

TÁCH TÂM TÁN XẠ BẰNG MÔ HÌNH PRONY VÀ ĐẶC TRƯNG ĐỘNG MÁY BAY TRONG TRƯỜNG ĐIỆN TỪ

Nguyễn Xuân Tý⁽¹⁾, Lê Tiến Thường⁽²⁾

(1)Học viện Hải quân Nha Trang

(2)Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 22 tháng 12 năm 2006, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 21 tháng 11 năm 2007)

TÓM TẮT: Bài báo này giới thiệu một phương pháp thiết lập các thông số tâm tán xạ hai chiều (vị trí, độ lớn, pha) bằng mô hình Prony và mô phỏng đặc trưng động máy bay trong trường điện từ. Mục tiêu được mô hình ở đây là một máy bay vận tải C-29, nó được quan sát bởi một radar chủ động cố định (thực hiện cả hai quá trình thu và phát sóng điện từ). Các thông số về tâm tán xạ của máy bay C-29 là đầu vào mô phỏng. Đầu ra của mô phỏng là các thông số: trường điện tán xạ, độ dịch tần, sai số góc. Kết quả nghiên cứu này là một trong những cơ sở cho việc phân loại, nhận dạng, nén dữ liệu trong kỹ thuật radar hiện đại, đồng thời, có thể là một công cụ trong nghiên cứu và thực hiện kỹ thuật tàng hình.

1. GIỚI THIỆU

Quan hệ cơ bản được mô phỏng ở đây: một radar chủ động gắn với một mục tiêu máy bay. Radar được giả sử là cố định. Các đặc trưng tán xạ tĩnh của mục tiêu (máy bay vận tải C29) được yêu cầu là đầu vào mô phỏng. Mô phỏng sử dụng một mô hình đơn giản cho sự tán xạ tĩnh của mục tiêu là mô hình hàm mũ suy giảm hai chiều. Mô hình này thỉnh thoảng được gọi là mô hình tán xạ nhiều điểm [1, 2, 3,4]. Sau đó mô phỏng mô hình động radar-mục tiêu mà sự chuyển động và rung lắc của mục tiêu sẽ ảnh hưởng đến các đặc trưng của máy thu radar. Đầu ra của gói mô phỏng là trường tán xạ, độ dịch tần và sai số góc.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

- Mô hình tán xạ máy bay
- Mô hình hàm mũ suy giảm của mô hình máy bay tỷ lệ C29
- Mô phỏng chuyển động và rung lắc của máy bay
- Các thông số trường tán xạ, độ dịch tần và sai số góc

2.1.Mô hình tán xạ máy bay

Để tính được trường tán xạ mà radar thu được, các đặc trưng tán xạ của máy bay phải được mô hình. Ở tần số cao, trường tán xạ từ một mục tiêu lớn về mặt diện (máy bay) có thể được xấp xỉ bằng tổng tán xạ của một số giới hạn các tâm tán xạ nổi bật. Các hệ số tán xạ là hàm của tần số f và góc hướng mục tiêu θ sẽ được mô tả với mô hình hàm mũ suy giảm hai chiều (2-D damped Exponential Model) [4, 5] sau:

$$d(m, n) = \sum_{g=1}^{\Gamma} a_g p_{x_g}^m p_{y_g}^n \quad (1)$$

ở đây: p_{x_g} : cực x thứ g , thành phần x của hàm mũ hai chiều; p_{y_g} : cực y thứ g , thành phần y của hàm mũ hai chiều; a_g : hệ số biên độ thứ g (số phức); Γ : số tâm tán xạ (số nguyên); $m = 0, 1, \dots, M-1$ (tần số chuẩn hoá); $n = 0, 1, \dots, N-1$ (góc chuẩn hoá).

