

## 单发双收 SAR 系统通用极化定标算法

陈琳<sup>\*①②③</sup> 张晶晶<sup>①②③</sup> 李洋<sup>①②③</sup> 洪文<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 单发双收极化 SAR 系统只接收两个通道数据,使得极化定标可用的先验信息减少;同时由于这类系统收发极化方式的多样性(包括多种收发极化组合的双极化和简缩极化模式),目前还没有通用的定标算法。对此,该文提出了一种新的通用极化定标算法,可以广泛应用于多种收发极化组合的单发双收 SAR 系统。该算法利用常见的三面角、 $0^\circ$  二面角与  $45^\circ$  二面角作为理想点目标,无需对目标场景和系统作假设,可以直接估计系统的发射端和接收端失真项。该文理论推导了定标算法的求解过程,仿真分析了定标器误差对失真参数估计的影响,通过点目标的定标结果和极化特征图验证了该通用定标算法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 单发双收; 双极化; 简缩极化; 定标

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-0323-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20062

## General Calibration Algorithm for Single-transmitting-dual-receiving Polarimetric SAR System

Chen Lin<sup>①②③</sup> Zhang Jing-jing<sup>①②③</sup> Li Yang<sup>①②③</sup> Hong Wen<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The single-transmitting-dual-receiving polarimetric SAR system has only two receiving channels, which induces lack of prior information for calibration. Due to the polarization diversity of this kind of system (which operates on different dual and compact polarimetric modes), there has not a general algorithm currently. In this paper, a new general calibration algorithm is proposed for single-transmitting-dual-receiving polarimetric SAR system, which can be widely applied to diverse polarization modes. The transmitting and receiving distortion can be estimated using trihedral,  $0^\circ$  dihedral and  $45^\circ$  dihedral as ideal point targets without any assumption on the scene and system. The basic principle of this new algorithm is induced theoretically. The effect of calibrator error on the distortion estimation is analyzed by simulation. Point targets' calibration results and polarization signatures verify this algorithm.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Single-transmitting-dual-receiving; Dual polarimetry; Compact Polarimetry (CP); Calibration

### 1 引言

多极化技术是合成孔径雷达(SAR)系统的主要发展趋势之一。与单极化相比,多极化技术可以提高 SAR 系统获取目标信息的能力<sup>[1]</sup>。目前多极化 SAR 系统的极化方式包括单发双收的双极化模式(例如 HH/VH, HV/VV)、交替发射两种极化波并接

收与发射极化相同回波信号的双极化模式(例如 HH/VV)、发射极化经特殊设计的单发双收的简缩极化模式<sup>[2-5]</sup>和双发双收的全极化模式(例如 HH/VH/HV/VV)等。全极化 SAR 可以得到 SAR 信号能携带的最大极化信息量,但是目前全极化技术的应用仍然存在瓶颈,SAR 系统设计受到多种因素限制<sup>[2-5]</sup>。尤其随着高分辨、宽测绘带 SAR 的发展,全极化数据的获取非常困难。虽然已有的星载 SAR 系统 ALOS/PALSAR, TerraSAR-X, RADARSAT-2 具

2012-09-04 收到, 2012-09-13 改回; 2012-09-17 网络优先出版

国家自然科学基金青年基金项目(60902100)资助课题

\*通信作者: 陈琳 chenlin\_83@sina.com

有全极化数据获取能力,但是这些系统的全极化模式实际运行时间有限。

作为单极化与全极化技术的折衷,双极化是比较常见的极化模式。现有 ALOS/PALSAR, TerraSAR-X, RADARSAT-2 等星载 SAR 系统都有双极化模式,而计划中的 Sentinel-1 等系统也将保留双极化模式。近年提出的简缩极化(Compact Polarimetry, CP)SAR 系统也是单发双收的双极化系统,与传统双极化不同的是,CP SAR 发射与接收电磁波采取不同的极化方式,根据收发极化基的区别,目前主要有发射 $\pi/4$ 线极化波并接收水平和垂直极化分量的 $\pi/4$ 模式<sup>[2,3]</sup>和发射左旋或右旋圆极化波并接收水平和垂直极化分量的 CL 模式<sup>[4,5]</sup>。CP SAR 在极化信息获取能力和系统设计方面具有很大的发展潜力,已经升空的印度 RISAT-1 以及计划近几年发射的加拿大 RADARSAT 星座任务、日本 ALOS-2、阿根廷 SAOCOM-1,已将简缩极化模式纳入系统计划<sup>[5]</sup>。

