

## تحليل أداء مُقدِّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر باستخدام مرشح كالمن متعدد الحلقات

محمد يوسف عيسى\*، وليم شكيب أبو حمرا\*\*، جميل محمد صارم\*\*\*  
\*طالب دراسات عليا (ماجستير)، كلية الهندسة الإلكترونية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية.  
\*\*مدرس، كلية الهندسة الإلكترونية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية.  
\*\*\*أستاذ، كلية الهندسة الإلكترونية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية.

### الملخص

تطورت صناعة الطائرات بشكل كبير في العقود الأخيرة، وزادت قدرتها على المناورة، لذلك أصبحت هناك ضرورة ملحة لتطوير الأجهزة المستخدمة للتعامل مع هذه الطائرات وقدراتها المتزايدة. يقدم هذا البحث دراسة تحليلية شاملة لمُقدِّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر (مرشح كالمن متعدد الحلقات) متضمنةً إيجاد توابع نقل مُقدِّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر، ودراسة استقراره، وتحديد بارامترات استجابته العابرة بالإضافة إلى إجراء محاكاة حاسوبية لهذا المُقدِّر في البيئة البرمجية ماتلاب (Matlab)، وتقييم النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث. أظهرت نتائج البحث الأداء الجيد، والاستقرار العالي لمُقدِّر الإحداثيات الزاوية، وانخفاض زمن استجابته العابرة عند القيم الكبيرة لأرباح كالمن.

**الكلمات المفتاحية:** تحديد هوية الأنظمة، الإحداثيات الزاوية، مرشح كالمن.

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2023/5/16

قُبِل للنشر بتاريخ 2023/6/25

## 1- مقدمة:

تُعتبر عملية تحليل وتركيب الأنظمة من أهم المفاهيم والمواضيع التي تعالجها نظريات الأنظمة والتحكم، وتُعرّف عملية تحليل الأنظمة بأنها التنبؤ الدقيق والمسبق بسلوك هذه الأنظمة، حيث يتم هذا التحليل من خلال نموذج يمثل ويوصف سلوك وأداء هذه الأنظمة، كما يمكن الوصول إلى هذا النموذج بطريقتين هما الطريقة التحليلية والطريقة التجريبية، حيث تعتمد الطريقة التحليلية على بناء نموذج رياضي يصف هذا النظام ويساعد في دراسته وتحليله والتنبؤ بسلوكه، أما الطريقة الاختبارية أو التجريبية والمعروفة باسم تحديد هوية الأنظمة (System Identification)، فتعتمد على معطيات الدخل والخرج لتقييم البارامترات المجهولة في هذه الأنظمة.

## 2- أهمية البحث:

يهدف البحث إلى إيجاد توابع نقل مُقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر (مرشح كالمن متعدد الحلقات) ودراسة استقرار هذه التوابع وتحليل استجابتها العابرة والثابتة، كما يتميز مُقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر بأنه نظام متكيف، إذ عندما يكون الخطأ كبيراً (عند وجود حالة عابرة) يزداد معامل مرشح كالمن بشكل كبير، وبالتالي يزداد عرض عصبية التمرير، مما يؤدي إلى انخفاض زمن الحالة العابرة وازدياد سرعة الاستجابة، وعندما يكون الخطأ صغيراً (وجود حالة مستقرة) ينخفض معامل المرشح وبالتالي تضيق عصبية التمرير مما يؤدي إلى زيادة الدقة (accuracy)، والاستقرار (stability)، وانخفاض زمن الحالة العابرة.

## 3- مقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر (مرشح عملية التتبع):

يُعتبر مُقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر بمثابة قانس تتبع أمثلي، يُشكل حلقة مغلقة للملاحظة. تُؤخذ الإحداثيات المقاسة من خرج الأجهزة التنفيذية ويتم قياسها وتقديرها، ثم تتم عملية مقارنة الإحداثيات المقاسة مع الإحداثيات المقدرّة وضرب إشارة الخطأ بمعامل ربح مرشح كالمن، الأمر الذي يؤدي إلى خفض الضجيج المرافق للإشارة المقاسة والحصول على إشارة بأقل خطأ ممكن [1].

تُبنى هذه المرشحات باستخدام قوائم متعددة الحلقات تؤدي إلى رفع جودة الدقة، وسرعة الاستجابة، والاستقرار، وتخفيض الكلفة.

تُعطى معادلات مُقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر وفق العلاقات

التالية [1]:

$$\begin{aligned}\hat{\varepsilon}_T &= \hat{\omega}_T + K_{\theta 1}(Z_1 - K_{\Delta}\Delta\hat{\varepsilon}) \\ \hat{\dot{\varepsilon}}_T &= -2\frac{\dot{r}_T}{r_T}\hat{\omega}_T + \frac{1}{r_T}\hat{W}_{Tca} + K_{\theta 2}(Z_1 - K_{\Delta}\Delta\hat{\varepsilon}) \\ \hat{W}_{Tca} &= -\alpha_{Tca}\hat{W}_{Tca} + K_{\theta 3}(Z_1 - K_{\Delta}\Delta\hat{\varepsilon})\end{aligned}\quad (1)$$

$\varepsilon_T$ : زاوية الجسم الطائر.  $\dot{\varepsilon}_T$ : السرعة الزاوية لدوران خط جسم طائر-محطة التوجيه.