Đây là một mở rộng 2-D của mô hình Prony [2,4]. Mô hình này giả sử rằng mục tiêu radar bao gồm Γ tâm tán xạ. Hành vi tán xạ của tâm tán xạ thứ γ , với một phân cực phát và thu đơn, được mô hình bởi cực x , cực y và ba hệ số biên độ $\{p_x, p_y, a_\gamma\}$. Nhấn mạnh thêm rằng, đây là một mô hình miền tần số hai chiều. Một phép biến đổi Fourier ngược hai chiều của dữ liệu trong miền này cho ra dữ liệu trong miền ảnh ISAR (hay miền khoảng cách).

Độ lớn của hàm mũ suy giảm thành phần x , $|P_{x_\gamma}|$, xác định độ tán xạ của tâm tán xạ thứ γ trong toạ độ x của trục dọc (trong ảnh ISAR). Độ tán xạ ở đây có nghĩa là mô tả một đáp ứng tâm tán xạ thứ γ mở rộng như thế nào trong hướng dọc (down-range) của ảnh ISAR. Góc của hàm mũ suy giảm thành phần x , $\angle P_{x_\gamma}$, xác định vị trí của tâm tán xạ thứ γ trong hướng dọc. Tương tự ta cũng có các biểu diễn như vậy đối với thành phần y nhưng các biểu diễn của thành phần y ứng với trục ngang (cross-range) trong ảnh ISAR. (Tài liệu [6,7,8] mô tả việc tạo ảnh radar)

Khảo sát các mẫu hệ số tán xạ $S(f, \theta)$ được lấy tại các tần số $f = f_0, f_1, \dots, f_{M-1}$ và các góc $\theta = \theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}$. Giả sử rằng các tần số và các góc được đặt cách nhau một khoảng lần lượt là df và da . Nếu dữ liệu được tạo thành trong một ma trận, ma trận dữ liệu $M \times N$ được gọi là D và được cho bởi:

$$D = \begin{bmatrix} S(f_0, \theta_0) & S(f_0, \theta_1) & \dots & S(f_0, \theta_{N-1}) \\ S(f_1, \theta_0) & S(f_1, \theta_1) & \dots & S(f_1, \theta_{N-1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S(f_{M-1}, \theta_0) & S(f_{M-1}, \theta_1) & \dots & S(f_{M-1}, \theta_{N-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

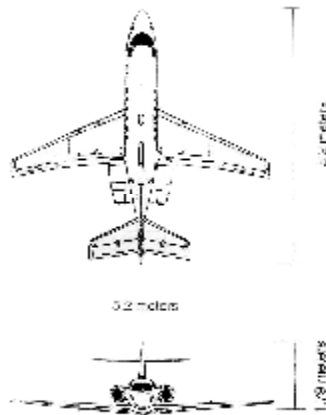
Từ dữ liệu radar thô này trong ma trận D , các thông số hàm mũ suy giảm hai chiều, $\{p_{x_\gamma}, p_{y_\gamma}, a_\gamma\}_{\gamma=1}^{\Gamma}$, được thiết lập bằng việc sử dụng kỹ thuật 2-D TLS-Prony [1,2]. Mỗi lần các thông số này được tìm, chúng có thể được sử dụng lặp đi lặp lại để ước đoán sự tán xạ từ mục tiêu với một dãy các tần số và các góc.

Chú ý rằng, mô hình được mô tả bởi $\{p_{x_\gamma}, p_{y_\gamma}, a_\gamma\}_{\gamma=1}^{\Gamma}$, chỉ có giá trị với m, n mà m, n này liên quan đến dải tần số và góc của dữ liệu ISAR thô ban đầu, Δf và $\Delta \theta$, mà từ đây mô hình được phát triển. Một quy luật tốt là sử dụng mô hình hàm mũ suy giảm hai chiều tại các tần số giữa $(f_0 - \Delta f)$ và $(f_{M-1} + \Delta f)$ và các góc giữa $(\theta_0 - \Delta \theta)$ và $(\theta_{N-1} + \Delta \theta)$. Điều này tương ứng với các giá trị tần số chuẩn hoá m nằm giữa $(-M+1)$ và $(2M-1)$ và các giá trị góc chuẩn hoá n nằm giữa $(-N/2)$ và $(3N/2)$. Hơn nữa, các tần số và góc chuẩn hoá m, n liên quan đến các biến thực tế f, θ như sau:

$$\begin{aligned} m &= \frac{f - f_0}{df} \\ n &= \frac{q - q_0}{da} + \frac{N}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2. Mô hình hàm mũ suy giảm của mô hình máy bay tỷ lệ C29

Dữ liệu C29 thô ISAR [9,10] được mô tả trong bảng 1. Máy bay C29 được đo là một mô hình tỷ lệ 1:3 chất lượng cao của máy bay C29 thực tế. Mô hình tỷ lệ này được cho trong hình 1. Mô hình C29 tỷ lệ 1:3 được bao phủ hoàn toàn với một chất dẫn điện lý tưởng.



Hình 1: Mô hình tỷ lệ 1:3 máy bay C29

Các mô hình nhận được từ dữ liệu ISAR thô không phải duy nhất, và các thông số của dữ liệu được sử dụng để khai triển các mô hình được cho trong bảng 2.

2.3. Mô phỏng chuyển động của máy bay

Có hai loại chuyển động của máy bay được mô phỏng ở đây. Thứ nhất là chuyển động thân cứng và thứ hai là chuyển động riêng biệt. Chuyển động thân cứng là sự chuyển động rung lắc toàn thân máy bay hoặc là sự di chuyển ra xa một đường bay đã định như một thân cứng. Trong trường hợp này, không có sự uốn cong của máy bay. Trường hợp thứ hai, có sự uốn cong của máy bay và trong trường hợp này máy bay uốn cong và các phần khác nhau của máy bay di chuyển đến một vị trí khác. Tiếp theo, từng loại chuyển động được mô tả.

Bảng 1: Dữ liệu ISAR C29 thô

Dải tần số (GHz), bước	Dải góc AZ ($^{\circ}$), bước	EL ($^{\circ}$)
26 đến 30, 0.01	-5 đến 5, 0.04	3
26 đến 30, 0.01	-5 đến 5, 0.04	5
26 đến 30, 0.01	-5 đến 5, 0.04	7
26 đến 30, 0.01	19 đến 29, 0.04	3
26 đến 30, 0.01	19 đến 29, 0.04	5
26 đến 30, 0.01	19 đến 29, 0.04	7
26 đến 30, 0.01	-19 đến -29, 0.04	3
26 đến 30, 0.01	-19 đến -29, 0.04	5
26 đến 30, 0.01	-19 đến -29, 0.04	7

