

基于正则总体最小二乘的 SAR 系统运动 误差估计方法

郭鹏 王岩飞

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 机载合成孔径雷达(SAR)平台在飞行过程中的航迹误差导致实际成像结果的分辨率下降,利用雷达回波数据提取运动误差是运动补偿的重要手段。通过对运动误差提取算法的研究,提出了一种基于正则总体最小二乘的估计方法。该方法综合考虑了各距离门相位估计误差的异方差性、空变误差模型的系数误差以及模型自身存在的病态性几方面因素,在运动误差估计过程中结合误差加权、正则总体最小二乘处理思路消除偏差异方差性,减小系数误差和病态的影响,并在正则处理过程中引入 L-曲线法实现正则参数的自动选取。实验结果验证了该方法对运动误差估计的准确性和有效性。

关键词: 合成孔径雷达;运动误差估计;总体最小二乘法;正则化;L-曲线

中图分类号: V243.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Motion error estimation for SAR systems based on regularized total least square

Guo Peng Wang Yanfei

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The deviations from the reference track of airborne synthetic aperture radar (SAR) systems decrease the resolution in SAR imagery, and motion error estimation based on raw data is an important step for motion compensation. According to the research of motion error estimation, a new approach for estimation of motion errors based on regularized total least square (RTLS) is proposed. This new method fully considers the effects of the heteroscedasticity of phase estimation error in different range cells, the error of model coefficient matrix and the ill-conditioned problem in the motion error estimation. It combines weighted method, total least square with regularization method while in process to eliminate the heteroscedasticity and decrease the effects of coefficient matrix error and ill-conditioned problem. It also utilizes the L-curve method to realize the automatic regularization parameter selection. The experimental results show that the proposed method is validated and accurate to motion estimation.

Keywords: SAR; motion error estimation; total least square; regularization; L-curve

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种有源雷达,具有全天候全天候的对地观测能力,能够实现远距离、大测绘带精确成像^[1-2]。SAR系统分为星载SAR系统和机载SAR系统。相对于星载SAR,机载SAR平台通常飞行在低空高度,因此,其容易受到大气扰动的影响而偏离理想航迹。航迹误差带来的相位误差是回波数据的主要误差部分,带来图像的模糊、分辨率的下降^[3-5]。因此需要对平台做相应的补偿

以消除轨迹偏移的影响。

SAR回波数据相位对载机的轨迹偏移非常敏感,轨迹偏移误差如果大于1/4个波长将引起场景目标的模糊^[6]。对于配备高精度导航系统的SAR平台,如E-SAR^[7]、AJRSAR^[6]和ORBISAR^[8]等,其导航精度可达到厘米级,能够有效补偿回波数据中绝大部分运动误差。但对于中等或低精度导航系统则难以满足高分辨率要求,甚至在很多小型SAR平台中,出于成本或者载荷限制在飞机上无法搭载高精度导航系统^[9]。因此,需要从雷达的回波数据中进

一步提取误差信息来进行相应的补偿^[10]。

传统的自聚焦算法,如 MDA^[11](map drift algorithm),PGA^[12-13](phase gradient autofocus),WPGA^[14](weighted PGA),COA^[15](contrast optimization algorithm)等算法,试图从信号相位的角度出发,提取回波的误差相位信息,通过相位补偿的方式得到良好的聚焦图像。这些算法通常是建立在相位误差的“冗余性假设”基础上,即各距离门的相位误差保持一致。这一假设在窄测绘带条件下是成立的,但在宽测绘带或低飞行高度条件下,各距离门相位误差相差较大,“冗余性假设”不再成立,单一的相位误差估计已难以达到高分辨率的成像要求,需要从回波数据提取运动误差进行补偿。

为从回波数据提取运动误差,文献^[16]建立了垂直于航迹向的空变误差模型,通过建立运动误差和相位误差之间的对应关系,将运动误差的提取转化为了求解矩阵方程的一个过程。作者在求解过程中采用了广义逆的求解思路,但是广义逆的不唯一性会导致求解结果不稳定。在此基础上,文献^[17]提出的加权相位曲率自聚焦(weighted phase curvature autofocus rate,WPCA)算法则采用加权最小二乘的思路,通过加权消除各距离门相位估计误差的异方差性影响,得到稳定的求解结果。但实际模型参数存在一定误差,即求解线性方程的系数矩阵存在误差,这使得该算法得到的结果不是最优的。针对系数矩阵存在误差情况,文献^[9]提出了加权总体最小二乘估计算法(weighted total least square algorithm,WTA),将总体最小二乘法和加权最小二乘法相结合;而文献^[18]的基于近似总体最小二乘(approximate total least square algorithm,ATLS)的处理算法,同样将总体最小二乘引入到误差估计之中,采用奇异值分解和截断方式实现对误差影响的去除。但在实际的应用过程中,系数矩阵自身的病态性同样会对估计结果产生影响。针对估计过程中的病态性问题,文献^[19]采用基于 LS 的 Tikhonov 正则化处理算法来处理运动误差提取求解过程中出现的病态性。该算法在处理过程中并未考虑相位估计误差的异方差和系数矩阵的误差特点,且正则参数初始值对结果影响较大,正则参数的设定需要人为参与,这在一定程度上降低了算法的适用性。

