

## 基于距离谱分析的方位多通道 HRWS SAR 通道偏差稳健估计

房超<sup>①</sup> 刘艳阳<sup>②</sup> 索志勇<sup>\*①</sup> 李真芳<sup>①</sup> 陈筠力<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(上海卫星工程研究所雷达总体与仿真技术实验室 上海 201109)

<sup>③</sup>(上海航天技术研究院 上海 201109)

**摘要:** 在方位多通道高分辨宽测绘带合成孔径雷达(HRWS SAR)系统中, 通道间幅相偏差和通道时延偏差将会导致多普勒解模糊性能下降。为了解决该问题, 该文提出一种基于距离频谱分析的方位多通道 HRWS SAR 通道偏差稳健估计方法。该算法分为两步: 第1步, 通过对相邻通道回波距离频谱的干涉相位进行相位解缠绕和加权多项式拟合, 从而获得通道时延偏差的稳健估计; 第2步, 基于空间互相关理论, 根据通道间常数干涉相位同时估计基带多普勒中心和通道间相位偏差。相比于传统算法, 该算法克服了相位缠绕和跳变对系数估计的影响, 提高了算法稳健性, 而且能同时估计基带多普勒中心和通道相位偏差。实测及仿真数据处理验证了该算法的稳健性和精确性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 通道偏差估计; 多通道

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1561-06

DOI: 10.11999/JEIT170996

## Robust Channel Mismatch Estimation in Multichannel HRWS SAR Based on Range Spectrum Analysis

FANG Chao<sup>①</sup> LIU Yanyang<sup>②</sup> SUO Zhiyong<sup>①</sup> LI Zhenfang<sup>①</sup> CHEN Junli<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

<sup>③</sup>(Shanghai Academy of Space Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In multichannel High-Resolution and Wide-Swath (HRWS) Synthetic Aperture Radar (SAR) systems, channel amplitude and phase mismatches would degrade the performance of azimuth ambiguity suppression as well as range sampling mismatches. To address this problem, a robust estimation method based on range spectrum analysis is proposed in this letter. The method includes two steps: firstly, by exploiting the interferometric phases between the range spectrums of adjacent channels, the proposed method can robustly estimate range sampling mismatches by the combination of phase unwrapping and a weighted least squares fitting. Secondly, based on the theory of spatial cross correlation, an accurate Doppler centroid and phase mismatches could be obtained from constant phases between adjacent channels. Compared with traditional methods, the proposed method overcomes the effect of phase wraps and jumps on polynomial coefficient estimation. It not only improves the robustness of parameter estimation but also can simultaneously obtain the Doppler centroid and phase mismatches. Experimental results based on airborne real data and simulated data validate its effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Channel mismatch estimation; Multichannel

### 1 引言

在方位多通道高分辨宽测绘带 (High-Resolution and Wide-Swath, HRWS) 系统中, 数字

波束形成技术是多普勒谱重构的重要实现方式, 可以有效地解决方位欠采样导致的多普勒模糊<sup>[1,2]</sup>。然而, 由于加工工艺等因素的影响, 各通道间表现出通道不一致性, 包括通道时延偏差、通道相位偏差和通道幅度偏差等<sup>[1,2]</sup>。在方位解模糊前, 需要精确校正各通道间的不一致性, 否则将导致方位解模糊性能明显恶化<sup>[1,2]</sup>。一般地, 幅度均衡法<sup>[3]</sup>能简单地校正通道幅度偏差, 因此通道幅度偏差估计不在本文的研究范围。

收稿日期: 2017-10-24; 改回日期: 2018-04-11; 网络出版: 2018-05-10

\*通信作者: 索志勇 zysuo@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471276, 61601298, 61671355, 41371439)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471276, 61601298, 61671355, 41371439)

