

简缩极化 SAR 数据支持的森林地上生物量反演

赵含¹, 张王菲¹, 姬永杰¹, 韩宗涛²

1. 西南林业大学 林学院, 昆明 650224;

2. 威海五洲卫星导航科技股份有限公司, 威海 264400

摘要: 简缩极化 CP (Compact Polarimetry) SAR 作为一种国内外学者高度关注的新型 SAR, 目前鲜有将其应用于森林地上生物量 AGB (Above Ground Biomass) 反演研究。在全球气候变化及“双碳”目标下, 森林 AGB 的精确反演是当下亟待解决的热点问题。为探究 CP SAR 数据在森林 AGB 反演中的可行性, 以云南省昆明市宜良县小哨林区为研究区, 提取水平线性 CP Stokes1 模式、垂直线性 CP Stokes2 模式、 $\pi/4$ 线性模式及 CTLR 模式的 4 种 CP SAR 数据, 并基于波的二分性原理, 分别提取了各种模式的若干 SAR 参数, 利用基于快速迭代特征选择的 K 最近邻 (KNN-FIFS) 算法开展了研究。结果表明: 基于 CTLR 模式的森林 AGB 反演结果最优, $R^2=0.52$, RMSE=13.02 t/hm²; 联合 4 组 CP SAR 数据的森林 AGB 反演结果精度有明显提升, $R^2=0.58$, RMSE=12.16 t/hm²; KNN-FIFS 适合于采用 CP SAR 参数进行森林 AGB 反演, 其反演结果与采用全极化 SAR 数据进行反演的差别并不明显。本研究提取的 CP SAR 参数中, 线极化度 m_t 、倾斜角 45° 或 135° 时的线极化分量功率值 g_2 等特征在森林 AGB 反演中表现出较高的适用性, 说明其能更好的表征森林信息。

关键词: 遥感, 森林 AGB, GF-3, Stokes, 简缩极化 SAR, KNN-FIFS

中图分类号: S771.8/P2

引用格式: 赵含, 张王菲, 姬永杰, 韩宗涛. 2024. 简缩极化 SAR 数据支持的森林地上生物量反演. 遥感学报, 28(9): 2416-2426

Zhao H, Zhang W F, Ji Y J and Han Z T. 2024. Retrieval of forest aboveground biomass via compact polarimetric SAR data. National Remote Sensing Bulletin, 28(9): 2416-2426 [DOI:10.11834/jrs.20232363]

1 引言

森林是陆地生态系统的主体, 在碳循环进程中对二氧化碳浓度变化及辐射能量交换起着决定性作用。森林作为最大的有机碳贮库, 在改善生态环境、减少温室气体、减缓全球气候变暖方面发挥着十分重要的作用 (陶玉华, 2012)。森林地上生物量 AGB (Above Ground Biomass) 是描述森林生态系统物质循环、能量流动的重要指标之一 (魏雪梅, 2019), 其作为森林生态系统固碳能力的直观表达, 是评估森林生态系统碳收支的重要指标 (张少伟等, 2019), 因此, 森林 AGB 的精确反演对碳循环、碳达峰、碳中和等研究具有重要意义。

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar)

数据由于获取的波长较长, 具有穿透云雾雨雪的能力, 能够全天时全天候工作, 同时可以穿透森林冠层, 能够反映树干和树枝的信息, 进而提供更准确的森林结构信息, 具有提高森林 AGB 反演精度的潜力 (李增元和陈尔学, 2019)。全极化 SAR 即同时包含 HH、HV、VH、VV 等 4 种不同的极化状态的微波探测技术; 不同收发极化组合, 可获得较全面的森林散射信息。全极化 SAR 数据虽然可以获取丰富的信息, 但其数据下载速度、测绘带宽、能量消耗和天线技术等问题成为全极化 SAR 发展的一大掣肘, 为解决上述限制因素, 简缩极化 CP (Compact Polarimetry) SAR 方法被提出 (Souyris 等, 2005; Raney, 2007)。CP SAR 本质上是一种双极化系统, 但相较于传统线性双极化 SAR, CP SAR 能够存储回波信号的相对相位,

收稿日期: 2022-08-11; 预印本: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42161059, 32160365, 31860240); 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (编号: CAFYBB2021SY006)

第一作者简介: 赵含, 研究方向为林业遥感。E-mail: zhan98gisrs@swfu.edu.cn

通信作者简介: 张王菲, 研究方向为农林业微波遥感机理及应用研究。E-mail: mewhff@163.com

信号组合方式更加灵活，从而能获取更丰富的散射信息，在许多应用中取得了与全极化SAR数据相近的结果；相较于全极化SAR，系统的设计和维护复杂度较低、成像范围更大（张红等，2013；Raney，2019；许璐等，2020；王樱洁等，2021）。

基于全极化SAR数据的森林AGB反演研究中多以极化协方差矩阵 $[C]$ 和极化相干矩阵 $[T]$ 为基础进行极化分解参数展开。但 C 和 T 矩阵均不能有效地描述去极化信息，而去极化信息在反映森林的散射特征中具有重要作用（董贵威等，2003）。CP SAR数据的参数提取通常基于Stokes参数，Stokes参数基于Born-Wolf波分解理论（Born和Wolf，1999），可以将部分极化电磁波分解为完全极化波和完全去极化波的总和，是处理去极化信息的一个更有效的参数，在SAR影像分类中体现出较大的优势，在农作物AGB反演中取得了较好的反演结果（Dube和Mutanga，2015；Raney，2019）。

然而，目前的CP SAR数据多应用在农作物中，在森林中的应用多集中在采用CP SAR数据提取森林高度信息，将各种模式的CP SAR数据用于森林AGB反演的研究目前则开展较少（Charbonneau等，2010；谈璐璐等，2010；Yang等，2014；Raney，2019；张王菲等，2020；Zhang等，2017，2021）。Truong-Loi等（2012）指出，对于平坦地形上的生物量估计，CP SAR数据可在一定程度上代替全极化数据。为探究CP SAR数据在森林AGB反演中的可行性，本文以云南省昆明市宜良县花园林场小哨林区为例，基于高分三号GF-3（Gaofen-3）全极化SAR数据模拟4种常见的简缩极化模式，并基于Stokes特征参数，提取各简缩极化模式的SAR参数进行森林AGB反演，进而探索CP SAR数据在森林AGB反演中的可行性，以期ALOS-2-PALSAR-2、RCM及国内计划发射的See-Earth计划SAR星座等平台获取的CP SAR真实数据的应用提供参考。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

研究区及调查样地的分布情况见图1。云南省昆明市宜良县花园林场小哨林区位于 $24^{\circ}30'N$ — $25^{\circ}17'N$ ， $103^{\circ}02'E$ — $103^{\circ}12'E$ ，北回归线南侧，

属于亚热带季风气候，年平均气温约为 $16.3^{\circ}C$ ，年平均降雨量约为 912.2 mm ，全年无霜期约 260 d 。研究区海拔为 1500 — 1800 m ，坡度为 0° — 30° ，森林类型为常绿阔叶林与针叶林，优势树种为云南松（*Pinus yunnanensis* Franch.）、华山松（*Pinus armandii* Franch.）、桉树（*Eucalyptus robusta* Smith）等。