$\alpha_{Tca}$ : معامل يراعي خصائص مناورة الجسم الطائر.

تُعطى مصفوفة المعاملات (مصفوفة الارتباط) لمُقدّر الإحداثيات الزاوية

بالعلاقة التالية:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\dot{r}}{r} & \frac{1}{r} \\ 0 & 0 & -\alpha_{Tca} \end{bmatrix}\quad (2)$$

يوضح الشكل (1) المخطط الصندوقي لمقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة

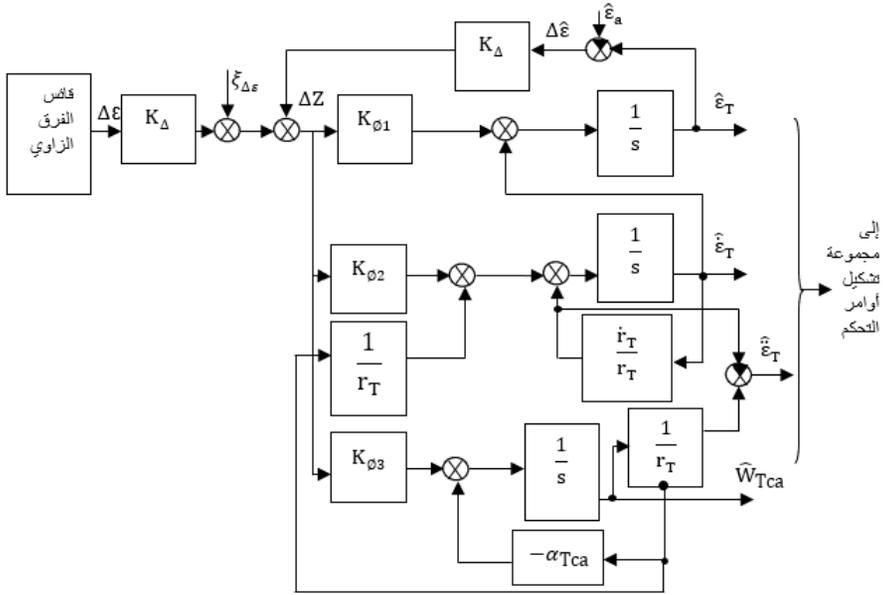
الجسم الطائر، الذي يقوم بتقدير زاوية مكان (ارتفاع) الجسم الطائر  $\varepsilon_T$ ، وسرعته

الزاوية  $\dot{\varepsilon}_T$ ، وتسارعه الزاوي  $\ddot{\varepsilon}_T$  بالاعتماد على المعادلات (1)، حيث يُطبق إلى

دخله إشارة الفرق الزاوي، التي تعبر عن زاوية الانحراف بين الاتجاه الآني الحقيقي للجسم

الطائر واتجاه الهوائي، أما خرجهُ الذي يتضمن الإحداثيات المُقدّرة فيطبق إلى مجموعة

تشكيل أوامر التحكم.



الشكل (1) يوضح الدارة التصميمية لمرشح تتبع الإحداثيات الزاوية

#### 4- إيجاد توابع نقل مُقدِّر الإحداثيات الزاوية (مرشح كالمن متعدد الحلقات):

يتم الانطلاق من النموذج الرياضي لمرشح كالمن التكيُّفي [2]:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + K(Z - H\hat{X}) \quad (3)$$

بتطبيق تحويل لابلاس على المعادلة (3) مع اعتبار الشروط الابتدائية صفرية [3]:

$$S\hat{X}(S) = A\hat{X}(S) + K(Z(S) - H\hat{X}(S))$$

$$(SI - A)\hat{X}(S) = K.Z(S) - KH\hat{X}(S)$$

$$(SI - A + K.H)\hat{X}(S) = K.Z(S) \quad (4)$$

$$T(S) = \frac{\hat{X}(S)}{Z(S)} = \frac{K}{SI - A + K.H}$$

$$T(S) = [SI - A + K.H]^{-1}K$$

وبالتعويض نجد:

$$T(S) = \begin{bmatrix} S + K_1K_\Delta & -1 & 0 \\ K_2K_\Delta & \left(S + 2\frac{\dot{r}}{r}\right) & -\frac{1}{r} \\ K_3K_\Delta & 0 & (S + \alpha_{Tca}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

بحل المعادلة (5) نحصل على توابع نقل مُقدِّر الإحداثيات الزاوية.

