

一种基于分布目标的 PolSAR 法拉第旋转角和通道不平衡参量的估计方法

段俊峰 洪峻

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 星载极化 SAR 定标时除了考虑雷达系统本身的交叉耦合 δ 和通道不平衡 f 系统失真参数的校正外还需要考虑法拉第旋转角 Ω 的校正问题。该文提出了一种利用分布目标统计特性估计法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f 的方法,该方法不需要预先知道所用目标的散射矩阵,而只需要两种不同类型分布目标满足互易性和不相关性。在实际应用中,同一场景内要找到满足要求的两种不同类型分布目标(如森林、草地、农田等)是比较容易的事情,因此该方法具有实际应用价值。该文还通过半物理仿真实验对该方法的有效性进行了验证。

关键词: 极化 SAR; 极化 SAR 定标; 法拉第旋转角; 通道不平衡

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2069-04

An Estimation Method of Faraday Rotation and Channel Imbalance of PolSAR Using Distributed Targets

Duan Jun-feng Hong Jun

(Institute of Electronics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Besides the crosstalk δ and channel imbalance f of SAR system, calibration of the spaceborne Polarimetric SAR(PoSAR) also needs to consider the correction of Faraday rotation Ω . This paper proposes a method for estimating Faraday rotation and channel imbalance which uses the statistical characteristics of distributed targets. The method does not need to know the scattering matrixes and only requires that the two different distributed targets satisfy reciprocity and reflection symmetry. In practical applications, it would be easy to find two different kinds of distributed targets(such as forests, farmland or pasture) which meet the requirements in one scene of the SAR image. Therefore the method proposed here has practical values. Simulation experiment with real PolSAR data is carried out to validate the method.

Key words: Polarimetric SAR; PolSAR calibration; Faraday rotation; Channel imbalance

1 引言

极化合成孔径雷达(PoSAR)图像数据必需经过极化定标才能有效应用^[1]。星载SAR信号经过电离层传播不可避免地会受到法拉第旋转角的影响,尤其对于P、L波段的星载SAR影响更为严重,法拉第旋转会大大降低极化波对于地面参数变化的敏感性,超过 $5^\circ\sim 8^\circ$ 的法拉第旋转角(单程)会严重影响利用极化SAR得到的极化信息估计地表参数(土壤湿度等)的精度,而在太阳活动活跃期将约有75%的轨道上的单程法拉第旋转角超过了 5° ^[2]。因此星载PoSAR极化定标除了考虑雷达系统本身交叉耦合 δ 和通道不平衡 f (包括发射通道 f_1 、接收通道 f_2)的校正外还需要考虑法拉第旋转角 Ω 的校正问题^[3]。

PolSAR极化定标技术发展可概括为3个阶段:起先人们在特定场景内放置标准人工点目标测量SAR系统失真参数,并将测量的失真参数推广应用于其它场景的极化数据校正。该阶段的定标方法未考虑法拉第旋转角的影响,因此极化定标精度受到影响。针对法拉第旋转角影响问题,第二阶

段发展了在法拉第旋转角影响下的极化定标方法^[4],这些方法在极化定标的同时对法拉第旋转角进行估计并消除影响,提高了极化定标精度,但未考虑实际应用中法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_1, f_2 随时间和场景的变化问题。因此极化定标技术近期发展到第三个阶段,解决实际应用中 Ω 和 f_1, f_2 变化问题,需要根据PoSAR数据估计这些参数并进行校正。Freeman提出了利用分布目标不相关性估计 f_1/f_2 比值的方法^[5],在此方法的基础上Touzi提出了基于分布目标对称性估计 Ω 和 f_1 的方法^[6]。该方法对目标对称性要求较为严格,并要求事先已知与目标散射特性相关的两个参数值,因此在实际应用中仍受到一定的限制。

本文提出了一种基于分布目标统计特性来估计星载PoSAR法拉第旋转角和系统通道不平衡参量的方法,该方法首先采用Freeman的方法^[5]利用分布目标不相关性估算 f_1/f_2 比值,再利用两种不同类型分布目标的互易性估计 Ω 和 f_1 。该方法不需要预先知道所用目标的散射矩阵,而只需要两种不同类型分布目标满足互易性和不相关性。在实际应用中,同一场景内要找到满足要求的两种不同类型分布目标(如森林、草地、农田等)是比较容易的事情,因此该方法具有实

