



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118688738 A

(43) 申请公布日 2024.09.24

(21) 申请号 202411166298.3

(22) 申请日 2024.08.23

(71) 申请人 中国科学院空天信息创新研究院
地址 100190 北京市海淀区北四环西路19号

(72) 发明人 刘立志 赵飞 张岩岩 杨天园
孙旺宇 陆萍萍 王宇

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251
专利代理师 孔伟

(51) Int. Cl.
G01S 7/40 (2006.01)

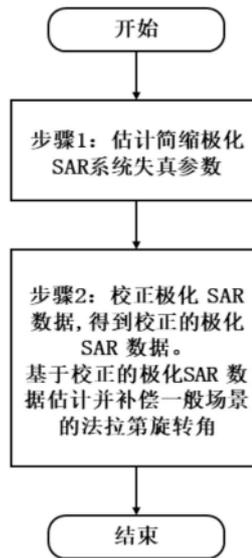
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种简缩极化SAR系统的极化定标方法

(57) 摘要

本发明公开了一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,包括,步骤1,估计简缩极化SAR系统的失真参数,用于校正极化SAR数据的失真;步骤2,基于步骤1所得的简缩极化SAR系统的失真参数,校正极化SAR数据,得到校正的极化SAR数据,基于校正的极化SAR数据估计并补偿一般场景的法拉第旋转角,完成简缩极化SAR系统的极化定标。本发明提出的基于有源定标器和三面角反射器的简缩极化定标方法,实现了高精度的参数估计,为获取高质量简缩极化数据提供保障。



1. 一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤1,估计简缩极化SAR系统的失真参数;用于校正极化SAR数据的失真,步骤1具体包括以下步骤:

步骤1.1,对简缩极化SAR系统的极化失真进行建模,得到简缩极化SAR系统定标模型;

步骤1.2,基于优化算法对简缩极化SAR系统定标模型进行参数估计,得到简缩极化SAR系统的失真参数;

步骤2,基于步骤1所得的简缩极化SAR系统的失真参数,校正极化SAR数据,得到校正的极化SAR数据,基于校正的极化SAR数据估计并补偿一般场景的法拉第旋转角,完成简缩极化SAR系统的极化定标;

步骤1.1具体实现方法为:

考虑雷达系统的收发失真,有源定标器观测矢量 \mathbf{M} 满足下式:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{R}^T\mathbf{\Omega}\mathbf{S}\mathbf{\Omega}\mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中, \mathbf{A} 表示有源定标器的绝对幅度相位值, $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_r \end{bmatrix}$ 表示接收失真矩阵,

$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_t \end{bmatrix}$ 表示发射失真矩阵, $\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & \sin(\Omega) \\ -\sin(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix}$ 表示法拉第旋转矩阵,其中 Ω 表示

法拉第旋转角, $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$ 表示散射矩阵,其中 S_{hh} 表示接收水平极化波反射水平极化波

的后向散射系数, S_{vh} 表示接收水平极化波反射垂直极化波的后向散射系数, S_{hv} 表示接收

垂直极化波反射水平极化波的后向散射系数, S_{vv} 表示接收垂直极化波反射垂直极化波

的后向散射系数, \mathbf{H} 表示不同简缩极化模式的发射基,对于 $\pi/4$ 模式, $\mathbf{H} = [1 \quad \pm 1]/\sqrt{2}$, 对于

CTLR模式,则有 $\mathbf{H} = [1 \quad \pm j]/\sqrt{2}$, j 表示虚数单位, \mathbf{N} 表示系统噪声、干扰信号和杂波对有

源定标器观测矢量贡献的随机误差矩阵, f_r 表示接收通道的不平衡值, δ_1 和 δ_2 表示接收通

道的串扰, f_t 表示发射通道的不平衡值, δ_3 和 δ_4 表示发射端的串扰;

采用一个复参数描述发射信号的畸变程度,即:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{R}^T\mathbf{\Omega}\mathbf{S}\mathbf{\Omega}(\mathbf{H} + \tau\bar{\mathbf{H}}) + \mathbf{N} \quad (2)$$

其中, τ 表示发射等效串扰因子, $\bar{\mathbf{H}}$ 表示与预设发射基正交的极化分量。

2. 根据权利要求1所述的一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,其特征在于,步骤1.2中提出一种基于有源定标器和一个三面角定标器的定标方法,具体包括以下步骤:

步骤1.2.1. 初次求解时,使用散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 有源定标器和散射矩阵

为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 的三面角反射器的观测量构建非线性方程组,忽略接收串扰,采用列文伯格-马夸

尔特法算法对非线性方程组进行求解得到接收通道不平衡 f_r 的参数估计;

