

星载寄生式 SAR 系统干涉信号模型与相对高程测量性能分析*

何 峰,梁甸农,刘建平

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:以星载寄生式 SAR 系统成像信号模型为基础,给出了该系统的干涉模型,分析了其特点和限制条件,提出了距离向有效基线和方位向有效基线的新概念。以 Cartwheel 和 Pendulum 两种编队构形为实例,分析了寄生式 SAR 系统有效基线的限制和相对高程测量的性能,结果表明,编队形式固有的基线耦合给性能造成不利影响,在这方面 Pendulum 编队优于 Cartwheel 编队构形,距离向和方位向预滤波处理可提高图像对的相关性,但并不能完全去除几何去相关对性能的影响。

关键词:星载寄生式 SAR;干涉 SAR;基线

中图分类号:TN958 文献标识码:A

The Analysis of Signal Model and Performance for Spaceborne Parasitic Insar Relative Height Measurement

HE Feng, LIANG Dian-nong, LIU Jian-ping

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:Based on the radar image model of spaceborne parasitic SAR system, interferometric model of this new system is proposed; new characters and limits are analyzed in detail. The concepts of the range and azimuth effective baseline are given at the same time. The limits of effective baselines and performance of INSAR relative height measurement of Cartwheel and Pendulum configuration are analyzed. The influence of interrelation of the range and azimuth baseline and pre-filtering technology are pointed out.

Key words:spaceborne parasitic SAR; INSAR; baseline

星载寄生式 SAR 是近年来提出的一种具有吸引力的空间遥感技术,有广泛的应用前景^[1-3]。干涉测高是其重要应用之一。已有的分析星载寄生式 SAR 系统的文献有的只从原理上分析了干涉的可行性^[1],或是借用旧系统(如重复轨道星载 SAR、双天线单航过干涉 SAR 系统等)中的一些结论分析星载寄生式 SAR 的性能^[2]。然而星载寄生式 SAR 系统是一种新的体制,与以往系统相比有其新特点,如基线耦合、编队构形问题、多基线等,有必要针对其特点进行深入的分析研究。

1 信号模型

星载寄生式 SAR 系统的空间几何关系如图 1 所示,一个编队小卫星群(图中以两颗小卫星 s_1 、 s_2 代表)伴随大卫星 s_0 飞行,编队几何尺寸远小于它到大卫星及目标的距离,编队中心下视角为 θ_b ,方位角为 ψ_b 。地面位置以 (x, y) 描述: x 对应方位向,即沿航迹方向; y 对应距离向,即沿主星天线垂直地面的主平面(距离—高度平面)在地面的交线方向, x 、 y 轴方向并不一定垂直,除非是正侧视情况。回波的两维为 (x, t) ,方位向上以空域变量 x 描述,与描述地面位置的 x

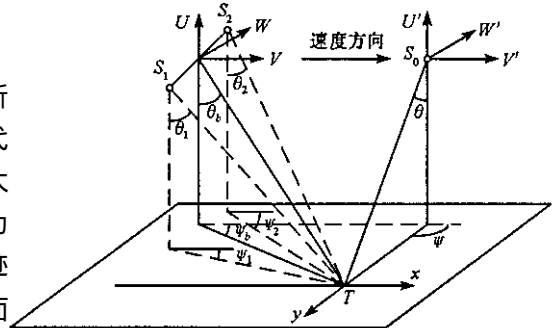


图 1 星载寄生式 SAR 系统空间几何示意图

Fig.1 Geometry of spaceborne parasitic SAR

* 收稿日期 2004-12-10

作者简介:何峰(1976—),男,博士生。

一致。\$x\$ 与慢时间 \$s\$ 的对应关系为: \$x = V \cdot s\$, \$V\$ 为等效平台运动速度, 距离向上以快时间 \$t\$ 描述。

设在任一方位位置 \$x\$ 的发射信号为 \$\exp[j2\pi(f_c t + Kt^2/2)]\$, \$|t| \le \tau_p/2\$, 信号带宽 \$W_t = |K| \tau_p\$。对于地面分布式目标 \$f(x, y)\$, 雷达图像 \$g_b(x, t)\$ 可表示为如下的积分形式^[4]:

$$g_b(x, t) = \iint f(x', y') \exp[-j2\pi \frac{r(y') + r_1(y')}{\lambda}] \cdot \exp[j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{V}(x - x')] \cdot \text{sinc}\{\pi \frac{t - [r(y') + r_1(y')]/c}{\rho_t}\} \text{sinc}\left(\pi \frac{x - x'}{\rho_x}\right) dx' dy' \quad (1)$$

