## BỘ QUỐC PHÒNG Học viện kỹ thuật quân sự

THIỀU HỮU CƯỜNG

### NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHỊCH CHUYỂN CHO ƯỚC LƯỢNG ĐỘ CAO RỪNG SỬ DỤNG ẢNH POLINSAR

Chuyên nghành: Kỹ THUẬT ĐIỆN TỬ Mã số: 9 52 02 03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2021

### CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS Phạm Minh Nghĩa TS Lê Văn Nhu

Phản biện 1: PGS. TS Nguyễn Văn Trung

Phản biện 2: PGS. TS Trịnh Lê Hùng

Phản biện 3: PGS. TS Trần Đức Tân

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo Quyết định số 4790 ngày 12 tháng 11 năm 2021 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi ... giờ ... ngày ..... tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự.

# DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH SỬ DỤNG TRONG LUẬN ÁN

- HuuCuong Thieu, and MinhNghia Pham, "A Novel Three Steps Method for Forest Parameters Extraction Using PolInSAR Images," 2020 IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications, vol. 1, pp. 149-154, 2020, (Scopus).
- HuuCuong Thieu, and MinhNghia Pham, "Optimal Polarization Channel Method for Estimating Forest Height From PolInSAR Images," 2020 IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications, vol. 1, pp. 160-165, 2020, (Scopus).
- HuuCuong Thieu, and MinhNghia Pham, "An Improved Forest Height Inversion Method Using Dual-Polarization PolInSAR Data," 6th EAI International Conference on Industrial Networks and Intelligent System, vol.1, pp. 233–242, 2020, (Scopus).
- 4. Thiều Hữu Cường, Phạm Minh Nghĩa, "Mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng các tham số rừng trên địa hình dốc sử dụng ảnh PolInSAR," *Tạp chí* Nghiên cứu KH và CN quân sự, số 66, tr. 61-70, 2020.
- HuuCuong Thieu, MinhNghia Pham, and Van Nhu Le, "Forest Parameters Inversion by Mean Coherence Set from Single-baseline PolInSAR Data," *Journal of Advances in Space Research*, vol. 68, no. 7, pp. 2804-2818, 2021. (SCI, SCIE, IF=2.177, Q1).

### KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA LUẬN ÁN

### Một số kết quả đạt được của luận án

- 1. Đề xuất thuật toán tối ưu vùng kết hợp dựa trên dấu hiệu phân cực để cải thiện độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng. Hiệu quả của các phương pháp đề xuất được so sánh với các phương pháp của các tác giả trên thế gới mới được công bố gần đây. Kết quả mô phỏng cho thấy các phương pháp đề xuất có độ chính xác cao và đáng tin cậy.
- 2. Đề xuất mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi sử dụng ảnh PolInSAR. Mô hình đề xuất đã mô tả một cách chân thực quá trình tán xạ sóng siêu cao tần trong môi trường rừng thực tế. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình S-RVoG cải tiến không những nâng cao hiệu quả cho các tham số rừng ước lượng mà còn cho thấy độ chính xác cao khi áp dụng với các địa hình có độ dốc khác nhau.
- 3. Đề xuất sử dụng thuật toán tổng bình phương tối thiểu thích nghi (ATLS) để ước lượng pha bề mặt với mục đích nâng cao độ chính xác cho phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp đề xuất có thể áp dụng linh hoạt với các khu vực rừng phức tạp (đồi núi, rừng ôn đới, nhiệt đới...) nhưng vẫn có độ ổn định và hiệu quả cao.

### Hướng phát triển của luận án

- Nghiên cứu, ứng dụng các phương pháp đề xuất trong luận án với nhiều loại địa hình rừng khác nhau. Đặc biệt là các khu vực rừng Việt Nam với địa hình đa phần là đồi núi có độ dốc cao và chùng loài cũng như độ cao cây đa dạng.
- 2. Nghiên cứu, cải tiến các thuật toán đề xuất nhằm làm giảm độ phức tạp cũng như thời gian tính toán nhưng vẫn giữ được độ chính xác cao để đáp ứng được các yêu cầu tính toán với khu vực rừng có diện tích lớn.
- 3. Nghiên cứu, đề xuất phương pháp ước lượng tham số rừng dựa trên mô hình tán xạ ba lớp cải tiến với hệ số suy hao sóng thay đổi từ dữ liệu PolInSAR. Mô hình này cho phép phân tích chính xác hơn về các thành phần tán xạ sóng trong môi trường rừng thực tế, đồng thời cho phép trích xuất các tham số rừng trên các địa hình khác nhau với hiệu quả cao nhất.

# MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết:

Ngày nay, vấn đề biến đổi khí hậu đã và đang ảnh hưởng đến môi trường sống của con người trên toàn thế giới mà Việt Nam là một trong các nước bị ảnh hưởng tương đối nghiêm trọng. Một trong những nguyên nhân chính gây ra diễn biến khí hậu phức tạp, thiên tai, lũ lụt... đó là sự suy giảm nhanh của diện tích rừng trên toàn thế giới [6, 7]. Rừng là một hệ sinh thái mà quần xã cây rừng giữ vai trò chủ đạo trong mối quan hệ tương tác giữa sinh vật với môi trường. Có thể nhận thấy rằng rừng có vai trò rất quan trọng đối với cuộc sống của con người cũng như môi trường. Do đó, các hoạt động quản lý, giám sát và bảo vệ rừng đang là vấn đề được quan tâm hàng đầu đối với mỗi quốc gia.

Có rất nhiều tham số phục vụ cho công tác quản lý và giám sát tài nguyên rừng như: chỉ số cấu trúc tán (CST), chỉ số tán xạ khối (VSI), chỉ số sinh khối (BMI), chỉ số suy hao tán xạ sóng ra-đa trong môi trường rừng (FDI), độ cao, mật độ, chủng loại cây, độ dốc địa hình .... Trong đó chỉ số sinh khối đóng vai trò cốt lõi trong công tác đánh giá và giám sát tài nguyên rừng. Ngày nay, nhu cầu về thông tin sinh khối rừng luôn đòi hỏi độ chính xác cao để sử dụng tính toán lượng các-bon và phục vụ cho các mục đích khác nhau.

Hiện nay, có rất nhiều các công nghệ viễn thám hiện đại đã và đang được ứng dụng trong việc kiểm tra, giám sát và bảo vệ tài nguyên rừng. Trong đó, kỹ thuật PolInSAR đã cho thấy ưu thế vượt trội trong việc cung cấp các thông tin về chiều cao, cấu trúc, mật độ, độ ẩm của đất và chủng loại rừng [25-27]. Ngoài ra, kỹ thuật PolInSAR cũng giúp cho các nhà khoa học và các nhà hoạch định chính sách đưa ra các phương án lựa chọn có tính chiến lược về sử dụng, quản lý tài nguyên rừng với hiệu quả kinh tế cao.

Tuy nhiên kỹ thuật PolInSAR còn tồn tại nhiều yếu tố ảnh hưởng tới độ chính xác khi ước lượng tham số rừng [27]. Các yếu tố này bao gồm sự tương quan giữa các tín hiệu thu được, độ suy giảm sóng trong môi trường, nhiễu hệ thống, sự thay đổi của mục tiêu giữa các lần quét ảnh, nhiễu nhiệt... Do vậy, việc nghiên cứu đề xuất các phương pháp mới nhằm nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR là một nhiệm vụ cấp thiết.

