

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R TF.538-4
(2017/07)

قياسات عدم الاستقرار العشوائي للتردد والتوقيت (الطور)

السلسلة TF

إرسالات الترددات المعيارية
وإشارات التوقيت

تمهيد

يوظف 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 والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني

جنيف، 2018

© ITU 2018

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصية ITU-R TF.538-4

قياسات عدم الاستقرار العشوائي للتردد والتوقيت (الطور)

(2017-1994-1992-1990-1978)

مجال التطبيق

يمكن تحديد خصائص أوجه عدم الاستقرار في التردد والطور بواسطة عمليات عشوائية يمكن تمثيلها إحصائياً في ميدان فورييه الترددي أو في الميدان الزمني. وتقدم هذه التوصية مختلف الطرق والأساليب لتحديد خصائص أوجه عدم الاستقرار هذه للتردد والطور.

مصطلحات أساسية

أوجه عدم الاستقرار العشوائي، تغاير آلن، قياس التوقيت، قياسات إحصائية، طور، تردد.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن هناك حاجة للغة ملائمة يمكن بواسطتها الإبلاغ عن خصائص عدم الاستقرار لمصادر التردد المعياري والتوقيت وأنظمة القياس؛

ب) أن التغاير التقليدي لا يتقارب بالنسبة لبعض أصناف عدم الاستقرار العشوائي للتردد والتوقيت؛

ج) أن المختبرات والمراسد والصناعات الكبرى والمستهلكين العامين قد اعتمدوا بالفعل على بعض توصيات اللجنة التقنية المعنية بالتردد والتوقيت التابعة للجمعية المعنية بالمعدات والقياس في معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين (IEEE) وعلى وجود المعيار IEEE 1139-2008 بشأن "تعريف المعايير لدى معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين المتعلقة بالكميات الفيزيائية لقياس التردد الأساسي والتوقيت - عدم الاستقرار العشوائي"؛

د) أن قياسات عدم استقرار التردد والتوقيت ينبغي أن تستند إلى مبادئ نظرية سليمة، وقابلة للاستعمال بسهولة، ويمكن تفسيرها مباشرة؛

هـ) أن من المستحسن أن يكون الحصول على قياسات عدم الاستقرار للتردد والتوقيت ممكناً بواسطة تجهيزات بسيطة،

توصي

1 بأن تحدد خصائص عدم الاستقرار العشوائي للتردد المعياري وإشارات التوقيت بواسطة القياسات الإحصائية $S_y(f)$ أو $S_\phi(f)$ أو $S_x(f)$ في الميدان الترددي، و $\sigma_y(\tau)$ و $\sigma_\phi(\tau)$ و $\text{Mod. } \sigma_y(\tau)$ و $\sigma_x(\tau)$ و $\sigma_y(t, \tau)$ و $\sigma_x(t, \tau)$ و TheoBR في الميدان الزمني كما هو محدد أدناه:

1.1 تمثل $S_y(f)$ قياس عدم الاستقرار $y(t)$ للتردد المقيس في الميدان الترددي؛ أي الكثافة الطيفية أحادية الجانب ($0 < f < \infty$) لعدم استقرار التردد المقيس $y(t) = (v(t) - v_0)/v_0$ ، حيث $v(t)$ التردد الآتي للموجة الحاملة، و v_0 التردد الاسمي؛

2.1 تمثل $S_\phi(f)$ قياس عدم الاستقرار للطور $\phi(t)$ في الميدان الترددي؛ أي الكثافة الطيفية أحادية الجانب ($0 < f < \infty$) لعدم استقرار الطور $\phi(t)$ على تردد فورييه f ؛

3.1 تمثل $S_x(f)$ قياس عدم استقرار الطور معبراً عنه بوحدات الوقت (الطور-الوقت) $x(t)$ في الميدان الترددي؛ أي الكثافة الطيفية أحادية الجانب ($0 < f < \infty$) لعدم استقرار الطور-الوقت $x(t)$ ، حيث $x(t) = \phi(t)/2\pi v_0$ ، والعلاقة بين $x(t)$ و $y(t)$ هي $y(t) = dx(t)/dt$

4.1 وفيما يلي العلاقات بين الكثافات الطيفية الواردة أعلاه:

$$(1) \quad S_y(f) = \frac{f^2}{v_0} S_\phi(f) = 4\pi^2 f^2 S_x(f)$$

حيث تكون أبعاد الكثافات $S_x(f)$ و $S_\phi(f)$ و $S_y(f)$ على التوالي Hz^{-1} و $\text{Rad}^2 \text{Hz}^{-1}$ و $\text{s}^2 \text{Hz}^{-1}$ ؛

5.1 يتمثل قياس عدم الاستقرار للتردد المقيس $y(t)$ في الميدان الزمني بالانحراف المعياري ثنائي العينة، $\sigma_y(\tau)$ ، والانحراف المعياري ثنائي العينة المعدل، $\text{Mod. } \sigma_y(\tau)$ ، وتغاير TheoBR كما هو محدد في الملحق 1؛

6.1 يمثل $\sigma_x(\tau)$ قياس عدم استقرار التوقيت في الميدان الزمني كما هو محدد في الملحق 1؛

7.1 يمثل الانحراف المعياري ثنائي العينة، $\sigma_y(t, \tau)$ ، قياس تغيرات عدم الاستقرار $y(t)$ للتردد المقيس في الميدان الزمني كما هو محدد في الملحق 1؛

2 بضرورة الاعتراف بالظواهر غير العشوائية عند الإشارة إلى القياسات الإحصائية لعدم استقرار التردد والتوقيت، وعلى سبيل المثال:

1.2 ينبغي الإشارة إلى أي ارتباط زمني ملاحظ بين القياسات الإحصائية؛

2.2 ينبغي تحديد أسلوب قياس السلوك المنتظم (مثلاً الحصول على تقدير للانحراف الخطي للتردد انطلاقاً من معاملات الارتداد الخطي بطريقة المربعات الأقل إلى عدد M من قياسات التردد، لكل منها أسلوبه المحدد لحساب القيمة المتوسطة أو الفاصل الزمني τ بين العينات وعرض النطاق (f_h) ؛

