

## 基于RadarSat2数据的法拉第旋转校正算法实验

陶利, 曲圣杰, 陈曦

(中国电子科技集团公司第38研究所, 合肥 230088)

**摘要:** 鉴于星载合成孔径雷达(SAR)系统受法拉第旋转效应引入的极化矢量偏移影响, 研究基于极化 SAR 传输模型给出常用星载 SAR 法拉第旋转效应校正算法, 还原目标真实散射特性以用于地面精确信息反演. 实验给出了四种常用校正算法关于 C 波段全极化 RadarSat2 数据的法拉第旋转角估计性能分析, 对比得到 Bickel&Bates 算法及 Freeman 算法具有较稳健的估计性能表现; 并基于其对整景数据进行法拉第旋转效应估计, 得到该雨林区域数据具有  $0^\circ \sim 2^\circ$  的法拉第旋转角变化, 对于一般遥感数据应用不会产生较大影响. 这为进一步精确监测星载极化 SAR 系统失真变化打下了技术基础.

**关键词:** 合成孔径雷达; 星载合成孔径雷达; 法拉第旋转校正

**中图分类号:** TN958

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-5839(2015)02-0079-05

基于多极化星载合成孔径雷达(SAR)数据的定量参数反演可以获取更加广阔区域的精确地面信息, 但由于极化系统存在通道间隔离度不够高、电磁波传输过程受到复杂电磁传输条件等影响, 使得极化 SAR 散射矩阵测量引入失真<sup>[1-3]</sup>. 尤其对于低频段星载 SAR 系统, 如在太阳活动活跃期, 75% 的 L 波段星载 SAR 都将受到大于  $5^\circ$  以上的法拉第旋转角度影响<sup>[4]</sup>. 因此, 一般来说, 对于星载 SAR 系统校正, 应综合考虑法拉第旋转和系统失真参数的影响, 提出受电离层效应影响下的极化 SAR 定标方案, 以获取雷达数据中的真实全极化散射信息<sup>[5-9]</sup>.

本文主要考虑星载 SAR 系统受法拉第旋转效应引入的极化矢量偏移影响, 以及如何对其进行估计校正以还原目标真实散射矩阵信息. 目前研究方法有 2 种: ①对失真参数逐步求解, 如对多极化数据进行极化串扰及通道不平衡参数定标, 再进行法拉第旋转角的估计校正<sup>[10-14]</sup>; ②将法拉第效应同其他系统失真参数一起联合求解, 进而获得极化数据的整体校正<sup>[15-17]</sup>. 本文主要针对第 1 种方法, 即对已经过良好极化串扰及通道不平衡定标后的极化 SAR 图像, 分析其受法拉第旋转效应影响及如何进行校正估计与去除, 然后基于一景雨林区域的 C 波段全极化 RadarSat2 数据进行常用法拉第旋转效应校正算法的性能对比实验, 并给出此景雨林数据的法拉第旋转估计结果分析.

### 1 星载 SAR 法拉第校正方法

#### 1.1 极化 SAR 传输模型

极化 SAR 天线发射的电磁波经由大气传输后照射地面目标, 经反射后带有目标散射特性返回接收天线进行成像. 研究人员通过建立极化雷达系统发射和接收模型, 并明确通道串扰、通道不平衡及法拉第旋转等系统失真模型参数, 建立目标实测与真实散射矩阵之间关系<sup>[18]</sup>, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{O} &= \mathbf{N} + A e^{j\phi} \begin{bmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{bmatrix} = \\ &= A e^{j\phi} \mathbf{RFSFT} + \mathbf{N} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{O}$  为极化观测矩阵,  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$  为目标真实散射矩阵,  $A$  为雷达系统幅度增益,  $\phi$  为地物与雷达之斜距带来的系统相位漂移,  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{bmatrix}$  和  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{bmatrix}$  分别代表天线接收/发射

过程中引入的极化扰动矩阵,  $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix}$

为电磁波传输电离层时引入的法拉第旋转角  $\Omega$  影响矩阵,  $\mathbf{N}$  为系统噪声. 因此, 通过对地面已知散射特性目标进行建模求解可以获取目标真实散射矩阵信息. 考虑经过良好极化校正如极化串扰及通道不平衡定标后的 SAR 图像, 可以

收稿日期: 2015-01-26

基金项目: 国家高技术发展计划 863 资助项目(2011AA120404)

作者简介: 陶利(1983-), 女, 工程师, 博士, 主要从事 SAR 图像处理研究.

