

Tổng hợp luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường có tính tới lượng bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu cho lớp tên lửa tự dẫn hồng ngoại

Đoàn Văn Thúy*

Viện Tên lửa/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

*Email : doanvanth@gmail.com

Nhận bài ngày 28/4/2021; Hoàn thiện ngày 30/6/2021; Chấp nhận đăng ngày 14/02/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.77.2022.60-66>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu, tổng hợp phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường có tính tới lượng bù dịch tâm điểm ngắm mục tiêu cho lớp tên lửa phòng không tự dẫn hồng ngoại. Tiến hành phân tích và xây dựng lệnh bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu trong pha cuối của quá trình tự dẫn tên lửa để tăng cường xác suất tiêu diệt mục tiêu. Các kết quả nghiên cứu, mô phỏng đã chứng tỏ các ưu điểm vượt trội của luật dẫn mới so với luật dẫn tiếp cận tỷ lệ truyền thống.

Từ khóa: Tên lửa phòng không tự dẫn hồng ngoại; Dẫn tỷ lệ tăng cường; Bù dịch tâm điểm ngắm mục tiêu.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ (PN - Proportional Navigation) được sử dụng phổ biến trong điều khiển tự dẫn cho lớp tên lửa (TL) phòng không tự dẫn hồng ngoại [1-3]. Trong quá trình bay tiếp cận mục tiêu (MT), bộ tọa độ bám sát của TL có xu hướng bám sát theo điểm phát nhiệt lớn nhất của MT chẳng hạn như luồng phụt xả ra từ động cơ thay vì trọng tâm của MT bay. Đối với lớp TL phòng không tự dẫn hồng ngoại có cự ly tác chiến ngắn, lượng nổ chiến đấu nhỏ thì độ trượt mục tiêu tức thời này là lớn, từ đó, làm giảm xác suất tiêu diệt MT.

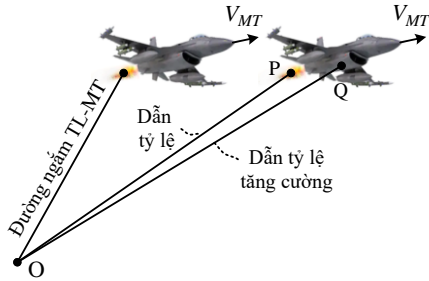
Một trong những phương pháp để tăng cường xác suất tiêu diệt MT cho lớp TL loại này là cải tiến phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ truyền thống bằng cách thêm vào luật dẫn một lệnh bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu. Tham số lệnh bù dịch tâm điểm ngắm này sẽ làm thay đổi vị trí điểm ngắm MT từ điểm ngắm cũ tại luồng phụt động cơ sang điểm ngắm mới tại trọng tâm của MT bay (hình 1a).

Bài báo này sẽ trình bày các kết quả nghiên cứu, xây dựng phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường (APN - Augmented Proportional Navigation) cho lớp TL phòng không tự dẫn hồng ngoại có tính đến bù vị trí điểm ngắm mục tiêu trong điều kiện mục tiêu cơ động. Khảo sát, mô phỏng, đánh giá và so sánh các kết quả về độ trượt tức thời của phương pháp dẫn tỷ lệ tăng cường với phương pháp dẫn tỷ lệ truyền thống trong các trường hợp bắn đón và bắn đuổi MT cơ động.