Từ những phân tích ở trên, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài "Nghiên cứu xây dựng các phương pháp nghịch chuyển cho ước lượng độ cao rừng sử dụng

ảnh PolInSAR" để làm luận án tiến sĩ. Thông qua đề tài này, nghiên cứu sinh mong muốn có được những đóng góp mang tính học thuật để làm cơ sở khoa học, tiền đề cho quá trình nghiên cứu về ước lượng độ cao rừng tại Việt Nam. Từ đó, góp phần nhỏ vào sự phát triển các sản phẩm sử dụng công nghệ viễn thám nhằm đánh giá, giám sát tài nguyên tài rừng và đa dạng sinh học.

#### 2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về PolInSAR. Nghiên cứu các mô hình, thuật toán và các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác trong ước lượng các tham số rừng đã được công bố trước đây.

#### 3. Phương pháp nghiên cứu

Luận án chọn phương pháp kết hợp giữa nghiên cứu lý thuyết với mô phỏng kiểm chứng. Căn cứ theo các đối tượng và phạm vi nghiên cứu, nghiên cứu tổng quan đến các nghiên cứu chuyên sâu, cập nhật thông tin, tập trung giải quyết các vấn đề mới, các vấn đề học thuật khó khăn.

#### 4. Đóng góp của luận án

- 1. Đề xuất thuật toán tối ưu vùng kết hợp dựa trên dấu hiệu phân cực để cải thiện độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng [CT1, CT2, CT3].
- 2. Đề xuất mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi sử dụng ảnh PolInSAR [CT4].
- 3. Đề xuất sử dụng thuật toán tổng bình phương tối thiểu thích nghi (ATLS) để ước lượng pha bề mặt với mục đích nâng cao độ chính xác cho phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng [CT5].

Các đề xuất trên đã được kiểm nghiệm bằng mô phỏng trên phần mềm PolSAR<br/>proSim, ENVI và MATLAB.

### 5. Bố cục của luận án

Luận án được bố cục gồm phần mở đầu, kết luận và 03 chương như sau:

Chương 1:tổng quan về kỹ thuật ước lượng các tham số rừng từ ảnh PolIn-SAR; Chương 2: trích xuất độ cao rừng dựa trên tối ưu vùng kết hợp từ dữ liệu PolInSAR; Chương 3: các phương pháp nghịch chuyển cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi sử dụng dữ liệu PolInSAR. Ngoài ra, kết quả đạt được ở dạng 2D của Hình 3.6(a), 3.7(a) và 3.8(a) cho thấy sự tương đồng về địa hình so với các khu vực nghiên cứu đã chọn của hình ảnh quang học được trích xuất từ Google Earth (Hình 3.5). Hình 3.6(b), 3.7(b)và 3.8(b) thể hiện độ chính xác của chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp đề xuất và chiều cao rừng của tập dữ liệu LiDAR của ba khu vực nghiên cứu. Hình này cho thấy các giá trị  $R^2$  thu được lần lượt là 0.815, 0.909 và 0.915, tương ứng với các khu vực FA1, FA2 và FA3.

Độ cao rừng ước lượng được tại khu vực FA1 so với đường thẳng phù hợp là có độ khuếch tán lớn nhất, biểu thị sự ảnh hưởng bởi mật độ cây thưa thớt. Kết quả tại khu vực FA3 cho thấy độ hội tụ với đường thẳng phù hợp là tốt nhất với giá trị RMSE là 3,26 (m) và tham số  $R^2 = 0,915$ . Tuy nhiên, giá trị RMSE của kết quả ước lượng được trong khu vực này cao hơn hai khu vực còn lại. Nguyên nhân chính là do mật độ cây và chiều cao cây ở khu vực này là lớn nhất, điều này có thể làm tăng vùng không rõ ràng dẫn đến sai số trong xác định hệ số CPI tối ưu.

Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp FIM luôn đạt được độ chính xác cao khi ước lượng độ cao rừng trên cả địa hình bằng phẳng và địa hình đồi núi.

### 3.3 Kết luận chương

Trong chương này, luận án đã đề xuất một mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng tham số rừng trên địa hình dốc và phương pháp nghịch chuyển tham số rừng dựa trên lý thuyết tập kết hợp trung bình từ ảnh PolInSAR (FIM). Trong đó, hệ số suy hao sóng thay đổi theo chiều cao rừng tương ứng được sử dụng để xác định hệ số CPI cho thành phần tán xạ khối. Điều này làm cho phương pháp đề xuất phù hợp hơn để ước tính các tham số rừng ở các khu vực đồi núi.

Từ kết quả mô phỏng có thể rút ra được ba khả năng tiềm ẩn của hai đề xuất trong chương 3 như sau: Thứ nhất, các phương pháp được đề xuất cho thấy độ chính xác cao khi ước lượng các tham số rừng trên khu vực rừng đồi núi và đồng nhất với hệ số suy hao sóng thay đổi theo chiều cao của cây. Thứ hai là tính ổn định để ước lượng độ cao rừng trên địa hình bằng phẳng cũng như dốc. Thứ ba, nó làm giảm một số lõi không mong muốn (nhiễu pha, sai số mô hình ...), dẫn đến không có sự chồng chéo trong vùng không rõ ràng và gây ra sai số cho quá trình nghịch chuyển độ cao rừng.

Các kết quả trình bày trong Chương 3 đã được công bố trong các bài báo [CT4] và [CT5] theo danh mục các công trình khoa học đã công bố.



Hình 3.6: Khu vực FA1: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp FIM, (b) hiệu quả của phương pháp FIM và dữ liệu LiDAR.

vị trí khảo sát này được kí hiệu là FA1, FA2 và FA3 với kích thước (575 x 685) điểm ảnh và được chia bốn phần bằng nhau.

Hình 3.6(a), 3.7(a) và 3.8(a) thể hiện độ cao rừng ước lượng của phương pháp FIM cho các khu vực nghiên cứu FA1, FA2 và FA3. Đối với khu vực nghiên cứu FA1 cho thấy độ cao rừng tập trung nhiều ở độ cao xấp xỉ 40 (m). Tuy nhiên đây là khu vực có địa hình gồm song và các vùng đất trống vì vậy chiều cao cây trung bình của FA1 thấp hơn so với các vùng nghiên cứu còn lại. Đối với các khu vực nghiên cứu FA2 và FA3 cho thấy độ cao và mật độ cây đồng đề hơn so với FA1 và đa phần chiều cao cây được ước lượng thướng ở độ cao hơn 40 (m).



Hình 3.7: Khu vực FA2: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởiphương pháp FIM, (b) hiệu quả của phương pháp FIM và dữ liệu LiDAR.





### Chương 1

## Tổng quan về kỹ thuật ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR

### 1.1 Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Công tác kiểm tra, giám sát và quản lý độ che phủ rừng trên quy mô lớn bằng công nghệ viễn thám hiện nay là một vấn đề cấp thiết đang thu hút nhiều nhà khoa học nghiên cứu. Kỹ thuật PolInSAR đã cho thấy ưu thế vượt trội trong ước lượng độ cao rừng dựa trên việc trích xuất thông tin phân cực và thông tin giao thoa phân cực trong ảnh SAR.

Cho đến nay, đã có một số mô hình nghịch chuyển độ cao rừng và các phương pháp ước lượng độ cao rừng từ ảnh PolInSAR được nghiên cứu, phát triển với mục đích cải thiện độ chính xác trong ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR. Trong đó, S.R. Cloude và Papathanassious là những nhà khoa học tiên phong trong việc xây dựng thuật toán nghịch chuyển cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR [38-43]. Năm 2003, nhóm tác giả đã đề xuất thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cho ước lượng chiều cao rừng [39] và phương pháp này đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều năm sau đó. Trong đó, độ cao rừng được xác định thông qua phương pháp cực tiểu hóa độ sai lệch giữa dữ liệu PolInSAR và mô hình rừng dự đoán.

