الاتحـــاد الدولـــي للاتصـــالات

# ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

**التوصية ITU-R TF.2118-0**
**(2018/12)**

# نقل إشارات التوقيت النسبي

**السلسلة TF**

## إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت

الاتحاد الدولي للاتصالات

## تمهيد

يضطلع 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 لمدى 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 الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار 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)

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

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

*النشر الإلكتروني*
جنيف، 2019

التوصية ITU-R TF.2118-0

# نقل إشارات التوقيت النسبي

(2018)

## مجال التطبيق

تضع هذه التوصية الخوارزميات والإجراءات التقليدية العامة التي يجب استعمالها لدى مقارنة الميقاتيات على سطح الأرض وعلى متن منصات بعيدة عن الأرض ولكن داخل النظام الشمسي. وتُحدد هذه العبارات صراحةً في نظرية النسبية العامة المقبولة حالياً لتشكيل الأساس للأنظمة المرجعية المكانية-الزمانية. ومن المتوخى أن تستعمل هذه الخوارزميات والإجراءات لمقارنة الميقاتيات على متن سواتل الأرض والمركبات الفضائية فيما بين الكواكب وسطوح أجرام النظام الشمسي.

## مصطلحات أساسية

النسبية، نقل إشارة التوقيت، انتشار الإشارة، الميقاتية، نظام إحداثيات

## التوصيات والقرارات ذات الصلة

التوصيات ITU-R TF.1011-1 وITU-TF.767-2 وITU-R TF.374-5.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

*إذ تضع في اعتبارها*

*أ )* أنه يستحسن الحفاظ على تنسيق إشارات التوقيت والترددات المعيارية على منصات تعمل على مقربة من سطح الأرض وفي النظام الشمسي؛

*ب)* أن الوسائل الدقيقة لنقل إشارات التوقيت والترددات مطلوبة من أجل تلبية احتياجات الاتصالات والملاحة والعلوم في المستقبل على مقربة من سطح الأرض وداخل النظام الشمسي؛

*ج)* أن الميقاتيات تخضع لتغيرات التوقيت والترددات تبعاً للمسير بسبب حركتها وظروف كمون الثقالة التي تعمل فيها؛

*د )* أنه ينبغي أن يحدد بوضوح الأساس المفاهيمي لنقل إشارات التوقيت والترددات؛

*هـ)* أن الإجراءات اللازمة لنقل إشارات التوقيت والترددات على مقربة من سطح الأرض وعبر الأجرام السماوية والمركبات الفضائية في النظام الشمسي تقتضي استعمال الخوارزميات الرياضية التي تحتسب التأثيرات النسبية؛

*و )* أن متطلبات الإحكام والدقة في نقل إشارات التوقيت والترددات على مقربة من سطح الأرض وفي النظام الشمسي تتوقف على خصوصية التطبيق،

*توصي*

باستخدام الخوارزميات الرياضية التي تأخذ في الاعتبار التأثيرات النسبية في نقل إشارات التوقيت والترددات على النحو الوارد في الملحق 1، حسب الاقتضاء.

# الملحق 1

## جدول المحتويات

*الصفحة*

## 1 الهدف

الغرض من الملحق 1 تحديد المفاهيم والإجراءات الأساسية التي يتعيّن تطبيقها لمواجهة تأثيرات النسبية في أنظمة ضبط الوقت، والملاحة، والعلوم، والاتصالات. ومن المزمع أن يعمل الملحق كمرجع مناسب لبعض التطبيقيات، بما في ذلك المقارنة بين التوقيتات التي تسجلها الميقاتيات على متن المركبات الفضائية التي تدور في مدار حول الأرض، وفي الفضاء الواقع بين الكواكب وعلى سطح الكواكب، مع التوقيتات التي تسجلها ميقاتيات على الأرض. ويستند الملحق إلى اصطلاحات الهيئة الدولية المعنية بدوران الأرض (IERS) (2010)، وكتيب قطاع الاتصالات الراديوية بشأن نقل إشارات التوقيت والتردّدات ونشرها ساتلياً (2010)، ونلسون، جريدة ميترولوجيا (2011)، وبتيت وولف، جريدة ميترولوجيا (2005). ويمكن للمستعملين الرجوع إلى هذه المنشورات والمراجع المستشهَد بها هنا لمزيد من التفاصيل.

## 2 الإطار النسبي

النظام المرجعي هو بنية رياضية تستخدم لتوصيف أحداث مكانية–زمانية توصف بالإحداثيات الأربعة $x^\alpha = (x^0, x^i) = (x^0, x^1, x^2, x^3)$. وتأخذ الأدلة اليونانية القيم 0 و1 و2 و3 بينما تأخذ الأدلة اللاتينية القيم 1 و2 و3 ودليل مكرر ينطوي ضمناً على عملية جمع على هذا الدليل. ويُشير الدليل 0 إلى متغيّر الزمن، والأدلة 1 و2 و3 إلى الإحداثيات المكانية الثلاثة. وهناك إطار مرجعي يتمثل في تحقيق النظام المرجعي الذي يأخذ عادة شكل بيان مصور لمواقع الأشياء وحركتها أو تقويم فلكي.

وأي نظام مرجعي يعد ثابتاً من خلال التمديد المتري لمتجهه $g_{\alpha\beta}(t, x^i)$، بما يمكّن المرء من حساب المسافة المكانية–الزمانية بين حدثين $x^\alpha$ و $x^\alpha + dx^\alpha$:

$$ds^2 = g_{\alpha\beta}\left(t, x^i\right) dx^\alpha dx^\beta \equiv g_{00}\mathrm{c}^2 dt^2 + 2g_{0i}\mathrm{c}dtdx^i + g_{ij}dx^i dx^j. \tag{1}$$

حيث $c$ هي سرعة الضوء

وتعرف قرارات المنظمات العلمية الدولية النظام المرجعي بشكل محدد. وأهم هذه القرارات:

1) قرار الاتحاد الفلكي الدولي (IAU) A4 (1991) الذي يعرّف النظام المرجعي السماوي المتمركز في مركز الكتلة (BCRS) والنظام المرجعي السماوي المتمركز في مركز الأرض (GCRS) وإحداثياتهما الزمنية. ويُدخل قرار الاتحاد الفلكي الدولي B1 (2000) مزيداً من التحسينات على تعريف النظام BCRS.

