

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF DOPPLER FREQUENCY ON MISS DISTANCE BETWEEN ARTILLERY SHELL AND TARGET WHEN USING THE RADIO PROXIMITY FUSE UTILIZING THE DOPPLER EFFECT

Pham Xuan Quyen

Military Technical Academy

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 12/01/2023 Revised: 27/02/2023 Published: 28/02/2023	The fuze is the heart of the artillery shells and contains many of the manufacturer's technological secrets. In particular, the radio proximity fuse utilizing the doppler effect has always received special attention from many weapons experts because it ensures the technical requirements and is not too expensive to manufacture. This paper presents the theoretical basis for a mathematical model to determine the dependence of the doppler frequency of the radio proximity fuse utilizing the doppler effect on the miss distance of artillery shells. On that basis, the authors have evaluated the change in the value of Doppler frequency when changing relative velocity and miss distance of artillery shells using Matlab software. The results have shown that when the miss distance of artillery shells increases, the value of doppler frequency also decreases and approaches 0. The Doppler frequency reaches the maximum value when the miss distance of artillery shells is zero. The results obtained can be applied to calculate and design the radio proximity fuse utilizing the doppler effect for artillery shells to destroy aircrafts.
KEYWORDS	
Proximity fuse	
Fragments beam	
Short range radar	
Relative speed	
Artillery shells	

XÁC ĐỊNH SỰ PHỤ THUỘC CỦA TẦN SỐ DOPPLER VÀO ĐỘ TRƯỢT GIỮA ĐẠN PHÁO VÀ MỤC TIÊU KHI SỬ DỤNG NGÒI NỔ KHÔNG TIẾP XÚC DOPPLER

Phạm Xuân Quyền

Học viện Kỹ thuật Quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 12/01/2023 Ngày hoàn thiện: 27/02/2023 Ngày đăng: 28/02/2023	Ngòi nổ là trái tim của quả đạn và chứa nhiều bí mật công nghệ của nhà sản xuất. Trong đó ngòi nổ không tiếp xúc sử dụng hiệu ứng Doppler luôn nhận được sự quan tâm đặc biệt của nhiều chuyên gia vũ khí do đảm bảo được các yêu cầu kỹ thuật và có giá thành sản xuất không quá cao. Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết xây dựng mô hình toán học xác định sự phụ thuộc tần số Doppler của ngòi nổ không tiếp xúc vào độ trượt mục tiêu của đạn pháo. Trên cơ sở đó nhóm tác giả đã tiến hành đánh giá sự thay đổi giá trị của tần số Doppler khi thay đổi vận tốc tương đối và độ trượt của đạn pháo bằng phần mềm Matlab. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng khi độ trượt của đạn pháo tăng thì giá trị của tần số Doppler cũng giảm theo và tiến tới 0. Khi độ trượt của đạn pháo bằng không thì tần số Doppler đạt giá trị lớn nhất. Kết quả thu được có thể được áp dụng trong giai đoạn tính toán và thiết kế ngòi đạn không tiếp xúc Doppler dùng cho đạn pháo để tiêu diệt máy bay.
TỪ KHÓA	
Ngòi không tiếp xúc	
Luồng mảnh	
Rada gần	
Vận tốc tương đối	
Đạn pháo	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7226>

Email: phamngockhoi0205@gmail.com

1. Giới thiệu

Nhiệm vụ chính của đạn dược là tiêu diệt hoặc sát thương mục tiêu của đối phương. Đây luôn là nhiệm vụ vô cùng khó khăn và phức tạp, đặc biệt là đối với đạn pháo phòng không nổ phá sát thương bằng mảnh văng sử dụng ngòi nổ không tiếp xúc Doppler.