Trong thời gian gần đây có nhiều đề xuất hướng đến cải tiến thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39] nhằm nâng cao hiệu quả ước lượng độ cao rừng [55-65]. Nhìn chung, các phương pháp này [55-65] đã phần nào cải thiện được độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng. Tuy nhiên, các phương pháp này [55-65] vẫn còn sử dụng một số giả định chưa phù hợp vì vậy gây ra sai số đáng kể trong ước lượng độ cao rừng.

Ngày nay, các nhà nghiên cứu tại Việt Nam đã có nhiều những công bố khoa học quan trọng về áp dụng kỹ thuật viễn thám trong việc xác định sinh khối rừng [1, 2, 12, 13, 14], cảnh báo nguy cơ sụt lún [3, 5, 28, 29, 30], ước lượng độ cao rừng [61-65], xây dựng mô hình số độ cao DEM ...

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng nghiên cứu xây dựng các phương pháp nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng từ ảnh PolInSAR là vấn đề có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao.

# 1.2 Kỹ thuật ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực (PolInSAR)

Ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực (PolInSAR) là một kỹ thuật tương đối mới với các hoạt động nghiên cứu thuộc lĩnh vực ra-đa nói chung và kỹ thuật viễn thám nói riêng. Kỹ thuật PolInSAR là sự kết hợp các ưu điểm của kỹ thuật InSAR và kỹ thuật PolSAR.



Hình 1.1: Hình ảnh thu thập từ hệ thống PolInSAR $\left[67\right]$ 

Trong đó, Cloude và Papathanassiou [67] là những người đầu tiên đặt nền tảng cho việc phát triển các kỹ thuật PolInSAR. Kỹ thuật này cho phép đo đạc đầy đủ độ phân giải của các phần tử trong thực địa, từ sự thay đổi nhỏ góc nhìn trong Hình 1.1 [67]. Hai ma trận tán xạ trong hệ phân cực (H, V),  $\mathbf{S}_1$  và  $\mathbf{S}_2$  được xác định như sau:

$$\mathbf{S}_{i} = \begin{bmatrix} S_{HH}^{i} & S_{HV}^{i} \\ S_{VH}^{i} & S_{VV}^{i} \end{bmatrix}$$
(1.1)

Trong đó, i = 1, 2 biểu thị cho hai hệ thống PolSAR. Đối với trường hợp tán xạ ngược trong môi trường thuận nghịch, khi đó vector tán xạ Pauli  $\overrightarrow{\mathbf{k}_{P_i}}$  và véc-tơ tán xạ kinh điển Lexicographic  $\overrightarrow{\mathbf{k}_{L_i}}$  được định nghĩa như sau:

$$\overrightarrow{\mathbf{k}_{P_i}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH}^i + S_{VV}^i & S_{HH}^i - S_{VV}^i & 2S_{HV}^i \end{bmatrix}^T$$
(1.2)

$$\overrightarrow{\mathbf{k}_{L_i}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH}^i & \sqrt{2}S_{HV}^i & S_{VV}^i \end{bmatrix}^T$$
(1.3)

Sử dụng kết quả tích ngoại từ các véc-tơ tán xạ  $\vec{\mathbf{k}_1}$  và  $\vec{\mathbf{k}_2}$  cho các ma trận  $\mathbf{S}_1$  và  $\mathbf{S}_2$ . Từ đó, có thể xác định một ma trận Hermitian với các giá trị riêng của nó là không âm  $\mathbf{T}_6$  và  $\mathbf{C}_6$ .

$$\mathbf{T}_{6} = \left\langle \left[ \begin{array}{c} \overrightarrow{\mathbf{k}_{P_{1}}} \\ \overrightarrow{\mathbf{k}_{P_{2}}} \end{array} \right] \left[ \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{1}}^{*T} \quad \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{2}}^{*T} \right] \right\rangle = \left[ \begin{array}{c} \mathbf{T}_{1} & \mathbf{\Omega} \\ \mathbf{\Omega}^{*T} & \mathbf{T}_{2} \end{array} \right]$$
(1.4)

$$\mathbf{C}_{6} = \left\langle \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}_{L_{1}}} \\ \overrightarrow{\mathbf{k}_{L_{2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_{1}}^{*T} & \overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_{2}}^{*T} \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{1} & \mathbf{C}_{\text{int}} \\ \mathbf{C}_{\text{int}}^{*T} & \mathbf{C}_{2} \end{bmatrix}$$
(1.5)

Đường thẳng kết hợp này cắt đường tròn đơn vị tại hai điểm (Hình 3.4), một trong hai điểm được xác định là pha bề mặt. Sau đó, pha bề mặt được xác định theo công thức (3.5).

$$\phi_0 = \arg(x_0 + j \, y_0) \tag{3.5}$$

### 3.2.2 Ước lượng các tham số rừng dựa trên thuật toán lặp tối ưu

Dựa trên lý thuyết tập kết hợp [35], sau đó phân tích các trị riêng của ma trận rút gọn và bổ sung thêm một số điều kiện ràng buộc. Khi đó, hệ số CPI tối ưu  $\tilde{\gamma}_{opt}$  được xác định như sau:

$$\min_{\chi_l,\tau_l} \left\| \operatorname{Im}\left(\tilde{\gamma}\left(\chi_l,\tau_l\right)\right) - \widehat{M}_{opt} \operatorname{Re}\left(\tilde{\gamma}\left(\chi_l,\tau_l\right)\right) - \widehat{C}_{opt} \right\| \; ; \; l = 1 \div M \tag{3.6}$$

Đối với mỗi giá trị  $\tilde{\gamma}_{opt}$  trên đường kết hợp thì hệ số CPI cho mỗi kênh phân cực có thể được ước lượng như (3.7).

$$\tilde{\gamma}_{est}\left(h_{v},\,\alpha,\,L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\right) = e^{j\phi_{0}}\left(\tilde{\gamma}_{v}\left(h_{v},\,\alpha\right) - \,L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\left(1 - \tilde{\gamma}_{v}\left(h_{v},\,\alpha\right)\right)\right) \tag{3.7}$$

Tiếp theo, phương pháp FIM đề xuất thuật toán lặp tối ưu cho ước lượng độ cao rừng. Cuối cùng các tham số rừng sẽ được trích xuất trực tiếp bằng cách giải phương trình (3.8).

$$\frac{e^{-j\phi_0}\,\tilde{\gamma}_{opt} - \bar{L}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)}{1 - \bar{L}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)} = e^{\frac{-\cos\theta\,k_z^2}{8\,\bar{\alpha}} + j\,k_z\,h_v} \cdot \frac{erf\left(\frac{4\bar{\alpha}h_v + j\,\cos\theta\,k_z}{2\sqrt{2}\cos\theta}\right) - erf\left(\frac{j\,k_z}{2}\sqrt{\frac{\cos\theta}{2\bar{\alpha}}}\right)}{erf\left(\sqrt{\frac{2\bar{\alpha}}{\cos\theta}}\cdot h_v\right)} \tag{3.8}$$

3.2.3 Kết quả các tham số rừng ước lượng bởi phương pháp FIM

Phương pháp đề xuất được áp dụng cho tập dữ liệu được thu thập bởi rađa tổng hợp mặt mở đặt trên thiết bị bay không người lái (UAV-SAR) của NASA/JPL thuộc dự án AfriSAR. Thông tin đầy đủ về tập dữ liệu UAV-SAR này được trình bày chi tiết trong mục 3.1.2.



