LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của cán bộ hướng dẫn. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa được công bố trong bất kì công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng tham khảo đều đã được trích dẫn đầy đủ và theo đúng qui định.

Người cam đoan

Phạm Trọng Hùng

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án này, nghiên cứu sinh đã nhận được nhiều sự giúp đỡ, động viên và đóng góp quý báu từ các cơ quan, tổ chức và cá nhân.

Lời đầu tiên, nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng cảm ơn tới các thầy TSKH. Đào Chí Thành, GS. TSKH. Tatarinov V.N, TS. Nguyễn Mạnh Cường đã tận tình hướng dẫn và giúp đỡ nghiên cứu sinh trong quá trình nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn Phòng sau đại học, Khoa Vô tuyến điện tử - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo điều kiện thuận lợi để nghiên cứu sinh hoàn thành nhiệm vụ. Nghiên cứu sinh cũng xin cảm ơn các thầy, các đồng nghiệp trong Bộ môn Tác chiến điện tử, Bộ môn Ra đa - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong quá trình thực hiện nghiên cứu.

Tiếp theo, nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn các đồng nghiệp tại Viện Công nghệ Điện tử - Liên hiệp các Hội Khoa học và Kỹ thuật Việt Nam đã tạo điều kiện cho nghiên cứu sinh trong các năm làm nghiên cứu sinh.

Nhân dịp này nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn sâu sắc nhất tới những người thân trong gia đình: vợ và hai con đã chia sẻ những khó khăn, cảm thông và đã tiếp thêm nghị lực cho nghiên cứu sinh thực hiện thành công luận án.

MỤC LỤC

| DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU TOÁN HỌCiv |
|--|
| DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮTix |
| DANH MỤC HÌNH VĨxii |
| DANH MỤC BẢNG BIỂUxvi |
| MỞ ĐẦU |
| Chương 1. TỔNG QUAN BÀI TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRÊN MẶT BIỀN SỬ DỤNG RA ĐA PHÂN CỰC VÀ ĐẶT BÀI TOÁN NGHIÊN CỨU9 |
| 1.1. Xu hướng nghiên cứu bài toán phát hiện mục tiêu phản xạ nhỏ trên bề mặt nền. 9 |
| 1.2. Tổng quan bài toán phát hiện mục tiêu sử dụng tham số phân cực 10 |
| 1.2.1.Các tham số phân cực mục tiêu ra đa13 |
| 1.2.2. Thuật toán tách các tham số bất biến phân cực từ MTTX 15 |
| 1.3. Tổng quan các phương pháp phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng tham số phân cực của tín hiệu phản xạ16 |
| 1.3.1. Bài toán phát hiện theo tham số phân cực 16 |
| 1.3.2. Phát hiện mục tiêu sử dụng phép kiểm định tỷ số hợp lý tổng quát phân cực (GLRT)20 |
| 1.3.3. Phát hiện tàu thuyền trên biển bằng bộ lọc Notch nhiễu địa hình phân cực (GP-PNF) [85]21 |
| 1.3.4. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ phân cực DoP [26]. 23 |
| 1.3.5. Phát hiện các mục tiêu nhỏ trên mặt biển sử dụng cửa sổ trượt theo tham số phân cực [88]25 |
| 1.4. Hiệu ứng "Vết" phân cực của mục tiêu hỗn hợp khi đo hệ số elip phân cực K bằng tín hiệu phân cực tròn |
| 1.5. Đặt vấn đề nghiên cứu31 |

| 1.6. Kết luận Chương 1 33 |
|--|
| Chương 2. NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT SỬ DỤNG HỆ SỐ ELIP PHÂN CỰC K CHO BÀI TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRÊN MẶT BIỂN |
| 2.1. Đặc tính thống kê của hệ số elip phân cực <i>K</i> |
| 2.1.1. Độ không đẳng hướng phân cực phức |
| 2.1.2. Hệ số elip phân cực 40 |
| 2.1.3. Phân bố xác suất của hệ số elip phân cực trong cơ sở phân cực tròn41 |
| 2.1.4. Phân bố xác suất của hệ số elip phân cực đối với nhiễu biển 46 |
| 2.2. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực 50 |
| 2.2.1. Lựa chọn tham số phát hiện 50 |
| 2.2.2. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực |
| 2.2.3. Tính toán xây dựng bộ phát hiện hai mức dựa trên hệ số elip phân cực <i>K</i> |
| 2.2.4. Đánh giá xác suất phát hiện đúng mục tiêu theo tham số phân cực K sử dụng tiêu chuẩn Neyman-Pearson |
| 2.3. Kết luận Chương 2 61 |
| Chương 3. ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRÊN MẶT BIẾN SỬ DỤNG ĐỘ LỆCH CHUẦN CỦA THAM SỐ PHÂN CỰC62 |
| 3.1. Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K nhằm nâng cao chất lượng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển |
| 3.1.1. Động lực nghiên cứu62 |
| 3.1.2. Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số <i>K</i> cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển64 |
| 3.1.3. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo hệ số K và σ_K với các mục tiêu khác nhau |

| 3.1.4. Phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số <i>K</i> và σ_K với các mô hình nhiễu biển khác nhau |
|--|
| |
| 3.1.5. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo hệ số <i>K</i> và σ_K khi mục tiêu có hệ số <i>K</i> giống với hệ số <i>K</i> của nhiễu biển |
| 3.2. Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của độ phân cực <i>DoP</i> nhằm nâng cao chất lượng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển |
| 3.2.1. Động lực nghiên cứu 81 |
| 3.2.2. Độ phân cực DoP 82 |
| 3.2.3. Thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ phân cực DoP và σ_{DoP} |
| 3.2.4. Khảo sát đặc trưng chất lượng phát hiện |
| 3.3. Kết luận Chương 3 100 |
| Chương 4. KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG CHẤT LƯỢNG PHÁT HIỆN CÁC MÔ HÌNH MỤC TIÊU RA ĐA TRÊN MẶT BIỂN SỬ DỤNG ĐỘ LỆCH CHUẨN CỦA THAM SỐ PHÂN CỰC101 |
| 4.1. Khảo sát khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa Swerling sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực101 |
| 4.2. Đánh giá và so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực |
| 4.3. So sánh đặc trưng chất lượng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng σ_K và σ_{DoP} |
| 4.4. Kết luận Chương 4 115 |
| KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỀN CỦA LUẬN ÁN116 |
| DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ NGHIÊN CỨU118 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO120 |

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU TOÁN HỌC

| Kí hiệu | Ý nghĩa | Thứ nguyên |
|--|---|------------|
| \overrightarrow{E} | Véc-to điện trường | [V/m] |
| \overrightarrow{H} | Véc-to từ trường | [A/m] |
| E_{X}, E_{Y} | Biên độ các thành phần phân cực trực giao | [V] |
| $\varphi_{_X}, \; \varphi_{_Y}$ | Pha của các thành phần trực giao | [rad] |
| φ_c | Copolarized phase difference – Hiệu pha đồng phân cực | [rad] |
| $arphi_P$ | Pha của tham số Pauli | [rad] |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle arphi_{\scriptscriptstyle C}}$ | Độ lệch chuẩn của hệ số sai pha đồng phân cực | |
| β | Góc hướng phân cực | [rad] |
| Κ | Hệ số elip | |
| rA | Bán trục nhỏ của elip phân cực | |
| r _B | Bán trục lớn của elip phân cực | |
| α | Góc elip phân cực | [rad] |
| и | Biên độ (kích thước elip) | |
| S_0 | Tham số Stock 0 | |
| S_1 | Tham số Stock 1 | |
| S ₂ | Tham số Stock 2 | |
| \vec{S} | Véc-to Stock | |
| $\vec{S}_{_N}$ | Véc-to Stock chuẩn hoá | |
| \vec{S}_{1N} | Véc-to Stock 1 chuẩn hoá | |
| t_T | Véc-tơ mục tiêu | |
| t_P | Véc-tơ nhiễu địa hình | |
| $ec{S}_{_{2N}}$ | Véc-to Stock 2 chuẩn hoá | |

| $ec{S}_{_{3N}}$ | Véc-tơ Stock 3 chuẩn hoá | |
|---|---|---------------------|
| \vec{x} | Véc-to đơn vị trục OX | |
| \vec{y} | Véc-tơ đơn vị trục OY | |
| Z. | Phương truyền sóng OZ | |
| $arphi_X$ | Pha ban đầu kênh X | [rad] |
| $arphi_Y$ | Pha ban đầu kênh Y | [rad] |
| heta | Góc lệch của véc-tơ \vec{E} so với phương ngang | [rad] |
| $E_{_L}$ | Tín hiệu kênh phân cực tròn trái | [V] |
| $E_{\scriptscriptstyle R}$ | Tín hiệu kênh phân cực tròn phải | [V] |
| $\left\ R(heta) \right\ $ | Toán tử quay | |
| $\left\ \boldsymbol{R}(\boldsymbol{	heta}) ight\ ^{-1}$ | Toán tử quay ngược | |
| $m{J}_{_{XY}}$ | Cường độ sóng | [W/m ²] |
| (†) | Liên hợp Hermitean | |
| (*) | Liên hiệp phức | |
| E_{1}, E_{2} | Biên độ tín hiệu các kênh phân cực trực giao | [V] |
| \otimes | Tích vô hướng Kronecker | |
| $F^{\scriptscriptstyle FP}_{jl}$ | Các phần tử của ma trận tương quan | |
| $ec{E}^{s}$ | Trường tán xạ | [V/m] |
| $ec{E}^{\scriptscriptstyle R}$ | Trường bức xạ | [V/m] |
| $F_{_{jl}}^{_{R}}$ | Ma trận tương quan của sóng phát xạ | |
| $\dot{ec{E}}_{I}$ | Véc-tơ điện trường của sóng tới | [V/m] |
| $\dot{ec{E}}_{S}$ | Véc-tơ điện trường của sóng phản xạ | [V/m] |
| \vec{n}_I | Véc-tơ mô tả hướng sóng tới | |
| \vec{n}_S | Véc-tơ mô tả hướng sóng phản xạ | |
| S _{ij} | Các phần tử của ma trận tán xạ | |
| G_{ij} | Ma trận Grawes | |
| | | |

| Trị riêng của ma trận tán xạ | |
|------------------------------|--|
| Pha của kênh phân cực HH | |
| Pha của kênh VV | |
| | |

[rad]

[rad]

[rad]

[rad]

| Véc-to Stock |
|--------------|
| |

 λ_i

 φ_{HH}

 φ_{VV}

|J| Định thức của ma trận J

- Tr(J) Vết của ma trận J
- $C = E(XX^H)$ Ma trận hiệp phương sai
- σ_i Độ lệch chuẩn
- r Hệ số phân cực
- P_D Xác suất phát hiện đúng
- P_{F} Xác suất báo động lầm
- *h* Tỉ số độ lệch chuẩn các kênh phân cực trực giao *R* Hệ số tương quan của hai kênh phân cực trực giao
- m Độ không đẳng hướng phân cực

 \dot{P}^{RL} Tỉ số phân cực tròn

- C_{β} Cos góc β
- S_{β} Sin góc β
- $\dot{\mu}$ Độ không đẳng hướng phân cực phức
- $[\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2]$ Hệ cơ sở phân cực bất kì a_i Tỉ số thành phần xác định/thành phần thăng giáng
- trên các kênh phân cực trực giaobTỉ số tín hiệu tổng cộng trên các kênh phân cựctrực giao
- δ_0 Hiệu pha của các kênh phân cực trực giao đối với thành phần xác định
- W(K) Hàm mật độ xác suất của hệ số elip phân cực K

| I_0 | Hàm Bessel bậc 0 |
|--|---|
| I_1 | Hàm Bessel bậc 1 |
| ΔK | Khoảng phát hiện theo hệ số K |
| K_L | Ngưỡng phát hiện trái theo hệ số elip phân cực K |
| K_{R} | Ngưỡng phát hiện phải theo hệ số elip phân cực K |
| <i>K_{mt}</i> | Hệ số elip phân cực riêng của mục tiêu |
| K_{mt+nb} | Hệ số elip phân cực của mục tiêu cộng nhiễu biển |
| K_{nb} | Hệ số elip phân cực của nhiễu biển |
| $W_{nen}(K)$ | Hàm mật độ xác suất của hệ số <i>K</i> đối với bề mặt nền |
| $W_{vb}(K)$ | Hàm mật đô xác suất của hệ số elip K đối với |
| | nhiễu biển |
| $W_{mt+nb}(K)$ | Hàm mật độ xác suất của hệ số elip K đối với mục |
| | tiêu hỗn hợp |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle K}$ | Độ lệch chuẩn của hệ số K |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle DoP}$ | Độ lệch chuẩn của độ phân cực <i>DoP</i> |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle L}^{\scriptscriptstyle 2}$ | Công suất của nhiễu nền trên kênh phân thu cực |
| | tròn trái |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle R}^2$ | Công suất của nhiễu nền trên kênh phân thu cực |
| | tròn phải |
| A_{Σ} | Biên độ tín hiệu tổng cộng trên hai kênh thu phân |
| | cực tròn trực giao |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle{\Sigma}}^2$ | Phương sai của nhiễu tổng cộng trên hai kênh thu |
| | phân cực tròn trực giao |
| SCR | Tỉ số tín hiệu/nhiễu nền |
| Σ | Ma trận hiệp phương sai phân cực |
| RedR | Reduction ratio – tỷ lệ suy giảm |
| P_C | Công suất nhiễu nền |

| P_T | Công suất tín hiệu mục tiêu |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Н | Entropy |
| р | Tỷ số phân cực |
| $\mu_{\scriptscriptstyle K}$ | Giá trị K trung bình |
| $\mu_{\scriptscriptstyle DoP}$ | Giá trị DoP trung bình |
| | |

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

| Từ viết tắt | Nghĩa Tiếng Anh | Nghĩa Tiếng Việt |
|-------------|---------------------------|------------------------------------|
| AirSAR | Airborne SAR | Hệ thống SAR trên không |
| ALOS | Advanced Land Observing | Vệ tinh giám sát mặt đất tiên tiến |
| | Satellite | |
| ASI | Italian Space Agency | Cơ quan không gian Italia |
| AWGN | Additive White Gaussian | Tạp Gauss trắng cộng tính |
| | Noise | |
| CDPA | Complex Degree of | Độ không đẳng hướng phân cực |
| | Polaziration Anisotropy | phức |
| CFAR | Constant False Arlam Rate | Ôn định xác suất báo động lầm |
| CL | Cicular-Linear | Phân cực tròn-tuyến tính |
| СР | Compact Polarimetric | Phân cực nén |
| CPD | Co-Polarized Phase | Hiệu pha đồng phân cực |
| | Difference | |
| CPRO | Complex Plan of Radar | Mặt phẳng phức của mục tiêu ra |
| | Object | đa |
| CSA | Canadian Aerospace | Cơ quan hàng không vũ trụ |
| | Agency | Canada |
| CUT | Cell under test | Cell phát hiện |
| DCP | Dual Circular Polarimetry | Phân cực tròn kép |
| DoD | Degree of Depolarization | Độ khử cực |
| DoP | Degree of Polarization | Độ phân cực |
| Dual- | Dual Polarimetric SAR | Hệ thống SAR phân cực kép |
| PolSAR | | |
| EMW | Electromagnetic Wave | Sóng điện từ |
| ESA | European Space Agency | Cơ quan hàng không Châu Âu |
| | | |

| ENVISAT- | Enviromental Satellite | SAR tiên tiến của vệ tinh giám sát |
|----------|----------------------------|------------------------------------|
| ASAR | Advance SAR | môi trường |
| Full- | Full Polarimetric SAR | Hệ thống SAR phân cực đầy đủ |
| PolSAR | | |
| GLR | Generalized Likelihood | Tỉ số hợp lý tổng quát |
| | Ratio | |
| GLRT | Generalized Likelihood | Kiểm định tỷ số hợp lý tổng quát |
| | Ratio Test | |
| GP-PNF | Geometrical Perturbation- | Lọc nhiễu địa hình bằng bộ lọc |
| | Polarimetric Notch Filter | Notch phân cực |
| HH | Horizotal - Horizoltal | Phân cực HH |
| HR | High Resolution | Độ phân giải cao |
| HV | Horizotal - Vertical | Phân cực HV |
| ML | Maximum Likelihood | Hợp lý cực đại |
| MLE | Maximum Likelihood | Ước lượng hợp lý cực đại |
| | Estimation | |
| MTC | Multiplying the amplitude | Nhân biên độ hai kênh phân cực |
| | of the Two Channels | |
| PDF | Probability Density | Hàm mật độ xác suất |
| | Function | |
| PolSAR | Polarimetric Synthetic | Ra đa mặt mở tổng hợp phân cực |
| | Aperture Radar | |
| Pol-STD | Polarimetric Standard | Độ lệch chuẩn của tham số phân |
| | Deviation | сџс |
| PRF | Pulse Repetition Frequency | Tần số lặp xung |
| Quad- | Quad-Polarimetric SAR | Hệ thống SAR phân cực bốn |
| PolSAR | | kênh |
| RAA | Relative Average | Biên độ trung bình tương đối |
| | Amplitude | |

| Radar Cross Section | Diện tích phản xạ hiệu dụng |
|----------------------------|--|
| Right hand circular | Phân cực tròn phải |
| polarization | |
| Relative Peak High of | Độ cao đỉnh Doppler tương đối |
| Dopple | |
| Reflection symmetry | Phản xạ đối xứng |
| Relative Vector Entropy of | Véc-to entropy tương đối của |
| Doppler Amplitude | biên độ Doppler |
| Synthetic Aperture Radar | Ra đa mặt mở tổng hợp |
| Signal to Clutter+Noise | Tỷ số tín/nhiễu nền+tạp |
| ratio | |
| Signal to Clutter Ratio | Tỉ số tín/nhiễu nền |
| Signal to Noise Ratio | Tỷ số tín/tạp |
| Sensetivity time control | Điều chỉnh độ nhạy theo thời gian |
| Two-parameter CFAR | CFAR hai tham số |
| Vertical - Horizoltal | Phân cực VH |
| | Ma trận tán xạ |
| | Phân cực tròn phải |
| | Phân cực tròn trái |
| | Radar Cross Section Right hand circular polarization Relative Peak High of Dopple Reflection symmetry Relative Vector Entropy of Doppler Amplitude Synthetic Aperture Radar Signal to Clutter+Noise ratio Signal to Clutter Ratio Signal to Noise Ratio Sensetivity time control Two-parameter CFAR Vertical - Horizoltal |

DANH MỤC HÌNH VĨ

| Hình 1.1. Elip phân cực14 |
|---|
| Hình 1.2. Sơ đồ khối thuật toán cửa sổ trượt [88]27 |
| Hình 1.3. Tham số phân cực và năng lượng của tín hiệu phản xạ từ: [92] 30 |
| Hình 2.1. Sự phụ thuộc của hàm PDF $W(K)$ vào h^2 với $R = 0, \dots, 44$ |
| Hình 2.2. Sự phụ thuộc của hàm PDF $W(K)$ vào b với tham số của nhiễu nền: |
| $R = 0, h = 1$, và tham số mục tiêu $a_1 = 1$ 45 |
| Hình 2.3. Sự phụ thuộc của hàm PDF $W(K)$ vào a_1 với tham số nhiễu nền 45 |
| Hình 2.4. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác |
| định (mục tiêu) với $R = 0$; $a_1 = a_2 = 0$ 46 |
| Hình 2.5. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác |
| định (mục tiêu) với $R = 0,5$; $a_1 = a_2 = 0$ |
| Hình 2.6. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác |
| định (mục tiêu) với $R = 0.8$; $a_1 = a_2 = 0$ |
| Hình 2.7. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác |
| định (mục tiêu) với $R = 0,9$; $a_1 = a_2 = 0$ |
| Hình 2.8. Hàm PDF W(K) đối với nhiễu biển với các hệ số R khác nhau49 |
| Hình 2.9. PDF của $W(K)$ đối với nhiễu biển với $R = 0$, $h^2 = 1$ |
| Hình 2.10. Tín hiệu thu được trên kênh PCTP52 |
| Hình 2.11. Hệ số elip <i>K</i> tính được52 |
| Hình 2.12. Sự khác nhau của hàm PDF của K trong hai trường hợp: 1. Mục tiêu |
| cộng nhiễu biển $W_{nb+mt}(K)$, và 2. Chỉ có nhiễu biển $W_{nb}(K)$ |
| Hình 2.13. Chọn ngưỡng phát hiện theo hệ số elip phân cực <i>K</i> |
| Hình 2.14. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số phân cực $K.54$ |
| Hình 2.15. Mối tương quan giữa ngưỡng phát hiện K_R và P_F cho trước 56 |
| Hình 2.16. Sự phụ thuộc của xác suất phát hiện đúng P_D và đặc tính phân cực |
| của tín hiệu tổng cộng b với P_F cho trước và $a_1 = 0,3$ |

| Hình 2.17. Xác suất phát hiện đúng ứng với xác suất báo động lầm cho trước |
|--|
| và $a_1 = 1$ với các giá trị <i>b</i> khác nhau |
| Hình 2.18. Xác suất phát hiện đúng theo a_1 |
| Hình 2.19. So sánh P_D theo phương pháp của Gromov và phương pháp đề xuất |
| với trường hợp $b = 4, h = 160$ |
| Hình 3.1. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng σ_K |
| Hình 3.2. Lưu đồ thuật toán tính ngưỡng phát hiện theo độ lệch chuẩn K, σ_K^{ng} . 68 |
| Hình 3.3. Hệ số elip phân cực K của nhiễu biển (hình trên) và của mục tiêu |
| cộng nhiễu biển (hình dưới)69 |
| Hình 3.4. Hệ số K trung bình của nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển 70 |
| Hình 3.5. Độ lệch chuẩn của hệ số <i>K</i> với các loại mục tiêu khác nhau |
| Hình 3.6. Phân bố xác suất của hệ số K với trường hợp chỉ có nhiễu biển và |
| mục tiêu cộng nhiễu biển72 |
| Hình 3.7. Đánh giá và so sánh khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử |
| dụng hệ số <i>K</i> và σ_K |
| Hình 3.8. Các mô hình nhiễu biển khác nhau75 |
| Hình 3.9. Hệ số elip K trung bình với các mô hình nhiễu biển khác nhau khi có |
| mục tiêu và không có mục tiêu75 |
| Hình 3.10. Độ lệch chuẩn của hệ số K với các mô hình nhiễu biển khác nhau 76 |
| Hình 3.11. Đặc trưng thống kê của hệ số K với các mô hình nhiễu biển và mục |
| tiêu cộng nhiễu biển khác nhau77 |
| Hình 3.12. Hiệu quả phát hiện mục tiêu theo hệ số K và σ_K với các mô hình |
| nhiễu biển khác nhau78 |
| Hình 3.13. Đặc trưng thống kê của hệ số K đối với nhiễu biển và mục tiêu cộng |
| nhiễu biển |
| Hình 3.14. Hệ số K trung bình của nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển 79 |
| Hình 3.15. σ_K đối với nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển |

| Hình 4.5. Các tham số phân cực mục tiêu, K và DoP1 | 07 |
|---|-----|
| Hình 4.6. Độ lệch chuẩn của tham số phân cực <i>K</i> và <i>DoP</i> 1 | 08 |
| Hình 4.7. Đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu dựa trên σ_{I} | DoP |
| và mô hình mục tiêu Marcum-Swerling 0 [109]1 | 11 |
| Hình 4.8. Đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling | sử |
| dụng σ_K và mô hình Marcum-Swerling 0 [109]1 | 13 |
| Hình 4.9. Đặc trưng chất lượng phát hiện khi sử dụng σ_K và σ_{DoP} | 14 |

DANH MỤC BẢNG BIỀU

| Bảng 1.1. Kết quả đo thực nghiệm hệ số elip phân cực K đối với mặt t | piển và |
|--|---------|
| mục tiêu cộng nhiễu biển bằng thực nghiệm [92] | 31 |
| Bảng 2.1. Tham số mục tiêu | 51 |
| Bảng 2.2. Ngưỡng phát hiện K_L , K_R tương ứng với P_F cho trước | 56 |
| Bảng 3.1. Xác suất phát hiện đúng mục tiêu sử dụng hệ số K và σ_K | 73 |
| Bång 4.1. Tham số mục tiêu | 102 |
| Bảng 4.2. Các tham số phân cực của mục tiêu | 109 |

MỞ ĐẦU

Hiện nay, việc phát hiện mục tiêu có kích thước nhỏ trên mặt biển là rất khó khăn đối với ra đa hàng hải, không phải chỉ bởi vì không có phương pháp hiệu quả để mô hình hóa nhiễu biển mà còn bởi vì tỉ số tín hiệu/nhiễu nền thấp của mục tiêu nhỏ trên mặt biển [1, 2, 3]. Trong những năm gần đây, các mô hình nhiễu biển hay được sử dụng như mô hình logarit chuẩn, mô hình Weibull, hoặc mô hình K. Tuy nhiên, kết quả của các phương pháp trên vẫn chưa phải là tối ưu bởi vì đôi khi không có thông tin tiên nghiệm về các tham số của những mô hình đó. Các nghiên cứu trong công trình [4, 5] chỉ ra rằng nhiễu biển là phi tuyến và không dừng, từ đó một số phương pháp phát hiện mục tiêu nhỏ trên mặt biển được đề xuất như kỹ thuật phân tích trên miền thời gian – tần số [6], kỹ thuật phân tích đa mảnh [7], các phương pháp dựa trên kĩ thuật wavelet [8], các phương pháp sử dụng mạng nơ-ron [9, 10].

Bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển còn khó khăn hơn khi mục tiêu và nhiễu biển gần nhau trên miền tần số Doppler. Khi đó thông tin phân cực được xem như là một giải pháp hiệu quả để tăng khả năng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển. Các công trình nghiên cứu đã chỉ ra rằng thông tin phân cực cũng quan trọng như biên độ, pha và tần số. Đặc biệt khi trạng thái phân cực của hệ thống thu phát trùng với đặc tính phân cực của mục tiêu và không trùng phân cực với nhiễu nền, chất lượng phát hiện mục tiêu sẽ tăng lên rõ rệt.

Ra đa phân cực sử dụng nhiều tham số phát hiện mới, ví dụ như: entropy (*H*), độ phân cực (*DoP*), Span tín hiệu (*SS*), hiệu pha, hệ số elip (τ), góc hướng (φ) v.v. Các tham số phân cực này có đặc trưng khác nhau đối với nhiễu nền và mục tiêu cộng nhiễu nền và điều này có thể là cơ sở để cải thiện thuật toán phát hiện mục tiêu ra đa. Có thể rút ra các tham số phân cực này từ các dạng biểu diễn trạng thái phân cực khác nhau: từ ma trận tán xạ, từ tham số Stock, ma trận hiệp phương sai phân cực v.v.

Thông tin phân cực được sử dụng để làm tăng hiệu quả phát hiện mục tiêu từ những năm 1950 [11]. Ban đầu các nhà nghiên cứu tập trung vào việc lựa chọn trạng thái phân cực tối ưu khi biết trước phân cực của nhiễu nền và của tạp. Một trong các phương pháp lựa chọn trạng thái phân cực tối ưu sử dụng trong thực tế được đề xuất bởi Boerner W. M [12]. Sau đó Novak L. M tiếp tục phát triển ý tưởng này thành trường hợp thực tế hơn khi mục tiêu nằm trên nền nhiễu có phân bố xác định [13]. Mô hình nhiễu phân bố Gauss [14] và mô hình nhiễu phân bố không Gauss [15, 14] được sử dụng để xây dựng các bộ phát hiện phân cực. Để tổng quát hóa hơn các mô hình của tạp và nhiễu nền Pastina D đã sử dụng dữ liệu tập để ước lượng và đánh giá nhiễu nền. Nehorai A đã sử dụng các mô hình nhiễu nền có phân bố Gauss kết hợp trong các ứng dụng khác nhau [16, 17].

Có nhiều lí do dẫn đến việc khó phát hiện các mục tiêu có kích thước nhỏ trên mặt biển. Hai lí do chính là: thứ nhất, các mục tiêu nhỏ như tàu thuyền nhỏ, xuồng, tàu cá hầu hết không được làm từ kim loại và do vật liệu cũng như cấu trúc đơn giản nên rất khó để tạo được phản xạ đủ mạnh giống như các vật thể có các góc phản xạ. Vì vậy tỷ số tín/nhiễu nền SCR (Signal to Clutter Ratio) của chúng tương đối nhỏ, đôi khi còn tương đương với mức tín hiệu phản xạ từ mặt biển do đó sẽ rất khó để phát hiện. Với các SAR phân cực đơn kênh, thậm chí còn không phát hiện mục tiêu và điều này dẫn đến việc bỏ sót khá nhiều mục tiêu [18, 19]. Thứ hai, không kể là mục tiêu bằng kim loại hay không, với số lượng nhỏ điểm ảnh bị chiếm bởi mục tiêu, rất dễ để nhầm đó là do nhiễu lốm đốm và sẽ bị lọc khỏi quá trình phát hiện, đặc biệt là ở vùng tập trung mật độ mục tiêu lớn với các kích thước mục tiêu khác nhau. Ra đa phân cực mang nhiều thông tin trong tín hiệu phản xạ hơn liên quan đến mục tiêu và mặt biển. Nếu có thể xử lý và tham số phân cực trong tín hiệu phản xạ giữa mục tiêu và nhiễu biển thì có thể nâng cao chất lượng phát hiện mục tiêu. Có thể sử dụng các tham số phân cực khác nhau làm tham số phát hiện. Những nghiên cứu đầu tiên sử dụng độ không đẳng hướng phân cực, liên quan đến phân hoạch Cloude-Pottier [20] để phát hiện vết dầu tràn trên mặt biển được công bố bởi Fortuny-Guasch [21]. Việc sử dụng entropy, độ không đẳng hướng và tham số alpha trung bình của phép khai triển Cloude-Pottier để phát hiện các vật thể trên mặt biển được tiếp tục nghiên cứu trong các công trình gần đây của Schuler [22] và Migliaccio [23]. Dựa trên cơ sở dữ liệu từ các hệ thống SAR phân cực kép (dual-pol), các nghiên cứu gần đây đã chứng minh cho tiểm năng sử dụng độ sai pha đồng phân cực CPD (Co-Polarized Phase Difference), tức là ($\varphi_{HH} - \varphi_{VV}$) để tăng chất lượng phát hiện [24, 25]. Reza Shirvany [26] đã chứng minh được tiềm năng trong việc sử dụng độ phân cực *DoP*. Vachon [27] đã đề xuất thuật toán phát hiện tàu trên mặt biển sử dụng dữ liệu ra đa phân cực đầy đủ.

Ngoài ra còn có các phương pháp xử lý phát hiện mục tiêu theo tham số phân cực của các chuyên gia Nga như Logvin A.I [28], Tatarinov V.N [29, 30], Kozlov A.I [31] và nhiều nhà khoa học khác.

Tại Việt Nam, năm 2007, trong nội dung Luận án Tiến sỹ "*Nghiên cứu nâng cao khả năng phát hiện các mục tiêu ra đa bằng phương pháp xử lý phân cực tín hiệu*", [32] tác giả Nguyễn Quốc Ân đề xuất giải pháp phân cực động [33] để nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu ra đa. Giải pháp này có thể tìm được tham số phát hiện ra đa sao cho đạt được xác suất phát hiện đúng cao nhất. Tuy nhiên tác giả chưa thực sự sử dụng tham số phân cực mục tiêu trong bài toán phát hiện ra đa mà chỉ là thay đổi phân cực tín hiệu phát sao cho thu được năng lượng tổng phản xạ về trên các kênh phân cực (thông qua ma trận tán xạ mục tiêu) đạt giá trị cao nhất. Năm 2008, tác giả Đặng Vũ Hồng của luận án tiến sỹ "*Giải bài toán phát hiện tín hiệu ra đa dựa vào dấu hiệu phân cực*" [34] đã sử dụng độ không đẳng hướng phân cực cho bài toán phát hiện, tuy nhiên

trong công trình này tác giả chưa đánh giá cụ thể hiệu quả của phương pháp đề xuất và cũng chưa có những so sánh với các phương pháp trước đó.

