

# 基于多时相 TanDEM-X 极化干涉 SAR 数据的水稻株高反演

国贤玉<sup>1,2,4</sup>, 李坤<sup>2,3,4\*</sup>, 邵芸<sup>2,3,4</sup>, Juan M. Lopez-Sanchez<sup>5</sup>, 王志勇<sup>1</sup>

1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590
2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101
3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049
4. 中科卫星应用德清研究院微波目标特性测量与遥感重点实验室, 浙江 德清 313200
5. University of Alicante, Alicante, 99, Spain

**摘要** 水稻株高是水稻本身以及土壤、水文、气象等因素的综合反映,是水稻长势监测的重要指标。准确、高效、大范围的株高反演为水稻品种识别、物候监测、病虫害评估和产量预测等提供了可靠的依据。合成孔径雷达(SAR),具有全天时、全天候、穿透性的优势,成为水稻株高反演的重要手段之一。基于极化干涉测量(PolInSAR)的散射模型的反演算法具有严密的物理模型的支撑及较高的反演精度等特点,成为植被高度反演研究的热点。结合极化干涉 SAR 技术,构建了一种基于 RVoG(Random Volume over Ground)模型的水稻株高反演算法,并利用 2015 年水稻生长季内 9 个时相的 TanDEM-X 极化干涉 SAR 数据,进行了水稻株高反演试验。首先基于每个时相下的极化干涉 SAR 数据分别得到 8 个复相干系数,利用这 8 个复相干系数在考虑卫星双站模式等情况下进行去相干处理,然后建立适用于水稻田特性的 RVoG 模型,接着构建基于该模型的水稻株高反演迭代算法,最后对 9 个时相下的 TanDEM-X 数据进行研究区的水稻株高反演及精度评定。结果表明,当水稻株高高于 0.4m 时,该方法的反演结果较好,决定系数( $R^2$ )为 0.86,均方根误差 RMSE 为 6.79 cm;当水稻株高较低时(水稻株高小于 0.4 m),反演误差在 0.1~0.8 m 之间,反演结果较差,被明显高估。通过分析认为,基于极化干涉理论, TanDEM-X 数据在较好地反映出水稻植株的较大体散射射量的前提下,利用所构建的基于 RVOG 模型的水稻株高反演算法,能够较好地反演株高在 0.33~1.2 m 的水稻株高。

**关键词** 水稻;株高;TanDEM-X;极化干涉 SAR;RVoG 模型;模式搜索法

**中图分类号:** TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0878-07

## 引言

水稻株高是水稻本身以及土壤、水文、气象等因素的综合反映,是水稻长势监测的重要指标。遥感以其宏观性、时效性、周期性等特点,在水稻株高反演中具有不可替代的作用。光学遥感能够直接获取植被水平分布信息,利用光谱反射率、植被指数以及纹理因子等参数,与水稻株高建立定量关系,实现大范围快速反演<sup>[1]</sup>。但光学遥感对植被垂直分布信息探测难度较大,而且水稻生长季内多云雨天气,又给光学数据获取带来较大的困难,这些原因大大限制了其在水稻

株高反演中的应用<sup>[2]</sup>。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)具有全天时、全天候、穿透性的优势,成为水稻株高反演的重要手段之一。

目前基于 SAR 的水稻株高反演方法主要有三类:基于辐射传输理论(radiative transfer theory, RTT)的水稻株高反演方法、基于 SAR 干涉测量(interferometry SAR, InSAR)以及基于极化干涉测量(polarimetric SAR interferometry, PolInSAR)的水稻株高反演方法<sup>[3-6]</sup>。其中,基于 PolInSAR 的水稻株高反演方法是通过干涉和极化信息的有效组合实现了观测维度的拓展,将目标竖直方向上不同位置的散射中心分离开来,估计确定具有最高相干性的散射分量,然后利用

收稿日期: 2019-01-25, 修订日期: 2019-04-09

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(41871272), 国家自然科学基金重点基金项目(41431174), 国家重点研发计划项目(2016YFB0502504), 国家自然科学基金青年基金项目(41601375)资助

作者简介: 国贤玉, 1991 年生, 山东科技大学测绘科学与工程学院硕士研究生 e-mail: guoxianyu@126.com

\* 通讯联系人 e-mail: likun@radi.ac.cn

通道差分法<sup>[7]</sup>、模型解算法<sup>[8-9]</sup>，计算水稻株高，该方法既有 InSAR 对地表植被散射体的空间分布敏感的特性，又具有极化 SAR 对植被散射体的形状和方向敏感的特性<sup>[10]</sup>。近年来，PolInSAR 已成为植被高度反演研究热点，尤其是在森林高度反演方面得到验证和应用<sup>[8,11]</sup>。

