BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2021

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Chuyên ngành: Kỹ THUẬT ĐIỆN TỦ Mã số: 9 52 02 03

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: PGS. TS PHẠM MINH NGHĨA TS LÊ VĂN NHU

HÀ NỘI - NĂM 2021

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Luận án và các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của các 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 kỳ công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng tham khảo đều đã được trích dẫn đầy đủ và theo đúng quy định.

> Hà Nội, ngày 12 tháng 11 năm 2021 Tác giả

> > Thiều Hữu Cường

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án, nghiên cứu sinh đã nhận được nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu.

Trước hết nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc đến PGS . TS Phạm Minh Nghĩa và TS Lê Văn Nhu đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ nghiên cứu sinh trong suốt quá trình nghiên cứu khoa học và hoàn thành luận án.

Nghiên cứu sinh cũng chân thành cảm ơn các thầy giáo trong Khoa Vô tuyến điện tử, tập thể Bộ môn Lý thuyết mạch - Đo lường, Khoa Vô tuyến Điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự, nơi nghiên cứu sinh làm việc, đã quan tâm và tận tình giúp đỡ và tạo điều kiện mọi mặt trong suốt thời gian nghiên cứu sinh học tập, nghiên cứu tại đây.

Nghiên cứu sinh cũng chân thành cảm ơn Phòng Sau đại học - Học viện Kỹ thuật Quân sự, Trường Sĩ quan thông tin - Binh chủng Thông tin Liên lạc là các đơn vị chủ quản đã thường xuyên hỗ trợ, tạo điều kiện và giúp đỡ nghiên cứu sinh rất nhiều trong thời qua.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh trân trọng cảm ơn vợ, con, những người thân yêu trong gia đình, bạn bè và các đồng nghiệp, những người luôn quan tâm tới tiến độ thực hiện luận án và tạo động lực rất lớn để nghiên cứu sinh hoàn thành công trình này. đã chia sẻ khó khăn, tiếp thêm động lực giúp nghiên cứu sinh hoàn thành luận án này.

Xin chân thành cảm ơn!

MỤC LỤC

••
v
viii
xi
xiv
1
ЭÔ
8
8
11
11
13
16
18
21
23
23
25

1.6. Kỹ thuật nghịch chuyển độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR	27
1.6.1. Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cho ước lượng độ cao rù	ing
sử dụng ảnh PolInSAR	28
1.6.2. Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng cho ước lượ	ong
tham số rừng	31
1.6.3. Phương pháp tối ưu hệ số tương can giao thoa phân cực phức c	cho
ước lượng độ cao rừng sử dụng dữ liệu PolInSAR \ldots	33
1.7. Kết luận chương	37
Chương 2. TRÍCH XUẤT ĐỘ CAO RỪNG DỰA TRÊN T	ốΙ
ƯU VÙNG KẾT HỢP TỪ DỮ LIỆU POLINSAR	38
2.1. Phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn nâng cao cho trích xuất c	các
tham số rừng từ ảnh PolInSAR (NTS)	39
2.1.1. Tối ưu vùng kết hợp	40
2.1.2. Ước lượng pha bề mặt	42
2.1.3. Ước lượng độ cao rừng sử dụng vòng lặp tối ư u $\ldots\ldots\ldots$	43
2.2. Phương pháp tối ưu trạng thái phân cực cho ước lượng độ cao rừng	sử
dụng ảnh PolInSAR (OPC)	45
2.2.1. Ước lượng pha bề mặt dựa trên tối ưu trạng thái phân cực	45
2.2.2. Ước lượng các tham số rừng	48
2.3. Phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng cải tiến từ ảnh PolInSAR l	hai
kênh phân cực	50
2.3.1. Ước lượng pha bề mặt dựa trên lý thuyết tập kết hợp \ldots	52
2.3.2. Ước lượng các tham số rừng dựa trên phương pháp tìm kiếm to	oàn
diện kênh phân cực	53

2.4. Kết quả mô phỏng	55
2.4.1. Dữ liệu mô phỏng	55
2.4.2. Kết quả ước lượng tham số rừng dựa trên phương pháp NTS \sim	57
2.4.3. Kết quả ước lượng tham số rừng bởi phương pháp OPC	63
2.4.4. Kết quả mô phỏng từ phương pháp IDP	68
2.5. Kết luận chương	74
Chương 3. CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHỊCH CHUYỂN CH	O
ƯỚC LƯỢNG ĐỘ CAO RỪNG TRÊN ĐỊA HÌNH ĐỒI NÚI S	Ů
DỤNG DỮ LIỆU POLINSAR	76
3.1. Mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng các tham số rừng trên địa hìn	nh
đồi núi	77
3.1.1. Ước lượng pha bề mặt	80
3.1.2. Xác định hệ số CPI tối ưu dựa trên dấu hiệu phân cực	80
3.1.3. Ước lượng các tham số rừng	82
3.1.4. Kết quả ước lượng các tham số rừng dựa trên mô hình S-RVoG c	eåi
tiến	83
3.2. Phương pháp nghịch chuyển tham số rừng dựa trên lý thuyết tập k	ź
hợp trung bình từ ảnh PolInSAR (FIM)	92
3.2.1. Ước lượng pha bề mặt dựa trên phương pháp tổng bình phươn	ng
tối thiểu thích nghi (ATLS)	92
3.2.2. Ước lượng các tham số rừng dựa trên thuật toán lặp tối ưu	96
3.2.3. Kết quả các tham số rừng ước lượng bởi phương pháp FIM 10	00
3.3. Kết luận chương 1	17

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU	120
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	123
TÀI LIỆU THAM KHẢO	124

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nghĩa Tiếng Anh	Nghĩa Tiếng Việt
ATLS	Adaptive Total Least	Tổng bình phương tối thiểu
	Square	thích nghi
CPI	Complex polarymetric in-	Tương can giao thoa phân
	terferometry coherence	cực phức
CUC	Complex Unit Circle	Vòng tròn đơn vị phức
DEM	Digital Elevation Model	Mô hình số độ cao
ENVISAT	Environmental Satellite	Vệ tinh môi trường
ESAR	European Space Agency	Cơ quan Vũ trụ Châu Âu
ESPRIT	Estimation Signal Parame-	Ước lượng tham số tín hiệu
	ter via Rotation Invariant	dựa trên kỹ thuật xoay bất
	Technique	biến
FAO	Food and Agriculture Orga-	Tổ chức Nông lương Liên
	nization of the United Na-	Hiệp Quốc
	tions	
FIM	Forest Parameters Inversion	Chuyển đổi các tham số
	by Mean Coherence Set	rừng dựa trên tập kết hợp
	from Single-baseline PolIn-	trung bình sử dụng dữ liệu
	SAR Data	PolInSAR môt đường cơ sở
IDP	An Improved Forest Height	Phương pháp nghịch chuyển
	Inversion Method Using	chiều cao rừng cải tiến sử
	Dual-Polarization PolIn-	dung dữ liệu PolInSAR hai
	SAR Data	kênh phân cực

InSAR	Interferometric SAR	Ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa
NASAR	National Aeronautics and	Cơ quan Hàng không vũ trụ
	Space Administration	Hoa Kỳ
NTS	A Novel Three Steps	Phương pháp nghịch chuyển
	Method for Forest Pa-	ba giai đoạn nâng cao cho
	rameters Extraction Using	trích xuất tham số rừng sử
	PolInSAR Images	dụng ảnh PolInSAR
OPC	Optimal Polarization Chan-	Phương pháp tối ưu trạng
	nel Method for Estimating	thái phân cực cho ước lượng
	Forest Height From PolIn-	chiều cao rừng từ ảnh PolIn-
	SAR Images	SAR
LiDAR	Light Detection And Rang-	Công nghệ đo khoảng cách
	ing	bằng tia laser
LUT	Look Up Table	Bảng tra cứu
LS	Least Squares	Bình phương tối thiểu
PolSAR	Polarimetric SAR	Ra-đa tổng hợp mặt mở
		phân cực
PolInSAR	Polarimetric Interferomet-	Ra-đa tổng hợp mặt mở
	ric SAR	giao thoa phân cực
RE	Relative Erorr	Sai số tương đối
RMSE	Root Mean Squared Erorr	Sai số bình phương trung
		bình căn bậc hai
RVoG	Random Volume over	Mô hình khối các vật tán xạ
	Ground	ngẫu nhiên trên mặt đất
SAR	Synthetic Aperture Radar	Ra-đa tổng hợp mặt mở
S-RVoG	Slope Random Volume over	Mô hình khối các vật tán
	Ground	xạ ngẫu nhiên trên địa hình
		dốc

STSM	Slope Three-layer Scatter	Mô hình tán xạ ba lớp trên
	Model	địa hình dốc
TLS	Total Least Squares	Phương pháp tổng bình
		phương tối thiểu
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Thiết bị bay không người lái
UNEP	United Nations Environ-	Chương trình Môi trường
	ment Programme	Liên Hiệp Quốc

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa.
\overrightarrow{E}^{i}	Điện trường sóng tới.
$\overrightarrow{oldsymbol{E}}^{s}$	Điện trường sóng tán xạ.
$\overrightarrow{m{E}}_h^i$	Trường sóng tới cho phân cực ngang .
$\overrightarrow{E}_{v}^{i}$	Trường sóng tới cho phân cực đứng .
$\overrightarrow{E}_{h}^{s}$	Trường sóng tán xạ cho phân cực ngang .
$\overrightarrow{m{E}}_v^s$	Trường sóng tán xạ cho phân cực đứng .
r	Khoảng cách từ ăng-ten thu đến vật tán xạ.
S	Ma trận tán xạ.
$S_{hh},\ S_{hv},\ S_{vh},\ S_{vv}$	Các hệ số tán xạ phức .
k_z	Tỷ số sóng đứng .
P_t	Tổng công suất tán xạ của hệ thống ra-đa.
$Tr\left(\mathbf{S} ight)$	Vết của ma trận tán xạ.
$\mathbf{\Psi}_P$	Ma trận chuyển đổi hệ tọa độ Pauli.
$\mathbf{\Psi}_{L}$	Ma trận chuyển đổi hệ tọa độ Lexicographic.
$\overrightarrow{\mathbf{k}_{P}}$	Véc-tơ mục tiêu trong cơ sở Pauli.
$\overrightarrow{\mathbf{k}_L}$	Véc-to mục tiêu trong cơ sở Lexicographic.
$Span\left(\mathbf{S} ight)$	Bao tuyến tính của ma trận S.
$\mathbf{U}_{(L ightarrow P)}$	Ma trận chuyển đổi nguyên trị.
Т	Ma trận kết hợp.
С	Ma trận hiệp phương sai.
s_1, s_2	Các tín hiệu của ra-đa.
R	Khoảng cách giữa ra-đa và điểm tán xạ .
ϕ_S	Pha tán xạ của ra-đa.

ϕ	Pha giao thoa .
ϕ_{opt}	Pha tối ưu.
ϕ_0	Pha bề mặt.
ϕ_v	Pha giao thoa cho tán xạ khối.
λ	Bước sóng hoạt động của ra-đa.
В	Đường cơ sở không gian.
T_B	Đường cơ sở thời gian.
δ_b	Góc nghiêng của đường cơ sở.
heta	Góc tới của ra-đa.
h	Chiều cao của mục tiêu.
$ ilde{\gamma}$	Hệ số tương can giao thoa phân cực phức.
$ ilde{\gamma}_v$	Hệ số tương can giao thoa phân cực phức cho
	thành phần tán xạ khối.
$ ilde{\gamma}_{opt}$	Hệ số tương can giao thoa phân cực phức tối ưu
	cho thành phần tán xạ khối.
\mathbf{T}_{6}	Ma trận kết hợp PolInSAR trong hệ cơ sở Pauli.
\mathbf{C}_6	Ma trận hiệp phương sai trong hệ cơ sở Lexico-
	graphic.
Ω	Ma trận tương quan chéo.
\mathbf{C}_{int}	Ma trận tương quan chéo giao thoa phân cực trong
	cơ sở Lexicographic.
$\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_1, \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_2$	Véc-to phân cực.
$ar{h}_v$	Chiều cao rừng trung bình.
m_V	Công suất của thành phần tán xạ khối.
m_G	Công suất của thành phần tán xạ bề mặt.
σ	Hệ số suy hao sóng trung bình.
$\mu(\overrightarrow{oldsymbol{\omega}})$	Tỷ lệ biên độ hiệu dụng giữa tán xạ bề mặt và
	tán xạ khối.
\mathbf{T}_{g}	Ma trận kết hợp tán xạ mặt đất.
\mathbf{T}_v	Ma trận kết hợp tán xạ khối.

$\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{opt}$	Trạng thái phân cực tối ưu.
$\overrightarrow{\mathbf{k}}$	Véc-tơ mục tiêu tán xạ.
η	Độ dốc của địa hình.
k_z	Hệ số sóng đứng.
$(\cdot)^*$	Đại lượng liên hợp phức.
$\left(\cdot ight)^{T}$	Chuyển vị mma trận.
$\langle \cdot \rangle$	Lọc trung bình hai chiều.
$rg\left(\cdot ight)$	Thành phần agument của số phức.
Π	Ma trận rút gọn.
$\operatorname{er} f\left(\cdot ight)$	Hàm sai số Gauss.

DANH MỤC HÌNH VẼ

1.1	Các trạng thái phân cực trong ra đa viễn thám [66]. \ldots \ldots	12
1.2	Sự tương tác của sóng điện từ với nhiều mục tiêu [66]	14
1.3	Cấu trúc hình học của ra đa giao thoa [67]	19
1.4	Hình ảnh thu thập từ hệ thống PolInSAR [67]	21
1.5	Hàm cấu trúc cho mô hình RVoG [21].	24
1.6	Sơ đồ biểu diễn mô hình S-RVoG [58]	26
1.7	Bài toán nghịch chuyển độ cao rừng.	27
1.8	Thuật toán TLS [39]	29
1.9	Biểu đồ thể hiện các hệ số CPI trong đường tròn đơn vị [55]	31
1.10	Vòng tròn đơn vị trên mặt phẳng phức của phương pháp	
	Tayebe-1 [57]	34
1.11	(a) Mô tả vị trí pha tán xạ trung tâm, (b) Biểu diễn cách xác	
	định hệ số CPI tối ưu	35
2.1	Biểu diễn các hệ số CPI của phương pháp NTS trong CUC	42
2.2	Biểu diễn hệ số CPI tối ưu của phương pháp OPC	47
2.3	Vòng tròn đơn vị trên mặt phẳng phức của phương pháp IDP	53
2.4	Ảnh màu Pauli của khu vực rừng nghiên cứu	57
2.5	Biểu đồ so sánh độ cao rừng bởi phương pháp NTS và Tayebe-1	
	[57]	58
2.6	Biểu đồ mô tả chỉ số RMSE của hai phương pháp	61
2.7	Biểu đồ mô tả độ lớn của hệ số CPI	62
2.8	Biểu đồ 2D thể hiện pha bề mặt ước lượng bởi phương pháp OPC.	63
2.9	Biểu đồ 2D thể hiện pha bề mặt ước lượng bởi phương pháp	
	Tayebe-2	64

2.10	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. 65
2.11	Các tham số ước lượng bởi phương pháp OPC
2.12	Biểu đồ so sánh giá trị RMSE của hai phương pháp 67
2.13	(a) Ảnh Pauli của khu vực rừng khảo sát, (b) Biểu đồ so sánh
	pha bề mặt ước lượng của các phương pháp
2.14	Đồ thị so sánh độ cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp 70
2.15	Đồ thị thể hiện độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp IDP:
	(a) đồ thị 2D, (a) đồ thị 3D
2.16	Biểu đồ so sánh độ cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp
	với chủng loại cây khác nhau.
3.1	Sơ đồ biểu diễn sự tán xa của mô hình S-RVoG cải tiến trên
0.1	địa hình dốc.
3.2	Biểu diễn hình học của các hệ số CPI của mô hình S-RVoG cải tiến.81
3.3	Lưu đồ thuật toán của mô hình S-RVoG cải tiến
3.4	Ånh màu Pauli của khu vực rừng khảo sát
3.5	Độ cao rừng ước lượng trên toàn bộ khu vực rừng quan sát:
	(a) mô hình đề xuất, (b) mô hình S-RVoG [58]
3.6	Hình ảnh của khu vực rừng nghiên cứu: (a) ảnh quang học từ
	Google Earth, (b) ånh LiDAR
3.7	Khu vực KV1: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi mô
	hình đề xuất, (b) hiệu quả của mô hình đề xuất và dữ liệu LiDAR. 90
3.8	Khu vực KV2: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi mô
	hình đề xuất, (b) hiệu quả của mô hình đề xuất và dữ liệu LiDAR. 91
3.9	Khoảng cách trực giao d_i
3.10	Dạng đường thẳng kết hợp PolInSAR bên trong CUC 95
3.11	(a) ảnh màu Pauli, (b) độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp FIM.101
3.12	Kết quả chiều cao rừng ước lượng: (a) phương pháp Tayebe-1
	[57], (b) phương pháp Khati [53], (c) phương pháp Xiao [27],
	(d) phương pháp FIM

3.13	Kết quả độ cao rừng trung bình với các hệ số sóng đứng khác nhau	.104
3.14	Hình ảnh khu vực rừng khảo sát.	107
3.15	Kết quả ước lượng chiều cao rừng trên toàn bộ khu vực rừng	
	khảo sát	108
3.16	Kết quả ước lượng các tham số rừng của phương pháp FIM:	
	(a) hệ số suy hao sóng, (b) pha bề mặt	110
3.17	Kết quả ước lượng các tham số rừng trên 9 khu vực khác nhau:	
	(a) chiều cao rừng, (b) hệ số suy hao sóng	111
3.18	Khu vực rừng nghiên cứu	113
3.19	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.	114
3.20	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.	115
3.21	Khu vực FA3: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi phương	
	pháp FIM, (b) hiệu quả của phương pháp FIM và dữ liệu LiDAR.	115

DANH MỤC BẢNG

1.1	Các dạng phân cực của ảnh SAR
2.1	Các tham số rừng từ dữ liệu mô phỏng
2.2	Kết quả mô phỏng của phương pháp NTS và Tayebe-1 [57] 59
2.3	Kết quả mô phỏng từ phương pháp OPC và Tayebe-2 [56] 65
2.4	Kết quả mô phỏng của các phương pháp . \ldots . \ldots . \ldots .71
3.1	Kết quả mô phỏng bởi mô hình S-RVoG và mô hình đề xuất 86
3.2	Kết quả mô phỏng của mô hình S-RVoG cải tiến
3.3	Hiệu quả của mô hình đề xuất so với giá trị từ dữ liệu Li DAR 91 $$
3.4	Thuật toán lặp tối ưu cho ước lượng độ cao rừng 99
3.5	Kết quả mô phỏng bởi bốn phương pháp
3.6	Kết quả mô phỏng của phương pháp FIM trên các độ dốc khác
	nhau
3.7	Các tham số được ước lượng bởi bốn phương pháp 109
3.8	Kết quả mô phỏng từ phương pháp đề xuất và tập dữ liệu LiDAR. 117

MỞ ĐẦU

Ngày nay, vấn đề biến đối 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]. Theo nguồn tin từ tổ chức Nông lương Liên Hiệp Quốc (FAO) cho biết tỷ lệ diện tích rừng bao phủ trên tổng diện tích đất toàn cầu giảm từ 31,9% năm 2000 xuống còn 31,2% trong năm 2020 [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. Tổ chức UNEP [8, 9] cho biết diện tích rừng bị mất hàng năm sẽ làm gia tăng 6 tỷ tấn CO_2 gây hiệu ứng nhà kính, gấp 3,6 lần lượng khí thải do các nhà máy điện và các nhà máy công nghiệp. 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.

Cho đến nay, có rất nhiều phương pháp được áp dụng cho xác định sinh khối rừng [10-17] và mỗi phương pháp cũng đã mang lại hiệu quả nhất định.

Tuy nhiên, xác định sinh khối thông qua độ cao rừng là một phương pháp đặc biệt điển hình và mang lại độ chính xác cao. Do đó, độ cao rừng có thể được xem như một trong các tham số quan trọng phục vụ cho công tác kiểm tra, giám sát và quản lý hệ sinh thái rừng. Độ cao rừng không chỉ được sử dụng cho ước lượng sinh khối mà còn có thể dùng để xác định được các đặc trưng khác của rừng như: độ tuổi rừng, mức độ che phủ, trữ lượng gỗ ...

Trước đây, các nhà lâm học thường sử dụng phương pháp đo đạc trực tiếp để thu thập dữ liệu rừng và nó thường mang lại kết quả chính xác cao. Tuy nhiên, phương pháp này rất tốn nguồn nhân công và cần thời gian từ 5 năm đến 10 năm để thực hiện. Thời gian kéo dài này có thể dẫn đến sự sai lệch giữa kết quả đã thu được với tình hình thực tế của hiện trạng rừng do việc khai thác và phát triển rừng trong thời gian điều tra.

Ngày 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. Các kỹ thuật viễn thám đang được sử dụng rộng rãi bao gồm: vệ tinh quang học, ra-đa tổng hợp mặt mở phân cực (PolSAR), ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa (InSAR) và ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực (PolInSAR). Trong đó, kỹ thuật PolInSAR là một trong những ứng dụng nổi bật và đầy triển vọng đang được nghiên cứu, phát triển mạnh mẽ cho phân loại, nhận dạng và xác định các tham số rừng [18-24].

Kỹ thuật PolInSAR ra đời đã mở ra một hướng đi mới cho ứng dụng kỹ thuật viễn thám sóng siêu cao tần trong quản lý tài nguyên môi trường, khí tượng thủy văn, cứu hộ cứu nạn, phục vụ cho mục đích quân sự Kỹ thuật này đã cho thấy ưu thế vượt trội trong việc cung cấp các thông tin về chiều cao, cấu trúc, mật độ 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.

Ở Việt Nam, kỹ thuật viễn thám đã được đưa vào sử dụng từ năm 1976 (Viện Điều tra quy hoạch rừng). Cho đến nay, Việt Nam đã đạt được những thành tựu nhất định trong việc phóng vệ tinh thu ảnh viễn thám với nhiều loại dữ liệu khác nhau như dữ liệu ảnh quang đen trắng và dữ liệu ảnh quang phổ. Đặc biệt, Việt Nam đã phóng thành công lên quỹ đạo vệ tinh VNREDSat-1 và VNREDSat-2 là vệ tinh viễn thám đa mục đích, có khả năng cung cấp các ảnh viễn thám với diện tích quét rộng và độ phân giải cao. Những thành tựu này đã được ứng dụng trong thực tiễn như các lĩnh vực khí tượng, đo đạc bản đồ, địa chất khoáng sản, quản lý tài nguyên rừng và đã thu được các kết quả rõ rệt như giảm thiểu tới mức thấp nhất thiên tai ở một số vùng. Hiện nay, Cục viễn thám, Bộ thông tin và truyền thông, Viện hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam cùng với các nhà khoa học cũng đang nghiên cứu và ứng dụng kỹ thuật viễn thám trong giám sát tài nguyên rừng [1, 2, 12, 13, 14], cảnh báo sụt lún và sạt lở đất [28-30]...

Ngoài ra, kỹ thuật PolInSAR cũng được sử dụng nhiều cho các nhiệm vụ khác như: nhận dạng, trích xuất các tham số của mục tiêu quân sự, mục tiêu tự nhiên và nhân tạo (hệ sinh thái rừng; vùng cây nông nghiệp; khu vực đô thị; khu công nghiệp và các quần đảo thuộc chủ quyền của Việt Nam) ... Do đó, việc sử dụng ảnh PolInSAR phục vụ cho các nhiệm vụ khác nhau ngày càng trở nên cấp thiết, đồng thời cũng là thách thức lớn cho các nhà khoa học nghiên cứu trong lĩnh vực khoa học trái đất. 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.

1. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

 Nghiên cứu cơ sở lý thuyết tán xạ sóng điện từ và kỹ thuật ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực (PolInSAR).

- Nghiên cứu ưu, nhược điểm của các phương pháp ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR đã được công bố trước đây. Xác định những yếu tố chính ảnh hưởng đến độ chính xác của độ cao rừng ước lượng và đề xuất các giải pháp khắc phục những vấn đề này.

- Nghiên cứu sự ảnh hưởng của quá trình tán xạ sóng đến các tham số rừng ước lượng. Các mô hình mô tả quá trình tán xạ sóng siêu cao tần trong môi trường rừng đã áp dụng cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR.

2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về kỹ thuật ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa

phân cực (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.

Nghiên cứu các loại rừng trong tự nhiên (ôn đới, nhiệt đới, hàn đới...)
 đánh giá các tham số: chiều cao, mật độ cây, độ dốc, độ ẩm...

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.

- Luận án nghiên cứu về cơ sở lý thuyết của hệ thống PolInSAR, các công trình khoa học về lĩnh vực ước lượng tham số rừng sử dụng ảnh PolInSAR đã được công bố trên các hội thảo, tạp chí có uy tín trong nước và quốc tế.

- Luận án sử dụng các lý thuyết về toán tối ưu với các điều kiện ràng buộc khi đề xuất các thuật toán, mô hình cải tiến nhằm nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR.

- Luận án sử dụng các phần mềm PolSARproSim, ENVI và MATLAB đế đánh giá độ chính xác cũng như tính ứng dụng của các phương pháp đề xuất.

4. Đóng góp của luận án

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

- 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. Ý tưởng chính của các phương pháp này là đi tìm một hệ số CPI tối ưu cho thành phần tán xạ khối, mà nó có ít nhất sự đóng góp của các thành phần tán xạ khác. Sau đó, xây dựng các điều kiện rằng buộc để xác định đường thẳng kết hợp và pha bề mặt. Cuối cùng, các tham số rừng được trích xuất theo từng điều kiện cụ thể tương ứng với mỗi đề xuất [CT1, CT2, CT3].

- Đề xuất mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi sử dụng ảnh PolInSAR. Trong mô hình đề xuất, độ dốc địa hình được hiệu chỉnh thành một mặt phẳng nghiêng theo hướng cự ly với hệ số suy hao sóng tuyến tính. Do đó, mô hình đề xuất có thể mô tả chính xác quá trình tán xạ sóng điện từ trong môi trường rừng thực tế [CT4].

- 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. Bên cạnh đó, luận án dựa trên lý thuyết tập kết hợp trung bình và phát triển thêm một số điều kiện ràng buộc để trích xuất độ cao rừng với độ chính xác cao [CT5].

5. Bố cục của luận án

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

- Phần mở đầu: Đánh giá tính cấp thiết của luận án, mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án. Trên cơ sở đó xác định phương pháp, nội dung nghiên cứu của luận án.
- Chương 1: TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT ƯỚC LƯỢNG CÁC THAM SỐ RÙNG TỪ ẢNH POLINSAR

Chương 1 trình bày tổng quan về cơ sở lý thuyết của kỹ thuật PolInSAR. Phân tích, đánh giá các mô hình nghịch chuyển độ cao rừng và các thuật toán ước lượng độ cao rừng từ ảnh PolInSAR đã được công bố có liên quan đến nội dung nghiên cứu của luận án. Từ đó, đưa ra các nhược điểm còn tồn tại và đề ra giải pháp mà luận án cần tập trung giải quyết.

Chương 2: TRÍCH XUẤT ĐỘ CAO RỪNG DỰA TRÊN TỐI ƯU
 VÙNG KẾT HỢP TỪ DỮ LIỆU POLINSAR

Chương 2 tập trung xây dựng và đề xuất các thuật toán tối ưu vùng kết hợp dựa trên dấu hiệu phân cực và phát triển, bổ sung các điều kiện rằng buộc nhằm khắc phục những nhược điểm của các thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn trước đây và nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng từ ảnh PolInSAR. Thông qua kết quả mô phỏng để đánh giá hiệu quả của các phương pháp đề xuất với các công trình nghiên cứu trước đó, cũng như xét đến các yếu tố ảnh hưởng đến độ ổn định của các phương pháp đề xuất.

 Chương 3: CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHỊCH CHUYỂN CHO ƯỚC LƯỢNG ĐỘ CAO RỪNG TRÊN ĐỊA HÌNH ĐỒI NÚI SỬ DỤNG DỮ LIỆU POLINSAR.

Nội dung chính trong Chương 3 là đề xuất mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi sử dụng dữ liệu PolInSAR và đề xuất phương pháp nghịch chuyển tham số rừng dựa trên lý thuyết tập kết trung bình từ ảnh PolInSAR. Trong đó, các phương pháp đề xuất được áp dụng các dữ liệu mô phỏng từ phần mềm PolSARProSim 5.2, dữ liệu thực nghiệm từ hệ thống vệ tinh SIR-C và dữ liệu thực nghiệm từ thiết bị bay không người lái (UAV-SAR) để đánh giá hiệu quả của các đề xuất. Đồng thời các dữ liệu này cũng được áp dụng với các thuật toán đã công bố nhằm so sánh độ chính xác với các phương pháp đề xuất.

