

اقتراح شروط رياضية جديدة لاستخدام المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى لحل الغموض ضمن التوضع النقطي الدقيق (PPP) ومقارنته بأداء مرشح كالمن

د. أديب القاموع*

د. محسن أحمد**

د. سلافيكو غوسبودينوف***

عمار كحيله****

(تاريخ الإيداع 19 / 10 / 2020. قبل للنشر في 25 / 1 / 2021)

□ ملخص □

تعاني تقنية التوضع النقطي الدقيق (Precise Point Positioning, PPP) من مشكلة بطء تقارب الحل الملاحي (Slow Convergence Time) من القيمة المستقرة (Stable Value)، يعود سبب هذه المشكلة إلى أن هذه التقنية تعتمد الحل الملاحي بصيغته غير النفاضلية من المستقبل الجيوديزي الوحيد (Single Receiver)، ولأنها تتعامل مع مصادر الأخطاء لأرصاء نظم الملاحة العالمية بالأقمار الصناعية (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) بشكل فردي ومستقل. إن تقارب الحل الملاحي مرتبط باقتراب حل غموض الموجة الحاملة (Phase Ambiguity Resolution) من القيمة المستقرة، والتي تتم بشكل وسطي بين (20-40) دقيقة من الأرصاء ضمن تقنية التوضع النقطي الدقيق (PPP) [1]، والمرتبطة بشكل أساسي بحدوث قفزات خاطئة للدورة (Cycle Slips) أو انقاطاعات في الموجة، تعيد التقارب إلى قيمة ابتدائية غير دقيقة (Initial Value).

يتم غالباً استخدام المرشحات (Filters) في تصفية الأرصاء الواردة إلى المستقبل الجيوديزي الوحيد، ويكون أداء هذا المرشح هو المقياس الفعلي لزمان تقارب الحل الملاحي ككل ضمن تقنية التوضع النقطي الدقيق (PPP) [2]. يهدف البحث إلى تطوير طريقة استخدام المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى في مواجهة قفزات الدورة (Cycle Slips)، عن طريق تعويض الفاقد في قيمة الغموض وتصحيح القفزات فيها، باشتراطات رياضية جديدة، ثم مناقشة أداء المرشحات الثلاثة: الخطي بالتريبعات الصغرى، وكالمن، والخطي بالتريبعات الصغرى المطورة من قبلنا، بتقنية التوضع النقطي الدقيق (PPP)، على ثلاث محطات محلية (T11, T21, T51).

بلغت الفروقات المطلقة بين الشبكة المرجعية وقياسات التوضع النقطي الدقيق (PPP) في المحطات الثلاثة المدروسة القيم الوسطية التالية: (3.5 cm) على المركبة (X)، و(2.70 cm) على المركبة (Y)، و(7.70 cm) على المركبة (Z)، وذلك باستخدام المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدلة وفق الشروط الرياضية الجديدة المقترحة في البحث، متفوقاً بذلك على أداء مرشح كالمن والمرشح الخطي بالتريبعات الصغرى القياسي.

الكلمات المفتاحية: تموضع نقطي دقيق (PPP)، مرشح خطي بالتريبعات الصغرى التكرارية، مرشح كالمن، غموض الموجة الحاملة، قفزات الدورة.

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

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

*** أستاذ-جامعة العمارة والهندسة والجيوديزيا-صوفيا-بلغاريا.

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

Supporting Linear Least Square Filter by Adding New Mathematical Conditions for Solving Ambiguity in Precise Point Positioning and Comparative Study Versus Kalman Filter

Dr. Adib Alkamouh*
Dr. Mouhsen Ahmad**
Dr. Slaveyko Gospodinov***
Ammar kahila****

(Received 19 / 10 / 2020. Accepted 25 / 1 / 2021)

□ ABSTRACT □

Precise Point Positioning (PPP) suffers from (Slow Convergence Time) from the stable value, because this technique adopts the navigational solution on its non-differential form from the (Single Receiver), and because it deals with error sources in Global Navigation Satellite Systems (GNSS) individually and independently.

The convergence of the navigation solution is related to the approach of the phase ambiguity resolution to the stable value, which takes place on average after (20-40) minutes of observations within the Precise Point Positioning (PPP) technique [1], and is mainly related to the occurrence of unpredicted jumps of Phase cycle which return convergence to an inaccurate initial value.

Filters are often used to filter the observations coming to the single geodetic receiver, and the performance of this filter is the actual measure of the Convergence time of the navigation solution as a whole within the Precise Point Positioning (PPP) technique [2].

The research aims to develop a new method of using the linear least square Filter to overcome (Cycle Slips), by compensating ambiguity loss, and correcting the wrong jumps on it, with new mathematical conditions, then discussing the performance of the three filters: linear least squares filter, Kalman filter, and adaptive Least squares filter developed in this research, in Precise Point Positioning (PPP) technique.

The absolute differences between the reference network and the (PPP) measurements in the three stations, reached mean values of (3.5 cm) on the (X) axis, (2.70 cm) on the (Y) axis, and (7.70 cm) on the (Z) axis, By using new mathematical conditions in Linear Least Square Filter, we reach high accuracy level that outperform the Kalman Filter (PPP) Positioning, and Linear Least Square Filter (PPP) Positioning as well.

Keywords: Precise Point Positioning (PPP), Linear Least Square Filter, Kalman Filter, Phase Ambiguity Resolution, Cycle Slip.

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

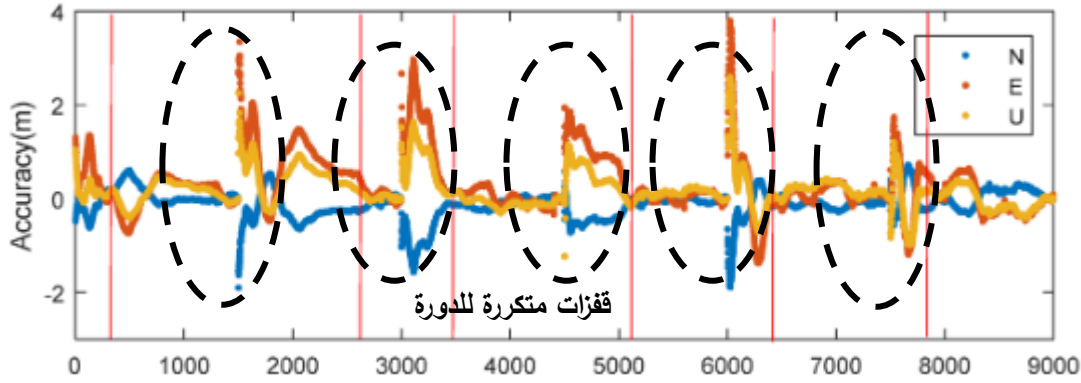
** Professor- Department of Topographic Engineering- Tishreen University- Lattakia- Syria.

*** Professor- University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy- Sofia- Bulgaria.

**** PhD student- Department of Topographic Engineering- Tishreen University- Lattakia- Syria.

مقدمة:

يعتبر ببطء زمن تقارب الحل الملاحي (Convergence Time) ضمن التموضع النقطي الدقيق (PPP) المعيار الرئيسي في تقييم جودة التقنية، بالإضافة إلى معيار دقة الموقع النهائي، مع الأخذ بعين الاعتبار إلى وجود علاقة تابعة بين زمن تقارب الحل الملاحي والدقة النهائية الناتجة للموقع، حيث يتم دمجها معاً ضمن مصطلح الثبات (Stability) للحل الملاحي، وهو يفترض أنه بعد استقرار الخط البياني لتابع (الدقة-الزمن) سيكون التفاضل الجزئي لهذا الخط أصغرياً وينتهي إلى قيمة قريبة جداً من الصفر (نظرياً)، ويبين الشكل (1) العلاقة بين زمن تقارب الحل الملاحي والدقة ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) [3]، حيث تشير العديد من الدراسات إلى أن زمن تقارب الحل الملاحي في التموضع النقطي الدقيق (PPP) يكون وسطياً بحدود (20-40) دقيقة [1].



الشكل (1) علاقة الحل الملاحي بحدوث قفزات الدورة (Cycle Slips) [3]

منشأ زمن تقارب الحل الملاحي (Convergence Time) هو معاملات المعادلة الملاحية للموجة الحاملة أو الطور، فالحل يتم بالتقريب المتتالي لأرصاء الأقمار الصناعية ذات غموض الموجة الحاملة غير المعلوم في بداية الحل (Phase Ambiguity)، ويبقى هذا المعامل في تقارب مستمر وصولاً للقيمة الأكثر احتمالاً له ضمن مجموع أرصاء نظم (GNSS) [2].

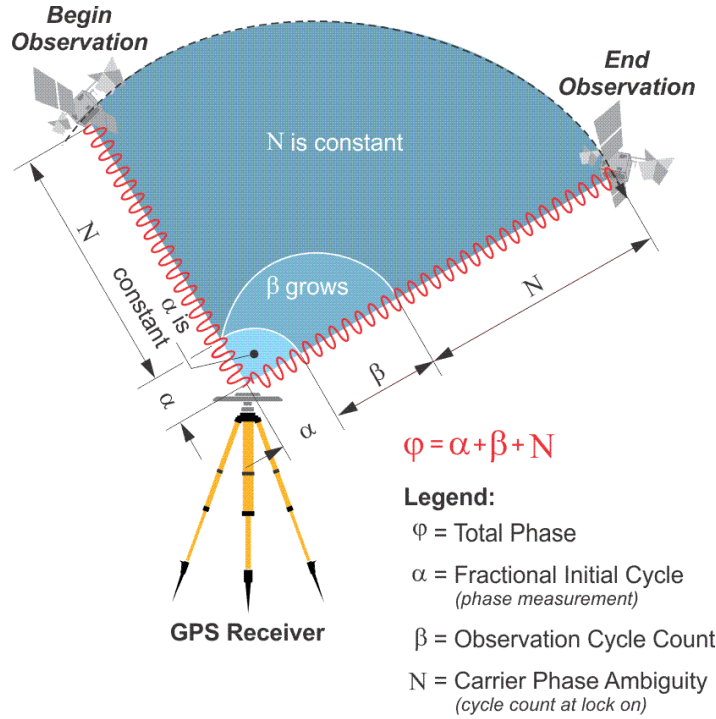
إن خوارزمية تقدير الموقع في تقنية التموضع النقطي الدقيق لا تستخدم الصيغة التفاضلية لحل جملة المعادلات ضمن المستقبل الوحيد، من أقمار صناعية متعددة وبترددات متعددة (أحادية-ثنائية-ثلاثية)، بل تعالج بشكل فردي كل مصدر من مصادر الأخطاء لأرصاء (GNSS)، وبذلك يبرز بشكل واضح أهمية وجود خوارزمية صلبة (Robust Algorithm) للتعامل مع كم البيانات الكبير ضمن كل مستقبل مدروس [4].

