

## 通道一致性误差对 InSAR 性能的影响分析

何志华\* 何峰 黄海风 梁甸农

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 雷达设备收发分置带来的通道幅相一致性误差是单航过 InSAR 系统必须考虑的突出问题之一。该文建立了通道间幅度和相位一致性误差模型,采用面目标统计信号模型得到幅相误差存在时相干系数的计算结果,分析了通道一致性误差对 InSAR 干涉相位偏差和标准差的影响。最后利用地面半实物仿真试验得到实际雷达通道一致性误差引入的干涉测高误差,半实物试验结果与理论分析一致,验证了通道一致性误差影响分析的正确性。

**关键词:** 干涉 SAR; 通道一致性误差; 性能分析; 半实物仿真

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2709-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00111

## Analysis of Channel Mismatch Error on InSAR Performance

He Zhi-hua He Feng Huang Hai-feng Liang Dian-nong

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The channel mismatch error between separate radar instruments is one of the challenges in the single pass Interferometric SAR (InSAR) system. A channel amplitude and phase mismatch error model is introduced. The correlation coefficient with the channel mismatch error is obtained by a statistical signal model of extended scene. The influence of channel mismatch error on the InSAR phase deviation and variance is analyzed. Finally, a ground-based hardware-in-loop simulation is carried out to study the actual radar channel mismatch error impact on the InSAR performance. The simulation results are concordant with the theoretical analysis, which validate the correctness of the influence analysis of the channel mismatch error.

**Key words:** InSAR; Channel mismatch error; Performance analysis; Hardware-in-loop simulation

### 1 引言

单航过 InSAR 系统不存在重复轨道 InSAR 系统时间去相干和成图率低的问题,是实现全球高精度地形测绘的一种有效手段<sup>[1]</sup>,但其雷达设备收发分置的特点也带来时间、相位和空间三同步<sup>[1,2]</sup>、基线测量<sup>[3]</sup>和通道不一致<sup>[4]</sup>等需要解决的问题。雷达通道非理想特性不但会恶化分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比等 SAR 成像性能指标<sup>[5]</sup>,还会带来 SAR 图像域相位误差,进而引起 InSAR 干涉相位偏差,同时幅相不一致也会降低 InSAR 相干性,增大干涉相位标准差<sup>[4]</sup>,最终降低 InSAR 测高性能<sup>[6]</sup>。

文献[5]从通道非理想特性对 SAR 成像的影响出发,给出幅度误差优于 0.9 dB,相位误差优于 10°的工程实现建议。但很少有文献针对 InSAR 测高应用,来讨论通道非理想特性的影响<sup>[2,3,7]</sup>。本文首先建立干涉信号模型和通道幅度与相位不一致性模型,

得到通道不一致引起的相干系数,然后分析了通道不一致对干涉相位偏差和标准差的影响,最后给出数值分析和半实物仿真试验结果。

### 2 信号模型

与采用点目标成像模型分析 SAR 脉冲压缩响应的聚焦性能不同<sup>[5,8]</sup>,InSAR 干涉相位是随机信号,只能采用面目标统计信号模型,从对干涉相位偏差和标准差两个方面的影响进行分析。

考虑主星带两颗编队小卫星的一般性情况,以  $(x_0, y_0)$  为中心同一个分辨单元对应的两个小卫星 SAR 图像  $S_1, S_2$  为<sup>[9]</sup>

$$S_k = \exp\left[-j2\pi \frac{r_{B_k}(y_0)}{\lambda}\right] \iint \sigma_b(x_0 + \mu, y_0 + \nu) \cdot \exp(j2\pi f_{X_k} \mu) \exp(j2\pi f_{Y_k} \nu) \cdot h_{x_k}(\mu) h_{y_k}(\nu) d\mu d\nu + n_k \quad (1)$$

其中  $k = \{1, 2\}$ ,  $r_{B_k}(y_0)$  为主星波束中心穿越散射元时小卫星  $k$  对应的双站斜距,  $\lambda$  为波长,  $\sigma_b$  为散射系数,  $\mu, \nu$  为积分变量,  $f_{X_k} = (f_{D_{c0}} + f_{D_{c_k}})/2V$ ,  $f_{Y_k} =$

