

Tối ưu hoá quỹ đạo bay thiết bị bay không người lái

Vương Anh Trung, Ngô Văn Tài, Nguyễn Sỹ Hiếu*

Khoa Kỹ thuật hàng không, Học viện Phòng không - Không quân.

*Email: nguyensyhiu30@gmail.com

Nhận bài: 24/8/2022; Hoàn thiện: 07/11/2022; Chấp nhận đăng: 28/11/2022; Xuất bản: 23/12/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.25-32>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương pháp tối ưu quỹ đạo thiết bị bay không người lái trong giai đoạn bay tự lập với chỉ tiêu tối thiểu hoá năng lượng đồng thời đảm bảo điều kiện biên tại thời điểm chuyển sang tự dẫn. Kết quả đã hình thành được quỹ đạo tối ưu của thiết bị bay không người lái trong giai đoạn tự lập và chứng minh được tính ưu việt của phương pháp dẫn kết hợp so với phương pháp dẫn tiếp cận tỉ lệ.

Từ khóa: Phương pháp dẫn kết hợp; Tối ưu quỹ đạo; Thiết bị bay không người lái.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thiết bị bay không người lái (TBB) hiện được ứng dụng rộng rãi trên thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng với mục đích đưa từ các thiết bị phóng đến các vị trí trên mặt đất, mặt nước như: nhà cửa, cầu cống, các cụm công trình trọng yếu có giá trị cao về mặt chiến thuật,... Thiết bị bay không người lái thế hệ cũ thường sử dụng các phương pháp dẫn như: từ xa, tự dẫn, tự lập để tiếp cận các mục tiêu. Phương pháp điều khiển từ xa có ưu điểm: cự ly hoạt động xa tuy nhiên, nhược điểm là phải có thiết bị điều khiển có công suất phát lớn từ đó dễ bị lộ vị trí điều khiển. Phương pháp điều khiển tự dẫn, ưu điểm có độ chính xác cao nhưng cự ly hoạt động hạn chế do phụ thuộc vào khả năng làm việc của đầu tự dẫn trên thiết bị bay không người lái. Với phương pháp điều khiển tự lập, ưu điểm cự ly hoạt động của TBB xa nhưng độ chính xác không cao.

Yêu cầu đặt ra cần có một phương pháp dẫn kết hợp được các ưu điểm của các phương pháp dẫn nêu trên và khắc phục được những nhược điểm. Xu hướng hiện nay là sử dụng các phương pháp dẫn kết hợp trong đó phương pháp dẫn kết hợp tự lập-tự dẫn (TL-TD) được trong nước và thế giới rất quan tâm. Phương pháp dẫn này chia quá trình dẫn TBB làm hai giai đoạn: giai đoạn 1 là giai đoạn tự lập, giai đoạn 2 là giai đoạn tự dẫn. Độ chính xác đưa đến mục tiêu ở giai đoạn 2 được quyết định bởi khả năng cơ động đến vị trí mong muốn của TBB ở cuối giai đoạn một đảm bảo cho đầu tự dẫn hoạt động.

Các nghiên cứu về tối ưu quỹ đạo giai đoạn bay tự lập [5- 7] tập trung với mô hình toán đã được tuyến tính hoá, với các mô hình phi tuyến ít được công bố. Vì vậy, nghiên cứu xây dựng phương pháp dẫn kết hợp TL-TD cho TBB là một nhiệm vụ quan trọng, cần thiết nhằm hoàn thiện một phương pháp dẫn mới đảm bảo mở rộng tầm bay, có độ chính xác cao góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng trong của thiết bị bay không người lái.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

