

# كتيب

## نقل إشارات التوقيت والترددات وبثها بالساتل



طبعة 2010  
مكتب الاتصالات الراديوية



# كتيب

## نقل إشارات التوقيت والترددات وبثها بالساتل



طبعة 2010

مكتب الاتصالات الراديوية

## قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

يُضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى 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.

### للحصول على المعلومات المتعلقة بمسائل الاتصالات الراديوية:

يرجى الاتصال بالعنوان التالي:

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

Telephone: +41 22 730 5800  
Fax: +41 22 730 5785  
E-mail: [brmail@itu.int](mailto:brmail@itu.int)  
Web: [www.itu.int/itu-r](http://www.itu.int/itu-r)

### طلب منشورات الاتحاد الدولي للاتصالات

يرجى العلم بأنه لا يمكن تسليم الطلبات عبر الهاتف. وينبغي إرسالها عبر الفاكس أو البريد الإلكتروني.

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

Fax: +41 22 730 5194  
E-mail: [sales@itu.int](mailto:sales@itu.int)

المكتبة الإلكترونية للاتحاد الدولي للاتصالات: [www.itu.int/publications](http://www.itu.int/publications)

© ITU 2015

جميع حقوق النسخ محفوظة. لا يمكن نسخ أي جزء من هذا المنشور بأي وسيلة كانت دون الموافقة الكتابية من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).



## مقدمة

يتطلب التطور التكنولوجي عموماً وتطور تكنولوجيات المعلومات والاتصالات وتطبيقاتها بشكل خاص زيادة دقة التوقيت والمزامنة لمختلف الأجهزة الإلكترونية.

ويجري الاتحاد الدولي للاتصالات دراسات ويضع معايير دولية بشأن سلا لم التوقيت ذات الصلة واستخدامها في شبكات الاتصالات وشبكات الحاسوب وأنظمة الملاحة الإلكترونية وغيرها.

وفي 1974، وضعت اللجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) التوقيت العالمي المنسق (UTC) بالتعاون مع المؤتمر العام للأوزان والمقاييس والمكتب الدولي للتوقيت.

وفي 1978، وافقت اللجنة الاستشارية الدولية للراديو على استخدام التوقيت العالمي المنسق "لتعيين التوقيت في كافة أنشطة الاتصالات الدولية وجميع الوثائق الرسمية للاتحاد الدولي للاتصالات". ونصت اللجنة أيضاً على أن يُستخدم التوقيت العالمي المنسق "كمراجع نهائي لبث الترددات المعيارية".

وأدرج المؤتمر العالمي الإداري للراديو الذي عقده الاتحاد في 1979 (WARC-79) التوقيت العالمي المنسق في لوائح الراديو التي لها صفة المعاهدة الدولية، ويستخدم التوقيت العالمي المنسق من وقتها باعتباره سلم التوقيت الرئيسي لشبكات الاتصالات (السلوكية واللاسلكية) وللتطبيقات الأخرى المتصلة بالوقت.

والأنظمة الساتلية الحديثة التي توفر خدمة بث إشارات التوقيت والترددات من خلال مسير واضح غير معاق مع تأخير يسهل نمذجته هي المصدر الرئيسي لدقة التوقيت والترددات التي تعد ضرورية للخدمات البحرية وخدمات الطيران والملاحة وأنظمة تحديد الموقع والتشغيل السليم لشبكات الاتصالات والحاسوب.

وهذا هو الكتيب الأول للاتحاد الذي يقدم معلومات تفصيلية عن الطرائق والتكنولوجيات والخوارزميات وأنساق البيانات المطبقة والاستعمال العملي لإشارات الترددات وإشارات التوقيت التي توفرها الأنظمة الساتلية.

ويولى اهتمام خاص للأنظمة العالمية للملاحة الساتلية (GNSS) التي تنتمي إلى خدمة الملاحة الراديوية الساتلية. وتوفر الأنظمة GNSS إشارات التوقيت والترددات لأي مكان على وجه الأرض وتمثل حالياً المصدر الرئيسي الفعلي لإشارات التوقيت الدقيق من أجل التطبيقات الحكومية والتجارية والمتعلقة بالنقل والتطبيقات العلمية.

الدكتور فاليري تيموفيف

مدير

مكتب الاتصالات الراديوية



## جدول المحتويات

### الصفحة

iii	.....	مقدمة
vii	.....	تمهيد
ix	.....	شكر وتقدير
xi	.....	مقدمة
1	.....	الفصل 1 - نقل إشارات التوقيت والترددات وبثها بالساتل
7	.....	الفصل 2 - النظام العالمي لتحديد الموقع
23	.....	الفصل 3 - النظام القائم على السواتل المعزز للنظام العالمي لتحديد الموقع (GPS)
49	.....	الفصل 4 - وقت النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS)
55	.....	الفصل 5 - نظام الملاحة الساتلية في النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS)
71	.....	الفصل 6 - نظم سواتل الاتصالات
79	.....	الفصل 7 - سلاسل التوقيت
97	.....	الفصل 8 - مراكز التوقيت الوطنية
103	.....	الفصل 9 - المفاعيل النسبوية في تحويل التوقيت والترددات ونشرها
131	.....	الفصل 10 - اتجاه الأرض والنظام الجيوديسي
141	.....	الفصل 11 - الانتشار والعوامل البيئية
151	.....	الفصل 12 - النظم العالمية للسواتل الملاحية - كأداة أولية لتحويل التوقيت
169	.....	الفصل 13 - التقنيات الجيوديسية التي تستخدم طور النظام العالمي لتحديد المواقع وقياسات الشفرة
199	.....	الفصل 14 - نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين (TWSTFT)
211	.....	الفصل 15 - خلاصة نشر التوقيت والتردد



## تمهيد

أنشئت لجنة الدراسات 7 التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية (SG 7) المعنية بالخدمات العلمية من خلال إعادة تنظيم هيكلية أثناء الجمعية العامة للجنة CCIR التي عقدت في دوسلدورف في 1990. وفي ذلك الوقت، تم توحيد لجنة الدراسات المعنية بالأبحاث الفضائية وعلم الفلك الراديوي (SG 2) ولجنة الدراسات المعنية بمعايير التردد والتوقيت (SG 7) لتشكيل لجنة الدراسات 7 الجديدة المعنية بالخدمات العلمية.

ويرتبط العديد من نشاطات لجنة الدراسات المتعلقة بالخدمات العلمية بتطوير استعمال الطيف الراديوي من أجل تحقيق أهداف علمية. وبهذا الصدد، ارتبط مجتمع معايير التردد والتوقيت منذ أمد بعيد بالاتحاد الدولي للاتصالات (ITU) بهدف صريح يتمثل في صياغة توصيات تتعلق باستعمال الطيف الراديوي لتسهيل بث مراجع التوقيت الدقيقة ولتقييس طرق ذلك البث. والنتيجة الطبيعية لذلك هو وضع مواصفات معايير التردد الدقيقة والتقنيات اللازمة لتنفيذها.

وتتضمن لجنة الدراسات 7 (الخدمات العلمية) 4 فرق عمل للاتصالات الراديوية (WP) تتناول القضايا التقنية المتصلة بأنظمة محددة تحت مظلة الخدمات العلمية. وتعني فرقة العمل 7A (إرسالات إشارات التوقيت والترددات المعيارية) بتوليد وبث إشارات التوقيت والترددات بواسطة خدمات الاتصالات الراديوية للأرض والفضائية. وفي الخمس عشرة سنة إلى العشرين سنة الماضية، أصبحت خدمات التوقيت والترددات الدقيقة التي تقدمها الأنظمة الساتلية وبصورة خاصة أنظمة السواتل الملاحية، الوسيلة الرئيسية للبث وتعززت قدرات تلك الخدمات بشكل كبير. وجعلت هذه الزيادة في قدرة هذه الأنظمة الساتلية وتطورها من الصعب مواكبة تطورها وأثرها على مجتمع التوقيت والترددات ومجتمعات الراديو والاتصالات بصفة عامة.

ويقدم هذا الكتيب معلومات تقنية وتشغيلية شاملة بشأن الأنظمة الساتلية الحالية المستخدمة لبث إشارات التوقيت والترددات الدقيقة.

وإنه لمن دواعي سروري البالغ بصفتي رئيس لجنة الدراسات 7 أن أقدم هذا الكتيب إلى المجتمعات المذكورة أعلاه من المستعملين وأنا على يقين من أنهم سيجدون فيه أداة مرجعية هامة، كل في عمله.

ولقد كان هذا الكتيب نتاج عدة سنوات من التحضير والعمل في محاولة لمواكبة التطور في التكنولوجيات الساتلية والقدرة المتزايدة التي تولدها. وما كان لهذا الكتيب أن يكتمل بدون المساهمات المقدمة من العديد من الإدارات المشاركة في لجنة الدراسات 7 وفرقة العمل 7A التابعة لها. وينبغي توجيه شكر خاص إلى رئيس فرقة العمل 7A، السيد رونالد بيرد على قيادته لهذا المشروع. وأود أن أعرب أيضاً عن امتنان خاص للسيد أ. فاسيليف من مكتب الاتصالات الراديوية الذي اضطلع بدور هام في إعداد هذا الكتيب وتحريره ونشره.



## شكر وتقدير

إن العمل الذي اضطلع به المقررون المعنيون بمختلف أقسام هذا الكتيب رائع للغاية ونود أن نعرب عن تقديرنا للمساهمين وللعديد من الأشخاص الآخرين الذين ساهموا بوقتهم وجهودهم في إنجاز هذا الكتيب.

الأنظمة الساتلية:

AXELRAD, P.  
KLEPCZYNSKI, W. J.  
RUNET, M.  
IMAE, M.  
BARTENEV, V.  
KLIMOV, V.  
KOSSENKO, V.  
KRASILSCHKOV, M.  
REVNIVYKH, S.  
REINHARDT, V.  
VASSILIEV, A.

سلام التوقيت، وحفظ الوقت والأنظمة المرجعية:

CORDARA, F.  
McCARTHY, D.  
NELSON, R.  
ARIAS, E.  
BAUCH, A.

التقنيات:

LEWANDOWSKI, W. and AZOUBIB, J.  
KLEPCZYNSKI, W. J.  
KIRCHNER, D.  
De JONG, G.  
RAY, J.  
SENIOR, K.



الانتشار والعوامل البيئية:

KLOBUCHAR, John A.

ونتوجه بشكر خاص إلى رئيس فرقة العمل 7A، السيد رونالد بيرد على قيادته لهذا المشروع ومساهمته وتحريره لهذا الكتيب وإلى مستشار لجنة الدراسات 7 للاتصالات الراديوية، السيد ألكسندر فاسيلييف، مكتب الاتصالات الراديوية على النصوص الإضافية التي قدمها وحررها وأعدّها للنشر.

فانست مينز

رئيس لجنة الدراسات 7 للاتصالات الراديوية

## مقدمة

### نبذة تاريخية...

في قديم الزمان، كان الناس يعرفون الوقت من خلال حركة الشمس والنجوم الأخرى ومراحل القمر وتغير المواسم وتعاقب الأجيال. وكان يتم قياس الفترات الزمنية بواسطة الساعات الرملية والساعات المائية والأجهزة الميكانيكية. وكانت ترددات الآلات الموسيقية تولف بمقارنتها بالشوكلات الرنانة والمزمار.

وقد سجل التاريخ أمثلة مبتكرة لقياس الوقت والفترات الزمنية والترددات. وكان هناك جهاز مصري يرجع تاريخه إلى القرن الخامس عشر قبل الميلاد يشبه من حيث الشكل مسطرة على شكل حرف T منثنية، وكان يُستخدم لقياس مرور الوقت من خلال الظل الذي يكونه الجزء العرضي من حرف T على مسطرة غير خطية. وكان يُوجه حرف T شرقاً في فترات الصباح. وعند الظهر، كان يُلف الجهاز بحيث يُراقب ظله في اتجاه المساء.

وفي أوائل عام 1000 قبل الميلاد، وضع الصينيون معايير الترددات بواسطة حساب عدد حبات الفول التي تملأ أنبوب آلة هوائية. وبالنسبة للأنابيب من نفس القطر، كان يتم تحديد التردد (النغمة) بعدد الحبوب اللازمة لملء الأنبوب.

وكانت الفواصل الزمنية تقاس في القرن الثالث عشر في إسبانيا بحرق الشموع على أذرع روافع يتناقص وزنها كلما احترقت مما يؤدي إلى تحريك الذراع لتبيان مرور الوقت.

وكان الصينيون يحرقون ساعات بخورية للإشارة إلى الوقت من خلال تغيير رائحة البخور المنبعثة من طبقات البخور المشربة بزيوت مختلفة. وقد استعملت جداول كاسيني للخصوف المتوقع لأقمار كوكب المشتري لإجراء قياسات الوقت التي لا تعتمد على الموقع، بدقة تصل إلى بضع دقائق، لرسم خريطة فرنسا في 1679. وسمح كرونومتر هاريسون الذي أكتمل في 1759 بمعرفة الوقت على متن سفينة بدقة تصل إلى 10 ثوانٍ على مدى فترات خلال أسابيع [Dana and Penrod، 1990].

وفي عام 1450، زعم علماء الفلك أنه يمكن تحديد خط الطول بواسطة زاوية النجوم الثابتة باتجاه القمر، إلا أن جداول النجوم لم تكن كافية. وفي 1675، أمر الملك تشارلز الثاني ببناء مرصد غرينتش وتم إنشاء خط طول غرينتش. واستغرق إعداد التقويم البحري الأول 100 سنة. وفي هذا الوقت من الزمان، كانت التجارة نحو العالم الجديد بالغة الأهمية.

وتم التركيز الشديد على الأهمية الحاسمة لتحديد خط الطول في 1707 عندما اصطدم أسطول تحت قيادة الأميرال السير كلاودسلي شوفيل بجزر سيلبي - مما أسفر عن فقدان أربع سفن و2000 من الرجال. واستجاب التاج البريطاني لهذا الحادث بعرض 20 000 جنيه استرليني (ما يعادل مليوني دولار أمريكي بأسعار اليوم) لتطوير كرونومتر على درجة كافية من الجودة لتحديد خط الطول بدقة تصل إلى 30 ميلاً.

وعمد جون هاريسون، من يوركشاير، الذي كان يبلغ عمره 21 سنة آنذاك إلى مواجهة هذا التحدي وأمضى حياته في صنع كرونومترات من الخشب والمعدن. وصنع جهاز كرونومتر بتروس خشبية لم يتغير بأكثر من ثانية في الشهر خلال فترة 14 سنة. واستخدم الكرونومتر رقم 4 الذي صنعه هاريسون في رحلة أبحرت من بليموث إلى ماديرا - وأعطى دقة من حيث الموقع بمقدار ميل واحد تقريباً. غير أن عالم الفلك الملكي شكك في النتيجة. وانطلقت رحلة أخرى عندما كان جون يبلغ من العمر 70 عاماً وكانت هذه المرة باتجاه باربادوس. وبعد خمسة أشهر من الإبحار، تنبأ الكرونومتر رقم 4 بموقع باربادوس بدقة تصل إلى 10 أميال. واستغرق الأمر 10 سنوات أخرى من السعي المضني للحصول على المكافأة المالية التي لم يحصل عليها بالكامل أبداً.

وعلى الرغم من التقدم الكبير الذي أحرز في مجال أجهزة الكرونومتر الملاحية بعد العمل الذي أنجزه هاريسون، لم تتحقق الخطوة الرئيسية التالية إلا في عشرينيات القرن الماضي. وشهد هذا العقد اكتشاف وتطوير مذبذب كوارتز-البلوري. ومع هذا الاكتشاف، تم تطوير ساعات الكوارتز القادرة على الكشف عن حالات عدم الاستقرار في معدل دوران الأرض، التوقيت UT1. وسمحت هذه الساعات بدفع جميع مجالات قياس الوقت خطوة كبيرة إلى الأمام - سواء بالنسبة إلى الملاحظة أو غيرها [Allan، 1995].

ومكن تطوير الرادار والاتصالات الراديوية فائقة التردد في ثلاثينيات وأربعينيات القرن الماضي من توليد هذا النوع من الموجات الكهرومغناطيسية (الموجات الصغيرة) اللازمة للتفاعل مع الذرات. وركزت البحوث الرامية إلى استحداث ساعة ذرية في البداية على رنين الموجات الصغيرة في جزيء الأمونيا.

أنشئت أول ساعة ذرية قائمة على الأمونيا في 1948 وتم عرضها في 1949. ومع ذلك، لم يكن أداؤها (حوالي  $1 \times 10^{-10}$ ) أفضل بكثير من المعايير القائمة آنذاك وتحول الاهتمام على الفور إلى أجهزة الشعاع الذري القائمة على الرنين الذري للـسيزيوم التي تبشر بقدر أكبر من النجاح. ووضع أول معيار تردد عملي ذري بالسيزيوم في المختبر الفيزيائي الوطني بإنكلترا في 1955. وظل التوقيت الذري قائماً منذ ذلك الحين.

ويقدم كتيب قطاع الاتصالات الراديوية "اختيار أنظمة التردد والتوقيت المحكّمة واستعمالها" أوصافاً لمعايير التردد والتوقيت الدقيقة والمصادر والخصائص ذات الصلة وسلام التوقيت ومنهجيات القياس المستعملة حالياً والأنظمة الحالية والخبرة التشغيلية.

### أهمية التوقيت والتردد الدقيقين ومزامنة التوقيت

أصبح التردد والتوقيت الدقيقين أساساً للعديد من العمليات التكنولوجية والمعيشية. ويستخدم التوقيت الدقيق الآن فيما يلي:

- جميع أنظمة الاتصالات؛
- معظم أنظمة الملاحة؛
- أنظمة الاتصالات والحاسوب وشبكاتها؛
- الأنظمة المحاسبية والمصرفية؛
- أنظمة التحكم في حركة الطيران والحركة البحرية؛
- كثير من البحوث العلمية؛
- الكشف عن الأعطال وكفاءة رصد شبكات الإمداد بالطاقة؛
- معظم الأنظمة العسكرية؛
- الأبحاث الفضائية والاستكشاف في الفضاء؛
- كشف الزلازل الأرضية والطبقات التكتونية العالمية؛
- الاستشعار البيئي؛
- قياسات مستوى المحيطات والتيارات المحيطات؛ وتجنب اصطدام الطائرات ودقة الهبوط؛
- تعقب أساطيل الشاحنات؛
- رسم خرائط الطرق السريعة.

ويُصنع أكثر من ملياري مرنان كوارتز سنوياً ويصل عدد الميقاتيات الذرية المستعملة إلى حوالي مائة ألف ساعة.

وجودة الميقاتيات، وإن كانت من المسائل الهامة، ليست العامل الوحيد الذي يساهم في دقة قياس الوقت. وهناك عامل مهم آخر وهو جودة الوصلات الزمنية المستخدمة لمقارنة الميقاتيات ومزامنتها. وتعد شبكات الاتصالات/الحاسوب واحدة من العينات. ومعظم شبكات الاتصالات والحاسوب تعتمد على الميقاتيات. وعندما تكون ميقاتيات أجهزة الاتصالات/الحاسوب غير متزامنة، قد تنشأ العواقب السلبية للغاية التالية:

- فشل العملية بسبب انتهاك التسلسل السليم للأحداث التي تستهلكها البرمجية ذات الصلة (البروتوكولات) والنسخ الاحتياطية للبيانات وما إلى ذلك؛
- فقدان البيانات - يمكن أن يؤدي الختم غير الصحيح للوقت إلى تعديل غير صحيح للبيانات في قواعد البيانات، وقد تقوم بعض التطبيقات بإجراء غير صحيح أو يمكن أن تتسبب حتى في تعطيل التشغيل؛

- ثغرات أمنية - نظراً لأن سجلات النفاذ إلى المخدم عبارة عن معلومات مجمعة من مضيفين مختلفين، من الضروري أن تكون أختام التوقيت صحيحة. وقد يعرض سوء ضبط التوقيت أمن المخدم إلى الخطر نظراً لأن ملفات التسجيل تكون غير دقيقة وبالتالي لا يمكن للمشرفين على النظام تتبع أنشطة القرصنة.

### الأنظمة القائمة على السواتل لبث إشارات التوقيت والترددات الدقيقة

استُخدمت الموجات الراديوية لنقل إشارات التوقيت وبثها منذ بداية القرن العشرين. ولكن كان من المعروف منذ البداية أن إشارات التوقيت الراديوية تتعرض للتأخير عند تنقلها عبر المسير من جهاز الإرسال للأرض إلى جهاز الاستقبال للأرض، وأن دقة إشارة التوقيت المستقبلية لا يمكن أن تكون أفضل من معرفة تأخير المسير. وتتعرض الإشارات الصادرة من جهاز إرسال منصوب على الأرض لحالات تأخر على المسير يصعب تقييمها نظراً لتغير التأخير باستمرار بسبب تغير الظروف الأيونوسفيرية. وتقل بعض هذه المشاكل بالنسبة لإشارات خط البصر التي لها منطقة تغطية صغيرة.

وعلى العكس من ذلك، يكون التأخير على مسير بدون عائق بين جهاز إرسال على متن ساتل وجهاز استقبال منصوب على الأرض أكثر استقراراً ويمكن تحديده بشكل أكثر دقة من التأخير بين المحطات المنصوبة على الأرض. وهذه ميزة هامة نظراً لأن دقة أي أسلوب توزيع تكاد تكون مقيدة دائماً بعدم اليقين بشأن أي أسلوب يُستخدم للتعويض عن الوقت الذي تستغرقه الإشارة للتنقل من المصدر إلى المقصد.

وإشارة التوقيت التي تُبث من السماء على ارتفاع أعلى من مستوى سطح الأرض، حيث يكون المسير صافياً وخالٍ من العوائق بين جهازي الإرسال والاستقبال، عادة ما تكون أكثر دقة من أي إشارة قائمة على الأرض. وإضافة إلى ذلك، عند بث إشارة من الساتل، فإنه يمكن استقبالها على مساحة واسعة، ومن ثم يمكن للأنظمة الساتلية أن تدعم توزيع الوقت والترددات عبر منطقة واسعة بسهولة أكبر بكثير من أي نظام للأرض. وعلاوة على ذلك، يمكن نمذجة تأخر المسير بين جهاز إرسال ساتلي وجهاز استقبال منصوب على الأرض بشكل أكثر دقة من التأخير المقابل بين محطات لنظام منصوب بالكامل على الأرض.

ويُقصد بهذا الكتيب أن يكون مقدمة لمجال نقل إشارات التوقيت والترددات وبثها بالساتل. وتقدم الفصول الأولى لمحة عامة عن الأنظمة الساتلية المستعملة لبث إشارات التوقيت والترددات. ومع هيمنة الأنظمة العالمية للملاحة الساتلية مثل النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS) والنظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS) وأنظمة الاتصالات الساتلية من خلال تأثيرها الواسع في بث إشارات التوقيت، هناك فصول تشرح نشأة هذه الأنظمة وعلاقتها بسلم التوقيت الدولي. وبعد وصف الأنظمة الساتلية، تُقدم لمحة عامة عن إنشاء ورعاية سلم التوقيت الدولي، التوقيت العالمي المنسق (UTC). وسلم التوقيت هذا هو نتاج مساهمة العديد من مراكز ومختبرات التوقيت الوطنية. ولذلك، تم تخصيص أحد الفصول لوصف هيكل وتشغيل مراكز التوقيت الوطنية هذه التي تدعم إنشاء سلم التوقيت وبثه. ويتم نقل إشارات التوقيت وبثها بين مراكز التوقيت هذه وفرادي المستعملين بواسطة الإرسالات الراديوية. وتناقش آثار النسبية والانتشار على هذه الإرسالات قبل الفصول النهائية التي تصف الأساليب الأولية المستخدمة لنقل إشارات التوقيت والترددات.

## المراجع

- ALLAN, D. W. [5-7 June 1995] The Impact of Precise Time in Our Lives, 50<sup>th</sup> Anniversary Annual Meeting, Institute of Navigation, Colorado Springs, Colorado, United States of America, (<http://www.ALLANsttime.com/Publications/DWA/PDF/95jungps.pdf>).
- DANA, P. and PENROD, B. [July-August, 1990] The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination, GPS World, ([http://www.pdana.com/PHDWWW\\_files/gpsrole.pdf](http://www.pdana.com/PHDWWW_files/gpsrole.pdf)).
- ITU-R [1997] Handbook on Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems. Geneva Switzerland, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-31/en>).



## الفصل 1

### نقل إشارات التوقيت والترددات وبثها بالساتل

#### الصفحة

2	.....	1.1	مقدمة
2	.....	2.1	خدمات الاتصالات الراديوية الفضائية والأنظمة الساتلية المستعملة لنقل إشارات التوقيت والترددات وبثها ..
2	.....	1.2.1	خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت
4	.....	2.2.1	الأنظمة العالمية للملاحة الساتلية
5	.....		المراجع

## 1.1 مقدمة

لقد أصبحت الميقاتية الذرية، التي كانت على مدى العقود القليلة الماضية بدعة المختبرات، تغطي مجالاً واسعاً من الاستعمالات. وقد انضافت التحسينات التي أدخلت على تكنولوجيا مذبذب الكوارتز وأنظمة التوقيت الساتلية إلى التحسينات التي أدخلت على الميقاتية الذرية. واستفادت أنظمة الملاحة والاتصالات والطاقة جميعها من تلك التحسينات استفادة كبيرة. هذا، وأصبحت أنظمة التوقيت الدقيق ضرورة بعد أن كانت مجرد بدعة. ومن ثم، تعتمد العديد من التطبيقات حالياً على عناصر التوقيت الدقيق. وترد في التوصية ITU-R TF.686 - "مسرد وتعريف مصطلحات التوقيت والتردد"، مصطلحات وتعريف مصطلحات التوقيت والتردد المستخدمة في هذا الكتيب.

## 2.1 خدمات الاتصالات الراديوية الفضائية والأنظمة الساتلية المستعملة لنقل إشارات التوقيت والترددات وبثها

بدأ عصر الفضاء بإطلاق الساتل الروسي سبوتنيك 1 في أكتوبر 1957 تلاه إطلاق الساتل الأمريكي الأول الذي يدعى إكسبلورر 1، بعد أربعة أشهر فقط. واستُخدمت السواتل الأولى في الدراسات المتعلقة بالشمس والغلاف الجوي ولكن سرعان ما تحول التركيز إلى الاتصالات. وأطلقت الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (NASA) في أغسطس 1960 ساتل ترحيل منفعلاً، إيكو 1، استخدم بمثابة "مرآة" تعكس الإشارات الراديوية وتعيدها ثانية إلى الأرض [Whalen, 2002]. وتُعرف أحياناً دراسات الانتشار المبكرة التي أجريت باستخدام إيكو 1 في 1960 [Jakes Jr, 1961] على أنها تجارب التوقيت الساتلي الأولى. ومن المرجح أن أول تجربة للتوقيت الدقيق أجريت بواسطة ساتل الترحيل النشط تليستار 1 في أغسطس 1962. وقد سمحت هذه التجربة للمرصد البحري للولايات المتحدة (USNO) والمختبر الفيزيائي الوطني (NPL) للمملكة المتحدة ومرصد غرينتش الملكي (RGO) بإجراء مقارنة بين الساعات عبر المحيط الأطلسي باستخدام تقنية جديدة تدعى نقل التوقيت الساتلي ثنائي الاتجاه.

وجميع الأنظمة الساتلية المنتمية إلى مختلف خدمات الاتصالات الراديوية الفضائية (الخدمة الإذاعية والخدمة الساتلية الثابتة والمتنقلة وغيرها من الخدمات) لديها، بطريقة أو بأخرى، القدرة على نقل إشارات التوقيت والترددات واستخدامها [Lowe et al., 2007]. ونقل التوقيت مطلوب من أجل نظام القياس عن بُعد والتتبع والتحكم لأغراض تحديد التوقيت ووسمه. غير أن متطلبات دقة التردد والتوقيت بالنسبة للعديد من سواتل الاتصالات (لا سيما التجارية منها) تقتصر عموماً على تلك المطلوبة للحفاظ على نطاق التردد الراديوي المخصص وأداء المهام المذكورة أعلاه. وفي الوقت نفسه، تتطلب بعض أنظمة الاتصالات الساتلية مثل تلك التي تستخدم أنظمة النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني (TDMA) التوقيت الدقيق لأغراض الاتصالات.

وتحتاج الأنظمة الساتلية لاستكشاف الأرض والأرصاد الجوية إلى وسائل توقيت دقيقة لقياس المعلومات البيئية المختلفة (مثل مستوى البحر) وقد استعملت خلال فترة طويلة لبث إشارات التوقيت الدقيق [Lombardi and Hanson, 2005; EUMETSAT Satellite Jason-2, 2008].

وتؤدي بعض الأنظمة وخاصة تلك التي تنتمي إلى خدمة الملاحة الراديوية الساتلية [لوائح الراديو، 2008]، دوراً مهماً في بث إشارات التوقيت والتردد الدقيقة. ويؤدي نقل إشارات التوقيت والتردد دوراً حاسماً في تشغيل هذه الأنظمة، حيث إن دورها الأساسي يتمثل في توفير خدمة الموقع والسرعة والتوقيت على نحو فعال عبر العالم. وتتضمن هذه الأنظمة مصادر دقيقة للتوقيت/التردد على متن السواتل فضلاً عن أجزاء فعالة منصوبة على الأرض لرصد تشغيل هذه السواتل والحفاظ على دقة مصادر التوقيت/التردد على متنها. وقد خصصت لوائح الراديو (RR) التي يصدرها الاتحاد خدمة خاصة للاتصالات الراديوية الفضائية من أجل بث إشارات التوقيت والتردد الدقيقة عبر العالم يطلق عليها خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت الساتلية.

### 1.2.1 خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت

اعترافاً بأهمية معايير التوقيت والتردد الدقيقين بالنسبة للعديد من الصناعات والمنظمات العلمية واتصالات الطوارئ، أدرج الاتحاد الدولي للاتصالات تعريف [لوائح الراديو، 2008] لخدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت ومحطات الاتصالات الراديوية المتصلة بها في معاهدته الدولية المتمثلة في لوائح الراديو. وفيما يلي التعاريف المقدمة في طبعة 2008 من لوائح الراديو:



**53.1»** خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت: هي خدمة اتصالات راديوية تؤمن إرسال ترددات خاصة أو إشارات توقيت أو النوعين معاً، بدقة فائقة معطاة، وهذا الإرسال معد للاستقبال العام، لغايات علمية وتقنية وغيرها.

**54.1** خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت الساتلية: هي خدمة اتصالات راديوية تستعمل محطات فضائية واقعة على سواتل أرضية، لنفس الغايات التي تهدف إليها خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت.

يمكن أن تشمل هذه الخدمة أيضاً وصلات التغذية اللازمة لتشغيلها.

**95.1** محطة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت: هي محطة في خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت.

توزع المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية (WRC) بعض أجزاء طيف التردد الراديوي لخدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت. ويتضمن الجدول 1-1 مقتطفاً من جدول توزيع نطاقات التردد الوارد في لوائح الراديو الذي يصف نطاقات الترددات الموزعة لخدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت الساتلية.

#### الجدول 1-1

#### نطاقات التردد الموزعة لخدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت الساتلية (لوائح الراديو، طبعة 2008)

نطاق التردد	التوزيع	الوضع	التعليق
MHz 400,15-400,05		أولي	يطبق الرقمان 261.5 و 262.5 من لوائح الراديو
MHz 2 ± 4 202	فضاء-أرض		مصرح به بموجب الرقم 440.5 من لوائح الراديو شريطة الحصول على الموافقة بموجب الرقم 21.9
MHz 2 ± 6 427	أرض-فضاء		مصرح به بموجب الرقم 440.5 من لوائح الراديو شريطة الحصول على الموافقة بموجب الرقم 21.9
GHz 13,75-13,4	أرض-فضاء	ثانوي	
GHz 14-13,75	أرض-فضاء	ثانوي	
GHz 21,2-20,2	فضاء-أرض	ثانوي	
GHz 25,5-25,25	أرض-فضاء	ثانوي	
GHz 31-30	فضاء-أرض	ثانوي	
GHz 31,3-31	فضاء-أرض	ثانوي	طبق الرقم 149.5 من لوائح الراديو

تلتزم المادة 26 من لوائح الراديو (انظر أدناه النص المقتطف من طبعة لوائح الراديو لعام 2008) الدول الأعضاء في الاتحاد بأن تدعم الأنشطة المتعلقة بتوفير التشغيل الفعال لأنظمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت (بما في ذلك الساتلية منها) وحماية هذه الأنظمة من التداخل الضار.

## المادة 26

## خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت

**1.26** البند 1 (1) على الإدارات التي تؤمن أو تعتزم تأمين خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت أن تنسق وفقاً لأحكام هذه المادة إنشاء هذه الخدمة وتشغيلها على المستوى العالمي، مع العمل على التوسع في هذه الخدمة لتصل إلى مناطق العالم التي لا تتوافر فيها بقدر كافٍ، وذلك لتحقيق المزيد من الفعالية في استخدام طيف الترددات الراديوية ولدعم أنشطة تقنية وعلمية أخرى.

**2.26** (2) تحقيقاً لهذا الغرض، تتخذ الإدارات التدابير اللازمة لتنسيق كل بث جديد للترددات المعيارية أو إشارات التوقيت أو أي تغيير في البث الموجود بنطاقات الترددات المعيارية بمساعدة المكتب. وتتبادل الإدارات جميع المعلومات المفيدة في هذا المجال فيما بينها وتبلغها إلى المكتب. وفي هذا الخصوص، يستشير المكتب المنظمات الدولية الأخرى التي لها اهتمام مباشر وجوهري بالموضوع.

**3.26** (3) ينبغي قدر الإمكان ألا يخصص أي تردد جديد في نطاقات خدمة الترددات المعيارية أو ألا يبلغ إلى المكتب قبل إجراء التنسيق المشار إليه أعلاه.

**4.26** البند 2 يجب أن تتعاون الإدارات فيما بينها للحد من التداخلات في نطاقات الترددات الموزعة لخدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت.

**5.26** البند 3 يجب على الإدارات التي تؤمن هذه الخدمة أن تتعاون فيما بينها عن طريق المكتب من أجل تجميع نتائج قياسات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت وتوزيعها، وكل تفاصيل التعديلات الخاصة بالترددات وإشارات التوقيت.

**6.26** البند 4 تسترشد الإدارات بالتوصيات ITU-R ذات الصلة عند اختيار الخصائص التقنية لبث الترددات المعيارية وإشارات التوقيت.

وجدير بالإشارة أنه لا يوجد أي نظام ساتلي مكرس حصراً لبث الترددات المعيارية وإشارات التوقيت. وكما ذكر أعلاه، غالباً ما ترتبط أجهزة نقل إشارات التوقيت والترددات الدقيقة بتطبيقات أخرى على متن الساتل ذاته.

ولا يوجد لدى بعض البلدان تخصيصات في خدمة الترددات المعيارية وإشارات التوقيت الساتلية، نظراً لأنها تستخدم، كمصدر دقيق لنقل إشارات الوقت والترددات، الأنظمة الساتلية المنتمة إلى خدمات الاتصالات الراديوية الفضائية الأخرى القادرة على نقل إشارات التوقيت عالية الدقة إلى أي مكان على سطح الأرض (النظام GNSS مثلاً).

## 2.2.1 الأنظمة العالمية للملاحة الساتلية

تعد الأنظمة العالمية للملاحة الساتلية (GNSS) (2010) التي تنتمي إلى خدمة الملاحة الراديوية الساتلية (RNSS) [لوائح الراديو، 2008]، عملياً في الوقت الحالي، الأدوات الرئيسية لنقل الترددات وإشارات التوقيت الدقيقة على أساس عالمي.

وهناك نظامان عالميان للملاحة الساتلية وثلاثة أنظمة من أنظمة التعزيز القائمة على السواتل (SBAS) تعمل في الوقت الراهن:

- النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS) للولايات المتحدة الذي يوفر تغطية عالمية؛

- النظام العالمي الساتلي الروسي للملاحة (GLONASS) الذي يوفر تغطية عالمية تقريباً.

وأنظمة SBAS التي توفر مزيداً من التغطية الملاحة المحلية هي:

- نظام التعزيز واسع المنطقة (WAAS) يوفر إشارات GNSS إضافية باستخدام السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض إنمارسات لزيادة التغطية في الولايات المتحدة الأمريكية.

- الخدمة الملاحة المكملة المستقرة بالنسبة إلى الأرض للتغطية الأوروبية (EGNOS) توفر إشارات GNSS إضافية باستخدام إنمارسات لزيادة التغطية في أوروبا.
  - نظام التعزيز الساتلي متعدد الوظائف (MSAS) يستخدم سواتل MSAS مكرسة لتوفير إشارات GNSS إضافية في اليابان والبلدان الآسيوية المجاورة.
- ويرد في الفصول التالية وصف مفصل لأنظمة GPS و GLONASS و SBAS.
- وهناك عدة أنظمة وطنية ودولية أخرى في مراحل التصميم والتطوير، مثل نظام COMPASS (الصين)، و Galileo (وكالة الفضاء الأوروبية)، والنظام الإقليمي الهندي للملاحة الساتلية (IRNSS) (الهند) و QZSS (اليابان).
- وترد أيضاً أوصاف موجزة للأنظمة المذكورة أعلاه والخصائص التقنية الأساسية لأجزائها الفضائية في التوصية ITU-R M.1787 - وصف الأنظمة والشبكات في خدمة الملاحة الراديوية الساتلية (فضاء-أرض وفضاء-فضاء) والخصائص التقنية لمخطات الإرسال الفضائية العاملة في النطاقات MHz 1 164-1 215 و MHz 1 215-1 300 و MHz 1 559-1 610.

## المراجع

- JAKES Jr, W.C. [1961] Participation of Bell Telephone Laboratories in Project Echo, Bell System Technical. Journal, 40, 975-1028.
- LOMBARDI, M. A., HANSON D. W., [March-April 2005] The GOES Time Code Service, 1974-2004: A Retrospective. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 11, 2, (<http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/110/2/j110-2lom.pdf>).
- Low Earth Orbiting (LEO) satellite Jason-2 Space segment, the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), 2006, ([http://www.eumetsat.int/Home/Main/What\\_We\\_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en](http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en)).
- LOWE, J., HEIDECKER, J., SWIDAN, M., HISHAM, A., SAMUEL, A. S. [2007] Standard time and frequency dissemination via egyptian digital satellite. 39<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Long Beach, California, USA, (<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/2274.pdf>).
- WHALEN, D. J. [2002] The origins of Satellite Communications: 1945-1965. Smithsonian History of Aviation and Spaceflight Series, Smithsonian Books.

## نصوص قطاع الاتصالات الراديوية

- لوائح الراديو، طبعة 2008، المجلد 1، المادة 1 - مصطلحات وتعريفات، الاتحاد الدولي للاتصالات، 2008، (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- التوصية ITU-R TF.686-2 - مسرد وتعريف مصطلحات التوقيت والتردد، (<http://web.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>).
- التوصية ITU-R M.1787 - وصف الأنظمة والشبكات في خدمة الملاحة الراديوية الساتلية (فضاء-أرض وفضاء-فضاء) والخصائص التقنية لمخطات الإرسال الفضائية العاملة في النطاقات MHz 1 164-1 215 و MHz 1 215-1 300 و MHz 1 559-1 610، (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/en>).



## الفصل 2

### النظام العالمي لتحديد الموقع

#### الصفحة

8	وصف عام ومبادئ التشغيل	1.2
8	أساسيات النظام العالمي لتحديد الموقع	2.2
9	شفرات الضوضاء العشوائية من أجل النفاذ المتعدد بتقسيم شجري وقياس المدى	1.2.2
10	طيف النظام GPS	2.2.2
11	رسالة الملاحة	3.2.2
12	أجزاء النظام العالمي لتحديد الموقع	3.2
12	الجزء الفضائي	1.3.2
13	الجزء الخاص بالتحكم	2.3.2
14	الجزء الخاص بالمستعمل	3.3.2
14	الدور الذي يقوم به التوقيت والتزامن في العمليات	4.2
14	قياسات تحديد المدى وعوامل الأداء	1.4.2
15	استقرار مقياسية الساتل والتنبؤ بها	2.4.2
15	تقييم أداء مقياسية ساتل النظام GPS	5.2
17	تأخيرات مسيرات السواتل	1.5.2
18	النسبية	2.5.2
18	مساهمات مقياسية المستقبل	6.2
19	مقياسية مستقبل الملاحة	1.6.2
19	مقياسية مستقبل التوقيت	2.6.2
20	تحديد التوقيت ورعايته	7.2
20	عمليات جزء التحكم	1.7.2
20	توجيه توقيت النظام GPS	2.7.2
21	المراجع	

يؤدي نقل إشارات التوقيت والتردد دوراً هاماً في عمل النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS) وقد تعزز إلى حد كبير بفضل قبوله على الصعيد العالمي. ويسلط هذا الفصل الضوء على دور الساعات وإشارات الوقت والتردد في تشغيل النظام العالمي لتحديد الموقع وقدرات هذا النظام وأوجه قصوره فيما يتعلق بتوفير آلية لبث هذه الإشارات.

## 1.2 وصف عام ومبادئ التشغيل

يوفر النظام العالمي لتحديد الموقع البنية التحتية لتحديد الموقع والسرعة والتوقيت (PVT) على الصعيد العالمي بالإضافة إلى مجموعة من التطبيقات الأخرى المستمدة من هذه القدرات الأساسية. ويتألف النظام من ثلاثة أجزاء - الجزء الفضائي وجزء التحكم وجزء المستعمل.

والجزء الأكثر شيوعاً هو الجزء الفضائي، وهو عبارة عن كوكبة تتألف اسمياً من 24 ساتلاً في مدارات شبه متزامنة (11 ساعة و 58 دقيقة) ترسل باستمرار إشارات قياس المدى بتمديد الطيف باتجاه الأرض. وترسل جميع السواتل على نفس الترددات (حوالي 1,5 GHz (النطاق-L)) المشكلة بعدة شفرات تعريف ضوئية شبه عشوائية.

ويرصد جزء التحكم سلامة السواتل وحالتها وأدائها وينشئ رسالة بيانات تبثها السواتل ويتخذ الإجراءات اللازمة للإبلاغ عن أي عيوب في السواتل ومعالجتها. ويشمل جزء المستعمل أجهزة استقبال عسكرية ومدنية على السواء في العالم كافة. وتحمل سواتل نظام GPS معايير الروبيديوم أو السيزيوم (أو كليهما) التي توفر مرجعاً يولد إشارات قياس المدى التي ترسها السواتل.

## 2.2 أساسيات النظام العالمي لتحديد الموقع

يلخص الجدول 1-2 العديد من السمات الرئيسية للنظام العالمي لتحديد الموقع. ويقوم كل ساتل GPS بإرسال إشارتين (أو أكثر) للموجة الحاملة في النطاق-L مشكلتين بشفرتين أو أكثر للضوضاء شبه العشوائية (PRN) وتدقق اثنتين للبيانات. وشفرات الضوضاء العشوائية ضرورية لتنفيذ المتعدد بتقسيم الشفرة الذي يسمح لجميع السواتل باستخدام نفس الترددات مع أدنى حد من التداخل. وتمكن الشفرات أيضاً من إجراء قياسات المدى في اتجاه واحد بدقة عالية. ولتحقيق ذلك، يولد المستقبل نسخة محلية مطابقة لشفرة الساتل التي يتوقع رؤيتها ويبحث عن التراصيف الصحيح لإشارة النسخة المطابقة في حالتي التأخير والدوبلر. وتوفر رسالة البيانات التي تُدعى "NAV-MSG" معلومات حول الساعة الساتلية وموقع الساتل الدقيق وهي عبارة عن تقويم لكوكبة السواتل وسلامتها وحالتها وما إلى ذلك. وهناك عدد من المراجع الممتازة بشأن نظام GPS تتطرق إلى التشغيل الأساسي بتفصيل أكبر بكثير مما سنقوم به هنا. وعلى وجه التحديد، تقدم الكتب الدراسية من إعداد Misra و Enge [Misra and Enge, 2001] و Kaplan [Kaplan and Hegarty, 2006] أوصافاً تفصيلية ومفهومة بشأن جميع الجوانب المتعلقة بنظام GPS. وتقدم المقالة العلمية [Parkinson, et al., 1996] دراسة أكثر شمولاً مع مناقشات مستفيضة للتطبيقات ومبادئ التشغيل. ونقتصر في هذا الكتيب على تقديم لمحة عامة موجزة تمهيداً لمناقشة دور التوقيت في هذا النظام الهام.

### الجدول 1-2

#### النظام العالمي لتحديد الموقع

تردد الإشارة	شفرات الطيف الممتد	معدلات الشفرة
MHz 1 575,42 L1	حياسة واضحة - C/A	MHz 1,023
	الدقة - شفرة P	MHz 10,23
	شفرة Y (إشارة عسكرية)	MHz 10,23
	NAV-MSG (بيانات ساتلية)	bits/s 50
MHz 1 227,60 L2	الدقة - شفرة P	MHz 10,23
	شفرة Y (إشارة عسكرية)	MHz 10,23
	NAV-MSG (بيانات ساتلية)	bits/s 50

وقد صُمم نظام GPS في أوائل سبعينيات القرن الماضي بهدف أساسي يتمثل في تزويد المستعملين التابعين لوزارة الدفاع الأمريكية (DoD) وحلفائهم بخدمة تحديد الموقع والسرعة والتوقيت على نحو فعال. واستُمدت المتطلبات التي حددت معمارية النظام الأصلي بالكامل تقريباً من بعثات وزارة الدفاع. ومع ذلك، أصبح نظام GPS منذ ذلك الحين، نظاماً نموذجياً "مزيج الاستخدام". وتشير التقديرات إلى أن النظام GPS خدم في عام 2002 حوالي 300 000 مستعمل تابع لوزارة الدفاع و4 000 000 مستعمل مدني وتجاري في الولايات المتحدة بمفردها. ولم يذهب دور المستعملين المدنيين سدى، حيث يجري حالياً التحكم في النظام بواسطة مكتب برنامج مشترك يضم ممثلين عن وزارة الدفاع الأمريكية ومنظمة حلف شمال الأطلسي ووزارة النقل المسؤولة عن التطبيقات المدنية.

وتم الاعتراف بأهمية الاستخدام المزيج للنظام داخل الحكومة الأمريكية بحيث تم تشكيل فريق توجيه تنفيذي لتنسيق استخدام النظام وتوجيهه في دوره المزيج. ويشارك في رئاسة اللجنة التنفيذية المعنية بالموقع والملاحة والتوقيت (PNT) النواب الرئيسيون للدفاع والنقل مع ممثلين من وكالات حكومية أخرى. ويدعم مكتب تنسيق اللجنة التنفيذية للإشراف على إدارة البرنامج المعني.

## 1.2.2 شفرات الضوضاء العشوائية من أجل النفاذ المتعدد بتقسيم شفري وقياس المدى

تستعمل شفرات الضوضاء العشوائية (PRN) في نظام GPS للتمكين من إجراء قياسات المدى والنفاذ المتعدد على تردد مشترك في نفس الوقت. والشفرتان الأصليتان لنظام GPS هما شفرة الدقة (P) وشفرة الحيابة التقريبية (C/A). ويتم انتقاء شفرات GPS C/A من مجموعة من شفرات غولد (Gold Codes)، يبلغ طولها 1 023 بته تُؤَلَد داخل الساتل بمعدل يبلغ 1,023 MHz.

ويرسل كل ساتل GPS شفرة C/A فريدة بحيث يتسنى لجهاز استقبال المستعمل تمييزها بسهولة. وتسهّل المدة القصيرة (1 ms) للشفرة C/A سرعة الحيابة ولكن تجعلها عرضة للتداخل أيضاً. وتبلغ مدة كل بته من الشفرة C/A حوالي 900 نانوثانية (ns) أو 300 m. وتقوم عادة عروة تتبع شفرة جهاز الاستقبال لدى المستعمل بقياس تراصف الشفرة بدقة تتراوح بين 1/100 و1/1 000 من البته.

وشفرة P أطول بكثير وتُولَد عند 10,23 MHz. وبهذا المعدل، يستغرق استكمال الشفرة الكاملة 37 أسبوعاً. ويُخصّص لكل ساتل GPS قطاع لمدة أسبوع واحد للشفرة P التي تستهل الإرسال على امتداد الأسبوع من منتصف الليل من السبت - الأحد.

وفي إطار عملية تدعى "A/S" أو مكافحة الاحتيال، لا ترسل الشفرة P عادة بل يستعاض عنها بشفرة P-محفرة ذات خصائص مماثلة تُعرف باسم شفرة Y. ويستخدم مصطلح P(Y) عموماً لتمثيل مكون الإشارة هذا. والإشارة P(Y) أكثر قدرة على مقاومة التداخل من الشفرة C/A ومع مدة بتهتها الأقصر، لديها القدرة على تحقيق دقة قياس أكبر.

وتم انتقاء الشفرتين C/A و P(Y) لخصائص الترابط المتبادل والترابط التلقائي لديهما. ويسمح الترابط المتبادل المنخفض بين الشفرتين ضمن المجموعة بتقليل التداخل بنفاذ متعدد لدى جميع السواتل التي ترسل في آن واحد.

وخصائص الترابط التلقائي للشفرات PRN شبيهة بتلك الخاصة بالضوضاء البيضاء الغوسية. وبالنسبة إلى حالات التأخير خلاف الصفر، لا تتطابق الشفرة جيداً مع نفسها، وهذا أمر مهم إذ إنها تسمح بتراصف النسخة المرجعية المطابقة لجهاز الاستقبال بدقة وبدون لبس مع إشارة GPS الواردة. ويبين الشكل 1-2 خصائص الترابط للشفرات GPS C/A.

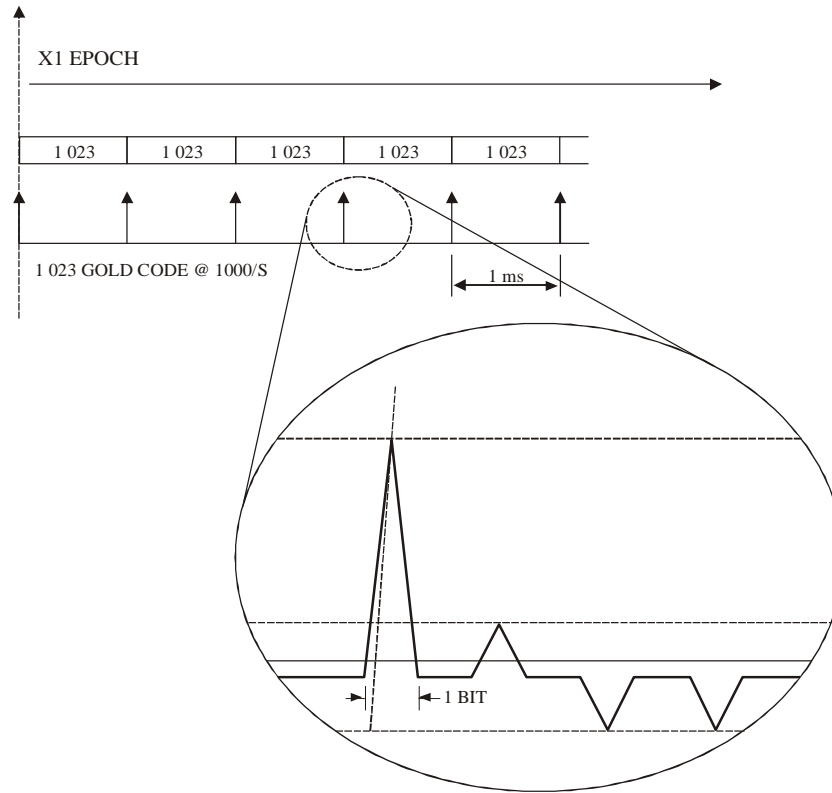
ويجري حالياً تعريف وتنفيذ مجموعات جديدة متعددة من الشفرات لسواتل النظام GPS من الجيل التالي. وهناك شفرات مدنية جديدة أضيفت إلى ترددات النطاق L2، تُدعى L2C وتردد جديد تماماً، 1 176,45 MHz يُدعى L5 ومجموعة جديدة من الشفرات العسكرية تُدعى شفرات M.

وتستفيد تصاميم الشفرات الجديدة من تحسينات التشفير وتصحيح الخطأ ومعالجة الإشارة الرقمية التي أدخلت منذ سبعينيات القرن الماضي. ومن المتوقع ظهور هذه الشفرات الجديدة في البداية مع المجموعة المقبلة من السواتل التي سيتم إطلاقها والمعروفة باسم سواتل Block IIF الجاري إرسالها بواسطة الكوكبة الكاملة مع تنفيذ سواتل النظام GPS من الجيل التالي التي تدعى GPS III.



الشكل 1-2

## خصائص الترابط للشفرة GPS C/A



Sat\_time\_freq-02-01

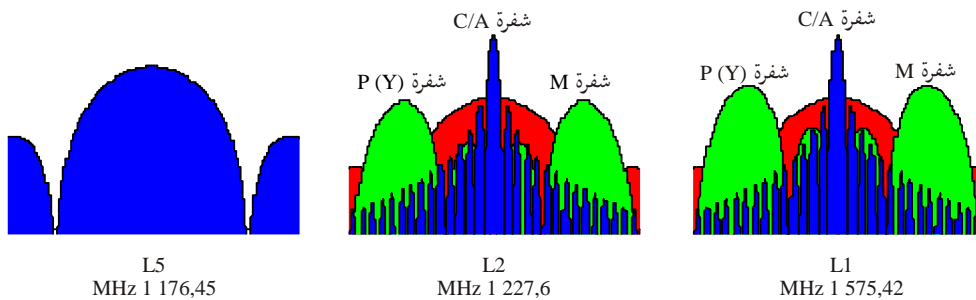
## 2.2.2 طيف النظام GPS

يوضح الشكل 2-2 طيف إشارة النظام GPS الحالية والمحدثة. وتُستمد جميع الترددات على متن سواتل النظام GPS من معيار تردد ذري مرجعي يبلغ 10,23 MHz، يعرف بالميكانيات الذرية. والإشارتان التقليديتان الحاملتان هما L1 عند 1 575,42 MHz و L2 عند 1 227,6 MHz.

وفي 2002، كانت الموجات الحاملة للإشارة L2 تنقل فقط الشفرة P(Y) عند 10,23 MHz بينما تنقل الموجات الحاملة L1 كلاً من الشفرتين P(Y) و C/A بأسلوب مربع الطور.

الشكل 2-2

## طيف إشارة النظام GPS



Sat\_time\_freq-02-02

وتقتصر معظم أجهزة الاستقبال منخفضة التكلفة في الوقت الحالي على تتبع إشارات الشفرة L1 C/A. وبمقدور أجهزة الاستقبال لوزارة الدفاع تتبع الشفرة P(Y) إلى حد كبير عند الترددات L1 و L2. كما أن أجهزة الاستقبال التجارية عالية الأداء المصممة للقيام بوظائف علمية أو غيرها من الوظائف عالية الدقة تقوم بتتبع كلتا الإشارتين الحاملتين باستعمال مجموعة متنوعة من التقنيات للنفاذ إلى إشارات الترددات الراديوية الأساسية وإن كان ذلك مع انخفاض كبير في النسبة إشارة إلى ضوضاء [Misra and Enge, 2001].

وسيضيف طيف النظام GPS المحدث إشارتين مدنيتين PRN متميزتين ضيقتي النطاق إلى الإشارة L2 لإنشاء الإشارة L2C ونسخة محدثة من رسالة الملاحة المعروفة باسم CNAV. وسيضاف طيف الشفرة-M المقسم إلى الإشارتين L1 و L2 كليهما. ويقصد بالإشارة المدنية L5C الجديدة أن تكون إشارة لسلامة الحياة البشرية ومن المخطط إتاحتها مع الإطلاق الأول للساتل GPS IIF (2010) [Kaplan and Hegarty, 2006]. ويتم إرسال شفرتين PRN لقياس المدى على الإشارة L5: شفرة مع الطور (تدعى شفرة-I5)؛ وشفرة بطور متعامد (تدعى شفرة-Q5). ويبلغ طول الشفرتين 10,230 بتة يتم إرسالهما على تردد 10,23 MHz بمعدل تكرار يبلغ 1 ms. ويتم تشكيل تدفق الشفرة-I5 بشفرة نيومان-هوفمان بمعدل 10 بتات مضبوطة على 1 kHz ويتم أيضاً تشكيل الشفرة-Q5 بشفرة نيومان-هوفمان بمعدل 20 بتة مضبوطة على 1 kHz.

وبالإضافة إلى الفوائد التي يوفرها التردد الإضافي، تُصمم بنية الإشارة والشفرات من أجل:

- تحسين بنية الإشارة لتحسين الأداء؛
- توفير قدرة أعلى بمقدار 3 dB؛
- دعم كسب معالجة يصل لعشرة أضعاف بفضل عرض النطاق الأوسع.

### 3.2.2 رسالة الملاحة

تشمل رسالة الملاحة (NAV-MSG) جميع البيانات التي يحتاج إليها جهاز الاستقبال لوضع الحلول المتعلقة بالموقع والسرعة والتوقيت استناداً إلى المدى التقريبي و/أو تأثير دوبلر الملاحظ [IS-GPS-200 rev D, 2006]. ويوضح الشكل 2-3 عناصر الرسالة NAV-MSG. وتتكون هذه العناصر من رتل يضم 1 500 بتة يتألف من 5 أرتال فرعية لكل منها 300 بتة. ويُرسَل كل رتل فرعي بمعدل 50 بتة/ثانية ويستغرق 6 ثوان لاستكمالها. ومع ذلك، يمثل الرتلان الفرعيان 4 و 5 معاً 1/25 من تقويم كوكبة السواثل ككل. وهذا يعني أن استكمال التقويم بكامله يستغرق 12,5 دقيقة.

الشكل 3-2

#### رسالة الملاحة

الرتل الفرعي 1	كلمة القياس عن يُعد	كلمة تمرير					تصحيح الميقاتية				
الرتل الفرعي 2	كلمة القياس عن يُعد	كلمة تمرير					التقويم الفلكي				
الرتل الفرعي 3	كلمة القياس عن يُعد	كلمة تمرير					التقويم الفلكي				
الرتل الفرعي 4	كلمة القياس عن يُعد	كلمة تمرير					البث المتعدد الرسالة عبر 25 رتلاً				
الرتل الفرعي 5	كلمة القياس عن يُعد	كلمة تمرير					البث المتعدد للتقويم/السلامة/الحالة عبر 25 رتلاً				

تأتي كلمة التمرير HOW في بداية كل رتل فرعي. وتوفر الكلمة HOW معلومات التوقيت الحرجة اللازمة لأجهزة استقبال الأنظمة الدقيقة لتحديد الموقع (PPS) من أجل "التمرير" من تتبع شفرة C/A إلى تتبع شفرة P(Y). وتوفر الكلمة HOW التوقيت الدقيق للأسبوع الذي يبدأ فيه الرتل الفرعي التالي بوحدات من 1,5 ثانية. وبالتالي، يمكن للجهاز الاستقبال الذي يتولى فك تشفير الكلمة HOW أن يحدد توقيته الداخلي بدون لبس استناداً إلى هذه القيمة.

ويشمل الرتلان الفرعيان الأوليان معلومات محددة عن سائل الإرسال وتعرف هذه البيانات مجتمعة بالتقويم وتشمل معلمات مدارية وتنبؤات بشأن أخطاء الميقاتية. ويتضمن الرتل الفرعي 1 ثلاث معلمات للميقاتية تقوم بنمذجة انحراف ميقاتية الساتل عن توقيت النظام GPS بواسطة دالة متعددة الحدود تربيعية. وانحراف التوقيت بالثواني عند التوقيت المرجعي (toc) هو الحد af0، وخطأ التردد بالوحدات sec/sec عند التوقيت المرجعي هو الحد af1؛ وانحراف التردد بالوحدات sec/sec<sup>2</sup> هو الحد af2.

ويدرج حد توقيت إضافي في رسالة الملاحية في الرتل الفرعي 4 وهو التصحيح UTC-GPS. ويمكن حساب التوقيت UTC من النظام GPS وهذه المعلمات. وينمذج هذا الحد كذلك بواسطة حد تحالف وانحراف. وفي نهاية عملية ضبط التوقيت UTC بالثانية الكبيسة، يدرج في هذا الرتل الفرعي بيان الأسبوع وقوع الحدث ومتى ستطبق الثانية الكبيسة على خرج التوقيت.

وعندما تتاح الإشارتان L2C وL5 ستقومان معاً بإرسال نسخة محدثة من الرسالة NAV-MSG تعرف بالرسالة CNAV. وكل واحدة من هاتين الإشارتين ستكون فعلياً عبارة عن مجموعة من التشكيلات على تردد الموجة الحاملة. وتبث في بعض الحالات وسيلة مساعدة للاستحواذ بدون بيانات تسمى موجة حاملة إرشادية إلى جانب إشارة البيانات كوسيلة مساعدة للاستحواذ. وتصمم هذه الإشارة بحيث يسهل استحواذها عن البيانات المشفرة، ويمكن عند استحواذها بنجاح أن تستخدم في الاستحواذ على إشارة البتات.

وتحسن هذه التقنية من استحواذ إشارة النظام GPS ويزيد من مستويات القدرة عند وحدة الربط. وستكون الرسالة CNAV على إشارة البيانات وستشمل نفس معلومات الرسالة التقليدية في نسق مرزم عشوائياً من رزم رسائل مدة كل منها 12 ثانية بمعدل 300 بته بدلاً من بنية الرتل. وستستخدم التصحيح الأمامي للأخطاء بشفرة تلافيفية بمعدل 1/2. وتدقق البيانات الناتج ذو المعدل 100 رمز في الثانية يضاف بعد ذلك إلى الموجة الحاملة للإشارة المتماثلة في الطور لإنتاج إشارة البيانات. ولن تحتوي الموجة الحاملة المتعامدة في الطور بعد ذلك أي بيانات وستتحول إلى إشارة إرشادية بدون بيانات.

### 3.2 أجزاء النظام العالمي لتحديد الموقع

يوصف النظام العالمي لتحديد الموقع عموماً بأنه يضم ثلاثة أجزاء - السواتل والتحكم والمستخدمين. ويقع عبء توليد الإشارة على كاهل كل من جزئي السواتل والتحكم.

#### 1.3.2 الجزء الفضائي

تضم الكوكبة الاسمية أو التشغيلية للنظام GPS 24 ساتلاً في مدارات شبه متزامنة. ويتم نشر السواتل في ستة مستويات مدارية بميل 55° يضم كل مستوى أربعة سواتل. والكوكبة الحالية تتجاوز الشرط الاسمي المتمثل في وجود 24 ساتلاً عاملاً، وتعرض في الشكل 2-4.

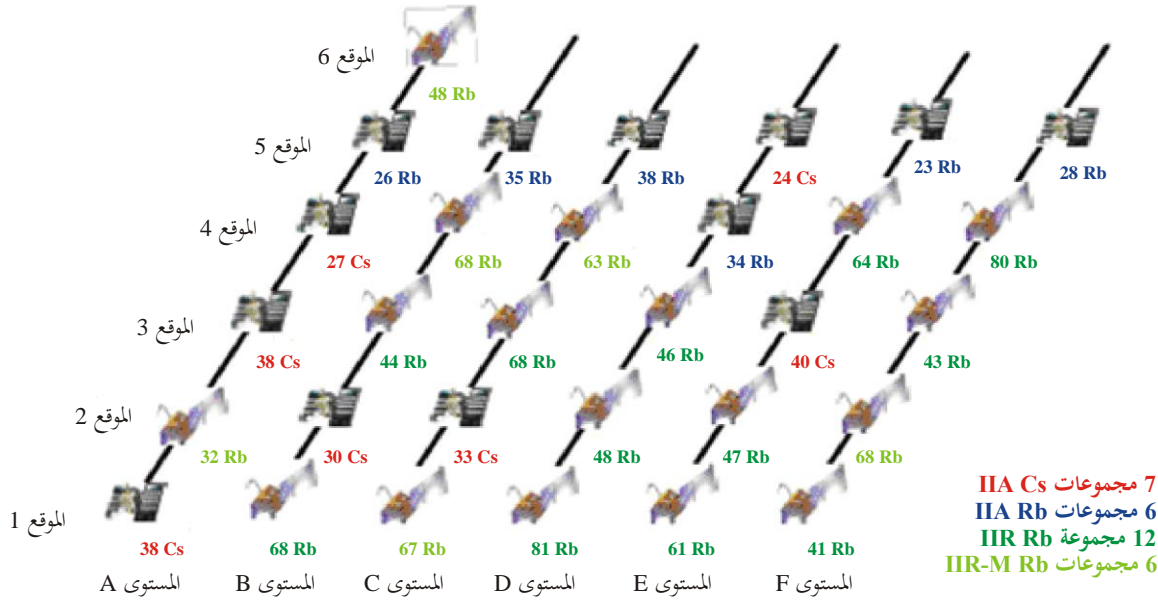
والسواتل مستقرة في ثلاثة محاور لتسديد صفيح هو إثبات الإرسال نحو الأرض والألواح الشمسية نحو الشمس. وقد تم استنباط العديد من "مجموعات" السواتل، بدءاً من المجموعة I التجريبية ووصولاً إلى أحدث عمليات النشر للمجموعة IIF من السواتل. وجاري حالياً تصميم الجيل التالي من سواتل المجموعة III.

وترسل إشارات النظام GPS بواسطة صفيح مكون من 12 من الهوائيات الحلزونية لإنتاج حزمة مشكلة توجه نحو الأرض بقدرة إشارة مستقبلية ثابتة تقريباً على سطح الأرض. والغرض من ذلك هو تدنية التداخلات بين السواتل وتحسين الأداء بالنسبة للمستخدم. وتشمل الحمولة النافعة لملاحية النظام GPS ثلاث أو أربع ميقاتيات ذرية ومعدات إلكترونية من أجل توليد إشارات تحديد الطيف المشتقة من الميقاتية. ويتحتم استعمال الميقاتيات الذرية لإتاحة الفرصة أمام تحسين التنبؤات المدارية وتوسيع عمليات تشغيل السواتل المستقلة في حالة عدم قدرة جزء التحكم الأرضي على أداء مهمته. وبالتالي، فخلافاً لسواتل الاتصالات النمطية

التي تقوم فقط بالإرسال رداً على إشارات ولدتها محطات أرضية، تنتج سواتل النظام GPS الإشارات المرجعية على متنها. ويبين الشكل 4-2 أنواع الميقاتيات المحمولة على متن كل ساتل بالكوكبة في عام 2008. وتستعمل ميقاتية واحدة فقط في كل الأوقات فيما تبقى الميقاتيات الأخرى في حالة عدم تشغيل إلى أن يطرأ عطل للميقاتية العاملة أو يحدث انخراط في أدائها. وتعمل الميقاتية الموجودة على متن الساتل كمرجع ترددي لتوليد الشفرتين C/A و P(Y) والإشارتين L1 و L2.

الشكل 4-2

### سواتل وميقاتيات النظام GPS في ديسمبر 2008



Sat\_time\_freq-02-04

### 2.3.2 الجزء الخاص بالتحكم

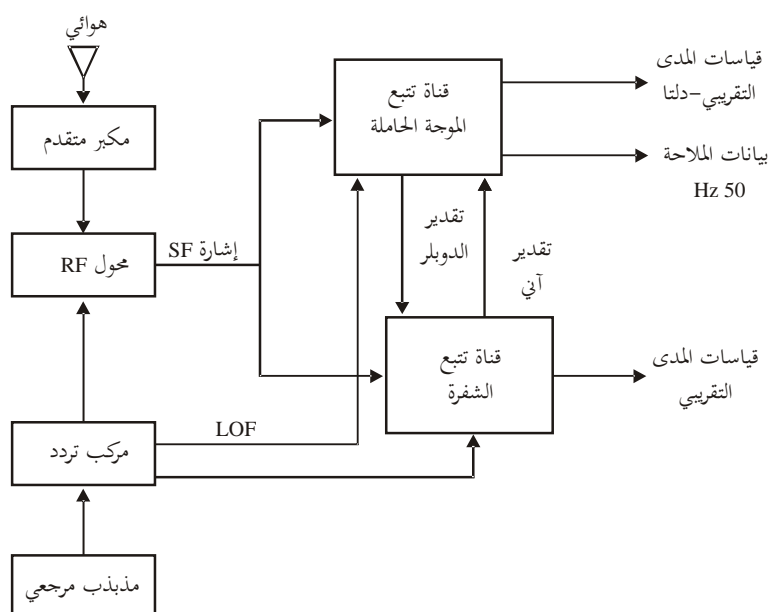
يتضمن الجزء الخاص بالتحكم محطة التحكم الرئيسية (MCS) في قاعدة شريف الجوية خارج كلورادو سيرنغ ومحطات مراقبة DoD مخصصة في هاواي وآسينسيون ودييغو غارسيا وكاواجليين. وتدعم الوكالة الوطنية للمعلومات الجيوفيزيائية (NGA) أيضاً مواقع مراقبة إضافية توفر قياسات GPS للجزء الخاص بالتحكم في النظام GPS من أجل تعزيز دقة التقويمات الفلكية والميقاتيات. وتوصل مستقبلات النظام GPS المزودة بالخدمة PPS لمحطات المراقبة المنزلية بهوائيات عالية الكسب تقوم بتتبع سواتل النظام GPS في السماء. وتقوم مستقبلات محطات المراقبة بالتسجيل المستمر لقياسات المدى التقريبي وتردد دوبلر وطور الموجة الحاملة على الإشارتين L1 و L2 على فواصل زمنية قيمة كل منها 1,5 ثانية.

والخطة MCS هي المسؤولة عن تحليل البيانات التي يتم تجميعها بواسطة محطات المراقبة لتحديد سلامة وأداء الحمولات النافعة لملاحقة سواتل النظام GPS. وتعالج قياسات محطات المراقبة أيضاً بواسطة المحطة MCS لتحديد الأخطاء في مدارات وميقاتيات سواتل النظام GPS. ومعلومات التقويم الفلكي والميقاتية في رسالة الملاحقة تحسب على أساس تنبؤات للمدارات والميقاتيات خلال الساعات الأربع والعشرين التالية. وتجري عمليات نشر رسائل الملاحقة على الشبكة عادة مرة أو مرتين يومياً.

تصمم تجهيزات المستعمل من أجل النظام GPS بحيث تستحوذ على إشارات النظام GPS وتتبعها بصورة منفصلة. ويوضح الشكل 2-5 العناصر الرئيسية لجهاز استقبال GPS - الهوائي والمذبذب ووحدة تركيب التردد ومحول الخفض والحول من تماثلي إلى رقمي (A/D) ومعالج القناة أو معالج الإشارة ومعالج الملاحظة.

وفي أي مستقبل ملاحظة نمطي، يكون مرجع التردد هو مذبذب بللوري كوارتز؛ في حين يمكن إضافة مذبذب مرجعي خارجي في حالة مستقبل التحويل الزمني. وتكون الهوائيات عادة نصف كروية مع بعض التركيبات التي تستخدم ما يطلق عليه هوائيات حلقات الكبح للتخفيف من انعكاسات الإشارة من الأسطح القريبة [Misra and Enge, 2001]. وينتج عن تحويل الخفض والاعتيان عينات IF من طيف GPS تغلب عليه الضوضاء. ويربط العينات المستقبلية بالانعكاسات المحلية لشفرات النظام GPS، يكون بمقدور المستقبل، حيازة كل سائل من السوائل المرئية وإجراء قياسات المدى له.

## المخطط الوظيفي العام لمستقبل GPS



## 4.2 الدور الذي يقوم به التوقيت والتزامن في العمليات

يشرح هذا القسم أهمية التوقيت الدقيق في عملية التشغيل الاعتيادي للنظام GPS بالنسبة للملاحة والتطبيقات الأخرى.

### 1.4.2 قياسات تحديد المدى وعوامل الأداء

يعد قياس التأخير الزمني أحادي الاتجاه وتأثير دوبلر هما الأساس بالنسبة للنظام GPS. فالمدى النظري عبارة عن قياس للتأخير بين زمن الوصول المدرك لإشارة عند مستقبل وزمن إرسال هذه الإشارة من الساتل الخاص بالنظام GPS.

وفي صورة معادلة:

$$(2-1) \quad PR = c(t_R - t_T)$$

ويربط المدى النظري بموقع المستقبل كالتالي:

$$PR = R + b_R - b_T + I + T + MP + \varepsilon \quad (2-2)$$

وبالتالي، فإن الأخطاء في زمن الإرسال المفترض للإشارة نتيجة الانحيازات في التوقيت في الساتل الخاص بالنظام GPS ( $b_T$ )، وزمن استقبال الإشارة نتيجة الانحيازات في التوقيت في المستقبل ( $b_R$ )، والتأخيرات الأيونوسفيرية ( $I$ )، والتروبوسفيرية ( $T$ )، وتعدد المسيرات وأخطاء المستقبل ( $\gamma$ )، تساهم جميعها في الخطأ في قياس المدى النظري. وتنفذ نماذج لتصحيح تأخيرات الانتشار في كافة مستقبلات النظام GPS. وأخطاء تتبع المستقبل ( $\varepsilon$ ) تنزع إلى أن تكون ذات وتيرة عالية ومن شأن التوسيط عبر الزمن أن يحد من مساهمتها. وميزانية الأخطاء المعنية لتنبؤ ميقائية الساتل ترد في الجدول 2-2 [Parkinson et al., 1996].

ومساهمة ميقائية المستقبل في الأخطاء غير محدودة بشكل أساسي، نظراً لأنه لا يلزم أن تكون مذبذباً ذرياً. وبالتالي، يجب تقدير هذه المعلمة في حل الملاحية الخاص بالمستقبل أو القضاء عليها من خلال تمييز مزدوج في أحد الحلول الشبكية.

## الجدول 2-2

### ميزانية أخطاء النظام GPS

مصادر الأخطاء	فضاء (m)	تحكم (m)	مستعمل (m)	نظام (m)
استقرار الميقائية والنظام الفرعي للملاحية	2,7	2,7	—	2,7
التنبؤ باضطراب الساتل	1,0	1,0	—	1,0
أخرى	0,5	0,5	—	0,5
تنبؤ التقويم الفلكي والميقائية	—	2,5	—	2,5
تعويض التأخير الأيونوسفيري	—	—	2,3	2,3
التأخير التروبوسفيري	—	—	2,0	2,0
ضوضاء واستبانة المستقبل	—	—	1,5	1,5
تعدد المسيرات	—	—	1,2	1,2
أخرى	—	—	0,5	0,5
RSS	3,0	3,8	3,6	
خطأ النظام ( $1\sigma$ )				5,3

## 2.4.2 استقرار ميقائية الساتل والتنبؤ بها

تعد ميقائية ساتل النظام GPS هي الأساس الذي تتولد منه جميع الإشارات المرسله. وكما هو موضح في الفقرة 1.3.2، يحمل كل ساتل على متنه ثلاث أو أربع ميقائيات ذرية متكررة، لا تعمل منها إلا واحدة في أي لحظة معينة. وتحدد إمكانية التنبؤ الخاصة بهذه الميقائية المساهمة في الخطأ بالنسبة لتحديد الموقع ودقة نقل التوقيت المطلق التي يمكن الحصول عليها بواسطة مستعمل مستقل بذاته والمعدل المطلوب لتحديثات رسالة الملاحية.

## 5.2 تقييم أداء ميقائية ساتل النظام GPS

يقوم مركز نافال لتكنولوجيا الفضاء بمختبر أبحاث نافال (NCST/NRL) بمراقبة أداء ميقائيات سواتل النظام GPS ونشر تقرير بشأن هذا الأداء كل ثلاثة أشهر. ومن الجوانب المهمة لدعم البرنامج ككل تقييم أداء الميقائيات الذرية للمركبات الفضائية وهي على المدار لدعم تطوير ميقائيات ذرية فضائية جديدة ومحسنة وتقييم المفاهيم التشغيلية للنظام وقياس أداء النظام. وتتاح إمكانية التقييم الدقيق لأداء أي نظام فرعي في النظام GPS من خلال قواعد بيانات شاملة إلكترونية للبرنامج NAVSTAR SV وبيانات مرصودة للمدى النظري.

وتشمل قاعدة البيانات بيانات مستمرة لدورة كل رحلة تطلق للبرنامج NAVSTAR SV. والبيانات المستقاة من جزء التحكم التشغيلي (OCS) في النظام GPS ومن محطات المراقبة التابعة للوكالة NGA إلى جانب بيانات التقويمات الفلكية الدقيقة المعالجة لاحقاً بالوكالة NGA، تستخدم جميعها لاشتقاق إشارات الميقاتيات من كل ميقاتية ذرية عاملة في النظام.

وقد برز هذا الجهد أثناء تتبع البرنامج المشترك NAVSTAR Block I و NCST/NRL ومكتب البرنامج المشترك (JPO) التابع للنظام GPS لساتل تكنولوجيا الملاحة الثاني والمجموعة I من السواتل التوضيحية التي تعمل مع جزء التحكم المؤقت. وقد تم توسيع النطاق ليشمل مجموعتي السواتل التشغيلية II/IIA و IIR وتشغيل جزء من التحكم التشغيلي.

وقد بدأ المختبر NRL في 2004 في إنتاج تقديرات للميقاتيات مشتقة من عمليات رصد لطور الموجة الحاملة والبيانات الدقيقة للتقويمات الفلكية المأخوذة من الخدمة الدولية للأنظمة GNSS (IGS). وتتألف الخدمة IGS من اتحاد يضم أكثر من 200 وكالة وطنية وجامعة ومركز بحوث في أكثر من 80 بلداً.

ويقدم كل مشارك مساهمات تضم مجموعة متنوعة واسعة من البيانات الملتقطة للنظام GPS وتحليلاتها. وتفضي هذه المساهمات إلى أفضل النماذج وتقنيات التحليل ومنتجات البيانات المتاحة التي تفيد بدورها كل وكالة من الوكالات المشاركة. ويرعى النظام IGS أكثر من 350 محطة تتبع GPS دائمة تعمل باستمرار وتستعمل مستقبلات تتبع متعددة القنوات مزدوجة التردد شفيرة وبالموجات الحاملة.

وقد طورت معايير مشتركة واعتمدت بشأن تخزين البيانات وتبادلها. وتشمل منتجات ميقاتية النظام IGS تقديرات لميقاتيات النظام GPS وميقاتيات المحطات الأرضية من أجل المنتجات السريعة والنهائية على حد سواء والجدول الزمني الموزعة للنظام IGS (IGST و IGRT) تنتج في المركز NCST/NRL وتوفر مرجعاً مستقراً لتحليل بيانات ميقاتية النظام GPS، مستقلاً عن ميقاتية محطة أرضية وحيدة.

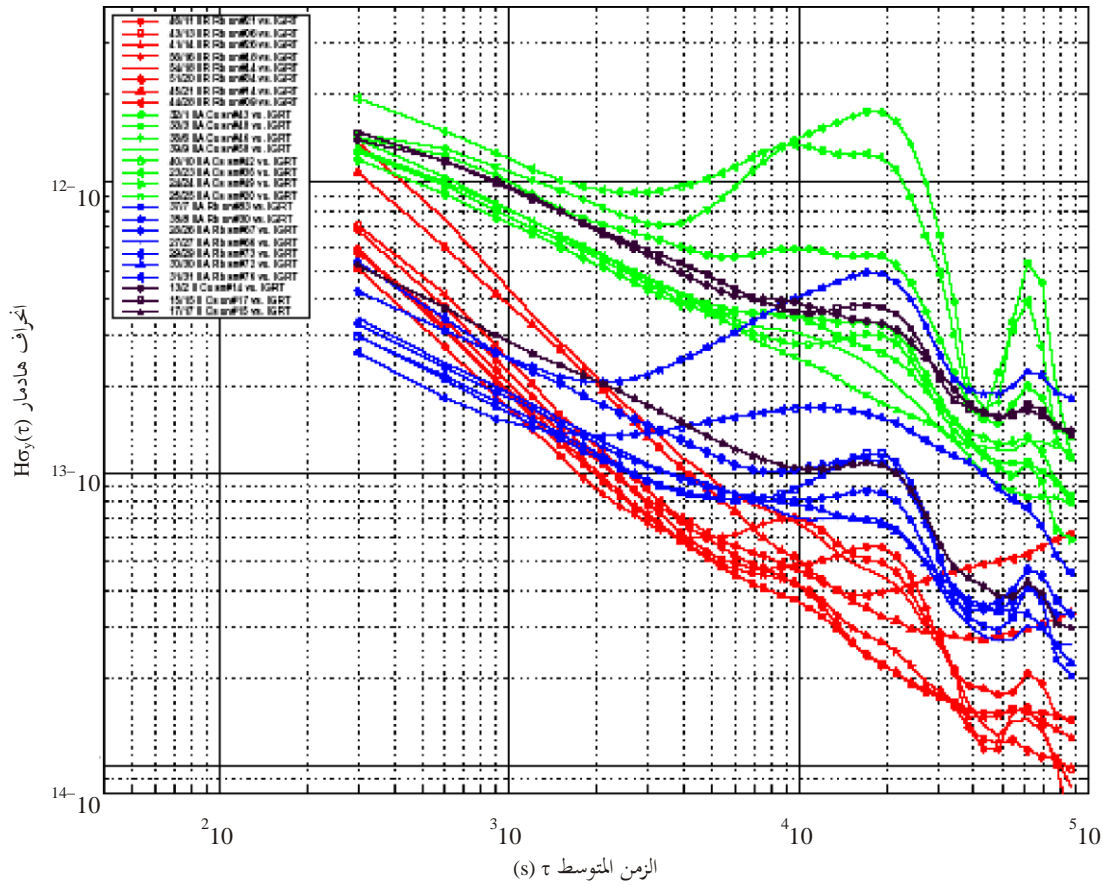
واستقرار التردد بالنسبة لكل ميقاتية ذرية SV و MS عاملة يحسب من البيانات الواردة في قاعدة البيانات على المدار وتقييم من خلال سلسلة مستمرة من البيانات. ويعتبر هذا التحليل مستقلاً عن ما تجريه الوكالات الأخرى من تحليلات ومكماً لها. ويتم تنسيق المقارنة البينية مع التحليلات الأخرى غالباً بشكل غير رسمي كمقياس اختباري لأغراض الاستقلالية. وينشر الأداء الاسمي كل ثلاثة أشهر ويجري تحليل مفصل على الرصدات التي تشير إلى سلوك غير اعتيادي أو شاذ. والأرشفة الإلكترونية لقاعدة بيانات البيانات على المدار في قاعدة بيانات النظام GPS يمكن استعماله في تحليل الأداء الاعتيادي والشاذ للميقاتية في فترة سابقة. وتمكن قاعدة البيانات الإلكترونية هذه من تقدير استقرار التردد من تدفقات مستمرة للبيانات بفترات زمنية متوسطة تتراوح بين 5 دقائق وسنوات بالإحالة إلى معيار مشترك.

ويوضح الشكل 2-6 استقرار التردد لميقاتيات السواتل في كوكبة النظام GPS.



الشكل 2-6

## استقرار الميقاتيات الذرية لسواتل النظام GPS



Sat\_time\_freq-02-06

## 1.5.2 تأخيرات مسيرات السواتل

إلى جانب التغيرات في الحمولة النافعة من التوقيت، يمكن لتأخيرات المسارات أو اختلافاتها داخل سائل النظام GPS أن تساهم هي الأخرى في أخطاء التوقيت بالنسبة لحل نقل التوقيت للمستعمل النهائي. ويجب على نحو خاص مراعاة الاختلافات في تأخير المسير بين مسيري الإشارتين L1 و L2 والاختلافات في الطور وفي تأخيرات الشفرة وتغيرات مركز الطور بالنسبة للهوائي.

والتصحيحات af0 و af1 الخاصة بالميقائية التي ترسل في رسالة الملاحية تحسب بالنسبة لمستقبل مزود بإمكانية الشفرة P(Y) مزدوجة التردد. ويرجع ذلك إلى أن الحل يقوم على رصدات لترددات مزدوجة من محطات المراقبة التابعة لجزء التحكم في النظام GPS. وبالتالي، فإن التصويب يتضمن تأثير الاختلافات في مسير الإشارة في توليفة من المسيرين P1 و P2 لإلغاء تأثير طبقة الأيونوسفير. ويجب على مستعمل التردد الوحيد تطبيق تصحيح على قيم ميقائية البث، يطلق عليه تأخير مجموعة التوقيت (tgd). وتستعمل قيمة وحيدة للتصحيح tgd لجميع السواتل في كل مرة. ومع ذلك تجرى قياسات فردية لتأخير المجموعات لكل سائل وتدرج حالياً في رسالة البث.

وحتى وقت قريب، كانت الأخطاء الأقل من دورة موجة حاملة واحدة (ns 0,6) لا تعتبر كبيرة بالنسبة لنقل التوقيت. بيد أنه مع ظهور حلول نقل التوقيت القائمة على طور الموجة الحاملة [Larson and Levine, 1999]، أصبحت تغيرات مركز الطور في هوائيات النظام GPS تحظى بأهمية متزايدة. ونتيجة لاستعمال هوائي باستقطاب دائري ميامن، فإذا كان على المركبة الفضائية أن تقوم بدورة كاملة حول اتجاه السم، فإن طور الموجة الحاملة يلف بمقدار دورة كاملة (cm 19,04 أو ns 0,6). وبالمثل، فإن المستعملين الذين يستقبلون إرسالات النظام GPS في أجزاء مختلفة من الأرض سيرصدون قيماً مختلفة لطور الإشارة. ويوجد حالياً تصويب لهذه الإزاحات بالنسبة للتطبيقات عالية الدقة [Larson et al., 2000].

## 2.5.2 النسبية

تقوم النسبية بدور بارز في توقيت النظام GPS وقد كرس مقالات عديدة وفصول في كتب كثيرة لهذا الموضوع. وترد تفاصيل أكثر عن هذا الموضوع الهام في فصل لاحق. ولن نتطرق هنا إلا إلى العناصر الرئيسية.

نظراً لوجودها على ارتفاع 20 000 km من سطح الأرض، فإن أي مقياسية على متن أي ساتل خاص بالنظام GPS تتأثر بتأثيرين من آثار النسبية يعدلان التردد الذي تولده. واجتماع تمدد التوقيت وإزاحة تردد الجاذبية يدفع بمقياسيات سواتل النظام GPS إلى العمل بوتيرة أسرع من أي مقياسية مكافئة لها على سطح الأرض بمقدار 38,59 μs في اليوم الواحد.

ولكي يتسنى للسواتل إنتاج ترددات الإشارات اللازمة بدقة أكبر كما ترى على سطح الأرض، يتم تعديل تشغيل المذبذبات المحمولة في الفضاء بحيث تعمل بوتيرة أبداً بمقدار 38,59 μs في اليوم، وبالتالي تكون ترددات الإشارات المستقبلية سليمة بالنسبة للتوقيت الإحداثي على سطح الأرض. وإضافة إلى ذلك، يحدث تخالف ترددي ثان نتيجة للنسبية نظراً إلى أن مدارات السواتل ليست دائرية تماماً. وفيما يلي صيغة تقريبية للخطأ الناتج عن هذا التخالف:

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (3-2)$$

حيث:

$\mathbf{v}$  و  $\mathbf{r}$ : موقع وسرعة الساتل وتصحيح  $\Delta t_r$  في معالجة مستقبل النظام GPS باستخدام معلومات الالامركزية المأخوذة من رسالة الملاحة.

ويكون مقدار خطأ التوقيت الناجم عن لا تركزية المدار بالنسبة للنظام GPS في حدود عشرات النانوثانية ويكون واحداً لجميع المستقبلات التي تتبع سواتل النظام GPS المعني.

## 6.2 مساهمات مقياسية المستقبل

داخل مستقبل النظام GPS، كما هو الحال في سواتل النظام GPS، تشتق كافة التوقيتات من مذبذب مشترك. ومع ذلك، فبالنسبة لمعظم المستقبلات التجارية والعسكرية، يكون هذا المرجع معياراً من الكوارتز بدلاً من الروبيديوم أو السيزيوم. والأخطاء في تردد مذبذب المستقبل وعدم الاستقرار في قسم تركيب التردد بالمستقبل تظهر بذاتها في قياس تردد دوبلر أو تردد دوبلر الإجمالي أو طور الموجة الحاملة. وأخطاء انزياحات مقياسية المستقبل أو تخالفات التوقيت وتأخيرات المسير في المستقبل من الهوائي وصولاً إلى A/D تظهر في قياسات المدى النظري وطور الموجة الحاملة، وفي الوسم الزمني للردود وحلول الموقع. فإذا أجريت القياسات لجميع السواتل في آن واحد، تظهر نفس أخطاء التردد والانزياح في جميع القياسات.

وتنفذ خطوات عديدة لتحديد التوقيت في مستقبل النظام GPS. وتعرف قاعدة التوقيت هذه بتوقيت المستقبل أو التوقيت المحلي. وبمجرد التشغيل في أسلوب البداية الساخنة، يضبط المستقبل توقيته استناداً إلى قيم تخزن في ذاكرة مؤقتة. وحسب المستقبل المقصود، يرحح أن تكون دقة هذا التوقيت في حدود ثانية واحدة أو أسوأ. وفي البداية الباردة، لن تكون هناك أي معرفة بالتوقيت ويضبط توقيت البدء اعتباطياً.

وعندما تفك شفرة أول رسالة بالتقويم الفلكي للساتل، يمكن ضبط التوقيت المحلي في حدود 1-10 ms حسب الوقت من الأسبوع (TOW) المعروض في رسالة الملاحة. وتحدد دقة هذا التحديد الأولي للتوقيت الجزء الباقي من حل المقياسية الذي يجب تصحيحه على هذا الأساس. والتوقيت المحلي في فترة انقطاع تقابل فترة القياس التالية يضبط بما يساوي توقيت الإرسال من الأسبوع مضافاً إليه الزمن اللازم لانتقال الإشارة من الساتل وقت الإرسال إلى موقع المستقبل وقت الاستقبال. وأي تقدير للموقع بدقة في 100 km يعد كافياً لضبط هذا التوقيت بدقة تصل إلى 1 ms (بالنسبة لمستقبل على سطح الأرض، يتراوح زمن العبور من 67 ms تقريباً من مرسل الساتل GPS الموجود فوق الموقع مباشرةً إلى 85 ms بالنسبة لمرسل على خط الأفق).

وبمجرد تحديد التوقيت المحلي بدقة في حدود 1 ms، تقدر الانحيازات الميقاتية باعتبارها جزءاً من معالجة التطبيقات. وفي بعض المستقبلات، تظل الانحيازات في إطار ما يعرف بالتصحيح الورقي للميقاتية، بمعنى أنه لا تجري عملية ضبط مادية لخفض الانحيازات، ولكن ترصد القيمة وتبلغ. وفي بعض المستقبلات، يضبط توقيت القياس لتعويض الانحيازات بحيث تجري القياسات بالفعل على الفترات الخاصة بالنظام GPS المقدرة بثانية واحدة. ويتسم هذا الأمر بأهمية خاصة بالنسبة للمستقبلات الجيوديسية حيث تتسق القياسات من مستقبلات متعددة لتحقيق دقة عالية في تحديد الموقع النسبي المتحرك أو الثابت. وفي النهاية، لا تقوم بعض المستقبلات بضبط التوقيت الفعلي لإجراء القياسات، ولكنها تقوم بتصويب أختام التوقيت المبلغة وإجراء قياسات للانحيازات.

### 1.6.2 ميقاتية مستقبل الملاحه

بالنسبة لمعظم تطبيقات الملاحه، تكون القيمة الفعلية لانحياز الميقاتية غير كبيرة إلى حد ما. ولا يكون تزامن القياسات مع الفترات الزمنية للنظام GPS ضرورياً إلا في حالة التنسيق مع قياسات مستقبلات أخرى، وحتى في هذه الحالة لن يكون التزامن حرجاً إلا بالنسبة للتطبيقات التي تحتاج إلى دقة في حدود السنتيمترات والميلليمترات. والوسم الزمني السليم للقياسات وحلول الملاحه هام بالنسبة للمنصات سريعة الحركة مثل الطائرات والسواحل عالية السرعة. وهناك نقطة دقيقة للتوقيت بالنسبة للسواحل القريبة من الأرض وهي عبارة عن خطأ في الوسم الزمني بمقدار 1 ms يولد أخطاء في تحديد الموقع عبر المسار في حدود 7 أمتار. وأخطاء تحديد الموقع التي تكون في حدود المتر تكون محتملة هي الأخرى بالنسبة للأخطاء المماثلة في الوسم الزمني على المنصات الأخرى ذات الدينامية العالية.

وانحيازات المدى النظري وأخطاء التردد الناجمة عن انحياز ميقاتية المستقبل تحل بطريقة موثوقة كجزء من حل موقع وسرعة الملاحه. وعادة، لا تفيد هذه القيم من تطبيقات الملاحه. وفي تطبيقات الملاحه والمسح ذات الصلة، هناك تقنية شائعة تتمثل في استخدام التمييز المزدوج لطور الموجة الحاملة [Misra and Enge, 2001]. ويزيل هذا النهج معلمة انحياز الميقاتية من الحل بتمييز أزواج من الرصدات الآتية من مستقبلين ومن ساتلين. وفي حالة معالجة ارتباطات القياسات بالصورة السليمة، تكون حلول نقطة الفارق المزدوج مكافئة لحلول الموقع النسبي التي تحل فيها الميقاتية.

### 2.6.2 ميقاتية مستقبل التوقيت

#### 1.2.6.2 النسبية

في أي مستقبل يصمم تحديداً لنقل التوقيت، يتم عادة تجنب المذبذب الداخلي أو إغفاله من أجل دخل قادم من مذبذب مرجعي خارجي وإشارة مرجعية بمعدل تكرار للنضات يبلغ نبضة واحدة في الثانية (1 PPS). والتصحيحات المتعلقة بتأثيرات النسبية ضرورية لتصحيح تخالف التردد والتوقيت لميقاتيات سواحل GPS. وتحدث تأثيرات مشابهة للنسبية على ميقاتية المستقبل بالنسبة للمنصات ذات الدينامية العالية. وتكون التخالفات مشتركة بالنسبة لكافة القياسات، لذا، فهي لا تؤثر على دقة حلول الملاحه. وبالنسبة لنقل التوقيت إلى منصة سريعة الحركة، ينبغي تعويض تخالفات تأثيرات النسبية للمذبذب المرجعي.

### 2.2.6.2 التصويبات الورقية للميقاتية

كما ورد آنفاً، لا تعدل معظم مستقبلات GPS توقيتاتها الداخلية لتصحيح أخطاء الميقاتية المقدرة. والأخطاء تقدر ويشار إليها بتصحيحات "الميقاتية الورقية". وفي بعض الحالات تطبق التصحيحات على التوقيتات المعروضة والمبلغة وعلى القياسات المبلغة.

### 3.2.6.2 ميقاتيات الخرج المصححة - التردد والمعدل 1 PPS

أي مستقبل توقيت يكون مطلوباً من أجل توليد إشارة بتردد مصحح ومعدل 1 PPS، يجب أن يطبق داخلياً تصحيحات الميقاتية لتوليد إشارات الخرج المتزامنة هذه. ويمكن تحقيق ذلك عن طريق الضبط في عروة مغلقة للمذبذب الداخلي أو لقسم تركيب التردد في المستقبل أو استعمال دائرة عروة مفتوحة منفصلة لتوليد الإشارات المصححة. في حالة إجراء التحكيم في عروة مغلقة، فإنه يجب تنفيذه بحيث لا يخل بوظائف تتبع الإشارة.

## 7.2 تحديد التوقيت ورعايته

الأساس بالنسبة لجميع قياسات النظام GPS يعرف بما يطلق عليه توقيت النظام GPS (GPST). والتوقيت GPST عبارة عن أساس زمني مستمر تحدد في فترة زمنية للنظام GPS هي الساعة 00:00 يوم 6 يناير 1980 بالتوقيت العالمي المنسق. والتوقيت GPST يرتبط بالمقياس الزمني الدولي، التوقيت العالمي المنسق (UTC) عن طريق (USNO) [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. بيد أنه خلافاً للمقياس الزمني UTC، لا يطبق التوقيت GPST خطوات الثواني الكبيسة، وبالتالي، فإنه يستمر في الانحراف عن التوقيت UTC بتخالف يبلغ حالياً 14 ثانية. وجزء التحكم هو المسؤول عن الحفاظ على التوقيت GPST على أساس دخل من USNO ومراقبة أداء التوقيت ككل ساتل من سواتل النظام GPS. وترتبط إرسالات السواتل بالتوقيت GPST وباستخدام قياسات سواتل النظام GPS، يمكن لأي مستقبل توصيل توقيته المحلي بالتوقيت GPST وبالتالي بالتوقيت UTC (USNO).

### 1.7.2 عمليات جزء التحكم

منذ 17 يونيو 1990، تم تحديد التوقيت GPST بواسطة تركيبته أو مجموعة من معايير الترددات الذرية في محطة التحكم الرئيسية (MCS) ومحطات المراقبة للنظام GPS والميقاتيات المحمولة على متن السواتل. والتوقيت GPST الفعلي لا يتم الحفاظ عليه بواسطة أي ميقاتية واحدة داخل النظام. فهو يحسب ضمناً بواسطة مرشح كالمال يعمل في إطار وظيفة التحليل والتنبؤ بمحطة التحكم الرئيسية. وتخضع القياسات من المعايير الترددية الفردية للتوزيع طبقاً لاستقرارها أثناء فترة التقدير.

وبالتالي فإن GPST يتكون من متوسط خضع للتوزيع لمجموعة من الميقاتيات الذرية. وتحسب تصحيحات الميقاتيات الورقية لكل معيار ترددي أيضاً مع تصويبات ميقاتيات سواتل النظام GPS بحيث تشكل الأساس للمعلومات المرسلة في رسالة البث.

وتستعمل المحطة MCS القياسات من محطات المراقبة لتقدير مدارات وميقاتيات سواتل النظام GPS وأخطاء ميقاتيات محطات المراقبة والمعلومات الأخرى. وتقوم وحدة التقدير بالمحطة MCS بتقسيم القياسات والحالات المطلوب تقديرها في "أقسام" عديدة يقوم كل قسم منها بمعالجة مجموعة فرعية من سواتل النظام GPS وجميع محطات المراقبة. وقد نشأ التقسيم نتيجة لقيود الحوسبة التي كانت تتسم بها الحواسيب القديمة للمحطة MCS، بيد أنه روي الاستمرار في العمل به لتخفيف عبء الحوسبة وللمساعدة في فصل مشكلات السواتل الفردية [Hutsell, 1994]. ويضم كل قسم حالات تصل إلى ستة سواتل وخمس محطات مراقبة GPS. وهناك خوارزمية منفصلة من أجل "توفيق الأقسام" تقوم بضبط حالات محطات المراقبة من أجل الاتساق عبر الأقسام.

ويزود "متوسط كبير" بين الأقسام المحطة MCS بأفضل تقديرات انحرافات ميقاتيات محطات المراقبة والسواتل عن التوقيت GPST. والمرصد البحري للولايات المتحدة (USNO) هو المسؤول عن رعاية مرجع زمني فيزيائي لوزارة الدفاع بالولايات المتحدة. والتوقيت UTC (USNO) عبارة عن تحقيق للتوقيت في الوقت الفعلي من أجل وزارة الدفاع. كما يعرى المرصد USNO الميقاتية الأساسية البديلة للمرصد (USNO/AMC) في محطة التحكم الرئيسية للنظام GPS في Schriever AFB.

ويقوم المرصد USNO بمراقبة خدمة تحديد الموقع القياسية (SPS) لسواتل النظام GPS والإرسالات PPS باستخدام مستقبلات توقيت متخصصة توجد في واشنطن العاصمة. وتجمع القياسات من السواتل الفردية على فواصل بمقدار 6 s خلال دورة مدتها 13 دقيقة. وتستعمل الدورات من جميع السواتل لتشكيل استقراء خطي لمدة يومين لتقدير معلومات التصحيح  $a_0$  و  $a_1$  للتوقيت GPS-UTC (USNO). وجذر متوسط التربيع لحلول الدورة 13 دقيقة يكون في حدود 15-20 ns. ورصدات السواتل الفردية والتقديرات الخطية تقدم إلى المحطة MCS وتكون في العادة دخلاً لبرمجيات في المحطة MCS من أجل الحفاظ على النظام GPS كنظام مغلق لا يسمح بأي دخل من الخارج.

### 2.7.2 توجيه توقيت النظام GPS

تفرض وثيقة التحكم المشترك أن يتم الحفاظ على التوقيت GPST في حدود  $\pm 1 \mu s$  من التوقيت UTC (USNO) باستثناء تخالفات الثواني الكبيسة [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. ومن ثم، فإن التوقيت GPST يوجه نحو الترافف مع التوقيت UTC (USNO) لتحقيق هذا الشرط. ويتحقق التوجيه من خلال تحليل التقديرات اليومية للانحياز GPS-UTC (USNO) وتحديد ما إذا كانت هناك حاجة إلى التوجيه خلال اليوم التالي من أجل الحفاظ على تخالف GPS-UTC (USNO) ضمن حدود الموصوفة.

ويتألف التوجيه من إضافة انحراف تخالف ثابت موجب أو سالب إلى التوقيت GPST لليوم الواحد. وقبل 18 مارس 1994 كانت قيمة الانحراف الثابت المستعملة  $2 \pm 10^{-10}$  s/s<sup>2</sup>. وبعد هذا التاريخ استعملت القيمة  $1 \pm 10^{-10}$  s/s<sup>2</sup>. ويطبق التوجيه بتعديل تصحيحات ميقاتيات سواتل البث وتصحيحات GPS-UTC ويكون معروفاً للمستعملين [Hutsell, 1994]. وإذا ما طبق توجيه غير ضروري، فإن مستعملي النظام GPS يلمسونه من خلال عدم استقرار التوقيت GPST.

## المراجع

- HUTSELL, S.T. [Sep 20-23, 1994] Recent MCS Improvements to GPS Timing. Proc. ION GPS-94, Salt Lake City, UT, p. 261-273.
- KAPLAN, E.D. and HEGARTY, C.J., Editors [2006] Understanding GPS: Principles and applications. 2ed., Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062.
- LARSON, K.M., *et al.* [March 2000] Assessment of GPS Carrier-Phase Stability for Time-Transfer Applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, 2, p. 484-494.
- LARSON, K.M., and LEVINE, J. [July 1999] Carrier-Phase Time Transfer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, 4, p. 1001-1012.
- MISRA, P. and ENGE, P. [2001] Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press.
- Naval Observatory Time Transfer Interfaces ICD-GPS-202B [31 October, 2001] Navstar GPS Control Segment/U.S.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- PARKINSON, B.W., *et al.*, Editors [1996] Global Positioning System: Theory and Applications, AIAA Press.



### الفصل 3

## النظام القائم على السواتل المعزز للنظام العالمي لتحديد الموقع (GPS)

الصفحة

24	..... مقدمة	1.3
24	..... وصف النظام القائم على السواتل المعزز (SBAS) للنظام العالمي لتحديد الموقع	2.3
24	..... وصف نظام تعزيز منطقة واسعة (WAAS) (الولايات المتحدة الأمريكية)	3.3
26	..... وصف نظام النقل متعدد الوظائف (MSAS) (اليابان)	4.3
26	..... نظرة عامة	1.4.3
27	..... وظيفة الضوضاء شبه العشوائية المزدوجة	2.4.3
28	..... التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة	3.4.3
29	..... وصف نظام EGNOS (أوروبا)	5.3
29	..... نظرة عامة على القطاع الأرضي في نظام EGNOS	1.5.3
29	..... نظرة عامة على نظام EGNOS فيما يتعلق بالوقت	2.5.3
30	..... مزامنة ميقانية محطات RIMS وإنشاء وقت شبكة نظام EGNOS (ENT)	3.5.3
30	..... توجيه وقت ENT إلى وقت GPS	4.5.3
31	..... تصحيحات ميقانية الساتل	5.5.3
31	..... وقت ENT المذاع من خلال السواتل في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO)	6.5.3
31	..... تقدير الفرق بين السلام الزمنية لوقت ENT والتوقيت العالمي المنسق (UTC)	7.5.3
32	..... نظام التعزيز القائم على الساتل (SBAS) والوقت	8.5.3
34	..... الوقت والمدار المستقر بالنسبة إلى الأرض	9.5.3
42	..... نظام SBAS ونقل الوقت	10.5.3
43	..... نقل الوقت بين مختبرين	11.5.3
45	..... نقل الوقت بين نظامي SBAS	12.5.3
47	..... المراجع	

### 1.3 مقدمة

اعتمدت أنظمة الملاحة تاريخياً على الوقت. ولقد تجلّى ذلك بوضوح من خلال إبحار مقياس الزمن العائد لهاريسون على متن سفينة صاحب الجلالة ديفيد في عام 1761، لإثبات أن الجهاز يسمح للملاحين لأول مرة بتحديد خط الطول (الكرونومتر) على نحو دقيق وموثوق. وبسبب هذه العلاقة بين الملاحة والوقت، كان اهتمام مجتمع ضبط الوقت دائماً وكبيراً باستخدام أنظمة الملاحة من أجل توزيع الوقت. وحتى اليوم، يركز النظام العالمي لتحديد الموقع في الصميم إلى تكنولوجيا الميقاتية الرقابة جداً. وبخلاف الملاحين الذين يحتاجون إلى أربعة سواتل لتحديد موقعهم، فإن من يضبطون الوقت العارفين موقعهم لا يحتاجون إلا لساتل واحد لتحديد الوقت. ويمكن لرصدات ساتل واحد أن تسمح للقائمين على ضبط الوقت بمزامنة ميقاتيات في جميع أنحاء العالم عن بُعد.