不同的研究者从不同的角度进行了 PolInSAR 理论、方法和应用研究。目前基于 PolInSAR 的植被高度反演方法主要有两类：通道差分法、模型解算法。通道差分法是通过直接选择或计算得到代表植被冠层散射和代表地表散射相位并作差，进而得到水稻株高。该方法计算简单，但选择和计算得到的代表植被冠层散射和代表地表散射分量并不准确，存在较大误差。模型解算法是基于 PolInSAR 散射模型开展的反演算法，有严密的物理模型的支撑，反演精度较为准确。目前采用的 PolInSAR 散射模型主要以双层散射模型最为广泛，而双层体散射主要有随机体散射体/地表二层模型 RVoG 模型<sup>[8,12]</sup>、方向体积层模型 (oriented volume over ground, OVoG)<sup>[13]</sup>。尽管 OVoG 模型更贴合真实场景，水稻层内部结构是垂直分布的，消光系数极化状态存在依赖性，但是这种依赖性并不强烈，且 OVoG 模型应用需要许多假设，涉及参数多，导致对模型的推演和应用较困难。RVoG 模型简单，涉及的参数少，反演精度较高，是森林研究中最

常见的模型<sup>[14]</sup>。然而，水稻作为低矮植被的代表，具有其独特的生长环境，下垫面常常为水面，地表散射容易发生镜面散射，传统的 RVoG 模型并不完全适用<sup>[15-16]</sup>。

传统的 RVoG 模型未考虑植被生长环境，反演结果精度不高，对水稻株高反演应用有局限性。因此，针对水稻植株结构与生长环境等特点，利用多时相 TanDEM-X 数据，对 9 个时相的 TanDEM-X 极化干涉 SAR 数据进行距离向频谱滤波，求取 8 个复相干系数，进行去相干处理，建立适用于水稻田特性的 RVoG 模型，构建基于 RVoG 模型的极化干涉 SAR 水稻株高反演方法，进而评定反演结果。

## 1 研究区概况和数据源

研究区位于西班牙塞维利亚西南部，瓜达尔基维尔河的南部，地中海西北沿岸，面积约为 30 km<sup>2</sup>，地理位置位于 36.85°—37.38°N，5.91°—6.23°W 之间。该区农作物主要为水稻，水稻常年在五月左右种植，十月前后收割，一年一熟。水稻品种大都是普通栽培稻，播种方式为撒播种植，在整个水稻物候期间稻田内有一层水覆盖。图 1 为 Google earth 获取 QuickBird 卫星数据制作的研究区正射影像。

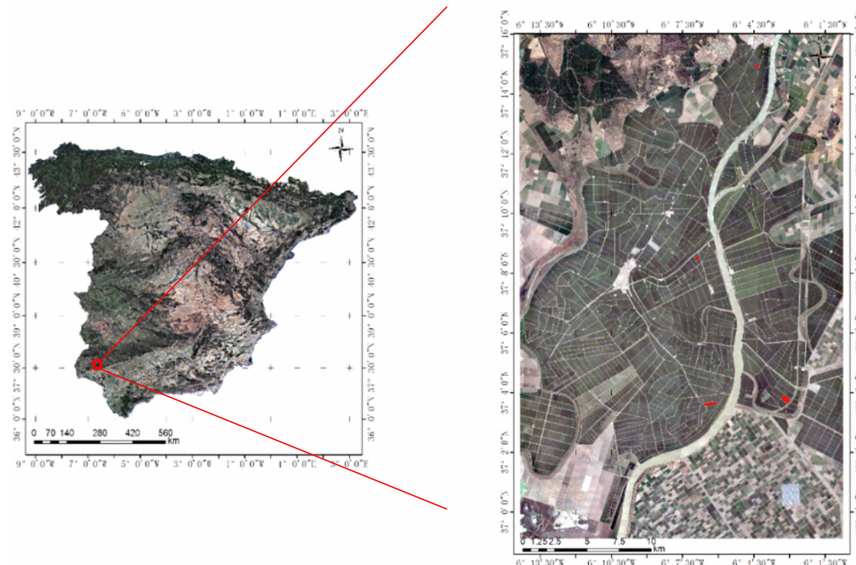


图 1 研究区地理位置与范围(右图 4 个红图框为研究区所选的水稻样区)

Fig. 1 Location and scope of study site and four rice sampling areas of ground measurement campaign coloured in red

由于基于 PolInSAR 植被株高反演需要较低的时间去相干、大空间基线数据<sup>[17]</sup>，星载卫星 TanDEM-X 系统，是双站模式，TanDEM-X 卫星发射电磁波，TanDEM-X 和 TerraSAR-X 同时接受回波信号。因此，TanDEM-X 系统可以忽略时间去相干和大气的影 响，另外 2015 年 4 月到 9 月，TanDEM-X 系统进行一次科学实验，提高到 2~3 km 的空间基线，是反演农作物的最佳数据。因此，在水稻生育期内获取了 9 个不同时相的 TanDEM-X 双极化 CoSSC 数据，中心波

长 9.65 GHz，带宽为 150 MHz，极化方式为 HH 和 VV 极化，该数据为一发双收的双站 SAR 数据，包括已配准的单视复数据对，详细信息如表 1 所示。图 2 给出了 TanDEM-X 双极化 CoSSC 数据彩色合成图。

SAR 卫星过境的同时，获取了详细的地面数据。9 个时相中地面数据的采集大部分为卫星过境当天采集，个别时相样区地面采集数据与卫星过境时间相差 1~2 d。地面数据主要来自均匀分布于研究区的 4 块水稻样区，图 1 中红色方块

为样区。对每一块样区,采集数据包括水稻物候和株高、样区面积( $\text{hm}^2$ )、测量/播种/收割日期、稻株密度( $\text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ )、稻穗密度( $\text{穗} \cdot \text{m}^{-2}$ )、产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、灌溉方式、盐碱性、