Bảng 2.Dữ liệu mô hình C29, tỷ lệ

STT	Dải tần, bước (Hz)	AZ tâm, bước (⁰)	El (⁰)	MxN
1	8.67 đến 9.09, 0.0067	-3.76, 0.04	3	64x64
2	8.67 đến 9.09, 0.0067	-0.08, 0.04	3	64x64
3	8.67 đến 9.09, 0.0067	3.72, 0.04	3	64x64
4	8.67 đến 9.09, 0.0067	-3.76, 0.04	5	64x64
5	8.67 đến 9.09, 0.0067	-0.08, 0.04	5	64x64
6	8.67 đến 9.09, 0.0067	3.72, 0.04	5	64x64
7	8.67 đến 9.09, 0.0067	-3.76, 0.04	7	64x64
8	8.67 đến 9.09, 0.0067	-0.08, 0.04	7	64x64
9	8.67 đến 9.09, 0.0067	3.72, 0.04	7	64x64
10	8.67 đến 9.09, 0.0067	20.24, 0.04	3	64x64
11	8.67 đến 9.09, 0.0067	23.92, 0.04	3	64x64
12	8.67 đến 9.09, 0.0067	27.72, 0.04	3	64x64
13	8.67 đến 9.09, 0.0067	20.24, 0.04	5	64x64
14	8.67 đến 9.09, 0.0067	23.92, 0.04	5	64x64
15	8.67 đến 9.09, 0.0067	27.72, 0.04	5	64x64
16	8.67 đến 9.09, 0.0067	20.24, 0.04	7	64x64
17	8.67 đến 9.09, 0.0067	23.92, 0.04	7	64x64
18	8.67 đến 9.09, 0.0067	27.72, 0.04	7	64x64
19	8.67 đến 9.09, 0.0067	20.24, 0.04	3	64x64
20	8.67 đến 9.09, 0.0067	23.92, 0.04	3	64x64
21	8.67 đến 9.09, 0.0067	27.72, 0.04	3	64x64
22	8.67 đến 9.09, 0.0067	20.24, 0.04	5	64x64
23	8.67 đến 9.09, 0.0067	23.92, 0.04	5	64x64
24	8.67 đến 9.09, 0.0067	27.72, 0.04	5	64x64
25	8.67 đến 9.09, 0.0067	20.24, 0.04	7	64x64
26	8.67 đến 9.09, 0.0067	23.92, 0.04	7	64x64
27	8.67 đến 9.09, 0.0067	27.72, 0.04	7	64x64

2.3.1.Chuyển động thân cứng

Có hai dạng chuyển động thân cứng, đó là: chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay. Với chuyển động tịnh tiến, toàn bộ máy bay tịnh tiến từ đường bay chuẩn của nó trong tất cả ba hướng của tọa độ Đề các tại từng thời điểm tức thời. Với chuyển động quay, toàn bộ máy bay sẽ quay các hướng của nó trong cả ba hướng góc (roll, pitch và yaw).

- Chuyển động thân cứng tịnh tiến

Để mô phỏng chuyển động này ta thay đổi các thành phần tọa độ của vectơ vị trí máy bay bởi một lượng nhỏ bằng cách: ta khảo sát ba quá trình ngẫu nhiên Gaussian trắng phân bố đồng nhất độc lập, có trị trung bình 0 và độ lệch chuẩn khoảng 10cm. Từng quá trình được lọc bởi bộ lọc thông thấp FIR bậc 16 với tần số cắt 2-5 Hz. Tiếp theo, một ma trận tương quan 3x3 [13] được khái niệm:

$$C_t = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.9 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cuối cùng ta nhân ma trận của ba quá trình ngẫu nhiên được lọc với ma trận tương quan này, ta được một ma trận mới tương ứng với sự thay đổi các thành phần tọa độ của vector vị trí.

- Chuyển động thân cứng quay

Ta cũng thực hiện tương tự như trong mô phỏng chuyển động thân cứng tịnh tiến. Tuy nhiên ở đây ta thực hiện thay đổi các thành phần góc trục giao nhau quanh ba trục x, y, z, nên độ lệch chuẩn ở đây là khoảng 2^0-3^0 . Ma trận tương quan và tần số cắt đồng nhất với ma trận và tần số trong chuyển động tịnh tiến.

2.3.2.Chuyển động riêng biệt tâm tán xạ

Để mô phỏng sự uốn cong cấu trúc máy bay, ta đi thực hiện mô phỏng sự di chuyển của các tâm tán xạ. Các tâm tán xạ được phép di chuyển trong mặt phẳng hai chiều vật lý mà các tâm tán xạ hiện có trong đó. Do đó, các vị trí theo phương dọc và phương ngang của các tâm tán xạ được thay đổi. Giả sử rằng có Γ tâm tán xạ và các quá trình ngẫu nhiên Gaussian được tạo. Các quá trình này được cho qua bộ lọc thông thấp với tần số cắt bộ lọc khoảng 20 Hz. Tiếp theo các quá trình này được nhân với ma trận tương quan [13]:

$$C_i = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4.Các thông số đầu ra gói mô phỏng