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 kiếm 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. Ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực (PolInSAR) là một nhánh quan trọng trong kỹ thuật viễn thám với nhiều tính năng tiêu biểu cho ước lượng tham số rừng. PolInSAR được phát triển trên cơ sở sự kết hợp các ưu điểm của ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa (InSAR) và ra-đa tổng hợp mặt mở phân cực (PolSAR). Ra-đa tổng hợp mặt mở phân cực là sự mở rộng của kỹ thuật kênh đơn SAR nhằm thu được thông tin phân cực đầy đủ về các thuộc tính tán xạ của mục tiêu [31-33]. PolSAR rất nhạy với những thay đổi theo hình dạng, sự định hướng của các phần tử tán xạ do sóng bức xạ ngược trả về ăng-ten thu của ra-đa. Ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa là một công nghệ dựa trên sự kết hợp hai hình ảnh SAR tại cùng một cảnh nhưng từ các vị trí và thời điểm khác nhau. Kỹ thuật này cho phép thu được thông tin về chiều cao của mục tiêu cũng như thông tin về cấu trúc của rừng, như độ che phủ của tán cây hoặc mật độ thực vật [34-37]. Tuy nhiên, độ chính xác của kỹ thuật InSAR phụ thuộc lớn vào những thay đối bề mặt và các điều kiện khí tượng học.

Kỹ thuật PolInSAR đã cho thấy ưu thể 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 phương pháp 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. Do vậy, độ chính xác của thuật toán còn phụ thuộc nhiều vào việc xây dựng mô hình dự đoán.

Trong tài liệu [44-48], Yamada và các cộng sự tại đại học Niigata Nhật bản đã trình bày phương pháp ước lượng độ cao rừng sử dụng thuật toán ước lượng tham số tín hiệu bằng kỹ thuật xoay bất biến (ESPRIT). Phương pháp ESPRIT cho phép xác định điểm tán xạ trung tâm tương ứng với tán cây và mặt đất, nhưng độ chính xác tương đối thấp đối do điểm tán xạ trung tâm tương ứng với hai tầng này tương đối gần nhau. Ngoài ra, để nâng cao hiệu quả ước lượng độ cao rừng của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn dựa trên mô hình RVoG đã có nhiều công trình nghiên cứu được công bố. Năm 2016, Fu Wenxue đã đề xuất thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55]. Thuật toán này đã phần nào cải thiện được độ chính xác cho ước lượng tham số rừng của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Trong thời gian gần đây có nhiều đề xuất hướng đến cải tiến mô hình RVoG nhằm nâng cao hiệu quả ước lượng các tham số rừng trên địa hình dốc [58-61]. Trong đó, tiêu biểu như mô hình tán xạ khối ngẫu nhiên trên địa hình dốc (S-RVoG) của Hongxi Lu vào năm 2013 [58], Qi Zhang đề xuất một thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cải tiến dựa trên mô hình R-RVoG vào năm 2016 [59], mô hình tán xạ ba lớp trên địa hình dốc (STSM) của Lamei Zhang đề xuất năm 2020 [60] và mô hình tán xạ ba lớp trên địa hình dốc được đề xuất bởi tác giả Phạm Minh Nghĩa và các cộng sự vào năm 2018 [61]. Nhìn chung, các mô hình này đã tính toán sự ảnh hưởng của độ dốc địa hình đối với kết quả ước lượng các tham số rừng và đã phần nào mang lại hiệu quả tích cực khi tính toán chiều cao rừng trên địa hình dốc. Tuy nhiên, các mô hình này vẫn còn sử dụng một số giả định chưa phù hợp vì vậy gây ra sai số đáng kể trong ước lượng tham số rừng trên địa hình đồi núi.

Mặc dù công nghệ viễn thám ra-đa đã phát triển khá lâu trên thế giới, tuy nhiên gia nhập của cộng đồng khoa học Việt Nam vào lĩnh vực này còn non trẻ thể hiện qua những công trình nghiên cứu và công bố còn ít về số lượng so với mặt bằng chung trên thế giới. Trong những năm gần đây, 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, cảnh báo nguy cơ sụt lún, xác định thay đổi bề mặt, xây dựng mô hình số độ cao DEM

Trong đó, các nhà khoa học đã công bố những nghiên cứu về ứng dụng viễn thám ra-đa trong xác định sinh khối lớp phủ rừng của các khu vực tại Việt Nam [1, 2, 12, 13, 14]. Tiêu biểu như nhóm tác giả Trần Tuấn Ngọc đã ứng dụng viễn thám ra-đa trong xác định sinh khối lớp phủ rừng tại Việt Nam [1] và ứng dụng tư liệu ảnh SAR ước tính sinh khối rừng ngập mặn khu vực ven biển tỉnh Nam Định [2]. Năm 2016, nhóm tác giả Nguyễn Bá Duy đã công bố nghiên cứu thành lập mô hình số độ cao (DEM) từ dữ liệu ảnh Radar giao thoa sử dụng phần mềm mã nguồn mở NEST và SNAPHU [4].

Ngoài ra, các nghiên cứu về phát hiện sụt lún trên các khu vực mỏ và đô thị sử dụng dữ liệu InSAR cũng được nhiều nhà khoa học nghiên cứu và cho thấy tính ứng dụng cao [3, 5, 28, 29, 30]. Trong đó, nhóm tác giả Đặng Vũ Khắc đã áp dụng dữ liệu ảnh ra-đa giao thoa để xác định sụt lún đất trong vùng đô thị trung tâm thành phố Hà Nội, năm 2015 [3] và sụt lún do khai thác hầm lò tại Quảng Ninh, năm 2021 [28].

Đặc biệt từ năm 2014 đến nay, tác giả Phạm Minh Nghĩa và các cộng sự tại Học viện kỹ thuật quân sự đã có nhiều công bố về kỹ thuật ước lượng chiều cao rừng từ dữ liệu PolInSAR băng L [61-65]. Các công bố này đa phần là những cải tiến mới nhằm khắc phục những hạn chế của các đề xuất trước đây và nâng cao độ chính xác cho ước lượng các tham số rừng.

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng kỹ thuật viễn thám sử dụng ảnh PolInSAR đã được nghiên cứu, phát triển mạnh mẽ và áp dụng cho nhiều mục đích khác nhau và mạng lại hiệu quả rõ rệt. Vì vậy, 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 phân cực (PolSAR)

1.2.1. Thông tin phân cực của mục tiêu

Như tất cả các sóng điện từ khác, sóng ra-đa dao động theo hai phương vuông góc trong mặt phẳng điện trường và mặt phẳng từ trường (Hình 1.1). Thông tin về mục tiêu có thể được thể hiện dựa trên đặc tính phân cực của mục tiêu chứa trong các sóng tán xạ ngược từ một môi trường nhất định: quá trình phản xạ cấu trúc hình học như hình dạng và góc định hướng hoặc cấu trúc địa vật lý như độ ẩm, độ gồ ghề bề mặt...



Hình 1.1: Các trạng thái phân cực trong ra đa viễn thám [66].

Sử dụng sóng ra-đa phân cực để thu ảnh là một trong những tính chất cơ bản của hệ thống chụp ảnh ra-đa. Sóng điện từ truyền đi trong không gian theo mặt phẳng đứng (Vertical -V) hoặc ngang (Horizontal - H), do đó hệ thống chụp ảnh ra-đa cũng có khả năng phát ra và thu nhận năng lượng sóng ra-đa theo phương đứng (V) hoặc ngang (H). Tùy thuộc vào phân cực của sóng tới ra-đa và sóng tán xạ ngược mà có thể có các tổ hợp phân cực khác nhau được minh họa trong Bảng 1.1.

Phân cực đứng thường cho phép thu được năng lượng phản hồi mạnh đối với những đối tượng có cấu trúc thẳng đứng như các loại cây lâm, nông nghiệp. Trong khi đó, phân cực ngang HH sẽ tương tác yếu hơn với bề mặt tán cây và do đó sẽ đâm xuyên sâu hơn xuống bề mặt đất bên dưới (tuy nhiên bước sóng phải đủ dài). Sử dụng kết hợp các loại phân cực chéo như HV và VH rất có hiệu quả khi tương tác với các đối tượng có tính chất phản xạ nhiều lần, trong trường hợp này các sóng phân cực sẽ bị đổi hướng, đảo phân cực khi tương tác với đối tượng. Sử dụng kết hợp đồng phân cực và phân cực

Phân cực sóng tới	Phân cực sóng tán xạ ngược	Tổ hợp phân cực	Kiểu phân cực
Н	Н	НН	Đồng phân cực
н	V	HV	Phân cực chéo
V	V	VV	Đồng phân cực
V	Н	VH	Phân cực chéo

Bảng 1.1: Các dạng phân cực của ảnh SAR.

chéo sẽ thu được hai hình ảnh của đối tượng, cho phép tách ra thành phần ảnh hưởng của sự gồ ghề của bề mặt và độ ẩm hoặc cấu trúc của tán cây tới tín hiệu phản hồi.

1.2.2. Véc-tơ mục tiêu tán xạ

Hình 1.2 mô tả sự tương tác quá trình tán xạ sóng điện từ đến đa mục tiêu. Khi đó, quan hệ giữa sóng tới và sóng tán xạ như sau [66]:

$$\overrightarrow{\mathbf{E}}_{S} = \frac{e^{-jkr}}{r} \mathbf{S} \ \overrightarrow{\mathbf{E}}_{I} = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{E}}_{I}$$
(1.1)

Trong đó $\overrightarrow{\mathbf{E}}_I$ là điện trường sóng tới, $\overrightarrow{\mathbf{E}}_S$ là điện trường sóng tán xạ và \mathbf{S} là ma trận tán xạ và S_{ij} là các hệ số tán xạ phức hay là biên độ tán xạ phức. Thành phần trên đường chéo chính gọi là tham số đồng phân cực, khi đó sóng tới và sóng tán xạ có cùng dạng phân cực. Thành phần trên đường chéo phụ là thành phần (kênh) phân cực chéo, nghĩa là liên quan đến trạng thái phân cực thu và phát. Số hạng e^{-jkr}/r là hiệu ứng truyền dẫn cho cả biên độ và pha. Quan hệ này được biểu diễn trong biểu thức (1.1) và nó chỉ phù hợp cho các vùng điện trường ở xa, trong đó một mặt phẳng sóng được xem như một trường tới và trường phản xạ.



Hình 1.2: Sự tương tác của sóng điện từ với nhiều mục tiêu [66].

Nhiệm vụ quan trọng đó là làm thế nào để thu được một các tốt nhất những thông tin vật lý từ ma trận Sinclair kết hợp (2×2) thông qua cấu trúc véc-tơ hệ thống, có thể biểu diễn ma trận Sinclair theo véc-tơ $\mathbf{V}(\cdot)$ như:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{\mathbf{k}} = \mathbf{V} (\mathbf{S}) = \frac{1}{2} Trace (\mathbf{S} \Psi)$$
(1.2)
Với $S_{HH} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $S_{HV} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$; $S_{VH} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
và $S_{VV} = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}$

Trong đó, $Trace(\cdot)$ là vết của ma trận, Ψ là một tập hợp đầy đủ của ma trận cơ sở phức (2×2) , ma trận này được cấu tạo như một tập hợp trực

giao dưới dạng tích nội của các ma trận Hermitan.

Trong trường hợp tán xạ ngược đơn tĩnh, do tính tương hỗ nên ma trận tán xạ Sinclair buộc phải đối xứng, điều đó có nghĩa là $S_{HV} = S_{VH}$. Do đó các véc-tơ mục tiêu phân cực bốn chiều giảm xuống thành các véc-tơ mục tiêu phân cực ba chiều và hai tập hợp đặc biệt trực giao liên kết được định nghĩa như sau:

Tập ma trận xoay Pauli phức Ψ_P có dạng.

$$\Psi_P = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\}$$
(1.3)

Tương ứng véc-tơ mục tiêu $\overrightarrow{\mathbf{k}_P}$ ba chiều hay véc-tơ đặc trưng Pauli trở thành:

$$\overrightarrow{\mathbf{k}_P} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \qquad S_{HH} - S_{VV} \qquad 2S_{HV}]^T \tag{1.4}$$

Khi đó tập ma trận xoay Lexicographic phức Ψ_L được biểu diễn theo phương trình (1.5).

$$\boldsymbol{\Psi}_{L} = \left\{ 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2\sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\}$$
(1.5)

Khi đó, véc-tơ mục tiêu $\overrightarrow{\mathbf{k}_L}$ ba chiều được mô tả như sau:

$$\overrightarrow{\mathbf{k}_L} = \begin{bmatrix} S_{HH} & \sqrt{2}S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix}^T$$
(1.6)

Bổ sung các hệ số 2, $\sqrt{2}$, $2\sqrt{2}$ trong công thức (1.3) và (1.6) để đảm bảo thỏa mãn điều kiện tổng công suất là bất biến.

$$Span(\mathbf{S}) = \left|\overrightarrow{\mathbf{k}_P}\right|^2 = \left|\overrightarrow{\mathbf{k}_L}\right|^2 = \left|S_{HH}\right|^2 + 2\left|S_{HV}\right|^2 + \left|S_{VV}\right|^2 \tag{1.7}$$

Mối quan hệ giữa hai véc-tơ tán xạ $\overrightarrow{\mathbf{k}_P}$ và $\overrightarrow{\mathbf{k}_L}$ được biểu diễn như sau [31]:

$$\vec{\mathbf{k}}_{P} = \mathbf{U}_{3(L \to P)} \vec{\mathbf{k}}_{L}; \ \mathbf{U}_{3(L \to P)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix}$$
(1.8)

Trong đó $\mathbf{U}_{3(L\to P)}$ là ma trận chuyển đổi đơn trị từ véc-tơ mục tiêu trong hệ cơ sở Lexicographic sang véc-tơ mục tiêu trong hệ cơ sở Pauli và nó thỏa mãn điều kiện $|\mathbf{U}_{3(L\to P)}| = +1$; $\mathbf{U}_{3(L\to P)}^{-1} = \mathbf{U}_{3(L\to P)}^{*T}$.

1.2.3. Ma trận kết hợp ${\bf T}$ và ma trận hiệp phương sai ${\bf C}$

Ma trận kết hợp \mathbf{T} trong hệ cơ sở Pauli và ma trận hiệp phương sai \mathbf{C} trong hệ cơ sở Lexicographic được xây dựng dựa trên tích ngoại của véc-tơ mục tiêu với véc-tơ chuyển vị kết hợp phức của nó. Các ma trận này phản ánh chính xác các thông tin về mục tiêu như: hình dạng, cấu trúc, thuộc tính địa vật lý, góc định hướng của mục tiêu.

$$\mathbf{T} = \left\langle \overrightarrow{\mathbf{k}_{3P}} \; \overrightarrow{\mathbf{k}_{3P}^{*T}} \right\rangle \tag{1.9}$$

$$\mathbf{C} = \left\langle \overrightarrow{\mathbf{k}_{3L}} \ \overrightarrow{\mathbf{k}_{3L}^{*T}} \right\rangle \tag{1.10}$$

Trong đó $(\cdot)^*$ là đại lượng liên hiệp phức, $(\cdot)^T$ chuyển vị ma trận và $\langle \cdot \rangle$ biểu thị mức lấy trung bình trong quá trình xử lý dữ liệu.

* Ma trận kết hợp \mathbf{T}

Trong trường hợp tán xạ ngược ở một môi trường thuận nghịch, ma trận kết hợp \mathbf{T} có thể biểu diễn như công thức (1.11) [67]:

$$\mathbf{T}_{3} = \left\langle \overrightarrow{\mathbf{k}_{3P}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{k}_{3P}}^{*T} \right\rangle$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \left\langle \left| S_{HH} + S_{VV} \right|^{2} \right\rangle & \left\langle \left(S_{HH} + S_{VV} \right) \left(S_{HH} - S_{VV} \right)^{*} \right\rangle \\ \left\langle \left(S_{HH} - S_{VV} \right) \left(S_{HH} + S_{VV} \right)^{*} \right\rangle & \left\langle \left| S_{HH} - S_{VV} \right|^{2} \right\rangle \\ 2 \left\langle S_{HV} \left(S_{HH} + S_{VV} \right)^{*} \right\rangle & 2 \left\langle S_{HV} \left(S_{HH} - S_{VV} \right)^{*} \right\rangle \\ 2 \left\langle \left(S_{HH} + S_{VV} \right)^{*} \right\rangle & 2 \left\langle \left(S_{HH} - S_{VV} \right)^{*} \right\rangle \\ 2 \left\langle \left(S_{HH} - S_{VV} \right) S_{HV}^{*} \right\rangle \\ 2 \left\langle \left(S_{HH} - S_{VV} \right) S_{HV}^{*} \right\rangle \\ 4 \left\langle \left| S_{HV} \right|^{2} \right\rangle$$

$$(1.11)$$

* Ma trận hiệp phương sai ${f C}$

Véc-tơ tán xạ được trình bày trong các tài liệu [22, 67] bằng cách kết hợp hai phương trình (1.11) và (1.12) và có thể biểu diễn ma trận hiệp phương sai như sau:

$$\mathbf{C}_{3} = \left\langle \overrightarrow{\mathbf{k}_{3L}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{k}_{3L}^{*T}} \right\rangle = \begin{bmatrix} \left\langle \left| S_{HH} \right|^{2} \right\rangle & \sqrt{2} \left\langle S_{HH} S_{hv}^{*} \right\rangle & \left\langle S_{HH} S_{Hv}^{*} \right\rangle \\ \sqrt{2} \left\langle S_{HH}^{*} S_{Hv} \right\rangle & 2 \left\langle \left| S_{Hv} \right|^{2} \right\rangle & \sqrt{2} \left\langle S_{Hv} S_{vv}^{*} \right\rangle \\ 2 \left\langle S_{HH}^{*} S_{Hv} \right\rangle & \sqrt{2} \left\langle S_{Hv}^{*} S_{vv} \right\rangle & \left\langle \left| S_{Vv} \right|^{2} \right\rangle \end{bmatrix} \right]$$

$$(1.12)$$

Từ phương trình (1.11) và (1.12) cho thấy rằng ma trận kết hợp \mathbf{T} và ma trận hiệp phương sai \mathbf{C} đều là những ma trận bán xác định dương thỏa mãn $Trace(\mathbf{T}) = Trace(\mathbf{C})$, điều này cho thấy là tổng năng lượng thu được không đổi dù biểu diễn dưới hệ tọa độ nào và các các ma trận này có các giá trị riêng thực không âm và véc-tơ riêng trực giao [67]. Khi xây dựng véc-tơ hệ thống cho ma trận tán xạ, sẽ tồn tại một ma trận chuyển đổi đơn vị có liên quan đến hai véc-tơ mục tiêu, điều đó cho phép đưa ra mối quan hệ giữa ma trận kết hợp **T** và ma trận hiệp phương sai **C** được trình bày bởi Lee và Pottier [34]. $\mathbf{T}_{3} = \left\langle \overrightarrow{\mathbf{k}_{3P}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{k}_{3P}} \right\rangle = \left\langle \left(\mathbf{U}_{3(L \to P)} \overrightarrow{\mathbf{k}_{3L}} \right) \left(\mathbf{U}_{3(L \to P)} \overrightarrow{\mathbf{k}_{3L}} \right)^{*T} \right\rangle = \mathbf{U}_{3(L \to P)} \mathbf{C} \mathbf{U}_{3(L \to P)}^{*T}$ (1.13)

Do đó ma trận kết hợp \mathbf{T} và ma trận hiệp phương sai \mathbf{C} có quan hệ với nhau như sau:

$$\mathbf{T}_3 = \mathbf{U}_{3(L \to P)} \ \mathbf{C}_3 \ \mathbf{U}_{3(L \to P)}^{-1} \tag{1.14}$$

1.3. Kỹ thuật ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa (InSAR)

Giao thoa là một khái niệm trong vật lý chỉ sự xếp chồng của hai hoặc nhiều sóng mà tạo ra một hình ảnh sóng mới. Giao thoa là do tương tác giữa các sóng có tương can đến từ một nguồn hoặc có cùng tần số gần nhau. Sự giao thoa của các sóng trên thực chất tuân theo nguyên lý xếp chồng sóng mà đây chính là sự cộng gộp của các dao động. Tại mỗi điểm trong không gian nơi có sự gặp nhau của các sóng, dao động của môi trường sẽ chính là dao động tổng hợp của các dao động thành phần từ các sóng tới riêng biệt. Nhờ sự tổng cộng dao động này mà trong không gian tự do có thể tạo ra các điểm có dao động được tăng cường (khi các sóng thành phần đồng pha) hoặc bị dập tất (khi các sóng. Điều này tạo ra một hình ảnh giao thoa khác với hình ảnh của từng sóng thành phần, được tạo ra bởi chính tập hợp các điểm có sự giao thoa tăng cường hoặc dập tất.

Kỹ thuật ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa sử dụng sự khác biệt pha giữa hai ảnh phức để mô tả sự khác biệt tại các vị trí hoặc tại các thời điểm khác nhau. Kỹ thuật này được áp dụng đầu tiên cho mô hình số độ cao tổng quát
(DEM) [4] và phát hiện sự thay đổi nhỏ hoặc biến dạng bề mặt [5]. Ngoài ra, khả năng của kỹ thuật này để xác định cấu trúc đứng của phân bố mục tiêu, có thể khôi phục các tham số vật lý từ các vùng tự nhiên. Trong [12-14] đã ước lượng được sinh khối rừng từ dữ liệu SAR giao thoa phân cực băng L trên một khu vực rừng không đồng nhất.



Hình 1.3: Cấu trúc hình học của ra đa giao thoa [67].

Mặc khác, một tín hiệu tán xạ từ hệ ra-đa đơn kênh có thể được biểu diễn bởi một hệ số phức vô hướng, nó bao gồm độ lớn a và pha ϕ như sau:

$$S_1 = a_1 e^{j\phi_1} = a_1 e^{-j\left(\beta_2 R_1 + \phi_{S_1}\right)} = a_1 e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}2R_1 + \phi_{S_1}\right)}$$
(1.15)

Trong đó, B là đường cơ sở không gian, δ_b là góc đường cơ sở, θ là góc tới và $R_{1,2}$ đại diện cho khoảng cách từ hai vị trí hệ thống PolSAR đến điểm tán xạ. Các tham số mục tiêu thể hiện trong Hình 1.3 gồm P là điểm tán xạ và h là độ cao của điểm tán xạ. Từ (1.15) có thể phân tích pha của tín hiệu thành hai thành phần: thành phần pha truyền dẫn nghĩa là thành phần này phụ thuộc vào khoảng cách giữa ra-đa và điểm tán xạ (R_1) , thành phần thứ hai là pha tán xạ và thành phần này phụ thuộc vào tính chất tự nhiên của quá trình tán xạ. Trong ra-đa phân cực, quá trình xác định sự thay đổi của pha tán xạ từ sự kết hợp hai tín hiệu với các kênh phân cực khác nhau nhưng được lựa chọn tại cùng một điểm trong không gian và bỏ qua thành phần pha theo hướng cự ly như sau:

$$S_{1} = a_{1}e^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda}R_{1}+\phi_{S_{1}}\right)} \\ S_{2} = a_{2}e^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda}R_{2}+\phi_{S_{2}}\right)} \\ S_{1}S_{2}^{*} = a_{1}a_{2}e^{-j\left(\phi_{S_{1}}-\phi_{S_{2}}\right)}$$
(1.16)

Có thể thấy sự đóng góp của thành phần tán xạ khối từ các phần tử không đẳng hướng sẽ có mức khử phân cực là rất cao dẫn đến nhiễu pha phân cực.

Xác định tích phức $S_1S_2^*$ cho hệ ra-đa giao thoa có thể loại bỏ được thành phần pha tán xạ (giả định là hai thành phần này là như nhau cho cả hai hệ thống) và pha hình học. Từ đó, có thể thu được một pha tín hiệu mà pha này phụ thuộc vào sự khác nhau theo hướng cự ly giữa hai vị trí $\Delta R = R_1 - R_2$ như sau:

$$S_{1} = a_{1}e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}2R_{1}+\phi_{S_{1}}\right)} \\ S_{2} = a_{2}e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}2R_{2}+\phi_{S_{2}}\right)} \end{cases} S_{1}S_{2}^{*} = Ae^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right)}$$
(1.17)

Thành phần quan sát được chính trong các hệ thống ra-đa giao thoa đó là pha giao thoa ϕ và được xác định như (1.18).

$$\phi = \arg(S_1 S_2^*) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + 2\pi N; \quad N = 0, \ \pm 1, \ \pm 2, \dots$$
 (1.18)

Trong đó, pha giao thoa nằm trong khoảng từ $(0 \div 2\pi)$, nghĩa là với mỗi lần dịch của một bước sóng $\lambda/2$ thì độ sai lệch theo hướng cự ly một khoảng ΔR thì pha giao thoa sẽ lặp lại chính giá trị trước. Vấn đề này còn gọi là "trải pha" và để giải quyết nó cần sử dụng thêm các thông tin về pha như là sử dụng pha gần các điểm tán xạ để tạo ra gradient pha không gian hoặc sử dụng hệ thống giao thoa đa đường cơ sở.

1.4. 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 1.4: Hình ảnh thu thập từ hệ thống PolInSAR [67].

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 1.4 [67]. Hai ma trận tán xạ trong hệ phân cực (H, V), \mathbf{S}_1 và \mathbf{S}_2 được xác định như sau:

$$\mathbf{S}_{i} = \begin{bmatrix} S_{HH}^{i} & S_{HV}^{i} \\ S_{VH}^{i} & S_{VV}^{i} \end{bmatrix}$$
(1.19)

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:

$$\overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{i}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH}^{i} + S_{VV}^{i} & S_{HH}^{i} - S_{VV}^{i} & 2S_{HV}^{i} \end{bmatrix}^{T}$$
(1.20)

$$\overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH}^i & \sqrt{2}S_{HV}^i & S_{VV}^i \end{bmatrix}^T$$
(1.21)

Sử dụng kết quả tích ngoại từ các véc-tơ tán xạ $\overrightarrow{\mathbf{k}_1}$ và $\overrightarrow{\mathbf{k}_2}$ 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 .

$$\mathbf{T}_{6} = \left\langle \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{1}} \\ \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{*T} & \overrightarrow{\mathbf{k}}_{*T} \\ \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{1}} & \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{2}} \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{\Omega} \\ \mathbf{\Omega}^{*T} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix}$$
(1.22)

$$\mathbf{C}_{6} = \left\langle \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_{1}} \\ \overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_{1}}^{*T} & \overrightarrow{\mathbf{k}}_{L_{2}}^{*T} \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{1} & \mathbf{C}_{\text{int}} \\ \mathbf{C}_{\text{int}}^{*T} & \mathbf{C}_{2} \end{bmatrix}$$
(1.23)

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, $\boldsymbol{\Omega}$ và \mathbf{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.

Độ lệch pha giữa véc-tơ $\overrightarrow{\mathbf{k}}_1$ và $\overrightarrow{\mathbf{k}}_2$ 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 $(\overrightarrow{\mathbf{k}}_1 \neq \overrightarrow{\mathbf{k}}_2)$, do đó $(\overrightarrow{\mathbf{k}}_1 \overrightarrow{\mathbf{k}}_2^{*T} \neq \overrightarrow{\mathbf{k}}_2 \overrightarrow{\mathbf{k}}_1^{*T})$. Để có được hình ảnh giao thoa cần xây dựng các véc-tơ tán xạ lên hai véc-tơ phân cực $\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_1$ và $\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_2$, hai véc-tơ đó để xác định sự phân cực của hai hình ảnh tương ứng (1.24).

$$\mu_1 = \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_1^{*T} \overrightarrow{\mathbf{k}}_1; \quad \mu_2 = \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_2^{*T} \overrightarrow{\mathbf{k}}_2 \qquad (1.24)$$

Với μ_1 , μ_2 là sự kết hợp tuyến tính của các phần tử của ma trận tán xạ \mathbf{S}_1 và \mathbf{S}_2 , chúng tạo thành cơ sở cho sự hình thành các véc-tơ ảnh giao thoa. Trong đó cường độ phân cực và ảnh giao thoa liên quan đến sự phân cực được đưa ra bởi $\vec{\boldsymbol{\omega}}_1$ và $\vec{\boldsymbol{\omega}}_2$ [67].

$$\langle \mu_{i} \mu_{i}^{*} \rangle = \left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{i}} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{i}}^{*T} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i}^{*T} \right\rangle = \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i}^{*T} \mathbf{T}_{i} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i} \quad (i = 1, 2)$$

$$\langle \mu_{1} \mu_{2}^{*} \rangle = \left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{1}} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{2}}^{*T} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \right\rangle = \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1}^{*T} \mathbf{T}_{i} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2}$$

$$(1.25)$$

Khi đó, pha giao thoa có thể thu được từ phương trình (1.26).

$$\phi = \arg\left\{\left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{1}} \overrightarrow{\mathbf{k}}_{P_{2}}^{*T} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \right\rangle\right\} = \arg\left\{ \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1}^{*T} \boldsymbol{\Omega} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2} \right\}$$
(1.26)

Bằng cách sử dụng phương trình (1.26), hệ số CPI như một hàm phản ánh quá trình phân cực của hai hình ảnh có thể được định nghĩa sau.

$$\tilde{\gamma} \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1}, \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2} \right) = \frac{\langle \mu_{1} \mu_{2}^{*} \rangle}{\sqrt{\langle \mu_{1} \mu_{1}^{*} \rangle \langle \mu_{2} \mu_{2}^{*} \rangle}} = \frac{\left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1} \mathbf{\Omega} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \right\rangle}{\sqrt{\left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1}^{*T} \mathbf{T}_{11} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{1} \right\rangle \left\langle \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2}^{*T} \mathbf{T}_{22} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{2} \right\rangle}} \quad (1.27)$$

Các mô đun của $(|\tilde{\gamma}(\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2)| \leq 1)$ chỉ ra mức độ tương can giữa hai ảnh giao thoa và argument của nó biểu thị hiệu pha giao thoa.