其中, \$r(y_0)\$ 是散射点在合成孔径中心时刻到主星的斜距; \$r_1(y_0)\$ 是同一时刻散射点到小卫星雷达的斜距; \$\rho_t = \frac{1}{W_t}\$ 为系统在快时间上的时间分辨率, \$\rho_x = \frac{V}{W_d}\$ 为方位分辨率, \$W_d\$ 为多普勒带宽; \$f_{Dc}\$、\$f_R\$ 为主星多普勒参数, \$f_{Dc1}\$、\$f_{R1}\$ 为小卫星雷达若为完整发射接收雷达时的多普勒参数。当小卫星雷达接收主星电磁波回波时, 其多普勒参数为: \$f_{Dc1}^b = \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{2}\$, \$f_{R1}^b = \frac{f_R + f_{R1}}{2}\$^[3]。

考虑以 \$(x_c, y_c)\$ 为中心的一小块地面区域的雷达图像。\$(x_c, y_c)\$ 附近点在合成孔径中心到主星、小卫星的斜距可近似表示为: \$r(y') = r(y_c) + u' \sin\theta\$, \$r_1(y') = r_1(y_c) + u' \sin\theta_1\$, 其中 \$u' = y' - y_c\$, \$\theta\$、\$\theta_1\$ 分别为主星、小卫星雷达在 \$(x_c, y_c)\$ 处的下视角。若令 \$t - \frac{r(y_c) + r_1(y_c)}{c} = \tau\$, 又令 \$\tau = \frac{u(\sin\theta + \sin\theta_1)}{c}\$, 且

$$\text{记 } g'_b\left(x, \frac{\sin\theta + \sin\theta_1}{c}u\right) = g_b\left[x, \frac{r(y_c) + r_1(y_c)}{c} + \frac{\sin\theta + \sin\theta_1}{c}u\right], \text{式(1)可改写为:}$$

$$g'_b\left(x, \frac{\sin\theta + \sin\theta_1}{c}u\right) = \exp\left[-j2\pi \frac{r(y_c) + r_1(y_c)}{\lambda}\right] \cdot \left[f(x, y_c + u) \exp\left(-j2\pi \frac{\sin\theta + \sin\theta_1}{\lambda}u\right) \right] \otimes_{x, u} \left\{ \exp\left[j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{V}x\right] \text{sinc}\left[\pi \frac{(\sin\theta + \sin\theta_1)/c}{\rho_t}u\right] \text{sinc}\left(\pi \frac{x}{\rho_x}\right) \right\} \quad (2)$$

2 干涉模型

设有两颗伴随主星飞行的小卫星 1 和小卫星 2 同时接收主星发射的电磁波回波, 对地面相同区域成像。两颗小卫星视线方向略有不同, 两幅图像之间存在相干性。图像中一个像素点对应的是以地面某点 \$(x_0, y_0)\$ 为中心、以一个分辨单元为大小的区域内所有随机散射点散射信号的相干叠加。将式(2)中的中心点设为 \$(x_0, y_0)\$, 令 \$x = x_0, u = 0\$, 可得小卫星 1 和小卫星 2 对应以 \$(x_0, y_0)\$ 为中心的同一个小分辨单元的像素点的值 \$S_1\$、\$S_2\$ 为:

$$S_i = \exp\left[-j2\pi \frac{r(y_0) + r_1(y_0)}{\lambda}\right] \cdot \iint f(x', y_0 + u') \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{u'(\sin\theta + \sin\theta_i)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{V}(x_0 - x')\right] \cdot \text{sinc}\left[-\pi \frac{(\sin\theta + \sin\theta_i)/c}{\rho_t}u'\right] \cdot \text{sinc}\left(\pi \frac{x_0 - x'}{\rho_x}\right) dx' du' + n_i \quad (3)$$

