

不依赖人工定标器的全极化 SAR 定标研究进展

史磊¹, 杨杰¹, 李平湘¹, 杨乐¹, 赵伶俐²

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 极化定标是极化合成孔径雷达应用的前提。传统极化定标方法以地面布设的人工定标器为参考, 通过极化畸变模型对系统误差进行求解与标定。然而, 人工定标器价格昂贵、数量稀少, 每次定标任务都需根据传感器过境方向、雷达视角等信息进行设备调整; 此外, 现代雷达系统工作波段多、入射角调节范围大, 不同视角获取影像的定标参数也不相同, 这对地面定标设备的布设精度、调整的时效性提出了更高要求。为了及时、快速地完成极化定标, 如何以自然界中的某些特殊地物作为人工定标器的替代品来完成定标具有重大的科学价值。本文综述了近年来国内、外提出的不依赖人工定标器的 SAR 极化定标研究进展 (即自主定标)。首先阐述了极化定标的基本流程与极化质量评价体系; 然后对近年来高精度自主定标相关研究进行了梳理, 根据技术特点将其分为基于自然地物约束的自主极化定标、基于似角反射器的自主极化定标两类, 对不同算法适用性进行了分析; 最后对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 合成孔径雷达 (SAR), 极化, 角反射器, 自主定标

引用格式: 史磊, 杨杰, 李平湘, 杨乐, 赵伶俐. 2021. 不依赖人工定标器的全极化 SAR 定标研究进展. 遥感学报, 25(11): 2211-2219

Shi L, Yang J, Li P X, Yang L and Zhao L L. 2021. Research process of full-polarimetric SAR calibration without using corner reflectors. National Remote Sensing Bulletin, 25(11):2211-2219[DOI:10.11834/jrs.20219310]

1 引言

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 是一种高分辨率成像雷达, 因其穿云透雾、全天时、全天候对地观测能力而受到广泛关注 (Morena 等, 2004; Han 等, 2018; Shao 等, 2019)。极化 SAR (Polarimetric SAR, PolSAR) 在传统 SAR 的基础上通过发射、接收不同极化状态电磁波, 记录地物在不同极化状态下的后向散射特性, 实现对地物结构、粗糙度、含水量等的表述。相对于传统单极化 SAR, 全极化系统获得的影像对目标散射类型具有更强的判别能力, 被广泛应用于地物类型分类、地物精细类别判别、农作物生长状态估计、植被生物量估计、灾后建筑物损毁判别、军事目标判别等领域 (Shi 等, 2012, 2013, 2015; Dai 等, 2019; Wang 等, 2020), 甚至还可以摆脱立体观测的限制, 实现基于单张影像的地形起伏

估计 (Schuler 等, 1998; Li 等, 2015)。

极化 SAR 硬件系统在设计、制造时不可避免的存在偏差, 系统获取的多通道极化数据存在各种幅度、相位误差。通常, 雷达系统首先对原始回波数据进行成像处理获取单视复数据 SLC (Single Look Complex), 而 SLC 中包含的极化误差常高于产品要求的设计指标, 如: 中国 GF-3 传感器未定标前同极化通道不平衡相位误差大于 10° 设计指标 (Chang 等, 2018)、Radarsat-2 系统通过极化定标将串扰改善了近 8 dB (Thompson 等, 2008)、Alos-1 通过极化定标将串扰改善了近 5 dB (Touzi 和 Shimada, 2009)。为了消除通道间的相对偏差, 极化误差的估计与标定处理必不可少, 如即将发射的欧洲 Biomass-P 传感器需要将串扰误差抑制到 -30 dB 以下, 才能确保森林生物量估计误差小于 5% (Quegan 和 Lomas, 2015; Quegan 等, 2018)。SAR 极化定标主要包括两个方面: 系统内定标和

收稿日期: 2019-09-03; 预印本: 2020-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41601355, 41771377); 湖北省自然科学基金 (编号: 2019CFB484); 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室探索类项目基金; 自然科学基金深科技创新项目 (编号: JCYJ20200109150833977)

第一作者简介: 史磊, 1986年生, 男, 副教授, 研究方向为极化雷达传感器定标。E-mail: shi.lei@whu.edu.cn

外场定标。系统内定标通过 SAR 系统中内置的定标回路获得关于系统极化通道的监测信号, 并通过内定标信号的处理, 提取极化通道幅相不平衡等参数。外场定标采用地面布设的设备用于估计、消除内定标无法解决的或残留的误差 (Freeman, 1992)。本文旨在综述如何不依赖人工定标器实现外场定标。

一般而言, 观测散射矩阵是极化误差、系统加性噪声与真实散射矩阵的叠加。为了实现高精度的参数求解, 传统定标方法需要在地形平坦区域修建定标场, 并在定标场中布设三面角反射器、二面角反射器与 45° 倾斜二面角反射器、有源定标器等设备。此外, 为了进一步提高定标精度, 还需要考虑定标器周围背景杂波的影响。当角反射器回波与背景杂波的信杂比足够高时, 可以不布设吸波材料。如地面角反射器尺寸足够大、布设背景是平整的河床、裸土、沙地等低回波地物时, 需要求解、评估的标定参数不易受到背景杂波的影响, 此时角反射器对定标参数的求解较为准确。当角反射器回波与背景杂波的信杂比较低时, 需要考虑布设吸波材料。如利用三面角反射器对串扰进行标定或评价时常采用交叉极化 HV、VH 与同极化 HH、VV 的比值作为观测。当传感器分辨率较低、角反射器尺寸较小, 影像上角反射器像素的灰度值是角反射器与背景杂波回波的总和, 以该观测值作为参考进行定标会不可避免的引入误差。特别地, 当三面角反射器被布设在草地等地物上, 背景杂波的 HV、VH 散射使系统串扰被高估。增加角反射器尺寸、将设备布设在低回波目标上或布设吸波材料都可以有效的抑制背景杂波引入的解算误差 (Freeman, 1992)。