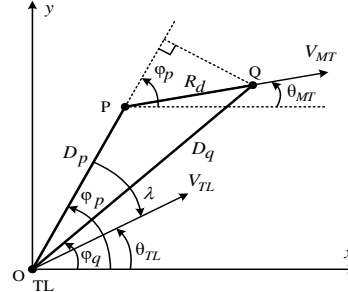
2. LUẬT DẪN TIẾP CẬN TỶ LỆ TĂNG CƯỜNG CÓ TÍNH TỚI LƯỢNG BÙ DỊCH TÂM ĐIỂM NGẮM

Xét bài toán tự dẫn TL-MT trong một mặt phẳng thẳng đứng Oxy , tương quan động hình học (ĐHH) tự dẫn giữa TL và MT có tính tới sự dịch chuyển vị trí điểm ngắm MT được thể hiện trên hình 1b. Các tham số trong hình 1b được định nghĩa như sau: O – Vị trí của TL; P – Điểm ngắm tại nguồn nhiệt ở luồng phụt động cơ của MT bay (điểm có cường độ bức xạ hồng ngoại mạnh nhất được phát hiện bởi đầu tự dẫn TL); Q – Điểm ngắm mới tại trọng tâm của MT trong luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường; $R_d = PQ$ – Khoảng cách dịch chuyển điểm ngắm; D_p, φ_p – Cự ly tương đối và góc đường ngắm TL-MT trong luật dẫn tiếp cận tỷ lệ truyền thống; D_q, φ_q – Cự ly tương đối và góc đường ngắm TL-MT trong luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường; λ – Góc sai lệch

giữa trục quang và trục dọc TL; θ_{TL} – Góc nghiêng trục dọc TL; θ_{MT} – Góc nghiêng quỹ đạo MT; V_{TL} – Vận tốc của TL; V_{MT} – Vận tốc của MT.



Hình 1a. Thay đổi vị trí điểm ngắm trên MT.



Hình 1b. Tương quan ĐHH tự dẫn TL-MT với dịch chuyển điểm ngắm.

Trong phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ truyền thống, gia tốc pháp tuyến của TL tỷ lệ với tốc độ quay của đường ngắm TL-MT [2, 3]. Phương trình dẫn có dạng:

$$W_{TL} = NV_{ic} \dot{\phi}_p \quad (1)$$

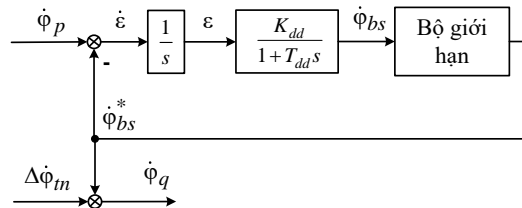
Trong đó: W_{TL} – Gia tốc pháp tuyến của TL, có phương vuông góc với đường ngắm TL-MT; N – Hệ số dẫn ($N = 3 \div 5$); $V_{ic} = -\dot{D}_p$ – Vận tốc tiếp cận TL-MT; $\dot{\phi}_p$ – Vận tốc góc của đường ngắm TL-MT.

Phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ truyền thống (1) có độ chính xác dẫn cao khi MT có khả năng cơ động thấp hoặc không cơ động ($W_{MT} \approx 0$), quỹ đạo TL được nắn thẳng khi tiếp cận MT [3, 4]. Khi MT có khả năng cơ động cao, thì luật dẫn (1) sẽ gây ra sai số lớn. Trong trường hợp này, người ta thường áp dụng phương pháp dẫn tỷ lệ có tính tới tham số gia tốc của MT. Phương trình dẫn lúc này có dạng:

$$W_{TL} = NV_{ic} \dot{\phi}_p + \frac{N}{2} W_{MT} \quad (2)$$

Trong đó: W_{MT} – Gia tốc pháp tuyến của MT.

Mục đích của luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường là tổng hợp được lệnh bù dịch tâm điểm ngắm trong vòng điều khiển bám sát con quay (hình 2) và kết hợp với luật dẫn tỷ lệ (2) để dẫn TL đến điểm ngắm Q là trọng tâm của MT bay (hình 1a).



Hình 2. Sơ đồ vòng bám sát con quay có tính tới lệnh bù dịch tâm điểm ngắm.

Trong hình 2: $\Delta\phi_m$ – Lệnh bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu; $\dot{\phi}_p$ – Tốc độ góc đường ngắm TL-MT; $\dot{\phi}_{bs}$ – Tốc độ góc đường ngắm TL-MT ở đầu ra khâu bám sát con quay; $\dot{\phi}_{bs}^*$ – Tốc độ góc đường ngắm TL-MT tại đầu ra bộ giới hạn tốc độ góc; K_{dd} – Hệ số dẫn động con quay; T_{dd} – Hằng số thời gian dẫn động con quay.

