

تطوير خوارزمية تقدير الموقع باستخدام تقنية التموضع النقطي الدقيق لقياسات نظم الملاحة العالمية بالأقمار الصناعية اعتماداً على مرشح كالمن الموسع

الدكتور أديب القاموح*

الدكتور محمد علي سمونة**

عمار كحيله***

(تاريخ الإيداع 20 / 5 / 2015. قُبل للنشر في 13 / 7 / 2015)

□ ملخص □

تستخدم تقنية التموضع النقطي الدقيق الخوارزميات التكرارية للحصول على حل المسألة الملاحة، وذلك نتيجة قصور طريقة التربيغات الصغرى التقليدية على مواكبة المتطلبات المتزايدة للحصول على مخرجات المعالجة من الكم الهائل للبيانات المزودة من نظم الملاحة العالمية بالأقمار الصناعية بالسرعة والجودة المطلوبة للتطبيقات الجيوديزية والمساحية المختلفة. مرشح كالمن الموسع يعد المقاربة الأفضل للحل لكنه بالإضافة إلى المعرفة بالقياسات ونماذج الأرصاد الخاصة بها، فإنه يتطلب أيضاً المعرفة بالحالة الفيزيائية لمسألة التقدير مثل ديناميكية جهاز الاستقبال وخصائص الإشارة المستقبلية، والتقدير المناسب لشروطه الابتدائية.

يتضمن البحث اقتراحاً رياضياً لتعديل طريقة استخدام مرشح كالمن الموسع في تقنية التموضع النقطي الدقيق لتقليل الأثر السلبي لزمّن التقارب ضمن الشروط الابتدائية للخوارزمية التكرارية للمرشح، وعرض لنتائج تجربة تعديل طريقة الاستخدام تلك على دقة تقدير الموقع. ويؤكد البحث على ضرورة استخدام التعديل المقترح على خوارزمية تقدير الموقع على الرغم من زيادة زمن المعالجة نسبياً.

الكلمات المفتاحية : مرشح كالمن الموسع، التموضع النقطي الدقيق، نظم الملاحة العالمية بالأقمار الصناعية، خوارزمية تقدير الموقع.

* أستاذ - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب - سورية.

*** طالب ماجستير - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Developing a position estimation algorithm in GNSS-Precise Point Positioning technique depending on Extended Kalman Filter

Dr. Adib Alkamouh*
Dr. Muhammad Ali Sammuneh**
Ammar Khila***

(Received 20 / 5 / 2015. Accepted 13 / 7 / 2015)

□ ABSTRACT □

Precise point positioning technique uses recursive algorithms to solve the navigation problem. In fact, traditional least square method doesn't meet the required assessments of processing speed, and quality in different geodetic and surveying applications, due to big amount of output processing data provided by global navigation satellite systems.

Extended Kalman filter is considered as optimal solution approach of the navigation problem. This filter requires the knowledge of measurements, its observational models, and physical state for estimation problem like: (receiver dynamic, received signals characters, and suitable estimation of its initial conditions).

Research refers to a mathematical suggestion, which reduce the negative effect of convergence time at EKF initial conditions. This work also shows how a position estimation accuracy affected by the suggested modification of using EKF in PPP, and supporting the use of this modification in position estimation field, in spite of increasing processing time.

Key words: Extended Kalman Filter, Precise Point Positioning, Global Navigation Satellite Systems, Position Estimation Algorithm

*Professor-Department of Topographic Engineering- Faculty of Civil Engineering- Tishreen University-Lattakia- Syria.

**Associate Professor- Department of Topographic Engineering- Faculty of Civil Engineering-Aleppo University- Aleppo - Syria.

*** Postgraduate Student- Department of Topographic Engineering- Faculty of Civil Engineering- Tishreen University-Lattakia- Syria.

مقدمة:

تطورت تقنية التموضع النقطي الدقيق (Precise Point Positioning) أو ما يعرف اختصاراً (PPP) لقياسات نظم الملاحة بالأقمار الصناعية (Global Navigation Satellite Systems) أو اختصاراً (GNSS) تدريجياً منذ بداية 2001م [1]، وتعد هذه التقنية النواة الرئيسية للشبكات الجيوديزية الحديثة، والتي تشكل محطات الرصد الدائمة أساس بنيتها الشبكية، مثل شبكة المحطات المرجعية متواصلة التشغيل في الولايات المتحدة Continuously Operating Reference Station أو اختصاراً (CORS)، أو شبكة المحطات المرجعية الأوروبية الدائمة (EUREF Permanent Stations Network)، أو شبكة المحطات المرجعية اليابانية (GEONET)، ساعد على ذلك التطور الكبير الحاصل في مجال نظم GNSS المختلفة، وكذلك التطور في تصميم أجهزة الاستقبال القادرة على تعقب العديد من الإشارات، سواء المرسل من أقمار صناعية عائدة لكوكبات نظم GNSS مختلفة، و/أو المرسل من المرسلات الراديوية الأرضية (Ground Radio Beacons) المختلفة.

تستخدم طريقة التموضع النقطي الدقيق أرساد الشيفرة والموجة الحاملة صفرية التفاضل، والمستقبلة من خلال أجهزة استقبال ثنائية التردد. وهي تستخدم منتجات تصحيحات خارجية ونماذج دقيقة لمصادر الأخطاء بدلاً من استخدام التفاضل بين أجهزة الاستقبال والأقمار الصناعية لتقليل مقدار الأخطاء.

نقطة البداية لتقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) هي استخدام المدارات (Orbit) والساعات (Clock) الدقيقة، والتي يمكن الحصول عليها من خلال شبكة عالمية من المستقبلات مثل خدمة أنظمة الملاحة العالمية بالأقمار الصناعية (International GNSS Services) أو اختصاراً (IGS). ومع استخدام التجميعات الخطية للتحرر من أثر الأيونوسفير (Ionosphere Free Linear Combinations) لأرساد الشيفرة والموجة الحاملة، جنباً إلى جنب مع النماذج الدقيقة للأخطاء السائدة على أرساد (GNSS)، فإنه من الممكن الوصول إلى تقليل كمية الأخطاء بشكل ملحوظ. عادةً يتم تقييم أداء تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) لمعالجة بيانات (GNSS) من خلال معاملات الدقة (Accuracy)، والسلامة (Integrity)، والاستمرارية (Continuity)، ولكن هناك معاملاً تجريبياً إضافياً يجب تقييمه أيضاً هو زمن التقارب (Convergence Time) وهو بالتعريف الزمن اللازم للموقع المقدر للوصول إلى دقة معينة. إن هذا المعامل هو الرابط المحوري بين عناصر المعالجة الرئيسية وهي الزمن وخوارزمية التقدير (Estimation Algorithm) طالما أن مدى دقة خوارزمية التقدير (المرتبطة بشدة بالشروط الابتدائية للمرشح المستخدم)، وقدرتها على معالجة هذا الكم الكبير من البيانات المنمذجة وفق نماذج رياضية دقيقة خلال فترة زمنية معينة مرتبط ارتباطاً مباشراً بدقة المنتج النهائي وهو الموقع [2].

