

考虑基线抖动的双天线干涉 SAR 原始回波仿真

唐晓青^{①②} 向茂生^① 吴一戎^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 该文针对双天线干涉 SAR 系统基线抖动的特点提出了一种能够精确仿真基线抖动影响的改进二维频域原始回波生成算法。该算法通过 Taylor 展开近似将基线抖动造成的相位误差分解为随方位向时变和随距离向空变的两个一维函数,从而实现了精确仿真。适用范围分析表明该算法能满足实际系统的仿真需求,是一种精确高效的算法,具有较大应用价值。

关键词: 双天线干涉 SAR; SAR 原始回波仿真; 基线抖动; 二维频域算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1856-06

SAR Raw Signal Simulation of Dual-Antenna InSAR Accounting for Baseline Oscillations

Tang Xiao-qing^{①②} Xiang Mao-sheng^① Wu Yi-rong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences,

National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, an improved 2D Fourier domain simulator is presented, which can take the effects of baseline oscillations into account accurately. The phase error caused by baseline oscillation is separated into the azimuth time-variant term and the range space-variant one by Taylor expansion and then is taken into account accurately. The analysis of validity limits shows that this algorithm can be used for the simulation of practical systems. It is accurate and efficient, so it has good application values.

Key words: Dual-antenna InSAR; SAR raw signal simulation; Baseline oscillation; 2D Fourier domain algorithm

1 引言

构建稳定的基线是保证双天线干涉 SAR 系统高程测量精度的关键,然而在干涉 SAR 系统工作期间基线抖动难以避免。对于双天线干涉 SAR 系统,雷达平台轨迹偏移误差可互相抵消,对干涉性能影响较小,然而基线抖动则直接引起干涉相位误差和显著的去相关效应,严重影响系统性能,因而在进行系统设计时必须详细分析其影响,并研究相应的补偿算法。

对存在基线抖动情况的原始回波进行精确高效的仿真是辅助干涉 SAR 系统设计、运动补偿算法研究的重要手段。然而,现有的原始回波生成算法都存在一定不足:时域方法^[1]能够精确地仿真各种误差影响,但计算量巨大,难以适应对面目标进行不同运动情况多次仿真的实际应用;通常的 2 维频域原始回波生成算法^[1]虽然具有高效的特点,但局限于匀速直线运动假设;文献[2]提出了一种能够在窄波束

假设下仿真慢变的载体轨迹偏移的改进型 2 维频域算法,但是对于频率相对较高的基线抖动情况并不适用。因而有必要按照干涉 SAR 仿真精确保相的要求,针对基线抖动幅度相对较小但频率较高的特点,研究一种能精确仿真基线抖动影响的高效的原始回波生成算法。

本文提出了一种改进的 2 维频域原始回波生成算法。该算法将基线抖动造成的相位误差通过 Taylor 展开近似分解为随方位向时变和随距离向空变的两个分量,并对两个分量分别进行仿真,实现了对基线抖动的精确仿真。基于典型的双天线干涉 SAR 系统参数(机载系统和 SRTM^[3]),分析了改进算法的适用范围。与时域算法进行点目标仿真结果比较验证了改进算法的精确性,面目标仿真验证了该算法对于基线抖动影响干涉性能仿真的有效性。

本文的结构安排如下:首先,分别针对刚性和柔性基线的双天线干涉 SAR 系统建立了描述基线抖动影响的几何模型。之后,介绍了本文算法的基本思路,并通过受到基线抖动影响的原始回波 2

维频域表达式推导阐明算法的具体实现,给出了算法流程。分析了改进算法的适用范围及运算量。最后,给出点目标和面目标仿真结果。

2 基线抖动误差几何模型

作为讨论仿真方案的基础,首先针对刚性基线和柔性基线构型系统建立基线抖动误差的几何模型。基线抖动误差由双天线相位中心不一致的运动轨迹偏移误差引起,对基线抖动的仿真实质就是对双通道相对运动轨迹偏移误差的仿真。刚性基线构型系统由雷达平台姿态变化导致基线旋转而引起天线相位中心偏移,利用载机平台姿态数据和基线矢量可精确计算偏移误差。柔性基线系统除了平台姿态影响外,还存在柔性基线弯曲、扭曲和伸缩引起的天线相位中心位置偏移,因而需要配备专门的基线测量系统(如 GeoSAR 系统^[4]和 SRTM 系统^[3])。

