

基于多普勒谱优化的 HRWS SAR 系统通道相位偏差估计算法

王志斌^① 刘艳阳^② 李真芳^{*①} 陈筠力^③

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(上海卫星工程研究所 上海 201109)

^③(上海航天技术研究院 上海 201109)

摘要: 方位多通道 SAR 系统通过抑制多普勒模糊, 能够实现高分辨率和宽测绘带(HRWS)对地观测。针对通道间幅相偏差会导致成像结果中出现目标模糊分量的问题, 该文提出一种通道相位偏差估计算法。该算法利用通道间相位偏差会造成多通道重构方位谱在主瓣内展宽的特性, 通过优化多普勒谱能够实现通道相位偏差的有效估计。该算法在通道相位偏差估计前不需要进行多普勒中心估计, 减小了由多普勒中心估计不准引入的误差, 并且在低信噪比的情况下仍然具有良好的估计性能。基于仿真数据和实测数据的实验验证了该文算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 高分辨率宽测绘带; 多通道; 数字波束形成; 通道相位偏差估计; 多普勒谱优化

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3026-08

DOI: 10.11999/JEIT161038

Phase Bias Estimation Algorithm for HRWS SAR System in Azimuth Based on Doppler Spectrum Optimization

WANG Zhibin^① LIU Yanyang^② LI Zhenfang^① CHEN Junli^③

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

^③(Shanghai Academy of Space Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: By suppressing the Doppler ambiguity, the along-track multi-channel Synthetic Aperture Radar (SAR) system can simultaneously achieve High-Resolution and Wide-Swath (HRWS) imaging. However, the presence of unavoidable amplitude and phase bias tends to the absence of ambiguous signals in the SAR images. To address this issue, a novel phase bias estimation algorithm based on Doppler spectrum optimization is proposed. By exploiting the fact that phase bias can cause Doppler spectrum broadened, the phase bias can be successfully estimated by optimizing the Doppler spectrum. The Doppler centroid estimation can be avoided before phase biases estimation, which reduces the estimation accuracy caused by the inaccurate Doppler centroid. The proposed algorithm can achieve better performance when Signal to Noise Ratio (SNR) is low. The effectiveness of the algorithm is validated by experimental results carried out on simulated data and SAR data collected by an airborne multi-channel system.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); High-Resolution and Wide-Swath (HRWS); Multi-channel; Digital Beam-Forming (DBF); Phase bias estimation; Doppler spectrum optimization

1 引言

高分辨和宽测绘带(High-Resolution and Wide-Swath, HRWS)成像是星载合成孔径雷达(SAR)成像的发展方向, 为了能够获取方位高分辨率, 需要方位向小天线来获取宽方位多普勒带宽, 并且要求

提高脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)以满足奈奎斯特采样定律, 从而获取无模糊的方位多普勒谱。但是, 为了获取无距离模糊的宽测绘带需要降低 PRF, 因此, 高分辨率和宽测绘带是一对矛盾量^[1]。传统的星载单通道 SAR 系统由于面临上述约束, 难以实现 HRWS 成像。方位多通道系统采用数字波束形成技术(Digital Beam-Forming, DBF)能够突破上述限制^[2,3], 已经成为 HRWS 成像的有效手段。DBF 解模糊要求各通道间特性一致^[4,5], 但是, 由于制造工艺, 加工环境等, 通道间

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2016-11-28; 网络出版: 2016-12-14

*通信作者: 李真芳 lzf@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471276, 61601298, 61671355)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471276, 61601298, 61671355)

之间不可避免地存在通道偏差,而通道偏差的存在会降低 DBF 的性能。因此,为了提高方位多通道 DBF 的性能,需要首先进行通道偏差校正。

为解决多通道 SAR 成像存在的通道偏差问题,近几年来,许多学者提出了不同的解决方法^[5-17]。针对分布式小卫星系统,文献[6]提出了一种基于“虚拟校正源”的通道偏差校正方法,该方法将每个通道主瓣内的谱分量作为校正源,将通道间幅相偏差校正问题转换为传统的已知校正源的阵列误差估计问题。文献[7]提出了一种自适应加权最小二乘(Adaptively Weighted Least Square, AWLS)的相位偏差估计算法,该算法通过约束处理多普勒带宽外的信号能量最小,能够有效地对通道间的相位偏差进行估计。

针对通道间的相位偏差估计问题,本文提出一种基于多普勒谱优化的 HRWS 系统通道相位偏差估计新算法。基于通道间相位偏差的存在,将会导致重构的方位多普勒谱展宽的事实,本文从重构的多普勒谱出发,通过优化重构的多普勒谱来估计通道间的相位偏差。基于仿真数据和机载实测数据的实验验证了本文算法的有效性和性能。

