

**ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN MUSIC (MULTIPLE SIGNALS CLASSIFICATION)
TRONG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN TÌM PHƯƠNG SỬ DỤNG ANTEN MẠNG
USING MUSIC (MULTIPLE SIGNALS CLASSIFICATION) ALGORITHM
FOR RADIO DIRECTION FINDING WITH ANTENNA ARRAY**

TS. TRẦN XUÂN VIỆT

Khoa Điện - Điện tử tàu biển, Trường ĐHHH

Tóm tắt

Vô tuyến tìm phương có vai trò quan trọng trong các hệ thống viễn thông và trong lĩnh vực kiểm soát tần số. Các phương pháp tìm phương kinh điển vẫn có nhiều ứng dụng quan trọng, do tính đơn giản về thuật toán xác định phương hướng và ưu thế về độ nhạy và độ chính xác. Còn các hệ thống vô tuyến tìm phương giải pháp mạnh như ứng dụng thuật toán MUSIC với anten mạng trong các công nghệ Smart antennas và công nghệ Direction finding ngày càng bộc lộ nhiều ưu điểm do sử dụng các thuật toán mạnh.

Abstract

*Radio direction finding (DF) is growing in importance of communication systems and radio monitoring. The benefits of classical DF methods are: High sensitivity, simple and inexpensive realization. In addition, MUSIC (**m**ultiple **s**ignals **c**lassification) algorithm is a high-resolution with using antenna array for modern direction finding with many advantages in Smart antennas and Direction finding techniques.*

1. Giới thiệu

Ngày nay các hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu đang được phát triển và ứng dụng rộng rãi, như hệ thống GPS của Mỹ, GLONASS của Nga, hay Hệ thống GALILEO đang được các nước Châu Âu phát triển, thì mục đích ứng dụng vô tuyến tìm phương để định vị dẫn đường đang trở nên kém tầm quan trọng. Tuy nhiên nhu cầu định vị các nguồn phát sóng ngày càng tăng lớn với tính năng di động của các thiết bị thông tin : trong lĩnh vực kiểm soát tần số (tìm kiếm các nguồn gây nhiễu, định vị các nguồn phát xạ trái phép...), trong lĩnh vực an ninh (đấu tranh chống tội phạm), trong lĩnh vực tình báo quân sự (dò tìm các hoạt động của đối phương, thu thập thông tin chiến trường...), trong lĩnh vực thông tin hiện đại (phương thức đa truy nhập phân chia theo không gian yêu cầu có thông tin về hướng sóng tới...), trong các lĩnh vực nghiên cứu khác (khoa học vũ trụ, khoa học trái đất...) ...

Nhiệm vụ của một hệ thống tìm phương là xác định phương của một nguồn phát xạ bằng cách đo đạc và tính toán các tham số trường điện từ. Thông thường góc phương vị (azimuth) là thông số chính xác định phương của sóng tới, giá trị góc ngẩng (elevation) sẽ được quan tâm đối với các nguồn phát xạ trong không gian đa chiều và các trường hợp đặc biệt đối với hệ thống tìm phương sóng ngắn.

Có hai nguyên lý tìm phương cơ bản [4]: nguyên lý tìm phương theo đặc tính phân cực và nguyên lý tìm phương theo đặc tính pha.

Nguyên lý ***tìm phương theo đặc tính phân cực*** được thực hiện bởi một dipol và một anten vòng. Các hệ thống tìm phương anten vòng quay kinh điển được xếp vào loại này (quay anten vòng tới khi thu được tín hiệu cực tiểu, thì xác định hướng của sóng tới là vuông góc với mặt anten vòng). Ngày nay các hệ thống tìm phương theo đặc tính phân cực chỉ còn áp dụng trong các trường hợp không gian lắp đặt anten nhỏ hẹp, như trên các phương tiện giao thông hay trên tàu thuyền đối với việc tìm phương ở băng HF. Phương pháp tính toán, đánh giá thường áp dụng nguyên lý Watson-Watt.