步骤1.2.2. 补偿接收通道不平衡值 f_r , 利用相应的有源定标器估计接收串扰 δ_1 和 δ_2 ; 串扰 δ_1 和 δ_2 的参数估计如下式所示:

$$\begin{aligned} A_{\text{ARC}_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_r \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\tau \\ j(1-\tau) \end{bmatrix} &= A_{\text{ARC}_1} \begin{bmatrix} j(1-\tau) \\ \delta_1/f_r \cdot j(1-\tau) \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \delta_1 &= \frac{M_{\text{ARC}_1}(2)}{M_{\text{ARC}_1}(1)} f_r \\ A_{\text{ARC}_2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_r \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\tau \\ j(1-\tau) \end{bmatrix} &= A_{\text{ARC}_2} \begin{bmatrix} \delta_2(1+\tau) \\ 1+\tau \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \delta_2 &= \frac{M_{\text{ARC}_2}(2)}{M_{\text{ARC}_2}(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, A_{ARC_1} , M_{ARC_1} 分别表示散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 的有源定标器的绝对幅度相位值和观测矢量, A_{ARC_2} , M_{ARC_2} 表示散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 的有源定标器的绝对幅度相位值和观测矢量;

步骤1.2.3. 补偿串扰, 重新估计以下参数: 接收通道不平衡值 f_r 和等效发射失真因子 τ 。

3. 根据权利要求2所述的一种简缩极化SAR系统的极化定标方法, 其特征在于, 步骤2具体实现方法为:

对于非定标场的极化SAR数据, 仅受法拉第旋转效应影响的观测矢量 \mathbf{M}_F 如下式所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_F &= A \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \mathbf{S} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} \\ &= A \exp(j\Omega) \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \mathbf{S} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

观测矢量 \mathbf{M}_F 的二阶统计量协方差矩阵 $\mathbf{C} = \langle \mathbf{M}_F \mathbf{M}_F^* \rangle$ 满足下式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} C_{11} - C_{22} \\ C_{12} + C_{21} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos 2\Omega & \sin 2\Omega \\ -\sin 2\Omega & \cos 2\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \pm \text{Im}(\sigma_{12} - \sigma_{23}) \\ \text{Re}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \pm \text{Im}(\sigma_{13}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_{11} + C_{22} \\ 2\text{Im}(C_{12}) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (\sigma_1 + 2\sigma_2 + \sigma_3)/2 \pm \text{Im}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \\ \text{Im}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \pm \sigma_2 \mp \text{Re}(\sigma_{13}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示与领域像素的空间平均, 上标*表示共轭转置, Re 表示复数的实部, Im 表示复数的虚部, C_{xy} 表示协方差矩阵 \mathbf{C} 中的元素, x 表示行序号, y 表示列序号;

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle \quad \sigma_3 = \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \quad \sigma_{13} = \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sigma_2 &= \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle \quad \sigma_{12} = \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle \quad \sigma_{23} = \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

根据发射对称假设得到：

$$\sigma_{12} \approx \sigma_{23} \approx 0 \quad (8)$$

根据裸土的性质得到：

$$\text{Im}(\sigma_{13}) \approx 0 \quad (9)$$

因此,根据式 (6) - (9) 得出：

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2 \text{Re}(C_{12})}{C_{22} - C_{11}} \right) \\ \mu &= \frac{2 \text{Im}(C_{12})}{C_{11} + C_{22}} = \frac{\pm 2\sigma_2 \mp 2 \text{Re}(\sigma_{13})}{\sigma_1 + 2\sigma_2 + \sigma_3} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, μ 表示一致性系数,用于刻画自然地物是否满足所提假设。

一种简缩极化SAR系统的极化定标方法

技术领域

[0001] 本发明属于极化定标,特别涉及一种简缩极化SAR系统的极化定标方法。

背景技术

[0002] 简缩极化合成孔径雷达(compact polarimetric synthetic aperture radar, CP-SAR),与传统的四极化系统架构相比,具有更优的观测幅宽和距离模糊性能而被极化应用领域的学者关注。简缩极化模式相比于四极化模式,取代交替发射正交的电磁波,仅发射单一类型的电磁波,并仍具有水平和垂直两个极化接收通道。根据发射电磁波的类型不同分为不同的简缩极化模式。陆地探测一号卫星搭载了极化SAR载荷,可实现多种简缩极化模式,包括: $\pi/4$ 模式和圆发线收(CTRL)模式。其中, $\pi/4$ 模式指发送45度或135度线极化电磁波。CTRL模式指发射左旋或者右旋圆极化电磁波。此外,为了获取高质量的极化SAR数据,一方面需要内定标回路标定系统偏差,另一方面需要借助外部定标补偿完整的收发链路的残余失真。简缩极化SAR与四极化SAR在外定标补偿中存在差异,即简缩极化的发射失真通过外定标补偿,依赖于高精度的发射源。内定标系统在在载荷设计时已完成,现有技术中尚不存在高精度的外定标方法。

发明内容

[0003] 本发明旨在提出一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,尤其一种高精度的外定标方法,用于评估发射失真的程度以及补偿接收失真。本发明的技术方案如下。

[0004] 一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,该方法包括以下步骤:

步骤1,估计简缩极化SAR系统的失真参数;用于校正极化SAR数据的失真,步骤1具体包括以下步骤:

步骤1.1,对简缩极化SAR系统的极化失真进行建模,得到简缩极化SAR系统定标模型;

步骤1.2,基于优化算法对简缩极化SAR系统定标模型进行参数估计,得到简缩极化SAR系统的失真参数;

步骤2,基于步骤1所得的简缩极化SAR系统的失真参数,校正极化SAR数据,得到校正的极化SAR数据,基于校正的极化SAR数据估计并补偿一般场景的法拉第旋转角,完成简缩极化SAR系统的极化定标。

[0005] 进一步,所述步骤1.1具体实现方法为:

考虑雷达系统的收发失真,有源定标器观测矢量 \mathbf{M} 满足下式:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{R}^T\mathbf{\Omega}\mathbf{S}\mathbf{\Omega}^T\mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中, \mathbf{A} 表示有源定标器的绝对幅度相位值, $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_r \end{bmatrix}$ 表示接收失真矩阵,

$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_t \end{bmatrix}$ 表示发射失真矩阵, $\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & \sin(\Omega) \\ -\sin(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix}$ 表示法拉第旋转矩阵, 其中 Ω 表示法拉第旋转角, $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$ 表示散射矩阵, 其中 S_{hh} 表示接收水平极化波反射水平极化波的后向散射系数, S_{vh} 表示接收水平极化波反射垂直极化波的后向散射系数, S_{hv} 表示接收垂直极化波反射水平极化波的后向散射系数, S_{vv} 表示接收垂直极化波反射垂直极化波的后向散射系数, \mathbf{H} 表示不同简缩极化模式的发射基, 对于 $\pi/4$ 模式, $\mathbf{H} = [1 \ \pm 1]/\sqrt{2}$, 对于 CTLR 模式, 则有 $\mathbf{H} = [1 \ \pm j]/\sqrt{2}$, j 表示虚数单位, \mathbf{N} 表示系统噪声、干扰信号和杂波对有源定标器观测矢量贡献的随机误差矩阵, f_r 表示接收通道的不平衡值, δ_1 和 δ_2 表示接收通道的串扰, f_t 表示发射通道的不平衡值, δ_3 和 δ_4 表示发射端的串扰;

采用一个复参数描述发射信号的畸变程度, 即:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{R}^T\mathbf{\Omega}\mathbf{S}\mathbf{\Omega}(\mathbf{H} + \tau\bar{\mathbf{H}}) + \mathbf{N} \quad (2)$$

其中, τ 表示发射等效串扰因子, $\bar{\mathbf{H}}$ 表示与预设发射基正交的极化分量。

[0006] 进一步, 步骤1.2中提出一种基于有源定标器和一个三面角定标器的稳定高精度定标方法, 具体包括以下步骤:

步骤1.2.1. 初次求解时, 使用散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 有源定标器和散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 的三面角反射器的观测量构建非线性方程组, 忽略接收串扰, 采用列文伯格-马夸尔特法算法对非线性方程组进行求解得到接收通道不平衡 f_r 的参数估计;

步骤1.2.2. 补偿接收通道不平衡值 f_r , 利用相应的有源定标器估计接收串扰 δ_1 和 δ_2 ; 串扰 δ_1 和 δ_2 的参数估计如下式所示:

$$\begin{aligned} A_{\text{ARC}_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_r \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\tau \\ j(1-\tau) \end{bmatrix} &= A_{\text{ARC}_1} \begin{bmatrix} j(1-\tau) \\ \delta_1/f_r \cdot j(1-\tau) \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \delta_1 &= \frac{M_{\text{ARC}_1}(2)}{M_{\text{ARC}_1}(1)} f_r \\ A_{\text{ARC}_2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_r \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\tau \\ j(1-\tau) \end{bmatrix} &= A_{\text{ARC}_2} \begin{bmatrix} \delta_2(1+\tau) \\ 1+\tau \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \delta_2 &= \frac{M_{\text{ARC}_2}(2)}{M_{\text{ARC}_2}(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, A_{ARC_1} , M_{ARC_1} 分别表示散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 的有源定标器的绝对幅度相位值和观测矢量, A_{ARC_2} , M_{ARC_2} 表示散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 的有源定标器的绝对幅度相位值和观测矢量;

步骤1.2.3. 补偿串扰, 重新估计以下参数: 接收通道不平衡值 f_r 和等效发射失真因子 τ 。

[0007] 进一步, 步骤2具体实现方法为:

对于非定标场的极化SAR数据, 还需估计电离层对收发电磁波偏振平面产生的旋转效应, 仅受法拉第旋转效应影响的观测矢量 \mathbf{M}_F 如下式所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_F &= A \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \mathbf{S} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} \\ &= A \exp(j\Omega) \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \mathbf{S} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