Xây dựng mô hình toán

a) Mô hình động học thiết bị bay không người lái

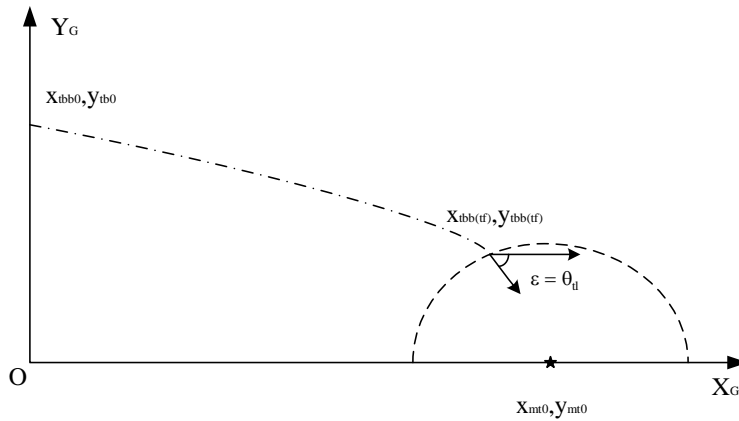
Việc điều khiển TBB trong không gian có thể được thực hiện thông qua việc điều khiển trong hai mặt phẳng vuông góc. Bài toán điều khiển trong không gian có thể quy về bài toán điều khiển trong hai mặt phẳng. Không mất tính tổng quát, có thể coi TBB là chất điểm trong giai đoạn bay tự lập với mô hình toán được trình bày trong (1) [1- 3]. Trong đó: n_x, n_y - Quá tải tiếp tuyến và quá tải pháp tuyến, phụ thuộc vào lực đẩy, lực cản, độ cao...; v - Vận tốc TBB; θ - Góc chúc góc tốc độ của TBB; x, y - Tọa độ theo thời gian của TBB theo phương đứng.

$$\begin{cases} \dot{V} = g \cdot (n_x - \sin\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{g}{V} \cdot (n_y - \cos\theta) \\ \dot{x} = V \cos\theta \\ \dot{y} = V \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

Theo yêu cầu bài toán, giai đoạn 1 đưa TBB đến vị trí xác định đảm bảo các yếu tố: $r(t_f) = r_d$; $q(t_f) = 0$ ($r(t_f)$ là khoảng cách thiết bị bay-mục tiêu (TBB-MT) tại thời điểm t_f ; $q(t_f)$ - Góc đón TBB tại thời điểm t_f).

Xét điều kiện 1 với yêu cầu khoảng cách TL-MT tại thời điểm kết thúc giai đoạn 1 bằng khoảng cách bắt được của đầu tự dẫn. Điều kiện thứ nhất tương đương với:

$$\sqrt{(x(t_f) - x_{mt}(t_f))^2 + (y(t_f) - y_{mt}(t_f))^2} - r_d = 0 \quad (2)$$



Hình 1. Mối liên hệ động hình học giữa TBB-MT.

Xét điều kiện 2: Điều kiện để TBB bắt được mục tiêu khi kết thúc giai đoạn 1 là $q(t_f) \leq FOV / 2$ với yêu cầu nâng cao độ chính xác dẫn trong giai đoạn 2 ta lấy $q(t_f) = 0$. Từ hình 1 có: tại thời điểm chuyển t_f véc tơ vận tốc TBB trùng với đường ngắm TBB-MT. Do đó, ta có góc chúc ngóc TBB tại thời điểm chuyển $\theta(t_f)$ (góc hợp giữa véc tơ vận tốc TBB với trục ngang OX_G) tính theo công thức:

$$\tan(\theta(t_f)) = \frac{y(t_f) - y_{mt}(t_f)}{x(t_f) - x_{mt}(t_f)} \quad \text{Hay} \quad \frac{\cos\theta(t_f)}{x(t_f) - x_{mt}(t_f)} = \frac{\sin\theta(t_f)}{y(t_f) - y_{mt}(t_f)}$$

Từ các phân tích như trên ta có:

$$\begin{cases} (x(t_f) - x_{mt}(t_f))^2 + (y(t_f) - y_{mt}(t_f))^2 - r_d^2 = 0 \\ \cos\theta(t_f) \cdot (y(t_f) - y_{mt}(t_f)) - \sin\theta(t_f) \cdot (x(t_f) - x_{mt}(t_f)) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

với x_{mt}, z_{mt} : tọa độ mục tiêu trong phương đứng, được cập nhật liên tục theo thời gian.

b) Ứng dụng lý thuyết điều khiển tối ưu xây dựng bài toán tối ưu theo chỉ tiêu năng lượng

Hàm chỉ tiêu chất lượng theo Bol-za tại thời điểm t_f (giá trị các tham số được tính tại thời điểm t_f) với hàm chỉ tiêu tối thiểu hóa năng lượng kết hợp với điều kiện biên tại thời điểm kết thúc giai đoạn bay tự lập [4, 9]:

$$J = \rho_1((x(t_f) - x_m(t_f))^2 + (y(t_f) - y_m(t_f))^2 - r_d^2) + \rho_2(\cos\theta(t_f).(y(t_f) - y_m(t_f)) - \sin\theta(t_f).(x(t_f) - x_m(t_f))) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (u^T . k^{-2} . u) \rightarrow \min \quad (4)$$

trong đó: ρ_1, ρ_2 là các trọng số tương ứng yêu cầu độ chính xác về toạ độ hay góc; $k^2 = \text{diag}(k_1^2, k_2^2)$ - Hệ số; x_{m0}, y_{m0} - Tọa độ ban đầu mục tiêu; t_0, t_f - Thời điểm đầu và thời điểm cuối; $u = [n_x, n_y]^T$ - Tín hiệu điều khiển.