病虫害等信息。其中,利用皮尺测量水稻株高,其精度为  $\text{cm}$  级。此外,研究区日值气象数据(温度、湿度、风速、风向、降水等)由西班牙农业气候信息系统(SIAR)提供。

表 1 TanDEM-XCoSSC 信息列表  
Table 1 List of TanDEM-X CoSSC image information

获取时间 (年-月-日)	年积日	入射角 / $^\circ$	分辨率/m (距离向 $\times$ 方位向)	像元大小 (距离向 m)	像元大小 (方位向 m)	垂直波数 $k_z$ (弧度 $\cdot \text{m}^{-1}$ )
2015-06-04	155	22.71	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48
2015-06-15	166	22.71	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48
2015-06-26	177	22.73	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48
2015-07-07	188	22.73	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.47
2015-07-18	199	22.73	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48
2015-07-29	210	22.74	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48
2015-08-09	221	22.73	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.49
2015-08-20	232	22.73	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48
2015-08-31	243	22.73	1.17 $\times$ 6.6	0.91	2.18~2.45	2.48

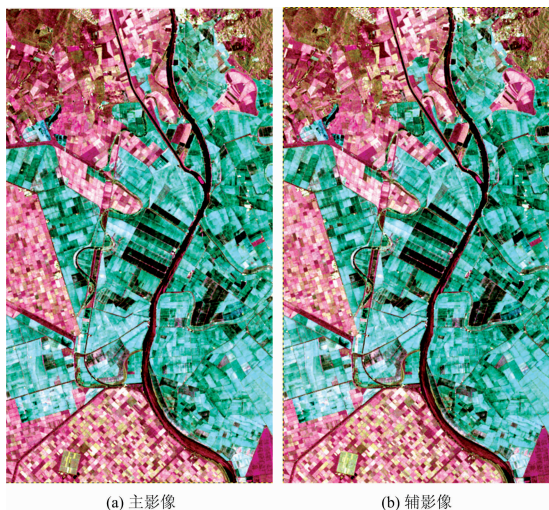


图 2 TanDEM-X 双极化 CoSSC 数据彩色合成图  
(获取时间 2015 年 7 月 7 日,  $R=VV$ ;  $G=HH-VV$ ;  $B=HH$ )  
(a): 主影像; (b): 辅影像

Fig. 2 TanDEM-X color composite images of CoSSC data (time: 7 July 2015,  $R=VV$ ,  $G=HH-VV$ , and  $B=HH$ )  
(a): Master image; (b): Slave image

## 2 实验部分

采用基于 RVoG 模型的极化干涉植被高度反演方法,构建复相干系数与水稻株高之间的定量关系。复相干系数与目标场景、传感器特性等多种因素密切相关,可以表示为

$$\gamma = \gamma_{\text{temp}} \gamma_{\text{geom}} \gamma_{\text{proc}} \gamma_{\text{SNR}} \gamma_{\text{BQ}} \tilde{\gamma} \quad (1)$$

其中,  $\gamma_{\text{temp}}$  为时间去相干系数;  $\gamma_{\text{geom}}$  为几何去相干系数;  $\gamma_{\text{proc}}$  为干涉处理过程中造成的去相干系数;  $\gamma_{\text{SNR}}$  为信噪比去相干系数;  $\gamma_{\text{BQ}}$  为比特量化去相干系数; 为体去相干。在极化干涉 SAR 水稻株高反演之前,需要剔除水稻场景以外去相干因素对复相干系数的影响。图 3 给出了极化干涉 SAR 水稻株高反演基本流程。

