

文章编号:2095-6134(2015)06-0783-07

机载三基线干涉合成孔径雷达的系统参数估计*

马 萌^{1,2†}, 李道京¹, 潘舟浩³, 杜剑波^{1,2}

(1 中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 中国电子科学研究院, 北京 100041)
(2014 年 12 月 5 日收稿; 2015 年 4 月 24 日收修改稿)

Ma M, Li D J, Pan Z H, et al. System parameter estimation for airborne interferometric synthetic aperture radar with three-baseline[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015,32(6):783-789.

摘 要 针对机载刚性三基线干涉合成孔径雷达的应用需求,在存在干涉相位噪声的情况下,研究基于 2 个地面控制点估计系统基线倾角和干涉相位偏差的问题,分析干涉相位噪声对参数估计精度的影响,提出一种三基线联合参数估计方法.使用牛顿法求解系统参数估计方程,根据不同基线的高程测量精度,对目标函数进行加权处理,并使用不同基线得到的高程差来评价参数估计效果.仿真结果表明,相比于传统的单基线参数估计方法,该方法具有较高的参数估计精度.

关键词 干涉合成孔径雷达;系统参数估计;机载三基线

中图分类号:TN957 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2015.06.009

System parameter estimation for airborne interferometric synthetic aperture radar with three-baseline

MA Meng^{1,2}, LI Daojing¹, PAN Zhouhao³, DU Jianbo^{1,2}

(1 Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract This work investigated the parameter estimation problem for airborne interferometric synthetic aperture radar with rigid three-baseline. The considered system parameters are baseline orientation angle and interferometric phase offsets. So the least number of ground control points can be reduced to two. The effect of phase noise on the estimation accuracy is analyzed and a novel method called three-baseline union parameter estimation is proposed. The proposed method employed Newton optimal algorithm to solve the nonlinear estimation equations and used weighting process to deal with elevation accuracy difference of each baseline. Elevation difference between any two baselines is used to evaluate the efficiency of parameter estimation method. Simulation results indicate that the proposed method can obtain higher estimation accuracy than the conventional single baseline parameter estimation method.

* 国家自然科学基金(61271422)资助
† 通信作者, E-mail: mameng_ee@163.com

Key words interferometric synthetic aperture radar; system parameter estimation; airborne three-baseline

系统干涉参数估计是干涉合成孔径雷达 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 系统获得高精度数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 的基础^[1]. 经典的参数估计方法主要基于求解敏感度方程^[2], 该方法需在定标场合理地布设足够多的地面控制点 (ground control point, GCP), 以提供地面真实高程信息. 在实际应用中, 常常使用角反射体定标器作为 GCP, 而布设与管理多个定标器需要耗费大量的人力和物力, 减少定标器数量对促进 InSAR 系统的广泛应用具有重要意义. 由于受到干涉相位噪声和 GCP 高程测量误差的影响, 该方法得到的系统参数存在误差. 为提高系统参数估计的抗噪性能, 王彦平等^[3]研究定标器的布设问题; 为减少 GCP 数量, 李品等^[4]研究基于高程差的定标方法; Mao 等^[5]研究不同条带间的联合定标方法; Yun 等^[6]研究借助外 DEM 的定标方法. 这些研究给单基线 InSAR 系统参数估计提供了指导.

近几年, 多基线 InSAR 系统的研究得到了广泛关注, 相关报道主要侧重于相位解缠^[7-8]和解叠掩^[9-10]两方面, 而对多基线 InSAR 系统参数估计的研究不多. 对于多基线 InSAR 系统, 其基线参数与干涉相位满足固有的关系, 在系统参数估计过程中应给予考虑和利用, 且多基线系统能够对同一场景获得多幅高程图, 增加了观测量, 这有望在使用较少 GCP 的情况下实现系统参数的高精度估计. 潘舟浩^[11]研究毫米波机载三基线 InSAR 系统参数估计问题, 提出一种三基线联合校正方法. 该方法首先对高程精度高的长基线进行系统参数估计, 然后利用系统参数间关系对短基线进行参数估计, 相当于逐个进行单基线参数估计, 未能充分利用三基线高程信息.

本文在文献[11]的基础上, 使用三基线系统

参数间的关系, 提出基于牛顿法的三基线联合参数估计方法; 考虑到参数估计受干涉相位噪声的影响, 在求解方程中进行加权处理; 通过仿真, 验证了该方法相比于传统的单基线参数估计方法, 具有较高的参数估计精度.