简要分析仅受法拉第旋转影响的极化 SAR 观测模型为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} = \mathbf{FSF}$$

因此,若已知法拉第旋转角  $\Omega$ ,则可得到目标真实散射矩阵,即

$$\mathbf{S} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{F}^{-1} \quad (3)$$

## 1.2 法拉第旋转校正方法

早期法拉第旋转效应估计是基于电离层数据模型和地球电磁场模型,由于电离层的不断变化,其实际情况与模型有一定差别,后来的研究专注于从极化 SAR 回波数据中估计法拉第旋转角<sup>[10-14]</sup>. 对于经过良好极化通道串扰及不平衡定标后的极化 SAR 图像,常用的法拉第旋转校正算法有 Bickel&Bates 算法<sup>[10]</sup>、Freeman 算法<sup>[11]</sup>、Qi&Jin 算法<sup>[12-13]</sup>及 Chen&Quegan 算法<sup>[14]</sup>等,其方法原理及处理步骤简要介绍如下.

Bickel&Bates 算法,首先将观测矩阵从线极化通道转变到圆极化基下,即

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{hh} & M_{vh} \\ M_{hv} & M_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过假设散射互易并忽略系统噪声,可得到法拉第旋转角,即

$$\hat{\Omega}_{BB} = \frac{1}{4} \arg(Z_{12} Z_{21}^*) \quad (5)$$

通常,该方法采用图像的区域多样本平均来降低估计方差,以得到法拉第旋转角的最大似然估计.

对于由图像的区域测量得到的极化协方差矩阵  $C_{pq} = \langle M_p M_q^* \rangle$  (其中,  $p=1, 2, 3, 4$ ,  $q=1, 2, 3, 4$ . 这里  $M_1=M_{hh}$ 、 $M_2=M_{hv}$ 、 $M_3=M_{vh}$ 、 $M_4=M_{vv}$ ,  $\langle M_p M_q^* \rangle$  为窗口区域内的  $M_p$  与  $M_q$  复共轭之积的区域平均), Freeman 算法的角度估计为

$$\hat{\Omega}_F = \pm \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{\langle (M_{vh} - M_{hv})(M_{vh} - M_{hv})^* \rangle}{\langle (M_{hh} + M_{vv})(M_{hh} + M_{vv})^* \rangle} \right)^{1/2} = \pm \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{C_{22} + C_{33} - 2 \operatorname{Re}(C_{23})}{C_{11} + C_{44} + 2 \operatorname{Re}(C_{14})} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中  $\operatorname{Re}$  表示取复数的实部.

同样基于协方差矩阵测量, Qi&Jin 算法基于协方差矩阵元素的虚部特性进行角度估计, Chen&Quegan 算法则在反射对称性条件下,基于协方差矩阵的非对角线元素项为零进行方程式估计.

Qi&Jin 算法估计如下:

$$\hat{\Omega}_{QJ} = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{\operatorname{Im}(C_{13} - C_{12})}{\operatorname{Im}(C_{14})} \right) \quad (7)$$

式中  $\operatorname{Im}$  表示取复数的虚部.

Chen&Quegan 算法的角度估计为

$$\hat{\Omega}_{CQ} = \begin{cases} \frac{1}{2}(\arg(Z_3) + \pi) & \operatorname{Im}(\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle) < 0 \\ \frac{1}{2}\arg(Z_3) & \operatorname{Im}(\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $Z_3 = \operatorname{Im}(C_{14}) + j \operatorname{Im}(\frac{C_{13} - C_{12} + C_{34} - C_{24}}{2})$ .

以上估计方法中前三者具有  $\pi/2$  估计模糊度,而 Chen&Quegan 估计方法具有  $\pi$  模糊度,因此最终的法拉第旋转角具有如下形式:

$$\hat{\Omega} + n\pi/2 \text{ 或 } \hat{\Omega} + n\pi \quad (9)$$

式中  $n$  为未知整数,可以通过参考一个已知角度进行估计. 然后将其代入式(3)即可获得真实目标散射矩阵信息反演.