- Trường tán xạ:

Trường tán xạ đơn phân cực từ một mục tiêu phức tạp được xấp xỉ:

$$E_s(f, q) = S(f, q) E_t(f, q) \left(\frac{e^{-jk_0 2r}}{4\pi r^2} \right) \quad (6)$$

Trong đó: $S(f, \theta)$ là hệ số tán xạ của mục tiêu và có thể được khái niệm:

$$S(f, q) = \left(\sum_{g=1}^{\Gamma} s_g(f, q) \right) = \left(\sum_{g=1}^{\Gamma} a_g P_{x_g}^m P_{y_g}^n \right) \quad (7)$$

ở đây, $s_g(f, \theta)$ là hệ số tán xạ của tâm tán xạ thứ γ , $E_s(f, \theta)$ là trường tán xạ (miền tần số) khi được xem xét tại máy thu radar, $E_t(f, \theta)$ là trường điện được phát từ radar và r là khoảng cách từ radar đến tâm pha mục tiêu (máy bay), p_{x_g} : cực x thứ γ , p_{y_g} : cực y thứ γ , a_g : hệ số biên độ thứ γ , Γ : số tâm tán xạ (số nguyên), m : tần số chuẩn hoá, n : góc chuẩn hoá.

- Độ dịch tần Doppler

Độ dịch tần là một thông số quan trọng với các máy thu radar vì nó liên quan đến tần số tức thời của trường tán xạ tại máy thu radar. Khái niệm chuẩn về độ dịch tần là sự khác nhau giữa tần số của trường điện từ với sự chuyển động radar-mục tiêu và không có chuyển động radar-mục tiêu. Biểu thức độ dịch tần được biểu diễn như sau:

$$f_d = \frac{-1}{2pE_0^2} x$$

$$\sum_{i=1}^{\Gamma} a_i \left\{ \frac{d\Phi_i}{dt} - 2k_0 \left(\frac{d\hat{n}_i}{dt} \cdot \hat{R}_{ot} + \frac{d\hat{R}_{ot}}{dt} \cdot \hat{n}_i \right) \right\} \quad (8)$$

với

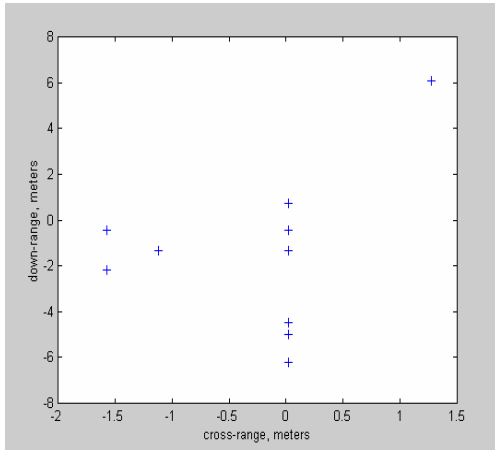
$$a_i = E_i \sum_{l=1}^{\Gamma} E_l \cos \left(\frac{f_i - 2k_0 \left(\hat{n}_i \cdot \vec{R}_{ot} \right) - f_l + 2k_0 \left(\hat{n}_l \cdot \vec{R}_{ot} \right)}{2k_0 \left(\hat{n}_l \cdot \vec{R}_{ot} \right)} \right) \quad (9)$$