1.5. Mô hình nghịch chuyển độ cao rừng dựa trên ảnh PolIn-SAR

1.5.1. Mô hình khối tán xạ ngẫu nhiên trên mặt đất (RVoG) [21]

Mô hình khối tán xạ ngẫu nhiên trên mặt đất (Random Volume over Ground - RVoG) được đề xuất bởi Treuhaft và các cộng 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 như: thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39], các thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn cải tiến [55-57] ... Mô hình RVoG phân chia 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 và được đặc trưng bởi một hệ số suy hao sóng cố định, mô hình này được mô tả như trong Hình 1.5.



Hình 1.5: Hàm cấu trúc cho mô hình RVoG [21].

a. Sơ đồ biểu diễn quá trình tán xạ rừng

b. Mô hình hóa quá trình tán xạ của lớp thực vật và mặt đất

c. Sơ đồ biểu diễn hàm cấu trúc theo phương đứng

Khi đó, khối tán xạ ngẫu nhiên từ tán cây có thể mô hình hóa bằng một hàm cấu trúc đứng của hai tham số: chiều cao rừng và hệ số suy hao sóng trung bình và được định nghĩa như sau.

$$f(\sigma, z) = m_V\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) \exp\left(\frac{2\sigma z}{\cos\theta}\right) + m_G\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\sigma\left(z - z_0\right)$$
(1.28)

Trong đó z_0 là độ cao của bề mặt so với mực nước biển, σ là hệ số suy hao sóng của toàn bộ khi vực rừng quan sát. m_V và m_G biên độ tán xạ khối và tán xạ bề mặt, θ là góc tới của hệ thống PolInSAR. Từ (1.26) hệ số CPI của mô hình RVoG có thể được biểu diễn trong phương trình (1.29).

$$\tilde{\gamma}^{RVoG} = e^{j\phi_0} \frac{\tilde{\gamma}_v(h_v\sigma) + \mu\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)}{1 + \mu\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)}$$
(1.29)

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 trực tiếp từ tán cây và h_v là chiều cao

rừng tính từ đỉnh đến mặt đất. k_z là hệ số sóng đứng và được định nghĩa:

$$k_z = m \frac{4\pi \Delta \theta}{\lambda \sin \theta} \tag{1.30}$$

Trong đó λ là bước sóng, $\Delta \theta$ là độ lệch pha góc tới của hệ thống PolInSAR tại hai lần quan sát mục tiêu, và do sự khác nhau về vị trí trong không gian của hệ thống ra-đa trong các lần thu nhận tín hiệu. Hệ số hiển thị chế độ thu, phát tín hiệu của hệ thống PolInSAR: m = 2 là hệ thống PolInSAR sử dụng một ăng-ten cho cả phát và thu tín hiệu, m = 1 là hệ thống PolInSAR sử dụng hai ăng-ten, một ăng-ten cho phát và một ăng-ten cho thu tín hiệu. Khi đó, hệ số CPI cho thành phần tán xạ từ tán cây của mô hình RVoG được biểu diễn lại như sau:

$$\tilde{\gamma}^{RVoG}(h_v,\sigma) = \frac{2\sigma}{2\sigma + jk_z\cos\theta} \cdot \frac{\exp\left(\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta} + jk_zh_v\right) - 1}{\exp\left(\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta} - 1\right)}$$
(1.31)

Có thể thấy rằng mô hình RVoG là mô hình tán xạ đơn giản và đã được áp dụng rộng rãi cho xây dựng các thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng từ ảnh PolInSAR. Tuy nhiên, mô hình này vẫn còn tồn tại một số nhược điểm như: giả định hệ số suy hao sóng là một hằng số trên toàn bộ khu vực rừng quan sát và chỉ hiệu quả khi áp dụng tính toán với khu vực rừng có địa hình tương đối bằng phẳng. Các nhược điểm này đã phần nào gây ra sai số cho quá trình ước lượng tham số rừng.

1.5.2. 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 (Slope Random Volume over Ground - 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 và được mô tả như trong Hình 1.6.



Hình 1.6: Sơ đồ biểu diễn mô hình S-RVoG [58].

Từ Hình 1.6 cho thấy rằng, trục z là véc-tơ pháp tuyến của địa hình bằng phẳng, trong khi z' là véc-tơ pháp tuyến của địa hình dốc. Khi đó, khối tán xạ ngẫu nhiên từ tán cây có thể mô hình hóa bằng một hàm toán học như thể hiện trong công thức (1.32).

$$f(\sigma, z') = m'_V(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}) \exp\left(\frac{2\sigma z'}{\cos\left(\theta - \eta\right)}\right) + m'_G(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}) \,\delta\left(z' - z'_0\right) \qquad (1.32)$$

Trong đó $z'_0 \leq z' \leq z'_0 + z'_0 h_v \cos\eta$ và z'_0 là độ cao của bề mặt so với mực nước biển theo trục z', m'_G và m'_V là biên độ tán xạ bề mặt và tán xạ khối theo trục z'. Kết hợp công thức (1.30) và (1.32) biểu thức tính hệ số tương can giao thoa phân cực phức của mô hình S-RVoG được định nghĩa như sau:

$$\tilde{\gamma}^{S-RVoG} = \frac{2\sigma}{2\sigma + jk'_z \cos\theta'} \cdot \frac{\exp\left((2\sigma h_v/\cos\theta' + jk'_z h_v) \cdot \cos\eta\right) - 1}{\exp\left(2\sigma h_v/\cos\theta' \cdot \cos\eta\right) - 1} \quad (1.33)$$

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.

Mô hình S-RVoG [58] đã tính toán sự ảnh hưởng của độ dốc địa hình đối với kết quả ước lượng các tham số rừng và đã phần nào mang lại hiệu quả tích cực khi tính toán chiều cao rừng trên địa hình dốc. Tuy nhiên, mô hình S-RVoG vẫn giả định môi trường rừng là một khối đồng nhất với hệ số suy hao sóng trong môi trường rừng là hằng số.

1.6. Kỹ thuật nghịch chuyển độ cao rừng sử dụng ảnh PolIn-SAR

Trong các kỹ thuật ước lượng độ cao rừng dựa trên dữ liệu PolInSAR hiện nay đa phần có thể phân tích thành hai bài toán thuận và ngược. Đối với các bài toán thuận thì một mô hình biểu diễn cho các thành phần tán xạ của sóng ra đa trong môi trường rừng sẽ được xây dựng dựa trên các tham số địa vật lý của sóng. Ngược lại, trong các bài toán ngược thì các tham số của rừng sẽ được ước lượng từ dữ liệu PolInSAR thu được.



Hình 1.7: Bài toán nghịch chuyển độ cao rừng.

Hình 1.7 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 và 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 số rừng dựa trên các dữ liệu quan sát được. Trong phần này, một số thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng được trình bày. Thông qua phân tích ưu, nhược điểm của các thuật toán này thì luận án sẽ hướng đến đề xuất các phương pháp nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng từ ảnh PolInSAR.

1.6.1. 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 tính toán chiều cao rừng và pha bề mặt. Thuật toán này biểu diễn sự nghịch chuyển về mặt hình học trên mô hình tán xạ hai lớp. Trong mô hình này hệ số CPI được định nghĩa như sau:

$$\tilde{\gamma}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} \mathbf{\Omega} \,\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} \mathbf{T} \,\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}} = e^{j\phi_0} \frac{\tilde{\gamma}_v + \mu\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)}{1 + \mu\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)} = e^{j\phi_0} \left(\tilde{\gamma}_v + \frac{\mu\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)}{1 + \mu\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)}\left(1 - \tilde{\gamma}_v\right)\right)$$
$$= e^{j\phi_0} \left(\tilde{\gamma}_v + L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\left(1 - \tilde{\gamma}_v\right)\right) \quad ; \quad 0 \leq L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) \leq 1$$
(1.34)

Trong đó ϕ_0 , $\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}$ lần lượt là pha địa hình và véc-tơ phức nguyên trị của kênh

phân cực. Ω là ma trận phức chứa các thông tin về giao thoa và phân cực của mục tiêu, \mathbf{T} là ma trận kết hợp phân cực Hermitian mô tả các thuộc tính phân cực của mục tiêu thu được từ mỗi hệ thống PolSAR và $\mathbf{T} = (\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{22})/2$. Sự nghịch chuyển của phương trình (1.34) liên quan đến quá trình thực hiện các quan sát về hệ số tương can phức tại một số phân cực khác nhau. Sau đó, giảm thiểu sự khác biệt giữa các mô hình dự đoán và mô hình quan sát theo nghĩa bình phương nhỏ nhất. Độ cao rừng được ước lượng trong thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn có thể được tiến hành như sau:

Giai đoạn 1: Mô hình hóa tổng bình phương tối thiểu (TLS).

Trong giai đoạn này, đầu tiên là xác định đường thẳng phù hợp nhất cho biểu diễn các hệ số tương can giao thoa phức của các kênh phân cực khác nhau trong vòng tròn đơn vị. Để thực hiện điều này, các tác giả đã sử dụng phương pháp tìm đường thẳng phù hợp nhất theo giá trị tổng bình phương tối thiểu của thành phần thực và phần ảo của các dữ liệu thu được. Sau đó, sử dụng đường thẳng này để xác định giao điểm giữa đường thẳng với vòng tròn đơn vị (do $|\tilde{\gamma}_i| \leq 1$) [39]. Trong phương pháp này, các tác giả đã sử dụng nhiều kênh phân cực (HH, HV, VV, HH+VV, HH-VV) để xác định đường thẳng phù hợp nhất với giả định rằng sự không ổn định đã được giảm thiểu bằng cách lấy trung bình pha bề mặt trong giai đoạn 2.



Hình 1.8: Thuật toán TLS [39].

Giai đoạn 2: Loại bỏ độ mấp mô của bề mặt.

Trong giai đoạn thứ hai, tiến hành chọn một trong hai điểm cắt giữa đường thẳng kết hợp và đường tròn đơn vị làm pha bề mặt cho mỗi điểm ảnh. Dựa trên lý thuyết tán xạ sóng, pha bề mặt được chọn là điểm có khoảng cách từ điểm đó đến hệ số tương can giao thoa phức của kênh HV là lớn nhất. Việc ước lượng pha bề mặt là một trong những yếu tố quan trọng quyết định đến tính chính xác của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn.

Giai đoạn 3: Ước lượng chiều cao rừng và hệ số suy hao sóng

Đầu tiên, tiến hành xây dựng một bảng tìm kiếm (Lock Up Table - LUT) cho các giá trị $\tilde{\gamma}_v$ theo một hàm của hai tham số chiều cao rừng h_v và hệ số suy hao sóng σ theo biểu thức (1.35).

$$\tilde{\gamma}_v = \frac{2\sigma}{\cos\theta_0 \left(e^{\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta_0}} - 1\right)} \int_0^{h_v} e^{jk_z z} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta_0}} dz \tag{1.35}$$

Cuối cùng, bằng cách so sánh hệ số CPI kênh HV $\tilde{\gamma}_{HV}$ với các giá trị $\tilde{\gamma}_v$ trong bảng LUT để trích xuất độ cao rừng và hệ số suy hao sóng.

Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn sử dụng phương pháp tổng bình phương tối thiểu (TLS) để xác định pha bề mặt. Thông thường, để tăng độ chính xác cho pha bề mặt ước lượng thì cần sử dụng từ 8 đến 12 hệ số CPI của các kênh phân cực. Điều này làm cho khối lượng tính toán pha bề mặt trở nên phức tạp và tốn nhiều thời gian. Ngoài ra, kết quả ước lượng độ cao rừng bởi thuật toán này thường thấp hơn so với chiều cao thực tế của khu vực rừng quan sát. Nguyên nhân chính gây ra sai số này là do trong thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn giả định hệ số CPI kênh HV chỉ chứa duy nhất thành phần tán xạ khối và sử dụng hệ số này cho ước lượng độ cao rừng.

1.6.2. Thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng cho ước lượng tham số rừng

Năm 2016, Fu Wenxue và các cộng sự đã đề xuất một phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55] 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. Trong phương pháp này, các tác giả đã bổ sung thêm thuật toán tối ưu để xác định hệ số CPI và phần nào cải thiện được nhược điểm của các thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Fu Wenxue đã sử dụng các giá trị khác nhau của chiều cao cây và hệ số suy hao sóng để lập bảng tìm kiếm dựa trên mô hình RVoG [21]. Sau đó, xác định hệ số CPI tối ưu cho thành phần tán xạ từ tán cây. Cuối cùng, chiều cao rừng và hệ số suy hao sóng được ước lượng bằng cách so sánh giá trị CPI tối ưu với các giá trị trong bảng tra cứu.



Hình 1.9: Biểu đồ thể hiện các hệ số CPI trong đường tròn đơn vị [55].

Trong thực tế, hệ số CPI chỉ có duy nhất thành phần tán xạ khối không thể trích xuất trực tiếp từ các hình ảnh ra-đa mặt mở tổng hợp quan sát được. Trong quá trình tán xạ của sóng siêu cao tần [31, 32], thành phần mặt đất luôn hiện diện trong kênh HV và có thể là nguyên nhân gây ra sai số khi ước lượng chiều cao rừng. Trong tài liệu [55] các nhà nghiên cứu giả định rằng hệ số CPI tối ưu xác định được chỉ chứa duy nhất thành phần tán xạ từ tán cây, nó cách xa pha bề mặt và thường nằm trong vùng không rõ ràng (đường màu đỏ) trong Hình 1.9.

Các tác giả đã ước lượng hệ số tương can giao thoa phức theo hai kênh phân cực HV và HH để đảm bảo giá trị này nằm trên đường màu đỏ, hay nói cách khác là thay đổi giá trị L(HV) và L(HH) trong khoảng $(0 \div 1)$.

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

$$\tilde{\gamma}_{est(HV)} = e^{j\phi_0} \left[\tilde{\gamma}_v - L(HV)(1 - \tilde{\gamma}_v) \right]$$
(1.36)

Sau đó, khoảng cách giữa các hệ số CPI ước lượng và các hệ số CPI của các kênh phân cực được xác định theo biểu thức (1.37).

$$d_{1} = \left| \tilde{\gamma}_{HH} - \tilde{\gamma}_{est(HH)} \right|$$

$$d_{2} = \left| \tilde{\gamma}_{HV} - \tilde{\gamma}_{est(HV)} \right|$$
(1.37)

Từ biểu thức (1.37) sẽ xác định được hai hệ số CPI tối ưu của hai kênh phân cực là $\tilde{\gamma}_{opt1}$ và $\tilde{\gamma}_{opt2}$. 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 (1.38).

$$\min\left(\sum_{i=1}^{2} d_i\right) \tag{1.38}$$

Xây dựng bảng tra cứu dựa trên (1.35) và chiều cao rừng, hệ số suy hao sóng được xác định bằng cách so sánh hệ số CPI tối ưu (chỉ chứa thành phần tán xạ từ tán cây) với các giá trị trong bảng LUT.

Phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng tuy đã cải thiện đáng kể hiệu quả ước lượng tham số rừng so với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn tồn tại một số vấn đề. Đầu tiên, phương pháp này đã sử dụng bốn hệ số tương can giao thoa phân cực phức ($\tilde{\gamma}_{opt1}$, $\tilde{\gamma}_{opt2}$, $\tilde{\gamma}_{HH}$ và $\tilde{\gamma}_{HV}$) cho ước lượng pha bề mặt và điều này đã làm tăng độ phức tạp của quá trình tính toán. Thứ hai, hệ số CPI tối ưu được giả định là chỉ chứa duy nhất thành phần tán xạ khối và giả định này thường gây ra sai số đối với độ cao rừng ước lượng.

1.6.3. Phương pháp tối ưu hệ số tương can giao thoa phân cực phức cho ước lượng độ cao rừng sử dụng dữ liệu PolInSAR

Tối ưu hệ số tương can giao thoa phân cực phức là một trong những yếu tố quan trọng và có ý nghĩa quyết định đến cải thiện hiệu quả ước lượng chiều cao rừng của mỗi thuật toán. Đây cũng là yếu tố không được đề cập khi ước lượng các tham số rừng bởi thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Do vậy, Tayebe và các cộng sự đã đề xuất một phương pháp tối ưu hệ số tương can giao thoa phân cực phức cho ước lượng độ cao rừng dữ liệu PolInSAR (phương pháp Tayebe-1) [57] nhằm nâng cao hiệu quả của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Dựa vào vị trí tương đối của hệ số CPI các kênh phân cực trên đường thẳng kết hợp trong đường tròn đơn vị. Tayebe đã tính toán và xác định hệ số CPI tối ưu trong vùng không rõ ràng, như được mô tả trong Hình 1.10. Phương pháp Tayebe-1 được tiến hành qua các bước sau:

Bước 1: Sử dụng phương pháp TLS để xác định đường thẳng phù hợp nhất [39]. Đường thẳng này sẽ cắt đường tròn đơn vị tại hai điểm (ϕ_0, ϕ_1) là các pha tương ứng với $(e^{j\phi_0}, e^{j\phi_1})$ và được biểu diễn trong Hình 1.10.

Bước 2: Xác định pha bề mặt ϕ_0 .

Bước 3: Xây dựng bản tra cứu (LUT) dựa trên công thức (1.39) và (1.40).

$$\phi = \arg\left(\tilde{\gamma}\left(\vec{\boldsymbol{\omega}}\right)\right) = \arg\left(\vec{\boldsymbol{\omega}}^* \boldsymbol{\Omega}_{12} \,\vec{\boldsymbol{\omega}}\right) \tag{1.39}$$

$$\arg\left(\tilde{\gamma}_{HV}\right) \leqslant \phi_C \leqslant \phi_1 \tag{1.40}$$



Hình 1.10: Vòng tròn đơn vị trên mặt phẳng phức của phương pháp Tayebe-1 [57].

Bước 4: Pha tối ưu đại diện cho thành phần tán xạ khối ϕ_{opt} được xác định dựa trên điều kiện (1.41).

$$\max |\phi_C - \arg \left(\tilde{\gamma}_{HV} \right)| \tag{1.41}$$

Bước 5: Xác định hệ số CPI tối ưu của thành phần tán xạ khối $\tilde{\gamma}_{opt}$ dựa trên giao điểm của đường thẳng kết hợp và $\phi = \phi_{opt}$.

Bước 6: Độ cao rừng và hệ số suy hao sóng được xác định như trong thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Tuy nhiên trong phương pháp này hệ số CPI kênh HV $\tilde{\gamma}_{HV}$ sẽ được thay thế bởi hệ số CPI tối ưu $\tilde{\gamma}_{opt}$.

* 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 $(\mu(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}) = 0)$.

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 đề xuất trong luận án thường được trình bày trong giai đoạn xác định hệ số CPI tối ưu và được mô tả trong Hình 1.11 (b). 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.



Hình 1.11: (a) Mô tả vị trí pha tán xạ trung tâm, (b) Biểu diễn cách xác định hệ số CPI tối ưu.

Theo lý thuyết tán xạ sóng điện từ, pha giao thoa trung tâm tương ứng tán cây sẽ gia tăng theo chiều cao thực [31, 32]. Trên thực tế rất khó có thể xác định các kênh phân cực mà pha giao thoa nằm tại đỉnh tán cây và sát bề mặt đất. Từ đó có thể thấy rằng hệ số tương can giao thoa phức của một số kênh phân cực có thể trở thành hệ số tương can giao thoa cho thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây. Như vậy, pha giao thoa của thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây có thể nằm đâu đó trong vùng từ một nửa độ cao cây đến đỉnh tán cây (như chỉ ra trên Hình 1.11 (a)). Pha giao thoa này chỉ nằm tại đỉnh tán cây khi hệ số suy hao sóng trong mô hình RvoG có giá trị vô cùng lớn. Chính vì vậy, nó gây ra một vùng không rõ ràng trên đường thẳng kết hợp. Do vậy, mục tiêu xuyên suốt của các đề xuất trong luận án là xây dựng và phát triển các thuật toán nhằm tối ưu hệ số CPI của thành phần tán xạ khối sao cho nó có thể phản ánh chính xác quá trình tán xạ trực trực tiếp từ tán cây. Từ đó, nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng và các tham số có liên quan. Hơn nữa, xác định hệ số CPI tối ưu là một trong những yếu tố quyết định để nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng.

Quá trình tối ưu hóa hệ số CPI có thể được thực hiện bằng cách thay đối trạng thái phân cực phát và thu để thu được các cơ chế tán xạ tối ưu với agrument của hệ số CPI cao nhất. Tối ưu hóa hệ số CPI cung cấp khả năng làm giảm độ không ổn định trong ước lượng pha giao thoa (Hình 1.11 (b)). Tối ưu hóa hệ số CPI có thể được áp dụng với các đối tượng theo phương đứng để từ đó xác định tâm của các thành phần tán xạ chủ đạo [68].

Một bài toán tối ưu hóa bao gồm ba thành phần:

- Hàm đối tượng f(x) phải được tối ưu theo nghĩa cực đại hóa hoặc cực tiểu hóa.

- Tập các biến chưa biết $x = \{x_1, ..., x_n\}$ đại diện cho bậc tự do của hàm đối tượng.

- Tập các điều kiện $g(x) = \{g_1(x), ..., g_n(x)\}$ mà nó sẽ hạn chế phạm vi của các biến trong không gian tìm kiếm. Từ đó, đưa ra các giải pháp phù hợp có thể về mặt vật lý. Các bài toán tối ưu thường có thể được chuyển thành các bài toán phi điều kiện bằng cách hiệu chỉnh f và x, trong khi đặt $g\left(x\right)=\left\{\,\ldots\right\}$ sử dụng hàm Lagrange.

Trong đó, bài toán cực đại hóa có thể được biểu diễn như sau:

maximize {
$$f(x) : g_1(x), ..., g_n(x)$$
 } (1.42)

Các phương pháp khác nhau được áp dụng để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa. Có thể phân biệt giữa tối ưu hóa có điều kiện so với không có điều kiện, toàn cục so với cục bộ, phân tích so với lặp lại, tuyến tính so với phi tuyến tính, liên tục so với rời rạc, v.v.

1.7. 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.

Các nội dung đã được phân tích, đánh giá trong Chương 1 là cơ sở, nền tảng quan trọng cho sự hình thành và phát triển của các mô hình, thuật toán đề xuất nhằm nâng cao độ chính xác cho ước lượng các tham số rừng được trình bày trong Chương 2 và Chương 3.

Chương 2

TRÍCH XUẤT ĐỘ CAO RỪNG DỰA TRÊN TỐI ƯU VÙNG KẾT HỢP TỪ DỮ LIỆU POLINSAR

Kỹ thuật PolInSAR đang được nghiên cứu mạnh mẽ trong hơn hai thập kỷ qua và được chứng minh là một công cụ hiệu quả phục vụ cho công tác kiểm tra, giám sát tài nguyên rừng. Ngày nay, có nhiều thuật toán được đề xuất để khắc phục những nhược điểm của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn nhằm nâng cao hiệu quả cho ước lượng độ cao rừng. Nhìn chung, các đề xuất cải tiến này đã sử dụng sự kết hợp giữa thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn và bổ sung thêm các điều kiện xác định hệ số CPI tối ưu [55-57]. Kết quả thực nghiệm cho thấy các phương pháp này đã phần nào cải thiện được độ chính xác cho các tham số rừng ước lượng so với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn ban đầu [39]. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn chưa thực sự tối ưu hóa hết các tham số cũng như chưa xây dựng được mô hình dự đoán chính xác.

Ngoài ra, có nhiều đề xuất thường giả định rừng là một khối đồng nhất với hệ số suy hao sóng không đổi và giả định này chưa thực sự phù hợp với quá trình tán xạ sóng siêu cao tần trong môi trường rừng thực tế. Đồng thời, các tác giả cũng thường xác định hệ số CPI của kênh phân cực HV hay một giá trị tối ưu nào đó là hệ số CPI chỉ có duy nhất sự đóng góp của thành phần tán xạ khối mà không có sự đóng góp của bất kỳ thành phần tán xạ nào khác. Các nguyên nhân này đã làm giảm độ chính xác của các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng [39, 55, 56, 57].

Theo lý thuyết tán xạ sóng điện từ, độ sâu xâm nhập của sóng ra-đa không chỉ tỷ lệ nghịch với tần số phát mà còn phụ thuộc vào cấu trúc rừng thẳng đứng gồm các lớp lá, cành và thân từ đỉnh tán cây xuống mặt đất [31, 32]. Do đó, hệ số suy hao sóng và sự đóng góp của thành phần tán xạ mặt đất đối với hệ số CPI của kênh HV có thể gây ra sai số không thể đoán trước trong ước lượng độ cao rừng. Ngoài ra, hiệu suất của các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng không chỉ phụ thuộc vào độ chính xác của pha bề mặt mà còn phụ thuộc vào độ chính xác của hệ số CPI đại diện cho thành phần tán xạ từ tán cây.

Xuất phát từ các luận điểm trên, trong Chương 2 đề xuất các phương pháp mới nhằm khắc phục những nhược điểm của các thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng trước đây [55-57] và nâng cao độ chính xác cho ước lượng các tham số rừng từ ảnh 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 một pháp nghịch chuyển ba giai đoạn nâng cao cho trích xuất các tham số rừng từ ảnh PolInSAR (A Novel Three Steps Method for Forest Parameters Extraction Using PolInSAR Images -NTS). Trong phương pháp NTS, một thuật toán tối ưu có điều kiện được áp dụng để xác định hai kênh phân cực cho thành phần tán xạ khối và bề mặt. Sau đó, pha bề 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. 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].

2.1.1. Tối ưu vùng kết hợp

Đối với trường hợp tán xạ ngược trong môi trường thuận nghịch, véc-tơ tán xạ ngược Pauli của hệ thống PolSAR được biểu diễn như sau:

$$\overrightarrow{\mathbf{k}}_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH}^{i} + S_{VV}^{i} & S_{HH}^{i} - S_{VV}^{i} & 2S_{HV}^{i} \end{bmatrix}^{T}$$
(2.1)

Trong đó, $\mathbf{S}_{p,q}(p, q = \{H, V\})$ là các ma trận tán xạ phức và i = 1, 2tương ứng với hai hệ thống PolSAR. Khi đó, dữ liệu nhận được từ hệ thống PolInSAR thường được biểu diễn bằng ma trận kết hợp phức (2.2).

$$\mathbf{T}_{6} = \left\langle \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}_{1}} \\ \overrightarrow{\mathbf{k}_{2}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{k}_{1}^{*T}} & \overrightarrow{\mathbf{k}_{2}^{*T}} \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{\Omega}_{12} \\ \mathbf{\Omega}_{12}^{*} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix}$$
(2.2)

Các ma trận \mathbf{T}_{11} và \mathbf{T}_{22} là các ma trận kết hợp phân cực Hermitian mô tả các thuộc tính phân cực của mục tiêu thu được từ mỗi hệ thống PolSAR riêng lẻ, ma trận $\mathbf{\Omega}_{12}$ là ma trận phức chứa các thông tin về giao thoa và phân cực của mục tiêu. Khi đó, ma trận kết hợp rút gọn được định nghĩa như sau.

$$\bar{\mathbf{\Omega}}_{12} = \mathbf{T}^{-\frac{1}{2}} \, \mathbf{\Omega}_{12} \, \mathbf{T}^{-\frac{1}{2}} \, ; \, \mathbf{T} = (\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{22}) \, /2$$
 (2.3)

Để có thể xác định các hệ số CPI tối ưu nhất, chúng tôi đề xuất xây dựng một ma trận Γ bằng cách bổ sung thêm một tham số pha tự do vào ma trận kết hợp rút gọn. Khi đó, Ma trận Γ được biểu diễn trong phương trình (2.4).

$$\Gamma = \frac{\bar{\Omega}_{12} \ e^{j\psi} + \bar{\Omega}_{12}^* \ e^{-j\psi}}{2}$$
(2.4)

Tương ứng với mỗi giá trị của ψ chạy trong dải $(0 \div \pi)$ có thể xác định được một cặp véc-tơ riêng $(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_1^k, \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_3^k)$. Cặp véc-tơ riêng này tương ứng với hai trị riêng $(\lambda_1^k, \lambda_3^k)$ của ma trận $\Gamma(\psi^k)$. Để đơn giản ta giả định các trị riêng của ma trận Γ được sắp xếp như sau.