2) القرار 2 للاتحاد الدولي للجيوديسياء والجيوفيزياء (IUGG) (2007) الذي يعرّف النظام المرجعي الأرضي المتمركز في مركز الأرض (GTRS)، إلى جانب النظام المرجعي الأرضي الدولي (ITRS).

وباختصار؛ فإن النظام BCRS هو نظام للإحداثيات المكانية–الزمانية للنظام الشمسي متمركز في مركز كتلة النظام الشمسي يتم توصيفه بالتمديد المتري للمتجهه المحدد بالقرار B1.3 لعام 2000 للاتحاد IAU (انظر https://www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies). والنظام GCRS هو نظام عطالي متمركز في مركز الأرض (ECI) للإحداثيات المكانية–الزمانية المتمركزة في مركز الأرض بالتمديد المتري للمتجه الموصف أيضاً بنفس القرار للاتحاد IAU. وهو يعرف بحيث لا يتضمن التحويل بين الإحداثيات المكانية للنظامين BCRS وGCRS أي مكون دوران بحيث يكون النظام GCRS غير دوار حركياً بالنسبة للنظام BCRS. والنظام المرجعي الأرضي المتمركز في مركز الأرض (GTRS) هو نظام إحداثيات متمركز في مركز الأرض وثابت بالنسبة للأرض (GCEF).

وفي إطار النسبية العامة، يُشير التوقيت الأصولي ($\tau$) إلى القراءة الفعلية للميقاتية أو التوقيت المحلي في الإطار المرجعي للميقاتية. ويُشير توقيت الإحداثيات ($t$) إلى متغير مستقل في معادلة حركة الأجرام المادية ومعادلات انتشار الموجات الكهرمغنطيسية. وهو إحداثي رياضي في نظام الإحداثيات المكانية–الزمانية رباعي الأبعاد. وخلال حدث معين، يتخذ توقيت الإحداثيات نفس القيمة في كل مكان. ولا تقاس تواقيت الإحداثيات، بل تُحسب من التواقيت الأصولية للميقاتيات. وتعتمد العلاقة بين التوقيت الأصولي وتوقيت الإحداثيات على موضع الميقاتية وحالة حركتها في بيئتها الثقالية وهي تُشتق من تكامل الفاصل المكاني–الزماني. وبمقارنة

التوقيتين الأصوليين لميقاتيتين، يستغنى عن توقيت الإحداثيات في نهاية المطاف. وبالتالي فإن النقل النسبي لإشارة التوقيت بين ميقاتيتين مستقل عن نظام الإحداثيات. ويمكن اختيار نظام الإحداثيات عشوائياً حسب مقتضى الحال.

وبالنسبة للميقاتية المنقولة، فإن الفاصل المكاني–الزماني:

$$ds^2 = g_{00}\, \mathrm{c}^2\, dt^2 + 2\, g_{0j}\, \mathrm{c}\; dt\, dx^j + g_{ij}\, dx^i\, dx^j = -\mathrm{c}^2 d\tau^2 \qquad (2)$$

لذا، فإن $dt = d\tau$ بالنسبة لأي ميقاتية ساكنة في إطار مرجعي عطالي تكون فيه $dx^i = 0$ و$g_{00} = 1$ و$g_{0j} = 0$ و$g_{ij} = \delta_{ij}$. وتوقيت الإحداثيات المنقضي المقابل للتوقيت الأصولي المقاس أثناء نقل الميقاتية بين النقطتين $A$ و$B$ هو:

$$\Delta t = \pm \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{1 + \frac{1}{\mathrm{c}^2}\left(g_{ij} + \frac{g_{0i}\, g_{0j}}{-g_{00}}\right) \frac{dx^i}{d\tau}\frac{dx^j}{d\tau}}\; d\tau \;+\; \frac{1}{\mathrm{c}} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}}\, \frac{dx^j}{d\tau}\, d\tau . \qquad (3)$$

ويكون الفاصل المكاني–الزماني لإشارة كهرمغنطيسية كما يلي:

$$ds^2 = g_{00}\, \mathrm{c}^2\, dt^2 + 2\, g_{0j}\, \mathrm{c}\; dt\, dx^j + g_{ij}\, dx^i\, dx^j = 0 \qquad (4)$$

وسرعة الضوء هي $c$ في كل إطار مرجعي عطالي. ويكون توقيت الإحداثيات المنقضي للانتشار بين النقطتين $A$ و$B$ كما يلي:

$$\Delta t = \pm \frac{1}{\mathrm{c}} \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i}\, g_{0j}}{-g_{00}}\right) dx^i\, dx^j} \;+\; \frac{1}{\mathrm{c}} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}}\, dx^j \qquad (5)$$

## 3 سلالم التوقيت

*سلالم توقيت الإحداثيات*

إن توقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الأرض (TCG) هو نظام إحداثيات أصله في مركز الأرض.

أما التوقيت الأرضي (TT) فهو توقيت إحداثيات في نظام الإحداثيات ECI معدل قياسياً من توقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الأرض بحيث يكاد يمتلك نفس معدل التوقيت الأصولي لميقاتية ساكنة على المجسم الأرضي. وتعرَّف العلاقة بين TCG وTT بحيث $d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG} \equiv 1 - L_G$، حيث $L_G$ تعرف بأنها مقدار ثابت، $L_G \equiv 6{,}969\,290\,134 \times 10^{-10} \approx 60{,}2\ \mu\mathrm{s/d}$. وبناءً على ذلك:

$$\mathrm{TT} = (1 - L_G)\ \mathrm{TCG} \qquad (6)$$

أو

$$\mathrm{TCG} - \mathrm{TT} \;=\; L_G\ \mathrm{TCG} \;=\; \frac{L_G}{1 - L_G}\ \mathrm{TT} \qquad (7)$$

وتوقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة (TCB) هو توقيت الإحداثيات في نظام إحداثيات أصله في مركز كتلة النظام الشمسي. ويأخذ الفارق بين TCG وTCB الشكل:

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{TCG} \;=\; L_C\ \mathrm{TCB} + P(t) + \frac{1}{\mathrm{c}^2}\ \mathbf{v}_E(t) \cdot \mathbf{R}(t) \qquad (8)$$

حيث $L_C = 1 - \langle d\mathrm{TCG}/d\mathrm{TCB}\rangle$، $\langle d\mathrm{TCG}/d\mathrm{TCB}\rangle$ وهي إزاحة متوسطة في المعدل، و$P(t)$ تمثل مجموعة من الحدود الدورية و$\mathbf{v}_E(t)$ هي السرعة التي مركزها الكتلة لمركز كتلة الأرض و$\mathbf{R}(t)$ هو متجه الموقع المعتمد على التوقيت بالنسبة لمركز الأرض.