为更加精确地从回波数据中估计运动误差,本文基于垂直于航迹向的空变误差模型,在估计过程中全面考虑了各距离门相位误差偏差的异方差性、模型系数误差以及模型病态性的影响。为消除各距离门相位估计误差偏差不一致对结果的影响,采用加权的思路消除异方差;为减小模型系数误差和病态性对估计结果的影响,采用正则总体最小二乘方法的估计方法,并在正则化参数选取过程中引入 L-曲线方法,实现了参数的自动选取,达到正则条件下的估计结果最优化。最后,通过仿真和实际数据验证了该算法的有效性。

2 运动误差模型

机载 SAR 平台的运动误差具有多种形式,如视线(LOS)移位,姿态变化,前向加速度等等。姿态变化可以通过固定天线的瞄准方向或者在图像的校准阶段利用已知的发射天线辐射特性进行补偿消除;而前向加速度可以通过对采样数据沿方位向进行重采样进行消除。因此,接收回波数据的主要误差部分为航迹误差。

文献^[16]针对运动误差的提取建立了如图 1 所示的空变误差模型,其中表示 t 时刻机载平台的理想位置, B 表示其实际位置。在垂直于理想航迹向的平面上,将运动误差分解为平行于水平向的水平分量 $x(t)$ 和垂直于水平方向的垂直分量 $y(t)$ 。角度 θ 表示在理想位置 SAR 天线与目标点 P 的入射角。 R_0 表示在理想位置处 SAR 与目标点的理想斜距, R_1 表示在实际位置处 SAR 与目标点的实际斜距。对于 P 点来说,机载平台偏离实际位置带来的斜距变化为^[16]

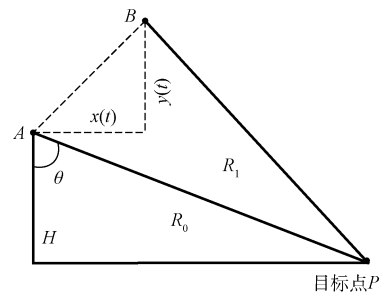


图 1 运动误差分解

$$R_1 - R_0 \approx -x(t)\sin\theta + y(t)\cos\theta \quad (1)$$

斜距变化引起相位变化,相位误差为:

$$\phi(\theta, t) = -4\pi/\lambda \cdot [-x(t)\sin\theta + y(t)\cos\theta] \quad (2)$$

式中:入射角 θ 可以用斜距和飞行高度 H 表示。

$$\theta = \arccos(H/R_0) \approx \arccos(H/R_1) \quad (3)$$

不同斜距的点对应不同的入射角 θ 。当飞行平台高度 H 较低或者距离向条带宽度较大时, θ 变化很大,这意味着不同距离门处斜距差别很大。这同时也意味着,传统自聚焦算法中相位误差“冗余性假设”不再成立。

如果在距离向上选取多个不同距离门上的散射点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, 将每个点处的相位误差归结可以得到一个关于方位位置 t (用离散采样时刻 m 表示) 的运动误差的线性方程组:

$$\Phi_m = HD_m \quad (4)$$

式中: $\Phi_m = [\phi_m(\theta_1) \phi_m(\theta_2) \dots]^T$, 表示各散射点处的相位误差矩阵;

$$H = -\frac{4\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \text{表示各散射点处的入射角}$$

决定的系数矩阵;

$\mathbf{D}_m = [x(m)y(m)]^T$ 表示在 m 时刻,运动误差水平分量和垂直分量矩阵。

因此,求解运动误差 $x(t)$, $y(t)$ 的过程,实质上是解矩阵方程 $\dot{\Phi}_m = \mathbf{H}\mathbf{D}_m$ 的过程。这里将 Φ_m 和 \mathbf{D}_m 表示成梯度的形式。由于相位误差的估计通常是估计相位误差梯度,而在相位误差梯度的估计过程中不可避免存在误差,因此在相位梯度积分之前求运动误差梯度可以避免相位误差在积分求相位误差时的误差累积^[19]。最后的运动误差通过梯度拼接和积分的形式得到。

3 正则总体最小二乘理论

运动误差反演是一个不适定性模型的估计问题,对于不适定模型

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \approx \mathbf{b} \quad (5)$$

系数矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ($m > n$), $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为待估计参数; $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 为已知观测值。 \mathbf{A} , \mathbf{b} 均受到误差的影响。