图 1 为系统的几何模型。 A_1 , A_2 分别为主、副天线, ϑ 为雷达视角, α 为基线倾角, B 为基线。为简化描述假设主天线稳定,基线矢量变化以其为基准,实际系统中该基准点位置由双天线安装结构决定,但本文算法及相关分析方法仍然适用。对于两类基线构型系统的基线抖动误差统一用副天线相位中心位置偏移 $\Delta = [d_x, d_y, d_z]^T$ 描述,可进一步分解为方位向偏移误差 δx 和斜距偏移误差 δr :

$$\delta x(x') = d_x(x') \quad (1)$$

$$\delta r(x', r) = -\sin \vartheta \cdot d_y(x') + \cos \vartheta \cdot d_z(x') \quad (2)$$

对于刚性基线构型系统还可以载机姿态变化角度(侧滚 θ_R , 俯仰 θ_P , 偏航 θ_Y)描述:

$$\delta x(x') \simeq -B_y \cdot \sin \theta_Y(x') + B_z \cdot \sin \theta_P(x') \quad (3)$$

$$\delta r(x', r) \simeq B \cdot \theta_R(x') \cdot \cos(\vartheta - \alpha) \quad (4)$$

式(3)、式(4)的推导过程中的近似对于姿态变化幅度较小、基线较短的实际情况是成立的。

3 改进算法

3.1 基本思路

基线抖动造成天线相位中心在斜距和方位向均

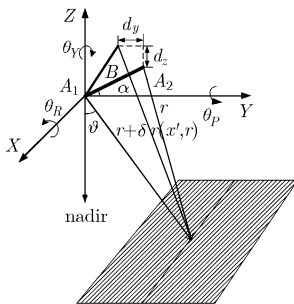


图 1 干涉 SAR 几何构型及基线抖动示意图

出现偏移误差,不满足匀速直线运动假设,原有 2 维频域原始回波生成算法不再适用,需要重新推导回波信号的 2 维频域表达式。存在基线抖动时副天线原始回波表达式见文献[3]式(2.6),对其作距离向傅里叶变换得到

$$H_2(x', \eta) = \exp \left[-j \frac{\eta^2}{4b} \right] \text{rect} \left[\frac{\eta}{bc\tau} \right] \cdot \iint \gamma_1(x, r) \exp \{ -j[\eta r + \tilde{\eta} \cdot (\Delta R + m \cdot (\Delta r_{\text{top}} + \delta R(x', x' - x, r)))] \} W^2 \cdot \left(\frac{x' - x}{X} \right) dx dr \quad (5)$$

$\gamma_1(x, r) = \gamma(x, r) \exp \{ -j(4\pi/\lambda)r \}$, $\gamma(x, r)$ 为地物后向散射系数。 $b = 4\pi/\lambda[(\Delta f/f)/c\tau]$, Δf 为发射信号带宽, f 为信号频率, λ 为波长, c 为光速, τ 为脉冲宽度。 X 为合成孔径长度, W 表示天线方向图函数, $\text{rect}[\]$ 表示矩形窗函数。 $\Delta r_{\text{top}}(r) = -B \sin(\vartheta(r) - \alpha)$ 由双天线视角差引起,包含了地形信息。利用文献[1]中的方法可实现对 $\Delta r_{\text{top}}(r)$ 的仿真,具体算法不再详述,后面的分析中将其忽略。 $\delta R(x', x' - x, r)$ 为基线抖动引起的斜距误差。 $\tilde{\eta} = \eta + (4\pi/\lambda)$, $\Delta R = R_1 - r$ 。标准干涉模式 m 为 0.5, 乒乓模式为 1。

方位向偏移误差 δx 通过原始回波信号方位向重采样即可实现仿真,因而式(5)中将其忽略。而斜距误差 $\delta R(x', x' - x, r)$ 是影响干涉系统性能的主要因素,是仿真算法需要解决的主要问题。斜距误差具有方位向时变特性(对应于原始回波域方位向自变量 x')以及距离向、方位向 2 维空变特性(对应于目标点的 2 维平面位置)。2 维频域原始回波算法提高运算效率的关键是用后向散射系数与系统传递函数的频域乘积代替时域卷积,这隐含着一个重要前提即场景的后向散射系数和 SAR 系统传递函数能够独立生成,然而式(5)中斜距误差时变特性和空变特性的耦合使其无法满足。