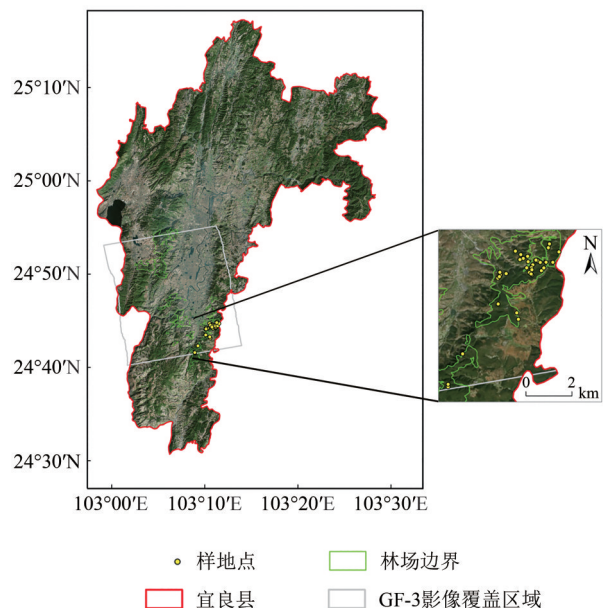


图1 研究区及样地分布示意图

Fig. 1 Study area and the distribution of the sample collecting spots

2.2 数据获取及预处理

2.2.1 地面调查数据

野外调查样地数据于2019年8月获取，GF-3影像覆盖区域内共获取了39个云南松纯林样地数据。样地调查内容包括胸径、树高、树干中心至角规点的水平距离及样地中心的GPS坐标，采用断面积系数为1.0的角规控制检尺方法，胸径的起测径阶为 5 cm 。样地森林AGB采用蓄积量—生物量转换方法（黄从德等，2008）计算得出，即先算各样地每公顷蓄积量 V ，再计算出云南松单位面积生物量 W_Y 。具体计算公式如下：

$$V = F_g \sum_{i=1}^k Z_j \cdot (fh)_i \quad (1)$$

$$W_Y = 0.8596V^{0.8564} \quad (2)$$

式中， V 为蓄积量， F_g 为断面积系数， Z_j 为各径阶计树木总和， fh 为各径阶形高， W_Y 为森林AGB。调查的样地云南松纯林森林AGB最小值为 9.34 t/hm^2 ，最大值为 78.51 t/hm^2 ，平均值为 36.42 t/hm^2 。

2.2.2 GF-3全极化数据

研究获取了一景覆盖整个研究区的分辨率为8 m的全极化C波段GF-3全极化条带1工作模式(QPSI)影像数据,数据级别为L1A,数据形式为单视复数SLC(Single Look Complex)图像产品。数据成像时间为2018年5月18日,中心经度为103.03°E,中心纬度为24.67°N,中心入射角为39.104°,波长为0.0555 m,极化方式为全极化。

2.2.3 DEM数据

文中用于SAR数据地理编码的DEM数据为ASTER GDEM v3数据。该数据分辨率为30 m,于2019年免费面向公众分发,其是目前唯一覆盖全球陆地表面的免费高分辨率高程影像数据,下载地址为[https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C1711961296-LPCLOUD\[2022-08-11\]](https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C1711961296-LPCLOUD[2022-08-11])。本文所获取的DEM数据高程最大值为2507 m、最小值为1502 m、平均值为1837.20 m。

2.2.4 数据预处理

GF-3数据预处理分为两部分,一部分为辐射定标,一部分为地理编码。辐射定标在PolSARpro 4.2软件中实现,其可将相位信息与强度信息转化为表现能量值的后向散射系数,获取GF-3数据的极化后向散射矩阵;地理编码在GAMMA软件中实现,通过地理编码将SAR数据从SAR成像空间转换到地理空间。考虑到地理编码之后的数据较难实现特征参数的提取,本研究先对辐射定标结果图像提取特征参数,再对特征参数进行地理编码处理。本研究在提取特征参数时都需要进行窗口区域空间平均,能达到与多视和滤波相近的去噪效果,因此未在预处理过程中做多视与滤波处理。

3 研究方法

3.1 基于全极化SAR数据模拟CP SAR数据

目前可获取的CP SAR数据较少,现有研究多基于全极化SAR数据模拟生成CP SAR数据。模拟CP SAR数据通常由全极化SAR数据的散射矩阵 $[S_{QP}]$ 和琼斯矢量 $[J]$ 计算获得。具体计算公式如下

$$[J_{CP}] = [J_R][S_{QP}][J_T] \quad (3)$$

式中, $[J_{CP}]$ 为CP SAR数据的琼斯矢量, $[J_R]$ 为接收电磁波的琼斯矢量, $[J_T]$ 为发射电磁波的琼斯矢

量。公式推导参见文献(Cloude等, 2012; 张红等, 2015)。

在CP SAR数据的分析中,基于4个要素的斯托克斯矢量SV(Stokes Vectore)用于分析更方便且容易解释提取参数的物理意义,因此,通常将 $[J_{CP}]$ 转换为SV $[G]$ 。 $[G]$ 具体表达式如下:

$$[G] = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$[J_{CP}]$ 和 $[G]$ 的转换关系如下:

$$[J_{CP}] \times [J_{CP}]^{*T} = [C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} g_0 + g_1 & g_2 + ig_3 \\ g_2 - ig_3 & g_0 - g_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,*为共轭,T为转置。

变换发射和接收电磁波的极化方式,可以获得不同模式的CP SAR模拟数据。本文中模拟了水平(H)发射,垂直(V)和水平(H)接收模式(Stokes1)、垂直(V)发射,垂直(V)和水平(H)接收模式(Stokes2)、 $\pi/4$ 线性发射,垂直(V)和水平(H)接收的 $\pi/4$ 模式,以及右圆发射,垂直(V)和水平(H)接收的圆发射线性接收的CTRL(Circular Transmit and Linear Receive)模式,该模式又称HP(Hybrid Polarimetric)模式。

3.2 CP SAR数据参数提取

本文中参数提取及反演建模均基于PolSARpro 4.2软件、ENVI 5.3软件及其拓展插件实现。

3.2.1 Stokes1和Stokes2模式参数提取

本文提取了如表1所示的23个参数,参数的计算方法见文献(Raney, 2007; 杨浩, 2015; Zhang等, 2017)。其中,极化度 m ($0 < m < 1$)表示极化分量占总功率的比例,是表征部分极化波最重要的参数之一;去极化度 m_1 与 m 互补,表示非极化部分占总功率的比例,代表随机极化散射;散射场圆度 χ 和相对相位差 δ 为单次散射和偶次散射的区分因子,但是相对相位差中包含了地物散射方向的信息,散射场圆度可表征散射地物形状。最后3个参数为极化参数比,即HH和VV相位差的余切值 g_3/g_2 、水平或垂直线极化功率占总功率比 g_1/g_0 、倾斜角 45° 或 135° 线极化功率占总功率比 g_2/g_0 。

