

应用分布目标的多极化合成孔径雷达定标技术¹

席育孝* ** 杨汝良*

*(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

** (中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文对 Sarabandi 的分布目标定标算法作了改进, 然后利用 SIR-C 系统的 L 波段的未定标的和经过 SIR-C 定标组定标过的同一场景数据, 采用修正的 Sarabandi 算法进行定标实验. 最后比较该算法结果与 SIR-C 定标组定标结果, 检验该算法的性能.

关键词: 极化, 合成孔径雷达 (SAR), 定标

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1714-06

The Calibration Technique of Polarimetric SAR Using Distributed Targets

Xi Yu-xiao* ** Yang Ru-liang*

*(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

** (The Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The Sarabandi's Calibration Algorithm(SCA) using distributed targets is modified in the paper. Then the calibration experiment with the Modified Sarabandi's Calibration Algorithm(MSCA) is carried out, using the uncalibrated image data and calibrated image data from the same scene obtained by SIR-C system L band SAR. Finally, the calibration result of MSCA is compared with that obtained by SIR-C calibration group and the performance of MSCA is verified.

Key words Polarimetry, Synthetic Aperture Radar(SAR), Calibration

1 引言

随着多极化合成孔径雷达技术的发展, 以及这些雷达获取的数据的广泛和深入的应用, 越来越要求这些数据的定量应用. 这样极化定标就成为必须. 目前已经出现大量极化定标算法, 大致分为点目标极化定标算法, 点目标与分布目标混合极化定标算法, 分布目标极化定标算法 3 类.

点目标算法是最早展开研究的算法, 但是点目标的选择, 定标场的选择, 点目标的定向精度问题, 点目标的制造精度, 野外的摆放方便性, 点目标与背景的互相影响都会使定标结果产生误差, 而且为了定标整个测绘带, 需要在整个测绘带摆放大量人造点目标, 成本太高. 点目标与分布目标混合算法, 对点目标的精度和数量的要求都降低了, 但是需要对成像区域的分布目标作一些假定, 这些假定的合理性则直接影响着定标精度, 而这个精度又是算法本身无法测知的, 需要其他算法来检验其精度. 但是因为其简单, 而且总体说来性能良好, 被 SIR-C 任务作为系统极化定标算法. 极化定标算法的发展趋势则是完全采用分布目标来定标, 而不采用任何人造点目标, 因为环境险恶的成像区域是不大可能放置人造点目标的, 而且分布目标没有人造点目标遇到的那些难以克服的问题, 也不需要对其成像区域的分布目标做任何假定, 定标精度很高.

¹ 2002-05-14 收到, 2002-10-08 改回

本文就是着力于研究分布目标算法——Sarabandi 算法的性能的。但是分布目标定标算法需要微波散射计对定标用分布目标的散射特性进行测量, 获取高精度数据作为标准数据, 而这在当前国内还没有开展。故本文使用经 SIR-C 定标组定标过的数据作为标准数据, 来检验算法的性能。

2 修正的 Sarabandi 定标算法

首先定义地物目标的散射矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{pmatrix} \quad (1)$$

文献 [1] 指出使用多极化微波散射计可以很精确地测量分布目标的 Mueller 矩阵。Sarabandi 算法 [2] 就是基于 Mueller 矩阵已知的分布目标的。

文献 [2] 在推导过程中采用矩阵 \mathbf{W} , 也就是由地物目标散射矩阵求 Mueller 矩阵的过渡矩阵, 其定义如式 (2)。由于矩阵 \mathbf{W} 不是艾米特共轭对称的, 使得计算过程很麻烦。本文则采用地物目标的协方差矩阵, 定义如式 (3)。地物目标的协方差矩阵是艾米特共轭的, 计算过程能简化一些。

