

PolInSAR 极化误差对最优相干相位的影响研究

张林涛^{*①②③} 洪峻^{①②} 明峰^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 极化干涉 SAR 定量应用中, 极化误差会导致最优干涉相位估计误差。该文研究了极化干涉 SAR 测量处理中极化误差的传递, 基于极化相干最优过程理论提出了一个新极化误差传递模型。在此基础上通过仿真验证并分析了极化误差对极化干涉最优干涉相位估计的影响, 其结论能为在实际应用中进行精度分析和提出定标指标要求提供理论依据和参考。

关键词: 极化干涉 SAR; 极化干涉相干最优; 极化误差; 误差传递模型

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0412-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00331

Study on the Impact of Polarimetric Error on Optimal Coherence Phase of PolInSAR

Zhang Lin-tao^{①②③} Hong Jun^{①②} Ming Feng^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Key Laboratory of Geo-spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(The Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The polarimetric error will cause optimal interferometric phase estimation error. In this paper the polarimetric error transferring in the Polarimetric Interferometric SAR (PolInSAR) measurement is studied and a new polarimetric error transfer model is proposed based on polarimetric interferometric coherence optimization. The model is proved through the experimental simulation and the impact to the precision of optimal interferometric phase estimation due to the polarimetric error is analyzed based on the model. The conclusions could provide theoretical support and reference for the precision analysis and calibration requirements in the application.

Key words: PolInSAR; Polarimetric-interferometric phase coherence optimization; Polarimetric error; Error transfer model

1 引言

极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)技术是以极化测量和干涉测量为基础发展起来的, 它既保持了极化测量对目标散射特性的敏感性, 又引入了干涉测量对空间分布和高度的敏感性, 因此在地形测绘、微地形变化检测、植被生物量估计等众多领域有着重要应用^[1-3]。PolInSAR 技术在结合了极化测量和干涉测量技术优势的同时, 也同时引入了极化误差和干涉误差, 导致误差源增加, 这些误差既相互影

响又有各自的特点。其中极化误差源主要有收发通道不平衡与天线极化通道的耦合(即极化串扰), 他们会直接影响干涉相位对极化的依赖特性, 导致最优干涉相位估计误差。

在 PolInSAR 的最优相干算法中, 极化基变化要求进行精确的同极化和交叉极化的复定标, 串扰定标、消除极化通道不平衡以及同极化相位的估计将在极化干涉处理中起关键作用^[4]。因此在本文中主要针对极化误差, 即通道不平衡和极化串扰误差进行分析研究。Cloude^[5]于 2002 年分析了极化误差对最优相干系数的影响, 但没有分析其对最优干涉相位的影响。为此, 本文基于 Papathanassiou 和 Cloude 等人^[6,7]提出的极化干涉相干最优过程理论,

2010-04-01 收到, 2010-07-15 改回

国家自然科学基金重大项目(60890070)资助课题

*通信作者: 张林涛 zhlt1985@163.com

研究分析了极化误差在极化干涉测量和处理中的传递过程, 推导出了其对最优干涉相位估计精度影响的误差传递模型, 并在此基础上通过仿真实验进行验证并分析了极化误差对最优干涉相位的估计结果的影响机制和特点, 最后讨论其应用潜力和价值。

2 PolInSAR 测量相干最优理论基础

目前 PolInSAR 信息提取主要基于极化干涉相干最优理论 (Polarimetric-Interferometric Phase Coherence Optimization)。1997 年, 文献[6]首先利用 SIR-C/X-SAR 数据研究了频率、极化对相干性的影响, 发现了相干性对极化的强烈依赖, 在进行了较系统的研究之后, 于 1998 年提出了极化干涉相干最优过程和基于相干最优的目标分解理论^[7], 奠定了极化干涉雷达遥感的理论基础。本文基于这一理论进行误差分析和误差传递模型推导, 现简介如下:

通过极化干涉测量, 每个分辨单元可以获得两副天线(或两次飞行)的极化相干散射矢量 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 , 它由散射矩阵 \mathbf{S} 在 Pauli 基下矢量化得到, 可以对散射机制进行更好的解释, 如式(1)所示。

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{S}_{hh} + \mathbf{S}_{vv}, \mathbf{S}_{vv} - \mathbf{S}_{hh}, \mathbf{S}_{hv} + \mathbf{S}_{vh}, j(\mathbf{S}_{vh} - \mathbf{S}_{hv})]^T \quad (1)$$

对于互易介质, 有 $\mathbf{S}_{hv} = \mathbf{S}_{vh}$, 散射矢量可以简化为如下的 3 维矢量:

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{S}_{hh} + \mathbf{S}_{vv}, \mathbf{S}_{vv} - \mathbf{S}_{hh}, \mathbf{S}_{hv} + \mathbf{S}_{vh}]^T \quad (2)$$

两副天线获取的极化干涉信息可以用半正定极化干涉相干矩阵 \mathbf{T}_6 表示:

$$\mathbf{T}_6 = \left\langle \begin{pmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{k}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{k}_1^H & \mathbf{k}_2^H \end{pmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{\Omega}_{12} \\ \mathbf{\Omega}_{12}^H & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{T}_{11} = \langle \mathbf{k}_1 * \mathbf{k}_1^H \rangle$, $\mathbf{T}_{22} = \langle \mathbf{k}_2 * \mathbf{k}_2^H \rangle$, $\mathbf{\Omega}_{12} = \langle \mathbf{k}_1 * \mathbf{k}_2^H \rangle$ 。

引入两个代表散射机制的归一化矢量 ω_1 , ω_2 , 同时定义两个复散射系数 μ_1 , μ_2 分别为

$$\mu_1 = \omega_1^H \mathbf{k}_1, \quad \mu_2 = \omega_2^H \mathbf{k}_2 \quad (4)$$

μ_1 和 μ_2 可以理解为相干散射矢量 \mathbf{k} 在散射机制 ω 上的投影, 代表了对应特定散射机制的分量。则极化干涉相干矩阵可以写为

$$[\mathbf{J}] = \left\langle \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1^* & \mu_2^* \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \omega_1^H [\mathbf{T}_{11}] \omega_1 & \omega_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \omega_2 \\ \omega_2^H [\mathbf{\Omega}_{21}] \omega_1 & \omega_2^H [\mathbf{T}_{22}] \omega_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中矢量干涉图可由式(6)表示:

$$\mu_1 \mu_2^* = (\omega_1^H \mathbf{k}_1) (\omega_2^H \mathbf{k}_2)^H = \omega_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \omega_2 \quad (6)$$

则矢量干涉相干系数与干涉相位可分别表示为

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = \frac{|\langle \omega_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \omega_2 \rangle|}{\sqrt{\langle \omega_1^H [\mathbf{T}_{11}] \omega_1 \rangle \langle \omega_2^H [\mathbf{T}_{22}] \omega_2 \rangle}} \quad (7)$$

$$\phi(\omega_1, \omega_2) = \arg(\omega_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \omega_2) \quad (8)$$

为了使相干系数达到最大, 引入拉格朗日乘子则有

$$L = \omega_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \omega_2 + \lambda_1 (\omega_1^H [\mathbf{T}_{11}] \omega_1 - C_1) + \lambda_2 (\omega_2^H [\mathbf{T}_{22}] \omega_2 - C_2) \quad (9)$$

对最大值的求解可以转化为下式的复特征值问题, 且特征值 $v = \lambda_1 \lambda_2^*$ 。

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{T}_{22}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12}^H \mathbf{T}_{11}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12}) \omega_{2j} &= v_j \omega_{2j} \\ (\mathbf{T}_{11}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12} \mathbf{T}_{22}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12}^H) \omega_{1j} &= v_j \omega_{1j} \end{aligned} \right\} j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

最终获得 3 个最优的复相干系数为

$$\tilde{\gamma}_j = \sqrt{v_j} \exp(i \arg\{\omega_{1j}^H \mathbf{\Omega}_{12} \omega_{2j}\}), \quad j = 1, 2, 3 \quad (11)$$

且特征值的关系为 $1 \geq v_1 \geq v_2 \geq v_3 = |\tilde{\gamma}|^2 \geq 0$, 与 v_j 对应的 ω_{1j} , ω_{2j} 分别是两组全极化数据的特征矢量, 代表了最优散射机制。

需要注意的是, 特征矢量的绝对相位并不唯一, 从物理意义上说, 所有的干涉信息应包含在 $\mathbf{\Omega}_{12}$ 中, 因此可以加上如下限制:

$$\arg(\omega_{1j}^H \omega_{2j}) = 0 \quad (12)$$

这在后面的误差分析中也是需要考虑的关键一步。

3 PolInSAR 极化误差影响分析

3.1 PolInSAR 失真模型

在极化 SAR 系统定标理论中系统的失真模型^[8,9]可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= K e^{j\phi} \begin{bmatrix} 1 & \delta_2 \\ \delta_1 & f_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{vv} & \mathbf{S}_{vh} \\ \mathbf{S}_{hv} & \mathbf{S}_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{bmatrix} + \mathbf{N} \\ &= K e^{j\phi} \mathbf{RST} + \mathbf{N} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 \mathbf{M} 为系统测量所得的目标散射矩阵, \mathbf{S} 为目标真实散射矩阵, K 为系统绝对增益因子, ϕ 为系统绝对相位, \mathbf{N} 为噪声, \mathbf{R} , \mathbf{T} 分别为接收通道与发射通道的失真矩阵, f 表示通道不平衡因子, δ 表示极化串扰因子。

