

Nghiên cứu phát triển hệ thống báo điểm chạm của đạn nhọn trên mặt bia, ứng dụng cảm biến siêu âm, phục vụ hiệu chỉnh đường ngắm

Vũ Trần Phú*, Phạm Chí Thành, Vũ Xuân Huy

Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 89B Lý Nam Đế, Cửa Đông, Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: phutdh2012@gmail.com

Nhận bài: 03/01/2024; Hoàn thiện: 10/3/2024; Chấp nhận đăng: 14/3/2024; Xuất bản: 01/4/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.CAPITI.2024.155-160>

TÓM TẮT

Bài báo tóm tắt cơ sở lý thuyết nguyên lý tính tọa độ đường đạn trên cơ sở độ lệch thời gian thu được (TDOA) của các cảm biến siêu âm, tập trung xây dựng thuật toán tính toán tọa độ đường đạn, từ đó nghiên cứu thiết kế bộ thiết bị phù hợp với thuật toán, bao gồm: khối tính toán hiển thị, khối thu thập truyền số liệu, khối gá lắp cảm biến.

Từ khóa: Cảm biến siêu âm; TDOA; Ultrasonic shooting target.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

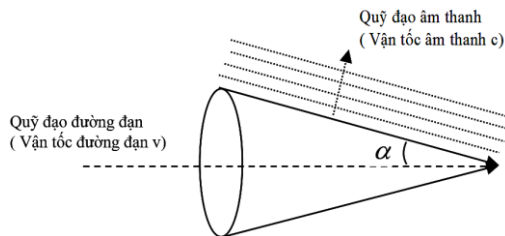
Các hệ thống bia báo điểm tự động sử dụng nguyên lý chập mạch được ứng dụng rộng rãi, nhưng có nhược điểm là tuổi thọ thấp. Sử dụng nguyên lý xử lý ảnh để xác định điểm chạm trên mặt bia cũng được áp dụng, tuy nhiên, thiết bị phức tạp, khó đảm bảo kỹ thuật trong điều kiện dã ngoại. Bia sử dụng cảm biến siêu âm có một số ưu điểm, khắc phục được các nhược điểm trên.

Hiện nay, chưa có công trình công bố chi tiết về các thuật toán khả dụng xác định tọa độ điểm chạm viên đạn trên mặt bia ứng dụng cảm biến siêu âm. Đây chính là nhiệm vụ mà bài báo sẽ giải quyết. Bài báo sẽ giải quyết ba vấn đề sau: xây dựng hệ phương trình xác định tọa độ điểm chạm theo độ chênh lệch thời gian của thời điểm sóng âm thanh đến các cảm biến trong trường hợp tổng quát; lựa chọn thuật toán thích hợp giải quyết bài toán ứng dụng cảm biến siêu âm trong xác định tọa độ điểm chạm để hiệu chỉnh đường ngắm; xây dựng bộ thiết bị phù hợp với thuật toán lựa chọn.

2. GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ

2.1. Cơ sở lý thuyết sử dụng cảm biến siêu âm để xác định điểm chạm của viên đạn vào mặt bia

Khi viên đạn bay trong không khí với vận tốc siêu âm, sóng âm do đầu đạn va chạm vào không khí lan truyền ra với vận tốc âm thanh c , theo phương vuông góc với cạnh hình nón. Góc nửa đỉnh hình nón: $\alpha = \arcsin(c/v)$, với c là vận tốc âm thanh trong không khí và v là vận tốc viên đạn. Điều này được minh họa trên hình 1 dưới đây.



Hình 1. Mô tả sóng âm tạo ra do viên đạn chuyển động với vận tốc v .