## 2 数据实验与分析

### 2.1 RadarSat2 实验数据

本文采用一景亚马逊雨林区域的全极化 RadarSat2 数据用于算法分析实验,图像获取时间为 2014-07-15. 为进行法拉第旋转角估计及算法对比分析,对数据的极化串扰水平及通道不平衡水平进行检验分析,采用常用的分布目标估计算法 Ainsworth 算法<sup>[19]</sup>对数据的极化失真水平进行估计,得到了表征多极化数据串扰水平参数  $(u, v, w, z)$  及通道不平衡参数估计,如图 1 所示. 可以看到,对于该景雨林数据的串扰水平估计在 -30 dB 左右,通道幅度不平衡约为 1,相位不平衡小于  $1^\circ$ ,这也验证了该 RadarSat2 数据已经过良好极化定标,可用于接下来的法拉第效应校正算法实验.

### 2.2 算法比较分析

首先采用  $800 \times 500$  局部数据进行算法及性能分析实验. 需要指出的是,虽然已知雨林区域的法拉第旋转角较小,但对于所选取数据区域其真实角度却是未知的,因此为验证及对比分析算法估计精度,对原数据加入  $10^\circ$  的法拉第旋转效应影响,然后对原数据及已加入  $10^\circ$  旋转影响数据分别进行算法估计实验,最后由估计结果对比分析不同算法性能,进而采用性能较好的算法用于整景 RadarSat2 数据的法拉第旋转角估计.

图 2 给出采用 4 种算法对原数据进行的法拉第旋转角估计,对加入  $10^\circ$  法拉第旋转角影响数据的估计结果表现与图 2 相同,表 1 给出 4 种算法对原数据和加入  $10^\circ$  旋转角效应影响数据的估计结果及其统计特性. 对于原数据, Bickel&Bates 算法及 Freeman 算法能够给出较小的方差估计,而 Qi&Jin 算法、Chen&Quegan 算法的方差估计较