Ngòi không tiếp xúc đã bắt đầu được quan tâm từ những năm 1940 và đạt được nhiều tiến bộ vào những năm 1946 [1] xuất phát từ sự hoạt động không hiệu quả của đạn pháo phòng không sử dụng ngòi chạm nổ cơ khí [2]. Để đảm bảo bí mật về công nghệ quân sự nhiều công trình nghiên cứu đã không được công bố rộng rãi, trong tài liệu “Nguyên tắc cấu tạo và vận hành ngòi nổ vô tuyến tên lửa phòng không tầm xa” của nhóm tác giả người Nga [3] ra đời đã hé lộ nhiều kết quả nghiên cứu, song không trình bày cụ thể các mô hình toán học để đạt được các kết quả đó. Đến năm 2005 tác giả người Nga S. Veksin đã cho ra đời cuốn sách “Xử lý tín hiệu radar trong đầu tự dẫn Doppler” đã đề cập và cũng đưa ra kết quả một số nghiên cứu đến việc áp dụng hiệu ứng Doppler trong ngòi nổ không tiếp xúc [4]. Ngoài ra, chuyên gia vũ khí đạn M. A. Kolodny đã có công trình nghiên cứu bàn về lịch sử phát triển lâu dài và liên tục của ngòi nổ vô tuyến không tiếp xúc [5]. Việc phát triển cảm biến dành cho ngòi nổ không tiếp xúc để phát hiện mục tiêu và kích nổ đạn đúng thời điểm ngày càng được áp dụng nhiều thành tựu khoa học tiên tiến nhằm giải quyết triệt để hơn các vấn đề mà trước đó chưa từng được giải quyết hoàn toàn [6 - 8].

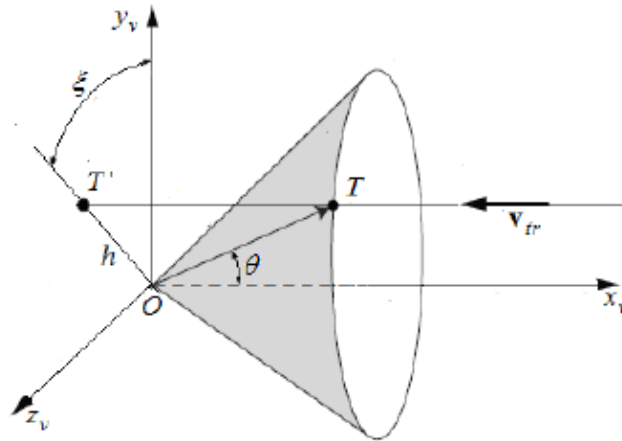
Tại Việt Nam hiện nay vẫn chưa có công trình nghiên cứu nào về vấn đề này được công bố cụ thể. Trong khi đó yêu cầu làm chủ công nghệ đảm bảo khả năng bảo dưỡng, sửa chữa, cải tiến vũ khí trang bị luôn là nhiệm vụ hàng đầu và ngày càng trở nên cấp bách hơn bao giờ hết. Vì thế, vấn đề xác định sự biến thiên tần số Doppler của ngòi không tiếp xúc Doppler nhận được sự quan tâm của rất nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước song do tính bảo mật thông tin liên quan đến bí mật về công nghệ vũ khí quân sự nên các công trình nghiên cứu cụ thể về nó hầu như không được công bố công khai.

Chính vì vậy, việc nghiên cứu xác định tần số Doppler của ngòi không tiếp xúc Doppler có ý nghĩa cấp thiết và khoa học. Trong nghiên cứu này tác giả đã trình bày mô hình toán học xác định sự phụ thuộc của tần số Doppler vào độ trượt giữa đạn pháo và mục tiêu khi sử dụng ngòi nổ không tiếp xúc Doppler.

Cấu trúc bài báo bao gồm: Phần 1 trình bày các nghiên cứu quốc tế nổi bật, thực trạng vấn đề nghiên cứu tại Việt Nam từ đó làm nổi bật tính cấp thiết của nội dung nghiên cứu. Phần 2 trình bày mô hình toán học xác định tần số Doppler của ngòi nổ không tiếp xúc sử dụng hiệu ứng Doppler theo thời gian khi vận tốc tương đối và độ trượt mục tiêu của đạn pháo phòng không. Phần 3 trình bày kết quả nghiên cứu, phạm vi áp dụng của nó và các hướng mở cần tiếp tục được nghiên cứu.