对于病态系统, Gene H. Golub 等人^[20-21] 提出并分析了正则化的 TLS (regularized TLS, RTLS) 特性。与 Tikhonov 正则化的 LS 方法类似,正则化 TLS 问题表示为:

$$\min \|\mathbf{E}, \mathbf{F}\|_F \quad (6)$$

式中: $(\mathbf{A} + \mathbf{E})\mathbf{x} = \mathbf{b} + \mathbf{f}$, 且 $\|\mathbf{L}\mathbf{x}\| \leq \delta$ 。 \mathbf{E} , \mathbf{f} 分别为给 \mathbf{A} 和 \mathbf{b} 添加的扰动矩阵, $\|\cdot\|$ 表示 2-范数, δ 表示正则化参数, $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 定义了解的范数(半范数),可以将 \mathbf{L} 取单位矩阵 \mathbf{I} 的形式。

通过计算方程

$$(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \lambda_l\mathbf{I} + \lambda_l\mathbf{L}^T\mathbf{L})\mathbf{x}_L = \mathbf{A}^T\mathbf{b} \quad (7)$$

可以得到正则化的总体最小二乘解。

式中: $\lambda_l = -\phi(x_L) = -\|\mathbf{A}\mathbf{x}_L - \mathbf{b}\|^2 / (1 + \|\mathbf{x}_L\|^2)$, 对于固定的参数 λ_l 方程的解 \mathbf{x}_L 等效于正则总体最小二乘解 \mathbf{x}_{rtls} 。

4 基于正则总体最小二乘的运动误差估计

运动误差估计过程中距离门的选取数量通常较多,矩阵方程 $\dot{\Phi}_m = \mathbf{H}\mathbf{D}_m$ 是一个超定方程,且满足不适定模型基本形式。在大测绘带宽或者低飞行高度条件下,选取的距离门之间的间隔可能较宽,各距离门处的噪声影响可能会存在较大差异,因而相位估计误差 $\dot{\Phi}_m$ 各分量偏差不一致。其次,系数矩阵是 1 个与 θ 有关的量, θ 是理想航迹时的入射角,但实际计算过程中由于无法事先知道理想航迹的位置,计算角度时用的是实际斜距 R_1 代替,这不可避免的导致了系数矩阵 \mathbf{H} 的误差。数学上,在 $\dot{\Phi}_m$ 不存在异方差情况下通常利用总体最小二乘的方法进行求解。但相比于最小二乘法,总体最小二乘的条件数更大,这也意味着总体最小二乘的结果更容易受到数据误差的影响。特别的,当系数矩阵病态性比较严重时,普通的总体最小二乘法难以得到稳定的解,其结果的均方误差较大。因此,将正则总体最

小二乘法引入到运动误差的估计之中。由于该方法要求观测值矩阵的噪声为高斯白噪声,因此,需要对运动误差的矩阵模型进行处理以消除各距离门相位估计结果的异方差性,将偏差的随机量转变为白噪声的形式,这一点和 WTA, WPCA 等算法具有相同的思路。

4.1 相位估计误差的加权处理

为方便讨论,将空变相位模型重新表示成如式(8)所示:

$$\dot{\Phi}_r = \mathbf{H}\dot{\mathbf{D}} + \mathbf{N} \quad (8)$$

式中: $\dot{\Phi}_r$ 表示真实相位误差梯度矩阵, \mathbf{N} 表示误差矩阵,该矩阵受噪声和估计精度的影响,是一个随机量。

假设各距离门的随机误差相互独立且具有各态历经性,即一个距离门的误差不会影响到其它距离门,那么误差矩阵的方差可以表示为:

$$\text{var}(\mathbf{N}) = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_i^2, \dots, \sigma_n^2) \quad (9)$$

式中: σ_i^2 表示第 i 个距离门中随机误差的方差。在求解方差矩阵的过程中对于各距离门的误差情况是未知的,文献^[14]利用信号的幅度进行估计。假设第 i 个距离门的信号幅度为 $g(m)$,那么对应的方差形式可以进行如下估计:

$$\sigma_i^2 \approx R/2 + 5R^2/24 \quad (10)$$

式中:

$$R \approx [4(2c^2 - d) - 4c\sqrt{4c^2 - 3d}]/d \quad (11)$$

$$c = E[g_i(m)] = \sum_{m=1}^M g_i(m)/M \quad (12)$$

$$d = E[g_i^2(m)] = \sum_{m=1}^M g_i^2(m)/M \quad (13)$$

根据加权最小二乘理论,利用加权矩阵 \mathbf{W} 即可实现对各距离门误差的处理,随机误差向量转变为同分布白噪声向量。

$$\mathbf{W} = \text{diag}(1/\sigma_1^2, 1/\sigma_2^2, \dots, 1/\sigma_n^2) \quad (13)$$

$$\mathbf{H}^T\mathbf{W}\dot{\Phi}_r = \mathbf{H}^T\mathbf{W}\mathbf{H}\dot{\mathbf{D}} \quad (14)$$