观测矢量 \mathbf{M}_F 的二阶统计量 $\mathbf{C} = \langle \mathbf{M}_F \mathbf{M}_F^* \rangle$ 满足下式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} C_{11} - C_{22} \\ C_{12} + C_{21} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos 2\Omega & \sin 2\Omega \\ -\sin 2\Omega & \cos 2\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \pm \text{Im}(\sigma_{12} - \sigma_{23}) \\ \text{Re}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \pm \text{Im}(\sigma_{13}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_{11} + C_{22} \\ 2\text{Im}(C_{12}) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (\sigma_1 + 2\sigma_2 + \sigma_3)/2 \pm \text{Im}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \\ \text{Im}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \pm \sigma_2 \mp \text{Re}(\sigma_{13}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示与领域像素的空间平均, 上标*表示共轭转置, Re 表示复数的实部, Im 表示复数的虚部, C_{xy} 表示协方差矩阵 \mathbf{C} 中的元素, x 表示行序号, y 表示列序号;

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle \quad \sigma_3 = \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \quad \sigma_{13} = \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sigma_2 &= \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle \quad \sigma_{12} = \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle \quad \sigma_{23} = \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

此时, 无法直接从式 (7) 估计出法拉第旋转角, 根据发射对称假设得到:

$$\sigma_{12} \approx \sigma_{23} \approx 0 \quad (8)$$

根据裸土的性质得到:

$$\text{Im}(\sigma_{13}) \approx 0 \quad (9)$$

因此, 根据式 (6) - (9) 得出:

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\text{Re}(C_{12})}{C_{22} - C_{11}} \right) \\ \mu &= \frac{2\text{Im}(C_{12})}{C_{11} + C_{22}} = \frac{\pm 2\sigma_2 \mp 2\text{Re}(\sigma_{13})}{\sigma_1 + 2\sigma_2 + \sigma_3} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, μ 表示一致性系数,用于刻画自然地物是否满足所提假设。

[0008] 本发明具有以下有益效果:

本发明给出了一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,基于有源定标器和三面角反射器的简缩极化定标方案,实现了高精度的参数估计,为获取高质量简缩极化数据提供保障。

附图说明

[0009] 图1为本发明的一种简缩极化SAR系统的极化定标方法的流程图。

[0010] 图2为未有源定标器失真的系统极化失真参数估计误差。其中,(a) 接收通道不平衡值幅度误差,(b) 接收通道不平衡值相位误差,(c) 接收通道串扰幅度误差,(d) 发射圆极化轴比估计误差。

[0011] 图3为考虑有源定标器失真的系统极化失真参数估计误差。其中,(a) 接收通道不平衡值幅度误差,(b) 接收通道不平衡值相位误差,(c) 接收通道串扰幅度误差,(d) 发射圆极化轴比估计误差。

[0012] 图4为基于自然地物估计的法拉第旋转角与一致性系数的散点图。

具体实施方式

[0013] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。为达到上述目的,本发明采用如下的技术方案。

[0014] 本发明的主要目的在于提出一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,尤其一种基于有源定标器和三面角反射器的简缩极化点目标定标方法。

[0015] 一种简缩极化SAR系统的极化定标方法,如图1所示,该方法包括以下步骤,

步骤1,估计简缩极化SAR系统的失真参数;用于校正极化SAR数据的失真,步骤1具体包括以下步骤;

步骤1.1,对简缩极化SAR系统的极化失真进行建模,得到简缩极化SAR系统定标模型;

步骤1.2,基于优化算法对简缩极化SAR系统定标模型进行参数估计,得到简缩极化SAR系统的失真参数;

步骤2,基于步骤1所得的简缩极化SAR系统的失真参数,校正极化SAR数据,得到校正的极化SAR数据,基于校正的极化SAR数据估计并补偿一般场景的法拉第旋转角,完成简缩极化SAR系统的极化定标。

[0016] 步骤1.1的具体实现方法为:

考虑雷达系统的收发失真,有源定标器观测矢量 \mathbf{M} 满足下式:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{R}^T\mathbf{\Omega}\mathbf{S}\mathbf{\Omega}^T\mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中, \mathbf{A} 表示定标器的绝对幅度相位值, $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_r \end{bmatrix}$ 表示接收失真矩阵,

$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_t \end{bmatrix}$ 表示发射失真矩阵, $\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & \sin(\Omega) \\ -\sin(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix}$ 表示法拉第旋转矩阵, 其中 Ω 表示法拉第旋转角, $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$ 表示散射矩阵, 其中 S_{hh} 表示接收水平极化波反射水平极化波的后向散射系数, S_{vh} 表示接收水平极化波反射垂直极化波的后向散射系数, S_{hv} 表示接收垂直极化波反射水平极化波的后向散射系数, S_{vv} 表示接收垂直极化波反射垂直极化波的后向散射系数, \mathbf{H} 表示不同简缩极化模式的发射基, 对于 $\pi/4$ 模式, $\mathbf{H} = [1 \ \pm 1]/\sqrt{2}$, 对于 CTLR 模式, 则有 $\mathbf{H} = [1 \ \pm j]/\sqrt{2}$, j 表示虚数单位, \mathbf{N} 表示系统噪声、干扰信号和杂波等对定标器观测矢量贡献的随机误差矩阵, f_r 表示接收通道 (H/V) 的不平衡值, δ_1 和 δ_2 表示接收通道的串扰, f_t 表示发射通道的不平衡值, δ_3 和 δ_4 表示发射端的串扰。