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} S_{vv}S_{vv}^* & S_{vh}S_{vh}^* & S_{vv}S_{vh}^* & S_{vh}S_{vv}^* \\ S_{hv}S_{hv}^* & S_{hh}S_{hh}^* & S_{hv}S_{hh}^* & S_{hh}S_{hv}^* \\ S_{vv}S_{hv}^* & S_{vh}S_{hh}^* & S_{vv}S_{hh}^* & S_{vh}S_{hv}^* \\ S_{hv}S_{vv}^* & S_{hh}S_{vh}^* & S_{hv}S_{vh}^* & S_{hh}S_{vv}^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} S_{vv}S_{vv}^* & S_{vv}S_{vh}^* & S_{vv}S_{hv}^* & S_{vv}S_{hh}^* \\ S_{vh}S_{vv}^* & S_{vh}S_{vh}^* & S_{vh}S_{hv}^* & S_{vh}S_{hh}^* \\ S_{hv}S_{vv}^* & S_{hv}S_{vh}^* & S_{hv}S_{hv}^* & S_{hv}S_{hh}^* \\ S_{hh}S_{vv}^* & S_{hh}S_{vh}^* & S_{hh}S_{hv}^* & S_{hh}S_{hh}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

地物目标的测量所得的散射矩阵与其理论散射矩阵之间的关系, 在系统通道间存在不平衡和串扰的情况下, 关系式为

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{T}^T = \begin{pmatrix} R_{vv} & R_{vh} \\ R_{hv} & R_{hh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{vv} & T_{hv} \\ T_{vh} & T_{hh} \end{pmatrix} \quad (4)$$

注意天线增益、传输损耗因子、以及其他系统常数全都包含在接收和发射失真矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 里面了, \mathbf{M} 为测量所得的散射矩阵。

利用已知分布目标的极化合成孔径雷达定标算法的详细内容, 可参阅文献 [2]。

3 实验结果

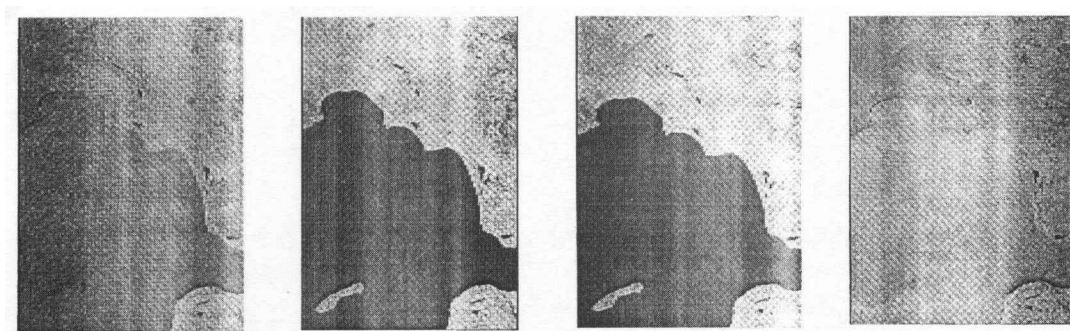
本文处理的数据是 SIR-C 系统的 L 波段未定标四极化数据, 图像是美国密歇根州 Raco 地区, 其总功率图如图 1。

本文采用经过作者修正的 Sarabandi 分布目标定标算法进行实验。这个算法需要微波散射计准确测量其 Mueller 的分布目标作为标准目标来进行定标处理。但是由于条件所限, 无法获得图 1 中任何一块分布目标的准确的 Mueller 矩阵数据。为此, 只好采用一种替代办法。为了验证算法的有效性, 作者还购买了与图 1 同一地区的经 SIR-C 定标组定标过的数据, 按照文献 [3], 经 SIR-C 定标组定标过的数据精度是非常高的, 实验中就把这些定标过的数据作为标准数据来用, 从而可以从中选择合适的分布目标用来定标图 1 所示的未定标数据, 从而验证本文算法。



图 1 Racó 地区极化定标前总功率图

SIR-C 系统 L 波段定标过的 4 个通道 (HH,HV,VH,VV) 获取的图像如图 2 所示。因为 SIR-C 系统 L 波段定标前的 4 个通道图像仅凭肉眼无法看出其与定标后的图像的差别, 故文中未给出这些定标前的分通道图像。