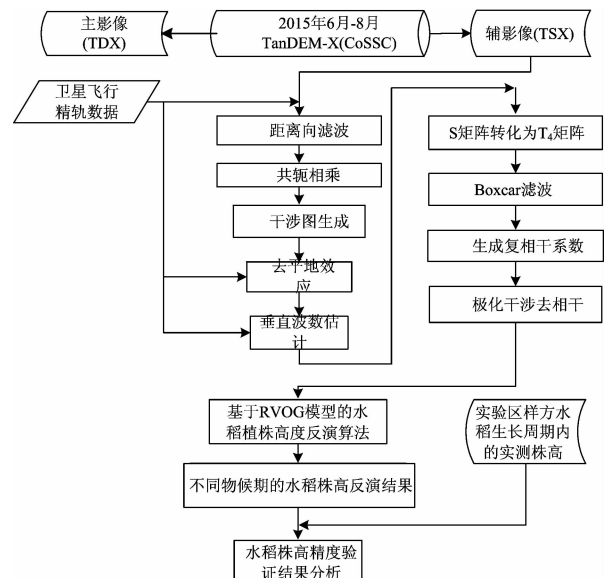


图 3 极化干涉 SAR 水稻株高反演基本流程

Fig. 3 Basic process of rice crop height inversion using PolInSAR data

①首先对 9 景 TanDEM-X CoSSC 双极化 SAR 数据进行距离向频谱滤波补偿<sup>[18]</sup>,对于 TanDEM-X CoSSC 数据,由于其空间基线大,传感器空间方位差异对复相干系数的影响较大,  $\gamma_{\text{geom}}$  小于 0.8,因此必须考虑  $\gamma_{\text{geom}}$  的影响。②对距离向频谱滤波后的 TanDEM-X 数据进行共轭相乘得到干涉图,并利用主辅影像斜距、入射角、中心波长等获取影像时的轨道参数计算平地相位并去除平地效应。③全极化干涉 SAR 系统中每个散射单元为  $2 \times 2$  的散射矩阵,但对于 TanDEM-X 双极化系统,每个散射单元为  $2 \times 1$  的散射矩阵。因此将 TanDEM-X 数据对应的  $S$  矩阵转化为  $T_4$  矩阵,并利用 Boxcar 方法对  $T_4$  矩阵进行滤波处理,窗口大小:  $21 \times 21$ ,以便减小相干斑点噪声,提高图像的辐射分辨率。④计算 8 个复相干系数,分别为主辅影像  $HH$ ,  $VV$ ,  $HH-VV$ ,  $HH+VV$

复相干系数、两个优化的相干性系数<sup>[7]</sup> (OPT1, OPT2)、PD 相位差分法得到的复相干系数 (PDHigh, PDLow)。然后进行去相干因素影响的剔除。由于 TanDEM-X CoSSC 为一发双收的双站模式数据产品, 其主辅图像同时获取, 不受时间去相干的影响, 即  $\gamma_{\text{temp}}$  为 1。 $\gamma_{\text{proc}}$  主要是由主辅图像配准引起的, 而 TanDEM-X CoSSC 数据产品具有较高的配准精度, 因此  $\gamma_{\text{proc}}$  可以忽略。对于 TanDEM-X and TerraSAR-X 数据, 考虑到成像区域主要为农田场景,  $\gamma_{\text{BQ}}$  约为 0.965<sup>[15]</sup>。在干涉测量研究中, 信噪比去相干  $\gamma_{\text{SNR}}$  通常被忽略, 因为它只对低散射区造成影响。但对于稻田场景, 由于其 X 波段 SAR 图像上的后向散射系数通常在 -25 ~ -5 dB 之间, 尤其是幼苗期后向散射系数很低, 因此, 信噪比去相干  $\gamma_{\text{SNR}}$  不能忽略。基于 TanDEM-X 头文件数据计算 SNR, 采用公式 (2) 计算信噪比去相干  $\gamma_{\text{SNR}}$ <sup>[4]</sup>。

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}} \quad (2)$$

⑤ 利用剔除去相干因素影响后的 8 个复相干系数, 构建一种基于 RVoG 模型的水稻植株高度反演算法, 实现研究区 9 个时相水稻株高反演。

### 2.2 基于 RVoG 模型的水稻植株高度反演算法

RVoG 模型包含植被层及其下垫面, 其中植被层厚度近似为  $h_v$  且包含随机取向粒子集合。对于一般植被目标, RVoG 主要考虑植被层体散射以及地表面散射。对于水稻而言, 由于其生长周期内下垫面多为水面, 易发生镜面反射, 因此地表面散射可忽略不计, 此外水稻与下垫面之间的二次散射较强, 需要考虑。因此, 对于水稻目标, RVoG 模型可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\tilde{\gamma} = e^{i\varphi_0} \frac{\gamma_V + \frac{\sin k_z h_v}{k_z h_v} m_{DB}(\omega)}{1 + m_{DB}(\omega)} \quad (3)$$

其中,  $k_z$  为垂直波数,  $\varphi_0$  为地形相位,  $h_v$  为植被层厚度也就是我们所要反演的水稻株高,  $m_{DB}(\omega)$  为二次散射对应的地体幅度比。

$\gamma_V$  表示体相干, 取决于趴标地物散射体的消光系数和植被层厚度  $h_v$ 。

$$\gamma_V = \frac{\int_0^{h_v} e^{2\sigma z / \cos\theta} e^{(ik_z z)} dz}{\int_0^{h_v} e^{2\sigma z / \cos\theta} dz} \quad (4)$$

其中,  $\sigma$  为消光系数,  $\theta$  为雷达数据入射角。

于是, 式 (3) 和式 (4) 中包含了 4 个未知数:  $h_v$ ,  $m_{DB}$ ,  $\sigma$ ,  $\varphi_0$ 。式 (3) 可以写成复平面内的线性形式

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma} &= e^{i\varphi_0} \left[ \gamma_V + \frac{m_{DB}(\omega)}{1 + m_{DB}(\omega)} (\gamma_{DB} - \gamma_V) \right] \\ &= e^{i\varphi_0} [\gamma_V + L(\omega)(\gamma_{DB} - \gamma_V)] \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\gamma_{DB} = \frac{\sin k_z h_v}{k_z h_v}$ ,  $L(\omega) = \frac{m_{DB}(\omega)}{1 + m_{DB}(\omega)} \in [0, 1]$ 。由此可以看出, 理想情况下在复平面上不同极化方式所对应的复相干系数都落于以  $\gamma_{DB} e^{i\varphi_0}$  和  $\gamma_V e^{i\varphi_0}$  为端点的线段上, 其中  $\varphi_0$  为植被下的地形相位, 而  $\gamma_V e^{i\varphi_0}$  则为具有完全体散射的复相干