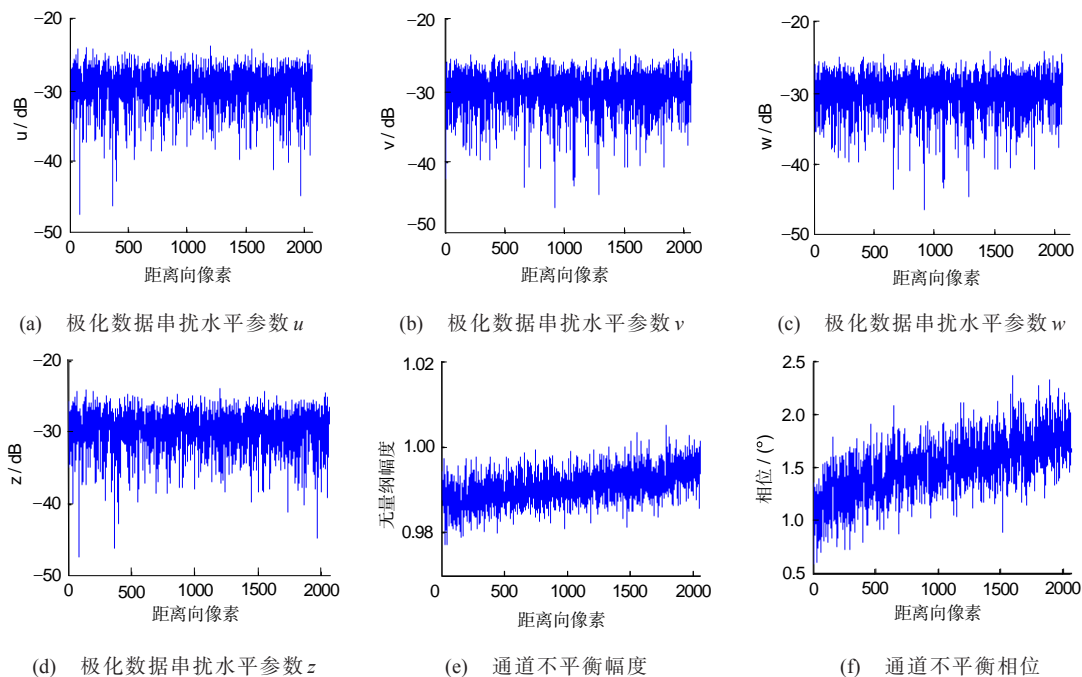


图1 RadarSat2极化数据串扰及通道不平衡水平

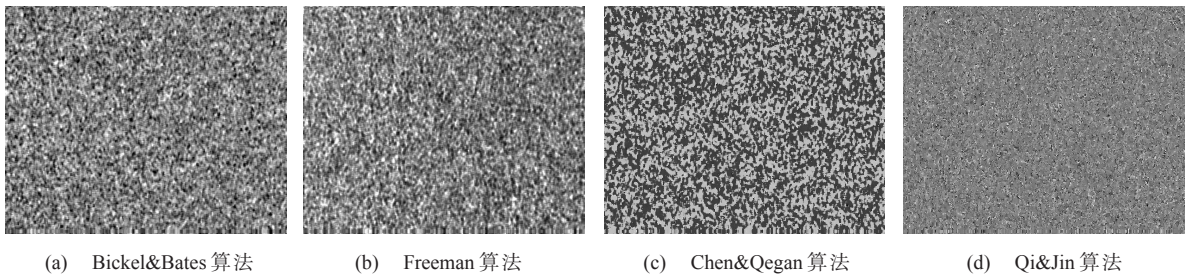


图2 4种常用算法关于RadarSat2数据的法拉第旋转角估计

大. 对比4种算法对原数据及加入误差后数据的均值估计结果,可以看到,Bickel&Bates算法能够比较准确地给出约 $10^{\circ}$ 的差值, Freeman算法、Chen&Qegan算法及Qi&Jin算法给出约 $8^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 的差值.

表1 4种算法的法拉第旋转角估计及其统计特性

算法	原数据的法拉第旋转角估计			
	最小值/( $^{\circ}$ )	最大值/( $^{\circ}$ )	均值/( $^{\circ}$ )	方差
Bickel&Bates	-1.250 120	1.175 940	0.013 095	0.305 498
Freeman	1.078 204	3.623 392	2.062 568	0.343 070
Chen&Qegan	-44.994 400	134.989 838	40.322 809	45.421 140
Qi&Jin	-44.997 944	44.997 601	0.023 464	11.704 215
算法	加入 $10^{\circ}$ 旋转角效应影响数据的法拉第旋转角			
	最小值/( $^{\circ}$ )	最大值/( $^{\circ}$ )	均值/( $^{\circ}$ )	方差
Bickel&Bates	8.749 882	11.175 940	10.013 096	0.305 498
Freeman	9.032 817	11.438 487	10.189 170	0.304 085
Chen&Qegan	-44.998 192	134.994 156	49.650 510	45.423 441
Qi&Jin	-44.999 638	44.996 628	8.830 584	11.950 270

Qi&Jin算法及Chen&Qegan算法估计结果需要进行说明如下. 对于Qi&Jin算法,其详细的算法步骤中还将包括一个较复杂的相位解缠步骤,

通过对周围相邻像素之间的阶跃值大小进行判断,进而采取一定策略进行相位集成,再参考已知点法拉第旋转角获取图像每个像素的真实角度估计. 本文算法考虑其较大的估计方差及较复杂的估计步骤,并没有对初步的估计结果进行解缠,致使出现较大的上下阶跃变化结果. 同时Chen&Qegan算法的估计结果也具有 $\pi$ 模糊度误差,需要借助全球电离层数据地图进行估计及标定去除,而由于数据及步骤的缺失,也致使其估计结果出现很大的偏差.

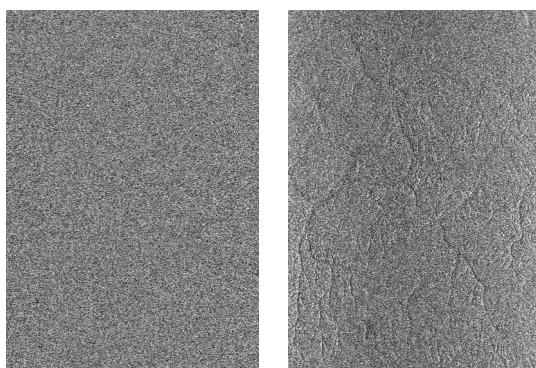
通过实验数据分析可知,Bickel&Bates算法能够给出较好的估计效果, Freeman算法能够给出比较细节的图像信息反演(见图2(b)),并鉴于算法步骤的简洁易实现,使用该2种方法对RadarSat2全极化数据进行法拉第旋转估计. 关于Freeman算法结果的细节展现说明如下:由于该算法本质上是一种相对相位测量方法<sup>[11]</sup>,这种方法同干涉测量一样对地形高度差有很好的反映,即图像中的细节信息表面上相对地反映了地物高度信息. 而实际上对法拉第旋转角估计,这种相邻区间内的相对细节纹理变化可以理解为