表 1 Stokes 参数
Table 1 Stokes parameters

参数	定义	参数	定义
g_0	电磁波总功率	μ_l	线极化比
g_1	水平或垂直线极化分量功率	μ_c	圆极化比
g_2	45°或 135°线极化分量功率值	L1、L2	特征值
g_3	左旋圆或右旋圆极化分量的功率	P1、P2	特征向量
m	极化度	Entropy(H)	散射熵
m_l	去极化度	Anisotropy(A)	反熵
χ	散射场圆度	γ	HH 和 VV 相干幅度
δ	相对相位	g_3/g_2	HH 和 VV 相位差的余切值
m_s	标准极化度	g_1/g_0	水平或垂直线极化功率占总功率比
m_l	线极化度	g_2/g_0	45°或 135°线极化功率占总功率比
m_c	圆极化度		

3.2.2 $\pi/4$ 模式参数提取

在 $\pi/4$ 简缩极化模式中，本文除了提取部分对应于 Stokes1 和 Stokes2 模式的参数外，还提取了两种极化分解的参数及其对应的体散射与表面散射分量比，其中极化分解的参数包括 $m - \delta$ 和 $m - \chi$ 两种极化分解的参数，具体计算方法见文献（杨浩，2015），这两种极化分解方式的体散射 P_v 相同，因此仅用一个。对应于上一模式的参数从 g_0 到 μ_c 共 13 个，除此之外还包括： $m - \delta$ 极化分解的三分量 P_{d1} 、 P_v 、 P_{s1} 及其体散射与表面散射分量比 $vs_1(P_v/P_{s1})$ ， $m - \chi$ 极化分解的两个分量 P_{d2} 、 P_{s2} 及其体散射与表面散射分量比 $vs_2(P_v/P_{s2})$ ，总计提取 20 个参数。

3.2.3 CTLR 模式参数提取

在 CTLR 简缩极化模式中，本文除了提取对应于 $\pi/4$ 简缩极化模式的 20 个参数外，还提取了其 σ_{RH}^0 、 σ_{RV}^0 两个后向散射系数，即右圆发射水平接收通道对应的后向散射系数与右圆发射垂直接收通道对应的后向散射系数（RH、RV 为极化通道标识）。此外，由于 CTLR 模式的线性组合可以得到双圆极化 DCP（Circular Transmit and Dual Circular Receive）。该模式发射圆极化波，同时接收左圆和右圆极化波模式，但 CTLR 模式比 DCP 模式更简单、稳定，对噪声敏感程度降低，且具有自校正能力，因此本文中没有单独提取 DCP 模式对应的参数，仅选取了 DCP 模式的 σ_{RL}^0 和 σ_{RR}^0 极化后向散射参数。本文中 CTLR 简缩极化模式总计提取了

24 个参数。

3.3 森林 AGB 反演方法

为解决高维度的遥感特征及其伴随而来的信息冗余、易使模型过拟合等问题，韩宗涛 等（2018）提出了 KNN-FIFS 算法，快速优选出对森林 AGB 变化敏感的特征组合，以此高效构建出高精度的森林 AGB 反演模型。李云 等（2020）研究表明了 KNN-FIFS 算法在生物量估测中的优越性，因此在本研究中采用该方法进行森林 AGB 反演。本文基于 KNN-FIFS 算法，由 Stokes1 模式参数、Stokes2 模式参数、 $\pi/4$ 模式 CP SAR 参数、CTLR 模式 CP SAR 参数逐个建立森林 AGB 反演模型。KNN-FIFS 算法可实现分析不同特征组合寻求确定最优参数组合，建立森林 AGB 估测模型，并使用留一交叉验证法对模型估测森林 AGB 值进行精度评价。

KNN-FIFS 算法在常规的以 KNN 方法建模的过程中加入了特征选择算法，该算法以模型均方根误差 RMSE（Root Mean Square Error）值为评价标准，RMSE 值最小对应特征最优；以迭代时的 RMSE 值不再降低为停止准则；从空集与对应 RMSE 最大值开始，每轮将上一轮特征子集与余下的特征逐一组合建模，以当轮评价最优且未达停止准则的特征组合进行特征子集的迭代，一轮仅向特征子集中引入一个特征，以此得到精度最高的模型及其特征组合。KNN-FIFS 算法中 KNN 方法选用马氏距离计算待估像元特征向量到样地所在像元特征向量的距离，针对训练数据，使用特

征参数建立森林 AGB 估测模型, 以留一交叉验证法得出的 RMSE 最小为原则, 依次快速迭代特征参数, 优化反演模型。留一交叉验证法即每次仅从样本集总样地中不重复地抽取出一块样地, 利用其余样地建立反演模型, 反演估计所抽样地的森林 AGB, 重复该过程直至样本集中每块样地都被抽取过, 根据真实值与每一次估计值计算出 RMSE 值; RMSE 是反映模型精度的常用指标, RMSE 值越低代表模型更加准确。RMSE 计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

式中, Y_i 为第 i 个样地的森林 AGB 实测值, y_i 为第 i 个样地的森林 AGB 估测值, n 为样地总数。

本研究中模型反演精度由决定系数 R^2 的值表示预测模型解释了变量的方差的比例, R^2 值越接近 1 表示模型拟合程度或预测精度越高。具体计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中, Y_i 为第 i 个样地的森林 AGB 实测值, y_i 为第 i 个样地的森林 AGB 估测值, \bar{y} 为实测森林 AGB 的平均值, n 为样地总数。

4 结果与分析

本文对比了基于不同尺寸窗口空间平均所提取的 4 种简缩极化模式 SAR 矢量, 发现随着区域平均处理的窗口尺寸增大, 小范围内森林区域 SAR 参数的数值趋于稳定, 为匀质区域。因此, 本文选取森林区域 SAR 参数数值开始稳定的窗口尺寸提取对应的 CP SAR 参数, 此时窗口大小为 5×5 。

首先基于各组由全极化模拟所得的 CP SAR 数据提取出建模参数; 然后使用 KNN-FIFS 算法确定最优参数组合并建立森林 AGB 反演模型; 最后根据每个样本的森林 AGB 预测值与实测值, 计算相关的模型估测效果评价指标, 即采用 RMSE 和 R^2 描述反演结果精度。

4.1 单一 CP SAR 数据的森林 AGB 反演结果

4 种 CP SAR 参数利用 KNN-FIFS 算法进行森林 AGB 的反演结果如表 2 所示。可知: Stokes1 模式参数基于 KNN-FIFS 方法进行森林 AGB 反演建