التقدير (Estimation) هو عملية المعالجة التي تأخذ البيانات المقاسة كمدخلات لتنتج تقديراً لبعض المعاملات. من أجل نظام خطي خاضع لضجيج قياسات غوسي (Gaussian Noise) بتباينات متساوية، تؤمن طريقة التريبعات الصغرى (Least Square method) أو اختصاراً (LSM) التقدير الأمثل للمعاملات المقدر [3]، ويمكن استعمال طريقة التريبعات الصغرى الموزونة (Weighted Least Square) أو اختصاراً (WLSM) لتشمل القياسات ذات قيم الضجيج المختلفة. ضمن الملاحة باستخدام نظم (GNSS) تكون القياسات عادةً ضمن فترات زمنية معينة متواصلة أو منفصلة وهي مطلوبة لتقدير الموقع الجديد ضمن كل مجموعة قياس جديدة. التريبعات الصغرى التقليدية تنتج تقديراً جديداً للموقع لكل مجموعة أرساد مستقلة عن جميع التقديرات السابقة للموقع وغير مترابطة فيما بينها. مرشح كالمن (Kalman Filter) هو مجموعة من المعادلات الرياضية التي تؤمن حلاً حسابياً تكرارياً يهدف

لتقدير الحالة (State) ضمن عملية المعالجة، بصورة تقلل متوسط مربعات الأخطاء. من أجل نظام خطي (Linear System) بوجود ضجيج غوسي، مرشح كالمن هو الحل الأمثل. إن مرشح كالمن هو خوارزمية التقدير القياسية المستخدمة في تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) ضمن العديد من المنشورات العلمية [4,5,6]. إن نماذج أرصاد تلك التقنية هي في الغالب لا-خطية (Non-Linear)، وعليه يجب تكييف مرشح كالمن ليتوافق مع هذه المسألة. إن مرشح كالمن الموسع (Extended Kalman Filter) هو المقاربة الأقوى للحل، ولكنه بالإضافة إلى القياسات ونماذج الأرصاد المتعلقة بها، فإنه يتطلب المعرفة الدقيقة للنماذج الفيزيائية التي تصف مسألة التقدير (مثل ديناميكية جهاز الاستقبال، وخصائص الإشارة المستقبلية)، ويتطلب كذلك التقدير الجيد لشروطه الابتدائية والتي تمثل المركبة الأساسية لمعامل زمن التقارب المذكور أعلاه.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى زيادة دقة تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) وذلك من خلال معالجة الأثر السلبي لمعامل زمن التقارب اللازم للوصول إلى دقة معينة خلال فترة قياس محددة، والذي يؤثر على الدقة الكلية للموقع، وذلك من خلال تكييف خوارزمية تقدير الموقع (لمرشح كالمن الموسع) المضمنة في التقنية المذكورة لامتصاص هذا الأثر من خلال استغلال الطبيعة التكرارية للمرشح.

طرائق البحث ومواده:

يتألف النموذج الرياضي المقترح لخوارزمية تقدير الموقع ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) من مكونين أساسيين وهما:

- النمذجة الرياضية الدقيقة لمصادر الأخطاء الرئيسية المؤثرة على قياسات نظم (GNSS)، بحيث تشمل كل من الأخطاء السائدة (التقليدية) والصيغ الدقيقة للأخطاء المؤثرة على قياسات تقنية التموضع النقطي الدقيق.
- تكييف وتطوير طريقة استخدام مرشح كالمن الموسع بصيغته الرياضية الجديدة لمعالجة بيانات قياسات نظم (GNSS).

وتم استخدام برنامج MATLAB من أجل الصياغة الرياضية لتلك النماذج.

1- صيغ النمذجة الدقيقة لأخطاء نظم GNSS المؤثرة على تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP):

- تأثير النسبية من الدرجة الثانية (Second order relativistic effect):

يتم تطبيق التأثير الثانوي للنسبية والذي يسببه تقوس المكان-زمن نتيجة حقل الجاذبية الأرضية على المسافة

الهندسية بين جهاز الاستقبال والقمر الصناعي [7]:

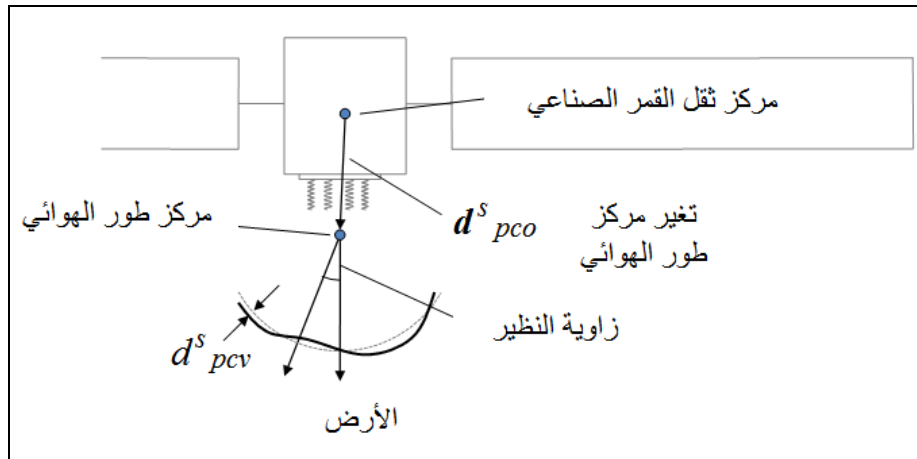
$$\Delta\rho_{rel} = \frac{2\mu_{\oplus}}{c^2} \ln \left(\frac{\|\vec{r}_{sat}\| + \|\vec{r}_{rcv}\| + \|\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{rcv}\|}{\|\vec{r}_{sat}\| + \|\vec{r}_{rcv}\| - \|\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{rcv}\|} \right) \quad (1)$$

حيث: C سرعة الضوء في الخلاء، و \vec{r}_{sat} موقع القمر الصناعي لحظة إرسال الإشارة، و \vec{r}_{rcv} موقع جهاز

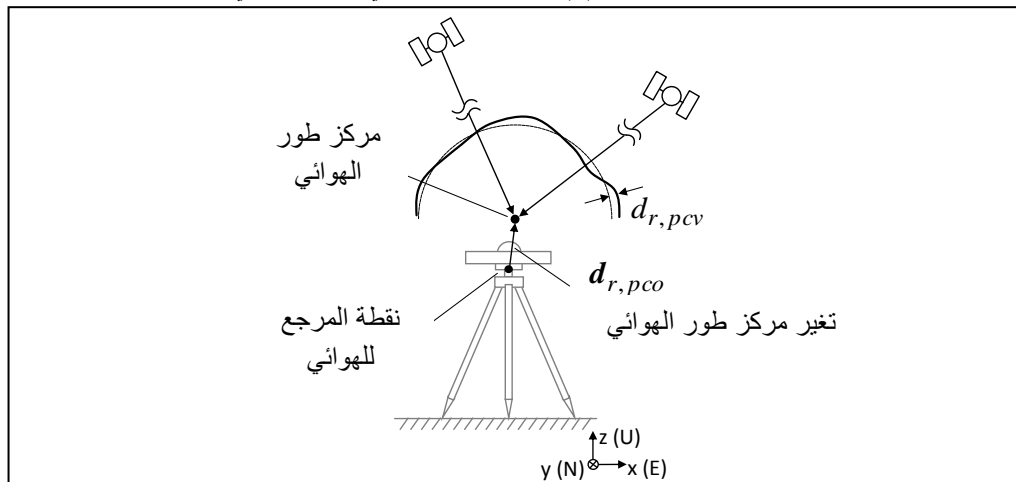
الاستقبال لحظة وصول الإشارة، و μ_{\oplus} معامل الجاذبية الأرضية.