تقدم المرشحات الرياضية طريقة فعالة للتعامل مع عدد بيانات كبير ضمن مستقبل جيوديزي محدد، وتتنوع المرشحات التي يمكن استخدامها ضمن خوارزمية تقدير الموقع، من المرشحات الخطية التي تعتمد مبدأ التربيعات الصغرى (Least Square Method)، وصولاً إلى المرشحات التكرارية مثل مرشح كالمن (Kalman Filter).

1-1 غموض الموجة الحاملة (Carrier Phase Ambiguity Resolution):

لنفترض قمراً صناعياً يبث إشارة بشكل موجة جيبية بطور معين، كما هو موضح بالشكل (2)، يتم استقبال الإشارة من قبل هوائي المستقبل ضمن طور زمني مختلف. يولد المستقبل نسخة مطابقة للإشارة المولدة من القمر الصناعي، ويتم مقارنة الطور المولد مع الطور المرصود وذلك للحصول على أرصاء الطور. إن العدد الصحيح من أطوال الموجة بين القمر الصناعي والمستقبل خلال فترة الانتقال للإشارة هو عدد مجهول. يدعى هذا العدد بالغموض الصحيح (Integer)

(Ambiguity) ويرمز له بالرمز N . من أجل الوصول إلى دقة من رتبة السنتيمتر للتموضع يجب أن يتم حل الغموض ومعرفة القيمة الصحيحة للدالة N [5].



الشكل (2) مفهوم غموض الموجة الحاملة

أهمية البحث وأهدافه:

تتمثل أهمية البحث في سعيه لتحديد المرشح ذو الثبات الأفضل (Best Stability Filter) لاستخدامه ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP)، وتعديل طريقة استخدام المرشح الخطي بالترجيحات الصغرى لمواجهة قفزات الدورة (Cycle Slips)، وبالتالي زيادة دقة الموقع الناتج من استخدام تقنية التموضع النقطي الدقيق.

يهدف البحث إلى تقييم دقة الموقع وزمن تقارب الحل الملاحي ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) في حال استخدام مرشح خطي بالترجيحات الصغرى (LSF) أولاً ثم باعتماد مرشح كالمن (KF) ثانياً، على نفس العينة المدروسة، بتثبيت جميع معاملات المعالجة وتغيير المرشح فقط، أي:

1- استخراج قيم غموض الموجة الحاملة من ضمن أرصاد المحطات المدروسة بتقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP)، باستخدام المرشح الخطي بالترجيحات الصغرى (LSF) ثم بالمرشح التكراري لكالمن.

2- تصميم المرشح الخطي بالترجيحات الصغرى المعدلة، عن طريق وضع الاشتراطات الرياضية اللازمة لتعويض الفاقد في قيمة الغموض عند لحظة حدوث قفزات الدورة (Cycle Slips)، وإجراء التقييم مع المرشحين (الخطي بالترجيحات الصغرى، وكالمن) من خلال التحليل البياني.

3- تقييم أداء التموضع النقطي الدقيق (PPP) من خلال إيجاد منحنيات العلاقة التابعية بين معاملي الدقة وزمن التقارب للحل الملاحي باعتماد المرشحين (المرشح الخطي بالترجيحات الصغرى، ثم بالمرشح التكراري لكالمن ثم بالمرشح الخطي بالترجيحات الصغرى المعدلة).

2- ميزات وسلبيات استخدام المرشحات ضمن التموضع النقطي الدقيق (PPP):

نلجأ في معالجة العينات الاحصائية ذات الأرصدا كثيرة العدد إلى المرشحات أو الفلاتر (Filters)، وذلك ناتج عن ضرورة تقنية وبرمجية، خصوصاً في الأجهزة الحديثة التي تتطلب بيانات مكانية سريعة وأنية للإحداثيات، إن الفارق الأساسي بين المرشحات المستخدمة ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق هو التابع الرياضي المستخدم، وسوف نستعرض المرشحين الأكثر استخداماً وهما: المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى، والمرشح التكراري لكالمين.

2-1 المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى (Linear Least Square Filter):

تمكننا خوارزمية التريبعات الصغرى من الحصول على مقدرات المجاهيل من خلال تصغير مجموع مربعات الأخطاء. وبذلك نستطيع تقدير القيم المجهولة ضمن نموذج أرساد الطور [6]. بافتراض لدينا قياسات الطور أو الموجة الحاملة من قمر صناعي معين، تكون أبعاد مصفوفة قياسات الطور (y) هي $(n \times 1)$ ، وتكون أبعاد مصفوفة الغموض (a) هي $(m \times 1)$ ، وباعتبار شعاع القاعدة هو (b) أبعاده $(t \times 1)$ ، وبفرض أن (A) و (B) ، هما مصفوفتا الأمثال لكل من غموض الطور وشعاع القاعدة، على الترتيب يمكن أن نكتب نموذج الأرساد بالعلاقة:

$$y = Aa + Bb + v \quad (1) \text{ المعادلة}$$

بافتراض أن مصفوفات التباينات هي (Q_a, Q_b, Q_y) يمكن صياغة العلاقة التالية:

$$\min_{a,b} \|y - Aa - Bb\|_{Q_y}^2 = \|e\|_{Q_y}^2 + \|\hat{b} - b\|_{Q_b}^2 + \|\hat{a} - a\|_{Q_a}^2 \quad (2) \text{ المعادلة}$$

حيث إن:

- e : هي الرواسب الكلية للتريبعات الصغرى يتم تطبيق هذه الخوارزمية على مرحلتين أساسيتين:
- **المرحلة الأولى:** وتسمى مرحلة التريبعات الصغرى العائمة (Float Solution)، ويتم فيها التقدير الأولي للمجهولين (a, b) وتحضير القيم وفق الصيغة:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{aa} & Q_{ab} \\ Q_{ba} & Q_{bb} \end{bmatrix} \quad (3) \text{ المعادلة}$$

- **المرحلة الثانية:** يتم استخدام قيم الحل العائم الناتجة من المرحلة الأولى لتقدير القيم الدقيقة للغموض وفق الصيغة:

$$\min(\hat{a} - a)^T Q_a^{-1} (\hat{a} - a) \quad (4) \text{ المعادلة}$$

يتميز المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى بسهولة برمجته، وقدرته على التعامل مع القيم الفعلية فقط للأرساد وفق مبدأ التريبعات الصغرى، لذلك يعتبر المرشح الأكثر قرباً من حقيقة البيانات المدروسة، ولكن حدوث قفزات في الدورة، وما تسببه من إرجاع الحل الإبتدائي لحل الغموض إلى قيمة مغايرة للواقع يؤثر سلباً على الحل الملاحي النهائي وفق تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP)، وهي من أكبر سلبيات هذا المرشح.

2-2 المرشح التكراري لكالمين (Kalman Filter):

يقوم باستقراء القيمة القادمة ضمن العينة الإحصائية، بدلالة معرفة الحالة الأولية للنظام (Prior Knowledge of State)، ثم يقوم بمقارنتها مع القيمة الواردة من القياسات الفعلية (Measurements)، ليقوم بتحديث تابع الحالة للمرشح (State Update)، وهكذا، حتى انتهاء عدد عناصر مصفوفة الأرساد، وبذلك فهو قادر على التعامل مع قفزات الدورة، لأنه يقوم بخطوة المقارنة السابقة بين القيمة المتوقعة وقيمة القياس الفعلي، ويقوم باستيفاء قيمة وسطى بين القيمتين السابقتين، كما هو موضح بالشكل (3).

إن هذا الأداء للمرشح له إيجابيات وسلبيات في نفس الوقت، فهو من جهة يقوم بتخفيف أثر حدوث قفزات في الدورة ضمن القياسات، وبالتالي يكون الوصول إلى مرحلة الاستقرار أسرع، ولكن تحديث تابع الحالة يسبب خسارة في القيم الدقيقة الفعلية للقياسات، وبالتالي يضعف الحل الملاحي فعلياً [7].

بافتراض لدينا معادلة ملاحة بنظامي (GPS, GLONASS) ضمن مستقبل جيوديزي وحيد، تعطى حالة النظام (System State) بالعلاقة:

$$X = [x, y, z, N_1, N_2, \dots, N_m]^T \quad \text{المعادلة (5)}$$

حيث إن:

- (m) عدد الأقمار الصناعية التي تم رصدها في لحظة زمنية معلومة.

بنشر العلاقة السابقة باستخدام أرصاد (GPS, GLONASS) يصبح لدينا:

$$\begin{aligned} X &= [b^T, (N_{Float}^{GPS})^T, (N_{Float}^{GLONASS})^T] \\ X &= [x, y, z, N_1^{GPS}, N_2^{GPS}, \dots, N_m^{GPS}, N_1^{GLONASS}, N_2^{GLONASS}, \dots, N_n^{GLONASS}]^T \end{aligned} \quad \text{المعادلة (6)}$$

حيث إن:

- $N_{Float}^{GPS}, N_{Float}^{GLONASS}$: الغموض الأولي لكل من قمري (GPS) و (GLONASS) على الترتيب.
- b : شعاع القاعدة للمحطة المدروسة.