2 方位多通道信号模型和通道误差模型

如图 1 所示,假设方位多通道 SAR 系统有 M 个沿方位向布置的天线, X 轴沿卫星运动方向, Z 轴背向地球中心, Y 轴垂直于轨道平面,构成右手坐标系。图中, φ 为地面目标的入射角, θ 为方位角, ϕ 为锥角, W_g 为测绘带宽。

通常情况下,星载 SAR 系统整个面板发射宽波束信号,然后,各个通道同时接收地面回波,各个通道工作于双基模式,但是,由于各个通道之间的沿航向基线很短,补偿一个常数相位后,可以等效为各个通道在各自的相位中心自发自收的单基模式。假设第 m 通道在 t_s 时刻的位置为 $(x_m + vt_s, 0, 0)$,

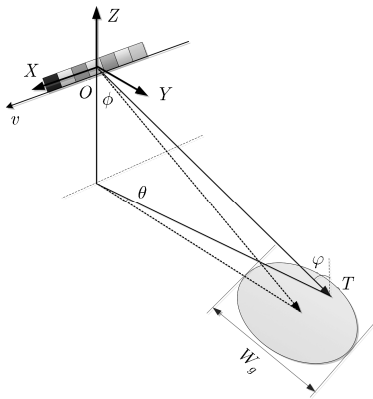


图 1 方位多通道 SAR 系统对地观测示意图

x_m 为 m 通道与参考通道之间的沿航向等效基线长度, v 为卫星速度。将参考通道接收的信号记为 $s_0(\tau, t)$, 则第 m 通道接收的信号可以写为

$$s_m(\tau, t) \approx s_0(\tau, t + x_m/v) \quad (1)$$

其中, τ 为距离快时间。从式(1)可知,通道 m 接收的回波相对于参考通道回波有一方位向时移,其在方位多普勒域表现为一线性相位,即

$$S_m(\tau, f_d) \approx S_0(\tau, f_d) \cdot \exp\left[j2\pi \frac{x_m}{v} f_d\right] \quad (2)$$

每个方位多普勒单元内包含无数同锥角的场景回波,传统的星载单通道 SAR 系统的 PRF 高于方位向带宽,方位多普勒频率 f_d 与锥角的余弦值为线性关系:

$$f_d = 2v \sin(\phi)/\lambda \quad (3)$$

式中, λ 对应雷达载波波长。此时,单通道 SAR 系统在方位多普勒带宽内无谱模糊现象。然而,方位多通道 SAR 系统为了在无距离模糊的条件下获得方位高分辨率,需要降低每个通道的 PRF,这时每个通道接收的信号是欠采样的,因此,方位多普勒谱在主瓣内会产生模糊现象。多通道成像时,需要进行 DBF 解模糊。

对于多通道 SAR 系统,通道间幅度误差、相位偏差以及位置误差的存在会降低 DBF 解模糊的性能,因此多通道解模糊成像前首先要对通道偏差进行校正。通道位置误差对多通道解模糊性能影响较小,而通道幅度误差可以通过幅度均衡的方法进行校正^[18],因此,本文重点考虑通道相位偏差估计校正问题。假设第 m 个通道与参考通道间的相位偏差为 ζ_m ,第 m 通道接收的信号在距离-多普勒域可以写为

$$\begin{aligned} S_m^p(\tau, f_d) &\approx \exp(j\zeta_m) \sum_k S_0(\tau, f_d + k \cdot \text{PRF}) \\ &\quad \cdot \exp[j2\pi(f_d + k \cdot \text{PRF})\Delta t_m], \\ k &\in \{k | k \in \mathbf{N}, |f_d + k \cdot \text{PRF} - f_{dc}| \leq M \cdot \text{PRF}/2, \\ |f_d - f_{dc}| &\leq \text{PRF}/2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中,上标“p”表示周期重复性信号, S_0 是参考通道接收的信号, Δt_m 是第 m 通道和参考通道之间的时间延迟, PRF 表示其中一个通道的脉冲重复频率, f_d 和 f_{dc} 分别表示多普勒频率和多普勒中心。为了简化表示,我们将 $S_m^p(\tau, f_d)$ 和 $S_0(\tau, f_d + k \cdot \text{PRF})$ 分别记为 $S_m^p(f_d)$ 和 $S_{0,k}(f_d)$ 。将所有通道接收通道的信号写为向量的形式为

$$\mathbf{S}_e^p(f_d) = \mathbf{\Gamma} \mathbf{H}(f_d) \mathbf{S}_0(f_d) \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{e^{j\zeta_1} \ e^{j\zeta_2} \ \dots \ e^{j\zeta_M}\} \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_e^p(f_d) = \begin{bmatrix} S_{e,1}^p(f_d) & S_{e,2}^p(f_d) & \cdots & S_{e,M}^p(f_d) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_0(f_d) = \begin{bmatrix} S_{0,k_0}(f_d) & S_{0,k_0+1}(f_d) & \cdots & S_{0,k_0+M-1}(f_d) \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$k_0 = \min \left\{ k | k \in \mathbf{N}, |f_d + k \cdot \text{PRF} - f_{dc}| \leq M \cdot \text{PRF} / 2 \right\} \quad (9)$$

$$\mathbf{H}(f_d) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(f_d) & \mathbf{h}_2(f_d) & \cdots & \mathbf{h}_M(f_d) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{h}_{k-k_0+1}(f_d) = \begin{bmatrix} h_{1,k}(f_d) & h_{2,k}(f_d) & \cdots & h_{M,k}(f_d) \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

$$h_{m,k}(f_d) \triangleq \exp(j2\pi(f_d + k \cdot \text{PRF})\Delta t_m) \quad (12)$$