[0017] Freeman给出了等效失真模型, 由于发射失真无法补偿, 一个复参数足以描述发射信号的畸变程度, 即:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A} \mathbf{R}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{S} \mathbf{\Omega} (\mathbf{H} + \tau \bar{\mathbf{H}}) + \mathbf{N} \quad (2)$$

其中, τ 表示发射等效串扰因子, $\bar{\mathbf{H}}$ 表示与预设发射基正交的极化分量。

[0018] 步骤1.2的具体实现方法为:

由简缩极化 SAR 系统定标模型可知, 存在四个极化失真参数。每增加一个定标器, 则增加一个未知的绝对幅相因子。那么至少需要四个定标器的观测矢量来估计所有未知量。由于有源定标器自身的限制, 以及每增加一个定标器, 都会引入新的未知量, 即使多个定标器构成的定标器组也无法精确求解四个失真参数。但是, 由于有源定标器通过旋转极化天线来实现不同收发特性的散射矩阵, 因此得到的散射矩阵的秩都为1, 导致等效串扰因子与绝对幅度相位值存在模糊, 即:

$$\mathbf{M}_{\text{ARC}} = \mathbf{R}^T(\Omega) A_{\text{ARC}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \cos \theta_t & \cos \theta_r \sin \theta_t \\ -\sin \theta_r \cos \theta_t & -\sin \theta_r \sin \theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \pm \tau \\ j(1 \mp \tau) \end{bmatrix} \\ = \begin{cases} \mathbf{R}^T(\Omega) \begin{bmatrix} 1 \\ -\tan \theta_r \end{bmatrix} A_{\text{ARC}} m(\tau) \theta_r \neq \pm \pi/2 \\ \mp \mathbf{R}^T(\Omega) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} A_{\text{ARC}} [\cos \theta_t (1 \pm \tau) + j \sin \theta_t (1 \mp \tau)] \theta_r = \pm \pi/2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $m(\tau) = \cos \theta_r \cos \theta_t (1 \pm \tau) + j \cos \theta_r \sin \theta_t (1 \mp \tau)$, θ_r 和 θ_t 分别表示有源定标器收发通道相对于本地水平极化方向的天线取向角, 下标 ARC 表示对应于有源定标器的量。由式 (3) 可知, 仅通过有源定标器的观测量无法解耦绝对幅度相位值 A 以及等效串扰因子 τ 。因此, 至少需要两个散射矩阵秩为2的定标器。考虑到星载 SAR 定标方法, 往往不采用二面角等散射特性对取向角极为敏感的定标器。本方法提出如下一种基于有源定标器和一个三面角定标器的稳定高精度定标方法, 具体包括以下步骤:

步骤1.2.1.初次求解时使用散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 有源定标器和散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 的三面角反射器的观测量构建非线性方程组,忽略接收串扰,采用列文伯格-马夸尔特法算法对非线性方程组进行求解得到参数接收通道不平衡 f_r 的估计;

步骤1.2.2.补偿接收通道不平衡值 f_r ,利用相应的有源定标器估计参数接收串扰 δ_1 和 δ_2 ;

步骤1.2.3.补偿串扰,重新估计参数接收通道不平衡值 f_r 和等效发射失真因子 τ ;采用列文伯格-马夸尔特法算法对非线性方程进行求解得到参数接收通道不平衡值 f_r 的估计,参数接收串扰 δ_1 和 δ_2 的估计如下式所示:

$$\begin{aligned} A_{\text{ARC}_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_r \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\tau \\ j(1-\tau) \end{bmatrix} &= A_{\text{ARC}_1} \begin{bmatrix} j(1-\tau) \\ \delta_1/f_r \cdot j(1-\tau) \end{bmatrix} \Rightarrow \delta_1 = \frac{M_{\text{ARC}_1}(2)}{M_{\text{ARC}_1}(1)} f_r \\ A_{\text{ARC}_2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_r \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\tau \\ j(1-\tau) \end{bmatrix} &= A_{\text{ARC}_2} \begin{bmatrix} \delta_2(1+\tau) \\ 1+\tau \end{bmatrix} \Rightarrow \delta_2 = \frac{M_{\text{ARC}_2}(2)}{M_{\text{ARC}_2}(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,下标 ARC_1 表示散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 的有源定标器,下标 ARC_2 表示散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 的有源定标器。

[0019] 结合上述方法,当没有噪声时,可实现对四个失真参数高精度估计。

[0020] 步骤2具体实现方法为,对于非定标场的极化SAR影像,还需估计电离层对收发电磁波偏振平面产生的旋转效应。仅受法拉第旋转效应影响的观测矢量 \mathbf{M}_F 如下式所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_F &= A \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \mathbf{S} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} \\ &= A \exp(j\Omega) \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \mathbf{S} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, Ω 表示法拉第旋转角。