### 2.3 وصف النظام القائم على السواتل المعزز (SBAS) للنظام العالمي لتحديد الموقع

إن أنظمة التعزيز القائمة على الساتل (SBAS) هي أحد أحدث المستحدثات في تطور أنظمة الملاحة. وفي حين أنها تشبه أنظمة GPS التفاضلية من حيث المفهوم، فهي تعطي إدارات الطيران المدني والملاحة الجوية الوطنية مستوى أعلى بكثير في الأداء من أنظمة GPS التفاضلية الأخرى (DGPS). وبفضل أساليب التعزيز التي تستخدمها أنظمة SBAS، فهي لا تحسن الدقة فحسب، بل تزيد أيضاً من تيسر الخدمة وسلامتها واستمراريتها. وهي تقوم بذلك من خلال الاستمرار بمراقبة إرسالات GPS من محطات مرجعية أرضية وإرسال رسالة معززة من سواتل الاتصالات المستقرة بالنسبة إلى الأرض (GEO). وإذا تستخدم الإشارة الصادرة عن الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض نفس تردد نظام GPS في إشارة L1 (GPS L1) فهي تختلف في النسق ومعدل البتات.

ويعطي محتوى الرسالة القادمة من الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض معلومات إلى المستخدم لا تحسن دقة موقع المستخدم المحددة من إشارات GPS فقط بل تعطي المستخدم معلومات أيضاً بشأن موثوقية ذلك الموقع. ويمكن أيضاً استخدام الإشارة من الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض كمصدر آخر لقياس المدى في الملاحة. ولكن يجب أن تكون الإشارات متزامنة مع توقيت النظام GPS كي يحدث ذلك.

وبالتالي، فإن الإشارات من الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض يمكن أن تستخدم أيضاً لتوزيع الوقت ونقل الوقت. وتبين الدراسات الحالية على استخدام أنظمة SBAS لوظائف التوقيت هذه أنها بالفعل في مستوى نظام تحديد المواقع الدقيق في GPS (PPS). وما من مغالاة في توقع تحسن مستويات الدقة والصحة إذ تأخذ هذه الأنظمة بالنزوح.

### 3.3 وصف نظام تعزيز منطقة واسعة (WAAS) (الولايات المتحدة الأمريكية)

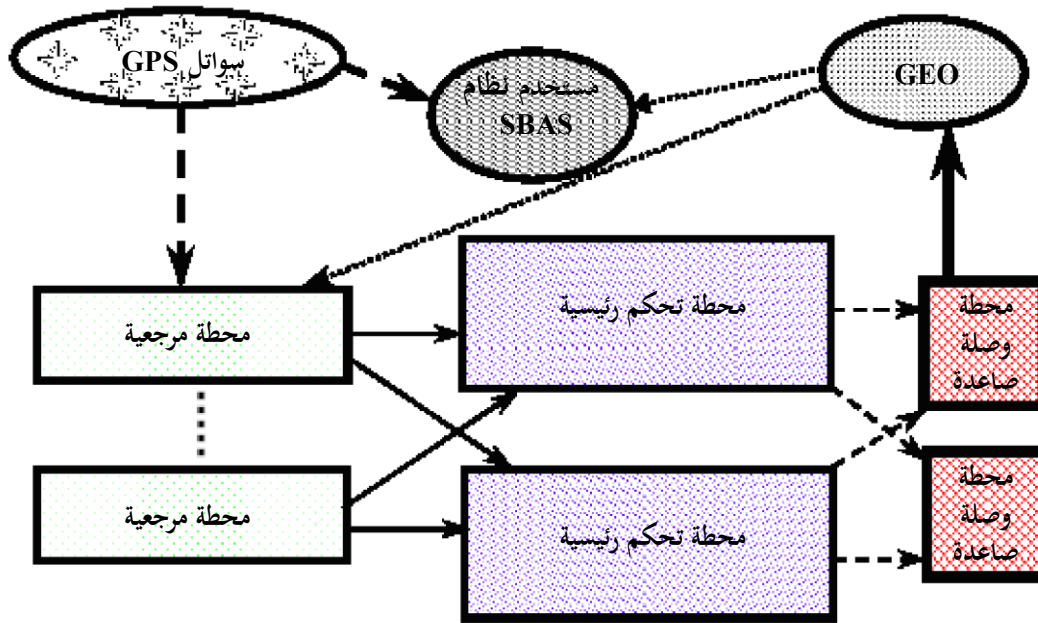
يصور الشكل 1-3 تخطيطاً نظام تعزيز منطقة واسعة عملية (WAAS). والوحدة الأساسية فيه هي المحطة المرجعية لنظام WAAS (WRS). وضمن المحطة المرجعية، توجد معدات تتكون من معايير تردد حزمة السيزيوم الرديفة أو شكل آخر من الميقاتيات الذرية، وعدة مستقبلات WAAS/GPS ذات 12 قناة مزدوجة التردد، ومستقبلات GPS متخصصة لتتبع الطور واسعة وضيق النطاق. وتتبع كل محطة مرجعية باستمرار قدر ما تستطيع رؤيته وتحصيله من سواتل GPS.

وتؤدي كل محطة WRS وظائف جمع البيانات والتحقق من المعقولة، ومعالجة البيانات وتسجيلها ونقلها. تتكون كل محطة WRS من رف معدات المحطة المرجعية في منطقة واسعة (WRE) بترادف ثلاثي، وهو يجمع مجموعات مستقلة من البيانات تشمل ما يرصده سائل GPS وما يرصده الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض، ويرسل البيانات إلى كل محطة رئيسة في نظام WAAS (WMS). ويكفل استقلال مجموعات البيانات بجمع المعلومات القابلة للرصد من خلال مجموعات مستقلة من العتاد اللازمة لدعم وظيفة التحقق التي تقوم بها محطة WMS. وتُجمع البيانات بمعدل يتسق مع مستواها المتوقع من الاختلاف؛ فعلى سبيل المثال، تسمح الظروف الجوية التي تتغير ببطء بجمع هذه البيانات بتواتر أقل كثيراً من البيانات الواردة من سواتل GPS. وقبل إرسال البيانات إلى محطات WMS، تتحقق كل من معدات WRE من معقولة بياناته التي جرى جمعها. وتوسم البيانات الفاشلة على أنها فشلت في اختبار المعقولة ثم ترسل إلى محطات WMS. ولضمان تيسر البيانات في كل محطة WMS، ترسل كل محطة WRS البيانات إلى كل محطة WMS من خلال عقدتين فقرتين مستقلتين في النظام الفرعي للاتصالات الأرضية (TCS).



الشكل 1-3

نظرة عامة بسيطة عالية المستوى على نظام التعزيز القائم على السواتل (SBAS)



Sat\_time\_freq-03-01

وتؤدي كل محطة WMS وظائف المعالجة التصحيحية وتحديد مدار الساتل، وتحديد السلامة والتحقق منها وإقرارها، وإنشاء رسالة نظام WAAS. وتقوم محطة WMS بجمع البيانات الواردة من جميع محطات WRS، مرة واحدة في الثانية، وتعالجها لدعم الوظائف المذكورة أعلاه. وتجري هذه المعالجة على جميع البيانات المتاحة من محطات WRS وتفضي إلى إرسال رسالة WAAS بنسق 250 بته مرة واحدة في الثانية. وترسل رسائل WAAS هذه إلى الأنظمة الفرعية المستقرة بالنسبة إلى الأرض في الوصلة الصاعدة (GUS).

ويجدول توقيت المعالجة التي تقوم بها محطة WMS للسماح بإذاعة رسالة WAAS الناتجة عن الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض المتلائم مع اللحظة المرجعية لشفرة الحيازة/التقريبية (C/A) في نظام GPS 1-s [بيك (Peck) وآخرون، 1997]. ويتحقق نظام WAAS من صحة الإشارة-في-الفضاء (SIS) عن طريق التحقق من الرسائل المرسلّة في الوصلة الهابطة للتأكد من أنها مطابقة لتلك التي ترسل إلى السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض وبمقارنة حلول موقع الملاحة من WAAS/GPS مع مواقع WRS التي شملها الاستطلاع. وتحتوي كل محطة WMS وحدة تشغيل وصيانة (O & M) يمكن منها التحكم في نظام WAAS عبر سطح تماس بين الحاسوب والبشر. ولتجنب التضاربات، لا يمكن تعيين إلا محطة WMS واحدة ضمن نظام WAAS بوصفها محطة WMS المتحكم (ذات وحدة تشغيل وصيانة نشطة) في أي وقت معين.

ويؤدي كل نظام اتصالات مستقر بالنسبة إلى الأرض (GCS) وظائف إذاعة وقياس مدى. ويتكون كل نظام GCS ضمن نظام WAAS من نظامين فرعيين لإنشاء الإشارة (SGS) ونظامين فرعيين لوصلة التردد الراديوي الصاعدة (RFU) وساتل واحد يدور حول الأرض في مدار مستقر (GEO). وينتج عن الجمع بين نظام SGS ووصلة RFU، محطة وصلة صاعدة مستقرة بالنسبة إلى الأرض (GUS). وتُستهل وظيفة الإذاعة في نظام GCS باستقباله رسائل WAAS بنسق 250 بته مرة واحدة كل ثانية من كل محطة WMS في النظام. ولتحسين تيسر رسائل WAAS، توصّل كل محطة GUS بعقدتي WAAS فريقيتين على نظام TCS. وتختار محطة GUS محطة WMS مصدراً لرسائلها وتشفر الرسالة المستقبلّة باستخدام 1/2 معدل شفرة تحويل التصحيح المسبق للخطأ. وتشكّل الرسالة الناتجة بطول 500 بته على إشارة من نمط GPS وترسل في وصلة صاعدة إلى الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض. ويخدم كل ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض بمحطتي GUS:

- إحداها تعمل كوصلة صاعدة أساسية؛

- وتقوم الأخرى بمقام وصلة احتياطية جاهزة للعمل فوراً.

ومحطتا GUS المخدمتان للساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض مستقلتان من الناحية التشغيلية وتقعان في محطتين أرضيتين متباعدتين جغرافياً بمسافة لا تقل عن 300 ميل. والمحطة الأرضية على سطح الأرض (GES) هي مرفق يتكون من واحدة أو أكثر من محطات GUS، ويوفر المأوى والقدرة والعمليات وخدمات الصيانة للأنظمة الفرعية المستقرة بالنسبة إلى الأرض في الوصلة الصاعدة. ويقوم المرسل المستجيب ذو "الأنبوب المعقوف" في الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض بزحزة تردد الإشارة وببثها إلى مستخدم نظام WAAS. ويبدأ إلى الانتقال بين محطتي GUS الأساسية والاحتياطية، عند الضرورة، للحفاظ على تيسر الإشارة-في-الفضاء من نظام WAAS.

وتُنجز وظيفة قياس المدى في نظام GCS بإرسال إشارة إلى المستخدمين على تردد نظام GPS في إشارة L1 (GPS L1) مع المعلومات التالية:

1 شفرة الضوضاء شبه العشوائية (PRN) المخصصة لكل ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض

2 التقويم الفلكي الدقيق الذي يرد في رسالة الملاحية المرسله دورياً من الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض في وظيفة الإذاعة.

ويتحقق هيكل الإشارة هذا بطريقة مماثلة لهيكل نظام GPS، إلا أن التوقيت الدقيق لشفرة PRN ينقذ على سطح الأرض وليس على متن السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. وتسمح هذه الوظيفة للمستخدمين بالتعامل مع السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض كما لو كانت ساتل GPS آخر، وبالتالي فهي تزيد من التيسر الإجمالي للنظام.

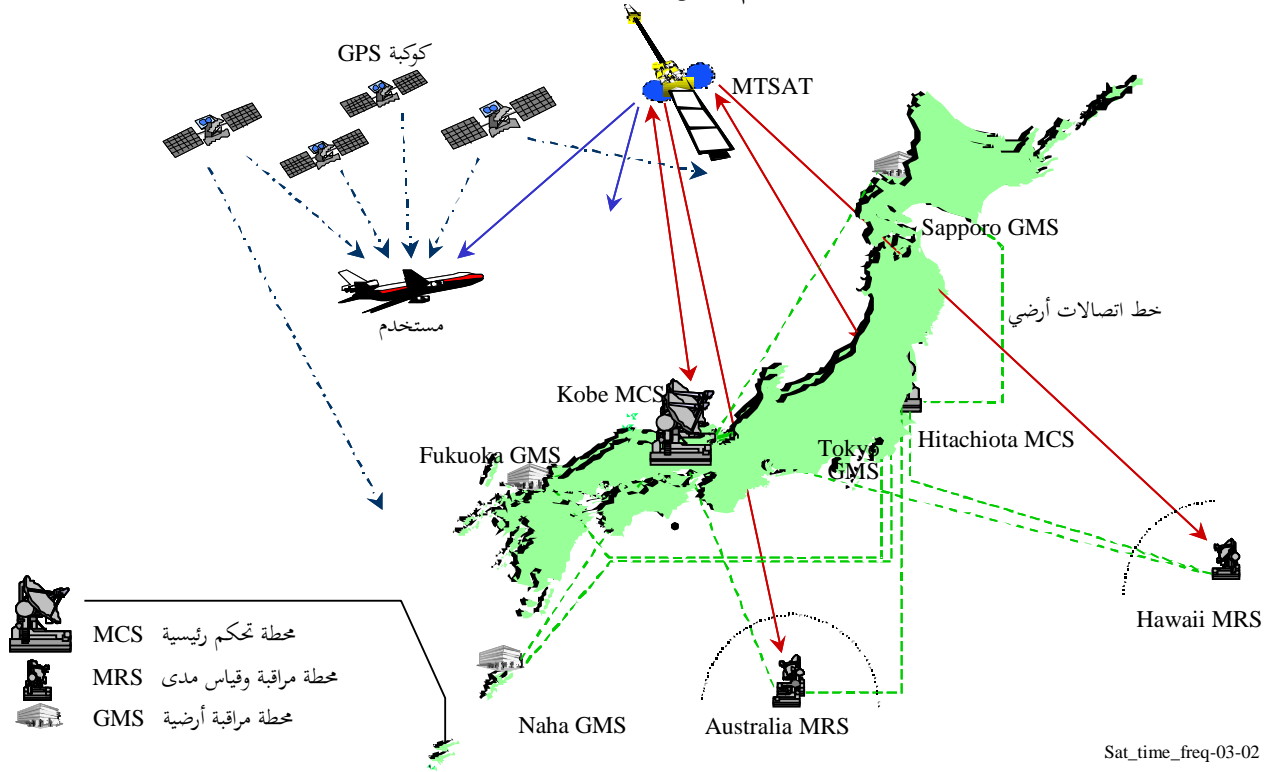
### 4.3 وصف نظام النقل متعدد الوظائف (MSAS) (اليابان)

#### 1.4.3 نظرة عامة

يظهر في الشكل 2-3 تشكيلة نظام التعزيز القائم على السواتل لساتل النقل متعدد الوظائف (MTSAT). وتُستقبل بيانات ساتل GPS في محطات المراقبة الأرضية (GMS) المثبتة في أربعة مواقع في اليابان؛ هي سابورو وطوكيو وفوكوكا وناها. وتُستقبل أيضاً بيانات ساتل GPS وإشارة ساتل MTSAT المستقر بالنسبة إلى الأرض في محطات مراقبة وقياس مدى (MRS) مثبتة في أربعة مواقع أخرى؛ هي كوبي وهيتاشيأوتا وهاواي وأستراليا. وترسل البيانات الواردة إلى محطات التحكم الرئيسية (MCS) المثبتة في موقعين في اليابان؛ هما كوبي وهيتاشيأوتا.

الشكل 2-3

## تشكيلة نظام النقل متعدد الوظائف (MSAS)



في محطة MCS، يحسب النظام الفرعي لمرفق المعالجة المركزية (CPF) تصحيحات السواتل ونقاط الشبكة الأيونوسفيرية (IGP) المعروفة مسبقاً في نظام MSAS، ويراقب السلامة. ويحافظ على وقت شبكة MSAS (MNT) وهو وقت الشبكة الداخلي في نظام MSAS، بحيث يبقى انحرافه عن وقت GPS ضمن حد معين. ويولد النظام الفرعي للمحطة الأرضية للملاحة (NES) رسائل MSAS باستخدام بيانات من CPF، ويشكلها على النطاق Ku. وترسل رسائل MSAS إلى سائل MTSAT من محطة أرضية على سطح الأرض (GES) في نفس المكان بعد التكبير بمكبر عالي القدرة (HPA). وبالإضافة إلى ذلك، يعالج النظام الفرعي لاتصالات الشبكة (NCS) الاتصالات بين المرافق على سطح الأرض.

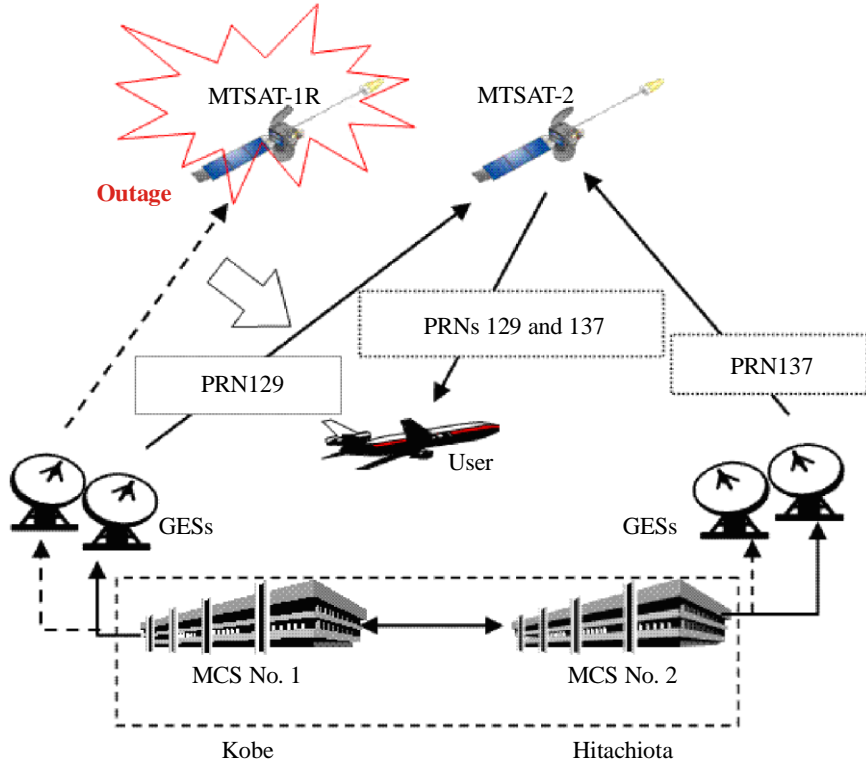
ولمرافق MSAS على سطح الأرض العديد من السمات التي تشترك فيها مع نظام WAAS. ومن ناحية أخرى، يمتلك نظام MSAS خصائصه الخاصة، أي وظيفة شفرة PRN المزدوجة ليعمل بنمطين من شفرات PRN، لسائل واحد مستقر بالنسبة إلى الأرض وللتحكم بقدرة الوصلة الصاعدة (UPC) للتعويض عن التوهين الناجم عن هطول الأمطار في النطاق Ku.

## 2.4.3 وظيفة الضوضاء شبه العشوائية المزدوجة

يعمل نظام MSAS عادة مع ساتلي MTSAT مستقرين بالنسبة إلى الأرض (MTSAT-1R, MTSAT-2) على النحو المبين في الشكل 3-3. وترسل مختلف شفرات الضوضاء شبه العشوائية (PRN) على وصلة صاعدة إلى ساتلي MTSAT بشكل منفصل. وحتى عند عدم توفر أي من محطات MCS بسبب عطل في مرفق الأرض أو بسبب الأمطار الغزيرة، تظل إحدى شفرات PRN توزع إلى المستخدم نظراً لقدرته على استقبال أكثر من قناتي إشارات من سواتل MTSAT المستقرة بالنسبة إلى الأرض لمنع ترويدي الاستمرارية والتيسر. فإذا تعطل أحد هذه السواتل، يمكن لنظام MSAS أن يتحول نحو التشغيل بشفرة PRN مزدوجة.

الشكل 3-3

## التشغيل بشفرة الضوضاء شبه العشوائية (PRN) المزدوجة



Sat\_time\_freq-03-03

وفي التشغيل بشفرة الضوضاء شبه العشوائية المزدوجة، ترسل مختلف شفرات PRN على وصلة صاعدة إلى ساتل واحد مستقر بالنسبة إلى الأرض. ويشكل انقطاع الوصلة الصاعدة بسبب توهين هطول الأمطار عوامل صغيرة تساهم في تدرج الاستمرارية في نظام MSAS. وفي التشغيل بشفرة PRN مزدوجة، حتى لو جاوز التوهين في النطاق Ku بسبب الأمطار الغزيرة التعويض الذي يقدمه التحكم UPC في أي من محطتي MCS، يتواصل التشغيل بشفرة PRN المرسل بالوصلة الصاعدة من محطة MCS الأخرى دون الحاجة إلى أي تبديل بين محطتي MCS.

## 3.4.3 التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة

أثناء هطول الأمطار، يتحكم نظام MSAS بقدرة الوصلة الصاعدة بتحكم العروة المغلقة لتعويض توهين هطول الأمطار لإشارة الوصلة الصاعدة في النطاق Ku من أجل تحقيق استقرار الوصلة بين سواتل MTSAT المستقرة بالنسبة إلى الأرض ومحطات أرضية على سطح الأرض (GES). ويستخدم التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة (UPC) بيانات نسبة الموجة الحاملة إلى ضوضاء الخلفية ( $C/N_0$ ) في إشارة L1 ( $L1-C/N_0$ ) لسواتل MTSAT المستقرة بالنسبة إلى الأرض التي يحصل عليها مستقبل UPC المركب في مكبر عالي القدرة (HPA). ويجري تحكم العروة المغلقة عن طريق التحكم في المؤهّن ضمن مكبر HPA على أساس القيمة المقاسة لنسبة  $L1-C/N_0$  والقيمة المستهدفة المحددة مسبقاً لنسبة  $C/N_0$ .

بالإضافة إلى ذلك، ولضمان التحكم، تُستخدم أيضاً نسبة  $C/N_0$  في النطاق Ku.

### 5.3 وصف نظام EGNOS (أوروبا)

يتكون نظام EGNOS من أربعة قطاعات: قطاع أرضي وقطاع فضائي وقطاع المستخدم وقطاع مرافق الدعم على غرار القطاعات التي ورد وصفها لنظامي MSAS و WAAS.

- 1 يتكون القطاع الفضائي في نظام EGNOS من مرسلات مستجيبيات على متن سواتل مستقرة بالنسبة إلى الأرض.
  - 2 يتكون قطاع المستخدم في نظام EGNOS من مستقبلات عادية للنظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS) مطورة وفق معايير الحد الأدنى من الأداء التشغيلي (MOPS) رقم RTCA DO-229 أو (RTCA MOPS DO-229).
  - 3 ويتضمن قطاع الدعم في نظام EGNOS بعض المرافق اللازمة لدعم تطوير النظام وعملياته وتأهيله.
- وأخيراً يرد في الفقرة 1.5.3 وصف القطاع الأرضي في نظام EGNOS.

#### 1.5.3 نظرة عامة على القطاع الأرضي في نظام EGNOS

يتألف القطاع الأرضي في نظام EGNOS من محطات قياس المدى ومراقبة السلامة (RIMS) الموصولة بمجموعة من مرافق رديفة للتحكم والمعالجة تدعى مركز التحكم في المهمة (MCC). ويحدد مركز التحكم في المهمة، السلامة والتقويم الفلكي والتصحيحات التفاضلية لكل ساتل تحت المراقبة، ويحدد التأخر الأيونوسفيري، ويولد التقويم الفلكي للسواتل المستقر بالنسبة إلى الأرض. وترسل هذه المعلومات في رسالة إلى المحطة الأرضية البرية للملاحة (NLES)، لمواصلة إرسالها عبر الوصلة الصاعدة مع إشارة قياس المدى إلى السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. وترسل هذه السواتل تلك البيانات عبر الوصلة الهابطة على تردد (L1) في الوصلة 1 من نظام GPS بخطة تشكيل وتشفير تماثل تلك المتبعة في نظام GPS. وتوصّل جميع مكونات القطاع الأرضي بينياً بواسطة شبكة اتصالات منطقة واسعة (EWAN) في نظام EGNOS.

#### 2.5.3 نظرة عامة على نظام EGNOS فيما يتعلق بالوقت

استجابةً للمتطلبات، توفر الفقرات التالية وصفاً لكل من وظائف الوقت والأداء المتوقع، استناداً إلى التحليل والتجربة. ويستخدم نظام GPS والنظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS) كلاهما فارق وقت الوصول (TDOA) أساساً لتشكيل قياسات مدى المستقبل إلى الساتل. وبالتالي، فإن لدقة مقياتي المستقبل والساتل المشاركة تأثيراً مباشراً على دقة قياس المدى المحققة. ويوفر ساتلا GPS و GLONASS كلاهما معلومات في رسائل الملاحة التي يذيعانها تمكن مستخدمي النظام من تصحيح أخطاء مقياتي الساتل، أي انحراف فرادي مقياتي الساتل عن سلم التوقيت الاسمي للنظام الساتلي. وهذه التصحيحات دقيقة في حدود بضعة أجزاء النانو من الثانية (ns).

ومع ذلك، في حالة نظام GPS، فإنها لا تحتسب قلقلة التيسر الانتقائي (SA)، وما لم تقدّر وتزال، فإن هذه القلقلة ستسبب تردّي أداء تحديد موقع المستخدم. وعلاوة على ذلك، يُستحسن لتطبيقات السلامة العالية إنتاج تقديرات مستقلة عن أخطاء مقياتي الساتل من أجل مراقبة تصحيحات الإذاعة. ومن أجل تحديد تقديرات دقيقة للغاية لأخطاء مقياتي الساتل.

ونشرها بين مستخدمي النظام، يؤدي نظام EGNOS ثلاث وظائف مقياتي أساسية تقع في مرفق المعالجة المركزية:

- مزامنة مقياتي محطات RIMS وإنشاء وقت شبكة نظام EGNOS (ENT).
  - توجيه وقت ENT نحو وقت نظام GPS.
  - تحديد تخالفات مقياتي الساتل مع وقت ENT.
- تقدير الفرق بين وقت ENT والتوقيت العالمي المنسق (UTC).

### 3.5.3 مزمنة ميقاتية محطات RIMS وإنشاء وقت شبكة نظام EGNOS (ENT)

تجرى مزمنة ميقاتية محطات RIMS باستخدام تقنية الميقاتية المركبة. وبهذه التقنية يعرف وقت شبكة نظام EGNOS (ENT) كمتوسط ضماني لمجموعة تضم جميع ميقاتيات محطات RIMS، وتولد عملية المزمنة تقديرات للتخالف والانسيق لكل من ميقاتيات RIMS نسبة إلى وقت ENT. ويمكن بعد ذلك أن تُستخدم هذه التقديرات لإسناد القياسات ضمن شبه مدى محطات RIMS إلى وقت ENT كمرجع لها. ولا بد من عملية المزمنة هذه من أجل السماح بالجمع بين ما يُرصد من القياسات ضمن شبه المدى من محطات RIMS متعددة في الدالة التي تقدر أخطاء ميقاتية الساتل.

وثمة تقنية مزمنة بديلة أبسط هي تقنية الميقاتية الرئيسة، حيث ترشّح ميقاتية RIMS واحدة لتوفر وقت الشبكة، وتزامن جميع ميقاتيات RIMS الأخرى مع تلك الميقاتية. ولأسلوب الميقاتية المركبة ميزتان هامتان على هذا النهج. فأولاً هناك في نهج الميقاتية الرئيسة نقطة عطل واحدة. فإذا فُقدت الميقاتية الرئيسة، فُقد وقت ENT. وفي المقابل، تبقى ميقاتية ENT المركبة طالما توجد ميقاتيتان في المجموعة. وثانياً، يكون استقرار وقت ENT الذي يوفره نهج الميقاتية الرئيسة محدوداً باستقرار الميقاتية الرئيسة نفسها. أما بتقنية الميقاتية المركبة، يصبح استقرار وقت ENT هو استقرار المتوسط الضماني لمجموعة جميع ميقاتيات محطات RIMS. وعلى افتراض مجموعة من ميقاتيات  $n$  متطابقة ومستقلة، فإن ذلك يعطي  $\sqrt{n}$  تحسناً في الاستقرار. ولهذه الميزة الأخيرة للميقاتية المركبة تأثير جانبي مهم يتمثل في زيادة قدرة النظام على كشف وعزل أعطال الميقاتية.

وتنفذ خوارزمية الميقاتية المركبة عن طريق مرشاح كالمات. وتضم بيانات قياس المرشاح مجموعة مستقلة خطياً من رصدات الرؤية المشتركة بالحد الأدنى من التغيرات المسبق. وتشكّل رصدة الرؤية المشتركة لزوج من محطات RIMS من خلال القيام في الوقت نفسه بطرح قياسات شبه المدى المرصودة إلى ساتل مشترك. وقبل الطرح، تجري معالجة مسبقة لأشياء المديات لإزالة المديات الجغرافية لهوائي محطات RIMS إلى هوائي الساتل وتقليل الأخطاء غير المرغوب فيها، مثل التأخر المتعدد المسيرات والضوضاء الحرارية. وتمثل رصدات الرؤية المشتركة الناتجة هذه قياسات مباشرة لتخالفات ميقاتية محطة RIMS بالإضافة إلى الأخطاء المتبقية.

وتشمل حالات المرشاح تخالفات وانسيقات كل من ميقاتيات محطات RIMS بالنسبة إلى مقياس الزمن الافتراضي. وتتمثل نتيجة هذه الصيغة في أن يوفر المرشاح تقديرات للتخالفات والانسيقات بالنسبة إلى المتوسط المرجّح الضماني لجميع ميقاتيات محطات RIMS. ويعرف متوسط المجموعة الضماني هذا أساساً سلم التوقيت لنظام EGNOS، أي ENT. ويعتمد الترجيح النسبي للميقاتيات المستخدمة ضمن المرشاح على عدة عوامل، ولكنه يتحدد إلى حد كبير بنماذج ضوضاء العملية المرتبطة بكل من الميقاتيات. وتميز هذه النماذج استقرار ميقاتية محطة RIMS.

ونظراً لعدم توفر سوى قياسات فرق الميقاتية للمرشاح، يمتلك نموذج المرشاح مكونات غير قابلة للرصد تسبب اتجاهات نمو بطيء خلال فترة طويلة من الزمن في مصفوفات التغيرات المشترك لخطأ الحالة. يجب أن توظف تدابير خاصة لإزالة هذه الاتجاهات. وإلا فإنها سوف تؤدي في النهاية إلى زعزعة الاستقرار العددي داخل المرشاح. ويمكن إثبات أنه حالما تزال من مصفوفة التغيرات المشترك اتجاهات النمو البطيء خلال فترة طويلة من الزمن بفعل مكونات غير قابلة للرصد في نموذج النظام، فإن التغيرات المشترك الناتج يصف الأخطاء في تقديرات حالة المرشاح نسبة إلى متوسط المجموعة الضماني، وليس إلى مقياس الزمن المثالي.

### 4.5.3 توجيه وقت ENT إلى وقت GPS

تقتضي الضرورة توجيه وقت ENT إلى وقت GPS للحد من المدى الدينامي لتصحيحات ميقاتية الساتل، الأمر الذي يقلل من مقاس رسائل الميقاتية التفاضلية لمنطقة واسعة (WAD) ويحسن كفاءة عملية نشر الرسالة. ويجري توجيه وقت ENT إلى سلم التوقيت لنظام GPS باستخدام مرشاح تمرير منخفض رقمي من الدرجة الثانية. وإشارة دخل التوجيه هي تقدير آني لتخالف سلم التوقيت بين وقت ENT ووقت GPS. وهو يُحسب من تخالفات ميقاتية الساتل المقدّرة المستقاة من وقت ENT وتصحيحات ميقاتية الساتل المذاعة في نظام GPS، وهي تقديرات تخالفات ميقاتية الساتل مع سلم التوقيت لنظام GPS. ويُنتار تردد قطع المرشاح لتقديم أفضل خفض للتيسر الانتقائي (SA)، في حين يُتجنب التخلف الكبير بسبب الانسيق النسبي في وقت ENT فيما يتعلق بسلم التوقيت لنظام GPS. وكلما زاد استقرار وقت ENT، انخفض تردد القطع الذي يمكن ضبطه وزاد تخفيض التيسر الانتقائي.

وسيفي الأساس المرجعي لنظام EGNOS بسهولة بمطلب توجيه سلم التوقيت من ENT إلى GPS، أي  $50 \text{ ns}$ . وتبين جميع سيناريوهات السيزيوم التي درست إمكانية تحقيق دقة توجيه بواقع  $3 \text{ ns}$ . ويجب أن تعامل هذه النتائج بحذر لأنها تستند إلى مجموعات بيانات مركبة بنماذج مثالية للتيسر الانتقائي وميقاتيات محطات RIMS. ومع ذلك، فإن النتائج متسقة مع نتائج أخرى، كالشواهد المذكورة في المرجع [بندكتو (Benedicto) وآخرون، 1998].

وستسمح دقة توجيه بواقع  $3 \text{ ns}$  بمزامنة تطبيقات وقت ENT من مختلف مرافق المعالجة المركزية (CPF) بشكل مستقل دون الحاجة لوظيفة تزامن مخصصة من وقت ENT-A إلى وقت ENT-B. ولكن إذا لزم هذه الوظيفة، فقد أظهرت التجارب بالبيانات الحقيقية والمركبة إمكانية تحقق تزامن أوقات ENT بسهولة بدقة أفضل من  $3 \text{ ns}$  ( $\sigma$ ). ويُفرض متطلب النظام هذا لجعل تبديلات مرافق المعالجة المركزية شفافة لمستخدمي نظام EGNOS.

### 5.5.3 تصحيحات ميقاتية الساتل

وتُحسب تصحيحات ميقاتية الساتل ومعدلات التصحيح باستخدام كل ما هو متاح من قياسات شبه المدى وقياسات دوبلر من وظيفة ما قبل المعالجة. وتستند القياسات إلى وقت ENT كمرجع لها باستخدام معلمات تزامن محطات RIMS ثم يجري جمعها في مجموعات عبر الساتل. وتُحسب لكل ساتل التقديرات المرجحة بالحد الأدنى من مجموع مربعات الأخطاء في تحالف ميقاتيته ومعدل التغيير بالنسبة إلى وقت ENT. ثم تُفصل التخالافات بالاصطفاء منخفض التمرير على غرار ما يُستخدم لوظيفة توجيه وقت ENT إلى داخل المكونات البطيئة والسريعة التي تتألف منها رسائل تصحيح ميقاتية الساتل. وتُستخدم تقديرات معدل التغيير ليتوقع الكمون المرتقب في النظام هذه التصحيحات مسبقاً.

### 6.5.3 وقت ENT المذاع من خلال السواتل في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO)

تُنشر تصحيحات الساتل السريعة والبطيئة إلى مستخدمي نظام EGNOS عبر الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض في رسائل منفصلة. ويقوم المستقبل لدى مستخدم نظام EGNOS بفك شفرة هذه الرسائل ويعيد تكوين مجموع تخالفات ميقاتية الساتل مع وقت ENT لكل ساتل يتبعه، ويطبق عليها أشباه مدياته مع التصحيحات التفاضلية الأخرى لمنطقة واسعة التي يقدمها نظام EGNOS. وفي هذه الطريقة، يحل مقياس ENT الزمني محل سلم التوقيت لنظام GPS أو GLONASS في حل الملاحية لدى المستقبل. وبالتالي، لا يقف المستقبل عند حساب تقدير محسّن للموقع بفضل التصحيحات التفاضلية لمنطقة واسعة، بل يحسب أيضاً تقديراً لتخالف ميقاتية المستقبل الخاصة به مع وقت ENT.

وحالما يتيسر وقت ENT على الأرض، يجب نقله بدقة على متن السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. وفي الواقع، يعرف وقت المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض في مخرج حمولة المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض عند مركز الطور تماماً لهوائي النطاق L1. وتضمن هذه الوظيفة بما يدعى بالعروة الطويلة، وهي آلية تحكم مؤازرة تستند إلى التناظر التقريبي بين الوصلتين الصاعدة والهابطة من المحطة الأرضية البرية للملاحية (NLES) إلى الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض.

### 7.5.3 تقدير الفرق بين السالام الزمنية لوقت ENT والتوقيت العالمي المنسق (UTC)

بما أن التوقيت العالمي المنسق هو المتوسط النظري للعديد من الميقاتيات في جميع أنحاء العالم، ليس من الممكن إقامة صلة مباشرة بين ENT و UTC. ومن الضروري، بدلاً من ذلك، استخدام ميقاتية فعلية مشاركة في وضع التوقيت العالمي المنسق.

وبالتالي، يمكن تقسيم الفارق الزمني بين ENT و UTC إلى حدين:

$$(1-3) \quad \text{ENT} - \text{UTC} = [\text{ENT} - \text{UTC}(k)] + [\text{UTC}(k) - \text{UTC}]$$

حيث:

k هو أي مختبر أوروبي مشارك في وضع التوقيت العالمي المنسق.

### 1.7.5.3 فارق التوقيت (UTC – UTC(k))

يتيح المكتب الدولي للأوزان والمقاييس (BIPM) فروق التوقيت على أساس شهري من خلال الرسالة المعممة T، وهي خارج نطاق نظام EGNOS.

وفيما يلي أداء فارق التوقيت (UTC – UTC(k)):

- تدعو توصية معاهد الجامعة للتكنولوجيا (IUT) واللجنة الاستشارية لتعريف الثانية (CCDS) إلى إبقاء فارق الوقت (UTC – UTC(k)) ضمن 100 ns ( $\sigma_1$ ).
- ويقع الارتياح المقدّر في فروق التوقيت (UTC – UTC(k)) حالياً عند مستوى 10 ns ( $\sigma_1$ )، وهو مقدّم في وقت لاحق من خلال الرسالة المعممة T.
- ويعتمد الارتياح المقدّر في فارق التوقيت (UTC – UTC(k)) على دور التنبؤ، ويمكن أن يكون في حدود 20 ns ( $\sigma_1$ ).

### 2.7.5.3 ENT – UTC(k)

لمزامنة ENT و UTC (حسب مرصد باريس (OP))، يتعين أن تقع محطة RIMS في نظام EGNOS في نفس موقع مختبر SYRTE الموجود في مرصد باريس، وأن تكون موصولة مادياً بميقاتيتها الذرية (بسطوح بنية على مستويي 10 MHz ونبضة واحدة في الثانية (1pps)). وستقدر وحدة مزامنة محطة RIMS في نظام EGNOS مباشرة فرق الوقت بين ENT ومحطة RIMS (حسب مرصد باريس (OP)) بارتياح يقل عن 3 ns ( $\sigma_2$ ). وسيذاع فرق الوقت برسالة من النمط 12 تنبئ بالارتياح المذكور أعلاه. انظر التذييل A للاطلاع على وصف موجز محتوى رسالة نظام التعزيز القائم على الساتل (SBAS) التي يرسلها ساتل SBAS مستقر بالنسبة إلى الأرض.

### 8.5.3 نظام التعزيز القائم على الساتل (SBAS) والوقت

تمثل الميزة الرئيسية لنظام التعزيز القائم على الساتل (SBAS) بالنسبة إلى ضبط الوقت في أنه يستخدم ساتلاً مستقراً بالنسبة إلى الأرض كساتل متمم لقياس المدى الواصل إلى نظام GPS. وتحدّد مواصفات نظام SBAS بحيث تواكب الإشارات الواردة من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض زمنياً وقت نظام GPS ضمن 50 ns. ولأن الساتل في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض يبقى في نفس النقطة في السماء، يمكن استخدام هوائي ثابت عالي الاتجاهية، من قبيل بوق التغذية أو طبق مكافئ، لكي يتتبع مختبر ضبط الوقت ذلك الساتل. ويزيد هذا الهوائي من نسب الإشارة إلى الضوضاء ويساعد على تخفيف المسيرات المتعددة أيضاً. ومن شأن مثل هذا الهوائي أن يساعد أيضاً في تخفيف التداخل. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن للمرء أن يتتبع المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض باستمرار أثناء المساء عندما يكون النشاط الأيونوسفيري في الحد الأدنى، وخاصة في المناطق ذات خطوط العرض الوسطى حيث يكون التأخير في الحد الأدنى.

وهناك العديد من أنواع تجارب ضبط الوقت المختلفة التي ينبغي لنظام SBAS أن يساهم فيها. وهي تشمل تجارب المعايرة وتجارب تخفيف المسيرات المتعددة والمقارنات بين ضبط الوقت في المختبرات المختلفة والمقارنات بين مختلف أنظمة SBAS.

وثمة شاغل خاص في ضبط الوقت يتمثل في المعايرة أو قياس التأخرات عبر نظام، فتقدير التأخر عبر نظام، التوقيت أمر بالغ الأهمية في دقة تقييم الفرق بين اثنتين من الميقاتيات. وقد أدت تجارب الأساس المرجعي الصفري [براون (Brown)، 1991] دوراً هاماً في هذه العملية. ويمكن لنظام SBAS أن يوفر منصة للقياسات طويلة الأجل في هذا المجال بفضل تيسره المستمر.

### 1.8.5.3 الوقت والمحطات المرجعية

يعني نظام التعزيز القائم على الساتل (SBAS) بتسجيل أوقات الرصد. إذ تجري كل أعمال الرصد في محطات مرجعية مستقلة لنظام SBAS (SRS). ومن أجل ضمان انتظام الأساس الزمني في كل محطة SRS، تُستخدم ميقاتية على أساس وقت GPS كمرجع. وعادة ما تحتوي كل محطة SRS على عدد من الخيوط المستقلة التي تدعى معدات المحطة المرجعية (RSE). وتلزم هذه الخيوط لكفاية الترادف من أجل تزويد المحطة الرئيسية في نظام SBAS (SMS) بالبيانات في حال حدوث عطل واحد في محطة SRS. وبالإضافة



إلى غيرها من المكونات التجارية الجاهزة (COTS) الموجودة في معدات المحطة المرجعية، عادة ما يكون هناك معيار تردد حزمة السيزيوم (الميكانيكية الذرية).

ويحتاج معيار التردد لتلبية مواصفات معينة ليكون مفيداً في معمارية نظام SBAS. وتشمل المتطلبات الوظيفية ما يلي:

- الدقة؛
- قابلية الضبط؛
- الاستقرار؛
- ضوضاء طور النطاق الجانبي الواحد؛
- وقت الإحماء.

ويجب أن تكون الدقة  $2 \times 10^{-12}$  على الأقل دون أن تهرم طيلة عمر صمام السيزيوم، بحيث يمكن توليفه بتردد محدد. ويزود معيار التردد كل مستقبل في محطة مرجعية بإشارة موجة جيبية مرجعية ترددها 10 MHz باستقرار لا يقل عن الدقة  $2 \times 10^{-13}$  خلال 24 ساعة من أجل مقارنة الإشارات الواردة من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض مع وقت نظام GPS بدقة. وتتطلب معايير تردد محطة SRS الاتصال عبر سطح بيني ما للاستجابات وتعديلات المعلومات.

وفي بعض الأحيان يُدخل خرج معيار تردد حزمة السيزيوم البالغ 10 MHz في مستقبل نظام GPS الذي يوفر خرجاً ذا نبضة واحدة في الثانية (PPS 1) يُستخدم بمثابة اللحظة المرجعية للرصدات. وتُضبط ميكانيكية المستقبل لتتطابق وقت نظام GPS عند بدء التشغيل. وبالتالي، تُزامن مستقبلات محطة SRS تقريباً على مستوى بضع ميكرو-ثوانٍ. ويحتوي تدفق بيانات الخرج لكل مستقبل في محطة SRS على معلمة لها تخالف المستقبل البالغ 1 PPS مع وقت نظام GPS. وبعد ذلك، يُضبط معدل 1 PPS بمعدل ميكانيكية السيزيوم عند الدخل. وباختصار، يكون خرج مستقبل محطة SRS ميكانيكية حرة غير مترابطة. وهذا أمر ضروري لتشكيل مقياس زمني مستقل.

### 2.8.5.3 الوقت والمحطة الرئيسة

تمثل المحطة الرئيسة في نظام SBAS (SMS) معدات المعالجة اللازمة لإنشاء التصحيحات التي تُرسل من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض وللتحقق منها. وينبغي أيضاً أن تؤدي وظائف العمليات والصيانة (O & M) وأن تمتلك ميكانيكية نظام GPS للترزامن معه.

وتؤدي محطة SMS عدة وظائف. وتشمل تلك التي تنطوي على الوقت، بشكل مباشر أو غير مباشر، ما يلي:

- أ) تحديد المدارات الساتلية المستقرة بالنسبة إلى الأرض/نظام GPS؛
- ب) مراقبة أداء الإشارة في الفضاء (SIS)؛
- ج) إنشاء وقت شبكة نظام SBAS (SNT)؛
- د) إنشاء رسالة تخالف SNT/UTC؛
- هـ) إنشاء رسائل SBAS.

وترسل البيانات من معدات المحطة المرجعية لكل محطة SRS إلى معالج تصحيحات محطة SMS وتُقارَن البيانات من كل محطة SRS. وتراقب الميكانيكيات بالنسبة لبعضها البعض لتحديد ما إذا كانت إحدى الميكانيكيات "سيئة"، أي فيها تغير كبير في التخالف. وتلك هي بداية تشكيل وقت شبكة نظام SBAS (SNT) الذي يرد وصفه في الفقرة 3.8.5.3.

### 3.8.5.3 وقت شبكة نظام SBAS

يجب أن يكون إرسال نظام SBAS مترابلاً مع إشارات الملاحية في نظام GPS، أي مع وقت نظام GPS، كي تتمم إشارة نظام SBAS. ويتم ذلك بجعل وقت شبكة نظام SBAS (SNT) الوقت المرجعي لنظام SBAS. ويوجه وقت SNT نحو وقت نظام GPS. وترسل القياسات من جميع المحطات المرجعية في كل محطات SRS إلى كل محطة رئيسة، حيث تحسب خوارزمية سلم توقيت SNT المستقل من البيانات الواردة من المحطات المرجعية. وتستخدم جميع "الميكانيكيات الجيدة" المشاركة في قياسات المحطة

المرجعية التي تستقبلها محطة رئيسة لتشكيل سلم توقيت SNT. ثم يوجّه هذا سلم التوقيت نحو نظام GPS بنفس الخوارزمية. وتنقذ خوارزمية وقت SNT التي جاء وصفها المقتضب أعلاه في كل محطة رئيسة.

وتتضمن رسائل نظام SBAS تصحيحات سريعة وبطيئة تُرسل من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض. ويتعين أن تحدّد التصحيحات السريعة لكل مركبة GPS ساتلية (SV). ويُجنز ذلك باستخدام رسالة التصحيح الطويلة الأجل التي كانت تذاغ من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض لإزالة الميقاتيات الطويلة الأجل من التصحيح السريع المستكمل خارجياً؛ علماً بأن مجمل التصحيحات السريعة الطويلة الأجل يجب أن تضاف معاً.

وتشير التقديرات إلى أن التوجيه مرة واحدة في اليوم قد لا يكفي لإبقاء وقت SNT قريباً من وقت GPS. ولذلك، يُستكمل عتاد التوجيه برسائل تصحيح ضمن رسائل ملاحية نظام SBAS. وتُرسل من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض رسائل التصحيح البطيء (رسالة من النمط 9) ورسالة التصحيح السريع (رسالة من النمط 2-5). وسيجري تحديث التصحيح البطيء كل دقيقتين على الأقل، مما ينجز الجزء الأكبر من التصحيح. وستصدر التصحيحات السريعة مرة واحدة على الأقل في الدقيقة الواحدة.

### 9.5.3 الوقت والمدار المستقر بالنسبة إلى الأرض

سيجري توضيح الطريقة التي يؤدي فيها الوقت دوراً في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض باستخدام نظام WAAS كمثال. وستوضع ميقاتية السيزيوم في محطة GUS تحت قيادة وقت SNT. وتصدر محطة SMS مرة واحدة في اليوم الواحد أوامر لتوجيه ميقاتية محطة GUS من أجل الحد من أي تخالف مع وقت نظام GPS. وتتحكم ميقاتية محطة GUS بتزامن رسالة الملاحية في نظام WAAS من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض.

ويتكون نظام الاتصالات المستقر بالنسبة إلى الأرض (GCS) من النظام الفرعي لتوليد الإشارة (SGS) ووصلة التردد الراديوي الصاعدة (RFU) والساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض. ويزود نظام SGS وصلة RFU بشفرة الحياة/التقريبية (C/A) للضوءاء شبه العشوائية (PRN) بالإضافة إلى إشارة رسالة نظام WAAS كتردد متوسط (IF) قدره 70 MHz. وتحول وصلة RFU التردد المتوسط إلى تردد راديوي في الوصلة الصاعدة (455,42 MHz)، وتكبره وترسل الإشارة إلى الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض INMARSAT-3.

ويستقبل ساتل المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض الوصلة الصاعدة في النطاق C ويحولها إلى وصلات هابطة ذات الإشارة L1 والنطاق C، والتي تذاغ في حزم التغطية الأرضية باستقطاب دائري أيمن (RHCP) إلى المستخدمين وإلى وصلة RFU. وتستقبل وصلة RFU إشارات الوصلة الهابطة ذات الإشارة L1 والنطاق C من الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض INMARSAT-3. وتُكَبَّر الإشارات ويحوّل النطاق C إلى الإشارة L2. وتزود وصلة RFU النظام الفرعي لتوليد الإشارة (SGS) بالإشارتين L1 وL2.

ويستلم مستقبل محطة GUS الإشارات بشفرة PRN C/A على ترددات الإشارتين L1 وL2 من وصلة RFU. ويقاس مستقبل محطة GUS بيانات شبه مدى طور الموجة الحاملة لكلتا إشارتي الدخل. وترسل هذه المعلومات إلى معالجات ومولد إشارة، حيث توجد في المعالجات ومولد الإشارة خوارزميات وعتاد لتطهير الوقت والتردد وإشارات تصحيح التغذية الراجعة من الطور. ويشفر المعالج أيضاً رسالة نظام WAAS بشفرة التصحيح المسبق للخطأ (FEC).

وتضبط إشارات التصحيح هذه الوقت والتردد والطور في الإشارة المشفرة بشفرة PRN C/A، لتحذف مدى الوصلة الصاعدة ومعدل المدى والمؤثرات الأيونوسفيرية. ويجمع مولد إشارة أيضاً بين بيانات رسالة نظام WAAS المشفرة بشفرة التصحيح المسبق للخطأ (FEC) وشفرة PRN C/A المصححة في الوصلة الصاعدة والمقدمة كإشارة تردد متوسط إلى وصلة RFU. ويوفر معيار التردد مراجع ترددية دقيقة ومستقرة لجميع المحولات ومولدات الإشارة، والمستقبلات في وصلة RFU ونظام SGS.

ويتعين أن يكون تخالف التردد للخرج ذي التردد 5 و10 MHz قابلاً للضبط ضمن مدى  $1 \pm 10^{-9}$ . ولا يسري مطلب قابلية الضبط إلا على معيار التردد في نظام SGS كي يتمكن هذا النظام من تعويض أي انسياق في مذبذب التحويل المحلي للمدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض.

ويرسل النظام الفرعي للوصلة الصاعدة ذات التردد الراديوي إلى الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض إشارات من نظام SGS تحتوي على بيانات السلامة والتصحيح إلى جانب إشارة قياس مدى على غرار نظام GPS. وتستقبل الوصلة الصاعدة ذات التردد الراديوي إشارات من المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض على ترددات النطاقين C و L كليهما. وتحت إدارة نظام SGS تتحكم وصلة RFU بمستويات قدرة الوصلة الصاعدة للحماية من التداخل عليها ومن الاختلافات في خسائر الإرسال. وتوفر وصلة RFU تحويلاً ترددياً للإشارة المرسلّة في الوصلة الصاعدة إلى النطاق C وتحويلاً للإشارة المرسلّة في الوصلة الهابطة ضمن النطاق C إلى إشارة بتردد الإشارة L2.

والنظام الفرعي للساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض هو ساتل في الفضاء يدور في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض ويدعى ساتل INMARSAT-3 AOR-E ويقع في خط الطول 15,5° غرباً. وسيوفر الجزء الفضائي للساتل INMARSAT-3 سعةً لإرسال الإشارات الملاحية بعرض نطاق يبلغ 2,2 MHz ويتمركز حول التردد 1 575,42 MHz.

### 1.9.5.3 نظام SBAS وتوزيع الوقت

تناط بنظام SBAS عادةً مهمة ثانوية هي توزيع الوقت. ويكون مرجع معيار الوقت لنظام SBAS عادةً التوقيت العالمي المنسق (UTC) على النحو المرعي لدى بعض المؤسسات الوطنية أو الدولية. ويتحقق توزيع الوقت من خلال تزويد المستخدمين بتخالف الوقت بين وقت شبكة نظام SBAS (SNT) والتوقيت العالمي المنسق في رسالة من النمط 12 (MT12). وتحدد مختبرات ضبط الوقت الوطنية هذا التخالف في الوقت. وترقب المختبرات ما يقع ضمن مجال رؤيتها من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض في نظام SBAS. وتحسب فارق الوقت بين الوقت المرجعي منذ بداية رسالة نظام SBAS والنبضة الواحدة في الثانية التي تمثل التنفيذ الفعلي (في المختبر). ثم تُنقل البيانات إلى المحطات الرئيسية في نظام SBAS (SMS) عبر سطح بيني ما. وتجمع محطة SMS التخالف بين وقت شبكة نظام SBAS (SNT) والتوقيت العالمي المنسق وتنشئ رسالة من النمط 12 (MT12) تُرسل بعد ذلك إلى محطة الوصلة الصاعدة المستقرة بالنسبة إلى الأرض (GUS) التي ترسل إلى الساتل في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض. والغرض من رسالة MT12 هو تزويد مستخدم الوقت بمصدر دقيق للوقت يتخذ من التوقيت العالمي المنسق مرجعاً له.

ويعد نظام SBAS بأن يكون الجيل القادم من نظام النقل العالمي. وتشير العديد من ميزات نظام SBAS إلى ذلك الاستنتاج. فالسواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض على مرمى النظر دوماً. ويوفر ذلك القدرة على تحقيق "تلازم طور" مشاهد متعددة بشكل دائم بتلازمها مع إشارة ساتلية مشتركة. وتسمح الإرسالات من ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض باستخدام هوائيات اتجاهية عالية الكسب يمكنها أن توفر إشارات أكثر نظافة وأقل عرضة للتداخل والزلات الدورية. وتولد إشارات الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض ويجري التحكم بها في شبكة من مستقبلات GPS القائمة على السيزيوم التي توفر مرجعية مستقرة إلى حد معقول. وبالإضافة إلى ذلك، توفر رسالة نظام SBAS من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض أيضاً تقديرات في الوقت الفعلي لتخلف إشارات GPS أثناء عبورها طبقة الأيونوسفير من خلال نموذج يقوم على رصدات سواتل نظام GPS في الوقت الفعلي.

وتوزع أنظمة الملاحة سلم توقيتها المرجعي، وأحياناً علاقته بسلاّم التوقيت الأخرى. فعلى سبيل المثال، يوزع نظام GPS ما يسمى "وقت GPS" وعلاقته بالتوقيت العالمي المنسق المرجعي في مرصد البحرية الأمريكية (UTC(USNO)). وباستخدام نظام GPS، يمكن للمستخدم ضبط الميقاتية المحلية على توقيت UTC(USNO)، وعن طريق المراقبة المستمرة لنظام GPS، يمكن للمستخدم أن يتتبع حسن أداء تلك الميقاتية إزاء توقيت UTC(USNO). ويختلف وقت GPS عن التوقيت العالمي المنسق حالياً بخمس عشرة ثانية، بسبب الثواني الكبيسة.

ويشكل كل من وقت شبكة نظام WAAS (WNT) ووقت شبكة نظام EGNOS (ENT) ووقت شبكة نظام MSAS (MNT) تقدير نظام SBAS لوقت GPS. وينبغي أن يتمكن المستخدم من تحديد تخالف وقته المحلي المرجعي مع وقت WNT أو وقت ENT. وفي تشكيلته التشغيلية النهائية، سيزود كل نظام SBAS المستخدم بتقدير للفرق بين وقت شبكة نظام SBAS (SNT) لديه والتوقيت العالمي المنسق. وسيرسل نظاما WAAS و EGNOS تصحيحات تظهر الفرق بين WNT أو ENT وبين UTC. ويمكن للمستخدم استخدام هذه المعلومات لضبط ميقاتية ما على التوقيت العالمي المنسق. بيد أن تلك المعلومات قد لا تكون متاحة دائماً في هذه المراحل المبكرة من التطوير.

### 2.9.5.3 نسق CGGTTS لتوزيع بيانات التوقيت

من خلال فريق عمل مخصص يسمى CGGTTS، وضع مجتمع التوقيت نسقاً لتسهيل تبادل بيانات توقيت نظام GPS بين المستخدمين المهتمين في نقل الوقت عالي الدقة. وهؤلاء المستخدمون هم في المقام الأول مختبرات ضبط الوقت الرئيسية في العالم. ودون الخوض في التفاصيل الدقيقة لهذا النسق، حسبنا القول أن هناك عمودين يحويان بيانات ذات صلة بعملية ضبط الوقت. وهي تظهر في الجدول 1-3. ويرد في الصف الأول عنوانا العمودين، فيما يبين الصف الثاني ماهية البيانات الواردة في العمودين. فتشير عبارة "Lab MC" اختصاراً إلى الميقاتية الرئيسة في المختبر القائم بالقياسات والمبلغ عنها. وتشير عبارة SVN إلى ميقاتية ساتل معين يعطى رقمه SVN أيضاً في نسق الرسالة. ويشير وقت GPS إلى وقت النظام العالمي لتحديد الموقع.

الجدول 1-3

#### البيانات ذات الصلة بضبط الوقت

REFSYS	REFSV
GPS - وقت Lab MC	Lab MC - SVN (لساتل نظام GPS)

نظراً لاختلاف نسق الرسالة والبيانات القادمة من سواتل نظام WAAS عن تلك القادمة من سواتل نظام GPS، وجب تعديل النسق المعياري لرسالة التوقيت بنسق CGGTTS. ويتدارس الآن فريق CGGTTS الرسالة المعدلة التي اقترحتها شركة NovAtel. وينطوي التعديل المقترح على إضافة عمود ثالث إلى العمودين اللذين سبق ذكرهما والواردين في الجدول 2-3. ويعنون العمود الثالث الجديد اختصاراً بعبارة GAT حيث يشير الحرف G إلى ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض، ويشير الحرف A إلى نظام WAAS (ويستعاض عنه بحرف B عند الإشارة إلى نظام EGNOS) ويشير الحرف T إلى الوقت. وأعد هذا النسق المقترح من أجل الحفاظ على الاستمرارية مع العرف المعتمد سابقاً الذي لا يزال يأخذ في الاعتبار تفرد رسالة الملاحة في نظام WAAS والطريقة التي تطبق فيها التصحيحات على شبه المدى المرصود (المقيس). ويبين الجدول 2-3 التفسير الذي ينبغي أن يُسند إلى بيانات بالصيغة المراجعة المقترحة لنسق CGGTTS عندما يطبق على ساتل نظام SBAS.

ففي نسق CGGTTS المقترح، يحتوي العمود المسمى REFSV على تحالف الميقاتية المحلية مع وقت إرسال ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض للإشارة. وهو يماثل التحالف بالنسبة لساتل نظام GPS. وبالإشارة إلى الجدول 1-3، يسمى العمود الأول في الصف الثاني من الجدول 2-3 'Lab MC-Geo'. ولكن عبارة "Geo" تظل مغايرة لوقت شبكة نظام SBAS (SNT). ويُقرب من وقت SNT بتطبيق تصحيحات الميقاتية البطيئة الواردة في رسالة من النمط 9. ويسمى العمود الثاني الآن 'Lab MC-SBAS'. ولكن عبارة "SBAS" تظل مغايرة لوقت شبكة نظام SBAS (SNT)، لذلك فهي تدعى وقت SBAS، على غرار وقت GPS. وبعد تطبيق التصحيحات السريعة الواردة في رسالة من النمط 2 حتى 5، يُشتق أخيراً تحالف الميقاتية المحلية مع وقت SNT.

الجدول 2-3

#### البيانات بالصيغة المراجعة المقترحة لنسق CGGTTS

GAT	REFSYS	REFSV
Lab MC - SNT	Lab MC - SBAS	Lab MC - Geo
تصحيحات الميقاتية والمدار السريعة	تصحيحات الميقاتية البطيئة	قيم PSR + الأيونوسفير + التروبوسفير + المدار المقيسة
MT2 (تصحيحات سريعة)	الميقاتية من MT9	المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض من MT9

روقت إرسالات نظام WAAS في مرصد البحرية الأمريكية (USNO) باستخدام نظام وحدة ترابط NovAtel ضيقة النطاق. وتعالج البيانات يومياً باستخدام برنامج ينتج بيانات الخرج وفقاً للصيغة المراجعة المقترحة لنسق CGGTTS.

وتعطي نتيجة المعالجة تحالف الميقاتية الرئيسة لمرصد البحرية الأمريكية (USNO) مع وقت WNT. وتستخدم هذه البيانات في نهاية المطاف لإعداد رسالة MT12 يرسلها نظام WAAS. فتقوم سواتل نظام SBAS المستقرة بالنسبة إلى الأرض بإرسال رسالة MT12 للسماح للمستخدمين بالحصول على اختلاف وقت SNT عن توقيت UTC (في المختبر). وتُحذر الإشارة إلى أن الميقاتية الرئيسة لمرصد البحرية الأمريكية التي تقدم الوقت لوحدة ترابط نظام WAAS ضيقة النطاق المستخدمة للقيام بالقياسات، هي تقدير في الوقت الفعلي لتوقيت (USNO) UTC.

واختيرت لهذا التحليل فترة أربعين يوماً من البيانات (يوماً جوليانياً معدلاً (MJD) من 52167 إلى 52207 (MJD)). وهي ليست مجموعة بيانات مستمرة. ومن أجل تسهيل نقل البيانات من مرصد USNO إلى حاسوب آخر عبر مودم هاتفي، أرسلت عدة مجموعات فرعية من البيانات في أوقات الحد الأدنى من الاستخدام.

نظراً لأن المستقبل المستخدم في هذه التجربة لم يخضع للمعايرة بالمعنى المطلق، أي من خلال قياس التأخر عبر جميع مكونات النظام، قورنت القيم التي تم الحصول عليها بمستقبل نظام WAAS لوقت محطة التحكم الرئيسة في مرصد USNO والمبلّغة إلى نظام GPS (USNO MC – GPS) مع القيم التي تم الحصول عليها بمستقبلات مرصد USNO المعاييرة. وتشكلت قيمة متوسطة للفروق خلال يوم واحد. واستُخدم هذا المتوسط كتقدير للاختلافات المنهجية بين مستقبل NovAtel ومستقبل USNO المستخدمين لإبلاغ بيانات نظام GPS إلى محطة التحكم الرئيسة في نظام GPS.

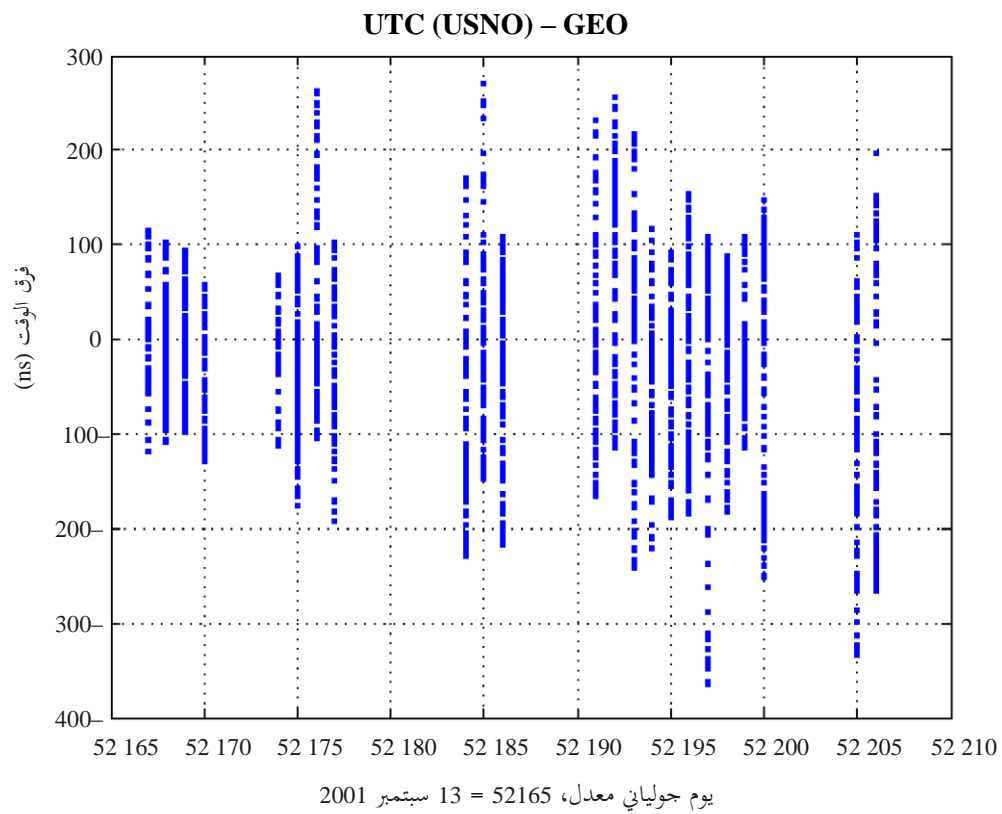
ويوضح الشكل 3-4 البيانات الواردة في العمود المسمى REFSV الناتج باتباع نسق CGGTTS المراجع. وهو يظهر الفرق بين وقت USNO MC والوقت من سائل WAAS المستقر بالنسبة إلى الأرض بعد تطبيق التصحيحات للتأخيرات الناجمة عن الأيونوسفير والتروبوسفير، والتصحيحات لمدار السائل المستقر بالنسبة إلى الأرض، والتصحيحات الواردة في رسالة MT9 لأشباه المديات المقيسة.

ثم طُبقت تصحيحات الميقاتية الواردة في رسالة MT9 على البيانات وتُعرض النتائج في الشكل 3-5. ويلاحظ انخفاض كبير في التخالفات. ولكن لا يزال هناك انحراف كبير نوعاً ما بدءاً من حوالي 52198 MJD. ويقابل ذلك اضطراب أيونوسفيري كبير إلى حد ما، حصل في 13 أكتوبر 2001.

ويُظهر تطبيق التصحيحات السريعة الواردة في الرسالة 5- MT2 مزيداً من التحسن على النحو المبين في الشكل 3-6.

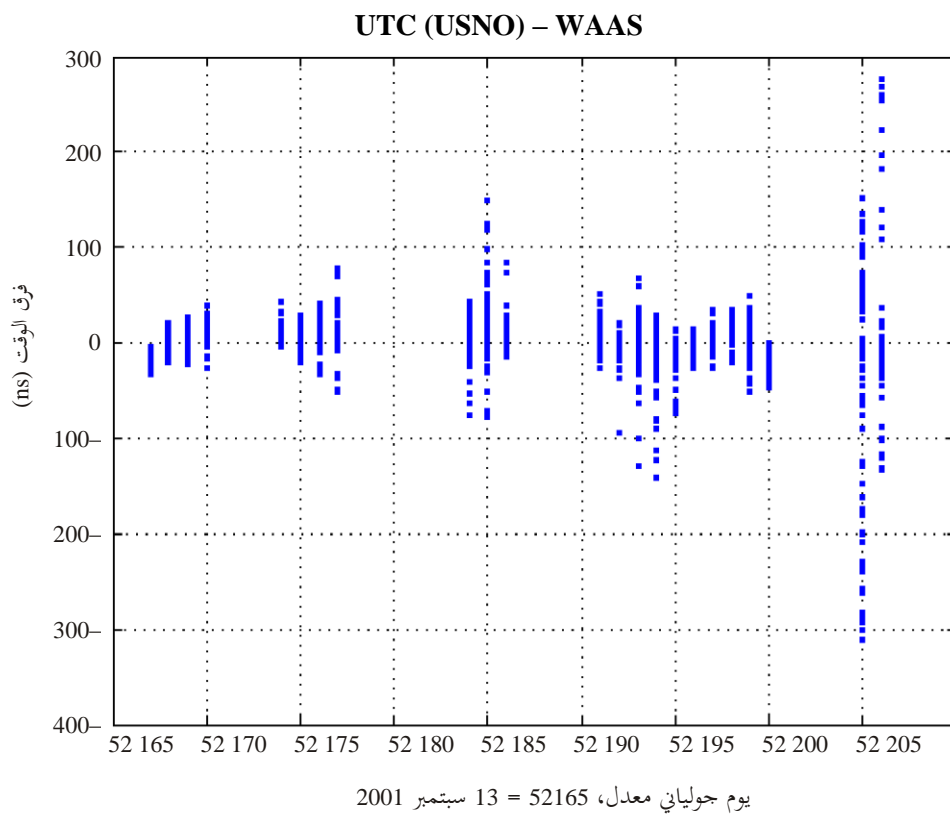
وفيما خُفضت قيم UTC (USNO)–WNT فإنها لا تزال كبيرة بالنسبة لتوزيع الوقت بالمقارنة مع قيم مماثلة تم الحصول عليها باستخدام نظام تحديد المواقع (GPS). ويبين الشكل 3-7 المتوسطات اليومية المستخلصة من النقاط الفردية التي وردت في الشكل 3-6. وهناك تباعد محدود 40 نانوثانية (ns) في القيم. ويعود هذا التباعد الكبير على الأرجح إلى اختلافات في إجراءات التشغيل التي يجري تنفيذها خلال المراحل الأولى من تنفيذ نظام WAAS.

الشكل 4-3



Sat\_time\_freq-03-04

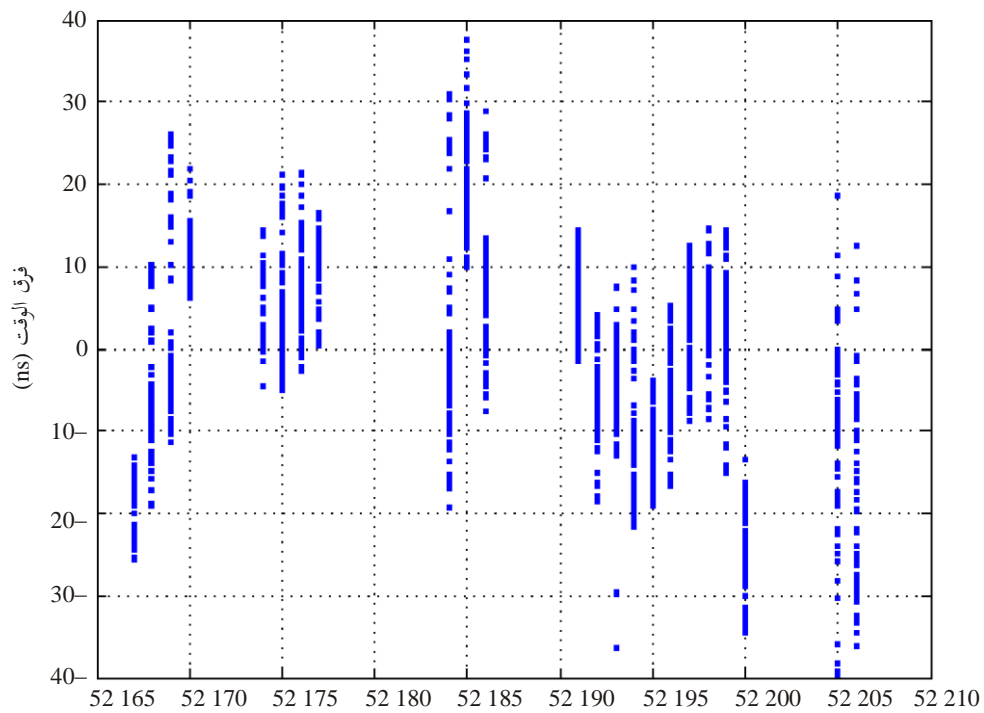
الشكل 5-3



Sat\_time\_freq-03-05

الشكل 6-3

UTC (USNO) – WNT

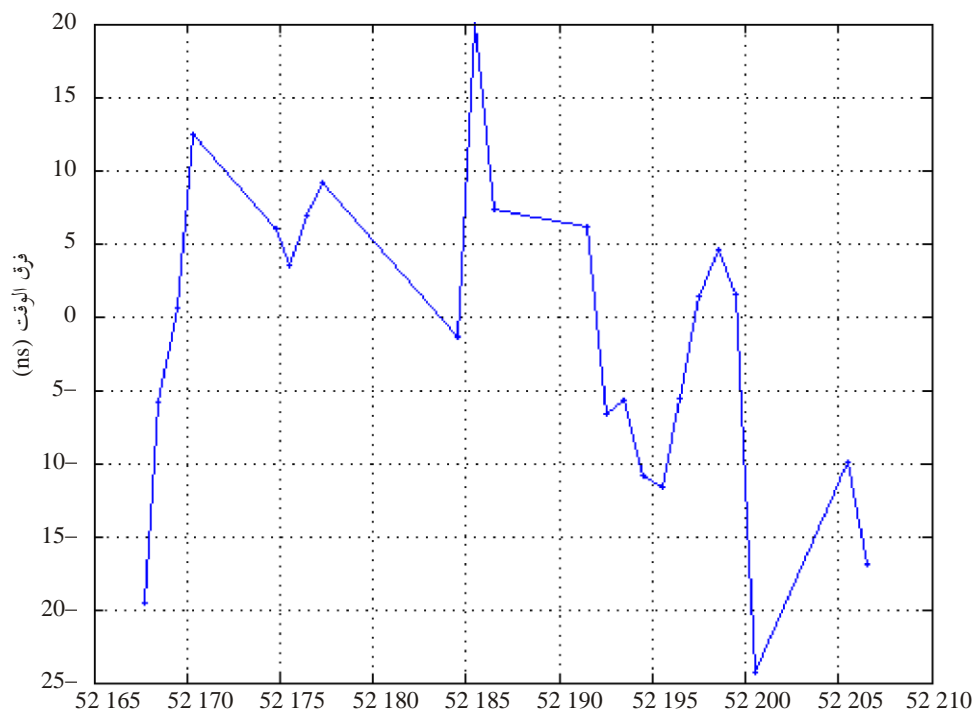


يوم جولياني معدل، 52165 = 13 سبتمبر 2001

Sat\_time\_freq-03-06

الشكل 7-3

المتوسطات اليومية لوقت UTC (USNO) – WNT



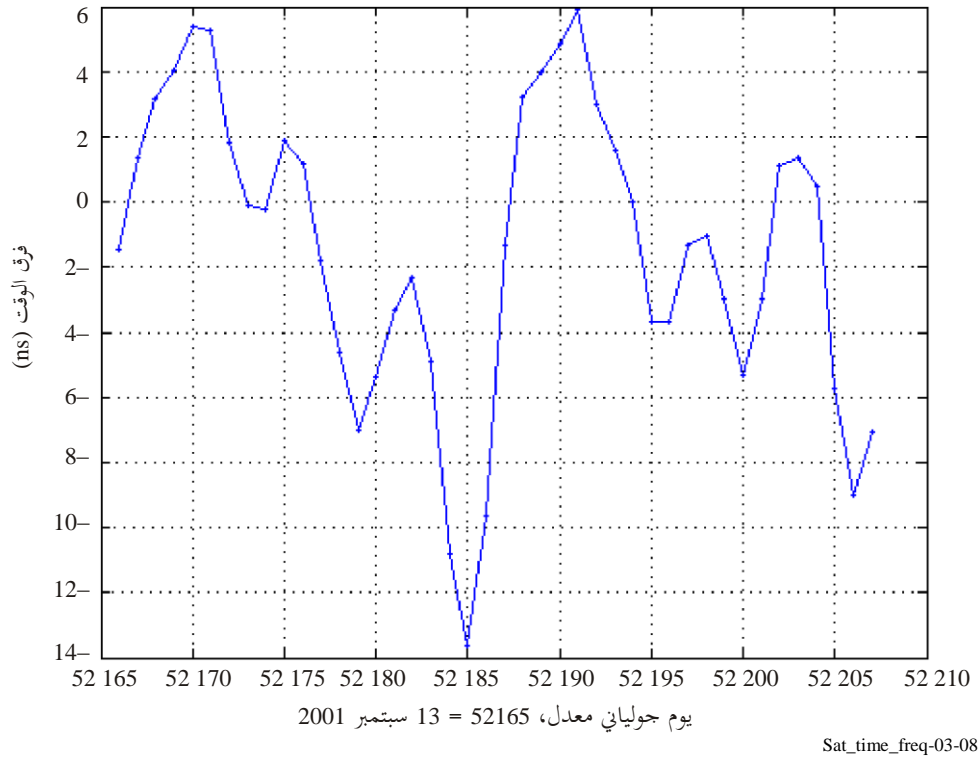
يوم جولياني معدل، 52165 = 13 سبتمبر 2001

Sat\_time\_freq-03-07

ويبين الشكل 8-3 المتوسطات على مدى يومين لقيم وقت نظام GPS - UTC (USNO). ويبلغ التباعد في هذه الحالة حوالي 20 نانوثانية (ns).

الشكل 8-3

### المتوسطات على مدى يومين لقيم وقت نظام GPS - UTC (USNO)



### 3.9.5.3 نظام SBAS وتوزيع الترددات

استُعمل نقل الوقت باستخدام سواتل نظام GPS على نطاق واسع لسنوات عديدة من أجل المقارنات الدولية بين مختبرات التوقيت لحساب التوقيت الذري الدولي (TAI). وبفضل ساتل يرى محطتين في آن واحد ويحصل من كل منهما البيانات التي يرصدها نظام GPS، يمكن بعملية طرح بسيطة تحديد تحالف الوقت المطلق بين مقياسيتين تغذيان مستقبلات GPS. ويتطلب ذلك معرفة التأخيرات الداخلية في كل محطة (عبر الهوائي والكبلات والمستقبل، وما إلى ذلك). فإذا اعتُبرت هذه التأخيرات ثابتة، يمكن تنفيذ نقل تردد بين المحطتين، مما يتيح النفاذ إلى تغيرات تحالف الوقت بين المقياسيتين وبالتالي إلى استقرارهما.

وتستطيع مستقبلات GPS الجيوديسية الآن أن تتعامل مع عدة قنوات (بحيث يمكن رصد العديد من السواتل في نفس الوقت) ومع ترددتين (بحيث تمكن إزالة التأخير الأيونوسفيري). لذلك يمكن التوسع بالتقنية الكلاسيكية باستخدام جميع قياسات الشفرة من أجل الحصول على نتائج أكثر دقة. وعلاوة على ذلك، يمكن لهذه المستقبلات أن تسجل بيانات رصد الشفرة وطور الموجة الحاملة. ومن المعروف جيداً أن بيانات رصد طور الموجة الحاملة تبشر بنقل أدق للترددات من أجل مرات التكامل بين عدة ساعات وعدة أيام.

ويمكن لبعض مستقبلات GPS أيضاً أن تتبع إشارات المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، أي رسالة كرسائل GPS قادمة من حمولة الملاحية في النطاق L للسواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. وتقدم هذه الإشارات الإضافية ميزة هامة لنقل الوقت/التردد. فالساتل في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض هو دائماً في مرمى النظر من حيث التعريف. لذلك ينبغي أن يتيح فرصة تلازم طوره باستمرار مع إشارته. وينبغي أيضاً لقابلية الرصد الدائمة هذه أن تمكن تبسيط معالجة الإشارات. وعلاوة على ذلك، لا تتعرض إشارة المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض لمسببات الترددي المتعمدة مثل التيسر الانتقائي.



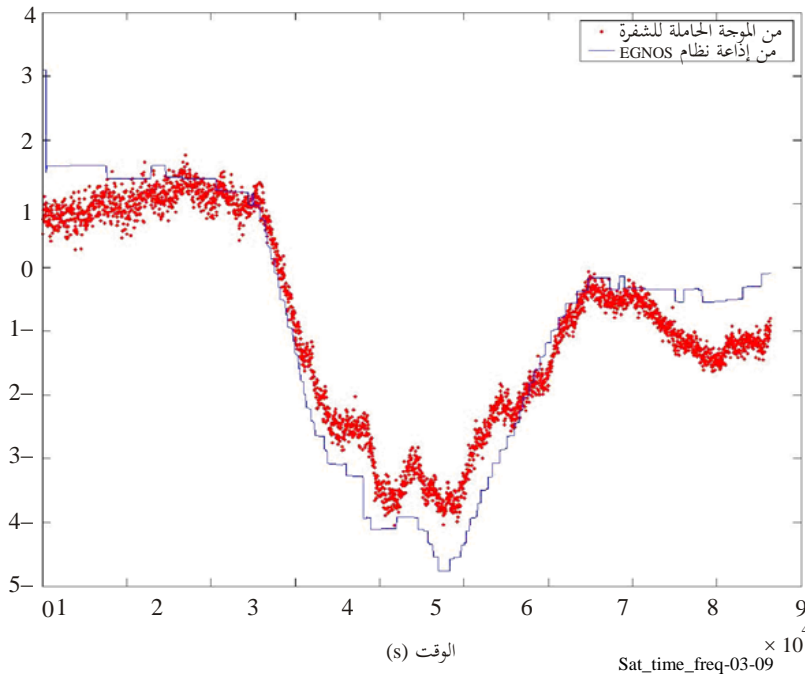
ومع ذلك، فإن استخدام سواتل المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض ينطوي على مشاكل محددة. فهي أولاً ترسل على تردد واحد مما يحول دون استخدام التوليفة المعروفة الخالية من مؤثرات الأيونوسفير. ويمكن تصحيح هذه المؤثرات باستخدام المعلومات التي يذيعها نظام SBAS أو من خلال حساب الشفرة/فرق الطور. وفي الواقع، يتطابق تشويه الأيونوسفير للشفرة والطور، ولكن بعلامة جبرية مختلفة. وبالتالي يُمكن حساب التصحيح الأيونوسفيري بسهولة كنصف الشفرة/فرق الطور.

ويبين الشكل 9-3 النتائج التي تم الحصول عليها وفق الأساس المرجعي المكتب الدولي للأوزان والمقاييس/المركز الوطني للدراسات الفضائية (BIPM/CNES) (حوالي 600 km) بهوائي مكافئ، وكلاهما موجهان صوب الساتل INMARSAT AOR-E (EGNOS):

ويمكننا أولاً أن نقارن التصحيح الأيونوسفيري المحسوب على محطة واحدة من فرق الشفرة-الموجة الحاملة مع ذلك الذي يذعه نظام EGNOS.

الشكل 9-3

#### التصحيحات الأيونوسفيرية بالشفرة/فرق الطور والمعلومات المذاعة

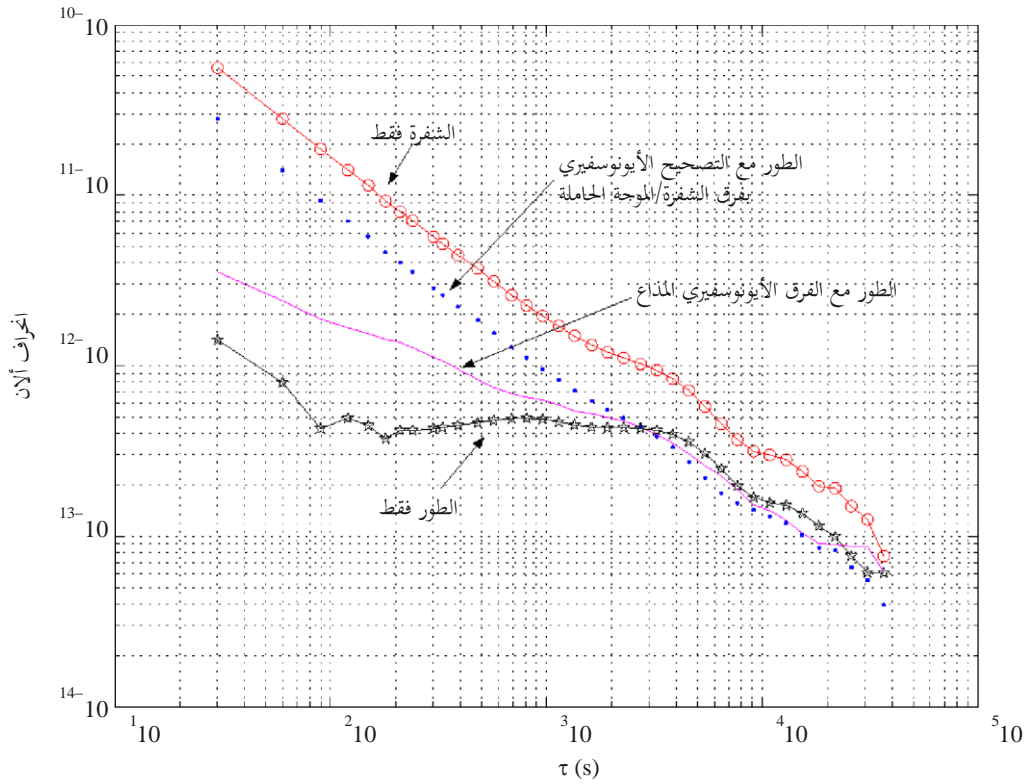


من الواضح أن التصحيح الأيونوسفيري المحسوب من الشفرة/فرق الطور مشوب بقدر أكبر من الضوضاء ولكنه مستمر على عكس إذاعة نظام EGNOS التي تجري عبر العديد من الخطوات.

ويقارن الشكل 10-3 استقرار حل الميقاتية مع التصحيح الأيونوسفيري (بالأسلوبين) وبدونه.

الشكل 10-3

انحراف آلان (Allan) لمختلف حلول الميقاتية



Sat\_time\_freq-03-10

من الواضح أن حل الميقاتية الذي يستخدم الطور غير المصحح هو الأفضل على المدى القصير، ولكن غياب التصحيح الأيونوسفيري يؤثر على الاستقرار على المدى المتوسط. أما حل الميقاتية الذي يستخدم الطور مع التصحيح الأيونوسفيري بالشفرة/فرق الطور فهو على قدر كبير من الضوضاء على المدى القصير بسبب ضوضاء الشفرة. وبعد وقت تكامل محدود ساعة واحدة، يصبح الطور غير المصحح والطور بالتصحيحين كليهما قريبين جداً.

لذلك ثمة إشكال هام في نسبة الإشارة إلى الضوضاء. وتحسن هذه النسبة باستخدام الهوائيات الكبيرة التي ينبغي أن تشكل ميزة كبيرة لتلازم الطور المستمر (خفض عدد زلات الدورة) وللتصحيح الأيونوسفيري بالشفرة/فرق الطور.

### 10.5.3 نظام SBAS ونقل الوقت

قد يرغب المستخدمون في ضبط ميقاتية تقع في مكان بعيد لتعمل وفق سلم زمني محدد، أو يريدون مجرد معرفة الفرق بين ميقاتية محلية وميقاتية نائية. ويمكن أن يتم ذلك من خلال تقنية تعرف باسم الرؤية المشتركة. وبهذه التقنية، ترصد محطتان في وقت واحد الساتل نفسه. وعلى كل من المستخدمين في كلتا المحطتين أن يسجل الفرق بين ميقاتيته المحلية أو المرجع الزمني المحلي في نفس اللحظة الزمنية باستخدام الساتل نفسه. ويتم القيام بذلك عادة باستخدام مستقبِل نقل وقت نظام GPS. وبتزويد المستقبلات الحديثة بالقدرات، قد يتسنى القيام بذلك بمستقبِل أكثر تقدماً.

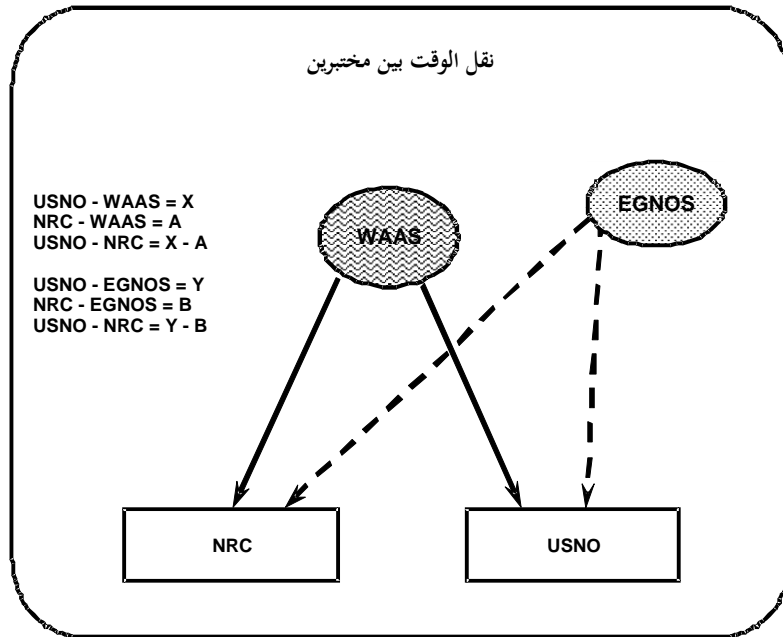
ويشارك مستخدمان في استخدام نظام SBAS لنقل الوقت. وللحصول على النتائج المثلى، ينبغي أن يرصد الساتل نفسه في الوقت نفسه وأن يستخدم تقنيات اختصار البيانات نفسها عند حساب تحالف ميقاتييهما المحليتين مع وقت SNT. والميزة في ذلك هي التخفيف الكبير من آثار أي مصدر خطأ مشترك.

### 11.5.3 نقل الوقت بين مختبرين

حالياً، يمكن رصد نظامي SBAS فوق منطقة واسعة في العالم. وهما يوفران بعض الميزات المجزية الإضافية لنقل الوقت. والشكل 11-3 هو رسم تخطيطي يبين كيف يمكن لمختبرين استخدام نظامي SBAS لمقارنة ميقاتييهما. ويمكن لكل مختبر أن يرصد نظامي SBAS. وبعد ذلك، يمكن أن تكون النتائج من أحد نظامي SBAS بمثابة مراجع تحقق للآخر.

الشكل 11-3

رسم تخطيطي يبين نقل الوقت بين مختبرين لضبط الوقت  
باستخدام نظامي SBAS لمقارنة فارق الوقت بين المختبرين



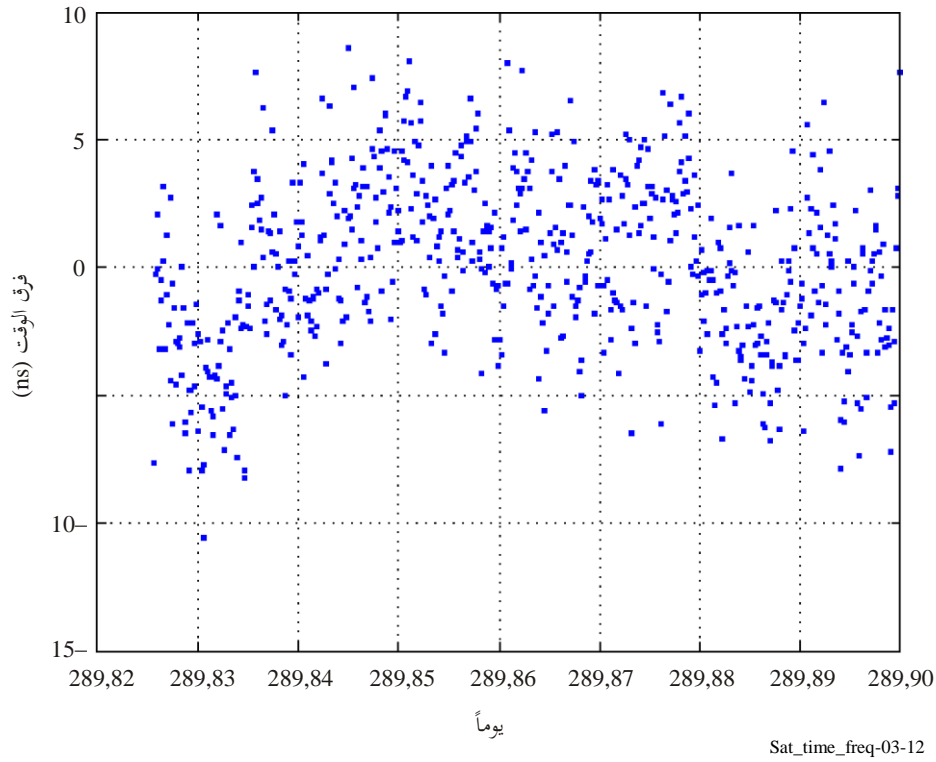
Sat\_time\_freq-03-11

في هذا المثال، تجرى عمليات الرصد في مرصد USNO في واشنطن العاصمة، وفي مجلس البحوث الوطني (NRC) في أوتاوا، كندا، باستخدام نظام WAAS في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض ومنصة اختبار نظام خدمة الملاحة التكميلية الأوروبية المستقرة بالنسبة إلى الأرض (EGNOS) (ESTB) في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، بوصفهما سواتل نقل الوقت. ويبين الشكل 12-3 الفرق بين الميقاتيتين الرئيسيتين في مرصد USNO وفي مجلس البحوث الوطني باستخدام نظام WAAS في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، ويبين الشكل 13-3 الفرق نفسه باستخدام منصة اختبار النظام EGNOS (ESTB). ونظراً لعدم معايرة المستقبلات المستخدمة في هذه التجربة، أزيلت نقطة الصفر الجزافية.

ومن ثم لا يمكن استخدام هذا المثال إلا لإعطاء مؤشر للدقة التي يمكن بلوغها حالياً بهذه التقنية. ويعطي الانحدار الخطي من خلال كل من مجموعات البيانات خطأ معيارياً بمقدار ns 1,3 و ns 2,1 على التوالي.

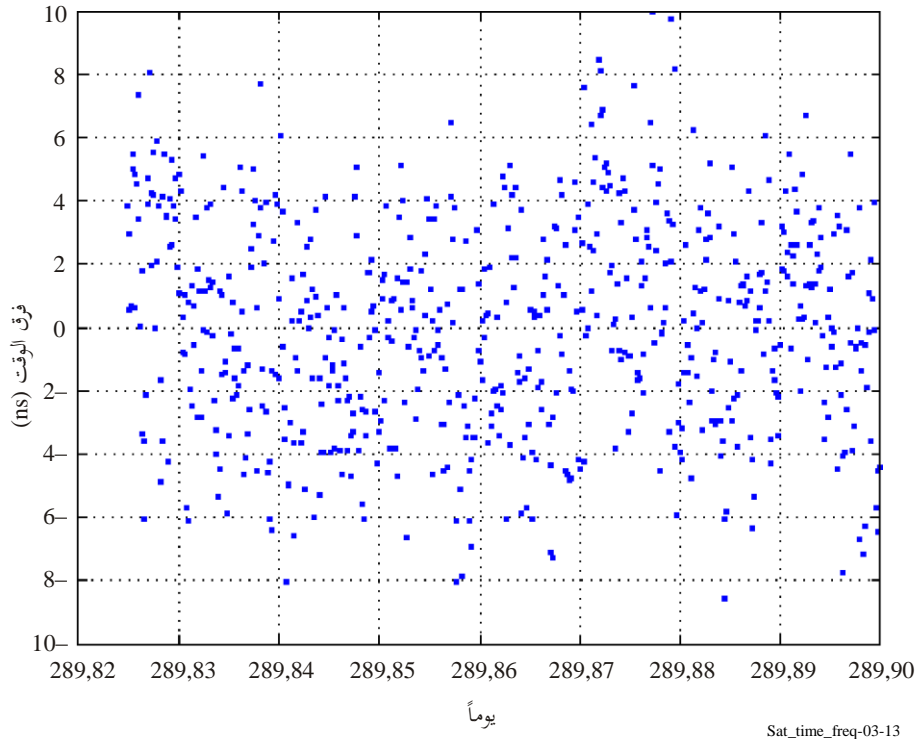
الشكل 12-3

الفرق بين مرصد USNO ومجلس البحوث الوطني (NRC) المستخدمين لنظام WAAS  
في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض  
الخطأ المعياري هو ns 1,3



الشكل 13-3

الفرق بين مرصد USNO ومجلس البحوث الوطني (NRC) المستخدمين لنظام EGNOS  
في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض  
الخطأ المعياري هو ns 2,1

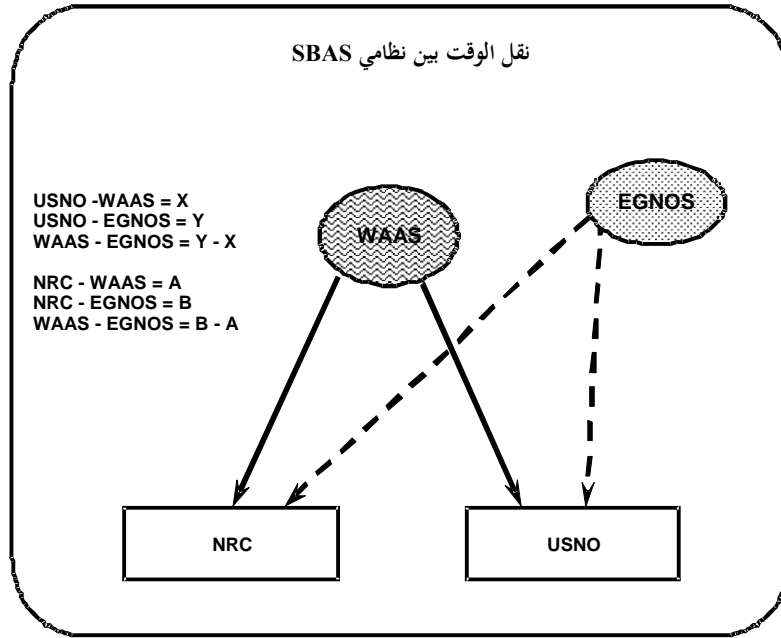


### 12.5.3 نقل الوقت بين نظامي SBAS

الشكل 14-3 هو رسم تخطيطي يوضح كيف يمكن لمختبرين مقارنة الفارق الزمني بين نظامي SBAS. ويوفر كل مختبر مرجع تحقق للمختبر الآخر.

الشكل 14-3

رسم تخطيطي يوضح نقل الوقت بين مختبرين لضبط الوقت باستخدام نظامي SBAS للحصول على فارق الوقت بين هذين النظامين



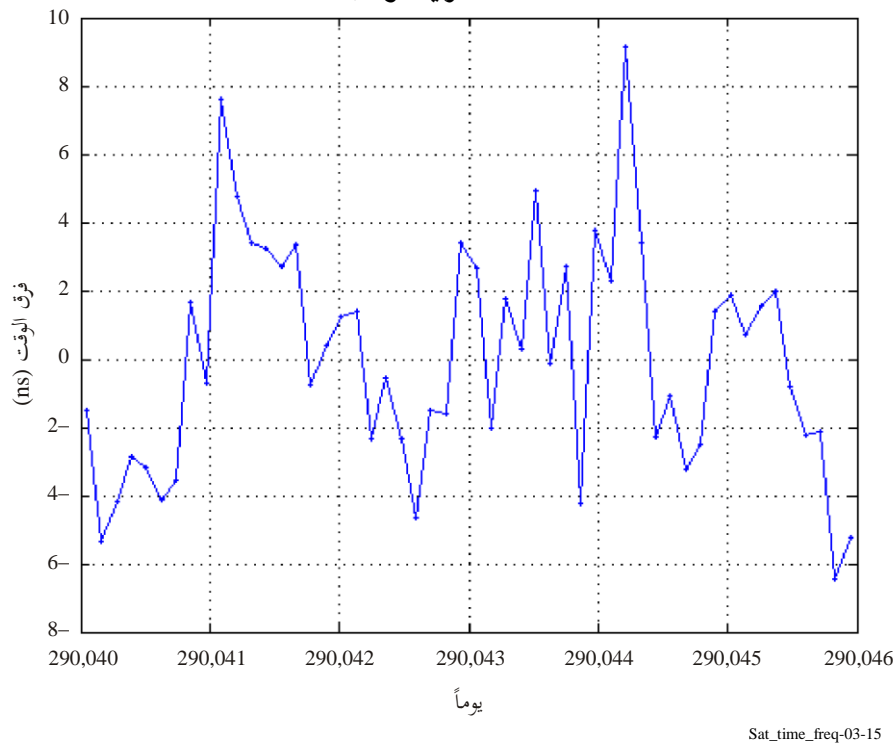
Sat\_time\_freq-03-14

يبين الشكل 15-3 الفرق بين وقتي WNT و ENT كما تم الحصول عليهما في مرصد USNO بعد أن جرى احتواء الانحدار الخطي من خلال الرصدات. ومرة أخرى، ونظراً لعدم معايرة المستقبلات، يشير هذا الرسم البياني إلى الدقة يمكن بلوغها حالياً بهذه التقنية. والخطأ المعياري للانحدار الخطي من خلال هذه البيانات هو 1,2 ns.

ويبين الشكل 16-3 الفرق بين وقتي WNT و ENT كما تم الحصول عليهما لدى مجلس البحوث الوطني (NRC). ويكاد يتطابق الانحدار الخطي من خلال هذه البيانات مع ذلك الذي تم الحصول عليها في مرصد USNO. وهو 1,0 ns.

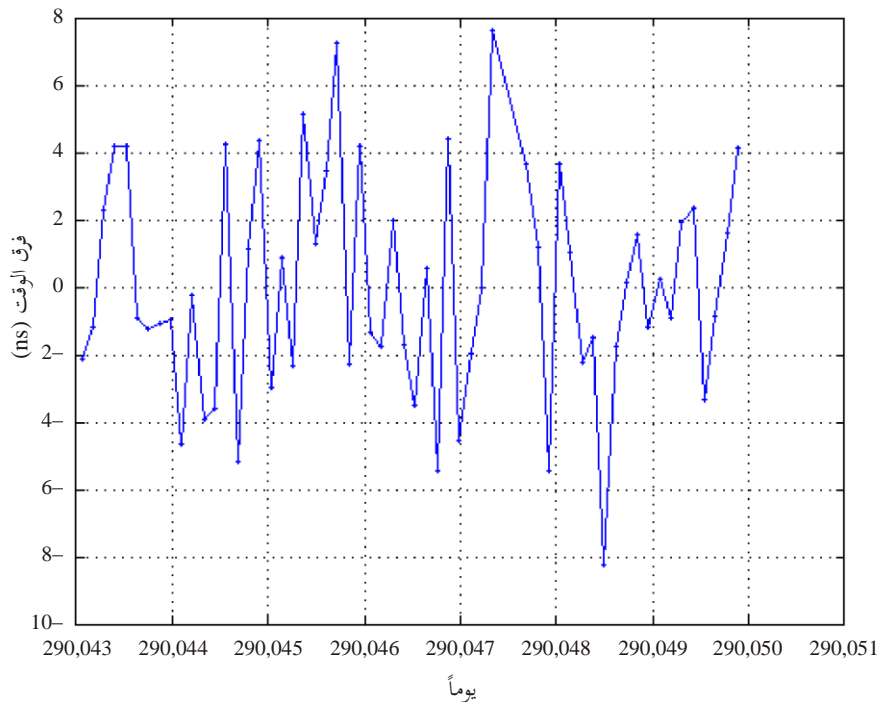
الشكل 15-3

الفرق بين نظامي WAAS و EGNOS باستخدام بيانات مرصد USNO  
الخطأ المعياري هو ns 1,2



الشكل 16-3

الفرق بين نظامي WAAS و EGNOS باستخدام بيانات مجلس البحوث الوطني (NRC)  
الخطأ المعياري هو ns 1,0



### 1.12.5.3 نظام SBAS ومجتمع ضبط الوقت

يمكن لنظام SBAS أن يزود، وهو سيزود، الوقت عالمياً لتسجيل جميع الأحداث. وهو لن يتأثر بالتيسر الانتقائي (SA). إذ يبقى المصدر في نفس النقطة التقريبية في السماء. وهكذا، يمكن استخدام هوائي عالي الكسب لتزويد المستخدم الثابت في مكانه بإشارة جيدة جداً. ويرسل تحالف وقت SNT مع توقيت UTC طي رسالة الملاحة في نظام SBAS. وتكون الإشارة متيسرة بشكل مستمر. وتوفر مثل هذه الإشارة بعض القدرات غير العادية لمجتمع ضبط الوقت. وينبغي أن يتيح نظام SBAS تطوير أنظمة توقيت أكثر اقتصاداً باستخدام إشاراته. ويمكن الآن أن تستخدم بلورات أرخص في الأنظمة التي تعتمد على معايير ذرية كمحركاتها العطالية فيما تدمج وقت GPS لإزالة آثار انتقائية التيسر. ونظراً لغياب انتقائية التيسر، سيتسنى كشف أي سلوك مختلف على الفور تقريباً في نظام يزود بالوقت. فبنظام GPS، يتعين الانتظار لمعرفة ما إذا كان مرد الظواهر العابرة، انتقائية التيسر أو سلوك الميقاتية الشاذ. أما إذا كان الموقع ضمن رقعة ساتلي إرسال نظام SBAS، فيحصل تحقق فوري بالترادف. ويمكن أن يُستخدم ذلك بمثابة تحقق حصين للغاية في العديد من الأنظمة العاملة بالتوقيت.

## المراجع

- BENEDICTO, J. *et al.*, [1998] EGNOS: the European Satellite Based Augmentation to GPS and GLONASS. Proc. GNSS98.
- BROWN, K.R. [1991] The theory of the GPS composite clock. Proc. ION GPS-91, p. 223-241 and GOUNI, Ph. *et al.* [1997] Time and Frequency aspects in EURIDIS, EFTF 1997.
- BRUNET M. *et al.* [1998] The role of time and frequency in EGNOS. PTTI 1998.
- FLAMENT, D. *et al.* [1998] EGNOS: the European Based Augmentation to GPS and GLONASS-mission and system architecture. Proc. GNSS98.
- PECK, S. *et al.* [1997] WAAS network time performance and validation, Proc. ION GPS97, p. 1123-1131.
- PIEPLU, J-M. *et al.* [1998] EGNOS algorithms performances status and experiment activities. Proc. GNSS98.

