

# Increasing The Attitude Estimation Accuracy of a 1U CUBESAT on Low Orbit Using the Developed Extended Kalman Filter Algorithm

Dr. Bilal Chiha \*

Dr. Hasan al-Ahmad \*\*

Rabih Sbera \*\*\*

(Received 12 / 12 / 2022. Accepted 16 / 2 / 2023)

## □ ABSTRACT □

This research studies, analyzes, and develops the extended Kalman filter algorithm to increase its accuracy in estimating the attitude of a CUBESAT with a size of 1U and dimensions of  $10 * 10 * 10 \text{ cm}^3$  at a low altitude of 600 km and a weight of 1.33 kg. This research also shows the components of the control system for the stability of the cubic satellite and its mechanism of action, Simulations were made for the control and attitude estimation systems using the MATLAB/R2020a environment. The nature of the orbit within which the cubic satellite moves is circular.

This research demonstrated the effectiveness of the developed EDEKF attitude estimation algorithm in increasing the position accuracy of the CUBESAT by 2.79 times over the EKF filter, with an improvement rate of 64.1%. It also contributed to increasing the stability of the CUBESAT on orbit by 1.73 times, with an average error of 0.01%. The EDEKF algorithm was also able to reduce the settling time of the CUBESAT in orbit to a value of 130.65 minutes, which is approximately 1.52 times that of the EKF filter.

**Keywords:** CUBESAT, Extended Kalman Filter , Attitude Estimation ,Attitude Accuracy, Prediction, Printed Circular Coil PCB.

---

\* Associate Professor, Department Of Computer and Control Engineering, Faculty Of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University , Lattakia , Syria.

\*\* Assistant Professor, Department of Informatics, Faculty Of Engineering, Manara University, Lattakia, Syria.

\*\*\*Postgraduate Student (Control Engineering) Ph.D., Department Of Computer and Control Engineering, Faculty Of Mechanical And Electrical Engineering, Tishreen University , Lattakia, Syria.

## زيادة دقة تقدير موضع قمر صناعي مكعب بحجم 1U على مدار منخفض باستخدام خوارزمية مرشح كالمان الموسع المطورة

د. بلال شيحا\*

د. حسن الأحمد\*\*

ربيع صبيره\*\*\*

(تاريخ الإيداع 12 / 12 / 2022. قُبِلَ للنشر في 16 / 2 / 2023)

### □ ملخص □

يقوم هذا البحث بدراسة وتحليل وتطوير خوارزمية المرشح كالمان الموسع لزيادة دقته في تقدير موضع قمر صناعي مكعب ذي حجم 1U وأبعاده  $10*10*10\text{cm}^3$  على ارتفاع منخفض 600km وبوزن 1.33kg. كذلك يبين هذا البحث مكونات منظومة التحكم الخاصة باستقرار القمر الصناعي المكعب وآلية عملها. تمت المحاكاة لمنظومتى التحكم وتقدير الموضع باستخدام بيئة MATLAB/R2020a مع افتراض أن طبيعة المدار الذي يتحرك ضمنه القمر الصناعي المكعب دائري.

يبين هذا البحث فعالية خوارزمية تقدير الموضع المطورة EDEKF (Estimation Decision for Extended Kalman Filter) في زيادة دقة موضع القمر الصناعي المكعب بمقدار 2.79 مرة عن المرشح Extended Kalman Filter) EKF(Filter) وبنسبة تحسین 64.1% ، كما ساهمت في زيادة ثبات القمر الصناعي على المدار بمقدار 1.73 مرة وبمتوسط خطأ 0.01% وانخفضت السرعة الزاوية بمقدار 5.12 مرة. تمكنت الخوارزمية EDEKF أيضاً من خفض زمن استقرار القمر الصناعي على المدار إلى 130.65 دقيقة أي أقل 1.52 مرة عن المرشح EKF.

**الكلمات المفتاحية:** قمر صناعي مكعب ، مرشح كالمان الموسع ، تقدير الموضع ، دقة الموضع ، التنبؤ ، ملفات دائرية مطبوعة PCB.

\* استاذ مساعد، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية ، سورية.  
\*\* مدرس، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية ، سورية.  
\*\*\* طالب دراسات عليا(دكتوراه هندسة تحكم آلي)، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

## مقدمة:

تعددت اهتمامات العلماء حول استكشاف معالم الفضاء والوصول إلى فهم دقيق لتفسير حدوث ظواهر معينة، فبدأ التفكير بإيجاد آليات تسمح بالمراقبة والقياس من خلال العمل على وضع مجموعة من المعادلات الرياضية الدقيقة أو التقريبية، وكان لا بد لهم من التحقق من صحتها، لذلك قاموا بصناعة مركبات فضائية ذات أحجام وأشكال مختلفة تناسب المهمة المطلوبة. ومع تطور علوم الفضاء أصبحت هناك حاجات متعددة تهدف إلى تعديل مهام المركبات الفضائية الموجودة ضمن مداراتها، وهذا غير ممكن مباشرة فكان لا بد لهم من التصنيع من البداية لمركبة أخرى وهذا يحتاج إلى وقت وكلفة عالية، لذا تم اقتراح تصنيع مركبات فضائية صغيرة بأقل كلفة وأقل زمن للتصنيع تدعى الأقمار الصناعية المكعبة ذات وزن يتراوح من 100g إلى 16kg [1]. تم استخدام وحدات حجم تعبر عن وزن وأبعاد هذه الأقمار من رتبة 1U أبعادها  $10*10*10 \text{ cm}^3$  والوزن القياسي لهذه الوحدة هو 1.33kg [3]، [2].

## أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى تقديم دراسة مفضلة حول آلية عمل خوارزمية مرشح كالمان الموسع لتقدير موضع قمر صناعي مكعب بهدف ضبط زواياه عند ارتفاع منخفض بهدف المحافظة على ثباتها أثناء حركة القمر ضمن المدار وبالتالي تأمين أفضل استقرار له، بالإضافة إلى زيادة دقة الموضع و تقليل الزمن اللازم لإنجاز العمليات الحسابية المتعلقة بمراحل عمله الأمر الذي ينعكس إيجاباً على زيادة سرعة الاستقرار وذلك من خلال تطوير خوارزمية المرشح.