Như đã trình bày ở trên, có nhiều phương pháp phát hiện mục tiêu dựa trên tham số phân cực tín hiệu thu, mỗi phương pháp có các ưu nhược điểm riêng. Tham số phân cực mục tiêu là tính chất đặc trưng cho một loại mục tiêu, với các dạng mục tiêu khác nhau thì tính chất phân cực tín hiệu phản xạ về từ các loại mục tiêu đó cũng khác nhau. Đó là cơ sở để phát hiện các mục tiêu nhỏ trên mặt biển sử dụng tham số phân cực.

Tuy nhiên, trong các phương pháp trên chưa sử dụng đến độ lệch chuẩn của tham số phân cực trong bài toán phát hiện mục tiêu trên bề mặt nền. Gần đây năm 2018, Andrea Buono [35] đã phân tích độ lệch chuẩn σ_{φ_c} của tham số Sai pha đồng phân cực (CPD), φ_c để phát hiện vết tràn dầu trên mặt biển. Kết quả cho thấy khi sử dụng tham số σ_{φ_c} có thể phát hiện được vết dầu tràn, trong khi nếu sử dụng pha của tham số Pauli φ_P thì không phát hiện được mục tiêu. Điều này đã cho thấy có thể sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực trong bài toán phát hiện mục tiêu trên bề mặt biển.

Xuất phát từ tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu với mong muốn đóng góp vào việc nâng cao khả năng phát hiện các vật thể nhỏ trên mặt biển, luận án tiến hành nghiên cứu và đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực mục tiêu ra đa. Cụ thể là, luận án sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K và độ lệch chuẩn của độ phân cực *DoP* để phát hiện các mục tiêu trên mặt biển. Đồng thời khảo sát và đánh giá khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa Swerling trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K và độ phân cực *DoP*.

1. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Nghiên cứu các giải pháp nâng cao chất lượng phát hiện các vật thể nhỏ trên mặt biển sử dụng tham số phân cực, cụ thể tập trung vào nghiên cứu các nội dung sau:

- Nghiên cứu sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực nhằm nâng cao chất lượng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển.
- Nghiên cứu khảo sát khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực.
- Nghiên cứu khả năng phát hiện các mục tiêu có tham số phân cực giống với nhiễu biển sử dụng tham số phân cực cho bài toán phát hiện ra đa.

2. Phạm vi nghiên cứu

- Nghiên cứu lý thuyết thống kê phát hiện mục tiêu ra đa trên bề mặt nền sử dụng ra đa phân cực;
- Nghiên cứu bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực.

3. Đối tượng nghiên cứu của luận án

- Nghiên cứu bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực.
- Nghiên cứu nâng cao chất lượng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực.
- Khảo sát và đánh giá khả năng phát hiện các mục tiêu ra đa Swerling trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực.

4. Phương pháp nghiên cứu

 Phân tích, tổng hợp các công trình nghiên cứu về ra đa phân cực trên thế giới, tập trung vào bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực và đặt giới hạn cho bài toán cần nghiên cứu. Sử dụng lý thuyết xác suất và thống kê toán học, đại số tuyến tính để giải bài toán đặt ra. Các chương trình tính toán, khảo sát, mô phỏng sử dụng ngôn ngữ lập trình MATLAB.

5. Đóng góp của luận án

Một số đóng góp chính của luận án có thể được tóm tắt như sau:

- Đề xuất thuật toán mới nâng cao chất lượng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực *K*.
- Đề xuất thuật toán mới nâng cao chất lượng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của độ phân cực *DoP* của mục tiêu ra đa.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học:

Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực làm tham số phát hiện mới cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực có thể nâng cao khả năng phát hiện các vật thể nhỏ trên mặt biển. Ngoài ra khi sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực còn có thể phát hiện được mục tiêu mà có cùng tham số phân cực giống với tham số phân cực của nhiễu biển, điều mà khi chỉ sử dụng tham số phân cực thì không thể phát hiện được.

Kết quả nghiên cứu sẽ bổ sung thêm lý thuyết mới về bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực. Đồng thời đó là tài liệu tham khảo quan trọng trong việc nghiên cứu, phát triển và triển khai các hệ thống ra đa phân cực.

Ý nghĩa thực tiễn:

Các nghiên cứu trong luận án góp phần xây dựng bổ sung thêm các phương pháp xử lý tín hiệu ra đa phân cực nhằm nâng cao khả năng phát hiện các vật thể nhỏ trên mặt biển như tàu nhỏ, xuồng nhỏ, phao với rất nhiều ứng dụng trong thực tế liên quan đến dân sinh và An ninh Quốc phòng, chống buôn lậu, thâm nhập đổ bộ bất ngờ bằng đường biển trong điều kiện thời tiết xấu hoặc trong điều kiện ban đêm.

7. Bố cục luận án

Bố cục luận án được chia thành: phần mở đầu, 4 chương, kết luận và kiến nghị, danh mục các công trình đã công bố, tài liệu tham khảo. Toàn bộ luận án gồm 132 trang, 6 bảng và 63 hình. Danh mục tài liệu tham khảo gồm 112 tài liệu.

Chương 1. Tổng quan bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng ra đa phân cực và đặt bài toán nghiên cứu.

Trình bày tổng quan về ra đa phân cực. Nêu những hướng nghiên cứu chính về ra đa phân cực trên thế giới, những ứng dụng của phép đo phân cực trong các hệ thống viễn thám. Các phương pháp cơ bản khi sử dụng tham số phân cực cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

Phân tích một số công trình nghiên cứu trên thế giới về bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển mới được công bố gần đây. Từ đó đưa ra những đánh giá, nhận xét và các hướng nghiên cứu phát triển của luận án. Xác định hướng và giới hạn nghiên cứu của đề tài cho phù hợp với xu hướng phát triển của kĩ thuật ra đa hiện đại và các nhu cầu thực tế.

Chương 2. Nghiên cứu khảo sát sử dụng hệ số elip phân cực K cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

Trình bày cơ sở toán học về các đặc tính thống kê của tham số phân cực, cụ thể là hệ số elip phân cực K, đối với tín hiệu phản xạ từ nhiễu nền và mục tiêu cộng nhiễu nền. Đánh giá sự ảnh hưởng của các tham số mục tiêu, tham số bề mặt nền lên đặc tính phân bố của hệ số elip phân cực. Giả định hàm phân bố của hệ số elip phân cực. Giả định nàm phân bố của hệ số elip phân cực K đối với nhiễu biển, đối với nhiễu biển cộng mục tiêu. Từ đó đề xuất một phương pháp phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực.

Chương 3. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực mục tiêu ra đa.

Trong chương này nghiên cứu sinh đề xuất hai thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K và độ lệch chuẩn của độ phân cực DoP. Sau đó thực hiện mô phỏng khảo sát các tham số liên quan đến đặc trưng thống kê của hệ số elip phân cực K và của DoP trong trường hợp chỉ có nhiễu biển và trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển. Đặc biệt chú ý đến sự khác biệt về độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K và độ phân cực DoP trong trường hợp có mục tiêu và trường hợp không có mục tiêu trên mặt biển. Tiếp theo là khảo sát và so sánh hiệu quả phát hiện mục tiêu khi sử dụng tham số phát hiện là hệ số K hoặc DoP với độ lệch chuẩn của các tham số phân cực đó.

Chương 4. Khảo sát đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực

Trong chương này nghiên cứu sinh thực hiện việc khảo sát và đánh giá khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa Swerling trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số K và độ lệch chuẩn của DoP. Sau đó so sánh hiệu quả phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K và độ lệch chuẩn của độ phân cực DoP.

Chương 1

TỔNG QUAN BÀI TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRÊN MẶT BIẾN SỬ DỤNG RA ĐA PHÂN CỰC VÀ ĐẶT BÀI TOÁN NGHIÊN CỨU

Nội dung Chương 1 trình bày tổng quan về bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng tham số phân cực của tín hiệu phản xạ từ mục tiêu và nghiên cứu một số phương pháp phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng ra đa phân cực. Trên cơ sở nhận xét những ưu nhược điểm của các phương pháp hiện nay và phân tích các yêu cầu thực tế, từ đó xác định hướng nghiên cứu của luận án.

1.1. Xu hướng nghiên cứu bài toán phát hiện mục tiêu phản xạ nhỏ trên bề mặt nền

Tìm hiểu các nghiên cứu [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44] trong bài toán phát hiện mục tiêu có phản xạ nhỏ trong điều kiện nhiễu phức tạp, có thể thấy một số hướng phát triển sau:

 Sử dụng tín hiệu công suất lớn trong các đài ra đa dải rộng và dải siêu rộng (phổ tín hiệu từ 0.1 đến 10 GHz);

 Tích hợp đài ra đa giám sát và phát hiện với các hệ thống quan sát quang học, hồng ngoại và cực tím;

 Nghiên cứu các phương pháp hiện đại hơn mô phỏng toán học các đặc tính phản xạ của mục tiêu ra đa có cấu trúc không gian phức tạp;

 Nghiên cứu các phương pháp tạo và xử lý tín hiệu số, phát triển các thuật toán nhận dạng nâng cao;

Sử dụng ra đa mặt mở tổng hợp.

Như vậy, xu hướng phát triển chung của các hệ thống ra đa là ứng dụng các thuật toán xử lý thông tin, khai thác triệt để thông tin trong tín hiệu ra đa, chuyển sang sử dụng các phương pháp xử lý số thông minh, các hệ thống phức hợp trong các dải tần khác nhau, kết hợp với các hệ thống quang học và dải gần quang học. Nhờ có sự phát triển của công nghệ thông tin mà giá thành các sản phẩm của hệ thống ra đa giảm đi, giải quyết được bài toán xử lý thông tin ra đa theo thời gian thực và nâng cao độ tin cậy của hệ thống.

Ví dụ, việc xử lý phát hiện mục tiêu bằng thuật toán Wavelet [45] với nhiều ưu điểm trong bài toán phát hiện các mục tiêu có kích thước bé trên bề mặt nền. Trong công trình [46], tác giả đã sử dụng thuật toán Inter-frame difference để phân tích tính chất chuyển động của mục tiêu trên nhiều ảnh khác nhau trên cơ sở sai lệch độ xám tuyệt đối của hai ảnh khác nhau. Từ thuật toán này có thể xác định được sự chuyển động của mục tiêu.

Trong các phương pháp của ra đa truyền thống cũng đã sử dụng nhiều thuật toán phát hiện mục tiêu. Trong công trình [47], tác giả đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng 3 tham số của nhiễu biển và mục tiêu gồm: biên độ trung bình RAA (Relative Average Amplitude), độ cao đỉnh Doppler tương đối RPH (Relative Peak High of Dopple), Véc-tơ entropy tương đối của biên độ Doppler RVE (Relative Vector Entropy of Doppler Amplitude). Dựa trên các tham số đo được có thể phân biệt được mục tiêu và nhiễu biển và đưa ra quyết định phát hiện mục tiêu. Các phương pháp phát hiện mục tiêu nhỏ sử dụng ra đa phân giải cao HR (High Resolution) được trình bày trong [48, 49].

1.2. Tổng quan bài toán phát hiện mục tiêu sử dụng tham số phân cực

Các thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng tham số phân cực được chia thành hai loại: giải pháp thứ nhất là sử dụng mô hình thống kê của nhiễu nền và mục tiêu cộng nhiễu nền. Có thể sử dụng mô hình Gauss hoặc không Gauss và sử dụng tiêu chuẩn Neyman-Pearson để thực hiện bài toán phát hiện. Giải pháp thứ hai sử dụng sự mô tả tham số của sóng phản xạ. Các thuật toán phát hiện dựa trên mô hình hồi qui các đặc tính phân cực của các thăng giáng từ nhiễu nền. Thuật toán phân cực ảo Poelman [50, 51, 52, 53, 54] và các mô hình tự hồi qui [55] là một phần của dạng giải pháp thứ hai này.

Trong bài toán phát hiện mục tiêu theo tham số phân cực, có thể sử dụng các hệ thống ra đa mặt đất xử lý phân cực hoặc phát hiện mục tiêu thông qua xử lý ảnh ra đa phân cực như hệ thống ra đa mặt mở tổng hợp phân cực PolSAR, ra đa mặt mở tổng hợp giao thoa phân cực PolInSAR. Việc ứng dung PolSAR mở ra các cơ hôi mới cho bài toán phát hiện các mục tiêu trên mặt biển. Có hai dạng phương pháp phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng PolSAR. Đầu tiên là phương pháp phân hoạch mục tiêu phân cực được dùng để phân biệt tàu bè trên mặt biển. Tác giả Wang C đã rút ra trị riêng nhỏ nhất của ma trận tương quan T bằng phân hoạch Cloud và sử dụng tính đồng nhất cục bộ của trị riêng để phát hiện mục tiêu trên mặt biển trong công trình [56]. Tác giả Sigumoto M của công trình [57] đã phân tích sự khác biệt về cơ chế tán xạ giữa mục tiêu và nhiễu biển sau đó sử dụng lý thuyết phân hoạch Yamagachi và phương pháp CFAR để phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Tác giả Xi. Y đã phát triển phương pháp phân hoạch bốn thành phần dựa trên lí thuyết phân hoạch Yamaguchi và phương pháp CFAR để xây dựng bộ phát hiện mới sử dụng các thành phần đó để phát hiện tàu thuyền trong công trình [58]. Tác giả Marino A đã phát triển bộ lọc Notch phân cực để phát hiện tàu dựa trên mối tương quan giữa hai véctơ tán xạ [59, 18]. Bằng cách phân tích sự khác nhau trong tín hiệu phản xạ giữa mục tiêu và mặt biển, một số bộ phát hiện có khả năng tặng tỉ số tín/nhiễu nền SCR (Signal to Clutter Ratio) đã được xây dựng khi sử dụng các đặc điểm phân cực. Có một số nghiên cứu liên quan đến phương pháp này đã được công bố. Ví dụ, tác giả Jian Y đã xây dựng hàm mục tiêu bằng cách kết hợp các tham số đồng dạng và năng lượng và giải quyết bài toán tối ưu tổng quát nhằm tăng cường độ tương phản phân cực để đưa ra bộ phát hiện có khả năng tăng tỉ số SCR, sau đó việc phát hiện sẽ được thực hiện bằng phương pháp CFAR [60]. Shirvany R đã sử dụng độ phân cực DoP của dữ liệu phân cực nén để tăng tỉ số SCR và phát hiện mục tiêu tàu thuyền [61]. Tác giả Touzi R xây dựng tỉ số DoP tối ưu bằng cách sử dụng các đặc điểm tán xạ của ra đa và phương pháp này cho kết quả tốt khi phát hiện hiệu quả các loại mục tiêu tàu thuyền không ổn định [62]. Mặt khác một số bộ phát hiện có khả năng phân biệt được mục tiêu và mặt biển với mức ngưỡng 0 cũng được xây dựng sử dụng các đặc điểm phân cực. Với các bộ phát hiện này, những điểm ảnh (pixel) mà có giá trị lớn hơn 0 được xem như có mục tiêu, còn những điểm ảnh có giá trị nhỏ hơn 0 được xem như là mặt biển [63].

Trong thực tế, có nhiều phương pháp phát hiện tàu thuyền sử dụng ra đa hoặc ảnh phân cực từ ra đa mặt mở tổng hợp SAR, tuy nhiên các phương pháp này cũng chủ yếu tập trung vào việc phát hiện tàu bè thông thường. Trong khi đó, việc phát hiện các loại tàu nhỏ, mục tiêu nhỏ đặc biệt là các tàu không phải bằng kim loại và các loại mục tiêu nhỏ phản xạ yếu khác thì ít được nghiên cứu hơn. Theo như nghiên cứu của Marino A, tác giả chỉ ra rằng rất khó để phát hiện các thuyền đánh cá không phải kim loại nhỏ trên ảnh SAR [59, 18]. Thậm chí với cùng một cấu trúc, kích thước và các tham số khác thì diện tích phản xạ hiệu dụng (RCS – Radar Cross Section) của các loại tàu gỗ cũng nhỏ hơn nhiều so với các tàu kim loại [64]. Tác giả Stastny J đã làm thực nghiệm phát hiện tàu gỗ với kích thước từ 6 đến 25 m bằng ảnh SAR và thấy rằng trong chế độ ảnh siêu min của RADARSAT – 2 với đô phân giải là 3 m thì cũng không thể phát hiện chắc chắn mục tiêu và thậm chí đôi khi còn không phát hiện được mục tiêu [19]. Trong các nghiên cứu phát hiện mục tiêu nhỏ trên mặt biển bằng ảnh SAR, tác giả Arnaud A đề xuất phương pháp phát hiện các mục tiêu nhỏ trên mặt biển sử dụng đồ thị tương quan của hàm giao thoa pha [65], trong khi tacs giả Tello M đề xuất giải pháp dựa trên biến đổi wavelet [66] còn Ouchi K thì phát triển phương pháp dựa trên mối tương quan giữa các ảnh [67]. Trên thực tế cả phương pháp biến đổi wavelet và phương pháp xử lý tương quan ảnh đều cần đến khai triển theo cả thời gian-tần số và điều này sẽ làm giảm độ phân giải của ảnh và làm giảm cường độ tín hiệu từ các mục tiêu nhỏ do phải xử lý với một số lượng điểm ảnh (pixel) ít hơn và tương đương với việc là càng khó phát hiện mục tiêu hơn. Tác giả Gao G đề xuất phương pháp phát hiện mục tiêu sử dụng bộ lọc Notch phân cực và CFAR trong môi trường nhiễu biển không đồng nhất, sau đó mở rộng thành chế độ phát hiện SAR giao thoa theo hướng dọc hai kênh (ATI-SAR). Các phương pháp này có thể phát hiện được các mục tiêu có kích thước nhỏ trên mặt biển [68, 69]. Tuy nhiên hiện nay không có dữ liệu vệ tinh của ATI- SAR hai kênh cho mục đích giám sát tàu thuyền. Gần đây cũng có một số thuật toán dựa trên mạng nơ-ron [70, 71], tuy nhiên các phương pháp này cần có sự hỗ trợ về cơ sở dữ liệu lớn và thuật toán cũng phức tạp nên cần phải có yêu cầu cao về hệ thống phần cứng.

1.2.1. Các tham số phân cực mục tiêu ra đa

Thông tin về tính chất phân cực mục tiêu ra đa nằm trong tín hiệu phản xạ từ mục tiêu. Nhìn chung, mục tiêu có thể nằm trên bề mặt nền dàn trải hoặc nằm trong các đối tượng phân bố không gian. Do đó, tín hiệu phản xạ từ mục tiêu, ngoài những thông tin có ích còn chứa cả thông tin về bề mặt nền (khối) xung quanh mà gây khó khăn cho quá trình phát hiện. Như vậy cần đặt ra bài toán tách thông tin về mục tiêu từ tín hiệu phản xạ tổng cộng này.

Có nhiều phương pháp liên quan nhau dùng để mô tả các tham số phân cực [29]: tham số hình học, tham số Stock, véc-tơ Jones, tỷ số phân cực trong các cơ sở phân cực khác nhau, các phương pháp mô tả phân cực sóng điện từ ở các dạng mặt phẳng phức khác nhau và hình cầu phân cực Poincare. Tất cả các phương pháp mô tả tham số phân cực đều liên quan chặt chẽ với nhau xuất phát từ khái niệm elip phân cực (Hình 1.1), trong đó cấu trúc hình học của nó liên quan đến các tỷ số biên độ-pha của các thành phần phân cực trực giao, được cho trong hệ tọa độ mục tiêu ra đa.



Hình 1.1. Elip phân cực

Các tham số của elip phân cực gồm:

- Hướng trong không gian (xác định bởi hướng lan truyền sóng điện từ);
- Hướng của hệ tọa độ riêng (góc β), được tạo bởi các bán trục ứng với hệ tọa độ chuẩn và thường liên quan đến bộ chiếu xạ anten ra đa;
- Hình dạng (elip, $tg\alpha = \frac{r_B}{r_A}$).

Tính chất mục tiêu ra đa được mô tả thông qua ma trận tán xạ (MTTX), có dạng trùng với ma trận Jones. Ma trận Jones lại liên quan với ma trận Mueller [72] bằng biến đổi ma trận tương quan của sóng phân cực phẳng một phần. Ma trận Mueller liên quan đến sóng tới và sóng phản xạ từ mục tiêu ra đa:

$$\vec{S}_{px} = \|\boldsymbol{M}\|\vec{S}_{toi} \tag{1.1}$$

trong đó \vec{S}_{px} , \vec{S}_{toi} - là véc-tơ Stock của sóng phản xạ và sóng tới;||M|| là ma trận Mueller (4x4).

MTTX liên quan đến các thành phần trực giao của sóng tới và sóng phản xạ và được biểu diễn ở dạng véc-tơ phức hai chiều:

$$\vec{E}_{px} = \left\| \dot{S} \right\| \vec{E}_{toi} \tag{1.2}$$

trong đó $\vec{E}_{px} = \left\| \frac{\dot{E}_x^{px}}{\dot{E}_y^{px}} \right\|, \vec{E}_{toi} = \left\| \frac{\dot{E}_x^{toi}}{\dot{E}_y^{toi}} \right\|$ - là véc-to Jones của sóng phản xạ và sóng tới; $\left\| \dot{S} \right\| = \left\| \frac{\dot{s}_{11}}{\dot{s}_{21}} \frac{\dot{s}_{12}}{\dot{s}_{21}} \right\|$ - là MTTX phức của mục tiêu ra đa.

Với trường hợp ra đa tích cực một vị trí thì $s_{12}=s_{21}$. Khi đó MTTX sẽ mang toàn bộ thông tin về mục tiêu ra đa. Tuy nhiên, các tham số của mục tiêu luôn thay đổi theo thời gian, do đó hiệu quả sử dụng MTTX phụ thuộc vào tính ổn định của nó. Với trường mục tín hiệu giả đơn sắc, MTTX được bảo toàn như thể mục tiêu ổn định. Mặc dù vậy việc mô tả tính chất mục tiêu ra đa bằng các tham số của MTTX trong thực tế lại gặp khó khăn do sự phụ thuộc của chúng vào môi trường xung quanh và do sự chuyển động của mục tiêu. Một cách khác hiệu quả hơn là sử dụng các tham số bất biến của MTTX do chúng không phụ thuộc vào hướng tương hỗ giữa cơ sở phân cực riêng mục tiêu ra đa với hệ tọa độ liên quan với đài ra đa.

1.2.2. Thuật toán tách các tham số bất biến phân cực từ MTTX

Một trong các nghiên cứu đầu tiên sử dụng MTTX là của Sinclair. Tác giả đã chứng minh được rằng mục tiêu làm thay đổi trạng thái phân cực tín hiệu ra đa và mô tả các biến đổi này bằng MTTX (2x2) của mục tiêu ổn định. Nghiên cứu của Sinclair G được tiếp tục bởi Ramsey V, Kennaugh E, Deschamps G và Copeland J.

Để tách một tham số phân cực nào đó đặc trưng cho tính chất của mục tiêu ra đa và có thể đo đạc được trực tiếp và hiển thị trên màn hình ra đa thì cần phải giải quyết bài toán khai triển MTTX mục tiêu ra đa. Với các mục tiêu có cấu trúc đối xứng xoay đơn giản (mô hình hai chấn tử trực giao, góc phản xạ hai mặt, mục tiêu hình cầu, góc phản xạ ba mặt và đĩa kim loại phẳng) có thể chuyển đổi MTTX thành dạng đường chéo đối xứng ($s_{12}=s_{21}$) bằng biến đổi đơn giản, đảm bảo tính đối xứng của MTTX với mục tiêu là để xác định các trị riêng.

Thuật toán chéo hóa MTTX không phải là cách duy nhất để khai thác MTTX của mục tiêu bất kì, đặc trưng bởi 3 số phức tuy nhiên các mục tiêu xoay có thể được tính xấp xỉ giống với nhiều dạng mục tiêu thực tế. Có thể lưu ý một số ưu điểm nhất định của phương pháp này, bao gồm tính đơn giản và cũng đủ để xác định tính chất của mục tiêu ra đa trong hầu hết các tình huống giám sát ra đa.

1.3. Tổng quan các phương pháp phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng tham số phân cực của tín hiệu phản xạ

1.3.1. Bài toán phát hiện theo tham số phân cực

Khi mục tiêu nằm trên mặt biển và được chiếu xạ bởi ra đa thì các thành phần của tín hiệu phản xạ sẽ chứa thông tin của cả mục tiêu lẫn mặt biển. Nếu chỉ quan tâm đến việc có hay không mục tiêu trên mặt biển thì tín hiệu phản xạ từ mặt biển được xem như là tín hiệu nhiễu và cần phải loại bỏ. Tuy nhiên, điều này sẽ rất khó khăn bởi vì ta không biết chính xác về nhiễu do bản chất ngẫu nhiên của nhiễu biển. Bài toán này được giải quyết bằng phương pháp thống kê để xác định có hay không mục tiêu nằm trên mặt biển.

Nhiễu biển là những tín hiệu phản xạ không mong muốn đến ra đa. Thông thường các tín hiệu phản xạ từ các đối tượng tự nhiên hoặc nhân tạo sẽ tác động giống như là các mục tiêu ngẫu nhiên. Khi ra đa được sử dụng cho mục đích cụ thể trong quân sự thì chỉ cần quan tâm đến tín hiệu phản xạ từ các mục tiêu như các xe vũ trang, máy móc, máy bay không người lái, sự di chuyển quân thay vì các chướng vật khác. Nhiễu biển là tín hiệu không mong muốn do phản xạ từ ngọn sóng, do sự xáo động của mặt biển, những yếu tố này chịu tác động của điều kiện môi trường như trạng thái biển, tốc độ gió, độ cao sóng, dòng chảy v.v. và các tham số của ra đa như góc nhìn, độ phân giải, tần số v.v. Do có gió

và sóng không dừng, nhiễu biển thường có phổ Doppler dàn trải. Nhiễu biển là các đỉnh nhọn và có công suất lớn ở điều kiện biển sóng mạnh. Do tín hiệu phản xạ mạnh nên trên màn hình ra đa sẽ xuất hiện các đốm sáng, làm mờ hoặc che lấp mục tiêu thật. Như vậy bài toán phát hiện mục tiêu nhỏ với RCS thấp nằm trong nhiễu biển là một thách thức trong xử lý tín hiệu ra đa. Bài toán này đặc biệt quan trọng trong An ninh Quốc phòng, viễn thám và nhiệm vụ giám sát bờ biển với nhiều mục đích như: nhận dạng các thuyền nhỏ, kính tiềm vọng của tàu ngầm, máy bay không người lái tốc độ chậm và tên lửa, phát hiện vết tràn dầu, các tảng băng trôi, các tàu đánh cá trái phép v.v.

Kỹ thuật phát hiện mục tiêu trên nền nhiễu biển truyền thống dựa trên việc phân tích thống kê với các hàm mật độ xác suất. Do phân bố của nhiễu biển là Non-Gauss nên người ta hay sử dụng các phân bố Rayleigh, Weibull, log-normal hoặc phân bố *K* để phân tích nhiễu biển.

Để sử dụng phân cực của tín hiệu ra đa trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển cần phải nghiên cứu mô hình thống kê phân cực của tín hiệu phản xạ đối với cả nhiễu nền lẫn mục tiêu. Mô hình nhiễu nền bao gồm một số lượng lớn lưỡng cực định hướng, phân bố ngẫu nhiên và có tính dừng [73]. Khi một diện tích phân biệt của nhiễu nền được chiếu xạ bởi ra đa thì các thành phần I, Q của tín hiệu phản xạ có thể xem như là quá trình ngẫu nhiên Gauss kỳ vọng 0. Mục tiêu không có dạng lưỡng cực mà có tán xạ chẵn hoặc lẻ (đĩa phẳng, góc phản xạ hai mặt, góc phản xạ ba mặt). Mỗi dạng mục tiêu ứng với một MTTX và đảm bảo rằng khi sóng chiếu xạ có phân cực tròn thì sóng phản xạ cũng có phân cực tròn.

Tóm lại, mô hình thống kê phân cực của nhiễu nền và của mục tiêu được xây dựng dựa trên các tín hiệu phản xạ ra đa phụ thuộc về phân cực và bao gồm hai phân cực trực giao. Trong đó, các thành phần I, Q của mỗi phân cực trực giao đều là quá trình ngẫu nhiên Gauss với kỳ vọng 0.

Các phương pháp nghiên cứu bộ phát hiện phân cực đều dựa trên phương pháp thống kê phát hiện sử dụng tổ hợp của các thành phần của MTTX. Như vậy nhiệm vụ chính là tính các thành phần của MTTX theo giá trị trung bình của các mẫu hữu hạn. Các phần tử của MTTX được tính theo biểu thức:

$$x_{0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[x_{h}^{2}(iT_{s}) + y_{h}^{2}(iT_{s}) + x_{v}^{2}(iT_{s}) + y_{v}^{2}(iT_{s}) \right]$$

$$x_{1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[x_{h}^{2}(iT_{s}) + y_{h}^{2}(iT_{s}) - x_{v}^{2}(iT_{s}) - y_{v}^{2}(iT_{s}) \right]$$

$$x_{2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[x_{h}(iT_{s})x_{v}(iT_{s}) + y_{h}(iT_{s})y_{v}(iT_{s}) \right]$$

$$x_{3} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[x_{h}(iT_{s})y_{v}(iT_{s}) + x_{v}(iT_{s})y_{h}(iT_{s}) \right]$$
(1.3)

trong đó T_s là chu kì lấy mẫu; N là số mẫu trong một chu kì sử dụng để tính tham số Stock. Theo [74] hàm mật độ xác suất PDF (Probability Density Function) kết hợp xây dựng từ các tham số Stock có dạng:

$$p_{s}(x_{0}, x_{1}, x_{2}, x_{3}) = \frac{2N^{2N}}{\pi\Gamma(N)\Gamma(N-1)} \frac{\left[x_{0}^{2} - (x_{1}^{2} + x_{2}^{2} + x_{3}^{2})\right]^{N-2}}{\left[s_{0}^{2} - (s_{1}^{2} + s_{2}^{2} + s_{3}^{2})\right]^{N}}$$

$$exp\left\{-2N\frac{\left[x_{0}s_{0} - (x_{1}s_{1} + x_{2}s_{2} + x_{3}s_{3})\right]}{\left[s_{0}^{2} - (s_{1}^{2} + s_{2}^{2} + s_{3}^{2})\right]}\right\}, x_{0}^{2} > x_{1}^{2} + x_{2}^{2} + x_{3}^{2}$$
(1.4)

trong đó, *N* là số mẫu độc lập dùng để tính các tham số Stock s_i , i = 0,1,2,3 là các tham số Stock thực (nhận được khi số mẫu dùng để tính các tham số Stock tiến đến vô cùng) và x_0, x_1, x_2, x_3 là các tham số Stock đo được.

Có thể xây dựng các mô hình thống kê phát hiện theo các tham số phân cực khác nhau dựa trên bộ tham số Stock. Một trong các thống kê phát hiện đầu tiên là kiểm định tỉ số hợp lý LR (likelihood ratio). LR được định nghĩa bằng tỉ số của hàm mật độ xác suất kết hợp từ các tham số Stock khi có cả mục tiêu và nhiễu nền trên hàm mật độ xác suất PDF kết hợp khi chỉ có nhiễu nền. Tỉ số hợp lý có dạng [75]:
$$L = \frac{P(x_0, x_1, x_2, x_3 \mid mt + n)}{P(x_0, x_1, x_2, x_3 \mid n)}$$
(1.5)

Thế các giá trị x_i của biểu thức (1.3) vào (1.4) khi đó biểu thức (1.5) có dạng:

$$L = (1+2\alpha)^{-N} exp\left[\frac{2N\alpha}{s_0^C (1+2\alpha)}(x_0 + x_3)\right]$$
(1.6)

trong đó: α là tỉ số tín hiệu/nhiễu nền s_0^T / s_0^C . Kiểm định tỉ số hợp lý là kết quả so sánh tỉ số hợp lý này với ngưỡng $\gamma': L \ge \gamma'$.