(a) 定标后的 HH 极化图像 (b) 定标后的 HV 极化图像 (c) 定标后的 VH 极化图像 (d) 定标后的 VV 极化图像

图 2 Racó 地区 L 波段四极化图像, 经过 SIR-C 定标组定标

处理的第一步工作就是选择均匀分布目标。应该挑选那些基本上各向同性的单一散射机制的分布目标, 具体说就是要么纯粹的干燥土壤, 要么就是同一种植物覆盖的地表, 等等。而平静的水面 (在灰度图像中表现为接近黑色) 这类具有镜面反射特性的地表不适合用来定标, 因为它们的交叉极化回波信号太小, 在计算中造成的误差将会非常大。

由于数据是以散射矩阵格式存储的, 所以随后就是计算所挑选的分布目标的未定标和经 SIR-C 定标组定标过的集合平均的 Mueller 矩阵, 分别作为测量值和理论值用于下面的定标实验中。

接着就是按照文献 [2] 进行计算, 求解 $g = x_3/x_2 = R_{hh}/R_{hv}$ 。求解 g 的过程中用到的函数 $\varphi(g)$ (见文献 [2] 的式 (14) 和 (15)) 虽然可能具有多个极小值, 但是却只有一个全局最小值, 从而 g 的解的唯一性得到保证。图 3 给出最典型的 $\varphi(g)$ 的全局最小值的情况。

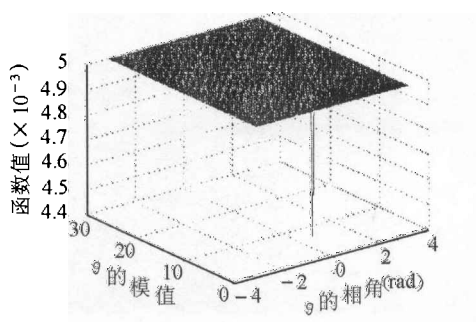
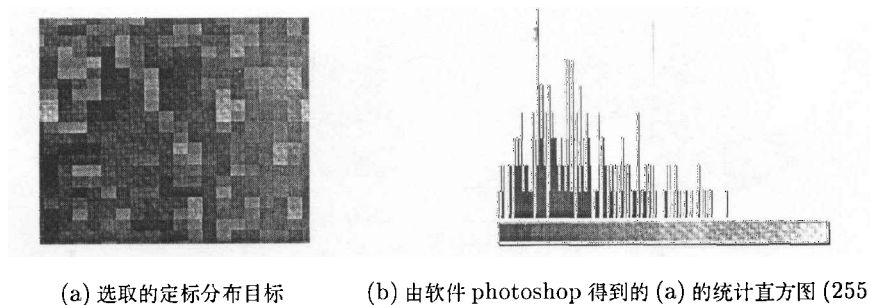


图 3 求 g 使用的函数 $\varphi(g)$ 的全局最小值的典型情况

本实验中选取的分布目标及其灰度统计直方图如图 4 所示，该图从图 1 中截取。从图 4(b) 的灰度统计直方图可以看出，所选取的分布目标是比较均匀的，散射机制接近单一。

经过计算，最终得到如下结果： $g = 23.76\angle -12.96^\circ$ ， $x_1 = R_{vh}/R_{vv} = -29.00\text{dB}\angle 154.58^\circ$ ， $x_2 = R_{hv}/R_{vv} = -27.34\text{dB}\angle 55.72^\circ$ ， $x_3 = R_{hh}/R_{vv} = 0.18\text{dB}\angle 42.76^\circ$ ， $x_4 = T_{vh}/T_{vv} = -27.13\text{dB}\angle -173.08^\circ$ ， $x_5 = T_{hv}/T_{vv} = -30.88\text{dB}\angle -23.07^\circ$ ， $x_6 = T_{hh}/T_{vv} = 1.26\text{dB}\angle 51.13^\circ$ ； $\omega = 1.2312 \times 10^4$ 。



(a) 选取的定标分布目标 (b) 由软件 photoshop 得到的 (a) 的统计直方图 (255 级灰度)