## طرائق البحث ومواده:

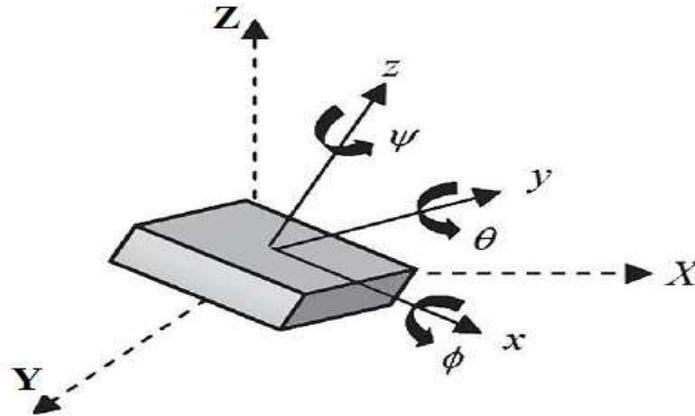
تم التطرق إلى أنواع الخوارزميات المستخدمة في تحديد موضع القمر الصناعي المكعب حيث تبين إمكانية استخدام ثلاث خوارزميات تساعد على ضبط زوايا القمر الصناعي المكعب أثناء حركته في المدار ألا وهي: خوارزميات تحديد الموضع ، خوارزميات تقدير الموضع والمراقبات اللاخطية. تم تحليل المخطط التدفقي الخاص بمرشح كالمان الموسع وتم التوصل إلى الخطوات الأساسية التي يعمل وفقها بالإضافة إلى المعادلات الناظمة لكل خطوة ، تبين من خلال التحليل وجود مرحلتين أساسيتين لعمل هذا المرشح هما: التنبؤ والقياس .

تم اختيار ارتفاع القمر الصناعي المكعب 600km ذي الكتلة 1.33kg. تم استخدام خوارزمية المرشح كالمان الموسع الأساسية ومن ثم المطورة بوجود المتحكم PID للتحكم بالمشغل المغناطيسي المستخدم لتأمين حركة القمر، علماً أن المشغل هو عبارة عن أربعة ملفات دائرية مطبوعة اثتان منها موصولة بشكل تسلسلي واثتان موصولة بشكل تفرعي بعدد لفات 75 لفة لكل ملف ووزن 1.5 g للملف الواحد كما تم ضبط البارامترات التصميمية للملف كالاتي: عرض المسار 0.2mm وثخانة المسار  $35\mu\text{m}$  والتباعد بين الملفات 0.3 mm.

## موضع القمر الصناعي المكعب

يقصد بموضع القمر الصناعي المكعب بأنه ميلان جملة مرتبطة بالجسم ومركزها منطبق ومتحرك معه عن جملة مرجعية مركزها مركز الجسم وغير متحركة معه نتيجة تطبيق حركات دورانية عليه، أي مقدار تغير زاوية ميلان القمر عن جملة إحداثياته الثابتة نتيجة تعرضه للاضطرابات الخارجية أثناء حركته ضمن المدار. ويعدُّ مقدار التغير في

الزاوية وثباته عند زاوية محددة أحد أهم بارامترات الأداء التي تحدد مدى استقرار القمر الصناعي المكعب بمعنى آخر يحكم على قمر صناعي مكعب بأنه مستقر بشكل تام إذا كان مقدار التغير في الزاوية صغير لا يتجاوز  $0.01\text{rad}$  وثابت أثناء حركته، ويستخدم مصطلح تحديد موضع قمر صناعي مكعب للدلالة على مقدار اقتراب زوايا القمر الصناعي الثلاث (Roll, Pitch, Yaw) أثناء حركته من الزوايا المطلوبة بعد تطبيق خوارزميات تقدير الموضع [4]. ولتوضيح مفهوم الموضع بالنسبة للقمر الصناعي المكعب نفترض أن للقمر جملة مرجعية ومرتبطة به ومتمركزة معه وثابتة (Fixed Frame) وجملة أخرى مرتبطة معه ومتحركة معه (Moving Frame)، فإن زاوية الميلان المقصود بها هي انحراف المحاور الثلاث لجملة الجسم المتحركة (Moving Frame) عن الجملة المرجعية (Fixed Frame). والشكل (1) يبين هاتين الجملتين وبعض البارامترات الخاصة بهما، حيث نلاحظ من هذا الشكل وجود جملة الاحداثيات المتحركة ممثلة بالاحداثيات  $(x,y,z)$ ، جملة الاحداثيات الثابتة ممثلة بالاحداثيات  $(X,Y,Z)$  بالإضافة إلى زوايا الموضع الزاوية Roll( $\Phi$ ): هي زاوية الدوران حول المحور  $x$ ، الزاوية Pitch( $\theta$ ): هي زاوية الدوران حول المحور  $y$ ، الزاوية Yaw( $\psi$ ): هي زاوية الدوران حول المحور  $z$ . وسوف يتم اعتماد ترتيب زوايا الموضع الثلاث ( $\Phi, \theta, \psi$ ) عند التعامل مع موضع القمر الصناعي المكعب.



الشكل (1): البارامترات الخاصة بموضع قمر صناعي مكعب [5].

### تحديد موضع القمر الصناعي المكعب وخوارزمياته

يوجد مجموعة من الخوارزميات (الطرق) التي تستخدم في هذا المجال وتقسّم إلى ثلاثة تصنيفات: التصنيف الأول هو خوارزميات تحديد الموضع، التصنيف الثاني هو خوارزميات تقدير الموضع أما التصنيف الثالث فهو المراقبات اللاخطية [6].

تتميز خوارزميات تحديد الموضع (Attitude Determination Algorithms) بانخفاض زمن التنفيذ وهذا يعود إلى عدم اعتمادها على النماذج الديناميكية الحركية الممثلة للقمر، إلا أنها غير قادرة على تحديد باقي حالات النظام مثل تحديد مقدار الاضطراب في القياسات والسبب يعود إلى أن آلية عملها تعتمد بشكل كلي على قيم القياسات الواردة من الحساسات وتطبيقها مع أخطائها على المنظومة دون ترشيحها مما يؤدي إلى تراكم الأخطاء التي تؤدي بدورها للفشل الكلي في تحديد الموضع ولحل هذه المشكلة كان لا بد من استخدام خوارزميات تقدير الموضع التي تعتمد على التنبؤ

بقيم حالات النظام وترشيح قيم الأخطاء. من هذه الخوارزميات: خوارزمية المربعات الأقل (Least Squares)، طريقة البحث (Quest method)، Q-method، وخوارزمية TRIAD [6].

وتعد المراقبات اللاخطية (Nonlinear Observers) أحد طرق التقدير لموضع القمر الصناعي المكعب وتغيرات السرعة الزاوية، حيث تقوم بتقدير شعاع الحالة اعتماداً على المداخل والمخارج والنموذج الرياضي للنظام، ومن أفضل أنواع هذه المراقبات هو مراقب الوضع المنزلق SMC الذي يتميز بإمكانية تقسيم الحركة لأي منظومة لاخطية إلى جزئيات مستقلة ذات أبعاد أقل وهذا ما يقلل من تعقيد المنظومة بالإضافة إلى حساسيته المنخفضة للضجيج، أما سلبياته فهي استبدال النظام الأصلي بنظام جديد قريب منه وفقاً للمتطلبات المرغوبة وهذا ما يسبب الابتعاد قليلاً عن تمثيل جميع حالات النظام والتي تؤدي بدورها إلى حدوث اضطرابات في عمل المنظومة غير مأخوذة بالحسبان [7]، [6].