في اللحظة الزمنية $(k + 1)$ يعطى تحديث شعاع القاعدة بالعلاقة:

$$b_{k+1} = [x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}]^T = b_k + W_{b,k} \quad \text{المعادلة (7)}$$

وبالتالي نستطيع صياغة علاقة حالة النظام في لحظة زمنية لاحقة بالعلاقة:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= F_{k,k+1} X_k + W_k \\ Z_{k+1} &= [\phi_{GPS}^T, \phi_{GLONASS}^T, \rho_{GPS}^T, \rho_{GLONASS}^T]^T = h(X_{k+1}) + V_{k+1} \end{aligned} \quad \text{المعادلة (8)}$$

حيث إن:

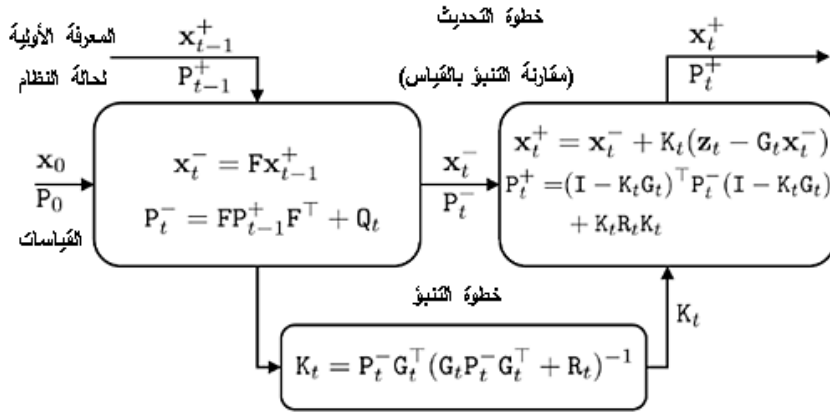
- $F_{k,k+1}$: مصفوفة الانتقال بين حالي النظام للحظتين متتاليتين $(k, k + 1)$
- Z : مصفوفة تفاضل الترددات لكل نظام مستخدم $(L_1 + L_2)$
- W_k, V_{k+1} : ضجيج القياسات، وضجيج المعالجة، على الترتيب.
- $h(X_{k+1})$: تابع لا خطي يصف العلاقة بين الأرصاد والحالة.

عند تحويل التابع $(h(X_{k+1}))$ إلى تابع خطي، تصبح مصفوفة الأرصاد بشكلها الخطي كما يلي:

$$H_k = \begin{bmatrix} H^{GPS} & D^{GPS} & & & \\ H^{GLONASS} & & D^{GLONASS} & & \\ & H^{GPS} & & & 0 \\ H^{GLONASS} & & & & 0 \end{bmatrix} \quad \text{المعادلة (9)}$$

حيث إن:

- $D^{GPS}, D^{GLONASS}$: مصفوفة المعاملات لأرصاد (GPS) و (GLONASS).
- 0 : مصفوفة صفرية



الشكل (3) خوارزمية مرشح كالمن التكرارية [8]

وعليه يمكن كتابة معادلات مرشح كالمن بالعلاقات:

$$\begin{aligned}
 P_{k+1/k} &= F_{k,k+1} P_k F_{k,k+1}^T + Q_k \\
 K_{k+1} &= P_{k+1/k} H^T (H P_{k+1/k} H^T + R_k)^{-1} \\
 P_{k+1} &= (I - K_{k+1} H) P_{k+1/k} \\
 X_{k+1/k} &= F_{k,k+1} X_k \\
 X_{k+1} &= X_{k+1/k} + K_{k+1} (Z_{k+1} - h(X_{k+1/k}))
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

حيث إن:

- P_k : مصفوفة تباينات الحالة عند التحديث رقم (k) .
- P_{k+1} : هو التقدير اللاحق بخطوة للقيمة (P_k) .
- K, Q : ضجيج المعالجة، ومصفوفة كالمن، على الترتيب.

2-3 الاشتراطات الرياضية المقترحة لتعديل المرشح الخطي بالتربيعات الصغرى للتعامل حدوث قفزات في قيم الغموض ناتجة عن قفزات في الدورة:

بافتراض لحظة حدوث زلة الدورة هي اللحظة الزمنية (t) من وقت القياس، وأن قيمة الغموض في تلك اللحظة قبل حدوث القفزة في القيمة (N_t) وقيمة الغموض في اللحظة الزمنية التالية أي بعد حدوث القفزة هي (N_{t+1}) ، وأن قيمة الغموض في اللحظة الزمنية اللاحقة مباشرة لحدوث قفزة قيمة الغموض هي (N_i) والقيمة التالية لها هي (N_{i+1}) ، حيث $(i > t + 1)$ ، وبافتراض أنه بعد تطبيق المرشح أصبحت قيم الغموض كما يلي: لحظة حدوث زلة الدورة قيمة الغموض بعد الترشيح هي (N'_t) ، وقيمة الغموض في اللحظة التالية بعد حدوث القفزة هي (N'_{t+1}) ، وأن قيمة الغموض في اللحظة اللاحقة مباشرة لحدوث قفزة قيمة الغموض هي (N'_i) والقيمة التالية لها بعد الترشيح (N'_{i+1}) ، حتى نتغلب على قفزة قيمة الغموض يجب أن نتحقق جملة المعادلات التالية:

$$\begin{aligned}
 N'_t &= N_t \\
 N'_{t+1} &= N_t \\
 N'_i &= N'_{t+1} + (N_{t+1} - N_i) \\
 N'_{i+1} &= N'_i + (N_i - N_{i+1})
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

يتم تطبيق المعادلات السابقة في كل لحظة قفزة في قيمة الغموض والتي تم اقتراح الاختبار التالي لتحديدها.

2-3-1 اختبار وجود قفزات في قيم الغموض وتحديد لحظة حدوث القفزة:

بافتراض عينة أرساد مكونة من (n) لحظة قياس، وأن النسبة المئوية بين قيمتي غموض متتاليتين هي ($\mu_x = 100 * \frac{N_n}{N_{n+1}}$) حتى لا يكون هناك قفزات في قيم الغموض يجب أن تكون قيمة النسبة بين نسبتي متتاليتين أكبر من القيمة (0.8)، وهذه القيمة حصلنا عليها تجريبياً ضمن العينة الإحصائية المدروسة في تجربة البحث، وذلك من دراسة وتحليل منحيات النسب المئوية بين قيمتي غموض متتاليتين.

$$\frac{\mu_x}{\mu_{x+1}} \leq 0.8 \quad \text{المعادلة (12)}$$

وتجدر الملاحظة إلى الآتي:

(1) يتم تطبيق المرشح بدءاً من من قفزة قيمة الغموض المواكبة لقفزة الدورة الأولى، ثم يتم إعادة حساب جميع عناصر العينة الإحصائية، ثم يطبق اختبار حدوث القفزة مرة ثانية على العينة بعد الترشيح الأول، ثم يتم تكرار المرشح حتى تحقق شرط الاختبار الوارد بالمعادلة (12).

(2) في لحظات القياس الأولى، حيث تقارب الحل الملاحي في مرحلته الأولى، لا يتم تطبيق هذا المرشح على الرغم من تجاوز المتراحة الاختبار الواردة سابقاً، بل يتم تنفيذ المرشح بعد الاستقرار النسبي لمنحني التابع (الغموض-الزمن).

(3) أن هذا الاختبار يتم استخدامه أيضاً بعد تطبيق المرشح للتأكد من جودة عملية الترشيح.

طرائق البحث ومواده:

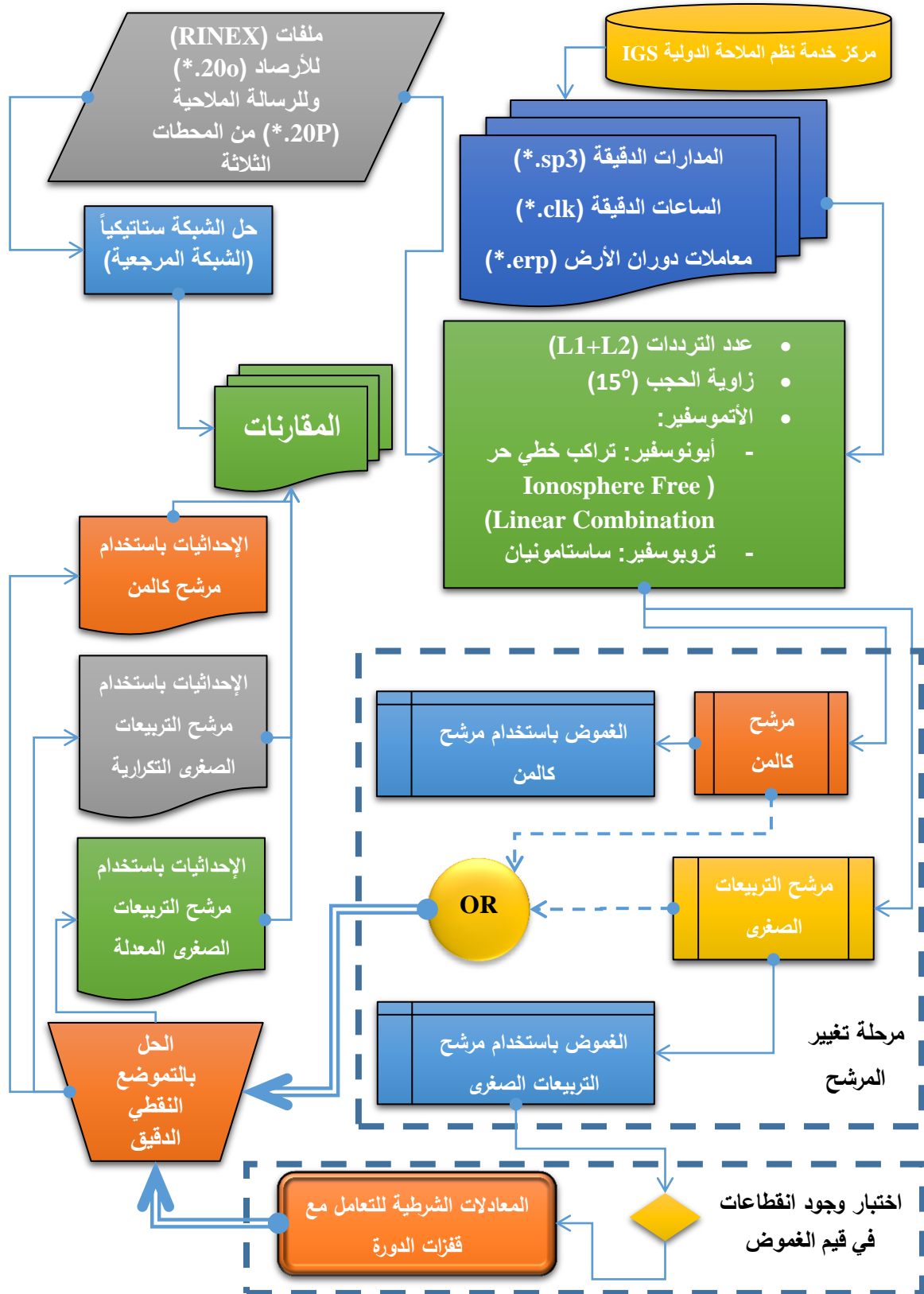
قمنا باختيار (3) محطات ضمن محافظة اللاذقية، إحداثيات المنطقة الوسطية (4202968.478E, 3044709.221N, 3695195.680H) متر، ضمن النظام المرجعي (WGS84 –Earth Centered Earth) (Fixed)، كما هو موضح في الشكل (4)، يوم الرصد (2020/04/20م) ضمن الزمن المحلي، أما ضمن النظام المرجعي الزمني (GPST) فالقياسات تمت ضمن الأسبوع رقم (2102) ضمن اليوم رقم (111) ضمن عام (2020م)، واليوم رقم (01) من أسبوع القياس، وجميع المحطات ثابتة ومقيسة بالمستقبل الجيوديزي (Hi-Target V8)، بتواتر رصد (5) ثانية.