Ngoài ra còn có mô hình thống kê phát hiện sử dụng công suất tổng x_0 và tỉ số công suất tín hiệu bị phân cực trên tổng công suất $P = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2}/x_0$ [76]. Thống kê phát hiện *P* còn được gọi là độ phân cực. Một thống kê phát hiện khác liên quan đến cấu trúc hình học là $W = x_3/x_0$. *W* chỉ ra mối tương quan của góc elip phân cực trên mặt cầu Poincare [72].

Như đã thảo luận ở trên, việc biết được hàm mật độ xác suất có điều kiện của các tham số Stock về mặt lý thuyết cho phép biến đổi được thành các hàm mật độ xác suất ứng với mỗi dạng thống kê phát hiện khác nhau. Có thể tham khảo một số hàm PDF đối với từng tham số thống kê phát hiện trong [75].

Một trong những hướng nghiên cứu chính trong bài toán giám sát các mục tiêu trên mặt biển là phát hiện các mục tiêu nhân tạo (tàu, phao, dầu tràn..). Việc phát hiện các mục tiêu này rất cần thiết cả trong dân sự lẫn quân sự. Có nhiều công trình nghiên cứu về bài toán phát hiện mục tiêu nhân tạo trên mặt biển, đặc biệt là phát hiện tàu sử dụng ảnh ra đa phân cực PolSAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar) dựa trên các hệ thống phân cực kép (Dual-PolSAR) và phân cực toàn phần (Full-PolSAR) như ENVISAT ASAR, RADARSAT-2, ALOS-PALSAR và TerraSAR-X [27, 64, 77, 78].

Một số phương pháp phát hiện mục tiêu dựa trên sự khác biệt về cường độ của tín hiệu phản xạ từ mục tiêu và vùng bề mặt xung quanh sử dụng ra đa

phân cực đơn kênh được trình bày trong các công trình [79, 80, 81]. Tuy nhiên các phương pháp phân cực đơn kênh không phản ánh hết tính chất tương phản của tán xạ từ mục tiêu và nước, do đó độ tương phản của mục tiêu/mặt biển sẽ không cao nếu chỉ sử dụng một cặp anten thu-phát đơn kênh phân cực. Có nhiều tham số phân cực có thể được sử dụng làm tham số phát hiện cho bài toán ra đa. Trong phần này nghiên cứu sinh chỉ trình bày một vài tham số phân cực hay được sử dụng cho bài toán phát hiện mục tiêu sử dụng ra đa phân cực.

1.3.2. Phát hiện mục tiêu sử dụng phép kiểm định tỷ số hợp lý tổng quát phân cực (GLRT)

Pastina D đề xuất giải pháp bộ phát hiện sử dụng kiểm định tỷ số hợp lý phân cực tổng quát (GLRT) [82, 83]. Như đã biết, kiểm định phát hiện tối ưu là sự so sánh tỷ số của khả năng tín hiệu thu được ứng với giả thiết H_1 trên khả năng tín hiệu ứng với giả thiết H_0 so với ngưỡng phát hiện. Tuy nhiên hàm hợp lý này phụ thuộc vào nhiều tham số khác như ma trận tương quan của nền R, hệ số của véc-tơ tín hiệu $a_1, ..., a_L$, do đó các bộ phát hiện này khó được sử dụng trong thực tế. Để có thể xây dựng được bộ thu trong thực tế thì các hàm hợp lý tổng quát với hai giả thiết cần được tính đến và một trong các giải pháp được Kelly E [84] đề xuất. Bản chất của bài toàn là làm cực đại hoá hàm hợp lý theo các tham số chưa biết, điều này tương đương với việc thay các tham số chưa biết bằng các ước lượng hợp lý cực đại. Khi đó cấu trúc bộ kiểm định tỷ số hợp lý tổng quát có dạng:

$$\frac{\max_{R,a_{HH},a_{VV},a_{HV}}\left\{p_{x}(x/H_{1}).p_{Y}(Y)\right\}}{\max_{R}\left\{p_{x}(x/H_{0}).p_{Y}(Y)\right\}} \underset{H_{0}}{\overset{R}{\rightarrow}} \lambda$$
(1.7)

trong đó λ là ngưỡng phát hiện. Bằng cách thực hiện lấy tổng tương tự như [83], ta được:

$$\eta = \frac{x^{H} R^{-1} \Sigma (\Sigma^{H} R^{-1} \Sigma)^{-1} \Sigma^{H} R^{-1} x}{K + x^{H} R^{-1} x} \sum_{H_{0}}^{+} \eta_{0}$$
(1.8)

trong đó $\hat{R} = 1/KYY^{H}$ là ma trận hiệp phương sai đo được và $\eta_{0} = 1 - \lambda^{-1/(K+1)}$. Bộ phát hiện này là tổng hợp các kết quả trong [84] với L = 1 và kết quả trong [83] với L = 2 để xây dựng trường hợp tổng quát (L là số lượng hệ số của véc-tơ $a = [a_{1},...a_{L}]^{T}$), phù hợp hơn trong ứng dụng thực tế cho việc phát hiện mục tiêu đối với các hệ thống ra đa phân cực tương can. Thậm chí với trường hợp L kênh, đặc tính thống kê của bộ phát hiện theo công thức (1.8) cũng không phụ thuộc vào hệ số tỉ lệ trong tín hiệu thu được. Như vậy nó có tính chất của bộ CFAR đối với nhiễu Gauss, khi đó biểu thức tính xác suất báo động lầm có dạng:

$$P_{F} = \frac{(1-\eta_{0})^{K-LM+1}}{(K-LM)!} \sum_{j=1}^{L} \frac{(K-LM+L-j)!\eta_{0}^{L-j}}{(L-j)!}$$
(1.9)

Phương pháp GLRT đã tăng đáng kể các thông tin phân cực của mục tiêu. Khi sử dụng ra đa phân cực nhiều kênh có thể tăng đáng kể việc phát hiện tương quan mục tiêu ra đa. Đặc biệt khi có thêm kênh HV vào hai kênh cùng phân cực HH, VV đã tăng chất lượng phát hiện so với việc chỉ sử dụng đơn kênh HH, VV. Điều này đặc biệt đúng đối với các mục tiêu nhân tạo có thành phần phân cực chéo cao hơn nhiễu nền. Khi mục tiêu có thành phần phân cực chéo tấp hơn nhiễu nền hiệu quả có thể giảm đi nhưng suy hao thích nghi sẽ thấp. Trong mọi trường hợp đặc tính của bộ CFAR không đổi theo nhiễu nền Gauss.

1.3.3. Phát hiện tàu thuyền trên biển bằng bộ lọc Notch nhiễu địa hình phân cực (GP-PNF) [85]

Bộ lọc GP-PNF (Geometrical Perturbation-Polarimetric Notch Filter) được đề xuất bởi Marino A [18] và là một dạng thích nghi của bộ lọc nhiễu địa hình GPF (Geometrical Perturbation Filter) làm việc như bộ lọc Notch trong không gian phân cực. GP-PNF có thể phát hiện hiệu quả các mục tiêu trên mặt biển bằng cách cô lập và loại bỏ các phản xạ từ mặt biển trong không gian phân cực của ma trận hiệp phương sai.

Trong GP-PNF, trước tiên cần xây dựng một véc-tơ đặc điểm 6 chiều [86]:

$$\underline{t} = Trace\left(\left[C_{quad-pol}\right]\Psi_{q}\right) = \left[t_{1}, t_{2}, t_{3}, t_{4}, t_{5}, t_{6}\right]^{T}$$

$$= \left[\left\langle\left|k_{1}\right|^{2}\right\rangle, \left\langle\left|k_{2}\right|^{2}\right\rangle, \left\langle\left|k_{3}\right|^{2}\right\rangle, \left\langle\left|k_{1}*k_{2}\right|\right\rangle, \left\langle\left|k_{1}*k_{3}\right|\right\rangle, \left\langle\left|k_{2}*k_{3}\right|\right\rangle\right]^{T}$$
(1.10)

trong đó Ψ_q là tập đầy đủ ma trận cơ sở 6x6 và k_i là các thành phần của véc-tơ tán xạ thu được từ MTTX Sinclair [S] trong trường hợp ra đa một vị trí và có tính thuận nghịch.

Sau đó véc-tơ \underline{t}_{T} được gán cho mục tiêu cục bộ. Một mục tiêu như vậy cũng sẽ chứa thành phần nhiễu nền \underline{t}_{P} . Sau khi biến đổi, cuối cùng sẽ tính ra được bộ phát hiện phân cực có dạng:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + Re \, dR \frac{P_c}{P_T}}} \tag{1.11}$$

trong đó *RedR* là tham số với tên gọi tỷ số rút gọn, P_C và P_T thể hiện cho công suất nhiễu nền và mục tiêu tương ứng. Nếu mục tiêu cục bộ có thành phần mạnh hơn, P_T sẽ lớn hơn P_C và γ tiến đến 1.

Với GP-PNF, Marino A [85] đã thực nghiệm khả năng phát hiện các mục tiêu tàu trên mặt biển với các tham số phát hiện khác nhau như MTC (tích các kênh phân cực HH*VH), kênh năng lượng VH, tham số *DoP*. Kết quả cho thấy khi so sánh với kênh VH, thì kênh VH_{filter} có thể phát hiện được các tàu nhỏ hơn mặc dù vẫn còn một báo động lầm. Và bộ lọc có khả năng phát hiện tốt mục tiêu trong trường hợp trạng thái sóng biển cao. Với tham số MTC, khi sử dụng bộ lọc thì một số tàu có kích thước nhỏ hơn vị bỏ sót và có 2 báo động lầm. Kết quả với tham số *DoP* là kém nhất, có nhiều tàu bị bỏ sót cũng như là

nhiều báo động lầm hơn. Với tham số RS (Reflection symmetry) thì khó có thể sử dụng để phát hiện các tàu nhỏ trong điều kiện sóng biển mạnh.

1.3.4. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ phân cực DoP [26]

Shirvany R [26] đã chứng minh được tiềm năng trong việc sử dụng độ phân cực *DoP* và độ khử cực *DoD* (Degree of Depolarization) để tăng độ tương phản của vết dầu tràn so với môi trường xung quanh sử dụng các chế độ phân cực kép SAR tương quan. Độ phân cực khi sử dụng bộ ước lượng hợp lý cực đại ML được tính theo công thức:

$$P_{ML} = \left[1 - \frac{4(s_0 s_1 - \left[s_2^2 + s_3^2\right])}{(s_0 + s_1)^2}\right]^{1/2}$$
(1.12)

trong đó $a = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ là véc-to Stock.

Đối với các hệ thống ra đa có các chế độ phân cực khác nhau, Shirvany R [26] đã đề xuất tham số độ phân cực tổng quát dùng cho các chế độ phân cực khác nhau như phân cực lai (Hybrid), phân cực nén (Compact) và các chế độ phân cực kép khác. Giả sử véc-tơ tán xạ phân cực kép k_i có phân cực phát là *i*. Ma trận tương quan 2x2 J_i được định nghĩa thông qua véc-tơ tán xạ k_i :

$$J_i = \left\langle k_i k_i^{\dagger} \right\rangle \tag{1.13}$$

trong đó $k_i \in \{k_{DP1}, k_{DP2}, k_{DP3}, k_{CL-pol}, k_{\pi/4}, k_{DCP}\}$. Véc-tơ Stock đối với trường hợp phân cực phát là *i*, phân cực thu tuyến tính được cho bởi:

$$s_{i} = \begin{pmatrix} \left\langle \left| E_{iH} \right|^{2} + \left| E_{iV} \right|^{2} \right\rangle \\ \left\langle \left| E_{iH} \right|^{2} - \left| E_{iV} \right|^{2} \right\rangle \\ 2\Re \left\langle E_{iH} E_{iV}^{*} \right\rangle \\ -2\Im \left\langle E_{iH} E_{iV}^{*} \right\rangle \end{pmatrix}$$
(1.14)

trong đó E là biên độ điện trường phức của tín hiệu thu được từ các kênh phân cực tương ứng. Phân cực phát *i* đối với các ra đa phân cực truyền thống sẽ là H

hoặc V, đối với phân cực lai thì *i* có thể là phân cực tròn phải hoặc phân cực tròn trái (L hoặc R), còn đối với chế độ phân cực nén $\pi/4$ thì là cả hai phân cực H+V đều lệch một góc 45°.

Trạng thái phân cực của sóng điện từ có thể được đặc trưng bởi độ phân cực *DoP*. Nếu tính qua các tham số Stock sẽ có dạng [61]:

$$DoP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}$$
(1.15)

hoặc có thể tính qua trị riêng λ_1 , λ_2 của MTTX bằng biểu thức [87]:

$$DoP = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \ \lambda_1 \ge \lambda_2 \tag{1.16}$$

Hệ số *DoP* là một tham số bất biến phân cực, không phụ thuộc vào việc chọn cơ sở phân cực ở phía thu mà chỉ phụ thuộc vào phân cực ở phía phát. Mục đích sử dụng và đặc điểm mục tiêu sẽ quyết định việc sử dụng phân cực nào tối ưu nhất. Các tham số Stock được tính trong mỗi cell cự ly ra đa sử dụng cửa sổ trượt với tâm nằm ở cell phát hiện. Việc tính toán *DoP* đơn giản, không cần tính toán phức tạp, thiết bị không cần cồng kềnh, phù hợp cho việc đặt trên các thiết bị bay.

Trong công trình [26], tác giả đã thực nghiệm khả năng sử dụng tham số *DoP* cho việc phát hiện tàu và so sánh kết quả với các tham số khác như phân cực kép HH-HV, VH-VV, HH-VV. Kết quả chỉ ra rằng hầu hết các tàu đều được phát hiện khi sử dụng hệ số *DoP*, không thể phát hiện đối với phân cực kép (HH, HV) và (VH, VV) và có thể phát hiện ở phân cực (HH, VV) cùng với các chế độ phân cực kép nén (Compact polarimetry) hoặc phân cực lai (Hybrid polarimetry). Ở đây cũng nhấn mạnh đến việc sử dụng hệ số *DoP* cho kết quả tương đương so với khi sử dụng bộ lọc Notch phân cực, dùng toàn bộ thông tin phân cực của dữ liệu.

Ngoài ra, còn có nhiều nghiên cứu sử dụng độ phân cực trong bài toán giám sát mặt biển như phát hiện tàu và nhận dạng tràn dầu cho kết quả tốt [77, 78, 27].

1.3.5. Phát hiện các mục tiêu nhỏ trên mặt biển sử dụng cửa sổ trượt theo tham số phân cực [88]

Trong công trình này, các tác giả đã đề xuất tham số Λ_M dùng để phát hiện các mục tiêu là tàu thuyền trên biển dựa trên sự khác nhau về phân cực của tín hiệu phản xạ từ tàu và từ mặt biển, sau đó kết hợp với phương pháp ổn định xác suất báo động lầm hai tham số (TP-CFAR) để thực hiện việc phát hiện mục tiêu. Mục đích của bộ phát hiện này là đánh giá đầy đủ các hiệu ứng phân cực của tàu, sau đó khuếch đại lên thông qua xử lý cửa sổ trượt.

Đặc tính phân cực của mục tiêu có thể được thể hiện đầy đủ thông qua ma trận Sinclair [S], khi đó 4 thành phần của MTTX thể hiện cho dữ liệu từ 4 kênh phân cực:

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$$
(1.17)

Trên cơ sở ma trận [S], có thể rút ra được đặc tính thống kê bậc hai của ma trận tương quan *T*:

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \left\langle \left| S_{hh} + S_{vv} \right|^{2} \right\rangle & \left\langle \left(S_{hh} + S_{vv} \right) \left(S_{hh} - S_{vv} \right)^{*} \right\rangle 2 \left\langle \left(S_{hh} + S_{vv} \right) S_{hv}^{*} \right\rangle \\ \left\langle \left(S_{hh} - S_{vv} \right) \left(S_{hh} + S_{vv} \right)^{*} \right\rangle \left\langle \left| S_{hh} - S_{vv} \right|^{2} \right\rangle & 2 \left\langle \left(S_{hh} - S_{vv} \right) S_{hv}^{*} \right\rangle \\ 2 \left\langle \left(S_{hh} + S_{vv} \right) S_{hv}^{*} \right\rangle & 2 \left\langle \left(S_{hh} - S_{vv} \right) S_{hv}^{*} \right\rangle & 4 \left\langle \left| S_{hv} \right|^{2} \right\rangle \end{bmatrix}$$
(1.18)

Giữa ma trận *T* và ma trận Kennaugh [89] có mối quan hệ lẫn nhau theo biểu thức [90]:

$$T = \left\langle \vec{k}_{p} \vec{k}_{p}^{+} \right\rangle = \begin{bmatrix} T_{11} \ T_{12} \ T_{13} \\ T_{12}^{*} \ T_{12} \ T_{23} \\ T_{13}^{*} \ T_{23}^{*} \ T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2A_{0} \ C + jD \ H + jG \\ C + jD \ B_{0} + B \ E + jF \\ H - jG \ E - jF \ B_{0} - B \end{bmatrix}$$
(1.19)

Ma trận Kennaugh có thể được dùng để mô tả nhiều cơ chế tán xạ với công suất tán xạ phân cực. Các tham số trong ma trận Kennaugh cũng được biết như các tham số Huynen. Trong biểu thức (1.19) A_0 thể hiện cho công suất phần lồi đều, B_0+B là công suất của thành phần đối xứng, B_0-B là công suất thành phần không đối xứng; C và D là các mục tiêu đối xứng thẳng và cong; E và Fthể hiện cho thành phần xoắn và đinh ốc không đối xứng; G và H là kết hợp giữa thành phần đối xứng và không đối xứng của mục tiêu.

Trong biểu thức (1.19), T_{11} , T_{22} , T_{33} là ba thành phần của T ứng với cộng suất tán xạ bề mặt, công suất phản xạ của góc nhị diện ở phương vị 0° và 45°. Từ đó có thể tính được $T_{22} + T_{33} = 2B_0$ và $T_{11} = 2A_0$ trong đó A_0 biểu diễn cho công suất tổng cộng từ phần lồi, nhẵn đều của mục tiêu trong khi B_0 thể hiện cho thành phần mục tiêu bất thường, lồi lõm. Có nghĩa A chủ yếu là công suất tán xạ từ mặt biển, B_0 chủ yếu là công suất tán xạ bởi tàu. Sự khác nhau giữa A_0 và B_0 là cơ sở để phân biệt mục tiêu trên mặt biển. Từ đó Yin J đã đề xuất tham số phát hiện rất tốt cho bài toán phát hiện mục tiêu tàu trên mặt biển [91]:

$$M = \frac{T_{22} + T_{33}}{T_{11}} = \frac{\left\langle \left| S_{hh} - S_{vv} \right|^2 \right\rangle + 4 \left\langle \left| S_{hv} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| S_{hh} + S_{vv} \right|^2 \right\rangle}$$
(1.20)

$$\rho_B = \arctan \frac{T_{22} + T_{33}}{T_{11}} \tag{1.21}$$

Thuật toán cửa sổ trượt được tính bằng:

$$\Lambda_{M} = \frac{\langle B_{0} \rangle_{test} - \langle B_{0} \rangle_{tr}}{\langle A_{0} \rangle_{tr}} = \frac{\langle T_{22} + T_{33} \rangle_{test} - \langle T_{22} + T_{33} \rangle_{tr}}{\langle T_{11} \rangle_{tr}}$$
(1.22)

trong đó $\langle . \rangle_{test}$ và $\langle . \rangle_{tr}$ tương ứng là trung bình theo không gian của cell phát hiện và cell tập và tr = bg + test. Sơ đồ tổng quát bộ phát hiện cửa sổ trượt như trên Hình 1.2.



Hình 1.2. Sơ đồ khối thuật toán cửa sổ trượt [88]

Một số đặc điểm của Λ_M như sau:

- 1. Khi cell tập trượt qua vùng chỉ có mặt biển, các pixel trong cell tập là tương đối đồng nhất và công suất phân cực trong cả cell tập và cell phát hiện về cơ bản không đổi. Tử số tiến đến 0 và do đó Λ_M tiến đến 0.
- 2. Khi mục tiêu rơi vào cell phát hiện, giá trị B_0 trung bình trong cell phát hiện sẽ lớn hơn so với vùng xung quanh và công suất tán xạ kép của tàu sẽ lớn hơn công suất tán xạ đơn trong cell phát hiện, trong khi đó công suất tán xạ kép của mặt biển lại thấp hơn công suất tán xạ kép trong cell phát hiện. Điều này dẫn đến $\langle B_0 \rangle_{\text{test}}$ sẽ có giá trị lớn, trong khi $\langle B_0 \rangle_{\text{tr}}$ và $\langle A_0 \rangle_{\text{tr}}$ sẽ nhỏ hơn $\langle B_0 \rangle_{\text{test}}$ nên bộ phát hiện Λ_M sẽ lớn và nổi dấu hiệu mục tiêu là tàu.
- 3. Khi cell phát hiện nằm ở cạnh tàu, hầu hết các pixel trong cell phát hiện đều là mặt biển, trong khi đó cell nền chỉ có mục tiêu là tàu. $\langle B_0 \rangle_{\text{test}}$ sẽ nhỏ hơn $\langle B_0 \rangle_{\text{tr}}$ thế nên tử số có thể có giá trị âm và Λ_M cũng mang giá trị âm.

Khi thực hiện thử nghiệm với mục tiêu là tàu có kích thước từ 8 đến 90 m, kết quả của phương pháp trên được so sánh thông qua tỷ số SCR với các phương pháp sử dụng kênh HV, phương pháp SPAN, PWF và GNF. Phương pháp SPAN sử dụng năng lượng tổng cộng từ 4 kênh phân cực để tăng cường tín hiệu phản xạ từ mục tiêu. Phương pháp PWF triệt nhiễu biển bằng bộ lọc làm trắng phân cực và kết hợp tối ưu dữ liệu phân cực thu được. Phương pháp GNF thực hiện việc lọc nhiễu địa hình trong không gian phân cực. Với các tàu có kích thước nhỏ hơn 35 m thì độ tương phản trung bình của Λ_M là 33.7 dB cao hơn 20 dB so với kênh HV. Với mục tiêu có kích thước nhỏ hơn 16 m, độ tương phản trung bình của Λ_M là 16 dB cao hơn so với kênh HV. Với tàu có kích thước lớn hơn 35 m thì phương pháp sử dụng Λ_M cho kết quả tốt, giảm được báo động lầm. Với mục tiêu nhỏ hơn 16 m thì phương pháp Λ_M có thể giảm đáng kể báo động lầm trong khi vẫn cho kết quả phát hiện tốt.

Tuy nhiên, phương pháp Λ_M vẫn còn một số nhược điểm. Thứ nhất để cải thiện độ chính xác khi phát hiện tàu cần phải nghiên cứu mô hình hóa phân bố thống kê của nhiễu biển đối với Λ_M thì mới cải thiện được thuật toán phát hiện. Thứ hai, hiệu suất của bộ phát hiện chỉ đảm bảo khi các tàu có khoảng cách xa nhau, trong trường hợp gần bờ hoặc hải cảng, mật độ tàu tăng lên thì việc phát hiện các mục tiêu là tương đối khó khăn.

1.4. Hiệu ứng "Vết" phân cực của mục tiêu hỗn hợp khi đo hệ số elip phân cực K bằng tín hiệu phân cực tròn

Trong quá trình nghiên cứu thực nghiệm về các tham số phân cực của tín hiệu ra đa, nhóm các chuyên gia của đại học TOMSK-Liên Bang Nga do Kozlov A.I và Tatarinov V.N chủ trì [92] đã phát hiện hiệu ứng thay đổi mạnh giá trị trung bình của hệ số elip phân cực đo được trong trường hợp trên mặt biển có mục tiêu nhân tạo kích thước bé với đặc tính phân cực ổn định.

Thực nghiệm tiến hành đo đồng thời hai tham số trong tín hiệu phản xạ là: RCS của mục tiêu và một tham số bất biến phân cực của hai dạng mục tiêu: dạng 1 chỉ có nhiễu biển; dạng 2 là mục tiêu nằm trên mặt biển (gọi là mục tiêu hỗn hợp). Hệ số elip phân cực $K = tg\alpha$ trong đó $-\frac{\pi}{4} \le \alpha \le \frac{\pi}{4}$, α là góc elip phân cực. Giá trị *K* xác định trong khoảng $-1 \le K \le 1$. *K*=-1 ứng với phân cực tròn trái, *K*=1 ứng phân cực tròn phải. *K* có thể được xác định bằng cách đo mô đun của tỷ số phân cực tròn $\dot{P}^{RL} = tg(\alpha + \pi/4)$ của tín hiệu phản xạ:

$$\frac{\left|\dot{P}^{RL}\right| - 1}{\left|\dot{P}^{RL}\right| + 1} = \frac{tg(\alpha + \pi/4) - 1}{tg(\alpha + \pi/4) + 1} = tg\alpha \equiv K$$
(1.23)

Trong đó cần lưu ý rằng RCS và *K* là các tham số bất biến của MTTX mục tiêu ra đa, chúng không nhạy cảm với việc xoay mục tiêu trong mặt phẳng vuông góc với hướng lan truyền sóng.

Thực nghiệm được thực hiện với tín hiệu phản xạ từ một ô cự ly ra đa trên mặt biển. Thể tích xung ra đa được xác định bởi độ rộng xung $\tau = 1\mu$ s, bước sóng $\lambda = 3cm$, độ rộng giản đồ hướng anten $\Delta \theta \approx 3,5^{\circ}$; khoảng cách thực hiện từ 1 km đến 3 km. Mục tiêu là cọc sắt hình trụ độ cao 1,5 m; đường kính 0,05m được đặt trên đế hấp thụ nằm ở cự ly R = 1,6 km. Độ cao anten so với mặt nước biển là h = 60m. Diện tích phản xạ hiệu dụng của cọc sắt được tính bằng $\sigma_0 \approx 4,3.10^{-2}m^2$.

Diện tích phản xạ riêng của mặt biển trong điều kiện thí nghiệm với bước sóng $\lambda = 3$ cm, được tính tương đương bằng $\sigma_{\Sigma}^{\text{max}} \approx 3,5m^2$; $\sigma_{\Sigma}^{\text{min}} \approx 1,4.10^{-2}m^2$. Như vậy, có nghĩa RCS của mục tiêu nhỏ hơn nhiều lần so với RCS của diện tích xung ra đa của mặt biển. Thời gian thực hiện việc đo đạc là 10s, với tần số lặp xung là 100 Hz thì đảm bảo được 1000 giá trị mẫu cho mỗi tham số đo được. Kết quả đo được thể hiện như trên Hình 1.3.



Hình 1.3. Tham số phân cực và năng lượng của tín hiệu phản xạ: [92] a, Từ mặt biển, độ cao sóng 1,2÷1,5 m, cự ly 1,6 km
b, Từ mục tiêu hỗn hợp, độ cao sóng 1,2÷1,5 m, cự ly 1,6 km

Kết quả đo đạc được trình bày trên Hình 1.3 và bảng 1.1. Hình 1.3 thể hiện cho hai tham số đo được là RCS và hệ số elip phân cực K. Hình 1.3.a ứng với trường hợp tín hiệu phản xạ về chỉ từ mặt biển (không có mục tiêu) và Hình 1.3.b ứng với trường hợp tín hiệu phản xạ từ mục tiêu hỗn hợp (mục tiêu cộng nhiễu biển). Có thể thấy sự thay đổi mạnh của hệ số elip sóng phản xạ trong trường hợp có mục tiêu trên mặt biển. Hệ số elip phân cực K trong trường hợp chỉ có nhiễu biển thăng giáng mạnh và có giá trị trung bình gần bằng 0, trong khi nếu có mục tiêu trên mặt biển thì giá trị hệ số K ít thăng giáng hơn và có giá trị trung bình gần bằng -0,75.

| Mục tiêu, khoảng cách | Độ cao sóng | <i>K</i> trung bình μ_K | σκ |
|---|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Mặt biển $D = 1,5 \div 1,6$ km | \approx 0,2 m | $\langle K \rangle = -0, 2 \div 0, 1$ | $\sigma_{\kappa}=0,23$ |
| Cọc sắt ($l = 1,5 \text{ m}; d = 0,05 \text{m}$) trên mặt biển $D = 1,5 \div 1,6 \text{ km}$ | \approx 0,2 m | $\langle K \rangle = -0,8$ | $\sigma_{\rm K}=0,07\div0,08$ |
| Mặt biển $D = 1,5 \div 1,6$ km | ≈0,4÷0,5 m | $\langle K \rangle = 0$ | $\sigma_{\kappa}=0,26$ |
| Cọc sắt ($l = 1,5 \text{ m}; d = 0,05 \text{m}$) trên mặt biển $D = 1,5 \div 1,6 \text{ km}$ | ≈ 0,5 m | $\langle K \rangle = -0,75$ | $\sigma_{\rm K}=0,033$ |
| Mặt biển $D = 1,2 \div 1,6$ km | ≈1,2÷1,5 m | $\langle K \rangle = 0$ | $\sigma_{\kappa} = 0,56$ |
| Cọc sắt ($l = 1,5 \text{ m}; d=0,05 \text{ m}$) trên mặt nền $D = 1,5 \div 1,6 \text{ km}$ | ≈1,2÷1,5 m | $\langle K \rangle = -0,7$ | $\sigma_{K} = 0,11 \div 0,125$ |

Bảng 1.1. Kết quả đo thực nghiệm hệ số elip phân cực K đối với mặt biển và mục tiêu cộng nhiễu biển bằng thực nghiệm [92]

1.5. Đặt vấn đề nghiên cứu

Có rất nhiều tham số phân cực có thể sử dụng cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển [92]. Các tham số phân cực này có thể thu được thông qua MTTX, ma trận tương quan phân cực, ma trận hiệp phương sai phân cực với các chế độ phân cực khác nhau như: phân cực đơn kênh, hai kênh, bốn kênh hoặc phân cực lai, phân cực nén. Các hệ thống phân cực có thể là PolSAR trên không hoặc các hệ thống ra đa phân cực mặt đất. Tùy từng các tham số phân cực lại có các hướng xử lý khác nhau như các bộ lọc phân cực, cửa sổ trượt phân cực v.v.

Tuy nhiên qua khảo sát các công trình nghiên cứu liên quan trong Chương 1, có thể thấy còn một số hạn chế trong việc sử dụng tham số phân cực cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Thứ nhất là xác suất báo động lầm còn tương đối cao (theo kết quả thống kê ở Bảng 6 trong công trình [88] hoặc có thể nhìn trực quan từ Hình 1.3), thứ hai là sẽ không phát hiện được mục tiêu dựa theo tham số phân cực khi mà mục tiêu có cùng tham số phân cực với tham số phân cực của nhiễu biển. Ngoài ra, trong các nghiên cứu được công bố chưa thấy sử dụng đến độ lệch chuẩn của các tham số phân cực để phát hiện sự khác biệt của các giá trị độ lệch chuẩn đối với mặt biển và đối với mục tiêu nằm trên mặt biển tại vị trí đó. Độ lệch chuẩn của các tham số phân cực cũng có thể là một trong các dấu hiệu khác biệt và có thể dùng để phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

Trong các tham số phân cực thì hệ số elip phân cực K và độ phân cực DoP là những tham số có ưu điểm như: Thứ nhất đây là các tham số bất biến phân cực, tức là nó không phụ thuộc vào việc xoay mục tiêu xung quanh hướng lan truyền sóng. Thứ hai chúng có thể được xác định một cách đơn giản theo thời gian thực mà vẫn đảm bảo đầy đủ tính chất phân cực của mục tiêu liên quan đến các tính chất điện vật lý của mục tiêu [72]. Với giá trị K chỉ cần phát tín hiệu phân cực tròn phải, thu tín hiệu về ở hai kênh phân cực tròn trái, tròn phải là có thể tính được K. Với giá trị DoP có thể sử dụng hệ thống phân cực nén (Compact) hoặc phân cực lai (Hybrid) để phát một loại tín hiệu và cũng thu về từ hai kênh phân cực để thu được các giá trị DoP [61].

Trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng tham số phân cực, hiệu quả phát hiện phụ thuộc rất nhiều vào tính chất phân cực của mục tiêu. Tức là nếu mục tiêu có tính chất phân cực càng khác so với nhiễu biển thì hiệu quả phát hiện (hoặc phân biệt) càng cao, ngược lại nếu mục tiêu có tham số phân cực mà gần giống với nhiễu biển thì gần như là không thể phát hiện được mục tiêu cho dù RCS của mục tiêu lớn. Tuy nhiên trong các nghiên cứu chưa có công trình nào giải quyết bài toán này, tức là khi mục tiêu có tham số phân cực giống với nhiễu biển. Trong khi thực hiện nghiên cứu sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực, nghiên cứu sinh thấy có thể dựa vào độ lệch chuẩn của tham số phân cực để giải quyết bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng tham số phân cực trong trường hợp mục tiêu có cùng tham số phân cực giống với nhiễu biển. Từ nhận định như vậy nghiên cứu sinh xác định các vấn đề nghiên cứu như sau:

1. Khảo sát khả năng sử dụng hệ số elip phân cực *K* trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển, từ đó đánh giá được ưu nhược điểm khi sử dụng tham số phân cực trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển;

2. Nghiên cứu đề xuất thuật toán sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực *K* trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Tập trung vào nội dung sử dụng độ lệch chuẩn trong bài toán phát hiện các mục tiêu có cùng tham số phân cực với nhiễu biển.

3. Nghiên cứu đề xuất thuật toán sử dụng độ lệch chuẩn của độ phân cực *DoP* trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Khảo sát khả năng sử dụng độ lệch chuẩn giải quyết bài toán phát hiện mục tiêu có độ phân cực *DoP* giống với *DoP* của nhiễu biển.

4. Sau khi đưa ra được thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng độ lệch chuẩn của *K* và của *DoP* sẽ thực hiện khảo sát khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực trên.

1.6. Kết luận Chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng các tham số phân cực cũng như là các thuật toán liên quan đến tham số phân cực.

Trên cơ sở nghiên cứu những vấn đề còn tồn tại trong bài toán phát hiện mục tiêu sử dụng tham số phân cực và tiềm năng để đề xuất tham số phát hiện mới, nghiên cứu sinh đã xây dựng định hướng nghiên cứu của luận án.

Chuong 2

NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT SỬ DỤNG HỆ SỐ ELIP PHÂN CỰC K CHO BÀI TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRÊN MẶT BIỂN

Trong phần này nghiên cứu sinh thực hiện việc nghiên cứu khảo sát đặc tính thống kê của hệ số elip phân cực K trong các trường hợp tổng quát, trong trường hợp chỉ có nhiễu nền và trong trường hợp mục tiêu trên nhiễu nền. Từ nghiên cứu đó sẽ làm cơ sở cho việc khảo sát khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực K. Sau đó thực hiện việc đánh giá hiệu quả phát hiện khi sử dụng hệ số elip phân cực K phụ thuộc vào các tính chất phân cực của mục tiêu và của bề mặt nền.

Đóng góp của Chương 2 nằm trong các bài báo số A1 và số A2.

2.1. Đặc tính thống kê của hệ số elip phân cực K

2.1.1. Độ không đẳng hướng phân cực phức

Một véc-tơ Jones bất kỳ được xem như là tổng của hai véc-tơ Jones trực giao:

$$\vec{E} = \dot{E}_X \vec{e}_X + \dot{E}_Y \vec{e}_Y \tag{2.1}$$

trong đó véc-to $\vec{e}_x = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad \vec{e}_y = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$ (2.2)

là các véc-tơ đơn vị cơ sở đặc trưng cho phân cực trực giao tuyến tính.

Nếu một cặp số phức \dot{E}_x và \dot{E}_y (hình chiếu của véc-tơ điện trường lên hướng của các véc-tơ đơn vị \vec{e}_x và \vec{e}_y) nhận tất cả các giá trị thì sẽ định dạng một không gian đầy đủ các véc-tơ Jones này. Không gian này ứng với tất cả các trạng thái phân cực.

Nếu véc-tơ cơ sở phân cực tuyến tính trùng với các trục OX' và OY', lệch so với hệ toạ độ XOY một góc θ thì trong hệ toạ độ X'OY' phân cực cơ sở trở thành:

$$\vec{e}_{x}' = \begin{vmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{vmatrix}; \quad \vec{e}_{y}' = \begin{vmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{vmatrix}$$
 (2.3)

Ta sẽ xét mối liên hệ giữa các tham số hình học của elip phân cực. Tham số này được gọi là tỷ số phân cực phức [72]. Tỷ số phân cực phức được xem là tham số cơ bản để nghiên cứu các tính chất phân cực tín hiệu. Các phương pháp sử dụng tỷ số phân cực khác nhau tuỳ thuộc vào từng dạng cơ sở phân cực khác nhau.

Trong phần này ta sử dụng cơ sở phân cực tuyến tính (Đề-các) nên tỷ số phân cực trong cơ sở này có tên gọi là tỷ số phân cực Đề-các. Véc-tơ Jones trong mặt phẳng này có dạng [72]:

$$\begin{bmatrix} E_{X} \\ E_{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta - j\sin\alpha\sin\beta \\ \cos\alpha\sin\beta + j\sin\alpha\cos\beta \end{bmatrix}$$
(2.4)

trong đó α , β là góc elip và góc hướng của elip phân cực.

Khi đó tỷ số phân cực Đề-các với độ lớn bằng một có dạng [72]:

$$\dot{P}_{XY} = \frac{\cos\alpha\sin\beta + j\sin\alpha\cos\beta}{\cos\alpha\cos\beta - j\sin\alpha\sin\beta}$$
(2.5)

$$\dot{P}_{XY} = \operatorname{Re}\left[\dot{P}_{XY}\right] + \operatorname{Im}\left[\dot{P}_{XY}\right] = \frac{\cos\alpha\sin\beta + j\sin\alpha\cos\beta}{\cos\alpha\cos\beta - j\sin\alpha\sin\beta} \cdot \frac{\cos\alpha\cos\beta + j\sin\alpha\sin\beta}{\cos\alpha\cos\beta + j\sin\alpha\sin\beta}$$
$$= 0.5 \left[\frac{\cos2\alpha\sin2\beta}{\left(\cos\alpha\right)^{2}\left(\cos\beta\right)^{2} + \left(\sin\alpha\right)^{2}\left(\sin\beta\right)^{2}} + j\frac{\sin2\alpha\cos2\beta}{\left(\cos\alpha\right)^{2}\left(\cos\beta\right)^{2} + \left(\sin\alpha\right)^{2}\left(\sin\beta\right)^{2}}\right]$$
(2.6)

Từ đó suy ra:

$$\left|\dot{P}_{XY}\right|^{2} = \dot{P}_{XY}\dot{P}_{XY}^{*} = \frac{\cos^{2}\alpha\sin^{2}\beta + \sin^{2}\alpha\cos^{2}\beta}{\cos^{2}\alpha\cos^{2}\beta + \sin^{2}\alpha\sin^{2}\beta}$$
(2.7)

$$1 - \left|\dot{P}_{XY}\right|^2 = \frac{\cos 2\alpha \cos 2\beta}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}$$
(2.8)

$$1 + \left| \dot{P}_{XY} \right|^2 = \frac{1}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}$$
(2.9)

với Re $\dot{P}_{XY} = \frac{0.5\cos 2\alpha \sin 2\beta}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}$, Im $\left[\dot{P}_{XY}\right] = \frac{0.5\sin 2\alpha}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}$

đồng thời sử dụng các biểu thức (2.7), (2.9) suy ra:

$$\tan \beta = \frac{2 \operatorname{Re}(\dot{P}_{XY})}{1 - |\dot{P}_{XY}|^2}, \quad \sin 2\alpha = \frac{2 \operatorname{Im}(\dot{P}_{XY})}{1 + |\dot{P}_{XY}|}$$
(2.10)

Biểu thức (2.10) cho phép xác định cả góc elip và góc hướng của phân cực elip thông qua tỷ số phân cực Đề-các. Tuy nhiên trong thực tế, để tính tỷ số này cần nhiều thao tác tính toán và đo đạc mà không phải lúc nào cũng thực hiện được. Bên cạnh đó thấy rằng biểu thức tính các tham số elip phân cực thông qua tỷ số phân cực Đề-các cũng rất phức tạp nên việc sử dụng trong thực tế cũng gặp nhiều khó khăn.

Độ không đẳng hướng phân cực được định nghĩa bằng [72]:

$$\mu_{P} = \frac{\lambda_{1}^{2} - \lambda_{2}^{2}}{\lambda_{1}^{2} + \lambda_{2}^{2}}$$
(2.11)

trong đó λ_1 , λ_2 là các trị riêng của MTTX mục tiêu ra đa. λ_1 , λ_2 phụ thuộc vào cường độ tín hiệu phản xạ từ mục tiêu ra đa từ các kênh phân cực trực giao. Có thể sử dụng độ không đẳng hướng phân cực μ_p như một tham số bất biến phân cực mục tiêu ra đa.

Độ phân cực theo công suất của tín hiệu mục tiêu ra đa nằm trong khoảng $\mu_p \in [0,1]$. Trong biểu thức tính μ_p (2.11) hoàn toàn chưa tính đến đặc tính pha của các trị riêng MTTX. Tuy nhiên tác động của đặc tính pha có thể sẽ lớn và để đảm bảo độ chính xác khi tính toán đặc tính phân cực cần phải nghiên cứu một tham số bất biến quan trọng khác của MTTX mục tiêu ra đa – đó là độ không đẳng hướng phân cực phức.

Để trình bày về tham số này cần biểu diễn MTTX của mục tiêu ra đa trong cơ sở phân cực Đề-các khi góc hướng của hệ toạ độ riêng và của hệ toạ độ phụ có giá trị bất kì.

$$\begin{aligned} \left\| \dot{S}_{jl} \right\| &= \left\| \begin{matrix} C_{\beta} & -S_{\beta} \\ S_{\beta} & C_{\beta} \end{matrix} \right\| \left\| \dot{\lambda}_{1} & 0 \\ 0 & \lambda_{2} \end{matrix} \right\| \left\| -S_{\beta} & S_{\beta} \\ -S_{\beta} & C_{\beta} \end{matrix} \right\| = \\ &= 0.5 \left\| \begin{matrix} (\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}) + (\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2})\cos 2\beta & (\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2})\sin 2\beta \\ (\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2})\sin 2\beta & (\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}) - (\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2})\cos 2\beta \end{matrix} \right\| \end{aligned}$$
(2.12)

trong đó β là góc hướng; $\dot{\lambda}_1 = \lambda_1 \exp\{i\varphi/2\}$, $\dot{\lambda}_2 = \lambda_2 \exp\{-i\varphi/2\}$ là các trị riêng phức của MTTX; λ_1 , λ_2 là mô đun của các trị riêng và φ là độ lệch pha của các trị riêng.

Khai triển MTTX $||S_{jl}||$ thông qua hệ ma trận Pauli [94]:

$$\|S_{jl}\| = 0.5 \left\{ S_0^{SM} \| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \| + S_1^{SM} \| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{matrix} \| + S_2^{SM} \| \begin{matrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{matrix} \| + S_0^{SM} \| \begin{matrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{matrix} \right\}$$
(2.13)

trong đó:

$$S_{0}^{SM} = Sp\{\|\sigma_{0}\|\|S_{jl}\|\} = \dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{1}; S_{1}^{SM} = Sp\{\|\sigma_{1}\|\|S_{jl}\|\} = (\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{1})\cos 2\theta;$$

$$S_{2}^{SM} = Sp\{\|\sigma_{2}\|\|S_{jl}\|\} = (\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2})\sin 2\theta; S_{3}^{SM} = Sp\{\|\sigma_{0}\|\|S_{jl}\|\} = 0$$
(2.14)

là các trọng số của biểu thức khai triển.

Sử dụng các trọng số (2.14), có thể viết lại biểu thức (2.13) ở dạng:

$$\|S_{jl}\| = 0.5 \left\{ \left(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}\right) \| \begin{array}{c} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right\| + \left(\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2}\right) \| \begin{array}{c} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{array} \right\| \right\}$$
(2.15)

hoặc sau khi đã chuẩn hoá:

$$\|S_{jl}\| = 0.5(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}) \left\{ \| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \| + \frac{(\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2})}{(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2})} \| \begin{matrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{matrix} \right\} = = 0.5(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}) \left\{ \| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \| + \dot{\mu} \| \begin{matrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{matrix} \right\}$$
(2.16)

trong đó giá trị phức:

$$\dot{\mu} = \frac{\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2}{\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2} \tag{2.17}$$

cũng là một tham số phân cực bất biến. Biểu thức này là hệ số không đẳng hướng theo biên độ phức đầy đủ của sóng phản xạ bởi mục tiêu ra đa. Có thể gọi hệ số μ , đặc trưng cho mục tiêu ra đa, là độ không đẳng hướng phân cực phức CDPA (complex degree of polaziration anisotropy). CDPA là trọng số trong biểu thức khai triển MTTX (2.16). Như vậy thấy rằng MTTX $\|S_{\mu}\|$ có thể được biểu diễn thành tổng của mục tiêu ra đa đẳng hướng phân cực (góc phản xạ ba mặt) và mục tiêu không đẳng hướng phân cực (góc phản xạ hai mặt) với trọng số là μ .

Mô đun của CDPA bằng:

$$\left|\dot{\mu}\right| = \sqrt{\dot{\mu}\dot{\mu}^{*}} = \sqrt{\frac{\lambda_{1}^{2} + \lambda_{2}^{2} - 2\lambda_{1}\lambda_{2}C_{\varphi}}{\lambda_{1}^{2} + \lambda_{2}^{2} + 2\lambda_{1}\lambda_{2}C_{\varphi}}}$$
(2.18)

Đối số, phần thực, phần ảo được xác định theo biểu thức:

$$\arg\{\dot{\mu}\} = \arctan\left(\frac{2\lambda_1\lambda_2 S_{\varphi}}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}\right), \ \operatorname{Re}\{\dot{\mu}\} = \frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2\lambda_1\lambda_2 C_{\varphi}},$$
$$\operatorname{Im}\{\dot{\mu}\} = \frac{2\lambda_1\lambda_2 S_{\varphi}}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2\lambda_1\lambda_2 C_{\varphi}}$$
(2.19)

trong đó: λ_1 , λ_2 là mô đun của các trị riêng; $\varphi = \arg\{\dot{\lambda}_1\} - \arg\{\dot{\lambda}_2\}$ là độ lệch pha, sinh ra do các tính chất điện của mục tiêu. Rõ ràng các giá trị $|\dot{\mu}|$, Re $\{\dot{\mu}\}$, Im $\{\dot{\mu}\}$ arg $\{\dot{\mu}\}$ cũng là các tham số bất biến của MTTX. Do vậy CDPA mô tả đầy đủ tính chất phân cực của mục tiêu. Giá trị này không bị ảnh hưởng bởi việc quay mục tiêu. CDPA có thể được đo và hiển thị đồng thời với tham số RCS và cung cấp cho việc phân tích, hiển thị rõ ràng ảnh ra đa thu được.

Khi phân tích sự tương đồng giữa mặt phẳng μ và mặt phẳng phức tròn có thể kết luận rằng sẽ hợp lý hơn khi chọn cơ sở phân cực tròn để biểu diễn sóng phát xạ và sóng phản xạ. MTTX trong cơ sở tròn được xác định bằng cách sử dụng toán tử:

$$\left| \dot{Q}_{RL} \right\|^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\| \begin{matrix} 1 & i \\ i & 1 \end{matrix} \right\|$$
(2.20)

Khi tính đến cả sự thay đổi hướng của sóng phản xạ ta được:

$$\begin{split} \|S_{jl}^{RL}\| &= 0.25 \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \left\{ \left(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \left(\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2}\right) \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \\ &= 0.5 j \begin{bmatrix} \left(\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2}\right) \exp\left\{j\left(2\theta - \pi/2\right)\right\} & \left(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}\right) \\ & \left(\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}\right) & \left(\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2}\right) \exp\left\{-j\left(2\theta - \pi/2\right)\right\} \end{bmatrix} \end{split}$$
(2.21)

Tiếp theo sẽ biểu diễn sóng phát xạ trong cơ sở tròn $(\dot{\vec{e}}_R, \dot{\vec{e}}_L)$. Tỷ số phân cực tròn của sóng này có dạng $\dot{P}_R^{RL} = \dot{E}_R / \dot{E}_L$. Tỷ số phân cực tròn của sóng phản xạ có dạng:

$$\dot{P}_{S}^{RL} = \frac{S_{21}^{RL} + S_{22}^{RL} \dot{P}_{R}^{RL}}{S_{11}^{RL} + S_{22}^{RL} \dot{P}_{R}^{RL}} = \frac{1 + \dot{\mu} \exp\{-j(2\theta - \pi/2)\}\dot{P}_{R}^{RL}}{\dot{\mu} \exp\{-j(2\theta - \pi/2)\} + \dot{P}_{R}^{RL}}$$
(2.22)

Có thể thiết lập trạng thái phân cực cụ thể cho sóng phát xạ, khi đó tỷ số phân cực của sóng phản xạ sẽ có dạng đồng nhất. Nếu $\dot{P}_{R}^{RL} = \infty$ (sóng phân cực tròn phải) biểu thức (2.22) trở thành:

$$\dot{P}_{S}^{RL} = \lim_{\dot{P}_{R}^{RL} \to \infty} \frac{1 + \dot{\mu} \exp\{-j(2\theta - \pi/2)\}\dot{P}_{R}^{RL}}{\dot{\mu} \exp\{-j(2\theta - \pi/2)\} + \dot{P}_{R}^{RL}} = \dot{\mu} \exp\{-j[2\theta - \arg(\dot{\mu}) - \pi/2]\} (2.23)$$
Néu $\theta = 0$ ta có:

$$\dot{P}_{S}^{RL} = |\dot{\mu}| \exp\{-j(2\theta - \pi/2)\} + \sigma(2)$$
(2.24)

$$F_{S} = |\mu| \exp\{-\int [\arg(\mu) + \pi/2)\}$$
(2.24)

Cần so sánh biểu thức (2.23) và (2.24) với biểu thức tỷ số phân cực tròn \dot{P}^{RL} . Ở đây cần chú ý đến cách định nghĩa tỷ số phân cực tròn. Véc-tơ Jones của sóng phân cực elip trong cơ sở phân cực Đề-các có dạng:

$$\dot{\vec{E}}_{XY} = \begin{vmatrix} \cos\alpha\cos\beta - j\sin\alpha\sin\beta \\ \cos\alpha\sin\beta + j\sin\alpha\cos\beta \end{vmatrix}$$
(2.25)

Có thể chuyển đổi véc-tơ Jones này từ cơ sở phân cực Đề-các sang cơ sở phân cực tròn, sử dụng biểu thức:

$$\dot{\vec{E}}_{RL} = 0.5 \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \alpha \cos \beta - j \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \beta + j \sin \alpha \cos \beta \end{vmatrix}$$

$$= 0.5 \begin{vmatrix} (\cos \alpha - \sin \alpha) \exp\{i\beta\} \\ (\cos \alpha + \sin \alpha) \exp\{-i(\beta - \pi/2)\} \end{vmatrix}$$
(2.26)

Sử dụng véc-tơ Jones $\dot{\vec{E}}_{RL}$ có thể tìm được tỷ số phân cực tròn:

$$\dot{P}_{S}^{RL} = \frac{\cos\alpha + \sin\alpha}{\cos\alpha - \sin\alpha} \exp\left\{-i\left(2\beta - \pi/2\right)\right\} = \tan\left(\alpha + \pi/4\right) \exp\left\{-i\left(2\beta - \pi/2\right)\right\} (2.27)$$

Từ việc so sánh thấy rằng mô đun tỷ số phân cực của sóng phản xạ (khi sóng phát xạ có phân cực tròn phải) bằng mô đun độ không đẳng hướng phân cực phức CDPA:

$$\left|\dot{P}_{S}^{RL}\right| = \tan(\alpha + \pi / 4) = \left|\dot{\mu}\right| \tag{2.28}$$

Từ biểu thức (2.28) thấy rằng có thể đo trực tiếp tham số phân cực của mục tiêu mà không cần thêm các phép tính phụ.

2.1.2. Hệ số elip phân cực

Ý tưởng chính của việc ứng dụng tham số phân cực sóng phản xạ trong ra đa phân cực là sử dụng các tham số bất biến từ MTTX mục tiêu ra đa. Các tham số bất biến này là tổ hợp của các trị riêng MTTX và có thể đo được trực tiếp bằng một thuật toán đơn giản [72]. Cần phải đo đủ hai tham số bất biến: công suất toàn phần và mô đun độ không đẳng hướng phân cực phức CDPA của mục tiêu ra đa. CDPA liên quan trực tiếp với hệ số elip phân cực của sóng phản xạ [72]. Cả hai tham số này đều không phụ thuộc vào góc hướng giữa hệ toạ độ anten ra đa và hệ toạ độ phân cực mục tiêu. Có thể đo cả hai tham số này trong một cell ra đa theo thời gian thực.

Như trên đã trình bày, khi phát xạ tín hiệu có phân cực tròn phải (PCTP) thì tỉ số phân cực tròn của tín hiệu phản xạ kênh PCTP trên tín hiệu phản xạ của kênh phân cực tròn trái (PCTT) bằng CDPA của mục tiêu ra đa:

$$\dot{P}_{RL} = \frac{\cos\alpha + \sin\alpha}{\cos\alpha - \sin\alpha} e^{-i(2\beta - \frac{\pi}{2})} = \tan\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) e^{-i(2\beta - \frac{\pi}{2})}$$
(2.29)

trong đó α , β là góc elip và góc hướng của elip phân cực. Mô đun của CDPA liên quan trực tiếp đến tính chất phân cực của mục tiêu theo biểu thức [72]:

$$\left|\dot{P}_{RL}\right| = \left|\dot{\mu}_{P}\right| = \left|\frac{\dot{\lambda}_{1} - \dot{\lambda}_{2}}{\dot{\lambda}_{1} + \dot{\lambda}_{2}}\right| = \tan\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)$$
(2.30)

Tuy nhiên, việc sử dụng CDPA sẽ không thuận tiện do $\mu_p \subset [0,\infty)$, do đó cần phải biến đổi tuyến tính CDPA thành dạng:

$$\frac{\left|\dot{P}_{RL}\right|-1}{\left|\dot{P}_{RL}\right|+1} = \frac{\tan\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)-1}{\tan\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)+1} = \tan\alpha = K$$
(2.31)

với *K* được gọi là hệ số elip. Hệ số này được xác định bởi các trị riêng của MTTX mục tiêu ra đa. Như vậy tính chất phân cực của mục tiêu ra đa được thể hiện trực tiếp thông qua các giá trị đo được. Trong thực tế hiện nay các hệ thống ra đa phân cực không thực hiện việc đo trực tiếp các tính chất phân cực của mục tiêu ra đa. Hơn nữa do góc elip phân cực xác định trong khoảng $[-\pi/4, \pi/4]$ nên hệ số elip *K* nằm trong khoảng $-1 \le K \le 1$. Trong đó, K = -1 ứng với mục tiêu ra đa có dạng góc phản xạ ba mặt, K = 0 ứng với mục tiêu dạng lưỡng cực và K = 1 ứng với mục tiêu dạng góc phản xạ hai mặt [72].

2.1.3. Phân bố xác suất của hệ số elip phân cực trong cơ sở phân cực tròn

Khi sử dụng cơ sở phân cực tròn, thực tế cũng không mang lại nhiều hiệu quả khi nghiên cứu tính chất thống kê của sóng phân cực bởi vì nó chỉ là trường hợp đặc biệt đối với hệ cơ sở bất kì. Tuy nhiên lại hiệu quả khi nghiên cứu tính chất thống kê của các tham số bất biến phân cực dựa trên đặc tính hình học của elip phân cực thông qua tham số K.

Theo [95], biểu thức tổng quát hàm mật độ xác suất PDF (Probability Density Function) của hệ số elip W(K) trong cơ sở phân cực tròn với tín hiệu phát có PCTP có dạng:

$$W(K, a_{1}, b, \mathcal{G}_{0}, R, \beta, h) = \frac{4(1-R^{2})h^{2}(1-K^{2})}{\left[(1-K)^{2}+h^{2}(1+K)^{2}\right]^{2}} \times \exp\left\{-\frac{a_{1}^{2}}{2(1-R^{2})}\left\langle1-2Rb\cos(2\mathcal{G}_{0}-\beta)+b^{2}\right\rangle\right\} \times \\ \times \sum_{m,n,k=0}^{\infty} \frac{\Gamma(1+2m+2K+n)}{\Gamma(m+k+1)\Gamma(m+n+1)} B_{m}B_{n}B_{k}\cos\left[m(\Psi_{12}-\Psi_{21}-\beta)\right]F_{1}\left[-n,-(m+n);m+1;-\chi^{2}h^{2}\left(\frac{1+K}{1-K}\right)^{2}\right]$$

$$(2.32)$$

trong đó: $a_i^2 = E_{0i}^2 / \sigma_i^2$ - tỉ số công suất của tín hiệu thành phần xác định (mục tiêu) trên công suất của thành phần thăng giáng (nhiễu nền), có thể gọi là tỷ số tín/nhiễu nền SCR (Signal to clutter ratio), với $i = 1, 2; b = \frac{a_2}{a_1} = \frac{E_2^0}{E_1^0} \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = r_0 \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ - tham số đặc trưng cho phân cực của tín hiệu tổng hợp (của mục tiêu cộng bề mặt nền), $r_0 = E_2^0 / E_1^0$ là đặc tính phân cực của thành phần thăng giáng (nhiễu nền); $\delta_0 = \varphi_{02} - \varphi_{01}$ - hiệu pha giữa các thành phần xác định (mục tiêu); $R = \sqrt{\rho^2 + g^2}$, $\beta = \operatorname{arctg}(g / \rho)$ - mô đun và argumen của hệ số tương quan giữa các thành phần sóng phân cực trực giao.

$$B_{k} = \frac{1}{k!} \left\{ \frac{Rh(1-K^{2})}{(1-K)^{2} + (1+K)^{2}h^{2}} \right\}^{2k}; P_{12} = \left[a_{1}^{2} \left\langle 1 - 2Rb\cos(\delta_{0} - \beta) + R^{2}b^{2} \right\rangle \right]^{1/2};$$
$$P_{21} = \left[a_{1}^{2} \left\langle b^{2} - 2Rb\cos(\delta_{0} - \beta) + R^{2} \right\rangle \right]^{1/2}; \ \varepsilon_{m} = \begin{cases} 1 \ khi \ m = 0 \\ 2 \ khi \ m \neq 0 \end{cases}$$

$$B_{m} = \frac{\varepsilon_{m}}{m!} \left(\frac{Rh^{2}(1-K^{2})^{2} \left[a_{1}^{4} \left\{b^{2}-2Rb\cos(2\theta_{0}-\beta)+R^{2}\right\} \left\langle1-2Rb\cos(2\theta_{0}-\beta)+R^{2}b^{2}+R^{2}b^{2}\right\rangle\right]^{1/2}}{2(1-R^{2}) \left[(1-K)^{2}+(1+K)^{2}h^{2}\right]^{2}} \right]^{n}$$

$$B_{n} = \frac{1}{n!} \left\{ \frac{a_{1}^{2} \left[1-2Rb\cos(2\theta_{0}-\beta)+R^{2}b^{2}+R^{2}b^{2}\right] (1-K^{2})}{2\left[(1-K)^{2}+(1+K)^{2}h^{2}\right]}\right\}^{n}; \chi = \frac{P_{21}^{2}}{P_{12}^{2}}$$

$$\Psi_{12} = \arctan\left[\frac{Ra_{2}\sin(\phi_{02}-\beta)-a_{1}\sin\phi_{01}}{a_{1}\cos\phi_{01}-Ra_{2}\cos(\phi_{02}-\beta)}\right]; \Psi_{21} = \arctan\left[\frac{Ra_{1}\sin(\phi_{01}-\beta)-a_{2}\sin\phi_{02}}{a_{2}\cos\phi_{02}-Ra_{1}\cos(\phi_{01}-\beta)}\right]$$

$$F_{1}\left[-n, -(m+n); m+1; -\chi^{2}h^{2}\left(\frac{1+K}{1-K}\right)^{2}\right] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-n)_{n}\left[-(m+n)\right]_{n}}{(m+1)_{n}} \frac{\left(-\chi^{2}h^{2}\left(\frac{1+K}{1-K}\right)^{2}\right)^{n}}{n!} - 1a$$

hàm siêu hình học.

Hàm PDF của hệ số elip W(K) trong trường hợp hệ số tương quan của các thành phần phân cực trực giao R = 0 có dạng [95]:

$$W(K, a_{1}, b, h) = \frac{4h^{2}(1 - K^{2})}{\left[(1 - K)^{2} + h^{2}(1 + K)^{2}\right]^{2}} \times \exp\left\{-\frac{a_{1}^{2}\left[(1 - K)^{2}b^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}\right]}{2\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}\right]}\right\} \times \left\{\left[1 + \frac{a_{1}^{2}\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}b^{2}\right]}{2\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}\right]}\right] \times I_{0}\left[\frac{a_{1}^{2}bh(1 - K)^{2}}{(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}}\right] + \frac{a_{1}^{2}bh(1 - K)^{2}}{(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}} \times I_{1}\left[\frac{a_{1}^{2}bh(1 - K)^{2}}{(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}}\right]\right\}$$

trong đó I_0 , I_1 là các hàm Bessel loại 1. Như vậy hàm PDF của hệ số elip phân cực K trong cơ sở phân cực tròn phụ thuộc vào các đại lượng: a_1 , a_2 – là tỷ số SCR của tín hiệu trên hai kênh phân cực trực giao; $b = a_2 / a_1$ – thể hiện cho tính chất phân cực của tín hiệu tổng cộng (mục tiêu cộng nhiễu nền); h, σ_1 , σ_2 – thể hiện cho đặc trưng của nhiễu nền.

Sự phụ thuộc của hàm PDF (2.33) vào các biến a_1 , b, h được minh hoạ trên các Hình 2.1, 2.2, 2.3.



Hình 2.1. Sự phụ thuộc của hàm PDF W(K) vào h^2 với R = 0, và tham số mục tiêu $a_1 = 0,3; b = 5$

Trên Hình 2.1 thấy rằng, với R = 0; $a_1 = 0,3$; b = 5 các giá trị h^2 khác nhau sẽ cho phân bố xác suất ứng với các dạng bề mặt nền khác nhau. Khi h tăng từ 1 đến ∞ giá trị trung bình của K, μ_K tiến đến -1. Khi h giảm từ 1 đến 0, μ_K tiến đến 1. Khi h = 1, hàm PDF W(K) trở thành hàm đối xứng qua 0 trên toàn miền giá trị $K \subset [-1, 1]$. Phương sai của hàm W(K), σ_K^2 đạt giá trị cực đại khi h = 1 và $\mu_K \approx 0$. Khi h thay đổi, σ_K^2 giảm. Trong bài toán phát hiện chỉ cần sử dụng một giá trị h, ứng với một dạng nhiễu nền cụ thể. Hàm PDF W(K) phụ thuộc vào đặc tính phân cực của nhiễu nền. Nếu hệ số elip K của mục tiêu và nhiễu nền càng khác nhau thì giá trị trung bình của hệ số elip μ_K đối với nhiễu nền và đối với mục tiêu cộng nhiễu nền càng khác nhau. Khi đó xác suất phân biệt mục tiêu trên nhiễu nền sẽ tăng lên.