改进算法的基本思路是:对基线抖动引入的相位误差 $\exp \{ -j\tilde{\eta} \cdot m \cdot \delta R(x', x' - x, r) \}$ 通过一系列分解将空变和时变特性解耦,将式(5)转化成与理想情况原始回波信号具有相同的形式。相位误差的空变分量与后向散射系数一并生成得到等效后向散射系数,变换至频域后与系统传递函数相乘,得到原始回波域信号再与相位误差的时变分量在时域相乘,从而完成原始回波仿真。下节通过回波信号 2 维频域表达式的推导详细说明算法的具体实现。

3.2 算法实现

对斜距误差进行分解如下:

$$\delta R(x', x' - x, r) \simeq \delta r_0(x') + \delta r_1(x', r) + \delta r_2(x', x' - x, r) \quad (6)$$

其中 $\delta r_0(x') = -d_y(x') \cdot \sin \vartheta(r_0) + d_z(x') \cdot \cos \vartheta(r_0)$ 为距离向非空变分量, 仅随方位向时间变化, $\delta r_1(x', r) = -d_y(x') \cdot \sin \vartheta(r) + d_z(x') \cdot \cos \vartheta(r) - \delta r_0(x', r_0)$ 为距离向空变分量, $\delta r_2(x', x, r) \simeq [-d_y(x') \cdot \sin \vartheta(r) + d_z(x') \cdot \cos \vartheta(r)] \cdot (x' - x - x_d)^2 / (2r^2)$ 为方位向空变分量。

方位向空变分量引起的相位误差和距离向空变分量引起的距离向偏移很小, 因而将这两项忽略, 其合理性在后面详细分析。则式(5)改写为

$$H_2(x', \eta) = \exp\{-j\tilde{\eta} \cdot m \cdot \delta r_0(x')\} \hat{H}_2(x', \eta) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_2(x', \eta) = & \exp\left[-j\frac{\eta^2}{4b}\right] \text{rect}\left[\frac{\eta}{bc\tau}\right] \\ & \cdot \iint \gamma_1(x, r) \exp\{-j(\eta r + \tilde{\eta}\Delta R)\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi m}{\lambda} \cdot \delta r_1(x', r)\right\} W^2\left(\frac{x' - x}{X}\right) dx dr \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中的空变相位误差 $\exp\{-j[(4\pi m)/\lambda] \delta r_1(x', r)\}$ 同时随方位向时变和距离向空变, 显然这是仿真需要解决的关键问题。观察式(2), 式(4)发现斜距误差 $\delta r_1(x', r)$ 为方位向时变和距离向空变的两个 1 维函数的乘积(和)。根据这一特点, 可以利用指数函数的 Taylor 展开实现解耦:

以刚性基线系统为例, $\delta r_1(x', r) = B \cdot \theta_R(x') \cdot q(r)$, $q(r) = \cos(\vartheta(r) - \alpha) - \cos(\vartheta(r_0) - \alpha)$, 通过 Taylor 展开得到

$$\begin{aligned} \exp\left(-j\frac{4\pi m}{\lambda} \delta r_1(x', r)\right) & \simeq \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[j\frac{4\pi m}{\lambda} B \cdot \theta_R(x')\right]^n [q(r)]^n \\ & = 1 + \sum_{n=1}^N f_n(r) \cdot g_n(x') \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $f_n(r) = [q(r)]^n$, $g_n(x') = \frac{1}{n!} \left[j\frac{4\pi m}{\lambda} B \cdot \theta_R(x')\right]^n$ 分别为以 r 和 x' 为自变量的 1 维函数。

同理, 对于柔性基线系统也可展开为式(9)的形式。理论上, 对于任意有限取值 x , 指数函数 e^x 的 Taylor 展开级数均收敛, 因而可以利用有限展开项逼近。将式(9)代入式(8)得到

$$\hat{H}_2(x', \eta) = \bar{H}_{20}(x', \eta) + \sum_{n=1}^N g_n(x') \bar{H}_{2n}(x', \eta) \quad (10)$$