对于极化干涉系统来说, 有两组全极化数据, 可用式(14)表示:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= K_1 e^{j\phi_1} \mathbf{R}_1 \mathbf{S} \mathbf{T}_1 + \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{M}_2 &= K_2 e^{j\phi_2} \mathbf{R}_2 \mathbf{S} \mathbf{T}_2 + \mathbf{N}_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

在这个模型中干涉测量几何误差主要会影响系统相位 (ϕ_1, ϕ_2), 由于本文主要考虑极化误差的影响, 因此认为干涉测量几何为理想状态, 此外也不考虑系统增益和热噪声。

上述模型还可以表示为^[8]

$$\mathbf{m} = Ke^{j\phi} \mathbf{P} \mathbf{s} \quad (15)$$

其中 $\mathbf{m} = [M_{hh} \ M_{hv} \ M_{vh} \ M_{vv}]^T$, $\mathbf{s} = [S_{hh} \ S_{hv} \ S_{vh}]^T$, \mathbf{P} 为

$$S_{vv}]^T, \mathbf{P} = \mathbf{R} \otimes \mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} 1 & \delta_4 & \delta_1 & \delta_1 \delta_4 \\ \delta_3 & f_2 & \delta_1 \delta_3 & \delta_1 f_2 \\ \delta_2 & \delta_2 \delta_4 & f_1 & \delta_4 f_1 \\ \delta_2 \delta_3 & \delta_2 f_2 & \delta_3 f_1 & f_1 f_2 \end{bmatrix}, \mathbf{P}$$

失真矩阵。

对于相干散射矢量有

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{vv} - S_{hh}, S_{hv} + S_{vh}, j(S_{vh} - S_{hv})]^T$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -j & j & 0 \end{bmatrix} \mathbf{s} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{A} \mathbf{s} \quad (16)$$

\mathbf{A} 为行列变换矩阵。因此相干散射矢量也可表达为

$$\mathbf{k}' = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{A} \mathbf{m} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\mathbf{A} \mathbf{P}) \mathbf{s} = (\mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^{-1}) \mathbf{k} = \mathbf{Z} \mathbf{k} \quad (17)$$

\mathbf{Z} 为相干散射矢量的失真矩阵。则测量的相干散射矢量与实际相干散射矢量间的关系可表示为

$$\mathbf{k}'_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{k}_1, \quad \mathbf{k}'_2 = \mathbf{Z}_2 \mathbf{k}_2 \quad (18)$$

同理, 在互易介质情况下, 由互易定理相干散射矢量将简化为 3 维矢量, 也会有类似的表达式, 此时 \mathbf{Z} 可表示为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A}' \mathbf{P}' \mathbf{A}'^{-1} \quad (19)$$

其中

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 + \delta_4 & \delta_1 \delta_4 \\ (\delta_2 + \delta_3)/2 & (\delta_1 \delta_3 + \delta_2 \delta_4 + f_1 + f_2)/2 & (\delta_1 f_2 + \delta_4 f_1)/2 \\ \delta_2 \delta_3 & \delta_2 f_2 + \delta_3 f_1 & f_1 f_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

由于两组全极化数据的采集有重轨模式和单轨模式, 因此失真矩阵 \mathbf{Z}_1 和 \mathbf{Z}_2 会在某些条件下相同, 而在其他条件下略有不同。本文将基于式(18), 式(19)进行下面的误差传递分析。

3.2 PolInSAR 极化误差传递模型

基于 3.1 节的数学模型与分析, 由式(18)可定义有误差影响的复散射系数为

$$\left. \begin{aligned} \mu'_1 &= \omega_1^H \mathbf{k}'_1 = \omega_1^H \mathbf{Z}_1 \mathbf{k}_1 \\ \mu'_2 &= \omega_2^H \mathbf{k}'_2 = \omega_2^H \mathbf{Z}_2 \mathbf{k}_2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