模时, K 为 2, 以样地中心点对应遥感影像像元周围邻域 11×11 窗口内像元均值作为训练数据构建模型所建模型最佳, 其模型精度最优 ($R^2 = 0.28$, $\text{RMSE} = 16.36 \text{ t/hm}^2$), 对应最优特征组合为 γ 、 μ_l 、 δ ; Stokes2 模式参数基于 KNN-FIFS 方法进行森林 AGB 反演建模时, K 为 2, 以样地中心点对应遥感影像像元周围邻域 9×9 窗口内像元均值作为训练数据构建模型所建模型最佳, 其模型精度最优 ($R^2 = 0.35$, $\text{RMSE} = 14.96 \text{ t/hm}^2$), 对应最优特征组合为 $P2$ 、 γ 、 $m1$ 、 $P1$; $\pi/4$ 模式 CP SAR 参数基于 KNN-FIFS 方法进行森林 AGB 反演建模时, K 为 2, 以样地中心点对应遥感影像像元周围邻域 7×7 窗口内像元均值作为训练数据构建模型所建模型最佳, 其模型精度最优 ($R^2 = 0.34$, $\text{RMSE} = 15.21 \text{ t/hm}^2$), 对应最优特征组合为 m_s 、 m_l 、 vs_1 、 μ_c 、 g_0 ; CTRLR 模式 CP SAR 参数基于 KNN-FIFS 方法进行森林 AGB 反演建模时, K 为 2, 以样地中心点对应遥感影像像元周围邻域 11×11 窗口内像元均值作为训练数据构建模型所建模型最佳, 其模型精度最优 ($R^2 = 0.52$, $\text{RMSE} = 13.02 \text{ t/hm}^2$), 对应最优特征组合为 m_l 、 σ_{RL}^0 。

表 2 反演结果及优选特征组合
Table 2 Inversion results and optimal feature combination

参数	K	窗口	R^2	RMSE/ (t/hm^2)	优选特征组合
Stokes1 模式参数	2	11×11	0.28	16.36	γ, μ_l, δ
Stokes2 模式参数	2	9×9	0.35	14.96	$P2, \gamma, m1, P1$
$\pi/4$ 模式参数	2	7×7	0.34	15.21	$m_s, m_l, vs_1, \mu_c, g_0$
CTRLR 模式参数	2	11×11	0.52	13.02	$m_l, \sigma_{\text{RL}}^0$

CTRLR 模式 CP SAR 参数在森林 AGB 反演中表现出的效果最好。各模式 CP SAR 中的森林 AGB 反演模型中都用到表征极化波极化度或极化比性质的特征, 4 个模型中有两个模型应用了线极化度特征 m_l , 说明该类特征对森林 AGB 的敏感性较高。此外, HH 和 VV 相干幅度特征 γ 为 Stokes1 模式与 Stokes2 模式中的特有参数, 在这两种模式对应的模型中都表现出了一定的适用性。

图 2 为各模拟 CP SAR 数据森林 AGB 反演值与地面实测值交叉验证对比的散点图。可知: 由于研究区的森林 AGB 平均水平约为 36 t/hm^2 , 因此 4 种 CP SAR 数据中, 样本在 60 t/hm^2 以下的区域较为集

中。其中, CTLR 模式的反演结果最接近于 1:1 线, 森林 AGB 低值高估和高值低估的现象不如其

他 3 种数据模式显著, 因此总体反演精度在 4 种模拟 CP SAR 数据中最高。

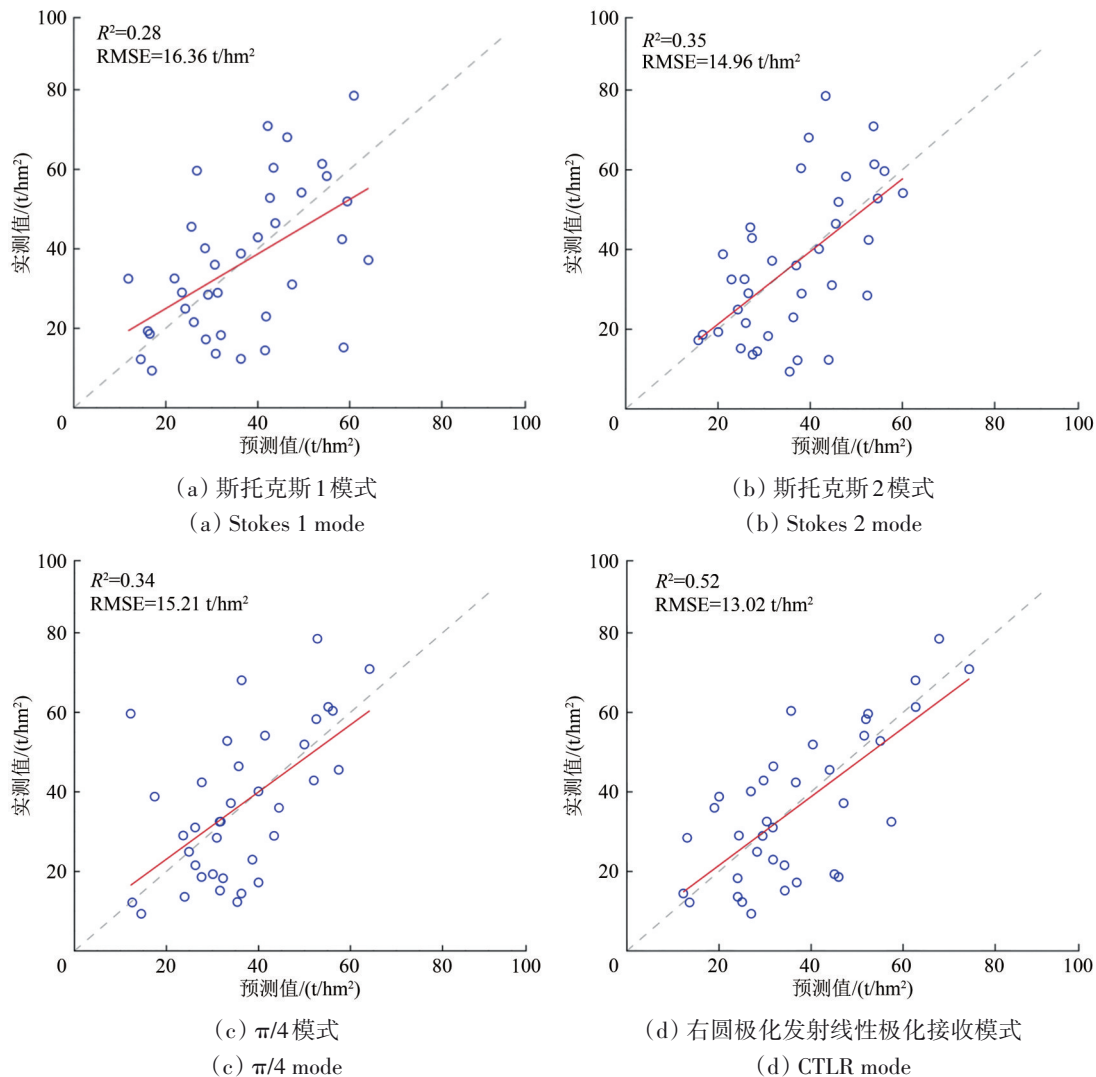


图 2 实测值与基于 KNN-FIFS 方法反演森林 AGB 的交叉验证散点图

Fig. 2 The cross-validation of scatter plots of the measured and estimated AGB by KNN-FIFS model

