

MÔ PHỎNG QUỸ ĐẠO TÊN LỬA ĐẠN ĐẠO

TRAJECTORY MODELLING OF BALLISTIC MISSILES

TS. Lê Hữu Ban, TS. Nguyễn Nam Quý

Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: lehuuban.mta@gmail.com;

nnq26021983@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một mô hình toán học mô phỏng quỹ đạo của tên lửa đạn đạo, có xét đến các yếu tố vật lý quan trọng như lực cản khí động học, sự thay đổi mật độ khí quyển theo độ cao và ảnh hưởng của lực Coriolis do sự quay của Trái Đất. Hệ phương trình chuyển động được giải bằng phương pháp số Euler để mô phỏng quỹ đạo bay trong không gian hai chiều và ba chiều. Kết quả cho thấy lực cản không khí làm giảm đáng kể tầm bay và độ cao cực đại, trong khi lực Coriolis gây ra sai lệch phương ngang của quỹ đạo. Mô hình đề xuất có ưu điểm về tính đơn giản, hiệu quả tính toán và phù hợp cho các bài toán mô phỏng.

Từ khóa: Quỹ đạo bom; Hệ số xấp xỉ; Lực cản không khí; Đạn đạo; Mô phỏng số.

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive mathematical model for the trajectory of ballistic missiles. The model considers gravitational variation with altitude, aerodynamic drag with exponential atmospheric density, and Coriolis effects due to Earth's rotation. A numerical solution based on the Euler method is applied to simulate missile motion in two and three dimensions. The results demonstrate that aerodynamic drag significantly reduces range and altitude, while Coriolis force introduces lateral deviation. The proposed model provides a balance between computational efficiency and physical realism, making it suitable for simulation and educational purposes.

Keywords: Ballistic missile; Trajectory modelling; Drag force; Coriolis effect; Numerical simulation.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mô phỏng quỹ đạo tên lửa đạn đạo là một bài toán quan trọng trong lĩnh vực kỹ thuật hàng không vũ trụ và cơ học ứng dụng. Quỹ đạo của một tên lửa đạn đạo thường được chia thành ba giai đoạn chính: Giai đoạn tăng tốc (boost phase); Giai đoạn bay tự do (midcourse phase); Giai đoạn rơi xuống mục tiêu (terminal phase).

Trong nghiên cứu này, trọng tâm là giai đoạn bay tự do, khi tên lửa chuyển động dưới tác dụng của các lực tự nhiên mà không còn lực đẩy từ động cơ. Khác với bài toán ném xiên đơn giản, mô hình thực tế cần xét đến: Lực cản không khí phi tuyến; Mật độ khí quyển thay đổi theo độ cao; Ảnh hưởng của chuyển động quay của Trái Đất.

Mục tiêu của bài báo là xây dựng một mô hình toán học có độ chính xác cao nhưng vẫn đảm bảo tính đơn giản trong tính toán.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong quá trình chuyển động của tên lửa, các lực tác dụng lên tên lửa bao gồm: trọng lực, lực cản không khí và lực Coriolis.

- Trọng lực:

$$Q = mg \quad (1)$$

- Lực cản không khí:

$$R_x = \frac{1}{2} \rho(h) C_x S V^2 \quad (2)$$

Trong đó: $\rho(h)$ - Mật độ không khí tại độ cao h ; C_x - Hệ số cản; S - Diện tích cản; V - Vận tốc.

Theo [1], mật độ không khí tại độ cao h được tính theo công thức sau:

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/H} \quad (3)$$

Trong đó: ρ_0 - Mật độ tại mực nước biển; H - Chiều cao đặc trưng khí quyển.