际应用价值。本文还分析了非互易性对 Ω 和 f_1 估计精度的影响, 并通过半物理仿真实验对该方法的有效性进行了验证。

2 法拉第旋转角影响下 PolSAR 测量模型及极化定标原理

PolSAR 极化测量受到系统失真参数和法拉第旋转角的影响, 在忽略噪声影响时测量矩阵 \mathbf{M} 与目标散射矩阵 \mathbf{S} 之间的关系可由下列模型确定^[5]:

$$\begin{pmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{pmatrix} = A e^{j\Phi} \begin{pmatrix} 1 & \delta_2 \\ \delta_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 Ω 为法拉第旋转角; δ_i 为通道交叉耦合; f_j 为系统的通道不平衡; A 为雷达系统的增益, $e^{j\Phi}$ 为绝对相位。

极化定标的原理就是利用地面其散射矩阵 \mathbf{S} 精确已知的参考目标来建立相互独立的方程组来求解测量系统失真参数 δ_i , f_j 和法拉第旋转角 Ω , 并利用精确已知雷达截面积的地面参考目标对雷达系统的增益 A 进行辐射标定。问题是这些参数的测量一般是在特定的场景(定标场)布设目标来完成的, 对于相对稳定的参数(如通道交叉耦合 δ_i)可以用于其他区域极化数据的校正, 而对于变化的参数(如法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_j)将对其他区域极化数据的校正精度产生很大影响^[5, 6]。因此实际应用中需根据 PolSAR 数据对法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_j 进行估计。

3 法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_1 、 f_2 估计方法

经过系统增益和通道耦合校正后, 测量的散射矩阵为

$$\begin{pmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

若目标满足互易性, 即 $S_{vh} = S_{hv}$, 则展开式(2)可得:

$$M_{hh} = S_{hh} \cos^2 \Omega - S_{vv} \sin^2 \Omega \quad (3)$$

$$M_{hv} = f_2 [S_{hv} + (S_{hh} + S_{vv}) \sin \Omega \cos \Omega] \quad (4)$$

$$M_{vh} = f_1 [S_{hv} - (S_{hh} + S_{vv}) \sin \Omega \cos \Omega] \quad (5)$$

$$M_{vv} = f_1 f_2 [S_{vv} \cos^2 \Omega - S_{hh} \sin^2 \Omega] \quad (6)$$

3.1 f_1/f_2 的估计

首先利用同极化通道与交叉极化通道不相关性, 即 $\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle = \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle = 0$ 来估计 f_1/f_2 比值, 此方法由 Freeman 首先提出^[5], 在此简单介绍如下:

由不相关性可得:

$$M_{vh} M_{hv}^* = f_1 f_2^* [S_{hv} S_{hv}^* - (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vv} S_{vv}^* + 2 \operatorname{Re}\{S_{hh} S_{vv}^*\}) \cdot \sin^2 \Omega \cos^2 \Omega] \quad (7)$$

可见式(7)右边方括号内应为实数(正或负), 则其相位为 $\arg\{M_{vh} M_{hv}^*\} = \arg\{f_1 f_2^*\} \pm n\pi$ 也就是说可以在 π 的范围内求出 f_1 , f_2 之间的相对相位; 由式(4), 式(5)还可以得到:

$$\frac{\langle M_{vh} M_{vh}^* \rangle}{\langle M_{hv} M_{hv}^* \rangle} = \frac{|f_1|^2}{|f_2|^2}, \quad \text{因此可以据此求得 } f_1, f_2 \text{ 之间的相对}$$

幅度值, 与相位结合并判断相位是否存在误差 π 就能得到通道不平衡比率的估计值 \hat{f}_1/\hat{f}_2 。

3.2 Ω 和 f_1 估计

在估计并校正了通道不平衡比率 f_1/f_2 后, 式(3)-式(6)可以写成:

$$M_{hh} = S_{hh} \cos^2 \Omega - S_{vv} \sin^2 \Omega \quad (8)$$

$$M_{hv} = f [S_{hv} + (S_{hh} + S_{vv}) \sin \Omega \cos \Omega] \quad (9)$$

$$M_{vh} = f [S_{hv} - (S_{hh} + S_{vv}) \sin \Omega \cos \Omega] \quad (10)$$

$$M_{vv} = f^2 [S_{vv} \cos^2 \Omega - S_{hh} \sin^2 \Omega] \quad (11)$$

其中为方便下面的推导, M_{pq} 仍表示消除了通道不平衡比率的测量的散射矩阵分量; 并且将 f_1 简记为 f 。可得 $\{(9)-(10)\} \times f / \tan 2\Omega = (8) \times f^2 + (11)$, 即