### خوارزميات تقدير موضع القمر الصناعي المكعب Attitude Estimation Algorithms

تتميز خوارزميات تقدير الموضع بالأداء الجيد من حيث الدقة، بالإضافة إلى تقدير كافة حالات النظام باستخدام الحساسات المثبتة على القمر الصناعي المكعب ولكنها تستغرق وقتاً طويلاً في التنفيذ لأنها تستخدم النماذج الديناميكية الحركية للقمر، من هذه الخوارزميات: مرشح كالمان، مرشح كالمان الموسع، مرشح كالمان غير المحسوس [8]. وفيما يلي سيتم عرض آلية عمل مرشح كالمان الموسع بشكل مفصل.

### مرشح كالمان الموسع Extended Kalman Filter

يعتبر مرشح كالمان الموسع تحديثاً لمرشح كالمان المستخدم للتقدير أو للتنبؤ ببعض البارامترات أو الحالات في الأنظمة الديناميكية الخطية بالاعتماد على مجموعة من القياسات بهدف تقليل متوسط مربع الخطأ الأصغري) وهو مخمن حالة عودي أي يقوم بمجموعة من التقديرات لشعاع الحالة (تقدير الموضع والسرعة الزاوية) ومن ثم إجراء تصحيحات مناسبة بشكل تكراري للوصول إلى حل أمثلي لقيم شعاع الحالة، كما يقوم بحل ومعالجة مشاكل اللاخطية التي يعاني منها مرشح كالمان وذلك بعد تحويل النماذج اللاخطية إلى خطية وفق تابع تحويل  $f$  ومن ثم إيجاد التقديرات اللازمة لحالات النظام المختلفة [9]، تعطى معادلات تحديث أزمنا المرشح كالمان الموسع وفق الجدول (1)، أما معادلات تحديث قياسات المرشح كالمان الموسع فتعطى وفق الجدول (2)، حيث يرمز للقيم التي تم تقديرها بإشارة (-) علوية:

الجدول (1): معادلات تحديث أزمنا مرشح كالمان الموسع (التنبؤ) [9].

المعادلة	دلالة المعادلة
$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0)$ (1)	معادلة تقدير شعاع الحالة
$P_k^- = AP_{k-1}A^T + W_k Q_{k-1}W_k^T$ (2)	معادلة تقدير مصفوفة تغاير الخطأ في شعاع الحالة
$z_k = Hx_k + v_k$ (3)	معادلة تعديل القياس
حيث A: مصفوفة الانتقال، B: مصفوفة التحكم، H: مصفوفة التحويل.	

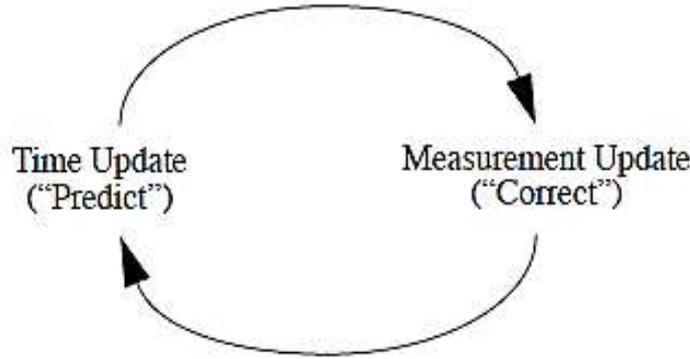
الجدول (2): معادلات تحديث قياسات مرشح كالمان الموسع [9].

المعادلة	دلالة المعادلة
$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T]^{-1}$ (4)	معادلة تحديث ربح المرشح
$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$ (5)	معادلة تحديث شعاع الحالة
$P_k = [I - K_k H_k] P_k^-$ (6)	معادلة تحديث مصفوفة تغاير الخطأ

$$\lim_{R_k \rightarrow 0} K_k = H^{-1} \quad (7)$$

$$\lim_{P_k^- \rightarrow 0} K_k = 0 \quad (8)$$

نلاحظ من العلاقة (7) بأنه عندما يكون خطأ القياس  $R$  ينتهي إلى الصفر فإن ربح المرشح هو  $H^{-1}$  وبالتعويض في علاقة تحديث شعاع الحالة (5) ينتج بأن القيمة الجديدة لشعاع الحالة هي قيمة القياس أما في حال كان تغاير الخطأ ينتهي إلى الصفر عندها سيكون ربح المرشح مساوياً للصفر وبالتالي ستكون قيمة شعاع الحالة الجديدة مساوية إلى قيمة التقدير (التنبؤ)، أي باختصار فإن مبدأ هذه الخوارزمية يقوم على مرحلتين (تنبؤ - تصحيح) للوصول إلى حلول لترشيح الأخطاء من حالات النظام المدروس، ويوضح الشكل (2) دورة عمل مرشح كالمان الموسع [9].



الشكل (2): دورة عمل مرشح كالمان [9].

ويوجد ست خطوات مبينة بالترتيب توضح مبدأ عمل مرشح كالمان الموسع وهي:

#### الخطوة الأولى

يتم في هذه الخطوة ضبط مجموعة من القيم كمصفوفات النظام  $(A, B, H)$  وتحديد القيم الابتدائية الخاصة بالدخل والموضع والسرعة والزاوية بالإضافة إلى تحديد قيم مصفوفات الأخطاء لكل من تقدير حالة النظام  $(Q)$  والقياس  $(R)$  [10]، [11].

#### الخطوة الثانية

يتم في هذه الخطوة تنفيذ أول مرحلة من مراحل عمل المرشح كالمان وهي التنبؤ بحالة النظام  $\hat{x}_k^-$  (الموضع) بالاعتماد على القيم الابتدائية التي تم ضبطها ومن ثم حساب الخطأ في حالة النظام  $P_k^-$  [10]، [11].

#### الخطوة الثالثة

بعد التنبؤ يتم إجراء قياس لحالة النظام  $z_k$  باستخدام الحساسات أو بطرق رياضية حسب حالة النظام المدروس [10]، [11].

