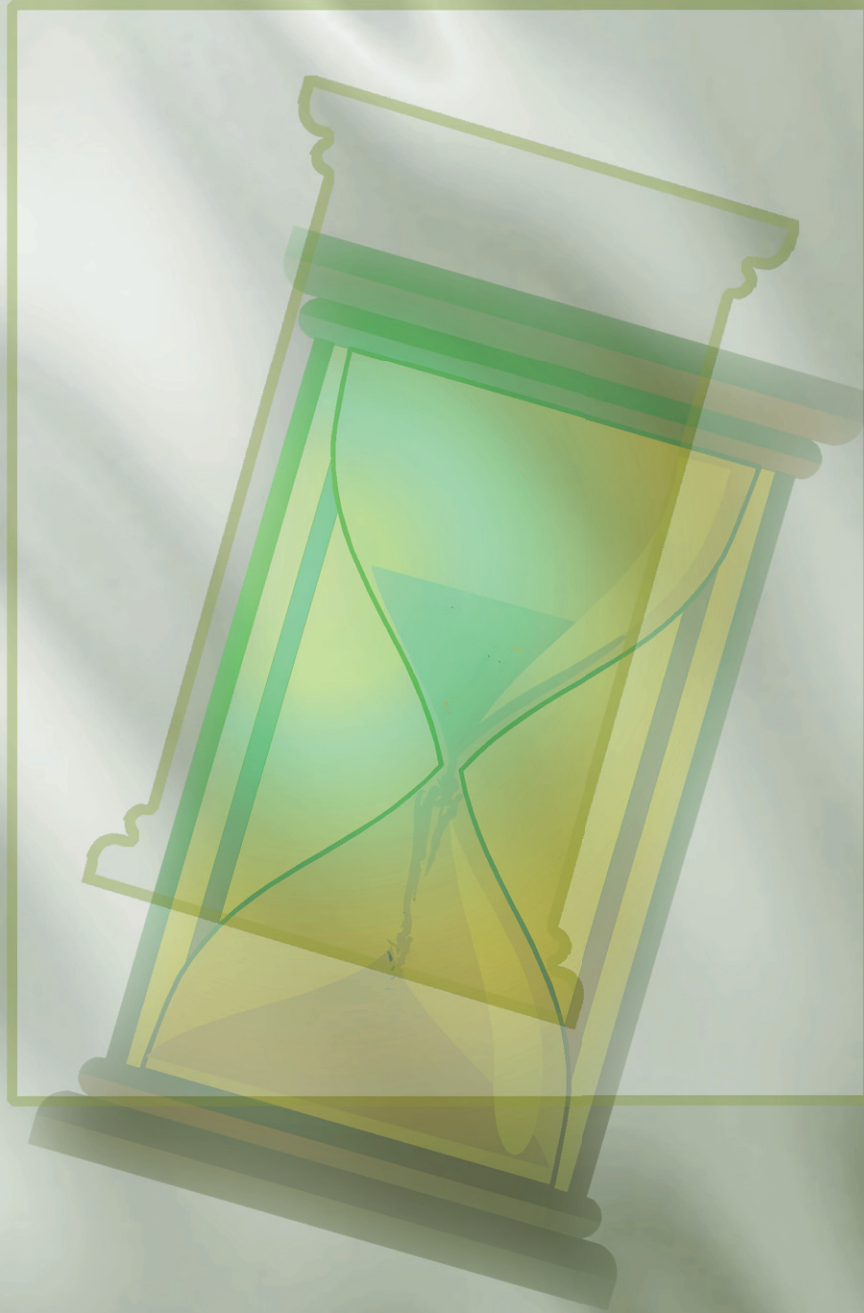


# كتيب في انتقاء أنظمة التردد والتوقيت المحكمة واستعمالها



1997

مكتب الاتصالات الراديوية

## قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

يوظف قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترخيص والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياسية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

يرجى الاتصال بالعنوان التالي للحصول على المعلومات المتعلقة بمسائل الاتصالات الراديوية :

ITU  
Radiocommunication Bureau  
Place des Nations  
CH- 1211 Geneva 20  
Switzerland

Telephone	+41 22 730 5800
Fax	+41 22 730 5785
Internet	brmail@itu.int
X.400	S=brmail; P=itu; A=400net; C=ch

يرجى الاتصال بالعنوان التالي لطلب منشورات الاتحاد الدولي للاتصالات :

ITU  
Sales and Marketing Service  
Place des Nations  
CH- 1211 Geneva 20  
Switzerland

Telephone	+41 22 730 6141 English
Telephone	+41 22 730 6142 French
Telephone	+41 22 730 6143 Spanish
Fax	+41 22 730 5194
Telex	421 000 uit ch
Telegram	ITU GENEVE
Internet	sales@itu.int
X.400	S=sales; P=itu; A=400net; C=ch

الاتحاد الدولي للاتصالات



كتيب  
في انتقاء أنظمة التردد  
والتوقيت المحكمة واستعمالها

1997

مكتب الاتصالات الراديوية

© ITU 1997

جميع حقوق النسخ محفوظة. لا يمكن نسخ أي جزء من هذه المنشورة ولا استعماله تحت أي شكل كان ولا بأي وسيلة إلكترونية أو ميكانيكية، بما فيها تصوير النسخ والأفلام الصغيرة، دون الموافقة الخطية من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

## تمهيد

صاغت هذا الكتيب الذي يتعلق بانتقاء أنظمة التردد والتوقيت المحكمة واستعمالها لجنة الخبراء في مجال معايير الترددات وإشارات التوقيت التابعة للجنة دراسات الاتصالات الراديوية رقم 7 - الخدمات العلمية برئاسة السيد R. Sydnor (المحرر، الولايات المتحدة الأمريكية) والسيد David W. Allan (مساعد المحرر، الولايات المتحدة الأمريكية).

ويتكون هذا الكتيب من 10 فصول تتعرض بالوصف إلى المفاهيم الأساسية، ومصادر التردد والتوقيت، وتقنيات القياس، وخصائص معايير الترددات المختلفة، وخبرة التشغيل ومشكلاتها وآفاقها المستقبلية. كما تتضمن محتوياته تفسيرات مفصلة ومراجع عديدة يمكن الاطلاع عليها للحصول على المزيد من التفاصيل.

ويصلح هذا الكتيب في مضمونه التقني لاستعماله من قبل الإداريين التابعين لكل من البلدان النامية والبلدان المتقدمة واستعماله من قبل مكتب الاتصالات الراديوية. كما سيكون الكتيب ذا نفع كبير بالنسبة إلى مهندسي المنظمات العلمية والمنظمات الصناعية أيضاً.

Robert W. Jones

مدير مكتب الاتصالات الراديوية

## مقدمة رئيس لجنة الدراسات 7 للاتصالات الراديوية

تم تكوين لجنة الدراسات المتعلقة بالخدمات العلمية التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية (SG-7) من خلال إعادة التنظيم الهيكلي أثناء جمعية CCIR العامة التي انعقدت في دوسلدورف سنة 1990. وقد تم دعم لجنة الدراسات رقم 2 للأبحاث الفضائية وعلم الفلك الراديوي (SG-2) في ذلك الوقت بلجنة دراسات معايير التردد والتوقيت (SG-7) لتكوّن لجنة الدراسات المتعلقة بالخدمات العلمية الجديدة.

ويرتبط العديد من نشاطات لجنة الدراسات المتعلقة بالخدمات العلمية بتطوير فن استعمال الطيف الراديوي من أجل تحقيق أهداف علمية. وقد ارتبطت، في هذا المجال، أوساط معايير التردد والتوقيت طويلاً بالاتحاد الدولي للاتصالات بهدف صريح يتمثل في صياغة التوصيات المعنية باستعمال الطيف الراديوي، وذلك لتسهيل بث مراجع التوقيت الدقيقة ولتقيس طرق ذلك البث. وينتج عما تقدم أساساً مواصفات لمعايير التردد المحكمة وتقنياتها المعنية بوضعها موضع التنفيذ.

وبينما كانت صياغة التوصيات تمثل النقطة الأساسية التي تركز عليها نشاطات لجنة الدراسات، ولا تزال، فقد اتضح جلياً أن في حوزة الخبراء، الذين ينكبون على هذه المسائل ضمن لجنة الدراسات، كمية هامة من المعلومات التي يمكنهم إفادة زملائهم العاملين في الميدان العلمي بها وكل من يعتمد على معطيات التوقيت والتردد الدقيقة من أجل وضع تشكيلة معينة من تقنيات الاتصالات موضع التنفيذ. وتتضمن تلك التقنيات توليد التوقيت الرسمي لكافة البلدان والاتصالات والملاحة (بما في ذلك تجنب التصادم) وأنظمة التغذية بالطاقة وتحديد المواقع ومعاينتها وإلكترونيات الطيران وأنظمة النقل واستكشاف الفضاء وعلم الفلك وعلم مواقع النجوم (وقياسات جزء من ألف من الثانية بولسار بالخصوص) ومراقبة الهزات الأرضية وكافة مخابر المعايير الوطنية.

وقد تقرر إعداد هذا الكتيب ونشره على ذلك الأساس، الشيء الذي يسمح لمستعملي تلك المعايير بفهم أشمل لمصادر التوقيت والتردد الدقيقة وأنظمتها حتى يتمكنوا من تصميم تلك الأدوات الفعالة وتطبيقها.

وإنه لمن دواعي الشرف والسرور بالنسبة لي، كرئيس لجنة الدراسات 7، أن أقدم هذا الكتيب إلى جموع مستعملي معايير التوقيت والتردد الدقيقة، وإني على يقين من أنهم سيجدون فيه أداة مرجعية لا تقدر بثمن في عملهم.

H. G. Kimball

جنيف، 1996

## شكر وتقدير

نود التوجه بالشكر إلى كل من الإدارات والمنظمات التالية على كل ما قدمه لنا خيراؤها من دعم ومساهمة:

فرنسا، ألمانيا (جمهورية ألمانيا الاتحادية)، إيطاليا، سويسرا (كونفدرالية)، الولايات المتحدة الأمريكية، مخابر هيولت-باكارد (Hewlett-Packard Laboratories) بالولايات المتحدة الأمريكية، المعهد الإلكتروني الوطني G. Ferrar (بإيطاليا)، ومخبر الدفع النفاث (بالولايات المتحدة الأمريكية)، ومخبر المقياسية الذرية (بفرنسا)، والمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا (بالولايات المتحدة الأمريكية)، ومرصد نيوشاتل (بسويسرا)، ومرصد باريس (بفرنسا)، و Physikalische-Technische Bundesanstalt (بألمانيا)، وبوليتكنيك تورينو (بإيطاليا) والمكتب الدولي للأوزان والقياسات (BIPM)،

كما نود شكر الشخصيات التالية على مساهماتهم وتوجيههم الرشيد والمناقشات التي خاضوها معنا:

الفصل 1	Claude Audoin	مخبر المقياسية الذرية، فرنسا؛
الفصل 2A	Andreas Bauch	Physikalische-Technische Bundesanstalt، ألمانيا؛
الفصل 2B	Roger Beehler	المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا، الولايات المتحدة الأمريكية؛
الفصل 3	Laurent-Guy Bernier	مرصد نيوشاتل، سويسرا؛
الفصل 4	Fred Walls	المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا، الولايات المتحدة الأمريكية؛
الفصل 5	Richard L. Sydnor	مخبر الدفع النفاث، الولايات المتحدة الأمريكية؛
الفصل 6	Claudine Thomas	المكتب الدولي للأوزان والقياسات، فرنسا؛
الفصل 7	Sigfrido Leschiutta	بوليتكنيك تورينو، إيطاليا؛
	Franco Cordara	المعهد الإلكتروني الوطني G. Ferrar، إيطاليا؛
الفصل 8	Michel Granveaud	مرصد باريس، فرنسا؛
الفصل 9	Leonard Cutler	مخابر هيولت-باكارد (Hewlett-Packard Laboratories)، الولايات المتحدة الأمريكية؛
الفصل 10	Donald Sullivan	المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا، الولايات المتحدة الأمريكية؛

ونشكر كذلك السيد R. L. Sydnor والسيد D. W. Allan على ما قاما به من أعمال التحرير.

## جدول المحتويات

iii	تمهيد
iv	مقدمة رئيس لجنة الدراسات 7 للاتصالات الراديوية
v	شكر وتقدير
1	مقدمة الكتيب
2	المسرد
<b>الفصل 1</b>	
<b>المقدمة والمفاهيم الأساسية</b>	
11	لمحة تاريخية 1.1
12	مبادئ معايير التردد الأساسية 2.1
12	معايير تردد المرو البلوري 1.2.1
12	معايير التردد الذرية 2.2.1
15	مفاهيم علم القياس الأساسية 3.1
15	استقرار التردد 1.3.1
18	الدقة 2.3.1
19	قابلية إعادة الإنتاج والتدميث 3.3.1
20	المراجع
<b>الفصل 2</b>	
<b>مصادر التردد والتوقيت المتيسرة</b>	
23	نظرة شاملة على الفصل 2
<b>الجزء A</b>	
<b>مصادر التردد والتوقيت المحلية</b>	
24	المقدمة 1.2
24	معايير تردد المرو البلورية 2.2
24	الطنان 1.2.2
25	المذبذب 2.2.2
25	معيار التردد بخلية غاز الروبيديوم 3.2
27	ماز الهيدروجين 4.2
29	معيار التردد بالجزمة السيزيومية 5.2
<b>الجزء B</b>	
<b>مراجع توجيهية</b>	
33	المقدمة 6.2
33	العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار عند انتقاء واستعمال خدمات بث التوقيت والتردد وتقنياتها البديلة 7.2
34	مقارنات مختلف المصادر وتقنيات البث لمراجع التوقيت والتردد المحكمة 8.2
34	معلومات إضافية تتصل باستعمال مختلف بدائل الخدمات والأنظمة والتقنيات البديلة 9.2
46	المراجع
47	قائمة المصادر
<b>الفصل 3</b>	
<b>خاصيات ميدان التردد وميدان التوقيت</b>	
51	المقدمة 1.3
51	نموذج المذبذب 2.3
51	نموذج المطوار والإشارة التحليلية 1.2.3
51	مذبذب منخفض الضوضاء 2.2.3
52	طيف المذبذب المنخفض الضوضاء 3.2.3
53	المذبذب العالي الضوضاء 4.2.3
53	طيف المذبذب العالي الضوضاء 5.2.3
53	أثر تضاعف التردد 6.2.3
54	إزالة تشكيل عمليات الضوضاء 7.2.3



54	تعريف معياري لعمليات الضوضاء	8.2.3
55	ضوضاء مضاعفة وضوضاء إضافية	9.2.3
56	نموذج متعدد الحدود	10.2.9
57	تمييز: تعريفات وطرائق	3.3
57	ميدان طيفي	1.3.3
58	ميدان التوقيت	2.3.3
74	الأوضاع البيئية	3.3.3
74	حسر باتجاه الفصل التالي	4.3
75	تذييل: العمليات العشوائية	5.3
75	مقدمة	1.5.3
75	تعريف العملية العشوائية	2.5.3
75	عمليات عشوائية مستقرة	3.5.3
75	عمليات عشوائية غير مستقرة	4.5.3
75	دالة الترابط الذاتي	5.5.3
75	كثافة طيفية للمقدرة	6.5.3
76	ترشيح خطي للعمليات العشوائية	7.5.3
77	المراجع	

#### الفصل 4

#### تقنيات القياس (علم القياس)

81	المقدمة	
90	قياسات مباشرة للتوقيت (الطور) والتردد	1.4
90	قياسات التوقيت المباشرة (الطور)	1.1.4
91	قياسات مباشرة للتردد	2.1.4
92	قياسات تحفيقية للتردد والطور (توقيت)	2.4
94	قياسات الطور التحفيقية (التوقيت)	1.2.4
94	قياسات التردد التحفيقية	2.2.4
95	قياسات الضوضاء PM التحفيقية	3.2.4
101	أنظمة قياس التوقيت بمخلاطين	4.2.4
102	أنظمة قياس على قاعدة الإشارة بسياج الورد	5.2.4
104	تقنيات رقمية لقياسات التردد و PM	6.2.4
104	قياسات تقنية القبة الثلاثية الزوايا	7.2.4
104	أنظمة قياس الارتباط المتبادل	8.2.4
105	قياسات التردد والضوضاء PM بمذبذب واحد	3.4
106	قياسات التردد والضوضاء PM بخط التأخر	1.3.4
107	قياسات الضوضاء AM	4.4
108	المراجع	

#### الفصل 5

#### خاصيات مختلف معايير التردد

112	تعريفات ودراسة: قياسات وتضمينات	1.5
112	تمييز العمليات العشوائية	1.1.5
112	آثار نظامية	2.1.5
114	خاصيات مختلف مصادر التردد	2.5
119	المراجع	

#### الفصل 6

#### سلام التوقيت

121	المقدمة	1.6
121	التوقيت العالمي	1.1.6
121	توقيت التقويم الفلكي	2.1.6
122	التوقيت الذري الدولي	3.1.6
123	التوقيت العالمي المنسق	4.1.6

124	سلام الوقت في نظرية النسبية العامة	2.6
124	أنظمة الإحداثيات في نظرية النسبية العامة	1.2.6
124	قرار الاتحاد IAU A4 لسنة 1991	2.2.6
125	التوقيت الذري الدولي	3.2.6
125	سلام وقت أخرى للإحداثيات	4.2.6
126	توليد سلام الوقت	3.6
126	النوعية المنتظرة	1.3.6
128	معطيات التوقيت	2.3.6
133	خوارزمية الاستقرار	3.3.6
140	دقة الفاصل السلمي لسلام الوقت	4.3.6
140	أمثلة	5.3.6
142	بث سلام الوقت	4.6
146	الخلاصة	5.6
147	المراجع	

## الفصل 7

### استعمالات مصادر التردد

151	استعمال مصادر التردد في العلم والتكنولوجيا	1.7
151	علم القياس	2.7
151	مقارنة الدقة بين معيار التوقيت ومعايير الكميات الأساسية الأخرى	1.2.7
152	العلاقات القائمة بين وحدة التوقيت وغيرها من الوحدات	2.2.7
153	الفيزياء الأساسية والفيزياء التطبيقية	3.7
153	g، تسارع الجاذبية	1.3.7
153	GM، ثابتة الجاذبية المضاعفة في كتلة الأرض	2.3.7
154	حقل الجاذبية الأرضية	3.3.7
154	قياس بالتداخل ذو خط أساس طويل جداً (VLBI) وشبه VLBI	4.3.7
154	تحديد الموضع والملاحة	4.7
155	ملاحة مخروطية	1.4.7
156	الملاحة الدائرية أو الكروية	2.4.7
159	الملاحة الزائدية المقطع	3.4.7
159	قطع زائد وسطوح زائدة وخصائص كل منها	4.4.7
160	متطلبات الدقة لمعايير التردد المستعملة في أنظمة الملاحة	5.4.7
160	الاتصالات	5.7
161	الأنظمة التماثلية	1.5.7
161	الأنظمة الرقمية	2.5.7
162	تطبيقات أخرى	6.7
163	التطبيقات الذاتية الحركة	1.6.7
163	أنظمة الطاقة الكهربائية وتسيير الغاز المضغوط	2.6.7
163	الأجهزة	3.6.7
165	رادار دوبلر	4.6.7
165	المراجع	
165	قائمة المصادر	

## الفصل 8

### خبرة التشغيل، مشكلات، ومواطن الشك

167	أدوات التردد والتوقيت	1.8
167	اختيار مرجع معين	1.1.8
168	أدوات التطبيق التشغيلي	2.1.8
173	معطيات وأمثلة مستقاة من التجارب التشغيلية	2.8
173	معايير التردد والتوقيت	1.2.8
175	أمثلة على المشكلات المطروحة	2.2.8
175	مقارنة الترددات والتوقيت	3.2.8
176	معطيات أخرى وضبط الأنظمة وأفكار ومشكلات عمليات المعالجة	4.2.8
177	الخلاصة	3.8
178	المراجع	

## الفصل 9 توقعات مستقبلية

180	المقدمة	1.9
180	نظرة عامة	2.9
180	أجهزة الخلايا الغازية	3.9
181	معايير الحزمة السيزيومية	4.9
182	موازر الهيدروجين	5.9
183	معايير أيونية مفضحة	6.9
184	نافورة السيزيوم	7.9
184	مذبذبات المرو	8.9
185	مذبذبات مستقرة بالنسبة إلى GPS	9.9
186	مذبذب مستقر بواسطة طنان من الصغير المبرد	10.9
186	معايير التردد البصرية	11.9
186	الخلاصة	12.9

## الفصل 10 الاستنتاجات

188	ملاحظات عامة	1.10
188	ميكانيات ومذبذبات	2.10
189	طرائق القياس والتمييز	3.10
190	سلام الوقت والتنسيق والبث	4.10
191	حقائق	5.10



## مقدمة الكتيب

لقد أصبحت الميقاتية الذرية، التي كانت على مر العقود السابقة بدعة المخابر، تغطي مجالاً واسعاً من الاستعمالات. وقد انضافت التحسينات التي أدخلت على تكنولوجيا مذبذب المرو وأنظمة التوقيت بالساتل إلى التحسينات التي أدخلت على الميقاتيات الذرية. كما انتفعت كل من الملاحظة وأنظمة الطاقة كافة من تلك التحسينات إلى حد كبير. هذا، وأصبحت أنظمة التوقيت المحكم ضرورة بعد أن كانت مجرد بدعة، إذ ما انفك العديد من التطبيقات الأخرى تنتفع منها كذلك. ويعود ذلك إلى أن التردد لا يعتبر فقط أدق القياسات التي عرفها الإنسان على الإطلاق، وإنما هو أقل وحدات علم القياس تكلفة في علاقته بالجودة أيضاً. ولهذا الأمر تعتمد العديد من التطبيقات على عناصر التوقيت الدقيق.

وقد تم إعداد هذا الكتيب كاستجابة لحاجيات عدد المستعملين السريع الارتفاع والذين ينتمون إلى ميادين أكثر عمومية. وهو يرمي إلى توفير المساعدة والإرشاد لمستعملي أنظمة التوقيت المحكم المتمرسين وكذلك المستعملين الجدد والمستقبليين منهم حتى يتمكنوا من الإيفاء بحاجياتهم على أكمل وجه. كما يعالج الكتيب انتقاء المصادر واستعمالها المناسب.

ونظراً لتوجه هذا الكتيب إلى جمهور أوسع بكثير من مجرد المجموعة المعنية بالتردد والتوقيت، فإن كتابه قد اجتهدوا في تفسير مجموعة المصطلحات والرموز المستعملة فيه. كما ضمّنوه مسرداً ورد في أوله. وقد تم تحرير الفصل 3 بالخصوص المتعلق بخصائص مصادر التوقيت والتردد بواسطة استعمال المصطلحات التابعة إلى هندسة الاتصالات. ويتطابق الكتيب في مجمله مع معايير IEEE لمجموعة المصطلحات ما عدا الفصل 3، إذ نجد في هذا الأخير جدول تحويل، الشيء الذي يمكن ذوي المعرفة بهندسة الاتصالات من التعرف على تسمية IEEE للمصطلحات المرجعية الملائمة والعكس بالعكس. ويربط الفصل 10 الذي هو فصل الخلاصة، بين أهمية كل فصل على حدة وقد يكون من المفيد قراءته في الأول لأنه يقدم بداية جيدة لهذا العمل وخاتمة له في الوقت ذاته.

هذا، وقد تم بذل مجهود كبير من أجل المحافظة على اتساق الكتيب العام وتواصله. ويكتمل كل من الفصل 1 والفصل 2 بعضهما بعضاً من ناحية توفير المبادئ المادية لمصادر معايير التوقيت ومعايير التردد وأنظمتها. والفصل 4 (وهو ذو صبغة تجريبية أكثر) مبني على الفصل 3 (وهو ذو صبغة نظرية أكثر)، وكلاهما يوفر قاعدة لتحديد خصائص تلك المصادر للتوقيت والتردد وأنظمتها. أما الفصل 5 فهو يلخص عوامل أداء تلك المصادر والأنظمة، بما في ذلك الآثار البيئية، بواسطة استعمال ما جاء من معلومات في الفصول الأربعة الأولى. وبين الفصل 6 قوة مجموعات الميقاتيات وأهميتها بواسطة المعلومات التي وردت في الفصول السابقة، كما يبين بعض المفاهيم الهامة لتكوين المجموعات. وهو فصل يتميز بأهمية كبيرة بالنسبة إلى مراكز التوقيت سواء كانت جديدة أم قديمة. وبين الفصل 7 العدد الضخم للتطبيقات الموجودة حالياً وبعض التطبيقات المستقبلية. ويستعرض الفصل 8 مواطن الشرك التي يجب تفاديها حتى لا يُعاد ارتكاب أخطاء الماضي وحتى يتعلم القارئ بالتالي من تجارب الخبراء الميدانية. ويقدم الفصل 9 مساعدة كبرى للمخطّط بواسطة إسقاطاته على المستقبل. وكما سبق أن قلنا، فإن الفصل 10 يمثل خلاصة العناصر الأساسية الواردة في كل فصل من فصول الكتيب، ويبين بمزيد من التفصيل الكيفية التي يمكن استعمالها بها وكيفية ترابط الفصول بعضها ببعض.

إن كُتاب هذه الفصول قد تم انتقاؤهم من بين أجود كتاب العالم في هذا الاختصاص. وقد سخر كل من الكتاب والمحررين مجهوداتهم على أمل أن يشكل هذا الكتيب مصدراً مرجعياً أساسياً وصالحاً لسنوات عديدة قادمة.

وتتمثل أهم خلاصة تتعلق بانتقاء مصادر التردد والتوقيت المحكمة وأنظمتها وباستعمالها في كون مقدرة الحصول على الدقة المتناهية بأدنى تكلفة ممكنة قد شهدت تقدماً ملحوظاً خلال العقد الماضي. ويعود ذلك بالأساس إلى تقنيات الساتل وخصوصاً منها تقنيات النظام GPS. ويمكن لزوج من الميقاتيات الذرية المصورة بشكل ملائم والمستقبل النظام GPS أن يكوّنوا نظام توقيت موثوق به وفي غاية من الدقة. ونتوقع أن يؤدي نضوج التقنيات التي يعمل بها الساتل إلى تحسين مصادر التوقيت والتردد وأنظمتها بشكل طبيعي، بالإضافة إلى تراجع أهمية تقنيات التوزيع للتوقيت على الأرض والتردد.

## 1 مقدمة

تشكل قائمة المصطلحات التالية مسرداً لمستعملي خدمات ترددات المعيار وإشارات التوقيت. وهي مأخوذة من التوصية ITU-R TF.686، ومن المعجم الدولي للمصطلحات الأساسية والعامية في علم القياس (VIM)، الذي نشرته ISO، وغيرها من المصطلحات الواردة في الاستعمال العام في مجال التردد والتوقيت. وقد تتأثر قياسات التوقيت الدقيقة بآثار النسبية. ولا تتضمن المصطلحات والتعريفات الواردة أدناه بأي حال من الأحوال أخذ تلك الآثار بعين الاعتبار أو الحاجة إلى ذلك. ويحتوي المسرد على نوعين من المصطلحات، وهي المصطلحات المستعملة عادة ضمن خدمات ترددات المعيار وإشارات التوقيت، وتلك ذات الاستعمالات العامة ولكن بدون أن يؤدي ذلك إلى حجب علاقتها الخاصة بذلك المجال. وقد حاولنا إيجاد اتفاق متين بين هذه الأخيرة وبين التعريفات الموجودة في المعجم الكهترتقني الدولي (IEV). ومقابل المصطلحات يرد بالفرنسية والإسبانية (بالخط المائل). أما المصطلحات المأخوذة من التوصية ITU-R TF.686 فهي ليست مُعلّمة، في حين أن المصطلحات المأخوذة من لوائح الراديو للاتحاد الدولي للاتصالات ونشريات ISO مبيّنة بالمختصرات (RR) و (ISO)، على التوالي. ويمكن العثور على مصطلحات إضافية في الملاحظات التقنية للمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا رقم 1297 لسنة 1994، بعنوان "إرشادات التقييم والتعبير عن عدم التيقن من نتائج قياسات NIST".

## 2 التعريفات

تتبع التعريفات الترتيب الأبجدي (في الأصل بالإنكليزية).

### الدقة؛ *Accuracy*؛ *Exactitude*

هي درجة مطابقة قيمة تم قياسها أو احتسابها لتعريفها (انظر "عدم التيقن").

(ISO) تتميز الدقة عموماً بعدم التيقن الشامل من القيمة التي تم قياسها.

### التقادم؛ *Ageing*؛ *Vieillessement*

التغير الآلي في التردد مع الوقت نظراً لحدوث تغيرات داخلية في المذبذب.

ملاحظة - هو تغير التردد مع الوقت عندما تبقى العوامل الخارجة على المذبذب (الآثار البيئية، والتغذية بالطاقة، إلخ) ثابتة.

### سلم الوقت الذري؛ *Atomic Time Scale*؛ *chelle De Temps Atomique*

سلم وقت يعتمد على ظاهرات الطنين الذري أو الطنين الجزئي.

### معايرة\*؛ *Calibration*؛ *etalonage*

هي عملية تعرف هوية التخالفات وقياسها بالأجهزة و/أو الإجراءات.

ملاحظة - ترتبط المعايرة في الكثير من الحالات، مثل مولد التردد، باستقرار الجهاز فتكون نتائجها بالتالي عاملاً من عوامل التوقيت.

(ISO) هي عملية تعرف هوية الانحرافات وقياسها بين القيمة المحددة وقيمة معيار مرجعي يُستعمل كأداة اختبار.

### ميكاتية؛ *Clock*؛ *Horloge*

جهاز لقياس التوقيت و/أو عرضه.

\* يختلف هذا التعريف عن تلك التعريفات الواردة في IEV، لكن ITU-R يرى أنه أكثر ملاءمة لخدمة ترددات المعيار وإشارات التوقيت.

### فارق الميقاتية الزمني؛ *Clock time difference*؛ *Différence entre temps d'horloge*

الاختلاف بين ما يقرأ على ميقتيتين في الوقت ذاته.

ملاحظة - يستحسن استعمال القيم الجبرية بغرض استبعاد أي التباس في الإشارة، وذلك بتطبيق الاتفاقيات التالية: في اللحظة  $T$  لسلم الوقت المرجعي حيث تدل  $a$  على قراءة سلم الوقت  $A$ ، وتدل  $b$  على قراءة سلم الوقت  $B$ ؛ ويُعبر عن الاختلاف في سلم الوقت بواسطة  $a - b = A - B$  وذلك في اللحظة  $T$ . وتطبق الاتفاقية ذاتها على الحالة التي يكون فيها كل من  $A$  و  $B$  ميقتيتين.

### تماسك التردد؛ *Cohérence de fréquence*؛ *Coherence of frequency*

انظر "تماسك الطور".

### تماسك الطور؛ *Cohérence de phase*؛ *Coherence of phase*

يوجد هذا النوع من التماسك إذا استردت إشارتان دوريتان للتردد  $M$  والتردد  $N$  اختلاف الطور ذاته بعد الأدوار  $M$  من الإشارة الأولى والأدوار  $N$  من الإشارة الثانية، مع كون  $M/N$  عدداً مُنطَقاً، تم الحصول عليه من خلال عملية الضرب و/أو القسمة من ذات التردد الأساسي.

### ميقاتية منسقة؛ *Horloge coordonnée*؛ *Coordinated clock*

ميقاتية متزامنة ضمن حدود مضبوطة مع ميقاتية مرجعية منفصلة من ناحية الفضاء. (انظر أيضاً التقرير رقم 439 (دوسلدورف، 1990) الذي يتعرض لمفهوم الوقت المنسق).

### وقت منسق؛ *Temps-coordonnée*؛ *Coordinated time*

مفهوم الوقت مطابق لرتل منسق محدد، يكون صالحاً في منطقة فضائية مع وجود احتمال جاذبي متغير.

ملاحظة - في حالة تحقيق سلم الوقت طبقاً لمفهوم الوقت المنسق، فإنه يسمى بسلم الوقت المنسق.

مثال: يكون TAI سلم الوقت المنسق المعرف ضمن رتل مرجعي مركزي الأرض وتكون ثانية SI كما تم تحقيقها على شكل الكرة الأرضية الدائرة كوحدة السلم.

### سلم الوقت المنسق؛ *échelle de temps coordonnée*؛ *Coordinated time scale*

سلم وقت متزامن ضمن الحدود المضبوطة مع سلم وقت مرجعي.

### توقيت عالمي منسق (UTC)؛ *Temps universel coordonné*؛ *Coordinated Universal Time*

هو سلم وقت يتمسك به كل من BIPM والخدمة الدولية لدوران الأرض (IERS)، يكون قاعدة للنشر المنسق للترددات المعيارية وإشارات التوقيت (انظر التوصية ITU-R TF.460).

وهو يتطابق من ناحية المعدل مع TAI تماماً، غير أنه يختلف عنه بعدد صحيح من الثواني. ويتم ضبط السلم UTC بواسطة إدراج الثواني أو شطبها (ثواني كبيسة إيجابية أو سلبية) لضمان التوافق التقريبي مع السلم UT1.

### تاريخ؛ *Date*؛ *Date*

قراءة سلم وقت محدد.

ملاحظة - يمكن التعبير عن التاريخ بطريقة اصطلاحية بالسنوات والأشهر والأيام والساعات والدقائق والثواني والأقسام منها. كما يعتبر "التاريخ اليوليوسي" (JD) و"التاريخ اليوليوسي المعدل" (MJD) قياسات صالحة لحساب التاريخ (انظر "التاريخ اليوليوسي" و "التاريخ اليوليوسي المعدل").

### انسياق (ويعني ضمناً انسياق التردد)؛ *Dérive*؛ *Drift*

التغير الآلي في تردد مذبذب ما مع الوقت.

ملاحظة - يعود الانسياق إلى التقادم بالإضافة إلى التغييرات التي تطرأ على البيئة وغيرها من العوامل الخارجة على المذبذب (انظر التقادم).

### **DUTI ،DUTI ؛DUTI**

قيمة الفارق المتوقع UTC - UT1، المنشورة مع إشارات التوقيت. وقد يعتبر DUTI أنه تصحيح يضاف إلى السلم UTC للحصول على تقريب أفضل إلى UT1. وتورد الخدمة IERS قيم DUTI في شكل متعددات صحيحة من 0,1 من الثانية. (انظر التوقيت العالمي).

### **خطأ ؛ Erreur ؛ Error**

الفارق بين قيمة ما والقيمة الصحيحة المتوقعة.

(ISO) نتيجة قياس ناقص القيمة الحقيقية.

### **تردد ؛ Fréquence ؛ Frequency**

إن كان  $T$  مرحلة ظاهرة متكررة، فإن التردد  $f = 1/T$ . ويعبر عن الفترة في وحدات SI بالثواني، ويعبر عن التردد بالهرتز.

### **اختلاف التردد ؛ Différence de fréquence ؛ Frequency difference**

الاختلاف الجبري بين قيمتين من قيم الترددات.

### **انسياق التردد ؛ Dérive de fréquence ؛ Frequency drift**

انظر "انسياق" و "تقادم".

### **عدم استقرار التردد ؛ Instabilité de fréquence ؛ Frequency instability**

التغير العفوي أو ذلك الناتج عن آثار بيئية خلال فاصل زمني معين.

ملاحظة - عادة ما يميز بين الآثار النظامية مثل آثار انسياق التردد وتقلبات التردد العرضية. وقد تم وضع الفروقات الخاصة لتمييز تلك التقلبات. فعدم الاستقرار النظامي يمكن أن ينتج عن الإشعاع والضغط ودرجة الحرارة والرطوبة، إلخ. وهو يعتمد بشكل نمطي على نطاق عرض نظام القياس و/أو على امتداد وقت العينات أو وقت التكامل. ويتميز عدم الاستقرار العشوائي أو العرضي بشكل نمطي في ميدان الوقت و/أو ميدان التردد (التوصية ITU-R TF.538).

وتستعمل عبارة "استقرار" في مكان "عدم استقرار" في العديد من السياقات. وهو استعمال مقبول.

### **تخالف الترددات ؛ Décalage de fréquence ؛ Frequency orrset**

اختلاف التردد النظامي بين القيمة التي تم تحقيقها وقيمة التردد الاسمية.

### **زحزحة التردد ؛ Déplacement de fréquence ؛ Frequency shift**

تغير مقصود للتردد.

### **استقرار التردد ؛ Stabilité de fréquence ؛ Frequency stability**

انظر "عدم استقرار التردد".

### **معيار التردد ؛ Etalon de fréquence ؛ Frequency standard**

مولد يُستعمل خرج كمرجع للتردد.

ملاحظة - انظر "معيار تردد أولي" و "معيار تردد ثانوي".

### **لحظة ؛ Instant ؛ Instant**

نقطة في الزمن.

\* يختلف هذا التعريف عن تلك التعريفات الواردة في IEC، لكن ITU-R يرى أنه أكثر ملاءمة لخدمة ترددات المعايير وإشارات التوقيت.



### التوقيت الذري الدولي (TAI)؛ *Temps atomique international*؛ *International Atomic Time*

هو سلم الوقت الذي وضعه المكتب الدولي للموازين والقياسات (BIPM) على أساس معطيات المقياسات الذرية التي تشتغل في العديد من المؤسسات طبقاً لتعريف الثانية، وهي الوحدة الزمنية لنظام الوحدات الدولي (SI).

### تاريخ يوليوسي (JD)؛ *Date julienne*؛ *Julian Date*

عدد اليوم اليوليوسي المتبوع بجزء من اليوم المنقضي منذ منتصف النهار السابق (12h00 UT).

مثال: يتطابق تاريخ 1900 يناير 0.5 d UT مع JD = 2 415 020.0.

ملاحظة - يحيل التاريخ اليوليوسي تقليدياً إلى السلم UT1، ولكنه قد يستعمل ضمن سياقات أخرى، إن ذكرت.

### عدد اليوم اليوليوسي؛ *Numéro de jour julien*؛ *Julian day number*

عدد يوم بعينه مأخوذ من بقية أيام متواصلة يكون أصلها الأساسي على الساعة 12h00 UT في 1 من يناير سنة 4713 قبل الميلاد، من تقويم يوليوس التسبتي (واليوم الأول ذاك هو يوم يوليوس الصفر).

مثال: يكون لليوم الممتد من سنة 1900 يناير 0.5 d UT عدد 2 415 020.

### ثانية كبيسة؛ *Seconde intercalaire*؛ *Leap second*

وثبة مقصودة في الوقت بثانية تستعمل لتعديل السلم UTC من أجل تأمين التوافق التقريبي مع السلم UT1. وتسمى الثانية المدرجة بالثانية الكبيسة الإيجابية، في حين تسمى الثانية المشطوبة بالثانية الكبيسة السلبية (انظر التوصية ITU-R TF.460).

### تاريخ يوليوسي معدل (MJD)؛ *Date julienne modifiée*؛ *Modified Julian Date*

هو التاريخ اليوليوسي ناقص 2 400 000.5 يوم (انظر التوصية 457).

### يوم يوليوسي معدل

جزء صحيح من التاريخ اليوليوسي المعدل.

### قيمة اسمية؛ *Valeur nominale*؛ *Nominal value*

قيمة تم تحديدها أو السعي للحصول عليها بصرف النظر عن أي رية في إمكانية تحقيقها.

ملاحظة - ففي الجهاز الذي ينتج كمية مادية معينة، تكون قيمة تلك الكمية التي تم تحديدها. وهي قيمة مثالية وبالتالي فهي نخالية من التسامح.

### قيمة مقيسة؛ *Valeur normée*؛ *Normalized value*

هي النسبة من قيمة معينة إلى قيمتها الاسمية.

ملاحظة 1- يمكن استعمال هذا التعريف في علاقته بالتردد وانحراف التردد واختلاف التردد وانسياب التردد وتخالف الترددات، إلخ.

ملاحظة 2- يكون المصطلح "نسي" مقبولاً بدلاً عن المصطلح "مقيس"، ولكن ينبغي تجنب استعمال المصطلح "كسري".

### تخالف؛ *Décalage*؛ *Offset*

اختلاف نظامي بين القيمة التي تم تحقيقها والقيمة الاسمية. (انظر أيضاً "تخالف مقيس").

### طور؛ *Phase*؛ *Phase*

يدل الطور عموماً، في ظاهرة دورية توصف تحليلياً بواسطة وظيفة الوقت (أو الفضاء)، على أي حالة ممكنة وقابلة للتمييز للظاهرة ذاتها.

\* يختلف هذا التعريف عن تلك التعريفات الواردة في IEC، لكن ITU-R يرى أنه أكثر ملاءمة لخدمة ترددات المعايير وإشارات التوقيت.

ويمكن تعرف هويته من خلال مدة ظهوره إلى حدود مرجع معين، ولا بد من تسمية هذه المدة كما ينبغي "بوقت الطور" (التي يتم اختصارها مراراً "بالطور"). وإذا كانت الظاهرة ظاهرة جيبية بشكل خاص، فإنه يمكن مواصفة الطور إما بالزاوية أو بالوقت، وكلاهما يقاس انطلاقاً من مرجع مخصص، وذلك حسب أبعاد مخصصة لمرحلة المرجع ( $2p$  أو  $T$ ).

وتتم دراسة فوارق وقت الطور بالأساس في خدمة التردد المعياري وإشارات التوقيت، أي فوارق الوقت بين طورين معينين من ذات الظاهرة أو من ظاهرتين مختلفتين.

#### زحزحة الطور؛ *Phase shift*؛ *Déphasage*

تغير مقصود في الطور عن مرجع ما.

#### انحراف الطور؛ *phase deviation*؛ *Décalage de phase*

اختلاف الطور عن مرجع ما.

#### أحكام؛ *Precision*؛ *Précision*

درجة الاتفاق المتبادل ما بين سلسلة من القياسات الفردية؛ وعادة ما يعبر عنها بانحراف المعيار، بدون أن يكون استعمال ذلك التعبير ضرورياً.

#### معيار تردد أولي؛ *Primary frequency standard*؛ *Etalon primaire de fréquence*

معيار التردد الذي يتطابق التردد التابع له مع التعريف الذي أُنخذ للثانية، بالإضافة إلى دقته المتميزة التي تم الحصول عليها بدون معايرة خارجية للجهاز.

ملاحظة - تعرف الثانية كالاتي:

"هي مدة طول 9 192 631 770 من فترات الإشعاع المطابقة للانتقال بين سويي موسوعيي الدقة لحالة الذرة السيزيومية - 133 الأساسية". (المؤتمر العام الثالث عشر للموازين والقياسات، 1967).

#### ميقانية أولية؛ *Primary clock*؛ *Horloge primaire*

معيار توقيت يشتغل بدون معايرة خارجية (انظر "معيار التوقيت").

#### توقيت خاص؛ *Proper time*؛ *Temps propre*

توقيت محلي، كما تدل عليه ميقاتية مثالية، في اتجاه نسوي (انظر التقرير رقم 439).

ملاحظة - يتميز هذا التوقيت عن التوقيت المنسق الذي يتضمن نظرية واحتمالات معينة.

وفي حالة تحقيق سلم وقت ما طبقاً لمفهوم التوقيت الخاص، فإن ذلك السلم يسمى بسلم الوقت الخاص.

أمثلة:

أ) بالنسبة إلى التوقيت الخاص: تعرف الثانية في توقيت الذرة السيزيومية الخاص؛

ب) بالنسبة إلى سلم التوقيت الخاص: هو سلم وقت تم إنتاجه في المخبر ولا ينقل خارجه.

#### تكرارية؛ *Repeatability*؛ *Répétabilité*

(ISO) تقارب الاتفاق بين نتائج القياسات المتتابعة لذات المقيس المتمم في ظل ظروف القياس نفسها:

أ) فيما يتعلق بجهاز منفرد، وعندما يتم ضبط المعلومات المحددة على نحو مستقل ضمن ظروف استعمال منصوص عليها، يكون انحراف معيار القيم التي تم إنتاجها عن طريق ذلك الجهاز. ومن المستحسن تسمية هذه الخاصية بتكرارية دلالة جهاز ما مع إعادة ضبطه، أو إعادة تدميته.

ب) فيما يتعلق بجهاز منفرد يُشغل بشكل متكرر بدون إعادة ضبطه، يكون انحراف معيار القيم التي تم إنتاجها عن طريق ذلك الجهاز. ويستحسن تسمية تلك الخاصية بتكرارية دلالة جهاز ما بدون إعادة ضبطه.

ج) فيما يتعلق بمجموعة من الأجهزة المستقلة من ذات التصميم، يكون انحراف معيار القيم التي تم إنتاجها عن طريق تلك الأجهزة. ويستحسن تسمية تلك الخاصية بتكرارية دلالة مختلف الأجهزة من ذات التصميم والمستعملة في ظل نفس الظروف.

### قابلية إعادة الإنتاج؛ *Reproducibility /Reproductibilité*

- أ) فيما يتعلق بمجموعة من الأجهزة المستقلة من ذات التصميم، تتمثل قابلية تلك الأجهزة في إنتاج ذات القيم.
- ب) فيما يتعلق بجهاز ما يتم تشغيله بشكل متكرر وبدون ضبطه، تتمثل قابلية ذلك الجهاز في إنتاج ذات القيم.
- ملاحظة - يتمثل انحراف المعيار في القياس المعتاد للنقص في قابلية إعادة الإنتاج.

### قابلية إعادة التدميث\*؛ *Resettability /Fidélité*

- وتتمثل في قابلية جهاز ما لإنتاج ذات القيم عندما يتم ضبط المعلومات المحددة بشكل مستقل وفي ظل ظروف الاستعمال نفسها. ويستعمل هذا المصطلح بدلاً عن مصطلح "التكرارية" الذي يعتبر غير ملائم في حالة الحديث عن مولدات التردد.
- ملاحظة - يتمثل انحراف المعيار في القياس المعتاد للنقص في قابلية إعادة التدميث.

### معيار التردد الثانوي؛ *Secondary frequency standard /Etalon secondaire de fréquence*

معيار تردد يتطلب معايرة خارجية.

### تردد معياري؛ *Standard frequency /Fréquence étalon*

تردد له علاقة معروفة بتردد معياري معين.

ملاحظة 1- عادة ما يستعمل مصطلح التردد المعياري للإشارة التي يكون ترددها تردداً معيارياً.

ملاحظة 2- عادة ما يستعمل مصطلح التردد المعياري للتردد الذي ينتمي إلى مجموعة الترددات بقيم التوصية ITU-R المتفق عليها، أي 1 MHz، 5 MHz، إلخ.

### محطة التردد المعياري وإشارات التوقيت؛ *Station de fréquence étalon et/ou de signaux horaires* *Standard frequency and time-signal station*

محطة تبث تردداً معيارياً و/أو إشارات التوقيت.

(RR) محطة في خدمة التردد المعياري وإشارات التوقيت.

### بث التردد المعياري؛ *Standard-frequency emission /mission de fréquences étalon*

بث يتم بموجبه نشر ترددات معيارية بفواصل منتظمة مع دقة تردد محددة.

ملاحظة - توصي التوصية ITU-R TF.460 بانحراف تردد مقيس لا يتجاوز  $10^{-10}$ .

### خدمة التردد المعياري وإشارات التوقيت؛ *Service des fréquences étalon et des signaux horaires* *Standard Frequency and Time Signal Service*

(RR) خدمة الاتصالات الراديوية للأغراض العلمية والتقنية وغيرها من الأغراض، توفر إرسال ترددات أو إشارات توقيت محددة، أو كليهما، عالية الإحكام المحدد والموجهة للاستقبال العام.

### خدمة ساتلية للتردد المعياري وإشارات الوقت؛ *Service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite* *Standard Frequency and Time Signal-Satellite Service*

(RR) خدمة الاتصالات الراديوية التي تستعمل محطات فضائية على سواتل أرضية من أجل تحقيق أغراض خدمة التردد المعياري وإشارات التوقيت ذاتها.

### بث إشارات التوقيت المعيارية؛ *Standard-time-signal emission /Emission de signaux horaires*

بث يتم بموجبه نشر تتابع من إشارات التوقيت بفواصل منتظمة ودقة محددة.

\* يختلف هذا التعريف عن تلك التعريفات الواردة في IEV، لكن ITU-R يرى أنه أكثر ملاءمة لخدمة ترددات المعايير وإشارات التوقيت.

ملاحظة - توصي التوصية ITU-R TF.460 ببث إشارات التوقيت المعيارية خلال 1 ms بالرجوع إلى UTC وأن تتضمن المعلومات DUTI حسب شفرة محددة.

**تزامن؛ Synchronism؛ Synchronisme**

انظر "سلم الوقت بالتزامن".

**توقيت؛ Time؛ Temps**

ملاحظة - تستخدم كلمة "توقيت" في الإنكليزية للدلالة على لحظة ما (برهة، وساعة ودقيقة وثانية من النهار) أو لتحديد فاصل من الوقت.

**مقارنة التوقيت؛ Time comparison؛ Comparaison de temps**

عملية تحديد الفوارق بين سلالم الوقت.

**شفرة التوقيت؛ Time code؛ Code horaire**

نسق المعلومات الذي يستعمل لنقل معلومات التوقيت.

**فاصل زمني؛ Time interval؛ Intervalle de temps**

الفترة الممتدة بين لحظتين.

**واسم الوقت؛ Time maker؛ Repère de temps**

إشارة مرجعية تمكن من تخصيص التواريخ على سلم الوقت.

**سلم الوقت؛ Time scale؛ Echelle de temps**

نظام لترتيب غير ملتبس للأحداث.

**اختلاف بين سلالم الوقت؛ Time scale difference؛ Différence entre échelles de temps**

الفارق بين قواعدي سلمين من سلالم الوقت في ذات اللحظة.

ملاحظة - يستحسن استعمال القيم الجبرية بغرض استبعاد أي التباس في الإشارة وذلك بتطبيق الاتفاقيات التالية: في اللحظة  $T$  لسلم الوقت المرجعي، حيث تدل  $a$  على قراءة سلم الوقت  $A$  وتدل  $b$  على سلم الوقت  $B$ ، ويعبر عن الاختلاف في سلم الوقت بواسطة  $a - b = A - B$  وذلك في اللحظة  $T$ . وتطبق الاتفاقية ذاتها على الحالة التي يكون فيها كل من  $A$  و  $B$  مقياسيتين.

**سلم الوقت بالتزامن؛ Time Scales in synchronism؛ Echelles de temps en synchronisme**

يكون سلمان من سلالم الوقت سلمين بالتزامن عندما يُخصصان التاريخ ذاته للحظة معينة.

ملاحظة - في حالة إنتاج سلالم الوقت في مناطق منفصلة من الناحية الفضائية، فإنه لا بد من أخذ وقت انتشار إشارات التوقيت المرسله والآثار النسبوية بعين الاعتبار - بما في ذلك رتل التنسيق المرجعي - (انظر التقرير رقم 439).

**قراءة سلم الوقت؛ Time scale reading؛ Lecture d'une échelle de temps**

القيمة المقروءة على سلم وقت ما في لحظة معينة.

ملاحظة - يجب تصنيف قراءة سلم الوقت بإعطائها اسم سلم الوقت ذاته. (انظر التوصية ITU-R TF.536).

**وحدة سلم الوقت؛ Time scale unit؛ Unité d'une échelle de temps**

الفاصل الزمني الأساسي المعرف لسلم وقت ما.

ملاحظة - لا بد من تمييزها عن وحدة سلم الوقت المحققة.

**خدمة ساتلية لإشارات التوقيت؛ Time-signal satellite service؛ Service des signaux horaires par satellite**

خدمة الاتصالات الراديوية التي تستخدم سواتل أرضية لتحقيق ذات الأغراض التي ترمي إلى تحقيقها خدمة إشارات التوقيت.

**معياري زمني؛ Time standard؛ Etalon de temps**

أ) جهاز يستعمل لتحقيق وحدة زمنية.

ب) جهاز متواصل التشغيل يتم استعماله لتحقيق سلم الوقت طبقاً لتعريف الثانية، يكون له أصل مناسب تم اختياره.

(ISO) جهاز متواصل التشغيل يتم استعماله لتحقيق سلم الوقت.

قفزة في الزمن؛ *Saut de temps*؛ *Time step*

عدم التواصل في سلم الوقت خلال لحظة معينة.

ملاحظة - تكون القفزة في الزمن إيجابية (+) إذا ارتفعت قراءة سلم الوقت، في حين تكون سلبية (-) إذا انخفضت القراءة في تلك الآونة.

عدم التيقن؛ *Incertitude*؛ *Uncertainty*

حدود فواصل الثقة للكبر المقيس أو المحتسب.

ملاحظة - يجب وصف احتمال حدود الثقة، ويستحسن أن يتم ذلك بواسطة قيمة سيغماوية.

(ISO) معلمة مرتبطة بنتيجة القياس الذي يميز تشتت القيم التي كان من الممكن إعطاؤها إلى المقيس على نحو معقول.

عادة ما يكون التمييز بين مكونين أمراً ممكناً، أي التمييز بين عدم التيقن العشوائي وعدم التيقن الناجم عن الآثار النظامية.

ويعبر عن عدم التيقن العشوائي عموماً بانحراف المعيار أو بمتعدّد لانحراف المعيار لقياسات متكررة. ويقدر عدم التيقن النظامي عموماً على قاعدة كافة المعلومات المتوفرة بخصوص المعلومات المعنية.

توقيت عالمي (UT)؛ *Temps universel*؛ *Universal Time*

التوقيت العالمي (UT) هو التسمية العامة لسلاّم الوقت المعتمدة على دوران الأرض. وفي التطبيقات التي لا تحتل عدم الاحكام ببضعة أعشار من الثانية، لا بد من تحديد شكل UT مثلما هو الشأن بالنسبة إلى UT1، الذي يرتبط مباشرة بدوران الأرض كما تفسره التوصية ITU-R TF.460.

توقيت عالمي منسق (UTC)؛ *Temps universel coordonné*؛ *Universal Time Coordinated*

انظر "Coordinated Universal Time"، وهي عبارة مكافئة.

## المقدمة والمفاهيم الأساسية

### المحتويات

11	..... لحة تاريخية	1.1
12	..... مبادئ معايير التردد الأساسية	2.1
12	..... معايير تردد المرو البلوري	1.2.1
12	..... معايير التردد الذرية	2.2.1
12	..... خاصيات مطيافية تتسم بالأهمية	1.2.2.1
13	..... معايير التردد الذرية المنفصلة والفعالة	2.2.2.1
15	..... مفاهيم علم القياس الأساسية	3.1
15	..... استقرار التردد	1.3.1
15	..... التعريف	1.1.3.1
15	..... مذبذبات المرو البلورية	2.1.3.1
15	..... تقلبات التردد العشوائية	1.2.1.3.1
16	..... آثار نظامية	2.2.1.3.1
16	..... معايير التردد الذرية	3.1.3.1
16	..... استقرار التردد على المدى القصير	1.3.1.3.1
16	..... استقرار التردد على المدى المتوسط	2.3.1.3.1
18	..... الدقة	2.3.1
18	..... تخالفات الترددات المتبقية	1.2.3.1
18	..... التعريف	2.2.3.1
18	..... معايير التردد الأولية والثانوية	3.2.3.1
19	..... قابلية إعادة الإنتاج والتدميث	3.3.1
20	..... المراجع	

## 1.1 ملحة تاريخية

لقد كانت مذبذبات المرو البلورية أول معايير التردد والتوقيت التي استفادت من تطور التكنولوجيا الإلكترونية. وهي تعتمد على اكتشاف بي. كيوري (P. Curie)، وهو الحائز على جائزة نوبل سنة 1903، للكهربائية الضغطية سنة 1880، كما تعتمد على اختراع لي دي فوريس (Lee de Forest) سنة 1907 لأول مضخم إلكتروني (الصمام الثلاثي). وبدأ استعمال تلك المذبذبات في أنظمة الاتصالات وفي مخابر التردد وعلم قياس التوقيت ما بين سنة 1920 وسنة 1930. وقد استعملت كثيراً خلال الحرب العالمية الثانية، ومنذ ذلك التاريخ، تم بذل جهد كبير لتحسين تصميم الطنان، حتى يصبح سلوك الدارة الإلكترونية المرتبطة به سلوكاً مثالياً لفهم الأصل المادي لعدم استقرار التردد القصير المدى، والحساسية إزاء العوامل الخارجية وعمليات التقادم [بوسون (Besson)، 1977؛ فيلار و فيغ (Filler and Vig)، 1993؛ جاربار وبالانو (Gerber and Ballato)، 1985؛ فيغ (Vig)، 1991؛ والز وآخرون (Walls)، والز وغانيان (Walls and Gagnepain)، 1992]. وقد تم استعمال مذبذبات المرو البلورية العالية الجودة، في إطار مجال نظر هذا الكتيب، وذلك كمعايير ثانوية للتردد والتوقيت. هذا، وهي موجودة في أغلب معايير التردد الذرية، حيث يقوم الطنين الذري بمراقبة تردداتها وحيث تكون مصدراً لإشارات الخرج.

وتعود فكرة استعمال خاصيات الطنين لمجموعة من الذرات المعزولة (أي في البخار) من أجل الحصول على معيار التردد والميقاتية إلى أي. أي. رايب (I. I. Rabi) سنة 1939 وهو الحائز على جائزة نوبل سنة 1944. أما أول ميقاتية ذرية فقد تم بناؤها بالمكتب الوطني للمعايير (NBS) أثناء الفترة الممتدة بين 1948 و 1949، باستعمال خط امتصاص الموجات الصغرية لغاز الأمونيأك. وتتمثل أهم الاكتشافات التي تحدد بنية معايير التردد الذرية بالسيزيوم والروبيديوم والهيدروجين المستعملة حالياً في: أ) طريقة الحقلين المنفصلين من الطين المغناطيسي ومازر الهيدروجين من قبل

إن. إف. رامساي (N. F. Ramsey) سنة 1950 و 1960 على التوالي، وقد حاز على جائزة نوبل سنة 1989؛ ب) الضخ البصري من قبل أي. كاستلار (A. Kastler) سنة 1950 وقد حاز على جائزة نوبل سنة 1966؛ و ج) أثر المازر في مازر الأمونيأك من قبل سي. إتش. تاونز (C. H. Townes) و إن. جي. باسوف (N.G. Basov) وأي. إم. بروخاروف (A.M. Prokhorov) وذلك سنة 1955 (جائزة نوبل سنة 1964). وتسير الأبحاث في طريق تطوير معايير التردد الذرية التي تعتمد على طين الأيون المخزن في شرك كهربائي سيراً على إثر ما أنجزه كل من واي. بول (W. Paul) وإتش. جي. دمال (H. G. Dehmelt) (جائزة نوبل سنة 1989) [فينيلاند (Wineland) وآخرون، 1990].

وقد تمت صناعة أول معيار تردد بحزمة سيزيومية بالمعهد الوطني للمعايير (NBS) في أوائل الخمسينات، كما بدأت أول ميقاتية ذرية بالسيزيوم في العمل لدى المخبر الوطني للفيزياء (NPL) بالإنجلترا في يونيو 1955 [إسّان وباري (Essen and Parry)، 1957]. وظهرت أول الأجهزة منها في السوق حوالي سنة 1958. وبعد ذلك بقليل، وفي بداية الستينات سُجّلت بداية إنتاج معايير التردد بالروبيديوم ومازر الهيدروجين أيضاً.

كما قد استعمل جهاز الحزمة السيزيومية من إنتاج NPL سنة 1958 لقياس الفصل العالي الدقة غير المضطرب للذرة السيزيومية في حالتها الأساسية، حسب ثانية التقويم الفلكي المعروفة في ذلك الوقت. والنتيجة يتضمنها التعريف الحالي للوحدة الزمنية التي تم القرار بشأنها سنة 1967 من قبل المؤتمر العام الثالث عشر للموازين والقياسات: "الثانية هي امتداد للفترة 9 192 631 770 من الإشعاع المطابق للانتقال بين سويتين عاليتي الدقة من حالة الذرة 133 السيزيومية الأساسية" [BIPM، 1991].

وتم الحصول على معايير التردد بالحزمة السيزيومية المخبرية من قبل أكبر مخابر التردد والتوقيت، وقد تم ذلك على سبيل المثال لا الحصر في كل من كندا والصين وفرنسا وألمانيا واليابان وروسيا والولايات المتحدة الأمريكية، من أجل الوصول إلى تعريف دقيق للثانية بأكبر قدر ممكن. وتقدر أجود دقة تم الحصول عليها إلى حدود صياغة هذا الكتيب مع بعض معايير التردد الأولية هاته بحوالي  $1 \leftarrow 2 \times 10^{-14}$  [باوخ وآخرون (Bauch)، 1988؛ دورينفانت وآخرون (Dorenwendt)، 1990؛ لي وآخرون (Lee)، 1995].

وقد تحسن استقرار التردد ودرجة الاعتمادية منذ ظهور معايير التردد الذرية المصنعة باستعمال الطنين في ذرة كل من السيزيوم والروبيديوم والهيدروجين تحسناً كبيراً، بالإضافة إلى تقلص حجمها.

ويعتبر التقدم الذي سجلته المعايير الأولية للتردد المخبري والأجهزة القابلة للتشغيل الميداني من نتائج تفهم أفضل لخاصياتها المادية وأسباب عدم استقرار التردد ولتخالف التردد المتبقي. ولا شك في أن تقدم التكنولوجيا الخاصة بالدارات الإلكترونية الضرورية في عملية رصد انتقال الذرة ومراقبة مذبذب المرو البلوري قد ساهم في ذلك التطور مساهمة كبيرة. وتدرج الدراسة التي أجريت على مبادئ معايير التردد الذرية وصفاتها ضمن المراجع التالية: هالفين (Hellwig)، 1985؛ فانيي وأودوان (Vanier and Audoin)، 1989؛ بوسكا وآخرون (Busca)، 1990؛ كوتلار (Cutler)، 1990؛ فيسو (Vessot)، 1990؛ لوفيس (Lewis)، 1991؛ أودوان وآخرون (Audoin)، 1992؛ ماتيسون (Mattison)، 1992؛ ريلاي (Riley)، 1992.

## الفصل 1

وتتوجه الجهود المبذولة حالياً في إطار الأبحاث نحو تطبيق الضخّ البصري على معايير التردد بالحزمة السيزيومية [أودوان، 1992]، ونحو تنفيذ طرق التبريد الليزري للأيونات [فينيلاند وآخرون، 1990؛ بريستايج وآخرون (Prestage)، 1994]، والتبريد الليزري في معيار التردد باستعمال نافورة من ذرات السيزيوم [كليرون وآخرون (Clairon)، 1995؛ جيبل وتشو (Gibble and Chu)، 1993] وتطوير مازر الهيدروجين المرّد [فيسو وآخرون، 1990].

### 2.1 مبادئ معايير التردد الأساسية

يقدم هذا الفصل نظرة شاملة عن مبادئ تشغيل معايير التردد المتيسرة، بالإضافة إلى مفاهيم علم القياس الأساسية لتمييز تلك المعايير، بما في ذلك مفهومي الاستقرار والدقة. ويتضمن الجزء A من الفصل 2 وصفاً أكثر تفصيلاً للأجهزة والخصائص أدائها.

#### 1.2.1 معايير تردد المرو البلوري

إن معيار تردد المرو البلوري هو مذبذب إلكتروني حيث يكون العنصر المحدد للتردد طناناً مصنوعاً من المرو البلوري. ويُحدّد تردد الطنان أساساً بواسطة خصائص المادة الخام المجرية. فهو يعتمد أيضاً على كل المؤثرات البيئية التي تعدل من تلك الأبعاد والخصائص والتي لا يمكن عملياً طرحها من الخصائص الأساسية للذرات الفردية. فتردها إذاً يحتاج إلى المعايرة في علاقته بمصدر تردد أكثر دقة. وتستعمل الأجهزة العالية الأداء على نطاق واسع في مخابر علم قياس الترددات والتوقيت كمعايير تردد ثانوية. بالإضافة إلى أن إشارة خرج معظم معايير التردد الذرية هي مشتقة من مذبذب مرو يُراقب بالتوتر (VCXO)، ويراقب الطنين الذري تردها.

#### 2.2.1 معايير التردد الذرية

يُحدّد التردد المرجعي في معايير التردد الذرية، على خلاف مذبذبات المرو، أساساً بواسطة خصائص أصيلة للذرات ذات عناصر منتقاة بشكل معين، أي بعبارة أخرى يُحدّد التردد المرجعي بواسطة ثوابت أساسية ناجمة عن تفاعلات أساسية بين جسيمات أولية.

وعلى حد علمنا بالفيزياء وعلم الفلك، فإنه يحق لنا التسليم بأن الخصائص الذرية هي صفات ثابتة، لا تعتمد على الفضاء ولا على الزمن (وذلك في حدود الآثار النسبوية المعروفة). فيمكن بالتالي إنتاج خصائص تجهيزات ما تقوم بتوفير ذات التردد لعدد من المواقع وتوزيعها، شريطة أن تتم ملاحظة انتقال معين في عنصر معين وشريطة أن يتم أخذ الآثار النسبوية (المرتبطة بالارتفاع مثلاً بعين الاعتبار. فيكون التردد المرجعي آنذاك متيسراً على المستوى المحلي في الوقت الفعلي. ويبقى ثابتاً مع الوقت ومساوياً لغيره من معايير التردد الذرية الموجودة في أماكن مختلفة من الأرض وأماكن أخرى قريبة منها (وذلك ضمن حدود عدم التيقن الذي ينص عليه الفصل 2، الجزء A والفصل 5). وفي الواقع، يقتصر تعاملنا تقريباً على ثلاثة أنماط من المعايير التي تستعمل خصائص عناصر الهيدروجين (مازر الهيدروجين) والروبيديوم (معيار التردد بخلية غاز الروبيديوم) والسيزيوم (معيار التردد بالحزمة السيزيومية). وستتم مناقشة تلك الأنماط من المعايير لاحقاً عند التعرض إلى التطورات المستقبلية في الفصل 9.

#### 1.2.2.1 خصائص مطيافية تتسم بالأهمية

لتنفحص ذرة عنصر معين. فهي تتميز بسويات كمية من الطاقة الواضحة المعالم. ولنفترض أن  $E_1$  و  $E_2$  طاقة لسويتين منهما، وأن  $E_2 > E_1$ . فقد يحدث انتقال بين تينك السويتين تحت تأثير إشعاع كهرومغناطيسي بتردد  $\nu_0$ . ويحدد الاحتفاظ بالطاقة القيمة  $\nu_0$ . ويؤدي ذلك إلى علاقة بوهر (Bohr):

$$(1.1) \quad h\nu_0 = E_2 - E_1,$$

حيث إن  $h$  تمثل ثابتة بلانك (Planck). وعندها يمكن ملاحظة وجود طنين معين. ويكون له العرض  $\Delta\nu$  الذي تعطيه علاقة عدم التيقن التابعة لهايسنبرغ (Heisenberg):

$$(2.1) \quad \Delta\nu\Delta\tau \geq 1.$$

أما بالنسبة لعمليات الانتقال المتوقعة هنا، تدل  $\Delta t$  على امتداد ملاحظاتها العملية. وهي محدودة. بمختلف الظواهر أو العمليات المادية مثل وقت الانتقال أو الاسترخاء، إلخ، كما تتراوح تقريباً بين 1 ms في خلية الروبيديوم وفي أنبوب بحزمة سيزيومية و 1 s في مازر هيدروجين. ويقع عامل



الفصل 1

نوعية الخط الذري،  $\Delta V / V_0$ ، على نحو نمطي بين  $10^7$  و  $10^9$ ، وذلك مع قيم من  $V_0$  ذات الصلة (انظر الجدول 1.1) وعرض الخط الناجم عن تلك العمليات.

الجدول 1.1

تردد انتقال عالي الدقة للهيدروجين والروبيديوم 87 والسيزيوم

ذرة	كتلة ذرية	تردد انتقال عالي الدقة (Hz)
H	1	1 420 405 751,770 +/- 0,003
Rb	87	6 384 682 612,8 +/- 0,5
Cs	133	*9 192 631 770

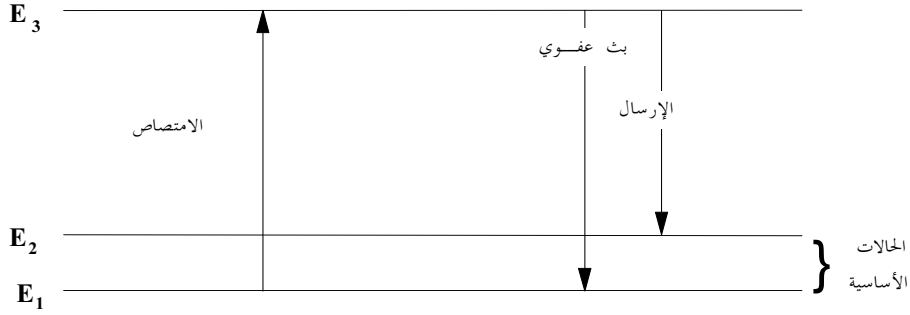
\* حسب تعريف الثانية

تحدد السويتان اللتان تحظيان بالأهمية، في معايير التردد الذرية، بالتفاعل المغنطيسي داخل الذرة. ويحدث ذلك التفاعل بين اللحظة المغنطيسية التابعة إلى الكهريب غير المزاوج لذرات قلووية أو شبه قلووية في حالتها الأساسية واللحظة المغنطيسية التابعة إلى النواة. ويسمى ذلك التفاعل بالتفاعل العالي الدقة. وهو تفاعل ضعيف ويؤدي إلى قيمة صغيرة من  $E_2 - E_1$ . وبناء على ما تقدم، فإن تردد الطنين  $V_0$  يكمن في سلم تردد الموجات الصغيرة، كما يبينه الجدول 1.1. ويمكن للنظام الإلكتروني الذي يراقب تردد مذذب المرو البلوري المرتبط به، كنتيجة عملية، أن يكون فعالاً وصغيراً وموثوقاً.

وتؤدي القيمة الصغيرة  $E_2 - E_1$  إلى نتيجة أخرى، ولكنها مزعجة، وتمثل في كون لدينا بالفعل  $kT \ll E_2 - E_1$ ، حيث إن  $kT$  هي الطاقة الحرارية. فعند التوازن الحراري تكون سوينا الطاقة مأهولة على نحو متساوٍ تقريباً، مما يؤدي إلى ضرورة الإخلال بالتوازن الحراري ذاك حتى تتسنى ملاحظة أي تغيير يطرأ على خاصيات الذرة أو أي تبادل لقدر من الطاقة يمكن الكشف عنه عند حدوث الانتقال الذري. ويتم تنفيذ طريقتين مختلفتين من أجل الإخلال بالتوازن الحراري. ترتبط أولهما بما تظهره الذرة من قيم متناقضة مع لحظتها المغنطيسية الفعالة، وذلك سواء احتلت سوية واحدة أو غيرها من سويتي الطاقة المعنيتين. وبالتالي، فإن انحراف الذرات في حزمة تمر في حقل مغنطيسي قوي وغير متجانس يعتمد على حالتها الداخلية وهي ذرات قابلة للفصل [غرلاخ وستيرن (Gerlach and stern)، 1924؛ غرلاخ، 1925]. وتُستعمل هذه الطريقة لانتقاء الحالة في معايير التردد بالحزمة السيزيومية وفي موازر الهيدروجين. أما الطريقة الأخرى فتعتمد على الضخ البصري [كاستلار، 1950]. وإلى جانب سويتي التفاعل 1 و 2 العاليتين الدقة في الحالة الأساسية، فإن الذرات تتميز بسويات نشاط طاقتها أقوى بكثير، ومثل السوية 3 التي يبينها الشكل 1.1. ويمكن للإشعاع البصري المزود بطول موجة مناسب، على سبيل المثال، أن ينقل الذرات من السوية 2 إلى السوية 3. أما الرجوع العفوي إلى السوية 1 والسوية 2 فهو أمر يحدث في لمح البرق، أي في أقل من 50 ns. وتمثل النتيجة الواضحة للضخ البصري في ارتفاع تأهيل سوية من سويات الحالة الأساسية (السوية 1 هنا)، على حساب تأهيل السوية الأخرى (السوية 2 حسب المثال المذكور). وهذا هو مبدأ إعداد الحالة في معيار تردد الروبيديوم المتيسر وفي معايير التردد بالحزمة السيزيومية بالضخ البصري والتي يجري تطويرها حالياً.

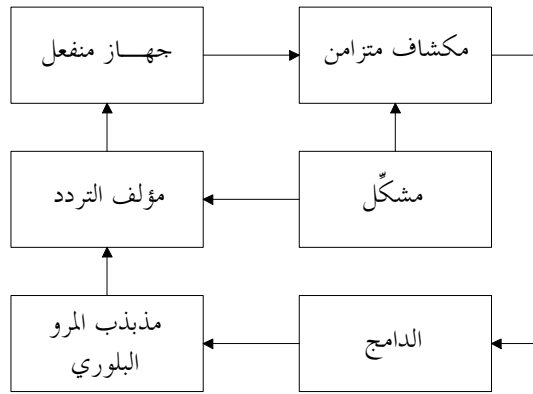
2.2.2.1 معايير التردد الذرية المنفصلة والفعالة

تزود معايير التردد بالحزمة السيزيومية وبخلايا الروبيديوم بإشارة سير الموجات الصغيرة للحصول على المعلومات الضرورية بخصوص تردد الطنين الذري. وتتصرف تلك المعايير وكأنها طنان وتسمى بمعايير التردد المنفصلة. وكاستجابة للطنان، نتحصل على إشارة الطنين المميزة  $I_s$  المركبة على كامل الإشارة  $I_t$ . وتمثل كل من  $I_s$  و  $I_t$  قياسات عدد الجسيمات التي تساهم في الإشارة وفي الضوضاء الخلفية على التوالي. ويمكن تشغيل موازر هيدروجين صغيرة الحجم بتجويف متراص، غير أنه يتميز بخسارة مرتفعة، بطريقة ماثلة. ويبين الشكل 1.2 النظام الإلكتروني الذي يكشف عن تردد الطنين ويراقب تردد مذذب المرو البلوري ذي 5 أو 10 MHz، وذلك على نحو تخطيطي. وتتألف إشارة سير الموجات الصغيرة من المذذب VCXO، في حين يركب عليها تشكيل ما للتردد. ويؤدي ذلك إلى تشكيل نطاق جwab الجهاز. وتتم العملية بالكشف المتزامن لانتزاع إشارة الخطأ المطبقة على التحكم في المذذب VCXO.



الشكل 1.1

مبدأ الضخّ البصري

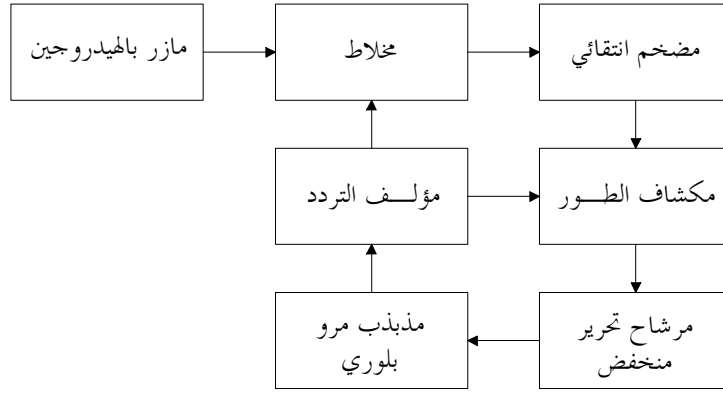


الشكل 1.2

تخطيط فدرة يمثل تحكّم التردد في مذبذب المرو البلوري في معيار التردد المنفعل

يولد مازر الهيدروجين الذي يحتوي على تجويف كامل الحجم بدون حمولة مذبذباً. ويسمى في هذه الحالة بمعيار التردد الفعال. وينفذ النظام الإلكتروني مبادئ المستقبلين التخفيقيين ومبادئ العروات المحكومة الطور كما يبينه الشكل 1.3. ويخضع مذبذب مرو بلوري ذو 5 أو 10 MHz أو 100 MHz بالنسبة إلى مذبذب المازر. ويمكن تشغيل مازر بالهيدروجين صغير الحجم على نحو فعال، وذلك شريطة أن يتم تحسين عامل نوعية التجويف بواسطة عملية إلكترونية.

الفصل 1



الشكل 1.3

تخطيط فدرة يمثل تحكّم الطور في مذبذب مرو بلوري بواسطة مذبذب مازر بالهيدروجين

تؤخذ إشارات الخرج لمعايير التردد، في كلتا الحالتين للمعايير المنفصلة والمعايير الفعالة، من مذبذب مرو بلوري مُتّحكّم فيه.

### 3.1 مفاهيم علم القياس الأساسية

#### 1.3.1 استقرار التردد

يراجع هذا الجزء باختصار الأصل المادي لتقلبات التردد العشوائية أو الأصل المادي لانسياقه. وينص الفصل 2 في الجزء A منه والفصل 5 على القيم الرقمية النمطية. كما يتعرض الفصل 4 بالنقاش إلى قياسات الاستقرار. ونتناول في هذا الجزء القيم النظرية المعتمدة على الخصائص المادية للمذبذب، في حين يعرض كل من الفصل 3 والفصل 4 كل ما يتعلق بقياس استقرار التردد.

##### 1.1.3.1 التعريف

عادة ما يستعمل مصطلح "استقرار التردد" عوضاً عن "عدم استقرار التردد". وهو يدل على تغير التردد التلقائي و/أو الناتج عن الظروف البيئية خلال فاصل زمني معين (انظر المسرد). ويتم التمييز عموماً بين تقلبات التردد الاعتبائية والآثار النظامية مثل انسياق التردد. فقد ينجم عدم الاستقرار النظامي عن الآثار البيئية. في حين يعتمد استقرار التردد على عرض نطاق نظام القياس و/أو على وقت العينة أو وقت التكامل. وتتميز حالات عدم الاستقرار العشوائية أو الاعتبائية إما ضمن مجال الوقت أو مجال التردد أو ضمن كليهما.

##### 2.1.3.1 مذبذبات المرو البلورية

##### 1.2.1.3.1 تقلبات التردد العشوائية

بالقرب من الموجة الحاملة، أي لدى ترددات فورييه الأصغر تقريباً من نصف عرض نطاق الطنان،  $2QV_0$ ، يبدر عن مذبذبات المرو البلورية ضوضاء رفيف التردد، الذي يولده طنان المرو [والز وآخرون، 1992] وفي دارة عروة التغذية الراجعة. وهكذا تتغير الكثافة الطيفية لقدرة ضوضاء الطور (PSD) حسب  $f^{-3}$ . وتحدد هذه الضوضاء استقرار التردد لأوقات الاعتيان ما بين حوالي 1 و  $10^3$ s. وفي داخل هذه السلسلة، يكون قياس استقرار التردد في المجال الزمني،  $\sigma_y(\tau)$ ، (انظر الفصل 4)، ثابتاً. وسيتميز مذبذب مرو بلوري متقن ذو 5 MHz بقيمة نمطية من  $\sigma_y(\tau) = 8 \times 10^{-14} \leftarrow 3 \times 10^{-13}$ .

## الفصل 1

وتقوم ضوضاء رفيف الطور، لدى ترددات فورييه الأكبر من  $V_0 / 2Q$ ، بإزعاج المذبذب إلى أن يصير أصغر من ضوضاء الطور البيضاء. وتعتبر ضوضاء رفيف الطور (PSD المتغيرة حسب  $f^{-1}$ ) نتيجة لمعالجة ضوضاء رفيف التردد في عروة المذبذب للتغذية الراجعة [ليسون، 1966؛ سوفاج (Sauvage)، 1977].

وتكون ضوضاء الطور، لدى ترددات فورييه الأكبر تقريباً من  $10^2 \text{ Hz}$ ، بالنسبة إلى مذبذبات مرو بلورية ذات  $5 \text{ MHz}$ ، ضوضاء بيضاء. وهي ناتجة عن الضوضاء المضافة في دائرة خرج التضخيم. وتكون ضوضاء الطور PSD ضمن عرض نطاق درجة الخرج على النحو التالي:

$$(3.1) \quad S_{\phi}(f) \approx \frac{FkT}{P},$$

حيث  $k$  هي ثابتة بولتزمان (Boltzmann)، و  $T$  هي الحرارة الديناميكية الحرارية، و  $P$  هي القدرة المولدة في عروة المذبذب و  $F$  هو عامل الضوضاء لمضخم الخرج.

### 2.2.1.3.1 آثار نظامية

يتشوش استقرار التردد في حالة مذبذب مرو بلوري ذي  $5 \text{ MHz}$ . بموجب آثار التقادم عندما تكون أوقات الاعتيان أكبر من  $10^3$  [والز وغانيوبان، 1992؛ فيلار وفيغ، 1993]. وتؤدي تلك الآثار إلى تغيير بطيء في التردد بمقدار  $10^{-11}$  في اليوم الواحد. وتعود آثار التقادم تلك إلى التغيير الذي يطرأ على خصائص المكونات الإلكترونية والتخفيف من الاجهاد ونشر التلوث في المرو البلوري، إلخ. هذا، بالإضافة إلى تأثير تردد مذبذبات المرو البلورية بتغيير الوضعيات الخارجية، مثل توتر التزويد ودرجة الحرارة والرطوبة والضغط والنوسان (انظر الفصل 5).

### 3.1.3.1 معايير التردد الذرية

كما يجدر بنا التمييز بين استقرار التردد على المدى القصير واستقراره على المدى المتوسط، اللذين تحدهما العمليات العشوائية، والاستقرار على المدى الطويل الذي يعتمد على الآثار النظامية.

#### 1.3.1.3.1 استقرار التردد على المدى القصير

يكون استقرار التردد على المدى القصير، في كلا الصنفين من معايير التردد الذرية المنفعل منها والفعال، استقرار مذبذب المرو البلوري. ويحدث ذلك عندما تكون أوقات الاعتيان  $\tau$  أصغر من ثابتة وقت عروة التحكم، التي تكون لها  $s$  على نحو نمطي.

#### 2.3.1.3.1 استقرار التردد على المدى المتوسط

يحدد عامل نوعية الطنين الذري ونسبة الإشارة إلى الضوضاء استقرار التردد من ملاحظته، وذلك إذا كان  $\tau$  أكبر من ثابتة وقت عروة التحكم ( $s \approx 1$ )، وإلى حد يعتمد على معيار التردد الذري المعني ( $\approx 1$  يوماً للسيزيوم، و  $\approx 4 \times 10^4$  s للهيدروجين، و  $\approx 3 \times 10^3$  s للروبيديوم).

#### 1.2.3.1.3.1 استقرار التردد على المدى المتوسط في معايير التردد المنفصلة

يرتبط استقرار التردد ارتباطاً وثيقاً بدقة قياس أقصى نقاط مخطط الطنين الذري. ويمكن أن يبرهن على أن قياس استقرار تردد في ميدان التوقيت  $\sigma_y(\tau)$  يكون على النحو التالي [فاني وأودوان، 1989]:

$$(4.1) \quad \sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{S} \frac{1}{Q N(\tau)},$$

حيث  $S/N(\tau)$  هي نسبة اتساع الإشارة إلى الضوضاء لوقت الاعتيان  $\tau$  و  $Q$  عامل نوعية الخط الذري.

وفي معايير التردد بالخرمة السيزيومية وبخلية الروبيديوم، تكون الضوضاء ضوضاء رشقية لدفق جسيمات الذرات والفوتونات المكشوف عنها، على التوالي. ويكون لدينا ما يلي:

$$(5.1) \quad \frac{S}{N(\tau)} \approx \frac{I_s}{I_t^{1/2}} \tau^{1/2},$$

حيث  $I_s$  هو دفق الجسيمات التي تقيس اتساع الخط و  $I_t$  هو الدفق الكلي للجسيمات المكشوف عنها. فنتحصل بالتالي على:

$$(6.1) \quad \sigma_y(\tau) \approx \frac{I_t^{1/2}}{QI_s} \tau^{-1/2}.$$

ويتغير استقرار التردد حسب  $\tau^{-1/2}$ ، وهو أمر يرتبط بكون ضوضاء الترددات المشوشة هي ضوضاء بيضاء (عشوائية وغير مترابطة).

ولنا في معيار التردد بخلية الروبيديوم عادة  $I_s \ll I_t$ . أما في معيار التردد بالحزمة السيزيومية، فيكون  $I_s$  متساوياً تقريباً مع  $I_t$  وتعطينا المعادلة (6.1) ما يلي:

$$(7.1) \quad \sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{QI_s^{1/2}} \tau^{-1/2},$$

ويكون لدينا في مازر الهيدروجين المنفعل ما يلي:

$$(8.1) \quad \frac{S}{N(\tau)} \approx K \left( \frac{P}{kT} \right)^{1/2} \tau^{1/2},$$

حيث  $kT$  هي قدرة الضوضاء الحرارية بأسلوب التحويل و  $P$  هي القدرة التي تمنحها الذرات إلى التحويل. و  $K$  هي ثابتة أكبر من الوحدة تعتمد على معاملات التشغيل. وفي هذه الحالة يكون لدينا ما يلي:

$$(9.1) \quad \sigma_y(\tau) \approx \frac{K}{Q} \left( \frac{kT}{P} \right)^{1/2} \tau^{-1/2}.$$

### 2.2.3.1.3.1 استقرار التردد على المدى المتوسط في معايير التردد الفعالة

نميز من الناحية التخطيطية، في جميع أنماط المذبذبات، بين ضوضاء التردد التي تولدها دائرة راعية للمذبذب وضوضاء التردد المضافة إلى المذبذب في دارات التضخيم اللاحقة.

وتكون الضوضاء المولدة في عروة التغذية الراجعة ضوضاء تردد بيضاء (وتكون هذه الضوضاء البيضاء للتردد عادة في مذبذب المرو البلوري مقنعة بوضوء الرفيف FM). وتعطينا المعادلة التالية قياس استقرار التردد في ميدان التوقيت المعني [كوتلار وسايرل (Searle)، 1966؛ فانيي وأودوان، 1989]:

$$(10.1) \quad \sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{Q} \left( \frac{kT}{2P} \right)^{1/2} \tau^{-1/2}.$$

وتهيمن هذه الضوضاء البيضاء للتردد، في موازر الهيدروجين الفعالة، على استقرار التردد بالنسبة إلى  $\tau$  بين حوالي 20 و  $10^4$  s.

وتكون الضوضاء المضافة إلى دائرة الخرج المضخمة ضوضاء بيضاء، وذلك كما تبينه المعادلة (3.1). ولدينا ما يلي:

$$(11.1) \quad \sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{v_o} \left( \frac{3FkTf_h}{2\pi P} \right)^{1/2} \tau^{-1},$$

حيث  $f_h$  هو عرض نطاق ضوضاء التجهيز المستعمل في قياس استقرار التردد. وتهيمن هذه الضوضاء البيضاء للطور حالياً بالنسبة إلى  $\tau$  بين 1 و  $10$  s تقريباً.

### 3.2.3.1.3.1 استقرار التردد على المدى الطويل

إذا كان  $\tau$  أكبر من  $1 \approx$  يوماً للسيزيوم، و  $s^{410}$  للهيدروجين و  $s^{310}$  للروبيديوم، فإن قياس استقرار التردد  $\sigma_y(\tau)$  يتوقف عن الانخفاض عندما يرتفع  $\tau$ . بل إنه يصبح وظيفة لارتفاع وقت الاعتبار  $\tau$ .

وما من نظرية تربط بين تغييرات التردد على المدى الطويل والآثار المادية الأساسية مثل الضوضاء الرشيقة أو الضوضاء الحرارية. وفي المقابل نرى أن تلك التغييرات هي من نتائج التغييرات البطيئة لعدد من تخالفات الترددات، التي لخصها الفصل 2 في الجزء A، والتي تشوش على تردد الطنين المثالي الذي أوردت المعادلة (1.1) تعريفاً له. وتعتمد معظم تخالفات التردد تلك على طريقة ملاحظة النقل الذري وبالتالي على تصميم معيار التردد أو نمطه. وتحدد آثار التقادم تغييرها كما تحدده تغييرات الظروف البيئية [دي ماركي (De Marchi)، 1987؛ أودوان وآخرون، 1992؛ ماتيسون، 1992؛ ريلاي، 1992]. ويرتبط معدل التقادم والحساسية تجاه التشوش الخارجي ارتباطاً مباشراً بخيارات التصميم المحددة. ويناقش الفصل 5 تلك الآثار بالتفصيل.

### 2.3.1 الدقة

#### 1.2.3.1 تخالفات الترددات المتبقية

إنه بالرغم من محاولة تصميم معايير التردد الذرية على نحو يمكن من بلوغ الوضعية المثلى للذرات المعزولة والذرات في الراحة بأكبر قدر ممكن، إلا أنه لا يمكن تفادي تخالفات الترددات الضعيفة خلال الممارسة الحالية. ويحدد عدم التيقن لدينا بشأن معرفتنا بمجم تخالفات الترددات تلك دقة معايير التردد الذرية. والأصل المادي للبعث من تلك التخالفات تشترك فيه كافة أنماط معايير التردد، إذ يعود أثر دوبلار (Doppler) من الرتبة الثانية مثلاً إلى الحركة الحرارية للذرات. أما الباقي منها فهو خاص بنمط معين مثل تخالف تردد غاز الدارئ وزحزحة الضوء في خلية الروبيديوم وهو ما سيناقشه الفصل 2 في الجزء A منه.

#### 2.2.3.1 التعريف

تعرف الدقة عموماً بكونها درجة تطابق القيمة المقیسة أو القيمة المختسة مع تعريفها (انظر المسرد). ويعبر عنها بعدم التيقن المقیس التراكمي للقيمة التي تم تحقيقها في علاقتها بالقيمة التي يعطيها التعريف. وعادة ما يكون لعدم التيقن ذلك مكونتان مختلفتان. وترتبط إحداها، في حالة معايير التردد الذرية، بالتشوش العشوائي الذي يؤثر على قياس تخالفات الترددات المتبقية (مثال، تلك التي تنجم عن قياس الحقل المغنطيسي المطبق). وتمثل المكونة الأخرى في مكونة نظامية ترتبط بسطحية معرفتنا ببعض معلمات التشغيل (مثال، عدم تجانس الحقل المغنطيسي). ويتعين تركيب هاتين المكونتين بعناية [BIPM، 1992].

#### 3.2.3.1 معايير التردد الأولية والثانوية

إن معايير التردد بالحزمة السيزيومية المستعملة في المخابر مبنية بشكل مقصود من أجل الحصول على تعريف الثانية بأكبر قدر ممكن من الدقة. وتمثل دقتها في عدم التيقن المقیس لاختلاف التردد المقیس أو المقدر بين القيمة التي تم تحقيقها لتردد الانتقال العالي الدقة وتردد الانتقال غير المضطرب المذكور في الجدول 1. وتبلغ أفضل درجات الدقة المسجلة إلى حدود يومنا هذا (1994) حوالي  $1 \times 10^{-14}$ . وفي حالة معيار تردد مثل مازر الهيدروجين، حيث تكون قيمة تردد الانتقال العالي الدقة غير المضطرب  $V_H$  معروفة بعدم تيقن مقیس ضعيف جداً، يساوي  $2 \times 10^{12}$ ، فإنه بالإمكان اعتبار مفهوم الدقة كذلك في حالة معيار التردد بالحزمة السيزيومية. وتتميز الدرجة التي يرتبط بها تردد الخرج بقيمة تردد الانتقال العالي الدقة غير المضطرب لذرة الهيدروجين بدقة مازر الهيدروجين. وهذا يعني أن عدم التيقن المقیس للتردد الذي يعطيه مازر الهيدروجين يطابق تركيباً من الدقة التابعة له وعدم التيقن لقيمة تردد الانتقال العالي الدقة غير المضطرب لذرة الهيدروجين.

وتعتبر دقة معايير التردد بخلية الروبيديوم ضعيفة جداً، نظراً لمختلف الآثار المذكورة أعلاه. ولا بد من معايرة تردد الخرج إزاء معيار تردد ذري أكثر دقة. فمعايير التردد بخلية الروبيديوم يستعمل إذاً كمعايير تردد ثانوي.

الفصل 1

وتبلغ دقة مذبذبات المرو البلورية  $10^{-6}$  بدون معايرة. وتكاد أن تكون معايرة مذبذبات المرو البلورية بالتالي مقابل تردد المعيار دائماً، كما أنها تُستعمل كمعايير تردد ثانوية.

### 3.3.1 قابلية إعادة الإنتاج والتدميث

يحتوي مفهوم قابلية إعادة الإنتاج على وجهين (انظر المسرد) وهما:

(أ) في علاقته بمجموعة من أجهزة مستقلة لها ذات التصميم، فهو يمثل قدرة تلك الأجهزة على إنتاج ذات القيمة.

(ب) في علاقته بجهاز واحد، يتم تشغيله مراراً بدون ضبطه، فهو يمثل قدرة ذلك الجهاز على إنتاج ذات القيمة.

أما قابلية إعادة التدميث (انظر المسرد) فهي قدرة جهاز ما على إنتاج ذات القيمة عندما يتم ضبط معلمات محددة بشكل منفصل وذلك في وضعيات الاستعمال المحددة.

ولا بد من ذكر أن عامل الدقة لمعيار تردد ذري ما (مثال،  $2 \times 10^{-12}$ ) يمثل حداً أعلى لقابلية إعادة إنتاجه وتدميثه (مثال،  $5 \times 10^{-13}$ ) بالإضافة إلى كونه حداً أعلى لاستقرار التردد التابع له على المدى الطويل (مثال،  $2 \times 10^{-12}$  لحياة الجهاز).

- AUDOIN, C., [1992] "Caesium Beam Frequency Standards: Classical and Optically Pumped", *Metrologia*, 29, 1992, pp. 113-134.
- AUDOIN, C., DIMARCQ, N., GIORDANO V., and VIENNET J., [1992] "Physical Origin of the Frequency Shifts in Cesium Beam Frequency Standards: Related Environmental Sensitivity", *IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 39, 1992, pp. 412-421.
- BAUCH, A., DE BOER, H., FISCHER, B., HEINDORFF, T. and SCHREIBER, R., [1988] "Long term Performance of the PTB's Primary Clock CS2", *Proc. 2nd European Frequency and Time Forum*, Neuchâtel, 1988, pp. 425-435.
- BESSON, R.J., "A New Electrodeless Resonator Design", [1977] *Proc. of the 31st Annual Symposium on Frequency Control*, Atlantic City, N.J., USA, 1977, pp. 147-152.
- BIPM., [1991] "Le Système International d'Unités", Sèvres, France. 1991.
- BIPM., [1992] "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", Sèvres, France. 1992. ISO Document ISO/TAG 4/WG3, June 1992.
- BUSCA, G., THOMANN, P., BERNIER, L.G., WILLEMIN, P. and SCHWEDA, H., [1990] "The Classical Microwave Frequency Standards", *Proc. of the 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI). Applications and Planning Meeting*, Vienna, VA, USA, 1990, pp. 9-17.
- CLAIRON, A., LAURENT, P., SANTARELLI, G., GHEZALI, S., LEA, S.N., and BAHOURA, M. [1995] "A Cesium Fountain Frequency Standard: Preliminary Results", *IEEE Trans. on Inst. and Meas.* 44, 1995, pp 128-132
- CUTLER, L.S., [1990] "The Status of Cesium Beam Frequency Standards", *Proc. of the 22nd Annual Precise Time and Time Interval, (PTTI), Applications and Planning Meeting*, Vienna, VA, USA, 1990, pp. 19-27.
- CUTLER, L.S. and SEARLE, C.L., [1966] "Some Aspects of the Theory and the Measurement of Frequency Fluctuations in Frequency Standards", *Proc. of the IEEE*, 54, 1966, pp. 136-154
- DE MARCHI, A., [1987] "New Insights into Causes and Cures of Frequency Instabilities (Drift and Long Term Noise) in Cesium Beam Frequency Standards", *Proc. 41st Annual Frequency Control Symposium*, Philadelphia, USA, 1987, pp. 53-58.
- DORENWENDT, K., FISCHER, B. and HEINDORFF, T., [1990] "The PTB's Primary Time and Frequency Standards. Performance and Uncertainty", *Physica Scripta*, 41, 1990, pp. 712-716.
- ESSEN, L. and Parry, J.V.L., [1957] "The Caesium Resonator as a Standard of Frequency and Time", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 250, 1957, pp. 45-69.
- FILLER, R.L. and Vig, J.R., [1957] "Long-Term Aging of Oscillators", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 42, 1993, pp. 387-393.
- GERBER, E.A. and Ballato, A.; Editors., [1985] "Precision Frequency Control", 2 volumes, 1985, Academic Press, Orlando, Florida, USA.
- GERLACH, W. and Stern, O., [1924] "Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld", *Annalen der Physik* 74, 1924, pp. 673-699.
- GERLACH, W., [1925] "Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld II. Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten normaler Atome unter magnetischer Kraftwirkung", *Annalen der Physik* 76, 1925, pp. 163-197.
- GIBBLE, K. and CHU, S., [1993] "Laser-Cooled Cs Frequency Standard and a Measurement of the Frequency Shift due to Ultracold Collisions", *Phys. Rev. Letters*, 70, 1993, pp. 1771-1774.
- HELLWIG, H., [1985] "Microwave Frequency and Time Standards" *Precision Frequency Control*, Volume 2, Gerber E.A. and Ballato A. editors, Academic Press, 1985, Orlando, Florida, USA.



- KASTLER, A., [1950] "Quelques suggestions concernant la production optique et la détection optique d'une inégalité de population des niveaux de quantification spatiale des atomes. Applications à l'expérience de Stern et Gerlach et à la résonance magnétique", *Journal de Physique et le Radium*, 11, 1950, pp. 255-265.
- LEE, W.D., SHIRLEY, J.H., LOWE, J.P., and DRULLINGER, R.E., [1995] "The accuracy evaluation of NIST-7", *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, 44, 1995, pp 120-124
- LEESON, D.B., [1966] "A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum", *Proceedings of the IEEE*, 54, 1966, pp. 329-330.
- LEWIS, L.L., [1991] "An Introduction to Frequency Standards", *Proc. of the IEEE*, 79, 1991, pp. 927-935.
- MATTISON, E.M., [1992] "Physics of Systematic Frequency Variations in Hydrogen Masers", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 39, 1992, pp. 250-255.
- PRESTAGE, J.D., TJOELKER R.L., DICK G.J. and MALEKI L., [1994] "Progress report on the linear ion trap extended (LITE)", *CPEM Conference Digest*, 27 June - 1 July 1994.
- RILEY, W.J., [1992] "The Physics of Environmental Sensitivity of Rubidium Gas Cell Atomic Frequency Standards", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 39, 1992, pp. 232-240.
- SAUVAGE, G., [1992] "Phase Noise in Oscillators: A Mathematical Analysis of Leeson's Model", *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, 26, 1992, pp. 408-410.
- VANIER, J. and AUDOIN, C., [1989] "The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards," 2 volumes, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1989.
- VESSOT, R.F.C., [1990] "State of the Art and Future Direction for the Atomic Hydrogen Maser", *Proc. of the 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting*, Vienna, VA, USA, 1990, pp. 29-51.
- VESSOT, R.F.C., MATTISON, E.M., WALSWORTH, R.L. and SILVERA, I.F., [1990] "Future Prospects for the Cold Hydrogen Maser", *Proc. of the 4th European Forum on Time and Frequency*, Neuchâtel, Switzerland, 1990, pp. 277-281.
- VIG, J.R., [1991] "Quartz Crystal Resonators and Oscillators for Frequency Control and Timing Applications. A Tutorial", 1991. Available from US Army Electronics Technology and Devices Laboratory. Fort Monmouth, N.J. USA.
- WALLS, F.L. and GAGNEPAIN, J.J., [1992] "Environmental Sensitivities of Quartz Crystal Oscillators," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 39, 1992, pp. 241-249.
- WALLS, F.L., HANDEL, P.H., BESSON, R. and GAGNEPAIN, J.J., [1992] "A New Model of 1/f Noise in BAW Quartz Resonators," *Proc. IEEE Frequency Control Symposium*, Hershey, Pennsylvania, USA, 1992, pp. 327-333.
- WINELAND, D.J., ITANO, W.M., BERGQUIST, J.C., BOLLINGER, J.J., HEINZEN, D.J., MANNEY, C.H., MOORE, F.L., RAIZEN, M.G. and WEIMER, C.S., [1990] "Trapped-Ion Frequency Standards," *Proc. of the 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting*, Vienna, VA, USA, 1990, pp. 53-60.

## مصادر التردد والتوقيت المتيسرة

### المحتويات

23	..... نظرة شاملة عن الفصل 2
----	-----------------------------

#### الجزء A

#### مصادر التردد والتوقيت المحلية

24	..... المقدمة	1.2
24	..... معايير تردد المرو البلورية	2.2
24	..... الطنان	1.2.2
25	..... المذبذب	2.2.2
25	..... معيار التردد بخلية غاز الروبيديوم	3.2
27	..... ماز الهيدروجين	4.2
29	..... معيار التردد بالحزمة السيزيومية	5.2

#### الجزء B

#### مراجع توجيهية

33	..... المقدمة	6.2
33	..... العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار عند انتقاء واستعمال خدمات بث التوقيت والتردد وتقنياتها البديلة .	7.2
34	..... مقارنات مختلف المصادر وتقنيات البث لمراجع التوقيت والتردد المحكمة	8.2
34	..... معلومات إضافية تتصل باستعمال مختلف بدائل الخدمات والأنظمة والتقنيات البديلة	9.2
46	..... المراجع	
47	..... قائمة المصادر	

## نظرة شاملة عن الفصل 2

بينما قام الفصل 1 بمعالجة المفاهيم الفيزيائية ومبادئ التشغيل الأساسية لمعايير التردد المحكمة، فإن الفصل 2 يتولى معالجة مصادر التردد والتوقيت. وسيبين هذا الفصل للمستعمل مختلف الخيارات للحصول على مصادر التوقيت والتردد، وذلك أخذاً بعين الاعتبار للوضعيات البيئية والقيود والإمكانيات المحلية. وينقسم الفصل إلى قسمين. فالجزء A يتناول مصادر التوقيت والتردد المستقلة، أي أنه سيتعرض بالوصف هنا إلى معايير التردد المتيسرة بمزيد من التفصيل. في حين يتناول الجزء B التوقيت والتردد كما يمكن الحصول عليهما من المصادر الإشعاعية (الأرضية منها والساتلية). ويتضمن ذلك الجزء بالطبع تقدم الطرائق المتعلقة بنقل التوقيت والتردد.

وتعتبر المصادر المذكورة في الجزء A مصادر التردد بشكل نمطي. ولن يقوم أي من تلك المصادر فعلياً بتوفير UTC خارج إطار استعماله كميقاتيات تُحمل، وهي لم تعد أفضل طريقة للحصول على UTC. ويوفر الجزء B مصادر التوقيت (بما في ذلك UTC). ولا تعتبر هذه الأخيرة مصادر جيدة للتردد كالمصادر التي يقدمها الجزء A. ومن المفيد، في هذا المجال، أن نأخذ في الاعتبار ارتباط المصادر المذكورة في الجزء A بمفاهيم الفيزياء التي تمثل منطلقاً لتعريف التردد (الثانية SI). وفي مقابل ذلك، فإن التوقيت الذي يمثل صحيح التردد، له كتابته اندماج عدد مُصطنع ومُتفق عليه من قبل أجهزة المعايير الدولية أو مُحدد من قِبل المستعمل. وعلى ذلك الأساس يمكن الحصول على UTC، أو UTC(k)، أو على سلم وقت آخر ذاتي الاتساق.

وقد يؤدي تركيب أفضل ما ورد في الجزأين A و B ضمن منهج نظام واحد إلى الاستفادة بكليهما، وذلك لتوفير مصدر تردد يرتبط بالثانية SI في دقة كاملة وتقدير أمثل للتوقيت UTC. وسيتعرض الجزء B إلى هذا المفهوم.

وقد يتسم الجزء A في شيء منه بتكرار ما جاء في الفصل 1، غير أن المراد هنا هو مساعدة المستعمل على اختيار أفضل المصادر التي يمكنها أن تلأئم حاجياته ومتطلباته.