- انحرافات الهوائي والتوجيه (Antenna biases and orientation):

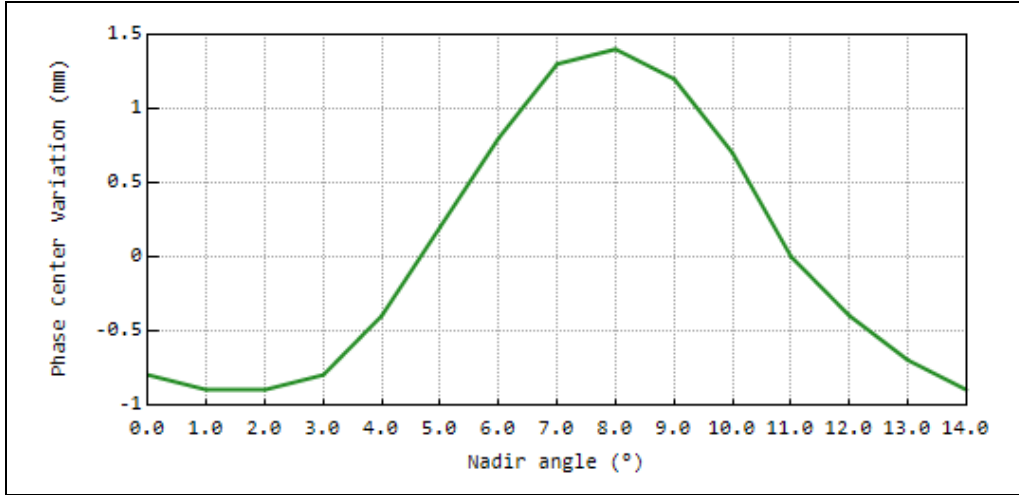
- تغير مركز الطور (Phase center variation) يوجد انحراف صغير في مركز طور موجة الهوائي والذي يعتمد على التوجيه المشترك لهوائي القمر الصناعي، كما هو موضح في الشكل (1) وهوائي جهاز الاستقبال، كما هو موضح في الشكل (2)، بالنسبة لتردد الإشارات الحاملة. ملفات ANTEX والتي تؤمنها IGS، تتضمن تصحيحات لمركز طور هوائي كل قمر صناعي، وتحتوي أيضاً على تصحيحات للعديد من هوائيات أجهزة الاستقبال التجارية، مثال عن قيمة هذا التصحيح ضمن الشكل (3).



الشكل (1) تغير مركز طور هوائي القمر الصناعي



الشكل (2) تغير مركز طور هوائي المستقبل



الشكل (3) انحراف مركز موجة القمر الصناعي GPS 01

يظهر الشكل (3) العلاقة بين قيمة تغير مركز الطور لهوائي القمر الصناعي GPS 01 (المحور الشاقولي mm)، وبين قيمة زاوية النظر (المحور الأفقي بالدرجات)، حيث تقترب قيمة تغير مركز الطور من 1.5 mm عند قيمة لزاوية النظر تعادل 8.0° .

- تأثير تموج الموجة الحاملة (Carrier-phase wind-up effect): يثبت كل من نظامي GPS و GLONASS موجات راديوية دائرية مستقطبة صحيحة (Right Circular Polarized (RCP)). هذا يعني أن الموجة الحاملة المرصودة تعتمد على التوجيه المشترك لكل من هوائي القمر الصناعي وجهاز الاستقبال. بما أن الأقمار الصناعية تدور ضمن مدارات حول الأرض، والهوائي الخاص بها يمر في مرحلة معينة ضمن مرحلة دوران بطيئة بسبب أن الألواح الشمسية للقمر الصناعي يعاد توجيهها مقابل الشمس. من أجل أجهزة الاستقبال المتحركة، هذا الأثر يتم امتصاصه بشكل كامل من خلال حل تأثير الساعة، ولكن بالنسبة للمستقبلات الثابتة هذا الأثر يجب تصحيحه خصوصاً أنه يصل إلى دورة واحدة للموجة الحاملة خلال نصف ساعة. تصحيح تموج الموجة الحاملة يمكن تحديده من خلال [8]:

$$\delta\phi = \text{sign}\left(\hat{k}(\vec{D}_{sat} \times \vec{D}_{rcv})\right) \cos^{-1}\left(\frac{\vec{D}_{sat} \vec{D}_{rcv}}{\|\vec{D}_{sat}\| \|\vec{D}_{rcv}\|}\right)$$

$$\Delta\phi_k = \delta\phi + 2\pi \left\lfloor \frac{\Delta\phi_{k-1} - \delta\phi}{2\pi} \right\rfloor \quad (2)$$

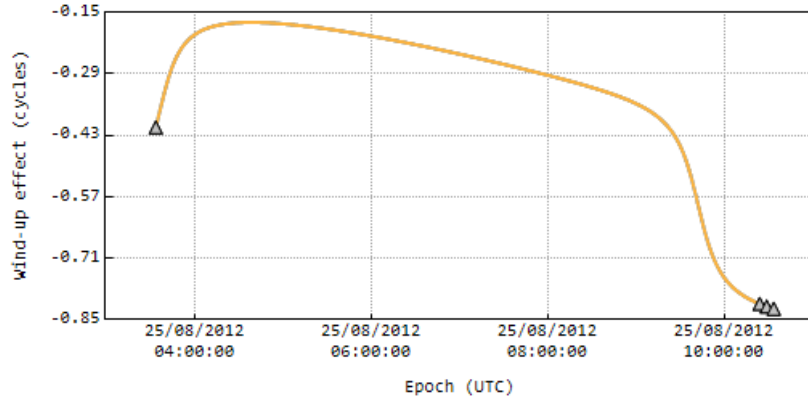
حيث \hat{k} شعاع الواحدة من القمر الصناعي إلى المستقبل، و \vec{D}_{rcv} و \vec{D}_{sat} الأشعة الفعالة ثنائية الاستقطاب للقمر الصناعي وجهاز الاستقبال وهي معرفة كالتالي:

$$\vec{D}_{sat} = \hat{x}_{sat} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}_{sat}) - \hat{k} \times \hat{y}_{sat}$$

$$\vec{D}_{rcv} = \hat{x}_{rcv} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}_{rcv}) + \hat{k} \times \hat{y}_{rcv} \quad (3)$$

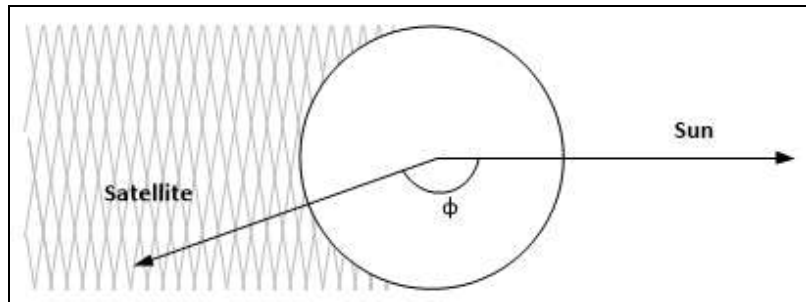
حيث $(\hat{x}_{sat}, \hat{y}_{sat}, \hat{z}_{sat})$ أشعة الواحدة لنظام الإحداثيات المحلي للقمر الصناعي، و $(\hat{x}_{rcv}, \hat{y}_{rcv}, \hat{z}_{rcv})$ أشعة الواحدة لنظام الإحداثيات المحلي لجهاز الاستقبال، و $\Delta\phi_{k-1}$ تصحيح التموج للموجة من اللحظة الزمنية السابقة.