2. Hệ trục tọa độ

Chuyển động tương đối của mục tiêu được mô tả là vị trí hiện tại khối tâm của nó trong hệ tọa độ quy chiếu. Vì hệ thống radar gần và phần chiến đấu hoạt động dựa trên các nguyên tắc vật lý khác nhau, nên việc xây dựng các mô hình toán học của chúng cũng cần sử dụng các hệ tọa độ riêng. Để xây dựng mô hình toán học của tần số Doppler chúng ta sử dụng hệ tọa độ hình trụ liên kết với hệ tọa độ vận tốc thẳng $Ox_v y_v z_v$ với gốc tọa độ đặt tại vị trí ăng ten phát xạ của hệ thống radar gần và đó cũng chính là vị trí của đạn, với giả thiết mục tiêu tại vị trí T và hướng chuyển động tương đối của mục tiêu với đạn là hướng của véc tơ V_{rt} (Hình 1). Trục Ox_v song song với vector vận tốc tương đối đạn – mục tiêu V_{rt} , mặt phẳng tọa độ $Ox_v y_v$ trùng với mặt phẳng tam giác vận tốc được tạo thành từ các vector vận tốc: V_r ; V_t ; V_{rt} . Vị trí của điểm T được xác định bởi các đại lượng: x_v , h , ξ , trong đó x_v - là tọa độ Đề-cát; h - là khoảng cách từ gốc tọa độ O đến hình chiếu T' của điểm T trên mặt phẳng $Oy_v z_v$, đặc trưng cho độ chính xác dẫn và được gọi là độ trượt; Góc cực ξ - là pha của độ trượt. h , ξ - gọi là tọa độ cực của điểm T'.



Hình 1. Hệ tọa độ hình trụ và hệ tọa độ vận tốc

Trên hình 1 thể hiện quỹ đạo chuyển động của mục tiêu tương đối so với hệ thống radar gần với hướng của vector vận tốc tương đối hướng từ phải sang trái. Trong đó, gốc tọa độ O là vị trí đặt radar, mục tiêu tại vị trí T.

Do thời gian tương tác của hệ thống radar với mục tiêu là rất nhỏ nên có thể coi chuyển động tương đối giữa chúng là thẳng đều.

3. Xây dựng mô hình toán học xác định tần số Doppler của ngòi nổ không tiếp xúc Doppler

Giả sử rằng đạn và mục tiêu chuyển động ngược chiều nhau và chuyển động của mục tiêu là thẳng đều so với đạn, khi đó tần số Doppler đối với ngòi nổ tuyến chủ động được xác định theo công thức [4]:

$$f_d = \Delta f = f_{OT} - f_{TO} = \frac{V_{rt}}{\lambda} \cos\theta + \frac{V_{rt}}{\lambda} \cos\theta \quad (1)$$

Suy ra:

$$f_d = \frac{2V_{rt}}{\lambda} \cos\theta \quad (2)$$

Trong đó, λ - độ dài bước sóng thăm dò; θ - góc phát hiện mục tiêu (hình 1); V_{rt} - vận tốc tương đối của đạn – mục tiêu.

Theo công thức (1) rõ ràng giá trị f_d có thể nhận giá trị âm hoặc dương. Do đó khi xét về giá trị độ lớn của f_d ta phải lấy giá trị tuyệt đối của nó. Trong khuôn khổ bài báo này tác giả thể hiện cả độ lớn và hướng (chiều) đối với trường hợp mục tiêu và đạn tiến lại gần nhau và khi đi xa nhau.