2011-02-14 收到, 2011-07-22 改回

\*通信作者: 何志华 skynismile@163.com

$-(\sin \theta + \sin \theta_k)/\lambda$  分别表示双基地下的方位向和距离向中心波数, 其变量含义可参见文献[9];  $h_{x_k}(\mu), h_{y_k}(\nu)$  分别表示方位向和距离向 SAR 系统从散射系数到 SAR 图像的冲激响应, 为 sinc 型函数<sup>[9]</sup>;  $n_k$  表示噪声。假设地面散射系数  $\sigma_b(x, y)$  是分布均匀的白噪声<sup>[9]</sup>

$$\langle \sigma_b(x, y) * \sigma_b^*(x', y') \rangle = \sigma_0^2 \delta(x - x') \delta(y - y') \quad (2)$$

其中  $\sigma_0^2$  为分辨单元平均散射系数。并假设 SAR 图像噪声与信号不相关, 则两幅 SAR 图像同一像素点的复相干为

$$\begin{aligned} \langle S_1 S_2^* \rangle &= \sigma_0^2 \exp \left[ -j2\pi \frac{r_{B_1}(y_0) - r_{B_2}(y_0)}{\lambda} \right] \\ &\cdot \int h_{x_1}(\mu) h_{x_2}^*(\mu) \exp(j2\pi \Delta f_X \mu) d\mu \\ &\cdot \int h_{y_1}(\nu) h_{y_2}^*(\nu) \exp(j2\pi \Delta f_Y \nu) d\nu \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $\Delta f_X = f_{X_1} - f_{X_2}$ ,  $\Delta f_Y = f_{Y_1} - f_{Y_2}$  分别表示方位向和距离向频偏, 由干涉基线引起, 式(3)前面部分为干涉有用相位, 后面是方位向和距离向与 SAR 系统传递函数有关的两个积分。

根据 SAR 系统的特点, SAR 接收机幅相特性仅影响距离向传递函数, 由于方位向传递函数由天线方位向决定, 方位向不存在幅相误差, 若不考虑由斜距差异引起的干涉相位, 即  $r_{B_1}(y_0) = r_{B_2}(y_0)$ , 则由通道幅相误差引起的复相干可简化为

$$\langle S_1 S_2^* \rangle = \sigma_0^2 \int h_{y_1}(\nu) h_{y_2}^*(\nu) \exp(j2\pi \Delta f_Y \nu) d\nu \quad (4)$$

不妨将通道间幅相不一致性误差归结到小卫星 2 的接收通道, 即

$$\begin{aligned} \text{FT}(h_{y_1}(\nu)) &= H_{Y_1}(f_\nu) = \text{rect}(f_\nu/B_\nu) \\ \text{FT}(h_{y_2}(\nu)) &= H_{Y_2}(f_\nu) \\ &= H_{Y_1}(f_\nu) \Delta A(f_\nu) \exp(j\Delta\psi(f_\nu)) \\ &= \text{rect}(f_\nu/B_\nu) \Delta A(f_\nu) \exp(j\Delta\psi(f_\nu)) \quad (5) \end{aligned}$$

其中 FT(·) 表示傅里叶变换,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形函数,  $f_\nu$  为距离频率变量,  $B_\nu$  为接收机带宽,  $\Delta A(f_\nu)$  为通道间幅度一致性误差,  $\Delta\psi(f_\nu)$  为通道间相位一致性误差, 在对大量实测雷达通道特性分析的基础上, 采用多项式模型对系统相频特性非周期部分, 用谐波模型对系统幅频特性和剩余高次相频特性进行建模

$$\Delta A(f_\nu) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\tilde{c}_1 2\pi f_\nu + \tilde{\phi}_1) \quad (6)$$

$$\Delta\psi(f_\nu) = \sum_{m=0}^M K_m f_\nu^m + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\tilde{c}_2 2\pi f_\nu + \tilde{\phi}_2) \quad (7)$$

式中  $a_0$  为系统增益,  $a_n$  为各次谐波幅度,  $\tilde{\phi}_1, \tilde{\phi}_2$  为谐波初相, 反映某些系统幅相特性不对称特性,  $\tilde{c}_1,$