والتحول الخالص من TCB إلى TT له إزاحة متوسطة في المعدل:

$$\langle d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCB}\rangle = (d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG})\langle d\mathrm{TCG}/d\mathrm{TCB}\rangle = (1 - L_G)(1 - L_C) \equiv 1 - L_B \tag{9}$$

حيث $L_G \equiv 6{,}969\ 290\ 134 \times 10^{-10} \approx 60{,}2\ \mu s/d$ و$L_C = 1{,}480\ 826\ 867\ 41 \times 10^{-8} \approx 1{,}28$ و $L_B = 1{,}550\ 519\ 767\ 72 \times 10^{-8} \approx 1{,}34$ والفارق بين TCB وTT هو:

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{TT} = L_B\,\mathrm{TCB} + (1 - L_G)\left[P(t) + \frac{1}{c^2}\mathbf{v}_E(t)\cdot\mathbf{R}(t)\right] \tag{10}$$

وحقبة التوقيتات TT وTCG وTCB هي January 1, 1977 0 h 32,184 s TAI (JD 2 443 144,5003725).

والتوقيت الدينامي المتمركز في مركز الكتلة (TDB) هو سلم توقيت محول من سلم التوقيت TCB ويعرف بالمعادلة $\mathrm{TDB} \equiv (1 - L_B)\,\mathrm{TCB} + \mathrm{TDB}_0$ حيث $L_B \equiv 1{,}550\ 519\ 768 \times 10^{-8}$ و$\mathrm{TDB}_0 \equiv -65{,}5\ \mu s$ هما قيمتان ثابتتان محددتان. وللتوقيت TDB نفس معدل التوقيت TT.

*سلالم التوقيت الذري*

إن سلم التوقيت الأساسي القائم على الميقاتيات الذرية هو التوقيت الذري الدولي (TAI)، الذي يُحسب في المكتب الدولي للأوزان والمقاييس (BIPM) من المتوسط المرجح لقراءات الميقاتيات الذرية في مختبرات توقيت موزعة في جميع أنحاء العالم. وتتألف العملية من خطوتين: (1) سلم توقيت ذري حر، Echelle Atomique Libre (EAL)، يحسب باستعمال بيانات مقارنة الميقاتيات؛ و(2) تطبق تصحيحات التردد على السلم EAL استناداً إلى قراءات المعايير الترددية الأولية المشغلة في عدد ضئيل من المختبرات، تخفض بتصويبات نسبية على المجسم الأرضي المعرّف بشكل تقليدي. والسلم TAI هو سلم توقيت مرجعي مستمر لا يتم نشره. وبالرغم من أن التوقيت TT هو سلم توقيت منتظم نظراً إلى السلم TAI يشتق سكونياً، فإن التحقيق العملي للتوقيت TT هو $\mathrm{TT} = \mathrm{TAI} + 32{,}184$ s.

وسلم التوقيت الذري لضبط التوقيت المدني هو التوقيت العالمي المنسق (UTC)، الذي يختلف عن التوقيت الذري الدولي (TAI) بعدد صحيح من الثواني. ويُنشر التوقيت العالمي المنسق كل شهر في *الرسالة المعممة T* من المكتب الدولي للأوزان والمقاييس (BIPM) على شكل الاختلافات من فرادى عمليات التحويل المختبرية UTC(*k*)، حيث *k* هو رمز المختبر المعني.

## 4 مقارنة الميقاتيات

*نظام الإحداثيات العطالي المتمركز في مركز الأرض*

إن توقيت الإحداثيات المرتبط بنظام الإحداثيات العطالي المتمركز في مركز الأرض (ECI) هو توقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الأرض (TCG). ومن خلال مُدد بمرتبة $1/c^2$، تكون مكونات الممتد المقياسية في نظام الإحداثيات هذا هي $-g_{00} = 1 - 2U/c^2$ و$g_{0j} = 0$ و$g_{ij} = (1 + 2U/c^2)\,\delta_{ij}$ حيث $U$ هو الكمون التثاقلي.

ويتحصل على ما انقضى من التوقيت TCG في نظام الإحداثيات ECI المقابل لما انقضى من التوقيت الأصولي أثناء انتقال الميقاتية بين النقطتين $A$ و$B$ كالتالي:

$$\Delta t = \int_A^B \left(1 + \frac{1}{c^2}U + \frac{1}{2}\frac{1}{c^2}v^2\right)d\tau\,. \tag{11}$$

و$U$ هو الكمون التثاقلي للأرض عند موقع الميقاتية مع استبعاد كمون الطرد المركزي و$v$ هي *سرعة الميقاتية بالنسبة للمجسم الأرضي.*

ويمكن التعبير عن $U$ على مسافة شعاعية $r$، وخط عرض $\phi$ متمركز في مركز الأرض، وخط طول $\lambda$ كامتداد في التوافقيات الكروية على النحو التالي:

$$U(r,\phi,\lambda)=\frac{GM_E}{r}\left[1+\sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R_E}{r}\right)^n P_{nm}(\sin\phi)\left(C_{nm}\cos m\lambda+S_{nm}\sin m\lambda\right)\right]$$
$$=\frac{GM_E}{r}\left[1-\sum_{n=2}^{\infty}J_n\left(\frac{R_E}{r}\right)^n P_n(\sin\phi)-\sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=1}^{n}\left(\frac{R_E}{r}\right)^n P_{nm}(\sin\phi)(J_{mn}\cos m\lambda+K_{mn}\sin m\lambda)\right], \quad (12)$$

حيث $GM_E$ هو الثابت التثاقلي للأرض و$R_E$ هو نصف القطر الاستوائي للأرض. والعوامل $P_n(\sin\phi)$ هي متعدد حدود ليجندر من الدرجة $n$ والعوامل $P_{nm}(\sin\phi)$ هي دوال ليجندر المرتبطة بها من الدرجة $n$ والرتبة $m$. وخط العرض $\phi_c$ المتمركز في مركز الأرض يتعلق بخط العرض $\phi_g$ المتمركز في مركز الأرض بالعلاقة $\phi_c = (1-f^2)\tan\phi_g$، حيث $f$ هو عامل التسوية.

