

一种基于频域解模糊的星载P波段全极化SAR 法拉第旋转效应校正方法

张永胜¹, 于春锐², 计一飞¹, 董臻¹, 张启雷¹, 于雷¹, 甘楠¹, 姚柏栋³

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
3. 华东电子工程研究所对地观测研究与发展中心, 安徽合肥 230031)

摘要: 星载P波段合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)极化测量性能易受电离层法拉第旋转(Faraday Rotation, FR)效应的影响, 随着系统带宽增加, 以及中心频率对应的法拉第旋转角(FR Angle, FRA)增大, FR效应色散特征突显, 将导致距离向成像恶化以及额外的极化测量误差. 针对色散FR效应, 提出了一种基于频域解模糊的星载P波段全极化SAR法拉第旋转效应校正方法, 通过模糊度一致化以及频域拟合等关键步骤, 解决了P波段SAR系统FRA估计值模糊问题, 最后在频域实现色散FR效应的校正. 利用机载P波段全极化SAR数据开展了仿真验证实验, 与传统的图像域校正方法相比, 有效抑制了色散的FR效应, 显著改善了交叉极化通道图像之间的相关性.

关键词: 星载SAR; P波段; 极化测量; 电离层; 法拉第旋转; 色散

基金项目: 国家自然科学基金(No.62101568, No.61501477)

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)03-0585-08

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210698

A Correction Method of the Faraday Rotation Effect Based on the Frequency-Domain Ambiguity-Resolving in Spaceborne P-Band Full-Polarimetric SAR

ZHANG Yong-sheng¹, YU Chun-rui², JI Yi-fei¹, DONG Zhen¹, ZHANG Qi-lei¹, YU Lei¹, GAN Nan¹,
YAO Bai-dong³

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication, Beijing 100094, China;

3. Earth Observation Research and Development Center, East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: The spaceborne P-band synthetic aperture radar (SAR) polarimetric performance is susceptible to the effect of ionospheric Faraday rotation (FR). In particular, as the system bandwidth increases and the FR angle(FRA) with regard to the center frequency increase, the dispersion feature of the FR effect becomes prominent, which will result in the range-imaging deteriorations and extra polarimetric errors. As to the dispersive FR effect, a correction method of the FR effect based on the frequency-domain ambiguity-resolving in spaceborne P-band full-polarimetric SAR is proposed. By implementing the key steps of the ambiguity-extent uniformization and frequency-domain fitting, we solve the problem of FRA estimate ambiguity for P-band SAR systems. Finally, the FR correction is realized in the frequency domain. A set of airborne P-band full-polarimetric SAR data is used for the simulation validation experiment. Compared with the conventional image-domain correction method, the proposed method effectively mitigates the dispersive FR effect, and significantly improves the correlation of the cross-pol channel images.

Key words: spaceborne SAR; P-band; polarimetry; ionosphere; Faraday rotation; dispersion

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62101568, No.61501477)

1 引言

星载 P 波段合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 系统具有对叶簇、浅层地表穿透性强, 以及对生物量敏感度高等优势, 在军事和民用方面均具有巨大应用前景^[1-4]. 军事应用方面, 可穿透植被、冰雪、伪装网等覆盖物, 实现各种气象条件下对隐蔽目标的成像侦察和监视^[1-3]; 民用方面, 可实现全球生物量反演、植被高度测量、冰层探测、灾害预防与监测等^[4-6]. 首颗 P 波段 SAR 卫星, 即欧空局的 BIOMASS 任务计划于 2024 年发射^[6], 主要用于全球生物量反演. 值得关注, 其系统带宽仅 6 MHz.

然而相比于高波段系统, 星载 P 波段 SAR 系统更易受电离层效应的影响^[1-4, 7]. 电离层是地球高层大气中被电离的部分, 其中的带电粒子多到足以影响电磁波的传播, 将引起信号相位超前、群延迟、色散、折射、衰减、法拉第旋转 (Faraday Rotation, FR) 以及闪烁等效应^[7]. 电离层效应随电磁波频率降低而更加明显, 将对星载 P 波段 SAR 图像及应用造成不可忽略的影响. 特别地, 当法拉第旋转角 (FR Angle, FRA) 大于 5° , FR 效应造成的极化测量误差不可忽略, 造成地物分类失效^[8-10]. FRA 与频率平方成反比, L 波段系统对应的 FRA 不超过 40° ; 但对于中心频率为 435 MHz 的 P 波段系统, 太阳活动极大值年份的 FRA 可达 321° ^[9].

目前国内外学者提出众多 FRA 估计器^[10-15], 用于估计星载全极化 SAR 图像中的 FRA, 以及校正 FR 效应导致的极化测量误差. 除 FR 效应以外, 噪声、通道幅相不平衡以及串扰等其它极化扰动因素也会造成极化测量误差^[12-18], 从而影响 FRA 估计器性能. 现有文献一致认为 B&B 估计器具有最稳健的估计性能, 即最优估计器^[16-18]. 另外, 这些 FRA 估计器普遍存在 FRA 估计值模糊问题, 该问题会充分体现于未来的星载 P 波段全极化 SAR 系统^[10, 12, 18, 19]. 针对该问题, Freeman 提出利用定标目标、特定地物以及约束 FRA 等实现 FRA 估计值解模糊^[11], 但 these 方法自适应性能差、适用范围比较有限. 我们提出了一种像素级解模糊的方法^[18, 19], 可实现 FRA 估计值模糊度一致化, 但仍可能存在未解决的图像级模糊问题.