$$\frac{M_{hv} - M_{vh}}{\tan 2\Omega} f = f^2 M_{hh} + M_{vv} \quad (12)$$

由式(12)可解得 f 为

$$f = \frac{-\frac{M_{vh} - M_{hv}}{\tan 2\Omega} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{vh} - M_{hv}}{\tan 2\Omega}\right)^2 - 4M_{hh}M_{vv}}}{2M_{hh}} \quad (13)$$

现假定有两个均满足互易性的目标, 其散射矩阵分别记为 S_1 , S_2 , 且 $S_1 \neq k \cdot S_2$, k 为常数, 若此两个目标位置相近或处于同一场景内, 则对应的 f 和 Ω 可认为相同, 则有

$$\begin{aligned} & \frac{-\frac{M_{1vh} - M_{1hv}}{\tan 2\Omega} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{1vh} - M_{1hv}}{\tan 2\Omega}\right)^2 - 4M_{1hh}M_{1vv}}}{2M_{1hh}} \\ &= \frac{-\frac{M_{2vh} - M_{2hv}}{\tan 2\Omega} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{2vh} - M_{2hv}}{\tan 2\Omega}\right)^2 - 4M_{2hh}M_{2vv}}}{2M_{2hh}} \quad (14) \end{aligned}$$

其中 M_{1pq} , M_{2pq} (p, q 分别为 h 或 v) 分别代表目标 $S_1 S_2$ 的测量矩阵的各分量。由于同一景内的 f 相同, 因此式(14)两边的正负号应同取正号或负号; 为简便记, 约定以下的推导均采用正号。

当 $2M_{1hh}M_{2hh} \tan 2\Omega \neq 0$ 时, 即两个目标的测量的散射矩阵的 HH 项不为零且法拉第旋转角存在的情况下, 对式(14)进行一系列移项、平方等操作, 则可得:

$$b^2 x^2 + (2bc + g)x + (c^2 - e) = 0 \quad (15)$$

其中各个符号分别为 $e=4a^2 M_{2hh}^2 (M_{1vh} - M_{1hv})^2$; $g=16a^2 \cdot M_{2hh}^2 M_{1hh} M_{1vv}$; $x=\tan^2 2\Omega$; $b=4M_{2hh}^2 M_{1hh} M_{1vv} - 4M_{1hh}^2 M_{2hh} \cdot M_{2vv}$; $c=M_{1hh}^2 (M_{2vh} - M_{2hv})^2 - a^2 - M_{2hh}^2 (M_{1vh} - M_{1hv})^2$; $a=[M_{2hh} (M_{1hv} - M_{1vh}) - M_{1hh} (M_{2hv} - M_{2vh})]$ 。

解此二次方程可得到 x 的值, 继而可以求出 Ω 的估计值。在 Ω 求解出来后, 可以根据式(13)求得 f , 即 f_1 的估计值; 由于式(13)存在两个值, 即要选择正负号, 此时可以将式(13)的两个结果与以前的 f_1 的值进行比较, 因为通道不平衡的变化不会很大, 所以选择与前次定标得到的 f_1 的值相近

的作为此次通道不平衡的估计。

因为 \tan^{-1} 的取值范围为 $(-\pi/2, \pi/2)$, 所以估计出的法拉第旋转角的范围为 $(-\pi/4, \pi/4)$, 即估计的法拉第旋转角是模 $\pi/2$ 的。对于 Ω 的估计可能存在 $\pi/2$ 的误差, 这需要根据实际应用情况或其它条件来检测, Freeman 在文献 [5] 中提出几种检测 $\pi/2$ 误差的方法, 如利用点目标或者对平的、较为粗糙的地表的散射矩阵进行分析, 或在夜间测量以此限制法拉第旋转角的范围等。

法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_1, f_2 的估计方法可概述如下:

(1) 首先利用同极化通道与交叉极化通道不相关性来估计 f_1/f_2 比值;

(2) 在相近的区域或同场景内选择两种不同的目标, 其散射矩阵 $S_1 \neq kS_2$, 且满足互易性, 并且测量得到的散射矩阵 M_{hh} 项不能为零。虽然方法本身对目标的类型(点目标或分布目标)没有限制, 但在实际应用中大多数情况下, 选择满足条件的分布目标比较容易;