Nguyên lý ***tìm phương theo đặc tính pha*** sẽ cho các thông tin về hướng sóng tới từ vị trí không gian của các đường hoặc mặt đồng pha. Có hai loại cơ bản:

- Nguyên lý tìm phương theo đặc tính phương hướng: trong phương pháp này các mặt sóng tác động tới các điểm khác nhau của hệ thống anten và được kết hợp lại tại một điểm thành một tín hiệu tổng. Sự cực đại của tín hiệu tổng xảy ra tại góc mà sự lệch pha giữa các mặt sóng là nhỏ nhất. Tín hiệu tổng luôn trực giao với mặt pha của sóng tác động (nguyên lý tìm phương theo cực

đại tín hiệu). Đối với tìm phương theo nguyên lý cực tiểu tín hiệu, thì các mặt sóng được kết hợp sao cho sự khác pha là lớn nhất và thu được một tín hiệu cực tiểu rõ rệt.

- Nguyên lý tìm phương bằng cách lấy mẫu không gian (aperture sampling): với phương pháp này, các mẫu được lấy ở các vị trí khác nhau và áp dụng các thuật toán để tính toán trình tự hoặc song song, xác định góc phương vị. Các hệ thống tìm phương loại này là hệ thống tìm phương theo nguyên lý giao thoa, hệ thống tìm phương trường quay và hệ thống tìm phương nguyên lý Doppler... Các phương pháp tìm phương đã đề cập trên chỉ giới hạn xử lý tín hiệu trong miền tần số. Với kỹ thuật xử lý tín hiệu số các phương pháp được biết đến từ lý thuyết xác định phổ đang được phát triển. Khái niệm "sensor array processing" dùng để chỉ kỹ thuật xử lý thông tin về các tham số của mặt sóng tới từ các tín hiệu thành phần của mạng các chấn tử (nguyên lý tìm phương bằng mạng anten).

2. Thuật toán MUSIC

Thuật toán MUSIC (**M**ultiple **S**ignal **C**lassification) được Schmidt [2] đề xuất là một giải pháp mạnh (high-resolution) cho phương pháp phân loại đa tín hiệu, trên cơ sở khai thác cấu trúc riêng của ma trận hiệp phương sai đầu vào. MUSIC là một thuật toán xác định tham số tín hiệu, có thể cung cấp các thông tin về số lượng sóng tới, hướng sóng tới của mỗi tín hiệu, cường độ và sự tương quan chéo giữa chúng, công suất tạp âm... Trong khi đó nó cũng yêu cầu lấy chuẩn mạng anten rất chi tiết và chính xác. Thuật toán MUSIC đã được áp dụng và hiệu quả của nó đã được thực tế chứng minh.

Giả sử có D tín hiệu tới mạng anten, vecto dữ liệu đầu vào máy thu tại M chấn tử của mạng anten có thể được biểu diễn như là một tổ hợp tuyến tính của D mặt sóng tới và tạp âm, cụ thể là:

$$u(t) = \sum_{j=0}^{D-1} \mathbf{a}(\phi_j) s_j(t) + n(t) \quad (1)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}(\phi_0) & \mathbf{a}(\phi_1) & \dots & \mathbf{a}(\phi_{D-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(t) \\ \dots \\ s_{D-1}(t) \end{bmatrix} + n(t) = \mathbf{A}s(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

ở đây $\mathbf{s}^T(t) = [s_0(t) \quad s_1(t) \quad \dots \quad s_{D-1}(t)]$ là vecto tín hiệu sóng tới,

$\mathbf{n}(t) = [n_0(t) \quad n_1(t) \quad \dots \quad n_{D-1}(t)]$ là vecto tạp âm, và

$\mathbf{a}(\phi_j)$ là vecto lái của mạng anten tương ứng với hướng sóng tới của tín hiệu thứ j . Trong điều kiện có tác động tạp âm trắng cộng Gaussian (AWGN), ma trận hiệp phương sai số liệu vào được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{R}_{uu} = E[\mathbf{u}\mathbf{u}^H] = \mathbf{A}E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H]\mathbf{A}^H + E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{uu} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (4)$$

ở đây \mathbf{R}_{ss} là ma trận hiệp phương sai tín hiệu $E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H]$.

Khi phân hoạch không gian con đối với ma trận hiệp phương sai số liệu vào, các vecto riêng tín hiệu và tạp âm tạo nên các không gian con trực giao. Các vecto lái tương ứng với các hướng sóng tới căng trên không gian con tín hiệu trực giao với không gian con tạp âm. Bằng cách tìm tất cả các vecto lái trực giao với các vecto riêng tương ứng với các giá trị riêng của \mathbf{R}_{uu} có giá trị xấp xỉ bằng σ_n^2 ta ấn định được các hướng sóng tới cần tìm.