3.2 ينبغي الإشارة إلى الحساسيات البيئية (مثلاً ارتباط التردد و/أو الطور بدرجة الحرارة والمجال المغنطيسي والضغط البارومتري وما إلى ذلك)؛

3 بضرورة تحديد جميع معلمات القياس ذات الصلة عند الإشارة إلى قياس لعدم استقرار التردد والتوقيت:

1.3 طريقة إجراء القياسات؛

2.3 خصائص الإشارة المرجعية؛

3.3 تردد الإشارة الاسمي v_0 ؛

4.3 عرض نطاق منظومة القياس f_h واستجابة مرشاح التمرير المنخفض المقابل؛

5.3 الوقت الإجمالي للقياس أو عدد القياسات M ؛

6.3 أساليب الحساب (مثلاً تفاصيل تتعلق بنوافذ التأخير لدى تقدير الكثافات الطيفية للقدرة انطلاقاً من بيانات الميدان الزمني، أو افتراض وجود وقت ميت عند تقدير الانحراف المعياري ثنائي العينة $(\sigma_y(\tau))$ ؛

7.3 الثقة في التقدير؛

4 بضرورة تقديم رسم بياني أو عبارة تحليلية لقياسات عدم الاستقرار للتردد والتوقيت، وبأن يشمل هذا الرسم أو هذه العبارة فترات الثقة عند الاقتضاء (أي $S_y(f)$ و $S_\phi(f)$ و $S_x(f)$ كدالة في التردد f ؛ و/أو $\sigma_y(\tau)$ و $\text{Mod. } \sigma_y(\tau)$ و $\sigma_x(\tau)$ كدالة في τ ؛ و/أو $\sigma_y(t, \tau)$ كدالة في t و τ).

الملحق 1

تحديد خصائص ضوضاء التردد والطور

1 تعريف المصطلحات

يمكن تحديد خصائص عدم الاستقرار للتردد والطور بواسطة عمليات عشوائية يمكن تمثيلها إحصائياً في ميدان فورييه الترددي أو في الميدان الزمني. ويرتبط الانحراف الآني $y(t)$ للتردد المقيس عن التردد الاسمي ν_0 بتقلبات الطور الآني $\varphi(t)$ حول الطور الاسمي $2\pi \nu_0 t$ بالعلاقة التالية:

$$(2) \quad y(t) = \frac{1}{2\pi \nu_0} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi \nu_0}$$

$$x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi \nu_0}$$

حيث $x(t)$ هي تغير الطور معبراً عنه بوحدات الزمن.

2 ميدان فورييه الترددي

في ميدان فورييه الترددي، يمكن تعريف عدم استقرار التردد بواسطة الكثافات الطيفية أحادية الجانب (حيث يتراوح مدى ترددات فورييه من 0 إلى ∞) مثل:

$$S_y(f) \text{ of } y(t), S_\varphi(f) \text{ of } \varphi(t), S_{\dot{\varphi}}(f) \text{ of } \dot{\varphi}(t), S_x(f) \text{ of } x(t), \text{ etc.}$$

ترتبط هذه الكثافات الطيفية بالمعادلات التالية:

$$(3) \quad S_y(f) = \frac{f^2}{\nu_0} S_\varphi(f)$$

$$(4) \quad S_{\dot{\varphi}}(f) = (2\pi f)^2 S_\varphi(f)$$

$$(5) \quad S_x(f) = \frac{1}{(2\pi \nu_0)^2} S_\varphi(f)$$

وتستخدم غالباً الكثافات الطيفية ذات القانون الأسّي كنماذج معقولة للتقلبات العشوائية في المذبذبات الدقيقة. ومن المسلم به عملياً أن هذه التقلبات العشوائية بالنسبة للكثير من المذبذبات هي مجموع خمس عمليات مستقلة من الضوضاء يمكن بعدد قليل من القيود تمثيلها بالمعادلة التالية:

$$(6) \quad S_y(f) = \begin{cases} \sum_{\alpha=-2}^{+2} h_\alpha f^\alpha & \text{for } 0 < f < f_h \\ 0 & \text{for } f > f_h \end{cases}$$

حيث h_α هي أعداد ثابتة، و α أعداد صحيحة، و fh تردد القطع المرتفع لمرشاح تمرير منخفض. وتعتبر المعادلات (3) و(4) و(5) صحيحة ومتسقة بالنسبة لأنواع الضوضاء المستقرة بما في ذلك ضوضاء الطور. وتتم إزالة انحراف التردد العالي بالقيود المفروضة على المعادلة (6). ويرد في الجدول 1 تحديد هوية وخصائص عمليات الضوضاء الخمسة، ويبيّن الشكل 1. ومن الناحية العملية، يكفي فقط اثنتين أو ثلاثة من عمليات الضوضاء لوصف تقلبات التردد العشوائية في مذبذب محدد؛ ويمكن إهمال العمليات الأخرى.

3 الميدان الزمني

يمكن تحديد عدم الاستقرار العشوائي للتردد في الميدان الزمني بواسطة عدد من تباينات العينة. ويعرف الجذر التربيعي لتباير العينة باسم الانحراف، وهو القيمة الإحصائية التي تعطى عادة.