记 $\bar{f}_0(r) = 1$, $\bar{g}_0(x') = 1$, 将 \bar{H}_{20} 与 \bar{H}_{2n} 统一表示如下:

$$\begin{aligned} \bar{H}_{2n}(x', \eta) = & \exp\left[-j\frac{\eta^2}{4b}\right] \text{rect}\left[\frac{\eta}{bc\tau}\right] \\ & \cdot \iint \gamma_1(x, r) f_n(r) \exp\{-j(\eta r + \tilde{\eta}\Delta R)\} \\ & \cdot W^2\left[(x' - x)/X\right] dx dr \end{aligned} \quad (11)$$

记

$$\gamma_{2n}(x, r) = \gamma_1(x, r) f_n(r) \quad (12)$$

则 $\bar{H}_{2n}(x', \eta)$ 与理想情况的原始回波具有相同的形式, 可以利用现有的 2 维频域原始回波生成算法^[3]进行仿真。最终原始回波分解为多个信号分量 \bar{H}_{2n} 的加权和, 2 维频域表达式为

$$H_2(\xi, \eta) = Q_0(\xi, \eta) \otimes_{\xi} \left\{ \sum_{n=0}^N Q_{gn}(\xi, \eta) \otimes_{\xi} \bar{H}_{2n}(\xi, \eta) \right\} \quad (13)$$

$Q_0(\xi, \eta) = \text{FT}(\exp\{-j\tilde{\eta} \cdot m \cdot \delta r_0(x')\})$, $Q_{gn}(\xi, \eta) = \text{FT}(g_n(x'))$, \otimes_{ξ} 表示方位向频域卷积。

依据式(13)得到仿真流程如下, 算法流程图如图 2 所示。

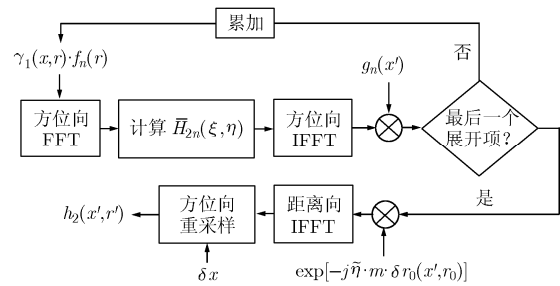


图 2 改进算法流程图

(1) 根据斜距误差空变项最大取值确定展开阶数 N , 具体地, 需满足条件:

$$\frac{1 + \sum_{n=1}^N [f_n(r_{\max}) g_n(x'_{\max})]^2}{\sum_{n=N+1}^{\infty} [f_n(r_{\max}) g_n(x'_{\max})]^2} > 10^4, \quad \text{下标 max 表示对应于最大值。}$$

(2) 根据式(12)计算等效后向散射系数 $\gamma_{2n}(x, r)$, 并进行方位向傅里叶变换。

(3) 利用原有 2 维频域算法^[1]计算理想匀速直线运动情况下的原始回波信号 $\bar{H}_{2n}(x', \eta)$ 。

(4) 对 $\bar{H}_{2n}(x', \eta)$ 作方位向逆傅里叶变换并乘以 $g_n(x')$ 。

(5) 判断是否最后一个展开项, 不是则进行信号累加, 并重复步骤(2)~步骤(4)。

(6) 将累加结果乘以 $\exp[-j\tilde{\eta} \cdot m \cdot \delta r_0(x', r_0)]$, 并进行距离向逆傅里叶变换。

(7) 依据副天线方位向偏移误差进行方位向重采样, 得到最终仿真结果。

3.3 适用范围

在本文算法的推导过程中作了 3 点近似, 下面逐一分析, 明确本算法的适用范围。

(1) 忽略了方位向空变相位误差项, 要求

$[(4\pi m)/\lambda]\delta r(x',r)(X/(2r))^2 \ll 1$, 此条件极易满足。对于刚性基线构型干涉系统以中国科学院电子学研究所的机载双天线干涉 SAR 系统为例(系统参数见文献[5]), 对于柔性基线系统以 SRTM 为例(系统参数见文献[3]), 此近似满足的限制条件为: 载机侧滚角 $\theta_R \ll 786^\circ$; 副天线位置偏移 $d_y \ll 2112 \text{ m}$, $d_z \ll 2703 \text{ m}$ (SRTM)。