2.2. Xây dựng hệ phương trình xác định tọa độ điểm chạm theo độ chênh lệch thời gian của thời điểm sóng âm thanh đến các cảm biến

a. Định nghĩa các hệ tọa độ

Độ chênh lệch thời gian của thời điểm sóng âm thanh đến các cảm biến, phụ thuộc vào tọa độ

của các cảm biến trong mối quan hệ với đường đạn. Tuy nhiên, việc bố trí các cảm biến được thực hiện không phụ thuộc vào đường đạn mà theo mặt bia, tọa độ của các cảm biến được xác định tương đối theo mặt bia. Chính vì vậy cần xây dựng hai hệ tọa độ, hệ tọa độ đường đạn và hệ tọa độ mặt bia.

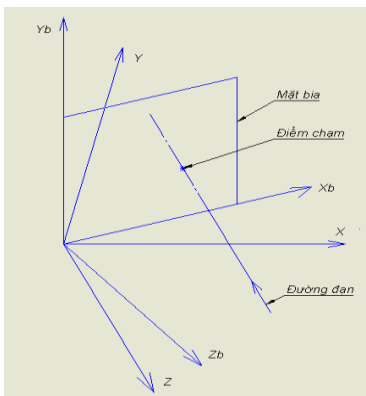
Định nghĩa 1. Hệ tọa độ đường đạn OXYZ là hệ tọa độ có tâm O nằm trùng góc trái bên dưới mặt bia, OZ nằm ngược hướng đường đạn, OY nằm trên mặt phẳng thẳng đứng chứa đường đạn và hướng lên trên, OX vuông góc với mặt phẳng OYZ và kết hợp với OY và OZ tạo thành một tam diện thuận.

Định nghĩa 2. Hệ tọa độ mặt bia là hệ tọa độ có tâm O_b trùng tâm O, OZ_b vuông góc với mặt bia, hướng ngược hướng đường đạn; OY_b, OX_b nằm trên mặt phẳng mặt bia OY_b hướng lên trên, OX_b vuông góc với OY_b và kết hợp với OY_b và OZ_b tạo thành một tam diện thuận.

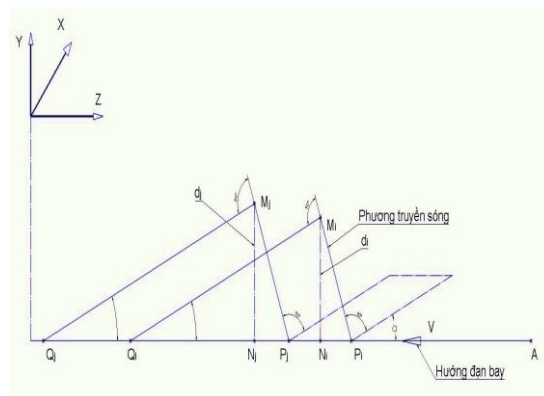
Hệ tọa độ đường đạn khác với hệ tọa độ mặt bia ở chỗ có các góc O le so với hệ tọa độ mặt bia là β - độ lệch góc hướng đường đạn và ε - góc nghiêng đường đạn. Hình 2 mô tả định nghĩa các hệ trục tọa độ.

b. Xây dựng hệ phương trình

Giả sử trong giai đoạn bay cuối trước khi viên đạn chạm vào mặt bia, quỹ đạo của nó là đường thẳng và vận tốc của nó không đổi. Khi đó, nếu biết điểm chạm của đạn vào mặt bia là (x, y) , các góc của đường đạn với mặt bia là β (góc hướng) và ε (góc tầm), vận tốc đạn v , vận tốc âm thanh c . Thì có thể xác định được độ lệch thời gian sóng âm đến các cảm biến.



Hình 2. Định nghĩa các hệ tọa độ.



Hình 3. Sơ đồ xác định thời điểm tín hiệu sóng âm truyền đến cảm biến M_i, M_j .