为了获取真实的极化信息,多极化 SAR 系统必需进行极化定标,校正天线与收发通道误差造成的信号失真。本文针对单发双收 SAR 系统定标问题展开研究,这类系统定标存在的问题是:与全极化定标相比,由于极化通道的减少,导致定标器可利用的先验信息减少。目前提出的定标方法都是针对某种具体的单发双收系统,无法同时应用于各种不同收发模式的双极化和简缩极化 SAR 系统<sup>[6-10]</sup>。而且提出的定标方法基于对系统和目标场景的假设<sup>[6,7]</sup>或是引入造价较高的特殊定标器<sup>[6]</sup>,很难应用于实际场景目标的定标。本文提出一种新的单发双收极化 SAR 系统定标处理算法,可以对忽略法拉第旋转影响的短波长星载系统和地基实验系统进行定标。利用常见三面角、 $0^\circ$ 二面角与 $45^\circ$ 二面角作为定标器,不需要对系统和目标场景作假设,可以估计系统发射端失真、接收端通道不平衡和通道间串扰。该算法求解过程与发射极化基无关,适用于各种单发双收双极化及简缩极化 SAR 系统定标。

文章首先介绍了单发双收极化 SAR 系统的误差模型,然后在分析角反射器极化响应的基础上推导了定标算法的求解过程,最后对算法进行了仿真分析并给出了结论。

## 2 单发双收极化 SAR 系统误差模型

多极化 SAR 系统的误差模型一般可以表示为目标真实散射矩阵与实际测量值的关系

$$\mathbf{M} = \mathbf{RST} + \mathbf{N} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{M}$ 表示实际测量矩阵, $\mathbf{S}$ 表示目标理想散射

矩阵, $\mathbf{R}$ 表示接收端失真, $\mathbf{T}$ 表示发射端失真, $\mathbf{N}$ 表示系统加性噪声。对于不同的极化系统,矩阵的维数与各个元素表示的意义都有相应的变化。

单发双收极化 SAR 系统模型可以具体表示为

$$\begin{bmatrix} M_H \\ M_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{HH} & R_{HV} \\ R_{VH} & R_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_H \\ N_V \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,下标 H, V 分别表示发射和接收电磁波的水平极化和垂直极化。 $N_H$ 和 $N_V$ 是各极化通道的噪声增益,可以在雷达系统处于单纯接收模式时测量得到。对接收端失真矩阵进行归一化,可以得到 $\delta_1 = R_{HV}/R_{HH}$ , $\delta_2 = R_{VH}/R_{HH}$ , $f_1 = R_{VV}/R_{HH}$ 。 $\delta_1$ 和 $\delta_2$ 分别是接收垂直极化波和水平极化波时的天线串扰(即接收一种极化波中混入另一种极化成分的比例), $f_1$ 是两路接收通道间的不平衡度(包括幅度和相位)。对不同的单发双收 SAR 系统,发射端可以用不同极化基表示。假设发射端误差来源于通道串扰 $\delta_3$ ,可以将双极化 HH/VH 模式和简缩极化 $\pi/4$ 模式、CL 模式的发射端失真分别表示为

$$\text{HH/VH 模式} \quad \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\pi/4 \text{ 模式} \quad \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \delta_3 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{CL 模式} \quad \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} + \delta_3 \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 3 单发双收极化 SAR 定标算法

受文献[11]方法启发,本文选择三面角、 $0^\circ$ 二面角与 $45^\circ$ 二面角作为定标器,利用定标器已知的散射矩阵与实际测量值间的关系建立方程组,估计各失真项,对测量数据进行定标。3种定标器的散射矩阵分别为

$$\text{三面角} \quad \alpha \mathbf{S}_1 = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$0^\circ \text{ 二面角} \quad \beta \mathbf{S}_2 = \beta \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$45^\circ \text{ 二面角} \quad \beta \mathbf{S}_3 = \beta \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\alpha$ , $\beta$ 是目标散射矩阵的归一化系数,由目标距离与雷达散射截面(RCS)决定。

将式(6)、式(7)、式(8)分别代入式(2)中,得到

$$\mathbf{M}_1 = a_1 \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \alpha \mathbf{R} \mathbf{S}_1 \mathbf{T} = \alpha \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_2 = a_2 \begin{bmatrix} 1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \beta \mathbf{R} \mathbf{S}_2 \mathbf{T} = \beta \mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_3 = a_3 \begin{bmatrix} 1 \\ b_3 \end{bmatrix} = \beta \mathbf{R} \mathbf{S}_3 \mathbf{T} = \beta \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (11)$$

