

CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA KỸ THUẬT CHỈ BÁO MỤC TIÊU DI ĐỘNG BASIC THEORY OF MOVING TARGET INDICATOR TECHNIQUE

TS. LÊ QUỐC VƯỢNG
Khoa Điện - ĐTTB, Trường ĐHHH

Tóm tắt:

Bài viết này trình bày về cơ sở lý thuyết của kỹ thuật chỉ báo mục tiêu di động. Trên cơ sở nguyên lý phát hiện mục tiêu trên nền nhiễu phản xạ cộng tạp âm, kỹ thuật chỉ báo mục tiêu di động là hướng phát triển về xử lý tín hiệu rất mới của công nghệ radar hiện nay. Xuất phát từ dấu hiệu đặc trưng phân biệt giữa nhiễu phản xạ và tín hiệu mục tiêu là vận tốc tương đối của chúng, thông qua xử lý Doppler, người ta có thể làm tăng được tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm của tín hiệu mục tiêu.

Abstract:

This article discusses the fundamental theory of moving target indicator (MTI) technique. Based on the principle of target detection in clutter plus noise, the moving target indicator technique is a modern development of the signal processing in current radar technology. From the special discriminant differences between clutter and target signal is their relative velocity, by Doppler filtering technique, one can increase the ratio of signal to interference plus noise (SINR) of target signal.

Trong loạt bài nghiên cứu về **Các công nghệ mới được áp dụng trên radar biển** bắt đầu đăng từ tạp chí số trước, đặc biệt đi sâu vào các giải pháp nhằm nâng cao tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm (SINR), nguyên lý phát hiện mục tiêu trên nền nhiễu phản xạ cộng tạp âm có vai trò và ý nghĩa rất quan trọng. Theo hướng này, kỹ thuật chỉ báo mục tiêu di động (MTI) áp dụng các biện pháp xử lý tín hiệu dựa trên dấu hiệu đặc trưng phân biệt giữa nhiễu phản xạ và tín hiệu mục tiêu là vận tốc tương đối của chúng, thông qua xử lý Doppler đã nâng cao SINR với một hiệu quả rõ rệt. Trong phần này chúng ta sẽ đi sâu tìm hiểu về cơ sở lý thuyết của kỹ thuật MTI và trong các tạp chí số tiếp theo sẽ trình bày các giải pháp thực hiện cụ thể.

I. Hiệu ứng Doppler trong radar

Trước hết chúng ta hãy xem xét quá trình phát và thu tín hiệu trong radar. Giả sử radar phát xạ tín hiệu có dạng [3]:

$$s_t(t) = A_t E(t) \cos \omega_0 t = \Re [A_t E(t) e^{j\omega_0 t}] \quad (1)$$

trong đó $\omega_0 = 2\pi f_0$ là tần số mang, $A_t = \sqrt{P_t}$ với P_t là công suất phát xạ và $E(t)$ là đường bao của dạng sóng phát xạ với chuẩn đơn vị, nghĩa là:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2 dt = 1 \quad (2)$$

Giả sử một mục tiêu phản xạ lý tưởng nằm cách radar một khoảng R_t , phản xạ lại radar thành tín hiệu thu được:

$$s_r(t) = \Re [A_r E(t - \tau) e^{j\omega_0(t - \tau)}] \quad (3)$$

trong đó: $A_r = \sqrt{P_r}$ với P_r là công suất thu được;

τ là thời gian trễ do tín hiệu truyền lan đi-về giữa radar và mục tiêu, nó được tính bằng:

$$\tau = \frac{2R_t}{c} \quad (4)$$

trong đó c là vận tốc ánh sáng.

Tín hiệu thu được (3) qua thực hiện giải điều chế bằng cách nhân với $e^{j\omega_0 t}$ và cho đi qua mạch lọc thông thấp, kết quả nhận được là:

$$s_r(t) = A_r E(t - \tau) \quad (5)$$

Tiếp tục cho tín hiệu này đi qua một mạch lọc băng giới hạn phối hợp (có nghĩa là đáp ứng của mạch lọc này có dạng trùng đúng như đường bao tín hiệu $E(t)$) và có tín hiệu đầu ra:

$$s_r(\tau_m) = A_r \int_{-\infty}^{\infty} E(t - \tau) E^*(t - \tau_m) dt \quad (6)$$

trong đó τ_m là thời gian tín hiệu đến tới mạch lọc phối hợp.