常用的通道时延偏差估计校正方法可分为两类：第1类，利用复图像配准方法对回波数据进行整体配准以校正通道时延偏差<sup>[4,5]</sup>；第2类，根据傅里叶变换的性质，即信号在时域的时间延迟等于在频域叠加一个线性相位，通过提取通道距离频谱的干涉相位梯度估计距离向偏移<sup>[6,7]</sup>。然而，图像配准方法严重依赖回波数据的相干性，并且需要精细插值才能获得精准的距离向偏移。而传统的距离频域干涉方法<sup>[6,7]</sup>是通过对于干涉相位梯度进行平均或者多项式拟合求取通道时延偏差，在干涉相位缠绕和跳变等情况下表现不够稳健。与此同时，针对通道相位偏差和多普勒中心的估计问题，国内外专家学者提出了很多有效的估计算法<sup>[8-12]</sup>，但是这些算法并没有考虑通道时延偏差的影响。因此，各类的通道偏差通常需要分别估计校正，这将在实际数据处理中引入繁琐和冗余的操作。

基于谱分析，本文提出了一种稳健的方位多通道 HRWS SAR 通道偏差估计算法。该算法首先通过对相邻通道距离频域的回波干涉，获得其干涉相位；然后，经相位解缠绕，加权多项式拟合等操作实现对常数相位项和线性相位项系数(对应通道时延偏差)的稳健估计，通过对残余相位低通滤波估计高次项相位偏差；最后，利用空间互相关系数理论，通过常数相位项同时估计得到基带多普勒中心和通道间相位偏差。该算法优势在于克服了相位缠绕和跳变的影响，能够在实现通道时延偏差稳健估计的同时，得到基带多普勒中心、通道常数相位偏差和高次项相位偏差。实测和仿真数据结果验证了本文算法的稳健性和精确性。

## 2 算法原理和描述

### 2.1 信号模型和基本原理

在典型的方位多通道 HRWS SAR 系统中，将参考通道回波信号表示为  $s_0$ ，通道  $m$  的回波信号可视为附加方位时间延迟的参考通道回波<sup>[8]</sup>，即

$$s_m(t_a, \tau) \approx s_0(t_a + \Delta t_m, \tau) \quad (1)$$

其中， $t_a$ 、 $\tau$  和  $\Delta t_m$  分别表示方位时间、距离时间和通道  $m$  相对参考通道的方位时间延迟。当距离采样带宽远小于中心载频时，多普勒中心在整个距离频域可视为常数。考虑通道间常数相位偏差和通道时延偏差，通道  $m$  与参考通道间回波的方位互相关函数在距离频域可写为<sup>[7]</sup>

$$C_{m,0}(f_r) = E_a \{s_m(f_r, t_a) s_0^*(f_r, t_a)\} = R_0(f_r, \Delta t_m) \cdot \exp(j(\phi_m + 2\pi f_r \Delta \tau_m + 2\pi f_{dc} \Delta t_m)) \quad (2)$$

式中， $f_r$  和  $f_{dc}$  分别表示距离频率和多普勒中心频

率， $s_m(t_a, f_r)$  和  $s_0(t_a, f_r)$  分别表示通道  $m$  和参考通道的回波距离向频谱。 $E_a\{\cdot\}$  代表方位时域上的几何平均，而上标 \* 表示共轭。 $R_0$  表示参考通道回波  $s_0$  的实自相关函数<sup>[7]</sup>。 $\Delta \tau_m$  和  $\phi_m$  分别表示通道  $m$  相对参考通道的通道时延偏差和通道常数相位偏差。

对式(2)的两边取相角后，可得通道  $m$  和参考通道回波沿距离向频率的干涉相位<sup>[6,7]</sup>，如式(3)所示。

$$\theta_m(f_r) = \arg\{C_{m,0}(f_r)\} = \phi_m + 2\pi f_r \Delta \tau_m + 2\pi f_{dc} \Delta t_m \quad (3)$$

其中， $\arg\{\cdot\}$  表示取相角操作。对  $\theta_m(f_r)$  按距离频率进行 1 阶多项式拟合<sup>[6]</sup>后，可得线性项系数  $c_1$  和常数项系数  $c_0$ ，则  $\Delta \tau_m = c_1 / 2 / \pi$ 。此外，当多普勒中心精确已知，可根据式(4)计算  $\phi_m$ 。

$$\phi_m = c_0 - 2\pi f_{dc} \Delta t_m \quad (4)$$

### 2.2 本文改进算法

上述算法没有考虑相位噪声以及相位缠绕的影响。这里采用一组机载实测 3 通道数据说明上述影响，该数据系统参数如表 1 所示。如图 1(a)所示，干涉相位不但在距离带宽外梯度存在明显偏差，而且在整个频谱范围内存在相位缠绕现象及由噪声等引起的相位起伏，这些情况将导致传统算法<sup>[6,7]</sup>的估计结果不准确。实际上，在距离频域内，接收通道间的相频特性不一致同样会引起高次项相位偏差  $\varphi_m(f_r)$ ，则式(3)可重写为

$$\theta_m(f_r) = \arg\{C_{m,0}(f_r)\} = \phi_m + 2\pi f_r \Delta \tau_m + 2\pi f_{dc} \Delta t_m + \varphi_m(f_r) + n \quad (5)$$