## التذييل A

## وصف موجز لمحتوى رسالة نظام SBAS

النمط	المحتويات
0	لا تستخدم هذا المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO) لأي شيء (لاختبار WAAS)
1	تخصيصات قناع PRN، إنشاء 51 بثة من 210 بتات
2 إلى 5	تصحیحات سريعة
6	معلومات السلامة
7	عامل ترددي التصحيح السريع
8	محفوظ لرسائل المستقبل
9	رسالة الملاحه في GEO (X، Y، Z، الوقت، الخ.)
10	معلومات الترددي
11	محفوظ لرسائل المستقبل
12	معلومات تخالف وقت شبكة UTC/SBAS
13 إلى 16	محفوظ لرسائل المستقبل
17	تقاوم ساتل GEO
18	أقنعة نقطية للشبكة الأيونوسفيرية
19 إلى 23	محفوظ لرسائل المستقبل
24	تصحیحات سريعة مختلطة/تصحیحات خطأ الساتل على المدى الطويل
25	تصحیحات خطأ الساتل على المدى الطويل
26	تصحیحات التأخير الأيونوسفيري
27	رسالة خدمة SBAS
28	مصفوفة التغيرات المشترك للميقاتية-التقويم الفلكي
29 إلى 61	محفوظ لرسائل المستقبل
62	رسالة اختبار داخلي
63	رسالة معلومات ناقصة



## الفصل 4

### وقت النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS)

الصفحة

50	..... مقدمة	1.4
50	..... تتبع قياسات الميقاتية وتحديد التقويم الفلكي	2.4
51	..... وقت نظام GPS	3.4
52	..... تنفيذ الميقاتية المركبة	1.3.4
52	..... تقليص التغيرات المشتركة	2.3.4
53	..... التوفيق بين التقسيمات	3.3.4
53	..... التوقيت العالمي المنسق في مرصد USNO (UTC (USNO)) من نظام GPS	4.4
53	..... المراجع	

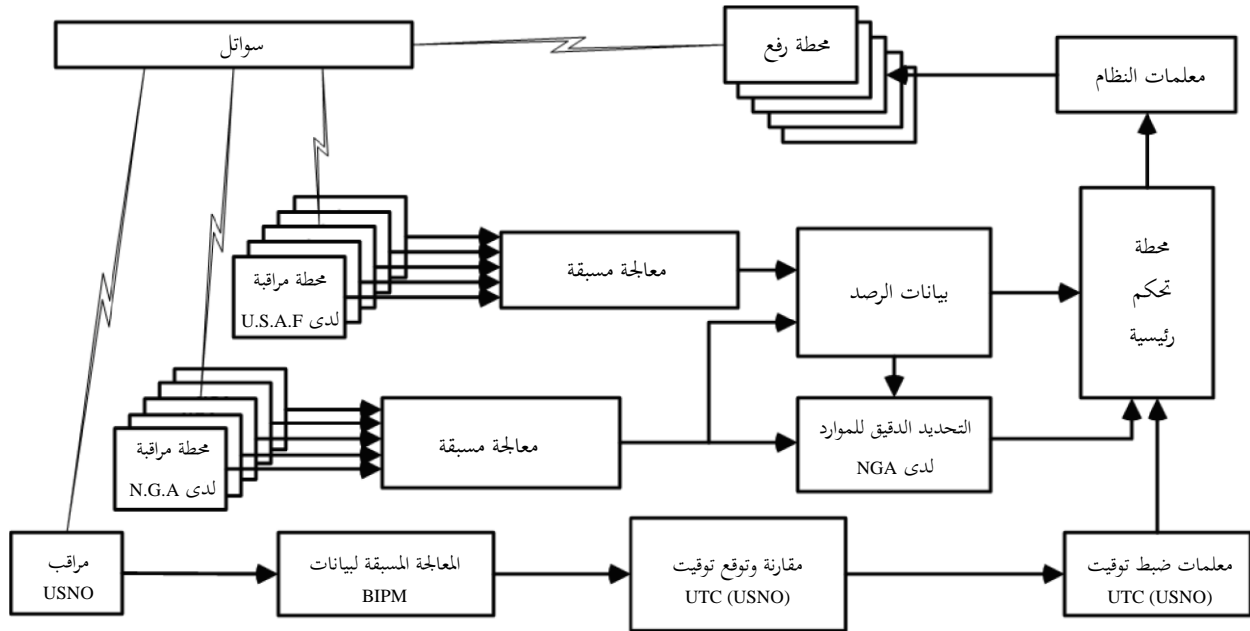
## 1.4 مقدمة

إن النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS) هو تشغيل لمعلومات يُتنبأ بها في الوقت الفعلي. وتحتفظ خمس محطات مراقبة تابعة لسلاح الجو الأميركي بوصلات مستمرة في الوقت الفعلي المستمر مع محطة التحكم الرئيسية (MCS) بحيث يمكن الجمع بين المعلومات الراهنة عن التتبع والحالة وبين تلك الواردة من محطات مراقبة إضافية أنشأتها وكالة الاستخبارات الوطنية والجيوفيزيائية (NGA) لتوفير تغطية إضافية لكوكبة سواتل نظام GPS. ثم تقدم بيانات الرصد المعززة تنبؤاً بمتغيرات النظام الجديدة. وبعدئذ تُرفع التنبؤات بشأن أداء النظام إلى الذاكرات على متن الساتل لإرسالها طي رسائل الملاحة الساتلية. وإذ تزال الأخطاء المنهجية (التحيزات) السائدة، تعتبر الأخطاء المتبقية في هذه العملية عشوائية.

ويبين في الشكل 1-4 تدفق البيانات من جزء التحكم لنظام GPS. ويحمل كل ساتل عامل في الكتلة II/IIA بنظام GPS ميقاتي سيزيوم (Cs) وذريتين وميقاتي روبيديوم (Rb) ذريتين. ويحمل كل ساتل في الكتلة IIR ثلاث ميقاتيات روبيديوم. والتردد الأساسي للميقاتية هو 10,23 MHz. وتساهم ميقاتيات الساتل وميقاتيات محطة المراقبة في التشكيل الإحصائي لوقت النظام المستمر المعروف باسم وقت GPS الموصّف ليكون في حدود 1  $\mu$ s من توقيت UTC، عدا الثواني الكبيسة غير المدرجة. وبعد احتساب التصحيحات المختلفة لتأخر الانتشار الأيونوسفيري والتروبوسفيري والنسبية ومؤثرات العتاد، يمكن لنظام GPS أن يوفر مرجعاً زمنياً بدقة  $\geq 25$  ns. ولكن في الممارسة العملية يمكن أن تكون الدقة 10 ns أو أفضل.

الشكل 1-4

### تدفق بيانات جزء التحكم



Sat\_time\_freq-04-01

## 2.4 تتبع قياسات الميقاتية وتحديد التقويم الفلكي

تتألف القياسات الأساسية في نظام تحديد المواقع (GPS)، في الوقت الحاضر (2009)، من أشباه المديات وطور شبه الموجة الحاملة بين ميقاتي الساتل ومحطة المراقبة. وهناك خمس محطات مراقبة في جزء التحكم التشغيلي (OCS)، بما في ذلك محطة التحكم الرئيسية في كولورادو سبرينغز، بولاية كولورادو التي يشغلها سلاح الجو الأمريكي. وقد عُزز جزء التحكم التشغيلي من خلال إنشاء وصلات جديدة مباشرة مع ثماني محطات مراقبة تشغيلها وكالة الاستخبارات الوطنية والجيوفيزيائية (NGA). وتعالج أشباه المديات

التي تقيسها محطات المراقبة من جميع السواتل كل 15 دقيقة في مرشاح كالمان (Kalman) يحتوي على الثوابت والنماذج ذات الصلة لمراقبة إحداثيات المحطة وتحديد المدار وخصائص الميقاتية. ويتوقع مرشاح كالمان بوقت نظام المجموعة (وقت GPS) وبالعناصر المدارية لكل سائل فيما يتعلق بإطار الإحداثيات الجيوديسي WGS84.

وتوزع أخطاء القياس بين حالات كالمان. وتقدر ميقاتيات الساتل ومحطة المراقبة وفقاً لنموذج الميقاتية، ويعبر عن الأخطاء بدلالة مصفوفة التغير المشترك للنموذج.

وتتطلب عملية تحديد المدار لنظام GPS معرفة الفرق بين توقيت UT1 و UTC من أجل تحديد اتجاه المدار الأولي بالنسبة إلى الإطار المرجعي العطالي المتمركز حول الأرض (ECI). وتُدمج معادلات الحركة في هذا الإطار المرجعي. وتحوّل هذه الإحداثيات إلى إطار مرجعي ثابت متمركز حول الأرض (ECEF) عبر أربع مصفوفات دوران تمثل حركة الأرض القطبية، ودورانها المتغير، وميدها، وتغير توجه محور دورانها. وتوسم البيانات الواردة من محطات التتبع بوسم زمني في وقت GPS. ويستخدم مرشاح كالمان في محطة التحكم الرئيسية (MCS) بيانات محطة المراقبة (MS) لتوليد التقديرات الراهنة لموضع الساتل وبيانات الميقاتية، ويتوقع هذه القيم لمدة 14 يوماً مقبلة. وترتب هذه البيانات في نسق نظامي وترفع إلى السواتل لثُرسل إلى المستخدمين كرسالة ملاحية (NAV-MSG) إلى جانب إشارات قياس المدى. وتجري عمليات رفع البيانات إلى السواتل عادة كل 24 ساعة، ولكن يمكن القيام بها بتواتر أعلى وفق ما تمليه ديناميات النظام والبيانات. وتحتوي رسالة NAV-MSG على التقويم الفلكي الساتلي وبيانات الميقاتية وحالة النظام وغيرها من البيانات التي يحتاجها المستخدم [IS-GPS-2002 rev D, 2006]. والوظيفة المرحجة التي يقدمها جزء التحكم تتمثل في التنبؤ بمواضع الساتل الدقيقة وانحراف ميقاتية فرادى السواتل عن قاعدة الوقت المشتركة، وهي التي تمكن مفهوم نظام GPS من الأداء الذي يؤديه.

### 3.4 وقت نظام GPS

إن لحظة البدء المرجعية لوقت نظام GPS هي منتصف ليلة 5-6 يناير، 1980. لذلك، يتأخر وقت GPS عن التوقيت الذري الدولي (TAI) بمقدار 19 ثانية وفي يونيو 2009، كان توقيت النظام GPS يسبق التوقيت العالمي المنسق بمقدار 15 ثانية. ويتغير فرق وقت GPS عن التوقيت العالمي المنسق (UTC) في كل مرة تُدرج ثانية كبيسة.

وكان المفهوم الأصلي لتزامن مكونات النظام أثناء تطوير نظام GPS مبنياً على نَحج الميقاتية الرئيسية التي يشيع استخدامها في أنظمة الاتصالات. وكان يُفترض أن تتخذ جميع الميقاتيات في النظام ميقاتية واحدة في إحدى محطات المراقبة (MS) مرجعاً لها. فالمتطلب الأساسي لنظام الملاحة الساتلي هو نظام وقت منتظم خال من القفزات أو الانقطاعات بحيث يتسق تزامن عناصر النظام. وحينها تقدم خدمة الملاحة الناتجة تحديداً دقيقاً للمواقع ولا تنقطع. وفي نَحج الميقاتية الرئيسية الأولى الذي استخدمه نظام GPS، اتخذت جميع الميقاتيات في النظام مرجعاً لها ميقاتية واحدة في محطة التحكم الرئيسية (MCS) في كولورادو سبرينغز. ولضمان وجود ميقاتية رئيسية في حال تعطل الميقاتية يمكن لبرمجيات النظام أن تسمي أي ميقاتية في محطات المراقبة لتكون الميقاتية الرئيسية المرجعية في أي وقت. وأدت ممارسة هذه القدرة إلى تغييرات كبيرة في مجمل أداء الملاحة عند وقوع مثل هذا التبديل. وأدت الاختلافات في الميقاتيات التي افترضت مثالية كمرجع رئيس إلى تغيير مجمل النظام وتعطيل أداء الملاحة. وطُور لاحقاً نَحج الميقاتية المركبة ودمج في نظام مرشاح كالمان.

ويتشابه نَحج الميقاتية المركبة هذا مع المفهوم التقليدي لإنشاء مجموعة ميقاتيات الذي ينتج "ميقاتية نظرية" لا تعتمد على أي جهاز معين [Stein و Filler، 1988]. وإنشاء مجموعة ميقاتيات هو تقنية معروفة تستخدم لضبط الوقت على المدى الطويل، ولكن في حالة الميقاتية المركبة تُستخدم تقنية مقدّر كالمان لتحديد وقت مرجعي مشترك له صفة تمثيلية للقيمة المتوسطة لاختلافات الميقاتية ضمن نظام ينتج وقت النظام المتزامن على المدى القصير (أقل من 10<sup>5</sup> ثانية). والتزامن المتسق في المدى القصير هو تماماً ما تحتاجه خدمة الملاحة. وتُعرف القاعدة الزمنية الداخلية المشتركة بوقت GPS، وهي تمثل الأساس لمزامنة جميع الميقاتيات في أجزاء نظام GPS وخاصة في معدات المستخدم.

وصُمم مقدّر مرشاح كالمان لحساب معلمات نظام GPS أصلاً كمرشاح مقسّم. وكان مرد هذا التصميم أساساً إلى متطلبات حسابية ولكن أيضاً إلى موثوقية التقديرات. فقدّر كل شطر من المرشاح مجموعة فرعية من الميقاتيات الساتلية وميقاتيات محطة المراقبة. وعندما نُفذت الميقاتية المركبة في المرشاح، أضيفت حالة إضافية بحيث يمكن التفريق بين فرادى الميقاتيات بمتوسط القياسات الضمني. والمتبقي الذي يخلفه هذا المتوسط هو صفر بطبيعة الحال. وكانت حصيلة التقديرات من حالات الميقاتية الفعلية المنتجة

مستقرة ومتوقعة، ولكن التغيرات المشتركة للحل تنامي خطياً بلا حدود جراء عدم إمكانية رصد النظام. وكذلك، ظلت النتائج نفسها عند الإخلال في حالات الميقاتية. وبالتالي، أضيف شبه قياس من شأنه أن يحد من تنامي التغيرات المشتركة دون التأثير على التقديرات المحسوبة. ولكن أقسام المرشاح المختلفة لم تتوصل كلها إلى نفس الوقت المشترك المقدر. لذلك كان لا بد من التوفيق بين التقديرات الواردة من الأقسام لضمان اتساق وقت GPS عبر كوكبة السواتل.

#### 1.3.4 تنفيذ الميقاتية المركبة

وعند إضافة حالات أخرى إلى مرشاح كالمان في مكان ميقاتية محطة المراقبة يصبح النظام العالمي لتحديد الموقع غير قابلاً للرصد. وذلك لأن انزياح الاختلال الثابت في جميع حالات الميقاتية لن يؤثر في شبه المدى، ومن ثم سيتعذر رصده بالنسبة إلى المرشاح. ويسبب وجود مكون الحالة غير القابلة للرصد هذا أن ينمو التغيرات المشتركة لطور الميقاتية خطياً مع الوقت على الرغم من أن النظام مستقر تماماً بمكاسب مرشاح محدودة جيداً. انظر المرجع براون [Brown, 1991] للاطلاع على بحث أوفى لهذه الخصائص. وبما أن تزايد مصفوفة التغيرات المشتركة ستؤدي في نهاية المطاف إلى مشاكل عديدة، استُحدث أسلوب لتقليص مصفوفة التغيرات المشتركة دون أن يتردى أداء المرشاح. ووقع الاختيار على التقليص بتحديث شبه القياس [Satin و Leondes, 1990].

#### 2.3.4 تقليص التغيرات المشتركة

يتخذ تحديث شبه القياس شكل كالمان المعياري:

$$(4-1) \quad P' = P - [PH^T (HPH^T + R)^{-1}]HP$$

حيث:

$P'$ : مصفوفة التغيرات المشتركة الناتج من التحديث (أي تقلص مصفوفة التغيرات المشتركة)

$R$ : تغير ضوضاء شبه القياس

$H$ : مصفوفة القياس التي تتعلق بقياس معلمة الحالة.

المصفوفة في هذه المعادلة هي مصفوفة تغير مشترك  $n \times n$  كاملة بعدد  $n$  من حالات التقويم الفلكي والميقاتية للسواتل ومحطات المراقبة في تقسيم معين. وتخضع كل تقسيمات المرشاح لتقليصات مستقلة للتغيرات المشتركة في كل دورة تحديث للمرشاح. ويُنشأ المتجه  $H^T$  للعمود  $n \times 1$  بإدراج كل عنصر من عناصر المتجه  $\hat{H}^T$  للعمود  $m \times 1$  في الموضع المناسب في متجه أصفار  $n \times 1$ . ويعطى  $\hat{H}^T$  بما يلي:

$$(4-2) \quad \hat{H}^T = \frac{B^{-1}u}{u^{-1}Bu}$$

حيث:

$B$ : المصفوفة الفرعية  $m \times m$  من المصفوفة  $P$  تقابل المتجه الوحيد الصفري كلياً للعمود  $m \times 1$  من حالات طور الميقاتية

$u$ : المتجه الواحد كلياً للعمود  $m \times 1$ .

ويكون لكل ميقاتية في تقسيم عندئذ ترجيح المجمعات في متجه العمود  $H$  (بالترتيب المماثل لترتيب المصفوفة  $P$ ) حيث لكل حالة من التقويم الفلكي ترجيح صفري. ويُقيس مجموع عناصر العمود  $H$  كواحد. ثم تسند صيغة المتجه  $\hat{H}^T$  إلى كل ميقاتية مجموعة مقيسة من ترجيحات الطور والتردد متناسبة عكساً مع اتساع تغير خطأ التقدير، أي أقطار المصفوفة  $B$ . ولكن نظراً لخصوصية الشكل في متجه  $\hat{H}^T$ ، سننتج صيغة تصحيح التحديث بعض حالات التقويم الفلكي غير الصفري. إذن، فإن تقنية التصحيح هذه ليست شفافة تماماً إزاء تقديرات التقويم الفلكي. ولكن في الممارسة العملية، بدا الفرق في الحدود الدنيا.

### 3.3.4 التوفيق بين التقسيمات

كان التوفيق بين التقسيمات مطلوباً لضمان اتساق وقت الميقاتية المركبة في كل من تقسيمات المرشاح. فمن شأن انحراف وقت الحل في التقسيمات أن يُحدث خطأ مباشراً في شبه المدى. ويختلف حد الاختلال للوقت المرجعي في كل شطر، ويمكن تقدير ذلك الاختلاف من قيم ميقاتية محطة المراقبة في كل شطر. وكان الحل الأفضل للمشكلة العددية التي تسببها التقسيمات، هو استخدام مرشاح واحد للتقسيمات بحيث تعالج التقديرات بالطريقة نفسها. وقد أدخل نظام GPS مرشاح واحد للتقسيمات. وتظل تُستخدم تقنية الميقاتية المركبة لتحديد وقت GPS.

### 4.4 التوقيت العالمي المنسق في مرصد USNO (UTC (USNO)) من نظام GPS

تعمل الميقاتيات الذرية الساتلية لنظام GPS بحرية دون تزامن، فيما يقدّم التزامن إلى وقت GPS بتصحيح البيانات. ولا يتحقق وقت GPS ضمن النظام نظراً لغياب ميقاتية مادية تضبط وقت GPS كمرجع. ويتحقق وقت GPS في خرج مستقبلات GPS، وعلى هذا النحو فهو مراقب في مرصد USNO. وهناك تقارن هذه البيانات مع التوقيت العالمي المنسق في مرصد USNO، ومن هذه البيانات تُتوقع المعلومات التي تعاد إلى محطة التحكم الرئيسة لنظام GPS كي ترسل طي رسالة NAV-MSG من الساتل [ماكنزي (McKenzie) وآخرون، 1989]. والتخالف المتوقع في الوقت الفعلي للتوقيت العالمي المنسق المحسوب في مرصد USNO بالنسبة إلى وقت GPS يتوفر من الإطار الفرعي 4 في الصفحة 18 من رسالة NAV-MSG المذاعة.

## المراجع

- BROWN, K. [September 1991] The theory of the GPS composite clock. *Proc. Of ION GPS-91*, p. 223–241.
- McKENZIE, C.H., *et al.* [28-30 November 1989] GPS-UTC Time Synchronization. *Proc. of the 21<sup>st</sup> Annual PTTI Applications and Planning Meeting*.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- SATIN, A.L. and LEONDES, C.T. [January 1990] Ensembling Clocks of the Global Positioning System (GPS). *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, 1.
- STEIN, S. and FILLER, R. [June 1988] Kalman filter analysis for real time applications of clocks and oscillators. *Proc. of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control*, p. 447-452.



## الفصل 5

### نظام الملاحة الساتلية في النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS)

الصفحة

56	..... مقدمة	1.5
56	..... الوصف العام ومبادئ التشغيل	2.5
56	..... معمارية نظام GLONASS وتطوره	3.5
57	..... الجزء الفضائي	1.3.5
61	..... الجزء الخاص بالتحكم	2.3.5
62	..... الجزء الخاص بالمستخدم	3.3
62	..... وقت نظام GLONASS	4.5
64	..... تحديد مدار ومزامنة وقت (OD & TS) نظام GLONASS	5.5
65	..... الإشارات وطيف الترددات الراديوية في نظام GLONASS	6.5
65	..... متطلبات التردد	1.6.5
67	..... قدرة الإشارة وأطيافها	2.6.5
68	..... مميزات الاستخدام الجامع بين نظامي GLONASS و GPS	7.5
69	..... الخلاصة	8.5
70	..... المراجع	

## 1.5 مقدمة

إن النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS) هو نظام حكومي (GNSS) مصمم لتوفير الدعم المستمر في جميع الأحوال الجوية لعدد غير محدود من مستخدمي الطيران والخدمات البحرية والأرضية، والمستخدمين المحمولين جواً، بدرجة عالية من الدقة في تحديد المواقع ومعلومات التوقيت في أي نقطة على سطح الأرض وفي الفضاء الخارجي القريب من الأرض.

ونظام GLONASS هو مرفق فضائي ثنائي المقاصد يطبق لحل المشاكل العلمية والصناعية والاقتصادية والاجتماعية والدفاعية والأمنية وغيرها من المشاكل ذات الصلة. ووكالة الفضاء الاتحادية الروسية (Roscosmos) وزارة الدفاع الروسية هما عميلان مشتركان لنظام GLONASS على قدم المساواة [Glotov وآخرون، 2006].

**الملاحظة 1** - يفيد الاختصار الروسي لعبارة GLONASS معنى *Global' naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*، أو النظام العالمي للملاحة الساتلية.

## 2.5 الوصف العام ومبادئ التشغيل

يتكون نظام GLONASS عند اكتمال نشره من 24 ساتلاً تدور في 3 مستويات مدارية. وتتباعد المستويات المدارية فيما بينها بمقدار  $120^\circ$  (على خطوط الطول). وفي كل مستوى مداري، تتباعد 8 سواتل بالتساوي فيما بينها بمقدار  $45^\circ$  (ترتيب أطوار). وعلاوة على ذلك، تنزاح أطوار المستويات نفسها فيما بينها بمقدار  $15^\circ$ .

ويبلغ الدور الاسمي لمدار الساتل 11 ساعة و 15 دقيقة و 44 ثانية، بما يقابل ارتفاع مدار دائري يبلغ 19,100 km. ويضمن هذا الدور تكرار مسير الساتل على سطح الأرض كل 17 مداراً. وقد اختير هذا الدور بحيث يحد من مؤثرات ظنين مجال الجاذبية على حركة الساتل، وبالتالي يستبعد مناورات التحكم في مدار الساتل على مدى عمره كله. ويبلغ ميل المدار الاسمي  $64,8^\circ$ . ويسمح تباعد السواتل بتوفير تغطية مستمرة وشاملة لسطح الأرض والفضاء القريب من الأرض، [GLONASS، 2008] و(التوصية ITU-R M.1787).

ويعمل هذا النظام على أساس مبدأ التثليث المنفعل. وتقوم تجهيزات المستعمل للنظام بقياس أشباه المديات وأشباه السرعات الموجهة القطرية من كل السواتل المرئية ويستقبل المعلومات بشأن المعلومات التقويمية الفلكية ومعلومات الميقاتية للسواتل. وعلى أساس من هذه البيانات، تُحسب الإحداثيات الثلاث لموقع المستعمل والمكونات الثلاث لمتجهات السرعة ثم يجري تصحيح ميقاتية المستعمل وتردده (التوصية ITU-R M.1787).

ويرسل كل ساتل إشارات الملاحة في واحد (GLONASS) أو اثنين (GLONASS-M) أو ثلاثة (GLONASS-K) من النطاقات الترددية: L1 (1,6 GHz) و L2 (1,2 GHz) و L3 (1,1 GHz) [Dvorking وآخرون، 2009] و(التوصية ITU-R M.1787).

ومن المزايا الفريدة للساتل من نمط GLONASS، توفر نظام العاكس البصري الرجعي على متن الساتل مما يمكن من قياس المدى بالليزر الساتلي. وهي تُستخدم لتحديد المدار بدقة وفي البحوث الجيوديسية [Dvorking وآخرون، 2009].

## 3.5 معمارية نظام GLONASS وتطوره

لتوفير الوظائف المطلوبة، أُدرجت الأنظمة الفرعية/العناصر المبنية في الشكل 1-5 ضمن نظام GLONASS [Polischuk وآخرون، 2002].



## الشكل 1-5

## معمارية GLONASS



Sat\_time\_freq-05-01

ويتكون نظام GLONASS من الأجزاء التالية:

- كوكبة مدارية من سواتل GLONASS (الجزء الفضائي).
- نظام التحكم الأرضي.
- معدات المستخدم (جزء المستخدم).

ويقوم اثنان من أنظمة الصواريخ الفضائية بنشر وصيانة الكوكبة المدارية: أحدهما قائم على القاذفة "بروتون" (Proton) والآخر على القاذفة "سويوز" (Soyuz) إما من موقع الإطلاق بايكونور (BAYKONOUR) أو من موقع الإطلاق بليسييتسك (PLESETSK).

### 1.3.5 الجزء الفضائي

في الشكل العادي، تتضمن كوكبة GLONASS المدارية (الجزء الفضائي) 24 جهازاً فضائياً عاملاً في مدارات km 19 100 دائرية عملياً في زاوية ميل قدرها 64,8° عن خط الاستواء وبدور مداري يناهز 11 ساعة و15 دقيقة. وتتنوع هذه الأجهزة وهي موزعة بالتساوي في 3 مستويات مدارية (متباعدة على امتداد خط طول العقدة الصاعدة بزاوية 120°)، ويحتوي كل مستوى على 8 سواتل (بتباعدات متساوية فيما بينها على خط العرض بمقدار 45°). وتمتلك سواتل الملاحية في مستويات المدار المجاورة تباعداً على خط العرض بمقدار 15°. ويضمن هذا الهيكل الهندسي لكوكبة المدار تغطية عالمية ومستمرة لسطح الأرض بمجال الملاحية، بحيث لا يقل ما يمكن أن يراه المستهلك عن 4 سواتل في أي لحظة وفي أي نقطة على الأرض (التشكيلة المثلى عندما يكون أحد السواتل في السمات والسواتل الثلاثة الأخرى بالقرب من الأفق) [Dvorking وآخرون، 2009].

وقد وُضع الساتل GLONASS في المدار الأول في عام 1982. وفي عام 1993، كان النظام يتألف من 12 ساتلاً وأُعلنت قدرته التشغيلية.

ونُفذ نظام GLONASS على 3 مراحل [Polischuk وآخرون، 2002]:

- المرحلة 1 (1983 – 1985): الاختبارات التجريبية. تحسين مفهوم النظام. كوكبة مدارية من 4-6 سواتل.
- المرحلة 2 (1986 – 1993): كوكبة مدارية من 12 ساتلاً. الانتهاء من اختبار الطيران. التشغيل الأولي للنظام.

- المرحلة 3 (1993 – 1995): نشر كوكبة مدارية اسمية من 24 ساتلاً. تشغيل النظام.
- وفي مارس 1995، عرض قرار من حكومة الاتحاد الروسي نظام الملاحة الساتلية GLONASS للاستخدام المدني من خلال المنظمين الدوليين، منظمة الطيران المدني الدولي والمنظمة البحرية الدولية.
- وفي عام 1995، تم الانتهاء من نشر النظام بالكامل. ولكن نظراً لعدم كفاية التمويل، لم يتغذ تجديد نظام GLONASS خلال الفترة من 1995 إلى 1998. ومنذ عام 1998، اقتصر تجديد النظام على إطلاق أحد السواتل الثلاثة سنوياً.
- وبتاريخ 4 أغسطس 2010، تمثلت حالة الكوكبة المدارية في 21 ساتلاً عاملاً (ويمكن الاطلاع على الحالة الراهنة عبر الرابط الإلكتروني لمركز المعلومات التحليلية عن نظام GLONASS لدى وكالة الفضاء الروسية، <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/html/db/f?p=202:1:9296521002007641687>).
- ومنذ أواخر السبعينات، قامت شركة Reshetnev المساهمة "لأنظمة سواتل المعلومات"، التي طورت سواتل نظام GLONASS، بتصميم 3 أجيال من سواتل نظام GLONASS: GLONASS، GLONASS-M و GLONASS-K. وتظهر في الشكل 2-5 مشاهد إجمالية لهذه السواتل.

الشكل 2-5

## أجيال الساتل GLONASS الثلاثة:

أ ( GLONASS، ب ( GLONASS-M، ج ( GLONASS-K



a)



b)



c)

و تُعرض الخصائص التقنية لسواتل GLONASS في الجدول 1-5.

الجدول 1-5

### الأداء المقارن لسواتل نظام GLONASS

GLONASS-K	GLONASS-M	GLONASS	
تقرر في عام 2010	2003	1982	أول إطلاق
12-10	7	3	العمر (بالسنوات)
750	1 415	1 415	الكتلة (kg)
260	250	180	كتلة حمولة الملاحة (kg)
			عدد السواتل في كل إطلاق
6	3	3	PROTON -
2	1	-	SOYUZ -
1 270	1 450	1 000	إمدادات القدرة (W)
750	580	600	استهلاك حمولة الملاحة للقدرة (W)
8-5 (40 - 60 cm باستخدام نظام تفاضلي عالمي)	30	60	دقة الملاحة العمودية في الوقت الفعلي (95%) (m)
3	3	1	عدد الإشارات المدنية
3	2	2	عدد الإشارات الخاصة
$10 \times 1 - 13$	$10 \times 1 - 13$	$10 \times 5 - 13$	استقرار الميقاتيات على متن الساتل
4-3	8	15	جذر متوسط تربيع خطأ التزامن المتبادل لإشارات الملاحة (ns)
إشارة السلامة. تصحيحات مختلفة البحث والإنقاذ			وظائف تكميلية

ويستند تصميم الساتل GLONASS-K إلى صندوق معدات غير مغلق ومقسم مادياً إلى وحدة منصة ووحدة حمولة.

وتحمل السواتل من نمط GLONASS-M محل سواتل GLONASS. وقد حسن هذا الساتل الأداء و القدرة.

وفيما يلي الأهداف الرئيسية على مستوى الأداء للساتل من النمط M:

- استعمال نطاق ترددي جديد بفضل إشارة الملاحة العصرية:

- يُرَاح النطاق الترددي إلى اليسار (فُتستخدم بدلاً من أحرف التردد  $0 = K - 12$  أحرف تردد أخرى  $K = 7 \dots 6$ ).

- وتُستخدم البايئات المحفوظة سابقاً للحصول على معلومات إضافية، بما في ذلك السّلمان الزمنيان لنظامي GPS و GLONASS، وعَلَم صحة (صلاحية) إطار الملاحة، وعمر بيانات الملاحة.

- تركيب المراشيع التي تقلل من البث خارج النطاق.

- وترسَل على كلا الترددين L1 و L2 إشارات مزدوجة تحتوي على البيانات الرقمية وشفرات قياس المدى من أجل قياسات شبه المدى.

- إدخال وصلة راديوية بين السواتل لقياسات المسافة وتبادل البيانات بين السواتل التي تدور في نفس المستوي المداري وفي مستويات مدارية مختلفة على السواء.

- تحسين استقرار إشارة الملاحة بما يصل إلى  $10 - 13$ ، بفضل الاستقرار الحراري الدقيق لميقاتيات السيزيوم.

- الحد من عدم اليقين بشأن الضغط الشمسي، بفضل تحسين دقة تصويب الصفييف الشمسي.

- زيادة عمر الساتل بما يصل إلى 7 سنوات.

ويمكن إطلاق الساتل GLONASS-M إطلاقاً مشتركاً (3 سواتل في وقت واحد من موقع الإطلاق BAYKONOUR بقاذفة Proton-M مع الداعم Breeze-M) وكذلك إطلاقاً منفرداً (من موقع الإطلاق PLESETSK بقاذفة Soyuz-2 مع الداعم Fregat).

والجزء الرئيسي من هيكل الساتل GLONASS-M هو حاوية مغلقة يُحافظ داخلها على درجة حرارة مريحة تتراوح بين 0 و 40 درجة مئوية. وفي الناحية التي توجد فيها معايير التردد، يبلغ استقرار الحرارة  $\pm 1$  درجة مئوية.

وبالوضعية الاسمية، يكون المحور الطولي للساتل مصوباً باستمرار نحو الأرض بدقة 0,5°، ويتطابق المحور الأفقي للساتل مع مستوى الشمس-الساتل-الأرض بدقة 0,5°، وتصوّب الصفائف الشمسية نحو الشمس بدقة  $\pm 2^\circ$ . ويجري تصويب الساتل من خلال عجلات عزم يُزال إشباعها دورياً بوحدات كهربائية مغنطيسية.

ويتضمن نظام الدفع الفرعي دافعات الهيدرازين (أميدول) التي تولد عزم دوران التحكم ضمن الوضعيات الأولية للساتل والتحكم في المدار.

ومن المهم جداً عدم القيام بمناورة التحكم في المدار إلا خلال تموضع الساتل في حيزه المداري المعين. ويمكن الاستغناء عن مناورات التحكم في المدار طيلة عمر مهمة الساتل بالدقة العالية للتحكم في معلمة المدار خلال مرحلة المدار المبكرة وباستخدام مدارات غير طنانة للكوكبة المدارية.

ويستند النظام الفرعي للقدرة الكهربائية إلى بطاريات Ni-H و صفائف شمسية سيليكونية. وكان أول إطلاق للساتل GLONASS-M في ديسمبر 2003. وقد صنّعت شركة NPO PM هذا الساتل.

وقرر برنامج GLONASS الاتحادي المخصص (المعني بالرحلات الفضائية) مواصلة تطوير نظام GLONASS، ووافقت حكومة الاتحاد الروسي على ذلك في 20 أغسطس 2001. وفيما يلي حوافز برنامج التحديث:

- (للمستخدمين المدنيين) ضرورة تحسين دقة النظام وتيسره وأداءه من حيث السلامة لزيادة قدرة النظام التنافسية في السوق العالمية لخدمات الملاحة؛
  - (للعلماء) تخفيض نفقات صيانة كوكبة المدار بفضل زيادة عمر الساتل وعدد السواتل في كل إطلاق، فضلاً عن تخفيض نفقات جزء التحكم الأرضي بفضل تنفيذ الأتمتة؛
  - (للتعاون الدولي) التوافق بين نظامي GLONASS و GPS وقابلية تشغيلهما بينياً.
- ويغطي برنامج الفترة 2002-2011. وفيما يلي مهام البرنامج الرئيسية:
- إنشاء وتطوير الجزء الفضائي والبنية التحتية الأرضية لنظام الملاحة الساتلي.
  - تحديد وصيانة الكوكبة على مستوى توفير حلول الملاحة التي تخدم مصالح مختلف المستخدمين.
  - تنمية التعاون الدولي في الملاحة الساتلية (SATNAV).
  - تطوير وتصنيع معدات المستخدم الروسية.

ويُنوخذ تطوير جيل جديد من السواتل من نمط GLONASS-K وفق البرنامج الاتحادي المخصص (المعني بالرحلات الفضائية) إلى جانب صيانة النظام باستخدام سواتل GLONASS-M.

بالمقارنة مع سواتل GLONASS-M، يتميز ساتل GLONASS-K بالسمات المميزة التالية:

- أ) تردد ثالث أُدخل في النطاق L لتحسين موثوقية ودقة حلول ملاحة المستخدم؛
- ب) زيادة عمر الساتل بما يصل إلى 10 سنوات؛
- ج) خفض كتلة الساتل إلى النصف؛
- د) استيعاب حمولة البحث والإنقاذ على متن الساتل.

وحتى عام 2010 أكملت شركة NPO PM المرحلة B وشرعت بالمرحلة C. ويمكن إطلاق الساتل A GLONASS-K وفقاً لإحدى خطط الإطلاق المشترك التالية:

- 6 سواتل في وقت واحد من موقع الإطلاق بايكونور (BAYKONOUR) بقاذفة Proton-M مع الداعم Breeze-M.
  - ساتلان في وقت واحد من موقع الإطلاق بليسيتسك (PLESETSK) بقاذفة Soyuz-2 مع الداعم Fregat.
- ويستند تصميم الساتل GLONASS-K إلى صندوق معدات غير مغلق ومقسم مادياً إلى وحدة منصة ووحدة حمولة. وبالوضع الاسمية، يكون المحور الطولي للساتل مصوباً نحو الأرض بدقة  $\pm 5^\circ$  وتصوب الصفائف الشمسية نحو الشمس بدقة  $1^\circ$ . ويثبت استقرار معايير التردد محلياً وحرارياً ضمن مدى  $\pm 0,5$  درجة مئوية. وبالنسبة لبقية المعدات تُحفظ الحرارة ضمن مدى يتراوح بين  $-10$  و  $+50$  درجة مئوية.

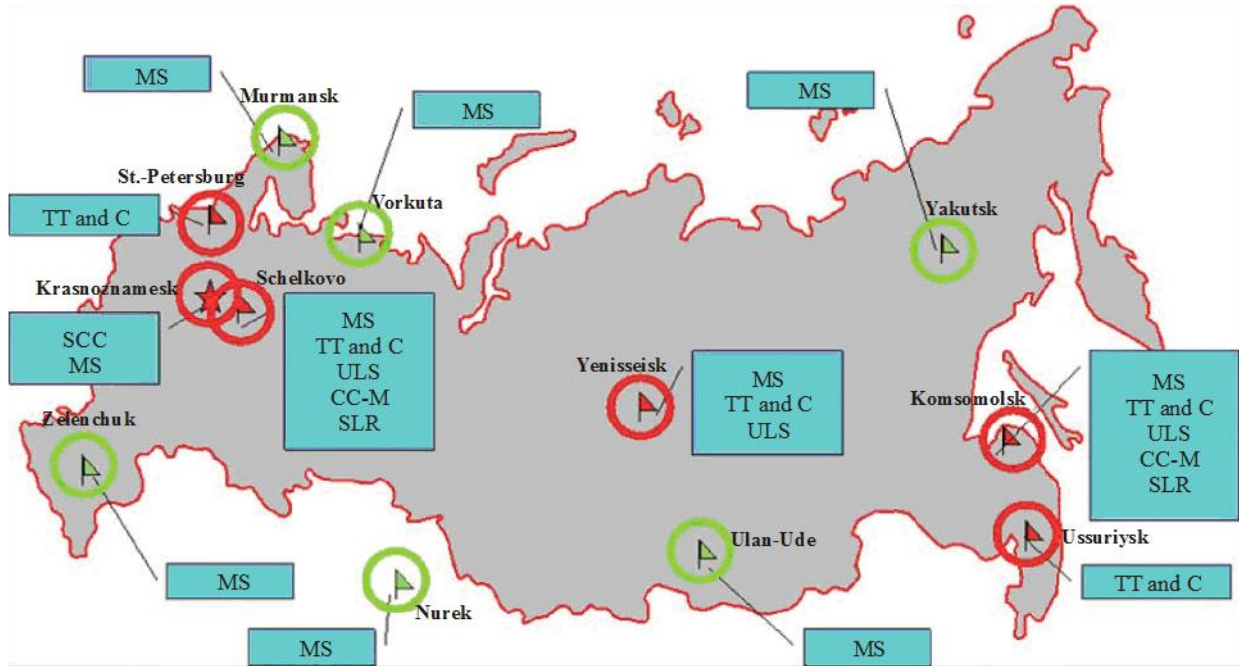
### 2.3.5 الجزء الخاص بالتحكم

يتكون الجزء الخاص بالتحكم مما يلي:

- مركز التحكم في النظام (SCC)؛
  - محطات القياس عن بُعد والتتبع والتحكم (UT & C)؛
  - محطات المراقبة في اتجاه واحد؛
  - محطات ساتلية لقياس المدى بالليزر.
- وتظهر في الشكل 3-5 مرافق التحكم الأرضية لساتل GLONASS [Kosenko, 2009].

الشكل 3-5

### جزء التحكم لساتل GLONASS



Sat\_time\_freq-05-03

- محطة مراقبة وقياس MS
- ميقاتية مركزية CC
- محطة تتبع بالليزر SLR
- محطة عاملة ○

- مركز التحكم في النظام SSC
- القياس عن بُعد والتتبع والتحكم TT and C
- محطة رفع ULS
- محطة جديدة (بعد 2010) ○

وتقيس محطات المراقبة المعلومات المدارية وزحزحة الميقاتية نسبةً إلى الميقاتية الرئيسية للنظام. ويتم إرسال هذه المعطيات إلى مركز تحكم النظام. وبحسب هذا المركز المعطيات التقويمية الفلكية ومعلومات تصحيح الميقاتية ثم يقوم بتحميل الرسائل إلى السواتل عن طريق محطات المراقبة على أساس يومي.

### 3.3.5 الجزء الخاص بالمستخدم

يتألف الجزء الخاص بالمستخدم من عدد كبير من مطاريف المستخدم متعددة الأنواع. ويتكون مطارف المستخدم من هوائي، ومستقبل، ومعالج، وجهاز دخل/خرج. ويمكن الجمع بين هذه التجهيزات وأجهزة ملاحة أخرى من أجل زيادة الدقة والاعتمادية للملاحيين. ويمكن أن يكون هذا الجمع مجدياً على وجه خاص بالنسبة للمنصات عالية الدينامية.

وتؤدي معدات المستخدم قياسات منفصلة لأشباه المديات ومعدل شبه المدى في 4 (3) سواتل GLONASS، وتستقبل كذلك وتعالج رسائل الملاحة الواردة في إشارات الملاحة من السواتل. وتصف رسالة الملاحة مواقع السواتل في المكان والزمان معاً. والجمع بين معالجة القياسات ورسائل الملاحة من 4 (3) سواتل GLONASS، يتيح للمستخدم تحديد إحداثيات 3 (2) مواقع و 3 (2) من مكونات متجه السرعة، ويحيل السلم الزمني للمستخدم إلى المرجع الوطني للتوقيت العالمي المنسق (UTC). وترسل كجزء من رسالة الملاحة، البيانات الضامنة للجدولة الزمنية للدورات من أجل التحديدات الملاحة، و"كوكبة" مختارة من مركبات GPS الساتلية (SV) العاملة وكشف الإشارات الراديوية التي ترسلها.

وتدمج هذه الأجهزة وظيفياً في ساتل GLONASS، تماماً مثلما تدمج الهواتف المتنقلة ومطاريف المستخدم في أنظمة الاتصالات. وبدأ إنتاج أجهزة الملاحة الاستهلاكية (CND) لنظام GPS على نطاق واسع في أواخر الثمانينات. وفي الوقت الحاضر، يجري الإنتاج المتسلسل لهذه الأجهزة، التي تشمل مستقبلات GPS/GLONASS في أكثر من 100 شركة تنتج 500 نمط معياري من أجهزة الاستقبال؛ علماً بأن تطوير وإنتاج أجهزة الملاحة الاستهلاكية للمستخدمين غير الحكوميين هو ما تسعى إليه مصالح الأعمال الخاصة، وخاصة لأن رقم المبيعات السنوية العالمية من المنتجات والخدمات في هذه الصناعة يتجاوز في الوقت الحاضر 10 مليارات دولار أمريكي. ومع ذلك، تدعم الحكومة تطوير قاعدة العناصر اللازمة لإنشاء نماذج تنافسية من أجهزة الملاحة الاستهلاكية [GLONASS، 2008].

### 4.5 وقت نظام GLONASS

توجد على متن كل ساتل معايير السيزيوم للوقت والتردد مدمجة في نظام جهاز المزامنة على متن الساتل. ويستخدم هذا الجهاز لتشكيل وتخزين وإنتاج السلم الزمني وإشارات ملاحة عالية الاستقرار على متن الساتل في النطاقات الترددية 1 600 MHz و 1 250 MHz. ومن المخطط في عام 2010 أن يبدأ إطلاق الجيل الجديد من سواتل GLONASS-K (الشكل 5-1 ج)) مع تحسين الخصائص. وسيلعب عمرها المكفول 10 سنوات. وستتضمن أيضاً إشارة مدنية ثالثة في النطاق الترددي L3 (1 198-1 212 MHz). ومعايير الوقت والتردد هي أجهزة المزامنة على متن الساتل التي تحدد إلى حد كبير العمر المكفول لسواتل الملاحة [GLONASS، 2008؛ Dvorking وآخرون، 2009].

وعلى غرار نظام GPS، يعتمد وقت GLONASS على سلم زمني ذري. وهذا السلم الزمني هو التوقيت العالمي المنسق كما تحفظه روسيا ((SU) UTC). وعلى عكس النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS)، فإن السلم الزمني لنظام GLONASS ليس مستمراً، ويجب أن يُضبط لاحتساب الثواني الكبيسة الدورية. وتطبق الثواني الكبيسة على جميع المراجع الزمنية للتوقيت العالمي المنسق على النحو الموصّف لدى الهيئة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية (IERS). وتستخدم الثواني الكبيسة لإبقاء التوقيت العالمي المنسق قريباً من متوسط الوقت الشمسي الذي يستند إلى دوران الأرض حول محورها، وهو ليس منتظماً ومعدله يتغير تدريجياً بسبب احتكاك المد وغير ذلك من العوامل، مثل تحركات اللب السائل لكوكب الأرض.

يحافظ الجزء الخاص بالتحكم على وقت نظام GLONASS في حدود 1 ms، وعادةً أفضل من 1 µs، من التوقيت العالمي المنسق كما تحفظه روسيا ((SU) UTC) ويذاع الجزء المتبقي من التخالف في رسالة الملاحة. وكذلك، تقيم موسكو تخالفاً لوقت نظام GLONASS بمقدار زائد ثلاث ساعات عن التوقيت العالمي المنسق المحفوظ لدى روسيا. ويحوي سجل GLOClock، راجع الدليل المرجعي للبرمجيات الثابتة من عائلة OEMV، على معلومات التخالف بين وقتي GPS و GLONASS.



وتجهز سواتل GLONASS بميقاتيات (معايير وقت/تردد) لا يتزعزع استقرارها اليومي بمقدار أسوأ من  $10 \times 10^{-13}$  و  $10 \times 5 \times 10^{-13}$  لسواتل GLONASS-M. أما دقة التزامن المتبادل لسلاسل الساتل الزمنية فهي ليست أسوأ من 20 ns ( $\sigma 1$ ) لسواتل GLONASS ومن 8 ns ( $\sigma 1$ ) لسواتل GLONASS-M.

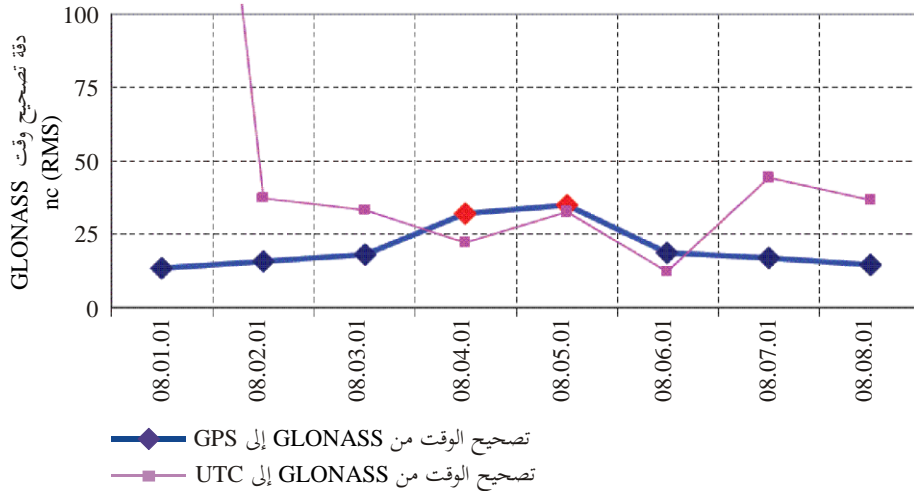
ويتولد وقت GLONASS على أساس وقت المزامن المركزي (CS) لنظام GLONASS. ولا يتزعزع الاستقرار اليومي لميقاتيات المزامن المركزي الهيدروجينية بمقدار أسوأ من  $10 \times 2 \times 10^{-15}$ .

وتقارن السلاسل الزمنية لسواتل GLONASS دورياً مع السلم الزمني للمزامن المركزي. وتُحسب التصحيحات لكل سلم زمني على متن الساتل بالنسبة إلى وقت GLONASS وتوقيت (SU) UTC، ويرفع الجزء الخاص بالتحكم هذه التصحيحات إلى الساتل مرتين في اليوم. وينبغي ألا يتجاوز خطأ نظام يستخدم السلم الزمني لتوقيت (SU) GLONASS UTC 1  $\mu$ s.

ويصحح السلم الزمني لنظام GLONASS بشكل دوري إلى عدد صحيح من الثواني في وقت واحد مع تصحيحات توقيت UTC التي تنفذ وفقاً للبلاغ الوارد من المكتب الدولي للأوزان والقياسات (BIPM) (تصحيح الثانية الكبيسة) - انظر الشكل 5-3. والمعتاد هو أن تنفذ هذه التصحيحات (1 ثانية) مرة واحدة كل سنة (أو سنة ونصف سنة) في منتصف الليل عند الساعة 00 والدقيقة 00 والثانية 00 بالتوقيت العالمي المنسق من 31 ديسمبر إلى أول يناير (أو من 31 مارس إلى أول أبريل، أو من 30 يونيو إلى أول يوليو، أو من 30 سبتمبر إلى أول أكتوبر) من جانب جميع مستعملي التوقيت العالمي المنسق.

الشكل 4-5

#### مقارنة دقة تصحيح وقت نظام GLONASS مع توقيت UTC ووقت GPS [2009، Kosenko]



Sat\_time\_freq-05-04

ومستعملو النظام العالمي للملاحة الساتلية المطبق في الاتحاد الروسي يتم إبلاغهم مقدماً (قبل ثلاثة أشهر على الأقل) بهذه التصحيحات المزمع إدخالها من خلال إصدار النشرات والبلاغات ذات الصلة، وغيرها من المواد. ولا تضمن سواتل النظام العالمي للملاحة الساتلية المطبق في الاتحاد الروسي ذاتها أي بيانات تتعلق بتصحيح الثواني الكبيسة في التوقيت العالمي المنسق في رسائل الملاحة التي تصدرها. غير أن رسالة الملاحة من الساتل GLONASS-M تقدم إشعاراً مسبقاً للمستخدمين بشأن التصحيح المقبل للثانية الكبيسة في التوقيت العالمي المنسق وقيمة هذا التصحيح وعلامته الجبرية (انظر الفقرة 5.4 من المرجع [GLONASS، 2008]).

ونتيجة للتصحيحات الدورية للثواني الكبيسة، لا يوجد فرق بعدد صحيح من الثواني بين توقيت النظام العالمي للملاحة الساتلية المطبق في الاتحاد الروسي والتوقيت العالمي المنسق التي يحتفظ به الاتحاد الروسي. ومع ذلك، يوجد فرق ثابت مدته ثلاث ساعات بين هذين السلمين الزمنيين بفعل ميزات خاصة في الجزء الخاص بالتحكم من نظام GLONASS.

(1-5)

$$t_{\text{GLONASS}} = t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min}$$

حيث:

$t_{GLONASS}$ : وقت GLONASS؛

$t_{UTC (SU)}$ : السلم الوطني للتوقيت العالمي المنسق (UTC (SU)).

ولإعادة حساب التقويم الفلكي الساتلي، في لحظة القياسات بتوقيت (UTC (SU)، يجب أن تُستخدم المعادلة التالية:

$$t_{UTC (SU)} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b) (t - t_b) \quad (2-5)$$

حيث:

$t$ : وقت إرسال إشارة الملاحه في السلم الزمني على متن الساتل

$\tau_c, \tau_n, \gamma_n, t_b$ : التقويم الفلكي وتقويم المعلمات (الواردان في الفقرتين 4.4 و 5.4).

وترسل سواتل GLONASS-M أيضاً المعاملين الخاصين B1 و B2 لتحديد الفرق بين التوقيت العالمي UT1 والتوقيت العالمي المنسق (UTC) وكذلك تصحيح نظام GPS لوقت GPS بالنسبة إلى وقت GLONASS والذي يجب ألا يكون أكثر من 30 ns (σ) [2008، GLONASS].

## 5.5 تحديد مدار ومزامنة وقت (OD & TS) نظام GLONASS

بالوضعية الاسمية، يؤدي تحديد تصحيحات الوقت ومعلومات المدار بشكل منفصل. وتحدد تصحيحات الوقت مرتين في اليوم لكل ساتل باستخدام قياسات في اتجاه واحد وفي اتجاهين. وتسهّل مقارنة المديات المحسوبة باستخدام قياسات في اتجاه واحد وفي اتجاهين تحديد تصحيحات الوقت للميقاتيات على متن الساتل. ولا تُستخدم إلا القياسات في اتجاهين لتحديد التقويم الفلكي.

ويتضمن نظام دعم التردد-الوقت محطات قياس بدون استعمال وباستعلام (NMS و QMS) راديوية والمزامن المركزي للنظام (Shchelkovo في إقليم موسكو). وتنتج قياسات شبه المدى إلى ساتل الملاحه بدون استعمال وقياسات المسافة باستعلام قيم انزياحات السلم الزمني على متن الساتل بالنسبة إلى السلم الزمني للنظام. أما المزامن المركزي، الذي يتكون من عدة معايير تردد هيدروجينية مستقرة للغاية بعدم استقرار يومي لا يزيد على  $5 \times 10^{-14}$ ، فهو يقوم في الواقع بمقام ميقاتية النظام، وتزامن ميقاتيات الساتل كلها بالنسبة لها ويقارن المستهلك ميقاتيته بها.

وبدوره، يزامن السلم الزمني لنظام GLONASS مع السلم الوطني لمعيار الوقت والتردد (منديليفو، إقليم موسكو)، (UTC (SU)، وهو أحد حالات تنفيذ التوقيت العالمي المنسق (UTC). ويحدد تصحيح السلم الزمني لنظام GLONASS بالنسبة إلى التوقيت العالمي (UT1) وفقاً لبيانات قياس التداخل الراديوي ذات الأساس المرجعي الطويل جداً، ويُرسَل التصحيح إلى المستهلك في رسالة الملاحه [Dvorking وآخرون، 2009].

وفي الوقت الحاضر (2010) وبفضل إنشاء مرافق للقياس في اتجاه واحد و الانتهاء من أنشطة مجال جاذبية الأرض، بدأ التحقق من صحة تكنولوجيا من تصحيحات الوقت المتزامنة وتحديد التقويم الفلكي على أساس قياسات في اتجاه واحد حصراً.

ويصف التقويم الفلكي الذي ترسله سواتل نظام GLONASS موقع الساتل في الإطار المرجعي المتمركز حول الأرض PZ-90. وللاستخدام المشترك لنظامي GLONASS و GPS، يمكن تحويل الإحداثيات الساتلية إلى نظام WGS-84 وتوجد مصفوفة مقابلة لهذا الغرض. ويقل خطأ تحويل الإحداثيات عن 1.5 m (1 σ) على امتداد كل محور.

وتُحل بعض مهام تحديد مدار ومزامنة وقت سواتل GLONASS-K الآن ببرمجيات على متن الساتل تحسن كثيراً من استقلالية الساتل. وفيما يلي المهام الرئيسية لتحديد المدار ومزامنة الوقت على متن الساتل:

- توليد وإيصال الأطر الكبرى للملاحه إلى مراسلات الملاحه؛
- المعالجة الأولية لقياسات المدى بين السواتل؛
- تحسين التقويم الفلكي المرجعي للساتل باستخدام قياسات المدى بين السواتل؛



- حساب تصحيحات الوقت بالنسبة إلى السَّلم الزمني لمجموعة؛
  - نشر بيانات التقويم الفلكي والوقت.
- وفيما يتعلق بتحسين التقويم الفلكي المرجعي للساتل باستخدام قياسات المدى بين السواتل، دُرست ثلاثة أساليب:
- أسلوب المشاهدة المتعامدة عند الاكتفاء بتحسين المكونات على طول المسار باستخدام قياسات متبادلة لدى تعامد خط البصر مع حركة الساتل.
  - أسلوب يعتمد على "المستخدم" الرئيسي عند تحسين كل تقويم فلكي مرجعي للساتل على افتراض أن التقويمات الفلكية المرجعية للساتل الأخرى معروفة بالضبط.
  - أسلوب تحسين معلمات مستوي المدار التي تتكون من التحسين على طول المسار والمكونات الشعاعية. ويحسن التقويم الفلكي لكل ساتل وجميع السواتل الأخرى في مرمى النظر على متن الساتل.
- ويبدو أن الأسلوب الثالث هو الأمثل. إذ يجري تحسين التقويم الفلكي المرجعي على متن الساتل وتحسين تصحيحات الوقت على متن الساتل باستخدام القياسات بين السواتل بشكل منفصل. وفيما يلي أخطاء (RMS) التقويم الفلكي المرسل في إطار الملاحظة:
- في سواتل GLONASS: على طول المسار -20 m، على طول الناظم المزدوج -10 m، على طول نصف القطر -5 m؛
  - في سواتل GLONASS-M: على طول المسار -7 m، على طول الناظم المزدوج -7 m، على طول نصف القطر -1,5 m.
- ومنذ عام 1999، ووفقاً لمرسوم صادر عن الحكومة الروسية، أصبح نظام GLONASS نظاماً ثنائياً المقاصد، أي يُتوقع استخدامه من جانب المستخدمين العسكريين والمدنيين على السواء. وعلاوة على ذلك، فُتحت أبواب نظام GLONASS للتعاون الدولي لإنشاء نظام ملاحية دولي يتوخى استخدامه لدى منظمة الطيران المدني الدولي والمنظمة البحرية الدولية. وسيزود الاستخدام المشترك لنظامي GLONASS و GPS المستخدمين بنظام ملاحية موثوق يتميز بدرجة عالية من الدقة والتيسر ويسهل كذلك تنمية السوق العالمية لخدمات الملاحية.

## 6.5 الإشارات وطيف الترددات الراديوية في نظام GLONASS

على النقيض من نظام GPS الذي يطبق إشارات بتقسيم مشفر للقناة وحيث تَبَث كل سواتل الملاحية إشارات على تردد واحد متماثل للموجة الحاملة، يطبق نظام GLONASS تقسيم التردد بحيث يَبَث كل ساتل إشارة الملاحية على تردده الخاص للموجة الحاملة. ولكلا الأسلوبين مزاياهما وعيوبهما. وعلى وجه الخصوص، ييسر استخدام التقسيم المشفر للقناة إلى حد كبير من إنتاج الأجهزة الاستهلاكية على نطاق واسع ويمكّن زيادة غير محدودة في عدد السواتل. ولذلك، وتوخياً لتطوير متوازن لنظام GLONASS وللتوسع في كمية ونوعية خدمات الملاحية، من المقرر إدخال إشارات ملاحية جديدة على سواتل GLONASS-K بتقسيم للتردد والطور معاً.

### 1.6.5 متطلبات التردد

تم تحديد متطلبات التردد للنظام العالمي للملاحية الساتلية على أساس شفافية غلاف التأين (أو الأيونوسفير)، وميزانية الوصلة الراديوية، وبساطة هوائيات المستخدم، وكبت تعدد المسيرات، وتكلفة التجهيزات، وأحكام لوائح الراديو. وتباين الترددات الحاملة طبقاً لعدد صحيح مضاعفٍ للقيمة 0,5625 MHz في النطاق الترددي L1، ولعدد صحيح مضاعفٍ للقيمة 0,4375 MHz في النطاق الترددي L2، ولعدد صحيح مضاعفٍ للقيمة 0,423 MHz في النطاق الترددي L3.

وتستعمل السواتل الجديدة في النظام العالمي للملاحية الساتلية، منذ عام 2006، من 14 إلى 20 تردداً من الترددات الحاملة في النطاقات المختلفة. وتُستعمل الترددات من 1 598,0625 MHz (أدنى تردد) إلى 1 605,3750 MHz (أعلى تردد) في النطاق الترددي L1، وتُستعمل الترددات من 1 242,9375 MHz (أدنى تردد) إلى 1 248,6250 MHz (أعلى تردد) في النطاق الترددي L2، وتُستعمل الترددات من 1 201,7430 MHz (أدنى تردد) إلى 1 209,7800 MHz (أعلى تردد) في النطاق الترددي L3. ويُقدّم الجدول 1-5 القيم الاسمية للترددات الحاملة لإشارات الملاحية الراديوية المستعملة في النظام العالمي للملاحية الساتلية (التوصية ITU-R M.1787).

## الجدول 1-5

القيم الاسمية للترددات الحاملة لإشارات الملاحة الراديوية المستعملة  
في النظام العالمي للملاحة الساتلية

$F_K^{L3}$ (MHz)	$F_K^{L2}$ (MHz)	$F_K^{L1}$ (MHz)	K (رقم التردد الحامل)
1 209,7800	—	—	12
1 209,3570	—	—	11
1 208,9340	—	—	10
1 208,5110	—	—	09
1 208,0880	—	—	08
1 207,6650	—	—	07
1 207,2420	1 248,6250	1 605,3750	06
1 206,8190	1 248,1875	1 604,8125	05
1 206,3960	1 247,7500	1 604,2500	04
1 205,9730	1 247,3125	1 603,6875	03
1 205,5500	1 246,8750	1 603,1250	02
1 205,1270	1 246,4375	1 602,5625	01
1 204,7040	1 246,0000	1 602,0000	00
1 204,2810	1 245,5625	1 601,4375	01—
1 203,8580	1 245,1250	1 600,8750	02—
1 203,4350	1 244,6875	1 600,3125	03—
1 203,0120	1 244,2500	1 599,7500	04—
1 202,5890	1 243,8125	1 599,1875	05—
1 202,1660	1 243,3750	1 598,6250	06—
1 201,7430	1 242,9375	1 598,0625	07—

ويتم إرسال إشارات الملاحة المشكّلة بواسطة الإبراق بزحزحة طورين (بزواية الطور 180°) والمزحزحة الطور بزواية 90° (في التشكيل التربيعي) عند كل تردد حامل. وهي إشارات من نوعين، إشارة معيارية الدقة (SA) وأخرى عالية الدقة (HA).

ويرسل كل ساتل (GLONASS و GLONASS-M) في النطاقين التردديين L1 (1,6 GHz) و L2 (1,2 GHz) ويستخدمان موجات حاملة مختلفة. وهي الموجات الحاملة نفسها التي تستخدمها السواتل التقابلية في نفس المستوي. وتعرّف الموجات الحاملة الاسمية في النطاقين التردديين L1 و L2 بالصيغتين التاليتين:

$$(3-5) \quad f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1$$

$$(4-5) \quad f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2$$

حيث:

K: رقم الموجة الحاملة

$$f_{01} = 1602 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_1 = 562,5 \text{ kHz}$$

$$f_{02} = 1246 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_2 = 437,5 \text{ kHz}$$

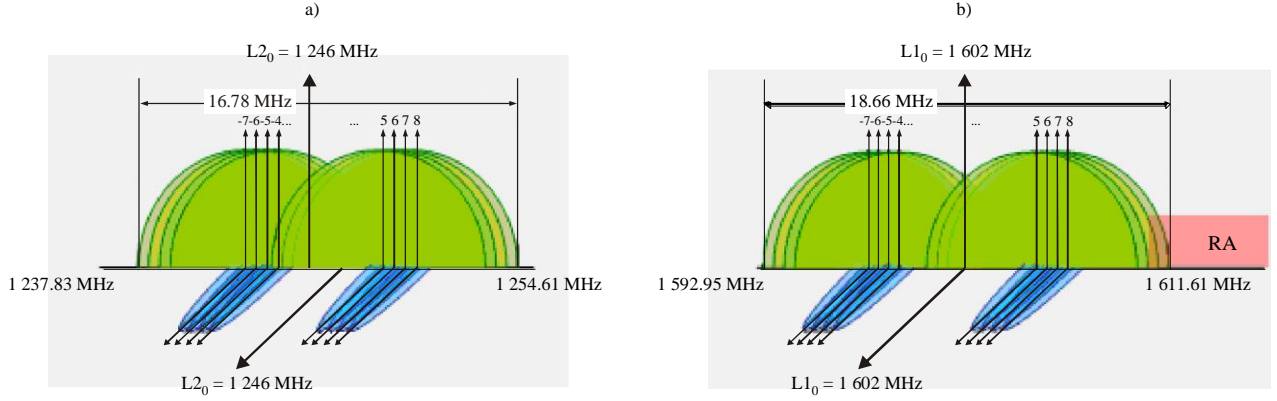
وقبل عام 2005، كانت القيم التي يتخذها K أعداداً صحيحة تتراوح بين 0 و 13، بعد عام 2005 صارت تتراوح بين -7 و +6. وقد أُدخل التردد الثالث L3 على سواتل GLONASS-K.

### 2.6.5 قدرة الإشارة وأطيافها

يظهر في الشكل 4-5 طيف إشارات GLONASS في النطاقين L1 و L2، فيما يظهر في الشكل 5-5 طيف إشارة الساتل GLONASS-K في النطاق L3 [2005، Revnivkykh].

الشكل 5-5

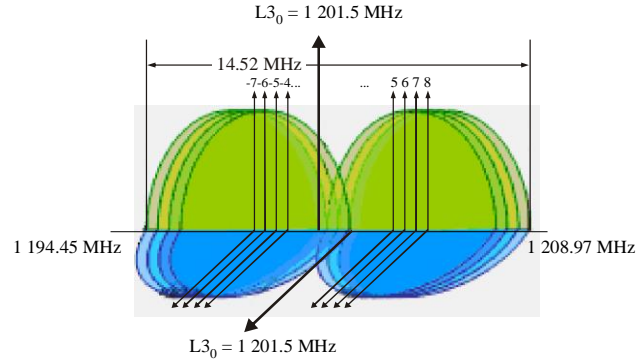
#### طيف إشارات GLONASS: (ب) النطاق L1، أ) النطاق L2



Sat\_time\_freq-05-05

الشكل 6-5

#### طيف إشارات GLONASS: إشارة النطاق L3 (GLONASS-K)



Sat\_time\_freq-05-06

تكون الإشارات المرسلّة مستقطبة إهليلجياً مُيَّامنة مع عامل إهليلجي لا يكون أسوأ من 0,7 بالنسبة للنطاقات L1 و L2 و L3. وتُحدد أدنى قدرة مضمونة للإشارة عند دخل مستقبلٍ ما (مع افتراض كسب للهوائي بقيمة 0 dBi) بالقدر -161 dBW (-131 dBm) بالنسبة للإشارتين معيارية الدقة وعالية الدقة في النطاقات L1 و L2 و L3 (التوصية ITU-R M.1787). وتُستعمل ثلاثة أصناف من البث في النظام العالمي للملاحة الساتلية وهي: 10M2G7X و 1M02G7X و 8M19G7X. ويُقدّم الجدول 2-5 خصائص هذه الإشارات.

## الجدول 2-5

## خصائص إشارات النظام العالمي للملاحة الساتلية

مدى التردد	صنف البث <sup>(1)</sup>	عرض نطاق البث Tx (MHz)	أقصى قدرة ذروة للبث (dBW)	أقصى كثافة طيفية للقدرة (dB(W/Hz))	كسب الهوائي (dB)
النطاق الترددي L1	10M2G7X 1M02G7X	10,2 1,02	15 15	52- 42-	11
النطاق الترددي L2	10M2G7X 1M02G7X	10,2 1,02	14 14	53- 43-	10
النطاق الترددي L3 <sup>(2)</sup>	8M19G7X 8M19G7X	8,2 8,2	15 15	52,1- 52,1-	12

(1) لوائح الراديو، طبعة عام 2008. المجلد 2، التذييل 1.

(2) تتم زحزحة إشارتين GLONASS في النطاق L3 نسبةً إلى بعضهما البعض بزاوية 90° (في التشكيل التربيعة).

وتُتيح الدالة الجيبية:  $(\sin x/x)^2$  وصف غلاف التوزيع لطيف قدرة الإشارة الملاحية، حيث:

$$x = \pi(f - f_c) / f_t \quad (5-5)$$

حيث:

$f$ : التردد قيد النظر

$f_c$ : التردد الحامل للإشارة

$f_t$ : معدل شرائح طور الإشارة.

ويُشكّل الفص الرئيسي للطيف التشغيلي للإشارة. ويَشغَل عرض نطاق مساوٍ للدالة  $2f_t$ . وللفضوص عرض نطاق مساوٍ للدالة  $f_t$ .

## 7.5 مميزات الاستخدام الجامع بين نظامي GPS و GLONASS

من الواضح أن الجمع بين نظامي GPS و GLONASS سينتج في المحصلة النهائية نظاماً يضم 48 ساتلاً. وفي مثل هذا النظام، تتراجع حجب الساتل كعامل مقيد، مما يتيح زيادة ترادف القياس.

وتتمكّن الطرائق الحديثة لمعالجة الإشارات الرقمية من معالجة إشارات النظامين GPS و GLONASS باستخدام المستقبلات بنفس المعمارية، على الرغم من الفروق بين النظامين. ومديا الترددات في النظامين GPS و GLONASS قريبان من بعضهما، وهذا يساعد على استعمال هوائي مدمج، ومضخم مسبق مشترك للدخل في تجهيزات المستعمل. ومن شأن التصميم الأمثل للمستقبل مع تنفيذ برمجية مناسبة لمعالجة الإشارة أن يتيح صنع مستقبل مدمج لا يزيد ثمنه إلا قليلاً عن ثمن المستقبل في النظام GPS أو GLONASS. والفروقات الموجودة بين معلومات الجداول الفلكية والتمثيل التقويمي في النظامين GPS و GLONASS لا تشكل عقبة لتشغيل تجهيزات المستعمل. وتقدّم برمجية معالج بيانات الملاحة التصحيحات اللازمة، وتتيح معالجة تدفقي البيانات كليهما.

أما تجهيزات المستعمل، وهي الجزء الأكثر مرونة في النظام كله، فهي في تحسّن مستمر. وأغلب المستقبلات الموجودة حالياً متعددة القنوات قادرة على تحليل المسافات الكاذبة والسرعات الكاذبة في نفس الوقت لعدد من السواتل المرئية. وهكذا فإن هذه المستقبلات تضمن أكثر ما يمكن من الدقة والاكتمال لرصدات الملاحة. وبفضل التقدم التقني الحاصل في مجال معالجة الإشارات الرقمية يمكن تحقيق درجة عالية جداً من الاكتمال تؤمن بالفعل تحويلاً منفصلاً ومعالجة رقمية لإشارات الساتل في مرحلة قريبة جداً من الدخل الأمامي.

والاستخدام المشترك للنظامين GPS و GLONASS يؤمن مزايا مهمة مقابل الاستعمال الفردي لأي واحد من النظامين: تعزيز التيسر: في العمليات التي تجري في بيئة مملوءة بالعوائق، مثل الأرض الجبلية أو "الأخاديد" الحضرية، تأتي مضاعفة عدد السواتل غالباً بحلّ مقبول، بينما لا يعطي استعمال مستقبل واحد في النظام GPS أو النظام GLONASS أي حلّ. تحسين الدقة: زيادة عدد السواتل تؤدي عادة إلى تحسين التشكيلة الهندسية من المستعمل إلى الساتل (PDOP). تسريع الانطلاق البارد: عندما لا يحصل المستقبل على أي معلومات عن الموقع أو الزمن، فإن احتمال حيازة المعلومات من الساتل تزداد بازدياد عدد السواتل المرئية، وبذلك ينخفض الزمن اللازم للحيازة. سلامة النظام ومتانته: تزداد كثيراً مقدرة الكشف عن ساتل أصابه عطب وعزله بازدياد عدد السواتل المرئية. وكذلك توفر الاعتمادية على نظامين مستقلين سوية إضافية من السلامة يؤمن حماية من عطب عام يصيب مجمل النظام. تتوفر في السوق أجهزة مصممة للعمل مع إشارات سواتل الملاحة GLONASS و GPS في إرسالات متآونة، في مسح طوبولوجي وجيوديسي على أرض اليابسة وفي البحر وفي الجو. وعندما تعمل هذه الأجهزة بالأسلوب التفاضلي فإنها تضمن دقة في التحديد الجيوديسي لمواقع المحطات الأرضية بتقريب  $1-3 \text{ cm} + 10^{-6} L$  (حيث  $L = 1000 \text{ km}$ ) هي المسافة بين المحطات الجيوديسية والسيارات والطائرات والسفن [كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد، 2002]. واعتراضاً بالمزايا المذكورة أعلاه للجمع بين نظامي GLONASS و GPS، التقى وفدان من الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الروسي في واشنطن العاصمة في 9-10 ديسمبر 2004 وشكلا أفرقة عمل للتعامل مع مسائل تطوير واستخدام نظامي GLONASS و GPS. وتتمحور الجهود التعاونية المتواصلة حول الحفاظ على توافق الترددات الراديوية بين إشارات الملاحة والتوقيت الساتلية فيما بينهما. وكرر الجانبان التزامهما بمواصلة هذه المحادثات، وأكدوا مجدداً عزم الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الروسي على مواصلة تقديم إشارات GLONASS و GPS مدنية تلائم الاستخدامات التجارية والعلمية وتلك الهادفة للحفاظ على سلامة الأرواح على نحو مستمر في جميع أنحاء العالم، دون رسوم مباشرة من المستخدم. ومنذ ذلك الحين، يجتمع فريق عمل GPS-GLONASS بصورة منتظمة.

## 8.5 الخلاصة

استناداً إلى المعلومات الواردة أعلاه، تمكن الإشارة إلى ما يلي:

- نظام GLONASS هو نظام عالمي للملاحة الساتلية يوفر في الوقت الحالي (2010) تغطية عالمية تقريباً (يُرتقب أن تكتمل في غضون سنوات قليلة).
- نظام GLONASS هو نظام مزدوج الاستخدامات (مدني وعسكري).
- تتولى الوكالة المدنية، وكالة الفضاء الروسية الاتحادية (ROSCOSMOS)، تنسيق نظام GLONASS.
- الاستخدام الجامع بين نظامي GLONASS و GPS سيحسن جودة خدمات الملاحة ونشر الوقت الدقيق.
- وأبواب نظام GLONASS مفتوحة للتعاون الدولي.

## المراجع

- DVORKING, V. V., NOSENKO, YU. I., URLICHICH, YU. M., FINKEL'STEIN, A. M. [2009] The Russian Global Navigation, Satellite Program. Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk. Vol. 79, 1, (<http://www.springerlink.com/content/180m3184w46747u5/fulltext.pdf>).
- GLOTOV, V. D., REVNIVYKH, S. G., MITRIKAS, V. V. [October 2006] GLONASS status update. MCC activity in GLONASS program. 15<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia, (<http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/GLONASS%20Status%20Update%20and%20MCC%20Activity%20in%20GLONASS%20Program.pdf>).
- KOSENKO V. [3-9 May, 2009] Satellite System GLONASS Status and Plans. Proceedings of European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems (ENC-GNSS), Naples, Italy, ([http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04\\_Kosenko.pdf](http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04_Kosenko.pdf)).
- POLISCHUK G., M., KOZLOV, V. I., ILITCHOV, V. V., KOZLOV, A. G., BARTENEV V. A., KOSENKO, V. E., ANPHIMOV, N. A., REVNIVYKH, S. G., PISAREV, S. B., TYULYAKOV, A. E. [2002] Global navigation satellite system GLONASS: development and usage in the 21st century. 34<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, Virginia, USA, (<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2002/paper13.pdf>).
- REILLY, J. P. [2004] A review of the evolution of the Russian GLONASS system, ([http://www.topconpositioning.com/uploads/tx\\_topconfilearchive/POB\\_Magazine\\_takes\\_an\\_in-depth\\_look\\_at\\_GLONASS - Click here for article.pdf](http://www.topconpositioning.com/uploads/tx_topconfilearchive/POB_Magazine_takes_an_in-depth_look_at_GLONASS_-_Click_here_for_article.pdf)).
- REVNIVYKH, S. G. [14-15 March, 2005] GLONASS: Status and Perspectives. Civil GPS Service Interface Committee International Information Subcommittee, Prague, Czech Republic, (<http://radio.feld.cvut.cz/satnav/CGSIC/>).
- RISDE [2008] Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document Navigational radio signals in bands L1, L2, Ed. 5.1, Russian Institute of Space Device Engineering (RISDE), (<http://rniikp.ru/en/pages/about/publ/ikd51en.pdf>).

## نصوص قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

- كتيب قطاع الاتصالات الراديوية عن مراقبة الطيف، طبعة عام 2002، (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-23/en>).
- لوائح الراديو، طبعة عام 2008، المجلد 2، التذييل 1 - تصنيف الإرسالات وعروض النطاق اللازمة (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- التوصية ITU-R M.1787 - وصف الأنظمة والشبكات في خدمة الملاحة الراديوية الساتلية (فضاء أرض وفضاء فضاء) والخصائص التقنية لمحطات الإرسال الفضائية العاملة في النطاقات 164-1215 MHz و 1215-1300 MHz و 1559-1610 MHz، (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/en>).

## الفصل 6

## نُظُم سواتل الاتصالات

## الصفحة

72	..... المقدمة	1.6
72	..... الحمولة النافعة الخاصة بالاتصالات	2.6
72	..... المعمارية التماثلية العقفاء	1.2.6
74	..... المعمارية المعيدة للتوليد	2.2.6
74	..... الأعمال الرقمي	3.2.6
74	..... نظام التتبع والقياس عن بُعد والتحكم	4.2.6
74	..... التوقيت والمزامنة فيما يخص عمل السواتل	3.6
75	..... أثر ضوضاء الروابط والشوائب التي تعتري السواتل في الحمولات النافعة ذات المعمارية العقفاء	4.6
75	..... إسهام الضوضاء البيضاء	1.4.6
76	..... الضوضاء المتأنية عن الطور والأخطاء التي تعتري النظام برمته على متن السواتل	5.6
77	..... الخلاصة	6.6
77	..... المراجع	

## 1.6 المقدمة

تتمثل الوظيفة الرئيسية لسواتل الاتصالات في تحويل إشارات التردد الراديوي لأغراض الاتصالات. وعليه فإن تحويل التوقيت والتردد عن طريق سواتل الاتصالات يتم عادة بمثابة علاوة على وظائف الاتصالات. فبعض نظم السواتل، ولا سيما نظمها التي تستخدم منافذ متعددة بتقسيم زمني (TDMA)، تستلزم توقيتاً دقيقاً لكي تقوم بوظائفها على صعيد الاتصال [كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد، 2002؛ Ha، 1990]. وفي معظم حالات المنافذ المتعددة ذات التقسيم الزمني يقتصر الأمر على تمرير الساتل إشارات توقيت دقيقة واردة من الأرض ولا تتطلب حمولة الساتل النافعة بحد ذاتها توقيتاً دقيقاً لعملها. وتلزم القدرة على تحويل التوقيت في نظام ناقلة الساتل الخاص بالقياس عن بُعد والتتبع والتحكم، لأغراض قياس الأمداء ووضع العلامات الزمنية. بيد أن هذا الجزء من نظام السواتل لا يكون بوجه عام متوفراً لكي يُستعمل في إطار الخدمات المستأجرة. وعلى العموم تكون متطلبات دقة وثبات التردد فيما يخص السواتل التجارية مقصورة على المتطلبات التي تستلزمها استدامة تخصيصات النطاق وأداء وظائف قياس الأمداء. أما سواتل الاتصالات الحكومية فيُنزَع إلى تجهيزها بموارد للترددات المتوفرة على متنها هي أكثر دقة بكثير، لأنها تُستخدم أيضاً للملاحة وغيرها من الأغراض التي تستلزم توقيتاً دقيقاً.

ويمكن أن يُستخدم لتحويل التوقيت جزءان من سائل الاتصالات، هما حمولته النافعة المتعلقة بالاتصالات ونظام ناقلته الخاص بالتتبع والقياس عن بُعد والتحكم (TT & C). ويرد في الأقسام التالية عرض لمبادئ تشغيل كل من هذه النظم مع التركيز على المسائل المتصلة بتحويل التوقيت.

أما بنية سواتل الاتصالات وخصائصها التقنية والتشغيلية فهي معروضة في [كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد، 2002].

## 2.6 الحمولة النافعة الخاصة بالاتصالات

تُستخدم سواتل الاتصالات من أجل توفير خدمات اتصالات شتى. وتُستخدم نُطُق ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة للاتصال من خلال حمولة الساتل النافعة. وغالباً ما تخضع هذه النُطُق إلى المزيد من التقسيم إلى نُطُق فرعية، كثيراً ما تدعى بالقنوات. ويتمثل الغرض من الحمولة النافعة الخاصة بالاتصالات في تلقي الإشارات من نُطُق الوصلة الصاعدة أو القنوات، لإكساب الإشارات المتلقاة ترددات جديدة والمضي في معالجتها، والإجابة بتحويل الإشارات المعالجة إلى نُطُق الوصلة الهابطة أو قنواتها.

ويستخدم نُطُق الساتل أو قنواته مستعمل واحد بأسلوب النفاذ الوحيد (SA)، مثل التطبيقات الإذاعية، أو مستعملون متعددون بأساليب نفاذ متعددة (MA). وأساليب النفاذ المتعددة هي النفاذ المتعدد إلى المجال الفضائي (SDMA)، والنفاذ المتعدد بتقسيم الزمن (TDMA)، والنفاذ المتعدد بتقسيم الشفرة (CDMA)، والنفاذ المتعدد بتقسيم التردد (FDMA)، والنفاذ المتعدد العشوائي (RMA). وغالباً ما يُستعمل معاً أكثر من واحد من أساليب النفاذ المتعدد هذه لزيادة قدرة النطاق أو القناة.

وتتألف الحمولات النافعة الخاصة بالاتصالات من نوعين عامين من المماريات، هما الممارية العقفاء والممارية المعيدة للتوليد، ونوعين من أنواع الأعمال، هما الأعمال التماثلي والإعمال الرقمي. وتُنَاقَش في الأقسام التالية هذه المماريات وطرائق الأعمال.

### 1.2.6 الممارية التماثلية العقفاء

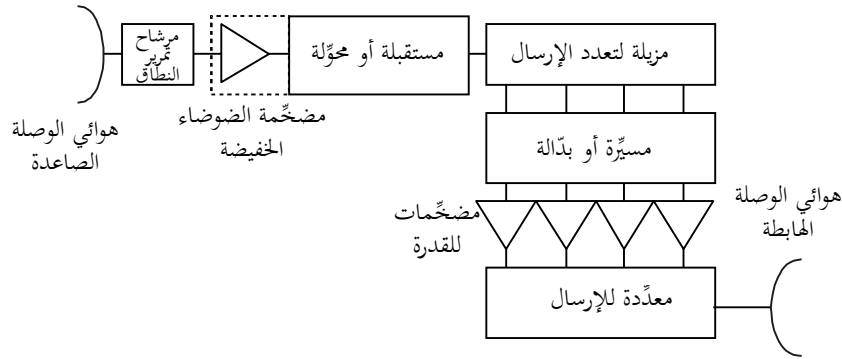
تُعتبر الممارية التماثلية العقفاء [المشكلة للأنبوب المعقوف] أشيع ما يُستعمل من مماريات الحمولات النافعة. وفي هذه الممارية إنما تقوم مرسلات مجييات عقفاء متعددة بترجمة واحدة أو أكثر من واحدة من الإشارات في نطاق ترددات الوصلة الصاعدة إلى نطاق ترددات الوصلة الهابطة وإعادة بث الإشارة المجمعة على نطاق ترددات الوصلة الهابطة. ويُعتبر هذا النوع من المماريات النوع الأكثر فائدة فيما يخص تحويل التوقيت لأن مسار الإشارة يكون مباشراً نسبياً. وتنزع السواتل التجارية التي تُستخدم فيها هذه الممارية إلى استعمال مذبذبات محلية (LO) طليقة الحركة لترجمة نُطُق التردد. أما السواتل الحكومية التي تستخدم هذه الممارية فغالباً ما تستعمل مذبذبات محلية مشتقة على نحو متماسك من مذبذبة رئيسية (MO) وحيدة على متن الساتل. وفي بعض الحالات تكون المذبذبة الرئيسية مُرتبطة بالطور بالقياس إلى نقطة إسناد أرضية في محطة التحكم بالساتل. وتمثل خصائص الأخطاء التي تعترى الطور في المذبذبات المحلية المستخدمة لإجراء ترجمة التردد حداً هاماً فيما يخص تطبيقات تحويل التوقيت.



ويبين الشكل 1-6 المخطط الأتري لمعمارية نمطية من المعماريات العقفاء [كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد، 2002؛ Ha، 1990]. ويظهر في هذا المخطط هوائي للوصلة الصاعدة يليه مرشاح لتمرير النطاق (BPF) ومضخمة الضوضاء الخفيفة (LNA) لتحديد نسبة كسب هوائي الوصلة الصاعدة إلى درجة حرارة الضوضاء (G/T) التي تُعتبر أهم رقم متعلق بالساتل فيما يخص الوصلة الصاعدة. ثم يجري تضخيم الإشارة المتلقاة وترجمتها لإرسالها إلى نطاق الوصلة الهابطة بواسطة مستقبلية أو محوِّلة (تتضمن أحياناً على مضخمة للضوضاء الخفيفة).

الشكل 1-6

### معمارية التكرار النمطية من النوع الأعقف

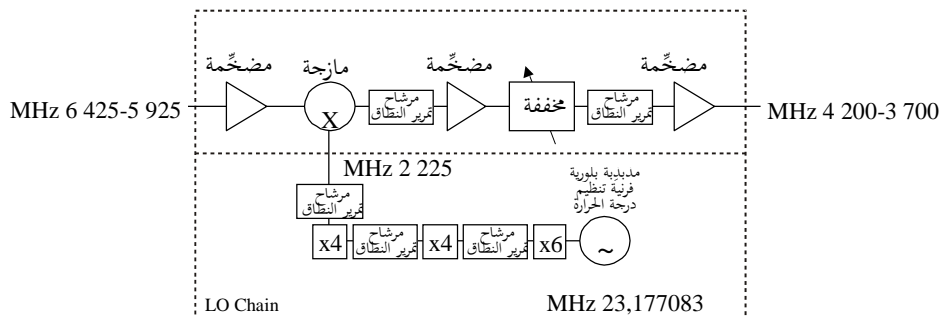


Sat\_time\_freq-06-01

وكما ذكر آنفاً، تنزع المحوِّلات أو المستقبلات التجارية إلى استخدام مذبذبات محلية بلورية منفردة طليقة الحركة خاضعة للتنظيم بغية ترجمة التردد، بينما تنزع المحوِّلات الحكومية إلى استخدام مذبذبات محلية مركّبة متماسكة الطور مع مذبذبة رئيسية وحيدة. ويبين الشكل 2-6 مستقبلية تجارية نمطية [Ha، 1990]. وتُلاحظ سلسلة المذبذبات المحلية المضاعفة المشتقة من مذبذبة بلورية فرنية تنظيم درجة الحرارة طليقة الحركة.

الشكل 2-6

### مستقبلية تجارية نمطية للنطاق C



Sat\_time\_freq-06-02

في الشكل 6-1 تأتي بعد الحوالة مزيلة لتعدد الإرسال (DEMUX)، تفصل نطاق الوصلة الصاعدة بكامله إلى نُطُق أو قنوات منفردة. وفي بعض الحمولات النافعة تتم إزالة تعدد الإرسال في الحوالات بواسطة مذبذبات محلية مركبة لإتاحة إمكانية الانتقاء من بين فرادى تحويلات ترددات القنوات. ثم تسيّر فرادى القنوات إلى مضخمات قدرة الخرج، وتُستعمل أحياناً بدالة لانتقاء المسارات. ثم تجمّع الإشارات الواردة من فرادى مضخمات القدرة في معدّدة لإرسال الخرج (MUX) لإعادة بثها بواسطة هوائي الوصلة الهابطة.

إن معظم تشكيلات الحمولات النافعة لإعادة الإرسال لا يستلزم عملها توقيتاً دقيقاً وتقتصر فيها دقة الترددات وثباتها على الحد الذي يستلزمه التقيد بتخصيصات النُطُق. ويصح ذلك أيضاً عندما يجري التبديل فيما يخص النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن عن طريق الأرض أو المحطات الأرضية [كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد، 2002]. وثمة استثناء من ذلك يتمثل في النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن الذي يُجري الساتل التبديل فيما يخصه (SS-TDMA)، حيث يُستعان بالتبديل بين مزيلة تعدد الإرسال ومعدّدة الإرسال للمساعدة على إعمال النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن. وفي هذه الحالة تبلغ درجة دقة التوقيت اللازمة جزءاً من الميكروثانية [Ha، 1990].

وتلزم درجة أعلى من دقة الترددات وثباتها في الحمولات النافعة المستخدمة من أجل قياس الأمداء من ساتل إلى ساتل وإشارات الاتصالات. وغالباً ما تُستعمل في هذه الحمولات النافعة مذبذبات محلية مركبة مقرونة بمذبذبة رئيسية قرناً مُزَجَّجاً.

## 2.2.6 المعمارية المعيدة للتوليد

تجري في معماريات الحمولات النافعة المعيدة للتوليد إزالة تشكيل إشارات الوصلة الصاعدة لإيتاء بيانات النطاق الأساسي وإعادة تشكيل هذه البيانات على حاملات الوصلة الهابطة. ولما لم يكن ثمة مسار مباشر بين الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة فإنه يجب أن يُراعى في حساب زمن التحويل خلال هذه الحمولات تباطؤ حركة البيانات عبر نظام المعالجة الرقمية على متن الساتل.

## 3.2.6 الأعمال الرقمي

تستخدم السواتل الجديدة المعالجة الرقمية حتى عندما تكون معماريتها عقفاء. وفي هذه الحالة أيضاً يجب أن يُراعى التباطؤ الرقمي في حساب زمن التحويل عبر هذه النظم. ومن الصعب التعميم فيما يتعلق بخصائص هذه الحمولات النافعة من حيث تحويل التوقيت، وغالباً ما تكون تفاصيل طبيعة هذه الحمولات النافعة مندرجة ضمن نطاق الملكية الخاصة. ويُحال القارئ في هذا الصدد إلى مصنع الحمولة النافعة المعنية.

## 4.2.6 نظام التتبع والقياس عن بُعد والتحكم

يمثّل نظام القياس عن بُعد والتتبع والتحكم (TT & C) في الساتل جزءاً من نظام تدبر شؤون ناقلته، وتندرج تفاصيل عمله ضمن نطاق الملكية الخاصة بوجه عام. ويستخدم النظام شفرات زمنية، لكن هذه القدرة تكون عادة مقصورة على درجات الدقة التي يستلزمها وضع العلامات الزمنية التشخيصية ما لم يُستخدم في الساتل النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن التبدلي أو كانت هناك متطلبات أخرى من قبيل الملاحظة. ونظام التتبع مصمّم لتحديد مكان الساتل واتجاهه. وهو يتألف من وسائل للتتبع الزاوي من أجل تحديد الاتجاه ووسائل لقياس الأمداء من أجل تحديد الموضع. ويمكن استخدام نظم قياس الأمداء لأغراض تحويل التوقيت. وتُستخدم في نظم قياس الأمداء إشارات متماسكة مشكّلة بالنغمة الجانبية أو بشفرة شبه عشوائية لقياس الوقت الذي تستغرقه الرحلة ذهاباً أو الرحلة ذهاباً وإياباً من المحطة الأرضية إلى الساتل على نحو مماثل لما يجري في النظام العالمي لتحديد المواقع (قياس المدى باتجاه واحد). وتُقرن بيانات قياس الأمداء بعلامات زمنية ذات درجة كافية من الدقة لإجراء حسابات المدارات فتكون على دقة كافية لأغراض تحويل التوقيت المطلوبة للدقة.

## 3.6 التوقيت والمزامنة فيما يخص عمل السواتل

يُعتبر التوقيت والمزامنة في سواتل الاتصالات التجارية أمراً بسيطاً عادة. والمعتاد أن توجّه المذبذبات الرئيسية بصورة يدوية لإبقائها ضمن حدود التردد المسموح بها أو إتاحة حركتها الطليقة طيلة مدة المهمة. أما المذبذبات المحلية المستقلة الخاصة بنظم الإرسال والإجابة المستخدمة في السواتل التجارية فلا يُتحكم بها من حيث التردد، لكنها مصمّمة للوفاء بدرجة من الدقة يستلزمها تخصيص النُطُق على

مدى عمر الساتل. ويجري عادة تحين نظام التوقيت بصورة يدوية بواسطة إيعاز آت من الأرض عند اللزوم. ويمكن أن تستخدم السواتل الحكومية نظم توقيت أكثر تطوراً بالنظر إلى ما تستلزمه مهمة الملاحة وغيرها من المتطلبات. أما المذبذبات الرئيسية الحكومية فتُقرن أحياناً بنقاط إسناد أرضية وتُترك أحياناً لتتحرك حركة طليقة، في حين يجري توجيهها عن طريق تحديثات للترددات.

#### 4.6 أثر ضوضاء الروابط والشوائب التي تعتري السواتل في الحمولات النافعة ذات المعمارية العقفاء

يؤثر ما يقوم في الرابط عبر الحمولة النافعة العقفاء من ضوضاء وما يعتريها من شوائب على قدرة الساتل على تحويل التوقيت. ومن العوامل التي تسهم في حصول الضوضاء ووجود الشوائب الضوضاء البيضاء، وضوضاء الطور، وتغيرات الطور التي تعتري المنظومة برمتها.

##### 1.4.6 إسهام الضوضاء البيضاء

يمكن أن يُشتق تعبير عام عن إسهام الضوضاء البيضاء في خطأ تحويل التوقيت الذي يقع في الساتل من معادلات ضوضاء روابط الساتل الأساسية ومعادلات الخطأ في التوقيت على النحو التالي. فإذا استعملنا إشارة بتردد زاوي مقداره  $\omega$  (بالراديانات/ثانية: rad/s) لتحويل التوقيت فإن خطأ التوقيت  $x$  في بيان الميقاتية لتحويل بيان الوقت (بالثواني: s) يمكن أن يُربط بالخطأ في طور الإشارة  $\phi$  (بالراديانات) بالمعادلة المعروفة:

$$(1-6) \quad x = \phi / \omega$$

ويمكن أن تكون إشارة تحويل التوقيت هذه هي إشارة الحاملة نفسها أو أن تتألف من شتى عناصر التشكيل التي تنطوي عليها الحاملة. وفيما يخص الضوضاء البيضاء يُعطى التباير القياسي للمقدار  $\phi$  (لقياس وحيد للطور) بالمعادلة:

$$(2-6) \quad \sigma_{\phi}^2 = P_{noise} / P_{signal}$$

حيث:

$P_{signal}$ : قدرة الإشارة المتلقاة

$P_{noise}$ : قدرة الضوضاء المتلقاة.

ويُستنتج من المعادلتين (1-6) و(2-6) أن التباير القياسي  $x$  (لقياس وحيد) يساوي:

$$(3-6) \quad \sigma_{x-std}^2 = P_{noise} / (P_{signal} \omega^2)$$

وبالاستعانة بالمعادلات المتعلقة بالرابط والضوضاء البيضاء التي ترد في منشورات مشهورة [كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد، 2002]، يمكننا أن نشق العبارة التالية لنسبة الإشارة المتلقاة إلى الضوضاء البيضاء (سواء للوصلة الصاعدة إلى الساتل أم للوصلة الهابطة منه) مقيسة بمعلمات الرابط الأساسية:

$$(4-6) \quad P_{noise} / P_{signal} = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T)$$

حيث:

$P_{eirp}$ : القدرة المشعة المكافئة المتناحية الفعلية المنقولة

$G/T$ : نسبة كسب التلقي إلى درجة الحرارة

$B$ : عرض النطاق الذي يمثل حداً (أدنى) للرابط

$\omega_{car}$ : تردد الحاملة الزاوي الخاص بالرابط

$k$ : ثابت بولتزمان، مع العلم بأن  $r$  هي المدى و  $c$  هي سرعة الضوء.

وعليه نجد فيما يخص كل رابط:

$$\sigma_{x-std}^2 = kB(2r_{\omega_{car}}/(c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T) \quad (5-6)$$

ولما كان إسهام الضوضاء البيضاء المتأتية عن الوصلة الصاعدة وإسهام الضوضاء البيضاء المتأتية عن الوصلة الهابطة مستقلين إحصائياً فإن مجموع التغيرين لكلتا الوصلتين يُعطى بالمعادلة:

$$(6-6) \quad \sigma_{x-std-tot}^2 = 4kB(\omega_{car}/(c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})]$$

حيث:

B: حد عرض النطاق فيما يخص الرابط بأسره.

إن المعادلة (6-6) تمثل خطأ بيان الميقاتية فيما يخص قياس طور واحد. ويمكن تقدير التردد الكسري على مدى زمن لحساب المتوسط مقداره  $\tau$  بقسمة تفاضل قياس الميقاتية على  $\tau$ . وعليه فإن التغير القياسي، أو تغاير Allan (وهو نفسه فيما يخص الضوضاء البيضاء)، لتقديرات التردد الكسرية لزمن حساب المتوسط البالغ  $\tau$  يُعطى بالمعادلة:

$$(7-6) \quad \sigma_y^2 = 8kB(\omega_{car}/(c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})]$$

أما تغاير الفرق الثاني لخطأ بيان الميقاتية على مدى الوقت البالغ  $\tau$  فهو:

$$(8-6) \quad \sigma_X^2 = \tau^2 \sigma_y^2$$

فهو بالتالي يُعطى بالمعادلة:

$$(9-6) \quad \sigma_x^2 = 8kB(\omega_{car}/(c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})]$$

وتنطبق المعادلتان (7-6) و (9-6) على تحويل التوقيت عبر الساتل ذهاباً وعلی تحويله ذهاباً وإياباً (لكل عملية تحويل) لأن نظام التحويل في الاتجاهين لا يستبعد الضوضاء البيضاء. وعليه فإن الحساب وفق المعادلات أعلاه يمثل أفضل ما يمكن أن يُفعل فيما يخص الرابط الساتلي. وينبغي التنويه أيضاً إلى أن تحويل التوقيت بواسطة الحاملة يعثره فيما يتعلق ببيان الوقت تؤثر أقل مما في حالة الاستعانة بالتشكيل لأن تردد التشكيل يكون دائماً أدنى من  $\omega_{car}$ .

## 5.6 الضوضاء المتأتية عن الطور والأخطاء التي تعثر النظام برمته على متن السواتل

تضيف المذبذبات المحلية في محوّلات التردد الضوضاء المتأتية عن الطور إلى إشارة الاتصالات. وتسهم هذه الضوضاء وانسياب التردد في المذبذبات المحلية إسهاماً مباشراً في عدم استقرار حاملة إشارة نظام الإرسال والإجابة وطور التشكيل. والضوضاء والانسياب اللذان يحصلان ضمن الطور أو قربه يكونان عادة أعلى في نظم الإرسال والإجابة التجارية التي تستعمل مذبذبات بللورية منفردة. فالتأخر العام والتأخر الذي يتعلق بالطور وتباينات التأخر في المراشيع والمكوّنات النشطة في النظام تؤثر على طور التشكيل وعلى طور الحاملة، وإن كانت أوجه عدم الاستقرار هذه محدودة. والمبعث الرئيسي لوجوه عدم الاستقرار هذه هو التغيرات في درجة الحرارة، ومقادير التوتر الكهربائي في ناقلات الساتل، ومقادير الطاقة في شتى مكوّنات روابط القنوات. وفيما يخص القيم المعيّنة، يتعيّن الاتصال بالجهة التي توفر الخدمة الساتلية.

وينطوي تحويل التوقيت ذهاباً وإياباً عبر نظام الإرسال والإجابة على درجة عالية من حالات استبعاد انسيابات المذبذبات المحلية وتغايرات مقادير التأخر. وفيما يخص تحويل التوقيت ذهاباً وإياباً بصورة آنية بواسطة ترددتين مختلفتين، تتمثل المسألة الرئيسية في تباين مقادير التأخر عبر نطاق القناة بسبب تشتت التردد. أما فيما يخص تحويل التوقيت ذهاباً وإياباً على نحو متتابعي فإن المسألة الرئيسية تتمثل في تغير الطور في المذبذبات المحلية على مدى الزمن الفاصل بين عمليتي التحويل.

## 6.6 الخلاصة

إذا أريد استخدام أنظمة الاتصالات الساتلية لتحويل التوقيت فمن المهم الإحاطة ببنية النظام الذي نستعمله وأسلوب عمله وبالقيود التي يخضع لها. وقد تم بنجاح تحويل التوقيت بواسطة أنواع مختلفة من أنظمة الاتصالات الساتلية وذلك بوضع طرائق للاستفادة من مواطن قوة آحاد الأنظمة وتقليل أثر مواطن ضعفها.

## المراجع

HA, T. T. [1990] Digital Satellite Communications. McGraw-Hill, 1990.

ITU-R [2002] Handbook on Satellite Communications, Third Edition, International Telecommunication Union, Wiley & Sons, Inc.

MORGAN, W. L. and GORDON, G. D. [1989] Communications Satellite Handbook. Wiley & Sons, Inc.



## الفصل 7

### سلاالم التوقيت

الصفحة

80	..... المقدمة	1.7
80	..... التوقيت العالمي	2.7
81	..... التوقيت الجدولي	3.7
81	..... التوقيت الذري	4.7
82	..... سلاالم التوقيت النسبوية	5.7
82	..... التوقيت الأرضي	1.5.7
82	..... التوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد	2.5.7
83	..... التوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد	3.5.7
85	..... التوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية	4.5.7
86	..... سلاالم التوقيت الدولية	6.7
86	..... التوقيت الذري الدولي	1.6.7
90	..... التوقيت العالمي المنسق	2.6.7
95	..... المراجع	

## 1.7 المقدمة

استُعملت في قياس الزمن ثلاث طرائق رئيسية. وهي:

- 1 التوقيت المستند إلى دوران الأرض؛
- 2 التوقيت المستند إلى الحركات الفلكية للأرض والقمر والكواكب؛
- 3 التوقيت المستند إلى ميكانيك الكم المعني بالذرة.

وبالنظر إلى تغير درجة دقة طرائق القياس ومدى تعقيدها شهدت كل من هذه الطرائق العديد من عمليات التهذيب.

وترد تعاريف سلام التوقيت والمصطلحات ذات الصلة في التوصية ITU-R TF.686-2 "مسرد وتعاريف مصطلحات التوقيت والترددات".

## 2.7 التوقيت العالمي

يُدعى الزمن المقيس بدوران الأرض التوقيت الشمسي المتوسط. وعندما يُحسب في منتصف الليل على خط الطول Greenwich فإنه يُدعى التوقيت العالمي (UT). ويعرّف اليوم الشمسي المتوسط اسماً بأنه الفترة الزمنية الفاصلة بين مرورين متتاليين للشمس المتوسطة المتخيلة على خط عرض معين. وتعرّف الثانية الشمسية المتوسطة بأنها تساوي 1/86400 من اليوم الشمسي المتوسط.

ويمثل القياس الحقيقي لزوايا دوران الأرض بالنسبة إلى نظام الإسناد الفلكي التوقيت العالمي بشكله المسمى "التوقيت العالمي 1". وعلى الصعيد العملي لا يحدّد UT1 بوضعية الشمس بل بالحركة اليومية لخط الاعتدال الريعي على الكرة السماوية وفقاً للعلاقة المتفق عليها لتحديد UT1 بدلالة "التوقيت الفلكي المتوسط المقيس على خط الطول Greenwich" (GMST). وفي الماضي كان UT1 يقاس انطلاقاً من أوقات مرور النجوم. وهو يقاس اليوم بوسائل القياس بالتداخل ذي الأساس البالغ الطول (VLBI) لمصادر نقطية راديوية متراصة منتقاة، وقياس الأمداء اللازري الساتلي (SLR)، وسواتل التتبع في النظام العالمي لتحديد المواقع.

أما المعادلة التي يتحدد بها "التوقيت العالمي 1" بدلالة التوقيت الفلكي المتوسط المقيس عند خط الطول فهي [Aoki et al., 1982]:

$$(1-7) \quad \text{GMST} = 24110.54841 + 8640184.812866T + 0.093104T^2 - 0.0000062T^3$$

حيث:

$T$ : الزمن المنقضي منذ الساعة الثانية عشرة من الأول من يناير 2000، بالتوقيت العالمي، مقيساً بال عقود اليوليوسية التي يبلغ مقدار كل منها 36 525 يوماً.

وباعتماد الاتحاد الفلكي الدولي (IAU) [جمعية العامة، 1997] نظام الإسناد الفلكي المعهود، المستند إلى وضعيات أجرام من خارج المجرة مرصودة بوسائل القياس بالتداخل ذي الأساس البالغ الطول، تغير الأساس الذي يقوم عليه "التوقيت العالمي 1" ولم يعد يُحتاج إلى خط التعادل.