Hình 2.2. Sự phụ thuộc của hàm PDF W(K) vào b với tham số của nhiễu nền: $R = 0, h = 1, và tham số mục tiêu a_1 = 1$

Hình 2.2 chỉ ra rằng, với R=0, h=1, $a_1=1$ PDF của hệ số elip K thay đổi khi đặc tính phân cực của mục tiêu, tham số b, thay đổi. Khi b tăng, μ_{κ} tiến đến 1. Trường hợp này ứng với mục tiêu có dạng góc phản xạ hai mặt [96]. Ngược lại khi b giảm đến 0, μ_{κ} tiến đến -1, ứng với mục tiêu ra đa có dạng góc phản xạ ba mặt [96].



Hình 2.3. Sự phụ thuộc của hàm PDF W(K) vào a_1 với tham số nhiễu nền R = 0, h = 1, và tham số mục tiêu b = 5

Hình 2.3 thể hiện sự phụ thuộc của hàm PDF W(K) vào a_1 , đặc trưng cho tỉ số cường độ tín hiệu trên cường độ nhiễu nền SCR trên kênh phân cực tròn phải. Khi a_1 tăng hàm PDF W(K) hẹp hơn và μ_K tiến đến tham số phân cực mục tiêu. Điều này có thể làm tăng xác suất phát hiện đúng mục tiêu. Khi a_1 giảm, W(K) rộng hơn, μ_K tiến đến giá trị của tham số phân cực nhiễu nền và điều này có thể giảm xác suất phát hiện mục tiêu.

2.1.4. Phân bố xác suất của hệ số elip phân cực đối với nhiễu biển

Trong trường hợp không có thành phần xác định (tức không có mục tiêu) thì trong biểu thức (2.33) với các tham số $a_i = 0$, b = 0 thì hàm mật độ xác suất W(K; R, h) [95] có dạng:

$$W(K; R, h) = \frac{4(1-R^2)h^2(1-K^2)\left[(1-K)^2 + (1+K)^2h^2\right]}{\left\{\left[(1-K)^2 + (1+K)^2h^2\right]^2 - 4R^2h^2(1-K^2)^2\right\}^{3/2}}$$
(2.34)

Sự thay đổi hàm PDF của hệ số elip *K* theo biểu thức (2.34) phụ thuộc các tham số *R* và *h* được minh hoạ trên Hình 2.4 đến 2.7.



Hình 2.4. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác định (mục tiêu) với R = 0; $a_1 = a_2 = 0$



Hình 2.5. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác định (mục tiêu) với R = 0,5; $a_1 = a_2 = 0$



Hình 2.6. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác định (mục tiêu) với R = 0,8; $a_1 = a_2 = 0$



Hình 2.7. Hàm phân bố của $W_{nen}(K)$ trong trường hợp không có thành phần xác định (mục tiêu) với R = 0,9; $a_1 = a_2 = 0$

Đối với nhiễu biển, tài liệu [97] chỉ ra rằng $\sigma_L^2 \approx \sigma_R^2$. Điều này cũng đúng với các kết quả thực nghiệm trong các công trình [98, 99]. Kết hợp kết quả thực nghiệm [98, 99] thấy rằng $h^2 = \sigma_L^2 / \sigma_R^2 \approx 1$ và biểu thức (2.34) có dạng:

$$W(K, R, h = 1) = \frac{4(1 - R^{2})(1 - K^{2})\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}\right]}{\left\{\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}\right]^{2} - 4R^{2}(1 - K^{2})^{2}\right\}^{3/2}}$$
(2.35)

Hàm PDF đối với nhiễu biển với R khác nhau được trình bày trên Hình 2.8.

Trên Hình 2.8 thấy rằng, dạng phân bố xác suất của hệ số elip *K* đối với nhiễu biển thay đổi khi *R* thay đổi. *R* càng tăng thì dạng hàm phân bố càng hẹp và ngược lại. Với R = 0 thì hàm phân bố có dạng đối xứng và dàn trải rộng nhất trên toàn trục $K \subset [-1, 1]$. Biểu thức (2.35) có dạng:

W(K, R = 0, h = 1) =
$$\frac{1 - K^2}{(1 + K^2)^2}$$
 (2.36)



Hình 2.8. *Hàm PDF W(K) đối với nhiễu biển với các hệ số R khác nhau* Khi đó hàm PDF *W(K)* đối với nhiễu biển có dạng như trên Hình 2.9. Giá trị trung bình của nhiễu biển bằng $\mu_K \approx 0$, độ lệch chuẩn $\sigma_K = 0,5$ tương tự như với kết quả thực nghiệm [92].



Hình 2.9. *PDF của W(K) đối với nhiễu biển với* R = 0, $h^2 = 1$

2.2. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực

2.2.1. Lựa chọn tham số phát hiện

Sử dụng tín hiệu phát của đài ra đa với tín hiệu có phân cực tròn phải (RHCP) [100] E_R , được biểu diễn theo véc-tơ Jones trong hệ toạ độ Đềcác [72]. Khi đó tín hiệu phản xạ về máy thu đài ra đa được thu đồng thời trên hai kênh PCTT, PCTP trực giao và được biểu diễn thông qua các thành phần cầu phương $E_{Lcos}(E_{Lsin})$ và $E_{Rcos}(E_{Rsin})$:

$$E_{L}(t) = \sqrt{\left[E_{L\cos}(t)\right]^{2} + \left[E_{L\sin}(t)\right]^{2}}$$

$$E_{R}(t) = \sqrt{\left[E_{R\cos}(t)\right]^{2} + \left[E_{R\sin}(t)\right]^{2}}$$
(2.37)

Nếu tín hiệu phản xạ từ mục tiêu hỗn hợp gồm mục tiêu và nhiễu biển cộng với tạp âm thì các thành phần cầu phương của tín hiệu thu có dạng:

$$E_{L\cos}(t) = E_{L\cos,s}(t) + E_{L\cos,nb}(t) + n(t)$$

$$E_{L\sin}(t) = E_{L\sin,s}(t) + E_{L\sin,nb}(t) + n(t)$$

$$E_{R\cos}(t) = E_{R\cos,s}(t) + E_{R\cos,nb}(t) + n(t)$$

$$E_{Rsin}(t) = E_{R\sin,s}(t) + E_{R\sin,nb}(t) + n(t)$$
(2.38)

trong đó: $E_{R.nb}(t)$, $E_{L.nb}(t)$ – tín hiệu nhiễu biển; $E_{R.s}(t)$, $E_{L.s}(t)$ – tín hiệu mục tiêu; n(t) – tạp âm.

Các thành phần phân cực trực giao của tín hiệu thu có dạng:

$$E_{L}(t) = \sqrt{\left[E_{L\cos.s}(t) + E_{L\cos.nb}(t) + n(t)\right]^{2} + \left[E_{L\sin.s}(t) + E_{L\sin.nb}(t) + n(t)\right]^{2}}$$

$$E_{R}(t) = \sqrt{\left[E_{R\cos.s}(t) + E_{R\cos.nb}(t) + n(t)\right]^{2} + \left[E_{R\sin.s}(t) + E_{R\sin.nb}(t) + n(t)\right]^{2}}$$
(2.39)

Trị tuyệt đối của tỉ số phân cực tròn được tính theo biểu thức:

$$P_{RL}(t) = \frac{\left|E_{R}(t)\right|}{\left|E_{L}(t)\right|} = \frac{\sqrt{\left[E_{R\cos,s}(t) + E_{R\cos,nb}(t) + n(t)\right]^{2} + \left[E_{R\sin,s}(t) + E_{R\sin,nb}(t) + n(t)\right]^{2}}}{\sqrt{\left[E_{L\cos,s}(t) + E_{L\cos,nb}(t) + n(t)\right]^{2} + \left[E_{L\sin,s}(t) + E_{L\sin,nb}(t) + n(t)\right]^{2}}}$$
(2.40)

Theo [72] hệ số elip phân cực bằng:

$$K(t) = \frac{\left|\hat{P}_{RL}(t)\right| - 1}{\left|\hat{P}_{RL}(t)\right| + 1}$$
(2.41)

Hình 2.10 là minh họa cho tín hiệu phản xạ từ mục tiêu cộng nhiễu biến của kênh phân cực tròn phải, ba vị trí có mục tiêu được đánh dấu bằng đường thẳng đứng nét đứt. Thông số các mục tiêu được cho trên Bảng 2. 1. Mục tiêu dạng mô hình Swerling 0, nhiễu biển với mô hình Weibull. Hình 2.11 là hệ số elip phân cực K, ba mục tiêu với các hệ số K thực tương ứng là K_I =0,82; K_2 =- 0,75; K_3 =-0,98 và cũng được đánh dấu bằng các đường thẳng đứng nét đứt. Ngoài các vị trí được đánh dấu là của mục tiêu là các giá trị K đối với nhiễu biển.

| | Mục tiêu 1 | Mục tiêu 2 | Mục tiêu 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| Cự ly (m) | 2025 | 3525 | 3850 |
| Hệ số K | 0,82 | -0,75 | -0,98 |
| RCS (m ²) | 0,5 | 0,1 | 0,7 |

Bång 2.1. Tham số mục tiêu

Trên Hình 2.11 thấy rằng giá trị *K* đối với nhiễu biển thăng giáng ngẫu nhiên, dao động trong khoảng [-0,75 ÷ 0,95]. Giá trị của hệ số *K* tại các vị trí ứng với các mục tiêu bằng $\hat{K}_{mt1} = 0,7$; $\hat{K}_{mt2} = -0,63$; $\hat{K}_{mt3} = 0,8$. Các giá trị này khác với giá trị *K* thực của mục tiêu (như trên Bảng 2.1). Điều này là do mục tiêu nằm trên nền nhiễu thăng giáng và có giá trị trung bình $\mu_{K} = 0$ nên giá trị *K* của mục tiêu đo được bị thay đổi và giảm so với giá trị thật.

Bài toán đặt ra là làm sao để phát hiện được mục tiêu trên nền nhiễu biển sử dụng hệ số K này. Vấn đề này sẽ được giải quyết trong các phần tiếp theo.







Hình 2.11. Giá trị hệ số K tương ứng

2.2.2. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực

Theo [95], hàm phân bố xác suất của hệ số elip W(K) khi hệ số tương quan của các kênh phân cực trực giao R = 0 có dạng (2.33). Từ biểu thức này có thể xây dựng được hàm PDF W(K) cho hai trường hợp: chỉ có nhiễu biển và có mục tiêu cộng nhiễu biển. Hình 2.12 minh hoạ cho trường hợp này.



Hình 2.12. Sự khác nhau của hàm PDF của K trong hai trường hợp: 1. Mục tiêu cộng nhiễu biển W_{nb+mt}(K), và 2. Chỉ có nhiễu biển W_{nb}(K)
Thuật toán phát hiện được thực hiện như sau:

Trong khoảng giá trị của $K \subset [-1, 1]$, đặt khoảng giá trị của hệ số K đối với nhiễu biển bằng $\Delta K_{nb} = [K_L, K_R]$. Giả sử hệ số K đo được trong một cự ly phân giải ra đa có giá trị K_0 , nếu K_0 nằm ngoài khoảng $[K_L, K_R]$, hay nói cách khác là $K_0 \subset [-1, K_L) \cup (K_R, 1]$, thì sẽ kết luận rằng có mục tiêu nằm trong cự ly phân giải đó. Ngược lại nếu K_0 nằm bên trong khoảng giá trị đó thì có thể kết

luận không có mục tiêu nằm trong cự ly phân giải đó. Lưu đồ thuật toán này được minh hoạ như trên Hình 2.13 và Hình 2.14.



Hình 2.13. Ngưỡng phát hiện theo hệ số elip phân cực K



Hình 2.14. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số phân cực K
2.2.3. Tính toán xây dựng bộ phát hiện hai mức dựa trên hệ số elip phân cực K

Nếu sử dụng tiêu chuẩn Neyman-Pearson để tìm khoảng phát hiện (ngưỡng phát hiện hai mức), thì khoảng phát hiện ΔK_{nb} được chọn sao cho xác suất của sự kiện $K_0 \subset [-1, K_L) \cup (K_R, 1]$ trong trường hợp chỉ có nhiễu biển bằng xác suất báo động lầm P_F . Phần diện tích nằm trong khoảng phát hiện và hàm phân bố xác suất $W_{nb}(K)$ bằng với xác suất báo động lầm cho trước P_F và ứng với phần diện tích được gạch chéo trên Hình 2.12.

Vùng diện tích tạo bởi khoảng phát hiện $[-1, K_L) \cup (K_R, 1]$ và hàm PDF của nhiễu biển $W_{nb}(K)$ bằng xác suất báo động lầm P_F .

$$P_F = P_{F1} + P_{F2} = \int_{-1}^{K_L} W_{sc}(K) dK + \int_{K_R}^{+1} W_{sc}(K) dK$$
(2.42)

Theo các kết quả thực nghiệm trong các công trình [101] và [97], đối với nhiễu nền là nhiễu biển thì K_L và K_R có dạng đối xứng qua 0, hay nói cách khác $-K_L = K_R$. Khi đó (2.42) có dạng:

$$P_F = P_{F1} + P_{F2} = 2 \int_{K_R}^{+1} W_{nb}(K) dK = 2 \int_{-1}^{K_L} W_{nb}(K) dK$$
(2.43)

Xác suất bỏ sót mục tiêu bằng:

$$P_M = \int_{K_L}^{K_R} W_{nb+mt}(K) dK$$
(2.44)

Xác suất phát hiện đúng P_D bằng:

$$P_D = 1 - P_M = 1 - \int_{K_L}^{K_R} W_{nb+mt}(K) dK$$
(2.45)

với hàm $W_{nb+mt}(K)$, có dạng như biểu thức (2.33).

Từ (2.36) hàm PDF $W_{nb}(K)$ đối với nhiễu biển có dạng:

$$W_{nb}(K, R = 0, h = 1, a_i = 0) = \frac{1 - K^2}{(1 + K^2)^2}$$
(2.46)

Khi đó, từ biểu thức (2.43) và (2.46) với xác suất báo động lầm cho trước có thể tính được ngưỡng phát hiện khi giải phương trình:

$$P_{F} = 2\int_{K_{R}}^{+1} W_{nb}(K) dK = 2\int_{K_{R}}^{+1} \frac{1-K^{2}}{\left(1+K^{2}\right)^{2}} dK$$
(2.47)

$$P_F = 1 - \left| \sin(2arc\tan K_R) \right| \tag{2.48}$$

Từ biểu thức (2.48), suy ra:

$$K_{R} = \tan\left[\frac{\arcsin(1-P_{F})}{2}\right]$$
(2.49)

Mối tương quan giữa ngưỡng phát hiện K_R và xác suất báo động lầm P_F được thể hiện trên Hình 2.15 và Bảng 2.2.



Hình 2.15. Mối tương quan giữa ngưỡng phát hiện K_R và P_F cho trước

Trên Hình 2.15 thấy rằng nếu P_F giảm, thì khoảng phát hiện thu hẹp lại và ngược lại. Như vậy ngưỡng phát hiện tối ưu phụ thuộc vào P_F . Xác suất báo động lầm càng nhỏ thì ngưỡng phát hiện càng cao.

| P_F | Ngưỡng phát hiện $[K_L \div K_R]$ |
|-------|-----------------------------------|
| 0,1 | $[-0,62 \div 0,62]$ |
| 0,01 | $[-0,86 \div 0,86]$ |
| 0,005 | $[-0,90 \div 0,90]$ |
| 0,001 | [-0,95 ÷ 0,95] |

Bång 2.2. Ngưỡng phát hiện K_L, K_R tương ứng với P_F cho trước

Trên Bảng 2.2 thấy rằng xác suất báo động lầm lớn khi sử dụng hệ số K làm tham số phát hiện. Điều này là không tránh khỏi khi sử dụng các tham số phân cực làm tham số phát hiện, như đã nhận định trong Chương 1 và có thể thấy rõ như trên Hình 2.12 và Hình 1.3. Do giá trị của K đối với các loại mục tiêu nằm trong khoảng (-1 ÷ 1), trong đó đặc trưng thống kê của hệ số K đối với nhiễu biển có dạng phân bố chuẩn trên miền giá trị này. Mức P_F cũng không thể nhỏ hơn 0,001 được vì thực tế sẽ không có mục tiêu nào trên nền nhiễu biển có thể vượt ngưỡng phát hiện K=0,95.

2.2.4. Đánh giá xác suất phát hiện đúng mục tiêu theo tham số phân cực K sử dụng tiêu chuẩn Neyman-Pearson

Nếu hàm W_{nb+mt} (*K*) có dạng như biểu thức (2.33), thì có thể tính được xác suất phát hiện đúng P_D theo ngưỡng phát hiện bằng cách thế biểu thức (2.49) vào biểu thức (2.45):

$$P_{D} = 1 - P_{M} = 1 - \int_{K_{L}}^{K_{R}} W_{\text{nb+mt}}(K) dK =$$

$$= \int_{K_{L}}^{K_{R}} \frac{4h^{2}(1 - K^{2})}{\left[(1 - K)^{2} + h^{2}(1 + K)^{2}\right]^{2}} \times \exp\left\{-\frac{a_{1}^{2}\left[(1 - K)^{2}b^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}\right]}{2\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}\right]}\right\} \times \left\{\left[1 + \frac{a_{1}^{2}\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}b^{2}\right]}{2\left[(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}\right]}\right] \times I_{0}\left[\frac{a_{1}^{2}bh(1 - K)^{2}}{(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}}\right] + \frac{a_{1}^{2}bh(1 - K)^{2}}{(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}} \times I_{1}\left[\frac{a_{1}^{2}bh(1 - K)^{2}}{(1 - K)^{2} + (1 + K)^{2}h^{2}}\right]\right\} dK$$

$$(2.50)$$

Từ biểu thức (2.50) có thể xây dựng được hàm phụ thuộc của P_D vào tham số *b*, được thể hiện như trên Hình 2.16 và vào P_F như trên Hình 2.17.



Hình 2.16. Sự phụ thuộc của xác suất phát hiện đúng P_D và đặc tính phân cực của tín hiệu tổng cộng b với P_F cho trước và $a_1 = 0,3$

Hình 2.16 chỉ ra rằng, xác suất phát hiện đúng phụ thuộc vào đặc tính phân cực của tín hiệu tổng cộng thông qua tham số *b*. Với cùng một giá trị P_F , nếu *b* tăng thì P_D tăng. Có thể thấy trên Hình 2.2, khi *b* tăng hàm PDF $W_{nb+mt}(K)$ dịch về giá trị K = 1. Hàm PDF của *K* đối với mục tiêu cộng nhiễu biển khác so với hàm PDF của *K* trong trường hợp chỉ có nhiễu biển. Với cùng một giá trị *b*, nếu P_F tăng, thì P_D cũng tăng. Điều này được thể hiện như trên Hình 2.17.



Hình 2.17. Xác suất phát hiện đúng ứng với xác suất báo động lầm cho trước và $a_1 = 1$ với các giá trị b khác nhau.

Trên Hình 2.18 chỉ ra xác suất phát hiện đúng phụ thuộc tỉ số SCR. Có thể thấy rằng xác suất phát hiện đúng tăng khi a_1 tăng. Với cùng xác suất báo động lầm, ví dụ với $P_F = 0,2$; nếu *b* tăng, xác suất phát hiện đúng cũng tăng. Khi sự khác biệt của tham số phân cực giữa mục tiêu và nhiễu biển (h = 1) càng lớn thì P_D càng tăng.

Nếu tham số phân cực mục tiêu có b = 2 gần bằng với tham số phân cực của nhiễu biển h = 1, thì xác suất phát hiện đúng thậm chí còn giảm mặc dù SCR tăng. Lí do của việc này là: nếu a_1 tăng, hàm mật độ xác suất W(K) hẹp hơn, và hàm mật độ W(K) của tham số K đối với cả hai trường hợp nhiễu biển cộng mục tiêu giống với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Kết quả là làm tăng xác suất báo động lầm và giảm xác suất phát hiện đúng. Nói cách khác là không thể phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số K khi mục tiêu có cùng hệ số K giống với nhiễu biển.



Hình 2.18. Xác suất phát hiện đúng theo a_1

Trên Hình 2.18 cũng chỉ ra rằng xác suất phát hiện đúng tăng trong khoảng giá trị $a_1 < 1$, ví dụ P_D tăng 0,6 dB đến 0,7 dB khi a_1 tăng từ 0,5 đến 1. Nếu $a_1 > 1$, xác suất phát hiện đúng chỉ tăng nhẹ khi a_1 tăng, cụ thể P_D chỉ tăng từ 0,3 dB đến 0,4 dB khi a_1 tăng từ 1,5 đến 3. Đó là do xác suất phát hiện đúng mục tiêu phụ thuộc rất nhiều vào đặc tính phân cực của mục tiêu so với nhiễu biển. Nếu hệ số phân cực của mục tiêu càng khác xa hệ số phân cực của nhiễu thì hiệu quả phát hiện tăng, còn nếu hệ số phân cực của mục tiêu càng gần với hệ số phân cực của nhiễu biển ($b\approx1$) thì hiệu quả phát hiện mục tiêu sẽ giảm hoặc không phát hiện được, kể cả là khi có tăng tỉ số SCR. Điều này khác với phương pháp phát hiện thông thường sử dụng ngưỡng phát hiện theo năng lượng, trong đó khi tăng tỉ số SCR thì xác suất phát hiện đúng tăng.

Trên Hình 2.18 cũng thấy rằng, với cùng một giá trị P_F , khi *b* càng tăng (tức là tham số phân cực mục tiêu càng khác so với tham số phân cực của nhiễu biển) thì P_D càng lớn hơn. Ví dụ với $P_F = 0,2$ và $a_I = 0,5$ thì khi b = 5 sẽ có $P_D=0,35$ trong khi với b = 8 sẽ cho $P_D = 0,6$. Hoặc với $P_F = 0,3$; $a_I = 0,5$ thì khi b = 5 sẽ có $P_D = 0,5$ trong khi với b = 8 sẽ cho $P_D = 0,78$.

Hình 2.19 là đánh giá so sánh xác suất phát hiện đúng P_D dựa trên SCR của phương pháp đề xuất với phương pháp của Gromov V.A [102, 103] với xác suất báo động lầm $P_F = 0,1$. Tín hiệu tổng cộng bằng $SCR = a_1^2 + a_2^2 = a_1^2(1+b^2)$ trong đó $a_1^2, a_2^2 = a_1^2b^2$ là tỉ số tín/nhiễu nền của hai kênh phân cực trực giao.



Hình 2.19. So sánh P_D theo phương pháp của Gromov và phương pháp đề xuất với trường hợp b=4, h=1.

Trên Hình 2.19 có thể thấy xác suất phát hiện đúng của phương pháp đề xuất cao hơn so với phương pháp của Gromov V.A trong trường hợp tỉ số tín hiệu/nhiễu nền bé. Với SCR = 4 dB, phương pháp đề xuất sẽ cho P_D = 0,7 trong khi với phương pháp của Gromov sẽ cho P_D = 0,22. Với SCR=7 dB phương pháp đề xuất có P_D =0,8, và của phương pháp Gromov có P_D =0,4. Tuy nhiên khi SCR > 14dB thì phương pháp của Gromov lại cho xác suất phát hiện đúng cao hơn, trong khi P_D của phương pháp sử dụng hệ số K gần ở mức không đổi.

2.3. Kết luận Chương 2

Trong Chương 2 nghiên cứu sinh đã khảo sát đặc trưng thống kê của hệ số *K* đối với nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển. Kết quả tính toán trong Chương 2 đã chỉ ra rằng, xác suất báo động lầm P_F khi sử dụng hệ số *K* làm tham số phát hiện còn tương đối lớn. Điều này làm cho việc ứng dụng trong thực tế chưa đạt được hiệu quả như mong muốn. Chỉ nên sử dụng hệ số *K* làm tham số phát hiện khi mục tiêu có $0.8 < K_{mt} < 1$ hoặc $-1 < K_{mt} < -0.8$ ứng với $P_F < 0.01$. Với các giá trị *K* của mục tiêu nằm trong khoảng $-0.8 < K_{mt} < 0.8$ sẽ làm cho $P_F > 0.01$.

Đặc biệt, nếu gặp trường hợp mục tiêu có hệ số phân cực gần với hệ số phân cực của nhiễu biển thì cũng sẽ không thể phát hiện được mục tiêu dựa trên tham số phân cực bất kể tỉ số SCR lớn hay không.

Như vậy để tăng hiệu quả sử dụng tham số phân cực trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển cần giải quyết được hai điểm hạn chế trên. Giải pháp mà nghiên cứu sinh đề xuất là sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực mà cụ thể là độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực *K* và độ lệch chuẩn của độ phân cực *DoP*. Nội dung nghiên cứu sẽ được trình bày ở chương tiếp theo.

Chương 3

ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRÊN MẶT BIẾN SỬ DỤNG ĐỘ LỆCH CHUẨN CỦA THAM SỐ PHÂN CỰC

Sau khi khảo sát khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực *K* trong Chương 2 thấy rằng xác suất báo động lầm của bài toán phát hiện còn tương đối lớn, thể hiện ở Bảng 2.2. Điều này là không tránh khỏi vì giá trị của hệ số elip phân cực *K* chỉ trong khoảng [-1: +1] ứng với tất cả các dạng mục tiêu (bao gồm cả nhiễu biển), như đã trình bày ở Mục 2.1.2 thông qua hàm phân bố xác suất của nhiễu biển và của mục tiêu cộng nhiễu biển. Trong chương này nghiên cứu sinh sẽ nghiên cứu biện pháp cải thiện nhược điểm này thông qua việc đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực *DoP*. Trong mỗi phần sẽ so sánh hiệu quả phát hiện khi sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực đó.

Đóng góp của Chương 3 được trình bày trong các bài báo số A3, A4.

3.1. Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K nhằm nâng cao chất lượng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển

3.1.1. Động lực nghiên cứu

Bài toán phát hiện các mục tiêu trên mặt biển là rất khó khăn đối với các hệ thống ra đa giám sát, kể cả khi sử dụng phương pháp Doppler do sự thăng giáng mạnh và tính không đồng nhất của mặt biển. Khi đó thông tin phân cực có thể trở thành tham số quan trọng để tăng khả năng phát hiện mục tiêu nhỏ trên mặt biển.

Để phân biệt hoặc phát hiện một mục tiêu trên nền nhiễu biển, thì việc sử dụng càng nhiều các dấu hiệu khác nhau giữa mục tiêu và nhiễu biển sẽ càng tăng khả năng phát hiện mục tiêu đó. Ngoài các dấu hiệu thường được sử dụng như dựa trên cường độ tín hiệu, tham số về tần số, thời gian thì tham số phân cực cũng là một trong những yếu tố có thể làm tăng thêm khả năng phát hiện mục tiêu. Tuy nhiên, khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển dựa vào tham số phân cực lại phụ thuộc rất nhiều vào sự khác nhau giữa tính chất phân cực của mục tiêu và của nhiễu biển. Một ví dụ về sự ảnh hưởng của tham số phân cực của nhiễu nền và của mục tiêu thông qua hệ số elip phân cực K được trình bày rõ trong Mục 2.1.

Tuy nhiên nếu mục tiêu và nhiễu biển có tham số phân cực gần giống nhau thì gần như không thể phát hiện được mục tiêu dựa trên dấu hiệu phân cực kể cả khi mục tiêu có RCS đủ lớn. Bài toán đặt ra là làm thế nào để có thể giải quyết được vấn đề này. Thông thường trong một diện tích xung ra đa, nhiễu biển là ngẫu nhiên vậy nên các tham số phân cực của nhiễu biển cũng sẽ ngẫu nhiên và thăng giáng theo sự thay đổi ngẫu nhiên của nhiễu biển. Nếu có mục tiêu ổn định và choán hết diện tích xung ra đa đó thì tín hiệu phản xạ về từ diện tích xung ra đa đó sẽ ổn định và như vậy tham số phân cực đo được trong diện tích xung ra đa này cũng sẽ ổn định.

Với phân tích như trên, có thể nghiên cứu tính ổn định của tham số phân cực trong trường hợp chỉ có nhiễu biển và trong trường hợp có mục tiêu trên nền nhiễu biển đó để tăng khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Và tính ổn định của tham số phân cực được thể hiện thông qua giá trị độ lệch chuẩn của nó.

Ngoài ra khi đánh giá kết quả thực nghiệm với việc phát hiện hiệu ứng "Vết" phân cực ở Mục 1.4 thấy rằng ngoài sự khác biệt của hệ số K trung bình đối với trường hợp ô phân giải cự ly có mục tiêu và trường hợp không có mục tiêu trên mặt biển, còn có sự thay đổi độ lệch chuẩn của hệ số phân cực K đối với hai trường hợp trên. Cụ thể với trường hợp không có mục tiêu trên mặt biển thì độ lệch chuẩn của K thay đổi từ 0,23 đến 0,56 tùy thuộc vào điều kiện sóng

biến, trong khi đó với trường hợp có mục tiêu trên mặt biến thì độ lệch chuẩn của K thay đổi từ 0,08 đến 0,125 cũng với điều kiện biển tương tự. Như vậy có thể sử dụng cả hệ số phân cực K và độ lệch chuẩn của K trong bài toán phát hiện mục tiêu trên bề mặt biển.

Trong phần này nghiên cứu sinh đề xuất thuật toán sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Nội dung chủ yếu gồm: đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số K, sau đó là khảo sát và so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện khi sử dụng hệ số K và độ lệch chuẩn của hệ số K. Bài toán đánh giá hiệu quả phát hiện khi sử dụng độ lệch chuẩn của K được thực hiện trong 3 trường hợp: trường hợp 1 là có các mục tiêu với hệ số K khác nhau trên cùng một mô hình nhiễu biển, trường hợp thứ hai là khi có một mục tiêu với hệ số K cụ thể nằm trên các mô hình nhiễu biển khác nhau, trường hợp thứ 3 là khi mục tiêu có hệ số K gần giống với hệ số K của nhiễu biển.

3.1.2. Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số K cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển

Để giải quyết bài toán phát hiện mục tiêu theo tham số phân cực, cần sử dụng phương pháp thống kê dựa trên sự khác biệt giữa các phân bố xác suất của tín hiệu phản xạ từ mặt biển và tín hiệu tổng cộng phản xạ từ mục tiêu cộng nhiễu biển. Các mô hình xác suất này đã được trình bày trong [95]. Tuy nhiên, khi sử dụng tham số độ lệch chuẩn thì hiện tại chưa có biểu thức giải tích nào mô tả được phân bố xác suất của tham số này. Vậy nên trong phần này nghiên cứu sinh chỉ đề xuất phương pháp để tính toán độ lệch chuẩn của hệ số K và sử dụng các biện pháp mô phỏng Monte Carlo để khảo sát khả năng sử dụng tham số này cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

Với những nghiên cứu trình bày trong Chương 2 về đặc tính thống kê của hệ số elip phân cực K, dựa trên biểu thức (2.34) trong trường hợp chỉ có

nhiễu biển có thể tính được giá trị *K* trung bình và phương sai của *K* theo các biểu thức sau [95]:

$$m_{\kappa} = \frac{\left[1 - h^{4} - 4h^{2}\ln h - h(1 - h^{2})\pi\right](1 + 0,007 \,\mathrm{R})}{(1 + h^{2})^{2}}$$
(3.1)
$$\sigma_{\kappa}^{2} = \left\{\frac{16h^{2}(h^{2} - 1)\ln h + 11h^{4} - 15h^{2} - h^{6} + 5}{(1 + h^{2})^{3}} - \frac{(1 + h^{2})^{4} - 4(1 - h^{2})^{4} - 48h^{2}(1 - h^{2})^{2}}{2h(1 + h^{2})^{3}} - \frac{\left[1 - h^{4} - 4h^{2}\ln h - h(h^{2} - 1)\pi\right]^{2}}{(1 + h^{2})^{2}} - 3\right\}(1 + 0,19 \,\mathrm{R-R^{2}})$$
(3.2)

Tương tự như khi sử dụng hệ số elip phân cực *K* cho bài toán phát hiện (Mục 2.2.2), khi sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *K* cho bài toán phát hiện thì bài toán đặt ra là quyết định có hay không mục tiêu trong CUT (Cell under Test), dựa trên dữ liệu thu được. Hay nói cách khác bài toán phát hiện là ra quyết định một trong hai giả thuyết: giả thuyết H_0 (không có mục tiêu) và giả thuyết H_1 (có mục tiêu). Có thể phát biểu dựa trên kiểm định tham số sau:

$$\begin{cases} H_0: & \sigma_K > \sigma_K^{ng} \\ H_1: & \sigma_K \le \sigma_K^{ng} \end{cases}$$
(3.3)

Với σ_{K}^{ng} là giá trị ngưỡng theo độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực *K* và được chọn dựa trên xác suất báo động lầm yêu cầu. Như đã biết, bộ phát hiện tối ưu sử dụng phép thử tỷ số hợp lý [55] cho xác suất phát hiện cao nhất (P_D) với xác suất báo động lầm cho trước P_F . Tuy nhiên do không có thông tin về phân bố của dữ liệu nên phép kiểm định tỷ số hợp lý khó áp dụng trong thực tế. Một phương pháp khác là sử dụng phép kiểm định tỷ số hợp lý tổng quát (GLR) trong đó các tham số chưa biết của phân bố được thay bằng giá trị ước lượng hợp lý cực đại (MLE) của chúng [55].