## مصادر التردد والتوقيت المحلية

### 1.2 المقدمة

تستعمل معايير التوقيت والتردد الدقيقة التي تعتمد على الطنين الميكانيكي في أجهزة المرو وظواهر الطنين الذرية استعمالاً واسعاً في التطبيقات العلمية والتكنولوجية بما في ذلك شبكات المعطيات وأنظمة الاتصالات والملاحة وعلم القياس وأنظمة التوقيت العالمية، كما تستعمل في الأبحاث العلمية، مثل علم الفلك والتحليل المطيافي. وقد فسر الفصل 1 مبدأ تلك الأجهزة الأساسي ووضع المصطلحات اللازمة لوصف أدائها. ونجد هنا وصفاً لكل جهاز في قسم منفصل بشيء من التفصيل (انظر أيضاً [فانبي وأودوان، 1989] للمزيد من التفاصيل). وسيساعد تفهم الأوجه الفيزيائية المستعمل على رؤية الطريقة التي يتصرف بها معيار خاص في بيئة معينة. كما أن هناك ذكر لأكثر التحديدات تشدداً على الأداء بسبب ما تحدثه آثار البيئة، وهو ما يتعرض إليه الفصل 5 بشكل مفصل.

### 2.2 معايير تردد المرو البلورية

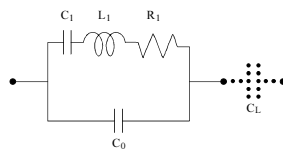
#### 1.2.2 الطنان

يصنع الطنان من صفيحة من المرو. وقد تنتشر التشويشات الميكانيكية من مختلف الأنماط (من التواء وتمدد وقص) في مجمل التجهيزات ويحدث الطنين عندما تبلغ الموجات السعوية من نمط معين وضعيات الحدود.

ويمكن استعمال خصائص الصفيحة الميكانيكية المميزة في دارات كهربائية بسبب الأثر الكهربائي الضغطي، الذي يزاوج بين الحقول الكهربائية والانزياح الميكانيكي في البلور غير مركزي التناظر مثل المرو. ويعتبر هذا التجهيز ملائماً جداً. إذ يمكن تصنيعه بكميات كبيرة، وبتكلفة منخفضة، مع ما يلزم ذلك من النقاء الكيميائي والإلتقان العالي للشبكة. وهو يعرض خسارة كهربائية طفيفة.

ويبين الشكل 2.1a الدارة الكهربائية المكافئة للطنان الكهربائي الضغطي. ويكون تردد الطنين  $\nu_0$ ، في تطبيقات علم قياس التردد والتوقيت، من 5 إلى 10 MHz دائماً. في حين أنه قد يبلغ في غيرها من التطبيقات 1 GHz. ويختلف عامل النوعية Q عكسياً مع تردد الطنين. ويكون لدينا عادة

$$Q = \frac{K}{\nu_0} \approx 10^3 \text{ Hz}.$$



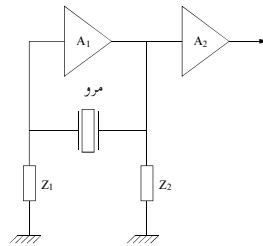
الشكل 2.1a

### دارة كهربائية مكافئة للطنان الكهربائي الضغطي

ويرمي تصميم طنان المرو البلوري عموماً إلى تقليص تشويش الجزء الفعال من البلور الناتج عن العوامل البيئية. فتوجيه الصفيحة في علاقتها بالخواص البلورية، أي عملية القص يتم اختيارها للتقليص من تأثير درجة الحرارة والإجهاد لدى تردد التذبذب إلى أقصى الحدود. وفي تصميم متقدم (تصميم BVA) [بوسون، 1977]، لا توضع الأقطاب الكهربائية على سطحي الصفيحة النائسة، كما يحدث ذلك غالباً. وتوضع الأقطاب الكهربائية على صفائح مساعدة، وعلى مسافة بضعة ميكرومترات من الصفيحة الفعالة. وبذلك يتم القضاء على حمولة جسم الصفيحة الرئيسية بواسطة الأقطاب الكهربائية، بالإضافة إلى تحرير الإجهاد وهجرة المادة على السطح البيئي بين المرو والمعدن.

## 2.2.2 المذبذب

يندرج المذبذب في عروة التغذية الراجعة، كما يبينه تخطيط الشكل 2.1b. وتكون زحزحة طور العروة المغلقة، في الحالة المستقرة،  $0$  أو  $\pi$  ويكون اتساع المذبذب ثابتاً. ويكون تغير التردد الكسري المعني، بالنسبة إلى تشوش معين للطور، تغيراً نسبياً إلى  $1/Q_L$ ، حيث إن  $Q_L$  هو عامل النوعية المحمل للمذبذب في الشبكة. ويكون لدينا عادة  $Q_L \sim 10^6$  على  $5$  MHz. ويجعل المكثف الإضافي  $C_L$  ضبط تردد المذبذب أمراً ممكناً. ويتكون هذا المكثف عادة من جزأين يتم إضافتهما بالتوازي: مكثف ثابت وفراكتور. ويستخدم هذا الأخير في التوفيق الدقيق مع مصدر توتر مستمر خارجي. ويوضع المذبذب وغيره من العناصر الحساسة إزاء درجة الحرارة، في كافة معايير تردد المرو البلوري العالية النوعية، في فرن متحكم فيه تضبط درجة حرارته على أقرب درجة لا يعتمد فيها تردد المذبذب على درجات الحرارة.



الشكل 2.1b

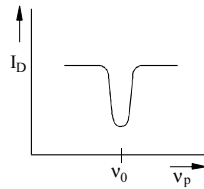
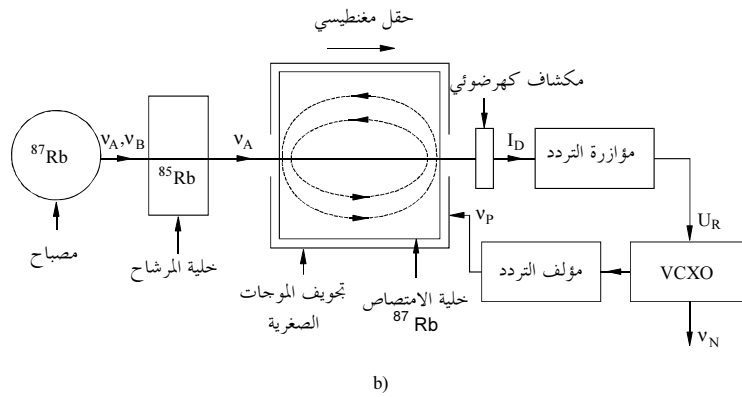
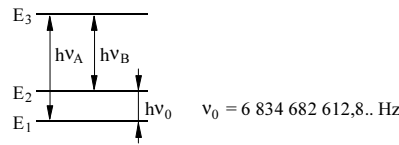
تقديم تخطيطي لمذبذب مرو بلوري

## 3.2 معيار التردد بخلية غاز الروبيديوم

يتم التوصل إلى انتقاء الحالة والكشف عن انتقال الميقاتية في معيار التردد بخلية غاز الروبيديوم (المختصر بمعيار Rb) بواسطة استعمال طريقة الضخ البصري. ويخترق الضوء من المصباح (المعبأ بالنظير  $^{87}\text{Rb}$ ) خلية المرشاح (المسمى بالمرشاح العالي الدقة) الذي يحتوي على بخار النظير  $^{85}\text{Rb}$  قبل تنشيط الذرات  $^{87}\text{Rb}$  في خلية مملوءة بغاز الدارئ داخل طنان الموجات الصغيرة، كما يبينه الشكل 2.2. ويقوم غاز الدارئ الذي هو خليط من غازات جامدة تتميز بتصادمات مرنة مع الذرات Rb بالرفع من وقت التفاعل،  $T$ ، للذرات مع حقل الموجات الصغيرة المسنود في المذبذب بواسطة تقليص معدل تصادم الذرات (غير المرن) مع حيطان الخلية.

ويغير نشاط خلية مرشاح النظير من طيف الضوء بما يسمح بضخ الذرات  $^{87}\text{Rb}$  فقط في السوية الدنيا العالية الدقة ( $E_1$  في الشكل 1.1 والشكل 2.2) ضحاً بصرياً. ويتم تفريغ هذه السوية إذا وتصيح الخلية شفافة. وإذا طبق إشعاع الموجات الصغيرة على  $\nu_0 = 6,834$  GHz على الذرات فإنه يعاد إعمار السوية الدنيا العالية الدقة من جديد ويُستأنف الامتصاص البصري مرة أخرى. وتبين الإشارة عند الطنين،  $\nu_0 = \nu_p$ ، بلوغ حدها الأدنى بالمكشاف الكهروضوئي، حسب ما يوضحه الشكل 2.2. ويتألف العرض الطيفي لخاصية الطنين عادة من  $500$  Hz كنتيجة للحدود المفروضة على  $T$  بسبب كل من غاز الدارئ والتصادمات المتبقية على الحيطان. وتتألف الإشارة ذات  $\nu_p$  انطلاقاً من المذبذب VCXO ويتم تشكيلها. ويعطي التحكم المترامن إشارة التحكم، UR، لتقوم بتوجيه المذبذب VCXO. وينحرف التردد المركزي لخط الطنين عن القيمة  $\nu_0$  للذرات  $^{87}\text{Rb}$  غير المضطربة انحرافاً كبيراً. وتحدث زحزحات التردد بسبب وجود الحقول المغنطيسية والتصادمات مع غاز الدارئ وتفاعل الذرات المتأون مع الإشعاع البصري وإشعاع الموجات الصغيرة. وقد تبلغ الزحزحة الكلية  $10^{-9}$  بالوحدات النسبية ويتم ضبط تركيبة الغاز

وكتافة الضوء بشكل أولي للحصول على الأداء الأمثل بالحد الأدنى للحساسية إزاء الآثار البيئية. لكن التأثيرين الأخيرين لا يدومان على استقرارهما في الزمان لتقادم المصابيح (لحدوث تغيير في طيفها وحساسيتها) كما تتغير تركيبة الغاز في خلية المرشاح وخلية الطنين نفسها بعض الشيء مع الزمن بسبب النشر وزوال الغاز. وفي حالة وجود الهليوم في البيئة، فبإمكانه الانتشار داخل خلية المرشاح وتغيير أداء الجهاز تغييراً كبيراً. فكل من التأثيرين يتغيران مع درجة حرارة الجو ونسبة الزيادة أو النقصان فيها.



## الشكل 2.2

أ) سويا ت طاقة  $^{87}\text{Rb}$ ؛

ب) معيار الروبيديوم، تقديم تخطيطي؛

ج) إشارة المكشاف  $I_D$  مقابل التردد  $\nu_p$  لإشعاع الموجات الصغيرة

ونظراً لاقتران الدقة الفيزيائية الأساسية للمعيار Rb على حوالي  $10^{-9}$ ، فإن تلك المعايير تميل لأن تكون أكثر حساسية إزاء الوضعيات البيئية من حساسية المعايير بالحزمة السيزيومية وبالهيدروجين. ولا يمكن تقييم المعيار Rb كمعيار تردد أولي (معايرة ذاتية)، ولكنه في المقابل لا بد من معايرته إزاء مرجع تردد معروف. وإذا تمت معايرة المعايير Rb من قبل مصنعها أو من قبل مخبر مختص في علم القياس، فإن تلك المعايير يمكنها حمل

## الفصل 2

التردد على سوية بحوالي  $10^{-11} \times 1$  من الدقة. ولكن استقرارها الداخلي على المدى القصير قد يكون غالباً أفضل من استقرار المعايير بالحزمة السيزيومية بسبب معدل الإشارة إلى الضوضاء المتيسر في المعايير Rb. وما عدا الاهتزاز والحقول المغنطيسية AC، فإن هذا الاستقرار الجيد على المدى القصير لا يتدهور عادة عند تعرضه للوضعية البيئية السيئة.

وتوجد معايير الروبيديوم متيسرة على مختلف سويات الأداء التي تعتمد بالأساس على قد الوحدات وتطور التحكم في معلمات التشغيل. ويقدم الجدول 2.1 مقارنة بين وحدات صغيرة لقياس القد (بمجم لا يتجاوز  $10^{-3} \text{m}^3$ ) - ويكون المرشاح العالي الدقة هنا دوماً متكاملًا مع خلية الطين التي تحتوي على Rb الطبيعي - ووحدات قد المعدات (عادة بمجم  $10^{-2} \text{m}^3$ )، ويعطي كدلالة على احتمالات المعايير Rb المستعملة في السواتل GPS التي تحتوي على تحكم خاص في درجات الحرارة. لكن هذا الأخير ليس متيسراً في السوق.

### الجدول 2.1

#### معطيات أداء معايير التردد بخلية غاز الروبيديوم

سواتل GPS	معدات	وحدة قياس صغيرة	دقة
$10^{-9} \times 1$	$10^{-10} \times 1$	$10^{-9} \times 1$	
$10^{-12} \times 3$	$10^{-12} \times (7-3)$	$10^{-11} \times (5-2)$	عدم استقرار التردد ( $\sigma_y(\tau=1s)$ )
$10^{-14} \times 3$	$10^{-13} \times 2$	$10^{-11} \times 5$	أرضية الريف ( $\sigma_{y,min}$ )
$10^{-12} \times 2$	$10^{-11} \times 1$	$10^{-13} \times 4$	تقلبات التردد (التقادم بالخصوص، في الشهر الواحد)
$10^{-13} \times 1$	$10^{-12} \times 1$	$10^{-12} \times 3$	درجة الحرارة (بحساب K)
$10^{-12} \times 2$	$10^{-12} \times 5$	$10^{-11} \times 2$	حقل مغنطيسي (بحساب $T^{-4} \times 10$ )

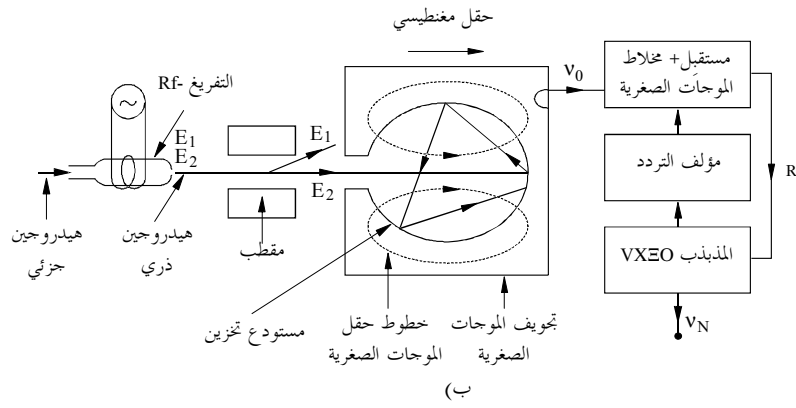
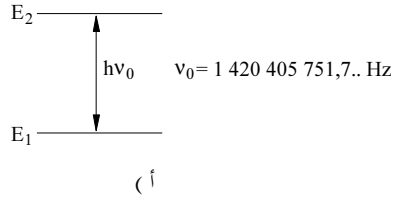
## 4.2 مازر الهيدروجين

يقدم الشكل 2.3 نظرة عامة عن مازر الهيدروجين. ويتم توليد الهيدروجين الذري من تفريغ الغاز بتنشيط تردد راديوي، يغذيها غاز الهيدروجين (في شكل جزئيات). وتنشأ حزمة الهيدروجين الذري من فوهة ويتم انتقاء حالتها بشكل مغنطيسي في مغنطيس سداسي أو رباعي الأقطاب. وتوجه ذرات الهيدروجين في حالة الطاقة العليا  $E_2$  في مستودع تخزين يكون سطحها الداخلي مغلف بالتفلون (مادة تجارية مسجلة تحت اسم دي بون (Dupont)). ويحاط المستودع بتجويف الموجات الصغيرة Q العالي ويؤلف إلى تردد الطين الذري على  $1420 \text{ MHz}$  (انظر الجدول 1.1). وبينما تكون الذرات في حالة هيجان داخل المستودع، تسجل تراجعاً من السوية  $E_2$  إلى السوية  $E_1$ . وبذلك تطلق الذرات طاقتها عبر البث المحفز الذي يتسبب فيه حقل الموجات الصغيرة الذي كانت الذرات نفسها قد أنتجته. ويؤمن غلاف التفلون تصادمات مرنة بالأساس على الحيطان، فيكون متوسط زمن تفاعل الذرات مع حقل الموجات الصغيرة حوالي ثانية واحدة، حتى وإن حدثت  $10^5$  تقريباً من التصادمات بحيطان المستودع [كلابنير (Kleppner) وآخرون، 1962؛ كلابنير وآخرون، 1965]. ويقوم حاجب مغنطيسي بحماية منطقة التفاعل من الحقل المغنطيسي المحيطي، وينشأ حقل متجانس بحوالي  $0.1 - 1 \mu T$  في تلك المنطقة. وتُستعمل المضخات لتفريغ الجهاز والحفاظ على ضغط لا يتجاوز  $10^{-5} \text{ Pa}$ ، بالرغم من دفع الهيدروجين الثابت.

ويُستعمل الإشعاع الذي تبثه الذرات نفسها في مازر الهيدروجين **الفعال** للتحكم في تردد المرو، لكن مقدار الطاقة المتيسر من الذرات يكون ضئيلاً جداً. وكنيجة لذلك تكون الدارات الإلكترونية المتصاحبة التي تكشف عن إشارة النطاق L للانتقال الكومومي متقنة إلى حد بعيد. ويتم تراوج بعض الإشعاعات، ذات  $10^{-13} - 10^{-14} \text{ W}$ ، خارج التجويف مع مستقبل ضعيف الضوضاء للموجات الصغيرة. فتُخلط الإشارة إذا مع إشارة ذات تردد متعدد للمذبذب VCXO (مثال  $1400 \text{ MHz}$ ) ويصبح هذا الأخير محكوم الطور بالنسبة إلى الإشعاع الذري.

ويعود عدم استقرار تردد المازر في أوقات تكامل قصيرة لعدم استقرار المذبذب VCXO ذي التشغيل الحر والضوضاء الحرارية للتجويف والضوضاء المضافة من الخارج. وبالرغم من وجود التعقيدات، فإن العلاقة الجيدة المتيسرة بين الإشارة والضوضاء توفر مع الدارات الإلكترونية المناسبة أفضل استقرار على المدى القصير لأي معيار تردد معروض في السوق (انظر الجدول 2.2).

الفصل 2



الشكل 2.3

مازر الهيدروجين

(أ) سوياات الطاقة في ذرة الهيدروجين  
(ب) تقديم تخطيطي

الجدول 2.2

معطيات عن أداء موازر الهيدروجين الفعالة والمنفعلة

منفعل	فعال	
$10^{-12}$	$10^{-12}$	دقة
$2 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-13}$	$\sigma_y (\tau=1s)$
$1 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-14} \leftarrow 5 \times 10^{-16}$	أرضية الرفيف
$1 \times 10^{-14}$ لا يطبق	$3 \times 10^{-15}$ $3 \times 10^{-13}$	$\sigma_y (\tau = 1s \text{ شهراً})$ بتوليف أوتوماتي بدون توليف أوتوماتي
$1 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-14}$	درجة الحرارة (بحساب K)
$1 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-14}$	حقل مغناطيسي (بحساب $T^4 \cdot 10 = G$ ) ( $T^4 \cdot 10 = G$ )



يتحكم استقرار تردد التجويف إلى حد بعيد في استقرار التردد على المدى الطويل: ويؤثر الجذب التجويفي للتردد تأثيراً قوياً على أي جهاز فعال بسبب القيمة العالية للتجويف جزئياً. وقد اعتُبر المازر الفعال عادةً نافعاً خصوصاً بالنسبة إلى التطبيقات التي تستوجب أداءً عالياً على المدى القصير والمدى المتوسط، مثلما هو الشأن بالنسبة إلى المحطات VLBI على الأرض. ولكن على مرّ السنين، تم البحث في الطرائق المتعددة لتوليف التجويف الأوتوماتي في المازر وهي مدمجة الآن في بعض الأجهزة المعروضة في السوق. وقد أبدى البعض من المازر تقادماً للترددات يصل في انخفاضه إلى  $10^{-16}$  يوماً بالمقارنة مع الميقاتيات السيزيومية الأولية [دمدوف (Demidov)، وآخرون، 1992؛ أوينغز (Owings) وآخرون، 1992]. وقد يحدث الانسياب المتبقي بسبب تقادم غلاف المستودع من التفلون، وبذلك يتغير عامل "زحزحة الحائط" بالعديد من  $10^{-12}$  (الناجم عن تصادمات الذرات بسياجها). وتبلغ أفضل دقة في تحديد تردد الانتقال غير المضطرب لذرة الهيدروجين بسبب الجذب التجويفي وعامل زحزحة الحائط حوالي  $2 \times 10^{-12}$ . ولا يزال انسياب التردد على المدى الطويل يشكل مشكلة في معظم المازر بالرغم من كونه من الناحية النمطية متناهي الصغر.

ونظراً لتأثير تردد طنين التجويف القوي، المعرف تعريفاً ميكانيكياً، على تردد خرج المازر فإن الأجهزة تتسم عادة بالحساسية إزاء الصدمات الميكانيكية والتغيرات في درجات الحرارة المحيطية. ولا يمكن الحصول على الاستقرار على المدى الطويل المذكور آنفاً إلا إذا أحاط حجاب حراري فعال جداً بحجم التفاعل. ويبلغ حجم مازر فعال عادة  $0,5 \text{ m}^3$  ووزنه  $80 \text{ kg}$  وقد يفوق سعره من خمس إلى عشرين مرة سعر الميقاتية السيزيومية.

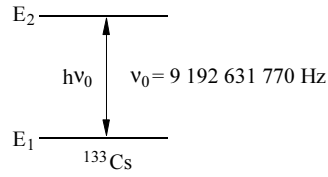
أما في المازر المنفعل فيمكن صنع حجم التجويف وكامل التصميم بالتالي أصغر مما يصنع في المازر الفعال. وطالما أنه يُشغّل بتجويف محمل خاص من أدنى Q، فلا يمكن وجود أي مذذب مسنود ذاتياً. ويطبق في مقابل ذلك حقل سير الموجات الصغيرة على التجويف كما يتم الكشف عن الطنين الذري بواسطة استعمال مستقبل الموجات الصغيرة. وتكون معالجة الإشارة مماثلة لمعالجة الميقاتية السيزيومية. أما الاستقرار على المدى القصير فينحدر بنحو درجة من الكبر بالنسبة إلى استقرار المازر الفعال على  $s \tau = 1$ ، ولا يتحسن الاستقرار إلا حسب  $\tau^{-1/2} \sim \sigma(\tau)$  ويكون المازر الفعال على  $s \tau = 1000$  مستقراً عادةً بأكثر من 10 مرات من ذلك المنفعل. ولكن المازر المنفعل يكون عموماً أقل حساسية بالنسبة إلى البيئية بسبب مؤازرة التجويف.

## 5.2 معيار التردد بالحزمة السيزيومية

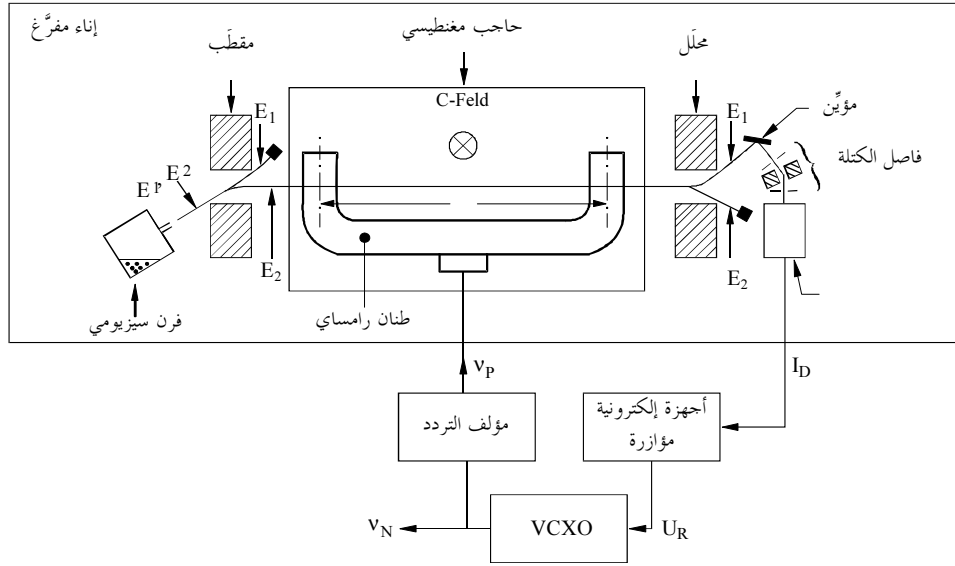
يبين الشكل 2.4 على نحو تخطيطي معيار التردد بالحزمة السيزيومية (الميقاتية السيزيومية باختصار). وتنتشر الحزمة الذرية السيزيومية من فرن يحتوي على بضعة غرامات من  $^{133}\text{Cs}$ . وتمر الحزمة عبر مغنطيس انتقاء الحالة يسمى بالمقطب الذي يُزيغ فقط الذرات التي تبلغ سوية طاقتها  $E_2$  في الاتجاه المطلوب. وتعرض الذرات في تجويف الموجات الصغيرة بذراعين إلى الإشعاع مرتين بنضات حقل الموجات الصغيرة، وذلك حسب طريقة رامساي لحقلي التذبذب التي يعود تاريخها إلى الخمسينات [رامساي، 1950؛ رامساي، 1990].

وعندما تتوفر وضعية الطنين (1.1)، يتم نقل الذرات إلى الحالة  $E_1$ . ولا يُزيغ المغنطيس الحقل إلا تلك الذرات باتجاه مكشاف سلبي يقوم بتأيين الذرات السيزيومية على سطحه. وتُسرع الأيونات في الميقاتيات السيزيومية المعروضة في السوق داخل مقياس الطيف الجماعي وتوجه باتجاه أول دينود لمعدد إرسال إلكتروني. وقد تعتمد بعض أجهزة المخابر إلى قياس تيار الأيون ذي بضعة أمبيرات صغيرة مباشرة. وتكون إشارة الخرج  $I_D$  في الحالتين نسبية بالمقارنة مع عدد الأيونات التي أزاغها المغنطيس الحقل. وتظهر مكونة طنين معين في إشارة الخرج  $I_D$  عندما يتم كنس التردد  $\nu_p$  لحقل الموجات الصغيرة المختبر عبر القيمة  $\nu_0$ . ويبلغ عرض خطها بضعة مئات من الهرتز في الميقاتيات التجارية ودون  $100 \text{ Hz}$  في المعايير المخبرية، ويُحدّد القيمة الوقت  $T$  لطيران الذرات من خلال تجويف بطول  $L$  (انظر الشكل 2.4) طبقاً لما جاء في (1.2). ويتم توجيه المذبذب VCXO بنفس الطريقة التي تتبع في المعيار Rb. وقد تم تثبيت القيمة  $\nu_0$  للذرات السيزيومية غير المضطربة على  $9\ 192\ 631\ 770 \text{ Hz}$  في تعريف الثانية.

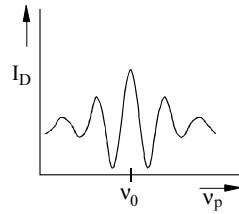
وكما سبق الذكر، فإن مفهوم دقة معيار التردد يمكن تطبيقه على أنماط المعايير الثلاثة كافة. أما فيما يتعلق بمدى إمكانية تحقيق الثانية SI لميقاتية سيزيومية، فيبدو أنه من المناسب تطوير مختلف تخالفات التردد المعنية بالأمر. وقد تم التعرض إليها بالتفصيل في [دي ماركي، 1987؛ دي ماركي وآخرون، 1987؛ فانيي وأودوان، 1989]. وباختصار شديد ترتبط أهمها بالعوامل التالية:



أ) سوياوات الطاقة من  $^{133}\text{Cs}$  (انظر الشكل 2.2)



ب) تقدم تخطيطي لميقاتية سيزيومية



ج) إشارة المكشاف  $I_D$  مقابل التردد  $\nu_p$  لإشعاع الموجات الصغيرة

## الشكل 2.4

### ميقاتية سيزيومية

(i) ملاحظة وجود سوياوات طاقة إضافية قريبة جداً من السوية 1 والسوية 2 في تصميم مبسط. وتتطلب ذرات الهيدروجين والذرات القلوية تطبيق حقل مغناطيسي ساكن لفصل عدد معين من السويات الفرعية المتدهورة بطريقة أخرى. ويزحزح هذا الحقل تردد الطنين حسب علاقة تربيعية. وتكون قيمته توفيقاً بين متطلبين متعارضين. ويجب أن يكون أصغر ما يمكن للحد من حساسية تردد الانتقال إزاء تقلباته. ولكن يجب أن يكون عريضاً بما فيه الكفاية لتفادي تراكم الانتقالات المجاورة. ويتم اختيار قيمة هذا الحقل في معايير التردد بالحزمة السيزيومية مثلاً في حدود  $7 \mu\text{ Tesla}$ . ويقارب تخالف الترددات المتصل 2 Hz، أي  $2 \times 10^{-10}$  من انتقال التردد ويقوم تبدل نسبي ما من كبر هذا الحقل يساوي  $5 \times 10^{-4}$  بتغيير نسبي لانتقال التردد على  $1 \times 10^{-13}$ . ويؤدي ذلك إلى تنفيذ ما يلي: أ) أحجبة مغناطيسية فعالة للتخفيف من الحقل المغناطيسي

## الفصل 2

الحيطي ومن تقلباته بما فيه الكفاية، ب) مصدر تيار مستقر لتغذية الملفات التي تنتج الحقل المغنطيسي. وينطبق الاستنتاج نفسه على سائر معايير التردد الذرية الأخرى. ويمكن قياس قيمة الحقل الساكن بواسطة سبر الانتقالات الأكثر حساسية التي تعتمد تردداتها على كبرها بشكل خطي.

(ii) حركة ذرية. فهي تؤدي إلى أثر دوبلار المتبقي الممكن من الدرجة الأولى وإلى أثر دوبلار نسبي من الدرجة الثانية لا مجال إلى تفاديه. وتكون تخالفات الترددات المتصلة بجوالي  $10^{-13} \times 1$  في معيار التردد بالحزمة Cs على سبيل المثال.

(iii) تشوه وظيفة الموجة الذرية. إذ تُدخل التصادمات بين الذرات القلوية والذرات شبه القلوية بالإضافة إلى التصادمات بغاز الدارئ أو بحيطان الحاوي الاضطراب على سويات الطاقة وتحث زحزحة للتردد. وبالمثل، تدخل التصادمات التي تحدث بمحاطت الحاوي الاضطراب على تفاعل الذرة العالي الدقة وتحث زحزحة للتردد أيضاً. ويبلغ تخالف الترددات درجة  $10^{-11}$  في المازر العالي الدقة ودرجة  $10^{-9}$  في معيار التردد بخلية الروبيديوم.

(iv) انتقاء الحالة. تحدث زحزحة التردد عندما تتعرض الذرات إلى إشعاعات خارجية. ويؤدي ذلك على سبيل المثال إلى زحزحة الضوء الذي يتميز به معيار التردد بخلية الروبيديوم.

(v) الاقتران بحقل الموجات الصغيرة الاستفهامية. وينتج عن هذا الاقتران ضرورة الإيفاء بمطلب التوليف الدقيق بالشكل الكافي لتجويف الموجات الصغيرة، وإلا فإنه ينتج عامل جذب التردد التجويفي. وعادة ما يكون أصغر من  $10^{-13} \times 1$ . ويمكن لاتساع الموجات الصغيرة ذاتها أن تحد من آثار الجذب التجويفي.

(vi) عملية الاستفهام. يكون تردد الطنين المقيس في كل من معايير التردد بالحزمة السيزيومية ومعايير التردد بخلية الروبيديوم حساساً إزاء نوعية إشارة التردد المشكّلة الضرورية من أجل سبر الانتقال. وعلاوة على ذلك، فإن بعض تخالفات الترددات في معايير التردد بالحزمة السيزيومية ومعايير التردد بخلية الروبيديوم تعتمد على اتساع حقل الموجات الصغيرة.

وقد تم تطوير الأجهزة المخبرية التي تذكر بكونها الميقاتيات السيزيومية الأولية أو معايير التردد في بعض المعاهد وقد صممت بصفة خاصة لتسهيل تقييم زحزحات التردد النظامية كافة [غينو (Guinot) وأزويب (Azoubib)، 1989]. وتُشغّل تلك الميقاتيات بهدف تحقيق تعريف الثانية بأعلى قدر ممكن من الدقة. وهي تحدد تردد الوقت الذري الدولي (TAI) (انظر الفصل 6).

ويكون عدم استقرار تردد الميقاتية السيزيومية في آجال متوسطة القصر تحددها الضوضاء الرشقية للحزمة الذرية، وبواسطة التحكم في معلمات التشغيل على المدى الطويل. وتتميز خاصيات الميقاتيات Cs الفيزيائية بحساسية داخلية أضعف إزاء الاضطرابات البيئية من حساسية المعايير Rb. وقد يتأثر خرج المعايير Cs مع ذلك بالحقول المغنطيسية المناوئة، وبدرجة الحرارة ودرجات الزيادة والنقصان فيها. وإذا تم قلب المعيار السيزيومى مثلاً رأساً على عقب، فإن تردده سيتغير - وذلك نظراً لدرجات الحرارة أكثر من كونه بسبب حقل الأرض المغنطيسي أو الحقل المغنطيسي للقوى-g.

وقد كشفت السنوات القليلة الماضية عن وجهات نظر جديدة تخص الآثار الفيزيائية الأساسية التي يعتمد عليها أداء الميقاتيات السيزيومية [بوخ وآخرون، 1988؛ دي ماركي وآخرون، 1984؛ كوتلار وآخرون، 1991؛ بوخ وشرويدر (Schr.der)، 1993]. وقد تكون هذه الاكتشافات قد أثرت على أداء آخر التصاميم المسوّقة. ويعتبر الاتفاق في هذه الأجهزة بين الوزن والحجم والإتقان وسعر الوحدات وأدائها أمراً لا مجال إلى تفاديه. وقد حدثت في السنوات القليلة الماضية ثغرة رئيسية في إنتاج المعيار Cs الموجود في السوق الذي يتميز بحساسية أضعف بكثير إزاء التغيرات البيئية حتى ذلك الحين. ويعود ذلك التحسن بما يقارب الدرجة من الكبر في الاستقرار على المدى الطويل إلى دراسة مبادئ الانتقال الفيزيائية وإلى استعمال الخاصيات اللاخطية الفريدة المرتبطة بالتقنيات الإلكترونية الرقمية المؤازرة.

كما تبحت الدراسات الحرارية منذ مدة في إمكانية حذف مغنطيس انتقاء الحالات وفي إمكانية استعمال الضخ البصري عوضاً عنه لانتقاء الحالات والكشف عن الذرات [أودوان، 1992]. وقد تمت البرهنة على إمكانية تحقيق هذه الطريقة واستعملت في الميقاتيات الأولية [دي كلارك (De Clerq) وآخرون، 1993؛ درولينغار (Drulinger) وآخرون، 1993] وفي صيغة تجريبية لميقاتية سيزيومية متراسة [بتي (Petit) وآخرون، 1992] ولكن بدون أن يتم تصنيع أي وحدة منها للسوق إلى حد الآن.

## الفصل 2

ويبلغ وزن الميقاتيات المعروضة في السوق حوالي 25 kg وتقاس بمقياس حشرات العرض من 19 إنشاً (كما توجد أيضاً صيغ الزجالية). ويمكن تغذيتها بالتآون بالتيار AC والتيار DC مع استهلاك للطاقة يقدر بحوالي 50 W. كما أن الميقاتيات أو معايير التردد المخيرية الأولية ليست قابلة للنقل أو الشراء. ويبين الجدول 2.3 معطيات الأداء للميقاتيات السيزيومية المعيارية المتيسرة في السوق والمعدات السيزيومية العالية الأداء والمعدات السيزيومية الجديدة بالتحكم الرقمي والمعطيات الخاصة بالميقاتيات السيزيومية الأولية المخيرية المستعملة في مخابر المعايير الوطنية (البيئة الثابتة) [بوخ وآخرون، 1988؛ درولينغار وآخرون، 1993].

### الجدول 2.3

#### معطيات عن أداء الميقاتيات السيزيومية

وحدة	معياري	أداء عال	بتحكم رقمي	مخبر أولي
دقة	$7 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-14}$
$(\sigma_y(\tau=100s))$	$3 \cdot 10^{-12}$	$< 10^{-12}$	$< 10^{-12}$	$< 10^{-13}$
أرضية الرفيف $(\sigma_{y,min})$	$1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-15} *$
$\sigma_y$ ( $1s = \tau$ ) شهراً واحداً	$1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-15}$	+
درجة الحرارة (بحساب K)	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$< 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15} *$
حقل مغنطيسي (بحساب $T^{-4-10}$ )	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$< 10^{-14}$	+

+ لا تنطبق على الميقاتية الأولية.\* معطيات مقدرة (سيكون من الضروري توفير مرجع يتمتع بدرجة عالية من الاستقرار لإجراء قياس ما، لكن ذلك المرجع غير متيسر).

## الجزء B

## مراجع توجيهية

## 6.2 مقدمة

عادة ما يحتاج العلماء والمهندسون وغيرهم من مستخدمي تجهيزات التوقيت والتردد إلى مزامنة إشارات التوقيت المحلية أو مزامنة إشارات التردد التي يتم إنتاجها محلياً ذات المعايير المقبولة وطنياً أو دولياً. وقد يقتصر الأمر في حالات أخرى على مقارنة الإشارات المحلية بالمعايير المرجعية لتحديد أية اختلافات كانت. ونظراً لقيام الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU) وغيره من المنظمات العلمية والتقنية بالتوصية بالأخذ بالتوقيت UTC (التوقيت العالمي المنسق) كمرجع دولي مناسب للتوقيت والتردد بالنسبة لمعظم التطبيقات، فإنه من الهام بمكان أن يكون الموظفون التقنيون الذين يستعملون تجهيزات التوقيت والتردد على علم بوجود مختلف المصادر للمعلومات الخاصة بالتوقيت UTC المحكم وبالوسائل التي تمكن من الوصول إليها بسهولة.

وبرغم تحمل BIPM مسؤولية إنشاء نظام UTC وصيانته وتنسيقه والإشراف عليه عموماً، فإن للمستخدمين من كافة أنحاء العالم بشكل عام أن ينفذوا لتقريبات التوقيت UTC المحلية، وذلك بواسطة مختلف خدمات بث التوقيت والتردد الوطنية التي يتم التنسيق بينها حتى تكون على اتفاق وثيق بسلم الوقت UTC الدولي. وتنص التوصية ITU-R TF.685 على بقاء مختلف سلالم الوقت UTC(k) ضمن 1 ms من الوقت UTC متى كان ذلك ممكناً. ولكن، وكما سيتم بيانه بمزيد من التفصيل لاحقاً، فإن طرائق البث المستعملة لنقل الوقت UTC من مراكز التوقيت والتردد الوطنية إلى المستخدمين عادة ما تدخل أخطاء هي أكبر بكثير من ذلك. وبناء عليه، تعتبر سوية الدقة المطلوبة لدى موقع المستعمل هي واحدة من أهم العوامل في عملية انتقاء مصدر الإشارات المرجعية للتوقيت والتردد من جملة عدد من البدائل الأخرى.

وتتضمن الاتجاهات الحديثة في بث التوقيت والترددات استعمال الإذاعات الراديوية للأرض وبالساتل في مختلف نطاقات الترددات والوصلات الهاتفية بالدارات المبدلة والبدالة المتأونة لإشارات التوقيت والتردد عبر المرسل المستجيب في الساتل ونقل الإشارات عبر شبكات الاتصالات الرقمية المتزامنة العريضة النطاق والوصلات التي تستعمل الألياف البصرية والكبلات المتحددة المحور أو أنظمة الموجات الصغرية. وتستعمل خدمات البث الراديوية وتقنياتها كلاً من نطاقات الترددات المكرسة التي أسداها الاتحاد ITU إلى خدمة التردد المعياري وإشارات التوقيت (وتتمديدها إلى الخدمات الساتلية)، وغيرها من الترددات التي أسداها الاتحاد إلى مختلف خدمات الاتصالات الراديوية. ونذكر كمثال على المنهج الأخير، أن خدمة الاستدلال الراديوي تشغل العديد من الإذاعات الأرضية والساتلية التي يجب التحكم فيها بإحكام فيما يتعلق بالتوقيت و/أو التردد. وتتميز تلك الإذاعات من أجل الملاححة الراديوية أيضاً بمنفعة كبيرة لبث التوقيت والتردد بدون أن يؤدي ذلك إلى فرض المزيد من المطالب على عمليات إسداء الترددات.

لقد أسدى الاتحاد ITU هذه الترددات المحددة لبث التوقيت والتردد:  $0,5 \pm 20,0$  kHz؛  $0,005 \pm 2,5$  MHz؛  $0,005 \pm 5,0$  MHz؛  $0,005 \pm 10,0$  MHz؛  $0,01 \pm 15,0$  MHz؛  $0,01 \pm 20,0$  MHz؛ و  $25,0 \pm 0,01$  MHz. كما تتضمن لوائح الراديو للاتحاد ITU من الصيغ ما يمكن من استعمال أجزاء معينة من المنطقة 14-90 kHz للطيف من أجل بث التوقيت والتردد. هذا، بالإضافة إلى العديد من الترددات الأخرى التي تم إسدائها إلى الخدمة الساتلية للتردد المعياري وإشارات الوقت، غير أن هذه الأخيرة لم تستعمل قط لذلك الغرض (إلى حدود 1995).

## 7.2 العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار عند انتقاء واستعمال خدمات بث التوقيت والتردد وتقنياتها البديلة

لقد تم وضع الكثير من خدمات البث للتوقيت والتردد وتقنياتها في كامل أنحاء العالم منذ بداية الإذاعة الراديوية الأولى لإشارات التردد المعيارية في العشرينات. وتعكس التعددية الناجمة عن مصادر الإشارات المرجعية المعيارية ضمن ما تعكسه، التشكيلة الواسعة لتطبيقات التوقيت والتردد والنطاق العريض للدقة المطلوبة والطبيعة الشاملة لمنطقة التغطية التي يجب خدمتها والاختلافات التي تتميز الأهمية النسبية لمراجع التوقيت بالمقارنة مع مراجع التردد والتغيرات في سوية إتقان المستعمل وتكاليف التجهيزات. ويمكن اليوم لمستخدمين من أنحاء عديدة من العالم أن تكون لهم إمكانية النفاذ إلى الإذاعة HF من خلال البعض من أكثر من 20 خدمة وطنية تستعمل كلاً من النطاقات التي تم إسدائها والترددات HF الأخرى؛

وعدد معين من خدمات الموجات الكيلومترية (LF)؛ والترددات VLF. بما في ذلك كل من الإذاعة المكرسة للتوقيت والتردد والإذاعة الملاحية الراديوية مثل طريقة لوران-C وأوميغا؛ والنفاذ إلى العديد من الإذاعات الساتلية باستعمال سواتل الرصد الجوي (GOES) وسواتل الملاحية الراديوية (عبور، GPS، GLONASS)، وسواتل تلفزيونية وغيرها من السواتل المتعددة الأهداف (INSAT). أما بالنسبة إلى المستعملين الذين لا يحتاجون إلا لدقة توقيت متواضعة فلهم أن يتحصلوا على التوقيت UTC بسهولة من شبكات الحواسيب الدولية (مثل، إنترنت) ومن الخدمات الهاتفية بالدارات المبدلة المناسبة، ويمكن ذلك خصوصاً في كل من أوروبا وأمريكا الشمالية.

ويحتاج المستعملون في إطار عملية انتقاء مصدر أو أكثر من مصادر التوقيت UTC أو التردد المتيسرة لتطبيقات معينة أن يأخذوا مجموعة من العوامل والأهمية النسبية التي تتميز بها في حسابهم. وتتضمن تلك العوامل تيسر كل خدمة في موقع المستعمل الجغرافي الخاص؛ وما إذا كان التطبيق يتطلب مرجع "توقيت" أو مرجع "تردد" (أو المرجعين معاً)؛ والدقة المطلوبة؛ والحاجة إلى تيسر المرجع بشكل متواصل وليس بشكل دوري أو عرضي؛ وأهمية التشغيل الأوتوماتي النسبية؛ وتكاليف التجهيز والتشغيل بالنسبة إلى المستعمل. ونظراً لعدم وجود أي مصدر فريد للتوقيت UTC كمصدر أمثل من كافة الأوجه، فإنه لا بد من القيام بالتوفيق والاختيارات عند تحليل تلك العوامل والخدمات المقدمة في حالات معينة. وتلخص الأجزاء التالية المعلومات المتصلة بمساعدة المستعملين في اختيار أفضل الحلول المتيسرة في شكل جداول، ثم تضيف البعض من المعلومات الوصفية بشأن كل حل منها، بما في ذلك التعليقات بشأن استعمالها العملية.

## 8.2 مقارنات مختلف المصادر وتقنيات البث لمراجع التوقيت والتردد المحكمة

يُعتبر الجدول 2.4 مقارنة تلخص مختلف المصادر لمعلومات مراجع التوقيت والتردد المحكمة في علاقتها بعدد من العوامل التي تتسم بالأهمية في تحديد الخيار الأمثل لكل حالة معينة. ولا يتضمن الجدول بغرض الاستفاضة المصادر المباشرة للوقت UTC والتردد فقط، بل ويتضمن أيضاً عدداً من الأنظمة والتقنيات التي اتضح أنها مفيدة لتوزيع المعلومات عن التوقيت والتردد المحكمة ومقارنتها. وتعتمد المعلومات الواردة في الجدول 2.4 على إجماع خبراء التوقيت والتردد المشاركين في أعمال لجنة الدراسات رقم 7 ITU-R منذ منتصف 1993. ونظراً لتطور البعض من خدمات بث التوقيت والتردد وأنظمتها وتقنياتها بسرعة، فلا بد من بقاء المستعملين المحتملين على العلم بالتطورات المستقبلية التي تحدث مع مرور الزمن. كما أنه لا بد من ملاحظة أن تحقيق سويات الأداء المحددة للدقة عادة ما تتطلب معايرة حذرة للتأخيرات التي تطرأ على التجهيز المستقبل. وتعتبر هذه المعايرة في غاية الأهمية بالنسبة إلى أعلى سويات الدقة المحددة.

وتوفر الخدمات والأنظمة والتقنيات التي يلخصها الجدول 4.2 سلسلة نسق عريض لأداء الدقة من 10 ms إلى 1 ns بالنسبة إلى التوقيت، ومن 10<sup>6</sup> إلى 10<sup>15</sup> بالنسبة إلى التردد. بل ويمكن الحصول على نتائج أفضل ضمن مناطق جغرافية أصغر بواسطة استعمال توصيلات الألياف البصرية كما ينص عليها الجدول. وكما هو متوقع، فإن التكاليف بالنسبة إلى المستعمل تغطي نسقاً عريضاً أيضاً وتميل إلى الارتفاع كلما تحسنت مقدرة الدقة.

## 9.2 معلومات إضافية تتصل باستعمال مختلف بدائل الخدمات والأنظمة والتقنيات البديلة

يقدم الجدول 2.5 معلومات إضافية تتعلق بكل مصدر من المصادر البديلة للإشارات المرجعية الدقيقة للتوقيت والتردد. وترمي هذه المعلومات إلى مساعدة المستعملين المحتملين على الاستعمال العملي لتلك المصادر. ويصف عمود المعلومات العامة النظام أو التقنية وتيسرها والبعض من أهم منافعها وسيئاتها. ويورد عمود "التعليقات" بعض التعليقات المختصرة على استعمالها العملية، بما في ذلك نمط التجهيز الضروري وطرائق استعمالها وغيرها من الاعتبارات العملية.

وتقدم المراجع وقائمة المصادر المزيد من المعلومات عن تقنيات نقل التوقيت والتردد. ونظراً لما تتميز به الأدبيات في هذا الحقل من شمول، فقد تم انتقاء المراجع المذكورة حتى تمثل التيسر منها. وينحصر تركيزها على أحدث المنشورات التي تدعم النتائج الواردة في الجداول مرفوعة البعض من المنشورات التي سبقتها لاحتوائها على معلومات عامة إضافية عن كل موضوع معين.

## خصائص بعض المصادر الاحتمالية وتقنيات بث المعلومات المرجعية للحكمة للتوقيت والبيود

نظام	مقدرة غمطية لدقة نقل التوقيت	مقدرة غمطية لنقل التردد	تغطية	تيسر	سهولة الاستعمال	تكلفة نسبية تقريبية بالنسبة إلى المستعمل (بالدولار الأمريكي (1995)	نظام نموذجي	تعليقات (1995)
HF إذاعة	1-10 ms	من $10^{-6}$ إلى $10^{-8}$ (خلال يوم واحد)	عالية	متواصل، ولكن المشغل والواقع	يعتمد على متطلبات الدقة	من 50 إلى 5 000	خدمات عديدة في العالم. انظر التوضيحية IUT-R TF:768	يعتمد الدقة على طول المسير والوقت من النهار ومعايرة المستقبل، إلخ.
LF إذاعة	1 ms	من $10^{-10}$ إلى $10^{-11}$	محلية	متواصل	أوتوماتي	3 000-5 000	انظر التوضيحية ITU-R TF:768	يعتمد على المسافة الفاصلة بين المصدر والانتشار النهاري (ارتفاع غلاف التأين)
ملاحة LF (بنجمية)	1 $\mu$ s	$10^{-12}$	محلية	متواصل	أوتوماتي	12 000	طريقة لوران C	تغطية النصف الشمالي من الكرة الأرضية. يعتمد الاستقرار والدقة على استقبال الموجة الأرضية.
إذاعة VLF	10 ms	$10^{-11}$ - (خلال اليوم الواحد) $10^{-13}$	عالية	متواصل	أوتوماتي	4 000	أوميجا	يمكن لاستبانة الموجة الطويلة أن تخمن من دقة التوقيت.
إذاعة تلفزيونية	10 ms، رؤية مشتركة	من $10^{-10}$ إلى $10^{-13}$ (خلال اليوم الواحد)	محلية	يعتمد على ميقات الإذاعة	أوتوماتي	5 000		ضرورة المعايرة للتوقيت
إذاعة ساتلية ملاحية	20-500 ns (انظر ملاحظات الجدول 2)	من $10^{-10}$ إلى $10^{-13}$	عالية	متواصل	أوتوماتي	من 3 000 إلى 15 000	GPS و GLONASS	متوسط اليوم الضروري للبرخ مقدرة نقل التردد المحددة. ويوجد اليوم نظام بث أفضل مع مستقبلين في السوق.
ساتل ملاحية، رؤية مشتركة	5-20 ns	من $10^{-10}$ إلى $10^{-15}$ (خلال اليوم الواحد)	ما بين القارات	متواصل (يختسب بعد الحدت)	1 كسب أوتوماتي للمعطيات يتطلب معالجة لاحقة	من 10 000 إلى 20 000 للموقع الواحد	GPS و GLONASS	أكثر طرائق تزامن التوقيت دقة وانتشاراً للاستعمال المنتشرة اليوم (1995)؛ مستقبلين على السوق لخطوط أساسية تقل عن 8 000 كلم.

خصائص بعض المصادر الاحتمالية وتقنيات بث المعلومات المرجعية المحكمة للتوقيت والتردد (تتمه)

تعليقات (1995)	نظام نموذجي	تكاليف نسبية تقريبية بالنسبة إلى المستهلك (بالدولار الأمريكي (1995)	سهولة الاستعمال	تيسر	تغطية	مقدرة تغطية لنقل التردد	مقدرة تغطية لامتة نقل التوقيت	خط
قد لا يكون متيسراً أثناء كسوف الساتل	GOES	من 4 000 إلى 5 000	أوتوماتي	متواصل	محلية (بضمة الساتل)	لا يوصى بها لنقل التردد	µs 100	إذاعة أرساد جوية ساتلية
دقة تحدها بضمة الساتل. قد لا يكون متيسراً أثناء كسوف الساتل	INSAT	4 000	أوتوماتي	متواصل	محلية (بضمة الساتل)	$5 \times 10^{-10}$	µs 20	إذاعة متعددة الأهداف بساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض
بدون تصحيح موضع الساتل	DBS سواتل	7 000	اكتساب أوتوماتي للمعطيات	يعتمد على مبيعات الإذاعة	بضمة الساتل	من $10^{-10}$ إلى $10^{-11}$	µs $5,0 \times 10^{-10}$	تلفزيون ساتلي
مع تصحيح حركة الساتل	DBS سواتل	7 000	معالجة لاحقة للمعطيات المطلوبة	يعتمد على مبيعات الإذاعة	محلية (بضمة الساتل)	من $10^{-10}$ إلى $10^{-13}$	µs 100-10	
طريقة التشغيل الأكثر إحكاماً إلى يومنا هذا.	وجود شبكات أوروبية وأمريكية نخالية	50 000 للموقع الواحد	قد يكون اكتساب المعطيات أوتوماتياً (حسب الساتل) ضرورة المعالجة اللاحقة.	متواصل (حسب المبيعات)	محلية (بضمة الساتل)	من $10^{-10}$ إلى $10^{-15}$	µs 10-1	اتصالات ساتلية ثنائية الاتجاهات
يجب أن يكون للخط الماتفي ذات المسير في كلا الاتجاهين. يفترض تيسر الحاسوب والبرمجيات	أوروبا وأمريكا الشمالية	100	أوتوماتي	متواصل	نسق النداء الماتفي	$10^{-8}$ (خلال اليوم الواحد)	µs 10-1	شفرة توقيت هاتفية



خصائص بعض المصادر الاحتمالية وتقنيات بث المعلومات المرجعية المحكمة للتوقيت والتردد (تتمة)

تعليلات (1995)	نظام نموذجي	تكاليف نسبية تقريبية بالنسبة إلى المستعمل (بالدولار الأمريكي (1995)	سهولة الاستعمال	تيسر	تغطية	مقدرة تغطية لنقل التردد	مقدرة تغطية لادقة نقل التوقيت	نظ
يجب أن تكون درجة حرارة الكبل مستقرة، (مثال، عند وضعه تحت الأرض بعمق متر ونصف)	مكثف لنقل التردد	30 000 دولار أمريكياً لمجموعة المرسلين والمستقبلين، زائد تكاليف الكبل وتركيبه تحت الأرض.	أوتوماتي	متواصل	محلية، أقل من 50 km	17-10 إلى 16-10 من	ps 50-10	ألياف بصريية
جزء من نظام اتصالات رقمي	شبكة رقمية ترانزيتية متزامنة (SDH)	لا تطبق. يكون التجهيز جزءاً من نظام اتصالات معين	أوتوماتي	متواصل	بين المدن، km 2 000	14-10 إلى 13-10 من (خلال اليوم الواحد)	ns 100	
ذو حساسية إزاء الوضعية الجوية و آثار المسبارات المتعددة. يجب أن يكون ثانياً لبلوغ الدقة والاستقرار الجاددين.		75 000-50 000	أوتوماتي	متواصل	محلية	15-10 إلى 14-10 من	ns 10-1	وصلة موجات صغيرة
ذو حساسية إزاء درجة الحرارة، و VSWR والرطوبة والضغط البارومتري		من 5 إلى 30 للمتر	أوتوماتي	متواصل	محلية	15-10 إلى 14-10 من	ns 10-1	كبل متحد التحول

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البديلة

تعليلات تخص التجهيز واستعماله	معلومات عامة	نظام/ تقنية
<p>تيسر أجهزة استقبال وهويات أسعارها ليست مشطبة. تستعمل الأجهزة المستقبلة في تنوع الترددات HF المتعددة للتعرض جزئياً عن آثار الانتشار. وعادة ما تستعمل هويات بسيطة قصيرة الموجات أو طولياتها. ويمكن الحصول على المزيد من المعلومات التي تخص تصميم الهويات من كتيبات هواة الراديو.</p> <p>ويكون الاستقبال أفضل عموماً بالنسبة إلى الترددات الدنيا (&gt; 10 MHz) أثناء الليل، وبالنسبة إلى الترددات العليا (&lt; 10 MHz) أثناء النهار. وقد يكون الاستقبال متقطعاً نظراً للاضطرابات الانتشار أو التداخل. ويكون الاستقبال دائماً في ذروته أثناء النهار أو الليل عندما يكون غلاف التأين مستقرًا.</p> <p>وتتوفر الإعلانات الصوتية للتوقيت دقة بضعمة أعمار من الثانية. وقد يكون من الضروري توفير تقنيات قياس وتجهيزات خاصة مثل كاشف التذبذب والمعاد الإلكروني لحمل الدقة إلى أقل من 1 ms. كما يتوجب معايرة تأخر الاستقبال للحصول على أعلى درجة للدقة.</p> <p>وتتحصّر دقة قياس التردد إلى حوالي <math>1 \times 10^{-7}</math> بحركة غلاف التأين. وعادة ما تُستعمل تقنيات تردد الخفض إلى جانب كاشف التذبذب وأو المعاد. كما قد تُطرح قياسات التردد من القياسات اليومية لاختلاف التوقيت.</p> <p>ويتعقد احتساب تأخر مسير الإشارة بعدم التيقن من عدد "قفزات" الإشارة ما بين الحطة والمستعمل وارتفاع الطبقة العاكسة في نقطة معينة من الوقت. ويمكن الافتراض دائماً ألا تتجاوز القفزات الواحدة 600 km.</p>	<p>هناك ما يقارب 13 محطة تبث في العالم على تردد واحد أو أكثر من الترددات HF الموزعة. وتشغل العديد من المحطات الأخرى على غيرها من الترددات HF. وتحتوي الخدمات النشطة على الترددات المبحارية وإشارات التوقيت والتواصل الزمنية؛ وتحتوي على شفرة التوقيت والإعلانات الصوتية على التوقيت، والمعلومات عن التوقيت UT1. وتوفر هذه الخدمات مصدراً مناسباً وسهل الاستعمال للتوقيت UTC بسويات متواضعة من الدقة. وبالرغم من إمكانية استقبال الإشارات HF على بعد مسافات كبيرة، فإن آثار الانتشار قد تحد من دقة الاستقبال واستقراره. وقد يؤدي تشغيل محطات متعددة على ذات الترددات الموزعة إلى تداخل متبادل في بعض المناطق. وعادة ما تكون وضعيات الاستقبال عالية التغير بحسب العوامل من مثل الموسم والساعة من النهار وحركة الشمس والوضعيات الجوية، إلخ. وقد عُهد إلى وضع نهاية لعمل البعض من الخدمات HF لفائدة غيرها من البدائل. وتحتوي التوصية ITU-R TF.768 على قائمة كاملة بالخدمات HF، بما في ذلك تفاصيل عن محتوى الإذاعات ونسقتها.</p>	<p>إذاعات HF</p>
<p>يمكن الحصول على أجهزة الاستقبال والهويات غير مرتفعة الثمن نسبياً من المراكز التجارية للمناطق التي تغطيها إذاعات مناسبة. وأجهزة الاستقبال هي أجهزة ذاتية التحكم وتوفر تشكيلة من الخرج التي يمكن للمستعمل عادة أن يعطي مواضعها. كما توجد أجهزة استقبال أكثر تطوراً يتيح الطور، الشيء الذي يسمح للمستعملين بإنشاء قابلية مباشرة لرسم التردد من أجل مصادر التوقيت UTC المبرولة.</p> <p>وتحتوي أنماط الهويات المستعملة لتلك الإذاعات على تصاميم لوغاريتمية السلك (مثال، 50-100 m)، وهويات سرطية (مثال، 3 m)، وهويات جوية العروة المقيدة للتسيير إزاء التداخل وهويات عروة قُرَيْت الصغيرة.</p> <p>وتختلف وضعيات الاستقبال باختلاف طاقة الإرسال وموقع المستعمل وفي بعض الحالات باختلاف الموسم والساعة من النهار. ويتم تفادي القيام بأية قياسات للمسير الأطول ما بين المرسل والمستعمل، وذلك عند طلوع الشمس أو غروبها على أية نقطة من المسير.</p>	<p>تتضمن هذه الفئة من الإذاعات تلك المشغلة في النطاق LF (30-300 kHz) التي تعتبر مصادر مفيدة للتوقيت UTC أو التردد ولكنها تستثني إذاعات أنظمة الملاحة مثل طريقة لوران-C. وتتكون تلك الإذاعات من طنين: (1) خدمات بث التوقيت والتردد المكرسة مثل DCF77، HBG، WWVB، و JF2؛ و (2) المحطات المشغلة في خدمة الإذاعة الصوتية التي لها حاملات مستقرة وأو تشكيلات الطور الإضافية أو الاتساع التي تعطي المعلومات عن التوقيت المشفر. وتستعمل الخدمات المكرسة عموماً الترددات الموزعة على سياق kHz40-80.</p>	<p>إذاعات LF</p>

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البدئية (تتمه)

نظام/تقنية	معلومات عامة	تعليمات تخص التجهيز واستعماله
إذاعات LF (تتمه)	تردد، بما في ذلك الإذاعات الصوتية المستقرة، دقة معايرة تقل عن $1 \times 10^{-11}$ بمعدل قرابة اليوم الواحد. وتتراوح مناطق التغطية الموثوقة لمختلف الإذاعات ما بين بضعه المئات من الكيلومترات إلى 3 000 km. وللمزيد من التفاصيل بخصوص الإذاعات الميسرة لاستعمال التوقيت والتردد انظر ما جاء في التوصية ITU-R TF.768.	ويمكن أداء معايير التردد للبدئيات المحلية بواسطة مراقبة اختلاف الطور مراقبة متواصلة بين المذبذب المحلي وإذاعة LF المستهدفة. ولكن يتطلب التقسيم الخاص بتسجيلات الطور الحاصلة من المشغل نوعاً من المهارة والخبرة في ترجمة وحساسية مختلفة زحزحات الطور و"الزلاجات للدورة" الممكنة.
إذاعات ملاحية (نبضية) LF	تقوم 65 محطة بطريقة لوران-C تقريباً عبر النصف الشمالي من الكرة الأرضية بإذاعة إشارات الملاحية العالية الطاقة بشكل متواصل على تردد 100 kHz. وقد رتبت هذه المحطات في سلسلات تتكون كل منها من 4 إلى 5 محطات. وترسل كل سلسلة زمراً من النبضات المتحكم فيها بإحكام على مدى فاصل فريد محدد لها لتكرار الزمر. ونظراً لكون إشارات الملاحية متزامنة ومتوازنة بواسطة المعايير الذرية كما أنها محكمة المراقبة والمتحكم، فهي قد تكون ذات نفع كبير كمراجع توقيت وتردد.	وتوجد أجهزة الاستقبال الخاصة بطريقة لوران-C في السوق. وتُحزَر أعلى التصاميم على إشارات طريقته وحتى يتم استعمال طريقة لوران-C للحفاظ على ميثاقية محلية معينة موجهة نحو التوقيت UTC فإنه يمكن مزامنة نبضة Hz 1 على خرج المشغل على التوقيت UTC، وذلك بواسطة جداول "زمن الصداقة" (Time of Coincidence) التي يشرها مرصد الولايات المتحدة البحري. وتغطي هذه الجداول الأوقات عندما تصادف بداية استقبال إشارة الطريقية لوران-C ثانية الوقت UTC. وقد يؤدي البعض من مستقبلي طريقة لوران-C إلى ذلك التزامن بشكل أوتوماتي. وقد تستعمل إشارة موجة غلاف التآين الناتجة من طريقة لوران-C على مسافات بعيدة من المحطة للتوقيت على سوية 50-100 m وذلك حتى عندما لا تكون إشارة الموجة الأرضية الأولية قابلة للاستعمال.
إذاعة VLF	هناك عدد من المحطات الإذاعية التي تشغل ضمن نطاق 10-30 kHz وهي مفيدة لتطبيقات التوقيت والتردد. وتضمن تلك المحطات الإذاعات الموجهة أساساً إلى الاتصالات أو الملاحية على مسافات طويلة ولكنها عالية الاستقرار من ناحية التردد والتوقيت بالرجوع إلى المعايير الذرية المتعددة. كما يكون الانتشار مستقراً نسبياً على مسافات عرضية وآلاف الكيلومترات، وتردد تتطلب الاستقبال من محطة واحدة فقط.	كما قد تؤدي الآثار الموسمية على انتشار طريقة لوران-C إلى حدوث تغييرات في التوقيت بعدة ميكروثوان. وتحتاج تأخيرات المشغل على هذه السوية إلى أخذها بعين الاعتبار. ويمكن تنفيذ معايير تردد المذبذب المحلي بواسطة تسجيل اختلاف الطور بين طريقة لوران-C والنظام المحلي أو بواسطة إجراء قياسات يومية لاختلاف الطور باستعمال العداد. ويمكن تحقيق دقة تبلغ $1 \times 10^{-12}$ بمعدل يتناسب خلال 24 ساعة.
	ويؤدي تطوير أجهزة استقبال طريقة لوران-C للملاحية الرخيصة الثمن (أقل من 1 000 دولار أمريكي) إلى خلق إمكانيات معينة لتكييفها لتطبيقات التوقيت والتردد، شريطة أن تتوفر الخبرة التقنية الضرورية لذلك.	وتتضمن التجهيزات المستعملة عموماً تجهيزات استقبال تتبع الطور، وهوائيات العروة وسجلات يورق مخطط. وتحتاج تأخيرات نظام الاستقبال إلى المعايير للحصول على أفضل النتائج.
	كما تحتاج تجهيزات استقبال الإرسال بالأسلوب MSK لإعادة بناء الموجة حاملة متماسكة الطور بواسطة مضاعفة الموجات وخالطها خلطاً مناسباً. وللمزيد من المعلومات عن الإشارات MSK انظر الملاحظة 10 من الجدول 2 التي وردت في التوصية ITU-R TF.768.	

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البدئية (تتمه)

تعليقات تخص التجهيز واستعماله	معلومات عامة	نظام/تقنية
<p>وتوجد محطات أوميجا بالولايات المتحدة (داكوتا الشمالية وهاواي) واليابان وفرنسا (الريونيون) وليبيريا والنورفانج وأستراليا. وبما أن كل محطة ترسل ترددات متعددة في تنابع، فإن استعمال تردد واحد من ترددات أوميجا للملاحة المعاصرة يتطلب استعمال مبدأ لتنج المستقبل بتبع الطور وإغلاقه في الأوقات المناسبة حتى لا يتم استقبال إلا التردد المحدد الذي يتميز بأهمية معينة.</p> <p>وعادة ما تحتل آثار الانتشار من دقة الإشارات VLF المفيدة، وذلك خصوصاً على أطوال المسيرات الطويلة جداً. وهناك على سبيل المثال تغيرات يومية وسوية مهمة بتسبب فيها ما يطرا على غلاف التأين من تغير. كما قد تتأثر النتائج أيضاً باضطرابات غلاف التأين الطارئة وغير المرتبطة (SID)، التي تتبدل عادة لمدة تطول من 20 إلى 30 دقيقة، وبأحداث امتصاص القمة القطبية (PCA)، التي تبدل غلاف التأين القطبي لمدة قد تبلغ الأسبوع.</p> <p>وبالإضافة إلى التغيرات اليومية والسبوعية في تأخيرات الانتشار على VLF، فقد تمت ملاحظة غيرها من التغيرات مع فترات من 27، 29.53، و 14,765 يوماً نتيجة للآثار الشمسية والقمرية المختلفة.</p> <p>وقد انخفض استعمال الإذاعات VLF بهدف مقارنة التوقيت والتردد في السنوات الأخيرة نظراً لظهور أنظمة وتقنيات أخرى.</p>	<p>ويعتبر نظام أوميجا للملاحة نظاماً VLF صالحاً في تطبيقات التوقيت والتردد. ويحتوي على 8 أجهزة مرسلة ذات 10 kW في أنحاء العالم، ويوفر تغطية عالية متواصلة وإطانية. وترسل كل محطة منها أربعة ترددات ملاحية ذات 10.2 و 11.05 و 11.33 و 13.6 KHz بالتتابع وبأسلوب تقاسم الوقت. كما ترسل كل محطة غيرها من الترددات "الفرعية" الأخرى ضمن نسق 13 kHz.</p> <p>هنا، وتُشغل عدة بلدان محطات الاتصالات VLF أيضاً المفيدة بالخصوص بالنسبة إلى معايرة التردد. وتشغل بعض المحطات على الأقل بأسلوب MSK (تشكيل بترددية موجة دنيا)، مطلوبة بذلك استعمال تجهيزات وتقنيات استقبال خاصة لتغطية ترددات الموجة الحاملة باستقرار الطور.</p>	<p>VLF إذاعة (تتمه)</p>
<p>وتتضمن التجهيز النمطي الضروري تجهيزات استقبال تلفزيونية مناسبة وهوائيات وعائدات ومسجلات للمعطيات. ويتعين تعديل تجهيزات الاستقبال التلفزيونية لاستخلاص الرزمة الخاصة من الإشارة التلفزيونية المستقبلة.</p> <p>وتقوم بعضه المقاتية المحلية في كل موقع بقياس بدء العمل بالعداد في حين تقوم الإشارة التلفزيونية المستقبلة بإيقاف العمل به. وعادة ما تكون حوالي 10 من تلك القياسات التي تتم مرة كل ثانية كافية للحصول على نتائج جيدة.</p> <p>ونظراً لضرورة القياس بالتأون في كل موقع ولضرورة تبادل المعطيات الناتجة عنه، فإن التعاون الفعال بين المواقع يصبح أمراً لا بد منه.</p> <p>والقيام بتلك المقارنات كل يوم خلال فترة معينة من الزمن يمكن من القيام بمقارنة دقة التردد الشديدة وذلك بالاعتماد على التغيرات التي تطرأ على اختلافات التوقيت اليومية. ويفترض ذلك بقاء تأخير مسير الانتشار الفضائي مستقراً أو معاليرته في كل مرة بشكل مستقل.</p> <p>وتتبع هذه التقنية خصوصاً بؤائد كبيرة ضمن منطقة محلية محدودة بسبب بساطتها وكلفتها المنخفضة نسبياً ودقتها العالية.</p>	<p>لقد تم اختبار عدد معين من التقنيات لبث ومقارنة التوقيت والتردد اللذين يستعملان لإشارات الإذاعة التلفزيونية. وتتضمن تلك التقنيات إدراج معلومات التوقيت والتردد في الإشارة التلفزيونية، واستقرار ترددات الموجة الحاملة التلفزيونية ومرامنة النبضات واستقبال الرؤية المشتركة لإذاعة تلفزيونية وحيدة في مواقع متعددة ضمن منطقة محلية. ولا تزال التقنيات الأورليمان قيد الاستعمال في مناطق جغرافية محدودة، غير أن تقنية استقبال الرؤية المشتركة هي الطريقة التلفزيونية الأكثر استعمالاً.</p> <p>وتسمح طريقة الرؤية المشتركة بمقارنة محكمة للتوقيت من بين مواقع متعددة ضمن منطقة تغطية محطة تلفزيونية واحدة. ويقوم كل موقع بقياس متأون لاختلاف التوقيت بين نبضة مرامنة معينة في الإشارة التلفزيونية ومقتابيتها المحلية. وتغطي عملية طرح القياسات من موقعين مختلفين الفارق بين المقائبات المحلية زائد تأخير انتشار تقاضي ثابت. ويبلغ عدم اليقين من مقارنات المقايمة المحلية عامة حوالي 10 ns.</p>	<p>إذاعة تلفزيونية (وصلات أرضية)</p>

## الجدول 2.5

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لـ مختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البديلة (تتمه)

نظام/ تقنية	معلومات عامة	وتتوفر في السوق بشكل متزايد من تجهيزات الاستقبال، خصوصاً الإذاعات بالنظام GPS. وقد تم إنتاج بعض الصيغ منها لاستقبال كل من النظام GLONASS والنظام GPS. وتكون تجهيزات الاستقبال مصممة دائماً بحيثيات شاملة الاتجاه المتنامية في الصغر. وقد انخفضت التكلفة بدرجة مع ارتفاع الطلب وتتوفر رزم تجهيزات استقبال التوقيت في السوق منذ أواخر 1995 مقابل 3 000 إلى 15 000 دولار أمريكي.
إذاعة ساتلية ملاحة	هناك نظامان رئيسيان للملاحة الساتلية قيد الاستعمال إلى حدود 1995 يوزان مقدرات رائدة ببت التوقيت والتردد. وهما نظام المراقبة العالمي للولايات المتحدة (GPS) والنظام العالمي للملاحة الساتلية الروسي (GLONASS). ويعطي نظام العمور الأمريكي جباراً ثالثاً، ولكن لن تتعمق في دراسته بسبب ضعف دقته وارتفاع تكلفته بالنسبة إلى المستهلك وجناته ذات الحدودية المتوقعة سلفاً.	ومعظم تجهيزات الاستقبال هي تجهيزات عالية الأمانة. ويمكن برمجتها أثناء الإنشاء الأول لتتبع ما يكفي من السواتل بشكل أوتوماتي حتى تحدد إحداثيات المستقبل بكل دقة من أجل دعم توقيت دون الميكروثانية. ولا بد من توشي الخلل عند موقعة العوائق لتقليص آثار المسورات المتعددة. وللتجهيزات المستقبلية بعد الإنشاء أن تتواصل في اكتساب السواتل المنتقاة وتتمتعها بأسلوب أوتوماتي كلياً.
إذاعة ساتلية ملاحة	وبالرغم من وجود بعض الفوارق بين النظامين فيما يتعلق ببنية الإشارة وخواصها، وباستعمال طيف التردد ومدارات الساتل وتصويره، فإن التشابه بينهما أهم بكثير بالنسبة إلى مستعملي التوقيت والتردد. وباستخدام كل من النظام GPS والنظام GLONASS المقتنيات الذرية المحمولة الإطانية والتغطية العالمية التواصلة من 24-21 ساتلاً تشغيلياً وإذاعات محكمة التوقيت يمكن ربطها بالتوقيت UTC(USNO) والتوقيت UTC(SU) على التوالي إلى حدود 100 ms، ومعلومات موقعة الساتل المتضمنة في الإذاعات التي يمكن استعمالها بتجهيزات استقبال المستعملين لتعويض تأخير المسور الدقيق. وتكون 4 سواتل على الأظار دائماً من أي منطقة كانت (تتطلبها الملاحة)، لكن الاستقبال من ساتل واحد لقراءة التوقيت والتردد يعتبر أمراً كافياً.	ويمكن للمستعمل أن يتحكم بسهولة في العديد من تجهيزات الاستقبال لتتبع سواتل معينة فقط بعض الوقت. وقد تخزن فوارق التوقيت عادة بين الإشارة GPS المستقبلية ومقايمة عملية ما في ذاكرة المستقبل لتحميلها لاحقاً. ويرغم الفارق الزمني في المقتنيات الفردية بالنظام GPS والنظام GLONASS عن توقيت النظام الساتلي الذي يختلف بدوره عن التوقيت UTC، فإن أنساق الإذاعة الساتلية تتضمن معطيات إضافية كافية للسماح للمستقبل بضبط إشارة توقيت حرجه أساساً لتكون ضمن حوالي 100 ns من التوقيت UTC(USNO) أو التوقيت UTC(SU). وقد يتغير العرض الطيفي وأوقات الخروج وعلاقتها بسلام التوقيت UTC المتصل من مستقبل إلى آخر، وذلك حسب المصنع المحدد والتصميم.
إذاعة ساتلية ملاحة (أسلوب الرؤية المشتركة)	انظر المدخل السابق في هذا الجدول بخصوص المعلومات العامة عن النظام GPS والنظام GLONASS. يستعمل كل مستعمل من مستعملي النظام GPS أو النظام GLONASS الموجودين في موقعين منفصلين بأسلوب الرؤية المشتركة للتشغيل، إشارة من ذات الساتل في نفس الوقت. ويعطي طرح المعطيات (الساتل - المقتنية المحلية) المقتنية من الموقعين الفارق الزمني بين المقتنيات المحلية. وتتمثل الفائدة من هذه العملية في كون التغيرات في مقتنية الساتل أو أعطائها هي مشتركة بين كلا المسيرين وهي بالتالي مغلقة. وإذا نفذت عملية الانحطاط SA بالنسبة إلى النظام GPS بشكل يحدث التغيرات في مقتنية الساتل، فإن	وتجمل توقيت النظام GLONASS عن توقيت النظام الساتلي الذي يتغير العرض الطيفي وأوقات الخروج وعلاقتها بسلام التوقيت UTC المتصل من مستقبل إلى آخر، وذلك حسب المصنع المحدد والتصميم.
إذاعة ساتلية ملاحة (أسلوب الرؤية المشتركة)	وتجمل دقة التوقيت النطوي من 25-500 ns ودقة التردد من 10 <sup>-10</sup> إلى 10 <sup>-13</sup> أنظمة الساتل الملاحة من أفضل المصادر الإذاعية التجارية ذات توقيت وتردد عالي الدقة للاستعمال مع تجهيزات الاستقبال المروجة في السوق.	وتجمل دقة التوقيت النطوي من 25-500 ns ودقة التردد من 10 <sup>-10</sup> إلى 10 <sup>-13</sup> أنظمة الساتل الملاحة من أفضل المصادر الإذاعية التجارية ذات توقيت وتردد عالي الدقة للاستعمال مع تجهيزات الاستقبال المروجة في السوق.
إذاعة ساتلية ملاحة (أسلوب الرؤية المشتركة)	ويحتاج كل موقع يتشارك في قياس الرؤية المشتركة إلى مستقبل وهوائي النظام GPS والنظام GLONASS ملائمين، ومقدرات تسجيل المعطيات، ووصلة اتصالات بمواقع مشاركة أخرى. كما أنه من الضروري تحديد موقع المستقبل بدقة، إلا أن ذلك يمكن تحديده أوتوماتياً بواسطة المستقبل المتشغل بنفسه بأسلوب الملاحة.	ويحتاج كل موقع يتشارك في قياس الرؤية المشتركة إلى مستقبل وهوائي النظام GPS والنظام GLONASS ملائمين، ومقدرات تسجيل المعطيات، ووصلة اتصالات بمواقع مشاركة أخرى. كما أنه من الضروري تحديد موقع المستقبل بدقة، إلا أن ذلك يمكن تحديده أوتوماتياً بواسطة المستقبل المتشغل بنفسه بأسلوب الملاحة.
إذاعة ساتلية ملاحة (أسلوب الرؤية المشتركة)	ولا بد من العناية بهنداد القياسات في ذات الفترة الزمنية بشكل مضبوط في كل موقع. كما يتعين على المستقبل أن يكون مرجحاً لتتبع الساتل الملاحة ضمن الرؤية المشتركة مع المواقع الأخرى. وتبلغ أطوال التتبع النمطية حوالي 13 دقيقة. وقد أوصت اللجنة الفرعية للجنة الاستشارية لتعريف الثانية بأنساق معطيات معيارية وغيرها من الأمور الإجرائية لتسهيل استعمال هذه الطريقة بالنظام.	ولا بد من العناية بهنداد القياسات في ذات الفترة الزمنية بشكل مضبوط في كل موقع. كما يتعين على المستقبل أن يكون مرجحاً لتتبع الساتل الملاحة ضمن الرؤية المشتركة مع المواقع الأخرى. وتبلغ أطوال التتبع النمطية حوالي 13 دقيقة. وقد أوصت اللجنة الفرعية للجنة الاستشارية لتعريف الثانية بأنساق معطيات معيارية وغيرها من الأمور الإجرائية لتسهيل استعمال هذه الطريقة بالنظام.

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت وال تردد البديلة (تتمه)

تعليمات تخص التجهيز واستعماله	معلومات عامة	نظام/تقنية
<p>وكون هذه التقنية قابلة للاستعمال بالنسبة إلى الخطوط الأساسية بين المواقع التي قد تصل إلى حوالي 8 000 km. وقد يمكن استعمال تجهيزات الاستقبال المتعددة القنوات في أسلوب الرؤية المشتركة من الحصول على مقدرة مرجحة لنقل التردد على السوية 10<sup>-14</sup>. ويوجد احتمال استعمال طور الموجة حاملة للنظام GPS مثلاً لتتمديد هذا الأداء إلى المنطقة 10<sup>-15</sup> بتقدير متوسط عدد من الأيام أو من عدة أسابيع.</p> <p>ويقوم المكتب BIPM بنشر نتائج المقارنات المنتظمة العديدة لتوقيت الرؤية المشتركة بين مراكز التوقيت الوطنية والدولية وحفظ سجلاتها.</p> <p>ولا بد من معايرة تأخيرات نظام الاستقبال للحصول على أكبر دقة ممكنة للمقارنة ومن معرفة إحدائيات الهوائي ضمن أقل من متر واحد.</p>	<p>ذلك التغير لا يؤثر على دقة قياس الرؤية المشتركة. ومن جهة أخرى، إذا تسبب SA في إضاءة أخطاء موضع الساتل، فإن تلك الأخطاء لن يتم التعويض عنها في قياس الرؤية المشتركة لاستقبال كل موقع الإشارة على مسير مختلف بعض الشيء.</p> <p>وتسمح طريقة الرؤية المشتركة بدرجات دقة مقاربة لتوقيت من 5 إلى 20 على مسافات ما بين قارية، حتى في حضور SA (كما هو مطبق حالياً في أوائل 1995).</p> <p>ويمكن استخلاص مقارنات التردد انطلاقاً من تلك المعطيات بدقة من 10-13 إلى 10-15. ويقوم BIPM في باريس بتوليد مقاييس مناسبة لتتبع الرؤية المشتركة وتوزيعها بشكل بين أي السواتل التي تتلامح مع هذه الطريقة في أوقات مختلفة وذلك بغرض تسهيل مقارنات توقيت الرؤية المشتركة من بين محاور التوقيت في أنحاء العالم.</p>	<p>ساتل ملاحي (أسلوب الرؤية المشتركة) (تتمه)</p>
<p>وتزوف العديد من الصناعات تجهيزات الاستقبال التجارية البرودة هوائيات صغيرة. وتستخدم التصميمات الحديثة المعلومات التي يتم بثها عن موقع الساتل من أجل تصحيح تأخير المسير وتحسينه كل دقيقة. وتتطلب الصوزة الأولية من المشغل أن يدخل إحداثيات موقع المستقبل.</p> <p>ويتم إرسال الشفرة الزمنية GOES على ترددين بحوالي 469 MHz. ونظراً لتخصيص هذين الترددتين للاستعمال البري المتبادل في الولايات المتحدة، فإنه من المتوقع حدوث بعض التداخل خصوصاً قرب العواصم الكبيرة. وتكون تجهيزات الاستقبال على قدر معقول من الفعالية في "الخطاظ على الموازنة" خلال مثل فترات التداخل تلك.</p> <p>وقد يتحتم الاستقبال باستعمال الهوائيات اللولبية أو الهوائيات ياغي (Yagi) البسيطة في مناطق انخفاض كثافة الإشارات أو تداخل الترددات.</p> <p>ونظراً للتغيرات اليومية على الشفرة الزمنية المستقلة بشكل غطي مع اتساع من ذروة إلى ذروة يبلغ 10-70 μs نتيجة لعدم إتقان البرمجيات خصوصاً المستعملة في احتساب توقعات موقع الساتل.</p> <p>ويتمثل كل من النظام الأوروبي لساتل الأرصاد الجوية والنظام الياباني للأرصاد الجوية المستقرة بالنسبة إلى الأرض (GMS) بالأساس مع النظام GOES غير أنهما لا يفتان حالياً أية شفرة زمنية.</p> <p>وتعاني السواتل القديمة GOES، مثل المركبة الفضائية الغربية GOES الحالية الموقفة، من انقطاع إشارات الشفرة الزمنية لمدة حوالي ساعتين في اليوم أثناء فترات الكسوف في الربيع والخريف. أما السواتل الأكبر حدة فهي في مأس من ذلك.</p>	<p>يخووي الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض لعمليات دراسة البيئة الأمريكية (GOES) منذ الشفرة 1974 على شفرة زمنية تكون مرجحتها سلم التوقيت UTC(NIST). ويتم بث الشفرة الزمنية بشكل متواصل من ساتلين مستقرين بالنسبة إلى الأرض بموقع محدد على الدرجة 75 والدرجة 135 عادة من خط الطول الغربي. كما يتم بث المعطيات عن موضع الساتل إلى المستعملين الشيء الذي يمكن تجهيزات الاستقبال الأوتوماتية المناسبة من احتساب تأخير مسير الإشارة وتصحيح خروجها 1 Hz بالنالي. وتبلغ دقة الشفرة الزمنية المحددة كما تُعطى إلى المستعمل 100 μs. وتتضمن منطقة النغطية الطبيعية للشفرة الزمنية معظم النصف الغربي من الكرة الأرضية مع تغطية متراكبة لأغلب أمريكا الشمالية والجنوبية.</p> <p>ومع أوائل 1994 سجل أداء الشفرة الزمنية من الساتل الغربي/GOES نوعاً من التراجع الناجم عن استعمال ساتل قديم مؤقت. كما يشغل الساتل الغربي/GOES حالياً انطلاقاً من موقع مداري ذي 112 درجة من خط الطول الغربي، عوضاً عن 75 درجة. ومن المتوقع أرحاع تجديد مواقع الساتل العادية و كامل أداء الدقة المحددة في منتصف 1994 مع إطلاق ساتل بديل. وتحتوي الشفرة الزمنية GOES المعلومات المتعلقة بالنسبة التجارية واليوم من السنة والساعة والدقيقة والثانية وتصحيح التوقيت UT1 ودقة النظام ودقة دلالات التوقيت المقصود للبحار والهوائي الكهيسية.</p>	<p>إذاعة أرصاد جوية ساتلية</p>

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البديلة (تتمه)

تعليمات تخص التجهيز واستعماله	معلومات عامة	نظام/تقنية
<p>توجد تجهيزات الاستقبال في السوق (1993) بسعر حوالي 4 000 دولار أمريكي. في حين تتميز الحاجة إلى الطوائف بالواضحة.</p>	<p>كما نيت السواتل الهندية المستقرة بالنسبة إلى الأرض INSAT شفرة زمنية مرجعية - UTC كجزء من هذا النظام التعداد الأهداف. وتتضمن إشارة الشفرة الزمنية أيضاً، كما هو الحال مع GOES، المعلومات المتعلقة بموقع الساتل التي تحول للمستعمل بالحساب تأخير مسير الإشارة والتعويض عنه.</p> <p>وتجدر بصمة الساتل INSAT من النقطية الأرضية لمنطقة شبه القارة الهندية. وتكون دقة التوقيت حوالي 20 <math>\mu</math>s ودقة الترددات حوالي <math>10^{-10} \times 2</math> ممكنة ضمن هذه المنطقة.</p>	<p>إضاءة متعددة الأهداف بساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض</p>
<p>وتحتوي التجهيزات المطلوبة على هوائي صحي صغير، وتجهيز استقبال تلفزيوني بسائل تجاري، ومستخرج نبضات ويقس عداد الفواصل الزمنية في كل موقع الفارق الزمني بين نبضات المقاتية المحلية والإشارة التلفزيونية المستقبلية من الساتل. ولا بد من إجراء سلسلتين من 10 من تلك القياسات على الأقل بغاقل 12 ساعة يومياً. كما لا بد من وجود نظام لاكتساب المعطيات لتخزينها وتبادلها مع غيرها من الخطات لمعالجتها واستخلاص النتائج منها.</p> <p>ويمكن الحصول على تصحيح انسياب خط طول الساتل الذي يؤدي إلى تدهور النتائج بأساليب متعددة: (1) من معلمات موقع الساتل التي توفرها محطة التحكم في الساتل؛ (2) من قياسات شبه نسقية تؤددها محطة واحدة؛ (3) من قياسات الساتل GPS التي تؤددها على الأقل 3 محطات؛ أو (4) من قياسات التوقيت التي تؤددها 3 محطات على الأرض تقوم بمراقبة ساتلين.</p>	<p>تكون تقنية القياس هي دائماً المذكورة في حالة الوصلات الأرضية، لكن الإشارات يتم استقبالها بأسلوب الرؤية المشتركة من ساتل الأذاعة المباشرة (DBS)، الشيء الذي يؤدي إلى تحديد منطقة النقطية إلى أبعاد قارية تقريباً.</p> <p>ويعد مصدر الأخطاء الرئيسي في تحديد فوارق المقاتيات من التغيرات في موقع الساتل المستمر بالنسبة إلى الأرض المستعمل. ويمكن تقليص هذا التدارك بأساليب مختلفة حتى يتم الحصول على أنساق الدقة الواردة في الجدول 1.</p> <p>ويمكن إزالة التغيرات الدورية ذات 12 ساعة و 24 ساعة بواسطة متوسط القيمة وأهم من ذلك يمكن أيضاً إزالة انسياب خط طول الساتل الذي تتم ملاحظته أثناء المقاتية بمختلف التقنيات.</p>	<p>إذاعة تلفزيونية (وصلات ساتلية)</p>
<p>يتعين أن تكون تجهيزات الخطه الأرضية المطلوبة في كل موقع للمستعمل متطابقة مع السواتل المعنية التي تستعمل في نقل التوقيت. وقد تبلغ الأسعار العادية، بما في ذلك الودم الضروري، 50 000 دولار أمريكي للموقع الواحد. كما قد تكون مهارة التشغيل المطلوبة للتشغيل الملائم أكبر حتماً من المهارة المطلوبة لتشغيل معظم التقنيات الأخرى التي تمت مناقشتها. ونظراً لكون التقنية الثابتة الاتجاه هي نظام اتصالات من نقطة إلى نقطة بالأساس، فإنه لا يجب اعتبارها ك تقنية عامة للبت.</p>	<p>تعتبر أكثر الطرائق إحكاماً ودقة في الوقت الحاضر لمقاتية التوقيت بين المواقع البعيدة هي طريقة التبادل المتأون الثنائي الاتجاه لإشارات التوقيت عبر قنوات سواتل الاتصالات. وتعود الدقة العالية القابلة للتحقيق إلى استعمال التبادل الثنائي الاتجاه للإشارات الذي يزيل بقايات الحاجة إلى المعرفة بالحكمة بموقع الساتل، والدرجة العالية لتبادلية المسير في الاتجاهين، وعرض نطاق قناة الساتل الراجع الذي يسمح بتصميم الإشارة تصميماً فعالاً.</p>	<p>ساتل الاتصالات (ثنائي الاتجاهات)</p>

## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البديلة (تتمه)

تعليمات تخص التجهيز واستعماله	معلومات عامة	نظام/تقنية
<p>وفي الأنظمة المنفصلة بشكل تطبيقي، يتبادل موقعان أو أكثر إشارات التوقيت بالنظام مرة أو مرتين في الأسبوع مثلاً. ونظراً للندرة والاستقرار اللذان من هذه الطريق، فلا يكون من الضروري عادة إلا إجراء النبذات لبضعة دقائق من الزمن. وتتضمن عملية القياس قياس الفارق بين وقت وصول الإشارة الساتلية واليقاينة المحلية. وتتم القياسات دوماً مرة كل ثانية لفترة بضعة دقائق. ويعطي طرح قياسات كل موقع المناقشة، وقسمتها على 2 الفارق بين مقاييسات الموقع. وتعتبر معايرة تأخير الإشارة من خلال تجهيز الخطة على الأرض بالغة الأهمية بالنسبة إلى أعلى دقة قابلة للتحقيق من 10-1 ns. وقد يبدو هذا الأمر مشكلة عويصة بما أن الكمية المنصاة الضرورية هي الفارق بين التأخيرات من خلال حصص إرسال النظام واستقباله.</p> <p>وقد تم تطوير عدة تقنيات متخصصة لهذا الغرض.</p> <p>وكحسب النظام الساتلي الذي يكون قيد الاستعمال وتحديد مواقع الخطات الأرضية، قد يستوجب الأمر اتباع إجراءات إدارية مكثفة بغرض التصديق على تجهيز الخطة الأرضية والحصول على الموافقة للنبذ إلى الساتل.</p> <p>إن متطلبات التجهيز لاستعمال مثل تلك الخدمات هي قليلة جداً. فإل جانب الحاسوب أو غيره من التجهيزات التي تحتوي على مقياسية يجب ضبطها، فلا ينفذ إلى الخط الحائقي إلا اللود المناسب، مع ضرورة وجود برنامجية لضبط الميقاتية. كما قد يحتاج المستعمل أيضاً، بغرض التعويض عن تأخير المسير، إلى ترجيح صدى الإشارة التي استقبالها إلى مركز التوقيت.</p> <p>وعادة ما يحتاج نقل توقيت ناطق إلى توصيل هاتفي لا يتجاوز الجزء من الدقيقة.</p> <p>ويعتبر تطوير برامجيات استعمال تلك الخدمات بسيطة نوعاً ما من قبل المستخدمين أو قد يتم الحصول على بعض التصاميم لأمانة من البرامجيات عبر لوحات العرض الإلكترونية الحاسوبية، ومن مراكز التوقيت أو من المصادر المعروضة في السوق بأسعار معقولة.</p> <p>كما يمكن استعمال معظم الخدمات الهاتفية المنتشرة بأسلوب وحيد الاتجاه حيث يكون هناك إما التعويض عن تأخير المسير أو التعويض عن تأخير ثابت متوسط القيمة. وللدقة المعنية بهذا الأسلوب أن تتراوح من 0,1 إلى 0,5 s.</p> <p>ويمكن تحديد متوسط التردد بإجراء قياسات دورية للميقاتيات المحلية بواسطة استعمال خدمة من الخدمات الهاتفية. وتكون الدقة بحوالي 10<sup>-8</sup> s ممكنة للتحقيق بمتوسط قيمة يتناسب على امتداد فترة من يوم واحد.</p>	<p>ومن مساوئ هذه التقنية حاجة كل موقع إلى كل من إشارات الإرسال وإشارات الاستقبال وإلى تبادل المعطيات لعملية المعالجة اللاحقة بعد ذلك. وتعمل التجهيز الأرضي لكل موقع إلى ارتفاع منه أكثر، خصوصاً إذا كان النظام عالي الأمانة. ويتوجب على المتأخر كن في نقل التوقيت أن ينسقوا فيما بينهم ومع مشغل نظام الساتل.</p> <p>ويطور العديد من مخابر التوقيت في أنحاء كثيرة من العالم، بسبب الدقة الختمة التي تبلغ حوالي 1 ns والإحكام الذي يبلغ 0,5-0,1 ms، مقدرة نقل التوقيت ثنائية الاتجاه. كما يتم تطوير مودم متميز واستعماله لتحقيق دقة عالية واستقرار على المدى الطويل. في حين تبدو قنوات الساتل المناسبة متمسرة في كامل أرجاء العالم وبأسعار معقولة.</p> <p>قام عدد من مراكز التوقيت في أوروبا وأمريكا الشمالية بإنشاء خدمات مصممة لبيت معلومات التوقيت UTC المنشورة على الخطوط الهاتفية بأسلوب أوتوماتي. ويترجم المستعمل الحواسيب أو غيرها من الأنظمة المؤتممة بشكل تطبيقي لمراقبة تلك الخدمات حسب الحاجة إليها واستقبال الشفرة الزمنية ASCII من مركز التوقيت وإعادة ضبط الميقاتية المحلية على التوقيت الصحيح والتعويض في بعض الحالات أوتوماتياً عن تأخير المسير من خلال الوصلة الهاتفية. وعلى أساس الخدمة المحددة، يمكن القيام بالتعويض عن تأخير المسير إما بواسطة تجهيز مركز التوقيت أو لدى موقع المستعمل. ويعتمد التعويض عن التأخير على قياسات تأخير وقت الانتشار ذهاباً وإياباً ويفترض أن يكون المسير مسياراً متبادلاً.</p> <p>وتكون دقة نقل التوقيت من 1-10 ms ممكنة، حتى عندما تكون الوصلات الساتلية معينة بذلك. هذا، وبالإضافة إلى التوقيت UTC، فإن أغلب الخدمات المنشأة حتى ذلك اليوم تحتوي أيضاً معلومات عن السنة واليوم وتصححات التوقيت UT1 وإشارات التوقيت الكيسية ومؤشرات التوقيت المقصود للنهار.</p>	<p>ساتل الاتصالات (ثنائي الاتجاه)</p> <p>شفرة زمنية هاتفية (ثنائية الاتجاه)</p>



## معلومات إضافية تتعلق بالاستعمال العملي لمختلف مصادر إشارات التوقيت والتردد البدئية (تتمه)

تعليمات تخص التجهيز واستعماله	معلومات عامة	نظام/تقنية
<p>يتم جعل درجة حرارة الكبل بالأهمية في التنفيذ العملي لوصلة الألياف البصرية لنقل التوقيت والتردد على أعلى سويات الدقة الممكنة. ويبلغ العامل الاسمي للتأخير بالنسبة إلى درجة الحرارة 7 PPM/°C. ولا بد من وضع الكبل تحت الأرض بعمق 1,5 م من الأمتار على الأقل لتحقيق الأداء المذكور في الجدول 1 للوصلات التي يتجاوز طولها 50 km. وتبلغ تكلفة وصلة الألياف البصرية المكرسة لنقل التوقيت والتردد حوالي 30 000 دولار أمريكي للموقع الواحد بالنسبة إلى المرسل والمستقبل زائد تكلفة الكبل وتركيبه تحت الأرض.</p> <p>وتصل حساسية الإدراج إلى 0,5 dB/Km.</p> <p>ويتعين على المستخدمين المختصين للتوقيت UTC ومزوده أن يكونوا على علم بتطور شبكات الاتصالات الترابية الرقمية المحلية والوطنية والدولية. إذا قد توفر مثل تلك الشبكات في المستقبل وسائل جيدة ومرجحة لتوزيع التوقيت UTC والتردد بدقة عالية.</p>	<p>تغطي الألياف البصرية أحملاً رائعاً لنقل إشارات التوقيت والتردد بدقة عالية جداً على كل من المسافات القصيرة (&gt; 50 km) والمسافات الطويلة. وفي ظل غياب الخدمات المكرسة لبت التوقيت UTC التي تستعمل توزيع الألياف البصرية حالياً، يتم الحديث هنا عن هذه التقنية كاعتزاف بإمكاناتها المستقبلية المحتملة.</p> <p>ويستعمل في الوقت الحاضر نطاق من الألياف البصرية المتعددة الأساليب وأحاديتهها. وتستخدم الألياف المتعددة الأساليب عموماً لإرسال المعطيات الرقمية والترددات الكيلومترية على مسافة قصيرة نسبياً (مثال، 1 km). في حين يكون استعمال الألياف الوحيدة الأسلوب أفضل للمسافات الطويلة (مثال، 50 km) وتدعم عرض نطاق واسع (مثال، من 5 MHz إلى 100 GHz)، ولا بد من توفر ألياف وجيدة الأسلوب مع ليزر يبلغ 300 mm لتحقيق الأداء المذكور في الجدول 1 للمسافات المحلية.</p> <p>وقد تم تحقيق الدقة الواردة في الجدول 1 لوصلات الألياف البصرية الطويلة في إطار نظام اتصالات رقمي طبقاً للتوصيات G.707 و 708 و 709 للجنة CCITT على مسافة 2 400 km. وقد صمّم هذا النظام الخاص لتحقيق متطلبات النطاق ITU-T بالإضافة إلى القيام بتجارب نقل التوقيت والتردد.</p>	<p>ألياف بصرية</p>
<p>يعتبر التجهيز باهض التكلفة بعض الشيء (ما بين 50 000 دولار أمريكي و 75 000 دولار أمريكي). وتتميز النتائج بالحساسية تجاه الوضعيات الجوية وآثار المسيرات المتعددة. وللحصول على دقة أعلى لا بد من العمل بالتنسيق الثنائي الاتجاه مع عروة التغذية الراجعة بشكل متواصل لإلغاء تغيرات الطور.</p>	<p>قد يعطي استعمال وصلات الموجات الصغيرة لتوزيع التوقيت والتردد ضمن المناطق المحلية دقة تبلغ ns 10-1 للتوقيت ومن 10<sup>-14</sup> إلى 10<sup>-15</sup> للتردد بأسلوب ثنائي الاتجاه.</p>	<p>وصلة الموجات الصغيرة</p>
<p>تبلغ تكلفة الكبل حوالي ما بين 5 و 30 دولاراً أمريكياً للمتر الواحد. وتعتمد حساسية الإدراج على طول الكبل ونقطه والتردد المستعمل. ويكون لكل العازل الكهربائي المتواصل معامل تأخير من 230 PPM (أو حتى أكثر مع 25 نسبة مئوية من الحرارة). ويبلغ العازل الكهربائي الجوي 15 PPM، ولكن يجب أن يكون في شكل غار التروحين الجاف المضغوط بواسطة منظم ضغط بطاقتين في بيئة مراقبة ضمن الدرجة المئوية 1.</p>	<p>تغطي الكبلات المتصلة الطور وسيلة مرجحة لنقل المعلومات المتعلقة بالتوقيت والتردد على مسافات تقل عن عدة مئات من الأمتار. ولا بد من توخي الحذر الشديد من درجة حرارة البيئة ونقط الكبل ونقط الكبل وطوله من أجل بلوغ أداء الدقة الملبين في الجدول 1. ويمكن الحصول على استقرار جيد لدرجة الحرارة بواسطة دفن كبل بعرض 1,5 m تحت الأرض.</p>	<p>كل متحدد الطور</p>

## المراجع

- AUDOIN, C., [1992] "Caesium Beam Frequency Standards: Classical and Optically Pumped", *Metrologia* 29 (1992), p. 113-134.
- BAUCH, A., DE BOER, H., FISCHER, B. HEINDORFF, T., SCHRÖDER, R., [1988] "Performance of the PTB's Primary Clocks CS2 and CS1", *Proc. 42nd Annual Frequency Control Symposium 1988, IEEE Cat. CH2588-2/88*, p. 490-495.
- BAUCH, A. and SCHRÖDER, R., [1993] "Frequency Shifts in a Cesium Atomic Clock due to Majorana Transitions", *Annalen der Physik* 2 (1993), p. 421-449.
- BESSON, R.J., [1977] "A New Electrodeless Resonator Design", *Proc. of the 31st Ann.Symp.Frequ.Control* (1977), p. 147-152.
- CUTLER, L.S., FLORY, C.A., GIFFARD, R.P., DE MARCHI, A., [1991] "Frequency Pulling by Hyperfine  $\sigma$  Transitions in Cesium Beam Atomic Frequency Standards", *J.Appl. Phys.* 69 (1991), p. 2780-2792.
- DE CLERCQ, E., ROVERA, G.D., BOUZID, S., CLAIRON, A., [1993] "The LPTF Optically Pumped Primary Frequency Standard", *IEEE Trans. Instr. Meas.* IM-42 (1993), p. 457-461.
- DE MARCHI A., [1987] "New Insights into Causes and Cures of Frequency Instability (Drift and Long Term Noise) in Cesium Beam Frequency Standards", *Proc. 41st Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, USA* (1987), p. 53-58.
- DE MARCHI, A., ROVERA, G.D., PREMOLI, A., [1984] "Pulling by Neighboring Transitions and its Effects on the Performance of Caesium-Beam Frequency Standards", *Metrologia* 20 (1984), p.37-47.
- DE MARCHI A., ROVERA G.D. and PREMOLI A., [1987] "Effects of Servo-Loop Modulation in Atomic Beam Frequency Standards Employing a Ramsey Cavity", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 34 (1987), p. 582-591.
- DEMIDOV, N.A., EZHOV, E.M., SAKHAROV, B.A., ULJANOV, B.A., BAUCH, A., FISCHER, B., [1992] "Investigations of the Frequency Instability of the CH1-75 Hydrogen Maser", *Proc. 6th European Frequency and Time Forum, esa SP-340* (1992), p. 409-414.
- DRULLINGER, R.E., SHIRLEY, J.H., LOWE, J.P., GLAZE, D.J., [1993] "Error Analysis of the NIST Optically Pumped Primary Frequency Standard", *IEEE Trans. Instr. Meas.* IM-42 (1993), p. 453-456.
- GUINOT, B., and AZOUBIB, J., [1989] "Comparison of Primary Frequency Standards", De Marchi, A. (ed.): *Frequency Standards and Metrology*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag 1989, p. 37-43.
- KLEPPNER, D., BERG H.C., CRAMPTON S.B., RAMSEY N.F., VESSOT R.F.C., PETERS H.E. and VANIER J., [1965] "Hydrogen-Maser Principles and Techniques", *Physical Review* 138 (1965), pp. A-972-A983.
- KLEPPNER, D., GOLDENBERG H.M. and RAMSEY N.F., [1962] "Theory of the Hydrogen Maser", *Physical Review*, 126 (1962), pp. 603-615.
- OWINGS, H.B., KOPPANG, P.A., MACMILLAN, C.C., PETERS, H.E., [1992] "Experimental Frequency and Phase Stability of the Hydrogen Maser Standard Output as Affected by Cavity Auto-Tuning," *Proc. 1992 IEEE Frequency Control Symposium, IEEE Cat.No. 92CH3083-3* (1992), p. 92-103.
- PETIT, P., GIORDANO, V., DIMARCO, N., CERREZ, P., AUDIOIN, C., THEOBALD, G., [1992] "Miniature Optically Pumped Cesium Beam Resonator", *Proc. 6th European Frequency and Time Forum, ESA SP-340* (1992), p. 83 - 86.
- RAMSEY, N.F., [1950] "Molecular Beam Resonance Method with Separated Oscillating Fields", *Physical Review* 78 (1950), pp. 695-699.
- RAMSEY, N.F., [1990] "Experiments with separated oscillatory fields and hydrogen masers," *Reviews of Modern Physics* 62 (1990), pp. 541-552.
- VANIER, J. and AUDIOIN, C., [1989] "The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards", Bristol and Philadelphia, Adam Hilger 1989.