 $\arg(\lambda_1(\psi_k)) \leqslant \arg(\lambda_2(\psi_k)) \leqslant \arg(\lambda_3(\psi_k))$ (2.5)

Theo nguyên lý giao thoa của sóng ra-đa trong môi trường tự nhiên, có thể thấy rằng argument của trị riêng (λ_3^k) xấp xỉ giá trị pha trung tâm của thành phần tán xạ trực tiếp từ đỉnh cây và argument của trị riêng (λ_1^k) xấp xỉ giá trị pha trung tâm của thành phần tán xạ trực tiếp từ bề mặt [18]. Khi đó, các cặp hệ số CPI của thành phần tán xạ khối và tán xạ bề mặt được xác định từ phương trình (2.6).

$$\tilde{\gamma}_{i}\left(\psi_{k}\right) = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i}^{*T} \boldsymbol{\Omega} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i}}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i}^{*T} \boldsymbol{\Gamma} \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i}}; \quad i = 1, 3 \qquad \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{i} = \overrightarrow{\boldsymbol{y}_{i}}\left(\psi_{k}\right) \cdot T^{\frac{1}{2}}$$
(2.6)

Trong giai đoạn này, các điều kiện (2.7) và (2.8) được đề xuất áp dụng cho xác định một cặp hệ số tương can giao thoa phân cực phức tối ưu. Từ các cặp $\tilde{\gamma}_1(\psi_k)$, $\tilde{\gamma}_3(\psi_k)$ ứng với mỗi giá trị ψ sẽ lựa chọn được các cặp hệ số CPI ($\tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_3$) thỏa mãn điều kiện (2.7).

$$\begin{cases} \arg\left(\tilde{\gamma}_{3}\right) \geqslant \arg\left(\tilde{\gamma}_{HV}\right) \\ \arg\left(\tilde{\gamma}_{1}\right) \leqslant \arg\left(\tilde{\gamma}_{HH-VV}\right) \end{cases}$$
(2.7)

Sau đó, ta hoàn toàn có thể xác định được một tập các cặp hệ số $(\tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_3)$ thỏa mãn điều kiện (2.7). Tiếp theo, một cặp hệ số CPI tối ưu nhất $(\tilde{\gamma}_{1_opt}, \tilde{\gamma}_{3_opt})$ được xác định dựa trên điều kiện (2.8).

$$d = \|\tilde{\gamma}_3 - \tilde{\gamma}_1\|_{\max} \tag{2.8}$$

2.1.2. Ước lượng pha bề mặt

Pha bề mặt là một trong những tham số quan trọng và có tác động gián tiếp đến việc nâng cao độ chính xác cho xác định chiều cao rừng của mỗi thuật toán. Ngoài ra, tham số pha bề mặt cũng phản ánh sự đóng góp của thành phần tán xạ bề mặt và cung cấp các thông tin về độ ẩm của đất, độ mấp mô của địa hình. Thông qua tham số này có thể khôi phục được địa hình của khu vực rừng cũng như ước lượng được độ cao của địa hình so với mực nước biển.



Hình 2.1: Biểu diễn các hệ số CPI của phương pháp NTS trong CUC.

Hình 2.1 cho thấy rằng $\tilde{\gamma}_{3_{opt}}$ tương ứng với thành phần tán xạ từ tán cây và $\tilde{\gamma}_{1_{opt}}$ tương ứng với hệ số CPI của thành phần tán xạ trực tiếp từ bề mặt. Thực hiện vẽ một đường thẳng đi qua hai giá trị này trên mặt phẳng phức. Đường thẳng này sẽ cắt đường tròn đơn vị tại hai điểm và một trong hai điểm này sẽ là pha bề mặt. Khi đó, pha bề mặt ϕ_0 sẽ được xác định theo công thức (2.9).

$$\phi_0 = \arg \left\{ \tilde{\gamma}_{1_opt} - (1 - K) \, \tilde{\gamma}_{3_opt} \right\}$$
(2.9)

Trong đó K là nghiệm của phương trình bậc 2.

$$A_0 K^2 + A_1 K + A_2 = 0$$

$$\Rightarrow K = \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_0 A_2}}{2A_0}$$
(2.10)

Với
$$A_0 = |\tilde{\gamma}_{3_opt}|^2 - 1$$
; $A_1 = 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(\tilde{\gamma}_{1_opt} - \tilde{\gamma}_{3_opt} \right) \tilde{\gamma}_{3_opt}^* \right\}$;
 $A_2 = |\tilde{\gamma}_{1_opt} - \tilde{\gamma}_{3_opt}|^2$

Có thể thấy rằng pha bề mặt được ước lượng bằng phương pháp tối ưu tập kết hợp đã khắc phục được nhược điểm trong xác định pha của các phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn trước đây. Trong [56, 57] Tayebe sử dụng phương pháp TLS để xác định pha bề mặt. Tuy đơn giản và dễ thực hiện nhưng phương pháp TLS cho kết quả ước lượng pha bề mặt thiếu chính xác.

Ngoài ra, phương pháp này thường sử dụng từ 8 đến 12 kênh phân cực để xác định đường thẳng kết hợp. Do đó, thời gian xác định pha bề mặt của phương pháp này là rất lớn. Ngược lại, phương pháp đề xuất chỉ dùng hai kênh phân cực để vẽ một đường thẳng cắt đường tròn đơn vị tại hai điểm và xác định pha địa hình theo điều kiện (2.9). Như vậy, pha bề mặt được ước lượng bởi phương pháp NTS không những đã nâng cao được độ chính xác mà còn giảm thời gian tính toán.

2.1.3. Ước lượng độ cao rừng sử dụng vòng lặp tối ưu

Sau khi đã xác định được các hệ số CPI tối ưu cho thành phần tán xạ bề mặt và tán xạ khối theo điều kiện (2.8). Từ đó có thể ước lượng được hai hệ số CPI cho các thành phần tán xạ này tương ứng với mỗi giá trị (h_v, σ) cho trước theo phương trình (2.11) và (2.12).

$$\tilde{\gamma}_{1_est} = e^{j\phi_0} \left[\tilde{\gamma}_v \left(h_v, \, \sigma \right) - L_1 \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \left(1 - \tilde{\gamma}_v \left(h_v, \, \sigma \right) \right) \right]$$
(2.11)

$$\tilde{\gamma}_{3_est} = e^{j\phi_0} \left[\tilde{\gamma}_v \left(h_v, \, \sigma \right) - L_3 \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \left(1 - \tilde{\gamma}_v \left(h_v, \, \sigma \right) \right) \right]$$
(2.12)

Trong đó $\tilde{\gamma}_v(h_v, \sigma)$ là hệ số CPI của thành phần tán xạ khối và được định nghĩa theo phương trình (1.35). $L_1(\overrightarrow{\omega}), L_3(\overrightarrow{\omega})$ là các số thực dương và chúng có giá trị nằm trong khoảng (0 ÷ 1). Sau đó, xác định khoảng cách từ hệ số CPI tối ưu đến hệ số CPI ước lượng tương ứng theo điều kiện (2.13).

$$\begin{cases} d_1 = \left| \tilde{\gamma}_{1_opt} - \tilde{\gamma}_{1_est} \right| \\ d_2 = \left| \tilde{\gamma}_{3_opt} - \tilde{\gamma}_{3_est} \right| \end{cases}$$
(2.13)

Trong giai đoạn này, phương pháp đề xuất bổ sung thêm điều kiện (2.14) và (2.15) cho phép trích xuất trực tiếp các tham số rừng mà không cần xây dựng mô hình dự đoán. Theo đó, hệ số CPI tối ưu cho mỗi giá trị (h_v, σ) được xác định từ điều kiện (2.14).

$$D\left(h_{v}^{m},\,\sigma^{n}\right) = \min\left\{\sum_{i=1}^{2}d_{i}\right\}$$

$$(2.14)$$

Thay đổi giá trị h_v trong khoảng $(0 \le h_v \le 2\pi/k_z)$ và hệ số suy hao sóng σ trong khoảng $(0 \le \sigma \le 1) dB/m$, lặp lại quá trình trên cho đến giá trị cuối cùng. Sau đó, các tham số rừng chính xác nhất được trích xuất trực tiếp từ phương trình (2.15).

min {
$$D(h_v^m, \sigma^n)$$
}; $m = 1...M, n = 1...N$ (2.15)

Cách tìm kiếm hệ số CPI tối ưu của phương pháp đề xuất đã khắc phục được giả định $(\mu(\vec{\omega}) = 0)$ của phương pháp Tayebe-1 [57] và đồng thời cũng đã nâng được hiệu quả của độ cao rừng ước lượng.

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

Phương pháp tối ưu trạng thái phân cực cho ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR (Optimal Polarization Channel Method for Estimating Forest Height From PolInSAR Images - 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 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 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.

2.2.1. Ước lượng pha bề mặt dựa trên tối ưu trạng thái phân cực

Trong hệ thống PolInSAR thì hệ số tương can giao thoa phân cực phức là một trong những tham số chính bao hàm rất nhiều các thông tin của mục tiêu và được biểu diễn như sau:

$$\tilde{\gamma}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} \,\mathbf{\Omega} \,\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} \,\mathbf{T} \,\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}$$
(2.16)

Trong đó $\vec{\omega}_1 = \vec{\omega}_2 = \vec{\omega}$ là véc-tơ nguyên trị phức đại diện cho mỗi trạng thái phân cực của sóng điện từ trường. Hệ thống PolInSAR trong điều kiện tán xạ thuận nghịch thì véc-tơ nguyên trị phức có thể được biểu diễn.

$$\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha \sin \beta \,.\, e^{j\phi_1} & \sin \alpha \sin \beta \,.\, e^{j\phi_2} \end{bmatrix}^T \tag{2.17}$$

Trong đó α , β , ϕ_1 và ϕ_2 là các hệ số thực và dải giá trị của chúng được

xác định trong phương trình (2.18).

$$\begin{cases}
0 \leq \alpha \leq \pi/2 \\
0 \leq \beta \leq \pi/2 \\
0 \leq \phi_1 \leq 2\pi \\
0 \leq \phi_2 \leq 2\pi
\end{cases}$$
(2.18)

Dựa trên ba biểu thức (2.16)-(2.18), luận án đề xuất một thuật toán tìm kiếm vét cạn để xác định các hệ số CPI cho thành phần tán xạ bề mặt và tán xạ từ tán cây. Như vậy, lúc này bài toán tối ưu trạng thái phân cực trở thành bài toán tìm kiếm bốn giá trị thực α , β , ϕ_1 và ϕ_2 tối ưu theo điều kiện nào đó.

Trong phần này, các hệ số CPI tối ưu được xác định cho hai thành phần tán xạ chủ đạo trong môi trường rừng có độ tin cậy cao hơn so với việc lựa chọn hai kênh phân cực kinh điển là $\tilde{\gamma}_{HH}$ và $\tilde{\gamma}_{HV}$. Đầu tiên, cho bốn tham số α , β , ϕ_1 và ϕ_2 chạy trong dải giá trị tương ứng. Sau đó, xác định được một tập các giá trị $\tilde{\gamma}$ ($\vec{\omega}$) theo công thứ (2.16) và hệ số CPI cho thành phần tán xạ khối được lựa chọn dựa trên điều kiện (2.19).

$$\arg\left(\tilde{\gamma}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{k}\right)\right) > \arg\left(\tilde{\gamma}_{HV}\right) \tag{2.19}$$

Theo lý thuyết tán xạ sóng điện từ [31], các hệ số CPI $\tilde{\gamma}(\vec{\omega}_k)$ mà thỏa mãn điều kiện (2.19) sẽ được xem như là các hệ số CPI đại diện cho thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây và được kí hiệu là $\tilde{\gamma}_2(\vec{\omega})$. Ngoài ra, những hệ số CPI $\tilde{\gamma}(\vec{\omega}_l)$ mà thỏa mãn điều kiện (2.20) tương ứng với thành phần tán xạ bề mặt và được xác kí hiệu là $\tilde{\gamma}_1(\vec{\omega})$.

$$\arg\left(\tilde{\gamma}_{HH-VV}\right) > \arg\left(\tilde{\gamma}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{l}\right)\right)$$
 (2.20)



Hình 2.2: Biểu diễn hệ số CPI tối ưu của phương pháp OPC.

Dựa trên một tập các hệ số CPI xác định được thông qua hai điều kiện (2.19) và (2.20), ta hoàn toàn có thể xác định được một cặp véc-tơ nguyên trị tối ưu $(\overrightarrow{\omega}_{1_{opt}}, \overrightarrow{\omega}_{2_{opt}})$ cho hai thành phần tán xạ bề mặt và tán xạ trực tiếp từ tán cây. Sau đó, luận án đề xuất điều (2.21) với mục đích xác định cặp hệ số CPI tối ưu $(\widetilde{\gamma}_{1_{opt}}(\overrightarrow{\omega}_1), \widetilde{\gamma}_{2_{opt}}(\overrightarrow{\omega}_2))$ cho thành phần tán xạ khối và tán xạ bề mặt.

$$\max_{\alpha,\beta,\phi_1,\phi_2} \| \arg\left(\tilde{\gamma}_{2_opt}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_2\right)\right) - \arg\left(\tilde{\gamma}_{1_opt}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_1\right)\right) \|$$
(2.21)

Tiếp theo, một thuật toán tổng bình phương tối thiểu được áp dụng để xác định một đường thẳng phù hợp nhất dựa trên hai hệ số CPI của các kênh phân cực $\tilde{\gamma}_{1_opt}$ ($\vec{\omega}_{1_opt}$) và $\tilde{\gamma}_{2_opt}$ ($\vec{\omega}_{2_opt}$). Đường thẳng này sẽ cắt đường tròn đơn vị trong mặt phẳng phức tại hai điểm và một trong hai điểm này sẽ là pha bề mặt, đường thẳng này thường có dạng như sau:

$$y = \hat{M}x + \hat{C} \tag{2.22}$$

Trong đó, \hat{M} và \hat{C} là các hệ số của đường thẳng kết hợp và được xác định như (2.23).

$$\hat{\mathbf{M}} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}{2 \, a_2}; \quad \hat{C} = \bar{y} - \hat{\mathbf{M}} \, \bar{x} \tag{2.23}$$

Với:

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{3} \operatorname{Re}(\tilde{\gamma}_{i}) \quad ; \bar{y} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{3} \operatorname{Im}(\tilde{\gamma}_{i})$$

$$a_{0} = \sum_{i=1}^{3} \left(\operatorname{Im}(\tilde{\gamma}_{i}) - \bar{y}\right)^{2}; \ a_{2} = \sum_{i=1}^{3} \left(\operatorname{Re}(\tilde{\gamma}_{i}) - \bar{x}\right)^{2} \quad (2.24)$$

$$a_{1} = -2 \sum_{i=1}^{3} \left(\operatorname{Im}(\tilde{\gamma}_{i}) - \bar{y}\right) \left(\operatorname{Re}(\tilde{\gamma}_{i}) - \bar{x}\right)$$

Khi đó, pha bề mặt được xác định theo công thức (2.25).

$$\phi_0 = \arg \left(x_0 + j \, y_0 \right)$$
(2.25)
Trong đó,
$$\begin{cases} x_0 = \frac{-\hat{M} \, \hat{C} - \sqrt{\hat{M}^2 - \hat{C}^2 + 1}}{1 + \hat{M}^2} \\ y_0 = \hat{M} \, x_0 + \hat{C} \end{cases}$$

Có thể thấy rằng pha bề mặt được ước lượng bằng phương pháp tối ưu trạng thái phân cực đã khắc phục được nhược điểm trong xác định pha của phương pháp Tayebe-2 [56]. Trong phương pháp đề xuất chỉ sử dụng ba hệ số CPI để xác định đường thẳng phù hợp nhất và pha bề mặt được xác định theo điều kiện (2.25). Như vậy, pha bề mặt được ước lượng bởi phương pháp đề xuất không chỉ nâng cao được độ chính xác mà còn giảm được độ phức tạp trong tính toán so với phương pháp Tayebe-2 [56].

2.2.2. Ước lượng các tham số rừng

Phần lớn các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng trước đây [21, 27, 39, 55, 56, 57] thường đưa ra giả định để tìm một hệ số CPI nào đó chỉ có

duy nhất thành phần tán xạ khối mà có sự đóng góp của bất kỳ thành phần tán xạ nào khác. Trong thực tế thì hệ số CPI của mỗi kênh phân cực là sự đóng góp của nhiều thành phần tán xạ khác nhau. Vì vậy, giả định trên là một trong những nguyên nhân chính gây ra sai số cho các tham số rừng ước lượng của các phương pháp trước đây.

Để khắc phục nhược điểm này, phương pháp OPC đề xuất một giải pháp tìm kiếm hệ số CPI tối ưu cho thành phần tán xạ khối (có ít sự đóng góp của thành phần tán xạ bề mặt nhất). Mục đích chính của phương pháp đề xuất là đi tìm một hệ số CPI $\tilde{\gamma}_{est}$ ($\vec{\omega}$) và argument của hệ số này có giá trị lớn hơn argument của kênh HV. Tương ứng với mỗi hệ số CPI tối ưu đã xác định trong phương trình (2.26) hoàn toàn có thể ước lượng được một hệ số CPI theo phương trình sau:

$$\tilde{\gamma}_{est}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) = e^{j\phi_0} \left[\tilde{\gamma}_{2_opt} + L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) \left(1 - \tilde{\gamma}_{2_opt}\right) \right]$$
(2.26)

Sau đó, cho $L(\vec{\omega})$ chạy trong dải từ 0 đến 1 để xác định hệ số CPI có ít nhất sự ảnh hưởng của thành phần tán xạ bề mặt. Trong giai đoạn này, phương pháp OPC bổ sung thêm một điều kiện (2.27) để xác định hệ số CPI tối ưu như sau.

$$\arg\left(\tilde{\gamma}_{2_opt}\right) > \arg\left(\tilde{\gamma}_{est}\right) > \arg\left(\tilde{\gamma}_{HV}\right)$$
 (2.27)

Dựa trên một tập các hệ số CPI tìm được thỏa mãn điều kiện (2.27) hoàn toàn xác định được một hệ số tương can giao thoa phân cực phức tối ưu $\tilde{\gamma}_{est}^{opt}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)$ theo điều kiện (2.28).

$$\min_{L\left(\vec{\omega}\right)} \left\| \operatorname{Im}\left(\tilde{\gamma}_{est}\right) - \hat{\mathrm{M}}.\operatorname{Re}\left(\tilde{\gamma}_{est}\right) - \hat{C} \right\|$$
(2.28)

Trong đó \hat{M} và \hat{C} là hệ số của đường thẳng kết hợp và được xác định

trong biểu thức (2.23). Để nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng, phương pháp OPC áp dụng dải hệ số suy hao sóng trung bình của Taybe-2 [56] trong xây dựng một bảng tra cứu hai chiều cho hệ số $\tilde{\gamma}_v (h_v, \sigma_e)$ là một hàm hai biến của chiều cao rừng h_v và hệ số suy hao sóng trung bình σ_e như sau:

$$\tilde{\gamma}_{v}(h_{v}, \sigma_{e}) = \frac{I_{1}}{I_{0}} = \frac{p_{1}(e^{p_{2}h_{v}} - 1)}{p_{2}(e^{p_{1}h_{v}} - 1)}; \qquad \begin{cases} p_{1} = \frac{2\sigma_{e}}{\cos\theta} \\ p_{2} = \frac{2\sigma_{e}}{\cos\theta} + j k_{z} \end{cases}$$
(2.29)

Cuối cùng, chiều cao rừng và hệ số suy hao sóng trung bình được xác định bằng cách so sánh các giá trị trong bảng tra cứu với giá trị $\tilde{\gamma}_{est}^{opt} \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right)$. Các giá trị h_v và σ_e được trích xuất phải thỏa mãn điều kiện:

$$\min_{h_{v},\sigma_{e}} \left\| \tilde{\gamma}_{est}^{opt} \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) - \tilde{\gamma} \left(h_{v}, \, \sigma \right) \right\|$$
(2.30)

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 tham số 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. Hiệu quả của phương pháp đề xuất sẽ được kiểm chứng với dữ liệu mô phỏng ở phần tiếp theo.

2.3. Phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng cải tiến từ ảnh PolInSAR hai kênh phân cực

Hiện nay, hệ thống PolInSAR vẫn cho thấy những ưu thế vượt trội trong việc trích xuất các tham số rừng [55-62]. Hệ thống PolInSAR phân cực toàn phần tuy cung cấp đầy đủ các thông tin và mô tả đầy đủ hơn về cấu trúc đứng của rừng nhưng không có độ phân giải cao và diện tích quan sát không lớn so với hệ thống PolInSAR hai kênh phân cực. Như vậy, hệ thống PolInSAR hai kênh phân cực có thể đáp ứng được các yêu cầu về việc khảo sát trên diện rộng và có tính toàn cục. Trong những năm gần đây, có rất nhiều các nghiên cứu về ước lượng độ cao rừng sử dụng ảnh PolInSAR hai kênh phân cực [55, 69] và nó cho thấy một tiềm năng lớn của kỹ thuật này.

Tuy nhiên, các phương pháp đã đề xuất trước đó chủ yếu chỉ thực hiện hiệu chỉnh dựa trên sự kết hợp các kênh phân cực HH và HV mà không có bất kỳ quá trình tối ưu vùng kết hợp nào. Do vậy vùng kết hợp với ít kênh phân cực có thể tạo ra sự không ổn định và chính xác cho quá trình trích xuất tham số rừng. Năm 2016, Fu Wenxue đã đề xuất một phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55] với dữ liệu PolInSAR hai kênh phân cực. Phương pháp này đã phần nào cải thiện được hiệu quả cho ước lượng tham số rừng so với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Tuy nhiên, phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng vẫn còn tồn tại một số vấn đề: (1) vẫn sử dụng phương pháp TLS để ước lượng pha bề mặt, (2) một trong hai kênh phân cực tối ưu sẽ được lựa chọn làm kênh phân cực chỉ có duy nhất sự đóng góp của thành phần tán xa khối.

Để khắc phục những nguyên nhân trên, một phương pháp chuyển đối độ cao rừng cải tiến sử dụng dữ liệu PolInSAR hai kênh phân cực (An Improved Forest Height Inversion Method Using Dual-Polarization PolInSAR Data -IDP) được đề xuất nhằm nâng cao độ chính xác cho độ cao rừng ước lượng. Trong phương pháp IDP, pha bề mặt được ước lượng dựa trên lý thuyết tập kết hợp trung bình. Phương pháp này không những cải thiện độ chính xác cho ước lượng pha địa hình mà còn giảm thiểu độ phức tạp tính toán của phương pháp đề xuất. Sau đó, một phương pháp tìm kiếm toàn diện để xác định các kênh phân cực tương ứng với thành phần tán xạ khối. Cuối cùng, độ cao rừng được ước lượng bằng cách so sánh giữa giá trị của mô hình dự báo và hệ số CPI tối ưu cho thành phần tán xạ khối.

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]. Khi đó hình dạng của vùng kết hợp trong mặt phẳng phức sẽ được trích xuất dựa trên hàm mật độ pha của hệ số CPI. Khi đó, hệ số CPI cho dữ liệu PolInSAR hai kênh phân cực được định nghĩa như (2.31).

$$\tilde{\gamma}\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right) = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} \mathbf{\Omega} \ \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T} \mathbf{T} \ \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}} = \ \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_{i}^{*T} \cdot \mathbf{H} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}$$
(2.31)

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

Theo lý thuyết cự ly số [15] thì tập kết hợp của tất cả các hệ số CPI được xác định như sau:

$$\Gamma = \left\{ \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_{i}^{*T} \cdot \mathbf{H} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}} : \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_{i}^{*T} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}} = 1 \right\}; \quad \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}} \in \mathbb{C}^{2}$$
(2.32)

Phương trình (2.32) có dạng tương tự với cự ly số học của một ma trận vuông $[\mathbf{A}]$; $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$.

$$[\mathbf{A}] = \left\{ x^n \, \mathbf{A} \cdot x : x^{*T} \cdot x = 1 \right\}; \ x \in \mathbb{C}^2$$
(2.33)

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 λ_1 , λ_2 với $(\arg(\lambda_1) < \arg(\lambda_2))$. Trong thực tế thì λ_2 rất gần với giá trị của $\tilde{\gamma}_{HV}$. Vì vậy, khi tiến hành nối hai điểm λ_1 và λ_2 sẽ vẽ được một đường thẳng cắt đường tròn đơn vị phức tại hai điểm và một trong hai điểm này sẽ là pha địa



Hình 2.3: Vòng tròn đơn vị trên mặt phẳng phức của phương pháp IDP.

hình. Khi đó, pha địa hình sẽ được xác định theo công thức (2.34).

$$\phi_0 = \arg \left\{ \lambda_1 - \lambda_2 \left(1 - B \right) \right\}$$
(2.34)

Theo đó B được xác định là nghiệm của phương trình sau:

$$a_0 B^2 + a_1 B + a_2 = 0$$

$$\Rightarrow B = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2}}{2a_0}$$
(2.35)

Trong đó $a_0 = |\lambda_2|^2 - 1$, $a_1 = 2 \operatorname{Re} \{ (\lambda_1 - \lambda_2) \lambda_2 \}$, $a_2 = |\lambda_1 - \lambda_2|^2$

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

Để khắc phục các nhược điểm của phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55]. Trong phần này, một phương pháp tìm kiếm toàn diện được đề xuất để tìm một kênh phân cực tối ưu mà nó có ít nhất sự đóng góp của thành phần tán xạ khác. Từ phương trình (2.31) cho thấy hệ số CPI của hệ thống PolInSAR hai kênh phân cực là một hệ số phụ thuộc vào véc-tơ phân cực. Trong trường hợp này véc-tơ phân cực là một véc-tơ phức hai chiều và được biểu diễn như sau:

$$\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \, e^{j\psi} \end{bmatrix}^T \tag{2.36}$$

Với α và ψ là các hệ số thực thỏa mãn điều kiện (2.37).

$$\begin{cases} 0 \leqslant \alpha \leqslant \pi/2 \\ 0 \leqslant \psi \leqslant 2\pi \end{cases}$$
(2.37)

Tiếp theo, áp dụng phương pháp tìm kiếm vét cạn để xác định một hệ số CPI đại diện cho thành phần tán xạ khối. Đầu tiên, thực hiện tìm kiếm các véc-tơ phức nguyên trị $\vec{\omega}$ để xác định tất cả các pha của hệ số CPI trên vùng không rõ ràng (vùng màu xanh lá cây trong Hình 2.3). Để nâng cao độ chính xác cho xác định hệ số CPI, chúng tôi đề xuất điều kiện (2.38). Nghĩa là cho cặp giá trị (α , ψ) 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.

$$\phi_1 > \arg\left(\tilde{\gamma}_c\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\right) > \phi_{HV}$$
 (2.38)

Trong đó ϕ_1 là pha tương ứng với điểm cắt thứ hai giữa đường thẳng kết hợp và đường tròn đơn vị như được biểu diễn trong Hình 2.3.

Với tập các giá trị hệ số CPI $\tilde{\gamma}_c(\vec{\omega})$ thỏa mãn điều kiện (2.38) có thể ước lượng hệ số tương can giao thoa cho hai kênh phân cực HH và HV theo phương trình sau:

$$\begin{cases} \tilde{\gamma}_{HH_est} = e^{j\phi_0} \left[\tilde{\gamma}_c \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) + L_{HH} \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \left(1 - \tilde{\gamma}_c \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \right) \right] \\ \tilde{\gamma}_{HV_est} = e^{j\phi_0} \left[\tilde{\gamma}_c \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) + L_{HV} \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \left(1 - \tilde{\gamma}_c \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}} \right) \right) \right] \end{cases}$$
(2.39)
Sau đó, xác định khoảng cách giữa các kênh ước lượng và hai kênh phân cực thực tế theo biểu thức.

$$\begin{cases} d_1 = \left| \tilde{\gamma}_{HH} - \tilde{\gamma}_{HH_est} \right| \\ d_2 = \left| \tilde{\gamma}_{HV} - \tilde{\gamma}_{HV_est} \right| \end{cases}$$
(2.40)

Khi đó hệ số CPI của kênh phân cực tối ưu $\tilde{\gamma}_{c_opt} \left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{opt} \right)$ sẽ được xác định theo điều kiện (2.41).

$$\min_{\alpha,\psi} \left\| \sum_{i=1}^{2} d_{i} \right\|$$
(2.41)

Sau đó, một bảng tra cứu cho thành phần tán xạ từ tán cây được xây dựng dựa trên công thức (1.35). 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 $\tilde{\gamma}_{c_{opt}} (\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{opt})$ 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. Dựa trên dữ liệu rừng mô phỏng chúng ta hoàn toàn biết được chính xác các tham số từ hệ thống vì vậy khi áp dụng tính toán với dữ liệu này sẽ đưa ra các đánh giá tương đối khách quan về hiệu quả của phương pháp đề xuất. Tuy nhiên, do dữ liệu mô phỏng được tạo ra trong điều kiện tương đối lý tưởng với các tham số cho trước và không bị ảnh hưởng của nhiễu như trong môi trường thực tế. Vì vậy, độ chính xác của các tham số rừng ước lượng trên dữ liệu mô phỏng thường cao hơn dữ liệu thực nghiệm. Để đảm bảo tính nhất quán và khách quan trong phần trình bày kết quả của luận án. Một dữ liệu mô phỏng sẽ được xây dựng dựa trên phần mềm PolSARProSim và 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 với các tham số được mô tả trong Bảng 2.1.