[0021] 经推导,观测矢量 \mathbf{M}_F 的二阶统计量 $\mathbf{C} = \langle \mathbf{M}_F \mathbf{M}_F^* \rangle$ 满足下式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} C_{11} - C_{22} \\ C_{12} + C_{21} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos 2\Omega & \sin 2\Omega \\ -\sin 2\Omega & \cos 2\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \pm \text{Im}(\sigma_{12} - \sigma_{23}) \\ \text{Re}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \pm \text{Im}(\sigma_{13}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_{11} + C_{22} \\ 2 \text{Im}(C_{12}) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (\sigma_1 + 2\sigma_2 + \sigma_3)/2 \pm \text{Im}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \\ \text{Im}(\sigma_{12} + \sigma_{23}) \pm \sigma_2 \mp \text{Re}(\sigma_{13}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示与领域像素的空间平均,上标*表示共轭转置。 Re 表示复数的实部,

Im 表示复数的虚部。 C_{xy} 表示协方差矩阵 \mathbf{C} 中的元素, \mathbf{x} 表示行序号, \mathbf{y} 表示列序号。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle & \sigma_3 &= \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle & \sigma_{13} &= \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sigma_2 &= \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle & \sigma_{12} &= \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \sigma_{23} &= \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

此时,无法直接从式(7)估计出法拉第旋转角。根据发射对称假设可以得到:

$$\sigma_{12} \approx \sigma_{23} \approx 0 \quad (8)$$

根据裸土的性质可以得到:

$$\text{Im}(\sigma_{13}) \approx 0 \quad (9)$$

因此,根据式(6)-(9)可以得出:

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2 \text{Re}(C_{12})}{C_{22} - C_{11}} \right) \\ \mu &= \frac{2 \text{Im}(C_{12})}{C_{11} + C_{22}} = \frac{\pm 2\sigma_2 \mp 2 \text{Re}(\sigma_{13})}{\sigma_1 + 2\sigma_2 + \sigma_3} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, μ 表示一致性系数,用于刻画自然地物是否满足所提假设。

[0023] 实施例:

(1) 仿真实验

采用在如表I所示的参数范围内,随机生成系统失真参数进行蒙特卡洛实验的方式,验证迭代算法的精度。

[0024] 表I 极化SAR系统失真参数的跨度

参数名称	表达式	值
通道幅度不平衡量级	$20 \log_{10} \Delta_{ f }$	2dB
接收串扰幅度量级	$(20 \log_{10} \Delta_{ \delta })_{\min}$	-50dB
	$(20 \log_{10} \Delta_{ \delta })_{\max}$	-20dB
发射等效串扰幅度量级	$(20 \log_{10} \Delta_{ \tau })_{\min}$	-50dB
	$(20 \log_{10} \Delta_{ \tau })_{\max}$	-40dB
后向散射系数幅度波动量级	$20 \log_{10} \Delta_{ A }$	2dB

[0025] 除了评估每个失真参数的估计值与真值的误差,还给出了整体误差的评价指标,即最大归一化误差(MNE),如下式所示:

$$\text{MNE} = \sqrt{\lambda_{\max} \left[(\mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}})^H (\mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}}) \right]} \quad (11)$$

其中, $\lambda_{\max}(\cdot)$ 表示所附矩阵的最大特征值, \mathbf{H} 表示共轭转置。由于简缩极化无法校

正发射失真,所以该指标仅评估接收失真的补偿效果。并使用圆极化轴比 (AR) 用于评估发射失真程度;

$$AR = \cot(\chi) \quad (12)$$

其中, χ 表示椭圆率角,由发射极化波的琼斯矢量计算得到。

[0026] 此外,需要考虑点目标信噪比对定标精度的影响,假设每个定标器的杂波干扰的强度相近,且系统噪声稳定,那么定标器的后向散射系数如表 II 所示。

[0027] 以发射右旋圆极化波的圆发线收筒缩极化模式为例,经过20000次Monte Carlo实验的仿真结果如图2所示,(a)为接收通道不平衡值幅度误差,(b)为接收通道不平衡值相位误差,(c)为接收通道串扰幅度误差,(d)为发射圆极化轴比估计误差, $\hat{\bullet}$ 表示为估计量。横轴表示有源定标器的信噪比 (SNR)。实验表明,当信噪比足够高时,所得定标参数无误差。为了获取较高的定标精度,有源定标器的信噪比应大于75dB。此外,有源定标器同样是极化系统,也存在随时间变化的极化失真。考虑将有源定标器的随机误差加入仿真分析。有源定标器的失真参数的跨度如表 III 所示。经过20000次Monte Carlo实验的仿真结果如图3所示,(a)为接收通道不平衡值幅度误差,(b)为接收通道不平衡值相位误差,(c)为接收通道串扰幅度误差,(d)为发射圆极化轴比估计误差, $\hat{\bullet}$ 表示为估计量。实验结果表明,源定标器的误差与参数估计的误差为相同量级,是误差的主要来源。