$\tilde{c}_2$  为与系统带宽有关的常数。通常情况下, 一个谐波项和三阶多项式就能够较好地描述系统幅相特性, 用峰峰值定量描述谐波项误差, 用二(三)阶多项式带内最大相位即二(三)次相位一致性误差定量描述相频特性非周期项误差。

不妨假定距离向谱偏  $\Delta f_Y$  为正数, 将式(5)代入式(4)得到相干系数为<sup>[10]</sup>

$$\gamma = \frac{\langle S_1 S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_2 S_2^* \rangle}} = \frac{p}{\sqrt{q_1 q_2}} \quad (8)$$

$$p = \int_{\Delta f_Y - B_\nu/2}^{B_\nu/2} \Delta A(f_\nu) \exp(-j\Delta\psi(f_\nu)) df_\nu \quad (9)$$

$$q_1 = (1 + \text{SNR}_1^{-1})(B_\nu - \Delta f_Y) \quad (10)$$

$$q_2 = (1 + \text{SNR}_2^{-1}) \int_{\Delta f_Y - B_\nu/2}^{B_\nu/2} \Delta A^2(f_\nu) df_\nu \quad (11)$$

式中  $\text{SNR}_1, \text{SNR}_2$  为干涉通道信噪比, 式(10)的  $-\Delta f_Y$  和式(11)中的积分区间为公共频谱部分, 即信号经过距离向预置滤波时的情形, 这样设定隔离了基线引起的去相关因素。

### 3 对干涉相位偏差的影响分析

根据相干系数, 由雷达幅相不一致性误差引起的偏差  $\phi_0$  为<sup>[10]</sup>

$$\phi_0 = \arg(\gamma) = \arg(p) \quad (12)$$

考虑到  $\Delta f_Y \ll B$ , 通道幅度和奇次相位一致性误差对应式(9)的虚部为零, 对干涉相位偏差无影响, 而由偶次相位一致性误差引入的干涉相位偏差为<sup>[4]</sup>

$$\gamma_n = \arctan \left( \frac{\int_0^{\sqrt{\Delta P_n}} \sin(x^n) dx}{\int_0^{\sqrt{\Delta P_n}} \cos(x^n) dx} \right) \quad (13)$$

其中  $n = 2, 4, \dots$ ,  $\Delta P_n$  表示  $n$  次相位一致性误差。在积分上限  $\sqrt{\Delta P_n} \ll 1$  的情况下, 利用泰勒近似得到偏差的近似解为

$$\gamma_n \approx \frac{1}{n+1} \Delta P_n + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)! (2k+1)n+1} (\Delta P_n)^{2k+1} \quad (14)$$

可见, 二次相位一致性误差  $\Delta P_2$  是影响干涉相位的主要因素, 引入的固定干涉相位偏差近似为  $\Delta P_2/3$ 。

### 4 对干涉相位标准差的影响分析

由雷达通道间幅相不一致性误差引起的标准差  $\sigma_\phi$  可由相关系数幅度  $|\gamma|$  求得, 假设  $\text{SNR}_2 = \text{SNR}_1$ , 由式(8), 仅存在幅度一致性误差时,

$$|\gamma| = \frac{\int_{\Delta f_Y - B_\nu/2}^{B_\nu/2} \Delta A(f_\nu) df_\nu}{(1 + \text{SNR}_1^{-1}) \sqrt{B_\nu \int_{-B_\nu/2}^{B_\nu/2} \Delta A^2(f_\nu) df_\nu}} \quad (15)$$

仅存在相位一致性误差时，

$$|\gamma| = \frac{\left| \int_{\Delta f_{\nu} - B_{\nu}/2}^{B_{\nu}/2} \exp\{-j\Delta\psi(f_{\nu})\} df_{\nu} \right|}{(1 + \text{SNR}_1^{-1})B_{\nu}} \quad (16)$$

由相关系数幅度，可按如下理论公式计算干涉相位标准差，当视数  $N_L = 1$  时<sup>[11]</sup>，

$$\sigma_{\phi} = \left\{ \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin(|\gamma|) + \arcsin^2(|\gamma|) - \frac{Li_2(|\gamma|^2)}{2} \right\}^{1/2} \quad (17)$$