$$T(S) = \frac{1}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 (S + \alpha_{Tca}) + K_3 \frac{1}{r} \\ -K_1 K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) - \frac{1}{r} K_1 K_3 K_\Delta + K_2 (S + K_1 K_\Delta) (S + \alpha_{Tca}) + \frac{K_3}{r} (S + K_1 K_\Delta) \\ -K_1 K_3 K_\Delta \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) - K_2 K_3 K_\Delta + K_3 (S + K_1 K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) + K_3 K_2 K_\Delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

تُعطى توابع نقل مقدر الإحداثيات الزاوية (مرشح كالمن المتعدد الحلقات)

وفق العلاقات التالية:

$$\begin{aligned} T_1(S) &= \frac{K_1 \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 (S + \alpha_{Tca}) + K_3 \frac{1}{r}}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \\ T_2(S) &= \frac{-K_1 K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) - \frac{1}{r} K_1 K_3 K_\Delta + K_2 (S + K_1 \cdot K_\Delta) (S + \alpha_{Tca}) + \frac{K_3}{r} (S + K_1 \cdot K_\Delta)}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \\ T_3(S) &= \frac{-K_1 K_3 K_\Delta \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) - K_2 K_3 K_\Delta + K_3 (S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) + K_3 K_2 K_\Delta}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \end{aligned} \quad (7)$$

بترتيب (7) نحصل على العلاقات التالية:

$$\begin{aligned} T_1(S) &= \frac{K_1 S^2 + \left( \left( 2\frac{\dot{r}}{r} + \alpha_{Tca} \right) K_1 + K_2 \right) S + 2\frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} K_1 + \alpha_{Tca} K_2 + \frac{1}{r} K_3}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \\ T_2(S) &= \frac{K_2 S^2 + (K_2 \alpha_{Tca} + K_3 \frac{1}{r}) S}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \\ T_3(S) &= \frac{K_3 S^2 + 2\frac{\dot{r}}{r} K_3 S}{(S + K_1 \cdot K_\Delta) \left( S + 2\frac{\dot{r}}{r} \right) (S + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta (S + \alpha_{Tca}) + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta} \end{aligned} \quad (8)$$

### 5- تحليل الاستجابة العابرة لمقدر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر.

تعتمد الاستجابة العابرة للنظام المدروس على مواضع (مواقع) الأقطاب والأصفار، ولكن لا توجد طريقة مباشرة وسريعة لتحديد بارامترات الحالة العابرة أو الاستجابة العابرة للنظام (من النسبة المئوية لتجاوز الهدف OS (Over Shoot) وزمن الاستجابة العابرة  $t_s$  وزمن الوصول للقيمة الأولى  $t_p$ ) بمجرد معرفة مواضع الأقطاب والأصفار، لذلك قام الباحثون بإعداد مخططات تُظهر العلاقة بين مواضع الأقطاب

والأصفار وبين هذه البارامترات، وباستخدام هذه المخططات يمكن للمصمم أن يحدد ويختار مجال تغير مواضع الأقطاب والأصفار التي تحقق هذه البارامترات.

يكون للأنظمة ذات الدرجات الأعلى من الدرجة الثانية قطبان مترافقان عقدياً قريبان من المحور التخيلي أما باقي الأقطاب فتكون بعيدة عن المحور التخيلي حيث يدعى القطبان القريبان من المحور التخيلي بالقطبان المسيطران، لأنهما يسيطران على سلوك النظام واستجابته العابرة والثابتة، لذلك يمكن معالجة هذه الأنظمة ذات الدرجات الأعلى من الدرجة الثانية كأنظمة من الدرجة الثانية إذ يمكن تعميم طريقة معالجة وتحليل نظام الدرجة الثانية على الأنظمة ذات الدرجات الأعلى [4].

يُعطى تابع نقل أي نظام من الدرجة الثانية وفق العلاقة التالية [4]:

$$T(S) = \frac{k \cdot w_n^2}{S^2 + 2 \cdot \mu \cdot w_n \cdot S + w_n^2} \quad (9)$$

$w_n$ : التردد الطبيعي غير المتخامد،  $\mu$ : معامل التخامد الذي يعبر عن سرعة تخامد الاهتزازات في الاستجابة العابرة (الحالة العابرة)،  $k$ : معامل ربح النظام.

تُعطى المعادلة المميزة لأي نظام تحكم من الدرجة الثانية وفق العلاقة [4]:

$$S^2 + 2 \cdot \mu \cdot w_n \cdot S + w_n^2 = 0 \quad (10)$$

يتم حساب بارامترات الاستجابة العابرة لأي نظام من الدرجة الثانية وفق

العلاقات التالية:

تُعرف زمن الاستجابة العابرة بالعلاقة التالية [4]:

$$t_s = 4\tau = \frac{4}{\mu \cdot w_n} \quad (11)$$

حيث ( $\tau$ ) تمثل ثابت تخامد الاهتزازات أو الثابت الزمني لنظام الدرجة الثانية.