Biến đổi J ta được:

$$J = \rho_1((x(t_f) - x_m(t_f))^2 + (y(t_f) - y_m(t_f))^2 - r_d^2) + \rho_2(\cos\theta(t_f).(y(t_f) - y_m(t_f)) - \sin\theta(t_f).(x(t_f) - x_m(t_f))) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (k_1^{-2} . n_x^2 + k_2^{-2} . n_y^2) \rightarrow \min \quad (5)$$

Hàm Hamilton với $P_0 = 1$, theo nguyên lý cực đại Potryagin được viết như sau (P_i : là các biến đồng trạng thái):

$$H = \sum_{i=0}^n P_i . f_i = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (k_1^{-2} . n_x^2 + k_2^{-2} . n_y^2) + P_V . g . n_x - P_\theta . \frac{g}{V} . n_y + P_x . V . \cos\theta - P_y . V . \sin\theta$$

Điều kiện dừng (phương trình Euler-Lagarange) có dạng:

$$\frac{dP_\theta}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \theta}; \frac{dP_V}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial V}; \frac{dP_x}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}; \frac{dP_y}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial y}; \frac{dn_x}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n_x}; \frac{dn_y}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n_y}$$

Tương đương với hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \frac{dP_V}{dt} = P_\theta . \frac{g}{V^2} . (n_y - \cos\theta) - P_x . \cos\theta - P_y . \sin\theta \\ \frac{dP_\theta}{dt} = -P_V . g . (-\cos\theta) - P_\theta . \frac{g}{V} . \sin\theta + P_x . V . \sin\theta - P_y . V . \cos\theta \\ \frac{dP_x}{dt} = 0 \\ \frac{dP_y}{dt} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Giá trị n_x, n_y tối ưu được tìm theo điều kiện:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial n_x} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial n_y} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_1^{-2} . n_x^2 + P_V . g = 0 \\ k_2^{-2} . n_y^2 - P_\theta . \frac{g}{V} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} n_x = -P_V . g . k_1^2 \\ n_y = P_\theta . \frac{g}{V} . k_2^2 \end{cases} \quad (7)$$

Từ (1) và (6) ta có hệ phương trình mở rộng:

$$\begin{cases} \dot{V} = g . (n_x - \sin\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{g}{V} . (n_y - \cos\theta) \\ \dot{x} = V \cos\theta \\ \dot{z} = V \sin\theta \\ \frac{dP_V}{dt} = P_\theta . \frac{g}{V^2} . (n_y - \cos\theta) - P_x . \cos\theta - P_y . \sin\theta \\ \frac{dP_\theta}{dt} = -P_V . g . (-\cos\theta) - P_\theta . \frac{g}{V} . \sin\theta + P_x . V . \sin\theta - P_y . V . \cos\theta \\ \frac{dP_x}{dt} = 0 \\ \frac{dP_y}{dt} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Để đảm bảo điều kiện (3) ta xác định điều kiện biên. Do các biên và thời gian không cố định, ta đi xác định điều kiện chuyển đổi của các biến đồng trạng thái P_i tại t_f theo điều kiện $P_i = \partial G / \partial x_i(t_f)$ để thay thế điều kiện biên. Hàm Teriminant được xác định theo biểu thức:

$$G = \rho_1((x(t_f) - x_m(t_f))^2 + (y(t_f) - y_m(t_f))^2 - r_d^2) + \rho_2(\cos\theta(t_f).(y(t_f) - y_m(t_f)) - \sin\theta(t_f).(x(t_f) - x_m(t_f)))$$

$$\text{Ta có điều kiện biên chuyển đổi: } P_V(t_f) = \frac{\partial G}{\partial V(t_f)}; P_\theta(t_f) = \frac{\partial G}{\partial \theta(t_f)}$$

$$P_x(t_f) = \frac{\partial G}{\partial x(t_f)}; P_y(t_f) = \frac{\partial G}{\partial y(t_f)}$$

$$\begin{cases} P_V(t_f) = 0 \\ P_\theta(t_f) = \rho_2(-\sin\theta(t_f).(y(t_f) - y_m(t_f)) - \cos\theta(t_f).(x(t_f) - x_m(t_f))) \\ P_x(t_f) = \rho_1(2(x(t_f) - x_m(t_f))) + \rho_2(-\sin\theta(t_f)) \\ P_y(t_f) = \rho_1(2(y(t_f) - y_m(t_f))) + \rho_2(\cos\theta(t_f)) \end{cases} \quad (9)$$