الشكل (4) موقع المحطات المدروسة في تجربة البحث

1- منهجية البحث:

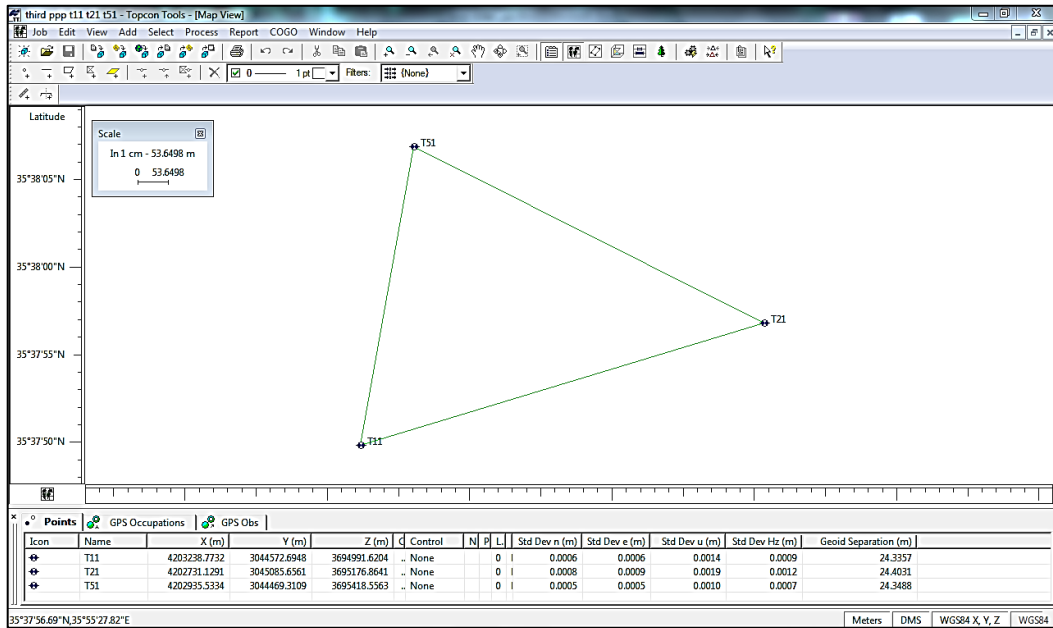
ليبان تأثير الشروط الرياضية المقترحة من قبلنا على المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى، في تحديد قيم غموض الموجة الحاملة وإزالة أثر قفزات الدورة، ومقارنة أدائها مع قيم غموض الموجة الحاملة الناتجة من مرشح كالمن، وتقييم صحة الموقع للمحطات المدروسة بالمقارنة مع الشبكة المرجعية، اتبعنا المنهجية الواردة بالشكل (5).



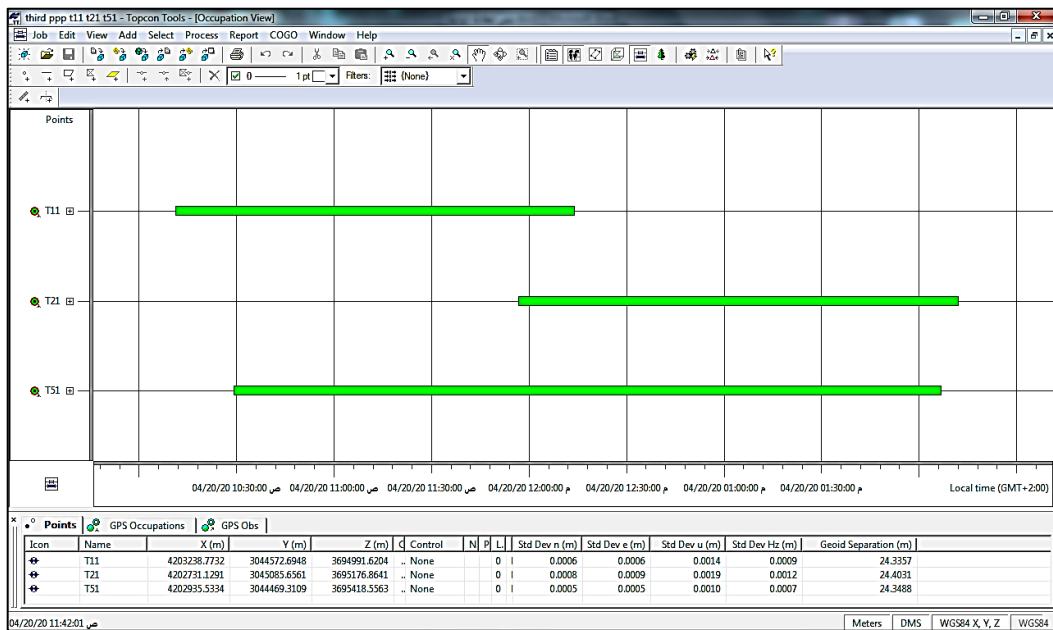
الشكل (5) المنهجية المتبعة في البحث

2- تحديد إحداثيات المحطات (T11, T21, T51) باعتماد الطريقة الشعاعية الساكنة:

باستخدام برنامج (TopconTools) تم إدخال ملفات الأرصاد والرسالة الملاحية للمحطات المدروسة (T11, T21, T51)، وباعتماد الحل الحر للشبكة (Free Network)، تم حساب الإحداثيات مع أخطائها المتوسطة الترتيب ضمن نظام الإحداثيات المركزي للأرض للأهلينج (Earth centered Earth Fixed WGS-84, ECEF)، وهي إحداثيات جملة المقارنة ضمن البحث، كما هو مبين بالشكلين (6-7)، والجدول (1) الموضح فيه زمن الرصد في كل محطة ضمن تجربة البحث.



الشكل (6) المحطات المدروسة بعد تعديلها كشبكة حرة ستاتيكية بلوك واحد



الشكل (7) أزمنة الرصد في المحطات الثلاثة المدروسة ضمن تجربة البحث

الجدول (1) إحدائيات المحطات المدروسة الناتجة من تعديل حر ستاتيكي ضمن برنامج (TopconTools).

Station Name	مدة الرصد ساعة	X (m)	$\sigma(x)$ m	Y (m)	$\sigma(y)$ m	Z (m)	$\sigma(z)$ m	σ (أفقياً) m
T11	02:02:55	4203238.773	0.0006	3044572.695	0.0006	3694991.620	0.0014	0.0009
T21	02:15:45	4202731.129	0.0009	3045085.656	0.0008	3695176.864	0.0019	0.0012
T51	03:37:45	4202935.533	0.0005	3044469.311	0.0005	3695418.556	0.0010	0.0007

ونلاحظ من نتائج التعديل الحر الستاتيكي للشبكة مقدار الدقة الناتجة والتي بلغت (1.2mm) أفقياً و(1.9 mm) شاقولياً، وهذا المستوى من الدقة تم التوصل إليه نتيجة مدة الرصد الكافية والتي فاقت الساعتين كحد أدنى في كافة المحطات، والموضحة في الجدول أعلاه لكل محطة من محطات الشبكة.

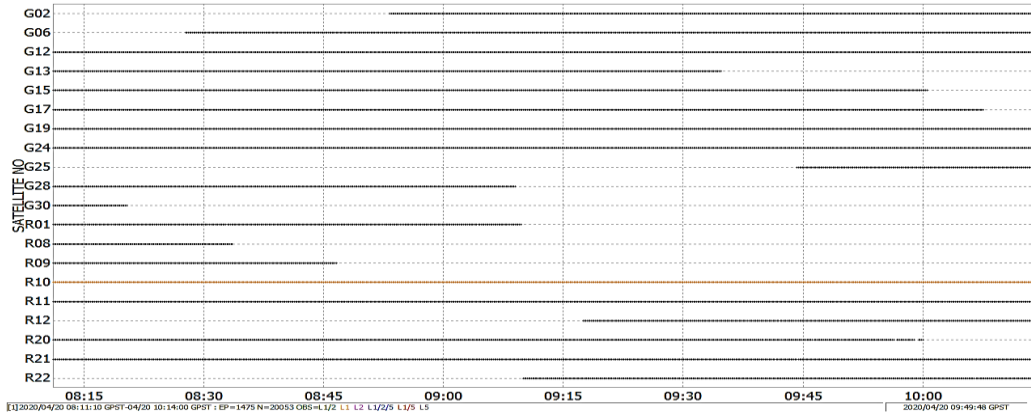
3- التحليل باستخدام تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP):

3-1 مرحلة التحضير الأولية (Pre-Processing):

اعتمدنا في البحث ضمن مرحلة المعالجة الأولية على برنامج (RTKLIB) المفتوح المصدر، حيث تم ضمن كل محطة مدروسة إجراء اختبار توفر الأقمار الصناعية (Satellite Visibility)، واختبار انحرافات الدقة (Dilution of Precision, DOP)، وذلك من أجل التأكد من جودة الأرصاد الداخلة في معالجة التموضع النقطي الدقيق (PPP)، ومن خدمة نظم الملاحة الدولية (International GNSS Services, IGS) على شبكة الإنترنت تم تحميل المنتجات الجيوديزية الدقيقة من مركز (IGS) حصراً، لأنه يعطي أفضل منتجات جيوديزية بالنسبة لمعاملات الصّحة النهائية للحل الملاحي (Positioning Accuracy) من بقية مراكز تحليل البيانات المتوفرة عالمياً [8]، وهذه الملفات الرقمية هي ملفات المدارات الدقيقة والساعات الدقيقة (GNSS Satellite Ephemerides / Satellite & Station Clocks) ومعاملات دوران الأرض (Earth Rotation)، وتم التحميل باتباع البروتوكولات الواردة في [9]، ونورد فيما يلي مثالاً عن دراسة المحطة (T11).