4.2 基于正则总体最小二乘的运动误差估计

设经过加权处理的矩阵方程(14)进一步表示为 $\dot{\Phi}_w = \mathbf{H}_w\dot{\mathbf{D}}$, 其中 \mathbf{H}_w 是一个含有误差的系数矩阵。如果直接应用总体最小二乘法进行求解,那么由于总体最小二乘法的条件数相对较大,直接求解会导致估计结果相对较差。并且,条件数越大,方程的求解越不稳定,相位误差的微小估计误差都会引起较大的运动误差求解误差,即方程的病态性越严重^[19]。

考虑到矩阵方程实质上是一个不适定模型,且模型经过加权处理后,其相位估计的随机误差为同分布白噪声向量,因此,运动误差反演可以采用正则总体最小二乘法的思想。根据文献^[20]中的关于正则总体最小二乘的相关理论,可以分析得到如下的运动误差正则总体最小二乘法迭代求

解步骤:

假设 $\mathbf{B}(\lambda_L) = \mathbf{M} + \lambda_L \mathbf{N}$, 式中, λ_L 已知, $\mathbf{N} = \text{diag}(\mathbf{I}, -\delta^2)$, $\delta^2 = \|\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}\|^2$. 并且 $\mathbf{M} = [\mathbf{H}_w, \dot{\boldsymbol{\phi}}_w]^T [\mathbf{H}_w, \dot{\boldsymbol{\phi}}_w]$. 假设 $\mathbf{B}(\lambda_L)$ 的最小特征值为 ρ , 对应的特征向量为 $\mathbf{x}_\rho = (\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}^T, -1)^T$.

- 1) 对于已知的正则参数 λ_L , 假设 δ 初始值为 1, 计算此时的 $\mathbf{B}(\lambda_L)$ 对应的特征值对 (ρ, \mathbf{x}_ρ)
- 2) 利用计算得到的 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}$ 对 δ 进行更新, 得到新的参数 δ .
- 3) 重复到步骤 1) 直至参数 δ 收敛, 此时 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_{\text{min}}}$ 值即为正则参数 λ_L 对应的正则总体最小二乘解。

对于 RTLS 问题的求解, 不同的正则参数 λ_L 对应了不同的正则解 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}$. 如果 λ_L 取值较小, 则范数 $\|\mathbf{L}\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}\|^2$ 较大, 此时正则化解 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}$ 由 \mathbf{A} 和 \mathbf{b} 中误差影响占主导; 如果 λ_L 取值较大, 则 $\phi(\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i})$ 较大, 正则化解 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}$ 误差影响由正则误差占主导. 因此, 合理选择正则参数 λ_L 对求解的正则结果至关重要. 为此引入 L-曲线法进行参数 λ_L 的选取.

L-曲线法由 LAWSON 等人^[22-23] 提出, 最早用以解决 LS 正则化处理过程中的正则参数选择问题. 将 L-曲线法引入到此处的 RTLS 的正则化参数选取中. 令 $\rho(\lambda) = \phi(\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i})$ 和 $\eta(\lambda) = \|\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}\|^2$, 以瑞利商 $\rho(\lambda)$ 的为横坐标, 以 $\eta(\lambda)$ 的为纵坐标做出二者关系曲线图. 由于实际中 $\rho(\lambda)$ 和 $\eta(\lambda)$ 的跨度较大, 通常会采用双对数坐标的形式, 即对横纵坐标分别进行 \log 处理.

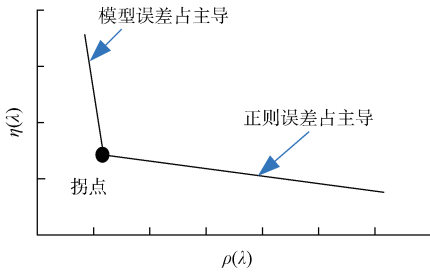


图 2 L-曲线示意图

L-曲线法的目的是要找出能够平衡两者大小的 λ_L 值使 $\rho(\lambda)$ 和 $\eta(\lambda)$ 同时取值较小. 而在曲线的拐点处, 正则化解 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}$ 由相位和模型误差影响占主导变为由正则误差占主导, 因此, 选择 L-曲线拐点处的正则参数 λ_{corner} 可以很好平衡二者之间的关系.

由于不同的参数 λ_L 对应不同的正则总体最小二乘解, 为了得到一个最优解, 采用求取 L-曲线拐点的方式, 最优正则参数 λ_{corner} 的迭代求解步骤如下:

- 1) 对系数矩阵 \mathbf{H}_w 进行奇异值分解, 得到最小奇异值 σ_{min} 和最大奇异值 σ_{max} . 可以以 $\sigma_{\text{min}}/10$ 和 $10\sigma_{\text{max}}$ 为上下界限取中间一系列离散的点作为 λ_i 的离散序列并计算对应的 $\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}$ 值, 由此计算各参数下的 $\phi(\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i})$ 和 $\|\dot{\mathbf{D}}_{\lambda_i}\|$ 值.