ونظراً إلى ما يشوب دوران الأرض من حالات عدم الانتظام فإن "التوقيت العالمي 1" ليس متجانساً. فثمة ثلاثة مباحث لتباينه: التزايد المطرد في طول اليوم من جراء الاحتكاك الذي تسببه حركة المد والجزر، والتباين الفصلي الدوري، والتقلبات العشوائية. "التوقيت العالمي 2" هو "التوقيت العالمي 1" مصححاً لمراعاة التباين الفصلي ويحدّد وفقه الوقت بالثواني بحسب المعادلة التالية [Seidelmann, 1992]:

$$(2-7) \quad \text{UT2} = \text{UT1} + 0.022 \sin 2\pi t - 0.012 \cos 2\pi t - 0.006 \sin 4\pi t + 0.007 \cos 4\pi t$$

حيث:

$t$ : جزء من السنة البيسلية.

يبد أن "التوقيت العالمي 2" لم يعد يُستعمل عملياً.



### 3.7 التوقيت الجدولي

التوقيت الجدولي (ET) هو توقيت متجانس يحدّد بنظرية نيوتن القائمة على التجاذب في حركة الأرض حول الشمس كما تمثّل في جداول الشمس التي وضعها نيوكومب. فهو يقول بأن خط الطول الوسطي الهندسي للشمس بدءاً من 1900 يتعيّن بالمعادلة التالية [Newcomb, 1895]:

$$L = 279^{\circ}41'48.''04 + 129\,602\,768.''13 T + 1.''089 T^2 \quad (3-7)$$

حيث:

$T$ : الوقت الجدولي مقيساً بالقرون انطلافاً من 1900.

وبالمعامل الخطي لهذا التعبير تتحدد الثانية الجدولية. وعليه فإن السنة المدارية 1900 تضمنت من الثواني ما يبلغ عدده:  $31\,556\,925,9747 = 86\,400 \times 36\,525 \times [60/129\,602\,768,13 \times 60 \times 360]$

وفي عام 1956 عرّفت اللجنة الدولية للأوزان والمقاييس (CIPM) الثانية بحسب التوقيت الجدولي بأنها تساوي  $1/31\,556\,925,9747$  من السنة المدارية 1900 في الساعة 12 من الصفر من يناير بالتوقيت الجدولي.

وقد صدّق المؤتمر العام للأوزان والمقاييس (CGPM) في عام 1960 على هذا التعريف.

ولا تستتبع الإشارة إلى عام 1900 أنه مبتدأ يوم شمسي متوسط مقداره 86 400 ثانية. بل هو مبتدأ سنة مدارية مقدارها بالثواني  $31\,556\,925,9747$ .

ولئن كان التوقيت الجدولي قد عرّف بدلالة وضعية الشمس فإنه قد حُقّق بصورة غير مباشرة عن طريق رصد القمر. ويمكن أن يعرف التوقيت الجدولي بأنه المتغير المستقل الذي يجعل وضعيات الأجرام الفلكية المحددة انطلافاً من قوانين الحركة التي وضعها نيوتن متوافقة مع نتائج الرصد. فهو بالتالي لا يستند إلا إلى ميكانيك نيوتن، الذي يُفترض بموجبه وجود وقت إحدائي عالمي، دون تهيئة للنسبية. وفي عام 1960 استُعيض بالتوقيت الجدولي عن "التوقيت العالمي 1" فيما يخص التقاويم الفلكية.

### 4.7 التوقيت الذري

في عام 1955 أصبح المعيار الذري الأول المتمثل في حزمة من ذرات السيزيوم معياراً معمولاً به في المعهد الوطني للفيزياء بالملكة المتحدة. وفي عام 1956 استحدث مرصد البحرية والمكتب الوطني للمعايير في الولايات المتحدة الأمريكية سلاماً للتوقيت الذري، فلم تلبث أن حذت حذوهما مرصد ومختبرات أخرى عديدة. ولم تمضِ إلا سبع سنوات بعد اعتماد المؤتمر العام للأوزان والمقاييس الثانية الجدولية في عام 1960 حتى اعتمد هذا المؤتمر الثانية الذرية بصفتها وحدة الزمن الأساسية في النظام الدولي للوحدات (SI). فعُرفت الثانية بأنها "مدة 9 192 631 770 دورة من دورات الإشعاع المناظر للانتقال بين الطبقتين الفائقتي الرقة من طبقات ذرة السيزيوم-133 وهي في الحالة الأرضية". وقد حُدّدت هذه القيمة بالمقارنة بالتوقيت الجدولي المستند إلى عمليات رصد القمر تبعاً لسلم التوقيت الذري.

وغدا التوقيت الذري أساس كل التوقيت الحديثة واستمر على تدبّره في مختبرات شتى منذ عام 1955 وإن كان لم يُعتمد رسمياً بصفته توقيتاً دولياً إلا في عام 1971. وبدءاً من إنشاء المكتب الدولي للتوقيت (BIH) في عام 1920 في مرصد باريس (OP)، استندت التوقيت الدولية استناداً كاملاً إلى عمليات الرصد الفلكي. ومثلت الثانية وحدة الزمن، المستند أيضاً في تحديدها إلى عمليات الرصد الفلكي. وأفضى قدوم المعايير القائمة على ذرة السيزيوم والعمل بها في خمسينات القرن العشرين، والنظم الإذاعية من قبيل نظام الملاحة البعيد المدى (LORAN) الذي أتاح إجراء مقارنة دولية دقيقة لهذه المعايير، إلى شكل أولي من التوقيت الذري (AT).

أما التوقيت الذري الدولي (TAI) فقد أوصى باستحداثه الاتحاد الفلكي الدولي (IAU) في عام 1967، والاتحاد الدولي لعلوم الراديو (URSI) في عام 1969، واللجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات في عام 1970.

وفي عام 1971 أقر المؤتمر العام الرابع عشر للموازين والمقاييس (CGPM) استحداث التوقيت الذري الدولي (TAI) بصفته التوقيت الإحداثي الذي تتمثل فترة وحدته في ثانية النظام الدولي للوحدات (SI) كما يتحقق على مجسم الأرض الدائر. ويرد في القسم 1.6.7 مزيد من المعلومات المفصلة عن أعمال التوقيت الذري الدولي (TAI).

## 5.7 سلاسل التوقيت النسبوية

جاء التوقيت الجدولي (ET) بمثابة توقيت معرّف بقوانين الحركة التي وضعها نيوتن. لكن لم يميّز فيه بين التوقيت الحركية المعرّفة بالنسبة إلى سطح الأرض، أو إلى مركز الأرض، أو إلى مركز المنظومة الشمسية. ولذا تلزم تعاريف أكثر دقة فيما يخص التوقيت النسبوية التي سبق أن اشتُت من التوقيت الجدولي. وتمثل هذه التوقيت الإضافية المتحوّلات المستقلة التي تتبع لها التقاويم النسبوية المستعملة في الفلك وفي الميكانيك الفلكي. ويرد في الفصل 9 بحث المفاعيل النسبوية في تحويل ونشر إشارات التوقيت والتردد عن طريق السواتل.

وفي عام 1976 اعتمد الاتحاد الفلكي الدولي سلّمَي توقيت للتقاويم النسبوية لا يختلفان عن التوقيت الذري الدولي إلا بالحدود الدورية [Muller et al. 1977]. وفي عام 1979 أُطلق على سلّمَي التوقيت المعينين الاسمان "التوقيت المستند إلى حركة الأرض" (TDT) و "التوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية" (TDB). وفي عام 1991 أعيدت تسمية "التوقيت المستند إلى حركة الأرض" فسمي ببساطة "التوقيت الأرضي" (TT). ويضاف إلى ذلك أن الاتحاد الفلكي الدولي اعتمد توقيت جديدة تتمثل وحدة كل منها في ثانية النظام الدولي للوحدات. أما التوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد (TCG) والتوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد (TCB) فهما التوقيتان القائمان على نظامي الإحداثيات اللذين تتمثل نقطتا إسنادهما في مركز الأرض وفي مركز ثقل المنظومة الشمسية، على الترتيب [Bergeron, 1992]. وقد أضفي المزيد من الوضوح على هذين التوقيتين بقرارين اعتمدهما الاتحاد الفلكي الدولي في عام 2000.

### 1.5.7 التوقيت الأرضي

التوقيت الأرضي (TT) هو التوقيت الإحداثي الذي تمثله بيانات الوقت الذاتي التي تسجلها مقيّاتيات على مجسم الأرض. ومن الناحية العملية يُحسب الزمن بحسب التوقيت الأرضي بدلالة الزمن بحسب التوقيت الذري الدولي (TAI)، الذي تتمثل وحدته في ثانية النظام الدولي للوحدات (SI). ويمكن أن يُعتبر التوقيت الأرضي مكافئاً للتوقيت الأرضي المستند إلى حركة الأرض، الذي ابتداءً في الأول من يناير 1977 في الساعة صفر بحسب التوقيت الذري الدولي ويحافظ على الاستمرارية مع التوقيت الجدولي (ET). وفي عام 1984 استُعيض عن التوقيت الجدولي بالتوقيت المستند إلى حركة الأرض باعتباره المتحوّل المستقل الجدولي في أهم التقاويم الأرضية الإسناد. ولما كان التوقيت الأرضي توقيتاً متجانساً من الناحية النظرية، بينما يُعتبر التوقيت الذري الدولي توقيتاً ذرياً مشتقاً اشتقاقاً إحصائياً فإنهما ليسا متطابقين صارمً التطابق. لكن الفرق بينهما ثابت، في حدود هامش تسامح يقارب مقداره  $\pm 10 \mu s$ . ومن الصيغ العملية لحساب الوقت الأرضي:

$$(4-7) \quad TT = TAI + 32.184 \text{ s}$$

والتخالف الثابت هو مقدّر الفرق بين التوقيت الجدولي و "التوقيت العالمي 1" عند مبتدأ التوقيت الذري الدولي الذي يرقى إليه تعريفه (الأول من يناير 1958). ويمكن أن يعتبر التوقيت الأرضي تعبيراً مثالياً عن التوقيت الذري الدولي.

### 2.5.7 التوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد

إن التوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد (TCG) هو التوقيت الإحداثي للتقاويم الذي تتمثل نقطة إسناده في مركز الأرض وتتمثل وحدته في ثانية النظام الدولي للوحدات. فالزمن الإحداثي  $\Delta t$  بالتوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد يرتبط بالزمن الذاتي  $\Delta \tau$  على مجسم الأرض (TT) وفق المعادلة:

$$\Delta t = (1 + W_0 / c^2) \Delta \tau.$$

فالتوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد والتوقيت الأرضي يختلفان بمقدار المعامل السلمي:

$$(5-7) \quad TCG - TT = L_G \Delta T$$

حيث:

$$(60,2 \mu s/d \text{ تقريباً}) \quad 6,969 \ 290 \ 134 \times 10^{-10} = W_0 / c^2 = L_G$$

$\Delta T$ : الزمن المنقضي منذ 1 يناير 1977 في الساعة صفر بالتوقيت الذري الدولي (JD 244 3144,5).

وفي عام 2000 أعاد الاتحاد الفلكي الدولي تعريف التوقيت الأرضي بحيث يختلف عن التوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد بالمعدل الثابت:  $dTT / dTCG = 1 - L_G$ . وكانت قيمة  $L_G$  هي أفضل قيمة مقدرة للنسبة  $(W_0 / c^2)$  في عام 2000، لكنها تُعتبر الآن ثابتاً تعريفياً لا يخضع لأي تعديل في المستقبل [Rickmand, 2001].

### 3.5.7 التوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد

إن التوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد (TCB) هو التوقيت الإحداثي للتقاويم الذي تتمثل نقطة إسناده في مركز ثقل المنظومة الشمسية وتتمثل وحدته في ثانية النظام الدولي للوحدات. فالزمن الإحداثي  $\Delta t_B$  في نظام إحداثي مُسنده مركز ثقل المنظومة الشمسية يرتبط بالزمن الذاتي المناظر  $\Delta \tau$  الذي تسجله ميقاتية على مجسم الأرض وفق المعادلة:

$$(6-7) \quad \Delta t_B = \int_{\tau_0}^{\tau} \left( 1 + \frac{1}{c^2} U(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau$$

حيث:

$\mathbf{r}$  و  $\mathbf{v}$ : موضع الميقاتية بالنسبة إلى مركز ثقل المنظومة الشمسية، وسرعة الميقاتية

$U(\mathbf{r})$ : الكمون التجاذبي لجميع الأجرام في المنظومة الشمسية (بما فيها الأرض) مقدراً على مجسم الأرض.

ويُطابق بين الوقت الإحداثي  $t_B$  والزمن بحسب التوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد كما يُطابق بين الوقت الذاتي  $\tau$  والزمن بحسب التوقيت الأرضي.

ويتوقف حساب التكامل على موضع الميقاتية وسرعتها في النظام الإحداثي الذي تتمثل نقطة إسناده في مركز ثقل المنظومة الشمسية. وبالتالي فإن من المستحسن فصل الجزء المرتبط بالميقاتية عن الجزء المستقل عن الميقاتية.

وبهذا التقريب يمكن التعبير عن  $\mathbf{r}$  و  $\mathbf{v}$  كما يلي:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_E + \dot{\mathbf{R}} \quad \text{و} \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_E + \mathbf{R}$$

حيث:

$\mathbf{r}_E$  و  $\mathbf{v}_E$ : هما موضع مركز ثقل الأرض وسرعته بالنسبة إلى مركز ثقل المنظومة الشمسي

$\mathbf{R}$  و  $\mathbf{R} \times \boldsymbol{\omega} = \dot{\mathbf{R}}$ : هما موضع الميقاتية وسرعتها بالنسبة إلى مركز الأرض.

فمجموع الكمون يساوي:

$$U(\mathbf{r}) = U_E(\mathbf{r}) + U_{ext}(\mathbf{r})$$

حيث:

$U_E$ : كمون الأرض بحسب قوانين نيوتن

$U_{ext}$ : الكمون الخارجي بحسب قوانين نيوتن لجميع أجرام المنظومة الشمسية عدا الأرض.

كما أن  $\mathbf{v}_E \cdot \dot{\mathbf{R}} = (d/dt_B)(\mathbf{v}_E \cdot \mathbf{R}) - \mathbf{a}_E \cdot \mathbf{R}$  و  $U_{ext}(\mathbf{r}) \approx U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \nabla U_{ext} \cdot \mathbf{R}$  حيث:

$$\mathbf{a}_E = \nabla U_{ext} \text{ هو تسارع الأرض.}$$

وعليه فإن [Thomas, 1975; Moyer 1971 and 1981]

$$(7-7) \quad \Delta t_B \approx \Delta \tau + \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} W_0 \Delta \tau + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E)$$

حيث:

- الحد الأول هو الزمن الذاتي مقيساً بمقياسية على مجسم الأرض.
- الحد الثاني يُعزى إلى الجمع بين أثر الانزياح نحو الأحمر وأثر تمدد الزمن في مركز الأرض بالنسبة إلى مركز ثقل المنظومة الشمسية وهو مستقل عن المقاتية.
- الحد الثالث هو الفرق بين الوقت الذي تسجله مقياسية في مركز الأرض والوقت الذي تسجله مقياسية على مجسم الأرض.
- الحد الرابع يتوقف على المكان الذي توجد فيه المقاتية.

وهو يقابل، في حدود الفضاء المكاني - الزماني المسطح، تصحيح تزامن المقاتية المعزو إلى النسبية الخاصة في الإطار الإسنادي المتحرك الأرضي المركز عندما يُرصد من إطار منظومي المركز. وهو يتباين يومياً، فيما يخص مقياسية موجودة على مجسم الأرض، باتساع مقداره  $2,1 \mu s$ . ويمثل حذف حدي التسارع تطبيقاً لمبدأ التكافؤ فيما يخص الأطر الإسنادية الحرة السقوط.

ويمكن أن يُحسب التكامل بالمكاملة العددية للتقويمين الكوكبي والقمرى أو أن يمثل بقانون تحليلي. ويعبر عنه بمجموع الحد  $L_C \Delta T$  المعزو إلى التغيرات التدريجية البطيئة وباقي الحدود الدورية  $P$ .

فالعلاقة بين التوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد والتوقيت الأرضي تتمثل في المعادلة التالية (التوصية ITU-R TF.686-2):

$$(8-7) \quad \begin{aligned} \text{TCB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \end{aligned}$$

وتتمثل العلاقة بين التوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد والتوقيت الأرضي الإسناد في المعادلة التالية:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCG} - \text{TT})$$

وعليه فإن:

$$(9-7) \quad \text{TCB} - \text{TCG} = \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) = L_C \Delta T + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E)$$

حيث:

$$L_C = 1,480\,826\,867\,41 \times 10^{-8} \text{ ms/d (تقريباً) [Irwin and Fukushima, 1999].}$$

ويجب أن يشمل ذلك أكثر من مائة حد دوري للتوصل إلى درجة دقة مقدارها  $100 \text{ ns}$  [Fairhead et al., 1998]. ويؤتي التقريب الأول:

$$(10-7) \quad \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B \approx \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_S}{a_E} \Delta T + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM_S a_E} e \sin E$$

حيث:

$GM_S$ : ثابت جاذبية الشمس

$a_E$  و  $e$ : نصف المحور الرئيسي لمدار الأرض والاختلاف المركزي.

إن الحد الأول هو تقريب لقيمة  $\Delta T$  لـ  $L_C$ . والحد الثاني هو الحد الدوري الرئيسي  $P$ ، الذي يبلغ اتساعه 1,7 ms.

#### 4.5.7 التوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية

التوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية (TDB) هو أيضاً توقيت إحداثي منظومي الإسناد. لكن، وفقاً لقرار الاتحاد الفلكي الدولي الصادر في عام 1976، يجب أن لا يتضمن الفرق بين هذا التوقيت والتوقيت الأرضي TT (الذي كان حينذاك يدعى التوقيت المستند إلى حركة الأرض (TDT)) إلا حدوداً دورية. ولذا يعاد حساب معدل الزمن الإحداثي بالضرب في معامل سلمي كما يلي:

$$\Delta t'_B = (1 - L_B) \Delta t_B$$

حيث:

$\Delta t'_B$ : يُعتبر مطابقاً للتوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية

$\Delta t_B$ : يُعتبر مطابقاً للتوقيت الإحداثي المنظومي الإسناد.

والفرق بين التوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية والتوقيت المستند إلى حركة الأرض هو:

$$(11-7) \quad TCB - TDB = L_B \Delta T$$

وتربط بين التوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية والتوقيت الأرضي العلاقة:

$$TDB - TT = (TCB - TT) - (TCB - TDB) \quad \text{وعليه فإن:}$$

$$(12-7) \quad TDB - TT = \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T$$

$$= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T$$

ما لا يتضمن حدوداً معزوة إلى التغيرات التدريجية البطيئة إذا كان  $L_B \approx L_C + L_G$ . وثمة توقيت آخر خاص بالتقاويم النسبوية، يدعى  $T_{eph}$ ، يستخدمه مختبر الدفع النفاث (JPL) [Standish, 1998] وهو مقارب للتوقيت المستند إلى حركة مركز ثقل المنظومة الشمسية. فإذا حُسب التكامل بواسطة تقاويم كوكبية معبر عنها بدلالة التوقيت  $T_{eph}$  بمثابة متحول مستقل فتنبغي قسمته على المعامل  $1 - L_B$ .

فمعدل التوقيت المستند إلى حركة الأرض بالنسبة إلى التوقيت الأرضي الإسناد يساوي:

$$(13-7) \quad \left\langle \frac{dTDB}{dT_{TCB}} \right\rangle = \left\langle \frac{dTDB}{dT} \right\rangle \frac{dT}{dT_{TCG}} \left\langle \frac{dT_{TCG}}{dT_{TCB}} \right\rangle$$

حيث:

$\langle \rangle$  تشير إلى المتوسط المحسوب للأمد الطويل مأخوذاً في مركز الأرض؛

ويُحصل على قيمة  $L_B$  بواسطة العلاقة:

$$1 - L_B = (1 - L_G)(1 - L_C)$$

$$\text{لأن: } \langle dTDB/dTCB \rangle = 1 - L_B$$

$$dT/dTCG = 1 - L_G$$

$$\langle dTCG/dTCB \rangle = 1 - L_C$$

$$\langle dTDB/dTT \rangle = 1$$

وعليه فإن:  $L_B = 1,550\,519\,767\,72 \times 10^{-8}$  (تقريباً 1,34 ms/d).

ويربط المعامل  $L_B - 1$  بين الوحدات الجدولية للوقت والمسافة في التقاويم محسوبة بدلالة التوقيت المستند إلى حركة الأرض وبين الوحدات المناظرة في النظام الدولي للوحدات.

## 6.7 سلاسل التوقيت الدولية

إن تطوير شبكات الاتصال الدولية وشبكات الحواسيب، ولا سيما نظم الملاحة الإلكترونية العالمية، تستلزم توافيق دولية متزامنة عالية درجة الدقة. وبالتالي قامت المنظمات الدولية ذات الصلة بوضع وإقرار التوقيتين الدوليين الرئيسيين التاليين:

- التوقيت الذري الدولي (TAI)؛
- التوقيت العالمي المنسق (UTC).

### 1.6.7 التوقيت الذري الدولي

يرقى مبتدأ التوقيت الذري الدولي (TAI) إلى الأول من يناير 1958. ويعرّف هذا التوقيت بأنه التوقيت الذري الذي أنشأه المكتب الدولي للأوزان والمقاييس استناداً إلى بيانات الوقت التي سجلها ما يقارب 400 ميقاوية ذرية تُتدبّر شؤونها في زهاء 60 مختبراً. كما أن هذا التوقيت وُصف [BIPM, 1981] بأنه توقيت إحدائي معرّف في إطار إسنادي أرضي المركز تتمثل وحدته في ثانية نظام الوحدات الدولي كما يتحقق على مجسم الأرض الدائر. وقد مثل هذا التوقيت توسيعاً لتوقيت ذري تولى تدبره المكتب الدولي للتوقيت يرقى وجوده المستمر إلى عام 1955.

لقد أوصى باستحداث التوقيت الذري الدولي الاتحاد الفلكي الدولي (IAU) في عام 1967، والاتحاد الدولي لعلوم الراديو (URSI) في عام 1969، واللجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات في عام 1970. وفي عام 1971 أقر المؤتمر العام الرابع عشر للموازين والمقاييس (CGPM) استحداث التوقيت الذري الدولي.

إن التوقيت الذري الدولي هو توقيت يبين الوقت الفعلي وُضع انطلاقاً من بيانات مقارنة الميقاتيات، التي قدمتها إلى المكتب الدولي للأوزان والمقاييس المختبرات المشاركة فيه، واستناداً إلى حوارية معينة تدعى ALGOS. كما عرّف هذا التوقيت بأنه توقيت إحدائي في إطار إسنادي أرضي المركز تتمثل وحدته في ثانية نظام الوحدات الدولي كما يتحقق على مجسم الأرض الدائر. لقد خلصت إلى كونه توقيتاً إحدائياً للجنة الاستشارية المعنية بتعريف الثانية (CCDS) في عام 1980. وقد غُيّر اسم هذه اللجنة فأصبحت تدعى اللجنة الاستشارية المعنية بالتوقيت والتردد (CCTF) في عام 1997. كما أن اللجنة الاستشارية المعنية بتعريف الثانية قدمت معلومات التصحيح اللازمة من أجل إرساء التوقيت الذري الدولي بالمفهوم النسبوي ومن أجل استعماله في الأطر الإسنادية غير المتصلة بالأرض. ويمثل مدى دقة هذا التوقيت اعتباراً رئيسياً فيما يتعلق باستدامة ثانية النظام الدولي للوحدات وتوفير توقيت يمكن التعويل عليه في الأمد الطويل. ويُهتم بتعظيم الثبات في الأمد الطويل على حساب تيسر الانتفاع في الأمد القصير. ويُستعان في حساب الزمن وفق هذا التوقيت ببيانات تتعلق بفترة مديدة. وتقدّم إلى المكتب الدولي للأوزان والمقاييس بيانات مسجلة على الميقاتيات في الأيام التي توفق التواريخ التي تنتهي بالرقم 4 والتواريخ التي تنتهي بالرقم 9 بحسب التقويم اليوليوسي المعدّل.

وتُستخدم لمقارنة بيانات الوقت التي تسجلها الميقاتيات تقنيتان لتحويل التوقيت:

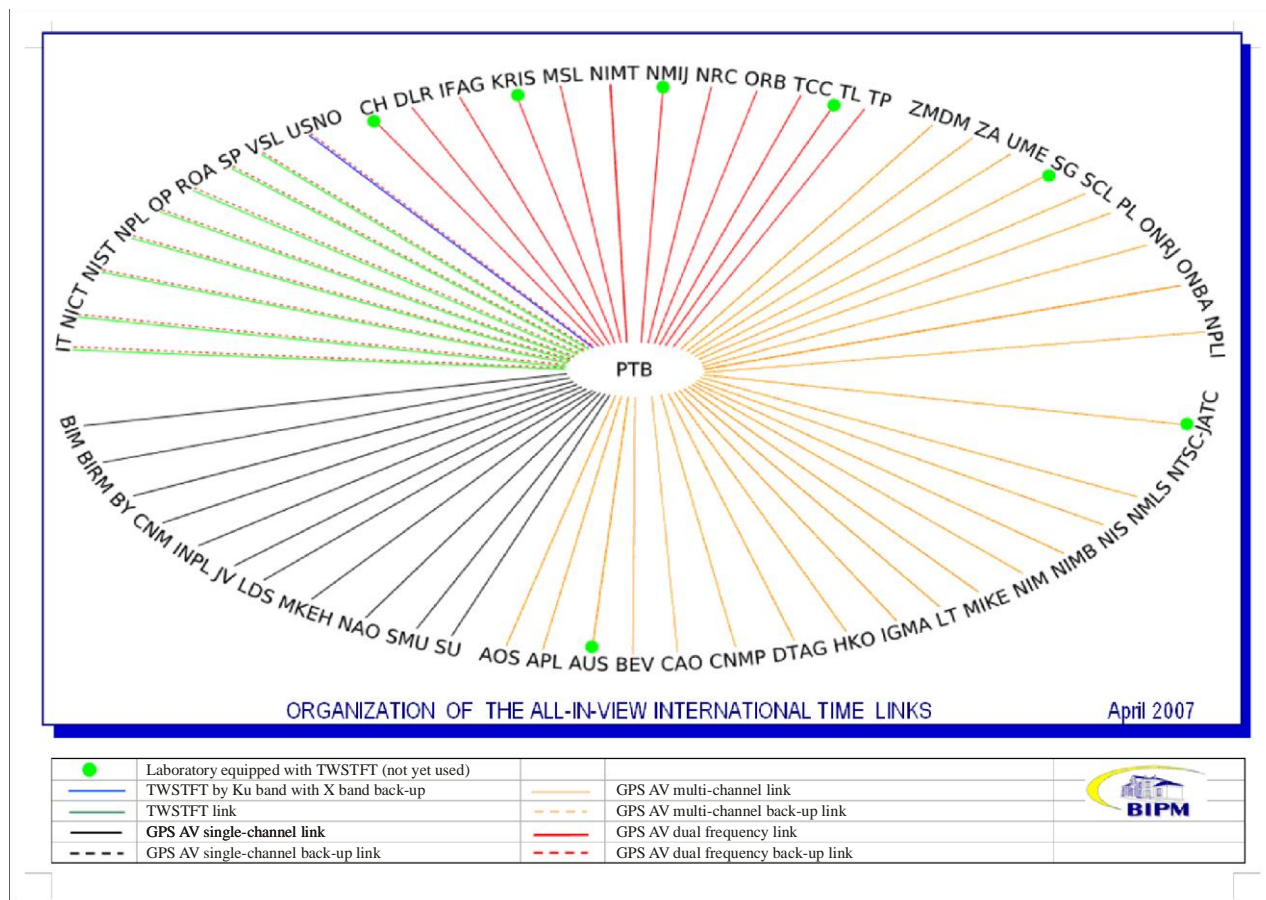
أ) مقارنة بيان التوقيت العالمي المنسق المحلي بالوقت الذي يبينه النظام العالمي لتحديد المواقع عن طريق تتبع الساتلي بهذا النظام،

ب) مقارنة توقيتين عالميين منسقين محليين (القسم 2.6.7) عن طريق التحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والترددات.

ويتولى المكتب الدولي للأوزان والمقاييس تنظيم روابط التوقيت لإجراء عمليات مقارنة الميقاتيات تبعاً للنسق المبين في الشكل 1-7. وتُستخدم في حساب بيان التوقيت جمل بيانات تشمل ثلاثين يوماً. وقد اختيرت فترة مقدارها 30 يوماً بمثابة إطار زمني للمكاملة الفعلية لسلم التوقيت عند نقطة المرور بين الحد الأدنى للرفيف وتشكيل تردد ميقاويات السيزيوم بالسير العشوائي. فليس من شأن اختيار فترة مكاملة أطول أن يحسّن الثبات. وتكفي فترة الثلاثين يوماً لملاشاة أثر الضوضاء المتأنية عن روابط التوقيت والضوضاء البيضاء المتأنية عن تشكيل تردد الميقاتيات.

الشكل 1-7

## روابط التوقيت الدولية بين المراكز المشاركة



Sat\_time\_freq-07-01

PTB	الوكالة الاتحادية الألمانية للفيزياء والتقنيات
ORGANAIZATION OF THE ALL IN-VIEW INTERNATIONAL TIME LINKS	تنظيم جميع روابط التوقيت الدولية في منظر واحد
APRIL 2007	أبريل 2007
BIPM	المكتب الدولي للأوزان والمقاييس
Laboratory equipped with TWSTFT (not yet used)	مختبر مجهز بوسائل للتحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والترددات (لم تستخدم)
TWSTFT by Ku band with X band back-up	أجهزة التحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والترددات عن طريق النطاق Ku مع وحدة احتياطية للنطاق X
TWSTFT link	رابط التحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والترددات
GPS AV single-channel link	رابط بالنظام العالمي لتحديد المواقع سمعي بصري وحيد القناة
GPS AV single-channel back-up link	رابط احتياطي بالنظام العالمي لتحديد المواقع سمعي بصري وحيد القناة
GPS AV multi-channel link	رابط بالنظام العالمي لتحديد المواقع سمعي بصري متعدد القنوات
GPS AV multi-channel back-up link	رابط احتياطي بالنظام العالمي لتحديد المواقع سمعي بصري متعدد القنوات
GPS AV dual frequency link	رابط بالنظام العالمي لتحديد المواقع سمعي بصري ثنائي التردد
GPS AV dual frequency back-up link	رابط احتياطي بالنظام العالمي لتحديد المواقع سمعي بصري ثنائي التردد

ويجري تحقيق التوقيت الذري الدولي في ثلاث خطوات:

الخطوة 1: إجراء حساب يُستعان فيه بمعالجة لاحقة، وحساب تكراري على سلم وسيط، يسمى "السلم الذري الطليق" (EAL) بالاستعانة ببيانات مقارنة الميقاتيات والخوارزمية ALGOS.

الخطوة 2: تقييم طول المدة المتخذة وحدةً للزمن في السلم EAL بالاستعانة ببيانات متأتية من معايير التردد الرئيسية والمرشاح الأمثل.

الخطوة 3: حساب بيان التوقيت TAI انطلاقاً من بيان السلم EAL بالقيام عند اللزوم بتطبيق تصحيح لفترة وحدة الزمن في السلم EAL لإيتاء قيمة تكون أقرب ما يمكن من ثانية النظام العالمي للوحدات. وتُعرف عملية تصحيح وحدة السلم بالتسمية "توجيه التردد" وهي تُجرى كل شهر إذا اعتبر ذلك ضرورياً بتطبيق تصحيح متغير على أن لا يزيد مقدار التغير من شهر إلى شهر عن  $10 \times 7^{-16}$ .

وبين أدناه على نحو عام وجيز كيف يُحقق التوقيت الذري الدولي. ويُرجع إلى [Azoubib, et al., 1977] للمزيد من التفاصيل.

1 بنية TAI: في الوقت  $t$ ، يحدّد  $EAL.f(t)$ ، أي الوقت وفق السلم EAL بمثابة دالة،  $f(t)$ ، بدلالة البيانات  $h_i(t)$  التي تسجلها مجموعة من  $N$  ميقاتية،  $H_i$ ، بالمعادلة:

$$EAL(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i [h_i(t) + h'_i(t)]}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (14-7)$$

حيث:

$P_i$ : معامل الترجيح الإحصائي المسند إلى الميقاتية  $H_i$

$h'_i(t)$ : تصحيح الوقت المراد به التكفل باستمرارية وقت وتردد السلم عندما تتغير عوامل الترجيح المسندة لفرادى الميقاتيات أو يتغير العدد الإجمالي للميقاتيات.

ولا يمكن استعمال هذه المعادلة مباشرة لأن المقادير المقيسة التي توفرّ البيانات الأساسية ليست البيانات التي تسجلها فرادى الميقاتيات بل هي نتائج عمليات المقارنة بين أزواج من الميقاتيات. ففي الوقت  $t$ ، يعبر عن الاختلاف البطيء التباين  $\zeta_{ij}(t)$  بين بيان الميقاتية  $H_i$  وبيان الميقاتية  $H_j$  بالمعادلة التالية:

$$\zeta_{ij}(t) = h_i(t) - h_j(t) \quad (15-7)$$

وبالتالي فإن خرج EAL هو مجموعة من  $N$  قيمة للفروق  $x_i(t)$  محدّدة بالمعادلة:

$$x_i(t) = EAL(t) - h_i(t) \quad (16-7)$$

حيث:

$x_i$ : الفوارق بين البيانات التي تسجلها فرادى الميقاتيات والوقت المحدّد وفق التوقيت EAL.

فيمكن أن يعبر عن الفرق بالمعادلة:

$$x_i(t) - x_j(t) = -\zeta_{ij}(t) \quad (17-7)$$

ويمكن أن تحوّل المعادلة (14-7) إلى المعادلة:

$$\sum_{i=1}^N p_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N p_i h'_i(t) \quad (18-7)$$



وعلى صعيد الواقع تُستخدم منظومة غير إطنابية مؤلفة من  $N-I$  من الروابط التوقيتية لحل هاتين المعادلتين الأخيرتين.

2 إجراء تحديد معاملات الترجيح: يُحسب معامل الترجيح المسند إلى كل ميقاتية على نحو يسهم في إطالة أمد ثبات السلم الناتج عن ذلك ويقلل التقلبات السنوية وانسياب التردد بالنسبة إلى معايير التردد الرئيسية. ومن السمات الهامة لخوارزمية ALGOS أنها تأخذ بالحسبان في تقييم معامل ترجيح الميقاتية بيانات فترة الثلاثين يوماً التي يُحسب EAL فيما يخصها، وذلك على الرغم من أن البيانات المستند إليها تشمل سنة كاملة. فيمكن إذن تقييم الميقاتيات من حيث أدائها الفعلي خلال الفترة التي يوضع EAL فيما يخصها. كما يمكن أن يؤخذ بالحسبان كل ما قد يعاين من حالات خروج عمل الميقاتية عن المعتاد وذلك بضبط معامل ترجيحها، وبجعله صفرًا عند اللزوم. وقد تبينت فائدة ذلك في حالات كثيرة.

ويستند تحديد معامل الترجيح عادة إلى تغاير المعدل المتوسط [Thomas and Azoubib, 1996]  $\sigma^2(6, \tau)$  بالنسبة إلى السلم الذري الطليق محسوباً لعينات مأخوذة على مدى شهر واحد. وقد اختير هذا التغاير، بدلاً من تغاير الأزواج المعتاد، لأنه يؤدي مزيداً من تقليص معامل ترجيح الميقاتيات التي يعترها انسياب في التردد. وتحسب معاملات الترجيح مباشرة من المعادلة:

$$(19-7) \quad p_i = \frac{1000}{\sigma_i^2(6, \tau)}$$

(يعبر عن  $\sigma_i$  بالنانوثواني في اليوم: ns/day) شريطة أن لا يسجل في فترة الثلاثين يوماً أي خروج عن المعتاد في عمل الميقاتية المعنية. أما في حالة خروج عملها عن المعتاد فتعطى لمعامل ترجيحها القيمة صفر. ويثبت حد أعلى لمعامل الترجيح مقداره  $2,5/N$  (مع العلم بأن  $N$  هو عدد الميقاتيات المشمولة بالحساب الشهري). وقد اختير مقدار الحد الأعلى لمعامل الترجيح هذا لضمان ميل السلم ميلاً كبيراً لصالح أفضل الميقاتيات دون إتاحة هيمنة إحداها [Thomas and Azoubib, 1996].

3 التنبؤ بالمعدل: يتكون حد التصحيح  $h'_i(t)$  من عنصرين:

$$(20-7) \quad h'_i(t) = a_i(t_0) + B_{ip}(t)(t - t_0)$$

حيث:

$a_i(t_0)$ : هو عبارة عن الفرق بين بيان الوقت الذي تسجله الميقاتية  $H_i$  وبيانه وفق السلم EAL في الوقت  $t_0$ ، أي عند بدء فترة الثلاثين يوماً

$B_{ip}(t)$ : الفرق المتنبأ به بين معدل الميقاتية  $H_i$  ومعدل السلم EAL للفترة الممتدة من  $t_0$  إلى  $t$ ، حيث يعرف معدل (rate) الميقاتية  $H_i$  بالمعادلة:

$$(21-7) \quad \text{rate} = \frac{a_i(t_0 - t) - a_i(t_0)}{(t - t_0)}$$

ويُحصل على المقدار المتنبأ به للفرق  $B_{ip}(t)$  بخطوة تنبؤ خطي واحدة استناداً إلى القيمة السابقة. ويسوّغ ذلك أن ضوضاء الميقاتية المهمة لفترة الثلاثين يوماً تقابل من الناحية الإحصائية سيراً عشوائياً من شأن القيمة المقدرة المحتمل أكبر احتمال أن يؤتيها على مدى الفترة التالية أن تتمثل ببساطة في القيمة المسجل إياها للفترة السابقة.

وبعد تحديد أفضل تقدير لبيان السلم EAL يُجرى التحويل إلى التوقيت الذري الدولي بتبين ما إذا كان معدل السلم EAL يختلف اختلافاً كافياً عن أفضل المعايير الرئيسية بحيث يكون من المبرر إجراء تصحيح "توجيهي" له. ومن عام 2005 إلى عام 2008 طُبقت كل شهر تقريباً تعديلات للتردد قيمتها القصوى  $0,6 \times 10^{-15}$ .

وأخيراً تُنشر نتيجة هذه الحسابات في التعميم الشهري المسمى  $Circular T$  الذي يوزّع على المختبرات المشاركة. ويظهر في الشكل 2-7 مقتطف من هذا المنشور. فالقيمة [UTC-UTC(k)] لكل مختبر  $k$  من المختبرات المساهمة تُنشر كل خمسة أيام مقرونة بأوجه عدم اليقين التي تعترها، والتي تبقى قيمها ثابتة في حسابات كل شهر.

## 2.6.7 التوقيت العالمي المنسق

يسمى قياس الوقت العالمي استناداً إلى ثانية نظام الوحدات الدولي المحددة ذرياً بالتوقيت العالمي المنسق. وقد عُهد إلى المكتب العالمي للتوقيت في عام 1961 بمهمة تنسيق التواقيت الذرية الدولية. وفي عام 1988 نُقلت هذه المسؤولية من المكتب الدولي للتوقيت إلى المكتب الدولي للأوزان والمقاييس.

وفي بادئ الأمر كانت تطبق تعديلات لتعويض تخالف المعدلات وتعديلات تدريجية دورية عند بث إشارات التوقيت لإبقاء الفارق بين التوقيت العالمي المنسق والتوقيت الدولي 2 (UT2) ضمن حدود عُشر الثانية. وفي عام 1972 أُخذ بالشكل الحالي للتوقيت العالمي المنسق، حيث كُفّ عن تطبيق تعويض تخالف المعدلات واستُعيض بالتعديلات التدريجية التي يبلغ مقدار كل منها "ثانية كبيسة" كاملة عن التعديلات التدريجية التي كانت تطبق البالغ مقدارها 100 ms أو 200 ms وذلك لضآلتها وكثرة تكرارها [Nelson, 2001]. فمعدل التوقيت العالمي المنسق مساو لمعدل التوقيت الذري الدولي لكنه يختلف عنه بعدد صحيح من الثواني، بحيث يبقى اختلافه عن التوقيت الدولي 1 في حدود تسعة أعشار الثانية على الدوام.

### الشكل 2-7

#### مقتطف من منشور المكتب الدولي للأوزان والمقاييس Circular T

CIRCULAR T 208  
2005 MAY 12, 17h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE  
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)].  
From 1999 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 32 s.

Date 2005	0h UTC	MAR 30	APR 4	APR 9	APR 14	APR 19	APR 24	APR 29	Uncertainty/ns			
MJD		53459	53464	53469	53474	53479	53484	53489				
Laboratory k					[UTC-UTC(k)]/ns				uA	uB	u	(1)
AOS (Borowiec)		8.2	12.1	17.1	22.7	19.0	16.0	16.8	1.6	5.2	5.4	
APL (Laurel)		-18.6	-23.3	-13.6	-2.0	4.6	39.3	26.5	1.6	5.3	5.5	(2)
AUS (Sydney)		-541.1	-547.9	-556.5	-561.7	-574.0	-590.8	-608.2	3.2	6.4	7.2	
BEV (Wien)		97.8	88.7	80.6	70.6	63.0	58.2	46.3	1.6	5.2	5.4	
BIRM (Beijing)		-145.0	-170.1	-192.3	-217.0	-238.1	-260.8	-288.4	2.8	20.4	20.6	
CAO (Cagliari)		-2890.4	-2883.7	-2871.8	-2865.4	-2845.1	-2819.2	-2794.1	1.6	7.2	7.4	
CH (Bern)		-21.7	-24.4	-24.6	-21.4	-14.6	-9.4	-0.7	0.8	5.2	5.3	
CNM (Queretaro)		36.7	44.2	47.2	52.2	52.6	59.5	78.3	5.0	20.3	20.9	
CNMP (Panama)		-2514.2	-2543.1	-2584.6	-2629.9	-2655.4	-2690.8	-2721.4	4.0	7.2	8.2	
CSIR (Pretoria)		-3393.0	-3468.5	-3548.2	-3628.6	-3718.2	-3800.9	-3891.4	3.0	20.1	20.3	
DLR (Oberpfaffenhofen)		-40.4	-46.1	-44.7	-46.1	-62.1	-62.9	-71.4	0.8	5.2	5.3	
DTAG (Darmstadt)		254.6	274.3	283.9	273.2	267.7	271.2	273.3	3.0	10.1	10.5	
HKO (Hong Kong)		93.7	71.6	68.9	55.1	45.9	45.2	51.0	3.2	6.4	7.2	
IEN (Torino)		-116.2	-116.2	-109.3	-104.5	-99.3	-98.1	-100.5	0.7	1.9	2.0	
IFAG (Wetzell)		-348.7	-340.9	-340.6	-340.4	-332.8	-324.9	-314.8	0.8	5.2	5.3	
IGMA (Buenos Aires)		351.7	353.5	346.2	354.1	361.3	366.9	367.4	5.0	19.9	20.5	
INPL (Jerusalem)		-264.7	-311.1	-347.5	-387.4	-432.2	-478.0	-523.6	4.0	10.1	10.9	
JATC (Lintong)		-10237.5	-10227.2	-10209.8	-10197.3	-10180.0	-10167.2	-10155.8	2.7	21.0	21.2	
JV (Kjeller)		-6316.2	-6310.2	-6252.7	-6243.4	-6219.6	-6173.5	-6177.2	5.0	20.1	20.7	
KRIS (Daejeon)		-3.8	-4.2	0.9	2.5	3.4	5.7	6.0	2.8	6.4	7.0	

Sat\_time\_freq-07-02

هكذا غدت توفر إشارات التوقيت في عملية البث ذاتها الفترة الوحيدة المتمثلة في ثانية النظام الدولي للوحدات وقيمة تقريبية لبيان التوقيت الدولي 1. ويمكن أن يتم، بتكة أو نبضة مزدوجتين، تضمين إشارة التوقيت المبنوثة تصحيحاً إضافياً يبلغ مقداره أعداداً صحيحة من أعشار الثانية، بحيث يهسى عند إضافته إلى بيان التوقيت العالمي المنسق تقريباً أفضل إلى التوقيت العالمي 1. وقد أقرّ بالتوقيت العالمي المنسق أساساً للتوقيت المدني كما يُنص عليه في قرارات لمنظمات شتى منشأة بموجب معاهدات واتحادات علمية، مثل المؤتمر العالمي للأوزان والمقاييس والاتحاد الدولي للاتصالات والاتحاد الفلكي الدولي، وكما يُحدّد في معظم النصوص القانونية الوطنية.

واختيرت ثانية النظام الدولي للوحدات، المحددة الآن بدلالة دورة انتقال ذرة السيزيوم، لتكون متوافقة مع الثانية الجدولية ضمن حدود المقدار التجريبي لعدم اليقين. بيد أن دراسات مستندة إلى سجلات الكسوف والخسوف القديمة وعمليات الرصد الحديثة بالمناظير تشير إلى أن طول النهار يشهد ازدياداً بطيئاً. وعلى مدى السنين الألف السابقة ازداد طولُه بمعدل يقارب  $1,4 \text{ ms}$  كل قرن. فالثانية الجدولية، المستندة إلى جداول الشمس التي وضعها نيوكومب، كانت في الواقع تساوي متوسط الثانية الشمسية على مدى القرنين الثامن عشر والتاسع عشر.

وبحسب الاتجاه في الأمد الطويل، كان متوسط الثانية الشمسية يساوي ثانية النظام الدولي للوحدات نحو عام 1820 [Stephenson, 1997]. وهذا التاريخ هو أيضاً المتوسط التقريبي لتواريخ ابتداء حساب الفترات التي ترقى إليها البيانات التي حللها نيوكومب، والتي تقع بين عام 1750 وعام 1892. ومنذ عام 1820 ازداد طول اليوم بمقدار  $2,5 \text{ ms}$  تقريباً. وعليه فإن طول متوسط اليوم الشمسي يقارب حالياً  $86\,400,0025$  ثانية، أي ما يزيد عن طول اليوم المدني البالغ بالضبط  $86\,400$  ثانية. فعلى مدى سنة واحدة يؤتي تجمع الفارق البالغ  $0,0025$  ثانية زهاء ثانية كاملة، ما يُعوّض عنه بإدراج ثانية كبيسة. بيد أنه، بالنظر إلى عشوائية تقلبات دوران الأرض، يتعذر التنبؤ مسبقاً بموعد إضافة الثانية الكبيسة، ويعتري التغير تواتر إضافتها.

لقد وضعت التوقيت العالمي المنسق للجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات (تم إدماج هذه اللجنة باللجنة الدولية لتسجيل الترددات (IFRB) وسميت الوحدة الجديدة "قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات" (ITU-R) التي أوصت باستحداثه في عام 1972 بمثابة توقيت يمثل حلاً وسطاً بين التوقيت الدولي والتوقيت الذري الدولي (TAI). ويستعان بهذا التوقيت لتنسيق التوقيت المحلي الذي تتدبر شؤونه شتى مراكز التوقيت والدول ويتوافق بدرجة معقولة مع التوقيت العالمي 1. وقد لزم التنسيق بالنظر إلى استحداث نظم ملاحية إلكترونية، من قبيل نظام Loran، يمكن أن تهيئ قياسات توقيتية دقيقة دقة معقولة على مدى مسافات شاسعة. أما تعريف التوقيت العالمي المنسق على وجه التحديد فيرد في التوصية ITU-R TF.460 - بث الترددات المعيارية وإشارات التوقيت. ومنذ اعتماد التوقيت العالمي المنسق تنامي استعماله تنامياً كبيراً في أوساط الراديو والاتصالات إذ تنامت نظم الملاحية والاتصال الإلكترونية لتوفير قياسات توقيتية عالية الدقة في كل أنحاء العالم، وإذ تستلزم هذه النظم بدورها توقيتاً عالي الدقة (التوصيتان ITU-R TF.535-2 و ITU-R TF.767-2).

وقد أقرّ بالتوقيت العالمي المنسق باعتباره التوقيت الدولي المرجعي في قرارات صادرة عن العديد من الاتحادات العلمية والمنظمات المنشأة بموجب معاهدات، مثل الاتحاد الفلكي الدولي (IAU)، والاتحاد الدولي للاتصالات (ITU)، والاتحاد الدولي لعلم الراديو (URSI)، والمؤتمر العام للأوزان والمقاييس (CGPM)، وهيئات تقييس من قبيل المنظمة الدولية للتوحيد القياسي (ISO). وفي عام 1978 أقرت اللجنة الاستشارية الدولية للراديو صيغة جديدة من توصيتها 486 (التي أصبحت الآن التوصية ITU-R TF.486-2 - استعمال تردد التوقيت العالمي المنسق مرجعاً في التردد المعياري وإشارات التوقيت) وقرر المؤتمر الإداري العالمي للراديو لعام 1979 (WARC-79) وجوب أن يُستعمل التوقيت العالمي المنسق لتعيين التوقيت في كافة أنشطة الاتصالات الدولية وجميع الوثائق الرسمية للاتحاد [الوثائق الختامية، 1980].

ويعرّف التوقيت العالمي المنسق التعريف التالي في لوائح الراديو (طبعة 2008):

**14.1"** *التوقيت العالمي المنسق (UTC):* هو جدول توقيت قائم على الثانية (SI)، حسب التعريف في التوصية ITU-R TF.460-6. (WRC-03)

يكون التوقيت العالمي المنسق في أغلب التطبيقات العملية ذات الصلة بلوائح الراديو مكافئاً للتوقيت الشمسي المتوسط عند مبدأ مستويات الزوال (خط الطول الصفري)، والمعبر عنه سابقاً بتوقيت غرينتش المتوسط (GMT). ومن المقبول اليوم قبولاً عاماً أن التوقيت العالمي المنسق هو المرجع فيما يخص التطبيقات الساتلية المتعلقة بالوقت والتردد.

### 1.2.6.7 تحقيق التوقيت العالمي المنسق

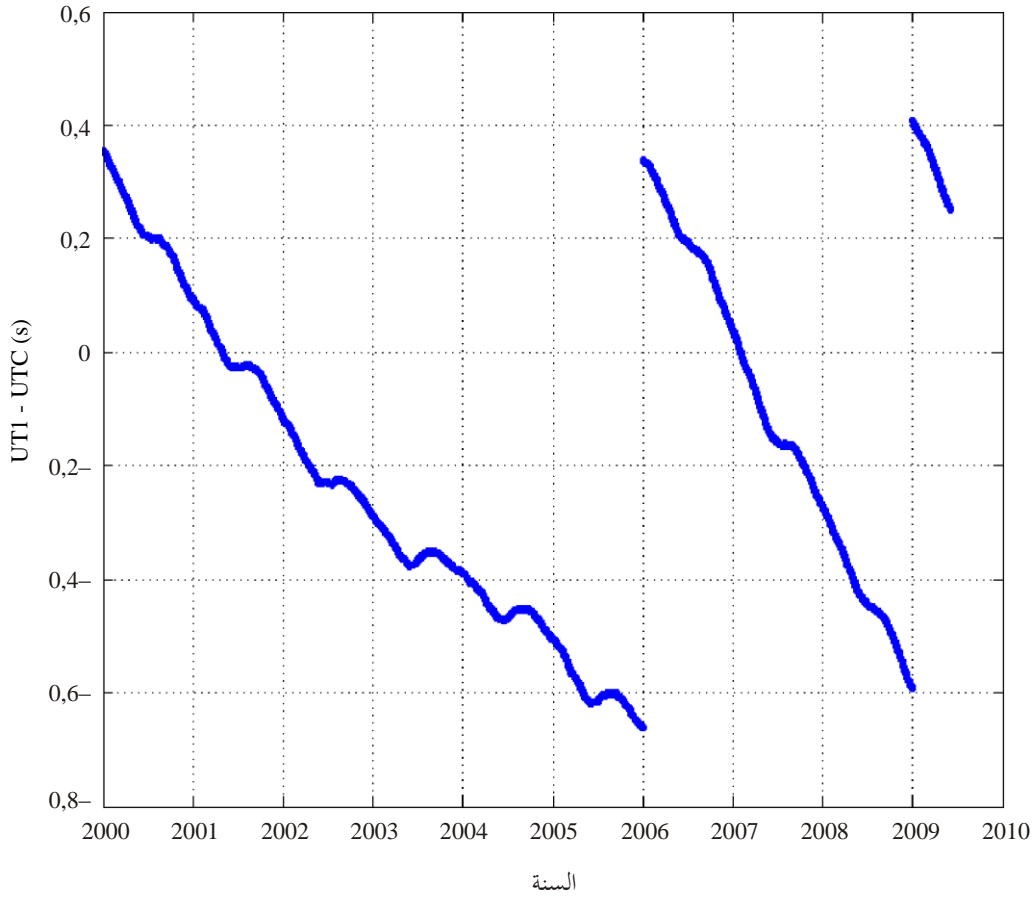
التوقيت العالمي المنسق هو صيغة من التوقيت الذري الدولي معدلة بالقيام تدريجياً بزيادة أو بطرح ثانية واحدة، تسمى الثانية الكبيسة. وللحفاظ على علاقة وثيقة بين التوقيت العالمي المنسق وبين "التوقيت العالمي 1"، كان يتعين أن يُثبت أو أن يُبلغ مع التوقيت UTC تعديل معروف بالاسم DUT1، كما يُوضَّح في الشكل 7-3. أما قيمة DUT1 فهي القيمة المنتبأ بها للفرق بين UT1 و UTC مقدرة بأعداد صحيحة من أعشار الثانية. وبذلك كان مستعمل التوقيت UT1 يتمكن من تعديل القيمة المبتوثة للتوقيت UTC بجعل الفرق بين هذين التوقيتين أقل من عُشر الثانية (0,1 s). إن التوقيت UT1 صيغة من التوقيت العالمي مصححاً لمراعاة الحركة القطبية، بسبب عدم انتظام دوران الأرض. وكان التوقيت UT1 في الماضي يُحدَّد بوقت مرور النجوم مُصححاً لمراعاة التباينات الفصلية. أما اليوم فإن تحديد التوقيت UT1 يعتمد على التقنيات الساتلية الفضائية ويهيئ قياساً لمعدل دوران الأرض ويربط بين اتجاه الأرض وبين طول اليوم بحسب هذا التوقيت. ويرد المزيد عن تاريخ التوقيتين UTC و UT1 وتطورهما في المنشور "الثانية الكبيسة: تاريخها ومستقبلها الممكن [نلسون وآخرون، 2001]".

فالتوقيت العالمي المنسق هو توقيت ذري يتوافق في المعدل مع التوقيت الذري الدولي لكنه يختلف عنه بعدد صحيح من الثواني. وفي يونيو 2008 كان مقدار الزمن بالتوقيت العالمي المنسق متخلفاً عنه بالتوقيت الذري الدولي تخلفاً مقداره 33 ثانية. وُيُثبت في شأن إضافة ثانية كبيسة بحسب تغير معدل دوران الأرض بحيث يبلغ مقدار الخطأ المتجمّع تسعة أعشار الثانية على الأكثر. ويتولى الجهاز الدولي المعني بدوران الأرض والنظم الإسنادية (IERS) مراقبة دوران الأرض، ويبت في الموعد الذي سيتم فيه تجاوز العتبة، ويسدي المشورة إلى المكتب الدولي للموازين والمقاييس الذي يتدبر شؤون التوقيت العالمي المنسق منذ أن نُقلت إليه المسؤولية عن التوقيت الذري الدولي من المكتب الدولي للتوقيت في عام 1988. ويبين في الشكل 7-3 حيدان التوقيت العالمي المنسق عن "التوقيت العالمي 1" للسنوات العشر الأخيرة. وتُلاحظ إضافة دقيقة كبيسة في نهاية عام 2005 وفي 2008، على الترتيب.

لقد تمثل الشكل الأصلي للتوقيت العالمي المنسق، الذي حُول تطبيقه قبل عام 1972، في استدامة مقارنة "التوقيت العالمي 1" بتعديل التعويض عن تخالف التردد وإجراء تعديلات تدريجية مقدارها أجزاء من الثانية لكي تتطابق إشارات التوقيت الذري المبتوثة مع دوران الأرض. فقد اعتُبر أن التطابق الوثيق مع دوران الأرض ضروري للمساعدة على الملاحة الفلكية، لكنه كان يصعب في هذا النظام التنسيق بين محطات البث وتوفير توقيت مرجعي دقيق موحد. فاعتمد النظام الحالي للتوقيت العالمي المنسق المستند إلى الإضافة التدريجية لثوان كبيسة دون التعويض عن تخالف التردد بحيث يتوفر من خلال توقيت وحيد التقريب إلى مبتدأ التوقيت العالمي 1 وفترة ثانية النظام الدولي للوحدات.

## الشكل 3-7

التخالف بين UT1 و UTC بالثواني  
على مدى الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2009



Sat\_time\_freq-07-03

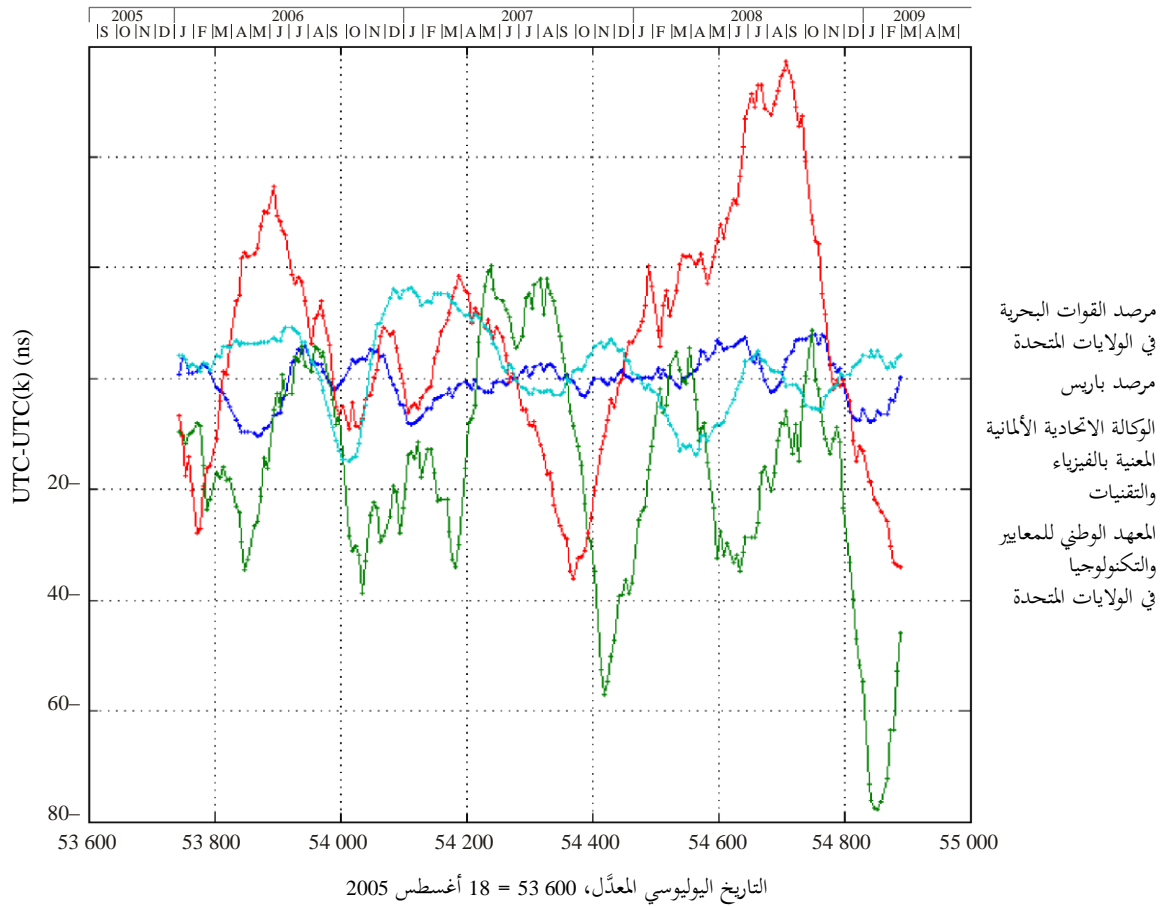
بالنظر إلى أن احتياجات مرافق البث تستلزم توليد وإرسال إشارات من نفس الميقاتيات والمذبذبات التي تؤدي إشارات تدبر التوقيت، فيلزم سلّم توقيت "آني" أو فوري. ولتوفير هذه الإشارات "الآنية" يمكن لمراكز التوقيت أن تعد تمثيلاً محلياً للتوقيت العالمي المنسق شريطة أن يُفاد المكتب الدولي للموازين والمقاييس) بقياسات إشارات الميقاتيات وأن تراعى هذه الإشارات عند تحديد سلّم التوقيت الدولي. ويشار بالرمز (UTC(k)) لتقريب من هذا القبيل إلى التوقيت العالمي المنسق يُجرى في المختبر k الذي يسهم ببيانات لتحقيق التوقيت الذري الدولي والتوقيت العالمي المنسق في المكتب الدولي للموازين والمقاييس. فعلى سبيل المثال يُشار بالرمز UTC (USNO) إلى بيان الزمن بحسب التوقيت العالمي المنسق المتنبأ به آنياً الوارد من مرصد القوات البحرية في الولايات المتحدة الذي يتولى تدبر شؤون هذا التوقيت حالياً.

وثمة تمثيلات توقيتية آنية مشابهة تعدها مراكز توقيت أخرى، مثل مرصد باريس (OP)، والوكالة الاتحادية الألمانية المعنية بالفيزياء والتقنيات (PTB)، والمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا في الولايات المتحدة (NIST)، تسهم في إثراء ما تسجله الميقاتيات من بيانات القياس ذات المعاملات الترجيحية، التي يستخدمها المكتب الدولي للموازين والمقاييس [Quinn, 1991]. واستخدام الرمز UTC بدون أقواس لاحقة تتضمن معلومات محددة يشير إلى القيمة الدولية النهائية التي يكون المكتب الدولي للموازين والمقاييس قد حددها. ويرد عرض لهذه الإجراءات والتعاريف في التوصية ITU-R TF.536-2 - الترميزات التي تستعمل للإشارة إلى سلامة التوقيت. ولا يؤدي التحديد النهائي للتوقيت العالمي المنسق ناتجاً مادياً، وهو يتوفر بعد أجل مقداره أسبوعان إلى أربعة أسابيع على شكل بيان بالتخالف عن التمثيلات التي تدبرها المختبرات المشاركة. وتُنشر قيم التوقيت الذري الدولي والتوقيت العالمي

المنسق بمنشور شهري يصدر عن المكتب الدولي للموازين والمقاييس اسمه *Circular T*. وتُبيّن في الشكل 4-7 الفرق بين القيم  $UTC(k)$  التي حدتها المؤسسات المذكورة أعلاه وقيمة  $UTC$  كما يفاد بها في المنشور *Circular T* الصادر عن المكتب الدولي للموازين والمقاييس.

الشكل 4-7

الفرق  $UTC-UTC(k)$  كما يفاد به في المنشور *Circular T* الصادر عن المكتب الدولي للموازين والمقاييس (القيم اليومية)



## المراجع

- AOKI, S., GUINOT, B., KAPLAN, G. H., KINISHITA, H., MCCARTHY, D. D. and SEIDELMANN, P. K. [1982] The New Definition of Universal Time. *Astron. Astrophys.* **105**, p. 359-361.
- AZOUBIB, J. [2001] A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation. *Report to the 15th meeting of the CCTF*, available on request to the BIPM.
- AZOUBIB, J., GRANVEAUD, M., GUINOT, B. [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales. *Metrologia*, Vol. 13, p. 87-93.
- BERGERON, J. (editor) [1992], Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIB, Proc. 21st General Assembly, Buenos Aires, 1991, Reidel, Dordrecht, p. 41-52.
- BIPM *Com. Cons. Déf. Seconde* **9**, 15 (1980), *Metrologia* **17**, 70, 1981.
- FAIRHEAD, L., BRETAGNON, P. and LESTRADE, J.-F. [1998] The Time Transformation TB – TT: An Analytical Formula and Related Problem of Convention, in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geophysics*, edited by A. K. Babcock and G. A. Wilkins, Kluwer, Dordrecht, p. 419-426.
- FUKUSHIMA, T. [1995] Time Ephemeris. *Astron. Astrophys.* **294**, p. 895-906.
- IRWIN, A. W. AND FUKUSHIMA, T. [1999] A Numerical Time Ephemeris of the Earth. *Astron. Astrophys.* **348**, p. 642-652.
- MOYER, T. D. [1971/1981] Transformation from Proper Time on Earth to Coordinate Time in Solar System Barycentric Space-Time Frame of Reference. *Celestial Mech.* **23**, p. 33-68.
- MULLER, E. A. and JAPPEL, A. (editors) [1977], Trans. Int. Astron. Union, Vol. XVIB, Proc. 16th General Assembly, Grenoble, 1976, Reidel, Dordrecht, p. 60.
- NELSON, R. A., MCCARTHY, D. D., MALYS, S., LEVINE, J., GUINOT, B., FLIEGEL, H. F., BEARD, R. L. and BARTHOLOMEW, T. R. [2001] The Leap Second: Its History and Possible Future. *Metrologia* **38**, p. 509-529.
- NEWCOMB, S. [1895] Astronomical Papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac. Vol. VI, Part I: *Tables of the Sun*, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C, p. 9.
- QUINN, T. J. [July 1991] The BIPM and the Accurate Measurement of Time. *Proc. IEEE*, 79(7), p. 894-905.
- RICKMAND, H. (editor) [2001], Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIVB, Proc. 24th General Assembly, Manchester, 2000, Astron. Soc. Pacific, San Francisco, p. 37-49.
- SEIDELMANN P. K. (editor) [1992] Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. University Science Books, Mill Valley, CA.
- STANDISH, E. M. [1998] Time Scales in the JPL and CfA Ephemerides. *Astron. Astrophys.* **336**, p. 381-384.
- STEPHENSON, F. R. [1997] Historical Eclipses and Earth's Rotation. Cambridge, New York, p. 28.
- The XXIII<sup>rd</sup> International Astronomical Union General Assembly [1997] Resolution B2 On the International Celestial Reference System (ICRS). Kyoto, Japan.
- THOMAS, C. and AZOUBIB, J. [1996] TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- THOMAS, J. B. [1975] Reformulation of the Relativistic Conversion between Coordinate Time and Atomic Time. *Ap. J.* **80**, p. 405-411.

## نصوص لقطاع الاتصالات في الاتحاد الدولي للاتصالات

قطاع الاتصالات الراديوية [1979] الوثائق الختامية للمؤتمر الإداري العالمي للراديو لعام 1979 (WARC-79)، جنيف.

لوائح الراديو، طبعة عام 2008، المجلد 1، الاتحاد الدولي للاتصالات، 2008،

.(<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>)

التوصية ITU-R TF.458-3 - مقارنات دولية بين سلا لم التوقيت الذري،

.(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.458-3-199802-I/en>)

التوصية ITU-R TF.460-6 - بث الترددات المعيارية وإشارات التوقيت،

.(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.460-6-200202-I/en>)

التوصية ITU-R TF.486-2 - استعمال تردد UTC مرجعاً في بث الترددات المعيارية وإشارات التوقيت،

.(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.486-2-199802-I/en>)

التوصية ITU-R TF.535-2 - استخدام المصطلح UTC، (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.535-2-199802-I/en>)

التوصية ITU-R TF.536-2 - ترميزات تستعمل للإشارة إلى سلا لم التوقيت،

.(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.536-2-200305-I/en>)

التوصية ITU-R TF.686-2 - مسرد وتعريف مصطلحات التوقيت والتردد،

.(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>)

التوصية ITU-R TF.767-2 - استخدام النظام العالمي للملاحة الساتلية لأغراض نقل التواقيت العالي الدقة،

.(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.767-2-200103-I/en>)



## الفصل 8

### مراكز التوقيت الوطنية

الصفحة

98	..... المقدمة	1.8
99	..... مخطط تصميم مختبر التوقيت	2.8
100	..... نظام القياس المحلي	3.8
101	..... إمكانية التعقب على المستوى الدولي	4.8
101	..... خدمات نشر التواقيت	5.8
102	..... المراجع	

## 1.8 المقدمة

- كما سبق بيانه، يُحدّد التوقيت العالمي المنسق المكتب الدولي للموازين والمقاييس بحساب معالجة لاحقة يستند إلى بيانات عن زهاء 350 معياراً من معايير التردد الذري يتدبر شؤونها زهاء 60 مختبراً منتشرة في جميع أنحاء العالم. وهذه المختبرات، التي تعمل في كثير من الحالات ضمن نطاق المؤسسات الوطنية لعلم القياس (NMI)، تضطلع أيضاً، بالإضافة إلى إعداد سلّم التوقيت العالمي المنسق على الصعيد المحلي، المعترف به عادة باعتباره المرجح الوطني للتوقيت، بأنشطة في العديد من المجالات التالية إن لم يكن في جميعها:
- إعداد معايير التردد الرئيسية والميقاتيات،
  - المشاركة في تجارب المزامنة الدولية،
  - نشر التوقيت وإشارات التردد المعياري،
  - تطوير التقنيات الدقيقة لتحويل التوقيت والترددات،
  - إجراء البحوث فيما يتعلق بتحديد خصائص الميقاتيات وخوارزميات التوقيت،
  - معايرة معدات التوقيت والتردد.

وثمة بين هذه الأنشطة ما لا يقل عن نشاطين، هما نشاط المشاركة في روابط المزامنة ونشاط النشر، يمكن أن يعاين إجراؤهما في جميع المؤسسات الوطنية لعلم القياس التي وقّعت في عام 1999 على ترتيب الاعتراف المتبادل للجنة الدولية للأوزان والمقاييس (CIPM MRA) بغية التقيد بمتطلباته المتعلقة بتحديد درجة تكافؤ المعايير الوطنية، من خلال المشاركة في أهم عمليات المقارنة (KC)، والاعتراف المتبادل بشهادات المعايرة والقياس التي يجري إصدارها [اللجنة الدولية للأوزان والمقاييس/المكتب الدولي للموازين والمقاييس/المنظمة الدولية لعلم القياس القانوني، 1999].

إن كل مختبر من المختبرات الوطنية لعلم القياس التي تسهم في تقديم بيانات الميقاتيات لتحقيق التوقيت العالمي المنسق في المكتب الدولي للموازين والمقاييس يتولى، بمثابة مهمة أولى، تدبر شؤون التمثيل المحلي للتوقيت الدولي المنسق UTC الذي يدعى UTC(k) ويُبقى عليه متوافقاً وثيق التوافق مع التوقيت العالمي المنسق ويمكن أن يستند إلى بيان ميقاتية رئيسية واحدة أو بيانات مجموعة من الميقاتيات. ومن ناحية أخرى يتعيّن على كل مختبر من مختبرات التوقيت [المختبر k]، ليتمكن من المشاركة في تحقيق التوقيت العالمي المنسق وعمليات المقارنة الرئيسية التي تحددها اللجنة الاستشارية للتوقيت والتردد [تقرير اللجنة الاستشارية للتوقيت والتردد، 2001؛ تقرير اللجنة الاستشارية للتوقيت والتردد، 2006]، أن يُعمل نظام مزامنة واحد على الأقل، يكون في معظم الحالات نظاماً عالمياً لتحديد المواقع، لتزويد المكتب الدولي للموازين والمقاييس على نحو منتظم بالبيان المتمثل في الفرق بين توقيته وتوقيت النظام العالمي لتحديد المواقع [UTC(k) – GPS time]، الذي سيُستخدم لتحقيق المعايير الدولية للتردد والتوقيت (التوقيت الذري الدولي والتوقيت العالمي المنسق)؛ وترد شهرياً في المنشور المسمى Circular T قيم [UTC – UTC(k)] لكي ينشرها المكتب الدولي للموازين والمقاييس في قاعدة بيانات المقارنة الرئيسية من أجل إقامة التكافؤ بين المعايير الوطنية. وثمة مسألة هامة متصلة بهذه المهمة هي تقييم مدى دقة حساب نسبة عدم اليقين في روابط المزامنة المستخدمة، التي تُداول من أجلها بانتظام معدات معايرة من معدات النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) أو نظام الملاحة الساتلي العالمي (GLONASS) أو نظام التحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والتردد (TWSTFT). ويُجري المكتب الدولي للموازين والمقاييس بانتظام حملات لمعايرة معدات النظام العالمي لتحديد المواقع في المختبرات المساهمة.

وإلى جانب ما تستلزمه هذه الأنشطة الرئيسية من معدات، يجب أن يكون لدى المختبر المعني بالتوقيت والترددات أجهزة مخصصة لتوليد ورصد إشارات التوقيت والتردد المعياريين التي يتعيّن توزيعها على الصعيد المحلي أو إرسالها إلى مستعملين في أماكن نائية بوسائل شتى، من قبيل الإرسال على الموجات الكيلومترية (LF) والموجات الديكامترية (HF) المخصصة، والإرسال التلفزيوني، وخطوط الهاتف، وشبكات الحواسيب. وبهذه العناصر، بالإضافة إلى الأجهزة المناسبة لمعايرة معدات التوقيت والتردد فيما يتعلق بمواصفاتها (التوقيت، والتردد وانسياقه، وثبات التردد)، تكتمل سلسلة تتبع المنصوص عليها في ترتيب الاعتراف المتبادل الذي وضعته اللجنة الدولية للأوزان والمقاييس.

وفي البلدان التي أُقيم فيها نظام مختبرات المعايرة المعتمدة، توفر المؤسسات الوطنية لعلم القياس خبراتها أيضاً لهيئة الاعتماد ويمكن أن تشارك في تنظيم مقارنات بين المختبرات على النطاقين الوطني والدولي تتسم بأهمية أساسية في تقييم ما تتمتع به مختبرات الدرجة الثانية المعنية بالمعايرة من قدرات على القياس، وذلك هو المستوى النهائي لسلسلة التتبع المصممة وفق ترتيب الاعتراف المتبادل للجنة الدولية للأوزان والمقاييس.

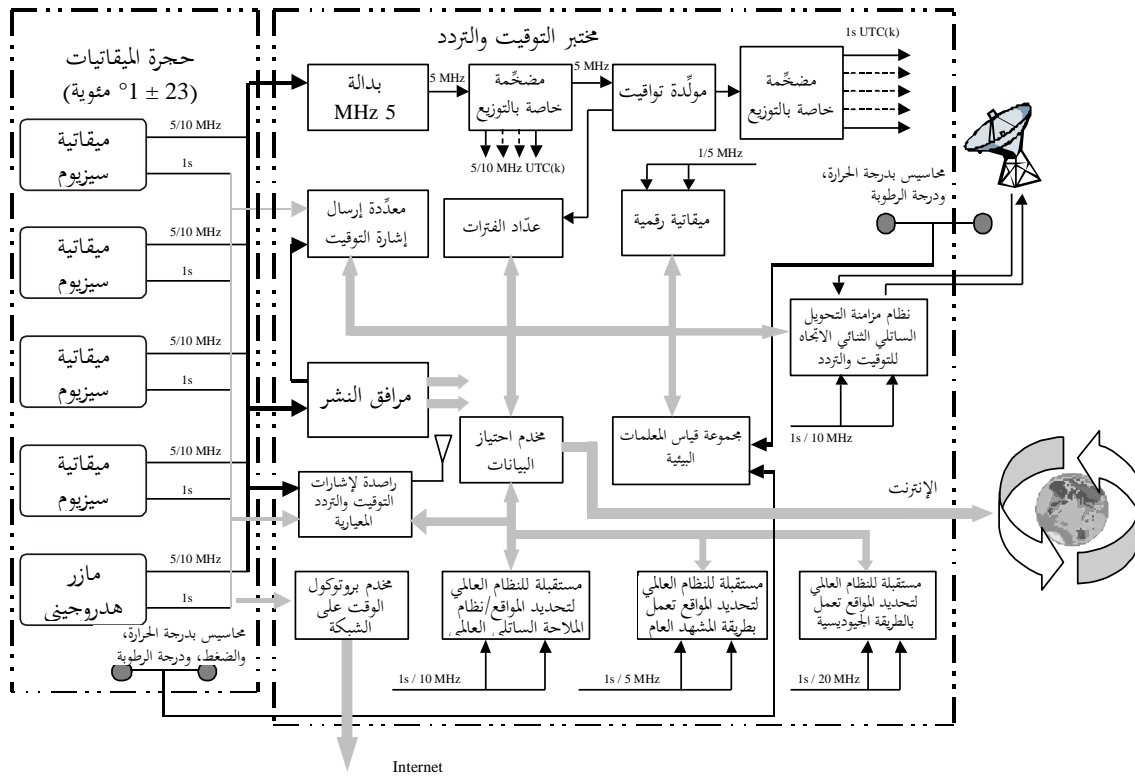
## 2.8 مخطط تصميم مختبر التوقيت

يرد في الشكل 1-8 عرض لنمط معتمد لمخطط تنفيذ الأنشطة الرئيسية التي أُشير إليها، بمعزل عن المعدات المخصصة للبحوث المتعلقة بموارد الترددات المعيارية، ومعايير السيزيوم، ومرافق المعايرة. فجميع المعدات، عدا هوائيات الاستقبال الخاصة بنظم المزامنة، منصوبة في حجرات ذات درجة حرارة ودرجة رطوبة منظمين، ويتوفر فيها نظام إضافي للتكفل باستمرار التزويد بالطاقة، لا يظهر في المخطط؛ وذلك مرفق بالغ الأهمية فيما يخص إمكانية التعويل على الأنشطة في مجال علم القياس.

وتظهر إلى يسار الشكل حجرة منفصلة خاصة بمجموعة الميقاتيات، تُنظم درجة حرارتها عادة بحيث تساوي  $(1 \pm 23)^\circ$  مئوية؛ ويُوصى بالأخذ بهذا الحل إذا لزم الحصول على أفضل وجوه أداء ميقاتيات السيزيوم حيال تغيرات البيئة، لكن يمكن الحصول على نتائج أفضل إذا أُبقي على الميقاتيات في حجرات صغيرة يُتحكم تحكماً صارماً بدرجة حرارتها  $(\pm 0,1)^\circ$  مئوية ودرجة رطوبتها. ويُعتبر هذا الحل مناسباً بصورة خاصة في حالة استخدام المازر الهيدروجيني لتحقيق أقصى قدر من ثبات التردد عند إنشاء التوقيت أو استخدامها بمثابة مذبذبة محلية من أجل معيار السيزيوم الرئيسي.

الشكل 1-8

### المخطط المعتمد لتصميم مراكز التوقيت



ووفقاً للمعمارية المقترحة، تُقترح الاستعانة بعدد من الميقاتيات الذرية لا يقل عن 4 من أجل تحقيق التوقيت العالمي المحلي على نحو مكين؛ مع العلم بأن هذه التشكيلة تتيح أيضاً إبقاء سلم توقيت مطبوع يحسّن تطور التوقيت في الأمد الطويل وإمكانية التعويل عليه. وعلى أية حال يتمثل النهج الأكثر اتّباعاً في انتقاء ميقاتية واحدة من بين مجموعة الميقاتيات، على أساس دقتها وثباتها، واستعمال الميقاتية المنتقاة بمثابة ميقاتية رئيسية لتوليد التوقيت UTC(k) آنياً. ولتحسين إمكانية التعويل على توليد التوقيت، يمكن وضع بدالة أوتوماتية (بدالة 5 MHz مثلاً) بين ميقاتيات السيزيوم ومولدة التوقيت (TSG)، تستقبل عند موارد الدخل فيها جميع الترددات القياسية المتاحة وتتحقق من اتّساعاتها ومن تغير أطوارها، لكشف أي خلل في النظام، وبالتالي إتاحة تفادي حالات الانقطاع في سلم التوقيت.

ويمكن الحصول على معلومات عن حالات الخلل التي قد تقع عن طريق مراقبة بعض المعلومات المادية التي تتوفر قيمها من المنافذ التسلسلية لميقاتيات السيزيوم؛ ويُصحح عندها بمراقبة بعض البيانات التي تظهر في مخدّم المختبر مراقبة دائمة.

وتقيّد بتوصيات اللجنة الاستشارية المعنية بالتوقيت والتردد، CCTF، (القاضية بأن لا يتجاوز حيدان بيان التوقيت العالمي المنسق المحسوب محلياً عن بيان التوقيت العالمي المنسق حداً أعلى مقداره ns 100 (تقرير اللجنة الاستشارية الدولية المعنية بتعريف الثانية، 1993)، ينبغي أن يوضع جهاز تعديل تدريجي ضئيل الطور بين الميقاتية الرئيسية ومولد سلم التوقيت لضبط تردده لكي يتوافق مع تردد التوقيت العالمي المنسق، وفقاً للتصحّيات التي ينشرها المكتب الدولي للموازين والمقاييس في منشوره Circular T، أو لتقييم درجة دقته على محك معيار رئيسي من معايير المختبرات. وتنطوي بعض معايير السيزيوم على جهاز التعديل التدريجي الضئيل الطور ضمنها ولا يتطلب الأمر في حالاتها جهازاً إضافياً يوضع في مسار توليد سلم التوقيت.

وتوزّع الإشارات المعيارية التي تقيّمها الميقاتيات المرجعية في مختبر التوقيت والتردد بواسطة كبلات متحدة المحور عالية الجودة أو خطوط ألياف بصرية.

وتلزم أيضاً لإجراء عمليات القياس الممكن تنبؤها ضمن المختبر مضخّعات لتوزيع الترددات القياسية للتوقيت العالمي المنسق المحسوب محلياً UTC(k) وإشارات الثانية الواحدة (s 1).

### 3.8 نظام القياس المحلي

تكتنف مختبرات التوقيت والتردد المعدات المخصّصة لإنشاء سلم التوقيت وإجراء عمليات المقارنة بين الميقاتيات، ومرافق النشر، ومستقبلات السواتل، ونظم احتياز البيانات، ومعدات الرصد المساعدة.

ويُرمى من إقامة وتشغيل نظام القياس المحلي ضمن المختبر إلى هدفين يتمثلان في توفير بيانات الميقاتيات من أجل حساب سلم التوقيت وإجراء عمليات مقارنة التوقيت والتردد على الصعيد الداخلي بين التوقيت العالمي المنسق المحلي UTC(k) وجميع الميقاتيات ومعايير التردد التي يجري تدبرها في المختبر. وتلزم عادة نظم قياس مخصّصة للقيام بعمليات القياس المعتاد على سواتل النظام العالمي لتحديد المواقع أو غيره من نظم المزامنة المنصوص عليها من أجل إمكانية التعقب على الصعيد الدولي.

ويتألف نظام القياس المحلي من عدّاد للفترات (TIC) عالي الوضوح يقيس فيما يخص زمناً معيّناً الاختلافات بين الميقاتيات بمعدّل تكرار مقداره ثانية واحدة ويعيد الدورة كل ساعة. إن الحل المثالي فيما يتعلق بوثيرة القياس يتوقف إلى حد كبير على الأنشطة التي يجريها المختبر. ولما كانت دقة القياس متصلة بأساس التوقيت فإن عدّاد الفترات يُزوّد بالتردد المرجعي الخارجي للتوقيت العالمي المنسق المحلي UTC(k). وتسهم في عدم اليقين الذي يشوب عمليات مقارنة الميقاتيات عوامل أخرى مثل وقت الإطلاق، وخطأ التكمية، والتأخر التفاضلي لقناة الانطلاق وقناة التوقف. ولذا يجب القيام على نحو منتظم بمعايرة دقيقة لتقييم استقرار نظام القياس. ويجب أن تحال إلى جهاز حساب UTC(k) جميع القياسات التي يجريها عدّاد الفترات، بينما تُرسل عن طريق معدّدة إرسال إشارة التوقيت إشارات "التوقف" الآتية من شتى الميقاتيات. وتوفّر ميقاتية رقمية بيانات الوقت التي يتعيّن أن تُقرن بكل قياس. ويراقب عمليات القياس حاسوب يُخزن فيه جميع النتائج الآتية من عدّاد الفترات، ومن نظم المزامنة، ومن رصد البيئة. كما يمكن إدارة الوصل الخارجي بالمكتب الدولي للموازين والمقاييس وسائر المؤسسات الوطنية لعلم القياس عبر مخدّم شبكي مخصّص يتيح النفاذ الآمن إلى الإنترنت.

## 4.8 إمكانية التعقب على المستوى الدولي

تستند روابط مقارنة التوقيت المعتاد استخدامها في مختبرات التوقيت، لإرساء إمكانية تعقب التوقيت العالمية المنسقة المحلية UTC(k) بالمقارنة بالمراجع الدولية لتوقيت وتردد UTC (التوقيت العالمي المنسق) و TAI (التوقيت الذري الدولي)، إلى مستقبلات للنظام العالمي لتحديد المواقع تعمل وفق متطلبات المكتب الدولي للموازين والمقاييس والتحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والتردد (TWSTFT) بواسطة سواتل الاتصال. ويتيح رابط القياس نفسه إسهام الميقاتيات الذرية الجاري تدبرها في كل مختبر في حساب هذه المقادير المرجعية. وقد تمت ترقية معدات تحويل التوقيت في معظم المختبرات، ويستعاض بتقنيات مزمنة أخرى عن النظام العالمي الأساسي لتحديد المواقع مثل استقبال ما تبثه سواتل النظام العالمي لتحديد المواقع ونظام الملاحة الساتلي العالمي بمستقبلات متعددة القنوات، يتسم كثير منها بوظيفة استقبال التردد المزدوج، والأداء المزيد للتحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والتردد أو قياسات طور حاملات النظام العالمي لتحديد المواقع بمستقبلات من النوع الجيوديسي. وتتسم التقنيتان الأخيرتا الذكر بقيمة خاصة من حيث المتطلبات الأكثر صرامة على صعيد عمليات مقارنة التردد والتوقيت، فيما يخص المقادير الأساسية المشتركة بين القارات أيضاً. ويُحتاج إلى تلقّي جميع هذه الأجهزة مراجع التوقيت والتردد الخارجية للنظام العالمي المنسق المحلي UTC(k)، ويتعيّن إيلاء عناية خاصة لاختيار المكان الذي تُنصب فيه نظم هوائياتها ولتنفيذ عمليات توصيل الإشارات مع مختبر التوقيت والتردد.

وفي حالة أجهزة النظام العالمي لتحديد المواقع وأجهزة نظام الملاحة الساتلي العالمي تُخزن بيانات القياس عادة ضمن المستقبلات وتحوّل فيما بعد تلقائياً إلى نظام احتياز البيانات، بينما قد يلزم نظام قياس مساعد في حالة التحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والتردد. ولتقييم مدى دقة أي رابط من روابط المزامنة ينبغي أن تشارك المستقبلات المرجعية لمختبر التوقيت في حملات المعايرة الدورية، التي ينظمها المكتب الدولي للموازين والمقاييس أو تنظمها المنظمات الإقليمية المعنية بعلم القياس من خلال تعميم مستقبلات معايرة من مستقبلات النظام العالمي لتحديد المواقع، بغية رصد ثبات زمن تأخر المستقبلات المستخدمة في المختبر. وفي حالة التحويل الساتلي الثنائي الاتجاه للتوقيت والتردد يمكن أيضاً أن يفيد في تحقيق الغرض استعمال محطة محمولة من المطارييف ذات الفتحات البالغة الصغر ومحفزة ساتلية. ويرد في المنشور Circular T وصف كامل لعدم اليقين الذي يعتري الروابط المستخدمة في إنشاء التوقيت العالمي المنسق، والمعلومات المتعلقة بعمليات معايرتها؛ وقد ورد في الشكل 7-2 من القسم السابق مقتطف من الجدول الذي ترد فيه هذه المعلومات. وحالياً يبلغ مستوى عدم اليقين الذي يمكن التوصل إليه ما يقارب بضع نانوثوان.

## 5.8 خدمات نشر التوقيت

يمكن أن يُعمل مركز التوقيت الوطني، بغية تلبية احتياجات المستعملين في المجال العلمي وفي مجال الصناعة وتزويد المجتمع الوطني بالمعلومات القانونية المتعلقة بالتوقيت، عدة خدمات للتوقيت ونشر التوقيت استناداً إلى بث مخصّص على الموجات الميريامترية والموجات الكيلومترية والموجات الديكامترية والموجات التلفزيونية، وكذلك على السواتل وعلى الشبكات الهاتفية وعلى الإنترنت.

ويمكن العثور في كتيب قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد (اختيار أنظمة الترددات والتوقيت الدقيقة واستعمالها) على معلومات وافية عن التقنيات المستعملة ومقادير عدم اليقين التي يمكن الحصول عليها من المستعملين، بينما ترد قائمة محيّنة ببث إشارات التوقيت ومعايير التردد في سلسلة التوصيات ITU-R TF (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF/en>). كما يرد في التقرير السنوي المتعلق بأنشطة التوقيت الصادر عن المكتب الدولي للموازين والمقاييس عرض لإشارات التوقيت وخدمات نشر التوقيت.

وقد مُثّل هذا النوع من النشاط، في المخطّط الأطري الوارد في الشكل 8-1، بإطارين، إطار "مرافق النشر" وإطار "مخدم بروتوكول الوقت على الشبكة"؛ وللتوثيق لإمكانية تعقب مستعملي هذه الخدمات وصولاً إلى التوقيت العالمية المنسقة المحلية UTC(k)، يجب أن يُعمل المختبر نظاماً ما من نظم الرصد وينبغي أن تتاح للجمهور دورياً، بنسخ مطبوعة أو نسخ إلكترونية، مقادير حيدان التوقيت أو التردد ومقادير عدم اليقين الذي يعتري إشارات التوقيت والتردد المنشورة.

كما يمكن أن يوفر مركز التوقيت إمكانية التعقب وصولاً إلى معيار وطني من خلال نشر نتائج عمليات القياس المجرأة على النظام العالمي لتحديد المواقع، التي يمكن اعتبارها معياراً للتحويل، لتمكين مختبرات الدرجة الثانية من أن تحيل إلى مراجع التوقيت الدولية معايرها المحلية، وهي في معظم الحالات مذبذبات مضبوطة بالنظام العالمي لتحديد المواقع.

## المراجع

BIPM Annual Report on Time Activities, Bureau International des Poids et Mesures, Available upon request from the BIPM.

CCDS – Report on the 14<sup>th</sup> Meeting, 1993.

CCTF – Report of the 15<sup>th</sup> Meeting, June 2001, (<http://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>).

CCTF – Report of the 17<sup>th</sup> Meeting, 2006, (<http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CCTF17.pdf>).

CIPM/BIPM/OIML – Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Paris, October 1999.

## الفصل 9

### المفاعيل النسبوية في تحويل التواقيت والترددات ونشرها

#### الصفحة

104	..... المجال المكاني - الزماني	1.9
104	..... مبدأ النسبية	2.9
105	..... الممتدة المسافية	1.2.9
107	..... كمون جاذبية الأرض	2.2.9
109	..... تمدد الزمن	3.2.9
110	..... الانزياح التجاذبي نحو الأحمر	4.2.9
111	..... تحويل التواقيت بنقل الميقاتيات	5.2.9
112	..... نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز	6.2.9
113	..... نظام الإحداثيات الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض	7.2.9
116	..... الميقاتية المحمولة على متن ساتل	3.9
120	..... تحويل التوقيت بإشارة كهرمغناطيسية	4.9
121	..... نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز	1.4.9
124	..... نظام الإحداثيات الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض	2.4.9
125	..... الرابط بين السواتل	3.4.9
127	..... ظاهرة دوبلر النسبوية	4.4.9
129	..... الخلاصة	5.9
129	..... المراجع	

## 1.9 المجال المكاني - الزماني

تقوم نظرية المكان والزمان والتجاذب بحسب النظرية العامة للنسبية على مفهوم مجال مكاني - زماني رماني من الشكل:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j \quad (1-9)$$

حيث:

تأخذ المؤشرات بالأحرف اليونانية القيم 0، 1، 2، 3

تأخذ المؤشرات بالأحرف اللاتينية القيم 1، 2، 3.

ويعني تكرار مؤشر (واحد في وضعية معلاة وواحد في وضعية مدناة) عملية جمع وفقه. ويتمثل الشيء الرياضي الأساسي في الممتدة المسافية  $g_{\mu\nu}$ ، التي تمثل مركباتها دالات للإحداثيات  $(c t, x^i) = x^\alpha$  وهي متناظرة في المؤشرين  $\mu, \nu$  (أي أن  $g_{\nu\mu} = g_{\mu\nu}$ ). ويعرّف مقلوب الممتدة المسافية  $g^{\mu\nu}$  بالعلاقة  $g^{\mu\alpha} g_{\alpha\nu} = \delta^\mu_\nu$  حيث  $\delta^\mu_\nu = 1$  إذا كان  $\mu = \nu$ ، وإلا فهي تساوي الصفر). وبحسب الإشارات المصطلح عليها هنا، لدينا  $g_{00} < 0$ .

إن الزمن هو الكمية الأساسية الوحيدة في قياس الطول والوقت؛ فالطول مفهوم مشتق. وبالتالي فإن الميقاتيات والإشارات الضوئية هي وسائل القياس الأساسية الوحيدة. وهناك طريقتان مختلفتان لتحويل الوقت بين ميقاتيتين إحداها بعيدة عن الأخرى:

1 نقل ميقاتية وسيطة قابلة للحمل؛

2 إرسال إشارة كهرومغناطيسية.

وفيما يخص النقل النسوي للزمن، يتعين التمييز بين الوقت الإحداثي والوقت الذاتي. فالوقت الإحداثي  $t$  لحادث ما هو نفسه في كل مكان من النظام الإحداثي المكاني - الزماني. أما الوقت الذاتي  $\tau$  فهو البيان الذي تسجله الميقاتية في إطار سكونها الخاص. فالوقت الذاتي يتوقف على حال حركة الميقاتية وموضعها في حقل الكمون التجاذبي. وفيما يخص الميقاتية المنقولة يكون المجال المكاني - الزماني:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \equiv -c^2 d\tau^2 \quad (2-9)$$

وفي حالة الإشارة الكهرومغناطيسية يحقق المجال المكاني - الزماني الشرط التالي:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0 \quad (3-9)$$

## 2.9 مبدأ النسبية

وفقاً للنظرية الخاصة للنسبية، التي صاغها آينشتاين في عام 1905، يجب أن يكون لقوانين الفيزياء الشكل ذاته في كل إطار إسنادي حامل. وتُعرف هذه المسلّمة بمبدأ النسبية. وعليه فإنه، بالإضافة إلى قوانين الميكانيك، ينبغي أن تكون معادلات مكسويل للحقل الكهرومغناطيسي صالحة في جميع الأطر الحاملة. وقد تم بناءً على معادلات مكسويل التنبؤ بأمر أساسي هو وجود موجات كهرومغناطيسية تنتشر في الفراغ بسرعة الضوء، تعطى على نحو فريد بالمعادلة:

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

حيث:

$\epsilon_0$  و  $\mu_0$ : ثابتان كهربائيان يمثلان نفاذية الفضاء الطليق وسماحيته، على الترتيب.

وعليه فإن سرعة الضوء  $c$  يجب أن تكون هي ذاتها في كل إطار حامل.

وفي عام 1908 أدرك منكوسكي أنه يمكن التعبير عن هذه الخاصة بعدم تغاير المجال المكاني - الزماني الرباعي الأبعاد، ذي الشكل التالي:



$$(4-9) \quad ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = -c^2 dt'^2 + dx'^2 + dy'^2 + dz'^2$$

بحيث إن المعادلة  $0 = ds^2$  فيما يخص إشارة ضوئية، تمثل سطح موجة كروياً متوسعاً في الإطار الخامل  $S(ct, x, y, z)$  أو في الإطار الخامل  $S'(ct', x', y', z')$  وتعطى معاملات التفاضلات الإحداثية بمسافية منكوسكي  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} \equiv \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ .

أما التحويل الإحداثي الذي يحافظ على عدم تغاير هذه العبارة فهو تحويل لورنتس. فإذا كانت  $S'$  تتحرك بسرعة  $V$  على امتداد محور الإحداثية  $x$  فيكون تحويل لورنتس كما يلي:

$$(5-9) \quad \begin{aligned} x &= \gamma(x' + Vt'); & y &= y'; & z &= z' \\ t &= \gamma(t' + Vx'/c^2) \end{aligned}$$

حيث

$$\gamma \equiv (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$$

ويكون الحدثان مترامين إذا تساوى وقتاهما الإحداثيان. وعليه فإن الحد الثاني في تحويل الوقت الإحداثي يستتبع نسبية التزامن: فالحدثان المترامين في  $S$  ليسا بالضرورة مترامين في  $S'$ .

ويقضي مبدأ أساسي من مبادئ النسبية العامة، بيّنه آينشتاين في عام 1916، بأن "قوانين الفيزياء يجب أن يكون لها من طبيعتها ما يجعلها تنطبق على النظم الإسنادية في أي نوع من أنواع الحركة". وعليه ففي النسبية العامة يكون التحويل الإحداثي بين أي إطارين إسناديين اعتباطياً ويأخذ المجال المكاني-الزماني شكلاً تفاضلياً تربيعياً تشكل مكوناته المسافية دالات تابعة للإحداثيات. وبفعل عدم تغاير المجال المكاني-الزماني إذ يخضع للتحويل الإحداثي الاعباطي  $x^\alpha \rightarrow x^\alpha(x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$ ، فإنه يساوي:

$$(6-9) \quad ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g'_{\alpha\beta} dx'^\alpha dx'^\beta$$

ويكون تحويل التفاضلات الإحداثية:

$$(7-9) \quad dx^\mu = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} dx'^\alpha$$

وعليه ينتج عن التعويض وفق هذه المعادلة الأخيرة في التعبير الذي يعطي  $ds^2$  أن تحويل الدالة المسافية هو:

$$(8-9) \quad g'_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\beta} g_{\mu\nu}$$

إن التفاضلات الإحداثية والدالة المسافية هي أمثلة على مقادير معينة تدعى "ممتدات". والممتدة في أي نظام إحداثي تتميز بقانون تحويلها إلى نظام إحداثي جديد. والتحويل خطي ومتجانس بحيث إنه إذا كانت المعادلة الممتدة صالحة في نظام إحداثي فإنها تكون صالحة أيضاً في أي نظام إحداثي آخر. وعليه فإن عدم تغاير القوانين الفيزيائية من إطار إلى إطار آخر، الذي يقول به مبدأ النسبية العامة، يتحقق بالتعبير عن المعادلات بدلالة ممتدات.

### 1.2.9 الممتدة المسافية

تتحدد الخواص الهندسية للفضاء المكاني-الزماني بممتدة ريمان  $R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta}$ ، التي تتألف برمتها من الممتدة المسافية ومشتقها الأول والثاني. والشرط اللازم والكافي لوجود تحويل للإحداثيات يحوّل مسافية معينة  $g_{\mu\nu}$  لتأخذ شكل مسافية منكوسكي  $\eta_{\mu\nu}$  للنسبية الخاصة هو أن تكون ممتدة ريمان مساوية للصفر. وفي هذه الحالة يكون الفضاء المكاني-الزماني مسطحاً. أما عند وجود المادة فإن الفضاء المكاني-الزماني يكون منحنياً ولا يمكن اختزال المسافية لتأخذ شكل مسافية منكوسكي في كل هذا الفضاء بأي تحويل إحداثي. لكن يمكن دائماً إيجاد نظام إحداثيات، مثل بإطار إسنادي حر السقوط، تنعدم فيه المشتقات الأولى للمسافية عند نقطة منتقاة وتتطابق الدالة المسافية مع مسافية منكوسكي في جوار النقطة المعنية. وهذه الخاصة متضمنة في مبدأ التكافؤ، الذي يقضي بأن الإطار الإسنادي الحر السقوط يكافئ محلياً الإطار الإسنادي الخامل في ظل عدم وجود الجاذبية. ويمكن التعبير عن ذلك بصيغة

بديلة بالقول بأن هذا المبدأ يقضي بأن الإطار الإسنادي غير الخامل لا يمكن تمييزه محلياً عن الإطار الإسنادي الساكن في حقل تجاذبي. ويستند مبدأ التكافؤ إلى المعاينة التجريبية التي مفادها أن جميع الأجسام تسقط بنفس التسارع، بصرف النظر عن تكوينها أو عن بنيتها الداخلية، ويعبر عنه في نظرية نيوتن عن التجاذب بتكافؤ الكتلة الحاملة والكتلة التجاذبية.

وتحدد الممتدة المسافية، لتوزيع معين للمادة، بمعادلة حقل آينشتاين التالية:

$$(9-9) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

حيث

$$R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} = R_{\mu\nu} \quad \text{ممتدة ريكي، التي يُحصل عليها بقصر (جمع) ممتدة ريمان حسب مؤشريها الأول والثالث}$$

$$g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} = R \quad \text{الانحناء السلبي P}$$

$$T_{\mu\nu} \quad \text{ممتدة الطاقة-العزم، و } G \text{ هو ثابت نيوتن المتعلق بالجاذبية. وفي الفضاء الطليق تُختزل معادلة الحقل إلى}$$

$$0 = R_{\mu\nu}$$

بيد أنه لا ينتج عن هذه المعادلة الشرط الأشد  $0 = R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta}$  الذي يعني أن الفضاء المكاني-الزماني مسطح.

وفي حدود التقريب الأول، الذي تقارب درجة دقته  $1/c^2$ ، تختزل معادلة حقل آينشتاين إلى معادلة بواسون  $\nabla^2 U = -4\pi G \rho$  حيث  $U$  هو الكمون التجاذبي بحسب نيوتن و  $\rho$  هو كثافة المادة.

وفي الفضاء الطليق تتحول معادلة الحقل إلى معادلة لابلاس  $\nabla^2 U = 0$ .

وفيما يخص تحليل نقل الميقاتية وفق هذا التقريب، تكون الدالة المسافية في الأطر الإسنادية الحاملة الأرضية المركز (ECI):

$$(10-9) \quad -g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = \delta_{ij}$$

حيث

$$\delta_{ij} \quad \text{هي دلتا كرونيكر.}$$

وبتحويل الإحداثيات تغدو الدالة المسافية في إطار إسنادي دائر أرضي المركز ثابت بالنسبة إلى الأرض (ECEF):

$$(11-9) \quad -g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = \delta_{ij}$$

حيث

$$\boldsymbol{\omega} \quad \text{السرعة الزاوية لدوران الأرض}$$

$$W \equiv U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 \quad \text{كمون جاذبية الأرض.}$$

ولتحليل الإشارات الضوئية يتعين أن يؤخذ بالحدود في  $g_{ij}$  بحسب نفس درجة التقريب المأخوذ بها وفقها في  $g_{00}$ . وعليه فإن لدينا فيما يخص الإشارات الضوئية في الإطار الإسنادي الخامل:

$$(12-9) \quad -g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij}$$

وفي الإطار الإسنادي الدائر:

$$(13-9) \quad -g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij}$$

إن هذه التقريبات لمكونات الممتدة المسافية كافية فيما يخص المشكلات العملية التي تتعلق بالميقاتيات والإشارات الضوئية.

**الملاحظة 1 -** تبعاً لتوصية صادرة عن الاتحاد الفلكي الدولي، تعتبر إشارة الكمون التجاذبي بحسب نظرية نيوتن إشارة إيجابية.

## 2.2.9 كمون جاذبية الأرض

إن كمون جاذبية الأرض  $U$  عند المسافة الشعاعية  $r$ ، وخط العرض الزاوي بالنسبة إلى مركز الأرض  $\phi$ ، وخط الطول الزاوي بالنسبة إلى مركز الأرض  $\lambda$ ، هو حل معادلة لابلاس  $\nabla^2 U = 0$  الذي يمكن التعبير عنه على شكل متوالية منشورة في التوافقيات الدائرية كما يلي:

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right\}$$

$$(14-9) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_n(\sin \phi) - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) (J_{mn} \cos m\lambda + K_{mn} \sin m\lambda) \right\}$$

حيث

 $G$ : ثابت الجاذبية $M$ : كتلة الأرض $R$ : قطر دائرة خط استواء الأرض $P_n(\sin \phi)$ : متعددات حدود لجاندر من الدرجة  $n$  $P_{nm}(\sin \phi)$ : دوال لجاندر ذات الصلة من الدرجة  $n$  والرتبة  $m$ .

إن الحد الأول هو الكمون لأرض كروية. أما الحدود الخاضعة للجمع وفق مؤشر واحد فتدعى التوافقيات النطاقية وهي مرتبطة بتفريطح الأرض. وأما الحدود الخاضعة للجمع وفق مؤشرين فتدعى التوافقيات التشابكية وهي مرتبطة بالشكل الناقصي لخط استواء الأرض. وإذا كان الاقتصار على أخذ توافقيات التفريطح الأولى بالاعتبار كافياً فيمكن التعبير بصورة تقريبية عن الكمون التجاذبي بالمعادلة:

$$U(r, \phi) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \frac{1}{2} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] \quad (15-9)$$

حيث

 $J_2$ : معامل درجة التفريطح الدنيا

$$P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1)$$

وفيما يخص القياسات المتعلقة بالأرض يتعين احتساب كمون جاذبية الأرض وكمون دوران الأرض. إن مجموع كمون الجاذبية  $U$  وكمون الدوران  $\frac{1}{2} (\omega \times \mathbf{r})^2 = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi$  هو كمون الأرض:

$$W = U + \frac{1}{2} (\omega \times \mathbf{r})^2 = U + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (16-9)$$

ما يمثل حلاً للمعادلة  $\nabla^2 W = 4\pi G \rho + 2\omega^2$  حيث  $\omega$  هي السرعة الزاوية لدوران الأرض. فإذا اقتصرنا على الإبقاء على تصحيح التفريطح الأول فيمكن التعبير عن كمون الأرض بالمعادلة:

$$W(r, \phi) \approx \frac{GM}{r} \left[ 1 + \frac{1}{2} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (17-9)$$

ويسمى السطح ذو الكمون الأرضي الثابت مجسم الأرض، ويقارب مستواه متوسط مستوى البحر مقارنة وثيقة. ولما كان الكمون الأرضي  $W_0$  على سطح مجسم الأرض ثابتاً فيمكن تقييمه على خط الاستواء وهو يُعطى بالمعادلة:

$$(18-9) \quad W_0 \equiv U_0 + \frac{1}{2}(\omega \times \mathbf{R})^2 \approx \frac{GM}{R} \left(1 + \frac{1}{2}J_2\right) + \frac{1}{2}\omega^2 R^2$$

حيث

$U_0$ : هو الكمون التجاذبي بحسب نظرية نيوتن على مجسم الأرض في الموضع  $\mathbf{R}$ .