#### الخطوة الرابعة

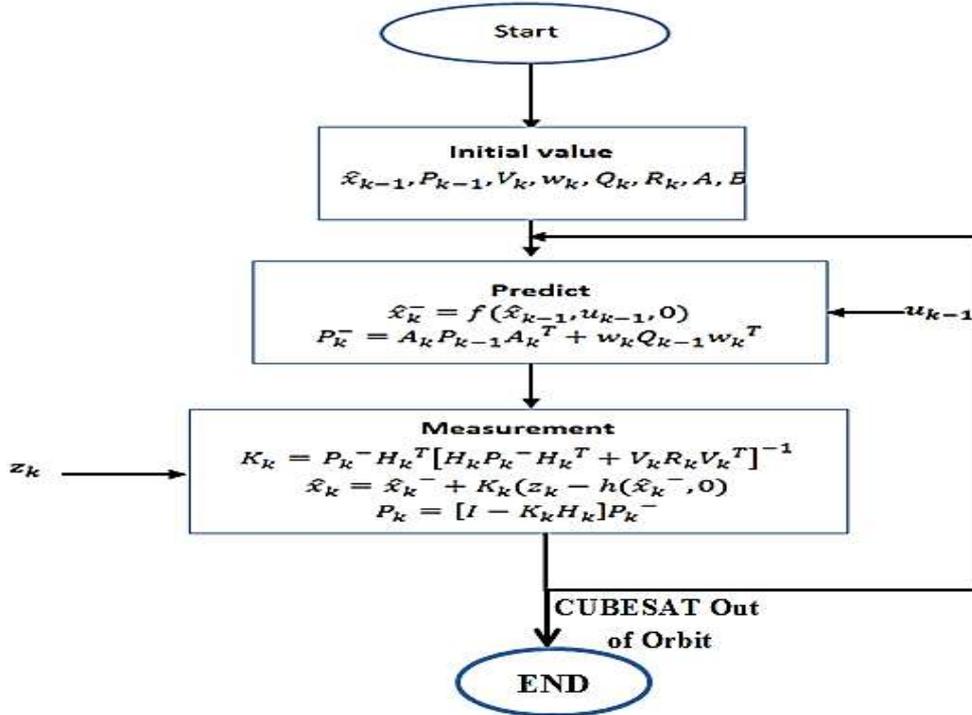
بعد إجراء كل من القياس والتنبؤ يتم حساب ربح كالمان والذي تقع على عاتقه مهمة إجراء تناغم بين مرحلة التنبؤ ومرحلة القياس أي إظهار تأثير القيمة ذات الخطأ الأقل، أي إذا كانت قيمة خطأ القياس كبيره في هذه الحالة سوف يتم إقصاء قيمة القياس واعتماد قيمة التنبؤ أما إذا كانت قيمة الخطأ صغيرة فإن قيمة القياس هي التي تعتمد وتهمل قيمة التنبؤ [10]، [11].

#### الخطوة الخامسة

بعد حساب قيمة ربح كالمان سوف يتم التصحيح والتعديل على قيمة شعاع الحالة للنظام وكذلك تعديل مصفوفة تغاير خطأ حالة النظام [11]، [10].

### الخطوة السادسة

يتم في هذه الخطوة تكرار العمل انطلاقاً من الخطوة الثانية ولكن مع مراعاة أن التنبؤ سيتم بالاعتماد على القيم السابقة لكل من حالة النظام ومصفوفة تقدير الخطأ. يبين الشكل (3) المخطط التدفقي للمرشح كالمان الموسع [11]، [10].

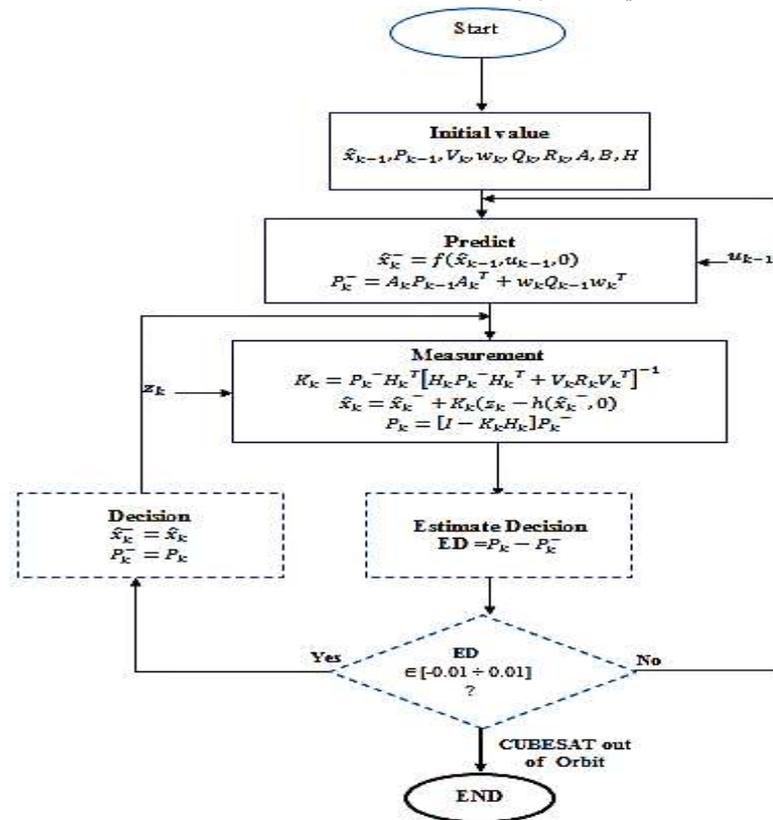


الشكل (3): المخطط التدفقي للمرشح كالمان الموسع [11].

### خوارزمية تقدير الموضع المطوّرة

تعتبر عملية ضبط السرعة الزاوية للقمر الصناعي المكعب وثبات زواياه أثناء حركته ضمن المدار هي البارامترات الأساسية المعتمدة عليها لتقييم مدى استقراره، حيث اعتمد في هذا البحث استخدام التمثيل الرباعي لتحقيق موضع القمر الصناعي والذي يضم كل من السرعة الزاوية وزوايا الحركة على المحاور الإحداثية الثلاث، ولكي يتم تقدير هذين البارامترين بشكل دقيق تم اعتماد مرشح كالمان الموسع كون طبيعة معادلات الحركة للقمر الصناعي المكعب لاخطية من جهة ولمزاياه من جهة أخرى مع إجراء تعديل على آلية عمله بإضافة خطوة سابعة إلى مراحل عمله، تم الانطلاق من فكرة أن للمرشح مرحلتان هما التنبؤ والقياس وتعتبر مرحلة القياس مرحلة أساسية لا يمكن الاستغناء عنها ضمن عمل منظومة التحكم المطوّرة أي لا بد من إجراء قياس في كل تكرار لمعرفة القيم الجديدة لحالة النظام وفي كل لحظة زمنية، أما بالنسبة للتنبؤ فهي تستخدم من أجل إعطاء تنبؤ يحتمل الصواب والخطأ بهدف المقارنة مع قيمة القياس، ومن هنا جاءت فكرة الاستفادة من هذه الخطوة في جعلها غير ملزمة في كل تكرار ولكن بشرط أن يكون مقدار تغير الخطأ (الفرق بين خطأ تقدير الحالة السابق مع خطأ تقدر الحالة الجديد)  $\pm 1\%$  وذلك من أجل زيادة الدقة في تقدير الموضع، فإذا تحقق وكان الخطأ يقع ضمن المجال المذكور عندها لن يتم التنبؤ بقيمة جديدة (هنا يتم التخلص من