极化干涉相干矩阵可表示为

$$[\mathbf{J}'] = \begin{bmatrix} \omega_1^H [\mathbf{Z}_1 \mathbf{T}_{11} \mathbf{Z}_1^H] \omega_1 & \omega_1^H [\mathbf{Z}_1 \mathbf{\Omega}_{12} \mathbf{Z}_2^H] \omega_2 \\ \omega_2^H [\mathbf{Z}_2 \mathbf{\Omega}_{12}^H \mathbf{Z}_1^H] \omega_1 & \omega_2^H [\mathbf{Z}_2 \mathbf{T}_{22} \mathbf{Z}_2^H] \omega_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

则求解特征值的式(10)可表示为

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{Z}_2^H)^{-1} (\mathbf{T}_{22}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12}^H \mathbf{T}_{11}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12}) \mathbf{Z}_2^H \omega'_{2j} = v'_j \omega'_{2j} \\ (\mathbf{Z}_1^H)^{-1} (\mathbf{T}_{11}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12} \mathbf{T}_{22}^{-1} \mathbf{\Omega}_{12}^H) \mathbf{Z}_1^H \omega'_{1j} = v'_j \omega'_{1j} \end{aligned} \right\}, j = 1, 2, 3 \quad (22)$$

通过比较式(10)和式(22)可知, 两式中的相干矩阵是相似矩阵, 根据矩阵理论, 两式具有相同的特征值, 即在有误差的情况下, 最优相干系数不变^[4]: $v'_j = v_j$, 这一结论可以解释为在极化误差影响下, 相干最优过程处理对散射机制进行了重新选择, 以保证相干系数的最优。这是现有处理算法的全局最优特点所决定的, 但也正是由此改变了代表散射机制的特征矢量, 导致干涉相位估计误差。因此要分析极化误差是如何影响到散射机制并导致最优干涉相位误差的。

由于相干最优过程得到的代表最优散射机制的特征矢量 ω 并不唯一, 假设 \mathbf{v} 为代表散射机制的某一绝对相位确定的单位特征矢量, 则根据矩阵理论由式(12)可知 ω 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \omega_{1j} &= a_1 \mathbf{v}_{1j} \\ \omega_{2j} &= a_2 \mathbf{v}_{2j} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其中 $|\mathbf{v}_{1j}| = |\mathbf{v}_{2j}| = 1$, $\arg(\mathbf{v}_{1j}^H \mathbf{v}_{2j}) = 0$, a_1 和 a_2 为复系数, 且满足 $|a_1| = |a_2| = 1$ 。则

$$\omega_{1j}^H \omega_{2j} = a_1^* a_2 \mathbf{v}_{1j}^H \mathbf{v}_{2j} = w e^{j\phi_a} \quad (24)$$

其中 $\phi_a = \arg(a_1^* a_2)$, $w = |\omega_{1j}^H \omega_{2j}|$ 。

又由限制条件, 式(12), 可得 $\phi_a = 0$, 则

$$\mu_1 \mu_2^* = e^{j\phi_a} \mathbf{v}_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_1^H [\mathbf{\Omega}_{12}] \mathbf{v}_2 \quad (25)$$

通过前面的分析, 由式(10), 式(22)和相似矩阵的相关定理可知, 失真矩阵 \mathbf{Z} 在求解特征值的过程中扮演了过渡矩阵的角色, 因此在极化误差影响下获得的特征矢量与原来的特征矢量间存在下面的关系:

$$\left. \begin{aligned} \omega'_{1j} &= b_1 (\mathbf{Z}_1^H)^{-1} \mathbf{v}_{1j} \\ \omega'_{2j} &= b_2 (\mathbf{Z}_2^H)^{-1} \mathbf{v}_{2j} \end{aligned} \right\}, j = 1, 2, 3 \quad (26)$$

其中 b_1, b_2 为复系数, 那么

$$\omega_{1j}^H \omega'_{2j} = b_1^* b_2 \mathbf{v}_{1j}^H (\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1)^{-1} \mathbf{v}_{2j} = |b_1^* b_2| e^{j\phi_b} w' e^{j\phi'_\omega} \quad (27)$$

其中 $\phi_b = \arg(b_1^* b_2)$, $w' = |\mathbf{v}_{1j}^H (\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1)^{-1} \mathbf{v}_{2j}|$, $\phi'_\omega = \arg(\mathbf{v}_{1j}^H (\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1)^{-1} \mathbf{v}_{2j})$ 。

在处理过程中若加限制条件 $\arg(\omega_{1j}^H \omega'_{2j}) = 0$, 则 $\phi_b = -\phi'_\omega$ 。

又由于

$$\mu'_1 = \omega_{1j}^H \mathbf{k}'_1 = \left(\mathbf{b}_1 \left(\mathbf{Z}_1^H \right)^{-1} \bar{\omega}_{1j} \right)^H \left(\mathbf{Z}_1 \mathbf{k}_1 \right) = b_1^* \omega_{1j}^H \mathbf{k}_1 \quad (28)$$