إن ثابت جاذبية الأرض، في نموذج الأرض وفق النظام الجيوديسي العالمي المراجع في عام 1984 (WGS-84) (التقرير التقني للوكالة الوطنية للتصوير وإعداد الخرائط في الولايات المتحدة (NIMA)، 1997)، يساوي:

$$GM = 3.986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

مع العلم بأن شعاع دائرة خط استواء الأرض هو  $R = 6\,378\,137,0 \text{ m}$  والسرعة الزاوية لدوران الأرض هي  $\omega = 7,292\,1150 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ .

ويشار أيضاً إلى أن سرعة الضوء تبلغ على وجه الدقة 299 792 458 متراً في الثانية.

**الملاحظة 1 -** بهذه القيمة يُعرّف المتر في النظام الدولي للوحدات (SI). إن سماحية الفضاء الطليق هي  $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$  مع العلم بأن نفاذية الفضاء الطليق هي  $\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  بحسب تعريف الأمبير. ولما كان  $c$  و  $\epsilon_0$  الآن ثابتين بالتعريف فإنهما لم يعودا يخضعان لقياس تجريبي.

ويبلغ معامل تفلطح الأرض من الدرجة الثانية،  $J_2$ ، زهاء 0,001 0826.

وعليه فإن:  $W_0 = 6,2637 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$  و  $W_0 / c^2 = 6,9693 \times 10^{-10}$  على وجه التقريب.

والتسارع المحلي بفعل الجاذبية  $g$  هو ميل كمون الأرض.

وعليه فإن:

$$(19-9) \quad \mathbf{g} = \nabla W = \nabla U - \omega \times (\omega \times \mathbf{r})$$

ويقارب fark كمون الأرض على الارتفاع  $h$ :  $\Delta W \approx \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{r}$

إن مقدار التسارع بفعل جاذبية الأرض المفلطحة الدائرة يُعطى في شكل مُغلق بقانون سومغليانا للجاذبية [Heiskanen and Moritz, 1967]:

$$(20-9) \quad g = g_0 \frac{1 + k \sin^2 \phi'}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi'}}$$

حيث:

$\phi'$ : خط العرض الجيوديسي

$e^2 = f^2 - 2f$ : مربع الاختلاف المركزي الأول

$f$ : التسطح

$g_0$ : قيمة  $g$  عند خط الاستواء.

ويرتبط خط العرض الجيوديسي  $\phi'$  وخط العرض بالنسبة إلى مركز الأرض  $\phi$  بالمعادلة الدقيقة التالية:

$$\tan \phi = (1 - f)^2 \tan \phi' = (1 - e^2) \tan \phi'.$$

مع العلم بأنه، حسب نموذج الأرض وفق النظام الجيوديسي العالمي المراجع في عام 1984 (WGS-84):

$$k = 0,001\,931\,852\,652\,41$$

$$1/298,257\,223\,563 = f \quad -$$

$$0,006\,694\,379\,990\,14 = e^2 \quad -$$

$$9,780\,325\,3359 = g_0 \quad -$$

الملاحظة 1 - تعتبر  $\Delta W$ ، من باب الاصطلاح، سالبة عندما تكون الميقاتية فوق مجسم الأرض.

### 3.2.9 تمدد الزمن

في النسبية الخاصة يعطى بالمعادلة التالية المجال المكاني-الزماني لميقاتية تتحرك بسرعة مقدارها  $v$  بالنسبة إلى إطار إسنادي حامل:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 (1 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (21-9)$$

حيث:

$$v^2 = \delta_{ij} (dx^i/dt)(dx^j/dt) \text{ ولدينا فيما يخص ميقاتيتين تتحركان بالسرعتين } v_1 \text{ و } v_2$$

$$d\tau_1 = \sqrt{1 - v_1^2/c^2} dt \quad (22-9)$$

و

$$d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} dt \quad (23-9)$$

ولما كان مجالا الزمن الذاتي  $d\tau_1$  و  $d\tau_2$  يقابلان نفس مجال الزمن الإحداثي  $dt$  فإن:

$$\frac{d\tau_2}{d\tau_1} = \sqrt{\frac{1 - v_2^2/c^2}{1 - v_1^2/c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (24-9)$$

ولذا فإن الميقاتية الأعلى سرعة بالنسبة إلى إطار إسنادي حامل ستتحرك حركة أبطأ من حركة الميقاتية الأدنى سرعة بالنسبة إلى الإطار الإسنادي الحامل.

$$\text{وإذا كان } v_1 = 0, \text{ فإن } d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} d\tau_1 \text{ وبالعكس } d\tau_1 = d\tau_2 / \sqrt{1 - v_2^2/c^2}.$$

وعليه فإن مجال الزمن الذاتي  $d\tau_1$  الذي سجلته الميقاتية الساكنة أطول من مجال الزمن الذاتي  $d\tau_2$  الذي سجلته الميقاتية المتحركة. ويطلق على هذه الظاهرة اسم التمدد.

وقد تم على نحو مستفيض التحقق من ظاهرة تمدد الزمن وذلك بقياس أعمار الجسيمات الأولية. فعلى سبيل المثال يبدو أن الميونات العالية السرعة الناتجة عن الأشعة الكونية في الطبقة العليا من الغلاف الجوي تعمّر، كما تدل عليه أطوال مساراتها قبل أن تفنى، أعماراً أطول من أعمار الميونات الساكنة المقاسة بالوقت الذاتي في المختبر [Frish and Smith, 1963].

كما يُلاحظ التمدد في نقل الميقاتيات. لاحظ الفرق بين الوقت الذاتي  $\tau_2$  الذي تسجله الميقاتية المحمولة بسرعة نسبية مقدارها  $v'$  حول خط استواء الأرض الدائرة والوقت الذاتي  $\tau_1$  الذي تسجله ميقاتية مرجعية تبقى في مكان واحد على خط الاستواء. فبالنسبة إلى الإطار الإسنادي الحامل تكون سرعة الميقاتية المرجعية:

$$v_1 = \omega R,$$

وسرعة الميقاتية المنقولة:

$$v_2 = \omega R + v'$$

حيث:

$\omega$ : السرعة الزاوية لدوران الأرض

$R$ : شعاع دائرة خط استواء الأرض.

وتكون القيمة التقريبية للفرق بين الوقتين الذاتيين (وقت الميقاتية المنقولة - وقت الميقاتية المرجعية):

$$(25-9) \quad \tau_2 - \tau_1 \approx -\frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \tau_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} v'^2 + \omega R v' \right) \tau_1 = -\frac{2\pi R}{c^2} \left( \frac{1}{2} |v'| \pm \omega R \right)$$

فعندما تكون الرحلة باتجاه الشرق، تكون السرعة النسبية  $v'$  إيجابية ويتضايّف الحدان، لكن عندما تكون الرحلة باتجاه الغرب فإن السرعة النسبية تكون سالبة وينزع الحدان إلى أن يلغى أحدهما الآخر. وفي إطار الأرض الدائر، يمثل الحد الثاني إلى اليمين أثر سنّاك. وفي عام 1971 بيّن جوزيف هافيل وريتشارد كيتنغ [Pound and Rebka, 1960] تمدد الزمن لأول مرة بمقياسيات ذرية كبيرة. لقد حملا مجموعة من أربع مقياسيات من مقياسيات السيزيوم حول العالم على متن طائرة نفّاثة تجارية، مرة في اتجاه الشرق ومرة في اتجاه الغرب فتحققا كميّاً من لاتناظرية فروق البيانات التي سجلتها الميقاتيات في الرحلة في اتجاه الشرق وفروق البيانات التي سجلتها في الرحلة في اتجاه الغرب.

#### 4.2.9 الانزياح التجاذبي نحو الأحمر

في النسبية العامة يُحسب المجال المكاني-الزمني للميقاتية بالمعادلة:

$$(26-9) \quad ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2$$

وفي الحالة الخاصة التي تكون فيها الميقاتية ساكنة، لدينا  $dx^i = 0$  و  $d\tau = \sqrt{-g_{00}} dt$ .

إذا كانت لدينا مقياسيتان  $A$  و  $B$  ساكنتان في حقل كمون تجاذبي في النقطتين  $x_A$  و  $x_B$  فإن مجالي وقتيهما الذاتيين هما:

$$(27-9) \quad d\tau_A = \sqrt{-g_{00}(x_A)} dt$$

و

$$(28-9) \quad d\tau_B = \sqrt{-g_{00}(x_B)} dt$$

ولما كان مجالا الزمنين الذاتيين  $d\tau_B$  و  $d\tau_A$  يقابلان نفس مجال الزمن الإحداثي  $dt$  فإن:

$$(29-9) \quad \frac{d\tau_B}{d\tau_A} = \frac{\sqrt{-g_{00}(x_B)}}{\sqrt{-g_{00}(x_A)}}$$

وإذا كان الفرق بين ارتفاعي النقطتين اللتين توجد فيهما الميقاتيتان  $r_B - r_A = h$  في حقل كمون جاذبية الأرض الدائرة فإن:

$$(30-9) \quad -g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 = 1 - 2W/c^2$$

و

$$(31-9) \quad \frac{d\tau_B}{d\tau_A} \approx \frac{1 - W_B/c^2}{1 - W_A/c^2} \approx 1 - \frac{1}{c^2} (W_B - W_A) = 1 - \frac{\Delta W}{c^2} \approx 1 + \frac{gh}{c^2}$$

حيث:

$W$ : هو الكمون الأرضي، مع العلم بأن  $g$  هو التسارع المحلي بفعل الجاذبية؛

$$gh \approx \Delta W$$

وبالتالي يكون الفرق بين الوقتين الذاتيين اللذين تسجلهما الميقاتيتان:

$$(32-9) \quad \tau_B - \tau_A = -\frac{1}{c^2} \Delta W \quad \tau_A \approx \frac{1}{c^2} gh \tau_A$$

فبسبب الفرق في الكمون التجاذبي، سيكون الوقت الذاتي الذي تسجله الميقاتية  $B$  الموجودة في موضع أعلى (أي في نقطة ذات كمون تجاذبي أضعف) أطول من الوقت الذاتي الذي تسجله الميقاتية  $A$  الموجودة في موضع أدنى (أي في نقطة ذات كمون تجاذبي أقوى). وإذا أرسلت الميقاتية  $A$  إشارة دورية إلى الأعلى فاستقبلتها الميقاتية  $B$  فإن فرق التردد النسبي هو:

$$(33-9) \quad \frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{f_B}{f_A} - 1 = \frac{d\tau_A}{d\tau_B} - 1 = -\frac{gh}{c^2}$$

فالتردد المتلقى  $f_B$  الذي تقيسه الميقاتية  $B$  أقل من التردد المرسل  $f_A$  الذي تقيسه الميقاتية  $A$ . وهذا يعني أن نفس العدد من نبضات الإشارة يعاين على امتداد فترة من الزمن الذاتي أطول<sup>1</sup>. وتسمى هذه الظاهرة الانزياح التجاذبي نحو الأحمر (من الناحية العملية يُعتبر مصطلح "الانزياح نحو الأحمر" مصطلحاً عاماً ويسري على تغير التردد السالب الإشارة وتغيره الإيجابي الإشارة).

لقد قيس الانزياح نحو الأحمر لأول مرة بصورة مباشرة في تجربة أجراها روبرت باوند وغلين ريك [Pound and Rebka, 1960] في جامعة هارفرد عام 1960. فقد قاسا على نحو دقيق التغير الكسري الصغير في تردد فوتونات أشعة غاما الصاعدة أو الساقطة على مسافة شاقولية معروفة. واشتملت التجربة على تحريك بآلة من نظير الحديد  $^{57}\text{Fe}$  حركة بسيطة لإحداث ظاهرة دوبلر التي تعوّض بالضبط الانزياح التجاذبي نحو الأحمر لإتاحة امتصاص الطنين على نطاق تردد ضيق بواسطة ماصّة ساكنة من الحديد  $^{57}$ . وقد تسنت هذه الدرجة من الدقة باستخدام ظاهرة موسبار التي كانت قد اكتشفت حديثاً، وهي ظاهرة تتمثل في البث والامتصاص بلا ارتداد وتحدث عندما يكون النظر متضمناً في بلور مناسب.

وفي عام 1975 أجرى فريق بحث بقيادة كارول آلي [Alley, 1983] في جامعة ماريلاند، مجموعة من تجارب الميقاتيات الذرية المحمولة على الطائرات مصممة خصيصاً لاختبار الانزياح التجاذبي نحو الأحمر على ثلاثة ارتفاعات مختلفة، فتوصلوا إلى تطابق كامل مع ما تقول به النظرية. كما أن أثر كمون جاذبية الأرض قيس في إطار تجربة هافيل - كيتنج التي تمثلت في حمل ميقاتيات ذرية في رحلة حول العالم عام 1971.

إن أدق ما أُجري حتى الآن من اختبارات الانزياح نحو الأحمر هو الاختبار الذي أجراه في عام 1976 روبرت فيسوت [فيسوت وليفين وآخرون، 1980] من مرصد سمثسون للفلك والفيزياء مستخدماً مازراً هيدروجينياً رُفع إلى علو مقداره 10 000 km بواسطة صاروخ من النوع Scout D. لقد مُزجت إشارة ثنائية الاتجاه تم إرسالها واستقبالها بواسطة حمولة الاتصالات النافعة للصاروخ بإشارة وحيدة الاتجاه لاستخراج التغير النسبي في التردد. إن أثر الجاذبية يتلاشى تماماً على الوصلتين الصاعدة والهابطة، وبالتالي فإن الإشارة التي يجري إرسالها فيجانب عنها، تخضع لانزياح دوبلر مرتين، لكن الإشارة الوحيدة الاتجاه تتأثر بظاهرة الجاذبية وبظاهرة دوبلر. وقد توافقت نتيجة هذا الاختبار مع ما تقول به النظرية في حدود نسبة مقدارها 0,01%.

**الملاحظة 1 -** من ناحية ميكانيك الكم تكون الطاقة الحركية للفوتون  $hf = E$ ، حيث  $h$  هو ثابت بلانك. وعندما يرتفع الفوتون فإنه يفقد طاقته الحركية ويتناقص التردد المعاين.

## 5.2.9 تحويل التواقيت بنقل الميقاتيات

في حالة الميقاتية المنقولة يكون المجال المكاني-الزماني:

$$(34-9) \quad ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2$$

ويتحدد الزمن الإحداثي بالزمن الذاتي لميقاتية قياسية ساكنة موجودة في اللانهاية، لأنه:

$$\text{إذا كان } dx^i = 0 \text{ و } g_{00} = 1 \text{ فإن } d\tau = dt.$$

والمعادلة (34-9) معادلة جبرية تربيعية فيما يخص  $dt$ .

فالزمن الإحداثي المنقضي خلال نقل الميقاتية المقابل للزمن الذاتي المقيس هو [مع العلم بأن الكلمة path تشير إلى المسار]:

$$(35-9) \quad \Delta t = \pm \int_{\text{path}} \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{1 + \frac{1}{c^2} \left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right) \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau}} d\tau + \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} \frac{dx^j}{d\tau} d\tau$$

وعليه فإنه، عند تحويل التوقيت من النقطة A إلى النقطة B بواسطة ميقاتية محمولة وبسيطة، يكون الزمن الإحداثي المنقضي في التقريب الأول:

$$(36-9) \quad \Delta t = \int_A^B \left[ 1 - \frac{1}{2}(-g_{00} - 1) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} g_{ij} \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt} \right] dt + \frac{1}{c} \int_A^B g_{0j} \frac{dx^j}{dt} dt$$

إن الحد الثاني هو أثر سنياك فيما يخص الميقاتية المنقولة. وفي حالة الإطار الإسنادي الخامل ينعدم هذا الحد لأن  $g_{0j} = 0$ .

### 6.2.9 نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز

إذا أخذنا من حيث درجة التقريب بالحدود من الرتبة  $1/c^2$ ، تكون مكوّنات الممتدة المسافية في نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز كما يلي:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{and} \quad g_{ij} = \delta_{ij}.$$

وبهذه الدرجة من التقريب يكون لدينا:

$$(37-9) \quad ds^2 = -\left(1 - \frac{2U}{c^2}\right) c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 \left(1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{1}{c^2} v^2\right) dt^2 = -c^2 dt^2$$

حيث:

$U$ : الكمون التجاذبي في موضع الميقاتية

$v$ : سرعة الميقاتية بالنسبة إلى الإطار الإسنادي الخامل.

وعليه فإن الوقت الإحداثي المنقضي خلال حركة الميقاتية:

$$(38-9) \quad \Delta t = \int_A^B \left( 1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) dt$$

والتصحّيات الخاضعة للمكاملة هي أثر الانزياح التجاذبي نحو الأحمر بسبب كمون الأرض وأثر تمدد الزمن نظراً إلى سرعة الميقاتية. أما التوقيت الإحداثي  $t$  المبين في هذا العرض فهو توقيت إحداثي أرضي الإسناد (TCG)، يمثل التوقيت الإحداثي الأرضي الإسناد كما يُحسب بالنسبة إلى نظام إحداثيات حامل أرضي المركز تتمثل وحدته في ثانية النظام الدولي للوحدات.

وفي حالة الميقاتية الساكنة الموجودة في الموضع  $\mathbf{R}$  على مجسم الأرض الدائر في حقل الكمون التجاذبي  $U_0$  وذات السرعة  $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$  بالنسبة إلى إطار إسناد أرضي المركز، يكون الزمن الإحداثي المنقضي:

$$(39-9) \quad \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} U_0 + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \right\} dt = (1 + W_0/c^2) \Delta t$$

حيث:

$W_0$ : الكمون الأرضي على سطح مجسم الأرض.



ولما كان  $W_0$  ثابتاً، بينما يمثل الزمن الإحداثي  $t$  إحداثية عالمية، فإن الميقاتيات في كل مكان على مجسم الأرض تعطي الزمن الذاتي نفسه  $\Delta\tau$ . ويمكن جعل الزمن الإحداثي مساوياً للزمن الذاتي لميقاتية على مجسم الأرض بإجراء تحويل سلمي للزمن الإحداثي على النحو التالي:

$$(40-9) \quad \Delta t' \equiv \left(1 - W_0/c^2\right) \Delta t = \Delta\tau$$

وعليه فإن الزمن الإحداثي المنقضي، مقيساً بالزمن الذاتي لميقاتية مرجعية على مجسم الأرض، الذي يناظر الزمن الذاتي لميقاتية حقل كمون موضعها  $U$  وسرعتها  $v$  بالنسبة إلى الإطار الإسنادي الحامل الأرضي المركز، هو:

$$(41-9) \quad \Delta t' = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2}(U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau$$

ويجدر التنويه إلى أن  $W_0$  يشتمل على أثر دوران الأرض لكن  $U$  لا يشتمل عليه. ويمكن أن تستخدم هذه المعادلة فيما يخص الميقاتيات الموجودة قرب سطح الأرض وفيما يخص الميقاتيات الموجودة على متن سواتل على ارتفاع المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (35 786 km). إن التوقيت الإحداثي  $t'$  الممثل على هذا النحو هو التوقيت الأرضي، المعرف بأنه التوقيت الإحداثي الذي تؤتيه الميقاتيات الموجودة على مجسم الأرض الدائر مقيساً بثانية النظام العالمي للوحدات.

ولذا فإن المطابقة  $TT \equiv t'$  لا تختلف عن المطابقة  $TCG \equiv t$  إلا بمعدل ثابت، من قبيل  $1 - L_G = dTT / dTCG$ ؛ حيث:

$$L_G \equiv W_0 / c^2 = 10^{-10} \times 6,969\,290\,134 \text{ ms/d (تقريباً)}.$$

فالتوقيت الأرضي TT شكل مثالي للتوقيت الذري الدولي TAI.

### 7.2.9 نظام الإحداثيات الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض

إذا أخذنا من حيث درجة التقريب بالحدود من الرتبة  $1/c^2$ ، تكون مكوّنات الممتدة المسافية في نظام الإحداثيات الدائر الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض (ECEF) كما يلي:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c \quad \text{and} \quad g_{ij} = \delta_{ij}.$$

وبهذه الدرجة من التقريب يكون المجال المكاني-الزماني:

$$(42-9) \quad ds^2 = - \left[ 1 - 2 \frac{1}{c^2} U - \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 \right] c^2 dt^2 + 2 (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j dx^j c dt + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2$$

وبالتالي فإن الزمن الإحداثي المنقضي:

$$(43-9) \quad \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + U/c^2 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' / c + \frac{1}{2} v'^2 / c^2 \right\} d\tau$$

حيث:

$\mathbf{v}'$ : سرعة الميقاتية بالنسبة إلى الأرض الدائرة. كما أن هذه النتيجة تتأتى عن المعادلة التي تعطي  $\Delta t$  بالنسبة إلى إطار مرجعي حامل بالتعويض  $\mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} = \mathbf{v}$  بنفس درجة التقريب.

ولجعل هذا الزمن الإحداثي يساوي الزمن الذاتي الذي تسجله ميقاتية ساكنة موجودة على مجسم الأرض، يُضرب في المعامل السلمي  $1 - W_0 / c^2$  ما يؤتي:

$$(44-9) \quad \Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0\right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[ U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 \right] + \frac{1}{2} v'^2 \right\} d\tau + \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau -$$

ويمكن التعبير عن الحد الموضوع بين قوسين معقوفتين تحت علامة التكامل الأولى كما يلي:

$$(45-9) \quad U + \frac{1}{2}(\omega \times \mathbf{r})^2 - W_0 = W - W_0 = \Delta W = -g h$$

حيث:

$W$ : الكمون الأرضي عند الارتفاع  $h$

$W_0$ : الكمون الأرضي على سطح مجسم الأرض

$g$ : التسارع المحلي بفعل الجاذبية.

وبالتالي يصبح الزمن الإحداثي المنقضي:

$$(46-9) \quad \Delta t' = \int_A^B \left( 1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau -$$

أما التكامل الثاني فيمثل أثر سنيك للميقاتية المنقولة. وظاهرة سنيك هي خاصية حركية ملازمة للإطار الإسنادي الدائر. ويمكن التعبير عن هذا الحد كما يلي:

$$(47-9) \quad \Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B \omega \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \omega \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\omega A}{c^2}$$

حيث:

$A$ : المساحة التي يمسحها متجه الموضع بالنسبة إلى مركز الأرض مُسَقَّطاً على مستوي خط الاستواء (وهو إيجابي فيما يخص الاتجاه شرقاً وسلبي فيما يخص الاتجاه غرباً).

ويمكن أيضاً التعبير عن أثر سنيك كما يلي:

$$(48-9) \quad \Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega R \cos \phi) (v' \cos \theta) d\tau = \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda -$$

حيث:

$R$ : شعاع الأرض، مع العلم بأن  $\phi$  هي خط العرض

$\lambda$ : خط الطول

$v' \cos \theta$ : مكُون السرعة عند الاتجاه شرقاً. أما الزاوية  $\theta$ ، التي تمثل المتحول المستقل الرئيسي، المقيسة بالنسبة إلى الشرق، فهي متممة زاوية السم  $Az$ ، المقيسة بالنسبة إلى الشمال، أي أن لدينا  $\cos \theta = \sin Az$

ويكون تصحيح سنيك للزمن الإحداثي المنقضي إيجابياً في حالة الميقاتية المنقولة شرقاً وسلبياً في حالة الميقاتية المنقولة غرباً؛ ومنعدياً في حالة الميقاتية المنقولة شمالاً أو جنوباً.

وعليه فإنه، عند تحويل التوقيت من النقطة  $A$  إلى النقطة  $B$  بواسطة ميقاتية محمولة، يكون الزمن الإحداثي المنقضي:

$$(49-9) \quad \Delta t' = \int_A^B \left( 1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda -$$

وبحسب هذا القانون يجب أن تؤخذ بالحسبان ثلاث ظواهر نسبية. فالتصويبات تحت علامة التكامل الأولى تمثل الانزياح التجاذبي نحو الأحمر وتمدد الزمن. أما التصحيح المعطى بالتكامل الثاني فيمثل ظاهرة سنيك. وبوجه عام يجب أن يكامل الوقت الإحداثي عددياً على المسار المحدد.

وفي حالة الميقاتية التي تُنقل لدورة كاملة حول خط الاستواء في اتجاه الشرق وتعود إلى منطلقها، يبلغ تصحيح سنيك 207,4 ns. وفي حالة المسار المغلق الذي يحد جيئراً صغيراً  $S$  على سطح الأرض:

$$A \approx S \sin \bar{\phi}, \quad \text{حيث } \bar{\phi} \text{ هي متوسط مقدار زاوية خط العرض مقيماً في مركز } S.$$

إذا نُقلت الميقاتية ذهاباً وإياباً بين نقطتين على نفس المسار فإن تصحيح سنيك يلغي أحدهما الآخر فيبلغ صافي أثر ظاهرة سنيك الصفر.

وإذا كان المسار دائرة عظمى فإن  $\cos \phi \cos \theta = \cos i$ ، وهذا مقدار ثابت، حيث تمثل  $i$  ميل مستوي الدائرة العظمى بالنسبة إلى مستوي خط الاستواء.

وتكون المساحة المسقطة  $A = \frac{1}{2} R^2 \gamma \cos i$ ، حيث  $\gamma$  هي قوس الدائرة العظمى من النقطة 1 إلى النقطة 2 عند بداية المسار ونهايته. وعليه فإن تصحيح سنيك يساوي:

$$(50-9) \quad \Delta t_{\text{Sagnac}} = \frac{2\omega A}{c^2} = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i$$

وبحساب المثلثات الكروي نجد أن  $\gamma$  تعطى بالمعادلة:

$$(51-9) \quad \cos \gamma = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1)$$

حيث:

$\phi$  و  $\lambda$ : زاويتا خط العرض وخط الطول لكل نقطة.

ويعطى ميل مستوي الدائرة العظمى بالعلاقة:

$$(52-9) \quad \tan i = \begin{cases} \tan \phi_1 \csc \beta, & \beta \neq 0, \quad \phi_1 \neq 0 \\ \tan \phi_2 \csc(\lambda_2 - \lambda_1), & \beta = \phi_1 = 0 \end{cases}$$

على اعتبار أن النقطة 1 تقع إلى الغرب من النقطة 2. والزاوية  $\beta$  هي الفرق بين زاويتي خطي الطول في نقطة تقاطع الدائرة العظمى مع خط الاستواء وفي النقطة 1، وهي تحسب بالمعادلة:

$$(53-9) \quad \cot \beta = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \csc(\lambda_2 - \lambda_1) - \cot(\lambda_2 - \lambda_1)$$

ويمكن التعبير عن زاوية خط العرض في أية نقطة على الدائرة العظمى بدلالة زاوية خط الطول فيها على النحو التالي:

$$(54-9) \quad \tan \phi = \tan i \sin(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta)$$

وبدلاً من ذلك يمكن، بالاستعانة بهذه المعادلة وبالمطابقة  $\cos^2 \phi = 1 / (1 + \tan^2 \phi)$ ، وملاحظة أن  $\tan(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) = \cos i \tan(\gamma + \psi)$  وأن  $\tan \beta = \cos i \tan \psi$  حيث  $\psi$  هي قوس الدائرة العظمى من نقطة التقاطع مع خط الاستواء إلى النقطة 1، البرهان على ما يلي، كما ورد آنفاً:

$$(55-9) \quad \Delta t_{Sagnac} = \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi \, d\lambda = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i$$

لننظر على سبيل المثال في قياس تحويل الوقت من المختبر الوطني للفيزياء إلى مرصد البحرية في الولايات المتحدة بواسطة مقيانية ذرية منقولة. لنفترض أن الميقاتية محمولة على متن طائرة تحلق فوق مسار على الدائرة العظمى من لندن إلى واشنطن العاصمة بارتفاع متوسط مقداره m 10 000 وسرعة متوسطة مقدارها 220 m/s، وأن الزمن الذي تستغرقه الرحلة يقارب بالساعات 7,5. ليكن  $\Delta\tau$  مجال الزمن الذاتي الذي تسجله الميقاتية التي على متن الطائرة، و  $\Delta t' = \Delta\tau$ . مجال الزمن الذاتي الذي تسجله الميقاتية المرجعية على مجسم الأرض. عندها يتكوّن فرق الزمنين الذاتيين  $\Delta\tau' - \Delta\tau$  (بيان الميقاتية الطائرة - بيان الميقاتية المرجعية) من +29 ns تعزى إلى الانزياح التجاذبي نحو الأحمر و-7 ns تعزى إلى تمدد الزمن. وفي حالة الرحلة باتجاه الغرب يساوي أثر سنيك +18 ns. وبالتالي فإن الميقاتية الطائرة تكسب ما مجموعه 40 ns بالنسبة إلى الميقاتية المرجعية.

أما في حالة الرحلة باتجاه الشرق، من واشنطن العاصمة إلى لندن، فإن أثر سنيك يساوي -18 ns ولا تكسب الميقاتية الطائرة في هذه الحالة إلا ما صافيه 4 ns. وعلى مدى الرحلة في الاتجاهين ذهاباً وإياباً، يلغي تصحيحاً سنيك أحدهما الآخر إذا كان مسار رحلة الذهاب مطابقاً لمسار رحلة الإياب ويكون صافي التغير الناتج عن ذلك +44 ns (= 29 x 2 - 7 x 2) ns ويعزى بكامله إلى الانزياح التجاذبي نحو الأحمر وإلى تمدد الوقت.

### 3.9 الميقاتية المحمولة على متن ساتل

في حالة الميقاتية المحمولة على متن ساتل، يكون الزمن الإحداثي المنقضي بالنسبة إلى إطار إسنادي حامل أرضي المركز:

$$(56-9) \quad \Delta t = \int_A^B \left( 1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau$$

وإذا كان الساتل يتحرك على مدار كبلري لا يعتريه اضطراب فإن الكمون التجاذبي يساوي:

$$(57-9) \quad U = \frac{GM}{r}$$

وتحسب سرعة الساتل استناداً إلى مبدأ صون الطاقة  $E$  (لوحدة الكتلة):

$$(58-9) \quad E = \frac{1}{2} v^2 - U = \frac{1}{2} v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a}$$

حيث:

$a$ : نصف المحور الرئيسي للمدار.

وعليه فإن الزمن الإحداثي المنقضي يساوي:

$$(59-9) \quad \Delta t = \int_{orbit} \left( 1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} + \frac{1}{c^2} \frac{2GM}{r} \right) d\tau = \left( 1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} \right) \Delta\tau + \frac{2GM}{c^2} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau$$

وفي حالة المدار الكبلري، تكون المسافة الشعاعية:

$$r = a (1 - e \cos E)$$

حيث:

$e$ : الاختلاف المركزي للمدار

$E$ : الانحراف المركزي.

ولدينا أيضاً معادلة كبلر:

$$M \equiv n (\tau - \tau_0) = E - e \sin E$$

حيث:

$M$ : متوسط الانحراف

$n \equiv 2\pi/T = \sqrt{GM/a^3}$ : متوسط الحركة

$T$ : الدور المداري

$\tau_0$ : وقت الحضيض.

فيكون التكامل:

$$(60-9) \quad \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau = \frac{1}{na} E = \frac{1}{a} \Delta\tau + \sqrt{\frac{a}{GM}} e \sin E$$

حيث:

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0$$

وبالتالي فإن:

$$(61-9) \quad \Delta t = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a}\right) \Delta\tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E$$

ومن الملائم تطبيق التحويل السلمي:

$$(62-9) \quad \Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0\right) \Delta t = \int_A^B \left\{1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2\right\} d\tau$$

بحيث يطابق الزمن الإحداثي الزمن الذاتي التي تسجله الميقاتيات على مجسم الأرض. وهكذا تغدو الميقاتية الموجودة على مجسم الأرض ميقاتية إحداثية. وعليه يكون الزمن الإحداثي المنقضي:

$$(63-9) \quad \Delta t' = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0\right) \Delta\tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E$$

إن الحد الأول يمثل تخالفاً ثابتاً في المعدل بين الميقاتية الموجودة على متن الساتل والميقاتية الموجودة على سطح مجسم الأرض. ويكون التصحيح اللازم إجراؤه على بيان مجال الزمن الذاتي لميقاتية الساتل:

$$(64-9) \quad k \equiv 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 = \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{R} \left(1 + \frac{1}{2} J_2\right) - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2$$

وتنعدم قيمة  $k$  في حالة نصف المحور الرئيسي الذي يقارب طوله 9 545 km.

وعند هذه المسافة يلغى أثر الانزياح التجاذبي نحو الأحمر وأثر تمدد الوقت كل منها الآخر. وفي حالة المدار الأخفض تكون قيمة تمدد الزمن أكبر ويكون  $k$  موجباً، لكن في حالة المدار الأعلى تكون قيمة الانزياح التجاذبي نحو الأحمر أكبر وتكون  $k$  سالبة.

أما الحد الثاني فيمثل تصحيحاً دورياً نسبياً صغيراً يعزى إلى لادائرية المدار ويمكن أن يعبر عنه دون تقريب على النحو التالي:

$$(65-9) \quad \Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2}$$

حيث:

$$\mathbf{r} \text{ و } \mathbf{v}: \text{ موضع الساتل وسرعته.}$$

ولما كان الجداء  $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$  مقداراً سَلَمياً فيمكن تقييمه إما في نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز أو في نظام الإحداثيات الأرضي المركز والثابت بالنسبة للأرض. وبالتالي يمكن التعبير عن مجال الزمن الإحداثي بالشكل:

$$\Delta t' = (1 + k) \Delta \tau + \Delta t_r$$

ويكون الزمن الذاتي لميقاتية الساتل:

$$\Delta \tau = (1 - k) \Delta t' + \Delta t_r$$

حيث:

قيمة تصحيح الزمن الذاتي هي المقلوب الجمعي لقيمة تصحيح الزمن الإحداثي، أي  $\Delta \tau_r \equiv -\Delta t_r$ .

وبتطبيق معدّل ميقاتية الساتل وفق التحويل السَلَمي  $\Delta \tau' = (1 + k) \Delta \tau$ ، يمكن جعلها تتساوى مع الميقاتية الموجودة على مجسّم الأرض من حيث المعدّل الوسطي. وبالتالي يغدو الزمن الذاتي:

$$\Delta \tau' = \Delta t' + \Delta \tau_r$$

وعليه فإنه، بمعدل عن تصحيح دوري صغير، تغدو ميقاتية الساتل أيضاً ميقاتية إحدائية.

وفي حالة ساتل من سواتل النظام العالمي لتحديد المواقع يبلغ نصف المحور الرئيسي لمداره 26 562 km، يكون تخالف المعدّل التدريجي البطيء:

$$k = -4,464\,733 \times 10^{-10} = -38,575\,293 \mu\text{s/d}$$

فالميقاتية الموجودة على متن ساتل النظام العالمي لتحديد المواقع تتقدم بوتيرة تفوق وتيرة الميقاتية العادية الموجودة على مجسّم الأرض بزهاء 38  $\mu\text{s}$  في اليوم، هي حصيلة زيادة مقدارها 45  $\mu\text{s}$  في اليوم تعزى إلى اختلاف الكمون التجاذبي ونقص مقداره 7  $\mu\text{s}$  في اليوم يعزى إلى الاختلاف في سرعة الحركة.

وتلكم ظاهرة هامة بالمقارنة بدرجة الدقة الاسمية للميقاتية البالغة 10 ns على مدى بضع ساعات. وتعويضاً لاختلاف الوتيرة، يطبّق على ميقاتية ساتل النظام العالمي لتحديد المواقع مقدار تخالف كسري قبل إطلاقها يساوي  $\Delta f/f = -4,464\,733 \times 10^{-10}$  ما يعادل تغييراً في معدّل ميقاتية من ذوات التردد البالغ 10,23 MHz يساوي  $\Delta f = -0,004\,5674 \text{ Hz}$ .

ويؤثّر ذلك تردداً مقداره 10 229 999,995 4326 Hz، فيبقى التردد دون تغيير، كما يبدو لمراقب موجود على سطح مجسّم الأرض. فإذا كان الحد الأقصى للاختلاف المركزي للمدار يبلغ 0,02 فيكون للحد الدوري  $\Delta \tau_r$  اتّساع مقداره 46 ns على أساس الدور المداري البالغ بالساعات 11,967. ويطبّق هذا التصحيح النسبوي على مستقبلية المستعمل.

لقد قيس اختلاف الوتائر لأول مرة في الإشارات المتلقاة من الساتل التجريبي NTS-2 للنظام العالمي لتحديد المواقع في عام 1977، وكانت النتيجة متوافقة مع ما تقول به نظرية النسبية العامة بتقريب مقداره 0,7% [Buisson, et al., 1977]. كما عُيّنَت تبدلات نسبية صغيرة في التردد خلال عمليات إعادة تحديد المواقع المدارية [Epstein, et al., 2001]. ويمكن أن يكون اتّساع الحد الدوري هاماً في حالة المدار الناقصي ذي الاختلاف المركزي الكبير. فعلى سبيل المثال يبلغ الاتّساع 1,7  $\mu\text{s}$  في حالة مدار مولنيا البالغ دوره 12 ساعة والبالغ اختلافه المركزي 0,722.

وتكفي هذه التصحيحات النسبوية لقياس الوقت بدرجة دقة تدرج في حدود النانوثانية (ns). وفيما يخص قياس الزمن بأجزاء النانوثانية يتمثل العامل التالي الأكثر أهمية في الإسهام في الانزياح التجاذبي نحو الأحمر الذي يُعزى إلى الاختلال المتأني عن تفلطح الأرض  $J_2$  [معامل درجة التفلطح الأدنى] في المعادلة التي وردت آنفاً لحساب الكمون  $U(r, \phi)$ . وبحسب نصف المحور الرئيسي المضطرب  $a$  والمسافة الشعاعية  $r$  كما يلي [Kozai, 1959]:

$$(66-9) \quad a = \bar{a} \left[ 1 + \frac{3}{2} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right]$$

و

$$(67-9) \quad r = \bar{a} \left[ 1 - e \cos E + \frac{1}{4} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right]$$

حيث:

 $\bar{a}$ : متوسط نصف المحور الرئيسي $e$ : الاختلاف المركزي (المفترض أن يكون صغيراً) $E$ : الانحراف المركزي $i$ : الميل $u$ : المحوّل المستقل المتمثل في زاوية خط العرض.فنصف المحور الرئيسي المضطرب  $a$  هو دالة دورية للمحوّل المستقل  $u$ . والطاقة الإجمالية  $E$  (التي يمكن أن تحدد قيمة  $a$ ) هي:

$$(68-9) \quad E = \frac{1}{2} v^2 - U(r, \phi) = \left( \frac{GM}{r} - \frac{GM}{2a} \right) - U(r, \phi) = -\frac{GM}{2\bar{a}} \left[ 1 + J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right]$$

وهي ثابتة على النحو المطلوب.

وعليه فإننا نجد (التقرير التقني للوكالة الوطنية للتصوير ووضع الخرائط في الولايات المتحدة، 1997)، إذا عوضنا  $v^2$  و  $U(r, \phi)$  في معادلة حساب الزمن الإحداثي المنقضي  $\Delta t'$ ، ملاحظين أن  $\sin i \sin u = \sin \phi$  و  $n \Delta \tau \approx u$  حيث  $\Delta \tau$  هي الزمن الذاتي بدءاً من العقدة الصاعدة كما تقيسه مقياسية الساتل:

$$(69-9) \quad \Delta t_{oblateness} = \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{\bar{a}} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left[ \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \Delta \tau + \frac{\sin^2 i}{n} \sin(2n \Delta \tau) \right]$$

وفي حالة مدار النظام العالمي لتحديد المواقع ذي الميل 55°، يبلغ اتّساع الحد الدوري 24 بيكوثانية (ps).

ووفقاً لمبدأ التكافؤ، لا يؤثر الكُمونان التجاذبيان للقمر والشمس تأثيراً مباشراً على الميقاتية الموجودة على متن الساتل الذي يتحرك في مدار حول الأرض لأن الأرض تمثل إطاراً إسنادياً حر السقوط في حقل هذين الكُمونين.

وبدلاً من ذلك يتمثل أثرهما في ظاهرتي المد والجزر. ويُحسب كمون المد والجزر (U<sub>tidal</sub>) المعزو إلى جسم ثالث خارجي على نحو تقريبي بالمعادلة:

$$(70-9) \quad U_{tidal} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{ext}}{\partial x^i \partial x^j} x^i x^j \approx \frac{GM_{ext}}{r_E^3} (r_S - r_E)^2$$

حيث:

 $r_E$  و  $r_S$ : بعد الجسم الثالث عن الساتل وعن الأرض، على الترتيب.

$$r_S - r_E \approx r \cos i \sin(n \Delta \tau)$$

حيث:

 $r$ : شعاع المدار $i$ : ميل المدار بالنسبة إلى الجسم الثالث، الذي يتغير.

فإن التصحيح الذي يجب إدخاله على مجال الزمن الإحداثي هو:

$$(71-9) \quad \Delta t_{tidal} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_{ext}}{r_E} \left( \frac{r}{r_E} \right)^2 \cos^2 i \left[ \Delta \tau - \frac{1}{2n} \sin(2n \Delta \tau) \right]$$

إن تأثيرات المد والجزر على مقياسية النظام العالمي لتحديد المواقع صغيرة. فبمعزل عن عامل الميل، يبلغ معدل الانسياب التدريجي البطيء فيما يخص القمر 15 ps لكل دورة، ويبلغ اتساع الحد الدوري 1 ps. أما فيما يخص الشمس فتبلغ هاتان القيمتان، على الترتيب، 7 ps و 0,5 ps في الدورة. ولئن كانت كتلة الشمس تبلغ زهاء 30 مليون ضعف من أضعاف كتلة القمر فإن الأرض أبعد من القمر بزهاء 400 مرة. ولما كان الكمون المتأني عن المد والجزر يتباين عكسياً بتباين مكعب المسافة فإن أثر ظاهرة المد والجزر المتأني عن الشمس يناهز نصف أثر ظاهرتيها المتأني عن القمر.

#### 4.9 تحويل التوقيت بإشارة كهزمغناطيسية

في النسبية الخاصة يُحسب انتشار الضوء في إطار إسنادي خامل بالمعادلة:

$$(72-9) \quad ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = 0$$

حيث:

$\eta_{\mu\nu}$ : مسافية منكوسكي.

أما زمن الانتشار بين النقطتين  $A$  و  $B$  فيحسب ببساطة بالمعادلة:

$$(73-9) \quad \Delta t_{AB} = \Delta t_{BA} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} -$$

لقد اقترح آينشتاين في إطار النسبية الخاصة اصطلاحاً متبعاً لمزامنة الميقاتيات في إطار إسنادي خامل عن طريق إشارة كهزمغناطيسية، من قبيل النبضة الضوئية أو نبضة الرادار. فلنفترض أن إشارة أرسلت من النقطة  $A$  فاستقبلت في النقطة  $B$ ، حيث انعكست لتعود إلى مستقبلية في النقطة  $A$ . فإذا كانت الأوقات الإحداثية للإرسال والانعكاس والاستقبال، المقاسة بميقاتيات في  $A$  وميقاتيات في  $B$ ، هي على الترتيب  $t_1$  و  $t_2$  و  $t_3$ ، فتكون الميقاتيات بالتعريف متزامنة إذا كان  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ . ولما كان  $\Delta t_{AB} = t_2 - t_1$  و  $\Delta t_{BA} = t_3 - t_2$  فإن:

$$(74-9) \quad t_2 \equiv \frac{1}{2} [(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3)$$

فالوقت الإحداثي للانعكاس  $t_2$  يتطابق مع متوسط الوقتين  $t_1$  و  $t_3$ . ويُسند إلى الميقاتية  $A$  الوقتان الذاتيان  $t_1 = \tau_1$  و  $t_3 = \tau_3$ ، بينما يُسند إلى الميقاتية  $B$  الوقت الذاتي  $t_2 = \tau_2$ . وبهذه الطريقة يمكن وضع جدول توقيت إحداثي يتحدد بالبيانات التي تسجلها ميقاتيات معيارية موزعة في الفضاء على شكل شبكة. فإذا كانت الميقاتية  $A$  متزامنة مع الميقاتية  $B$ ، وكانت الميقاتية  $B$  متزامنة مع الميقاتية  $C$ ، فإن الميقاتية  $A$  متزامنة أيضاً مع الميقاتية  $C$ .

ولدينا في إطار النسبية العامة معادلة انتشار الضوء التالية:

$$(75-9) \quad ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{ij} dx^i dx^j + 2 g_{0j} dx^j c dt + g_{00} c^2 dt^2 = 0$$

إنها معادلة تربيعية في زائدة الزمن الإحداثي  $dt$ . فيكون الزمن الإحداثي المنقضي للانتشار:

$$(76-9) \quad \Delta t = \pm \frac{1}{c} \int_{path} \frac{1}{-g_{00}} \sqrt{(-g_{00} g_{ij} + g_{0i} g_{0j}) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j$$



إن الجذرين يقابلان انتشار الضوء إلى الأمام وانتشاره إلى الخلف. وبالتالي فإننا، إذا أشرنا بالرمز  $\Delta t_{AB}$  إلى زمن الانتشار في الاتجاه الأول وبالرمز  $\Delta t_{BA}$  إلى زمن الانتشار في الاتجاه الثاني (وحسبنا التكامل من  $A$  إلى  $B$  فيما يخص الاتجاه الأول ومن  $B$  إلى  $A$  فيما يخص الاتجاه الثاني)، نحصل على المعادلتين:

$$(77-9) \quad \Delta t_{AB} = \frac{1}{c} \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right)} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j$$

و

$$(78-9) \quad \Delta t_{BA} = -\frac{1}{c} \int_B^A \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right)} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_B^A \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j$$

ويمثل الحد الأول فيهما زمن الانتشار على المسار ذي المجال المكاني  $dp^2 \equiv \gamma_{ij} dx^i dx^j$  حيث  $\gamma_{ij} \equiv g_{ij} + g_{0i} g_{0j} / (-g_{00})$  هو الدالة المسافية الثلاثية الأبعاد. أما الحد الثاني فهو أثر سنيك.

لنفترض أن نبضة أرسلت من ميقائية مرجعية في النقطة  $A$  في الوقت  $t_1$ ، فانعكست على ميقائية بعيدة في النقطة  $B$  في الوقت  $t_2$ ، واستقبلتها الميقائية المرجعية في النقطة  $A$  في الوقت  $t_3$ . فيكون الوقت الإحداثي للانعكاس في النقطة  $B$ :

$$(79-9) \quad t_2 = \frac{1}{2} [(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j$$

وبوجه عام سيتوقف زمن الانعكاس على مكوّني الدالة المسافية  $g_{0j}$  و  $g_{00}$  وعلى مسار الضوء من  $A$  إلى  $B$ . وعليه فإنه، عندما لا تساوي  $g_{0j}$  الصفر، تتعذر مزامنة الميقاتيات بالمعنى الذي قال به آينشتاين على نحو فريد. وتلكم ستكون الحال في الأطر الإسنادية الدائرة، حيث تقوم ظاهرة سنيك المعبر عنها بالحد الثاني.

#### 1.4.9 نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز

يمكن لنا في تقريب أول أن نحمل الكمون التجاذبي. وبذا تغدو الدالة المسافية في نظام الإحداثيات الخامل الأرضي المركز:

$$g_{ij} \approx \delta_{ij} \text{ و } g_{00} \approx 1, g_{0j} = 0$$

وبمكاملة المعادلة  $0 = ds^2$  على امتداد المسار، يُحصل على زمن انتشار الإشارة:

$$(80-9) \quad \Delta t = \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{\rho}{c}$$

حيث:

$\rho$ : طول مسار الانتشار في الإطار الإسنادي الخامل الأرضي المركز.

وليس ذلك إلا زمن الانتشار غير النسبوي على مسار له المجال المكاني الإقليدي  $dp^2 \approx \delta_{ij} dx^i dx^j$ .

فإذا أرسلت إشارة من ساتل في الوقت الإحداثي  $t_T$  إلى مستقبل متحركة في الوقت الإحداثي  $t_R$  فإن الزمن الإحداثي المنقضي على امتداد طول المسار في الإطار الإسنادي الخامل الأرضي المركز يساوي:

$$(81-9) \quad \Delta t = \frac{\rho}{c} = \frac{1}{c} |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_T)| \approx \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r}| + \frac{1}{c^2} \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R$$

حيث:

$\Delta \mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_R(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$ : الفرق بين موضع المستقبل وموضع الساتل في الوقت الإحداثي للإرسال  $t_T$  مع العلم أن  $\mathbf{v}_R$  هي سرعة المستقبل في الإطار الإسنادي الخامل الأرضي المركز.

وعليه يكون التصحيح الواجب إدخاله على بيان الوقت الإحداثي بسبب سرعة المستقبل:

$$(82-9) \quad \Delta t_v \approx \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R / c^2$$

وإذا كانت المستقبلية في الموضع  $\mathbf{R}$  وكانت سرعتها بالنسبة إلى مجسم الأرض الدائر  $\mathbf{v}'_R$  فإن  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$  و  $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}'_R + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$

وعليه يصبح تصحيح سرعة المستقبلية مجموع حدين:

$$(83-9) \quad \Delta t_v = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + \boldsymbol{\omega} \cdot [\mathbf{r}_T(t_T) \times \mathbf{R}(t_T)] / c^2 = |\Delta \mathbf{r}| v'_R \cos \theta / c^2 + 2 \omega A / c^2$$

حيث:

$$|\Delta \mathbf{r}| : \text{المدى}$$

$\theta$ : الزاوية بين سرعة المستقبلية والخط الواصل بين الساتل والمستقبلية، و  $A$  هي مساحة المثلث الذي تقع رؤوسه في الساتل وفي المستقبلية وفي مركز الأرض مُسَقَّطاً على مستوى خط الاستواء في الوقت الإحداثي للإرسال  $t_T$ .

وفي الإطار الإسنادي الأرضي الدائر يمثل الحد الأول تصحيح معدل المدى، أو التصحيح المتكامل المعزو إلى إزاحة دوبلر، ويمثل الحد الثاني تصحيح سنيك.

وزمن الانتشار  $\Delta t$  هو الزمن الذي تقيسه ميقاتية معيارية ساكنة موجودة في اللانهاية. ولتحديد زمن الانتشار بالنسبة إلى ميقاتية موجودة على سطح الأرض، يجب أن يؤخذ بالحسبان أثر الكمون الأرضي. وعليه فإنه، بالتحويل السلمي  $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \Delta t$ ، يغدو زمن الانتشار  $\rho / c$   $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \rho / c$

وفي حالة ساتل النظام العالمي لتحديد المواقع يبلغ الحد الأقصى لزمن انتشار الإشارة 86 ms ومقدار التصحيح -60 ps. وللنظر في أثر الكمون التجاذبي  $U$  على الإشارة الضوئية، لا بد من أن يُدخل الكمون في حساب العناصر المكانية والعناصر الزمانية للدالة المسافية. ومكوّنات الممتدة المسافية هي:

$$-g_{00} = 1 - 2U / c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{and} \quad g_{ij} = (1 + 2U / c^2) \delta_{ij}$$

وعليه تُفرض المعادلة  $ds^2 = 0$  إلى أن الزمن الإحداثي المنقضي للانتشار، الذي تقيسه ميقاتية موجودة في اللانهاية، هو:

$$(84-9) \quad \Delta t = \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \sqrt{\frac{g_{ij}}{-g_{00}}} dx^i dx^j \approx \frac{1}{c} \int_{\text{path}} (1 + 2U / c^2) - \sqrt{\delta_{ij}} dx^i dx^j = \frac{\rho}{c} + \frac{2}{c^3} \int_{\text{path}} U d\rho -$$

حيث:

$$GM / r = U \text{ هو الكمون التجاذبي.}$$

إن الحد الأول هو زمن الانتشار الإقليدي والحد الثاني هو زمن التأخر الناجم عن الجاذبية  $\Delta t_{\text{delay}}$ . وفي حالة المسار وفق خط مستقيم في الاتجاه الشعاعي نحصل على المساواة:

$$(85-9) \quad \Delta t_{\text{delay}} = \frac{2}{c^3} \int_R^r \frac{GM}{r} dr = \frac{2GM}{c^3} \ln \frac{r}{R}$$

لكن قانون جيوب التمام يربط بوجه عام بين المدى  $\rho$  وزاوية الارتفاع  $\theta$  والبعد الشعاعي  $r$  على النحو التالي:

$$r^2 = R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin \theta$$

ويمكن التعبير عن المدى بدلالة زاوية الارتفاع على النحو التالي:

$$\rho = \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} - R \sin \theta$$

وعليه فإن زمن التأخر المعزو إلى الجاذبية يُحسب بالعلاقة:

$$(86-9) \quad \Delta t_{\text{delay}} = \frac{2}{c^3} \int_0^{\rho} \frac{GM}{\sqrt{R^2 + \rho^2 + 2 R \rho \sin \theta}} d\rho = \frac{2GM}{c^3} \ln \left[ \frac{r + \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2}}{R(1 + \sin \theta)} \right]$$

ويمكن اشتقاق قانون بديل ينطوي على المسافات  $r$  و  $R$  و  $\rho$  على نحو تناظري.

فلما كان  $\sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} = \rho + R \sin \theta$  و  $R \sin \theta = (r^2 - R^2 - \rho^2) / 2 \rho$ ، فإن قيمة المتحوّل المستقل لدالة اللوغاريتم تساوي:

$$(87-9) \quad \frac{2 r \rho + \rho^2 + r^2 - R^2}{2 R \rho + r^2 - R^2 - \rho^2} = \frac{(r + \rho)^2 - R^2}{r^2 - (\rho - R)^2} = \frac{(r + \rho + R)(r + \rho - R)}{(r + \rho - R)(r - \rho + R)} = \frac{R + r + \rho}{R + r - \rho}$$

وعليه فإن زمن التأخر المعزو إلى الجاذبية فيما يخص الميقاتية الموجودة في اللانهاية يمكن أن يعبر عنه كما يلي:

$$(88-9) \quad \Delta t_{\text{delay}} = \frac{2 GM}{c^3} \ln \left( \frac{R + r + \rho}{R + r - \rho} \right)$$

وعندما يكون  $\rho = r - R$ ، تؤول هذه المعادلة إلى التأخر الزمني في حالة المسار وفق خط مستقيم.

وعليه يكون التصحيح النسبوي الإجمالي فيما يخص ميقاتية موجودة على سطح مجسم الأرض:

$$(89-9) \quad \Delta t'_{\text{delay}} = -\frac{W_0 \rho}{c^3} + \frac{2 GM}{c^3} \ln \left( \frac{R + r + \rho}{R + r - \rho} \right)$$

حيث يمثل الحد الأول إسهام الكمون الأرضي المعزو إلى تغير السلم، ويمثل الحد الثاني زمن التأخر المعزو إلى الجاذبية. وينزع هذان الحدان إلى أن يلغي أحدهما الآخر في جوار الأرض.

لقد قام إروين شابيرو [Shapiro, 1980] في عام 1967 وعام 1971 بالتحقق من المقدار المتنبأ به للتأخر الزمني المعزو إلى التجاذب بواسطة رادار يطال بمداه كوكبي عطارد والزهرة. وبلغ مقدارا التأخر الزمني في رحلة الذهاب والإياب عند الاقتران الأعلى زهاء  $240 \mu\text{s}$  و  $180 \mu\text{s}$ ، على الترتيب. أما الرادار الأدق الذي طال بمداه مسبار فيكنغ الذي حط على المريخ فقد بيّن أن التأخر المعزو إلى التجاذب عند الاقتران الأعلى يبلغ زهاء  $250 \mu\text{s}$ .

وفي حالة سائل النظام العالمي لتحديد المواقع الذي يبلغ شعاع مداره  $26\,562 \text{ km}$  وزاوية ارتفاعه  $40^\circ$ ، بلغ التأخر النسبوي للمسار  $48 \text{ ps}$  فيما يخص الميقاتية الموجودة في اللانهاية و  $3 \text{ ps}$  فيما يخص الميقاتية الموجودة على مجسم الأرض. وفي حالة سائل "الديناميات الأرضية اللازمة" (LAGEOS)، البالغ شعاع مداره  $12\,270 \text{ km}$ ، يبلغ مقدار التأخر الأقصى  $38 \text{ ps}$  في حالة الميقاتية الموجودة في اللانهاية و  $14 \text{ ps}$  في حالة الميقاتية الموجودة على مجسم الأرض. وفيما يخص الإشارة التي ترسل من خط الاستواء إلى سائل مستقر بالنسبة إلى الأرض على مدار يبلغ شعاعه  $42\,164 \text{ km}$ ، يساوي مقدار التصحيح  $56 \text{ ps}$  في حالة الميقاتية الموجودة في اللانهاية و  $27 \text{ ps}$  في حالة الميقاتية الموجودة على مجسم الأرض.

### 2.4.9 نظام الإحداثيات الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض

في نظام الإحداثيات الدائر الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض يكون الزمن الإحداثي لانتشار الإشارة الكهرومغناطيسية:

$$(90-9) \quad \Delta t = \frac{\rho'}{c} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j$$

حيث:

$\rho'$ : طول مسار الانتشار في الإطار الإسنادي الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض.

فإذا كانت سرعة المستقبل  $\mathbf{v}'_R$  فإن  $\rho' = |\mathbf{R}(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| \approx |\Delta \mathbf{r}| + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c$  وثمة تصحيح لمقدار المدى يُحسب بالعلاقة  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$  حيث  $\Delta t_v' = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2$

إن الحد الذي يتضمّن التكامل في معادلة حساب  $\Delta t$  هو أثر سنيك.

أما مكوّنات الدالة المسافية فهي:

$$-g_{00} \approx 1, g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c, \text{ and } g_{ij} \approx \delta_{ij}$$

وعليه فإن أثر سنيك يُحسب بالعلاقة:

$$(91-9) \quad \Delta t_{\text{Sagnac}} \approx \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\boldsymbol{\omega} A}{c^2}$$

حيث:

A: المسقط العمودي للحيز الذي يشكله محور الدوران ونقطتا طرقي مسار الضوء.

إن المسار كما يظهر من الإطار الإسنادي الدائر يقارب الخط المستقيم. وإذا كانت نقطتا طرقي المسار  $(x_A, y_A)$  و  $(x_B, y_B)$  فيمكن التعبير عن أثر سنيك بالمعادلة التالية:

$$(92-9) \quad \Delta t_{\text{Sagnac}} = \frac{2\boldsymbol{\omega} A}{c^2} = \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r}_A \times \mathbf{r}_B) = \frac{\omega}{c^2} (x_A y_B - y_A x_B)$$

وفي حالة المستقبل الساكنة الموجودة على الأرض ينظر المراقب الموجود في الإطار الإسنادي الأرضي المركز والثابت بالنسبة إلى الأرض إلى المستقبل باعتبارها ثابتة فيطبق عليها تصحيح سنيك، لكن المراقب الموجود في الإطار الإسنادي الحامل الأرضي المركز فإنه يرى أن المستقبل تتحرك بسبب دوران الأرض فيطبق عليها بدلاً من ذلك تصحيح السرعة. ويكون الزمن الإجمالي للانتشار:

$$\Delta t = |\Delta \mathbf{r}| / c + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + 2 \boldsymbol{\omega} A / c^2 = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| / c$$

**الملاحظة 1 -** يندرج المصطلح "أثر سنيك" في عداد المفردات التي لا يستخدمها إلا المراقب الموجود في الإطار الإسنادي الدائر. فالتصحيح المقابل الذي يطبقه المراقب الموجود في الإطار الإسنادي الحامل ينبغي أن يُدعى "تصحيح السرعة".

وكما يُشار إليه في وثائق النظام العالمي لتحديد المواقع [نظام Navstar العالمي لتحديد المواقع، 2000]، يطبق في مستقبله المستعمل التصحيح الإجمالي لزمان انتشار إشارة النظام العالمي لتحديد المواقع. وبلغ المقدار الأقصى لأثر سنيك 133 ns، وهو يحصل عندما تكون المستقبل على خط الاستواء والساتل على خط الأفق. ومن ناحية المراقب الموجود في نظام إسنادي حامل أرضي المركز يُعزى هذا التصحيح إلى حركة المستقبل بسرعة مقدارها 465 m/s بالنسبة إلى الإطار الإسنادي الحامل الأرضي المركز خلال زمن انتشار الإشارة البالغ 86 ms. وقد أثبت التماسك الذاتي لهذا التصحيح بإنجاز قياسات النظام العالمي لتحديد المواقع للمشاهد المشتركة المتزامنة بين أزواج مراكز التوقيت الموزعة في جميع أنحاء العالم [Allen et al., 1985].

كما يجب النظر في أثر سنيك فيما يخص تحويل التوقيت بواسطة إشارة كهرومغناطيسية عبر ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض. وقد أُكّدت هذه الخاصية اعتيادياً بالمقارنة مع التزامنة بواسطة نقل الميقاتيات [Saburi, 1976]. لنفترض أن الأرض كرة شعاعها R وأن

مدار الساتل هو مدار دائري تماماً شعاعه  $r$  في مستوي خط الاستواء. وتكون إحداثياتنا المحطة الأرضية الموجودة في موضع زاوية خط عرضه  $\phi_E$  وزاوية خط طوله شرقاً  $\lambda_E$  كما يلي:

$$x_E = R \cos \phi_E \cos \lambda_E \text{ and } y_E = R \cos \phi_E \sin \lambda_E$$

حيث:

$$R = 6371 \text{ km هو متوسط شعاع الأرض.}$$

وتكون إحداثياتنا الساتل كما يلي:

$$x_S = r \cos \lambda_S \text{ and } y_S = r \sin \lambda_S$$

حيث:

$$r = 42164 \text{ km هو شعاع المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض.}$$

فيكون لدينا فيما يخص مسار إشارة الوصلة الصاعدة في اتجاه الشرق من المحطة الأرضية  $A$  إلى الساتل:

$$(93-9) \quad \Delta t_1 = \frac{\omega}{c^2} (x_{EA} y_S - y_{EA} x_S) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{EA} \sin(\lambda_S - \lambda_{EA})$$

وعلى نحو مماثل، لدينا في حالة مسار إشارة الوصلة الهابطة في اتجاه الشرق من الساتل إلى المحطة الأرضية  $B$ :

$$(94-9) \quad \Delta t_2 = \frac{\omega}{c^2} (x_S y_{EB} - y_S x_{EB}) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{EB} \sin(\lambda_{EB} - \lambda_S)$$

ويساوي تصحيح سنيك الإجمالي مجموع هذين الحدين،  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ . وفي حالة مسار الإشارة في اتجاه الغرب يكون للتصحيح نفس المقدار لكن بإشارة معاكسة.

لننظر على سبيل المثال في قياس لتحويل التوقيت الثنائي الاتجاه بواسطة السواتل (TWSTT) من المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا في بولدر في كولورادو (حيث يبلغ خط العرض  $40,0^\circ$ ، وخط الطول  $105,3^\circ$  غرباً) إلى مرصد بحرية الولايات المتحدة في واشنطن العاصمة (حيث يبلغ خط العرض  $38,9^\circ$ ، وخط الطول  $77,1^\circ$  غرباً) عن طريق ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض عند خط الطول  $97,0^\circ$  غرباً. في هذه الحالة يبلغ تصحيحاً سنيكاً  $24,1 \text{ ns}$  للوصلة الصاعدة و  $57,7 \text{ ns}$  للوصلة الهابطة فيكون التصحيح الإجمالي  $81,8 \text{ ns}$ . وفي حالة مسار الإشارة في الاتجاه المعاكس يبلغ التصحيح  $-81,8 \text{ ns}$ .

لكن الأرض ليست كروية تماماً في واقع الأمر. ويضاف إلى ذلك أن مدار الساتل يشوبه اضطراب فهو ليس دائرياً تماماً ولا يقع في مستوي خط الاستواء على وجه الدقة. ويبلغ مقدار الخطأ في تصحيح سنيك زهاء  $0,1 \text{ ns}$  لكل خطأ مقداره  $300 \text{ m}$  في موضع المحطة الأرضية، أو كل خطأ مقداره  $1^\circ$  في خط طول موضع الساتل، أو كل خطأ مقداره  $0,2^\circ$  في خط عرض موضع الساتل. فإضافة المزيد من الدقة على الحسابات يتعين تقييم إحداثيات موضع المحطة الأرضية وإحداثيات موضع الساتل بمراعاة شكل الأرض وعناصر مدار الساتل.

### 3.4.9 الرابط بين السواتل

إن تحليل الإشارات الكهرومغناطيسية المستخدمة في قياس الأمداء فيما بين الروابط، وتحويل التوقيت بين السواتل والمحطات الأرضية، وقابلية التشغيل البيني لمجموعات شتى من السواتل، يشتمل على ثلاث خطوات:

- 1 التحويل النسبي من الوقت الذاتي الذي تسجله الميقاتية في مكان الإرسال إلى الوقت الإحداثي للإرسال في منظومة الإحداثيات المعتمدة؛
- 2 حساب الزمن الإحداثي لانتشار الإشارة، بما في ذلك الأثر النسبي والأثر غير النسبي؛

3 التحويل النسبي من الوقت الإحداثي للاستقبال في منظومة الإحداثيات المعتمدة إلى بيان الوقت الذاتي الذي تسجله الميقاتية في مكان الاستقبال.

ويضاف إلى ذلك أنه يجب تصحيح جميع الأوقات الذاتية لاحتساب آثار "العتاد"، مثل الضوضاء خلال المعالجة والبيئة التي توجد فيها الميقاتية.

فلننظر في تحويل نسبي للتوقيت بين الميقاتيتين الذريتين  $A$  و  $B$  الموجودتين على متن ساتلين بواسطة رابط بين الساتلين. ولنفترض أن الوقت الذاتي  $\tau$  لكل ميقاتية قد تم تبسيطه وفق المعادلة  $\Delta\tau' = (1 + k) \Delta\tau$ ، بحيث يكون الوقت الذاتي الناتج عن ذلك  $\tau'$  مساوياً في المتوسط للوقت الإحداثي  $t'$  كما تبينه ميقاتيات ذرية على مجسم الأرض. فإذا كان لكل ميقاتية الموضع  $\mathbf{r}$  والسرعة  $\mathbf{v}$  في الإطار الإسنادي الحامل الأرضي المركز فإن  $\Delta\tau' = \Delta t' + \Delta t_r$ ، حيث يُعطى التصحيح النسبي بالمعادلة:

$$(95-9) \quad \Delta t_r = -2 \frac{1}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = -\frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2}$$

وعليه يكون الوقت الذاتي الذي تسجله الميقاتية  $A$  في الوقت الإحداثي للإرسال:

$$\tau'_T = t'_T - 2 \mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T / c^2$$

ويكون الوقت الذاتي الذي تسجله الميقاتية  $B$  في الوقت الإحداثي للاستقبال:

$$\tau'_R = t'_R - 2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R / c^2 + \Delta\tau_R$$

حيث:

$\Delta\tau_R$ : مقدار التعويض عن تخالف الميقاتية  $B$  بالنسبة إلى الميقاتية  $A$  من أجل مزامنتهما.

إن الزمن الإحداثي لانتشار الإشارة الذي تقيسه ميقاتية موجودة في اللاحاية يساوي:

$$(96-9) \quad t_R - t_T = \frac{\rho}{c} + \Delta t_{delay}$$

حيث:

$\rho$ : طول المسار من الساتل الأول وقت الإرسال إلى الساتل الثاني وقت الاستقبال؛

$\Delta t_{delay}$ : التأخر الزمني المعزو إلى الجاذبية.

ويكون طول المسار:

$$(97-9) \quad \rho = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = |\Delta\mathbf{r} + \mathbf{v}_R(t_R - t_T)| \approx |\Delta\mathbf{r}| + \frac{1}{c} \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R$$

حيث:

$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T$ : الفاصل بين الساتلين في الوقت الإحداثي للإرسال.

ويكون التأخر الزمني المعزو إلى الجاذبية:

$$(98-9) \quad \Delta t_{delay} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right)$$

ويكون الزمن الإحداثي لانتشار الإشارة الذي تقيسه الميقاتيات الموجودة على سطح مجسم الأرض:

$$t'_R - t'_T = (1 - W_0/c^2)(t_R - t_T)$$

وعليه فإن الفرق في الوقتين الذاتيين المثاليين يساوي:

$$(99-9) \quad \tau'_R - \tau'_T = \Delta\tau_R + \frac{|\Delta\mathbf{r}|}{c} + \frac{\Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} - \frac{2\mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} + \frac{2\mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T}{c^2} - \frac{W_0 |\Delta\mathbf{r}|}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right)$$

إن الأوقات التي تسجلها الميقاتيات فعلاً هي الأوقات الذاتية "العتادية" المتأثرة بالحيد المتأني عن الضوضاء والحيد المتأني عن البيئة. كما يمكن أن يكون هناك تأخر في المسار غير نسبي يُعزى إلى باقي الجو المحيط.

#### 4.4.9 ظاهرة دوبلر النسبية

لننظر مرسله لها الموضع  $\mathbf{r}_T$  والسرعة  $\mathbf{v}_T$  ترسل إشارة كهرومغناطيسية في الوقت الإحداثي  $t_T$  ومحطة أرضية لها الموضع  $\mathbf{r}_R$  والسرعة  $\mathbf{v}_R$  تستقبل الإشارة في الوقت الإحداثي  $t_R$  بالنسبة إلى إطار إسنادي حامل أرضي المركز. إن نسبة التردد الذاتي  $f_T$  للإشارة المرسله إلى التردد الذاتي  $f_R$  للإشارة المتلقاة تتناسب عكساً مع نسبة الدورين الذاتيين.

وبالتالي لدينا:

$$(100-9) \quad \frac{f_R}{f_T} = \frac{d\tau_T}{d\tau_R}$$

ويمكن أن يُكتب هذا التعبير بدلالة زَيدات الوقت الإحداثي على النحو التالي:

$$(101-9) \quad \frac{f_R}{f_T} = \frac{(dt_R / d\tau_R) dt_T}{(dt_T / d\tau_T) dt_R}$$

ويكون المدى من المرسله إلى المستقبل:

$$\rho \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)$$

ويكون الفرق في الوقتين الإحداثيين للاستقبال والإرسال:

$$t_R - t_T = \rho / c = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| / c$$

وبمفاضلة جانبي هذه المساواة بالنسبة إلى  $t_R$  نحصل على ما يلي:

$$(102-9) \quad 1 - \frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1}{c} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t_R} + \frac{\partial \rho}{\partial t_T} \frac{dt_T}{dt_R} \right) = \frac{1}{c} \left( \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \frac{dt_T}{dt_R} \right)$$

حيث يكون متجه الوحدة في اتجاه الانتشار انطلاقاً من المرسله:

$$(103-9) \quad \mathbf{n} \equiv \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T}{|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T|}$$

وبالتالي:

$$(104-9) \quad \frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c}{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T / c}$$

وفيما يخص القياسات التي يجري تحليلها في الإطار الإسنادي الحامل الأرضي المركز بكمون تجاذبي مقداره  $U$ ، تكون مكُونات الممتدة المسافية:

$$g_{00} = 1 - 2U / c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{and} \quad g_{ij} = \delta_{ij}$$

$$ds^2 = -c^2 (1 - 2U / c^2 - v^2 / c^2) dt^2 - c^2 d\tau^2$$

وبالتالي فإن:

$$(105-9) \quad \frac{dt_R}{d\tau_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}}$$

و

$$(106-9) \quad \frac{dt_T}{d\tau_T} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}}$$

وعليه فإن:

$$(107-9) \quad \frac{f_R}{f_T} = \frac{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \frac{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R/c)}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T/c)}$$

وتلكم هي معادلة أثر دوبلر النسبوي. والعامل الأول فيها هو التصحيح النسبوي، أما العامل الثاني فهو أثر دوبلر المعهود. وينشر هذا التعبير آخذين من حيث درجة التقريب بالحدود من الرتبة  $v^2/c^2$  نحصل على ما يلي:

$$(108-9) \quad \frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{1}{c^2} (U_R - U_T) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_R^2 - v_T^2)$$

حيث:

$$\Delta f \equiv f_R - f_T$$

وينبغي التنويه إلى خاصيتين من خواص المعادلة (108-9). وأولاهما أن فيها حداً يقارب  $v^2/c^2$  ليس نسبياً في الأصل. وثانيتهما أنه ليس فيها حدود مختلطة من النوع  $\mathbf{v}_T \cdot \mathbf{v}_R/c^2$ .

وهناك حالة تحظى باهتمام خاص هي الحالة التي تكون فيها المرسل على متن الساتل وتكون المستقبل على الأرض الدائرة. وتُعطى سرعة الساتل بالنسبة إلى الإطار الإسنادي الخامل الأرضي المركز بمعادلة القوة الحية مع العلم بأن الإحداثية الشعاعية تساوي:

$$r = a(1 - e^2) / (1 + e \cos \nu)$$

حيث:

$a$  و  $e$  هما نصف المحور الرئيسي للمدار واختلافه المركزي

$\nu$ : هي الانحراف المركزي الحقيقي.

كما تكون سرعة المستقبل التي تبلغ زاوية خط عرض موضعها  $\phi_R$ :

$$v_R = \omega R \cos \phi_R$$

ويكون الكمون التجاذبي في المستقبل الموجودة على متن الساتل:  $U_T = GM/r$  ويكون الكمون التجاذبي في المستقبل الموجودة في الحطة الأرضية:  $U_R = GM/R$ .

وعليه فإن لدينا، إذا أهملنا الحدود من الرتبة  $e^2$ :

$$(109-9) \quad \frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{GM}{c^2} \left( \frac{1}{R} - \frac{3}{2a} \right) - \frac{2GM}{c^2 a} e \cos \nu + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \cos^2 \phi_R$$

إن الحد الأول في هذه المعادلة هو انزياح دوبلر المعهود. والحد الثاني هو الجزء الضئيل البطيء من مجموع أثر تمدد الزمن وأثر الانزياح التجاذبي نحو الأحمر. والحد الثالث هو أثر دوري نسبوي متبق. وأول من أفاد عن تبين وجود هذا الأثر هو R. E. Jenkins



في عام 1969 [Jenkins, 1969]. وأما الحد الرابع فيُعزى إلى سرعة المحطة الأرضية. وفي حالة سائل النظام العالمي لتحديد المواقع ذي المدار البالغ اختلافه المركزي 0,02 يبلغ مقدار الأثر الدوري  $6,7 \times 10^{-12}$ . وهذا يستتبع أن تردد الحاملة للنطاق L1 للنظام العالمي لتحديد المواقع، البالغ 1,57542 GHz، سيخضع لتشكيل بسبب نسبة الاتساع 0,011 Hz والدور المساوي لدور مدار الساتل البالغ بالساعات 11,967.

## 5.9 الخلاصة

تهيئ النظرية العامة للنسبية الأساس للمفاهيم الحديثة للمكان والزمان والتجاذب. وعلى مر العقود الأربعة الأخيرة أكدت طائفة واسعة من التجارب الدقيقة مجموعة متنوعة غنية من التنبؤات التي وضعت بناءً على هذه النظرية. وهكذا غدت النسبية واحداً من الاعتبارات العملية الهامة فيما يتعلق بنظم تدبر الوقت في الهندسة والفيزياء وعلم الفلك.

وثمة في هذا الصدد ثلاث ظواهر رئيسية هي تمدد الزمن، والانزياح نحو الأحمر بفعل التجاذب، وأثر سنيك. ويمثل النظام العالمي لتحديد المواقع مثالاً على النظم الهندسية التي تتسم فيها هذه الظواهر الثلاث بالأهمية. وتنتج ظاهرتا تمدد الزمن والانزياح نحو الأحمر بفعلهما معاً انسياقاً في الوتيرة ضئيلاً بطيئاً مقداره 38  $\mu$ s في اليوم وتغاييراً دورياً ثانوياً يصل اتساعه حتى 46 ns، بينما يكون أثر سنيك عادة في حدود 100 ns. وقد استُخدم النظام العالمي لتحديد المواقع بمثابة مختبر لقياس الزمن نسبياً بدقة تراوح بين 1 و10 من النانوثواني (ns). ومن الشواهد على نجاح تطبيق النسبية على قياسات الزمان والمكان بواسطة النظام العالمي لتحديد المواقع دقة النظام التشغيلية والتجارب الكثيرة المصممة لاختبار كل من هذه الظواهر في طائفة واسعة من الشروط. ولقياس الزمن بالميكانيات في الفضاء بدقة تبلغ البيكوثانية (ps)، سيلزم النظر في ظواهر أخرى، منها إسهام الانزياح نحو الأحمر بسبب تفلطح الأرض، والكمونان المعزوان إلى المد والجذر بفعل جاذبية الشمس وجاذبية القمر، وأثر التجاذب على سرعة انتشار الضوء نفسها.

إن التصحيحات التي تفرضها النظرية العامة للنسبية لا يقتصر أمرها على إثارة الاهتمام العلمي النظري فحسب، بل إنها لازمة لقياس ونشر الوقت الدقيق على نحو متسق بواسطة الميكانيات الذرية الأرضية والمحمولة على متن المركبات الفضائية.

## المراجع

- ALLEY, C.O. [1983] Proper Time Experiments in Gravitational Fields With Atomic Clocks, Aircraft, and Laser Light Pulses. Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory, edited by P. Meystre and M. O. Sculley, Plenum, New York, p. 363-427.
- ALLEN, D. W., WEISS, M. A. and ASHBY, N. [1985] Around-the-World Relativistic Sagnac Experiment. *Science* **228**, p. 69-70.
- ASHBY, N. [2001] Relativistic Effects on SV Clocks Due to Orbit Changes, and Due to Earth's Oblateness. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 509-524.
- BUISSON, J. A., EASTON, R. L. and MCCASKILL, T. B. [1977] Initial Results of the Navstar GPS NTS-2 Satellite. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 177-200.
- DEPARTMENT of DEFENSE WGS 84 [1997] NIMA Tech. Rep. TR8350.2, 3<sup>rd</sup> edition. National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, MD.
- EPSTEIN, M., STOLL, E. and FINE, J. [2001] Observable Relativistic Frequency Steps Induced by GPS Orbit Changes. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 493-508.
- FRISCH, D. H. and SMITH, J. H. [1963] Measurement of the Relativistic Time Dilation Using  $\mu$ -Mesons. *Am. J. Phys.* **31**, p. 342-355.
- HAFELE, J. C. and KEATING, R. E. [1972] Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains; Observed Relativistic Time Gains. *Science* **177**, p. 166-170.
- HEISKANEN, W. A. and MORITZ, H. [1967] Physical Geodesy. Freeman, San Francisco, p. 70.

- JENKINS, R. E. [1969] A Satellite Observation of the Relativistic Doppler Shift. *Astron. J.* **74**, p. 960-963.
- KOZAI, Y. [1959] The Motion of a Close Earth Satellite. *Astron. J.* **64**, p. 367-377.
- NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, ICD-GPS-200C-004 [2000] Arinc Research Corporation, El Segundo, CA.
- POUND, R. V. and REBKA, Jr .G. A. [1960] Apparent Weight of Photons. *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341.
- SABURI, Y. [1976] Observed Time Discontinuity of Clock Synchronization in Rotating Frame of the Earth. *J. Radio Research Laboratories* **23**, p. 255-265.
- SHAPIRO, I. I. [1980 ] Experimental Tests of General Relativity, in *General Relativity and Gravitation*, edited by A. Held, Plenum, New York, , Vol. II, p. 469-489.
- VESSOT, R. F. C. and LEVINE, M. W. *et al.* [1980] Tests of Relativistic Gravitation With a Space-Borne Hydrogen Maser. *Phys. Rev. Lett.* **45**, p. 2081-2084.

## الفصل 10

### اتجاه الأرض والنظام الجيوديسي

#### الصفحة

132	..... مقدمة	1.10
132	..... اتجاه الأرض	2.10
134	..... الحيدان/التأرجح	1.2.10
134	..... الحركة القطبية	2.2.10
135	..... التوقيت العالمي (UT)	3.10
136	..... النظم الجيوديسية	4.10
136	..... السطوح المرجعية	5.10
136	..... المجسم الأرضي (Geoid)	1.5.10
136	..... المجسم الإهليلجي (Ellipsoid)	2.5.10
137	..... أنواع الإحداثيات	3.5.10
139	..... المراجع	

## 1.10 مقدمة

تتكون النظم المرجعية مما يلي:

- 1 أصل محدد؛
- 2 اتجاهات المحاور الأساسية؛
- 3 مجموعة من النماذج والإجراءات التقليدية التي تستخدم لتنفيذ النظام.

والإطار المرجعي، إذاً، هو تنفيذ ذلك النظام من خلال قائمة من الإحداثيات التي ينبغي أن تنسب إلى العناصر المحددة. ويشير اتجاه الأرض إلى الإجراءات والنماذج المستخدمة لربط نظام مرجعي جيوديسي أرضي بنظام سماوي.

وترد التفاصيل الإلزامية في 'اتفاقيات الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية' (IERS) المتاحة إلكترونياً في الموقع التالي: <http://www.iers.org/iers/products/conv/>

ويقوم علماء الفلك بتحديد النظم المرجعية السماوية، ويعتبر أن أصول غالبية النظم الحديثة هي عادة في مركز ثقل (barycentre) النظام الشمسي، ومحاورها القطبية ذات صلة بشكل أو بآخر بمحور الأرض. ومن ثم فإن المحور الثالث يقع في المستوى الاستوائي متعامداً مع المحور القطبي ومتجهاً نحو نقطة علامة (fiducial point) في ذلك المستوى. ولذلك فإن قائمة مواقع الأجسام الفلكية وتحركاتها الممكنة تشتمل على الأطر المرجعية السماوية ذات الصلة. وقد حدد الاتحاد الفلكي الدولي نظاماً وإطاراً مرجعيين سماويين معياريين يُدعيان النظام المرجعي السماوي الدولي (ICRS) والإطار المرجعي السماوي الدولي (ICRF) على التوالي. ويتألف الإطار المرجعي ICRF من المواقع المعينة لمصادر راديوية نائية.

ومن باب القياس، تكون أصول النظم المرجعية الأرضية عموماً في مركز كتلة الأرض وترتبط محاورها القطبية باتجاه محور ثابت نسبة إلى قشرة الأرض. ويوفر أصل خطوط الطول في المستوى الاستوائي الاتجاه الثالث. وعلى غرار الأطر السماوية، تتألف الأطر الأرضية من قائمة إحداثيات المواقع والتحركات الممكنة. ويحظى النظام المرجعي الأرضي الدولي (ITRS) والإطار المرجعي الأرضي الدولي (ITRF) اللذان ترعاها الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية (IERS) بالقبول بمثابة معيارين دوليين.

## 2.10 اتجاه الأرض

يتحدد اتجاه الأرض بواسطة خمس زوايا. ويكفي ثلاثة زوايا عادة، ولكن تستخدم خمس زوايا من أجل وصف العمليات الفيزيائية ذات الشأن ولتيسير تطبيق التحويلات.

وتستخدم زاويتان لنمذجة تغير اتجاه محور الأرض في نظام سماوي تقليدي. ويسمى هذا المحور القطب الوسيط السماوي (CIP) وتعزى حركته إلى حيدان وتأرجح الأرض. وتحدث هاتان الظاهرتان بفعل قوة الجاذبية من أجرام النظام الشمسي، ولا سيما الشمس والقمر، التي تؤثر على الأرض غير الكروية. ويشير الحيدان إلى الجزء اللادوري من الحركة ويشير التأرجح إلى الجزء الدوري منها. وكلتا الحركتين تتوقف على مواقع الأجرام في النظام الشمسي والبنية الداخلية للأرض، ولكن من الممكن نمذجتهما رياضياً بدرجة معقولة من الدقة.

وتستخدم زاويتان أخريان لوصف حركة القطب الوسيط السماوي (CIP) عبر قشرة الأرض. وتسمى هذه الظاهرة "الحركة القطبية" وتدفعها الاختلافات الجيوفيزيائية والجوية داخل الأرض وفي غلافها الجوي. والمكونات الرئيسية هي انحراف خطي وحركتان دوريتان لفترتين من 365 و 435 يوماً. ومن الصعب نمذجة الحركة القطبية لعدم إمكانية التنبؤ بالقوى الدافعة لهذه الحركة. ونتيجة لذلك يجب رصد هذه الزوايا فلكياً وإبلاغ المستعملين بها روتينياً.

والقطب الوسيط السماوي هو قطب معرّف تقليدياً يفصل حركة قطب النظام المرجعي الأرضي (TRS) في النظام المرجعي السماوي (CRS) نسبة إلى الحركة السماوية للقطب CIP (حيدان/تأرجح)، بما يشمل كل الحدود التي فيها فترات أطول من يومين في النظام المرجعي السماوي (الترددات بين -0.5 دورة في كل يوم فلكي (cpsd) (من غير المؤلف، في أوساط قياس الوقت والتردد

وفي الاتحاد الدولي للاتصالات، استخدام قيم تردد سالبة ومن ثم ينبغي شرحها) و+0,5 cpsd)، والحركة الأرضية للقطب الوسيط السماوي (الحركة القطبية)، بما في ذلك كل الحدود خارج النطاق النهاري الخلفي في النظام TRS (ترددات أقل من -1,5 cpsd أو أكثر من -0,5 cpsd).

وتتميز آخر زاوية من الزوايا الخمس زاوية دوران الأرض، ويعبر عنها بوصفها فرق التوقيت [UT1 - UTC]، حيث UT1 هو التوقيت الفلكي الذي تحدده رصدات من مصادر راديوية نائية و UTC (التوقيت العالمي المنسق) هو مقياس توقيت موحد. وتشمل الاختلافات الرئيسية في سرعة دوران الأرض تباطؤاً مستمراً بسبب تباطؤ حركة المد والجزر وذوبان الجليد، والاختلافات العُقدية نتيجة للتغيرات في التوزيع الداخلي لكتلة الأرض، وإلى حد كبير الاختلافات الموسمية الناجمة عن الأحوال الجوية والتغيرات الدورية الناجمة عن حركة المد والجزر. وكما هو حال الحركة القطبية، من الصعب نمذجة العلاقة UT1 - UTC والتنبؤ بها، وإنما يجب رصدها فلكياً وإبلاغ المستعملين بها روتينياً.

وقد أوصى القرار B1.8، الذي اعتمدته الجمعية العامة الرابعة والعشرون للاتحاد الفلكي الدولي في أغسطس 2000، باستخدام "الأصل غير الدوار" [Guinot, 1979] سواء في النظام المرجعي السماوي الذي مركزه الأرض (GCRS) أو النظام المرجعي الأرضي الدولي (ITRS) وأن تسمى هذه الأصول بمثابة أصل التقويم الفلكي السماوي (CEO) وأصل التقويم الفلكي الأرضي (TEO). وتعرف زاوية دوران الأرض بأنها الزاوية التي تقاس على طول خط استواء القطب الوسيط السماوي بين التقويم السماوي CEO والتقويم الأرضي TEO. وأوصى هذا القرار أيضاً بأن يكون التوقيت UT1 متناسباً خطياً مع زاوية دوران الأرض وبأن يحدد التحول بين النظام ITRS والنظام GCRS بحكم موقع القطب CIP في النظام GCRS، وموقع القطب CIP في النظام ITRS، وزاوية دوران الأرض.

ويمكن التعبير رياضياً عن عملية التحويل من النظام المرجعي الأرضي إلى النظام المرجعي السماوي عند الزمن  $t$  على النحو التالي:

$$(1-10) \quad [CRS(t)] = Q(t) R(t) W(t) [TRS(t)]$$

حيث  $Q(t)$ ،  $R(t)$  و  $W(t)$  هي مصفوفات التحويل التي تصف حركة القطب السماوي في النظام السماوي (حيدان/تأرجح) ودوران الأرض حول محور القطب والحركة القطبية، على التوالي. والمعلمة  $t$ ، التي تستخدم في هذه العلاقة وفي جميع العلاقات التالية، معرفة على النحو التالي:

$$(2-10) \quad t = [TT - 2000 \text{ January } 1, 12\text{h TT} - \text{in days}] / 36525$$

يلاحظ أن يناير 2000 بتوقيت الأرض 1,5 (TT) = التاريخ الجولياني 2451545,0 بتوقيت الأرض (TT).

وفي المناقشة التالية لمصفوفات الدوران التي يتعين استخدامها في التحويلات، يستخدم الترميز  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  للدلالة على الدوران حول المحاور  $x$  و  $y$  و  $z$  في النظام المرجعي، على التوالي، أي:

$$(3-10) \quad R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$(4-10) \quad R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$(5-10) \quad R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 1.2.10 الحيدان/التأرجح

تؤثر قوى الجاذبية بواسطة أجرام النظام الشمسي على الأرض غير الكروية لتحريك اتجاهها في النظام المرجعي السماوي. وخلال 26 000 سنة يتحرك المحور ليرسم مخروطاً في الفضاء. وهذا ما يسمى حركة الحيدان. أما التأرجح فهو يتسبب في حركة إيماء دورية طفيفة جداً في المحور بالإضافة إلى حركة الحيدان. والفترة الرئيسية لحركة التأرجح هي 18,6 سنة. وقد أوصى الاتحاد الفلكي الدولي، اعتباراً من 1 يناير 2003، باستخدام نموذج الحيدان - التأرجح IAU 2000A، أو الصيغة الأقصر IAU 2000B لأولئك الذين يحتاجون إلى نموذج دقيق حتى مستوى 1 مليار ثانية (mas)، لوصف هذه الحركة.

وبالإشارة إلى المعادلة (1-10) يمكن كتابة مصفوفة الحيدان/التأرجح  $Q(t)$  على النحو التالي:

$$(6-10) \quad Q(t) = \begin{bmatrix} 1-aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1-aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1-a(X^2+Y^2) \end{bmatrix} \bullet R_3(s)$$

على أن تكون:

$$a = 1/2 + 1/8(X^2 + Y^2)$$

حيث:

$X$  و  $Y$ : هما "إحداثيتا" القطب الوسيط السماوي (CIP) في النظام المرجعي السماوي (CRS)، وهما متوفران في النموذج IAU 2000A أو IAU 2000B التقليديين اللذين يقومان على نظرية جيوفيزيائية وفلكية.

وتُمنذج هذه العلاقة حركة القطب بسبب التحركات القمرية-الشمسية والكوكبية. وهي لا تشمل ما سُمي "التأرجح الكوكبي" في الأدبيات، وهو حركة مسير الشمس (مسير الحركة المدارية للأرض) التي تسببها الجاذبية الكوكبية. وقبل أن يعتمد الاتحاد الفلكي الدولي هذا الإجراء في عام 2000 لوصف حيدان الأرض وتأرجحها، كان مسير الشمس يُستخدم بمثابة مستوى مرجعي أساسي وكانت حركته توصف بتعبير تقليدي قائم على نظرية فلكية. وكان مجموع حيدان/تأرجح قطب الأرض ومسير الشمس يسمى الحيدان العام.

وتحدد الكمية  $s$  موقع أصل التقويم الفلكي السماوي في خط استواء القطب الوسيط السماوي. وهي تتمثل في العلاقة:

$$(7-10) \quad s = -XY/2 + \sum_{i=0}^{i=3} c_i t^i + \sum_k C_k \sin \alpha_k + 1.71t \sin \Omega + 3.57t \cos 2\Omega \\ + 743.53t^2 \sin \Omega + 56.91t^2 \sin(2F - 2D + 2\Omega) + 9.84t^2 \sin(2F + 2\Omega) - 8.85t^2 \sin 2\Omega$$

ويمكن الاطلاع على الجداول والبرمجيات لتنفيذ الخوارزمية الموصوفة أعلاه في اتفاقيات الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية [McCarthy and Petit, 2003].

### 2.2.10 الحركة القطبية

يتحرك القطب الوسيط السماوي أيضاً داخل الإطار المرجعي الأرضي، ولكن هذه الحركة لا يمكن نمذجتها. وبدلاً من ذلك يجب رصد هذه الحركة ومراعاتها على النحو الملائم في التحويل بين نظم الإحداثيات. ويتم تمثيل الحركة عندما يعبر عن الإحداثيتين القطبيتين  $x$  و  $y$  بوحدة زاوية. ويتم توجيه  $x$  على امتداد خط الطول  $0^\circ$ ، ويتم توجيه  $y$  على امتداد خط الطول  $90^\circ$  غرباً. ويعرف نظام خط الطول ضمناً بحسب المواقع المعتمدة في الإطار المرجعي TRF.

وتتألف الحركة القطبية أساساً من انحراف خطي تقريباً بالإضافة إلى فترتين دوريتين. والانحراف هو حركة القطب الحرة التي تدعى 'حيدان تشاندلر' نسبة إلى مكتشفها، Seth C. Chandler. وفترتها 435 يوماً، وهي تتوافق مع الحركة الحرة للأرض غير الجامدة التي تنبأ بها أصلاً L. Euler بالنسبة لأرض جامدة في عام 1758. والمكونة الرئيسية الثانية للحركة القطبية هي حركة سنوية تدفعها إعادة التوزيع الموسمية لكتلة الغلاف الجوي للأرض.

وحجم هذه الحركات ضئيل ولكنه مهم جداً من أجل دقة التحويل بين الأطر المرجعية. ويبلغ الانحراف الخطي بضعة سنتيمترات سنوياً في اتجاه خط الطول 75° غرباً. وتدفع الحركات الدورية القطب الوسيط السماوي باتساعات تبلغ بضع عشرات الأمتار.

ويمكن التعبير رياضياً عن هذا الدوران بالرجوع مرة أخرى إلى المعادلة (1-10) كما يلي:

$$(8-10) \quad W(t) = R_3(-s')R_1(y)R_2(x)$$

ويجب رصد معلومات الإحداثيتين القطبيتين والإبلاغ عنهما. ويمكن استقاء البيانات من الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظام المرجعي (IERS). وهي توفر مجموعة من الملفات التي تحتوي على أحدث البيانات والتنبؤات للمستقبل. انظر الموقع <http://www.iers.org/iers/products>.

ويمكن احتساب  $s'$  تقريباً للقرن الحادي والعشرين بوصفها دالة للزمن كما يلي:

$$(9-10) \quad s' = -47 \mu\text{as } t$$

### 3.10 التوقيت العالمي (UT)

يحتسب التوقيت الشمسي على أساس دوران الأرض نسبة إلى الشمس. وقد صمم متوسط التوقيت الشمسي لإزالة أحوال الشذوذ الناجمة عن ميلان مسير الشمس وتفاوت سرعة الأرض في مدارها حول الشمس. وهو الزاوية الساعية لنقطة وهمية تتحرك بانتظام على امتداد خط الاستواء السماوي بنفس معدل متوسط مسير الشمس على امتداد الجسم الإهليلجي. وهي، في الممارسة العملية، فترات التوقيت النجمي المرصودة فلكياً مباشرة والمحولة بعد ذلك إلى فترات من متوسط التوقيت الشمسي بالقسمة على 1,00273790935.

ويطلق على متوسط التوقيت الشمسي المحدد لخط الزوال من أجل خط الطول 0° المختصر UT1. وتجري رصدات فلكية لتحديد الفرق بين هذا التوقيت والتوقيت العالمي المنسق (UTC). ويشار إلى رصدات الوقت الخام بالمختصر UT0 والتي يجب تصحيحها لمراعاة حركة الأرض القطبية من أجل الحصول على التوقيت UT1. وقد يبلغ تأثير الحركة القطبية عدة أجزاء من المائة من الثانية. وتتلقى الخدمة الدولية IERS هذه البيانات وتحافظ على مقياس الوقت UT1.

وتبين هذه الرصدات أن للأرض تغيرات في سرعة الدوران يمكن تصنيفها إلى ثلاثة أنواع: زمنية وشاذة ودورية. ويشير الاختلاف الزمني في سرعة الدوران إلى الزيادة الخطية الظاهرية في طول النهار وذلك أساساً بسبب حركة المد والجزر. ويؤدي هذا التأثير إلى تباطؤ سرعة دوران الأرض مما يؤدي إلى إطالة اليوم بنحو 0,0005 إلى 0,0035 ثانية في القرن. ويبدو أن التغيرات غير النظامية في السرعة هي نتيجة تسارعات عشوائية، ولكن قد تكون مرتبطة بعمليات فيزيائية تحدث على الأرض أو في باطنها. وهي تشمل تقلبات عِقدية ذات فترات مميزة من 5 إلى 10 سنوات فضلاً عن تغيرات تحدث في فترات زمنية أقصر.

وترتبط التغيرات الدورية بعمليات فيزيائية قابلة للتكرار دورياً تؤثر على الأرض. فعمليات المد والجزر التي تحدث بفعل القمر والشمس في الأرض الصلبة تفضي إلى تغيرات دورية في طول اليوم في حدود 0,0005 ثانية على فترات سنة واحدة ونصف سنة و 27,55 يوماً و 13,66 يوماً.

وبالرجوع مرة أخرى إلى المعادلة (1-10) يتمثل هذا الدوران كما يلي:

$$(10-10) \quad R(t) = R_3(-\theta)$$

حيث  $\theta$  هي زاوية دوران الأرض بين التقويمين CEO و TEO في تاريخ  $t$  في مستوى استواء القطب الوسيط السماوي. وهي تُستخرج من العلاقة التقليدية نسبة إلى التوقيت UT1 [Capitaine et al., 2000]:

$$\theta(T_u) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u) \quad (11-10)$$

حيث:

$T_u = (\text{Julian UT1 date} - 2451545.0)$ , and  $UT1 = UTC + (UT1 - UTC)$  أو ما يكافئها

$$\theta(T_u) = 2\pi(\text{UT1 Julian Days elapsed since } 2451545.0 + 0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u)$$

**الملاحظة 1 -** انظر المزيد من التفاصيل في الفصل 7 - مقياس الوقت.

#### 4.10 النظم الجيوديسية

ترجع أصول النظم المرجعية الأرضية، كما أوضح أعلاه، إلى مركز كتلة الأرض وترتبط محاورها القطبية باتجاه محور ثابت نسبة إلى قشرة الأرض. ويوفر أصل خطوط الطول في مستوي الاستواء الاتجاه الثالث. وتتكون الأطر المرجعية الأرضية من قائمة إحداثيات المواقع والتحركات الممكنة. ويمكن التعبير عن هذه الإحداثيات كمجموعة من إحداثيات الموقع ( $x, y, z$ ) الديكارتية. وغالباً ما توصف بموجب خط الطول وخط العرض وارتفاع الموقع فوق سطح مرجعي ما. وقد يكون هذا السطح مجسم إهليلجي مرجعي أو سطح كمون أرضي.

#### 5.10 السطوح المرجعية

##### 1.5.10 المجسم الأرضي (Geoid)

يمكن اعتبار الأرض بأنها تتكون من سلسلة من السطوح لكل منها نفس الكمون. ولا يقتصر هذا الكمون على كمون الجاذبية الأرضية فحسب وإنما يشمل أيضاً الكمون الناجم عن القوة النابذة. وتدعى هذه السطوح geoids ويدعى السطح الذي يقترب من متوسط سطح البحر geoid. وهو سطح مرجعي طبيعي لأن خط الشاقول متعامد معه، ومن السهل قياس الارتفاعات على امتداد خط الشاقول. وgeoid هو السطح الذي يشار إليه عادة بأنه متوسط مستوى سطح البحر. وهو يعرّف بوصف ارتفاعه فوق مجسم إهليلجي مرجعي، يدعى تموج geoid، على امتداد الخط المتعامد مع المجسم الإهليلجي. ويسمى ارتفاع تضاريس السطح فوق المجسم الأرضي، المقياس على امتداد خط الشاقول، الارتفاع فوق متوسط سطح البحر أو الارتفاع المتعامد.

##### 2.5.10 المجسم الإهليلجي (Ellipsoid)

يستخدم المجسم الإهليلجي المرجعي لوصف شكل الأرض تقريباً لأغراض مرجعية. وهو يتحدد بواسطة نصف القطر الأكبر (الإستوائي) والتفلطح (العلاقة بين نصف القطر الاستوائي ونصف القطر القطبي). ويعرّف التفلطح بالعلاقة:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (12-10)$$

حيث:

$a$  و  $b$ : هما نصف القطر الاستوائي ونصف القطر القطبي، على التوالي.

ويسمى ارتفاع تضاريس السطح فوق المجسم الإهليلجي على امتداد خط متعامد مع المجسم الإهليلجي الارتفاع الإهليلجي. على سبيل المثال، من أجل مجسم إهليلجي من النظام الجيوديسي العالمي (WGS 84) تكون:  $a = 6378137,0 \text{ m}$  و  $f = 1,0/298,2572235630$ .



## 3.5.10 أنواع الإحداثيات

## 1.3.5.10 الإحداثيات التي مركزها الأرض

مرجع هذه الإحداثيات هو مركز الأرض. ويمكن التعبير عنها في شكل متجه، أي إحداثيات  $(x, y, z)$  الديكارتية لموقع ما، أو في شكل خط عرض  $\phi'$  وخط طول  $\lambda$  مركزهما الأرض. ويعبر عن العلاقة بينها كما يلي:

$$(13-10) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \lambda \\ \cos \phi' \sin \lambda \\ \sin \phi' \end{bmatrix}$$

يشير خط العرض الذي مركزه الأرض لموقع ما إلى الزاوية بين خط الاستواء لمحسم إهليلجي مرجعي وخط ينطلق من مركز المحسم الإهليلجي إلى ذلك الموقع. وخط الطول الذي مركزه الأرض هو الزاوية بين خط الزوال المرجعي للمحسم الإهليلجي وخط الزوال للموقع.

## 2.3.5.10 الإحداثيات الجيوديسية

يتم تحديد الإحداثيات الجيوديسية بالنسبة إلى محسم إهليلجي مرجعي. ويعبر عنها عادة من حيث خط العرض الجيوديسي  $\phi$  وخط الطول الجيوديسي  $\lambda$ . وخط العرض الجيوديسي هو الزاوية بين خط استواء المحسم الإهليلجي والناظم بالنسبة إلى المحسم الإهليلجي الذي يمر من خلال الموقع. ويظهر الفرق بين خط العرض الذي مركزه الأرض وخط العرض الجيوديسي في الشكل 1-10. وخط الطول الجيوديسي هو الزاوية بين خط الزوال للمحسم الإهليلجي المرجعي وخط الزوال للموقع. وهو نفس خط الطول الذي مركزه الأرض إذا كان للمحسم الإهليلجي المرجعي في كل حالة نفس المحاور وخط الزوال المرجعي. ويمكن أن تنسب الإحداثيات الديكارتية التي مركزها الأرض إلى الإحداثيات الجيوديسية بالعلاقة:

$$(14-10) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} (N_\phi + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N_\phi + h) \cos \phi \sin \lambda \\ \left[ (1 - e^2) N_\phi + h \right] \sin \phi' \end{bmatrix}$$

حيث:

$h$ : ارتفاع المحسم الإهليلجي

$e$ : الابتعاد عن مركز المحسم الإهليلجي بالعلاقة:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{2f - f^2}$$

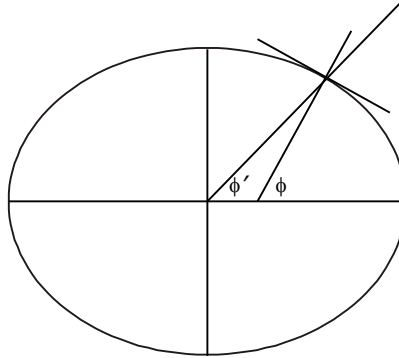
$N_\phi$ : نصف قطر المحسم الإهليلجي للانحناء في خط الزوال بالعلاقة:

$$(15-10) \quad N_\phi = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

ويتم تحديد الارتفاع بموجب ارتفاع المحسم الإهليلجي،  $h$ ، وهو مسافة الموقع فوق المحسم الإهليلجي المرجعي مقيساً على امتداد الخط الذي يمر عبر الموقع متعامداً مع المحسم الإهليلجي.

الشكل 1-10

الفرق بين خط العرض الذي مركزه الأرض  $\phi$  وخط العرض الجيوديسي  $\phi$



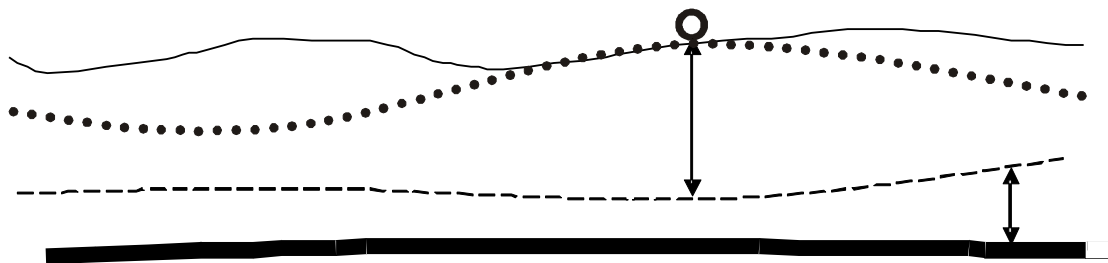
Sat\_time\_freq-10-01

### 3.3.5.10 الإحداثيات الفلكية

تقاس الإحداثيات الفلكية استناداً إلى اتجاه الخط العمودي المحلي أو خط الشاقول. والخط العمودي المحلي متعامد مع سطح تساوي الكمون الأرضي في الموقع. ويطلق على هذه السطوح اسم geops، ويدعى السطح geop الذي له كمون الأرض عند مستوى سطح البحر المجسم الأرضي geoid. وخط العرض الفلكي، إذاً، هو الزاوية بين اتجاه الخط الرأسي ومستوي خط الاستواء للأرض. وخط الطول الفلكي هو الزاوية بين المستوي الذي يحتوي الخط الرأسي ومستوي خط الزوال المرجعي. وانحراف الخط الرأسي هو الزاوية بين ناظم المجسم الإهليلجي والخط العمودي، ويوصف بتحديد مكونات الزاوية في اتجاهي الشمال-الجنوب والشرق-الغرب. ويسمى ارتفاع الموقع فوق geoid ارتفاع متوسط مستوى سطح البحر أو الارتفاع المتعامد،  $H$ . ويقاس على امتداد اتجاه الخط الرأسي. ويسمى ارتفاع geoid فوق المجسم الإهليلجي المرجعي تموج geoid،  $N$ ، ويقاس على امتداد الناظم إلى المجسم الإهليلجي.