*الميقاتية الساكنة على المجسم الأرضي*

بالنسبة إلى الميقاتية الساكنة على سطح الأرض الدوار، تقتضي الضرورة احتساب سرعة الميقاتية $\mathbf{v}=\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r}$ في نظام الإحداثيات ECI، حيث $\boldsymbol{\omega}$ هي السرعة الزاوّية للأرض و$\mathbf{r}$ هو موضع الميقاتية. وبالتالي يكون توقيت الإحداثيات (TCG) المنقضي عندما تسجل الميقاتية الوقت الأصولي $\Delta\tau$ كما يلي:

$$\Delta t=\int_A^B\left(1+\frac{1}{\mathrm{c}^2}U+\frac{1}{2\mathrm{c}^2}(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})^2\right)d\tau=\int_A^B\left(1+\frac{1}{\mathrm{c}^2}W_0\right)d\tau, \quad (13)$$

حيث $W_0$ هو كمون الجاذبية مؤلف من مجموع الكمون التثاقلي، $U$ والكمون الدوراني $½(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})^2$، وبما أن كمون الجاذبية، $W_0$، ثابت على سطح المجسم الأرضي، يمكن تقييمه على خط الاستواء ويعطى تقريباً بالمعادلة التالية:

$$W_0\approx\frac{GM_E}{R_E}\left(1+\frac{1}{2}J_2\right)+\frac{1}{2}\omega^2R_E{}^2 \quad (14)$$

*نقل التوقيت*

عند نقل التوقيت من النقطة $Q$ إلى النقطة $P$ بواسطة ميقاتية، فإن توقيت الإحداثيات المنقضي أثناء حركة الميقاتية يكون كالتالي:

$$d\tau,\left[1+\frac{U(\mathbf{r})-\mathrm{Ug}}{\mathrm{c}^2}+\frac{\mathbf{v}(\mathbf{r})^2}{2\mathrm{c}^2}\right]\Delta t=\int_P^Q \quad (15)$$

حيث $U(\mathbf{r})$ هو الكمون التثاقلي عند موقع الميقاتية مع استبعاد كمون الطرد المركزي و$\mathbf{v}(\mathbf{r})$ هي سرعة الميقاتية كما ترى في الإطار المرجعي غير الدوار المتمركز في مركز الأرض و$\mathrm{U_g}$ هي الكمون عند المجسم الأرضي.

*ميقاتية على متن ساتل يدور حول الأرض*

بالنسبة إلى ميقاتية على متن الساتل يدور في مدار حول الأرض، يمكن اعتبار المدار كبلرياً (غير مضطرب) في أول تقدير تقريبي. ويساوي الكمون على مسافة $r$ من مركز الأرض حوالي $U = GM/r$، ويكون توقيت الإحداثيات ($TCG$) المنقضي عندما تسجل الميقاتية التوقيت الأصولي $\Delta\tau$ هو كالتالي تقريباً:

$$\Delta t=\int_A^B\left(1-\frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{GM_E}{2a}+\frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{2GM_E}{r}\right)d\tau\approx\left(1+\frac{3}{2}\frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{GM_E}{a}\right)\Delta\tau+\frac{2}{\mathrm{c}^2}\sqrt{GM_E\,a}\,e\sin E \quad (16)$$

حيث $E$ هو الشذوذ اللاتمركزي المحدد من الشذوذ المتوسط بمعادلة كيبلر، $M\equiv n\Delta t=E-e\sin E$، و$\mathrm{n}$ متوسط الحركة المتحصّل عليها بالمعادلة $n\equiv 2\pi/T=\sqrt{\mathrm{GM}_E/a^3}$، و$T$ هي المدة المدارية و$a$ هي المحور المداري شبه الرئيسي.

ولمقارنة التوقيت الأصولي لميقاتية على متن ساتل يدور حول الأرض مع التوقيت الأصولي لميقاتية ساكنة على المجسم الأرضي، لا بد من تحويل *TCG* إلى *TT*. وبالتالي يمكن الحصول على فاصل التوقيت الأصولي المسجل بميقاتية ساكنة على المجسم الأرضي والمقابل لفاصل التوقيت الأصولي المسجل بميقاتية على متن الساتل كالتالي:

$$\Delta\tau_0 = \left[1 + \frac{3}{2}\frac{1}{c^2}\frac{GM_E}{a} - \frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{GM_E}{R_E}\left(1+\frac{1}{2}J_2\right) - \frac{1}{2\mathrm{c}^2}\omega^2 {R_E}^2\right]\Delta\tau + \frac{2}{\mathrm{c}^2}\sqrt{GM_E\, a}\; e\sin E \tag{17}$$

حيث $J_2$ هي معامل تفلطح الأرض من الدرجة الثانية. والحد الثاني هو تصويب للتغاير في السرعة والكمون نتيجة للاتمركزية المدارية.

في مستوى دقة زمنية أقصر من النانو ثانية، من الضروري أن تؤخذ في الاعتبار الاضطرابات المدارية الناجمة عن توافقيات كمون ثقالة الأرض، وتأثيرات المد والجزر للقمر والشمس، وضغط الإشعاع الشمسي. وعلى هذا المستوى من الدقة، ينتج الاضطراب $J_2$ تغيرات في $\mathbf{r}$ و$\mathbf{v}$ تنتج مؤثرات دورية إضافية بمرتبة 0,1 ns. وللتحسب للاضطراب في $J_2$ تماماً، من الضروري إجراء التكامل العددي للمدار والتكامل العددي للمعادلة (16). وينبغي أيضاً النظر في تأثيرات المد والجزر للقمر والشمس، وضغط الإشعاع الشمسي.