تُعرف زمن الوصول للقيمة الأولى بالعلاقة التالية [4]:

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1 - \mu^2}} \quad (12)$$

$w_d$ : يمثل التردد الطبيعي المتخامد.

تُعرف النسبة المئوية لتجاوز الهدف بالعلاقة التالية [4]:

$$OS = \frac{C_{max} - C_{ss}}{C_{ss}} = \exp\left\{-\frac{\pi\mu}{\sqrt{1 - \mu^2}}\right\} \quad (13)$$

$C_{max}$ : أعظم قيمة للاستجابة عند القمة الأولى.  $C_{ss}$ : قيمة الاستجابة عند زمن الاستقرار. بالعودة إلى توابع نقل مقدر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر فإنه يمكن تحليل ومعالجة هذه التوابع ودراسة استجاباتها العابرة والثابتة كتوابع نقل من الدرجة الثانية.

يتم إيجاد بارامترات الاستجابة العابرة لتابع النقل الأول  $T_1(S)$  وفق الشكل:  
يُعطى تابع النقل  $T_1(S)$  وفق العلاقة التالية:

$$T_1(S) = \frac{a_0 S^2 + a_1 S + a_2}{b_0 S^3 + b_1 S^2 + b_2 S + b_3} \quad (14)$$

حيث:  $a_0 = K_1$ ،  $a_1 = (2\frac{f}{r} + \alpha_{Tca}) K_1 + K_2$ ،  $a_2 = \alpha_{Tca} (2\frac{f}{r}) K_1 + \alpha_{Tca} K_2 + \frac{1}{r} K_3$

$b_0 = 1$ ،  $b_1 = 2\frac{f}{r} + \alpha_{Tca} + K_1 K_\Delta$ ،  $b_2 = 2\frac{f}{r} \alpha_{Tca} + K_1 K_\Delta (2\frac{f}{r} + \alpha_{Tca}) + K_2 K_\Delta$ ،  $b_3 = 2\frac{f}{r} \alpha_{Tca} K_1 K_\Delta + K_2 K_\Delta \alpha_{Tca} + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta$

يتم تقسيم بسط ومقام تابع النقل  $T_1(S)$  على  $b_3$  فيصبح من الشكل:

$$T_1(S) = \frac{\frac{a_0}{b_3} S^2 + \frac{a_1}{b_3} S + \frac{a_2}{b_3}}{\frac{b_0}{b_3} S^3 + \frac{b_1}{b_3} S^2 + \frac{b_2}{b_3} S + 1} \quad (15)$$

تُعطى المعادلة المميزة لنظام الدرجة الثانية وفق العلاقة التالية:

$$\frac{S^2}{w_n^2} + 2 \frac{\mu}{w_n} S + 1 = 0 \quad (16)$$

بالمقارنة مع مقام تابع النقل  $T_1(S)$  وعلى اعتبار أنه يمكن تحليل ومعالجة

أي نظام من الدرجات الأعلى من الدرجة الثانية كنظام من الدرجة الثانية فإننا نجد:

$$\frac{b_1}{b_3} S^2 + \frac{b_2}{b_3} S + 1 = 0 \quad (17)$$

يُحسب التردد الطبيعي غير المتخامد وفق العلاقة التالية:

$$\frac{1}{w_n^2} = \frac{b_1}{b_3} \Rightarrow K_3 = \sqrt{\frac{b_3}{b_1}} \quad (18)$$

يُحسب معامل التخامد وفق العلاقة التالية:

$$2 \frac{\mu}{w_n} = \frac{b_2}{b_3} \Rightarrow \mu = \frac{w_n b_2}{2b_3} \quad (19)$$

تُحسب النسبة المئوية لتجاوز الهدف وفق العلاقة التالية:

$$OS = \exp\left\{-\frac{\pi\mu}{\sqrt{1-\mu^2}}\right\} \quad (20)$$

يُحسب زمن الاستجابة العابرة وفق العلاقة التالية:

$$t_s = 4\tau = \frac{4}{\mu \cdot w_n} \quad (21)$$

يُحسب زمن الوصول للقمة الأولى بالعلاقة التالية:

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1-\mu^2}} \quad (22)$$

يتم إيجاد بارامترات الاستجابة العابرة لتابع النقل الثاني  $T_2(S)$  وفق الشكل:

يُعطى تابع النقل  $T_2(S)$  وفق العلاقة التالية:

$$T_2(S) = \frac{a_0 S^2 + a_1 S + a_2}{b_0 S^3 + b_1 S^2 + b_2 S + b_3} \quad (23)$$

حيث:  $a_0 = K_2$ ،  $a_1 = K_2 \alpha_{Tca} + \frac{1}{r} K_3$ ،  $a_2 = 0$ ،  $b_0 = 1$ ،  $b_1 = 2 \frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} + K_1 K_\Delta$ ،  $b_2 = 2 \frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} + K_1 K_\Delta$ ،  $b_3 = 2 \frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} K_1 K_\Delta + K_2 K_\Delta \alpha_{Tca} + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta$

$$b_2 = 2 \frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} + K_1 K_\Delta$$

$$b_3 = 2 \frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} K_1 K_\Delta + K_2 K_\Delta \alpha_{Tca} + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta$$