由式(9)可得

$$\mathbf{T} = \frac{a_1}{\alpha} \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)分别代入式(10)、式(11)可得

$$\mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a_1}{a_2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ b_3 \end{bmatrix} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a_1}{a_3} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

令  $p = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a_1}{a_2}$ ,  $q = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a_1}{a_3}$ , 式(13)、式(14)可写

为

$$R_{22} - b_2 R_{12} = p(R_{22} - b_1 R_{12}) \quad (15)$$

$$-R_{21} + b_2 R_{11} = p(R_{21} - b_1 R_{11}) \quad (16)$$

$$R_{22} - b_3 R_{12} = q(-R_{21} + b_1 R_{11}) \quad (17)$$

$$-R_{21} + b_3 R_{11} = q(R_{22} - b_1 R_{12}) \quad (18)$$

虽然  $p$ ,  $q$  未知, 但  $p/q = a_3/a_2$  是已知的。  
令

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{\text{HH}} & R_{\text{HV}} \\ R_{\text{VH}} & R_{\text{VV}} \end{bmatrix} = R_{\text{HH}} \begin{bmatrix} 1 & uw \\ v & w \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中,  $u = R_{\text{HV}}/R_{\text{VV}}$ ,  $v = R_{\text{VH}}/R_{\text{HH}}$ ,  $w = R_{\text{VV}}/R_{\text{HH}}$ 。  
式(16)除式(15)得

$$\frac{1 - b_2 u}{-v + b_2} = \frac{1 - b_1 u}{v - b_1} \quad (20)$$

式(15)除式(18)得

$$w \frac{1 - b_2 u}{-v + b_3} = \frac{a_3}{a_2} \quad (21)$$

式(17)除式(16)得

$$w \frac{1 - b_3 u}{-v + b_2} = -\frac{a_2}{a_3} \quad (22)$$

式(22)除式(21)得

$$\frac{(1 - b_3 u)(b_3 - u)}{(1 - b_2 u)(b_2 - u)} = -\frac{a_2^2}{a_3^2} \quad (23)$$

令  $k = a_2^2/a_3^2$ , 式(23)可写为

$$-v + b_2 = \frac{(b_2 - b_3)(1 - b_3 u)}{(1 + k) - (kb_2 + b_3)u} \quad (24)$$

式(20)可写为

$$-v + b_2 = \frac{(b_2 - b_1)(1 - b_2 u)}{2 - (b_1 + b_2)u} \quad (25)$$

或

$$\frac{1 - b_2 \frac{1}{v}}{-\frac{1}{u} + b_2} = \frac{1 - b_1 \frac{1}{v}}{\frac{1}{u} - b_1} \quad (26)$$

由式(20)与式(26)可以看出,  $u$  与  $1/v$  是同解的。

由式(24)等于式(25), 可得

$$\begin{aligned} & [b_3(b_2 - b_3)(b_1 + b_2) - b_2(b_2 - b_1)(b_3 + kb_2)]u^2 \\ & + [(b_2 - b_1)((1 + k)b_2 + (b_3 + kb_2)) \\ & - (b_2 - b_3)(b_1 + b_2 + 2b_3)]u \\ & + 2(b_2 - b_3) - (1 + k)(b_2 - b_1) = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)解二次方程可得  $u$  (复数) 的两根  $u_1$ ,  $u_2$ , 由于  $u$  与  $1/v$  同解, 两根必然有一个大于 1, 另一个小于 1。由于  $u$  表示接收通道串扰与通道间不平衡的比值, 通常小于 1, 因此取幅度较小的解为  $u$  的估计值

$$\hat{u} = u_i, |u_i| = \min\{|u_1|, |u_2|\}, i = 1, 2 \quad (28)$$

将  $\hat{u}$  代入式(25), 可以解得  $\hat{v}$ 。再将  $\hat{u}$ ,  $\hat{v}$  代入式(21), 可以解得  $\hat{w}$ 。最终可以得到接收端失真  $f_1$ ,  $\delta_1$  和  $\delta_2$  的估计。