虽然基于定标器的定标方法能够获取高精度的定标结果, 但存在以下不足。首先, 定标器制造、布设精度要求高。以常见的三面形、矩形、五角形反射器为例, 当反射器金属板间的夹角制造偏差大于 1° 时可引起 $0.2\text{--}1\text{ dB}$ 的雷达后向散射截面变化 (Garthwaite 等, 2015)。由于电磁波衍射作用的影响, 标定长波传感器则需要更大尺寸的角反射器, 如用于 P 波段 Biomass 定标任务的角反射器边长达到了 5 m , 增大了角反射器的加工难度 (Ulander, 2015)。而角反射器布设时朝向角、仰角的偏差也会对极化定标带来影响, 其高昂的制造成本极大的限制了人工定标器的大范围

使用。

其次, 现代雷达入射角可变范围大, 不同入射角产品由相控阵天线的不同波位产生, 其对应极化误差也不相同 (Luscombe, 2004; Morena 等, 2004), 每次定标任务都需要根据传感器入射角调节定标器仰角, 较为耗时耗力, 短时期很难实现全波位定标。

此外, 雷达系统的辐射特性会随运行时间发生漂移, 标定参数也随之发生改变 (Shimada 等, 2009; Touzi 和 Shimada, 2009)。因此, 对机载、星载产品的周期性检校十分必要, 定标与质量监测任务需要常态化执行, 增加了定标对人力、物力的消耗。

为了在定标任务中减少对人工角反射器的依赖, 需要从影像中选取极化散射特性稳定的目标作为人工定标器的替代物, 实现基于极化影像的自主定标具有十分重大的科学意义与应用价值。从 1990 年至今, 不依赖角反射器的极化定标方法 (即自主定标) 获得了长足发展, 可大致分为: 基于自然地物定标法、基于似角反射器定标法两类。现有大多数自主定标法以植被等自然目标为参考, 对极化畸变中串扰、交叉通道不平衡进行估计, 但仍需要至少一个角反射器用于同极化通道不平衡求解。为了摆脱对角反射器的依赖, 近年来国内、外学者开始尝试利用影像中某些特殊目标对同极化通道不平衡强度或相位进行求解, 并取得了一些成就。目前, 在满足某些前提假设的情况下, 不依赖人工定标器的方法可以获得与角反射器定标法相当的定标精度。

本文对近年来国内、外极化 SAR 自主定标研究进行了分类与概括。首先对极化系统畸变模型进行了阐述, 介绍了极化影像质量评估原理。并在此基础上对自然地物定标法、似角反射器定标法进行了比较、分析, 给出了不同方法的优劣。最后, 针对现有方法的不足, 对极化 SAR 的自主定标研究进行了展望。

2 极化系统畸变模型与精度评价

2.1 极化 SAR 系统畸变模型

全极化系统通过交替发射水平与垂直极化, 同时接收水平与垂直极化获取全极化 Sinclair 散射矩阵。极化系统的误差影响可由模型式(1)或式(2)

表征：

$$\begin{bmatrix} M_{hh} \\ M_{hv} \\ M_{vh} \\ M_{vv} \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} 1 & w & v & vw \\ u & 1 & uw & v \\ z & wz & 1 & w \\ uz & z & u & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^2 & ab & -ab & -b^2 \\ -ab & a^2 & b^2 & -ab \\ ab & b^2 & a^2 & ab \\ -b^2 & ab & -ab & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vh} \\ S_{vv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{hh} \\ N_{hv} \\ N_{vh} \\ N_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\rightarrow \mathbf{M} = \mathbf{YXQK}\mathbf{\Omega}\mathbf{S} + \mathbf{N}$$

$$\begin{bmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{hh} & N_{hv} \\ N_{vh} & N_{vv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， u 、 v 、 w 、 z 为串扰， k 、 α 为同极化、交叉极化通道不平衡； f_1 、 f_2 为接收、发射通道不平衡， δ_1 、 δ_2 与 δ_3 、 δ_4 为接收、发射通道串扰。 S_{hh} 、 S_{hv} 、 S_{vh} 、 S_{vv} 为地物真实散射系数， M_{hh} 、 M_{hv} 、 M_{vh} 、 M_{vv} 为雷达系统观测地物散射系数。式(1)与式(2)两者可由Kronecker乘积相互转换(Wang等, 2011; Villa等, 2015)。为简化起见，本文主要通过式(1)展开讨论，由于系统绝对辐射畸变 Y 、串扰 X 、交叉极化通道不平衡 Q 与同极化通道不平衡 K 的存在，极化SAR观测的散射矩阵 M 并不等于地物真实散射矩阵 S 。而太阳辐射诱发的电离层法拉第旋转矩阵 $\mathbf{\Omega}$ 进一步扰动了观测，其中 $a = \cos\theta$ 与 $b = \sin\theta$ 分别为法拉第旋转角 θ 的余弦、正弦函数。 N 为系统加性随机热噪声。对于机载系统或X、C等星载短波系统，法拉第旋转角矩阵 $\mathbf{\Omega}$ 可被忽略；但对于L、P等星载长波系统， $\mathbf{\Omega}$ 极大的干扰了极化定标对串扰与极化通道不平衡的准确求解。