在隐蔽目标侦察需求牵引下, 一些学者提出利用更大的信号带宽实现星载 P 波段 SAR 高分辨率成像^[1-3]. 然而, 随着系统带宽增大, 以及中心频率对应的 FRA 增大, 电离层色散效应对距离向成像性能的影响将不可忽略^[1-3, 6]. 在此之前, 本课题组基于全极化 SAR 距离压缩模型系统分析了色散的 FR 效应对距离向成像、极化测量性能的影响^[20-22]. 研究发现^[22], 受到色散 FR 效应的影响, 距离压缩结果分为三部分: 主响应、第一副响应以及第二副响应. 对于窄带系统, 主响应近似

为理想的 sinc 函数, 两个副响应能量远低于主响应, 故可以忽略色散 FR 效应; 对于宽带或超宽带系统, 主响应主瓣展宽及峰值能量损失较严重, 第一、第二副响应能量与主响应相当, 将引入额外的旁瓣. 此外, 色散的 FR 效应可改变图像域对应的极化测量矩阵^[21, 22], 从而引入额外的极化测量误差, 这对现有的 FRA 估计与校正方法来说是一个新的挑战.

针对星载 P 波段全极化 SAR 存在的色散 FR 效应校正问题, 本文提出一种基于频域解模糊的 FR 效应校正方法. 该方法一方面利用 FRA 随距离频率变化的特征, 自适应地实现 FRA 估计值解模糊, 具有适用范围广、自适应性强等优势; 另一方面在频域实现 FR 效应校正, 很好地应对了色散 FR 效应带来的挑战, 有效抑制了其成对成像性能以及极化测量性能的双重影响.

2 模型回顾

2.1 非色散 FR 效应

线极化电磁波信号穿过电离层介质时会分裂成两个能量相等、旋向相反的圆极化波, 分别以不同的折射指数传播. 一旦穿过电离层, 这两个圆极化波就会重新合成一个新的线极化波; 而相比于原来的线极化波, 该线极化波的极化方向存在一个角度偏差, 即 FRA, 该现象称为 FR 效应^[8-10]. FRA 表示为

$$\Omega = \frac{KB \cos \Theta}{f^2} \cdot \text{TEC} = \sigma \cdot \text{TEC} \quad (1)$$

其中 $K \approx 2.3648 \times 10^4 (\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg})$ 为常数, B 为当地磁感应强度, 单位为特斯拉, Θ 为地磁场矢量与电磁波传播方向的夹角, f 为频率, TEC 为电磁波传播路径上的电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC), 单位为 TECU, 且 $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrons/m}^2$, σ 为 TEC 与 FRA 之间的传递系数. 对于典型的太阳同步轨道卫星系统 (轨道倾角约 90° , 如 ALOS 系列卫星), 根据以下公式计算^[18]

$$\cos \Theta \approx \cos I \sin D \sin \theta_i + \sin I \cos \theta_i \quad (2)$$

其中 I 为磁倾角, D 为磁偏角, θ_i 为电离层高度对应的入射角.

对于现有的星载全极化 SAR 以及即将发射的 BIOMASS 等窄带系统来说, 可忽略 FR 效应的色散特征对极化测量的影响^[20-22]. 因此, 可建立图像域的极化测量矩阵模型^[8-10]

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \mathbf{F}_c \mathbf{S} \mathbf{F}_c \mathbf{T} + \mathbf{N} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix}, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{hh} & M_{vh} \\ M_{hv} & M_{vv} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} \cos \Omega_c & \sin \Omega_c \\ -\sin \Omega_c & \cos \Omega_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $S_{hh}, S_{hv}, S_{vh}, S_{vv}$ 为极化散射矩阵 S 的各极化通道元素, $M_{hh}, M_{hv}, M_{vh}, M_{vv}$ 为极化测量矩阵 M 的各极化通道元素, N 为噪声矩阵, R, T 分别为收发系统对应的极化扰动矩阵, $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 代表通道串扰, f_1, f_2 代表通道不平衡, F_c 代表非色散 FR 效应对应的极化扰动矩阵, Ω_c 为中心频率 f_c 对应的 FRA, 即中心 FRA.