خطأ التنبؤ) وإنما سنعتمد قيم حالة النظام وخطأ تقدير الحالة الجديدة كقيم عوض عن التنبؤ وثبتت لتكون أساس في المقارنة مع قيمة القياس الجديدة ومن ثم تتابع الخوارزمية عملها في الخطوات اللاحقة، أما إذا كان الخطأ أكبر من قيم المجال فعندها يتم التنبؤ بقيم جديدة لعلها تعطي خطأ حالة أقل من خطأ القياس ويتم متابعة تنفيذ باقي خطوات الخوارزمية التي اطلق عليها اسم خوارزمية قرار التقدير (Estimation Decision Algorithm) وتم التعبير عنها بالرمز المختصر ED ليصبح بذلك اسم المرشح المطور (EDEKF) (Estimation Decision Extended Kalman Filter) ، وتجدر الإشارة إلى أن هذه الخوارزمية المطورة أنت تسميتها من كونها تركز فقط على اختزال قرارات التقدير وبالتالي يمكن عندها إنقاص عدد كبير من الأخطاء التي يمكن أن تحدث عن تقدير قيم جديدة، ويعبر المخطط التدفقي المبين في الشكل (4) عن خطوات عمل خوارزمية تقدير الموضع المطورة، حيث تم التعبير عن التعديلات على خوارزمية المرشح EKF ضمن المخطط المبين في الشكل (4) وفق تمثيلات نقطية.



الشكل (4): المخطط التدفقي للمرشح كالمات الموسع EDEKF.

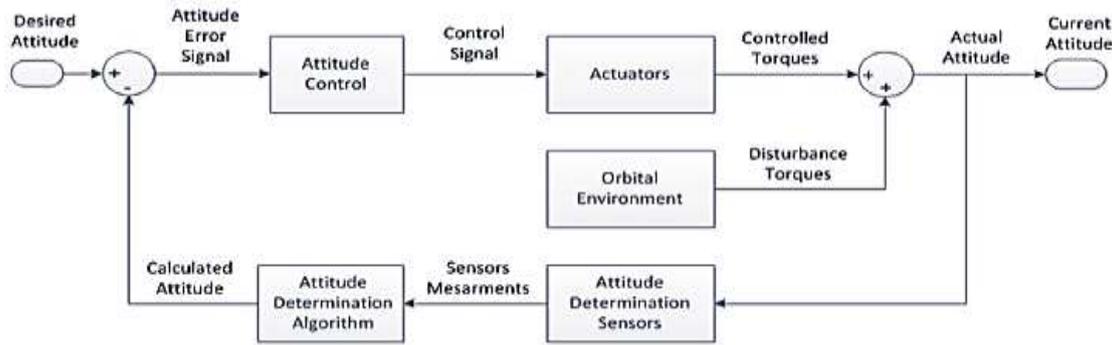
### نظام التحكم بتحديد موضع القمر الصناعي المكعب

يتكون نظام التحكم الخاص بتحديد موضع القمر الصناعي المكعب من أربع مراحل:

المرحلة الأولى هي عبارة عن مجموعة الحساسات المستخدمة ضمن القمر الصناعي المكعب كالحساس الشمسي وحساس قياس شدة الحقل المغناطيسي ... الخ حيث تُؤخذ منها القراءات والقياسات للعوامل المحيطة لتكون دخلاً للمرحلة الثانية التي يتم فيها إجراء ترشيح للأخطاء الناتجة عن قياسات الحساسات لتحديد الموضع الجديد ومركزة الإحداثيات وفق مجموعة من تحويلات جمل الإحداثيات، كما تضمنت هذه المرحلة إجراء مجموعة من الحسابات

المتعلقة بالحقل المغناطيسي الأرضي وعزوم القوى الخارجية المؤثرة على القمر الصناعي المكعب، أما بالنسبة للمرحلة الثالثة تضمنت خوارزميات التحكم وخوارزميات تحديد الموضع (تقدير الموضع) المستخدمة لتحقيق استقرار أمثلي للقمر الصناعي المكعب في مداره أي التحكم ببارامترات خاصة تختلف باختلاف نوع المشغل كالمشغلات الحركية، المشغلات المغناطيسية، المشغلات الدافعة... الخ، هذه المشغلات قد تكون متواجدة ضمن القمر الصناعي لوحدها أو مدمجة مع بعضها حسب دواعي التصميم، أما بالنسبة للمرحلة الرابعة تتضمن حساب الأخطاء لكل من السرعة الزاوية وزوايا الموضع.

يعطى المخطط التفصيلي العام لنظام التحكم بموضع القمر الصناعي المكعب وفق الشكل (5) حيث يظهر خرج كل مرحلة ودخلها (حلقة مغلقة)، بالنسبة لمرحلة التحكم وخرجها إما ضبط لتيار المشغل المغناطيسي أو تحكم بعرض النبضات عندما يكون المشغل حركي لضبط سرعتها، بالنسبة لمرحلة الخرج تكون على شكل عزم للتحكم بسرعة وزاوية القمر الصناعي، أما مرحلة تحديد الموضع تحتاج لمجموعة من القياسات التي تؤخذ من الحساسات كقياس شدة الحقل المغناطيسي الأرضي، شعاع الشمس، السرعة الزاوية، الموقع الحالي للقمر حيث يكون خرجها تحديد للموضع الجديد الذي يشكل دخلاً لمرحلة حساب الخطأ الذي يحسب بالمقارنة مع الموضع المرغوب تحقيقه وإن المخطط العام لنظام التحكم بتحديد موضع القمر الصناعي المكعب مبين في الشكل (5) [12].



الشكل (5): المخطط التفصيلي العام لنظام التحكم بموضع القمر الصناعي المكعب [12].

## النتائج والمناقشة:

تم الحصول على النتائج من منظومة التحكم الخاصة باستقرار القمر الصناعي المكعب بعد إجراء المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/R2020a واستخدام المتحكم PID بعد ضبط بارامتراته (معايرته) وفق القيم الآتية:  $k_p = 2, k_i = 0.2, k_d = 0.9$  بوجود خوارزميتي تقدير الموضع (EKF و EDEKF) بهدف المقارنة بين أدائهما في تحقيق التموضع للقمر الصناعي المكعب ومدى تأثيرهما في خفض السرعة الزاوية وذلك وفق سيناريوهين.

كون قيم موضع القمر الصناعي المكعب وسرعته الزاوية كثيرة وصغيرة جداً تم اعتماد طريقة المتوسط الحسابي للبارامتر المدروس خلال فترة المحاكاة لإعطاء القيمة التقريبية له بحيث يمكن الحكم على مدى دقته أو قرابه من القيمة المطلوبة بكل سهولة ، يبين الجدول (3) قيم بارامترات منظومة التحكم وتقدير الموضع التي اعتمدت خلال تنفيذ المحاكاة لحركة القمر الصناعي ضمن مداره.