同理, $\mu'_2 = b_2^* \omega_{2j}^H \mathbf{k}_2$, 则有

$$\begin{aligned} \mu'_1 \mu_2^* &= b_1^* b_2 \mathbf{v}_1^H [\boldsymbol{\Omega}_{12}] \mathbf{v}_2 = |b_1^* b_2| e^{j\phi_b} \mathbf{v}_1^H [\boldsymbol{\Omega}_{12}] \mathbf{v}_2 \\ &= |b_1^* b_2| e^{j(-\phi_\omega)} \mathbf{v}_1^H [\boldsymbol{\Omega}_{12}] \mathbf{v}_2 = |b_1^* b_2| e^{j(-\phi_\omega)} \mu_1 \mu_2^* \end{aligned} \quad (29)$$

由于只考虑干涉相位, 式(29)可写为

$$\arg(\mu'_1 \mu_2^*) = \arg(\mu_1 \mu_2^*) - \phi'_\omega \quad (30)$$

因此由式(30)与式(27)将极化误差导致的干涉相位估计误差表示为

$$\Delta\phi_j = -\phi'_\omega = -\arg\left(\mathbf{v}_j^H \left(\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1\right)^{-1} \mathbf{v}_{2j}\right), \quad j=1,2,3 \quad (31)$$

这就是基于极化干涉相干最优过程理论的极化误差对干涉相位估计影响的误差传递模型。最优干涉相位估计误差的大小受失真矩阵 \mathbf{Z} 和代表散射机制的特征矢量 \mathbf{v} 的影响, 式(31)中 j 表示 3 个最优相干相位的估计误差。

下面分别讨论通道不平衡与极化串扰对相位估计的影响(为简便起见, 这里假设 $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2$):

(1)若通道平衡特性理想, 且串扰参数相同, 则有

$$f_1 = f_2 = 1 \quad \text{且} \quad \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta \quad (32)$$

则式(19)简化为 $\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} 1 & 2\delta & \delta^2 \\ \delta & 1 + \delta^2 & \delta \\ \delta^2 & 2\delta & 1 \end{bmatrix}$ 。

在 δ 较小, 可以忽略高次项情况下, 可以得到如下的简化结果:

$$\left(\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1\right)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 + b + 2c & 0 & 4a \\ 0 & 1 - 2b & 0 \\ 4a & 0 & 1 + b + 2c \end{bmatrix}^{-1} \quad (33)$$

其中 $a = \text{real}(\delta)$, $b = \text{real}(\delta^2)$, $c = |\delta^2|$ 。

由 a, b, c 的定义可以看出, 串扰因子的相位影响比较小, 在 δ 较小的情况下可以忽略。

(2)若系统极化隔离理想, 没有串扰, 则有

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta = 0 \quad (34)$$

则式(19)简化为 $\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & (f_1 + f_2)/2 & 0 \\ 0 & 0 & f_1 f_2 \end{bmatrix}$ 。

$$\left(\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1\right)^{-1} = \begin{bmatrix} (1 + d^2)/2 & (d^2 - 1)/2 & 0 \\ (d^2 - 1)/2 & (1 + d^2)/2 & 0 \\ 0 & 0 & e^2/4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (35)$$

其中 $d = |f_1 f_2|$, $e = |f_1 + f_2|$ 。

由式(35)可以看出, 不仅需要考虑到通道不平衡

因子的幅度, 其相对相位对 e 的影响很大, 也要考虑。

总之, 由式(33), 式(35)可以看出在越理想的情况下, $(\mathbf{Z}_2^H \mathbf{Z}_1)^{-1}$ 矩阵越接近单位阵, 又由式(12)可知相位估计误差就越小。

4 仿真试验及结果分析

4.1 仿真参数及数据来源

本文的模拟数据是由欧洲航空局发布的 PolSARpro v4.0 Software^[10]生成的。仿真区域为具有一定粗糙度的平坦地面, 地面上是一片落叶树林位于图像的中心区域, 树林中包含有 17 棵树。系统参数有: 中心频率 $f = 1.3 \text{ GHz}$, 入射角度 $\theta = 45^\circ$, 飞机平台高度 $H = 3000 \text{ m}$, 水平基线 $B_h = 10 \text{ m}$, 垂直基线 $B_v = 1 \text{ m}$, 方位向分辨率 $\rho_a = 1.5 \text{ m}$, 斜距向分辨率 $\rho_r = 1.06 \text{ m}$, 树高 $h_t = 18 \text{ m}$ 。最终获得了 2 组 105×141 像素的全极化单视复图像数据, 其中主天线极化数据在 Pauli 基下的 RGB 图像如图 1 所示。