在推导 FRA 估计器时, 通常假设 FR 效应是影响极化测量矩阵的唯一因素, 极化测量矩阵简化为 $M = F_c S F_c$. 基于散射互异性原理 ($S_{vh} = S_{hv}$), M 中的各元素可简化并展开为

$$\begin{aligned} M_{hh} &= S_{hh} \cos^2 \Omega_c - S_{vv} \sin^2 \Omega_c, \\ M_{hv} &= S_{hv} + (S_{hh} + S_{vv}) \sin(2\Omega_c)/2, \\ M_{vh} &= S_{vh} - (S_{hh} + S_{vv}) \sin(2\Omega_c)/2, \\ M_{vv} &= S_{vv} \cos^2 \Omega_c - S_{hh} \sin^2 \Omega_c. \end{aligned} \quad (6)$$

从信息总量的角度来看, 线极化极化测量矩阵包含的信息量等效于圆极化基底包含的信息量, 而圆极化基底对应的极化测量矩阵 Z 表示为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{hh} & Z_{vh} \\ Z_{hv} & Z_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{hh} & M_{vh} \\ M_{hv} & M_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将其展开可得

$$\begin{aligned} Z_{hh} &= (S_{hh} - S_{vv}) + 2jS_{hv}, \\ Z_{hv} &= j(S_{hh} + S_{vv}) \exp(j2\Omega_c), \\ Z_{vh} &= j(S_{hh} + S_{vv}) \exp(-j2\Omega_c), \\ Z_{vv} &= (S_{vv} - S_{hh}) + 2jS_{hv} \end{aligned} \quad (8)$$

通过 Z_{hv} 与 Z_{vh} 的互相关反推 FRA

$$\Omega_{B\&B} = \frac{1}{4} \arg(\langle Z_{hv} Z_{vh}^* \rangle) \quad (9)$$

其中 $\arg(\cdot)$ 表示取角运算, $\langle \cdot \rangle$ 表示数学期望, $*$ 表示取复数共轭. 式(9)为著名的 B&B 估计器^[11]. 在现有的估计器中, B&B 估计器的整体估计性能最稳健^[16-18], 本文后续的估计与校正处理将采用该估计器. 值得一提的是, B&B 估计器存在 $n\pi/2$ 的模糊, 其中 n 为未知整数且表示模糊度.

2.2 色散 FR 效应

由于 FRA 与信号频率有关, 因此随着波段降低、带宽增加以及 Ω_c 增大, FR 效应的色散特征将突显. 对于星载 P 波段宽带或超宽带系统来说, 色散 FR 效应对极化测量矩阵的影响不可忽略^[19,21]. 受到色散 FR 效应的影响, 星载全极化 SAR 图像的频域形式定义为^[1,22]

$$\tilde{X}(f, \eta) = \int \sum_{pq} H_{pq}(f, \eta; P) S_{pq}(P) + N dP \quad (10)$$

其中 $pq = \{hh, hv, vh, vv\}$ 表示各极化通道, η 为方位慢时刻, $H_{pq}(f, \eta; P)$ 为 pq 极化通道对应的极化冲激响应矩阵. 忽略 FRA 扰动对全极化 SAR 图像的影响^[7],

$H_{pq}(f, \eta; P)$ 表示为

$$H_{pq}(f, \eta; P) = RF(f) I_{pq} F(f) T \cdot \tilde{g}(f, \eta; P) \quad (11)$$

其中 $F(f)$ 为色散 FR 效应对应的极化扰动矩阵, $\tilde{g}(f, \eta; P)$ 为距离向脉冲压缩理想冲激响应函数频域表示形式, 单位冲激响应矩阵 I_{pq} 表示为

$$\begin{aligned} I_{hh} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, I_{vh} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ I_{hv} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, I_{vv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

在影响分析研究中^[19-21], 通过推导图像域的极化测量矩阵, 进一步分析色散 FR 效应对星载全极化 SAR 极化测量以及距离向成像性能的影响. 对于 P 波段宽带或超宽带系统来说, 图像域的极化测量矩阵实际由主响应、第一副响应以及第二副响应三个部分组成^[21], 具有复杂的数学表示形式, 不再等效为式(3)中简化的数学模型, 从而对现有的图像域 FRA 估计与校正方法提出了新挑战. 根据式(10)~(12), 定义距离频域的极化测量矩阵为

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} \tilde{M}_{hh}(f) & \tilde{M}_{vh}(f) \\ \tilde{M}_{hv}(f) & \tilde{M}_{vv}(f) \end{bmatrix} = RF(f) SF(f) T + N \quad (13)$$

这样一来, 可以在距离频域推导 FRA 估计器, 频域的 B&B 估计器表示为

$$\tilde{\Omega}_{B\&B}(f) = \frac{1}{4} \arg(\langle \tilde{Z}_{hv}(f) \tilde{Z}_{vh}^*(f) \rangle) \quad (14)$$

其中 $\tilde{Z}_{hv}, \tilde{Z}_{vh}$ 分别为 Z_{hv}, Z_{vh} 的距离频域表示式.

3 校正原理及实现流程

针对非色散 FR 效应, 通常在图像域利用 FRA 估计器实现 FRA 估计与校正, 并通过加窗平均的方式抑制噪声的影响. 针对色散 FR 效应, 图像域校正方法可能会导致明显的残余 FR 效应, 本文提出一种基于频域解模糊的星载 P 波段全极化 SAR 法拉第旋转效应校正方法, 实施流程如图 1 所示. 下面将具体介绍 FR 效应校正原理及实现流程.