وبافتراض أن تصحيح التموج للموجة في اللحظة الزمنية الابتدائية هو $\Delta\phi_0$ ، يتم جعل قيمته الابتدائية مساوية للصفر، وقيمتها المجهولة سوف يتم امتصاصها ضمن غموض الموجة الحاملة. مثال عن قيمة هذا التصحيح في الشكل (4) حيث يظهر مقدار تغير قيمة أثر تموج الموجة الحاملة (المحور الشاقولي بوحدة الدورة) خلال ساعات الرصد (المحور الأفقي يمثل فترة الرصد ضمن المرجع الزمني UTC)، وذلك ضمن قياسات القمر الصناعي GPS 27.



الشكل (4) تأثير تموج الموجة الحاملة ضمن القمر الصناعي GPS 27

- كسوف الأقمار الصناعية (Eclipsed Satellites): تدور الأقمار الصناعية الخاصة بنظم GNSS على مدارات حول الأرض، وهي ضمن فترات زمنية محددة تمر عبر فصول من الكسوف (عندما يغطي القمر الصناعي بالكامل بظل الأرض)، كما يبين الشكل رقم (5). خلال فصول الكسوف هذه، قلة الأشعة الشمسية تخفض قدرة القمر الصناعي على التحكم بالأداء مما ينتج أخطاء في مدار القمر الصناعي [8].



الشكل (5) كسوف القمر الصناعي

هذه الأقمار الصناعية التي تمر ضمن مرحلة الكسوف أو خرجت مؤخراً من مرحلة الكسوف يجب إزالتها من الحل باعتبار أرسادها غير موثوقة كفايةً. مقارنة بسيطة لفحص فيما إذا كان القمر الصناعي يمر ضمن مرحلة الكسوف هي عن طريق فحص فيما إذا كان موقع القمر الصناعي (\vec{r}_{sat}) يحقق الشروط التالية:

$$\cos \phi = \frac{\vec{r}_{sat} \cdot \vec{r}_{\odot}}{|\vec{r}_{sat}| |\vec{r}_{\odot}|} < 0$$

$$\|\vec{r}_{sat}\| \sqrt{1 - \cos^2 \phi} < a_{\oplus} \quad (4)$$

حيث \vec{r}_{sat} موقع القمر الصناعي لحظة إرسال الإشارة، و \vec{r}_{\odot} موقع الشمس ضمن الإطار المرجعي ECEF، و a_{\oplus} نصف قطر المحور الرئيسي للإهليلج (يعادل 6378137.00m ضمن الإهليلج WGS-84).
• تأثيرات عدم صلابة الأرض (Non-Rigid Earth Effects):

- المد الصلب (Solid Tide): هي انزياحات أساسية سببها التجاوب اللدن للقشرة الأرضية بسبب القوى الجاذبية الناجمة عن أجسام خارجية مثل الشمس والقمر. والانزياحات الناجمة عن تأثير المد الصلب يمكن نمذجتها كالتالي [8]:

$$\Delta r = f_2(\vec{r}_{\odot}, \mu_{\odot}) + f_2(\vec{r}_{\oplus}, \mu_{\oplus}) + f_3(\vec{r}_{\odot}, \mu_{\odot}) + f_3(\vec{r}_{\oplus}, \mu_{\oplus}) \quad (5)$$

حيث \vec{r}_{\odot} و \vec{r}_{\oplus} موقع الشمس والقمر ضمن الإطار المرجعي ECEF، و μ_{\oplus} و μ_{\odot} المعاملات القياسية لجاذبية الشمس والقمر وهي على الترتيب، 1.327124×10^{20} ، و 4.902801×10^{12} .

التوابع f_2 و f_3 هي نماذج الانزياحات للمد من الدرجة الثانية والثالثة على الترتيب، وهي معرفة كالتالي [9]:

$$f_2(\vec{R}, \mu) = \frac{\mu a_{\oplus}^4}{\mu_{\oplus} \|\vec{R}\|^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left(\frac{3}{2} (\hat{R} \cdot \hat{r})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R} \cdot \hat{r}) [\hat{R} - (\hat{R} \cdot \hat{r}) \hat{r}] \right\}$$

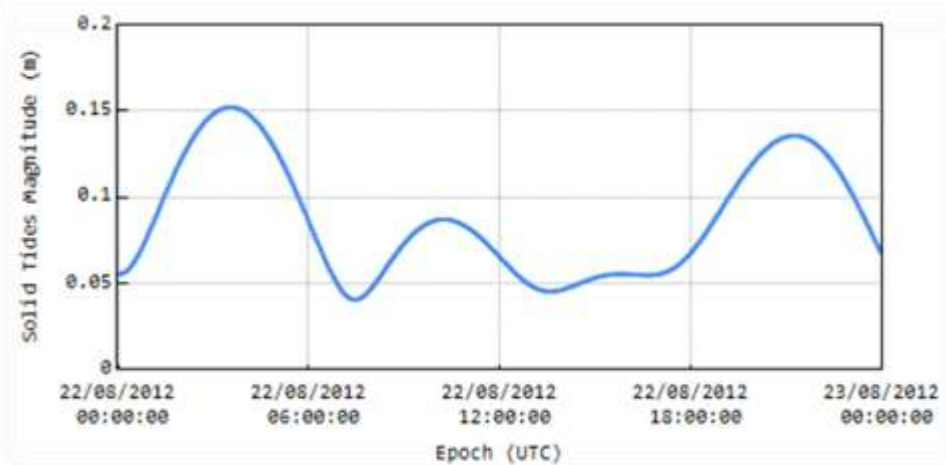
$$f_3(\vec{R}, \mu) = \frac{\mu a_{\oplus}^5}{\mu_{\oplus} \|\vec{R}\|^4} \left\{ h_3 \hat{r} \left(\frac{5}{2} (\hat{R} \cdot \hat{r})^3 - \frac{3}{2} (\hat{R} \cdot \hat{r}) \right) + l_3 \left(\frac{15}{2} (\hat{R} \cdot \hat{r})^2 - \frac{3}{2} \right) [\hat{R} - (\hat{R} \cdot \hat{r}) \hat{r}] \right\} \quad (6)$$

حيث \hat{R} شعاع الوحدة لـ \vec{R} ، و \hat{r} شعاع الوحدة من المحطة لمركز الأرض، و h_2 و h_3 و l_2 و l_3 معرفة كالتالي:

$$h_2 = 0.6078 - 0.0006 \left(\frac{3 \sin^2 \varphi - 1}{2} \right); \quad h_3 = 0.292$$

$$l_2 = 0.0847 - 0.0002 \left(\frac{3 \sin^2 \varphi - 1}{2} \right); \quad l_3 = 0.015 \quad (7)$$

مثال عن قيمة هذا التصحيح في الشكل (6) حيث يظهر الشكل تغيرات شدة المد الصلب (المحور الشاقولي بـ m) خلال فترة رصد تعادل 24 ساعة (المحور الأفقي يمثل فترة الرصد ضمن المرجع الزمني UTC).



الشكل (6) شدة المد الصلب

- أثر تحميل المحيط (Ocean Loading): هو انزياح ثانوي سببه التجاوب اللدن للقشرة الأرضية بسبب المد في المحيطات، يجب أخذه بالحسبان في الأرصاد التي تزيد مدتها عن 24 ساعة في المناطق القريبة من المحيطات [9].