Ta thấy hệ phương trình (8) là hệ phương trình vi phân bậc nhất phi tuyến, nếu biết trước biến trạng thái $[V(t_0) \theta(t_0) x(t_0) y(t_0)]$ (cho trước) và biến đồng trạng thái $[P_V(t_0) P_\theta(t_0) P_x(t_0) P_y(t_0)]^T$, giải hệ phương trình vi phân bằng các phương pháp số như phương pháp Euler, Runge-Kutta, ... ta tìm được họ các quỹ đạo tối ưu của tên lửa. Ứng với mỗi bộ biến đồng trạng thái khác nhau tại thời điểm t_0 , ta có một quỹ đạo tối ưu khác nhau, tuy nhiên, chỉ một hoặc vài quỹ đạo tối ưu thỏa mãn điều kiện chuyển đổi (9). Mục đích của bài toán tìm bộ biến đồng trạng thái $[P_V(t_0) P_\theta(t_0) P_x(t_0) P_y(t_0)]^T$ tại thời điểm t_0 thỏa mãn điều kiện chuyển đổi (9).

c) Phương pháp liên tục giải theo tham số [8]

Phương pháp liên tục giải theo tham số là một trong những phương pháp hiệu quả để giải bài toán tối ưu với mô hình phi tuyến trong điều khiển thiết bị bay. Từ hệ phương trình $F(X) = 0$, ta đưa về hệ phương trình $K(X, \tau)$, với X là véc tơ tham số trạng thái. Trong phương pháp này ta sử dụng tham số τ , với τ nằm trong khoảng $[0, 1]$.

Khi $\tau = 0$ ta có hệ $K(X, \tau) = 0$, giải hệ phương trình tìm được X_0 ;

Khi $\tau = 1$ ta có hệ $K(X, 1) = 0$, giải hệ phương trình tìm được X^* ;

Hàm $K(X, \tau)$ liên tục theo τ , cho τ thay đổi từ 0 đến 1, giải lần lượt với mỗi hệ $K(X, \tau_i) = 0$, ví dụ theo phương pháp Newton ta có thể tìm được các giá trị X_0, X_1, \dots, X^* liên tiếp. Do tìm được X_0 tại $\tau = 0$, ta luôn tìm được τ_1 đủ gần τ_0 với các điều kiện hội tụ được thỏa mãn. Tương tự có thể tìm được điều kiện hội tụ theo phương pháp Newton cho $\tau_2, \tau_3, \dots, \tau = 1$.

Hàm véc tơ $K(X, \tau)$, có thể được lựa chọn như sau:

$$\begin{aligned} K(X, \tau) &= F(X) + (\tau - 1) * F(X_0) = 0, \text{ với } X = X(\tau); 0 \leq \tau \leq 1 \\ F(X) &= (1 - \tau) * F(X_0) \end{aligned} \quad (10)$$

Ta thấy (10) thỏa mãn các điều kiện:

Khi $\tau = 0$, ta nhận được $F(X_0) - F(X_0) = 0$;

Khi $\tau = 1$, ta có $F(X^*) + (1 - 1)F(X_0) = F(X^*) = 0$;

Hàm $K(X, \tau)$ liên tục theo τ .

Vi phân 2 vế phương trình (10) với tham số liên tục τ ta nhận được:

$$\frac{dX}{dt} = -\left(\frac{\partial F(X)}{\partial X}\right)^{-1} * F(X_0) \quad (11)$$

Từ (11) lấy tích phân 2 vế ta được:

$$\int_0^1 \frac{dX}{d\tau} d\tau = - \int_0^1 \left(\frac{\partial F(X)}{\partial X} \right)^{-1} \cdot F(X_0) d\tau$$

$$X(1) = X(0) - \int_0^1 \left(\frac{\partial F(X)}{\partial X} \right)^{-1} \cdot F(X_0) d\tau \quad (12)$$