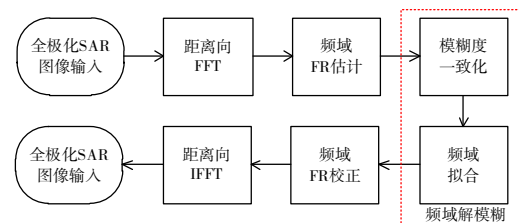


图 1 基于频域解模糊的 FR 效应校正流程

对于较小尺寸的场景, 一般可以忽略场景内 FRA 的空变性; 而对于较大尺寸的场景, 可以进行分块操作, 然后对每个子块图像进行以下操作, 确保 FRA 估计

不受 FRA 本身空变性的影响. 首先, 对输入的全极化 SAR 图像作距离向快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 并利用式 (14) 所示的频域 B&B 估计器实现频域 FRA 估计. 值得注意的是, 与图像域的 FRA 估计类似, 采用加窗平均, 有助于获得更收敛的估计结果.

由于 FRA 估计值模糊问题, FRA 估计值与真值之间存在 $n\pi/2$ 的模糊, 并且可能存在模糊度不一致的情况. 针对 P 波段系统, 图 2 给出了 FRA 估计值模糊的示意图, 设置中心频率为 500 MHz, 带宽为 135 MHz, 中心频率对应的 FRA 为 120° . 图 2(a) 为 FRA 真值随距离频率的变化曲线, 低频端对应 FRA 为 160.38° , 高频端对应 FRA 为 93.15° , 变化范围接近 70° . 图 2(b) 为理想情况下 (无其它扰动因素的影响) 频域 FR 估计结果, FRA 估计值被限制在 -45° 至 45° 的范围内, 与真值相比存在 $n\pi/2$ 的模糊. 模糊度 n 在整个频域范围内不一致: “点线”部分模糊度为 2, “虚线”部分模糊度为 1. 因此, 必须对频域 FR 估计的结果进行模糊度一致化操作^[17,18]: 将 FRA 估计值分为模糊度不同的两组, 然后将靠近 -45° 的一组估计值都加上 90° , 或者将靠近 45° 的另一组估计值都减去 90° .

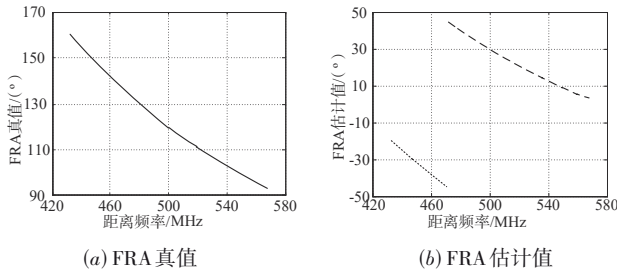


图 2 FRA 估计值模糊示意图

由于噪声、串扰、通道幅相不平衡等其它扰动因素的存在, 频域 FRA 估计获得的 FRA 估计值具有随机性分布特征, 并伴随一定的估计偏差, 可通过拟合的方式获取随距离频率变化的 FRA. 另外, 在模糊度一致化操作之后, 仍然可能存在一致模糊问题, 为了避免一致模糊问题对后续拟合造成影响, 这里构造 $\varpi(f) = \Omega(f) - \Omega_c$ 作为拟合函数, 其中 $\Omega(f) = \Omega_c f_c^2 / f^2$, 拟合过程可表示为

$$\Omega_c = \min_{\Omega_c} \left\| \underbrace{\left[\Omega(f) - \Omega_c \right]}_{\varpi(f)} - \underbrace{\left[\tilde{\Omega}_{\text{B\&B}}(f) - \tilde{\Omega}_c \right]}_{\tilde{\varpi}(f)} \right\| \quad (15)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示求取数组的范数, $\tilde{\Omega}_c$ 为 $\tilde{\Omega}_{\text{B\&B}}(f)$ 在中心频率处的平均值. 式 (15) 的拟合过程可描述为: 寻找一个 Ω_c 的合适值, 使拟合函数与实际估计值之间的均方误差达到最小.

以上两个步骤实现了 FRA 估计值的频域解模糊及精确估计. 随后, 利用拟合得到的 $\hat{\Omega}(f)$ 进行频域 FRA 校正, 校正过程可表示为

$$\tilde{\mathbf{M}}_{\text{cor}}(f) = \begin{bmatrix} \cos \hat{\Omega}(f) & -\sin \hat{\Omega}(f) \\ \sin \hat{\Omega}(f) & \cos \hat{\Omega}(f) \end{bmatrix} \cdot \tilde{\mathbf{M}}(f) \begin{bmatrix} \cos \hat{\Omega}(f) & -\sin \hat{\Omega}(f) \\ \sin \hat{\Omega}(f) & \cos \hat{\Omega}(f) \end{bmatrix} \quad (16)$$

得到 FR 效应校正后的距离频域极化测量矩阵. 最后, 对频域 SAR 图像作距离向逆 FFT (Inverse FFT, IFFT) 输出 FR 效应校正后的全极化 SAR 图像.