- Lực Coriolis:

Lực này Coriolis xuất hiện do hệ quy chiếu quay của Trái Đất, theo [1], lực này được tính theo công thức dưới đây:

$$\begin{aligned} \vec{F}_c &= -m\vec{a}_c \\ \vec{a}_c &= \vec{\Omega} \times \vec{V} \end{aligned} \quad (4)$$

3. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Sử dụng hệ tọa độ xuất phát, theo [1], [2] mô hình toán học của tên lửa đạn đạo dưới tác dụng của các lực như đã trình bày ở trên được mô tả qua hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \dot{V}_x = -\frac{R_x}{m} \frac{V_x}{V} \\ \dot{V}_y = -g - \frac{R_x}{m} \frac{V_y}{V} \\ \dot{V}_z = a_c \end{cases} \quad (5)$$

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Giải hệ phương trình (5), sử dụng các điều kiện ban đầu cho loại tên lửa đạn đạo chiến thuật tầm ngắn SRBM (tương tự như tên lửa Scub), với các thông số cụ thể được cho như trong bảng 1: Thông số tên lửa.

Bảng 1. Các tham số cơ bản của tên lửa SRBM

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng ban đầu	m	5860	kg
Tốc độ tiêu hao nhiên liệu	dm	60	kg/s
Lực đẩy	P	133000	N
Đường kính	Prum	0.88	m
Hệ số cản	C_x	0.3	-

Tùy thuộc vào các giai đoạn khác nhau của quỹ đạo tên lửa mà tên lửa được điều khiển theo các quy luật khác nhau của góc nghiêng θ [3]:

Giai đoạn 1: Bay thẳng đứng (với thời gian bay từ 1 đến 3 giây): $\theta(t) = 90^\circ$;

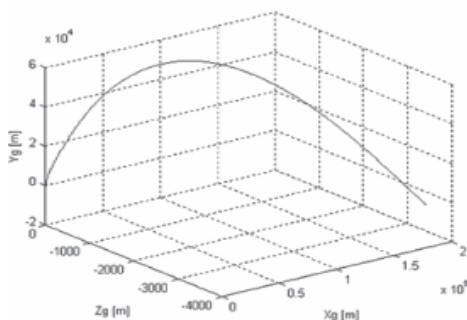
Giai đoạn 2: Lấy góc nghiêng (góc nghiêng giảm tuyến tính trong khoảng thời gian từ 3 đến 8 giây): $\theta(t) = 90 - kt$;

Giai đoạn 3: Góc nghiêng được tính theo đa thức bậc 5:

$$\theta(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4 + A_5 t^5$$

Trong đó, theo [2], giá trị của các hệ số có thể được tính một cách gần đúng như sau:

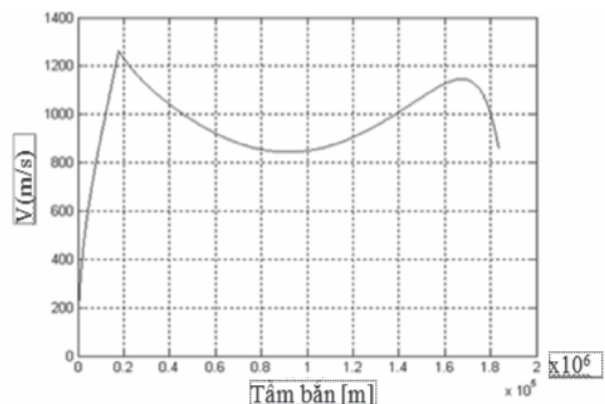
$$\begin{aligned} A_0 &= 50.50448806; A_1 = 17.77062; \\ A_2 &= -3.21136; A_3 = 0.22179; \\ A_4 &= -0.0059105; A_5 = 0.000030864. \end{aligned}$$



Hình 1. Kết quả mô phỏng quỹ đạo của tên lửa trong không gian

Kết quả mô phỏng quỹ đạo của tên lửa được mô tả trên hình 1, từ đồ thị này cho thấy:

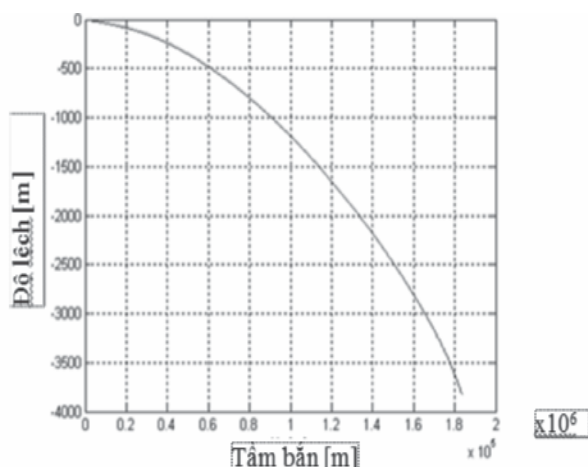
- Quỹ đạo thực tế không đối xứng như parabol lý tưởng, độ cao cực đại bị giảm đáng kể và tầm bay ngắn hơn so với trường hợp không có lực cản. Điều này chứng tỏ lực cản không khí đóng vai trò chi phối hình dạng quỹ đạo.



Hình 2. Kết quả mô phỏng sự thay đổi vận tốc của tên lửa theo tầm bay

Kết quả mô phỏng vận tốc của tên lửa theo tầm bay của tên lửa được thể hiện như trên hình 2, cho thấy: vận tốc giảm nhanh trong giai đoạn đầu, sau đó giảm chậm dần khi mật độ không khí giảm. Từ đây có thể thấy lực cản phụ thuộc mạnh vào vận tốc và mật độ không khí, đây là nguyên nhân chính làm suy giảm năng lượng của tên lửa.





Hình 3. Kết quả mô phỏng độ lệch của tên lửa theo tầm bay

Kết quả mô phỏng độ lệch của tên lửa theo tầm bay được thể hiện tại hình 3, kết quả này cho thấy: Quỹ đạo bị lệch theo phương ngang và độ lệch phụ thuộc vào các tham số vận tốc, thời gian bay và vĩ độ phóng. Độ lệch của quỹ đạo chủ yếu gây ra do tác động của lực Coriolis. Từ kết quả mô phỏng có thể rút ra nhận xét về ảnh hưởng của lực Coriolis lên độ lệch của quỹ đạo tên lửa đạn đạo như sau:

- Với tầm bắn ngắn: Lực Coriolis ảnh hưởng nhỏ đến độ lệch của quỹ đạo;
- Với tên lửa tầm xa: Lực Coriolis ảnh hưởng đáng kể đến độ lệch của quỹ đạo.

5. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng cho thấy quỹ đạo thực của tên lửa đạn đạo khác đáng kể so với mô hình lý tưởng do ảnh hưởng của lực cản không khí và sự thay đổi mật độ khí quyển. Ngoài ra, lực Coriolis gây ra sai lệch phương ngang, rõ rệt đối với các quỹ đạo tầm xa. Phương pháp Euler mặc dù đơn giản nhưng vẫn cho kết quả phù hợp trong phạm vi nghiên cứu.

Bài báo đã xây dựng mô hình mô phỏng quỹ đạo tên lửa đạn đạo có xét đến các yếu tố thực tế như lực cản không khí, mật độ khí quyển và lực Coriolis. Kết quả cho thấy: Lực cản làm giảm đáng kể tầm bay, lực Coriolis gây lệch quỹ đạo và phương pháp số cho hiệu quả tốt. ❖

Ngày nhận bài: **18/3/2026**

Ngày phản biện: **27/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Bộ môn Cơ sở bắn, “*Giáo trình thuật phóng ngoài*”. Học viện Kỹ thuật quân sự, 2003.
- [2]. Lê Minh Thái, Vũ Nhật Minh, “*Các nguyên lý cơ bản tính toán quỹ đạo của các thiết bị bay*”. Học viện Kỹ thuật quân sự, 2018.
- [3]. Robert L. McCoy, “*Modern Exterior Ballistics: The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*”. Schiffer Publishing Ltd, 1999.