Thuật toán MUSIC có thể tóm tắt như sau:

1. Tập hợp các mẫu dữ liệu đầu vào $u_k, k = 0, \dots, K-1$, và tính ma trận hiệp phương sai đầu vào theo công thức:

$$\mathbf{R}_{uu} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H \quad (5)$$

2. Phân tích riêng ma trận \mathbf{R}_{uu} :

$$\mathbf{R}_{uu} \mathbf{V} = \mathbf{V} \Lambda \quad (6)$$

ở đây: $\Lambda = \text{diag} \{ \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{M-1} \}$, $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{M-1}$ là các giá trị riêng

và $\mathbf{V} = [\mathbf{q}_D \quad \mathbf{q}_{D-1} \quad \dots \quad \mathbf{q}_{M-1}]$ là các vecto riêng tương ứng của ma trận \mathbf{R}_{uu} .

3. Xác định số tín hiệu D từ số bội K của giá trị riêng nhỏ nhất λ_{\min} , theo công thức:

$$D = M - K \quad (7)$$

4. Tính phổ MUSIC theo công thức :

$$\hat{P}_{MUSIC}(\phi) = \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{a}(\phi)}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\phi)} \quad (8)$$

ở đây: $\mathbf{V}_n = [\mathbf{q}_D \quad \mathbf{q}_{D+1} \quad \dots \quad \mathbf{q}_{M-1}]$

5. Tìm D đỉnh cao nhất của phổ $\hat{P}_{MUSIC}(\phi)$ để xác định về hướng sóng tới.

3. Hệ thống vô tuyến tìm phương sử dụng anten mạng

Sự phát triển các hệ thống tìm phương kinh điển với mục đích thiết kế các cấu hình anten và mạch xử lý để xác định phương vị ngày càng đơn giản hơn. Cần lưu ý là việc phát huy mối liên hệ toán học đơn giản giữa tín hiệu thu được với hướng sóng tới khá độc lập với các tham số như tần số, sự phân cực và môi trường truyền sóng.

Với sự phát triển xử lý tín hiệu số, các phương pháp mới có khả năng:

- Với các chip xử lý tín hiệu số tốc độ cao, các nhu cầu đối với một hệ thống đơn giản và xử lý độc lập với tần số không còn được ứng dụng nhiều. Các hệ thống có mối liên hệ toán học phức tạp cũng có thể được sử dụng để có đáp ứng thời gian ngắn, hoặc các phương pháp tính nhanh và hiệu quả cũng được nghiên cứu ứng dụng.

- Phương pháp số cho phép phân tách một số sóng tới từ các hướng khác nhau ngay cả khi khẩu độ anten hạn chế (high-resolution, super-resolution, multi-wave resolution).

Một cấu hình phần cứng điển hình của một hệ thống tìm phương xử lý tín hiệu số giới thiệu trong hình 1.

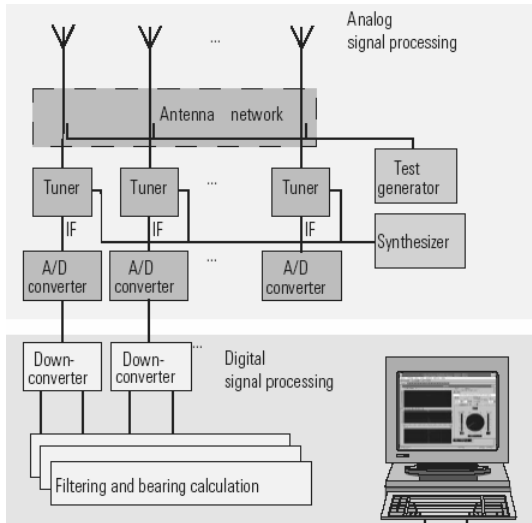
Các đầu ra của các anten thường được đưa tới một mạng để:

- kiểm tra tín hiệu và
- trộn tín hiệu khi N - số đầu ra anten lớn hơn H - số máy thu sử dụng.