Ta có tương quan về góc của hai đường ngắm TL-MT tại P và Q trong hình 1b được viết như sau:

$$\sin(\varphi_p - \varphi_q) = \frac{R_d \sin(\varphi_p - \theta_{MT})}{D_q} \quad (3)$$

Lấy đạo hàm hai vế của (3), ta có:

$$\dot{\varphi}_q = \dot{\varphi}_p - \frac{R_d}{D_q \cos(\varphi_p - \varphi_q)} \left[(\dot{\varphi}_p - \dot{\theta}_{MT}) \cos(\varphi_p - \theta_{MT}) - \frac{\dot{D}_q}{D_q} \sin(\varphi_p - \theta_{MT}) \right] \quad (4)$$

Trong đó: $\dot{\varphi}_q, \dot{D}_q$ tương ứng là tốc độ góc đường ngắm TL-MT và vận tốc tiếp cận MT khi có lệnh bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu.

Trong (4), sai lệch góc $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_q$ nhỏ nên $\cos(\varphi_p - \varphi_q) \approx 1$. Trong pha cuối tự dẫn thì biểu thức \dot{D}_q/D_q sẽ trở lên vô cùng lớn so với hiệu tốc độ góc $(\dot{\varphi}_p - \dot{\theta}_{MT})$. Khi đó, (4) có thể tương đương với biểu thức sau:

$$\dot{\varphi}_q = \dot{\varphi}_p + \frac{R_d \dot{D}_q}{D_q^2} \sin(\varphi_p - \theta_{MT}) \quad (5)$$

Trong pha đầu và pha giữa của quá trình tự dẫn, cự ly tương đối TL-MT D_q lớn nên sai lệch góc $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_q$ rất nhỏ. Vì vậy, quá trình dẫn trong hai giai đoạn này tương tự như luật dẫn tỷ lệ truyền thống. Tham số \dot{D}_q/D_q^2 sẽ lớn trong pha cuối tự dẫn do D_q tiến dần tới 0 khi TL tiếp cận gần đến MT. Do đó, phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường chỉ phát huy hiệu quả ở pha cuối của quá trình tự dẫn.

Trong (5) thì góc nghiêng quỹ đạo mục tiêu θ_{MT} không thể quan sát được khi MT không cơ động [5]. Vì vậy, ta phải biến đổi sai lệch góc $\varphi_p - \theta_{MT}$ về dạng khác. Từ tương quan ĐHH trên hình 1b, ta có mối quan hệ về góc để TL trùng MT là:

$$V_{MT} \sin(\varphi_q - \theta_{MT}) = V_{TL} \sin(\varphi_q - \theta_{TL}) \quad (6)$$

Phương trình (6) có thể được biến đổi về dạng sau:

$$V_{MT} \sin\left[(\varphi_q - \varphi_p) + (\varphi_p - \theta_{MT})\right] = V_{TL} \sin\left[(\varphi_q - \varphi_p) + \lambda\right] \quad (7)$$

Với giả thiết sai lệch góc $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_q$ nhỏ, thì (7) được xấp xỉ như sau:

$$\sin(\varphi_p - \theta_{MT}) \approx \frac{V_{TL}}{V_{MT}} \sin \lambda \quad (8)$$

Thay (8) vào (5), ta thu được lệnh bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu $\Delta\dot{\varphi}_m$ có dạng:

$$\Delta\dot{\varphi}_m = \dot{\varphi}_q - \dot{\varphi}_p = \frac{R_d \dot{D}_q}{D_q^2} \frac{V_{TL}}{V_{MT}} \sin \lambda \quad (9)$$