A انحراف آلن $\sigma_y(\tau)$

يمثل قياس عدم الاستقرار العشوائي للتردد الانحراف المعياري ثنائي العينة ويساوي الجذر التربيعي للتباير ثنائي العينة ذي الوقت الميت الصفري $\sigma_y^2(\tau)$ ويعرّف على النحو التالي:

$$(7) \quad \sigma_y^2(\tau) = 1/2 \langle (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \rangle$$

حيث:

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = \frac{x_{k+1} - x_k}{\tau} \quad \text{and} \quad t_{k+1} = t_k + \tau \quad (\text{عينات متجاورة})$$

وترمز $\langle \rangle$ إلى القيمة المتوسطة عبر زمن لانهائي. ويطلق غالباً على القياس الوارد في المعادلة (7) اسم تباير آلن (AVAR). فلنفترض أن x_k و x_{k+1} هما قياسان متبقيان أُخذاً في اللحظتين t_k و $t_{k+1} = t_k + \tau$ حيث $k = 1, 2, \dots$ ، وأن $1/\tau$ هي معدل اعتيان ثابت يعطي وقتاً ميتاً صفرية بين قياسات التردد. ويقصد بكلمة "متبقي" أن التأثيرات المنهجية المعروفة قد تمت إزالتها. وإذا كان معدل الاعتيان الأولي محدد بالقيمة $1/\tau_0$ ، يمكن عموماً الحصول على تقدير أكثر فعالية للكمية $\sigma_y(\tau)$ باستخدام ما يسمى "التقدير المتداخل". ويتم الحصول على هذا التقدير بحساب المعادلة (8).

$$(8) \quad \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2n)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2$$

حيث N عدد القياسات الأصلية التي يبلغ التباعد الزمني فيما بينها τ_0 ($N = M + 1$)، حيث M عدد قياسات التردد الأصلية التي تبلغ فترة اعتيانها τ_0 و $\tau = n \tau_0$.

وقد تبين في الحالة التي يوجد فيها وقت ميت بين قياسات انحراف التردد ويتم تجاهل ذلك في المعادلة (7)، أن قيم الاستقرار الناتجة (التي لم تعد تبايرات آلن) تتعرض للتحيز (باستثناء حالة ضوضاء الترددات البيضاء) لأن قياسات التردد يعاد تجميعها لتقدير الاستقرار في حالة $n \tau_0$ ($n > 1$). وقد تمت دراسة هذا التحيز ونشرت بعض الجداول لتصحيحه.

أما في الحالة التي لا يوجد فيها وقت ميت بين القياسات، فيمكن عندئذ دمج القيم \bar{y}_i الأصلية لإنشاء مجموعة من القيم \bar{y}_k .

$$\bar{y}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} \bar{y}_i$$

الجدول 1

الخصائص الوظيفية لعمليات الضوضاء المستقلة الخمس في حالة عدم استقرار التردد في المذبذبات

خصائص الميل في الرسم البياني اللوغارتمي-اللوغارتمي					وصف عملية الضوضاء
الميدان الزمني			الميدان الترددي		
$\sigma_x^2(\tau)$	Mod. $\sigma_y^2(\tau)$	$\sigma_y^2(\tau)$	$S_\phi(f)$ or $S_x(f)$	$S_y(f)$	
η	μ'	μ	$\beta \equiv \alpha - 2$	α	
3	1	1	4-	2-	تردد السير العشوائي
2	0	0	3-	1-	تردد الارتعاش
1	1-	1-	2-	0	تردد الضوضاء البيضاء
0	2-	2-	1-	1	طور الارتعاش
1-	3-	2-	0	2	طور الضوضاء البيضاء

$$S_y(f) = h_\alpha f^\alpha \quad \alpha = -\mu - 1, -2 \leq \mu < 2 \quad \sigma_y^2(\tau) \sim |\tau|^\mu$$

$$S_\phi(f) = v_0^2 h_\alpha f^{\alpha-2} = v_0^2 h_\alpha f^\beta \quad \beta \equiv \alpha - 2; \eta \equiv \mu' + 2$$

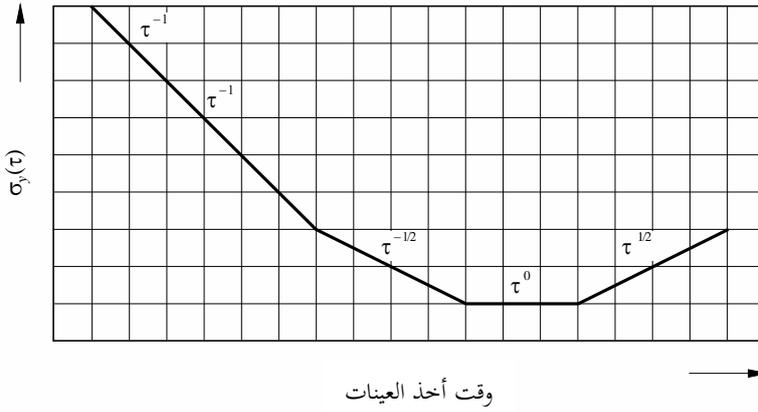
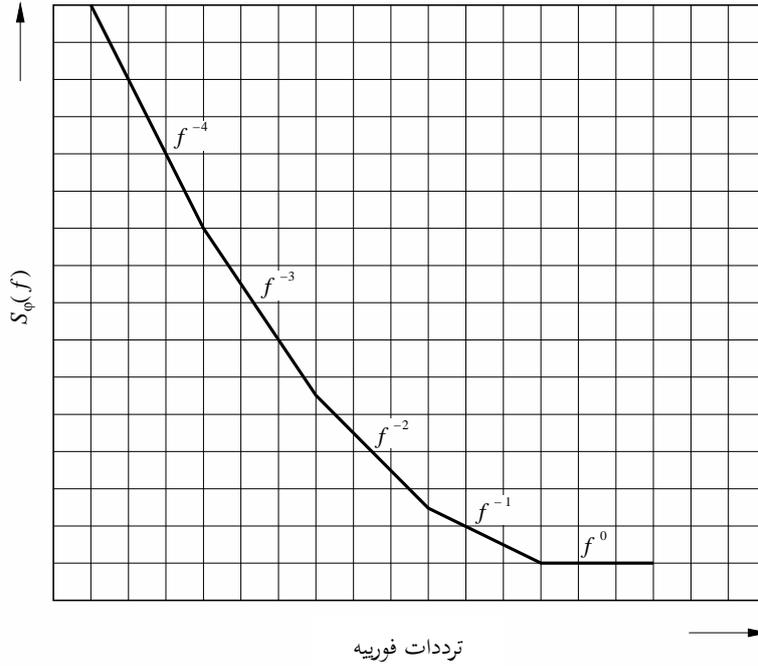
$$S_x(f) = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^{\alpha-2} = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^{\beta\alpha} = -\mu' - 1$$

$$\text{Mod. } \sigma_y^2(\tau) \sim |\tau|^{\mu'}$$

$$\sigma_x^2(\tau) \sim |\tau|^\eta$$

الشكل 1

خصائص الميل في عمليات الضوضاء الخمس المستقلة
(مقياس لوغاريتمي-لوغاريتمي)