(2)忽略了斜距误差距离向空变分量引起的距离向偏移, 要求: $\delta r_1(x',r) \ll 2/(bc\tau)$, 对上述两个典型系统基线抖动的限制条件为 $\theta_R \ll 55.5^\circ$; $d_y \ll 3.2 \text{ m}$, $d_z \ll 4.1 \text{ m}$ 。

(3)对距离向空变相位误差项 $\exp\{-j(4\pi m)/\lambda\delta r_1(x',r)\}$ 利用有限阶 Taylor 展开项逼近。从理论上讲, 只要基线抖动幅度满足前两个限制条件就可以通过增大展开阶数实现仿真。表 1 为展开阶数和基线抖动幅度限制的对应关系。此近似的要求最为严格。分析实际载机姿态数据可知, 侧滚角在短期内(3-4 倍合成孔径时间)抖动幅度通常小于 0.5° , SRTM 支撑臂末端抖动幅度在 5 cm 范围内^[3]。因而 4 阶展开足以适应实际系统的仿真。需要强调的是, 本算法可以对满足一定幅度限制任意频率的抖动进行精确仿真, 不再限于对慢变运动的仿真^[2]。

3.4 运算量

表 2 为本算法和两种现有算法的运算量比较。可见, 改进算法相比原有 2 维频域算法^[1]有 N 倍的运算量增大, 并增加了 $(N+1) N_{r_fft} N_{a_fft}$ 次复乘运算。但仍与 2 维频域算法运算量处于相同数量级, 显著优于时域算法。改进算法以较小的运算效率损失为代价, 实现了对基线抖动影响的精确仿真, 对

于干涉 SAR 系统设计和运动补偿算法研究具有重要意义。

4 仿真

采用本文改进算法对中科院电子所的机载双天线干涉 SAR 系统进行考虑基线抖动影响的原始回波仿真。在点目标仿真中以精确的时域算法^[9]为评价标准验证改进算法的精确性。再进行面目标仿真以验证对基线抖动造成的干涉相位误差和去相关效应仿真的有效性。

4.1 点目标

利用第 2 节建立的几何模型描述基线抖动, 载机侧滚、俯仰和偏航的姿态变化均为幅度 0.5° , 频率 0.5 Hz 的余弦振动。如图 3 所示为改进算法相比于时域算法仿真结果的相位误差。为消除推导频域表达式使用驻定相位原理造成的相位波动, 首先计算两种方法对存在抖动情况与无抖动情况的仿真结果的相位差, 再比较两种方法的相位差值。对于不同斜距处的目标, 改进算法仿真结果的相位误差均小于 0.01 rad, 可见算法是精确的。

4.2 面目标

根据同一系统的实测载机姿态数据得到基线抖动, 对方位向 1049 m×距离向 3840 m 大小的平地场景进行原始回波仿真。地面后向散射系数依据 Ulaby 模型生成, 并根据距离向天线方向图加入了信噪比随距离向变化的热噪声。如图 4 所示为仿真结果成像(6 视的子孔径成像)得到的干涉相位图与实际数据对比。图 5 分别为相关系数和干涉相位误差随方位向变化曲线对比。仿真结果的干涉相位误

表 1 展开阶数与基线抖动幅度限制的关系

展开项数	θ_R (°)	d_y (m)	d_z (m)	展开项数	θ_R (°)	d_y (m)	d_z (m)
2	0.5	0.021	0.017	4	2.6	0.11	0.092
3	1.4	0.06	0.05	5	4	0.17	0.14

表 2 不同算法运算量对比

算法	实乘次数	复乘次数
2 维频域算法	$N_{r_map} N_{a_map} + N_{a_fft} + 5 N_{r_fft} N_{a_fft}$	$N_{r_fft} N_{a_fft} (2 + \log_2 N_{r_fft} + \log_2 N_{a_fft})$
本文改进算法	$N(N_{r_map} N_{a_map} + N_{a_fft} + 5 N_{r_fft} N_{a_fft})$	$N[N_{r_fft} N_{a_fft} (2 + \log_2 N_{r_fft} + \log_2 N_{a_fft})] + (N+1) N_{r_fft} N_{a_fft}$
时域算法	$2f_s \tau + N_{a_raw} N_{a_map} (1 + N_{r_map}) + 2 N_{r_fft} N_{r_map} N_{a_map} N_{a_raw}$	$N_{r_fft} \log_2 N_{r_fft} (1 + N_{a_raw}) / 2 + N_{a_raw} N_{r_fft} (1 + N_{r_map} N_{a_map})$