[0028] 表 II 用于系统失真参数估计仿真的定标器的后向散射系数

定标器类型	后向散射系数(dB)
有源定标器	53
三面角反射器	22

[0029] 表 III 有源定标器失真参数的跨度

参数名称	表达式	值
通道幅度不平衡量级	$20 \log_{10} \Delta_{ f_{ARC} }$	0.1dB
通道相位不平衡量级	$20 \log_{10} \Delta_{\angle f_{ARC}}$	2deg
串扰量级	$\left(20 \log_{10} \Delta_{ \delta_{ARC} }\right)_{\min}$	-50dB
	$\left(20 \log_{10} \Delta_{ \delta_{ARC} }\right)_{\max}$	-44dB

[0030] (2) 实测数据验证

基于陆地探测一号系统获取的筒缩极化数据评估定标和校正结果的准确度。选取陆地探测一号A星观测苏尼特右旗定标场所采集的数据,成像时间为2024年1月12日,失真参数定标结果如表IV所示。根据图3所示的对发射轴比的估计误差可以得出实际发射轴比低于0.26dB,说明陆地探测一号可实现发射高精度的圆极化电磁波。

[0031] 表IV 失真参数估计结果

失真参数	$ f_r (\text{dB})$	$\angle f_r(\text{deg})$	$ \delta_1 (\text{dB})$	$ \delta_2 (\text{dB})$	AR (dB)
值	0.506	-1.370	-31.237	-29.875	0.060

[0032] 图4展示了基于自然目标估计的法拉第旋转角与一致性系数的散点图,当一致性系数较高时,法拉第旋转角的估计值呈现出集中分布的特点,此时估计的法拉第旋转角为 5.9° 。