Trong (9), các tham số R_d, V_{TL}, λ đã biết hoặc có thể đo được qua bộ tọa độ con quay. Tuy nhiên các tham số D_q, \dot{D}_q, V_{MT} không thể đo được qua bộ tọa độ của TL tự dẫn hồng ngoại. Vì vậy, trong trường hợp này ta cần phải ước lượng các giá trị này $\hat{D}_q, \hat{\dot{D}}_q, \hat{V}_{MT}$. Tuy nhiên, các

công trình [5, 6] đã chứng minh rằng khi sử dụng phương pháp dẫn tỷ lệ truyền thống cho lớp TL hồng ngoại với chỉ một kênh đo tốc độ góc đường ngắm TL-MT thì không thể ước lượng được các tham số của mục tiêu khi MT không cơ động. Nguyên nhân là do trong hệ thống điều khiển của lớp tên lửa này thiếu kênh đo cự ly.

Để tăng tính quan sát được cho hệ thống điều khiển, một giải pháp đưa ra là bổ sung thêm thành phần tần số dao động của vector đường ngắm TL-MT vào phương trình dẫn [6]. Khi này, phương trình dẫn (2) được viết lại như sau:

$$W_{TL} = NV_{ic}\dot{\phi}_p + \frac{N}{2}W_{MT} + FD_p\phi_p \quad (10)$$

Trong (10), tham số F là hằng số dương, tương ứng với tần số dao động tự nhiên của đường ngắm TL-MT khi TL cơ động trong quá trình tự dẫn. Tần số dao động này xuất hiện do sai số dẫn ban đầu của TL tự dẫn hồng ngoại ngay cả khi MT không cơ động. Trong vế phải của (10), số hạng thứ ba ($FD_p\phi_p$) được coi là tần số dao động của đường ngắm TL-MT.

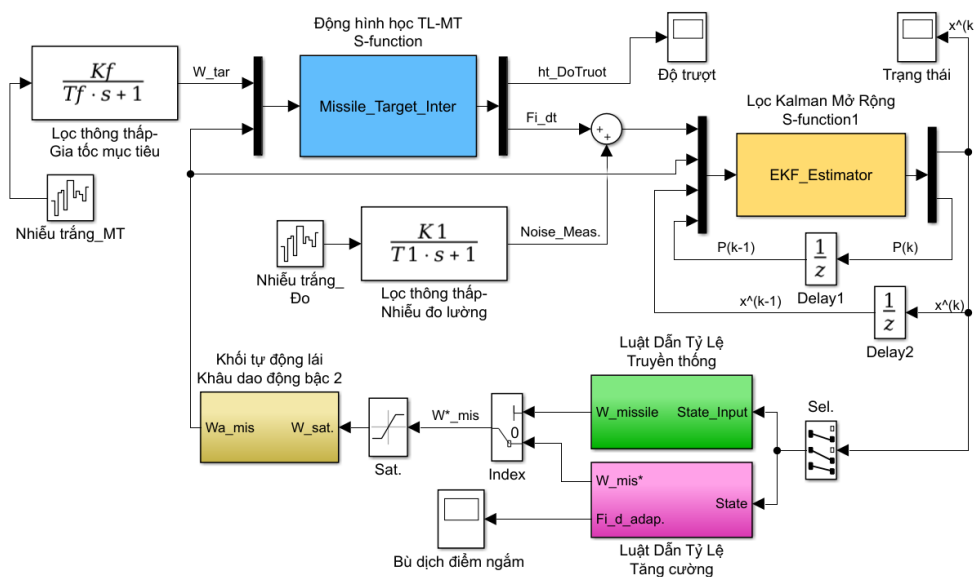
Kết hợp (10) với lệnh bù dịch tâm điểm ngắm (9), ta sẽ thu được phương trình luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường như sau:

$$W_{TL} = N\hat{V}_{ic}(\dot{\phi}_p + \Delta\dot{\phi}_m) + \frac{N}{2}\hat{W}_{MT} + F\hat{D}_q\phi_p \quad (11)$$