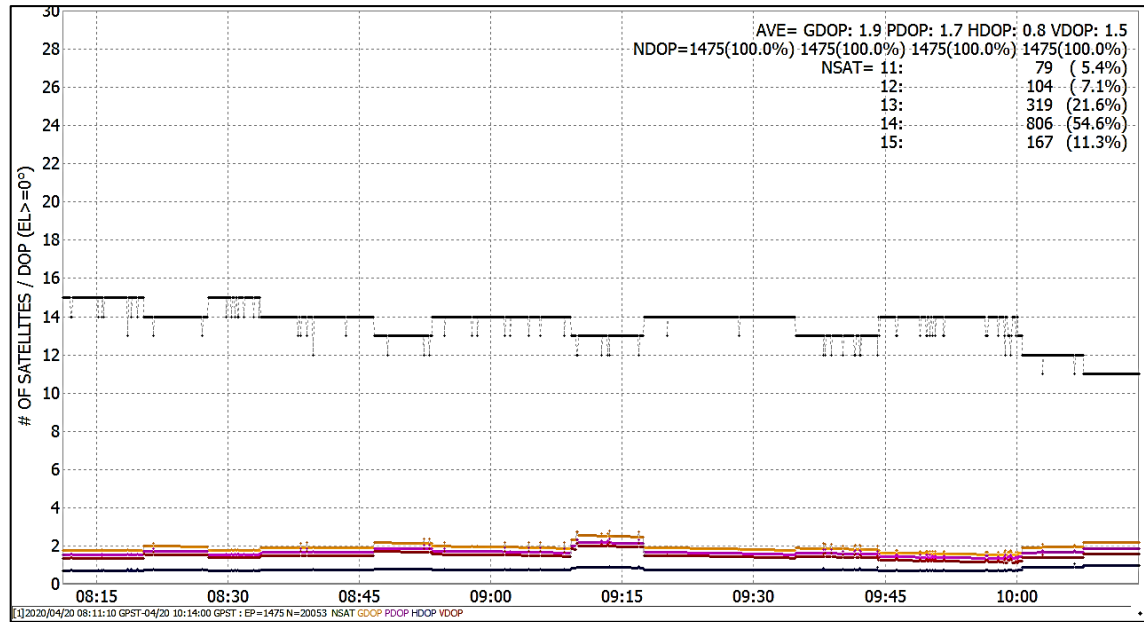
• دراسة المحطة (T11):

1- تحليل توفر الأقمار ضمن فترة الرصد للمحطة (Satellite Visibility):



الشكل (8) توفر الأقمار الصناعية من منظومتي (GPS, G) و(GLONASS, R) للمحطة (T11)

2- تحليل انحرافات الدقة (Dilution of Precision, DOP):



الشكل (9) قيم انحرافات الدقة (DOP) ضمن المحطة (T11)

بعد التأكد من أن قيم (DOP) الناتجة (GDOP:1.9, PDOP:1.7, HDOP:0.8, VDOP:1.5) منسجمة مع متطلبات الدقة ضمن تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) [10]، انتقلنا إلى خطوة الحصول على قيم غموض الموجة الحاملة، وفق ما يلي:

2-3 تطبيق المرشحات على معادلة الطور ضمن المحطة (T11):

قبل البدء بتطبيق المرشحات يجب الأخذ بعين الاعتبار أنه ضمن التموضع النقطي الدقيق (PPP) قمنا باعتماد المعاملات الواردة في الجدول (2) للمعالجة اللاحقة (Post Processing)، وهي:

الجدول (2) معاملات المعالجة الثابتة ضمن التموضع النقطي الدقيق (PPP)

المعامل	الوصف
نوع التموضع	تموضع نقطي دقيق (PPP)
الترددات	L1+L2
زاوية الحجب	15°
تصحيات الأتموسفير	• تراكب خطي حر من أخطاء الأيونوسفير • تطبيق معادلات ساستامونيان لتصحيح التروبوسفير

إن معادلة التراكب الخطي الحر من أخطاء الأيونوسفير (Ionosphere Free Linear Combination) تعطى بشكلها العام وفق المعادلة: [11]

$$P_{IF} = \frac{f_{L1}^2 P_{L1} - f_{L2}^2 P_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} = \rho + c. (\delta t_{rcv} - \delta t_{sat}) + T_d + \epsilon'_p \quad (13) \text{ المعادلة}$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_{L1}^2 \Phi_{L1} - f_{L2}^2 \Phi_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} = \rho + c. (\delta t_{rcv} - \delta t_{sat}) + T_d + \lambda N + \epsilon'_\Phi \quad (14) \text{ المعادلة}$$

حيث إن:

معادلة الشيفرة ضمن قياسات (GNSS) P_{IF} معادلة الطور ضمن قياسات (GNSS) Φ_{IF} تمثل المسافة الهندسية بين المستقبل والقمر الصناعي ρ تمثل خطأ ساعة المستقبل ضمن النظام المرجعي الزمني الخاص بنظام (GNSS) δt_{rcv} تمثل خطأ ساعة القمر الصناعي ضمن النظام المرجعي الزمني الخاص بنظام (GNSS) δt_{sat} تمثل طول موجة التركيبة الخالية من تأثير الأيونوسفير وتعطى بالمعادلة: λ

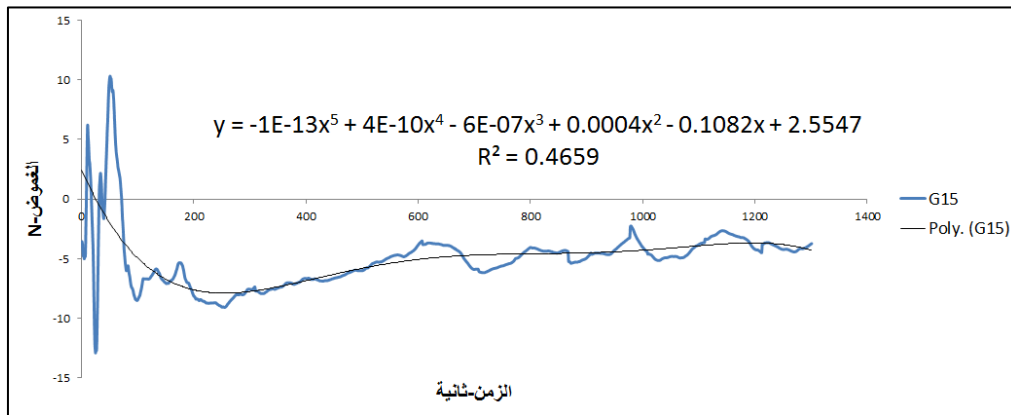
$$\lambda = \frac{f_{L1}^2 \lambda_{L1} - f_{L2}^2 \lambda_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}$$

يمثل غموض الموجة الحاملة للتركيبة الخالية من تأثير الأيونوسفير وتعطى بالمعادلة: N

$$N = \frac{f_{L1}^2 N_{L1} - f_{L2}^2 N_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}$$

التأخير التروبوسفيري T_d مركبتي الضجيج لكل من الشيفرة والطور على الترتيب $\epsilon'_P/\epsilon'_\Phi$ **3-2-1 عزل قيم غموض الطور بتطبيق مرشح كالمن:**

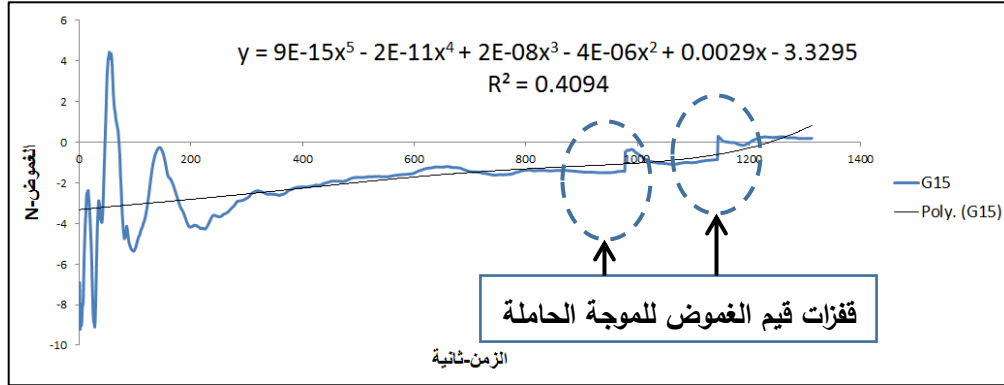
من المعادلة (14) وبدلالة الحالة الأولية للنظام، واستخراج قيم الطور من ملفات الأرصاد الرقمية في كل لحظة قياس، وتطبيق تابع ساستامونيان للحصول على قيم التروبوسفير في لحظات الرصد، تبقى قيم غموض الموجة الحاملة لتركيبة التردد (L1+L2) هي المجهولة، وتطبيق جملة المعادلات (10) حصلنا ضمن المحطة (T11) على قيم الغموض للموجة الحاملة لكل قمر صناعي تم رصده من المستقبل الجيوديزي الوحيد، ويبين الشكل (10) مثال عن غموض الطور الوارد إلى المستقبل الجيوديزي في المحطة (T11) من القمر الصناعي (G15)، مع العلاقة التابعة الرياضية بين زمن الرصد وقيمة الغموض.