4 仿真验证实验

4.1 FR 效应仿真

由于尚没有在轨的 P 波段 SAR 卫星, 目前针对该系统 FR 效应校正方法的研究主要依赖于半实物仿真, 即基于机载 P 波段全极化 SAR 数据开展 FR 效应估计与校正的仿真验证实验. 如图 3 所示为原始机载全极化 SAR 伪彩色图像 (Pauli 分解), 系统中心频率为 500 MHz, 带宽为 135 MHz. 根据文献^[10], 中心频率为 435 MHz 的 P 波段系统对应 FRA 极大值达 321° , 因此对于中心频率为 500 MHz 的 P 波段 SAR 系统, FRA 极大值为 243° . 基于国际地磁参考场 (International Geomagnetic Reference Field, IGRF), 输入时间为 2021 年 7 月 1 日, 设置 $\theta_i = 30^\circ$, 可得 σ 全球分布图, 如图 4 所示, σ 总体上随纬度增高而变大, 故 FRA 极大值一般出现在中纬地区^[16]. 本节仿真将选取三个典型 FRA 值: 30° 、 120° 、 210° . 其中 $\Omega_c = 30^\circ$ 可能发生在任意地区的夜间 (TEC 较小) 或赤道附近任意时刻 (σ 较小); $\Omega_c = 120^\circ$ 可能发生在太阳活动高年的白天 (TEC > 50 TECU); $\Omega_c = 210^\circ$ 可能发生在中纬地区太阳极大值年份的单日 TEC 峰值点 (TEC > 120 TECU), 属于少数极端情况. 若不考虑色散 FR 效应以及其它误差因素, 由于 B&B 估计器存在 $n\pi/2$ 模糊, 上述三种情况对应的 FR 估计结果均为 30° .

在距离频域加入色散 FR 效应的影响, 图 5(a) 对应 $\Omega_c = 30^\circ$, 图 5(b) 对应 $\Omega_c = 120^\circ$, 图 5(c) 对应 $\Omega_c = 210^\circ$,

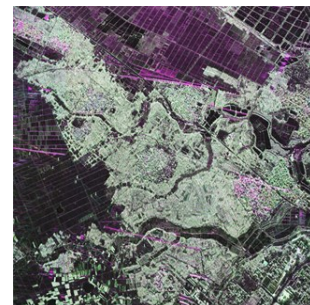


图 3 P 波段全极化 SAR 伪彩色图像

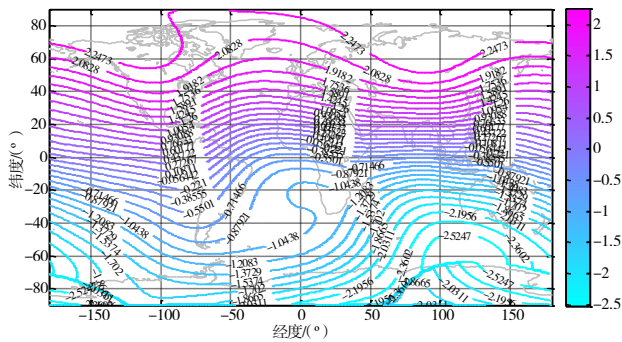
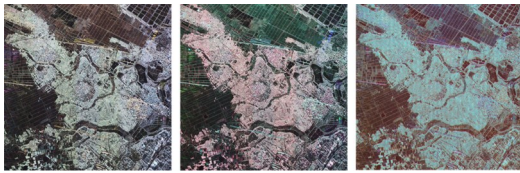


图4 TEC与FRA传递系数的全球分布图(单位:deg/TECU)

加入了噪声、通道不平衡、串扰等扰动因素,设置信噪比 15 dB,通道幅度不平衡 0.5 dB,通道相位不平衡 1°,串扰-25 dB.如图 5 所示,FR 效应造成的极化测量误差改变了 RGB 各颜色通道的原始成分,进而影响地物分类、极化干涉等全极化 SAR 后续应用.随着 Ω_c 增大,FR 色散效应突显,导致图 5(c)中出现了距离向虚像,这与文献^[22]理论分析结论一致.

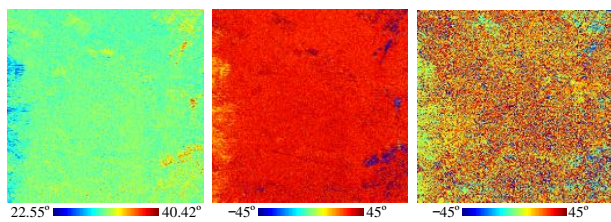


(a) $\Omega_c=30^\circ$ (b) $\Omega_c=120^\circ$ (c) $\Omega_c=210^\circ$

图5 受到FR效应影响的P波段全极化SAR伪彩色图像

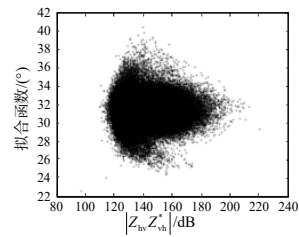
4.2 估计实验

首先进行图像域FRA估计,采用10×10加窗平均,估计结果如图6所示.结果说明FRA估计值与地物存在某种联系.为了进一步揭示这种联系,图7给出了FRA估计值关于 $|Z_{hv}Z_{vh}^*|$ 的散点图,可见 $|Z_{hv}Z_{vh}^*|$ 越大(意味地物背向散射强度越大),FRA估计值越收敛.对于 $\Omega_c=30^\circ$,图像域FRA估计平均值31.18°,标准差1.103°;对于 $\Omega_c=120^\circ$,图像域FRA估计平均值30.42°,标准差12.93°;对于 $\Omega_c=210^\circ$,图像域FRA估计平均值11.40°,标准差22.28°.因此,随着中心FRA增大,图像域FRA估计值更加分散,且存在FRA估计值模糊的问题.