Trong đó, các tham số \hat{V}_{ic} , \hat{D}_q , \hat{W}_{MT} là các giá trị ước lượng tương ứng được xác định từ bộ ước lượng trạng thái sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng [7]. Phương trình dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường (11) sử dụng thành phần tần số dao động của vector đường ngắm TL-MT để nâng cao tính quan sát được cho bộ ước lượng trạng thái trong pha đầu và pha giữa của quá trình tự dẫn. Ở pha cuối tự dẫn, tham số lệnh bù dịch tâm điểm ngắm sẽ làm tăng xác suất tiêu diệt MT bằng cách di chuyển điểm ngắm đến trọng tâm của MT bay.

3. MÔ PHỎNG VÀ BÌNH LUẬN

Việc mô phỏng, giá hiệu quả làm việc của phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường được xem xét trong thành phần của vòng điều khiển kín quỹ đạo TL-MT. Sơ đồ khối mô phỏng sử dụng Matlab/Simulink được thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối vòng điều khiển kín tên lửa tự dẫn trong Simulink.

Trong hình 3, mô hình ĐHH TL-MT cho bởi phương trình vi phân sau [3, 7]:

$$\dot{\varphi}_p = \frac{2\dot{D}_p}{D_p} \varphi_p + \frac{1}{D_p} (W_{MT} - W_{TL}) \quad (12)$$

Khô tự động lái (Autopilot) là khâu dao động bậc hai có hàm truyền:

$$G_w(s) = \frac{W_{TLa}}{W_{TL}} = \frac{K_a}{1 + 2\zeta T_a s + T_a^2 s^2} \quad (13)$$

Trong đó: K_a là hệ số lệnh của TL; T_a là hằng số thời gian của hệ tự động lái.

Bộ lọc Kalman mở rộng được sử dụng để ước lượng các tham số trạng thái trong (11) với vector trạng thái [7]: $\mathbf{x}_K^T = [D_p \quad \dot{D}_p \quad \varphi_p \quad \dot{\varphi}_p \quad W_{MT}]$ và thời gian trích mẫu $T = 5 \cdot 10^{-4}$ (s).

Gia tốc của MT cơ động được mô tả dưới dạng mô hình Singer với bộ lọc thông thấp có phương trình vi phân như sau [8]:

$$\dot{W}_{MT} = -\lambda_{MT} W_{MT} + \xi_{MT} \quad (14)$$

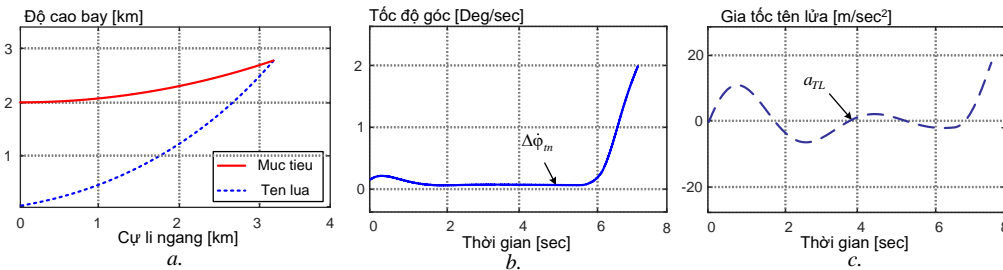
Trong đó: λ_{MT} là hệ số có tính tới tính chất cơ động của mục tiêu ($\lambda_{MT} = 0.3$ (1/s)); ξ_{MT} là tạp trắng với phương sai nhiễu $\sigma_{MT}^2 = 15$ (m/s²).

Các tham số mô phỏng của TL và MT được cho như sau: vận tốc của TL $V_{TL} = 450$ (m/s); vận tốc của MT $V_{MT} = 250$ (m/s); hệ số dẫn $N = 4$; tần số dao động riêng của vector đường ngắm TL-MT $F = 3$; khoảng cách dịch chuyển điểm ngắm $R_d = 8$ (m); biên độ lệnh bù dịch điểm ngắm được giới hạn trong khoảng 15% của tốc độ góc lớn nhất của con quay đầu tự dẫn: $|\Delta\dot{\varphi}_m| \leq 2$ (deg/sec) [9].