4.2 联合 4 组 CP SAR 数据的森林 AGB 反演结果

联合 4 组 CP SAR 参数, 于 KNN-FIFS 方法进行森林 AGB 反演建模时, K 为 5, 以样地中心点对应遥感影像像元周围邻域 9×9 窗口内像元均值作为训练数据构建模型所建模型最佳, 其模型精度最优 ($R^2=0.58$, $RMSE=12.16 \text{ t/hm}^2$), 对应最优特征组合为来自 CTLR 模式的一个特征 (m_l)、来自 Stokes2 模式的两个特征 (m_c 与 g_2/g_0)、来自 $\pi/4$ 模式的两个特征 (P_{sl} 与 vs_l)。对比联合 4 组参数数据与 4 组单一数据森林 AGB 的反演结果, 联合 4 组数据的反演结果精度具有明显的提升, 所建的森林 AGB 反演模型中, 有 3 种模式的 CP SAR 都贡献了

信息, Stokes1 模式 CP SAR 未有参数被选入模型, 优选特征共 5 个。具体结果如下:

(1) 从各模式的 CP SAR 表现情况来看: 4 种模式中 Stokes1 模式 CP SAR 没有贡献到相应的信息; 此外, CTLR 模式 CP SAR 所贡献的参数最少, 仅提供了表征地物散射类型的线极化度特征 m_l , 这可能是在 CTLR 模式 CP SAR 下线性散射分量的能量较为独特的反映了森林信息; Stokes2 模式 CP SAR 所贡献的参数与 $\pi/4$ 模式 CP SAR 的被选中建模的参数数量相同, Stokes2 模式 CP SAR 提供了圆极化度和 45° 或 135° 线极化功率占总功率比两个特征, $\pi/4$ 模式 CP SAR 提供了 $m - \delta$ 极化分解分量中

的表面散射分量 P_{sl} 及其体散射与表面散射分量比 $vs_1(P_v/P_{sl})$ 。

(2) 从模型优选的特征的物理意义来看：表征极化波性质的特征、表征森林散射特性的特征及 45° 或 135° 线极化散射能量对森林 AGB 的变化较为敏感。通常体散射分量被认为表征森林冠层散射信息及地物去极化信息，因此可认为体散射与表面散射分量比 $vs_1(P_v/P_{sl})$ 特征在一定程度上反映了森林冠层及强去极化效应特性。此外，C 波段下森林 AGB 的主要贡献信息来源于冠层侧枝、叶片，而 45° 线性极化的能量正是受林木的这部分结构影响，因此该特征在森林 AGB 反演中表现出极高的适用性；在农业研究上也有类型的现象， g_2 因植被的冠层侧枝、叶片增多，使得 45° 线性极化的能量增加而在研究中贡献了更多信息（张王菲等，2020）。

图 3 为联合 4 组 CP SAR 参数的森林 AGB 反演值与地面实测值交叉验证对比的散点图，图 4 为联合 4 组 CP SAR 参数采用 KNN-FIFS 方法对研究区森林 AGB 反演制图结果图，该图选用对应区域的高分一号光学影像作为底图。

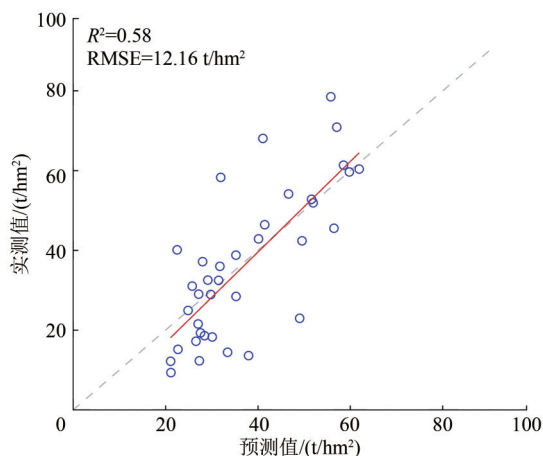


图 3 实测值与联合 4 组 CP SAR 参数基于 KNN-FIFS 方法反演的森林 AGB 的交叉验证散点图

Fig. 3 The cross-validation of scatter plots of the measured and estimated AGB of combined four groups of compact polarimetric parameters by KNN-FIFS model

将单一模式的 CP SAR 参数反演结果与联合 4 种模式 CP SAR 参数反演结果结合起来分析，可以发现：(1) $\pi/4$ 模式 CP SAR 参数在森林 AGB 反演中未表现出较好的适用性，这可能是由于该模式假设地物散射具有反射对称性而表现出的限制性。

(2) 从参数表征的信息类型来看，表征极化波性质 (g_2 、 g_0)、地物散射波类型 (μ_c 、 m_s 、 m_l 、 m_c)、后向散射能量 σ_{RL}^0 、地物散射极化特征 (P_{sl} 、 vs_1) 信息的参数、单次散射和偶次散射的区分因子相对相位差 δ 及派生参数 (γ 、 P_2 、 P_1) 都为森林 AGB 的反演贡献了信息，但其中表征地物散射波类型的特征及表征极化波性质的参数表现出的重要性最大，线极化度 m_l 与表征 45° 或 135° 线极化分量功率值的 g_2 参数显现出极高的敏感性；表征地物散射极化特征的参数表现出的重要性次之。

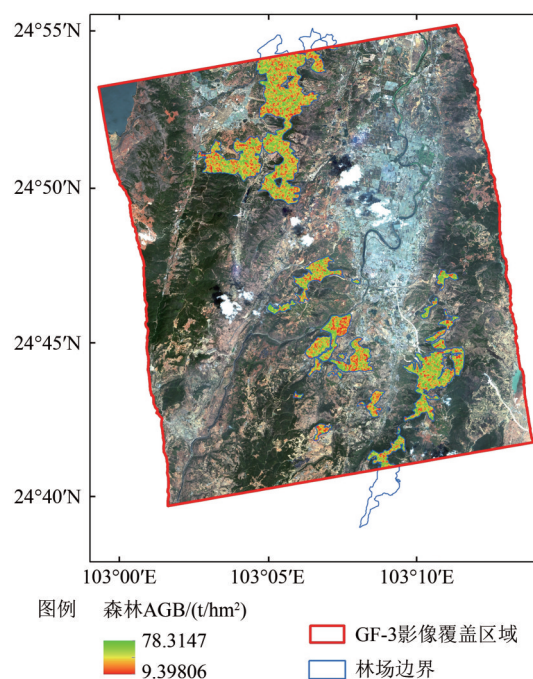


图 4 研究区森林 AGB 分布图
Fig.4 Forest AGB distribution map of Survey Region

(3) HH 和 VV 相干幅度特征 γ 在单一模式的 CP SAR 参数的森林 AGB 反演中有较好表现，但在联合 4 种模式 CP SAR 参数反演模型中并未应用到，其原因可能是该特征与其他特征组合建立的模型精度不是最高，因此被特征选择算法所剔除，但该特征为 Stokes1 及 Stokes2 模式的特有特征，在其他模式中并未提取到相应的参数，该类特征具体适用性还待进一步探究。