式中, 下标“e”表示存在通道相位偏差。

3 通道相位偏差估计新方法

3.1 相位偏差估计新算法

根据式(4)-式(12)可以得出, 主瓣内无模糊的多通道信号为

$$\hat{\mathbf{S}}_0(f_d) = \mathbf{P}(f_d) \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{S}_e^p(f_d) \quad (13)$$

其中,

$$\mathbf{P}(f_d) = \mathbf{H}^{-1}(f_d) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1(f_d) & \mathbf{p}_2(f_d) & \cdots & \mathbf{p}_M(f_d) \end{bmatrix}^H \quad (14)$$

式(14)可以写简化为

$$\hat{\mathbf{S}}_{0,k}(f_d) = \mathbf{x}^H \mathbf{p}_{k,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d) \quad (15)$$

其中,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} e^{j\zeta_1} & e^{j\zeta_2} & \cdots & e^{j\zeta_M} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{p}_{k,D}(f_d) = \text{diag}(\mathbf{p}_k(f_d)) \quad (17)$$

星载 SAR 系统通过优化方向图设计, 越偏离多普勒中心处的频率能量越小, 其多普勒谱分量的强度越低。由于通道相位偏差的存在, 改变了多通道重构方位多普勒谱的能量分布, 相比于无误差的多通道重构谱, 较多的能量会分布于远离多普勒中心处, 因此, 通道相位偏差的存在将会导致方位多通道重构谱主瓣的展宽。一个直观的现象是方位多通道重构谱的幅度峰值会下降, 从而导致重构谱的对比度降低。我们定义多普勒谱的对比度来定量描述方位谱的变化, 定义式(18):

$$f(\Phi) = \sum_{f_d} \sum_{k=k_0}^{k_0+M-1} \left\| S_{0,k}(f_d; \Phi) \cdot \hat{S}_{0,k}^*(f_d; \Phi) \right\|^2 \quad (18)$$

式中, $\Phi = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \cdots \ \zeta_M]^T$ 。

利用某机载 X 波段 HRWS SAR 系统录取的数据来说明通道相位偏差的存在对重构多普勒谱的影响, 其系统参数如表 1 所示。

需要指出的是, 此机载 SAR 系统每个通道的 PRF 都高于其方位向带宽, 因此, 每个通道获取的数据在方位谱的主瓣内是无模糊的。为了获取主瓣内有模糊的信号, 我们对每个通道获取的数据进行 5 倍降采样处理, 此时, 每个通道的 PRF 等效为 100 Hz, 此时, PRF 低于方位向带宽, 方位多普勒谱在

表 1 某 X 波段机载多通道 SAR 系统参数

参数	取值
雷达载频	9.6 GHz
发射信号带宽	20 MHz
距离向采样率	24 MHz
脉冲重复频率	500 Hz
方位向带宽	280 Hz
平台速度	148 m/s
相邻通道等效相位中心间距	0.4 m

主瓣内会产生模糊现象。降采样处理前第 1 个通道无模糊的方位多普勒谱如图 2 中无模糊的方位谱所示, 当通道间存在相位偏差时, 重构的多普勒谱如图 2 中含通道误差的重构谱所示, 通过对比我们能够明显看出, 当存在通道相位偏差时, 重构谱相对于第 1 通道无模糊谱有明显的谱展宽现象。经计算, 无模糊的方位谱的最大对比度约为含通道误差重构谱的 1.05 倍, 因此, 通过约束多普勒谱主瓣的对比度最大能够估计通道间的相位偏差。

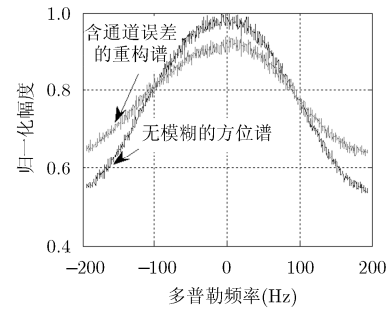


图 2 通道间相位偏差对重构方位多普勒谱的影响

当观测场景内的回波信号不满足方位谱的对比度最大的分布特性时, 更一般地, 我们定义式(19):

$$f(\Phi) = \sum_{f_d} \sum_{k=k_0}^{k_0+M-1} \left\| S_{0,k}(f_d; \Phi) \cdot \hat{S}_{0,k}^*(f_d; \Phi) \right\|^p \quad (19)$$