وفي المدارات الأرضية المنخفضة، تُعتبر التوافقيات التثقالية المناطقية والكروية مهمة. ولا يبقى تصحيح اللاتمركزية المعتاد في المعادلة (16) دقيقاً. وفي هذه الحالة، يفضَّل إجراء التكامل للمدار وإجراء التكامل للمعادلة (16) عددياً بما في ذلك التوافقيات ذات المرتبة الأعلى للكمون التثاقلي للأرض.

## 5 نظام الإحداثيات الثابت بالنسبة إلى الأرض والمتمركز في مركز الأرض (ECEF)

من خلال الحدود من الرتبة $1/\mathrm{c}^2$، تكون المكونات المترية كالتالي $g_{00} = 1 - 2\,U/\mathrm{c}^2 - (\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})^2/\mathrm{c}^2 = 1 - 2W_0/\mathrm{c}^2$ و $g_{0j} = (\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})_j/\mathrm{c}$ و$g_{ij} = \delta_{ij}$ . وفي نظام الإحداثيات الثابت بالنسبة إلى الأرض والمتمركز في مركز الأرض، يساوي توقيت الإحداثيات التوقيت الأرضي وتوقيت الإحداثيات المنقضى المتراكم أثناء نقل الميقاتية يكون:

$$\Delta t = \int_A^B \left[1 - \frac{\Delta U(\mathbf{r})}{\mathrm{c}^2} + \frac{1}{2\mathrm{c}^2}v^2\right] d\tau + \frac{1}{\mathrm{c}^2}\int_A^B (\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})\cdot\mathbf{v}\, d\tau\,, \tag{18}$$

حيث $\Delta U(\mathbf{r})$ هو فارق الكمون التثاقلي (بما في ذلك كمون الطرد المركزي) بين موقع الميقاتية عند $\mathbf{r}$ والمجسم الأرضي كما يرى من نظام إحداثيات ثابت بالنسبة إلى الأرض بما يتفق مع الاصطلاح (القرار A4، الاتحاد IAU، 1992)، حيث يكون $\Delta U(\mathbf{r})$ سالباً عندما تكون الميقاتية فوق المجسم الأرضي. وعندما يقل ارتفاع الميقاتية عن 24 km فوق المجسم الأرضي، يمكن تقريب $\Delta U(\mathbf{r})$ بالمكون g*h*، حيث g هي العجلة الإجمالية نتيجة للجاذبية (بما في ذلك العجلة الدورانية للأرض) محددة قيمتها عند المجسم الأرضي. ويطبق هذا التقريب على جميع عمليات النقل الدينامية الهوائية والمقيدة بالأرض. وعندما يزيد الارتفاع *h* عن 24 km يمكن حساب فارق الكمون $\Delta U(\mathbf{r})$ بدقة أكبر كالتالي:

$$\Delta U(\mathbf{r}) = \frac{GM_E}{r} + J_2 GM_E a_1^2\left(\frac{1-3\cos^2\theta}{2r^3}\right) + \omega^2 r^2 \sin^2\frac{\theta}{2} - \mathrm{U_g}. \tag{19}$$

ولنقل التوقيت بدقة 1 ns، ينبغي عدم استعمال هذه المعادلة عل مسافات تتجاوز 000 50 km تقريباً من مركز الأرض.

والتكامل الثاني هو تأثير سانياك (Sagnac) لميقاتية منقولة. ويمكن التعبير عن ذلك على النحو التالي:

$$\Delta t_{\mathrm{Sagnac}} = \frac{\omega \mathrm{R}^2}{\mathrm{c}^2}\int_A^B \cos^2\phi\, d\lambda \;= \frac{2\,\omega\, A_E}{\mathrm{c}^2}, \tag{20}$$

حيث R نصف قطر الأرض وϕ خط العرض وλ خط الطول، و$A_E$ الاسقاط على المستوى الاستوائي للمنطقة التي يكنسها متجه الموضع بالنسبة لمركز الأرض (موجب بالنسبة للاتجاه نحو الشرق وسالب بالنسبة للاتجاه نحو الغرب). ويكون التصحيح موجباً لأي ميقاتية تتحرّك في اتجاه الشرق وسالباً عندما تتحرّك في اتجاه الغرب.

*نقل التوقيت*

عند نقل التوقيت من نقطة A إلى نقطة B بواسطة ميقاتية محمولة، يكون توقيت الإحداثيات المتراكم أثناء النقل كالتالي:

$$\Delta t = \int_A^B \left[ 1 + \frac{\Delta U(\mathbf{r})}{c^2} + \frac{v^2(\mathbf{r})}{2c^2} \right] d\tau + \frac{2\omega}{c^2} A_E \tag{21}$$

حيث تقاس $A_E$ في نظام إحداثيات ثابت بالنسبة إلى الأرض. وحيث أن المساحة $A_E$ قد تم كنسها، فإنها تؤخذ كقيمة موجبة عندما يتحرك إسقاط مسار الميقاتية على المستوى الاستوائي نحو الشرق. وبالنسبة لنقل التوقيت بدقة 1 ns، ينبغي عدم استعمال هذه المعادلة على مسافات تتجاوز 50 000 km تقريباً من مركز الأرض. وينبغي حساب نقل التوقيت على مسافات أبعد من هذه المسافة في نظام الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة.