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

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

Bảng 2.1 mô tả các tham số cơ bản của kịch bản rừng mô phỏng. Trong đó, ra-đa hoạt động ở độ cao khoảng 3000 (m) với đường cơ sở theo phương ngang là 10 (m) và đường cơ sở theo phương đứng là 1,0 (m). Do phần mềm PolSARProSim chỉ cho phép tạo ra các dữ liệu dưới dạng ảnh của hệ thống air-bourne, vì vậy độ cao ra-đa hoạt động thường thấp hơn rất nhiều so với hệ thống space-bourne. Hệ thống PolInSAR hoạt động ở băng tần L với tần số trung tâm là 1,3 (GHz) và góc tới là 40 độ. Khu vực rừng khảo sát có diện tích là 2,8274 (Ha), chiều cao cây trung bình là 20 (m), mật độ 900 (cây/Ha) và địa hình tương đối bằng phẳng.

Hình 2.6 là hình ảnh Pauli của dữ liệu rừng mô phỏng với kích thước (225x217) điểm ảnh và đường ngang màu đỏ thể hiện hàng ngang 86 được sử



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

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. Thông qua các kết quả ước lượng tham số rừng ước lượng được để đánh giá hiệu quả và độ tin cậy của hai phương pháp này.

Hình 2.5 biểu thị so sánh độ cao rừng ước lượng từ phương pháp NTS (đường màu đỏ) với phương pháp Tayebe-1 (đường màu xanh). Kết quả này cho thấy độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp được đề xuất dao động ổn định xung quanh độ cao 20 (m) (ngoại trừ điểm ảnh số 42, 69 và 146 là cao quá 22 (m)). Trong khi đó, độ cao rừng được ước lượng bởi phương pháp Tayebe-1 thường dao động trong khoảng giá trị từ 16 (m) đến 19,6 (m) (đặc biệt có nhiều điểm ảnh thấp hơn 15 (m)). Mặc dù phương pháp Tayebe-1 đã cải thiện đáng kể độ chính xác tốt hơn so với phương pháp ba giai đoạn truyền thống. Tuy nhiên, kết quả độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp này vẫn chưa đạt được hiệu quả cao và không ổn định. Nguyên nhân gây ra



Hình 2.5: Biểu đồ so sánh độ cao rừng bởi phương pháp NTS và Tayebe-1 [57].

sai số này là do phương pháp Tayebe-1 [57] vẫn giả định hệ số CPI tối ưu xác định được là hệ số chỉ chứa duy nhất thành phần tán xạ khối $(\mu(\overrightarrow{\omega}) = 0)$. Giả định này hoàn toàn không phản ánh đúng quá trình tán xạ sóng trong môi trường rừng thực tế.

Ngoài ra, hiệu suất của phương pháp đề xuất được đánh giá một cách định lượng hơn thông qua các tham số: độ cao rừng trung bình \bar{h}_v , pha bề mặt ϕ_0 , hệ số suy hao sóng σ , sai số bình phương trung bình (RMSE) và sai số tương đối (RE). Kết quả mô phỏng của phương pháp NTS và phương pháp Tayebe-1 [57] được trình bày trong Bảng 2.2.

Độ cao rừng trung bình \bar{h}_v được định nghĩa:

$$\bar{h}_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{v-i}$$
(2.42)

Sai số bình phương trung bình căn bậc hai (RMSE) được xác định theo

Các tham số	Giá trị thực của dữ liệu mô phỏng	Phương pháp Tayebe-1 [57]	Phương pháp NTS
$ar{h}_v~(m)$	20	18,48	19,58
$\phi_{0}\left(rad ight)$	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].

phương trình (2.43).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} |h_{v-i} - \bar{h}_{v}|^{2}}{N}}$$
(2.43)

Sai số tương đối (RE) được định nghĩa:

$$RE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N} \frac{|h_{v-i} - \bar{h}_v|}{\bar{h}_v} \right) \cdot 100\%$$
(2.44)

Trong đó, h_{v-i} là độ cao rừng ước lượng được tại điểm ảnh thứ i và N là tổng số điểm ảnh.

Bảng 2.2 cho thấy độ cao rừng trung bình được ước lượng bởi phương pháp NTS và phương pháp Tayebe-1 lần lượt là 19,58(m) và 18,48 (m), trong khi chiều cao rừng thực tế là 20 (m). Từ kết quả ước lượng độ cao rừng ở Hình 2.5 và Bảng 2.2, có thể thấy rằng 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 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].

Tiếp theo, để đánh giá sự ảnh hưởng của hệ số sóng đứng với các tham số rừng ước lượng được bởi hai phương pháp. Luận án sẽ áp dụng cả hai phương pháp trên các dữ liệu rừng mô phỏng có các tỷ số sóng đứng khác nhau. Dữ liệu rừng mô phỏng được tạo ra bằng cách thay đổi góc tới của vệ tinh, các tham số khác giữ nguyên như trong Bảng 2.1. Các thử nghiệm được tiến hành với với 9 dữ liệu khác nhau, góc tới thay đổi từ 20 độ đến 60 độ (khoảng cách góc tới của mỗi dữ liệu mô phỏng là 5 độ), tương ứng với các giá trị của hệ số sóng đứng từ 0,108 (rad/m) đến 0,631 (rad/m). Theo lý thuyết sóng siêu cao tần [31, 32], hầu hết các kênh phân cực (HH, HV và VV) đều có liên quan tới hệ số kết hợp giao thoa phân cực và tất cả chúng đều chịu ảnh hưởng của tỷ số sóng đứng. Do đó, sự thay đổi các giá trị tỷ số sóng đứng sẽ trực tiếp gây ra các sự thay đổi độ về cao rừng ước lượng.



Hình 2.6: Biểu đồ mô tả chỉ số RMSE của hai phương pháp.

Hình 2.6 mô tả sai số bình phương trung bình căn bậc hai của phương pháp đề xuất (đường màu đỏ) và phương pháp Tayebe-1 (đường màu xanh). Kết quả này cho thấy giá trị RMSE của hai phương pháp là rất lớn khi hệ số sóng đứng có giá trị từ 0,339 (rad/m) đến 0,631 (rad/m). Ngược lại, khi hệ số sóng đứng giảm dần từ 0,258 (rad/m) đến 0,108 (rad/m) thì giá trị RMSE của cả hai phương pháp trở nên ổn định và đáng tin cậy hơn. Kết quả trong Hình 2.6 thể hiện rằng chỉ số RMSE của phương pháp NTS là luôn nhỏ hơn phương pháp Tayebe-1 trên cả 9 dữ liệu được tính toán. Đồng nghĩa rằng độ cao rừng ước lượng của phương pháp NTS có độ chính xác cao hơn phương pháp Tayebe-1 [57].

Hình 2.7 biểu diễn hệ số CPI kênh HV $\tilde{\gamma}_{HV}$, hệ số CPI tối ưu $\tilde{\gamma}_{opt}$ của phương pháp Tayebe-1 và hệ số CPI tối ưu $\tilde{\gamma}_{3_opt}$ được xác định bởi phương pháp NTS. Kết quả trong Hình 2.7 cho thấy, khi hệ số sóng đứng giảm từ



Hình 2.7: Biểu đồ mô tả độ lớn của hệ số CPI.

0,258 (rad/m) đến 0,108 (rad/m) thì hệ số CPI của các phương pháp đạt giá chính xác và ổn định hơn. Kết quả này cho thấy hệ số CPI tối ưu được xác định từ phương pháp NTS luôn đạt được giá trị cao hơn giá trị này của kênh HV và phương pháp Tayebe-1 trên 9 tỷ số sóng đứng khác nhau. Điều này phản ánh sự chính xác của quá trình xác định hệ số CPI tối ưu của phương pháp NTS với các điều kiện bổ sung.

Từ kết quả trong Hình 2.6 và 2.7 có thể đưa ra nhận định rằng hệ số sóng đứng phù hợp từ 0,108 (rad/m) đến 0,258 (rad/m) (tương ứng với các góc tới từ 10 độ đến 60 độ) thì kết quả các tham số rừng ước lượng có độ ổn định và chính xác cao hơn. Ngoài ra với các hệ số sóng đứng quá lớn thường cho thấy kết quả ước lượng độ cao rừng thiếu chính xác và gây ra sai số lớn. Bởi vì giới hạn có thể đạt được của độ cao rừng ước lượng được xác định theo công thức $\left(h_v \leq \frac{2\pi}{k_z}\right)$ [39].

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 2.8: Biểu đồ 2D thể hiện pha bề mặt ước lượng bởi phương pháp OPC.

Hình 2.8 mô tả pha bề mặt của khu vực rừng quan sát được ước lượng bởi phương pháp OPC là các giá trị thay đổi trong phạm vi $(-0, 21 \div 0, 19)$ (rad) và giá trị trung bình đạt được là 0,105 (rad).

Trong khi đó, pha bề mặt của khu vực rừng quan sát ước lượng bởi phương pháp Tayebe-2 được biểu diễn trong Hình 2.9 thường dao động trong phạm vi $(-0, 31 \div 0, 40)$ (rad) và giá trị pha bề mặt trung bình ước lượng là 0,166(rad). Kết quả này cho thấy rằng pha bề mặt được ước lượng từ phương



Hình 2.9: Biểu đồ 2D thể hiện pha bề mặt ước lượng bởi phương pháp Tayebe-2. pháp Tayebe-2 có sai số lớn hơn phương pháp OPC. Nguyên nhân gây ra sai số này là do phương pháp Tayebe-2 vẫn sử dụng thuật toán TLS để xác định pha địa hình. Phương pháp này thường không có độ chính xác cao và làm tăng thời gian tính toán.

Hình 2.10 (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 2.10 (b). Chiều cao rừng ước lượng được bởi phương pháp Tayebe-2 có dao động lớn và không đồng đều. Từ kết quả trong Hình 2.10 có thể thấy rằng chiều cao rừng được xác định bởi phương pháp OPC là chính xác và đáng tin cậy hơn.

Các tham số được trình bày trong Bảng 2.3 cho thấy chiều cao rừng trung



Hình 2.10: 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.

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

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

bình được xác định bởi phương pháp đề xuất là 19,459 (m) và phương pháp 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].

Tiếp theo, để đánh giá toàn diện hơn về hiệu quả của phương pháp đề xuất, chúng tôi lấy ngẫu nhiên 100 điểm ảnh bất kỳ theo hướng phương vị trong vùng khảo sát. Các tham số mô phỏng được ước lượng bởi phương pháp OPC trong 100 điểm ảnh khảo sát được thể hiện trên Hình 2.11.



Hình 2.11: Các tham số ước lượng bởi phương pháp OPC.

Hình 2.11 là các đồ thị biểu diễn giá trị và độ lệch chuẩn của các tham số được xác định từ phương pháp đề xuất. Hình 2.11 (a) cho thấy rằng độ cao rừng thay đổi từ 16 (m) đến 21 (m), tuy nhiên tập trung chủ yếu là xung quanh độ cao 20 (m). Pha của địa hình mặt đất thay đổi trong dải từ -0,2(rad) đến 0,18 (rad) (Hình 2.11 (b)). Hệ số suy hao sóng thay đổi trong khoảng từ 0,05 (dB/m) đến 0,9 (dB/m), đa số tập trung ở giá trị xấp xỉ 0,2(dB/m) (Hình 2.11 (c)). Hình 2.11 (d) biểu diễn giá trị của hệ số CPI ước lượng được bởi phương pháp OPC, chúng thường dao động trong khoảng từ 0,45 đến 0,96 và tập trung xung quanh giá trị lớn hơn 0,65.

Để phân tích, đánh giá mức độ ảnh hưởng của mật độ cây với kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp. Phần mềm PolSARprosim 5.2 [70] được sử dụng để tạo ra 15 dữ liệu rừng mô phỏng với các mật độ cây thay đổi từ 100 (cây/Ha) đến 1500 (cây/Ha). Các tham số khác của dữ liệu được giữ nguyên như trong Bảng 2.1.



Hình 2.12: Biểu đồ so sánh giá trị RMSE của hai phương pháp.

Hình 2.11 mô tả sai số bình phương trung bình căn bậc hai (RMSE) của độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp OPC và phương pháp Tayebe-2 [56] với các dữ liệu mô phỏng có mật độ rừng khác nhau. Kết quả trong Hình 2.12 cho thấy, với dữ liệu có mật độ cây rừng thưa thớt (100 – 500 cây/Ha) hoặc mật độ cây dày đặc (1100 – 1500 cây/Ha) thường gây ra sai số lớn. Ngược

lại, các giá trị RMSE giảm xuống và ổn định đối với các dữ liệu có mật độ cây trong khoảng từ 600 (cây/Ha) đến 1000 (cây/Ha).

Giá trị RMSE càng nhỏ tương ứng với độ chính xác của chiều cao rừng càng cao. Đồng thời, kết quả này cũng cho thấy rằng với các dữ liệu có mật độ cây rừng phù hợp khi đó sóng ra-đa sẽ vừa có thể thâm nhập đến bề mặt cũng vừa có thể tán xạ trên tán cây [71]. Do đó các tín hiệu tán xạ ngược thu được sẽ đảm bảo tốt và độ sai lệch pha trung tâm của thành phần tán xạ khối và tán xạ bề mặt đảm bảo cho việc tính toán các tham số rừng. Từ các phân tích trên, có thể kết luận rằng mật độ rừng là một tham số rất quan trọng và có tác động trực tiếp đến hiệu quả ước ượng tham số rừng của các phương pháp. Hình 2.12 cũng cho thấy giá trị RMSE của phương pháp OPC luôn nhỏ hơn phương pháp Tayebe-2 [56], đồng nghĩa rằng chiều cao rừng được ước lượng bởi phương pháp OPC luôn ổn định với độ chính xác cao.

2.4.4. Kết quả mô phỏng từ phương pháp IDP

Hiệu quả của phương pháp IDP được đánh giá với dữ liệu mô phỏng được tạo ra từ phần mềm PolSARProSim 5.2 [70]. Dữ liệu mô phỏng hoạt động ở băng L với các tham số được trình bày cụ thể trong Bảng 2.1. Hình 2.13 (a) thể hiện ảnh màu Pauli của khu vực rừng quan sát, đường ngang màu đỏ thể hiện hàng ngang số 86 được dùng để trích xuất chiều cao rừng. Hiệu quả của mô hình đề xuất được đánh giá bằng cách so sánh kết quả của phương pháp IDP với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55].

Hình 2.13 (b) biểu diễn hệ số pha bề mặt được ước lượng bởi hai phương pháp. Trong đó, đường màu đen tương ứng với pha bề mặt được ước lượng bởi phương pháp IDP, đường màu xanh hiển thị kết quả của phương pháp



Hình 2.13: (a) Ánh Pauli của khu vực rừng khảo sát, (b) Biểu đồ so sánh pha bề mặt ước lượng của các phương pháp.

nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng và đường thắng màu đỏ là giá trị pha bề mặt thực tế. Từ Hình 2.13 (b) và Bảng 2.4, có thể thấy rằng pha bề mặt ước lượng của phương pháp IDP có giá trị trung bình là 0,095 (rad) và dao động khá gần với giá trị pha bề mặt chuẩn. Trong khi đó, pha bề mặt ước lượng bởi phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng có giá trị trung bình là 0,134 (rad) và thường dao động trong một dải tương đối rộng và nó có sai số lớn so với giá trị pha bề mặt chuẩn. Như vậy, pha bề mặt ước lượng bởi phương pháp IDP cho độ chính xác cao hơn và giảm được thời gian tính toán so với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55].

Hình 2.14 là đồ thị so sánh độ cao rừng ước lượng từ phương pháp IDP (màu đỏ) với phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55] (Màu xanh). Hình này cho thấy độ cao rừng ước lượng trung bình của phương pháp được IDP dao động ổn định xung quanh độ cao 20 (m) (ngoại trừ một số điểm ảnh là cao quá 21 (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) (đặc biệt có những điểm ảnh thấp



Hình 2.14: Đồ thị so sánh độ cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp.

hơn 12 (m)). Mặc dù phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55] đã cải thiện đáng kể độ chính xác tốt hơn so với phương pháp ba giai đoạn truyền thống [39]. Tuy nhiên, kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp này vẫn chưa đạt được hiệu quả cao và không ổn định.

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].

Ngoài ra, một tham số quan trọng thể hiện sự chính xác của chiều cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp được trích suất là giá trị sai số bình

Các tham số	Giá trị thực của dữ liệu mô phỏng	Phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng [55]	Phương pháp IDP
$\bar{h}_v(m)$	20	18,696	19,629
$\phi_0\left(rad ight)$	0,092	0,134	0,095
$\sigma\left(dB/m\right)$	0,126	0,264	0,185
RMSE(m)	0	3,062	1,582
RE (%)	0	6,39	1,81

Bảng 2.4: Kết quả mô phỏng của các phương pháp.

phương trung bình của hai phương pháp là 3,062 (m) và 1,582 (m). Giá trị RMSE của phương pháp IDP là nhỏ hơn đồng nghĩa với hiệu quả ước lượng độ cao rừng của phương pháp này cao hơn phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng. Hơn nữa, các tham số khác được trích suất trong Bảng 2.4 gồm pha bề mặt và hệ số suy hao sóng được ước lượng bởi phương pháp IDP cũng cho thấy độ chính xác cao và gần với các giá trị thực của dữ liệu mô phỏng.

Hình 2.15 minh họa độ cao cây trong toàn bộ khu rừng được khảo sát được ước lượng từ phương pháp IDP. Có thể thấy rằng các điểm ảnh được thể hiện trong hình 2D và 3D, chúng hầu hết tập trung ở độ cao xấp xỉ 20(m) (có một số điểm ảnh cao hơn 20 (m) nhưng không đáng kể). Từ các kết quả được biểu diễn trong Hình 2.15 cho thấy phương pháp IDP cho kết quả tương đối chính xác và đáng tin cậy.

Để đánh giá, phân tích sâu hơn về hiểu quả của phương pháp IDP. Trong



Hình 2.15: Đồ thị thể hiện độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp IDP: (a) đồ thị 2D, (a) đồ thị 3D.

phần này, phương pháp IDP và phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn mở rộng được áp dụng với các dữ liệu rừng mô phỏng có chủng loài cây khác nhau (rừng lá kim, rừng hỗn hợp và rừng tán rộng) để ước lượng chiều cao rừng. Trong phần dữ liệu mô phỏng, chỉ thay đổi chủng loại cây và các tham số khác được giữ nguyên không thay đổi như trong Bảng 2.1.



Hình 2.16: Biểu đồ so sánh độ cao rừng ước lượng bởi hai phương pháp với chủng loại cây khác nhau.

Hình 2.15 mô tả độ cao rừng rừng ước lượng bởi hai phương pháp với ba chủng loài cây khác nhau. Hình này cho thấy rằng với chủng loại cây rừng thuộc họ lá kim (Pine) thường gây ra sai số lớn cho kết quả rừng ước lượng độ cao rừng của cả hai phương pháp. Nguyên nhân chính là do chủng loại cây rừng thuộc họ lá kim thì sóng tán xạ dễ dàng thâm nhập xuống bề mặt đất và khi đó thì pha trung tâm của thành phần tán xạ bề mặt và tán xạ khối là tương đối gần nhau. Ngược lại, với khu vực rừng gồm loại cây hỗn hợp (Hedge) và cây tán rộng (Deciduous) thì sóng ra-đa hầu như khó có thể xuyên thấu qua lớp tán cây để tác động đến mặt đất, mà đa phần sóng ra-đa tán xạ tại đỉnh của lớp tán cây do đó pha trung tâm của hai thành phần tán xạ này tương đối cách xa nhau. Tuy nhiên, trong trường hợp này mật độ cây rừng được lựa chọn cho dữ liệu mô phỏng là 900 (cây/Ha). Khi đó sóng ra-đa sẽ vừa có thể thâm nhập đến bề mặt cũng vừa có thể tán xạ trên tán cây. trung tâm của thành phần tán xạ khối và thành phần tán xạ bề mặt không quá gần hoặc không quá xa và nó đảm bảo cho việc tính toán các tham số rừng được chính xác.

Từ các phân tích trên, có thế kết luận rằng chủng loại cây rừng cũng là một tham số có ảnh hưởng đến độ chính xác của chiều cao rừng ước lượng. Hình 2.15 cho thấy kết quả ước lượng chiều cao rừng của hai phương pháp có sự thay đổi tương ứng với dữ liệu mô phỏng của từng loại cây khác nhau. Tuy nhiên, do mật độ được đặt cho dữ liệu mô phỏng ban đầu là 900 (cây/Ha), nó tương đối thuận lợi với quá trình tán xạ ngược của sóng ra-đa. Vì vậy, kết quả chiều cao rừng ước lượng trong trường hợp này không có nhiều sự thay đổi lớn. Kết quả này, một lần nữa cho thấy rằng chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp IDP luôn chính xác và linh hoạt hơn 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. Mục đích chung của ba đề xuất này là tiến hành tìm kiếm hệ số CPI tối ưu nhất cho thành phần tán xạ khối. Trong đó, hệ số CPI tối ưu được tìm kiếm dựa trên tối ưu tập kết hợp, dấu hiệu phân cực và phát triển, bổ sung thêm các điều kiện rằng buộc khác nhau cho mỗi đề xuất. Sau đó, áp dụng tính toán các đề xuất này trên cùng một dữ liệu rừng mô phỏng để đánh giá hiệu quả và so sánh với các thuật toán trước đây [55 - 57]. Kết quả của độ cao rừng trung bình ước lượng được bởi ba phương pháp đề xuất trong Chương 2 được xếp từ cao đến thấp như sau: phương pháp IDP là 19,629 (m), tương ứng với sai số tương đối 1,81 %, phương pháp NTS là 19,58 (m), tương ứng với sai số tương đối 1,98 % và phương pháp OPC là 19,459 (m), tương ứng với sai số tương đối 2,46 %. Kết quả này 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.

Mặc dù, các đề xuất này đã đạt được hiệu suất cao và cải thiện được đáng kể độ chính xác cho các tham số rừng ước lượng so với các phương pháp trước đây. Tuy nhiên, việc xây dựng, bổ sung thêm nhiều điều kiện rằng buộc cho bài toán tối ưu đã làm cho các đề xuất này tăng độ phức tạp tính toán. Đồng nghĩa với thời gian xử lý sẽ tăng lên đáng kể so với các phương pháp nghịch chuyển ba giai đoạn trước đây.

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 của tác giả, trang 123.

Chương 3

CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHỊCH CHUYỂN CHO ƯỚC LƯỢNG ĐỘ CAO RỪNG TRÊN ĐỊA HÌNH ĐỒI NÚI SỬ DỤNG DỮ LIỆU POLINSAR

Thông qua các thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng đã được trình bày trong Chương 1 và Chương 2 có thể thấy rằng các thuật toán này cơ bản đều có chung muc tiêu là nâng cao hiệu quả ước lương đô cao rừng: (1) xác đinh hệ số CPI tối ưu, mà nó có sự đóng góp lớn nhất của thành phần tán xạ từ tán cây. (2) xây dựng mô hình rừng dự đoán có thể phản ánh gần đúng nhất quá trình tán xạ sóng siêu cao tần trong môi trường rừng thực tế. Trong đó, các phương pháp trong các tài liệu tham khảo [27, 53, 55, 57] phần nào đã khắc phục được các nhược điểm của thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39] và cải thiện được độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng. Tuy nhiên, còn một số hạn chế trong việc đưa ra các giả định như hệ số suy hao sóng trên toàn bộ khu vực rừng không đổi (σ là hằng số) và sử dụng phương pháp TLS hoặc LS để xác định pha bề mặt. Những yếu tố trên là nguyên nhân làm giảm đi độ chính xác của các thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng [27, 53, 55, 57]. Ngoài ra, khi áp dụng tính toán trên các dữ liệu thực nghiệm thì yếu tố về độ dốc địa hình cũng là nguyên nhân gây ra sai số của các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng trước đây.

Từ các phân tích trên, trong Chương 3 luận án sẽ đề xuất hai phương pháp nhằm nâng cao độ chính xác khi ước lượng các tham số rừng trên địa hình đồi núi với hệ số suy hao sóng thay đối. Các đề xuất gồm, mô hình S-RVoG cải tiến cho ước lượng các tham số rừng trên địa hình đồi núi và phương pháp nghịch chuyển tham số rừng dựa trên lý thuyết tập kết trung bình từ ảnh PolInSAR (FIM). Hiệu quả của các phương pháp đề xuất sẽ được kiểm chứng với ba loại dữ liệu khác nhau: dữ liệu mô phỏng từ phần mềm PolSARproSim 5.2, dữ liệu thu được từ hệ thống vệ tinh SIRC/X-SAR và dữ liệu thu được từ thiết bị bay không người lái (UAV-SAR).

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

Mô hình khối các vật tán xạ ngẫu nhiên trên mặt đất (RVoG) [21] được đề xuất đầu tiên vào năm 1996 và được áp dụng rộng rãi để xây dựng các thuật toán cho ước lượng các tham số rừng. Trong mô hình RVoG, môi trường rừng được mô hình hóa như một tập các vật thể đồng nhất đặt trên bề mặt đất. Mô hình này định nghĩa hệ số CPI là một hàm của bốn tham số chính: (1) chiều cao rừng; (2) hệ số suy hao sóng trung bình biể thị độ sâu thâm nhập của sóng siêu cao tần qua lớp tán cây và nó được giả định là không đổi; (3) tỷ lệ biên độ tán xạ mặt đất trên tán xạ khối; và (4) pha bề mặt. Với giả định hệ số suy hao sóng là một hằng số không đổi, cũng như bỏ qua các yếu tố về độ dốc của địa hình. Vì vậy, khi ước lượng độ cao rừng thường gây ra sai số đáng kể, đặc biệt là khi áp dụng với các khu vực rừng trên địa hình đồi núi.

Hiện nay, đã có nhiều nghiên cứu được đề xuất nhằm khắc phục những nhược điểm của mô hình RVoG và đã đạt hiệu quả nhất định giúp nâng cao độ chính xác cho ước lượng các tham số rừng [58-60]. Trong đó, mô hình S-RVoG [58] và mô hình R-RVoG [59] là hai nghiên cứu mang lại hiệu quả tốt khi ước lượng chiều cao rừng trên các địa hình phức tạp. Nhìn chung, hai mô hình này có cách xây dựng khá tương đồng và đều giả định hệ số suy hao sóng là hằng số. Đồng thời, các mô hình này luôn giả định rằng kênh phân cực HV là kênh chỉ có sự đóng góp duy nhất của thành phần tán xạ khối. Đây cũng là các nguyên nhân làm cho hiệu quả của các tham số rừng ước lượng bởi các mô hình này chưa cao.

Để khắc phục nhược điểm của mô hình trên [58, 59] và nâng cao hiệu quả cho ước lượng độ cao rừng, chúng tôi đề xuất mô hình S-RVoG cải tiến với hệ số suy hao sóng thay đổi cho ước lượng độ cao rừng trên địa hình đồi núi.

Môi trường rừng thực tế là một vùng hỗn hợp của nhiều chủng loại cây, có mật độ phân bố khác nhau, có cấu trúc phức tạp và thường được phân bố trên các địa hình với độ dốc nhất định. Do vậy khi sóng ra đa tương tác với môi trường rừng thì hầu như các kênh phân cực sóng (HH, VV, HV...) luôn bị ảnh hưởng rất lớn bởi nhiều tham số như tần số tín hiệu, mật độ cây, chủng loại cây [72-74]... Ngoài ra, các thành phần tán xạ trực tiếp từ mặt đất và tán xạ trực tiếp từ tán cây, cũng như các hệ số tán xạ ngược cũng bị thay đổi rất lớn khi địa hình thay đổi độ dốc cũng như sự phân bố không đồng đều các vật thể tán xạ theo phương đứng. Từ đây, có thể thấy rằng độ dốc địa hình và cấu trúc đứng của rừng là những yếu tố có vai trò thiết yếu quyết định đến độ chính xác của việc khôi phục tham số rừng. Do đó, việc xây dựng mô hình tán xạ phản ánh đúng quá trình tán xạ sóng trong môi trường rừng thực tế là một trong những nhiệm vụ rất quan trọng nhằm nâng cao độ chính xác của các tham số rừng ước lượng.