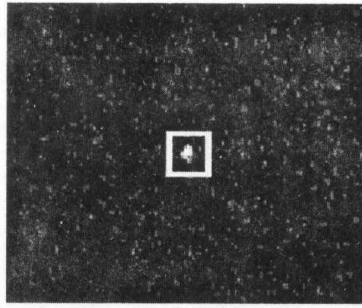
图 4 选取的定标分布目标及其统计直方图

从上述结果可以看出，串扰项 (x_1, x_2, x_4, x_5) 的幅度 (分贝) 都小于 -27dB ；通道不平衡 (x_3, x_6) 不超过 1.3dB ，这些结果与文献 [3] 中给出的定标结果都是非常接近的。

到此只剩下绝对定标因子 ω 的计算值的合理性的判断了。实验中采用图 5 对应的点目标的未定标散射矩阵数据和 SIR-C 定标组定标过的散射矩阵数据来估计 ω 的测量值的合理性和准确性。

该点目标定标前的散射矩阵如下：

$$M = \begin{pmatrix} M_{vv} & M_{vh} \\ M_{hv} & M_{hh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 955.43 + 561.66i & -13.12 + 4.99i \\ 12.29 - 8.05i & -323.4 + 1263.66i \end{pmatrix}$$



(a) 点目标所在区域

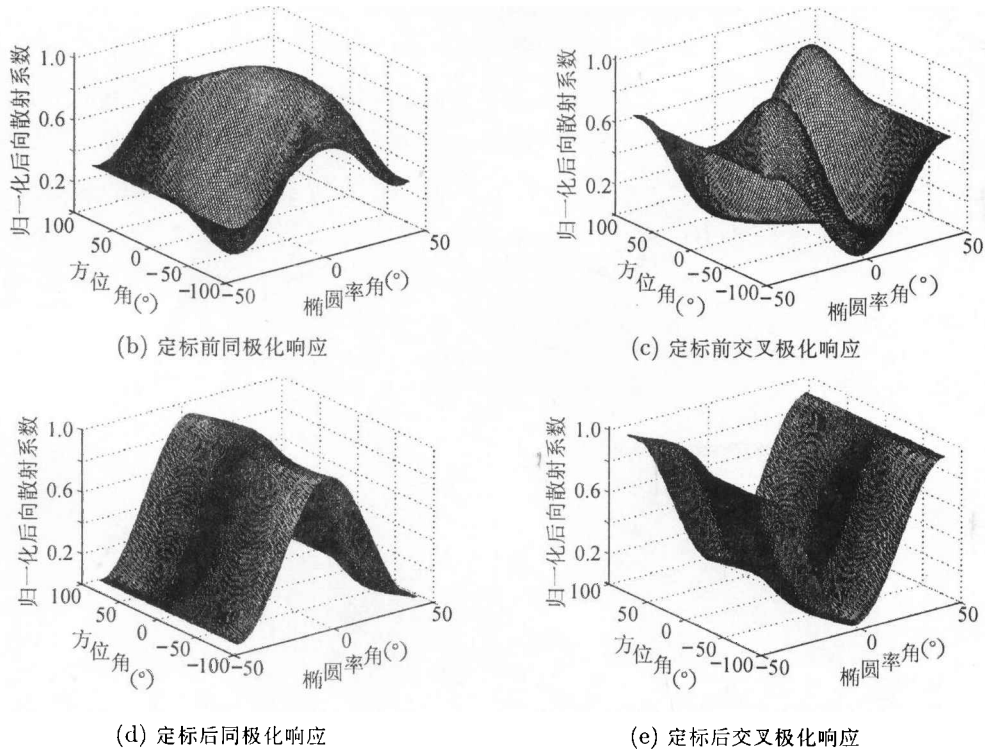


图 5 测试点目标定标前后的极化响应

该点目标定标后的散射矩阵如下:

$$S = \begin{pmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5.64 + 8.21i & -0.09 + 0.01i \\ 0.09 + 0.09i & -2.53 + 9.87i \end{pmatrix}$$