TF.0538-01

يمكن الحصول على "تقدير متداخل" للقيمة $\sigma_y(\tau)$ من المعادلة:

$$(9) \quad \sigma_y(\tau) = \left| \frac{1}{2(M - 2n + 1)} \sum_{k=1}^{M-2n+1} (\bar{y}_{k+n} - \bar{y}_k)^2 \right|^{1/2}$$

وبالتالي يمكن التأكيد بأن $\sigma_y(\tau)$ هي دالة في τ انطلاقاً من مجموعة واحدة من البيانات وبطريقة بسيطة جداً.

ويظهر عادةً الرسم البياني للقيمة $\sigma_y(\tau)$ مقابل τ بالنسبة لمعيار ترددي سلوكاً مكوناً من عدة عناصر كما هو مبين في الشكل 1. ويعبر الجزء الأول، حيث $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1/2}$ (تردد الضوضاء البيضاء) و/أو $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$ (ضوضاء بيضاء أو طور الارتعاش) عن

الخصائص الأساسية لضوضاء المعيار. وفي الحالة التي تكون فيها $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$ ، ليس من العملي التقرير ما إذا كان المذبذب مضطرباً بسبب ضوضاء الطور البيضاء أو بسبب ضوضاء الارتعاش البيضاء.

ويرد أدناه أساليب بديلة مقترحة. ويعتبر ذلك بمثابة تقييد لحدوى $\sigma_y(\tau)$ إذا كان الهدف دراسة طبيعة مصادر الضوضاء الموجودة في المذبذب. ويعتبر التحليل في الميدان الترددي ملائماً أكثر لترددات فورييه التي تزيد على 1 Hz تقريباً. فقانون τ^{-1} و/أو $\tau^{-1/2}$ يظل سارياً مع تزايد مدة حساب القيمة المتوسطة إلى أن يتم الوصول إلى ما يعرف باسم "الحد الأدنى" للارتعاش، حيث تكون $\sigma_y(\tau)$ مستقلة عن مدة حساب القيمة المتوسطة τ . ونجد هذا السلوك في جميع معايير التردد تقريباً؛ وهو يعتمد على معيار التردد الخاص ولا يمكن فهمه تماماً في أساسه الفيزيائي. ومن الأمثلة على الأسباب المحتملة "للحد الأدنى" للارتعاش تقلبات الجهد في مصدر التغذية الكهربائية، وتقلبات المجال المغنطيسي، والتغيرات في مكونات المعيار، والتغيرات في قدرة الموجات الصغيرة. ويظهر المنحنى أخيراً تدهوراً في الاستقرار مع تزايد مدة حساب القيمة المتوسطة. ويحدث ذلك عادة في أوقات تتراوح بين عدة ساعات وعدة أيام بحسب النوع الخاص للمعيار.

B انحراف آلان المعدل $\text{Mod. } \sigma_y(\tau)$

وضع "تغاير آلان المعدل (MVAR)"، أو $\text{Mod. } \sigma_y^2(\tau)$ ، الذي يتميز بأنه يسفر عن تبعيات مختلفة لقيمة τ في حالة ضوضاء الطور البيضاء وضوضاء طور الارتعاش، حيث تكون تبعية انحراف آلان المعدل (MDEV)، $\text{Mod. } \sigma_y(\tau)$ ، وفق $\tau^{-3/2}$ و τ^{-1} على التوالي. وتقدر قيمة $\text{Mod. } \sigma_y(\tau)$ عن طريق حساب الجذر التربيعي للمعادلة التالية:

$$(10) \quad \text{Mod. } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2 \tau^2 n^2 (N - 3n + 1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2$$

حيث:

N : العدد الأساسي للقياسات المتغيرة زمنياً التي يساوي التباعد بينها τ_0
 $\tau = n \tau_0$ وقت العينات التي تم اختيارها

ونجد في الدراسات التقنية بحث لخصائص التقدير ودرجة الثقة به. وقد وضعت أساليب الاحتمال الأقصى لتقدير قيمة $\sigma_y(\tau)$ بالنسبة للنماذج المحددة للضوضاء البيضاء وضوضاء السير العشوائي. وقد أثبت النموذجان فائدتهما بالنسبة لأوقات العينات التي تزيد على بضعة ثوان في حالة معايير حزمة السسزيوم.

C الانحراف الزمني $\sigma_x(\tau)$

يمكن قياس عدم الاستقرار للتوقيت في الميدان الزمني في حالة عمليات الضوضاء الخمس المستقلة المبينة في الشكل 1 باستخدام فرق الرتبة الثانية للقيم المتوسطة المتجاورة. وهذا القياس مرتبط أيضاً بقيمة $\text{Mod. } \sigma_y^2(\tau)$.

$$(11) \quad \sigma_x^2(\tau) = (\tau^2 \text{Mod. } \sigma_y^2(\tau)) / 3$$

$$(12) \quad \sigma_x^2(\tau) = (1/6) \langle [\bar{x}_{k+2n} - 2\bar{x}_{k+n} + \bar{x}_k]^2 \rangle$$

حيث $(dx/dt) = y$ و $\tau = n \tau_0$. وبالتالي فإن $\sigma_x(\tau)$ يمثل الانحراف الزمني (TDEV). وترمز الحاصرتان " $\langle \rangle$ " إلى متوسط زمني لانحائي، بينما ترمز الشرطة " $-$ " فوق x إلى القيمة المتوسطة عبر الفترة τ . وتكون القيم المتوسطة الثلاث المستخدمة في معادلة الرتبة الثانية قيماً متجاورة. وبالتالي فمن أجل قيمة معينة k في معادلة الرتبة الثانية الواردة أعلاه، تبلغ المدة التي تشغلها هذه القيم المتوسطة 3τ .