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 biểu diễn quá trình tán xạ sóng trong mô hình đề xuất.



Hình 3.1: Sơ đồ biểu diễn sự tán xạ của mô hình S-RVoG cải tiến trên địa hình dốc.

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 α ngẫu nhiên. Theo đó, hệ số suy hao sóng σ được giả định là thay đổi tuyến tính theo phương đứng z với một hệ số α và được xác định như (3.1).

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

Với $\alpha > 0$ và $0 < z < h_v$, thay giá trị σ từ (3.1) vào phương trình (1.35) 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, η 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.

So sánh biểu thức (3.2) với biểu thức (1.35) trong việc xác định hệ số CPI của hai mô hình. Khi đó, có thể nhận thấy sự khác biệt duy nhất là hệ số suy hao sóng được xác định thay đổi theo độ cao rừng và đây là một đề xuất mới trong mô hình S-RVoG cải tiến. Trong đó, hệ số CPI cho thành phần tán xạ từ tán cây là một hàm có dạng phân bố Gaussian. Giả định này không chỉ phản ánh quá trình tán xạ sóng trong môi trường rừng có cấu trúc phức tạp mà còn khắc phục hạn chế của mô hình RVoG [21] và mô hình S-RVoG [58].

3.1.1. Ước lượng pha bề mặt

Pha bề mặt được ước lượng dựa trên phương pháp TLS như trong thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39]. Ý tưởng của thuật toán TLS là sử dụng hai góc pha ψ_1 và ψ_2 giả định chạy trên đường tròn đơn vị để vẽ ra các đường thẳng giả định trong đường tròn. Sau đó, áp dụng thuật toán tổng bình phương tối thiểu để xác định khoảng cách từ đường thẳng giả định đến các hệ số CPI nhằm chọn ra một đường thẳng phù hợp nhất. Đường thẳng được chọn có tổng trung bình bình phương đến các hệ số CPI của các kênh phân cực là nhỏ nhất và được thể hiện như Hình 1.8. Một trong hai điểm đó được xác định là pha bề mặt ϕ_0 , điểm còn lại là pha ϕ_1 .

3.1.2. Xác định hệ số CPI tối ưu dựa trên dấu hiệu phân cực

Các biểu đồ giao thoa phân cực trong hệ thống PolInSAR có thể được xây dựng từ các kênh phân cực tuyến tính hoặc từ sự kết hợp nào đó giữa các kênh phân cực ellip [75]. Tất cả các kênh phân cực ellip có thể được tạo ra bằng cách áp dụng sự thay đổi của cơ sở phân cực để biến đổi véc-tơ tán xạ. Sự biến đổi tương ứng của véc-tơ phân cực $\overrightarrow{\mathbf{k}_l}$ từ điểm tán xạ trong hệ tọa



Hình 3.2: Biểu diễn hình học của các hệ số CPI của mô hình S-RVoG cải tiến. độ cơ sở được biểu diễn trong công thức (3.3).

$$\overrightarrow{\mathbf{k}'_l} = \mathbf{U}_3 \, \overrightarrow{\mathbf{k}_l} \tag{3.3}$$

Khi đó ma trận chuyển đổi hệ tọa độ \mathbf{U}_3 được xác định như sau:

$$\mathbf{U}_{3} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a+b-jcd & \sqrt{2}(c+jad) & b-a+jcd \\ jd-cb & \sqrt{2}ab & d-a-jcb \\ jd+cb & \sqrt{2}(-c+jad) & b+a+jcd \end{bmatrix}$$
(3.4)

Trong đó $a = \cos(2\psi)$, $b = \cos(2\chi)$, $c = \sin(2\psi)$ và $d = \sin(2\chi)$, hai tham số góc (χ, ψ) lần lượt là góc định hướng và góc ellip. Dựa trên lý thuyết tán xạ sóng điện từ, tiến hành xây dựng một thuật toán tối ưu cho xác định pha trung tâm của thành phần tán xạ của tán cây. Với mỗi giá trị của ψ trong khoảng $(0 \div \pi)$ và mỗi giá trị của χ trong dải $\left(\frac{-\pi}{4} \div \frac{\pi}{4}\right)$ hoàn toàn có thể xác định được ma trận hiệp phương sai và ma trận hiệp phương sai giao thoa phức cho hệ thống PolInSAR trong hệ tọa độ (χ, ψ) như trong biểu thức (3.5) [75].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} \end{bmatrix}_{(\chi,\psi)} = \langle \mathbf{U}_3 \, \mathbf{C}_{11} \, \mathbf{U}_3^{*T} \rangle$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix}_{(\chi,\psi)} = \langle \mathbf{U}_3 \, \mathbf{C}_{22} \, \mathbf{U}_3^{*T} \rangle$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{12} \end{bmatrix}_{(\chi,\psi)} = \langle \mathbf{U}_3 \, \mathbf{C}_{12} \, \mathbf{U}_3^{*T} \rangle$$

$$(3.5)$$

Có thể thấy rằng thuật toán tối ưu toàn cục được thực hiện tìm kiếm trực tiếp trong không gian (χ, ψ) đối với giá trị cực đại của dấu hiệu phân cực. Trong thuật toán này, vị trí cực đại được xác định đối với từng điểm ảnh, góc định hướng và góc ellip (χ, ψ) tương ứng với các giá trị cực đại của dấu hiệu phân cực được trích xuất để tính toán ma trận giao thoa và pha giao thoa. Khi đó hệ số CPI trong hệ tọa độ (χ, ψ) được xác định như sau:

$$\tilde{\gamma} = [\gamma]_{(\chi,\psi)} = [\mathbf{C}_{12}]_{(\chi,\psi)} . / \sqrt{[\mathbf{C}_{11}]_{(\chi,\psi)} [\mathbf{C}_{22}]_{(\chi,\psi)}}$$
(3.6)

Ứng với mỗi giá trị (χ, ψ) có thể nhận được một hệ số CPI như trong (3.6) và giá trị CPI tối ưu $\tilde{\gamma}_{opt}$ phải thỏa mãn điều kiện (3.7).

$$\begin{cases} \phi_{HV} \leqslant \phi_c \leqslant \phi_1 \\ |\phi_c - \phi_{HV}|_{\max} \end{cases}$$
(3.7)

Trong đó $\phi_c = \arg(\tilde{\gamma}_{opt})$ là tương ứng với pha của thành phần tán xạ khối thuần túy và ϕ_{HV} là pha của thành phần tán xạ kênh HV. ϕ_1 là pha tương ứng với điểm pha cao nhất cắt đường tròn đơn vị được chỉ ra trên Hình 3.2.

3.1.3. Ước lượng các tham số rừng

Đầu tiên, xây dựng một bảng tra cứu ba chiều của hệ số CPI cho thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây $\tilde{\gamma}_{0v}$ theo phương trình (3.2), với ba tham số độ cao rừng h_v , góc nghiêng địa hình η và tham số α của hệ số suy hao sóng σ . Sau đó, để ước lượng độ cao rừng tại mỗi điểm ảnh, thực hiện so sánh hệ



Hình 3.3: Lưu đồ thuật toán của mô hình S-RVoG cải tiến.

số CPI tối ưu $\tilde{\gamma}_{opt}$ với giá trị $\tilde{\gamma}_v$ trong bảng LUT, sao cho $|\tilde{\gamma}_{opt} - \tilde{\gamma}_v|$ cực tiểu. Thông qua đó, xác định được độ cao rừng, góc nghiêng địa hình, hệ số suy hao sóng và pha bề mặt được xác định dựa trên mô hình S-RVoG cải tiến là $\phi' = \phi_0 - \eta$. Thứ tự các bước thực hiện của thuật toán ước lượng tham số rừng dựa trên mô hình đề xuất được trình bày tóm tắt trên Hình 3.3.

3.1.4. Kết quả ước lượng các tham số rừng dựa trên mô hình S-RVoG cải tiến

Trong phần này, hiệu quả của mô hình đề xuất được đánh giá thông qua hai dữ liệu PolInSAR, dữ liệu mô phỏng được tạo ra từ phần mềm mô phỏng PolSARProSim [70] và dữ liệu thực nghiệm nhận được từ hệ thống UAV- SAR. 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.

Đầu tiên, phầm mềm PolSARProSim sẽ được sử dụng để ra dữ liệu mô phỏng với độ dốc địa hình là 16,7°. Các tham số còn lại không thay đổi và được mô tả chi tiết trong Bảng 2.1. Hình 3.4 mô tả hình ảnh màu Pauli của khu vực khảo sát rừng với kích thước (191 x 231) điểm ảnh. Hiệu quả của mô hình đề xuất được đánh giá bằng cách so sánh kết quả của mô hình đề xuất với mô hình S-RVoG [58].



Hình 3.4: Ánh màu Pauli của khu vực rừng khảo sát.

Hình 3.5 (b) là biểu đồ 2D minh họa chiều cao rừng ước lượng bởi mô hình S-RVoG. Kết quả trong hình này cho thấy chiều cao rừng thường dao động mạnh từ 18 (m) đến 25 (m) và có nhiều điểm ảnh thể hiện chiều cao cây ước lượng được vượt ngưỡng 20 (m). Trong khi đó, toàn bộ khu rừng khảo sát được ước lượng bởi mô hình đề xuất được thể hiện trong Hình 3.5 (a) cho



Hình 3.5: Độ cao rừng ước lượng trên toàn bộ khu vực rừng quan sát: (a) mô hình đề xuất, (b) mô hình S-RVoG [58].

thấy chiều cao cây rừng hầu hết tập trung ở độ cao xấp xỉ 20 (m). Các điểm ảnh đạt được ở độ cao 20 (m) có mật độ cao hơn so với mô hình S-RVoG. Ngoài ra khi so sánh kết quả ở Hình 3.5 cũng cho thấy sự tương đồng về chiều cao rừng ước lượng bởi hai mô hình. Điều này đồng nghĩa với hiệu quả và độ chính xác của cả hai mô hình là rất đáng tin cậy.

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 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 pha bề mặt và hệ số suy hao sóng

Các tham số	Giá trị thực của dữ liệu mô phỏng	Mô hình S-RVoG [58]	Mô hình đề xuất
$ar{h}_v(m)$	20	21,29	19,36
$\phi_{0}\left(rad ight)$	0,062	0,16	0,10
$\alpha \left(dB/m^2 \right)$	_	_	0,0039
$\sigma\left(dB/m\right)$	0,14	0,25	0,19
η	$16, 7^{o}$	_	$16, 2^{o}$
$\begin{tabular}{c} RMSE (m) \\ \hline \end{tabular}$	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.

trung bình được ước tính bởi mô hình S-RVoG cải tiến là chính xác hơn so với mô hình S-RVoG. Đặc biệt, hệ số α được sử dụng để xác định hệ số suy hao sóng tuyến tính và tham số độ dốc địa hình ước lượng η được trình bày trong Bảng 3.1 đã làm tăng độ tin cậy và chính xác của mô hình đề xuất. Trong mô hình S-RVoG [58] sử dụng thuật toán nghịch chuyển ba giai đoạn [39] để ước lượng tham số rừng và giả định hệ số suy hao sóng là một hằng số, vì vậy không thể trích xuất hai tham số này trong phần kết quả.

Tiếp theo, để phân tích ảnh hưởng của độ dốc địa hình đến kết quả ước lượng độ cao rừng, luận án sử dụng phần mềm PolSARProSim để tạo ra 10 dữ liệu với các độ dốc địa hình khác nhau. Các dữ liệu mô phỏng chỉ thay đổi độ dốc địa hình các tham số còn lại được giữ nguyên như trong Bảng 2.1.

Độ dốc địa hình	Độ cao rừng thực tế từ dữ liệu mô phỏng (m)	Mô hình S-RVoG cải tiến (m)	RMSE (m)
00	20	19,46	1,9
$5,7^{o}$	20	19,30	1,92
11,3°	20	19,32	1,97
$16, 7^{o}$	20	19,36	2,0
$21, 8^{o}$	20	20,98	2,45
$26, 6^{o}$	20	21,86	2,69
$29,9^{o}$	20	22,96	3,54
$34,9^{o}$	20	23,43	4,27
$38,6^{o}$	20	24,88	6,52
41,9°	20	26,27	8,65

Bảng 3.2: Kết quả mô phỏng của mô hình S-RVoG cải tiến.

Các thí nghiệm được thực hiện với 10 độ dốc khác nhau từ 0° (0%) đến $41, 9^{\circ}$ (90%). Theo lý thuyết tán xạ sóng siêu cao tần thì hầu hết các kênh phân cực (HH, HV và VV ...) đều chịu tác động bởi độ dốc địa hình. Độ dốc địa hình thay đổi làm cho quá trình tán xạ sóng trong môi trường rừng cũng thay đổi và dẫn đến hệ số tương can giao thoa của các kênh phân cực sẽ có sự biến thiên nhất định [31, 32]. Ngoài ra, khi độ dốc địa hình tăng lên làm cho quá trình xác định điểm tán xạ bề mặt và tán xạ khối có dao động lớn.

Đặc biệt khi độ dốc địa hình lớn hơn $26, 6^{\circ}$ thì kết quả trong Bảng 3.2 cho thấy là thường ước lượng vượt mức độ cao rừng thực tế và có sai số lớn.

Bảng 3.2 thể hiện kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi mô hình đề xuất trên các độ dốc khác nhau. Kết quả trong Bảng 3.2 cho thấy với các độ dốc địa hình từ 0^{o} đến 26, 6^{o} thì chiều cao rừng trung bình ước lượng được có độ chính xác cao với sai số nhỏ. Khi độ dốc tăng lên với các giá trị lớn hơn 26, 6^{o} thì kết quả ước lượng chiều cao rừng của phương pháp đề xuất cũng tăng lên đáng kể. Đồng thời, chỉ số RMSE cũng tăng mạnh khi độ dốc địa hình lớn hơn 26, 6^{o} . Đặc biệt, với độ dốc địa hình là 41, 9^{o} cho thấy kết quả chiều cao rừng của mô hình đề xuất đạt giá trị vượt ngưỡng là 26,27 (m) và chỉ số RMSE là 8,65 (m). Từ kết quả trên có thể kết luận rằng, mô hình đề xuất cho thấy độ chính xác cao khi áp dụng tính toán với các địa hình rừng có độ dốc nhỏ hơn 26, 6^{o} . Ngoài ra, với các khu vực rừng có độ dốc lớn khoảng 30^{o} trở lên thì mô hình đề xuất không còn đáng tin cậy và thường gây ra sai số lớn cho ước lượng chiều cao rừng.

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. Ra-đa hoạt động tại băng tần L, góc tới từ 21° đến 65° và đường cơ sở từ 0 (m) đến 160 (m). 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.

Khu vực nghiên cứu là địa hình đồi núi với các độ dốc khác nhau, có tài nguyên rừng phong phú gồm các chủng loại và độ cao cây khác nhau. Để ước



Hình 3.6: Hình ảnh của khu vực rừng nghiên cứu: (a) ảnh quang học từ Google Earth,(b) ảnh LiDAR.

lượng chính xác chiều cao rừng của khu vực nghiên cứu, dự án đã công bố số liệu đo LiDAR tương ứng với từng lâm phần. Số liệu đo LiDAR sẽ được sử dụng làm tham chiếu để đánh giá độ chính xác của phương pháp đề xuất. Dữ liệu LiDAR được tải xuống từ Distributed Active Archive Center For Biogeochemical Dynamics (ORNL DACC) được biểu diễn tương ứng trong Hình 3.6 (b).

LiDAR (Light Detection And Ranging - LiDAR) là thuật ngữ để chỉ một công nghệ viễn thám mới, chủ động, sử dụng các loại tia laser để khảo sát đối tượng từ xa. Dữ liệu thu được của hệ thống là tập hợp đám mây điểm phản xạ ba chiều của tia laser từ đối tượng được khảo sát. Công nghệ này cũng mới được áp dụng phổ biến, nó cho phép đo đạc độ cao chi tiết địa hình một cách chính xác và nhanh chóng. Trong lĩnh vực lâm nghiệp, công nghệ LiDAR chủ yếu được sử dụng để đánh giá, thống kê, phân tích điều kiện sống hoang dã, tương quan của các yếu tố như tán, độ dày tán, dạng lá,... hay sản lượng gỗ rừng; ước tính sinh khối, trữ lượng gỗ và các tham số lâm nghiệp khác.

Hình 3.6 (a) cho thấy hình ảnh quang học của công viên Lope, Gabon từ Google Earth. 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. Các vùng khảo sát đã được đặt vào ảnh quang học từ Google earth và khí hiệu là KV1 và KV2, mỗi khu vực này có kích thước (500x500) điểm ảnh.



Hình 3.7: Khu vực KV1: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi mô hình đề xuất,
(b) hiệu quả của mô hình đề xuất và dữ liệu LiDAR.

Kết quả ước lượng tham số rừng dựa trên mô hình S-RVoG cải tiến trên hai khu vực rừng nghiên cứu (KV1, KV2) được thể hiện trong Bảng 3.3 và Hình 3.7 (a), 3.8 (a). Ngoài ra, Hình 3.7 (b), 3.8 (b) cho thấy sự so sánh giữa chiều cao rừng trung bình được ước lượng bởi mô hình đề xuất và giá trị này ở các khu vực tương ứng được trích xuất từ dữ liệu LiDAR. Theo đó, mỗi khu vực nghiên cứu (KV1, KV2) sẽ được chia thành 50 vùng nhỏ bằng nhau


Hình 3.8: Khu vực KV2: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi mô hình đề xuất,
(b) hiệu quả của mô hình đề xuất và dữ liệu LiDAR.

để phân tích, đánh giá và so sánh với chiều cao rừng tại khu vực tương ứng của dữ liệu LiDAR.

		Các tham số rừng được ước lượng			
Khu vực rừng	Độ cao rừng từ	bởi mô hình đề xuất			
nghiên cứu	dữ liệu LiDAR (m)	Độ cao rừng	Độ dốc	Hệ số suy hao	
		trung bình (m)	địa hình	sóng (dB/m)	
KV 1	27,6	26,2	$10, 6^{o}$	$0,\!154$	
KV 2	31,2	29,1	$16, 2^{o}$	0,206	

Bảng 3.3: Hiệu quả của mô hình đề xuất so với giá trị từ dữ liệu LiDAR.

Trong đó, khu vực nghiên cứu KV1 cho kết quả chiều cao rừng thường dao động tập trung ở độ cao khoảng 30 (m). Tương ứng với giá trị R^2 thu được trong Hình 3.7 (b) là 0,812 và giá trị RMSE là 3,38 (m). Cụ thể hơn, trong Bảng 3.3 cho thấy chiều cao cây trung bình được ước lượng bởi mô hình đề xuất là 26,2 (m) và so với giá trị từ dữ liệu 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 sai số bình phương trung bình căn bậc hai có giá trị là 4,06 và giá trị R^2 thu được trong Hình 3.8 (b) là 0,862. Bảng 3.3 cho thấy độ dốc địa hình trung bình của KV2 được trích xuất bởi mô hình đề 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.

3.2. Phương pháp nghịch chuyển tham số rừng dựa trên lý thuyết tập kết hợp trung bình từ ảnh PolInSAR (FIM)

3.2.1. Ước lượng pha bề mặt dựa trên phương pháp tổng bình phương tối thiểu thích nghi (ATLS)

Dế khắc phục các nhược điểm của phương pháp TLS và LS nhằm nâng cao hiệu quả cho ước lượng pha bề mặt. Trong phần này, chúng tôi đề xuất một phương pháp tổng bình phương tối thiểu thích nghi (Adaptive Total Least Square - ATLS) cho xác định đường thẳng kết hợp và pha bề mặt. Phương pháp ATLS được đề xuất sử dụng ba hệ số CPI thu được từ ma trận rút gọn Π trong (2.3). Giả sử rằng ma trận Π có ba trị riêng là λ_1 , λ_2 và λ_3 [76]. Theo lý thuyết tập kết hợp trung bình thì ba trị riêng của ma trận Π xấp xỉ với hệ số CPI của ba thành phần tán xạ từ tán cây ($\tilde{\gamma}_3 \approx \lambda_3$), thân câymặt đất ($\tilde{\gamma}_2 \approx \lambda_2$) và mặt đất ($\tilde{\gamma}_1 \approx \lambda_1$) trong môi trường rừng. Để đảm bảo tính tổng quát [15], giả định rằng mối quan hệ tuyến tính giữa phần thực và phần ảo của hệ số CPI được biểu diễn qua một đường thẳng như sau.

$$y = Mx + C \tag{3.8}$$

Nhược điểm chính của việc sử dụng phương trình (3.8) để biểu diễn một đường thẳng kết hợp là không thể biểu diễn một đường thẳng đứng. Để khắc phục nhược điểm này, có thể sử dụng dạng chuẩn hóa của đường thẳng theo phương trình (3.9).

$$l = \langle r, \phi \rangle \tag{3.9}$$

Trong đó r và ϕ là độ dài và góc của đường chuẩn hóa. Áp dụng công thức (3.9), phương trình đường thẳng kết hợp có thể được biểu diễn như sau:



 $y = -\cot(\phi) x + \frac{r}{\sin\phi}$ (3.10)

Hình 3.9: Khoảng cách trực giao d_i .

Hình 3.9 cho thấy khoảng cách ngắn nhất từ một điểm nhất định $(Z_i(x_i; y_i))$ đến đường thẳng kết hợp $l = \langle r, \phi \rangle$ là $d_{\perp} = (Z_i, l)$ và được biểu thị bởi d_i .

$$d_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2 \phi}} \cdot \left(y_i + \cot \phi \, x_i - \frac{r}{\sin \phi} \right) \tag{3.11}$$

Trong bài toán tổng bình phương tối thiểu chỉ ra rằng hàm tối thiểu $\left(\chi^2 = \sum_{i=1}^N d_i^2\right)$ được sử dụng để điều chỉnh đường thẳng kết hợp. Tuy nhiên, hiệu suất của phương pháp TLS phụ thuộc nhiều vào số lượng kênh phân cực được sử dụng.

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

$$\chi^{2}(a,\phi) = \sum_{i=1}^{3} d_{i}^{2} = \sum_{i=1}^{3} \frac{a \cot^{2}(\phi) + 1}{\cot^{2}(\phi) + 1} \left(y_{i} + \cot(\phi) \ x_{i} - \frac{r}{\sin(\phi)} \right)^{2}$$
(3.12)

Có thể thấy rằng khi a = 0 thì phương trình (3.12) sẽ tương ứng với bài toán TLS và ngược lại khi a = 1 thì phương trình này sẽ tương ứng với bài toán LS. Do đó, phương trình (3.12) cho thấy phương pháp ALTS là dạng tổng quát cho hai phương pháp TLS và LS. Mặt khác, theo Leonando và cộng sự [33] thì độ dài của đường chuẩn hóa được biểu thị theo độ nghiêng như phương trình (3.13).

$$r = \bar{x}\,\cos\phi + \bar{y}\,\sin\phi \tag{3.13}$$

Trong đó $\bar{x} = \sum_{i=1}^{3} \frac{\operatorname{Re}(\tilde{\gamma}_i)}{3}$; $\bar{y} = \sum_{i=1}^{3} \frac{\operatorname{Im}(\tilde{\gamma}_i)}{3}$, và phương trình (3.12) có thể được biểu diễn lại như sau:

$$\chi^{2}(a,\phi) = \sum_{i=1}^{3} \frac{a \cot^{2}(\phi) + 1}{\cot^{2}(\phi) + 1} (y_{i} + x_{i} \cot^{2}(\phi) - (\bar{x} \tan(\phi) + \bar{y}))^{2} \quad (3.14)$$

Tiếp theo, một phương pháp tìm kiếm toàn diện được đề xuất đế cải thiện độ chính xác của ước lượng đường thẳng kết hợp cũng như ước lượng pha bề mặt. Theo đó, các tham số đầu vào của phương pháp tìm kiếm toàn diện cho hai tham số (a, ϕ) trong khoảng $a \in [0, 1]$ và $\phi \in (0, \pi)$. Sau đó, thực hiện xác định cặp giá trị tối ưu (a, ϕ) , chúng được coi là đáng tin cậy hơn cho đường thẳng kết hợp. Khi đó, cặp giá trị tối ưu (a_{opt}, ϕ_{opt}) được xác định thỏa mãn điều kiện (3.15).



$$\min_{\{a,\phi\}} \left\| \chi^2\left(a,\phi\right) \right\| \tag{3.15}$$

Hình 3.10: 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 (3.16).

$$y = \hat{M}_{opt} x + \hat{C}_{opt}$$
(3.16)
Trong đó
$$\begin{cases} \hat{M}_{opt} = -\frac{\cos \phi_{opt}}{\sin \phi_{opt}} \\ \hat{C}_{opt} = -\frac{\hat{r}_{opt}}{\sin \phi_{opt}} \\ \hat{r}_{opt} = \bar{x} \cos \phi_{opt} + \bar{y} \sin \phi_{opt} \end{cases}$$

Đường thẳng kết hợp trong phương trình (3.16) cắt đường tròn đơn vị tại hai điểm, một trong hai điểm được xác định là pha bề mặt. Sau đó, pha bề

mặt được xác định theo công thức (3.17).

$$\phi_0 = \arg(x_0 + j y_0) \tag{3.17}$$

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

Trong các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng trước đây, hệ số CPI của kênh HV thường được giả định rằng chỉ có duy nhất sự đóng góp của thành phần tán xạ khối mà không có sự đóng góp của bất kỳ thành phần tán xạ nào khác [27, 53, 57]. Trong thực tế, hệ số CPI của kênh HV không chỉ bị ảnh hưởng bởi thành phần tán xạ mặt đất mà còn là hỗn hợp của các cơ chế tán xạ khác như: tán xạ từ thân cây, tán xạ nhị diện. Điều đó có nghĩa là pha trung tâm ϕ_{HV} không phải là pha trên cùng của các thành phần tán xạ quan sát được [77-78]. Do đó, giả định của các phương pháp này sẽ gây ra sai số lớn trong việc ước lượng độ cao số rừng. Đế nâng cao độ chính xác cho ước lượng độ cao rừng, một số phương pháp tối ưu hệ số CPI đã được giới thiệu nhằm xác định hệ số CPI cho thành phần tán xạ từ tán cây mà chỉ chứa duy nhất thành phần tán xạ khối [55-57]. Tuy nhiên, do còn sử dụng nhiều giả định cũng như việc cố gắng tìm kiếm một hệ số CPI chỉ có duy nhất thành phần tán xạ khối mà không tồn tại thành phần tán xạ nào khác cho ước lượng tham số rừng là rất khó thực hiện. Vì vậy, hiệu quả ước lượng của các phương pháp này đạt được chưa cao.