Với: $\frac{\partial F(X)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}$

Ý tưởng của phương pháp: đặt $\tau_1 = \Delta\tau$ giải hệ $K(X, \tau_1)$ cho X_0 đã chọn nhận được X_{τ_1} , tiếp theo lấy X_{τ_1} như một xấp xỉ ban đầu, với $\tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau$ mới, giải hệ $K(X, \tau_2) = 0$ nhận được X_{τ_2} . Tiếp tục đến khi đạt đến độ chính xác cho trước. Các bước thực hiện thuật toán như sau: Bước 1: Xây dựng hệ $K(X, \tau)$; Bước 2: Lựa chọn xấp xỉ ban đầu X_0 và độ chính xác ε ; Bước 3: Đặt $i = 1$; Bước 4: Tính $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau$; Bước 5: Giải hệ phương trình $K(X, \tau_i) = 0$ nhận được X_{τ_i} , tính số lần lặp lại m . Nếu $m > 10$ phương pháp Newton không hội tụ vì $X_{\tau_{i-1}}$ và X_{τ_i} cách nhau quá xa. Giảm $\Delta\tau$ trở về bước 4. Giả sử X_{τ_i} tìm được; Bước 6: Xác định sai số tìm được thỏa mãn điều kiện đầu: $|X_{\tau_i} - X_{\tau_{i-1}}| < \varepsilon$, nếu không thỏa mãn trở về bước 4.

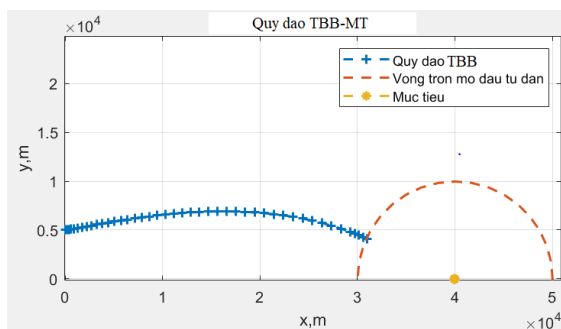
Bài toán trở thành: Tìm bộ tham số của các biến động trạng thái $X = [P_v(t_0) P_\theta(t_0) P_x(t_0) P_z(t_0)]^T$ thỏa mãn hệ phương trình (8) với điều kiện biên (9).

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

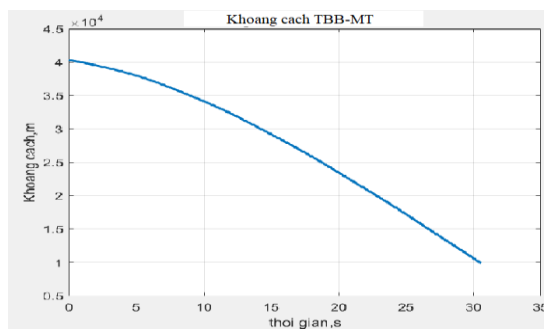
3.1. Số liệu đầu vào

Các tham số ban đầu đưa vào khảo sát với một loại TBB giả định: Vận tốc TBB: $V_{t10} = 300 \text{ m/s}$; Toạ độ ban đầu của TBB: $(x_{t10}, z_{t10}) = (0, 5000) \text{ m}$; Góc nghiêng quỹ đạo TBB: $\theta_{t1}(t_0) = 5^\circ$; Cự ly hoạt động của đầu tự dẫn: $r_d = 10000 \text{ m}$; Vận tốc mục tiêu: $V_{m10} = 0 \text{ m/s}$; Toạ độ ban đầu của mục tiêu: $(x_{m10}, y_{m10}) = (40000, 0) \text{ m}$; Hệ số: $k_1 = 0.08; k_2 = 0.1$.

3.2. Kết quả mô phỏng giai đoạn bay tự lập



Hình 2. Quỹ đạo TBB-MT.



Hình 3. Khoảng cách TBB-MT.

Nhận xét: Hình 2 cho ta thấy kết thúc giai đoạn bay tự lập điểm đến mong muốn của TBB nằm trên vòng tròn có bán kính bằng cự ly hoạt động của đầu tự dẫn (ĐTD). Hình 3 cho thấy khoảng cách TL-MT giảm dần theo thời gian từ khoảng cách ban đầu theo trục Ox là 40000m xuống còn 10000m khoảng cách này đúng bằng cự ly hoạt động của đầu tự dẫn.

Kết quả khảo sát trên hình 2, 3 có tọa độ TBB tại thời điểm kết thúc giai đoạn bay tự lập là $(x, y) = (31005.7672, 4076.3502)$ ta tính được $r = 10000m \leq r_d$. Như vậy, khoảng cách TL-MT đáp ứng yêu cầu đặt ra đối với điểm kết thúc mong muốn của giai đoạn bay tự lập trước khi chuyển sang giai đoạn tự dẫn.