其中， $n$  代表随机噪声。下文分别介绍如何估计线性相位梯度、高次项相位和常数相位。

首先，在多项式拟合之前，可先通过 1 维相位解缠绕消除相位缠绕<sup>[13]</sup>，如式(6)所示。

$$\theta_{m,i} = \begin{cases} \theta_{m,i} - 2\pi, & \theta_{m,i} - \theta_{m,i-1} \geq \pi \\ \theta_{m,i}, & |\theta_{m,i} - \theta_{m,i-1}| < \pi \\ \theta_{m,i} + 2\pi, & \theta_{m,i} - \theta_{m,i-1} \leq -\pi \end{cases} \quad (6)$$

表 1 主要系统参数

参数	数值
载频(GHz)	9.6
平台速度(m/s)	120
原始 PRF(Hz)	600
多普勒带宽(Hz)	300
通道数	3
相邻通道间距(m)	0.2
降采样后的 PRF(Hz)	200

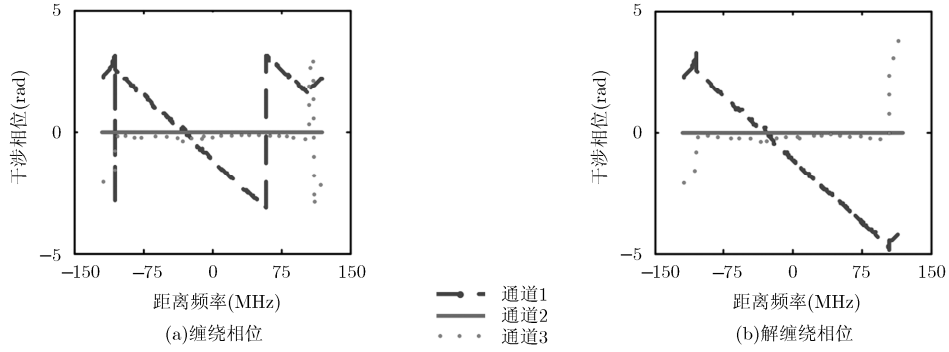


图1 各通道和参考通道回波在距离频域的干涉相位

其中,  $i = 2, 3, \dots, N$ ,  $N$  表示距离频率采样点数。  $\theta_{m,i}$  为在第  $i$  距离频率采样处通道  $m$  相对于参考通道的干涉相位。

如图 1(b)所示, 经过相位解缠绕之后, 干涉相位中仅剩相位的微小起伏和带宽外的相位需要处理。这里采用加权多项式拟合<sup>[14]</sup>以提高系数估计的稳健性。首先, 将距离频域中的所有干涉相位以矢量形式排列, 如式(7)所示。

$$\boldsymbol{\Omega}_m = [\theta_{m,1} \ \theta_{m,2} \ \dots \ \theta_{m,N}]^T \quad (7)$$

而一阶拟合时系数矩阵  $\mathbf{A}$  和权值矩阵  $\mathbf{W}$  的定义如式(8)和式(9)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ f_1 & f_2 & \dots & f_{N-1} & f_N \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{[w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{N-1} \ w_N]\} \quad (9)$$

其中,  $w_i$  为距离频率  $f_i$  对应的权值,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 而上标  $T$  表示转置。权值  $w_i$  可按如下设置: 当  $f_i$  位于距离带宽内时  $w_i = 1$ , 否则  $w_i = 0$ 。多项式拟合系数可通过式(10)解算。

$$\hat{\mathbf{P}}_m = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\Omega}_m, \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_m = [p_{m,0} \ p_{m,1}]$$