وفيما يلي العلاقات التي تربط الكثافة الطيفية بتغير الزمن:

$$S_x(f) \sim f^\beta$$

$$(13) \quad \sigma_x^2(\tau) \sim \tau^\eta$$

$$\beta = -\eta - 1$$

وبما أن الأنواع العادية لضوضاء القياس متمحورة حول $\eta = 0$ ، فإن ارتباط تغير الزمن TVAR مع τ يقترب من الصفر (وهذه سمة مطلوبة للقياس الجيد). ومن بين الخصائص الأخرى لهذا القياس ما يلي:

- أنه مساوٍ للانحراف المعياري التقليدي لقياسات فرق الزمن عندما يكون $\tau = \tau_0$ ، في حالة تشكيل طور الضوضاء البيضاء (WPM)؛
- أنه يساوي الانحراف المعياري لمتوسط قياسات فرق الزمن عندما يكون $\tau = N\tau_0$ (طول البيانات)، في حالة تشكيل طور الضوضاء البيضاء (WPM)؛
- أنه متقارب ومحكم الإعداد بالنسبة للعمليات العشوائية التي تحدث عادة في قياس التوقيت والتردد؛
- أن التبعية للوقت τ تبين نموذج القانون الأسّي للكثافة الطيفية الذي يعتبر مناسباً للبيانات؛
- أن سعة $\sigma_x(\tau)$ عند قيمة معينة τ ، إلى جانب افتراض أحد النماذج الخمسة للقانون الأسّي للكثافة الطيفية $(\beta = -4, -3, -2, -1, 0)$ ، يقدم معلومات كافية لتقدير المستوى المقابل في الميدان الترددي بالنسبة لأي قياس من القياسات المعيارية للكثافة الطيفية.

وقد جرت دراسة مسألة تقدير استقرار الميقاتيات الإفرادية انطلاقاً من مقارنة القياسات أدت إلى اقتراح نموذج عام متسق لمعالجة قياسات فرق الزمن، من دون وضع افتراض مسبق بانعدام الترابط بين الميقاتيات.

D انحراف آلان الدينامي $\sigma_y(t, \tau)$

انحراف آلان الدينامي (DADEV) هو قياس لتغيرات عدم الاستقرار العشوائي في الميدان الزمني، ويساوي الجذر التربيعي لتغير آلان الدينامي (DAVAR)، ويعرّف على النحو التالي:

$$(14) \quad \sigma_y^2(t, \tau) = \frac{1}{2(T_w - 2\tau)} \int_{t - \frac{T_w}{2} + \tau}^{t + \frac{T_w}{2} - \tau} E \left[(\bar{y}(t' + \tau) - \bar{y}(t'))^2 \right] dt'$$

حيث ترمز E إلى القيمة المتوقعة التي يتم الحصول عليها كإجمالي المتوسط عبر عدد لا متناه من عمليات التنفيذ التجريبية، و T_w طول نافذة التحليل. ويمكن إعطاء تقدير لتغير DAVAR بالمعادلة التالية:

$$(15) \quad \sigma_y^2(n, k) = \frac{1}{2k^2\tau_0^2(N_w - 2k)} \sum_{m=n - \frac{N_w}{2}}^{m=n + \frac{N_w}{2} - 2k - 1} (x_{m+2k} - 2x_{m+k} + x_m)^2$$

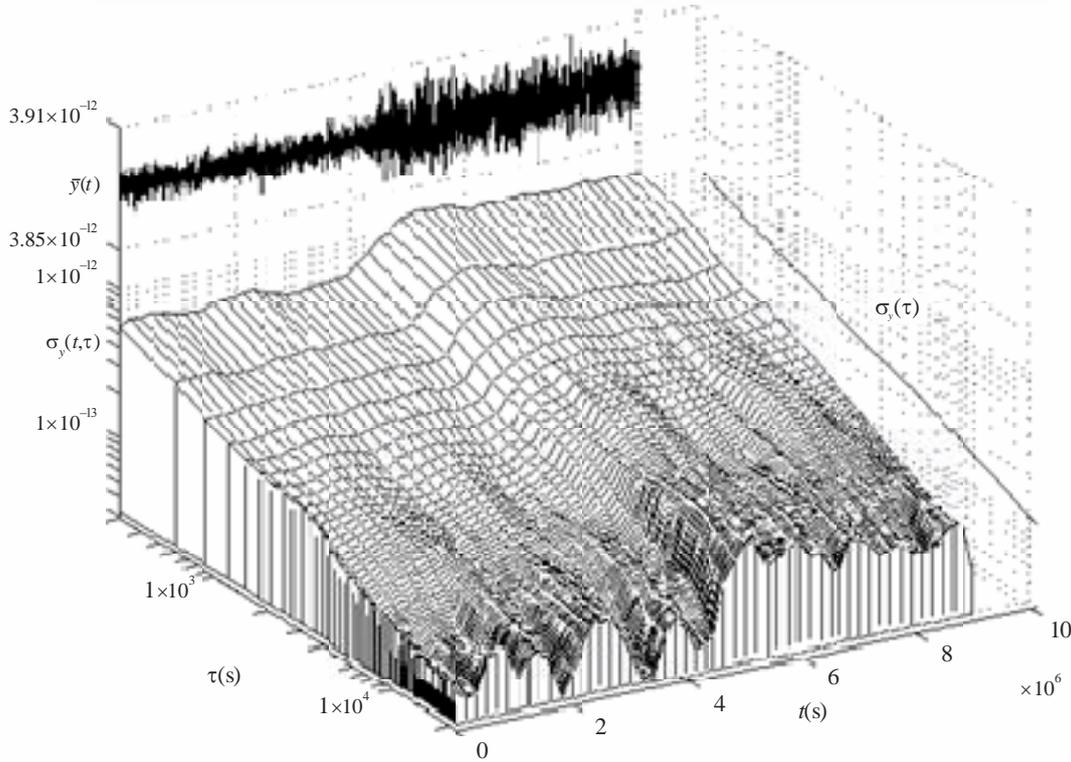
حيث $t = n\tau_0$ و $\tau = k\tau_0$ ، و $T_w = N_w\tau_0$ ، و N_w عدد زوجي.