Để khắc phục những hạn chế của các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng trước đây [27, 53, 57]. Phương pháp FIM đề xuất sử dụng thuật toán tìm kiếm vét cạn dựa trên lý thuyết tập kết hợp và dấu hiệu phân cực để xác định hệ số CPI tốt nhất, mà nó có thể biểu diễn đặc tính của thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây. Trong đó, tất cả các pha giao thoa sẽ được tìm kiếm bằng cách xác định véc-tơ nguyên trị phức có thể có $\overrightarrow{\omega}$. Khi đó, ma trận rút gọn trong hệ thống phân cực elip được biểu diễn như sau [35]:

$$\mathbf{\Pi}' = \mathbf{W} \cdot \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{W}^{*T}; \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_1 & \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_2 & \overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}_3 \end{bmatrix}^{*T}$$
(3.18)

Trong đó

$$\begin{cases} \vec{\nu}_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\chi + \cos 2\tau - j \sin 2\chi \sin 2\tau & -\sin 2\tau \sin 2\chi + j \sin 2\chi \\ \sin 2\tau \cos 2\chi + j \sin 2\chi \end{bmatrix}^T \\ \vec{\nu}_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \sin 2\tau + j \cos 2\chi \sin 2\tau & j \cos 2\tau \cos 2\chi \\ -\sin 2\tau + j \cos 2\chi \sin 2\tau \end{bmatrix}^T \\ \vec{\nu}_3 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\tau - \cos 2\chi + j \sin 2\chi \sin 2\tau & \sin 2\tau - \cos 2\chi - j \cos 2\tau \sin 2\chi \\ \cos 2\tau + \cos 2\chi + j \sin 2\chi \sin 2\tau \end{bmatrix}^T \\ \end{cases}$$

Trong đó $\overrightarrow{\boldsymbol{\nu}}' = \frac{W\sqrt{T}W^{*T}\cdot\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T}\cdot W\sqrt{T}W^{*T}\cdot\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}}$. Tương ứng với mỗi cặp giá trị (χ, τ) chạy trong khoảng $[-\pi/4 \div \pi/4]$, thực hiện phân tích trên các giá trị riêng và hiệu riêng cho ma trận $\mathbf{\Pi}'(\chi_k, \tau_k)$. Sau đó, véc-tơ đơn nhất phức có thể được xác định như (3.20).

$$\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_{j}^{k} = T^{1/2} \cdot \mathbf{V}_{j}^{k} \quad ; \quad j = 1, \ 2, \ 3 \tag{3.20}$$

Trong đó \mathbf{V}_{j}^{k} là véc-tơ trị riêng của ma trận $\mathbf{\Pi}'(\chi_{k}, \tau_{k})$ và có thể thấy rằng pha kết hợp của tất cả các trạng thái phân cực là một hàm của hai biến phân cực (χ, τ) . Theo lý thuyết tán xạ sóng điện từ [31, 32], các thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây thường có pha giao thoa kết hợp lớn nhất và hệ số CPI của nó nằm trên đường thẳng kết hợp. Phương pháp này đề xuất hai điều kiện ràng buộc để cải thiện độ chính xác cho ước lượng hệ số CPI. Đầu tiên, thuật toán được đề xuất sẽ tìm kiếm các cặp giá trị (χ, τ) thỏa mãn các điều kiện sau:

$$\phi_1 > \arg\left(\left[\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_j^k\left(\chi_k, \tau_k\right)\right]^{*T} \cdot \boldsymbol{\Omega} \ \overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}_j^k\left(\chi_k, \tau_k\right)\right) > \arg\left(\widetilde{\gamma}_{HV}\right) \qquad (3.21)$$

Trong đó $\phi_1 = e^{j\phi_1}$ là giao điểm còn lại của đường kết hợp với đường tròn đơn vị (Hình 3.10). Giả sử rằng có Mcặp giá trị (χ, τ) thỏa mãn điều kiện (3.21). Sau đó, tập hợp M các hệ số CPI sẽ được xác định là phương trình (3.22).

$$\tilde{\gamma}\left(\chi_{l},\,\tau_{l}\right) = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T}\left(\chi_{l},\,\tau_{l}\right)\cdot\boldsymbol{\Omega}\cdot\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\left(\chi_{l},\,\tau_{l}\right)}{\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}^{*T}\left(\chi_{l},\,\tau_{l}\right)\cdot\mathbf{T}\cdot\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\left(\chi_{l},\,\tau_{l}\right)};\qquad l=1\div M \qquad(3.22)$$

Theo lý thuyết tập kết hợp [35] của ra-đa tổng hợp mặt mở giao thoa phân cực thì một cặp hệ số CPI tối ưu nhất trên đường thẳng kết hợp trong mặt phẳng phức. Khi đó, một cặp hệ số CPI tối ưu nhất (χ_{opt}, τ_{opt}) được xác định theo điều kiện (3.23).

$$\min_{\chi_l,\tau_l} \left\| \operatorname{Im}\left(\tilde{\gamma}\left(\chi_l,\,\tau_l\right) \right) - \widehat{M}_{opt} \operatorname{Re}\left(\tilde{\gamma}\left(\chi_l,\,\tau_l\right) \right) - \widehat{C}_{opt} \right\| \, ; \, \, l = 1 \div M \quad (3.23)$$

Trong đó \hat{M}_{opt} và \hat{C}_{opt} là các hệ số của đường thẳng kết hợp, chúng được xác định trong phương trình (3.16). Từ phương trình (3.23), hệ số CPI tối ưu được xác định và ký hiệu là $\tilde{\gamma}_{opt}$. Các thuật toán tối ưu vùng kết hợp trước đây thường giả định rằng $\tilde{\gamma}_{opt}$ là một hệ số CPI chỉ có duy nhất thành phần tán xạ từ tán cây mà không có sự đóng góp của bất kỳ thành phần tán xạ nào khác. Tuy nhiên, trong môi trường rừng thực tế thì các kênh phân cực luôn là một giá trị hỗn hợp của nhiều thành phần tán xạ khác nhau. Do đó, giả định này thường gây ra sai số trong ước tính chiều cao rừng, đặc biệt là ở những khu vực rừng ở địa hình đồi núi có cấu trúc phức tạp.

Để khắc phục những tồn tại trên, một phương pháp lặp tối ưu được đề xuất nhằm nâng cao độ chính xác của việc ước lượng các tham số rừng trên

	Bắt đầu
1.	Cố định $h_v = h_{v-3stage}$, thay đổi $L\left(\overrightarrow{\omega}\right) \in \{0, 0.1,1\}$; $\alpha \in \{0, 0.0014,1/h_{v-3stage}\}$. Ước lượng hệ số CPI $\widetilde{\gamma}_{est} = e^{j\phi_0} \left(\widetilde{\gamma}_v \left(h_v, \alpha_i\right) - L_i\left(\omega\right) \left(1 - \widetilde{\gamma}_v \left(h_v, \alpha_i\right)\right)\right)$. Sau đó, tính toán $\varsigma = \widetilde{\gamma}_{opt} - \widetilde{\gamma}_{est} $ và ghi lại giá trị của $L\left(\overrightarrow{\omega}\right)$ và α tương ứng với giá trị nhỏ nhất của ς .
2.	Thay đổi h_v với bước nhảy Δh_v và lặp lại các bước trên cho đến khi $h_v \leq \frac{2\pi}{k_z}$.
3.	Lập bảng cho các giá trị $L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)$ và α tương ứng với các giá trị h_v .
4.	Lấy trung bình của tập giá trị $L(\vec{\omega})$ và α thu được ở bước 3 và ký hiệu là $\overline{L}(\vec{\omega})$ và $\overline{\alpha}$.
5.	Tính hệ số CPI cho thành phần tán xạ khối theo $\bar{L}(\vec{\boldsymbol{\omega}})$ và $\bar{\alpha}$. $\tilde{\gamma}_v(h_v, \bar{\alpha}) = \frac{e^{-j\phi_0} \tilde{\gamma}_{opt} - \bar{L}(\vec{\boldsymbol{\omega}})}{1 - \bar{L}(\vec{\boldsymbol{\omega}})}$
6.	$ \frac{e^{-j\phi_0} \tilde{\gamma}_{opt} - \bar{L}(\vec{\omega})}{1 - \bar{L}(\vec{\omega})} = e^{\frac{-\cos\theta k_z^2}{8\bar{\alpha}} + jk_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{jk_z}{2}\sqrt{\frac{\cos\theta}{2\bar{\alpha}}}\right)}{erf\left(\sqrt{\frac{2\bar{\alpha}}{\cos\theta}} \cdot h_v\right)} $
	Lặp lại cho từng điểm ảnh
	Kết thúc

Bảng 3.4: Thuật toán lặp tối ưu cho ước lượng độ cao rừng.

các khu vực rừng có cấu trúc phức tạp. 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 sau:

$$\tilde{\gamma}_{est}\left(h_{v},\,\alpha,\,L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\right) = e^{j\phi_{0}}\left(\tilde{\gamma}_{v}\left(h_{v},\,\alpha\right) - \,L\left(\overrightarrow{\boldsymbol{\omega}}\right)\left(1 - \tilde{\gamma}_{v}\left(h_{v},\,\alpha\right)\right)\right) \quad (3.24)$$

Trong đó $\tilde{\gamma}_v(h_v, \alpha)$ là hệ số CPI của các thành phần tán xạ trực tiếp từ tán cây.

Trong bước tiếp theo, phương pháp FIM đề xuất thuật toán lặp tối ưu cho ước lượng độ cao rừng và được tóm tắt trong Bảng 3.4.

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

Trong phần này, phương pháp đề xuất sẽ được áp dụng tính toán với ba loại dữ liệu PolInSAR khác nhau nhằm mục đích chứng minh tính hiệu quả của các tham số rừng ước lượng. Đầu tiên, phương pháp FIM được áp dụng với dữ liệu PolInSAR mô phỏng được tạo ra từ phần mềm mô phỏng PolSARProSim [70], để đánh giá hiệu quả, độ ổn định và độ tin cậy của các kết quả. Tiếp theo, dựa trên kết quả thu được với dữ liệu mô phỏng hoàn toàn có thể tin cậy để áp dụng phương pháp FIM với dữ liệu từ vệ tinh không gian SIR-C và máy bay không người lái (UAV-SAR). Cuối cùng, từ các kết quả thu được có thế đưa ra nhện xet về hiệu quả của phương pháp đề xuất so với các phương pháp nghịch chuyển tham số rừng trước đây [27, 53, 57].

Kết quả ước lượng tham số rừng với dữ liệu mô phỏng

Mục đích của việc áp dụng phương pháp đề xuất với dữ liệu mô phỏng là để đánh giá độ chính xác và hiệu quả của phương pháp đề xuất. Các tham số của hoạt cảnh rừng mô phỏng tạo ra từ phần mềm PolSARProSim được chỉ ra trong Bảng 2.1. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được đánh giá thông qua sự so sánh với các phương pháp Xiao [27], phương pháp Tayebe-1 [57] và phương pháp Khati [53] với các dữ liệu rừng mô phỏng đã được tạo ra.

Độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp FIM trên toàn bộ khu vực rừng khảo sát được thể hiện trên Hình 3.11 (b). Hình này cho thấy độ cao rừng trung bình thường dao động xung quanh giá trị 20 (m). Từ kết quả này, ban đầu có thể thấy được tính hiệu quả và độ ổn định của phương pháp đề xuất. Tiếp theo, để tăng thêm độ tin cậy và độ chính xác của phương pháp FIM, chúng tôi thực hiện so sánh kết quả thu được từ phương pháp FIM với các



Hình 3.11: (a) ảnh màu Pauli, (b) độ cao rừng ước lượng bởi phương pháp FIM.

phương pháp Tayebe-1 [57], Khati [53] và Xiao [27], kết quả được chỉ ra trên Hình 3.12.



Hình 3.12: Kết quả chiều cao rừng ước lượng: (a) phương pháp Tayebe-1 [57], (b) phương pháp Khati [53], (c) phương pháp Xiao [27], (d) phương pháp FIM.

Hình 3.12 minh họa tần suất ước lượng chiều cao rừng của bốn phương pháp trên trong toàn bộ khu vực rừng quan sát. Hình 3.12 (d) biểu diễn kết quả của phương pháp FIM cho thấy tần xuất của chiều cao trung bình từ 18 (m) đến 20 (m) là cao hơn đáng kể so với ba phương pháp còn lại. Đồng thời, tần xuất của các độ cao rừng dưới 15 (m) và trên 23 (m) của phương pháp này là thấp nhất. Kết quả này cho thấy chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp FIM là chính xác và đáng tin cậy cao.

Các tham số	Giá trị thực từ dữ liệu mô phỏng	Phương pháp Tayebe-1 [57]	Phương pháp Khati [53]	Phương pháp Xiao [27]	Phương pháp FIM
$ar{h}_v\ (m)$	20	18,531	19,083	19,265	19,586
$\phi_{0}\left(rad ight)$	0,0982	0,1616	0,1218	$0,\!1225$	0,0918
$ar{lpha}$	_	_	_	_	0,0094
$\sigma\left(dB/m ight)$	0,1262	0,2465	0,2006	0,1919	0,1860
RMSE(m)	0	2,9566	2,4661	2,2622	$1,\!9654$
RE (%)	0	7,12	4,45	3,61	2,0

Bảng 3.5: Kết quả mô phỏng bởi bốn phương pháp.

Bảng 3.5 trình bày kết quả các tham số rừng ước lượng bởi bốn Phương pháp. Trong đó chiều cao rừng trung bình của dữ liệu mô phỏng là 20 (m). Kết quả của Bảng 3.5 cho thấy chiều cao rừng trung bình được ước lượng bởi phương pháp FIM là 19,586 (m), tương ứng với sai số tương đối là 2,0 (%). Có thể thấy rằng kết quả này có độ chính xác cao nhất trong bốn phương pháp. Đồng thời, độ cao rừng trung bình được ước lượng bởi phương pháp Khati và phương pháp Xiao là 19,083 (m) và 19,265 (m) tương ứng với các giá trị sai số tương đối là 4,45 (%) và 3,61 (%). Hai phương pháp này cũng cho thấy độ chính xác cao và ổn định trong việc xác định độ cao rừng.

Trong khi đó, kết quả độ cao rừng trung bình được ước lượng bởi phương pháp Tayebe-1 là 18,531 (m) tương ứng với sai số tương đối là 7,12 (%), kết quả độ cao rừng cũng như các tham số được ước lượng khác của phương pháp này phản ánh hiệu quả thấp hơn các phương pháp còn lại và cho sai số lớn. Bởi vì, Tayebe vẫn giả định rằng hệ số CPI tối ưu chỉ có thành phần tán xạ khối và không tồn tại thành phần tán xạ bề mặt ($\mu(\vec{\omega}) = 0$) và sử dụng phương pháp TLS để ước lượng pha đất. Do vậy, hiệu quả ước lượng các tham số rừng của phương pháp Tayebe-1 [57] chưa độ tin cậy cao và chưa phản ánh chính xác quá trình tán xạ trong môi trường rừng thực tế.

Ngoài ra, khi xem xét giá trị sai số bình phương trung bình căn bậc hai (RMSE) của bốn phương pháp thì phương pháp đề xuất vẫn đạt được hiệu quả cao nhất. Bảng 3.5 cũng cho thấy pha bề mặt và hệ số suy hao sóng trung bình được ước tính bởi phương pháp đề xuất là chính xác cao và gần với các giá trị tương ứng của hệ thống hơn so với các phương pháp trên.

Tiếp theo, luận án áp dụng cả bốn phương pháp trên các dữ liệu rừng mô phỏng có hệ số sóng đứng khác nhau. Dữ liệu rừng mô phỏng được tạo ra bằng cách thay đổi góc tới của vệ tinh, các tham số khác giữ nguyên không đổi như trong Bảng 2.1. Các thí nghiệm được tiến hành với với 12 dữ liệu có hệ số sóng đứng khác nhau, góc tới thay đổi từ 15 độ đến 70 độ (Khoảng cách góc tới của mỗi dữ liệu mô phỏng là 5 độ), tương ứng với các giá trị của hệ số sóng đứng từ 0,0217 (rad/m) đến 0,489 (rad/m). Trong tài liệu tham khảo [33] đã chỉ ra rằng hầu hết các kênh phân cực HH, HV và VV đều có liên quan tới hệ số CPI và tất cả chúng đều chịu ảnh hưởng của hệ số sóng đứng. Do đó, sự thay đổi các giá trị hệ số sóng đứng sẽ trực tiếp gây ra các sự thay đổi về độ cao rừng ước lượng.



Hình 3.13: Kết quả độ cao rừng trung bình với các hệ số sóng đứng khác nhau.

Hình 3.13 mô tả chiều cao rừng trung bình ước lượng của bốn phương pháp với các dữ liệu mô phỏng có tỷ số sóng đứng khác nhau. Trong đó chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp đề xuất (đường màu đỏ), phương pháp Xiao (đường màu xanh lục), phương pháp Khati (đường màu đen) và phương pháp Tayebe (đường màu xanh lam).

Kết quả này cho thấy chiều cao rừng trung bình ước lượng của cả bốn phương pháp trở nên ổn định và có độ chính xác cao với các dữ liệu có hệ số sóng đứng trong dải từ 0,0917 (rad/m) đến 0,226 (rad/m). Với các dữ liệu có hệ số sóng đứng nhỏ hơn 0,0917 (rad/m) cho thấy kết quả ước lượng trung bình thường cao hơn chiều cao rừng trung bình của dữ liệu mô phỏng và gây ra sai số lớn. Ngược lại, khi hệ số sóng đứng tăng lên đáng kể $(k_z = 0, 2828 (rad/m))$ làm cho sự đóng góp của các thành phần tán xạ bề mặt, nhị diện vào hệ số CPI cho thành phần tán xạ khối tăng lên [64] và chiều cao rừng bị giảm xuống. Vì vậy, kết quả ước lượng độ cao rừng trung bình của bốn phương pháp giảm mạnh và trở nên không đáng tin cậy. Từ các phân tích trên, có thể kết luận rằng hệ số sóng đứng là một tham số rất quan trọng đối với hiệu quả của phương pháp FIM và phục hồi chiều cao rừng.

Để phân tích, đánh giá ảnh hưởng của độ dốc đến kết quả của các tham số ước tính một cách đầy đủ nhất, chúng tôi đã áp dụng phương pháp đề xuất với 8 dữ liệu mô phỏng có địa hình độ dốc khác nhau. Các dữ liệu này được tạo ra bằng cách thay đổi độ dốc theo hướng cự ly của địa hình thay đổi dần từ 0° đến 38,6° (tương ứng với 0 (%) đến 80 (%)), các tham số khác được giữ nguyên như trong Bảng 2.1.

Theo lý thuyết, hầu hết các kênh phân cực HH, HV và VV có liên quan đến các hệ số CPI và chúng đều bị ảnh hưởng bởi độ dốc địa hình. Mặt khác, độ cao rừng thường tương quan với pha trung tâm của thành phần tán xạ khối. Vì vậy, các sự thay đổi của hệ số CPI tối ưu và pha trung tâm của thành phần tán xạ khối sẽ dẫn đến thay đổi độ cao rừng ước lượng. Trong phương pháp đề xuất, độ chính xác của chiều cao rừng ước lượng được cải thiện đáng kể bằng cách xác định tham số phù hợp nhất để tìm kiếm hệ số CPI cho thành phần tán xạ khối dựa trên các điều kiện tối ưu.

Kết quả trong Bảng 3.6, có thể thấy rằng các tham số rừng được ước lượng bởi phương pháp đề xuất cùng tăng khi độ dốc địa hình tăng. Đặc biệt, khi độ dốc địa hình lớn hơn 30,9° thì kết quả ước lượng các tham số rừng xuất hiện sự sai lệch đáng kể. Tuy nhiên, sai số ước lượng của phương pháp FIM là tương đối nhỏ đồng thời các tham số rừng được ước lượng bởi phương pháp

Bảng 3.6: Kết quả mô phỏng của phương pháp FIM trên các độ dốc khác nhau.

Độ dốc địa hình	Pha trung tâm của thành phần tán xạ khố i $\phi_{opt}~(rad)$	Độ lớn của hệ số TCGP tối ư u $\left \tilde{\gamma}_{opt}\right $	Độ cao rừng trung bình (m)
00	4,965	0,769	19,586
$5,7^{o}$	4,982	0,782	19,599
$11, 3^{o}$	5,298	0,806	19,623
$16, 7^{o}$	5,299	0,819	$19,\!685$
$21, 8^{o}$	5,566	0,846	19,821
$26, 6^{o}$	5,681	0,859	20,386
$30, 9^{o}$	5,788	0,861	20,571
$34,9^{o}$	6,004	0,882	20,892
38,6°	6,186	0,922	21,519

này luôn đảm bảo được độ chính xác và gần với giá trị thực của hệ thống. Các tham số rừng ước lượng bởi phương pháp đề xuất được trình bày trong Bảng 3.6 cho thấy rằng, hệ số CPI tối ưu và pha trung tâm của thành phần tán xạ khối là các tham số chính quyết định đến độ chính xác của chiều cao rừng của thuật toán được áp dụng.

Kết quả ước lượng tham số rừng với dữ liệu thực nghiệm từ hệ thống vệ tinh SIR-C

Từ các kết quả tích cực của phương pháp đề xuất khi áp dụng với các dữ

liệu mô phỏng. Trong phần này, phương pháp FIM sẽ được áp dụng với tập dữ liệu thực nghiệm này bao gồm một cặp hình ảnh phức chụp bởi hệ thống SIR-C/X-SAR vào ngày 7 và ngày 9 tháng 10 năm 1994. Hệ thống SIRC/X-SAR hoạt động ở độ cao 225 (km) với góc tới 24.569° và đường cơ sở 413,8 (m). Khu vực rừng nghiên cứu có kích thước 495 điểm ảnh theo hướng phạm vi và 495 điểm ảnh theo hướng phương vị và được giới hạn bởi hình chữ nhật màu đỏ trong Hình 3.14.



Hình 3.14: Hình ảnh khu vực rừng khảo sát.

Sử dụng phần mềm Google Earth, có thể xác định khu vực này có tên là KUDARA, LAKE BAIKAL, RUSSIA, nằm ở tọa độ từ $52^{\circ}12'48'' N$ tới $52^{\circ}16'34, 48'' N$ và $106^{\circ}46'2'' E$ tới $106^{\circ}52'2'' E$ như được chỉ ra trong Hình 3.14. Khu vực rừng nghiên cứu là một vùng địa hình hỗn hợp gồm các khu vực rừng, các con đường và khu vực nông nghiệp.

Giá trị tương quan theo thời gian giữa hai dữ liệu là 0,7439 và 0,7381. Do đó, sự tương quan giữa hai tín hiệu ra-đa ảnh hưởng không đáng kể đến độ chính xác của độ cao rừng ước lượng [64, 79].



Hình 3.15: Kết quả ước lượng chiều cao rừng trên toàn bộ khu vực rừng khảo sát.

Hình 3.14 mô tả khu vực rừng khảo sát và các khu vục nhỏ được sử dụng để phục vụ cho các tính toán tiếp theo. Hình 3.15 cho thấy những khu vực đất trống như đường giao thông hoặc vùng nông nghiệp, chiều cao của thảm thực vật được ước tính là rất thấp. Ở những vùng này, thảm thực vật cao trung bình dưới 3 (m).

Ngược lại, ở những vùng rừng thường thu được kết quả chiều cao cây trung bình là 20,169 (m). Kết quả thu được hoàn toàn phù hợp với sự phân bố của thảm thực vật trong khu vực thử nghiệm. Trong khi đó, chiều cao cây trong Bảng 3.7 được ước lượng bởi các phương pháp của Tayebe-1, Khati và Xiao lần lượt là sấp xỉ 18,81 (m), 19,68 (m) và 19,85 (m). Kết quả này hoàn toàn

Các tham số	Phương pháp Tayebe-1 [57]	Phương pháp Khati [55]	Phương pháp Xiao [27]	Phương pháp FIM
$ \tilde{\gamma}_{opt} $	0,683	0,772	0,779	0,792
$\phi_{opt} \left(rad \right)$	4,362	4,589	4,657	4,682
$\bar{h}_v (m)$	18,814	19,683	19,852	20,169
$\phi_0\left(rad ight)$	-0,1265	-0,0971	-0,0892	-0,0682
$\bar{\alpha}$	_	_	_	0,0096
$\sigma\left(dB/m\right)$	0,2739	0,2469	0,2549	0,2095
RMSE(m)	2,9983	2,4627	2,2592	2,0885

Bảng 3.7: Các tham số được ước lượng bởi bốn phương pháp.

logic với kết quả ước lượng chiều cao rừng cho dữ liệu mô phỏng của các phương pháp đã được đưa ra ở phần dữ liệu mô phỏng. Ngoài ra, các tham số còn lại cũng phản ánh hiệu quả của phương pháp đề xuất là chính xác và đáng tin cậy hơn các phương pháp còn lại và chúng được trình bày chi tiết trong Bảng 3.7.

Phương pháp FIM cung cấp thêm hai bản đồ tham số vật lý: pha bề mặt và hệ số suy hao sóng trong Hình 3.16 (a) và 3.16 (b). Chiều sâu thâm nhập phụ thuộc vào hệ số suy hao sóng, hay nói cách khác hệ số suy hao sóng tương ứng với giá trị suy hao sóng trung bình của lớp thực vật.

Đối với những vùng rừng, nơi có mật độ cây lớn tán cây che gần hết bề mặt thì tán xạ khối chiếm ưu thế nên hệ số suy hao sóng trong tán cây là rất

lớn nhất. Đồng thời, pha mặt đất ở những khu vực này cho thấy giá trị lớn hơn. Ngược lại, ở các khu vực đường bộ, cây nông nghiệp và trang trại cho thấy hệ số suy hao sóng và pha mặt đất được ước tính là tương đối nhỏ.



Hình 3.16: Kết quả ước lượng các tham số rừng của phương pháp FIM: (a) hệ số suy hao sóng, (b) pha bề mặt.

Dựa trên kết quả thể hiện trong Hình 3.15 và 3.16 (a), có thể đưa ra giả định rằng hệ số suy hao sóng và chiều cao rừng ước lượng có sự tương quan với nhau. Hình này cũng cho thấy hệ số suy hao sóng trên toàn bộ diện tích rừng được quan sát tỷ lệ thuận với chiều cao rừng ước tính. Trong Hình 3.16(a) hệ số suy hao sóng tại các khu vực đất nông nghiệp và các khu vực đường là rất nhỏ, trong khoảng $(0 \div 0, 1) (dB/m)$. Giá trị trung bình của chiều cao rừng và hệ số suy hao sóng của phương pháp đề xuất lần lượt là khoảng 20 (m) và 0,2095 (dB/m). Các giá trị này tương đối chính xác và hoàn toàn phù hợp với giá trị thực của khu vực quan sát.

Cuối cùng, để đánh giá đầy đủ hiệu quả của phương pháp đề xuất, nhóm



Hình 3.17: Kết quả ước lượng các tham số rừng trên 9 khu vực khác nhau: (a) chiều cao rừng, (b) hệ số suy hao sóng.

nghiên cứu đã khảo sát các thông số rừng trên 9 khu vực (kích thước (10x10) điểm ảnh) được đánh dấu trong Hình 3.14. Áp dụng phương pháp FIM để đánh giá trên 9 khu vực và đưa ra hai tham số là độ cao rừng trung bình và hệ số suy hao sóng trung bình.

Từ đó đánh giá độ chính xác của phương pháp đề xuất cũng như đánh giá mối liên hệ giữa hệ số suy hao sóng và kết quả ước lượng độ cao rừng. Hình 3.17 (a) cho thấy độ cao rừng thường thấp hơn 5 (m) đối với các khu vực cây nông nghiệp hoặc trang trại như vùng 1 hoặc vùng 3. Ngoài ra, các khu vực còn lại đều thể hiện độ cao khoảng 20 (m). Ở các khu vực 1 và 3 có mật độ cây thưa thớt và độ cao rất thấp vì vậy quá trình truyền, nhận sóng tán xạ khá thuận lợi do đó hệ số suy hao sóng là rất nhỏ. Ngược lại, đối với các khu vực rừng rậm rạp, tán cây và cành cây sẽ gây ra hiện tượng tán xạ nhiều lần vì vậy hệ số suy hao sóng ở các khu vực này là lớn hơn và thường dao động từ (0,164 – 0,269) (dB/m).

Từ các kết quả thu được với dữ liệu mô phỏng cũng như dữ liệu vệ tinh SIR-C cho thấy rằng phương pháp FIM có hiệu quả tốt hơn so với các phương pháp được đề xuất trước đây cho chuyển đổi tham số rừng [27, 53, 57]. Độ chính xác trong ước lượng pha bề mặt đóng một vai trò quan trọng trong nâng cao hiệu quả của các thuật toán nghịch chuyển độ cao rừng. Các phương pháp đã được đề xuất trước đa phần đều sử dụng phương pháp TLS để ước lượng pha bề mặt. Tuy nhiên phương pháp TLS thường mang lại hiệu quả không cao do rất khó lựa chọn được một hệ số đường thẳng kết hợp tốt nhất và độ chính xác của phương pháp này lại phụ thuộc vào số lượng kênh phân cực được sử dụng.

Độ chính xác pha bề mặt của phương pháp đề xuất đã được cải thiện đáng kể do sử dụng phương pháp ATLS dựa trên lý thuyết tập kết hợp. Phương pháp ATLS không chỉ khắc phục các nhược điểm của phương pháp TLS mà còn kết hợp thêm với một số điều kiện ràng buộc tối ưu để cải thiện độ chính xác trong ước lượng pha bề mặt. Kết quả trên các Bảng 3.5, 3.7 và Hình 3.16(b) cho thấy rằng pha bề mặt được ước lượng bởi phương pháp đề xuất luôn có độ chính xác cao hơn và gần với giá trị thực hơn so với các phương pháp còn lại.

Ngoài ra, phần lớp các phương pháp nghịch chuyển độ cao rừng thường sử dụng giả định nào đó để tìm ra một hệ số CPI chỉ có duy nhất thành phần tán xạ khối và dựa vào hệ số này để trích xuất độ cao rừng [27, 53, 57]. Tuy nhiên, sự ảnh hưởng tổng hợp của mối tương quan không chứa thành phần tán xạ khối và đóng góp của thành phần tán xạ mặt đất đã gây ra sai số đáng kể đối với quá trình nghịch chuyển độ cao rừng. Nhược điểm này có thể được khắc phục bằng cách điều chỉnh điểm giữa vùng không rõ ràng đến hệ

Phương pháp FIM đã thực hiện điều chỉnh điểm giữa này thông qua quá trình xác định hệ số CPI tối ưu $\tilde{\gamma}_{opt}$. Ngoài ra, phương pháp đề xuất cũng đã

phát triển thuật toán lặp tối ưu để nâng cao độ chính xác cho ước lượng chiều cao rừng với hệ số suy hao sóng thay đổi. Chính vì thế, hiệu quả của phương pháp đề xuất đã được cải thiện đáng kể so với các phương pháp nghịch chuyển khác [27, 53, 57]. Các kết quả cho thấy phương pháp FIM luôn mang lại độ ổn định và chính xác cao khi áp dụng cho trích xuất các tham số cho nhiều loại rừng khác nhau (rừng nhiệt đới, rừng ôn đới, rừng núi).