在得到接收端失真参数的估计后, 即可对简缩极化测量数据进行定标,

$$\begin{bmatrix} M_{\text{H}}^{\text{cal}} \\ M_{\text{V}}^{\text{cal}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_{\text{H}} \\ M_{\text{V}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

根据式(3), 式(4)或式(5), 可以得到发射端串扰  $\delta_3$  的估计。

虽然可以通过定标算法估计出发射端误差, 但是由单发双收极化系统只能获取两个通道数据的特性决定, 目前定标算法都只能对接收端失真进行校正, 而无法校正发射端失真。

## 4 仿真实验结果及分析

### 4.1 误差估计精度仿真分析

由式(9)-式(18)可知, 本文定标算法的求解过程是与发射极化基无关的。在实验中, 以简缩极化  $\pi/4$  模式仿真数据作为具体例子, 对本文提出的定标算法性能进行仿真分析。

当定标器是理想的, 且忽略系统噪声时, 定标算法的求解过程是精确的。但实际中, 定标器是非理想的, 受到加工精度和天线指向等因素的影响。利用点目标的定标过程实际上是一种最优化过程, 它通过对各种失真参数的估计以使得定标器的响应

逼近定标器的理论相应。当定标器存在误差时,最优化过程会将该误差并入所求得的失真参数,导致失真参数的估计偏离实际值。为了分析定标器误差对失真参数估计的影响,对提出的定标算法进行蒙特卡洛仿真。将定标器误差看作均匀极化噪声(Average Polarimetric Noise, APN),定标体的误差模型可以表示为<sup>[8,9]</sup>

$$\mathbf{S}_t = \begin{bmatrix} 1 & \delta_t \\ \delta_t & 1 + \delta_t^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{S}_{d0} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_d \\ \delta_d & -1 + \delta_d^2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{S}_{d45} = \begin{bmatrix} \delta_d & 1 \\ 1 & \delta_d \end{bmatrix} \quad (32)$$

式中,复数 $\delta$ 表示定标体的误差(APN),在仿真中假设二面角 APN 比三面角大 10 dB,即 $\delta_d = \sqrt{10}\delta_t$ 。

在仿真中,设置各项失真参数的取值范围如下<sup>[8]</sup>:假设定标器误差 $\delta$ 的幅度在 $-60 \sim -20$  dB内均匀分布,接收通道不平衡度 $f_1$ 的幅度在 $-3 \sim 3$  dB内均匀分布,接收通道和发射通道交叉串扰 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 的幅度在 $-40 \sim -20$  dB内均匀分布,通道不平衡度

及通道交叉串扰的相位均为随机相位,在 $\pm\pi/3$ 内均匀分布。根据设置的参数变化范围,对定标算法进行蒙特卡洛仿真,可以得到失真参数估计精度随定标器误差变化的统计分布。

当 APN 在 $-60 \sim -20$  dB间变化时,失真参数估计误差的均值随蒙特卡洛仿真次数的增加趋向于0,然而估计误差的标准差随 APN 的增大不断增大。从图1和图2中可以看出,APN 对接收通道不平衡度和发射端通道串扰的估计精度影响相对较小,而在同样的 APN 下,接收通道交叉串扰受 APN 的影响较大。当 APN 为 $-45$  dB时, $\delta_1, \delta_2$ 的幅度估计误差为 $|\delta_1| = 0.34$  dB和 $|\delta_2| = 2.6$  dB,相位估计误差为 $\arg(\delta_1) = 2.38^\circ$ 和 $\arg(\delta_2) = 24.1^\circ$ 。此时, $\delta_3$ 和 $f_1$ 的幅度估计误差为 $|\delta_3| = 0.01$  dB和 $|f_1| = 0.02$  dB,相位估计误差为 $\arg(\delta_3) = 0.16^\circ$ 和 $\arg(f_1) = 0.57^\circ$ 。为了保证接收通道交叉串扰的估计精度,必须使定标器的精度足够小。