- 2) 对离散点 $(\log(\rho(\lambda_i)), \log(\eta(\lambda_i)), \lambda_i)$ 拟合一条曲线 S, 并计

算投影到 $(\log(\rho), \log(\eta))$ 坐标下的曲线 L.

- 3) 计算 L-曲线上最大的曲率点 $(\rho(\lambda'), \eta(\lambda'))$, 并找对 S 曲线中对应的正则参数 λ' .
- 4) 将正则参数 λ' 添加到 L-曲线中.
- 5) 重复步骤 2 直到收敛, 此时的 λ' 即为所求的 λ_{corner} .

至此, 根据求解得到的 λ_{corner} 确定相对应的正则总体最小二乘解, 即得到正则总体最小二乘方法下的运动误差估计结果.

4.3 基于 RTLS 的运动误差估计流程

对于经过惯导补偿或初步非系统 RCM(non-systemic RCM, NRCM)^[24] 补偿的条带 SAR 数据, 由于每个散射点的回波只包含雷达沿方位方向的部分航迹信息, 因此为了进一步提取运动误差, 可以沿方位方向进行子孔径的重叠划分, 每个子孔径作出估计之后再拼接成整个条带的运动误差.

在运动误差估计之前首先对相位估计误差进行相位梯度滤波以减小噪声的影响. 通过加权处理, 将各距离门相位误差转化为高斯白噪声形式, 并消除异方差性的影响. 根据加权处理后的矩阵参数进行 SVD 分解求取相应奇异值参数, 以此确定正则参数的选取范围, 并通过 L-曲线法得到最优的正则参数. 最后利用最优正则参数计算出运动误差的正则总体最小二乘解. 处理流程如图 3 所示.

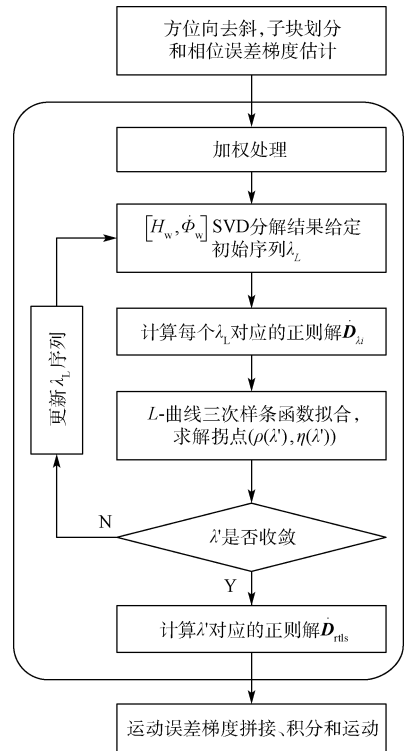


图 3 基于 RTLS 的运动误差估计流程

5 实验结果与分析

5.1 仿真数据

为了验证基于 RTLS 的运动误差估计方法的有效性,

根据表 1 参数和假设的运动误差垂直和水平分量生成一组雷达回波数据,并选取 WPCA 和 WTA 算法进行对比。其中,仿真中添加的运动误差垂直和水平分量都是正弦形式函数,分别如图 4(a)、(b)所示。

表 1 机载雷达仿真参数

参数	数值	单位
斜视角	0	rad
载波频率	15.5	GHz
飞行速度	50	m/s
飞行高度	5 000	m
天线长度	1.8	m
场景中心斜距	17 000	m
系统带宽	100	MHz
方位采样频率	100	Hz
距离向采样率	120	MHz

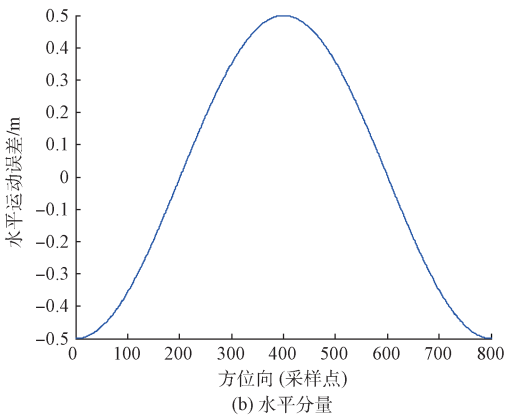
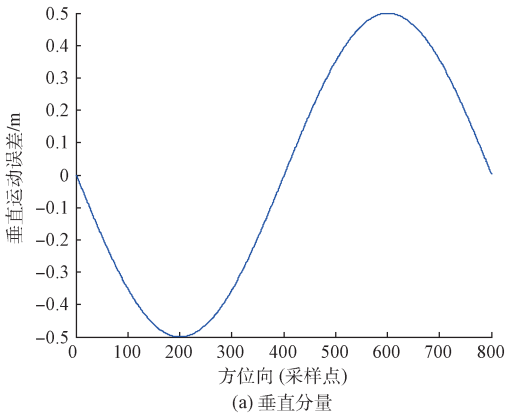