Chọn điểm A là điểm bất kỳ trên đường quỹ đạo, ta có khoảng thời gian từ khi viên đạn đi qua điểm A, cho đến khi sóng âm đến 2 cảm biến M_i, M_j , được xác định như sau:

$$t_i = \frac{AQ_i}{v} = \frac{AN_i + N_iQ_i}{v} = \frac{AN_i}{v} + \frac{d_i}{tg(\alpha).v} \tag{1}$$

$$t_j = \frac{AQ_j}{v} = \frac{AN_j + N_jQ_j}{v} = \frac{AN_j}{v} + \frac{d_j}{tg(\alpha).v} \tag{2}$$

Biến đổi (1 và (2) được:

$$\Delta t_{ji} = t_j - t_i = \frac{AN_j - AN_i}{v} + \frac{d_j - d_i}{tg(\alpha).v} = -\frac{z_j - z_i}{v} + \frac{d_j - d_i}{tg(\alpha).v} = -\frac{z_j - z_i}{v} + \frac{(d_j - d_i) \cdot \sqrt{v^2 - c^2}}{c.v} \tag{3}$$

$$\text{Từ } \alpha = \arcsin\left(\frac{c}{v}\right) \Rightarrow \sin(\alpha) = \frac{c}{v} \Rightarrow tg(\alpha) = \frac{c}{\sqrt{v^2 - c^2}}$$

Biến đổi (3) được:

$$\Delta t_{ji}.tg(\alpha).v + (z_j - z_i).tg(\alpha) = d_j - d_i \quad (4)$$

Với:

$$d_j - d_i = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$$

$$tg(\alpha) = \frac{c}{\sqrt{v^2 - c^2}}$$

Thay $d_j - d_i$ vào (4), ta có:

$$\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = \Delta t_{ji}.tg(\alpha).v + (z_j - z_i).tg(\alpha) \quad (5)$$

(5) là phương trình tổng quát biểu diễn độ lệch thời điểm thu được tín hiệu sóng siêu âm của các cảm biến. Chú ý (x_j, y_j, z_j) , (x_i, y_i, z_i) là các tọa độ của các cảm biến trên hệ tọa độ OXY. Do đó, chúng là các hàm phụ thuộc vào (ϵ, β) . Từ đó, các ẩn cần tìm là $(x, y, \epsilon, \beta, v)$. Có 5 ẩn nên cần tối thiểu 5 phương trình để tìm ra lời giải (hay tối thiểu 6 cảm biến).

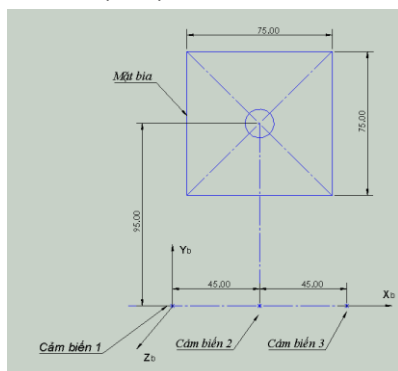
2.3. Thuật toán tính toán

a. Xác định tham số góc tâm ϵ

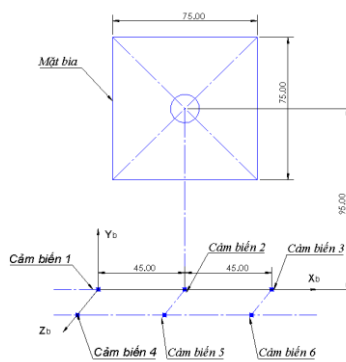
Qua tìm hiểu thực tế bắn chỉnh súng và đường đạn, kết hợp tham khảo một số nghiên cứu về quỹ đạo đường đạn dành cho 1 số loại súng bộ binh thông dụng, nhận thấy trong huấn luyện, bắn hiệu chỉnh đường đạn, góc tâm $\epsilon \approx 0$.

b. Xác định các tham số góc hướng β , vận tốc v

Xây dựng các hàm tọa độ của điểm hình chiếu quỹ đạo đường đạn lên OXY phụ thuộc vào (β, v) :



Hình 4. Sơ đồ 3 cảm biến.