式中, 上标“p”表示频谱能量的 p-范数, 通过约束式(19)最大化能够估计通道相位偏差。

根据以上分析, 为了估计通道间的相位偏差, 本文提出一种基于多普勒谱优化的通道相位偏差估计新方法, 其中待优化的目标函数为

$$\hat{\Phi} = \arg \max_{\Phi} \sum_{f_d} \sum_{k=k_0}^{k_0+M-1} \left\| \mathbf{x}^H (\mathbf{p}_{k-k_0+1,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d) \cdot (\mathbf{p}_{k-k_0+1,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d))^H \mathbf{x}) \right\|^p \quad (20)$$

式中, 下标“D”表示对称阵。需要指出的是, 当功率谱范数 $p = 2$ 时, 表示方位多普勒谱的对比度。为了简化上述目标函数, 定义:

$$f(\Phi) = \left\| \mathbf{x}^H \left(\mathbf{p}_{k-k_0+1,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d) \right) \left(\mathbf{p}_{k-k_0+1,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d) \right)^H \right\|^p = \left\| \mathbf{x}^H \mathbf{A} \mathbf{x} \right\|^p \quad (21)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \mathbf{p}_{k-k_0+1,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d) \left(\mathbf{p}_{k-k_0+1,D}(f_d) \mathbf{S}_e^p(f_d) \right)^H \quad (22)$$

上述优化问题可以通过牛顿迭代法或者迭代的最小化过程求解^[19]。本文中, 简单介绍利用牛顿迭代法求解该优化问题的过程。利用牛顿迭代方法, 第 $(k+1)$ 迭代的值由式(23)获得

$$\Phi_{k+1} = \Phi_k + \Delta\Phi_{k+1} \quad (23)$$

其中,

$$\Delta\Phi_{k+1} = -\mathbf{J}^{-1} \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \Phi} \Big|_{\Phi=\Phi_k}, \quad \mathbf{J} = \frac{\partial^2 f(\Phi)}{\partial \Phi^2} \Big|_{\Phi=\Phi_k} \quad (24)$$

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \Phi} = \left[\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \zeta_1} \dots \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \zeta_m} \dots \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \zeta_{M-1}} \right]^T \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 f(\Phi)}{\partial \Phi^2} = \left[\frac{\partial^2 f(\Phi)}{\partial \Phi \partial \zeta_1} \dots \frac{\partial^2 f(\Phi)}{\partial \Phi \partial \zeta_m} \dots \frac{\partial^2 f(\Phi)}{\partial \Phi \partial \zeta_{M-1}} \right]^T \quad (26)$$

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \zeta_m} = p \left(\sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{-j\zeta_m} e^{j\zeta_n} \right)^{p-1} \left(-j \cdot e^{-j\zeta_m} \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{j\zeta_n} + j \cdot e^{j\zeta_m} \sum_{n=1}^M a_{n,m}(f_d) e^{-j\zeta_n} \right) \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 f(\Phi)}{\partial \zeta_m \zeta_n} = \begin{cases} \left(p \cdot (p-1) \cdot \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{-j\zeta_m} e^{j\zeta_n} \right)^{p-2} \left(-j \cdot e^{-j\zeta_m} \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{j\zeta_n} + j \cdot e^{j\zeta_m} \sum_{n=1}^M a_{n,m}(f_d) e^{-j\zeta_n} \right)^2 \right) \\ + p \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{-j\zeta_m} e^{j\zeta_n} \right)^{p-1} \left(-e^{-j\zeta_m} \sum_{q=1, q \neq m}^M a_{m,q}(f_d) e^{j\zeta_q} - e^{j\zeta_m} \sum_{q=1, q \neq m}^M a_{q,m}(f_d) e^{-j\zeta_q} \right), m=n \\ \left(p \cdot (p-1) \cdot \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{-j\zeta_m} e^{j\zeta_n} \right)^{p-2} \left(-j \cdot e^{-j\zeta_m} \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{j\zeta_n} + j \cdot e^{j\zeta_m} \sum_{n=1}^M a_{n,m}(f_d) e^{-j\zeta_n} \right)^2 \right) \\ + p \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_{m,n}(f_d) e^{-j\zeta_m} e^{j\zeta_n} \right)^{p-1} \left(a_{m,n}(f_d) e^{j(\zeta_n - \zeta_m)} + a_{n,m}(f_d) e^{j(\zeta_m - \zeta_n)} \right), m \neq n \end{cases} \quad (28)$$