一般而言，极化定标只对复数串扰矩阵 X 、复数交叉极化通道不平衡矩阵 Q 与复数同极化通道不平衡矩阵 K 中的元素进行求解，以此还原不同极化通道间的真实比值关系。因此，绝对辐射畸变的校正不属于极化定标范畴，其可以通过地面布设的角反射器或辐射稳定的亚马逊热带雨林进行估计与消除。法拉第旋转角 θ 源于电磁波穿越大气电离层时发生的极化改变，在不同地理位置、不同太阳辐射状态下 θ 均不相同。由于 θ 不属于硬件系统带来的误差，因此 $\mathbf{\Omega}$ 的校正也不属于极化定标的范畴。但是，电离层引起的法拉第旋转角会极大的干扰系统串扰、通道不平衡的求解，所以星载长波传感器定标方法与机载或星载短波传

感器定标方法有较大不同。对于L、P等星载长波系统，通常需要在地面布设更多不同散射类型的定标器，或在赤道附近寻找地磁场与雷达视线向垂直地区作为定标场，并在夜间太阳辐射微弱时近似忽略法拉第旋转角的影响，完成极化扰动矩阵 X 、 Q 与 K 的估计(Satake等, 2007; Shimada等, 2009; Touzi和Shimada, 2009)。当系统串扰与通道不平衡被准确标定后，法拉第旋转角 θ 可以在互易约束下通过影像自适应估计完成校准。

2.2 极化畸变精度评价

全极化SAR影像质量主要由地面布设的散射类型已知人工目标进行评价。常见目标包括三面角反射器、二面角反射器、金属球、金属柱等，可用于串扰与通道不平衡的评价。若角反射器的制造误差与布设误差较小时，三面角反射器的理论散射矩阵为 $[1, 0, 0, 1]^T$ 、正二面角反射器理论散射矩阵为 $[1, 0, 0, -1]^T$ 、45°或225°倾斜二面角反射器理论散射矩阵为 $[0, 1, 1, 0]^T$ ，角反射器影像峰值的极化比可以作为极化质量的评价。当经过高精度极化定标处理后，理想定标影像中的三面角反射器极化通道比 M_{hh}/M_{vv} 、45°或225°倾斜二面角反射器极化通道比 M_{hv}/M_{vh} 应为1，其通道比的相位应为0°。此外，三面角与正二面角反射器的极化比 M_{hv}/M_{vv} 、 M_{vh}/M_{vv} 也可以用于极化系统串扰的评价。

特别需要强调的是：无论是定标前还是定标后影像，角反射器的极化通道比都可以用来对部分极化畸变量或畸变残留量进行求解。例如，当忽略法拉第旋转角时，若45°倾斜二面角反射器足够大、回波足够强，系统加性噪声可以在观测值中被忽略，则HV与VH通道极化比为： $M_{hv}/M_{vh} = (\alpha k + kuv)/(k + \alpha kuv)$ ，现代雷达 u 、 v 、 w 、 z 很小（即使没有经过定标的系统串扰也常低于-20 dB），因此串扰二阶项 uv 、 wz 在 M_{hv}/M_{vh} 中对 αk 与 k 比值的影响极小，且有 $M_{hv}/M_{vh} \approx \alpha k/k = \alpha$ 。利用三面角反射器计算HH与VV通道比也类似有： $M_{hh}/M_{vv} = (\alpha k^2 + vw)/(1 + \alpha k^2 uz) \approx \alpha k^2$ ，结合上述45°倾斜二面角可以用于 k 的计算。因此，某些文献将三面角反射器的极化通道比 M_{hh}/M_{vv} 、二面角反射器的极化通道比 M_{hv}/M_{vh} 也认定为同极化与交叉极化通道不平衡的影响，读者在比较不同文献

时需要留意极化误差定义的差别。

3 全极化SAR自主定标

传统极化定标方法常在影像覆盖区内布设多个不同散射类型的定标器,通过影像观测的极化散射矩阵 \mathbf{M} 结合对应定标器的已知散射矩阵 \mathbf{S} 联合求解串扰、交叉极化通道不平衡、同极化通道不平衡。而极化自主定标方法需要以影像中的森林、土壤、建筑区等特殊目标的后向散射为观测量,在某些假设下进行极化畸变的求解。为了在求解中增加约束条件,极化自主定标方法常以式(1)获取的极化协方差矩阵 $E(\mathbf{M}\mathbf{M}^H)$ 为观测,通过矩阵二阶矩完成估计;其中 H 为Hermit运算, $E(\cdot)$ 为数学期望。极化自主定标方法根据原理可被大致分为:基于自然地物定标法、基于似角反射器定标法两类。在影像中参考目标类型丰富的前提下,两类方法可相互组合,以期产生更高精度的定标结果。

3.1 基于自然地物的极化畸变求解

基于自然地物的极化定标理论最早由Van Zyl (1990)提出,其假设森林目标满足散射对称性:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{S}_{hh}\mathbf{S}_{hv}^*) &= E(\mathbf{S}_{hh}\mathbf{S}_{vh}^*) = 0 \\ E(\mathbf{S}_{vv}\mathbf{S}_{hv}^*) &= E(\mathbf{S}_{vv}\mathbf{S}_{vh}^*) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