الشكل 2-10

السطوح المرجعية الجيوديسية



### 4.3.5.10 البيانات الجيوديسية

تستخدم البيانات الجيوديسية لتوفير نموذج جيوديسي شامل للأرض، وهي تعرف تقليدياً بواسطة مجسم إهليلجي مرجعي وتوصيف نقطة بدء. وقد أمكن الآن، بفضل الجيوديسيا الفضائية الحديثة، توفير نظام مرجعي مرتبط مباشرة بمركز الأرض دون استخدام مجسم إهليلجي مرجعي. وغالباً ما تستخدم هذه الرصدات لتوفير بيانات تتكون من مجموعة من المعلومات وتحدد إحداثيات الموقع

التي يمكن استخدامها لتوسيع النظام بواسطة قياسات تفاضلية فيما يتعلق بتعريف المواقع. ويمكن التعبير عن التحويلات بين البيانات بالتعبير التالي:

$$(16-10) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 - \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1$$

حيث:

تحدد معلمات التحويل  $(T_3, T_2, T_1)$  ومعلمات الدوران  $(R_3, R_2, R_1)$  ومعلمة المقياس تجريبياً بمقارنة إحداثيات المواقع في مجموعتين مختلفتين من البيانات.

### 5.3.5.10 الإطار المرجعي الدولي للأرض

توفر الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية (IERS) النظام المرجعي الأرضي الدولي (ITRS) كمعيار دولي. وأصل النظام هو المركز الجيولوجي لكتلة الأرض، بما في ذلك المحيطات والغلاف الجوي، وهو معرف بحيث لا يكون له أي دوران إجمالي متبق فيما يتعلق بالتحركات الأفقية على سطح الأرض. ووحدة الطول هي المتر (النظام الدولي SI) بما يوفر مقياساً متسقاً مع إحداثية التوقيت الذي مركزه الأرض (TCG) لإطار محلي مركزه الأرض، بما يتفق مع التوصيات الدولية.

ويدعى تنفيذ النظام المرجعي الأرضي الدولي في مركز منتجات الخدمة الدولية IERS الإطار المرجعي الأرضي الدولي (ITRF). وهو مستمد من الرصدات الجيوديسية في الفضاء. وفي الوقت الحاضر، تنشر حلول الإطار المرجعي الأرضي الدولي سنوياً تقريباً من قبل مركز منتجات النظام ITRS في المذكرات التقنية الصادرة عن الخدمة الدولية IERS. وتشير الأرقام (yy) التي تتبع التسمية "ITRF" إلى آخر سنة استخدمت بياناتها في تشكيل الإطار. ومن ثم يشير المختصر ITRF97 إلى إطار مواقع المحطات والسرعات الذي وضع في عام 1999 باستخدام كل البيانات IERS المتاحة حتى عام 1998.

ويحتوي تقرير الفريق العامل المعنى ببيانات الإطار المرجعي [Ray et al., 1999] على معلومات مفيدة تتعلق بتاريخ تعريف بيانات الإطار المرجعي ITRF. كما أنه يورد تفاصيل الآثار الخاصة بكل تقنية على بعض معلمات تعريف البيانات، ولا سيما الأصل والمقياس.

## المراجع

- CAPITAINE, N., GUINOT, B. and MCCARTHY, D. D. [2000] *Astronomy & Astrophysics*. p. 355-398.
- GUINOT, B. [1979] *Time and the Earth's Rotation*, IAU Symp. 82, ed. D. D. McCarthy & J. D. H. Pilkington, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 7.
- MCCARTHY, D. D. and PETIT, G. (editors) [2003] *IERS Conventions (2003)*, *IERS Technical Note* 32, International Earth Rotation Service.
- RAY, J., BLEWITT, G., BOUCHER, C., EANES, R., FEISSEL, M., HEFLIN, M., HERRING, T., KOUBA, J., MA, C., MONTAG, H., WILLIS, P., ALTAMIMI, Z., EUBANKS, T. M., D. GAMBIS, PETIT, G., RIES, J., SCHERNECK, H. G., SILLARD, P. and P. [1999] *Report of the Working Group on ITRF Datum*.



## الفصل 11

### الانتشار والعوامل البيئية

#### الصفحة

142	.....	1.11	مقدمة
142	.....	2.11	تأخر المدى المقارن في تروبوسفير الأرض وفي الأيونوسفير
143	.....	3.11	نمذجة تأخر المدى في تروبوسفير الأرض
144	.....	1.3.11	تفاوت تأخر المدى في الأيونوسفير وفي التروبوسفير
144	.....	4.11	تأخر الوقت في الأيونوسفير وسلوكه على صعيد العالم والتفاوت اليومي والتفاوت الدوري الشمسي
147	.....	1.4.11	طرائق التصحيح لتأخر الوقت في الأيونوسفير، ونماذج المتوسط الشهرية، والنماذج المحدثة، واستخدام بيانات SBAS/WAAS/IGS الأيونوسفيرية في الوقت الفعلي، والتصحيحات ثنائية التردد
148	.....	2.4.11	الآثار الأيونوسفيرية الأعلى مرتبة على تأخر الوقت
149	.....	3.4.11	آثار التلألؤ
150	.....	5.11	خاتمة
150	.....		المراجع

## 1.11 مقدمة

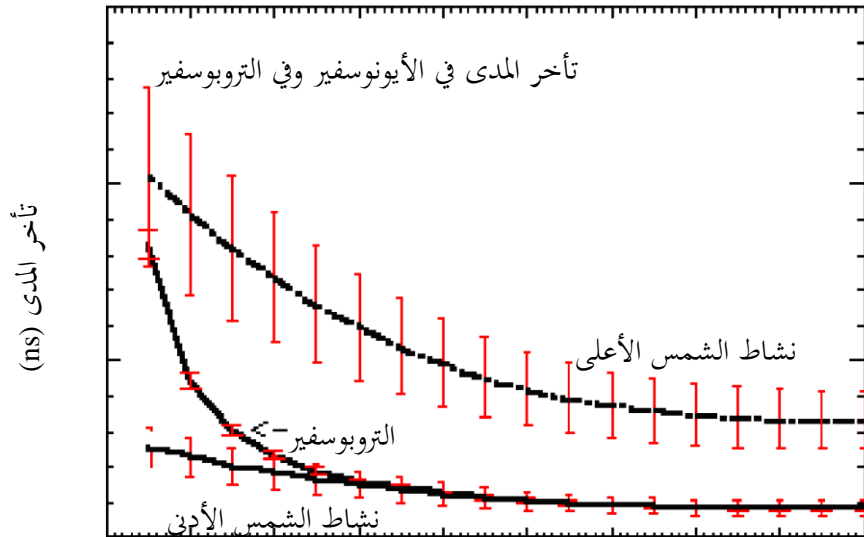
ينطوي نقل الوقت على وجه الدقة عبر الساتل، كأكبر مصدر خطأ محتمل، على تأخرات الانتشار في الغلاف الجوي المحايد نسبة للأرض وفي الأيونوسفير. ويتناول هذا القسم تأخرات المدى هذه ويعرض ويناقش التقنيات المختلفة لتعويضها. وتختلف تأخرات المدى في التروبوسفير والأيونوسفير في عدة جوانب هامة. وتأخر المدى في تروبوسفير الأرض ليس تأخر تشتت؛ أي إنه ليس دالة تتبع التردد، على الأقل ليس عبر مدى الترددات الراديوية الاعتيادية المستخدمة للوصول إلى سواتل الأرض الاصطناعية. أما تأخر المدى في الأيونوسفير فهو تأخر تشتت؛ وهو يتفاوت عكساً مع التردد. وبالتالي يمكن، من خلال قياس تأخر المدى النسبي في ترددين متباعدين بشكل مناسب، حساب تأخر المدى المطلق مباشرة على طول المسير من الساتل إلى المستعمل. ولا يمكن قياس تأخر المدى في تروبوسفير الأرض مباشرة، ولكن يمكن استخدام العديد من النماذج، أو تقنيات القياس غير المباشر، للاستدلال على مساهمة تأخر الزمن في التروبوسفير لنقل الوقت عبر الساتل بدرجة عالية من الدقة.

## 2.11 تأخر المدى المقارن في تروبوسفير الأرض وفي الأيونوسفير

يوضح الشكل 1-11 قيم تأخر المدى النموذجية إزاء زاوية الارتفاع بالنسبة لتروبوسفير الأرض ولأيونوسفير منتصف خطوط العرض عند التردد L1 في النظام العالمي لتحديد المواقع، في ظروف مختلفة من النشاط الشمسي. وهناك عدة ظواهر هامة يتعين أن تلاحظ في الشكل 1-11. أولاً، تأخر المدى في التروبوسفير عند زوايا ارتفاع عالية مماثل لتأخر المدى في الأيونوسفير في منتصف خطوط العرض في الظروف الشمسية الدنيا. ثانياً، يختلف تفاوت تأخر المدى باختلاف زاوية الارتفاع، من السميت إلى ارتفاع 5°، بعامل تقريبي قدره 3 للأيونوسفير، ولكن بعامل أكبر من 10 للتروبوسفير. ومرد ذلك، بطبيعة الحال، أن التروبوسفير أقرب كثيراً إلى سطح الأرض مما هو الأيونوسفير، وعند زوايا ارتفاع منخفضة تشاهد الأرض على نحو أمثل مما هو الحال عبر الأيونوسفير الذي هو على ارتفاع أعلى.

الشكل 1-11

تأخر المدى المقارن للتروبوسفير ومنتصف خطوط العرض في الأيونوسفير إزاء زاوية الارتفاع



زاوية الارتفاع (بالدرجات)

Sat\_time\_freq-11-01

أخيراً، تلاحظ في الشكل 1-11 أشرطة الخطأ التقريبي  $\pm 1\sigma$ . وأخطاء متوسط تأخر المدى الأيونوسفيري هي في حدود  $\pm 25\%$  في جميع ظروف النشاط الشمسي، في حين أن أشرطة الخطأ  $\pm 1\sigma$  في التروبوسفير هي أقل من حوالي  $\pm 5\%$ . وكذلك فإن تأخر المدى

بسبب تروبوسفير الأرض أكثر ثباتاً بكثير، متراوحاً بأقل من 20% عبر الأرض بأكملها. ومرد ذلك أن ما يقرب من 90% من تأخر المدى في التروبوسفير يعزى إلى ما يسمى "المكونة الجافة" في تروبوسفير الأرض، وهي متناسبة مع الضغط المطلق ودرجة الحرارة المطلقة اللذين، لحسن الحظ بالنسبة لنا سكان الأرض، لا يختلفان عموماً بأكثر من بضع درجات في المائة عن قيمتهما الاسمية. وبما أن غالبية التروبوسفير تعزى إلى "المكونة الجافة" فإن تأخر المدى فيه أسهل نمذجة من مثيله في أيونوسفير الأرض.

### 3.11 نمذجة تأخر المدى في تروبوسفير الأرض

هناك نماذج كثيرة لتروبوسفير الأرض، استعرض البعض منها [Spilker 1996]. وأساس معظم النماذج التروبوسفيرية هو مجرد دالة زاوية ارتفاع تُنسب تأخر مدى السميت إلى التأخر في زوايا ارتفاع أدنى. ولئن اختلفت إلى حد ما كل دالة لزاوية ارتفاع فإن معظمها يتطلب ببساطة أن يتحدد تأخر مدى السميت وأن يُضرب بعد ذلك بعدد، هو دالة زاوية الارتفاع، للحصول على التأخر المكافئ المطلوب عند زاوية ارتفاع الساتل المرصود. وهناك طرائق مناخية لتحديد تأخر المدى الرأسي وطرائق لتحديد التأخر الرأسي الفعلي بقياسات في شبه الوقت الفعلي باستخدام بيانات التردد المزدوج الدقيقة المستقاة من عدد من سواتل النظام GPS في زوايا ارتفاع مختلفة وضبط تأخر المدى لأفضل دالة زاوية ارتفاع مناسبة في ذلك الوقت. ويمكن التوصل إلى دقة في حدود 1-2 cm في تصحيح تأخر المدى باستخدام أسلوب مطابقة المنحنى هذا.

ويحتسب تأخر المدى الرأسي بسبب التروبوسفير تقريباً كما يلي:

$$\Delta r = 10^{-6} c \int N(h) dl \quad (1-11)$$

حيث:

$c$ : سرعة الضوء بالململيثانية

$N(h)dl$ : قابلية الانكسار الكلية في التروبوسفير، بوحدات قابلية الانكسار.

وثمة شكل من بين العديد من أشكال تأخر مدى السميت، حيث يمكن تفريق الفصل الجاف، أو الهيدروستاتي، وما يسمى الفصل "الرطب"، وحيث يمكن أن يؤخذ في الحسبان محلياً درجة الحرارة والضغط وبخار الماء، وهو:

$$\Delta r_{Total} = \Delta r_{Dry} + \Delta r_{Wet} \quad (2-11)$$

$$\Delta r_{dry} = \frac{0.62 \times P_{millibars}}{T_{Kelvin}} \quad (m) \quad (3-11)$$

حيث:

$P$ : الضغط الكلي، بوحدة ملليبار.

$$\Delta r_{wet} = \frac{8.3 \times 10^2 \times P_{WV}}{T^2} \quad (m) \quad (4-11)$$

حيث:

$P_{WV}$ : الضغط الجزئي لبخار الماء.

وباستخدام أرقام نموذجية للضغط، 1013 ملليبار، ودرجة الحرارة، 15° درجة مئوية، أو 288° K، وضغط ماء جزئي يعادل 8,5 ملليبار، ما يقابل 50% رطوبة نسبية، يكون تأخر المدى التروبوسفيري الرأسي الكلي:

$$\Delta r_{Total} = 2,18 + 0,08 = 2,26 \quad (m) \quad (5-11)$$

وفي هذه الحالة النموذجية تكون المكونة "الرطبة" بسبب بخار الماء في الغلاف الجوي مجرد  $0,08/2,26 = 3,5\%$  من تأخر المدى التروبوسفيري الرأسي الكلي.

ويمكن للمستعملين الذين لا يتطلبون سوى متوسط تأخر مدى التروبوسفير لمختلف خطوط العرض استخدام قيمة ثابتة وحيدة في جميع أنحاء العالم، تعطى تقريباً بالعلاقة:

$$\Delta r = \frac{2.47}{\sin E + 0.0121} \quad (m) \quad (6-11)$$

حيث:

$E$ : زاوية الارتفاع.

وتكون دالة المناقلة المبسطة:

$$m(E) = \frac{1.0121}{\sin E + 0.0121} \quad (7-11)$$

وقام كولينز ولانجلي بوضع نموذج مدى تأخر مناخي تروبوسفيري تم اختباره على نطاق واسع إزاء بيانات مسابير راديوية فعلية مستقاة من محطات عديدة في أمريكا الشمالية [Collins and Langley, 1999]. ووصفت النتائج من حيث الانحرافات عن الترسبات العادية، أو الغوسية. وهذا النموذج، ويدعى UNB3، يتبع عن كثب توزيعاً غوسياً من حوالي  $\sigma 5-$  إلى  $\sigma 4+$  نقاط، وهو أداء مثير للإعجاب لنموذج مناخي دون مدخلات في الوقت الفعلي. وقد وُصفت العوامل التي تحد النموذج في [Collins and Langley, 1996].

### 1.3.11 تفاوت تأخر المدى في الأيونوسفير وفي التروبوسفير

يعزى تفاوت تأخر المدى في تروبوسفير الأرض، كما هو مبين أعلاه، في المقام الأول إلى محتوى بخار الماء في الغلاف الجوي. ومع ذلك، فإن الحجم المطلق لتأخر مدى السميت بسبب بخار الماء هو في حدود مجرد بضعة سنتيمترات، وحتى في زوايا ارتفاع دنيا قد لا يكون عاملاً رئيسياً في خطأ المدى الإجمالي. والتفاوت المطلق لتأخر المدى في أيونوسفير الأرض هو أكبر من ذلك بكثير، ولكن يمكن إزالته شبه كلياً باستخدام مستقبل GPS مزدوج التردد كما هو موضح أدناه.

ويتعين على من يحتاج إلى أعلى درجات الدقة لكلا تصحيحات تأخر المدى الأيونوسفيرية والتروبوسفيرية استخدام تصحيح مزدوج التردد لإزالة تأخر المدى الأيونوسفيري من الرتبة الأولى، ثم عليه النظر في استخدام واحدة من دالات "المطابقة" في أخطاء المدى المتبقية إزاء زاوية الارتفاع لتحديد تأخر المدى التروبوسفيري بشكل مستقل. وإذا لم يتوفر سوى مستقبل GPS وحيد التردد فمن المحتمل عندئذ أن يكون تأخر المدى الأيونوسفيري المتبقي، حتى بعد استخدام واحدة من مختلف طرائق التصحيح الأيونوسفيري، أكبر من تأخر المدى التروبوسفيري المتبقي حتى باستخدام نموذج مناخي لتأخر المدى، مثل النموذج UNB3.

### 4.11 تأخر الوقت في الأيونوسفير وسلوكه على صعيد العالم والتفاوت اليومي والتفاوت الدوري الشمسي

تأخر مدى الأيونوسفير متشتت؛ أي أنه يتفاوت عكساً مع التردد على النحو التالي:

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \int_0^{Sat.} Ndl - (s) \quad (8-11)$$

حيث:

$\int_0^{Sat.} Ndl$ : عدد متكامل من الإلكترونات الحرة على طول مسير موجات الراديو من نقطة القياس على الأرض إلى الساتل، ويعرف عادة باسم منحدر إجمالي المحتوى من الإلكترونات (TEC) على طول هذا المسير.

$c$ : سرعة الضوء بالمللي ثانية

$f$ : تردد تشغيل النظام (Hz).

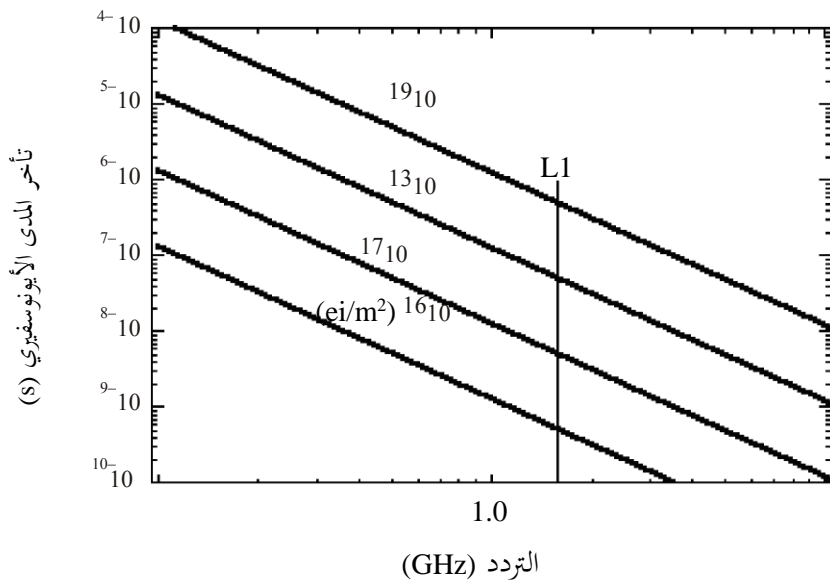


وبما أن تأخر المدى الأيونوسفيري هو دالة تتبع التردد فإن أفضل طريقة لتصحيح آثاره على نقل الوقت هو ببساطة قياسه عند ترددتين متباعدين بما فيه الكفاية، وبالتالي قياس تأخر الوقت في الأيونوسفير مباشرة. والطرائق الأخرى كلها أقل مباشرة، وهي بالضرورة أقل دقة.

وتتراوح الأرقام النموذجية لإجمالي المحتوى من الإلكترونات (TEC) في أيونوسفير الأرض في العمود من  $10^{16}$  إلى  $10^{19}$  إلكترون في المتر المربع. ويظهر الشكل 11-2 قيم تأخر الوقت في الأيونوسفير الوحيد الاتجاه المقابل إزاء التردد لقيم المحتوى TEC في العمود من  $10^{16}$  إلى  $10^{19}$  إلكترون في المتر المربع. ويظهر تردد GPS L1 بمقدار 1,57542 GHz في خط رأسي في الشكل 11-2. ويعزى التباين الكبير في المحتوى TEC في حدود 3 قيم أسية إلى عوامل كثيرة، من بينها الوقت من اليوم والموسم وموقع المحطة وتدفق الأشعة الشمسية فوق البنفسجية المؤينة.

الشكل 11-2

تأخر المدى الأيونوسفيري الوحيد الاتجاه كدالة تردد  
لقيم TEC مختلفة في العمود من  $10^{16}$  إلى  $10^{19}$  إلكترون في المتر المربع.  
ويشار إلى التردد GPS L1 بخط رأسي عند 1,575 GHz



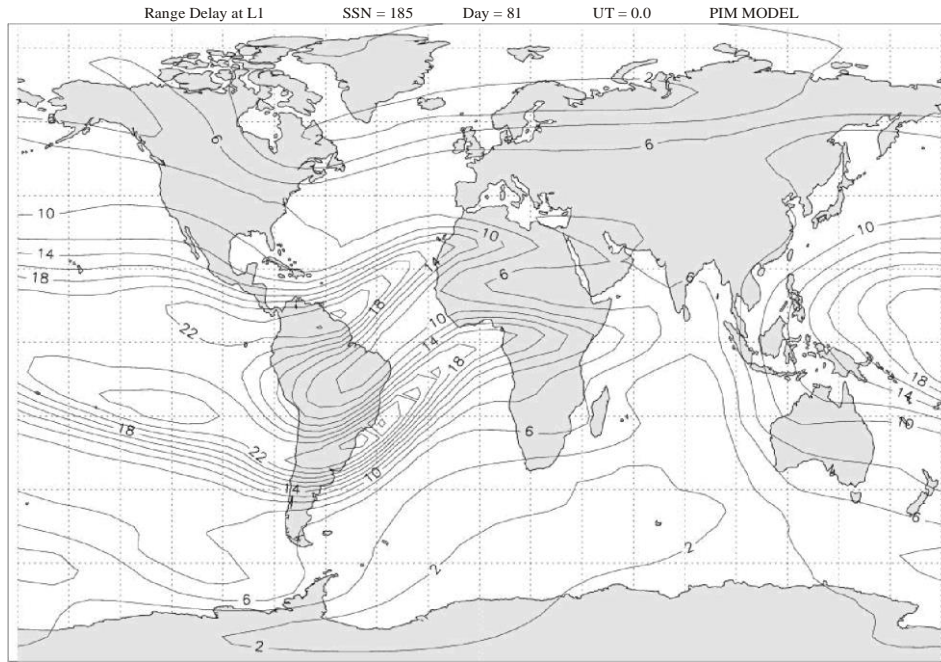
Sat\_time\_freq-11-02

ويوضح الشكل 11-3 المتوسط الشهري لتأخر المدى الرأسي الأيونوسفيري على صعيد العالم، بالأمتار عند التردد GPS L1، لظروف الشمس القصوى وقت الاعتدال. ويلاحظ أن تأخرات المدى الأقصى لا تحدث عند خط الاستواء الجغرافي وإنما عند خطوط العرض حوالي  $\pm 15^\circ$  على جانبي خط الاستواء المغنطيسي. وبينما يظهر هذا التمثيل النموذجي لظروف المدى المتوسط القيم القصوى لمجرد 24 m عند L1 فإن القيم المطلقة يمكن أن تكون أكبر من ذلك بكثير كما أن التباين اليومي مرتفع عادة أيضاً.

ويوضح الشكل 11-4 التباين اليومي والموسمي والدوري الشمسي لأيونوسفير خطوط العرض الشمالية الوسطى وذلك برسم قيم تأخر المدى لكل يوم من الأشهر الأربعة يناير ومارس ويونيو وسبتمبر من 1986 حتى 1990 محطة تقع بالقرب من بوسطن، ماساشوستس، وهي فترة زيادة في النشاط الشمسي في الدورة الشمسية التي بلغت ذروتها في الفترة الزمنية 1989-1999. ويلاحظ التباين اليومي الكبير في منحنيات تأخر المدى النهارية ضمن أي شهر معين، وكذلك الآثار الموسمية مع ارتفاع القيم المطلقة في شهري الاعتدال عما هي في شهري الانقلاب، مع انخفاض القيم بشكل خاص في شهر يونيو. ويلاحظ التغيرات الكبيرة في تأخر المدى المطلق بتزايد الدورة الشمسية من 1986 إلى 1989 و1990. أما نماذج تأخر المدى الأيونوسفيري التي لم يتم تحديثها بقياس قريب في الوقت المناسب فلا يسعها سوى تكرار متوسط تأخر المدى الشهري؛ مما يترك بالتالي التباين اليومي المتبقي بحوالي 25% من جذر متوسط التربيع في تأخر المدى الأيونوسفيري دون تصحيح.

## الشكل 3-11

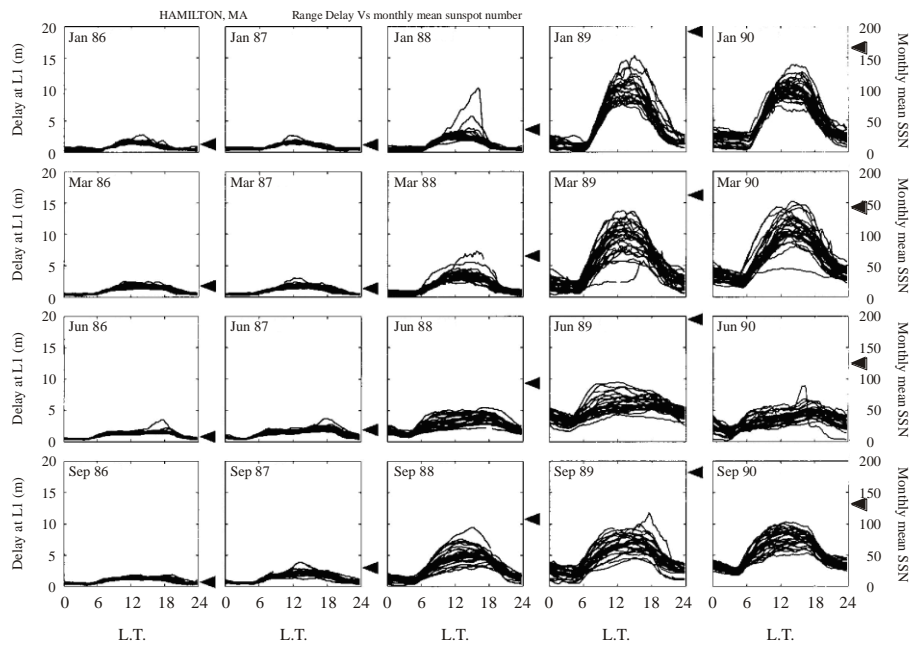
متوسط تأخر المدى الأيونوسفيري على صعيد العالم،  
بالأمتار عند التردد GPS L1، لظروف الشمس القصوى وقت الاعتدال



Sat\_time\_freq-11-03

## الشكل 4-11

الرسم الطبقي الشهري للمنحنيات النهارية لمكافئ تأخر المدى الأيونوسفيري الراسي  
عند التردد GPS L1 لأربعة أشهر في خمس سنوات من تزايد النشاط الشمسي.  
متوسط أعداد البقع الشمسية لكل شهر، يشار إلى أعداد البقع الشمسية (SSN)  
بالأسهم العريضة إلى يمين كل رسم طبقي شهري



Sat\_time\_freq-11-04

### 1.4.11 طرائق التصحيح لتأخر الوقت في الأيونوسفير، ونماذج المتوسط الشهرية، والنماذج المحدثة، واستخدام بيانات SBAS/WAAS/IGS الأيونوسفيرية في الوقت الفعلي، والتصحيحات ثنائية التردد

يمكن لأخطاء المدى الزائف الرأسية النموذجية في النظام GPS الناجمة عن إجمالي المحتوى من الإلكترونات، إذا بقيت غير مصححة، أن تكون في حدود 10-25 m. وفي الواقع إن تأخر المدى الأيونوسفيري الرأسي إلى الجنوب مباشرة من الجزء القاري الجنوبي الشرقي في الولايات المتحدة الأمريكية بلغ أكثر من 40 m خلال عاصفتين مغنطيسيتين أرضيتين كبيرتين حدثتا مؤخراً، وهي منطقة يكون فيها المتوسط الشهري لقيم تأخر المدى الرأسي عموماً في حدود 10 m فقط. ولحسن الحظ، هناك عدة طرائق لتصحيح آثار الأيونوسفير على نقل الوقت. وترد هذه الطرائق أدناه، بدءاً بالحالة (التافهة) لعدم القيام بأي محاولة للتصحيح، وتدرجاً نحو أسلوب التصحيح بالتردد الثنائي الذي يوفر أفضل التصحيح، وإن كان ذلك بزيادة تكلفة معتدلة في المعدات الأولية، ولكنه يستثني الأيونوسفير من الاعتبار، حتى مستوى بضعة سنتيمترات من التصحيح على الأقل.

هناك على الأقل خمس طرائق مختلفة لتصحيح آثار تأخر المدى الأيونوسفيري. وسيناقش كل من هذه الطرائق، إلى جانب الصعوبة النسبية في تنفيذ التصحيح. وتسفر هذه الطرائق عن التصحيحات التقريبية التالية:

**0 % -** عدم القيام بأي محاولة لتصحيح تأخر المدى الأيونوسفيري. هذه حالة تافهة، ولكنها أدرجت رغبة في الاكتمال. ومن شأن أي تصحيح "ثابت" لكل "موسم" ومكان، دون تبعية يومية، أن يشكل تحسناً كبيراً على حالة "عدم المحاولة" هذه.

**05 % -** يرمي استخدام خوارزمية التصحيح الأيونوسفيري (ICA) إلى تصحيح ما يقرب من نصف (جذر متوسط تربيع) تأخر المدى الأيونوسفيري. وهذا هو التصحيح المعهود المستخدم في كل مستقبلات نظام GPS وحيدة التردد تقريباً. وترسل معاملات الخوارزمية ICA كجزء من الرسالة الساتلية، ويتم تحديثها مرة واحدة على الأقل كل عشرة أيام من مرفق التحكم الرئيسي في نظام GPS، أو بتواتر أكبر إذا كانت هناك تغييرات كبيرة في متوسط التدفق الراديوي الشمسي المستمر لمدة خمسة أيام خلال فترة الأيام العشرة. وتقتصر الخوارزمية ICA على 8 معاملات فقط نظراً للقيود المفروضة على طول رسائل [Klobuchar, 1987] GPS.

**75 % -** يتطلب استخدام نموذج أيونوسفيري من أحدث طراز آلاف المعاملات ولكنه يوافق متوسط السلوك الشهري لتأخر المدى الأيونوسفيري ضمن حدود تحيز متبق بما يقرب من 10%. ومن النماذج المألوفة الأيونوسفير المرجعي الدولي (IRI) [Bilitza, 2000]، ونموذج Bent. وكلا النموذجين متاح عبر الإنترنت. ومع ذلك ما زال استخدام هذين النموذجين يحتم على مستعمل النظام GPS أن يتعامل مع التباين اليومي المتبقي بحوالي 20-25%، وما يترتب على ذلك من تقريب بنسبة 22-27%، وخطأ بمقدار  $\sigma$  واحدة عندما يراعى التحيز في المعرفة بصدد المتوسط الشهري. ويلاحظ أن هذا المستوى من التصحيح ما زال لا يستخدم أي مدخلات في الوقت شبه الفعلي، ولكنه يعتمد فقط على نموذج من أحدث طراز ليصف على نحو أدق المتوسط الشهري لسلوك الأيونوسفير بدلاً من خوارزمية ICA التي لا تستخدم سوى 8 معاملات. وهكذا، بزيادة عدد المعاملات من 8 إلى عدة آلاف ترتفع نسبة التحسين من حوالي 50% إلى حوالي 75%، من حيث جذر متوسط التربيع.

**90 % -** استخدام التصحيحات الأيونوسفيرية بواسطة نظم التعزيز في الفضاء (SBAS) المرسل كجزء من رسائل التعزيز في هذا النظام. وتتوفر هذه الرسائل بوسائل منها نظام التعزيز الواسع النطاق (WAAS) والخدمة الملاحية المستقرة بالنسبة إلى الأرض للتغطية الأوروبية (EGNOS)، كما جاء في الفصل 2 بشأن نظم التعزيز. ويوفر هذا التحسين الكبير في التصحيح بيانات تأخر المدى الأيونوسفيري في الوقت شبه الفعلي المستقاة من شبكة من محطات نظم SBAS المرجعية التي تستخدم لتوليد شبكة من تصحيحات تأخر المدى الأيونوسفيري عند نقاط مساحتها 5° في 5° في شبكة خطوط العرض والطول فوق منطقة التغطية. وبطبيعة الحال، لا يمكن استخدام أسلوب التصحيح هذا إلا في المناطق التي يوجد فيها نظام SBAS وحيث توجد محطات مرجعية كافية على الأرض لقياس تأخرات المدى في الأيونوسفير. والتحسين باستخدام البيانات الأيونوسفيرية في الوقت شبه الفعلي مرهون باشتراط توفر مستقبل GPS وحيد التردد قادر أيضاً على تلقي رسالة SBAS. وسبب التصحيح المقدّر بنسبة 90% فقط باستخدام النظام WAAS مثلاً، حتى مع استخدام بيانات تأخر المدى في الوقت شبه الفعلي، هو الحاجة إلى الاستيفاء الرياضي من قيم شبكية بمساحة 5° في 5° من

تأخر المدى الأيونوسفيري بواسطة النظام WAAS للميل المكافئ من تأخرات المدى الأيونوسفيري على طول خط البصر إلى كل من سواتل GPS التي يرصدها المستعمل.

**99 % -** استخدام مستقبل مزدوج التردد كما هو موضح في الفصل 1 بشأن نظام GPS وفي الفصول المتعلقة بنقل الوقت للعمل أساساً على إزالة كل تأخرات المدى الأيونوسفيري على طول المسير إلى كل سواتل GPS المرصودة. وقيس هذا الأسلوب بشكل مباشر ميل تأخر المدى الأيونوسفيري على خط البصر طوال مسير كل ساتل GPS، ولا ينطوي على أي حسابات نموذجية، ولا على استيفاء من قيم تأخر مدى مقيسة على طول مسير آخر. وهو حتى الآن أفضل أسلوب تصحيح على الإطلاق، وينبغي أن يصبح المعيار لجميع مستعملي GPS المدنيين عندما يدخل التردد L5 الجديد حيز التنفيذ الكامل في سواتل GPS و Galileo في المستقبل، ومن المرجح أن يكون ذلك في وقت مبكر من العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين.

وينطوي كل من مستويات نسبة التصحيح المئوية المذكورة أعلاه على مأخذ أو آخر. فالتصحيح الصفر، بطبيعة الحال، يشكو من وجود أكبر عدد من الأخطاء، والتصحيح 99% ينطوي بالطبع على أعلى تكلفة، إذ يشترط وجود مستقبل GPS مزدوج التردد. ولا ينطوي استخدام الخوارزمية ICA لتصحيح ما يقرب من 50% من جذر متوسط التربيع من خطأ تأخر المدى الأيونوسفيري سوى على علة صغيرة إذ إن المعادلات اللازمة لتنفيذه واردة في وثيقة التحكم في الواجهات ICD-200، وهو الإجراء المعهود المستخدم في مستقبلات مستعملي نظام GPS الوحيدة التردد.

#### 2.4.11 الآثار الأيونوسفيرية الأعلى مرتبة على تأخر الوقت

تستخدم المعادلة 1-11 التي تربط تأخر الوقت في الأيونوسفير بإجمالي المحتوى من الإلكترونات النموذج من الدرجة الأولى من قرينة الانكسار الأيونوسفيري. ويتألف الشكل الكامل لقرينة الانكسار، بإهمال الحدود التي هي أقل من  $10^{-9}$  [Brunner and Gu, 1991]، من عدة حدود إضافية تشمل:

$$(9-11) \quad n = 1 - (X/2) \pm (XY/2) \cos \theta - (X^2/8)$$

حيث:

1: حد الفضاء الحر

$X/2$ : حد المرتبة الأولى، متناسبة مع  $1/f^2$

$XY/2 \cos \theta$ : متناسبة مع  $1/f^3$

$X^2/8$ : متناسبة مع  $1/f^4$ .

وإذا سميت هذه الحدود A و B و C على التوالي، يكون حجم حدود المراتب الأعلى عند ترددات GPS لأقصى ظروف الأيونوسفير على صعيد العالم كما يلي:

$$B \approx 2 \times 10^{-4}, C \approx 2 \times 10^{-7}, D \approx 2 \times 10^{-8}$$

وتكون النسبتان للحدين من المرتبة الأعلى، C و D، إلى الحد من المرتبة الأولى، B، مرة أخرى في أسوأ ظروف الأيونوسفير، هي:

$$C/B \approx 10^{-3}, D \approx 10^{-4}$$

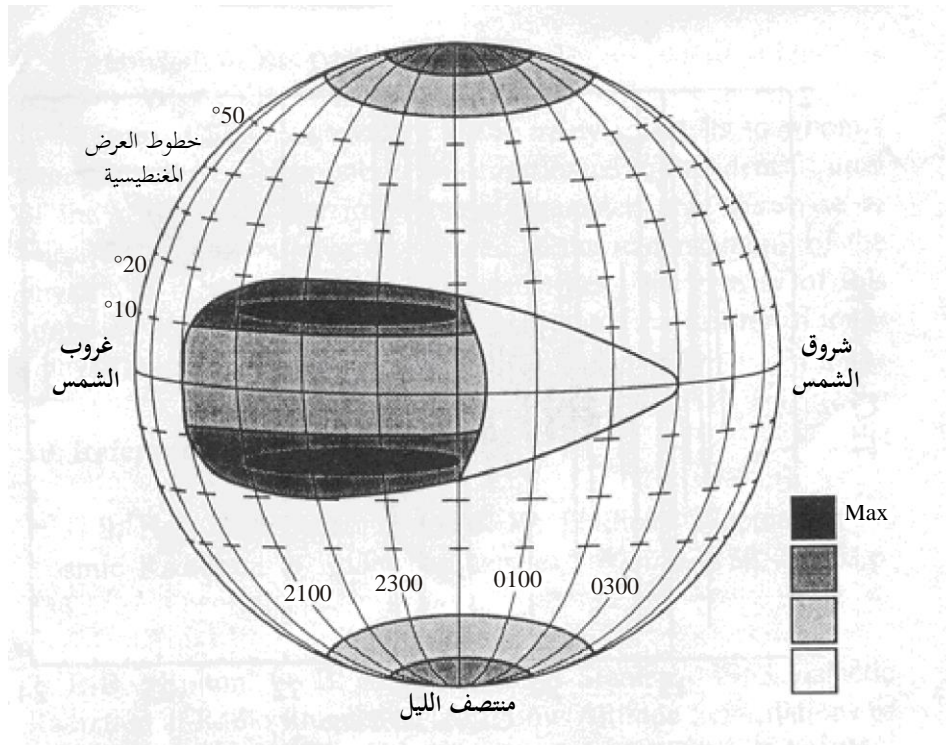
وهكذا، يكون الحدان من المرتبة الأعلى هما 0,1% و 0,01% من الحد من المرتبة الأولى عند ترددات GPS، حتى بالنسبة للأيونوسفير العالي للغاية قيد النظر هنا. وقد توصل [Ioannides and Strangeways, 2002] إلى استنتاجات مماثلة حيث كانت أكبر مساهمة في حدود المرتبة الأعلى مجرد بضعة سنتيمترات.

## 3.4.11 آثار التلألؤ

يمكن أن يؤثر كل من تلألؤ الاتساع وتلألؤ الطور على أداء المدى القصير لمختلف مستقبلات GPS. ومع ذلك، فإن حدوث قدر لا بأس به من آثار خبو التلألؤ أو "ارتعاش" تلألؤ الطور ضئيل جداً في مناطق خطوط العرض الوسطى. وحتى في المنطقة شبه الاستوائية، حيث يحتسب متوسط زمن الإشارة، لا تشكل آثار التلألؤ أي مشكلة. وفي المنطقة الاستوائية لا تحدث آثار خبو الاتساع العميقة عموماً سوى في ساعات ما بعد غروب الشمس حتى منتصف الليل المحلي، وذلك فقط خلال أشهر الاعتدالين في سنوات النشاط الشمسي العالي نسبياً. ويوفر الشكل 5-11 تمثيلاً تصويرياً للأوقات والمناطق في العالم التي تتسم بمستويات تلألؤ مختلفة. وقد استعرض عدد من الباحثين آثار التلألؤ، ومنهم [Goodman and Aarons, 1990] حيث وُصفت مورفولوجية تلألؤ الاتساع لمختلف الترددات التي يشيع استخدامها في الاتصالات الساتلية ونقل الوقت. وقد يمثل التلألؤ قيداً على دقة نقل الوقت بالساتل، ولكن من الممكن تقليل آثار التلألؤ ببساطة بتجنب الأوقات والفترات من اليوم التي يحدث فيها عادة. على سبيل المثال، على الرغم من أن خبو الاتساع العميق الذي يمكن أن يتسبب في انقطاع إرسال الإشارة على ترددات النظام GPS أمر نادر الحدوث في خطوط العرض الشفقية، من المستحسن لو أمكن تجنب نقل الوقت خلال فترات الاضطراب المغنطيسي. وكذلك، يستحسن تجنب نقل الوقت بعد غروب الشمس المحلي في المناطق شبه الاستوائية، وخصوصاً في سنوات النشاط الشمسي العالي. وأخيراً، من الأفضل دائماً مراقبة نسبة كثافة الموجة الحاملة إلى الضوضاء  $C/N_0$  في الوقت الفعلي لكل سواتل GPS حرصاً على استمرار توفر طريقة موثوق بها لتحديد ما إذا كان تلألؤ الاتساع العميق يؤثر على الإشارة الواردة أم لا.

الشكل 5-11

خارطة العالم بالاحداثيات المغنطيسية والتوقيت المحلي،  
تبين أين تقع مناطق التلألؤ عادة



## 5.11 خاتمة

إن أفضل نصيحة يمكن أن تعطى للمهتمين بنقل الوقت بشأن آثار التأخر الأيونوسفيري على نقل الوقت هي المسارعة، دون إبطاء، إلى أقرب مكان يباع فيه مستقبل GPS مزدوج التردد وشراء جهاز لكل نهاية في وصلة نقل الوقت. واستخدام مستقبل GPS مزدوج التردد هو ببساطة أفضل طريقة على الإطلاق لضمان إزالة أكثر من 99% من تأخر المدى الأيونوسفيري تلقائياً من كل مسيرات السواتل. وإذا تعذر استخدام مستقبل GPS مزدوج التردد، عندئذ تستخدم تصحيحات SBAS (WAAS أو EGNOS) الأيونوسفيرية لتوفير قيم تأخر الوقت في الأيونوسفير إذا كانت هذه التصحيحات متاحة في مناطق العالم حيث يتعين القيام بنقل الوقت. وإذا لم تتوفر تصحيحات SBAS الأيونوسفيرية، عندئذ من شأن قيم إجمالي المحتوى من الإلكترونات المستقاة من محطة قريبة من محطات الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية أن توفر تصحيحاً أفضل من أي من النماذج الأيونوسفيرية غير المحدثة.

## المراجع

- BILITZA, D. [2001] The International Reference Ionosphere 2000. Radio Science, Vol. 236, p. 261-275.
- BRUNNER, F. K. and GU, M. [1991] An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations. Manuscripta Geodaetica, Vol.16, p. 205-214.
- COLLINS, P. and LANGLEY, R. B. [July 1999] Tropospheric Delay Prediction for the WAAS User. GPS World, p. 52-58.
- COLLINS, P., LANGLEY, R. and LAMANCE, J. [19<sup>th</sup>-21 June, 1996] Limiting Factors in Tropospheric Propagation Delay Error Modelling for GPS Airborne Navigation. Presented at The Institute of Navigation 52<sup>nd</sup> Annual Meeting, Cambridge, Massachusetts, USA.
- GOODMAN, J. M. and AARONS, J. [1990] Ionospheric Effects on Modern Electronic Systems. Proc. of the IEEE, Vol. 78, p. 512-528.
- IOANNIDES, R. T. and STRANGEWAYS, H. J. [August 2002] Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency GPS. Proceedings of the XXVIIth General Assembly of URSI, Maastricht, Netherlands.
- KLOBUCHAR, J. A. [May 1987] Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, p. 325-331.
- SPIPKER, Jr. J. J. [1996] Tropospheric Effects on GPS. Chapter 12 in *Global Positioning System: Theory and Applications*. Edited by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., publ. by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ,Washington, DC. Vol. 1, p. 517-546.

## الفصل 12

### النظم العالمية للسواتل الملاحية - كأداة أولية لتحويل التوقيت

#### الصفحة

152	..... مقدمة	1.12
153	..... استخدام النظام GPS في التوقيت	2.12
153	..... كيف يوزع النظام GPS التوقيت؟	1.2.12
154	..... كيف يزامن النظام GPS الميقاتيات عبر مسافات طويلة؟	2.2.12
154	..... تطبيقات نقل الوقت بواسطة النظام GPS	3.12
156	..... نقل الوقت بالمشاهدة المشتركة الوحيدة القناة بشفرة C/A في نظام GPS	1.3.12
156	..... المقارنات وحيدة الموقع (خط الأساس صفر)	2.3.12
157	..... المعايير التفاضلية بواسطة النظام GPS	3.3.12
157	..... الالتفاف حول العالم	4.3.12
158	..... مقارنة النظام GPS بتقنيات أخرى لنقل الوقت	4.12
158	..... مقارنة إزاء نقل الوقت والتردد بالساتل في الاتجاهين	1.4.12
159	..... المقارنة إزاء نقل الوقت بأسلوب الليزر	2.4.12
160	..... التطورات الحديثة في نقل الوقت بواسطة النظام GPS	5.12
160	..... نقل الوقت بالمشاهدة المشتركة وتعدد القنوات في النظام GPS	1.5.12
163	..... هوائيات مستقرة الحرارة	2.5.12
163	..... استخدام طور الموجة الحاملة في النظام GPS	3.5.12
164	..... استخدام النظام العالمي للملاحة الساتلية	6.12
164	..... خاتمة	7.12
166	..... المراجع	

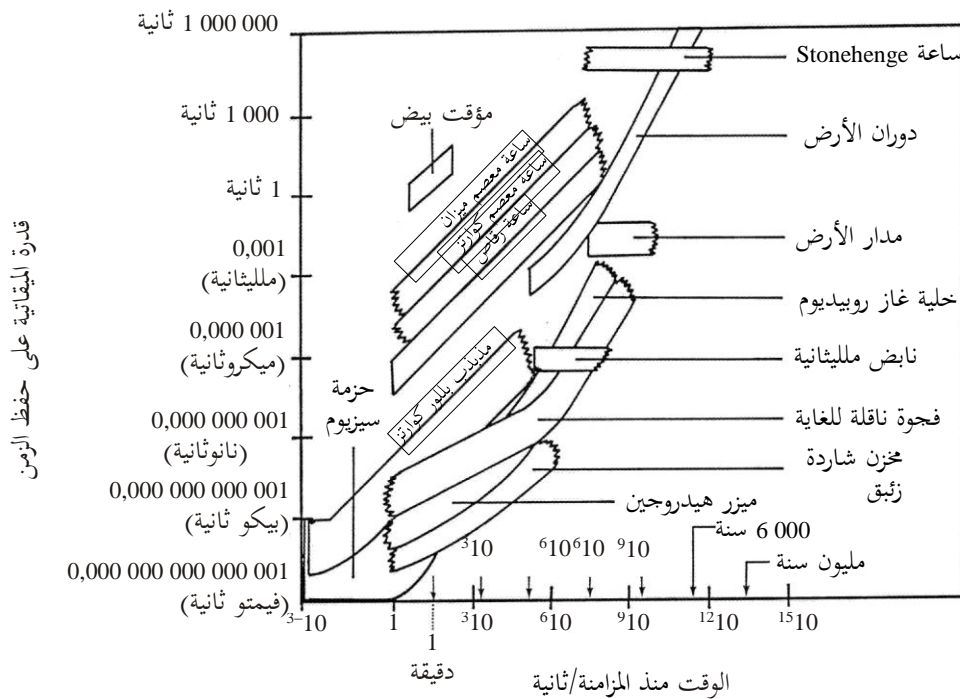


## 1.12 مقدمة

ما فتئت الميقاتيات التي تحفظ لنا الوقت على مر السنين تقترب من الكمال، من حيث الدقة والضبط على السواء. ويصور الشكل 1-12 مستويات أداء أشكال مختلفة من الميقاتيات على امتداد طائفة واسعة من الفترات الزمنية. وهناك تطور من الأقل دقة إلى الأدق من أعلى إلى أسفل. والجزء السفلي من الرسم البياني يصور التاريخ الأحداث عهداً. واليوم، نحن نشارف على استخدام ميقاتيات تبلغ دقة ترددها  $10 \times 10^{16}$ . وهذا يقابل ميقاتية لديها القدرة على الحفاظ على مستوى أداء من مرتبة 10 بيتا ثانية في اليوم.

الشكل 1-12

قدرة الميقاتيات على حفظ الوقت  
(هذا الشكل مقتبس بإذن من D. W. Allan)



Sat\_time\_freq-12-01

وقد اعتمدت أوساط ضبط الوقت، على مر السنين، العديد من التقنيات والنظم المختلفة لمساعدتها في مهمة مزامنة الميقاتيات أو نقل الوقت. ويبين الشكل 1-2 مستوى أداء بعض هذه النظم. وهي تشمل استخدام:

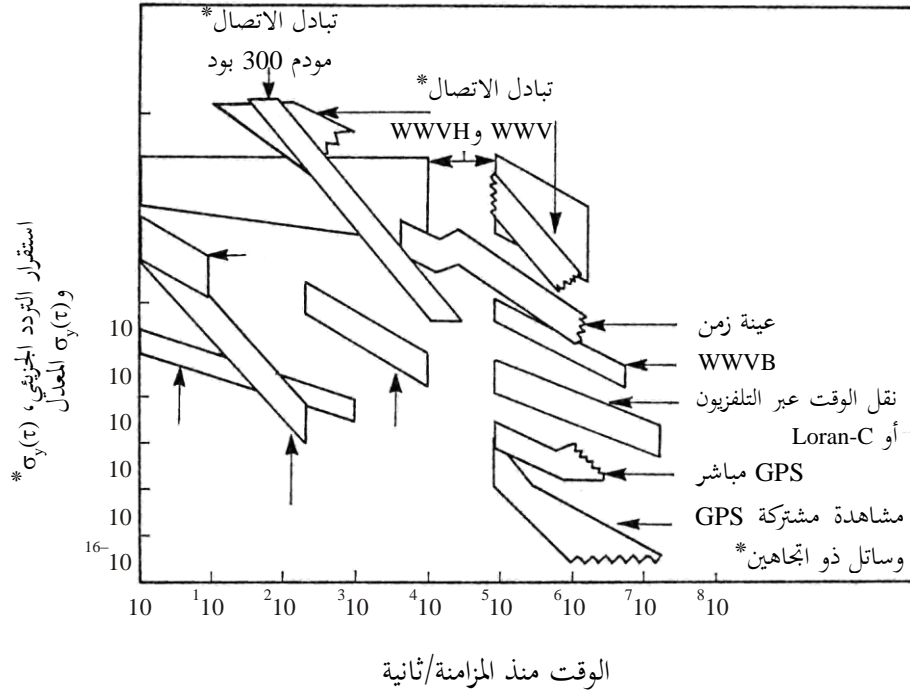
- أنظمة الاتصالات للأرض، مثل التلفزيون والهواتف (MODEMS)؛
- البث الإذاعي المباشر (WWV و WWVH)؛
- نظم الملاحة، مثل Loran-C و GPS؛
- أنظمة الاتصالات الساتلية، مثل نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين (TWSTT).

وإذ تزايد أداء الميقاتيات من حيث الدقة والضبط، سعى أرباب ضبط الوقت إلى تطوير نظم أكثر دقة وأكثر استقراراً لمساعدتهم في عملية المزامنة. وفي نظر هؤلاء المتخصصين، يسهم النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) مساهمة كبيرة في حل المشاكل التقليدية لضبط الوقت. بل هو مصدر موثوق من مصادر التوقيت ونظام موثوق لنقل الوقت.



## الشكل 2-12

أداء مختلف تقنيات نقل الوقت  
(هذا الشكل مقتبس بإذن من D. W. Allan)



Sat\_time\_freq-12-02

## 2.12 استخدام النظام GPS في التوقيت

النظام العالمي لتحديد المواقع هو نظام ملاحية أثبت أنه مصدر موثوق لتحديد المواقع في الأغراض العسكرية والمدنية على السواء. ولكن ما يغرب عن بال الكثيرين هو أن النظام GPS أثبت أنه أداة هامة وقيمة لدى المتخصصين في ضبط الوقت [Klepczynski et al., 1996]. فهذا النظام هو أداة مرنة وعالمية يمكن استخدامها لتوزيع الوقت على عدد غير محدود من المستخدمين ولمزامنة الميقاتيات عبر مسافات كبيرة بدرجة عالية من الدقة والضبط. وسوف يُبحث هنا بإيجاز كيف تستخدم أوساط التوقيت النظام GPS لهذه الأغراض ويُسلط الضوء على أحدث التطورات في هذا المجال.

## 1.2.12 كيف يوزع النظام GPS التوقيت؟

يستطيع الحاسوب الموجود ضمن مستقبل GPS، كجزء من حل الملاحية، تحديد الفرق بين الميقاتية الموجودة ضمن المستقبل لدى المستعمل وإما التوقيت GPS أو التوقيت المرجعي لنظام GPS، وهو التوقيت العالمي المنسق (UTC USNO)، أي UTC كما هو محدد في مرصد البحرية الأمريكية. وتكون الميقاتية ضمن مستقبل مستعمل النظام GPS عادة ميقاتية كوارتز. ومع ذلك، وفي بعض الحالات، يمكن أن تكون ميقاتية خارجية من معيار تردد الروبيديوم أو معيار تردد حزمة السيزيوم مرجعاً محلياً لمستقبل GPS. ويمكن برمجة المستقبل المحلي لعرض التوقيت (UTC USNO)، بمثابة بث من GPS، أو توقيت GPS إذ إن حل الملاحية يعطي الفرق بين ميقاتية المستقبل المحلية وتوقيت GPS. وينبغي الإشارة إلى أن التوقيت (UTC USNO) موجه نحو UTC كما يحدده المكتب الدولي للأوزان والمقاييس (BIPM). ويحتفظ بتوقيت (UTC USNO) عادة في حدود حوالي 10 نانوثانية من التوقيت UTC.

وتتميز أوساط التوقيت على أوساط الملاحاة من حيث عدد سواتل GPS التي تحتاجها. فالملاحون بحاجة إلى أربعة سواتل لتقرير موقعهم؛ ثلاثة لتحديد موقعهم وواحد لتقرير تخالف ميقاتيهم المحلية عن توقيت GPS. وبما أن ضباط الوقت في مواقع ثابتة ويعرفون موقعهم، فإنهم يحتاجون إلى ساتل GPS واحد فقط لمعرفة تخالف ميقاتيهم المحلية عن توقيت GPS. وتبعاً لذلك، فقد عدلوا الخوارزميات في مستقبلات ضبط الوقت لديهم من أجل الاستفادة من هذه الميزة.

### 2.2.12 كيف يزامن النظام GPS الميقاتيات عبر مسافات طويلة؟

يحدث ذلك بواسطة أسلوب يعرف باسم 'المشاهدة المشتركة' في النظام GPS. وفي أسلوب المشاهدة المشتركة هذا، ترصد محطتان في وقت واحد نفس ساتل النظام GPS. ويجب على كل مستعمل في كل محطة أن يسجل الفرق بين ميقاتيته المحلية (T) أو مرجع التوقيت المحلي وتوقيت GPS في نفس اللحظة في نفس الساتل باستخدام مستقبل GPS يعرف باسم وحدة نقل الوقت (TTU). وهذه الوحدة هي مستقبل GPS خاص مبرمج لحساب وعرض البنود التي تهم أوساط التوقيت.

$$(1a-12) \quad A = T_a - \text{GPS Time} \quad \text{المستعمل A يرصد:}$$

$$(1b-12) \quad B = T_b - \text{GPS Time} \quad \text{المستعمل B يرصد:}$$

ومن الضروري أن يرصد كلا المستعملين نفس الساتل في نفس اللحظة من أجل تقليل آثار بعض الأخطاء [Allan and Weiss, 1980]. وبحساب الفرق بين المجموعتين من الأرقام تكون العلاقة:

$$(2-12) \quad A - B = (T_a - \text{GPS Time}) - (T_b - \text{GPS Time}) = T_a - T_b$$

ويمكن بسهولة أن تحسب الفروق بين اثنتين من الميقاتيات المحلية لأن ميقاتية GPS المشتركة تخرج من العملية. وهذه عملية بسيطة جداً ولكنها فعالة لأنها مستقلة عن توقيت GPS.

وقد أحرز تقدم كبير على مر السنين في تحسين دقة وضبط توزيع الوقت وقدرات النظام GPS على مزامنة الميقاتيات. ونحن الآن في مستوى 10-25 نانوثانية في توزيع الوقت في اتجاه واحد إلى جانب مستقبل شفرة اكتساب خشن (C/A) وفي مستوى 2-15 نانوثانية في مزامنة التوقيت. وثمة مجموعة من القيم أعطيت لهذه التقديرات تشير إلى أن التجربة بينت أن ما يمكن تحقيقه يتوقف على المستعمل والموقع المحدد. وهذه القيم تمثل النتائج التي حققها المستعملون حالياً في مختلف المجالات من قبيل الاتصالات وعلم القياس.

### 3.12 تطبيقات نقل الوقت بواسطة النظام GPS

يجب أن تكون العقد الرئيسية، ضمن كل شبكة اتصالات، متزامنة [Butterline, 1993]. ويمكن القيام بذلك داخلياً (من خلال نبضات المزامنة) أو خارجياً (من خلال المزامنة). ويوفر النظام GPS بسهولة القدرة على تمكين المزامنة الخارجية للميقاتيات في العقد الرئيسية ضمن الشبكة بأقل من 100 ns من حيث الزمن و  $10^{-13}$  من حيث التردد. وهذا ما يعني، في شروط صناعة الاتصالات، بمتطلبات مستوى الطبقة الأولى التي تتطلب دقة بمقدار 1 مللي ثانية من حيث الزمن و  $10^{-11}$  من حيث التردد.

وفي بعض شبكات الاتصالات يُحتفظ بالوقت وخصوصاً بالتردد بواسطة طاقم من الميقاتيات الذرية، مثل معايير تردد الروبيديوم، تجري مزامنتها إزاء التوقيت العالمي المنسق بواسطة النظام GPS. ويتحدد عادة معدل كل ميقاتية روبيدوم في الطاقم إزاء التوقيت UTC باحتساب متوسط رصدات GPS على امتداد فترة معينة من الزمن. ويتوقف الفاصل الزمني المختار على متطلبات النظام المعين قيد النظر. ويحتاج المرء إلى معرفة الفرق بين معدل كل ميقاتية روبيدوم وتوقيت UTC بأعلى قدر من الدقة والضبط يمكن بلوغه وذلك للاطمئنان إلى أنه إذا فقد الاتصال مع نظام GPS لسبب ما، فإن معدل تخالف ميقاتية الروبيديوم فيما يتعلق بالتوقيت UTC يمكن استيفاءه باستخدام آخر القيم المرصودة حتى يستعاد الاتصال مع نظام GPS. وإذا ما فقد الاتصال، فإن هذا قد يعني أو لا يعني حدوث مشكلة فورية لنظام الاتصالات قيد النظر. والأمر يتوقف على الوقت المستغرق في انخراط المزامنة بين العقد بحيث لا تعود قادرة على التواصل بشكل متماسك فيما بينها. وقد يستغرق ذلك ساعة واحدة إلى عدة أسابيع، تبعاً للنظام المعين قيد النظر.

ويتزايد اعتماد صناعة الطاقة الكهربائية على النظام GPS لحفظ الوقت. وتستخدم شركات الكهرباء الآن النظام GPS لمزامنة الميقاتيات في محطات المراقبة لديها من أجل تحديد موقع الأعطال في الخدمة الكهربائية ضمن المنطقة موضع الاهتمام. فهي تحدد مصدر العطل (انقطاع في خط الكهرباء) بأسلوب الثلاث، أي من خلال الوقوف على وقت حدوث العطل في ثلاث محطات تمت مزامنة ميقاتياتها. كما تحتاج صناعة الطاقة إلى مزامنة الميقاتيات بين مختلف مقدمي الخدمات على المستوى الإقليمي. والمزامنة مهمة إذا أريد نقل الطاقة على نحو يتسم بالكفاءة من شبكة إلى أخرى. إذ من شأن نقل الطاقة الكهربائية خارج الطور من شبكة إلى أخرى أن يقلل من إجمالي الطاقة المتاحة.

وبدأ علم قياس الوقت باستخدام إشارات النظام GPS منذ حوالي 15 سنة في المكتب الوطني للمعايير (NBS) (الذي أصبح الآن المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا، NIST). واقترح العمل بنظام يستخدم رصدات المشاهدة المشتركة من سواتل GPS رغبة في دقة نقل الوقت والتردد [Allan and Weiss, 1980] وتم بناء مستقبلات مصممة خصيصاً لهذا الغرض، أولاً في المكتب NBS وبعد ذلك في العديد من الشركات التجارية. وكانت هذه المستقبلات وحيدة القناة وحيدة التردد بشفرة C/A قادرة على تتبع ساتل واحد فقط في وقت ما. وكان من الضروري لتشغيلها إصدار جداول دورية من رصدات المشاهدة CV. وكان أسلوب المشاهدة CV ذكياً وبعيد الأثر: إذ لم يقتصر على خفض بعض مواضع عدم اليقين المادية الأصل بل تعدها إلى إلغاء الانحطاط المتعمد في توقيت النظام GPS في عام 1990 تحت اسم 'التيسرية الانتقائية' (SA) [Lewandowski and Thomas, 1991].

وقد أفضى الأخذ بنظام GPS إلى تحسن كبير في نقل الوقت والتردد. وإزاء مجال عدم اليقين، الذي يتراوح من 10 إلى 20 نانوثانية لمقارنات الوقت خلال المراحل الأولى من استخدام النظام GPS، أصبح من الممكن، ولأول مرة، مقارنة أفضل المعايير الذرية في العالم على المستوى الكامل لها من الأداء باستخدام أزمنة التكامل بحوالي عشرة أيام. ومنذ ذلك الحين أدخل عدد من التحسينات، بما في ذلك استخدام إحداثيات الهوائي فائقة الدقة والتقويمات الدقيقة وقياسات الأيونوسفير [Lewandowski and Thomas, 1991]. وقد أدى ذلك في بداية التسعينيات إلى أحوال عدم اليقين في مقارنة الوقت بحوالي 3 نانوثانية. وجاءت بموازاة ذلك التحسينات في المعايير الذرية التي تقدمت بمقدار قيمة أسية وجعلت المقارنة ممكنة بين الميقاتيات الجديدة (مثل ذلك، معايير تردد حزمة السيزيوم HP5071A) عند مستوياتها الكاملة من الأداء لاحتساب متوسط الأزمنة لعدة أيام.

واليوم نشهد، في مجال علم القياس، ولادة عدد من معايير التردد الجديدة والمبتكرة. ويبدو أن هذه الأجهزة تقترب من  $10^{-15}$  من حيث الدقة ويبدو أن مقدار عدم الاستقرار على المدى القصير يقترب من  $10^{-16}$ . وغالباً ما يوصف أداء معيار التردد من حيث تفاوت فروق التردد على امتداد طائفة واسعة من الفترات الزمنية تتراوح ما بين ثانية واحدة وعدة أشهر. وهناك الكثير من الفوارق الرياضية المختلفة في هذه الصيغ الإحصائية المستخدمة لوصف أداء الميقاتية. ويبين الشكل 12-3 واحداً منها:  $\sigma_y(\tau)$ ، أو ما يسمى في بعض الأحيان فارق [Allan 1987]، لعدة أنواع مختلفة من معايير التردد، من قبيل الكوارتز والروبيديوم والسيزيوم وميزر الهيدروجين (H-maser). ويتكشف هذا التمثيل البياني لأداء معيار التردد عن خصائص مختلفة هي دالة تتبع عمليات الضوضاء التي تحدث داخل معيار التردد. وفي الواقع، يمكن استخدام ميل المنحنى لتعرف نمط الضوضاء. حيث يشير الميل بقيمة الصفر، أو منحنى يوازي المحور الرأسي، إلى أن أداء التحديد في استقرار معيار ما قد تم بلوغه (مقدار الوميض الأدنى). ونمط الضوضاء المقترن بهذه العملية هو تشكيل تردد الوميض.

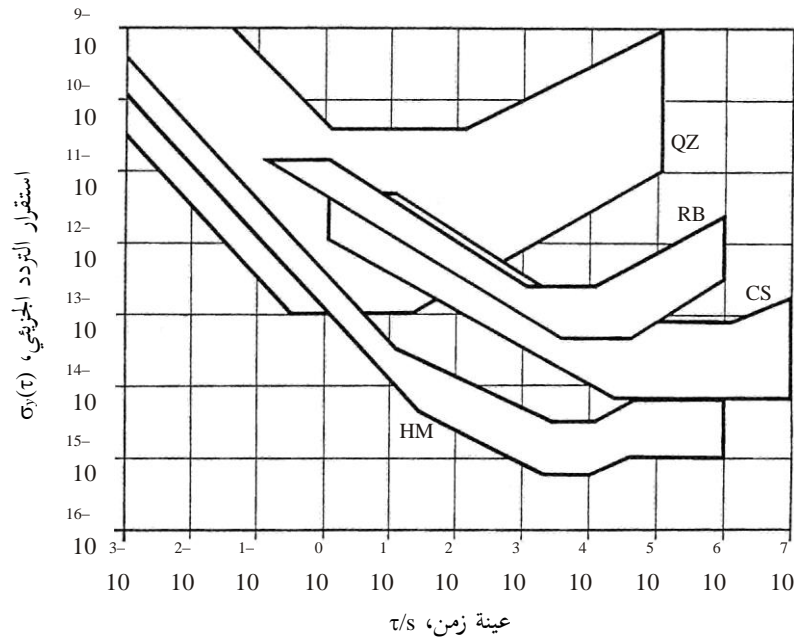
وبما أن أحدث الأجهزة غير ميسورة النقل ولا تعمل بشكل مستمر، فمن المهم مقارنتها خلال فترة معقولة من الزمن وذلك لتحديد وجود فوارق منهجية فيما بينها. ويقابل القياس بدقة 1 نانوثانية طوال فترة 24 ساعة  $10^{-14}$  في التردد. ولذلك، يستغرق الأمر في المستويات الحالية بضعة أسابيع لمقارنة اثنين من هذه الأجهزة. وهذا ما يسوّغ أهمية وضع وتحسين طرائق نقل الوقت لتمكين إجراء هذه المقارنات في غضون فترة معقولة من الزمن.

وتستند مقاييس الوقت، التوقيت الذري الدولي والتوقيت العالمي المنسق، إلى بيانات من نحو 220 ميقاتية ذرية موجودة حول العالم في حوالي 50 من مختبرات التوقيت. ويعكف قسم التوقيت في المكتب الدولي للأوزان والمقاييس على حساب مقاييس التوقيت هذه. والوسيلة التشغيلية الوحيدة لمقارنة هذه الميقاتيات هي تقنية GPS CV استناداً إلى قياسات شفرة C/A وحيدة القناة. ولهذا السبب، تنكب أوساط التوقيت على وضع نهج جديدة لمقارنات التوقيت والتردد. ومن بينها تقنيات تقوم على أساس قياسات شفرة GPS C/A، وقياسات طور الموجة الحاملة، والهوائيات ذات درجة الحرارة المستقرة، وتقييس برمجيات المستقبلات. وكمورد

إضافي، ثمة تطورات أخرى تستخدم قياسات شفرة C/A وشفرة P في النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS). وينصب التركيز هنا أساساً على التقدم الناجم عن استخدام رصدات GPS متعددة القنوات وهوائيات المستقبل التي تتمتع بحماية خاصة. ويشار أيضاً إلى بعض الصعوبات التي تصادف في تقنيات حالية أخرى. وتوصف حالات عدم الاستقرار في التأخر في مستقبلات توقيت GPS الحالية، ويقارن نقل الوقت بشفرة GPS C/A مع تقنيات ساتلية أخرى لنقل الوقت.

الشكل 3-12

## أمداء الاستقرار لمختلف مصادر التردد



Sat\_time\_freq-12-03

## 1.3.12 نقل الوقت بالملاحظة المشتركة الوحيدة القناة بشفرة C/A في نظام GPS

يعتمد العديد من المستعملين على مستقبلات وحيدة التردد (بشفرة C/A) تتعقب ساتلاً واحداً فقط (قناة واحدة) لمزامنة الميقاتيات بواسطة تقنية الملاحظة GPS CV. وعلى مدى السنوات الخمس عشرة الماضية، تحسن أداء نقل الوقت بواسطة النظام GPS بشفرة C/A بقيمة أسية. وفي الوقت الحاضر، يبلغ هامش عدم اليقين المقدر لنقل الوقت GPS التشغيلي بشفرة C/A في قناة واحدة حوالي 7 نانوثانية لرصد CV واحدة وحوالي 3 نانوثانية لمتوسط يومي، وهو ما يقابل بضعة أجزاء في  $10^{14}$  من حيث تحويل التردد. ومع ذلك، فإن هذا الأداء يكاد لا يكفي لمقارنة الميقاتيات الذرية الحالية ويحتاج إلى تحسين بسرعة لمواجهة التحدي المتمثل في الميقاتيات التي يجري تصميمها الآن. وعلى مدى السنوات الخمس والأربعين الماضية تحسن أداء الميقاتيات الذرية في المتوسط بقيمة أسية كل سبع سنوات. ويبلغ مدى استقرار التوقيتين TAI و UTC، وهما من مقاييس التوقيت المرجعية الدولية، حالياً حوالي جزئين في  $10^{15}$  على مدى فترة من بضعة أسابيع. وبالتالي، كان من المعقول أن يحقق استقرار التوقيتين TAI و UTC بحلول عام 2005 بضعة أجزاء في  $10^{16}$ .

## 2.3.12 المقارنات وحيدة الموقع (خط الأساس صفر)

المقارنات وحيدة الموقع هي المقارنات التي يتم فيها حساب الملاحظة المشتركة بين نظامي GPS لاستقبال التوقيت موجودين في نفس الموقع، موصولين بنفس الميقاتية، ولهما هوائيان لا يبعد أحدهما عن الآخر بأكثر من بضعة أمتار. وتمكن المقارنات على مسافات قصيرة من إلغاء أخطاء الميقاتيات الشائعة وعدد من الأخطاء الأخرى. وإذا كان المستقبلان اللذان تجري مقارنتهما يستخدمان برمجيات متماثلة، ينبغي ألا ينشأ أي خطأ من بث التقويمات الساتلي أو إحداثيات الهوائي أو النمذجة غير الكاملة للأيونوسفير والتروبوسفير. وينشأ أي

تحيز ثابت مقيس من فوارق التأخر في الجهازين اللذين تجري مقارنتهما، بما في ذلك المستقبل نفسه والهوائي والكبلات، وغيرها. وتتوفر الآن كمية كبيرة من البيانات تصف هذه المقارنات [Kirchner et al., 1993; Buisson et al., 1985]. وكلها تظهر نفس السلوك: اعتماد قصير الأجل (يوم واحد)، وأحياناً طويل الأجل (موسمي) على درجة الحرارة الخارجية. ومن المرجح أن يكون التغير النهاري مقدار ضئيل من النانوثانية والتغير الموسمي حوالي 10 ns. ولا بد من التأكيد على أن الظاهرة الملحوظة هي تأثير تفاضلي وبالتالي قد تكون التغيرات الفعلية في التأخر الناجمة عن الاعتماد على درجة الحرارة أكبر من ذلك.

### 3.3.12 المعايير التفاضلية بواسطة النظام GPS

لقد تقدمت المعايير التفاضلية لمعدات توقيت النظام GPS النائية، على مدى السنوات القليلة الماضية، استناداً إلى مبدأ التقنية الوحيدة الموقع الموضحة أعلاه. وفي هذه الحالة، يكون أحد المستقبلين اللذين تجري مقارنتهما مستقبل محلي. ويكون الآخر محمولاً، يُرسل بين المواقع التي يتعين معايرتها. وعلى افتراض ثبات تأخرات المستقبل في معدات توقيت النظام GPS المتنقلة (بما فيها الكبلات والهوائيات)، يمكن حساب تصحيح الوقت التفاضلي لكل من المواقع قيد المقارنة. وتبلغ درجة عدم اليقين المعلنة لمعايرة تفاضلية من هذا القبيل، إذا أُجريت في ظروف مثالية، حوالي 2 ns. وتمكن معايرة معدات توقيت GPS التفاضلية من المقارنة الدقيقة للميقاتيات الذرية النائية. ومما يحد من هذه الدقة أوجه عدم اليقين في المعايرة التفاضلية والضوضاء في وصلة المشاهدة المشتركة.

وعلى مدى السنوات الخمس عشرة الماضية أجرى المكتب الدولي للأوزان والمقاييس عدداً من المعايير التفاضلية [Lewandowski, 1996]. وجرى مقارنة معدات توقيت GPS الموجودة في المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا (NIST) وفي مرصد باريس (OP) حوالي عشر مرات؛ ولا تختلف تصويبات التوقيت التفاضلية التي تقررت خلال هذه المعايرة بأكثر من بضع نانوثوان. وهذا يعطي فكرة عن قابلية الاستنساخ التي يمكن تحقيقها عندما تجري المعايرة في ظروف مثالية في المختبرات حيث يحافظ بعناية على معدات توقيت GPS، بما فيها الكبلات. كما أنه يعطي بعض الأفكار عن الاستقرار طويل الأجل في معدات توقيت GPS. ومرة أخرى، لا بد من التأكيد على أن هذه المقارنات، على غرار المقارنة الوحيدة الموقع، هي مقارنات تفاضلية. ولعل الآثار الموسمية أُلغيت إذ إن كلا المستقبلين يقعان في نصف الكرة الشمالي. ولم يتم حتى الآن إجراء معايرات متكررة بين مواقع كائنة في نصفي الكرة الشمالي والجنوبي.

ولم يلاحظ أي اتساق واضح بين المعايير المتكررة لجميع المواقع. وفي بعض الحالات لوحظت حالات تفاوت بحوالي 10 ns. ويمكن أن تعزى هذه الحالات إلى استجابة مختلفة من المستقبلات قيد المقارنة للتغيرات الموسمية في درجة الحرارة أو تعدد مسيرات لم يؤخذ في الحسبان. وفي حالات أخرى كان التفاوت كبيراً، أحياناً عشرات النانوثانية؛ وربما تنشأ هذه التغيرات من تغييرات متعمدة غير مسجلة أو من تغييرات غير متعمدة في أجهزة معدات توقيت GPS.

### 4.3.12 الالتفاف حول العالم

تحدث تحويلات الوقت GPS CV، كما ذكر سابقاً، بين أزواج من المحطات. وفي بعض الحالات، من الممكن الالتفاف حول العالم، في اتجاه واحد، بواسطة عدد من أزواج المحطات. وتعني حالة الالتفاف إلغاء جميع أخطاء الميقاتيات، وفي الحالة المثالية من وصلات الزمن الحالية من الضوضاء ينبغي أن نصل إلى صفر. وقد أُجريت عدة اختبارات في الماضي. وثمة اختبار أُجري طوال حوالي سنة على البيانات المستقاة من المعهد الوطني NIST ومرصد باريس، ومختبر أبحاث الاتصالات (CRL)، استخدمت فيه التقويمات الدقيقة والقياسات الأيونوسفيرية المعالجة لاحقاً، أظهر وجود تحيز من بضع نانوثوان تغير بمرور الزمن [Lewandowski, 1993]. وبما أن تأخرات معدات الحوسبة تلغى أيضاً بحكم حالة الالتفاف فإن المصادر المتبقية من عدم اليقين ترتبط فقط بمسار إشارة النظام GPS عبر الفضاء أو تعدد المسيرات. ويبدو أن التحيز الملحوظ قد ينشأ عن الدقة المحدودة للقياسات الأيونوسفيرية. وهناك جزء من هذا التحيز يمكن أن يعزى أيضاً إلى خطأ في إحداثيات الهوائي في واحد من المختبرات المشاركة. ويشير اختلاف التحيز بمرور الزمن أيضاً إلى القياسات الأيونوسفيرية لأنها يمكن أن تتأثر بالأحوال المتغيرة بين النهار والليل إذ "تتحرك" مدارات GPS النجمية بمقدار 4 دقائق كل يوم على مدار السنة. وقد يسهم التصحيح التروبوسفيري أيضاً بدور في التباين الملحوظ في التأخرات.

ويبدو أن الالتفاف حول العالم يوفر اختباراً جيداً للدقة يمكن بموجبه حساب التأخرات بسبب الانكسار في الغلاف الجوي، حيث تجري المشاهدات المشتركة عبر خطوط أساس طويلة بالضرورة على ارتفاعات منخفضة للغاية.

## 4.12 مقارنة النظام GPS بتقنيات أخرى لنقل الوقت

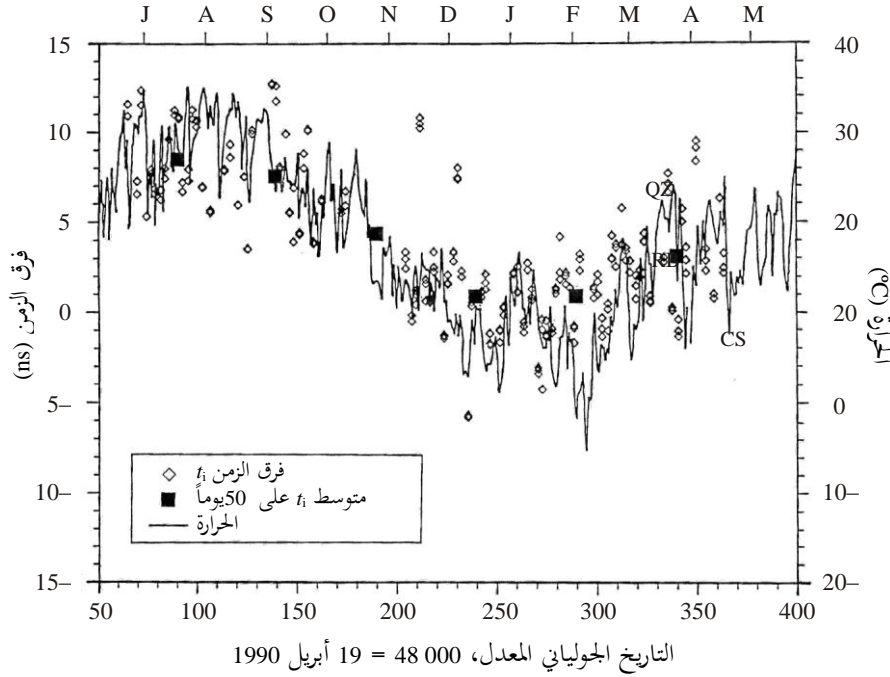
### 1.4.12 مقارنة إزاء نقل الوقت والتردد بالساتل في الاتجاهين

إن نقل الوقت والتردد بالساتل في الاتجاهين (TWSTFT) هو أسلوب يستخدم سواتل الاتصالات الثابتة بالنسبة إلى الأرض لنقل الوقت بدقة قدرها عدة مئات من البيكوثانية. وفي هذا الأسلوب، يرسل كل من محطتين، A و B، في آن واحد إشارة مشفرة إلى المحطة الأخرى ويتلقى إشارة مشفرة منها. وتتم مزامنة بدء الإشارة المشفرة من A مع إشارة من 1 Hz في الميقاتية المحلية A. وتتم مزامنة الإشارة المشفرة من B أيضاً مع الميقاتية المحلية B. وتستخدم الإشارة المشفرة المتلقاة لوقف عداد فاصل زمن كان قد بدأ من جانب الميقاتية المحلية لدى المستعمل. ويتعين ضم قراءات عداد فاصل الزمن من المحطتين A و B قبل التمكن من حساب الفرق بين الميقاتيتين المحليتين. ويحتاج الأمر عادة إلى حوالي دقيقتين للحصول على بيانات كافية لحساب متوسط القيمة وذلك بسبب عمليات الضوضاء المصاحبة. وتجري هذه الدورات ثنائية الدقائق عادة ثلاث مرات في الأسبوع. وفي عام 1991، ولمدة حوالي سنة، جرت مقارنة المقاييس الزمنية لمركز كوت دازور (OCA) وجامعة غراتس التقنية (TUG)، اللذين تفصلهما مسافة 800 km تقريباً، بأسلوب GPS CV I وأسلوب نقل الوقت بالساتل في الاتجاهين [Kirchner et al., 1993]. وكان مدى عدم اليقين في وصلة النظام GPS 3 ns.

وتُظهر البيانات المعروضة في الشكل 4-12 الفروق بين قيم [UTC(TUG)-Clock(OCA)] المستخلصة من قياسات TWSTT و GPS CV. وتمت معايرة الوصلات بشكل مستقل في نهاية التجربة بقياس التأخرات التفاضلية في مستقبلات النظام GPS والمحطات الأرضية الساتلية بنقل مستقبل GPS واحد ومطراف ساتلي واحد إلى الموقع الآخر. وبما أن الفروق بين قيم TWSTT و GPS CV تكشف عن تباين منهجي (موسمي) ظاهري، فإن متوسط القيمة والانحراف المعياري للفروق (3,6 و 3,9 نانوثانية، على التوالي) ليست قياسات مناسبة لوصف توافق الأسلوبين أثناء فترة المقارنة. ويكشف تباين Allan المعدل للفروق عن ضوضاء بيضاء بتشكيل الطور تصل إلى متوسط زمن بحوالي 50 يوماً، ولذلك فإن حساب متوسط القيم والانحرافات المعيارية المقابلة مبرر لفترات بيانات تصل إلى هذه القيمة. وبالنسبة لزمن المقارنة فإن متوسط 50 يوماً هو 3,2 نانوثانية والانحراف المعياري هو 2,6 نانوثانية. والفرق الأقصى للمتوسط هو 8 نانوثانية، وهو يقابل تأثير موسمي من المرجح، مرة أخرى، أن يكون نتيجة لتأخرات تعتمد على درجة الحرارة في معدات استقبال GPS المستخدمة (انظر الشكل 4-12).

## الشكل 4-12

الفروق بين ((UTC(TUG)-Clock(OCA)) المستخلصة من قياسات TWSTT  
والفروق بين ((UTC(TUG)-Clock(OCA)) المستخلصة من قياسات  
المشاهدة المشتركة GPS والحرارة الخارجية في جامعة غراتس التقنية (TUG)



Sat\_time\_freq-12-04

ويتم تنفيذ تقنية TWSTT في ثمانية مختبرات توقيت أوروبية ومختبري توقيت في الولايات المتحدة الأمريكية لها صفة ما قبل المرحلة العملية. وتظهر نتائج عملية عام 1997 نفس تبعية درجة الحرارة للفروق بين قياسات TWSTT و GPS CV كما في عملية عام 1991.

#### 2.4.12 المقارنة إزاء نقل الوقت بأسلوب الليزر

كان من شأن أسلوب التزامن بالليزر من مدار ثابت (LASSO) أن يسمح بمقارنة مقياسات ذرية نائية بمدى من عدم اليقين بحوالي 100 ps. وفي أثناء تجربة شملت الفترة من 8 ديسمبر 1992 إلى 28 يناير 1993، تمت مقارنة اثنتين من المقياسات الذرية النائية في مرصد ماكdonالد، تكساس، ومرصد كوت دازور، فرنسا (تفصلهما مسافة 8 000 km) باستخدام أسلوب LASSO و GPS CV [Friedelance, 1994; Baumont et al., 1993]. ونظراً لسوء الأحوال الجوية أجريت خمس عمليات LASSO فقط. وجرى حساب الوصلة GPS CV دون تطبيق تقويمات دقيقة أو قياسات أيونوسفيرية مزدوجة التردد، لذلك يعتبر مدى عدم اليقين فيها بمقدار 10 ns.

وجرت معايرة وصلة النظام GPS بواسطة مستقبل محمول: وكان لوصلة التزامن بالليزر LASSO مدى عدم يقين يعتقد بأنه أدق من 100 ps، ولكنها لم تعابر. وتظهر هذه المقارنة لنقل الوقت بأسلوب GPS CV وأسلوب LASSO اتساقاً في أمداء عدم اليقين ذات الصلة وتحيزاً بحوالي 192 نانوثانية. وتصل قياسات الفروق بين الطريقتين إلى تفاوت من ذروة إلى ذروة بحوالي 15 ns. ويبلغ خطأ جذر متوسط التربيع (r.m.s.) في المتبقيات نسبة إلى المتوسط مقدار 6 ns.

وهناك جيل جديد من نقل الوقت بأسلوب الليزر يتقدم في السنوات الأخيرة، من قبيل T2L2 (نقل الوقت بوصلة الليزر، الذي من المتوقع أن يكون مدى عدم اليقين فيه 30 ps) أو LTT (نقل الوقت بالليزر). وتجري هاتان التجربتان على متن Jason 2 وساتل Compass على التوالي منذ عام 2008، ومن المتوقع أيضاً أن يكون توقيت الليزر الأوروبي (ELT) على متن محطة الفضاء الدولية (ISS) في إطار بعثة وكالة الفضاء الأوروبية (ESA ACES).

ومع أن هذه النظم بطبيعتها غير ملائمة للمهام التشغيلية، وذلك بسبب حساسيتها للأحوال الجوية، فهي بالتأكيد أدوات ممتازة لتقييم دقة نقل الوقت في شبكة النظام العالمي للملاحة الساتلية وأسلوب نقل الوقت بالساتل في الاتجاهين. وعلاوة على ذلك، ومن خلال إجراء عمليات نقل للوقت دقيقة للغاية بين مقياسيات أرضية من أحدث طراز، من الممكن أيضاً أن تستخدم في اختبارات الفيزياء الأساسية.

## 5.12 التطورات الحديثة في نقل الوقت بواسطة النظام GPS

### 1.5.12 نقل الوقت بالملاحظة المشتركة وتعدد القنوات في النظام GPS

حدثت تحسنة في نقل الوقت بواسطة النظام العالمي لتحديد المواقع في الآونة الأخيرة بفضل تطور وتوفر مستقبلات التوقيت المتعددة القنوات التي تلت استكمال كوكبة GPS والتخفيضات في أسعار المستقبلات وتقاطر الطلبات من أوساط التوقيت. وكان نقل الوقت على الصعيد الدولي يجري، طوال السنوات الخمس عشرة الماضية، باستخدام مستقبلات GPS وحيدة القناة بشفرة C/A وجدول مشاهدة مشتركة دولي من مسارب مدة كل منها 13 دقيقة [Allan and Weiss, 1980].

ولما كانت المستقبلات الأقدم عهداً محدودة الذاكرة فإنه لم يكن في المستطاع برمجة أكثر من 48 مسرباً في اليوم، بل كان العدد المفيد في الواقع دون ذلك. وكان اختيار الرصد الوحيد الساتل تفضيلاً على فترة تكامل من 13 دقيقة نتيجة سرعة إرسال رسالة الملاحة GPS. وقد يتطلب الأمر ما يصل إلى 12,5 دقيقة لإرسال رسالة كاملة (25 صفحة مرسله). ومن شأن دمج أكثر من 13 دقيقة أن يضمن بأن جميع قياسات CV لها نفس البيانات. وفي بداية عهد نظام GPS لوحظ بعض الانقطاعات الهامة بين رسائل الملاحة المتعاقبة. وقد تغير هذا الحال، ولذلك ربما صار من الممكن تقصير فترات التكامل.

وترصد مستقبلات الشفرة C/A المتعددة القنوات قيد البحث هنا جميع سواتل GPS الواقعة في مجال نظرها وتستخدم المسارب المعيارية من 13 دقيقة كل 16 دقيقة في الساعات القياسية. وتُخترن بيانات الناتج المتعدد القنوات في ملف واحد في شكل موحد قياسياً [Allan and Thomas, 1994; Lewandowski, et al., 1996]. وتزاح الساعات القياسية في كل يوم بمقدار 4 دقائق لكي تواكب مدارات GPS النجمية.

ومرجع الساعات القياسية هو 1 أكتوبر 1997، وهو تاريخ مرجعي معتمد عرفاً [تقرير عن تقييس النظام GPS والنظام العالمي للملاحة الساتلية، 1997]. وتستخدم نفس الساعات القياسية في جدول تتبع CV وحيد القناة الدولي من وضع المكتب الدولي للأوزان والمقاييس، وهو يصدر كل ستة أشهر. والأدوات التي تستخدم إجراء "كل ما هو في مجال النظر" تراعي أيضاً الجدول الدولي الوحيد القناة. ومن شأن هذا أن ييسر إلى حد كبير إدخاله في الوقت ذاته في النظام الحالي للرصدات وحيدة القناة. ويبدو من المرجح أن تتوقف قريباً الرصدات وحيدة القناة، ولن تعود هناك حاجة للجدول الدوري الذي يصدره المكتب BIPM.

ومن الممكن، من الناحية النظرية، رصد ما يصل إلى 12 ساتلاً في نظام GPS في آن واحد، ومع ذلك لا يرصد سوى حوالي خمسة سواتل فوق 15° (وبالتالي ذات أهمية لنقل الوقت) في أي موقع حضري متوسط. ولما كان هناك 89 فترة مفيدة من 16 دقيقة في اليوم، فمن الممكن رصد 89 مسرباً في كل قناة. وباستخدام جميع الرصدات المتاحة فوق 15° (حوالي 5 رصدات لكل فترة من 16 دقيقة) يمكن من ثم رصد 445 مسرباً في اليوم. ويمكن استخدام كل هذه المسارب لوصلات CV الإقليمية. وبالنسبة لخطوط أساس طويلة جداً، بين القارات مثلاً، قد يتاح نحو 100 مسرب CV باستخدام النهج المتعدد القنوات.

ومن شأن الزيادة بقيمة أسية في عدد المشاهدات المشتركة في أسلوب GPS المتعدد القنوات، مقارنة بأسلوب القناة الواحدة، أن توفر تحسناً لا بأس به في نوعية نقل الوقت والتردد. ومن المتوقع تحقيق كسب نظري في الاستقرار بمقدار  $10^{1/2} = 3,2$  لحساب متوسط الأزمنة حيث تسود ضوضاء الطور البيضاء [Lewandowski et al., 1997].



ولكن قد تكون الرصدات المتعددة القنوات عرضة لتغيرات منهجية، تنجم أساساً عن الآثار البيئية على الهوائي. ومن شأن ذلك أن يؤثر على جميع القنوات بأساليب مشابهة لتلك المذكورة أعلاه بالنسبة للمستقبلات وحيدة القناة باستثناء آثار تعدد المسيريات. وتوضح تجربة المقارنة الموصوفة أدناه المكاسب المحققة من الرصدات المتعددة القنوات والآثار المنهجية.

وقد نُظر في وصلة الوقت بين المكتب BIPM والمختبر NMI Van Swinden Laboratorium (VSL) في دلفت، هولندا، لتجربة مقارنة لأنها تحتوي على خط أساس من حوالي 400 km [Lewandowski et al., 1997]. وقد تم تجهيز كل من المختبرين بمستقبلات GPS متعددة القنوات وتم التعبير عن إحداثيات الهوائي الأرضي في الإطار المرجعي الأرضي الدولي على أساس عدم اليقين بمقدار 0,3 m.

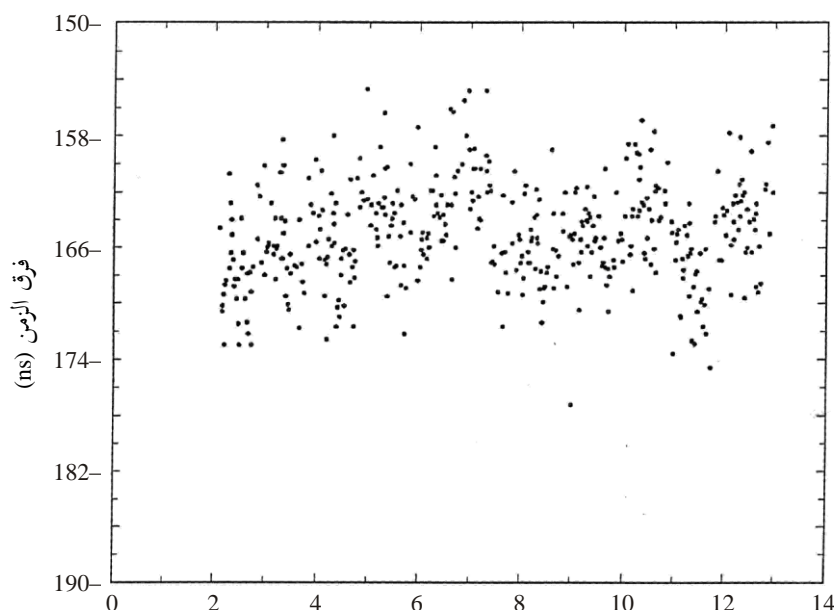
وتم توصيل المستقبل في كلا المختبرين بمقياسية HP5071A. وتمت معايرة كلا المستقبلين باستخدام مستقبل محمول. واستُخدمت نفس المستقبلات (لفترة الأيام العشرة نفسها) بالنسبة لنقل الوقت بأسلوب القناة الوحيدة وبأسلوب تعدد القنوات. وكان هنالك حوالي 38 رصدة مفيدة في كل يوم لأسلوب القناة الوحيدة وحوالي 350 رصدة لأسلوب تعدد القنوات (انظر الشكلين 5-12 و 6-12). وكان مستوى الضوضاء بحوالي 3 نانوثانية متماثلاً في كلتا الوصلتين.

ولننظر الآن في الميزة الناجمة عن زيادة عدد المشاهدات CV اليومية من 38 إلى 350. لقد بلغ الكسب النظري في الاستقرار مقدار  $3,0 = 1/2(350/38)$ . ويمكن ملاحظة ذلك في منحنيات الاستقرار لمتوسط الأزمنة التي هي أقل من 104 ثوان لنقل الوقت عبر 400 km، وكذلك لمقارنة موقعية في المكتب BIPM. وقد أبلغ عن منحنيات الاستقرار للمقارنة الموقعية في الشكل 7-12. وتتأثر المقارنة المتعددة القنوات بتأثير منهجي يصبح واضحاً عند حوالي  $3 \times 10^4$  ثانية (المسار 2).

وينخفض هذا التأثير لدى تنشيط الهوائيات المستقرة من حيث درجة الحرارة (المسار 3) (الفقرة 2.5.12). وآثار المنهجية غير مرئية بالنسبة للمقارنة وحيدة القناة (المسار 1) لأنها مشمولة بالتأكد في مستوى الضوضاء الأعلى. لذلك فإن الميزة الناجمة عن الرصدات المتعددة القنوات محدودة للغاية بسبب عدم استقرار تأخرات المستقبل وتكاد لا تسمح بمقارنة متوسط وحدات HP5071A عند مستواها الكامل من الأداء لحساب متوسط الأزمنة طوال خمسة أيام، وهو الفاصل القياسي لحساب التوقيت الذري الدولي.

الشكل 5-12

(مقياسية المكتب BIPM - مقياسية المختبر VSL) بمشاهدة مشتركة GPS وحيدة القناة

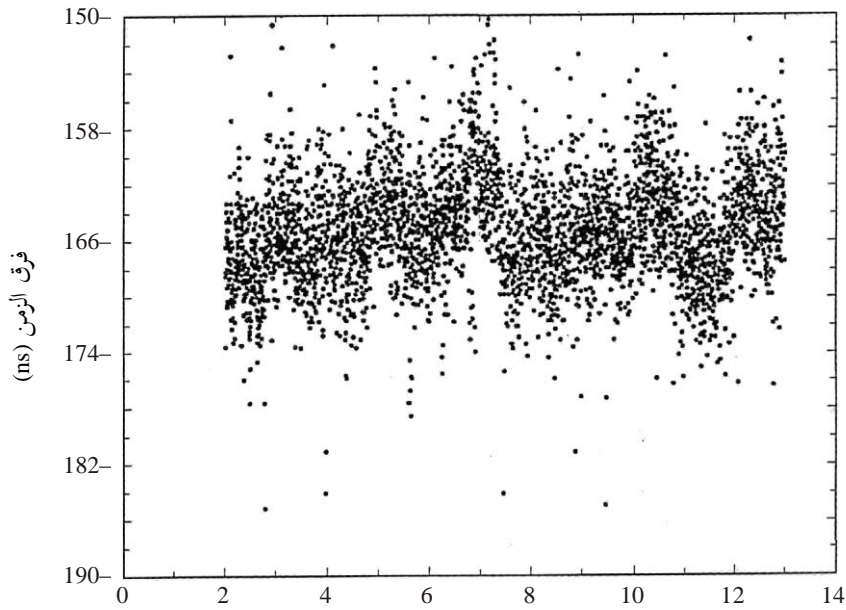


التاريخ الجولياني المعدل، 50 648 = 16 يوليو 1997

Sat\_time\_freq-12-05

الشكل 6-12

(مقارنة المكتب BIPM - مقياسية المختبر VSL) بمشاهدة مشتركة GPS متعددة القنوات



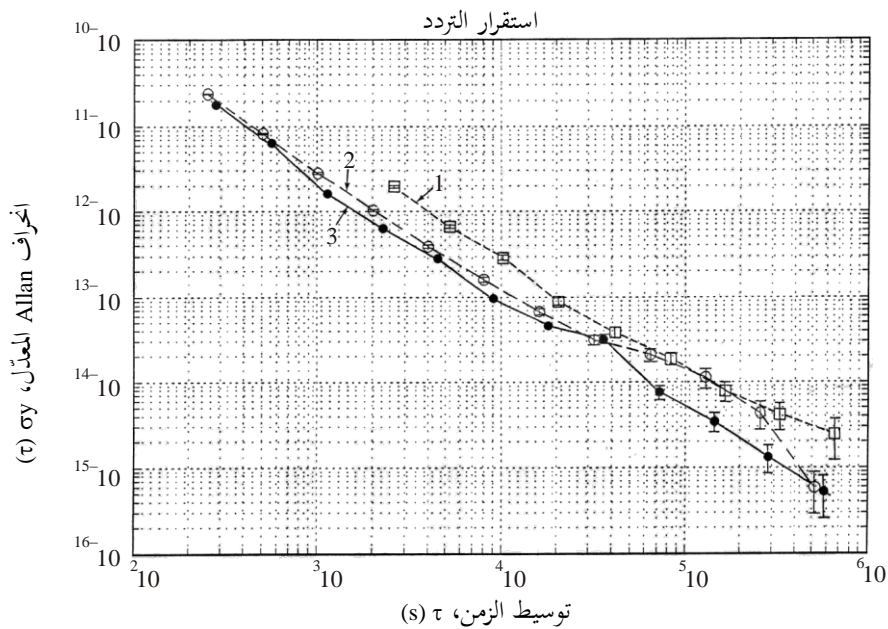
التاريخ الجولياني المعدل، 50 648 = 16 يوليو 1997

Sat\_time\_freq-12-06

الشكل 7-12

مقارنة في موقع وحيد لمستقبلي توقيت GPS في المكتب BIPM (هوائيان منفصلان في موقع وحيد) انحراف Allan المعدل من أجل:

- أ) مقارنة وحيدة القناة دون تنظيم حرارة الهوائي؛
- ب) مقارنة متعددة القنوات دون تنظيم حرارة الهوائي؛
- ج) مقارنة متعددة القنوات مع تنشيط هوائيات منتظمة الحرارة



Sat\_time\_freq-12-07

### 2.5.12 هوائيات مستقرة الحرارة

لقد أصبح من الأمور الموثقة جيداً الآن، والمُعترف بها عموماً، أن معدات استقبال التوقيت GPS، وعلى وجه التحديد الهوائي الخاص بها، حساسة لظروف البيئة [Lewandowski and Tourde, 1990]. وبالنسبة لنظام استقبال الوقت GPS التقليدي، يمكن التعبير عن هذه الحساسية بواسطة مُعامل بحوالي  $0.2 \text{ ns/C}$  ويمكن أن يقترب من  $2 \text{ ns/C}$ . وكانت هذه عقبة استبعاد رئيسية، حيث استبعدت هدف الدقة بمقدار  $1 \text{ ns}$  الذي أعلن في وقت سابق بشأن نقل الوقت في النظام GPS. وتظهر مقارنة الملاحظة المشتركة GPS مع نقل الوقت بالساتل في اتجاهين، بما يغطي فترة حوالي سنة، تأثيراً موسمياً من ذروة إلى ذروة بمقدار  $8 \text{ ns}$  (الشكل 4-12) وهو ما يعزى إلى عدم استقرار معدات التوقيت GPS. ولم يُعثر على حل لهذه المشكلة على الفور؛ وحتى اليوم يكاد يتعرض لهذا التأثير كامل معدات التوقيت GPS المستخدمة في مختبرات قياس الوقت. والأهم من ذلك، أن الميزة الناجمة عن الأخذ برصدات القنوات المتعددة "الكل في مجال النظر" في الآونة الأخيرة محدودة للغاية بسبب عدم استقرار تأخرات المستقبلات. وبما أنه لم يُعثر على وسيلة عملية لحل المشكلة إلكترونياً، فقد اقترح اتباع نهج آخر [Lewandowski, et al., 1997]: إذ من شأن استخدام فرن بدرجة حرارة مستقرة أن يحمي الهوائي. والهدف الأساسي من عملية تنظيم حرارة الهوائي هذه هو الحفاظ على العناصر الحاسمة في درجة حرارة معينة ثابتة.

وقد أنشئت النماذج الأولى من الأفران في المكتب BIPM. ثم سرعان ما توفرت منها صيغة تجارية، تدعى الهوائي المستقر الحرارة (TSA). وتظهر مقارنة أولية وحيدة الموقع لمستقبلين GPS متعددي القنوات مجهزين بهوائي TSA في المكتب BIPM الإزالة المنهجية واستقرار التردد الجزئي لبضعة أجزاء بمقدار  $10^{15}$  لحساب متوسط الأزمنة لحوالي يوم واحد (الشكل 7-12). وقد مكن هذا التحسن الاستفادة الكاملة من نقل الوقت المتعدد القنوات والاقتراب من الأداء المتوقع من استخدام طور الموجة الحاملة في النظام GPS.

### 3.5.12 استخدام طور الموجة الحاملة في النظام GPS

نُحِضت الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية (IGS)، والتي أنشئت لتحسين التطبيقات الجيوديسية للنظام GPS، بدور رئيسي في خطوات التقدم الأخيرة في تحويل الوقت بواسطة النظام GPS. فمستقبلات نقل الوقت القائمة تتجاهل عادة طور الموجة الحاملة وبيانات الأمداء الزائفة بعد تنفيذ خوارزمية نقل الوقت. وإذا ما احتفظ بهذه البيانات، فقد تؤدي المعالجة اللاحقة باستخدام خوارزميات أكثر تطوراً إلى مزيد من الدقة في نقل الوقت والتردد. وتستخدم هذه البيانات بالفعل في الجيوديسيا لتحديد الموقع التفاضلي. ومن شأن التمسك بطور الموجة الحاملة أن يخفف من آثار تعدد المسيرات. وبفضل توفر المستقبلات المتعددة القنوات الآن، وباستخدام أساليب المفارقة المزدوجة في الملاحظة المشتركة الشائعة في الجيوديسيا، من الميسور جداً لموقعين الحفاظ على طور موجة حاملة مشترك. وإذا ما استخدمت التأخرات الأيونوسفيرية المقيسة بالاقتران مع التصحيحات التروبوسفيرية المعوضة، فقد يكون من الممكن تحقيق استقرار في التردد بمقدار جزء واحد في  $10^{15}$  مع أزمنة تكامل في حدود يوم واحد [Schildknecht et al., 1990; Overney et al., 1998]. ويكفي هذا الأداء لمقارنة معايير التردد الأساسي الحالية. والقياسات المستمرة، بدلاً من القياسات التي تؤخذ مرة واحدة في اليوم، ضرورة لتحقيق هذا الأداء.

وقد أظهر العديد من التجارب مزايا استخدام قياسات طور الموجة الحاملة لمقارنات التردد [Overney et al., 1998; Petit et al., 1996]. ويوفر نسق التبادل المستقل عن المستقبل (RINEX) [Gurtner, 1994] نسقاً ملائماً لتسجيل بيانات طور الموجة الحاملة في النظام GPS والنظام GLONASS وبيانات الأمداء الزائفة. وإذا توفرت المقدرة لدى مستقبل التوقيت، يقترح توليد طور موجة حاملة من نسق RINEX وملف بيانات أمداء زائفة في فترات من 15 ثانية لجميع السواتل المشاهدة. ويمكن بعد ذلك استخدام هذا الملف في المعالجة اللاحقة لبيانات دقة الوقت والتردد.

وقد تضاعفت الجهود مؤخراً في أوساط قياس الزمن والجيوديسيا، حيث يتوفر فهم أفضل لإشارات طور الموجة الحاملة GPS، واتخذت مبادرة هامة تعرف باسم "المشروع الرائد IGS/BIPM". ويدرس هذا المشروع مقارنات دقة الوقت والتردد باستخدام قياسات طور وشفرة GPS. ومن القضايا الهامة في هذا الصدد حل جوانب غموض الطور لتطبيقات التوقيت التي تحد من دقة هذه التقنية.

ومن الجدير بالملاحظة أن طور الموجة الحاملة يتأثر أيضاً بجوانب عدم الاستقرار في تأخرات أجهزة الحوسبة. وهنا أيضاً، ورغبة في الاستفادة الكاملة من هذه التكنولوجيا المبشرة بالنجاح، لا بد من تنظيم وقياس التأخرات في مختلف أجزاء معدات الاستقبال.