Theo lý thuyết [1], tín hiệu đầu ra của mạch lọc phối hợp sẽ đạt giá trị cực đại khi $\tau_m = \tau$ và khi đó nếu thay (2) vào ta sẽ đi đến kết quả:

$$s_r(\tau) = A_r \quad (7)$$

Biểu thức (7) có nghĩa là, thời gian từ lúc phát tín hiệu đi cho đến khi nào thu được tín hiệu cực đại đúng bằng A_r chính là thời gian trễ τ cần xác định. Vì nếu biết τ , thay vào (4) ta sẽ tìm được khoảng cách R_t tới mục tiêu.

Xét trường hợp mục tiêu chuyển động với vận tốc xuyên tâm đều v_{rad} . Tại thời điểm $t = 0$, khoảng cách mục tiêu là R_0 . Do mục tiêu chuyển động lên khoảng cách mục tiêu biến thiên theo thời gian:

$$R(t) = R_0 - v_{rad}t \quad (8)$$

Tín hiệu thu được tại thời điểm t đã bị phản xạ tại thời điểm $t - \tau'/2$ và tại đúng thời điểm phản xạ đó thì mục tiêu đang ở khoảng cách theo (8) là:

$$R\left(t - \frac{\tau'}{2}\right) = R_0 - v_{rad}\left(t - \frac{\tau'}{2}\right) \quad (9)$$

Thay (4) vào (9) và giải phương trình theo τ' nhận được:

$$\tau' = \frac{2R_0/c}{1 + v_{rad}/c} - \frac{(2v_{rad}/c)t}{1 + v_{rad}/c} \quad (10)$$

Do vận tốc ánh sáng là rất lớn nên $v_{rad}/c \ll 1$ và có thể bỏ qua, do đó:

$$\tau' \approx \frac{2R_0}{c} - \frac{2v_{rad}}{c}t = \tau_0 - \frac{2v_{rad}}{c}t \quad (11)$$

trong đó τ_0 là thời gian trễ tương ứng với R_0 .

Thay (11) vào (3) ta có tín hiệu tín hiệu thu được của mục tiêu chuyển động là:

$$s_r(t) = \Re \left[A_r E\left(t - \tau_0 + \frac{2v_{rad}}{c}t\right) e^{j\omega_0\left(t - \tau_0 + \frac{2v_{rad}}{c}t\right)} \right] \quad (12)$$

Như vậy tín hiệu thu được của mục tiêu chuyển động có 2 hiệu ứng là [3]:

- Đường bao của tín hiệu có thể bị co vào hoặc giãn ra. Điều này có nghĩa là mạch lọc phối hợp (6) nếu không thay đổi được đáp ứng của nó thì sẽ trở thành không phối hợp. Nói cách khác để đảm bảo sự phối hợp cần phải sử dụng mạch lọc thích nghi. Trên thực tế, trong một số trường hợp đơn giản thì hiện tượng co giãn đường bao tín hiệu có thể được bỏ qua.

- Tần số mang bị dịch đi một lượng:

$$\omega_D = 2\pi f_D = 2\pi f_0 \frac{2v_{rad}}{c} = 2\pi \frac{2v_{rad}}{\lambda_0} \quad (13)$$

Trong đó f_D (hay ω_D) được gọi là tần số (góc) Doppler. Việc dịch tần số mang đi một giá trị bằng tần số Doppler này cũng sinh ra sự không phối hợp tần số của mạch lọc phối hợp. Nếu

như đảm bảo sao cho tần số Doppler thoả mãn $f_D \leq B_s$ (trong đó B_s là độ rộng băng của tín hiệu) thì hiệu ứng không phối hợp tần số có thể được bỏ qua.

Chú ý là nếu thực hiện tách sóng và lọc thông thấp cho tín hiệu thu được (12), ta có:

$$s_r(t) = A_r e^{j\omega_0 \frac{2v_{rad}}{c} t} = A_r e^{j\omega_D t} \quad (14)$$

trong đó $s_e(t)$ là dạng tương đương của $E(t)$ thông thấp.