这里近似认为 \$W_{d1} = W_{d2}\$^[3], 因此, \$\rho_{x1} = \rho_{x2} = \rho_x\$。假设地面散射系数是分布均匀的白噪声:

$$f(x, y) * f^*(x', y') = \delta(x - x') \delta(y - y') \sigma_0^2 \quad (4)$$

假设噪声与信号不相干, 则两幅图像同一像素点的复交相干为:

$$S_1 S_2^* = \sigma_0^2 \exp\left[-j2\pi \frac{r_1(y_0) - r_2(y_0)}{\lambda}\right] \iint \exp\left[-j2\pi \frac{u(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)}{\lambda}\right] \exp\left[j\pi \frac{f_{Dc1} - f_{Dc2}}{V}(x_0 - x)\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi \frac{(\sin\theta + \sin\theta_1)/c}{\rho_t}u\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi \frac{(\sin\theta + \sin\theta_2)/c}{\rho_t}u\right] \cdot \text{sinc}^2\left(\pi \frac{x_0 - x}{\rho_x}\right) dx du \quad (5)$$

式(5)积分中重要的是相位项, 幅度项相对而言并不需要那么精确, 可作一定近似。令 \$\theta_b = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\$, 并记

\$\rho_y = \frac{\rho_t}{(\sin\theta + \sin\theta_b)/c} \approx \frac{\rho_t}{(\sin\theta + \sin\theta_1)/c} \approx \frac{\rho_t}{(\sin\theta + \sin\theta_2)/c}\$, \$\rho_y\$ 是指双基地 SAR 系统的地距分辨率。将该近似引入式(5)中的幅度项可得:

$$S_1 S_2^* = \sigma_0^2 \exp\left[-j2\pi \frac{r_1(y_0) - r_2(y_0)}{\lambda}\right] \iint \exp\left[-j2\pi \frac{u(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)}{\lambda}\right] \exp\left[j\pi \frac{f_{Dc1} - f_{Dc2}}{V}(x_0 - x)\right] \text{sinc}^2\left(\pi \frac{u}{\rho_y}\right) \text{sinc}^2\left(\pi \frac{x_0 - x}{\rho_x}\right) dx dy = \sigma_0^2 \rho_x \rho_y \exp\left[-j2\pi \frac{r_1(y_0) - r_2(y_0)}{\lambda}\right] \cdot \alpha \cdot \beta \quad (6)$$

其中 $\exp\left[-j2\pi \frac{r_1(y_0) - r_2(y_0)}{\lambda}\right]$ 是期望得到的包含分辨单元中心到两颗小卫星斜距差信息的干涉相位,地面高程即是由此相位反演得到的。 α 、 β 分别为距离向和方位向引起的去相关:

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_y(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)}{\lambda} = 1 - \frac{f_c \sin\theta_2 - \sin\theta_1}{W_r \sin\theta + \sin\theta_b}; \quad \beta = 1 - \frac{\rho_x(f_{Dc1} - f_{Dc2})}{2V} = 1 - \frac{f_{Dc1} - f_{Dc2}}{2W_d} = 1 - \frac{f_{Dc1}^b - f_{Dc2}^b}{W_d} \quad (7)$$

由于两小卫星相距较近,可近似认为两天线距离—高度平面平行且重合,方位角为 Ψ_b ($\Psi_b = \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2}$, 见图 1)。在该平面内定义距离向有效垂直基线 B_{\perp}^r 为空间基线在该平面上的投影在视线垂线方向上的分量。定义方位向有效垂直基线 B_{\perp}^a 为空间基线在水平面的投影在水平视线垂线方向的分量。根据图 1 所示的几何关系,易得,当 α 、 β 分别为零时,对应的基线临界值为:

$$B_{\perp c}^r = \frac{\lambda r}{\rho_y \cos\theta_b} = \frac{W_r r \lambda}{c} \cdot \frac{\sin\theta + \sin\theta_b}{\cos\theta_b}; \quad B_{\perp c}^a = \frac{W_d r \lambda}{V_s \sin\Psi_b} \quad (8)$$

本文的距离向基线和方位向基线并不等同于一般定义的切航迹基线和沿航迹基线,区别在于后者将基线在垂直轨道的平面和航迹方向上投影,而前者考虑了小卫星雷达天线距离—高度主平面的方位角,因此更为准确,后者可认为是当小卫星编队方位角接近 90° 时与前者近似。