其中,  $p_{m,0}$  和  $p_{m,1}$  表示拟合得到的常数项系数和线性项系数, 且有  $p_{m,0} = \phi_m + 2\pi f_{dc} \Delta t_m$  和  $p_{m,1} = 2\pi \cdot \Delta \tau_m$ 。此外, 由式(7)和式(10)可得, 经过线性拟合相位去除后的残余相位  $\boldsymbol{\Omega}_{\text{res}}$  如式(11)所示。

$$\boldsymbol{\Omega}_{\text{res}} = \mathbf{W} \boldsymbol{\Omega}_m - \mathbf{W} \mathbf{A} \hat{\mathbf{P}}_m \quad (11)$$

式中的权值矩阵用  $\mathbf{W}$  表示, 此处同样仅考虑带宽内的相位, 这是因为噪声易将带宽外的有效信息完全淹没。显然, 根据式(11), 通过低通滤波(如均值滤波方法、经验模型分解方法<sup>[15]</sup>等)可进一步地提取高次项偏差, 以用于精确校正各通道与参考通道间的相频特性差异。

实际上, 为了利用相邻通道间回波的高相干

性<sup>[8]</sup>, 上述处理可在相邻通道间进行, 则有

$$p_{m,0} = (\phi_m - \phi_{m-1}) + 2\pi f_{dc} (\Delta t_m - \Delta t_{m-1}) \quad (12)$$

$$p_{m,1} = 2\pi (\Delta \tau_m - \Delta \tau_{m-1}) \quad (13)$$

因此, 通道  $m$  相对于参考通道的通道时延偏差可表示为

$$\Delta \tau_m = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^m p_{i,1} \quad (14)$$

根据空间互相关系数(SCCC)算法原理<sup>[8]</sup>, 多普勒中心估计过程如式(15)和式(16)所示。

$$\alpha = \exp(j \cdot p_l) \cdot \prod_{m=1}^l \exp(j \cdot p_{m,0}) \quad (15)$$

$$f_{dc} = f_{\text{PRF}} \frac{\arg(\alpha)}{2\pi} + f_{\text{PRF}} \cdot N_{\text{amb}} \quad (16)$$

其中,  $f_{\text{PRF}}$  表示脉冲重复频率,  $p_l$  为通道  $l$  的回波和下一个方位时刻的第 1 通道回波按照上述步骤处理后得到的相位常数项。多普勒模糊数可由雷达姿态和轨道信息计算得到, 参数  $l$  的确定方法参见文献[8]。由式(13)可知, 通道  $m$  相对于参考通道的相位偏差可由式(17)计算。

$$\phi_m = \sum_{i=1}^m (p_{i,0} - 2\pi f_{dc} (\Delta t_i - \Delta t_{i-1})) \quad (17)$$

### 2.3 本文算法流程

如图 2 所示, 本文算法处理流程描述如下:

- (1) 对距离压缩后各通道的回波数据进行距离向傅里叶变换, 转换到方位时域距离频域;
- (2) 取相邻通道的距离频谱数据共轭相乘;
- (3) 通过方位上复数平均和取相角操作得到沿距离向频率的干涉相位曲线;
- (4) 对干涉相位进行相位解缠绕, 去除相位缠绕的影响;
- (5) 如式(7)–式(10), 通过加权多项式拟合提取干涉相位中的常数项和线性项;
- (6) 通过对式(11)中的残余相位进行均值滤波估计高次项相位偏差。

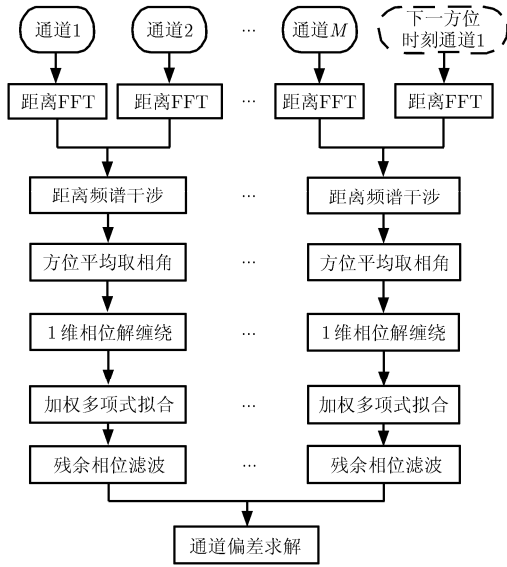


图 2 本文算法处理流程

(7)按照式(14)–式(17)计算通道时延偏差,多普勒中心和通道相位偏差。

### 3 实验验证

#### 3.1 有效性验证

本节实验中采用了机载 X 波段方位 3 通道实测数据验证所提算法的有效性,主要系统参数如表 1 所示,3 个接收通道在方位向上等间隔分布。由于各通道原始回波数据均满足奈奎斯特采样,为了获得方位模糊的多通道数据,对原始数据在方位向进行了 3 倍降采样,新的脉冲重复频率为 200 Hz。