(3) 根据式(15)和 $x = \tan^2 2\Omega$ 计算 Ω , 并检测 $\pi/2$ 误差;

(4) 根据式(13)计算 f_1 , 并通过与前次定标得到的通道不平衡的值进行比较, 选择相近的值作为此次 f_1 的估计值。

3.3 非互易性的影响

上述方法要求目标都满足互易性, 但是在实际应用中, 很难严格满足互易性, 本节通过建立散射矩阵互易性误差模型来分析非互易性对估计法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_1 的影响。散射矩阵 S_i 互易性误差模型为

$$S_i = \begin{pmatrix} S_{ihh} & (|S_{ihv}| + |\delta_i|)e^{j\psi_i}e^{j\psi_i} \\ S_{ihv} & S_{ivv} \end{pmatrix}, \text{ 其中 } i=1, 2 \text{ 表示两个不同的点目标; } S_{ihv} = |S_{ihv}|e^{j\psi_i}, |\delta_i| \text{ 表示互易性幅度误差, } e^{j\psi_i} \text{ 表示相位误差。}$$

为了分析互易性误差的影响, 设定 $\Omega = 30^\circ, f_1 = 0.7$, 并计算在只有幅度误差或相位误差时的估计误差, 结果如图 1, 图 2 所示:

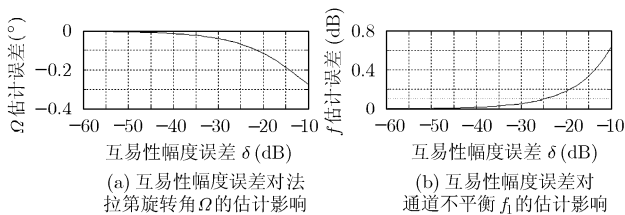


图 1 互易性幅度误差条件下的估计误差

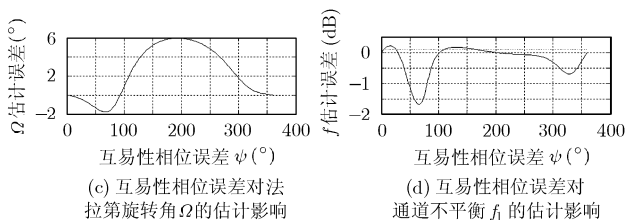


图 2 互易性相位误差条件下的估计误差

由图可知, 互易性误差的存在对于法拉第旋转角和通道不平衡的估计都产生一定的影响。其中互易性幅度误差对 Ω, f_1 两个参数估计的影响具有一定的规律性, 随着互易性幅度误差的增大, Ω 和 f_1 的估计误差也增大。实际应用中, 尤其是提取地表参数的应用, Freeman 指出法拉第旋转角的估计误差应小于 3° [7]; 而系统通道不平衡的误差一般都要求控制在 0.1dB 之内 [3]。要使得 Ω 和 f_1 的估计满足这两个要求, 则要求互易性幅度误差不超过 -25dB 。而对于互易性相位误差, 其对 Ω 和 f_1 的影响没有一定的规律可循, 但是要使得 Ω 和 f_1 的估计误差分别不超过上述的 3° 和 0.1dB, 则要求互易性的相位误差不能超过 6° 。

4 实验验证

为了检验上述方法的有效性, 本文利用 SIR-C 在天山区的全极化数据对算法进行半物理仿真, 该数据已经过极化定标, 能够反映实际目标的散射特性。首先在极化数据中选择两块代表不同类型的 50×50 像素大小的区域; 所选区域的图像(HH 通道幅度图像, 已经过量化处理)如图 3 所示, 从图像上可以明显看出两块区域为不同的植被类型。

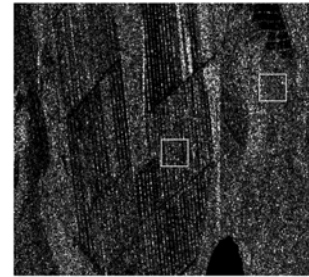


图 3 HH 通道幅度图, 其中矩形所围区域为选择的区域

然后平均计算这两块区域的散射矩阵 S , 分别为

$$S_1 = \begin{pmatrix} 7.71 - 6.08i & -3.70 - 1.18i \\ -3.70 - 1.28i & 1.54 - 0.49i \end{pmatrix}$$

$$S_2 = \begin{pmatrix} 4.59 + 8.49i & -0.52 + 0.56i \\ -0.48 + 0.59i & 7.15 + 8.68i \end{pmatrix}$$