## 6.12 استخدام النظام العالمي للملاحة الساتلية

يتشابه النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS) [Gouzhva et al., 1992] والنظام العالمي لتحديد المواقع في كثير من الجوانب ولكن حتى وقت قريب نادراً ما كانت الأوساط الدولية لقياس الوقت تستخدم النظام GLONASS لأن المستقبلات التجارية المناسبة لم تكن متوفرة. وهذا الوضع يتغير الآن، فقد أنشئت أولى وصلات التوقيت الدولية الدائمة. وأصبحت مستقبلات توقيت GLONASS متوفرة الآن وهي متوافقة مع نفس معايير مستقبلات توقيت النظام GPS. وقد أجريت عدة دراسات لمقارنة أداء القياسات وحيدة القناة بشفرة C/A في نظامي GPS و GLONASS [Lewandowski et al., 1993]. وتبين كل هذه الدراسات تشابه أداء النظامين بالنسبة للوصلات الإقليمية. وتظهر هوائيات مستقبلات GLONASS أيضاً تبعية لدرجة حرارة مماثلة لتلك التي شوهدت في هوائيات مستقبلات GPS. وفي حالة الوصلات ما بين القارات، من الضروري استخدام تقويمات GLONASS الدقيقة المعالجة لاحقاً.

وتثبت بعض الدراسات الحديثة جدوى نقل الوقت متعدد القنوات بشفرة C/A في النظام المزدوج GPS + GLONASS [Lewandowski et al., 1997]. وتعمل مستقبلات النظام المزدوج متعدد القنوات ومتعدد الشفرات بشكل سلس دون أي إشكال من حيث البرمجيات. وهي تستخدم البرمجيات والأنساق القياسية [Lewandowski et al., 1996]. وكانت المقارنة مع مستقبلات توقيت GPS أخرى بمثابة اختبار لجودتها من حيث القياس. والاستخدام المشترك لنظامي GPS و GLONASS في أسلوب تعدد القنوات يكاد يضاعف (كوكبة GLONASS غير مكتملة) عدد الرصدات. ويبلغ كسب الاستقرار في نقل الوقت المتعدد القنوات GPS + GLONASS بالنسبة لقياسات GPS وحيدة القناة حوالي أربعة. ويوفر نظام GPS متعدد القنوات وحده كسب استقرار بحوالي ثلاثة.

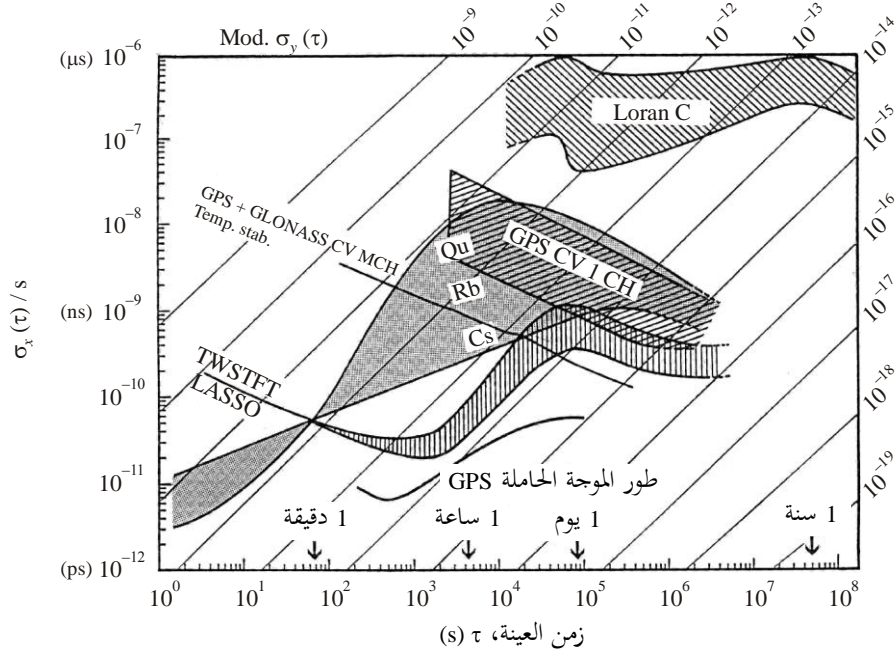
ويمثل استخدام النظام GLONASS بشفرة P ميزة واضحة. وهذا هو مستوى الضوضاء الأنخفض في قياس الشفرة الأساسية المعروفة باسم المدى الزائف. وتبلغ دقة قياس المدى الزائف حوالي 1 من مائة من طول موجة الشفرة قيد النظر. وهذا يعني أن دقة الأمداء الزائفة المحرزة في نظام GLONASS بشفرة P هي 1 نانوثانية (طول موجة GLONASS بشفرة P هو 30 ضمن 100 نانوثانية أو ما يقرب منها)، في حين يسمح نظام GLONASS بشفرة C/A بدقة قياس المدى الزائف بمقدار 10 نانوثانية فقط (طول موجة GLONASS بشفرة C/A هو 300 ضمن 1 000 نانوثانية أو ما يقرب منها). وأجريت بعض الاختبارات مؤخراً باستخدام مستقبلات توقيت GLONASS بشفرة P المتاحة حديثاً. وعلى الرغم من الصعوبات بسبب اختلاف ترددات GLONASS الذي يؤدي إلى اختلاف تأخرات معدات الحوسبة، فإن النتائج الأولى مبشرة جداً بالنجاح [Azoubib et al., 1998].

## 7.12 خاتمة

أصبح النظام العالمي لتحديد المواقع العمود الفقري في أوساط ضبط الوقت. وهو مصدر من مصادر الوقت ويمكن استخدامه في مقارنة الميقاتيات. وفي الوقت الراهن، يكاد النظام GPS يقترب من نظام نقل الوقت بدقة نانوثانية/يوم. ويقارن الشكل 8-12 تقنيات GPS المحسنة الأحدث عهداً مع تقنية GPS CV المعيارية المستخدمة الآن وتقنيات عديدة غيرها. ومع ذلك، هناك تطورات جارية من شأنها أن تحسن هذا النظام بشكل مذهل.

## الشكل 8-12

مقارنة بعض تقنيات نقل الوقت الأحدث عهداً بتقنية نقل الوقت GPS بالمشاهدة المشتركة وحيد القناة التقليدية. (بيانات الميقاتية وبيانات Loran-C وTWSTFT وطور الموجة الحاملة GPS مقتبس بإذن من D. W. Allan)



Sat\_time\_freq-12-08

إن نقل الوقت GPS بشفرة C/A، كما يمارس الآن، محدود أساساً بحكم حالات عدم الاستقرار في معدات الحوسبة وعبر المسافات الطويلة بحكم عدم اليقين في تحديد التأخرات الأيونوسفيرية. ويبلغ مدى عدم اليقين في المقارنات وحيدة القناة 3-4 نانوثانية لمتوسطات أوقات يوم واحد، وأحياناً أكثر من ذلك. وهذا يكاد لا يكفي للمقارنة بين متوسط الميقاتيات HP5071A التجارية. وهذه التقنية ليست كافية بالطبع لمقارنة معايير التردد في المختبرات عالية الأداء. وينطوي طور الموجة الحاملة GPS على أكبر إمكانية لمقارنات التردد لأنه على درجة أعلى من الدقة. وفي مرحلة التشغيل، يستخدم لمقارنة معايير التردد في المختبرات عالية الأداء ويمكن استخدامه لتقييم تقنيات أخرى لنقل الوقت والتردد. وينبغي أن يصل إلى حد الاستقرار في حدود 100 ps/يوم، بل ربما أقل من ذلك. وإذا أمكن إزالة أحوال الغموض في طور الموجة الحاملة GPS عندئذ يمكن استخدام هذه التقنية لا لتحويل التردد فحسب وإنما لنقل الوقت أيضاً.

وهناك أيضاً تطور النظام GPS بالذات. وسوف يستخدم برنامج "تحديث النظام GPS" إشارة ثانية وثالثة مشفرة مدنية. وسوف يؤدي ذلك إلى إحراز تقدم كبير، إذ من شأن المزيد من الترددات المدنية أن تسمح بقياسات أدق للأيونوسفير وبحل أفضل لأحوال غموض طور الموجة الحاملة GPS. وكذلك قد تحتوي كوكبة GPS في المستقبل على المزيد من السواتل وقد تكون إشارة الساتل أقوى. ووفقاً للتوجيه الرئاسي الصادر في مارس 1996، تم وضع 'التيسرية الإنتقائية' عند الصفر. وقد أفضى هذا إلى تحسين كبير في توزيع الوقت المباشر بواسطة النظام GPS.

ومن أهم الخطوات لتحسين دقة المستقبل هو تطوير نظام معايرة مدمج لمستقبلات التوقيت. وهذا يمثل أفضل حل للتغلب على الصعوبات الحالية فيما يتعلق بأحوال عدم استقرار التأخر في معدات توقيت النظام GPS. وإلى أن تتاح بوفرة نظم المعايرة المدمجة، لا بد من تحقيق استقرار الحرارة في مكونات الهوائي الإلكترونية وفي أي مضخمات خارج المبنى على الخط، وربما كبلات الهوائيات. ولن يقتصر استخدام الحاويات مستقرة الحرارة على تحسين نقل الوقت ونشره بالمشاهدة المشتركة بشفرة C/A فحسب وإنما سوف يحسن مقارنات التردد بواسطة قياسات طور الموجة الحاملة.

ويبدو حتماً أن الجمع بين قياسات شفرة نظامي GPS و GLONASS ضمن مستقبلات أجهزة التوقيت يوفر قيمة إضافية لمقارنات الوقت الدولية. وبالنسبة لنظام GLONASS، فإن إمكانية النفاذ إلى الشفرة الدقيقة في ترددتين يوفر وسيلة لقياس التأخرات الأيونوسفيرية. وكذلك يتم بث إشارات GLONASS على 48 تردداً (24 تردداً في المستقبل) على النقيض من نظام GPS الذي يبث على ترددتين. وهذا يوفر نظام بث قوياً وأكثر مقاومة للتداخل. ومع ذلك، يتعين على نظام GLONASS أن يعزز موثوقيته وأن يضمن استمرارية العمليات.

وماذا عن المستقبل؟ لقد تحسن أداء معايير التردد الذرية، على مدى السنوات الخمس والأربعين الماضية، في المتوسط بمقدار قيمة أسية كل سبع سنوات. وسوف تتطلب احتياجات مقارنتها في المستقبل عبر مسافات طويلة قدرافياً من التقدم في نقل الوقت والتردد. وتبشر المعلومات المفصلة في هذا البحث بإمكانية التصدي لهذا التحدي بفضل التقنيات المتقدمة لنظام GPS في نقل الوقت.

## المراجع

- ALLAN, D. W. [November, 1987] Time and frequency (time-domain) characterization, estimation and prediction of precision clocks and oscillators. *IEEE Trans. Ultrasonics., Ferroelectrics., Fre. Contr.*, UFFC-34, p. 647-654.
- ALLAN, D. W. and LEPEK, A. [1993] Trends in international timing. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 221-227.
- ALLAN, D. W. and THOMAS, C. [1994] Technical directives for standardization of GPS time receiver software. *Metrologia*, Vol. 31, 1, p. 69-79.
- ALLAN, D. W. and WEISS, M. M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. *Proc. 1980 Frequency Control Symp.*, p. 334-336.
- AZOUBIB, J., LEWANDOWSKI, W. and DE JONG, G., [1998] A new approach to international time transfer: multi-channel multi-code GPS+GLONASS common-view observations. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*, 1998, p. 87-93.
- BAERISWYL, P., T. SCHILDKNECHT, J. UTZINGER, and G. BEUTLER, [1995] Frequency and time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 9th European Frequency and Time Forum*, p. 46-51.
- BAUMONT, F., FRIEDELANCE, P., GRUDLER, P., VEILLET, C., WIAIT, L., LEWANDOWSKI, W. and G. PETIT [1993] Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfers. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 641-643.
- BIPM [1997] Report of the open forum on GPS and GLONASS standardization. Presented at 6th CGGTTS Meeting, 1997 (available, on request from).
- BUISSON, J. A., OAKS, O. J. and LISTER, M. J. [1985] Remote calibration and time synchronization (R-CATS) between major European time observatories and the US Naval Observatory using GPS. *Proc. 17th Annual. PTTI Meeting*, p. 201-222.
- BUTTERLINE, E. [January, 1993] Reach out and time someone. *GPS World*, p. 32-40.
- FRIEDELANCE, P. [1994] L'expérience LASSO. Ph. D. dissertation, Université de Paris 6, Paris, France.
- GOUZHVA, J. et al. [July/August, 1992] High-precision time and frequency dissemination with GLONASS. *GPS World*, p. 40-49.
- GURTNER, W. [1994] RINEX: The receiver independent exchange format version 2. Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, C., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W. and UHRICH, P. [September, 1993] Comparison of GPS common-view and two-way satellite time transfer over a baseline of 800 km. *Metrologia*, Vol. 30, 3, p. 183-192.
- KLEPCZYNSKI, W. J., [1996] GPS for precise time and time interval measurement. *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol.11. B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., Eds. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, chapter 17, p. 483-500.

- LEWANDOWSKI, W. [1996] Determination of the differential time correction between GPS time equipment located at the Observatoire de Paris, Paris, France, and the United States Naval Observatory, Washington, DC, USA. BIPM, Rep. BIPM-96/10.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., DE JONG, G., NAWROCKI, J. and DANAHER, J.[...] A new approach to international time and frequency comparisons: "All-in-view" multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. ION GPS97*, p. 1085-1091.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., GEVORKYAN, A. G., BOGDANOV, P. P., KLEPCZYNSKI, W. J., MIRANIAN, M., DANAHER, J., KOSHELYAEVSKY, N. B. and ALLAN, D. W. [1996] A contribution to the standardization of GPS and GLONASS time transfers. *Proc. 27th P7TI Meeting*, p. 367-383.
- LEWANDOWSKI, W., MOUSSAY, P., CHERENKOV, G. T., KOSHELYAEVSKY, N. B. and PUSHKIN, S. B. [1993] GLONASS common- view time transfer. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 147-151.
- LEWANDOWSKI, W., MOUSSAY, P., DANAHER, J., GERLACH, R. and LEVASSEUR, E. [1997] Temperature-protected antennas for satellite time transfer receivers. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 498-503.
- LEWANDOWSKI, W., PETIT, G. and THOMAS, C. [April 1993] Precision and accuracy of GPS time transfer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 42, p. 474-478.
- LEWANDOWSKI, W. and THOMAS, C. [July 1991] GPS time transfer. *Proc. IEEE*, Vol. 79, 7, p. 991-1000.
- LEWANDOWSKI, W. and TOURDE, R. [1990] Sensitivity to the external temperature of some GPS timing receivers. *Proc. 22<sup>nd</sup> P7TI Meeting*, p. 307-316.
- OVERNEY, F., PROST, L., DUDLE, D., SCHILDKNECHT, T., BEUTLER, G., DAVIS, J. A., FURLONG, J. M. and HETZEL, P. [1998] GPS time transfer using geodetic receivers (GeTT): Results on European baselines. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*.
- PETIT, G., MOUSSAY, P. and THOMAS, C. [1996] GPS time transfer using carrier-phase and P-code measurements. *Proc. 10th European Frequency and Time Forum*, p. 279-285.
- SCHILDKNECHT, T., BEUTLER, G., GURTNER, W. and ROTHACHER, M. M. [1990] Toward sub-nanosecond GPS time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 4th European Frequency and Time Forum*, p. 335-346.





## الفصل 13

### التقنيات الجيوديسية التي تستخدم طور النظام العالمي لتحديد المواقع وقياسات الشفرة

#### الصفحة

170	1.13	مقدمة .....
171	2.13	الاعتبارات المتعلقة بالأدوات ومعدات الحوسبة .....
171	1.2.13	مكونات سواتل النظام GPS .....
173	2.2.13	مرافق هوائيات تتبع النظام GPS .....
174	3.2.13	كبلات الهوائيات والتوصيلات .....
175	4.2.13	مستقبلات النظام العالمي لتحديد المواقع .....
175	5.2.13	تقييم آثار تعدد المسيرات واختبار النظم .....
176	6.2.13	معايرة تأخرات تتبع المحطات .....
177	3.13	استراتيجيات تحليل البيانات .....
177	1.3.13	معادلة رصد النظام GPS .....
178	2.3.13	طرائق من أجل حلول عالمية .....
180	3.3.13	الأطر والنماذج المرجعية لحدود التصحيح .....
181	4.3.13	الدقة في تحديد مواقع النقاط .....
181	5.3.13	آثار الأخطاء على حلول الميقاتيات .....
182	4.13	منتجات ميقاتيات الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية والمقاييس الزمنية .....
183	1.4.13	مجموعات المنتجات المتاحة .....
184	2.4.13	المقاييس الزمنية في الخدمة الدولية للنظام العالمي لتحديد المواقع .....
188	5.13	تقييم الأداء بتحليل الانقطاع في الحدود اليومية .....
193	6.13	مقارنات مع نتائج مستقلة لنقل الوقت في اتجاهين .....
194	7.13	تقييم أداء نقل الوقت .....
195	8.13	الاتجاهات في المستقبل .....
196		المراجع .....

## 1.13 مقدمة

كانت طرائق النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) هي الأساس لمعظم عمليات نقل الوقت والتردد عالية الدقة لأكثر من عقدين. وقد اعتمد النهج المعتاد للحفاظ على التوقيت العالمي المنسق (UTC) في المقام الأول على تحليلات بيانات المدى الزائف وحيد التردد (شفرة C/A) وبيانات الملاحظة المشتركة (CV) البسيطة التي تفترض إلغاء معظم الأخطاء المنهجية [Allan and Weiss, 1980]. ونظراً لتحسين حصيلة البيانات بفضل استبدال المستقبلات وحيدة القناة على نطاق واسع بوحدة متعددة القنوات، حققت مقارنات الملاحظة المشتركة بين القارات مقادير من عدم اليقين من متوسط بضعة نانوثوان خلال فترات من خمسة أيام [Lewandowski et al., 1997]. وعلى النقيض من ذلك، أظهر التطور الموازي في الطرائق الجيوديسية عالية الدقة باستخدام رصدات طور الموجة الحاملة GPS ثنائية التردد عمليات تحديد المواقع القابلة للتكرار على مستوى السنتيمترات لعمليات تكامل لمدة يوم واحد [Zumberge et al., 1997]. وعلى افتراض إمكانية تحقيق هذه النتائج لتحديد المواقع أيضاً بمثابة أزمنة مكافئة لانتقال الضوء (~33 بيكو ثانية)، فإن إمكانية التقنيات الجيوديسية القائمة على طور الموجة الناقلة GPS بما يسمح بمقارنات الوقت على الصعيد العالمي بمقادير دون النانوثانية أمر واضح، كما أصبح معترف به على نطاق واسع في التسعينيات. وفي الواقع، تبين أن الطريقة تتسم بدرجة من الدقة تقترب من ~100 بيكو ثانية في كل فترة في الحالات المؤاتية لأقواس التحليل لمدة يوم واحد [Ray and Senior, 2003]. ومع ذلك، تبقى إمكانية نقل الوقت المطلق محدودة في <1 نانوثانية، نظراً لأحوال عدم اليقين في معايرة الأدوات [Petit et al., 2001]. وبالإضافة إلى تحقيق درجة أعلى من الدقة (أي ما يعادل استقرار التردد)، فإن النهج الجيوديسي يتقبل بسهولة نشر الوقت والتردد على الصعيد العالمي. وهذا متسق مع التصميم التشغيلي الأساسي للنظام GPS (وإن كان باستبدال بث رسالة GPS بمعلومات أكثر دقة)، خلافاً لطبيعة CV من نقطة إلى نقطة، والتي تتردى علاوة على ذلك بازدياد طول مسافات خط الأساس.

والمكونات الأساسية للطريقة الجيوديسية هي توفر الرصدات GPS الثنائية التردد لكل من المدى الزائف (عادة شفرة P غير مشفرة) وطور الموجة الحاملة، التي تدون عادة كل 30 ثانية، إلى جانب نمذجة التحليل الشامل لانتشار الإشارة وحيد الاتجاه غير المختلف بدقة في مستوى المليمتر. وتبلغ الأخطاء المعيارية لقياسات الطور والشفرة في كل تردد حوالي 1 cm و 1 m، على التوالي. وبالنسبة لكل من الرصدات، يعتقد أن أخطاء تعدد المسير تغطي على الضوضاء الحرارية [Langley et al., 1996]. وبيانات الطور حيوية بالنسبة للتطبيقات الجيوديسية الحديثة نظراً لدقتها الأعلى، ومن ثم يلزم مواصلة الاعتيان من أجل ضمان استمرارية طور موثوق بها طوال مرور الساتل. وفيما يتعلق بحلول تحديد المواقع النسبية، حيث تستخدم خوارزميات الاختلاف المزدوج عادة لإزالة كل الآثار شبه الميكانيكية من السواتل ومن مستقبلات التتبع، لا تستخدم بيانات الشفرة عادة بسبب وزنها المنخفض جداً. ومع ذلك، ولتحليل البيانات غير المختلفة واستخراج تقديرات الميكانيكية، من الضروري إضافة بيانات الشفرة من أجل فصل تحالف الميكانيكية الذي لا يمكن تمييزه خلافاً لذلك ومعلومات غموض دورة الطور. ومن شأن تجميع الرصدات على هذا النحو أن يمهّد بشكل فعال بيانات شفرة الضوضاء بالاستفادة من الأطوار الأكثر دقة بكثير. ولكل زوج مستقبل-ساتل، يتم تعزيز نوعية تقديرات الميكانيكية بضمان أطول فترات ممكنة من بيانات الطور المستمر خالية من زلات الدورة، وبالتالي تقليل عدد معلومات الغموض. وتتعبق المستقبلات الجيوديسية الحديثة 12 ساتلاً أو أكثر في آن واحد مع تمريرات إفرازية تصل إلى نحو 4 ساعات في كل مرة. وفيما عدا رؤية العوائق، فإن عمليات التعقب أصعب ما تكون عادة عند أدنى زوايا الارتفاع، حيث قوة الإشارة عند أضعف مستوى لها وتأخر مسير الغلاف الجوي وآثار تعدد المسيرات على أشدها ومتغيرة إلى أقصى حد.

يستعرض هذا الفصل الطريقة الجيوديسية لنقل الوقت GPS وحالة التطورات الأخيرة. ويمكن من حيث المبدأ استخدام نفس الطرائق في النظم العالمية الأخرى للملاحة الساتلية (GNSS). وفي حين لم تستغل كوكبة GLONASS القائمة على نطاق واسع لهذا الغرض، من المتوقع عموماً أن يعزز نظام GALILEO الأوروبي القدرات الحالية إلى حد كبير.

## 2.13 الاعتبارات المتعلقة بالأدوات ومعدات الحوسبة

يمكن لأي مكونة في مسير إشارة النظام GPS (بل حتى بالقرب منه أحياناً) أن تؤثر على أداء الوقت والتردد. وفيما يتعلق بنقل الوقت، فإن اعتبارات معدات الحوسبة التي تنطبق في حالة مرفق جيوديسي تتبع أساساً نفس القواعد البديهية التي يتبعها أي مرفق آخر لضبط الوقت. وينبغي أن يبقى التشكيل الإجمالي لمعدات الاستقبال بسيطاً قدر الإمكان مع الحرص البالغ على استقرار مكونات النظام وبيئتها. وينبغي قدر الإمكان اختبار العناصر الجديدة بدقة قبل نشرها عملياً. وعندما يحتاج الأمر إلى تغييرات، فإن من شأن قصرها على مكونة واحدة في كل مرة أن يسمح بتقييم العواقب على نحو أوضح.

### 1.2.13 مكونات سواتل النظام GPS

تتوفر المعلومات الأساسية اللازمة لاستخدام النظام العالمي لتحديد المواقع في وثيقة التحكم في الواجهات ICD-GPS-200، أو مواصفات الواجهات الأحدث عهداً IS-GPS-200. وتُثبت مواقع السواتل لمراكز الطور الفعال في صفائف هوائيات المرسلات. ومع ذلك، فإن النظام GPS يحسب داخلياً المدارات الدينامية لمركز نقطة الكتلة لكل ساتل ويحول النتائج إلى مراكز الطور. ولا تتوفر رسمياً تخالفات المتجه المستخدمة لذلك، لأنها ليست مطلوبة من جانب مستعمل الشفرة الدولية.

كما أن وكالة الاستخبارات الجغرافية المكانية الوطنية (NGA) تنشر التخالفات في موقعها على الانترنت (<http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/>).

ويجب على المستعملين الذين يحسبون التقويمات الساتلية وقيم الميقاتيات الخاصة بهم أن يفترضوا أيضاً مجموعة ما من تخالفات مركز طور الهوائي. وعند مقارنة قيم الميقاتيات الساتلية من مصادر مختلفة، من الضروري التحسب لأي اختلافات في المكونات الشعاعية لتخالفات مركز الطور المفترضة حيث تتكشف هذه في شكل تحيزات في الميقاتيات الساتلية. ومما يزيد من تعقيد الوضع صعوبة إجراء قياسات دقيقة لتخالفات الهوائي الفعلي [Mader and Czopek, 2002]، مما يؤدي إلى استخدام مجموعات مختلفة من القيم.

وعلى النقيض من رسالة البث GPS، تُنسب المدارات الدقيقة في الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية (IGS) إلى المراكز الساتلية في الخدمة. وعندما أُطلق ساتل أول مجموعة IIR في عام 1997 بات من الواضح أن تخالفه في الاتجاه نحو الأرض يختلف عن المركبات الفضائية السابقة. وحرصاً على ضمان إمكانية مقارنة تحديدات الميقاتيات الساتلية من مختلف مراكز تحليل الخدمة IGS وتجميعها على نحو متسق، اعتمدت هذه الخدمة مجموعة مشتركة من القيم لمتجهات تخالف مركز طور الهوائي، نفذت ابتداءً من 29 نوفمبر 1998:

المجموعتان II و IIA	$dx = 0,279 \text{ m}$	$dy = 0,000 \text{ m}$	$dz = 1,023 \text{ m}$	[IGS]
المجموعة IIR	$dx = 0,000 \text{ m}$	$dy = 0,000 \text{ m}$	$dz = 0,000 \text{ m}$	[IGS]

وينطبق نظام الاحداثيات الثابتة ساتلياً المعتاد، حيث يتم توجيه المحور z من مركز الساتل نحو مركز الأرض ويساير المحور y الألواح الشمسية ويكون المحور x متعامداً. وقد حدد [Mader and Czopek, 2002] تخالف dz بقيمة 1,66 m لصفيفة هوائيات المجموعة IIA غير المستعملة على الأرض. والتخالفات المستخدمة من جانب نظام التشغيل GPS مماثلة لتخالفات IGS بالنسبة للمجموعتين II و IIA:

المجموعتان II و IIA	$dx = 0,2794 \text{ m}$	$dy = 0,0000 \text{ m}$	$dz = 0,9519 \text{ m}$	[GPS]
---------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------

ولكنها تختلف بشكل كبير وهي متميزة بالنسبة لكل مركبة فضائية في المجموعة IIR، ومعظمها حوالي 1,5 إلى 1,6 m من أجل dz. وإذا أراد المستعمل مقارنة قيم الميقاتيات الساتلية في الخدمة IGS مع نتائج أخرى تستعمل تخالفات هوائي مختلفة، عندئذ يجب تطبيق التصحيحات كما يلي:

$$C_i(\text{user}) = C_i(\text{IGS}) - \{ [ dz_i(\text{user}) - dz_i(\text{IGS}) ] / c \} \quad (1-13)$$

حيث:

 $dz_i(IGS)$ : قيمة IGS من أجل  $dz$  بشأن الضوضاء شبه العشوائية  $PRNi$  في الساتل $dz_i(user)$ : قيمة المستعمل من أجل  $dz$  بشأن  $PRNi$  في الساتل $C_i(user)$ : قيمة مقياسية IGS بشأن  $PRNi$  $C_i(user)$ : قيمة مقياسية المستعمل بشأن  $PRNi$  $c$ : سرعة الضوء (299792458 m/s).ويقع مجال بث النظام GPS حالياً ضمن نطاقي  $L_1$ ، ويكون الترددان المركزيان الاسميان هما:

$$L_1 = 154 \cdot 10,23 = 1575,42 \text{ MHz and } L_2 = 120 \cdot 10,23 = 1227,60 \text{ MHz}$$

ويحتوي النطاق  $L_1$  على تشكيل شفرة C/A بتردد 1,023 MHz فضلاً عن شفرة P1(Y) بـ 10,23 MHz وشفرة رسالة بمعدل 50 bit/s.

وفي النطاق  $L_2$  لا يتم حالياً سوى تشفير شفرة دقيقة P1(Y) (10,23 MHz)، ومع ذلك من المرتقب إضافة شفرة مدنية ثانية في المستقبل القريب.

إن مختلف تشكيلات GPS، وإن كانت اسمياً في الطور، لها حتماً تحيزات غير صفرية هامة في علاقاتها المتبادلة. وأهم هذه التحيزات هو تحيز المدى الزائف بين تشكيلي  $P1$  و  $P2$ . والتشتت من الذروة إلى الذروة في التحيزات  $P1-P2$  يفوق 10 نانوثانية. وبما أن تحديد مقياسيات البث يتم من أجل تركيبة خطية  $P1/P2$  حرة من الأيونوسفير (انظر المزيد أدناه)، يجب على مستعملي التردد الوحيد تعويض التحيزات  $P1-P2$  باستخدام قيم  $T_{GD}$  الواردة في رسالة الملاحية (انظر ICD-GPS-200). وعند توليد منتجات خريطة الأيونوسفير، تُبلغ الخدمة IGS أيضاً عن تحيزات  $P1-P2$  المرصودة الخاصة بها، المعروفة باسم تحيزات الشفرة التفاضلية (DCB). ومن باب الرجوع، تحسب العلاقة الاسمية بين قيم البث  $T_{GD}$  والتحيزات DCB في الخدمة IGS كما يلي:

$$DCB = [1 - (77/60)^2] * T_{GD} \quad (+ \text{ scale offset}) \quad (2-13)$$

وذلك لكل ساتل بمفرده، إلا أن المقياسين يختلفان بتخالف متغير مع الزمن لأن القيمة المتوسطة لتحيزات DCB محددة بعرف الخدمة IGS بقيمة صفر بينما تُنسب قيم البث  $T_{GD}$  مرجعياً إلى تحيز تجريبي مطلق في الأدوات. ويلاحظ أن فرق المقياس، في وحدات  $T_{GD}$ ، ينخفض تدريجياً، من حوالي -4,3 نانوثانية في بداية عام 2000 إلى -7,1 نانوثانية في منتصف عام 2004. وتراجع قيم البث  $T_{GD}$  وتحدث كل ثلاثة أشهر بينما تقوم الخدمة IGS برصد التحيزات DCB الخاصة بها والإبلاغ عنها بشكل مستمر على فترات يومية.

ويفترض إجراء التصحيح  $T_{GD}$  أن يكون التحيز  $P1-P2$  مناسباً لمستعملي التردد الوحيد الشفرة C/A، كما هو بالنسبة ل  $P1$ . وفي الواقع، هذا غير صحيح تماماً بسبب تحيزات  $P1-C/A$ ، إذ لها مدى من الذروة إلى الذروة بحوالي 5 نانوثانية. ولئن كانت هذه التحيزات تهمل حالياً في ICD-GPS-200، فإن الخدمة IGS تراعي هذه التحيزات منذ عام 1999. وهي ضرورية لأن بعض المستقبلات الجيوديسية تتعقب C/A بدلاً من  $P1$  والبعض يبلغ عن  $[C/A + (P2-P1)]$  بدلاً من  $P2$  الحقيقية، التي لها تحيزات مختلفة [Ray et al., 2000]. ولتجنب خلط البيانات التي لها تحيزات ساتلية مختلفة، ربما تخط من منتجات المقياسيات الساتلية IGS (ومن دقة تحديد مواقع النقاط باستخدامها)، عمدت الخدمة IGS إلى تنفيذ إجراءات لمعالجة وتحليل مجموعات بيانات GPS متنوعة حفاظاً على الاتساق. ولدى إضافة تشكيلات جديدة إلى إشارات GPS في المستقبل، من المتوقع أن يتم تضمين قيم المعايرة للتحيزات الإضافية بين الإشارات في بث رسالة الملاحية ومراقبتها من جانب الخدمة IGS.

وثمة تعقيد آخر في إرسال الإشارات الساتلية وهو نمط طور الحزمة. وبينما يفترض عموماً أن يكون نصف كروي تماماً، هناك أدلة قوية على خلاف ذلك [Schmid and Rothacher, 2003]. وغالباً ما يتسبب إهمال أنماط الطور غير المثالية، للسواتل أو هوائيات التبع (انظر المزيد أدناه)، في أخطاء في مقياس أرتال GPS (أي الاتجاه الشعاعي) على مستوى ما يقرب من 10 إلى 15 جزء

في المليار (ppb). وعلى الرغم من أهمية هذا التأثير في العديد من التطبيقات الجيوديسية، فلعله قليل الأهمية بالنسبة لمعظم مقارنات الوقت، على الأقل قبل أن تبلغ معايرة الأدوات دقة دون النانوثانية.

وثمة نقطة أخيرة جديرة بالملاحظة بشأن الميقاتيات الساتلية GPS وهي أن الانحطاط المتعمد في إشارات ميقاتيات GPS من خلال التيسر الانتقائي (SA) قد توقف عند الساعة 04:00 بالتوقيت العالمي المنسق (UTC) في 2 مايو 2000. وقبل ذلك الوقت، كان جذر متوسط تريع تغيرات الميقاتيات على مدى يوم في مستوى ما يقرب من 80 نانوثانية. ومنذ ذلك الحين، أصبح استقرار الميقاتية متأصلاً في نظام ضبط الوقت في كل ساتل، وهو أفضل بكثير من قيمة أسية. وبالإضافة إلى تمكين المدنيين من النفاذ إلى تحديدات الموقع والتوقيت GPS التي تحسنت كثيراً، فإن جميع المستعملين، وخصوصاً المستفيدين من منتجات الخدمة IGS الأكثر دقة بكثير، يمكنهم استكمال قيم ميقاتيات GPS المجدولة بهامش خطأ أضيق بكثير من ذي قبل.

### 2.2.13 مرافق هوائيات تتبع النظام GPS

يقام المرفق الجيوديسي عادة على منصة فائقة الاستقرار توفر الأساس المادي لقياسات عالية الدقة طويلة الأجل. ومن بين التصميمات الشائعة أرصفة الخرسانة عميقة الإرساء وهيكل القضبان المعدنية المتصالة والصواري الفولاذية، كما تستخدم المباني أيضاً، وخاصة من أجل تطبيقات التوقيت.

وثمة معلومات عن مختلف أنواع هذه المنصات في الموقع: [igsb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html](http://igsb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html).

ويُغرس في المنصة بشكل دائم وراسخ واسمٌ جيوديسي يحتوي على نقطة مرجعية لإحداثيات المحطة. ومن أفضل الممارسات أيضاً إنشاء شبكة مراقبة جيوديسية محلية عالية الدقة لرصد الحركات النسبية لمحطة GPS أولية.

ومن أجل تمييز تحركات المنصات المحلية جداً عن الآثار الأوسع نطاقاً، ينبغي أن تشمل شبكة المراقبة على علامات دائمة تغطي مدى من المسافات يتراوح من ~10-100 m إلى حوالي 10 km. ويجب إعادة مسح الشبكة المحلية دورياً لتكون مفيدة ويمكن أن تتشكل جزئياً من محطات GPS أخرى عاملة بشكل مستمر. وينبغي إرساء هوائي GPS بالذات بشكل راسخ مباشرة فوق العلامة الجيوديسية بحيث يكون موقعه ثابتاً ويمكن قياس ابتعاده عن نقطة الواسم المرجعية نسبة إلى نقطة الهوائي المرجعية (ARP) بدقة في حدود >1 ميليمتر.

وقد تم تعيين نقطة هوائي مرجعية تقليدية من جانب الخدمة IGS لكل نموذج هوائي. ويجب أن تكون نقطة يمكن النفاذ إليها مادياً، خلافاً لما هو حال مركزيّ الطور الكهربائيين L1 و L2، من أجل القيام بقياسات المسح المحلية. وبالنسبة لغالبية هوائيات حلقة الاختناق، فإن النقطة ARP هي نقطة في قاعدة المضخم المسبق في الجانب الأسفل من الجهاز. ويتم الحفاظ على الأبعاد المادية المتصلة بالنقطة ARP ومراكز طور الإشارة، فضلاً عن أنماط طور واجهة الموجة المقيسة، في ملفات متاحة لدى الخدمة IGS. والمعلومات عن ابتعاد الواسم وأبعاد الهوائي مطلوبة لتحليل بيانات الرصد واختزال النتائج إلى إحداثيات المحطة المرجعية.

وفي الحالات التي لا يشترط فيها أعلى مستوى من جودة الأداء الجيوديسية، مثل العديد من مرافق التوقيت، قد لا يلزم استخدام منصة أو علامة جيوديسية. وفي هذه الحالة، تحال إحداثيات المحطة مباشرة إلى النقطة ARP (أو في بعض الأحيان إلى مركز الطور). ولئن كان هذا الحل مريحاً فإنه يستوجب عموماً تغيير إحداثيات المحطة كلما تغير نموذج الهوائي. ولذا من الأفضل اتباع المبادئ التوجيهية الجيوديسية القياسية كلما كان ذلك ممكناً عملياً.

ويتطلب الأمر استخدام هوائيات عالية الجودة ثنائية التردد من أجل التطبيقات الجيوديسية، بما في ذلك نقل الوقت على درجة عالية من الدقة. ويتميز أكثر التصميمات شيوعاً بمجموعة من حلقات الاختناق متحدة المركز، متوفرة لدى العديد من الباعة بأبعاد داخلية مختلفة قليلاً. وقد تم تكييف التصميم من أجل استقبال مزدوج التردد يعمل في الوقت ذاته على تخفيف الإشارات بشدة بالقرب من الأفق ودونه، حيث الانعكاسات المتعددة المسير أسوأ ما تكون عادة [Schupler and Clark, 2001]. وبالنسبة لتطبيقات نقل الوقت، على وجه الخصوص، من الأهمية بمكان توضع الهوائي بحيث يقلل إلى الحد الأدنى من تعدد مسير الإشارات، لا سيما تعدد مسيرات الشفرة. وهذا يعني عموماً الحفاظ على أفق حر في كل الاتجاهات وتجنب وضع أجسام عاكسة بالقرب من الهوائي. والإشارة L2 حساسة بشكل خاص للانعكاسات المرتدة من خلف الهوائي [Byun et al., 2002] ولذلك من الأفضل عادة، إذا لم يمكن أن يوضع

الهوائي مباشرة على سطح غير عاكس، وضعه عالياً فوق أي خلفية بقدر ما هو ممكن عملياً (مع مراعاة متطلبات الاستقرار والنفاذ). وعلى أي حال، ينبغي حتماً أن تتجنب المسافة بين مركز طور الهوائي والسطح الذي يدعمه مضاعفات أنصاف طول الموجة في النطاق L، وخاصة في المجال القريب من الهوائي [Elosegui et al., 1995]. ويحتاج الأمر إلى رؤية واضحة للسماء حتى زاوية ارتفاع بمقدار 10° على الأقل، ويفضل أن تكون 5°، وذلك لتمكين تحديدات جيوديسية متينة لموقع الهوائي.

وكانت هناك بعض الادعاءات الضعيفة السند بوجود اختلافات قوية في تقديرات الميقاتيات الجيوديسية مع تغيرات درجات الحرارة في بعض هوائيات GPS، إلى جانب توصيات باستخدام وحدات مستقرة من حيث درجة الحرارة. وبينما قد ينطبق هذا على بعض الأجهزة المتواضعة الوحيدة التردد، فإن الاختبارات المباشرة على هوائي حلقة اختناق AOA Dorne Margolin لم تكشف عن أي حساسية من تقديرات الميقاتية لتغيرات درجة حرارة الهوائي. وقد وضع [Ray and Senior, 2001] حداً أعلى قدره 2 بيكو ثانية/°C لحساسية درجة الحرارة (النهارية) على المدى القصير وامتد في وقت لاحق إلى >10,1 بيكو ثانية/°C لأي مكونة على المدى الطويل [Ray and Senior, 2003]. بل حدد [Rieck et al., 2003] مقادير أصغر من الحساسية، 0,17 بيكو ثانية/°C أو أقل، بالنسبة لنموذج حلقة الاختناق Ashtech.

وكما هو حال هوائيات الإرسال الساتلية، وكما هو معترف به منذ وقت طويل، فإن مخططات حزمة هوائيات تتبع GPS تحيد عن النموذج الأمثل نصف الكروي تماماً [Schupler et al., 1994]. وهذا يعني فعلاً أن مركز طور الهوائي، وبالتالي النقطة المرجعية الجيوديسية، يتوقف على اتجاه الإشارة من ساتل معين. وقد أهملت عادة الاختلافات السمتية ولم يؤخذ في الحسبان سوى تبعية زاوية الارتفاع، مع أن من المرجح أن يتغير ذلك في المستقبل. وقد وضعت الخدمة IGS مجموعات من تصحيحات الطور لتطبيقها في تحليل البيانات لكل نموذج هوائي معين. وقد يتسبب إهمال هذه الآثار في أخطاء منهجية في تحديد ارتفاع المحطات تصل إلى 10 cm. ويستخدم النهج الحالي لدى الخدمة IGS تصحيحات الطور التفاضلية فيما يتعلق بهوائي حلقة الاختناق AOA Dorne Margolin T كمرجع قياسي وتتبع معظم القيم المقيسة منهجية [Mader, 1998]، الموصوفة في الموقع ([www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/](http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/)).

وقد أهملت مخططات الطور في المرسلات الساتلية. كما انتقلت الخدمة IGS إلى استخدام مخططات الهوائي المطلقة للسواتل ومحطات التتبع [Schmid and Rothacher, 2003].

وقد تم تجهيز العديد من هوائيات النظام GPS الدائمة بقبة لحماية عناصر حلقة الاختناق من تراكم الثلج أو شتى أنواع القمامة. فهذه تؤثر بالتأكد على أداء نظام GPS، وذلك أساساً جراء تشويه أطوار واجهة الموجة، مما قد يؤدي إلى تحولات ظاهرية في موقع المحطة، وخاصة الارتفاع. ويمكن أن تصل الخلافات في الموقع، بوجود القبة وبدونها، إلى مستوى عدة سنتيمترات. وقد أظهرت الاختبارات أن القبة المخروطية كثيراً ما تكون الأكثر إشكالية؛ ويبدو أن بعض أنواع القبة نصف الكروية تظهر الحد الأدنى من الآثار. ولا تأخذ الخدمة IGS حالياً في الحسبان وجود القبة في جداول مركز طور الهوائي المنشورة - حيث تعامل جميع الهوائيات على أنها خالية من القبة حتى عند قياس تصويبات مركز الطور من أجل القبة. وأفضل نصيحة عامة هي تجنب استخدام القبة ما لم تكن ضرورية حتماً. وخلاف ذلك ينصح باختيار قبة نصف كروية تم قياس أثرها ووجد ضئيلاً.

### 3.2.13 كبلات الهوائيات والتوصيلات

ينبغي أن يكون الكبل من هوائي GPS إلى المستقبل قصيراً قدر الإمكان وأن يتكون من وصلة واحدة متواصلة. وينبغي عدم إدراج أي فاصم إشارة أو مكونات أخرى وذلك لضمان أفضل طاقة وتطابق مقاومة ممكن. ولئن كانت الاختبارات المحددة بشأن آثار الفواصم أو العناصر الأخرى من هذا القبيل على أداء الميقاتيات محدودة للغاية، فإن الأقوال المروية تشير إلى حالات انخراط حيشما أدخلت إضافات من هذا النوع. ويبلغ [Rieck et al., 2003] عن نتائج حساسية لدرجة الحرارة، ولكنهم لم يدرسوا آثار تعدد المسيرات أو غيرها من الآثار. وينبغي أن تكون الموصلات محتومة جيداً ضد الرطوبة والتعرض. كما ينبغي اختيار نوع الكبل بحيث يتسم بخصائص جيدة من حيث استقرار الطور وانخفاض الحساسية لدرجة الحرارة (>0,1 بيكو ثانية/°C/متر) وانخفاض الخسارة. وينبغي تجنب مد الكبلات عبر أرض مفتوحة والأفضل مدها في قنوات مدفونة. ومن المستحسن عموماً بذل كل جهد للحد من التعرض للمؤثرات البيئية.

### 4.2.13 مستقبلات النظام العالمي لتحديد المواقع

يجب أن تُبلغ مستقبلات GPS الجيوديسية عن المدى الزائف ورصدات طور الموجة الناقلة في كل من الترددات L1 و L2. ولمقارنات الوقت، يجب أن يتمكن المستقبل من قبول التردد المرجعي ومدخلات نبضة واحدة في الثانية (PPS 1) من معيار خارجي واستخدامها بإخلاص لمهام التوقيت الداخلية. وغالباً ما تكون هذه المزايا خيارات لدى شراء معدات جيوديسية تكون قياسية خلاف ذلك. وعند التردد L1، تتبع معظم المستقبلات في شبكة الخدمة IGS الشفرة P1 على مدى شفرة C/A الأضيق، ومن ثم فإن الخبرة في استعمال نماذج C/A فقط محدودة. ولم يبلغ عن أي مقارنات جنباً إلى جنب في أداء الميقاتية لمختلف أنماط تتبع الشفرة. ومن ناحية أخرى، لم يشاهد أي فرق ملحوظ بالنسبة للنماذج الشائعة الاستعمال [Ray and Senior, 2003]. والاشتراط الأساسي هو أن تكون حساسية الشفرة لتعدد المسيرات منخفضة.

وقد أظهرت دراسات مختلفة الآثار الضارة لتغيرات درجة الحرارة على استقرار تردد مستقبلات GPS [Rieck et al., 2003] و [Overney et al., 1997] و [Petit et al., 1998] و [Bruyninx and Defraigne, 1999] و [Schildknecht and Dudle, 2000]. وتكون الحساسيات عموماً في حدود  $100 \pm$  بيكو ثانية/°C مع وجود اختلافات كبيرة بين فرادى الأجهزة، حتى من نفس الطراز. لذلك، وبالنسبة لتطبيقات الوقت والتردد عالية الأداء، من الضروري الحفاظ على معدات استقبال GPS في مكان محكم بيئياً، حيث يفضل ألا تتجاوز التقلبات الحرارية  $0.1^\circ\text{C}$ .

ويسمح العديد من المستقبلات بمعلمات يختارها المستعمل لوظائف مختلفة مثل تمكين تمهيد الشفرة على متن الجهاز أو مطابقة ميقاتية المستقبل الداخلية مع توقيت النظام GPS. ويجب تعطيل المعلمة الأخيرة من أجل مقارنات الوقت المفيدة. ومن المستصوب عادة تعطيل تمهيد الشفرة حيث من الأفضل القيام بذلك في تحليل البيانات لاحقاً.

وكما هو الحال في أي نظام لتوزيع الوقت والتردد، من الضروري الحرص على تماسك التردد المرجعي المدخل وإشارات النبضة الواحدة في الثانية (PPS 1) فيما بينها وعزلها جيداً عن مصادر التداخل. وينبغي توخي الحذر خاصة لدى توليد ترددات الدخل الثانوية، إذا لزم الأمر. وعلاوة على ذلك، يجب أن تكون النبضات في الثانية عادة ضمن هامش تسامح ضيق من توقيت GPS، من قبيل  $> 30$  مللي ثانية، كيما يعمل المستقبل بشكل صحيح.

وترسل البيانات الرصدية في النظام العالمي للملاحة الساتلية عالمياً باستخدام نسق التبادل المستقل عن المستقبل، الموصوف في الموقع (<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex210.txt>). وتتضمن هذه الوثيقة أيضاً مواصفات نسق رسائل الملاحة وبيانات الأرصاد الجوية وما يتصل بذلك من المعلومات. ومن المستحسن عموماً أرشفة ملفات البيانات الأصلية الخام من المستقبل، بالإضافة إلى ملفات RINEX، في حال اكتشاف مشكلة في التحويل في وقت لاحق. ويمكن لمستعملي التوقيت استقاء أنماط الملفات المستخدمة من أجل المشاهدة المشتركة ("نسق CGGTTS") من ملفات RINEX باستخدام أداة وضعها المرصد الملكي البلجيكي [Defraigne et al., 2001].

### 5.2.13 تقييم آثار تعدد المسيرات واختبار النظم

ينبغي، حالما تقام محطة جيوديسية، تقييم جودة البيانات بدقة قبل أن تدخل المحطة حيز التشغيل. وإذا صودفت مشاكل، فينبغي حلها قدر الإمكان. وقد أنشأ كونسورتيوم جامعة نافستار (UNAVCO) موقعاً على شبكة الإنترنت مفيداً للغاية ([www.unavco.org/facility/facility.html](http://www.unavco.org/facility/facility.html)) يحتوي على نصائح مفيدة وتقارير اختبار عن المعدات اللازمة لمواصلة تشغيل المحطات GPS. كما أنه يحافظ على مجموعة من أدوات البرمجيات. وعلى وجه الخصوص، هنالك مجموعة أدوات "teqc" لا غنى عنها لمعالجة وفحص بيانات GPS الخام، بما في ذلك تحويل ملف RINEX وتحرير البيانات والتحقق من الجودة [Estey and Meertens, 1999]. وباستخدام حصيلة teqc، يمكن الوقوف على أكثر المشاكل الأساسية في مجال جودة البيانات، مثل زلات الدورة المفرطة وعدم اكتمال التقاط البيانات والاستعصاء في تغطية السماء، وما إلى ذلك. وتقيس عمليتا التشخيص teqc وهما MP1 و MP2 اختلافات جذر متوسط التربيع في تعدد مسيرات الشفرة عند L1 و L2، على التوالي، على افتراض أن آثار تعدد مسيرات الطور تكاد لا تذكر. ويعاد تحديد تحيز غير معروف لكل مرة يمر فيها الساتل، ولذلك فإن مقاييس تعدد المسيرات هذه ليست حساسة للإشارات الطويلة الفترة والتي قد تكون هامة للتوقيت. وكذلك، ونظراً لاختلاف السلوك

جوهرياً في أنماط مختلفة من المستقبلات، فإن قياسات MPi تفتقر عموماً إلى المعنى المطلق ولا يمكن بسهولة مقارنتها من موقع لآخر. ومع ذلك، ثمة اختلافات كبيرة غير متوقعة في المسيرات المتعددة في زاوية الارتفاع ويمكن أن تشير بمرور الوقت إلى مشكلات من حيث الموقع أو التشكيل. وفي حالة واحدة على الأقل، تبين أن اختلافات MP2 مترابطة بشدة مع تغيرات في أداء الميقاتية الجيوديسية [Ray and Senior, 2003].

وإذا أمكن وضع حلول لتحديد مواقع النقاط بدقة (انظر أدناه) لسلوك ميقاتية المستقبل باستخدام مدار دقيق ومنتجات ميقاتيات ساتلية من الخدمة IGS، من شأن مقارنة حل شفرة فقط مع حل شفرة + طور أن تكشف عن مشاكل غير متوقعة في بيانات المدى الزائف. وثمة تشخيص مفيد آخر هو مستوى الانقطاعات في تقديرات الميقاتيات بين أقواس تحليل متتالية من يوم واحد [Ray and Senior, 2003]، تعكس إجمالاً اختلافات في ضوضاء تعدد مسيرات المدى الزائف (انظر أدناه). وثمة طرائق أخرى لتحري أخطاء تعدد المسيرات - مثل التوزيع السماوي لمخلفات ما بعد المطابقة من حل جيوديسي أو اختلافات عالية التردد في نسب الإشارة إلى الضوضاء في النظام GPS - تركز عادة على آثار الطور، بدلاً من التركيز على المدى الزائف. ومع ذلك فإن الاختبار التقليدي هو تكرار نمط خطأ معين من يوم ما إلى اليوم التالي في الفترة الاسمية ليوم فلكي واحد، أي 23 ساعة و 56 دقيقة و 4 ثوان، ما يقابل تقريباً دورة تكرار المسير الهندسي بين الساتل والأرض.

### 6.2.13 معايرة تأخرات تتبع المحطات

لمقارنة قراءات الميقاتية في محطة ما مع قراءاتها في محطة أخرى باستخدام أي نظام تدخل يتطلب الأمر أن تكون التأخرات الداخلية ضمن جميع معدات الحوسبة في الأجهزة معروفة بدقة. وتعرف هذه العملية باسم المعايرة. ويمكن عموماً النظر في فئتين من طرائق المعايرة: التحديدات المطلقة، حيث يتم إجراء مجموعة من قياسات التحيز من طرف إلى طرف باستخدام محاكي إشارة GPS، والذي يجب أن يكون قد خضع نفسه لمعايرة دقيقة؛ والتحديدات التفاضلية، حيث يتم إجراء مقارنة جنباً إلى جنب إزاء نظام مماثل آخر يُتخذ كمرجع قياسي. وفي الممارسة العملية تستخدم كلتا الطريقتين. حيث تتم معايرة عدد صغير من المستقبلات الجيوديسية في أسلوب مطلق. ثم تستخدم هذه المستقبلات كمعايير متنقلة لمعايرة تفاضلية تشمل عدداً أكبر بكثير من المستقبلات المنشورة تشغيلياً [Petit et al., 2001].

وقد جرت معايرة نمط مستقبل GPS جيوديسي واحد بشكل مطلق، وهو Ashtech Z-XII3T، باستخدام جهاز محاكاة في مختبر بحوث البحرية الأمريكية [White et al., 2001] و [Petit et al., 2001] و [Plumb et al., 2005]. وتتوافق النتائج المطلقة ضمن حدود عدم اليقين التي أبلغ عنها بحوالي 3,5 نانوثانية مع قياس تفاضلي نسبة إلى مستقبل توقيت مشاهدة مشتركة تقليدي معايير مسبقاً [Petit et al., 2000]. ويعتقد بأن مصدر الخطأ السائد في إجراء المعايرة المطلقة هو جهاز محاكاة GPS نفسه [Plumb and Larson, 2005]. ويمكن إجراء المعايير التفاضلية اللاحقة إزاء معيار مطلق بقدر أقل من عدم اليقين بحوالي 1,6 n/s [G. Petit، اتصالات خاصة].

وتيسيراً على المستعملين، يمكن تعديل بيانات GPS المستقاة من مستقبل معايير لإزالة تحيز الأدوات في عملية توليد تبادل الملفات RINEX. والإجراء المحدد للقيام بذلك هو أن يُكتب تصحيح تحالف الميقاتية، dT، في حقل مخصص في كل سجل حقبة رصد وأن تعدل الرصدات المبلغ عنها وفقاً للعلاقات التالية من أجل الحفاظ على اتساقها الصارم:

$$(3-13) \quad \text{Time(corrected)} = \text{Time} - Dt$$

$$(4-13) \quad \text{PR(corrected)} = \text{PR} - (dT * c)$$

$$(5-13) \quad \text{phase(corrected)} = \text{phase} - (dT * \text{freq})$$

حيث:

Time: حقبة الرصد

PR: المدى الزائف

phase: طور الموجة الحاملة للتردد "freq".



ومن شأن توفير قيمة تصحيح التحالف لكل حقبة رصد أن يسمح بإعادة بناء الرصدات الأصلية، إذا لزم الأمر. ومع ذلك، فإن ميزة نسق التبادل المستقل عن المستقبل هذه محدودة بمواصفة نسق الميقاتية لقيم تحالفاتها مختزلةً إلى أقرب نانوثانية. وإذا تم تطبيق تصحيحات لمعايرة الميقاتية بأقل من نانوثانية دون استخدام مجال تحالف ميقاتية النسق RINEX، عندئذ ينبغي أن تكون قيمة تصحيح الميقاتية موثقة في شكل تعليق في رأسية الملف RINEX.

### 3.13 استراتيجيات تحليل البيانات

يعزى عادة الاعتراف بإمكانية استخدام النظام GPS لتحقيق مستويات من الدقة الجيوديسية أفضل بعدة قيم أسية مما كان متصوراً أصلاً إلى [Counselman و Shapiro 1979]. حيث اقترحاً، بتطبيق تقنيات فلكية وضعت لقياس التداخل القاعدي الطويل جداً (VLBI)، استخدام طور الموجة الحاملة بوصفه هدف الرصد الأساسي في نظام GPS بدلاً من استخدام المدى الزائف. ومن خلال تتبع دقيق جداً للتغيرات في طور إشارة GPS تبين كيف يمكن القيام بتحديدات الموقع النسبي حتى مستوى سنتيمتر واحد بدلاً من عشرات الأمتار. وبعد ذلك بوقت قصير وصف [Bossler et al. 1980] طرائق لحل غموض طور العدد الصحيح في إشارة الموجة الحاملة. وسرعان ما تابعت التطورات بعد ذلك، بالاعتماد إلى حد كبير على طرائق ونماذج القياس VLBI، ومعظمها ينطبق مباشرة على نظام GPS أيضاً. والفروق الرئيسية في التحليل هي المعلومات الإضافية المتعلقة بالمدارات في نظام GPS والأهمية النسبية لرصدات تأخر المجموعة (وهي حيوية من أجل VLBI، وليس لنظام GPS باستثناء حلول الميقاتية) ورصدات الطور (وهي حيوية لنظام GPS، ولا تدرج عادة إلا بمثابة مشتقات زمنية ضئيلة الأهمية في قياس التداخل VLBI).

#### 1.3.13 معادلة رصد النظام GPS

ترد الخطوات الأساسية لاختزال رصدات النظام العالمي لتحديد المواقع في المنشور ICD-GPS-200 والعديد من المنشورات اللاحقة. وبالنسبة لساتل ما ولزوج معين من محطات التتبع، يمكن كتابة معادلة رصد المدى الزائف لكل تردد رصد،  $i$ ، على النحو التالي:

$$P_i = R + c(C_r - C_s) + I_i + T + e_i \quad (i=1,2) \quad (6-13)$$

حيث:

$i = 1$  و  $2$  يقابلان التردد  $L_1$  و  $L_2$

$R$ : المسافة بين الساتل ومراكز طور المستقبل

$c$ : سرعة الضوء في الفراغ

$C_r$ : خطأ مزمنة الميقاتية في محطة التتبع وقت استقبال إشارة (بما في ذلك جميع مكونات التأخر الداخلية)

$C_s$ : خطأ ميقاتية الساتل المرسل وقت البث

$I_i$ : التأخر الأيونوسفيري

$T$ : التأخر بسبب الغلاف الجوي المحايد (التروبوسفير أساساً)

$e_i$ : خطأ القياس (بما في ذلك الضوضاء الحرارية والمصادر الأخرى من قبيل تعدد المسيرات).

وتضع الضوضاء الحرارية في الهوائي والمستقبل حداً أدنى نظرياً على حجم أخطاء القياس، وهو يتوقف إلى حد ما على تكنولوجيا التتبع المستخدمة في المستقبل. وتظهر تجارب خط الأساس الصفري، حيث يمكن إزالة معظم الآثار الخارجية من قبيل تعدد المسيرات، جذر متوسط تربيع المدى الزائف C/A وضوضاء قياس طور الموجة الحاملة  $L_1$  لتكون 4 cm و 0.2 mm، على التوالي، لزوج من مستقبلات [Ashtech Z-12 [Langley, 1996]. ومع ذلك، تهيمن الآثار البيئية المحلية دائماً على ضوضاء القياس الفعلي. والقيم المعيارية/المسبقة للمعالجة الجيوديسية هي حوالي 1 m و 1 cm للمدى الزائف وطور الموجة الحاملة وللأخطاء، على التوالي، على أساس المخلفات الملحوظة بعد التوافق [Lichten and Border, 1987]، [Zumberge et al., 1997].

والأيونوسفير تشتتي (التأخر متناسب تقريباً مع معكوس التربيع التردد) ومخالف في الإشارة للمدى الزائف وللطور. ويكون الانضمام الخطي للترددين:

$$P3 = 2.5457 * P1 - 1.5457 * P2 \quad (7-13)$$

حتى المرتبة الأولى، حالياً من الآثار الأيونوسفيرية (لدراسة تأثير المرتبة الثانية انظر [Kedar et al., 2003]). وهكذا:

$$P3 = R + c(C_r - C_s) + T + e \quad (8-13)$$

حيث:

$e$ : مجموع أخطاء  $P1$  و  $P2$ .

ومعادلة الرصد من أجل رصدات الطور هي نفسها (بوحدة المسافة) مع إضافة شرط الغموض  $(N_i \cdot \lambda_i)$  للعدد المجهول من دورات الطور في كل تردد في الموجة الحاملة. ويعطى المدى،  $R$ ، في شكل إحداثيات الساتل  $(X, Y, Z)$  التي مركزها الأرض ومراكز طور الهوائي  $(x, y, z)$ :

$$R = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad (9-13)$$

وعند استخدام إحداثيات لمركز كتلة الساتل أو الواسم الجيوديسي في المستقبل، بدلاً من مراكز الطور، يجب أن تطبق قيم الابتعاد المناسبة بناءً على قياسات خارجية. وتوفر رسالة البث GPS قيماً لموقع كل ساتل (مركز الطور) وقراءة الميقاتية كتابع للزمن، بدقة في حدود بضعة أمتار. ومن الممكن، بفضل رصدات متآونة من أربعة سواتل مختلفة على الأقل ونموذج خام للتأخر التروبوسفيري، تحديد الموقع وقراءة الميقاتية لمستقبل المستعمل حتى  $10 >$  أمتار في كل حقبة. فإذا كان موقع المستعمل معروفاً مسبقاً والميقاتية فقط مجهولة، يحتاج الأمر عندئذ إلى رصدة ساتلية واحدة فقط.

وتتم مقارنات ميقاتيات الملاحظة المشتركة بتفريق البيانات المتآونة من مستقبلين لهما إحداثيات معروفة. ثم يُزال خطأ الميقاتية الساتلية، إلى جانب الكثير من أخطاء موقع السواتل والتأخر التروبوسفيري. وبالنسبة لقياسات الملاحظة المشتركة التقليدية، باستخدام الأمداء الزائفة  $C/A$  وحيدة التردد فقط، فإن أخطاء النمذجة الأيونوسفيرية تنال عادة من دقة تحديد فوارق الميقاتيات النائية. ويمكن تحسين ذلك إلى حد كبير باستخدام توليفة خطية من رصدات  $P1$  و  $P2$ ، كما هو الحال في أسلوب  $P3$  CV [Defraigne et al., 2001]. وكقاعدة عامة، تراجع دقة مقارنات الميقاتيات بالملاحظة المشتركة بتزايد المسافة بين المستقبلات، وذلك نظراً لتراجع فعالية إلغاء الحدود المهمة في الأسلوب المشترك. ولتخفيف هذه الآثار، تم تعديل أسلوب الملاحظة المشتركة للتوقيت UTC في السنوات الأخيرة. حيث تُستخدم الآن مدارات الخدمة IGS الدقيقة للغاية وخرائط الأيونوسفير ([igsb.jpl.nasa.gov](http://igsb.jpl.nasa.gov)) لحساب التصحيحات لهذه الآثار [G. Petit، اتصالات خاصة]. ويمكن إدخال المزيد من التحسينات، من قبيل نمذجة تروبوسفيرية أفضل ومراعاة التحركات الجيوفيزيائية (الإزاحات بفعل المد والجزر مثلاً). ولكن هذه التعديلات التدريجية لا تستفيد من الدقة المتأصلة في رصدات الطور، وبالتالي فإن نتائج التوقيت بالملاحظة المشتركة لا تستطيع الوصول إلى مستوى التقنية الجيوديسية الكاملة، ولا سيما خلال فترات أقل من يوم واحد أو نحو ذلك.

ولا تستخدم معلومات البث الملاحية في التحليلات الجيوديسية، ربما باستثناء المستوى الأول من فرز البيانات وتنقيحها. ويجري تقييم النماذج المسبقة التي هي في أعلى مستوى من الجودة من حيث جميع الآثار الجيوفيزيائية المعروفة ويتم تعديل الآثار المجهولة المتبقية من البيانات باستخدام عمليات معقولة مادياً لتحديد المعلومات. ومن المفيد، في معظم الحالات، تحديد قيم الميقاتية الساتلية والمدارات إزاء تحديدات دقيقة جداً تنشر في إطار الخدمة IGS إذ من غير المرجح أن يتقن ذلك مستعمل GPS عموماً. وهذا ييسر إلى حد كبير تقدير ميقاتيات المستقبل، شريطة أن تراعى أيضاً بكل بدقة اتفاقيات ونماذج الخدمة IGS.

### 2.3.13 طرائق من أجل حلول عالمية

عندما يتعين تحديد الميقاتيات والمدارات الساتلية، بدلاً من أن تؤخذ من مصدر خارجي، يُنظر أولاً في إجراءات كمثل المستخدمة في مراكز التحليل IGS، حيث تختزل البيانات من شبكة تتبع عالمية في تعديلات متآونة كبيرة. ويتطلب الأمر شبكة عالمية من المستقبلات موزعة جيداً لتحديد المدارات والميقاتيات الساتلية. وتكون أقواس التحليل عادة مجزأة في دفعات من 24 ساعة، متوافقة

مع الملفات اليومية RINEX القياسية التي تحتوي عادة على رصدات من الساعة 00:00:00 حتى 23:59:30. (يلاحظ أن اتفاقيات الخدمة IGS تستخدم توقيت GPS لعلامات الزمن في جميع ملفات البيانات الخاصة بها). ويمكن، بالنسبة لبعض أنواع الحلول، تشكيل أقواس تحليل متعددة الأيام بتوصيل عدة أقواس متعاقبة من يوم واحد. وتنطوي خطوة المعالجة الأولية على فرز ملفات البيانات المستقاة من كل محطة. ومن الضروري فحص وتنقيح البيانات لكشف ما قد ينطوي منها على مشاكل، وإصلاح الزلات أو تعليمها في أطوار الموجة الحاملة، وتعديل الانحرافات الصغيرة في علامة الزمن في بعض أنماط المستقبلات، وتصحيح التحيزات في المدى الزائف في الحالات التي لا يتوفر فيها P1 و P2. ويعاد إنساق البيانات المفزة عموماً في ملفات نفاذ مباشر مناسبة لنظام التحليل المختار.

وتفترض جميع طرائق التسوية الجيوديسية توفر معلومات مسبقة دقيقة بما فيه الكفاية بحيث يكون تقدير المعالم خطياً وبالتالي يمكن تطبيق طرائق المربعات الدنيا المعممة. ويمكن استخدام رسالة الملاحة المرسلّة إذا لم يكن هناك من مصادر أفضل في متناول اليد. وإذا لزم الأمر، بالنسبة لمحنة جديدة مثلاً، يمكن أن يستخدم حل التكرار لتلبية شرط الخطية. ويتم تدوير مدارات السواتل من إطار ثابت إزاء قشرة الأرض (يستخدم لمدارات موزعة في الرسالة المرسلّة وكذلك من قبل الخدمة IGS) إلى إطار عطالي مركزه الأرض باستخدام مجموعة مفترضة من قيم معلمة اتجاه الأرض (EOP). وتكون قيم EOP عموماً هي تلك التي تنتجها الخدمة IGS أو الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية (IERS)، انظر موقع الخدمة ([www.iers.org](http://www.iers.org)). ويمكن، في الإطار العطالي الذي مركزه الأرض، تكييف المدارات الساتلية وإدماجها لكي توافق نماذج محددة المعالم من أجل الحركات الدينامية. وهذه الخطوة مطلوبة لتوليد مشتقات جزئية المعالم إذا أريد تعديل المدارات في عملية تكييف البيانات اللاحقة. وقد تم تطوير أشكال مختلفة لوصف التحركات الساتلية GPS، بناءً على نهج العنصر المحدود الذي وضعه [Fliegel et al. 1992] للنموذج التجريبي الذي وضعه [Beutler et al. 1994]. ومع أن من المتوقع لنموذج مادي أفضل لسلوك السواتل أن يتفوق على نهج تجريبي بحت، تفيد التجربة بأن أي كسب يكاد لا يذكر. والسبب في ذلك، بالنسبة للتطبيقات الجيوديسية عالية الدقة، هو أن عملية تحديد معالم المدارات يجب أن تكون مكثفة بما يكفي لالتقاط التحركات في مستوى السنتيمترات، وهو أمر صعب للغاية لسواتل حقيقية دون استخدام بعض المعالم التجريبية على الأقل. ومما يزيد تعقيد التحركات حدوث التغيرات في التسارع نظراً لتغيرات التعرض لضغط الإشعاع الشمسي وخاصة جراء الاندفاعات الصغيرة التي تستخدم للحفاظ على منحى بعض السواتل القديمة.

ويتم تقييم معادلة الرصد لكل نقطة بيانات باستخدام إحداثيات المحطات المسبقة التي تدور أيضاً إزاء الإطار ECI. وبالإضافة إلى الآثار الأساسية التي سبق ذكرها، يجب أيضاً أن تدرج المساهمات الناجمة عن عدد أصغر من الآثار (انظر القسم التالي). وقد تم تعديل المعالم لكي تتوافق مع الرصدات عن طريق التقليل من المخلفات باستخدام طرائق قياسية، مثل دفعات المربعات الدنيا أو تتابعات المربعات الدنيا أو مرشاح Kalman. ومرشاح Kalman وما يتصل بها مناسبة بشكل خاص للتعامل مع معالم الميقاتيات لأنها تستوعب بسهولة عمليات الضوضاء العشوائية المناسبة للتغيرات الواقعية في الميقاتيات. وبالنسبة لشبكة عالمية تتألف من بضع عشرات محطات التتبع، تشمل المجموعة الكاملة من المعالم التي تم تعديلها عادة ما يلي:

- ما يصل إلى ثلاثة إحداثيات مركزها الأرض لكل محطة (مع مراعاة بعض المواصفات لمعطيات الأرض، مثل القيود المفروضة على مواقع محطات مرجعية معينة)؛
- معالم ميقاتيات المستقبل متفاوطة الزمن (التي يجب أن تكون كافية للسماح باختلافات كبيرة تكاد تكون عشوائية من حقبة إلى أخرى)؛
- معالم مدارية لكل ساتل (على الأقل عناصر Kepler الستة، أو ما يكافؤها، بالإضافة إلى تحيز Y وشروط تجريبية أخرى)؛
- ميقاتيات ساتلية متفاوطة الزمن؛
- تأخرات تروبوسفيرية سمتية متفاوطة الزمن (وكذلك تدرجات سمتية ممكنة)؛ إزاحات معلمة اتجاه الأرض (EOP) ومعدلات للحركة القطبية وطول اليوم؛
- أحوال غموض طور الموجة الحاملة.

وفي بعض الأحيان، تدرج معلمات إضافية بسيطة بشأن آثار من قبيل اختلافات في مواقف السواتل أو صافي التخالفات في أصل شبكة التتبع من مركز كتلة الأرض. ولمجموعة معلمات الميقاتيات مرتبة قصور بقيمة واحد، إذ ليس هناك أي معلومات مطلقة عن أي حقبة ميقاتية. وتعتمد التحليلات الجيوديسية القياسية لتدارك هذا الخلل باختيار ميقاتية واحدة محددة (عادة ميقاتية أرضية مستقرة جداً) تكون غير معدلة كمرجع في عملية التقدير. وعندئذ يتم تحديد تقديرات كل الميقاتيات الأخرى نسبة إلى تلك الميقاتية الثابتة. وبدلاً من ذلك، يمكن تحديد معطيات الميقاتية بتثبيت مجموعة خطية من الميقاتيات المتاحة لتكون مساوية للصفر (أو أي قيمة محددة، مثل نظام التوقيت GPS).

وللحصول على نتائج تتسم بأعلى درجة من الجودة، من المستصوب على الأقل "تثبيت" بعض معلمات غموض الطور. ونظراً للصعوبة الكبيرة في محاولة القيام بذلك باستخدام رصدات غير مفرقة في اتجاه واحد، فإن الإجراء الطبيعي هو أن تطبق قيود مشددة على القيم العددية الصحيحة لأحوال الغموض المزدوج التفريق لأزواج مختارة من المخطات. ويحقق النجاح في القيام بذلك لجزء كبير من معلمات الغموض استقرار الحل الشامل إلى حد كبير. وفي معظم الحالات، يمكن لتكرار الحل أن يزيد من عدد معلمات الغموض التي تُحسم بنجاح وأن يحسن من تنقيح البيانات.

### 3.3.13 الأطر والنماذج المرجعية لحدود التصحيح

لدى تقييم معادلة الرصد GPS الأساسية، يجب أيضاً النظر في عدد من الآثار الطفيفة إذا كان المتوخى الحصول على نتائج في مستوى السنتيمتر. ومعظم هذه النتائج موثقة في اتفاقيات الخدمة الدولية لدوران الأرض والنظم المرجعية [McCarthy and Petit, 2003]. ونظام الإحداثيات الذي مركزه الأرض المستخدم للنقاط المرتبطة بسطح الأرض هو الإطار المرجعي الأرضي الدولي (ITRF) [Altamimi et al., 2002]. ويأخذ التحويل من الإطار ITRF إلى إطار العطالة التي مركزها الأرض بعين الاعتبار تحركات القطب في إطار الأرض والدوران حول القطب. وتهمل في بعض الأحيان حركة القطب العطالية في الفضاء (أي التآرجح [Altamimi et al., 2002]) أو لا يتعامل معها سوى تقريباً بمثابة سواتل قريبة من الأرض غير حساسة جداً لهذا الأثر. وهكذا فإن إطار العطالة ECI ليس متوائماً دائماً على وجه الدقة مع الإطار المرجعي السماوي الدولي، وهو ما يقرب من نظام العطالة الذي يتشكل من مواقع قياس التداخل الطويل القاعدة جداً للمصادر الراديوية خارج المجرة والذي أصله في مركز كتلة النظام الشمسي.

وحدود التصحيح للسواتل هي التخالفات التي سبق وصفها بين مراكز الكتل ومراكز طور الهوائي ودوران طور الاستقطاب الساتلي نتيجة للتغيرات في المنظور. وينشأ هذا التأثير الأخير، المعروف في علم الفلك باسم زاوية الخطل، لأن إشارة GPS مستقطبة دائرياً نحو اليمين. ونظراً لاختلاف هندسة المشاهدة بين المستقبل والساتل، يبدو أن طور الاستقطاب يتغير تبعاً لذلك. ولا بد من التصحيح في تقييم رصدات طور الموجة الحاملة، ولكن ليس الأمداء الزائفة، كما وصفها [Wu et al. 1993].

وتصحیحات موقع المستقبل هي أكثر تنوعاً وتعقيداً وذلك بسبب الآثار الجيوفيزيائية [McCarthy and Petit, 2003]. وللتحركات الرأسية غالباً لنقاط السطح، بسبب مد وجزر ("جسم") الأرض الصلبة، اتساعات بمقدار بضعة ديسيمترات عند خطوط العرض المتوسطة ولا بد من نمذجتها بدقة. والتحركات المقابلة للقشرة الأرضية بسبب تحميل المد والجزر في المحيطات تكاد تكون أصغر بقيمة أسية في معظم الأماكن ولكنها قد تتسع في بعض المناطق الساحلية. وإذا كان الأمر يتناول تقدير مدارات GPS، عندئذ ينبغي أيضاً إدراج التغيرات في كمنون الأرض بسبب المد والجزر في الأرض الصلبة والمحيطات في عمليات التكامل المدارية/المسبقة. ويراعي تصحيح المد والجزر القطبي تشوه الدوران الواسع بسبب الاختلافات في موقع القطب نسبة إلى القشرة الأرضية. وتخضع الحركة القطبية نفسها، ومعدل الدوران، لتحولات نهائية وشبه نهائية كبيرة نوعاً ما بسبب حركات المد والجزر في المحيطات. وعندما يتم التعبير عن السواتل GPS في إطار العطالة، ينبغي إجراء التصحيحات لهذه التحركات الواسعة النطاق في إطار الأرض. وتشمل مدارات الخدمة IGS، في إطار ثابت نسبة إلى الأرض، بالفعل اختلافات EOP دون اليومية، ولذا ليس هناك أي تأثير صاف لراصد من الأرض. وقد وفر [McCarthy and Petit, 2003] نماذج دقيقة لجميع هذه الآثار. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي للمستعملين إجراء تصويبات مركز الطور المحددة للهوائي التي أوصت بها الخدمة IGS والتي سبق وصفها.

ومع أن الاتحادات العلمية الدولية تدعو إلى استخدام التوقيت المنسق الذي مركزه الأرض (TCG) لتحليل بيانات السواتل القريبة من الأرض، لا تزال معظم أفرقة التحليل (إن لم يكن كلها) تستخدم التوقيت الأرضي (TT) الذي يختلف عن التوقيت UTC وعن

التوقيت الذري الدولي (TAI) بمقدار تخالف فقط. ومن ناحية أخرى، يختلف التوقيت TCG من حيث المعدل (التردد) عن التوقيت TT نظراً للتأثيرات النسبية العامة. وبالتالي ينبغي أن تكون ترددات الميقاتية من الخدمة IGS وأفرقة تحليل GPS أخرى قابلة للمقارنة مباشرة مع تلك المقاسة في مختبرات التوقيت. وتتوقف بعض الثوابت الفيزيائية، مثل ناتج كتلة الأرض وثابت الجاذبية، GM، على اختيار إطار مرجعي نسبي، ومن ثم يجب توخي الحذر في استخدام القيم المناسبة.

ويتم عادة تطبيق ثلاثة أنواع من التصحيحات النسبية في معالجة نظام GPS:

- 1 تم بالفعل تطبيق زحزحة التردد من المرتبة الأولى، نسبة إلى TT، بسبب اتساع الوقت وفرق كمون الجاذبية في نظام GPS بتحديد تحالفات المذبذب في المركبة الفضائية، بافتراض عناصر مدارية اسمية. ويجب تطبيق التصحيح من المرتبة الثانية لمدارات نظام GPS غير الدائرية من جانب المستعمل (انظر ICD-GPS-200).
  - 2 يعطى تصحيح "دينامي" لتسارع السواتل القريبة من الأرض في اتفاقيات الخدمة IERS [McCarthy and Petit, 2003].
  - 3 يعطى توقيت الانتشار المنسق، بما في ذلك تأخر الجاذبية، بشكل منفصل في اتفاقيات الخدمة IERS (ولكن غالباً ما يهمل).
- (لمزيد من التفاصيل، انظر Kouba [2004]).

### 4.3.13 الدقة في تحديد مواقع النقاط

بدلاً من حلول إنشاء شبكة عالمية كبيرة من محطات GPS، من الأوفر جداً والأكثر كفاءة بالنسبة لمعظم التطبيقات العمل على تحليل البيانات من فرادى المحطات في أسلوب تحديد مواقع النقاط بدقة (PPP) [Zumberge et al., 1997]. وفي هذا النهج، تؤخذ القيم الدقيقة لمدارات السواتل والميقاتيات من مصدر سابق ما وتطبق دون تعديل. (وفي بعض الأنماط المختلفة في أسلوب PPP، يُسمح بتساهل جزئي للمدارات والميقاتيات.) وبتطبيق كل النماذج كما ورد أعلاه، يمكن للمستعمل أن يحدد الإحداثيات واختلافات الميقاتيات والتأخرات التروبوسفيرية من أجل مستقبل واحد منعزل [Kouba and Heroux, 2000]. وتعتمد جودة النتائج بشكل مباشر على دقة واتساق المعلومات الساتلية/المسبقة. وسوف يورث الإطار المرجعي ومعطيات المدارات والميقاتيات المفترضة من نتائج تحديد مواقع النقاط بدقة ولذلك من المهم أن تكون محددة بوضوح ومستقرة. ويقصد من منتجات الخدمة IGS (انظر أدناه) صراحة تحقيق هذا الغرض. ويقدم Kouba [2004] دليلاً على الاستخدام السليم لمنتجات IGS من أجل تحليلات PPP. وبالنسبة لأقواس حلول ليوم واحد، ينبغي أن تكون عمليات تكرار تحديد الموقع عموماً في مستوى حوالي 10 ملليمترات رأسياً و3 إلى 5 ملليمترات أفقياً. وينبغي أن تكون نتائج ميقاتيات المستقبل PPP دقيقة في مستوى مماثل، > 100 بيكو ثانية، ولكن الدقة (باستثناء عدم اليقين في المعايرة) ستكون عادة أكبر (انظر أدناه)؛ وسيكون المقياس الزمني لتحديد مواقع النقاط بدقة هو المقياس الزمني للميقاتيات الساتلية/المسبقة.

### 5.3.13 آثار الأخطاء على حلول الميقاتيات

من شأن الأخطاء في نماذج التحليل أو المعلومات المسبقة أو بيانات الرصد أن تؤثر على تقديرات ميقاتيات النظام GPS. وقد استخدم [Dach et al. 2003] عمليات محاكاة لتفحص توقعات مختلف أنواع أخطاء الدخل. مثال ذلك، من شأن خطأ في ارتفاع المحطة أن يتسبب في تخالف تردد بالنسبة لخطوط أساس طويلة شرقاً وغرباً. وفي مجال الزمن، يندرج انقطاع على الحدود بين أقواس المعالجة بسبب هذا الخطأ. وتنطوي أخطاء المدار الساتلي على آثار مماثلة. وفي الممارسة الفعلية، من غير المرجح أن تكون آثار هذه الأخطاء كبيرة جداً في منتجات الخدمة IGS نظراً لمواءمة مواقع المحطات والسواتل مع الميقاتيات. ولعل الأهم من ذلك هو تأكيد Dach وآخرون بأن ضوضاء المدى الزائف هي في مستوى 0,5 من المتر، حتى لو افترض أن يكون له توزيع ضوضاء بيضاء، وسوف تتسبب في تحالفات بين أقواس التجهيز ليوم واحد عند مستويات تشاهد في نتائج الميقاتيات الفعلية (انظر أدناه). ويفترض أن يكون لضوضاء المدى الزائف الملونة تأثير أكبر على قفزات الميقاتيات بين الأقواس.

ومن المتوقع أن يفضي استخدام المزيد من بيانات المدى الزائف (معدل اعتيان أعلى و/أو أقواس أطول) إلى تحسين دقة الميقاتية. ولن يكون رفع معدلات الاعتيان فعالاً إلا إذا كان طول موجة تعدد المسيرات المهيمنة أقصر من فترة الاعتيان؛ وإلا فإن أخطاء الميقاتيات لن تتدنى في المتوسط بإضافة المزيد من البيانات. وكما بين [Senior et al. 1999] بالنسبة لأحوال عدم اليقين الرسمية في الميقاتيات،

ينبغي لأقواس التحليل الأطول أن تنحدر بمتوسط آثار ضوضاء الشفرة، وإن كان بفعالية أقل من  $\sqrt{N}$ . ومع ذلك، لم يتم البرهان على ذلك بالنسبة للنتائج الفعلية للميقاتية وإنما فقط بالنسبة لأخطائها الرسمية. كما لم يتحدد ما إذا كانت الأقواس الأطول تختلف فقط بمقدار تحيز ميقاتية شبكة أم كان محتوى التردد يتغير (يتحسن) أيضاً. فإذا كانت الأقواس الأطول توفر دقة ميقاتية أفضل من حيث التحيز فقط، عندئذ ينبغي أن تعطي نُهج التحليل الأخرى نتائج مكافئة تقريباً، من قبيل ترشيح ملائم بعد التحليل لنتائج الأقواس الأقصر. وقد يبرهن النهج الأخير على أنه أكثر اقتصاداً أو أكثر ملاءمة لبعض التطبيقات.

والانقطاعات بين أقواس التحليل المستقل أمر طبيعي ومتوقع بالنسبة لجميع المعلومات الجيوديسية، بما في ذلك المدارات والتأخرات التروبوسفيرية وكذلك الميقاتيات. وينبغي أن تعكس التخالفات الجودة المتأصلة في بيانات النظم GPS وطرائق التحليل. وبميل مقدار قفزات الميقاتيات إلى أن يكون أكبر من معظم المعلومات الأخرى لأن بيانات الشفرة فقط تسهم في ذلك، مع أن متوسطها يُحتسب بفعالية على مدى قوس التحليل. وقد نُظر في نُهج مختلفة لتقليل انقطاعات ميقاتية حدود اليوم. والطريقة الأفضل هي تجنب دفعات التحليل المنفصلة تماماً واستخدام نوع ما من نظم المعالجة المستمرة [Petit et al., 1999; Senior et al., 1999].

غير أن من الصعب تحقيق هذا الأمر عملياً وقد يتسبب في تراكم بعض آثار الخطأ [Senior et al., 1999]. كما أن أقواس التحليل الطويلة تتسبب أيضاً في ترابط تقديرات الميقاتيات على امتداد نفس الفترات (الإحصاءات من نوع السير العشوائي)، والذي يمكن أن يجد من الاستقرار الذي يمكن خلاف ذلك تحقيقه باستخدام أقواس التحليل المستقلة (سلوك الضوضاء البيضاء). وثمة طريقة بديلة لإزالة انقطاعات التحليل وهي تعاقب السلاسل الزمنية باستخدام الأقواس المتراكبة لتحديد التخالفات [Bruyninx and Defraigne, 1999]، [Larson et al., 2000]. وحتى لو امتثلت قفزات الميقاتيات عند حدود القوس لتوزيع الضوضاء البيضاء [Ray and Senior, 2003]، فإن الأثر على السلاسل المتعاقبة سيكون إضافة عنصر ضوضاء السير العشوائي. وبعبارة أخرى، فإن عملية التعاقب تؤدي أيضاً إلى علاقات ترابط ميقاتيات على المدى الطويل ويمكن أن تحد من الاستقرار على المدى الطويل الذي يمكن تحقيقه خلاف ذلك. وينظر Dach وآخرون [Dach et al., 2006] في طرائق أخرى أكثر تعقيداً لتوليد نتائج ميقاتية شبه مستمرة في إطار عملية التقدير بالذات بتمرير المعلومات من قوس إلى أخرى. وتعمل هذه الطرائق إلى حد كبير بمثابة مرشح/ممهّد لتحسين استقرار نقل الوقت على المدى القصير دون تأثير يذكر في الفترات الأطول.

ومن الصعب أن نفهم الهاجس الشائع القاضي بقمع قفزات الميقاتيات عند حدود الأقواس، وخصوصاً عندما تكون صغيرة (في مستوى 100 إلى 200 بيكو ثانية). ويبدو أن استخدام الطرائق التي تدخل ترابطات طويلة الأجل في سلسلة زمن الميقاتيات (بالتعاقب السلسالي مثلاً) يعود بنتائج عكسية بشكل خاص. فإذا كان من الضروري حقاً القضاء على الانقطاعات، عندئذ ربما تكون طريقة الترشيح/التمهيد أفضل لتجنب مشكلة السلاسل الزمنية المترابطة، مع أن هذا يمكن أن يشوه سلوك الميقاتية على المدى القصير. ومن ناحية أخرى، توفر الانقطاعات في حد ذاتها معلومات تشخيصية قيمة عن جودة تجهيزات المحطة (انظر أدناه). فإذا كانت القفزات أكبر من مستوى الضوضاء المعهود، وهو حوالي 120 بيكو ثانية [Ray and Senior, 2003]، عندئذ ينبغي استبانة الأسباب الكامنة ومعالجتها، وليس إخفاءها من خلال المعاملات بعد التحليل.

#### 4.13 منتجات ميقاتيات الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية والمقاييس الزمنية

تقدم الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية، منذ إنشائها في عام 1994، ملفات يومية لمواقع ساتلية وقراءات ميقاتيات دقيقة، مدرجة في جداول على فترات 15 دقيقة. ومنذ ذلك الحين، أضيفت منتجات جديدة أو معدلة من وقت لآخر. وتشكل جميع منتجات الخدمة الدولية (<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>) من المتوسط المرجح لحلول مقدمة من مراكز تحليل مساهمة يصل عددها إلى ثمانية. وبينما تتراكم عادة مجموعات البيانات المستخدمة من قبل أفرقة إفرادية، فإن آثار استراتيجيات التحليل والنمذجة والبرمجيات المختلفة مستقلة بعضها عن بعض إلى حد كبير. ولذلك فإن التوليفات المرجحة بشكل صحيح من النتائج الإفرادية متفوقة عموماً على أي حل بمفرده. وهكذا، ربما تستفيد منتجات IGS من حيث الدقة والضبط، ولكنها تستفيد بالتأكيد من حيث الاستقرار والموثوقية والمتانة، مقارنة بنتائج أي فريق تحليل إفرادي.

## 1.4.13 مجموعات المنتجات المتاحة

تم تغيير منتجات الميقاتيات "الكلاسيكية" IGS في 5 نوفمبر 2000 (GPS Week 1087) عندما تم تنفيذ خوارزمية توليف جديدة وتم توسيع نطاق منتجات الميقاتيات لتشمل العديد من المستقبلات في شبكة التتبع، فضلاً عن السواتل [Kouba and Springer, 2001]. وتم تخفيض فترة جدولة الميقاتيات الجديدة (السواتل ومحطات التتبع) إلى 5 دقائق، مقارنة باعتياني الميقاتيات الساتلية كل 15 دقيقة سابقاً.

وتم توليد ثلاث سلاسل من خطوط الإنتاج على أساس كمون البيانات:

- 1 المنتجات فائقة السرعة (تحتوي على ميقاتيات ساتلية دون مستقبلات)، التي تستهدف المستخدمين في الوقت الفعلي؛
- 2 المنتجات السريعة، التي تصدر بعد حوالي 17 ساعة من نهاية كل يوم؛
- 3 المنتجات النهائية تماماً، التي تصدر بعد حوالي 13 يوماً من نهاية كل أسبوع.

ويلخص الجدول 1-13 منتجات مدارات وميقاتيات الخدمة IGS وقيم الكمون والدقة المقدرة. (بالإضافة إلى ما يرد في الجدول، توفر الخدمة IGS الخرائط الأيونوسفيرية وتأخرات مسير السمات التروبوسفيرية ومعلومات توجه الأرض، وما إلى ذلك). وجميع المنتجات متاحة من مراكز بيانات الخدمة IGS أو من المكتب المركزي ([igsb.jpl.nasa.gov](http://igsb.jpl.nasa.gov)). ومن شأن استخدام منتجات IGS السريعة أو النهائية بدلاً من المعلومات المذاعة أن يسمح بتحديد مواقع النقاط بدقة في مستوى 1 cm لأقواس من 24 ساعة.

وتتكون شبكة التتبع IGS من أكثر من 350 مرفق استقبال موزعاً عالمياً. وجميع المحطات تعمل بشكل مستمر وتقدم ملفات رصد RINEX تحتوي عينات 30 ثانية يومياً (على الأقل). وتستخدم معظم المحطات مذبذبات كوارتز داخلية، توجهها الرصدات الخاصة بها لتتبع التوقيت GPS، ولكن هنالك أكثر من 100 محطة IGS مجهزة بمعايير تردد خارجية. ويبين الشكل 1-13 توزيع ونمط المعايير الخارجية ضمن شبكة IGS (حتى نوفمبر 2004). وتستخدم حوالي 51 محطة معايير ميزر الهيدروجين (H-maser) و28 منها ميقاتيات السيزيوم (Cs) و27 منها ميقاتيات الروبيديوم (Rb). وثمة مجموعة فرعية، حوالي 20 محطة، في مختبرات التوقيت.

## الجدول 1-13

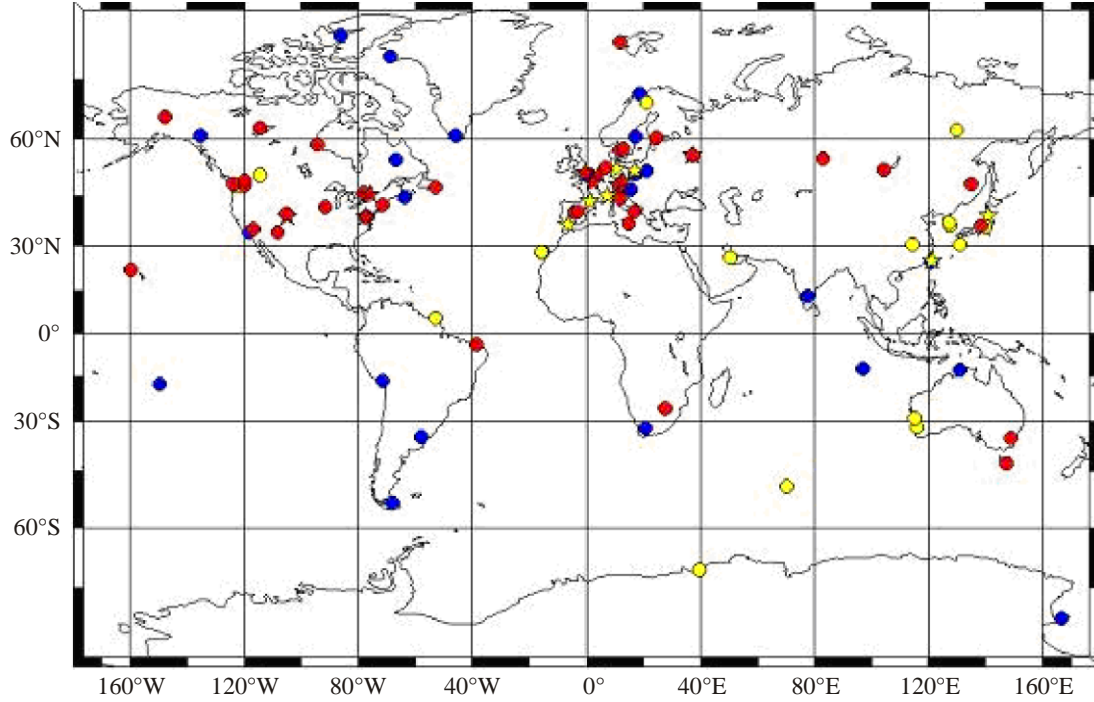
## منتجات IGS التي تجمع المدارات والميقاتيات وخصائصها مقارنة بالقيم المذاعة

تقويمات سواتل GPS وميقاتيات السواتل/المحطات	تقديرات الدقة	الكمون	فترات التحديث	فترة العينة
المذاعة	مدارات	cm 200~	وقت فعلي	يوميًا
	ميقاتيات سواتل	ns 7~		
سريع للغاية (النصف المتنبأ به)	مدارات	cm 10~	وقت فعلي	15 دقيقة
	ميقاتيات سواتل	ns 5~		
سريع للغاية (النصف المرصود)	مدارات	cm 5 >	3 ساعات	15 دقيقة
	ميقاتيات سواتل	ns 0,2~		
سريع	مدارات	cm 5 >	17 ساعة	15 دقيقة
	ميقاتيات سواتل ومحطات	ns 0,1~		5 دقائق
نهائي	مدارات	cm 5 >	13 يوماً	15 دقيقة
	ميقاتيات سواتل ومحطات	ns 0,1~		5 دقائق

تستند تقديرات دقة المدارات، باستثناء المدارات المتنبأ بها، إلى مقارنات مع نتائج أمداء ليزر مستقلة. وأحوال الضبط أفضل من أحوال الدقة المعلنة. وتتناول ملفات المنتجات فترات 24 ساعة ولكن المنتجات فائقة السرعة تشمل 48 ساعة. وبيانات الميقاتية من 5 دقائق متاحة في ملفات من نسق "RINEX"، في حين تتوفر عينات ميقاتيات من 15 دقيقة في ملفات نسق SP3 إلى جانب التقويمات الساتلية.

الشكل 1-13

خارطة تبين توزيع محطات الخدمة IGS التي تستخدم معايير التردد الخارجي (حتى نوفمبر 2004). تشير الألوان إلى نمط المعيار: أحمر يعني ميزر هيدروجين، وأصفر سيزيوم، وأزرق روبيدوم. يشار بنجمة إلى محطات IGS الموجودة في مختبرات التوقيت



Sat\_time\_freq-13-01

#### 2.4.13 المقاييس الزمنية في الخدمة الدولية للنظام العالمي لتحديد المواقع

ليس هناك من متطلبات معينة لجدول زمني كامن وراء منتجات الميقاتيات عند استخدامها لتطبيقات تحديد المواقع الجيوديسية، سوى أنها ينبغي أن تكون قريبة بشكل معقول من توقيت النظام GPS. ومن مواطن القوة في جيوديسية نظام GPS هو أنه لا يتوقف، في المرتبة الأولى، على استقرار أو دقة مقياس الوقت إذ من الممكن إزالة آثار الميقاتيات عن طريق التفريق المزدوج. ومع ذلك، من المستحسن أن يكون لمقياس الوقت المرجعي خصائص أخرى، كأن يكون مستقراً للغاية ويمكن تعقبه بدقة إزاء التوقيت UTC. ومن شأن هذه الصفات أن تعزز قيمة منتجات ميقاتيات الخدمة IGS من أجل تطبيقات أخرى غير الجيوديسيا الصرفة، وخاصة بالنسبة لعمليات التوقيت.

وكانت الخدمة IGS في الأصل تُستخدم، كمرجع لمنتجات الميقاتيات، مواءمة خطية يومية بسيطة من الميقاتيات الساتلية المرصودة بغية إذاعة التوقيت GPS. ومع ذلك، فإن عدم استقرار التوقيت GPS كبير نسبياً، حوالي  $2 \times 10^{-14}$  في يوم واحد، وهو على الأقل أسوأ بمقدار قيمة أسية من عدم الاستقرار في أفضل معايير التردد في شبكة الخدمة IGS. بل هنالك في بعض سواتل المجموعة IIR الأحداث ميقاتيات أكثر استقراراً من توقيت GPS ومرد ذلك، جزئياً، استعمال خوارزمية التوجيه السريع للحفاظ على مقياس الوقت المرسل متسقاً مع التوقيت UTC (بفضل مساعي مرصد البحرية الأمريكية). وقد أفضى الإجراء القديم لدى الخدمة IGS، في مواءمة الميقاتيات كل يوم مع توقيت النظام GPS، إلى انقطاعات كبيرة يوماً بعد يوم في كل من الوقت والتردد (الشكل 13-2). وليس لهذا الإجراء من تأثير على فائدة المنتجات لتحديد المواقع بدقة، ولكن الفائدة من حيث نشر الوقت والتردد محدودة بالتأكيد.

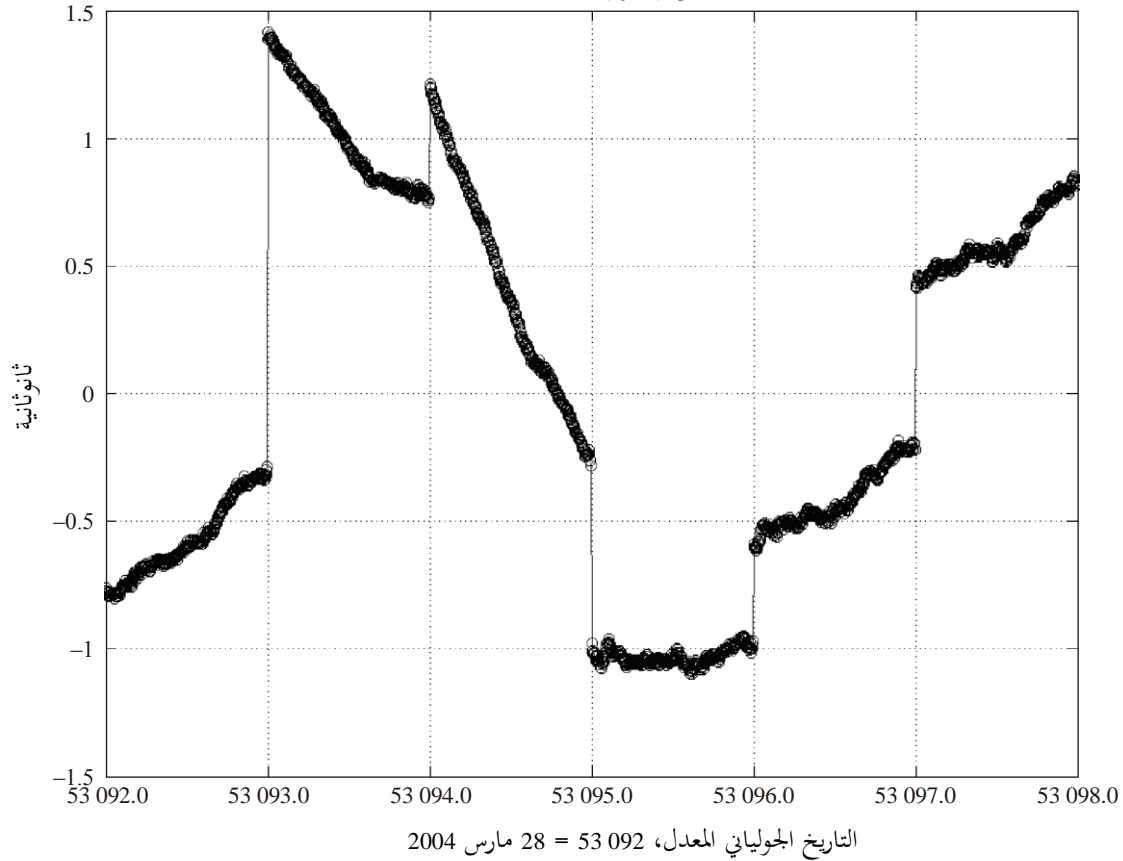


## الشكل 2-13

تقديرات تحويل التوقيت الجيوديسي GPS من أجل محطة BRUS في بروكسل

أثناء الفترة من 28 مارس إلى 2 أبريل 2004

فرق الزمن (الطور) BRUS-GPST



Sat\_time\_freq-13-02

وتنسب تقديرات نقل الوقت في الشكل 2-13 مرجعياً إلى مواءمة خطية يومية لتوقيت النظام GPS. ويهيمن على عدم الاستقرار في المحطة BRUS مواءمة مقياس الزمن الخطي اليومية لإذاعة توقيت النظام GPS، وهي مسؤولة عن الانقطاعات الكبيرة في الوقت والتردد. وقد أزيل الاتجاه الخطي من أجل الرسم البياني.

وسعياً لتحسين استقرار منتجات الميقاتية 'السريعة' و'النهائية'، وضعت في إطار الخدمة IGS مقاييس زمن داخلية جديدة. وتتكون مقاييس الزمن الجديدة هذه بمثابة مجموعات مرجحة من الميقاتيات المشمولة، للمحطات والسواتل على حد سواء. ويرد وصف تفصيلي للخوارزمية لدى [Senior et al., 2003].

وكل مقياس زمني ("IGRT" للسرعة و"IGST" للنهاية) مدفوع إلى حد كبير بأجهزة ميزر الهيدروجين (H-maser) المتاحة، مع أن الميقاتيات الأقل شأنًا يمكن أن تسهم قليلاً، بما في ذلك ميقاتيات الروبيديوم على متن سواتل المجموعة IIR.

والخوارزمية هي تطبيق لمرشح Kalman يستخدم نموذجاً بسيطاً متعدد الحدود لكل ميقاتية تليها خوارزمية خطية غوسية تربيعية (LQG) لتوجيه المقاييس الزمنية بشكل فضفاض نحو توقيت النظام GPS.

ويتم تحديد الأوزان لكل ميقاتية تكرارياً ودينامياً على أساس عدم الاستقرار المرصود في عدة فترات توسط لأقل من يوم واحد. ويُفرض حد أعلى على الأوزان لكل ميقاتية لتجنب الحالة التي تتجاوز فيها ميقاتية واحدة المقاييس الزمنية [Thomas and Azoubib, 1996].

ويتم إخماد خوارزمية التوجيه LQG على نحو حاسم بثابت زمن بحوالي 30 - 40 يوماً. والنتائج هي مقاييس زمنية لها عموماً سوية عدم استقرار بأفضل من حوالي  $1 \times 10^{-15}$  في يوم واحد، ولكنها لا تزال محدودة في الأجلين المتوسط والطويل بحكم التوجيه نحو

توقيت النظام GPS. ومع ذلك هناك فترات يمكن فيها الخط نوعاً ما من سوية عدم استقرار المقاييس الزمنية، كما هو الحال عندما يكون عدد محطات ميزر الهيدروجين في منتجات الميقاتيات صغيراً للغاية.

ويبين الشكل 3-13 أداء الميقاتية BRUS بعد تغيير الإحالة المرجعية إلى المقياس الزمني للميقاتيات 'النهائية' IGST. ومعلومات الميقاتيات بين المحطات هي نفسها كما في الشكل 2، ولا تختلف سوى المقاييس الزمنية الكامنة. والتحسين الكبير في الاستقرار باستخدام مقياس الزمن في الخدمة IGS واضح. وما تبقى من انقطاعات صغيرة في بعض الحدود اليومية تعكس في معظمها جودة بيانات BRUS المحلية.