Freeman 算法的估计偏差,文献[18]指出该算法对于不同的图像噪声等效散射系数(NESZ),存在具有  $0.6^{\circ}\sim 1.3^{\circ}$  的法拉第旋转角估计偏差. 所以简言之,其图像的细节信息是由算法本身带来的可相对表现地物高低变化的估计偏差.

### 2.3 RadarSat2 数据的法拉第旋转角估计

本文采用 Bickel&Bates 算法及 Freeman 算法分别对 2014-07-15 获取的亚马逊雨林区域全极化 RadarSat2 数据进行法拉第旋转效应估计如图 3 所示,2 种算法下的法拉第旋转角估计及其统计特性参数如表 2 所示,可见二者估计值的相对区间是比较一致的. 需要指出的是,由于这里没有已知点数值进行参考,所以二者均值的差异没有绝对意义上的区别,但是可以从法拉第旋转角估计值的统计参数上,得到法拉第旋转角的相对值参考意义,从而了解其整体统计特性.



(a) Bickel&Bates 算法 (b) Freeman 算法

图 3 雨林数据的法拉第旋转角估计结果

表 2 2 种算法的法拉第旋转角估计及其统计特性

算法	法拉第旋转角估计		
	区间/ $^{\circ}$	均值/ $^{\circ}$	方差
Bickel&Bates	-1.5~1.5	0.017 292	0.308
Freeman	0.9~4.5	2.089 048	0.358

## 3 结论

本文给出了 4 种星载 SAR 法拉第旋转校正算法关于 RadarSat2 数据的实验及比较分析,通过实验估计及结果分析,比较出性能较稳健的 2 种算法并进而使用其对整景雨林数据进行法拉第旋转角估计. 实验结果表明,对于 C 波段的雨林区 RadarSat2 数据,其图像分布着约  $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$  的法拉第旋转角变化,也再次验证对于一般的极化数据应用及地物极化响应分析,C 波段雨林区域全极化数据一般不需要进行法拉第旋转角校正.

本文经过良好极化定标后的极化 SAR 数据的法拉第旋转角估计,可以考虑法拉第旋转影响采用上述估计方法. 实际雷达系统中极化通道

不平衡、天线串扰及系统噪声等畸变影响会与法拉第旋转效应耦合在一起对目标极化散射测量造成影响,尤其是极化串扰和法拉第旋转效应之间存在较难区分的耦合模糊,加大了参数估计的难度. 因此,对于存在法拉第旋转效应的星载 SAR 系统标定,进一步综合考虑各种极化畸变因子及其相互作用影响,对于精确监测星载极化 SAR 系统失真及其参数变化影响具有重要研究意义.

### 参考文献:

- [1] TOUZI R, SHIMADA M. Polarimetric PALSAR calibration[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12):3951-3959.
- [2] SHIMADA M, ISOGUCHI O, TADONO T, et al. PALSAR radiometric and geometric calibration[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12):3915-3932.
- [3] CAVES R. Radarsat-2 polarimetric calibration performance over five years of operation[C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar. Belin, 2014:1057-1060.
- [4] VILLA A, IANNINI L, GIUDICI D, et al. Calibration of SAR polarimetric images by means of a covariance matching approach[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2):674-686.
- [5] SHIMADA M. Mode-based Polarimetric SAR calibration method using forest and surface-scattering targets[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(5):1712-1733.
- [6] MORIYAMA T, SHIMADA M, Watanabe M, et al. The application of polarimetric calibration using polarimetric scattering characteristics of urban areas to alos PALSAR [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, Colorado, USA. 2006:348-351.
- [7] SANDBERG G, ERIKSSON L B. Measurements of Faraday rotation using polarimetric PALSAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(1):142-146.
- [8] KIMURA H. Calibration of polarimetric PALSAR imagery affected by Faraday rotation using polarization orientation[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12):1-8.
- [9] ZHANG Jing-jing, GUO Sheng-long, LI Yang, et al. Polarimetric calibration in the presence of small Faraday rotation[C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar. Belin, 2014:386-389.
- [10] BICKEL S H, BATES R H T. Effects of magneto-ionic propagation on the polarization scattering matrix[J]. Proc. IRE, 1965, 53(8):1089-1091.
- [11] FREEMAN A. Calibration of linearly polarized polarimet-