Khi mục tiêu và đạn còn ở cách xa nhau, tần số Doppler được sử dụng để đánh giá độ lớn vector vận tốc tương đối.

$$V_{rt} = \frac{f_d \lambda}{2 \cos\theta} \quad (3)$$

Góc kích nổ đầu đạn θ được xác định theo công thức:

$$\theta = \arccos \frac{x_v}{\sqrt{h^2 + x_v^2}} \quad (4)$$

Trong ngòi nổ tuyến chủ động có bộ phận phát tín hiệu (chiếu xạ) tới mục tiêu và bộ phận thu tín hiệu phản xạ từ mục tiêu. Với ngòi nổ tuyến chủ động thường áp dụng đối với phương pháp tự dẫn tới mục tiêu hay còn gọi là bắn quên. Song không gian trong ngòi nổ rất nhỏ tạo nên nhiều khó khăn trong việc bố trí đồng thời hai bộ phận thu và phát cũng như các thiết bị phụ trợ

đặc biệt là nguồn nuôi cho chúng. Từ đó làm tăng mức độ phức tạp khi sản xuất và vận hành, cũng như chi phí tăng cao lên nhiều lần. Chính vì lý do đó ngòi vô tuyến bán chủ động đã ra đời để khắc phục các khó khăn kể trên. Trong ngòi vô tuyến bán chủ động chỉ bố trí bộ phận thu tín hiệu được phản xạ từ mục tiêu. Bộ phận phát tín hiệu (chiếu xạ) tới mục tiêu được đặt bên ngoài ngòi đạn, có thể được đặt trên máy bay hay radar mặt đất. Vì thế bài toán đặt ra sẽ không mất đi tính tổng quát khi tập trung nghiên cứu đối với ngòi vô tuyến bán chủ động.

Từ công thức (2) ta có thể xác định được tần số Doppler đối với ngòi vô tuyến bán chủ động:

$$f_d = \frac{V_{rt}}{\lambda} \cos\theta \quad (5)$$

Như vậy, rõ ràng rằng tần số Doppler tỉ lệ thuận với bán kính $V_{rt} \cos\theta$, phụ thuộc vào vận tốc đương đối giữa đạn và mục tiêu V_{rt} và tỉ lệ nghịch với bước sóng.

Công thức (2) và (5) được sử dụng trong trường hợp mục tiêu điểm, tức là kích thước của nó nhỏ hơn nhiều so với diện tích của cánh sóng.

Theo hình 1 thì công thức (5) có thể viết lại dưới dạng sau:

$$f_d = \frac{V_{rt}}{\lambda} \cdot \frac{x_v}{\sqrt{h^2 + x_v^2}} \quad (6)$$

Trong đó, $x_v = x_v(t)$ là hoành độ mục tiêu tại thời điểm t và được xác định theo công thức:

$$x_v = x_0 - V_{rt} \cdot t \quad (7)$$

Ở đây, x_0 - hoành độ ban đầu của mục tiêu tại thời điểm $t = 0$ trên quỹ đạo tương đối. Và tính từ thời điểm này mục tiêu nằm trong vùng hoạt động của ngòi hay còn gọi là vùng cận đích.

Khi mục tiêu ở gần đạn hay còn gọi là cận đích, tần số Doppler được sử dụng để xác định giá trị độ trượt h theo công thức:

$$h = x_v \sqrt{\left(\frac{V_{rt}}{f_d \lambda}\right)^2 - 1} = (x_0 - V_{rt} \cdot t) \sqrt{\left(\frac{V_{rt}}{f_d \lambda}\right)^2 - 1}, \quad (8)$$

Thay (8) vào (7) ta được:

$$f_d(t) = \frac{V_{rt}}{\lambda} \cdot \frac{x_0 - V_{rt} \cdot t}{\sqrt{h^2 + (x_0 - V_{rt} \cdot t)^2}} \quad (9)$$