## قائمة المصادر

- ALLAN, D. W. [1990] "Remote time and frequency comparisons now and in the future", Proc. 4th European Frequency and Time Forum, 619.
- BEEHLER, R. [1982] "GOES satellite time code dissemination", Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, December, 1982, 57-87.
- CORDARA, F., PETTITI, V., QUASSO, R., and RUBIOLA, E. [1992] "Performances of a date dissemination code on telephone lines using commercial modems", Proc. 24th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, McLean, VA, USA, December, 1992, 243-253.
- CUBBAGE, R. W. [1992] "SONET synchronization: what's happening", Proc. 24th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, McLean, VA, USA, December, 1992, 337-343.
- DALY, P., KOSHELYAEVSKY, N. B., LEWANDOWSKI, W., PETIT, G., and THOMAS, C. [1993] "Comparison of GLONASS and GPS time transfers", Metrologia, Vol. 30, 2, 89-94.
- DAVIS, J. A., PEARCE, P. R., KIRCHNER, D., RESSLER, H., HETZEL, P., SOERING, A., DE JONG, G., GRUDLER, P., BAUMONT, F., and VEENSTRA, L. [1994] "Two-way satellite time transfer experiments between six European laboratories using the INTELSAT (VA-F13) satellite", Proc. 8th European Frequency and Time Forum, 297.
- DAVIS, J. A., PEARCE, P. R., MENARY, P., HUTCHINS, M., and SAGIN, M. [1991] "Time transfer by passive use of direct broadcasting satellite signals", Proc. 5th European Time and Frequency Forum, 74.
- DE JONG, G. [1992] "Prospects of two-way international time scale comparisons", Proc. 6th European Frequency and Time Forum, 69.
- GAEDE, H. J. [1988] "Precise determination of UTC in remote regions using OMEGA signals with reference to monitoring performance of a hydrogen maser", Proc. 2nd European Frequency and Time Forum, 365.
- GUINOT, B., LEWANDOWSKI, W., and THOMAS, C. [1990] "A review of recent advances in GPS time comparisons", Proc. 4th European Frequency and Time Forum, 307.
- HETZEL, P. [1988] "Time dissemination via the LF transmitter DCF 77 using a pseudo-random phase-shift keying of the carrier", Proc. 2nd European Frequency and Time Forum, 351.
- ITU-R Recommendations [1994] TF Series Volume, Time signals and frequency standards emissions.
- ITU-R Recommendations [1995] TF Series Fascicle, Time signals and frequency standards emissions.
- JESPERSEN, J. L., BLAIR, B. E., and GATTERER, L. E. [1972] "Characterization and concepts of time-frequency dissemination", Proc. IEEE, Vol. 60, 5, 502-521.
- KALLIOMAKI, K. and MANSTEN, T. [1993] "TV-frequency standard as a traceability source in accredited calibration laboratories", Proc. 7th European Frequency and Time Forum, 383.
- KIHARA, M. and IMAOKA, A. [1992] "Timing and time signal distribution in digital communication networks", Proc. 6th European Frequency and Time Forum, 489.
- KIRCHNER, D. [July, 1991] "Two-way time transfer via communication satellites", Proc. IEEE, Vol. 79, 7, 983-991.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, CH., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W., and ULRICH, P. [1993] "Comparison of GPS common-view and two-way satellite time transfer over a baseline of 800 km", Metrologia, Vol. 30, 183-192.
- KITCHING, I. D. and DALY, P. [1989] "Time references from GLONASS satellites", Proc. 3rd European Frequency and Time Forum, 121.

- LEVINE, J., WEISS, M., DAVIS, D. D., ALLAN, D. W., and SULLIVAN, D. B. [1989] "The NIST Automated Computer Time Service", J. Res. NIST, Vol. 94, 5, 311-321.
- LEWANDOWSKI, W. and THOMAS, C. [1991] "GPS time transfer", Proc. IEEE, Vol. 79, 7, 991-1001.
- MEYER, M., GRANVEAUD, M., LAPORTE, B., VERNOTTE, F., and VINCENT, M. [1993] "Improved time transfer using geostationary direct TV satellites", Proc. 7th European Time and Frequency Forum, 129.
- NIST [1990] "Time and frequency users manual", National Institute of Standards and Technology Special Publication 559, available from the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402 (Note: This publication contains information at a tutorial level on how to use many of the techniques and services mentioned in this chapter).
- POTTS, C. E. and WIEDER, B. [1972] "Precise time and frequency dissemination via the LORAN-C system", Proc. IEEE, Vol. 60, 5, 530-539.
- PUSHKIN, S. B. [1993] "GLONASS common-view time transfer", Proc. 7th European Frequency and Time Forum, 147.
- SEN GUPTA, A., HANJURA, A. K., and MATHUR, B. S. [1991] "Satellite broadcasting of time and frequency signals", Proc. IEEE, Vol. 79, 7, 973-983.
- SENNEDOT, D., MINGUY, Y., and THOMAS, B. [1993] "Use of Loran-C signals for time/frequency transfer", Proc. 7th European Frequency and Time Forum, 423.
- STARKER, S. [1994] "Time transfer via satellites - a survey", Proc. 8th European Frequency and Time Forum, 275.
- STEBBINS, S., GIFFORD, A., and BEARD, R. L. [1989] "A comparison of time transfer techniques", Proc. 21st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Redondo Beach, CA, USA, November, 1989, 215-222.
- SYDNOR, R. L., and CALHOUN, M. [1993] "Precise frequency distribution using fiber optics", Proc. 7th European Frequency and Time Forum, 399.

## خاصيات ميدان التردد وميدان التوقيت

### المحتويات

51	..... المقدمة	1.3
51	..... نموذج المذبذب	2.3
51	..... نموذج المطوار والإشارة التحليلية	1.2.3
51	..... مذبذب منخفض الضوضاء	2.2.3
52	..... طيف المذبذب المنخفض الضوضاء	3.2.3
53	..... المذبذب العالي الضوضاء	4.2.3
53	..... طيف المذبذب العالي الضوضاء	5.2.3
53	..... أثر تضاعف التردد	6.2.3
54	..... إزالة تشكيل عمليات الضوضاء	7.2.3
54	..... تعريف معياري لعمليات الضوضاء	8.2.3
54	..... عمليات ضوضاء الاتساع وضوضاء الطور	1.8.2.3
54	..... عملية خطأ التوقيت	2.8.2.3
54	..... عملية التردد الآنية	3.8.2.3
55	..... ضوضاء مضاعفة وضوضاء إضافية	9.2.3
55	..... ضوضاء مضاعفة	1.9.2.3
55	..... ضوضاء إضافية	2.9.2.3
56	..... نموذج متعدد الحدود	10.2.9
57	..... تمييز: تعريفات وطرائق	3.3
57	..... ميدان طيفي	1.3.3
57	..... تعريفات أساسية	1.1.3.3
58	..... مفاهيم النقاء الطيفي	2.1.3.3
58	..... ميدان التوقيت	2.3.3
58	..... مقدمة	1.2.3.3
59	..... مفاهيم أساسية	2.2.3.3
59	..... نموذج من عدّاد التردد	1.2.2.3.3
59	..... مشغل المتوسط المتحرك	2.2.2.3.3
60	..... مشغل التزايد	3.2.2.3.3
60	..... قياسات ميدان التوقيت الأساسية	3.2.3.3
60	..... المعايرة الحقيقية	1.3.2.3.3
61	..... معايرة آلان	2.3.2.3.3

62	..... مغايرة آلان المعدلة	3.3.2.3.3
64	..... خطأ الفاصل الزمني	4.3.2.3.3
65	..... المغايرة الزمنية	5.3.2.3.3
65	..... قياسات أخرى لميدان التوقيت	6.3.2.3.3
66	..... تحليل متعدد المغايرات	7.3.2.3.3
66	..... مواطن الشرك	4.2.3.3
66	..... أثر الكشف عن التقاطع على الصفر	1.4.2.3.3
67	..... أثر الوقت الميت	2.4.2.3.3
67	..... أثر عرض نطاق النظام	3.4.2.3.3
68	..... آثار البتر	4.4.2.3.3
68	..... خوارزميات	5.2.3.3
68	..... تقدير متوسط التردد بواسطة اعتيان الطور	1.5.2.3.3
69	..... حوسبة مغايرة آلان الكلاسيكية	2.5.2.3.3
70	..... حوسبة مغايرة آلان المعدلة	3.5.2.3.3
71	..... الخلاصة	4.5.2.3.3
72	..... تطبيقات	6.2.3.3
73	..... تحويل بين ميدان التوقيت وميدان التردد	7.2.3.3
74	..... الأوضاع البيئية	3.3.3
74	..... جسر باتجاه الفصل التالي	4.3
75	..... تذييل: العمليات العشوائية	5.3
75	..... مقدمة	1.5.3
75	..... تعريف العملية العشوائية	2.5.3
75	..... عمليات عشوائية مستقرة	3.5.3
75	..... عمليات عشوائية غير مستقرة	4.5.3
75	..... دالة الترابط الذاتي	5.5.3
75	..... كثافة طيفية للمقدرة	6.5.3
76	..... ترشيح خطي للعمليات العشوائية	7.5.3
77	..... المراجع	

## 1.3 المقدمة

يمثل هذا الفصل مقدمة للطرائق المستعملة في تمييز الطور العشوائي وعدم استقرار تردد مذئذب في كل من ميدان التردد وميدان التوقيت.

وتغطي التوصية ITU-R TF.538 خاصيات عدم استقرار الطور والتردد في المذبذبات الصحيحة كما تعرضت إليها الأدبيات الأخرى باستفاضة. ونذكر كمثل على المراجع المعنية [آلان، 1987؛ آلان وآخرون، 1988؛ IEEE، 1988؛ لراج وآخرون، 1979؛ روثمان، 1978 وشتاين، 1985] وهي كلها مقالات تأليفية تغطي المواضيع المشابهة للفصل الحالي.

ويتميز هذا التقديم بتقديم مختلف المواضيع بمنهج موحد بواسطة استعمال مفاهيم الهندسة الكهربائية كالإشارة التحليلية والمعالجات العشوائية والمشغلين الخطيين ووظائف النقل ونظرية الاعتيان إلخ، بدلاً عن اتباع المنهج التقليدي الموروث عن التطور التاريخي لمفاهيم تمييز التوقيت والتردد.

وقد بُذل مجهود خاص لمدّ القارئ برؤية متبصرة ضرورية لأوجه نظرية طرائق تمييز ضوضاء الطور وضوضاء التردد وإعطائه في الوقت نفسه النصائح العملية والخوارزميات الضرورية لتطبيقاتها. ويغطي الفصل القادم مواضيع متشابهة ولكن بتوجه أكثر تجريبية.

## 2.3 نموذج المذبذب

## 1.2.3 نموذج المطوار والإشارة التحليلية

تتمثل إشارة المذبذب الجيبي في إشارة تمرير نطاق ضيق، موضوعة في المركز حول تردد الموجة الحاملة  $v_0$ . ويمكن أن يشكلها المطوار، أي بواسطة متجه دوّار في الخطة المعقدة لدى تردد الموجة الحاملة:

$$(1.3) \quad Y(t) = A\gamma(t) \exp(j2\pi v_0 t).$$

A هو الاتساع الاسمي، و  $\gamma(t)$  هو الغلاف المعقد و  $\exp(j1\pi v_0 t)$  هو المطوار. والإشارة الحقيقية  $s(t)$  هي الجزء الحقيقي من إشارة المطوار  $\Psi(t)$ :

$$(2.3) \quad Y(t) = s(t) + j\bar{s}(t)$$

أي إسقاط المطوار على المحور الحقيقي.

ويمكن البرهنة على أن تقديم المطوار لإشارة تمرير النطاق ما هو إلا حالة خاصة لإشارة تحليلية [بدروزيان (Bedrosian)، 1962؛ بيرني (Bernier) وآخرون، 1985].

والغلاف المعقد  $\gamma(t)$  من الإشارة التحليلية هي عملية عشوائية معقدة للتحرير المنخفض التي تمثل المعلومات المشكّلة للموجة الحاملة. وفي حالة إشارة تمرير نطاق الاتصالات تُنقل إشارة رسالة التحرير المنخفض قصداً حول تردد الموجة الحاملة بالتشكيل. أما في حالة إشارة المذبذب، من جهة أخرى، فإن الغلاف المعقد هي خاصية عملية عشوائية لمنظ معين من المذبذبات: مذئذب مرو، معيار تردد ذري إلخ. ويمكن العثور على مقالة التشكيل العشوائي في [بابوليس (Papoulis)، 1983].

ويمكن فصل الغلاف المعقد إما إلى عمليات تحرير منخفض في الطور  $p(t)$  أو بالتربيع  $q(t)$  أو إلى موجة حاملة الوحدة، وعملية الضوضاء لاتساع تحرير منخفض  $\varepsilon(t)$  وعملية الضوضاء لطور تحرير منخفض  $\phi(t)$ :

$$(3.3) \quad \gamma(t) = p(t) + jq(t) = [1 + \varepsilon(t)] \exp(j\phi(t))$$

## 2.2.3 مذئذب منخفض الضوضاء

تكون قيمة متوسط التربيع لعملية ضوضاء الطور في حالة مذئذب الإحكام أو المذبذب المنخفض الضوضاء أصغر بكثير من الوحدة ويكون متوسط التربيع لعملية ضوضاء الاتساع أصغر بكثير من الوحدة،

$$E\{\phi^2(t)\} \ll 1$$

$$E\{\varepsilon^2(t)\} \ll 1$$

وحيث  $E \{ \}$  مشغل المأمول الإحصائي وأسّ ضوضاء الطور قد يُجعل خطياً:

$$\exp(j\phi(t)) \approx 1 + j\phi(t)$$

مؤدياً إلى الأدنى ترتيباً:

$$(4.3) \quad \Psi(t) = A[1 + \varepsilon(t) + j\phi(t)] \exp(j2\pi\nu_0 t)$$

وتحت هذه الوضعيات يمكن تعريف هوية المكونة في الطور،  $p(t)$ ، بموجة حاملة الوحدة زائد ضوضاء الاتساع، في تعرف هوية مكونة التريبع،  $q(t)$ ، بضوضاء الطور.

$$(5.3) \quad \begin{aligned} p(t) &= 1 + \varepsilon(t) \\ q(t) &= \phi(t) \end{aligned}$$

إن ضوضاء الطور وضوضاء الاتساع هما تعامديتان عندما يُمثل الغلاف المعقد في الخطة المعقدة. وتسمح هذه الميزة بإزالة التشكيل المستقل لعمليات ضوضاء الطور والاتساع بواسطة إزالة التشكيل المترامنة كما هو موضح أدناه، لكن الميزة لا تستقيم إلا في حالة الضوضاء المنخفضة.

### 3.2.3 طيف المذبذب المنخفض الضوضاء

لاحظ أن التعريفات المتصلة بدالات الترابط الذاتي وبالكثافات الطيفية للقدرة وردت في التذييل الخاص بالعمليات العشوائية وتتبع الترميزات المستعملة في [فوزنكرافت (Wozencraft) وآخرون، 1965]. ويعبر  $S_{\phi\phi}(f)$ ، بشكل خاص، عن الكثافة الطيفية للقدرة الثنائية الجانب للعملية العشوائية  $\phi(t)$ ، ويعبر  $S_{\phi\phi}^+(f)$  عن الكثافة الطيفية للقدرة الأحادية الجانب للعملية العشوائية  $\phi(t)$ ، في حين يعبر  $R_{\phi\phi}(\tau)$  عن دالة الترابط الذاتي للعملية العشوائية  $\phi(t)$ . وعلاوة على ذلك، لاحظ أن خارج هذا الفصل الحالي من الكتيب، ترد دالة الترابط الذاتي  $\phi(t)$  في شكل  $R_{\phi}(\tau)$  وترد الكثافة الطيفية المطابقة لها في شكل  $S_{\phi}(f)$ . وتمثل معايير الاتحاد ITU و IEEE في استعمال الكثافات الطيفية الأحادية الجانب. أما دالة الترابط الذاتي للغلاف المعقد المصاحب لإشارة المذبذب المنخفض الضوضاء كما جاءت معرفة في (5.3) عند [بارنبي وآخرون، 1985] فهي كالآتي:

$$(6.3) \quad R_{\gamma\gamma}(\tau) = 1 + R_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) + R_{\phi\phi}(\tau)$$

والكثافة الطيفية للقدرة التابعة إلى إشارة المذبذب  $s(t)$  هي تحويل فورييه لدالة الترابط الذاتي للتحرير المنخفض (6.3) المُبدلة حول تردد الموجة الحاملة بسبب (1.3) و (2.3) مما يؤدي إلى:

$$(7.3) \quad S_{ss}^+(f) = \frac{A^2}{2} \left( \delta(f - \nu_0) + S_{\varepsilon\varepsilon}(f - \nu_0) + S_{\phi\phi}(f - \nu_0) \right)$$

حيث  $\delta(f - \nu_0)$  دالة ديراك (Dirac) التي تمثل الموجة الحاملة وحيث  $S_{\varepsilon\varepsilon}(f - \nu_0)$  و  $S_{\phi\phi}(f - \nu_0)$  هما الكثافتان الطيفيتان للمقدرة الثنائية الجانب لعمليات ضوضاء الاتساع والطور.

فيظهر بالتالي المذبذب المنخفض الضوضاء على محلل الطيف كموجة حاملة عند التردد الاسمي  $\nu_0$  المتراكب على الكثافات الطيفية للمقدرة الثنائية الجانب للاتساع والطور المُبدلة حول تردد الموجة الحاملة. ويعتبر هذا الطيف حسب مصطلحات الاتصالات هو طيف موجة حاملة تخضع للتشكيل المتأون بالاتساع وبالطور مع دليل ضعيف للتشكيل بواسطة خاصيات عمليات الاتساع والطور العشوائية للمذبذب.

ولا تصلح المعادلات الواردة في هذا القسم إلا إذا كان طيف الإشارة متناظراً بحوالي  $\nu_0$ . وما لم يكن الأمر كذلك، فإن المعادلة (6.3) تتضمن مصطلح تقاطع، في حين تُكتب المعادلة (7.3) مثل (7.3') [بارنبي، 1985، المعادلة (14)]. وبالنسبة إلى  $|V| < \nu_0$ ؛

$$(3.7') \quad \frac{1}{2} [S_{ss}^+(\nu_0 + f) + S_{ss}^+(\nu_0 - f)] = \frac{A^2}{4} [S_{\gamma\gamma}(f) + S_{\gamma\gamma}(-f)] = \frac{A^2}{2} [\delta(f) + S_{\varepsilon\varepsilon}(f) + S_{\phi\phi}(f)]$$

وهو ما يدل على أن متوسط سوية النطاق الجانبي = سوية AM + سوية PM. ولاحظ أن  $S_{\phi\phi}(f) = \ell(f)$ ، انظر (24.3).



### 4.2.3 المذبذب العالي الضوضاء

يكون متوسط القيمة التربيعية لعملية ضوضاء الطور عريضاً في حالة مذبذب ضوضاء طوره عالياً

$$E \{ \phi^2(t) \} \geq 1,$$

ولا يكون من الممكن جعل المصطلح الدليلي للغلاف المعقد خطياً. وفي هذه الحالة تساهم عملية ضوضاء الطور في كل من المكونة بالطور والمكونة التربيعية للغلاف المعقد مما يؤدي إلى:

$$(8.3) \quad \begin{aligned} p(t) &= (1 + \varepsilon(t)) \cos \phi(t), \text{ and} \\ q(t) &= \sin \phi(t). \end{aligned}$$

وفي هذه الحالة، لن تكون عمليات ضوضاء الطور تعامدية بعد ذلك في المخطط المعقد. ويعقد غياب التعامد مسألة إزالة التشكيل المستقل للعمليات. ويعالج الفصل 4 مسألة إزالة التشكيل.

### 5.2.3 طيف المذبذب العالي الضوضاء

لنفترض أن ضوضاء الاتساع هي ضوضاء طفيفة في حين أن ضوضاء الطور هي ضوضاء عالية، فيمكن البرهنة [بارنبي وآخرون، 1985] على أن دالة الترابط الذاتي للغلاف المعقد يمكن تقسيمها إلى ثلاثة مصطلحات مطابقة للموجة الحاملة والمكونة بالطور والمكونة التربيعية على التوالي [بارنبي وآخرون، 1985]:

$$(9.3) \quad R_{\gamma\gamma}(\tau) = \exp(-R_{\phi\phi}(0)) + r_p(\tau) + r_q(\tau),$$

حيث إن

$$(10.3) \quad \begin{aligned} r_p(\tau) &= [\exp(-R_{\phi\phi}(0))][\cosh(R_{\phi\phi}(\tau)) - 1], \text{ and} \\ r_q(\tau) &= [\exp(R_{\phi\phi}(0))] \sinh(R_{\phi\phi}(\tau)). \end{aligned}$$

وتكون الكثافة الطيفية للمقدرة الأحادية الجانب التابعة لإشارة تمرير النطاق  $s(t)$  كنتيجة لذلك [بارنبي وآخرون، 1985] كما يلي:

$$(11.3) \quad S_{ss}^+(f) = \frac{A^2}{2} \left( \exp(-R_{\phi\phi}(0)) \delta(f - v_o) + G_p(f - v_o) + G_q(f - v_o) \right),$$

حيث  $G_p$  و  $G_q$  هما تحويلا فورييه لكل من  $r_p$  و  $r_q$ .

وبارتفاع متوسط القيمة التربيعية  $R_{\phi\phi}(0) = E\{\phi^2(t)\}$  التابعة لضوضاء الطور بما يتجاوز الوحدة، فإن الموجة الحاملة تتلاشى على نحو دليلي، أي تصبح الإشارة غير متماسكة، في حين تميل كل من المكونة بالطور والمكونة الطيفية التربيعية إلى قالب غوسي بصرف النظر عن القالب الأصلي للكثافة الطيفية لمقدرة ضوضاء الطور. وهو أمر معروف في نظرية الاتصالات مثل نظرية ودوارد [بارنبي وآخرون، 1985؛ بلاخمان (Blachman) وآخرون، 1969؛ بابوليس، 1983]. وفي حالة عملية الضوضاء البيضاء لطور التحرير المنخفض، تختفي الموجة الحاملة كلياً ويصبح الطيف غوسياً عندما يتجاوز متوسط القيمة التربيعية لضوضاء الطور حوالي 8 رادات مكعبة [بارنبي وآخرون، 1985]. ويمثل ما سبق حالة مستقرة بسيطة. غير أن ضوضاء الطور في أي مذبذب عملي هي في الواقع ضوضاء غير مستقرة. ويعالج الحالة غير المستقرة [والز (Walls) وآخرون، 1975].

### 6.2.3 أثر تضاعف التردد

عندما يتضاعف تردد الموجة الحاملة بمعامل  $n$  في مضاعف التردد، يمكن الحصول على ضوضاء الاتساع  $\varepsilon(t)$  ضعيفاً جداً بواسطة استعمال المحددات، لكن ضوضاء الطور  $\phi(t)$  تضرب في  $n$ . ويتضاعف متوسط القيمة التربيعية لعملية ضوضاء الطور بالتالي بواسطة  $n^2$  في الحالة المثلى. وقد تكون سوية ضوضاء الطور في الواقع أعلى من هذا الحد الأدنى الأساسي وتعتمد سوية ضوضاء الاتساع على الخصائص الحالية لجهاز المضاعف. وإذا كان معامل المضاعفة  $n$  أعلى بشكل كاف، حينئذ قد يبلغ متوسط القيمة التربيعية لعملية ضوضاء الطور ويتجاوز الوحدة. وإن حدث ذلك، تصبح إشارة المذبذب المنخفض الضوضاء الأصلي إشارة مذبذب مرتفع الضوضاء، أي أنها تصبح أكثر تماسكاً تقريباً كما هو مبين أعلاه. انظر الفصل 4 للحصول على المزيد من التفاصيل وتفسير إزالة تشكيل عملية الضوضاء.

### 7.2.3 إزالة تشكيل عمليات الضوضاء

يتضمن تطبيق كل من طريقتي تمييز ميدان التوقيت والتردد اللتين يبينهما القسم التالي أن عملية ضوضاء الطور للتحريض المنخفض  $\phi(t)$  للمذبذب الذي يخضع للاختبارات قد يمكن استخراجها بواسطة إزالة التشكيل. ويعتبر استخراج ضوضاء الطور عملية أكثر بساطة في حالة مذبذب لضوضاء الطور المنخفض.

أما تمييز المذبذبات في ميدان التوقيت، فإن طريقة إزالة التشكيل تتمثل في التحويل-الميوط التخفيقي للتردد IF المنخفض نسبياً متبوعاً بعملية كشف التقاطع على الصفر. وتكون عمليات التقاطع على الصفر عندها "موسومة زمنياً" أو يتم احتساب متوسط فترة التردد IF واعتبارها باستعمال عدّاد الفترة/التردد أو عدّاد الوسم الزمني.

وفي حالة استعمال طريقتي تمييز الميدان الطيفي، تتمثل تقنية إزالة التشكيل في الكشف المتزامن. ويؤدي الكشف المتزامن لإشارة تمرير النطاق مع مذبذب محلي بالطور بموجة حاملة إلى مكونة بالطور للغلاف المعقد، أي  $p(t)$ . وعلى خلاف ذلك يؤدي الكشف المتزامن لإشارة تمرير النطاق مع مذبذب محلي بالتربيع بموجة حاملة إلى مكونة تربيعية للغلاف المعقد، أي  $q(t)$ .

وكما سبق تبيانه تكون عمليات ضوضاء الاتساع وضوضاء الطور تعامدية في المخطط المعقد، ويمكن بالتالي فصلها بسهولة بواسطة الكشف المتزامن في حالة وجود عملية ضوضاء الطور. بمتوسط صغير للقيمة التربيعية.

وعلاوة على ذلك، تتم نمذجة أي مذبذب حقيقي في ترددات فورييه المنخفضة بواسطة عملية غير مستقرة من نمط "قانون المقدر"، وانظر في هذا المجال الأقسام التي تعالج النموذج المتعدد الحدود والعمليات غير المستقرة المذكورة أدناه، والتي يمكن تعريف متوسط قيمتها محلياً لا غير. وهنا، لا يمكن الاحتفاظ بالمذبذب المحلي بالتربيع بالموجة الحاملة لأغراض الكشف المتزامن لضوضاء الطور إلا بواسطة تقنيات العروة المحكومة الطور. ويتعين تصحيح طور المذبذب المحلي باستمرار لتتبع انسياب الطور العشوائي البطيء للمذبذب تحت الاختبار في علاقته بالمذبذب المرجعي. ويتعرض الفصل 4 لوصف تقنيات إزالة التشكيل لتمييز المذبذبات الطيفية بالتفصيل.

### 8.2.3 تعريف معياري لعمليات الضوضاء

#### 1.8.2.3 عمليات ضوضاء الاتساع وضوضاء الطور

إن عمليات الضوضاء الأساسية التي تميز المذبذب هي عمليات ضوضاء الاتساع وضوضاء الطور  $\varepsilon(t)$  و  $\phi(t)$  المعرفة آنفاً في نموذج المطوار للمذبذب. وعلى أساس ما تم ذكره آنفاً، فإن عمليات ضوضاء الاتساع وضوضاء الطور في مذبذب منخفض الضوضاء تكون تعامدية في المخطط المعقد ويمكن الكشف عنها بشكل مستقل بنزد متبادل جيد جداً. ويمكن إهمال ضوضاء الاتساع على ذلك الأساس بغرض تحليل استقرار التردد وما يتصف بالأهمية هي عملية ضوضاء الطور. ولا بد من توخي الحذر آنذاك. إذ قد يحدث التحويل من التشكيل AM إلى التشكيل PM في بعض التجهيزات. وحتى مرشاح تمرير النطاق الخطي له أن ينتج التحويل من التشكيل AM إلى التشكيل PM إذا لم تكن وظيفة النقل متناظرة تماماً في علاقتها بتردد الموجة الحاملة [بارنيي وآخرون، 1985]. انظر الفصل 4 للحصول على المزيد من التفاصيل.

#### 2.8.2.3 عملية خطأ التوقيت

يمكن تعريف عملية خطأ التوقيت  $x(t)$  بكونها اختلاف الطور المقيس ما بين مذبذب مُستعمل كميقاتية ومذبذب مرجعي يعتبر كميقاتية مرجعية. فهي ترتبط بعملية ضوضاء الطور بواسطة

$$(12.3) \quad x(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi\nu_0},$$

حيث يتم التعبير عن التردد الاسمي  $\nu_0$  بحساب [Hz] وخطأ التوقيت بحساب [s].

#### 3.8.2.3 عملية التردد الآنية

يُعرّف انحراف التردد الآني المقيس  $y(t)$  بكونه اشتقاق من عملية خطأ التوقيت  $x(t)$ :

$$(13.3) \quad y(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d\phi(t)}{dt};$$

وليس هناك من وحدات بالنسبة إلى  $y(t)$ . وهو انحراف التردد بحيث أن ارتباطه بالغلاف المعقد لا يصف التردد الآني في علاقته بإشارة المذبذب  $s(t)$  وإنما يصف انحراف التردد في علاقته بتردد الموجة الحاملة الاسمي  $\nu_0$ .

ويرتبط التردد الآني  $\nu_0$  في [Hz] بالانحراف  $y(t)$  بواسطة ما يلي:

$$(14.3) \quad y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0}$$

ويعتبر انحراف التردد المقيس  $y(t)$  من أجل تحليل استقرار التردد من أهم الكميات المعنية. إذ يتم الاحتفاظ بانحراف التردد المقيس على إثر تضاعف التردد أو انحرافه كما يمكن ذلك أيضاً من إقامة مقارنة مباشرة بين سويات عدم استقرار التردد لمذبذبين لهما ترددات مختلفة للموجة الحاملة.

### 9.2.3 ضوضاء مُضاعِفة وضوضاء إضافية

#### 1.9.2.3 ضوضاء مُضاعِفة

عندما يتم تضخيم إشارة المذبذب أو إرسالها أو مضاعفتها، أو عندما تتم معالجتها بأي شكل كان، يمكن تدرجها إما بالضوضاء المضاعفة أو بالضوضاء الإضافية أو بكليتهما.

وتتمثل الضوضاء المضاعفة فعلياً في عملية تشكيل عشوائية يمكن تقديمها في شكل مشابه للغلاف المعقد لإشارة المذبذب ذاتها.

ولنفترض أن إشارة المذبذب قد تم تضخيمها وأن المُضخَّم ينتج تشكيلات AM و PM عشوائية للإشارة. فقد تكون آلية التشكيل العشوائي، على سبيل المثال، ضوضاء الرفيف داخل تيارات استقطاب الترانزستورات التي تقوم بتشكيل الربح وزحزحة الطور في تردد الموجة الحاملة. وتكون وظيفة التشكيل المصاحبة لعملية الضوضاء المضاعفة على النحو التالي:

$$(15.3) \quad M(t) = 1 + \varepsilon_m(t) + j\phi_m(t).$$

وغلاف إشارة المذبذب المعقد في خرج المُضخَّم هو الغلاف المعقد في الدخل المُضخَّم بواسطة وظيفة التشكيل. ولنفتراض أن عمليات ضوضاء الطور لكل من الإشارة الأصلية والمُضخَّم هي عمليتان من عمليات الضوضاء المنخفضة،

$$E\{(\phi_i(t))^2\} \ll 1 \text{ and } E\{(\phi_m(t))^2\} \ll 1$$

والغلاف المعقد للمذبذب المنخفض الضوضاء عند الدخل هو

$$(16.3) \quad \gamma_i(t) = 1 + \varepsilon_i(t) + j\phi_i(t)$$

والغلاف المعقد لإشارة المذبذب عند الخرج، إذا وضعنا المصطلحات التربيعية على جنب، هو

$$(17.3) \quad \gamma_o(t) = M(t)\gamma_i(t) = 1 + \varepsilon_i(t) + \varepsilon_m(t) + j(\phi_i(t) + \phi_m(t)).$$

وتبين النتيجة المذكورة أعلاه أنه في حالة ضوضاء الطور المنخفضة، وحيث تكون عمليات ضوضاء الطور وضوضاء الاتساع عمليات تعامدية، تتضاف عمليات ضوضاء الطور وضوضاء الاتساع المُضاعِفة ببساطة إلى عمليات ضوضاء الطور وضوضاء الاتساع الأصلية.

### 2.9.2.3 ضوضاء إضافية

يمكن معالجة حالة الضوضاء الإضافية على النحو التالي: لنفترض وجود عملية ضوضاء بيضاء محدودة النطاق  $n(t)$  للكثافة الطيفية للمقدرة الأحادية الجانب  $N_0$ . وطبقاً لنظرية رايس التقديمية [بابوليس، 1983، فونزكرافت وآخرون، 1965] يمكن تفكيك أي عملية عشوائية للتحرير المنخفض إلى مكونات بالطور ومكونات تربيعية بالنسبة إلى تردد اعتباطي للموجة الحاملة  $\nu_0$ :

$$(18.3) \quad n(t) = \sqrt{2}(n_p(t) + jn_q(t)) \exp(j2\pi\nu_o t).$$

وإذا افترضنا أن عملية التحرير المنخفض هي عملية ضوضاء بيضاء محدودة النطاق ذات عرض نطاق  $2B$  وكثافة طيفية للمقدرة الأحادية الجانب  $N_0$  وإذا افترضنا علاوة على ذلك أن كثافتها الطيفية للمقدرة هي كثافة متناظرة بالنسبة إلى التردد الاعتباطي للموجة الحاملة  $\nu_o$  ، فبالإمكان البرهنة على أن  $n_p(t)$  و  $n_q(t)$  هما عمليتان مستقلتان من الناحية الإحصائية لضوضاء التحرير المنخفض البيضاء التابعة للكثافة الطيفية للمقدرة الأحادية الجانب  $N_0$  ولعرض النطاق  $B$  [فوزنكرافت وآخرون، 1965].

ويعتبر تفكيك رايس في الواقع تقدماً للإشارة التحليلية. وباحتساب القيمة المقيسة بالنسبة إلى اتساع الذروة  $A$  التابعة إلى الموجة الحاملة لإشارة المذبذب نتحصل على ما يلي:

$$(19.3) \quad n(t) = A \left( \frac{\sqrt{2}}{A} n_p(t) + j \frac{\sqrt{2}}{A} n_q(t) \right) \exp(j2\pi\nu_o t).$$

وبمقارنة المصطلحات كل على حدة مع الإشارة التحليلية (4.3) من المذبذب المنخفض الضوضاء، يتضح أن مساهمات الضوضاء الإضافية إلى كل من ضوضاء الاتساع وضوضاء الطور هما عمليتان متماثلتان لضوضاء التحرير المنخفض البيضاء التابعة لعرض النطاق  $B$ .

$$(20.3) \quad S_{\epsilon\epsilon}^+(f)|_{\text{additive}} = S_{\phi\phi}^+(f)|_{\text{additive}} = \frac{N_o}{\frac{1}{2}A^2} = \frac{1}{S/N(1\text{ Hz})}.$$

وتكون الكثافة الطيفية للمقدرة الأحادية الجانب لكلتي العمليتين معادلة لعكس نسبة الإشارة إلى الضوضاء بمرتز واحد من عرض النطاق. وتعرف مقدرة الضوضاء بمرتز واحد من عرض النطاق بكونها الكثافة الطيفية للمقدرة  $N_0$  للضوضاء الإضافية  $n(t)$  في حين تعرف مقدرة الإشارة بكونها مقدرة الموجة الحاملة الجيبية لاتساع الذروة  $A$ .

### 10.2.3 نموذج متعدد الحدود

تمثل الطريقة التقليدية لنمذجة ضوضاء المذبذبات في استعمال النموذج المتعدد الحدود من  $S_{yy}^+(f)$

$$(21.3) \quad S_{yy}^+(f) = \sum_{a=-2}^{a=2} h_a f^a$$

ونظراً لكون العملية طور/توقيت  $x(t)$  صحيحاً من عملية التردد  $y(t)$  يوجد هناك تطابق مباشر بين الكثافة الطيفية للمقدرة  $x(t)$  والكثافة الطيفية للمقدرة  $y(t)$ :

$$(22.3) \quad S_{xx}^+(f) = \frac{S_{yy}^+}{(2\pi f)^2} = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_{\beta=-4}^0 h_a f^\beta \quad \text{where } \beta = \alpha - 2$$

ويخصص الجدول 3.1 مختلف أنماط عمليات الضوضاء التي يتعرض لها نموذج المذبذبات المتعدد الحدود. ويعتبر النموذج ملائماً بالنسبة إلى تصنيف مختلف أنماط عمليات الضوضاء والنسبة إلى تبديل نمط قياس استقرار التردد بنمط آخر.

ولاحظ عموماً أنه بالنسبة إلى عملية قانون المقدرة  $z(t)$  التابعة إلى الكثافة الطيفية للمقدرة  $S_{zz}^+(f) = k f^\theta$  ، تكون العملية غير مستقرة عندما  $\theta \leq -1$  . بمعنى أن متوسط القيمة المربعة للعملية يرد كما يلي:

$$(23.3) \quad E\{z^2(t)\} = R_{zz}(0) = \int_0^\infty S_{zz}^+(f) df$$

وهو غير مُعرّف عندما يتحول الصحيح عن الأصل. ولاحظ أننا نستعمل هنا العملية التنوعية  $z(t)$  والأس  $\theta$  بغرض ذكر الخصائص العامة التي تطبق على عملية التوقيت/الطور  $x(t)$  وعملية التردد  $y(t)$  بالتساوي تماماً مع أسبها  $\beta$  و  $\alpha$  على التوالي.

### الفصل 3

لا يتقارب الصحيح (23.3) بترددات فورييه العليا على  $1 - \theta \geq$  نظراً لكون عمليات قانون المقدره المبحته ليست بنطاق محدود. ولا تشكل هذه المشكله إلا جانباً ثانوياً من النموذج نظراً لكون عمليات ضوضاء الطور والتردد الفعلية للمذبذبات هي دائماً ذات نطاق محدود.

#### الجدول 3.1

##### تصنيف عمليات قانون المقدره في النموذج المتعدد الحدود

الأس $\beta$ من $S_{xx}^+(f)$	الأس $\alpha$ من $S_{yy}^+(f)$	
0	2	ضوضاء بيضاء PM
1-	1	PM بضوضاء الرفيف
2-	0	FM بضوضاء بيضاء
3-	1-	FM بضوضاء الرفيف
4-	2-	FM بسير عشوائي

وفي حين يسمى  $f^{-1}$  عادة "بضوضاء الرفيف"، يؤدي تكامل واحد لعملية الضوضاء البيضاء إلى عملية قانون المقدره  $f^{-2}$  تسمى "بالسير العشوائي" أو بعملية الحركة البرونية الوحيدة الأبعاد.

وقد بين [غرينهال (Greenhall)، 1983] أن العمليات العشوائية لقانون المقدره الموجودة في المذبذبات يمكن أن تتميز بالكثافات الطيفية للمقدره حتى عندما تكون عمليات غير مستقرة ( $\theta \leq -1$ ).

### 3.3 تمييز: تعريفات وطرائق

#### 1.3.3 ميدان طيفي

##### 1.1.3.3 تعريفات أساسية

تستعمل في الميدان الطيفي عادة أربعة قياسات لوصف المذبذب: الكثافة الطيفية للمقدره ذات  $y(t)$ ، والكثافة الطيفية للمقدره  $x(t)$ ، والكثافة الطيفية للمقدره  $\phi(t)$  و  $L(f)$  وهو قياس طيفي مرتبط بمفهوم النقاء الطيفي.

ويلخص الجدول 3.2 مختلف الكثافات الطيفية الأساسية. وتعتمد مسألة تحديد ما إذا كانت كمية الفائدة  $y(t)$  أو  $x(t)$  أو  $\phi(t)$  على التطبيق المحدد. غير أن القياسات الطيفية تُستعمل في أغلب الأحيان لتمييز النقاء الطيفي للمذبذب؛ وبالتالي عادة ما يتم إعطاء الكثافة الطيفية  $\phi(t)$ .

#### الجدول 3.2

##### قياسات الميدان الطيفي الأساسية

رمز	قياس
$S_{yy}^+(f)$ [Hz <sup>-1</sup> ]	PSD من $y(t)$
$S_{xx}^+(f)$ [s <sup>2</sup> Hz <sup>-1</sup> ]	PSD من $x(t)$
$S_{ff}^+(f)$ [rad <sup>2</sup> Hz <sup>-1</sup> ]	PSD من $\phi(t)$
$L(f)$ [Hz <sup>-1</sup> ]	Script $L(f)$

ويُعرف قياس النقاء الطيفي  $L(f)$  كالتالي:

$$(24.3) \quad L(f) \equiv \frac{1}{2} S_{\phi\phi}^+(f)$$

ويتم تعليل العلاقة بين القياسين لاحقاً.

### 2.1.3.3 مفاهيم النقاء الطيفي

يدل نقاء المذبذب الطيفي على الضوضاء الموجودة على كل جانب من جانبي الموجة الحاملة عندما تُقاس إشارة مذبذب معين على محل طيفي مباشرة.

ونذكر بأن المعادلة (7.3) تقدم الكثافة الطيفية للمقدرة التابعة للإشارة  $s(t)$  للمذبذب منخفض ضوضاء الطور، على فرض أن تُقاس الكثافة الطيفية للمقدرة لإشارة المذبذب ومُقَيَّسة بالنسبة إلى مقدرة الموجة الحاملة المتوسطة  $\frac{1}{2} A^2$  ومُبدَّلة من  $v_0$  نحو الأصل بطيف تحرير منخفض.

$$(25.3) \quad L(f) = \frac{S_{ss}^+(f + v_0)}{\frac{1}{2} A^2} = \delta(f) + S_{\varepsilon\varepsilon}(f) + S_{\phi\phi}(f)$$

ويفي ذلك بشروط تعريف قياس النقاء الطيفي  $L(f)$  إذا كان جعل ضوضاء الاتساع  $\varepsilon(t)$  طفيفة أمراً ممكناً بالنسبة إلى ضوضاء الطور  $\phi(t)$ . فيصبح بذلك قياس النقاء الطيفي مماثلاً لقياس ضوضاء الطور لكافة ترددات فورييه ما عدا الترددات الأصلية. ولا يصح هذا دائماً بالنسبة إلى مركبات التردد وغيرها من الأجهزة حيث تكون إشارة المذبذب قد مرت عبر عدد من مراحل التضخيم.

ولكن لاحظ أن محللات الطيف التجارية لا يكون لها الحلّ الضروري ولا المدى الدينامي لتمييز ضوضاء الطور بواسطة قياس مباشر لإشارة تمرير النطاق  $s(t)$ . هذا، علاوة على أن ضوضاء الاتساع عادة ما لا تكون طفيفة. وبعبارة أخرى، فإن قياس  $L(f)$  الفعلي هو أمر لا يمكن تحقيقه. ونتيجة لذلك، فبرغم تحديد مواصفات المذبذبات التجارية عادة بواسطة  $L(f)$  تقريباً، فإن القياس الفعلي يتضمن تشكيل  $\phi(t)$  بواسطة تقنيات العروة المحكومة الطور وتقييم كثافتها الطيفية للمقدرة باستعمال محل طيف رقمي للتحرير المنخفض. ويُقسَّم قياس  $S_{ff}^+(f)$  إذاً على اثنين ويُوسَّم بواسطة  $L(f)$ .

### 2.3.3 ميدان التوقيت

#### 1.2.3.3 مقدمة

يعالج ميدان التوقيت، على خلاف ميدان التردد، آثار تقدير متوسط مختلف قيم التوقيت،  $\tau$ . وبالنسبة إلى قياسات ميدان التوقيت المفيدة توجد علاقات فورييه للتحويل بين تردد فورييه،  $f$ ، ومعلمة ميدان التوقيت،  $\tau$ . وتعطي مراقبة تبعية مغايرة معينة مع تغير القيمة  $\tau$  عادة دلالة جيدة على خصائص المذبذب.

ويستعمل تمييز ميدان التوقيت تقليدياً الإحصاءات المحتسبة من سلسلة التوقيت المتقطعة لمتوسط عينات التردد التي تم الحصول عليها من عدّاد رقمي يُستعمل لقياس مدوِّنة الخفقان بين المذبذب تحت الاختبار ومذبذب مرجعي. كما يمكن استعمال ذات سلسلة التوقيت المتقطعة بالطبع في FFT على سبيل المثال لاحتساب طيف ميدان التردد.

ويقوم منهج هذا التقديم، من جهة أخرى، على التعريف بشروط تغير ميدان التوقيت على أساس متوسط القيمة المربعة للعملية العشوائية المستقرة المتواصلة التي تم الحصول عليها بواسطة تطبيق المُشغَّل الخطي الخاص بمغايرة ميدان التوقيت المعني بعملية التردد الآني  $y(t)$ . وبما أن متوسط  $y(t)$  خلال الفاصل الزمني  $\tau$  هو  $(x(t) - x(t - \tau)) / \tau$ ، فإن تلك المغايرات يمكن التعبير عنها أيضاً بعبارة  $x(t)$ .

كما يمكن هذا المنهج من إنشاء مغايرات مختلفة بطريقة أكثر بساطة وحدسيّة مما كانت عليه حتى الآن. ويتم تقدير المغايرات، في الواقع، انطلاقاً من عدد منته من العينات المأخوذة من العملية المتواصلة التحتية، ولا يؤثر هذا الأمر إلا على عدم التيقن من التقدير. ويمكن معالجة مشكلة عدم التيقن من التقدير العملي للمغايرات بشكل منفصل عن تعريف المغايرات ذاتها. وقد تعمقت الأدبيات السابقة في بحثها باستفاضة.

## 2.2.3.3 مفاهيم أساسية

## 1.2.2.3.3 نموذج من عدّاد التردد

لنفترض ضرورة تمييز المذبذب تحت الاختبار (OUT) في ميدان التوقيت. تقوم الطريقة التقليدية على تخفيف إشارة تمرير النطاق الأصلية لتخفيض ترددها إلى تردد اعتباطي منخفض الخفقان  $V_0$  بواسطة خلط إشارة المذبذب OUT مع إشارة مذبذب مرجعي أكثر استقراراً بكثير من المذبذب OUT. وتعيد إشارة خفقان التردد المنخفض إنتاج تقلبات تردد المذبذب OUT بأمانة، الذي يقيسه عادة عدّاد التردد الرقمي.

ويقيس العدّاد الرقمي الاعتيادي إشارة خفقان التردد باحتساب تقاطعات الإشارة على الصفر. ويعني التقاطع على الصفر عادة نقطة في التوقيت حين يقوم توتر الإشارة بعبور صفر من الفولطتات في الاتجاه الإيجابي. ويعطي العدّاد لكل فترة اعتيان،  $T$ ، العينة  $v_k$  وهي التردد الآني  $v_b(t)$  [Hz] الذي يُقدر متوسطه خلال توقيت انفتاح الباب،  $\tau$ .

وتكون فترة الاعتيان،  $T$ ، في معظم عدّادات التردد أطول من فترة تقدير المتوسط،  $\tau$ . فيوجد لذلك وقت ميت،  $T-\tau$  يَحْتَسِب العدّاد أثناءه متوسط التردد ويعيد إنشاء العدّادات/السجلات الداخلية وينتظر تقاطع الإشارة التالي على الصفر. ولا يمكن بدء العدّ التالي إلا مع تقاطع الإشارة التالي على الصفر فيكون للوقت الميت حينئذ في عدّاد التردد فترة واحدة على الأقل من الإشارة.

وقد يحظى الوقت الميت بالأهمية كما سيرد ذكره لاحقاً بسبب توجيهه للإحصاءات عندما يتم استعمال العينات في قياسات ميدان التوقيت.

وإذا تم طرح متوسط التردد الاسمي  $v_b$  من العينات  $v_k$  وإذا تم تقييس هذه الأخيرة بالنسبة إلى متوسط تردد المذبذب OUT  $v_0$  فإنه يمكن الحصول على العينات المقيّسة  $y_k$ ،

$$(26.3) \quad y_k = \frac{v_k - v_b}{v_0}$$

وتكون العملية العشوائية المتقطعة، أو سلسلة التوقيت،  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_k$  المتأتية من عدّاد التردد إذاً متساوية مع العملية العشوائية المتواصلة  $y(t, \tau)$ ، أي المتوسط المتحرك من  $y(t)$  خلال  $\tau$  كما يعرفه القسم التالي، وتقدم عينته الفترة  $T$ .

وتُعرَّف طرائق تمييز ميدان التوقيت لاستقرار التردد عادة بعبارات الإحصاءات التي يتم القيام بها خلال العملية المتقطعة  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_k$  المتأتية من عدّاد التردد. لكننا سنبين كيف أن هذه الطرائق تلقى تفهماً أكبر عندما تُعرف أيضاً من وجهة نظر العمليات العشوائية المتواصلة التحتية.

## 2.2.2.3.3 مشغّل المتوسط المتحرك

وكما سبق الذكر آنفاً، فإن شروط تغيير ميدان التوقيت تعرف تقليدياً من وجهة نظر الإحصاءات التي يتم القيام بها على سلسلة الوقت المتقطعة  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_k$  المتأتية من عدّاد التردد. وتعتبر العينات التي تم الحصول عليها من العدّاد اعتيائاً دورياً للتردد الآني الذي يقدر متوسطه خلال الفاصل الزمني لانفتاح الباب،  $\tau$ .

ويمكن اعتبار عينات التردد من العدّاد كعينات متقطعة للمتوسط المتحرك من  $y(t)$ :

$$y_0, y_1, y_2, \dots, y_k = y(t_0, \tau), y(t_0+T, \tau), y(t_0+2T, \tau), \dots, y(t_0+kT, \tau)$$

حيث إن  $T$  هو فاصل الاعتيان الزمني وحيث إن:

$$(27.3) \quad \text{ma}(\tau)\{y(t)\} = y(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t y(\alpha) d\alpha$$

### الفصل 3

تُعرَّف مشغِّل المتوسط المتحرك السببي. ولاحظ أننا نستعمل مصطلح "سببي" للتعبير على أن المشغِّل المطبَّق في الوقت  $t$  لا يُعرف إلا من وجهة نظر قيم العملية السابقة والحالية. وتُعتبر الاستجابة النبضية لمُشغِّل المتوسط المتحرك  $\{ma(\tau)\}$  وظيفة نبضية إيجابية ذات امتداد واتساع  $1/\tau$ . ويكون المعامل المربع لوظيفة نقلها كالتالي:

$$(28.3) \quad |H_{ma}(f)|^2 = \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$$

ويقوم مُشغِّل المتوسط المتحرك بوصف عملية تقدير المتوسط التي تحدث داخل عدِّاد التردد والتي ستستعمل لاحقاً في تحليل مغايرة ميدان التوقيت.

#### 3.2.2.3.3 مشغِّل التزايد

يُعرَّف مُشغِّل التزايد  $\{\Delta(\tau)\}$  كما يلي:

$$(29.3) \quad \Delta(\tau)\{x(t)\} = x(t) - x(t - \tau)$$

ويمكن تطبيقه بشكل تكراري. وعند تطبيقه مرة واحدة تسمى النتيجة "بالاختلاف الأول". أما عند تطبيقه مرتين:

$$(30.3) \quad \Delta^{(2)}(\tau)\{x(t)\} = \Delta(\tau)\{\Delta(\tau)\{x(t)\}\} = x(t) - 2x(t - \tau) + x(t - 2\tau)$$

وتسمى النتيجة "بالاختلاف الثاني"، وهكذا دواليك.

والمعامل المربع لوظيفة النقل المصاحبة لمُشغِّل التزايد  $\{\Delta(\tau)\}$  هو

$$(31.3) \quad |H_{\Delta}(f)|^2 = 4 \sin^2(\pi f \tau)$$

ولاحظ أن وظيفة نقل مشغِّل التزايد هي مكافئة للتشغيل الاشتقاقي الأول بترددات فورييه المنخفضة القريبة من الترددات الأصلية:

$$(32.3) \quad |H(f)|^2 = 4 \sin^2(\pi f \tau) = 4(\pi f \tau)^2 \quad \text{for } f \ll \frac{1}{\pi \tau}$$

وكتيجة لذلك، فإن الاختلاف الأول  $\{\Delta(\tau)\{z(t)\}$  التابع إلى عملية قانون المقدرة  $z(t)$ ، والكثافة الطيفية للمقدرة  $S_{zz}^+(f) = k f^\theta$  يؤدي إلى عملية الكثافة الطيفية للمقدرة  $f^\theta 4k \sin^2(\pi f \tau)$  التي تتصرف كعملية قانون المقدرة بالأس  $\theta + 2$  في منطقة ترددات فورييه المنخفضة القريبة من الترددات الأصلية.

وسيقوم بالتالي مشغِّل التزايد على سبيل المثال بتحويل عملية غير مستقرة للريف بقانون المقدرة بالأس  $\theta = -1$  إلى عملية مستقرة مع السلوك  $\theta = +1$  في منطقة ترددات فورييه المنخفضة.

ولا تبقى العملية الناتجة عملية "قانون المقدرة" إذ إن مشغِّل التزايد ليس مكافئاً للمشغِّل الاشتقاقي الأول بالنسبة إلى كافة ترددات فورييه ولكنها رغم ذلك تكون عملية مستقرة.

وتُعتبر قدرة مشغِّل التزايد أساسية لتعريف قياسات استقرار تردد ميدان التوقيت، وذلك سواء تم تطبيقها مرة واحدة أو عدة مرات لتحويل عملية غير مستقرة بقانون المقدرة إلى عملية مستقرة بفعل مرشاح للتحريز المرتفع.

#### 3.2.3.3 قياسات ميدان التوقيت الأساسية

##### 1.3.2.3.3 المغايرة الحقيقية

تتمثل الطريقة المنطقية لتمييز استقرار تردد المذبذب OUT للوهلة الأولى في تقدير المغايرة الحقيقية لعينات التردد:

$$(33.3) \quad I^2(\tau) = E\{y_k^2\}$$



الفصل 3

وتعتبر سلسلة التوقيت  $y_k$  اعتيائاً للعملية المتواصلة للمتوسط المتحرك  $y(t, \tau)$ ؛ ويكون متوسط القيمة المربعة لسلسلة التوقيت إذاً معادلاً لمتوسط القيمة المربعة بالنسبة إلى  $y(t, \tau)$ . وباستعمال (23.3) و (28.3) و (A4.3) نتحصل فوراً على ما يلي:

$$(34.3) \quad I^2(\tau) = \int_0^{\infty} S_{yy}^+(f) \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

وهو ما يؤدي إلى ربط المغايرة الحقيقية بالكثافة الطيفية للمقدرة ذات  $y(t)$ .

ويكون الصحيح (34.3) للأسف منتهاً بالنسبة إلى عمليات الضوضاء غير المستقرة بقانون المقدرة، أي بالنسبة إلى  $\alpha \leq -1$ .

وبعبارة أخرى فإن سلسلة التوقيت  $y_k$  المتأتية من العدّاد هي سلسلة غير مستقرة إذ إن العملية المتواصلة التحتية  $y(t, \tau)$  هي عملية غير مستقرة. وينحرف متوسط القيمة المربعة ذو  $y(t, \tau)$  الذي يعرف المغايرة الحقيقية، أي يصبح منتهاً عندما يتم تقدير متوسطه خلال وقت منته بسبب عدم استقرار النماذج التي تقدم المذبذبات الجاري تمييزها.

ويعود تعريف قياسات أخرى لاستقرار التردد في ميدان التوقيت ملائمة أكثر إلى هذه الملاحظة التي حدثت في الأيام الأولى من العمل بمعايير التردد الذرية.

### 2.3.2.3.3 مغايرة آلان

تعرّف مغايرة آلان التقليدية أو الكلاسيكية بكونها متوسط مغايرة لعينتين من عينات التردد  $y_k$ ، يتم قياسهما بدون وقت ميت، أي مع  $T = \tau$ .

$$(35.3) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} E\{(y_k - y_{k-1})^2\}$$

وبملاحظة كون أخذ اختلاف عينتين متجاورتين يتم قياسهما بدون وقت ميت هو اختلاف مكافئ لتشغيل الاختلاف الأول المطبق خلال  $\tau$ ، فإنه يمكن تعريف مغايرة آلان بكونها متوسط القيمة المربعة للعملية المتواصلة  $\Delta(\tau)\{y(t, \tau)\}$ .

$$(36.3) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} E\{(\Delta(\tau)\{y(t, \tau)\})^2\}$$

ويتم ترشيح العملية الأصلية  $y(t)$ ، من وجهة نظر المشغّل الخطي، بواسطة مشغّل المتوسط المتحرك، حسب نموذج عمل العدّاد، ويتبعها مشغّل الاختلاف الأول. ونتحصل باستعمال (23.3) و (28.3) و (31.3) و (A4.3) فوراً على ما يلي:

$$(37.3) \quad \sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S_{yy}^+(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

يتم تعريف الصحيح الأنف الذكر وانهاؤه بالنسبة إلى كافة العمليات بقانون المقدرة الواردة في الجدول 3.2. وتكون العملية  $\Delta(\tau)\{y(t, \tau)\}$  التي يعرف متوسط قيمتها المربعة مغايرة آلان الكلاسيكية، مستقرة بالفعل رغم أن العملية الأصلية غير المرشحة  $y(t)$  كانت عملية غير مستقرة. وينتج ذلك عن فعل ترشيح التحرير المرتفع لمشغّل الاختلاف الأول.

وإذا كان للعدّاد الذي ينتج العينات  $y_k$  وقتاً ميتاً، فإن تشغيل المتوسط المتحرك يتم خلال الفاصل الزمني  $\tau$  لانفتاح الباب ويتم تشغيل الاختلاف الأول خلال الفاصل الزمني  $T$  للاعتيان. فيؤدي بالتالي ذات التعريف (35.3) المطبق على عينات التردد  $y_k$  آنذاك إلى نتائج مختلفة إذ إننا نتحصل بتطبيق (23.3) و (28.3) و (31.3) و (A4.3) من جديد كما سبق على ما يلي:

$$(38.3) \quad \sigma_y^2(\tau, T) = 2 \int_0^{\infty} S_{yy}^+(f) \frac{\sin^2(\pi f T) \sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

عوضاً عن (37.3).

ويوجه حضور وقت ميت في اعتيان متوسط التردد الإحصاءات ويكف عن إعطاء مغايرة آلان عند تطبيق التعريف (35.3) على العينات. وقد يكون ذلك التوجيه ضئيلاً في بعض الحالات. أما في حالة FM بالضوضاء البيضاء، فيكون صفرًا. ولا بد عموماً من أخذه في الاعتبار إذا كان ملازماً لنظام قياس معين وإذا كان تفاديه أمراً غير ممكن. انظر القسم 2.4.2.3.3.

### 3.3.2.3.3 مغايرة آلان المعدلة

في البدء تم تعريف مغايرة آلان المعدلة حسب العينات  $x_k$  من عملية الطور/التوقيت  $x(t)$  [آلان وآخرون، 1981]:

$$(39.3) \quad \text{mod } \sigma_y^2(n\tau_o) = \frac{1}{2} \frac{1}{(n\tau_o)^2} E \left\{ \left( \frac{1}{n} \sum (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right)^2 \right\}$$

ويمكن إعادة كتابة التعريف (39.3) بمصطلحات عينات التردد من أجل تسهيل إقامة المقارنة بينها وبين مغايرة آلان الكلاسيكية:

$$(40.3) \quad \text{mod } \sigma_y^2(n\tau_o) = \frac{1}{2} E \left\{ \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{i+k+n} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{i+k} \right) \right]^2 \right\}$$

حيث إن  $y_k$  هي عينات التردد التي تم قياسها بدون وقت ميت وتقدير متوسطها خلال الفاصل الزمني  $\tau_o$  للاعتيان.

ويمكن تفسير هذه الصيغة الجديدة (40.3) كما يلي. وتُجمَعُ المحصّلات الداخلية العينات الأولية  $n$  بعد  $n$  ضمن عينات فوقية يقدر متوسطها خلال  $n\tau_o = \tau$ . وتمثل المحصلة الخارجية، من جهة أخرى، في تشغيل المتوسط المتحرك المتقطع (dma)، الذي يتم أدائه خلال الفاصل الزمني لتقدير المتوسط  $n\tau_o = \tau$ ، ويطبق على الاختلاف الأوّل للعينات الفوقية.

فيمكن تعريف مغايرة آلان المعدلة إذاً بكل بساطة في شكل العمليات المتواصلة التحتية كآلاتي:

$$(41.3) \quad \text{mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} E \left\{ [dma(n, \tau_o) \{ \Delta(\tau) \{ y(t, \tau) \} \}]^2 \right\}$$

حيث يُعرّف مشغّل المتوسط المتحرك المتقطع المطبق خلال الفاصل الزمني لتقدير المتوسط  $n\tau_o = \tau$  كما يلي:

$$(42.3) \quad dma(n, \tau_o) \{ z(t) \} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} z(t - i\tau_o)$$

في حين أن المعامل المربع لوظيفة النقل المرتبط بمشغّل المتوسط المتحرك المتقطع هو:

$$(43.3) \quad |H_{dma}(f)|^2 = \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{n^2 \sin^2\left(\frac{\pi f \tau}{n}\right)}$$

حيث إن الفاصل الزمني لتقدير المتوسط  $\tau$  هو  $n$  من الفواصل الزمنية الأولية للاعتيان  $\tau_o$ .

وتبين هذه النتيجة الأخيرة أن مغايرة آلان المعدلة هي ماثلة لمغايرة آلان الكلاسيكية إلا ما كان يتعلق بالتشغيل الإضافي للمتوسط المتحرك المتقطع.

وتحصل باستعمال وظائف النقل (23.3) و (28.3) و (31.3) و (A4.3) فوراً على ما يلي:

$$(44.3) \quad \text{mod } \sigma_y^2(n, \tau) = 2 \int S_{yy}^+(f) \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(n\pi f \tau)^2 \sin^2\left(\frac{\pi f \tau}{n}\right)} df$$

وهي العبارة الموجودة عموماً في الأدبيات السابقة. وتتمثل ميزة مغايرة آلان المعدلة على الأخرى الكلاسيكية في كون الأولى تنتج منحدرات بارزة كوظيفة  $\tau$  لكل عملية من عمليات الضوضاء بقانون المقدرة التي تجد تعريفاً لها في النموذج المتعدد الحدود. هذا من جهة، أما عقباتها

الفصل 3

فتمثل في اعتمادها ليس فقط على توقيت تقدير المتوسط  $\tau$  بل كذلك على العدد  $n$  من العينات الأولية المستعملة لبناء الفاصل الزمني  $\tau$  وعلى الفاصل الزمني للاعتيان  $\tau_0$  أيضاً بشكل غير مباشر.

ويعود ذلك ببساطة إلى حدوث انطواء، كما يحدث في أي تشغيل للمعالجة الرقمية، وذلك عندما لا يفي معدل الاعتيان بشروط نظرية الاعتيان، وبعبارة أخرى عندما يكون معدل الاعتيان أدنى من تردد نيكويست الذي يُعرّف بكونه ضعف عرض نطاق الإشارة.

ولنفترض، من جهة أخرى، أن معدل الاعتيان  $1/\tau_0$  أعلى من ضعف عرض النطاق  $B$  للعملية  $y(t)$ ، الشيء الذي يؤدي إلى الإيفاء بشروط نظرية الاعتيان ويؤدي مشغّل المتوسط المتحرك المتقطع تقريباً إلى نفس النتائج التي يؤدي إليها مشغّل المتوسط المتحرك المتواصل.

ويمكن التحقق من أنه عندما  $n \leftarrow \infty$  للقيمة الثابتة  $\tau$ ، وهو ما يوازي السماح إلى معدل الاعتيان  $1/\tau_0$  بالاتجاه نحو  $\infty$ ، وتتجه وظيفة النقل المتقطعة (43.3) نحو وظيفة النقل المتواصلة (34.3).

وبتطبيق شروط نظرية الاعتيان، أي بالنسبة إلى  $1/\tau_0 > 2B$ ، حيث يكون  $B$  عرض نطاق  $y(t)$ ، يمكن إذاً إنشاء مغايرة تماثلية من مغايرة آلان المعدلة باستعمال مشغّل المتوسط المتحرك المتواصل (27.3) عوضاً عن مشغّل المتوسط المتحرك المتقطع (42.3)، الشيء الذي يؤدي إلى ما يلي:

$$(45.3) \quad c \text{ mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} E \left\{ \left[ \Delta(\tau) \{ \text{ma}^{(2)}(\tau) \{ y(t) \} \} \right]^2 \right\}$$

وذلك عوضاً عن (41.3). ويمكن إنشاء مغايرة آلان المعدلة على نحو مماثل في الميدان الطيفي باستعمال وظيفة النقل لمشغّل المتوسط المتحرك المتواصل (28.3) عوضاً عن وظيفة النقل لمشغّل المتوسط المتحرك المتقطع (43.3)، الشيء الذي يؤدي إلى ما يلي:

$$(46.3) \quad c \text{ mod } \sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S_{yy}^+(f) \frac{\sin^6(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^4} df$$

عوضاً عن (44.3).

ومغايرة آلان المعدلة "المتواصلة" المُختزلة في  $c \text{ mod}$  هي حدّ مغايرة آلان المعدلة التي تم قياسها بدون بتر، (انظر القسم المتعلق بالبتر لاحقاً)، وطبقاً لنظرية الاعتيان.

وقد تمت حوسبة النتائج المتعلقة بمغايرة آلان المتواصلة  $c \text{ mod}$  التي تلخصها الجداول من 3.5 إلى 3.7 بطريقة تحليلية انطلاقاً من (46.3) وتفيد أن للمغايرة المتواصلة  $c \text{ mod}$  منحدرات بارزة لمختلف العمليات بقانون المقدرة، وأما مستقلة في الوقت ذاته عن  $n$  وعن  $\tau_0$  وعن عرض نطاق  $B$  للنظام كما يبينه ويتحقق منه [بارنبي، 1987].

فالمغايرة المتواصلة  $c \text{ mod}$  تقوم إذاً بتصحيح عقبتَي مغايرة آلان الكلاسيكية: إذ إن ميل المغايرة الكلاسيكية هو ذاته لكل من  $PM$  البيضاء و  $PM$  بالرفيف والاعتماد على عرض نطاق النظام.

وبالإضافة إلى النتائج التي تلخصها الجداول من 3.5 إلى 3.7 فهي تبين أيضاً أنه حتى وإن لم يتم الإيفاء بشروط نظرية الاعتيان، فإن مغايرات آلان المعدلة التقليدية لها ذات الخصائص التي تتمتع بها مغايرة آلان المتواصلة  $c \text{ mod}$  بالنسبة لكافة عمليات الضوضاء ما عدا  $PM$  البيضاء شريطة أن يكون  $n \gg 1$ . وفي حالة  $PM$  البيضاء يكون اعتماد مغايرة آلان المعدلة على عرض نطاق النظام هو ذاته من قبل مغايرة آلان الكلاسيكية.

وبعد الوصول إلى هذا الاستنتاج الهام، لنقم بتعريف صيغة أخرى من مغايرة آلان المعدلة، وهذا التعريف لن يلقي المزيد من الضوء على المسألة بل هو تعريف مفيد جداً من أجل القيام بتقدير عملي فعال لمغايرة آلان المعدلة.

لنعرّف  $w(t)$  كصحيح من  $x(t)$

$$(47.3) \quad w(t) = \int_0^t x(\alpha) d\alpha$$

والآن، وباستعمال (47.3)، يتم التعبير عن المتوسط المتحرك من  $x(t)$  على النحو التالي:

$$(48.3) \quad x(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \Delta(\tau) \{w(t)\}$$

وبتطبيق (47.3) مرة ثانية واحتساب الاختلاف الأول نتحصل على مغايرة آلان المعدلة المتواصلة (cmod)، أي على مغايرة آلان المعدلة التي يكون المشغل الإضافي للمتوسط المتحرك ضمنها مشغلاً متواصلاً، الشيء الذي يؤدي إلى:

$$(49.3) \quad c \text{ mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} E \left\{ \left( \frac{1}{\tau^2} \Delta^{(3)}(\tau) \{w(t)\} \right)^2 \right\}$$

وتعتبر هذه الحالة حالة متواصلة. أما في الحالة المتقطعة، فعندما تخرج العينات من العداد بفواصل زمني للاعتيان  $\tau_0$ ، وإذا تم تعريف  $w_k$  كمجموع متقطع من كافة العينات  $x$  السابقة،

$$(50.3) \quad w_k = \sum_{i=0}^k x_i$$

فيكون المتوسط المتحرك المتقطع المطلوب في ذلك الوقت لحوسبة مغايرة آلان المعدلة المتقطعة على هذا النحو:

$$(51.3) \quad \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{k-i} = \frac{1}{n} (w_k - w_{k-n})$$

ويمكن تعريف مغايرة آلان المعدلة المتقطعة كنتيجة لذلك في شكل الاختلاف الثالث من  $w(t)$ :

$$(52.3) \quad \text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \frac{1}{(n^4 \tau_0^2)} E \{ (w_k - 3w_{k-n} + 3w_{k-2n} - w_{k-3n})^2 \}$$

ويمكن استعمال هذه النتيجة الأخيرة لإجراء تقدير فعال لمغايرة آلان المعدلة كما يبينه القسم الذي يعالج الخوارزميات لاحقاً. انظر الفصل 4 والجدول 4.7 بخصوص فترات الثقة من أجل  $\sigma_y(\tau)$  و  $\text{mod } \sigma_y(\tau)$ .

### 4.3.2.3.3 خطأ الفاصل الزمني

إن خطأ الفاصل الزمني (TIE) هو مفهوم يُستعمل في التنبؤ بسلاّم الوقت وفي الاتصالات من أجل مزامنة الشبكات الرقمية [كارتشوف (Kartaschoff)، 1987]. ويعتبر مثلاً ممتازاً لتطبيق مغايرة آلان المباشر.

ولنفترض وجود مذبذبين، في الوقت  $t$ ، متزامنين (بحيث يضبط اختلاف التوقيت على الصفر) ومتوالفين (بحيث يضبط تخالف التردد على الصفر). في حين يكون خطأ الفاصل الزمني  $TIE(t, \tau)$  خطأ التوقيت  $x(t)$  المراكم بين المذبذبين باعتبارهما ميقائيتين في وقت  $t + \tau$  في المستقبل.

هناك طرائق مختلفة لتعريف الخطأ TIE بالاعتماد على اختيار المقدّر لتخالف التردد الأولي. وكنتيجة لذلك، فإن الخاصيات الإحصائية للعملية  $TIE(t, \tau)$  تعتمد بدورها على اختيار المقدّر.

ولنفترض أن تقدير تخالف التردد يتم بتقدير متوسط التردد الآني  $y(t)$  أثناء الفاصل الزمني  $\tau$  السابق للحظة  $t$ . فيكون مقدّر التردد في الوقت  $t$  بالتالي  $y(t, \tau)$  في حين يصبح الخطأ TIE كما يلي:

$$(53.3) \quad TIE(t, \tau) = x(t + \tau) - x(t) - \tau y(t, \tau)$$

يتمثل شرط التعريف (53.3) الأول في العملية العشوائية غير المستقرة لخطأ التوقيت بالتشغيل الحر  $x(t)$  في الوقت  $t + \tau$  في المستقبل. ويتمثل الشرط الثاني في الفارق الزمني الأولي  $x(t)$ . ويعتبر طرحه موازياً لمزامنة المذبذبات في الوقت  $t$ . أما الشرط الثالث فهو الفارق الزمني الذي تمت مراكمته بعد الفاصل الزمني  $\tau$  بسبب تخالف التردد الأولي  $y(t, \tau)$ . أما طرحه فيعتبر موازياً لتوالف المذبذبات في الوقت  $t$ .

ويمكن البرهنة على أن الخطأ TIE الذي يجد تعريفاً له في (53.3) متمائل مع الفارق الثاني من  $x(t)$ :

$$(54.3) \quad \text{TIE}(t, \tau) = x(t + \tau) - x(t) - \Delta(\tau)\{x(t)\} = \Delta^{(2)}(\tau)\{x(t + \tau)\}$$

المستقر بالنسبة إلى كافة العمليات بقانون المقدرة الموجودة في النموذج المتعدد الحدود. وعلى ذلك، وبرغم عدم إمكانية التنبؤ بسلك الخطأ TIE المضبوط نظراً لطابعه العشوائي، فإنه بالإمكان حوسبة متوسط قيمته المربعة.

ويعادل متوسط القيمة المربعة للخطأ TIE متوسط القيمة المربعة للفارق الثاني من  $x(t)$  الذي يمكن التعبير عنه على أساس أنه وظيفة بسيطة لمغايرة آلان الكلاسيكية:

$$(55.3) \quad E\{\text{TIE}^2(t, \tau)\} = 2\tau^2\sigma_y^2(\tau)$$

ويمثل متوسط القيمة المربعة للفارق الثاني من  $x(t)$  في الواقع وظيفة البنية الثانية من  $x(t)$ . ويناقش القسم اللاحق المتعلق بمغايرات ميدانية أخرى وظائف البنية.

ولا تتضمن المعادلة (55.3) استعمال إجراءات التنبؤ المثلى - إذ إنها تقتصر على إجراء محدد. وإذا كان لميقاتية معينة ضوضاء FM بيضاء وكان التنبؤ الأمثل قيد الاستعمال، فإن الخطأ TIE تعطيه  $\tau\sigma_y(\tau)$ . وفي هذه الحالة يتطابق تقدير التردد الأمثل مع متوسط التردد من الماضي السحيق.

ويقوم [بارنبي، 1988] بتعميم الخطأ TIE حيث يتم تعريف متنبئ من الدرجة  $n$  من  $x(t)$  على أساس إعطاء وظيفة البنية من الدرجة  $n + 1$  لمتوسط القيمة المربعة للخطأ في التنبؤ. وإذا اقتصر الخطأ TIE مثلاً على تصحيح أثر تحالف التردد الأولي مثلما هو مذكور في (54.3)، حيث يكون المتنبئ من الدرجة 1 والخطأ في التنبؤ هو وظيفة البنية من الدرجة 2 أورده التعريف (55.3). وإذا لم يقتصر المتنبئ على تصحيح تحالف التردد الأولي بل كذلك تصحيح انسياق التردد، فيكون التنبؤ عندها من الدرجة 2 والخطأ في التنبؤ هو وظيفة البنية من الدرجة 3 وما إلى ذلك. وتعتبر نمذجة التنبؤ لسلا لم الوقت موضوعاً هاماً تناقشه الأدبيات بشكل مستفيض [تافيلو وآخرون، 1991؛ آلان، 1987].

### 5.3.2.3.3 المغايرة الزمنية

تُعرف المغايرة الزمنية  $\sigma_x^2(\tau)$  [آلان وآخرون، 1991] كما يلي:

$$(56.3) \quad \sigma_x^2(\tau) = \frac{1}{3} \tau^2 \text{ mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6} E\{\Delta^{(2)}(\tau)\{\bar{x}(t)\}\}^2,$$

حيث إن  $\bar{x}(t)$  هو متوسط الخطأ الزمني خلال فاصل زمني  $\tau$  ينتهي في الوقت  $t$ .

وتُستعمل المغايرة الزمنية  $\sigma_y^2(\tau)$  في الوقت الحاضر كميّار في صناعة الاتصالات من أجل مواصفات أداء الشبكات، إلخ. وهي نوع من مقدرّ متوسط القيمة المربعة للخطأ TIE مماثل للمقدرّ الذي يعرفه القسم السابق. ويمكن الحصول على المزيد من الخواص المفصلة للمغايرة الزمنية في [NIST، 1990].

### 6.3.2.3.3 قياسات أخرى لميدان التوقيت

وتناقش الأدبيات قياسات أخرى لميدان التوقيت: مثل وظائف البنية [لينساي (Lindsey) وآخرون، 1976؛ غرينهال، 1983]، ومغايرة هادامار (Hadamard) [روتمان (Rutman)، 1978]، ومغايرة التحرير المرتفع [روتمان، 1978]، إلخ.

وكما سبق الذكر آنفاً فيما يتعلق بمغايرة آلان، فإن مغايرات ميدان التوقيت الأساسية لا تزال على حالها: فالمغايرة تُعرف بكونها متوسط القيمة المربعة لعملية مستقرة يقوم بإنتاجها مشغّل خطّي يطبق على العملية غير المستقرة الأصلية لتردد التحرير المنخفض  $y(t)$  أو لعملية الطور  $x(t)$ .

ويتم تعريف وظيفة البنية من الدرجة  $n$  من العملية  $z(t)$  بشكل خاص بكونها متوسط القيمة المربعة للزيادة من الدرجة  $n$  من عملية معينة [لينساي وآخرون، 1976]:

$$(57.3) \quad D_z^{(n)}(t, \tau) = E\{(\Delta^{(n)}(\tau)\{z(t)\})^2\}$$

ولنفترض مثلاً وجود عملية ضوضاء التردد FM بالسير العشوائي. فتكون الكثافة الطيفية للمقدرة  $y(t)$  التردد فورييه لقانون المقدرة  $f$  مع الأس  $-2$  وتكون الكثافة الطيفية لمقدرة وظيفة التوقيت  $x(t)$  قانون المقدرة مع الأس  $-4$ . وكما تبينه المعادلة (32.3) تقوم كل عملية تطبيق لمشغّل التزايد

## الفصل 3

بالزيادة في الأس بمقدار  $2+$  على ترددات فورييه القريبة من الصفر. فيكون بالتالي التزايد الأول من  $y(t)$  مستقراً كما يكون التزايد الثاني من  $x(t)$  كذلك مستقراً. في حين تكون وظيفة البنية  $D_y^{(1)}(t, \tau)$  ووظيفة البنية  $D_x^{(2)}(t, \tau)$  مستقلة بالتالي عن  $t$  وتحتوي على مغايرات ميدان التوقيت أي متوسط القيم المربعة التي تعتمد على معلمة الفارق الزمني  $\tau$  مثل مغايرة آلان الكلاسيكية. وترتبط هذه الأخيرة بالفعل مباشرة بوظيفة البنية الثانية من  $x(t)$ :

$$(58.3) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2} D_x^{(2)}(\tau)$$

وهو ما يفسر النتيجة الواردة في (55.3).

## 7.3.2.3.3 تحليل متعدد المغايرات

يتعين اعتبار التحليل المتعدد المتغايرات كمقدّر PSD من  $y(t)$  أكثر من مجرد قياس مغايرة كلاسيكية. ونظراً لإمكانية نمذجة PSD من  $y(t)$  كمجموع لقوانين المقدرة (من ضوضاء التردد  $2-f$  إلى ضوضاء التردد  $2+f$ )، فإن الهدف من هذه الطريقة يتمثل في قياس كل سوية من سويات الضوضاء. ويقوم المبدأ على استعمال مغايرات متعددة خلال الإشارة ذاتها. ويتعين اختيار تلك المغايرات المختلفة من أجل الحصول على قياس دقيق لضوضاء التردد المنخفضة (مغايرة آلان، مغايرة بيسنوبو (Picinbono) بالإضافة إلى ضوضاء التردد العالية (مغايرة آلان المعدلة، المغايرة الزمنية). هذا، وقد يتم قياس عمليات الانسياق بواسطة هذه الطريقة.

ويتم تحديد المعلمات المتصلة (سويات الضوضاء ومعاملات الانسياق) بواسطة الطريقة الموزونة الأقل مربعات: ومعرفة استجابة كل مغايرة لكل نمط من أنماط الضوضاء (انظر الجدول 3.8 والجدول 3.9)، وبوزن كل قياس مغايرة بواسطة عكس فترتها للثقة، فإنه يتم احتساب سويات الضوضاء ومعاملات الانسياق كأكثر المعلمات احتمالاً بمعنى أقلها مربعات.

وتعتبر هذه الطريقة أكثر حساسية من قياس مغايرة وحيد إذ تكون دقة القياس جيدة على الأقل كجودة أكثر المغايرات دقة من مجموعة المغايرات. ويُحدّد اختيار المغايرة إذاً حساسية التحليل المتعدد المغايرات: أي أن أفضل مجموعة للمغايرات ستحتوي على مغايرات تم تصميمها خصيصاً لكل معلمة معينة. إلا أن ذلك الخيار قد يتم تكيفه مع كل حالة [فارنوتي (Vernotte) وآخرون، 1995].

أما التحسين الثاني الذي أدخل على هذه الطريقة فيتمثل في الدينامية. ويمكن تعريف هذه الأخيرة باعتبارها المدى الذي يمكن لسويات الضوضاء أو لمعاملات الانسياق أن تتغير ضمنه بدون إغراق غيرها أو الغرق بسببها. وتعتمد الدينامية على عدد ونمط المغايرات التي تم اختيارها، لكنها عادة ما تكون أكبر من دينامية كل مغايرة من مجموعة المغايرات.

وتتمثل أهم ميزة للتحليل المتعدد المغايرات في تحديد ميدان عدم التيقن خلال كل قياس من قياسات المعلمة. وتُقدر فترات الثقة انطلاقاً من تشتت نتائج المغايرة باستعمال تجزئة القيمة الوحيدة. وعلاوة على ذلك، بما أن تقييم الدقة يؤدي إلى تصاحب مُتجه خاص مع سوية ضوضاء أو معامل انسياق، فاحتساب الزاوية بين كل مُتجه خاص. ويعني وجود زاوية صغيرة بين مُتجهين خاصين أن المعلمات التي تتطابق مع تينك المُتجهين تؤدي إلى ذات الآثار التي تحدث خلال استجابات المغايرات. وفي هذه الوضعية، يمكن تعريف قابلية الانفصال بكونها استعداد مغايرة ما أو مجموعة من المغايرات للتمييز بين نوعين من الضوضاء. فيؤدي بالتالي تحديد الزوايا بين المُتجهات الخاصة المتطابقة مع المعلمات إلى تقدير كمي لقابلية الانفصال التابعة للتحليل المتعدد المغايرات كما يوفر معياراً لتقدير اعتمادية القياس. ولا يتم قياس إلا أنماط الضوضاء والسياق التي توجد في الإشارة. وللحصول على وصف شامل ونتائج القياسات الكاملة للتحليل المتعدد المغايرات انظر [فارنوتي وآخرون، 1993] و [والتر (Walter)، 1992].

## 4.2.3.3 مواطن الشرك

## 1.4.2.3.3 أثر الكشف عن التقاطع على الصفر

تُقدر قياسات ميدان التوقيت إما باستعمال عينات الطور أو عينات التردد المتأتية من عدّاد رقمي. ويكشف العدّاد عن تقاطعات الإشارة التي تحدث على الصفر والتي تقابل عادة مدوّنة الخفقان بين المذبذب OUT ومذبذب مرجعي.

ويتطلب قياس مذبذبات الإحكام عادة استعمال مكشاف التقاطع على الصفر المكرس بين الإشارة ودخل العدّاد.

### الفصل 3

ويكمن سبب ذلك في أنه إن لم يكن معدل كنس الإشارة في دخل العدّاد عالياً بالقدر اللازم فستساهم الضوضاء في دائرة قرح العدّاد في مغايرة آلان التي تم قياسها. ولاحظ المفارقة المتمثلة في أنه كلما كان وقت الاستبانة أطول كلما كان عرض نطاق دائرة القرح أعرض والاتساع RMS للضوضاء الإضافية أعرض في مرحلة قرح العدّاد.

ويجب أن يتم تكييف تصميم مكشاف التقاطع على الصفر المكرس مع خاصيات الإشارة المزمع قياسها (عرض نطاق الاتساع، وتردد مدونة الخفقان، إلخ). وتصبح ضوضاء دائرة القرح في العدّاد طفيفة إذا كانت عمليات الانتقال لدى خرج مكشاف التقاطع على الصفر سريعة بالقدر الكافي.

غير أن مساهمة الضوضاء آنذاك من قبل مكشاف التقاطع على الصفر ذاتها هي التي تحدّد أرضية الضوضاء لنظام القياس. وتكون الضوضاء الناجمة عن مكشاف التقاطع على الصفر ضوضاء إضافية عريضة النطاق. وتبدو بالتالي في شكل ضوضاء طور بيضاء محدودة النطاق في قياس مغايرة آلان وتتميز بواسطة السلوك  $\tau^{-1}$  من انحراف آلان  $\sigma_y(t)$ .

#### 2.4.2.3.3 أثر الوقت الميت

وكما سبق الذكر آنفاً، فإن مغايرة آلان لا يمكن تعريفها بما جاء في (35.3) في شكل عينات التردد إلا إذا انعدم الوقت الميت في تتابع القياسات.

وقد تمت دراسة الانحياز في قياسات مغايرة آلان التي ينتجها الوقت الميت بشكل مستفيض ويمكن الحصول على الجداول في أدبيات [بارنيس (Barnes) وآخرون، 1989، ليزاج (Lesage) وآخرون، 1979، NIST، 1990]. ولكن كما سبق الذكر في القسم الذي يعالج مغايرة آلان، يجعل تيسر عدّادات الوسم الزمني العصرية التي تستطيع تعيين  $x(t)$  والإمكانات الحديثة لنقل عدّاد الفاصل الزمني التقليدي إلى عدّاد وسم زمني بواسطة برامجيات ما بعد المعالجة وإشارة مرجعية "بسياس الوتد" [غرينهال، 1983] تجعل تفادي الوقت الميت في القياسات أمراً هيناً.

إلى جانب ذلك، يوازي تجميع عينات التردد المتجاورة والمقدّر متوسطها خلال الفاصل الزمني  $\tau_0$  الإحراز على عينة واحدة بمتوسط يقدر خلال الفاصل الزمني  $n\tau_0$  فقط لو غاب الوقت الميت في تتابع القياسات. وما ينتج تجميع العينات من انحياز في ظل حضور الوقت الميت يلقي تحليلاً له في [ليزاج، 1983]. غير أن الملاحظة ذاتها يتم تطبيقها كما في السابق: فالتقنيات الحديثة تجعل تفادي الوقت الميت أمراً هيناً.

#### 3.4.2.3.3 أثر عرض نطاق النظام

يكون لوظيفة نقل مغايرة آلان بالصحيح (37.3) قيمة الصفر مثل  $f^{-2}$  بالنسبة إلى  $f \leftarrow \infty$ . وكنيجة لذلك، لا يتقارب الصحيح بالنسبة إلى عملية تردد بقانون المقدرة البحتة  $y(t)$  بالأس  $\alpha \geq 1$  بموجات فورييه الديكامترية. ولاحظ أن ذلك لا يحدث إلا إذا كانت العملية  $y(t)$  عملية بقانون المقدرة البحتة، أي أن عرض نطاقها لا حدّ له.

أما عرض نطاق العملية  $y(t)$  في مذبذب حقيقي فهو محدود لأن الإشارة هي إشارة محدودة النطاق والراجح الفعلي للصحيح (37.3) هو عرض النطاق B من  $y(t)$ . لذلك يكون الصحيح محدوداً دائماً على جانب الموجة الديكامترية.

ويعتبر سلوك القطع بالموجة الديكامترية  $f^{-2}$  لوظيفة النقل بالنسبة إلى  $\alpha < 1$  كافياً في حدّ ذاته للحد من عرض النطاق وجعل الصحيح يقوم بالتقارب. أما مغايرة آلان فهي بالتالي مستقلة عن عرض نطاق عملية التردد  $y(t)$ .

ومن جهة أخرى، لا يعتبر سلوك القطع بالموجة الديكامترية  $f^{-2}$  للنواة بالنسبة إلى  $\alpha \geq 1$  كافياً بذاته للحد من عرض النطاق ولجعل الصحيح يقوم بالتقارب. فتكون مغايرة آلان بالتالي وظيفة حدود الصحيح العليا، أي وظيفة عرض النطاق B من  $y(t)$ .

وعادة ما تكون العمليات بقانون المقدرة ذات الحياة الحقيقية الموجودة في المذبذبات مرشحة بالتحريز المنخفض وجيدة النمذجة بواسطة السلوك بقانون المقدرة على ترددات فورييه العالية. أما بالنسبة إلى  $\alpha \geq 1$  إذاً، فإن مغايرة آلان ليست وظيفة عرض النطاق B فقط، بل وظيفة الشكل المحدد لمرشاح التحريز المنخفض المستعملة في الحدّ من عرض النطاق. وقد تم أخذ ذلك الأمر بعين الاعتبار في الجداول التي نشرت في أدبيات [NIST، 1990].

ولاحظ بالإضافة إلى ذلك أن عرض النطاق B كما يبدو في قياس مغايرة آلان يُحدّد عادة بواسطة عرض نطاق التحريز المنخفض لنظام القياس الذي يستعمل بعد إزالة التشكيل وليس بواسطة عرض نطاق إشارة مذبذب تمرير النطاق الأصلي.

### الفصل 3

وكون مغايرة آلان لعملية ضوضاء الطور البيضاء ليست فقط وظيفة لكثافة طيف مقدرة ضوضاء الطور البيضاء، بل كذلك وظيفة لعرض نطاق نظام القياس، فإن ذلك يعتبر مبعث ضعف لمغايرة آلان الكلاسيكية.

ومن جهة أخرى، فإن لوظيفة نقل مغايرة آلان المعدلة المتواصلة، كما تعرفها (46.3)، سلوك القطع بالموجة الديكامترية  $f^4$  بسبب وجود مشغّلين للمتوسط المتحرك التشلشلي في تعريفها. وفي هذه الحالة، تعتبر وظيفة النقل آنذاك كافية للحد من عرض النطاق لكافة العمليات بقانون المقدرة في النموذج المتعدد الحدود. فتكون مغايرة آلان المعدلة بالتالي مستقلة عن عرض النطاق لكافة العمليات بقانون المقدرة في النموذج المتعدد الحدود إن كانت الوضعية بالنسبة لنظرية الاعتيان قد تم الإيفاء بها.

أما إذا لم يكن الأمر كذلك، فإن آثار الانطواء تؤدي إلى اعتماد مغايرة آلان المعدلة على عرض النطاق في حالة ضوضاء الطور البيضاء. وأما بالنسبة إلى العمليات بقانون المقدرة الأخرى، بما في ذلك ريف الطور، فإن سلوك القطع بالموجة الديكامترية لوظيفة النقل المعرفة في (44.3) يعتبر كافياً للقيام بالتقارب.

#### 4.4.2.3.3 آثار البتر

ويتمركز جوهر كل من وظيفتي نقل مغايرة آلان الكلاسيكية والمعدلة حول تردد فورييه:

$$\frac{1}{2\tau}$$

وكتيجة لذلك، إذا حاول أحدهم حوسبة مغايرة آلان الكلاسيكية أو المعدلة لتقدير متوسط فترات صغيرة جداً، أي بالنسبة إلى:

$$\tau < \frac{1}{2B}$$

يؤدي ذلك إلى تمركز وظيفة نقل تمرير النطاق للمغايرة على موجة فورييه ديكامترية أعلى من عرض نطاق التحرير المنخفض التابع للإشارة  $y(t)$ .

فتمر مغايرة آلان الناجمة عن ذلك إلى الصفر بسرعة مع انخفاض  $\tau$ . وفي هذه المنطقة من البتر تعتمد المغايرة بقوة على شكل مرشاح التحرير المنخفض الذي يُستعمل للحد من عرض نطاق الإشارة كما تنحرف قيمة المغايرة باتجاه الأسفل.

ولاحظ أيضاً أنه في حالة مغايرة آلان المعدلة، إذا تم اعتيان الإشارة طبقاً لنظرية الاعتيان فإننا نتحصل على ما يلي:

$$\tau_0 < \frac{1}{2B}$$

فيحدث البتر إذاً بالنسبة لقيم صغيرة من  $n$  ولا يختفي إلا بالنسبة إلى  $1 \gg n$  بما أن  $\tau_0 \tau = n$  [بارني، 1987].

#### 5.2.3.3 خوارزميات

##### 1.5.2.3.3 تقدير متوسط التردد بواسطة اعتيان الطور

يمكن تعريف كل من مغايرة آلان الكلاسيكية والمعدلة إما حسب عينات للتردد أو عينات للطور.

ونظراً لكون  $y(t)$  مجرد اشتقاق من  $x(t)$ ، فإنه من السهل جداً تحويل أي تعريف يستعمل كمية واحدة إلى تعريف مكافئ بمصطلحات كمية أخرى.

وتعتبر الهويتان التاليتان مفيدتين للغاية في عملية احتساب مغايرات ميدان التوقيت:

$$(59.3) \quad ma(\tau)\{y(t)\} = \frac{1}{\tau} \Delta(\tau)\{x(t)\}$$



$$(60.3) \quad \Delta(\tau)\{y(t)\} = \frac{1}{\tau} \Delta^{(2)}(\tau)\{x(t)\}$$

ولنفترض أن وظيفة الطور/التوقيت  $x(t)$  قد تم تعيينها مع فترة اعتيان  $\tau$ ، عندها تقوم سلسلة التوقيت

$$x_1, x_2, x_3 \dots x_n$$

بتمكيننا من حوسبة سلسلات عينات التردد المقدر متوسطها خلال  $\tau$  باستعمال الاختلاف الأول من العينات  $x$ :

$$y_1, y_2, y_3 \dots$$

حيث إن

$$(61.3) \quad y_n = \frac{1}{\tau} (x_n - x_{n-1})$$

ويؤدي الاختلاف الثاني من  $x(t)$  إلى الاختلاف الأول للتردد الضروري بالنسبة إلى حوسبة مغايرة آلان.

$$y_n \Delta y_3 \dots \Delta y_2, \Delta y_1, \Delta$$

حيث إن

$$(62.3) \quad \Delta y_n = y_n - y_{n-1} = \frac{1}{\tau} (x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2})$$

وينتج التقدير المباشر لمتوسط التردد في عدّاد رقمي بالضرورة، من وجهة نظر العداد، وقتاً ميثاً إذ يتعين على العدّاد بعد تسليم العينة الانتظار لمدة فترة على الأقل من الإشارة التي تنتظر التقاطع على الصفر القادم قبل أن يبدأ العد القادم.

ومن جهة أخرى فإذا تم تعيين وظيفة خطأ التوقيت  $x(t)$ ، فإن النتائج السابقة تبين أن عينات التردد المقدر متوسطها خلال  $\tau$  بدون وقت ميت يمكن حوسبتها بسهولة، وأن القيمة  $\tau$  يمكن انتقاؤها في البرمجيات وهو لا يتقيد إلا بواسطة  $\tau = n\tau_0$ ، حيث تكون  $n$  صحيحاً.

أما في التطبيق، فإن وظيفة الخطأ التوقيت  $x(t)$  يمكن تعيينها بواسطة الوسم الزمني للتقاطعات على الصفر للإشارة التي تستعمل عدّاد "الوسم الزمني". وإذا لم يكن عدّاد الوسم الزمني متيسراً مع ذلك، فقد نشر [غرينهال، 1989] خوارزمية تسمى بخوارزمية "سياج الوند" لحوسبة العينات مباشرة من  $x(t)$  باستعمال عدّاد تقليدي للفواصل الزمنية.

### 2.5.2.3.3 حوسبة مغايرة آلان الكلاسيكية

يمكن تقدير مغايرة آلان الكلاسيكية انطلاقاً من عينات  $N$  المتتابعة من  $x(t)$ ، مع فاصل اعتيان زمني  $\tau_0$ ، وذلك باستعمال الصيغة التالية:

$$(63.3) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2n+1)} \sum_{i=0}^{N-2n} (x_{k-i} - 2x_{k-i-n} + x_{k-i-2n})^2, \quad \text{where } \tau = n\tau_0$$

وهنا يتعلق الأمر بتقدير "متراكب" خلال عينات  $N$  من (35.3) التي تتم حوسبتها باستعمال التحويل الموجود في (61.3). وتعتبر هذه الصيغة صيغة سببية وهي بالتالي قابلة للاستعمال في عمليات الاحتمال في الوقت الفعلي. ولنفتراض أن  $x_k$  هي آخر عينة مكتسبة، وتعرف العينة الحالية، فإن الصيغة (63.3) لا تتضمن إلا احتساب العينات السابقة.

وقد تم تحديد عدم التيقن من متوسط القيمة المربعة الحقيقية الناجم عن احتساب التقدير انطلاقاً من عدد محدد من العينات في كل من [ليزاج وآخرون، 1973] و [ليزاج وآخرون، 1976]. كما توجد نتائج كل من ليزاج وأودوان ملخصة في [آلان وآخرون، 1988] و [IEEE، 1988].

ولكن لاحظ أن السبب الذي من أجله يتم احتساب المغايرة انطلاقاً من عينات متقطعة هو سبب ثانوي ناجم عن استعمال العدّاد الرقمي لتجميع المعطيات. ويمكن تعريف مغايرة آلان عموماً كمتوسط للقيمة المربعة للعملية المتواصلة  $\Delta(\tau)\{y(t, \tau)\}$  ويمكن تقديرها أيضاً بواسطة

### الفصل 3

احتساب متوسط القيمة المربعة للعملية المتواصلة التي تمت ملاحظتها أثناء فاصل زمني للملاحظة المحددة. ويُعالج عدم التيقن من تقدير مغايرة آلان انطلاقاً من متوسط القيمة المربعة للعملية  $\Delta(\tau)\{y(t, \tau)\}$  المحتسب خلال فاصل زمني محدد في [غرينهال، 1983]. كما يُعالج أثر اعتياني العملية المتواصلة  $\Delta(\tau)\{y(t, \tau)\}$  بالنسبة إلى تقدير مغايرة آلان في [والتار، 1994]. ويؤدي ذلك إلى تحسين الثقة باتجاه عملية التقدير.

كما أن للمقدّر (63.3) أيضاً الميزة التي بموجبها لا يتجاوز عدد المسجلات لكل قيمة من  $\tau$  5 مسجلات مطلوبة في الحاسوب من أجل تحيين مغايرة آلان بشكل متواصل (انظر الجدول 3.3).

#### الجدول 3.3

##### توزيع المسجلات لحوسبة مغايرة آلان الكلاسيكية

مسجل 1	$X_i$
مسجل 2	$X_{i+n}$
مسجل 3	$X_{i+2n}$
مسجل 4	مجموع المغايرات
مسجل 5	عدد المغايرات

لنفترض أن فترة الاعتيان من  $x(t)$  هي  $\tau_0$ . يجب حجز 5 مسجلات لكل قيمة من  $\tau = n \tau_0$ ، التي نريد حوسبة مغايرة آلان من أجلها.

ويتم اختيار عينة من دفع العينات  $x(t)$  القادم كل  $\tau_0$  من العدّاد بعد كل  $n$  من العينات. فتكون المباعدة بين العينات إذاً  $\tau = n \tau_0$ . وانطلاقاً من ثلاث قيم مباعد بينها على حدة  $\tau_0$ ،  $n$ ، تتم حوسبة الاختلاف الثاني المربع. في حين يتم تحيين المسجل 4 والمسجل 5. ويعوض محتوى المسجل 1 بالمسجل  $X_i$  التالي المباعد بالمدة  $\tau_0$ ، إلخ، بالنسبة إلى المسجل 2 و 3، في حين يعاد تحيين المسجل 4 والمسجل 5 من جديد.

ولاحظ في نهاية الأمر أنه عادة ما يتم مواصفة الانحراف المعياري في التطبيق، أي الجذر التربيعي للمغايرة وليس المغايرة ذاتها. وتمثل النتيجة العملية لذلك في كون المنحدرات المرتبطة بالانحراف المعياري على الرسم البياني اللوغاريتمي هي أنصاف المنحدرات المرتبطة بالمغايرة.

#### 3.5.2.3.3 حوسبة مغايرة آلان المعدلة

تبدو حمولة الحوسبة المرتبطة بمغايرة آلان المعدلة للوهلة الأولى أكبر بكثير، خصوصاً بالنسبة إلى قيم الكبر من  $n$  بسبب المحصلات التي أقيمت خلال  $n$  في التعريف (39.3). ولكن حمولة الحوسبة في الواقع هي بالأساس ذات حمولة المغايرة الكلاسيكية إلا في ما يتعلق بمسجل زائد واحد يتوجب حجه.

ويمكن تعريف التقدير المتراكب لعينة من العينات  $N$  والتابع لمغايرة آلان المعدلة انطلاقاً من صيغتها في (52.3) كما يلي:

$$(64.3) \quad \text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \frac{1}{(n^4 \tau_0^2)} \frac{1}{N-3n+1} \sum_{i=1}^{N-3n+1} (w_{k-i} - 3w_{k-i-n} + 3w_{k-i-2n} - w_{k-i-3n})^2$$

حيث متوسط التوقيت  $\tau$  هو  $n$  من المرات من فاصل الاعتيان الزمني الأوّلي  $\tau_0$ .

وتبرهن هذه النتيجة الأخيرة على أنه لا يتجاوز عدد المسجلات بالنسبة لكل قيمة من  $\tau$  6 مسجلات مطلوبة في الحاسوب من أجل تحيين مغايرة آلان المعدلة بشكل متواصل (انظر الجدول 3.4).

ويكون من المطلوب توفير مسجل واحد مشترك لتخزين  $w_k$ ، أي مجموع كافة  $x_k$  السابقة المتأتية من العدّاد كما يتم تعريفها بواسطة (50.3).

توزيع المسجلات لحوسبة مغايرة آلان المعدلة

مسجل 1	$w_i$
مسجل 2	$w_{i+n}$
مسجل 3	$w_{i+2n}$
مسجل 4	$w_{i+3n}$
مسجل 5	مجموع المغايرات
مسجل 6	عدد المغايرات

ويتم اختيار عينة بعد كل  $n$  العينات من دفع العينات  $w_k$  الحين في كل فترة  $\tau_0$ . وتكون المباعدة بين العينات مثل التي سبقتها  $\tau = n\tau_0$ . ويُتبع ذات الإجراء الذي اتبع في حوسبة (63.3) ولا يُغيّر إلا باستعمال الاختلاف الثالث التربيعي [غرينهال، 1992].

ونرى كخلاصة لذلك أنه بتعريف السلسلة الزمنية  $w_i$ ، والتي هي ببساطة مجموع كافة  $x_k$  السابقة، فإن مجهود الحوسبة الرامي إلى الوصول إلى مغايرة آلان المعدلة هو أساساً ذات المجهود الذي يبذل للحصول على مغايرة آلان الكلاسيكية. ويوفر NIST البرمجيات اللازمة لحوسبة تلك المغايرات.