如图 3 所示,该节分别给出了单通道成像结果、仅通道幅相偏差校正的多通道成像结果和经本文方法校正通道偏差后的多通道成像结果。这里选择通道 2 作为参考通道,本文算法估计得到的各通道相对于参考通道的时延偏差分别为 1.332, 0 和 -0.009,单位为像素。本文方法和 SCCC 方法估计得到的通道间相位偏差估计结果如表 2 所示。显然,如果没有进行通道时延偏差校正,同一目标在各通道的回波中位于不同距离单元,将对方位通道相位偏差校

表 2 相位偏差估计结果(°)

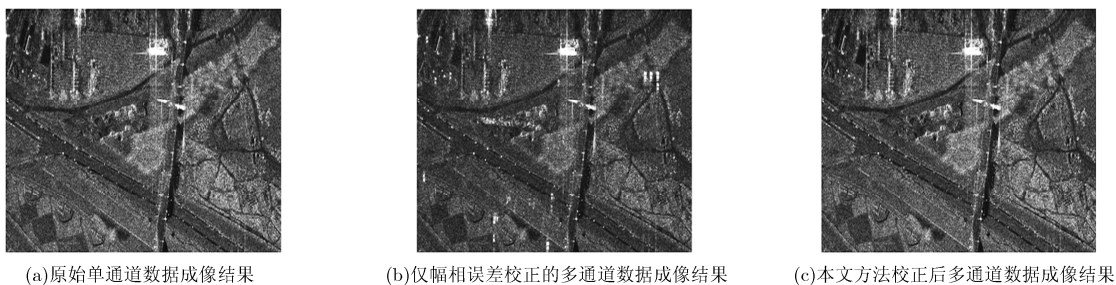
	通道 1	通道 2	通道 3
本文方法	67.2850	0	7.8527
SCCC(通道时延偏差校正后)	67.3208	0	8.6616
SCCC(通道时延偏差校正前)	18.3318	0	5.1157

正和方位解模糊产生严重的影响,因此图 3(b)中出现了明显的方位模糊。相比于图 3(b),图 3(c)中方位模糊得到了很好的抑制,这表明本文算法能准确地估计通道相位偏差和通道时延偏差。图 3(c)相较于图 3(b),其数据信噪比提升约 1.04 dB。为定量地评估方位模糊的抑制效果,这里引入了方位模糊信号比<sup>[10]</sup>,图 3(b)和图 3(c)对应数据的方位模糊信号比分别为 -6.73 dB 和 -28.39 dB。该结果同样说明,经过本文算法校正后,方位模糊得到了有效的抑制。此外,本文方法估计的基带多普勒中心为 8.93 Hz,而利用平均相位增量法<sup>[16]</sup>通过对通道 1–通道 3 无模糊数据单独估计的结果分别为 11.52 Hz, 11.13 Hz 和 8.40 Hz。上述结果说明本文方法能够准确地估计基带多普勒中心。

#### 3.2 性能分析验证

本节采用机载双通道仿真数据,通过蒙特卡洛试验分析本文所提出算法的精度。仿真数据系统参数如表 3 所示,试验次数为 1000 次。首先,分析了本文算法时延偏差估计精度随信噪比以及通道时延偏差的变化,并与多项式拟合法、相位梯度平均法的结果进行对比;然后,分析了通道时延偏差对多普勒中心估计和通道相位偏差估计的影响。多普勒中心估计精度和通道相位偏差估计精度随信噪比的变化可参见相关文献<sup>[8,12]</sup>,这里不再赘述。本节使用均方根误差评估时延偏差估计精度、多普勒中心估计精度和通道相位偏差估计精度<sup>[8,12]</sup>。