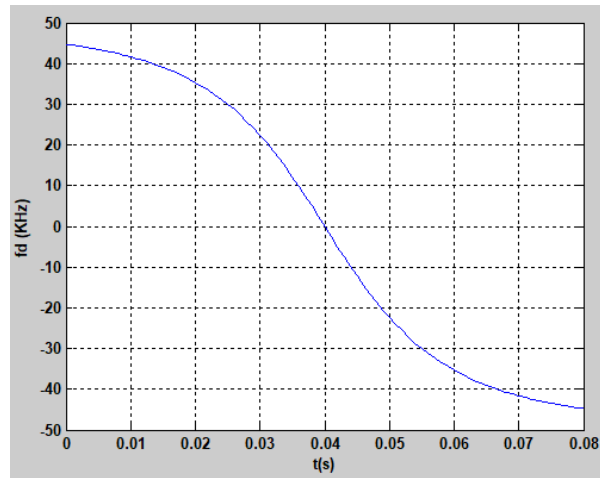
Công thức (9) đặc trưng cho dải thay đổi của tần số Doppler trong vùng cận đích và xác định giá trị tức thời của tần số Doppler tại thời điểm t . Từ công thức (9) ta thấy rằng, quy luật thay đổi tần số Doppler theo thời gian phụ thuộc vào các tham số V_{rt} và h . Để thực hiện được điều đó, ngoài thông tin về vận tốc tương đối V_{rt} cần thiết phải đánh giá đại lượng h trên cơ sở phân tích mối quan hệ phụ thuộc $f_d = f_d(t)$.

Theo công thức (9) giá trị tần số Doppler f_d đạt giá trị lớn nhất khi độ trượt $h = 0$:

$$f_{d\infty\text{Max}} = \frac{V_{rt}}{\lambda} = \text{const},$$

và có giá trị nhỏ nhất $f_{d\text{Min}} = 0$ khi $x_0 - V_{rt} \cdot t = 0$, tức là tại thời điểm $t = \frac{x_0}{V_{rt}}$

Ví dụ: với $h = 20m$, $V_{rt} = 1000m/s$, $\lambda = 20m$ và $x_0 = 40m$ thì sự thay đổi giá trị f_d theo thời gian trong vùng cận đích đối với mục tiêu điểm được thể hiện trên hình 2.

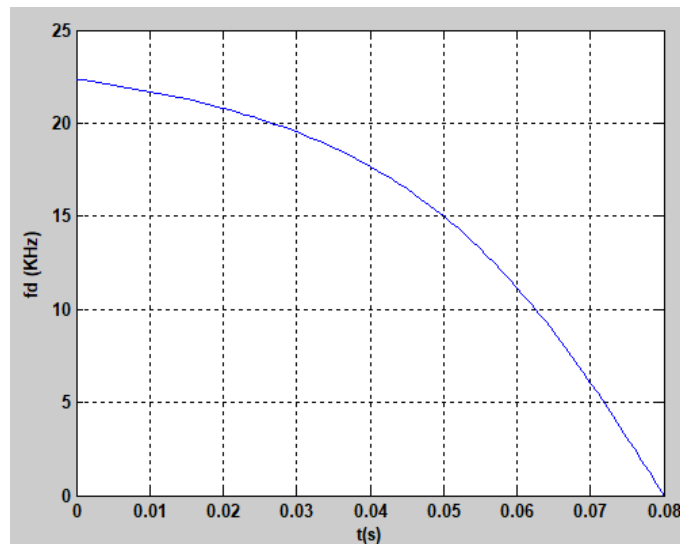


Hình 2. Sự thay đổi tần số Doppler theo thời gian đối với mục tiêu điểm trong vùng cận đích

Từ hình 2 nhận thấy rằng $f_d(t)$ thay đổi đáng kể khi đạn trong vùng cận đích. $f_d(t) > 0$ khi đạn và mục tiêu di chuyển lại gần nhau trong khoảng thời gian từ 0 đến 0,04 giây, và $f_d(t) < 0$ khi đạn và mục tiêu di chuyển dần xa nhau trong khoảng thời gian từ 0,04 đến 0,08 giây.