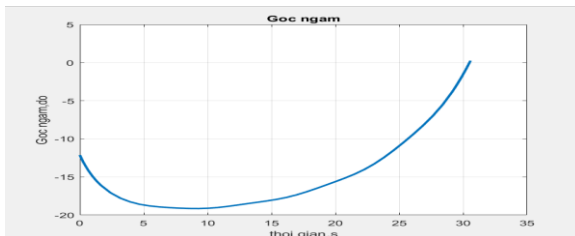
Hình 4. Tốc độ góc quay đường ngắm.



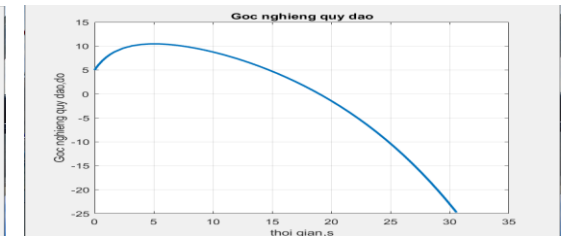
Hình 5. Độ trượt tức thời.

Nhận xét: Hình 4 cho thấy tốc độ góc quay đường ngắm thời điểm cuối tiến về 0, như vậy góc quay đường ngắm ε cuối giai đoạn bay tự lập có xu hướng ổn định. Theo công thức tính độ trượt tức thời $h_{tr} = \frac{r^2 \cdot \dot{\varepsilon}}{V_{tc}}$ thì khi tốc độ góc quay đường ngắm tiến về 0 khi đó độ trượt tức thời cũng tiến về 0 và TBB có xu hướng gặp mục tiêu. Kết quả trên hình 5 cho thấy kết thúc giai đoạn bay tự lập độ trượt tức thời tiến về 0, tương ứng với việc tốc độ góc quay đường ngắm tiến về 0, điều này phù hợp với kết quả khảo sát tốc độ góc quay đường ngắm trên hình 4.

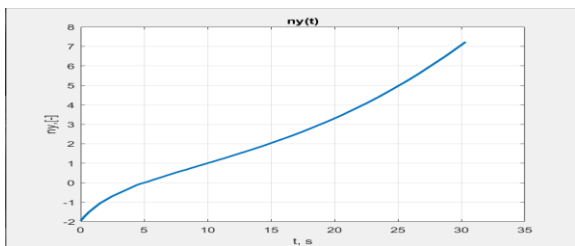
Nhận xét: Góc ngắm xác định theo công thức $q = \varepsilon - \theta$ (do $\alpha = 0$). Hình 6 cho thấy cuối giai đoạn bay tự lập $q \rightarrow 0$, điều này xảy ra khi $\varepsilon = \theta$ tức là trục dọc TBB trùng với đường ngắm. Như vậy, kết thúc giai đoạn bay tự lập góc ngắm đáp ứng yêu cầu đặt ra đối với điểm kết thúc mong muốn của giai đoạn bay tự lập trước khi chuyển sang giai đoạn tự dẫn. Hình 7 cho thấy góc nghiêng quỹ đạo của TBB thời điểm đầu tăng theo chiều dương sau đó tiến về 0 và tiếp tục tăng theo chiều âm. Góc nghiêng quỹ đạo ban đầu của TBB $\theta_0 = 5^\circ$ TBB sẽ bay lên sau đó bổ nhào tiếp cận mục tiêu.



Hình 6. Góc ngắm.



Hình 7. Góc nghiêng quỹ đạo tên lửa.



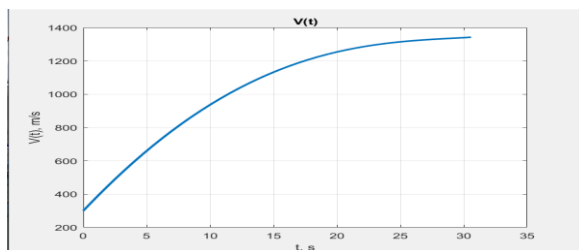
Hình 8. Quá tải của TBB theo trục Oy.



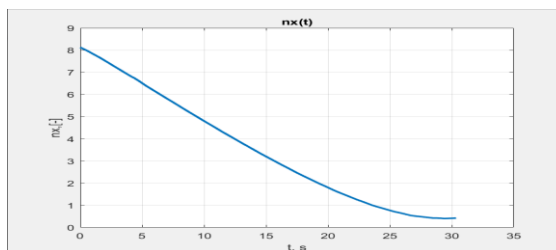
Hình 9. Góc nghiêng đường ngắm.