Hình 3.5: Khu vực rừng nghiên cứu.

Hình 3.5 cho thấy hình ảnh quang học của công viên Lope, Gabon từ Google Earth. Các vùng khảo sát đã được đặt vào ảnh quang học và khí hiệu của các

xuất ở KV1 là 26.2 (m) và so với giá tri từ dữ liêu LiDAR là thấp hơn 1.4 (m). Độ dốc địa hình trung bình của KV1 được trích xuất bởi mô hình S-RVoG cải tiến là 10,6°. Ở khu vực nghiên cứu KV2 cho thấy đô dốc đia hình được trích xuất là 16,2°. Ngoài ra, chiều cao rừng trung bình từ dữ liệu LiDAR đạt 31,2 (m), cao hơn xấp xỉ 2 (m) so với kết quả của mô hình đề xuất.

Từ kết quả trên cho thấy rằng mô hình S-RVoG cải tiến có khả năng tính toán đa dạng trên các địa hình khác nhau với hiệu quả cao và đáng tin cậy.

- Phương pháp nghich chuyển tham số rừng dưa trên lý 3.2thuyết tập kết hợp trung bình từ ảnh PolInSAR (FIM)
- 3.2.1Ước lượng pha bề mặt dựa trên phương pháp tổng bình phương tối thiểu thích nghi (ATLS)

Để tăng đô chính xác của ước lương đường thẳng kết hợp và pha bề mặt, chúng tôi đề xuất bổ sung một hệ số a vào bài toán tối thiểu và khi đó hàm cực tiểu có dang như sau:

$$\chi^{2}(a,\phi) = \sum_{i=1}^{3} d_{i}^{2} = \sum_{i=1}^{3} \frac{a \cot^{2}(\phi) + 1}{\cot^{2}(\phi) + 1} \left( y_{i} + \cot(\phi) \ x_{i} - \frac{r}{\sin(\phi)} \right)^{2}$$
(3.3)

Có thể thấy rằng khi a = 0 thì phương trình (3.3) sẽ tương ứng với bài toán TLS và ngược lại khi a = 1 thì phương trình này sẽ tượng ứng với bài toán LS. Do đó, phương trình (3.3) cho thấy phương pháp ALTS là dạng tổng quát cho hai phương pháp TLS và LS.



Hình 3.4: Dạng đường thẳng kết hợp PolInSAR bên trong CUC. Đường thẳng kết hợp trong đường tròn đơn vị có thể được biểu diễn như phương trình (3.4). y

$$J = \hat{M}_{opt} x + \hat{C}_{opt} \tag{3.4}$$

Trong đó  $\mathbf{T}_i$  và  $\mathbf{C}_i$  là những ma trận kết hợp phân cực và ma trận hiệp phương sai, các ma trận đó mô tả các đặc tính phân cực tương ứng cho mỗi hình ảnh riêng biệt. Mặt khác,  $\Omega$  và  $C_{int}$  là những ma trận phức, không có tính Hermitian mô tả mối quan hệ giao thoa và phân cực giữa hai hình ảnh.

Đô lệch pha giữa véc-tơ  $\vec{\mathbf{k}}_1$  và  $\vec{\mathbf{k}}_2$  được gây ra bởi các dãy khác nhau tới độ phân giải các tế bào cũng như có thể thay đổi dấu theo thời gian. Mặt khác  $(\vec{\mathbf{k}}_1 \neq \vec{\mathbf{k}}_2)$ , do đó  $(\vec{\mathbf{k}}_1 \vec{\mathbf{k}}_2^{*T} \neq \vec{\mathbf{k}}_2 \vec{\mathbf{k}}_1^{*T})$ . Để có được hình ảnh giao thoa cần xây dựng các véc-tơ tán xạ lên hai véc-tơ phức đồng nhất  $\vec{\omega}_1$  và  $\vec{\omega}_2$ , hai véc-tơ đó để xác đinh sự phân cực của hai hình ảnh tượng ứng (1.6).

$$\mu_1 = \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_1^{*T} \overrightarrow{\mathbf{k}}_1; \ \mu_2 = \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_2^{*T} \overrightarrow{\mathbf{k}}_2 \tag{1.6}$$

Với  $\mu_1, \mu_2$  là sự kết hợp tuyến tính của các phần tử của ma trận tán xạ  $\mathbf{S}_1$ và  $S_2$ , chúng tao thành cơ sở cho sự hình thành các véc-tơ ảnh giao thoa. Khi đó, pha giao thoa có thể thu được từ phương trình (1.7).

$$\phi = \arg\left\{\left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{1}} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{2}}^{*T} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \right\rangle\right\} = \arg\left\{ \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1}^{*T} \boldsymbol{\Omega} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2} \right\}$$
(1.7)

Hệ số CPI như một hàm phản ánh quá trình phân cực của hai hình ảnh có thể được đinh nghĩa sau.

$$\tilde{\gamma}\left(\vec{\boldsymbol{\omega}}_{1},\vec{\boldsymbol{\omega}}_{2}\right) = \frac{\left\langle \vec{\boldsymbol{\omega}}_{1} \mathbf{\Omega} \vec{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \right\rangle}{\sqrt{\left\langle \vec{\boldsymbol{\omega}}_{1}^{*T} \mathbf{T}_{11} \vec{\boldsymbol{\omega}}_{1} \right\rangle \left\langle \vec{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \mathbf{T}_{22} \vec{\boldsymbol{\omega}}_{2} \right\rangle}}$$
(1.8)

Các mô đun của  $\tilde{\gamma}(\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2)$  chỉ ra mức đô tương can giữa hai ảnh giao thoa và argument của nó biểu thị hiệu pha giao thoa và  $|\tilde{\gamma}(\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2)| \leq 1$ .  $\Omega$  là ma trân phức chứa các thông tin về giao thoa và phân cực của mục tiêu, **T** là ma trân kết hợp phân cực Hermitian mô tả các thuộc tính phân cực của mục tiêu thu được từ mỗi hệ thống PolSAR và  $\mathbf{T} = (\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{22})/2$ .

#### Các mô hình nghịch chuyển đô cao rừng 1.3

1.3.1Mô hình khối tán xạ ngẫu nhiên trên mặt đất (RVoG)



Hình 1.2: Sơ đồ biểu diễn mô hình RVoG [21]

Mô hình RVoG được đề xuất bởi Treuhaft và các công sự vào năm 1996 [21]. Trong suốt hơn hai thập kỷ qua, mô hình này được áp dụng rất phổ biến để xây dựng các thuật toán cho ước lượng độ cao rừng từ ảnh PolInSAR [27, 39, 55, 56, 57] ... Mô hình RVoG mô hình hóa rừng thành hai lớp bao gồm lớp tán cây và lớp mặt đất. Trong đó, tán cây được giả định là một khối các vật tán xạ có định hướng ngẫu nhiên trên mặt đất và được đặc trưng bởi một hệ số suy hao sóng cố định.

Khi đó, hệ số CPI của mô hình RVoG có thể được biểu diễn trong phương trình (1.9).  $_{RVoG}_{i\phi_0}\tilde{\gamma}_v(h_v\sigma) + \mu(\vec{\omega})$  (1.0)

$$\tilde{\gamma}^{RVoG} = e^{j\phi_0} \frac{\gamma_v(n_v\sigma) + \mu(\omega)}{1 + \mu(\vec{\omega})} \tag{1.9}$$

Với  $\phi_0 = k_z z_0$  biểu thị cho pha địa hình và  $\mu(\vec{\omega})$  là tỷ số biên độ hiệu dụng của thành phần tán xạ bề mặt so với thành phần tán xạ từ tán cây.  $\tilde{\gamma}_v$  là hệ số CPI cho thành phần tán xạ khối,  $h_v$  là độ cao rừng và  $k_z$  là hệ số sóng đứng.