牛顿迭代的终止条件与相位偏差估计精度有关, 通常情况下, 越高的估计精度需要越高的运算量。

3.2 实现步骤

本文基于多普勒谱优化的方位向多通道 HRWS SAR 系统通道相位偏差估计算法处理流程如图 3 所示, 主要包括以下处理步骤:

(1) 将各通道的 2 维回波信号经方位向 FFT 变

换至距离-多普勒域;

(2) 根据步骤(1)获得的距离-多普勒域多通道信号, 重构方位向多普勒谱, 构造式(20)所示的目标函数;

(3) 采用牛顿迭代法或者迭代的最小化过程求解上述优化问题, 提取各通道相对于参考通道的相位偏差。

4 实验分析与验证

4.1 仿真数据分析

本节利用仿真的星载 HRWS SAR 系统数据进行本文算法的性能分析, 方位多通道 SAR 系统的仿真参数如表 2 所示, 所选用的原始回波数据为 ASAR 于 2010 年 11 月 6 日在日本宫城地区所录取, 无模糊的回波经成像处理后的 SAR 图像如图 4(a)所示。将无模糊的信号进行方位向降采样处理能够获取存在方位多普勒模糊的多通道 SAR 回波, 在通道之间添加固定的相位偏差(添加的误差如表 3 所示)构成

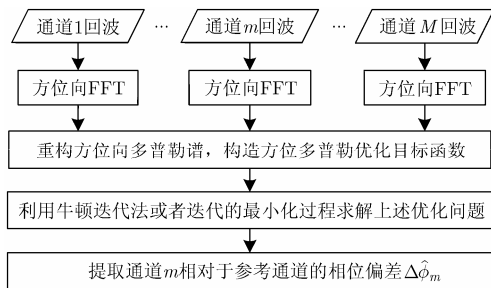


图 3 本文算法的处理步骤

表2 方位多通道 SAR 系统仿真参数

参数	取值
载频	5.4 GHz
卫星速度	7541.9 m/s
方位带宽	1426 Hz
多普勒中心	0
通道数	4
PRF	442.5 Hz

表3 相位偏差估计结果 (°)

	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
实际相位偏差	0	40.00	-35.00	20.00
相位偏差估计值	0	39.89	-35.15	19.84
相位偏差估计误差	0	-0.11	0.15	-0.16

含通道相位误差的 HRWS SAR 系统回波(SNR = 10 dB)。

(1)算法验证: 由本文算法对仿真的多通道数据进行通道相位偏差估计, 得到的相位偏差估计值如表 3 所示, 与实际仿真添加的相位偏差相比, 本算法的估计误差约为 0.15° 。通道相位偏差校正前后的 SAR 图像分别如图 4(b)和图 4(c)所示, 对比图 4(b)与图 4(c)可以看出, 校正本文估计的通道相位偏差后, 模糊信号得到了有效地抑制, 验证了本文算法的有效性。

(2)本文算法性能: 下面采用 Mento-Carlo 实验分析本文算法在不同通道均匀度和信噪比下的性能。定义通道均匀度因子 F_u 为^[7]

$$F_u = M \cdot \frac{d}{v \cdot \text{PRF}} \quad (29)$$

其中, d 为相邻通道间的间隔。定义相对相位偏差估计精度来描述算法性能^[7]。

$$\hat{\sigma}_{\Delta\zeta} = \left(\frac{1}{N_t} \sum_{l=1}^{N_t} \frac{2}{M(M-1)} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=m+1}^M \left((\zeta_m - \zeta_n) - (\hat{\zeta}_{m,l} - \hat{\zeta}_{n,l}) \right)^2 \right)^{1/2} \quad (30)$$

其中, N_t 为实验次数, $\hat{\zeta}_{m,l}$ 为第 l 次实验第 m 通道的相位偏差估计值。

优化函数中, 当 p 值不同时, 本文算法具有不同的处理性能, 我们分析 3 种通道均匀度因子 F_u (0.9, 1.0, 1.1) 下, 不同 p 时, 本文算法估计通道相位偏差的性能随信噪比的变化。仿真结果如图 5 所示。由图可见, 在此仿真条件下, p 取不同值时, 算法在不同信噪比下有不同的性能。当通道不均匀时, 当 $\text{SNR} > 15$ dB 时, $p = 2$ 具有较好的估计性能; $p = 3$ 在低信噪比时具有较好的估计性能; 通道均匀时, 两者估计性能相当。

对比分析同一信噪比(SNR = 10 dB)下, p 取不同值时, 本文算法估计通道相位偏差的性能随 F_u 的变化。仿真结果如图 6 所示。由图可见, 通道越均匀, 算法具有越高的估计性能, 并且通道越不均匀时, $p = 3$ 的估计性能高于 $p = 2$ 。