4.5.2.3.3 خلاصة

يورد الجدول 3.5 والجدول 3.6، لأغراض الحوسبة، صيغاً متناظرة لتقدير مغايرات آلان الكلاسيكية والمعدلة وذلك إما على أساس عينات التردد أو عينات الطور الأولية. كما ترد الصيغ الطيفية أيضاً إما على أساس الكثافات الطيفية لمقدرة ضوضاء الطور أو ضوضاء التردد.

صيغ متناظرة لحوسبة مغايرة آلان الكلاسيكية

$\sigma_y^2(t) = 2 \int_0^{\infty} S_{yy}^+(f) \frac{\sin^4(\pi f t)}{(\pi f t)^2} df$
$\sigma_y^2(t) = \frac{2}{v_0^2} \int_0^{\infty} S_{\phi\phi}^+(f) \frac{f^2 \sin^4(\pi f t)}{(\pi f t)^2} df$
$\sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \frac{1}{(n^4 \tau_0^2)} \frac{1}{(N-2n+1)} \sum_{i=0}^{N-2n} (x_{k-i} - 2x_{k-i-n} + x_{k-i-2n})^2$
$\sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \frac{1}{(N-2n+1)} \sum_{i=0}^{N-2n} \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y_{k-i-j} - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y_{k-i-j-n} \right]^2$

صيغ متناظرة لحوسبة مغايرة آلان المعدلة

$\text{mod } \sigma_y^2(n, \tau) = 2 \int_0^{\infty} S_{yy}^+(f) \frac{\sin^6(\pi f \tau)}{(n\pi f \tau)^2 \sin^2\left(\frac{\pi f \tau}{n}\right)}$
$\text{mod } \sigma_y^2(n, \tau) = \frac{2}{v_0^2} \int_0^{\infty} S_{\phi\phi}^+(f) \frac{f^2 \sin^6(\pi f \tau)}{(n\pi f \tau)^2 \sin^2\left(\frac{\pi f \tau}{n}\right)}$
$\text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \frac{1}{(n^4 \tau_0^2)} \frac{1}{(N-3n+1)} \sum_{i=0}^{N-3n} (w_{k-i} - 3w_{k-i-n} + 3w_{k-i-2n} - w_{k-i-3n})^2$
$\text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \frac{1}{(N-3n+1)} \sum_{i=0}^{N-3n} \left[ \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} \left( \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y_{k-i-j-l} - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y_{k-i-j-l-n} \right) \right]^2$

و تُفسَّر العلاقة  $S_{yy}^+ = \frac{f^2}{v_0^2} S_{\phi\phi}^+$  المستعملة في عملية التحويل بكون  $y(t)$  هو ببساطة الاشتقاق من  $x(t)$ .

تُشتق الصيغ الواردة في الجدول 3.5 والجدول 3.6 من (37.3) و (44.3) و (57.3) و (58.3). وهي تخضع لنفس التقييدات والتعريفات. وبرغم إمكانية تقدير المغايرات انطلاقاً من عينات التردد الأولية التي يُقدَّر متوسطها بدون الوقت الميت خلال  $\tau_0$ ، فلا بد من ملاحظة أن تقدير المغايرات باستعمال عينات الطور يتطلب موارد حاسوبية أقل كلفة مثلما تولى نص هذا القسم تفسيرها.

### 6.2.3.3 تطبيقات

لقد تم تقديم مغايرة آلان الكلاسيكية في الأصل كوسيلة لتمييز مصادر التردد المحكمة في وقت لم يكن فيه التحليل الطيفي لترددات فورييه المنخفضة جداً أمراً ممكناً. واليوم أصبح اعتيان  $x(t)$  بمعدل اعتيان أعلى من معدل نيكويست وحوسبة الكثافة الطيفية للمقدرة سواء من  $x(t)$  أو من  $y(t)$  حوسبة رقمية انطلاقاً من العينات ممكناً من الناحية التقنية على كافة ترددات فورييه. وبالوصول على الكثافة الطيفية للمقدرة يصبح من الممكن تعرف هوية عمليات الضوضاء وحوسبة كل نوع من أنواع مغايرات ميدان التوقيت.

ورغم ذلك، فإن مغايرات ميدان التوقيت لا تزال تعتبر أدوات مفيدة لتمييز المذبذبات وتعرف هوية عمليات الضوضاء. ومن الأسباب التي تفسَّر ذلك نذكر مدة الاكتساب والمعالجة المطلوبة من أجل درجة معينة من الثقة. هذا، وبالإمكان تحيين مغايرات ميدان التوقيت بشكل متواصل كلما تم الحصول على معطيات جديدة. أما من جهة أخرى، فإن التحليل الطيفي يتطلب اعتيان شرائح عديد من المعطيات، ومدة كل شريحة مساوية لعكس ما تتطلبه الاستبانة، وذلك قبل الحصول على تقدير دقيق للكثافة الطيفية للمقدرة.

ومن الأسباب الأخرى، هو أن معظم أنظمة القياس العملية تقوم بتعيين  $y(t)$  أو  $x(t)$  بدون احترام نظرية الاعتيان. وفي هذه الحالة، سيتقوض التحليل الطيفي للمعطيات بانطواء الطيف بينما لا تزال مغايرة آلان الكلاسيكية على أهميتها.

وتكون مغايرة آلان المعدلة متفوقة على مغايرة آلان الكلاسيكية، بمدف تعرف هوية عمليات الضوضاء التي يعرفها النموذج المتعدد الحدود، وذلك لأنها تؤدي إلى منحدرات مختلفة لكل نموذج من نماذج عملية الضوضاء المفيدة. ويتعين مقارنتها في هذا المجال بمغايرة آلان الكلاسيكية التي تؤدي إلى التبعية ذاتها إلى  $\tau^{-2}$  بالنسبة إلى كل من الضوضاء PM البيضاء والضوضاء PM للرفيف. هذا، وشريطة احترام وضعية نظرية الاعتيان، فإن مغايرة آلان المعدلة تكون مستقلة عن عرض نطاق القياس B بالنسبة لكافة العمليات بقانون المقدرة بينما تكون مغايرة آلان الكلاسيكية وظيفة لعرض النطاق B بالنسبة لكل من الضوضاء PM البيضاء والضوضاء PM للرفيف. أما في حالة الضوضاء PM للرفيف الخاصة، فتكون مغايرة آلان المعدلة مستقلة عن عرض نطاق النظام حتى وإن لم يتم احترام نظرية الاعتيان.

### 7.2.3.3 تحويل بين ميدان التوقيت وميدان التردد

يبين الجدول 3.7 التطابق بين المنحدرات اللوغارتمية المرتبطة بقياسات الميدان الطيفي وميدان التوقيت للعمليات بقانون المقدرة.

الجدول 3.7

تطابق المنحدرات اللوغارتمية بين الميدان الطيفي وميدان التوقيت لعمليات الضوضاء بقانون المقدرة

منحدر الرسم البياني اللوغارتمية				
ميدان التوقيت		ميدان طيفي		
$\sigma_y^2(\tau) \text{ mod}$	$\sigma_y^2(\tau)$	$S_{\phi\phi}^+(f)$	$S_{yy}^+(f)$	
m'	m	a-2 = b	a	منحدر
1	1	4-	2-	FM بالسير العشوائي
0	0	3-	1-	FM للرفيف
1-	1-	2-	0	FM البيضاء
2-	2-	1-	1	PM للرفيف
3-	2-	0	2	PM البيضاء

وكما سبق الذكر آنفاً، فإن مغايرة آلان المعدلة تؤدي إلى منحدرات مختلفة لمختلف عمليات الضوضاء. وتسهل هذه الخاصية تعرف هوية العمليات. وهو ما يتعين مقارنته مع مغايرة آلان الكلاسيكية التي تؤدي إلى ذات المنحدر  $2-\tau$  لكل من الضوضاء PM البيضاء والضوضاء PM للرفيف.

أما من جهة أخرى، فإن مغايرة آلان الكلاسيكية هي وظيفة لعرض النطاق B بالنسبة إلى الضوضاء PM البيضاء والضوضاء PM للرفيف. وقد تم التعرض لأسباب هذه التبعية فيما سبق. وكننتيجة لذلك تسمح مغايرة آلان بالنسبة إلى عملية الضوضاء PM البيضاء بتحديد متوسط القيمة المربعة  $B_{N0}$  من العملية في حين أنها لا تسمح بتحديد الكثافة الطيفية  $N_0$  ما لم تتم معايرة عرض نطاق النظام كما ينبغي. ومن جهة أخرى، تكون مغايرة آلان مستقلة عن عرض نطاق القياس B بالنسبة لكافة العمليات بقانون المقدرة، وذلك شريطة احترام نظرية الاعتيان. وتُكتب مغايرة آلان المعدلة التي تم قياسها في إطار تلك الوضعية في شكل "cmod" في الجدول 3.8 ويتعين استعمال المعاملات  $A_c$  إلى  $E_c$  من أجل القيام بالتحويل (انظر الجدول 3.9).

الجدول 3.8

عوامل التحويل لنقل العمليات بقانون المقدرة

$c \text{ mod } \sigma_y^2(\tau)$	$\text{mod } \sigma_y^2(\tau)$	$\sigma_y^2(\tau)$	$S_{yy}^+(f)$	
$A_c h_{-2} t$	$A_m h_{-2} t$	$A h_{-2} t$	$h_{-2} f^{-2}$	FM بالسير العشوائي
$B_c h_{-1}$	$B_m h_{-1}$	$B h_{-1}$	$h_{-1} f^{-1}$	FM للرفيف
$C_c h_0 t^{-1}$	$C_m h_0 t^{-1}$	$C h_0 t^{-1}$	$h_0$	FM البيضاء
$D_c h_1 t^{-2}$	$D_m h_1 t^{-2}$	$D h_1 t^{-2}$	$h_1 f$	PM للرفيف
$E_c h_2 t^{-3}$	$E_m h_2 t^{-3}$	$E h_2 t^{-2}$	$h_2 f^2$	PM البيضاء

## معاملات يتعين استعمالها في الجدول 3.8

$A = \frac{2}{3}\pi^2$	$A_m = A_c$	$A_c = \frac{11}{20}\pi^2$
$B = 2 \ln(2)$	$B_m = B_c$	$B_c = \frac{1}{8}(27 \ln(3) - 32 \ln(2))$
$C = \frac{1}{2}$	$C_m = C_c$	$C_c = \frac{1}{4}$
$D = \frac{1.038 + 3 \ln(2\pi B\tau)}{4\pi^2}$	$D_m = \begin{cases} D_{\text{small } n} \\ D_{\text{large } n} \end{cases}$	$D_c = \frac{3}{8\pi^2}(8 \ln(2) = 3 \ln(3))$
$E = \frac{3B}{4\pi^2}$	$E_m = E\tau_o$	$E_c = \frac{1}{8\pi^2}$

يحدث انطواء الطيف في حالة قياس مغايرة آلان المعدلة بدون الإيفاء بشروط نظرية الاعتيان. وتُكتب المغايرة المعدلة التي قيست في تلك الوضعية في شكل "mod" في الجدول 3.8 ويتعين استعمال المعاملات  $A_m$  إلى  $E_m$  للتحويل (انظر الجدول 3.9). وخلافاً لكل المعاملات الأخرى الواردة في الجدول فإن تلك المعاملات ليست بالقيم التحليلية الصحيحة. إذ تعتمد مغايرة آلان المعدلة الصحيحة على فترة الاعتيان  $\tau_0$  وعلى عدد العينات  $n$  من خلال المعادلة (44.3). والمعاملات المبينة هي قيم تقاربية تعتمد على الافتراض بأن أثر انطواء الطيف بالنسبة إلى FM بالسير العشوائي و FM للريف و FM البيضاء طفيف وأن المغايرة المعدلة المتقطعة مساوية للمغايرة المتواصلة التي أوردتها الصيغة (46.3). أما بالنسبة إلى PM للريف فقد تم التحقق في [بارني، 1988] بالتكامل الرقمي من أن المغايرة المعدلة المتقطعة تسلك سلوك المغايرة الكلاسيكية بالنسبة إلى القيم الصغرى من  $n$  وسلوك المغايرة المعدلة المتواصلة بالنسبة إلى القيم الكبرى من  $n$ . وفي حالة FM البيضاء فقد تم التحقق في [بارني، 1987] بالتكامل الرقمي من أن المغايرة المعدلة المتقطعة مساوية لمغايرة آلان الكلاسيكية بالنسبة إلى  $n = 1$  وهي تتبع منحدر -3 لمغايرة آلان المعدلة المتواصلة حتى ولو كان ذلك بالنسبة إلى قيم صغيرة من  $n$ . وتتم حوسبة عوامل تحويل العمليات بقانون المقدرة ذات الأس غير الصحيح نظرياً في [والتار، 1994] كما تؤكد تلك العوامل جدوى المعاملات الموجودة هنا بالنسبة إلى الأس الصحيح تأكيداً تاماً.

وتعتبر عملية النقل من ميدان التردد إلى ميدان التوقيت عملية صحيحة. غير أن العملية العكسية التي تتمثل في المرور من ميدان التوقيت إلى ميدان التردد ليست إلا عملية تقريبية وذلك ما لم يقتصر الأمر على عملية واحدة بقانون المقدرة [فارنوتي، 1993].

## 3.3.3 الأوضاع البيئية

يمكن استعمال القياسات السابقة لتميز أوضاع البيئة وبالتالي أثر المعلمات البيئية الخاصة لمذبذب ما. وقد انتشرت تطبيقات المذبذبات الدقيقة في السنوات الأخيرة انتشاراً سريعاً فتعاضت أهمية مسألة تمييز التأثيرات البيئية. وتبحث الكتابات [أودوان وآخرون، 1990؛ ماتيسون (Mattison) وآخرون، 1976؛ بابوليس، 1983؛ ووالز، 1990] في فيزياء التأثيرات البيئية على معايير التردد. كما تبحث كتابات [بيارد (Beard) وآخرون، 1989؛ بريكرون (Breakiron)، 1989؛ براندال (Brendel) وآخرون، 1989؛ دراغونيت (Dragonette) وآخرون، 1991؛ غانيوبان، 1989؛ غارفاي (Garvey)، 1989؛ سيدنور، 1989؛ والز، 1990 و IEEE، 1994] مسألة تمييز الحساسيات إزاء البيئة ومواصفاتها.

## 4.3 جسر باتجاه الفصل التالي

إن معظم الصيغ والرميزات التي استعملت في هذا الفصل قد تم اقتراضها من حقل الهندسة الكهربائية ونظرية الاتصالات. ولذلك فهذا الفصل الحالي لا يتبع الاصطلاحات المستعملة عادة من قبل مختصي التوقيت والتردد الذين قاموا بوضع المفاهيم والرميزات الخاصة بهم. ويعتبر هذا القسم جسراً من الرميزات المستعملة في الفصل الحالي ورميزات IEEE و ITU-R المعيارية المقترضة من صيغ الدراسات المختصة في التوقيت والتردد والتي تستعمل في الفصول الأخرى.

### الفصل 3

ففي الترميز المعياري للتوقيت والتردد مثلاً يُرمز إلى دالة الترابط الذاتي من  $\phi(t)$  بالشكل  $R_\phi(\tau)$  وليس هناك أي تمييز بين الكثافات الطيفية للمقدرة الأحادية الجانب والثنائية الجانب. فكلتاها يُرمز إليها بالشكل  $S_\phi(f)$ .

وعوضاً عن (3.3) و (3.5)، فإن النموذج المعياري لضوضاء المذبذب يستعمل الإسقاط المباشر لنموذج المطوار على المحور الحقيقي، أي يستعمل الإشارة الحقيقية عوضاً عن الإشارة التحليلية:

$$u(t) = U_0(1 + \varepsilon(t))\sin(2\pi\nu_0 t + \phi(t)) \quad (59.3)$$

حيث إن  $u(t)$  هو توتر خرج المذبذب و  $U_0$  هو الاتساع الاسمي.

## 5.3 تذييل: العمليات العشوائية

### 1.5.3 مقدمة

تتكون كميات الفائدة في ميدان تمييز استقرار التردد أساساً من العمليات العشوائية بالنطاق المحدود للتحرير المنخفض وتحرير النطاق مثل  $x(t)$  و  $y(t)$  و  $n(t)$  المعرفة آنفاً.

### 2.5.3 تعريف العملية العشوائية

تتمثل العملية العشوائية  $x(t)$  في المجموعة الإحصائية  $\{\Omega\}$  لجميع وظائف العينات الممكنة  $x(\omega, t)$  التي تتقاسم الخاصيات الإحصائية التي تعرف العملية العشوائية  $x(t)$ . فالعملية العشوائية هي بالنسبة إلى وظيفة العينات ما يمثله المتغير العشوائي بالنسبة إلى عدد عشوائي. ويمكن الحصول في [فوزنكراف وآخرون، 1965] على مقدمة ممتازة للعمليات العشوائية.

والعمليات  $\varepsilon(t)$  و  $\phi(t)$  و  $x(t)$  و  $y(t)$  و  $n(t)$  إلخ، التي عرفها القسم السابق تمثل كلها عمليات عشوائية.

### 3.5.3 عمليات عشوائية مستقرة

تكون عملية عشوائية ما عملية مستقرة إذا كانت خاصياتها الإحصائية غير متغيرة مع نقل التوقيت ومتوسط منته. ويعني ذلك أيضاً أن خاصياتها الإحصائية مستقلة عن أصل التوقيت. وخاصيات العملية المستقرة الإحصائية بالمعنى العريض للكلمة يكون لها متوسط منته، غير أنها متغيرة مع نقل التوقيت.

### 4.5.3 عمليات عشوائية غير مستقرة

وتكون عملية عشوائية ما غير مستقرة إذا كانت خاصياتها الإحصائية وظيفية للتوقيت. إذ تحتوي ضوضاء الطور  $\phi(t)$  وضوضاء التردد  $y(t)$  للمذبذبات عموماً مكونات غير مستقرة. فعملية ضوضاء الطور مثلاً  $\phi(t)$  عادة مكونات الرفيف أو مكونات السير العشوائي التي تجعل متوسط قيمتها ومتوسط قيمتها المربعة غير قابلة للتعريف. وتقتصر إمكانية التعريف على المتوسط المحلي الذي يمثله وظيفة عشوائية للتوقيت.

وبالتحديد فإن خاصية عدم الاستقرار لعمليات ضوضاء المذبذب هي التي منعت استعمال الطرائق الإحصائية الكلاسيكية للقيام بعملية تمييزها في ميدان التوقيت وهي التي أدت إلى تطوير طرائق محددة مثل مغايرة آلان. وخلاصة القول هو أنه لا بد من التذكر أن خاصية الاستقرار أو عدمها تمثل خاصية للنماذج وليست للمذبذبات.

### 5.5.3 دالة الترابط الذاتي

يتم تعريف دالة الترابط الذاتي لعملية عشوائية مستقرة حقيقية  $x(t)$  كما يلي:

$$R_{xx}(\tau) = E\{x(t)x(t+\tau)\} \quad (60.3)$$

حيث إن  $E\{\}$  هو مشغل المأمول الإحصائي. وفي حالة عملية غير مستقرة حقيقية أو عملية مستقرة بالمعنى العريض للكلمة، تكون دالة الترابط الذاتي وظيفية للتوقيت  $t$  أيضاً وليست وظيفية للفارق الزمني  $\tau$  فحسب.

### 6.5.3 كثافة طيفية للمقدرة

يتم تعريف الكثافة الطيفية للمقدرة الثنائية الجانب للعملية  $x(t)$  كتحويل فورييه لوظيفتها للترابط الذاتي.

$$(61.3) \quad S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau = 2 \int_0^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau$$

والكثافة الطيفية للمقدرة الأحادية الجانب  $S_{xx}^+(f)$  هي الكثافة الطيفية للمقدرة الثنائية الجانب المطوية على الأصل بشكل لا يمكن من استعمال إلا ترددات فورييه الإيجابية.

$$(62.3) \quad S_{xx}^+(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & \text{for } f \geq 0 \\ 0 & \text{for } f < 0 \end{cases}$$

### 7.5.3 ترشيح خطي للعمليات العشوائية

عندما يتم ترشيح عملية عشوائية  $z(t)$ ، كقاعدة، بواسطة مشغّل خطي ذي الاستجابة النبضية  $h(t)$ ، فإن الخرج  $w(t)$  يكون نتيجة تلفيف الاستجابة النبضية  $h(t)$  مع الدخل  $z(t)$ . ويمكن البرهنة على أن الكثافة الطيفية للمقدرة التابعة للخرج  $w(t)$  قد وردت في [فوزنكرافت وآخرون، 1965]

$$(A.4.3) \quad S_{ww}^+(f) = S_{xx}^+(f) |H(f)|^2$$

حيث إن  $|H(f)|^2$  هي الوحدة المربعة لوظيفة النقل  $H(f)$  التي تم تعريفها كتحويل فورييه للاستجابة النبضية  $h(t)$  التابعة للمشغّل الخطي.



ALLAN, D.W., [1966] "Statistics of Atomic Frequency Standards," Proceedings of the IEEE, vol. 54, February 1966, pp. 221-230.

ALLAN, D.W., [1987] "Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. UFFC-34, no. 6, November 1987, pp.647-654.

ALLAN, D.W., BARNES, J.A., [1981] "A Modified 'Allan Variance' with Increased Oscillator Characterization Ability," Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium, Ft. Monmouth NJ, May 1981, pp. 470-475.

ALLAN, D.W., HELWIG, H., KARTASCHOFF, P., VANIER, J., VIG, J., WINKLER, G.M.R., YANNONI, N.F.,[1988] "Standard Terminology for Fundamental Frequency and Time Metrology," Proceedings of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control, 1988, pp. 419-425.

ALLAN, D.W., WEISS, M.A., JESPERSEN, J.L., [1991] "A Frequency-Domain View of Time-Domain Characterization of Clocks and Time and Frequency Distribution Systems," Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control, May 1991, pp. 667-678.

AUDOIN, C., DIMARCQ, N., GIORDANO, V., VIENNET, J., [1990] "Physical Origin of the Frequency Shifts in Cesium Beam Frequency Standards: related Environmental Sensitivities," Proceedings of the 22nd PTTI Meeting, Vienna (Virginia), December 1990, pp. 419-440.

BARNES, J.A., ALLAN, D.W., [1989] "Variances Based on Data with Dead-Time Between the Measurements: Theory and Tables," Technical Note 1318, National Bureau of Standards, 1989.

BEARD, R., DANZY, F., POWERS, E., WHITE, J., [1989] "Test and Evaluation Methods at the NRL Clock Test Facility," Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, May-June 1989, pp. 275-288.

BEDROSIAN E., [1962] "The Analytic Signal Representation of Modulated Waveforms," Proceedings IRE, vol. 50, October 1962, pp. 2071-2076.

BERNIER, L.G., [1987] "Theoretical Analysis of the Modified Allan Variance," Proceedings of the 41st Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, May 1987, pp. 116-121.

BERNIER, L.G., [1988] "Linear Prediction of the Non-Stationary Clock Error Function," Proceedings of the 2nd European Time and Frequency Forum, Neuchâtel CH, March 1988, pp. 125-137.

BERNIER L.G., GARDIOL, F.E., [1985] "The Analytic Signal Representation of Oscillators with Application to Frequency Stability Analysis," Proceedings of the 39th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, May 1985, pp.127-131.

BLACHMAN, N.M., MCALPINE, G.A., [1969] "The Spectrum of a High-Index FM Waveform: Woodward's Theorem Revisited," IEEE Transactions on Communication Technology, vol. COM-17, no. 2, April 1969, pp.201-208.

BREAKIRON, L., [1989] "Measurement of the Frequency Response of Cesium Clocks to Temperature Fluctuations," Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, May-June 1989, pp. 296-297.

BRENDEL, R., EL HASSANI, C., BRUNET, M., ROBERT, E.,[1989] "Influence of Magnetic Field on Quartz Crystal Oscillators," Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, May-June 1989, pp. 268-274.

- DRAGONETTE, R.A., SUTER, J.J., [1991] "Barometric Pressure-Induced Frequency Offsets in Hydrogen Masers," Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control, May 1991, pp. 586-590.
- GAGNEPAIN, J., [1989] "Characterization Methods for the Sensitivity of Quartz Oscillators to the Environment," Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, May-June 1989, pp. 242-247.
- GARVEY R., [1989] "Testing and Specification of Environmental Sensitivities in Cesium and Precision Quartz Signal Sources," Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, May-June 1989, pp. 263-267.
- GREENHALL, C.A., [1983] "A Structure Function Representation Theorem with Applications to Frequency Stability Estimation," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-32, no. 2, June 1983, pp. 364-370.
- GREENHALL, C.A., [1989] "A Method for Using a Time Interval Counter to Measure Frequency Stability," IEEE Transactions. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. UFFC-36, no. 5, September 1989, pp. 478-480
- GREENHALL, C.A., [1992] "A Shortcut for Computing the Modified Allan Variance," 1992 IEEE Frequency Control Symposium, p.p 262-264
- IEEE [1988] "Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology", IEEE Std 1139-1988.
- IEEE [1994] "Guide for Measurement of Environmental Sensitivities of Standard Frequency Generators," IEEE Std 1193-1994, July 25
- KARTASCHOFF, P., [1987] "Reference Clock Parameters for Digital Communications Systems Applications," Proceedings of the 19th PTTI Meeting, December 1987, pp. 515-549.
- LESAGE, P., [1983] "Characterization of Frequency Stability: Bias due to the Juxtaposition of Time-Interval Measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-32., no. 1, March 1983, pp. 204-207.
- LESAGE, P., AUDOIN, C., [1973] "Characterization of Frequency Stability: Uncertainty due to the Finite Number of Measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-22, pp. 157-161.
- LESAGE, P., AUDOIN, C., [1976] "Corrections to : Characterization of Frequency Stability: Uncertainty due to the Finite Number of Measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-25.,p. 270.
- LESAGE, P., AUDOIN, C., [1979] "Effect of Dead Time on the Estimation of the Two-Sample Variance," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-28., no. 1, March 1979, pp. 6-10.
- LESAGE, P., AUDOIN, C., [1979] "Characterization and Measurement of Time and Frequency Stability," Radio Science, vol. 14, no. 4, 1979, pp. 521-539.
- LINDSEY, W.C., CHIE, C.M., [1976] "Theory of Oscillator Instability Based Upon Structure Functions," IEEE Proceedings, vol. 64, December 1976, pp. 1662-1666.
- MATTISON, E.M., [1990] "Physics of Systematic Frequency Variations in Hydrogen Masers," Proceedings of the 22nd PTTI Meeting, Vienna (Virginia), December 1990, pp. 453-464.
- NIST, [1990] "Characterization of Clocks and Oscillators", NIST Technical Note 1337, March 1990.

- PAGNELLI, C.J., Cashin, W.F., [1991] "Measurement of Precision Oscillator Phase Noise Using the Two-Oscillator Coherent Down-Conversion Technique," Proceedings of the 23rd PTTI Meeting, Pasadena CA, December 1991, NASA Conference Publication N° 3159, pp. 189-207.
- PAPOULIS, A., [1983] "Random Modulation: A Review," IEEE Transactions Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-31, no. 1, February 1983, pp. 96-105.
- RILEY, W.J., [1990] "The Physics of the Environmental Sensitivity of Rubidium Gas Cell Atomic Frequency Standards," Proceedings of the 22nd PTTI Meeting, Vienna (Virginia), December 1990, pp. 441-452.
- RUTMAN, J., [1978] "Characterization of Phase and Frequency Instabilities in Precision Frequency Sources: Fifteen Years of Progress," Proceedings of the IEEE, vol. 66, no. 9, September 1978, pp. 1048-1075.
- STEIN, S.R., [1985] "Frequency and Time - Their Measurement and Characterization," Precision Frequency Control, vol. 2, edited by E.A. Gerber and A. Ballato, Academic Press, New-York, 1985, pp. 191-416.
- SYDNOR, R., [1989] "Environmental Testing at the Jet Propulsion Laboratory's Frequency Standards Laboratory," Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, May-June 1989, pp. 242-247.
- TAVELLA, P., PREMOLI, [1991] "Characterization of Frequency Standard Instability by Estimation of their Covariance Matrix," Proceedings of the PTTI Meeting, 1991.
- VERNOTTE, F., LANTZ, E., GROSLAMBERT, J., GAGNEPAIN, J.J., [1993] "Oscillator noise analysis: multi-variance measurement," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-42, no. 2, April 1993, pp. 342-350.
- VERNOTTE, F., MCHUGH, M., ZALAMANSKY, G., [1995] "Cut-off frequencies and noise power law model of spectral density: adaptation of the multi-variance method using the structure function approach," Proceedings of the EFTF 95, Besançon, France, March 1995, pp 373-376.
- WALLS, F.L., [1990] "Environmental Sensitivities of Quartz Crystal Oscillators," Proceedings of the 22nd PTTI Meeting, Vienna (Virginia), December 1990, p. 465-486.
- WALLS, F.L. and DEMARCHI, A. [1975] "RF Spectrum of a Signal After Frequency Multiplication; Measurement and Comparison with a Simple Calculation," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-24, 210-217, 1975.
- WALTER, T., [1992] "A multi-variance analysis in the time domain," Proceedings of the 24th PTTI, 1992
- WALTER, T., [1994] "Characterizing Frequency Stability: A Continuous Power-Law Model with Discrete Sampling," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-43, no. 1, February 1994, pp. 69-79.
- WOZENCRAFT, J.M., JACOBS, I.M., [1965] "Principles of Communication Engineering", Wiley & Sons, New-York, 1965.

## تقنيات القياس (علم القياس)

### المحتويات

81	.....	المقدمة
90	..... قياسات مباشرة للتوقيت (الطور) والتردد	1.4
90	..... قياسات التوقيت المباشرة (الطور)	1.1.4
91	..... قياسات مباشرة للتردد	2.1.4
92	..... قياسات تخفيفية للتردد والطور (توقيت)	2.4
94	..... قياسات الطور التخفيفية (التوقيت)	1.2.4
94	..... قياسات التردد التخفيفية	2.2.4
95	..... قياسات الضوضاء PM التخفيفية	3.2.4
101	..... أنظمة قياس التوقيت بمخلاطين	4.2.4
102	..... أنظمة قياس على قاعدة الإشارة بسياج الوتد	5.2.4
104	..... تقنيات رقمية لقياسات التردد و PM	6.2.4
104	..... قياسات تقنية القبعة الثلاثية الزوايا	7.2.4
104	..... أنظمة قياس الارتباط المتبادل	8.2.4
105	..... قياسات التردد والضوضاء PM بمذبذب واحد	3.4
106	..... قياسات التردد والضوضاء PM بخط التأخر	1.3.4
107	..... قياسات الضوضاء AM	4.4
108	.....	المراجع

## المقدمة

يمكن استعمال العديد من تقنيات القياس لتمييز أداء مصادر التردد المحكمة. وتختلف هذه التقنيات إحداها عن الأخرى إلى حد بعيد من حيث تصميم الدارة ونمط المعلومات المتيسرة ودرجة عدم التيقن والاستبانة. ويقيم الجدول 4.1 المقتبس من [سوليفان (Sullivan) وآخرون، 1990] المقارنة بين عدم التيقن التقريبي والاستبانة بالنسبة إلى العديد من تلك الطرائق لقياس عدم استقرار التوقيت والتردد بالإضافة إلى ميزاتها ومساوئها. ونظراً لبساطة الجدول 4.1 القصوى، فإنه يتعذر عليه ذكر كافة العوامل المؤثرة في القياسات ولا بد بالتالي من اعتباره ليس أكثر من خطوة أولى في عملية انتقاء طريقة القياس. وتورد الأقسام اللاحقة المزيد من التفاصيل. في حين نجد قائمة بهذه الطرائق المجمعة في شكل معمارية للقياسات.

ولفهم تحديدات قياس التوقيت والتردد والنقاء الطيفي بشكل أفضل، لا بد من التعرض بعجالة إلى تعريفات القياس ومفاهيمه بالنقاش. وقد قدم الفصل 3 نقاشات أطول بكثير للتعريفات والعلاقات القائمة بينها. وتعطي المعادلة (1.4) نموذجاً لتوتر الإشارة الذي يتضمن تأثير الضوضاء [سوليفان وآخرون، 1990؛ بارنس وآخرون، 1971؛ آلان وآخرون، 1988].

$$(1.4) \quad V(t) = (V_0 + \varepsilon(t))\cos(2\pi\nu_0 t + \phi(t))$$

حيث إن  $V_0$  هو متوسط اتساع للإشارة و  $\nu_0$  هو متوسط تردد الإشارة. وتحتسب ضوضاء تشكيل الاتساع (AM) في  $\varepsilon(t)$  وتحتسب ضوضاء تشكيل الطور (PM) في المصطلح  $\phi(t)$ . ورغم أن التردد الآبي (طور  $d/dt$ ) قابل للتعريف من الناحية الرياضية، إلا أن قياس منحدر الطور يأخذ في الواقع قدراً منتهياً من الوقت. فتؤدي بالتالي جميع التقنيات المستعملة لقياسات التردد إلى تردد يكون متوسطه على امتداد فاصل زمني للقياس  $\tau$ .

وتعتبر كل من المعادلة (2.4) والمعادلة (3.4) تعريفين من تعريفات العمل لتمييز النقاء الطيفي للإشارات يمكن ربطهما بتقنيات القياس بسهولة. ويتجه اهتمامنا عادة إلى  $S_\phi(f)$ ، إلا أن أرضية الضوضاء أو الاستبانة تضبط في العديد من معماريات القياس بواسطة حضور الضوضاء AM.

ويُحدّد أداء الضوضاء PM في العديد من الأنظمة بواسطة تحويل الضوضاء AM إلى ضوضاء PM. وليس هناك بالتالي من تحديد كامل للضوضاء PM بدون تقدير الضوضاء AM ومساهمتها في الضوضاء PM الظاهرة.

$$(2.4) \quad S_\phi(f) = \frac{(\delta\phi(f))^2}{BW},$$

حيث BW هو عرض نطاق القياس بحساب Hz. و  $S_\phi(f)$  هو المتوسط المربع لانحراف الطور المفصول بواسطة  $f$  عن الموجة الحاملة، ومقيس بحساب الراد المكعب في Hz لعرض نطاق القياس.

## دليل لانتقاء طرائق القياس

مساوى	مميزات	استقرار التردد <sup>b</sup> $\sigma_y(\tau)$	دقة التردد <sup>e</sup>	استقرار التوقيت (حلال يوم واحد)	دقة التوقيت <sup>e</sup>	طريقة القياس
1. قياسات مباشرة						
استبانة محدودة جداً غير مناسبة للمذبذبات العالية الاستقرار <sup>d</sup>	أداء غاية في السهولة	محدودة باستقرار قاعدة التوقيت	محدودة بدقة قاعدة التوقيت	محدودة باستقرار قاعدة التوقيت	انظر الملاحظة <sup>e</sup>	1. بالتردد الأساسي
لا تتوفر إلا امتداداً بسيطاً بالنسبة إلى الطريقة السابقة وتعاين بالتالي من تحديات مماثلة <sup>e</sup>	أداء غاية في السهولة في الارتفاع N ترتفع الضوضاء إلى $20 \log(N)$	محدودة باستقرار قاعدة التوقيت	محدودة بدقة قاعدة التوقيت	محدودة باستقرار قاعدة التوقيت	انظر الملاحظة <sup>e</sup>	2. بعد الضائفة/التقسمة
11. قياسات تخيلية						
أذن فاصل زمني $\tau$ تقوم بتحديد فترة تردد الخلفان غير قابل عادة للضبط؛ لا يمكن مقارنة المذبذبات مع خفقتان يقارب الصفر؛ ضرورة توفر معلومات إضافية لتحديد المذبذب ذي التردد الأعلى/الأدنى في التردد؛ يتصاحب الوقت دائماً مع القياسات	يمكن التخفيض عادة من ضوضاء القياس لتكون أذن من حالات عدم استقرار المذبذبات بالفرامل الزمنية $1 + \tau$ وأكثر	$\approx 10^{-7} / (N_0 T)$ الذي يكون $10^{-14} / \tau$ على MHz 10	$\approx 10^{-16}$ at 10 MHz	انظر غريبها <sup>e</sup>	-----	1. طرائق أحادية التحويل 2. طرائق متعددة التحويل
باستعمال أجرد التجهيزات البسيطة؛ تكون الضوضاء في القياس عادة أعلى من حالات عدم استقرار المذبذب لفترة $\tau$ أقل من عدة ثوان، وبالتالي تكون هذه الطريقة محدودة مقتصرة على القياسات على المدى الطويل	يسمح دخول عرض النطاق الكبير بتشكيلته من الإشارات؛ بسبب الاستعمال؛ نادراً ما يشكل اللبس الدوري مشكلة؛ تقيس التوقيت واستقراره، والتردد واستقراره	$\approx 10^{-7} / (N_0 T)$ الذي يكون $10^{-14} / \tau$ على MHz 10	$\sim 10^{-16}$ يكون $\tau 10^{-14} /$	$\sim 20$ ps على 10 MHz	$\sim 100$ ps	3. طريقة الفارق الزمني
أكثر تعقيداً من الطرائق الأخرى، وبالتالي أكثر حساسية لانقطاع الإشارات الخارجية؛ مثال، عروات الزمرة؛ والفارق الزمني؛ ومدة الخفقتان بالقياس، مثال 200 ns على MHz 5	بدون وقت ممت؛ تستطيع اختيار مدة العينين (1 ms) كمدة تطول بالقدرة المطلوبة؛ قد يكون الخفقتان بين المذبذبات على الصفر أو معدوماً؛ قابلة لتغيير عرض نطاق القياس بسهولة؛ تقيس التوقيت واستقراره والتردد واستقراره	$\approx 10^{-7} / (N_0 T)$ الذي يكون $10^{-14} / \tau$ على MHz 10	$\sim 10^{-16}$ على 10 MHz	$\sim 5$ ps	$\sim 100$ ps	3a. طريقة الفارق الزمني الثابتة المخلاط

<sup>a</sup> دقة القياس لا يمكنها أن تكون أفضل من استقراره. وتحدد الدقة بدقة المذبذب المرجعي.

<sup>b</sup> هذا العرض نطاق القياس من  $10^4$  Hz؛  $V_0 = \tau$  = وقت القياس.

<sup>d</sup> يفترض ذلك استعمال عداد تردد بسيط.

<sup>e</sup> انظر [غريبها 1987].

تعني الشرطة (---) أن الطريقة ليست مناسبة عموماً لهذه الكمية.

## نموذج الخطأ لقياسات الضوضاء PM [أولر وآخرون، 1988]

طريقة القياس	دقة التوقيت <sup>e</sup>	استقرار التوقيت (بحال يوم واحد)	دقة التردد <sup>e</sup>	استقرار التردد <sup>b</sup> $\sigma_p(\tau)$	مميزات	عموما لا تُستعمل لقياسات التوقيت	مساوي <sup>c</sup>
طرائق العروة الحكومة الطور	_____	_____	_____	_____	مفيدة بشكل خاص لقياس ضوضاء الطور تؤمن التوزيع التواصل الاشارة والتردد	عموما لا تُستعمل لقياسات التوقيت	مساوي <sup>c</sup>
a. عروة طليقة محكومة الطور	_____	_____	تعتمد على معايرة الفاركتور	$10^{-7} / (f_0 T)$ يكون $10^{-14} / \tau \sim$ على 10 MHz	مفيدة لتحليل الاستقرار على المدى القصير بالإضافة إلى تحليل الطيف والكثيف عن دورية الضوضاء كخطوط طيفية؛ حساسية جيدة	لا بد من التأكد من وجود الضوضاء المعينة خارج عرض نطاق العروة قياسات الطور على الأمد الطويل (على امتداد ثوران عديدة) غير عملية	مساوي <sup>c</sup>
b. عروة مشبودة محكومة الطور	_____	_____	تعتمد على معايرة الفاركتور	$10^{-7} / (f_0 T)$ يكون $10^{-14} / \tau \sim$ على 10 MHz	تكون ضوضاء القياس عادة أقل من حالات عدم استقرار المذبذب لمدة $\tau = 1s$ فما فوق؛ تحكم ممتاز لعرض نطاق نظام القياس؛ يمكن تقليص الوقت الميت أو جعلها طفيفا	تحتاج إلى مذبذب مرجعي ذي توتر مراقب؛ حساسية التردد هي وظيفية للمحن توليف الفاركتور، وبالتالي غير مؤدية إلى قياس اختلافات التردد المطلقة	مساوي <sup>c</sup>
2. طرائق المميز	_____	_____	_____	_____	لا تتطلب مذبذباً مرجعياً	عرض نطاق أقل بكثير من مذبذبين، طرائق متجانسة الدائين حساسية أدن على ترددات فوربيه المنخفضة	مساوي <sup>c</sup>
a. مسحن المميز	_____	_____	تعتمد على خصائص المميز	تعتمد على خصائص المميز	لا تتطلب مذبذباً مرجعياً؛ سهولة الإنشاء و ذات حساسية عالية؛ عملية مع ترددات الموجات الصغيرة	تتطلب معايرة أكثر صعوبة للحصول على أية دقة حتى خلال مدى بسيط من ترددات فوربيه، طريقة دقيقة بالنسبة إلى ترددات فوربيه فقط التي تكون أدن من $0.1 \times$ أقل دقة بكثير من طرائق المذبذبين المتجانسة الدائين؛	مساوي <sup>c</sup>
b. خط التأخر	_____	_____	_____	تعتمد على خصائص خط التأخر	لا تتطلب مذبذباً مرجعياً؛ إنشاء مدى دينامي بواسطة خصائص خط التأخر؛ عملية مع ترددات الموجات الصغيرة	أقل دقة بكثير من طرائق المذبذبين المتجانسة الدائين؛ مجموعات ثقيلة من خطوط التأخر اللازمة لتغطية مدى دينامي معين؛ تتطلب تأخر طويل للقياسات التي تقل عن 100 kHz من الموجة الحاملة	مساوي <sup>c</sup>

<sup>a</sup> دقة القياس لا يمكنها أن تكون أفضل من استقراره. وتحدد الدقة بدقة المذبذب المرجعي.

<sup>b</sup> هذا لعرض نطاق القياس من 10 من الترددات؛  $\tau =$  وقت القياس.  
تعني الشرطة (-) أن الطريقة عموماً ليست مناسبة عموماً لهذه الكمية.  
اللاحقة رقم 2 من التبديل.

يقدم الجدول 4.2 قائمة بالمعلومات التي تؤثر على نحو مشترك على عدم التيقن من قياسات الضوضاء PM

#### الجدول 4.2

#### نموذج الخطأ لقياسات الضوضاء PM [والز وآخرون، 1988]

1.	تحديد k
2.	تحديد المضخم $G(f)$
3.	آثار العروة المحكومة الطور (PLL) (إن وُجدت)
4.	مساهمة الضوضاء AM
5.	تشوه توافقي
6.	مساهمة أرضية ضوضاء النظام
7.	مساهمة ضوضاء مرجعية
8.	درجة ثقة المعطيات الإحصائية
9.	خطية محللي الطيف
10.	عدم التيقن من الوظيفة PSD

$$(4.3) \quad S_a(f) = \left( \frac{\delta\epsilon(f)}{V_0} \right)^2 \frac{1}{BW}$$

$S_a(f)$  هو متوسط تقلب الاتساع التربيعي النسبي بعرض النطاق بالهرتز، يفصله التردد  $f$  عن الموجة الحاملة. ويورد الجدول 4.3 المعلومات التي تؤثر بشكل مشترك على عدم التيقن من قياسات الضوضاء AM.

#### الجدول 4.3

#### نموذج الخطأ لقياسات الضوضاء AM [والز وآخرون، 1988]

1.	تحديد k
2.	تحديد المضخم $G(f)$
3.	مساهمة أرضية ضوضاء النظام
4.	درجة ثقة المعطيات الإحصائية
5.	خطية محللي الطيف
6.	عدم التيقن من الوظيفة PSD

ويورد الجدول 4.4 فترة الثقة لقياسات الكثافة الطيفية.



فترة الثقة لقياسات الكثافة الطيفية

يكون عدم التيقن الإحصائي من قياسات الكثافة الطيفية كوظيفة من $k\sqrt{\frac{\alpha}{N}}$ ، حيث إن $k$ تتحكم في فترة الثقة، و $\alpha$ نسبة عرض نطاق فيديوي بالنسبة إلى عرض نطاق الاستبانة من أجل محللي الطيف المكتس و 1 من أجل محللي الطيف FFT، ويكون $N$ عدد المتوسطات المقدرة. في حين يتعين أن يكون عرض النطاق صغيراً جداً مقارنة بالتردد لتفادي الانحيازات [والز وآخرون، 1989؛ بارسيفال (Percival) وآخرون، 1993؛ تايلور (Taylor) وآخرون، 1993]							
k=1,9 (90% تقريباً)				k=1 (68% تقريباً)			$\frac{N}{\alpha}$
$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$		
6+	3-	2,5	3,3+	2-	0,54	4	
5+	2,5-	1,4	2,3+	1,5-	0,42	6	
4+	2,1-	0,61	1,7+	1,2-	0,32	10	
1,8+	1,3-	0,35	0,86+	0,72-	0,18	30	
0,92+	0,76-	0,19	0,46+	0,41-	0,1	100	
0,51+	0,46-	0,14	0,25+	0,24-	0,058	200	
0,28+	0,26-	0,06	0,13+	0,13-	0,032	1000	
0,15+	0,15-	0,035	0,08+	0,08-	0,018	3000	
0,08+	0,08-	0,019	0,04+	0,04-	0,01	10000	

وعادة ما يتميز استقرار التردد النسبي بمغايرة آلان أو مغايرة العينتين الواردة في:

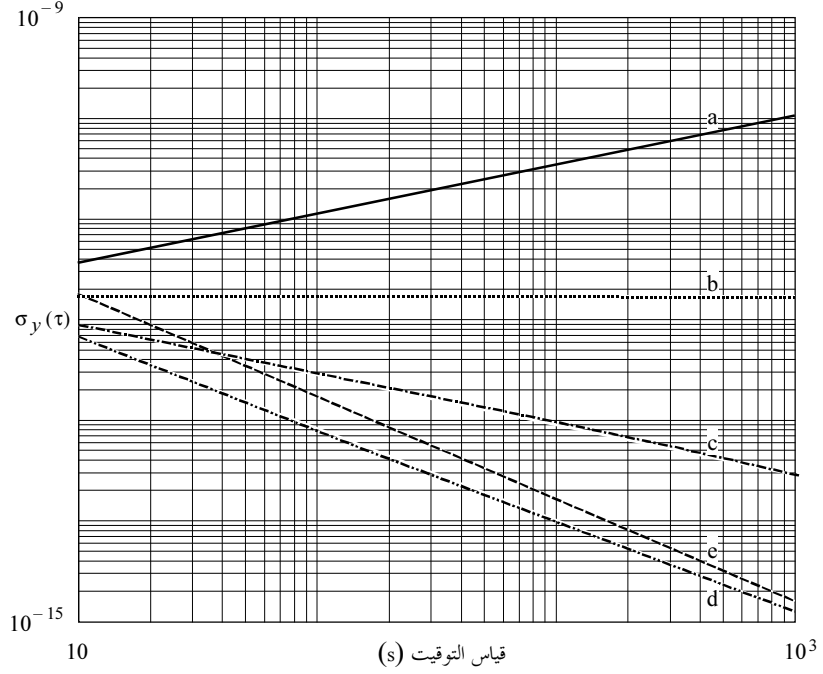
$$(4a.4) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2$$

$$(4b.4) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_1)^2$$

$$(4c.4) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{2}{(\pi v_o \tau)^2} \int_0^{\infty} S_{\phi}(f) \sin^4(\pi f \tau) df$$

حيث يكون  $N$  عدد العينات، و  $x_i$  هو انحراف التوقيت في النقطة  $i$ ، و  $M$  هو عدد عينات انحراف التردد، و  $y_i$  هو المتوسط المقدّر خلال  $\tau$  و  $\tau$  هي المبعادة بين قياسات انحراف التوقيت [بارنس وآخرون، 1971؛ آلان وآخرون، 1988]. وتُستعمل المعادلة (4a.4) في معطيات التوقيت، وتُستعمل المعادلة (4b.4) في معطيات التردد، وتُستعمل المعادلة (4c.4) في معطيات الضوضاء PM. أما إذا كانت الضوضاء المهيمنة هي من نمط تشكيل طور الرفيف على المدى القصير (PM) أو الضوضاء PM البيضاء، فإنه يمكن استعمال مغايرة آلان المعدلة التي أوردتها المعادلات (39.3) و (40.3) و (44.3) من الفصل 3 لتحسين تقدير استقرار التردد التحتي للمصادر [بارنس وآخرون، 1971؛ آلان وآخرون، 1988؛ اللجنة CCIR، 1986؛ والز وآخرون، 1990؛ بارنبي، 1987؛ فايس (Weiss)، 1995]. انظر المراجع [شتاين (Stein)، 1985؛ روتمان (Rutman) وآخرون، 1991] للمزيد من التفاصيل.

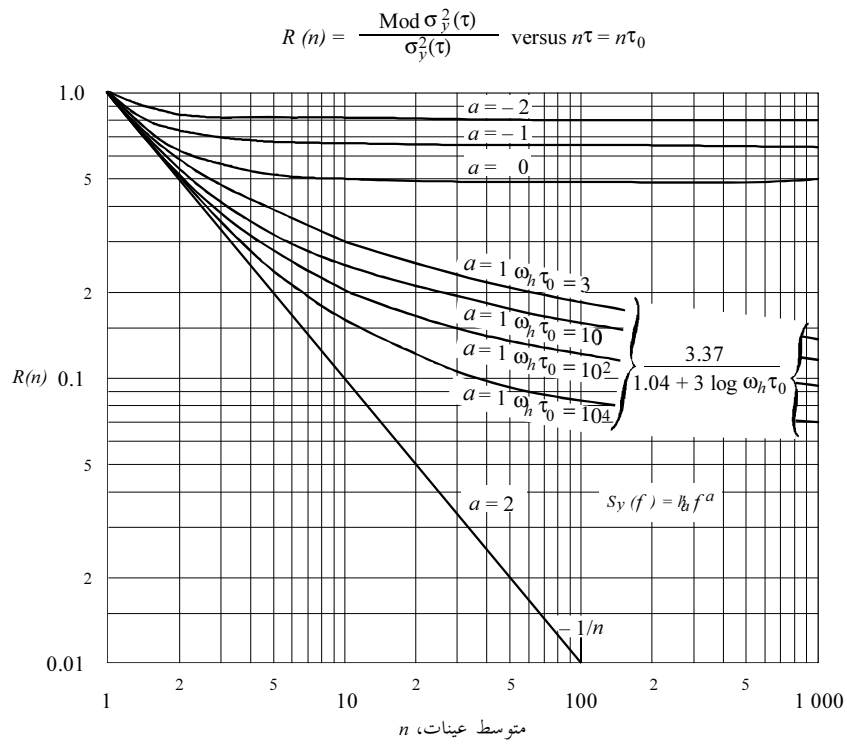
ويبين الشكل 4.1 القالب  $\sigma_y(\tau)$  لأنماط عديدة من الضوضاء بقانون القدرة.



الشكل 4.1

$\sigma_y(\tau)$  مقابل  $(\tau)$  لخمسة أنماط مشتركة من الضوضاء بقانون القدرة

ويبين الشكل 4.2 نسبة  $\sigma_y^2(n\tau_0)$  إلى  $\text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0)$  للأشكال الخمسة المشتركة من الضوضاء، وذلك في حدود أن يكون  $2\pi f_h \tau_0 \gg 1$ .



الشكل 4.2

نسبة  $\sigma_y^2(n\tau_0)$  إلى  $\text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0)$  كوظيفة  $n$

ويبين الجدول 4.5 المعلمات التي تؤثر بشكل مشترك على عدم التيقن من  $\sigma_y(n\tau)$ ، وقياسات  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$ .

#### الجدول 4.5

#### نموذج الخطأ لقياسات $\sigma_y(\tau)$ و $\text{mod}\sigma_y(\tau)$

1.	وقت ميت
2.	عرض نطاق القياس
3.	مساهمة المصدر المرجعي أو قاعدة التوقيت
4.	الضوضاء في مكشاف التقاطع على الصفر (ميدان التوقيت)
5.	الضوضاء في نظام قياس PM (ميدان التردد)
6.	انسياق التردد في المصادر
7.	آثار البيئة، مثال، التغييرات في تخالف المخلاط الناجمة عن التغييرات في درجة الحرارة والرطوبة والحمولة
8.	أثر جذب الطور من مصادر أخرى

ويعرض الجدول 4.6 قائمة بفترات الثقة بنسبة 68% بالنسبة إلى  $\sigma_y(\tau)$  و  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$  لتراكب المعطيات الكامل. انظر [والتار، 1994 وفايس وآخرون، 1993] للحصول على المزيد من التفاصيل. وقد وضع [هوف (Howe)، 1995] طريقة جديدة لتحليل المعطيات من أجل احتساب  $\sigma_y(\tau)$  و  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$  تقضي على الانحياز الذي يؤدي إليه طرح متوسط تخالف التردد من المعطيات. وقد أدى ذلك إلى تحسين فترة الثقة تحسناً كبيراً عندما يكون وقت القياس أطول من 20% من مجموع المعطيات.

الفصل 4

الجدول 4.6

فترات الثقة بسيغما واحدة (68%) من أجل قياسات ميدان التوقيت

فترات الثقة بسيغما واحدة (68%) من أجل قياسات ميدان التوقيت مع 1025 عينة مبادئ بينها مدة  $\sigma_t$ . وترد أوقات القياس على  $\tau = m\tau_0$ . ويعرض العمودان 2 و 5 درجات الحرية التقريبية إلى كل من  $\sigma_y(\tau)$  و  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$  [شتاين، 1985، والتار، 1995 وفايس وآخرون، 1995]. أما العمودان 3 و 4 فيقدمان فترات الثقة بسيغما واحدة من أجل  $\sigma_y(\tau)$  مع التراكب الكامل للمعطيات المُحتسبة من [شتاين، 1985 وهوف وآخرون، 1981]. ويقدم العمود 6 والعمود 7 فترات الثقة بسيغما واحدة من أجل  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$  مع تراكب المعطيات الكامل [فايس وآخرون، 1995]. وقد أدى عمل [هوف، 1995] إلى القضاء على انحياز طويل المدى وإلى تحسين فترات الثقة عندما يكون وقت القياس أطول من 20% من طول المعطيات الكلي.

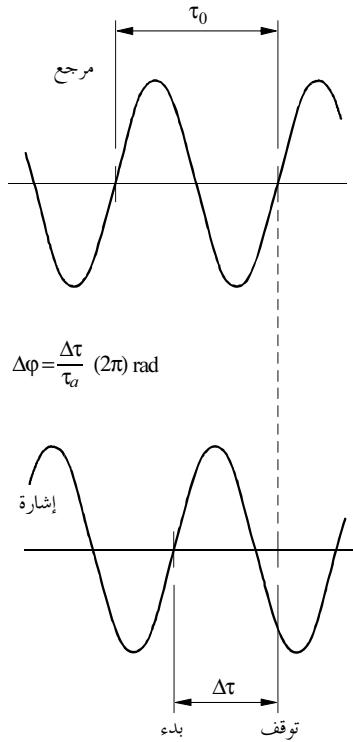
تراكب كامل + نسبة 68% $\text{mod}\sigma_y(\tau)$ الضوضاء PM البيضاء	تراكب كامل - نسبة 68% $\text{mod}\sigma_y(\tau)$ الضوضاء PM البيضاء	درجة حرية $\text{mod}\sigma_y(\tau)$ الضوضاء PM البيضاء	تراكب كامل + نسبة 68% $\sigma_y(\tau)$ الضوضاء PM البيضاء	تراكب كامل - نسبة 68% $\sigma_y(\tau)$ الضوضاء PM البيضاء	درجة حرية $\sigma_y(\tau)$ الضوضاء PM البيضاء	1025 = n
%3,2	%2,9	526	%3,2	%2,9	526	1=m
%3,4	%3,1	477	%3,2	%2,9	526	2=m
%4,3	%3,8	299	%3,2	%2,9	524	4=m
%6,1	%5,2	158	%3,2	%2,9	521	8=m
%9,0	%7,1	78,9	%3,3	%3,0	515	16=m
%14	%9,7	38,2	%3,4	%3,0	503	32=m
%22	%13	17,6	%3,2	%3,0	479	64=m
%14	%18	7,40	%3,5	%3,1	432	128=m
%94	%24	2,85	%4,0	%3,4	355	256=m
الضوضاء PM للرفيف	الضوضاء PM للرفيف	الضوضاء PM للرفيف	الضوضاء PM للرفيف	الضوضاء PM للرفيف	الضوضاء PM للرفيف	1025 = n
%3,0	%2,8	590	%3,0	%2,8	590	1=m
%3,3	%3,0	497	%3,1	%2,9	554	2=m
%4,6	%4,1	263	%3,5	%3,2	453	4=m
%6,8	%5,7	128	%4,0	%3,6	336	8=m
%10	%7,8	62,3	%5,0	%4,3	232	16=m
%16	%11	29,8	%6,1	%5,2	151	32=m
%26	%15	13,7	%8,4	%6,7	92,3	64=m
%50	%20	5,74	%11	%8,4	52,1	128=m
%134	%26	2,07	%16	%11	26,2	256=m
الضوضاء FM البيضاء	الضوضاء FM البيضاء	الضوضاء FM البيضاء	الضوضاء FM البيضاء	الضوضاء FM البيضاء	الضوضاء FM البيضاء	1025 = n
%2,8	%2,6	682	%2,8	%2,6	682	1=m
%3,2	%3,0	516	%3,0	%2,8	584	2=m
%4,7	%4,1	252	%4,0	%3,5	354	4=m
%7,0	%5,8	123	%5,6	%4,8	186	8=m
%10	%8,0	59,8	%8,1	%6,4	93,5	16=m
%16	%11	28,7	%12	%8,8	45,9	32=m
%27	%15	13,2	%19	%12	22,0	64=m
%51	%20	5,50	%32	%16	10,0	128=m
%158	%27	1,81	%65	%22	4,0	256=m
الضوضاء FM للرفيف	الضوضاء FM للرفيف	الضوضاء FM للرفيف	الضوضاء FM للرفيف	الضوضاء FM للرفيف	الضوضاء FM للرفيف	1025 = n
%2,5	%2,4	829	%2,5	%2,4	829	1=m
%3,2	%2,9	524	%3,0	%2,6	606	2=m
%4,8	%4,2	246	%4,3	%3,8	307	4=m
%7,1	%5,8	120	%6,0	%5,1	150	8=m
%11	%8,0	58,5	%9,0	%7,1	73,5	16=m
%16	%11	28,0	%14	%9,9	35,8	32=m
%27	%15	12,9	%22	%13	17,0	64=m
%53	%20	5,31	%41	%18	7,62	128=m
%192	%27	1,56	%90	%24	3,01	256=m
الضوضاء FM بالسير العشوائي	الضوضاء FM بالسير العشوائي	الضوضاء FM بالسير العشوائي	الضوضاء FM بالسير العشوائي	الضوضاء FM بالسير العشوائي	الضوضاء FM بالسير العشوائي	1025 = n
%2,2	%2,1	1023	%2,2	%2,1	1023	1=m
%3,5	%3,2	442	%3,3	%3,0	511	2=m
%5,4	%4,6	200	%4,8	%4,1	254	4=m
%8,0	%6,4	97,2	%7,0	%5,7	125	8=m
%12	%8,8	47,3	%10	%7,8	61,2	16=m
%19	%12	22,6	%16	%11	29,2	32=m
%32	%16	10,3	%26	%15	13,3	64=m
%65	%22	4,19	%51	%20	5,51	128=m
%256	%28	1,29	%134	%26	2,0	256=m

## 1.4 قياسات مباشرة للتوقيت (الطور) والتردد

تتميز هذه التقنية بمقارنة طور الإشارة تحت الاختبار مقارنة مباشرة بطور مرجع معين بدون استعمال أجهزة المخلاط. ويبين الشكل 4.3a تخطيط التوقيت البياني للقياس.

## 1.1.4 قياسات التوقيت المباشرة (الطور)

إن درجة عدم التيقن من التوقيت واستقراره تتحدد بشكل أساسي بدقة الإشارة المرجعية واستقرارها كما تتحدد من الناحية التقنية باستبانة التوقيت للعدّاد. وتختلف استبانات التوقيت النمطية لعدّادات الفاصل الزمني من البيكوثانية إلى الميكروثانية. ويتطلب قياس التوقيت توشي الحذر الشديد للحصول على نسبة صغيرة من الموجات المستقرة للتوتر (VSWR) بشكل يجعل طور كل من الإشارة والمرجع طوراً مهماً وقابلاً للإنتاج من جديد [نالسون (Nelson) وآخرون، 1992]. أما في حالة إشارات الموجة الجيبية، فإنه يتم إرجاع التوقيت إلى التقاطع على الصفر في الاتجاه الإيجابي للإشارة. (وفي حالة الإشارات الرقمية، يتم إرجاع التوقيت عادة إلى متوسط الحالة "0" والحالة "1"). وقد يكون العدّاد قد بدأ بالإشارة قيد القياس أو بالمرجع. ويبدأ القياس عادة بشكل منطقي بالإشارة وبعد ذلك يطابق كل تقدم في التوقيت (أو الطور) لتردد يكون أعلى من المرجع. في حين تحدّد الاستبانة إلى 1/n حيث n هو تردد مذبذب قاعدة التوقيت للعدّاد. انظر الشكل 4.3a. وفي بعض الحالات قد يوفر المرجع، على سبيل المثال، قاعدة التوقيت تلك بالإضافة إلى إشارة التوقف. كما قد تزيد تقنيات الاستكمال الداخلي في العدّادات الأكثر تطوراً من الاستبانة بواسطة عامل من 100.

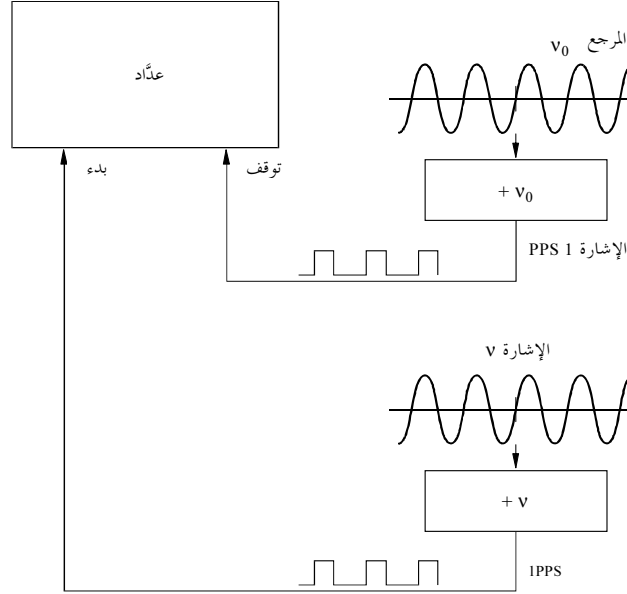


الشكل 4.3a

## تخطيط التوقيت البياني لنظام القياس المباشر للتوقيت (الطور)

يمكن تقدير استقرار التردد النسبي في ميدان التوقيت التابع لزوج الإشارة والمرجع انطلاقاً من معطيات التوقيت بواسطة استعمال المعادلة (4.4a). ونظراً لكون الاستبانة القصيرة المدى لهذا المنهج محددة دائماً باستبانة العداد، فإن استعمال المعادلة (المعادلة 39.4) من الفصل 3 يعتبر مفيداً عادة للحصول على تقدير أفضل لحالات عدم استقرار الميقاتية النحيتة. وكثيراً ما يكون لتلك القياسات وقتاً ميثاً ما بين القياسات التي تسبب الانحياز في تقديرات استقرار التردد النسبي [بارنيس وآخرون، 1990]. انظر الفصل 3 للمزيد من التفاصيل. ويذكر الشكل 4.3b قياساً واضحاً لفواصل زمني بين إشارتين للنبضة الواحدة في الثانية (1 PPS). ولا بد من ملاحظة كون الإشارات 1 PPS هي مشتقة من إشارة المذبذب (5 MHz مثلاً) بواسطة نوع من دائرة للعدّ و/أو دائرة للقسم. فيعد حدوث 5 ملايين من التقاطعات على الصفر في الاتجاه الإيجابي من

مذبذب ذي 5 MHz تقوم دائرة معينة بإنتاج نبضة واحدة. وتؤدي تلك الدارة عادة إلى تدهور استقرار التوقيت. وعلاوة على ذلك، يكون لتلك الإشارة 1 PPS المشتقة دائماً وقت صعود سريع جداً. ويتطلب ذلك هماية أمامية مناسبة للديكامترية من أجل عداد الفاصل الزمني.

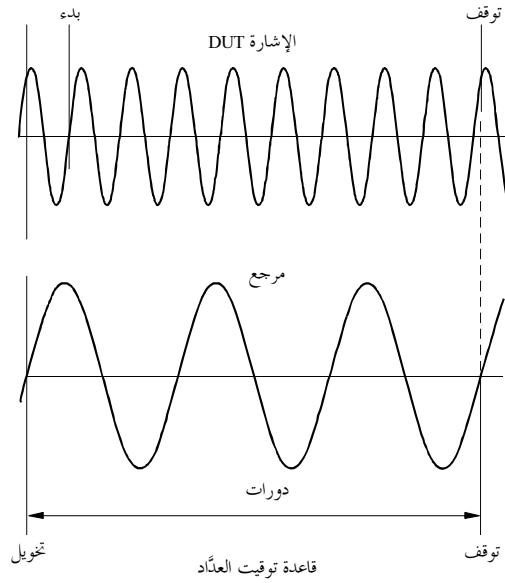


الشكل 4.3a

### تخطيط التوقيت البياني لأنظمة النبضة الواحدة في الثانية

#### 2.1.4 قياسات مباشرة للتردد

يُستعمل المرجع في أبسط تطبيقات هذا المنهج كقاعدة توقيت للعداد. ويسجل الجهاز عدد الدورات الكاملة التي تحدث أثناء العدد المحدد من دورات المرجع (التقاطعات على الصفر) كما يبينها الشكل 4.4. ويُعدُّ الجهاز عادة عدد التقاطعات على الصفر للإشارة المقیسة لمدة مرجع معينة من انفتاح الباب. ويكون هذا القياس محدود الاستبانة بدورة واحدة من المرجع. وإذا كان تردد هذا الأخير مثلاً 10 MHz، تكون الاستبانة المقیسة لقاعدة التوقيت  $1/(10 \text{ MHz} \cdot \tau)$ ، حيث إن  $\tau$  هي مدة انفتاح باب العداد. كما يكون القياس محدوداً كذلك بدورة واحدة من الإشارة المقیسة. وتُستعمل تقنيات الاستكمال الداخلي في العدادات الأكثر تعقيداً لتقدير عدد الدورات الكاملة زائد كسورات دورة واحدة. أما بالنسبة إلى الترددات التي تكون أصغر من التردد المرجعي، فإن الإشارة تُستعمل أحياناً كقاعدة توقيت لعداد الدورات المرجعية. ويتم احتساب عكس تلك النتائج عند ذلك للحصول على تردد الإشارة تحت الاختبار. وتكون درجة عدم التيقن في حالة قياسات تمتد على فترات طويلة سواء باستعمال هذه الطريقة أو تلك، محدودة بعدم التيقن المعياري المدمج النسبي لعدم التيقن من المرجع. في حين تكون الاستبانة على المدى القصير محدودة بكل من استقرار المرجع ومدة المرجع أو الإشارة.



الشكل 4.4

#### تخطيط التوقيت البياني لنظام القياس المباشر للتردد

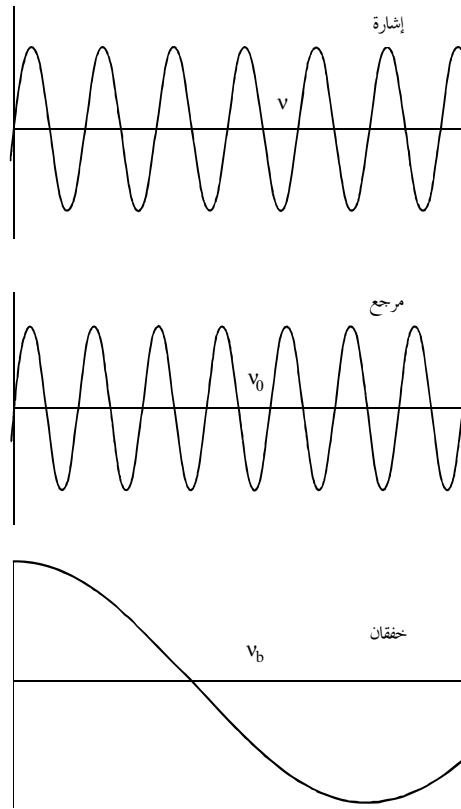
ويمكن تقدير استقرار التردد النسبي في ميدان التوقيت التابع للإشارة والمرجع انطلاقاً من معطيات التردد المستعملة في المعادلة (4.4b). ونظراً لكون استبانة هذا المنهج القصيرة المدى محدودة عادة باستبانة العداد، فإن استعمال المعادلة (40.3) من الفصل 3 كثيراً ما تكون مفيدة للحصول على تقدير أفضل لعدم الاستقرار التحتي للمصادر. ويكون لتلك القياسات دائماً وقتاً ميثاً بين القياسات. ويعتمد الانحياز الناجم عن الوقت الميث على نمط الضوضاء [بارنيس وآخرون، 1990].

#### 2.4 قياسات تخفيفية للتردد والطور (توقيت)

تمنح التقنيات التخفيفية تفوقاً كبيراً للاستبانة القصيرة المدى على تقنيات القياس المباشر للتوقيت والتردد وهي كثيراً ما تُستعمل لقياس الضوضاء PM أو لتقليل الميدان الترددي لاستقرار التردد. ويتم تخفيق الإشارة التي تكون تحت الاختبار في التقنية التخفيفية إزاء الإشارة المرجعية  $V_0$  كما يتم قياس الاختلاف أو إشارة الخفقان  $v_b$ . ويبين الشكل 4.5 مختلف أنواع الإشارات المعنية. ويقوم العامل  $V_0/V_b$  بتحسين استبانة التردد مقارنة بالقياسات المباشرة، حيث  $V_b = V_{\text{signal}} - V_0$ .

وعادة ما يتم الحصول على إشارة الخفقان بواسطة توصيل إشارتين بمكونة غير خطية مثل مخلوط ثنائي التوازن. ويؤدي خرج المخلوط إلى ترددات مجموع واختلاف زائد التوافقيات. ويتم استخراج الاختلاف بترشيح التحرير المنخفض ثم يتم قياسه. وللضوضاء التي يقدمها المخلوط مبدئياً أن تحدّ من الاستبانة القصيرة المدى ولكن عادة ما يتم التظليل عليها بالضوضاء المتيسرة في المصادر. وعند قياس الضوضاء PM بتقنيات تماثلية يتم ضبط تردد الخفقان دائماً على الصفر. أما عند استعمال التقنيات الرقمية، فإنه يتم ضبط تردد الخفقان أعلى بمرتين من ترددات فورييه ذات المنفعة الأعلى بالنسبة إلى الضوضاء PM أو الضوضاء AM. ويتمتع المنهج الرقمي بالميزة المتمثلة في إمكانية قياس جميع PM و AM واستقرار التردد بنفس التشييد. غير أن الاستبانة لا تضاهي عادة أفضل المناهج التماثلية.





الشكل 4.5

### تخطيط التوقيت البياني لنظام قياس تخفيقي للتوقيت

يتم الحصول على إشارة الخفقان عادة بواسطة توصيل إشارتين بمكونة غير خطية مثل مخلوط ثنائي التوازن. ويؤدي خرج المخلوط إلى ترددات مجموع واختلاف زائد التوافقيات. ويتم استخراج الاختلاف بترشيح التحرير المنخفض ثم يتم قياسه. وللضوضاء التي يقدمها المخلوط مبدئياً أن تحدّ من الاستبانة القصيرة المدى ولكن عادة ما يتم التظليل عليها بالضوضاء المتسيرة في المصادر. وعند قياس الضوضاء PM بتقنيات تماثلية يتم ضبط تردد الخفقان دائماً على الصفر. أما عند استعمال التقنيات الرقمية، فإنه يتم ضبط تردد الخفقان أعلى بمرتين من ترددات فورييه ذات المنفعة الأعلى بالنسبة إلى الضوضاء PM أو الضوضاء AM. ويتمتع المنهج الرقمي بالميزة المتمثلة في إمكانية قياس جميع PM و AM واستقرار التردد بنفس التشبيد. غير أن الاستبانة لا تضاهي عادة أفضل المناهج التماثلية.

ولا بد من توخي الحذر في القياسات التخفيقية بأن لا يتم التشويش على أي مصدر بطور المصدر الآخر. وتُعالج المشكلة دائماً باستعمال مضخم موزع ذي عزل عال على خرج كل مصدر. وتكون أقصى التشوشات بالنسبة للعزل  $\gamma$  حسب dB

$$(4.5) \quad \delta\phi_{\max} = 10^{-\gamma/20} \text{ rad.}$$

أما إذا كان تخالف التردد بين المصادر أقل من  $\phi_{\max}/2Q_1$ ، حيث  $Q_1$  هو عامل نوعية المصدر المشحون، فستتبع الأطوار "الإحكام بالحقن"، وهو ما يؤدي تقديراً إلى عدم الحصول على أي تقدم للطور المتراكم وذلك لمدة طويلة. وقد يكون من المفيد، في حالة وجود إحكام إشكالي بالحقن، إيجاد تخالف كاف لترددات خرج الميقاتيات الشيء الذي يمكن من ظهور تراكم الطور كسلسلة من القيم المتقطعة المتبوعة بفترة في القيمة.

وتتمثل ميزة نظام القياس بمذبذبين في إمكانية التحقق من أرضية الضوضاء باستعمال مذبذب ذي تردد أدنى نوعية مثلما يتعرض لتفسيره القسم 3.2.4 [والز وآخرون، 1988].

#### 1.2.4 قياسات الطور التخيفية (التوقيت)

ترتفع استبانة القياسات التخيفية للتوقيت أو الطور إلى:

$$(4.6) \quad \delta\tau = (v_0 / v_b) \delta t$$

حيث إن  $\delta t$  هي استبانة العداد كما تمت مناقشتها في القسم 1.1.4. وتتم مقارنة  $v_b$ ، تفادياً للالتباس، بتغيرات تردد الذروة بين المرجع والمصدر تحت الاختبار. كما يتطلب الأمر إجراء قياسات إضافية لتحديد ما إذا كان تردد المصدر أعلى أو أدنى من المرجع. ويتجه طور إشارة الخفقان إلى الصفر عندما يكون اختلاف الطور بين إشارتين  $\pm (2n+1) 90^\circ$  حيث،  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  انظر الشكل 4.5. ويحدث الانحياز في توقيت التقاطع على الصفر أو الخطأ يساوي  $\delta\phi$  بسبب خلل تناظر المخلاط و/أو بسبب VSWR في مسيرات المرجع والإشارة [نالسون وآخرون، 1992]. وترد أخطاء التوقيت الناجمة عن آثار VSWR ومعاملات درجة الحرارة النمطية لانحيازات المخلاط في [نالسون وآخرون، 1992] بالنسبة إلى ترددات 5 و 100 MHz. وتدرج تلك الأخطاء عادة في السلم  $1/V$ .

ويكون توقيت المصدر تحت الاختبار:

$$(4.7) \quad t_{DUT} = T_{ref} \pm n v_0 \pm \delta\phi$$

حيث  $n$  هو عدد دورات الخفقان التي تحدث منذ حدوث المزامنة الأصلية. ويكون التوقيت الأدنى بين عينات المعطيات  $1/V_b$ . وقد يكون هذا التحديد بالنسبة إلى الميقاتيات التي تكون على ذات الترددات تقريباً تحديداً شديداً التقييد.

وقد تُستعمل معطيات الفوارق الزمنية لتمييز استقرار التردد النسبي للمصادر التي تستعمل المعادلة (4a.4) أو المعادلة (39.3) من الفصل 3. في حين تكون استبانة قياس استقرار التردد في ميدان التوقيت على المدى القصير ( $\tau$  أدنى من 0,1 s) بشكل طبيعي أسوأ بكثير من تلك التي تم الحصول عليها من إجراء تكامل ضوضاء الطور باستعمال المعادلة (5c.4) [والز وآخرون، 1990].

#### 2.2.4 قياسات التردد التخيفية

يكون التردد التابع إلى DUT عند استعمال الطريقة التخيفية كما يلي:

$$(4.8) \quad v_{DUT} = v_0 \pm v_b$$

ويتطلب ذلك إجراء قياسات إضافية لتحديد إشارة اختلاف التردد. وتتمثل الطريقة في تغيير تردد المرجع أو DUT بقدر معلوم وتحديد ما إذا كان الخفقان قد انخفض أو أنه قد ارتفع. وتتمثل طريقة أخرى في إضافة زحزحة طور (أو توقيت) أو طرحها من المرجع وإليه أو إلى DUT ومراقبة اتجاه الزحزحة في تردد الخفقان. وتعطي المعادلة التالية استبانة قياس تخفيف التردد كما يلي:

$$(4.9) \quad \delta v = \delta t \frac{v_b^2}{v_0}$$

حيث  $\delta t$  هي استبانة التوقيت بالنسبة إلى  $\tau = 1/V_b$ . انظر القسم 1.1.4 للمزيد من التفاصيل. ويتحدد عدم التيقن عادة بواسطة استقرار تردد المرجع، وتغيرات طور مكشاف الطور وغيرها من العوامل التي أورد الجدول 4.2 والجدول 4.4 قائمة بها.

وعلى إثر القيام بعملية العدّ، يقوم عدّاد معياري بإعادة التدميث وانتظار التقاطع على الصفر القادم ليبدأ عملية العدّ القادمة. وكنسيجة لذلك، وإذا كان تردد الخفقان ضعيفاً، فإن العدّاد يقضي نصف الوقت بدون إنتاج أية معطيات (منتظراً التقاطع على الصفر القادم). وتؤدي مدة عدم التيسر تلك التي تسمى "بالوقت الميت" [بارنيس وآخرون، 1990] إلى تمييز عملية احتساب  $\sigma_v(t)$  و  $\text{mod}\sigma_v(t)$  بقدر يعتمد على نمط الضوضاء وطول الوقت الميت. وترد جداول الانحياز حسب نمط الضوضاء ونسبة الوقت الميت المثوية في [بارنيس وآخرون، 1990]. وقد تتم مراوغة

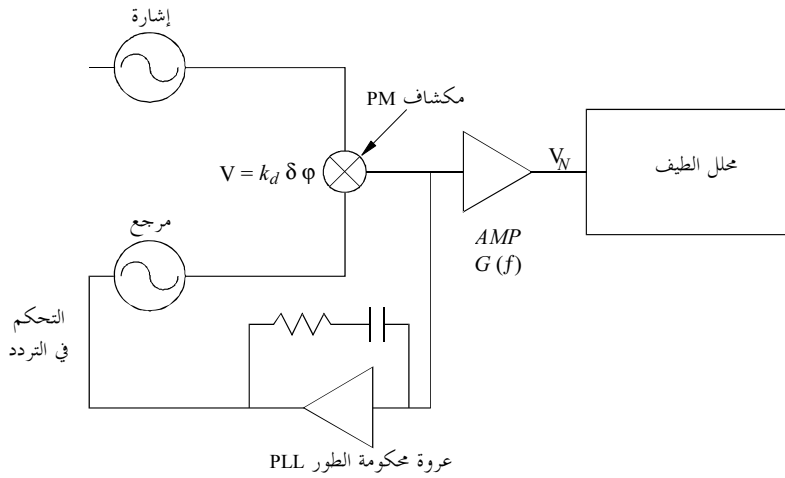
تحديد الوقت الميت باستعمال عدّادين يتم قدحهما بدورات متناوبة أو باستعمال إحدى التقنيات المنصوص عليها في الأقسام من 4.2.4 إلى 6.2.4. أما بالنسبة إلى الميقاتيات التي يكون لها ذات الترددات تقريباً فإن ذلك يعتبر مشكلة عويصة.

### 3.2.4 قياسات الضوضاء PM التخيفية

يبين الشكل 4.6 مخطط القدرة لنظام قياس تماثلي نمطي يُستعمل لقياس الضوضاء PM التابعة لمصدر معين مقابل مذبذب مرجعي. ويُستعمل المخلاط كمكشاف الطور لتحويل تغيرات الطور الصغيرة إلى تقلبات صغيرة للتوتر التي تُقاس فيما بعد بمحلّل الطيف. ويبين الجدول 4.2 والجدول 4.4 المعلمة التي تؤثر عموماً على عدم التيقن من القياس. أما الجدول 4.5 فيبين خرج المخلاط النمطي إزاء اختلاف الطور بين المصدر والمرجع. وتحدّد حساسية المخلاط  $k_d$  وربح المضخم الاسمي  $G(f)$  انطلاقاً من المعادلة (10.4) وقياس ميل إشارة الخفقان لدى التقاطع على الصفر وفترة الخفقان، وذلك على افتراض أن القياسات يتم إجراؤها بعد المضخم.

$$(4.10) \quad k_d G(f) = \frac{dV}{dt} \Big|_{v=0} \frac{T_b}{2\pi}$$

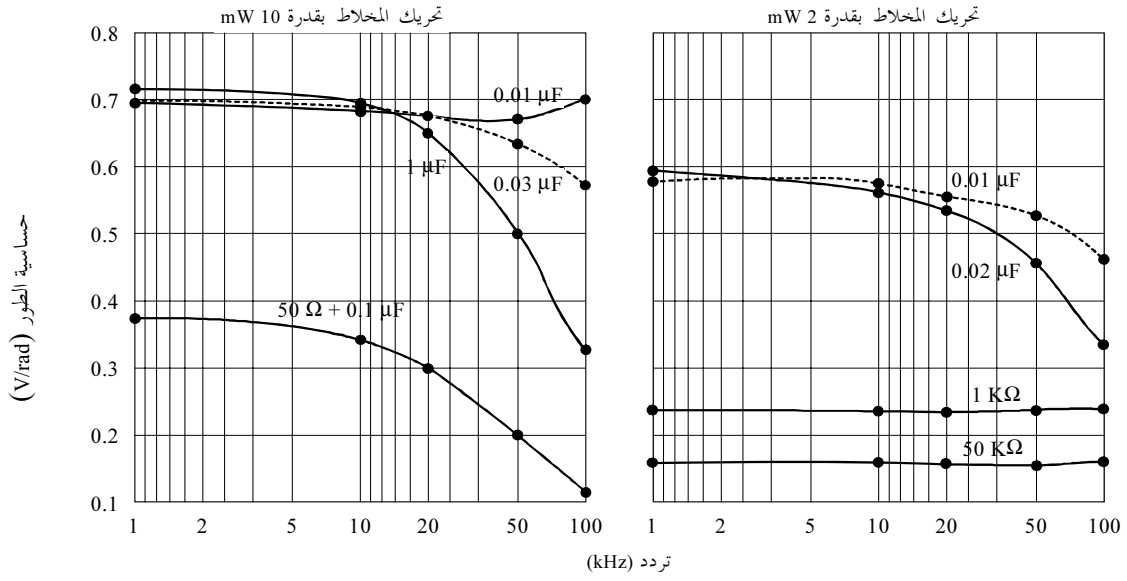
ويعتبر الاحتفاظ بتقلبات الطور في حدود  $90^\circ$  (تربيعية) للحصول على وظيفة نقل خطية من المخلاط عموماً أمراً ضرورياً، حيث يقارب توتر الخرج الصفر. ويؤدي الاحتفاظ بانحرافات الطور من التربيعية بأقل من 0,1 زاوية نصف قطرية عموماً إلى تقليص الخطأ إلى أقل من 0,2 dB. ويتم ذلك عادة باستعمال عروة محكمة الطور (PLL) تقوم بتخفيض تقلبات الطور على ترددات فورييه وتمرّر ترددات فورييه أعلى من عرض نطاق العروة المحكمة الطور [والز وآخرون، 1988؛ هوف وآخرون، 1981؛ والز وآخرون، 1976]. وعادة ما تُستعمل عروة محكمة الطور من الدرجة الثانية (عروة تحتوي على مُكاملة) لتقليل خطأ الطور [والز وآخرون، 1976]. انظر الشكل 4.6.



الشكل 4.6

### مخطط القدرة لقياسات نظام قياس الضوضاء PM باستعمال العروة المحكمة الطور

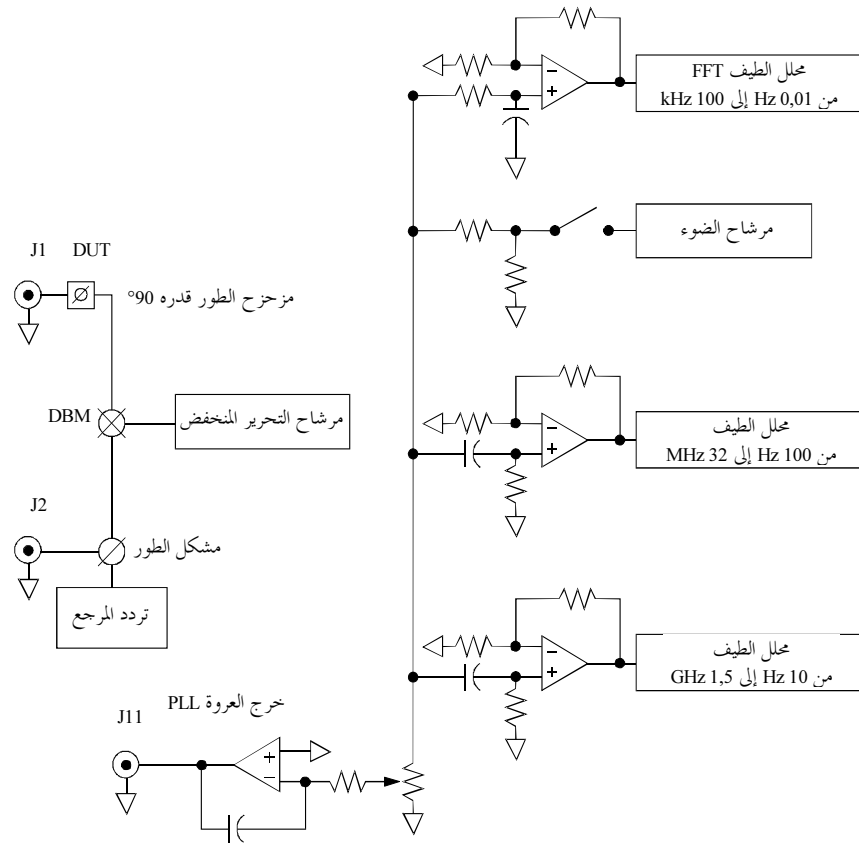
وتتكون الأخطاء الكبيرة من جراء تبعية التردد للمخلاط والمضخم على إثر المخلاط [والز وآخرون، 1988]. وتحدد ضوضاء المخلاط ومضخم الخرج استبانة هذا البناء أو أرضية الضوضاء التابعة له. وتؤدي استعمال الانتهات المنشطة من جديد إلى تحسين حساسية المخلاط وبالتالي إلى تحسين أرضية الضوضاء، غير أن ذلك يتم على حساب استحابة التردد التي لا تكون منتظمة في حين تزداد أخطاء الطور مقارنة بالأخطاء الحاصلة مع 50 ohm من الانتهات [نالسون وآخرون، 1992؛ والز وآخرون، 1988]. ويبين الشكل 4.7 الاعتماد النمطي لمخلاط منخفض السوية على 5 MHz بالنسبة إلى قدرة الحمولة ومقدرتها.



الشكل 4.7

حساسية نمطية لمخلوط ثنائي التوازن ذي سوية منخفضة على 5 MHz حسب وظيفة الانتهاء IF من أجل سويات تحريك تبلغ +2 و +10 dBm

قد يؤدي استعمال إحدى تقنيات المعايرة التالية إلى تخفيض الأخطاء وعدم التيقن الناجم عن تلك الآثار إلى حد بعيد. ويبين الشكل 4.8 تقنية متعددة الاستعمالات [والز وآخرون، 1988؛ والز، 1992؛ والز وآخرون، 1991].

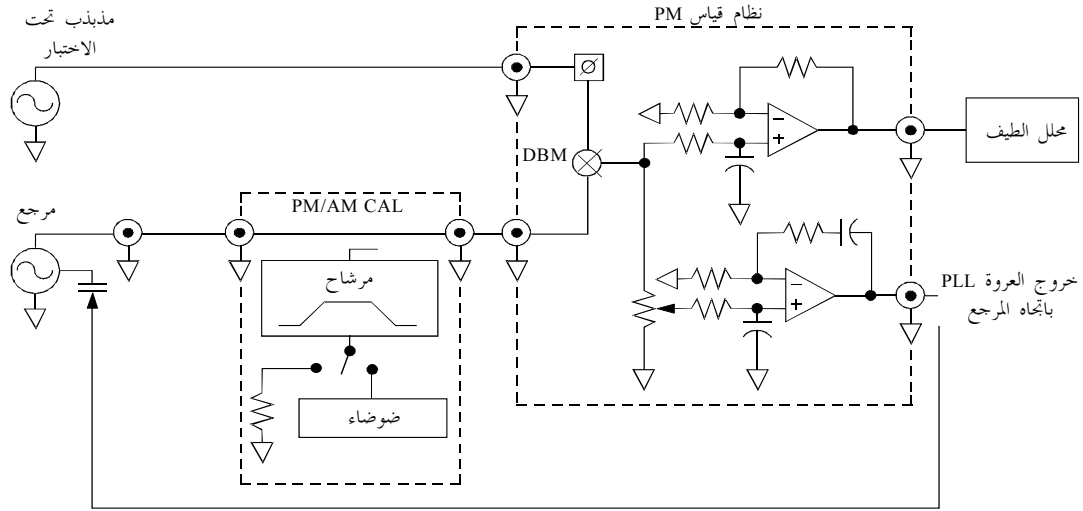


الشكل 4.8

#### مخطط القدرة لنظام قياس PM الممتد التابع إلى NIST باستعمال مشكل طور داخلي لمعايرة حساسية المخلاط وحساسية المضخم مقابل $f$

يتم في هذه التقنية تشفير نطاقات تشكيل الطور الجانبية، التي تكون باتساع ثابت يبلغ تقريباً  $f$ ، وذلك على الإشارة بواسطة المشكل. ويُنكس تردد مصدر التشكيل إلى ترددات تخالف فورييه ذات الفائدة. ونظراً لثبات اتساع نطاقات تشكيل الطور الجانبية إزاء تردد تخالف فورييه، فإنه بالإمكان استعمال اتساع الإشارة التي أزيل تشكيلها لدى محلل الطيف من أجل تصحيح كافة أخطاء التردد التابع [والز وآخرون، 1988]. وتحدد حساسية المخلاط والكسب على ترددات منخفضة على تردد الخفقان بواسطة قياس منحدر لإشارة الخفقان بعد المضخم في الشكل 4.8. ويقوم المنهج الوارد في هذا الأخير بتحسين دقة أنظمة القياس العريضة النطاق إلى أبعد الحدود. وقد تم تقرير القياسات التي لها تيقن معياري أقل من 2 dB من أجل ترددات فورييه إلى أكثر من 1 GHz من الموجة الحاملة [والز وآخرون، 1988؛ والز، 1992؛ والز وآخرون، 1991].

ويقدم الشكل 4.9 تقنية جديدة لمعايرة أخطاء التردد التابع التي تكيّفت جيداً مع الأنظمة المستعملة لإجراء العديد من القياسات على ذات التردد. ويضاف في هذه التقنية قدر صغير من ضوضاء غوسيان المتمركزة حول الموجة الحاملة إلى المرجع بواسطة مضخم تجميع بقدرة منخفضة الضوضاء. وينتج عن ذلك قدر متساو من الضوضاء PM والضوضاء AM التي يمكن إضافتها حسب الرغبة إلى المرجع [والز، 1993-1؛ والز، 1993-2؛ والز وآخرون، 1994]. وعند انقطاع تلك الضوضاء المُضافة، يكون منحدر الضوضاء PM المرجعية غير قابل للقياس من الناحية التقديرية [والز، 1993-2]. أما المصدر الذي يتعين قياسه فيتم إحكام طوره للمرجع باستعمال العروة PLL كما وُصفت آنفاً. ولا يتطلب استعمال هذه التقنية أية معطيات عن تردد الخفقان.



الشكل 4.9

### مخطط فدرية يبين استعمال معيار الضوضاء NIST PM/AM CAL لتحديد الضوضاء PM للمذبذب معين

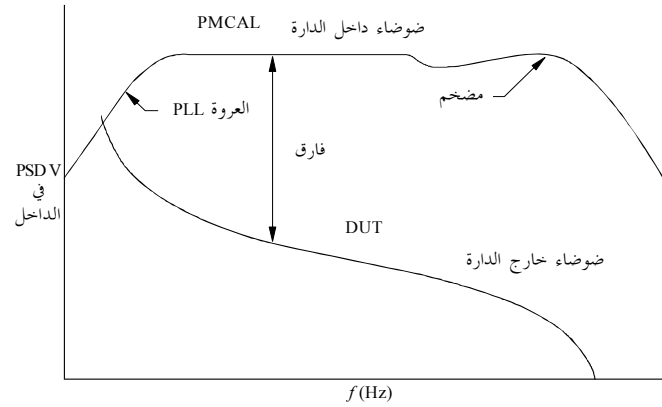
يمكن جعل الضوضاء PM/AM المضافة لضوضاء ثابتة بشكل متميز مع التردد فورييه حسب ما جاء في الشكل 4.7. ويتم قياس PSD لتوتر الضوضاء  $V_n$  عندما تكون الضوضاء في الدارة وعندما تكون خارجها. ويكون PSD مع الضوضاء داخل الدارة مساوياً لسوية الضوضاء المعيارية مضروباً في كسب المخلاط والمضخم. ويُفترض هنا أن يكون طرح ضوضاء المذبذبات وضوضاء النظام من هذا القياس وأن يكون لمكشاف الطور ما يكفي من نبذ للضوضاء AM الشيء الذي يسمح بطرح مساهمته. ويناقش القسم 8.2.4 القياسات التي تتسم ضوضاء النظام بالنسبة إليها بالأهمية. في حين يكون PSD من  $V_n$  عندما تكون الضوضاء خارج الدارة مساوية لضوضاء المذبذب تحت الاختبار زائد ضوضاء النظام مضروبة في كسب قدرة نظام المضخم والمخلاط. وإذا تم التعبير عن PSDs بحساب dB،

$$(4.11) \quad S_{\phi}(f)_{DUT} = S_{\phi}(f)_{calib} - \text{مُعَايَرَة - الفارق}$$

وذلك كما يوضحه الشكل 4.10. وتعكس التغييرات في PM/AM CAL التغير الذي يطرأ على الحساسية الإجمالية الناجمة عن آثار التردد التابعة مثل عمل PLL وكسب المضخم. ويتم الحصول على  $L(f)$  من الجهاز تحت الاختبار (DUT) انطلاقاً من المعادلة (4.11) [والز، 1990؛ والزر، وآخرون، 1991؛ والزر، 1993-1؛ والزر، 1993-2]. ويؤدي هذا المنهج إلى تقليص عدم التيقن من القياس إلى حد بعيد بسبب أخذه بعين الاعتبار لكافة مصطلحات الخطأ بشكل آلي، بما في ذلك المصطلحات التي تعتمد على التردد، ما عدا تحويل AM إلى PM. كما يؤدي هذا المنهج أيضاً إلى التقليص من الوقت المطلوب لإجراء قياسات الضوضاء PM الروتينية، إذ يُقلص القياس اليوم، مقارنة بالطرائق التقليدية، إلى إنشاء علاقة قياس بين الضوضاء داخل الدارة والضوضاء خارجها [والز، 1993-2].

خاصيات الضوضاء بالنسبة إلى معايير ضوضاء PM/AM على 5 MHz  
و 10 MHz و 100 Hz و 10,6 GHz

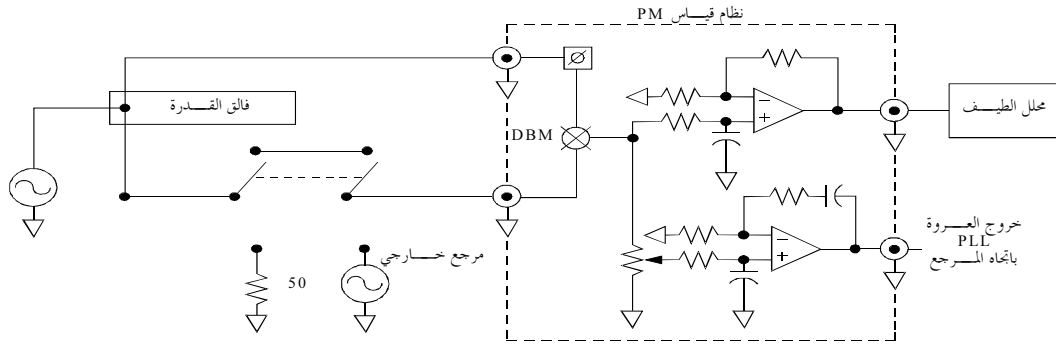
ضوضاء طور المصدر الاسمي/قناة، $\pm 3$ dBc/Hz								
تردد فورييه								
MHz 10	MHz 1	kHz 100	kHz 10	kHz 1	Hz 100	Hz 10	Hz 1	تردد المصدر
	174-	174-	174-	171-	163-	151-	121-	MHz 5
	168-	168-	168-	165-	157-	145-	115-	MHz 10
173-	173-	170-	170-	156-	130-	100-	70-	MHz 100
169-	140-	110-	85-	60-	30-	0	30+	GHz 10,6
أقصى الضوضاء المتبقية بين القنوات، dBc/Hz								
	175- $\geq$	175- $\geq$	194-	190-	182-	172-	162-	MHz 5
	175- $\geq$	175- $\geq$	197-	191-	183-	176-	161-	MHz 10
	194-	193-	193-	182-	172-	162-	152-	MHz 100
198-	196-	181-	181-	173-	163-	153-		GHz 10,6
الضوضاء PM/AM التفاضلية، $\pm 0,2$ dBc/Hz								
		127,3-	127,3-	127,3-	127,3-	127,3-	127,3-	MHz 5
	128,4-	128,4-	128,4-	128,4-	128,4-	128,4-	128,4-	MHz 10
129,8-	129,5-	129,5-	129,5-	129,5-	129,5-	129,5-	129,5-	MHz 100
138,9-	138,9-	138,9-	138,9-	138,9-	138,9-	138,9-	138,9-	GHz 10,6



الشكل 4.10

تحديد المعايرة باستعمال PM/AM CAL من الشكل 4.9

يمكن تحديد أرضية ضوضاء أنظمة القياس ذات مذبذبين بواسطة استعمال التخطيط المبين في الشكل 4.11. كما يستعمل فارق القدرة المعاد تنشيطه لتوفير إشارة مرجعية لكل من منفذي نظام قياس PM، ونظراً لثبات الطور بين الإشارتين الآن، فإنه لا بد من إيجاد إشارة ثالثة لمعايرة حساسية المخلاط وكسب المضخم. وهناك منهج يقوم على إنشاء الطور من  $\phi$  بحيث يقارب خرج المخلاط الصفر.



الشكل 4.11

#### مخطط قدرة صورة تقليدية لقياس أرضية الضوضاء لأنظمة قياس الضوضاء PM

وبعد ذلك يتم وضع انتهاء يبلغ 50 ohms على منفذ واحد لفائق القدرة ويتم توصيل الكبل بمصدر آخر مع ذات المعاوقة للخروج والقدرة مثل خرج فائق القدرة. ويكون المصدر الخارجي متخالفاً عن المرجع للحصول على إشارة خفقتان مناسبة لمعايرة حساسية المخلاط وكسب المضخم طبقاً لما تنص عليه المعادلة (4.10). وبعد معايرة  $G(f)$   $k_d$ ، يعاد توصيل الكبل من جديد بالمرجع الأصلي وتحتسب أرضية الضوضاء انطلاقاً من

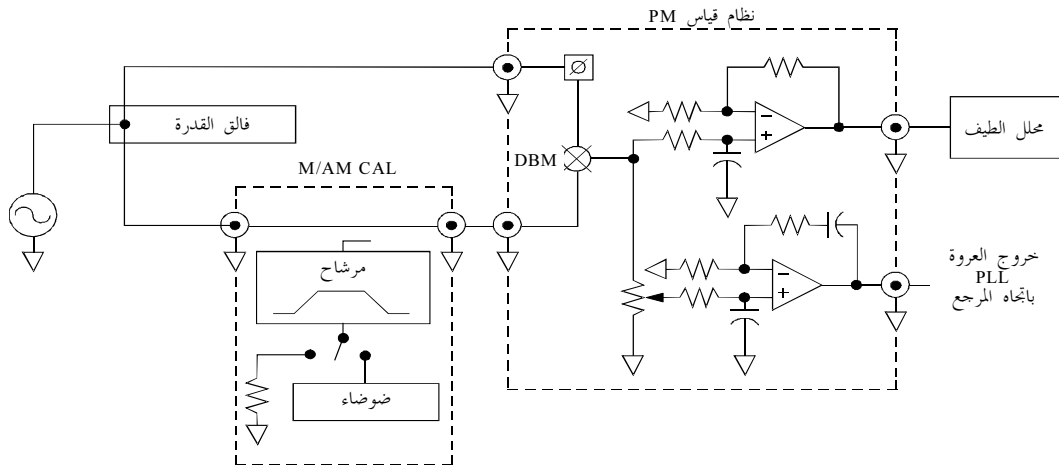
$$(4.12) \quad \frac{\text{PSD } V_N}{[k_d G(f)]^2} = S_{\phi \text{meas. syst.}} + 2\beta^2 S_{a1}(f) + \frac{\pi f}{v_o} S_{\phi 1}(f),$$

حيث  $S_{\phi 1}(f)$  هي الضوضاء PM للمرجع، و  $\beta^2$  هو تحويل AM إلى PM للمخلاط، و  $S_{a1}(f)$  هي الضوضاء AM للمرجع. وقد افترضنا وجود أدنى زحزحة للطور الضرورية للحصول على تربيعة طور المخلاط.

ويتمثل العائق الكبير الذي يواجه هذا المنهج لأنظمة القياس العريضة النطاق في كون المعايرة لا تقوم بقياس تغييرات التردد التابعة إلى  $k_d$  أو  $G(f)$  أو قياس مساهمة الضوضاء المرجعية [والز وآخرون، 1988]. انظر القسم 7.2.4 والقسم 8.2.4 للمزيد من التفاصيل.

ويعرض الشكل 4.12 تقنية جديدة تتمتع بدقة أكبر عموماً لأنها لا تتطلب أي تبديل لمصدر أو قياسات لتردد الخفقتان، ولأنها تأخذ تبعية التردد بالنسبة إلى  $k_d$  و  $G(f)$  بعين الاعتبار على نحو آلي. وفي هذا المنهج تتم معايرة حساسية المخلاط وكسب المضخم بواسطة قياس  $\text{PSD } V_n$  عندما يكون معيار الضوضاء PM/AM CAL داخل الدارة. ويُقطع مصدر الضوضاء في حين يتم قياس  $\text{PSD } V_n$  الناتج عن الضوضاء المتبقية. أما أرضية الضوضاء فتدرجها المعادلة (4.11). انظر الشكل 4.10. وقد تمت البرهنة على أن أرضية الضوضاء لهذا المنهج هي بمنتهى الضعف، بما يقارب 195 dBc/Hz في بعض الحالات. ويبين الجدول 4.7 مثلاً على أرضيات الضوضاء PM التي تم الحصول عليها باستعمال هذه التقنية لتردد الموجة الحاملة من 5 MHz إلى 10.6 GHz [والز، 1993-2].