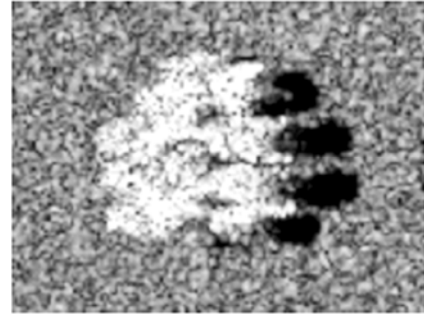


图 1 主天线极化图像示意图

4.2 仿真试验结果与分析

为了验证前面的理论分析与误差模型, 我们进行了仿真试验。在不影响本论文主要问题研究的前提下, 为简便起见, 数据模拟过程中没有考虑 PolInSAR 系统轨道高度和干涉相位测量值等参数的不确定性, 并且认为两组数据受到相同的极化误差影响, 即 $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}$ 。

首先, 通过前面的误差传递模型可知, 某像素点的相位误差的大小是与该分辨单元所求解的特征矢量(散射机制)有关的, 在固定的极化误差影响下, 所选择的特征矢量不同, 造成的相位误差也会有大有小, 因此不同位置的像素点所对应的特征矢量不同, 相位误差也各不相同。我们选取了实验处理结果的一条距离线上植被区的相位误差, 如图 2(a)所示, 并选取了一块 30×30 像素的植被区域进行了最优干涉相位一的估计误差直方图统计, 如图 2(b)所

示, 由图中可知, 在-19 dB 的串扰误差影响下, 该区域的相位误差基本上分布在±0.2° 范围内。

其次, 通过误差模型分析极化串扰对最优干涉相位的影响(图 3), 并用实验数据验证(图 4)。为简便起见, 这里假设通道平衡特性理想, 且串扰参数相同, 即式(32)所示。

虽然通过前述分析可知, 极化误差导致的最优干涉相位误差将会分布在一定的范围内, 但是通过误差模型式(31), 式(33)可知, 在某一固定散射机制(即特征矢量不变)下, 随着串扰的增加, 干涉相位误差会随之变大, 如图 2 所示。由图 2 还可以看出, 串扰对 3 个最优干涉相位的影响各不相同, 而不同的特征矢量也会导致不同的误差。通过对实验数据的相位误差进行统计, 如图 4 所示, 可以看出选定区域内最优相干相位的估计误差的标准差与分布范围都会随串扰的严重而变大。

最后, 通过误差模型式(31), 式(35)分析通道不平衡对最优干涉相位的影响如图 5 所示, 可以看出通道不平衡对干涉相位造成的误差有近似线性规律, 而且只有发射通道和接收通道的相对相位误差较小, 这种近似线性关系才较为理想。另外, 对比图 5(a), 5(b)两图可知, 通道不平衡因子的相对相位误差也会对干涉误差产生影响。通过对实验数据的相位误差进行统计, 结果如图 6(a)所示, 随着通

道不平衡增加, 误差均值逐渐偏移零均值, 标准差与分布范围也随之增加且有近似线性的关系。另外, 通道不平衡因子的相对相位误差对相位估计的影响如图 6(b)所示, 与误差模型分析的结论一致。

由前述实验结果分析可知, 本文提出的误差模型及其理论分析结论式(31)–式(35)与实验结果一致且基于该模型的误差分析及其结论能为在实际应用中进行精度分析与提出定标指标要求提供理论依据, 例如我们参考德国 DLR 的 P 波段 F-SAR 系统^[1], 其定标后的极化隔离度为-36 dB, 通道不平衡优于 1 dB, 相对相位优于 8°, 在本文的分析中-34 dB 串扰导致的最优相干相位估计误差优于 0.05° (如图 7 所示), 通道不平衡 10° 相对相位导致的最优相干相位估计误差优于 0.25°, 如图 6(b)所示。

5 结论

综上所述, 本文基于文献[6,7]提出的极化干涉相干最优过程理论, 分析了极化误差对极化干涉测量和处理过程的影响, 理论推导了其对最优相干相位估计影响的误差传递模型。基于该模型, 理论分析了通道不平衡与极化串扰对最优相干相位估计的影响, 从而对于极化误差对最优极化干涉相位的估计精度影响机制及大小有了更清晰深入的认识。最后通过仿真实验对基于该误差模型的分析结论进行