当视数  $N_L \geq 4$  时，可用式(18)近似公式计算<sup>[11]</sup>。

$$\sigma_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{2N_L}} \frac{\sqrt{(1-\gamma^2)}}{\gamma} \quad (18)$$

## 5 仿真分析

### 5.1 数值仿真分析

由于 InSAR 系统使用的基线长度远小于极限基线，谱偏远小于带宽，一般不用考虑谱偏对相关系数的影响。根据以上分析，采用数值仿真方法分析通道幅相一致性误差对干涉相位偏差  $\phi_0$  和标准差  $\sigma_{\phi}$  的影响。

只有通道间偶次相位一致性误差对干涉相位偏差有影响，影响曲线如图 1 所示。在不同视数  $N_L$  和信噪比条件下，幅度一致性误差、二次和三次相位一致性误差对干涉相位标准差的影响如图 2-图 4

所示，由幅相不一致误差引起的干涉相位误差总结如表 1 所示，可见二次相位一致性误差对干涉相位偏差影响最大，三次相位一致性误差对干涉相位标准差影响最大。在幅度一致性误差为 1 dB，二次和三次相位一致性误差分别为  $10^\circ$  和  $-10^\circ$ ，处理视数取 9 视的典型情况下，由通道幅相一致性误差引起的干涉相位偏差为  $2.9^\circ$ ，标准差为  $1.6^\circ$ 。

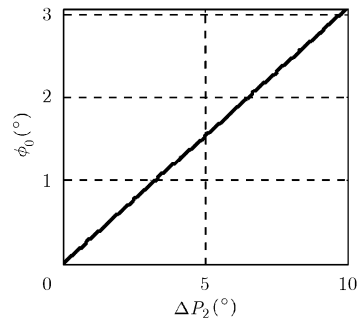


图 1 二次相位一致性误差引起的干涉相位偏差

### 5.2 半实物仿真分析

通过系统级半实物仿真试验验证实际雷达通道一致性误差对干涉测高性能的影响。地面半实物仿真系统通过集成 InSAR 主辅雷达设备及其它关键实物样机，利用雷达信号模拟器在地面构建回波生成-数据处理-性能评估半实物仿真大环路，能够逼真地评估 InSAR 系统通道一致性误差等误差源对干