3 干涉测高性能分析

现以具体的编队构形来分析星载寄生式 SAR 干涉测高的性能和限制因素。均以单视图干涉来考虑。以 Envisat 为假想主星,小卫星编队中心与主星距离为 75km。Envisat 上雷达载荷 ASAR 参数为:波长 5.6cm,带宽 16MHz,天线长 10m,天线高 1.3m,中心视角为 40° ,正侧视模式^[2]。

首先,分析第 2 节中得出的距离向有效基线和方位向有效基线临界值的变化规律。图 2 中左为两方向基线的临界值随主星下视角变化的规律,右为随编队中心与主星距离变化的规律,也即随方位角 Ψ_b 变化的规律,对应 Ψ_b 从 87.9° 到 79.8° 。有效基线的临界值决定了编队尺寸的取值上限。

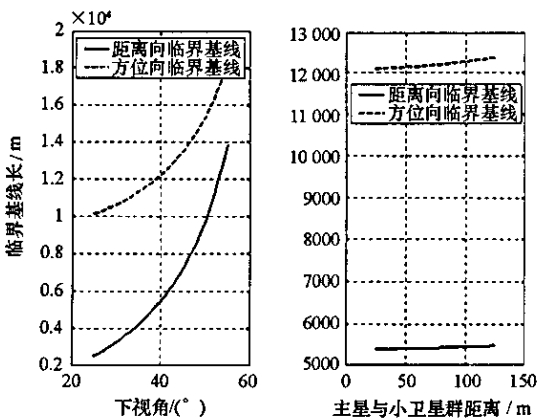


图 2 临界有效基线随下视角及方位角变化

Fig.2 Critical baseline length versus elevation and azimuth angle

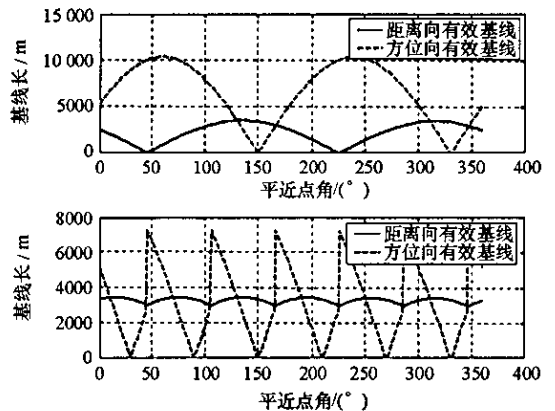


图 3 Cartwheel 一个轨道周期内基线变化规律

Fig.3 Baseline length versus mean anomaly of Cartwheel

接着,分析 Cartwheel 编队构形。编队卫星的相对运动可分解为轨道平面的椭圆运动和垂直于轨道方向的简谐振动两个相互独立的运动^[5],Cartwheel 构形垂直于轨道方向的简谐振动退化为 0,相对轨道为平面椭圆。图 3 所示为编队中任两颗小卫星间有效基线 B_{\perp}^r 和 B_{\perp}^a 在一个轨道周期内的变化规律,相应的椭圆短半轴取值为 3km。可见, B_{\perp}^r 和 B_{\perp}^a 的变化幅度很大,这对形成稳定的性能来说是不利的。

由于三颗小卫星间同时存在三条空间基线,可按需要在某一时刻选取最有利的基线来完成相应功能。对干涉测高来说,主要考虑的是距离向基线,它直接影响相位噪声大小,并决定着测高误差对相位噪声的敏感程度。一般希望它长且变化幅度小。方位向基线只起到降低相关性的作用,一般希望它长度较小。图3所示为在一个轨道周期内始终取距离向有效基线最长的两颗小卫星间基线时的有效基线变化曲线。可见,当综合三条空间基线后,有效地使距离向有效基线变化控制在很小的幅度以内,但方位向基线长度仍有较大起伏。

下面按照图3所示的基线变化规律来计算分析相对高程测量精度在一个轨道周期的变化。相关系数考虑信噪比、距离向去相关、方位向去相关、体散射去相关四个主要因素: $\gamma = \frac{\alpha\beta\gamma_Z}{1 + SNR^{-1}}$ [6,7], α 、 β 在第2节已详细讨论。体散射去相关是由一个分辨单元内散射系数的高度分布引起的,第2节中为简化问题没有考虑散射体在高程上的分布,因此 γ_Z 没有出现在式(6)中。 γ_Z 的影响可大致由下式确定[7,8]:

$$\gamma_Z = \frac{\int \alpha(z) \exp(-jk_z z) dz}{\int \alpha(z) dz}; \quad k_z = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{rsin\theta} \quad (9)$$

k_z 是高程方向引起的干涉条纹波数, $\alpha(z)$ 是散射系数随高程分布的归一化表达式,跟具体地貌密切相关,假设成像区域为植被覆盖区域,则有 $\alpha(z) = \exp[-2\mu(Z_0 - z)]$ ($0 \leq z \leq Z_0$), Z_0 为植被高度, μ 为穿透衰减系数[2,8]。由于是同时观测,所以不存在时间去相关。相关系数与相位噪声的关系为: $\sigma_{\phi} =$