- Sai số góc

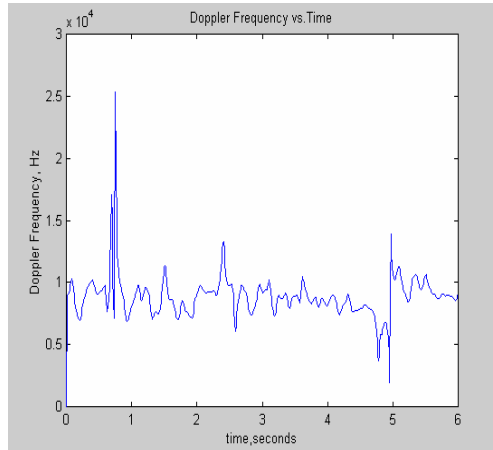
Sai số góc hay tia phản xạ cũng là một thông số quan trọng của radar. Sai số góc là góc giữa vector từ tâm pha mục tiêu đến máy thu radar và hướng tới trường tán xạ tại máy thu radar. Hướng tới trường tán xạ (DOA) được khái niệm giống như hướng của vector Poynting của sóng TEM tới máy thu radar. Vector DOA được ký hiệu là $\vec{d}$. Vector $\vec{d}$ liên quan với Gradient pha của trường tán xạ tới radar. Sai số góc Ω_e được tính:

$$\Omega_e = \arccos \left(\frac{\vec{d} \cdot \vec{R}_{ot}}{\|\vec{d}\| \|\vec{R}_{ot}\|} \right) \quad (10)$$

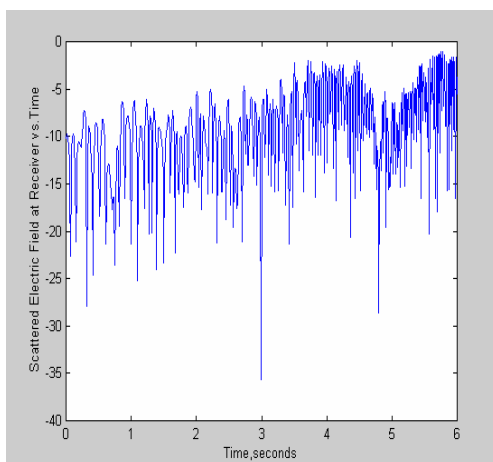
Dùng Matlab [12] mô phỏng và tính toán, ta được các đầu ra mô phỏng trong trường hợp chuyển động riêng biệt các tâm tán xạ (trường hợp ảnh hưởng lớn đến các đầu ra mô phỏng).



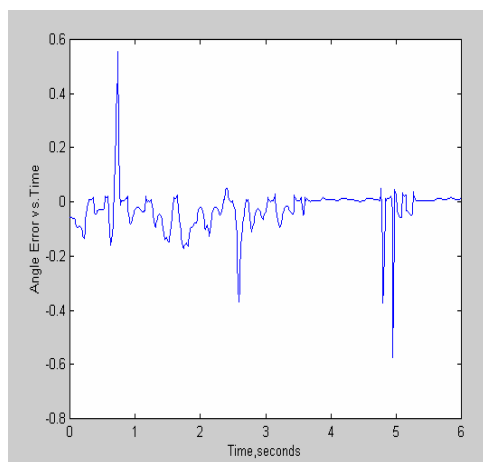
Hình 2: Vị trí tâm tán xạ



Hình 4: Giá trị độ dịch tần



Hình 3: Giá trị trường tán xạ



Hình 5: Giá trị sai số góc

3. KẾT LUẬN

Tóm lại, mục đích của gói mô phỏng này là cung cấp các giá trị về trường tán xạ, độ dịch tần và sai số góc về một mục tiêu radar động. Các giá trị này giúp cho chúng ta đánh giá đặc tính các máy thu radar và những cơ sở cho việc nhận dạng mục tiêu (máy bay C29). Ở đây radar là radar chủ động.

Một vấn đề không được thực hiện trong gói mô phỏng này là ảnh hưởng của tua bin phản lực cánh quạt của máy bay C29. Khi động cơ này hoạt động thì nó sẽ làm thay đổi các giá trị trường tán xạ, độ dịch tần và sai số góc. Đặc biệt khi máy bay bay hướng tâm radar thì ảnh hưởng này rất quan trọng.