- المد القطبي (Pole Tides): انزياحات ثانوية تحدث بسبب التجاوب اللدن للقشرة الأرضية بسبب تغيرات محور دوران الأرض، ويجب أخذها بعين الاعتبار للأرصاد التي تزيد مدتها عن شهرين [8].

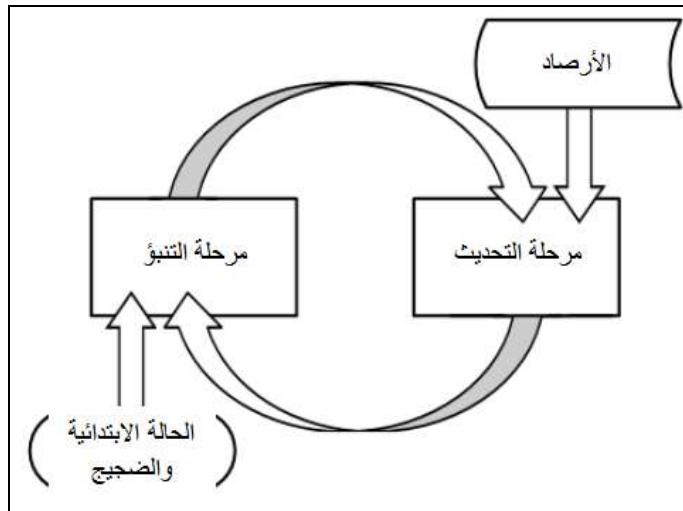
2- تطوير خوارزمية تقدير الموقع لمرشح كالمن الموسع:
مرشح كالمن (Kalman Filter) هو خوارزمية تعمل بشكل تكراري على سلسلة من الأرصاد المحتوية على الضجيج والأخطاء المختلفة، تصغر خطأ التقدير وتنتج تقديرات إحصائية مثلى لحالة النظام. وهي تختصر مسألة التقدير من خلال تقديرها لحالة النظام ذو الزمن المتقطع والمحكوم بالتتابع الخطية التالية:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Fx_k + w_k \\y_k &= Hx_k + v_k\end{aligned}\quad (8)$$

حيث k هي الخطوة الزمنية، x_k تمثل شعاع الحالة، y_k تمثل شعاع القياسات، w_k و v_k يمثلان ضجيج المعالجة وضجيج القياسات مع مصفوفتي التباينات الخاصتين بهما Q و R على الترتيب، F و H يمثلان تابع انتقال الحالة وتابع القياسات (نموذج الأرصاد) على الترتيب.

كخوارزمية تكرارية، يحتاج مرشح كالمن فقط للتقدير من لحظة زمنية سابقة والأرصاد الحالية، وذلك لحساب تقدير الحالة للحظة الزمنية الحالية، الأمر الذي يجعل هذه الخوارزمية مناسبة للتطبيقات اللحظية (Real-Time Applications).

مفهوم مرشح كالمن يمكن عرضه عبر مرحلتين أساسيتين، مرحلة التنبؤ (Prediction Stage) ومرحلة التحديث (Update Stage)، كما يظهر في الشكل (7):



الشكل (7) مخطط مرشح كالمن التكراري

وتعطى معادلات مرشح كالمن كالتالي:

$$\begin{aligned} P_k^- &= FP_{k-1}^+ F^T + Q, \\ K_k &= P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}, \\ \hat{x}_k^- &= F\hat{x}_{k-1}^+, \\ \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(y_k - H\hat{x}_k^-), \\ P_k^+ &= (I - K_k H)P_k^-, \end{aligned} \quad (9)$$

حيث I هي المصفوفة الواحدة، \hat{x}_k^- تمثل التقدير السابق للحالة x_k ، \hat{x}_k^+ تمثل التقدير اللاحق للحالة x_k ، K_k هي مصفوفة كالمن المكتسبة، P_k^- هي مصفوفة تباين خطأ التقدير السابق $x_k - \hat{x}_k^-$ ، P_k^+ هي مصفوفة تباين خطأ التقدير اللاحق $x_k - \hat{x}_k^+$.

مرشح كالمن تم تصميمه للأنظمة الخطية، ولكن يمكن توسيعه لمعالجة الأنظمة اللاخطية، هذه المقاربة تدعى مرشح كالمن الموسع (Extended Kalman Filter) أو (EKF). في حال كون نموذج انتقال الحالة و/أو نموذج الأرصاد توابع لاخطية، ولكنها توابع تفاضلية:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= f(\mathbf{x}_{k-1}) + w_{k-1} \\ \hat{y} &= h(\mathbf{x}) + v_k \end{aligned} \quad (10)$$

هذه التوابع تستخدم للتنبؤ بالحالة الحالية وللتنبؤ بالأرصاد الحالية، ولكنها غير ممكنة الاستخدام مباشرة لتعريف تباينات الحالة، وكبدل يتم تقييم مصفوفة JACOB خلال اللحظة الحالية k لتحديد تبايناتها:

$$F_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_{k-1|k-1}}; \quad H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_{k|k-1}} \quad (11)$$

هذه المعالجة هي في الجوهر تقوم على جعل النظام خطياً حول التقدير الأخير للحالة.

ضمن أي مجموعة قياسات وبسبب الطبيعة التكرارية لمرشح كالمن يمكن الحصول على نوعين من الحلول حسب اتجاه تحليل الأرصاد، الحل الأول ويدعى الحل الأمامي (Foreground Solution)، وهو الحل الذي نحصل عليه بتطبيق مرشح كالمن الموسع على القياسات من اللحظة الزمنية t_1 وحتى اللحظة الزمنية t_n . والحل الثاني ويدعى الحل الخلفي (Background Solution)، وهو الحل الذي نحصل عليه بتطبيق مرشح كالمن الموسع على القياسات من اللحظة الزمنية t_n وحتى اللحظة الزمنية t_1 . ضمن كلا الحلين السابقين سوف يظهر أثر زمن التقارب على الحل، وإن التطوير الممكن إجراؤه هو دمج كلا الحلين من خلال تابع تتعيم (Smoother Function) يتم تطبيقه خلال كل لحظة زمنية t ، والذي سنعمل على نمذجته رياضياً واستنباط طريقة استخدامه ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP)، وتجريبها عملياً.

$$x_s = Q_s * (Q_f^{-1} * x_f + Q_b^{-1} * x_b) \quad (12)$$

$$Q_s = (Q_f^{-1} + Q_b^{-1})^{-1}$$

حيث x_f الحل الأمامية ($n \times 1$)، و Q_f مصفوفة تباين الحل الأمامية ($n \times n$)، و x_b الحل الخلفية ($n \times 1$)، و Q_b مصفوفة تباين الحل الخلفية ($n \times n$)، و n عدد الحلول، و x_s الحل المنعمة ($n \times 1$)، و Q_s مصفوفة تباين الحل المنعمة ($n \times n$).