يُلاحظ أن توابع نقل مُقدَّر الإحداثيات الزاوية لها نفس المقام، وبالتالي لها

نفس بارامترات الحالة العابرة (التردد الطبيعي غير المتخامد، ومعامل التخامد، والنسبة

المئوية لتجاوز الهدف (Over Shoot)، وزمن الاستجابة العابرة، وزمن الوصول للقمة

الأولى) [5]. يُحسب التردد الطبيعي غير المتخامد وفق العلاقة التالية:

$$\frac{1}{w_n^2} = \frac{b_1}{b_3} \Rightarrow w_n = \sqrt{\frac{b_3}{b_1}} \quad (24)$$

يُحسب معامل التخامد وفق العلاقة التالية:

$$2 \frac{\mu}{w_n} = \frac{b_2}{b_3} \Rightarrow \mu = \frac{w_n b_2}{2b_3} \quad (25)$$

تُحسب النسبة المئوية لتجاوز الهدف وفق العلاقة التالية:

$$OS = \exp\left\{-\frac{\pi\mu}{\sqrt{1-\mu^2}}\right\} \quad (26)$$

يُحسب زمن الاستجابة العابرة وفق العلاقة التالية:

$$t_s = 4\tau = \frac{4}{\mu \cdot w_n} \quad (27)$$

يُحسب زمن الوصول للقيمة الأولى بالعلاقة التالية:

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1-\mu^2}} \quad (28)$$

يتم إيجاد بارامترات الاستجابة العابرة لتابع النقل الثالث  $T_3(S)$  وفق الشكل:

يُعطى تابع النقل  $T_3(S)$  وفق العلاقة التالية:

$$T_3(S) = \frac{a_0 S^2 + a_1 S + a_2}{b_0 S^3 + b_1 S^2 + b_2 S + b_3} \quad (29)$$

$$b_1 = 2\frac{\dot{r}}{r} + \alpha_{Tca} + \quad , b_0 = 1 \quad , a_2 = 0 \quad , a_1 = 2\frac{\dot{r}}{r} K_3 \quad , a_0 = K_3 \quad \text{حيث:}$$

$K_1 K_\Delta$

$$b_2 = 2\frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} + K_1 K_\Delta \left(2\frac{\dot{r}}{r} + \alpha_{Tca}\right) + K_2 K_\Delta$$

$$b_3 = 2\frac{\dot{r}}{r} \alpha_{Tca} K_1 K_\Delta + K_2 K_\Delta \alpha_{Tca} + \frac{1}{r} K_3 K_\Delta$$

يُلاحظ أن توابع نقل مُقدّر الإحداثيات الزاوية لها نفس المقام وبالتالي لها

نفس بارامترات الحالة العابرة. يُحسب التردد الطبيعي غير المتخامد وفق العلاقة

التالية:

$$\frac{1}{w_n^2} = \frac{b_1}{b_3} \Rightarrow w_n = \sqrt{\frac{b_3}{b_1}} \quad (30)$$

يُحسب معامل التخامد وفق العلاقة التالية:

$$2\frac{\mu}{w_n} = \frac{b_2}{b_3} \Rightarrow \mu = \frac{w_n b_2}{2b_3} \quad (31)$$

تُحسب النسبة المئوية لتجاوز الهدف (تجاوز القمة النسبي) وفق العلاقة:

$$OS = \exp\left\{-\frac{\pi\mu}{\sqrt{1-\mu^2}}\right\} \quad (32)$$

يُحسب زمن الاستجابة العابرة وفق العلاقة التالية:

$$t_s = 4\tau = \frac{4}{\mu \cdot w_n} \quad (33)$$

يُحسب زمن الوصول للقيمة الأولى بالعلاقة التالية:

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1 - \mu^2}} \quad (34)$$

يوضح الجدول (1) تغير بارامترات الاستجابة العابرة لمُقدِّر الإحداثيات

الزاوية لحركة من أجل  $K_\Delta = 1$ ،  $r = 10000$  m،  $r = 300$  m/sec،  $\xi_{\Delta\varepsilon} = 0$ ،

وقيمة معامل مناورة  $\alpha_{Tca} = 50$ ، وقيم مختلفة لمعاملات ربح كالمن  $K_1, K_2, K_3$ .

الجدول (1) يوضح تغير قيم بارامترات الاستجابة العابرة عند تغير قيم أرباح كالمن.