用于串扰求解。由于硬件的限制,早期雷达系统发射与接收不同极化电磁波的链路重叠度较高,因此同期极化定标理论常假设雷达为互易系统,即发射与接收模块的系统畸变互易相等,即 $\alpha = 1$ 且 u 、 v 、 w 、 z 中仅有两个独立变量。随着雷达传感器开始向多波位相控阵处理系统发展,收发链路的非互易性增强。因此,Quegan (1994)在van Zyl (1990)理论的基础上提出了基于非互易系统的极化定标理论,其假设 u 、 v 、 w 、 z 相互独立,且不对 α 做约束。为了对 u 、 v 、 w 、 z 、 α 5个复未知数进行求解,需要以自然地物为观测对象获取5个复约束条件。Quegan定标法(1994)假设植被在多视数平均的前提下,散射对称性假设式(3)可以提供4个复数约束,而植被互易假设 $\mathbf{S}_{hv} = \mathbf{S}_{vh}$ 可以提供额外的3个实约束条件:

$$\begin{aligned} E(|\mathbf{S}_{hv}|^2) &= E(|\mathbf{S}_{vh}|^2) = \text{real}(E(\mathbf{S}_{hv}\mathbf{S}_{vh}^*)) \\ \text{imag}(E(\mathbf{S}_{hv}\mathbf{S}_{vh}^*)) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

一般而言,极化定标中系统互易性与目标互易性是不同的概念。系统互易表明雷达的收、发链路畸变具有强相关性,接收畸变矩阵与发射畸变矩阵常互为转置;而目标互易性则表示在消除相干斑影响后地物HV极化散射系数与VH极化散射系数相等。相比于van Zyl (1990)定标法,Quegan (1994)定标法采用了4个复数、3个实数约束条件,其不但可以对系统畸变 u 、 v 、 w 、 z 、 α 进行求解,还可以估计系统热噪声的方差:

$$\sigma = E(|N_{hh}|^2) = E(|N_{hv}|^2) = E(|N_{vh}|^2) = E(|N_{vv}|^2) \quad (5)$$

此外,由于星载传感器可以对具有高随机体散射的亚马逊热带雨林进行高频度观测,在相当长的时间内Quegan算法都是星载极化SAR系统的常用定标方法,其也被考虑应用于2020年欧洲Biomass-P传感器定标中(Quegan等,2018)。

然而,在实际应用中雷达研究人员发现散射对称性假设有时只能近似满足,当选取的植被具有较强各向异性或平均视数较小时,约束条件式(3)会高估串扰 u 、 v 、 w 、 z 。高估的串扰会使雷达影像极化方位角偏离其对应地物的真实极化方位角。为了解决串扰高估问题,Ainsworth等(2006)提出了保持极化方位角的定标理论。该理论摒弃了散射对称性约束式(3),仅采用互易性约束 $E(\mathbf{S}_{hh}\mathbf{S}_{hv}^*) = E(\mathbf{S}_{hh}\mathbf{S}_{vh}^*)$ 、 $E(\mathbf{S}_{vv}\mathbf{S}_{hv}^*) = E(\mathbf{S}_{vv}\mathbf{S}_{vh}^*)$ 与式(4)求解串扰、交叉通道不平衡与系统加性噪声,并通过日本PiSAR系统证明了新方法相比于Quegan (1994)方法具有更好的极化方位角保持性。但是,约束条件 $E(\mathbf{S}_{hh}\mathbf{S}_{hv}^*) = E(\mathbf{S}_{hh}\mathbf{S}_{vh}^*)$ 、 $E(\mathbf{S}_{vv}\mathbf{S}_{hv}^*) = E(\mathbf{S}_{vv}\mathbf{S}_{vh}^*)$ 只能提供两个复数约束,无法独立求解 u 、 v 、 w 、 z 4个复数,因此Ainsworth (2006)迭代算法估计的4个串扰具有强相关性,并且容易发生串扰低估现象。实际上,Ainsworth (2006)定标算法对系统有一个潜在假设:待定标的极化系统硬件串扰较低,只需要对串扰进行最小程度的标定即可,借此避免串扰的高估。由于Quegan (1994)、Ainsworth (2006)算法估计交叉通道不平衡时主要依赖于互易约束式(4),因此两者求解的 α 差别不大;而在求解串扰时采用了不同约束,因此Quegan (1994)算法常高估串扰,而Ainsworth (2006)算法常低估系统串扰。特别需要强调的是:串扰与交叉通道不平衡的估计需要以植被作

为参考目标,当参考像素被错误的选为建筑或稀疏植被等,Quegan与Ainsworth算法获取的定标结果是不可信的。现有大多数串扰、交叉通道不平衡定标算法多基于散射对称性与互易性,其与Quegan(1994)、Ainsworth(2006)算法思路大致相同,如在Ainsworth(2006)算法中加入散射对称性假设,并通过牛顿迭代对串扰高阶项进行求解(Zhang等,2013);在植被观测基础上,通过互易、散射对称性约束直接对串扰、交叉通道不平衡进行数值求解等(Villa等,2015)。此外,双极化系统与紧致极化系统也常借助散射对称性与散射互易性完成串扰或交叉通道不平衡误差的标定(Tan等,2016;Pincus等,2017),限于篇幅原因本文在此不逐一详述。