## 6 نظام الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة

يكون الفاصل الزمني لنظام الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة (TCB) المقابل للفاصل الزمني للتوقيت الأصولي، كما يلي:

$$\mathrm{TCB} = \int_{\tau_0}^{\tau} \left[ 1 + \frac{1}{c^2} U_E(\mathbf{R}) + \frac{1}{2}\frac{1}{c^2} |\dot{\mathbf{R}}|^2 \right] d\tau + \frac{1}{c^2} \int_{\tau_0}^{\tau} \left[ U_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right] d\tau + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot \mathbf{R} \Big|_{\tau_0}^{\tau}, \tag{22}$$

حيث **R** الموضع المتمركز في مركز الأرض للميقاتية، $\mathbf{r}_E$ الموضع المتمركز في الكتلة لمركز كتلة الأرض، $U_E(\mathbf{R})$ كمون نيوتن للأرض، $U_{ext}(\mathbf{R})$ كمون نيوتن الخارجي لجميع الأجسام في النظام الشمسي باستثناء الأرض مقيّم عند الميقاتية و$\mathbf{v}_E$ السرعة المتمركزة في مركز الكتلة لمركز كتلة الأرض. وتنطبق المعادلة (22) على أي ميقاتية في أي مكان بالجوار من الأرض، بما في ذلك الميقاتيات الموجودة على متن ساتل أو على سطح الأرض. وبالنسبة للميقاتية الساكنة على المجسم الأرضي، يكون الحد الأول هو التوقيت TCG. وبالتالي، فإنه بالنسبة للرتبة $1/c^2$، يكون فارق توقيت الإحداثيات بين TCB وTCG كالتالي:

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{TCG} = \frac{1}{c^2} \int_{t_0}^{t} \left[ U_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right] dt + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E(t) \cdot \mathbf{R}(t). \tag{23}$$

وبالنسبة لنقل التوقيت بين جرم في النظام الشمسي والأرض، يلزم إجراء عمليتي تحويل. التحويل الأول من TT إلى TCB والثاني من TCB إلى التوقيت على جرم النظام الشمسي $T_{SSB}$. ونظراً إلى أن TCB مشترك في عمليتي التحويل، فإنه يحذف في حساب الفارق $T_{SSB}$–TT. ويكون التحويل من TCB إلى TT كالتالي:

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{TT} \approx (L_C + L_G)\,\mathrm{TCB} + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot \mathbf{R} \tag{24}$$

وبالمثل، يتحصل على التحويل من توقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة TCB إلى التوقيت $T_{SSB}$ كالتالي:

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{T}_{SSB} \approx (L_{CSSB} + L_{SSB})\,\mathrm{TCB} + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_{SSB} \cdot \mathbf{R}. \tag{25}$$

وفي حالة كوكب المريخ، $L_{CSSB} = L_{CM} = 0{,}972 \times 10^{-8} \approx 0{,}84$ ms/d، $L_{SSB} = L_M \equiv W_{0M}/c^2 = 1{,}403 \times 10^{-10} \approx 12{,}1$ µs/d حيث $W_{0M}$ كمون الجاذبية على المريخ.

## 7 انتشار إشارة كهرمغنطيسية

*نظام الإحداثيات العطالي المتمركز في مركز الأرض (ECI)*

بالنسبة لأي إشارة كهرمغنطيسية تنتشر في نظام إحداثيات ECI، يكون توقيت إحداثيات الانتشار (TCG) كالتالي:

$$\Delta t \approx \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \sqrt{g_{ij}\, dx^i dx^j} \; . \qquad (26)$$

يمكن إهمال الكمون التثاقلي في أول تقريب. وبالتالي تكون المكونات المترية $-g_{00} \approx 1$ و$g_{0j} = 0$ و$g_{ij} \approx \delta_{ij}$. وتوقيت الإحداثيات (TT) $(1 - L_G)\, \Delta t$. ويكون الطرف الأيمن للمعادلة (26) $\rho/c$ فقط، حيث $\rho$ هو طول المسير الإقليدي للنظام EC1.

فإذا ما أُرسلت الإشارة في توقيت الإحداثيات $t_T$ واستُقبلت في توقيت الإحداثيات $t_R$، يكون توقيت إحداثيات الانتشار (TCG) عبر المسير كما يلي:

$$\Delta t = \frac{\rho}{c} = \frac{1}{c} \,|\, \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T) \,|\, \approx \frac{1}{c} \,|\, \Delta\mathbf{r} + \mathbf{v}_R\; (t_R - t_T) \,|\, \approx \frac{1}{c} \,|\Delta\mathbf{r}| + \frac{1}{c^2}\, \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R, \qquad (27)$$

وحيثما يكون موضع المرسل $\mathbf{r}_T$ وموضع المستقبل $\mathbf{r}_R$ والسرعة $\mathbf{v}_R$، يكون الفارق بين موضع المستقبل والمرسل في توقيت إحداثيات الإرسال $(t_T)$ كالتالي: $\Delta\mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_R(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$. ويكون تصحيح توقيت الإحداثيات جراء سرعة المستقبِل كما يلي:

$$\Delta t_{\text{vel}} \approx \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \,/\, c^2. \qquad (28)$$

ولمراعاة تأثير الكمون التثاقلي على أي إشارة كهرمغنطيسية، من الضروري أن يُدرج الكمون في الأجزاء المكانية والزمانية من المكونات المترية على حد سواء. ويكون تأخير التوقيت التثاقلي كالتالي:

$$\Delta t_{\text{delay}} = \frac{2\, GM_E}{c^3} \ln\left(\frac{R + r + \rho}{R + r - \rho}\right), \qquad (29)$$

حيث تمثل $R$ و$r$ المسافة الشعاعية المتمركزة في مركز الأرض للمرسل والمستقبِل، وعلى التوالي. ويكون توقيت إحداثيات الانتشار (TCG) المكافئ للفاصل الزمني للتوقيت الأصولي المسجل بميقاتية ساكنة على المسطح الأرضي كالتالي:

$$(1 - L_G)\, \Delta t = \frac{\rho}{c} - L_G \frac{\rho}{c} + \frac{2\, GM_E}{c^3} \ln\left(\frac{R + r + \rho}{R + r - \rho}\right). \qquad (30)$$

*نظام الإحداثيات الثابت بالنسبة إلى الأرض والمتمركز في مركز الأرض (ECEF)*

بالنسبة لإشارة كهرمغنطيسية تنتشر في نظام إحداثيات ECEF، يكون توقيت إحداثيات الانتشار (TCG) كالتالي:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \sqrt{g_{ij}\, dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_{\text{path}} g_{0j}\, dx^i. \qquad (31)$$