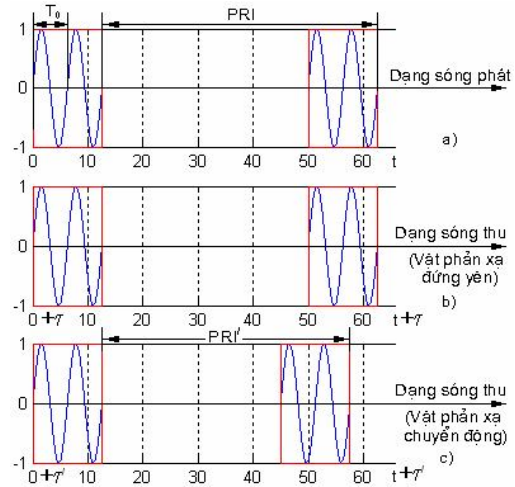
Và nếu rời rạc hoá tín hiệu này theo thời gian, nó trở thành:

$$s_r(m) = A_r e^{j2\pi f_D (mT_p)} \quad (15)$$

trong đó T_p là khoảng lặp xung PRI (Pulse Repetition Interval).

II. Nguyên lý phát hiện mục tiêu trong nhiễu phản xạ qua xử lý Doppler

Để có thể phát hiện được tín hiệu mục tiêu trong sự hiện diện của nhiễu phản xạ theo nguyên lý chung cần phải có một dấu hiệu đặc trưng giữa các dạng sóng phản xạ của 2 loại vật phản xạ này. Kỹ thuật xử lý Doppler dựa trên cơ sở dấu hiệu về vận tốc, mà như đã nói trên đó chính là dấu hiệu thông dụng nhất hiện nay để tách biệt giữa tín hiệu mục tiêu và nhiễu phản xạ. Thông thường các mục tiêu có vận tốc chuyển động nhất định nên tần số Doppler của chúng không nằm trong khoảng tần số thấp và cách xa gốc 0. Ngược lại, các vật tán phát nhiễu phản xạ (hay cũng còn gọi là *vật phản xạ không mong muốn*) thường đứng yên hoặc có tốc độ chuyển động rất chậm do đó tần số Doppler của chúng bằng 0 hay rất thấp (lân cận gốc 0). Như vậy thực chất dấu hiệu phân biệt giữa mục tiêu và vật phản xạ khi đó lại là sự phân bố phổ của chúng.



Hình 11.1. Mô tả nguyên lý xử lý Doppler

Khi nghiên cứu sâu hơn, chúng ta còn có thể thảo luận cả về vị trí không gian của mục tiêu và nhiễu dựa trên đặc điểm phân bố phổ [2]. Trên thực tế vật phản xạ có thể coi như đứng yên, còn chính radar là chuyển động. Công thức (13) chứa thành phần vận tốc xuyên tâm v_{rad} , nhưng trong trường hợp chung nhất có thể xét theo vector vận tốc bất kỳ với điều kiện có thêm góc lập bởi phương chuyển động của radar và phương của vector vận tốc đó. Do đó (13) trở thành:

$$f_D = \frac{2v_p}{\lambda_0} \cos \alpha \quad (16)$$

Trong đó v_p là vận tốc chuyển động của radar (vật phản xạ đứng yên) và α là góc lập bởi phương chuyển động của radar và vật phản xạ. Khi đó nếu vật phản xạ nằm trên phương chuyển động của radar thì tần số Doppler của nó có giá trị tuyệt đối là lớn nhất ($\alpha = 0$ hay $\alpha = \pi$). Còn nếu vật phản xạ nằm về một phía và vuông góc với phương chuyển động của radar thì tần số Doppler của nó bằng 0 ($\alpha = \pm\pi/2$). Suy ra phân bố phổ của vật phản xạ phản ánh vị trí của nó đối với chuyển động của radar.