### 1.3.2 Mô hình khối tán xạ ngẫu nhiên trên địa hình dốc (S-RVoG)

Để cải thiện nhược điểm của mô hình RVoG [21] và nâng cao độ chính xác cho các tham số rừng ước lượng. Năm 2013, Hongxi Lu đã đề xuất mô hình tán xạ khối ngẫu nhiên trên địa hình dốc (S-RVoG) [58] là một dạng cải tiến của mô hình RVoG trong đó lớp bề mặt của địa hình dốc được hiệu chỉnh thành một mặt phẳng nghiêng theo hướng cự ly. Khi đó, hệ số CPI trong mô hình S-RVoG được biểu diễn như sau:

$$\tilde{\gamma}^{S-RVoG} = \frac{2\sigma}{2\sigma + jk'_z \cos\theta'} \cdot \frac{\exp\left((2\sigma h_v/\cos\theta' + jk'_z h_v) \cdot \cos\eta\right) - 1}{\exp\left(2\sigma h_v/\cos\theta' \cdot \cos\eta\right) - 1} \tag{1.10}$$

Trong đó  $k'_z = 4\pi B_n / \lambda R \sin(\theta - \eta)$  biểu thị hệ số sóng đứng dọc theo trục z' và  $\theta' = \theta - \eta$  là góc phương vị. Trong trường hợp địa hình bằng phẳng không có độ dốc ( $\eta = 0$ ) thì mô hình S-RVoG trở thành mô hình RVoG.

### 1.4 Kỹ thuật nghịch chuyển độ cao rừng từ ảnh PolInSAR



Hình 1.3: Bài toán nghịch chuyển độ cao rừng

thấy rằng kết quả này cao hơn chiều cao rừng thực tế và có sai số tương đối lớn. Trong khi đó, chiều cao rừng trung bình ước lượng từ mô hình đề xuất là 19,36 (m) tương ứng với sai số trung bình là 3,16 (%). Ngoài ra, khi xem xét giá trị sai số bình phương trung bình căn bậc hai (RMSE) được xác định bởi hai mô hình thì mô hình đề xuất vẫn cho kết quả đáng tin cậy hơn. Có thể thấy rằng chiều cao rừng ước lượng theo mô hình S-RVoG cải tiến đã cải thiện đáng kể và gần với giá trị thực tế hơn so với mô hình S-RVoG. Kết quả trong bảng này cũng cho thấy các tham số còn lại được ước lượng bởi mô hình S-RVoG cải tiến luôn có độ chính xác cao hơn so với mô hình S-RVoG.

Tiếp theo, mô hình đề xuất cũng được áp dụng cho tập dữ liệu được thu thập bởi ra-đa tổng hợp mặt mở đặt trên thiết bị bay không người lái (UAV-SAR) của NASA/JPL thuộc dự án AfriSAR. Theo đó, tập dữ liệu này cung cấp các hình ảnh PolInSAR để ước lượng độ cao rừng ở Công viên Quốc gia Lope thuộc Gabon, Mỹ. Cả hai tập dữ liệu đều được đo vào ngày 25 tháng 02 năm 2016 bởi sự hợp tác của NASA với ESA và Cơ quan không gian Babon.



Hình 3.3: Hình ảnh của khu vực rừng nghiên cứu.

Hình 3.3 (a) cho thấy hình ảnh quang học của công viên Lope, Gabon từ Google Earth. Số liệu đo LiDAR sẽ được sử dụng làm tham chiếu để đánh giá độ chính xác của phương pháp đề xuất và được biểu diễn trong Hình 3.3 (b). Do dữ liệu của khu vực rừng từ hệ thống UAV-SAR cung cấp có kích thước lớn (8618 x 4922) điểm ảnh. Vì vậy, một khu vực nhỏ đã được tách ra để phân tích, đánh giá các tham số rừng và khí hiệu là KV1 và KV2, mỗi khu vực này có kích thước (500x500) điểm ảnh.

Bảng 3.2: Hiệu quả của mô hình đ	ề xuất so với	giá trị từ đ	lữ liệu LiDAR.
----------------------------------	---------------	--------------	----------------

Khu vực rừng	Độ cao rừng từ	Mô hình S-RVo		oG cải tiến	
nghiên cứu $d\tilde{u}$ liệu LiDAR (m)		$\bar{h}_v(m)$	$\eta$	$\sigma \left( dB/m \right)$	
KV 1	27,6	26,2	$10, 6^{o}$	0,154	
KV 2	31,2	29,1	$16, 2^{o}$	0,206	

Bảng 3.2 cho thấy chiều cao cây trung bình được ước lượng bởi mô hình đề



Hình 3.2: Lưu đồ thuật toán của mô hình S-RVoG cải tiến. được trích xuất gồm: độ cao rừng, hệ số suy hao sóng và góc nghiêng địa hình.

3.1.2 Kết quả mô phỏng của mô hình S-RVoG cải tiến

Mô hình đề xuất được áp dụng với dữ liệu PolInSAR mô phỏng nhằm để đánh giá tính hiệu quả, độ ổn định và tính tin cậy của các tham số rừng ước lượng. Sau đó, áp dụng tính toán với dữ liệu thực nghiệm, đồng thời so sánh hiệu quả với mô hình S-RVoG [58] và các tham số trích xuất từ dữ liệu LiDAR.

Các tham số	Giá trị thực của	Mô hình	Mô hình	
	dữ liệu mô phỏng	S-RVoG $[58]$	đề xuất	
$\bar{h}_v(m)$	20	$21,\!29$	19,36	
$\phi_0 \left( rad \right)$	0,062	$0,\!16$	0,10	
$lpha \left( dB/m^2  ight)$	—	_	0,0039	
$\sigma \left( dB/m  ight)$	0,14	$0,\!25$	$0,\!19$	
$\eta$	$16, 7^{o}$	_	$16, 2^{o}$	
RMSE(m)	0	$^{2,6}$	2,0	
RE~(%)	0	$6,\!38$	$3,\!16$	

Bảng 3.1: Kết	quả mô	phỏng	bởi mô	hình	S-RVoG	và mô	hình	đề xuất
---------------	--------	-------	--------	------	--------	-------	------	---------

Trong Bảng 3.1 cung cấp chi tiết về kết quả các tham số rừng ước lượng bởi hai mô hình. Trong đó, chiều cao rừng ước lượng bởi mô hình S-RVoG có giá trị trung bình là 21,29 (m) tương ứng với sai số trung bình là 6,38(%), có thể

Hình 1.3 biểu diễn sơ đồ tổng quát nhất cho bài toán nghịch chuyển độ cao rừng từ dữ liệu PolInSAR. Trong đó, (**G**) đại diện cho bài toán chuyển tiếp, là một toán tử trừu tượng nhằm dự đoán một tập các dữ liệu có thể quan sát (**d**) trên cơ sở một tập các tham số mô hình (**m**). Mục tiêu của các thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng là xây dựng một hàm biến đổi ngược ( $\mathbf{G}^{-1}$ ) để ước lượng các tham sô rừng dựa trên các dữ liệu quan sát được.