وتظهر الشواهد التجريبية أن عدم استقرار الميقاتيات والمذبذبات، التي يعتبر تغير آلان القياس المعياري الخاص بها، يمكن أن يتغير مع الوقت بسبب عدة عوامل من قبيل درجة الحرارة والرطوبة والارتجاجات وتأثيرات الجاذبية والإشعاعات. ويقوم تغير آلان الدينامي بقياس هذه التغيرات الزمنية لعدم استقرار الميقاتيات.

ويبين الشكل 2 متوسط انحراف التردد $\bar{y}(t)$ لضوضاء التردد البيضاء التي يزداد تغيرها بشكل فجائي. ويُظهر التغير DAVAR، الذي يظهر جذره التربيعي $\sigma_y(t, \tau)$ في الرسم البياني الشبكي، التغير في تباير الضوضاء، بينما يقوم تغير آلن، الذي يظهر جذره التربيعي $\sigma_y(\tau)$ في الرسم البياني الجانبي، بحساب القيمة المتوسطة لتغير التباير.

الشكل 2

تغير آلن الدينامي (DAVAR) لتغير التباير (الرسم البياني الشبكي)



TF.0538-02

E أداة التقدير الطويل الأجل TheoBR

تمثل نظرية التباير رقم 1، المعروفة باسم Theo1، أداة تقدير طويل الأجل لتباير آلن (AVAR)، وتتحول مع إزالة التحيز إلى ما يعرف بالتباير TheoBR الذي هو عبارة عن Theo1 مقترن بإلغاء تحيز خفيف بالنسبة لتباير العينة آلن. وتقوم Theo1 بحساب متوسط الأخطاء المربعة المسموحة لفرق الزمن من الرتبة الثانية x_i في دفعة بيانات معينة N_x وتعطي استقراراً للتردد أطول بنسبة 50% من أطول مدة ممكنة τ للتباير AVAR. وبالتالي فإن Theo1 و TheoBR يمثلان نوعاً جديداً من الإحصاءات الوصفية التي تتسم بدرجات مكافئة من الحرية أعلى بكثير من الصيغة المتداخلة لتباير العينة آلن.

تعريف Theo1

$$(16) \text{ Theo1}(m, \tau_0, N_x) := \frac{1}{0.75(N_x - m)(m\tau_0)^2} \times \sum_{i=1}^{N_x - m} \sum_{\delta=0}^{m-1} \frac{1}{\left(\frac{m-\delta}{2}\right)} \left[\left(x_i - x_{i-\delta+\frac{m}{2}} \right) + \left(x_{i+m} - x_{i+\delta+\frac{m}{2}} \right) \right]^2$$

$$\text{for } m \text{ even, } 10 \leq m \leq N_x, \tau = 0.75m\tau_0$$

يتسم انحراف Theo1، المعروف باسم Theo1-dev، بأنه انحراف دون تحيز بالنسبة لانحراف آلن الخاص بضوضاء الترددات FM البيضاء. ويكون Theo1-dev قليل التحيز بالنسبة لأنواع الأخرى من الضوضاء. ويمكن إزالة هذا التحيز بطريقة آلية باستخدام

خوارزمية تقوم بحساب القيمة المتوسطة للتحيز بين Theo1 وتغاير آلن في المنطقة τ التي يتداخل فيها الاثنان واستخدام هذه القيمة لتصحيح theo1. وبالتالي يصبح لدينا:

$$(17) \quad TheoBR = \frac{E[*AVAR]}{E[*Theo1]} \times Theo1$$

حيث يتم حساب *AVAR و*Theo1 فوق مدى $m\tau_0$ يتداخل عبره تغاير العينات AVAR و Theo1 ويتم اختيارهما بحيث يمثلان تحيز AVAR عند قيم τ الكبيرة وليس القيم الصغيرة. ويكون تصحيح التحيز ثابتاً ولا يتعلق بالوقت τ .

تعريف TheoBR

$$(18) \quad TheoBR(m, \tau_0, N_x) := \left[\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n \frac{AVAR(m=9+3i, \tau_0, N_x)}{Theo1(m=12+4i, \tau_0, N_x)} \right] \times Theo1(m, \tau_0, N_x)$$

$$\text{where } n = \left[\frac{0.5N_x}{3} - 3 \right]$$

تعريف TheoH

تغاير النظرية المختلطة، المعروف باسم التغاير TheoH، هو عدد إحصائي مختلط يجمع قيم الصيغة المتداخلة للتغاير AVAR في المدى القصير وتغاير TheoBR لتقدير استقرار التردد على الأجل الطويل عبر $\frac{3}{4}$ دفعة البيانات التي يبلغ طولها N_x ، وهو كما ذكر سابقاً الإشارة أطول بنسبة 50% من طول البيانات التي يمكن أن يستعملها التغاير AVAR.

$$(19) \quad TheoH(m, \tau_0, N_x) := \begin{cases} AVAR(m, \tau_0, N_x), & \text{for } 1 \leq m \leq \frac{k}{\tau_0} \\ TheoBR(m, \tau_0, N_x), & \text{for } \frac{k}{0.75\tau_0} \leq m \leq N_x - 1, m \text{ even} \end{cases}$$

حيث k هي $0.2T \leq \tau$ ، و $AVAR(m, \tau_0, N_x)$ تتسم بقدر كاف من الثقة.