系数。然而在实际获取的全极化 SAR 影像对上, 地形相位和完全体散射相干系数都无法直接得到。鉴于此, 利用不同极化方式对应的 8 个复相干系数进行最小二乘线性拟合, 获得式 (5) 对应的直线, 然后再计算地形相位  $\varphi_0$ 。对于传统的 RVoG 模型, 通过式 (5) 对应的直线与复平面内单位圆的交点来确定地形相位; 然而, 对于水稻而言, 还需要考虑二次散射的去相干影响, 因此, 利用式 (5) 对应的直线与复平面内半径为  $\gamma_{DB}$  的圆的交点, 来确定地形相位。

基于上面构建的极化干涉 SAR 水稻株高反演模型可以看出, 共有 5 个模型参数。这里采用模式搜索法<sup>[19]</sup> 的迭代算法进行水稻株高反演。由于模式搜索法是直接优化方法, 不需要求解目标函数的导数。因此, 该方法具有方法简单, 计算方便快捷等优点。总体流程如图 4 所示。

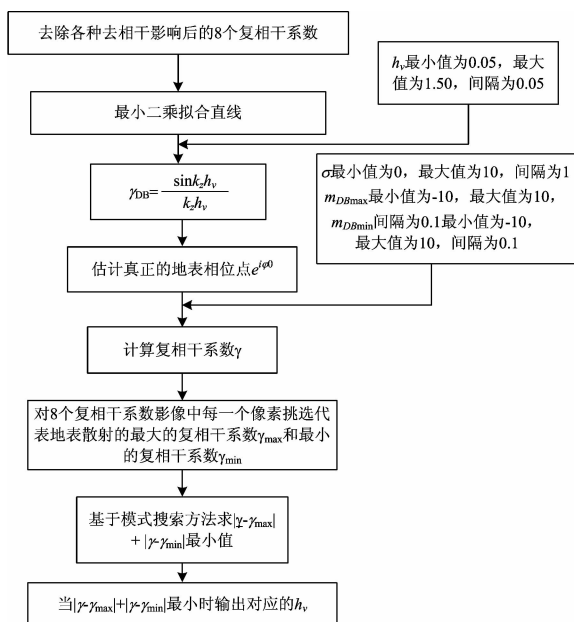


图 4 基于 RVoG 模型的针对水稻特性的水稻株高反演算法的流程图

Fig. 4 Flow chart of rice crop height inversion algorithm based on RVoG model for rice characteristics

① 基于剔除各种去相干因素影响的 8 个不同极化通道的复相干系数, 利用最小二乘拟合获得式 (5) 在复平面内对应的直线。② 由于模式搜索法的搜索步长影响搜索速度和全局搜索能力, 根据经验知识, 确定未知量的搜索步长、搜索范围。给定  $h_v$  初值、范围、步长,  $h_v \in (0.05, 1.5)$ , 步长  $\Delta h_v$  为 0.05。然后计算  $\gamma_{DB}$ , 进而获得地形相位  $\varphi_0$ 。③ 设定  $\sigma$ ,  $m_{DBmax}$ ,  $m_{DBmin}$  取值范围、初始值、步长。 $\sigma \in (0, 10)$ , 步长  $\Delta\sigma$  为 1 dB · m<sup>-1</sup>;  $m_{DBmax} \in (-10, 10)$ , 步长  $\Delta m_{DBmax}$  为 0.1 dB;  $m_{DBmin} \in (-10, 10)$ , 步长  $\Delta m_{DBmin}$  为 0.1 dB。利用设定的  $h_v$ ,  $\sigma$ ,  $m_{DBmax}$ ,  $m_{DBmin}$  根据式 (5), 计算模拟每一个像元的复相干系数。需要注意的是, 消光系数  $\sigma$  在代入模型中要进行转换, 其转换系数为 0.23。④ 确定模式搜索法基本参数。确定轴向方向  $E$ , 加速因子  $\alpha$ , 缩减率  $\beta \in (0, 1)$ 。由于是四个自变量参数, 因此, 设定轴向方向为  $E = (0, 0, 0, 1; 0,$

0, 0, -1; 0, 0, 1, 0; 0, 0, -1, 0; 0, 1, 0, 0; 0, -1, 0, 0; 1, 0, 0, 0; -1, 0, 0, 0), 加速因子  $\alpha$  设为 2, 缩减率  $\beta$  设为 0.5。⑤ 求出每一个像元 8 个复相干系数中表真实地表散射的最大复相干系数、最小复相干系数与模拟的复相干系数的距离和的最小值, 其具体公式见式(6)。

$$\min_{\varphi_0, h_v, \sigma, m^{DBmax}, m^{DBmin}} \left\| \begin{aligned} & \gamma(k_z, \vec{\omega}_{max}) - \gamma_{sim}(k_z, \varphi_0, h_v, \sigma, m^{DBmax}) \\ & \gamma(k_z, \vec{\omega}_{min}) - \gamma_{sim}(k_z, \varphi_0, h_v, \sigma, m^{DBmin}) \end{aligned} \right\| \quad (6)$$