1 基于牛顿法的三基线 InSAR 系统参数估计

图 1 给出机载刚性三基线 InSAR 系统几何模型, 其中 T_1 、 T_2 和 T_3 代表 3 个天线, 形成 3 条不同长度的基线, 基线长度分别为 b_1 、 b_2 和 b_3 . H 表示 T_1 相对于参考平面的高度, 目标点 P 的高程为 h , r_1 、 r_2 和 r_3 分别为 P 到 3 天线的斜距. θ_1 和 θ_2 分别为天线 T_1 和 T_2 的入射角, β_1 和 β_2 分别为基线与斜距 r_1 和 r_2 视线的夹角, α 为基线倾角. 由于采用刚性三基线, 三基线的基线倾角均为 α . 系统采用一发三收的工作模式, T_1 发射, T_1 、 T_2 和 T_3 同时接收.

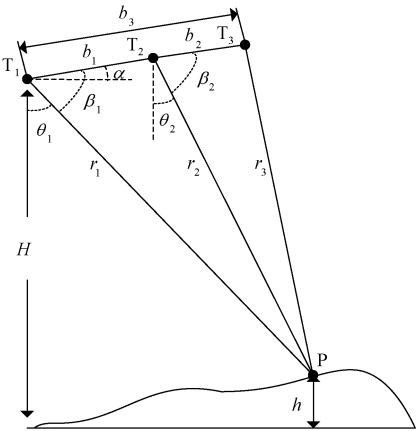


图 1 三基线 InSAR 系统几何模型
Fig. 1 Geometric model of InSAR system with three-baseline

对于 3 条基线, 对应的球面波模型下的高程反演公式^[12]为:

$$\begin{cases} h_1(l) = H - r_1 \cos \left\{ \alpha + \arcsin \left[\frac{b_1}{2r_1} - \frac{\lambda \varphi_1(l)}{2\pi b_1} - \frac{\lambda^2 \varphi_1^2(l)}{8\pi^2 r_1 b_1} \right] \right\} \\ h_2(l) = H - r_2 \cos \left\{ \alpha + \arcsin \left[\frac{b_2}{2r_2} - \frac{\lambda \varphi_2(l)}{2\pi b_2} - \frac{\lambda^2 \varphi_2^2(l)}{8\pi^2 r_2 b_2} \right] \right\} + b_1 \sin(\alpha), \\ h_3(l) = H - r_3 \cos \left\{ \alpha + \arcsin \left[\frac{b_3}{2r_3} - \frac{\lambda \varphi_3(l)}{2\pi b_3} - \frac{\lambda^2 \varphi_3^2(l)}{8\pi^2 r_3 b_3} \right] \right\} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\varphi_i(l) (i = 1, 2, 3)$ 表示空间采样点 l 处基线 b_i 解缠后的干涉相位, λ 为发射电磁波波长. 系统采用刚性基线时基线长度可以看作已知值, 斜距和平地高程偏差可通过对比 GCP 的位置和高程获得, 因此系统参数估计可简化为对基线倾角与干涉相位偏差的估计. 基线倾角偏差主要由位置和姿态测量系统 (position and orientation system, POS) 初始安装偏差

产生, 干涉相位偏差主要由不同接收通道相位不一致产生, 二者可视为常数. 设基线倾角偏差为 α_e , 基线 $b_i (i = 1, 2, 3)$ 对应的干涉相位偏差为 φ_{ei} , 由于干涉相位为 3 个天线复图像的相位两两作差得到, 因此 3 个干涉相位偏差具有以下关系

$$\varphi_{e1} + \varphi_{e2} = \varphi_{e3}, \quad (2)$$

由 1 个 GCP 的高程测量值 $h_r(l)$ 可得到方程组:

$$\begin{cases} h_r(l) = H - r_1 \cos \left\{ \alpha + \alpha_e + \arcsin \left[\frac{b_1}{2r_1} - \frac{\lambda [\varphi_1(l) + \varphi_{e1}]}{2\pi b_1} - \frac{\lambda^2 [\varphi_1(l) + \varphi_{e1}]^2}{8\pi^2 r_1 b_1} \right] \right\} \\ h_r(l) = H - r_2 \cos \left\{ \alpha + \alpha_e + \arcsin \left[\frac{b_2}{2r_2} - \frac{\lambda [\varphi_2(l) + \varphi_{e2}]}{2\pi b_2} - \frac{\lambda^2 [\varphi_2(l) + \varphi_{e2}]^2}{8\pi^2 r_2 b_2} \right] \right\} + b_1 \sin(\alpha + \alpha_e), \quad (3) \\ h_r(l) = H - r_1 \cos \left\{ \alpha + \alpha_e + \arcsin \left[\frac{b_3}{2r_1} - \frac{\lambda [\varphi_3(l) + \varphi_{e3}]}{2\pi b_3} - \frac{\lambda^2 [\varphi_3(l) + \varphi_{e3}]^2}{8\pi^2 r_1 b_3} \right] \right\} \end{cases}$$