图 4 运动误差

选取斜距为 $R=15\ 000$, $R=17\ 000$ 和 $R=19\ 000$ 位置处的距离门强点,根据生成的回波数据求取相应的相位误差,同时,为了更精确的模拟实际情形,在相位误差中添加幅度在 $-5\sim 5\ \text{rad}$, $-8\sim 8\ \text{rad}$ 和 $-10\sim 10\ \text{rad}$ 的随机噪声。

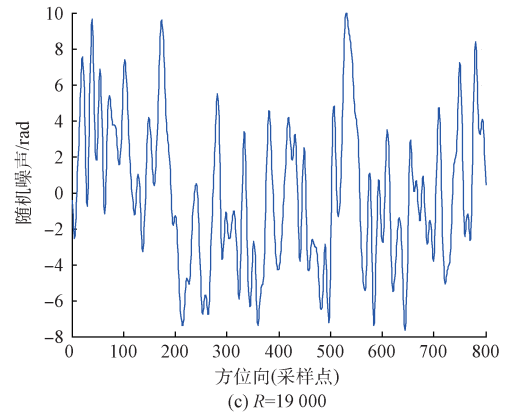
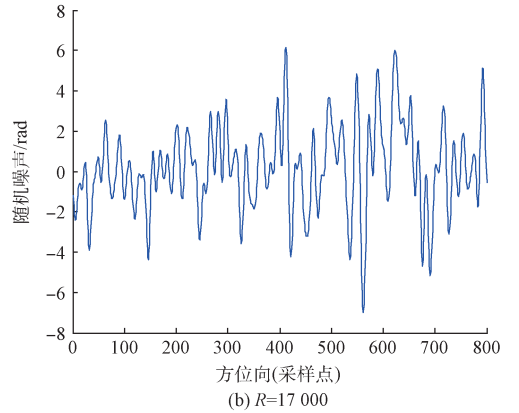
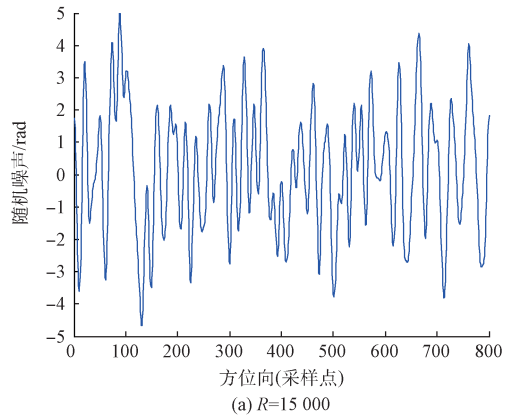


图 5 随机噪声

对于选取的 3 个距离门,若不考虑系数误差,可以得到系数矩阵:

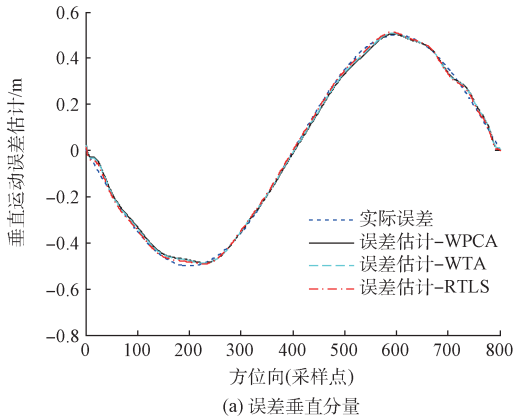
$$H = -\frac{4\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} -\sqrt{1 - \left(\frac{5\ 000}{15\ 000}\right)^2} & \frac{5\ 000}{15\ 000} \\ -\sqrt{1 - \left(\frac{5\ 000}{17\ 000}\right)^2} & \frac{5\ 000}{17\ 000} \\ -\sqrt{1 - \left(\frac{5\ 000}{19\ 000}\right)^2} & \frac{5\ 000}{19\ 000} \end{bmatrix}$$

通常利用 H 的法矩阵 $H^T H$ 的条件数来判断矩阵方程的病态程度。对于 PGA 算法来说, H 矩阵是一个元素全为 1 的列向量,其条件数为 1。对于本仿真模型,计算法矩

阵 $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ 得到:

$$\text{cond}(\mathbf{H}^T \mathbf{H}) = 1\ 103.3$$

可见,本例中求解方程的病态性严重,鲁棒性弱,微小的相位误差都将会可能导致大的运动误差。



分别采用 LS, TLS 和 RTLS 对带有噪声的相位误差进行求解。将各方法下的运动误差求解结果与真实结果相比较,并计算各估计分量的最大偏差和方差,得到表 2 数据。