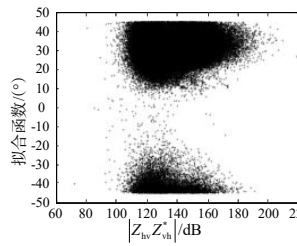


(a) $\Omega_c=30^\circ$ (b) $\Omega_c=120^\circ$ (c) $\Omega_c=210^\circ$

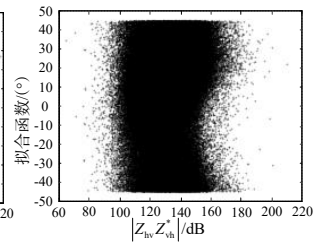
图6 图像域FRA估计结果



(a) $\Omega_c=30^\circ$



(b) $\Omega_c=120^\circ$

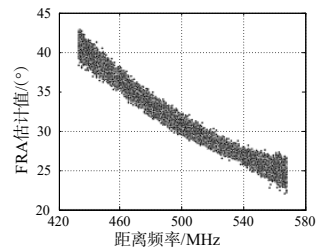


(c) $\Omega_c=210^\circ$

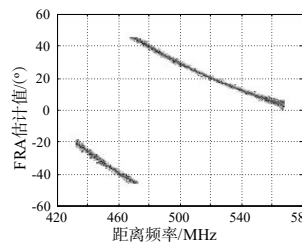
图7 图像域FRA估计结果对应的散点图

进一步采用距离频域FRA估计方法,估计值关于距离频率的散点图如图8所示.对于 $\Omega_c=30^\circ$,FRA估计值不存在模糊问题,且 $\tilde{\Omega}_c=31.01^\circ$;对于 $\Omega_c=120^\circ$ 、 $\Omega_c=210^\circ$,FRA估计值都存在模糊度不一致问题,且 $\tilde{\Omega}_c=29.01^\circ$ 、 $\tilde{\Omega}_c=31.19^\circ$.故有必要对图8(b)、(c)进行模糊度一致化的操作,这里很容易可以将FRA估计值分为两组,较小的一组FRA估计值整体加上90°.

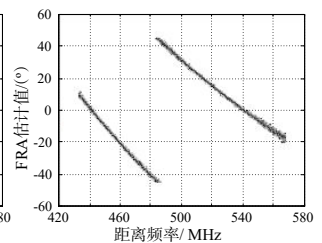
接下来,对模糊度一致化之后的FRA估计值进行



(a) $\Omega_c=30^\circ$



(b) $\Omega_c=120^\circ$



(c) $\Omega_c=210^\circ$

图8 距离频域FRA估计值散点图

拟合,拟合结果如图9所示.最终,分别估计得到 $\hat{\Omega}_c = 31.13^\circ$ 、 $\hat{\Omega}_c = 120.05^\circ$ 、 $\hat{\Omega}_c = 210.35^\circ$,非常接近于真值,相比于图像域FRA估计方法具有更高的估计精度.另外,图9的估计结果意味着距离频域FRA估计方法能够有效地实现FRA估计值的解模糊,从而精确得到FRA关于距离频率的变化曲线.

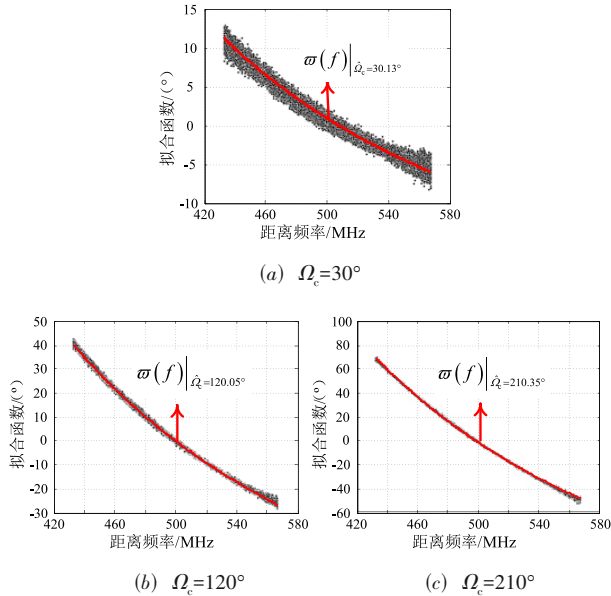


图9 距离频域FRA估计值的拟合结果

4.3 校正实验

由于FR效应会导致交叉极化通道(HV/VH)之间相干性减弱,因此可通过计算校正前后交叉极化通道之间的相关系数来定量描述FR效应校正的效果,其计算原理类似于干涉SAR主辅图像复相干系数的计算,即按照以下公式

$$\gamma = \frac{\langle M_{hv} M_{vh}^* \rangle}{\sqrt{\langle |M_{hv}|^2 \rangle \langle |M_{vh}|^2 \rangle}} \quad (17)$$