5 讨论

CP SAR 数据的提出是为了降低全极化 SAR 系统中系统设计复杂、天线技术、数据下载速率及功率消耗等高要求的局限而提出的（张红等，2013；许璐等，2020；Raney, 2019, 2007；王樱

洁等, 2021; Souyris等, 2005), 相比全极化SAR数据, CP SAR仅发射单一极化状态脉冲, 接收两个正交的极化通道信息, 在降低发射系统复杂度和数据下传速率要求的优势下较全面的保持了极化SAR的信息, 在植被结构信息提取方面具有接近全极化SAR数据的优势(Raney, 2019; 谈璐璐等, 2010; Truong-Loi等, 2012)。CP SAR数据提取的参数被广泛应用于农作物分类、生长参数反演及船只识别中, 在森林参数反演中的应用则多集中于采用简缩极化干涉SAR数据森林高度提取(Charbonneau等, 2010; 谈璐璐等, 2010; Yang等, 2014; Zhang等, 2017, 2021)。Zhang等(2017, 2021)较全面的探索了本文提取的CP SAR参数, 表明了单一CP SAR数据用于不同农作物生长参数反演、物候期监测时的优势, 特别是用于油菜的叶面积指数、株高反演时, R^2 最高可达0.96。Zhang等(2021)分析了分别采用垂直和水平极化发射, 而水平和垂直极化同时接收时两种CP SAR数据提取的类似参数在油菜物候期监测中的潜力。Truong-Loi等(2012)仅探讨了CP SAR的后向散射系数在平坦地区森林AGB估测中的适用性。本文将Charbonneau等(2010)、Zhang等(2017, 2021)、Truong-Loi等(2012)提取的CP SAR参数较早的应用于森林AGB的反演中, 并且较全面比较了4种CP SAR数据提取的相应参数在森林AGB反演中的可行性。与CP SAR数据应用于农作物生长参数反演类似, CTRLR模式在所有简缩极化模式中, 反演结果最优, 然而, 在森林AGB反演中, R^2 的值则明显低于农作物反演结果, 这可能是由于森林结构异质性强, 提取的CP SAR参数无法全面的表征森林结构, 导致适用性有所下降。CTRLR模式在所有单一简缩极化模式中, 反演结果最优, 这可能是由于CTRLR模式较稳定, 对噪声敏感程度较低, 且具有自校正能力, 甚至有文献(许璐等, 2020)认为这个模式的Stokes子参数具有指示散射机制变化的能力, 而其他的一些模式不具备这种特性。黄平平和谈璐璐(2011)采用简缩极化干涉数据进行了森林高度的反演, 研究结果表明 $\pi/4$ 模式的结果优于CTRLR模式, 而Souyris等(2005)也发现在采用复Wishart分布的最大似然比例作为测度对不同模式CP SAR数据分类时, $\pi/4$ 模式的结果较优; $\pi/4$ 模式CP SAR数据在本文的研究结果中, 总体反演精度低于CTRLR模式。由于CP SAR数据

在森林参数反演中的研究还展开较少, 其原因及有效性仍需要进一步探索。

本文提取的参数中, 相对相位 δ 可以反映森林散射方向特征, 表征去极化分量中的占优势散射机制, 其值 >0 为表面散射强于偶次散射, 反之为偶次散射强于表面散射, 森林AGB的贡献主要来源于树干, 而树干的主要散射机制则为偶次散射, 因此 δ 对森林AGB具有较强的表征能力; vs_1 为 $m - \delta$ 极化分解的体散射 P_v 与表面散射分量 P_{s1} 比, $vs_1 (P_v / P_{s1})$ 反映了代表森林冠层散射机制的体散射与代表地表散射的表面散射之比, 可能从一定程度上贡献了森林密度的信息, 从而具有较好表现; 冠层结构复杂时(冠层侧枝、叶片的增加), 45° 或 135° 线极化分量功率值 g_2 会表现得较大(45° 线性极化的能量增加), 可能这个现象使得 g_2 在森林AGB反演中贡献了更多信息, 但此现象是来自农作物高度与 g_2 的相关性研究时的表现(张王菲等, 2020), 具体原因还有待进一步研究; 交叉极化通道的后向散射系数通常也可以表征一定的去极化信息, 且极化基SAR数据可能在探测地物信息时有其特殊优势(Izumi等, 2017), 这种情况下, 双圆极化(DCP)模式的右圆发射左圆接收通道的后向散射系数 σ_{RL}^0 就能更好的表征森林的AGB信息; 而HH和VV相干幅度 γ 、线极化度 m_l 对森林信息探测的具体作用机制还有待进一步探究。

KNN-FIFS方法具有KNN算法灵活、透明泛化能力强的特征, 通过加入FIFS方法克服了KNN方法中海量特征组合的弊端, 实现了最优遥感输入特征组合的筛选和KNN中K值的优选, 可以有效提高森林AGB的反演精度。已有研究采用光学数据对比了其他特征优选的方法, 研究表明了KNN-FIFS方法在森林AGB反演中的优势(李云等, 2020)。李云等(2020)与韩宗涛等(2018)采用KNN-FIFS方法验证了其在光学数据、机载SAR数据、星载极化SAR数据进行森林AGB反演中的有效性。在这些研究中, R^2 值最高为0.77, RMSE的值最低为22.74 t/hm², 为采用光学和单通道SAR数据组合进行森林AGB的反演结果。在采用SAR全极化数据的反演结果中, 基于L波段全极化分解参数的森林AGB反演结果较优, $R^2=0.77$, RMSE=28.84 t/hm²。在Zhang等(2022)的文章中, 基于云南松纯林样本, 使用GF-3全极化SAR数据参

数,在改进的KNN-FIFS算法(MSFO-FIFS)下得出的森林AGB反演模型 $R^2=0.57$, $RMSE=18.87\text{ t/hm}^2$,而本文基于最优的单一模式的CP SAR数据得出的模型 $R^2=0.52$, $RMSE=13.02\text{ t/hm}^2$,即结果可以接近基于GF-3全极化SAR数据在森林生物量反演上的表现;本文联合4组CP SAR参数所得模型 $R^2=0.58$, $RMSE=12.16\text{ t/hm}^2$,即其表现能达到基于全极化SAR数据结果相当的水平。

6 结 论

本文基于GF-3全极化SAR数据模拟了4种常用的CP SAR数据,并基于SAR参数的物理特征,分别提取了各CP SAR数据的常用参数,最后利用KNN-FIFS算法、结合单一的CP SAR参数、组合的4种CP SAR参数对宜良县小哨林区的森林AGB进行反演,探索了CP SAR数据在森林AGB反演中的可行性。主要结论如下:

(1) CTRLR模式在所有简缩极化模式中反演森林AGB的结果最优;联合4组CP SAR数据进行森林AGB反演时,由于各组参数都贡献了不同的特征,较为全面的反映了森林信息,反演结果优于单独采用各组CP SAR参数进行森林AGB反演时的精度。

(2) 在所有提取的CP SAR参数中, γ 、 δ 、 σ_{RL}^0 等特征在单一模式CP SAR的森林AGB反演时表现出较高的适用性,能反映森林较多的信息;而 g_2 、 vs_1 、 m_l 等特征在单一模式的CP SAR参数反演结果与联合4种模式CP SAR参数反演中都保持了较高的适用性,能更好的表征森林信息。

(3) 本文采用了参数优选组合的KNN-FIFS算法进行了森林AGB的反演,研究结果同样表明了该算法采用CP SAR数据进行森林AGB反演中的适用性。

由于本文仅用C波段SAR数据进行研究,研究结果在其他波段CP SAR数据进行森林AGB反演中的适用性需进一步探究;本文用于森林AGB反演优化建模的算法的选择过于单一,对于其他优化建模方法的优势,仍需要进一步探索。

参考文献(References)

Born M and Wolf E. 1999. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light.