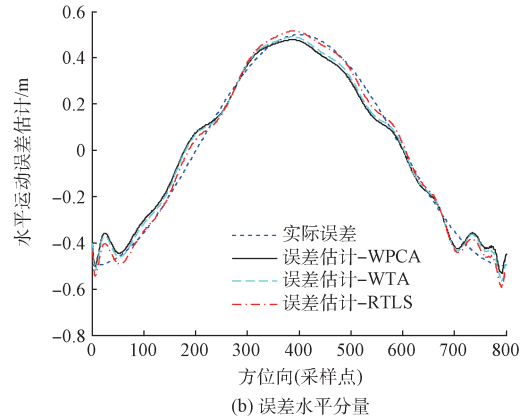


图 6 LS, TLS 和 RTLS 估计结果

表 2 LS, TLS 和 RTLS 下的运动误差估计偏差和方差

算法	Max_v/m	Max_h/m	Var_v /m ²	Var_h /m ²
WPCA	0.041 3	0.131 5	2.253 1e-04	0.002 4
WTA	0.037 9	0.120 7	1.730 9e-04	0.001 7
RTLS	0.029 2	0.096 3	1.047 8e-04	0.001 0

注:Max_v:垂直向估计误差最大偏差;Max_h:水平向估计误差最大偏差;Var_v:垂直向估计误差方差;Var_h:水平向估计误差方差

5.2 实际数据

为了进一步验证基于正则总体最小二乘法的运动误差估计方法在实际数据处理方面的可行性和有效性,采用某 SAR 系统的一段大测绘带模式实际数据,采用 RTLS 方法对运动误差进行估计并进行相应的补偿处理。处理结果如图 7 所示。

为了进一步说明 RTLS 方法的有效性,分别选用了 PGA, WPCA, WTA 这几种比较常用的算法进行成像处



图 7 RTLS 成像结果

理,并分别选取成像区域中部的一块数据图像进行对比。得到图 8 的结果。

选取原始图像、PGA, WPCA, WTA, RTLS 各算法图像中的亮点目标的剖面图,如图 9 所示。并根据处理结果

得到如表 3 所示的图像质量参数。

从仿真结果可以看出,正则化的总体最小二乘法能够比较充分的考虑到系数矩阵误差和系数矩阵病态性特点,得到更接近于真实运动误差的反演结果。在实际的成像

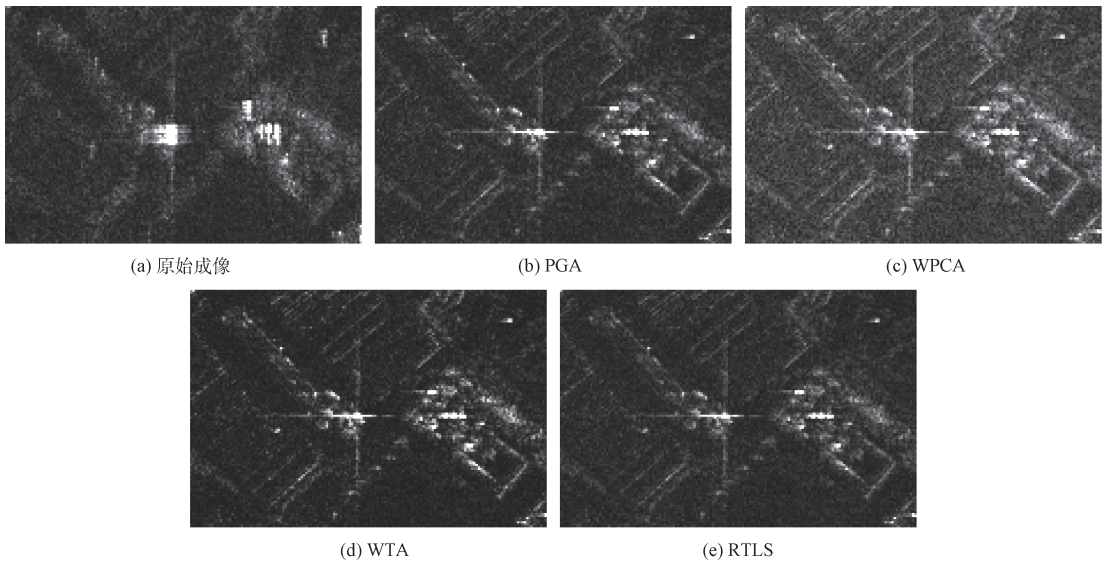


图 8 不同算法下各算法成像结果

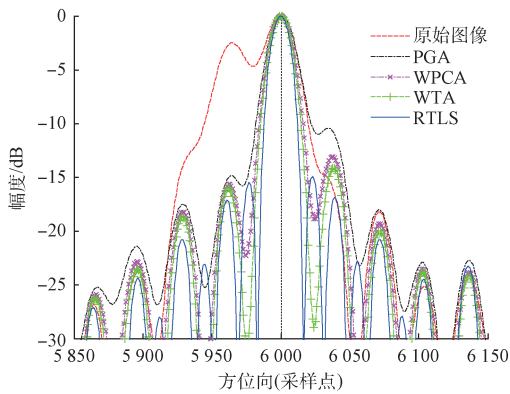


图 9 不同算法下重点方位剖面

表 3 几种不同算法下的图像质量参数对比

算法	3 dB 带宽/m	峰值旁瓣比/dB
原始图像	—	—
PGA	1.67	-10.47
WPCA	1.46	-13.10
WTA	1.36	-14.14
RTLS	1.21	-14.94