$\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{2\gamma^2}}$ [7,8] 相对高程误差与相位噪声关系为: $\frac{dh}{d\phi} = \frac{H_0 \lambda r sin\theta_b}{h_0 2\pi B_{\perp}}$, H_0 、 h_0 分别为卫星和目标地心距。该式

考虑地球曲面和小卫星天线方位角的影响,是文献[2]中式(3)的更精确形式。计算中信噪比取5dB, μ 取值为 $0.5 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$,植被高度 Z_0 取 5 m [2]。图4上显示了在几种不同的有效基线与临界基线比(对应不同的短半轴值)下的高度误差。由于 B_{\perp} 变化较小,对高程精度影响较稳定,而 B_{\parallel} 起伏较大,它引起的方位去相关效应对测高精度影响反而较为明显,图中可见相对高程精度变化规律与 B_{\parallel} 的变化接近一致,说明方位向基线对测高性能也有重要影响,应加以重视。同时这也是星载寄生 SAR 系统基线耦合影响的一个体现,说明 Cartwheel 构形是一种基线耦合较强的编队形式,对性能有不利的影响。此外基线与临界基线比值的选取也对测高精度有重要影响,当比值在 $1/3$ 左右时有较好的测高精度,基线长度接近最优基线。

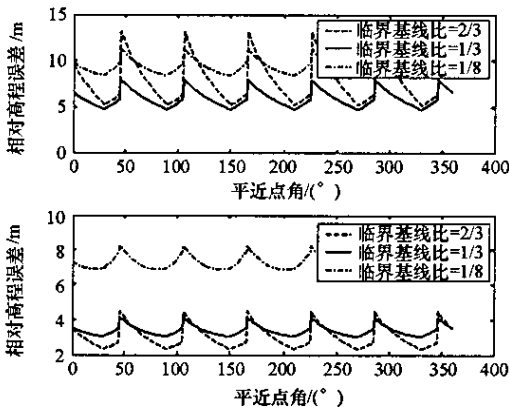


图4 Cartwheel 测高精度

Fig.4 Height-measure accuracy versus mean anomaly of Cartwheel

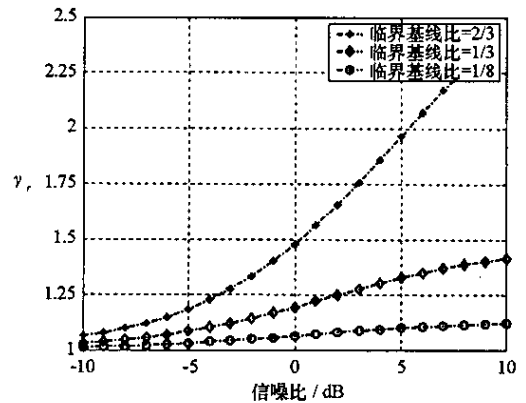


图5 距离与方位预滤波对相关性的改善

Fig.5 Correlativity improvement by range and azimuth pre-filtering

通过距离向和方位向的预滤波可增强相关性。文献[2]中认为可将 α 、 β 的去相关效应完全去除,这种分析是不够全面的,因为虽然经预滤波后,距离向和方位向频带重合一致,去相关效应完全滤除,但同时滤除了信号能量,使信号能量下降,而噪声功率谱密度不变,因此降低了信噪比,增加了热噪声去相关效应。预滤波后的信噪比和相关系数分别为:

$$SNR_{filter} = \alpha\beta SNR ; \quad \gamma_{filter} = \frac{\gamma_z}{1 + SNR_{filter}^{-1}} = \frac{\alpha\beta\gamma_z}{\alpha\beta + SNR^{-1}} \quad (10)$$