إن الحد الأعلى العادي للمدة τ الخاصة بالتغاير AVAR يبلغ 20% من دفعة البيانات T . وبما أن TheoBR أشد كثافة من AVAR من الناحية الحسابية، لم تدرج في التعريف الوارد أعلاه إلا قيم m الكبيرة وليس جميع هذه القيم. وعادة لا توجد ضرورة لحساب جميع قيم m ؛ إذ يكفي استخدام مسافات من ثمانيات أو عشرات لتحديد خصائص الضوضاء العشوائية. ولفصل قيم AVAR عن قيم TheoBR، أدخلت فجوة بقيمة $\frac{0.8T}{3\tau_0} < m < \frac{0.2T}{\tau_0}$ ولكن يمكن ملؤها إذا أردنا حساب جميع قيم m أو عدد أكبر منها. ويساوي انحراف TheoH الجذر التربيعي لتغاير TheoH، ويعرف باسم TheoH-dev.

4 التحويل بين الميدان الترددي والميدان الزمني

عموماً إذا كانت الكثافة الطيفية لتقلبات التردد المقيس $S_y(f)$ معروفة، يمكن حساب التغاير الثنائي العينة على النحو التالي:

$$(20) \quad \sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

$$(21) \quad \text{Mod. } \sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^6(\pi f \tau)}{(n \pi f \tau)^2 \sin^2(\pi f \tau_0)} df$$

$$(22) \quad \sigma_x^2(\tau) = \frac{8}{3} \int_0^{f_h} S_x(f) \frac{\sin^6(\pi f \tau)}{n^2 \sin^2(\pi f \tau_0)} df$$

وعلى وجه التحديد، ففي حالة نموذج القانون الأسّي الذي تعطيه المعادلة (6)، يتبع القياس في الميدان الزمني أيضاً القانون الأسّي الذي يشتق من المعادلتين (6) و(11).

$$(23) \quad \sigma_y^2(\tau) = h_{-2} \frac{(2\pi)^2}{6} \tau + h_{-1} 2 \log_e 2 + h_0 \frac{1}{2\tau} + h_1 \frac{1.038 + 3 \log_e(2\pi f_h \tau)}{(2\pi)^2 \tau^2} + h_2 \frac{3f_h}{(2\pi)^2 \tau^2}$$

وتمثل القيم h_α خصائص ضوضاء تردد المذبذب. وقد نلاحظ بالنسبة للأعداد الصحيحة (كما يبدو غالباً أن الحال هي كذلك) أن:

$$\mu = -\alpha - 1 \quad \text{for } -3 \leq \alpha \leq 1$$

$$\mu \sim -2 \quad \text{for } \alpha \geq 1$$

حيث:

$$\sigma_y^2(\tau) \sim \tau^\mu$$

وقد تم التحقق من عملية التحويل بطريقة تجريبية وعن طريق إجراء الحسابات. وترد في الجدول 2 معاملات التحويل بين قياسات عدم استقرار التردد من الميدان الزمني إلى الميدان الترددي ومن الميدان الترددي إلى الميدان الزمني.

الجدول 2

تحويل قياسات عدم استقرار التردد من الكثافات الطيفية
في الميدان الترددي إلى التغيرات في الميدان الزمني وبالعكس (لأجل $1 \ll 2\pi f_h \tau$)

$S_x(f) =$	$S_\phi(f) =$	$S_y(f) =$	$\sigma_y^2(\tau) =$	وصف عمليات الضوضاء
$\frac{3.636}{A} [\tau^{-3} \sigma_x^2(\tau)] f^{-4}$	$\frac{v_0^2}{A} [\tau^{-1} \sigma_y^2(\tau)] f^{-4}$	$\frac{1}{A} [\tau^{-1} \sigma_y^2(\tau)] f^{-2}$	$A [f^2 S_y(f)] \tau^1$	تردد السير العشوائي
$\frac{0.741}{AB} [\tau^{-2} \sigma_x^2(\tau)] f^{-3}$	$\frac{v_0^2}{B} [\tau^0 \sigma_y^2(\tau)] f^{-3}$	$\frac{1}{B} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^{-1}$	$B [f S_y(f)] \tau^0$	تردد الارتعاش
$\frac{1}{AC} [\tau^{-1} \sigma_x^2(\tau)] f^{-2}$	$\frac{v_0^2}{C} [\tau^1 \sigma_y^2(\tau)] f^{-2}$	$\frac{1}{C} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^0$	$C [f^0 S_y(f)] \tau^{-1}$	تردد أبيض
$0.89 [\tau^0 \sigma_x^2(\tau)] f^{-1}$	$\frac{v_0^2}{D} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^{-1}$	$\frac{1}{D} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^1$	$D [f^{-1} S_y(f)] \tau^{-2}$	طور الارتعاش
$\frac{1}{\tau_0 f_h} [\tau \sigma_x^2(\tau)] f^0$	$\frac{v_0^2}{E} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^0$	$\frac{1}{E} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^2$	$E [f^{-2} S_y(f)] \tau^{-2}$	طور أبيض

$$D = \frac{1,038 + 3 \log_e (2\pi f_h \tau)}{4\pi^2} \quad A = \frac{4\pi^2}{6}$$

$$E = \frac{3f_h}{4\pi^2} \quad B = 2 \log_e 2$$

$$C = 1/2$$

وقد رسمت في الشكل 1 خصائص الميل المتعلقة بالعمليات الخمس المستقلة للضوضاء في الميدانين الترددي والزمني (مقياس لوجارتمي-لوجارتمي).