当使用 L 个 GCP 进行系统参数估计, 则可得到方程组:

$$\begin{cases} h_r(1) = F_1(\varphi_1(1); \alpha_e, \varphi_{e1}) \\ \vdots \\ h_r(L) = F_1(\varphi_1(L); \alpha_e, \varphi_{e1}) \\ h_r(1) = F_2(\varphi_2(1)); \alpha_e, \varphi_{e2} \\ \vdots \\ h_r(L) = F_2(\varphi_2(L); \alpha_e, \varphi_{e2}) \\ h_r(1) = F_3(\varphi_3(1); \alpha_e, \varphi_{e3}) \\ \vdots \\ h_r(L) = F_3(\varphi_3(L); \alpha_e, \varphi_{e3}) \end{cases}, \quad (4)$$

其中, $F_i(\varphi_i(k); \alpha_e, \varphi_{ei}) (i = 1, 2, 3)$ 表示式(3)中等式右端基线 b_i 对应的参数估计等式. 式(4)可简化为

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_r \\ h_r \\ h_r \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

其中

$$F_i = \begin{bmatrix} F_i(\varphi_i(1); \alpha_e, \varphi_{ei}) \\ \vdots \\ F_i(\varphi_i(L); \alpha_e, \varphi_{ei}) \end{bmatrix}, h_r = \begin{bmatrix} h_r(1) \\ \vdots \\ h_r(L) \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} (i = 1, 2, 3).$$

本文待估计的系统参数为基线倾角偏差和 2 个干涉相位偏差, 共 3 个待估参数, 而每个 GCP 点能够建立 2 个有效方程, 因此至少需要 2 个

GCP 提供真实高程信息.

对式(5)的非线性方程组进行求解, 由于无法得到解析解, 本文采用最优化方法中的牛顿法进行迭代求解. 牛顿法使用泰勒级数展开将高阶函数进行线性近似, 通过迭代的方法逐渐逼近方程的真实解. 使用牛顿法对星载重轨 InSAR 进行系统参数估计的研究工作已有文献报道^[13]. 根据牛顿法可得到求解式(5)的迭代递推公式^[14]为

$$\begin{bmatrix} \varphi_{e1}^{k+1} \\ \varphi_{e2}^{k+1} \\ \alpha_e^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{e1}^k \\ \varphi_{e2}^k \\ \alpha_e^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\varphi_{e1}^k \\ \Delta\varphi_{e2}^k \\ \Delta\alpha_e^k \end{bmatrix}, \quad (a)$$
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1^k}{\partial \varphi_{e1}} & \mathbf{0} & \frac{\partial F_1^k}{\partial \alpha_e} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial F_2^k}{\partial \varphi_{e2}} & \frac{\partial F_2^k}{\partial \alpha_e} \\ \frac{\partial F_3^k}{\partial \varphi_{e3}} & \frac{\partial F_3^k}{\partial \varphi_{e3}} & \frac{\partial F_3^k}{\partial \alpha_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varphi_{e1}^k \\ \Delta\varphi_{e2}^k \\ \Delta\alpha_e^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_r \\ h_r \\ h_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_1^k \\ F_2^k \\ F_3^k \end{bmatrix}, \quad (b)$$
$$(6)$$

其中, 上标 k 表示第 k 次迭代后得到的结果. 式(6)中的方程(b)为超定方程, 通常采用求伪逆的方法对其求解. 采用式(6)进行迭代运算, 当 GCP 的反演高程误差小于设定值或是方程求解的系统参数更新量小于设定值时停止迭代, 认为已得到准确的系统参数. 值得注意的是, 式(6)也可对单个基线进行求解, 此时方程(b)即为 InSAR 系统干涉定标中所说的敏感度方程.