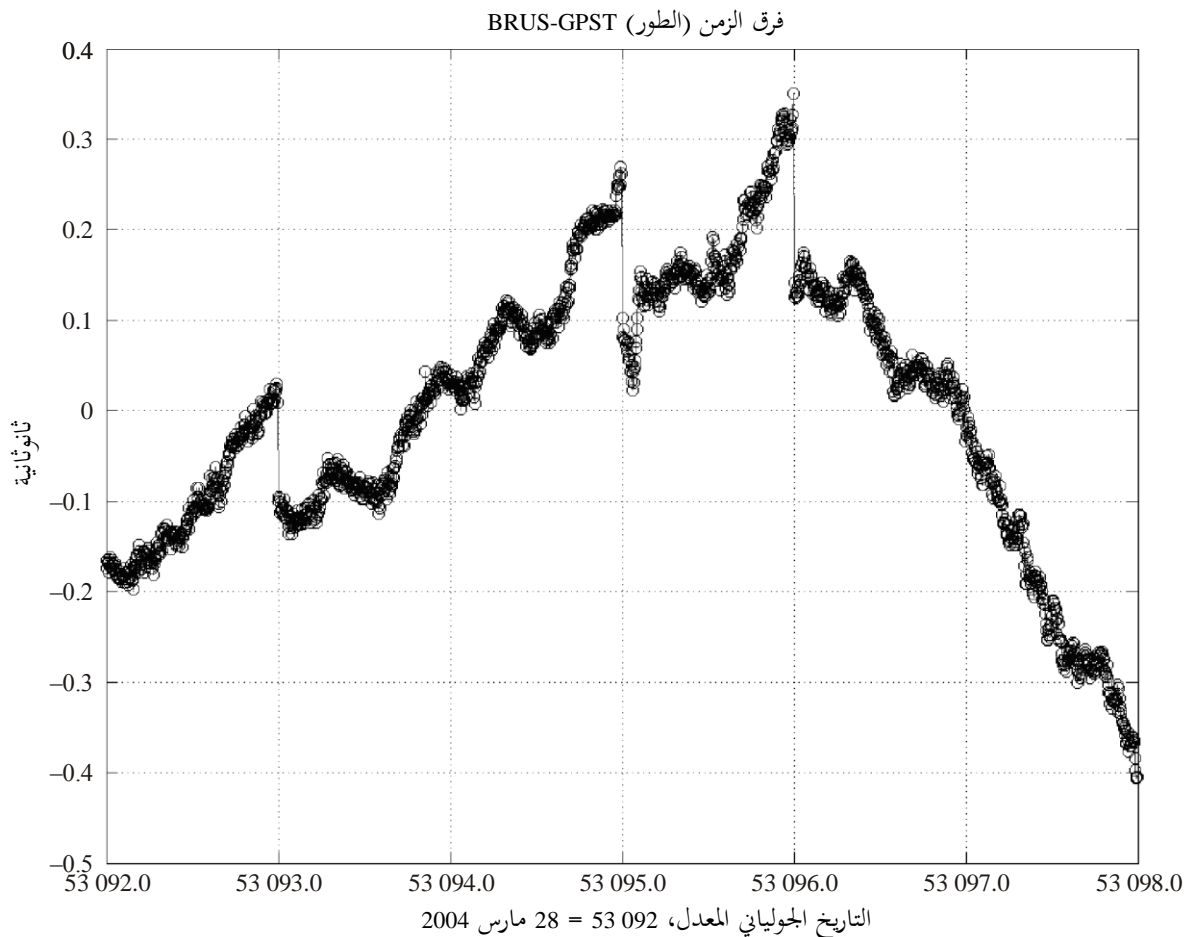
ومن الممكن أن تؤثر بعض آثار فرادى الميقاتيات، بما في ذلك قفزات حدود اليوم، سلباً على طاقم المقاييس الزمنية، وذلك مثلاً بسبب مشكلات في تنقيح البيانات لم يتم كشفها. ومع ذلك، تشير الأدلة إلى أن أي قيود من هذا القبيل طفيفة وأن مجموعة المقاييس الزمنية متفوقة كثيراً عن أي ميقاتية مساهمة بمفردها.

وقد تم تنفيذ المقاييس الزمنية الجديدة لخدمة IGS في إطار المنتجات الرسمية في أوائل مارس 2004 (انظر البريد IGS رقم 4875 في الموقع: [igsb.jpl.nasa.gov](http://igsb.jpl.nasa.gov)).

ومنتجات الميقاتيات المتوائمة مع نفس المقاييس الزمنية الداخلية متاحة اعتباراً من نوفمبر 2000 في الموقع: <https://goby.nrl.navy.mil/IGStime>.

### الشكل 3-13

نفس بيانات ميقاتيات BRUS كما هي مبينة في الشكل 2-13 سوى أنها محالة مرجعياً إلى مقياس زمن ميقاتية IGS النهائي، IGST. أزيل اتجاه خطي لأغراض الرسم البياني

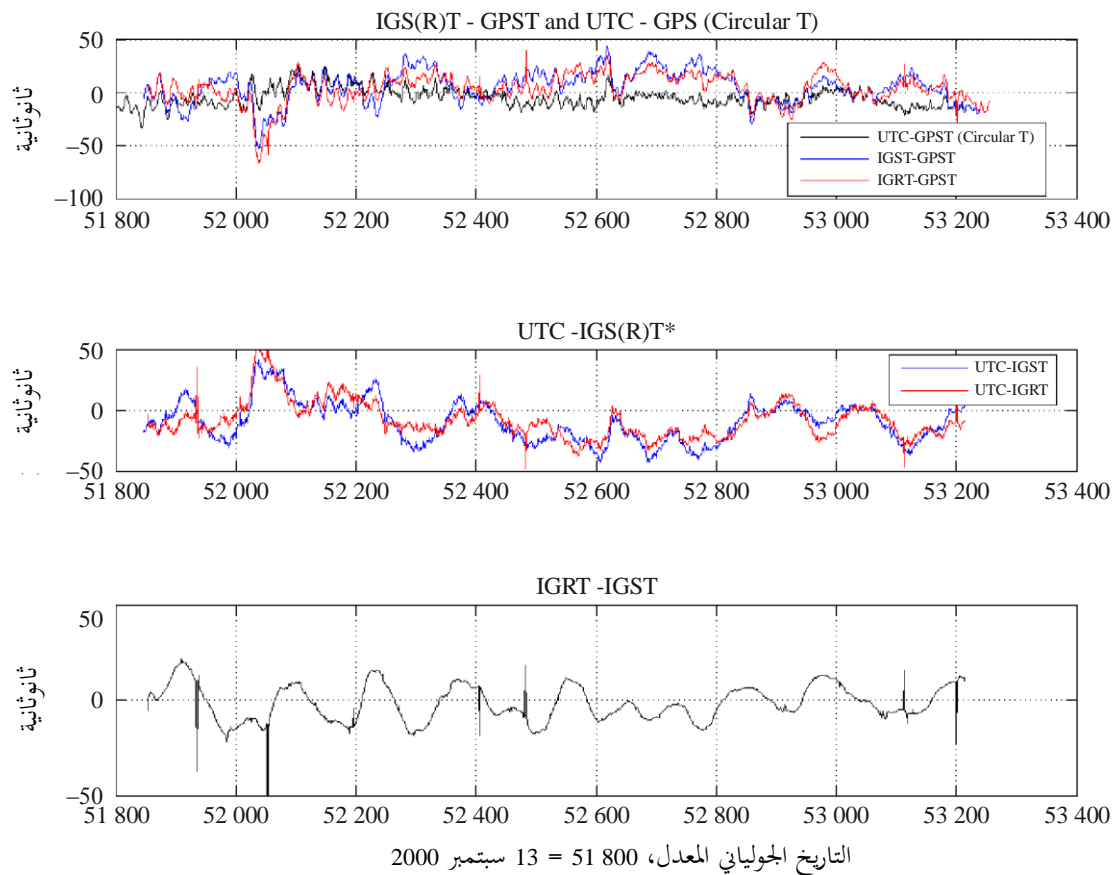


ويتضح الاختلاف الطويل الأجل لكل مقياس زمني للخدمة IGS في الشكل 4-13 بالنسبة لتوقيت النظام GPS والتوقيت UTC (تقريباً). ومع أن سوية استقرار المقاييس الزمنية اليومية وشبه اليومية للخدمة IGS تتفوق كثيراً على توقيت النظام GPS، فإن عدم الاستقرار على المدى الطويل مشابه بسبب استمرار الاعتماد على التوقيت GPS. وتبذل الجهود لربط المقاييس الزمنية IGS بتوقيت UTC على نحو أكثر دقة باستخدام البيانات المستقاة من المكتب الدولي للأوزان والمقاييس والاستفادة من محطات IGS القائمة في مختبرات التوقيت [Senior et al., 2004].

ويبين الرسم الأعلى في الشكل 4-13 التوقيت UTC ناقص GPST من سلسلة التعميمات T التي يصدرها المكتب BIPM فضلاً عن المقاييس الزمنية IGST وIGRT ناقص GPST. وقد تختلف عمليات تنفيذ الخدمة IGS والمكتب BIPM للمقاييس GPST بمقدار بضع نانوثوان بسبب استراتيجيات الرصد والتحليل المتميزة [Senior et al., 2004]. ويبين الرسم الأوسط كلاً من UTC-IGST وUTC-IGRT المحسوبتين بتفريق السلسلة الزمنية في الرسم الأعلى، والذي يفترض أن GPST مكافئة من التعميم T والخدمة IGS. والانحرافات عن هذا الافتراض هي المسؤولة عن جزء صغير من الاختلافات المرسومة، وخصوصاً في الترددات العالية. وأخيراً، يبين الرسم السفلي IGRT ناقص IGST، على افتراض أن كلاً منهما يرصد GPST على نحو مكافئ. وتعزى الذرى العرضية إلى أخطاء عدم المواءمة المتفرقة في مقياسات IGS السريعة مع المقاييس GPST وهي غير موجودة فعلاً في أي من مقياسي الزمن.

الشكل 4-13

**مقارنة مقياسي الزمن IGRT وIGST في خدمة IGS إزاء توقيت GPS (GPST)**  
**وإزاء UTC (ثواني قفز بتطبيق مودولو) من 5 نوفمبر 2000 حتى 28 يونيو 2004**



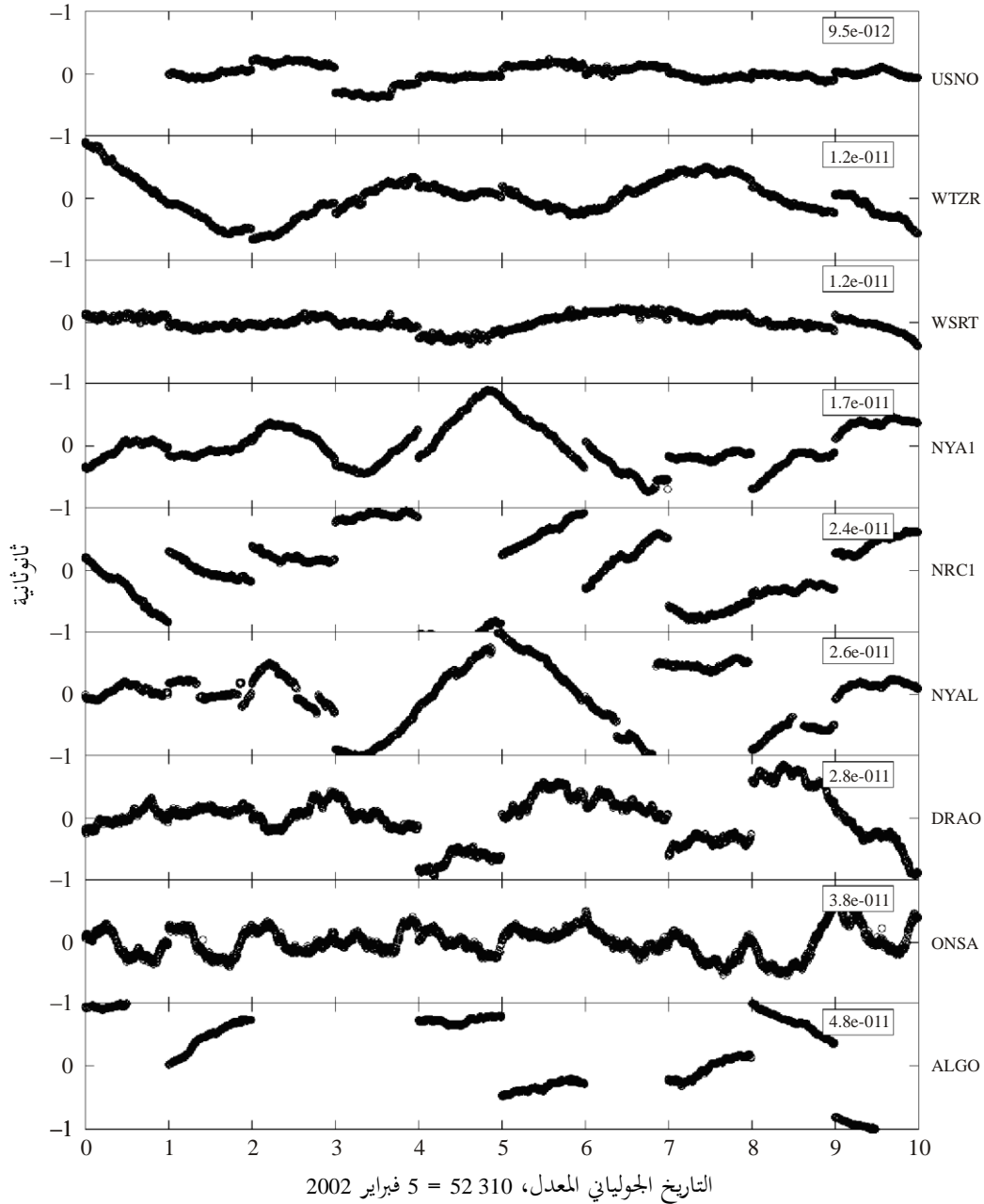
### 5.13 تقييم الأداء بتحليل الانقطاع في الحدود اليومية

يتم تحديد الدقة "المطلقة" لتقديرات الميقاتيات التي تستند إلى نظام GPS (بتطبيق مودولو على تحيز المعايرة) بالكامل باستخدام بيانات المدى الزائف، التي يحتسب متوسطها على امتداد فترة التحليل، 24 ساعة عادة. وعند تحليل أقواس اليوم الواحد لبيانات العينات الإجمالية على فترات 5 دقائق، تكون تقديرات الخطأ الرسمية للميقاتيات عموماً حوالي 120 بيكو ثانية، على افتراض أن هامش عدم اليقين لكل رصد مدى زائف هو متر واحد. ويمكن إجراء اختبار أكثر واقعية لدقة القياس الفعلي بمقارنة تقديرات الميقاتية عند الحدود بين أقواس التحليل المستقلة للمستقبلات المجهزة بمذبذبات مستقرة جداً. (ويمكن أيضاً اختبار الميقاتيات الأقل استقراراً إذا استخدمت أقواس التحليل المتراكبة لإزالة أخطاء الاستيفاء الداخلي، ولكن تقديرات الميقاتية المجاورة لن تكون بعدئذ مستقلة.) وهذا يشابه الاختبار التقليدي لقابلية التكرار الجيوديسي لسلسلة زمنية في تحديدات الموقع.

ويمكن تحليل قفزات الميقاتيات في الحدود اليومية بالنسبة لحلول أساسية أو لشبكات حيث يجري تثبيت ميقاتية محطة واحدة بوصفها الميقاتية المرجعية. ومع ذلك، قد يكون من الصعب تفسير النتائج، ذلك لأن الآثار في محطتين سوف تتوالف في السلسلة الزمنية لكل ميقاتية. وثمة نهج أفضل هو استخدام منتجات ميقاتيات الخدمة IGS، مع طاقم المقياس الزمني الجديد المستقر للغاية، لمثل هذا التحليل [Senior et al., 2003]. ولدى فصل أزواج الميقاتيات، يمكن عزل السلوك المرصود لفرادى المحطات. والشكل 5-13 هو مثال على سلسلة زمنية متآونة لتقديرات ميقاتيات الخدمة IGS لثمانى محطات ميزر هيدروجيني (H-maser). ويلاحظ أن التباين في الانقطاعات بين المحطات مستقل عن الاستقرار في فرادى الميقاتيات حيث تظهر بعض المواقع قفزات كبيرة ولكن مع استقرار شبه يومي جيد جداً والعكس بالعكس. وقد تبين أن التوزيعات لتخالفات الحدود اليومية التي درسها Ray و Senior صفرية الوسط وغوسية، ولكن اختلافات جذر متوسط التوزيع مقترنة بالموقع إلى حد كبير.

## الشكل 5-13

تقديرات الميقاتيات في تسعة مواقع IGS فيها محطات H-maser في الفترة 5 - 15 فبراير 2002  
أمثلة لميقاتيات IGS مرصودة (محالة إلى IGST)



Sat\_time\_freq-13-05

وقد أزيل اتجاه تربيعي منفصل عن كل ميقاتية لأغراض الرسم في الشكل 5-13. والقيمة داخل مستطيل في كل لوحة تعطي انحراف Allan عند 300 ثانية، وتحمّل قفزات الميقاتيات في الحدود اليومية. ويختلف حجم قفزات الحدود اليومية اختلافاً كبيراً بين المحطات وهو مستقل عن استقرار الميقاتيات شبه اليومي.

وتم تحديث التحليل السابق لقفزات ميقاتيات الخدمة IGS وتمديده في الجدول 2-13. كما تم تفحص ما مجموعه 1 310 أيام بين أكتوبر 2000 ويونيو 2004 من ميقاتيات IGS السريعة والنهائية.

وكانت معايير التنقيح والتجهيز نفسها كما في Ray و Senior [Senior et al., 2003] والحد الأقصى لفجوة البيانات عند حدود اليوم هو 30 دقيقة (عادة 5 دقائق)، وبالتالي فإن ضوضاء الاستيفاء الداخلي بسبب أحوال عدم الاستقرار في معايير H-maser مهمة. وبما أن إحصاءات جذر متوسط التوزيع هي للفروق بين أزواج من أيام مستقلة، ينبغي أن يكون كل تقدير دقة يومية أصغر من  $\sqrt{2}$ . وما يلاحظ بصفة خاصة هو التشتت الكبير جداً في أداء جذر متوسط التوزيع بين المحطات، ما يقرب من قيمة أسية واحدة. ويفترض أن هذا يعكس المدى الواسع في أداء الشفرة بين هذه المحطات، وبالتالي يظهر التباين الكبير في البيئات المتعددة المسيرات، الخارجي بالنسبة إلى الهوائي وكذلك الداخلي بالنسبة إلى أجهزة النظام GPS. وفي بعض الحالات تباين الأداء بشكل ملحوظ بمرور الزمن، مرتبطاً أحياناً بتغيرات أبلغ عنها في سجلات الموقع. ولوحظت اختلافات موسمية في بضع حالات. وتبين سابقاً أن اختلافات جذر متوسط التوزيع مستقلة عن اختيار نماذج المستقبل أو الهوائي، أو عن استخدام القبة.

## الجدول 2-13

موجز إحصاءات انقطاع ميقاتيات الحدود اليومية من أجل 38 محطة IGS  
مع معايير تردد H-maser

موقع الخدمة IGS	جذر متوسط تجميع قفزة الميكاتية (بيكو ثانية)	ملاحظات
ONSA	149	ممتاز
BREW	152	ممتاز
OPMT (TL)	158	محطة جديدة، لذا البيانات محدودة جداً
BRUS (TL)	165	بعد التغييرات في صيف 2003 تحسين حتى 118 بيكو ثانية
MAD2	170	بيانات محدودة جداً، لذا لا يعول على جذر متوسط التوزيع
WTZR (TL)	189	
GODE	205	
USN1 (TL)	225	محطة حلت محلها USN3 في يوليو 2004
WSRT	227	انحطاط طفيف منذ صيف 2003
KHAJ	233	بيانات محدودة
CRO1	236	ميزر لم يعد قيد الاستعمال
USUD	266	ميزر لم يعد قيد الاستعمال
NPLD (TL)	268	
TID*	269	تحسين ظاهر منذ صيف 2003
YEBE	271	
GOL2	271	بيانات محدودة جداً، لذا لا يعول على جذر متوسط التوزيع
AMC2 (TL)	283	تحسين بعد تغييرات في الهوائي/المستقبل في يونيو 2002
SPT0 (TL)	286	
WES2	296	
PIE1	305	تحسين منذ تغيير المستقبل في أكتوبر 2002
STJO	334	
USNO (TL)	354	يبدو أسوأ منذ ربيع 2003
IRKT	359	
NYAL	363	أفضل بكثير من NYA1 في 2004
NLIB	368	

الجدول 2-13

موقع الخدمة IGS	جذر متوسط تربيع قفزة الميقائية (بيكوثانية)	ملاحظات
MATE	389	تغيرات زمن هامة؛ أفضل في 2004
KOKB	460	انحطاط كبير قبل تغيير الهوائي/الكبل في مايو 2004
FAIR	478	تحسين إلى حد ما منذ صيف 2003
DRAO	522	
YELL	564	تغيرات موسمية كبيرة، أسوأ كثيراً في الشتاء
ALBH	587	بعد سبتمبر 2003 تحسين كبير حتى 97 بيكوثانية
HOB2	631	تغيرات مرتبطة بتغييرات المحطة
MEDI	703	
FORT	706	
NYA1	750	انحطاط كبير منذ صيف 2003
ALGO	877	تغيرات موسمية كبيرة، أسوأ كثيراً في الشتاء
NRC1 (TL)	936	تغيرات موسمية كبيرة، أسوأ كثيراً في الشتاء
METS	1 065	ميزر لم يعد قيد الاستعمال

استخدمت مقياسات الخدمة IGS السريعة والنهائية من أكتوبر 2000 حتى يونيو 2004. يشار إلى المحطات المشاركة في الموقع في مختبرات التوقيت بالمختصر (TL).

وكان أفضل أداء على المدى الطويل بين محطات الخدمة IGS التي خضعت للدراسة هو ONSA (أونسالا، السويد)، ما يقابل دقة ميقائية يومياً بمقدار  $105 = (149/\sqrt{2})$  بيكوثانية.

والمقياسات BREW (بروستر، ولاية واشنطن، الولايات المتحدة الأمريكية) و OPMT (باريس، فرنسا) و BRUS (بروكسل، بلجيكا) و MAD2 (مدريد، إسبانيا) و WTZR (ويتزيل، ألمانيا)، و GODE (غرينبيلت، ماريلاند، الولايات المتحدة الأمريكية) لديها قدر أكبر قليلاً من أخطاء الميقائية يومياً، في حدود 107-145 بيكوثانية.

وهناك تطور مستمر نحو الأداء الأدنى مستوى بين المحطات الأخرى، يصل إلى 620-753 بيكوثانية بالنسبة لمحطات ALGO (أجونكان، أونتاريو، كندا) و NRC1 (أوتاوا، أونتاريو، كندا) و METS (ميتساهوفي، فنلندا).

ويعكس مدى القيم الأسية لدقة الميقاتيات الاختلافات في الظروف المحلية، وليس عيوباً في المقياس الزمني في الخدمة IGS، على سبيل المثال. ومما يدعم هذا الاستنتاج بقوة هي التغيرات الزمنية في الأداء المشهودة في عدد من المحطات.

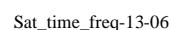
وتتوافق التغيرات المفاجئة عادة مع التغيرات المعروفة في التشكيل أو المعدات. (لأسف، لا يعلن عن كل التغييرات في المحطات). وتظهر بضع محطات تغيرات موسمية كبيرة، وخاصة المحطات الكندية الثلاث YELL و ALGO و NRC1 (الشكل 6-13).

وسبق أن تكهنّا بأن الزيادة الكبيرة في قفزات الميقاتيات خلال فصل الشتاء في هذه المواقع ناجمة عن تراكم الثلوج والجليد تحت الهوائيات وفي المجال القريب منها.

ويبين الشكل 6-13 تاريخ قفزات الميقاتيات في الحدود اليومية بالنسبة لتلك المحطات IGS في مختبرات التوقيت المجهزة بميزر هيدروجيني (مقرونة في الجدول 2-13 بالمختصر TL). واستبعدت المحطة OPMT بسبب ضالة البيانات الخاصة بها. وينبغي أن تعتبر محطة BRUS، وخاصة منذ صيف عام 2003، محطة مثالية ونموذجاً يحتذى لمختبرات التوقيت الأخرى.

الشكل 6-13

انقطاعات حدود اليوم





### 6.13 مقارنات مع نتائج مستقلة لنقل الوقت في اتجاهين

بالإضافة إلى التقييمات الداخلية التي نوقشت أعلاه، من المهم مقارنة تقديرات الميقاتيات الجيوديسية مع التقديرات من أنظمة مستقلة. والملاحظة المشتركة التقليدية، وإن كانت منشورة على نطاق واسع في مختبرات التوقيت، ليست دقيقة بما فيه الكفاية لتوفير مقارنات مفيدة جداً ربما باستثناء متوسط أطول الفترات. أما طريقتا P3 CV و TWSTT فهما تبشيران بنتائج أفضل. وتدلل بعض أفضل النتائج عبر خطوط أساس بين القارات على توافق مع الميقاتيات الجيوديسية بدقة تصل إلى حوالي 0,5 نانوثانية في جذر متوسط الترتيب أو حوالي 0,3 نانوثانية من انحراف الزمن لحساب متوسط الأزمنة حتى بضعة أشهر [Plumb *et al.*, 2005; Petit *et al.*, 2004].

ويُلخص الجدول 3-13 نتائج دراسات مقارنة حديثة العهد على درجة عالية من الجودة.

الجدول 3-13

ملخص مقارنات منشورة بين الطريقة الجيوديسية  
وطريقة P3 CV أو طريقة TWSTT لعدد من الوصلات المتفاوتة في الطول

المصدر	فترة البيانات	الطريقة/الإحصاء/القيمة	طول خط الأساس	وصلة
Petit & Jiang, 2004	5 أشهر 4 أشهر	P3 / RMS / 0.48 ns TW / RMS / 0.57 ns	km 749	NPL-PTB
Petit & Jiang, 2004	شهران شهران	P3 / RMS / 0.49 ns TW / RMS / 0.64 ns	km 835	IEN-PTB
Petit & Jiang, 2004	8 أشهر 8 أشهر	P3 / RMS / 0.58 ns TW / RMS / 1.27 ns	km 2 112	TL-CRL
Petit & Jiang, 2004	5 أشهر 3 أشهر	P3 / RMS / 0.48 ns TW / RMS / 0.59 ns	km 5 695	USNO-NPL
Petit & Jiang, 2004	5 أشهر 5 أشهر	P3 / RMS / 0.45 ns TW / RMS / 0.49 ns	km 6 275	USNO-PTB
Plumb & Larson, 2004	7 أشهر	TW / Difference $\pm$ RMS / -2.10 $\pm$ 0.69 ns (cal. agreement) TW / TDEV / < 0.1 ns, 300 $\leq \tau \leq$ 2 000 s < 0.34 ns, 2 000 $\leq \tau \leq$ 7 $\times 10^6$ s TDEV / 0.34 ns at 7 $\times 10^6$ s	km 2 361	USNO-AMC <sup>(1)</sup>
Plumb & Larson, 2004	5,5 أشهر	TW / RMS / 0.83 ns TW / TDEV / < 0.3 ns, 3 600 $\leq \tau \leq$ 6 $\times 10^6$ s < 0.72 ns, 6 $\times 10^6 \leq \tau \leq$ 7.4 $\times 10^6$ s TDEV / 0.72 ns at 7.4 $\times 10^6$ s	km 2 405	USNO-NIST
Plumb & Larson, 2004	7 أشهر	TW / RMS / 0.79 ns TW / TDEV / < 0.5 ns, 2 $\times 10^5 \leq \tau \leq$ 7.5 $\times 10^6$ s TDEV / 0.24 ns at 7.5 $\times 10^6$ s	km 7 532	PTB-NIST
Dach <i>et al.</i> , 2002	سنتان	RMS / 2 ns	km 6 275	USNO-PTB

(1) تمت معايرة وصلات الاتجاهين والوصلات الجيوديسية على نحو منفصل لمراعاة تأخيرات الأدوات.

قياسات TWSTT متفرقة نسبياً مقارنة مع بيانات النظام GPS المستمرة، حوالي أربع مرات يومياً في السنوات الأخيرة. ويتم احتساب الفروق من خلال استيفاء نتائج الطريقتين الجيوديسية و P3 CV بما يشمل فترات الطريقة TWSTT. واستخدمت مختبرات بيانات P3 CV مدارات الخدمة IGS الدقيقة والخرائط الأيونوسفيرية، إلى جانب تطبيق انزياحات نموذجية لمراعاة حركات المد والجزر للأرض الصلبة. كما تم تطبيق تمهيد Vondrak على نتائج P3، ما يعادل مرشح تمرير منخفض مع فترة قطع حوالي 0,4 يوم. وكما لاحظ [Petit and Jiang, 2004]، ينبغي أن تكون الفوارق بين السلاسل الزمنية المتأونة بمثابة ثابت لكل زوج من الميقاتيات (ما يعادل تحيز معايرة).

ولذلك ينبغي أن يكون الانحراف المعياري مقياساً لعدم الاستقرار النسبي الطويل الأجل في طريقتي نقل الوقت. والبيانات الجيوديسية وبيانات P3 تأتي في كثير من الأحيان من نفس المستقبل، لذلك من المتوقع أن تكون بعض الأخطاء المرتبطة بالمستقبل والهوائي مشتركة في كل منهما وغير واضحة في أوجه اختلافه (من قبيل آثار الحساسية للحرارة مثلاً). ولذلك فإن المقارنات مع TWSTT فقط مستقلة تماماً. وبالنسبة لكل الحالات الأساسية الطويلة الثلاث التي درسها [Plumb and Larson, 2005]، فإن حالات عدم الاستقرار TWSTT هيمنت على انحرافات Allan في اختلافات الميقاتية الجيوديسية في الاتجاهين حتى فترات من  $10^5$  إلى  $10^6$  ثانية. وعلى فترات أطول، تهيمن حالات عدم استقرار الميقاتية على نقل الضوضاء من كلتا الطريقتين.

واستناداً إلى المقارنات المنشورة مع أسلوب TWSTT، فإن نتائج دقة نقل الوقت الجيوديسي على ما يبدو لا تقل جودة عن 0,5 (0,35 = ns /  $\sqrt{2}$ ) نانوثانية (جذر متوسط تربيع)، على افتراض أن كل طريقة تسهم بشكل متساوٍ في الفروق الملحوظة. وهذا أكبر بكثير من الأخطاء الشكلية الجيوديسية لتحليلات اليوم الواحد، حوالي 0,12 نانوثانية، ولكنه ضمن مدى الأداء لبعض محطات GPS الأقل شأناً (الجدول 13-2). ونظراً إلى أن المقارنات تظهر أيضاً قدراً من الاستقرار أفضل باستمرار بالنسبة للميقاتيات الجيوديسية لفترات تصل إلى عدة أيام، وضوضاء جذر متوسط التربيع الفعلية في أسلوب TWSTT تكاد تكون بالتأكيد أكبر والدقة الجيوديسية عموماً أفضل من 0,35 نانوثانية.

### 7.13 تقييم أداء نقل الوقت

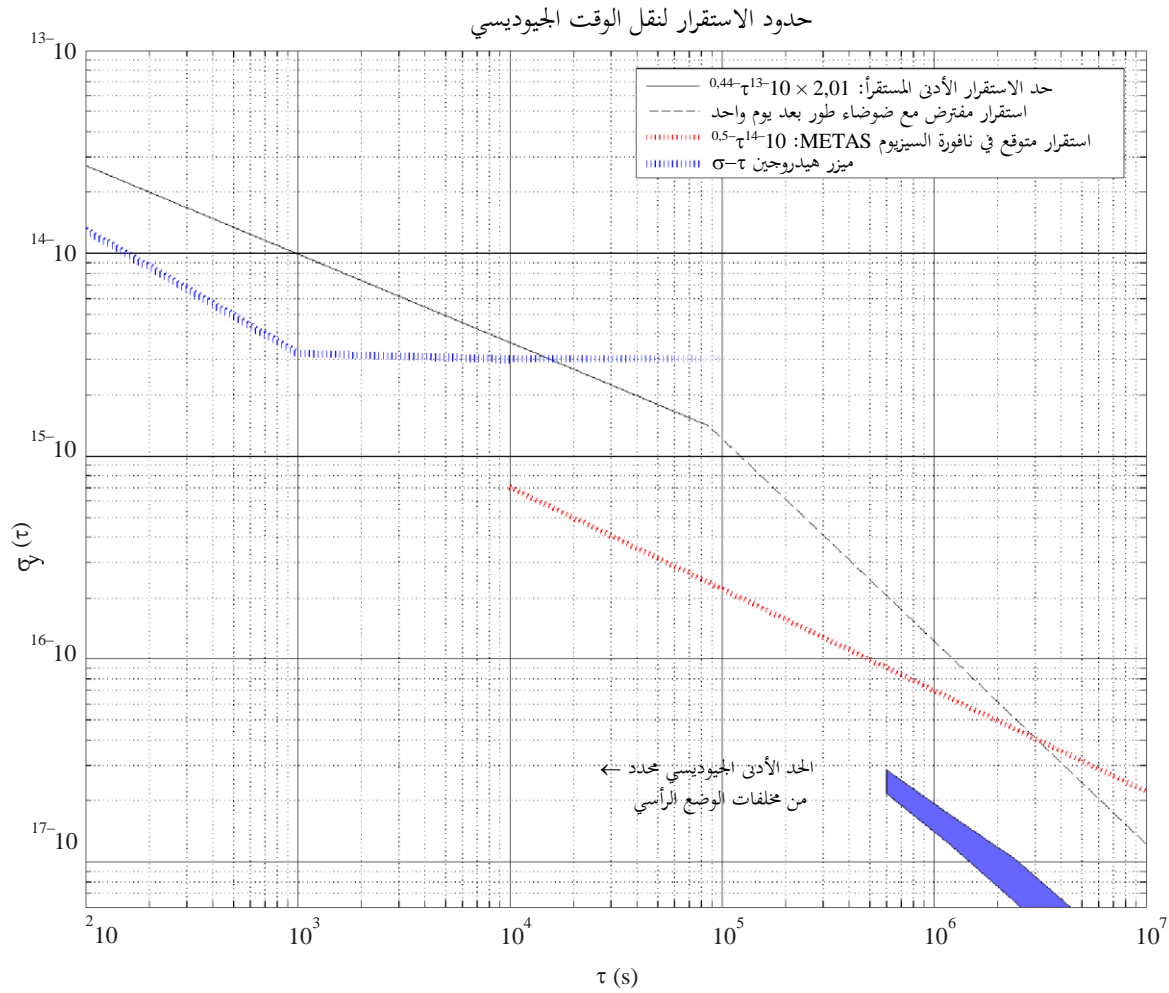
يبين الشكل 13-7 الحد الأدنى من الاستقرار لتحديدات ميقاتية جيوديسية لفترة 24 ساعة، كما يستدل على ذلك [Ray and Senior, 2003] من تحليل لفترات الحدود اليومية لميقاتية الخدمة IGS. وهذا السلوك لا يختلف كثيراً عن  $10^{-5}$ ، بما يتسق مع عملية ضوضاء السير العشوائي. وفي متوسط الزمن ليوم واحد، تكون سوية عدم الاستقرار المستدلة  $10^{-10}$  إلى  $10^{-15}$ . ويقترب بعض أفضل محطات IGS من مستوى الأداء هذا، ولكن البعض الآخر، كما رأينا، أسوأ بكثير. وفيما يتجاوز تحليل اليوم الواحد، ينبغي أن تكون تقديرات الميقاتيات مستقلة تقريباً، ومن المتوقع أن يكون السلوك أقرب إلى عملية ضوضاء بيضاء،  $10^{-1}$ ، كما هو موضح في الشكل 13-7.

ومع ذلك، لم يكن ممكناً حتى الآن دراسة هذا المجال بعناية نظراً لعدم الاستقرار في معايير التردد الشائعة الاستعمال. وعندما تتاح بيانات 'نافورة' السيزيوم على نطاق أوسع، سوف يمكن الكشف عن استقرار الميقاتيات الجيوديسية على فترات أطول من يوم واحد. ويرسم الشكل 13-7 هدف التصميم لنافورة سيزيوم (METAS Cs fountain) [Dudley et al., 2001]، على سبيل المثال. وإذا تم تمديد أقواس التحليل لأكثر من 24 ساعة، ربما يكون الحد الأدنى من الاستقرار أقل من المستوى المبين هنا، رغم أن هذا لم يثبت. ومن ناحية أخرى، فإن القيام بذلك سوف يمدد بالتأكيد سلوك السير العشوائي في الميقاتيات الجيوديسية خلال نفس الفترات الأطول وبالتالي يمكن أن ينال من تحقيق درجة أعلى من الاستقرار خلال أوقات أطول باستخدام أقواس مستقلة ليوم واحد.

وكذلك يظهر في الشكل 13-7 الاستقرار المحدد (يفترض أن يكون متحفظاً) لمخطط ميزر هيدروجيني نشطة MHM2010 من Symmetricon (خليفة Sigma Tau H-maser). وهذا يدل على أن الطريقة الجيوديسية لا تشكل قيداً على مقارنة ميقاتيات عالية الأداء من هذا القبيل على فترات لأكثر من يوم واحد، على الرغم من أن ضوضاء نقل الوقت ربما تهيمن على حالات عدم استقرار الميقاتيات لفترات أقل من حوالي 14 000 ثانية. والتشتت في حالات استقرار يوم واحد مشهود بين محطات H-maser في الخدمة IGS - من الحد الأدنى من الاستقرار المستدل لدينا حتى حوالي  $10^{-14}$  - هو على الأرجح مزيج من الاستقرار المتأصل في معيار التردد المحلي (بعضها أجهزة قديمة والبعض الآخر لا يخضع لسيطرة بيئية صارمة) والظروف المحلية للمدى الزائف المتعدد المسيرات.

الشكل 7-13

الحد الأدنى لاستقرار انحراف Allan من أجل عمليات نقل الوقت الجيوديسية مرسوم بخط أسود مستمر



Sat\_time\_freq-13-07

إن سلوك الحد في الشكل 7-13 متسق مع عملية ضوء السير العشوائي لفترات تصل إلى يوم واحد. وأكثر من ذلك، من المتوقع أن يكون لتقديرات الميقاتيات اليومية المستقلة أخطاء توزيع ضوء بيضاء وأن يتبع مقدار  $\tau$  من انحراف Allan، كما يبين ذلك الخط الأسود المتقطع. وللمقارنة، يشير الاتجاه الأحمر إلى هدف التصميم لنافورة سيزيوم METAS والاتجاه الأزرق هو من أجل ميقاتية H-maser  $\sigma \tau$  (من symmetricon). ويتمثل الحد الجيوديسي الأساسي بالشريط الأزرق الأدنى، استناداً إلى قابلية التكرار في قياسات ارتفاع المحطة.

### 8.13 الاتجاهات في المستقبل

ما زال تطبيق الطرائق الجيوديسية لعمليات نقل الوقت والتردد على الصعيد العالمي في أول عهده. وهو لا يستخدم حتى الآن على نطاق واسع في أوساط ضبط الوقت. ونحن نتوقع قدراً أكبر من الإقبال على اعتماد هذه التقنية من أجل المقارنات الدولية للوقت والتردد في المستقبل، لا سيما في ضوء أدائها العالي وتكلفتها المتواضعة. ومن شأن إرساء معايير جديدة أكثر استقراراً لمختبرات التردد أن يحفز بلا شك هذا الاتجاه. وربما كانت أكبر عقبة أمام الاستخدام الأوسع هي تحليل البيانات الأكثر تعقيداً المطلوبة في إطار النهج الجيوديسي. ولئن كان هنالك عدد من رزم البرمجيات موجوداً ويستخدم على نطاق شائع للغاية في الأوساط المعنية

بتحديد المواقع، فإنها غير معروفة جيداً في الأوساط المعنية بالتوقيت، وهذا أمر مفهوم. ويكاد يكون من المؤكد أن تطوير أدوات عامة بسيطة من أجل حلول الميقاتيات في تحديد مواقع النقاط بدقة سوف يسهل إلى حد كبير الاستخدام الأوسع لتقديرات الميقاتيات الجيوديسية.

ولما كان حد الأداء للتوقيت الجيوديسي مرهوناً بجودة بيانات المدى الزائف، وخاصة الآثار المتعددة المسيرات، فإن أي تحسينات رئيسية في التقنية ترتبط على الأرجح بتخفيضات في أخطاء المدى الزائف وتعدد المسيرات. ومن شأن التحسينات في تكنولوجيا تتبع مستقبلات النظام GPS وفي تصميم الهوائيات الجيوديسية أن تنطوي على بعض الفوائد. ومن شأن تحديد المواقع وتركيب المعدات على نحو أفضل أن يكون مفيداً بالتأكيد في كثير من الحالات. ولكن من المرجح أن تأتي أكبر المكاسب مع إشارات البث في النظام العالمي للملاحة الساتلية ومخططات التشكيل الجديدة. وبعض تصاميم الإشارة المقترحة لنظام GALILEO، على سبيل المثال، يتيح المجال لتخفيض أخطاء تعدد المسيرات إلى حد كبير [Hein and Pany, 2002]. وعموماً، تبشر هياكل الإشارات المقترحة التي تحول المزيد من الطاقة نحو حواف النطاق، بما في ذلك بعض تشكيلات النظام GPS الجديدة، بإمكانات تحسن كبير في التخفيف من أثر تعدد المسيرات [Weill, 2003].

وفيما يتعلق بمقارنات الوقت باستخدام أي طريقة قائمة، فإن عدم اليقين في معايرة المعدات الحاسوبية هو الخطأ المطلق المهيمن. وأخطاء المعايرة هي أكبر بقيمة أسية على الأقل من الأخطاء العمومية في تقديرات الميقاتيات الجيوديسية. أما آفاق تحسينات المعايرة الكبيرة في المستقبل فهي غير واضحة.

## المراجع

- ALLAN, D. and WEISS, M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite, *Proc. 1980 IEEE Freq. Contr. Symp.*, Philadelphia, PA, p. 334-356.
- ALTAMIMI, Z., SILLARD, P. and BOUCHER, C. [2000] ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application. *J. Geophys. Res.*, **107**(B10), 2214, doi: 10.1029/ 2001-JB000561, 2002.
- BEUTLER, G., BROCKMANN, E., GURTNER, W., HUGENTOBLE, U., MERVART, L. and ROTHACHER, M. [1994] Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, **19**, p. 367-386.
- BOSSLER, J.D., GOAD, C.C. and BENDER, P.L. [1980] Using the Global Positioning System (GPS) for geodetic positioning. *Bull. Geod.*, **54**, p. 553-563.
- BRUYNINX, C. and DEFRAIGNE, P. [1999] Frequency transfer using GPS codes and phases: Short- and long-term stability. *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 471-480.
- BYUN, S.H., HAJJ, G.A. and YOUNG, L.E. [2002] GPS signal multipath: A software simulator. *GPS World*, **July 13**(7), p. 40-49.
- COUNSELMAN, C.C. and SHAPIRO, I.I. [1979] Miniature interferometric terminals for Earth surveying. *Bull. Geod.*, **53**, p. 139-163.
- DACH, R., BEUTLER, G., HUGENTOBLE, U., SCHAEER, S., SCHILDKNECHT, T., SPRINGER, T., DUDLE, G. and PROST, L. [2003] Time transfer using GPS carrier phase: Error propagation and results. *J. Geodesy*, **77**, doi 10.1007/s00190-002-0296-z, p. 1-14.
- DACH, R., SCHILDKNECHT, T., HUGENTOBLE, U., BERNIER, L.G. and DUDLE, G. [2006] Continuous Geodetic Time Transfer Analysis Methods. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **53**(7), p. 1250-1259.
- DEFRAIGNE, P., PETIT, G., and BRUYNINX, C. [2001] Use of geodetic receivers for TAI, *Proc. 33rd Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 341-348.
- DUDLE, G., JOYET, A., BERTHOUD, P., MILETI, G. and THOMANN, P. [2001] First results with a cold cesium continuous fountain resonator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **50**(2).

- ELOSEGUI, P., J.L. DAVIS, R.T.K. JALDEHAG, J.M. JOHANSSON, A.E. NIELL, and I.I. SHAPIRO [1995] Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site positions. *J. Geophys. Res.*, **100**, p. 9921-9934.
- ESTEY, L.H. and MEERTENS, C.M. [1999] TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 42-49.
- FLIEGEL, H., T. GALLINI, and SWIFT, E. [1992] Global Positioning System radiation force model for geodetic applications. *J. Geophys. Res.*, **97**(B1), p. 559-568.
- HEIN, G. W. and PANY, T. [December, 2002] Architecture and signal design of the European satellite navigation system Galileo – Status. *J. Global Positioning Systems*, **1**(2), 2002, p. 73-84.
- KEDAR, S., HAJJ, G.A., WILSON, B.D. and HEFLIN, M.B. [2003] The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1829, doi:10.1029/2003 GL017639.
- KOUBA, J. [2004] Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*.
- KOUBA, J. and P. HEROUX, [2000] Precise point positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, **5**(2), p. 12-28.
- KOUBA, J. and SPRINGER, T. [2001] New IGS station and satellite clock combination. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 31-36.
- LANGLEY, R. B. [1996] GPS receivers and the observables. *GPS for Geodesy*, Teunissen, P.J.G. and A. Kleusberg (editors), Berlin: Springer-Verlag, p. 141-173.
- LARSON, K.M., LEVINE, J., NELSON, L.M., T.E. and PARKER [2000] Assessment of GPS carrier-phase stability for time-transfer applications. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **47**(2), p. 484-494.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., De JONG, G., NAWROCKI, J. and DANAHER, J. [1997] A new approach to international time and frequency comparisons: All-in-view multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. Institute of Navigation GPS97*, p. 1085-1091.
- LICHTEN, S. and BORDER, J. [1987] Strategies for high precision GPS orbit determination. *J. Geophys. Res.*, **92**, 1987, p. 12751-12762.
- MADER, G.L. [1998] GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 50-58.
- MADER, G.L. and CZOPEK, F. [2002] Calibrating antenna phase centers. *GPS World*, **13**(5), p. 40-46.
- MCCARTHY, D. D. and PETIT, G. [2003] IERS Conventions 2003, IERS Technical Note 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2003.
- OVERNEY, F., Th. SCHILDKNECHT, G. BEUTLER, L. PROST, and U. FELLER, [1997] GPS Time transfer using geodetic receivers: Middle-term stability and temperature dependence of the signal delays. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 504-508.
- PETIT, G. and JIANG, Z. [28 May 2004 and 16 July 2004] Study of time transfer methods: II. TWSTT vs. geodetic clock comparisons, internal BIPM reports.
- PETIT, G., JIANG, Z., MOUSSAY, P., WHITE, J., POWERS, E., DUDLE, G. and UHRICH, P. [2001] Progresses in the calibration of “geodetic like” GPS receivers for accurate time comparisons. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 164-166.
- PETIT, G., JIANG, Z., TARIS, T., UHRICH, P., BARILLET, R. and HAMOUDA, F. [1999] Processing strategies for accurate frequency comparison using GPS carrier phase. *Proc. 1999 Joint European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 235-238.
- PETIT, G., JIANG, Z., UHRICH, P. and TARIS, F. [2000] Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons. *Proc. 14th European Frequency and Time Forum*, p. 40-44.
- PETIT, G., JIANG, Z., WHITE, Z., J., BEARD, R. and POWERS, E. [2001] Absolute calibration of an Ashtech Z12-T GPS receiver. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 41-46.
- PETIT, G., THOMAS, C., JIANG, Z., UHRICH, P. and TARIS, F. [1998] Use of GPS Ashtech Z12T receivers for accurate time and frequency comparisons. *Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 306-314.
- PLUMB, J. and LARSON, K. [2005] Long-Term Comparisons Between Two-Way Satellite and Geodetic Time Transfer Systems. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1912-1918.
- PLUMB, J., LARSON, K., WHITE, J. and POWERS, E. [2005] Absolute Calibration of a Geodetic Time Transfer System. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1904-1911.

- RAY, J. R., DRAGERT, H. and KOUBA, J. [2000] Recommendations for handling non-Rogue data. *IGS 1999 Technical Reports*, Jet Propulsion Laboratory Publication, Pasadena, California, p. 445-451.
- RAY, J.R. and SENIOR, K. [2001] Temperature sensitivity of timing measurements using Dorne Margolin antennas. *GPS Solutions*, **5**(1), p. 24-30.
- RAY, J. R., and SENIOR, K. [ 2003] IGS/BIPM Pilot Project: GPS carrier phase for time/frequency transfer and time scale formation. *Metrologia*, **40**(3), p. S270-S288.
- RIECK, C., JARLEMARK, P., JALDEHAG, K. and JOHANSSON, J. [2003] Thermal influence on the receiver chain of GPS carrier phase equipment for time and frequency transfer. *Proc. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17<sup>th</sup> European Frequency and Time Forum*, p. 326-331.
- SCHILDKNECHT, Th. and DUDLE, G. [2000] Time and frequency transfer: High precision using GPS phase measurements. *GPS World*, 2000 **11**(2), 2000, p. 48-52.
- SCHMID, R. and ROTHACHER, M. [2003] Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *J. Geodesy*, **77**, doi: 10.1007/s00190-003-0339-0, p. 440-446.
- SCHUPLER, B.R., ALLSHOUSE, R.L. and CLARK, T.A. [1994] Signal characteristics of GPS user antennas. *J. Inst. Navigation*, **41**, p. 277-295.
- SCHUPLER, B.R. and CLARK, T.A. [2001] Characterizing the behavior of geodetic GPS antennas. *GPS World*, **12**(2), p. 48-55.
- SENIOR, K., KOPPANG, P. and RAY, J. [2003] Developing an IGS time scale, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **50**(6), p. 585-593.
- SENIOR, K., MATSAKIS, D. and POWERS, E. [1999] Attenuating day-boundary discontinuities in GPS carrier-phase time transfer. *Proc. 31<sup>st</sup> Precise Time and Time Interval Meeting*, p. 481-489.
- SENIOR, K., RAY, J. and PETIT, G. [2004] Comparison of instrumental and empirical station timing biases for a set of Ashtech GPS receivers, *Proc. 2004 European Frequency and Time Forum*.
- THOMAS, C. and AZOUBIB, J. [1996] TAI computation: Study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- WEILL, L. R. [2003] How good can it get with new signals? Multipath mitigation. *GPS World*, **14**(6), p. 106-113.
- WHITE, J., BEARD, R., LANDIS, G., PETIT, G. and POWERS, E. [2001] Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 167-172.
- WU, J.T., WU, S.C., HAJJ, G.A., BERTIGER, W.I. and LICHTEN, S.M. [1993] Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, **18**, p. 91-98.
- ZUMBERGE, J.F., HEFLIN, M.B., JEFFERSON, D.C., WATKINS, M.M. and WEBB, F.H. [1997] Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**(B3), p. 5005-5017.

## الفصل 14

### نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين (TWSTFT)

#### الصفحة

200	.....	1.14	مقدمة
200	.....	2.14	وصف تقنية نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين
202	.....	3.14	قياسات نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين
203	.....	4.14	معدات مختبرات المحطات
203	.....	1.4.14	مودم انتشار الطيف
203	.....	2.4.14	عدد الفاصل الزمني
204	.....	2.4.14	القياسات التي تعتمد على الوصلة (المسير والمعدات)
204	.....	1.5.14	تأثير Sagnac
204	.....	2.5.14	التصحيح النسبي من المرتبة الثانية لتأثير Sagnac
204	.....	3.5.14	الفرق في ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة
205	.....	6.14	طرائق المعايرة
205	.....	1.6.14	معايرة المحطة باستخدام محاكي ساتلي
206	.....	2.6.14	معايرة المحطة باستخدام محطة أرضية محمولة
206	.....	3.6.14	حملات المعايرة في عامي 1993 و 1998
206	.....	4.6.14	حملة المعايرة في النطاق X
207	.....	7.14	المشكلات الناشئة لدى استخدام مرسلات - مستجيبيات ساتلية مختلفة
207	.....	8.14	المشكلات الناشئة لدى استخدام مرسلات مستجيبيات ساتلية مختلفة
208	.....	9.14	الاستقرار الطويل الأجل في تقنية TWSTFT
208	.....	1.9.14	المقارنات الطويلة الأجل بين النظام GPS والتقنية TWSTFT
209	.....	10.14	خاتمة
210	.....		المراجع

## 1.14 مقدمة

إن واحداً من الأهداف الرئيسية، في مجال نقل الوقت، هو مقارنة الميقاتيات و/أو معايير التردد على مسافات متباعدة جداً. وهناك أسباب كثيرة للقيام بهذه المقارنات. وقد يهتم المرء ببساطة في إجراء قياسات آنية في ميقاتيات متباعدة جداً لمراقبة أداء مقاييس زمنية بوساطة الميقاتيات التي تجري مقارنتها. وقد يهتم المرء أيضاً في إجراء مقارنات لمعايير التردد المتقدمة، مثل نوافير السيزيوم، و/أو التحقق من استقرار هذه المعايير على المدى الطويل. ومدى الدقة والضبط اللذين يتم بهما تحقيق هذه القياسات هو موضع اهتمام علم القياس.

والتقنية التي تعرف باسم نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين هي طريقة يمكن بها للمرء أن يحصل على تقدير اختلافات الميقاتيات بين محطتين من خلال التبادل النشط لإشارات التوقيت عبر ساتل اتصالات مستقر بالنسبة إلى الأرض [Kirchner, 1991]. وقد أصدرت اللجنة الاستشارية لتعريف الثانية (CCDS)، التي أصبحت الآن اللجنة الاستشارية للتوقيت والتردد (CCTF)، في اجتماعها الحادي عشر في عام 1989 الإعلان 1989/1 الذي شجعت فيه استخدام تقنية النقل TWSTFT واقترحت أن يقوم المكتب الدولي للأوزان والمقاييس بإنشاء فريق عامل مخصص معني بتقنية نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين.

وفي أعقاب قرار الاجتماع الثاني عشر للجنة الاستشارية لتعريف الثانية في عام 1993، تم تحويل الفريق المخصص إلى فريق عمل دائم للجنة الاستشارية للتوقيت والتردد. وفيما يلي أهم إنجازات فريق العمل:

- وضع نسق موحد؛
- تنظيم وصلات الوقت TWSTFT؛
- اختيار المودمات؛
- وضع الجدول الزمني للرصدات؛
- تحديد مدة الرصد؛
- تبادل البيانات؛
- التفاوض بشأن استخدام السواتل؛
- تقييم وصلات TWSTFT؛
- المقارنة مع تقنيات أخرى لنقل الوقت.

وقد ازداد الإقبال على هذه التقنية كوسيلة للحصول على مقارنات على درجة عالية من الدقة بين مختبرات التوقيت. ويستخدم المكتب الدولي BIPM الآن معلومات عن الميقاتيات التي تسهم في التوقيت الذري الدولي الذي يتحقق باستعمال هذه التقنية (انظر التقرير العشرين لتقنية TWSTFT الصادر عن المكتب BIPM).

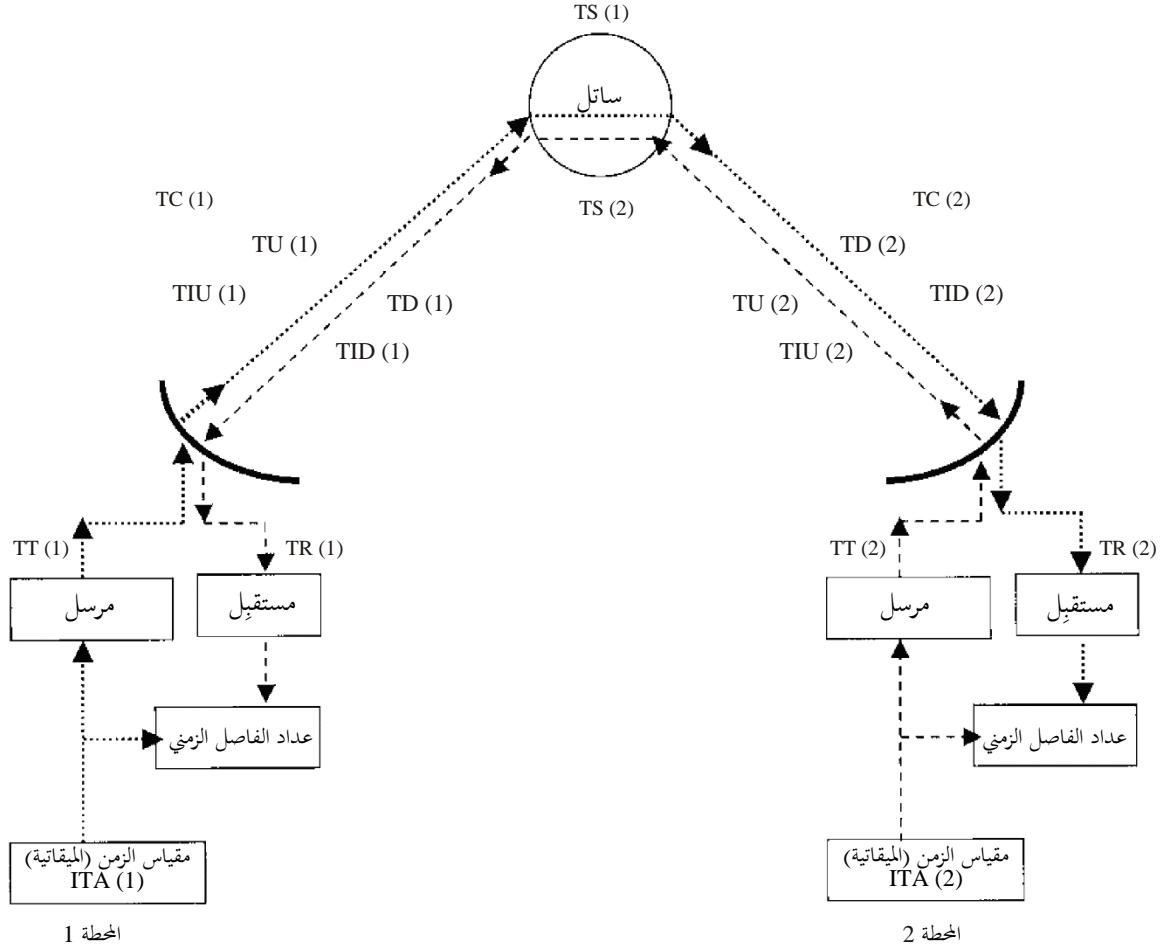
## 2.14 وصف تقنية نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين

لتنفيذ تقنية نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين يتعين على المختبرات أن تعمل في أزواج (الشكل 1-14). ويتطلب كل مختبر محطات استقبال وإرسال ومودمات انتشار الطيف من أجل تبادل معلومات التوقيت عبر سواتل الاتصالات التي تستخدم إشارات مشفرة بضوء زائفة (PN) ونفاذ متعدد بتقسيم الشفرة (CDMA). ويتم في موقع الإرسال، بواسطة مودم، تشكيل إشارة من نبضة واحدة في الثانية (1 PPS) في تردد وسيط (IF) في الحطة قدره 70 MHz عادة. ومن ثم يجري تحويل الإشارة صعوداً إلى تردد راديوي (RF) ويتم تضخيمها وإرسالها إلى الساتل. ويتم في مرسل - مستجيب الساتل تضخيمها وتحويلها في التردد بواسطة تردد التحويل في الساتل، ثم يتم تضخيمها مرة أخرى وبعاد إرسالها. ويتم في موقع الاستقبال تضخيم إشارة التردد الراديوي الواردة ويجري تحويلها نزولاً إلى تردد وسيط ثم يزال تشكيلها بواسطة المودم لتوليد نبضة في الثانية واردة. ويتألف القياس من قياسات فترات زمنية متآونة في كلا الموقعين. وتبدأ النبضة في الثانية التي تولدها الميقاتية المحلية عدّاد الفاصل الزمني المحلي ومن ثم تُوقف، بعد إرسالها عبر الساتل، عدّاد الفاصل الزمني النائي.



الشكل 1-14

مبدأ مقارنة تقنية نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين (TWSTFT)



Sat\_time\_freq-14-01

يظهر في الشكل 1-14 المعلومات التالية للمحطة 1 والمحطة 2 ( $k = 1, 2$ ):

- $TA(k)$ : الميقاتية أو مقياس الزمن في المحطة  $k$
- $TI(k)$ : قراءة عداد الفاصل الزمني
- $TT(k)$ : تأخر المرسل
- $TU(k)$ : تأخر الوصلة الصاعدة عبر الغلاف الجوي
- $TR(k)$ : خطأ Receiver delay
- $TD(k)$ : تأخر الوصلة الهابطة عبر الغلاف الجوي
- $TS(k)$ : تأخر الانتشار عبر المرسل-المستجيب الساتلي
- $TC(k)$ : تصحيح لمراعاة الآثار النسبية
- $TIU(k)$ : التأخر الأيونوسفيري نحو الأعلى
- $TID(k)$ : التأخر الأيونوسفيري نحو الأسفل

ويعطى الفرق بين الميقاتيتين في المحطتين 1 و 2 بالعلاقة:

$$TA(1)-TA(2)$$

حيث:

TA(1) مرتبطة بـ TI(1) كما يلي:

$$(1-14) \quad TI(1) = TA(1) - TA(2) + TT(2) + T_U(2) + TS(2) + T_D(1) + TR(1) + TC(1) + TI_U(1) + TI_D(1)$$

وTA(2) مرتبطة بـ TI(2) كما يلي:

$$(2-14) \quad TI(2) = TA(2) - TA(1) + TT(1) + T_U(1) + TS(1) + T_D(2) + TR(2) + TC(2) + TI_U(2) + TI_D(2)$$

ويعطى الفرق بين هاتين العلاقتين:

$$(3-14) \quad \begin{aligned} TI(1) - TI(2) = & 2 [TA(1) - TA(2) + TT(2) - TT(1) + T_U(2) - T_U(1) + TS(2) - TS(1) \\ & + T_D(1) - T_D(2) + TR(1) - TR(2) + TC(1) - TC(2) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \end{aligned}$$

ويمكن كتابة ذلك كما يلي:

$$(4-14) \quad \begin{aligned} TA(1) - TA(2) = & \frac{1}{2} [TI(1) - TI(2) + TT(1) - TT(2) + T_U(1) - T_U(2) + TS(1) - TS(2) \\ & + T_D(2) - T_D(1) + TR(2) - TR(1) + TC(2) - TC(1) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \end{aligned}$$

وإذا مرت الإشارات عبر نفس المرسل-المستجيب في الساتل، عندئذ TS(1) تساوي TS(2) ومن ثم يلغى تأخر أحدهما الآخر. وإذا لم يكن الساتل يتحرك بسرعة كبيرة، عندئذ  $T_U(1)$  يساوي  $T_D(1)$  و  $T_U(2)$  يساوي  $T_D(2)$  ومن ثم يلغى تأخر أحدهما الآخر. ويمكن حساب TC(1) و TC(2) ولكن رهناً بحالة عدم اليقين التي تعرف بها إحداثيات المحطة. وفي حال تقارب المحطتين تكون  $TI_D(2) = TI_D(1)$  و  $TI_U(2) = TI_U(1)$ .

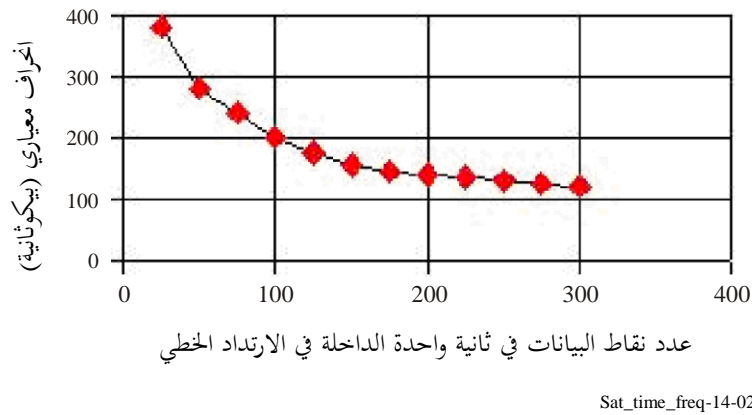
### 3.14 قياسات نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين

القياس الأساسي الذي يتم بتقنية نقل الوقت والتردد بالساتل في اتجاهين هو تقدير للفرق بين ميقاتيتين. ويمكن حساب الانحراف المعياري للمخلفات نسبة إلى الاختلافات المقيسة بين ميقاتيتين بواسطة التقنية TWSTFT. وفي ظل افتراضات معقولة لسلوك ميقاتية عادي تكشف عن ضوضاء بيضاء، يمكن أن يتوقع من انحراف معياري لانحدار خطي لاختلافات الميقاتية أن يقترب من حد معين كلما أدخل المزيد من القياسات في الارتداد.

ويبين الشكل 2-14 الانحراف المعياري كدالة تابعة لعدد من نقاط البيانات وحيدة الثانية المدرجة في فترة منحني التناسب [Klepczynski, 1995]. وبعد حوالي 300 ثانية من زمن الرصد يتم الاقتراب من حد قدره حوالي 125 بيكو ثانية.

الشكل 2-14

الانحراف المعياري للمخلفات إزاء تناسب خطي  
لفروق الميقاتيات المحسوب بتقنية TWSTFT



Sat\_time\_freq-14-02

#### 4.14 معدات مختبرات المحطات

أجري العديد من التحريات بشأن أحوال عدم اليقين في المعدات TWSTFT المستخدمة على الأرض. وهي ملخصة في [Kirchner, 1999]. والمصدران الرئيسيان لعدم اليقين في هذا المجال هما:

- مودم انتشار الطيف المستخدم لتوليد نبضة واحدة في الثانية (1 PPS) ترسلها محطة وتلقاها محطة أخرى؛
  - عداد الفاصل الزمني المستخدم لقياس الفرق بين ميقاتية محلية ونبض توقيت أعيد إنشاؤه بواسطة مودم انتشار الطيف؛
- وذلك على أساس استخدام عدم اليقين الناجم عن الاختلافات في نسبة كثافة الموجة الحاملة إلى الضوضاء ( $C/N_0$ ) داخل مودم انتشار الطيف.

##### 1.4.14 مودم انتشار الطيف

كان المودم MITREX أول مودم لانتشار الطيف متاحاً تجارياً صُمم خصيصاً لقياسات المدى ونقل الوقت من نقطة إلى نقطة على درجة عالية من الضبط والدقة، وذلك باستخدام سائل اتصالات مستقر بالنسبة إلى الأرض [Hartl et al., 1983]. وهو يستخدم ما يسمى تقنية التسلسل المباشر أو الضوضاء شبه العشوائية. ويُستخدم الإبراق بزحزة الطور ثنائي الحالة (BPSK) لتشكيل الموجة الحاملة. وتتوقف استبانة نظام يستخدم شفرات الضوضاء PN على طول عنصر الشفرة (طول الرقاقة) ويعطى عرض النطاق اللازم بمعكوس قيمته، أي معدل الرقاقة ( $f_c$ ). ويمكن، باستخدام شفرات ذات ارتباط عرضاني منخفض، إرسال العديد من هذه الشفرات على نفس القناة (CDMA) دون أن يتداخل بعضها ببعض. ويستخدم المودم MITREX معدل رقاقة قدره 2,5 MHz وهو يتطلب، تبعاً لترشيح الإشارة وخدمة السوائل المعتمدة، قناة ساتلية بعرض نطاق قدره 3,5 MHz عموماً [Veenstra, 1990].

وهناك في الوقت الحاضر نوعان من المودمات المتوفرة تجارياً: المودم ATLANTIS، الذي تصنعه شركة Allen Osborne Associates، الولايات المتحدة الأمريكية، والمودم SATRE، الذي تصنعه شركة Time Tech GmbH، ألمانيا. والمودم SATRE متوافق تماماً مع المودم MITREX، ولكن المودم ATLANTIS يستخدم معياره الخاص به (معدل رقائك مختلف قليلاً، وشفرات أخرى) وبالتالي لا يوفر التوافق. وثمة مودم وضع في مختبر بحوث الاتصالات (CRL) في اليابان غير متوافق مع المودم MITREX.

##### 2.4.14 عداد الفاصل الزمني

هنالك، من قبيل الممارسة الجيدة، محطات تستخدم عدداً خارجياً عندما تستخدم مودماً يضم قدرة داخلية لقياس الفاصل الزمني. ويكون العداد الخارجي ضرورياً عادة للقياسات المصاحبة.

#### 1.2.4.14 معدل كثافة الموجة الحاملة إلى الضوضاء ( $C/N_0$ )

في حالة محطات التقنية TWSTFT، يتم تحديد المعلومات التشغيلية للمحطة بحسب معدل كثافة الموجة الحاملة إلى الضوضاء،  $C/N_0$ ، في المودم وبحسب الساتل (أي القدرة المشعة المكافئة المتاحة، EIRP، ورقم الجدارة،  $G/T$ ، في مطراف الساتل). وتحسب المعلومات الأخيرة بواسطة ميزانية وصلة. ومعدل كثافة الموجة الحاملة إلى الضوضاء،  $C/N_0$ ، ضروري للحصول على دقة القياس المطلوبة.

#### 5.14 القياسات التي تعتمد على الوصلة (المسير والمعدات)

المصادر الرئيسية لعدم اليقين في هذا المجال هي:

- تأثير بسبب الحركة حول محور دوران الأرض، في المحطات المشاركة والساتل على السواء أثناء انتشار الإشارة من الساتل وإليه (تأثير Sagnac)؛
- تأثير بسبب حركة الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض نسبة إلى سطح الأرض؛
- تأثير بسبب الفرق في التأخر الأيونوسفيري للإشارة في ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة المستخدمتين لنقل الإشارات من المستعمل ومن الساتل.

#### 1.5.14 تأثير Sagnac

ينجم تأثير Sagnac عن الحركة حول محور دوران الأرض، في المحطات الأرضية والساتل على السواء، أثناء انتشار الإشارة من الساتل وإليه [Ashby and Allan, 1979]. وهو متناسب مع الإسقاط الاستوائي لمنطقة مربعة رؤوسها هي مركز الأرض وموقع المحطتين على سطح الأرض وموقع الساتل نسبة إلى سطح الأرض. ومن ثم فهو دالة تابعة للمحطتين 1 و 2 وللساتل. والحالة القصوى هي حوالي 420 نانوثانية للمحطتين 1 و 2 عند خط الاستواء، لكل منهما زاوية ارتفاع  $6^\circ$  ناجمة عن تفاوت أقصى في خط الطول (حوالي  $150^\circ$ ). ولحساب تأثير Sagnac، تكون متطلبات الدقة الموضعية أدنى بعدة قيم أسية من تلك اللازمة لحساب تأخر الإشارة، وذلك لطرائق اتجاه وحيد مثل النظام GPS. وتبلغ تقديرات حالة عدم اليقين الناجمة عن الأخطاء في إحداثيات المحطة بالنسبة لتأثير Sagnac بين محطتي جامعة غراتس التقنية ومرصد البحرية الأمريكية (TUG-USNO) مقدار 150 بيكو ثانية وبين محطتي جامعة غراتس التقنية ومرصد كوت دازور (TUG-OCA) مقدار 16 بيكو ثانية.

#### 2.5.14 التصحيح النسبي من المرتبة الثانية لتأثير Sagnac

التصحيح من المرتبة الثانية، بسبب حركة الساتل نسبة إلى سطح الأرض، هو دالة تتبع سرعة الساتل وارتفاعات الساتل من المحطتين 1 و 2 [Petit and Wolf, 1993]. والحالة القصوى هي محطة على ارتفاع  $6^\circ$  وأخرى على ارتفاع  $90^\circ$ . ويكون الاختلاف في أوقات وصول (TOA) الإشارات المرسلية في آن واحد في الساتل عندئذ حوالي 17 مللي ثانية. وإذا افترضنا سرعة ساتل شعاعي عالية إلى حد ما بمعدل 3 أمتار/ثانية، يكون الخطأ الناتج حوالي 170 بيكو ثانية. وباختيار ساتل ترصده كلتا المحطتين في نفس الارتفاع يمكن تقليل التأثير إلى الحد الأدنى. بل يمكن أيضاً إزالته كلياً بتخالف أزمنة الإرسال. وتقع الآثار التقديرية للتجارب التي أجريت بين مرصد البحرية الأمريكية (USNO) وجامعة غراتس التقنية (TUG) في حدود 100 بيكو ثانية؛ وبين مرصد كوت دازور (OCA) وجامعة غراتس التقنية (TUG) في حدود 10 بيكو ثانية.

#### 3.5.14 الفرق في ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة

يتوقف التأخر الزائد الأيونوسفيري لإشارة تخترق الأيونوسفير على التردد (متناسباً مع  $1/f^2$ ) وإجمالي المحتوى من الإلكترونات (TEC) والارتفاع [Flock, et al., 1982; Jespersen, 1989]. ويعطى إجمالي المحتوى من الإلكترونات لعمود رأسي مساحة مقطعه العرضي 1 متر مربع. وباستخدام دالة مناقلة، يمكن حساب إجمالي المحتوى من الإلكترونات على طول مسير مائل. ومدى عدم اليقين بسبب الأيونوسفير هو دالة لتردد الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة في المحطتين 1 و 2، وإجمالي المحتوى من الإلكترونات للمحطتين 1 و 2، ولا ارتفاعي المحطتين 1 و 2. ومدى عدم اليقين في حالة عدم المعاملة بالمثل هو حوالي 150 بيكو ثانية في الحالة المتطرفة:

- حيث ارتفاع أحد الساتلين 90° وارتفاع الآخر 6°؛
- ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة هي 14 GHz و 12 GHz و 14 GHz و 11 GHz؛
- إجمالي المحتوى من الإلكترونات بمقدار  $10^{17}$  إلكترون/متر مربع و  $10^{18}$  إلكترون/متر مربع (على افتراض محطة وقت الليل وأخرى وقت النهار).

وبالنسبة لترددات النطاق (4/6 GHz)، يكون التأثير، بطبيعة الحال، أعلى بكثير. ويمكن تقليل التأثير إلى الحد الأدنى باختيار ساتل ذي ارتفاعين متماثلين إلى حد ما، وله نفس إجمالي المحتوى من الإلكترونات ونفس ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة في كلا الموقعين، أو باستخدام ترددات أعلى من ذلك (النطاق Ka: 20/30 GHz).

وثمة تأثير أهم هو التأخر التروبوسفيري. وهو مستقل عن التردد (المهم) في الترددات المستخدمة للاتصالات الساتلية.

## 6.14 طرائق المعايرة

بعض جوانب عدم اليقين لا يمكن قياسها أو تقديرها إحصائياً. ولا بد من تقييمها من خلال عملية غالباً ما تسمى المعايرة. وفي بعض الحالات، يعني ذلك قياس التأخر من خلال المكونات الفردية للنظام المستخدم لإجراء القياسات أو قياس التأخر عبر النظام بأكمله. ويمكن أيضاً إجراء المعايرة من خلال نقل نظام إما أظهر درجة معقولة من الاستقرار أو نظام تمت معايرته. وهذا ما يسمى في بعض الأحيان المعايرة النسبية. بل يمكن في بعض الحالات إجراء مقارنات من خلال نظام مختلف تماماً.

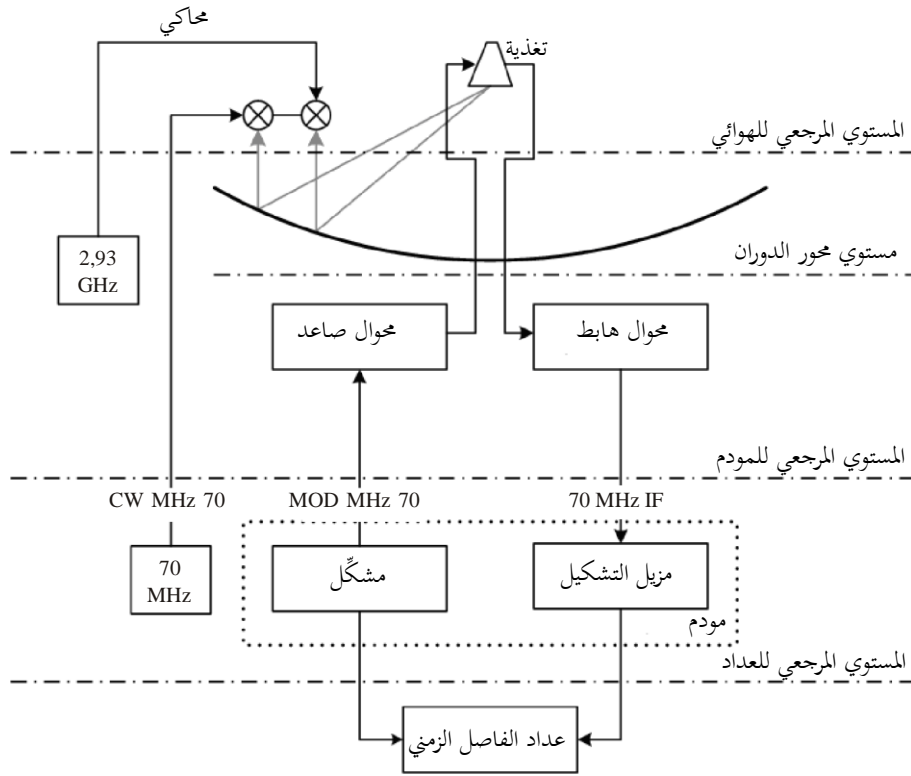
### 1.6.14 معايرة المحطة باستخدام محاكي ساتلي

من الممكن قياس التأخر في بعض المكونات الفردية لنظام ما، ومع ذلك لا يمكن ببساطة تقدير عدم اليقين في كل النظام نظراً للمسيرات المعقدة التي قد تمر فيها الإشارات. ويمكن أن تستخدم طريقتان لهذا الغرض. إذ يمكن إما قياس الفرق في التأخر بين المحطتين 1 و 2، أو قياس التأخر في كلتا المحطتين، بشكل منفصل.

في الطريقة الأولى، تحدث التأخرات من خلال المكونات الفردية للنظام بحقن إشارة عبر جهاز محاكاة ساتلي له خصائص موثقة جيداً [De Jong and Polderman, 1994; De Jong and Van Bemmelen, 2001]. ونظام المعايرة مؤتمت، وقد أجريت حملة قياس بالاقتران مع مطراف ساتلي طائر (FAST) [De jong et al., 1995]. ويمكن أيضاً استخدام جهاز محاكاة ساتلي من هذا القبيل لقياس تغير التأخرات في محطة ما على نحو دائم، مما يوفر الاستقرار للمحطة على المدى الطويل. والشكل 14-3 عبارة عن رسم تخطيطي لجهاز محاكاة ساتلي في محطة مختبر فان سفيندن (VSL) يستخدم لإجراء هذه القياسات.

## الشكل 3-14

رسم تخطيطي لجهاز المحاكاة الساتلي في مختبر VSL لقياس التأخرات  
عبر محطة أرض TWSTFT



Sat\_time\_freq-14-03

#### 2.6.14 معايرة المحطة باستخدام محطة أرضية محمولة

يمكن تحقيق النهج الثاني بإضافة محطة أرضية في موقع كل من محطتين مشاركتين أو باستخدام محطة ثالثة كمعيار نقل. وقد أجريت حملات قياس في عامي 1993 و1998 باستخدام هذه التقنية.

#### 3.6.14 حملات المعايرة في عامي 1993 و1998

في الحملة الأولى، نقلت محطة TWSTFT بين مرصد كوت دازور، غراس، فرنسا (OCA) وجامعة غراتس التقنية، النمسا (TUG)، على مسافة حوالي 800 km [Kirchner et al., 1993]. وكانت الانحرافات القياسات المعيارية الرسمية التي أجريت خلال الرحلة حوالي 1 نانوثانية. ونوقشت سبل تحسين هذه التجربة ومن ثم أطلقت حملة ثانية [Kirchner et al., 1998]. وخلال هذه الحملة، كانت الانحرافات المعيارية الرسمية في حدود 200 بيكوثانية، وهو تحسن كبير نسبة إلى التجربة الأولى. وأجريت خلال الحملتين مقارنات مع النظام العالمي لتحديد المواقع بالمشاركة ولوحظت اختلافات منهجية بين الطريقتين. وفي كلا النهجين للمعايرة الخارجية، ينبغي إجراء القياسات على أساس مستمر. وهذا من شأنه وضع تاريخ إحصائي لمدى عدم اليقين.

#### 4.6.14 حملة المعايرة في النطاق X

أجريت تجربة تستخدم محطة نطاق X محمولة بين مرصد البحرية الأمريكية (USNO)، واشنطن العاصمة، ومختبر الفيزياء الوطني (NPL)، تدينغتون، انكلترا.

#### 7.14 المشكلات الناشئة لدى استخدام مرسلات-مستجيبيات ساتلية مختلفة

ما لم يتم قياس التأخرات عبر مختلف المرسلات-المستجيبيات في الساتل قبل إطلاقه، فإنه من الصعب جداً الحصول على تقديرات عدم اليقين من التأخرات من خلالها. ولا يمكن أن يتم ذلك إلا بالمعايرة النسبية من خلال نقل نظام معايير إلى المحطات المشاركة. وينبغي تكرار هذه القياسات في فترات متقاربة قدر الإمكان. كما ينبغي القيام بها باستخدام تقنيات مختلفة مستقلة للتحقق على أفضل وجه ممكن من النتائج التي يتم الحصول عليها بواسطة تقنيات أخرى. والمشكلة الرئيسية هنا هي أن التقنيات المستخدمة للتحقق من تقنيات أخرى قد لا تكون على نفس القدر من عدم اليقين كما هو في التقنية الأولية. ويحتاج الأمر إلى بذل عناية فائقة عند تقييم حالة عدم اليقين على هذا النحو.

وقد يكون النظام المعايير المستقل أيضاً من نظم TWSTFT، إذا لم يكن في هذا النظام أي مشكلة تأخرات ساتلية تفاضلية مجهولة. وإذا عرف التأخر الساتلي التفاضلي (من القياسات قبل إطلاق الساتل، مثلاً)، يمكن عندئذ استخدام الطرائق الواردة في القسم الأسبق لمعايرة تأخرات المحطة.

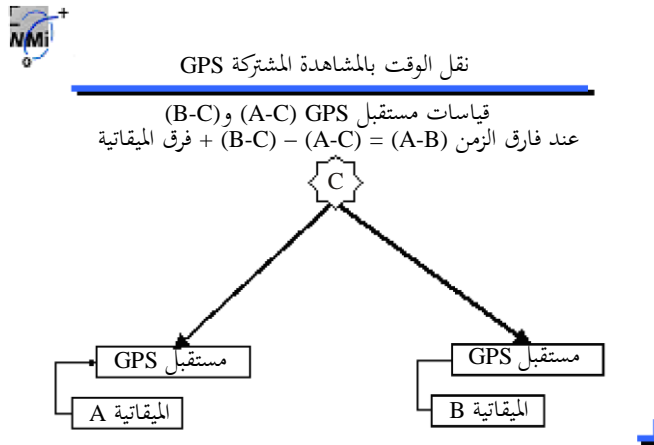
#### 8.14 المشكلات الناشئة لدى استخدام مرسلات مستجيبيات ساتلية مختلفة

بالإضافة إلى النظامين المذكورين سابقاً، يمكن استخدام طرائق أخرى من قبيل النظام العالمي لتحديد المواقع. وبطبيعة الحال، فإن الدقة التي يتم الحصول عليها لا يمكن أن تكون أفضل من دقة النظام GPS، في حد ذاته.

ويظهر في الشكل 4-14 ترتيبية القياس من أجل الملاحظة المشتركة في النظام GPS. حيث تُستقبل الإشارات الواردة من السواتل الملاحية (C) في المستقبلين وتقاس إزاء المقاييس الزمنية في الميقاتيتين A و B. وتطرح القيمتان المقيستان (A-C) و (B-C) وتكون النتيجة هي الفرق بين مقياسي الزمن (A-B).

الشكل 4-14

#### الملاحظة المشتركة GPS



Sat\_time\_freq-14-04

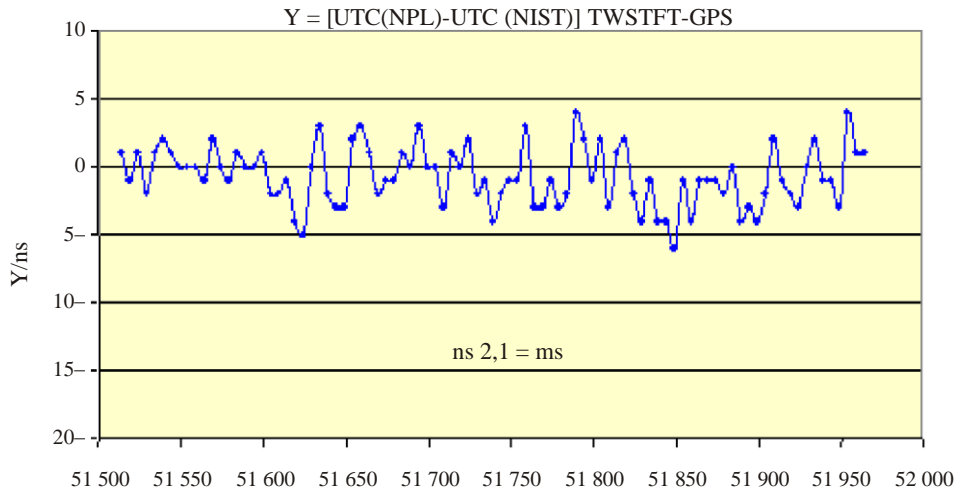
وتلتغي التأخرات المشتركة في الساتل وفي ميقاتيته. وما زال يتعين أن تؤخذ بعين الاعتبار الاختلافات في التأخر الزائد في الأيونوسفير والتروبوسفير. وينبغي أن تكون التأخرات في الهوائي وكبل الهوائي وكبل الميقاتية والمستقبل في كل موقع معروفة (معايرة)، بحيث يمكن تصحيح النتيجة لمراعاة اختلافات التأخر في المعدات في A و B. وينبغي أن تكون هذه التأخرات مستقرة مع الظروف البيئية.

أولاً، ترسل وحدة نقل وقت (TTU) معايرة في نظام GPS إلى المحطات المشاركة بحيث يمكن إجراء قياسات خط الأساس في بداية فترة المعايرة إزاء وحدة نقل الوقت GPS TTU التي تكون موجودة في المحطات المشاركة طوال فترة التقييم. ثم يرسل، أثناء الفترات اللاحقة، المستقبل المعايير مرة أخرى إلى المحطات المشاركة.

ويبين الشكل 5-14 نتائج هذه المقارنات التي أجريت على مدى فترات طويلة من الزمن.

الشكل 5-14

الاختلافات بين تقنية TWSTFT وشفرة GPS C/A للملاحظة المشتركة من أجل وصلة NPL/NIST



التاريخ الجولياني المعدل، 51 500 = 18 نوفمبر 1999

Sat\_time\_freq-14-05

#### 9.14 الاستقرار الطويل الأجل في تقنية TWSTFT

في مجال مقارنة الترددات، ربما تكون 150 بيكو ثانية تقديراً جيداً لحالة عدم اليقين المرتبطة بالقياسات التي أجريت باستخدام التقنية TWSTFT.

#### 1.9.14 المقارنات الطويلة الأجل بين النظام GPS والتقنية TWSTFT

كان هناك في سبتمبر 2002 اثنتا عشرة وصلة TWSTFT عاملة في أوروبا وأمريكا الشمالية وبلدان المحيط الهادئ. وتستخدم عشرة منها لإنشاء التوقيت الذري الدولي. وتقارن كل هذه الوصلات TWSTFT مع النظام GPS بالملاحظة المشتركة وتنشر في تقارير TWSTFT الصادرة عن المكتب الدولي للأوزان والمعايير (BIPM). ويوفر هذا الرصد الدائم معلومات قيمة عن الاستقرار على المدى الطويل في الطريقتين، ويذكر أن بعض هذه الوصلات عاملة بالفعل منذ 3 سنوات. ويرد في الشكل 5-14 مقارنة نموذجية لمختبر الفيزياء الوطني (NPL) في الهند والمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا (NIST) في الولايات المتحدة اللذين يبعد أحدهما عن الآخر نحو 8 000 km لفترة الأيام الجوليانية المعدلة 51 510-51 970. وتمت معايرة الوصلة NPL/NIST TWSTFT بواسطة النظام GPS.

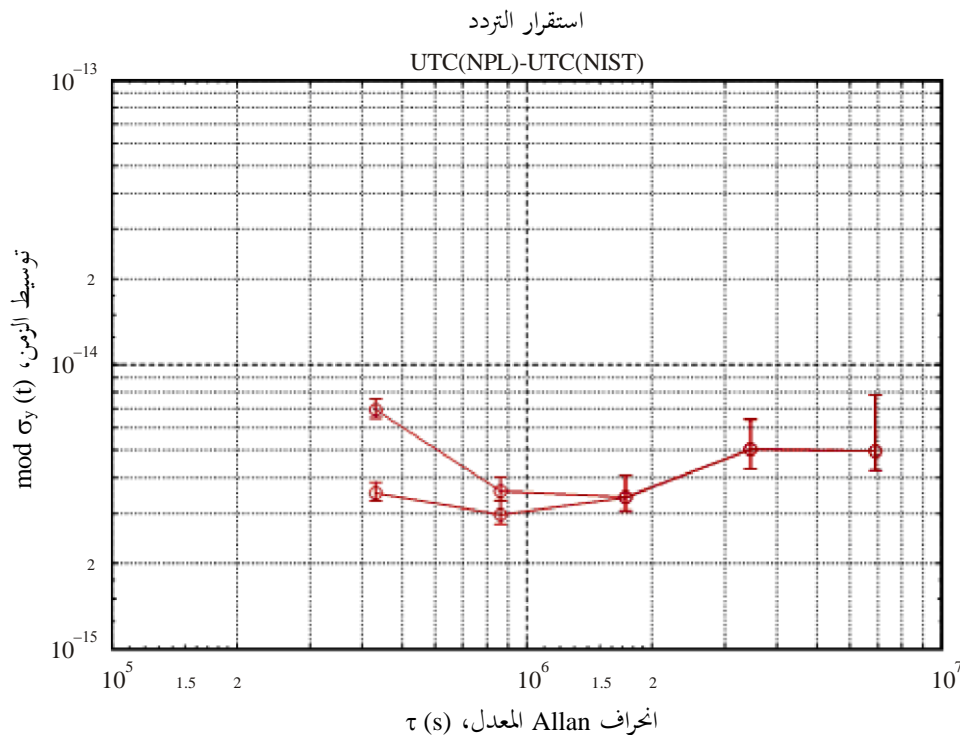
والبيانات TWSTFT التي جمعت خلال ثلاث دورات أسبوعية، أيام الإثنين والأربعاء والجمعة، جرى استيفاؤها خطياً لمراعاة تواريخ معايير التوقيت TAI (يوم جولياني معدل ينتهي بـ 4 و 9). وجرى حساب الملاحظة المشتركة GPS باستخدام تقويمات IGS الدقيقة وخرائط IGS الأيونوسفيرية، ثم جرى تمهيدها واستيفاؤها لمراعاة التواريخ القياسية. ولم يلاحظ خلال فترة المقارنة أي انحراف أو تأثير موسمي. وبلغ جذر متوسط تربيع الاختلافات بين الطريقتين لفترة المقارنة مقدار 2,1 نانوثانية.



ومدى عدم اليقين المقدّر لوصلة TWSTFT هو 1 نانوثانية، وذلك المقدّر لنظام GPS هو 2,5 نانوثانية. ولهذا السبب يعتقد أن معظم الضوضاء التي لوحظت في الاختلافات بين الطريقتين تعزى إلى النظام GPS بالملاحظة المشتركة. وهذا ما يؤكد تحليل استقرار التردد بمقدار [UTC(NPL) – UTC(NIST)] الوارد في الشكل 6-14.

الشكل 6-14

يشير انحراف Allan المعدل إلى استقرار التردد في التقنيتين،  
GPS الملاحظة المشتركة (المنحنى الأعلى) و TWSTFT (المنحنى الأسفل)



Sat\_time\_freq-14-06

تُظهر بيانات النظام GPS بالملاحظة المشتركة ضوضاء طور بيضاء نتيجة لطريقة مقارنة توسيط الأزمنة حتى 20 يوماً. وتُظهر بيانات TWSTFT ضوضاء تردد بيضاء تميز سلوك الميقاتيات لتوسيط الأزمنة حتى 5 أيام. وهذا يعني أنه بالنسبة لتوسيط أزمنة 5 أيام ليس لدينا أي ضوضاء إضافية من تقنية TWSTFT. وبعبارة أخرى تتم مقارنة ميقاتيتين واقعتين في المختبر NPL والمعهد NIST على مسافة 8 000 km بتقنية TWSTFT دون ضوضاء في نقل الوقت لتوسيط أزمنة 5 أيام. وتبين بيانات النظام GPS ضوضاء التقنية. وتُظهر التقنية TWSTFT ضوضاء الميقاتية.

#### 10.14 خاتمة

يبدو أن البيانات تدعم استخدام تقنية TWSTFT باعتبارها تقنية عالية الدقة لمقارنة الوقت والتردد. ولئن كانت تكاليف إنشاء تقنية TWSTFT عالية في البداية، فإن سهولة اختزال البيانات أيضاً يجعلها بديلاً جذاباً لغيرها من التقنيات. وبما أن إمكانات هذه التقنية يجري توسيعها الآن فقط لتشمل تجارب من قبيل تتبع طور الموجة الناقلة، فإن تقنية TWSTFT تبشر بتوفير قدرات محسنة في المستقبل.

## المراجع

- ASHBY N. and ALLAN, D. W. [1979] Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale. *Radio Science*, **14**, p. 649-669.
- 20<sup>th</sup> BIPM TWSTFT Report, ([http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg\\_twstft.html](http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg_twstft.html)).
- De JONG, G. *et al.* [1995] Results of the Calibration of the Delays of Earth Stations for TWSTFT using the VSL Satellite Simulator Method. *Proceedings of the 27th Annual PTI Meeting*, p. 359-372.
- De JONG, G. and POLDERMAN, M. C. [1994] Automated Delay Measurement System for an Earth Station for Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer. *Proceedings of the 26th Annual PTI Meeting*, December 6-8, Reston, Virginia, USA, p. 305-317.
- De JONG, G. and VAN BEMMELEN, R. [2001] Evaluation and Improvement of the Calibration of a TWSTFT Station Using SATSIM. *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual PTI Meeting*, p. 256-262.
- FLOCK, W. L., SLOBIN, S. D. and SMITH, E. K. [1982] Propagation effects on radio range and noise in earth-space telecommunications. *Radio Science*, **17**, No. 6, 1982, p. 1411.
- HARTL, Ph., GIESCHEN, N., MOSSENER, K. M., SCHAFER, W. and WENDE, C. M. [1983] High Accuracy Global Time Transfer via Geosynchronous Telecommunication Satellites with MITREX. *Journal of Flight Sciences and Space Research*, **7**, p. 335-342.
- JESPERSEN, J. [May 31-June 2, 1989] Impact of Atmospheric Non-reciprocity on Satellite Two-Way Time Transfers. *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*, Denver, Colorado, USA, p. 186-192.
- KIRCHNER, D. [1991] Two-Way Time Transfer via Communication Satellites, *Proceedings of the IEEE (Special Issue on Time and Frequency)*, **79**, p. 186-192.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, Ch., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W. and UHRICH, P. [1993] Comparison of GPS Common-View and Two-Way Satellite Time Transfer over a Baseline of 800 km.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., HETZEL, P., SORING, A. and LEWANDOWSKI, W. [1998] Calibration of Three European TWSTFT Stations using a Portable Station and Comparison of TWSTFT and GPS Common-View Measurement Results. *Proceedings of the 30<sup>th</sup> PTI Meeting*, p. 365-375.
- KIRCHNER, D. [1999] Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT): Principle, Implementation and Current Performance. *Review of Radio Science 1996-1999*, Oxford University Press.
- KLEPCZYNSKI, W. [1995] Two Way Satellite Time Transfer", Tutorial at PTI Meeting.
- PETIT, G. and WOLF, P. [1993] Relativistic Theory for Picosecond Time Transfer in the Vicinity of the Earth. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> Annual PTI Meeting*, p. 205-214.
- VEENSTRA, L. B. [1990] International Two-Way Satellite Time Transfers Using INTELSAT Space Segments and Small Earth Stations. *Proceedings of the 22nd Annual PTI Meeting*, December 4-6, 1990, Vienna, Virginia, USA, p. 383-398.

## الفصل 15

## خلاصة نشر التوقيت والتردد

يمكن نقل الوقت والتردد بواسطة عدد من التقنيات تبعاً للدقة المطلوبة. والوسيلة الرئيسية لنقل الوقت على وجه الدقة هي النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS). ويستخدم هذا النظام كوكبة من السواتل يحتوي كل منها على مقياسات ذرية. وتحدد هذه المقياسات الذرية المحمولة في الفضاء، مشفوعة بمعايير السيزيوم في محطة الرصد، توقيت النظام GPS، أي توقيت المزامنة على مستوى النظام. ويعتمد استخدام التوقيت GPS لنشر الوقت والتردد على استقرار ودقة توقيت النظام GPS لتحديد المواقع. ويتطلب الاستقبال المنفعل المتآون من سواتل GPS متعددة أن تكون هذه السواتل متزامنة بدقة فيما بينها، بدرجة أقل من الخطأ المتوقع من قياس المدى الزائف الساتلي إفرادياً إزاء مستقبل المستعمل. ويحدد استقرار فرادى مقياسات السواتل بين التحديثات أو إعادة المزامنة مع التوقيت GPS خطأ المزامنة في النظام. والعوامل المحددة الأخرى في دقة نقل الوقت المنفعل إلى المستعملين هي انتشار إشارات النظام GPS وأجهزة المستقبل، وعدم اليقين من موقع المستعمل، وتخالف رسالة تصحيح سائل التوقيت العالمي المنسق UTC (لدى مرصد البحرية الأمريكية USNO). ويأخذ نقل الوقت GPS شكلين:

- 1 يُستخدم نقل الوقت المنفعل في الغالب من قبل مستعملي الاتصالات الراديوية؛
- 2 يُستخدم نقل الوقت بالمشاهدة المشتركة ونقل الوقت بالمشاهدة المشتركة في طور الموجة الحاملة للعمليات العلمية وعمليات مقياس الزمن الدولية.

والعملية المنفصلة هي الأسلوب الأولي لنقل الوقت بالنسبة للغالبية العظمى من المستعملين. وفي إطار الخدمة المنفصلة تتوفر إرسالات النظام GPS على امتداد مساحة واسعة بصرف النظر عن موقع الاستقبال لدى المستعمل. وتحدد معلومات التوقيت إلى جانب الموقع والسرعة في العمليات الحسابية للمستعمل أثناء الطيران أو أي عمليات متنقلة أخرى. وتبعاً لذلك، فإن دقة تقديرات نقل الوقت تعتمد على مدى عدم اليقين من موقع المستعمل في عملية الملاحة. وبالنسبة لمواقع ثابتة مع معرفة دقيقة للموقع يمكن توقع نتائج شبه مثالية بأقل من 10 نانوثانية، أي  $10^{-8}$  s. ويتوقف الاستعمال الفعال لهذه المقدرة في المنصات المتنقلة على الأجهزة لدى المستعمل والقدرة على استخدام معلومات التوقيت عالية الدقة.

ولنقل الوقت GPS بين مراكز التوقيت في جميع أنحاء العالم والأوساط العلمية تُستخدم تقنية أخرى تعرف باسم المشاهدة المشتركة، ودرافتها المشاهدة المشتركة في طور الموجة الحاملة. والمشاهدة المشتركة هي تقنية من نقطة إلى نقطة بدلاً من البث العام كما في حالة الاستقبال المنفعل التي نوقشت أعلاه. وهنا يتبادل موقعان يتطلبان نقل الوقت قياسات مأخوذة من فرادى سواتل النظام GPS. ويفضي التفريق بين بيانات التتبع هذه إلى مقارنة دقيقة بين المقياسيتين المحليتين في الموقعين. وتزيد قياسات طور الموجة الحاملة من دقة قياس المدى الزائف أو قياس المدى بين المستقبل وكل سائل. وتنجم زيادة الدقة عن قياس طور الموجة الحاملة للتردد الراديوي الغامض بدلاً من قياس تشكيل شفرة الضوضاء شبه العشوائية (PRN) غير الغامض. ويفضي غموض إشارة التردد الراديوي المستمر في قياس تردد دقيق بدلاً من قياسات الوقت. ويجري تطوير تقنيات لاستخدام طور الموجة الحاملة GPS في العمليات من جانب الخدمة الدولية للنظام العالمي للملاحة الساتلية (IGS). وكانت محطات الخدمة IGS ومراكز التحليل المشاركة قادرة على إجراء مقارنات تردد على درجة من الدقة دون النانوثانية بين شبكة المحطات المشاركة. وقد أشارت النتائج حتى الآن إلى أنه لتحقيق القدرة الكاملة لهذه التقنية لا بد من تطوير التكنولوجيا لمعايرة أنظمة الاستقبال عند مستويات البيكوثانية. ومعايرة نظم الاستقبال الجيوديسية باستخدام محاكيات النظام GPS هو موضوع جهد لا بأس به في المختبر الوطني المرجعي. وتنطوي هذه التقنية، التي توفر السيطرة الكاملة على جميع شروط استقبال الإشارة، على إمكانيات معايرة مطلقة لتحديد نقل حقبة الزمن.

إن أكثر تقنيات نقل الوقت دقة المستخدمة عموماً هي تقنية نقل الوقت والتردد في اتجاهين. وتستفيد هذه التقنية من قدرة سواتل الاتصالات على نقل إشارات التوقيت في كلا الاتجاهين بحيث تكاد تزيل فعلياً تأخر الإرسال وتأخر الأجهزة المألوف بين الموقعين المشاركين. وهي تقنية من نقطة إلى نقطة تُستخدم في المقام الأول بين مراكز التوقيت الأجهزة بالمعدات المناسبة. ودقة القياس الوحيد لنقل وحيد في اتجاهين هي ما يقرب من 10 بيكوثانية. وتتوقف الدقة الكلية على تأخر الأجهزة غير المتبادل وتأخر المرسل المستجيب الساتلي واحتمال حركة الساتل أثناء عملية النقل. ومقادير دقة نقل الوقت في حدود 100 بيكوثانية ممكنة نظرياً إذا أمكن تخفيض الأخطاء غير المتبادلة بما فيه الكفاية.

والطرائق التي نوقشت أعلاه هي نظم لنقل الوقت مباشرة. وهي إما مصممة خصيصاً لنقل الوقت، مثل TWSTFT، أو أنها تستخدم مزامنة الوقت كوسيلة أساسية للتشغيل، مثل نظام GPS. وتنطوي أنظمة الاتصالات المحلية الأخرى، التي تتطلب المزامنة من أجل بروتوكولات اتصالات CDMA أو TDMA ونقل البيانات، على إمكانية استخدامها لتوزيع معلومات التوقيت بما يشمل منطقة التغطية المحلية الخاصة بها، والمستمدة من نظام GPS أو المصادر الأخرى باعتبارها آلية بديلة لنقل الوقت.

ويرد في الجدولين 1-15 و 2-15 أدناه موجز للأداء بموجب التقنيات المختلفة وذلك بمثابة موجز إجمالي للتقنيات والتكنولوجيات التي نوقشت في هذا الكتيب.

الجدول 1-15

## تقنيات نقل الوقت في النظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS)

معلمة	GPS منفعل (SPS) عادي	GPS منفعل (PPS) دقيق	مشاهدة مشتركة (قاعدة قصيرة)	مشاهدة مشتركة (قاعدة طويلة)	مشاهدة مشتركة متقدمة	طور الموجة الحاملة	WAAS/GPS
الدقة (ns) r.m.s. (المدى)	$\leq 8 \text{ ns}^{(1), (2)}$ wrt UTC(USNO)	$\leq 8 \text{ ns}$ wrt UTC(USNO)	3-8 ns (نقطة إلى نقطة)	5-10 ns (نقطة إلى نقطة)	$\leq 5 \text{ ns}$ (نقطة إلى نقطة)	$\leq 5-10 \text{ ns}$ (نقطة إلى نقطة)	$\leq 20 \text{ ns}$ w.r.t. UTC(USNO)
مصادر الخطأ الرئيسية	تيسرية إنتقائية، تعدد مسارات، ميقائية، أيونوسفير، تروبوسفير، معدات مستعمل، بيئة تردد راديوي، حرارة (مستقبل وهوائي)	تعدد مسارات، ميقائية، معدات مستعمل، بيئة تردد راديوي، حرارة (مستقبل وهوائي)	معدات مستعمل، تبادلية مسارات، تقويم، بيئة (حرارة)			معدات مستعمل، تعدد مسارات، زلات دورات	ميقائية، تقويم
الاستقرار (القيمة @ المتوسط)	$\leq 8 \text{ ns @ 13 min}$ $\approx 1 \text{ ns @ 1 day}$	$\leq 5 \text{ ns @ 13 min}$ $\approx 1 \text{ ns @ 1 day}$	$\leq 4 \text{ ns @ 1 h}$ $\leq 1 \text{ ns @ 48 h}$	$\leq 4 \text{ ns @ 1 h}$ $\leq 1 \text{ ns @ 48 h}$	$\leq 4 \text{ ns @ 1 h}$ $\leq 1 \text{ ns @ 48 h}$	$\leq 1 \text{ ns @ 6 min}$	$> \text{SPS}$ منفعل
قابلية المعايرة	3-5 ns إزاء مستقبل نظامي						3-5 ns إزاء مستقبل نظامي
معدل العينة	1 per 13 min	1 per 5 min 1 per 13 min	1 per 13 min	$\geq 1 \text{ per 13 min}$ (معالج لاحقاً)	1 per 5 min 1 per 13 min	مماثل للاستقبال المنفعل والمشاركة المشتركة	لم يتحدد بعد
التيسرية	وقت فعلي		تبعاً للجدول الزمني			تبعاً للمعالجة	وقت فعلي

(1) موقع ثابت وموضع 3D معروف إلى  $m 1 < 3D$ .

(2) تبعاً لمعدات المستعمل.

الجدول 2-15  
التقنيات ثنائية الاتجاه الساتلية والأرضية على السواء

معلمة	TWSTFT	ليف LAN-WAN	ليف مسافة طويلة	إتصال في إتجاهين (عبر الهواء)
الدقة (نقطة إلى نقطة) (المدى) (ns r.m.s)	$\approx 1$ ns (Ku-Band) $\approx 1$ ns (X-Band) $\approx 3$ ns (C-Band)	$\leq 1$ ns @ 200 km	$\leq 2$ ns @ 8 000 km	$\leq 5$ ns @ 200 km
مصادر الخطأ الرئيسية	تبادلية المسار، معايرة النظام، البيئة (حرارة)	تبادلية المسار، البيئة (حرارة)		تبادلية المسار، معايرة النظام، البيئة (حرارة)
الاستقرار (Value @ Avg’ g time)	200 ps @ 1 h 100 ps @ 12 h	100 ps rms	لم يتحدد بعد	لم يتحدد بعد
قابلية المعايرة (المستوى بالنانوثانية)	$\approx 1$		$\approx 2$	$\approx 3$ -5
معدل العينة	1 per 5 min		مستمر	
حسن التوقيت	شبه الوقت الفعلي			



ISBN 978-92-61-13306-1

SAP id



طبع في سويسرا  
جنيف، 2015

إصدار الصور: [www.itu.int](http://www.itu.int)