根据式(16),进一步利用拟合得到的FRA曲线对全极化SAR图像进行频域FRA校正.校正前后HV/VH相关系数幅度 $|\gamma|$ 分别如图10~图12所示.对于 $\Omega_c = 30^\circ$ 、 $\Omega_c = 120^\circ$ 、 $\Omega_c = 210^\circ$ 三种情况,校正前的 $|\gamma|$ 均值分别为0.41、0.41、0.42,图像域FRA校正后的 $|\gamma|$ 均值为0.67、0.43、0.41,频域FRA校正后的 $|\gamma|$ 均值为0.72、0.72、0.73.这说明采用传统的图像域FRA校正方法,尽管校正后HV/VH通道图像的相干性有所提高,但是校正以后仍然存在色散FR效应导致的残余极化测量误差,且残余极化测量误差随 Ω_c 增大而变大.相比于 $\Omega_c = 30^\circ$ 、 $\Omega_c = 120^\circ$ 、 $\Omega_c = 210^\circ$ 对应的色

散FR效应更加明显,残余极化测量误差也更加显著,此时频域FRA校正的必要性更加突出.另外,以上实验证明了频域FRA校正方法在 $\Omega_c = 30^\circ$ 、 $\Omega_c = 120^\circ$ 、 $\Omega_c = 210^\circ$ 三种情况下均具有很好的性能,即验证了该方法对于不同电离层情况具有很好的适应性.

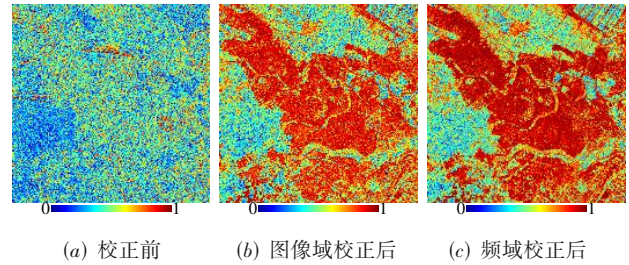


图10 FR校正前后HV/VH相关系数幅度($\Omega_c = 30^\circ$)

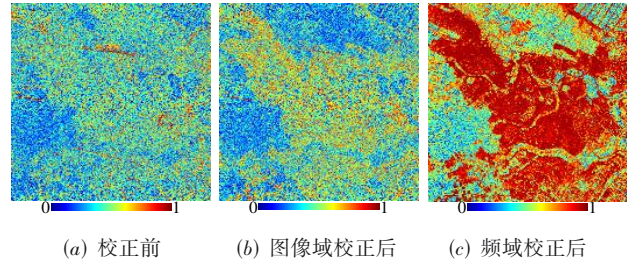


图11 FR校正前后HV/VH相关系数幅度($\Omega_c = 120^\circ$)

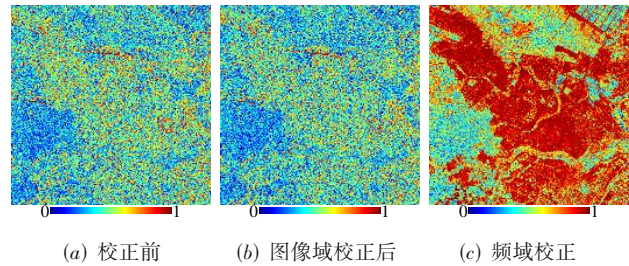


图12 FR校正前后HV/VH相关系数幅度($\Omega_c = 210^\circ$)

5 总结

针对星载P波段全极化SAR图像中色散FR效应的校正问题,国际上目前还是空白状态;而针对针对P波段系统中可能出现的FRA估计值模糊问题,国际上主要依靠特定场景,适用范围有限.该文提出了一种基于频域解模糊的星载P波段全极化SAR法拉第旋转效应校正方法,相比于传统的图像域FRA估计与校正方法,该方法既巧妙地利用数据本身解决了FRA估计值模糊的问题,提高了FRA估计的精度,又针对性地实现了色散FR效应的校正,极大地改善了校正后HV/VH通道图像之间的相干性.该方法填补了相关领域国内外研究