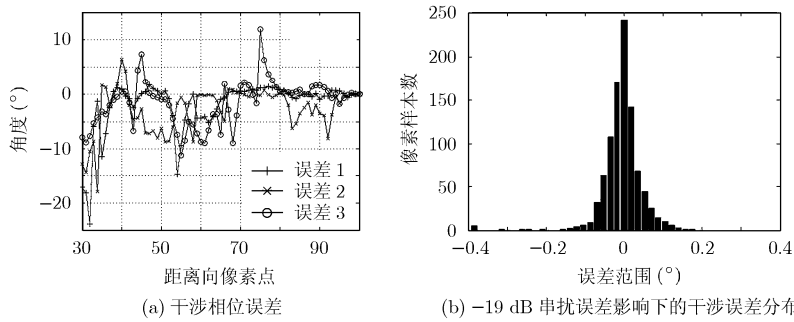


图 2 最优干涉相位误差示意图

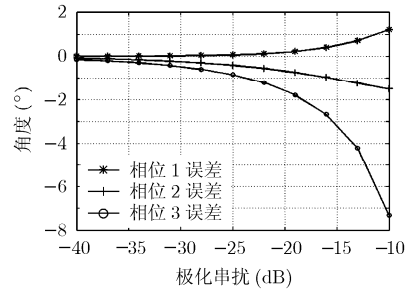


图 3 误差模型分析串扰对最优干涉相位估计的影响

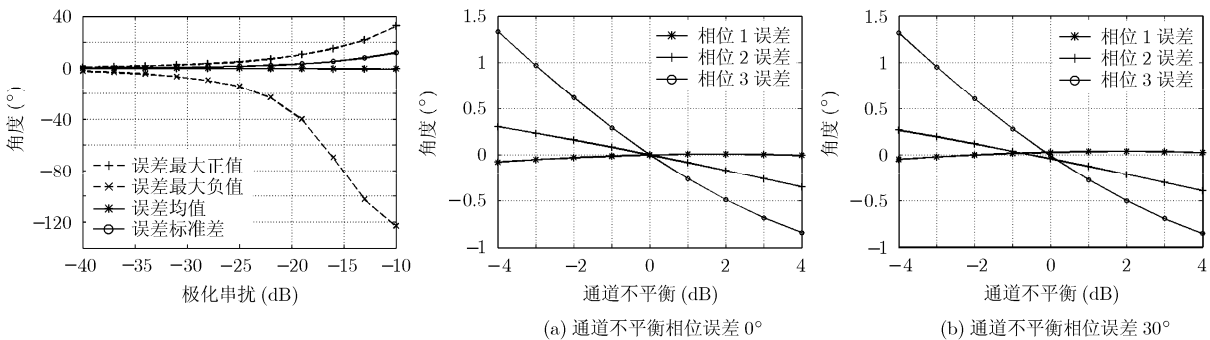


图 4 串扰影响下的最优干涉相位误差统计特征

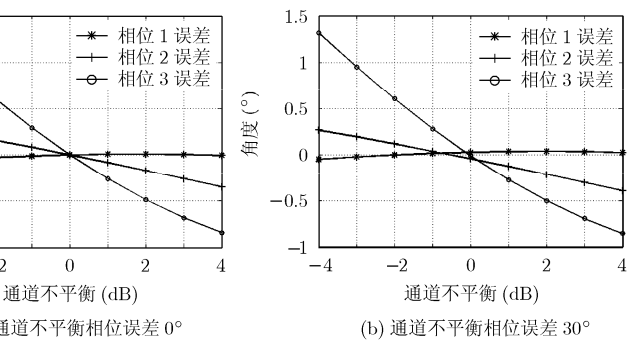


图 5 误差模型分析通道不平衡对最优干涉相位估计的影响

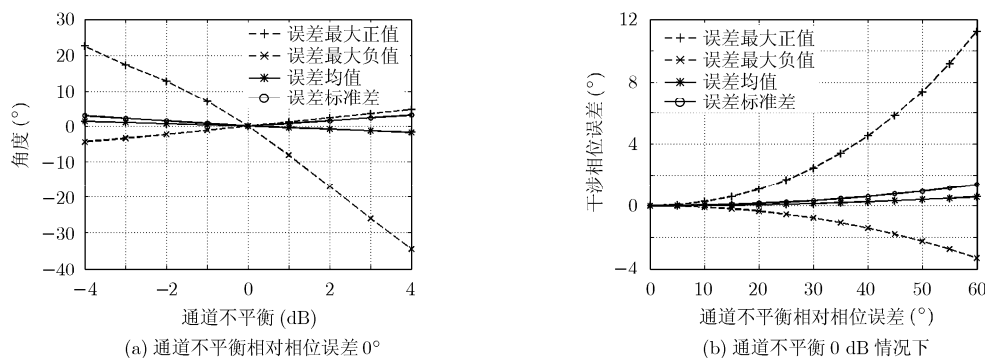


图 6 通道不平衡影响下的最优干涉相位误差统计特征

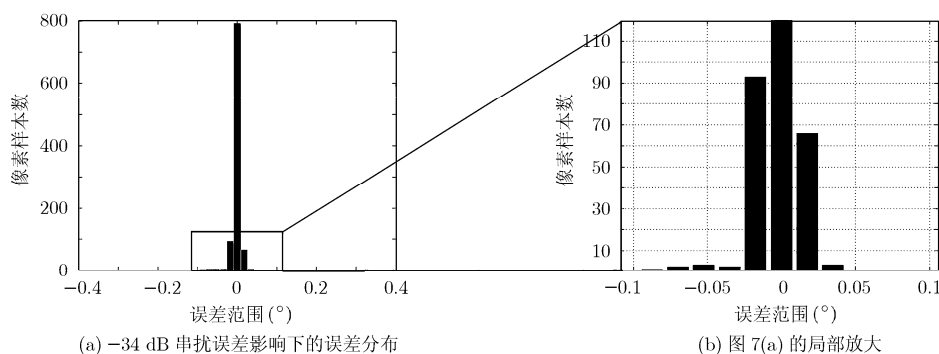


图 7 -34 dB 串扰影响下的最优干涉相位误差统计特征

了验证, 从而证明了误差模型的有效性。实验结果表明, 本文提出的误差传递模型能有效地反映和计算极化误差对极化干涉相干性及干涉相位的影响, 误差分析及其结论能为实际应用中进行精度分析和提出定标指标要求提供理论依据和参考。

参考文献

- [1] 郭华东, 李新武, 王长林, 李震. 极化干涉雷达遥感机制及作用[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 401-405.
Guo Hua-dong, Li Xin-wu, Wang Chang-lin, and Li Zhen. The mechanism and role of polarimetric SAR interferometry[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 401-405.
- [2] 周梅, 王新鸿, 唐伶俐, 李传荣. 极化干涉合成孔径雷达技术发展与应用[J]. 科技导报, 2008, 26(21): 90-93.
Zhou Mei, Wang Xin-hong, Tang Ling-li, and Li Chuan-rong. Developments and applications of polarimetric SAR interferometry techniques [J]. *Science & Technology*, 2008, 26(21): 90-93.
- [3] Wolfgang-Martin Boerner. Recent advances in polarimetric and interferometric radar remote sensing[C]. Proceedings EUSAR, Friedrichshafen, Germany, 2008: 119-122.
- [4] Papathanassiou K P, Reigber A, and Scheiber R. Airborne polarimetric SAR interferometry[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, WA USA, July 1998, Vol.4: 1901-1903.