7th ed. Cambridge: Cambridge University Press [DOI: 10.1017/CBO9781139644181]

Charbonneau F J, Brisco B, Raney R K, McNairn H, Liu C, Vachon P W, Shang J, Deabreu R, Champagne C, Merzouki A and Geldsetzer T. 2010. Compact polarimetry overview and applications assessment. Canadian Journal of Remote Sensing, 36(S2): S298-S315 [DOI: 10.5589/m10-062]

Cloude S R, Goodenough D G and Chen H. 2012. Compact decomposition theory. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(1): 28-32 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2158983]

Dong G W, Yang J, Peng Y N, Wang C and Zhang H. 2003. Forest characteristic detection with Pol-SAR. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 43(7): 953-956 (董贵威, 杨健, 彭应宁, 王超, 张红. 2003. 极化SAR遥感中森林特征探测. 清华大学学报(自然科学版), 43(7): 953-956) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2003.07.024]

Dube T and Mutanga O. 2015. Investigating the robustness of the new Landsat-8 Operational Land Imager derived texture metrics in estimating plantation forest aboveground biomass in resource constrained areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 108: 12-32 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.06.002]

Han Z T, Jiang H, Wang W, Li Z Y, Chen E X, Yan M and Tian X. 2018. Forest above-ground biomass estimation using KNN-FIFS method based on multi-source remote sensing data. Scientia Silvae Sinicae, 54(9): 70-79 (韩宗涛, 江洪, 王威, 李增元, 陈尔学, 闫敏, 田昕. 2018. 基于多源遥感的森林地上生物量KNN-FIFS估测. 林业科学, 54(9): 70-79) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20180909]

Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X and Zhao A J. 2008. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. Acta Ecologica Sinica, 28(3): 966-975 (黄从德, 张键, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 2008. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 28(3): 966-975) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.03.008]

Huang P P and Tan L L. 2011. Comparison of vegetation height retrieval performance for different modes of Compact polarimetric interferometric SAR. Inner Mongolia Prataculture, 23(1): 35-37 (黄平平, 谈璐璐. 2011. 不同模式简缩极化干涉SAR的植被高度反演性能比较. 内蒙古草业, 23(1): 35-37) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-5952.2011.01.007]

Izumi Y, Demirci S, Bin Baharuddin M, Watanabe T and Sumantyo J. 2017. Analysis of dual- and full-circular polarimetric SAR modes for rice phenology monitoring: an experimental investigation through ground-based measurements. Applied Sciences, 7(4): 368 [DOI: 10.3390/app 7040368]

Li Y, Zhang W F, Cui J B, Li C M and Ji Y J. 2020. Inversion exploration on forest aboveground biomass of optical and SAR data supported by parameter optimization method. Journal of Beijing Forestry University, 42(10): 11-19 (李云, 张王菲, 崔翟波, 李春梅, 姬永杰. 2020. 参数优选支持的光学与SAR数据森林地上生物量反演研究. 北京林业大学学报, 42(10): 11-19) [DOI: 10.12171/j.1000-1522.20190389]