Nhận xét: Trong mặt phẳng đứng quá tải n_y là tín hiệu điều khiển làm thay đổi quỹ đạo chuyển động của TBB. Giai đoạn đầu TBB bay với quá tải n_y ngược chiều với gia tốc trọng trường tức là TBB phóng hướng lên trên (hình 8). Góc nghiêng đường ngắm cuối giai đoạn bay tự

lập giữ ổn định, điều này tương ứng với việc tốc độ góc quay đường ngắm tiến về 0 (hình 9).



Hình 10. Tốc độ TBB.



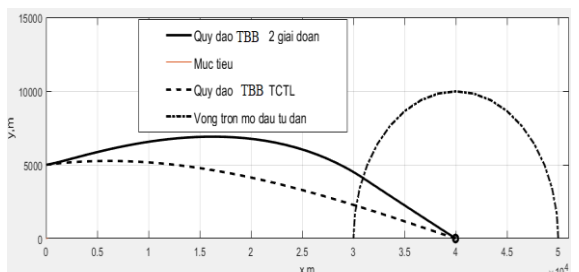
Hình 11. Quá tải của TBB theo trục Ox.

Nhận xét: Tốc độ của TBB được tạo ra do lực đẩy của động cơ, lực đẩy này được tạo ra do quá trình đốt cháy nhiên liệu ở buồng đốt. Hình 10 mô tả tốc độ của TBB phù hợp với thực tế hoạt động của động cơ, cuối giai đoạn bay tự lập tốc độ của TBB tăng chậm và có xu hướng không tăng. Quá tải n_x phụ thuộc vào sự thay đổi của tốc độ TBB theo trục Ox, hình 11 cho thấy n_x giảm dần và tiến dần về 0 phản ánh về cuối giai đoạn bay tự lập không có sự thay đổi tốc độ của TBB theo trục Ox. Phù hợp với kết quả khảo sát tốc độ của TBB như hình 10.

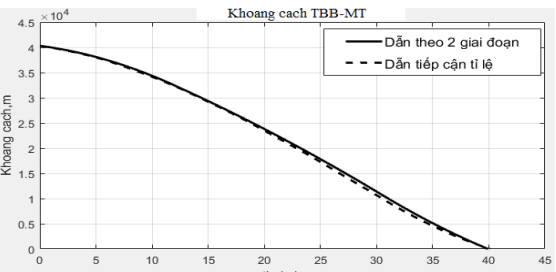
Nhận xét: Kết quả mô phỏng cho thấy, các tham số quỹ đạo đáp ứng được các yêu cầu đặt ra đối với điểm đến mong muốn tại thời điểm chuyển sang giai đoạn tự dẫn như: khoảng cách TBB-MT nằm trong cự ly hoạt động của đầu tự dẫn, góc ngắm $q=0$. Như vậy, dựa vào mối liên hệ động hình học TBB-MT, điều kiện ràng buộc tại thời điểm chuyển sang giai đoạn tự dẫn và ứng dụng lý thuyết điều khiển tối ưu mà cụ thể là bài toán biên với thời gian không cố định đã tối ưu hoá được quỹ đạo bay của TBB trong giai đoạn bay tự lập.

3.3. So sánh đánh giá phương pháp dẫn kết hợp với phương pháp dẫn tiếp cận tỉ lệ

Giả sử đầu tự dẫn trên TBB có thể đảm bảo bất mục tiêu với tham số như mục 3.1. Tiến hành so sánh chất lượng phương pháp dẫn kết hợp và phương pháp dẫn tiếp cận tỉ lệ.

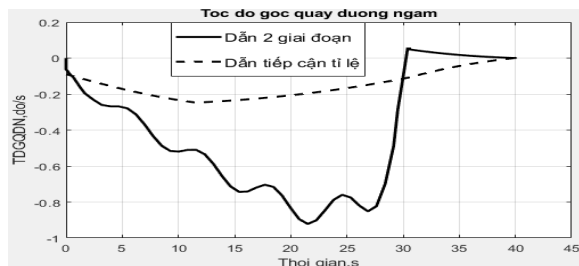


Hình 12. Quỹ đạo TBB-MT.

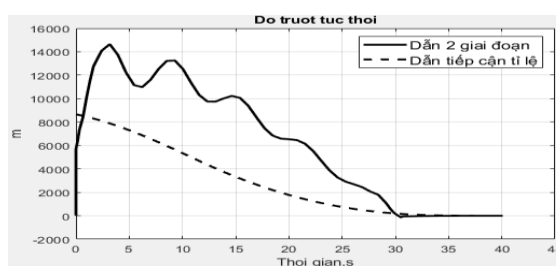


Hình 13. Khoảng cách TBB-MT.