通道时延偏差估计精度随信噪比的变化曲线如图 4(a)所示。以通道 1 为参考通道,各通道添加的通道时延偏差分别为 0 像素和 0.9 像素,未添加任



(a)原始单通道数据成像结果 (b)仅幅相误差校正的多通道数据成像结果 (c)本文方法校正后多通道数据成像结果

图 3 SAR 聚焦图像

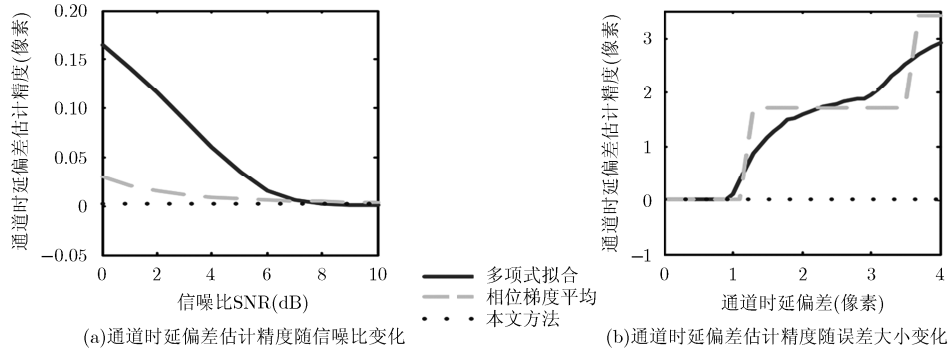


图 4 本文方法与其他方法通道时延偏差估计精度结果对比

表 3 仿真系统参数

参数	数值
载频(GHz)	9.6
平台速度(m/s)	100
原始 PRF(Hz)	125
多普勒带宽(Hz)	200
通道数	2
相邻通道间距(m)	0.4
多普勒中心频率(Hz)	-5.6

何通道幅度相位偏差。由图 4(a)可知，在通道时延偏差较小时，即沿距离频率的干涉相位不存在相位缠绕现象时，3 种方法的通道时延偏差估计精度均随信噪比的提升而提升，其中本文方法在低信噪比情况下明显优于其他两种方法，其估计精度在 $10^{-3}$ 量级。这是因为，本文算法考虑了距离带宽外噪声的影响，利用加权多项式拟合提高了时延偏差估计的准确性。其次，当信噪比为 10 dB 时，通道距离偏差估计精度随通道时延偏差大小的变化曲线如图 4(b)所示。显然，相比于其他算法，本文方法中的相位解缠绕操作在通道时延偏差较大时提高了估计

的稳健性。此外，本文方法多普勒中心估计精度与通道相位偏差估计精度随通道时延偏差的变化曲线如图 5 所示。仿真过程中，取信噪比为 10 dB，无通道幅度偏差，通道相位偏差在 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 范围内均匀分布。由图 5 可知，本文方法的相位偏差估计精度随通道时延偏差的增大而降低，而多普勒中心估计精度在实验中均优于 0.2 Hz。综合上文分析可知，本文方法同时具有较高的多普勒中心估计精度和通道相位偏差估计精度。

#### 4 结论

在距离频谱分析的基础上，本文提出了一种稳健高精度的方位多通道 HRWS SAR 通道偏差估计方法。该方法首先通过对各通道和参考通道距离频谱的干涉相位进行相位解缠绕和加权多项式拟合，从而稳健地估计通道间时延偏差；然后基于空间互相关系数理论，通过常数相位项同时估计得到基带多普勒中心和通道间相位偏差。该算法不但克服了相位缠绕和跳变的影响，提高了通道时延偏差估计的稳健性，能同时估计基带多普勒中心和通道间相位偏差，实测和仿真数据结果验证了该算法的稳健性和精确性。