الجدول (3): بارامترات منظومة التحكم وتقدير الموضع [13]، [2].

البارامتر	القيمة المضبوطة
حجم القمر الصناعي	1U
الارتفاع	600km
الأبعاد	10*10*10 cm <sup>3</sup>
الوزن	1.33kg
زمن المدار	96.57 min
مجموع قيم عزوم القوى الخارجية	[1.356 * 10 <sup>-7</sup> 2.7 * 10 <sup>-7</sup> ] N.m
المشغل	ملف دائري 2*2
أبعاد المشغل	(15mm,45mm,90mm)
زوايا الموضع المطلوبة	(0,0,0) deg
السرعة الزاوية المطلوبة	(0,0,0) rad/sec
المتحكم	PID

الجدول (4): مجالات دقة الموضع.

دقة موضع سيئة (deg)	دقة موضع مقبولة (deg)	دقة موضع متوسطة (deg)	دقة موضع جيدة (deg)	دقة موضع عالية (deg)
> 10	]5 ÷ 10]	]1 ÷ 5]	]0.05 ÷ 0.9]	< 0.05
EKF		خوارزمية تقدير الموضع		
EDEKF		خوارزمية تقدير الموضع المطور		

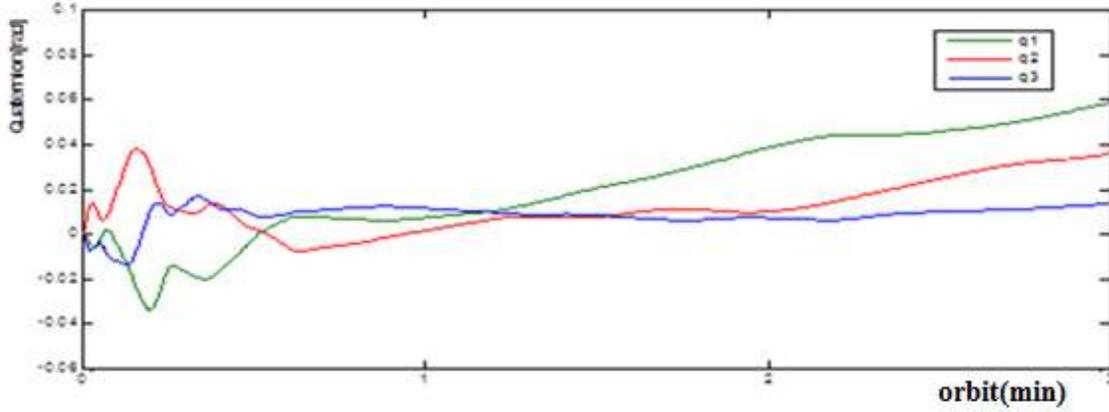
### سيناريوهات الاختبار والمناقشة

تم الحكم على مدى الدقة التي قدمتها خوارزمية تقدير الموضع المستخدمة وفق خمس مفردات بناءً على مجال قيم هذه الدقة كما هو موضح في الجدول (4).

تم رسم المنحنيات البيانية الخاصة بموضع القمر الصناعي وعددها ثلاثة منحنيات تمثل زوايا الموضع وهي (q1,q2,q3) ، ومنحني بياني يعبر عن متغير المدار الذي يستخدم لمعرفة فيما إذا كان القمر الصناعي قد خرج عن المدار أو بقي ضمنه بحيث يشترط أن تكون تغيرات قيم هذا المتغير لا تتجاوز 5% من قيمته العظمى (1 rad) ، أما بالنسبة لمنحنيات السرعة الزاوية أيضاً عددها ثلاث وهي بالنسبة للمحاور الإحداثية (Roll , Pitch , Yaw) وتعود تسمية هذه المحاور إلى استخدام التمثيل الرباعي لحركة القمر الصناعي ضمن المدار ، كون الواحدة المستخدمة لقياس زوايا الموضع ومتغير المدار rad فإن هذه القيم ستكون صغيرة ومتقاربة جداً بحيث يصعب الحكم عليها وإيجاد الاختلاف فيما بينها لذلك تم اعتماد التحويل إلى deg لإعطاء قراءات تعبر عن القيمة المدروسة في مجالات أوسع وكذلك تم الأمر بالنسبة للسرعة الزاوية حيث تم التحويل من rad/sec إلى deg/sec لنفس السبب السابق.

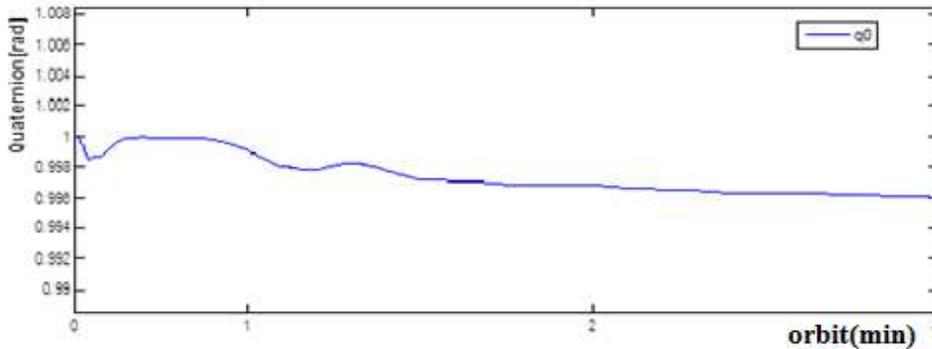
### السيناريو الأول

تم في هذا السيناريو إجراء المحاكاة على القمر الصناعي لمدة ثلاث مدارات أي ما يعادل 289.71 دقيقة وذلك بوجود خوارزمية تقدير الموضع EKF ومن ثم استخلصنا النتائج الخاصة بهذا السيناريو ومن ثم تم رسم المنحنيات البيانية لزوايا الموضع ، متغير المدار والسرعة الزاوية، كما هو مبين في الشكل (6) والشكل (7) والشكل (8) على الترتيب:



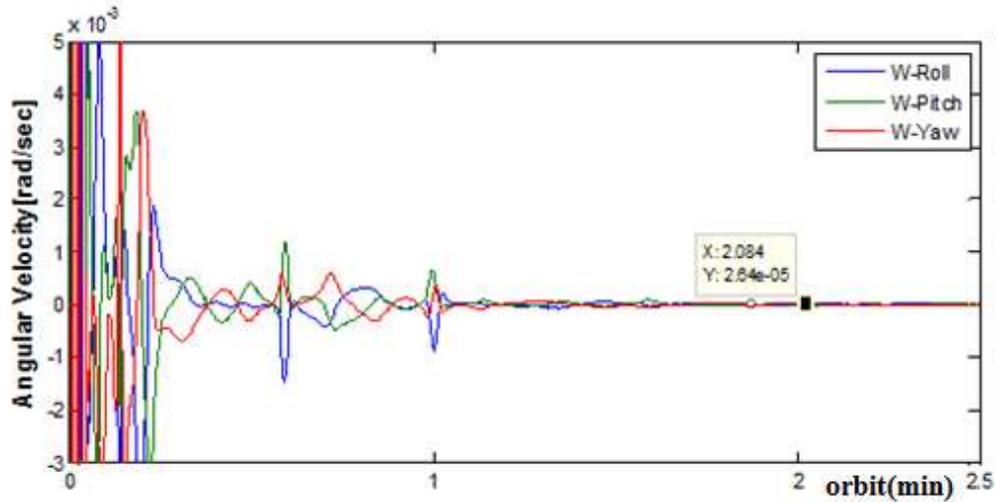
الشكل (6): منحنيات زوايا موضع القمر الصناعي المكعب في السيناريو الأول.