#### 4.2 定标结果仿真分析

在上一部分的系统失真参数取值范围内选择一组参数对点目标定标结果进行仿真,接收通道不平衡度 $f_1$ 的幅度固定取值为 $1.5(3.5$  dB),相位固定取

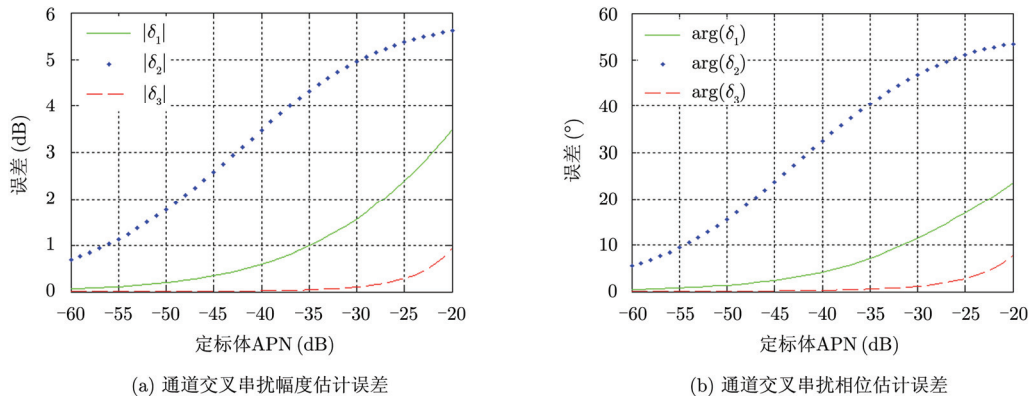


图1 通道交叉串扰估计误差随定标器误差变化曲线

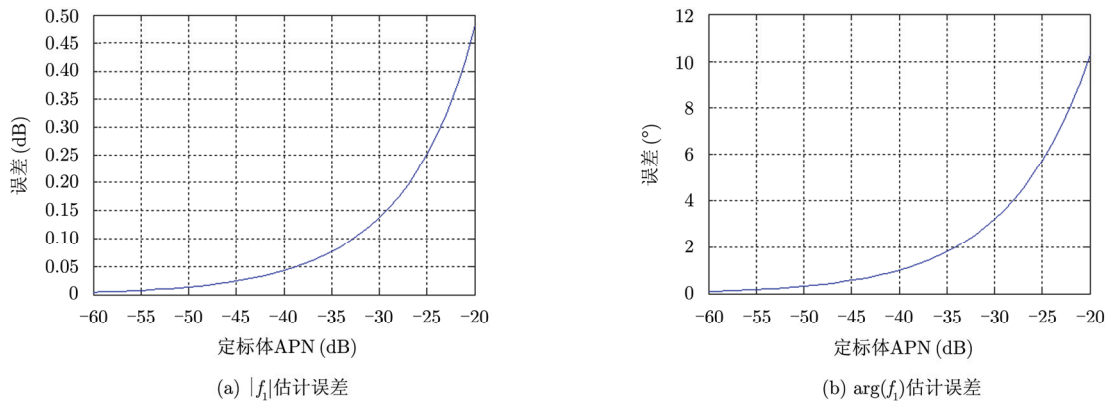


图2 接收通道不平衡度 $f_1$ 估计误差随定标器误差变化曲线

值为  $60^\circ$ ，通道串扰  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  的幅度固定取值为  $0.1(-20 \text{ dB})$ ，相位固定取值为  $10^\circ$ ，APN 的幅度固定取值为  $0.0316(-30 \text{ dB})$ ，相位固定取值为  $10^\circ$ 。

对三面角、 $0^\circ$  二面角、 $45^\circ$  二面角的自定标结果和验证目标  $22.5^\circ$  二面角的定标结果进行分析。表 1 中给出 4 个点目标的散射矢量，分别是角反射器定标前仿真数据、定标结果、存在发射端失真且接收端理想情况下的仿真数据(理论值加发射端误差)以及理论值。在发射端串扰为  $-20 \text{ dB} \angle 10^\circ$ ，接收端无失真的情况下，由三面角、 $0^\circ$  二面角、 $45^\circ$  二面角可以看出，两通道幅度差为  $1.72 \text{ dB}$ ，相位差为  $2^\circ$ 。由  $22.5^\circ$  二面角可以看出，两通道幅度差为  $-20 \text{ dB}$ ，相位差为  $10^\circ$ 。比较各目标理论值可以看出，发射端串扰影响了接收通道的幅度比和相位差。由于发射端误差是无法校正的，因此实际系统需要性能良好的发射天线。定标过程只校正了接收端误

差，理论上，定标后的数据等于理论值加发射端失真。在定标器误差为  $-30 \text{ dB} \angle 10^\circ$  时，定标后三面角、 $0^\circ$  二面角、 $45^\circ$  二面角的通道幅度差为  $1.69 \text{ dB}$ ，相位差为  $2^\circ$ ， $22.5^\circ$  二面角的幅度差为  $-24.2 \text{ dB}$ ，相位差为  $12.4^\circ$ ，比起未定标时，定标后目标的散射矢量更接近于理论值加入发射端失真后的情况，这表明本文算法能够比较准确地校正系统的接收端误差。