为了完成极化定标,同极化通道不平衡 k 的求解极其重要。复畸变 k 的存在会引起HH通道与VV通道的幅度、相位误差,使不同散射类型地物无法被有效判别。由于Quegan(1994)、Ainsworth(2006)方法并不能对 k 进行求解,传统定标方法需要在定标场中布设至少一个角反射器对 k 进行估计,不能实现完整意义上的SAR自主定标。为了逐步摆脱对定标器的依赖,国内、外研究学者尝试在影像中寻找HH与VV复比值已知的目标用于替代角反射器。Shimada(2011)对日本Alos-1传感器定标时假设亚马逊热带雨林地区某些森林、裸土目标的HH与VV通道相位差为0,并以此为基础对极化数据进行了定标。实验表明,通过算法提取的亚马逊森林、裸土可以消除部分同极化通道不平衡,残留的相位误差均值小于 8° 。虽然Shimada(2011)对完整的SAR自主标定流程进行了探索,但其开发的定标方法依赖于亚马逊森林的高度随机体散射特性,其他地区的森林、裸土是否能达到相同定标效果不得而知。随后,Chen(2011)以日本Sendai为研究区,通过直方图辅助的方式开展了基于单次散射地物的SAR自主定标研究。结果表明非亚马逊森林地区也可能存在合适的参考目标完成自主定标。受Chen(2011)研究的启发,Shi等(2014)提出了基于裸土等Bragg地物的同极化通道不平衡自估计理论,并在极化分解的基础上提出两类约束:(1)Bragg地物的螺旋体散射成分应接近0,未定标的复畸变 k 会增大裸土等Bragg地物的螺旋体强度;(2)裸土覆盖区极化SAR估计的极化方位角应与数字地形模型

DEM(Digital Elevation Model)估计的极化方位角相同,而未定标的复畸变 k 增大了两者的差异。Shi等(2014)基于两类约束条件提出了基于裸土螺旋体、基于裸土极化方位角的两种同极化通道不平衡估计方法,并通过AIRSAR、UAVSAR机载系统对两类约束进行了实验。结果表明基于Bragg地物的螺旋体约束具备更好的普适性,不依赖于特定地区的植被、裸土。当串扰、交叉通道不平衡被Quegan或Ainsworth方法标定后,Shi(2020a,2020b)提出的Bragg地物螺旋体约束可以较好地求解同极化通道不平衡幅度与强度,适合作为角反射器的应急替代品,完成基于影像的自主定标。

除了单一传感器自主定标外,近年来基于多传感器联合观测的极化畸变求解理论也得到了发展。为了校准国产GF-3数据中存在的极化通道不平衡,Jiang等(2018)通过Radarsat-2已定标的极化SAR数据,验证了大部分林木覆盖区域在单站SAR下满足互易性条件和同极化与交叉极化弱相关的条件,可以用于估计极化幅相误差和极化隔离度;因此该方法通过选取林地数据进行估计,并计算大量林地数据估计结果的重心,从而得到比较稳定准确的极化定标结果。为了评价算法精度,Jiang等(2018)采用模拟数据与真实数据进行了测试,实验表明该方法可以将GF-3数据中的不平衡相位误差标定在 10° 以内,较好的满足GF-3产品数据的设计指标。与自然地物、似角反射器定标方法不同,基于多传感器联合的极化畸变求解方法为极化数据的质量统一化提供了一种新思路,适用于同配置多卫星群数据标定等。

3.2 基于似角反射器的极化畸变求解

近年来,除了自然地物极化定标理论外,基于似角反射器的极化畸变求解理论也得到了一定发展。一般而言,似角反射器被定义为“雷达响应特性可知的强散射目标”。似角反射器概念与干涉理论中的永久散射体PS(Permanent Scatter)(Ferretti等,2001;Siddique等,2016;Sadeghi等,2018)相似,其假设城区或自然界中存在路灯、建筑物、大型石块等极化散射特性可知的强散射点目标,通过人工选择或自动选择方法挑选目标后完成极化定标。似角反射器探测理论的起源最早可追溯到散射对称目标自动探测。Schneider等(2006)采用子孔径分解技术开展了相干散射体的

探测研究, 由于子孔径间的相干性表征了目标在不同方位向视角间的相似程度, 因而可用于散射对称目标的判别。Schneider等(2006)发现单极化子孔径分解技术获取的似角反射器与全极化观测相似, 都可以对某些散射对称式目标进行有效探测, 这为后续的似角反射器自动探测与定标技术提供了启发。Lambers和Kolb(2008)从理想角反射器的反射响应出发, 提出以模板匹配的方式在影像中寻找具有特定主瓣、旁瓣的强散射目标作为似角反射器用于数据质量评价。随后, 为了校准Alos-1极化数据, Kimura(2009)提出以建筑物与传感器飞行方向为先验信息, 在自然地物散射对称与互易的基础上加入人工量测的建筑物极化方位角约束, 以此联合求解收发系统畸变与法拉第旋转角。虽然Kimura(2009)方法仍需要在场景中布设一个三面角反射器提供同极化通道不平衡求解约束, 但其为基于似角反射器的定标研究提供了新思路。

与统计特性相对稳定的自然参考目标相比, 建筑物等人工目标结构变化多样且复杂, 因此基于似角反射器的自主定标方法往往达不到同一时期自然地物定标法获取的精度。为了尽可能摆脱对角反射器的依赖, Shi等(2019)将似角反射器的散射特性定义为满足如下形式的强散射点目标:

$$S = [1, 0, 0, \pm t]^T \quad (6)$$

式中, t 为任意实数。式(6)表明似角反射器满足3个条件: (1) 其交叉极化响应为0; (2) 其同极化相位差为 0° 或 180° , 即发生单次或二次散射; (3) 不对同极化幅度做约束。基于此, Shi等(2019)在Quegan(1994)法初定标的条件下提出了一种基于串扰扰动测试的似角反射器定标法用于消除同极化通道不平衡相位, 并通过中国科学