- تمت نمذجة خوارزمية تقدير الموقع لمرشح كالمن الموسع ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) مع نماذج الأخطاء السائدة والدقيقة ضمن بيئة MATLAB. ولتجريب الخوارزمية المقترحة تم اعتماد المنهجية التالية:
- 1- تم اختيار ثلاث محطات عشوائية دائمة الرصد (DOBS, FRKN, NC77)، من شبكة الرصد الدائمة CORS في الولايات المتحدة، وتم تحميل البيانات الأولية للقياسات من الموقع الإلكتروني للشبكة [10] CORS.
 - 2- مدة القياس التجريبية هي 12 ساعة، والفترة الزمنية للقياس هي من الساعة 12 يوم 2014/6/1م، وحتى الساعة 24 من يوم 2014/6/1م.
 - 3- تم الحصول على ملفي (المدارات الدقيقة، وتغير مركز الطور) من الموقع الإلكتروني لخدمة IGS [11].
 - 4- تصحيحات صيغ النمذجة الدقيقة الداخلة في عملية المعالجة هي تموج الموجة الحاملة Wind Up Effect، وكسوف الأقمار الصناعية Eclipsed Satellites، وتأثير لا صلابة الأرض Non-Rigid Earth Effect.
 - 5- لبيان فعالية الخوارزمية المقترحة ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق، تم تثبيت جميع المعاملات الداخلة في عملية المعالجة، والظاهرة على يمين الجداول (1 و 2 و 3)، باستثناء خوارزمية الضبط (مرشحا كالمن الموسع الأمامي والخلفي والمرشح المدمج المقترح)، وتمت مقارنة قيم الدقة للمركبات الإحداثية باعتبارها تابعاً لخوارزمية الضبط.

النتائج والمناقشة:

لإظهار قدرة الخوارزمية المقترحة على امتصاص أثر زمن التقارب ضمن حل المسألة الملاحية، وأثر ذلك على دقة تحديد الموقع باستخدام تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP)، تم تطبيق الخوارزمية الجديدة المقترحة (Smoother Combined EKF) أو اختصاراً (SCEKF) ضمن تقنية (PPP)، ومقارنتها بالخوارزمية التقليدية لتقدير الموقع اعتماداً على مرشح كالمن الموسع باتجاهيها الأمامي، والخلفي، من ناحية الدقة (مقدرةً بـ Root Mean Square أو RMS)، على المركبات الإحداثية (خط الطول، دائرة العرض، الارتفاع) للنقطة المرصودة بتقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP)، مع الأخذ بعين الاعتبار صيغ النمذجة الدقيقة والتصحيحات السائدة لأخطاء نظام GNSS المستخدم (في حالتنا نظام GPS)، وجميع معاملات عملية المعالجة موضحة إلى جانب الأشكال المعبرة عن دقة التموضع النقطي الدقيق (PPP) في الحالات المذكورة أعلاه، وتم تنظيم النتائج في الجداول (1، 2، 3، 4).

الجدول (1) دقة الموقع ضمن تقنية PPP باستخدام خوارزمية تقدير الموقع Foreground-EKF، مع الشكل التوضيحي

			Dobs152 / CORS		الشبكة / النقطة			
			<ul style="list-style-type: none"> • ملف الأرصاد dobs1520.14o • ملف المدارات الدقيقة igs17950.sp3 • ملف انحراف مركز الموجة lgs08.Atx 		المدخلات			
			PPP Static		تقنية التموضع			
			Foreground-EKF		نوع خوارزمية التقدير			
			15 Degree		زاوية الحجب			
			Iono-Free Model		تصحيات الأيونوسفير		التصحيات الساتلية	
			Zenith Total Delay		تصحيات التروبوسفير			
			Solid Model		تصحيات المد الأرضي			
			دقيقة		نوع المدارات			
			lgs08.Atx ملف		انحراف مركز الموجة		صحيح النمذجة الدقيقة	
Windup Model		تموج الموجة الحاملة						
Reject Eclipsed Satellites		كسوف القمر الصناعي						
HIGHT 338.7193m	LONGTUDE -80°43'11.7348''	LATITUDE 36°25'31.5464''	Continuous		حل الغموض الصحيح			
RMS=0.6072m	RMS=0.0859m	RMS=0.078m	WGS84/Ellipsoid	Datum/Hight	المخرجات			

الجدول (2) دقة الموقع ضمن تقنية PPP باستخدام خوارزمية تقدير الموقع Background-EKF، مع الشكل التوضيحي

			الشبكة / النقطة		
			Dobs152 / CORS		
			<ul style="list-style-type: none"> • ملف الأرصاد dobs1520.14o • ملف المدارات الدقيقة igs17950.sp3 • ملف انحراف مركز الموجة lgs08.Atx 		المدخلات
			PPP Static	تقنية التموضع	
			Background-EKF	نوع خوارزمية التقدير	
			15 Degree	زاوية الحجب	
			Iono-Free Model	تصحيات الأيونوسفير	التصحيات السائدة
			Zenith Total Delay	تصحيات التروبوسفير	
			Solid Model	تصحيات المد الأرضي	
			دقيقة	نوع المدارات	صينغ النمذجة الدقيقة
lgs08.Atx ملف	انحراف مركز الموجة				
Windup Model	تموج الموجة الحاملة				
Reject Eclipsed Satellites	كسوف القمر الصناعي				
HIGHT 339.402m	LONGTUDE -80°43'11.7238''	LATITUDE 36°25'31.5385''	Continuous		حل الغموض الصحيح
RMS=0.1886m	RMS=0.2599m	RMS=0.4122 m	WGS84/Ellipsoid	Datum/Hight	المخرجات

الجدول (3) دقة الموقع ضمن تقنية PPP باستخدام خوارزمية تقدير الموقع SC-EKF، مع الشكل التوضيحي

			الشبكة / النقطة		Dobs152 / CORS			
			المدخلات		• ملف الأرصاد dobs1520.14o		تقنية التموضع	
					• ملف المدارات الدقيقة igs17950.sp3			
					• ملف انحراف مركز الموجة lgs08.Atx			
			نوع خوارزمية التقدير		الخوارزمية الجديدة المقترحة SC-EKF		PPP Static	
			زاوية الحجب		15 Degree			
			التصحيات الستارة		تصحيات الأيونوسفير		Iono-Free Model	
					تصحيات التروبوسفير		Zenith Total Delay	
					تصحيات المد الأرضي		Solid Model	
					نوع المدارات		دقيقة	
صحيح النمذجة الدقيقة		انحراف مركز الموجة		lgs08.Atx ملف				
		تموج الموجة الحاملة		Windup Model				
		كسوف القمر الصناعي		Reject Eclipsed Satellites				
حل الغموض الصحيح		Continuous		HIGHT 339.351m				
المخرجات		Datum/Hight		WGS84/Ellipsoid				
RMS=0.0017m		RMS=0.0025 m		RMS=0.0045m				
LONGTUDE -80°43'11.7322''		LATITUDE 36°25'31.5423''						

تظهر الجداول (1,2,3) قيم الدقة للمركبات الإحداثية الثلاث للمحطة المرجعية DOBS، وذلك باستخدام طريقة التموضع النقطي الدقيق باعتماد خوارزميات مرشح كالمن الموسع الأمامية (في الجدول (1))، والخلفية (في الجدول (2))، والمقترحة (في الجدول رقم (3))، وضمن شروط هذه التجربة ومن خلال تحليل النتائج نلاحظ ما يلي:

1- بمقارنة نتائج الجدولين (1) و(2) نجد أن دقة الحل الأمامي أعلى من دقة الحل الخلفي على المركبتين الأفقيتين، وذلك يعود إلى أن مدة زمن التقارب ضمن الحل الأمامي تعادل تقريباً نصف مدة زمن التقارب ضمن الحل الخلفي، ويعود هذا الفرق في قيم زمن التقارب ضمن الحلين إلى اختلاف الشروط الابتدائية لمرشح كالمن الموسع، والمرتبطة بالحالة الفيزيائية لمسألة التقدير (الظروف الفيزيائية لعملية الرصد)، والعائدة لكل من الحلين.