其中  $\vec{\omega}$  为极化通道,  $\gamma_{sim}$  为利用模型模拟的复相干系数。

基于模式搜索方法求出每一个像元 8 个复相干系数中表真实地表散射的最大复相干系数、最小复相干系数与模拟的

复相干系数的距离的最小值, 如果满足 2 条件(条件 1: 设定迭代次数为 2 000 次; 条件 2: 设定函数阈值为 0.001)其中之一, 终止迭代, 提取此时的给定的  $h_v$ ; 如果不满足, 回到第 2 步继续运算。⑥ 遍历每景影像中的每一个像元, 从而得到到该时相下的水稻株高反演结果。

### 3 结果与讨论

基于 9 个时相的 TanDEM-X 数据, 利用第 2 节所述方法进行研究区水稻株高反演, 并利用地块水稻样区的地面数据进行验证与精度评价, 如图 5 所示。

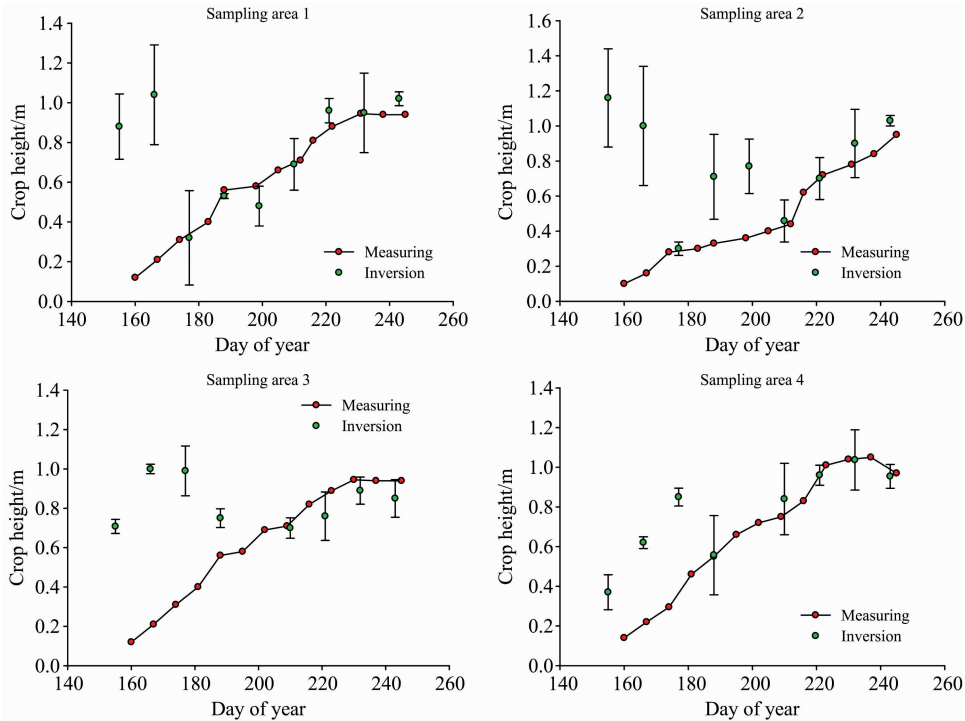


图 5 样区 1, 2, 3, 4 水稻株高反演结果与实测数据对比

红色圆点折线表示地面实测水稻株高数据曲线, 绿色圆点表示反演结果, 其误差线表示反演结果标准差

Fig. 5 Comparison of rice crop heights retrieved and measured for sampling area 1, 2, 3 and 4

The red dotted line represents the measured rice crop height, and the green dots represent the inversion result. What's more, the error line represents the standard deviation of the inversion result

对样区 1 来说, 在水稻生长前期, 第 155 天(6 月 4 日)、第 166 天(6 月 15 日)株高实测数据在 0.1~0.3 m 之间, 而反演结果大于 0.8 m, 明显高于真实值, 而且这两个时相反演结果对应的标准差也较大。由此, 在水稻生长前期, 当株高较小时( $<0.3$  m), 该方法反演结果较差, 株高被过高估计。第 177 天(6 月 26 日)株高在 0.3 m 左右, 反演结果与实测数据吻合较好, 但反演结果标准差较大。在水稻生长中期、成熟期, 即第 188 天(7 月 7 日)、第 199 天(7 月 18 日)、第 210 天(7 月 29 日)、第 221 天(8 月 9 日)、第 232 天(8 月 20 日)、第 243 天(8 月 31 日), 株高反演与地面实测值非常接近, 绝对差值在 0.1 m 之内, 并且其标准误差也远低于第 155 天、第 166 天、第 177 天的对应值。由此可以看出, 当株

高大于 0.4 m 时, 该方法反演精度较高, 而且稳定性好。

对样区 2 来说, 在第 155 天、第 166 天、第 188 天、第 199 天, 株高实测数据在 0.1~0.4 m 之间, 而这 4 个时相反演结果均比其实测结果高 0.2 m 以上, 虽然第 177 天反演结果较好, 但是当株高小于 0.4 m 时, 该方法稳定性较差。第 210 天、第 221 天、第 232 天、第 243 天株高实测数据在 0.4~1.0 m 之间, 其反演结果与实测株高吻合较好, 尤其是第 210, 221, 232 和 243 天, 其反演结果与实测值绝对误差在 0.1 m 以内, 而且反演结果标准差也较小。因此, 该方法在株高大于 0.4 m 时, 反演结果较好, 稳定性较高。