根据上面的互易性误差模型, 可得 S_1, S_2 的互易性误差分别为 $\delta_1 = 0.0081\text{dB}, \psi_1 = -1.3944^\circ; \delta_2 = 0.0047\text{dB}, \psi_2 = 3.7485^\circ$, 两块目标的互易性误差都在上面分析所允许的范围之内, 所以可以用于估计法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f_1 。

接着根据式(8)-式(11)在所选区域的 4 个通道极化数据上引入法拉第旋转角 Ω 和通道不平衡 f 两个误差参数(一景内这两个参数都稳定不变), 设定 $\Omega = 30^\circ, f = 0.7$ 。因为极化数据中不可避免存在噪声, 所以在所选区域中采用集平均来减小噪声的影响, 使得在该区域中的测量的散射矩阵为

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i = \frac{1}{N} F \Omega \sum_{i=1}^N S_i \Omega F + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N N_i \quad (16)$$

事实上,式(16)表明即使所选区域包含的散射机制不一样也不会影响到最后的估计,因为该区域的通道不平衡和法拉第旋转角是相同的,对实际测量的散射矩阵的平均不会引起估计的误差。然后分别对两个区域的散射矩阵 \mathbf{M} 进行平均得到 $\overline{\mathbf{M}}_1$, $\overline{\mathbf{M}}_2$, 最后利用本文的方法估计法拉第旋转角和通道不平衡,结果为 $\hat{\Omega}=29.9778^\circ$, $\hat{f}=0.6978$ 。与设定的值之间的误差分别为 $\Delta\Omega = \Omega - \hat{\Omega}=0.0222^\circ$, $\Delta f = 20\lg(\hat{f}/f) = -0.0630\text{dB}$; 误差的产生主要是由于两块所选区域并不是严格地满足互易性 $S_{hv} = S_{vh}$, 而是有一定的偏差。估计结果很好地符合了设定的参数值,证明了该方法的有效性。

5 结束语

本文提出了一种基于分布目标的统计特性来估计法拉第旋转角和系统通道不平衡的方法,文中给出了该方法的具体步骤、推导过程及其适用条件。该方法不需要预先知道所用目标的散射矩阵,而只需要两种不同类型分布目标满足互易性和不相关性,在实际应用中,可以比较容易地在同一场景内找到满足要求的两种不同类型的分布目标(如森林、草地、农田等),因此该方法具有实际应用价值。本文还分析了互易性误差对估计精度的影响,给出了使得估计值达到要求精度的目标互易性所需满足的条件;本文最后利用 SIR-C 天山地区的经过定标的全极化数据进行了半物理仿真实验,验证了算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Ulaby F T and Elachi C. Radar Polarimetry for Geoscience Applications. Artech House Inc., Boston, London, 1990, chapter 3.
- [2] Wright P A, *et al.* Faraday rotation effects on L-band spaceborne SAR data. *IEEE Trans. on GRS*, 2003, 41(12): 2735–2743.
- [3] Zakharov A I, *et al.* An algorithm for estimation of Faraday rotation for P-band polarimetric SAR. IGARSS '99 Proceedings, New York: Wiley, 1999, 2: 1460–1462.
- [4] Fujita M. Polarimetric calibration of space SAR data subject to Faraday rotation—A three target approach. *IEEE Trans. on GRS*, 2003, 41(10): 5497–5500.
- [5] Freeman A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation. *IEEE Trans. on GRS*, 2004, 42(8): 1617–1624.
- [6] Touzi R, *et al.* On the use of symmetric scatterers for calibration and validation of PALSAR polarimetric modes. IGARSS '04 Proceedings, Alaska, USA, 2004, 3: 1835–1837.
- [7] Freeman A. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures. *IEEE Trans. on GRS*, 2004, 42(8): 1607–1616.
- [8] Rignot E M. Effect of Faraday rotation on L-band interferometric and polarimetric synthetic-aperture radar data. *IEEE Trans. on GRS*, 2000, 38(1): 383–390.

段俊峰: 男, 1983 年生, 硕士生, 专业方向为信号与信息处理。

洪 峻: 男, 1960 年生, 研究员, 主要从事雷达微波遥感信息提取及应用、SAR 定标技术的研究。