الشكل (10) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G15) باعتماد مرشح كالمن للمحطة (T11)

3-2-2 عزل قيم غموض الطور بتطبيق المرشح الخطي بالتريعات الصغرى:

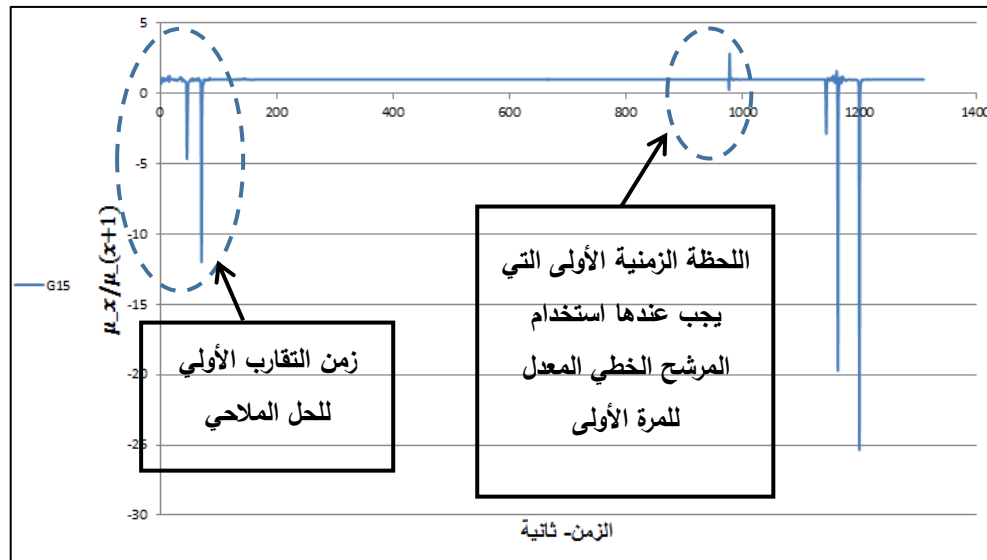
باعتدال نفس معاملات الجدول (2) قمنا بتطبيق المعادلات (1-4) وحصلنا على قيم الغموض للطور الوارد من جميع الأرقام الصناعية المرصودة في جميع المحطات، وببين الشكل (11) غموض الطور الوارد إلى المستقبل الجيوديزي في المحطة (T11) من القمر الصناعي (G15)، مع العلاقة التابعية الرياضية بين زمن الرصد وقيمة الغموض.



الشكل (11) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G15) باعتماد المرشح الخطي بالتريعات الصغرى للمحطة (T11)

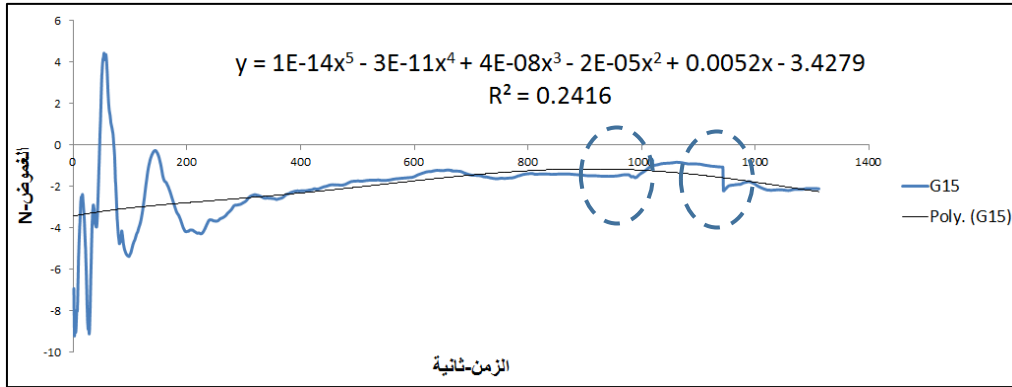
3-2-3 عزل قيم غموض الطور بتطبيق المرشح الخطي بالتريعات الصغرى المعدل باستخدام الشروط الرياضية الجديدة المقترحة في البحث:

• **مرحلة الاختبار:** بتطبيق المعادلة (12) على قيم الغموض الناتجة من تطبيق المرشح الخطي بالتريعات الصغرى نتج لدينا تحتوي عدة قفزات في قيم الغموض، كما هو موضح بالشكل (12).

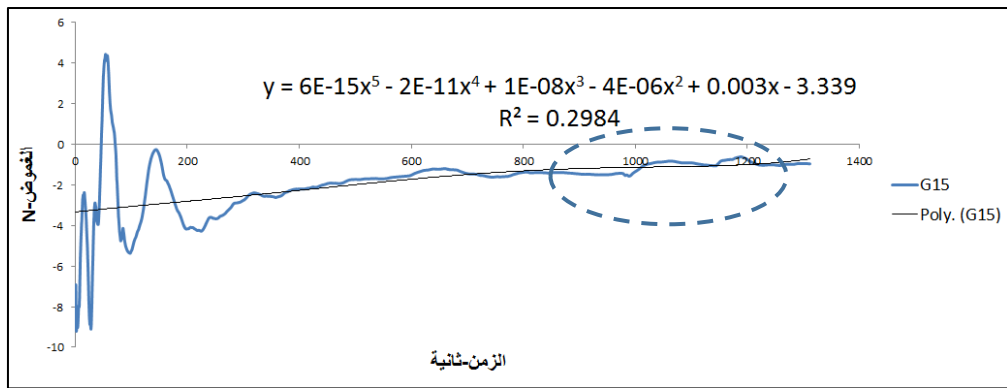


الشكل (12) التمثيل البياني لاختبار تحديد القفزات في قيم الغموض

• **مرحلة تطبيق المرشح المعدل وفق الاشتراطات المقترحة في البحث:** بعد تطبيق المرشح، كما هو وارد في الاشتراطات ضمن الفقرة (3-3) نتج لدينا قيم الغموض التالية للقمر الصناعي (G15) ضمن المحطة (T11)، كما هو مبين بالشكل (13)، بعد تطبيق المرشح لأول مرة، وبالشكل (14) بعد تطبيق المرشح للمرة الثانية.



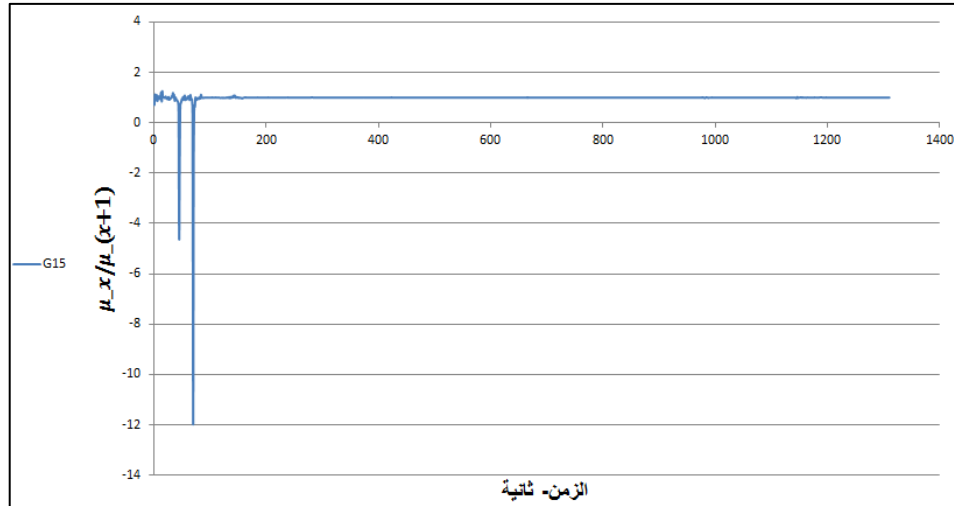
الشكل (13) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G15) باعتماد المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدل للمحطة (T11) بعد الترشيح رقم (1)



الشكل (14) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G15) باعتماد المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدل للمحطة (T11) بعد الترشيح رقم (2)

نلاحظ بمقارنة الشكلين (10) و(11)، أن مرشح كالمن يتعامل بشكل أفضل مع حالة حدوث قفزات في قيم الغموض ناجمة عن قفزات في قيم الطور، ولكنه يعطي منحنى بياني أقل ثباتاً من المنحنى الناتج عن تطبيق المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى، وبالمقابل فإن المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى لا يستطيع تجاوز قفزات الدورة وبالتالي تظهر بوضوح قفزات في قيم الغموض للطور. ويبين الشكل (14) قدرة الاشتراطات الرياضية المقترحة في البحث على تحسين أداء المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى لمواجهة قفزات قيم الغموض واستبعادها.

- **مرحلة التحقق من أداء المرشح بإعادة تطبيق الاختبار:** من أجل التحقق من قدرة المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدل وفق اشتراطات البحث الجديدة، قمنا بإعادة تطبيق الاختبار وفق المعادلة (12)، على العينة الإحصائية المعبرة عن مخرجات مرحلة الترشيح السابقة، وكانت النتائج أن المرشح المعدل قادر على إلغاء أثر قفزات الدورة بشكل فعال وتام، كما هو موضح بالشكل (15).