الشكل 4.12

#### مخطط قدرة صورة قياس أرضية الضوضاء لأنظمة قياس الضوضاء PM

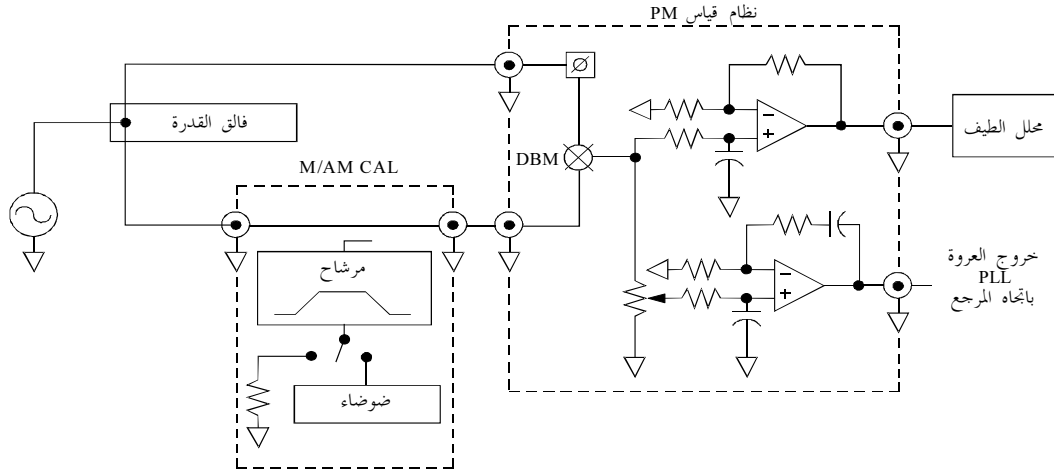
يحتوي المخلاط الثنائي التوازن المعتاد، المستعمل للكشف عن الطور، على تشوه توافقي كبير، وخصوصاً عندما يتم تحريكه بقوة. ويمكن استخدام هذه الخاصية للقيام بقياسات الضوضاء PM على توافقيات فردية من المذبذب المحلي أو التردد المرجعي. وتبلغ الحساسية النمطية لمثل ذلك القياس -9 dB للكشف لدى التوافقية الثالثة و -16 dB للكشف لدى التوافقية الخامسة [والز وآخرون، 1988]. ويُصمَّم البعض من أجهزة المخلاط للعمل حتى على توافقيات أعلى، وخصوصاً في نطاقات الموجات الصغيرة والمليمترية. وقد يُحدث التشوه التوافقي ذاك أخطاء في قياسات PM الأساسية لاحتواء خرج المخلاط على عناصر خارجية متأتية من الحفقتان بين توافقيات إشارة واحدة والضوضاء في الإشارة الأخرى. وقد تبلغ الأخطاء من 2 إلى 6 dB إذا كانت إحدى الإشارات موجة مربعة. كما قد يُستعمل مرشاح التحرير المنخفض أو مرشاح تمرير النطاق بالضوضاء المنخفضة للقضاء على هذه المشكلة [والز وآخرون، 1988؛ والز وآخرون، 1994].

وهناك مشكلة هامة أخرى تتعلق بقياسات PM الدقيقة وتمثل في وجود الضوضاء AM في المصادر وأنظمة القياس. وتقوم معظم الأجهزة بما في ذلك أجهزة التضخيم والتخليط بتحويل الضوضاء AM إلى ضوضاء PM ظاهرة. وتكون معاملات التحويل النموذجية من -3 إلى -30 dB. فمن الضروري إذاً استعمال مصدر ذي ضوضاء AM منخفضة نسبياً من أجل قياس أرضية الضوضاء لنظام القياس [والز وآخرون، 1988؛ نالسون وآخرون، 1994؛ أسكارونس (Ascarrunz) وآخرون، 1993؛ باركار (Parker)، 1989]. ويقوم التحويل من AM إلى PM في الواقع بإنشاء أرضية الضوضاء للعديد من الأجهزة ولا تقوم بذلك الضوضاء PM اللازمة. وتدل الوثائق المرجعية في [والز وآخرون، 1988؛ أسكارونس وآخرون، 1993؛ باركار، 1989] على ذلك الشأن. انظر القسم 4.4 للمزيد من التفاصيل بخصوص تقنيات قياس الضوضاء AM.

#### 4.2.4 أنظمة قياس التوقيت بمخلاطين

يبين الشكل 4.13 مخطط قدرة مبسطاً لنظام قياس التوقيت بمخلاطين [شتاين وآخرون، 1982؛ شتاين وآخرون، 1983]. ويسمح هذا النظام بقياس الطور بين مذبذب مرجعي معين ومصدر أو عدة مصادر أخرى، وهو يستعمل عموماً في إدارة نظام مجموعات الميقاتيات. وتعمل ميقاتيات مجموعة معينة عموماً بذات تردد تقريباً. وعادة ما تكون تخالفات التردد النسبية أقل من  $10^{-11}$ . ولا يستطيع النظام التخفيقي المعياري بمخلاط واحد قياس الميقاتيات على مثل تخالفات التردد المنخفضة تلك لأن المعطيات لا يتم استخلاصها إلا على التقاطعات على الصفر ولأن

ذلك قد يحدث أقل من مرتين في اليوم. ويمكن النظام بمخلاطين من التغلب على هذه المشكلة بخفان كل مصدر مقابل مذئب متخالف مشترك الذي يكون أحياناً محكوم الطور مع المرجع. وبتعديل تردد التخالف يمكن الحصول على معدل المعطيات المحدد من أجل مقارنة طور مختلف الميقاتيات.



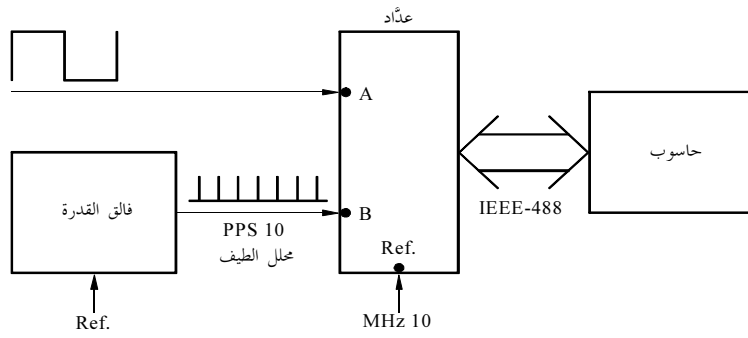
الشكل 4.13

#### مخطط فدرة نظام قياس الفارق الزمني بمخلاطين

يبدو هذا المنهج أكثر تعقيداً نوعاً ما من الأنظمة الأحادية القناة ولكنه يحتوي على ضوضاء منخفضة وعلى وقت ميت منعدم واستبانة قابلة للضبط، وهو قادر على قياس الطور والتوقيت والتردد واستقرار التردد [شتاين وآخرون، 1982؛ شتاين وآخرون، 1983]. إذ تكون استبانة التردد النسبي التابعة لهذا المنهج عادة من  $10^{-12}$  إلى  $10^{-14}$  على تردد الموجة الحاملة 5 MHz. ويدير هذا الأداء في السلم  $1/v$ . كما أنه بالإمكان تحسين أرضية الضوضاء كثيراً باستعمال تقنيات الارتباط المتبادل [ليباك (Lepek) وآخرون، 1993؛ غروسلامبارت (Gros Lambert) وآخرون، 1981]. انظر القسم 8.2.4 للمزيد من التفاصيل بخصوص المفاهيم العامة.

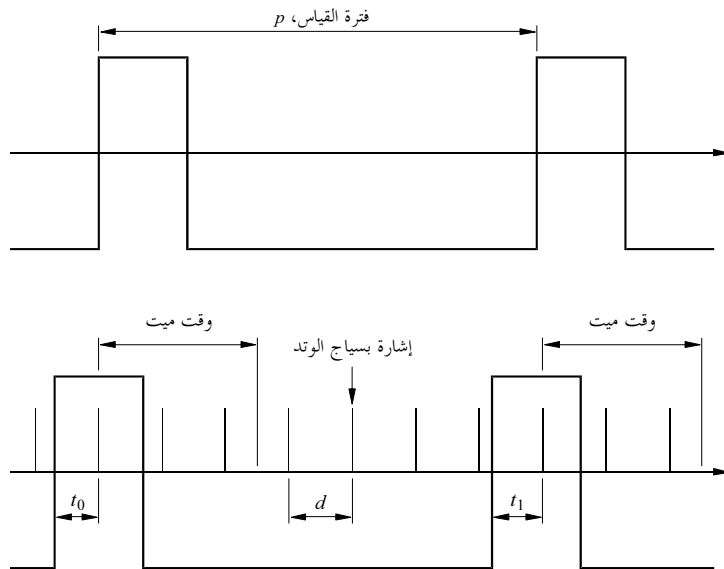
#### 5.2.4 أنظمة قياس على قاعدة الإشارة بسياج الود

يقدم الشكل 4.14 والشكل 4.15 طريقة أخرى لقياس استقرار تردد الميقاتيات المحكمة التي ينعدم فيها الوقت الميت أيضاً [غرنيها، 1989]. وتُقسم الإشارة المرجعية إلى تردد مناسب يكون عادة بدرجة 10 Hz. وتبدأ إشارة العمل بعدد الفاصل الزمني وتقوم نبضة الإشارة المرجعية المقسمة (إشارة بسياج الود) بتوقيفه. وطالما كانت فترة إشارة الخفان طويلة مقارنة بوقت إعادة تدميث العداد، فإن هذا المنهج سيعمل بدون وقت ميت. ويعتبر تحليل المعطيات لاسترجاع طور الميقاتية يسيراً وهو موجود بالتفصيل في [غرنيها، 1989]. ويبدو هذا المنهج أكثر تعقيداً من الأنظمة الأحادية القناة ولكنه يحتوي على ضوضاء منخفضة وعلى وقت ميت منعدم واستبانة قابلة للضبط، وهو قادر على قياس الطور والتوقيت والتردد واستقرار التردد. فهو يتطلب مرجعاً متخالفاً للخفان إزاء المصدر تحت الاختبار، مثلما هو الشأن بالنسبة إلى نظام قياس اختلاف التوقيت بمخلاطين.



الشكل 4.14

مخطط فدرية لنظام قياس الإشارة بسياج الوتد



الشكل 4.15

تخطيط التوقيت البياني لنظام قياس الإشارة بسياج الوتد

## 6.2.4 تقنيات رقمية لقياسات التردد و PM

إذا كانت إشارة الخفكان بين مصدرين قد تمت رقمنتها بقدر كاف من الإحكام، فإنه من الممكن استرجاع كل من التغييرات الزمنية للاتساع والطور [بليير (Blair)، 1994]. وقد تُحلل تغييرات الطور الزمنية للحصول على التوقيت والتردد كما ذكر آنفاً. ويعتبر تحويل فورييه للتقاطعات على الصفر نسبياً بالنسبة إلى الضوضاء PM. ولا يتعين على الإشارة أن تشبع المخلاط إذا كان الحصول على خرج نسبي مقارنة بتقلبات اتساع الإشارة تحت الاختبار مرغوباً. غير أن أفضل الترتيبات من أجل الحصول على قياسات PM بوضوء منخفضة تقوم على تشبيح منافذ كل من المرجع والإشارة.

## 7.2.4 قياسات تقنية القبة الثلاثية الزوايا

تحتوي القياسات التماثلية البسيطة الأحادية القناة التي ذكرت سابقاً على الضوضاء PM التابعة للإشارة والمرجع ونظام القياس. ونظراً لعدم ترابط ضوضاء مختلف المصادر بعضها ببعض، فإن خرج المخلاط يكون نسبياً مقارنة بالإضافة البسيطة لقدرة الضوضاء لكافة المساهمات، أي أن مختلف مكونات الضوضاء منفصلة. انظر المعادلة (4.13). [والز وآخرون، 1988؛ والز وآخرون، 1991]. ويكون  $\beta^2$  عامل تحويل AM إلى PM للمخلاط.

$$(4.13) \quad S_{\phi 1,2}(f) = S_{\phi 1}(f) + S_{\phi 2}(f) + S_{\phi \text{meas. syst.}}(f) + \beta^2 S_{a1}(f) + \beta^2 S_{a2}(f)$$

$$(4.14) \quad S_{\phi 1}(f) = \frac{1}{2}[S_{\phi 1,2}(f) + S_{\phi 1,3}(f) - S_{\phi 2,3}(f) - S_{\phi \text{meas. syst.}}(f) - \beta^2 S_{a1}(f)]$$

يمكن تقدير ضوضاء المصدر تحت الاختبار تقديراً أفضل أحياناً بواسطة قياس الضوضاء PM بين ثلاث مذبذبات مختلفة. ثم يتم تقدير الضوضاء PM لمذبذب واحد للإشارة انطلاقاً من المعادلة (4.14). ويتعين تقدير أرضية الضوضاء PM لنظام القياس ومساهمة ضوضاء الاتساع لهذه الطريقة. وإذا كانت الضوضاء AM التابعة للمصدر أعلى من الضوضاء PM، فإنه يمكن تحديد أرضية ضوضاء القياس وذلك حسب القيمة  $\beta$ . وتراوح القيم  $\beta^2$  النموذجية من -5 إلى -30 dB. ويمكن تقدير الضوضاء الناجمة عن نظام القياس بواسطة استعمال الطرائق التي تعرض لها القسم 3.2.4. ويمكن قياس  $S_a(f)$  بواسطة التقنيات المذكورة في القسم 4.4.

وفي الحالات المثلى يمكن تقليص المساهمة  $S_{\phi 1}(f)$  الناتجة عن الضوضاء PM من المصدرين 2 و 3 وعن نظام القياس، وذلك بعامل من 10. ويعتمد نجاح هذا المنهج على ملاءمة سويات الإشارة بجذر مع المخلاط وقياس  $k_d G(f)$  و  $V_n$  بالنسبة لكل عملية قياس.

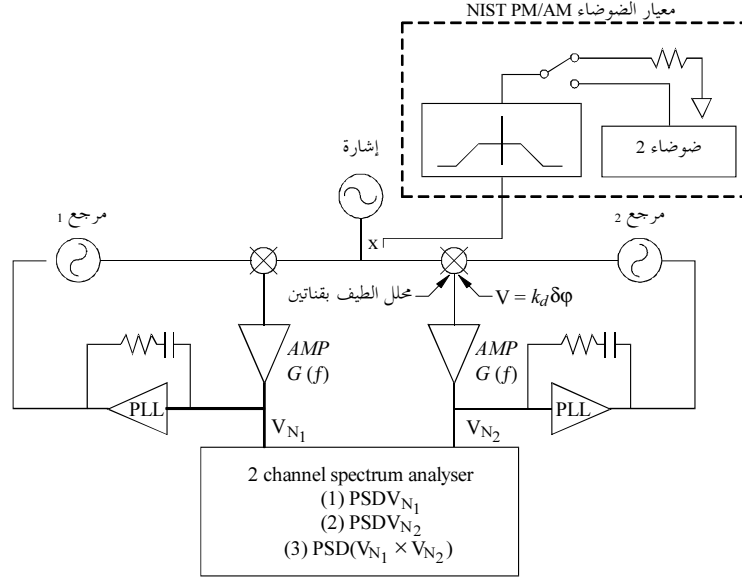
## 8.2.4 أنظمة قياس الارتباط المتبادل

يبين الشكل 4.16 نظام قياس بقناتين لقياس الضوضاء PM التابعة لمصدر الإشارة [والز وآخرون، 1988؛ نالسون وآخرون، 1994؛ أسكارونس وآخرون، 1993؛ لانس (Lance) وآخرون، 1984؛ والز، 1992]. ويحتوي كل نظام قياس على الضوضاء PM التابعة للمصدر تحت الاختبار زائد الضوضاء PM للإشارة المرجعية المتصاحبة معها ونظام القياس كما هو مذكور آنفاً. ولا يحتوي متوسط PSD من  $(V_{N1} \times V_{N2})$  في الحالة المثلى إلا على الضوضاء PM التابعة للمصدر المشترك. إذ إن الضوضاء التابعة للمرجعين ولنظامي القياس هي غير مرتبطة ويتعين تقدير متوسطها على الصفر كما الجذر التربيعي لعدد من القياسات، N. وفي التطبيق تكون أرضية الضوضاء مضبوطة بواسطة  $\beta^2$  والضوضاء AM التابعة للمصادر.

$$(4.15) \quad \frac{\text{PSD}(V_{N1} V_{N2})}{K_{d1} K_{d2} G_1(f) G_2(f)} = S_{\phi 1}(f) + \beta^2 (S_{a1}(f) + S_{a2}(f) + S_{a3}(f)) + \frac{S_{\phi}(f)_2 + S_{\phi}(f)_3 + S_{\phi}(f)_{\text{meas. syst.}}}{\sqrt{N}}$$

ويمكن تقليص مساهمة الضوضاء PM المتأتية من المصادر وأنظمة القياس في العادة بمعامل من 100 مع المتوسطات  $10^4$ . ويمكن ذلك من قياس الضوضاء PM في مصدر أفضل بكثير من مراجع أخرى متيسرة. وتعمل هذه التقنية من منطقة الترددات RF إلى منطقة الموجات mm [والز وآخرون، 1988؛ نالسون وآخرون، 1994؛ أسكارونس وآخرون، 1993؛ لانس وآخرون، 1984؛ والز، 1992]. ويبين الجدول 4.7 في وسطه

أرضيات الضوضاء النموذجية لهذا المنهج وترددات الموجة الحاملة من 5 MHz إلى 10,6 GHz. ويكون لتطبيق الارتباط المتبادل هذا على قياسات القبة الثلاثية الزوايا ضوضاء أكثر انخفاضاً من ضوضاء الطريقة المذكورة في القسم 7.2.4 نظراً لاستخلاص المعطيات بالتأون، وهو ما يؤدي إلى نبذ أفضل للضوضاء،



الشكل 4.16

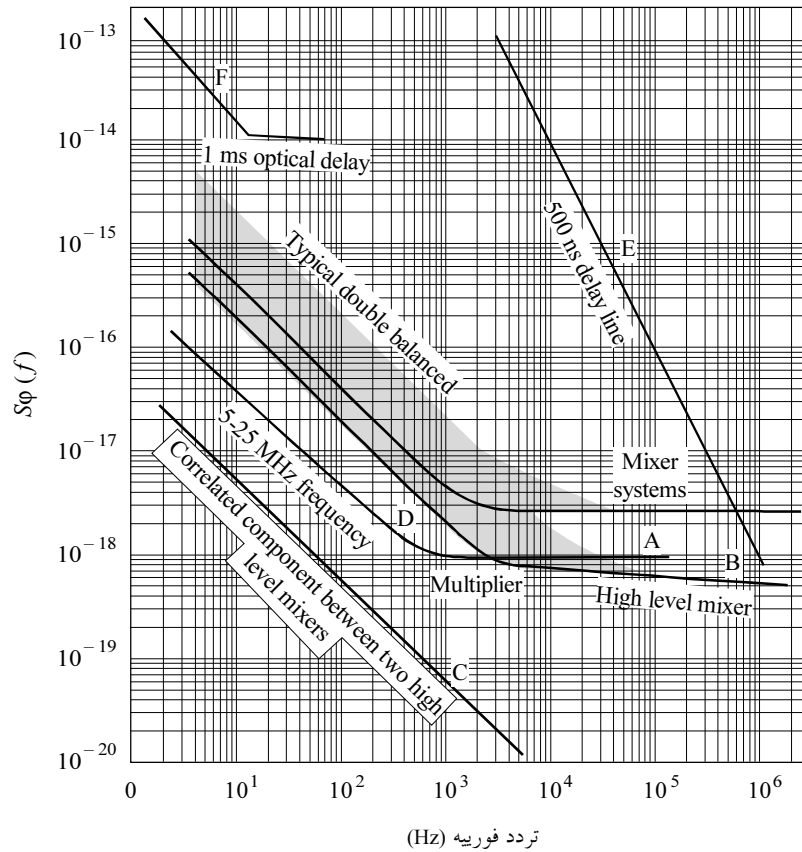
مخطط فدرية لنظام قياس بقناتين يستعمل تقنيات الارتباط المتبادل لتقدير الضوضاء PM التابعة لمذبذب إشارة معين

ونظراً لاعتماد النتائج على  $(k_d G(f))^2$  على نحو خطي في كل قناة عوضاً عن الاختلاف بين المصادر. انظر الشكل 4.17 لمقارنة أرضيات الضوضاء النموذجية لمختلف تقنيات قياس PM [والز وآخرون، 1988].

ويمكن استعمال الارتباط المتبادل مع أغلب التقنيات بقناة واحدة لتحسين الاستبانة فيها. وقد بين [لانس وآخرون، 1984] أيضاً استعمال الارتباط المتبادل للتقليص من أرضية الضوضاء لأنظمة قياس الضوضاء PM بخطوط التأخر. أما [ليباك وآخرون، 1993؛ غروسلايمارت وآخرون، 1981] فقد بينوا استعمال تقنيات الارتباط المتبادل للتقليص من أرضية الضوضاء في أنظمة قياس ميدان التوقيت.

### 3.4 قياسات التردد والضوضاء PM بمذبذب واحد

هناك عدد من التقنيات التي يمكن استعمالها لقياس أداء مصدر واحد. وتتميز كل تلك التقنيات باستعمال خط تأخر أو طنان مستقر كميّز للتردد. وتكون إشارة الخرج في مثل تلك الأنظمة نسبية مقارنة باختلاف التردد عن التردد الاسمي، عوضاً عن اختلاف الطور بين مصدرين كما ورد في القسمين 0.2.4 و 6.2.4. أما بالنسبة إلى قياسات PM فإن أرضية الضوضاء القريبة من الموجة الحاملة يكون مداها أعلى بدرجات عديدة مما يكون عليه في التقنيات بالمذبذين المذكورة آنفاً في الأقسام من 0.2.4 إلى 8.2.4 [لانس وآخرون، 1984؛ آشلاي (Ashley)، 1968]. انظر الشكل 4.17 لمقارنة أرضيات الضوضاء بتقنيات المذبذب الواحد بتلك المتحصل عليها في الطرائق بالمذبذين. ويمكن استعمال تقنيات الارتباط المتبادل لتحسين أرضية الضوضاء للقياسات بقناة واحدة الموضحة في الشكل 4.17. ويتمثل العائق الآخر في كافة تقنيات القياس بالمذبذب الواحد في صعوبة التحقق من وجود أرضية ضوضاء تكون أفضل من المصدر المختبر.



الشكل 4.17

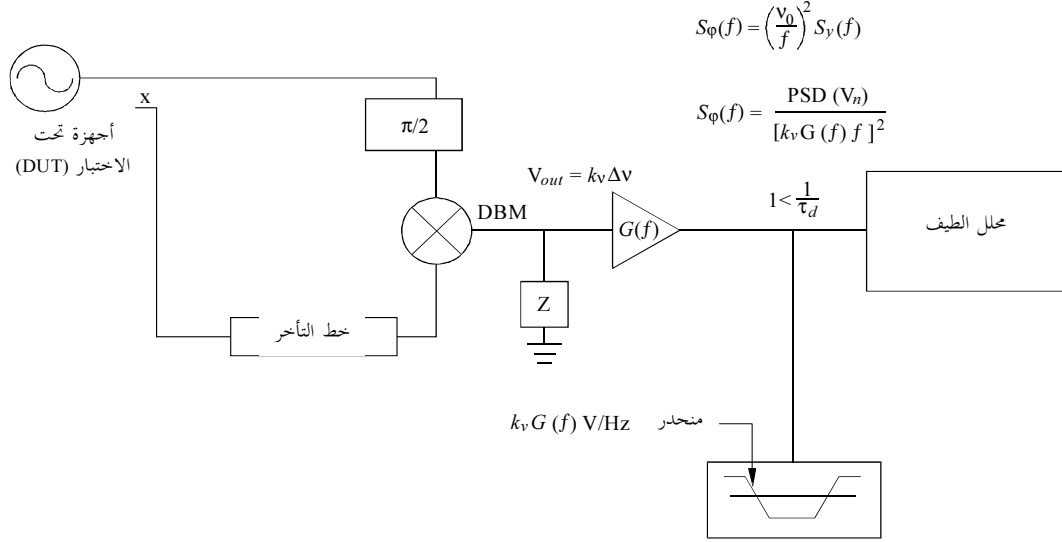
مقارنة أرضية الضوضاء أو استبانة مختلف صور قياس PM

### 1.3.4 قياسات التردد والضوضاء PM بخط التأخر

يبين الشكل 4.18 مخطط قدرة نظام بسيط لقياس التردد والضوضاء PM لمصدر ما باستعمال مُميز تردد خط التأخر [والز وآخرون، 1988]. وتوجد صيغ أكثر تبلوراً لهذا النظام في [لانس وآخرون، 1984؛ آشلاي، 1968؛ أفروموف (Avramov) وآخرون، 1994]. ويوفر المخلاط توتر خرج نسبي مقارنة بالاختلاف بين طور الإشارة الفورية والإشارة المتأخرة. ويتم ضبط زحزحة الطور  $\phi$  للحصول على توتر خرج يقارب الصفر بتردد محدد. وتكون التغيرات الصغيرة التي تطرأ على الطور بالنسبة إلى النقطة الأولية نسبية ذات تغيرات صغيرة في التردد. وتعتبر درجة عدم التيقن لتحديد التردد بواسطة هذه الطريقة درجة عالية، غير أنها مفيدة عادة في قياس التغيرات التي تطرأ على التردد. وتوجد تقنية بسيطة لمعايرة القيمة من  $k_v G(f)$  تتمثل في قياس  $dV$ ، والتغيير في توتر الخرج للتيار المتواصل عندما تطبق القفزة في التردد  $dV$  على إشارة الدخل التي يكون اختلافها  $dV$  قوياً مقارنة بالضوضاء وأضعف من  $1/50\tau$  تقريباً. انظر المعادلة 4.16. ويمكن تحليل المعطيات للحصول على الضوضاء PM باستعمال المعادلة 4.17.

وتصبح حساسية هذا المنهج صفرًا كلما اقترب تأخر الطور  $(2n + 1)90^\circ$  [آشلاي، 1968]. وتؤدي فترات التأخر الطويلة، الضرورية للحصول على حساسية عالية بتخالفات منخفضة لتردد فورييه، إلى توهين كبير لإشارات التردد RF وإشارات الموجات الصغيرة. ويتحدث المرجع [أفروموف وآخرون، 1994] عن أرضية ضوضاء تقارب -190 dBc/Hz بالعديد من MHz. بموجة حاملة ذات 1 GHz في حالة نظام تأخر بقناتين مع الارتباط المتبادل. ويمكن التخفيف من هذه المشكلة إلى حد ما بتشفير التردد RF أو الموجات الصغيرة على إشارة بصرية قد تمت ملاءمتها بواسطة خط تأخر بالألياف البصرية المنخفضة الفقدان. وتحسن بذلك حساسية الموجة الحاملة القريبة على حساب أرضية الضوضاء

العريضة النطاق التي تعتبر ضعيفة نسبياً نظراً للضوضاء الموجودة في أنظمة المشكّل/مزيل التشكيل البصرية. ويقدم الشكل 4.18 من المرجع [لانس وآخرون، 1984] مقارنة بين المعطيات التي تم الحصول عليها بخصوص مختلف التأخيرات مقابل النتائج المتأتية من الطريقة بالمذبذبين [أفروموف وآخرون، 1994].



$$S_{\phi}(f) = \left(\frac{V_0}{f}\right)^2 S_V(f)$$

$$S_{\phi}(f) = \frac{\text{PSD}(V_n)}{[k_v G(f) f]^2}$$

الشكل 4.18

#### مخطط فدرية مميّز خط التأخر لقياسات PM

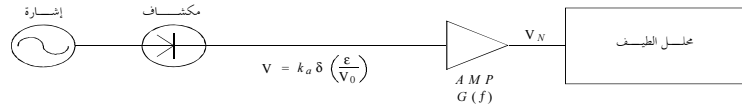
$$(4.16) \quad dV = k_v G(f) dv$$

$$(4.17) \quad S_{\phi}(f) = \frac{V_N^2}{(f k_v G(f))^2 BW}$$

#### 4.4 قياسات الضوضاء AM

تُحدّ الضوضاء AM الموجودة في المصادر والأجهزة وعملية تحويل AM إلى PM عادة من أداء الأنظمة العملية. وليس هناك من قياس PM كامل بدون قياس لسوية الضوضاء AM. ويمكن القيام بقياس ضوضاء تشكيل الاتساع (AM) بدون الحاجة إلى أي مرجع، وبالتالي فإن كافة تقنيات القياس لهذا النمط من الضوضاء هي قياسات بمذبذب واحد.

ويبين الشكل 4.19 نظام قياس بسيط بقناة واحدة لقياسات AM [والز وآخرون، 1988]. ويمكن معايرة الحساسية حسب تردد فورييه باستعمال مصدر يتم تشكيله بالاتساع [نالسون وآخرون، 1992]. وتتمثل فائدة هذا التخطيط في كونه قادراً على توفير درجة عدم تيقن أدنى على مدى أوسع من ترددات فورييه. في حين توفر القياسات التي تستعمل معيار الضوضاء AM الموجود في [والز، 2-1993] معايرة من  $K_a$  على مدى  $f$  ممتداً إلى قرابة dc حتى 10% من الموجة الحاملة أو 1 GHz، إن كانت تلك القيمة أدنى.



الشكل 4.19

### مخطط فدرة نظام بسيط لقياس الضوضاء AM

يمكن استعمال النظام لقياس الضوضاء AM بقناتين، المستخدم لتقنيات الارتباط المتبادل من أجل تحسين أرضية الضوضاء إلى حد كبير، للتقليص من المساهمة التي تقدمها ضوضاء نظام القياس إلى الضوضاء الكلية المقيسة [والز، 1993-1؛ والز، 1993-2؛ والز وآخرون، 1994؛ نالسون وآخرون، 1994؛ أسكارونس وآخرون، 1993]. وتقوم ذات التقنيات المذكورة آنفاً بمعايرة هذا النظام.

كما يعطي الجدولان 4.3 و 4.4 قائمة بالمعلومات التي تؤثر بشكل مشترك على عدم التيقن من قياسات الضوضاء AM.

## المراجع

- ALLAN, D.W. and BARNES, J.A., [1981] "A Modified "Allan Variance" with Increased Oscillator Characterization Ability," Proceedings of the 35th Annual Symposium on Frequency Control, 1981.
- ALLAN, D.W.; HELLWIG, H.; KARTASCHOFF, P.; VANIER, J.; VIG, J.; WINKLER, G.M. R., and YANNONI, N., [1988] "Standard Terminology for Fundamental Frequency and Time Metrology," Proceedings of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control, 1988.
- ASCARRUNZ, F.G.; FERRE, E.S.; and WALLS, F.L., [1993] "Investigations of AM and PM Noise in X-Band Devices," Proceedings of the 1993 Frequency Control Symposium, Salt Lake City, UT, June 2-4, 303-311, 1993.
- ASHLEY, J.R.; SEARLES, C.B.; and PALKA, F.M., [1968] IEEE Transactions Microwave Theory Tech. MTT-16, 1968, 753-760.
- AVRAMOV, I.D.; WALLS, F.L.; and PARKER, T.E., [1994] "Extremely low thermal Noise Floor Power Oscillator Using Surface Transverse Waves," Proceedings of the 1994 IEEE Frequency Control Symposium, 1994.
- BARNES, J.A. and ALLAN, D.W., [1990] "Variances Based on Data with Dead Time Between the Measurements," NIST Technical Note 1318, 1990.
- BARNES, J.A.; CHI, A.R.; CUTLER, L.S.; HEALEY, D. J.; LEESON, D.B.; McGUNIGAL, T.E.; MULLEN, J.A. Jr.; SMITH, W.L.; SYDNOR, R.L.; VESSOT, R.F.C.; and WINKLER, G.M.R., [1971] "Characterization of Frequency Stability," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1971.
- BERNIER, L.G., [1987] "Theoretical Analysis of the Modified Allan Variance," Proceedings of the 41st Annual Frequency Control Symposium 1987, pp 116-121.
- BLAIR, D., [1994] "Cryogenic Sapphire Dielectric Resonator Microwave Oscillator with Improved Stability", Proceedings of the 8th European and Time Forum, Weihenstephan, Germany, 1994.
- GREENHALL, C.A., [1989] "A Method for Using a Time Interval Counter to Measure Frequency Stability," IEEE Transactions. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. UFFC-36, no. 5, September 1989, pp. 478-480
- GROSLAMBERT, J.; FEST, D.; OLIVIER, M.; and GAGNEPAIN, J.J., [1981] "Characterization of Frequency Fluctuations by Cross-Correlation and by using 3 or more Oscillators", Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium, 1981, pp. 113-118.



- HOWE, D.A.; ALLAN, D.W.; and BARNES, J.A., [1981] "Properties of Signal Sources and Measurement Methods", Proceedings of the 35th Annual Symposium on Frequency Control, 1981.
- HOWE, D., [1995] "An Extension of the Allan Variance which Removes a Bias at Long Term", Proceedings of the 1995 International IEEE Frequency Control Symposium, 1995.
- LANCE, A.L.; SEAL, W.D.; and LABAAR, F., [1984] "Infrared and Millimetre Waves", Vol 11, 1984, pp 239-289.
- LEPEK, A. and WALLS, F. L., [1993] "Cross Correlation Analysis Improves Time-Domain Measurements", Proceedings of the 1993 IEEE Frequency Control Symposium, Salt Lake City, UT, 1993, pp 312-320.
- LESAGE, P. and AUDOIN, A., [1973] "Characterization of Frequency Stability: Uncertainty due to the Finite Number of Measurements", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-22, pp 157-161, 1973.
- LESAGE, P. and AYI, T., [1984] "Characterization of Frequency Stability: Analysis of the Modified Allan Variance and Properties of Its Estimate", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1984.
- NELSON, L.M. and WALLS, F.L., [1992] "Environmental Effects in Mixers and Frequency Distribution Systems", Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium, Hershey, PA. May 27-29, 831-837, 1992.
- NELSON, L.M.; NELSON, C.W.; and WALLS, F.L., [1994] "Relationship of AM to PM Noise in Selected RF Oscillators", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1994.
- PARKER, T. E., [1989] "Residual Noise in Components", Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, 349-359, 1989.
- PERCIVAL, D. B. and WALDEN, A.T., [1993] "Spectral Analysis for Physical Application", Cambridge University Press, 1993.
- RUTMAN, J. and WALLS, F.L., [1991] "Characterization of Frequency Stability in Precision Frequency Sources", Proceedings of the IEEE, 79, 952-960, 1991.
- STEIN, S.; GLAZE, D.; LEVINE, J.; GRAY, J.; HILLIARD, D.; and HOWE, D., [1982] "Performance of an Automated High Accuracy Phase Measurement System", Proceedings of the 36th Annual Symposium on Frequency Control, 314-320, 1982.
- STEIN, S.; GLAZE, D.; LEVINE, J.; HILLIARD, D.; HOWE, D.; and ERB, L., [1983] "Automated High Accuracy Phase Measurement System", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement IM-32, 1983, pp 227-231.
- STEIN, S.R., [1985] "Frequency and Time - Their Measurement and Characterization", Precision Frequency Control, Volume 2, NELSON et.al. 1992, 1985.
- STEIN, S.R. and TURNEEAURE, J.P., [1973] "The Development of the Superconducting Cavity Stabilized Oscillator", Proceedings of the 27th Annual Symposium on Frequency Control, 414-420, 1973.
- SULLIVAN, D.B.; ALLAN, D.W.; HOWE, D.A.; and WALLS, F. L., [1990] "Characterization of Clocks and Oscillators", NIST Technical Note 1337, 1-342, 1990.
- TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E. [1993] NIST Technical Note TN 1297, 1993.
- WALLS, F.L., [1990] "Method and Apparatus for Wide Band Phase Modulation", United States Patent - No.4, 968, 908, 1990.
- WALLS, F.L., [1992] "Frequency Calibration Standard Using a Wide Band Phase Modulator", United States Patent - No. 5, 101, 506, 1992.
- WALLS, F.L., [1993] "Reducing Errors, Complexity, and Measurement Time for PM Noise Measurements", Proceedings of 1993 Frequency Control Symposium, Salt Lake City, UT, June 2-4, 81-86, 1993.
- WALLS, F.L., [1993] "Secondary Standard for PM and AM Noise at 5, 10, and 100 MHz", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-42, 136-143, 1993.
- WALLS, F.L.; BARILLET, R.; BESSON, R.; GROSLAMBERT, J.; SCHUMACHER, P.; RUFENACHT, J.; and HILTY, K., [1994] "International Comparison of Phase Noise", Proceedings of the 8th European Frequency and Time Forum, March 9-11 Weihenstephan, Germany, 1994.

WALLS, F.L.; CLEMENTS, A.J.D.; FELTON, C.M.; LOMBARDI, M.A.; and VANEK, M.D., [1988] "Extending the Range and Accuracy of Phase Noise Measurements", Proceedings of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control, 432-441, 1988.

WALLS, F.L.; CLEMENTS, A.J.D.; FELTON, C.M.; and MARTIN, T.D. [1991] "Precision Phase Noise Metrology", Proceedings of the National Conference of Standards Laboratories (NCSL), Albuquerque, NM, August, 1991, 257-275.

WALLS, F. L. and DEMARCHI, A., [1975] "RF Spectrum of a Signal After Frequency Multiplication; Measurement and Comparison with a Simple Calculation", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-24, 210-217, 1975.

WALLS, F. L.; GARY, J.; O'GALLAGHER, A.; SWEET, L.; and SWEET, R., [1990] "Time-Domain Frequency Stability Calculated from the Frequency Domain: an Update", Proceedings of the 4th European Frequency and Time Forum, Neuchatel, Switzerland, March 1990, pp. 197-204.

WALLS, F.L.; PERCIVAL, D.B.; and IRELAN, W.R., [1989] "Biases and Variances of Several FFT Spectral Estimators as a Function of Noise Type and Number of Samples", Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, pp. 336-341, 1989.

WALLS, F.L. and STEIN, S.R., [1976] "Servo Techniques in Oscillators and Measurement Systems", NBS Technical Note 692, 1-20, 1976.

WALLS, W.F., [1992] "Cross-correlation Phase Noise Measurements", Proceedings of the 1992 Frequency Control Symposium, 257-261, 1992.

WALTER, T., [1994] "Characterizing Frequency Stability: A Continuous Power-Law Model with Discrete Sampling", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 43, pp 69-79, 1994.

WEISS, M.A.; WALLS, F.L.; GREENHALL, C.A.; WALTER, T., [1995] "Confidence on the Modified Allan Variance", Proceedings of the 9th European Frequency and Time Forum, Besançon, France 1995.

الفصل 5

خاصيات مختلف معاير التردد

المحتويات

112	تعريفات ودراسة: قياسات وتضمينات	1.5
112	تميز العمليات العشوائية	1.1.5
112	$L(f), S_{\phi}(f)$	1.1.1.5
112	$\sigma_y(\tau), \text{mod}\sigma_y(\tau), \sigma_x(\tau)$	2.1.1.5
112	آثار نظامية	2.1.5
112	آثار بيئية	1.2.1.5
112	درجة الحرارة	1.1.2.1.5
113	الرطوبة	2.1.2.1.5
113	الضغط البارومتري	3.1.2.1.5
113	الحقل المغنطيسي	4.1.2.1.5
113	توتر الخط الكهربائي، الضوضاء، وانقطاعات التغذية الكهربائية	5.1.2.1.5
114	التسارع، والذبذبة، والصدمة	6.1.2.1.5
114	التقادم	7.1.2.1.5
114	الانسحاق	8.1.2.1.5
114	خاصيات مختلف مصادر التردد	2.5
118	المراجع	

## 1.5 تعريفات ودراسة: قياسات وتضمينات

### 1.1.5 تمييز العمليات العشوائية

#### 1.1.1.5 $S_{\phi}(f)$ ، $L(f)$

$S_{\phi}(f)$  هي الكثافة الطيفية لقدرة الطور (انظر الفصلان 2 (الجزء A) و 3 و 4). وهي ما يشاهد على محلل الطيف القادر على قياس ضوضاء الطور فقط. ويتسم بالأهمية في التطبيقات حيث تكون درجة الاستقرار القصيرة المدى الجوهرية مثل الاتصالات الديكامترية وحيث يتعين على ضوضاء إشارات التوقيت أن تكون ضعيفة جداً. ويتم تعريف  $L(f)$  مثل  $1/2 S_{\phi}(f)$  أو بحساب dB، 3 أدنى من  $S_{\phi}(f)$ . ويدل التعريفان على أن  $L(f)$  هي الكثافة الأحادية الجانب وأن  $S_{\phi}(f)$  هي الكثافة الثنائية الجانب (ولا يعتبر ذلك صحيحاً بشكل مطلق بالنسبة إلى ترددات المذبذب القريبة جداً من الموجة الحاملة). وتستعمل كل من الكثافتين الوحدة dBc/Hz؛ أي الكمية من قدرة ضوضاء الطور في عرض نطاق من هرتز واحد، في علاقته بقدرة الموجة الحاملة. وترتفع ضوضاء الطور على إشارة ما مع تضاعف التردد حسب العامل  $\log 20 N$ ، حيث  $N$  هو عامل مضاعفة التردد. وحتى يتم استعمال مصدر تردد ما على ترددات أعلى، إذاً لنقل 30 GHz، فلا بد أن تكون  $S_{\phi}(f)$  ضعيفة جداً على التردد القاعدة الشيء الذي يؤدي إلى المحافظة على مقدرة ضوضاء منخفضة إما أثناء إرسال إشارة أو أثناء استقبالها. وإذا كان من الضروري مثلاً الحصول على سوية ضوضاء طور معين مثل  $L(f)$  أدنى من -5 dBc على 30 GHz، فيتعين على الإشارة الأساسية، لنقل إنها على

5 MHz، أن تكون لها  $L(f)$  من -50-20 log  $(10^6 \times 5 / 10^9 \times 30)$  أو -40-20 log  $(10^3 \times 6)$  = -75,6 - 125,6 dBc/Hz وتتطلب هذه القيمة نوعية عالية من مذبذب المرو البلوري المحكم ولا يمكن الحصول عليه عادة من مصادر تردد محكمة أخرى. ويحدث نفس الشيء عند القيام بقياسات توقيت محكمة فإن قيمة دنيا من  $L(f)$  تسمح بقياس الفواصل الزمنية بدقة أكبر. وكلما تم إعطاء  $L(f)$  أو  $S$  فإنه لا بد من إعطاء تردد الموجة الحاملة؛ وإلا بقيت المواصفة ناقصة التعريف.

#### 2.1.1.5 $\sigma_y(\tau)$ , $\text{mod}\sigma_y(\tau)$ , $\sigma_x(\tau)$

تشبه هذه القياسات الأعداد التي سيقوم عدّاد التردد بقياسها وهي مشتقة منها. إذ تم اشتقاق انحراف آلان،  $\sigma_y(\tau)$ ، من الاختلاف في القيمة التي تم الحصول عليها من سلسلة من القياسات المجاورة لمصدر تردد معين (انظر الفصلين 2 و 4). ونظراً لعجز  $\sigma_y(\tau)$  على كشف الاختلاف بين رفيف الطور وعمليات ضوضاء الطور البيضاء، فإنه قد تم تطوير  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$  بغرض وصف عمليات الضوضاء في مصدر التردد بشكل متكامل أكثر. وتعتبر تلك القياسات مفيدة لوصف أداء مصدر التردد عند استعماله كمولد للتوقيت أو كيميقاتية معينة. أما القياس  $\sigma_x(\tau)$  فقد وُضع لتمييز استقرار التوقيت. وهو معرف في الفصل 4. ويعتبر كقياس مفيداً للغاية في تمييز التغيرات العشوائية في أنظمة القياس وأنظمة توزيع التوقيت والشبكات. وقد تبنته صناعة الاتصالات كقياس لها. وترتبط عملية بنائه ببناء  $\text{mod}\sigma_y(\tau)$  ولاحظ أن  $\sigma_x(\tau) = \tau(\text{mod}\sigma_y(\tau) / \sqrt{3})$  وهو مشتق دائماً من الطور أو من الفوارق الزمنية أكثر من اشتقاقه من اختلافات التردد كما هو مذكور في الفصل 3.

### 2.1.5 آثار نظامية

#### 1.2.1.5 آثار بيئية

#### 1.1.2.1.5 درجة الحرارة [IEEE، 1995]

تتسم كافة مصادر التردد بالحساسية إزاء درجة الحرارة إلى حد كبير أو صغير. وبالاعتماد على هذه الحساسية وعلى الأداء المطلوب فقد يتطلب الأمر توحي احتياطات خاصة بغرض التحكم في درجة حرارة البيئة المحلية. فإذا بلغت حساسية درجة الحرارة مثلاً لمصدر تردد معين  $10^{-12}$  درجة مئوية، وكانت الغرفة التي يجب تركيب مصدر التردد فيها لها تغير في درجة الحرارة يبلغ 2 مئويتين من الذروة إلى الذروة انطلاقاً من تجهيز المكيف الهوائي بفترة 5 دقائق، فإن تغير التردد سيكون تقريباً بنحو  $2 \times 10^{-12}$  خلال الفترة ذاتها. (لاحظ تأثير الاتساع الفعلي للتغير بثابتة التوقيت الحرارية لمصدر التردد وإمكانية التقليل من التغير بواسطة ارتفاع ثابتة التوقيت). وإذا كان المطلوب هو أن يكون مصدر التردد مستقرًا إلى  $10^{-13}$  لدى 300 ثانية، فإن استقرار الغرفة (أو المكان المنفصل) يتعين تحسينه بعامل يتراوح بين 20 و 0,1 درجة مئوية من الذروة إلى الذروة. وفي مقدور نظام جيد لتكييف هواء الغرف أن يحقق استقرار درجة الحرارة بدرجتين

مئويتين من الذروة إلى الذروة، بشكل قد يستدعي القيام ببعض التحكم الإضافي في درجة الحرارة حسب هذا المثال. ولاحظ أن أنظمة تكييف الهواء الدقيقة قد يتم تصميمها خصيصاً حتى لا يتجاوز تغير درجة الحرارة فيها أكثر من  $\pm 0,05$  درجة مئوية بالنسبة للغرف العادية.

#### 2.1.2.1.5 الرطوبة [IEEE، 1995]

يمكن لتغيرات رطوبة المحيط أن تؤثر على مصدر التردد بأشكال عديدة. تختلف مقدرة الهواء الرطب الحرارية ومواصلته عن الهواء الجاف. وقد يؤثر ذلك على البيئة الحرارية الداخلية لمصدر التردد ونسب الزيادة أو النقصان في درجات الحرارة بالإضافة إلى تغيير مقاومة اللوحات بالدارات المطبوعة في دارات المعاوقة العليا. وقد تُغير جميع هذه الآثار تردد مصدر التردد. وقد أظهرت بعض مصادر التردد السيزيومية الأولى تأثيراً قوياً بالرطوبة، لكن ذلك التأثير قد تقلص في المصادر الأكثر جِدَّةً إلى أبعد الحدود. وتُظهر نتيجة التبعية إلى الرطوبة عادة كالتغيير الموسمي في تردد المصدر، أو كتغيير يمتد  $\frac{1}{2}$  4 من الأيام تقريباً، وهو متوسط المدة الناجم عن تحرك الجبهات الجوية في منطقة معينة، على الصعيد العالمي.

#### 3.1.2.1.5 الضغط البارومتري [IEEE، 1995]

تتأثر الخصائص الحرارية لمصدر التردد نظراً لتغير كثافة الهواء مع تغير الضغط البارومتري، مثلما هو الشأن بالنسبة إلى آثار الرطوبة. وعلاوة على ذلك، فإن التواء مختلف الأجزاء من مصدر التردد قد يؤدي إلى تغيير التردد، ونذكر كمثال على ذلك ما يحدث للتجويف في مازر الهيدروجين. وكثيراً ما ترتبط هذه التغييرات بحركة الجبهات الجوية في منطقة معينة. بمدة يكون متوسطها، من جديد،  $\frac{1}{2}$  4 من الأيام على الصعيد العالمي.

#### 4.1.2.1.5 الحقل المغنطيسي [IEEE، 1995]

تتسم كافة مصادر التردد بالحساسية إزاء الحقول المغنطيسية إلى حدود درجة معينة. وتنطبق الاعتبارات المشابهة للتغيرات في درجة الحرارة على هذه الحالة. وهو ما يجعل عادة من الحجب المغنطيسي أمراً مطلوباً. وقد يكون لمكان مصدر التردد الصحيح في جريدة جهاز إلكتروني مسننة في علاقة بعناصر تنفيذية أخرى تأثير كبير. وكثيراً ما تتواجد الحقول المغنطيسية التي تصل إلى  $5 \mu T$  (50 mgauss) على تردد خط الكهرباء (50 أو 60 Hz) في جريدة أجهزة إلكترونية مسننة نموذجية. وقد تؤثر الحقول الساكنة أو البطيئة التغير الناجمة عن حركة السيارات أو غيرها من الأشياء الفولاذية الكبيرة الحجم على مصدر التردد، كما تؤثر تغييرات الحقل الأرضي الناجم عن تغيرات درجة حرارة فولاذ التسليح في البناء الذي يؤثر على تنفيذية الفولاذ، وبالتالي على الحقل المغنطيسي في بيئة مصدر التردد. وتعتبر موقعة مصدر التردد في غاية الأهمية من أجل التقليل من تلك الآثار إلى سوية مقبولة. أما تدهور الأداء الناتج عن الحقول المتصلة بالخط الكهربائي فإنه بالإمكان التحقق منها بسهولة بواسطة استعمال محلل طيف جيد كما هو مذكور في الفصل 3. في حين أن اكتشاف التغييرات البطيئة يتطلب المراقبة المتواصلة لتردد المصدر في علاقته بمرجع خارجي، مثل GPS أو مخبر وطني وذلك كما ينص عليه الفصل 2 (الجزء B) والفصل 6. كما أن الحجابات المغنطيسية الداخلية لمعايير التردد هي أيضاً غير خطية، أي أنها تتميز بمعاملات حجب مختلفة لمختلف سويات الحقول المغنطيسية. ولها أيضاً قدر معين من التخلفية التي تعرض ذاكرة الأحداث الماضية بمعاملات حجبتها. ويحتوي معيار التردد ذاته على قابلية مختلفة للحقول المغنطيسية المفروضة من مختلف الاتجاهات، الشيء الذي يزيده من أهمية الموقعة والتوجيه إلى أقصى حد.

#### 5.1.2.1.5 توتر الخط الكهربائي، الضوضاء، وانقطاعات التغذية الكهربائية [IEEE، 1995]

قد تؤثر تغييرات توتر الخط المزود بالكهرباء على تردد مصدر التردد. وقد تشكل الضوضاء على الخط الكهربائي مصدر التردد أو قد تنضاف إلى الخرج. في حين أن الانقطاعات في توتر الخط الكهربائي الناجمة عن العواصف أو العطل لن تؤدي فقط إلى توقف عملية المصدر، بل قد تؤدي إلى فترات طويلة يبقى المصدر خلالها خارج المواصفات في انتظار إعادة تشغيله من جديد (وقد يمتد ذلك شهراً أو أكثر لبعض أنواع مصادر التردد). ويعتبر تشغيل مصدر التردد انطلاقاً من نظام كهربائي بدون انقطاعات (UPS) ممارسة جيدة. وفي العديد من الحالات، تكون البطاريات ملائمة على الأقل لحالات الانقطاع القصيرة. وقد يكون وجود المولدات ضرورياً للحفاظ على تشغيل مصدر التردد خلال أطول الانقطاعات المتوقعة. كما أنه من الضروري توفير مزودات كهربائية منخفضة الضوضاء ومستقرة (من الأفضل أن تكون إطنابية) للتقليل من آثار ضوضاء الخط الكهربائي وحالات التمور والخبو والوهن أو القضاء عليها.

### 6.1.2.1.5 التسارع، والمذبذبة، والصدمة [IEEE، 1995]

يدخل أي تسارع لمصدر التردد الإجهاد على أجزاء المصدر الداخلية. وقد يؤدي الانثناء الحاصل إلى تغير التردد. كما قد تتميز بعض الأجزاء أيضاً بالتخصُّر المغنطيسي الذي قد يؤثر على تشغيل المصدر وتغيير التردد. وتعتبر مذبذبات المرو البلورية حساسة بشكل خاص إزاء تلك الآثار. وإذ تحتوي كافة مصادر التردد على مذبذب مرو بلوري، فإنه لا بد من توخي الحذر حتى لا تكون المذبذبة كبيرة إلى حد تشكيل تردد خرج المصدر. ويحتوي مكتب نموذجي أو مخبر على ذبذبة تبلغ  $\approx 0,2 \text{ m/s}^2$  ناتجة عن تكييف الهواء، إلخ. وإذ تتراوح حساسية المذبذبة لمذبذب مرو بين  $10^{-10}$  و  $10^{-11}$  في g، فإنه لا بد من تقدير السوية الضرورية لتقليص المذبذبة التي يجب القيام بها. ويكون مذبذب المرو في مصادر التردد الذرية مسؤولاً على الأداء على المدى القصير. ويتحكم الطنان الذري أو المذبذب الذري في الأداء على المدى المتوسط والطويل. في حين يعتمد العبور الفعلي بين مذبذب المرو والطنان الذري على نمط المعيار. فيكون بالنسبة إلى مازر الهيدروجين Hz 0,5 تقريباً، في حين يكون بدرجة Hz 0,01 بالنسبة إلى معيار بالحزمة السيزيومية.

وقد تكون الصدمات كبيرة على نحو يجعلها تؤثر بشكل متواصل على تردد المصدر بواسطة تغيير مكان المكونات في طنان المرو أو في الجهاز الذري. ويتعين معاملة مصادر التردد تلك على أساس أنها أجهزة سهلة التيسر أثناء شحنها أو تناولها.

### 7.1.2.1.5 التقادم [IEEE، 1995]

تنتج العديد من مصادر التردد تردداً يتغير مع الزمن تحت وضعيات بيئية مثبتة، ويحدث ذلك دائماً بشكل خطي تقريباً. وهو ما يطلق عليه اسم التقادم. وهو نتيجة لتراخي حالات الإجهاد في مكونة طنانة أو في مكونة وثيقة الاقتران بمكونة طنانة. ومصادر التردد التي يظهر عليها عادة هذا السلوك هي: مذبذبات المرو البلورية، كنتيجة للتغيرات التي تطرأ على بلور المرو ذاته وكذلك الدارات المتصاحبة؛ وموازر الهيدروجين كنتيجة للتغيرات التي تطرأ على التحوييف وربما للتغيرات التي تطرأ على أغلفة الحيطان. وكثيراً ما لا يظهر السيزيوم أعراض التقادم في سوية قابلة للرؤية إلى أن يقارب أنبوب السيزيوم من نهاية حياته. وقد تظهر معايير الروبيديوم أعراض التقادم مثلاً، وذلك كنتيجة لتفاعل غاز الروبيديوم مع بلور المصباح وخليه الغاز.

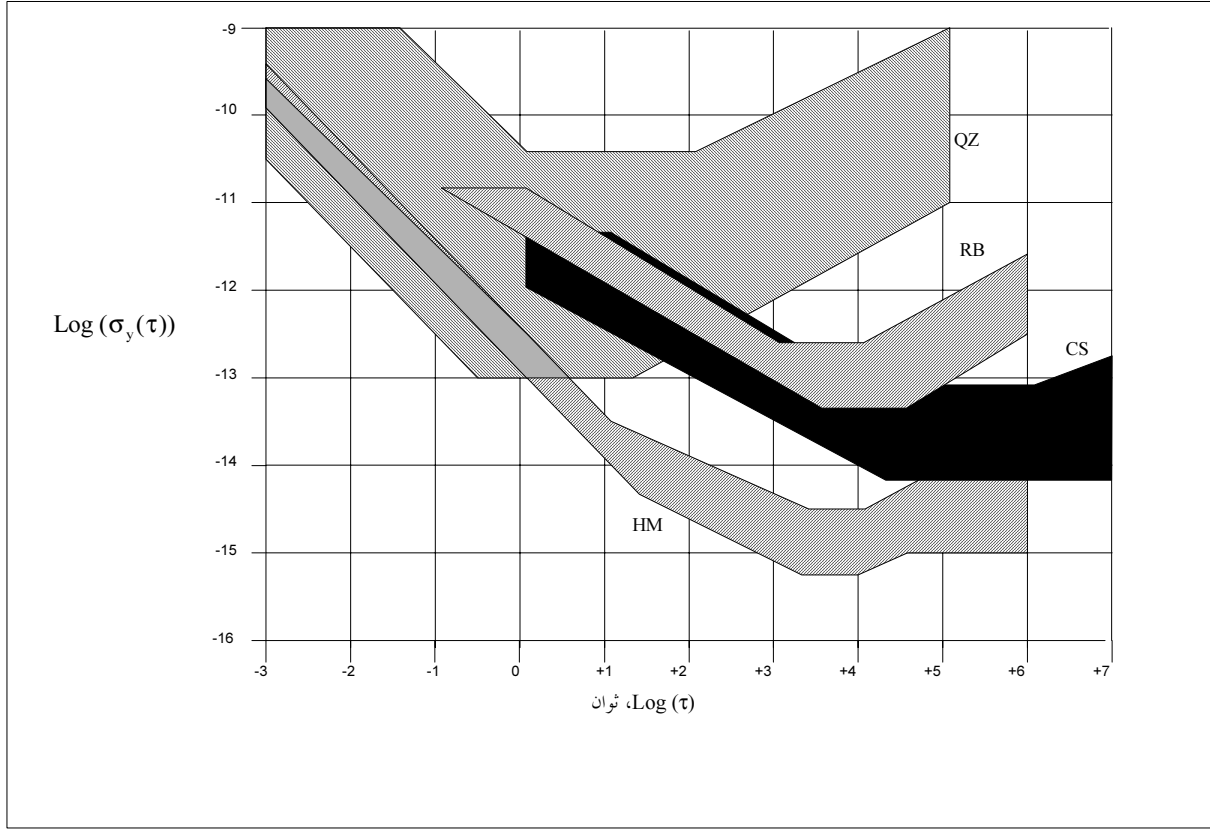
### 8.1.2.1.5 الانسياق [IEEE، 1995]

عادة ما تختلط معاني المصطلحين "تقادم" و"انسياق". ويتمثل التعريف المقبول للانسياق في تغيير التردد على المدى الطويل كنتيجة لكافة العلل، النظامية منها والعشوائية، بما في ذلك التقادم. والتقادم كما سبق الذكر، هو تغير التردد كنتيجة للآثار الداخلية مع تشغيل معياري في بيئة ثابتة.

### 2.5 خصائص مختلف مصادر التردد [اللجنة CCIR، 1990]

يعرض كل من الشكل 5.1 والشكل 5.2 والجدول 5.1 سلوك مختلف مصادر التردد في بيئة ثابتة. ولاحظ بالخصوص أن لمعيار بالسيزيوم يتمتع بأطول مدة استقرار كما ينبغي أن يكون في خياره الأصلي بالنسبة إلى تعريف الثانية. وبينما تتميز المعايير التي تصورها تلك الأشكال كافة بالصبغة التجارية، فإن معظم مخابر المعايرة والمخابر الوطنية التشغيلية تستعملها يومياً، وتتفع بمعايير أولية حقاً (في حالة المخابر الوطنية) لأغراض المعايرة فقط أو لمعايرة طول الثانية UTC لفائدة BIPM.

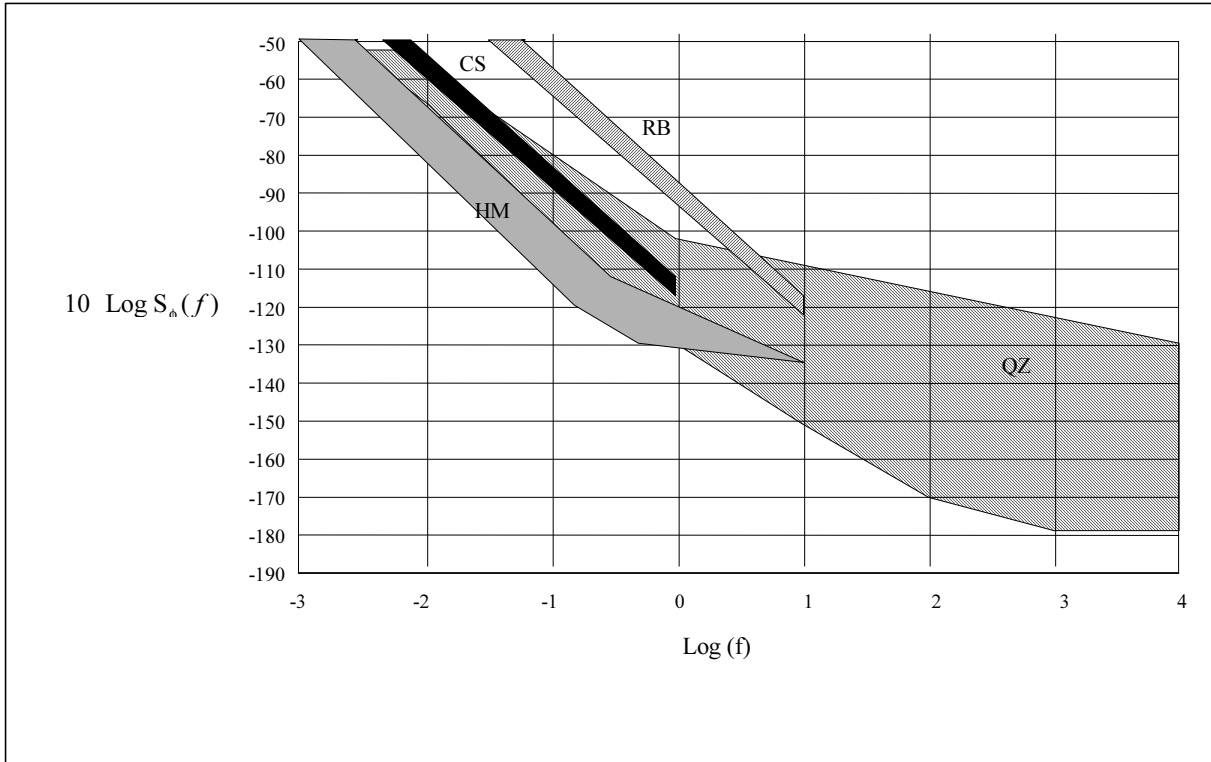
ويبين الشكل 5.1 الكثافة الطيفية لقدرة الطور من أجل معيار التردد بالمرو، ومعيار التردد بالروبيديوم ومعيار التردد بالسيزيوم ومعيار التردد بمازر الهيدروجين. ولاحظ أنه بالنسبة إلى ترددات فورييه العليا (الأبعد عن الموجة الحاملة)، فإن كل النتائج تقترب من القيمة الحاصلة لمعيار التردد بالمرو. ويعود ذلك إلى احتوائها جميعاً على مذبذب مرو كجزء من المعيار وكجهاز خرج، انظر الفصلين 1 و 2 (الجزء A). ويتمثل أفضل معيار تجاري لترددات فورييه الأدنى في مازر الهيدروجين، متبوعاً في الدرجة بمعيار التردد بالحزمة السيزيومية، ثم المعيار بالروبيديوم ومذبذب المرو.



الشكل 5.1

مدى استقرار مختلف مصادر التردد بالنسبة إلى 1 kHz

يبين الشكل انحراف آلان بالنسبة إلى ذات معايير التردد. وتقترب النتائج، في حالة متوسط فترات أقصر، مرة أخرى من أداء مذنب المرو الذي يعتبر جزءاً صحيحاً من أنظمتها. أما على المدى الطويل جداً، فإن السيزيوم هو الأفضل (ويقارب أداء مازر الهيدروجين بتوليف ذاتي أداء السيزيوم، لكنه ليس بالمعيار الأولي). وتتميز كل من المعايير بالمرور وبالروبيديوم وبالهيدروجين بسير عشوائي للتردد على المدى الطويل. في حين أن أفضل المعايير بالسيزيوم لا تظهر هذا السلوك إلى أن يقارب أنبوب الحزمة السيزيومية نهاية حياته.



الشكل 5.2

### كثافة طيفية اسمية لقدرة لطور لمختلف المعايير على 5 MHz

يقدم الجدول 5.1 قائمة بالمعلومات المادية الهامة لمختلف المعايير. وتتضمن تلك المعلومات عدم التيقن من التردد، وتكثيف الأداء، والحجم ومتطلبات قدرة الوزن، والتكلف المقدرة. وتبين دراسة سريعة لهذه القائمة التوافق الذي تم تحقيقه بين التكلفة والحجم والوزن والأداء.

ويعرض الجدول 5.2 قائمة بالحساسيات المعتادة إزاء البيئة لمعايير المرو ومازر الهيدروجين والسيزيوم والروبيديوم.

أما الشكل 5.1 فيبين مدى أداء انحراف آلان المتيسر بالنسبة إلى مختلف مصادر التردد [اللجنة CCIR، 1990]. ويعتمد الاختلاف في الأداء من قمة أحد النطاقات إلى أسفله على عوامل عديدة بما في ذلك حداثة التصميم، وتكلفة المعيار، واستقرار البيئة.

ويبين الشكل 5.2 مدى الكثافة الطيفية لقدرة لطور،  $S_0(f)$ ، بالنسبة إلى مختلف المعايير [اللجنة CCIR، 1990]. وينطبق ذات الوصف لمعاني العرض والنطاق كما وردت في الشكل 5.1.



الفصل 5

الجدول 5.1

أداء مصدر التردد في البيئة المراقبة

تكلفة مقدرة، 1987 (US k\$)	تغذية ضرورية	كتلة (kg)	حجم (dm <sup>3</sup> )	استقرار			عدم التيقن	معيار التردد
				Ageing, per year	Floor	Short Term (100 s)		
0,5 to 20	0,1 to 20	0,1 to 10	1 to 10	10 <sup>-6</sup> to 10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-10</sup> to 10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-10</sup> to 10 <sup>13</sup> (2)	(1)	مرو الإحكام
200 to 450	100	250	1000	10 <sup>-12</sup> to 10 <sup>-14</sup>	8 to 20×10 <sup>-16</sup>	2 → 6×10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-12</sup>	مازر الهيدروجين
40 to 75 67 to 75	30 30	30 30	45 45	3×10 <sup>-13</sup> 3×10 <sup>-13</sup>	2 → 5×10 <sup>-14</sup> 3 → 5×10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-12</sup> 8,5×10 <sup>-13</sup>	2×10 <sup>-12</sup> 1×10 <sup>-12</sup>	(3) (4)
	20	35	15	26	10 <sup>-10</sup>	4×10 <sup>-14</sup>	7×10 <sup>-15</sup>	(1)

(1) المواصفة لا تنطبق

(2) استقرار لمدة ثانية

(3) "وحدة الأداء العالي"، الوحدات الأولى [سيدنور، 1989]

(4) "وحدة الأداء العالي"، الوحدات الحديثة [كوتسار (Kuters)، 1992]

الجدول 5.2

حساسية مختلف مصادر التردد إزاء البيئة

التقادم، سنويا	ضغط بارومتري، بحساب باسكال	حقل مغنطيسي، بحساب التسلا	التسارع، بحساب m/s <sup>2</sup> *	درجة الحرارة، بحساب K	نمط معيار التردد
10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup>	مرو الإحكام، فرن مراقب
10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-14</sup>	مازر الهيدروجين
					حزمة سيزمية
10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-14</sup>	(3)
< 2×10 <sup>-14</sup>	≤ 1×10 <sup>-15</sup>	≤ 1×10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-14</sup>	≤ 1×10 <sup>-15</sup>	(4)
10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-12</sup>	خلية الروبيديوم

\* بالنسبة للترددات داخل نطاق المؤازرة. أما خارج عرض النطاق، فإن هذه الحساسية تكون ذاتها لدى مذئذب المرو.

(3) "وحدة الأداء العالي"، الوحدات الأولى [سيدنور، 1989]

(4) "وحدة الأداء العالي"، الوحدات الحديثة [كوتسار، 1992]

## المراجع

CCIR [1990] Reports, Annex to Volume VII, Report 364-6 "Performance of standard-frequency generators", pp 129-149

IEEE Standard 1193 [1995] IEEE Guide for Measurement of Environmental Sensitivities of Standard Frequency Generators

KUSTERS, J.A. and Johnson, J.L., [1992] A New Cesium Beam Frequency Standard Performance Data, Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium, pp 143-150, 27-29 May 1992

SYDNOR, R.L., Tucker, T.K., Greenhall, G.A., Diener, W.A., and Maleki, L. [1989] Proceedings of the Twenty-first Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, pp 409-419, 29-30 November 1989

الفصل 6

سلام التوقيت

المحتويات

121	..... المقدمة	1.6
121	..... التوقيت العالمي	1.1.6
121	..... توقيت التقويم الفلكي	2.1.6
122	..... التوقيت الذري الدولي	3.1.6
123	..... التوقيت العالمي المنسق	4.1.6
124	..... سلام الوقت في نظرية النسبية العامة	2.6
124	..... أنظمة الإحداثيات في نظرية النسبية العامة	1.2.6
124	..... قرار الاتحاد IAU A4 لسنة 1991	2.2.6
124	..... التوصية I	1.2.2.6
125	..... التوصية II	2.2.2.6
125	..... التوصية III	3.2.2.6
125	..... التوصية IV	4.2.2.6
125	..... التوقيت الذري الدولي	3.2.6
125	..... سلام وقت أخرى للإحداثيات	4.2.6
126	..... توليد سلام الوقت	3.6
126	..... النوعية المنتظرة	1.3.6
126	..... الاعتمادية	1.1.3.6
126	..... الاستقرار	2.1.3.6
127	..... الدقة	3.1.3.6
127	..... مهلة النفاذ	4.1.3.6
128	..... معطيات التوقيت	2.3.6
128	..... شكل معطيات التوقيت العام	1.2.3.6
128	..... مقارنة الميقاتيات الموجودة على ذات الموقع	2.2.3.6
129	..... مقارنة الميقاتيات الموضوعية في مواقع متباعدة	3.2.3.6
131	..... تمليس ضوضاء قياس المعطيات	4.2.3.6
133	..... حوارزمية الاستقرار	3.3.6
134	..... تعريف متوسط سلم الوقت	1.3.3.6
135	..... طول فاصل الحوسبة الأساسي	2.3.3.6

الفصل 6

136	..... تجميع السلم TA في كل فاصل من المدة $T$	1.2.3.3.6
136	..... تجميع السلم TA عندما يكون فاصل المدة $nT$ منتهياً	2.2.3.3.6
137	..... إجراءات الوزن	3.3.3.6
137	..... أفكار عامة	1.3.3.3.6
138	..... إجراء الوزن في (NIST) AT1	2.3.3.3.6
138	..... إجراء الوزن في (BIPM) ALGOS	3.3.3.3.6
139	..... التنبؤ بالتردد	4.3.3.6
139	..... أفكار عامة	1.4.3.3.6
139	..... التنبؤ بالتردد في (NIST) AT1	2.4.3.3.6
140	..... التنبؤ بالتردد في (BIPM) ALGOS	3.4.3.3.6
140	..... دقة الفاصل السلمي لسلم الوقت	4.3.6
140	..... أمثلة	5.3.6
140	..... استقرار بعض سلازم الوقت المستقلة	1.5.3.6
142	..... توجيه بعض التمثيليات المحلية التابعة إلى UTC	2.5.3.6
142	..... بث سلازم الوقت	4.6
146	..... الخلاصة	5.6
147	..... المراجع	

## 1.6 المقدمة

لا توفر طبيعة التوقيت الحقيقية أي تفسير عقلاي؛ فنحن نشعر ببساطة أن الوقت لا يتوقف أو يعود إلى الوراء أبداً. ولكن، إلى جانب الاعتبارات الفلسفية، فإن التجربة تدلنا على أن أي حدث يمكن موقعته بتحديد مواصفات ثلاث إحدائيات في الفضاء وإحدائية واحدة في الزمن، يرمز إليها عموماً  $(t, z, y, x)$ . ولم تناد أي تجربة إلى حد يومنا هذا باتخاذ المزيد من العلامات المستقلة. فسلم الوقت يتم تعريفه بشكل حدسي كمحور زمني لنظام الإحدائيات. وتعرف التوصية ITU-R TF.686 سلم الوقت بكونه مجموعة مرتبة من *واسمات السلم مع ترقيم مرافق*.

وتبدو مهمة إنشاء سلم وقت، للوهلة الأولى مهمة بسيطة، كما يسمح أي نظام متطور بتحويل قياس تغير التوقيت إلى قياس كمية بعدية. غير أن العلماء يبحثون عن خصائص علم القياس الشيء الذي يمكن من طلب سلم وقت ذا مرجع موثوق ومستقر ودقيق. علاوة على أن الزمن المطلق، كما تصوره نيوتن في الميكانيكا الكلاسيكية، لا وجود له. في الواقع تتأثر كل الظواهر الزمنية بمحور الجاذبية الأرضية والسرعات بالنسبة إلى المراقب. فيجب بالتالي تعريف سلم الوقت في إطار نظرية النسبية العامة، كما جاء في القسم 2.6.

ونميز تقليدياً بين *مُطَين* من سلم الوقت: سلم الوقت المتكامل وسلم الوقت الدينامي:

- و فيما يتعلق بسلم الوقت المتكامل، فأول المعطيات بخصوصه تتمثل في وحدة المدة، أي الفاصل الزمني المعرف انطلاقاً من الظاهرة المادية. ويُبنى سلم الوقت بتثبيت أصل متفق عليه وبمراكمة وحدات المدة بدون الوقت الميت ولا انقطاع. وقد طُبّق هذا المفهوم لبناء المحور الزمني على مدة اليوم، مما أدى إلى تعريف متوسط التوقيت الشمسي. ويُعتبر سلم الوقت المرجعي الحالي في كافة أنحاء العالم، التوقيت الذري الدولي، TAI، سلم وقت متكامل؛ وقد تم الحصول عليه بواسطة مراكمات الثوابي الذرية التي تُعرف بكونها عدد فترات الإشعاع المطابقة لانتقال ذرة السيزيوم.

- أما فيما يتعلق بسلم الوقت الدينامي، فإن المعطيات الأولية هي معطيات ناجمة عن مراقبة نظام فيزيائي دينامي، يصفه نموذج رياضي، يكون الزمن ضمنه معلمة تُعرف هوية صورة النظام بشكل لا لبس فيه. فيصبح قياس التوقيت على ذلك الأساس قياساً للموضع، وتعرف الوحدة الزمنية بكونها مدة محددة. ويعتبر التوقيت العالمي، و UT1، وتوقيت التقويم الفلكي، ET، سلاّم للوقت الدينامي، تعتمد على دوران الأرض حول محورها وحول الشمس على التوالي.

وقد تم، في الماضي، تعريف عدد من سلاّم الوقت سواء منها الدينامية أو المتكاملة. ثم استعملت وحدة المدة المرافقة لتعريف الثانية للنظام الدولي للوحدات (SI). وقد كان التغيير من تعريف إلى آخر بإلهام من الرغبة في تحسين الدقة. ونورد فيما يلي تلخيصاً مقتضباً لذلك في الأقسام التالية.

## 1.1.6 التوقيت العالمي

التوقيت العالمي، UT1، هو الوقت الدينامي المشتق من مراقبة الدورة الأرضية: وهو نسبي مقارنة بزواوية دوران الأرض حول محورها. ويتم اختيار معالم التناسب بشكل يجعل 24 ساعة من UT1 قريبة من متوسط مدة اليوم، ويتم اختيار الطور مما يجعل الساعة 0 من UT1 تتطابق في المتوسط مع منتصف الليل بتوقيت غرينيتش.

والوحدة الزمنية المرافقة هي الثانية من متوسط التوقيت الشمسي. ولا يتميز تعريفها بالدقة: فهي الكسر  $1/86400$  من متوسط اليوم الشمسي. وقد كان هذا حال الثانية SI إلى حدود 1960. وقد اعتبر علماء الفلك أنه من الممكن تحقيقها بقدر من عدم التيقن يبلغ  $10^{-9}$ ، وقد تم بلوغ هذه السوية من الدقة بعد مرور عقد من الزمن قضاه الخبراء في المراقبات الفلكية والتحليل والتقدير للمتوسطات.

وقد كان التوقيت UT1 سلم الوقت المرجعي، وبالتالي أساساً للوقت القانوني، إلى سنة 1972. ولا يزال يوفر المعطيات المتعلقة بدوران الأرض للجيوفيزياء وعلم الفلك، إلخ.

## 2.1.6 توقيت التقويم الفلكي

توقيت التقويم الفلكي (ET) هو الوقت الدينامي المشتق من نظرية دوران الأرض حول الشمس (كما في ذلك دوران القمر حول الأرض، إلخ): ويقدمه التعبير عن متوسط طول الشمس. وهذا التعبير كما الطور الأساسي للتوقيت ET تم اختيارهما على نحو جعل كل من التوقيت ET والتوقيت UT1 يتزامنان تقريباً في 1990. ومنذ ذلك الحين أخذنا في التباعد ببطء (ET - UT1)  $\approx 56$  s في 1988).

والوحدة الزمنية المرافقة هي الثانية بالتقويم الفلكي، عرفت بكونها الكسر  $1/31556925,9747$  من السنة المدارية بالنسبة إلى سنة 1900 في اليوم 0 من شهر يناير على الساعة 12 من توقيت التقويم الفلكي. وقد كان هذا تعريف الثانية SI من 1900 إلى 1967.

وقد أصبح من الممكن الحصول على اختلافات التوقيت بين التوقيت ET والتوقيت UT1 منذ 1630 من خلال مراقبة الكواكب والقمر، وذلك بدقة تصل إلى عدة أعشار من الثواني بالنسبة إلى القرن السابع عشر، وعدة ثوان بالنسبة إلى القرن التاسع عشر؛ مما يجعل التوقيت ET إذاً مرجعاً لدراسة دوران الأرض في الماضي.

### 3.1.6 التوقيت الذري الدولي

إن التوقيت الذري الدولي (TAI) هو توقيت متكامل متيسر منذ 1955. والوحدة الزمنية هي الثانية الذرية التي أصبحت الثانية SI في 1967 وهي لا تزال قيد الاستعمال. وفيما يلي تعريفها الذي تم تبنيه من قبل المؤتمر العام الثالث عشر للموازين والمقاييس في 1967:

*الثانية هي المدة المتكونة من 9 192 631 770 فترة من الإشعاع المتطابق مع الانتقال بين السويطي العاليتي الدقة للحالة الأساسية لذرة السيزيوم 133.*

ويمكن تحقيق الثانية الذرية في المخابر. وتقوم أفضل الميقاتيات السيزيومية الموجودة في السوق، والمنتشرة الاستعمال في مراكز التوقيت بإنتاج هذه الثانية مع دقة محددة بدرجة  $1 \times 10^{-12}$ . وتحتفظ بعض المخابر بعدد من معايير التردد الأولية؛ وتعطي هذه المعايير دقة إنجاز بالغة بدرجة  $1 \times 10^{-14}$  (انظر الفصل 1).

وتتمثل وظيفة الميقاتية في توفير مجموعة مرتبة من الواصفات المتواصلة مع ترقيم مرافق. وانطلاقاً من ذلك يتكوّن سلم الوقت. ويدل على الرقم المرافق لواسم معين بكونه "قراءة الميقاتية". ونظراً لعطل الأجهزة المحتمل، فإنه يتعين على المخابر أن يكون لديها عدة ميقاتيات. ويتم تجميع المعطيات المتأتية من الميقاتيات ومعالجة جميعها عبر تركيبة من قراءاتها من أجل توليد وقت إجمالي. ويوجد على الصعيد العالمي، كمثال على ذلك الوقت الإجمالي، والتوقيت الذري الدولي، و TAI.

وقد أقرت اللجنة الدولية للأوزان والمقاييس في 1970 تعريف التوقيت TAI، كما اعترف به المؤتمر العام للأوزان والمقاييس في 1971. وهو ينص على ما يلي:

*التوقيت الذري الدولي (TAI) هو الإحداثية المرجعية للتوقيت الذي أنشأه المكتب الدولي للساعة على قاعدة قراءات الميقاتيات الذرية التي تشتغل في مختلف المنشآت طبقاً لتعريف الثانية، والوحدة الزمنية للنظام الدولي للوحدات. [في 1988، وقد انتقلت مسؤولية التوقيت TAI لتصبح من مهام قسم التوقيت للمكتب الدولي للأوزان والمقاييس، BIPM].*

وقد تم الاتفاق رسمياً على كون أصل التوقيت TAI يتزامن مع التوقيت UT1 في غرة يناير 1958.

وتعد الآثار النسبوية الكبيرة من النتائج الهامة للتحسينات التي أدخلت على الدقة في إنجاز الثانية الذرية. ويتعين فهم تعريف الثانية، ضمن هذا الإطار، كتعريف خاص بالتوقيت، أي بالمعنى الضيق للكلمة، عل المستعمل أن يكون في جوار الميقاتية وفي حالة الراحة بالنسبة إلى هذه الأخيرة. وقد تظهر فوارق ببضعة أجزاء في  $10^{13}$ ، عند مقارنة إنجازين للثانية SI، وذلك كنتيجة لاختلاف حقول جاذبية الأرض التي تخص لها الميقاتيات. فتمت تكملة تعريف التوقيت TAI إذاً كالاتي في إعلان اللجنة الاستشارية لتعريف الثانية [تقرير اللجنة CCDS، 1980] خلال دورتها التاسعة التي انعقدت في 1980:

*التوقيت TAI هو سلم وقت الإحداثيات الذي تم تعريفه في الإطار المرجعي للمركز الأرضي (أصل الإطار في مركز الأرض) مع الثانية SI كوحدة سلمية مثلما تم إنجازها على الكرة الأرضية كالوحدة السلمية.*

وعلى إثر ذلك، وُجدت وضعية أخرى (مختلفة عن حالة التوقيت UT1 والتوقيت ET) تعتمد ضمنها العلاقة بين الوحدة السلمية للتوقيت TAI وإنجاز ما للثانية SI على موقع الميقاتية المسؤولة عن إنجازها. وتكون الوحدة السلمية للتوقيت TAI بالنسبة إلى كافة الميقاتيات المثبتة على الأرض والموقعة على سوية البحر مساوية للوحدة الزمنية كما تم إنجازها محلياً؛ ولكن تبدو الوحدة السلمية أطول بمقدار  $1,1 \times 10^{-13}$  s عند إقامة المقارنة مع ميقاتية موضوعة على ارتفاع 1000 متر، وذلك بسبب زحزحة التردد باتجاه الأحمر الناجم عن الجاذبية الأرضية [ميزنر (Misner) وآخرون، 1973]. وقد تم وضع تعريف نظري تام للتوقيت TAI في إطار نظرية النسبية العامة للمرة الأولى من قبل الاتحاد الدولي للفلك، IAU، (انظر القسم 2.6).

## 4.1.6 التوقيت العالمي المنسق

تم تعريف التوقيت العالمي المنسق، UTC، في 1972. ويمثل تركيبة من سلمي الوقت TAI و UT1، ويعرف بالنظام التالي للمعادلات الصالح لكل تاريخ  $t$ :

$$(6.1) \quad \text{صحيح } (n) \text{ ثوان } n = TAI(t) - UTC(t)$$

و

$$|UTC(t) - UT1(t)| < 0.9 \text{ s}$$

تختلف الكميات  $UTC(t)$  و  $TAI(t)$ ، بالنسبة إلى أي تاريخ  $(t)$ ، بعدد صحيح من الثواني، يساوي 29 بداية من غرة يناير 1994. ويقرر المكتب الدولي لدوران الأرض، IERS، والمسؤول عن نشر التوقيت UT1، في خصوص ضبط الثواني بالرجوع إلى التباعد المتوقع بين سلم الوقت UT1 وسلم الوقت TAI. وتدرج الثواني الكبيسة مع نهاية الشهر، ويتم ذلك في العادة مع نهاية شهر يونيو أو ديسمبر.

ويكون للتوقيت UTC، مبدئياً، ذات الخصائص القياسية التي تكون للتوقيت TAI، والمتمثلة في التوقيت الذري. وعلاوة على ذلك، فهو يتبع دوران الأرض إلى ما يقارب الثانية الواحدة. ويعتبر هذا كافياً لخدمة أغراض الملاحة الفلكية، حيث يكون التوقيت UT1 مطلوباً في الوقت الفعلي.

ويعتبر التوقيت UTC القاعدة العامة لتوزيع التوقيت في كافة أنحاء العالم. وتتبع الأوقات المحلية عن التوقيت UTC بزحزحة عدد صحيح من أنصاف الساعات (الشيء الذي قد يغير الوقت من فصل الشتاء إلى فصل الصيف)، المقرر من قبل إدارات البلدان الفردية، أو المجموعات الإقليمية. وتتم مزامنة كافة إشارات التوقيت، وعلى أية سوية كانت، بما في ذلك الإشارات التي يوزعها التلفزيون أو الراديو أو الميقاتيات المتكلمة، مع الأوقات المحلية، وبالتالي مع التوقيت UTC.

ويقوم قسم التوقيت للمكتب BIPM باحتساب سلمي الوقت المرجعيين TAI و UTC وتوزيعهما. وهما سلماً وقت للتوقيت المؤجل يتوجب عليهما تجميع المعطيات ومعالجتها على مدى شهور عديدة لبلوغ النوعية العلمية المثلى للقياس. لذلك تحتفظ مختبر التوقيت الوطنية بغيرهما من سلالم الوقت للاستعمال الفوري تتم مقارنتها بعناية على نحو تجريبي مع التوقيت TAI والتوقيت UTC مع كل طبعة جديدة. وهذه هي السلالم المحلية المستقلة للوقت،  $TA(k)$ ، والتمثيل المحلي للوقت  $UTC(k)$ ، حيث تدل  $k$  على رمز اختصاري للمخبر.

وفي 1994، وصل عدد السلالم المستقلة التي تم الاحتفاظ بها إلى 17 سلماً مستقلاً  $TA(k)$ . وتم توليدها من مجموعات الميقاتيات الموجودة بعناية في موقع واحد، مثل السلالم الأمريكية  $A.1(\text{MEAN})$  من USNO و  $AT1$  من NIST، أو في مواقع مختلفة عديدة في البلد ذاته، مثلما حدث مع السلالم الفرنسية  $TA(F)$  والسويسرية  $TA(CH)$ . وتكون دورة القياس الأساسية أقصر بكثير مما تكون عليه بالنسبة إلى TAI (من ساعة واحدة إلى يوم واحد مقابل 10 أيام)، في حين يتم تحيين سلم الوقت بأكثر من المرات (كل يوم أو أسبوع مقابل كل شهرين)، وقد يحتسب التحيين على نحو تجريبي أو في الوقت الفعلي تقريباً. وتكون سلالم الوقت تلك ذات تشغيل حرّ وليس لها تمثيلات مادية. وتعرف من خلال قيم الفوارق الزمنية في علاقتها بالميقاتيّة المادية التي يحتفظ بها هي أيضاً في المخابر. ويتمثل الغرض العلمي منها في توفير مرجع محلي مستقر.

وفي 1994، كانت  $UTC(k)$  مشغولة عبر العالم. ويتم وصلها عموماً بخرج الميقاتية، سواء كان ذلك بتصحيح للتردد أو بدونه، بشكل يجعلها تتطابق بالتالي مع الإشارة المادية القابلة للنفاد في الوقت الفعلي. ولا تتسم بحرية التشغيل، إلا أنها موجهة عن قرب لاتباع التوقيت UTC. ويكون أقصى فارق زمني المنصوص عليه بين سلم الوقت UTC وسلم الوقت  $UTC(k) \pm 1 \mu$  طبقاً للتوصية ITU-R TF.536 وذلك بهدف بلوغ  $\pm 100 \text{ ns}$  [تقرير اللجنة CCDS، 1993]. ويوفر سلم الوقت  $UTC(k)$  مزامنة في الوقت الفعلي، ويستعمل خصوصاً كمرجع لإذاعة إشارات التوقيت.

وتدعم غيرها من سلالم الوقت تطبيقات الملاحة والتوقيت عبر أنظمة الملاحة الساتلية العالمية. والسلّمان الأساسيان منها هما سلالم الوقت GPS، للنظام العالمي للموقعة الأمريكي، و سلالم الوقت GLONASS للنظام العالمي للملاحة المدارية الساتلية الروسي. وكلاهما مولد بمعدل تحيين عال (بدرجة تصل إلى عدة دقائق) من مجموعة ميقاتيات موضوعة في محطة التحكم الرئيسية للنظام، وموجهة على تمثيلية محلية للتوقيت  $UTC$ :  $UTC(\text{USNO})$  لسلالم الوقت GPS و  $UTC(\text{SU})$  لسلالم الوقت GLONASS.

أما بالنسبة للتطبيقات الأكثر دقة، فإن المكتب ينتج سلالم وقت ذرية بشكل استعادي، مثلما هو الشأن بالنسبة إلى توقيت بولسار الميليثانية. وتشير إلى تلك السلالم TT(BIPMxx) حيث xx + 1900 هي سنة الحوسبة [غينو، 1988]. وقد تم تحيين الطبقات المتعاقبة ومراجعتها، بشكل قد يجعلها مختلفة بالنسبة إلى التواريخ المعروفة.

وقبل التعرض إلى عملية حوسبة سلام الوقت ونشرها، مثل TAI، وUTC، وTA(k)، وUTC(k)، وسلم الوقت GPS، وسلم الوقت GLONASS، و(BIPMxx)TT، في القسمين 3.6 و4.6، نعود إلى التعريفات النظرية لسلام الوقت في نظرية النسبية العامة.

## 2.6 سلام الوقت في نظرية النسبية العامة

### 1.2.6 أنظمة الإحداثيات في نظرية النسبية العامة

تعتبر سلام الوقت في نظرية النسبية العامة كإحداثيات من إحداثيات الأنظمة المرجعية الفضائية-الوقئية الرباعية الأبعاد.

نظراً لتقوس الفضاء-الوقت، لا تكون للوحدات الزمنية لتلك الإحداثيات، عموماً، علاقة عالمية ثابتة بالكميات (الخاصة) القابلة للقياس محلياً [ميزنير وآخرون، 1973]؛ برومبارغ (Brumberg)، 1991]. وفي إطار ميكانيكا نيوتن، يكون من الممكن دائماً تعريف الإحداثيات بشكل يجعل وحداتها الزمنية متساوية حيثما كانت مع المسافات والمدد المقيسة. وهو أمر مستحيل في نظرية النسبية العامة، حيث تعتمد العلاقة بين الكميات المقيسة ووحدات الإحداثيات الزمنية على موقع الفضاء-الوقت للمراقب الذي يقوم بعملية القياس. ويتضمن ذلك بالنسبة إلى سلام الوقت أن تعتمد العلاقة التي تربط بين فاصل الإحداثيات الزمني والثانية التي تم إنجازها محلياً، بواسطة مقياسية ذرية مثلاً، على موقع المقياسية.

ولنا مبدئياً مطلق الحرية لاستعمال أية مجموعة من الإحداثيات لمواصفة الفضاء-الوقت. غير أننا نلاحظ أنه بعملية تعريف عدة أنظمة متراكبة للإحداثيات، كل منها صالح في المنطقة المحصورة، يمكننا تبسيط المعالجة العملية للمشكلات والعلاقة القائمة بين الإحداثيات والكميات القابلة للقياس إلى أبعد الحدود [IAU، 1992]. وتوفر مثل تلك التعاريف إحداثيات زمنية عديدة، كل منها صالح في منطقة معينة من الفضاء-الوقت، وتكون العلاقة بينهما متأتية من تحويلات الإحداثيات النسبوية.

ويعرف نظام إحداثيات ما حسب نظرية النسبية العامة بموتره المترى  $g_{\alpha\beta}(x^\lambda)$  (وتمر العلامات اليونانية من 0 إلى 3) الذي يعتمد على الموقع والوقت وتعيين معرفته من قبل منطقة الفضاء-الوقت بأكملها التي يُستعمل داخلها نظام الإحداثيات.

وقد اعترف الاتحاد الدولي للفلك IAU في قراره A4 لسنة 1991 بالحاجة إلى تعريف العديد من الأنظمة النسبوية لإحداثيات الفضاء-الوقت، وذلك خصوصاً منها في أنظمة المركزية الدوران والمركزية الأرضية [IAU، 1991، 1992]. ويتضمن هذا القرار تعاريف لسلام الوقت لإحداثيات مركزية الدوران وبالمركزية الأرضية، ويوفر بالتالي القاعدة النظرية لتعريف التوقيت TAI.

### 2.2.6 قرار الاتحاد IAU لسنة 1991

صادق الاتحاد الدولي للفلك على القرار A4 في جلسته العامة المنعقدة في بيونس آيرس في أغسطس 1991. ويوجد نص القرار الكامل في النشرة الإخبارية IAU 67 الصادرة في 1992. ويحتوي على عدة توصيات ذات أهمية بالنسبة إلى تعريف سلام وقت الإحداثيات. وتفسرها الأقسام التالية.

#### 1.2.2.6 التوصية I

تقدم التوصية I بشكل صريح النظرية العامة للنسبية كأساس نظرية لتعريف الأطر المرجعية للفضاء-الوقت. كما توفر الاستمارة المترية التي يجب استعمالها لأنظمة الإحداثيات الممركزة على مركزية دوران مجموعة من الكتل:

$$(6.2) \quad ds^2 = -c^2 d\tau^2 = g_{\alpha\beta}(x^\lambda) dx^\alpha dx^\beta,$$

$$(6.3) \quad ds^2 = -\left(1 - 2\frac{U}{c^2}\right)(dx^0)^2 + \left(1 + 2\frac{U}{c^2}\right)\left[(dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2\right],$$

حيث إن  $ds$  مكونة خطية متناهية الصغر لنظام الفضاء-الوقت، و  $\tau$  هو الوقت الخاص كما أنجزته مقياسية مثالية، و  $c$  هي سرعة الضوء في الفراغ، و  $U$  هو مجموع كمونات الجاذبية الأرضية لمجموعة الكتل وكمون المدّي المولّد بواسطة الكتل الخارجية بالنسبة إلى المجموعة، ويندثر الكمون الأخير لدى مركزية الدوران. وتعرف الإحداثيات الأربع للفضاء-الوقت بكونها  $(x^0 = ct, x^1, x^2, x^3)$ . وتُستعمل معاهدة المحصلة



أنشتاين مما يدل على تطبيق المحصلة على علامات مكررة. ولا بد من ملاحظة كون المعادلة (6.3) لا تعطي إلا أول المصطلحات من سلسلة منها، ويعد ذلك كافياً للسوية الحالية لدقة المراقبة. ويمكن إضافة مصطلحات أعلى رتبة عند الضرورة. وسيكون الأمر كذلك بالنسبة إلى تطبيقات التوقيت والتردد عندما تبلغ حالات استقرار الميقاتية بعض الأجزاء في 1910.

### 2.2.2.6 التوصية II

تنص التوصية II على أن شبكة الإحداثيات الفضائية التي يكون أصلها في مركز الكتلة الأرضية لا بد أن يغيب منها الدوران الشامل بالنسبة إلى مجموعة من الأشياء الخارجة عن الجمرات النائية، وأن على إحداثيات الوقت لكافة أنظمة الإحداثيات أن يتم اشتقاقها من سلم الوقت الذي أنجزته ميقاتيات ذرية تشتغل على الأرض، وتكون الوحدات المادية الأساسية للفضاء-الوقت هي الثانية للنظام الدولي للوحدات (SI) للوقت الخاص والمتر SI للطول الخاص. كما تنطبق هذه التوصية على الميقاتيات المحمولة على متن السواتل الأرضية.

### 3.2.2.6 التوصية III

تعرف التوصية III الوحدات السلمية وكافة أصول إحداثيات الوقت، كما تصنف إحداثيات الوقت لمركزية دوران النظام الشمسي وإحداثيات الوقت للمركزية الأرضية مثل توقيت إحداثيات مركزية الدوران، TCB، وتوقيت إحداثيات المركزية الأرضية، TCG، على التوالي. ولا بد من ملاحظة أن إحداثيات الوقت تلك تظهر اختلافات تحدث مرة كل قرن فيما بينها وفي علاقتها بالتوقيت TAI.

### 4.2.2.6 التوصية IV

تعرف التوصية IV التوقيت الأرضي (TT) بكونه سلم الوقت لإحداثيات المركزية الأرضية الذي يختلف عن التوقيت TCG بمعدل ثابت، ويتم اختيار الوحدة السلمية للتوقيت TT بشكل يجعلها تتفق مع الثانية SI على الكرة الأرضية الدائرة. ويقدر هذا المعدل الثابت حالياً إلى حدود  $6,9692904 \times 10^{-10}$  مع درجة عدم تيقن تبلغ  $1 \times 10^{-17}$  (1σ).

وإذ يعرف القرار A4 للاتحاد IAU سلام الوقت النظرية TCB، و TCG و TT تعريفاً كاملاً، يكون طريق الوصول إلى سلام الوقت المنجز مباشرة.

### 3.2.6 التوقيت الذري الدولي

يكون التوقيت الذري الدولي (TAI)، استناداً إلى تعريفه، إنجازاً للتوقيت TT ببساطة، يتخالف من 32,184 تم إدخاله عليه لأسباب تاريخية. ويمكن التحصل عليه بواسطة جمع المعطيات من مجموعة من حوالي مئتي ميقاتية ذرية موزعة في كافة أرجاء العالم. وحتى يتسنى ذلك، لا بد من مقارنة تلك الميقاتيات باستعمال معاهدة لمزامنة الإحداثيات [آلان وآشباي، 1986]. وتعريف ذلك كالتالي:

يعتبر الحدان الثابتان في نظام مرجعي معين بواسطة قيمتي إحداثياتهما  $(t_1, x_1, y_1, z_1)$  و  $(t_2, x_2, y_2, z_2)$  حدثين متآونين في علاقتهما بذلك النظام المرجعي إذا كانت قيمتا إحداثيات الوقت المطابقة لهما متساويتين  $t_2 = t_1$ . وتعتبر ميقاتيتان متزامنتان في علاقتهما بإطار مرجعي معين إذا أنتجتا علامات التوقيت ذاتها بشكل متآون (بالمعنى المذكور سابقاً).

وفي حوار المركزية الأرضية، يتم استعمال إطار مرجعي غير دائري، كما يعرفه القرار A4 في التوصية II للاتحاد IAU، من أجل مزامنة الميقاتيات، واحتساب التوقيت TAI وبته بالخصوص.

وتُعرف الوحدة السلمية للتوقيت TAI، حتى تكون مطابقة لتعريف التوقيت TT، بكونها مساوية للثانية SI كما يتم إنجازها على الأرض الدائرة. [BIPM، 1991]. وحتى يتسنى ذلك، تخضع المعطيات المتأتية من أكثر المعايير الأولية دقة إلى تصحيح منفرد من أجل زحزحة تردد الجاذبية الأرضية الناجمة عن ارتفاع المخبر بالنسبة إلى الكرة الأرضية ثم تجميع تلك المعطيات لتكوين الوحدة السلمية للتوقيت TAI.

### 4.2.6 سلام وقت أخرى للإحداثيات

إن سلام الوقت للإحداثيات الذرية مثل TA(k)، و UTC، و UTC(k)، و GPS، و GLONASS، و TT(BIPMxx) ... إلخ. هي إحداثيات الوقت المرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالتوقيت TAI ويتم توفيرها لفضاء أغراض مختلفة. ويرتبط السلم TCG والسلم TCB بالسلم TT وبالسلم TAI بالتالي بواسطة التحويلات النسبوية [ملاحظات متصلة بالتوصيتين III و IV من القرار A4 للاتحاد IAU، 1992].

### 3.6 توليد سلام الوقت

تمثل المشكلة الفعلية في توليد سلم الوقت انطلافاً من مجموعة من الميقاتيات الذرية موضوعة في مخبر واحد أو في مخابر متعددة. وتتطلب عملية الجمع الفعالة لقراءات الميقاتيات المشاركة [تافيلا (Tavella) وتوماس (Thomas)، 1990a] ما يلي:

- تعريف النوعية المنتظرة من سلم الوقت،
- تمييز معطيات التوقيت المتيسرة،
- تصميم حوارزمية لمعالجة المعطيات.

#### 1.3.6 النوعية المنتظرة

تقوم المتطلبات عموماً على توليد سلم وقت يكون أقرب ما يمكن من سلم الوقت المثالي. ويمكن تقدير الانطلاق من مراكمة الثواني SI المثالية على الكرة الأرضية الدائرة من خلال حوسبة "انطلاق تردد المقيس" في التاريخ  $t$ ، والذي يرجع إليه عامة بوصفه "التردد" المعرف كالتالي:

$$y(t) = \frac{v(t) - v_0}{v_0} \quad (6.4)$$

حيث  $v_0 = 1 \text{ Hz}$ ، و  $v(t)$  هو عكس الوحدة السلمية، المعبر عنها بثانية SI، لسلم الوقت بالتاريخ  $t$ .

وتعاني الميقاتيات المادية الفعلية من العيوب التي ينتقص من آثارها بواسطة جمع معطياتها للحصول على سلم وقت موثوق ومستقر ودقيق. ومن الأوجه المنفصلة ولكن الهام في هذا الصدد هو مهلة النفاذ إلى سلم الوقت. ويجب أن يكون النفاذ بالنسبة إلى بعض التطبيقات نفاذاً فورياً، في حين أنه يمكن التسامح لوجود تأخر طويل بالنسبة إلى البعض الآخر منها.

#### 1.1.3.6 الاعتمادية

قد تعطل الميقاتيات المادية الفردية مع انقطاع فوري لسلم الوقت التي تقدمها. وتقوم الاعتمادية إذاً على الإطنابية والتعاون الوطني أو الدولي في آخر المطاف بين المخابر التي تحتوي على الميقاتيات الذرية.

وتتمثل أبسط الحلول لهذه المشكلة في تغيير الميقاتية التي ظهر عليها العطل بأخرى. وهو ما يجري عادة في المخابر التي تولد السلم  $UTC(k)$ . ويكون السلم  $UTC(k)$  عادة موصولاً مباشرة بخرج ميقاتية مادية، التي تكون أفضل ميقاتية من المجموعة الموجودة في ذلك الموقع، وتسمى "بالميقاتية الرئيسية". ويراقب خرجها قفزات صغيرة للتردد والوقت تُحدّد سلفاً، من خلال مدرّج طور صغير، بشكل يوجه السلم  $UTC(k)$  باتجاه السلم  $UTC$ . ولا يؤثر تغيير ميقاتية رئيسية بالتالي على سلم وقت الخرج إذا كان مدرج الطور الصغير مبرمجاً على نحو مناسب للتعامل مع التغيير.

ويتم تأمين الاعتمادية، في أغلب الأحيان، باستعمال مجموعة من الميقاتيات وحوسبة وقت جملي. ونادراً ما يكون لهذا الوقت إنجاز مادي. وبحوسبة مثل ذلك الوقت الجملي، فإنه لا بد من تقليص التشويش الذي ينجم عن دخول الميقاتيات وخروجها من المجموعة. ومن الواضح أنه كلما كان عدد الميقاتيات المتاحة للمجموعة أكبر، كلما كان الأثر دخول أحدها وخروجها أقل. ونتيجة لذلك سجل ارتفاع عام في عدد الميقاتيات الموجودة في مجموعة معينة. وكمثال على ذلك، فقد كان عدد الميقاتيات التي تساهم في توليد TAI حوالي 180 لمدة 10 سنوات. غير أنه منذ بداية 1993، أدى بيع الميقاتية الجديدة HP 5071A، من شركة هيوليت-باكارد (Hewlett-Packard)، إلى زيادة منتظمة في عدد الميقاتيات الذي بلغ 237 في مايو 1994. وعادت هذه الزيادة بالنفع الكبير على الاعتمادية بالنسبة إلى التوقيت TAI.

#### 2.1.3.6 الاستقرار

يمكن تعريف استقرار سلم الوقت بكونه مقدرة على الحفاظ على فارق سلمي ثابت، حتى وإن اختلف عن السلم المثالي. ويقوم قياس الاستقرار إذاً على تقدير تشتت قيم التردد  $y(t)$  مع الزمن. وقد تم وضع بعض الأدوات الإحصائية لتقدير الاستقرار (انظر الفصل 4). وهي تتسم بالفعالية

في تمييز الأنماط العادية للضوضاء العشوائية التي تؤثر على إشارات الميقاتيات. وأكثر أدوات قياس الاستقرار استعمالاً هي المغايرة ذات العينتين أو مغايرة آلان  $\sigma_y^2(\tau)$  التي تعتمد على وقت المراقبة أو وقت الاعتين  $\tau$ .