5 حدود الثقة في قياسات الميدان الزمنية

لتقدير فاصل الثقة الزمني أو عمود الخطأ في نمط غاوسي للضوضاء يتميز بقيمة معينة $\sigma_y(\tau)$ تم الحصول عليها من عدد محدود من العينات، يمكن استخدام العبارة التالية (مع قيم تقديرية غير متداخلة):

$$(24) \quad \text{Confidence Interval } I_\alpha \simeq \sigma_y(\tau) \cdot \kappa_\alpha \cdot M^{-1/2} \quad \text{for } M > 10$$

حيث:

M : إجمالي عدد نقاط البيانات المستخدمة في التقدير

α : كما هي معرفة في القسم السابق

$$0,99 = \kappa_1 = \kappa_2$$

$$0,87 = \kappa_0$$

$$0,77 = \kappa_{-1}$$

$$0,75 = \kappa_{-2}$$

وكمثال على النموذج الغاوسي مع $M = 100K$ ، و $\alpha = -1$ (ضوضاء تردد الارتعاش)، و $\sigma_y(\tau = 1 \text{ s}) = 10^{-12}$ ، يمكن كتابة ما يلي:

$$(25) \quad I_\alpha \simeq \sigma_y(\tau) \cdot \kappa_\alpha \cdot M^{-1/2} = \sigma_y(\tau) \cdot (0,77) \cdot (100)^{-1/2} = \sigma_y(\tau) \cdot (0,077)$$

ما يسفر عن:

$$(26) \quad \sigma_y(\tau = 1 \text{ s}) = (1 \pm 0,08) \times 10^{-12}$$

وقد وضعت أيضاً طريقة معدلة تشمل الوقت الميت بين أزواج القياسات وتظهر تأثير الترابط الذاتي لتقلبات التردد. وتطبق فواصل الثقة على "التقديرات غير المتداخلة". وفي حالة "التقديرات المتداخلة" يكون فاصل الثقة الزمني أصغر ويمكن احتسابه. أما التحيز الناجم عن تطبيق التغيرات ثنائي العينة على الفواصل الزمنية التي تم الحصول عليها بربط القياسات الناجحة مع الوقت الميت فقد حدّد بدلالة نوع الضوضاء. وقد يكون هذا التحيز كبيراً.

وقد تم تحديد تأثير طبيعة الترشيح التماثلي الذي يحد من قدرة ضوضاء الإشارة المعنية حول ترددها الاسمي، ولا سيّما بالنسبة لاستخدام مرشاح تمرير منخفض بدلاً من مرشاح تمرير نطاقي مركزه التردد الاسمي.

وتم حساب درجة حرية التقديرات المتداخلة. وقد اشتقت بطريقة نظرية ورسمت لقانون الأطياف الأسي من أجل تقدير فاصل الثقة الزمني للانحراف المعياري ثنائي العينة. ويساوي فاصل الثقة الزمني للانحراف المعياري ثنائي العينة $\sigma_y(\tau)$:

$$(27) \quad \frac{\sqrt{(d.f.) \hat{\sigma}_y^2(\tau)}}{\chi_{P_1}} < \sigma_y(\tau) < \frac{\sqrt{(d.f.) \hat{\sigma}_y^2(\tau)}}{\chi_{P_2}}$$

حيث:

χ_{P_1} و χ_{P_2} : قيم العتبتين المتويتين لتوزيع تريبع كاي؛

“^” : تقدير أو التغير ثنائي العينة المقيس من مجموعة منتهية.

وإذا كان $\alpha = +2$ يكون التحسن في d.f. أفضل بنحو n مرات مما هو بالنسبة لحالة التقديرات المتداخلة. ويزداد التحسن أيضاً بشكل كبير إذا كان $\alpha = +1$. أما نسبة درجات الحرية فتساوي 2 إذا كان $\alpha = 0$ ؛ و 1,3 إذا كان $\alpha = -1$ ، و 1,04 إذا كان $\alpha = -2$.

6 تطبيقات يحتمل أن تكون مضللة للقياسات الإحصائية

استحدث كل واحد من القياسات الإحصائية المتعددة المحددة هنا لأغراض معينة، وقد لا تكون مفيدة لأغراض أخرى.

ويستند انحراف آلن وانحراف آلن المعدل والانحراف الزمني على فروقات الوقت المتعلقة بالكمية $x(t)$ وهي بالتالي غير حساسة لحدودية من الرتبة الأولى. ومع ذلك يمكن أن يؤدي إلغاء حدودية من الرتبة الثانية أو من رتبة أعلى إلى تخفيض القيم عند قيم τ المرتفعة ($\tau > 0,2T$).

لذلك إذا كان لا بد من إزالة هذه الحدودية قبل إجراء الحسابات الإحصائية، يوصى بشدة باستخدام قياسات إحصائية غير حساسة لإزالة المنحنى، كالقياسات التي تستند إلى فروقات أعلى رتبة للكمية $x(t)$. ويعتبر صنف القياسات الإحصائية التي تستخدم فروقات من الرتبة الثانية أو أعلى غير حساس للتغيرات الخطية في البيانات.

ويمكن أن تسفر القياسات في الميدان الترددي والميدان الزمني عن نتائج غير صحيحة في حالة وجود بيانات متباعدة بشكل غير منتظم. وبوجه عام، تشكل الفجوات بين البيانات معلومات ناقصة. وتستخدم عملية الاستكمال الداخلي في بعض أساليب التعامل مع هذه البيانات، بينما تفترض أساليب أخرى أن البيانات الناقصة تساوي الصفر، وقد تؤدي كلها إلى تأثيرات مشوهة. وينبغي فهم الطرق التي تقوم بموجها البرمجيات بمعالجة البيانات غير المنتظمة التباعده.

7 خلاصة

إن الطرق الإحصائية الواردة المتبعة لوصف عدم الاستقرار للتردد والطور والنموذج المقابل للقانون الأسّي للكثافة الطيفية تكفي عموماً لوصف عدم استقرار المذبذب. وتقدم الصيغة الحالية أساليب إضافية للتعامل مع أوجه عدم الاستقرار في الميدان الزمني والتي تختلف مع الوقت، وتوسع من حساب عدم الاستقرار في الميدان الزمني ليشمل جزءاً أكبر من طول البيانات.

ولا تغطي الأساليب الواردة هنا التغيرات غير العشوائية (الحتمية أو المنهجية). وقد تكون هذه التغيرات دورية أو رتيبة. ومن المقرر تحليل التغيرات الدورية بواسطة الأساليب المعروفة للتحليل التوافقي. أما التغيرات الرتيبة فيمكن وصفها بواسطة مصطلحات الانجراف الخطي أو الانجراف من الرتبة الأعلى.