Hình 5. Sơ đồ bố trí cảm biến kiểu H.

Sử dụng 3 cảm biến bố trí theo hình 4 (các khoảng cách đơn vị cm), ta có hệ 2 phương trình:

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = \Delta t_{21}.tg(\alpha).v + (z_2 - z_1).tg(\alpha) \quad (6)$$

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = \Delta t_{31}.tg(\alpha).v + (z_3 - z_1).tg(\alpha) \quad (7)$$

Trong đó, (x_i, y_i, z_i) (i bằng 1, 2, 3) lần lượt là tọa độ cảm biến M_1, M_2, M_3 trong hệ tọa độ OXYZ.

Bằng các phép biến đổi, và đặt ẩn trung gian ta xác định được các tọa độ (x, y) như sau:

$$x = \frac{c_1}{a_1} \quad (8)$$

$$y = \sqrt{k_1^2 - (x - x_1)^2} + y_1 \quad (9)$$

Trong đó: a_1, c_1, k_1, x_1, y_1 là các hàm phụ thuộc vào (β, v) , do đó (x, y) phụ thuộc vào (β, v) .

Xác định các ẩn (β, v) :

Để tính toán β, v , nhóm nghiên cứu lựa chọn sơ đồ bố trí cảm biến kiểu H, như hình 5. Với 3 cảm biến M_4, M_5, M_6 , ta có thể xây dựng thêm hệ 2 phương trình:

$$\sqrt{(x_5 - x)^2 + (y_5 - y)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} = \Delta t_{54}.tg(\alpha).v + (z_5 - z_4).tg(\alpha) \quad (10)$$

$$\sqrt{(x_6 - x)^2 + (y_6 - y)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} = \Delta t_{64}.tg(\alpha).v + (z_6 - z_4).tg(\alpha) \quad (11)$$

Thay (x, y) ở hệ phương trình (8, 9) và (x_i, y_i, z_i) theo β vào hệ phương trình (10, 11), từ đó thu được hệ 2 phương trình có 2 ẩn là (β, v) . Tuy nhiên, vì đây là hệ phương trình phi tuyến nên rất khó xây dựng một lời giải tường minh. Ta dùng phương pháp tính xấp xỉ để giải hệ trên.

Đặt:

$$F_{54} = \sqrt{(x_5 - x)^2 + (y_5 - y)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} - \Delta t_{54}.tg(\alpha).v + (z_5 - z_4).tg(\alpha) \quad (12)$$

$$F_{64} = \sqrt{(x_6 - x)^2 + (y_6 - y)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} - \Delta t_{64}.tg(\alpha).v + (z_6 - z_4).tg(\alpha) \quad (13)$$

$$F = |F_{54}| + |F_{64}| \quad (14)$$

Thay vì giải hệ (10, 11) ta tìm (β, v) để hàm F đạt cực tiểu. Chú ý, có thể có nhiều cặp (β, v) , do đó để giới hạn nghiệm, ta dùng phương pháp “vùng tin cậy”. Trong một vùng giới hạn đủ nhỏ của $\beta_0 - \Delta\beta < \beta < \beta_0 + \Delta\beta$ và $v_0 - \Delta v < v < v_0 + \Delta v$, hàm F có 1 cực tiểu.

Để xác định vùng tin cậy của (β, v) , ta giả thiết rằng, bài toán hiệu chỉnh đường ngắm gần như vuông góc với mặt bia. Căn cứ vào thực tế thao trường, kích thước bia, khoảng cách bắn hiệu chỉnh, nhóm nghiên cứu đưa ra giả thiết $-3^0 < \beta < 3^0$.

Với góc hướng bắn như trên, ta có thể tính toán:

$$v_0 = \left| \frac{(z_5 - z_2)}{\Delta t_{52}} \right| \quad (15)$$

Qua tính toán nhiều lần thực nghiệm $v_0 - 15 < v < v_0 + 15$ là “vùng tin cậy” của v .