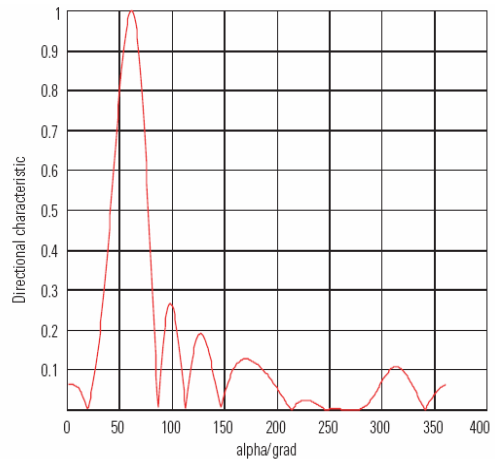
Tín hiệu sau khi đổi thành trung tần IF và được số hóa qua biến đổi A/D. Để giảm khối lượng, dữ liệu số được chuyển đổi xuống băng tần gốc. Các mẫu tín hiệu băng tần gốc $x_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) được xử lý lọc để phù hợp với độ rộng băng áp dụng các thuật toán xử lý tín hiệu số.

Phương pháp Beamforming

Tương tự như các mạng anten thông thường, các tín hiệu đầu ra x_i được nhân với các trọng số phức w_i , rồi lấy tổng, tín hiệu thu được thích ứng với đặc tính hướng phụ thuộc vào hướng sóng tới. Sự đáp ứng của tín hiệu ra y theo sự thay đổi của các trọng số w_i không thể sử dụng để tìm phương như các hệ thống tìm phương kinh điển. Cái khác là ở chỗ với kỹ thuật numeric beamforming tốc độ tìm phương chỉ bị giới hạn bởi tốc độ tính toán.



Hình 1. Cấu hình phần cứng điển hình của một hệ thống DF sử lý tín hiệu số.

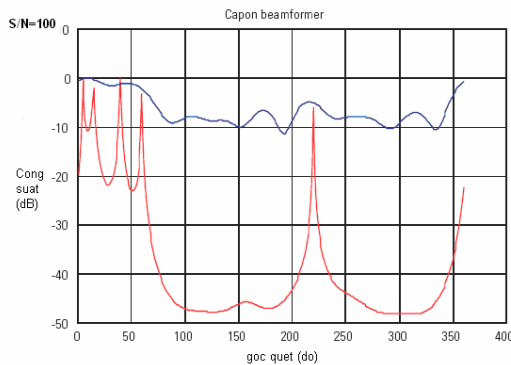


Hình 2. Kết quả tìm phương theo thuật toán beamforming.

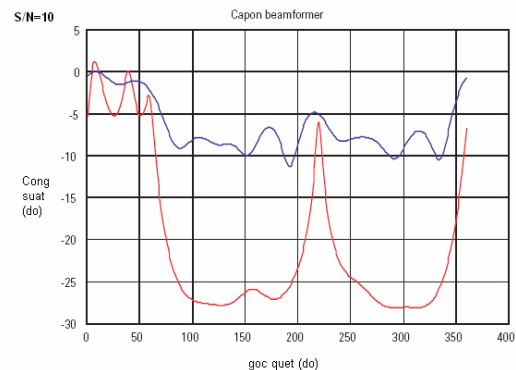
Các phương pháp tìm phương giải pháp mạnh

Nếu trong cùng một kênh tần số có cả các tín hiệu nhiễu tác động cùng với tín hiệu quan tâm thì phương pháp beamforming thông thường sẽ đưa đến sai số. Có hai phương pháp giải quyết:

- Nếu công suất các thành phần nhiễu nhỏ hơn so với tín hiệu quan tâm thì có thể làm cực tiểu phương gây sai số bằng cách chọn khẩu độ anten thích hợp.
- Nếu các thành phần nhiễu lớn hơn hoặc bằng tín hiệu quan tâm thì phải xác định chính nguồn nhiễu để loại trừ nó. Khi sử dụng các thuật toán beamforming thông thường phải sử dụng tính toán cực đại thứ hai. Các hạn chế dẫn tới là: nếu tỷ số giữa cực đại chủ yếu và các cực đại thứ yếu của đặc tính hướng quá nhỏ, hoặc sự sai khác giữa góc của tín hiệu quan tâm và nhiễu nhỏ hơn độ mở búp sóng chính.



a

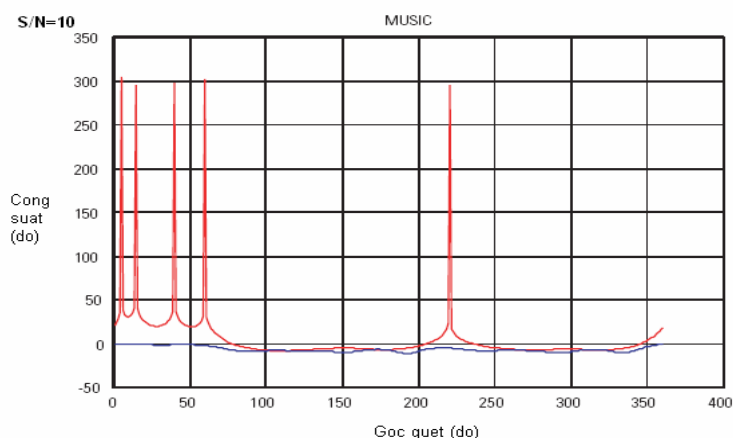


b

Hình 3. Phổ không gian Capon beamforming.