Để đánh giá chất lượng của phương pháp dẫn tỷ lệ tăng cường, ta tiến hành mô phỏng với hai trường hợp động học TL-MT như sau:

3.1. Trường hợp bắn đuổi MT

Các tham số mô phỏng khi bắn đuổi MT: $D_p(0) = 2500$ (m); $\varphi_p(0) = 25^\circ$; $X_{MT}(0) = 0$; $Y_{MT}(0) = 2000$ (m); $\theta_{TL} = 35^\circ$; $\theta_{MT} = 10^\circ$; $K_a = 3$; $T_a = 0.75$ (s); tại thời điểm $t = 1$ (s) MT cơ động với gia tốc $W_{MT} = 10$ (m/s²). Kết quả mô phỏng với luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường trong trường này được thể hiện trên hình 4.

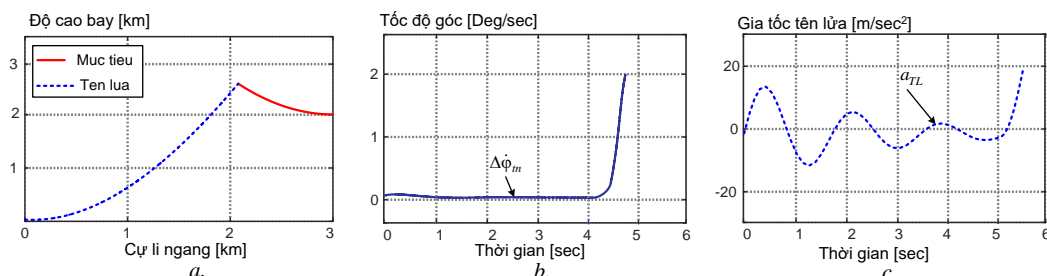


Hình 4. Kết quả mô phỏng luật dẫn tỷ lệ tăng cường khi bắn đuổi MT: a – Quỹ đạo TL-MT; b – đặc tuyến lệnh bù thích nghi khi bắn đuổi; c – Gia tốc của TL.

3.2. Trường hợp bắn đón MT

Các tham số mô phỏng khi bắn đón MT: $D_p(0) = 3600$ (m); $\varphi_p(0) = 20^\circ$;

$X_{MT}(0) = 3000(m)$; $Y_{MT}(0) = 2000(m)$; $\theta_{TL} = 25^\circ$; $\theta_{MT} = 170^\circ$; $K_a = 5$; $T_a = 0.5(s)$; tại thời điểm $t=1(s)$ MT cơ động với gia tốc $W_{MT} = 10 (m / s^2)$. Kết quả mô phỏng trong trường hợp này được thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Kết quả mô phỏng luật dẫn tỷ lệ tăng cường khi bắn đón MT:

a – Quỹ đạo TL-MT; b – Đặc tuyến lệnh bù thích nghi khi bắn đón; c – Gia tốc của TL.

Việc đánh giá chất lượng của phương pháp dẫn tỷ lệ tăng cường so với phương pháp dẫn tỷ lệ truyền thống được tiến hành qua việc so sánh độ trượt MT tức thời $h(t)$ [1, 3]:

$$h(t) = \frac{D_p^2}{V_{tc}} \dot{\phi}_p \quad (15)$$

Các kết quả so sánh giá trị độ trượt tức thời của hai phương pháp dẫn tương ứng với hai trường hợp bắn đuổi và bắn đón MT cho lớp TL phòng không tự dẫn hồng ngoại [9] được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. So sánh độ trượt tức thời.