### 1.4.1 Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR

Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR [39] được đề xuất bởi S.R Cloude và Papathanassiou vào năm 2003. Thuật toán này tương đối đơn giản và được áp dụng rộng rãi nhất trong việc nghịch chuyển độ cao rừng sử dụng dữ liệu PolInSAR. Trong đó, thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn được áp dụng với mô hình RVoG [21] để ước lượng độ cao rừng và pha bề mặt theo ba giai đoạn như Hình 1.4.



Hình 1.4: Lưu đồ thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]

# 1.4.2 Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng cho ước lượng tham số rừng [55]

Năm 2016, Fu Wenxue đã đề xuất một phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng nhằm khắc phục các hạn chế của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn và nâng cao hiệu quả cho ước lượng các tham số rừng. Theo đó, hệ số CPI của hai kênh phân cực HV và HH được xác định như sau.

$$\tilde{\gamma}_{est(HH)} = e^{j\phi_0} \left[ \tilde{\gamma}_v - L(HH)(1 - \tilde{\gamma}_v) \right]$$
  
$$\tilde{\gamma}_{est(HV)} = e^{j\phi_0} \left[ \tilde{\gamma}_v - L(HV)(1 - \tilde{\gamma}_v) \right]$$
  
(1.11)

Sau đó, xác định khoảng cách giữa các hệ số CPI ước lượng và các hệ số

CPI của các kênh phân cực HV và HH. Cuối cùng, hệ số CPI tối ưu  $\tilde{\gamma}_{opt}$  được xác định bằng giá trị nào làm cho tổng khoảng cách sai lệch là nhỏ nhất.

r

$$\min\left(\sum_{i=1}^{2} d_i\right) \tag{1.12}$$

Xây dựng bảng tra cứu dựa trên (1.9) và chiều cao rừng, hệ số suy hao sóng được xác định bằng cách so sánh hệ số CPI tối ưu  $\tilde{\gamma}_{opt}$  với các giá trị trong bảng LUT.

### 1.5 Những điểm hạn chế còn tồn tại và biện pháp khắc phục

Xuất phát từ việc phân tích đánh giá các mô hình, thuật toán ở trên có thể rút ra các điểm hạn chế chính còn tồn tại như sau.

(1) Sử dụng số lượng nhiều các kênh phân cực để ước lượng pha địa hình.

(2) Giả định hệ số suy hao sóng là một hằng số không đổi trên toàn bộ khu vực rừng nghiên cứu.

(3) Giả định hệ số CPI kênh phân cực HV hoặc một hệ số CPI tối ưu nào đó chỉ chứa duy nhất thành phần tán xạ khối, mà không chứa bất kỳ thành phần tán xạ nào khác ( $\mu(\vec{\omega}) = 0$ ).

Luận án sẽ tập trung xây dựng các đề xuất mới nhằm khắc phục những hạn chế còn tồn tại của các mô hình, thuật toán trước đây và nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng. Điểm mới của bài toán nghịch chuyển độ cao rừng trong luận án thường được trình bày trong giai đoạn xác định hệ số CPI tối ưu. Xác định hệ số CPI tối ưu chính xác vừa có thể khắc phục được những hạn chế còn tồn tại của các nghiên cứu trước đây [21, 39, 55, 56, 57] và vừa có thể nâng cao được độ chính xác cho các tham số rừng ước lượng.

### 1.6 Kết luận chương

Chương 1 của luận án đã trình bày tổng quan về các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước trong lĩnh vực ước lượng các tham số rừng sử dụng dữ liệu PolInSAR. Qua đó, rút ra được xu hướng nghiên cứu để giải quyết bài toán nâng cao độ chính xác của các tham số rừng ước lượng sử dụng ảnh PolInSAR, đồng thời nêu ra được tầm quan trọng của vấn đề nghiên cứu trong luận án. Tiếp theo, cơ sở lý thuyết của kỹ thuật ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực được trình bày tóm lược và nêu ra được ưu điểm của các kỹ thuật này trong lĩnh vực trích xuất các tham số rừng. Sau đó, luận án trình bày và phân tích các ưu, nhược điểm của các mô hình, thuật toán tiêu biểu đã công bố trước đây và đưa ra biện pháp khắc phục nhằm nâng cao độ chính xác của độ cao rừng ước lược và các tham số có liên quan.

### Chương 3

# Các phương pháp nghịch chuyển cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi sử dụng dữ liệu PolInSAR

### 3.1 Mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng các tham số rừng trên địa hình đồi núi

Trong phần này, luận án đề xuất một mô hình S-RVoG cải tiến với hệ số suy hao sóng thay đổi cho ước lượng các tham số rừng. Mô hình đề xuất không chỉ khắc phục hạn chế của mô hình S-RVoG [58] mà còn nâng cao độ chính xác trong trích xuất tham số rừng.



Hình 3.1: Sơ đồ biểu diễn sự tán xạ của mô hình S-RVoG cải tiến. Trong mô hình đề xuất, hệ số suy hao sóng là độc lập với kênh phân cực và thay đổi tuyến tính với một hệ số  $\alpha$  ngẫu nhiên và được xác định như (3.1).

$$\sigma = \alpha \,.\, z \tag{3.1}$$

Với  $\alpha > 0$  và  $0 < z < h_v$ , thay giá trị  $\sigma$  từ (3.1) vào phương trình (1.10) và áp dụng hàm sai số Gaussian. Khi đó, hệ số CPI được xác định bởi mô hình đề xuất như sau:

$$\tilde{\gamma}_{0v} = e^{\left(\frac{-\cos\theta' k' z^2}{8\alpha} + jk' z h_v \cos\eta\right)} \cdot \left[\frac{\operatorname{erf}\left(4\alpha h_v \cos\eta + jk' z h_v \cos\theta'\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{jk' z}{2} \sqrt{\frac{\cos\theta'}{2\alpha}}\right)}{\operatorname{erf}\left(h_v \cos\eta \sqrt{\frac{\cos\theta'}{2\alpha}}\right)}\right]$$

$$(3.2)$$

Trong đó  $\theta' = \theta - \eta$  là góc tới trên bề mặt nghiêng,  $\eta$  là góc nghiêng của địa hình,  $k'_z = k_z \frac{\sin \theta}{\sin \theta'}$  là tỷ số sóng đứng và er $f(\cdot)$  là hàm sai số Gaussian.

### 3.1.1 Ước lượng các tham số rừng

Trong phần này, luận án đề xuất một thuật toán cho trích xuất các tham số rừng dựa trên mô hình S-RVoG cải tiến như trong Hình 3.2. Các tham số



Hình 2.6: Đồ thị so sánh độ cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp. Bảng 2.4: Kết quả mô phỏng của các phương pháp.

Các tham số	Giá trị thực của Phương pháp ba		Phương pháp
	dữ liệu mô phỏng	giai đoạn mở rộng	IDP
$\bar{h}_v(m)$	20	$18,\!696$	$19,\!629$
$\phi_0 (rad)$	0,092	$0,\!134$	0,095
$\sigma \left( dB/m  ight)$	$0,\!126$	0,264	$0,\!185$
RMSE(m)	0	3,062	$1,\!582$
RE~(%)	0	$6,\!39$	$1,\!81$

Bảng 2.4 cho thấy chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng và phương pháp IDP có giá trị trung bình lần lượt là 18,696 (m) và 19,629 (m), so với giá trị của chiều cao rừng thực tế trong dữ liệu mô phỏng là 20 (m). Đồng thời, sai số tương đối của độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp IDP là 1,81 (%) và phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng có giá trị là 6,39 (%). Từ đó, có thể thấy rằng độ chính xác của chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp IDP cao hơn so với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55].