Gói mô phỏng này cho ta thấy những phản ánh về quá trình tương tác điện từ với máy bay C29 và những hành vi của quan hệ máy bay - radar. Từ đó mở ra cho ta việc lập trình điều khiển trong các thiết bị radar (radar trên tàu, trên máy bay, trong đầu tự dẫn tên lửa, ...) trong việc phát hiện và nhận dạng mục tiêu - một vấn đề quan trọng trong radar hiện đại ngày nay. Đồng thời, việc tách các tâm tán xạ của mục tiêu bằng mô hình Prony cũng là gợi ý cho một công cụ thiết kế các mục tiêu tàng hình – một vấn đề cấp bách của thực tiễn nước ta.

SCATTERING CENTERS BY USING THE PRONY MODEL AND SIMULATES DYNAMIC AIRCRAFT SIGNATURES

Nguyen Xuan Ty⁽¹⁾, Le Tien Thuong⁽²⁾

(1) Navy Institute Nha Trang

(2) University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT: This report estimates parameters of 2-D scattering centers (locations, magnitude, phase) by using the Prony model and simulates dynamic aircraft signatures. The simulated aircraft is C-29 transport aircraft. A radar is mono-static radar. The first, scattering model and 2-D damped exponentials model are researched. Scattering parameters are then

estimated by Prony model. Those parameters are simulation inputs. Outputs of this simulation are the scattered electric field, the Doppler shift, and the angular tracking error, or glint, all as seen by the radar. The purpose of this research is a recognition, identity method of target, as well as it is a tool for testing stealthy models.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Xuân Tý, *Đặc trưng động máy bay trong trường điện từ*, luận văn cao học, Đại học Bách khoa Tp.HCM, (2004).
- [2]. J.J. Sacchini, A. Romano, and W.M. Steedly, *Evaluation of singer and full-polarization two-dimensional prony techniques applied to radar data*, in 1994 SPIE Proceedings, orlando, FL, vol.2234, Apr.(1994)
- [3]. J.J. Sacchini, *Development of two-dimensional parametric radar signal modeling and estimation techniques with application to target identification*, PhD thesis, The Ohio State University, Columbus, OH, (1992)
- [4]. Lê Tiến Thường, *Ước lượng tham số tín hiệu radar phân giải cao dùng Prony Models*, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh, (1999).
- [5]. J.R.Huynen, *Phenomenological theory of radar tagets*, PhD thesis, Technical University Delft, Druckerij Bronder-offset, Netherlands, (1970).
- [6]. D.L.Mensa, *High resolution radar cross-section imaging*, Norwood, MA: Artech, 1 ed., (1991).
- [7]. B.P.Anderson and J.J.Sacchini, *A comparison of stepped and continous -wave radar imaging algorithms*, in Proceeding of the 1994 NAECON Conference, pp.303-308, IEEE, May (1994).
- [8]. D.L. Hardesty, *An investigation into the application of one and two dimensional parametric signal processing techniques to the extension of radar data*, Master's thesis, Air Force Institue of Technology, (1993)
- [9]. A.Romano, *Application of two-dimensional parametric signal processing techniques to the radar target identification problem*, Master's thesis, Air Force Institue of Technology, (1993)
- [10]. J.D. Pullis, *Three - dimensional inverse synthetic aperture radar imaging*, Master's thesis, Air Force Institute of Technology, (1995)
- [11]. Lê Tiến Thường, *Xử lý số tín hiệu và Wavelets*, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh, (2002)
- [12]. MathWorks, *Matlap user's guide*, Narick, MA, 01760: The MathWorks, inc., (1992).
- [13]. R. Glavacich, *The adaptation of vector algebra to the analysis of rf echoes from multi-point targets*, Tech.Rep. DSTO-TR-XX, Defence Science and Technology Organisation, salisbury, Autralia, May (1996).