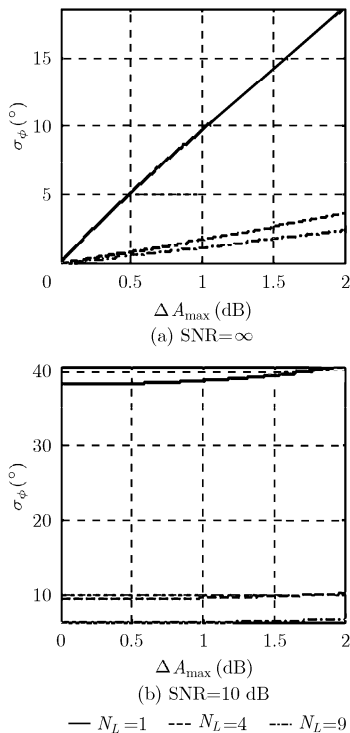


图 2 幅度一致性误差引起的干涉相位标准差

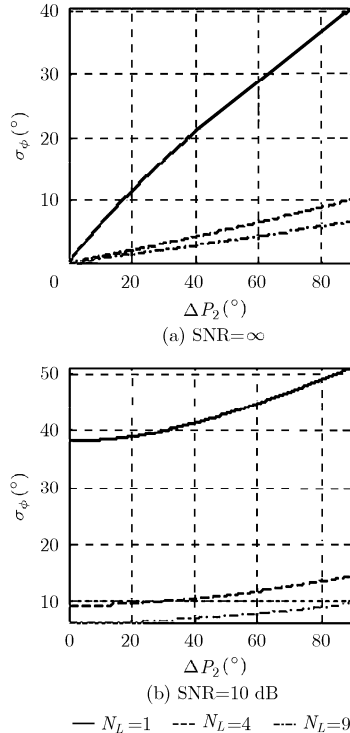


图 3 二次相位一致性误差引起的干涉相位标准差

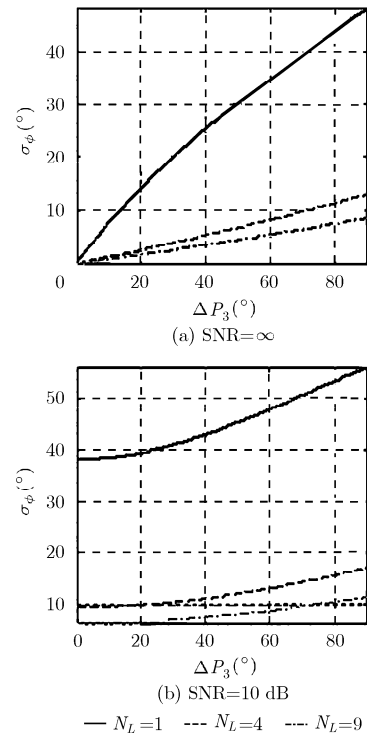


图 4 三次相位一致性误差引起的干涉相位标准差

表1 幅相不一致性单因素误差对 InSAR 干涉相位的影响

误差因素	偏差	标准差
通道间幅度误差	无	2 dB 内小于 3°
二次相位一致性误差	$\Delta P_2/3$	90°内小于 7°
三次相位一致性误差	无	90°内小于 9°

涉测高的影响<sup>[4]</sup>。仿真参数依据 TanDEM-X 系统<sup>[1]</sup>, 取中等波位、中等基线 InSAR 构形, 选取 3 km×3 km 平地+标志点场景。设置了主主通道和主辅通道两组干涉对比试验, 后者多出通道不一致误差源, 通过试验对比可得到通道不一致对 InSAR 性能的

影响。实测雷达回波主主通道和主辅通道的幅相特性如图 5 所示, 通道一致性误差指标如表 2 所示, 其中, 幅度一致性误差为 1.33 dB, 二次和三次相位一致性误差分别为 8.54°和-6.83°。半实物试验最终评估结果如表 3 所示。由试验评估结果, 雷达通道不一致引起的干涉相位偏差为  $2.7068^\circ - 0.1812^\circ = 2.53^\circ$ , 与理论分析  $\Delta P_2/3 = 2.85^\circ$  基本一致; 引起的相干性损失为  $0.94365/0.95146 = 0.99179$ , 引起的干涉相位偏差为  $\sqrt{0.8950^2 - 0.8039^2} = 0.4^\circ$ , 最终引入的干涉相对测高精度损失为  $\sqrt{0.0311^2 - 0.0243^2} = 0.02 \text{ m}$ 。

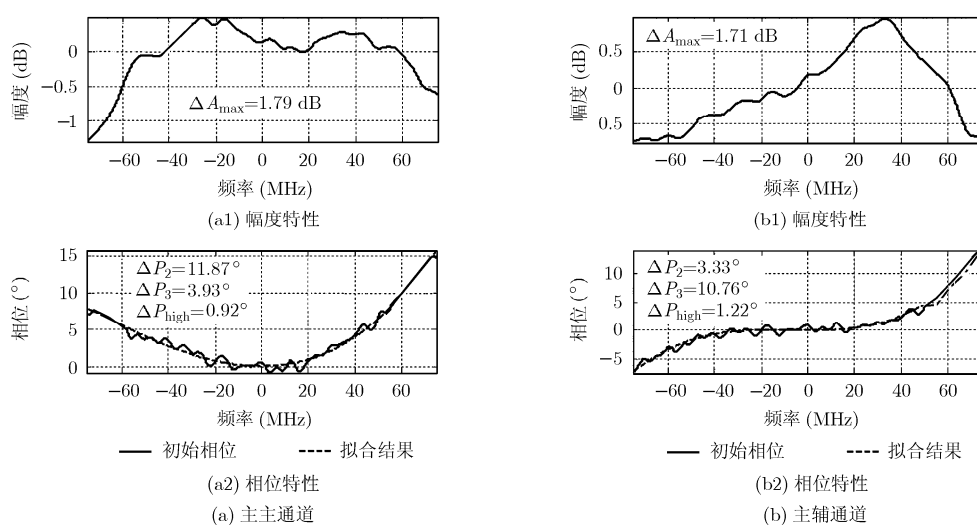


图5 雷达通道实测特性

表2 通道一致性误差指标

指标	主主通道	主辅通道	一致性误差
幅度误差峰峰值(dB)	1.79	1.71	1.33
二次相位误差(°)	11.87	3.33	8.54
三次相位误差(°)	3.93	10.76	-6.83
高次相位误差峰峰值(°)	0.92	1.22	0.89