- [5] Cloude S R. Calibration requirements for forest parameter estimation using POLinSAR[C]. Proc. of CEOS Working

- Group on Calibration & Validation SAR Workshop, London, United Kingdom, September 2002: 151-158.
- [6] Cloude S R and Papathanassiou K P. Polarimetric radar interferometry[C]. SPIE, 1997, 3120: 224-235.
- [7] Cloude S R and Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [8] Ainsworth L, Ferro-Famil L, and Lee Jong-Sen. Orientation angle preserving a posteriori polarimetric SAR calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 994-1003.
- [9] Moriyama T. Calibration of spaceborne polarimetric SAR data using a genetic algorithm[C]. Proc. of IGARSS 2009, Cape Town, South Africa, 2009, V: 158-161.
- [10] Pottier E, Ferro-Famil L, and Allain S, et al. Overview of the PolSARpro v4.0 software: the open source toolbox for polarimetric and interferometric polarimetric SAR data processing[C]. Proc. of IGARSS 2009, Cape Town, South Africa, 2009, IV: 936-939.
- [11] Fischer J and St Baumgartner, et al. Geometric, radiometric, polarimetric and along-track interferometric calibration of the new F-SAR system of DLR in X-Band[C]. Proceedings EUSAR, Friedrichshafen, Germany, 2008: 109-112.

- 张林涛: 男, 1985 年生, 博士生, 从事极化干涉 SAR 定标理论与技术研究。
洪峻: 男, 1960 年生, 研究员, 博士生导师, 从事微波遥感应用领域研究。
明峰: 男, 1977 年生, 副研究员, 从事 SAR 定标理论与定量化应用领域研究。