院电子所X波段机载系统开展了测试。实验表明: 虽然Shi等(2019)提出的定标方法不能对同极化通道不平衡的幅度进行标定, 但其可以将X波段机载数据的 k 相位定标误差限制在 4° 以内, 其较高的相位标定精度甚至可以被用于国产GF-3卫星数据的极化相位标定。相比于自然地物标定方法, Shi等(2019)方法需要影像中存在大量的孤立强散射点作为似角反射器的候选目标, 因此更适用于高分辨率城区极化SAR影像。

本文将两类定标方法的精度、适用范围等在表1中进行了归纳总结。总体而言, 由于体散射目标能够产生较高的HV、VH极化回波, 结合散射对称性与互易性假设, 植被常被用于串扰与交叉通道不平衡的标定, 这也是van Zyl(1990)、Quegan(1994)、Ainsworth(2006)等算法的理论基础。而同极化通道不平衡 k 主要用于量化系统HH与VV通道的差异, 因此Shimada(2011)、Kimura(2009)、Shi(2014, 2019, 2020a, 2020b)、Jiang(2018)等算法在影像中寻找能够直接或间接反映地物同极化通道比的目标, 并以此作为参考完成极化定标。由于极化定标可以分为串扰标定、交叉极化不平衡标定与同极化不平衡标定等步骤, 表1中van Zyl(2019)、Quegan、Ainsworth算法可以与Shimada、Kimura、Shi、Jiang算法结合使用进行逐步定标, 以期达到较好的精度。此外, 由于参考文献在评价定标算法时采用的传感器不同, 且算法适用性、预处理手段、实验地区等均不相同, 不同算法的横向比较具有一定难度, 因此表1仅作为参考。特别需要强调, 交叉通道不平衡的评价需要在场景中布设 45° 或 225° 倾斜二面角, 因此很多定标算法的研究者未在文献中评价其所提出算法的交叉通道不平衡估计精度。

表1 不同定标算法比较

Table 1 The comparisons of different calibration algorithms

定标法	参考目标	目标约束	求解项	标定后平均残留误差	
van Zyl (1990)	植被	对称+互易	CT	CT<-33 dB	
Quegan (1994)	植被	对称+互易	CT+XI	原文未提及, Shimada评价CT<-31 dB	
自然地物 定标法	Ainsworth (2006)	植被 互易	CT+XI	POA< 3° , 其他未提及	
Shimada (2011)	亚马逊雨林	对称+互易	CT+XI+CI	CT<-32 dB, CI<0.47 dB(7.5°)	
Shi (2014, 2020a, 2020b)	Bragg地物	低螺旋	CI	CI<0.55 dB (5.8°)	
Jiang (2018)	植被	对称+互易	CT+XI+CI	CT<-36 dB, XI/CI<0.5 dB(10°)	
似角反射器 定标法	Kimura (2009)	建筑物	POA约束	CT+XI	CT<-32 dB
Shi (2019)	建筑物	对称+互易	CI相位	CI< 4°	

注:CT为串扰;XI为交叉通道不平衡;CI为同极化通道不平衡;POA为极化方位角。

4 结 语

极化定标是极化SAR数据量化应用的前提,虽然地面布设的人工定标器可以获取高精度的极化定标结果,但有源、无源角反射器的布设需要耗费大量的人力、物力,而定标场的长期维护也耗费不菲。特别地,标定长波传感器需要在地面布设大尺寸角反射器,这增加了设备制造与布设的难度。开展不依赖人工定标器的全极化SAR定标研究对即将到来的P波段Biomass传感器具有极其重要的科学意义与应用价值。

本文回顾了SAR自主定标研究,根据算法特点将相关研究内容划分为两个方向:基于自然地物的极化定标、基于似角反射器的极化定标。其中,基于自然地物的极化定标发展较为成熟,对影像分辨率没有较多限制;而基于似角反射器的定标方法常需要在影像中寻找某些点目标作为参考,因此在高分辨率雷达影像中有更好的表现。经过数十年的研究,不依赖角反射器的定标方法获得了长足发展,其定标精度已经较为接近角反射器定标结果,但仍存在一些待解决的关键问题。

首先,如何在未定标影像上进行地物类型判别是待解决的关键问题之一。不依赖角反射器的定标方法需要以某些特殊地物作为定标参考,在完成极化定标前雷达影像不能反映地物真实散射机理,传统极化分类算法难以获取地物类型。虽然光学影像可以用于地类辅助判别,但对数据获取的时效性、经济性等有较高要求。在极化误差干扰下,通过深度学习、场景理解等理论发展针对未定标影像的极化分类算法是一种可行的思路。

其次,参考地物的选取对不依赖人工定标器的定标算法有较大影响,求解误差中通常包含定标算法误差、参考目标选择误差。由于参考地物散射特性具有一定随机性,即使传感器标定参数未发生变化,定标算法在不同地区求解的结果也略有差别。如何从长条带连续观测中将参考目标误差与算法估计误差进行分离是进一步提升标定精度的关键。这也增加了不依赖人工定标器的定标算法所需数据量,对算法的快速处理提出了新要求。