ويعتمد استقرار سلم الوقت التابع لمجموعة معينة على حالات استقرار الميقاتيات المساهمة وعلى تصميم الخوارزمية المستعملة في توليده. فعلى الخوارزمية بالخصوص، أن تعالج أي تغيير في سلوك الميقاتية كما ينبغي. أما الاعتبارات العامة فهي مفصلة في 3.3.6، لكن الفكرة المركزية تقوم على توليد سلم وقت أكثر استقراراً من السلم الذي تقدمه أية ميقاتية مشاركة. ويمكن تحقيق هذا الهدف، ولكن لا يتجاوز ذلك عموماً قدرًا معيناً من تقدير متوسط الأوقات  $\tau$ .

ولا ينطبق مفهوم الاستقرار مبدئياً إلا على سلم الوقت ذات التشغيل الحرّ. فالسلم  $UTC(k)$  هو من الناحية المبدئية، سلم موجه أي أنه متأثر بقطرات التردد المقصودة، ويتدهور استقرارها القصير المدى والطويل المدى حتماً. وعلاوة على ذلك، تظهر المشكلة العويصة بسبب تقدير قيم التردد لسلم الوقت أو قياسها دائماً في علاقتها بتردد سلم وقت أو ميقاتية مادية أخرى. ويؤدي تحليل الاستقرار لمثل تلك القياسات المقارنة إلى تقييم الاستقرار المقترن لسلمي الوقت. وقد تحدث كل من الحالتين التاليتين:

- يتم تقييم التردد لسلم الوقت تحت الاختبار بواسطة مقارنة سلم وقت ذي نوعية أفضل، مثل السلم التي تنجزها معايير التردد الأولية. ثم يمكن إسداء عدم الاستقرار المسجل كلياً إلى سلم الوقت تحت الاختبار.
- يُفترض من سلمي الوقت اللذين يخضعان للمقارنة أن يكونا بنفس النوعية. ويستدعي الأمر آنذاك اتباع تقنية لإزالة اقتران الضوضاء. وإذا أمكن افتراض أن تكون سلم الوقت المعنية بالمقارنة مستقلة تماماً، فإن تقنية القبعة ذات الزوايا-N [بارنيس، 1982؛ آلان، 1987] تعطي تقديراً بالاستقرار الملازم لكل مكونة. وفي حالة عدم التحقق من الاستقلالية، فإن التحليل الكامل يتطلب معالجة التفاوت أو شبيهه سويًا [تافيلا وبريمولي، 1994].

### 3.1.3.6 الدقة

يمكن تعريف دقة سلم الوقت بكونها مقدرتها على الحفاظ على متوسط الفارق السلمي أقرب ما يمكن من تعريفه. ويتعين على سلم الوقت التي تنجز التوقيت TT أن يكون متوسط الفارق السلمي لديها أقرب ما يمكن من الثانية SI على الكرة الأرضية الدائرة.

أما بالنسبة إلى معايير التردد الأولية، فإن الدقة تعطى ميزانية عدم التيقن من خلال تقييم الآثار المادية التي تغير تردد الخرج في علاقته بالتعريف. وعند استحالة تكوين ميزانية عدم تيقن كتلك، يتم تقييم الدقة بمقارنة مدة الفاصل السلمي بأفضل ما أنجزته الثانية SI التي تعطى معايير التردد الأولية. ومن الضروري طبعاً أن نأخذ في الاعتبار الأثر الذي تمارسه الزحزحة باتجاه الأحمر بسبب الجاذبية الأرضية على نتائج تردد المعيار الأولي حتى يتم تحويل الثانية SI على الكرة الأرضية (ارتفاع منعدم). وتأتي دقة سلم الوقت عموماً من فارق التردد بين سلم الوقت ومعيار التردد الأولي، الذي تم تقييمه لتقدير متوسط الأوقات المتطابقة مع أفضل استقرار لسلم الوقت، وبأخذ عدم التيقن من معيار التردد الأولي في الاعتبار.

ويتم إدخال التحسينات على دقة سلم الوقت بشكل عام خارج الخوارزمية الأساسية، وهي التي يقتصر نظرها على استمثال الاستقرار. وقد يمكن القيام بذلك بواسطة توجيه تردد سلم الوقت على تردد المعيار الأولي أو تردد سلم وقت مرجعي أكثر استقراراً. وحتى تكون هذه العملية فعالة، على تصحيحات التردد أن تكون أصغر من تقلبات تردد سلم الوقت حتى يتم تفادي تدهور استقراره.

### 4.1.3.6 مهلة النفاذ

ترتبط مهلة النفاذ إلى سلم الوقت بنوعية معطيات التوقيت الأولية والأهداف العلمية التي يُفترض أن يحققها سلم الوقت.

تُكتسب معطيات التوقيت الأولية طبقاً لدورة قياس أساسية، تتراوح مدتها من بضعة دقائق إلى ساعات عدة، وهي تخضع لتأثير ضوضاء القياس. وعلى أساس سوية تلك الضوضاء، قد يكون من اللازم تلبين القياسات الأولية بمراكمة المعطيات على عدة عينات قياس أساسية متتابعة (انظر القسم 2.3.6). وتؤدي هذه المراكمة إلى تأخير النفاذ إلى سلم الوقت الحاصل. وعلاوة على ذلك، يكون من المفيد مراقبة سلوك الميقاتيات

المساهمة لمدة طويلة، وذلك قبل اللحظة التي تنطبق عليها المعطيات وبعدها حتى يتم استعمال معطياتها على أفضل وجه. وتؤخر هذه العملية أيضاً النفاذ.

وتعتمد مقبولة مهلة نفاذ معينة إلى سلم الوقت على استعمالها. وتعتبر الاعتمادية القصوى والاستقرار على المدى الطويل بالنسبة إلى سلم وقت مرجعي، مثل السلم TAI من المتطلبات الضرورية. وحتى يتم تحقيق هذا الغرض، يعتمد سلم الوقت المرجعي على عدد كبير من الميقاتيات من أنماط مختلفة، وموجودة في مختلف أنحاء العالم. وكنتيجة لذلك يجب تجميع المعطيات ومعالجتها كما ينبغي، الشيء الذي يتطلب وقتاً طويلاً. مما يجعل التأخير كبيراً ولكنه مقبول بسبب النوعية الجيدة الحاصلة. أما بالنسبة إلى الدراسات العلمية في المخبر، فقد يكون من الضروري إنتاج سلم الوقت في الوقت الفعلي تقريباً، بعد إجراء قياسات الميقاتيات فوراً، حتى وإن أدى ذلك إلى إتلاف نوعية السلم على المدى الطويل.

### 2.3.6 معطيات التوقيت

#### 1.2.3.6 شكل معطيات التوقيت العام

تأخذ معطيات التوقيت شكل الفوارق الزمنية بين الميقاتيات. وتعطي الميقاتية الذرية سلسلة من النبضات الكهربائية مفصول بعضها عن بعض بمدة قدرها ثانية واحدة، تسمى عادة "بسلسلة 1 PPS". وتعتبر كل نبضة حدثاً بعدد مصاحب لها، كالوسم الموضوع عليها. وهذا العدد المصاحب لها هو قراءة الميقاتية لذلك الحدث الخاص: وقد تُقرأ مثلاً في شكل 13 11 27 h 13 mn 13 s. كما قد تسمى أيضاً بوصفها تاريخ الحدث: ويكون أصلها اعتباطياً ويتم اختياره على أساس عملي، ولكن تتم زيادته بثانية واحدة مع كل نبضة جديدة. وتختلف قراءات الميقاتيات باستمرار وبسرعة، حتى إنه لا يمكن أخذها إلا "على الطائر". غير أن العدادات متيسرة، ويمكن بدء العمل بها بنبضة معينة متأنية من ميقاتية معينة وإيقاف العمل بها بالنبضة ذات الوسم ذاته المتأنية من ميقاتية أخرى. وللعُدَاد إذاً أن يقيس الفوارق الزمنية التي تشكّل كميات خاصة. ويمكن قياس هذه الأخيرة والتعبير عنها بالوحدات SI.

ويرمز  $h_i(t)$  و  $h_j(t)$  إلى الإحداثيات الزمنية للنبضة الموسومة  $t$ ، التي تقدمها الميقاتية  $H_i$ ، والنبضة بذات الوسم التي تقدمها الميقاتية  $H_j$ ، في إطار مرجعي معين. فيكون الفارق في أوقات الإحداثيات:

$$(6.5) \quad x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t)$$

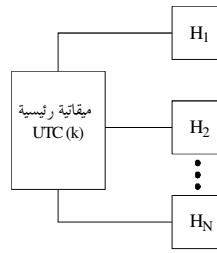
ضرورياً لتوليد سلام الوقت للإحداثيات وبثها.

وفي سوية الدقة الحالية في عمليات مقارنة الميقاتيات، يمكن تقريب كمية الإحداثيات  $x_{ij}(t)$  باستعمال الفارق الزمني الخاص الصادر عن العداد، وذلك بالأخذ في عين الاعتبار مهل انتشار الإشارات بالنسبة إلى الميقاتيات المنفصلة بمسافات كبيرة [بيتي وفولف (Wolf)، 1994]؛ ويمكن التعبير عنها بالتالي بالوحدات SI. وعلاوة على ذلك، ففي الممارسة الجارية، لا يتم تحديد أي إطار مرجعي، في حين أنه يتم تسمية الإحداثيات الزمنية  $h_i(t)$  "كقراءة للميقاتية  $H_i$  بتاريخ  $t$ "، وهو ما يعتبر غير لائق بتاتاً. ونستعمل في هذا النص ذات التسميات بهدف الحفاظ على تطابق الأدبيات الموجودة. ومع ذلك، فلا يجب نسيان المعنى الحقيقي للمعادلة (6.5) التي لا تحتوي إلا على كميات الإحداثيات.

وتعتبر الكميات  $x_{ij}(t)$  القياسات الأساسية المستعملة في توليد سلم الوقت. ويتم الحصول عليها من خلال طرائق نقل التوقيت، التي تنطبق على الميقاتيات الموجودة على ذات الموقع أو في أماكن متباعدة. وتستعمل الشبكة غير الإطنابية لوصلات التوقيت عموماً عند مقارنة ميقاتية معينة مرة واحدة مع سائر الميقاتيات الأخرى في كل تاريخ.

#### 2.2.3.6 مقارنة الميقاتيات الموجودة على ذات الموقع

تكون جميع الميقاتيات المساهمة في حوسبة البعض من سلام TA(k) التي تحتفظ بها مراكز التوقيت الوطنية، موضوعة على ذات الموقع. وهذا هو حال المعهد NIST (حوالي 10 ميقاتيات سيزيومية ومازر هيدروجين) و SU (من 4 إلى 6 من موازر الهيدروجين)، و USNO (حوالي 50 ميقاتية سيزيومية و 14 مازر هيدروجين). ويعين على كل موقع ميقاتية رئيسية، ويوفر خرجها عادة السلم UTC(k)، أي الإنجاز المحلي للسلم UTC. كما يصلح كميات مرجعية تُقارن بها بقية الميقاتيات الأخرى في مخطط النجم كما هو مبين في الشكل 6.1.



الشكل 6.1

### مقارنة بين مقياسات موضوعة في ذات الموقع

وتأخذ القياسات المأخوذة شكل:

$$(6.6) \quad x_{ik}(t) = UTC(k)(t) - h_i(t), \text{ with } i = 1, \dots, N$$

في التاريخ  $t$ ، و  $N$  يمثل عدد المقياسات.

توفر العدادات أو أجهزة قياس الفوارق الزمنية المستعملة عادة في مخابر التوقيت القياسات في كل ثانية أو حتى بتكرار أكبر مع درجات من الدقة تتراوح بين ps 0,1 و ps 100 ( $1 \sigma$ ) بالنسبة إلى القياس الفردي (وقد تمت البرهنة على أن الضوضاء التي تبلغ ps 0,1 في قياس معين يمكن الحصول عليها باستعمال منهج الفارق الزمني بمخلاطين [آلان ودامس (Daams)، 1975؛ شتاين وآخرون، 1982]). وإذا تم استعمال عدّاد الفارق الزمني، فإن تقدير متوسط قراءات عديدة، مع افتراض أن ضوضاء القياس المتبقية هي ضوضاء بيضاء، قد يقلص من ضوضاء القياس إلى سويات طفيفة. وتتكرر عملية تقدير المتوسط تلك بدورة قياس أساسية  $\tau_0$  بدرجة ساعات عديدة: مثال  $h_2 = \tau_0$  بالنسبة إلى توليد AT1 لدى NIST. ولكن لا بد من التأكيد على أن آثار درجة الحرارة التحتية على المهل الزمنية قد تقضي على البعض من فوائد عملية تقدير المتوسط.

### 3.2.3.6 مقارنة المقياسات الموضوعة في مواقع متباعدة

توضع المقياسات المساهمة في حوسبة بعض سلاسل الوقت المستقلة TA(k) في أكثر من مختبر واحد. وهذا هو الحال بالنسبة إلى السلم الفرنسي TA(F)، الذي تمت حوسبته انطلاقاً من 24 مقياسية سيزيومية موضوعة في 11 مخبراً بفرنسا، أما بالنسبة إلى TA(CH) الذي يحتوي على المعطيات انطلاقاً من 13 مقياسية موضوعة في 3 مخابر سويسرية، وأما بالنسبة إلى TAI المحوسب انطلاقاً من المعطيات المسجلة في 45 مركز توقيت وطني، تحتفظ بينها مجتمعة بنحو 230 مقياسية ذرية [BIPM، 1993].

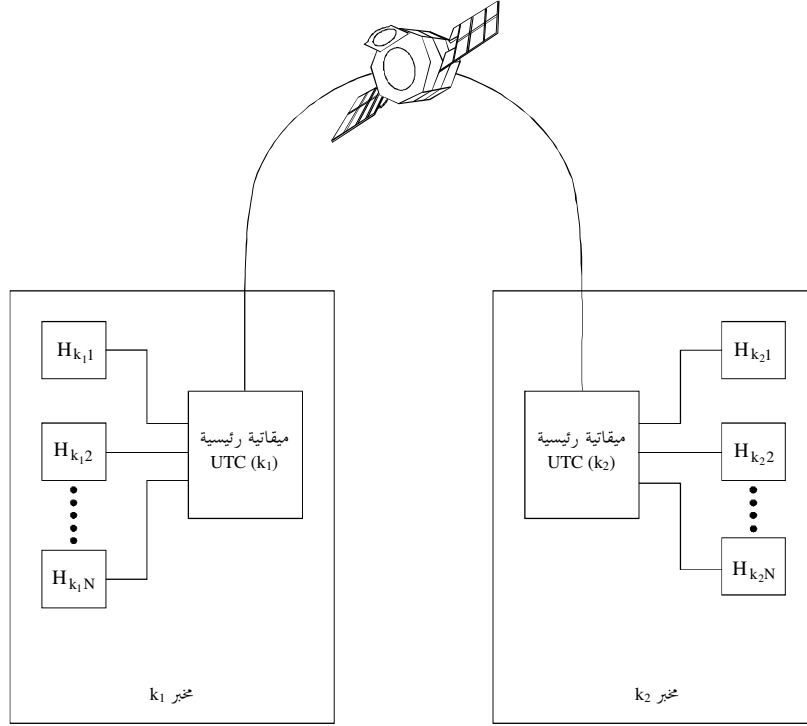
وعلاوة على المخطط الوارد في الشكل 6.1 والمستعمل من قبل المخابر المساهمة، فإنه لا بد من توفير وصلات أكثر إتقاناً بين السلاسل UTC(k) البعيدة. وتتطابق هذه الوصلات مع الوصلات المبينة في الشكل 6.2 وتؤدي إلى قياسات يُعبّر عنها على النحو التالي:

$$(6.7) \quad \begin{aligned} i = 1, \dots, N_1, \text{ مع } x_{ik_1}(t) &= UTC(k_1)(t) - h_i(t) \\ j = 1, \dots, N_2, \text{ مع } x_{jk_2}(t) &= UTC(k_2)(t) - h_j(t) \\ x_{k_1k_2}(t) &= UTC(k_2)(t) - UTC(k_1)(t) \end{aligned}$$

حيث  $t$  هو التاريخ، و  $k_1$  و  $k_2$  هما المختصران الرمزيان للمختبرين اللذين خضعا للمقارنة، و  $N_1$  و  $N_2$  هما عدد المقياسات الموجودة في كل منهما. ويتم الحصول على الكميات الأساسية  $x_{ij}(t)$  المعرفة في المعادلة (6.5) بواسطة تجميع خطي للفوارق المعرفة في المعادلة (6.7).

ويوجد هناك العديد من طرائق المقارنة لسلاسل الوقت البعيدة. وأقل هذه الطرائق دقة هي تلك التي تعتمد على استقبال إشارات التوقيت على ترددات راديوية، مثل DCF77 التي تُبث من ألمانيا على 77,5 kHz [BIPM، 1993]. كما كانت إشارات الملاحه للأرض مثل إشارات لوران-C

لقد استعمل على نطاق واسع إلى حدود سنة 1985. وتبلغ دقة الإشارات على مقارنة وحيدة بدرجة 0,5  $\mu$ s. وعلاوة على تلك الضوضاء، فقد تمت مراقبة حدوث تغييرات موسمية كبيرة. في حين كانت معايرة تجهيزات البث والاستقبال في غاية الصعوبة، وتميزت الدقة الحاصلة بعدم التيقن ( $1 \sigma$ ) بدرجة العديد من الميكروثوان.



الشكل 6.2

### مقارنة بين مقياسيات موضوعة في موقعين مختلفين

لقد أدى إدخال طرائق نقل التوقيت التي تستعمل الأنظمة الساتلية إلى تسجيل تحسن كبير في دقة علم القياس وإحكام وتغطية التوقيت على الصعيد العالمي. وتتمتع كافة هذه الطرائق بدقة احتمالية بدرجة العديد من  $1 \sigma$  ns أو حتى أفضل من ذلك. وفي بداية 1994، كانت أربع طرائق قيد الاستعمال أو موجودة في مرحلة التخطيط المتقدم لاستعمالها:

- نظام الموقعة العالمي، GPS [ليفاندوفسكي (Lewandowski) وتوماس، 1991]. والنظام GPS هو نظام أمريكي للملاحة الحربية، يعتمد على قياس المدى بالسواتل التي تستعمل على متنها مقياسيات ذرية. ومنذ الإعلان عن تشغيل النظام GPS في ديسمبر 1993، كان قادراً على توفير الموضع والسرعة والتوقيت بشكل متآون ومتواصل حيثما كان سواء على سطح الأرض أو فوقها. وتؤدي مراقبة أي نظام من أنظمة GPS بالخصوص إلى النفاذ إلى سلم الوقت المسمى بسلم الوقت GPS، الموجه عن قرب باتجاه السلم UTC(USNO). ويُستعمل النظام GPS، بالنسبة إلى تطبيقات التوقيت، طبقاً لطريقة الرؤية المشتركة [آلان وفيس، 1980]، التي تمكن من تجاوز مشكلة التدهور المقصود الذي يلحق بالإشارات الساتلية جزئياً. وقد استعملت في 1994 هذه الطريقة بشكل روتيني من قبل معظم مخابر التوقيت الوطنية في العالم، الشيء الذي أدى إلى حالات عدم التيقن من مقارنات التوقيت بدرجة من العديد من ns.

- النظام العالمي للملاحة الساتلية، GLONASS [دايلي (Daly) وآخرون، 1992؛ ليفاندوفسكي وآخرون، 1993]. والنظام GLONASS هو المكافئ الروسي للنظام GPS لكنه لا يحتوي على التدهور المقصود للإشارات. ولا تتوفر فيه إلى حدّ الآن أجهزة استقبال التوقيت التجارية، لذلك لا يُستعمل النظام على نطاق واسع.
- نظام النقل المزدوج الاتجاه للتوقيت الساتلي عبر ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض، TWSTT [كيرخنار (Kirchner) وآخرون، 1991؛ دي جونج (De Jong)، 1993]. ويتطلب النظام TWSTT وجود محطة لبث إشارات الموجات الصغيرة ولاستقبالها على الموقع، وذلك في نطاق الاتصالات والقناة الساتلية لتكرار الإشارات على متنه.
- نظام المزامنة الليزرية انطلاقاً من مدار الساتل، LASSO [بومون (Baumont) وآخرون، 1993]. ويتطلب النظام LASSO وجود محطة لإطلاق الليزر وساتل مجهز بمذبذبات مستقرة وعدّادات وعاكسات ضوء تراجعية.

#### 4.2.3.6 تمليس ضوضاء قياس المعطيات

يظهر عن معطيات المقارنة بين الميقاتيات البعيدة ضوضاء قياس يعود أصلها إلى طريقة نقل التوقيت. ويعتبر من الضروري إزالة هذه الضوضاء وذلك حتى يتسنى ما يلي:

- الانتفاع بالتنوع التامة التي تتميز بها الميقاتيات الخاضعة للمقارنة، و
- تفادي حقن ضوضاء القياس داخل سلم الوقت ذاته، وهو ما سيؤدي إلى تدهور استقراره على المدى القصير.

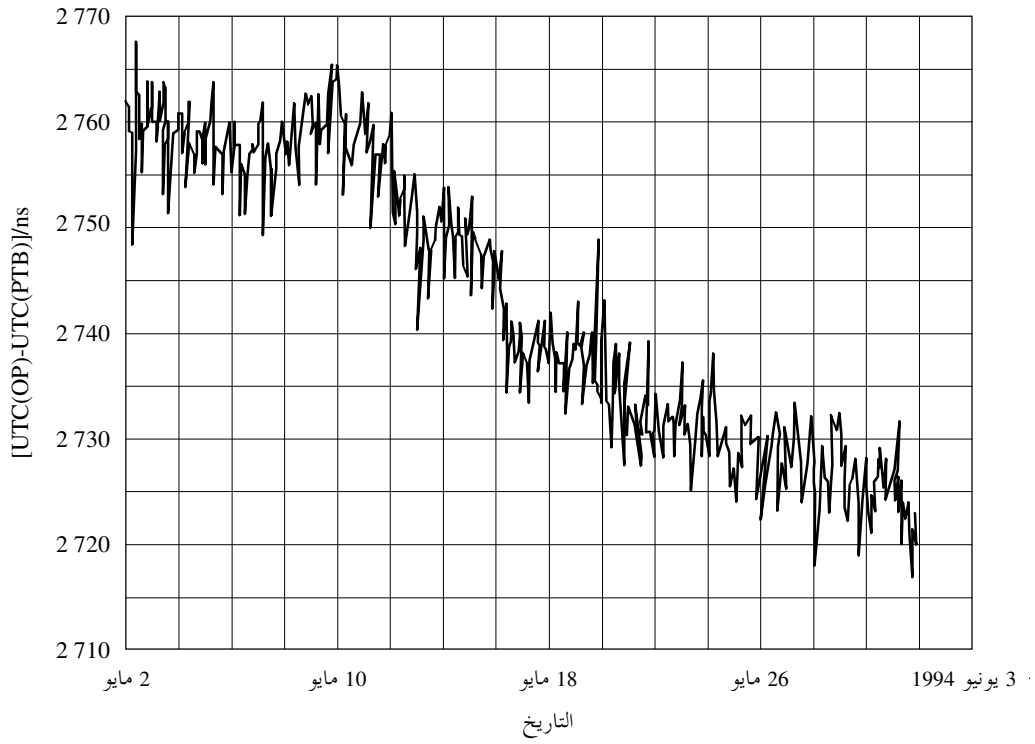
ويتطلب التمليس الفعال لضوضاء القياس بالتحليل الإحصائي له. ونوضح فيما يلي هذا التمليس للحالة المتكررة لنقل التوقيت بين مخبرين بطريقة الرؤية المشتركة للنظام GPS. ويتطابق المثال الذي تم اختياره هنا مع وصلة التوقيت الأوروبي بين OP الموجود في باريس بفرنسا و PTB الموجود في براونشفايغ بألمانيا. ويبين الشكل 6.3a قيم الرؤية المشتركة الأولية التي تم الحصول عليها لفترة بثلاثين يوماً من مايو 1994. وهي تتطابق مع حوالي 24 أثراً يومياً من عمليات المراقبة ضمن البرنامج رقم 22 للنظام GPS بالرؤية المشتركة الدولي. وتتم معالجة هذه المعطيات أولاً بحوسبة انحراف معيار آلان (انظر الفصل 4)، مع افتراض المعطيات بالتباعد المتساوي، والبعيدة بما قدره  $0 = 1/24\tau$  يوماً. وفي الرسم البياني اللوغارتمي الوارد في الشكل 6.3b، تتركز قيم انحراف معيار آلان  $\sigma_y(\tau)$  على خط مستقيم من المنحدر -1 لمتوسط أوقات التكامل  $1 \leq \tau \leq \tau_0$  يوماً. ويدل ذلك على وجود ضوضاء الطور بالنسبة إلى  $\tau$  أصغر من يوم واحد. ولا تهيمن ضوضاء الطور بالنسبة إلى أوقات التكامل على الأداء الفعلي للميقاتيات الرئيسية في كل من OP و PTB، بشكل يجعل ذلك الأداء قابلاً للنفذ. بمجرد تمليس ضوضاء الطور التي تجتهد أصلها في طريقة المقارنة. ويكفي لهذا الغرض لتقدير متوسط القيم على المعطيات الأولية المتعاقبة  $x_{OP\ PTB}(t)$  التي تغطي يوماً واحداً. ويؤدي ذلك إلى قيم وصلة التوقيت  $x_{OP\ PTB}(t')$  المسجلة في التاريخ  $t'$  المتطابق مع وسط الأيام المتتالية، مع ضوضاء عشوائية مملسة تنتج عن طريقة الرؤية المشتركة للنظام GPS. وتقدر سوية ضوضاء الطور البيضاء انطلاقاً من انحراف معيار آلان  $(Mod.\sigma_y(\tau_0))$  باستعمال (انظر الفصل 4):

$$(6.8) \quad \sigma_x = \tau_0 \frac{\text{mod}\sigma_y(\tau_0)}{\sqrt{3}},$$

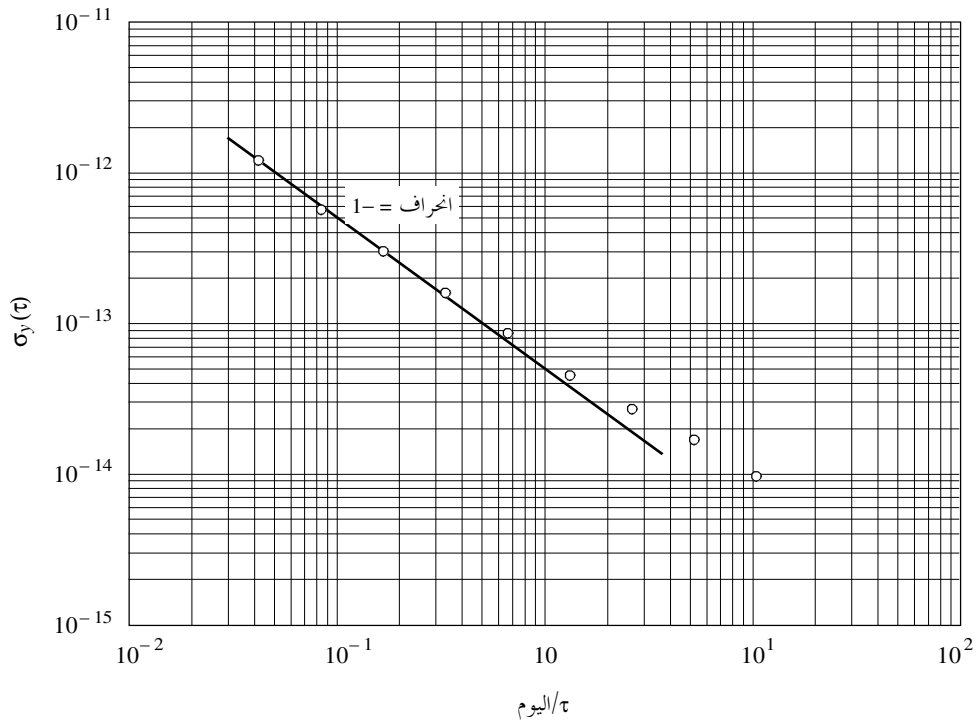
مما يعطي  $\sigma_x = 2,6$  بالنسبة إلى هذا المثال. وتكون ضوضاء الطور البيضاء المتبقية على المتوسط اليومي بدرجة  $\sigma_x / \sqrt{24}$ ، وهو دون 1 ns، إذا كانت 24 عملية للمراقبة تعطي تقديرات مستقلة للفارق الزمني الشيء الذي لا يمثل قاعدة بالمرة. ومهما يكن من أمرها، فإن الضوضاء المتبقية على إثر تقدير المتوسط تكون طفيفة مقارنة بأداء الميقاتية اليومي.

ويبين المثال السابق أنه برغم تحصيل معطيات التوقيت GPS بدورة قياس قصيرة نوعاً ما  $\tau_0$ ، متساوية مع ساعة 1 في هذه الحالة الخاصة، فإن القياسات المعنية، أي القياسات التي تمثل فعلياً نوعية الميقاتيات ذاتها، لا تتيسر إلا بتيسر فترة أساسية  $T_0$  بدرجة يوم 1. أما بالنسبة إلى وصلات النظام GPS ذات المسافة البعيدة، فإن  $T_0$  يتراوح بين 2 و 3 من الأيام في أفضل الحالات، وذلك عند استعمال مهل الأيونوسفيري المُقيسة والروزنامات الساتلية الدقيقة. وقبل ظهور النظام GPS، فقد كانت المدات  $T_0$  التي تصل إلى 50 يوماً ضرورية للتقليص من ضوضاء القياس لوران-C حتى تصل إلى السويات المقبولة.

وفي جميع الحالات، يتم تمليس ضوضاء القياس التي تؤثر على معطيات التوقيت قبل تطبيق الخوارزمية الأساسية المعنية بحوسبة سلم الوقت.



(أ) معطيات التوقيت الأولية لشهر مايو 1994



(ب) انحراف آلان المطابق لها

### الشكل 6.3

نقل التوقيت بطريقة الرؤية المشتركة للنظام بين OP و PTB



## 3.3.6 خوارزمية الاستقرار

لنفترض وجود مجموعة من  $N$  الميقاتيات: في التاريخ  $t$ ، تكون معطيات التوقيت المطابقة له  $(N-1)$  القياسات  $x_{ij}(t)$ ، بالنسبة إلى الميقاتية  $H_j$  التي تم اختيارها لتكون ميقاتية غير إطنابية أوردتها المعادلة (6.5):

$$j \neq i, i = 1, \dots, N, x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t)$$

ولنفترض أن السلم  $TA$  هو سلم الوقت البراجمي الحاصل؛ وتعين حوسبته للتاريخ  $t$  انطلاقاً من التركيبة المثلى لكل من  $x_{ij}(t)$  و  $N$  الفوارق الزمنية:

$$(6.9) \quad x_i(t) = TA(t) - h_i(t), i = 1, \dots, N,$$

تمكن من النفاذ إلى  $TA$  في التاريخ  $t$ ، و  $x_i(t)$  ما كان غير معروف منها.

ولنفترض أن  $TA$  هو السلم المعروف لتاريخ معين  $t_0$  حيث إن القياسات  $x_{ij}(t_0)$  متيسرة وتتم معالجتها. وقد تم تحصيل القياسات  $x_{ij}(t)$  الآن لتاريخ لاحق  $t > t_0$ . ويتم الفصل عادة بين التاريخ  $t$  والتاريخ  $t_0$  بواسطة مدة  $T$  أطول من  $T_0$ . وتمثل المشكلة في تصميم خوارزمية قادرة على التعامل مع معطيات التوقيت  $x_{ij}(t)$  لتوليد السلم  $TA$  في التاريخ  $t$ .

وتصمم خوارزمية سلم الوقت عموماً لتأمين أفضل استقرار ممكن لسلم الوقت، فيما تتم معالجة الدقة خارجياً مثلما جاء في 3.1.3.6. ولا بد من التأكيد على أنه لا وجود لأفضل الحلول العامة في تصميم خوارزميات سلم الوقت. بل إن التصميم الجيد يقدم سلسلة من الخيارات الملائمة للهدف الذي يستعمل سلم الوقت لتحقيقه. ولا يبدو أن الخوارزمية التي صمّمت لتوفير معيار مرجعي للتوقيت ستفي بمتطلبات أولئك الذين ينحصر همهم في تقديم خدمة للبحث. ويقوم أحد الخيارات الصعبة، على سبيل المثال، على ما إذا كان على الخوارزمية أن تقدم سلم الوقت في الوقت الفعلي أو قريب منه، أو ما إذا كان السلم المتأخر مقبولاً أم لا. ولكن في كل الحالات، تتطلب المعالجة الإحصائية لمعطيات الميقاتية على الأقل [تافيليا وتوماس، 1991a]:

- تعريفاً لتوسط سلم الوقت،
- اختيار مدة بين عمليتي تبيين لسلم الوقت،
- مواصفة إجراء استمثال مساهمة كل ميقاتية، و
- تنفيذ مرشاح على كل تردد ميقاتية للحصول على وسيلة للتنبؤ بالتردد، مع تعويض هام في حالة وجود انسياب التردد.

وترتكز خوارزميات سلم الوقت المستعملة في مراكز التوقيت على افتراضين أساسيين:

- تتأثر نتائج القياس  $x_{ij}(t)$ ، التي وردت في (6.5) بالضوضاء الملازمة التي تعتبر طفيفة مقارنة بضوضاء الميقاتية؛
- تكون الميقاتيات مستقلة في حين تكون سلسلة المعطيات المطابقة لها غير مترابطة. ويعتبر هذا الافتراض صحيحاً من الناحية المفهومية، بما أن كل ميقاتية هي صندوق مستقل تعمل فيه الذرات و "تحكم" على التردد المولد داخله. غير أنه في 1989، أوصت اللجنة الاستشارية لتعريف الثانية بإجراء دراسة تتعلق بالترابطات الممكنة بين الميقاتيات. وقد تم الكشف عن بعض الترابطات بين ترددات الميقاتية بواسطة دراسة تخص سلوك الميقاتيات المساهمة في TAI [تافيليا وتوماس، 1990b، 1991b]. وتتطابق هذه الترابطات بالأساس مع الاستجابات للتغيرات في الوضعيات البيئية التي تتعرض إليها الميقاتيات. وقد بُدّل منذ سنوات عديدة، بمجهودات كبيرة للزيادة في استقلال الميقاتية من خلال التحكم في البيئة أكثر أو من خلال تصنيع ميقاتيات ذرية أقل حساسية [دي ماركي، 1988].

وفيما يلي، نعود إلى الأمثلة التي يمكن الحصول بشأنها على العديد من الوثائق. وهي تتعلق بوجه خاص بالخوارزمية (ALGOS(BIPM)) [غينو وتوماس، 1988، تافيليا وتوماس، 1991a]. التي تنتج السلم TAI المرجعي الدولي في BIPM، والخوارزمية AT1(NIST) [فارنوم (Varnum) وآخرون، 1987؛ فايس وآخرون، 1989] التي تنتج سلم الوقت في الوقت الفعلي AT1 في NIST. وتعالج الخوارزمية (ALGOS(BIPM)) المعطيات المتأتية من عدد كبير من الميقاتيات الموزعة في العالم أجمع. وهي مصممة لتحقيق أقصى الاستقرار الطويل المدى ومهلة نفاذ بعدة أسابيع تكون مقبولة لتسليم TAI. أما الخوارزمية AT1(NIST) فتعالج المعطيات المتأتية من حوالي 10 ميقاتيات موضوعة في ذات الموقع. وهي مصممة للتجارب العلمية التي تتطلب نفاذاً في الوقت الفعلي للسلم AT1.

## 1.3.3.6 تعريف متوسط سلم الوقت

يمكن كتابة قراءة سلم الوقت الذري TA نظرياً، للملاءمة تعريفات سلام الوقت التي وردت في المقدمة وفي القسم 2.6، وذلك في التاريخ  $t$  في شكل المتوسط الموزون لقراءات الميقاتيات المساهمة:

$$(6.10) \quad TA(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i(t) h_i(t).$$

ويقوم التعريف الرياضي الأساسي الذي ورد في (6.10) بدور مركزي في التطوير المحيط بخوارزميات سلم الوقت وهو ما سيتم التعرض إليه بالتفصيل لاحقاً. ولم تعتمد بعض المواقيت العملية على تعريف مماثل للمتوسط مثلما هو الشأن بالنسبة إلى TA(NIST) القديم [جون (Jones) وترايون (Trayon)، 1983، 1987] والذي توقف العمل به في 1993، أو التوقيت GPS [فيزي (Feese) وآخرون، 1991]. ولا يأخذ الكتيب هذه الحالات في الاعتبار.

وقد تم إسداء الموازين النسبية  $N\omega_i(t)$ ،  $i = 1, \dots, N$  حتى يتسنى التمييز بين الميقاتيات حسب نوعياتها الملازمة لها. وهي تفي بشروط العلاقة التالي:

$$(6.11) \quad \sum_{i=1}^N \omega_i(t) = 1.$$

يكون توقيت الميقاتية عموماً خاطئاً مقارنة ببعض سلام الوقت المعرفة بسبب كل من الانحرافات النظامية بالإضافة إلى الانحرافات العشوائية. ويتم اختيار وظيفة الوزن على نحو نموذجي في (6.10) لاستمثال الاستقرار في حين أنها لا تعتمد على الانحرافات النظامية (مثال، تخالف التردد، انسياق التردد) ولكنها لا تتبع إلا الانحرافات العشوائية. ونتيجة لذلك، إذا تغير وزن ميقاتية معينة أو إذا تمت إضافة ميقاتية ما أو حذفها، فإن حوسبة سلم الوقت الحاصل ستتأثر عكسياً، نظراً لتطبيق وظيفة الوزن في (6.10) على الانحرافات النظامية أيضاً [آلان وآخرون، 1974؛ غينو 1987]. وينتج عن ذلك عدم إيفاء المعادلة (6.10). بمتطلبات مجموعات الميقاتيات الفعلية التي تكون تغييرات الوزن بالنسبة إليها أمراً لا مفر منه. وعلى ذلك الأساس لا بد من تكملة المعادلة (6.10) كالتالي:

$$(6.12) \quad TA(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i(t) [h_i(t) + h'_i(t)]$$

حيث إن  $h'_i(t)$  هو تصحيح للتوقيت أضيف في التاريخ  $t$  إلى قراءة الميقاتية  $H_i$ ، وصمم لتأمين تواصل التوقيت والتردد للسلم TA في تاريخ سابق  $t_0$  عندما تكون الموازين قد غيرت [غينو وتوماس، 1988]. ويكتب التصحيح  $h'_i(t)$  على النحو التالي:

$$(6.13) \quad h'_i(t) = x_i(t_0) + y_{ip}(t) \cdot (t - t_0),$$

حيث إن  $x_i(t_0) = TA(t_0) - h_i(t_0)$  معروف، إذ إنه ناجم عن حوسبة السلم TA في التاريخ  $t_0$  وحيث إن  $y_{ip}(t)$  هو تردد الميقاتية  $H_i$  المتوقع في علاقته بالسلم TA خلال الفاصل  $[t_0, t]$ . ويمكن تقدير التردد للميقاتية  $H_i$  في علاقته بالسلم TA خلال الفاصل  $[t_0, t]$  انطلاقاً من:

$$(6.14) \quad y_i(t) = \frac{[TA(t) - h_i(t)] - [TA(t_0) - h_i(t_0)]}{t - t_0}.$$

ويبقى التردد  $y_i(t)$  غير معروف إلى أن تتم حوسبة السلم TA في التاريخ  $t$ . ولا بد آنذاك من التنبؤ به طبقاً لسلوك الميقاتية  $H_i$  السابق. ويرد التردد المتنبأ به ممثلاً في  $y_{ip}(t)$  ويظهر في المعادلة (6.13).

وتفقد المعادلات (6.5) و (6.9) و (6.12) إلى نظام المعادلات التالي، إذا افترضنا عدم وجود ضوضاء القياس:

$$(6.15) \quad \sum_{i=1}^N \omega_i(t) x_i(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i(t) x_i(t_0) + \sum_{i=1}^N \omega_i(t) y_{ip}(t) \cdot (t - t_0),$$

$$. x_i(t) - x_j(t) = x_{ij}(t)$$

ويكون النظام (6.15) جبرياً مع المعادلات  $N$  ويكون  $N$  غير معروف. والحل لذلك فريد وتمثل نتائجه في الفوارق الزمنية  $x_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$  التي تمكن من النفاذ إلى السلم TA في التاريخ  $t$ . وتعطي المعادلة التالية الفارق بين الميقاتية  $H_i$  والسلم TA صراحة كالتالي:

$$(6.16) \quad x_j(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i(t) [h_i'(t) - x_{ij}(t)].$$

وقد يوجد النظام (6.15) في معظم الخوارزميات المستعملة في أرجاء العالم، كالخوارزميات المستعملة مثلاً لحوسبة السلم AT1 التابع إلى NIST [فارنوم وآخرون، 1987؛ تافيليا وتوماس، 1991a]، والسلم TA(F) [غرانفو (Granveaud)، 1986] في OP، والسلم TAI [غينو وتوماس، 1988] في BIPM، والسلم TA(AUS) في ORR [لوك (Luck)، 1979]، والسلم TA(CRL) في CRL [يوشيمورا (Yoshimura)، 1980]، والسلم A.1(MEAN) في USNO [بارسيفال، 1978].

وقد تمت البرهنة على فوائد استعمال كل من الاستقرار على المدى القصير والاستقرار على المدى الطويل [آلان وآخرون، 1974]، كما تم اقتراح إدخال تطورات جديدة على خوارزميات سلم الوقت، الشيء الذي يفتح الباب أمام إمكانية استعمال إجراءات الوزن القصيرة المدى والطويلة المدى [فاي غو (Wei Gu)، 1992؛ شتاين، 1992]. ويستعمل في USNO خوارزمية جديدة حيث تتم إعادة تقييم الوقت الجملي كل ساعة انطلاقاً من 75 يوماً سابقاً: وتُعدّل الموازين طبقاً لمعايرة تريبعية مع الزمن حتى تتسنى ملاءمة نوعيات مختلف أنماط الميقاتيات القصيرة والطويلة المدى (معايير بالسيزيوم وموازير الهيدروجين). ويستعمل تحيين آخر ساعة لتوجيه ميقاتية المازر [بيركبرون، 1991].

ويُستعمل تعريف سلم الوقت بالنسبة إلى بعض الخوارزميات إلى جانب المرشحة المحددة بشكل يؤثر على معطيات التوقيت الأولية التي لم يتم تمليسها قبل ذلك. وهو حال الخوارزمية KAS-1 [شتاين وآخرون، 1989] التي يستعمل ضمنها مرشاح كلمان. وفي غيرها من الحالات، تُستعمل شكلية كلمان لاستبانة المعادلة (6.6) لتحسين استقرار سلم الوقت، كما هو معمول به في KAS-2 [شتاين، 1992]، أو لتقييم درجة عدم التيقن من التقديرات والكشف عن السلوكات الشاذة، كما هو معمول به في TA2(NIST) [فايس وفايسار (Weissert)، 1994]. ونحصر فيما يلي النقاش على الخوارزميات الجمليّة "الكلاسيكية" الجيدة الإنشاء والتي تعتمد على المعادلة (6.15)، مقترحين بذلك على القارئ الذي يهّمه الأمر الرجوع إلى الأدبيات للمزيد من التعمق في البحث.

وإذ يأخذ تعريف سلم الوقت، وبالتالي نظام المعادلات الحاصل، تقريباً ذات الشكل، فإن مواصفات خوارزمية معينة تتركز على الاختيارات التي قادت إليها:

- طول الفاصل الزمني  $[t_0, t]$ ،
- الموازين المسندة إلى الميقاتية،
- الأسلوب الذي يتم به التنبؤ بترددات الميقاتية، والأسلوب الذي يُعامل به انسياب التردد.

وترتبط هذه الاختيارات ارتباطاً وثيقاً بالأهداف التي صُمم سلم الوقت من أجل تحقيقها.

### 2.3.3.6 طول فاصل الحوسبة الأساسي

تم تعريف مدتين أساسيتين في الأقسام السابقة:

- المدة  $\tau_0$ ، لدورة القياس الأساسية.
- أدنى المدة  $T_0$ ، يتم خلالها تقدير متوسط المعطيات الأولية من أجل تمليس ضوضاء القياس بالقدر الكافي لبلوغ النوعيات الملازمة للميقاتيات التي تخضع للمقارنة. وتمتد درجات طول المدة  $T_0$  من عدة دقائق إلى عدة ساعات داخل المخبر، ومن 12 ساعة إلى يوم 1 بين مخبرين موصولين عبر المراقبات بالنظام GPS بالرؤية المشتركة على مسافة قصيرة، وبضعة أيام بين مخبرين موصولين عبر المراقبات بالنظام GPS بالرؤية المشتركة على مسافة طويلة.

كما يتم تعريف تاريخين اثنين:

- التاريخ  $t_0$ ، الذي يعرف فيه السلم TA.
- التاريخ  $t$ ، اللاحق ( $t > t_0$ ) الذي تكون قياسات التوقيت المملسة متيسرة كما تتم حوسبة السلم TA بحل المعادلة (6.15) بالنسبة إليه.

ويكون فاصل التحيين  $T = t - t_0$  عموماً بنفس الدرجة من الكبر وأطول بقليل من  $T_0$ . فطوله إذاً يكون موصولاً مباشرة بمعطيات التوقيت. ونسوق مثلاً على ذلك:

- $T$  يساوي ساعتين بالنسبة إلى السلم (AT1(NIST)، الذي لا يستعمل إلا معطيات التوقيت التي تم تحصيلها في الموقع،
  - $T$  يساوي يوماً واحداً بالنسبة إلى السلم (TA(F)، الذي يستعمل معطيات التوقيت من كامل أنحاء فرنسا، وأقصى خط أساسي بين المخابر يبلغ درجة 1000 كلم.
  - $T$  يساوي ساعة واحدة بالنسبة إلى السلم (TA(F)، الذي يستعمل معطيات التوقيت من كامل أنحاء فرنسا، وأقصى خط أساسي بين المخابر يبلغ درجة 6000 كلم.
- وتمثل المطلب الآخر في التمييز الفعال لسلوك الميقاتيات المساهمة لوزنها كما ينبغي التنبؤ بتردداتها المتصلة بالسلم TA بفعالية (انظر الأقسام اللاحقة). فكثيراً ما يكون بالتالي من الضروري مراقبة الميقاتيات خلال مدة أطول من  $T$ . وهذا يؤدي إلى إمكانيتين سيرد ذكرهما لاحقاً.
- لنفترض أن الصحيح  $n$  أكبر من 1.

### 1.2.3.3.6 تحيين السلم TA في كل فاصل من المدة $T$

يتم الاحتفاظ بذاكرة من آخر الفواصل  $n$  من المدة  $T$ . ويتم تسليم سلم الوقت في الوقت الفعلي تقريباً، مع تأخر لا يتجاوز  $T$ ، لكنه لا يعتمد إلا على السلوك السابق للميقاتيات المساهمة. وليس هنا من إعادة للمعالجة أو معالجة لاحقة. وتكون الأوزان والترددات التي تم التنبؤ بها صالحة بالنسبة إلى فاصل من المدة  $T$ . مما يجعل الخوارزمية الحاصلة خوارزمية دينامية وقابلة للتكيف في الفواصل من  $T$ .

وتتمثل فائدة هذا المنهج في قابلية النفاذ إلى سلم الوقت في الوقت الفعلي. أما العائق الناتج عنه فيتمثل في عدم إمكانية الأخذ بعين الاعتبار لسلوك ميقاتية معينة الشاذ قبل تسجيله على السلم. فيمكن بالتالي لميقاتية مستقرة التي تظهر عليها قفزات في التردد فجأة أن تمر على سلم الوقت قبل الكشف عن ذلك الشذوذ.

ويُستعمل هذه المنهج للسلم AT1 الذي تعادل المدة  $T$  بالنسبة إليه ساعتين و  $nT \approx 10$  من الأيام ( $n \approx 120$ ). وتلقى مشكلة الكشف عن الشذوذ في السلوك حلها في خوارزمية مُحَيَّنة AT2، التي تم تصورها واختبارها في NIST [فايس وفايسار، 1991].

### 2.2.3.3.6 تحيين السلم TA عندما يكون فاصل المدة $nT$ منتهياً

تتم معالجة التواريخ ( $n + 1$ ) المتضمنة في الفاصل ككل، مما يؤدي إلى تسليم سلم وقت في الوقت المؤجل، المحوسب في عملية المعالجة اللاحقة. ويكون التنبؤ بالوزن والتردد لميقاتية معينة صالحاً لفاصل من المدة  $nT$ . ويتغير بالنسبة إلى الفاصل التالي من المدة  $nT$ ، إلا أنه يكون مساوياً بالنسبة إلى التواريخ المتضمنة في فاصل معين من المدة  $nT$ . ويكون سلوك الميقاتية التي تمت مراقبتها أثناء الفاصل الكامل من الحوسبة قد تم أخذه بعين الاعتبار. والخوارزمية الحاصلة هي خوارزمية دينامية وقابلة للتكيف بعدياً على فواصل من المدة  $nT$ .

والفائدة الحاصلة من ذلك هي إمكانية الأخذ بعين الاعتبار لأي سلوك شاذ للميقاتيات الذي يحدث أثناء تلك الفترة. أما العائق الناتج عنه فهو النفاذ إلى سلم الوقت في الوقت المؤجل بالنسبة إلى التواريخ ( $n + 1$ ) المتضمنة في فاصل الحوسبة.

ويكون هذا الحال بالنسبة إلى السلم (TA(F)، الذي تساوي المدة  $T$  بالنسبة إليه يوماً واحداً والمدة  $nT$  تساوي 30 يوماً ( $n = 30$ ). ويجوسب السلم TAI بواسطة العملية ذاتها مع المدة  $T$  تساوي 10 أيام والمدة  $nT$  تساوي 60 يوماً ( $n = 6$ ).

وتستعمل خوارزمية أخرى في NIST كلتا العمليتين. وهي TA2 التي تعتمد على الخوارزمية AT2 (AT1 زائد الكشف عن السلوك الشاذ)، التي تشتغل مع مدة  $T$  تساوي ساعتين ومدة  $nT$  تساوي 10 أيام، في الاتجاه الأمامي والاتجاه الخلفي خلال مدة شهر [فايس وفايسار، 1994]. ثم تأتي إعادة المعالجة التكرارية للمعطيات خلال الشهر بأكمله. فيكون لدى NIST إذاً سلمان من سلام الوقت، سلم الوقت في الوقت الفعلي AT1 وسلم الوقت للوقت المؤجل TA2، وتوقفت حوسبة السلم (TA(NIST) السابق والمعتمدة على مرشاح كلمان [بارنيس، 1982] منذ أواسط 1993.

وتتبين معظم الخوارزميات المستعملة في المخابر الوطنية الخيار الأول، بتحيين TA(k) في الوقت الفعلي أو في الوقت الفعلي القريب بدون المعالجة اللاحقة. وعلاوة على ذلك، تعتمد بعض الخوارزميات مثل تلك المستعملة للسلم TAI في BIPM أو السلم A.1(MEAN) في USNO أو السلم TA2 في NIST إلى اختيار الإجراء التكراري لتقييم التنبؤ بالموازن وبالترددات: ويأخذ ذلك شكل إعادة الحوسبات المتتابعة للسلم TA بالنسبة إلى ذات الفاصل، مع الكشف عن قيم تائهة لدى كل خطوة، إلى أن تتقارب النتائج [تافيليا وتوماس، 1991a].

## 3.3.3.6 إجراءات الوزن

## 1.3.3.3.6 أفكار عامة

إذ تُصمَّم خوارزميات سلم الوقت لاستمثال استقرار التردد، فإنه يتعين القيام بوزن ميقانية طبقاً لاستقرار ترددها الخاص بها. والوزن الذي أُسند إلى ميقانية معينة قد تم اختياره بالأساس ليكون عكسياً نسبياً بالنسبة إلى مغايرة ترددها  $\sigma_i^2$ .

$$(6.17) \quad \omega_i = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{k=1}^N 1/\sigma_k^2}, \quad i = 1, \dots, N.$$

ويكمن سبب ذلك في أنه لو كانت الميقاتيات المساهمة مستقلة ولو لم تكن الموازين محدودة بشكل اصطناعي، فإن مغايرة التردد لسلم الوقت الحاصل قد تُكتب كما يلي:

$$(6.18) \quad \frac{I}{\sigma_{TA}^2} = \sum_{i=1}^N \frac{I}{\sigma_i^2},$$

ويعني ذلك أن سلم الوقت هو أكثر استقراراً مبدئياً من أية مكونة مساهمة أخرى. ويعتمد اختيار نمط المغايرة (كلاسيكية كانت أو مرشحة أو مغايرة آلان) على الأهداف التي يخدمها توليد سلم الوقت، وقد يختلف بالتالي طبقاً للخوارزمية المعنية. غير أنه يوجد هناك عاملان محدّدان تتعرض لهما فيما يلي.

وتقدر ترددات الميقانية  $H_i$ ، المستعملة في حوسبة مغايرة ترددها، خلال فاصل من المدة  $\tau$ . وطبقاً للمعادلة (6.18) فإن استقرار سلم الوقت الحاصل يتم استمثاله لتقدير متوسط المواقيت القريبة من  $\tau$ . فيتسم تحديد أي القيم  $\tau$  التي تقوم الميقاتيات المساهمة بتقديم أفضل حالات استقرارها إليها عندئذ من أولى الأولويات، وكذلك تعريف هدف الاستقرار الذي يتعين على سلم الوقت تحقيقه. وبعبارة أخرى، قد يحتاج استمثال كل من الاستقرار القصير المدى والطويل المدى إلى مساهمات من مختلف أنماط الميقاتيات، تتم معالجتها طبقاً لمختلف الإجراءات المنصوص عليها في الخوارزمية. ويكون هذا حال سلم الوقت البرنامجي UTC(USNO) الحوسب في USNO [بريكرون، 1991]، وكذلك الأمر بالنسبة إلى الخوارزميات KAS [شتاين، 1992].

ويتم تقدير ترددات الميقانية  $H_i$ ، المستعملة في حوسبة مغايرة ترددها، بواسطة مقارنتها بمرجع ما. وكثيراً ما يكون هذا المرجع هو سلم الوقت ذاته لأن استقراره يُفترض أن يتفوق على استقرار الميقاتيات المساهمة. ويترتب عن ذلك انحياز المغايرة الحوسبة انحيازاً ملازماً [يوشيمورا، 1980] وتكف عن تمثيل نوعية الميقانية الحقيقية. ويطلق على ذلك أثر "الارتباط الجملي للميقاتيات". وقد نشر منهج لاشتقاق هذا الأثر في [تافيلا وآخرون، 1991]، وهو يقدم ما يلي:

$$(6.19) \quad \sigma_{i,bias}^2 = \sigma_{i,true}^2 (1 - \omega_i),$$

حيث إن  $\sigma_{i,bias}^2$  و  $\sigma_{i,true}^2$  هما مغايرتا التردد "المنحازتان" و "الحقيقيتان" للميقاتية  $H_i$ .

يعتبر أثر الارتباط الجملي للميقاتيات جزئياً مقارنة بالمساهمة النسبية للميقاتية في الحمل. ويؤدي عدم أخذه بعين الاعتبار إلى إصابة ميقانية شديدة الاستقرار بوزن أكبر، الشيء الذي يهدد اعتمادية سلم الوقت. ويظهر عامل التصحيح في (6.19) في أغلب الخوارزميات التي تُستعمل في المخابر الوطنية ويكون له عامل مضاعفة أحياناً قريب من 1 [تافيلا وتوماس، 1991a]. لكنه لا يتدخل في الخوارزمية TA لأن عدد الميقاتيات المساهمة وتنفيذ الحد الأعلى من الوزن يؤدي إلى مساهمة قصوى،  $\omega_i$ ، لميقاتية معينة التي كانت أدنى من 1% منذ بداية 1993، ويكون بالتالي طفيفاً بالنسبة إلى 1.

وبالإضافة إلى الأوجه الأساسية التي قمنا بتحليلها، يجب أن يخضع إجراء الوزن إلى بعض القواعد الأخرى. وتتمثل أهم هذه القواعد في تنفيذ حد أعلى من الوزن الضروري لجعل سلم الوقت يتركز على أفضل الميقاتيات بوجه خاص، مع تفادي إعطاء دور هام إلى أي منها. والقاعدة الأخرى تتمثل في مقياس موضوعي لحماية سلم الوقت من سلوك بعض الميقاتيات الشاذ الممكن. ولا بد من التأكيد على أن وجود حد أعلى من الوزن يحمي الاعتمادية لكنه يجعل المعادلة (6.18) غير صالحة. وقد يؤدي ذلك إلى سلم الوقت TA لا تكون نوعيته أفضل من أحسن الميقاتيات المساهمة.

وللبرهنة على ذلك، سنتناول أمثلة على الخوارزميتين AT1(NIST) و ALGOS(BIPM) لإقامة مقارنة صالحة كاملة بينهما [تافيليا وتوماس، 1991a].

### 2.3.3.3.6 إجراء الوزن في AT1 (NIST)

في الخوارزمية AT1(NIST)، يتم طرح الموازين المستعملة في حوسبة AT1 في التاريخ  $t$  من نتائج حوسبة AT1 في التاريخ  $t_0$  ( $T = t_0 - t$ ). ونتحصل على الوزن  $\omega_i(t)$  للميقاتية  $H_i$  انطلاقاً من المعادلة (6.21) حيث إن  $\sigma_i^2(t)$  تنتج عن مرشاح أسّي يكتب كما يلي:

$$(6.20) \quad \sigma_i^2(t) = \frac{1}{A+1} [\delta_i^2 + A \cdot \sigma_i^2(t_0)],$$

مع

$$(6.21) \quad \delta_i = |(t_0) - y_{ip}(t_0)| + \frac{K_i}{T}$$

ويُستعمل المرشاح الأسّي في إزالة وزن سلوك الميقاتية السابق. وتتراوح القيمة المعتادة لثابته الزمنية  $A$  من 20 إلى 30 يوماً. ويحتوي المصطلح  $\delta_i$  على الزحزحة الموجودة بين التردد الفعلي للميقاتية  $H_i$  وقيمتها المتوقعة، فيعطي بالتالي تقديراً لتنبؤ الميقاتية خلال  $T$ . أما المصطلح  $K_i$ ، الذي يُضاف إلى المعادلة (6.21) فيأخذ بعين الاعتبار الارتباط الموجود بين التوقيت الإجمالي والميقاتية  $H_i$ . ويعتبر ذلك ضرورياً للغاية في الخوارزمية AT1(NIST) التي صُممت لمعالجة عدد ضئيل من الميقاتيات ( $\approx 10$ ) وحيث قد تبلغ أقصى مساهمة لميقاتية معينة 20%. وقد تم اختيار المصطلح  $K_i$  مؤخراً طبقاً للمعادلة (6.19) في كل من الخوارزميتين AT1 و TA2 [فايس وفايسار، 1994].

لا تحتفظ الخوارزمية AT1(NIST) بالنسبة إلى تحديد الوزن بأية ذاكرة لقيم الترددات السابقة المطلقة، بل إنها تستند إلى مغايرات التردد. وهذا يشبه الاختلاف بين مغايرة آلان ومغايرة كلاسيكية. وبالرغم من اختبار عدم استقرار تردد الميقاتية، فإنه لا بد من التنبه إلى إمكانية بعض المعلومات التي تخص المغايرات النظامية الطويلة المدى.

ويعتبر استعمال مرشاح أسّي لتحديد الوزن فعالاً لأنه يزيل الموازين السابقة: وإذا حدث أن كان لميقاتية ما "حادث" تردد، فيُزال وزنه قصداً، يتم سحب إزالة الوزن تدريجياً خلال فاصل من عدة أوقات للتكامل. وفي الخوارزميتين AT2(NIST) و TA2(NIST) يتم إدخال عملية للكشف عن قفز الترددات صراحة [فايس وفايسار، 1994]: وتمثل الفكرة الأساسية في الكشف عن اختلاف تردد أكبر من سوية ضوضاء التردد التي تمت مراقبتها للميقاتية المعنية بأربع مرات. هذا، ويتم إدخال حد أعلى للوزن في الخوارزمية AT1(NIST) بهدف الاعتمادية.

### 3.3.3.3.6 إجراء الوزن في ALGOS (BIPM)

وكما سبق الذكر، فإن ALGOS(BIPM) تشتغل بأسلوب المعالجة اللاحقة، معالجة القياسات المأخوذة ككل خلال فترة أساسية  $nT = 60$  يوماً. وتيسر القياسات كل  $T = 10$  من الأيام بالتاريخ اليوليوسي المعدل (MJD) المنتهي برقم 9. ويتم تحيين سلم الوقت بالنسبة إلى كل من التواريخ الستة  $t$  المتضمنة في فترة الشهرين المعنية:  $mT + t_0 = t$  مع  $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ . والتاريخ  $t_0$  هو آخر تاريخ من فاصل الشهرين السابق، ومن أجله يتم الحفاظ على سلم الوقت بدون تحيين. فيكون الفصل بين عمليتي تحيين بمدة 10 أيام، لكن الثغرة بين عمليات الحوسبة تأخذ 60 يوماً.

وفي ALGOS(BIPM)، يكون الوزن  $\omega_i(t)$  التابع للميقاتية  $H_i$  ثابتاً خلال فاصل الشهرين  $I$  من الحوسبة: فهو صالح لسبعة تواريخ  $mT + t_0 = t$  مع الاستمرارية  $m = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  في التاريخ  $t_0$  يضمها التنبؤ بتردد الميقاتية. ويمكن كتابتها في شكل  $\omega_i(I)$  وتخضع للمعادلة (6.17)، حيث إن  $\sigma_i^2(I)$  هي مغايرات كلاسيكية منفردة محوسبة انطلاقاً من ستة ترددات متعاقبة على فترات بشهرين للميقاتية  $H_i$ . وهي الترددات المحوسبة خلال الفاصل  $I$  والفواصل الخمسة السابقة على فترات بشهرين. ونظراً لعدم معرفة التردد على الفاصل  $I$  بعد، فإنه يتم استعمال العملية التكرارية [تافيليا وتوماس، 1991a] التي تبدأ قيمها انطلاقاً من الموازين المأخوذة من حوسبة فاصل الشهرين السابقين، المنتهي في التاريخ  $t_0$ : ويعطي ذلك دلالة على سلوك كل ميقاتية أثناء الفاصل  $I$  ويمكن بالتالي من تكرير الموازين في عملية التكرار التالية.

وتستعمل الخوارزمية (ALGOS(BIPM) لتحديد الوزن قياسات الميقاتيات التي تغطي سنة كاملة، بشكل قد يمكن مغيرات التردد السنوية والانسياقات الطويلة المدى من إزالة الوزن. وقد ساعد ذلك على التقليل من المغايرة الموسمية للسلم TAI المراقب أثناء السبعينات والثمانينات. بالإضافة إلى ذلك، فإن خيار 60 يوماً، الذي كان لتلميس تاريخ لوران-C أساساً، يتطابق مع متوسط توقيت جيد من أجل الكشف عن حالات الشذوذ في التردد. ويسمح الاعتيان خلال 60 يوماً إذاً باستمثال استقرار TAI على المدى الطويل. ويمكن تقليص  $nT$  إلى 30 يوماً بالاستعمال المتزايد لوصلات الرؤية المشتركة بالنظام GPS للميقاتيات HP الجديدة التصميم. ثم يمكن تحديد الوزن باستعمال 12 عينة من عينات شهر واحد.

وفي (ALGOS(BIPM)، لا يحظى مصطلح الارتباط الجملي للميقاتيات للمعادلة (6.19) بأهمية كبيرة لذلك لا يتم العمل به [تافيليا وآخرون، 1991]. ويتطابق الحد الأعلى للموازن الموجود مع مغايرة دنيا  $\sigma_i^2(I)$  من  $10^{-14} \times 3.66$ ، يمكن تغييرها إذا استوجب الأمر ذلك لإدخال التحسينات على أداء الميقاتيات. كما يتم تنفيذ خوارزمية خاصة بالكشف عن الشاذ من السلوك أيضاً: فهي تختبر تغيرات التردد [تافيليا وتوماس، 1991a].

وخلاصة القول، هو أن الموازين المستعملة في AT1(NIST) وفي (ALGOS(BIPM) تخضع إلى ذات القواعد، وبالخصوص منها: استمثال الاستقرار والكشف عن الشاذ من السلوك والتقليل من الارتباط الجملي للميقاتيات. وتتلاءم الخيارات المحددة التي تمت مع معطيات التوقيت المتيسرة وتفي بالمطلبات الأساسية للنفاذ إلى سلم وقت معين في الوقت الفعلي أو في الوقت المؤجل.

### 4.3.3.6 التنبؤ بالتردد

#### 1.4.3.3.6 أفكار عامة

يعتمد الأسلوب الذي يتم به التنبؤ بتردد الميقاتية  $H_i$  على خاصياتها الإحصائية وعلى طول المدة التي يجب أن يكون التنبؤ خلالها صالحاً. وتوجد هناك العديد من الحالات الخاصة:

- تكون الضوضاء المهيمنة ضوضاء التردد البيضاء: وهذه حالة الميقاتيات السيزيومية التجارية لتقدير متوسط أوقات التكامل  $\tau$ ، الذي يتراوح من يوم 1 إلى 10 أيام. وأكثر الترددات احتمالاً هو التردد المقدر خلال فاصل من المدة  $\tau$ ، بالنسبة إلى الفاصل  $\tau$  التالي، يعطيها إذاً متوسط قيم التردد التي تمت مراقبتها خلال عدد من الفواصل السابقة للمدة  $\tau$ .
- وتكون الضوضاء المهيمنة هي من نمط تشكيل التردد بالسير العشوائي: وهذه حالة أغلب الميقاتيات السيزيومية التجارية لتقدير متوسط أوقات التكامل  $\tau$  الذي يتراوح من 20 يوماً إلى 70 يوماً. وأكثر قيمة للتردد احتمالاً بالنسبة إلى الفاصل  $\tau$  هي إذاً آخر قيم التردد المقدرة متوسطها خلال الفاصل السابق للمدة  $\tau$ .
- وانحراف التردد المهيمن هو انسياق خطي: وهذه حالة بعض موازر الهيدروجين لتقدير متوسط أوقات التكامل  $\tau$  التي تكون أطول من سبعة أيام. وأكثر الترددات احتمالاً بالنسبة إلى الفاصل  $\tau$  التالي هو إذاً آخر تردد تم احتسابه خلال الفاصل السابق من المدة  $\tau$  والتي تم تصحيحها بواسطة طرح اصطلاح من انسياق التردد المقدر.

ولا بد من الإلمام الجيد بسلوك الميقاتيات المساهمة من أجل استمثال مجموعة معينة ولتوخي انتقاء أساليب التنبؤ بالتردد الملائمة لمختلف أنماط الميقاتيات بجنكة.

ولنفترض وجود الخوارزمية AT1(NIST) والخوارزمية (ALGOS(BIPM) للتدليل على ذلك. كما تكون المقارنة صالحة أيضاً في [تافيليا وآخرون، 1991].

### 2.4.3.3.6 التنبؤ بالتردد في AT1 (NIST)

يتم طرح التردد  $y_{ip}(t)$  الذي تم التنبؤ به للميقاتية  $H_i$  من أجل حوسبة AT1 في التاريخ  $t$  بالنسبة إلى AT1(NIST) من نتائج حوسبة AT1 في التاريخ  $t_0$ ، مع  $T = t - t_0$ . ويمكن الحصول على ذلك انطلاقاً من مرشاح أسّي يكتب كما يلي:

$$(6.22) \quad y_{ip}(t) = \frac{1}{B_i + 1} [y_i(t_0) + B_i \cdot y_{ip}(t_0)].$$

والتردد المنتبأ به للميقاتية  $H_i$  هو متوسط تردداتها خلال الفترات السابقة مع وزن أسّي معين. وتعتمد ثابتة التوقيت  $B_i$  للمرشاح الأسّي على خاصيات الميقاتية  $H_i$  الإحصائية، وهي خاصيات قد تختلف بالتالي من ميقاتية إلى أخرى. كما أنها تسمح بتقدير مثالي لسلوك الميقاتية على المدى

الطويل نظراً لتطابقها مع تقدير متوسط تكامل الوقت الذي تبلغ الميقاتية أرضية رفيفها من أجله أو الذي يكون التقدير الجيد لمكونة بالسير العشوائي ممكنة به.

### 3.4.3.3.6 التنبؤ بالتردد في (BIPM) ALGOS

وكما سبقت الإشارة، فإن (BIPM) ALGOS تشتغل بأسلوب المعالجة اللاحقة، معالجة القياسات المأخوذة خلال فترة أساسية ككل  $60 = nT$  يوماً. ويكون التردد الذي تم التنبؤ به للميقاتية  $H_i$  ثابتاً خلال الفاصل  $I$  لحوسبة الشهرين، كما هو الشأن بالنسبة إلى الميزان الذي أسدي إليه: فهو صالح بالتالي للتواريخ السبعة  $t = t_0 + mT$ ، مع  $m = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ، ويمكن كتابته في شكل  $y_{ip}(I)$ .

وفي (BIPM) ALGOS، يكون التردد المنتبأ به والمستعمل من أجل فاصل الشهرين الحالي متساوياً مع التردد الذي تم الحصول عليه خلال فاصل الشهرين السابقين في شكل تنبؤ خطي بمرحلة واحدة. وهذا التنبؤ الأمثل لتقدير متوسط أوقات التكامل من شهرين، الذي تكون من أجله الضوضاء المهيمنة من نمط تشكيل التردد بالسير العشوائي. وكافة الميقاتيات المساهمة في إنشاء TAI تعتبر موضوعاً لذات الأسلوب من التنبؤ بالتردد: غير أن التغييرات في الإجراء هي قيد الدرس، وبالحصوص منها العمل بتقدير انسياب التردد للتنبؤ بترددات موازر الهيدروجين.

وخلاصة القول هو أن أساليب التنبؤ بالتردد في (NIST) AT1 و (BIPM) ALGOS تختلف لأن كل خوارزمية منها مكيفة لطول الفاصل الأساسي الخاص بها للحوسبة وبالتالي لخاصيات الميقاتيات الإحصائية خلال مثل تقدير متوسط أوقات التكامل ذلك.

### 4.3.6 دقة الفاصل السلمي لسلم الوقت

تم عملية تحسين دقة سلم الوقت عموماً خارج الخوارزمية الرئيسية التي يقتصر دورها على استمثال الاستقرار فقط.

أما بالنسبة إلى TAI، فهي تجري بواسطة توجيه التردد لسلم الوقت ذي التشغيل الحرّ والمشتق من خوارزمية الاستقرار (BIPM) ALGOS. وتكون تصحيحات التردد أصغر من تقلبات تردد سلم الوقت، وذلك لتفادي أي تدهور في استقراره. ويتم اتخاذ القرار بشأن تلك التصحيحات بعد مقارنة تردد سلم الوقت المحوسب مع تركيب يتكون من ترددات معايير التردد الأولية، والتي يتم تشغيلها باستمرار أو تقييمها من وقت لآخر، وذلك في كامل أرجاء العالم [أزويب وآخرون، 1977]. وفي هذا التمرين، يُؤخذ بعين الاعتبار أثر الرزحة باتجاه الأحمر نظراً للجاذبية الأرضية على ترددات المعايير الأولية. وفي 1993 لم يطبق إلا تصحيح واحد لتوجيه التردد: وقد بلغ  $10 \times 0,5 \times 10^{-15}$ . ويُعبّر عن دقة TAI حسب متوسط المدة من وحدتها السلمية، والمحسوبة بالنسبة إلى فواصل شهرين، بالتوازي SI على الكرة الأرضية الدائرة. وقد نُشر ذلك في المجلدات اللاحقة للتقرير السنوي لقسم التوقيت في المكتب BIPM. وكان متوسط مدة الوحدة السلمية TAI، على سبيل المثال، متساوياً مع  $(1 + 0,2 \times 10^{-14})$  ثانية SI على الكرة الأرضية الدائرة بالنسبة إلى الفاصل المسجل بين مايو ويونيو 1993، بدرجة عدم تيقن  $(1 \sigma)$  تساوي  $1,3 \times 10^{-14}$ .

أما بالنسبة إلى سلم الوقت الذرية NIST، فإن الدقة تؤمنها عمليات المقارنة مع معايير التردد الأولية NBS-6 و NIST-7.

### 5.3.6 أمثلة

#### 1.5.3.6 استقرار بعض سلالم الوقت المستقلة

تمت حوسبة انحرافات معيار آلان باستعمال قيم مقارنة الوقت بين TAI وبين TA(F) و AT1 و TA(PTB) و A.1(MEAN) على التوالي والتي جمّعت في [BIPM، 1993].

ويحوسب TA(F) انطلاقاً من 23 ميقاتية سيزيومية في المخابر المنتشرة في كامل أنحاء فرنسا، بخوارزمية تشابه الخوارزمية (BIPM) ALGOS. والقيمة الدنيا لانحراف معيار آلان هي:

$$(6.23) \quad \sigma_y(\tau \approx 40 \text{ days}) \approx 8 \times 10^{-15}.$$

أما AT1 فيحوسب انطلاقاً من 10 ميقاتيات سيزيومية يحتفظ بها في موقع واحد، وذلك باستعمال الخوارزمية (NIST) AT1. والقيمة الدنيا لانحراف معيار آلان هي:

$$(6.24) \quad \sigma_y(20 \text{ days} \leq \tau \leq 40 \text{ days}) \approx 5 \times 10^{-15}.$$



الفصل 6

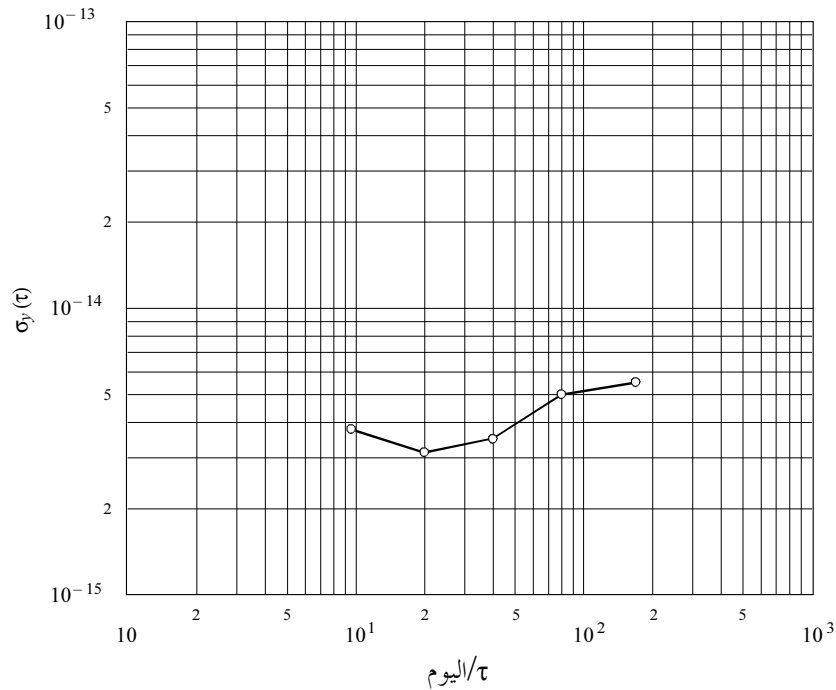
ولا يتم اشتقاق TA(PTB) انطلاقاً من خوارزمية لسلم الوقت. فهو لا يعدو أن يكون خرج معيار التردد الأولي PTB CS2 الذي يشتغل باستمرار في شكل ميقاتية. والقيمة الدنيا لانحراف معيار آلان هي:

$$(6.25) \quad \sigma_y(80 \text{ days} \leq \tau) \approx 6 \times 10^{-15}.$$

و TA(USNO) هو سلم الوقت A.1(MEAN) المحسوب انطلاقاً من حوالي 50 ميقاتية سيزيومية (36 منها هي ميقاتيات HP 5071A) و 14 من موازر الهيدروجين المحتفظ بها في الموقع، بخوارزمية تستعمل إجراء الوزن المضاعف لاستمثال كل من الاستقرار على المدى القصير وعلى المدى الطويل. والقيمة الدنيا لانحراف معيار آلان هي:

$$(6.26) \quad \sigma_y(\tau \approx 80 \text{ days}) \approx 5 \times 10^{-15}.$$

وإذ تعتمد قيم انحرافات معيار آلان الواردة هنا إلى وصف الفوارق الزمنية بين TAI وسلام الوقت المستقلة، فإن الجزء من عدم الاستقرار المتأني من TAI لا ينفصل عن ذلك المتأني من TAs الفردية. ويسمح تطبيق تقنية القبة بالزوايا N بهذا الفصل شريطة أن تكون سلام الوقت الداخلة في عملية الحوسبة مستقلة من الناحية الإحصائية. ويبين الشكل 6.4 قيم انحرافات معيار آلان بالنسبة إلى TAI التي تم الحصول عليها بواسطة تقنية القبة الرباعية الزوايا، وذلك باستعمال المعطيات المتأنية من المقارنات بين TAI و AT1، وبين TAI و TA(SU) وبين TAI و TA(PTB) للفترة الممتدة بين يناير 1993 ونيسان 1994. وتكون القيم التي نتحصل عليها دائماً أصغر من  $6 \times 10^{-15}$ .



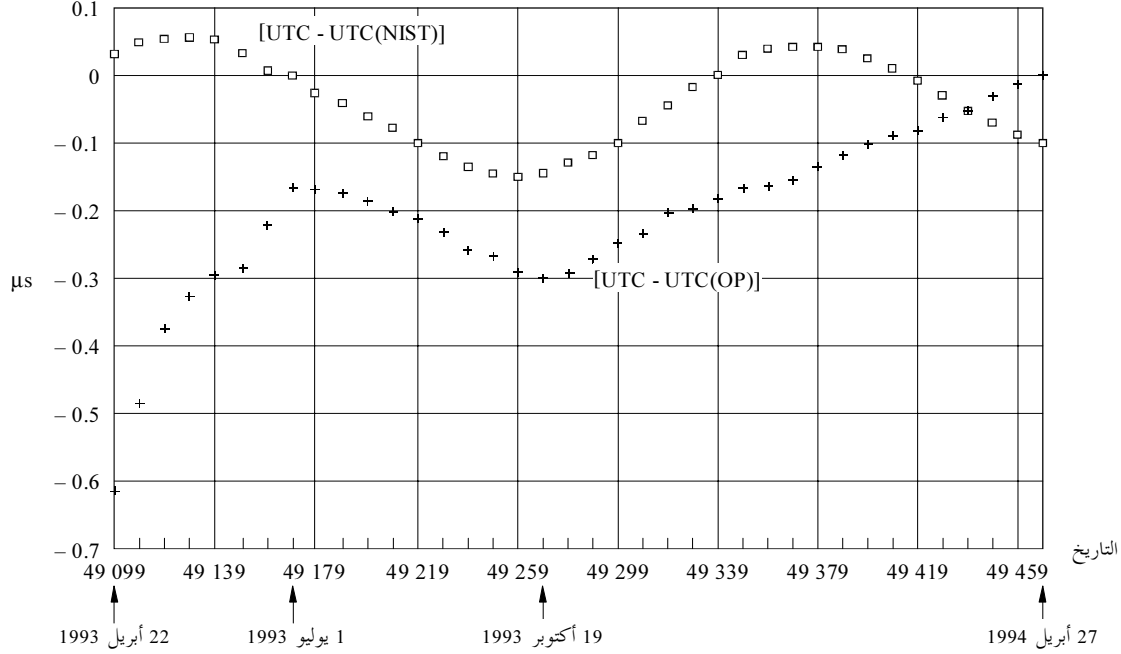
الشكل 6.4

قيم انحراف معيار آلان بالنسبة إلى TAI

وتجدر الإشارة إلى كون القيم المسجلة من انحراف آلان قد انخفضت إلى حد كبير بالنسبة إلى معظم سلام الوقت المستقلة في السنوات القليلة الماضية. أما بالنسبة إلى TAI، ومنذ بداية العمل بالميقاتيات الجديدة HP 5071A واستعمال موازر الهيدروجين الذاتية التوليف النشيطة، فقد سجلت القيم أيضاً انخفاضاً كبيراً. ويبقى أن موازر الهيدروجين، وبرغم تميزها باستقرار بارز على المدى القصير وال المدى المتوسط، فإنه يؤدي إلى انسياق إشكالي للتردد على المدى الطويل للسلم TAI.

### 2.5.3.6 توجيه بعض التمثيليات المحلية التابعة إلى UTC

يبين الشكل 6.5 أمثلة على مغايرات الوقت للمقارنات بين UTC و UTC(k) خلال سنة واحدة تنتهي في مايو 1994.



الشكل 6.5

### معايير التوقيت المتحصل عليها انطلاقاً من المقارنة بين UTC و UTC(OP) و بين UTC و UTC(NIST)

يعتبر UTC(OP) في باريس عتاد UTC المشتق انطلاقاً من ميقانية مادية واحدة موجهة عبر مدرّج طور صغير. وقد أصبح أثر التغيير الذي أُدخل على ميقانية المازر في 1993 من التصميم القديم HP إلى ميقانية HP 5071A بادياً؛ إذ تحسن الاستقرار فوراً. وقد تم إعطاء التحكم في توجيه التردد في 1993 ليصبح UTC(OP) قريباً من UTC.

أما UTC(NIST) الموجود في NIST فهو UTC براجمي مشتق من مجموعة من الميقاتيات المادية وموجه باتجاه UTC بالبرامجيات. ويحتوي هذا UTC على تمثيلات مادية محلية عديدة، تم الحصول عليها انطلاقاً من ميقانيات العتاد، يُوجّه كل منها كل 6 دقائق عبر مدرّج طور صغير. ويقوم UTC(NIST) بدبذبات بطيئة ومنتظمة حول UTC.

### 4.6 بث سلام الوقت

لا يمكن اشتقاق سلم الوقت، استناداً إلى ما قد تم شرحه آنفاً، إلا انطلاقاً من معرفة الفارق الزمني بين ذلك السلم وسلم آخر، أو من ميقانية مادية في تاريخ معين. فيتم النفاذ إلى سلام الوقت إذا بواسطة نشر الفوارق الزمنية. ويعتبر عدم التيقن من تلك القيم أفضل عموماً من 10 ns (5).

وتجدر الإشارة، قبل التعرض إلى الأمثلة الخاصة، إلى أنه بالإمكان بث جملة من سلم الوقت بإقامة مقارنة مع أي ميقانية أخرى في الخدمة، حتى ولو كانت تلك الميقاتية لا تساهم في توليد سلم الوقت، إذ يكفي توفير وصلة زمنية. فمن الهام بمكان التمييز بين توليد سلم الوقت وبثه. وفي الحالة القصوى قد يتم اختيار TA ليكون متوسط الوقت لبعض من الميقاتيات العالية الاستقرار والموجودة في عدد صغير من المخابر، لكن القيام ببثه، أي بإنشاء الشبكة GPS الدولية سيكون ذاته تماماً.

الفصل 6

ويتم القيام ببث معظم سلاسل الوقت بواسطة نشر الوثائق الرسمية على صفحات ورقية عادة، وكذلك عبر البريد الإلكتروني.

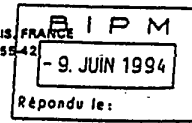
ويعيد الشكل 6.6 إنتاج أول صفحة من عدد النشرة  $H$  الشهرية التي ينتجها LPTF، وهو المخبر الفرنسي الأولي للتوقيت والتردد. وتحتوي على جداول عديدة، وخصوصاً منها الجدول الذي يعرض قيم مقارنة التوقيت بين التوقيت UTC(OP) والتوقيت GPS، وبين UTC(OP) وثلاث سلاسل لوران-C أوروبية خلال فترة شهر واحد.

OBSERVATOIRE DE PARIS Bulletin M 317  
LABORATOIRE PRIMAIRE DU TEMPS ET DES FREQUENCES  
Laboratoire primaire désigné par le Bureau National de Métrologie

TABLEAU 1 - MESURES DE TEMPS RAPPORTEES A UTC(OP)

Date 1994 Mai	Date MJD	MESURES DE PHASE DES CHAINES DE LORAN-C UTC(OP) - SIGNAL à 10h UT			MESURES DU TEMPS GPS à 14h UT	
		SYLT 7970-W µs	ESTARTIT 7990-Z µs	LESSAY 8940-M µs	UTC(OP)-GPS -9 s - µs	
1	49473	3.35	1.73	+0.27	0.070	
2	49474	3.38	1.76	+0.28	0.074	
3	49475	3.46	1.82	+0.29	0.072	
4	49476	3.42	1.72	+0.25	0.077	
5	49477	3.44	1.72	+0.27	0.062	
6	49478	3.52	1.78	+0.21	0.084	
7	49479	3.51	1.83	+0.23	0.088	
8	49480	3.47	1.78	+0.23	0.092	
9	49481	3.48	1.74	+0.21	0.114	
10	49482	3.49 (1)	1.74	+0.16	0.111	
11	49483	3.34	1.81	+0.17	0.090	
12	49484	3.33	1.81	+0.17	0.087	
13	49485	3.33	1.77	+0.17	0.087	
14	49486	3.38	1.93	+0.17	0.099	
15	49487	3.34	1.87	+0.11	0.096	
16	49488	3.41	1.95	+0.18	0.099	
17	49489	3.33	1.87	+0.11	0.074	
18	49490	3.33	1.79	+0.11	0.087	
19	49491	3.35	1.82	+0.10	0.072	
20	49492	3.35	1.92	+0.06	0.082	
21	49493	3.40	1.88	+0.07	0.084	
22	49494	3.43	1.91	+0.11	0.078	
23	49495	3.44	1.88	+0.10	0.072	
24	49496	3.51	1.84	+0.09	0.061	
25	49497	3.46	1.81	+0.05	0.063	
26	49498	3.52	1.82	+0.07	0.067	
27	49499	3.50	1.81	+0.08	0.073	
28	49500	3.52	1.79	+0.06	0.074	
29	49501	3.50	1.76	+0.03	0.087	
30	49502	3.52	1.77	+0.05	0.070	
31	49503	3.52	1.80	0.01	0.075	

LPTF, Observatoire de PARIS, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 PARIS, FRANCE  
Téléphone : (33-1) 40-51-22-21 • Téléc : 270 776 • Téléfax : (33-1) 43-25-55-42  
Internet : lptf@opdaf1.obspm.fr • Span : opdaf1:lptfop



الشكل 6.6

أول صفحة من النشرة  $H$  (العدد رقم 317)، تصدر على أساس شهري عن المخبر LPTF، بباريس، فرنسا

ويعيد الشكل 6.7 إنتاج أول صفحتين من عدد النشرة  $IERS A$  الأسبوعية. وتحتوي على جداول بقيم المقارنة بين  $UT1$  و  $UTC$  والمعلومات التي تخص الحركة القطبية.

# IERS Bulletin - A

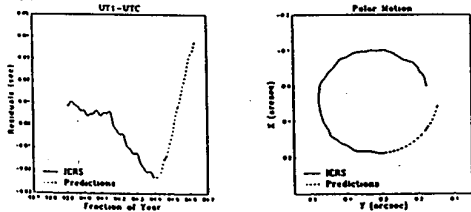
International Earth Rotation Service  
NEOS Earth Orientation Bulletin

26 May 1994 Incorporating U.S.N.O. Series 7 Vol. VII No. 21

CONTENTS OF THIS ISSUE:	PAGE
<b>OBSERVATIONS:</b>	
Very Long Baseline Interferometry . . . . .	2
Satellite Laser Ranging . . . . .	2
Global Positioning Systems . . . . .	2
<b>COMBINED EARTH ORIENTATION PARAMETERS:</b>	
IERS Rapid Service . . . . .	2
<b>PREDICTIONS:</b>	
90-day . . . . .	3
Long-term . . . . .	5
<b>CELESTIAL POLE OFFSET SERIES:</b>	
NEOS Daily series . . . . .	5
Predictions . . . . .	5

**GENERAL INFORMATION:**  
 MJD = Julian Date - 2 400 000.5 days  
 $UT1-UT1 = 0.022 \sin(2\pi T) - 0.012 \cos(2\pi T)$   
 $- 0.006 \sin(4\pi T) + 0.007 \cos(4\pi T)$   
 where  $\pi = 3.14159265\dots$  and  $T$  is the date in Besselian years.  
 TDT = TAI + 32.184 seconds = A.1 + 32.153 seconds  
 DUTI = (UT1-UTC) transmitted with time signals  
 = -0.2 seconds beginning 9 June 1994 at 0000 UTC  
 Beginning 1 July 1994:  
 TAI-UTC(BIPM) = 28.000 000 seconds  
 A.1(USNO)-UTC(USNO) = 28.034 381 7 seconds  
 A positive leap second will be introduced  
 in UTC on 30 June 1994.

**U.S.N.O. DATA AND PREDICTIONS OF UT1-UTC AND POLAR MOTION**  
 $T(\text{PLOT}) = UT1-UTC - .2811 + (MJD-49315) \cdot .00226$



**OBSERVATIONS:**

NEOS VLBI Intensives			
MJD	x	y	s.e.
49483.7962	-122264		.000035
49485.7863	-127547		.000030
49486.7837	-129754		.000030

P designates preliminary values based on preliminary pole positions

NEOS VLBI					
MJD	x	y	s.e.	UT1-UTC	s.e.
49490.253	.18678	.00010	.29495	.00007	-.137987
					.000004

VLBI from Jet Propulsion Laboratory					
MJD	UT0-UTC	s.d.	Baseline		
	(sec)	(sec)			
49490.010	-14455	.00025	1463		
49493.850	-14673	.00005	1463		

DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SLR					
MJD	x	y	s.e.	UT1-UTC	s.e.
49488.00	.18917	.00015	.30282	.00013	
49491.00	.18758	.00018	.29647	.00014	

GLOBAL POSITIONING SYSTEM COMBINED SOLUTION					
MJD	x	y	s.e.	UT1-UTC	s.e.
49489.0	.18837	.00040	.29903	.00038	
49490.0	.18802	.00035	.29698	.00041	
49491.0	.18771	.00033	.29494	.00037	
49492.0	.18741	.00023	.29289	.00036	
49493.0	.18710	.00024	.29086	.00036	
49494.0	.18677	.00027	.28882	.00038	
49495.0	.18646	.00029	.28678	.00038	

**COMBINED EARTH ORIENTATION PARAMETERS:**

IERS Rapid Service						
MJD	x	y	error	UT1-UTC	error	
1994 May 17	49489	.18847	.00030	.29906	.00016	-.134786
18	49490	.18816	.00032	.29700	.00018	-.137299
19	49491	.18783	.00031	.29495	.00018	-.139949
20	49492	.18748	.00031	.29290	.00017	-.142710
21	49493	.18713	.00026	.29086	.00017	-.145532
22	49494	.18677	.00024	.28882	.00018	-.148303
23	49495	.18642	.00024	.28678	.00011	-.150971

**PREDICTIONS:**

The following formulas will not reproduce the predictions given below, but may be used to extend the predictions beyond the end of this table.

$$x = .0270 - .0279 \cos A + .0756 \sin A + .1938 \cos C - .1141 \sin C$$

$$y = .3224 + .0721 \cos A + .0337 \sin A - .1141 \cos C - .1938 \sin C$$

$$UT1-UTC = -.1024 - .00231 (MJD - 49495) - (UT2-UT1)$$

الشكل 6.7

أول صفحتين من النشرة IERS A (عدد 26 مايو 1994)، الصادرة على أساس أسبوعي في IERS، باريس، فرنسا

ويعيد الشكل 6.8 إنتاج الأقسام الثلاثة الأولى من عدد Circular T الشهرية الصادرة عن المكتب BIPM. وتحتوي تلك الأقسام على جداول بقيم المقارنات بين UTC و UTC(k) بالنسبة إلى 45 تمثيلية محلية من UTC، وبين TAI و TA(k) بالنسبة إلى 17 سلماً من سلم الوقت الذرية المستقلة المحوسبة في كامل أرجاء العالم. كما يقدم BIPM تقديراً يومياً للمقارنات بين التوقيت UTC والتوقيت GPS وبين التوقيت UTC والتوقيت GLONASS.

# BIPM

1994-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES Poids ET Mesures

Circular T 76 (1994 May 25)

BIPM - T 76 (2)

## 1 - Coordinated Universal Time UTC. Computed values of UTC-UTC(1) (1).

(From 1993 July 1. On UTC, to 1994 July 1. On UTC, TAI-UTC = 28 s)  
(From 1994 July 1. On UTC, until further notice, TAI-UTC = 29 s)

Date 1994 On UTC MJD	Mar 28 49429	Apr 7 49449	Apr 17 49459	Apr 27 49469
Laboratory 1	UTC-UTC(1) (Unit = 1 microsecond)			
AGS (Borovick)	-1.153	-1.377	-1.520	-1.701
APL (Louvain)	1.240	1.181	1.126	1.061
AMS (Camorra)	0.498	0.476	0.447	0.408
BEV (Vienna)				
CAF (Cagliari)	-6.072	-7.066	-7.233	-7.483
CR (Bern)	1.929	1.921	1.826	1.633
CRJ (Tokyo)	2.053	2.024	2.010	2.025
CSAO (Lincang)	-0.477	-0.452	-0.407	-0.402
CSIN (Prague)	-3.061	-2.924	-2.805	-2.826
FTZ (Bernese)	0.040	0.092	0.161	0.220
IGH (Taipei)	0.065	0.103	0.131	0.177
IFAG (Wetzell)	-0.590	-0.575	-0.569	-0.522
IOA (Buenos Aires)	-3.14	-3.14	-3.13	-3.15
IRPL (Jerusalem)	-1.135	-1.200	-1.330	-1.474
JATC (Lincang)	-1.091	-1.203	-0.397	0.365
KJC-CYJ (Taejeon)	-0.276	-0.209	-0.264	-0.251
LDS (Leeds)	-0.282	-0.201	-0.323	-0.356
NST (Leopold Mutt)	-0.434	-0.431	-0.388	-0.346
NOM (Nizsava)	-1.436	-1.477	-1.513	-1.539
NOT (Tokyo)	-0.661	-0.076	-1.035	-1.262
NIK (Beijing)	3.78	7.81	7.78	7.80
NIST (Boulder)	-0.051	-0.068	-0.086	-0.094
ROC (Sofiya)				
RPL (Readington)	0.113	0.116	0.114	0.113
RPLI (New-Delhi) (2)	-3.32	-3.22	-	-3.18
ROC (Ottawa)	5.265	5.367	5.468	5.567
RUM (Tsubota)	-9.641	-9.937	-10.233	-10.521
SM (Budapest)	6.489	6.510	6.502	6.559
OMIA (Buenos Aires)	5.65	5.57	5.70	5.48
OMJ (Rio de Janeiro)	-13.877			
OP (Paris)	-0.047	-0.029	-0.010	0.005
OMB (Brussels)	-1.673	-1.712	-1.666	-1.755
PKM (Braunschweig)	0.454	0.373	0.241	0.212
PTB (Braunschweig)	2.748	2.753	2.754	2.772
RC (Havana)	-2.36	-3.00	-3.00	-3.00
RDA (San Fernando)	2.635	2.610	2.632	2.637
SCL (Hong Kong)	0.034	0.107	0.177	0.424
SET (Stockholm)	0.065	0.005	0.006	0.067
SO (Shanghai)	2.14	-	2.16	1.70
SO (Moscow)	-3.375	-3.461	-3.548	-3.624
TL (Chung-Li)	-2.706	-3.049	-2.985	-2.914
TP (Praha)	-1.147	-1.135	-1.090	-1.069
TUC (Graz)	0.481	4.564	4.643	4.739
USNO (Washington DC) (USG MC)	0.045	0.051	0.051	0.057
USL (Belft)	0.090	0.132	0.165	0.174

PAVILLON DE BRUXELLES F - 92312 SEVRES CEDEX

TEL CENTRAL - 33 1 45 97 20 20 TELER BIPM 031351 F TELECOM - 33 1 45 97 20 21

## 2 - International Atomic Time TAI and local atomic time scales TA(L).

The following table gives the computed values of TAI-TA(L) (1).

Date 1994 On UTC MJD	Mar 28 49429	Apr 7 49449	Apr 17 49459	Apr 27 49469
Laboratory 1	TAI-TA(L) (Unit = 1 microsecond)			
APL (Louvain)	2.712	2.644	2.589	2.524
AMS (Camorra)	-50.049	-51.020	-51.106	-51.273
CR (Bern)	-75.231	-75.059	-74.894	-74.767
CRJ (Tokyo)	36.458	37.065	37.496	37.948
CSAO (Lincang)	14.992	14.887	14.803	14.678
F (Paris)	127.051	126.227	126.004	125.907
IRPL (Jerusalem)	-	-196.410	-190.459	-189.582
JATC (Lincang)	9.415	10.044	10.700	11.386
KRIS (Taejeon)	-3.486	-3.279	-3.054	-2.811
NIK (Beijing)	-0.73	-0.60	-0.70	-0.64
NISA (Boulder) (4)	-45111.230	-45111.631	-45112.029	-45112.417
NBC (Ottawa)	21.334	21.436	21.537	21.636
PTB (Braunschweig)	-360.652	-360.647	-360.646	-360.628
RC (Havana)	(3)(5) -325.05	-326.53	-326.66	-326.42
SO (Shanghai)	-45.43	-	-45.40	-45.01
SO (Moscow)	(6) 27246.625	27246.539	27246.452	27246.376
USNO (Washington DC) (7)	-34695.050	-34696.529	-34697.211	-34697.880

## 3 - Notes on sections 1 and 2.

(1) Values UTC-UTC(1) and TAI-TA(L) are published within 1 ns except for laboratories which are not listed through GPS Common views.

(2) RPLI. MJD UTC-UTC(RPLI)  
49419 -3.29  
49429 -3.03

(3) RC. MJD UTC-UTC(RC) TAI-TA(RC) - 10 s  
49419 -2.78 -326.18  
49429 -2.54 -325.59

(4) NIST. TA(NISA) designates the scale ATU of NIST.

(5) RC. Listed values are TAI-TA(RC) - 10 seconds.

(6) SO. Listed values are TAI-TA(SO) - 2.00 seconds.

(7) USNO. TA(USNO) designates the scale ALN(ARI) of USNO.

## الشكل 6.8

أول صفتين من Circular T (عدد 25 مايو 1994)، الصادر على أساس شهري من المكتب BIPM، سافر، فرنسا

أما بالنسبة إلى سلام الوقت الأخرى، مثل توقيت GPS وتوقيت GLOANASS، يتم بثها في الوقت الفعلي عبر مراقبات السواتل التي تقوم بإرسالها. وقد يكون من الضروري ترشيح القياسات لإزالة ضوضاء المراقبة والتدهور المقصود. ويتم الحصول على النفاذ في الوقت الموجل بواسطة نشرات خاصة صادرة عن USNO [السلسلة 4] (انظر الشكل 6.9)، وكذلك عن خدمات التوقيت والتردد التابعة إلى NIST.

DAILY TIME DIFFERENCES, SERIES 4, NO. 1426 (CONTINUED)

GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)  
BLOCK I AND BLOCK II SATELLITES

VALUES PRESENTED BELOW FOR NAVSTAR GPS SATELLITES ARE THE RESULT OF A LINEAR FIT THROUGH APPROXIMATELY 130 DATA POINTS REFERRED TO THE BEGINNING OF THE TRACKING PERIOD. TRACKING PERIODS START ON THE MINUTE AND RANGE FROM TWO TO THIRTEEN MINUTES.

GPS TIME IS AHEAD OF UTC BY NINE SECONDS.

UNIT - ONE NANOSECOND

		NAVSTAR 10 PRN12		NAVSTAR 13 PRN02		NAVSTAR 14 PRN14		NAVSTAR 15 PRN15		NAVSTAR 16 PRN16	
		MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME
MAY	22 49494	0	(2102)	-96	(2005)	-40	(2135)	-7	(1901)	41	(0254)
	23 49495	-13	(2058)	-17	(2001)	-87	(2135)	-16	(1857)	-53	(0251)
	24 49496	-6	(2054)	-52	(1957)	67	(2123)	-9	(1853)	-34	(0247)
	25 49497	-5	(2050)	-8	(1953)	-49	(2119)	-15	(1849)	61	(0243)
	26 49498	2	(2046)	-137	(1949)	-29	(2115)	-20	(1845)	17	(0239)
	27 49499	-1	(2042)	-34	(1945)	-27	(2111)	-8	(1841)	-71	(0235)
	28 49500	9	(2038)	-7	(1941)	-42	(2107)	-5	(1837)	27	(0231)
	29 49501	-3	(2034)	38	(1937)	-79	(2103)	-5	(1833)	88	(0227)
	30 49502	0	(2030)	249	(1933)	-12	(2059)	-2	(1829)	10	(0223)
	31 49503	8	(2026)	0	(1930)	148	(2055)	4	(1825)	-109	(0219)
		NAVSTAR 17 PRN17		NAVSTAR 18 PRN18		NAVSTAR 19 PRN19		NAVSTAR 20 PRN20		NAVSTAR 21 PRN21	
		MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME	MC-GPS	GPS TIME
MAY	22 49494	73	(0607)	-9	(2327)	67	(1717)	18	(0954)	37	(0818)
	23 49495	-6	(0603)	-11	(2323)	29	(1713)	-10	(2351)	44	(0814)
	24 49496	-28	(0559)	119	(2319)	81	(1709)	-17	(2347)	4	(0810)
	25 49497	-2	(0555)	141	(2315)	97	(1705)	22	(2356)	6	(0806)
	26 49498	-51	(0551)	1	(2311)	-55	(1701)	-5	(2339)	176	(0802)
	27 49499	20	(0547)	216	(2307)	70	(1657)	0	(2335)	-85	(0758)
	28 49500	12	(0543)	-5	(2303)	11	(1653)	16	(2331)	32	(0754)
	29 49501	26	(0540)	-71	(2259)	-61	(1649)	13	(2327)	69	(0750)
	30 49502	-59	(0540)	190	(2358)	-25	(1645)	14	(2323)	91	(0746)
	31 49503	138	(0541)	-30	(2354)	101	(1641)	29	(2332)	62	(0742)

الشكل 6.9

الصفحة الثانية من السلسلة 4 USNO (عدد رقم 1426)، الصادر على أساس أسبوعي من USNO، واشنطن، D.C (الولايات المتحدة)

5.6 الخلاصة

قام الاتحاد الدولي للفلك في 1991 بتحديد الإطار الذي يجدر تعريف سلم الوقت ضمنه بشكل واضح من ناحية نظرية النسبية العامة. ويتمثل تحقيق التوقيت على الأرض، كما يذكره قرار الاتحاد IAU صراحة، في التوقيت الذري الدولي، TAI، الذي نتحصل عليه انطلاقاً من الجمع بين قراءات المقياسات الذرية الموجودة على الأرض.

وبينما TAI هو المرجع الدولي للتوقيت، فإنه تتم حوسبة العديد غيره من سلاالم الوقت بانتظام وتستعمل لتحقيق أهداف علمية. وإلى جانب الاحتفاظ بتمثيلات UTC المحلية، فإن المخابر التي تحوسب تلك السلاالم عليها أن تصمم خوارزميات لتوليد سلاالم الوقت ذات التشغيل الحر والمستقلة على أساس المعطيات المجمعة على الموقع. ويؤدي وضع الخوارزميات حتماً إلى ضرورة كتابة معادلة من التعريف، في شكل متوسط موزون، وإلى إنشاء إجراءات ترمي إلى تحديد وزن المقياسات والتنبؤ بتردد المقياسات. وتعتبر العديد من الاختيارات الاصطناعية ممكنة، إلا أن الفعلي منها تقوده الأهداف التي يسعى سلم الوقت إلى تحقيقها والضوضاء التي تؤثر على معطيات التوقيت.