تم حساب متوسط زوايا الموضع (q1,q2,q3) من خلال المنحنيات البيانية الخاصة بكل منها على كامل مدة المحاكاة وتبين بأن قيمتها هي  $[-0.13 \ 0.95 \ 0.37]$  deg وهذا يكافئ دقة موضع 0.48 deg حيث تعتبر هذه الدقة جيدة علماً بأن هذه الدقة تحسب بإيجاد المتوسط الحسابي لمتوسط زوايا الموضع، ونلاحظ أيضاً من الشكل السابق بأن استقرار زوايا الموضع يبدأ تقريباً بعد 212.45 دقيقة.



الشكل (7): منحنى متغير المدار لموضع القمر الصناعي المكعب في السيناريو الأول.

نلاحظ من الشكل (7) بأن تغيرات متغير المدار قريباً جداً من الواحد بمتوسط خطأ 0.2% وهي قيمة صغيرة جداً تدل على أن القمر الصناعي يدور ضمن مداره بثبات حيث بدء الاستقرار بثبات عال بعد 171.87 دقيقة.

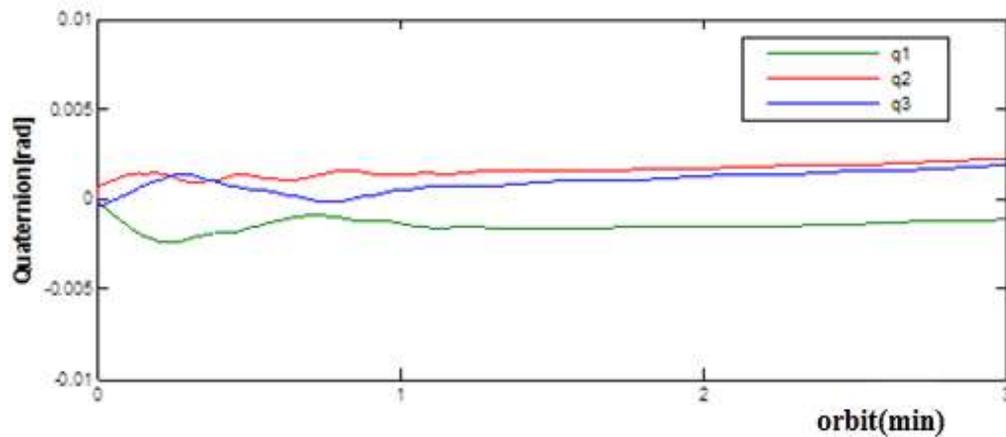


الشكل (8): منحنيات السرعة الزاوية في السيناريو الأول.

يبين الشكل السابق بأن السرعة الزاوية بدأت بالاستقرار والاقتراب من القيمة صفر وذلك بعد زمن 201.25 دقيقة حيث كانت قيمتها  $2.64E-5$  rad/sec.

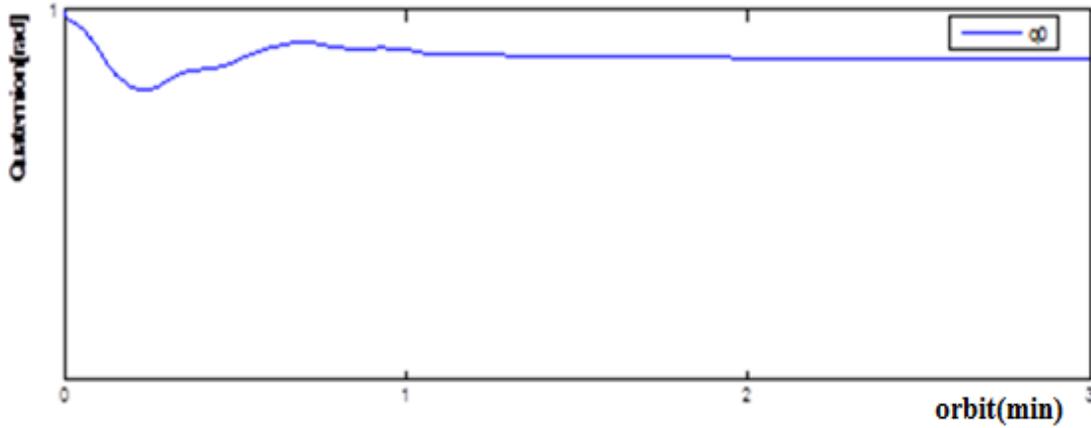
#### السيناريو الثاني

تم في هذا السيناريو إجراء المحاكاة على القمر الصناعي لمدة ثلاث مدارات أي ما يعادل 289.71 دقيقة وذلك بوجود خوارزمية تقدير الموضع EDEKF واستخلصنا النتائج الخاصة بهذا السيناريو ومن ثم تم رسم المنحنيات البيانية لزوايا الموضع، متغير المدار والسرعة الزاوية، كما هو مبين في الشكل (9) والشكل (10) والشكل (11) على الترتيب:



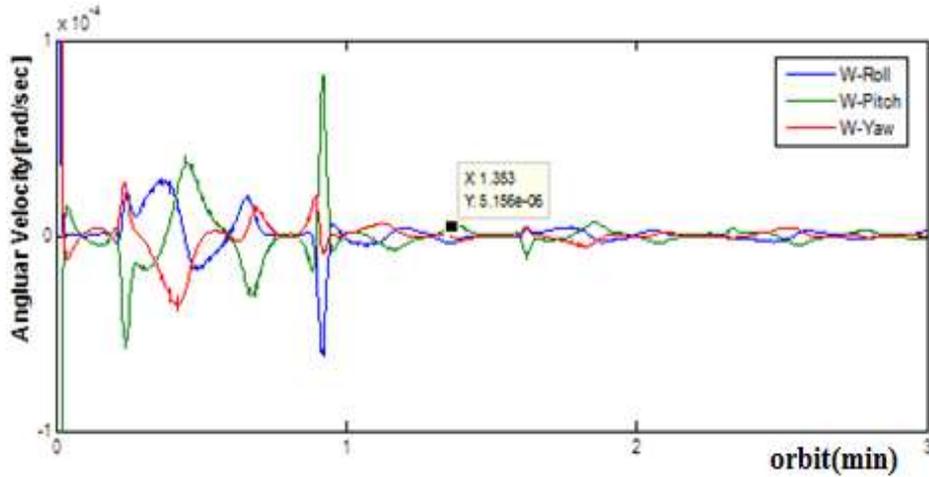
الشكل (9): منحنيات زوايا موضع القمر الصناعي المكعب في السيناريو الثاني.