空白,能够为我国未来的星载P波段全极化SAR系统论证以及数据应用提供有力的技术支撑。

致谢 在此感谢中国电子科技集团第38研究所提供机载P波段全极化SAR数据。

参考文献

- [1] 李力. 星载P波段合成孔径雷达中的电离层效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
LI L. Research on Ionospheric Effects in Spaceborne P Band Synthetic Aperture Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] 杨淋, 赵宁, 姚佰栋, 等. 高分辨率星载P波段SAR系统参数设计[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(1): 19-28.
YANG L, ZHAO N, YAO B D, et al. Parameter design of a high resolution space-borne P-band SAR system[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(1): 19-28. (in Chinese)
- [3] WANG C, CHEN L, LIU L. A new analytical model to study the ionospheric effects on VHF/UHF wideband SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4545-4557.
- [4] SANDBERG G, ULANDER L M H, WALLERMAN J, et al. Measurements of forest biomass change using P-band synthetic aperture radar backscatter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6047-6061.
- [5] 夏东坤, 李洋, 乞耀龙, 等. 星载极化干涉SAR系统电离层去相干研究[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1309-1314.
XIA D K, LI Y, QI Y L, et al. Investigation on ionospheric decorrelation of space-borne pol-in-SAR systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1309-1314. (in Chinese)
- [6] ROMONGASSIE S, VALLE P, ARPESI P G, et al. P-band SAR instrument for BIOMASS[C]//Proceedings of the 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: VDE, 2014: 1156-1159.
- [7] XU Z W, WU J, WU Z S. A survey of ionospheric effects on space-based radar[J]. Waves in Random Media, 2004, 14(2): S189-S273.
- [8] GAIL W B. Effect of faraday rotation on polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 301-307.
- [9] FREEMAN A, SAATCHI S S. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1607-1616.
- [10] QI R Y, JIN Y Q. Analysis of the effects of faraday rotation on spaceborne polarimetric SAR observations at P-band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1115-1122.
- [11] BICKEL S H, BATES R H T. Effects of magneto-ionic propagation on the polarization scattering matrix[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 1089-1091.
- [12] FREEMAN A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1617-1624.
- [13] CHEN J, QUEGAN S. Improved estimators of faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 846-850.
- [14] LI L, ZHANG Y S, DONG Z, et al. New Faraday rotation estimators based on polarimetric covariance matrix[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(11): 133-137.
- [15] WANG C, LIU L, CHEN L, et al. Improved TEC retrieval based on spaceborne PolSAR data[J]. Radio Science, 2017, 52(3): 288-304.
- [16] MEYER F J, NICOLL J B. Prediction, detection, and correction of faraday rotation in full-polarimetric L-band SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3076-3086.
- [17] ROGERS N C, QUEGAN S. The accuracy of faraday rotation estimation in satellite synthetic aperture radar images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4799-4807.
- [18] JI Y F, ZHANG Y S, ZHANG Q L, et al. Retrieval of ionospheric faraday rotation angle in low-frequency polarimetric SAR data[J]. IEEE Access, 7: 3181-3193.
- [19] LI J, JI Y, ZHANG Y, et al. A novel strategy of ambiguity correction for the improved faraday rotation estimator in linearly full-polarimetric SAR data[J]. Sensors (Basel), 2018, 18(4): E1158.
- [20] LI L, ZHANG Y S, DONG Z, et al. Ionospheric polarimetric dispersion effect on low-frequency spaceborne SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2163-2167.
- [21] LI J H, JI Y F, ZHANG Y S, et al. Effects of polarimetric dispersion on future spaceborne P-band ultra-wideband SAR[J]. Electronics Letters, 2018, 54(22): 1292-1294.
- [22] ZHANG Y S, JI Y F, DONG Z. Distortions imposed by

ionospheric faraday rotation dispersion in low-frequency full-polarimetric SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5. .

作者简介



张永胜 男, 1977年12月出生于内蒙古. 博士, 现为国防科技大学电子科学学院智能感知系主任、正高级工程师、硕士生导师, 主要研究方向: SAR系统设计与信号处理.

E-mail: zyscn@163.cn



于春锐 男, 1982年出生于河北省衡水市, 博士, 现为北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 主要研究方向为微波遥感卫星总体设计.

E-mail: ycrzxc@163.com



计一飞(通讯作者) 男, 1992年7月出生于江苏江阴. 博士, 现为国防科技大学电子科学学院讲师, 主要研究方向: SAR信号处理、电离层效应研究.

E-mail: jiyifei@nudt.edu.cn



董臻 男, 1973年9月出生于安徽. 博士, 现为国防科技大学电子科学学院教授、博士生导师, 主要研究方向: SAR系统设计与信号处理、地面动目标指示(GMTI)以及数字波束形成技术.

E-mail: dongzhen@vip.sina.com



张启雷 男, 出生于甘肃. 博士, 现为国防科技大学电子科学学院副研究员, 主要研究方向: 合成孔径雷达、信号处理等.

E-mail: zhangqilei@nudt.edu.cn



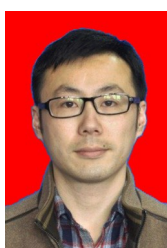
于雷 男, 1995年1月出生于吉林省延吉市. 现为国防科技大学电子科学学院博士研究生, 主要研究方向: 雷达信号处理、合成孔径雷达.

E-mail: yulei15@nudt.edu.cn



甘楠 男, 现为国防科技大学电子科学学院硕士研究生, 主要研究方向为SAR信号处理.

E-mail: rhttgs@163.com



姚柏栋 男, 1984年出生于安庆. 博士, 现为中国电子科技集团华东电子工程研究所对地观测研究与发展中心高级工程师, 主要研究方向为星载合成孔径雷达系统设计、P波段星载SAR系统设计、应用处理以及电离层效应校正方法.

E-mail: yaobaidong1@163.com