### 2.5 Kết luận chương

Chương 2 đã trình bày ba đề xuất nhằm nâng cao hiệu quả cho ước lượng các tham số rừng từ ảnh PolInSAR. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng cả ba phương pháp đề xuất đều đạt được độ chính xác cao với các sai số nhỏ. Trong đó, phương pháp IDP đạt được hiệu quả cao nhất trong ba phương pháp đề xuất.

Các kết quả trình bày trong Chương 2 đã được công bố trong các bài báo [CT1], [CT2] và [CT3] theo danh mục các công trình khoa học đã công bố.

### Chương 2

# Trích xuất độ cao rừng dựa trên tối ưu vùng kết hợp từ dữ liệu PolInSAR

### 2.1 Phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn nâng cao cho trích xuất các tham số rừng từ ảnh PolInSAR (NTS)

Trong phần này, luận án đề xuất phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn nâng cao cho trích xuất các tham số rừng từ ảnh PolInSAR (NTS). Trong phương pháp NTS, một thuật toán tối ưu có điều kiện được áp dụng để xác đinh hai kênh phân cực cho thành phần tán xa khối và bề mặt. Sau đó, pha bề



Hình 2.1: (a) biểu diễn các hệ số CPI, (b) lưu đồ thuật toán của phương pháp NTS

mặt được xác định dựa trên điểm cắt của đường thẳng qua hai kênh phân cực này với đường tròn đơn vị phức. Cuối cùng, một bảng tra cứu hai chiều được

xây dựng để trích xuất tham số rừng. Các bước tiến hành của phương pháp NTS được tóm tắt qua lưu đồ thuật toán trong Hình 2.1 (b).

Phương pháp NTS không chỉ nâng cao được hiệu quả của độ cao rừng ước lượng mà còn khắc phục được những giả định chưa chính xác của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39] và phương pháp Tayebe-1 [57].

# 2.2 Phương pháp tối ưu trạng thái phân cực cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR (OPC)

Phương pháp OPC được thực hiện thông qua các bước: Đầu tiên, một phương pháp tối ưu trạng thái phân cực được đề xuất để tăng độ chính xác cũng như độ tin cậy trong ước lượng pha địa hình. Sau đó, một dải giá trị hữu



Hình 2.2: (a) biểu diễn các hệ số CPI, (b) lưu đồ thuật toán của phương pháp OPC.

dụng cho hệ số suy hao sóng dựa trên cấu trúc hình học của Tayebe-1 được áp dụng để xây dựng bảng tra cứu. Tiếp theo, sử dụng phương pháp tối ưu toàn cục để xác định hệ số CPI tối ưu cho thành phần tán xạ khối, mà có ít nhất



Hình 2.5: Biểu đồ 3D thể hiện độ cao rừng ước lượng trên toàn bộ khu vực quan sát: (a) phương pháp OPC, (b) phương pháp Tayebe-2.

Bảng 2.3: Kết quả mô phỏng từ phương pháp OPC và Tayebe-2 [56].

		01 1	νL
Các tham số	Giá trị thực của	Phương pháp	Phương pháp
	dữ liệu mô phỏng	Tayebe-2 $[56]$	OPC
$ar{h}_v(m)$	20	18,862	$19,\!459$
$\phi_0\left(rad ight)$	0,092	0,166	$0,\!105$
$\sigma\left(dB/m ight)$	$0,\!126$	0,235	0,206
RMSE~(m)	0	$2,\!85$	1,92
RE~(%)	0	$5,\!52$	2,46

Tayebe-2 là 18,862 (m). Đồng thời, sai số tương đối của độ cao rừng ước lượng được bởi phương pháp OPC có giá trị là 2,46 (%) và nhỏ hơn xấp xỉ 3 (%) so với phương pháp Tayebe-2. Ngoài ra, hệ số suy hao sóng, pha bề mặt và chỉ số *RMSE* được xác định bởi phương pháp OPC đều cho thấy độ chính xác cao và gần với giá trị của hệ thống hơn phương pháp Tayebe-2. Từ các phân tích trên, có thể kết luận rằng các tham số rừng ước lượng của phương pháp OPC luôn chính xác cao hơn so với phương pháp Tayebe-2 [56].

### 2.4.4 Kết quả mô phỏng từ phương pháp IDP

Hiệu quả của mô hình IDP được đánh giá bằng dữ liệu mô phỏng và so sánh với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55].

Hình 2.6 cho thấy độ cao rừng ước lượng trung bình của phương pháp được IDP dao động ổn định xung quanh độ cao 20 (m). Trong khi đó, độ cao rừng được ước lượng bởi phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng thường dao động mạnh trong khoảng giá trị từ 16 (m) đến 19,5 (m).

Các tham số	Giá trị thực của	Phương pháp	Phương pháp
	dữ liệu mô phỏng	Tayebe-1 $[57]$	NTS
$\bar{h}_v$ (m)	20	18,48	19,58
$\phi_0 (rad)$	0,092	0,159	$0,\!117$
$\sigma \left( dB/m \right)$	0,126	0,226	0,188
RMSE(m)	0	$2,\!39$	1,59
RE~(%)	0	$7,\!46$	1,98

Bảng 2.2: Kết quả mô phỏng của phương pháp NTS và Tayebe-1 [57].

số tương đối của phương pháp Tayebe-1. Các kết quả này cho thấy rằng hiệu quả của độ cao rừng ước lượng từ phương pháp Tayebe-1 là thấp hơn so với phương pháp NTS.

Hơn nữa, pha bề mặt được xác định bởi phương pháp NTS đạt giá trị là 0,117 (rad) và gần với giá trị pha của hệ thống (0,092 (rad)). Ngược lại, pha bề mặt được ước lượng bởi phương pháp Tayebe-1 là 0,159 (rad) và sai lệch lớn so với giá trị của hệ thống. Ngoài ra, hệ số suy hao sóng được trích xuất bởi phương pháp NTS cũng cho kết quả chính xác và gần với giá trị hệ thống hơn phương pháp Tayebe-1.

Từ các phân tích trên, có thể kết luận rằng các tham số rừng ước lượng của phương pháp NTS đáng tin cậy hơn so với phương pháp Tayebe-1 [57].

### 2.4.3 Kết quả ước lượng tham số rừng bởi phương pháp OPC

Dữ liệu mô phỏng trong Bảng 2.1 sẽ được áp dụng để đánh giá hiệu quả của phương pháp OPC và so sánh với hiệu quả của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cải tiến cho ước lượng chiều cao rừng sử dụng dữ liệu PolInSAR của Tayebe [56] (phương pháp Tayebe-2).

Hình 2.5 (a) là biểu đồ ba chiều mô tả độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp OPC trên toàn bộ khu vực rừng quan sát. Kết quả trong Hình 2.10 (a) cho thấy các độ cao rừng ước lượng được tương đối đồng đều và phần lớn tập trung ở độ cao xấp xỉ 20 (m). Trong khi đó, độ cao rừng trung bình được ước lượng bởi phương pháp Tayebe-2 thể hiện ở Hình 2.5 (b) có dao động lớn và không đồng đều.

Các tham số được trình bày trong Bảng 2.3 cho thấy chiều cao rừng trung bình được xác định bởi phương pháp đề xuất là 19,459 (m) và phương pháp

sự đóng góp của các thành phần tán xạ khác. Cuối cùng, độ cao rừng và các tham số khác sẽ được xác định bằng cách so sánh hệ số CPI tối ưu với các giá trị trong bảng tra cứu.