## الفصل 6

وفي 1993، بلغت أكثر سلالم الوقت استقراراً في كامل أرجاء العالم درجات من الاستقرار تفوق  $10 \times 10^{-14}$  من أجل أوقات تكامل بدرجة أسابيع عديدة. وتتحدد درجات الدقة التي تم تحقيقها بدقة أفضل معايير التردد الأولية، وتتميز حالياً بعدم التيقن ( $1 \sigma$ ) بدرجة  $10 \times 10^{-14}$ . وتتسم التحسينات التي دخلت على الأداء بسرعة: إذ يمتثل أن تصبح درجات الدقة بدرجة بعض الأجزاء في  $10^{16}$ ، بالنسبة إلى إنجاز الثانية SI، وعدة مئات من البيكوثوان بالنسبة إلى عملية مقارنة التوقيت متيسرة في العام 2000.

وبالرغم من تعريف الثانية بالعبارات الذرية ومن توليد سلم الوقت من الميقاتيات الذرية، فإن التوقيت يحتفظ بعلاقته الوثيقة بالفلك: فسلم الوقت المرجعي الدولي هو التوقيت TAI الذري المحض، لكن التماسك مع الدورة الأرضية تم الاحتفاظ بها بواسطة إنتاج UTC. وقد يشهد القرن الحادي والعشرين توثق العلاقة مع الفلك من جديد عبر استعمال بولسار المليثانية لمراقبة استقرار TAI الطويل المدى [بيتي وآخرون، 1992].

ملاحظة - يمكن إيجاد رموز المختبرات الاختصاصية وتحديد موقعها في الجدول 3، على الصفحتين 20 و 21 من التقرير السنوي لقسم التوقيت للمكتب BIPM، المجلد 6، موجود عند طلبه من المكتب BIPM، في جناح بروتوي، 92312 سافر سيداكس، فرنسا.

## المراجع

- ALLAN D.W., [1987] Time and frequency (time domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators, *IEEE Trans. Ultr. Ferr. Freq. Control*, **UFFC-34**, 1987, 647-654.
- ALLAN D.W. and ASHBY N., [1986] *Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry*, ed. Kovalevsky J. and Brumberg V.A., Reidel Dordrecht, 1986, 299-313.
- ALLAN D.W. and DAAMS H., [1975] Picosecond Time Difference Measurement System, *Proc. 29th FCS*, 1975, 404-411.
- ALLAN D.W. and WEISS M.A., [1980] Accurate Time and Frequency Transfer during Common-View of a GPS Satellite, *Proc. 34th FCS*, 1980, 334-346.
- ALLAN D.W. et al, [1974] The National Bureau of Standards Atomic Time Scale: Generation, Stability, Accuracy, and Accessibility, *NBS Monograph 140*, ed. Byron Blair, 1974, Chapter 9.
- AZOUBIB J., GRANVEAUD M. and GUINOT B., [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales, *Metrologia*, 1977, **13**, 87-93.
- BARNES J.A., [1982] Time Scales Algorithms Using Kalman Filters - Insights from Simulation, *Proc. 2nd Symposium on Atomic Time Scales Algorithms*, 1982, Sect. 15, 42.
- BAUMONT F., GRUDLER P., VEILLET C., WIANJ J., LEWANDOWSKI W., and PETIT G., [1993] A preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfer, *Proc 7th EFTF*, 1993, 641-646.
- BIPM [1991] Le Système International d'Unités, SI, 6<sup>e</sup> Edition, Bureau International des Poids et Mesures.
- BIPM [1993] Annual Report of the BIPM Time Section, 1993, **6**, 129 pages.
- BREAKIRON L.A., [1991] Timescale algorithms combining cesium clocks and hydrogen masers, *Proc. 23th PTTI Meeting*, 1991, 297-305.
- BRUMBERG V.A., [1991] *Essential Relativistic Celestial Mechanics*, Adam Hilger, Bristol.
- CCDS Report, [1980] BIPM Com. Cons. Déf. Seconde, **9**, 1980, p S 15.
- CCDS Report, [1993] BIPM Com. Cons. Déf. Seconde, **12**, 1993, p S 69.
- DALY P., KOSHELYAEVSKY N.B., LEWANDOWSKI W., PETIT G. and THOMAS C., [1992] Comparison of GLONASS and GPS Time Transfers, *Proc 6th EFTF*, 1992, 249-252.

- DE JONG G., [1993] Two-Way Satellite Time Transfer: Overview and Recent Developments, *Proc. 25th PTTI Meeting*, 1993, 101-117.
- DE MARCHI A., [1988] The Accuracy of Commercial Cesium Beam Frequency Standards, *Frequency Standards and Metrology*, ed. A. De Marchi, Springer-Verlag, Berlin, 1988, 52-56.
- FEES W.A., HOLTZ H., SATIN A.L. and YINGER C.H., [1991] Evaluation of GPS/UTC steering performance, *Proc. 23th PTTI Meeting*, 1991, 35-46.
- GRANVEAUD M., [1986] Echelles de temps atomique, Monographie du Bureau National de Métrologie, 1986, ed. Chiron.
- GUINOT B., [1986] Some properties of algorithms for atomic time scales, *Metrologia*, 1987, **24**, 195-198.
- GUINOT B., [1988] Atomic time scales for pulsar studies and other demanding applications, *Astronomy and Astrophysics*, 1988, **192**, 370-373.
- GUINOT B. and THOMAS C., [1988] Establishment of International Atomic Time, *Annual Report of the BIPM Time Section*, 1988, **1**, D1-D22.
- IAU, [1991] IAU transactions Vol. XXIB, 1991, *Proc. 21st Gen. Assembly Buenos Aires*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Boston, London.
- IAU, [1992] Information Bulletin 67, p. 7.
- JONES R.H. and TRYON P.V., [1983] Estimating time from atomic clocks, *Journal of Research of the NBS*, 1983, **88**, 1, 17-24.
- JONES R.H. and TRYON P.V., [1987] Continuous Time Series Models for unequally Spaced Data Applied to Modeling Atomic Clocks, *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 1987, **8**, 71-81.
- KIRCHNER D., THYR U., RESSLER H., ROBNIK R., GRUDLER P., BAUMONT F., VEILLET C., LEWANDOWSKI W., HANSON W., CLEMENTS A., JESPERSEN J., HOWE D., LOMBARDI M., KLEPCZYNSKI W., WHEELER P., POWELL W., DAVIS A., UHRICH P., TOURDE R., and GRANVEAUD M., [1991] Comparison of Two-Way Satellite Time Transfer and GPS Common-View Time Transfer Between OCA and TUG, *Proc. 23rd PTTI*, 1991, 71-88.
- LEWANDOWSKI W. and THOMAS C., [1991] GPS Time Transfer, *Proc. IEEE Special Issue on Time*, 1991, **79**, 991-1000.
- LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., CHERENKOV G.T., KOSHELYAEVSKY N.B. and PUSHKIN S.B., [1993] GLONASS common-view time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 147-151.
- LUCK J.M., [1979] Comparison and coordination of time scales, *Proc. Astronomical Society of Australia*, 1979, **3**, 5-6, 357-363.
- MISNER C.W., THORNE K.S., and WHEELER J.A., [1973] *Gravitation*, 1973, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- PETIT G., TAVELLA P., and THOMAS C., [1992] How can Millisecond Pulsars improve the Long-Term - Stability of Atomic Time Scales?, *Proc. 6th EFTF*, 1992, 57-60.
- PETIT G. and WOLF P., [1994] Relativistic theory for picosecond time transfer in the vicinity of the Earth, *Astronomy and Astrophysics*, 1994, **286**, 971-977.
- PERCIVAL D.B., [1978] The U.S. Naval Observatory Time Scales, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1978, **IM-27**, 376-385.
- STEIN S.R., [1988] Kalman Ensembling Algorithm: Aiding Sources Approach, *Proc. 3rd International Time Scale Algorithm Symposium*, 1988, 345-358.
- STEIN S.R., [1992] Advances in time-scale algorithms, *Proc. 24th PTTI Meeting*, 1992, pp. 289-302.
- STEIN S.R., GIFFORD G.A., and BREAKIRON L.A., [1989] Report on the Timescale Algorithm Test Bed at USNO, *Proc. 21st PTTI Meeting*, 1989, 269-288.



- STEIN S.R., GLAZE D., LEVINE J., GRAY J., HILLIARD D., and HOWE D., [1982] Performance of an Automated High Accuracy Phase Measurement System, *Proc. 38th FCS*, 1982.
- TAVELLA P., AZOUBIB J., and THOMAS C., [1991] Study of the Clock-Ensemble Correlation in ALGOS Using Real Data, *Proc. 5th EFTF*, 1991, 435-441.
- TAVELLA P. and PREMOLI A., [1994] Estimating the instabilities of N clocks by measuring differences of their readings, *Metrologia*, 1994, **30**, 479-486.
- TAVELLA P. and THOMAS C., [1990a] Time Scale Algorithm: Definition of Ensemble Time and Possible Uses of the Kalman Filter, *Proc. 22nd PTTI Meeting*, 1990a, 157-170.
- TAVELLA P. and THOMAS C., [1990b] Study of the correlations among the frequency changes of the contributing clocks to TAI, *Proc. 4th EFTF*, 1990b, 527-541.
- TAVELLA P. and THOMAS C., [1991a] Comparative Study of Time Scale Algorithms, *Metrologia*, 1991a, **28**, 57-63.
- TAVELLA P. and THOMAS C., [1991b] Report on correlations in frequency changes among the clocks contributing to TAI, Rapport BIPM-91/4, 1991b, 50 pages.
- VARNUM F.B., BROWN D.R., ALLAN D.W., and PEPPLER T.K., [1987] Comparison of time scales generated with the NBS ensembling algorithm, *Proc. 19th PTTI Meeting*, 1987, 13-24.
- WEI GUO, [1992] A study of atomic time scale stability, *Proc. 46th FCS*, 1992, 151-156.
- WEISS M.A., ALLAN D.W. and PEPPLER T.K., [1989] A Study of the NBS Time Scale Algorithm, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, 1989, **IM-38**, 631-635.
- WEISS M.A. and WEISSERT T., [1991] AT2, A new time scale algorithm: AT1 plus frequency variance, *Metrologia*, 1991, **28**, 65-74.
- WEISS M.A. and WEISSERT T., [1994] Sifting through Nine Years of NIST Clock Data with TA2, *Metrologia*, 1994, **31**, 9-19.
- YOSHIMURA K., [1980] Calculation of unbiased clock-variances in uncalibrated atomic time scale algorithms, *Metrologia*, 1980, **16**, 133-139.

الفصل 7

استعمال مصادر التردد

المحتويات

151	..... استعمال مصادر التردد في العلم والتكنولوجيا.....	1.7
151	..... علم القياس .....	2.7
151	..... مقارنة الدقة بين معيار التوقيت ومعايير الكميات الأساسية الأخرى .....	1.2.7
152	..... العلاقات القائمة بين وحدة التوقيت وغيرها من الوحدات .....	2.2.7
153	..... الفيزياء الأساسية والفيزياء التطبيقية .....	3.7
153	..... g، تسارع الجاذبية .....	1.3.7
153	..... GM، ثابتة الجاذبية المضاعفة في كتلة الأرض .....	2.3.7
154	..... حقل الجاذبية الأرضية .....	3.3.7
154	..... قياس بالتداخل ذو خط أساس طويل جداً (VLBI) وشبه VLBI- .....	4.3.7
154	..... تحديد الموضع والملاحة .....	4.7
155	..... ملاحه مخروطية .....	1.4.7
156	..... الملاحة الدائرية أو الكروية .....	2.4.7
159	..... الملاحة الزائدية المقطع .....	3.4.7
159	..... قطع زائد وسطوح زائدة وخصائص كل منها .....	4.4.7
160	..... متطلبات الدقة لمعايير التردد المستعملة في أنظمة الملاحة .....	5.4.7
160	..... الاتصالات.....	5.7
161	..... الأنظمة التماثلية .....	1.5.7
161	..... الأنظمة الرقمية .....	2.5.7
162	..... تطبيقات أخرى .....	6.7
163	..... التطبيقات الذاتية الحركة .....	1.6.7
163	..... أنظمة الطاقة الكهربائية وتسيير الغاز المضغوط .....	2.6.7
163	..... الأجهزة .....	3.6.7
165	..... رادار دوبلر .....	4.6.7
165	..... المراجع .....	
165	..... قائمة المصادر .....	

## 1.7 استعمال مصادر التردد في العلم والتكنولوجيا

يعني الرمز الاختصاري FS، فيما يلي، مصدر التردد، أو معيار التردد، أي جهاز يكون قادراً على توفير إشارة كهربائية قد يفترض في تردد خرجها أن يفي بكافة المتطلبات الضرورية للتطبيق المعني، وذلك حسب ما ورد في الفصلين 1 و 2 (الجزء A). وتأخذ تلك المتطلبات شكل الدقة والاستقرار وانعدام الحساسية إزاء البيئة والنقاء الطيفي، إلخ، كما سبق الذكر في الفصلين 4 و 5. وليس هناك أي افتراض بالنسبة للوقت الحالي فيما يتعلق بنمط FS، إذ إن اختياره تملية عملية التطبيق وغيرها من المتطلبات.

ويعتبر FS فريداً من نوعه من بين كل الأجهزة التي صنعها الإنسان إلى حد الآن، وذلك بمعنى أنه يوفر دائماً أفضل توفيق بين الدقة والاعتمادية والتكلفة، إلخ. ويحتاج هذا التصريح إلى بعض الإيضاحات والأمثلة. إذ تبلغ تكلفة FS أو جهاز قياس التردد، على سوية معينة من الدقة مثلاً  $10^{-7}$ ، أقل من 100/1 من أجهزة الدقة المكافئة بالنسبة إلى الطول والحجم. وفي التطبيقات التكنولوجية، تتراوح حياة الأجهزة التجارية النافعة بالنسبة إلى FS بين 5 و 20 سنوات، وذلك حسب نمطها. كما أن متطلبات الطاقة أيضاً قد تكون ضئيلة جداً؛ فأجهزة FS المستعملة في ساعات المعصم البلورية أو الأجهزة المماثلة لها تشتغل بطاقة تقل عن ميكروواط واحد. وتعول الاتصالات من كافة الأنماط كثيراً على FS؛ إذ يتزود هاتف متنقل بما قدره 4 إلى 5 من FS، بينما يحتوي كل جهاز تلفزيوني أو حاسوب في داخله على FS واحد على الأقل.

وفي تكنولوجيا القياس، عادة ما يكون من المناسب تحويل الكمية المعنية، مهما كانت طبيعتها - توتر، ضغط، رطوبة، سرعة، إلخ - عبر محمول الطاقة، إلى تردد أو إلى فاصل زمني يقاس في النهاية باستعمال FS. ويوفر هذا الإجراء كسباً ذا صلة بالدقة، والتكلفة ويسر الاستعمال، إذ يمكن الحصول على أقصى دقة وإحكام من FS بأقل التكاليف. وأخيراً، تعتبر معايير التردد فريدة من نوعها في حل عدد لا يحصى من المشكلات، مثل قياس حجم مركبة فضائية بعيدة أو سرعتها أو تسارعها أو تحديد موقعها.

## 2.7 علم القياس

يرمي هذا القسم إلى وصف العلاقات الحالية والعلاقات في المستقبل المنظور القائمة بين علم قياس التوقيت والتردد، وغيره من علوم القياس والثوابت الأساسية. ويعتمد النظام الدولي للوحدات، الذي يطلق عليه اسم SI (The International System of Units) على سبع كميات أساسية، لكل كمية منها وحدة معيارية، يتضمن وصفها تعريفاً معيناً. وتكون المجموعة الطائفة من الوحدات المشتقة (السرعة والمقاومة ومعدل النقل الحراري والوزن المعين، إلخ) موصولة بتلك الوحدات الأساسية، وتُستعمل في العلوم والتكنولوجيا. أما فيما يتعلق بتوقيت الكمية، فقد تم تقديم الوحدة -الثانية- وتعريفها في الفصلين 1 و 2.

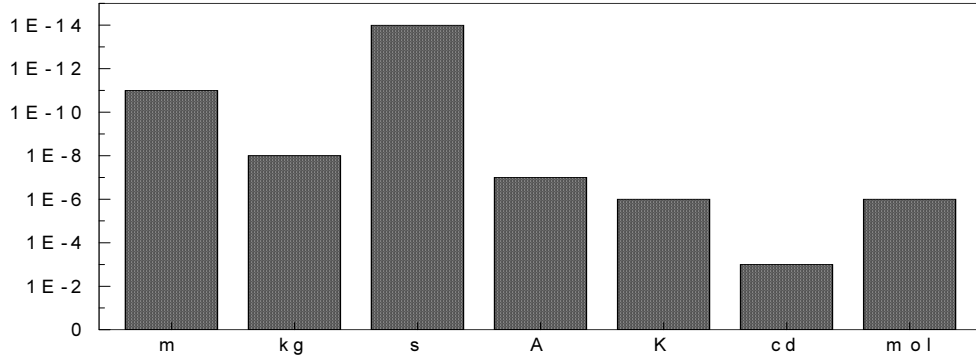
### 1.2.7 مقارنة الدقة بين معيار التوقيت ومعايير الكميات الأساسية الأخرى

يُشتق معيار التوقيت، كما سبق ذكره آنفاً في الفصلين 1 و 2، انطلاقاً من ثابتة أساسية، مباشرة ومن بعض خصائص المادة بأدنى ما يمكن من الافتراضات. وكما رأينا في الفصلين الآنفين الذكر، توجد بالفعل مصادر للخطأ، ولكن التقنيات المناسبة تمكن من إعادة إنتاج الثانية في كل مخبر لعلم قياس بدرجة من عدم التيقن تتراوح بين  $10^{-13}$  و  $10^{-14}$  وتتجاوز الدقة المتيسرة للثانية إلى حد بعيد تلك التي تيسر للشوائب القابلة للتحقيق في الإنجازات المخبرية لغيرها من الوحدات، وذلك لعدد من الأسباب التي لا تتم مناقشتها هنا. ويصور كل من الجدول 7.1 والشكل 7.1 الوضعية الحالية.

#### الجدول 7.1

#### عدم التيقن النسبي في إنجاز الوحدات SI

وحدة القاعدة	m	kg	s	A	K	mol	cd
عدم التيقن النسبي	$10^{-11}$	$10^{-8}$	$10^{-14}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$



الشكل 7.1

### عدم التيقن النسبي في إنجاز الوحدات SI

وبمجرد أن يتمكن FS معين، على سوية معينة من الدقة، أن يكون أبسط إلى حد بعيد وأقل تكلفة من المعايير الأخرى، فإن ذلك يفسر جزئياً ما ورد في القسم السابق بخصوص فائدة تحويل أي كمية أولاً إلى تردد أو إلى فاصل زمني، ليتم قياسه بعد ذلك بالتقنيات التي رأيناها مثلاً في الفصلين 3 و 4 والتي أكد عليها القسم 3.6.7 من الفصل الحالي.

### 2.2.7 العلاقات القائمة بين وحدة التوقيت وغيرها من الوحدات

كان النظام المتري في الماضي يعتمد أيضاً على عدد من الأحداث العارضة مثل القضبان للمتر، أو الخلية للتوتر أو المقاوم المعدني للأوم، وما إلى ذلك. أما في الوقت الحالي، فلا تزال الوحدة -وحدة الكتلة- يتم إنجازها عبر حدث عارض، وتخطو بعض الوحدات الأخرى، سواء كانت وحدات أساسية أو مشتقة، نحو تعريف يتصل بالطبيعة (ثوابت أساسية، قوانين فيزيائية) لإرساء الاستقرار ودوام التعريف. وقد تكفل هذا الجهد بالفعل بالنجاح بالنسبة للعديد من المعايير الأساسية.

وتتمثل الخطوة الهامة التي سجلت في 1983 في تغيير تعريف المتر الذي يشتق الآن من تعريف الثانية مباشرة بواسطة قياس قيمة سرعة الضوء وتعريفها.

#### تعريف المتر

تبني المؤتمر الدولي للموازين والقياسات في 1983 التعريف التالي للمتر: "المتر هو طول المسير الذي يعبره الضوء في فضاء معين أثناء فاصل زمني من 1/299 792 458 من الثانية".

وتتصل وحدة الطول، الآن وكنتيجة لذلك، بتعريف الثانية، ومنذ تبني قيمة "صحيحة" بالنسبة إلى "c"، أصبح في الإمكان مبدئياً نقل الدقة المتيسرة لوحدة الوقت (10<sup>-13</sup> ← 10<sup>-14</sup>) إلى وحدة الطول.

وتعتمد صيانة الوحدة الكهربائية القاعدية، الأمبير، على تمثيلات الفولت والأوم المتأنية من قيمة الثابنتين الأساسيتين-ثابتة جوزيفسون  $K_j = 2e/h$  وثابتة فون كلبتيغ  $R_K = h/e^2$ -زائد قياس لتردد إشارة الموجات الصغيرة بالنسبة إلى وحدة التوتر. وكنتيجة لذلك، تصبح هذه الكمية الكهربائية موصولة مباشرة بمعيار FS. والتجارب التي تستعمل بالنسبة للفولت وللأوم تتمثل في أثر جوزيفسون وأثر هال الكومومي على التوالي.

كما تم تقديم النظريات المتعلقة بإنشاء معيار كمومي للتيار، يكون متصلاً بالتردد والحمولة الإلكترونية مباشرة. ويمكن الحصول على تفاصيل تلك المعايير الجديدة في [بوبال (Pöpel)، 1992؛ هارتلاند (Hartland)، 1992].

### أثر جوزيفسون

يقوم أثر جوزيفسون بتوصيل تردد معين إلى توتر ما بواسطة النسبة بين  $e$ ، وهي حمولة الإلكترون، و  $h$ ، وهي ثابتة بلانك. وقد غيرت هذه الظاهرة للتصريد التي كانت منظورة من الناحية النظرية في 1962، علم القياس الكهربائي تغييراً أساسياً؛ إذ يمكن قياس التوتر بدقة حوالي  $10^{-10}$  بواسطة استعمال عدداً تردد. وبالعكس، إذا كان توتر معين معروفاً على نحو مناسب في علاقته بالوحدات SI الأساسية، فإنه يمكن اشتقاق النسبة  $e/h$  بدقة لا سابق لها.

ولم تعد وحدة الكثافة الضوئية، الشمعة، حدثاً عارضاً في 1979، وهي الآن تشتق من قياس الطاقة الكهربائية، وتردد ليزري، وقياسات هندسية. لذلك تكون الشمعة إذاً موصولة، وإن يكن بطريقة غير مباشرة إلى FS.

أما فيما يتعلق بالكتلة، فهي قيد البحث لتوصيل الكتلة بالكميات الكهربائية والفضاء والسرعة والوقت. ويعتمد هذا المشروع الجريء على المفهوم القائل إن الطاقة في نظام معين يجب أن تكون ذاتها سواء تم احتسابها بواسطة الكميات الميكانيكية (القوة والسرعة) أم بواسطة الكميات الكهربائية (التوتر والتيار).

وفي نهاية الأمر، قد تكون جميع الوحدات الأساسية، فيما عدا كميات المادة والجزئية الغرامية ودرجة حرارة الدينامية الحرارية والكلفن، قابلة للتوصيل مباشرة بعلم قياس التوقيت والتردد كما أن FS سيصبح المكونة الأساسية من أجل إنجاز عدد من الوحدات الأساسية والوحدات المشتقة [بيتلاي (Petley)، 1988].

### 3.7 الفيزياء الأساسية والفيزياء التطبيقية

تنصب معظم الأبحاث في مجال الفيزياء الأساسية والفيزياء التطبيقية الآن على أجهزة FS أو تقنياتها. وتتسم التطبيقات باتساع مجالها وهي تغطي: القوانين الفيزيائية والفيزياء التطبيقية والفلك وإقرار صلاحية نظريات ما بعد نيوتن وتطبيق النسبية العامة والخاصة والجيوديسيا والكمون الأرضي والجيوفيزياء. وتضطلع أجهزة FS وتقنياتها بدور أساسي أيضاً في علوم الجيولوجيا انطلاقاً من الفضاء، مثل دراسة المحيطات والمناخ مثلاً، وعموماً في التحسس عن بعد. ولن نتعرض فيما يلي إلا للبعض من تطبيقات FS تلك.

#### 1.3.7 g، تسارع الجاذبية

نتحصل على القيمة  $g$  في المخبر وفي الحقل بواسطة قياس سقوط حر لجسم معين. والجسم هو مكعب مربع الزوايا يسقط في الفراغ؛ ويتبع مساره جهاز لقياس التداخل الليزري، إذ يكون العاكس الرجعي الساقط ذراع المتغير لجهاز قياس تداخل ميشالسون. ويمكن جعل الليزر يستقر بالرجوع إلى FS معين، ويتم أداء الوسم الزمني باستعمال مقياسية ذرية. ويمكن الحصول على القيمة المحلية  $g$  بدقة من  $10^{-9}$ .

#### 2.3.7 GM، ثابتة الجاذبية المضاعفة في كتلة الأرض

تكون الكمية المعنية في احتسابات مدار الساتل المنتوج GM وليس القيم الفردية لثابتة الجاذبية G، وكتلة الأرض M. ونتحصل على قيمة دقيقة للمنتوج GM عبر قانون كيبلار الثالث، الذي يطلق الساتل حول الأرض ويقيس معالم المدار. ويكتب قانون كيبلار الثالث كما يلي:

$$G(M_1 + M_2) = k \cdot a^3 / P^2$$

حيث P هي فترة المدار، و a هو شبه محور المدار و  $M_1$  و  $M_2$  هما كتلتا الأرض والساتل على التوالي.

ومن الواضح أنه بالإمكان إهمال الكتلة  $M_2$ ، وقياس شبه المحور a بواسطة قياسات الفواصل الزمنية (قياس المدى الليزري)، بدقة تبلغ حوالي  $10^{-9}$ ، والحصول على الفترة P باستعمال علم تسجيل المسار المداري الدوبلري أو الليزري، أما الميقاتيات الذرية و TAI فيمكن تقديرها بدقة

تبلغ حوالي  $10^{-8}$  ←  $10^{-9}$ . ويمكن الحصول على قيمة المنتوج **GM** بدقة تبلغ حوالي  $10^{-9}$ . وتعتبر معرفة كل من **G** و **M** بأخطاء من  $10^{-4}$  ←  $10^{-5}$  على نحو منفصل عنصراً هاماً.

### 3.3.7 حقل الجاذبية الأرضية

تعكس كل من قيمة الكمون حول الأرض وتوزيعه توزيع الكتلة داخل الأرض ذاتها. وتعرف تلك الكميات الآن بواسطة مراقبة حالات الشذوذ في مدارات بعض السواتل الخاصة، الداخلة في مدارات دائرية محدّدة تماماً. وتُحدّد مواضع تلك السواتل الآنية بقياس الفواصل الزمنية لمغايرات التردد، أي بقياس المدى الليزري أو بقياسات دوبلر.

وعلى ذلك الأساس يتيسر شكل الكرة الأرضية الفعلي؛ ويعتبر وجود رادار ألتيمتر محمول مقدماً طوبوغرافيا السلم الصغير للقارات والبحار تنفيذاً في منتهى القوة في بعض السواتل الجيودودية. وتمكّن المعالجة المناسبة لصدى الرادار من عرض المعلومات التي تخص قوة الرياح وارتفاع الأمواج وتحديد مواضع التيار، إلخ.

### 4.3.7 قياس بالتداخل ذو خط أساس طويل جداً (VLBI) وشبه-VLBI

إن التطبيق العلمي الذي يتطلب أكبر درجة من عدم الاستقرار على المدى القصير من FS هو القياس VLBI، حيث يقيس وقت وصول النبضات القادمة من نجم راديوي في محطتين بعيدتين. وتتم مقارنة تلك القياسات فيما بعد وارتباطها. وعلى الميقاتيات التي يجب استعمالها في هذا التطبيق أن تكون مزودة بعدم استقرار في التردد بدرجة  $10^{-14}$  خلال مدة القياس، وتتراوح عادة من 10 دقائق إلى بضعة ساعات. وأفضل FS لهذه المهمة هي موازر الهيدروجين؛ فهي قادرة على توفير استقرار التردد بحوالي  $10^{-15}$  خلال ساعة من الزمن. وتصلح معطيات القياس VLBI في قياس الانسياقات القارية ووضعية المصادر الراديوية من خارج المجرة وشكلها، بدقة من 10 نانوراديان، وتحوّل القطب ومغايرات السلم الصغير في سرعة دوران الأرض وغيرها من المعطيات الفلكية الجيوفيزيائية.

كما تستعمل تقنية مشابهة لها، وتسمى بالشبه-VLBI، إشارات راديوية متماسكة متأتية من سائل اصطناعي عوضاً عن استعمال مصدر راديوي طبيعي مثل النجم الراديوي. وتعتبر هذه التقنية الأخيرة مفيدة في الجيوديسيا والمراقبة وفي الملاحاة الفضائية الدقيقة.

### 4.7 تحديد الموضع والملاحاة

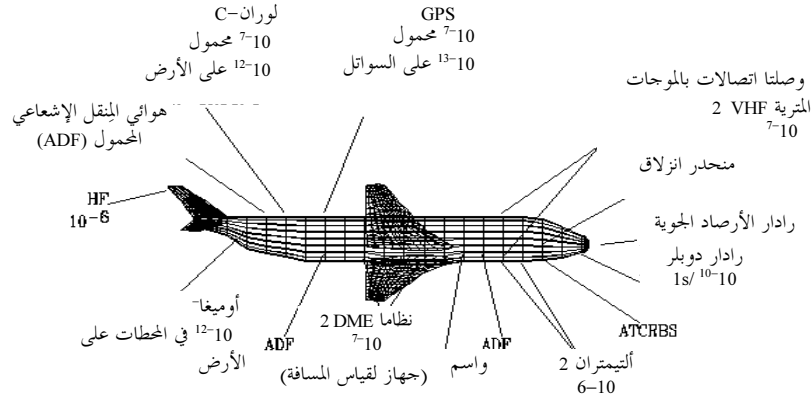
عند صعود أحدنا الطائرة، فإنه يلاحظ أنها مُجهزة بدزيتين على الأقل من الأجهزة التي تقوم بالاتصالات وتحديد الموضع والملاحاة والتحذير من المخاطر، إلخ، التي تتمركز على ميقاتية أو على FS. ويصور الشكل 7.2 حالة تغطية بقائمة من التجهيزات. كما تقدم الدقة المطلوبة على متن الطائرة أو السواتل أو في المحطات على الأرض بالنسبة إلى كل نظام

ولا تكون المتطلبات في المتوسط صارمة جداً، حتى وإن كانت التعليمات تذكر الالتجاء إلى مذئذب مرو أحياناً بدرجة حرارة مراقبة أو معوّضة، وذلك إلا في حالة الأنظمة الملاحية. وفي هذه الأنظمة الهامة جداً، لا بد أن تقترب الجودة المطلوبة من الميقاتيات، وفي حالات نادرة من تلك الموجودة على متن الطائرة، ولكن لا بد لها عادة أن تقترب من تلك الموجودة في البنيات على الأرض أو في السواتل، من أداء FS المستعملة في محابر علم القياس.

ونظراً لكون هذا التطبيق لأنظمة FS والطرائق المرتبطة بها تتسم بالأهمية القصوى بالنسبة إلى كفاءة السفر وأمانته، فإنه يستوجب معالجته بشكل خاص. ولا ينتبه لاعتماد التقنيات المعنية بتلك الكفاءة على الميقاتيات إلا القلة القليلة من المسافرين. وفيما يلي ملخص للطرائق الأساسية للملاحاة الراديوية بالإضافة إلى قائمة بقياس التردد والتوقيت المعني متبوعة في بعض الحالات بوصف لها.

ويرمي هذا القسم إلى توفير العناصر والوقائع التي تؤدي إلى فهم السبب الذي يستوجب وجود FS دقيقة للملاحاة.

## الفصل 7



الشكل 7.2

### أجهزة الطائرة التي تستعمل مصادر التوقيت والتردد

خضعت معاينة تحديد المواضع والملاحة، وهي من أقدم التقنيات التي برع فيها الإنسان، إلى تغييرات عنيفة. فقد كانت الملاحة منذ آلاف السنين تعتمد بالفعل على قياسات الزاوية والآن، ومنذ إدخال العمل بالمصادر FS، أصبحت معظم الطرائق تعتمد على قياسات المسافة أو السرعة النسبية. ويمكن الحصول على المسافات بواسطة وقت طيران نبضة كهرومغناطيسية. ويمكن الحصول على المواضع بواسطة تقاطعات خطوط الموضع أو مساحاته، الذي تعطي شكله وتحديد موقعه، المعبر عنهما حسب نظام مرجعي متبني، القياسات التالية:

- الوقت المطلق،
- وقت الطيران،
- الفوارق الزمنية للوصول،
- تخالفات الطور،
- تغيرات التردد.

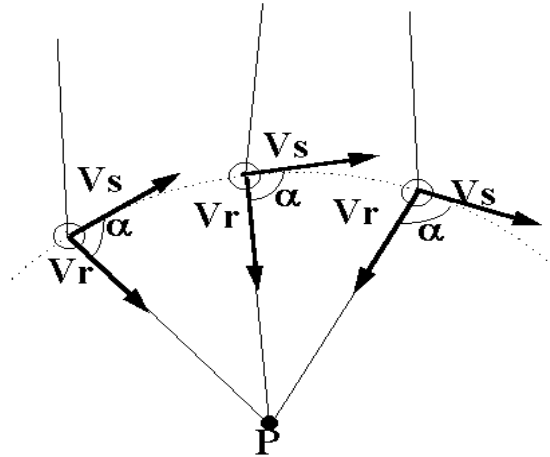
ويتم أداء كل تلك القياسات باستعمال تجهيزات التوقيت والتردد.

وتحتوي الأشكال الهندسية المعنية على الخطوط والمخروطات والمحيطات والأجسام الكروية والقطع الزائد والزائدي المقطع. ويستحسن دراسة مختلف الطرائق وبالتالي مختلف الاستعمالات لأجهزة FS، باستعمال الشكل الهندسي المعني كدليل، والمسمى بمكان الموضع.

### 1.4.7 ملاححة مخروطية

يجب على كافة النقاط التي تتلقى إشارة معينة بأثر دوبلر ذاته (انظر المدرج)، اعتماداً على الشكل 7.3، أن توجد على سطح المخروط، وذلك بوجود:

- القمة V في الموضع الآبي للساتل،
  - محوره مُماس على المسار، في موضع القمة،
  - زاوية نصف فتحة ألفا التي تعطيها  $\cos(\alpha) = V_r/V_s$ ، حيث إن  $V_r$  و  $V_s$  هما السرعة النسبية على التوالي تم قياسها في النقطة P وسرعة الساتل على مداره.
- ويرسل الساتل موضعه وكافة معلمات مداره، فتكون قمة الموضع بالتالي معروفة، في حين يكون  $V_s$  واتجاهاته معروفة، إلى جانب الوقت الذي كان الساتل فيه على رأس المخروط.



الشكل 7.3

### مبدأ الملاحة المخروطية

يتم قياس قيمة  $V_r$  في نقطة الاستراحة P، وذلك بقياس التردد بعدد التردد المحرك بواسطة FS مناسب. ولا بد من الإشارة إلى أن كافة النقاط المصطفة على V و P تقوم بقياس أثر دوبلر ذاته وكنتيجه لذلك ينطبق ذات الشيء على كافة النقاط الموجودة على سطح المخروط.

وتعاد العملية كاملة فيما بعد، باستعمال ذات الساتل مما يؤدي إلى عدد من المخروطات المتقاطعة في النقطة P من الناحية المبدئية. ويتطلب تنفيذ الطريقة المخروطية إذاً اثناً من FS، الأول في المركبة الفضائية، والثاني في النقطة المجهولة، زائد نظام قياس التردد بقياس أثر دوبلر في P.

أثر دوبلر هو التغير النظامي في تردد أية موجة (سمعية، كهرومغناطيسية) المنتشرة بين نقطتين في حركة نسبية. لنفترض بالرجوع إلى الشكل 7.3 ما يلي:

$V_s$	- سرعة ساتل على مداره
$F_s$	= تردد الموجة الكهرومغناطيسية كما يبثها الساتل
$\lambda$	= طول الموجة المطابقة
$V_1$	= سرعة نسبية بين الساتل S ونقطة معينة على الأرض، يُفترض أن تكون في الراحة
$F_r$	= التردد المُستقبل في P. وكتقريب أول، $F_r = F_s \pm V_a/\lambda$ ، حيث تُستعمل الإشارة + إذا كان $V_r$ إيجابياً (S يقترب من P) والإشارة - إذا كان $V_s$ سلبياً

وإذ يقتصر المستعملون على الاستقبال، فإن عددهم لا حد له.

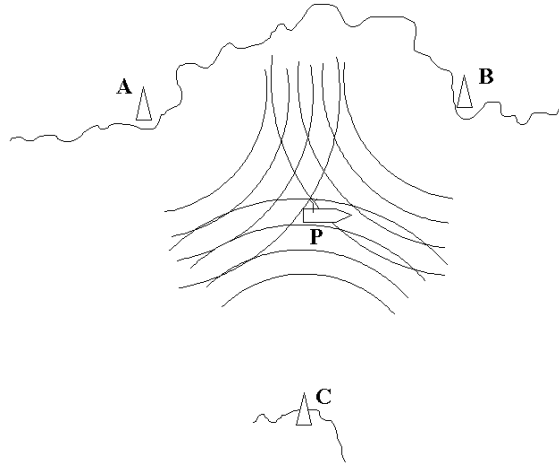
وينصب الانتباه على كون أجهزة FS المستعملة على السواتل وفي المحطات على الأرض هي أجهزة مستقلة بالكامل، أي أنها غير مركبة ولا متزامنة من قبل وسائل أخرى، وكونها لا توجد داخل شبكة معينة. مما يؤدي إلى كون القياسات كافة هي قياسات مطلقة كما أن أجهزة FS الفردية لا بد أن يتم توصيلها أو معايرتها بشكل مستقل بالنسبة إلى مصدر للثانية SI. ويتم أداء الملاحة المخروطية بواسطة بعض الأنظمة للموضوعة بالساتل، مثل ARGOS.

### 2.4.7 الملاحة الدائرية أو الكروية

تتبع الملاحة الدائرية أو الكروية أساساً ذات المبدأ في السطح والفضاء على التوالي. ولتبسيط الفكرة، لنفترض أبسط حالة للملاحة الدائرية في سطح معين.

واعتماداً على الشكل 7.4، لنفترض A و B نقطتين في الراحة أو في الحركة، إلا أن موضعيهما معروفين. وتقيس النقطة P مسافته (إشعاع المحيطات) عبر تحديد وقت طيران نبضة كهرومغناطيسية، وذلك باستعمال الافتراض بأن الإشارة تنتشر بسرعة الضوء. يوجد هناك الكثير من اللبس، إذ يتعارض محيطان في نقطتين، ولكن يمكن القضاء عليه بوسائل أخرى أو بواسطة إجراء قياس إزاء نقطة ثالثة C.

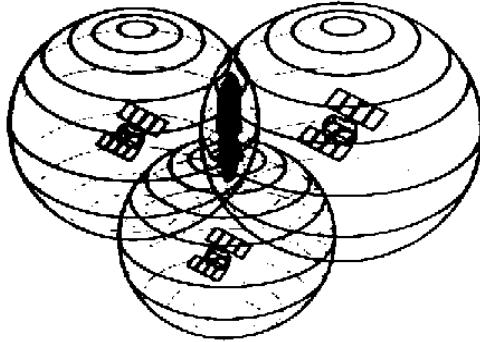




الشكل 7.4

#### الملاحة الدائرية في السطح

أما في حالة الملاحة الفضائية، فإن الموضع يتم الحصول عليه بواسطة تقاطع مناسب لثلاثة أجسام كروية على الأقل تكون مراكزها وإشعاعاتها معروفة.



الشكل 7.5

#### مثال على الملاحة الكروية

- قد يكون للملاحة الدائرية شكلان: أحادية الاتجاه، وثنائية الاتجاه. وفي الأنظمة الأحادية الاتجاه:
- يكون لكل من المحطات والمستعملين مقياسات دقيقة تتم مزامنتها على نحو متبادل.
  - يعطي وقت الوصول وقت الانتشار مباشرة فيعطي بالتالي المسافة.
  - يكون عدد المستعملين لا حد له (والمستعمل يستقبل فقط).

وعلى ذلك الأساس، يستوجب تنفيذ الطريقة الكروية الأحادية الاتجاه مبدئياً أربعة من أجهزة FS، يوضع ثلاثة منها على المركبة الفضائية في حين يوضع الرابع في نقطة غير معروفة، بالإضافة إلى أنظمة قياس الفوارق الزمنية وأنظمة مزامنة التوقيت.

ويجدر بنا التأكيد مرة أخرى على ضرورة أن تكون الميقاتيات الأربع (ثلاث على المركبة الفضائية والرابعة على مركبة المستعمل) لها ذات النوعية والدقة وأن تتم مزامنتها بشكل متبادل. ويتعدى اقتراح تنفيذ مثل ذلك النظام لأسباب تتعلق بتكلفته المرتفعة وتعدّد تطبيقاته.

وتتمثل أنظمة الملاحة الساتلية GPS و GLONASS استثناءً بارزاً جداً للمتطلبات المذكورة آنفاً، وذلك باستعمال ساتل رابع مجهز بمصدر FS دقيق ومتزامن، وقد يتم التخفيف من متطلبات الميقاتيات التي يجب استعمالها على مركبة المستعمل بالدرجتين 5 - 6 من الكبر. وحسب المستقبل أن يحتوي على مذبذب مرو بسيط ذي استقرار بحوالي  $10^{-6}$  خلال دورة القياس التي تستغرق عادة ثوان معدودات.

ويعتبر NAVSTAR/GPS (نظام الموضحة العالمي) نظاماً فضائياً للملاحة وللتوقيت بالساتل، الذي تستعمله إدارة الدفاع الأمريكية. ويتمثل الجزء الفضائي في كوكبة من 24 ساتلاً على ارتفاع 20,000 كلم، موزعة على 6 سطوح مدارية ومكملة المدارين في اليوم النجمي. وقد صمّم النظام لكي يوفر رؤية مستمرة متآونة على ستة سواتل على الأقل دائماً من أي مكان على الأرض. وترسل السواتل الإشارات الراديوية على ترددتين من النطاق L:  $L1 = 1575,42$  MHz و  $L2 = 1227,6$  MHz وتكون إشارات التشكيل من نمط تمديد الطيف بالتتابع المباشر (DSSS). وتنقل تلك الإشارات شفرتين: الشفرة "P" التي تمكن من النفاذ إلى خدمة الموضحة الدقيقة (PPS) والشفرة C/A (اكتساب تقريبي) تستعمل للنفاذ إلى خدمة الموضحة المعيارية (SPS) الذي يمنح سرعة أكبر للإحكام ولكن بأقل درجة من الدقة.

ويتطلب النظام الملاحي توفر أربعة سواتل؛ ويحوسب مستقبل المستعمل شبه مسافات السواتل انطلاقاً من الوقت المقيس لوصول الإشارات التي تحمل رسالة الملاحة. وتحتوي تلك الرسالة، من بين ما تحتويه، على روزنامات الساتل وخطأ ميقاتيته مقابل توقيت النظام GPS. والمعادلة الرئيسية المستعملة هي  $R = c.T$ ، حيث إن R هي المسافة بين كل ساتل ومستقبل، و c هي القيمة المعروفة لسرعة الضوء و T هو الفارق الزمني بين ميقاتيات السواتل (وكلها متزامن بعضها على البعض الآخر بشكل مثالي) ويقرأ وقت وصول الإشارات GPS في سلم وقت المستعمل. ونظراً لقياس مسافات السواتل بواسطة ميقاتية المستعمل الداخلية، وهو قياس ليس بدقيق لكنه يبقى مستقراً خلال قياس التوقيت، فإن ما يتم تحديده هو شبه مسافة لأنه يحتوي على انحياز ناجم عن خطأ ميقاتية المستعمل. ويمكن للمستعمل أن يحصل على نقطة فضائية ثابتة فريدة في الفضاء، شريطة أن يتم قياس شبه المسافات انطلاقاً من أربعة سواتل في صورة مناسبة. وتكون نانوثانية، خدمة لأغراض الملاحة، من خطأ التوقيت مكافئة لحوالي 0,3 m من خطأ المسافة، وبالتالي تحظى الزمانة الدقيقة للميقاتيات المحمولة بالأهمية القصوى في النظام GPS. ولذلك السبب، يتم الاحتفاظ بمعرفة توقيت النظام GPS مقابل سلم الوقت UTC (USNO) ضمن 100 من نانوثوان، وتوضع التصحيحات على ذمة المستعملين الذي يبحثون على الدقة القصوى.

ويقوم مستقبل النظام المرجعي الجيوديسي WGS - 84 بإعطاء الإحداثيات الجغرافية، بالإضافة إلى الارتفاع التي تم الحصول عليها من النقطة الفضائية الثابتة. وقد تتراوح دقة الموضع المتحصل عليها بين عشرات الأمتار إلى بضعة سنتيمترات، وذلك حسب تعدّد المستقبل. وللمزيد من الوصف المفصل للنظام انظر المرجع [معهد الملاحة، 1980].

ويمثل GPS التفاضلي (DGPS) اليوم أداة متطورة للملاحة الدقيقة في الوقت الفعلي، ويقوم على استقبال المعلومات عن طريق قناة اتصالات مساعدة، بخصوص أخطاء المسافة الموجودة في الروزنامات المُرسلة من السواتل المرئية كما تمت حوسبتها من قبل المستقبل الموجود في موضع معروف. فيكون بإمكان المستقبل المتنقل بالتالي تصحيح القياس الذي تم أدائه وتحسين تحديد الموضع.

كما أن الكوكبة GLONASS التي تشغلها روسيا، ستعتمد عند اكتمالها على 24 من السواتل التي تتميز بخصائص مختلفة نوعاً ما. وقيم المرجع [بونسونبي (Ponosonby)، 1995] مقارنة مفصلة بين هذين النظامين للملاحة.

أما في الأنظمة الثنائية الاتجاه:

- لا يتطلب الأمر وجود ميقاتيات متزامنة، ويقوم المستعمل بقياس مسافات الخطط المرجعية بإرسال نبضة كهرومغناطيسية إلى الأمام وإلى الخلف، ويوفر وقت انتشاره الجملي مقسماً على 2، ومضاعفاً في سرعة الضوء، شعاع محيط الجسم الكروي مباشرة.

- يكون عدد المستعملين محدوداً (تشيع قنوات الاتصالات).

وعلى ذلك الأساس، لا يحتاج تنفيذ الطريقة الكروية الثنائية الاتجاه إلا إلى FS واحدة لدى جانب المستعمل كمرجع لنظام قياس الفارق الزمني. وتقوم بعض أنظمة الموضعة الدقيقة على الأرض بأداء الملاحه الدائرية الثنائية الاتجاه، وذلك مثل موتورولا مينيتراك، وفي الفضاء بالنسبة إلى الملاحه في الفضاء البعيد.

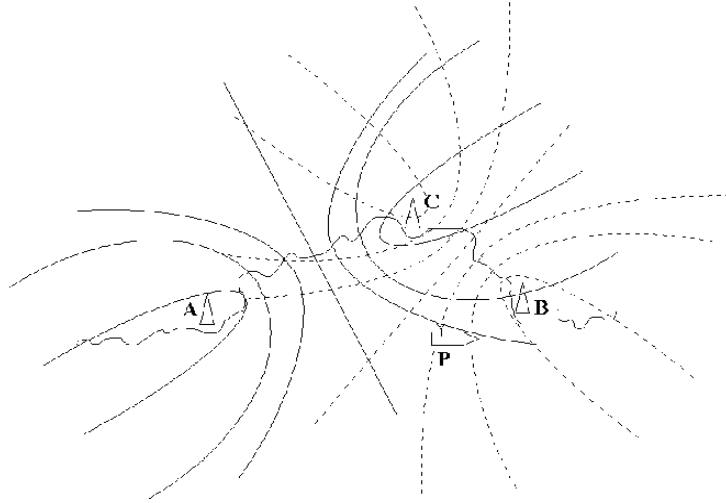
وتعتبر الطريقة الدائرية الأحادية الاتجاه، بصيغتها التي تتضمن أربعة سواتل متيسرة في كل نقطة على الأرض، بالنسبة للوقت الحاضر وبالنسبة للمستقبل المنظور، أهم طريقة وأكثر الطرائق انتشاراً.

### 3.4.7 الملاحه الزائدية المقطع

لنفترض أنه بواسطة قياسات مناسبة على ساتل فريد ولدى محطة على الأرض مثبتة لموضع غير معروف، نتحصل على مجموعة من المسافات،  $r_1$ ،  $r_2$ ،  $r_3$ ، ...، تم قياسها في أوقات مختلفة، في كل دقيقتين مثلاً أثناء مرور الساتل، في الأوقات UTC  $t_1$ ،  $t_2$ ،  $t_3$ . ويقوم الساتل بإرسال التوقيت UTC ومعلوماته المدارية. وبتجميع هذه المعلومات الأخيرة، فإنه يمكن حوسبة مواضع الساتل  $P_1$ ،  $P_2$ ، ...، إلخ، وذلك في أوقات UTC معينة  $t_1$ ،  $t_2$ ، وما إلى ذلك. ولنأخذ الفوارق الزمنية  $(r_2 - r_1)$ ،  $(r_3 - r_2)$ ، إلخ، فننتحصل على عدد من السطوح الزائدية، لها بؤر موجودة في مواضع من المركبة الفضائية ومعلومات تعطىها فوارق المسافة.

### 4.4.7 قطع زائد وسطوح زائدية وخصيات كل منها

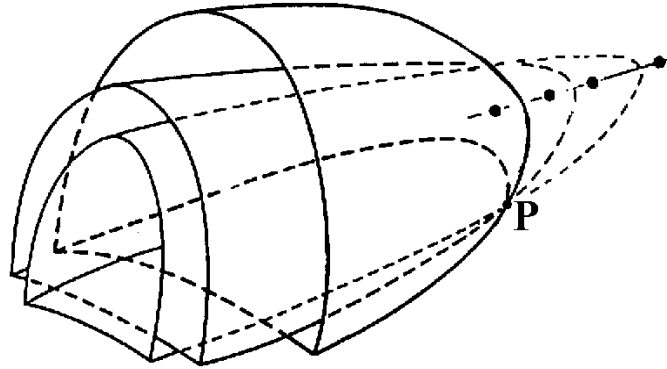
لنتذكر أن القطع الزائد، على السطح، هو التجويف الذي تكون لنقاطه فارق ثابت بين المسافات انطلاقاً من نقطتين ثابتتين، ويسمى البؤرة (الشكل 7.6). وفي الملاحه الزائدية المقطع، على السطح،



الشكل 7.6

### الملاحه الزائدية المقطع على السطح

ويقوم مستقبل محمول بقياس فارق وقت الانتشار انطلاقاً من محطتين، موجودتين في البؤر، بقياس موقعه الجاري. ومضاعفة وقت الانتشار بسرعة الضوء تعطي المسافة؛ ويمكن القياسات التالية من الحصول على الفارق في المسافات (موضع المحطة التي تقوم بالإرسال ناقص موضع المحطة المستقبلية). ويتم تعريف القطع الزائد بهذا السلوب (الخط المتواصل في الشكل 7.6). ويؤدي تكرار القياس مع محطتين أخريين إلى الحصول على قطع زائد آخر (الخط المنقط) في حين نتحصل على الموضع بواسطة تقاطع التجويفين. وفي الفضاء (انظر الشكل 7.7) تعطي قياسات الفوارق الزمنية مكائماً إلى السطوح الزائدية.



الشكل 7.7

### الملاحة الزائدية المقطع في الفضاء

يمكن أداء الملاحة الزائدية المقطع باستعمال الإشارات التي توفرها أنظمة الملاحة بالساتل TRANSIT و TSIKADA.

ويقوم عدد من الأنظمة بتوفير الملاحة الزائدية المقطع على سطح الأرض، وأهم تلك الأنظمة هي LORAN-C و OMEGA. وعند تنفيذ الطريقة الزائدية المقطع، لا بد من أن يتوفر لكل ساتل أو محطة على الأرض مقياسية FS ذرية؛ وفي بعض الحالات يكفي توفر مصدر للتردد، وفي غيرها من الحالات يستوجب الأمر وجود مقياسيات متزامنة أيضاً. أما من جانب المستعمل، فحسبه أن يكون له FS بسيط. وعدد المستعملين لا حد له (ويقتصر الاستعمال على الاستقبال).

### 5.4.7 متطلبات الدقة لمعايير التردد المستعملة في أنظمة الملاحة

إنه من الضروري استعمال أفضل الأجهزة المتطورة، أي المعايير الذرية، كقاعدة عامة، من أجل الحصول على أداءات مقياسيات و/أو معايير التردد التي تستعمل في المحطات أو السواتل التي تكوّن البنية التحتية.

وعلى متن المصطبة المتحركة، تعتمد دقة المقياسية وخطأ التردد وعدم استقرار معيار التردد على الطريقة المستعملة وعلى دقة الموضع المطلوبة. وقد تم إجراء بعض التقديرات المنصوص عليها كما يلي؛ في الملاحة الدائرية الأحادية الاتجاه تماماً، إذا كان لا بد أن يحتفظ بالخطأ في الموضع بعد يوم واحد من الملاحة ضمن حوالي 0,5 km، فإن خطأ ضبط المقياسية المحمولة في بداية الرحلة لا بد له أن يكون أقل من الميكروثانية الواحدة، في حين يجب أن يكون أقصى فارق نسبي في التردد بين جميع المقياسيات المعنية، أي تلك التابعة للبنية التحتية والمقياسية المحمولة، أقل من  $10^{-11} \times 2$ .

أما في الطريقة الثنائية الاتجاه، فليس هناك ضرورة لوجود مقياسية دقيقة على المتن أو على المحطة؛ ولكن لا بد من توفر جهاز متلقي مستجيب بسيط في واحد من مطاريف الوصلة في حين يستعمل عدّاد الفوارق الزمنية مع تجهيز راديوي في المطراف الآخر. ويعتمد نمط العدّاد من جديد على الدقة المطلوبة في قياس المسافة. وتتراوح الدقة بين  $10^{-5}$  بالنسبة إلى التطبيقات الأرضية و  $10^{-10}$  بالنسبة إلى الاستعمالات الفضائية مثل قياس المدى الليزري للساتل. وللقارئ المعني بالتفاصيل مختلف أنظمة الملاحة أن يطالع ما أُلّف في المراجع المعيارية.

### 5.7 الاتصالات

لقد كانت الاتصالات في بدايتها (حوالي 1850) تتمثل مبدئياً في نظام رقمي منخفض المعدل (الإبراق باستعمال شفرة مورس بحضور التيار أو غيابها)، لكن معظم طرائق الاتصالات اتخذت بسرعة منهجاً تماثلياً، تقوم مثلاً على الهاتف والفونوغراف والإذاعة الراديوية والراديو ووصلات الموجات الصغيرة والتسجيل المغنطيسي، والتلفزيون وغيرها، وذلك لمدة قرن من الزمن على الأقل.

وبعد 1970، سُحلت توجهات كبيرة نحو التقنيات الرقمية؛ ونلاحظ أن الوظائف الثلاث الأساسية في الأنظمة الهاتفية الجديدة - تشفير الرسالة وتفكيك شفرتها، والتشوير (التوصيل من المشترك الطالب إلى المشترك المطلوب) والإرسال - يتم أداؤها باستعمال التقنيات الرقمية. وعادة

ما تكون متطلبات الاتصالات الرقمية أكثر حزمًا من الأنظمة التماثلية، بالنسبة إلى FS المستعملة. ولا تزال هذه الأخيرة منتشرة الاستعمال الشيء الذي يستدعي تحليل الحالتين.

### 1.5.7 الأنظمة التماثلية

لا تستدعي الاتصالات على الترددات الديكامترية متطلبات متشددة، إذ تكون الدقة المطلوبة في منطقة تتراوح بين  $10^{-5}$  و  $10^{-7}$  وتقدم سلسلات تحويل التردد حالة خاصة يتم استعمالها في الوصلات الراديوية للموجات الصغيرة، حيث تنقل القناة السمعية الأساسية (300 Hz) - إلى الخلف والأمام، بمراحل 6-8، وباتجاه الموجات الحاملة للموجات الصغيرة التي توصل بين المكررات. وتنص لوائح ITU-T (للجنة CCITT سابقاً) على ضرورة أن يبقى خطأ التردد الجملي في النطاق الأساسي وعلى وصلة مُفترضة من 2500 km، أقل من 2 Hz. وفي سلسلات تحويل الترددات تلك، تكون عمليات التشغيل التي يتم أداؤها عادةً مجموعاً لدى الجانب المرسل وفوارق لدى الجانب المستقبل. ومن المعروف أن عدم التيقن من المجموع في عمليات تشغيل المجموع والفارق يتطابق مع مجموع عدم التيقن من كلا التعبيرين. ويكون خطأ التردد الجملي من 2 Hz إذاً الحد لمجموع فوارق التردد النسبية لذينة أو أكثر من مختلف المذبذبات الفردية.

ويستدعي ذلك الحد، في سلسلة من مذبذبات المرو 6-8 الضرورية لتحويل التردد المذكور أعلاه، أن تتراوح درجات عدم التيقن بين  $10^{-6}$  بالنسبة إلى المراحل الأولى و  $10^{-8}$  ←  $10^{-9}$  بالنسبة إلى آخر مراحل تحويل التردد. كما تستعمل الأدوات البسيطة ولكن الفعالة من أجل بلوغ ذلك الهدف.

### 2.5.7 الأنظمة الرقمية

تعتبر حالة الاتصالات الرقمية مختلفة تماماً نظراً لأداء الوظائف الثلاث المذكورة أعلاه، التشفير وتفكيك التشفير والتشوير والإرسال، بواسطة نبضات زمنية الترتيب. ويؤدي موضع كل نبضة فردية داخل دفق من النبضات الماثلة، في النظام الرقمي، إلى معنى الرمز الذي يجب إرساله. ويستدعي الموضع في الزمن أول استعمال لتقنيات FS (أي معايير التردد والعدادات، وما إلى ذلك). ويستوجب الموضع داخل الدفق، المسمى بالرتل، في المقابل أن تكون *بداية أي دفق معرفة هويتها* بما لا يدع مجالاً للشك فيها. ويستدعي تعرف الهوية ذلك استعمال ثان لتقنيات FS (أي معايير التردد والميقاتيات والعدادات وأنظمة المزامنة).

ومن البديهي أنه إذا وجدت فارق التردد بين ميقاتيات التشفير وميقاتيات فك التشفير، فإن فارق الطور سينمو بين الميقاتيتين. وعندما يبلغ ذلك الفارق درجة من الطول (في الزمن) ما يساوي الرتل، فإن درجة النبضة داخل الرتل سيتعذر تعرف هويتها نهائياً، في حين يحدث خطأ في فك التشفير ويُفتقد معنى الرتل. لذلك تعتبر الاتصالات الرقمية متجذرة بعمق في أجهزة FS وطرائقها. وقد تم العمل أو أنه يتم العمل حالياً بعدد من المناهج المختلفة وفيما يلي تلخيص لأهم منهجين منها.

وتعتمد الشبكة، حسب أول منهج مستعمل في معظم البلدان المصنعة، على تراتبية من الميقاتيات الموزعة على عدد من السويات المسماة بالطبقات. وعند البدء بالسوية العليا، التي تستعمل بها الميقاتيات الرئيسية الدقيقة نجد أن نوعية الميقاتيات تتدن كلما نزلنا في التراتب الأهرامي. وتميز وصلات التزامن بين طبقة والأخرى التي تأتي بعدها بعلاقة قائد منقاد. وتتحلّى هذه الوصلة من نمط قمة-أسفل بمزايا معترف بها، إلا أن وظيفة التشوير قد تكون مصدراً للمشكلات أحياناً. ففي داخل بلدان ذات امتداد جغرافي شاسع، حيث يمكن إيجاد شبكات تتمتع باستقلالية أكثر، كما في حالة شبكات بلدان مختلفة، تقود ميقاتية رئيسية منفصلة كل شبكة منها أو تقوم بذلك مجموعة من الميقاتيات المنفصلة (وجميعها ميقاتيات ذرية) مكوّنة بذلك الطبقة العليا.

ويسمى هذا المنهج الذي يعتمد على الميقاتيات المستقلة الشبه متزامنة بمنهج التراتبية الرقمية المتقاربة التزامن (PDH) ويمثل بنية الإرسال التحتية المستعملة في الوصلات الدولية. وتعني عبارة مقاربة التزامن (Plesiochronous) "قريب (Plesio) - ميقاتيات (chronos)"، أي ميقاتيات قريبة، أو مقربة من التردد، شبه متزامنة.

ويستعمل المنهج الجديد، الذي يوجد اليوم في مرحلة متقدمة من الدراسة ومقبل على عملية التنفيذ، ميقاتيات ذات بنية أكثر مرونة، ويسمى بمنهج التراتبية الرقمية المتزامنة (SDH) وسيعوض المنهج PDH. ويتم إدخال سلسلة من ميقاتيات منخفضة النوعية البعيدة في الفضاء، في حالة SDH، بين ميقاتيتين عاليتي النوعية تكون إحداها منقادة للأخرى. فيكون النظام بالتالي كله نظاماً متزامناً. فالتراتبية SDH تسهل تعدد إرسال الإشارات الرقمية والتشوير والتوصيل المتقاطع. كما تحسن كل من فعالية الشبكة ومتانتها. ويتعين على المعيار الجديد أن يوفر المطابقة الكاملة

مع التراتبية PDH حتى يتسنى التحوّل من هذه الأخيرة إلى التراتبية SDH برفق. وتميل البلدان الأقل تصنعاً إلى القفز على مرحلة معيار التراتبية PDH للمرور مباشرة إلى التراتبية SDH. ويمكن الحصول على التفاصيل التقنية المعنية بتنفيذ هذين المعيارين في منشورات لجنة الدراسات رقم 13 التابعة إلى ITU-T (اللجنة CCITT سابقاً)، ومنشورات ANSI و ETSI؛ إذ لا يغطي النص الحالي إلا متطلبات التردد والتوقيت.

ويسمح الاتحاد ITU (فيما ورد من التوصيات من G 811 إلى G 823) بخطأ واحد في فك التشفير كل 15 يوماً، وذلك بالنسبة إلى السوية العليا للأنظمة الشبه متزامنة المستعملة في الوصلات الدولية؛ والعلاقة التي تعطي الخطأ المتكامل الكلي TIE (وخطأ الطور متراكم بين الميقاتيتين المدرجتين) هي:

$$TIE < (10 \cdot s + 2500) \text{ ns},$$

حيث إن s هي المدة بالثواني التي لا تقبل خلالها أخطاء فك التشفير. وتعتمد المدة s على الخدمة (من تهااتف وطباعة بعدية وفاكس ومعطيات) وعلى معدل الأخطاء الذي تقبله به الوصلة. ويعتبر معدل الخطأ في البتات (BER) من أهم المعلمات في تصميم تنفيذ شبكة معينة.

ونلاحظ أنه بالنسبة إلى  $s = 8,64.10^5$  s (عشرة أيام)، يصبح  $TIE < 11140$  ns. وبتحويل تراكم الطور هذا في شكل فارق التردد النسبي بين الميقاتيتين، فإننا نحصل على  $\frac{\Delta f}{f} = 1.29 \times 10^{-11}$ . وتستوجب هذه القيمة الالتجاء إلى استعمال معايير التردد الذرية مع شبكة مزامنة معقدة جداً. وقد توفر هذه المزامنة وسائل خارجية (لوران-C، GPS، إلخ) أو قد يتم أداؤها داخل الشبكة.

وتستعمل معلمتان، من أجل تمييز أداء الشبكة في أنظمة SDH، أقصى خطأ للفواصل الزمني (MTIE) ( $\tau$ ) و  $TIE_{rms}(\tau)$ ، وكلاهما كوظيفة لوقت القياس  $\tau$ . وتحدد المعايير لتلك المعلمات الحدود التالية:

$$\text{MTIE}(\tau) < 18\ 000 \text{ ns with } \tau < 100\ 000 \text{ s}$$

$$TIE_{rms}(\tau) < 300 \text{ ns with } \tau > 100 \text{ s}.$$

ويمكن الحصول على استقرار طويل المدى بواسطة الميقاتيات الذرية (الروبيديوم، السيزيوم) أو بتقنيات المزامنة التي تستعمل صور قائد-منقاد. أما بالنسبة إلى الاستقرار القصير المدى فتوفرها ميقاتيات المرو المحكومة بتقنيات خاصة.

ويمثل أكثر التوازن ملاءمة بين الميقاتيات الذرية (تكلفة أعلى، انسياقات أقل انخفاضاً، إجراءات مزامنة أبسط، وأخطاء أقل في فك التشفير) مقابل شبكة يتكون معظمها من مذبذبات المرو (أقل تكلفة، اعتمادية موسعة ومبرهن عليها، انسياقات أعلى، إجراءات مزامنة أكثر تعقيداً ومعدل أخطاء أعلى) موضوعاً للنقاش. ورغم ذلك يمكن الافتراض بكل اطمئنان أن المشكلة تكمن في فعالية الشبكة ومقدرتها؛ فإذا كان معدل الأخطاء مرتفعاً تطلب الحواسيب التي تراقب تدفق الحركة بتكرار رسالة محددة إلى أن يتم الحصول على نتائج مرضية. ويؤدي هذا الإجراء إذا تكرر مراراً إلى إضعاف الاستعمال الفعّال للقناة. وقد قدر بأن زيادة 1% في مجمل تكاليف شبكة ما لتوفير ميقاتيات أفضل مع دارات إضافية قد يزيد في مقدرة الشبكة بحوالي 10%.

وسيتطلب تطوير الاتصالات الرقمية، من وجهة نظر FS على الأقل، إلى بعض التقدم في الأجهزة FS، وذلك مثل:

- تحسين اعتمادية معايير التردد الذرية، بهدف الوصول إلى حوالي  $10^{-10}$  -  $10^{-11}$  بالنسبة إلى مدة حياتها، حتى تُستعمل في أنظمة صغيرة مستقلة،
- إنتاج معايير صغيرة غير مرتفعة التكلفة بدرجات الدقة  $10^{-10}$  -  $10^{-11}$  بالنسبة إلى مدة حياتها، حتى تُستعمل في أنظمة صغيرة مستقلة،
- تحسين النقاء الطيفي لمعايير التردد نظراً لتطلب معدلات البتات العليا لسوية عالية من تماسك الطور في المنطقة البصرية أيضاً،
- وأخيراً، سيكون التفهم الأفضل لمختلف الميزات والمواصفات والرموز المستعملة وتقييم الإحصاءات بين منتجي FS ومستعملها شيئاً ضرورياً.

## 6.7 تطبيقات أخرى

إن التكلفة المنخفضة وسوية الدقة التي يسهل بلوغها مع أجهزة FS تفتحان المجال واسعاً لحقول التطبيقات الجديدة، لكن استعمال مراجع التوقيت والتردد الدقيقة يعمّ اليوم التقنية والعلوم بشكل يجعل أي دراسة بعيد عن أن تكون شاملة ويقود إلى ضرورة تحديد بعض الاختيارات. وفي حالتنا، لن يتم عرض إلا القليل من الأمثلة التطبيقية.

### 1.6.7 التطبيقات الذاتية الحركة

يتراوح عدد مذبذبات المرو داخل المركبة، حسب نوعية السيارة أو الشاحنة، بين بضعة وحدات وبضعة دزينات منها. وفيما يلي قائمة ببعض تطبيقاتها؛ ولا بد من التذكير، علاوة على ذلك، أن كل معالج صغير يستعمل في سيارة ما يحتوي على مذبذب مستقر بالمرو.

وحدات المرو في التطبيقات الذاتية الحركة:

- مستقبل ميقاتيات-راديو، مجهز عادة بمركب ترددات غير مباشر،
- محرك،
- تحكم في البث،
- إرسال،
- معالجات صغيرة مضادة للانزلاق،
- مصادر التوقيت،
- سطوح الحافلة البينية المستعملة في توزيع الطاقة الكهربائية،
- تحكم "ذكي" في التطواف،
- نفاذ إلى الممرات،
- مضاد للتصادم،
- خصوم الأوتوماتي،
- معلومات عن حركة المرور، إلخ.

### 2.6.7 أنظمة الطاقة الكهربائية وتسيير الغاز المضغوط

عندما يتم إرسال قدر كبير من الطاقة على الخطوط الكهربائية أو على خطوط الأنابيب لتأمين تدفق الطاقة المنتظم باتجاه الشبكة، فإنه لا بد من إجراء عدد معين من القياسات المنظمة في الزمن. وتمثل الغاية من ذلك في تحقيق الفعالية لتدفق الطاقة بواسطة تسيير ملائم لها. ويتعين في حالة أنظمة الطاقة الكهربائية أن يتم وسم تسجيلات التشوش الحاصل وسمًا زمنيًا بالنسبة للأخطاء التي لا تتجاوز 1 ms في المناطق القارية من أجل مساعدة عملية تحليل تشغيل النظام.

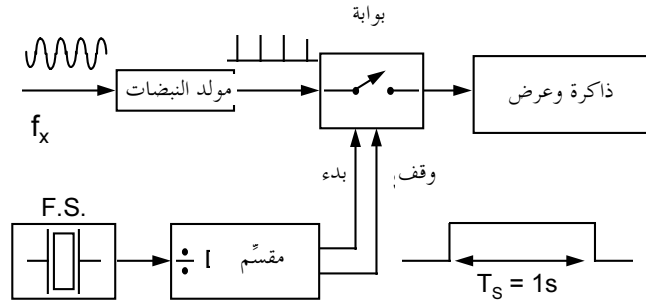
وفضلاً عن ذلك، تتطلب الإدارة السلسلة للمولدات العالية القدرة مثل توريينات الغاز أو البنخار الكبيرة وجود مزامنة حازمة. ولا يمكن تخزين الطاقة الكهربائية (تيار متناوب)، وفي حالة حدوث خلل ما ينتشر ارتفاع التيار والتوتر المتصل على الخطوط. وقد يكون ذلك الارتفاع كبيراً أحياناً إلى حد توليد آثار تخرب تجهيز الخطوط وتؤدي بالتالي إلى انقطاع الخدمة المتوفرة لمدة طويلة. ويعتبر الوسم الزمني للأحداث الفردية لازماً للكشف عن أصل المشكلة والعثور على التدابير المناسبة لحلها. وإذا تم تحقيق مزامنة التوقيت على سوية الميكروثواني، وهو الهدف الحالي، فإنه يمكن تحديد موقع الخلل على الخط بدرجة من عدم التيقن تبلغ 300 m، وهي المسافة الواقعة تقريباً بين أبراج الخطوط الكهربائية.

وعلى مر السنين، تم وضع عدد من الحلول التي تعتمد على إشارات التوقيت وعمليات بث الترددات المعيارية التي يتم إشعاعها عبر الشبكات المكرسة أو شبكات الإذاعة الراديوية، ومؤخراً تم اعتماد حلول تركز على استعمال أنظمة فضائية للملاحة بالساتل مثل GOES و GPS [ويلسون (Wilson)، 1991].

### 3.6.7 الأجهزة

يعتمد عدد كبير من أجهزة القياس الإلكترونية على FS. وتجدون فيما يلي بعض الأمثلة عليها.

ففي الحالة الأولى، يتم استعمال FS ذاته مباشرة وهو إلزامي. وأكثر الأمثلة دلالة هو الجهاز المسمى "بالعداد الإلكتروني" الذي يكون متيسراً بنوعين أساسيين: عدّاد التردد وعدّاد الفاصل الزمني (أو الفترة الزمنية). وفي الحالة الأولى المبينة في الشكل 7.8، تستعمل نبضات الجهاز FS لتوليد فاصل زمني بالطول المعروف  $T_s$ ، مثل ثانية واحدة، التي تفتح بوابة معينة.

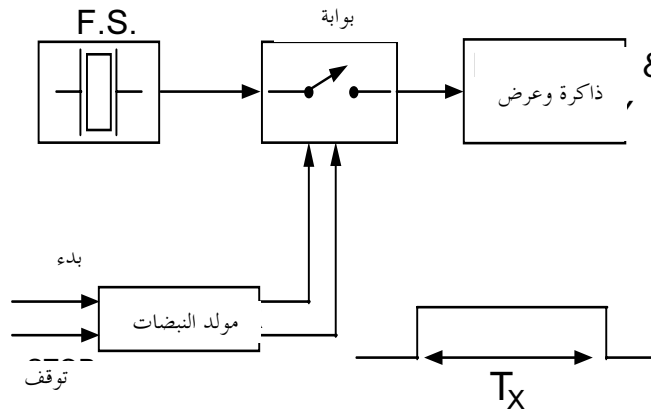


الشكل 7.8

مبدأ عداد التردد

تحتسب النبضات التابعة لإشارة خارجية ما  $F_x$ ، التي يكون ترددها غير معروف وتحدث في الفاصل  $T_s$ ، وتعطي نتيجة الاحتساب التردد  $F_x$  بالهرتز.

وفي الحالة الثانية المبيّنة في الشكل 7.9، يعطي عدد نبضات FS الموجودة داخل الفاصل الزمني المعروف بواسطة حدثين، والتي تحدث لدى الدخول المسماة "بدء" و "توقف"، طول الوقت الذي يستغرقه ذلك الفاصل، والمعبر عنه بوحدات من فترة التردد المولّد بواسطة FS. ويمكن تعريف ذلك الفاصل بواسطة تقاطعين متعاقبين على الصفر، وفي ذات الاتجاه من دخل الإشارة: ويسمى الجهاز في هذا المثال الأخير بعدّاد الفترة.



الشكل 7.9

مبدأ عداد الفاصل الزمني

لنفترض أن التردد الاسمي التابع إلى FS هو 100 MHz، وأن "المسافة الزمنية" على سبيل المثال بين نبضات البدء ونبضات التوقف تكون ms 1,450 بالضبط؛ في هذه الحالة، يكون المحتوى النهائي للذاكرة 145 000 بالوحدات من 10 ns، أي 1450,00 ميكروثوان أو 0,001 450 00 s، فالجهاز يسمح باختيار الوحدة المستعملة مباشرة (s, ms,  $\mu$ s, ...)، فتقدم النتيجة بالتالي بأفضل طريقة تناسب المستعمل.

وقد لقي هذان المنهجان الأساسيان عدداً من مختلف التطبيقات على مر السنين. ويدخل FS، المستعمل في مثالنا الثاني كمرجع تردد تشتق منه إشارة الخرج، تحسينات كبيرة على مقدرات الجهاز. فالجهاز هو المركّب، جهاز يقوده FS واحد وينتج عدداً كبيراً من الإشارات في تشكيلة



عريضة من الترددات، وتزوّد كل واحدة منها بدقة FS. وقد ينتج جهاز تجاري، على سبيل المثال،  $10 \times 5$  من الإشارات الفردية من نوع Hz 1 إلى MHz 50، بأذن فارق من إشارة إلى أخرى من Hz 0,001. وتستعمل مركبات الترددات بكثافة في ميدان البحث والاتصالات.

أما في الحالة الثالثة، فيستعمل FS في جهاز يقوم بقياس أي كمية مغايرة للتردد أو التوقيت، لأن استعماله يوفر فوائد تتعلق بالدقة أو بالبساطة في التصميم والبناء أو بسهولة استعماله في نهاية الأمر. ويمكن ملاحظة هذا الاتجاه في الأجهزة التي توفر خرجاً رقمياً بشكل خاص. وكمثال على ذلك، تحول العديد من الفولتترات الرقمية التوتر غير المجهول إلى تردد أو إلى فاصل زمني يتم قياسه في النهاية بعدد إلكتروني.

#### 4.6.7 رادار دوبلر

وفي حالات عديدة، تكون الكمية المعنية هي السرعة النسبية بين جسمين متحركين أو بين جسم متحرك وآخر في الراحة. ويتم إجراء هذا القياس عادة بواسطة أثر دوبلر، الذي قدم له القسم 7.4 سابقاً بخصوص بضع طرائق الملاحظة. وتستعمل رادارات دوبلر بكثافة في علم الطيران كما يقترح على أنظمة تفادي تصادم السيارات. وتحول السرعة النسبية في هذه الأجهزة إلى فارق تردد قد يُقاس في نهاية الأمر بعدد إلكتروني. كما تجد رادارات دوبلر المجال لاستعمالها في تطبيقات أخرى غير منتظرة، مثل الكشف عن الاقتراب أو إرساء ناقلات النفط الخام الضخمة أو سفينة نفطية كبيرة. فقد تصل كتلة هذه السفن إلى  $10 \times 5$  كغ ويتعين عليها الاقتراب من المرفأ بسرعة متحكم فيها بجوالي مليمتر واحد في الثانية. ويفرض قياس مثل تلك السرعة برادار دوبلر عندما يكون وقت انتشار ذهاباً وإياباً أقل من 100 ns متطلبات متشددة بالفعل فيما يتعلق بعدم استقرار التردد على المدى القصير في مذبذب الرادار على الأرض.

### المراجع

PETLEY B.W., [1988] "The Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement", Adam Hilger, London, 1988.

PÖPEL R., [1992] "The Josephson Effect and the Voltage standard", Metrologia n.29(1992), 153-174

HARTLAND A., [1992] "The Quantum Hall effect and Resistance standard", Metrologia n.29(1992), 175-190

INSTITUTE OF NAVIGATION [1980] "Global Positioning System", Navigation, Vol.I, Washington,D.C. (USA), 1980.

PONSONBY J.E.E., [1995] "Global Satellite Navigation Systems - Uses of Space-Time fixes from Geodesy to Sailing", U.R.S.I. Space and Radio Science Symposium, Brussels (Belgium), April 1995.

WILSON R.E., [1991] "Uses of precise time and frequency in power systems", Proc. of the IEEE, vol.79 n.7(1991), 1009-1018.

### قائمة المصادر

METROLOGIA, [1995] Special Issue on physical units, vol.31, n.6, February 1995.

B. FORSSELL, [1991] "Radionavigation Systems", Prentice Hall International Ltd, 1991.

P. KARTASCHOFF, [1991] "Synchronisation in Digital Communication networks", Proc. of IEEE, vol.79 n.7(1991), 1019-1028.

الفصل 8

خبرة التشغيل، مشكلات، ومواطن الشرك

المحتويات

167	أدوات التردد والتوقيت	1.8
167	اختيار مرجع معين	1.1.8
167	تقدير الحاجيات	1.1.1.8
168	ميقاتية موجهة مقابل ميقاتية التشغيل الحر	2.1.1.8
168	أدوات التطبيق التشغيلي	2.1.8
169	استقرار أنظمة التوقيت والتردد	1.2.1.8
169	ضوضاء القياس	1.1.2.1.8
170	قياس أداء الميقاتيات	2.1.2.1.8
170	اعتمادية النظام	2.2.1.8
170	معدلات الأعطال	1.2.2.1.8
171	مشكلات التعامل مع الأخطاء	2.2.2.1.8
171	دقة النظام	3.2.1.8
171	مشكلات العتاد العملية	4.2.1.8
173	معطيات وأمثلة مستقاة من التجارب التشغيلية	2.8
173	معايير التردد والتوقيت	1.2.8
175	أمثلة على المشكلات المطروحة	2.2.8
175	مقارنة الترددات والتوقيت	3.2.8
176	هل يستحسن الارتداد الخطي	1.3.2.8
176	مشكلات ذات غموض دوري	2.3.2.8
176	معطيات أخرى وضبط الأنظمة وأفكار ومشكلات عمليات المعالجة	4.2.8
176	النماذج والواقع	1.4.2.8
177	أنساق المعطيات	2.4.2.8
177	استرداد المعطيات وتخزينها	3.4.2.8
177	مشكلات التركيب	4.4.2.8
177	العناية والاستبدال	5.4.2.8
177	الخلاصة	3.8
178	المراجع	

## 1.8 أدوات التردد والتوقيت

يتألف نظام التردد و/أو التوقيت عموماً من أجزاء عديدة تحدد احتياجات النظام. ويتكون قلب النظام من مصدر التردد (انظر الفصلين 1 و 2). ويتم احتساب دورات هذا المصدر للاحتفاظ بالتوقيت، الشيء الذي يصيره مقياسية. وكثيراً ما يتم استعمال مجموعة من الوحدات بسبب الاعتمادية وللكشف عن الأخطاء أو العطل وللنفاذ إلى أداء كل مرجع تردد و/أو مقياسية. وتراود مسألة الثقة بأداء المصدر الذهن على الفور. وتقدم عمليات المقارنة الداخلية والخارجية إجابة تتطلب تفسيراً حكيماً. كما يتطلب تحليل المعطيات وتأريخ الأحداث والكشف عن الأخطاء وتحسين مصدر التردد/التوقيت توفر السعة لتخزين وحدات التردد/التوقيت ذاتها، بالإضافة إلى المعطيات التي تولدها تلك الوحدات. وكثيراً ما يستلزم الأمر التشغيل المستمر، ثم التغذية بالطاقة بالسلامة المتكاملة لدعم ذلك التشغيل. فكيف سيتم نشر الإشارات من أجل استعمالها؟ وكم عدد الغرف التي يتطلبها كل التجهيز؟

إن القيام باختيار حكيماً لتجهيز التردد/التوقيت من أجل تطبيق محدد ليس بالمهمة العادية. وتعتبر المراكز الوطنية والدولية للتوقيت ومنظمات الاتصالات الأماكن المناسبة للانطلاق في مساعدة المستعمل للقيام بهذه المهمة؛ إذ تحتوي تلك المراكز والمنظمات بالخصوص على خبرة تشغيل كبيرة يمكن الاستفادة منها.

ونتعرض في هذا القسم إلى أوجه مثل الاعتمادية والدقة والاستقرار وقابلية رسم الأثر وكيفية تمييز أنظمة التردد/التوقيت (F/T). وتُعرض المعطيات والأمثلة في القسم التالي.

تعود المتطلبات الأولية لمستعملي F/T إلى تيسر المصادر التي تعمل بشكل ملائم، أي طبقاً للتعريفات الرسمية والمراجع الوطنية والدولية المعروفة التي تم إنجازها. وبمجرد تجاوز الخصائص المطلوبة (الاستقرار والدقة) لتلك الخصائص التي يكفلها المصنّع، يواجه المستعمل شتى الأسئلة من مثل: كيف يمكن التأكد من عمل مصدر F/T عملاً جيداً؟ ما هي الخصائص القياسية؟ كيف يمكن تفادي أي عدم استمرارية للتوقيت؟ كيف تتم إدارة النظام بتقشف؟ كيف تتم صيانة أداء المصادر F/T وضماها؟

### 1.1.8 اختيار مرجع معين

نظراً لتباين مستعملي أجهزة F/T وتجهيزها الكبير، فإن الاختيارات تتسم هي الأخرى بالاختلاف الشديد. ويستحسن حصر الحاجيات والمتطلبات أولاً بالإضافة إلى المراجع قبل اقتناء التجهيز. وكما سبق الذكر آنفاً، فيستحسن استشارة ذوي الخبرة في القطاع المعني. هذا، وقد تم مؤخراً تسجيل تقدم هام في مصادر F/T والتجهيز المتصل بها. ويتسم قدوم إشارات F/T الدقيقة من السوائل بوقع عظيم على اختيار المصادر F/T المرجعية. ويمكن الحصول حالياً على دقة عالية في F/T بتكلفة منخفضة جداً.

وفي الماضي، كان للأنظمة F/T ميل باتجاه التعقيد والاعتماد على التكنولوجيا المتيسرة. أما الآن، فإن متطلبات الأنظمة F/T الدقيقة كبيرة، وتقود تلك الحاجيات عملية التصميم. وقد انحدرت التكلفة فعلياً في الفترات الأخيرة نظراً لارتفاع العدد الكبير للأنظمة المطلوبة. وتوجد حالياً تشكيلة متنقاة من المصادر F/T الجيدة أكبر بكثير مما كانت عليه من قبل.

#### 1.1.1.8 تقدير الحاجيات

ما هي حاجيات مرجع تردد و/أو مرجع توقيت؟ هل يحتاج إلى ربطه بالثانية SI و/أو بالتوقيت UTC؟ وهل يحتاج إلى الاحتفاظ به ضمن حد معين للتردد أو التوقيت كجزء من شبكة ما؟ وهل ستنتم مقارنته بمصدر آخر من F/T، وإذا كان الأمر كذلك، فما هي خصائص الاستقرار والدقة لذلك المصدر ووصلته للمقارنة؟ وقد يتطلب كل واحد من هذه الحاجيات تجهيزات ومراجع متباينة جداً. وسيكون التصميم الحذر للمرجع المعني بالإيفاء بالحاجيات والمتطلبات من أكثر الأشياء مردودية التي يمكن القيام بها. فقد تم تصميم العديد من الأنظمة على نحو غير ملائم لعدم أخذ هذه الأسئلة في الحسبان ولم تتم الإجابة عليها كما ينبغي، مما أدى إلى إنفاق مبالغ طائلة من المال بغير موجب.

وكمثال على ذلك، نذكر أن مواصفة التردد للاتصالات ITU-T من  $10^{-11}$  لا تتطلب كمية التوقيت، وإنما فقط التردد (التوليف). وتعود هذه المواصفة إلى وقت كان من الأسهل جداً أن تحصل فيه على التوليف عوضاً على المزامنة. وقد أصبحت المزامنة اليوم سهلة المنال أكثر من قبل بسبب أنظمة التوقيت بالساتل. ويستفيد العديد من أجهزة F/T الجديدة من ذلك: إذ يؤدي مذبذب مرجعي تم تصميمه على نحو ملائم ومقترن بنظام مترامز إلى التوليف أيضاً. وبوضع الشبكة SONET و SDH مما يسمح بالحصول على فعالية جيدة وتحديد موقع العطل في أنظمة توزيع الطاقة، فإن البعض من هذه المقدرات الجديدة البخسة الثمن آخذة في احتلال أهمية متنامية.

ويكتسي اختيار المرجع بالنسبة إلى مخابر المعايير بالأهمية القصوى في علم قياس التوقيت والتردد. وإذ يتعدى قياس توقيت مقياسية معينة على أحدنا، ولكن يمكن قياس الفارق الزمني بين مصدرين توقيت فقط، فإنه يتم تخزين معطيات الفارق الزمني تلك. وتعتبر تلك المعطيات دلالات على فوارق التوقيت (أو الطور) بين مقياسيتين، أو بين مقياسية وسلم وقت ورقي (كما يعرفه الفصل 6)، أو بين سلمى وقت. ويمكن الرجوع إلى الفوارق الزمنية كقياسات تتميز بها التغييرية المركبة للمقياسيتين أو سلمى الوقت. وتعتبر المقياسية المرجعية أو سلم الوقت أحياناً خالية أو خال من العيوب وتسد كامل التغييرية إلى المقياسية الأخرى أو سلم الوقت الآخر؛ وهو ما لا يتطابق مع الواقع بالطبع.

ويمكن ربط أثر معطيات التردد من جهة أخرى بالفيزياء الأساسية عبر تعريف الثانية SI. ولكن كثيراً ما تعرض قياسات التردد بقيم نسبية بين معيارين أو بين معيار ومرجع متفق عليه. وعلى خلاف ذلك، فإن التوقيت الرسمي يجب أن يكون مرجعه المعيار العارض، UTC.

### 2.1.1.8 مقياسية موجهة مقابل مقياسية التشغيل الحر

عندما يكون لمخبر معين عدة مصادر F/T ذات خصائص متشابهة (مثال، معايير عديدة بالسيزيوم ذات نمط واحد)، يكون من العادي من وجهة نظر عملية أن يتم اختيار مصدر واحد منها كمرجع أو كميقاتية رئيسية. وسأخذ اختياره في الحسبان الخاصيات الرسمية لعلم القياس، والسلوك الاختباري في علاقته بالمقياسيات الأخرى واحتمال تشغيله بدون عطل. ويمكن القيام بتحديد أفضلها من وجهة نظر الأداء بواسطة استعمال إجراء القبة ذات الزوايا-n أو باستعمال إجراء جديد نسبياً وأكثر فعالية كان قد وضعه ليباك [ليباك ووالز، 1993].

أما على المدى الطويل، فإن المقياسية المرجعية، وبصرف النظر عن نوعيتها، ستميل دائماً إلى السير العشوائي في التردد — إن كانت بالتشغيل الحر — مقارنة بأي سلم وقت معرف آخر. فتقوم الخيارات إذاً على ضبط المقياسية (توجيه ترددها للتحكم في التوقيت) أو على وجود مركب (موجه بشكل مستقل) على خرج المقياسية. ويحول الخيار الأول بالفعل دون استعمال المقياسية كمساهم مستقل في مجموعة للمقياسيات، وهو خيار غير مستحسن. وتحتوي بعض المعايير الجديدة على مركبات داخلها بشكل يمكن من وجود كل من المقياسية المستقلة بالإضافة إلى خرج موجه انطلاقاً من ذات الوحدة.

وإلى جانب المرجع المحلي العملي، يستحسن إن أمكن وجود وصلات مع المراجع الأخرى، الوطني والدولي منها. إذ يوفر ذلك فائدتين أساسيتين: تتمثل الفائدة الأولى في أن هناك مراجع خارجية التي تعتبر عموماً كمراجع مستقلة عن المرجع المحلي؛ وتتمثل الفائدة الثانية في أن لتلك المراجع خصائص علم القياس معترف بها ومكتملة للاستقرار والدقة. ولا تعرف النتائج المتعلقة بمثل تلك المراجع الخارجية عادة إلا بالتأخير. وفي حالة التوقيت UTC، يكون التأخير حالياً أكثر من شهر واحد.

وتتمثل خاصية علم قياس التردد والتوقيت المحددة في وصل أي مستعمل بسهولة بالمراجع الوطنية وبالتالي بالمراجع الدولية، وذلك بالتجهيز المناسب. وهكذا، لا يكون هنالك عموماً أية صعوبة للاتصال بمراجع متعددة قد تساهم في تأهيل مصدر معين وتكميته. وفي حالات الأنظمة المعزولة (الغواصات، المركبات الفضائية ... ) تصبح الوصلات أكثر صعوبة وقد يستوجب الأمر أن تكون متقطعة. ويستحسن الحصول على أكثر من وصلة مقارنة واحدة تعمل في نفس الوقت. وبهذا الأسلوب، يمكن مقارنة الوصلات بالإضافة إلى مقارنة المقياسيات.

وخلاصة القول إنه من الهام بمكان بالنسبة إلى المستعمل الذي يتعامل مع معطيات F/T أن يدرك مفاهيم الإطناب (بالنسبة إلى المصادر والمراجع)، ومفاهيم الاستقلالية بين المصدر والمرجع، وأن يدرك ضرورة إقامة المقارنات.

### 2.1.8 أدوات التطبيق التشغيلي

يتميز اثنان من بين الأدوات التي استعملت لتمييز التجهيز F/T بأهمية قصوى من وجهة النظر التشغيلية. ويهدف أحدها إلى قياس قابلية مصدر F/T معين (أو سلم وقت) لتسليم ذات الفاصل الزمني، أي لقياس استقرار تردده. وقد تم استعمال مغايرة محددة (مغايرة بعينتين أو مغايرة آلان) عموماً؛ وجاء ذلك مفصلاً في الفصل 3. وسنورد هنا بعض الملاحظات المتعلقة بالأوجه التشغيلية لهذه المغايرة.

وتعود الأداة الثانية إلى مفهوم الاعتمادية. وقد تم إجراء دراسة عميقة ومفصلة منذ بضعة سنوات خلت، وذلك في إطار دراسات ITU-R (اللجنة CCIR سابقاً) [1990، CCIR]؛ ويقاسم هذا الفصل القيم الأساسية معها بالإضافة إلى بعض المواد الجديدة، وخصوصاً المتعلق منها بمستقبلي GPS. ولا يوجد هناك مثل تلك المعلومات عن أكثر المعايير حداثة. وسيحتاج المستعمل إلى البحث عنها بمساعدة مراكز F/T ومخبرها.

وكثيراً ما يُستعمل ثالث تلك الأدوات، ويتمثل في دقة التردد. ويمكن أن يرتبط بشكل خاص بتعريف الثانية SI الذي يقدم معدلاً مرجعياً أساسياً بالنسبة إلى كافة المقياسيات، أو أنه قد يعود بمعنى أكثر شمولاً إلى غيرها من معايير التردد المفيدة، حسب ما جاء في تفسير الفصل I والمسرد. ورغم أهمية هذه الأداة في علم قياس التوقيت والترددات، فقد حدث بعض سوء التفاهم للأسف؛ لذلك فإنه لا بد من توخي الحذر عند استعمالها.

### 1.2.1.8 استقرار أنظمة التوقيت والتردد

يتحدد استقرار النظام F/T بأربعة عوامل: ضوضاء القياس، وحالات عدم الاستقرار في الميقاتيات المساهمة، ومعالجة الضوضاء و/أو الخوارزميات المستعملة في تركيب القراءات، وحالات عدم الاستقرار في توزيع F/T. وسيكون الخرج النهائي مركباً من العوامل الأربعة. وعادة ما يتم القيام ببذل الجهد لجعل ضوضاء القياس أقل من ضوضاء الميقاتية. ويمكن تحقيق ذلك في نظام جيد التصميم وسناقش هذا الأمر بمزيد من التفصيل أدناه.

وتعرف التوصية ITU-R TF.686 عدم استقرار التردد عموماً (انظر أيضاً المسرد) بكونه "تغير التردد التلقائي و/أو الناجم بفعل البيئة ضمن فاصل زمني معين" ويقام التمييز بين الآثار النظامية والتقلبات العرضية. فقد تميزت الأخيرة عموماً بالمغايرة ذات العينتين (أو مغايرة آلان) لسنوات عديدة وذلك من قبل كل من المستعملين ومصنعي المعايير. وأصبحت هذه المغايرة أداة تشغيلية تتسم بفوائد متعددة.

- أولاً، فهي متقاربة مع ضوضاء معايير التردد العادية.
- ثانياً، هي دلالة غير ملتبسة من نمط الضوضاء التي تقيمن على معطيات معايير التردد، ما عدا ضوضاء الطور البيضاء وضوضاء طور الرفيف غير المميزتين (انظر الفصل 3). وعادة لا تظهر مشكلة الالتباس فعلياً إلا عند قياس استقرار مذبذبات المرو البلورية القصير المدى وقياس موازر الهيدروجين.
- ثالثاً، تخضع هذه المغايرة لشروط انسياب التردد (قيم تربيعية لمعطيات الطور) بنفس الطريقة التي تخضع بها للشروط العشوائية. ويُفسر ذلك على نحو يسير بعمل المغايرة ذات العينتين باختلافات ثوابي الطور.
- رابعاً، لها إمضاء يتطابق مع تغيرات الطور الدورية.
- خامساً، سهلة الحوسبة انطلاقاً من معطيات معاينة. وتتمثل أبسط طريقة لذلك في أخذ أزواج من المعطيات المتجاورة. وقد بين [شتاين، 1985] أن استعمال الأزواج المترابطة يؤدي إلى تقدير المغايرة أفضل من استعمال الأزواج المتجاورة [NIST، 1990].
- سادساً، يمكن تقدير استقرار كل وحدة فردية من خلال تطبيق منهج القبعة الثلاثية الزوايا على مغايرات الأزواج من ثلاثة مصادر للترددات المستقلة التي تقارن في ذات التواريخ [NIST، 1990]. ويمكن استعمال منهج جديد مع أي مغايرة متقاربة (بما في ذلك مغايرة آلان) والحصول على تقدير حالات استقرار الميقاتية الفردية حتى أفضل من ذلك الذي يوفره منهج القبعة الثلاثية أو N- الزوايا [ليباك ووالز، 1993].

وقد تمثل ضرورة المعطيات الدورية لحوسبة المغايرة مشكلة من وجهة النظر التشغيلية. ويمكن أن يؤدي تمليس المعطيات غير الدورية للحصول على معطيات دورية إلى حدوث الخيانات خبيثة.

وتم وضع مغايرة آلان المعدلة حديثاً حتى يستعملها خبراء علم القياس. وهي تتسم بفائدة التمييز بين ضوضاء الطور البيضاء وضوضاء طور الرفيف. ويتعين على المستعمل أن يكون حذراً من اختلاف قيم المغايرة ذات العينتين المعدلة عادة عن قيم المغايرة بعينتين: فهي عادة أصغر من قيم الأخيرة وتعتمد النسبة على نمط الضوضاء وعلى مدة العينية.

كما تم مؤخراً وضع مغايرة توقيت (TVAR). وقد تبنتها مجموعة الاتصالات الأمريكية بسرعة وهي مفيدة في عملية تمييز المغايرات العشوائية في أنظمة القياس، وفي أنظمة توزيع F/T وفي الشبكات. ولها معظم الخصائص المرغوبة التي تتميز بها مغايرة آلان المعدلة، لكنها تطبق على بواقي التوقيت (أو الطور) مباشرة. (انظر الفصل 3).

#### 1.1.2.1.8 ضوضاء القياس

يحتوي نظام قياس الفارق الزمني (أو الطور) المثالي على بواقي الضوضاء PM البيضاء. وإذا تمت معالجة بواقي الضوضاء البيضاء PM على النحو الأمثل (باستعمال  $(\text{mod.}\sigma_y(\tau))$ ، فسيكون متوسطها بقيمة  $\tau^{-2/3}$  (انظر الفصلين 3 و 4). وتؤدي تغييرات التأخر النظامية إلى ابتعاد أنظمة القياس عن الحالة المثلى، وقد تصبح البواقي أفضل تصميمياً بواسطة معالج PM للرفيف. وفي هذه الحالة يقدر متوسطها بقيمة  $\tau^{-1}$ . ويقدر متوسط معظم الميقاتيات (انظر الفصل 5) بقيمة  $\tau^{-1/2}$ ؛ وهكذا، حتى تكون أوقات التكامل طويلة بالقدر الكافي، يمكن جعل ضوضاء القياس عادة أضعف من ضوضاء الميقاتية. ولكن قد يُضطر وقت التكامل ذلك أن يكون بدرجة عدد معين من الأيام حسب أنظمة غير مناسبة التصميم وميقاتيات متطورة تقنياً. ولكن مع تصميم مناسب يمكن جعل ضوضاء القياس أضعف من ضوضاء الميقاتية بالنسبة لمعظم القيم من  $\tau$  (انظر الفصل 4).

ويستعمل العديد من مراكز التوقيت إشارة من PPS 1 من كل ميقاتية لقياس الفارق الزمني بينها وبين غيرها من الميقاتيات الأخرى في النظام. وهذا مثال على التصميم غير المناسب المذكور سابقاً. فالإشارة PPS 1 هي نبضة بوقت ارتفاع سريع تطبق على عدّاد الفواصل الزمنية الأمامية

والخلفية للموجة الديكامترية. ويتطلب هذا التصميم عرض نطاق قياس بموجة ديكامترية،  $f_H$ ، الذي قد يؤثر عكسياً على القياسات. ولا بد أن يعكس تطور عدّاد الفواصل الزمنية وتوليد الإشارة PPS 1 وضعية التقنية الحالية لإضعاف ضوضاء القياس الفعالة. ويتطلب الأمر، حتى في تلك الحالة، توفير أوقات تكامل طويلة، في حين تكون تكلفة التجهيز باهظة.

وقد تم وضع تقنية تخفيفية مزدوجة تنفادي العديد من المشكلات التي تعرضنا إليها سابقاً. ويتم الرجوع إلى إحدى صيغها كتقنية الفوارق الزمنية المزدوجة المخلاط. وهي تنفادي ضوضاء المقسم للإشارة PPS 1 بواسطة قياس طور الإشارة RF التابع إلى الميقاتية، ويمكن الحصول بسهولة على عرض نطاقات قياس ضيقة مرغوب فيه وقابل للتحكم فيه، مثل عرض نطاقات أضيق بكثير من 1 kHz. ويمكن جعل ضوضاء القياس أضعف من ضوضاء الميقاتية في أغلب الحالات بالنسبة لأوقات التكامل بقصر ثانية واحدة (انظر الفصل 4).

### 2.1.2.1.8 قياس أداء الميقاتيات

يعتبر قياس أداء ميقاتية فردية أمراً مستحيلاً بالاقتران على استعمال معطيات القياس مقابل ميقاتية أخرى ذات نوعية موازية لها. وعندما تكون أحدهما أفضل بشكل محسوس، فإننا نستطيع تقريب أداء الأسوأ بينهما، لكن ذلك لا يمكنه أن يتحدد بإجراء القياسات بين الميقاتيتين فحسب.

ولا بد من وجود ثلاث ميقاتيات على الأقل أو أكثر من ثلاث لتقدير أداء كل ميقاتية من الميقاتيات الموجودة في المجموعة حقاً. وفي حالة استعمال منهج القعدة N- الزوايا، نتحصل على مغايرات سلبية من وقت لآخر وتُطرح دائماً مسألة جدواها [NIST، 1990]. ويقوم منهج جديد نسبياً بتفادي هذه المشكلة في حين أنه يقدم تقديراً أفضل للأداء [ليبيك وآخرون، 1993].

ويفتح استعمال الميقاتيات في مجموعة معينة المجال لتقييم الأداء الفردي لكل عنصر مساهم فيها. وحتى إن كانت كل ميقاتية مترابطة نوعاً ما بالتوقيت الجملي بما أتاها تساهم في القيمة، فإنه يمكن احتساب ذلك الترابط ويمكن تحديد تقدير أداء كل ميقاتية عضو بدون أن يكون منحازاً (انظر الفصل 6).

### 2.2.1.8 اعتمادية النظام

تمثل الاعتمادية في معظم التطبيقات العصرية أهم المواضيع المطروحة. إذ يجب أن يُصمّم النظام لتفادي نقاط الأعطال الفريدة أو لجعل نسبة احتمال وقوع إخفاق تام تقارب الصفر. ويعتبر استعمال المجموعات وإطنابية الأنظمة من الوسائل التي تمكن من الرفع في الاعتمادية في حالة استعمال مقاييس التصميم المناسبة. ويتسم توخي الحذر هنا بأهمية كبيرة، إذ قد تحظى الأنظمة الأكثر تعقيداً بأقل اعتمادية.

### 1.2.2.1.8 معدلات الأعطال

تقوم الطريقة التقليدية لقياس مدى اعتمادية جهاز ما على متوسط الأزمنة الفاصلة بين الأعطال الإحصائي (MTBF). ويقدر ذلك باقتسام فترة تشغيل (طبقاً للخصائص المحددة) جملة من الأجهزة المتشابهة بواسطة عدد من الأعطال التي تحدث أثناء فترة من الزمن؛ وقد تكون الوحدات سنوات وأشهر، إلخ. ولا يتسم التقدير الذي تم الحصول عليه بالأهمية إلا إذا أمكن اعتبار اعتمادية الجهاز ككتابة في علاقتها بالزمن. وتمثل مساوئ القياس MTBF الهامة في ضرورة انتظار إصابة كل الوحدات بالعطّل قبل الشروع في حوسبة المتوسط.

وأفضل متغيرة إحصائية للتدليل على الاعتمادية تتمثل في احتمال إصابة وحدة معينة، كانت أن بقيت على قيد الحياة لمدة  $t$ ، بالعطّل في الوقت  $t + \Delta t$ . وقد تم تعريفها كمعدل الأعطال الشرطي  $Z(t) = -\Delta N(t) / N(t) \Delta t$  حيث  $N(t)$  هو عدد الأجهزة التي تشتغل في الوقت  $t$ ، و  $\Delta t$  هو التغير في هذا العدد من  $t$  إلى  $t + \Delta t$ .

ويتم الحصول على التقديرات  $Z(t)$  بواسطة تقسيم عدد الأجهزة التي أصيبت بعطّل أثناء فترة محددة (سنة واحدة مثلاً) على الوقت الكلي لتشغيل الجهاز (ويحتسب بالسنوات في المثال).