Các bước tính toán để khảo sát hiệu quả phát hiện khi sử dụng hệ số K (lưu đồ thuật toán Hình 2.14) và theo độ lệch chuẩn của hệ số K (lưu đồ thuật toán Hình 3.1) được thực hiện như sau:

- **Bước 1**. Tạo tín hiệu từ các kênh PCTP, PCTT S_{RR} , $\overline{S_{RL}}$. Với $s_{ij} = s_{ij}^{nb} + s_{ij}^{mt}$ là tổng tín hiệu phản xa từ mục tiêu và từ mặt biển.
- **Bước 2**. Từ các tín hiệu này tính toán tham số phân cực *K* theo biểu thức (2.41)
- Bước 3. So sánh tham số phân cực K với các giá trị ngưỡng phát hiện tương ứng;
- Bước 4. Lặp lại bước 1 đến bước 3 với số vòng lặp bằng 50 để tính được 50 giá trị K;
- **Bước 5**. Từ 50 giá trị K ở bước 4, tính độ lệch chuẩn σ_{K} của hệ số phân cực K;
- **Bước 6**. So sánh độ lệch chuẩn σ_{κ} thu được với σ_{κ}^{ng} , cách chọn σ_{κ}^{ng} theo xác suất báo động lầm yêu cầu được trình bày theo lưu đồ thuật toán Hình 3.2;
- Bước 7. Ra quyết định phát hiện mục tiêu.

Thuật toán chọn ngưỡng phát hiện σ_{K}^{ng} theo xác suất báo động lầm:

- **Bước 1**: Sử dụng 50 cặp mẫu E_R , E_L của tín hiệu nhiễu biển (không có mục tiêu) để tính được 50 giá trị K(i), i=1..50;
- **Bước 2**: Từ 50 giá trị K(i) được dùng để tính một giá trị độ lệch chuẩn σ_{K} ;
- **Bước 3**: Lặp lại Bước 1 và Bước 2 *M* lần để có được *M* giá trị $\sigma_K^m, m = 1..M$
- **Bước 4**: So sánh σ_K^m với σ_K^{ng} và đếm số mẫu *h* của σ_K^m thỏa mãn điều kiện $\sigma_K^m < \sigma_K^{ng}$. Xác suất báo động lầm được tính bằng:

$$P_F = \frac{h}{M}$$

- **Bước 5**: Nếu $P_F \leq P_{F-yc}$ thì chọn ngưỡng theo độ lệch chuẩn là σ_K^{ng} . Ngược lại sẽ giảm mức σ_K^{ng} trong bước 4.
- Để tính $P_F=10^{-6}$ thì cần sử dụng $M=10^6$ vòng lặp. Xác suất báo động lầm đạt được khi chỉ có nhiều nhất một giá trị $\sigma_K^m > \sigma_K^{ng}$.
- Tương tự như vậy để tính $P_F=10^{-5}$ thì cần sử dụng $M=10^5$ vòng lặp. Tính $P_F=10^{-4}$ thì cần sử dụng $M=10^4$ vòng lặp.



Hình 3.1. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng σ_K



Hình 3.2. Lưu đồ thuật toán tính ngưỡng phát hiện theo độ lệch chuẩn K, σ_{K}^{ng}

3.1.3. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo hệ số K và σ_K với các mục tiêu khác nhau

Trong phần này sử dụng mô hình nhiễu biển có phân bố Rayleigh, tạo 4 loại mục tiêu Swerling 0 với các hệ số *K* có giá trị khác nhau tương ứng là: 0,846; 0,8; 0,75; -0,857. Do hệ số *K* đối với tất cả các dạng mục tiêu là từ (-1, 1) nên ở đây NCS lựa chọn mục tiêu ở các vị trí gần cực trị của hệ số *K* ứng với các mục tiêu chuẩn. Mục tiêu 1 có *K*=0,846 gần bằng giá trị *K* của góc phản xạ hai mặt, mục tiêu 4 có *K*=-0,857 gần bằng với giá trị *K* của góc phản xạ ba mặt. Mục tiêu 2 có *K*=0,8 và mục tiêu 3 có *K*=0,75 nằm ở khoảng giá trị giữa nhằm mục đích làm rõ kết quả đã thảo luận trong Chương 2 rằng các mục tiêu có hệ số *K* trung bình của nhiễu biển ($\mu_K \approx 0$) thì xác suất phát hiện đúng càng cao. Giá trị *K* được chọn lớn hơn 0,7 vì ngưỡng phát hiện đặt bằng 0,7 ứng với *P_F*=0,064 (giá trị mô phỏng này đúng với tính toán lý thuyết theo giải tích trong Bảng 2.2). Miền giá trị SCR = -10 đến 20 dB.



Hình 3.3. Hệ số elip phân cực K của nhiễu biển và của mục tiêu cộng nhiễu biển

Kết quả khảo sát được trình bày như trên Hình 3.3 đến Hình 3.7. Hình 3.3 mô tả hệ số K thu được với hai trường hợp: chỉ có nhiễu biển và mục tiêu 1 cộng nhiễu biển.

Trên Hình 3.3 thấy rằng giá trị *K* đối với nhiễu biển dao động trong miền giá trị [-0,9 \div 0,9], điều này là do sự thăng giáng ngẫu nhiên của nhiễu biển. Trong khi đó với trường hợp mục tiêu 1 cộng nhiễu biển thì hệ số *K* dao động trong khoảng giá trị [0,5 \div 0,83]. Trong trường hợp này, giá trị *K* của mục tiêu cộng nhiễu biển cũng không bằng giá trị *K* thực của mục tiêu. Có thể khảo sát sự phụ thuộc của hệ số *K* đối với mục tiêu cộng nhiễu biển theo tỷ số tín/nhiễu SCR như trên Hình 3.4.



Hình 3.4. Hệ số K trung bình của nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển

Trên Hình 3.4 thấy rằng giá trị trung bình của hệ số *K* đối với nhiễu biển $\mu_K \approx 0$, trong khi đó giá trị *K* trung bình của mục tiêu cộng nhiễu biển tăng theo tỷ số SCR. SCR càng tăng thì giá trị *K* trung bình của mục tiêu cộng nhiễu biển càng tiến gần về giá trị *K* thực của mục tiêu. Mục tiêu 1 có giá trị *K* cao nhất nằm trên cùng, mục tiêu 4 có giá trị *K* nhỏ nhất nằm dưới cùng. Như vậy có thể

thấy rằng có sự khác biệt của hệ số K trong trường hợp có mục tiêu nằm trên nhiễu biển so với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Đây chính là dấu hiệu để có thể sử dụng hệ số K cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.



 $K_{mt1} = 0.846; K_{mt2} = 0.8; K_{mt3} = 0.75; K_{mt4} = -0.857$

Hình 3.5. Sự phụ thuộc của σ_K với các loại mục tiêu khác nhau

Hình 3.5 là giá trị σ_K ứng với các mục tiêu trên. Trên Hình 3.5 thấy rằng σ_K đối với nhiễu biển có giá trị lớn nhất và xấp xỉ bằng 0,4 và không đổi khi SCR thay đổi. Trong khi đó σ_K của mục tiêu cộng nhiễu biển là gần bằng nhau đối với các mục tiêu và nhỏ hơn so với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Khi SCR càng tăng thì giá trị độ lệch chuẩn cho trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển càng giảm, tiến đến 0. Như vậy cũng có thể thấy sự khác biệt lớn khi đo giá trị độ lệch chuẩn của trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển so với khi chỉ có nhiễu biển. Trong khi σ_K đối với nhiễu biển ổn định khoảng 0,4 thì σ_K đối với mục tiêu cộng nhiễu biển thay đổi và giảm khi SCR tăng, như vậy cũng có thể sử dung giá tri đô lệch chuẩn này trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

Có thể khảo sát đặc trưng thống kê của hệ số K đối với trường hợp nhiễu biển và trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển như trên Hình 3.6.



Hình 3.6. Đặc trưng thống kê của hệ số K với trường hợp chỉ có nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển

Hình 3.6 chỉ ra rằng có sự khác biệt về đặc trưng thống kê của giá trị K đối với trường hợp chỉ có nhiễu biển và trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển. Ngoài ra còn có sự khác biệt về độ lệch chuẩn của hai trường hợp trên. Giá trị K trung bình của nhiễu biển gần bằng 0, còn với trường hợp nhiễu biển cộng mục tiêu thì giá trị này thay đổi tùy theo các mục tiêu khác nhau. Độ lệch chuẩn của K đối với nhiễu biển gần bằng $\sigma_{\kappa} = 0,37$; đối với trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển thì $\sigma_{\kappa} = 0,07$ đối với mục tiêu 1 và bằng $\sigma_{\kappa} = 0,065$ đối với mục tiêu 4. Dựa trên Hình 3.6 có thể đặt mức ngưỡng để phát hiện mục tiêu trên mặt biển và không có mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số elip phân cực K hoặc σ_{κ} .



Hình 3.7. Đánh giá và so sánh đặc trưng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số K và σ_K

Hình 3.7 là kết quả khảo sát và so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số K và σ_K với 4 loại mục tiêu như trên. Xác suất báo động lầm cho trường hợp phát hiện theo hệ số K, P_F =0,057 và cho trường hợp σ_K , $P_F^{\sigma} = 10^{-4}$. Từ Hình 3.7 thấy rằng, trong trường hợp sử dụng hệ số K, xác suất phát hiện đúng đối với mục tiêu 4 là cao nhất và đối với mục tiêu 3 là thấp nhất. Cụ thể với SCR = 0 dB, thì P_D đối với mục tiêu 4 là 0,7; với mục tiêu 3 bằng 0,15; mục tiêu 1 bằng 0,67. Điều này có nghĩa rằng khi mục tiêu có hệ số K càng xa hệ số K của nhiễu biển thì xác suất phát hiện đúng sẽ cao hơn. Đối với trường hợp sử dụng σ_K thì xác suất phát hiện đúng của các mục tiêu gần bằng nhau và thay đổi đột ngột từ 0 đến 1. Kết quả được thể hiện trên Bảng 3.1.

| MT | Mục tiêu 1 | | Mục tiêu 2 | | Mục tiêu 3 | | Mục tiêu 4 | |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| SCR | K | σ_K | K | σ_K | K | σ_K | K | σ_K |
| -5 dB | 0,4 | 0 | 0,2 | 0 | 0,1 | 0 | 0,45 | 0 |
| 0 dB | 0,67 | 0,6 | 0,38 | 0 | 0,15 | 0 | 0,7 | 0,8 |
| 5 dB | 0,85 | 1 | 0,6 | 1 | 0,27 | 1 | 0,87 | 1 |

Bảng 3.1. Xác suất phát hiện đúng mục tiêu sử dụng hệ số K và σ_{K} .

Từ kết quả khảo sát trên Hình 3.7 và Bảng 3.1 thấy rằng giá trị *K* của mục tiêu càng xa giá trị *K* của nhiễu biển thì xác suất phát hiện đúng khi sử dụng hệ số *K* càng lớn, cụ thể với SCR=5 dB thì $P_D = 0,27$ đối với mục tiêu 3; $P_D = 0,6$ đối với mục tiêu 2; $P_D = 0,85$ đối với mục tiêu 1; $P_D = 0,87$ đối với mục tiêu 4. Trong khi $P_D = 1$ khi sử dụng σ_K đối với tất cả các mục tiêu với SCR =dB. Ngoài ra còn thấy rằng P_D khi sử dụng σ_K ít phụ thuộc vào đặc tính phân cực của mục tiêu hơn so với khi sử dụng hệ số *K*.

Khi so sánh phương pháp sử dụng hệ số K và σ_K thấy rằng P_D khi sử dụng σ_K cao hơn. Ví dụ với SCR = 0 thì khi sử dụng hệ số K, $P_D \approx 0.7$ đối với mục tiêu 4; $P_D \approx 0.67$ đối với mục tiêu 1; $P_D \approx 0.38$ đối với mục tiêu 2; $P_D \approx 0.15$ đối với mục tiêu 3; $P_D \approx 0.7$ đối với mục tiêu 4, còn khi sử dụng σ_K thì $P_D \approx 1$. Một ru điểm khác của phương pháp sử dụng σ_K là xác suất báo động lầm trong trường hợp này thấp hơn phương pháp sử dụng hệ số K (0.057 so với 10⁻⁴).

3.1.4. Phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số K và σ_K với các mô hình nhiễu biển khác nhau

Trong phần này sẽ thực hiện khảo sát hiệu quả phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số K và σ_K với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Kết quả khảo sát được trình bày như trên Hình 3.8 đến Hình 3.12. Các mô hình nhiễu biển gồm: mô hình Rayleigh, mô hình Weibull và mô hình Laplace (Hình 3.8). Mục tiêu

được khảo sát có hệ số K bằng 0,8. Hình 3.9 là hệ số K trung bình với trường hợp chỉ có nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển.



Hình 3.8. Các mô hình nhiễu biển khác nhau



Hình 3.9. Hệ số elip K trung bình với các mô hình nhiễu biển khác nhau khi có mục tiêu và không có mục tiêu

Trên Hình 3.9 thấy rằng giá trị *K* trung bình đối với các dạng nhiễu biển gần giống nhau và có giá trị gần bằng 0. Với trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển, giá trị *K* trung bình đối với mô hình nhiễu Weibull là cao nhất, thấp nhất là mô hình nhiễu Laplace. Giá trị *K* trung bình trong các trường hợp này tỉ lệ

thuận với SCR. Khi SCR tăng, giá trị *K* trung bình của mục tiêu cộng nhiễu biển tiến về gần giá trị *K* thực của mục tiêu.



Hình 3.10. Sự phụ thuộc của σ_K với các mô hình nhiễu biển khác nhau

Hình 3.10 là độ lệch chuẩn của hệ số *K* với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Trong trường hợp này, σ_K đối với mô hình Laplace là lớn nhất gần bằng 0,6 trong khi σ_K của mô hình Rayleigh và Weibull bé hơn, gần bằng nhau và bằng 0,4. Với trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển thì σ_K đối với mô hình Laplace cũng cao hơn so với mô hình Weibull và mô hình Rayleigh, trong khi đó mô hình Weibull có độ lệch chuẩn nhỏ nhất. σ_K trong trường hợp này cũng giảm tỷ lệ nghịch với SCR, cụ thể σ_K giảm từ 0,2 đến xấp xỉ 0 khi *SCR* tăng từ -10 dB lên 20 dB đối với mô hình nhiễu Rayleigh. Khi đó có thể kết luận rằng sử dụng mô hình Weibull sẽ cho kết quả tốt hơn so với mô hình Rayleigh và Laplace. Điều này cũng được thể hiện rõ hơn khi khảo sát đặc trưng thống kê của hệ số *K* đối với các mô hình nhiễu biển khác nhau như trên Hình 3.11.



Hình 3.11. Đặc trưng thống kê của hệ số K với các mô hình nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển khác nhau

Trên Hình 3.11 thấy rằng mô hình nhiễu Laplace có σ_K lớn nhất $\sigma_n^{Lap} \approx 0,574$; mô hình nhiễu Rayleigh có σ_K là nhỏ nhất $\sigma_n^{Ray} \approx 0,37$. Với giá trị độ lệch chuẩn này thì hiệu quả phát hiện khi sử dụng mô hình nhiễu Rayleigh sẽ là tốt nhất. Điều này được thể hiện rõ khi khảo sát hiệu quả phát hiện mục tiêu với các mô hình nhiễu biển được trình bày trên Hình 3.12.

Trên Hình 3.12 là kết quả khảo sát hiệu quả phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số *K* và σ_K với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Xác suất báo động lầm với trường hợp sử dụng hệ số *K*, $P_F^K = 0,065$ và $P_F^{\sigma_K} = 10^{-4}$ với trường hợp sử dụng σ_K . Có thể thấy rằng mô hình Rayleigh cho kết quả phát hiện tốt nhất, ví dụ với *SCR* = 5*dB* thì xác suất phát hiện đúng mục tiêu $P_D = 0,82$ đối với mô hình Laplace, $P_D = 1$ đối với mô hình Rayleigh và $P_D = 0,98$ đối với mô hình nhiễu Weibull.



Hình 3.12. Đặc trưng chất lượng phát hiện mục tiêu theo hệ số K và σ_K với các mô hình nhiễu biển khác nhau

Khi so sánh hiệu quả phát hiện giữa phương pháp sử dụng *K* và σ_K thấy rằng xác suất phát hiện đúng của phương pháp sử dụng σ_K tốt hơn, đồng thời xác suất báo động lầm cũng bé hơn đối với tất cả các mô hình nhiễu biển.

3.1.5. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo hệ số K và σ_K khi mục tiêu có hệ số K giống với hệ số K của nhiễu biển

Một ưu điểm khác của việc sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *K* trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển là khi mục tiêu có hệ số *K* gần giống với hệ số *K* trung bình của nhiễu biển, đặc trưng thống kê cho các trường hợp này được trình bày như trên Hình 3.13. Khi đó không thể sử dụng hệ số *K* để phân biệt hoặc phát hiện mục tiêu trên mặt biển vì không có sự khác biệt của hệ số *K* trong hai trường hợp: chỉ có nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển. Phần khảo sát này cũng được thực hiện với các dạng mô hình nhiễu biển khác nhau và mục tiêu có hệ số K = 0,1. Hệ số *K* trung bình và σ_K đối với các mô hình nhiễu biển khác nhau và mục tiêu cho loại mục tiêu này được trình bày trên Hình 3.14 và Hình 3.15.



Hình 3.13. Đặc trưng thống kê của hệ số K đối với nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển



Hình 3.14. *Hệ số K trung bình của nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển*Từ Hình 3.13 với Hình 3.11 thấy rằng độ lệch chuẩn của *K* đối với trường
hợp mục tiêu cộng nhiễu nền khi mục tiêu có cùng hệ số *K* giống với nhiễu biển
lớn hơn so với trường hợp mục tiêu có hệ số *K* khác với của nhiễu biển. Tuy
nhiên, *σ_K* của mục tiêu cộng nhiễu biển vẫn nhỏ hơn so với *σ_K* của nhiễu biển.

Trên Hình 3.14 thấy rằng hệ số *K* trung bình của nhiễu biển và trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển đối với các mô hình nhiễu khác nhau là bằng 0,1 và gần bằng với giá trị μ_K của nhiễu biển. Như vậy nếu dựa trên tham số này sẽ không thể phân biệt được mục tiêu trên mặt biển. Tuy nhiên khi xét đến kết quả như trên Hình 3.15 lại thấy rằng σ_K trong trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển lại khác biệt so với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Giá trị độ lệch chuẩn này cũng giảm khi SCR tăng lên. Như vậy có thể thấy rằng, khi không thể sử dụng hệ số *K* cho bài toán phát hiện thì vẫn có thể sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *K* để phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Hiệu quả phát hiện đối với dạng mục tiêu này được khảo sát với kết quả trình bày trên Hình 3.16 với các dạng mô hình nhiễu biển khác nhau.



Hình 3.15. $\sigma_K d\acute{o}i$ với nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển



Hình 3.16. Hiệu quả phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo K và σ_K khi mục tiêu và nhiễu biển có cùng hệ số K

Trên Hình 3.16 thấy rằng không thể phát hiện được mục tiêu khi sử dụng hệ số μ_K trong khi đó nếu sử dụng σ_K thì xác suất phát hiện đúng vẫn cao, cụ thể với SCR = 0 dB thì khi sử dụng độ lệch chuẩn $\sigma_K, P_D \approx 0.6$ đối với mô hình nhiễu Weibull; $P_D \approx 1$ với mô hình nhiễu Rayleigh; $P_D \approx 0$ với mô hình Laplace. Với SCR = 7 dB thì $P_D \approx 0.9$ đối với mô hình Laplace. Đây chính là hiệu quả rõ ràng nhất của phương pháp sử dụng độ lệch chuẩn hệ số *K*. Bất kể hệ số *K* của mục tiêu có giống với hệ số *K* của nhiễu biển vẫn có thể phát hiện được mục tiêu khi sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *K*.

3.2. Đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của độ phân cực *DoP* nhằm nâng cao chất lượng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển

3.2.1. Động lực nghiên cứu

Trong phần này nghiên cứu sinh tiếp tục khảo sát việc sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực với tham số khác là độ phân cực *DoP* trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển để củng cố nhận định về hiệu quả sử

dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực làm tham số phát hiện trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

Độ phân cực là một tham số quan trọng để mô tả tính chất phân cực của sóng điện từ [104, 105]. Việc tính toán *DoP* có thể xác định được đặc tính của mục tiêu dựa trên tín hiệu phản xạ. Trong phần này tác giả sử dụng độ phân cực *DoP* và độ lệch chuẩn của *DoP* cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Bố cục gồm: phần đầu đặt vấn đề nghiên cứu, tiếp theo sẽ giới thiệu về đặc trưng thống kê của độ phân cực *DoP*; sau đó thực hiện khảo sát bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ phân cực *DoP* và đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của *DoP*; cuối cùng là tiến hành khảo sát và so sánh hiệu quả phát hiện khi sử dụng hệ số *DoP* và độ lệch chuẩn của hệ số *DoP*.

3.2.2. Độ phân cực DoP

Giả sử mục tiêu với MTTX xác định được chiếu xạ bởi ra đa phân cực có khả năng thu được đồng thời phân cực kép (HH-HV, VV-VH, HH-VV). Trong tín hiệu phản xạ bao gồm cả tín hiệu của mặt biển xung quanh mục tiêu. Khi đó tín hiệu phản xạ trong một ô cự ly có mục tiêu được tính theo mô hình [106]:

$$H_1: x = Sh_t a + c + n \tag{3.4}$$

$$H_0: x = c + n \tag{3.5}$$

trong đó H_1 biểu diễn cho giả thuyết có mục tiêu và *S* là MTTX 2x2 của mục tiêu; h_t là véc-tơ Jones của tín hiệu phát xạ; *a* bao gồm dạng sóng phát xạ và thông tin về cự ly cũng như thông tin Doppler; *c* là tín hiệu phản xạ từ mặt biển; *n* là tạp âm trong mỗi kênh phân cực. Giả sử mục tiêu chỉ nằm trong một cell phân giải theo cự ly ra đa.

Khi đó hàm mật độ xác suất PDF có dạng [107]:

$$f_{H_1(x)} = \frac{1}{\pi^2 |\Sigma|} \exp\{-(x-s)^H \Sigma^{-1}(x-s)\}$$
(3.6)

$$f_{H_0(x)} = \frac{1}{\pi^2 |\Sigma|} \exp\left(-x^H \Sigma^{-1} x\right)$$
(3.7)

trong đó ^{*H*} kí hiệu cho chuyển vị Hermitian, \sum là ma trận hiệp phương sai và $|\Sigma|$ là định thức của ma trận Σ ; giá trị trung bình của véc-tơ x, $s = E(x) = Sh_s a$ và $\Sigma = E[(x-s)(x-s)^H]$.

Độ phân cực có thể được dùng để mô tả trạng thái phân cực của sóng phân cực một phần. Có thể rút ra được tham số này từ véc-tơ Stock hoặc từ ma trận hiệp phương sai phân cực. Trong phần này sẽ sử dụng ma trận hiệp phương sai phân cực *DoP* được tính bằng:

$$DoP = \frac{\sqrt{tr(\Sigma)^2 - 4|\Sigma|}}{tr(\Sigma)} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1}$$
(3.8)

trong đó $tr(\Sigma)$ là vết của ma trận Σ , λ_1 , λ_2 là trị riêng của ma trận Σ . Do trong thực tế ta không có thông tin tiên nghiệm về ma trận hiệp phương sai nên nó có thể được tính toán thông qua dữ liệu tập. Theo định nghĩa về ma trận hiệp phương sai phân cực [76] việc ước lượng ma trận $\hat{\Sigma}$ được thực hiện thông qua tập các mẫu quan sát được $x_1, x_2, ..., x_N$:

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n x_n^H$$
(3.9)

trong đó *N* là số mẫu được sử dụng. Nếu các trị riêng của ma trận $\hat{\Sigma}$ là $\hat{\lambda}_1$, $\hat{\lambda}_2$ thì độ phân cực *DôP* được tính bằng:

$$D\hat{o}P = \frac{\hat{\lambda}_{1} - \hat{\lambda}_{2}}{\hat{\lambda}_{1} + \hat{\lambda}_{2}}$$
(3.10)

3.2.3. Thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ phân cực DoP và σ_{DoP}



Hình 3.17. *Minh họa bài toán phát hiện theo DoP* Thống kê phát hiện được tính bằng:

$$T_{DoP} = D\hat{o}P \tag{3.11}$$

Trong đó *DôP* được tính theo công thức (3.10). Bài toán phát hiện sử dụng độ phân cực *DoP* được minh họa như trên Hình 3.17 và lưu đồ thuật toán Hình 3.18. Bộ phát hiện sẽ quyết định giả thuyết H_I nếu $T_{DoP} < \gamma_{DoP}^{ng}$, ngược lại sẽ quyết định H_0 . Trong đó γ_{DoP}^{ng} là ngưỡng phát hiện theo *DoP* và được lựa chọn dựa trên xác suất báo động lầm theo yêu cầu:

$$T_{DoP} = \begin{cases} f_{r0}(D\hat{o}P), & H_0 \\ f_{r1}(D\hat{o}P), & H_1 \end{cases}$$
(3.12)



Hình 3.18. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu theo hệ số DoP

Tương tự như vậy, khi sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *DoP* cho bài toán phát hiện thì bài toán đặt ra là quyết định có hay không mục tiêu trong CUT dựa trên dữ liệu thu được. Trên mỗi ô phân giải theo cự ly ứng với mỗi cặp giá trị tín hiệu thu được từ các kênh phân cực sẽ tính được tương ứng một giá trị *DoP* theo biểu thức (3.10). Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu theo độ lệch

chuẩn DoP được trình bày trên Hình 3.19. Để tính được độ lệch chuẩn σ_{DoP} của DoP cần phải có N giá trị DoP. Nếu $\sigma_{DoP} \leq \sigma_{DoP}^{ng}$ sẽ quyết định có mục tiêu trong cell phân giải đó và ngược lại.

$$\begin{cases} H_0: \quad \sigma_{DoP} > \sigma_{DoP}^{ng} \\ H_1: \quad \sigma_{DoP} \le \sigma_{DoP}^{ng} \end{cases}$$
(3.13)

trong đó σ_{DoP}^{ng} là ngưỡng phát hiện theo độ lệch chuẩn của DoP và được chọn dựa trên xác suất báo động lầm cho trước trong trường hợp chỉ có nhiễu biển, thuật toán chọn ngưỡng báo động lầm được trình bày như trên Hình 3.20.



Hình 3.19. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu theo σ_{DoP}



Hình 3.20. Lưu đồ thuật toán tính ngưỡng phát hiện σ_{DoP}

3.2.4. Khảo sát đặc trưng chất lượng phát hiện

a. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo độ phân cực DoP và σ_{DoP} với các mục tiêu khác nhau

Trong phần này sử dụng nhiễu biển có phân bố Rayleigh, tạo 3 dạng mục tiêu Swerling 0 với các hệ số DoP có giá trị khác nhau tương ứng là: 0,43; 0,58; 0,75. Lí do lựa chọn các mục tiêu có giá trị DoP khác nhau tương tự như chọn mục tiêu với các hệ số K khác nhau trong mục 3.1.

Thuật toán chọn ngưỡng phát hiện σ_K^{ng} được thực hiện như sau:

Bước 1: Sử dụng 50 cặp mẫu *E_{hh}*, *E_{hv}*, *E_{vh}*, *E_{vv}* của tín hiệu nhiễu biển (không có mục tiêu) để tính được 50 giá trị *DoP(i)*, *i*=1..50;
Bước 2: Từ 50 giá trị *DoP(i)* được dùng để tính một giá trị độ lệch chuẩn σ_{DoP};
Bước 3: Lặp lại Bước 1 và Bước 2 *M* lần để có được *M* giá trị σ^m_{DoP}, *m*=1..*M*Bước 4: So sánh σ^m_{DoP} với σ^{ng}_{DoP} và đếm số mẫu *h* của σ^m_{DoP} thỏa mãn điều kiện σ^m_{DoP} < σ^{ng}_{DoP}. Xác suất báo động lầm được tính bằng: *P_F* = *h*/*M*Bước 5: Nếu *P_F* ≤ *P_{F-yc}* thì chọn ngưỡng phát hiện theo độ lệch chuẩn là σ^{ng}_{DoP}. Ngược lại sẽ giảm mức σ^{ng}_{DoP} trong bước 4.
Để tính *P_F*=10⁻⁶ thì cần sử dụng *M*=10⁶ vòng lặp. Xác suất báo động lầm đạt được khi chỉ có nhiều nhất một giá trị σ^m_{DoP} > σ^{ng}_{DoP}.
Tương tự như vậy để tính *P_F*=10⁻⁵ thì cần sử dụng *M*=10⁵ vòng lặp. Tính *P_F*=10⁻⁴ thì cần sử dụng *M*=10⁴ vòng lặp.

Kết quả thể hiện như trên Hình 3.21 đến Hình 3.24. Hình 3.21 mô tả hệ số *DoP* nhận được trong hai trường hợp: chỉ có nhiễu biển và trường hợp mục tiêu 1 cộng nhiễu biển.



Hình 3.21. Độ phân cực DoP của nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển



Hình 3.22. Giá trị trung bình của DoP

Trên Hình 3.21 cho thấy giá trị DoP đối với nhiễu biển dao động trong vùng rộng $DoP_{nb} \approx 0,3 \div 1$, trong khi đó với trường hợp mục tiêu 1 (có $DoP_{mt} \approx 0,43$) cộng nhiễu biển (hình dưới) thì hệ số DoP dao động trong khoảng giá trị $DoP_{mt+nb} \approx 0,45 \div 0,85$. Trong trường hợp này, giá trị DoP của mục tiêu cộng nhiễu biển cũng không bằng giá trị DoP thực của mục tiêu (0,43).
Hình 3.22 là kết quả khảo sát sự phụ thuộc của hệ số *DoP* trung bình đối với mục tiêu cộng nhiễu biển theo tỷ số SCR.

Trên Hình 3.22 thấy rằng giá trị trung bình của hệ số DoP đối với nhiễu biển $DoP_{nb} \approx 0.9$; trong khi đó giá trị DoP trung bình của mục tiêu cộng nhiễu biển giảm theo tỷ số SCR. SCR càng tăng thì giá trị DoP trung bình của mục tiêu cộng nhiễu biển càng tiến gần về giá trị DoP thực của mục tiêu. Mục tiêu 1 có giá trị DoP bé nhất nằm dưới cùng, mục tiêu 3 ($DoP \approx 0.75$) có giá trị DoPlớn nhất nằm trên cùng. Như vậy, có thể thấy rằng có sự khác biệt của hệ số DoP trong trường hợp có mục tiêu nằm trên nhiễu biển so với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Đây chính là dấu hiệu để có thể sử dụng hệ số DoP cho bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.