Như vậy, với phương pháp tìm cực tiểu trên vùng tin cậy, ta có thể xác định được 2 ẩn (β, v) , kết hợp với giả thiết $(\varepsilon = 0)$, phương trình tổng quát (5) còn lại 2 ẩn cần tìm là (x, y) .

c. Xác định tọa độ điểm chạm của đường đạn trên mặt bia

Ta xác định tọa độ điểm chạm của đường đạn trên mặt bia theo các bước sau:

- Từ kết quả tính toán (ε, β) ta xác định các tọa độ cảm biến M_1, M_2, M_3 trên hệ tọa độ OXYZ, thông qua phép biến đổi trục tọa độ $O_bX_bY_bZ_b$ sang OXYZ;

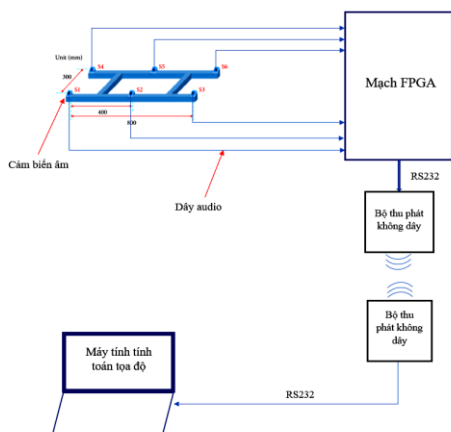
- Tính toán tọa độ (x, y) theo 2 phương trình (8, 9);

- Xác định z từ phương trình $z_b = 0$;

- Xác định (x_b, y_b, z_b) theo phép quay $O_bX_bY_bZ_b$ sang OXYZ.

2.4. Phát triển thiết bị

Để có thể cơ động và sử dụng thuận tiện trên thao trường, nhóm đề tài sử dụng thiết kế hệ thống như hình 6, bố trí thực tế ngoài thao trường - hình 7. Sử dụng 6 cảm biến được bố trí trên một thanh gá hình chữ H. Dữ liệu từ cảm biến sẽ được truyền về mạch FPGA xử lý. Sau khi đã tính toán được thời gian TDOA, mạch sẽ truyền số liệu thông qua bộ thu phát không dây LoRa về máy tính. Máy tính, tính toán điểm chạm theo thuật toán trình bày ở trên, sau đó, hiển thị kết quả lên màn hình.



Hình 6. Sơ đồ hệ thống.



Hình 7. Bố trí thiết bị thử nghiệm ngoài thao trường.

3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM BẢN

Qua nhiều lần thử nghiệm, hoàn thiện trang thiết bị, lần bắn gần nhất cho kết quả, thống kê trên bảng 1. Để dễ quan sát, đo đạc, các tọa độ (x, y) trong bảng đã được quy đổi về độ lệch so với tâm bia. Sai số trung bình qua 19 lượt bắn, theo phương ngang là 0.2 cm, theo độ cao là 0.3 cm, theo khoảng cách là 0.4 cm. Sai số lớn nhất qua 19 lượt bắn, theo phương ngang là 0.3 cm, theo độ cao là 0.9 cm, theo khoảng cách là 0.9 cm.

Bảng 1 cho thấy độ chính xác cao hơn, khi so sánh với phương pháp thường dùng “xác định giao nhau của các phương trình toán học”.

Bảng 1. Kết quả tính toán và đo đạc điểm chạm đường đạn và mặt bia.