此外,标定参数漂移模型的构建与规律分析也是待解决的关键问题之一。传感器标定参数往往会随硬件运行时间发生漂移,当参数漂移模型

能被准确构建时,可以通过模型拟合、数据同化等方式对不同定标方法的估计量进行融合,以削弱算法随机误差、参考目标随机误差等,产生精度更高的定标结果。

总体而言,无人工定标器的定标算法方兴未艾,如何利用影像中存在的自然地物、建筑物等对极化数据进行高精度定标仍将是雷达数据质量提升领域的重要研究方向。未来定标研究将聚焦于地物智能判别、传感器误差精准建模、标定参数同化等方面,实现准确、快速的极化雷达数据标定。

参考文献(References)

- Ainsworth T L, Ferro-Famil L and Lee J S. 2006. Orientation angle preserving a posteriori polarimetric SAR calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4): 994-1003 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.862508]
- Chang Y L, Li P X, Yang J, Zhao J Q, Zhao L L and Shi L. 2018. Polarimetric calibration and quality assessment of the GF-3 satellite images. *Sensors*, 18(2): 403 [DOI: 10.3390/s18020403]
- Chen J, Sato M and Yang J. 2011. Polarimetric calibration using distributed odd-bounce targets//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver: IEEE: 1079-1082 [DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049383]
- Dai Y H, Feng L, Hou X J, Choi C Y, Liu J G, Cai X B, Shi L, Zhang Y L and Gibson L. 2019. Policy-driven changes in enclosure fisheries of large lakes in the yangtze plain: evidence from satellite imagery. *Science of the Total Environment*, 688: 1286-1297 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.179]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Freeman A. 1992. SAR calibration: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(6): 1107-1121 [DOI: 10.1109/36.193786]
- Garthwaite M C, Nancarrow S, Hislop A, Thankappan M, Dawson J H and Lawrie S. 2015. The design of radar corner reflectors for the australian geophysical observing system: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and sar calibration at multiple microwave frequency bands. *Record 2015/03. Geoscience Australia* [DOI: 10.11636/Record.2015.003]
- Han B, Ding C B, Zhong L H, Liu J Y, Qiu X L, Hu Y X and Lei B. 2018. The GF-3 SAR data processor. *Sensors*, 18(3): 835 [DOI: 10.3390/s18030835]
- Jiang S, Qiu X L, Han B and Hu W L. 2018. A quality assessment method based on common distributed targets for GF-3 polarimetric sar data. *Sensors*, 18(3): 807 [DOI: 10.3390/s18030807]
- Kimura H. 2009. Calibration of polarimetric PALSAR imagery affect-

- ed by faraday rotation using polarization orientation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12): 3943-3950 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2028692]
- Lambers M and Kolb A. 2008. Automatic point target detection for interactive visual analysis of SAR images//IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston: IEEE: II-903-II-906 [DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779141]
- Li Y, Hong W and Pottier E. 2015. Topography retrieval from single-pass POLSAR data based on the polarization-dependent intensity ratio. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6): 3160-3177 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2369481]
- Luscombe A P. 2004. Radarsat-2 SAR image quality and calibration operations. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3): 345-354 [DOI: 10.5589/m04-007]
- Morena L C, James K V and Beck J. 2004. An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3): 221-234 [DOI: 10.5589/m04-004]
- Quegan S. 1994. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(1): 89-99 [DOI: 10.1109/36.285192]
- Quegan S, Lomas M, Papathanassiou K P, Kim J S, Tebaldini S, Giudici D, Scagliola M, Guccione P, Dall J, Dubois-Fenandez P and Paillou P. 2018. Calibration challenges for the biomass P-band SAR instrument. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia: IEEE: 8575-8578 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518646]
- Quegan S and Lomas M R. 2015. The interaction between faraday rotation and system effects in synthetic aperture radar measurements of backscatter and biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(8): 4299-4312 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2395138]
- Sadeghi Z, Zoj M J V, Hooper A and Lopez-Sanchez J M. 2018. A new polarimetric persistent scatterer interferometry method using temporal coherence optimization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11): 6547-6555 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2840423]
- Satake M, Matsuoka T, Umehara T, Nadai A, Uratsuka S and Fukuchi H. 2007. Polarimetric calibration experiment of ALOS PALSAR with polarization-selective dihedrals//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 1596-1598 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423117]
- Schneider R Z, Papathanassiou K P, Hajnsek I and Moreira A. 2006. Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4): 971-984 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.860950]
- Schuler D L, Ainsworth T L, Lee J S and De Grandi G. 1998. Topographic mapping using polarimetric SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(1): 141-160 [DOI: 10.1080/014311698216477]
- Shao Z F, Pan Y, Diao C Y and Cai J J. 2019. Cloud detection in remote sensing images based on multiscale features-convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6): 4062-4076 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2889677]
- Shi L, Li P X, Yang J, Sun H W, Zhao L L and Zhang L P. 2020a. Polarimetric calibration for the distributed Gaofen-3 product by an improved unitary zero helix framework. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 160: 229-243 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.12.003]
- Shi L, Li P X, Yang J and Zhang L P. 2012. A statistical polarimetric decomposition solution based on the maximum-likelihood estimator. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(5): 861-865 [DOI: 10.1109/lgrs.2012.2185214]
- Shi L, Li P X, Yang J, Zhang L P, Ding X L and Zhao L L. 2019. Co-polarization channel imbalance phase estimation by corner-reflector-like targets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147: 255-266 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.12.001]
- Shi L, Li P X, Yang J, Zhang L P, Ding X L and Zhao L L. 2020b. Polarimetric SAR calibration and residual error estimation when corner reflectors are unavailable. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6): 4454-4471 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2964732]
- Shi L, Sun W D, Yang J, Li P X and Lu L J. 2015. Building collapse assessment by the use of postearthquake Chinese VHR airborne SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(10): 2021-2025 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2443018]
- Shi L, Yang J and Li P X. 2014. Co-polarization channel imbalance determination by the use of bare soil. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95: 53-67 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.007]
- Shi L, Zhang L F, Zhao L L, Yang J, Li P X and Zhang L P. 2013. The potential of linear discriminative laplacian eigenmaps dimensionality reduction in polarimetric SAR classification for agricultural areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86: 124-135 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.013]
- Shimada M. 2011. Model-based polarimetric SAR calibration method using forest and surface-scattering targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(5): 1712-1733 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2090046]
- Shimada M, Isoguchi O, Tadono T and Isono K. 2009. PALSAR radiometric and geometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12): 3915-3932 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2023909]
- Siddique M A, Wegmüller U, Hajnsek I and Frey O. 2016. Single-look SAR tomography as an add-on to PSI for improved deformation analysis in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10): 6119-6137 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2581261]
- Thompson A A, Luscombe A, James K and Fox P. 2008. RADARSAT-2 mission status: capabilities demonstrated and image quality achieved//7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen: IEEE: 1-4
- Touzi R and Shimada M. 2009. Polarimetric PALSAR calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12): 3951-3959 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2032176]
- Ulander L M H. 2015. Trihedral corner reflector for polarimetric cali-