Kết quả ước lượng tham số rừng với dữ liệu UAV-SAR

Tiếp theo, phương pháp 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. Thông tin đầy đủ về tập dữ liệu UAV-SAR này được trình bày chi tiết trong mục 3.1.4.



Hình 3.18: Khu vực rừng nghiên cứu.

Hình 3.18 cho thấy hình ảnh quang học của công viên Lope, Gabon từ Google Earth, cung cấp vị trí của 12 ô trong khu vực nghiên cứu đã chọn.

Các vùng khảo sát đã được đặt vào ảnh quang học từ Google Earth và khí hiệu của các vị trí khảo sát này được kí hiệu là FA1, FA2 và FA3. Trong số tất cả các địa điểm khảo sát mặt đất do nhóm công tác tại công viên Lope thực hiện. Các vị trí được cung cấp trong Hình 3.18 là các vị trí có kích thước (575 x 685) điểm ảnh và được chia bốn phần bằng nhau. Để đơn giản trong biểu diễn, các ô này đặt tên là FA1s01, FA1s02, v.v. như được cung cấp trong Bảng 3.8.



Hình 3.19: 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.

Hình 3.19 (a), 3.20 (a) và 3.21 (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 3.20: 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.



Hình 3.21: Khu vực FA3: (a) kết quả chiều cao rừng ước lượng bởi phương pháp FIM,(b) hiệu quả của phương pháp FIM và dữ liệu LiDAR.

Ngoài ra, kết quả đạt được ở dạng 2D của Hình 3.19 (a), 3.20 (a) và 3.21 (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 3.18). Hình 3.19 (b), 3.20 (b) và 3.21 (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.

Chiều 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. Tuy nhiên, các giá trị này hoàn toàn phù hợp với điều kiện thực tế và nó phản ánh tính hiệu quả của phương pháp FIM.

Tiếp theo, chia các khu vực nghiên cứu thành bốn phần bằng nhau (Hình 3.18) để đưa ra các đánh giá chính xác hơn về hiệu quả của phương pháp đề xuất so với giá trị từ dữ liệu LIDAR của các khu vực nhỏ này. Bảng 3.6 cho thấy độ cao rừng trong các khu vực rừng nghiên cứu của dữ liệu LiDAR và phương pháp đề xuất. Kết quả chiều cao cây được trích xuất theo phương pháp đề xuất thường thấp hơn chiều cao cây được trích xuất theo phương các khu vực rừng nghiên cứu tương ứng (ngoại trừ FA1s02 và FA2s01 thu được kết quả cao hơn). Ngoài ra, các tham số như tỷ số sóng đứng và hệ số suy hao sóng ước lượng theo phương pháp FIM cũng được trình bày chi tiết trong Bảng 3.8. Kết quả các tham số rừng trong bảng này cho thấy độ chính xác và tin cậy cao của phương pháp đề xuất so với kết quả thu được từ dữ liệu LiDAR. Từ đó có thể thấy rằng phương pháp FIM không chỉ nâng cao độ chính xác cho các tham số rừng ước lượng mà còn có thể áp dụng hiệu quả cho cả địa hình bằng phẳng và địa hình đồi núi.

	Kí hiệu		Kết quả mô phỏng được ước lượng		
Khu vực rừng		Chiều cao từ	1	oởi phương pháp	pháp FIM
nghiên cứu		dữ liệu LiDAR (m)	Chiều cao	Hệ số sóng	Hệ số suy hao
			(m)	đứng (rad/m)	sóng (dB/m)
	FA1s01	24,36	21,17	0,089	0,182
FA1	FA1s02	36,15	37,32	0,065	0,219
	FA1s03	19,24	17,62	0,137	0,166
	FA1s04	34,68	$33,\!16$	0,071	0,301
	FA2s01	25,76	26,07	0,066	0,211
FA2	FA2s02	37,05	33,69	0,091	0,317
	FA2s03	34,41	31,27	0,084	0,196
	FA2s04	30,18	29,41	0,109	0,115
FA3	FA3s01	35,65	32,24	0,078	0,261
	FA3s02	42,94	41,02	0,052	0,352
	FA3s03	36,62	$33,\!15$	0,075	0,252
	FA3s04	41,27	39,65	0,069	0,259

Bảng 3.8: Kết quả mô phỏng từ phương pháp đề xuất và tập dữ liệu LiDAR.

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. Theo đó, cấu trúc đứng của rừng được mô hình hóa như một khối các vật tán xạ ngẫu nhiên có phân bố không đồng nhất thông qua một hệ số suy hao sóng thay đổi tuyến tính trong lớp tán cây. Đây là một đề xuất bổ sung mới trong việc phát triển mô hình dự đoán phù hợp với quá trình tán xạ trong môi trường rừng thực tế và đã khắc phục được điểm hạn chế lớn nhất của mô hình S-RVoG [58]. Dựa trên mô hình đề xuất một phương pháp mới được phát triển cho nâng cao độ chính xác trong ước lượng tham số rừng. Thông qua các đánh giá với dữ liệu mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm cho thấy mô hình S-RVoG cải tiến đã cải thiện được đáng kể độ chính xác so với mô hình S-RVoG [58]. Đồng thời, khi phân tích, đánh giá trên các dữ liệu mô phỏng có độ dốc khác nhau thì mô hình đề xuất cũng cho thấy hiệu quả và độ tin cậy cao.

Tiếp theo, một phương pháp mới cho trích xuất các tham số rừng dựa trên lý thuyết tập kết hợp trung bình (FIM) được đề xuất áp dụng cho khu vực rừng không đồng nhất. Trong phương pháp FIM, pha bề mặt được trích xuất dựa trên phương pháp ALTS. Sau đó, phương pháp tìm kiếm toàn diện với hai điều kiện ràng buộc được sử dụng để trích xuất các tham số rừng. Ngoài ra, 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. Phương pháp đề xuất đạt được hiệu suất cao hơn các phương pháp cùng so sánh [27, 53, 57] khi áp dụng với cả dữ liệu mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp FIM luôn đạt được độ chính xác cao khi ước lượng các tham số rừng trên cả địa hình bằng phẳng và địa hình đồi núi. Đồng thời, khi áp dụng phương pháp đề xuất để tính toán với các loại dữ liệu khác nhau, đặc biệt là khi so sánh với dữ liệu LiDAR đều cho thấy hiệu suất cao hơn các phương pháp cùng so sánh.

Từ đó có thể rút ra được ba khả năng tiềm ẩn của phương pháp FIM như sau. Thứ nhất, 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 lỗi 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.

Bên cạnh đó, độ phức tạp và thời gian tính toán của phương pháp đề xuất tăng lên đáng kể do sử dụng nhiều vòng lặp và thêm nhiều điều kiện ràng buộc trong giai đoạn ước lượng độ cao rừng. Đây cũng là một nhược điểm của phương pháp đề xuất trong ước tính các tham số rừng, đặc biệt khi tính toán với diện tích rừng lớn. Trong tương lai, chúng tôi sẽ cố gắng cải thiện tốc độ xử lý và giảm độ phức tạp tính toán của phương pháp đề xuất để các phép đo có thể được áp dụng cho các diện tích rừng lớn.

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 của tác giả, trang 123.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Luận án đã trình bày cơ sở lý thuyết về kỹ thuật ra-đa tống hợp mặt mở giao thoa phân cực. Sau đó, phân tích, đánh giá các mô hình, thuật toán về ước lượng tham số rừng. Bắt đầu từ các mô hình thuật toán cơ bản đến các đề xuất mới sau này, dựa trên kết quả mô phỏng để đánh giá hiệu xuất và rút ra được ưu, nhược điểm của từng mô hình, thuật toán. Từ đó, luận án đề xuất các phương pháp mới nhằm khắc phục các nhược điểm còn tồn tại của các mô hình, thuật toán trước đây và nâng cao độ chính xác cho ước lượng các tham số rừng từ ảnh PolInSAR.

Hiệu quả của các phương pháp đề xuất đã được kiểm chứng thông qua dữ liệu mô phỏng và dữ liệu thực địa từ các hệ thống PolInSAR khác nhau và tiến hành so sánh với các phương pháp đã công bố trước đây. Kết quả cho thấy các phương pháp đề xuất luôn đạt được độ tin cậy và hiệu quả cao hơn các phương pháp cùng so sánh. Luận án đã xây dựng, đề xuất các phương pháp nâng cao độ chính xác cho ước lượng tham số rừng từ ảnh PolInSAR cụ thể như sau:

A. 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 giới 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 [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. 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 [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. 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, nhiệt đới...) nhưng vẫn có độ ổn định và hiệu quả cao. Đồng thời, phương pháp đề xuất cũng đã trích xuất được tương đối chính xác hệ số suy hao sóng thay đổi tương ướng với chiều cao thực vật [CT5].

Các kết quả của luận án cung cấp những đánh giá đầy đủ về cơ sở khoa học cũng như khả năng ứng dụng cao. Do đó, kết quả nghiên cứu của luận án có thể được ứng dụng trong việc kiểm tra, giám sát và quản lý tài nguyên rừng. Ngoài ra, có thể phục vụ cho giảng dạy, nghiên cứu trong lĩnh vực chuyên ngành ra-đa viễn thám và hiện thực hóa các phần mềm ứng dụng và phát triển công nghệ viễn thám tại Việt Nam.

B. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Trên cơ sở các công trình nghiên cứu, để hoàn thiện hơn nữa cần phải tiếp tục nghiên cứu các vấn đề có liên quan và phát triển một số đề xuất mới. Nội dung cụ thể cần tiếp tục mở rộng nghiên cứu gồm:

- 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.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BÔ

A. 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).

B. Các công trình có liên quan

- HuuCuong Thieu, MinhNghia Pham, XuanMinh Trinh, VanNhu Le, and DangCuong Hoang, "An improved volume coherence optimization method for forest height estimation using PolInSAR images," 2019 3rd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications and Computing (SigTelCom), vol. 1, pp. 53-57, 2019.
- Pham MinhNghia, Mai Quang Vinh, Nguyen Ngoc Tan and Thieu Huu Cuong, "A Novel Volume Coherence Optimization Method for Forest Height Retrieval over Slope Terrain Using PolInSAR Images," 2019 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS), pp. 439-443, 2019.
- 3. NgocTan Nguyen, MinhNghia Pham, HuuCuong Thieu, and Van Nhu Le, "Volume coherence function optimization method for extracting vegetation and terrain parameters from polarimetric synthetic aperture radar interferometry images," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 14, no.4, pp. 1-20, 2020, (IF=1.361, Q2).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

TIÊNG VIỆT

- [1] Trần Tuấn Ngọc, Nguyễn Thanh Nga, "Ứng dụng viễn thám radar trong xác định sinh khối lớp phủ rừng tại Việt Nam," Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ, tr. 51-57, 2014.
- [2] Lê Quang Toan, Trần Tuấn Ngọc, Phạm Văn Cự, "Ứng dụng tư liệu ảnh SAR ước tính sinh khối rừng ngập mặn khu vực ven biển tỉnh Nam Định," *Hội thảo quốc gia về đất ngập nước và biến đổi khí hậu*, tr. 465 -471, 2011.
- [3] Đặng Vũ Khắc, Nguyễn Công Kiên, Đồng Minh Tâm, "Áp dụng phương pháp giao thoa radar để xác định hiện tượng lún đất trong vùng đô thị trung tâm thành phố Hà Nội," *Tạp chí KHCN Xây dựng*, số. 2, tr. 61-68, 2015.
- [4] Nguyễn Bá Duy, "Nghiên cứu thành lập mô hình số độ cao (DEM) từ dữ liệu ảnh Radar giao thoa sử dụng phần mềm mã nguồn mở NEST và SNAPHU, " Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, số. 36, tr. 77-87, 2015.
- [5] Nguyễn Minh Hải, Trần Vân Anh, "Nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật InSAR trong xác định thay đổi bề mặt địa hình," *Tạp chí Khoa học KT Mỏ-Địa* chất, số. 48, tr. 20-24, 2014.

TIÊNG ANH

- [6] FAO, "Forest Resources Assessment 2000," Pan-tropical survey of forest cover changes 1980-2000, FRA working paper, vol. 49, 2001.
- [7] FAO, "Global Forest Resources Assessment 2020," 2020.

- [8] UNFCCC, "Information on national greenhouse gas inventory data from Parties included in Annex I to the Convention for the period 1990–2002," including the status of reporting. Executive summary. http://ghg.unfccc. int /index.html, 2004.
- [9] UNFCCC, "Status of ratification," Last modification on: http://unfccc.int /essential-background/kyoto-protocol, active July 2005.
- [10] M. L. Imhoff, "A theoretical analysis of the effect of forest structure on synthetic aperture radar backscatter and the remote sensing of biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 341-352, 1995.
- [11] H. Yamada, Y. Yamaguchi, Y. Kim, et al, "Polarimetric SAR interferometry for forest analysis based on the ESPRIT algorithm," *IEICE Transaction on Electronic*, vol. 84, no. 12, pp. 1917-1924, 2003.
- [12] Tran Tuan Ngoc, Pham Van Cu and Nguyen Ngoc Thach, "Application of radar satellite Imagery for abouveground biomass estimation of forest cover in Vietnam - A Case study in Hoa Binh Province," VNU Journal of Science, Natural Science and Technology, pp. 75-82, 2012.
- [13] Thuy Le Toan, Tran Tuan Ngoc, Nguyen Thanh Nga, Lam Dao Nguyen, Ludovic Villard, Alexandre Bouvet and Ake Rosenqvist, "Forest biomass assessment in Vietnam using ALOS/PALSAR," The ALOS Kyoto and Science Team Initiative, KC Science Report – Phase 2, pp. 75-81, 2011.
- [14] M. V. Pham, Q.T. Bui, A. V. Tran, and T. N. Nguyen, "Integrating Sentinel-1A SAR data and GIS to estimate aboveground biomass and carbon accumulation for tropical forest types in Thuan Chau district-Vietnam," *Journal of Remote Sensing Applications: Society and Envi*ronment, vol. 14, pp. 148-157, 2019.
- [15] L. Zhang, B. Zou, and W. Tang, "Polarimetric interferometric eigenvalue similarity parameter and its application in target detection," *IEEE*
Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 8, no. 4, pp. 819-823, 2008.

- [16] M. L. Imhoff, "A theoretical analysis of the effect of forest structure on synthetic aperture radar backscatter and the remote sensing of biomass," *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 341-352, 1995.
- [17] H. T. Velentine, L. M. Tritton and G. M. Furnival, "Sub-sampling trees for biomass, volume or miniral content," *Forest Science*, vol. 30, no. 33, pp. 673-681, 1984.
- [18] J. vanZy, M. Arri, and Y. Kim, "Model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices constrained for nonnegative eigenvalues," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 9, pp. 3452-3459, 2011.
- [19] S. R. Cloude, "Polarimetry: the characterisation of polarisation effects in EM scattering," *PhD thesis, University of Birmingham, Birmingham*, 1986.
- [20] T. Mette, K. P. Papathanassiou, and I. Hanjnsek, "Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain *Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage, Alaska, vol. 1, pp. 2352-2363, 2004.
- [21] R. N. Treuhaft, S. N. Madsen, M. Moghaddam, et al, "Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar," *Radio Science*, vol. 31, no. 6, pp. 1449–1485, 1996.
- [22] J. VanZyl, "The effect of topography on the radar scattering from vegetated areas," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, no. 1, pp. 153-160, 1993.
- [23] R. N. Treuhaft and S. R. Cloude "The structure of oriented vegetation from polarimetric interferometry," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2620- 2624, 1999.

- [24] R. N. Treuhaft, and P.R. Siqueira, "Vertical structure of vegetation land surfaces from polarimetric and interferometry rada," *Radio Science*, vol. 35, no. 1, pp.141-177, 2000.
- [25] W. An, C. Xie, X. Yuan, et al, "Four-component Decomposition of Polarimetric SAR Images With Deorientation," *IEEE Geoscience Remote Sensing Letter*, vol. 8, no. 6, pp. 1090-1094, 2011.
- [26] J. D. Ballester-Berman and J. M. Lopez-Sanchez, "Applying the Freeman – Durden Decomposition Concept to Polarimetric SAR Interferometry," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no.1, pp. 466-479, 2010.
- [27] W. Xiao, and X. Feng, "A PolinSAR Inversion Error Model on Polarimetric System Parameters for Forest Height Mapping," *IEEE Transactions* On Geoscience And Remote Sensing, vol. 57, no. 8, pp. 5669-5685, 2019.
- [28] V. K. Dang , T. D. Nguyen, N. H. Dao, T. L. Duon,g and X. V. Dinh, "Land subsidence induced by underground coal mining at Quang Ninh, Vietnam: persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar observation using Sentinel-1 data," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 42, no. 9, pp. 3563-3582, 2021.
- [29] B. X. Nam, T. V. Anh, L. K. Bui, N. Q. Long, T. L. T. Ha and R. Goyal, "Mining-Induced Land Subsidence Detection by Persistent Scatterer InSAR and Sentinel-1: Application to Phugiao Quarries, Vietnam," *Lecture Notes in Civil Engineering - Springer*, vol. 1, pp. 18-38, 2020.
- [30] V. A. Tran, Q. C. Tran, D. A. Nguyen, T. M. D. Ho, A. T. Hoang, T. K. Ha, and D. T. Bui, "Subsidence Assessment of Building Blocks in Hanoi Urban Area from 2011 to 2014 Using TerraSAR-X and COSMO-SkyMed Images and PSInSAR," *Remote Sensing and GIScience - Springer Na*ture, vol. 1, pp. 127-150, 2020.

- [31] F. T. Ulaby, R. K. Moore and A. K. Fung, "Microwave remote sensing: active and passive," *Artech House*, vol. 2, 1984.
- [32] F. T. Ulaby, R. K. Moore and A. K. Fung, "Microwave remote sensing: active and passive," *Artech House*, vol. 3, 1986.
- [33] R. M. Leonardo, G. V. Moisés, and G. S. Cuauhtémoc, "A tutorial on the total least squares method for fitting a straight line and a plane," *Revista De Ciencia E Ingeniería Del Instituto Tecnológico Superior De Coatzacoalcos*, vol. 1, no. 1, pp. 167-173, 2014.
- [34] J. S. Lee, T. L. Anisworth and Y. Wang, "Recent advances in scattering modelbased decompositions: an overview," *Proc. of IGARSS'11*, *Vancouver, BC*, vol.9, no.12, pp. 24-29, 2011.
- [35] T. Flynn, and M. Tabb, "Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry," In Proceedings of the International Geoscience Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toronto, Canada, pp. 2596–2598, 2002.
- [36] Fu. H et al, "Inversion of vegetation height from PolInSAR using complex least squares adjustment method," Sci. China Earth Sci, vol. 58, no. 6, pp. 1018–1031, 2015.
- [37] F. Garestier, and T. Le Toan, "Forest Modeling For Height Inversion Using Single-Baseline InSAR/PolInSAR Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 3, pp. 1528-1539, 2010.
- [38] S. R. Cloude and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR," *IEEE Transaction on Geoscience* and Remote Sensing, vol. 35, no. 1, pp. 68-78, 1997.
- [39] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry," *IEEE Proceedings - Radar, Sonar* and Navigation, vol. 150, no. 3, pp. 125-134, 2003.

- [40] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric optimization in radar interferometry," *Electronic Letters*, vol. 33, no. 13, pp. 1176–1178, June 1997.
- [41] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric radar interferometry," SPIE's 42nd Annual Meeting Wideband Interferometric Sensing and Imaging Polarimetry, San Diego, CA, USA, vol. 31, no. 20, pp. 224-235, 1997.
- [42] K. P. Papathanssiou, and S. R. Cloud, "Single baseline polarimetric SAR interferometry," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 2352-2363, 2001.
- [43] K. P. Papathanssiou, and S. R. Cloud, "The effect of temporal decorrelation on the inversion of forest parameters from PolInSAR data," Proceeding of IEEE International conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGRASS-2003), Toulouse, France, pp. 1429-1431, 2003.
- [44] H. Yamada, M. Yamazaki, and Y. Yamaguchi, "On scattering model decomposition of PolSAR and its application to ESPRIT-base Pol-InSAR," *Proceeding of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 1-4, 2006.
- [45] H. Yamada, Y. Yamaguchi, Y. Kim, E. Rodriguez, and W. M. Boener, "Polarimetric SAR interferometry for forest analysis based on the ES-PRIT algorithm," *IEICE Transaction on Electron*, vol. 84, no. 12, pp. 1917-2014, 2001.
- [46] H. Yamada, Y. Yamaguchi, E. Rodriguez, et al, "Polarimetric SAR interferometry for forest canopy analysis by using the super-resolution method," *Proc. Of IGARSS'01, Sydney, NSW, Australia*, vol. 3, pp. 1101-1103, 2001.
- [47] H. Yamada, K. Sato, Y. Yamaguchi, et al, "Interferometric phase and coherence of forest estimated by ESPRIT - based polarimetric SAR inter-

ferometry," Proc. Of IGARSS'02, Toronto, Canada, vol. 2, pp. 829-831, 2002.

- [48] H. Yamada, H. Onoda and Y. Yamaguchi, "On scattering model decomposition with PolInSAR data," *Proceedings of EUSAR2008, Friedrichshafen, Germany*, pp. 1-4, 2008.
- [49] F. Garestier, and T. Le Toan, "Forest modeling for forest height inversion using single baseline InSAR/PolInSAR data," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 3, pp. 1528-1539, 2010.
- [50] F. Garestier and T. Le Toan, "Estimation of the backscatter vertical profile of a pine forest using single baseline P-band (Pol-) InSAR data," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 9, pp. 3340-3348, 2010.
- [51] F. Garestier, T. Le Toan and P. C. Dubois-Fernandez, "Forest height estimation using P- band Pol-InSAR data," *Proceedings of PolInSAR* 2007, Frascati, Italy, 2007.
- [52] F. Garestier, P. C. Dubois-Fernandez, and I. Champion, "Forest height inversion using high resolution P - band Pol InSAR data," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 11, pp. 3544-3559, 2008.
- [53] U. Khati, S. Gulab, and F. Laurent, "Analysis of seasonal effects on forest parameter estimation of Indian deciduous forest using TerraSAR-X PolInSAR acquisitions," *Remote Sensing of Environment*, vol. 199, pp. 265-276, 2017.
- [54] M. Tabb, T. Flynn, and R. Carande, "An extended model for characterizing vegetation canopies using polarimetric SAR interferometry," *Proceedings of IGARSS'02, Toronto, Canada*, vol. 2, pp. 1020-1022, 2002.
- [55] F. Wenxue, G. Huadong, L. Xinwu, T. Bangsen, and S. Zhongchang, "Extended three-stage polarimetric SAR interferometry algorithm by dual-

polarization data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 5, pp. 2792-2802, 2016.

- [56] M. Tayebe, Y. Maghsoudi, and M.J.V. Zoej, "An Improved Three-Stage Inversion Algorithm in Forest Height Estimation Using Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry Data," *IEEE Transactions on Geo*science and Remote Sensing, vol. 15, no. 6, pp. 887-891, 2018.
- [57] M. Tayebe, Y. Maghsoudi, and M.J.V. Zoej, "A Volume Optimization Method to Improve the Three-Stage Inversion Algorithm for Forest Height Estimation Using PolInSAR Data," *IEEE Geoscience and Remote* Sensing Letters, vol. 15, no. 8, pp. 1214-1218, Aug. 2018.
- [58] L. Hongxi, S. Zhiyong, G. Rui, and B. Zheng, "S-RVoG model for forest parameters inversion over underlying topography," *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 9, pp. 618-620, 2013.
- [59] Q. Zhang, T. Liu, Z. Ding, T. Zeng, and T. Long, "A Modified Three-Stage Inversion Algorithm Based on R-RVoG Model for PolInSAR Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 8, no. 10, pp. 1-17, 2016.
- [60] L. Zhang, D. Zhuang, B. Zou, B. Duan, and H. Chen, "A Slope Three-Layer Scattering Model for Forest Parameter Inversion of PolInSAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, PP. 1-5, 2020.
- [61] N. P. Minh, "Slope three-layer scattering model for forest height estimation over mountain forest areas from L-band single-baseline PolInSAR data," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 12, no. 2, pp. 1-20, 2018.
- [62] N. P. Minh, B. Zou, Y. Zhang, and V. N. Le, "General three-layer scattering model for forest parameter estimation using single-baseline polarimetric interferometry synthetic aperture radar data," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 9, no. 1, pp. 1-18, 2015.

- [63] N. P. Minh, B. Zou, H. Cai, and C. Wang, "Forest height estimation from mountain forest areas using general model-based decomposition of PolInSAR image," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, pp. 1821-1840, 2014.
- [64] N. P. Minh, T. N. Ngoc, and A. H. Nguyen, "An improved adaptive decomposition method for forest parameters estimation using polarimetric SAR interferometry image," *European Journal of Remote sensing*, vol. 52, no. 1, pp. 359-373, 2019.
- [65] T. N. Ngoc, N. P. Minh, H. C. Thieu, and V. N. Le, "Volume coherence function optimization method for extracting vegetation and terrain parameters from polarimetric synthetic aperture radar interferometry images," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 14, No. 4, pp. 1-20, 2020.
- [66] J. S. Lee and E. Pottier, "Polarimetric Radar Imaging: from basic to applications," *Taylor and Francis Group*, pp. 1-438, 2009.
- [67] S. R. Cloude, "Polarisation: Applications in remote sensing," Oxford University Press, Oxford, U.K, DOI:10.1093/acprof:oso/9780199569731.001.
 0001, 2010.
- [68] G. Nico, J. M. Lopez-Sanchez, J. Fortuny, D. Tarchi, D. Leva, and A. J. Sieber, "Assessment of the Impact of the Polarimetric Coherence Optimisation on Phase Unwrapping," *Proceedings of the European Conference no Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, vol. 1, pp. 523–526, 2000.
- [69] Y. Xie, H. Fu, J. Zhu, C. wang, and Q. Xie, "A LiDAR-Aided Multibaseline PolInSAR Method for Forest Height Estimation: With Emphasis on Dual-Baseline Selection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 17, no. 10, pp. 1807-1811, 2019.
- [70] M.L. Williams, "PolSARproSim: A coherent, Polarimetric SAR simulation of Forest for PolSARPro," http://earth.eo.esa.int/polsarpro/Simulated Data, 2000.

- [71] E. Colin, "A Mathematical study about the Coherence Set in Polarimetric Interferometry," In Proceedings of the European Conference no Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Dresden, Germany, 2006.
- [72] J. J. van Zyl, H. A. Zebker, and C. Elachi, "Imaging radar polarization signatures: Theory and observation," *Radio Sci*, vol. 22, pp. 529-543, 1987.
- [73] P. A. Rosen, S. Hensley, I. A. Joughin, F. K. Li, S. M. Madsen, E. Rodriguez and R. M. Goldstein, "Synthetic aperture radar interferometry," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 3, pp. 333-382, 2000.
- [74] T. Moriyama, S. Uratsuka, T. Umehara, et al, "Polarimetric SAR image analysis using model fit for urban structures," *IEICE Transaction on Communication*, vol. 88, no. 3, pp. 1234-1242, 2005.
- [75] B. Souissi, M. Ouarzeddine, and A. Belhadj-Aissa, "Interferometric coherence optimization using the polarimetric signatures," *Department of telecommunication Faculty of Electronics and Computing, USTHB university Algiers, Algeria*, pp. 1-16, 2003.
- [76] L. Zhang, B. Zou, and W. Tang, "Polarimetric interferometric eigenvalue similarity parameter and its application in target detection," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 819-823, 2008.
- [77] S. R Cloude and K.P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 5, pp. 1551-1556, 1998.
- [78] T. Mette, K. P. Papathanassiou, I. Hajnsek and K. Zimmerman, "Forest biomass estimation using Polarimetric SAR Interferometry," *Proc. of IGARSS 02, Trento, Italy*, vol. 2, no. 3, pp. 818-819, 2002.
- [79] J. Xu, J. Yang, Y. Peng, C. Wang, and Y. A. Liou, "Using similarity parameters for supervised polarimetric SAR image classification," *IEICE Transaction on Communication*, vol. 85, no. 12, pp. 2934-2942, 2002.