Hình 3.23. σ_{DoP} của nhiễu biển và của mục tiêu cộng nhiễu biển

Hình 3.23 biểu diễn độ lệch chuẩn của *DoP* ứng với các mục tiêu trên. Trên Hình 3.23 thấy rằng độ lệch chuẩn của hệ số *DoP* đối với nhiễu biển có giá trị lớn nhất và xấp xỉ bằng 0,2. Trong khi đó độ lệch chuẩn của *DoP* đối với mục tiêu cộng nhiễu biển nhỏ hơn so với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Khi SCR càng tăng thì độ lệch chuẩn cho trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển càng giảm, tiến đến 0. Như vậy ta thấy có sự khác biệt về độ lệch chuẩn của trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển so với khi chỉ có nhiễu biển. Trong khi độ lệch chuẩn của *DoP* đối với nhiễu biển $\sigma_{DoP}^{nb} \approx 0,2$ và không thay đổi khi SCR thay đổi thì σ_{DoP} đối với mục tiêu cộng nhiễu biển thay đổi và giảm khi SCR tăng, như vậy cũng có thể sử dụng độ lệch chuẩn này trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.



Hình 3.24. Đặc trưng chất lượng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng DoP và σ_{DoP} với các mục tiêu khác nhau

Hình 3.24 là kết quả khảo sát và so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện mục tiêu khi sử dụng hệ số DoP và σ_{DoP} với 3 loại mục tiêu Swerling 0. Xác suất báo động lầm khi sử dụng tham số DoP trong trường hợp này, $P_F^{DoP} \approx 0,0033$ và trong trường hợp sử dụng σ_{DoP} là $P_F^{\sigma} \approx 10^{-5}$. Từ Hình 3.24 thấy rằng, trong trường hợp sử dụng hệ số DoP, xác suất phát hiện đúng đối với mục tiêu 1 là tốt nhất và đối với mục tiêu 3 là kém nhất. Cụ thể với SCR = 5dB, thì $P_D \approx 0,85$ đối với mục tiêu 1; $P_D \approx 0,78$ đối với mục tiêu 2; $P_D \approx 0,5$ đối với mục

tiêu 3 bằng. Điều này có nghĩa rằng khi mục tiêu có hệ số *DoP* càng xa hệ số *DoP* của nhiễu biển thì xác suất phát hiện đúng sẽ cao hơn. Khi sử dụng σ_{DoP} thì xác suất phát hiện đúng mục tiêu 1, mục tiêu 2 cao hơn so với mục tiêu 3. Cụ thể với SCR = 0 dB thì P_D =1 đối với mục tiêu 1 và mục tiêu 2, trong khi đạt được P_D =1 đối với mục tiêu 3 khi SCR = 10 dB. Khi so sánh phương pháp sử dụng hệ số *DoP* và σ_{DoP} thấy rằng xác suất phát hiện đúng khi sử dụng σ_{DoP} cao hơn. Ví dụ với SCR = 0 thì $P_D \approx 1$ khi sử dụng σ_{DoP} và cao hơn so với khi sử dụng hệ số *DoP*. Trên Hình 3.24 còn thấy P_D khi sử dụng σ_{DoP} đối với mục tiêu 3 thấp hơn so với khi sử dụng hệ số *DoP*, tuy nhiên ở đây là do P_F đối với trường hợp sử dụng hệ số *DoP* cao hơn so với P_F khi sử dụng σ_{DoP} , cụ thể $P_F^{DoP} \approx 0,0033$ trong khi $P_F^{\sigma} \approx 10^{-5}$ nên P_D thấp hơn nhưng thực ra khi cùng một giá trị P_F thì xác suất phát hiện đúng mục tiêu khi sử dụng σ_{DoP} luôn cao hơn so với khi chỉ sử dụng *DoP*.

b. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số DoP và σ_{DoP} với các mô hình nhiễu biển khác nhau

Trong phần này thực hiện khảo sát hiệu quả phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số DoP và σ_{DoP} với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Kết quả khảo sát được thể hiện như trên Hình 3.25 đến Hình 3.28. Các mô hình nhiễu biển gồm: mô hình Rayleigh, mô hình Weibull và mô hình Lognormal (Hình 3.25). Mục tiêu được khảo sát có hệ số DoP bằng 0,58.





Hình 3.26 thể hiện độ lệch chuẩn của hệ số *DoP* với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Trong trường hợp này, σ_{DoP} đối với mô hình nhiễu Lognormal là lớn nhất gần bằng 0,2 trong khi σ_{DoP} của mô hình Rayleigh và Weibull nhỏ hơn, gần bằng nhau và xấp xỉ bằng 0,13. Với trường hợp mục tiêu cộng nhiễu

biển thì σ_{DoP} đối với mô hình Lognormal cộng mục tiêu cũng cao hơn so với mô hình Weibull và mô hình Rayleigh, trong khi đó mô hình nhiễu Weibull có độ lệch chuẩn nhỏ nhất. Độ lệch chuẩn của hệ số *DoP* trong trường hợp này cũng giảm tỷ lệ nghịch với SCR, cụ thể σ_{DoP} giảm từ 0,13 đến xấp xỉ 0 khi SCR tăng từ -10 dB lên 20 dB đối với mô hình nhiễu Rayleigh. Trong trường hợp này có thể thấy rằng mô hình nhiễu Weibull sẽ cho kết quả tốt hơn so với mô hình Rayleigh và Lognormal. Hình 3.27 là kết quả khảo sát đặc trưng thống kê của hệ số *DoP* đối với các mô hình nhiễu biển khác nhau.



Hình 3.27. Đặc trưng thống kê của hệ số DoP với các mô hình nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển

Trên Hình 3.27 thấy rằng mô hình nhiễu Lognormal có độ lệch chuẩn của DoP lớn nhất $\sigma_{DoPn}^{Log} \approx 0,2$, mô hình Weibull có σ_{DoP} là nhỏ nhất $\sigma_{DoPn}^{Wb} \approx 0,127$. Với giá trị độ lệch chuẩn này thì hiệu quả phát hiện khi sử dụng mô hình nhiễu Weibull sẽ là tốt nhất. Điều này được thể hiện rõ khi khảo sát hiệu quả phát hiện mục tiêu với các mô hình nhiễu biển được trình bày trên Hình 3.28.



Hình 3.28. Hiệu quả phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng DoP và σ_{DoP} với các mô hình nhiễu biển

Hình 3.28 là kết quả khảo sát hiệu quả phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số DoP và σ_{DoP} với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Xác suất báo động lầm với trường hợp này là P_F = 0,0058. Có thể thấy rằng khi sử dụng hệ số DoP thì mô hình Weibull cho kết quả phát hiện tốt nhất, ví dụ với SCR = 5 dB thì xác suất phát hiện đúng mục tiêu $P_D = 0$ đối với mô hình Lognormal, $P_D = 0,6$ đối với mô hình Rayleigh và $P_D = 0,7$ đối với mô hình Weibull. Khi so sánh hiệu quả phát hiện giữa phương pháp sử dụng hệ số DoP và phương pháp sử dụng σ_{DoP} thấy rằng xác suất phát hiện đúng của phương pháp sử dụng σ_{DoP} cao hơn. Ví dụ với SCR < 3 dB thì P_D của phương pháp sử dụng σ_{DoP} thấp hơn so với khi sử dụng hệ số DoP với $P_D \approx 0$ (điều này là do không cùng một xác suất báo động lầm) nhưng với SCR > 6 dB thì P_D với phương pháp sử dụng σ_{DoP} cao hơn với $P_D \approx 1$. Nhìn chung với cùng một xác suất báo động lầm thì khi sử dụng σ_{DoP} thì hiệu quả phát hiện mục tiêu luôn cao hơn so với khi chỉ sử dụng DoP.

c. Phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số DoP và σ_{DoP} khi mục tiêu có hệ số DoP giống với nhiễu biển

Một ưu điểm khác của việc sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *DoP* trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển là khi mục tiêu có hệ số *DoP* gần giống với hệ số *DoP* trung bình của nhiễu biển, bài toán được minh họa như trên Hình 3.29. Trong trường hợp này không thể sử dụng hệ số *DoP* để phân biệt hoặc phát hiện mục tiêu trên mặt biển vì không có sự khác biệt của hệ số *DoP* trong hai trường hợp: chỉ có nhiễu biển và trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển. Phần khảo sát này cũng được thực hiện với các mô hình nhiễu biển khác nhau và mục tiêu có hệ số *DoP* ≈1. Các mô hình nhiễu biển gồm: mô hình Rayleigh, mô hình Weibull và mô hình Lognormal (như trên Hình 3.25). Hệ số *DoP* trung bình và σ_{DoP} đối với các mô hình nhiễu biển khác nhau cộng mục tiêu được trình bày trên Hình 3.30 và 3.31.



Hình 3.29. Đặc trưng thống kê của hệ số DoP khi mục tiêu có hệ số DoP giống nhiễu biển



Hình 3.30. µ_{DoP} đối với nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển





Trên Hình 3.30 thấy rằng hệ số *DoP* trung bình của nhiễu biển và mục tiêu cộng nhiễu biển đối với các dạng mô hình nhiễu khác nhau gần bằng 1, bằng với hệ số *DoP* của nhiễu biển. Như vậy nếu dựa trên tham số này sẽ không thể phân biệt được mục tiêu trên mặt biển. Tuy nhiên, khi xét đến kết quả như trên

Hình 3.31 lại thấy rằng σ_{DoP} trong trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển lại khác so với trường hợp chỉ có nhiễu biển. Giá trị độ lệch chuẩn này cũng giảm khi SCR tăng lên. Như vậy có thể thấy rằng, khi không thể sử dụng hệ số *DoP* cho bài toán phát hiện thì vẫn có thể sử dụng σ_{DoP} để phát hiện mục tiêu trên mặt biển. Chất lượng phát hiện đối với dạng mục tiêu này được trình bày trên Hình 3.32 với các mô hình nhiễu biển khác nhau.



Hình 3.32. So sánh hiệu quả phát hiện mục tiêu trên mặt biển theo hệ số DoP [87] và σ_{DoP} khi mục tiêu có DoP giống với nhiễu biển

Trên Hình 3.32 thấy rằng không thể phát hiện được mục tiêu khi sử dụng hệ số *DoP* [87] trong khi đó nếu sử dụng σ_{DoP} thì xác suất phát hiện đúng vẫn cao, cụ thể với SCR = 0 dB thì $P_D \approx 1$ khi sử dụng σ_{DoP} đối với các mô hình nhiễu biển khác nhau. Đây chính là hiệu quả rõ ràng nhất của phương pháp sử dụng độ lệch chuẩn hệ số *DoP*. Bất kể hệ số *DoP* của mục tiêu có giống với hệ số *DoP* của nhiễu biển vẫn có thể phát hiện được mục tiêu trên mặt biển khi sử dụng σ_{DoP} .

3.3. Kết luận Chương 3

Kết quả tính toán và khảo sát trong Chương 3 đã chỉ ra rằng, phương pháp sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực: σ_K và σ_{DoP} làm tham số phát hiện đã nâng cao chất lượng phát hiện các mục tiêu trên mặt biển so với khi chỉ sử dụng các tham số phân cực *K* và *DoP*.

Cụ thể là đã giảm đáng kể xác suất báo động lầm và tăng xác suất phát hiện đúng mục tiêu khi sử dụng σ_K và σ_{DoP} . Kết quả chỉ ra rằng với các mục tiêu có SCR > 5 dB thì hầu hết phương pháp sử dụng σ_K và σ_{DoP} đều cho $P_D = 1$ với $P_F = 10^{-5}$ và xác suất phát hiện đúng mục tiêu cũng ít phụ thuộc vào đặc tính phân cực hơn.

Ngoài ra khi sử dụng σ_K và σ_{DoP} làm tham số phát hiện còn có thể phát hiện được các mục tiêu có cùng tham số phân cực với nhiễu biển với xác suất phát hiện đúng cao mà không thể phát hiện được nếu chỉ sử dụng các tham số phân cực *K* và *DoP*.

Kết quả khảo sát cũng chỉ ra rằng, về cơ bản chất lượng phát hiện mục tiêu sử dụng tham số phân cực *K*, *DoP* hoặc σ_K và σ_{DoP} phụ thuộc vào đặc tính phân cực của mục tiêu, phụ thuộc vào tỉ số SCR đồng thời cũng phụ thuộc vào đặc trưng thống kê của tham số phân cực nhiễu biển. Các mô hình nhiễu biển khác nhau sẽ cho chất lượng phát hiện khác nhau.

Chương 4

KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG CHẤT LƯỢNG PHÁT HIỆN CÁC MÔ HÌNH MỤC TIÊU RA ĐA TRÊN MẶT BIỀN SỬ DỤNG ĐỘ LỆCH CHUẨN CỦA THAM SỐ PHÂN CỰC

Với những đề xuất về thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực *K* và độ phân cực *DoP* như ở Chương 3. Trong Chương 4 nghiên cứu sinh thực hiện việc khảo sát và đánh giá đặc trưng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa Swerling sử dụng σ_K và σ_{DoP} . Các mô hình mục tiêu được khảo sát là Swerling 0 đến Swerling 4 trên nền nhiễu Rayleigh. Tham số phát hiện bao gồm cả hệ số *K*, *DoP* và σ_K và σ_{DoP} .

Đóng góp của Chương 4 nằm trong bài báo số A5.

4.1. Khảo sát khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa Swerling sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực

Trong phần này thực hiện mô phỏng khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực: σ_K và σ_{DoP} . Các tham số của ba mục tiêu với mô hình Swerling 0 như hệ số *K*, độ phân cực *DoP*, cự ly, RCS được cho trên Bảng 4.1. Cách lựa chọn tham số mục tiêu tương tự như mục 3.1. Nhiễu biển được sử dụng để mô phỏng có mô hình Rayleigh. Lưu đồ thuật toán phát hiện mục tiêu sử dụng hai tham số σ_K và σ_{DoP} được trình bày trên Hình 4.1 và Hình 4.2.

Trong lưu đồ thuật toán Hình 4.1 và Hình 4.2 thì số vòng lặp L dùng để tính xác suất phát hiện đúng sử dụng phương pháp Monte Carlo được chọn theo nguyên tắc được trình bày trong [108]. Số lượng vòng lặp cần thiết để thu được kết quả với độ tin cậy theo yêu cầu bằng:

$$L = \left[\frac{100z_c S_x}{E\overline{x}}\right] \tag{4.1}$$

trong đó: $z_c - d\phi$ tin cậy theo yêu cầu; S_x - độ lệch chuẩn của mẫu; E - phần trăm sai số của giá trị trung bình mẫu; \bar{x} – trung bình của mẫu.

Với độ chính xác bằng 95% thì $z_c=1,96$ [108]. Giá trị trung bình của độ lệch chuẩn σ_K , σ_{DoP} theo kết quả tính toán ở Chương 3 trong trường hợp có mục tiêu là $\bar{x} = 0,1$. Độ lệch chuẩn của 50 giá trị σ_K , σ_{DoP} theo kết quả ở Chương 3 là $S_x=0,05$. Sai số của giá trị trung bình mẫu tính bằng 5% nên E=5. Với các tham số như vậy thì số vòng lặp cần thiết tính theo biểu thức (4.1) là L=384.

| | Mục tiêu 1 | Mục tiêu 2 | Mục tiêu 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| Cự ly (m) | 2024,66 | 3518,63 | 3845,04 |
| Hệ số K | 0,82 | -0,75 | -0,98 |
| Hệ số <i>DoP</i> | 0,18 | 0,28 | 0,71 |
| RCS (m ²) | 0,5 | 0,1 | 0,7 |

Bång 4.1. Tham số mục tiêu

Hình 4.3 đến 4.6 mô tả kết quả mô phỏng khả năng phát hiện mục tiêu sử dụng hệ số *K* và độ phân cực *DoP* (Hình 4.5) cũng như dựa trên σ_K và σ_{DoP} (Hình 4.6). Hình 4.3 mô tả tín hiệu phản xạ về sau mỗi xung, Hình 4.4 mô tả tín hiệu sau tích lũy tương can (*N*=10 xung) có sử dụng bộ tự động điều chỉnh hệ số khuếch đại theo thời gian STC. Hình 4.5 là kết quả tính toán hệ số *K* và *DoP* theo thời gian. Hình 4.6 là kết quả tính σ_K và σ_{DoP} . Vị trí mục tiêu nằm tại vị trí được đánh dấu bằng đường thẳng nét đứt trên Hình 4.5 và Hình 4.6. Ngoài ba vị trí mục tiêu là nhiễu biển.



Hình 4.1. Lưu đồ thuật toán khảo sát khả năng phát hiện mục tiêu sử dụng σ_K



Hình 4.2. Lưu đồ thuật toán khảo sát khả năng phát hiện mục tiêu sử dụng σ_{DoP}

Trên lưu đồ thuật toán Hình 4.1 và 4.2, để tính hệ số K và σ_K cần phải sử dụng hệ thống ra đa phân cực tròn hai kênh với cặp tín hiệu $E_L(m,n)$, $E_R(m,n)$ và để tính hệ số DoP thì cần hệ thống ra đa phân cực 4 kênh đầy đủ E_{hh} , E_{hv} , E_{vh} , E_{vv} . Các tín hiệu này cho ở dạng ma trận mxn, trong đó m là số mẫu theo thời gian (theo cự ly), n là số mẫu dùng để tính σ_K . Mục tiêu nằm trên một cell cự ly cho trước trên trục thời gian. Mỗi cặp tín hiệu E_L , E_R tương ứng tính được một giá trị K, mỗi bộ giá trị E_{hh} , E_{hv} , E_{vh} , E_{vv} tương ứng tính được một giá trị DoP.

Mỗi kênh thu này bao gồm tín hiệu nhiễu biển (với các mô hình khác nhau) và mục tiêu nằm ở ô cự ly cần xem xét. Để tính hệ số *K* trong trường hợp có mục tiêu+nhiễu biển thì cần xử lý tại giá trị *m* ứng với vị trí mục tiêu, ngoài vị trí mục tiêu là tín hiệu chỉ của nhiễu biển.

Các mục tiêu Swerling 0, 1, 2, 3, 4 ứng với mục tiêu có điểm chói không thăng giáng, mục tiêu có điểm chói thăng giáng nhanh (hoặc thăng giáng chậm) và mục tiêu không điểm chói thăng giáng nhanh (hoặc thăng giáng chậm). Mô hình tín hiệu ở đây là tín hiệu điện, do tính chất phân cực chỉ thể hiện từ không gian đến phần anten, sau anten thu là tín hiệu điện thông thường. Tín hiệu của các kênh E_L , E_R , E_{hh} , $E_{h\nu}$, $E_{\nu\nu}$ đối với các mô hình mục tiêu Swerling 0, 1, 2, 3, 4 thể hiện đúng tính chất thăng giáng của các mục tiêu Swerling nêu trên. Các mô hình mục tiêu Swerling được lấy từ các mô hình mục tiêu có sẵn trong phần mềm Matlab2016.



Hình 4.4. Tín hiệu sau tích luỹ tương can, N=10;



Hình 4.5. Các tham số phân cực mục tiêu, K và DoP

Hình 4.5 cho thấy, tham số phân cực của mục tiêu thay đổi do ảnh hưởng của nhiễu biển và khác so với giá trị thực. Cụ thể, với mục tiêu 1, giá trị *K* đo được $\hat{K} = 0,5$ so với giá trị thực K = 0,82, mục tiêu 2 có $\hat{K} = -0,48$ so với giá trị thực K = -0,75; mục tiêu 3 có $\hat{K} = -0,4$ so với giá trị thực K = -0,98. Tương tự như vậy, mục tiêu 1 có hệ số $D\partial P = 0,6$ so với giá trị thực DoP = 0,18; mục tiêu 2 có $D\partial P = 0,7$ so với giá trị thực DoP = 0,28; mục tiêu 3 có $D\partial P = 0,83$ so với giá trị thực DoP = 0,71 (Bảng 4.2). Có một số vị trí của nhiễu biển, giá trị *K* và DoP còn rõ rệt hơn so với vị trí mục tiêu. Như vậy khi sử dụng hệ số *K* hoặc DoP thì giá trị của các tham số này đối với mục tiêu nằm lẫn trong các giá trị hiện được với xác suất báo động lầm lớn.



Hình 4.6. Độ lệch chuẩn của tham số phân cực K và DoP

Ngược lại như trên Hình 4.6 sau khi xử lý theo độ lệch chuẩn của tham số phân cực có thể thấy σ_K và σ_{DoP} tại vị trí có mục tiêu khác so với các vị trí của nhiễu biển. Ví dụ σ_K đối với nhiễu biển cao hơn, dao động trong khoảng giá trị từ 0,35 ÷ 0,45; trong khi $\sigma_K \approx 0,1$ đối với mục tiêu 1; $\sigma_K \approx 0,11$ với mục tiêu 2 và $\sigma_K \approx 0,12$ đối với mục tiêu 3. Tương tự như vậy, độ lệch chuẩn của DoP đối với nhiễu biển $\sigma_{DoP} = 0,1 \div 0,15$; trong khi đó $\sigma_{DoP} = 0,05$ ứng với mục tiêu 1; $\sigma_{DoP} = 0,06$ với mục tiêu 2 và $\sigma_{DoP} = 0,07$ với mục tiêu 3. Giá trị độ lệch chuẩn σ_K và σ_{DoP} tại vị trí của mục tiêu khác so với nhiễu biển xung quanh. Điều này được thể hiện trên Bảng 4.2. Ví dụ ở cột mục tiêu 1: mục tiêu có hệ số K=0,82; độ phân cực DoP=0,18; $\sigma_K = 0,35\div0,45$ và $\sigma_{DoP} = 0,35\div0,45$ đối với nhiễu biển; khi mục tiêu cộng nhiễu biển thì số K = 0,5; độ phân cực DoP=0,6; $\sigma_K = 0,1$ và $\sigma_{DoP} = 0,05$. Có sự khác biệt lớn của các giá trị này trong trường hợp có mục tiêu và không có mục tiêu. Như vậy, nếu sử dụng tham số phát hiện là σ_K và σ_{DoP} thì khả năng phát hiện mục tiêu sẽ tốt hơn so với khi sử dụng tham số K và DoP.

| Tham số | Mục tiêu 1 | | Mục tiêu 2 | | Mục tiêu 3 | |
|-----------------------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | MT/Nhiễu | MT+Nhiễu | MT/Nhiễu | MT+Nhiễu | MT/Nhiễu | MT+Nhiễu |
| K | 0,82 | 0,5 | -0,75 | -0,48 | -0,98 | -0,4 |
| DoP | 0,18 | 0,6 | 0,28 | 0,7 | 0,71 | 0,83 |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle K}$ | 0,35÷0,45 | 0,1 | 0,35÷0,45 | 0,11 | 0,35÷0,45 | 0,12 |
| $\sigma_{\scriptscriptstyle DoP}$ | 0,1÷0,15 | 0,05 | 0,1÷0,15 | 0,06 | 0,1÷0,15 | 0,07 |

Bảng 4.2. Các tham số phân cực của mục tiêu

4.2. Đánh giá và so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực

Để đánh giá đặc trưng chất lượng phát hiện với các mô hình mục tiêu Swerling khi sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực K và DoP ta thực hiện theo thuật toán sau.

Thuật toán đánh giá hiệu quả phát hiện mục tiêu sử dụng σ_{K} , σ_{DoP}

- Bước 1: Úng với mỗi giá trị RCS của mục tiêu, sử dụng 50 cặp mẫu tín hiệu tại vị trí có mục tiêu 1 (mục tiêu Swerling) để tính được 50 giá trị K(i) và DoP(i) i=1..50;
- **Bước 2**: Từ 50 giá trị K(i) và DoP(i) được dùng để tính một giá trị độ lệch chuẩn σ_{K}, σ_{DoP}
- **Bước 3**: Lặp lại Bước 1 và Bước 2 *L* lần để có được *L* giá trị $\sigma_K(l)$, $\sigma_{DoP}(l)$, l=1..L
- **Bước 4**: So sánh σ_{K}^{l} với σ_{K}^{ng} , σ_{DoP}^{l} với σ_{DoP}^{ng} , và đếm số mẫu *h* của σ_{K}^{l} , σ_{DoP}^{l} thỏa mãn điều kiện $\sigma_{K}^{l} < \sigma_{K}^{ng}$ và $\sigma_{DoP}^{l} < \sigma_{DoP}^{ng}$. Ngưỡng phát hiện theo σ_{K} và σ_{DoP} được tính theo lưu đồ thuật toán Hình 3.2 và Hình 3.20. Xác suất phát hiện đúng được tính bằng:

$$P_D = \frac{h}{L}$$

Bước 5: Dựng đồ thị (RCS, *P*_D).

Ứng với mỗi giá trị RCS của mục tiêu 1, tạo 50 cặp mẫu tín hiệu độc lập để tính 50 giá trị của *K* và *DoP*. Sau đó, với mỗi 50 giá trị này được dùng để tính một giá trị σ_{K} và σ_{DoP} đối với mục tiêu 1. Ứng với mỗi giá trị SCR sẽ thực

hiện *L* vòng lặp để thu được số lượng các giá trị σ_{K}^{l} và σ_{DoP}^{l} , *i*=1..*L*. Các giá trị này được dùng để tính xác suất phát hiện đúng. Xác suất phát hiện đúng được tính bằng số lần giá trị độ lệch chuẩn nhỏ hơn mức ngưỡng phát hiện trên tổng số vòng lặp *L*. Ngưỡng phát hiện theo độ lệch chuẩn được tính dựa trên xác suất báo động lầm khi chỉ có nhiễu biển (Thuật toán tính ngưỡng phát hiện theo độ lệch chuẩn được tiêu và hệ thống như trên Bảng 4.1. Sau đó đánh giá hiệu quả phát hiện các mô hình mục tiêu ra đa Swerling khác nhau sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực. Kết quả so sánh xác suất phát hiện đúng mục tiêu dựa trên độ lệch chuẩn của *K* và của *DoP* với các mô hình mục tiêu Swerling được cho như trên Hình 4.5, Hình 4.6 ứng với các giá trị xác suất báo động lầm khác nhau.

Hình 4.7 cho thấy xác suất phát hiện đúng P_D khi sử dụng σ_{DoP} đối với mục tiêu Swerling 0 và Swerling 1 là tốt nhất. Cụ thể với trường hợp $P_F = 10^{-6}$ như trên Hình 4.7.b khi SCR > 2dB thì xác suất phát hiện đúng đối với mô hình mục tiêu Swerling 0, 1 là $P_D \approx 1$. P_D đối với mục tiêu Swerling 2, 3, 4 gần tương đương nhau và kém hơn so với mục tiêu Swerling 0, 1. Cụ thể với $P_F = 10^{-6}$ (Hình 4.7.b), khi SCR = 4,5dB thì $P_D = 0,9$ đối với mục tiêu Swerling 2,3,4; $P_D = 1$ đối với mục tiêu Swerling 0, 1. Khi SCR > 5dB thì $P_D = 1$ đối với tất cả các mô hình mục tiêu Swerling. Như vậy, có thể thấy đối với mục tiêu có điểm chói, không thăng giáng hoặc thăng giáng chậm thì độ ổn định của hệ số DoPtrong trường hợp mục tiêu cộng nhiễu biển cao hơn, do đó xác suất phát hiện đúng tốt hơn.



Hình 4.7. Đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu sử dụng σ_{DoP} và mô hình mục tiêu Marcum-Swerling 0 [109]

Khi so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling với mô hình Marcum – Swerling 0 [109] thấy rằng xác suất phát hiện đúng mục tiêu khi sử dụng σ_{DoP} đối với mô hình mục tiêu Swerling 0 và Swerling 1 tốt hơn so với mô hình Marcum-Swerling 0 của phương pháp sử dụng năng lượng, trong khi xác suất phát hiện các mục tiêu Swerling 2, 3, 4 bằng độ lệch chuẩn của DoP kém hơn so với mô hình Marcum-Swerling 0. Cụ thể với SCR = 2 dB thì $P_D = 0,6$ đối với mô hình Marcum-Swerling 0, $P_D = 1$ đối với mô hình Swerling 0, Swerling 1 khi sử dụng σ_{DoP} , $P_D=0$ đối với các mô hình Swerling 2, 3, 4 khi sử dụng σ_{DoP} . Khi SCR = 4 dB thì $P_D = 0,95$ đối với mô hình Marcum-Swerling 0, $P_D = 1$ đối với mô hình Swerling 0, Swerling 1 khi sử dụng σ_{DoP} , $P_D=0,9$ đối với các mô hình Swerling 2, 3, 4 khi sử dụng σ_{DoP} .



a, $P_F = 10^{-5}$



Hình 4.8. Đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling sử dụng σ_K và mô hình Marcum-Swerling 0 [109]

Trên Hình 4.8 ứng với trường hợp sử dụng σ_K cho thấy P_D đối với các mô hình mục tiêu Swerling là gần bằng nhau. Cụ thể với $P_F > 10^{-5}$ thì $P_D \approx 1$ khi $SCR \ge 4 dB \cdot P_D$ tăng đột biến từ 0 đến 1 khi SCR thay đổi từ 0 đến 4 dB. Khi so sánh với mô hình Marcum-Swerling 0, với trường hợp $P_F=10^{-6}$ như trên Hình 4.6 thấy rằng, với SCR > 2 dB thì xác suất phát hiện đúng các mô hình mục tiêu Swerling 0, 1 khi sử dụng độ lệch chuẩn của *K* chỉ tốt hơn một chút so với mô hình Marcum-Swerling 0. Ngược lại khi SCR < 2 dB thì xác suất phát hiện đúng của mô hình Marcum-Swerling 0 sử dụng tham số năng lượng tốt hơn so với các mô hình Swerling sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số *K*. Ngoài ra khi P_F giảm thì P_D đối với các mục tiêu Swerling sử dụng σ_K cao hơn so với P_D của mô hình Marcum-Swerling 0 như trên Hình 4.8.a. Khi so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling sử dụng σ_{DoP} thì xác suất phát hiện đúng mục tiêu Swerling 0 là tốt nhất, trong khi đó với trường hợp sử dụng σ_K thì đặc trưng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling là gần bằng nhau.

4.3. So sánh đặc trưng chất lượng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng σ_K và σ_{DoP}

Quá trình so sánh được thực hiện khi mô phỏng khả năng phát hiện các mô hình mục tiêu có điểm chói không thăng giáng Swerling 0, mục tiêu có điểm chói thăng giáng chậm Swerling1 và mục tiêu không điểm chói thăng giáng chậm với hai tham số phát hiện khác nhau là σ_{K} và σ_{DoP} . Kết quả so sánh được trình bày trên Hình 4.9.





Hình 4.9 cho thấy nhìn chung đặc trưng chất lượng phát hiện các mô hình mục tiêu Swerling khi sử dụng σ_{DoP} tốt hơn so với khi sử dụng σ_K . Tuy nhiên đối với mục tiêu Swerling 3 thì phương pháp sử dụng σ_K cho kết quả tốt hơn khi sử dụng σ_{DoP} . Với SCR > 4 dB thì xác suất phát hiện đúng mục tiêu $P_D=1$

khi sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực. Nếu $P_D = 2$ dB thì $P_D = 1$ đối với các mục tiêu Swerling 0, 1; $P_D = 0,1$ đối với mục tiêu Swerling 3 khi sử dụng σ_{DoP} nhưng khi sử dụng σ_K thì $P_D=0,6$ đối với mục tiêu Swerling 0, $P_D = 0,55$ đối với mục tiêu Swerling 1 và $P_D = 0,4$ đối với mục tiêu Swerling 3.