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$w_n$ rad/sec	$\mu$	$t_s$ sec	$t_p$ sec	OS %
0.01	0.01	0.01	0.103	0.34	114.22	32.43	32.12
0.5	0.5	0.5	0.724	0.39	14.17	4.65	26.34
1	1	1	1.02	0.52	7.54	3.61	14.77
10	10	10	2.97	1.44	0.94	-	-
100	100	100	6	2.9	0.23	-	-
1000	1000	1000	7.11	3.43	0.164	-	-

عندما يكون  $\mu < 1$  فإن المنظومة تكون مستقرة استقراراً مطلقاً ذات تخامد

ضئيل، وعندما يكون  $\mu > 1$  فإن المنظومة تكون مستقرة استقراراً مطلقاً ذات تخامد

عالي، أما عندما يكون  $\mu = 1$  فإن المنظومة تكون مستقرة استقراراً مطلقاً ذات تخامد

حرج [6].

## 6- حساب عرض عصبية الضجيج المكافئة لمقدِّر الإحداثيات الزاوية:

يكون عرض عصبية تمرير الضجيج المكافئة أكبر بكثير من عرض عصبية

تمرير الإشارة في مُقدِّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر، وبالتالي فإن عرض

عصبية التمرير في مُقدِّر الإحداثيات الزاوية (عرض عصبية مرشح كالمن) يتناسب مع

عرض عصبية تمرير الضجيج المكافئة وبحسب بالعلاقة التالية [4]:

$$B_n = \frac{\pi}{2} \frac{\frac{a_0^2 b_2}{b_0} + a_1^2 - 2a_0 + b_1}{b_1 b_2 - b_0} \quad (35)$$

يوضح الجدول (2) عرض عصبية تمرير الضجيج لمُقدِّر الإحداثيات الزاوية

عند قيم مختلفة لمعاملات ربح كالمن  $K_1, K_2, K_3$ .

الجدول (2) يوضح تغير عرض عصابة تمرير الضجيج عند تغير قيم أرباح كالمن.

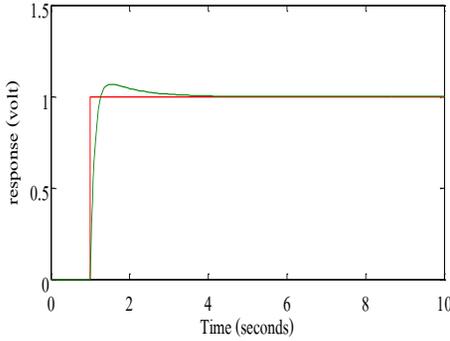
$K_1$	$K_2$	$K_3$	$B_n$
10	10	10	$5.05\pi \text{ rad/sec} = 15.9 \text{ rad/sec}$
100	100	100	$50.35\pi \text{ rad/sec} = 158.2 \text{ rad/sec}$
1000	1000	1000	$500.24\pi \text{ rad/sec} = 1572.3 \text{ rad/sec}$

يتضح مما سبق أن ازدياد قيم معاملات ربح مرشح كالمن المتعدد الحلقات

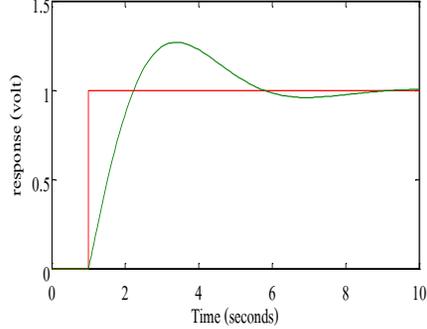
يؤدي إلى ازدياد عرض عصبته [7].

## 7- المحاكاة الحاسوبية لتتابع نقل مقدر الإحداثيات الزاوية:

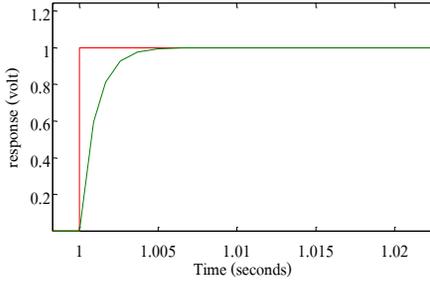
تم إجراء محاكاة حاسوبية لتتابع نقل مقدر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر باستخدام البيئة البرمجية ماتلاب (Matlab) من أجل إظهار استقرارية هذه التتابع وتحديد ومعرفة بارامترات الاستجابة العابرة عند قيم مختلفة لمعاملات ربح كالمن، حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها الأداء الجيد والاستقرار العالي لمقدر الإحداثيات الزاوية (مرشح كالمن متعدد الحلقات) وانخفاض زمن الحالة العابرة عند القيم الكبيرة لمعاملات ربح كالمن.