可见,虽然 γ_{filter} 较 γ 大,但仍没有真正消除 α 、 β 的影响。当信噪比本身很低时,这种滤波的效果越不明显。图 5 分析了不同临界基线比下相关系数改善倍数随信噪比的变化曲线。图 4 下图所示为图 4 上图经过距离和方位滤波处理后的测高精度,可见精度有一定程度的提高。

再分析 Pendulum 构形。Pendulum 在轨道面的椭圆运动退化为一,只保留垂直轨道方向的简谐振动,与 Cartwheel 相比, Pendulum 在沿航迹和切航迹方向有独立的参数可设置。对于干涉测高而言,基线的顺轨分量是不必要的,但考虑到小卫星的安全及其它应用,小卫星 y 轴位置应有所差别,本文取三颗小卫星 y 轴坐标,依次相差 100m。图 6 显示为 Pendulum 构形在一个轨道周期内始终取距离向有效基线最长的两颗小卫星间基线时的有效基线变化曲线,对应的 $B = 2.8\text{km}$ 。图 7 为 Pendulum 的测高精度,上图和下图分别对应不进行预滤波处理和进行预滤波处理的情况。将图 6、7 与图 3、4 比较可发现, Pendulum 构形的基线耦合情况要好于 Cartwheel 构形,其测高精度优于 Cartwheel 构形,且性能起伏较小。

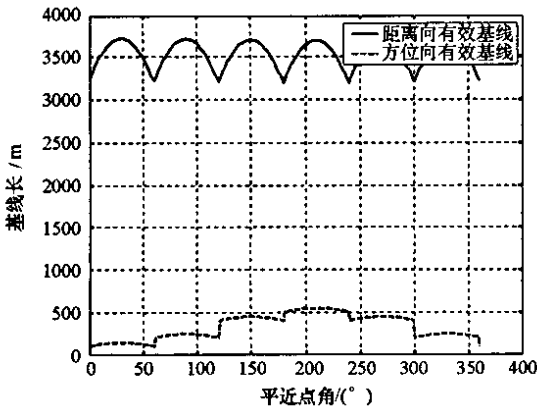


图 6 Pendulum 一个轨道周期内基线变化规律

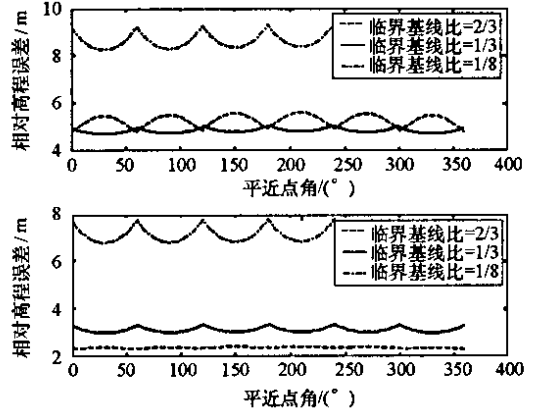


图 7 Pendulum 测高精度

Fig.6 Baseline length versus mean anomaly of Pendulum Fig.7 Height-measure accuracy versus mean anomaly of Pendulum

4 小结

本文分析考虑的是较理想的情况。实际上,星载寄生式 SAR 系统还存在时间同步和空间天线指向上的同步问题。特别是时间同步,直接影响单视复图像的相位,并最终影响到干涉相位图。时间同步误差可分解为系统误差和随机误差,系统误差可通过地面控制点的校正来消除影响,而随机误差则直接影响相位噪声。对这些问题的深入分析将是本文进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] Massonnet D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3):506-520.
- [2] Krieger G, Wendler M. Comparison of the Interferometric Performance for Spaceborne Parasitic SAR Configurations[A]. In EUSAR 2002[C], Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2002:467-470.
- [3] 何峰,梁甸农,刘建平. 星载寄生式 SAR 多普勒特性分析[J]. 信号处理, 2004, 20(5).
- [4] 何峰,梁甸农,董臻. 用星载寄生式 SAR 提高空间二维分辨率的信号处理[J]. 电子学报, 已录待刊.
- [5] 郗晓宁,王威,等. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2003.
- [6] 王超,等. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [7] Rosen P A, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3):333-382.
- [8] Rodríguez E, Martín J M. Theory and Design of Interferometric Synthetic-aperture Radars[J]. IEEE Proceedings-F, 1992, 139(2):147-159.