样区 3 和样区 4 的反演结果与样区 1 和样区 2 类似, 当水稻株高小于 0.4 m 时, 反演结果过高估计, 当株高大

0.4 m 时,反演精度较高(绝对误差  $< 0.15$  m),稳定性也较好。

通过上述 4 个水稻样区反演结果分析可以看出,当株高低于 0.4 m 时,反演结果较差,稳定性不高;然而当株高大于 0.4 m 时,反演结果精度较高而且稳定性较好,与实测值的绝对误差在 0.1 m 以内,最差不超过 0.15 m。图 6(a)给出了四个样区 9 个时相下的水稻株高反演结果。由图 6(a)看出,当株高低于 0.4 m 时,反演结果基本都分布在直线“ $y=x$ ”上侧,即反演结果被明显高估,绝对误差在 0.1~0.8 m 之间;当株高大于 0.4 m 时,反演结果较好,决定系数  $R^2$  为 0.86,均方根误差 RMSE 为 6.79 cm[图 6(b)]。

通过反演结果验证与分析发现,基于 TanDEM-X 数据的水稻株高反演算法,在株高低于 0.4 m 以下时,效果不好。这主要是由于所使用的 TanDEM-X 数据,空间基线为 2~3 km。根据 Cloude<sup>[20]</sup>提出的株高反演最优范围指数  $k_v = k_z h_v / 2$ (其中  $k_z$  为垂直波数,  $h_v$  为水稻株高)及其最优范围  $1 \leq k_v \leq 1.5$ ,结合表 1 中给出的  $k_z$  值,可以得出本文所使用的 TanDEM-X 数据对应的最佳植被高度反演范围为 0.81

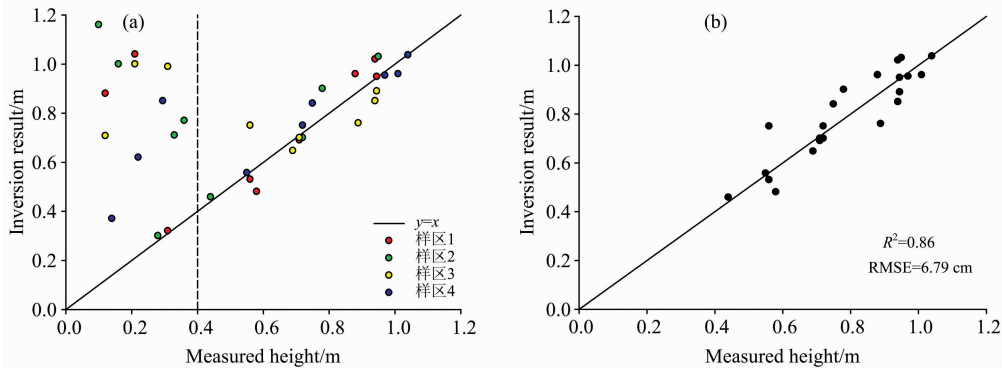


图 6 4 个样区 9 个不同时间水稻株高反演结果与实测水稻株高的对比

Fig. 6 Comparison of rice crop heights retrieved and measured from four sampling areas under 9 time phases

## 4 结 论

利用 9 个时相的 TanDEM-X CoSSC 数据,构建了一种基于 RVoG 模型的极化干涉水稻株高反演算法,实现了多时相的水稻株高反演,结果表明:当株高高于 0.4m 时,反演精度较高,决定系数  $R^2$  为 0.86,均方根误差 RMSE 为 6.79 cm;然而当株高低于 0.4 m 时,反演结果被高估而且稳定性

## References

- [1] Pasher J, King D J. Remote Sens. Environ., 2010, 114(8): 1718.
- [2] ZHOU Zhi-qiang, YUE Cai-rong, XU Tian-shu, et al(周志强, 岳彩荣, 徐天蜀, 等). Modern Agricultural Science and Technology(现代农业科技), 2012, (2): 198.
- [3] Guo H, Liu G, Liao J, et al. J. Appl. Remote. Sens., 2014, 8(1): 1.
- [4] Karila K, Vastaranta M, Karjalainen M, et al. Remote Sens. Environ., 2015, 159: 259.
- [5] Li Z, Guo M, Wang Z Q, et al. China Earth Sci., 2014, 57(6): 1314.
- [6] Tanase M, Panciera R, Lowell K, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2014, 52(8): 4671.
- [7] Cloude S R, Papathanassiou K P. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1998, 36(5): 1551.

$m \leq h_v \leq 1.21$  m。因此,当水稻株高低于 0.4 m 时,与所使用的 TanDEM-X 数据对应的最佳植被高度反演范围差距较大,无法较好地反映出水稻植株的较大体散射量,进而导致反演结果较差。

对于株高低于 0.4 m 的水稻,基于 TanDEM-X 数据,利用极化干涉的方法进行高度反演需要考虑两方面因素,一是要尽可能的增大基线,提高数据对目标体散射敏感性;二是要保持较高的相干性,不能无限制增大基线。根据频谱偏移超过系统带宽的理论<sup>[20]</sup>,得出 TanDEM-X 数据极限空间基线为 3.2 km,即当空间基线超过 3.2 km 时,相干性将为 0。根据这一极限条件,TanDEM-X 数据,对于高度大于 0.33 m 的水稻株高反演是有效的。通过  $k_v$  最优范围计算得出,当 TanDEM-X 数据基线范围在  $2.625 \text{ km} < B < 3.2 \text{ km}$  之间时,利用极化干涉的方法能够较好地反演株高在 0.33~0.4 m 的水稻株高。对于高度低于 0.33 m 的水稻,基于 TanDEM-X 数据,利用极化干涉的株高反演方法,很难得到较高精度的水稻株高反演结果。