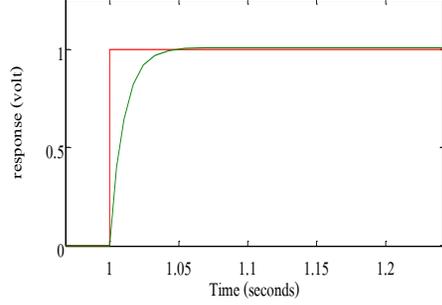
الشكل (3) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالزاوية (الاستجابة العابرة لتتابع النقل الأول) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 10$



الشكل (2) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالزاوية (الاستجابة العابرة لتتابع النقل الأول) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 1$

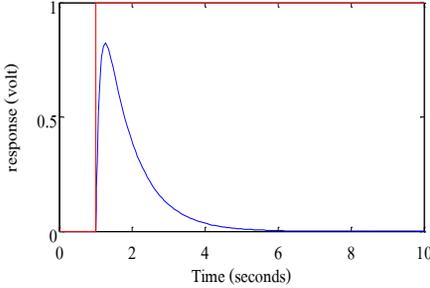


الشكل (5) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالزاوية (لتابع النقل الأول) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 1000$

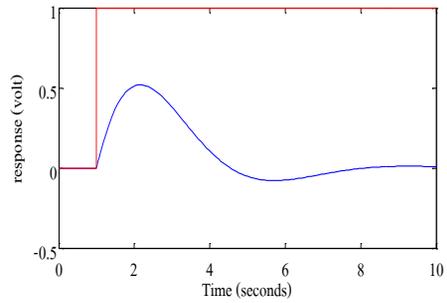


الشكل (4) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالزاوية (لتابع النقل الأول) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 100$

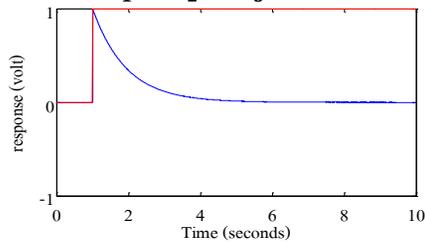
يُلاحَظ من الأشكال (2)، و(3)، و(4)، و(5) انخفاض زمن الحالة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالزاوية عند ازدياد قيم أرباح كالمن (قيم معاملات ربح كالمن)، وازدياد استقرارية الحلقة، وانخفاض قيمة الخطأ في الحالة الثابتة ( $e_{ss}$ ) من القيمة (0.04) إلى القيمة (0.001).



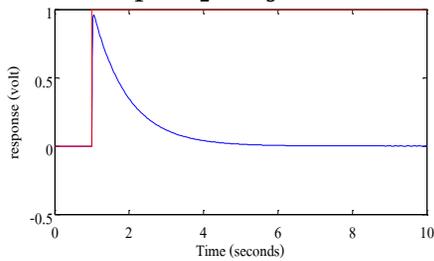
الشكل (7) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالسرعة الزاوية (لتابع النقل الثاني) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 10$



الشكل (6) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالسرعة الزاوية (لتابع النقل الثاني) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 1$



الشكل (9) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالسرعة الزاوية (لتابع النقل الثاني) من أجل

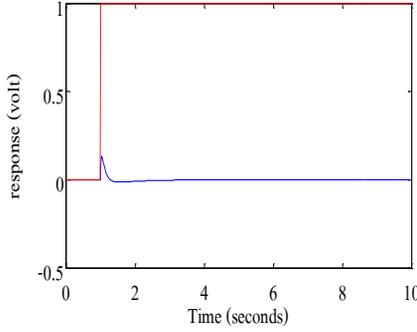


الشكل (8) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالسرعة الزاوية (لتابع النقل الثاني) من أجل

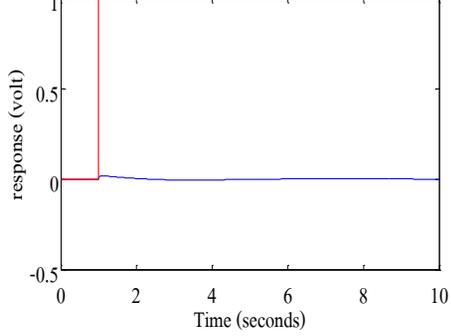
$$K_1 = K_2 = K_3 = 1000$$

$$K_1 = K_2 = K_3 = 100$$

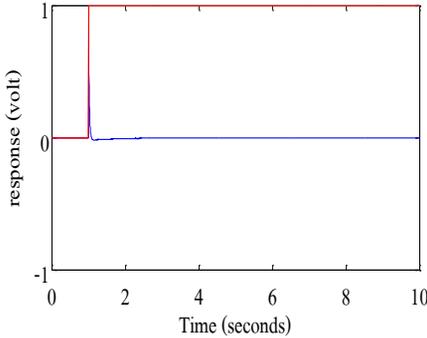
يُلاحَظ من الأشكال (6)، و(7)، و(8)، و(9) انخفاض زمن الحالة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالسرعة الزاوية عند ازدياد قيم أرباح كالمن وازدياد استقراريّة الحلقة، وانخفاض قيمة الخطأ في الحالة الثابتة ( $e_{ss}$ ) من القيمة (0.012) إلى القيمة (0.00045).