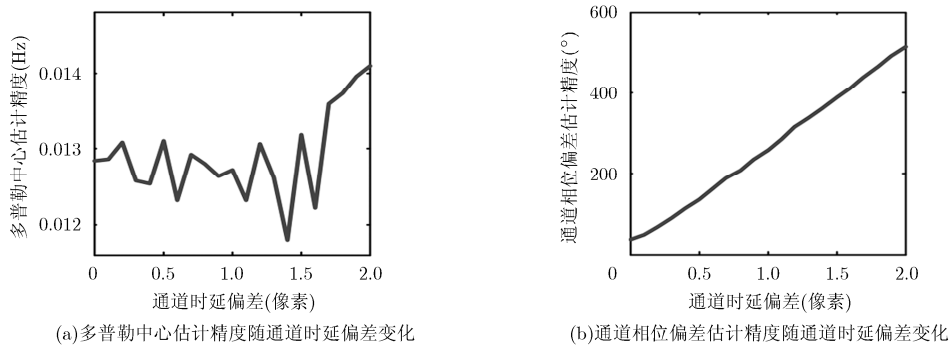


图 5 本文方法中多普勒中心与通道相位偏差估计精度随通道时延偏差的变化曲线

#### 参 考 文 献

[1] 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.
- [2] LI Zhenfang, WANG Hongyan, SU Tao, *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.
- [3] KIM J, YOUNIS M, PAU P, *et al.* First spaceborne demonstration of gigital beamforming for azimuth ambiguity suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 579–590. doi: 10.1109/TGRS.2012.2201947.
- [4] FANG Dongsheng, LV Xiaole, YUN Ye, *et al.* An InSAR fine registration algorithm using uniform tie points based on Voronoi diagram[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8): 1403–1407. doi: 10.1109/LGRS.2017.2715189.
- [5] YAGUE-MARTINEZ N, ZAN F D, and PRATS-IRAOLA P. Coregistration of interferometric stacks of Sentinel-1 TOPS data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(7): 1002–1006. doi: 10.1109/LGRS.2017.2691398.
- [6] ZHANG Shuangxi, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* Multichannel HRWS SAR imaging based on range-variant channel calibration and multi-Doppler-direction restriction ambiguity suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4306–4327. doi: 10.1109/TGRS.2013.2281329.
- [7] FENG Jin, GAO Canguan, ZHANG Yi, *et al.* Phase mismatch calibration of the multichannel SAR based on azimuth cross correlation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 903–907. doi: 10.1109/LGRS.2012.2227107.
- [8] LIU Yanyang, LI Zhenfang, WANG Zhibin, *et al.* On the baseband Doppler centroid estimation for multichannel HRWS SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2050–2054. doi: 10.1109/LGRS.2014.2318511.
- [9] LIU Yanyang, LI Zhenfang, YANG Taoli, *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.
- [10] FANG Chao, LIU Yanyang, LI Zhenfang, *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.
- [11] WANG Zhibin, LIU Yanyang, LI Zhenfang, *et al.* Phase bias estimation for multi-channel HRWS SAR based on Doppler spectrum optimisation[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(21): 1805–1807. doi: 10.1049/el.2016.2972.
- [12] YANG Taoli, LI Zhenfang, LIU Yanyang, *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.2012.2212873.
- [13] JIANG Zhibiao, WANG Jian, SONG Qian, *et al.* A refined cluster-analysis-based multibaseline phase-unwrapping algorithm[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(9): 1565–1569. doi: 10.1109/LGRS.2017.2723050.
- [14] 洪峻, 曾友兵, 王宇. 高分辨机载 InSAR 高程距离向空变误差定标方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(12): 3245–3251. doi: 10.11999/JEIT160021.
- HONG Jun, ZENG Youbing, and WANG Yu. Calibration method of range-variant height errors in high resolution airborne InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3245–3251. doi: 10.11999/JEIT160021.
- [15] WANG Hongrui, LIU Zhigang, SONG Yang, *et al.* Ensemble EMD-based signal denoising using modified interval thresholding[J]. *IET Signal Processing*, 2017, 11(4): 452–461. doi: 10.1049/iet-spr.2016.0147.
- [16] MADSEN S N. Estimating of the Doppler centroid of SAR data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1989, 25(2): 134–140. doi: 10.1109/7.18675.
- 房超: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为机载方位多通道 SAR/InSAR 信号处理.
- 刘艳阳: 男, 1987年生, 高级工程师, 研究方向为星载 SAR/InSAR 系统仿真与信号处理.
- 索志勇: 男, 1978年生, 副教授, 研究方向为 SAR/InSAR 系统分析和信号处理.
- 李真芳: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为 SAR/InSAR 系统分析与信号处理.
- 陈筠力: 男, 1971年生, 研究员, 研究方向为星载 SAR/InSAR 系统设计.