表中 N_{r_map} , N_{a_map} 分别为仿真场景的距离向和方位向点数, N_{r_fft} , N_{a_fft} 为计算过程所需的 FFT 点数, N_{a_raw} 为输出原始回波点数, N 为改进算法选取的展开阶数。

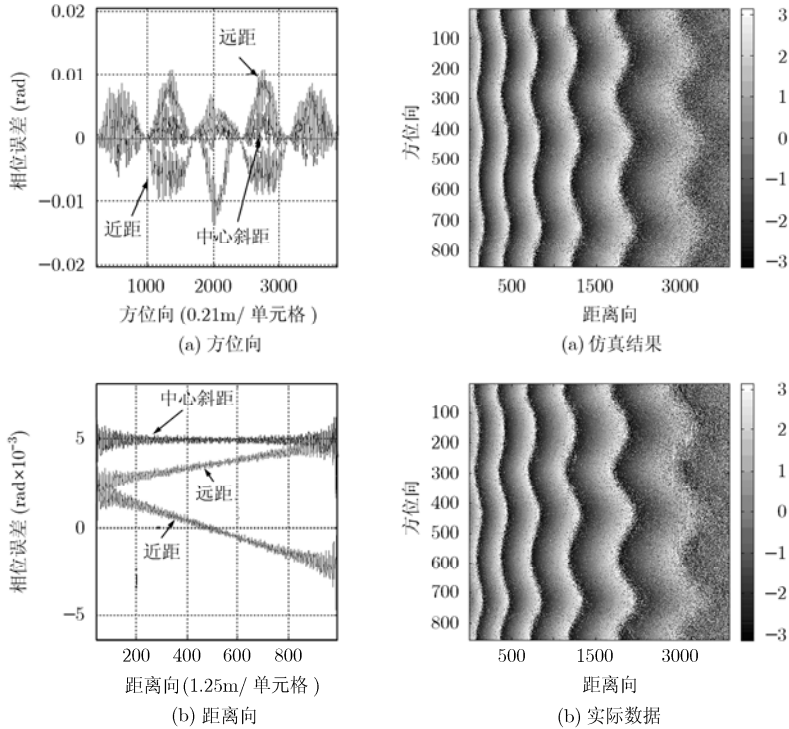


图 3 改进算法相位误差

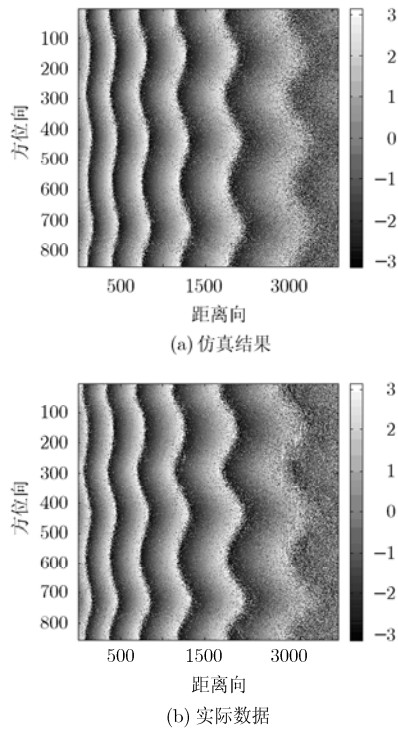


图 4 干涉相位图对比

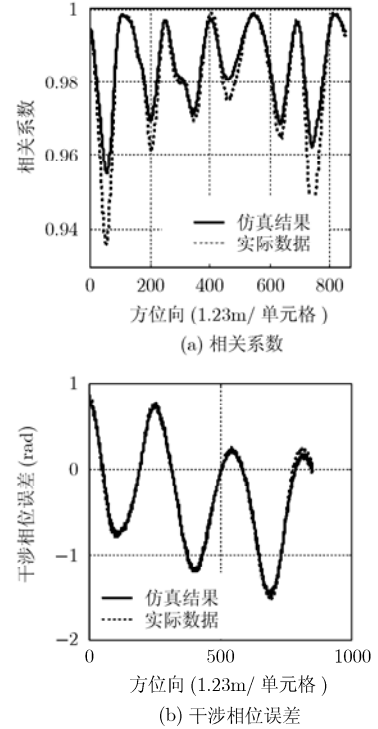


图 5 仿真结果与实际数据对比

差与实际数据完全吻合，相关系数(运动补偿前后的比值)也非常接近，由于实际系统的去相干源较多，实际相关系数比仿真结果略低也是易于理解的。

为进一步验证对距离向空变相位误差仿真的精确性，对仿真结果分别进行一级和两级运动补偿。前者按照中心斜距处的运动误差进行补偿，其结果应残留随距离向变化的干涉相位误差，相应的在近距和远距端仍存在去相关效应；而后者则按照不同斜距位置对空变相位误差进行精确补偿，彻底消除了基线抖动的影响^[6]。如图 6(a)，6(b)所示分别为两级和一级运动补偿后的干涉相位误差随方位向变化曲线。图 7 为两种运动补偿结果的相关系数同理想情况理论值的对比。仿真结果与理论分析一致，从而验证了算法对空变相位误差仿真的精确性。

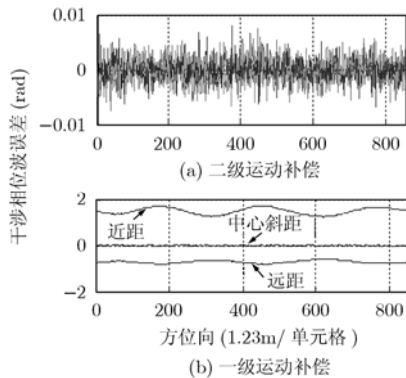


图 6 干涉相位误差

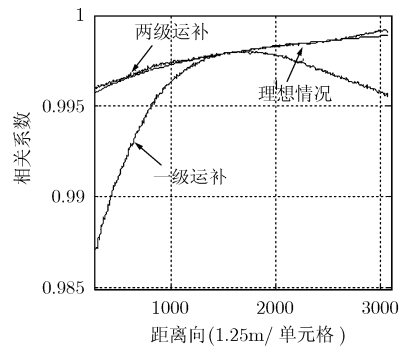


图 7 相关系数

5 结论

本文提出了一种可精确仿真双天线干涉 SAR 系统中基线抖动影响的改进型 2 维频域原始回波生成算法。该算法通过一系列分解和 Taylor 展开近似对基线抖动引起的相位误差进行方位向时变和距离向空变特性的解耦，实现了精确仿真。突破了现有考虑运动轨迹偏移误差的 2 维频域算法无法仿真快变化运动误差的限制，能满足实际系统仿真需求。点目标和面目标仿真结果验证了算法的精度和有效性。本文算法以较小的运算效率损失为代价实现了基线抖动的精确仿真，实用性强，可作为辅助系统设计和运动补偿算法研究的重要手段。

参考文献

[1] 韦立登. 机载双天线干涉合成孔径雷达计算机仿真系统设计、

- 实现与应用研究. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2005.
- Wei L D. Design, implement and application of the computer simulation system for airborne interferometric synthetic aperture radar [D]. [Ph.D. dissertation], Institute of electronics, CAS, 2005.
- [2] Franceschetti G, Iodice A, and Perna S, *et al.* SAR sensor trajectory deviations: Fourier domain formulation and extended scene simulation of raw signal [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2323-2334.
- [3] Franceschetti G, Iodice A, and Maddaluno S, *et al.* Effect of antenna mast motion on X-SAR/SRTM performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2361-2372.
- [4] http://www.nps.edu/Academics/Centers/RemoteSensing/Presentations/RADAR%20Presentations/Fugro_GeoSAR.pdf, 2008.4.
- [5] Xiang M S, Wu Y R, and Li S E. Introduction on an experimental airborne InSAR system [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul Korea, 2005: 4809-4812.
- [6] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- 唐晓青: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为机载干涉 SAR 运动补偿、干涉 SAR 仿真及运动误差影响分析.
- 向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为干涉合成孔径雷达系统与方法的研究.
- 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 研究领域包括星载/机载 SAR 信号处理、遥感图像几何与辐射校正、机载 InSAR 系统.