والمكونات المترية هي $-g_{00} = 1 - 2U/c^2$ و$g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c$ و $g_{ij} \approx \delta_{ij}$، حيث $\mathbf{r}$ هو موضع نقطة على مسير الإشارة. أما توقيت الإحداثيات $(TT)$ فهو $(1 - L_G)\, \Delta t$. وتوقيت الإحداثيات المستغرق بين إرسال واستقبال اي إشارة كهرمغنطيسية يكون:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \left[1 + \frac{\Delta U(\mathbf{r})}{c^2}\right] dr + \frac{1}{c^2} \int_{\text{path}} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})\, d\mathbf{r}, \qquad (32)$$

حيث $dr$ هي الزيادة في الطول المعياري أو الطول الأصولي عبر مسير الإرسال $\Delta U(\mathbf{r})$ الكمون عند النقطة $\mathbf{r}$ على مسير الإرسال الأقل من الكمون على المسطح الأرضي (انظر المعادلة (19))، كما يرى من نظام إحداثيات ثابت بالنسبة إلى الأرض.

وبإهمال $\Delta U(\mathbf{r})$، يكون الحد الأول من المعادلة (32) $\rho'/c$ حيث $\rho'$ هو طول المسير الإقليدي في نظام إحداثيات ECEF. وإذا كان موضع المرسل $\mathbf{r}_T$ وموضع المستقبل $\mathbf{r}_R$ والسرعة $\mathbf{v}'_R$، عندئذ،

$$\frac{\rho'}{\mathrm{c}} = \frac{1}{\mathrm{c}}\,|\,\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)\,| \approx \frac{1}{\mathrm{c}}\,|\,\Delta\mathbf{r} + \mathbf{v}'_R\,(t_R - t_T)\,| \approx \frac{1}{\mathrm{c}}\,|\,\Delta\mathbf{r}\,| + \frac{1}{\mathrm{c}^2}\,\Delta\mathbf{r}\cdot\mathbf{v}'_R. \tag{33}$$

حيث $\Delta\mathbf{r} \equiv \mathbf{r}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$.

ويكون الحد الثاني للمعادلة (32) هو تأثير سانياك:

$$\Delta t_{\text{Sagnac}} \approx \frac{1}{c^2}\int_A^B (\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})\cdot d\mathbf{r} = \frac{2\,\omega\,A_E}{\mathrm{c}^2}\ , \tag{34}$$

حيث $A_E$ الإسقاط على المستوي الاستوائي للمساحة المتشكلة بمركز الدوران ونقطتي طرفي مسير الإشارة. وتكون المساحة موجبة عندما يكون لمسير الإشارة مكون في اتجاه الشرق.

*نظام الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة*

إذا أرسلت إشارة كهرمغنطيسية في نظام إحداثيات متمركز في مركز الكتلة بإحداثيات ديكارتية $(x, y, z)$ من مرسل على النقطة $(-a_T, b, 0)$ أو مستقبل على النقطة $(a_R, b, 0)$ عبر مسير خط مستقيم تقريباً $y = b$ (مع إهمال الانحراف)، حيث $b$ المسافة لأقرب نقطة إلى الشمس، يكون توقيت إحداثيات الانتشار (TCB) كالتالي:

$$\Delta t \approx \frac{1}{\mathrm{c}}\int_{\text{path}} \sqrt{\frac{g_{ij}}{-g_{00}}\,dx^i dx^j} \approx \frac{1}{\mathrm{c}}\int_{-a_T}^{a_R}\left(1 + \frac{2}{\mathrm{c}^2}U_S\right)dx = \frac{1}{\mathrm{c}}\int_{-a_T}^{a_R}\left(1 + \frac{1}{\mathrm{c}^2}\,\frac{2\,GM_S}{\sqrt{x^2+b^2}}\right)dx, \tag{35}$$

حيث $U_S$ هو الكمون التثاقلي للشمس. لذلك،

$$\Delta t = \frac{1}{\mathrm{c}}(a_T + a_R) + 2\frac{GM_S}{\mathrm{c}^3}\ln\frac{a_R + \sqrt{a_R{}^2 + b^2}}{-a_T + \sqrt{a_T{}^2 + b^2}}. \tag{36}$$

وبمعايرته مع التوقيت الأرضي (TT) للانتشار المسجل بميقاتية على المسطح الأرضي:

$$\Delta t' = (1 - L_B)\,\Delta t = \frac{1}{\mathrm{c}}(1 - L_B)(a_T + a_R) + 2\frac{GM_S}{\mathrm{c}^3}\ln\frac{a_R + \sqrt{a_R{}^2 + b^2}}{-a_T + \sqrt{a_T{}^2 + b^2}}. \tag{37}$$

## 8 أمثلة

نتيجة للتأثيرات النسبية، فإن أي ميقاتية في موقع مرتفع ستبدو أعلى في التردد وستختلف في المعدل المقيس عن التوقيت TAI بمقدار $-\Delta U/c^2$. وبالقرب من مستوى سطح البحر، يتحصل على ذلك من $-g(\phi)h/c^2$، حيث $\phi$ خط العرض الجغرافي و$g(\phi)$ العجلة الإجمالية عند مستوى سطح البحر (التثاقلية وبقوة الطرد المركزي) $= (9{,}780 + 0{,}052\ \sin^2\varphi)\ \mathrm{m/s^2}$، و$h$ المسافة فوق مستوى سطح البحر.

وعند تحرك الميقاتية نسبة إلى سطح الأرض بالسرعة $V$ التي قد تكون لها مركبة $V_E$ في اتجاه الشرق، يكون الفارق المقيس في تردد الميقاتية المتحركة نسبة إلى تلك الساكنة على مستوى سطح البحر كالتالي:

$$\Delta f = -\frac{1}{2}\frac{V^2}{c^2} + \frac{g(\phi)h}{c^2} - \frac{1}{c^2}\omega r \cos\phi\, V_E, \tag{38}$$

حيث $r$ مسافة الميقاتية من مركز الأرض.