Phương pháp OPC đã bổ sung các điều kiện ràng buộc để xác định hệ số CPI tối ưu nhất nhằm nâng cao hiệu quả ước lượng độ cao rừng. Hệ số CPI tối ưu được xác định bởi phương pháp đề xuất đã khắc phục được nhược điểm của phương pháp Tayebe-2 [56] và đồng thời cũng đã nâng được hiệu quả của các tham số rừng ước lượng.

### 2.3 Phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng cải tiến từ ảnh PolInSAR hai kênh phân cực (IDP)

### 2.3.1 Ước lượng pha bề mặt dựa trên lý thuyết tập kết hợp

Tabb và Flynn là những người tiên phong trong việc ứng dụng lý thuyết cự ly số học của ma trận rút gọn trong phân tích và xử lý dữ liệu PolInSAR [54]. Theo đó, hệ số CPI cho dữ liệu PolInSAR hai kênh phân cực được định nghĩa.

$$\tilde{\gamma}\left(\overrightarrow{\omega}\right) = \frac{\overrightarrow{\omega}^{*T} \, \Omega \, \overrightarrow{\omega}}{\overrightarrow{\omega}^{*T} \, \underline{\mathbf{T}} \, \overrightarrow{\omega}} = \, \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_{i}^{*T} \cdot \mathbf{H} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}$$
(2.1)

Trong đó  $\mathbf{H} = T^{-\frac{1}{2}} \mathbf{\Omega} T^{\frac{1}{2}}; \quad \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}} = \frac{\sqrt{\overline{T}} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} T^{\frac{1}{2}} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}; \quad \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_{i}^{*T} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}} = 1$ 

Theo định lý về cự ly số của ma trận thì ma trận **H** là một đường bao lồi của các điểm trị riêng của nó. Giả sử ma trận **H** có hai trị riêng  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  với (arg ( $\lambda_1$ ) < arg ( $\lambda_2$ )). Khi đó, pha địa hình sẽ được xác định theo công thức (2.2).

$$\phi_0 = \arg \left\{ \lambda_1 - \lambda_2 \left( 1 - B \right) \right\}$$
(2.2)

2.3.2 Ước lượng các tham số rừng dựa trên phương pháp tìm kiếm toàn diện kênh phân cực

Từ phương trình (2.1) cho thấy hệ số CPI của hệ thống PolInSAR hai kênh phân cực là một hệ số phụ thuộc vào véc-tơ phân cực.

$$\vec{\omega} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \, e^{j\psi} \end{bmatrix}^T \tag{2.3}$$

Cho cặp giá trị  $(\alpha, \psi)$  thay đổi trong khoảng giá trị của nó và một tập các giá trị hệ số CPI  $\tilde{\gamma}_c(\vec{\omega})$  sẽ được xác định theo điều kiện.

$$\phi_1 > \arg\left(\tilde{\gamma}_c\left(\vec{\omega}\right)\right) > \phi_{HV} \tag{2.4}$$

Với tập các giá trị hệ số CPI  $\tilde{\gamma}_c(\vec{\omega})$  thỏa mãn điều kiện (2.4) có thể ước lượng hệ số tương can giao thoa cho hai kênh phân cực HH và HV như sau:

$$\begin{cases} \tilde{\gamma}_{HH\_est} = e^{j\phi_0} \left[ \tilde{\gamma}_c \left( \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) + L_{HH} \left( \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \left( 1 - \tilde{\gamma}_c \left( \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \right) \right] \\ \tilde{\gamma}_{HV\_est} = e^{j\phi_0} \left[ \tilde{\gamma}_c \left( \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) + L_{HV} \left( \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \left( 1 - \tilde{\gamma}_c \left( \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \right) \right] \end{cases}$$
(2.5)





Sau đó, xác định khoảng cách giữa các kênh ước lượng và hai kênh phân cực thực tế theo biểu thức.

$$\begin{cases} d_1 = |\tilde{\gamma}_{HH} - \tilde{\gamma}_{HH\_est}| \\ d_2 = |\tilde{\gamma}_{HV} - \tilde{\gamma}_{HV\_est}| \end{cases}$$
(2.6)

Khi đó hệ số CPI của kênh phân cực tối ưu  $\tilde{\gamma}_{c_opt}$  ( $\vec{\omega}_{opt}$ ) sẽ được xác định theo điều kiện (2.7).

$$\min_{\alpha,\psi} \left\| \sum_{i=1}^{2} d_i \right\| \tag{2.7}$$

Sau đó, một bảng tra cứu cho thành phần tán xạ từ tán cây được xây dựng dựa trên công thức (1.9). Cuối cùng, độ cao rừng và hệ số suy hao sóng sẽ được trích xuất bằng cách so sánh hệ số CPI của kênh phân cực tối ưu  $\tilde{\gamma}_{c\_opt} (\vec{\boldsymbol{\omega}}_{opt})$  với các giá trị trong tra cứu.

### 2.4 Kết quả mô phỏng

### 2.4.1 Dữ liệu mô phỏng

Dữ liệu rừng mô phỏng được tạo ra bởi phần mềm PolSARProSim 5.2 [70]. Phần mềm này cho phép lựa chọn các tham số đầu vào như chiều cao rừng, mật độ cây, diện tích... Sau đó sẽ tạo ra được dữ liệu rừng giả lập cho hệ thống PolInSAR. Để đảm bảo tính nhất quán và khách quan trong phần trình bày kết quả của luận án. Kịch bản rừng mô phỏng này được áp dụng để đánh giá hiệu quả của tất cả các phương pháp đề xuất trong luận án và các tham số được mô tả chi tiết trong Bảng 2.1.

Hình 2.6 là hình ảnh Pauli của dữ liệu rừng mô phỏng với kích thước

Bảng 2.1: Các tham số rừng từ dữ liệu mô phỏng

Đô cao	Đường cơ sở	Đường cơ sở	Tần số	Góc tới
ra-đa	theo phương đứng	theo phương ngang	trung tâm	
3000 m	1,0 m	10 m	1,3 GHz	$40^{0}$
Độ dốc	Diện tích	Loại cây	Chiều cao	Mật độ
địa hình			trung bình	
$0,001^{0}$	2,8274 Ha	Hedge	20 m	900
				cây/Ha



Hình 2.4: Ảnh màu Pauli của khu vực rừng nghiên cứu

 $(225 \mathrm{x} 217)$  điểm ảnh và đường ngang màu đỏ thể hiện hàng ngang 86 được sử dụng để đánh giá các tham số rừng ước lượng bởi các đề xuất.

### 2.4.2 Kết quả ước lượng tham số rừng dựa trên phương pháp NTS

Trong phần này, luận án sẽ áp dụng phương pháp NTS và phương pháp tối ưu hệ số CPI của Tayebe (phương pháp Tayebe-1) [57] với dữ liệu rừng mô phỏng trong Bảng 2.1.

Bảng 2.2 cho thấy độ cao rừng trung bình được ước lượng bởi phương pháp NTS và Tayebe-1 lần lượt là 19,58(m) và 18,48 (m), trong khi chiều cao rừng thực tế là 20 (m). Kết quả này cho thấy độ cao rừng được ước lượng bởi phương pháp đề xuất chính xác hơn so với phương pháp Tayebe-1 [57] là 1,1 (m).

Ngoài ra, giá trị RMSE của phương pháp NTS và phương pháp Tayebe-1 tương ứng là 1,59 (m) và 2,39 (m). Có thể thấy rằng giá trị RMSE của phương pháp Tayebe-1 cao gần gấp hai lần phương pháp đề xuất. Đồng thời, giá trị sai số tương đối của phương pháp NTS là 1, 98 (%), nhỏ hơn nhiều so với sai