(3)算法性能对比分析: 文献[7]依据能量分布提出了优化多普勒带宽内能量最大的相位偏差估计算法, 该方法在相位偏差估计前要先进行多普勒中心估计, 当缺少多谱勒中心估计或者多普勒中心估计不准时, 会导致相位偏差估计失败, 而本文算法优化重构的多谱勒谱, 相位偏差估计前无需进行多谱勒中心估计。本节采用 Mento-Carlo 实验对比分析本文算法与文献[6]和文献[7]中的算法在不同信噪比下的相位偏差估计性能, 性能对比如图 7 所示。通过图中的曲线能够看出, 相对于文献[6]和文献[7]中的通道相位偏差估计算法, 本文算法在低信噪比(SNR < 15 dB)时, 具有较好的估计性能, 而在高信噪比(SNR > 15 dB)时, 各算法的相位偏差估计性能相当。

4.2 实测数据分析

我们采用与 3.1 节相同的机载数据来说明本文提出的基于多普勒优化的相位偏差估计算法的性能。第 1 通道未降采样前的方位多普勒谱如图 8 中无模糊的方位谱线条所示, 利用 RD 成像算法得到第 1 通道聚焦后的 SAR 图像如图 9(a)所示。

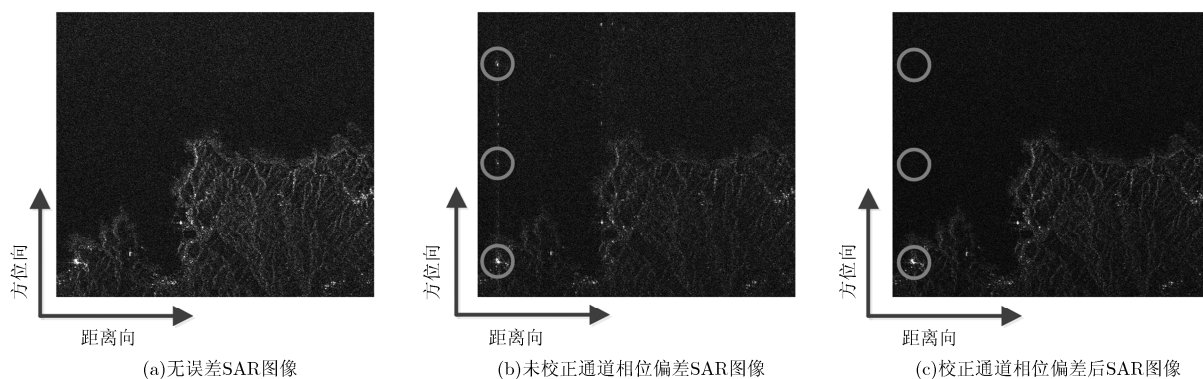


图4 仿真 HRWS SAR 系统通道相位偏差校正前后对比图

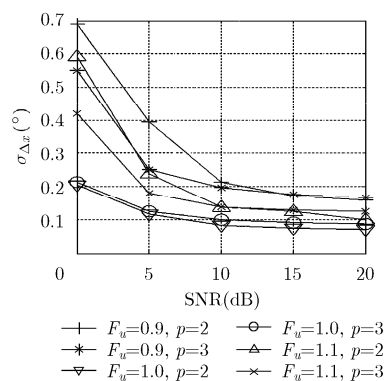


图 5 算法估计性能随 SNR 变化图

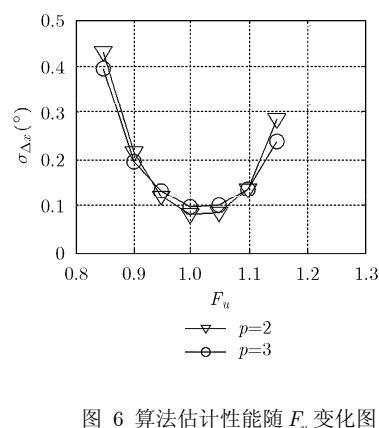
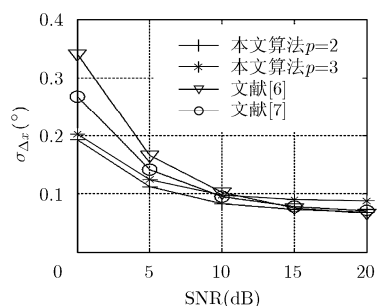
图 6 算法估计性能随 F_u 变化图