- bration of biomass//Proceedings of PolInSAR 2015. Frascati
- Van Zyl J J. 1990. Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3): 337-348 [DOI: 10.1109/36.54360]
- Villa A, Iannini L, Giudici D, Monti-Guarnieri A and Tebaldini S. 2015. Calibration of SAR polarimetric images by means of a covariance matching approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2): 674-686 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2326955]
- Wang L, Yang J, Shi L, Li P X, Zhao L L and Deng S P. 2020. Impact of backscatter in Pol-InSAR forest height retrieval based on the multimodel random forest algorithm. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(2): 267-271 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2919449]
- Wang Y T, Ainsworth T L and Lee J S. 2011. Assessment of system polarization quality for polarimetric sar imagery and target decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(5): 1755-1771 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2087342]
- Zhang H, Lu W P, Zhang B, Chen J H and Wang C. 2013. Improvement of polarimetric SAR calibration based on the ainsworth algorithm for chinese airborne polsar data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4): 898-902 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2226864]

Research process of full-polarimetric SAR calibration without using corner reflectors

SHI Lei¹, YANG Jie¹, LI Pingxiang¹, YANG Le¹, ZHAO Lingli²

1.State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 430079, China;

2.School of Remote Sensing and Information Engineering, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 430079, China

Abstract: The polarimetric synthetic aperture (PolSAR) system transmits and receives electromagnetic waves with different polarization to acquire the image measurements. Polarimetric calibration (PolCAL) is a critical stage for PolSAR image quality improvement. The general calibration technique relies on the ground deployed active and passive corner reflectors (CRs) to solve the residual system errors after the internal calibration, such as the crosstalk, channel imbalance, Faraday Rotation Angle (FRA), and so on. Although the best way to calibrate system distortion is based on ground reflectors, the manufacturing and deploying reflectors are time- and money-cost. For the common trihedral, rectangular, and pentagonal CRs, the angle bias of more than 1° between the metal plates would result in a 0.2-1 dB change of the Radar Cross Section (RCS). When the sensor wavelength increases, the ground-deployed CR length should also be enlarged to ensure that the RCS is high enough. A 1-m CR is usually required to calibrate a 0.05-m wavelength C-band satellite sensor, but a CR of more than 2 m is necessary to calibrate a 0.22-m wavelength L-band sensor. When calibrating the P-band BIOMASS, the CR length should be 5 m, which significantly increases the difficulties in the CRs manufacturing. Moreover, the azimuth and pitch angles of deployment reflector should be adjusted according the sensor pass direction and look angle. The current radar generally works on dozens of beam wave which demands heavy ground campaigns to accomplish with sensor configuration. During the operation period of the spaceborne SAR, the radiometric characteristics change with time, and the polarimetric distortions would change accordingly. Then it is of great importance to carry on the periodic calibration campaign. The regular performance of the calibration based on CRs undoubtedly increases the expenditure of time and effort. Therefore, it is vital to develop the calibration technique without using corner reflectors. This paper reports the recent research process of PolSAR calibration without using CRs. Firstly, we introduce the reason why non-reflector calibration technique is necessary and the evaluation criteria of image quality is given to help readers better understand the radar distortion. Secondly, we classify the recent non-reflector calibration methods into two categories as nature media-based calibration and corner reflector-like calibration. The properties of two categories are subsequently presented. The ways refer to the natural media, such as the in-scene vegetation in FRA-free area, to estimate the crosstalk and the cross-pol channel imbalance, while the co-pol channel imbalance may remain a constant or be solved using one or more CRs. In the scenes affected by FRA coupling with other distortions, a calibrator with no cross-polarized return may still be needed to increase the constraint for searching solutions. To get rid of the CRs, the special natural media or the CR-like point targets help to estimate the amplitude, phase of the co-pol channel imbalance and make outstanding achievements. Finally, the conclusion is given in the last section. The research on non-reflector calibration technique is meaningful and of great value for the SAR system with long wavelength.

Key words: radar image, polarimetric, corner reflector, calibration

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41601355, 41771377); Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2019CFB484)