Trong phần này chỉ xét cách xử lý về thời gian dựa trên cơ sở hiệu ứng Doppler để phân biệt mục tiêu và vật phản xạ. Trong trường hợp này radar được cho là đứng yên. Nguyên lý kỹ thuật này về bản chất vật lý là rất đơn giản, được trình bày như sau. Khoảng cách tới vật phản xạ đứng yên là giống nhau đối với 2 xung phát đi liên tiếp theo thời gian, còn ngược lại là khoảng cách thay đổi khác nhau tới vật phản xạ chuyển động (mục tiêu). Hình 11.1 mô tả nguyên lý này.

Hình II.1a là dạng sóng tín hiệu phát đi là các xung sóng sin với tín hiệu đường bao biên độ $E(t)$ trong trường hợp tổng quát có dạng xung $p_{t_0, t_x}(t)$, được định nghĩa:

$$p_{t_0, t_x}(t) \square \begin{cases} p(t) \neq 0 & t_0 \leq t \leq t_0 + t_x \\ 0 & \text{còn lại} \end{cases} \quad (17)$$

trong đó $p(t)$ được gọi là hàm dạng xung, t_0 là thời điểm bắt đầu xung, t_x thời gian kéo dài xung. Khi đó đường bao biên độ là:

$$E(t) = \sum_{m=0}^{M-1} p_{t_0+mT_p, t_x}(t) \quad (18)$$

trong đó khoảng cách giữa 2 xung đường bao được gọi là khoảng lặp xung PRI (Pulse Repetition Interval), ký hiệu T_p , chính là nghịch đảo của tần số lặp xung PRF (Pulse Repetition Frequency), ký hiệu f_p , nghĩa là $f_p = 1/T_p$ và M là số lượng xung trong dãy xung. Trong trường hợp đơn giản hơn như hình II.1 hàm dạng xung là các cửa sổ chữ nhật $rect_{t_0, t_x, h}(t)$, mà:

$$rect_{t_0, t_x, h}(t) \square \begin{cases} h & t_0 \leq t \leq t_0 + t_x \\ 0 & \text{còn lại} \end{cases} \quad (19)$$

với t_0 là thời điểm bắt đầu cửa sổ, t_x thời gian kéo dài cửa sổ, h biên độ cửa sổ và tín hiệu đường bao biên độ tương ứng là:

$$E(t) = \sum_{m=0}^{M-1} rect_{t_0-mT_p, t_x, h}(t) \quad (20)$$

Tần số của sóng sin (tần số mang) f_0 và f_p có liên quan đến nhau một cách chặt chẽ, sao cho các xung hình sin có cùng 1 pha bắt đầu tại mỗi xung. Có nghĩa là trong 1 khoảng lặp xung T_p phải chứa nguyên lần các chu kỳ sóng mang T_0 , tức là $T_p/T_0 = n$ (với n là số nguyên). Suy ra:

$$f_0 \cdot T_p = n \quad (21)$$

Hình II.1b là dạng sóng tín hiệu thu được đối với các vật phản xạ đứng yên, trong đó khoảng cách giữa 2 xung hình sin vẫn bằng PRI. Hình II.1c là dạng sóng tín hiệu thu được đối với các vật phản xạ chuyển động (về phía radar), với sự khác biệt so với II.1b là khoảng cách giữa 2 xung hình sin bằng $PRI' < PRI$.

III. Kết luận

Trên đây là cơ sở nguyên lý hoạt động của kỹ thuật chỉ báo mục tiêu di động MTI, mà như chúng ta thấy chủ yếu dựa trên quá trình phân tích và xử lý Doppler.

Giải pháp điển hình thực hiện cụ thể nguyên lý này là các *Bộ khử triệt đường dây trễ* (Delay Line Canceller) một khâu và nhiều khâu. Để khắc phục một số hạn chế của bộ khử triệt đường dây trễ, giải pháp hoàn thiện hơn là *Bank lọc Doppler* (Doppler Filter Bank). Các giải pháp này sẽ được trình bày trên các tạp chí số tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. K. Jain, *Fundamentals of Digital Signal Processing*, Englewood Cliffs of Prentice Hall, California, 2000.
- [2] Alfonso Farina, *Antenna-Based Signal Processing Techniques for Radar Systems*, Artech House Boston-London, London, UK, 1992.
- [3] Ramon Nitzberg, *Adaptive Signal Processing for Radar*, Artech House Inc., Boston-London, UK, 1992.

Người phản biện: TS. Phạm Văn Phước