图 7 算法估计性能对比分析图

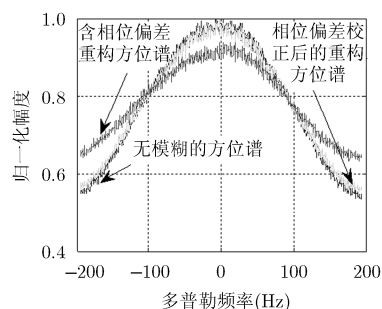


图 8 通道误差校正前后的重构方位多普勒谱

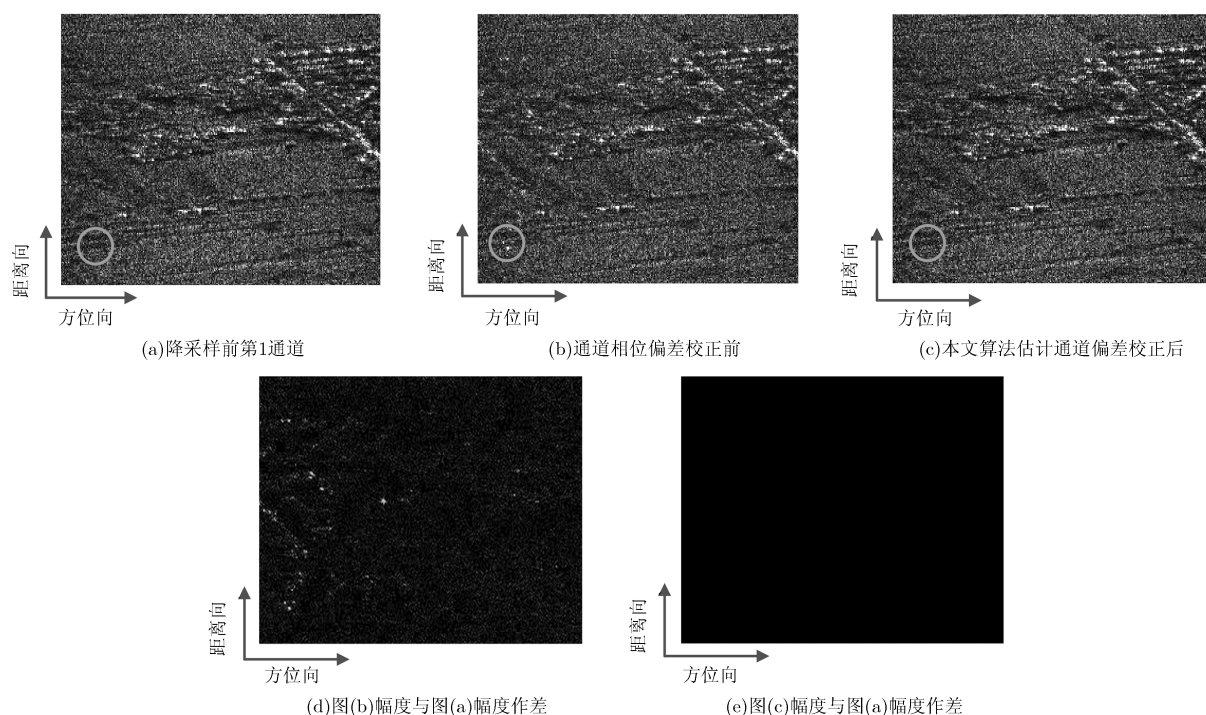


图 9 聚焦后的 SAR 图像

采用本文算法估计得到的系统各通道相对于第 1 通道的相位偏差分别为 0° , -19.8° , 37.9° , -32.3° 。校正后的方位向多普勒谱为图 8 中相位偏差校正后重构方位谱的线条, 通过对比可知, 校正后方位向

多普勒谱和无模糊方位向多普勒谱的差异较小, 而对比图 8 中校正后与校正前的方位多普勒谱(含相位偏差重构方位谱), 可以看出校正后多普勒谱主瓣展宽的现象得到明显的改善。

通道相位偏差校正前聚焦后的 SAR 图像如图 9(b)所示, 由图可知, 图 9(b)成像结果中存在许多模糊信号(特别是圆圈内标注区域)。利用本文算法校正通道间相位偏差后的聚焦 SAR 图像如图 9(c)所示, 为了更好地对比图 9(b)和图 9(c), 我们将图 9(b)和图 9(c)的图像幅度分别与图 9(a)的图像幅度作差, 得到的差值分别如图 9(d)与图 9(e)所示, 对比图 9(d)和图 9(e)可以看出, 通道相位偏差校正后的 SAR 图像方位模糊得到了较好的抑制。

5 结论

针对星载方位向多通道 HRWS SAR 系统通道相位偏差校正问题, 本文基于通道间的相位偏差的存在会导致方位多通道重构谱展宽的现象, 提出了一种基于多谱勒谱优化的通道相位偏差估计新算法。本文方法以重构的方位向多谱勒谱为目标函数, 采用牛顿迭代法或者迭代的最小化过程来优化求解得到通道间的相位偏差。基于仿真数据和实测数据的实验验证了本文算法的有效性。