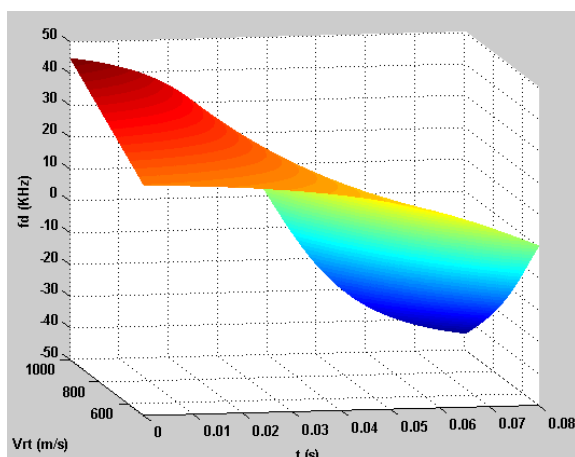
Tại thời điểm $\theta = \pi/2$, thì tần số Doppler đạt giá trị nhỏ nhất $f_{d\pi/2Min} = 0$ nghĩa là tốc độ thay đổi tần số Doppler là lớn nhất, lúc này khoảng cách giữa đạn và mục tiêu là nhỏ nhất và bằng độ trượt h . Khi đạn và mục tiêu bay ngang qua nhau thì giá trị của $f_d(t)$ tăng dần. Những tính chất động đặc biệt này của tần số Doppler trong hệ thống radar gần được sử dụng để giải các bài toán khác nhau.

Với $h = 20m$, $V_{rt} = 500m/s$, $\lambda = 20m$ và $x_0 = 40m$ thì sự thay đổi f_d theo thời gian trong vùng cận đích đối với mục tiêu điểm được thể hiện trên hình 3.

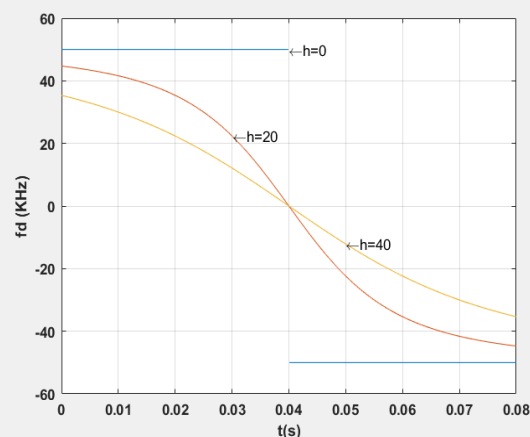


Hình 3. Sự thay đổi tần số Doppler theo thời gian đối với mục tiêu điểm trong vùng cận đích

Với độ trượt 20 m, vận tốc tương đối tăng dần từ 500 m/s đến 1000 m/s, bước sóng $\lambda = 20m$ và $x_0 = 40m$ thì sự thay đổi f_d theo thời gian và vận tốc tương đối giữa đạn và mục tiêu trong vùng cận đích đối với mục tiêu điểm được thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Sự thay đổi tần số Doppler theo thời gian đối với mục tiêu trong vùng cận đích khi vận tốc tương đối thay đổi theo thời gian



Hình 5. Sự thay đổi tần số Doppler theo thời gian đối với mục tiêu trong vùng cận đích khi độ trượt thay đổi h

Theo hình 4 ta thấy rằng f_d tăng khi V_{rt} tăng. Ngoài ra ta dễ dàng xác định được f_d ứng với từng giá trị của vận tốc tương đối tại mọi thời điểm. Ứng với dải vận tốc tương đối đã cho ta có thể xác định được chính xác thời điểm mà tại đó độ trượt là nhỏ nhất khi $f_d = 0$.

Từ hình 4 và công thức (9) ta nhận thấy rằng, khi vận tốc tương đối giữa đạn và mục tiêu giảm thì giá trị của tần số Doppler cũng giảm theo, và ngược lại.

Với độ trượt lần lượt là 0 m; 20 m và 40 m, $v_{rt} = 500 \text{ m/s}$, $\lambda = 20 \text{ m}$ và $x_0 = 40 \text{ m}$ thì sự thay đổi f_d theo thời gian trong vùng cận đích đối với mục tiêu điểm được thể hiện trên hình 5.

Từ hình 5 và công thức (9) ta nhận thấy rằng, khi $h = 0$, thì $f_d = f_{dMax} = \frac{V_{rt}}{\lambda} = \text{const}$; Khi $h = 30 \text{ m}$ và $h = 60 \text{ m}$, thì f_d giảm dần theo thời gian và giảm mạnh khi giá trị của độ trượt h tăng lên.