TT	Phương pháp dẫn	Độ trượt $h(t)$ [m], chế độ Bắn đuổi MT	Độ trượt $h(t)$ [m], chế độ Bắn đón MT
1	Tiếp cận tỷ lệ truyền thống - PN	4.1	4.7
2	Tiếp cận tỷ lệ tăng cường - APN	2.2	2.9

Nhận xét: Các kết quả mô phỏng trong bảng 1 cho thấy, cả hai phương pháp dẫn đều có thể đưa TL đến gặp MT, độ trượt nằm trong khoảng cho phép [9]. Tuy nhiên, độ trượt tức thời tại điểm va chạm của luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường nhỏ hơn so với luật dẫn tiếp cận tỷ lệ truyền thống.

Trong đồ thị trên hình 4b và 5b, ta thấy rằng lệnh bù dịch tâm điểm ngắm thích nghi theo mục tiêu có giá trị lớn và cực đại tại pha cuối của quá trình tự dẫn. Đồ thị gia tốc pháp tuyến của TL trên hình 4c, 5c cho thấy sự cơ động của TL cần có để tăng khả năng quan sát được cho hệ thống điều khiển trong quá trình tự dẫn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp tổng hợp luật dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường cho lớp tên lửa phòng không tự dẫn hồng ngoại, giúp tăng cường xác suất tiêu diệt mục tiêu. Các kết quả mô phỏng đã chứng tỏ phương pháp dẫn tiếp cận tỷ lệ tăng cường có những ưu điểm vượt trội so với phương pháp dẫn tỷ lệ truyền thống như độ trượt tức thời nhỏ, ít nhạy cảm với sự cơ động của MT và tăng tính quan sát được cho bộ ước lượng trạng thái của hệ thống điều khiển của lớp tên lửa tự dẫn hồng ngoại chỉ có một kênh đo tốc độ góc đường ngắm TL-MT.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lê Anh Dũng, Nguyễn Hữu Độ, Nguyễn Xuân Căn, Huỳnh Lương Nghĩa, “*Lý thuyết bay và hệ thống điều khiển tên lửa phòng không.*” Học viện Kỹ thuật Quân sự, 1999.

- [2]. Tô Văn Dục, “Hệ thống xử lý tín hiệu tên lửa tự dẫn hồng ngoại.” NXB Quân đội nhân dân, 2003, 263 tr.
- [3]. Zarchan Paul, “Tactical and strategic missile guidance.” American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012.
- [4]. Shneydor Neryahu A., “Missile guidance and pursuit: kinematics, dynamics and control.” Elsevier, 1998.
- [5]. Hepner S.R., Geering H. P., “Observability Analysis for Target Maneuver Estimation Via Bearing-Only and Bearing-Rate-Only Measurements.” Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 13, No. 6, 1990, pp. 977-983.
- [6]. Song Taek Lyul, Tae Yoon Um, "Practical guidance for homing missiles with bearings-only measurements." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 32.1, 1996, pp. 434-443.
- [7]. Đoàn Văn Thúy, Trần Hữu Phương, Phan Tương Lai, "Ứng dụng bộ lọc Kalman mở rộng trong bài toán điều khiển tên lửa tự dẫn bám sát mục tiêu." Tạp chí Nghiên cứu KH&CN Quân sự, Số đặc san FEE2020 (2020), tr. 66-73.
- [8]. Singer R. A., “Estimating optimal tracking performance for manned maneuvering targets.” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, pp. 473-483.
- [9]. Техническая документация на изделие 9М39, Переносной зенитный ракетный комплекс 9К38, Технические условия на ракету 9М39, Часть 3.

ABSTRACT

Synthesis of the augmented proportional navigation with lead bias aim point adapted to target for self-guided infrared missile

The paper presents the research results of augmented proportional navigation with taking into account a lead bias command aim point adapted to target for an infrared self-guided surface to air missile. The lead bias command in the terminal phase is proposed to engage the target kill probability. Simulation studies have demonstrated outstanding advantages of the proposed guidance law is compared with pure proportional navigation guidance.

Keywords: Infrared self-guided surface to air missile; Augmented proportional navigation; Lead bias command aim point.