参考文献

- [1] FREEMAN A, JOHNSON W, HUNEYCUTT B, *et al.* The “myth” of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320–324. doi: 10.1109/36.823926.
- [2] KIM J, YOUNIS M, PRATS-IRAOLA P, *et al.* First spaceborne demonstration of digital beamforming for azimuth ambiguity suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 579–590. doi: 10.1109/TGRS.2012.2201947.
- [3] GEBERT N, KRIEGER G, and MOREIRA A. Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564–592. doi: 10.1109/TAES.2009.5089542.
- [4] KRIEGER G, GEBERT N, and MOREIRA A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260–264. doi: 10.1109/LGRS.2004.832700.
- [5] LI Z, WANG H, SU T, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82–86. doi: 10.1109/LGRS.2004.840610.
- [6] LI Z, BAO Z, WANG H, *et al.* Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 436–452. doi: 10.1109/TAES.2006.1642562.
- [7] LIU Y, LI Z, YANG T, *et al.* An adaptively weighted least square estimation method of channel mismatches in phase for multichannel SAR systems in azimuth[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(2): 439–443. doi: 10.1109/LGRS.2013.2264771.
- [8] 李银伟, 陈立福, 韦立登, 等. 基于多普勒域多通道的机载合成孔径雷达自聚焦算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(4): 969–974. doi: 10.11999/JEIT140675.
- [9] LI Yinwei, CHEN Lifu, WEI Lideng, *et al.* An autofocus algorithm based on Doppler-domain multichannel for airborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 969–974. doi: 10.11999/JEIT140675.
- [9] JIN T, QIU X, HU D, *et al.* Channel error estimation methods comparison under different conditions for multichannel HRWS SAR systems[J]. *Journal of Computer & Communications*, 2016, 4(3): 88–94. doi: 10.4236/jcc.2016.43014.
- [10] LIU B and HE J. Improved DBF algorithm for multi-channel high-resolution wide-swath SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 1209–1225. doi: 10.1109/TGRS.2015.2476496.
- [11] 杨桃丽, 李真芳, 刘艳阳, 等. 两种星载高分辨宽测绘带 SAR 系统通道相位误差估计方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(5): 931–935. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.016.
- [11] YANG Taoli, LI Zhenfang, LIU Yanyang, *et al.* Two channel phase error estimation methods for spaceborne HRWS SAR system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(5): 931–935. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.016.
- [12] YANG T, LI Z, LIU Y, *et al.* Channel error estimation methods for multichannel SAR systems in azimuth[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 548–552. doi: 10.1109/LGRS.2012.2212878.
- [13] FANG C, LIU Y, LI Z, *et al.* Clutter-cancellation-based channel phase bias estimation algorithm for spaceborne multichannel high-resolution and wide-swath SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9): 1260–1264. doi: 10.1109/LGRS.2016.2580740.
- [14] 邢孟道, 孙光才, 李学仕. 用于高分辨率宽测绘带 SAR 系统的 SAR/GMTI 处理方法研究[J]. *雷达学报*, 2015, 4(4): 375–385. doi: 10.12000/JR15096.
- [14] XING Mengdao, SUN Guangcai, and LI Xueshi. Study on SAR/GMTI processing for high-resolution wide-swath SAR system[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(4): 375–385. doi: 10.12000/JR15096.
- [15] 刘让, 马喜乐, 何峰, 等. MC-SAR 改进正交子空间相位误差估计算法[J]. *雷达科学与技术*, 2015, 13(4): 402–409. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2015.04.012.
- [15] LIU Rang, MA Xile, HE Feng, *et al.* MC-SAR improved orthogonal subspace phase error estimation method[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(4): 402–409. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2015.04.012.

- [16] 刘艳阳, 李真芳, 索志勇, 等. 一种星载多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统通道相位偏差估计新方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1862–1868. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01424.
- LIU Yanyang, LI Zhenfang, SUO Zhiyong, *et al.* A novel channel phase bias estimation method for spaceborne multi-channel high-resolution and wide-swath SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1862–1868. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01424.
- [17] 刘艳阳, 李真芳, 杨桃丽, 等. 一种单星方位多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统通道相位偏差时域估计新方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2913–2919. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00562.
- LIU Yanyang, LI Zhenfang, YANG Taoli, *et al.* A novel channel phase bias estimation method for spaceborne along-track multi-channel HRWS SAR in time-domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2913–2919. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00562.
- [18] 张磊, 全英汇, 邢孟道, 等. 一种子空间投影的高分辨率宽测绘带 SAR 成像通道均衡方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 1–6. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01821.
- ZHANG L, QUAN Y, XING M, *et al.* An SSP based channel calibration for high-resolution and wide-swath SAR imagery [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 1–6. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01821.
- [19] ZHANG S, XING M, XIA X, *et al.* A robust channel-calibration algorithm for the multi-channel in azimuth HRWS SAR imaging based on local maximum-likelihood weighted minimum entropy[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 5294–5305. doi: 10.1109/TIP.2013.2274387.
- 王志斌: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR/InSAR 信号处理.
- 刘艳阳: 男, 1987 年生, 工程师, 研究方向为星载 SAR/InSAR 系统设计.
- 李真芳: 男, 1977 年生, 教授, 研究方向为星载 SAR/InSAR 系统分析与信号处理.