Từ hình 12, hình 13 nhận thấy, khoảng cách TBB-MT trong cả hai phương pháp giảm đến “0”, đảm bảo đưa TBB đến mục tiêu.



Hình 14. Tốc độ góc quay đường ngắm.



Hình 15. Khoảng cách TBB-MT.

Tốc độ góc quay đường ngắm (hình 14) và độ trượt tức thời (hình 15) tại giai đoạn 2 phương

pháp dẫn kết hợp giai đoạn có chất lượng tốt hơn.

Cự ly hoạt động của đài Ra đa trong không gian tự do [10]:

$$D_{\max_0} = \sqrt[4]{\frac{P_p \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot \eta \cdot \eta'}{P_{r\min} \cdot (4\pi)^3}} \quad (13)$$

Giả sử cả hai phương pháp dẫn sử dụng sử dụng cùng một loại Ra đa trên khoang của TBB, xét hai trường hợp TBB đưa đến mục tiêu từ cự ly 40.000m với hai phương pháp PPD TCTL và PPD kết hợp TL-TD. Theo công thức (13) có công suất đài Ra đa trên TBB sử dụng PPD TCTL gấp 256 lần so với TBB sử dụng PPD kết hợp TL-TD.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên phương pháp giải liên tục theo tham số bài báo đã tối ưu quỹ đạo bay TBB trong giai đoạn bay tự lập với mô hình phi tuyến, đảm bảo yêu cầu thuận lợi cho mở đầu tự dẫn. Kết quả khảo sát chứng minh ưu điểm của phương pháp dẫn kết hợp so với phương pháp dẫn tiếp cận tỉ lệ đặc biệt công suất của đài Ra đa trên TBB sử dụng PPD kết hợp TL-TD nhỏ hơn nhiều so với TBB sử dụng phương pháp dẫn TCTL. Phương pháp dẫn kết hợp TL-TD hoàn toàn có tính khả thi áp dụng trên thực tế nhờ máy tính trên khoang nhỏ gọn được trang bị trên khoang TBB.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Đức Cương, "Mô hình hóa và mô phỏng chuyển động của khí cụ bay tự động", NXB Quân đội nhân dân, Hà Nội (2002).
- [2]. Lê Anh Dũng, Nguyễn Hữu Độ, Huỳnh Lương Nghĩa, "Lý thuyết bay và cơ sở xây dựng hệ thống điều khiển tên lửa phòng không", Nhà xuất bản Học viện kỹ thuật quân sự, Hà Nội (1998).
- [3]. Vũ Hòa Tiến, "Động học các hệ thống điều khiển thiết bị bay", Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, Hà Nội (2013).
- [4]. Phạm Trung Dũng, Vũ Xuân Đức, "Cơ sở điều khiển tối ưu trong các hệ thống kỹ thuật", Nhà xuất bản quân đội nhân dân, Hà Nội (2012).
- [5]. Fumiaki Imado and Takeshi Kuroda, "Optimal Midcourse Guidance for Medium-Range Air-to-Air Missiles", Vol. 13, No. 4, July-August (1990).
- [6]. V. H. L. Cheng and N. K. Gupta, "Advanced midcourse guidance for air-to-air missiles," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, pp. 135–142, (1986).
- [7]. N. Indig, J. Z. Ben-Asher, and N. Farber, "Near-optimal spatial midcourse guidance law with an angular constraint", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 37, no. 1, pp. 214–223, (2014).
- [8]. Давиденко Д.Ф., "Об одном новом методе численного решения систем нелинейных уравнений", ДАН СССР, т. 88, № 4, с. 601-602, (1953).
- [9]. Александров А. А., "Оптимальное управление ЛА с учетом ограничений на управление", Диссертация по специальности 05.13.01, (2009).
- [10]. А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин, Д. Д. Дмитриев, С. Н. Андреев, И. Н. Ищук, И. Ф. Купряшкин, А. К. Гречкосеев, "Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга", Сиб. федер. ун-т. – 292 с, (2016).

ABSTRACT

Optimizing unmanned aerial vehicle flight trajectory

This paper presents a method to optimize the trajectory of an unmanned aerial vehicle in the autonomous flight phase with the aim of minimizing energy and ensuring boundary conditions at the time of switching to self-guided flight. The results have formed the optimal trajectory of the unmanned aerial vehicle in the autonomous phase and demonstrated the superiority of the combined guidance method over the proportional approach.

Keywords: Combined guidance method; Trajectory optimization; Unmanned aerial vehicle.