2- بمقارنة نتائج الجدول (3) مع الجدولين (1) و(2)، نلاحظ التحسن الكبير في دقة تعيين الموقع باستخدام الخوارزمية الجديدة المقترحة (SC EKF)، ويظهر من الجدول رقم (3) مع الشكل ضمنه، اختفاء أثر زمن التقارب على المركبات الثلاث للموقع بسبب امتصاصه ضمن عملية المعالجة بخوارزمية تقدير الموقع المقترحة اعتماداً على خوارزمية مرشح كالمن الموسع (SC EKF) مقارنةً بالجدولين (1) و(2) والشكلين ضمنهما، واللذان يظهران أثر زمن التقارب مبيئاً بشكل مظل، بمدة زمن تقارب بحدود ساعة زمنية واحدة للمرشح (Foreground EKF)، وزمن تقارب يصل لساعتين للمرشح (Background EKF).

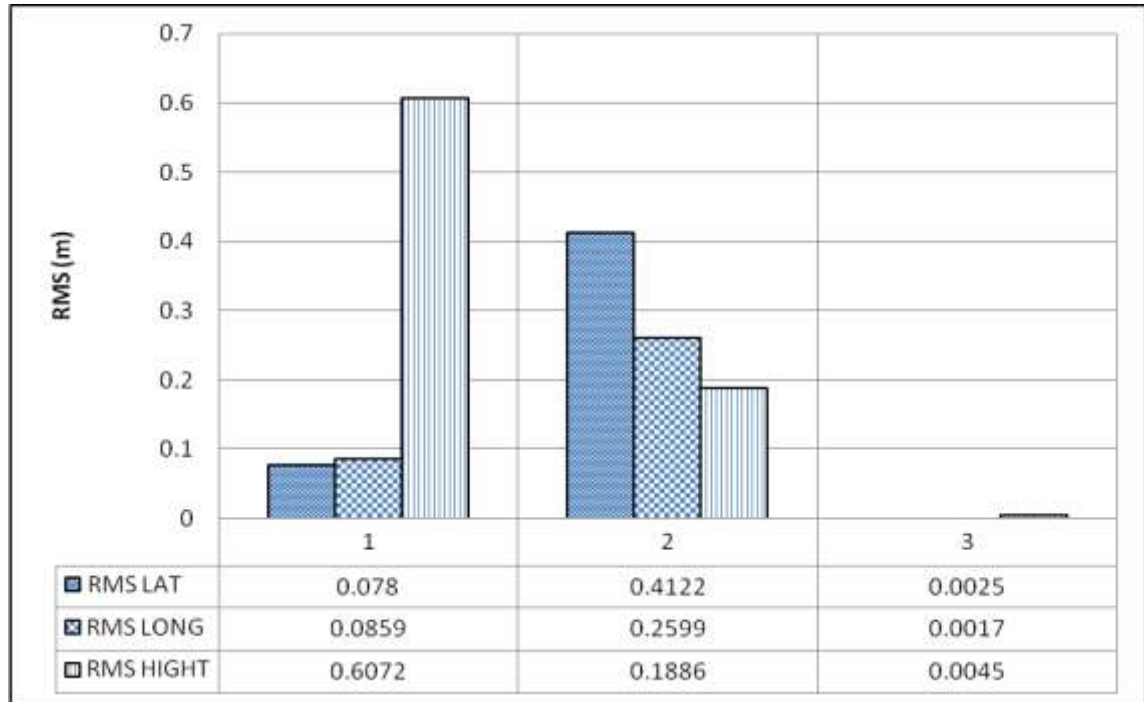
3- انتقال مستوى دقة المركبة الشاقولية من القيمة (RMS=0.607m) ضمن الحل الأمامي، والقيمة (RMS=0.1886m) ضمن الحل الخلفي، إلى القيمة (RMS=0.0045m) ضمن الحل المقترح، يمكن تفسيره من خلال الطبيعة التنبؤية التكرارية لمرشح كالمن الموسع المستخدم، والذي يعتمد في تقدير الحالة الزمنية الحالية على تقدير الحالة الزمنية السابقة والأرصاء الحالية، وعليه فإنه في النمطين الأمامي والخلفي للخوارزمية، يتم إدخال قيم البيانات المندرجة تحت الإطار الزمني لفترة زمن تقارب الحل الملاحي (والتي تحمل ارتياباً كبيراً) ضمن عملية المعالجة الإحصائية للحصول على الموقع، وبالتالي تضعف هذا الحل، وذلك بالمقارنة مع الحل الناتج عن استخدام الخوارزمية المقترحة، والتي تلغي أثر زمن التقارب.

4- لزيادة موثوقية استخدام الخوارزمية المقترحة، تم إعادة التجربة على المحطتين المرجعيتين FRKN، وNC77، وتم اعتماد نفس شروط التجربة المطبقة على المحطة المرجعية DOBS، و نتائج جميع التجارب موضحة في الجدول رقم (4)، وتوضح الأشكال (8,9,10) مقارنة قيم RMS للمركبات الإحداثية الثلاث للمحطات المرجعية DOBS، و FRKN، و NC77، وذلك باعتماد طريقة التموضع النقطي الدقيق باستخدام خوارزميات مرشح كالمن الموسع الأمامية والخلفية والمقترحة:

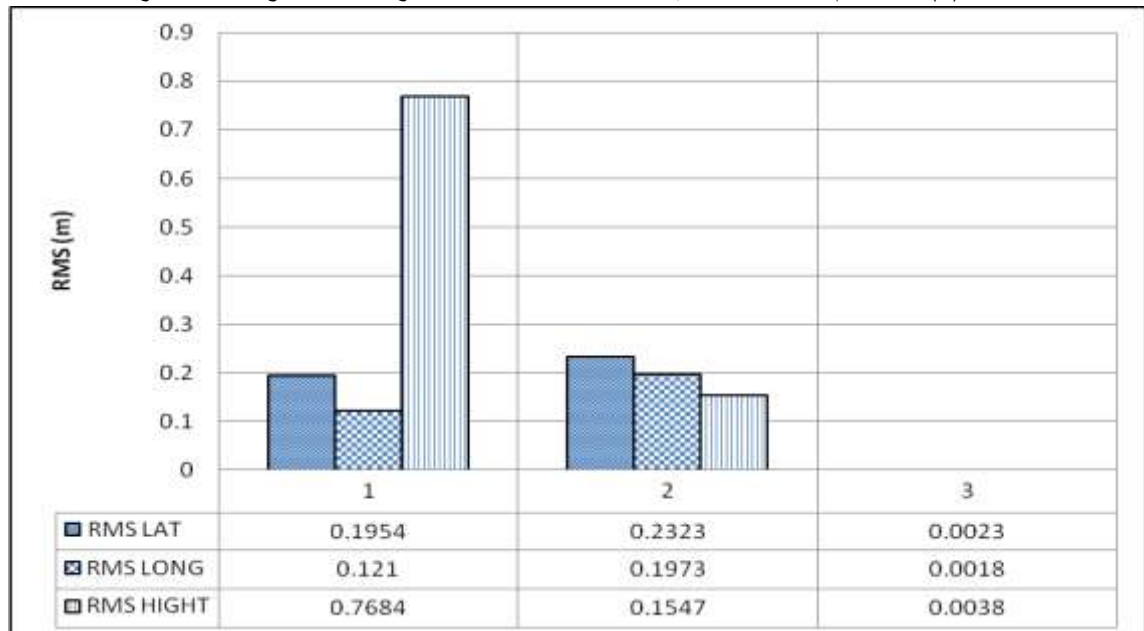
الجدول (4) مقارنة قيم RMS للمركبات الإحداثية للمحطات المرجعية المختارة للتجربة