Kết quả trên Hình 4.9 cũng cho thấy, khi sử dụng σ_K đối với mục tiêu thăng giáng chậm hoặc không thăng giáng thì σ_K ổn định hơn so với các mục tiêu không thăng giáng, trong đó hiệu quả phát hiện mục tiêu Swerling 0 cao hơn so với mục tiêu Swerling 1 và Swerling 3.

4.4. Kết luận Chương 4

Trong chương 4 nghiên cứu sinh đã thực hiện khảo sát khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của tham số phân cực: σ_K và σ_{DoP} với các mô hình mục tiêu Swerling. Kết quả cho thấy khi sử dụng σ_K thì xác suất phát hiện đúng đối với các mô hình mục tiêu Swerling gần bằng nhau. Trong khi nếu sử dụng σ_{DoP} thì xác suất phát hiện đúng đối với mô hình mục tiêu Swerling 0, 1 là tốt hơn so với các mô hình mục tiêu Swerling 2,3,4. Đặc trưng phát hiện mục tiêu sử dụng σ_K cũng tốt hơn so với khi sử dụng σ_{DoP} đối với các mô hình Swerling 2, 3, 4. Còn đối với mục tiêu Swerling 0, 1 thì phương pháp sử dụng σ_{DoP} tốt hơn so với σ_K .

Ngoài ra khi so sánh đặc trưng chất lượng phát hiện khi sử dụng tham số năng lượng của mô hình Marcum-Swerling 0 với khi sử dụng σ_{K} , σ_{DoP} chỉ ra rằng nhìn chung với các mô hình Swerling 0, 1 thì phương pháp sử dụng σ_{K} , σ_{DoP} tốt hơn so với phương pháp sử dụng năng lượng của mô hình Marcum-Swerling 0. Đặc biệt khi sử dụng σ_{DoP} thì cho kết quả tốt hơn hẳn so với mô hình Marcum-Swerling 0. Ngoài ra thì với các mô hình Swerling 2, 3, 4 thì xác suất phát hiện đúng khi sử dụng σ_{K} , σ_{DoP} cũng tương đương với mô hình Marcum-Swerling 0, trong đó mô hình Swerling 3, 4 thì kém hiệu quả hơn.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỀN CỦA LUẬN ÁN

Trong luận án này, nghiên cứu sinh đã hoàn thành được mục tiêu đề ra là đưa ra được thuật toán nâng cao chất lượng phát hiện các vật thể nhỏ trên mặt biển sử dụng tham số phân cực. Những kết quả chính và hướng phát triển tiếp theo của luận án được tóm tắt sau đây.

A. Các đóng góp mới của luận án

1. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của hệ số elip phân cực K. Đánh giá và so sánh khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển khi sử dụng hệ số elip phân cực K và độ lệch chuẩn của hệ số K. Kết quả chỉ ra hiệu quả của phương pháp sử dụng σ_K tốt hơn so với khi chỉ sử dụng hệ số K trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

- Xác suất báo động lầm giảm đáng kể khi sử dụng σ_K so với khi sử dụng hệ số *K*. P_F có thể giảm từ $P_F^K = 0,057$ khi sử dụng hệ số *K* xuống $P_F^{\sigma_K} = 10^{-4}$ khi sử dụng σ_K .
- Xác suất phát hiện đúng mục tiêu khi sử dụng σ_K tăng so với khi sử dụng hệ số K. Tuy nhiên xác suất phát hiện đúng phụ thuộc vào hệ số K của mục tiêu. Mục tiêu có hệ số K càng khác với hệ số K của nhiễu biển (K≈0) thì xác suất phát hiện đúng càng tăng và ngược lại.
- Có thể phát hiện các mục tiêu mà có hệ số K giống với hệ số K của nhiễu biển, điều mà không thể thực hiện được nếu chỉ sử dụng hệ số K.
- Khuyến nghị: Phương pháp sử dụng hệ số K chỉ hiệu quả với các mục tiêu có |K_{mt}| < 0,8; còn với |K_{mt}| > 0,8 thì sử dụng σ_K sẽ cho hiệu quả hơn.

2. Đề xuất thuật toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng độ lệch chuẩn của độ phân cực DoP. Đánh giá và so sánh khả năng phát hiện mục tiêu trên mặt biển sử dụng hệ số DoP và độ lệch chuẩn của độ phân cực DoP. Kết quả chỉ ra hiệu quả của phương pháp sử dụng σ_{DoP} cao hơn so với khi chỉ sử dụng hệ số DoP trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển.

- Xác suất báo động lầm giảm trong trường hợp sử dụng σ_{DoP} so với khi sử dụng hệ số DoP. P_F có thể giảm từ $P_F^{DoP} = 0,058$ khi sử dụng hệ số DoP xuống $P_F^{\sigma_{DoP}} = 10^{-5}$ khi sử dụng σ_{DoP} .
- Xác suất phát hiện đúng trong trường hợp sử dụng σ_{DoP} tốt hơn so với khi sử dụng hệ số DoP. Xác suất phát hiện đúng mục tiêu tăng có thể tăng từ P_D=0,8 trong trường hợp sử dụng hệ số DoP lên P_D≈1 trong trường hợp sử dụng σ_{DoP}. Tuy nhiên xác suất phát hiện đúng phụ thuộc vào hệ số DoP của mục tiêu. Hệ số DoP của mục tiêu càng khác so với hệ số DoP của nhiễu biển (DoP_{nb}≈1) thì xác suất phát hiện đúng càng tăng và ngược lại.
- Có thể phát hiện được các mục tiêu có hệ số *DoP* giống với hệ số *DoP* của nhiễu biển với xác suất phát hiện đúng *P_D*≈1 trong trường hợp sử dụng σ_{DoP} so với *P_D*=0 trong trường hợp sử dụng hệ số *DoP* với SCR=5 dB.
- Khuyến nghị: Phương pháp sử dụng hệ số DoP làm tham số phát hiện chỉ hiệu quả khi mục tiêu có *DoP_{mt}*<0,7; còn với mục tiêu có *DoP_{mt}*>0,7 thì sử dụng σ_{DoP} sẽ cho hiệu quả phát hiện tốt hơn.

B. Hướng phát triển của luận án

 Tiếp tục nghiên cứu sử dụng độ lệch chuẩn của các tham số phân cực khác trong bài toán phát hiện mục tiêu trên mặt biển hoặc trên bề mặt nền khác. Khi có thêm các tham số phát hiện khác nữa thì có thể khảo sát đánh giá khả năng phát hiện và nhận dạng các mô hình mục tiêu ra đa để tìm ra tham số phát hiện tốt nhất;

2. Nghiên cứu xây dựng bộ dữ liệu tham số phân cực của các mục tiêu trên biển thực tế để nâng cao chất lượng bài toán phát hiện và nhận dạng mục tiêu trên mặt biển sử dụng ra đa phân cực.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ NGHIÊN CỨU

A. Các công trình sử dụng trong luận án

A1. **Pham Trong Hung**, Nguyen Trung Thanh, Pham Minh Nghia, "*New Algorithm for detecting target on the Background Clutter Using Polarimetric Parameter*", REV Journal on Electronics and Communications", Vol. 6, No. 3–4, July–December, 2016.

A2. **Phạm Trọng Hùng**, Đào Chí Thành, Nguyễn Đôn Nhân, "*Hàm phân bố xác suất hai chiều phân cực-năng lượng và bài toán nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu*", Tạp chí Nghiên cứu khoa học và Công nghệ quân sự, Đặc san ra đa, 8-2016, trang 42-50.

A3. Pham Trong Hung, Nguyen Manh Cuong, Nguyen Van Hai, "Performance improvement of target detection in sea clutter by examing the dispersion of polarimetry coefficient K", Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) #12 (57), 2018, pp 4-10. ISSN 2411-6467, DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.1.62

A4. **Phạm Trọng Hùng**, Nguyễn Mạnh Cường, "Sử dụng độ tản mát của độ phân cực DoP nhằm nâng cao chất lượng phát hiện mục tiêu trên bề mặt nền", Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, HVKTQS, 8-2019, trang 47-56.

A5. **Hung P.T.,** Cuong N.M., Hai N.T., Chien V.D. "Evaluation of the ability of target detection on the background clutter using the standard deviation of polarization parameters", Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) #5 (62), 2019, pp 16-22. ISSN 2411-6467, DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.1.62

B. Các công trình công bố khác

B1. **Phạm Trọng Hùng**, "*Tăng khả năng phát hiện mục tiêu có kích thước nhỏ, phản xạ yếu chuyển động chậm trên bề mặt nền bằng giải pháp phân cực-Doppler*", Hội thảo quốc gia về công nghệ thông tin và truyền thông, REV-ECIT, TP Hồ Chí Minh 2015, trang 182-185.

B2. **Phạm Trọng Hùng**, "*Phát hiện, phân loại mục tiêu nhỏ trên mặt biển bằng ra đa phân cực với tín hiệu phân cực tròn*", Hội thảo về thông tin và định vị trên biển, COMNAVI 2014 – Hà Nội.

B3. **Phạm Trọng Hùng**, Đào Chí Thành, Nguyễn Tiến Tài, Nguyễn Ngọc Tân, "*Nghiên cứu bài toán phát hiện mục tiêu trên bề mặt nền theo tham số phân cực*", Tạp chí Nghiên cứu khoa học và Công nghệ quân sự, Số 37, 6-2015, trang 39-46.

B4. **Pham Trong Hung,** Pham Minh Nghia, Nguyen Trung Thanh. "*Two-levels threshold detection using polarimetric parameter ellipticity in accordance with Neyman-Pearson criterion*", Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, HVKTQS, 8-2016, trang 20-30.

B5. **Phạm Trọng Hùng**, Nguyễn Đôn Nhân, "Sử dụng tham số phi năng lượng – hệ số elip phân cực của tín hiệu phản xạ giải bài toán phát hiện mục tiêu trên bề mặt nền theo tiêu chuẩn Neyman-Pearson", Tạp chí Nghiên cứu khoa học và Công nghệ quân sự, Đặc san ra đa, 8-2016, trang 128-136.

B6. **Pham Trong Hung**, Nguyen Trung Thanh, "*Improving the constrast of target from background clutter in polarimetric radar image by the mean of polarimetry ellipticity coefficient*", East European Science Journal, No 4 (20), 2017 part 1, pp 116-121.

B7. **Phạm Trọng Hùng**, Nguyễn Trung Thành, "*Tăng khả năng phân biệt mục tiêu trên bề mặt biển bằng phương pháp xử lý trung bình hệ số elip phân cực của tín hiệu thu*", Tạp chí khoa học công nghệ và thông tin truyền thông, số 01, 2017, pp 74-79.

B8. **Pham Trong Hung**, Nguyen Tien Tai, Nguyen Trung Thanh, "*The target detection on the sea surface based on the maximum eigenvalue of the polarization covariance matrix*", Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) #10 (55), 2018, pp 12-17.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. M. Carretero, J.M. Gismero and A.L Asension, "Small-target detection in sea clutter based on the Radon Transform," *IEEE international Conference on radar*, vol. 2, pp. 610-615, 2008.
- W. Fuyou, "HF radar target detection based on fractal characteristics," *Modern Radar*, vol. 33, pp. 34-38, 2011.
- [3] W. Fuyou, Y. Gannan and Z. Weidong, "Analysis of backscatter for sea clutter and small target based on actual data," *J. Chinese Inertial*, vol. 16, pp. 439-444, 2008.
- [4] S.C. Guedes, Z Cherneva Z and E.M. Antao, "Steepness and asymmetry of the larget waves in stormy sea states," *Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 1147-1167, 2004.
- [5] S. Haykin, Bakker R and B.W. Currie, "Uncovering nonlinear dynamicsthe case study of sea clutter," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 860-881, 2002.
- [6] C.P. Unsworth, M.R. Cowper and S. Mclaughlin, "Re-examining the Nature of Radar Sea Clutter," *IEEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation*, vol. 149, pp. 105-114, 2002.
- [7] H Jing, T Wenwen and G Jianbo, "Detection of Low Observable Targets within Sea Clutter by Structure Function Based Multifractal Analysis," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 54, pp. 136-143, 2006.
- [8] G. Davidson and H. D. Griffith, "Wavelet detection scheme for small targets in sea clutter," *Electronics Letters*, vol. 38, pp. 1127-1129, 2006.
- [9] G. Hennessey, H. Leung and A. Drosopoulos, "Sea clutter modeling using a radial-basis-function neural network," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, pp. 358-372, 2001.

- [10] X. Nan, H. Leung and C. A. Hing, "Multiple-model prediction approach for sea clutter modelling," *IEEE Trans. Geosci. Remote*, vol. 41, pp. 1491-1502, 2003.
- [11] D. Giuli, "Polarization diversity in radars," *Proc. IEEE*, vol. 74, no. 2, pp. 245-269, 1986.
- [12] Kostinski A. B and Boerner W. M, "On foundations of radar polarimetry," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 12, pp. 1395-1404, 1986.
- [13] Novak L. M. and Sechtin M. B., "Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data," *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst*, vol. 25, no. 2, Mar. 1989., pp. 150-165, 1989.
- [14] Pastina D, Lombardo P and Bucciarelli T, "Adaptive polarimetric target detection with coherent radar. Part I: Detection against Gaussian background," *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst,* vol. 1, no. 4, pp. 1194-1206, 2001.
- [15] Maio A. D. and Alfano G., "A polarimetric adaptive detector in non-Gaussian noise," *Signal Processing*, vol. 83, pp. 197-306, 2003.
- [16] Wang, J and A. Nehorai, "Adaptive polarimetry design for a target in compound-Gaussian clutter," *Signal Processing*, vol. 89, pp. 1061-1069, 2008.
- [17] De Maio, A, G. Alfano and E. Conte, "Polarization diversity detection in compound-Gaussian clutter," *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 40, no. 1, pp. 114-131, 2004.
- [18] Marino, A and Hajnsek, I, "Statistical tests for a ship detector based on the Polarimetric Notch Filter," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, p. 4578–4595, 2015.

- [19] Stastny, J, Cheung, S, Wiafe, G and Agyekum, K.; G, "Application of RADAR Corner Reflectors for the Detection of Small Vessels in Synthetic Aperture Radar," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 8, p. 1099–1107, 2015.
- [20] Cloude S. R. and Pottier E., "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, 1996.
- [21] Fortuny-Guasch J., "Improved oil slick detection and classification with polarimetric SAR," in *Proc. of POLinSAR'03*, Frascati, Italy, 2003.
- [22] Schuler D. L., Lee J. S. and De Grandi G., "Spiral eddy detection using surfactant slick patterns and polarimetric SAR image decomposition techniques," *Proc. of IGARSS'04*, no. 1, pp. 212-215, 2004.
- [23] Migliaccio M., Gambardella A. and Tranfaglia M., "SAR polarimetry to observe oil spills," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 2, pp. 506-511, 2007.
- [24] Nunziata F., Gambardella A. and Migliaccio M., "On the use of dual-polarized SAR data for oil spill observation," *Proc. of IGARSS'08*, vol. 2, pp. 225-228, 2008.
- [25] Migliaccio M., Nunziata F. and Gambardella A., "On the co-polarized phase difference for oil spill observation," *Int. J. Remote Sens*, vol. 30, pp. 1587-1602, 2009.
- [26] Reza Shirvany., Estimation of the Degree of Polarization in Polarimetric SAR Imagery: Principles and Applications, Toulouse, France: PhD Thesis, 2012.
- [27] Vachon P. W, Campbel J. W, Bjerkelund C and Dobson F, "Ship detection by the RADARSAT SAR: validation of detection model

predictions," *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vols. 23, No. 1, p. 48–59, 1997.

- [28] Логвин А. И, Кораблев А. Ю and Моркович Д. Е, "Обнаружение радиолокационных целей по коэффициентам поляризационной анизотропии," in *Радиотехническое оборудование систем дистанционного зондирования*, М, МГТУ ГА, 1996, pp. 110-112.
- [29] Татаринов В.Н, Татаринов С.В and Лигтхарт Л. П, Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования, Томск: Издательство Томского университета, 2006.
- [30] Tatarinov S.N., "A complex plane of radar objects," in *The Proc. of all-Russian Conf. "The Scientific Session – 2005"*, Tomsk, 2005.
- [31] Козлов А.И., Татаринов В.Н, Татаринов С.Н and Кривин Н.Н, "эффекта поляризационного следа слабоконтрасных целей и его экспериментальное подтверждение," *Научный Вестник МГТУ ГА*, vol. 189, pp. 74-79, 2013.
- [32] N. Q. Ân, "Nghiên cứu nâng cao khả năng phát hiện các mục tiêu ra đa bằng phương pháp xử lý phân cực tín hiệu," in *Luận án Tiến sỹ*, Hà Nội, Học viện kỹ thuật quân sự, 2007.
- [33] N. Q. Ân, "Một giải pháp nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu ra đa bằng phương pháp phân cực động," *Tạp chí Nghiên cứu khoa học kĩ* thuật và Công nghệ quân sự, Trung tâm KHKT&CNQS, vol. 3, pp. 22-29, 2006.
- [34] Đ. V. Hồng, "Giải bài toán phát hiện tín hiệu ra đa dựa vào dấu hiệu phân cực," in *Luận án Tiến sỹ*, Hà Nội, Học viện kỹ thuật quân sự, 2008.
- [35] Andrea Buono, F. Nunziata, C. R Macedo, D. Velotto and M. Migliaccio, "A Sensitivity Analysis of the Standard Deviation of the Copolarized Phase Difference for Sea Oil Slick Observation," *IEEE*

TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 9, 2018.

- [36] Потапов А. А, Фракталы в радиофизике и радиолокации. Топология выборки, М: Университетская книга, 848 с., 2005.
- [37] Борзов А. Б, "Анализ радиолокационных характеристик объектов сложной формы методом математического моделирования," *Боеприпасы,* р. 32–38, 1994.
- [38] Дмитриев В. Г, Борзов А. Б and Быстров Р. П, "Научно-технические достижения и проблемы развития техники миллиметрового диапазона радиоволн," Зарубежная радиоэлектроника, № 4, С. 18– 80, 2001.
- [39] Буриев В. А, "Обнаружение слабоотражающих объектов на фоне подстилающей поверхности на основе использования свойств вторичного излучения в направлении распространения электромагнитной волны," in *Tes. Докладов 8 Всероссийской* Школы-семинара «Волновые явления внеоднородных средах», Красновидово, Моск. обл, 2005.
- [40] Сарычев В. А, "Сложные сигналы произвольной поляризационной и временной структуры и их применение в электросвязи," Электросвязь, pp. 43-46, 2003.
- [41] Антифеев В. Н, Борзов А. Б and Быстров Р. П, "Математические модели рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы," Электромагнитные волны и электронные системы, р. 38– 54, 1998.
- [42] Пирогов Ю. А, Гладун В. В and Тищенко Д. А, "Сверхразрешение в системах радиовидения миллиметрового диапазона," in *Труды* Всероссийской школы-семинара «Физика и применение радиоволн», Красновидово, Моск. обл, 1999.

- [43] Соколова А. В, Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография, М. Радиотехника, 2003.
- [44] Chen S. J, Yang J. Y and Kong L. J, "Small target detection in heavy sea clutter," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 44, pp. 405 -425, 2012.
- [45] Mallat S. G, "Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation," *IEEE Trans. PAMI*, pp. 674-693, 1989.
- [46] Ach T. A and et al, "Statistical Model-based Change Detection in Moving Video," *Signal Processing*, pp. 165-180, 1993.
- [47] Lianqing Y, Yun L, Ning W and Jin J, "Small target on sea surface detection algorithm research based on feature classification," *ICSP2014 Proceedings*, 2014.
- [48] Hatam M, Sheikhi A and Masnadi-Shirazi M. A, "Target detection in pulse-train MIMO radars applying ICA algorithms," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 122, pp. 413-435, 2012.
- [49] Qu Y, Liao G. S, Zhu S. Q and Liu X. Y, "Pattern synthesis of planar antenna array via convex optimization for airborne forward looking radar," *Progress In Electromagnetics Research.*, vol. 84, pp. 1-10, 2008.
- [50] A. J. Poelman, "Virtual polarization adaptation. A method of increasing the detection capability of a radar system through polarization vector processing," *Proceedings IEEE*, vol. 128, no. 5, p. 261–270, 1981.
- [51] A. J. Poelman, "Polarization vector translation in radar system," *Proceedings IEE*, vol. 130, no. 2, p. 161–165, 1983.
- [52] A. J. Poelman, "Non-linear polarization vector translation in radar systems : a promising concept for real time polarization vector signal processing via a single notch polarization suppression filter," *Proceedings IEE*, vol. 131, pp. 451-465, 1984.

- [53] Poelman, A. J and J. R. F. Guy, "Multinotch logic-product polarization suppression filters. A typical design example and its performance in a rain clutter environment," *Proceedings IEE*, vol. 131, no. 4, 1984.
- [54] Poelman, A. J and K. J. Hilgers, The Effectiveness of MultiNotch Logic Product Polarization Filters in Radar for Countering Rain Clutter, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [55] Kay S.M, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory, NJ: Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1993.
- [56] Wang, C, Wang, Y and Liao, M, "Removal of azimuth ambiguities and detection of a ship: Using polarimetric airborne C-band SAR images," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 33, p. 3197–3210, 2012.
- [57] Sugimoto, M, Ouchi, K and Nakamura, "On the novel use of modelbased decomposition in SAR polarimetry for target detection on the sea," *Remote Sens. Lett*, vol. 4, p. 843–852, 2013.
- [58] Xi, Y, Lang, H, Tao, Y, Huang, L and Pei, Z, "Four-component modelbased decomposition for ship targets using PolSAR data," *Remote Sens.*, vol. 9, pp. 621-630, 2017.
- [59] Marino, A, Sugimoto, M, Ouchi, K and Hajnsek, I., "Validating a notch filter for detection of targets at sea with ALOS-PALSAR data," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens*, vol. 7, p. 4907–4918, 2014.
- [60] Jian, Y, Zhang, H and Yamaguchi, Y, "GOPCE-based approach to ship detection," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 9, p. 1089–1093, 2012.
- [61] Shirvany, R, Chabert, M and Tourneret, J.Y, "Ship and Oil-Spill Detection Using the Degree of Polarization in Linear and Hybrid/Compact Dual-Pol SAR," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 5, p. 885–892, 2012.
- [62] Touzi, R., Hurley, J. and Vachon, P.W, "Optimization of the degree of polarization for enhanced ship detection using polarimetric radarsat-2," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, p. 5403–5424, 2015.
- [63] Nunziata, F.N.F, Migliaccio, M and Brown, C.E, "Reflection symmetry for polarimetric observation of man-made metallic targets at sea," *IEEE J. Ocean. Eng*, vol. 37, p. 384–394, 2012.
- [64] Yeremy M, Campbell J. W. M, Mattar K and Potter T, "Ocean surveillance with polarimetric SAR," *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vols. 27, No. 4, pp. 328–344, 2001.
- [65] Arnaud, A, "Ship detection by SAR interferometry," in *In Proceedings* of the IEEE IGARSS, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999.
- [66] Tello, M, Lopez-Martinez, C, Mallorqui and Bona. J, "Automatic detection of spots and extraction of frontiers in SAR images by means of the wavelet transform: Application to ship and coastline detection," in *In Proceedings of the IEEE IGARSS*, Denver, CO, USA, , 31 July–4 August 2006..
- [67] Ouchi, K, Tamaki, S, Yaguchi, H and Iehara, M, "Ship detection based on coherence images derived from cross correlation of multilook SAR images," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 1, p. 184–187, 2004.
- [68] Gao, G and Shi, G, "CFAR Ship Detection in Nonhomogeneous Sea Clutter Using Polarimetric SAR Data Based on the Notch Filter," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, p. 4811–4824, 2017.
- [69] Gao, G and Shi, G, "Ship Detection in Dual-Channel ATI-SAR Based on the Notch Filter," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, p. 4795–4810, 2017.

- [70] Zhao, J, Guo, W, Zhang, Z and Yu, W, "A coupled convolutional neural network for small and densely clustered ship detection in SAR images," *Sci. China Inf. Sci. 2019, 62, 42301*, vol. 62, p. 423, 2019.
- [71] Kang, M, Ji, K, Leng, X and Lin, Z, "Contextual Region-Based Convolutional Neural Network with Multilayer Fusion for SAR Ship Detection," *Remote Sens.*, vol. 9, p. 860, 2017.
- [72] Tatarinov V.N., Tatarinov S.N. and Ligthart L.P., An Introduction to Radar Signals Polarization Modern Theory, Tomck, Russia: Vol1. Publ. House of Tomsk State University, 380 p, 2006.
- [73] Ruck G.T, Barrick D.E and Stuart W.D, Radar cross section handbook vol.1, New York: Plenum Press, 1970.
- [74] Murza L.P, "The noncoherent polarimetry of noiselike radiation," *Radio Engineering and Electronic Physics*, no. 23, pp. 57-63, 1978.
- [75] Valchula G. M and Barnes R. M, "Polarization detection of a fluctuating radar target," *IEEE Transactions on aerospace and electronic system*, Vols. AES-19, no. 2, March 1983, pp. 250-256, 1983.
- [76] Born, M and Wolf. E, Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, Cambridge, U.K: Cambridge Univ. Press, 1999.
- [77] Hawkins R. K, Murnaghan K. P, Tennant T and Yeremy M, "Ship detection using airborne polarimetric SAR," in *In Proceedings of CEOS SAR Workshop*, Tokyo, Japan, 2001.
- [78] Ringrose R and Harris N, "Ship detection using polarimetric SAR data," in *in SAR workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites, ser. ESA Special Publication*, vol. 450, p. 687, 2000.

- [79] Brekke C. and Solberg A. H. S., "Review: Oil spill detection by satellite remote sensing," *Remote Sensing of Environment*, vol. 95, no. 1, pp. 1-13, 2005.
- [80] Mercier G. and Girard-Ardhuin F., "Partially supervised oil slick detection by SAR imagery using kernel expansion," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, vol. 44, no. 10, pp. 2839-2846, 2006.
- [81] Solberg A. H. S., Brekke C. and Husøy P. O., "Oil spill detection in Radarsat and Envisat SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, vol. 45, no. 3, pp. 746-755, 2007.
- [82] Pastina D, Lombardo P and Bucciarelli T, "Adaptive polarimetric target detection with coherent radar. Part I: Detection against Gaussian background," *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst,* Vols. 37, No. 4, pp. 1194-1206, 2001.
- [83] Park H. R, Li J and Wang H, "Polarization-space-time domain generalized likelihood ratio detection of radar targets," *Signal Processing*, vol. 41, p. 153—164, 1995.
- [84] Kelly E. J, "An adaptive detection algorithm," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-22*, vol. 1, p. 115—127, 1986.
- [85] Armando Marino, Tao Zhang and Huilin Xiong, "A Ship Detector Applying Principal Component Analysis to the Polarimetric Notch Filter," *Remote Sensing*, vol. 10, June 2018.
- [86] A. Marino, "A notch filter for ship detection with polarimetric SAR data," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs Remote Sens.*, vol. 6, p. 1219– 1232, 2013.
- [87] Bo Ren, Longfei Shi and Guoyu Wang, "Polarimetric Target Detection Using Statistic of the Degree of Polarization," *Progress In Electromagnetics Reserch M*, vol. 46, pp. 143-152, 2016.

- [88] Genwang Liu, Xi Zhang and Junmin Meng, "A Small Ship Target Detection Method Based on Polarimetric SAR," *Remote Sensing*, December, 2019.
- [89] E. Kennaugh, "Polarization properties of radar reflections," in M. Sc. Thesis, Dept. of Electrical Engineering, the Ohio State University, Columbus, 1952.
- [90] Lee, J.S and Pottier, E., "Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications," *CRS Press: Boca Raton, FL, USA*,, pp. 53-98, 2008.
- [91] Yin, J, Yang, J, .Zhou, Z.S and Song, J., "The extended bragg scattering model-based method for ship and oil-spill observation using compact polarimetric SAR.," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens*, vol. 8, p. 3760–3772, 2015.
- [92] Козлов А. И, Татаринов В.Н, Татаринов С.В and Кривин Н.Н, "Поляризационный следа при рассеянии электромагнитных волн составными объектами," *Научный вестник МГТУ ГА*, vol. 189, pp. 66-72, 2013.
- [93] H. Skriver, "Signatures of Polarimetric Parameters and their Implications on Land Cover Classification," *IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM: SENSING AND UNDERSTANDING OUR PLANE*, pp. 4195-4198, 2007.
- [94] Liboff and Richard L, Introductory Quantum Mechanics, Addison-Wesley. ISBN 0-8053-8714-5, 2002.
- [95] Поздняк С.И and Мелитицкий В.А, Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн, М: Сов.радио 480 с, 1974.
- [96] Tatarinov V.N., Potekchin V.A. and Masalov E.V., "A polarization contrast of man-made navigation scatterers," 2006.

- [97] Богородский В.В, Канарейкин Д.Б and Козлов А.И, Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов, Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981.
- [98] Krivin N.N., Tatarinov V.N. and Tatarinov S.V., "Innovations in Radar Technologies: Polarization Invariants Parameter Utilization for the Problem of Radar Object Detection and Mapping," in *Proceedings of the First Postgraduate Consortium International Workshop*, Tomsk, Russia, 2011.
- [99] Ligthart L., Tatarinov V.N., Tatarinov S.N. and Pusone E., "An effective polarimetric detection of small-scale man-made radar objects on the sea surface," in *Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2002.* 14th International Conference on Publication Year, Tomck, Russia, vol.2, 2002.
- [100] Хлусов В.А., Моноимпульсные измерители поляризационных параметров радиолокационных объектов, дисс. канд. тех. наук: 05.12.04, Томск, ТИАСУР, 1989, 187 с.
- [101] Ligthart L., Tatarinov V.N., Tatarinov S.N. and Pusone E., "An effective polarimetric detection of small-scale man-made radar objects on the sea surface," *Microwaves Radar and Wireless Communications, MIKON-2002. 14th International Conference on Publication Year*, vol. 2, pp. 677 680, 2002.
- [102] Громов В. А, Миронов М. В and Шарыгин Г. С, "Угол эллиптичности электромагнитных сигналов и его использование для неэнергетического обнаружения, оптимального по критерию Неймана-Пирсона," Известия вузов. Физика, pp. Т. 55, № 3, С. 15– 21, 2012.
- [103] Громов В. А, "Патент. 2476903 РФ, Способ обнаружения и селекции радиолокационных сигналов по поляризационному

признаку и устройство для его осуществления," опубл. 27.02.2013, 2013.

- [104] Raney, R. K, "Hybrid-polarity SAR architecture," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 11, 2007.
- [105] Wolf, E, "Coherence properties of partially polarized electromagnetic radiation," *Nuovo Cim*, vol. 13, no. 6, p. 1165–1181, 1959.
- [106] J. J van Jyl and F. T. Ulaby, Scattering matrix representation for simple targets, Norwood MA: Artech House, 1990.
- [107] Goodman, N. R, "Statistical analysis based on a certain multivariate complex Gaussian distribution (an introduction)," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 34, p. 152–177, 1963.
- [108] Morris R. Driels and Young S. Shin, "Determining the number of iterations for Monte Carlo simulations of weapon effectiveness," Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2004.
- [109] Bassem R. Mahafza, Radar sifnal analysis and processing using Matlab, Huntsville, Alabama, U.S.A: Chapman & Hall/CRC, 2009.
- [110] Réfrégier P. and Morio J., "Shannon entropy of partially polarized and partially coherent light with Gaussian fluctuations," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 23, no. 12, pp. 3036-3044, 2006.
- [111] Sarabandi K., Oh Y. and Ulaby F. T., "Polarimetric radar measurements of bare soil surfaces at microwave frequencies," *Proc. of IGARSS'91*, vol. 2, pp. 387-390, 1991.
- [112] Ulaby F. T., Sarabandi K. and Nashashibi A., "Statistical properties of the mueller matrix of distributed targets," *IEEE Proceedings-F, Radar* and Signal Processing, vol. 139, no. 2, pp. 136-146, 1992.