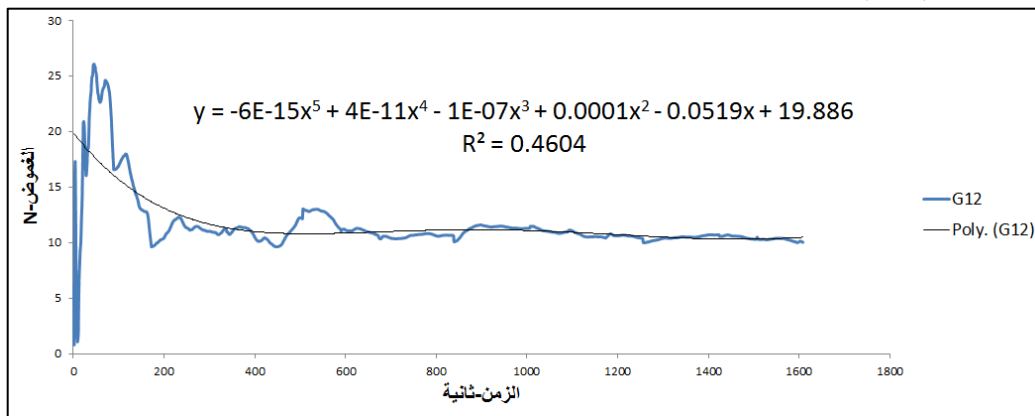


الشكل (15) التحقق من جودة نتائج المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدل على قيم الغموض للموجة الحاملة للقمر الصناعي (G15) على المحطة (T11)

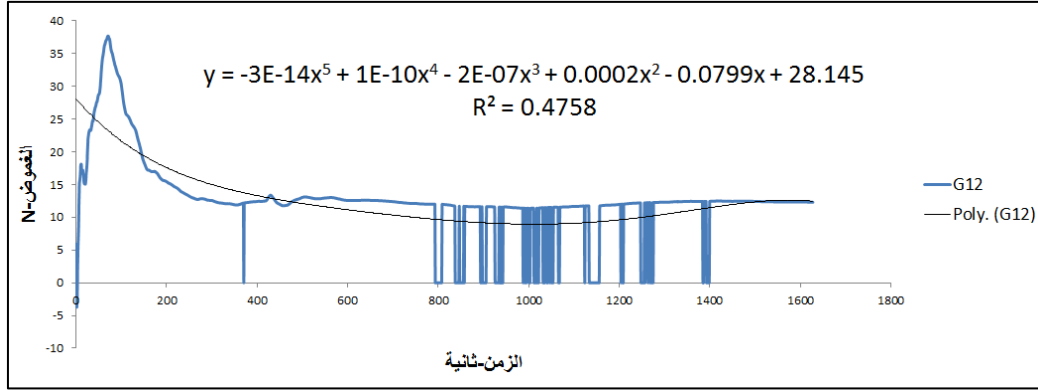
النتائج والمناقشة:

تم إعادة الخطوات الواردة في الفقرات (1-2-3-4)، (2-2-3-4)، (3-2-3-4) على جميع الأقمار الصناعية الواردة أرسادها إلى المستقبلات الجيوديزية في المحطات (T21)، (T51). وكانت النتائج كما هو موضح بالأمتلة الواردة في الأشكال من (16) حتى (21). وتبين من خلال مقارنة الخطوط البيانية في المحطات كافة أن الاشتراطات الرياضية المقترحة أعطت القدرة للمرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدل على حذف أغلاط قفزات قيم الغموض من الخط البياني للتابع (زمن-غموض)، وأن مرشح كالمن لا يعطي الثبات المطلوب على الرغم من قدرته على تخفيف أثر قفزات الدورة، مقارنة بثبات التابع الرياضي للمرشح الخطي بالتريبعات الصغرى.

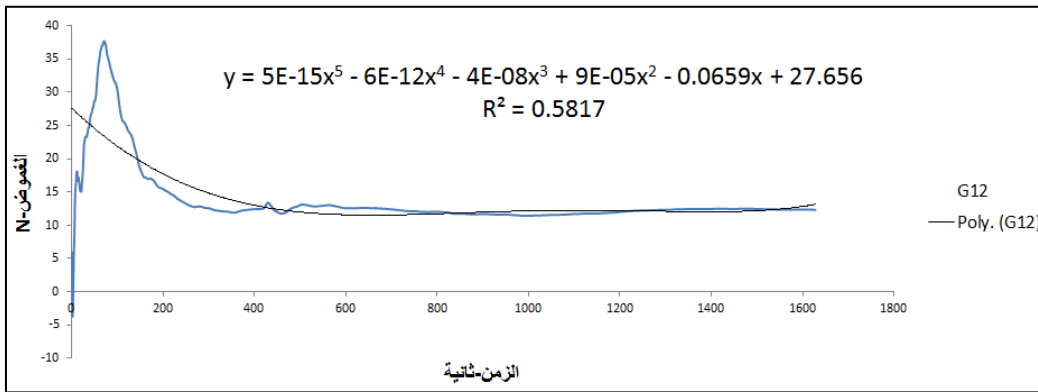
المحطة (T21):



الشكل (16) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G12) باعتماد مرشح كالمن للمحطة (T21)

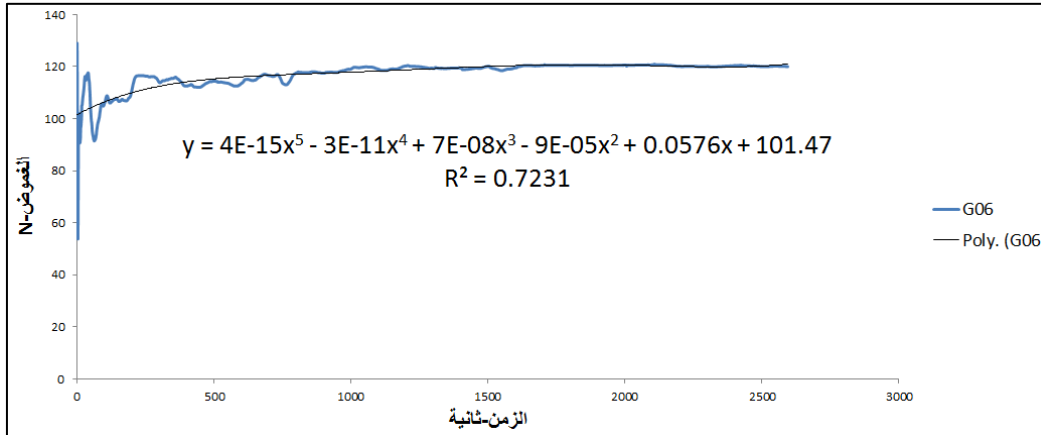


الشكل (17) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G12) باعتماد المرشح الخطي بالتريعات الصغرى للمحطة (T21)

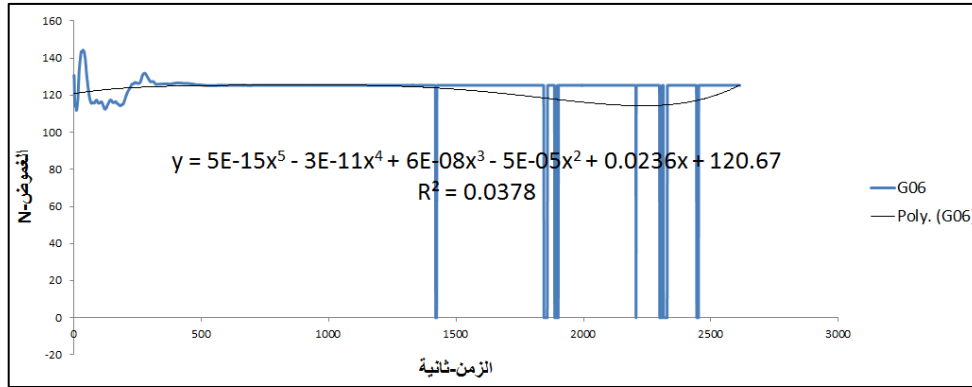


الشكل (18) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G12) باعتماد المرشح الخطي بالتريعات الصغرى المعدل للمحطة (T21)

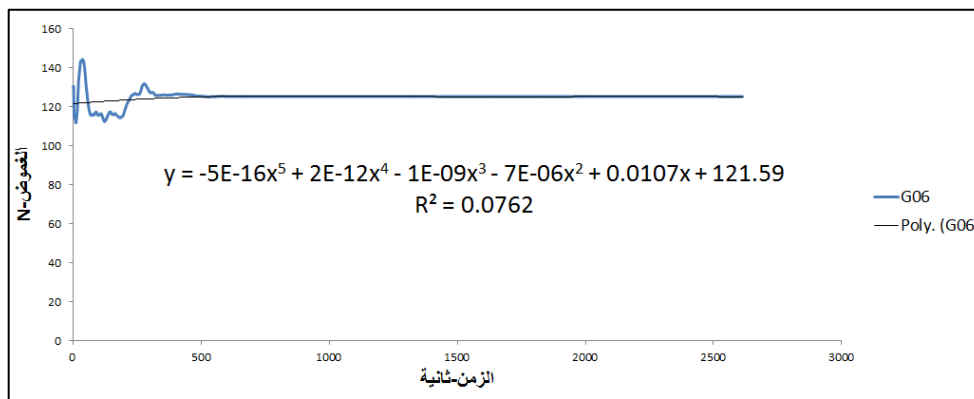
المحطة (T51):



الشكل (19) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G06) باعتماد مرشح كالمن للمحطة (T51)



الشكل (20) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G06) باعتماد المرشح الخطي بالتربيعات الصغرى للمحطة (T51)

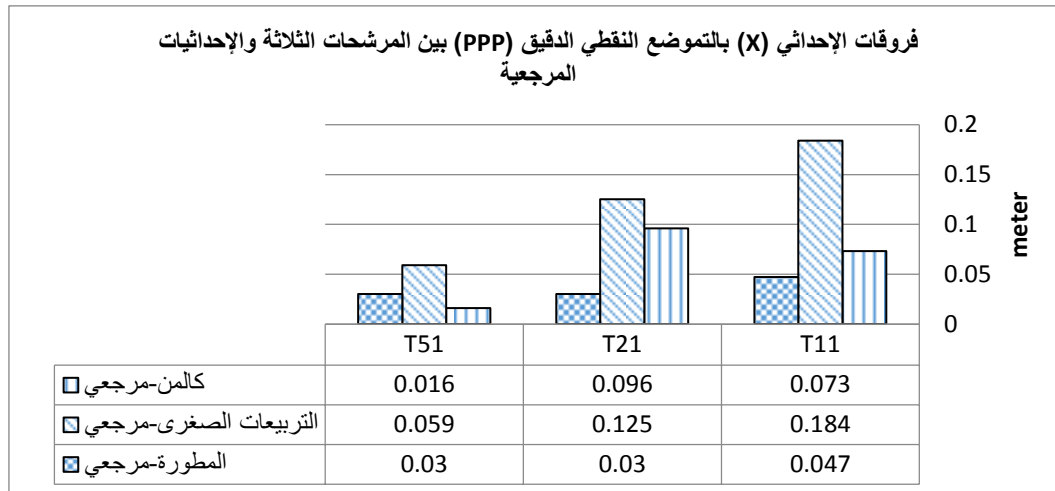


الشكل (21) غموض الموجة الحاملة من القمر الصناعي (G06) باعتماد المرشح الخطي بالتربيعات الصغرى المعدل للمحطة (T51)