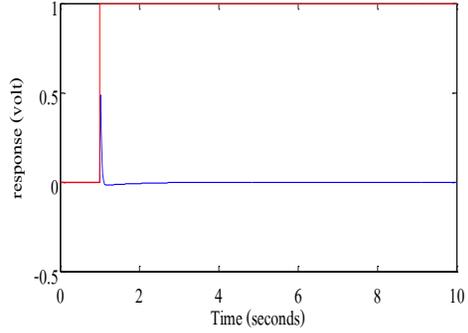
الشكل (11) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالتسارع الزاوي (لتابع النقل الثالث) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 10$



الشكل (10) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالتسارع الزاوي (لتابع النقل الثالث) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 1$



الشكل (13) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالتسارع الزاوي (لتابع النقل الثالث) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 1000$



الشكل (12) الاستجابة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالتسارع الزاوي (لتابع النقل الثالث) من أجل  $K_1 = K_2 = K_3 = 100$

يُلاحَظ من الأشكال (10)، و(11)، و(12)، و(13) انخفاض زمن الحالة العابرة لحلقة ملاحقة الجسم الطائر بالتسارع الزاوي عند ازدياد قيم أرباح كالمن وازدياد

استقرارية الحلقة، وانخفاض قيمة الخطأ في الحالة الثابتة ( $e_{ss}$ ) من القيمة (0.008) إلى القيمة (0.0001).

## 8- نتائج الدراسة:

- يعتبر مقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر (المصمم باستخدام مرشح كالمن متعدد الحلقات) نظاماً مستقراً، ويتحدد مدى استقراره بالإعتماد على قيم أرباح مرشح كالمن (قيم معاملات ربح كالمن).
- تتعلق بارامترات الاستجابة العابرة (زمن الاستجابة العابرة، زمن الوصول للقيمة الأولى، النسبة المئوية لتجاوز الهدف OS (Over Shoot)، التردد الطبيعي غير المتخادم، معامل التخادم) لتتابع نقل مُقدّر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر بقيم أرباح كالمن، حيث أدى ازدياد قيم أرباح كالمن إلى انخفاض زمن الاستجابة العابرة من القيمة 114.22 ثانية إلى القيمة 0.164 ثانية، وازدياد قيمة معامل التخادم من القيمة 0.34 إلى القيمة 3.43، وازدياد قيمة التردد الطبيعي غير المتخادم من القيمة 0.103rad/sec إلى القيمة 7.11rad/sec، وانخفاض قيمة الخطأ في الحالة الثابتة ( $e_{ss}$ ) من القيمة 0.04 إلى القيمة 0.001 ضمن حلقة ملاحقة الجسم الطائر بالزاوية.
- يتغير عرض العصبية لمُقدّر الإحداثيات الزاوية (مرشح كالمن المتعدد الحلقات) بشكل متكيف وآلي وفقاً لشروط الاستجابة العابرة والثابتة.
- يتعلق عرض عصبية التمرير لمقدر الإحداثيات الزاوية لحركة الجسم الطائر (مرشح كالمن المتعدد الحلقات) بقيم معاملات ربح كالمن (أرباح كالمن)، حيث أدى ازدياد قيم هذه المعاملات إلى ازدياد عرض العصبية لمُقدّر الإحداثيات الزاوية من القيمة 15.9rad/sec إلى القيمة 1572.3rad/sec.
- بالمقارنة مع الدراسات المرجعية السابقة والأبحاث ذات الصلة، التي اقتصرت على دراسة تابع نقل مرشح كالمن وحيد الحلقة (مُقدّر الإحداثيات الزاوية وحيد الحلقة) واستجابته العابرة، فقد تميّز هذا البحث في إيجاد توابع نقل مُقدّر

الإحداثيات الزاوية متعدد الحلقات (مرشح كالمن متعدد الحلقات) ودراسة استقرارها وتحديد بارامترات الاستجابة العابرة والثابتة لها.

### المراجع

- 1- Або Хамра Вильям -Дисертация – Алгоритемы оптимального траекторного управления полётом зенитных ракет в системах теленавещения перспективных зенитных ракетных комплексов-Научный руководитель: Финогенов.С.Н-Смоленск 2014.
- 2- مدين خضر، 2019 ترشيح كالمن. الطبعة الثانية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، سوريا، 109 صفحة.
- 3- Bohao Liao.,1997-Transfer function estimation with kalman filter. Annals of Nuclear Energy, Volume 24, Issue 11, Pages 847-857.
- 4- خالد علي، 2009 تحكم آلي بالصواريخ (الجزء الأول). الطبعة الأولى، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، سوريا، 182 صفحة.
- 5-Yuri. V. Kim.,2022-Review of Kalman Filter Developments in Analytical Engineering Design. Intechopen, London, UK.
- 6- محمود سلوم، نصر الحموي، 2016 التحكم الآلي. الطبعة الأولى، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، سوريا، 303 صفحة.
- 7- Inigo Cortes, Johannes Merwe, Elena Lohan, Jari Nurmi, and Wolfgang Felber.,2022-Performance Evaluation of Adaptive Tracking Techniques with Direct-State Kalman Filter. USA, Pages 420.