- ric SAR data subject to Faraday rotation[J].IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing,2004,42(8):1617-1624.
- [12] QI Ren-yuan, JIN Ya-qiu. Analysis of the effects of Faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR observations at P-band[J].IEEE Trans.on Geoscience and Remote Sensing, 2007,45(5):1115-1122.
- [13] 戚任远,金亚秋.星载全极化SAR观测P波段Faraday旋转效应分析与消除[J].自然科学进展,2007,17(7):920-929.
- [14] CHEN Jie,QUEGAN S. Improved estimators of Faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR data[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2010,7(4):846-850.
- [15] FUJITA M.Polarimetric calibration of space SAR data subject to Faraday rotation —— a three-target approach[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.Seoul,Korea,2005:5497-5500.
- [16] TOUZI R,HAWKINS R K, COTE S.High-precision assessment and calibration of polarimetric RADARSAT-2 SAR using transponder measurements[J].IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2013,51(1):487-503.
- [17] 彭鹏,张平,黄瑶.校正法拉第旋转影响的极化SAR图像定标算法[J].系统仿真学报,2009,21(9):2539-2545.
- [18] ROGERS N C,QUEGAN S.The accuracy of Faraday rotation estimation in satellite SAR images[J].IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(8):4799-4808.
- [19] AINSWORTH T L, FERRO-FAMIL L, LEE J S.Orientation angle preserving a posteriori polarimetric SAR calibration[J].IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing,2006,44(4):994-1003.

## Experiments on Faraday rotation correction algorithms based on RadarSat2 data

TAO Li, QU Sheng-jie, CHEN Xi

(No.38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

**Abstract:** Considering that the impacts of polarimetric vector offset introduced by Faraday rotation effects on the space-borne SAR system, this paper presents Faraday rotation correction algorithms for space-borne SAR in common use based on the polarization SAR transmission model, and reproduces the real scattering characteristics for precise information inversion of the ground targets. By experiments, the performance analysis of Faraday rotation angle estimation of C-band polarimetric Radarsat2 data is given, based on the four frequently used correction algorithms. By contrast, it is concluded that Bickel&Bates algorithm and Freeman algorithm are of the more robust performances, and based on using them to estimate Faraday rotation effect for the panoramic data, it comes to a conclusion that the data in this rain forest area are of  $0^{\circ}$ - $2^{\circ}$  change of Faraday rotation angle, thus having no bigger impacts on those common remote-sensing data, which lays a technical basis for further monitoring precisely the distortion change of space-borne polarimetric SAR system

**Key words:** synthetic aperture radar(SAR);space-borne SAR;Faraday rotation correction

## 《空军预警学院学报》投稿须知

《空军预警学院学报》主要刊登以预警监视技术、信息对抗技术、军事信息系统为主的学术论文。欢迎军内外院校、科研单位、雷达兵部队、电子对抗部队等有关以上专业内容的来稿。凡属相关栏目的科研项目(基金项目)论文,本刊将优先刊登。来稿时请注明“项目名称、项目代号或计划编号及作者信息”。地方作者可以通过互联网电子邮箱 hpdj288@263.net 投稿,军内作者投稿通过军训网点击空军预警学院主页→科研学术→学院学报。

所有稿件必须经稿件作者所在单位的领导、业务部门及保密委员会审查签字,加盖公章,并注明“无涉密内容,同意发表”字样。将保密审查单原件寄至本刊编辑部,通信地址:湖北省武汉市江岸区黄浦大街288号《空军预警学院学报》编辑部(邮编:430019)。

《空军预警学院学报》编辑部