差,这主要是因为本研究所使用的 TanDEM-X 数据空间基线对株高小于 0.4 m 的水稻敏感性不足。当 TanDEM-X 数据空间基线范围在  $2.625 \text{ km} < B < 3.2 \text{ km}$  之间时,利用极化干涉的方法能够较好地反演株高在 0.33~0.4 m 的水稻株高。

**致谢:**感谢德国航空太空中心(The German Aerospace Center, DLR)(项目编号:NTI-POLI6736)提供本文所用的 TanDEM-X CoSSC 数据。

- [ 8 ] Papathanassiou K P, Cloude S R. IEEE Trans. Geosci Remote Sens. , 2001, 39(11): 2352.
- [ 9 ] Hajnsek I, Kugler F, Lee S K, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 2009, 47(2): 481.
- [10] ZHOU Mei, WANG Xin-hong, TANG Ling-li, et al(周 梅, 王新鸿, 唐伶俐, 等). Science & Technology Review(科技导报), 2008, 26(21): 90.
- [11] Lee S K, Kugler F, Papathanassiou K P, et al. IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. , 2013, 6(3): 1351.
- [12] Treuhaft R N, Siqueira P R. Radio Sci. , 2000, 35(1): 141.
- [13] Treuhaft R N, Cloude S R. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1999, 37(5): 2620.
- [14] Kugler F, Schulze D, Hajnsek I, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 2014, 52(10): 6404.
- [15] Lopez-Sanchez J M, Fernando Vicente-Guijalba, Esra Erten, et al. Remote Sens. Environ. , 2017, 192: 30.
- [16] Erten E, Lopez-Sanchez J M, Yuzugullu O, et al. Remote Sens. Environ. , 2016, 187: 130.
- [17] Lopez-Sanchez J M, Ballester-Berman J D. Radio Sci. , 2009, 44(2): 1.
- [18] Gatelli F, Monti Guarnieri A, Parizzi F, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1994, 32(4): 855.
- [19] YUAN Xiao-fang, WANG Yao-nan, WU Liang-hong(袁小芳, 王耀南, 吴亮红). Journal of Hunan University • Natural Sciences(湖南大学学报 • 自然科学版), 2007, 34(9): 30.
- [20] Cloude S R. Polarisation: Applications in Remote Sensing. New York: Oxford University Press, 2009: 1.

## Inversion of Rice Height Using Multitemporal TanDEM-X Polarimetric Interferometry SAR Data

GUO Xian-yu<sup>1, 2, 4</sup>, LI Kun<sup>2, 3, 4\*</sup>, SHAO Yun<sup>2, 3, 4</sup>, Juan M. Lopez-Sanchez<sup>5</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1</sup>

1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. Laboratory of Radar Remote Sensing Application Technology, Institute of Remote Sensing and Digital Earth (RADI), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Laboratory of Target Microwave Properties (LAMP), Zhongke Academy of Satellite Application in Deqing (DASA), Deqing 313200, China

5. University of Alicante, Alicante, 99, Spain

**Abstract** Rice height, an important index of rice growth monitoring, is a comprehensive reflection of rice itself, soil, hydrology and meteorology. So accurate, efficient, and large-scale inversion of rice crop height can provide reliable basis for rice identification, phenological monitoring, pest and yield estimation. Synthetic Aperture Radar (SAR), because of its all-weather day-night imaging capability, has been proven to be one of the important means for inversion of rice height. Based on polarimetric SARinterferometry (PolInSAR), the inversion algorithm of scattering model has the characteristics of support of rigorous physical model and high inversion accuracy, which has become a hot spot of inversion of vegetation height. In this paper, based on PolInSAR technology, a new method based on Random Volume over Ground (RVoG) model for rice height inversion was proposed. The inversion experiment of rice height was carried out using the TanDEM-X PolInSAR data of 9 time phases in the rice growing season of 2015. First of all, 8 complex coherence coefficients were obtained based on PolInSAR data in each phase, and these were used for a product of decorrelation under the consideration of satellite dual-station mode. Then, the RVoG model was established for the characteristics of paddy fields. Moreover, using this model, an iterative algorithm of rice height inversion was constructed. Finally, the rice height inversion and precision evaluation using TanDEM-X data of 9 time phases were carried out. The results showed that when rice height was higher than 0.4 m, a coefficient of determination ( $R^2$ ) of was 0.86 and RMSE was 6.69 cm. When rice height was low (rice height was less than 40 cm), inversion results with inversion error of 0.1~0.8 m were significantly overestimated. Through analysis, on the premise that TanDEM X data reflect volume scattering of rice plants well, the inversion algorithm of rice height based on RVOG model can invert the rice height between 0.33~1.2 m with high precision.

**Keywords** Rice; Rice height; TanDEM-X; Polarimetric interferometry SAR (PolInSAR); RVoG model; Pattern search algorithm

\* Corresponding author

(Received Jan. 25, 2019; accepted Apr. 9, 2019)