لقد تم حوسبة  $Z(t)$  في يناير 1970 في المرصد البحري للولايات المتحدة لمجموعة من الميقاتيات السيزيومية وأدت إلى  $kt = Z(t)$  مع  $0,1 = k$  بالنسبة إلى  $t$  تمتد أكثر من سنة واحدة.

وانطلاقاً من النموذج  $Z(t)$ ، تعتبر حوسبة نصف الحياة (HL) أمراً ممكناً [بارسيفال، 1975]؛ وتمثل نسبة احتمال بقاء ميقاتية معينة على قيد الحياة لمدة بنصف حياة 50% ويتيسر تقدير HL بعد إصابة نصف واحد من ميقاتيات مجموعة الاختبار بالعطّل.

### 2.2.2.1.8 مشكلات التعامل مع الأخطاء

كثيراً ما يكون التعامل مع مواصفات الأخطاء مبعث ارتباك هام. فما هو نمط المغايرة التي تُستعمل لقياس الأخطاء؟ وهل يتمثل بيان الخطأ في القيمة  $1\sigma$  أو  $2\sigma$  أو  $3\sigma$ ، أم أنه يعتمد على الأطراف خلال وقت تشغيل معين؟ وهل يعتبر توزيع الأخطاء طبيعياً (غوسي)؟

يكتسي اتباع إجراء جيد وتحديد ما تم قياسه بوضوح بكثير من الأهمية. إذ لوحظ أن توزيع أخطاء الميقاتيات عادة ما يقترب من توزيع غوسي، لكن الطاقة الموجودة في الأجنحة كثيراً ما تتجاوز الطاقة المسخرة لتوزيع عادي.

### 3.2.1.8 دقة النظام

تُعرّف الدقة في التردد في علاقتها بالثانية SI. في حين تُعرّف الدقة في التوقيت في علاقتها بالتوقيت UTC. وقد يكون الاتساق الذاتي للتوقيت و/أو التردد، من وجهة نظر الأنظمة، كافياً لإجراء تشغيل يُكَلَّل بالنجاح.

فإذا قمت بشراء مصدر تردد يفترض أن يقدم، بعد فترة تحمية عادية، إشارة 5 MHz وتقارنها أثناء فاصل معين (من الساعات أو الأيام) مع مرجع تردد، فتحصل على 4,95 MHz؛ فتعتبر أن الدقة (أو عدم الدقة) تبلغ 1% (أي تخالف اسمي قياس على قيمة اسمية). وتبدو العبارة حسب الإدراك المشترك سليمة. ولكنها ليست كذلك حسب إدراك علم القياس. فما تم التعبير عنه بقيمة 1% هو قيمة انحراف تردد مقيس أو فارقته الذي قياس خلال فاصل زمني محدد في تاريخ واحد. ونواجه هنا ثلاث مشكلات احتمالية: ما هي دقة المرجع المستعمل بالنسبة إلى الثانية SI؟ كم تبلغ درجة عدم التيقن الناجمة عن القياس؟ وإذ يتعلق الأمر بقياس واحد في وقت معين، ما الذي يضمن أن ذلك القياس لن يتغير مع مرور الوقت؟

وما سبق لا يعبر عن الدقة طبقاً للتعريف الوارد في التوصية ITU-R TF.686، والذي ينص على أن الدقة هي "درجة تطابق القيمة التي تم قياسها أو احتسابها مع تعريفها (انظر عدم التيقن)" وأن عدم التيقن هو "الحدود لفترة الثقة التابعة للكمية التي تم قياسها أو احتسابها".

ومن الواضح أن مفهوم الدقة في علم القياس لا بد له من الانفصال عن المفهوم العام للدقة حسب الإدراك المشترك. إذ يهدف أي قياس إلى توصيل كمية الاهتمام والوحدة المطابقة لها، ويعبر عن الوصلة بعدد ووحدة. ويستحسن عموماً أن يكون العدد الذي يكمم القياس سليماً أكثر ما يمكن ويعكس إلى حد بعيد القيمة الحقيقية. وبعبارة أخرى، أن يستجيب أي قياس إلى منهج عام للدقة.

وفي علم قياس التردد/التوقيت، يتعلق مفهوم دقة التردد بتأهيل السلوك العام لمعيار معين، بشكل يجعله صالحاً لفترة طويلة جداً. وذلك بالنسبة إلى مدة حياة أنبوب سيزيوم للمعايير التجارية، والمدة التي لا يتغير خلالها معيار مخبري (وإجراءات القياس). وعلاوة على ذلك، وطبقاً للتعريف الوارد في التوصية ITU-R، فإن العدد الذي يمثل الدقة يعبر عن التطابق بين قياسات الكمية وتعريفها. ويوقف التطبيق الصارم لذلك التعريف لاستعمال الدقة على معايير السيزيوم التي تعمل طبقاً لتعريف الثانية، أو بطريقة معينة تضمن قابلية رسم الأثر بتعريف الثانية. وأخيراً، يُعبر عن الدقة بواسطة قيمة عدم التيقن. ففي معايير السيزيوم المخبرية، تؤخذ في الحسبان جميع المصادر الممكنة لعدم التيقن المرتبط بتشغيل المعيار، وينتج التقدير النهائي عن تحليل الشروط العشوائية وعن التفسير الإحصائي للشروط التي قد تكون ذات طبيعة حتمية (الفصل 1).

ومن المؤلف توسيع استعمال مفهوم الدقة في علم قياس التردد/التوقيت ليشمل المعايير غير السيزيومية، مثل المازر H- ومعايير الروبيديوم والليزر، وليشمل أيضاً الأنظمة المستعملة في مقارنة الميقاتيات، مثل LORAN-C، و GPS ... وفي الحالة الأخيرة، قد تكون الدقة في التوقيت مسألة تستوجب الاعتبار كذلك.

### 4.2.1.8 مشكلات العتاد العملية

كان بإمكان هذا القسم بالطبع أن يرد في شكل قائمة طويلة جداً. ولكن نظراً لحدودية المجال، فإننا سنتقصر هنا على عرض قائمة بالقليل من المشكلات الأكثر حدوثاً، وهي التي كثيراً ما يتم تجاهلها.

كثيراً ما يُلاحظ التباين الكبير في التعامل مع الدقة في التوقيت. فعند العمل على سوية النانوثانية، لا بد من معرفة جميع التأخيرات بدقة تفوق الدقة المستهدفة. كما أنه لا بد من معرفة أطوال الكبلات الكهربائية وتغذيات الهوائيات وتأخيرات المضخمات، إلخ. وحيث تُستعمل الكبلات المتناظرة، على مدخل عدّاد فاصل زمني مثلاً، فإن أطوالها الكهربائية يجب أن تكون ذاتها على سوية الدسيمتر وأن تكون لتلك الكبلات انتهائية ملائمة. وتصبح أوقات الصعود للإشارات PPS 1 ونقاط القدرح في غاية الأهمية وليس هناك أي تقييس في هذا الخصوص. وتستعمل بعض

المخابر نقاط الفدح على 0,4 من الفولت، وبعضها الآخر على 0,5 من الفولت، والآخر على فولت واحد. وفي تعريف سلم الوقت، لا بد من وجود سطح طور مُعرّف حيث يتم تحديد التوقيت ومعاوقة الموائمة ونمط الواصل على سبيل المثال.

### • عروات أرضية

في حالة وجود عدة أجهزة موصولة بينياً تطراً مشكلة لوجود التوصيلات الأرضية المتعددة التي يمكن للتيارات العالية الارتفاع المرور عبرها بسبب مقاومة العروة المنخفضة. وتتسبب تلك التيارات في توترات خارجية على دخول الأجهزة المختلفة وخروجها. وقد تؤدي تلك التوترات إلى تدهور أداء مصدر التردد ونظام التوزيع وتجهيزات القياس. ويتمثل الحل الأمثل لتلك المشكلة في تجميع كافة التوصيلات الأرضية في نقطة واحدة. وقد يتطلب ذلك استعمال محولات العزل. ويمكن الحصول على نصائح مفيدة عن كيفية القضاء على هذه المشكلة في أي كتيب يبحث في استعمال المضخمات التشغيلية المنخفضة الضوضاء.

### • حقول مغناطيسية ذات الصلة بالخطوط الكهربائية

تحتوي الأجهزة الكهربائية على التغذية بالطاقة التي عادة ما تنتج حقولاً مغناطيسية شاردة لدى تردد الخط الكهربائي (50 أو 60 Hz). وتم قياس هذا الحقل ليبلغ حجمه  $50 \mu T$  (50 مليغوس). وقد يكون تحديد موضع لمختلف الأجهزة بعناية أو استعمال الحجب المغناطيسي أمراً ضرورياً للحد من ذلك الحقل بشكل كاف حتى لا يؤدي إلى تدهور أداء مصدر التردد (انظر الفصل 5).

### • التحكم في درجة الحرارة

قد لا يكفي التحكم العادي في درجة حرارة الغرفة ليقوم مصدر التردد بأداء يتطابق مع مقدرته. ويبلغ تغير درجة الحرارة عموماً  $\pm 3^\circ C$  أو أكثر من ذلك، ومع أجهزة المراقبة من نمط بين الفينة والأخرى (أو لا شيء) يكون لها دورية تتراوح بين دقيقتين و 20 دقيقة. وإذا اتسم مصدر التردد بما يكفي من الحساسية، فقد يؤدي ذلك إلى حدوث تغير دوري في تردد الخرج وتدهور الكثافة الطيفية لقدرة الطور بتردد يتطابق مع فترة نظام مكيف الهواء. ويمكن لتكييف الهواء العالي النوعية ذي تحكم تناسبي أن يقلص من تغير درجة الحرارة إلى  $\pm 0,05^\circ C$  بالنسبة إلى الغرفة. أما إذا تطلب الأمر توفير حل أقل تكلفة فيمكن استعمال بعض الصناديق الصغيرة التي يتم التحكم في درجة حرارتها. وقد تكون أجهزة حضانة البيض فعالة جداً لهذا الغرض.

### • النوسان

يكون النوسان دائم الحضور في المخابر، ويعود ذلك إلى أنظمة تكييف الهواء ومروحيات الأجهزة. وتبلغ سوياته عادة سوية  $0,2 m/s^2$  على تردد يعتمد على فترة دوران المروحيات والمحركات. وتكون هذه الترددات عالية بالشكل الكافي الذي يمكن أجهزة عزل النوسان من تقليص آثاره. وقد يكون من الضروري وضع مصدر التردد على أساس يعزله عن نوسان البناية. وتبدو آثار النوسان على محلل الطيف المنخفض التردد (تحويل فورييه السريع).

### • استقرار الخط الكهربائي

تتسم بعض مصادر التردد بالحساسية إزاء تغييرات توتر الخطوط الكهربائية. وعلاوة على ذلك، قد يتطلب مصدر التردد عدة أيام أو أكثر لبلوغ تردد مستقر ودقيق بعد حدوث انقطاع في الطاقة. وعلى ذلك الأساس يستحسن تشغيل مصدر التردد انطلاقاً من تغذية بالطاقة غير قابلة للانقطاع (UPS). كما يتوفر في السوق عدد كبير من الوحدات التجارية الجيدة. وتجدر الإشارة إلى أهمية أن يكون قَدّ البطاريات في التغذية UPS كبيراً ليديم خلال أطول انقطاع منتظر وأن تكون البطارية قابلة للتغيير دورياً نظراً لمحدودية حياتها. أما بالنسبة إلى مصادر التردد التي صُمّمت للاشتغال انطلاقاً من نظام بطاريات خلفية، فقد يكون هذا النظام التغذية UPS الوحيدة المطلوبة لها.

### • أجهزة VSWR والكبلات والواصلات

تُعرف أجهزة الواصلات BNC المستعملة بكثرة بعدم الموائمة وتغييرات في التأخير والتغييرات في المراحل. ونسوق مثلاً على مشكلة تتعلق بطول الكبل. فطول الموجة على 5 MHz يبلغ حوالي 60 متراً. وقد تنتج الكبلات بدون انتهاء ذات طول كهربائي  $\lambda/4$  (15 متراً) ذات الأثر الذي تنتجه الكبلات القصيرة، وهو ليس بالشيء النادر بالنسبة إلى الاستعمال العام. وقد تتسبب الكبلات ذاتها في إحداث المشكلات للتغييرات التي تطرأ على الطور وقفزاته عندما يتم تحريكها أو عندما تتغير درجة الحرارة. وأكثر الكبلات التي تتسبب في جلب المصاعب هي الكبلات RG-58، تتبعها بالترتيب الكبلات RG-223 ثم أي كبلات مستقرة بالطور مثل كبلات فلاكسو (Flexo) وأخيراً الكبلات شبه الصلبة بالعزل الكهربائي الجوي. وبالمثل، فإن الواصلات بترتيب النوعية المتصاعد هي BNC، TNC، SMA بالدقة N. ومن الهام أن يتم تقليص VSWR على الكبلات بواسطة استعمال مقاومة الانتهاء المناسبة. إذ يعكس جهاز VSWR عال معاوقة تفاعلية داخل خرج مصدر التردد وقد يحدث تغييراً ما في التردد. وقد تتسبب التغييرات الصغيرة في الطول الكهربائي في تغييرات التردد الشيء الذي لن يحدث



إذا كانت الكبلات منتهية على نحو ملائم. (انظر الفقرة المتعلقة بالعزل). ولا بد من الملاحظة أن معظم الكبلات المستقرة هي كبلات الألياف البصرية، إلا أن نظام الألياف البصرية تستوجب هندسته عناية فائقة حتى يتم توزيع التردد و/أو التوقيت على أفضل وجه.

### • عزل مضخمات الخرج

إن كان خرج معيار التردد موصولاً بجهاز آخر ذي VSWR ضعيف أو يتسم بتسرب في الإشارات الداخلية، فإن التردد قد يتأثر بذلك. ويكتسي عزل مضخمات الخرج بأهمية كبيرة لمنع الأجهزة الخارجية من تغيير تردد مصدر التردد. ولا يحظى البعض من مصادر التردد بالعزل الملائم، لذلك قد تكون المضخمات الخارجية العالية العزل ضرورية. وتكون هذه الأخيرة متضمنة عموماً في نظام التوزيع ذي دخل واحد وعدد من الخرج. ويكون العزل بمقدار 100 إلى 130 dB ملائماً حتى بالنسبة لأفضل مصادر التردد.

## 2.8 معطيات وأمثلة مستقاة من التجارب التشغيلية

### 1.2.8 معايير التردد والتوقيت

تعرض الفصول 1 و 2 و 5 المعطيات المتعلقة باستقرار ودقة معايير التردد الذرية (معايير الروبيديوم والسيزيوم ومازr الهيدروجين). ويمكن استعمال تلك المعطيات كمواصفات أساسية لانتقاء التردد/التوقيت من أجل توفير احتياجات المستعمل.

وتعتبر معايير المرو البلورية بالنسبة إلى العدد من التطبيقات (انظر الفصل 1) مناسبة، خصوصاً إذا كان الاستقرار على المدى القصير مطلوباً (أوقات أقل من 1 s إلى 10 s). وبالإضافة إلى ذلك، أدت التطويرات الحديثة التي أدخلت على مذبذبات المرو (أو الروبيديوم) والموجهة بالإشارة GPS إلى الحصول على وحدات تردد/توقيت تتوفر فيها كل من استقرار المرو على المدى القصير والاستقرار الطويل المدى المشتق من معايير السيزيوم التابعة إلى GPS. وتعتبر الأعمال المنبثقة عن European Frequency and Time Forum، وعن Intentional IEEE Frequency Control Symposium وعن Precise Time and Time Interval Planning and Applications Meetings مصادر ثمينة للحصول على المعلومات بخصوص هذه التطورات.

كما تكتسي المعطيات المتعلقة بالاعتمادية بكثير من الأهمية، خصوصاً بالنسبة إلى المسؤولين عن التخطيط لصيانة وحدات التردد وتأمين أداء موثوق طويل المدى وسلامة الأنظمة. وقد تم تقدير المتوسط MTBF بالنسبة إلى ميقاتيات السيزيوم والروبيديوم والمرو. كما وردت فيها أيضاً النتائج المتعلقة بمتوسط الوقت قبل تصليح (MTTR) وحدة معطلة، بما في ذلك وقت الشحن. وتورد الجداول 8.1 و 8.2 و 8.3 تلك القيم التابعة إلى MTBF و MTTR.

## الجدول 8.1

### قيم MTBF و MTTR للميقاتيات السيزيومية

نموذج (سنة)	$\sum U$	$\sum F$	المتوسط MTBF (سنوات)	المتوسط MTTR (أيام)	عدد الوحدات الكلي
تقرير المستعملين					
HP5061A (1968)	3347	823	4.07 <sup>+0.69</sup> <sub>-0.52</sub>	90	492
OSA 3200 (1976/75)	96	32	3.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.4</sub>	90	25
HP5061A-004 (1973)	118	44	2.68 <sup>+0.41</sup> <sub>-0.31</sub>	90	24
HP5060A (1965) <sup>(1)</sup>	133	42	3.17	90	21
OSA 3000 (1976)	29	10	2.9 <sup>+0.9</sup> <sub>-0.6</sub>	90	14
HP5062 (1973)	1648	319 <sup>(2)</sup>	5.2 <sup>+1.0</sup> <sub>-0.7</sub>	90	408
تقرير المصنعين (انظر التعليق في الفقرة 3.3)					
OSA 3000 (1976)	285	30	9,6	35	97
OSA 3200 (1975)	679	161	4,22	50	149

(1) نموذج قديم، لم يعد يُصنّع.

(2) لا يتضمن هذا النمط الخاص من الميقاتيات إلا أعطال أنبوب الحزمة السيزيومية وغيرها من الأعطال المرتبطة بأعطال أنبوب الحزمة.

الجدول 8.2

قيم MTBF و MTTR لميقاتيات الروبيديوم

عدد الوحدات الكلي	المتوسط MTTR	المتوسط MTBF	$\sum F$	$\sum U$	نموذج
	120	7,6	21	159	(1970) HP5065A
159	90	11,2	52	584	(1973) FRT/FRK
15	90	5,5	13	71	(1972) XSRM
20	-----	1,08	41	44	(1976) POI

الجدول 8.3

MTBF لميقاتيات المرو

ملاحظات	عدد الوحدات الكلي	المتوسط MTBF (سنوات)	$\sum F$	$\sum U$	أول سنة	نموذج
تقرير المستعملين						
	11	48	1	48	1974	B5400
( <sup>1</sup> )	1	8	1	8	1973	B1250
( <sup>1</sup> )	132	37	25	926	1965	B1010
( <sup>2</sup> )	5	11.5	4	46	1970	HP104/105
( <sup>2</sup> )	15	10.5	13	136	1970	R&S XSC/D/S
	52	200	1	223	1972	C60MCS
	1288	191	33	6316	1970	CP12MCS
	139	64	13	834	1975	MT
	235	200	2	1353	1975	K
تقرير المصنعين						
	318	50	27	1352	1974	OSA B5400
( <sup>1</sup> )	20	71	3	2314	1970	OSA B1250
	587	42	104	4383	1970	HCD HCD50

(1) قديم: لم يعد يُصنَّع

(2) وحدات مجمعة في مسح واحد لتشابه النموذج الشديد ولعدم وجود أي انحياز باد.

$$MTBF = \frac{\sum U}{\sum F}$$

$\sum U$  هو المجموع الإجمالي لسنوات تشغيل كافة الوحدات المدروسة، و

$\sum F$  هو إجمالي الأعطال التي تمت معاينتها بالنسبة لتلك الوحدات.

وقد جرى تحليل توزيع الأعطال على مختلف المجموعات الفرعية بالتفصيل بالنسبة إلى المعايير السيزيومية: ويبدو أن الطنان الذري (أنبوب السيزيوم) يتعطل في حوالي 27 إلى 40% من الحالات. وهذه نتيجة هامة، إذ يبلغ سعر أنبوب السيزيوم حوالي نصف سعر المعيار. وتجدر الإشارة إلى أن فترة ضمان المعايير السيزيومية قد تم تمديدها من قبل المصنعين خلال العام الماضي، لتصل إلى 5 سنوات (أو أكثر) في بعض الحالات.

### 2.2.8 أمثلة على المشكلات المطروحة

- ويحاول علماء قياس التوقيت والتردد استغلال المعايير التجارية التي يستعملونها في مخبرهم أحسن استغلالاً (خصوصاً معايير السيزيوم وموازير الهيدروجين) ويعتنون بها عناية كبيرة. وفيما يلي أمثلة على المشكلات التي توصلوا إلى الكشف عنها.
- تم تسجيل وجود ترابطات بين إشارات الطور وميقاتيات السيزيوم التي تشغل الواحدة حذو الأخرى.
- تعتبر الوضعيات البيئية للميقاتيات (درجة الحرارة والرطوبة والمغناطيسية) من العوامل الهامة للاحتفاظ باستقرار جيد للإشارات. وقد تم الحديث، كثيراً عن الرطوبة بالخصوص كعامل محتمل لعدم الاستقرار. وتجدر الإشارة إلى أن المكتب BIPM يطلب في تحقيقه السنوي المعطيات المتعلقة بالتغيرات في الوضعيات البيئية للميقاتيات.
- وقد اعتبر تلوث الهواء [فريون (Freon)، 1990] السبب الأصلي لتدهور مفاتيح تبديل معايير السيزيوم، ولقفزات الطور الصغيرة أيضاً. وفي نفس المرجع، تم التعرف بوضوح شديد على عمليات الضبط والتعديل الإلكتروني بوصفها مصادر لقفزات التردد (بدرجة 10<sup>-13</sup>) وقفزات الطور (إلى حدود العشرات من النانوثوان) في المعايير السيزيومية. وكان من المفروض أن يتم التقليل من هذه المشكلات إلى حد بعيد بواسطة استعمال أنظمة معالجة المعطيات والتقنيات الرقمية في أكثر معايير سيزيوم للتسعينات حداثة.
- لا بد من وضع نظام مراقبة شامل من أجل الحفاظ على تكامل مصادر التردد. يعتبر توثيق المعطيات بشكل يمكن من تفحص التغيرات على المدى الطويل أمراً ضرورياً.
- يجب وضع فلسفة إصلاح/تعويض لإنشاء المقاييس التي تمكن من اتخاذ القرار العقلاني حول ما إذا حان الوقت لتصليح مصدر تردد أو تعويضه أم لا.

وتتمتع قلة من المخابر (VNIIFTRII في روسيا، وUSNO في الولايات المتحدة الأمريكية، إلخ) بتجربة واسعة في مجموعات كبيرة من موازير الهيدروجين التي تشغل بشكل متواصل. ويشكل تجويف وحدات التشغيل الذاتي لتلك المعايير عنصراً حاسماً، إذ قد يكون أصل الانقطاعات وتدهور الكثافة الطيفية للطور [أودوان، 1992].

### 3.2.8 مقارنة الترددات والتوقيت

إستناداً على ما ورد سابقاً، تعتبر عمليات مقارنة وحدات التردد/التوقيت أساسية لتحقيق أنظمة تردد/توقيت جيدة الأداء وموثوق بها. وتستعمل المقارنات الوطنية والدولية بواسطة الاستفادة من الإمكانيات الكبيرة التي توفرها السواتل؛ وقد استعمل علماء القياس (BIPM) المقارنات التي تمت بواسطة السواتل GPS استعمالاً مكثفاً منذ 1983. كما تم البحث مؤخراً فيما تقدمه السواتل GLONASS من إمكانيات (انظر الفصل 2B).

كما تكتسي معايرة نتائج المقارنات بالأهمية والصعوبة في آن واحد، خصوصاً في علم قياس التوقيت حيث تؤثر بشكل مباشر على نوعيات مراجع التوقيت. ويمكن التعامل مع المعايرة بأسلوبين: يتمثل الأول في منهج شامل يقوم على نقل ميقاتية معينة (كانت تستعمل هذه التقنية إلى حدود الثمانينات) أو نقل مستقبل GPS (أو GLONASS). وقد يكون عدم التيقن من نتيجة المعايرة منخفضاً إلى درجة البعض من النانوثوان، ويعتمد ذلك أساساً على العناية التي تحاط بها التجربة.

ويقوم المنهج الثاني [لوفاندوفسكي وتوماس، 1991] على قائمة تتكون من درجات عدم التيقن، مع الأخذ في الحسبان لكافة مصادر عدم التيقن ما أمكن (يجب أخذ الأوجه العشوائية والنظامية في الاعتبار). وتحتوي هذه القائمة على العناصر التي تتصل بما يلي:

- الهوائي (إحداثيات، بيئة، كبل ...)
- المستقبل (التأخير، البرمجيات ...)
- السواتل (الروزنامات، التصحيحات ...)
- المعالجة الإحصائية للمعطيات (عدد المرور، الانحيازات، الضوضاء ...).

وقد بينت معايرة التوقيت والدراسات التي تناولت مقدرات GPS وجود الترابط بين نتائج GPS ودرجة الحرارة [لوفاندوفسكي وتورد (Tourde)، 1990] بأنماط متعددة من المستقبلات. كما لوحظت قفزات الطور التي تصل إلى العشرات من النانوثوان والناجمة عن المستقبلات

GPS في مناسبات عديدة. ومن الواضح أن وجود الإطنابية في مستقبلات GPS وفي مقارنات GPS ضرورياً للحصول على النتائج النهائية في علم قياس التوقيت. ولا تعتبر المشكلة حاسمة في مقارنات التردد مبدئياً. ورغم ذلك، فإن مقارنات التردد بالسوية  $10^{-15}$  أو  $10^{-16}$  ذات تأخيرات معقولة تتطلب مستقبلات أكثر استقراراً من تلك الموجودة حالياً.

### 1.3.2.8 هل يستحسن الارتداد الخطي

إذا كان للبواقي الموجودة حول خط الارتداد طيف من الضوضاء البيضاء، تكون عملية الضبط عندئذ هي الأفضل. وعادة ما يكون هذا هو الحال مثلاً بين معياري السيزيوم: نظراً لكون التقلبات العشوائية ينمذجها طيف FM البيضاء، فإن فارق التردد الأمثل هو المتوسط البسيط. ويساوي طرح الباقي الأول للتوقيت من آخر فارق له وتقسيم الفارق الحاصل بالوقت المتقضي المتوسط - حيث إن المتوسط هو فارق التردد المقيس بين مقيقتين. وإذا تم استعمال هذه الطريقة التي تعتمد على النقاط الطرفية، فلا بد من توخي الحذر إذ قد تكون نقطة منهما أو النقطتين معاً نقاطاً ضالة.

وإذا تم تقدير انسياب تردد معين بين معياري السيزيوم، يكون خط الارتداد إلى التردد عنها خطأً أمثل. وإذا تم ضبط خط الارتداد الخطي على الفوارق الزمنية، فإن ميل ذلك الخط يكون بعيداً عن التقدير الأمثل لأن البواقي ستكون عادة من نمط السير العشوائي. وتتميز الطريقة غير الفعالة التي تقوم على جعل الارتداد الخطي مضبوطاً على الفارق الزمني (أو فارق الطور) من أجل تحديد فارق التوقيت والتردد بكثرة شيوعها بين خبراء التردد/التوقيت. وإذا كانت التقلبات الطويلة المدى بين مقيقتين قد تمت نمذجتها جيداً بواسطة التشكيل FM بالسير العشوائي، فإن الفارق من الدرجة الثانية هو مقدر انسياب التردد الأمثل. ويمكن الحصول على ذلك الفارق بفعالية انطلاقاً من أول نقطة متبقية في التوقيت ومن النقطة المتبقية المتوسطة ومن النقطة المتبقية الأخيرة [NIST، 1990].

ويتم الحديث عن تخالف الترددات أحياناً باعتباره انسياب التوقيت. ولا يعتبر ذلك شيئاً إيجابياً، إذ سيكون هناك دائماً تخالف في الترددات بين مقيقتين معينتين، أي أن الحديث عن تخالفات الترددات يعتبر عادياً، في حين يبدو الحديث عن الانسياب غير ملائم.

### 2.3.2.8 مشكلات ذات غموض دوري

عادة ما يكون اتخاذ التقاطع على الصفر للطور RF مثلاً كواسم وقت شيئاً فعالاً ومرحياً. إلا أن المشكلة الأساسية في هذه التقنية تتمثل في استبانة الدورة التي يتم قياسها. وعلى سبيل المثال تدوم دورة ما على 5 MHz 200 ns. فإذا عُرف التوقيت في أقل من زاوية نصف قطرية واحدة من الطور، يمكن أنذاك استبانة الدورة دائماً. ونظراً لكون انحراف RMS من يوم إلى يوم بين مقيقتين بالسيزيوم أقل من 10 ns، فلا تمثل استبانة الدورة دائماً مشكلة عويصة بالنسبة لتلك المقيقتين. ولكن، مع لوران-C، وحيث تدوم الدورة 10  $\mu$ s، فإن انزلاقات الدورة نادراً ما تحدث. ويشكل تعرف هوية الدورات أحياناً إشكالاً، على الخطوط الأساسية الطويلة التي تستعمل الأنظمة LF و VLF، وذلك بسبب التداخل المتبادل والتشوش الأيونوسفيري.

### 4.2.8 معطيات أخرى وضبط الأنظمة وأفكار ومشكلات عمليات المعالجة

يعتبر استعمال معطيات توقيت الميقاتيات وتخزينها بشكل جيد أمراً صعباً بالنسبة إلى علم قياس التردد والتوقيت. كما أن استعمالها بالأساليب المثلى له أن يوفر في الوقت ويزيد من فعالية وكفاءة الخرج. فالخوارزمية NIST AT1 على سبيل المثال، تسجل المعطيات كل ساعتين، وهي تردد المعايرة التي تحوسب فيها سلم الوقت خدمة لأغراض علم القياس في الوقت الفعلي تقريباً. وقد تنتج تلك الخوارزميات مبدئياً خرجاً يمكن أن يكون أكثر استقراراً من خرج أفضل الميقاتيات المساهمة في المجموعة. ويمثل الكشف عن الشذوذ في كل من التوقيت والتردد مجازة لقصر معدل الاعتيان ذلك. ورغم ذلك، فقد اشتغل ذلك السلم باستمرار مسجلاً تشوشاً بسيطاً فحسب منذ 1968 وله الآن أرضية رفيف من  $5 \times 10^{-15}$ . وينحو المكتب BIPM و USNO منحى أكثر رصانة. إذ يحوسب USNO توقيته الرسمي (USNO) UTC (USNO) بعد شهر من حدوثه مع أخذ أي سلوك شاذ بعين الاعتبار في أية مقيادية مساهمة. وميقاتية المازر الرئيسية المشغلة هي مازر هيدروجين مختار يتميز باستقرار قصير المدى واستقرار متوسطه. ويوجد على خرج المازر ذي التشغيل الحر مركب بأعلى التقنيات الموجودة، يوجه بلطف للقيام بتقدير أفضل للتوقيت UTC. ويؤدي ذلك إلى الحصول على مقيادية مادية بالوقت الفعلي ذات استقرار في غاية الجودة تكون بعد ذلك دائماً ضمن نحو 100 ns من التوقيت UTC. انظر الفصل 6 للحصول على المزيد من تفاصيل حوسبة UTC و TAI.

### 1.4.2.8 النماذج والواقع

شهدت نماذج سلوك الميقاتيات عبر مرور السنين تطوراً مشهوداً. وتصلح تلك النماذج للتقليد ولتقييم الخوارزميات ولتطوير إجراءات الكشف عن الأخطاء مثلاً. وقد تكون النماذج مستقرة كما قد لا تكون كذلك (مثل الضوضاء FM للرفيف)، لكن ذلك لا يعني بالضرورة أن معطيات

الميقاتيّة الفعلية هي معطيات غير مستقرة. فالمعطيات في الواقع ليست إلا تآليفاً من عمليات الميقاتيّة الداخلية المقترنة بالتشوش الخارجي والوضعيّات البيئية. أما صفة عدم الاستقرار فهي لا تعدو أن تكون من خاصيات النماذج وليس من خاصيات الميقاتيّات. ويجب أن يؤدي ذلك إلى الحصول على نماذج مقترنة تفسرها الفيزياء التحتية للميقاتيّات وتفاعلاتها مع العالم الواقعي ما أمكن.

#### 2.4.2.8 أنساق المعطيات

قام BIPM، نظراً لمقارنة الميقاتيّات على الصعيد العالمي، بإنشاء إجراء معياري لتوفير معطيات الدخل للتوقيت UTC. هذا، كما أقدمت مجلة Metrologia على نشر معيار جديد للحصول على المزيد من الدقة في نقل التوقيت انطلاقاً من GPS المستعمل في طريقة الرؤية المشتركة. ويستوجب على مراكز التوقيت التي ترغب في المساهمة أن تتصل بالمكتب BIPM وتعمل بمقتضى تلك المعايير. وقد حدث شيء من الاضطراب في الماضي فيما يتعلق باستعمال المعطيات التي توفرها السواتل GPS مثلاً سواء تم أخذ المعطيات على قاعدة 1 ns أو 0,1 ns. ويتمثل النسق الجديد في 0,1 ns.

#### 3.4.2.8 استرداد المعطيات وتخزينها

عادة ما تستخرج المعطيات في علم قياس F/T بشكل مستمر. وفي حالة ارتفاع معدلات المعطيات وطول كلماتها قد تصل الملفات إلى حالة التضخم الكبير، حتى مع وجود مقدرة تخزين الملفات الحالية. ولا بد من التروي كثيراً في معمارية نظام معين بخصوص ضوضاء القياس واحتياجات التوقيت في الوقت الفعلي وحوسبة السرعة وقد الذاكرة والكشف عن أخطاء F/T ومن ناحية قوته واعتماديته بالإضافة إلى أهداف الدقة والاستقرار المنشودة. ويتطلب أفضل نظام لسلم الوقت النفاذ إلى المعطيات السابقة. فقد تكون ضوضاء القياس عالية مثلاً بشكل يجعل استخراج المعطيات مرة واحدة في اليوم شيئاً ضرورياً وكافياً بالنسبة إلى أغلب تطبيقات سلم الوقت. ويتسم تفاعل المعطيات الحالية بتاريخ الميقاتيّات المساهمة السابق بأهمية كبيرة كجزء لا يتجزأ من علم قياس F/T. ونقترح على المهتمين بهذا المجال أن يتصلوا بمن كانت لهم الخبرة الواسعة فيه قبل القيام بتصميم أي نظام كان.

#### 4.4.2.8 مشكلات التركيب

لا بد من مراعاة المشكلات التالية عند تركيب نظام F/T. كما أنه لا بد من الحد من حجم وضعيات العروات الأرضية عند تزويد مختلف أجزاء النظام بالطاقة الكهربائية، الشيء الذي يتسم بالصعوبة خصوصاً بين نظام قياس بضوضاء منخفضة والميقاتيّات. وكذلك الشأن بالنسبة إلى الحقول المغنطيسية التي ينتجها التيار المتناوب (مثل 60 Hz أو 50 Hz) والتغيرات في سوية التيار المتواصل. وقد يساعد الاستعمال الحذر لدرجة معينة من الحجب المغنطيسي في ذلك. وتنبع أفضل مراكز التوقيت طريقة استعمال الغرف الحرارية للميقاتيّات، ويكون الضبط  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  مفيداً للغاية. في حين يتعين اجتناب مناطق النوسان. ويساعد تكييف الطاقة للتحكم في الخطوط الكهربائية، كما يعتبر العمل بالتغذية المتواصلة بالطاقة أمراً أساسياً. وتتسم كل المسائل بخصوص VSWR بالنسبة إلى جميع كبلات RF الحاسمة بأهمية كبرى. إذ يجب أن يكون للكبلات الموجودة بين الميقاتيّات ومضخمات الخرج سويات العزل بأكثر من 110 dB. ويزود البعض من أحدث الميقاتيّات بعدم الحساسية الممتازة إزاء البيئة.

#### 5.4.2.8 العناية والاستبدال

تحظى مراقبة معلمات الميقاتيّات الحاسمة بأهمية كبيرة في النظام بالتشغيل الطويل المدى. ويساعد ذلك في تقييم إجراءات التصليحات وعمليات اتخاذ القرارات بشأن استبدال القطع. وإذ تتميز حياة معظم الميقاتيّات بالحدودية، فلا بد من تضمين ميزانية التشغيل برنامجاً معقولاً لاستبدال المستهلك منها.

#### 3.8 الخلاصة

تقدم أجهزة التردد والتوقيت فرصاً سانحة للقيام بمختلف التطبيقات. وترتفع درجة الثقة في نتائج القياسات إلى حد بعيد إذا عمد المستعمل إلى تطبيق قواعد الإدراك المشترك والتي تتمثل في الإطنابية والعناية بالإجراءات والقياسات والتقديرية لكافة درجات عدم التيقن والعمل بنصائح مراكز علم القياس.

## المراجع

AUDOIN, C and DIENER, W.A. [1992] "Frequency, Phase and Amplitude Changes of the Hydrogen Maser Oscillation", Proceedings of IEEE Freq. Control Symp., p. 86.

BIPM [1993] "Annual Report of the BIPM Time Section".

CCIR [1990] Report 898-2 "Operational Experience with Reference Clocks in Time Systems", Reports of the CCIR, Annex to Volume VII, Standard Frequencies and Time Signals, Dusseldorf, 1990, pp. 179-188

FREON, G. [1990] "Preventive Maintenance and Stability of Commercial Caesium Clocks", Proceedings of 4th EFTF, p. 549.

LEPEK, A, and WALLS, F.L., [1993] "Cross Correlation Analysis Improves Time Domain Measurements", Proceedings of Freq. Control Symp. 1993, pp 313-320.

LEWANDOWSKI, W. and THOMAS, C [1991] "GPS Time Transfer", Proceedings of IEEE, Special Issue on Time, Vol. 79, p. 991.

LEWANDOWSKI, W. and TOURDE, R. [1990] "Sensitivity to the External Temperature of some GPS Time Receivers", Proceedings of 22nd PTTI, p. 307.

NIST, [1990] "Characterization of clocks and oscillators", NIST Technical Note 1337, March 1990.

PERCIVAL, D.B. and WINKLER, G.M.R. [1975] "Timekeeping and the Reliability Problem", Proceedings of 29th Freq. Control Symp.

STEIN, S.R. [1985] "Frequency and Time, Their Measurement and Characterization", Precision Frequency Control, Vol. 2, p. 191, edited by E.A. Gerber and A. Ballato, Academic Press, New-York (1985).

الفصل 9

توقعات مستقبلية

المحتويات

180	..... المقدمة	1.9
180	..... نظرة عامة	2.9
180	..... أجهزة الخلايا الغازية	3.9
181	..... معايير الحزمة السيزيومية	4.9
182	..... موازر الهيدروجين	5.9
183	..... معايير أيونية مفتوحة	6.9
184	..... نافورة السيزيوم	7.9
184	..... مذبذبات المرو	8.9
185	..... مذبذبات مستقرة بالنسبة إلى GPS	9.9
186	..... مذبذب مستقر بواسطة طنان من الصفيح المبرد	10.9
186	..... معايير التردد البصرية	11.9
186	..... الخلاصة	12.9

## 1.9 المقدمة

أورد الفصلان 1 و 2 من هذا الكتيب كل الشروحات ومبادئ التشغيل والأداء الحالي بالنسبة إلى معايير التردد الذرية الموجودة وهي: معايير الحزمة السيزيومية وخليية غاز الروبيديوم ومازر الهيدروجين، لذلك ستكون الشروحات التالية مقتضبة. ويغطي هذا الفصل ما يمكن أن ينتظر من تلك المعايير مستقبلاً بالإضافة إلى بعض المعايير الأخرى الجاري تطويرها والتي قد تيسر في المستقبل. وسيتم وصف الأجهزة الجديدة وتقدير أدائها. وتحتوي تلك المعايير الجديدة على الأجهزة الأيونية المفخخة ومعايير بنافورات السيزيوم والمذبذبات المضبوطة على GPS (نظام الموقعة العالمي) وأجهزة تشتغل ضمن مجال الترددات البصرية. هذا، كما سيتم التعرض إلى مذبذبات المرو الدقيقة إذ إنها تعتبر عناصر جوهرية في المعايير الذرية والمعايير الأيونية والمعايير المستقرة بالنسبة إلى GPS. كما نتعرض أيضاً إلى المذبذبات المستقرة بطئان العازل الكهربائي التصريدي. إذ تتمتع هذه الأخيرة باستقرار جيد قصير المدى ولها أن تصح عناصر ذات أهمية في المعايير الأعلى أداء مستقبلاً.

## 2.9 نظرة عامة

سجلت الفترة الأخيرة الكثير من التقدم في العديد من المجالات المتعلقة بمعايير التردد وتبشر التوقعات المستقبلية بالكثير في كل من المعايير المخبرية والمعايير التجارية. وما فتئت أهمية الاتصالات والاتصال المعطياتي تتزايد وتوجه الأعمال التي تناولت العديد من أوجه معايير التردد التجارية. كما أنه من المزمع استعمال المذبذبات البلورية معايير خلية الغاز المضبوطة على GPS بكثرة في التطبيقات ذات المتطلبات المتواضعة. إلا أن السعي إلى تحقيق المزيد من الدقة والاستقرار لا يزال من المهام التي تلقيها المخابر على عاتقها.

وتقوم الأهداف الأساسية للمعايير التجارية في المستقبل على كلفة أقل وقد أصغر وأداء أعلى واعتمادية متقدمة. وتعتبر الكلفة الأقل والقد الأصغر بالخصوص في منتهى الأهمية، وذلك في تطبيقات الاستعمال الكثيف بشكل خاص مما يجعل مواصلة تطوير النممة الدقيقة والتكامل المتزايد للعناصر الإلكترونية من الأمور الحاسمة. وسيكون من المطلوب دائماً تحقيق المزيد من الأداء في كل من الاستقرار والدقة وقد تم تحقيق تقدم كبير في هذا الميدان.

وتتجه الجهود المبذولة في تطوير المعايير المخبرية نحو تقليص الآثار النظامية أو حتى القضاء عليها ومن ثم تحسين الدقة المحتملة والاستقرار الطويل المدى. وقد بدأت العناية بالاستقرار القصير المدى إذ يتطلب ذلك التحقق من الدقة والاستقرار في أوقات قياس معقولة القصر، بالإضافة إلى تلك المطلوبة للنقاء الطيفي الجيد.

## 3.9 أجهزة الخلايا الغازية

تعمل معايير التردد بالخلية الغازية، كما ورد في الفصلين 1 و 2، بتمرير حزمة من ضوء الضخ عبر خلية غازية تحتوي على بخار الذرة التي هي قيد الاستعمال (وتكون عادة ذرة الروبيديوم أو الذرة السيزيومية)، مرفوقة دائماً بغاز الدارئي في تجويف الموجات الصغرية المحفزة. وقد صُمم النظام لتكون كثافة ضوء الضخ المنقولة عبر الخلية أدنى ما يمكن عندما يكون تردد تحفيز الموجات الصغرية يتطابق مع تردد الطنين الذري.

وتفوق كمية معاير الروبيديوم الحالية المبيعة كمية غيرها من معايير التردد الذرية بكثير وذلك بسبب تميز الأولى بانخفاض التكلفة والقد أساساً. وهي ما فتئت تحظى بالأهمية في الاتصالات. ويتوسط أدائها عادة معاير المرو ومعاير الحزمة السيزيومية. وقد تتميز الوحدات المصممة على نحو خاص بمقاومة للصدمات وللنوسان أكبر بكثير من وحدات المرو. وينطبق ذلك على الانسياقات الناجمة عن التغيير الذي يدخل على توجيه حقل الجاذبية الأرضية (g). وتحتل تكلفة تلك الوحدات وقودها أهمية قصوى ويتم التقليص فيها باستمرار.

وتُضخ معظم وحدات الروبيديوم الحالية ضخاً بصرياً بواسطة مصباح RF مُحفَّز. ويبين الجدول 9.1 أدائها النمطي. وتقوم عملية التطوير القادمة على تعويض المصباح RF المُحفَّز بليزر في حالة صلبة مناسبة. وقد يؤدي الضخ الليزري إلى الحصول على قد أصغر وربما قد يؤدي ذلك إلى الأداء الذي يبينه الجدول 9.1.



## الجدول 9.1

## أداء المعايير Rb المتراصة

معلومة	أداء (Rb متراس مع مصباح)	أداء (Rb متراس مع ليزر)
التقادم ( $^{11-10}$ /شهر)	من 1 إلى 2	من 1 إلى 2
الحساسية g ( $^{11-10}$ )	<1	<0,2
أرضية الرفيف ( $^{13-10}$ )	من 3 إلى 5	1
الحساسية إزاء درجة الحرارة ( $C/^{13-10}$ )	<6، (لكن غير خطية)	<1
نقاء طيفي، dBc في عرض نطاق يبلغ 1 Hz على:	80- 145- kHz 10	80- 145- kHz 10
استقرار قصير المدى:	3	<1
$^{12-10}$ (s 1 وقت التكامل)	3	<1
$^{13-10}$ (s 100 وقت التكامل)		
حجم	16	6
3in	260	100
3cm		

قد يمكن استعمال الليزر لضخ خلية الروبيديوم ولتصميم النظام من أجل أداء أمثل عوضاً عن القَدّ الصغير من الحصول على استقرار قصير المدى ربما يبلغ  $\tau^{-1/2} \times 2 \times 10^{-14}$ ، حيث  $\tau$  هو وقت التكامل. كما يمكن الحصول أيضاً على أرضية منخفضة جداً للرفيف. ويمثل هذا النوع من الأجهزة مترشحاً جيداً لمصدر دولاب الموازنة بالنسبة إلى المعايير الذرية العالية الاستقرار المتقدمة وبالتالي بالنسبة إلى المعايير ذات الأهمية الكبيرة المحتملة.

وتتركز الأعمال حالياً على جهاز الخلية بغاز السيزيوم المضخ بالليزر. وقد يكون هذا المعيار أصغر نوعاً من أجهزة الروبيديوم المضخّة بالمصباح RF بسبب طول الموجة الأقصر لخط السيزيوم بالأساس، 3,26 سنتيمتر مقابل 4,39 سنتيمتر بالنسبة إلى الروبيديوم، وبسبب القَدّ الصغير لليزر الذي تمت مقارنته بالمصباح RF المُحَفَّز. ولا بد من مقارنة الأداء بأداء معيار الروبيديوم، إلا أن أداء التقادم قد يكون أضعف نظراً لارتفاع النسبي للنسبة من الحجم إلى المنطقة المساحة في خلية صغيرة. وقد تتمكن مجموعة عالية التكامل من العناصر الإلكترونية، مع مجموعة صغيرة من العناصر المادية، من تقليص الحجم إلى 10 سنتيمترات أو أقل وربما قد تؤدي إلى تخفيض التكلفة إن كان حجم التصنيع كبيراً. ويمكن استعمال تلك المعايير في المستقبل بكثرة.

وتتوفر لسوق أجهزة الخلية الغازية التجارية الكبير إمكانية المزيد من التوسع إذا تم التمكن من تقليص كل من تكلفة تلك الأجهزة وقَدّها. ويحتل الضخ الليزري أهمية بالغة بالنسبة لكل من تقليص القَدّ والأداء، فقد يمكن ذلك من تخفيض التكلفة مقارنة بتكلفة المصباح RF المُحَفَّز إن كانت تكلفة الليزر معقولة. كما يمثل تسير الليزر وسعره عنصراً حاسماً، ولا شك أنهما يعتمدان على حجم كبير من الوحدات، الشيء الذي يجعل الكيفية التي ستتطور بها الحالة العامة مستقبلياً غامضة. ومن الدلالات ما يؤكد وجود مصنع ليزر واحد على الأقل يهتمه الاتجار في معايير التردد بالضخ الليزري بشكل أو بآخر. إذ قد يتمخض هذا الأخير على تحسينات عميقة في مجال الاستقرار القصير المدى مقارنة بالمعايير Rb بالخلية الغازية التقليدية.

## 4.9 معايير الحزمة السيزيومية

تعمل المعايير بالحزمة السيزيومية، كما ورد الذكر في الفصلين 1 و 2، بتمرير حزمة من الذرات السيزيومية، تكون قد تم انتقاء حالاً، عبر تجويف الموجات الصغيرة المُحَفَّز. وتوضع الذرات بمجرد خروجها من التجويف إلى عملية انتقاء أخرى للحالات بغرض اختيار تلك التي قامت بإجراء انتقال للموجات الصغيرة وحصلت في نهاية الأمر على إشارة بأنها عظمى عندما يتساوى تردد تحفيز الموجات الصغيرة مع تردد طنين الذرات. ويستعمل البعض من أنماط تشكيل التردد أو الطور عادة لتحفيز الموجات الصغيرة للتمكين من التحديد الدقيق لمركز الخط.

تتسم معايير تردد الحزمة السيزيومية بالأهمية حيث يتطلب الأمر توفير كل من الدقة وقابلية إعادة الإنتاج العاليتين والانسياب الطفيف. وتتميز الوحدات التجارية ذات أعلى أداء في السوق حالياً بدقة تفوق  $10^{-13}$ ، وبانسياب أقل من  $10^{-15}$  بكثير في اليوم الواحد، وبأرضية رفيف تقل عن  $10^{-14}$ ، واستقرار قصير المدى يفوق  $\tau^{-1/2} \times 8 \times 10^{-12}$  وبمعامل حرارة يقل عن  $10^{-15}$  للدرجة المثوية الواحدة. وتقدر كلفة معايير الحزمة السيزيومية من الأداء العالي بالسعر المعتدل.

ويستعمل الضخ البصري بالليزر للأجهزة بالحزمة السيزيومية، في الوقت الحاضر، للحصول على انتقاء الحالات والكشف عن الذرات في عدد من المخابر. ويوجد المعيار الجديد بالضخ الليزري الآن في NIST (NIST-7) قابلاً للتشغيل ويقدم أداءً متميزاً. ويعمل العديد من المخابر الأخرى في مجال أنابيب الحزمة السيزيومية بالضخ البصري حالياً، بما في ذلك بعض الأعمال التي تتعلق بأنابيب صغيرة خاصة بالتطبيقات التجارية. وسيتم استعمال الضخ الليزري في المعايير التجارية من تحسين دقتها ربما بمعامل يتراوح من 3 إلى 5 وتحسين استقرارها على المدى القصير بأكثر من 10. ويعود تحسن الدقة إلى عوامل عديدة. ويمكن تقليص جذب رابي ورامساي إلى حد كبير فتكون تجانسية الحقل C أفضل. وتعود تلك التحسينات إلى غياب مغنطيسيات الانحراف في أنبوب الضخ البصري وإلى التحسن الذي يدخل على تناظر عمليات انتقال الموجات الصغيرة القريبة من الانتقال الرئيسي في حالة استعمال الضخ السليم. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن إجراء تصحيحات أفضل على زحزحات التردد بسبب زحزحة طور التجويف وعامل النسبية (زحزحة دوبلر من الدرجة الثانية). ويتم الحصول على التحسينات في الاستقرار القصير المدى بسبب الاستعمال الحكيم للسيزيوم في الحزمة. ويكتسي الاستقرار القصير المدى المحسن منه خصوصاً بالأهمية نظراً لكونه يمثل أضعف أداء في معايير الحزمة السيزيومية التجارية الحالية. ويؤدي تحسين الاستقرار القصير المدى بمعامل 10 إلى التقليص من الوقت الذي يستغرقه القياس بدقة معينة بمعامل 100. وسيكون من المفروض توفير مجموعة من 100 معيار غير محسنة الاستقرار للحصول على ذات الدقة خلال الوقت ذاته! ومرة أخرى يتسم تيسر الليزر العالي الاعتمادية بالأهمية القصوى في هذه الحالة.

وقد يتمكن سوق معايير الحزمة السيزيومية المنخفضة التكلفة، وبالتالي المنخفضة الأداء من التوسع نظراً للتزايد المتواصل لمتطلبات التوقيت والمزامنة مع ارتفاع معدلات الاتصالات. إلا أن مذبذبات المرو المستقرة حسب GPS، مثلما سيرد ذكرها لاحقاً في الفصل، قد تستحوذ على قسط لا بأس به من ذلك السوق.

## 5.9 موازر الهيدروجين

تستعمل موازر الهيدروجين الفعالة الموصوفة في كل من الفصل 1 والفصل 2 لبث ذرات الهيدروجين المحفزة في التجويف لإنتاج مذبذب فعلي في التردد الموسوعي الدقة للهيدروجين، 1420 MHz، وذلك على خلاف الترددات المتفاعلة التي تعرضنا للنقاش لها إلى حد الآن. فهي تقدم أفضل استقرار قصير المدى يتيسر حالياً انطلاقاً من معيار ذري ضمن الموجات الصغيرة. ويكون الأداء النمطي، باستعمال  $\text{mod } \sigma_y(\tau)$  كقياس للاستقرار، بنحو  $\tau^{-1/2} \times 2.2 \times 10^{-14}$  للمرات الأقصر من حوالي 20 ثانية و  $\tau^{-3/2} \times 10^{-13}$  إلى أن يتم الحصول على أرضية الرفيف أو على الانسياب. ويتجاوز أفضل استقرار تم الحصول عليه عادة نوعاً ما  $10^{-15}$ . وتمثل موازر الهيدروجين الفعالة معايير جيدة عندما يتطلب الأمر توفير درجة عالية من الاستقرار القصير المدى، مثلما هو الشأن بالنسبة إلى القياس بالتداخل ذي خط أساس طويل جداً (VLBI) وبالنسبة إلى غيرها من تطبيقات علم الفلك الراديوي.

ويعود سحب التردد للمازر إلى عطب يصيب التوليف التجويفي يؤدي إلى انسياب التردد كلما انساق التجويف مع الوقت. ولكن توجد هناك عدة تقنيات للتوليف التجويفي الذاتي التي يمكنها بالفعل القضاء على مصدر الانسياب ذلك. وتتراوح معدلات انسياب الوحدات بدون التوليف التجويفي الذاتي عادة بين  $10^{-15}$  لليوم الواحد و  $10^{-14}$  لليوم الواحد.

كما توجد هناك زحزحة تردد ناجمة عن تصادمات ذرات الهيدروجين بحيطان مستودع التخزين التي تبلغ حوالي  $2 \times 10^{-11}$  بالنسبة إلى الموازر النمطية. وتحدد الدقة المطلقة لكبر مازر الهيدروجين حالياً بحوالي  $10^{-12}$  نظراً لعدم المعرفة الكاملة بزحزحة الحيطان تلك.

وتتسم موازر الهيدروجين الفعالة بارتفاع تكلفتها نسبياً في حين لا تتمتع بالرواج الكبير في الأسواق في هذه الأيام.

وتتشابه موازر الهيدروجين المنفعلة مع أجهزة الخلايا الغازية وبمعايير الحزمة السيزيومية التي تعرضنا إليها آنفاً. ويعتبر استقرارها القصير المدى أضعف بكثير من استقرار موازر الهيدروجين الفعالة، ولكنها أفضل نوعاً ما من المعايير السيزيومية التجارية ذات الأداء العالي في الوقت الحاضر. ويكون لدى الموازر المنفعلة ذات عدم التيقن من زحزحة الحيطان التي تكون للموازر الفعالة، غير أن السحب التجويفي يكون أصغر بكثير مثلما هو الشأن في غيرها من المعايير المنفعلة الأخرى. وقد تناولت الأعمال لفترة معينة في الولايات المتحدة الأمريكية الموازر المنفعلة إلا أن هذه الوحدات التجارية الأمريكية ليست معروضة في الأسواق.

ورغم ذلك، فإن الوحدات التجارية تعرضها للبيع حالياً شركة روسية. ولا تحظى هذه المعايير بانتشار واسع في الأسواق.

كما تناولت الأعمال موازر الهيدروجين الفعالة الباردة (التصريديّة) في العديد من الأماكن. ويُنتظر من هذه الأخيرة أن يكون لها استقرار قصير المدى في منتهى الجودة، مما قد يمكن من بلوغ أكثر من  $10 \times 10^{18}$  في حوالي 1000 ثانية، واستقرار جيد بالنسبة إلى تغيرات درجة حرارة المحيط. ويعتبر التبريد المطلوب معقداً نوعاً ما لذلك ستكون تلك الموازر مرتفعة السعر إلى حدّ ما. كما أنّها قد تكون مذبذباً جيداً لدولاب الموازنة بالنسبة إلى البعض من المعايير المنفصلة المتقدمة.

## 6.9 معايير أيونية مُفخّخة

المعايير الأيونية المُفخّخة هي أجهزة تستعمل بنية رباعية الأقطاب RF (فخ بول) للإيقاع في الفخ بعدد من الأيونات تتراوح بين الأيون الواحد والكمية الكبيرة منها (حوالي  $10 \times 10^7$ ). ويستعمل نمطان من الأفخاخ، أحدهما له الإلكترونات الحلقية والإلكترونات الكيسولية، والآخر له أربعة إلكترونات صولجانية موضوعة بشكل متناظر وإلكترونات طرفية. ويخضع أيون وحيد بحمولة خاصة إلى نسبة الكتلة في حقل RF وحقل التيار DC المركبين لواحد من ذلك الفخ أو الآخر لمتوسط قوة موجهة نحو مركز البنية الهندسي. وإذا تم إخماد الأيون بشكل لرج، فإنه يتوقف عن الحركة كلياً تقريباً هناك. وإذا تم تفخيخ العديد من الأيونات، فإن الحقلين المركبين لرباعي القطب وحمولة فضاء الأيونات يؤديان إلى تكوين سحب أيوني في ظل وجود درجة معينة من التبريد أو التخميد اللزج. وقد تحتفظ البنية الحلقية والبنية الكيسولية بسحاب كروي في حين تحتفظ البنية الصولجانية بسحاب ممتد. وفي كل الحالات، يمكن استجواب الأيونات المفخخة بتلك الطريقة لفترات طويلة جداً، الشيء الذي ينجم عنه خطوط متناهية في الضيق للطينين.

وتتمثل الطريقة المستعملة في التبريد اللزج في إدخال الهليوم في الفخ بضغط منخفض ( $10 \times 10^{-6}$  تور). وقد تخسر من ثم الأيونات الثقيلة التي تنوس في حقل الفخ RF الطاقة الحرارية بواسطة التصادم بذرات الهليوم الخفيفة. أما التبريد الليزري فهو طريقة أخرى يجري استكشافها بنجاح.

وفي معايير الأيونات المفخخة بالزئبق 199، يُستعمل الضخ البصري بالمصباح RF المُحفّز أو بمصدر ليزري لإعداد الحالات ومراقبة طنين الموجات الصغرية على 40 GHz. وقد بلغت عروض الخطوط إلى أقل من 0,1 Hz. ويعود أكبر تحالف للتردد النظامي عند تفخيخ عدد كبير من الأيونات إلى أثر السرعة النسبوي (زحزحة دوبلر من الدرجة الثانية) الناجم عن حركة الأيونات المستحثة في حقل التفخيخ RF. وتبلغ الزحزحة بالنسبة إلى السحاب الكروي، الذي يحتوي على حوالي  $2 \times 10^6$  من الأيونات، نحو  $2 \times 10^{-12}$ . وتتقلص تلك الزحزحة إلى حد بعيد باستعمال السحاب الممتد الموجود في الفخ من النمط الصولجاني أو قد تتلاشى فعلياً باستعمال أيونة واحدة أو خط من الأيونات الوحيدة. وينجم أيضاً عن استعمال التبريد بالهليوم زحزحة التردد المستحثة بالتصادم من حوالي  $10 \times 10^{-13}$ ، وهو القدر الفعلي الذي يمكن تحديده بواسطة تقدير استقرائي تجريبي يصل إلى ضغط من الهليوم المعلوم.

وقد تم بناء العديد من المعايير بالأيونات المفخخة باستعمال أيونات الزئبق 199 بالمصباح RF المُحفّز للضخ البصري. وتعمل زممرتان من الباحثين على الأقل حالياً بنشاط في هذا المجال. كما قد تمت البرهنة على استقرار قصير المدى في منتهى الجودة يبلغ حوالي  $10^{-13} \times \pi^{-1/2}$  مع مصباح RF مضخ وسحاب أيون زئبقي مفخخ في فخ رباعي القطب من نمط صولجاني ثنائي الأبعاد.

ويمكن أن تتسبب الجزئيات الغازية الخلفية، كالهيدروكربونات الثقيلة، في زحزحات تردد كبيرة بشكل قد يؤدي ذلك إلى ضرورة التشغيل التصريدي للحصول على أعلى قدر من الاستقرار. وتشير عمليات الحساب إلى أن الأيون المفخخ بمفرده بواسطة التبريد الليزري والضخ التصريدي من أجل التخلص من الغاز الخلفي قد يؤدي إلى حدوث تحالفات عن تردد طنين الأيون الحر بدرجة من الانخفاض تصل إلى  $10 \times 10^{-17}$ .

ولا ترتفع تكلفة معايير الأيونات المفخخة بدون التبريد التصريدي أو الضخ البصري الليزري إلا نوعاً ما مقارنة بتكلفة المعيار السيزيوم ذي النوعية العالية. في حين تكون تكلفة زيادة الضخ الليزري إلى الأيونات الزئبقية باهظة وضخمة بالنسبة للوضع التقنية الحالية.

ولا يتوفر أي من هذه المعايير التجارية في وقتنا الحاضر. ولكن قد يتم توفير نموذج منها في السوق يستعمل السحاب الممتد الزئبقي 199 الذي يضح المصباح RF ويرده غاز الهليوم المنخفض الضغط بأداء قد يكون أعلى من أداء معايير الحزمة السيزيومية العالية النوعية بتكلفة ليست باهظة.

## 7.9 نافورة السيزيوم

نافورة السيزيوم هي عبارة عن معيار منفعل يستعمل التبريد الليزري وتقنية معينة للمعالجة حتى يقذف بكرة شديدة البرودة (سوية ميكروكلفن) من الذرات السيزيومية، التي خضعت لعملية انتقاء الحالات، إلى الأعلى نحو تجويف الموجات الصغيرة المُحفزة. ومن ثم تسقط الذرات في التجويف ذاته تحت تأثير الجاذبية ويتم تقييم حالتها لمعرفة ما إذا كان انتقال الموجات الصغيرة قد تم أم لا. وترى الذرات نبضة ثنائية من الموجات الصغيرة التي هي تنشيط رامساي العادي. وعند تحقيق زمن العبور الذي يمتد خلال ثانية واحدة بين التفاعلين اللذين حدثا مع التجويف، يؤدي ذلك إلى عرض خطي يبلغ 0,5 Hz من الضيق مصحوباً بنسبة جيدة من الإشارة إلى الضوضاء. وتنكب العديد من مجموعات العمل حالياً على هذه الأجهزة والتطورات التي تتوصل إليها تتسم بالسرعة.

وينتظر أن تبلغ الدقة  $10 \times 10^{-15}$  أو أفضل من ذلك. ويتمثل العائق الأساسي في زحزحة تردد تابع للكثافة ينجم عن التصادمات بتبادل الدومان. وقد تكون تلك الزحزحة كبيرة عندما تكون درجات الحرارة منخفضة وعند استعمال الكثافات المعتدلة. ويمكن القيام بالتقدير الاستقرائي إلى حدود الكثافة المعدومة بواسطة سلسلة من القياسات وتفترض قيمة الدقة الواردة آنفاً تطبيق هذه العملية. ويتم الحصول على استقرار التردد على المدى القصير من  $\tau^{-1/2} \times 3 \times 10^{-14}$  مع النسبة من الإشارة إلى الضوضاء التي كان قد تم الحصول عليها سابقاً. وستكون آثار التسريع وتوجيه الأجهزة كبيرة باستعمال مثل تلك الذرات الطبيعية. وكنتيحة لذلك، فلن يعمل معيار نافورة السيزيوم إلا في موقع حيث تكون فيه آثار البيئة ضعيفة. ولا تيسر في الوقت الحالي أية معايير تجارية.

## 8.9 مذبذبات المرو

يكون أداء مذبذبات المرو العالية النوعية حالياً محدوداً بالطنان وبالمراقبة البيئية للطنان وللدارات الحاسمة المصاحبة له. وتعتبر البلورات BVA المتكونة من بنية كاملة من المرو بالكترودات متباعدة عن سطح البلور أفضل طنانات متيسرة اليوم من حيث الاستقرار والانسياب. ولكن تكلفتها تصنيعها للأسف تفوق تكلفة تصنيع الطنانات التقليدية التي تتكون إلكتروناتها مباشرة على البلور.

ولا تقتصر أهمية مذبذبات المرو الدقيقة على التطبيقات بالأسلوب الذاتي فقط، بل تعود أهميتها أيضاً لكونها عناصر الخرج الأساسية لمعظم المعايير الذرية. وتوفر تلك المذبذبات، في المعايير المنفصلة، القاعدة لإشارة استجواب الموجة الصغيرة. كما أنها تعتبر أساسية بالنسبة إلى مازر الهيدروجين الفعال نظراً للانخفاض الكبير لسوية طاقة ذبذبة الهيدروجين الفعلية. ويكون سلوك تردد المعيار خلال فترات طويلة في كل الحالات تابعاً لسلوك الطنين الذري أو الذبذبة الذرية في حين يقوم دولاب المرو للموازنة بالتحكم كلياً في ذلك السلوك خلال الفترات القصيرة. وتعتمد الثابتة الزمنية، التي تحدث خلالها عملية الانتقال، على ضوضاء المرجع الذري ومذبذب المرو ويتم اختيارها من أجل استمثال الأداء العام. وكلما كان المذبذب أفضل نوعية كلما كان الأداء العام أجود.

أما في المعايير المنفصلة، فإن الضوضاء لدى التوافق الثاني للتردد المستعمل بغرض تشكيل التردد أو الطور المقصود للعثور على المركز الخطي تسبب المزيد من الضوضاء لا يمكن التمييز بينها وبين ضوضاء الطنان الذري. ويحد ذلك كثيراً من إمكانيات المعايير العالية الأداء. وقد تم وضع تقنية جديدة مؤخراً للتقليص من هذا الأثر في NIST. وتتكون هذه التقنية من مرشاحين مفلّين، يوضع مرشاح واحد على كل جانب من تردد المذبذب ومفصول عنه بضعف تردد التشكيل المقصود، وتهدف إلى توهين تشكيل الضوضاء بشكل فعال إلى أبعد الحدود. ويمكن التقليص أكثر من أثر الضوضاء الهامشية بواسطة معالجة مناسبة لإشارة استجابة الطنان الذري، وذلك كما بينته مجموعة من الباحثين في فرنسا.

ويبين الجدول 9.2 مختلف أداء العديد من المذبذبات. ويقدم المذبذب BVA ذو 5 MHz المنفوق الدقة أفضل أداء عام على الإطلاق، ويحلّ بعده في المرتبة المذبذب BVA ذو 10 MHz. أما المذبذب الثالث فيستعمل طناناً بقطع تقليدي SC ذي 10 MHz. ويبلغ ضعف معدل تقادم أفضل المذبذبات أحياناً  $2 \times 10^{-12}$  في اليوم الواحد، غير أنه يكون في أغلب الأحيان بين 10 و  $50 \times 10^{-12}$  في اليوم الواحد. ويلاحظ في بعض المناسبات سويات أرضية الرفيف يصل انخفاضها إلى حدود  $4 \times 10^{-14}$ . ويحدد الطنان أساساً هذه النتائج طالما كان تصميم الدارات متقناً.

وتتراوح الحساسية الحرارية للمذبذب الكامل بين 0,2 و  $40 \times 10^{-12}$  في الدرجة المئوية الواحدة. ولا شك أن نتائج درجة الحرارة تتغير كثيراً وذلك حسب تصميم وبناء المذبذبات والفرن الضروري الذي يحتوي على البلور والبعض من الدارات.

## الجدول 9.2

## أداء مذبذبات المرو

معلمة	مذبذب متفوق الإحكام ذو 5 MHz	مذبذب متفوق الإحكام ذو 10 MHz	مذبذب محكم ذو 10 MHz	مذبذب مستقبلي متفوق الإحكام
تقادم (10 <sup>-12</sup> في اليوم)	من 2 إلى 7	من 5 إلى 50	<100	1
الحساسية g (10 <sup>-10</sup> g)	1	0,5	<10	<1
أرضية الريف (10 <sup>-13</sup> )	من 0,4 إلى 2	من 1 إلى 3	10	من 0,1 إلى 0,5
الحساسية الحرارية (في الدرجة المئوية الواحدة)	من 2 إلى 5	<50	<400	<1
نقاء طيفي dB لعرض النطاق من 1 Hz على: 1 Hz 100 kHz	130- 180-	120- 155-	105- 162-	145- 165-

ويدل الحصول على أداء تقادم وريف في منتهي الجودة من حين إلى آخر على إمكانية إدخال تحسينات كبيرة على الطنانات، غير أن العملية و/أو العتاد ليس متحكماً فيها بما فيه الكفاية حالياً.

وتتضمن التحسينات التي تحتاجها مذبذبات المرو توفير عتاد أفضل من أجل المذبذبات ويكون مرفوقاً بالعامل Q الأعلى الملائم؛ كما يحتاج ذلك إلى تفهم وتقنية متطورين لسطح إلكتروود المرو البيئي؛ وتطوير تصاميم الفرن والختم المحكم السد حتى يتم التخلص من الآثار البيئية. وأخيراً تحتاج الدارات الإلكترونية إلى عملية التطوير. وقد يمكن منهج طنان السلسلة المتعددة، الذي سجلت الشركة واستينغهاوس (Westinghouse) مؤخرًا براءة اختراعه، من الحصول على أداء عام أفضل كما يمكن استعماله في أكثر التطبيقات حزمًا.

ويبين الجدول 9.2 أيضاً الخصائص التي يمكن توقعها من المذبذبات المستقبلية المتفوقة الدقة.

## 9.9 مذبذبات مستقرة بالنسبة إلى GPS

وفي حالة الاستقرار الكافي لمذبذب ما، فإنه يمكن استعماله في العروة المحكومة الطور بمستقبل GPS ويمكن تقدير متوسطه خارج تغيرات التردد، أي قابلية التيسر الانتقائية الموضوعة عمداً على الإشارات GPS. وإذا كان المذبذب محكوماً بمتوسط التردد GPS بخوارزميات الترشيح المناسبة، فإنه يمكن تحقيق استقرار جيد طويل المدى بالنسبة إلى GPS. ويمكن استعمال أي مذبذب أو معيار يتميز بنوعية عالية مثل: المرو، وبالخلية Rb، وبالجزمة Cs، وبالهدروجين، إلخ.

ويمكن الحصول على عدم التيقن الزمني RMS بالنسبة إلى GPS من حوالي 2 ns بسيزيوم عالي النوعية وبمستقبل جيد. وقد يبلغ عدم التيقن المتوقع في مذبذب مرو عالي النوعية 20 ns. ويعتبر استقرار التردد التابع إلى GPS ذاته عامل تحديد. وتشير القياسات الحالية إلى أن GPS له انحراف آلان يبلغ حوالي 2 × 10<sup>-14</sup> ليوم واحد من وقت التكمال. كما يكتسي استقرار GPS الزمني أيضاً بأهمية كبيرة. وتسمح اللوائح الحالية بتخالف RMS من 340 ns غير أن القياسات تعطي قيمة تبلغ حوالي العشر من ذلك التخالف.

وتتميز تلك التقنية بانخفاض التكلفة نسبياً عند استعمال مذبذب مرو أو معيار بخلية غازية. ولم يمر طويلاً عن بدء توفرها في السوق ولها أن تعوض المعايير الذرية المرتفعة التكلفة في عدد معين من التطبيقات. وسيكون لمعيار سيزيوم أو لمجموعة من المعايير السيزيومية المحكومة بالنسبة إلى GPS بثابتة زمنية طويلة مناسبة أداء متميز النوعية.

## 10.9 مذبذب مستقر بواسطة طنان من الصَّفير المبرّد

يحتوي الصَّفير المبرّد على خسارة ضئيلة من العازل الكهربائي لدى ترددات الموجات الصغيرة ويستطيع طنان العازل الكهربائي للموجات الصغيرة الصَّفيرية بالتالي أن يكون له العامل Q عال جداً. وقد تم قياس القيم التي تتجاوز  $2 \times 10^7$  لدى النطاق X. ويعمل الباحثون في العديد من المجموعات حول موضوع المذبذبات التي يتم تحقيق استقرارها بواسطة تلك الطنانات وهم في طريقهم إلى التوصل إلى تحقيق نتائج جيدة في النطاق X بدرجات حرارية تبلغ 77 كلفن فما دون.

ويبلغ النقاء الطيفي الذي تم التوصل إليه في النطاق X حوالي -50 dBc بالرجوع إلى عرض نطاق من 1 Hz على تحالف من 1 Hz بالنسبة إلى الموجة الحاملة. وتبلغ الضوضاء الأرضية حالياً حوالي -162 dBc ويمكن الحصول عليها على حوالي 3 kHz. وتتميز تلك القيم، وبالخصوص منها قيم ضوضاء الأرضية، عن القيم التي يمكن تحقيقها بمذبذب مرو ذي 10 MHz عالي النوعية تتم مضاعفته بالتردد باتجاه النطاق X. ولم يتجاوز هذا الاستقرار لدى النطاق X إلا مذبذباً تم تحقيق استقراره بواسطة تجويف الموصّل الفوقي بالنيوبيوم عند بلوغ حوالي درجتين من درجات كلفن. ولا بد من توفير مصدر يحتوي على هذا النمط من النقاء الطيفي لكل رادار من رادارات دولر المتميزة بأدائها المتفوق. كما أنه سيكون مفيداً بوصفه دولااب موازنة عالي الأداء معني بتحقيق معايير الموجات الصغيرة والمعايير الذرية البصرية المتطورة. كما أنه لا بد من العناية بالتصميم والبناء عناية بالغة من أجل تفادي التشكيل المؤذي بسبب الضوضاء السمعية والنوسان. ولا يوجد في السوق إلا معيار واحد في الوقت الحاضر.

## 11.9 معايير التردد البصرية

تتضمن معايير التردد الذرية البصرية احتمال توفير دقة واستقرار عاليين جداً. وقد تم تداول أجهزة ليزرية للهيليوم-نيون المستقرة على 633 nm التي تستعمل قعر المصباح وغيرها من التقنيات في السوق لأكثر من 25 سنة. وبلغت قابلية إعادة الإنتاج لديها ودقتها نحو  $1 \times 10^{-7}$  وقد تم الحصول على أداء أفضل بكثير باستعمال أجهزة ليزرية مستقرة بالنسبة إلى خطوط امتصاص اليود. هذا، وقد أدت أجهزة الليزر المستقرة بواسطة الميثان التي تعمل قرب الأشعة تحت الحمراء إلى قابلية إعادة الإنتاج من بعض الأجزاء في 10<sup>12</sup>. وتم العمل بهمة في الولايات المتحدة الأمريكية في موضوع المعايير بالميثان في ما كان يسمّى سابقاً NBS (والمسمّى حالياً NIST) وكذلك في الاتحاد السوفياتي سابقاً (روسيا حالياً). وتم بناء عدد من معايير تُحمل بالميثان واستعملت في الاتحاد السوفياتي.

ويوجد هناك مرشحات لا بأس بها من بين الذرات والأيونات ذات خطوط طيفية بصرية ضيقة جداً.

ويعتبر الأيون الرنثيمي مثلاً جيداً. ويُنتظر أن تكون دقة المعايير التي تم بناؤها باستعمال تلك الخطوط أفضل بكثير من  $1 \times 10^{-15}$ .

وفي حين أن تلك المعايير تعتبر متميزة في المجال البصري، إلا أنها لا تزال تعتبر أيضاً في منتهى الصعوبة والتعقيد وارتفاع التكلفة من أجل توصيل تردداتها بدون فقدان في الدقة باتجاه الموجات الصغيرة/RF. وتقوم العديد من الجهات بالعمل في هذا المجال الذي يتسم بالأهمية وي طرح عليها تحدياً كبيراً وظهرت بوادر أمل تتمثل في بعض الأفكار التي قد تؤدي في نهاية الأمر إلى حل عملي لمشكلة التوصيل تلك.

## 12.9 الخلاصة

ستطال عمليات التحسين المتواصلة الأداء والتقليص في القدر وكبح التكلفة وزيادة الاعتمادية للعديد من المعايير الموحدة حالياً. وستنعم أجهزة الخلايا الغازية الصغيرة الحجم والمنخفضة السعر برواج كبير. فالاتصالات والاتصال المعطيات يشكّلان حقلين آخذين في النمو السريع في وقت تتعاضم فيه شدة متطلبات الزمانة التابعة إليهما. وتمثل هذه الخاصيات عناصر قيادية قوية باتجاه سوق معايير التردد. هذا، وستتفاهم استعمال المذبذبات المستقرة بالنسبة إلى GPS إلى حد بعيد.

كما يتم تسجيل حدوث عدد معين من الأمور في مجال الأداء الأعلى. فستقدم معايير الحزمة السيزيومية التجارية بالضخ البصري درجة هامة من التحسينات المتعلقة بالاستقرار والدقة. وتقدم الأجهزة الأيونية الرنثيمية المفخخة الكثير من الإمكانيات. وستواصل الحاجة الدائمة إلى مذبذبات دولااب الموازنة الجيدة وتكون متطلبات أدائها متشددة من أجل المعايير الذرية المتطورة المتأتية منها. ويجري تطوير المعايير العالية الأداء مثل معايير النافورة السيزيومية ومعايير الأيون الوحيد بفعالية ويمكن تسويقها مستقبلاً. وتعد المعايير البصرية بالكثير غير أن مشكلة التوصيل السهل والدقيق بمجال تردد الموجات الصغيرة/RF لا تزال تحتاج إلى إيجاد حلول لها. كما ستواصل الحاجة دائماً إلى المعايير العالية الأداء من أجل التطبيقات الخاصة والعمل العلمي، غير أنه ليس لتلك المعايير رواج كبير في الأسواق.

الفصل 10

الاستنتاجات

المحتويات

188	..... ملاحظات عامة	1.10
188	..... ميقاتيات ومذبذبات	2.10
189	..... طرائق القياس والتمييز	3.10
190	..... سلا لم الوقت والتنسيق والبث	4.10
191	..... حقائق	5.10

## 1.10 ملاحظات عامة

تداخل المواضيع عبر فصول هذا الكتيب. ويصعب التعرض بالوصف لموضوع ما بدون الاستعانة بالمعلومات التي تتعلق بالمواضيع الأخرى. ولا شك في أن القارئ، برغم عدم إحالة كاتب كل فصل على حدة دائماً إلى الفصول الأخرى صراحة، سيواجه الحاجة إلى العودة إلى هذه الأخيرة. ويتمثل الاستنتاج الأساسي إذاً في كون مواصلة العمل الذي يتعلق بموضوع معين ربما سيتطلب التعمق في تفهم المواضيع الأخرى. ولنناقش الأمثلة التالية على التداخل في المواضيع.

لا يمكن فهم الميقاتيات والمذبذبات المتطورة بسهولة دون فهم الميقاتيات والمذبذبات التي سبقتها، ومن المؤكد أن البحث في موضوع سواء الأجهزة الحالية أو الأجهزة المتقدمة يتطلب فهم كل من الأساس الإحصائي المستعمل في عمليات التمييز وطرائق القياس.

وقد يتطلب تقدير تطبيقات التوقيت والتردد فهم العديد من المواضيع. ويتضمن ذلك فهم خصائص الميقاتيات والمذبذبات، وبناء سلاسل الوقت الموثوقة وبث إشارات التوقيت والتردد وتمييز الإشارات المنقولة عبر مثل أنظمة البث تلك، والمشكلات العملية المتصاحبة مع تلك النشاطات. ويعتمد أداء الإشارات المستقبلية على سبيل المثال دائماً على خصائص مصدر الإذاعة المحلي وعلى سلم الوقت الذي يوجهه باتجاهه ذلك السلم، كما يعتمد الأداء على عملية البث.

ويعتمد نجاح تطوير المبادئ الواردة في هذا الكتيب وتطبيقها بالطبع على فهم عدد معين من المواضيع على الأقل التي تمت مناقشتها على مدى مختلف الفصول. ويعتبر ميدان التوقيت والتردد ميداناً تكنولوجياً ذا درجة عالية من التكامل.

## 2.10 ميقاتيات ومذبذبات

يتميز مدى الميقاتيات والمذبذبات المتيسرة من أجل التطبيقات بنوعية جيدة. وتتضمن الميقاتيات والمذبذبات المتيسرة في الأسواق مثلاً أجهزة المرو والروبيديوم والسيزيوم والهيدروجين. وهذا هو الترتيب التصاعدي التقريبي لتكلفة أجهزة التوقيت تلك. وتتغير مبادئ تلك الأجهزة الأساسية (الموجزة في الفصل 1) وأدائها (الموجز في الفصل 2) تغيراً كبيراً. كما أن متطلبات التطبيقات الخاصة (مثل استقرار التردد والانسياق والحساسية إزاء الوضعيات البيئية والقد والتكلفة والوزن ومتطلبات القدرة، إلخ) قد تؤدي إلى انتقاء أي جهاز من بين تلك الأجهزة. وتوجد عدا هذه الحلول التجارية الحالية الصالحة لمتطلبات التطبيقات أجهزة قيد البحث (موجزة في الفصل 9) تقترح إمكانية الحصول في المستقبل على أجهزة أكثر تطوراً. وتلخص الفقرات التالية البعض من الاستنتاجات الأساسية في هذا المجال.

إن مذبذبات المرو تعتبر الأساس بعينه الذي تعتمد عليه تقنية التوقيت والتردد. وتعتمد المعايير الذرية المنفصلة إلى حد بعيد على مذبذبات المرو. إذ إن وقت الشروع للأنظمة المؤازرة في تلك المعايير يتسم بالطول. ويعني ذلك أن استقرار المعايير الذرية المنفصلة القصير المدى هو بالأساس استقرار مذبذب المرو الذي يُستعمل في التحكم في مذبذب الموجات الصغيرة التي تسير الطنين الذري. ويُعدّ عدد مذبذبات المرو المستعملة حتى في التطبيقات ذات التقنية العالية جداً عدداً ضخماً. وتُهيمن تلك المذبذبات بوضوح على المعايير الذرية من الناحية العددية بدرجات عديدة من الكبر. وفي الوقت الذي يكون فيه الاستقرار الطويل المدى والانسياق التابعين إليها أدنى من استقرار وانسياق المعايير الذرية، فإن أجهزة المرو تظل تمثل الحلول المرغوب فيها بسبب انخفاض تكلفتها ووزنها وصغر قدها مع ارتفاع اعتماديتها وانخفاض متطلباتها من القدرة.

وتحتل معايير التردد بالروبيديوم السوية العالية التالية في مجال الأداء. إذ إن لها استقراراً أفضل عادة من استقرار مذبذبات المرو لفترات أطول من  $10^4$  s، غير أنه لا يضاها في نوعيته استقرار معايير الحزمة. فهي تتميز عموماً بحساسية أخف إزاء التغيرات البيئية من حساسية المرو. وعلى الرغم من كون معيار الروبيديوم المتراص أكبر عادة من مذبذب المرو المتراص، إلا أنه أصغر بكثير من معيار الحزمة السيزيومية المتيسر حالياً. وما فتئ عدد التطبيقات التي تستعمل فيها معايير التردد بالروبيديوم يتزايد، وخصوصاً في أنظمة الاتصالات، كما كان لتلك المعايير أداء جيد كميقاتيات محمولة على السواتل GPS.

وتحتل معايير التردد بالحزمة السيزيومية موضعاً لائقاً فريداً من نوعه، إذ إنها تعتمد على الطنين الذي يصلح لتعريف الثانية. وعلى ذلك الأساس، فإن المعايير السيزيومية تمثل الخيار الوحيد بالنسبة إلى معايير التردد الأولية الوطنية. وتختلف معايير التردد الأولية عن المعيار التجاري الموجود في الحقل العادي بتقييم الأخطاء النظامية بعناية من أجل بلوغ أفضل تحقيق ممكن للثانية. ويخضع العديد من الآثار النظامية عملياً للتحكم الجيد في معايير الحزمة السيزيومية التجارية بشكل يمكنها من توفير الدقة ولو كانت على سوية أدنى من الدقة التي توفرها المعايير الأولية. ونظراً لخضوع الآثار النظامية للتحكم الأنسب، تظهر معايير الحزمة السيزيومية عادة أقل انسياقاً مما تظهره غيرها من المعايير، الشيء الذي يمنح المستعمل المزيد من الثقة في تطابق تردد الخرج مع تردد الخرج الذي يعرضه المصنع تماماً. وهكذا، تشكل معايير الحزمة السيزيومية دائماً الخيار الأول بالنسبة إلى الأنظمة التي تستوجب الاحتفاظ بتردد دقيق بشكل مستقل لفترات طويلة. وتضطلع معايير الحزمة السيزيومية بدور رئيسي في محطات التحكم



على الأرض التابعة إلى GPS كما أنها محمولة على السواتل GPS (مع معايير الروبيديوم). وتتكون معظم الميقاتيات التي تقدم التوقيت والتردد انطلاقاً من السواتل GPS في وقتنا الحاضر (1995) من الميقاتيات السيزيومية.

وتوفر موازر الهيدروجين استقراراً عالياً جداً على المدى القصير والمتوسط بينما يتجاوز سعرها المشط سعر غيرها من معايير التردد. ولا تتفوق عليها إلا المعايير السيزيومية فيما يتعلق بالاستقرار على المدى الطويل، ومع ذلك تظل أحياناً متفوقة. وفي حالة التحكم في طنين تجويف الموجات الصغيرة بأسلوب الموازنة، قد يكون مازر الهيدروجين أكثر استقراراً من المعيار السيزيومومي التجاري لمرات عديدة من الترتيب السنوي. وتعتبر مشكلة الاستقرار الطويل المدى كنتيجة للصعوبة الكامنة في التحكم في الأثار النظامية. ومن أكثر هذه المشكلات إزعاجاً هي مشكلة الزحزحة المتصاحبة مع تصادم ذرات الهيدروجين بجيطان مستودع التخزين. وتمثل المشكلة الأخرى في جذب التجويف الطنان لتردد الهيدروجين بشكل يدخل الخطأ على تردد الخرج. وقد كان استقرار موازر الهيدروجين ذا نفع كبير في تطبيقات مثل القياس بالداخل ذي الخط الأساسي الطويل جداً (VLBI)، حيث يكون الوسم الزمني للملاحظات القريبة الواحدة من الأخرى حاسماً بشكل خاص. وتعود الموازر أيضاً بالفائدة على عملية تمييز معايير التردد العالية الأداء الأخرى، إذ يصبح الوقت الضروري للقيام بقياس معين أقصر كلما خفت الضوضاء في الجهاز المرجعي. ويتسم مازر الهيدروجين عادة بالفاعلية، أي أنه يقوم بعملية الذبذبة على نحو تلقائي، غير أنه قد تم أيضاً بناء موازر هيدروجين منفصلة. ولموازر الهيدروجين المنفصلة أداء يتوسط أداء موازر الهيدروجين الفعالة وأداء المعايير السيزيومية.

وتتناول الأبحاث الجارية كافة هذه المعايير بالدرس. فقد سجلت أجهزة المرو تحسناً تدريجياً مع الزمن، ويرجح التحاق التطور التدريجي مستقبلاً بركب التحسينات التي دخلت على فهم الأجهزة وآليات الضوضاء، ووضع طرائق بارعة للتحكم في الحساسية إزاء الضوضاء البيئية. ومن جهة أخرى، فقد قدمت الأبحاث الجارية في مجال الفيزياء الذرية أدوات جديدة واعدة ستمكن من تحسين أداء المعايير الذرية بدرجات عديدة. ويمكن الآن استعمال الأجهزة الليزرية للتحكم في الحالات الذرية وحركات الذرات والتقليص بالتالي من الحدودية المرتبطة بالحركة الذرية (زحزحات دوبلر) وزمن الملاحظة إلى حد بعيد. وتتصدر معايير التردد الأيونية ومعايير النافورة السيزيومية قائمة المعايير المنفصلة المتطورة. ويرجح استفادة معايير الروبيديوم من تقنيات الضخ الليزري التي قد تعوض تقنيات الضخ بمصباح بتفريغ غازي، وذلك نظراً لاقتران محدودية الأداء بطريقة الضخ التقليدية. ولا بد لموازر الهيدروجين من الاستفادة من البحوث بخصوص معاطف الجدران التصريديّة التي تعد بإدخال التحسينات الكبيرة على الاستقرار القصير المدى التابع إليها والذي يعتبر الآن استقراراً جيداً. وأخيراً، لا بد من ذكر الأبحاث التي تتناول طنان الصُّفيري المُبرِّد و طنان الموجات الصغيرة المُوصِّل المتفوق، وكلاهما يمكنه أن يظهر العامل Q العالي جداً، الشيء الذي يؤدي إلى تحقيق استقرار قصير المدى أعلى بكثير من استقرار مازر الهيدروجين.

### 3.10 طرائق القياس والتمييز

تملي طبيعة الضوضاء التي نقابلها في الميقاتيات والمذبذبات وأنظمة نقل الإشارات الطرائق المتبعة في القياس ضمن هذا الحقل. ونظراً لكون الضوضاء بالترددات المنخفضة ليست عادة ضوضاء بيضاء ولكنها تختلف مثل اختلاف عكس قدرة عليا معينة من التردد، فإن ذلك يتطلب معالجة إحصائية غير معيارية للضوضاء. ونظراً لكون الاحتفاظ بالتوقيت هو نشاط طويل المدى ويتطلب الانتباه حيال السلوك الطويل المدى (تردد منخفض)، فإن المعالجة الإحصائية لعمليات الضوضاء غير البيضاء تتسم بأهمية خاصة. ولا شك بأن الضوضاء العشوائية هي ضوضاء هامة، غير أنه لا بد أيضاً من فهم الأثار النظامية وتمييزها والتحكم فيها. وقد عرفت هذه المواضيع (تعرضت الفصول 3 و 4 و 5 لوصفها بإسهاب) خلال العقود العديدة الأخيرة تطوراً كبيراً.

وتكتسي طرائق تمييز كل من ميدان التوقيت وميدان التردد بالأهمية البالغة. وتعتبر قياسات ميدان التوقيت (المذكورة في الفصل 3) خصوصاً مفيدة من أجل تمييز العمليات الطويلة المدى في حين تعتبر قياسات ميدان التردد مفيدة أكثر من أجل تمييز السلوك القصير المدى (تردد أعلى). وقد قامت المغايرة ذات العينتين (مغايرة آلان) وتغيراتها بتعويض المغايرة المعيارية على أكمل وجه، ولا يمكن استعمال هذه الأخيرة نظراً لكونها تنحرف من أجل البعض من الضوضاء غير البيضاء. وتعتمد المغايرة ذات العينتين على وقت التكامل، بشكل يجعل طريقة التمييز هذه تتضمن رسماً بيانياً،  $\sigma - \tau$  عوضاً عن مجرد مغايرة بعدد واحد. وتتماشى قياسات المغايرة جيداً مع التكنولوجيا بما أن القياسات المتكررة بواسطة عدّاد ما قد تُستعمل لاكتساب المعطيات. ومن ثم يتم ضبط وقت التكامل  $\tau$  في المعالجة البرمجية للمعطيات. وتتصل التبعية إلى  $\tau$  بترددات فورييه الموجودة، وبالتالي يمكن أن يقدم الرسم البياني  $\sigma - \tau$  دلالة سريعة على مكونات التردد الموجودة في المعطيات.

ويتم وصف الضوضاء الأقصر مدى بشكل أكثر عمومية بواسطة استعمال قياس النقاء الطيفي كالكتافة الطيفية للقدرة مثلاً. وعادة ما ينصب الاهتمام على ضوضاء تشكيل الطور (PM)، ولكن لا يجب إهمال ضوضاء تشكيل الاتساع (AM) كلياً. ويعرض الفصلان 3 و 4 مفاهيم تتعلق بكل من تمييز القيام بالقياسات المادية وطرائقها. فقد تكون القياسات المباشرة التي تستعمل محلّ الطيف مفيدة، لكن أداء العديد من الأنظمة

العالي جداً يتطلب استبانة أعلى يمكن بلوغها عادة باستعمال الطريقة التحقيقية للتخفيف من الضوضاء انطلاقاً من التردد الأعلى ووصولاً إلى نطاق القاعدة.

وتخضع الميقاتيات والمذبذبات إلى الآثار النظامية الناجمة عن التغيرات التي تطرأ على المعلمات البيئية المعيارية مثل تغير درجة الحرارة والرطوبة والضغط البارومتري والحقل المغنطيسي (انظر الفصل 5). كما أن عوامل التسريع والنوسان والصدمات والتقدم تدخل أيضاً في الاعتبار. كما تتسم الأصول المادية التي تفسر عمليات الاستجابة من معايير مختلفة الأنماط إلى التغيرات في تلك المعلمات البيئية بالاختلاف الواضح. وقد يساعد فهم الأبعاد النسبية لتلك الآثار في مختلف الأجهزة في انتقاء ميقاتية/مذبذب من أجل تطبيق محدد أو في اتخاذ الاحتياطات اللازمة للتقليص من آثار التغيرات التي تطرأ على البيئة. هذا، ويعتبر فهم أصول تلك الآثار النظامية أيضاً أمراً مفيداً. ويتطلب ذلك دراسة مبادئها المادية (انظر الفصلين 1 و 2).

يكتسي تمييز الميقاتيات والمذبذبات بتعدد الأوجه، وكثيراً ما يتم ارتكاب الأخطاء في هذا المجال. ويستلزم علم القياس الجيد الحصول على فهم مفصل للقياسات الإحصائية ولطرائق القياس أساساً. وقد تنتج الأخطاء عند ارتكاب الهفوات في عملية الكشف على التقاطع على الصفر، وبتبر المعطيات وأخذ آثار عرض النطاق في الحسبان في غير محله وسوء تقدير الأوقات الميتة للعداد. ويمكن تحويل القياسات بشكل رياضي بين ميدان التوقيت وميدان التردد، غير أنه لا بد من الانتباه جيداً عند القيام بذلك، وخصوصاً عند المرور من ميدان التوقيت إلى ميدان التردد. وقد أدى سوء فهم المفاهيم المسؤولة على عمليات التمييز إلى الكثير من المتاعب، الشيء الذي دفع بالعديد من المنظمات إلى وضع تسميات معيارية للمصطلحات ومنهجيات معيارية لعمليات القيام بالقياسات.

#### 4.10 سلام الوقت والتنسيق والبث

لا يمكن تحقيق الفائدة المرجوة من خرج تردد مذبذب ما أو خرج توقيت ميقاتية معينة، بالنسبة إلى العديد من التطبيقات، إلا إذا تم الاحتفاظ بالإشارات بشكل موثوق به، ومقارنتها بغيرها من المذبذبات/الميقاتيات الأخرى وتوزيعها على مواقع أخرى (تطبيقات من نمط الشبكة). ويتطلب الكثير من التطبيقات تيسر إشارات التوقيت و/أو التردد باستمرار، وتكون مرسومة الأثر لدى مصدر مركز معين. وتشمل المشكلات التي تعترضنا بطبيعة الحال طرائق الاحتفاظ بالمصادر على نحو موثوق به والوسائل المثلى الضرورية من أجل توزيع الإشارات انطلاقاً من تلك المصادر.

وفي السنوات الأخيرة، أصبح تركيب الميقاتيات في مجموعة واحدة مع حوارزمية خاصة لتكوين سلم وقت مفهوماً بالغ الأهمية (انظر الفصل 6). ويمكن الحصول من التنفيذ المناسب لسلم الوقت على قدر أكبر من الاعتمادية والأداء مما يفوق اعتمادية وأداء أي من الميقاتيات التي تساهم في سلم، والحصول كذلك على وسائل تقييم أداء الميقاتيات المكوّنة للمجموعة بل تقييم حتى سلم الوقت ذاته. وتعتمد سلام المجموعة على الكثير من التطورات السابقة، بما في ذلك طرائق تمييز الميقاتيات وطرائق الضوضاء المنخفضة من أجل قراءة خروجات الميقاتيات والخوارزميات حت يتسن تركيب خروج مجموعة من الميقاتيات على النحو الأمثل.

وحتى يتم الاحتفاظ بسلم وقت مستقل ذي خرج متصل بالتوقيت UTC أو بأي سلم وقت غيره، يعتبر تنسيق سلم الوقت مع المرجع من خلال نقل التوقيت أمراً حاسماً. وقد سمحت الطرائق التي تعتمد على السواتل بتحسين التنسيق إلى درجة كبيرة تمكن من مقارنة أفضل المعايير وسلام الوقت وهي في غاية الدقة، رغم أن ذلك قد يتطلب احتساب عدد من الأيام لتقدير المتوسط إذا تعلق الأمر بأنظمة تتميز بأعلى أداء. ومن ثم، أصبح من الممكن الآن نقل أعلى دقة متيسرة حيثما كان. وإذا تطلب تطبيق معين توفير التوقيت محلياً باستمرار، فإنه من المستحسن الاحتفاظ بنظام ميقاتيات (من الأفضل أن تكون مجموعة من الميقاتيات) عالي الاستقرار. ويمكن توجيه النظام مع ثابتة زمنية طويلة باتجاه مصدر خارجي. وفي حالة فقدان الإشارة الخارجية لفترة معينة يمكن للنظام المحلي أن يسد الفراغ بنجاحة.

تحتوي معظم المتطلبات المتعلقة بإشارات التوقيت والتردد على درجات من الدقة أدنى بكثير من دقة سلام الوقت المرجعية الرئيسية، كم يمكن استعمال طرائق أبسط وأقل تكلفة لبث تلك الإشارات (مثلما ورد في الفصل 2). وقد تم استعمال العديد من مختلف أنظمة بث الإشارات على مر السنين، بما في ذلك الهاتف وراديو الموجات الديكامتري وراديو الموجات الكيلومترية وإشارات السواتل. وكانت هذه الأنظمة تُشغل عادة بواسطة مخابر المعايير الوطنية. وعلاوة على ذلك، فكثيراً ما تم تشغيل إشارات مستقرة أخرى، لا تعتبر دائماً كمعايير، في شكل مراجع للتردد. ويستطيع مخبر المعايير أن يراقب مثل تلك الإشارات وأن يقدم معطيات التصحيح في شكل تحالفات بالنسبة إلى معياره الخاص. ويطبق المستعمل تلك التصحيحات على الإشارة المستقبلية حتى يتحصل على دقة مرسومة الأثر لدى المعيار المرجعي. أما إذاعات التلفزيون وإذاعات LORAN-C فكثيراً ما كانت تُستعمل بتلك الطريقة. ويمكن مثل تلك الطرائق محضراً وطنياً معيناً من تقديم خدمة جلييلة بدون أن يستثمر مبالغ طائلة في التجهيزات الإذاعية.

وقد عرفت الحاجة إلى الدلالة على توقيت العمليات التجارية وإلى المعطيات التقنية بواسطة الأنظمة الحاسوبية الموزعة تنامياً سريعاً. وتفي الخدمات الحالية لبث التوقيت عبر الهاتف والشبكات ببعض من تلك الحاجيات، ولكن يبدو أن إشارات التوقيت من أجل تلك التطبيقات ستقوم الشركات الهاتفية في آخر الأمر ببثها من خلال أنظمة الألياف والكبلات.

## 5.10 حقائق

تملي مختلف التطبيقات عادة ضرورة التطور على التكنولوجيا، وهذا هو الحال بلا شك (كما ورد في الفصل 7) بالنسبة إلى تكنولوجيا التوقيت والتردد. فالتطبيقات تتراوح من التجارب العملية الصارمة إلى استعمال الميقاتيات والمذبذبات في تشكيلة من المنتجات الاستهلاكية الأكثر بساطة. وتتحكم الميقاتيات والمذبذبات في الكثير من الأنظمة، أي أنها تقوم بضبط المعدل الذي تقع بموجبه الأحداث. وبما أن مجتمعاتنا أصبحت تعتمد أكثر فأكثر على الإلكترونيات، فإن توقيت نشاطاتها أصبح يميل أكثر فأكثر إلى الصرامة في الدقة.

إن التردد هو الكمية المادية التي توصلنا إلى تحقيقها بأكبر قدر من الدقة. وكثيراً ما يتم قلب (تحويل) غيره من الكميات الأخرى إلى تردد نظراً لسهولة القيام بقياسات تردد متوسطة الدقة. ويعرّف الطول الآن على سبيل المثال بكونه المسافة التي يقطعها الضوء في زمن ثابت. كما يحوّل معيار الفولت جوزيفسون التردد إلى توتر. وهذه أمثلة على تحويلات وحدات القياس الكبرى، لكن أنماطاً أخرى عديدة من محوّلات الطاقة تقوم بتحويل غيرها من الكميات (مثل تحويل الضغط إلى نوسان) إلى ترددات. وهكذا تمتد قيمة معايير التردد إلى مجالات تتجاوز المجالات التقليدية للتوقيت.

وقد استغلت أنظمة الملاحة العلاقة الوثيقة التي تربط بين الطول والتوقيت؛ ويُشهد لنظام الموقعة العالمي (GPS) على ذلك الاستغلال بشكل خاص. ويتم تحويل فاصل زمني دقيق مباشرة إلى مسافة دقيقة. وقد كان وضع معايير التردد الذرية في الواقع خطوة حاسمة بالنسبة إلى تطوير أنظمة الملاحة تلك. فكان وقع تلك التطورات بليغاً. ولا يقتصر استعمال GPS مثلاً على الملاحة من قبل البواخر والطائرات، بل يشمل كذلك مسح البناء وإجراء الأبحاث الجيوفيزيائية. ولا شك أن مقدرة تحديد الموقع بدقة ستطبق على العديد من النشاطات الأخرى مولدة بذلك تشكيلة واسعة من المنتجات الاستهلاكية التي تصلح لتحديد المواقع.

وتمثل الاتصالات مجالاً مفتاحياً آخر تشمله التطبيقات. فكلما استعملت الأنظمة معدلات المعطيات المتزايدة باستمرار ارتفعت المتطلبات المتعلقة بالتوقيت. وتضطلع تكنولوجيا التوقيت والتردد بدور أكثر اتساعاً في الاتصالات بسبب انفجار عمليات تحويل المعلومات ومعالجتها. وقد كانت هذه الصناعة في حاجة إلى مقدرات معايير التردد الذرية لمدة طويلة، كما أن التوزيع الواسع للتوقيت العالي السوية يعتبر حاسماً لتشغيل الأنظمة الجديدة بنجاح.

وفي الوقت الذي ما فتئت فيه قائمة التطبيقات تطول، قد تجرد بنا الملاحظة هنا، في إطار الاستنتاج، على الأهمية التي تحظى بها هذه التكنولوجيا أيضاً بالنسبة للأبحاث العلمية. إذ يقوم عدد كبير من النظريات المادية الأساسية بالتنبؤ بسلوك الميقاتيات، ومن ثم تقوم هذه الأخيرة بدور رئيسي في الاختبارات التي تعنى بالتحقق من تلك النظريات. وقد استخدمت التطبيقات العلمية في الواقع دائماً كقوة دافعة باتجاه تطوير ميقاتيات أفضل من تلك الموجودة.

ونختتم هذا الفصل بالتنبيه إلى بعض النقاط، إذ إن تكنولوجيا التوقيت والتردد هي تكنولوجيا معقدة وتدخّل في إطارها تشكيلة من العلوم التي تتضمن على سبيل المثال الفيزياء الذرية وعلم المواد والإلكترونيات وعلم القياس والتحليل الإحصائي والاتصالات الراديوية للأرض وبالساتل. وأصبح للاستقرار والاعتمادية والدقة معان متميزة وأهمية خاصة في هذا الحقل. ولا بد من فهم جميع هذه المفاهيم فهماً عميقاً. وقد راكّم العاملون في ميدان التكنولوجيا خبرة مفادها أن بعض الأنماط من المشكلات يحدث على نحو سريع جداً. ويناقش الفصل 8 البعض من تلك المشكلات. وإذا كان أحدكم على أبواب الشروع في مشروع كبير من هذا الحقل، فله في تجارب الآخرين خير معين. وقد يمثل الفصل 8 نقطة انطلاق ممتازة للاستفادة من تلك التجارب.







\* 1 5 4 6 9 \*

طبع في سويسرا

1997، جنيف،

ISBN 92-61-06516-3