图1

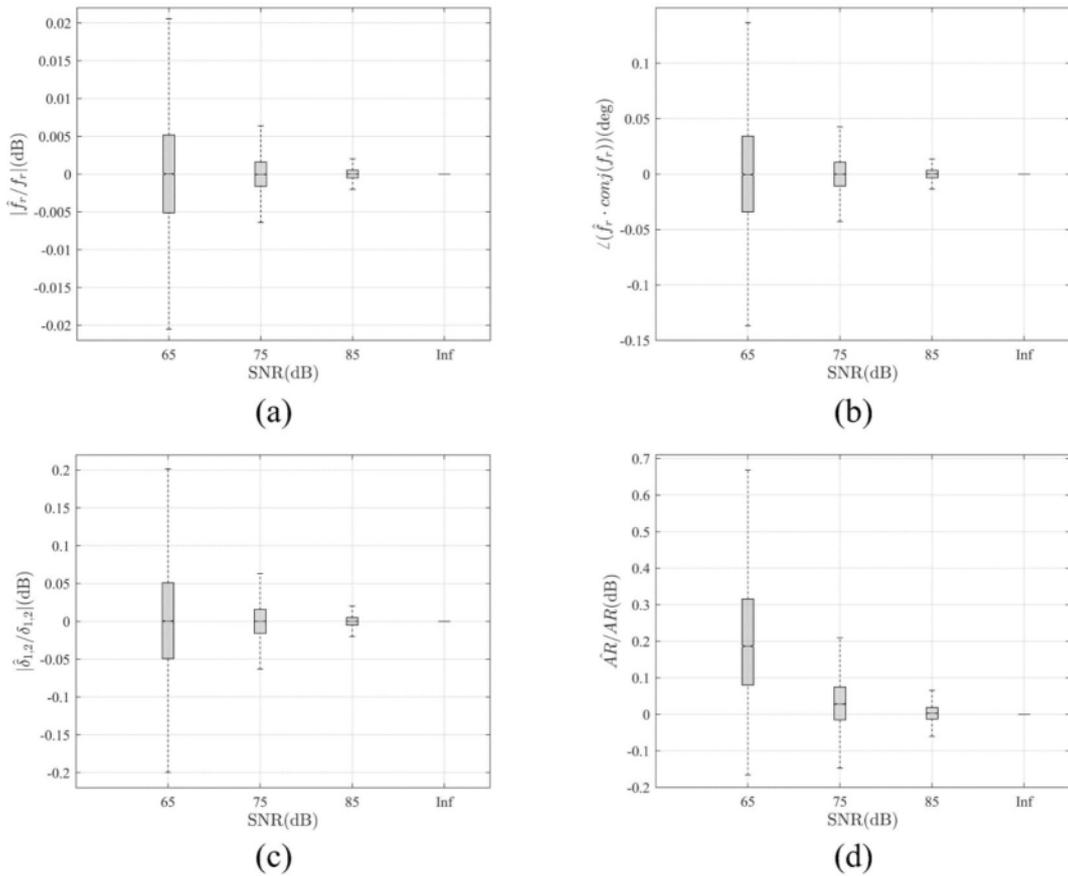


图2

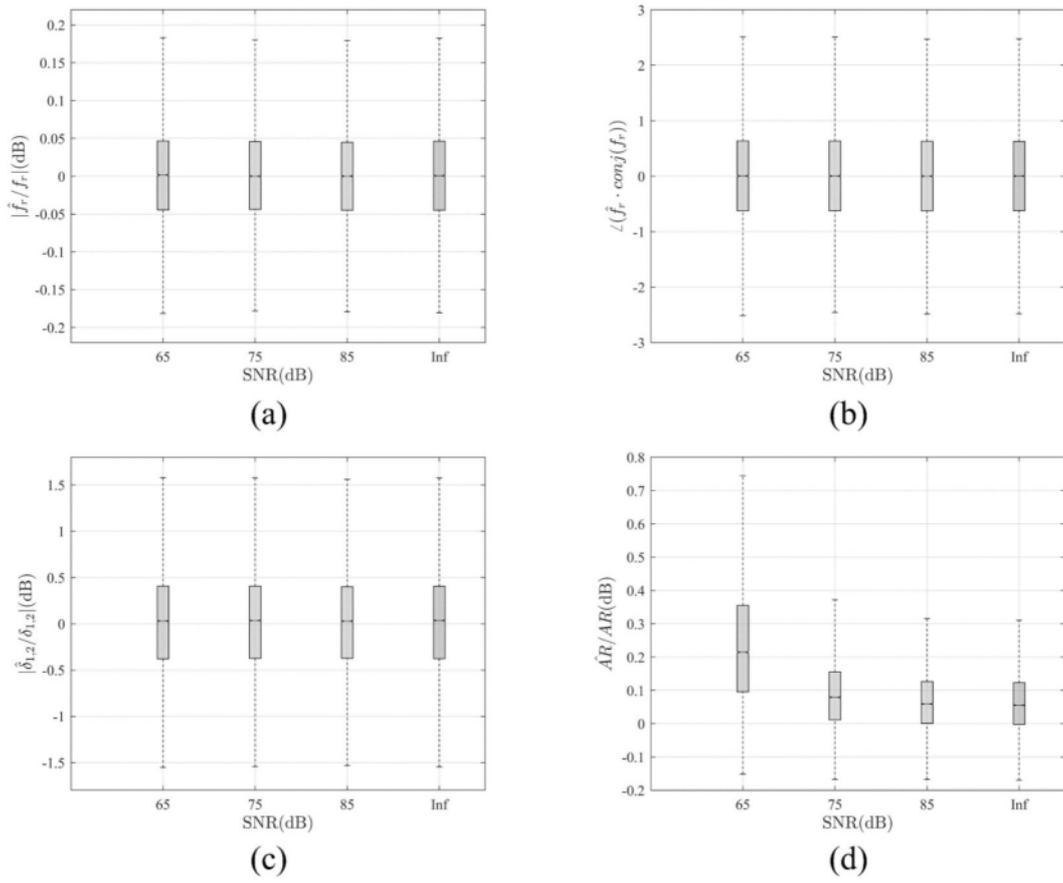


图3

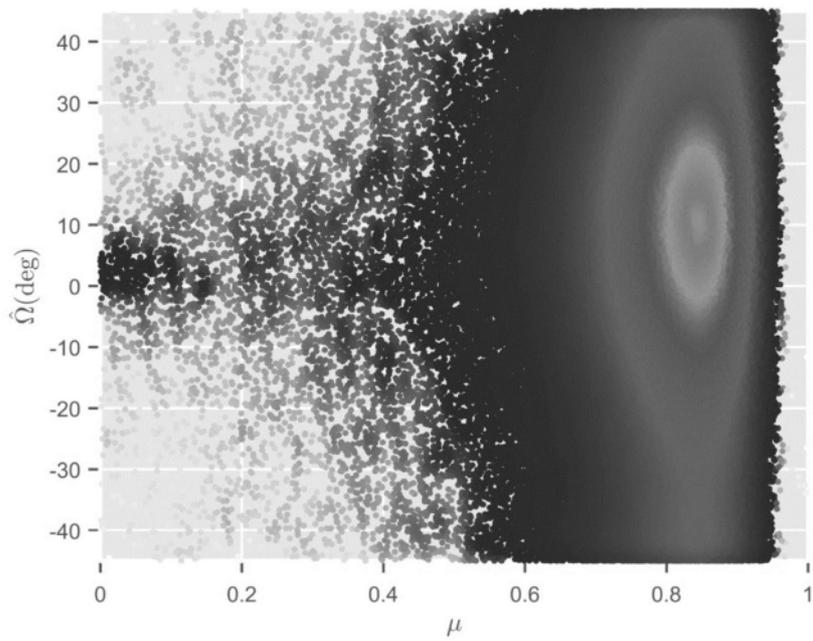


图4