图 3~图 5 分别是三面角、 $0^\circ$  二面角和  $22.5^\circ$  二面角定标前、定标后与理想散射特征图的比较。在定标前，各点目标的极化特征图均有严重失真，而利用本文算法进行定标后，极化特征图与理想情况非常接近。

### 5 结论

本文提出一种应用于单发双收极化 SAR 系统的极化定标算法。该算法的求解过程与极化基无关，

表 1 点目标定标结果

点目标	未定标	定标结果	理论值加入发射端失真	理论值
三面角	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ 1.69 \text{ dB} \angle 54.4^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -1.69 \text{ dB} \angle -2.0^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -1.72 \text{ dB} \angle -2.0^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$
$0^\circ$ 二面角	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -0.08 \text{ dB} \angle -119.7^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -1.69 \text{ dB} \angle 178.0^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -1.72 \text{ dB} \angle 178.0^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \angle 180^\circ \end{bmatrix}$
$45^\circ$ 二面角	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ 4.30 \text{ dB} \angle 57.7^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ 1.69 \text{ dB} \angle 2.0^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ 1.72 \text{ dB} \angle 2.0^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \angle 0^\circ \end{bmatrix}$
$22.5^\circ$ 二面角	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -10.82 \text{ dB} \angle 52.6^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -24.2 \text{ dB} \angle 12.4^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \text{ dB} \\ -20 \text{ dB} \angle 10^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