اسم النقطة	RMS الحل الأمامي (m)	RMS الحل الخلفي (m)	RMS الحل المقترح (m)
DOBS	LAT	0.4122	0.0025
	LONG	0.2599	0.0017
	HIGHT	0.1886	0.0045
FRKN	LAT	0.2323	0.0023

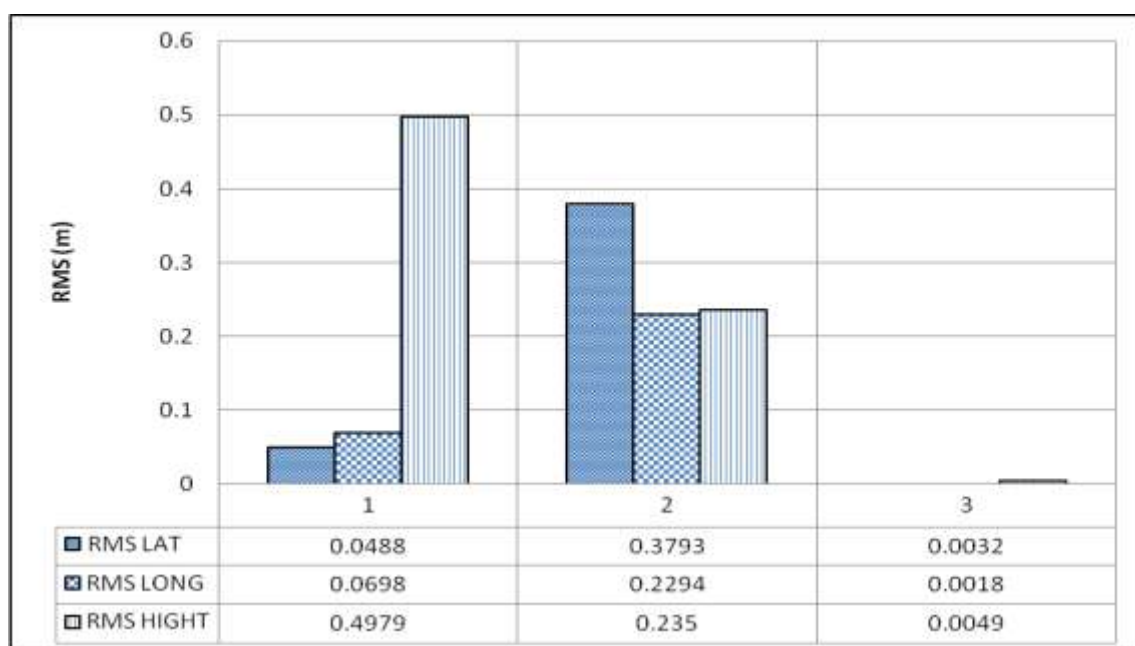
0.0018	0.1973	0.1210	LONG	NC77
0.0038	0.1547	0.7684	HIGHT	
0.0032	0.3793	0.0488	LAT	
0.0018	0.2294	0.0698	LONG	
0.0049	0.2350	0.4979	HIGHT	



الشكل (8) مقارنة قيم RMS للمركبات الإحداثية للنقطة DOBS وفق صيغ مختلفة لمرشح كالمن الموسع



الشكل (9) مقارنة قيم RMS للمركبات الإحداثية للنقطة FRKN وفق صيغ مختلفة لمرشح كالمن الموسع



الشكل (10) مقارنة قيم RMS للمركبات الإحداثية للنقطة NC77 وفق صيغ مختلفة لمرشح كالمن الموسع

الاستنتاجات والتوصيات:

إن تطبيق الخوارزمية الجديدة المقترحة لتقدير الموقع ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (SC-EKF)، يحسن بشكل فعال من دقة تعيين النقطة المرصودة على المركبات الإحداثية الثلاث.

إن تطبيق الخوارزمية الجديدة المقترحة لتقدير الموقع ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (SC-EKF)، يزيل بشكل نهائي الأثر السلبي لمعامل زمن التقارب الذي يؤثر على جودة الحل ضمن التقنية المذكورة.

ضمن شروط التجربة، زمن التقارب لخوارزمية تقدير الموقع المعتمدة على خوارزمية مرشح كالمن الموسع الخلفية (Background-EKF)، يعادل تقريباً ضعف زمن التقارب لخوارزمية تقدير الموقع المعتمدة على خوارزمية مرشح كالمن الموسع الأمامية (Foreground-EKF).

قيم RMS للمركبتين الأفقيتين للنقطة المرصودة بتقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) باستخدام الخوارزمية الأمامية (Foreground-EKF)، أصغر من قيم RMS المناظرة لها باستخدام الخوارزمية الخلفية (Background-EKF)، مما يشير لعلاقة طردية بين قيم RMS للمركبتين الأفقيتين للنقطة مع زمن التقارب ضمن التقنية المذكورة.

ضمن المعالجة ضمن الخوارزمية الجديدة المقترحة لتقدير الموقع ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (SC-EKF)، يعادل ضعف زمن المعالجة التقليدية باستخدام (Foreground OR Background -EKF)، وبالمقابل فإنه ذو دقة أعلى في تحديد الموقع.

تمنحجة زمن التقارب رياضياً، وكذلك العلاقة الرياضية بين زمن التقارب وقيم RMS من الأهداف المستقبلية للبحث.

المراجع:

- [1] MARTIN, I. *GNSS Precise Point Positioning: The enhancement with GLONASS*. School of Civil Engineering and Geosciences Newcastle University, Newcastle, 2013, 244.
- [2] MARTÍN, A.; ANQUELA, A.B.; CAPILLA, R.; BERNÉ, J. L. *PPP Technique Analysis Based On Time Convergence, Repeatability, IGS Products, Different Software Processing And GPS+Glonass Constellation*. Journal Of Surveying Engineering, Vol.137, N^o. 3, 2011, 99-108
- [3] LE, A.; TEUNISSEN, P. *Optimal Recursive Least-Squares Filtering Of GPS Pseudorange Measurements*. Springer, Verlag, 2008, 540.
- [4] BISNATH, S.; GAO, Y. *Current State Of Precise Point Positioning And Future Prospects And Limitations*. Springer, Observing Our Changing Earth, Vol. 133, 2008, 615-623.
- [5] KOUBA, J. *A Guide To Using International GNSS Service (IGS) Products*. 2009, 10 Sept. <[Http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/usage.html](http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/usage.html)>
- [6] GENG, J.; MENG, X.; TEFERLE, F.; DODSON, A. *Performance Of Precise Point Positioning With Ambiguity Resolution For 1 To 4 Hour Observation Periods*. Survey Review, Vol. (316), N^o. 42, 2010, 155–165.
- [7] ASHBY, N. *The Sagnac Effect in the Global Positioning System*. Department of Physics, University of Colorado, Colorado, 2004, 318.
- [8] KOUBA, J.A. *A guide to using International GNSS Service (IGS) products*. Geodetic Survey Division-Natural Resources Canada, Canada, 2009.
- [9] RIBEIRO, M. I. *Kalman and Extended Kalman Filters Concept, Derivation and Properties*. Institute for Systems and Robotics. Instituto Superior Técnico, 2004.
- [10] <<http://www.ngs.noaa.gov/UFCORS/>>
- [11] <<https://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/compindex.html>>