利用下式估计 ω :

$$\omega_{\text{估计}} = M_{vv}M_{vv}^*/(S_{vv}S_{vv}^*) \quad (5)$$

得到 $\omega_{\text{估计}} = 1.2380 \times 10^4$ 。比较本文方法获得的 ω 与 SIR-C 定标组定标获得的 $\omega_{\text{估计}}$ 值, 可见两者结果吻合的非常好。

上面只是把实验获得的定标参数与文献 [3] 的定标参数相比较从而判定方法的有效性的。为了进一步验证方法的有效性和精度, 还需要把本文方法定标后的图像中大量已知分布目标与 SIR-C 定标组定标的相应分布目标的特性互相比, 比较它们的后向散射系数和相位统计特性,

二者一致才能进一步验证本方法的性能。由于对于图像中除了水面以外的分布目标是什么并不清楚, 所以无法对大量各类测试目标进行处理以进一步验证算法, 但是对于水面还是可以做这个工作的。对于水面, 如图 6(截取自图 1), 有如下结果, 见表 1。

由表 1 可以看出, 两种方法获得的后向散射系数相差不到 0.5dB, 相位差不到 1° , 再考虑到 SIR-C 定标组定标方法的精度^[3], 可以得知修正的 Sarabandi 方法的结果与 SIR-C 定标组定标方法的结果是高度一致的, 可见这个方法的高精度。

4 结论

由实验结果可以看到, 本文算法的结果与作为标准数据的 SIR-C 定标组定标的结果的高度一致性, 显示了本文算法的高精度。虽然算法也有其缺点, 就是比较复杂, 但这与其精度相比还是值得的。

由于定标过程是非线性过程, 而本文算法中用到的是分布目标的集合平均的 Mueller 矩阵, 所以不能采用多种散射机制混合而成的分布目标进行定标实验, 那样得到的结果将与真实系统性能有偏差。整幅图像中最常见的混合分布目标, 其典型灰度直方图如图 7 所示, 由它们计算得到的定标参数就不符合实际情况。在实际的定标工作中, 定标目标的选择应当引起足够的注意。

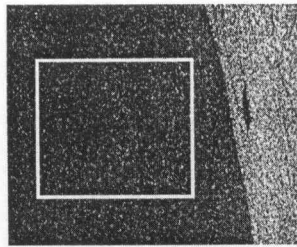


图 6 湖面分布目标

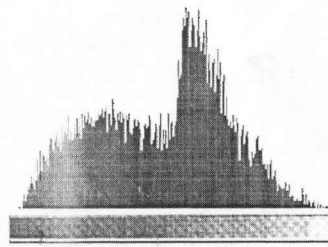


图 7 典型混合分布目标的灰度直方图 (255 级灰度)

表 1 图 6 所示湖面分布目标的定标结果比较

	σ_{vv}^o (dB)	σ_{vh}^o (dB)	σ_{hv}^o (dB)	σ_{hh}^o (dB)	α	$\zeta(^{\circ})$
修正的 Sarabandi 定标方法	-8.20	-30.46	-31.55	-10.22	0.9766	-10.82 $^{\circ}$
SIR-C 定标组定标方法	-8.03	-30.89	-31.55	-10.10	0.9766	-10.75 $^{\circ}$

注: 表中的地物相关程度 (α) 和极化相位差 (ζ) 与文献 [4] 中 (18) 式同极化情况下的定义相同, 因为表达式较复杂, 此处不列出, 请参考文献 [4]

参 考 文 献

- [1] Sarabandi K, Oh Y, Ulaby F T. Measurement and calibration of differential Mueller matrix of distributed targets. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1992, AP-40(12): 1524-1532.
- [2] Sarabandi K. Calibration of a polarimetric synthetic aperture radar using a known distributed target. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1994, GRS-32(3): 575-582.
- [3] Freeman A, Alves M, Chapman B, Cruz J, Kim Y, Shaffer S, Sun J, Turner E, Sarabandi K. SIR-C data quality and calibration results. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1995, GRS-33(4): 848-857.
- [4] Sarabandi K. Derivation of phase statistics from the Mueller matrix. *Radio Science*, 1992, 27(5): 553-560.

席育孝: 男, 1975 年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达信息处理、极化定标技术。

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像与信息处理。