STT	X _{tính} (cm)	X _{đo} (cm)	Sai X (cm)	Y _{tính} (cm)	Y _{đo} (cm)	Sai Y (cm)	Sai khoảng cách (cm)
1	2.5	2.3	-0.2	-7.7	-7.5	0.2	0.3
2	-6.3	-6.6	-0.3	-5.7	-5.5	0.2	0.4
3	-6.9	-7.3	-0.4	1.3	1.6	0.3	0.5
4	3.4	3	-0.4	4.3	4.4	0.1	0.4
5	-8.6	-9	-0.4	4.3	4.4	0.1	0.4
6	-0.7	-0.8	-0.1	10.6	10.8	0.2	0.2
7	-13.3	-13.4	-0.1	-2.9	-2	0.9	0.9
8	8.5	8.4	-0.1	15.8	15.5	-0.3	0.3
9	-9.9	-10.2	-0.3	-2.9	-2.2	0.7	0.8
10	-9.5	-9.5	0	-10.5	-10	0.5	0.5
11	11.6	11.3	-0.3	-3	-3.4	-0.4	0.5
12	-3.6	-3.8	-0.2	11.8	12.3	0.5	0.5
13	-3.8	-3.8	0	5.9	6.4	0.5	0.5
14	11.7	11.6	-0.1	-14.4	-14.5	-0.1	0.1
15	2.6	2.4	-0.2	0.9	0.8	-0.1	0.2
16	2.5	2.2	-0.3	-0.7	-0.8	-0.1	0.3
17	13	12.7	-0.3	-5.6	-6	-0.4	0.5
18	5.4	4.9	-0.5	-1.6	-1.3	0.3	0.6
19	4.6	4.2	-0.4	-3.5	-3.2	0.3	0.5
Trung bình			0.2			0.3	0.4
Lớn nhất			0.5			0.9	0.9

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được cơ sở lý thuyết để xác định điểm chạm của đạn trên mặt bia bằng cách sử dụng các cảm biến siêu âm. Các kết quả này được chứng minh chặt chẽ về mặt toán học và được kiểm chứng bằng các kết quả thực nghiệm. Đây là những kết quả bước đầu để làm cơ sở xây dựng hệ thống báo điểm theo nguyên lý siêu âm. Tuy nhiên, ảnh hưởng của gió theo cả phương ngang và dọc đến sai số tính toán còn chưa được xem xét. Đây là hướng nghiên cứu tiếp theo để hoàn thiện và đưa hệ thống vào hoạt động thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. SparkFun. “SparkFun Sound Detector”, (2016). <https://www.sparkfun.com/products/12642>
- [2]. Robert C. Maher, Jackson Lake, WY, “Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings” Proc. IEEE Signal Processing Society 12th DSP Workshop Department of Electrical and Computer Engineering, Montana State University, Bozeman MT 59717, pp. 257-261, (2006).
- [3]. Freytag, J.C., Brustad, B.M., “A survey of audio forensic gunshot investigations,” Proc. AES 12th International Conf., Audio Forensics in the Digital Age, pp. 131-134, (2005).
- [4]. Phạm Thị Phương Anh, Nguyễn Vũ, “Xác định tọa độ UAV sử dụng phương pháp TDOA” Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, Số đặc san Viện Điện tử, (2020).
- [5]. SIUS Electronic Scoring Systems, “Large Installations Overview and Components”, Defense of source: SIUS is one of the leading manufacturers of electronic scoring systems worldwide, (2014).
- [6]. Waterman M., Salazar D. “Electronic Target”. Northern Illinois University, (2011).

ABSTRACT

Target touch point determining algorithm based on ultrasonic sensors

In this paper, the target touch point determining algorithm based on ultrasonic sensors for evaluation shooting results is concerned. The target touch point determining method is based on time difference of arrival (TDOA) of ultrasonic shockwave to ultrasonic sensors. Derived equations are complicate nonlinear equations. In order to simplify in solving this equations, the sensor arrangement are considered for isolation of every unknown. The sensor arrangement diagram and target touch point determining algorithm are proposed and strigly mathematically verified.

Keywords: Ultrasonic shockwave; TDOA; Ultrasonic shooting target.