Phương pháp Capon beamforming

Bằng cách tối ưu trọng số, mức cực đại thứ yếu có thể bị suy giảm nhưng đồng thời cực đại chính lại được gia tăng. Đó chính là mục tiêu của giải pháp mạnh. Các hệ thống tìm phương tín hiệu cực tiểu là tiền thân của các giải pháp mạnh. Adaptive antennas là mạng anten có khả năng làm suy giảm không gian các nguồn nhiễu. Trong các hệ thống thông tin, sự tối ưu hoá tỷ số tín hiệu trên tạp âm là mục tiêu hàng đầu, trong các hệ thống tìm phương trọng số được xác định để nén tín hiệu nhằm tìm phương sóng tới.



Hình 4. Phổ không gian MUSIC với $S/N = 10$.

Trọng số của hệ thống beamforming được chọn sao cho dưới điều kiện phụ nhất định công suất tín hiệu ra là cực tiểu. Trong hệ thống Capon beamforming điều kiện phụ để đặt trọng số được xác định để duy trì độ tăng ích anten là hằng số đối với hướng đã cho α_r . Nếu các sóng tới không tương quan, hệ thống beamforming sẽ điều chỉnh suy giảm không đối với tất cả các hướng trừ hướng α_r . Hình 3a là một ví dụ về phổ không gian của một hệ thống Capon beamforming với mạng anten vòng ($D/\lambda = 1,4$) và với 5 sóng tới ($S/N=100$) ở các góc 5, 15, 40, 60 và 220 độ, so sánh với hệ thống beamforming thông thường. Giải pháp này phụ thuộc lớn vào tỷ số tín hiệu trên tạp âm, hình 3b là phổ không gian cũng của hệ thống Capon beamforming, với các điều kiện tương tự, chỉ có $S/N=10$.

Phương pháp MUSIC: các phương pháp không gian con (subspace methods) có mục đích là loại trừ tác động của tạp âm. Điều này được thực hiện bằng việc tách không gian tín hiệu N chiều thành các không gian con. Thuật toán MUSIC ứng dụng một thực tế là không gian tín hiệu trực giao với không gian tạp âm. Nếu chiếu các vector phương lên không gian tạp âm thì sẽ nhận được giá trị không, mà không phụ thuộc vào mức tạp âm. Giá trị nghịch đảo thường được sử dụng như là một hàm xác định phương hướng với các đỉnh tách biệt biểu thị hướng sóng tới (hình 4).

4. Kết luận

Vô tuyến tìm phương không còn có tầm quan trọng trong kỹ thuật định vị đạo hàng, song nó vẫn có vai trò quan trọng trong các hệ thống viễn thông và trong lĩnh vực kiểm soát tần số.

Trong sự phát triển của vô tuyến tìm phương, các phương pháp kinh điển vẫn có nhiều ứng dụng quan trọng, do tính đơn giản về thuật toán xác định phương hướng và lợi thế về độ nhạy và độ chính xác. Thuật toán MUSIC là một trong các phương pháp hiện đại xác định hướng sóng tới (DOA- direction of arrival), một thuật ngữ tương tự như vô tuyến tìm phương (DF- direction finding), nhưng được hiểu là các kỹ thuật tìm phương giải pháp cao với ứng dụng anten mạng (array antennas). Ứng dụng của nó trong các công nghệ Smart antennas và công nghệ Direction finding có nhiều ưu thế do sử dụng các thuật toán mạnh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phan Anh, “*Trường điện từ & truyền sóng*”, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà nội, 2000.
- [2] Liberti & Rapport, “*Smart antennas for wireless communications: IS95 and third generation CDMA applications*”, Prentice Hall PTR - 1999.
- [3] ITU publication, “*Spectrum monitoring handbook*”, edition 2002.
- [4] Rohde & Schwarz, “*Introduction into Theory of Direction Finding*”, 2000.

Người phản biện: TS. Lê Quốc Vượng