表3 半实物试验评估结果

评估指标	雷达主主通道	雷达主辅通道
相干系数	0.95146	0.94365
干涉相位均值(°)	0.1812	2.7068
干涉相位标准差(°)	0.8039	0.8950
相对测高精度(m)	0.0243	0.0311

## 6 结论

从上面的理论分析和半实物仿真试验结果可

知, 雷达通道幅度和相位一致性误差不但引起干涉相位偏差, 还会降低相干性, 引起干涉相位标准差, 最终导致干涉测高精度损失。在雷达典型 1 dB/10° 的幅相一致性误差下, 引起干涉相位偏差约为 3°, 干涉测高精度损失为 0.02 m, 这已与时间、相位同步等误差源的影响处于同一量级。为使雷达通道误差对干涉测高的影响可忽略, 建议工程上通过校准将雷达通道特性提高一个数量级至 0.1 dB/1°。

## 参考文献

- [1] Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3317-3341.
  - [2] 张永胜, 梁甸农, 孙造宇, 等. 时间同步误差对星载寄生式 InSAR 干涉相位的影响分析[J]. *宇航学报*, 2007, 28(2): 370-374.
- Zhang Yong-sheng, Liang Dian-nong, Sun Zao-yu, et al. Effect of time synchronization error on interferometric phase

- of spaceborne parasitic InSAR system [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(2): 370-374.
- [3] Wang Bing-nan, Zhang Fan, and Xiang Mao-sheng. Influence of baseline oscillations on SAR interferometric phase [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(6): 1171-1181.
- [4] He Zhi-hua, He Feng, Huang Hai-feng, *et al.* Influence of channel mismatch on interferometric SAR performance and experiment validation [C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 2010: 1110-1113.
- [5] 刘光炎, 胡学成, 林幼权. 通道不一致性对 SAR 成像质量的影响[J]. *现代雷达*, 2009, 31(7): 42-45.  
Liu Guang-yan, Hu Xue-cheng, and Lin You-quan. Impact of channel difference on SAR image quality[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(7): 42-45.
- [6] 张永胜, 黄海风, 梁甸农, 等. 星载分布式 InSAR 测高性能的理论及系统仿真评价方法[J]. *电子学报*, 2008, 36(7): 1273-1278.  
Zhang Yong-sheng, Huang Hai-feng, Liang Dian-nong, *et al.* Theoretic and simulation experimental performance evaluation methods of spaceborne distributed InSAR system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(7): 1273-1278.
- [7] 张伟华, 邹芳, 张文明, 等. 通道间幅度相位不一致对干涉仪测向的影响和解决方法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(5): 1240-1242.  
Zhang Wei-hua, Zou Fang, Zhang Wen-ming, *et al.* Influence of difference of amplitude and phase between channels to interferometer receiver and its solution method [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1240-1242.
- [8] 张群英, 杨学贤. LFM 信号误差对 SAR 成像的影响分析[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(2): 229-234.  
Zhang Qun-ying and Yang Xue-xian. Effect of LFM error on the image of SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(2): 229-234.
- [9] 何峰, 梁甸农, 刘建平. 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[J]. *国防科技大学学报*, 2005, 27(3): 72-76.  
He Feng, Liang Dian-nong, and Liu Jian-ping. The analysis of signal model and performance for spaceborne parasitic InSAR relative height measurement [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(3): 72-76.
- [10] Just D and Bamler R. Phase statistics of interferograms with application to synthetic aperture radar [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4361-4368.
- [11] Bamler R and Hartlz P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): 1-51.
- 何志华: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 系统仿真与信号处理.
- 何峰: 男, 1976 年生, 副研究员, 研究方向为新体制 SAR 系统与信号处理.
- 黄海风: 男, 1976 年生, 副研究员, 研究方向为干涉 SAR、分布式 SAR 系统理论.
- 梁甸农: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为超宽带雷达、分布式小卫星雷达系统理论.