处理中,基于正则总体最小二乘的运动误差估计和补偿算法得到的图像分辨率更高,峰值旁瓣比更大,图像质量要优于 PGA、WPCA 等其他几种算法。

6 结 论

以垂直航迹向空变误差模型为基础,提出了基于正则总体最小二乘的运动误差估计算法。该算法在运动误差的反演过程中充分考虑到相位估计误差的异方差,空变误

差模型系数误差和模型病态性问题。

为实现正则参数的自动选取和参数选取的最优化,在正则化处理中引入了 L-曲线法,这样可以减少成像的人为干预有利于对不同场景的成像处理。

实验结果表明,在系数矩阵存在误差且模型病态严重的情况下,本文所提出的 RTLS 运动误差估计算法得到的估计结果更接近于真实值,实际数据成像结果质量更高。因此,所提出的 RTLS 算法在运动误差估计方面具有有效性。

参考文献

- [1] BROWN W M. Synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1967, Aes3(2):217.
- [2] 吴铮,张磊,李宁. 基于 GPU 的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8):94-99.
- [3] FORNARO G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3):997-1009.
- [4] FARRELL J L, MIMS J H, SORRELL A. Effects of navigation errors in maneuvering SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, AES-9(5):758-776.
- [5] 陈霖周廷,房建成,宫晓琳. 航空遥感运动补偿用 POS 高阶误差模型的建立与分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11):2436-2445.
- [6] CALLOWAY T M, DONOHOE G W. Subaperture autofocus for synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,

- 1994, 30(2):617-621.
- [7] MOREIRA A, YONGHONG H. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5):1029-1040.
- [8] FORNARO G, LANARI R, SANSOSTI E, et al. Airborne differential interferometry: X-Band experiments [C]. Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. 20-24 Sept. 2004: 3329-3332.
- [9] YAKE L, CHANG L, YANFEI W, et al. A robust motion error estimation method based on raw data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(7):2780-2790.
- [10] 胡晓娥, 孙巍, 梁兴东. 一种高分辨率机载 SAR 实时运动补偿系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(6):41-44.
- [11] LU Y H, NG W E, YEO T S, et al. Autoregressive spectral estimation for SAR map-drift autofocusing[J]. 1997 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 1997:61-64.
- [12] EICHEL P H, GHIGLIA D C, JAKOWATZ C V. Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction[J]. Optics Letters, 1989, 14(1):1-3.
- [13] EICHEL P H, GHIGLIA D C, JAKOWATZ C V, et al. Applications of phase gradient autofocus to aperture synthesis imaging [C]. Multidimensional Signal Processing Workshop, 1989. , Sixth, 6-8 Sep 1989: 57-58.
- [14] YE W, YEO T S, BAO Z. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5):2487-2494.
- [15] BERIZZI F, CORSINI G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3):1185-1191.
- [16] THOMPSON D G, BATES J S, ARNOLD D V. Extending the phase gradient autofocus algorithm for low-altitude stripmap mode SAR[C]. Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference, 1999:36-40.
- [17] DE MACEDO K A C, SCHEIBER R, MOREIRA A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10):3151-3162.
- [18] MO S, WANG Y, LIU C, et al. A motion compensation method for airborne SAR imagery[J]. IEICE Electronics Express, 2015, advpub
- [19] LI Y K, LIU C, WANG Y F. A range-dependent autofocus algorithm based on the Tikhonov regularization method [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(21):6749-6762.
- [20] RENAUT R A, GUO H B. Efficient algorithms for solution of regularized total least squares[J]. Siam Journal on Matrix Analysis and Applications, 2004, 26(2):457-476.
- [21] GOLUB G H, VANLOAN C F. Matrix computations [M]. 3rd ed. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press, 1996.
- [22] C HP, P OLD. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1993, 14(06):1487-1503.
- [23] HANSEN P C. Analysis of discrete Ill-posed problems by means of the L-curve [J]. SIAM Review, 1992, 34(4):561-580.
- [24] LEI Z, ZHIJUN Q, MENGDAO X, et al. A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(8):3202-3218.

作者简介

郭鹏,工学硕士,研究生,主要研究方向为机载 SAR 的运动补偿。

E-mail: chinagrowing@yeah.net