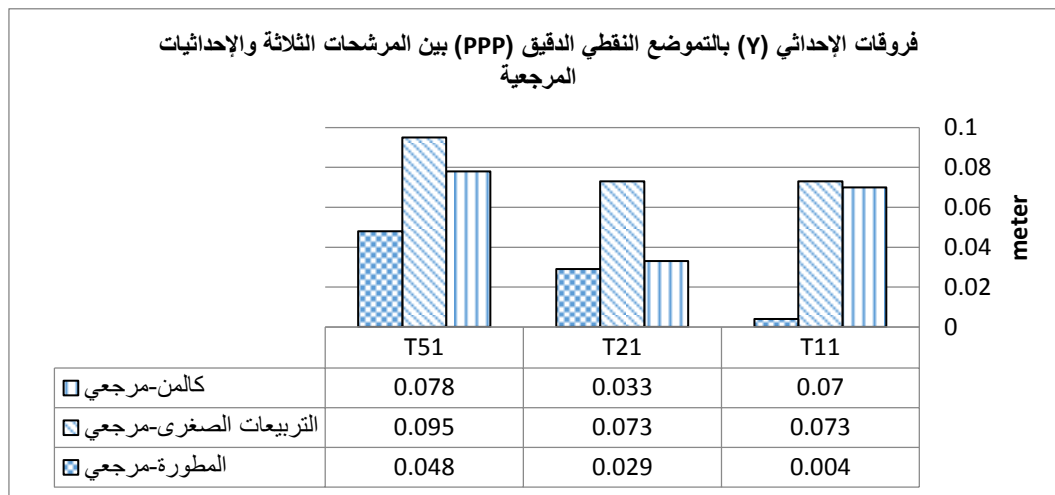
وكانت النتائج النهائية لقيم الإحداثيات للمحطات الثلاث المدروسة ضمن تجربة البحث، باعتماد التموضع النقطي الدقيق (PPP) من المرشحات الثلاثة المدروسة، موضحة بالجدول (3)، وقيم فروقاتها عن الإحداثيات المرجعية الواردة في الجدول (1)، مبينة بالأشكال (22) و(23) و(24).

الجدول (3) الإحداثيات النهائية بالتموضع النقطي الدقيق (PPP) باعتماد المرشحات الثلاثة المدروسة

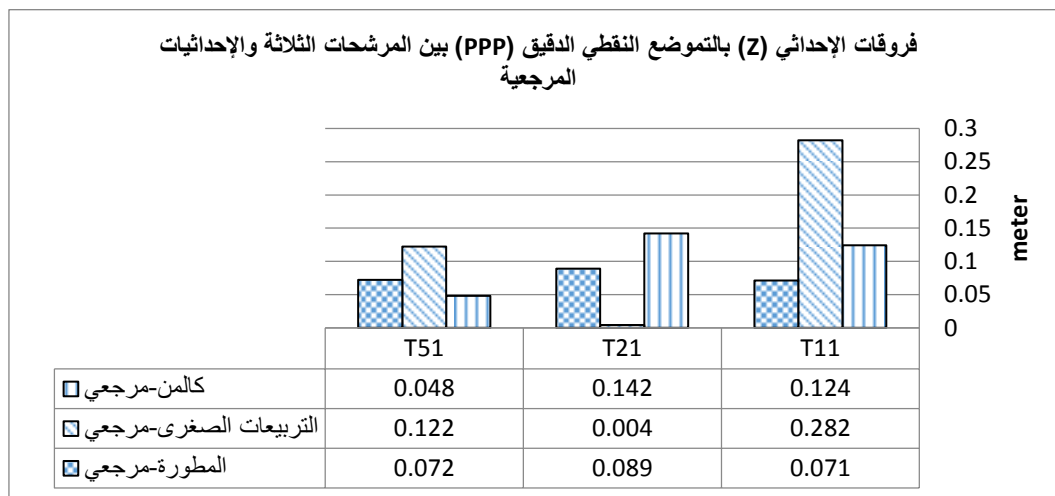
المرشح المستخدم	PPP	X (m)	Y (m)	Z (m)
مرشح كالمن	T11	4203238.846	3044572.765	3694991.496
	T21	4202731.225	3045085.689	3695176.722
	T51	4202935.549	3044469.233	3695418.508
المرشح الخطي بالتربيعات الصغرى	T11	4203238.957	3044572.622	3694991.338
	T21	4202731.004	3045085.583	3695176.868
	T51	4202935.474	3044469.406	3695418.678
المرشح الخطي بالتربيعات الصغرى المعدل	T11	4203238.82	3044572.691	3694991.549
	T21	4202731.159	3045085.627	3695176.775
	T51	4202935.563	3044469.263	3695418.484



الشكل (22) القيم المطلقة لفروقات الإحداثي (X) ضمن المحطات الثلاث بين تموضع نقطي دقيق (PPP) والإحداثيات المرجعية



الشكل (23) القيم المطلقة لفروقات الإحداثي (Y) ضمن المحطات الثلاث بين تموضع نقطي دقيق (PPP) والإحداثيات المرجعية



الشكل (24) القيم المطلقة لفروقات الإحداثي (Z) ضمن المحطات الثلاث بين تموضع نقطي دقيق (PPP) والإحداثيات المرجعية

الاستنتاجات والتوصيات:

اعتماداً على نتائج المعالجة لبيانات تجربة البحث، وبمقارنة أداء تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) الناتجة من استخدام المرشح التكراري لكالمن، والمرشح الخطي بالتريبعات الصغرى، وبإضافة اشتراطاتنا الرياضية الخاصة بالتعامل مع قفزات قيم الغموض الناتجة عن قفزات الدورة، وبمقارنتها مع القيم المرجعية للإحداثيات من الضبط الستاتيكي الحر للمحطات المدروسة نفسها، تم التوصل إلى الاستنتاجات والتوصيات الآتية:

- (1) أعطت الاشتراطات الرياضية المقترحة من قبلنا للمرشح الخطي بالتريبعات الصغرى القدرة على التعامل مع قفزات قيم الغموض طيلة فترة الرصد بعد التقارب الأولي للحل الملاحي.
- (2) ثبات الحل الملاحي ضمن التموضع النقطي الدقيق (PPP)، الناتج عن المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدلة وفق اشتراطاتنا الرياضية المقترحة أفضل من ثبات الحل الملاحي باعتماد المرشح التكراري لكالمن.
- (3) وصلت صحة الموقع النهائي للمحطات الثلاث المقيسة بالتموضع النقطي الدقيق (PPP) والتي تستخدم المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدلة باشتراطاتنا الرياضية، القيم الوسطية التالية: (3.6 cm) على المحور (X)، (2.7 cm) على المحور (Y)، (7.7 cm) على المحور (Z).
- (4) استخدام التموضع النقطي الدقيق (PPP) بالمرشح الخطي بالتريبعات الصغرى دون إضافة الاشتراطات الرياضية يعطي صحة موقع وسطية للمحطات الثلاث المدروسة كالتالي: (12.3 cm) على المحور (X)، (8 cm) على المحور (Y)، (13.6 cm) على المحور (Z).
- (5) بينما وصلت صحة الموقع النهائي للمحطات نفسها باعتماد المرشح التكراري لكالمن القيم الوسطية التالية: (6.2 cm) على المحور (X)، (6 cm) على المحور (Y)، (10.5 cm) على المحور (Z).
- (6) نوصي باستخدام الاشتراطات الرياضية المقترحة ضمن البحث عند اعتماد تقنية التموضع النقطي الدقيق (PPP) واستخدام المرشح الخطي بالتريبعات الصغرى المعدلة، لأنه يعطي ثبات أفضل للحل الملاحي، وصحة مطلقة في الموقع النهائي للمحطات، وذلك مقارنةً بالموقع الناتج من تطبيق مرشح كالمن.

References:

- [1] KOUBA, J. LAHAYE, F. TÉTREAU, P. *Precise Point Positioning*, Springer Handb of Global Navigation Satellite Systems, AG, Cham, Switzerland, 2017.
- [2] AN, X. MENG, X. JIANG, W. *Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric delay using linear combination*. SpringerOpen, Vol. 7, N^o. 1, 2020, 1-13.
- [3] Xidong, Y. Jingxiang, G. *Kinematic Precise Point Positioning Using Multi-Constellation Global Navigation Satellite System (GNSS) Observations*. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2017, 6 6; <https://doi.org/10.3390/ijgi6010006>.
- [4] Fei, G. Xiaohong, Z. *Adaptive robust Kalman filtering for precise point positioning*. Publishing Ltd, Meas. Sci. Technol. 25 (2014) 105011 (8pp).
- [5] WANG, S. DENG, J. LU, X. SONG, Z. XU, Y. *A New GNSS Single-Epoch Ambiguity Resolution Method Based on Triple-Frequency Signals*. International Journal of C Information. Vol. 6, 2017 .1-46.
- [6] ZHANG, S. CHENG, N. NI, S. *Analysis and Simulation of LAMBDA Integer Ambiguity Resolution Algorithm*. Atlantis Highlight in Intelligent System (AHIS), Vol. 1, 2018, 1-3
- [7] BERNTORP, K. WEISS, A. DI CAIRANO, S. *GNSS Ambiguity Resolution by Adaptive Mixture Kalman Filter*. International Conference on Information Fusion (FUSION).

- Broadway, Cambridge, Massachusetts. 2018.
- [8] Siavash, H. Deep Kalman Filter: *Simultaneous Multi-Sensor Integration and Modelling GNSS/IMU Case Study*. Sensors 2018, 18(5), 1316; <https://doi.org/10.3390/s18051316>.
- [9] ALKAMOUH, A. AHMAD, M. GOSPODINOV, S. KAHILA, A. *Studying the Effect using Precise Geodetic Products from Various Data Centers on Precise Point Positioning Accuracy*. Tishreen University Journal For Research and Scientific Studies Vol. 42. (4) 2020.
- [10] GE, H. LI, B. GE, M. ZANG, N. NIE, L. SHEN, Y. SCHUH, H. *Initial Assessment of Precise Point Positioning with LEO Enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS)*. Remote Sensing Journal, Vol.10, 984, 2018.
- [11] SUBIRANA J., JUAN, Z., HERNÁNDEZ, P. 2011. GNSS Measurements Model. Technical University of Catalonia, Spain.