Từ công thức (9) ta nhận thấy f_d không phụ thuộc vào ξ . Trong không gian ba chiều, khi cho trước các giá trị V_{rt} , λ và θ chỉ nhận được một và chỉ một giá trị f_d và được minh họa trên hình 1. Bề mặt hình trụ (hình 1) đặc trưng cho tập hợp các giá trị của f_d . Tín hiệu tương ứng với các điểm trên cùng một mặt cắt của hình trụ (hình 1) vuông góc với trục X_v không thể phân biệt được theo tần số f_d . Điều đó có nghĩa là, tín hiệu đầu vào của bộ thu từ hai hay nhiều mục tiêu được coi là một.

4. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết, có thể rút ra một số kết luận cơ bản sau:

- Bài báo đã trình bày cơ sở lý thuyết xây dựng mô hình toán học tính toán tần số Doppler của ngòi nổ không tiếp xúc theo thời gian khi có tính đến sự thay đổi của vận tốc tương đối và giá trị trượt mục tiêu của đạn pháo phòng không sử dụng ngòi nổ Doppler. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, giá trị tần số f_d tỷ lệ thuận với vận tốc tương đối giữa đạn và mục tiêu, tỉ lệ nghịch với độ trượt, bước sóng của hệ thống radar gần. Khi độ trượt h tăng thì giá trị của tần số Doppler cũng giảm theo và tiến tới 0. Khi độ trượt $h = 0$ thì tần số Doppler đạt giá trị lớn nhất $f_{dMax} = \frac{V_{rt}}{\lambda}$ phù hợp với kết quả trong tài liệu [2], [5].

- Nghiên cứu sự thay đổi tần số Doppler khi cận đích là cơ sở quan trọng để xác định thời điểm kích nổ đạn. Căn cứ vào tính chất phân mảnh của đạn pháo phòng không và công suất tối đa của bộ thu phát tín hiệu trên ngòi đạn để xác định khoảng cách tối đa kích nổ đầu đạn cho phép xác suất tiêu diệt mục tiêu cao nhất. Kết quả nghiên cứu có giá trị trong giai đoạn thiết kế ngòi đạn pháo phòng không sử dụng ngòi nổ không tiếp xúc Doppler.

- Kết quả thu được mở ra một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu như xây dựng mô hình toán học xác định vùng sát thương bằng mảnh của đầu đạn đối với giá trị pha trượt và vận tốc tương đối giữa đạn và mục tiêu cho trước, xây dựng mô hình toán học xác định góc kích nổ đầu đạn, thời điểm kích nổ đầu đạn...

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. H. Jr and C. Brunetti, "Radio proximity-fuze development," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, pp. 976-986, 1946.
- [2] L. Brown, "The origins of the proximity fuze," in *1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Baltimore, MD, USA, 1998, pp. 425-428, doi: 10.1109/MWSYM.1998.705024.
- [3] E. Ya. Menshikov, P. P. Cherkasov, A. A. Korchiny, V. A. Kuptsov, and R.A. Filippov, *Fundamentals of construction and operation of radio fuses for long-range anti-aircraft missiles*, Moscow: the Ministry of Defense of the USSR, 1975, p. 136.
- [4] S. Veksin, *Processing of radar signals in Doppler homing heads*, Moscow: MAI, 2005, p. 304.
- [5] M. A. Kolodny, "Radar proximity fuzing and the Cold War paradigm," in *2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Baltimore, MD, USA, 2011, pp. 1-4.
- [6] Z.-B. Li, "Implementation and development of compact UWB proximity fuze sensor system" in *2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, Chengdu, China, 21-23 October 2011, pp. 120-122.
- [7] Y. M. Astapov, V. I. Kozlov, N. S. Soboleva, V. K. Khokhlov, A. B. Borzov, and E. D. Avtonomnye, "Autonomous information and control systems," *Autonomous information and control systems*, vol. 1, pp. 409-464, 2011.
- [8] C. Klement, I. S. Comanescu, and M. Clinciu, "The mathematical model of the simulation of the doppler effect," *ICMS & COMEC 2019*, Brasov, Romania, vol. 5, no. 1, pp. 105, 2019.