Li Z Y and Chen E X. 2019. Synthetic Aperture Radar Forest Parame-

- ter Retrieval Technology and Method. Beijing: Science Press (李增元, 陈尔学. 2019. 合成孔径雷达森林参数反演技术与方法. 北京: 科学出版社)
- Raney R K. 2007. Hybrid-Polarity SAR architecture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(11): 3397-3404 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.895883]
- Raney R K. 2019. Hybrid dual-polarization synthetic aperture radar. Remote Sensing, 11(13): 1521 [DOI: 10.3390/rs11131521]
- Souyris J C, Imbo P, Fjortoft R, Mingot S and Lee J S. 2005. Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: $\pi/4$ mode. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(3): 634-646 [DOI: 10.1109/tgrs.2004.842486]
- Tan L L, Yang L B and Yang R L. 2010. Investigation on vegetation height retrieval technique with compact PolInSAR data. Journal of Electronics and Information Technology, 32(12): 2814-2819 (谈璐璐, 杨立波, 杨汝良. 2010. 合成孔径雷达简缩极化干涉数据的植被高度反演技术研究. 电子与信息学报, 32(12): 2814-2819) [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00091]
- Tao Y H. 2012. Research significance of carbon storage of forest ecosystem and research progress at home and abroad. Modern Agricultural Science and Technology, 9: 205, 212 (陶玉华. 2012. 森林生态系统碳储量研究的意义及国内外研究进展. 现代农业科技, (9): 205, 212) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2012.09.135]
- Truong-Loi M L, Dubois-Fernandez P and Pottier E. 2012. Assessment of forest biomass retrieval from compact-pol SAR data. Canadian Journal of Remote Sensing, 38(4): 452-460
- Wang Y J, Wang R, Yu W D, Zhao Q C, Liu K Y, Liu D C, Deng Y K, Ou N N, Jia X X, Zhang H, Zhao P F, Wang W, Yu W, Ge D Q, Tang X M and Li T. 2021. See-Earth: SAR constellation with dense time-series for multi-dimensional environmental monitoring of the earth. Journal of Radars, 10(6): 842-864 (王樱洁, 王宇, 禹卫东, 赵庆超, 刘开雨, 刘大成, 邓云凯, 欧乃铭, 贾小雪, 张衡, 赵鹏飞, 王伟, 余伟, 葛大庆, 唐新明, 李涛. 2021. See-Earth: 高频时序多维地球环境监测 SAR 星座. 雷达学报, 10(6): 842-864) [DOI: 10.12000/JR21176]
- Wei X M. 2019. Estimation of forest aboveground biomass based on multi-source data. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(9): 1385-1390 (魏雪梅. 2019. 多源数据支持下的森林地上生物量估算方法. 武汉大学学报(信息科学版), 44(9): 1385-1390) [DOI: 10.13203/j.whugis20190149]
- Xu L, Zhang H, Wang C, Wu F, Zhang B and Tang Y X. 2020. Progress in the processing and application of compact polarimetric SAR. Journal of Radars, 9(1): 55-72 (许璐, 张红, 王超, 吴樊, 张波, 汤益先. 2020. 简缩极化 SAR 数据处理与应用研究进展. 雷达学报, 9(1): 55-72) [DOI: 10.12000/JR19106]
- Yang H. 2015. Study on Quantitative Crop Monitoring by Time Series of Fully Polarimetric and Compact Polarimetric SAR Imagery. Beijing: Chinese Academy of Forestry (杨浩. 2015. 基于时间序列全极化与简缩极化 SAR 的作物定量监测研究. 北京: 中国林业科学研究院)
- Yang Z, Li K, Liu L, Shao Y, Brisco B and Li W G. 2014. Rice growth monitoring using simulated compact polarimetric C band SAR. Radio Science, 49(12): 1300-1315 [DOI: 10.1002/2014RS005498]
- Zhang H, Wang C, Liu M, Li H Z, Shan Z L, Xie L and Liu Z. 2015. Polarimetric SAR Theory, Method and Application. Beijing: Science Press (张红, 王超, 刘萌, 李洪忠, 单子力, 谢镭, 刘智. 2015. 极化 SAR 理论、方法与应用. 北京: 科学出版社)
- Zhang H, Xie L, Wang C, Zhang B, Wu F and Tang Y X. 2013. Information extraction and application of compact polarimetric SAR data. Journal of Image and Graphics, 18(9): 1065-1073 (张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先. 2013. 简缩极化 SAR 数据信息提取与应用. 中国图象图形学报, 18(9): 1065-1073) [DOI: 10.11834/jig.20130902]
- Zhang S W, Hui G Y, Han Z T, Sun S S and Tian X. 2019. Estimation of large-scale forest above-ground biomass based on fast optimizing remotely sensed features from optical multi-spectral and SAR data. Remote Sensing Technology and Application, 34(5): 925-938 (张少伟, 惠刚盈, 韩宗涛, 孙珊珊, 田昕. 2019. 基于光学多光谱与 SAR 遥感特征快速优化的大区域森林地上生物量估测. 遥感技术与应用, 34(5): 925-938) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.5.0925]
- Zhang W F, Li Z Y, Chen E X, Zhang Y H, Yang H, Zhao L and Ji Y J. 2017. Compact polarimetric response of rape (*Brassica napus* L.) at C-band: analysis and growth parameters inversion. Remote Sensing, 9(6): 591 [DOI: 10.3390/rs9060591]
- Zhang W F, Wen Z, Zhang Y H, Zhang T W and Li Y. 2020. Feasibility analysis of stokes related parameters for oilseed rape growth monitoring. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 45(2): 242-249 (张王菲, 文哲, 张亚红, 张庭苇, 李云. 2020. Stokes 参数在油菜长势监测中的可行性分析. 武汉大学学报(信息科学版), 45(2): 242-249) [DOI: 10.13203/j.whugis20180375]
- Zhang W F, Zhang Y X, Yang Y and Chen E X. 2021. Oilseed rape (*Brassica napus* L.) phenology estimation by averaged stokes-related parameters. Remote Sensing, 13(14): 2652 [DOI: 10.3390/rs13142652]
- Zhang W F, Zhao L X, Li Y, Shi J M, Yan M and Ji Y J. 2022. Forest above-ground biomass inversion using optical and SAR images based on a multi-step feature optimized inversion model. Remote Sensing, 14(7): 1608 [DOI: 10.3390/rs14071608]

Retrieval of forest aboveground biomass via compact polarimetric SAR data

ZHAO Han¹, ZHANG Wangfei¹, JI Yongjie¹, HAN Zongtao²

1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Weihai Wuzhou Navi-Tech, Weihai 264400, China

Abstract: Compact Polarimetric Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) is a new type SAR that has attracted most researchers, especially the application of CP-SAR data. However, only a few studies have explored the application of forest aboveground biomass (AGB) retrieval using CP-SAR information. In consideration of the global climate change and the goals of achieving peak carbon emissions and carbon neutrality, the accurate inversion of forest AGB has become urgent in recent years. This study aims to explore the feasibility of CP-SAR data applied in forest AGB inversion. In this study, we took Xiaoshao Forest Farm in Yiliang County as the test site, using simulated CP-SAR data from quad polarimetric GF-3 data with four modes, i.e., Stokes1 mode (Stokes-related parameters were extracted from horizontal transmission and dual-orthogonal linear receipt), Stokes2 mode (Stokes-related parameters were extracted from vertical transmission and dual-orthogonal linear receipt), $\pi/4$ linear mode ($\pi/4$ transmission and orthogonal linear receipt), and CTLR mode (circular transmission and dual-orthogonal linear receipt), to explore the potential of CP-SAR data in forest AGB estimation. First, several SAR parameters of various modes were extracted on the basis of wave dichotomy theory, then the k-nearest neighbor algorithms with fast iterative feature selection (KNN-FIFS) method were applied to estimate the forest AGB in the study area. Finally, the accuracy of the KNN-FIFS inversion results were verified using the leave-one-out cross-validation methods. An R^2 of 0.28 and an RMSE of 16.36 t/hm² were acquired for the forest AGB estimation using Stokes1 mode, and the corresponding optimal feature combination was γ, μ_b, δ ; for Stokes2 mode, an R^2 of 0.35 and an RMSE of 14.96 t/hm² were obtained, and the corresponding optimal feature combination was P_2, γ, m_1, P_1 . Compared with Stokes1 and Stokes2 modes, the similar performance was shown in $\pi/4$ mode for forest AGB estimation; the R^2 value was 0.34, while the RMSE was 15.21 t/hm², and the corresponding optimal feature combination was $m_s, m_b, vs_1, \mu_c, g_0$. Among four CP-SAR modes, CTLR mode exhibited the best performance in forest AGB inversion with an R^2 of 0.52 and an RMSE of 13.02 t/hm², and the corresponding optimal feature combination is m_b, σ_{RL}^0 . The forest AGB inversion result combining four sets of CP-SAR parameters showed remarkable improvement with an R^2 of 0.58 and an RMSE of 12.16 t/hm². The CTLR CP-SAR mode outperformed the other modes in terms of forest AGB estimation when the parameters extracted from four CP SAR modes were combined and applied for forest AGB estimation; the improvement of inversion result was remarkable. KNN-FIFS is suitable for forest AGB estimation via CP-SAR parameters, and no considerable difference was found between the estimation results estimated using CTLR CP-SAR data and quad polarimetric SAR data. Among all the extracted CP-SAR parameters, the degree of linear polarization (m_l) and the power of the linear polarization component at a tilt angle of 45 degrees or 135 degrees (g_2) showed the best performance in the forest AGB estimation because both of them are selected in all the four modes as the optimized features. It revealed that they can better characterize the forest AGB changes. Meanwhile, the parameters that can reflect the forest density to a certain extent (vs_1), the parameters that reflect the characteristics of the forest scattering direction (δ), and the parameters that represent the degree of forest depolarization all have good performance in the forest AGB inversion.

Key words: remote sensing, forest AGB, GF-3, Stokes, CP SAR, KNN-FIFS

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42161059, 32160365, 31860240); Special Fund Project for Basic Scientific Research Business Expenses of Central-level Public Welfare Scientific Research Institutes of the Chinese Academy of Forestry (No. CAFYBB2021SY006)