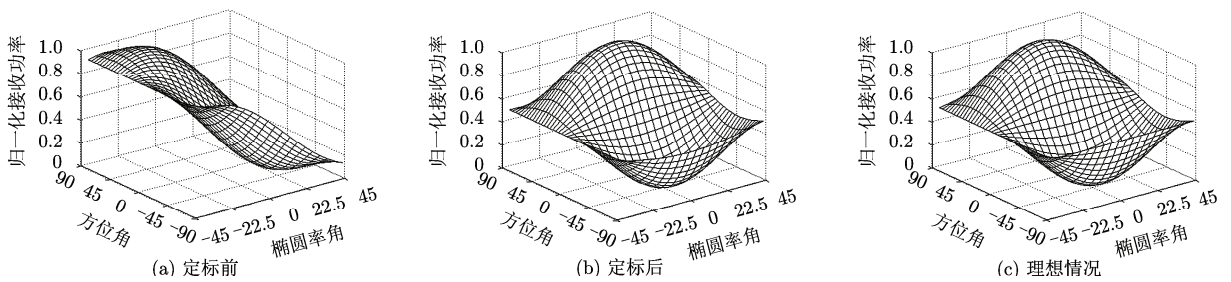


图 3 三面角极化特征图

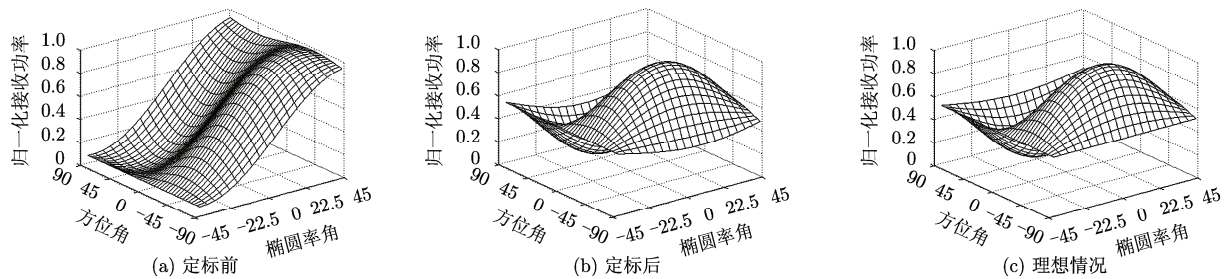


图 4  $0^\circ$  二面角极化特征图

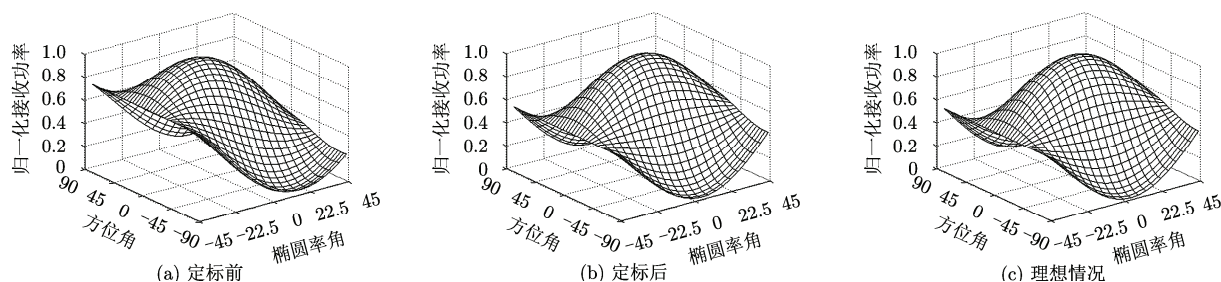


图5 22.5°二面角极化特征图

可以适用于多种双极化和简缩极化模式。利用3种常见的角反射器作为定标参考,通过理论值与测量值的关系,推导系统误差项的估计。该算法避免了对目标场景和系统的假设。理想情况下,该算法可以得到系统失真参数的精确估计。然而,定标体的误差会降低失真参数的估计精度。通过蒙特卡洛仿真可以看到,定标器误差对接收通道交叉串扰的估计影响比较大,为使接收通道交叉串扰估计误差小于3 dB,定标器APN需要达到-45 dB以下。但是从一组点目标定标结果分析来看,在存在定标器误差(-30 dB)和发射端失真(-20 dB)情况下,定标后幅度和相位得到了明显改善,此时该算法可以得到比较满意的定标结果。

### 参考文献

- [1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.  
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.
- [2] Souyris J-C, Imbo P, and Fjortoft R, *et al.* Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: the  $\pi/4$  mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(3): 634-646.
- [3] Souyris J-C, Stacy N, and Aniworth T L, *et al.* SAR compact polarimetry (CP) for earth observation and planetology: concepts and challenges, a study case at P band[C]. PolInSAR 2007: Third International Workshop on Science and Applications SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Rome, Italy, Jan. 22-26, 2007: 90-96.
- [4] Raney R K. Hybrid-polarity SAR architecture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3397-3404.
- [5] Raney R K. A perspective on compact polarimetry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter*, 2011, 160: 12-18.
- [6] Lavallo M, Pottier E, and Aniworth T L, *et al.* Calibration of dual polarimetric C-band SAR data: a possible approach for Sentinel-1[C]. PolInSAR 2009: Fourth International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Rome, Italy, Jan. 26-30, 2009: 1-6.
- [7] Freeman A, Dubois-Fernandez P, and Troung-Loi M-L. Compact polarimetry at longer wavelengths-calibration[C]. 2008 Seventh European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, June 2-5, 2008: 245-248.
- [8] Chen J and Quegan S. Calibration of spaceborne CTRLR compact polarimetric low-frequency SAR using mixed radar calibrators[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2712-2723.
- [9] 尹巽军, 陈杰, 李春升. 星载 P 波段森林生物量观测简缩极化 SAR 定标处理[C]. 2011 成像雷达对地观测高级学术研讨会, 北京, 中国, 2011 年 4 月 21 日-23 日: 77-87.  
Yin Xun-jun, Chen Jie, and Li Chun-sheng. Calibration of spaceborne P-band compact polarimetric SAR data for forest biomass observation[C]. ADSAR2011, Beijing, China, Apr. 21-23, 2011: 77-87.
- [10] Troung-Loi M-L, Dubois-Fernandez P, and Pottier E, *et al.* Potentials of a compact polarimetric SAR system[C]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, USA, July 25-30, 2010: 742-745.
- [11] Chen Tzong-jyh, Chu Tah-hsiung, and Chen Fu-chiang. A new calibration algorithm of wide-band polarimetric measurement system[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1991, 39(8): 1188-1192.

### 作者简介

陈琳(1983-),女,博士生,研究方向为简缩极化 SAR 信息处理与应用。

张晶晶(1986-),男,博士生,研究方向为极化 SAR 定标、混合极化 SAR。

李洋(1983-),男,助理研究员,博士研究生,研究方向为极化 SAR 信息处理与应用。

洪文(1968-),女,研究员,博士生导师,研究方向为雷达信号处理理论、SAR 成像算法、微波遥感图像处理及其应用等。