واختيار إطار الإحداثيات هو أمر تقديري خالص ولكن عند تعريف توقيت الإحداثيات، يتم اللجوء إلى اختيار محدد. ويوصى من أجل الاستعمال الأرضي، استعمال إطار ثابت بالنسبة للأرض. وفي هذا الإطار، عند مزامنة ميقاتية A مع أخرى B (الميقاتيتان ساكنتان على الأرض) بواسطة إشارة راديوية تسافر من A إلى B، تختلف هاتان الميقاتيتان في توقيت الإحداثيات بالمقدار:

$$t_B - t_A = -\frac{\omega}{c^2}\int_{path} r^2 \cos^2\phi d\lambda, \tag{39}$$

حيث $\phi$ خط العرض، $\lambda$ خط الطول شرقاً والمسير يشير إلى المسير الذي تسافر عبره الإشارة من A إلى B.

وإذا تمت مزامنة الميقاتيتين بميقاتية محمولة، فإنهما ستختلفان في توقيت الإحداثيات بالمقدار:

$$t_B - t_A = \int_{path}\left[\frac{\Delta U(\mathbf{r})}{c^2} - \frac{V^2}{2c^2}\right]dr - \frac{\omega}{c^2}\int_{path} r^2\cos^2\phi\, d\lambda, \tag{40}$$

حيث $V$ السرعة الأرضية للميقاتية المحمولة، ويُشير المسير إلى المسير الذي تسافر عبره الميقاتية من A إلى B.

## 9 مسرد

| | |
|---|---|
| $A_E$ | الإسقاط الاستوائي للمنطقة التي تم كنسها أثناء نقل التوقيت بواسطة المتجه **r** عند تحرك نهايته |
| BCRS | النظام المرجعي السماوي المتمركز في مركز الكتلة |
| c | سرعة الضوء = $2{,}997\ 924\ 58 \times 10^8$ m/s |
| ECEF | نظام الإحداثيات الثابت بالنسبة إلى الأرض والمتمركز في مركز الأرض |
| ECI | *نظام الإحداثيات العطالي المتمركز في مركز الأرض* |
| $f$ | عامل التسوية = 1/298,257 223 563 |
| GCRS | نظام عطالي متمركز في مركز الأرض (ECI) للإحداثيات المكانية–الزمانية المتمركزة في مركز الأرض |
| $GM_E$ | الثابت التثاقلي للأرض = 398 600 $km^3/s^2$ |
| GTRS | النظام المرجعي الأرضي المتمركز في مركز الأرض |
| $J_{mn}$ | معاملات التوافقات الكروية التي تصف تفلطح الأرض. والمعامل $J_2$ (m = 2, n = 0) هو المعامل الأكثر دلالة ويمكن تعريفه من حيث لحظات جمود الأرض في القطب ($C$) وعند خط الاستواء (A): $J_2 = \frac{C-A}{MR^2}$، حيث تشير M وR إلى كتلة الأرض ونصف قطرها على التوالي $J_2 = +1{,}083 \times 10^{-3}$ |
| $L_B$ | $1 - (1 - L_G)(1 - L_C)$ |
| $L_c$ | إزاحة متوسطة في المعدل $\langle d\mathrm{TCG}/d\mathrm{TCB}\rangle$، $1 - \langle d\mathrm{TCG}/d\mathrm{TCB}\rangle$ |
| $L_G$ | $1 - d\mathrm{TT}/d\mathrm{TCG}$, a defined constant ≡ $6{,}969\ 290\ 134 \times 10^{-10}$ |
| **r** | المتجه الذي أصله في مركز الأرض ونهايته تتحرك مع عقارب الساعة |

| | |
|---|---|
| $r$ | قدرة المتجه **r** |
| $R_E$ | نصف القطر الاستوائي للأرض = 6 378 136 km |
| t | توقيت الإحداثيات ($t$) إلى متغير مستقل في معادلة حركة الأجرام المادية ومعادلات انتشار الموجات الكهرمغنطيسية |
| TAI | التوقيت الذري الدولي |
| TCB | توقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الكتلة |
| TCG | توقيت الإحداثيات المتمركز في مركز الأرض |
| TDB | التوقيت الدينامي المتمركز في مركز الكتلة |
| TT | التوقيت الأرضي |
| UTC | التوقيت العالمي المنسق |
| $U$ | الكمون التثاقلي |
| $U_g$ | الكمون عند المجسم الأرضي = 62 636,86 $km^2/s^2$ |
| $v$ | سرعة الميقاتية بالنسبة للمجسم الأرضي |
| $W$ | كمون الجاذبية مؤلف من مجموع الكمون التثاقلي، $U$ والكمون الدوراني $½(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r})^2$ |
| $s_{ij}$ | Kronecker delta function: $\delta_{ij} = 0$ إذا $i \neq j$؛ $\delta_{ij} = 1$ إذا $i = j$ |
| $\Delta U(\mathbf{r})$ | فارق الكمون التثاقلي (بما في ذلك كمون الطرد المركزي) بين موقع الميقاتية عند **r** والمجسم الأرضي كما يرى من نظام إحداثيات ثابت بالنسبة إلى الأرض بما يتفق مع الاصطلاح (القرار A4، الاتحاد IAU، 1992)، حيث يكون $\Delta U(\mathbf{r})$ سالباً عندما تكون الميقاتية فوق المجسم الأرضي |
| θ | colatitude |
| λ | خط الطول |
| φ | خط العرض |
| $\phi_c$ | خط العرض بالنسبة لمركز الأرض $\phi_c$ |
| $\phi_g$ | خط العرض الجغرافي $\phi_g$ |
| τ | التوقيت الأصولي كما يُقاس في "إطار الراحة" للميقاتية؛ أي في الإطار المرجعي الذي يتحرك مع عقارب الساعة |
| ω | السرعة الزاوّية للأرض = $7{,}292\,115 \times 10^{-5}$ rad/s |

## المراجع

D.D. McCarthy and P.K. Seidelmann, Time: From Earth Rotation to Atomic Physics (Wiley-VCH, Weinheim, 2009).

R.A. Nelson, Relativistic Time Transfer in the Vicinity of the Earth and in the Solar System, Metrologia 48, S171 – S180 (2011).

G. Petit and B. Luzum (editors), IERS Conventions (2010) (International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2010).