تم حساب متوسط زوايا الموضع (q1,q2,q3) من خلال المنحنيات البيانية الخاصة بكل منها على كامل مدة المحاكاة وتبين بأن قيمتها هي  $[-0.3 \ 0.17 \ 0.062]$  deg وهذا يكافئ دقة موضع  $0.172$  deg حيث تعتبر هذه الدقة جيدة أقرب للعالية وهي أفضل من السيناريو الأول بمقدار 2.79 مرة كما أن استقرار زوايا الموضع يبدأ بعد 127.47 دقيقة وهذا يدل على فعالية الخوارزمية المطورة في زيادة الدقة وتخفيض زمن الاستقرار بمقدار 1.66 مرة عن السيناريو الأول.



الشكل (10): منحنى متغير المدار لموضع القمر الصناعي المكعب في السيناريو الثاني.

نلاحظ من الشكل السابق بأن تغيرات متغير المدار قريباً جداً من الواحد بمتوسط خطأ  $0.01\%$  وهي قيمة صغيرة جداً تدل على أن القمر الصناعي يدور ضمن مداره بثبات حيث بدء الاستقرار بثبات عال بعد زمن  $99.2$  دقيقة أي أن ثبات القمر في هذا السيناريو أفضل بمقدار  $1.73$  مرة عن السيناريو الأول وهنا يبرز دور خوارزمية EDEKF في زيادة ثبات القمر الصناعي في المدار.



الشكل (11): منحنيات السرعة الزاوية في السيناريو الثاني.

يبين الشكل السابق بأن السرعة الزاوية وصلت إلى القيمة  $5.156E-6$  rad/sec خلال زمن  $130.65$  دقيقة أي قدمت هذه الخوارزمية أيضاً تحسناً واضحاً في خفض السرعة الزاوية وذلك بسبب مقدرتها العالية على زيادة الدقة بمعنى آخر جعلت تغيرات زوايا الموضع صغيرة جداً التي تؤدي بدورها إلى خفض السرعة الزاوية كون التغيرات في الزوايا رياضياً تعني السرعة الزاوية، ونلاحظ أيضاً بأن مقدار الانخفاض في السرعة الزاوية هو  $5.12$  مرة عن السيناريو الأول كما انخفض زمن تحقيق هذه السرعة بمقدار  $1.52$  مرة عن السيناريو الأول.

## الاستنتاجات والتوصيات:

تبين من خلال نتائج السيناريوهين الأول والثاني بأن خوارزمية تقدير الموضع EDEKF المطورة سببت زيادة في دقة الموضع بنسبة 64.1% بالإضافة إلى تحقيق الاستقرار خلال مدة زمنية أقل بكثير من الخوارزمية EKF بمقدار 1.52 مرة وحققت ثباتاً للقمر الصناعي المكعب في مداره خلال مدة زمنية أقل بمقدار النصف تقريباً عن المرشح EKF كما أدت إلى خفض السرعة الزاوية بمقدار 5 أضعاف عن السيناريو الأول ، ونسنتج مما سبق أنه كل ما تمكناً من تجاوز مرحلة التنبؤ أثناء عمل خوارزمية المرشح EKF فإن الدقة في الموضع ستزداد وكذلك الأمر بالنسبة للثبات في المدار أما بالنسبة للسرعة الزاوية ستخضع أكثر وتقترب من الصفر .

## المقترحات المستقبلية

- 1- إجراء مقارنة بين أنواع أخرى من خوارزميات تقدير الموضع مع الخوارزمية EDEKF.
- 2- دمج أحد خوارزميات تقدير الموضع مع الخوارزمية EDEKF.
- 3- تطبيق الخوارزمية EDEKF مرتين متتاليتين لتقدير موضع القمر الصناعي المكعب.
- 4- دراسة فعالية خوارزمية تقدير الموضع عند ارتفاعات وأوزان مختلفة للقمر الصناعي المكعب.

## References:

- [1]- ARROYAV,J.E. *CubeSat System Structural Desig*. International Astronautical Congress ,2016.
- [2]- CHIHA,B;ALAHMAD,H;SBERA,R. *Studying and Analysis of Parameters Affecting on Lifetime of a 1U CUBESAT Spins in a Low Orbit*. Tartous University Journal For Research And Science Studies,Vol.6,No.3,2022.
- [3]- CHIHA,B;SBERA,R. *Studying the effects of the external disturbances on a 1U CUBESAT*. Tishreen University Journal,vol.43,No.4,2021.
- [4]- HÉRNANDEZ,J.A. *design and analysis of the attitude control system for the s2step mission*. M.Sc. in Aerospace Engineering ,Bremen, Germany November 5, 2017.
- [5]- ZORITA,J. *dynamics of small satellites with gravity gradient attitude control*. Space and Plasma Physics Department KTH, Kungliga Tekniska Högskolan SE-100 44 Stockholm Sweden,2011.
- [6]- MOHAMMED,M.A; et al. *Performance comparison of attitude determination, attitude estimation, and nonlinear observers algorithms*. Journal of Physics: Conf. Series, 783 (2017).
- [7]- Hassan,a.m; ElBadawy,a.a. *Design and validation of a sliding mode disturbance observer-based control for a Cubesat nano-satellite*. International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology,2019.
- [8]- SEGAN,S; AR·CETA,D. *Orbit Determination And Parameter Estimation: Extended Kalman Filter (EKF) Versus Least Squares Orbit Determination (LSQOD)*. Publ. Astron. Obs. Belgrade ,No. 86 (2009).
- [9]- GRIGORE,V. *Unscented Kalman Filters for Attitude and Orbit Estimation of a Low Earth Orbit CubeSat*. Kth Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden,2014.
- [10]- WELCH,G; BISHOP,G. *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill,2006.
- [11]- CILDEN,D; SOKEN,H.E; HAJIYEV,C. *Nanosatellite Attitude Estimation From Vector Measurements Using Svd-Aided Ukf Algorithm*. Metrology And Measurement Systems, Vol. 24 ,No. 1, 2017,pp. 113–125.

- [12]- GABER1,K; EL\_MASHADE1,M; ABDEL AZIZ,G.A. *High-precision attitude determination and control system design and real-time verification for CubeSats*. International Journal of Communication Systems ,May 2020.
- [13]- CHIHA,B;ALAHMAD,H;SBERA,R. *Magnetic Torque Coil (Control Torque) Design for a 1U CUBESAT at Low Orbit*. Journal of Al Baath University,Vol.44,2022.