在实际应用中, 系统参数的真值未知, 只能通过 GCP 处的高程反演情况来判断系统参数估计

的准确性;而对于三基线 InSAR 系统,当系统参数估计准确时,三基线反演的高程图应一致,因此可以通过三基线高程的一致性来评价参数估计效果^[11]. 本文采用两两基线高程间的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为评定标准, RMSE 计算公式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_l [h_i(l) - h_j(l)]^2} \quad (i, j = 1, 2, 3; i \neq j), \quad (7)$$

其中, N 表示统计的采样点个数.

2 干涉相位噪声下三基线 InSAR 系统参数估计

在实际应用中,由于接收机相位噪声的存在和干涉相位滤波处理的能力有限,系统得到的干涉相位总是有误差的,这将造成系统参数估计不准确. 对于式(6)中的方程(b),在存在误差的情况下,方程组的求解结果与左端系数矩阵的条件数相关,且条件数越大则方程数值稳定性越差^[15]. 目前,改善方程(b)条件数的方法通常是合理地布置足够多的 GCP^[3]. 当采用 2 个 GCP 时,这 2 个 GCP 应布设在距离向的近端与远端,并使二者的间距尽可能大.

对于刚性三基线 InSAR 系统,系统同时得到三基线的干涉相位图,且系统参数间满足固有关系,即在少未知数的情况下提供了更多的参数估计信息,这给改善方程(b)的条件数,提高干涉相位噪声下系统参数估计精度提供了条件. 而对于不同长度的基线,在相同程度的干涉相位噪声影响下得到的高程精度不同,这就需要对方程(b)进行改进,进行加权处理以合理利用三基线高程信息. 为使问题简化,本文假设三基线干涉相位存在随机噪声,且 3 个干涉相位随机噪声相互独立,并服从均值为 0,标准差为 σ_p 的高斯分布. 设三基线的高程精度分别为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 , 根据文献^[16]推导可得

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\partial h_1}{\partial \varphi_1} \sigma_p = -\frac{\lambda r_2 \sin \theta_1 \csc \beta_1}{2\pi b_1} \sigma_p \\ \sigma_2 = \frac{\partial h_2}{\partial \varphi_2} \sigma_p = -\frac{\lambda r_3 \sin \theta_2 \csc \beta_2}{2\pi b_2} \sigma_p \\ \sigma_3 = \frac{\partial h_3}{\partial \varphi_3} \sigma_p = -\frac{\lambda r_3 \sin \theta_1 \csc \beta_1}{2\pi b_3} \sigma_p \end{cases} \quad (8)$$

当斜距远大于基线长度时,有 $r_2 \approx r_3$, $\theta_1 \approx \theta_2$ 和 $\beta_1 \approx \beta_2$, 可以得到

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 \approx \frac{1}{b_1} : \frac{1}{b_2} : \frac{1}{b_3}, \quad (9)$$

使用加权最小二乘的方法对式(6)中方程组(b)进行加权处理,设三基线对应权值分别为 w_1 、 w_2 和 w_3 , 则

$$w_1 : w_2 : w_3 = \frac{1}{\sigma_1} : \frac{1}{\sigma_2} : \frac{1}{\sigma_3} \approx b_1 : b_2 : b_3, \quad (10)$$

因此方程组可扩展为下式.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1^k}{\partial \varphi_{e1}} & 0 & \frac{\partial F_1^k}{\partial \alpha_e} \\ 0 & \frac{\partial F_2^k}{\partial \varphi_{e2}} & \frac{\partial F_2^k}{\partial \alpha_e} \\ \frac{\partial F_3^k}{\partial \varphi_{e3}} & \frac{\partial F_3^k}{\partial \varphi_{e3}} & \frac{\partial F_3^k}{\partial \alpha_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varphi_{e1}^k \\ \Delta \varphi_{e2}^k \\ \Delta \alpha_e^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \left(- \begin{bmatrix} F_1^k \\ F_2^k \\ F_3^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_r \\ h_r \\ h_r \end{bmatrix} \right), \quad (11)$$

其中

$$w_1 = w_1 \mathbf{I}_{L \times L}, w_2 = w_2 \mathbf{I}_{L \times L}, w_3 = w_3 \mathbf{I}_{L \times L}.$$

使用式(11)代替式(6)中的原有方程,通过与第 1 节相同的迭代计算,即可得到对基线倾角与干涉相位偏差的估计值. 该方法与传统的单基线参数估计方法的估计精度将结合仿真结果在下一节中给出.

3 仿真结果

为验证系统参数估计方法的有效性并使问题简化,本文仿真在不考虑成像、图像配准与相位解缠等处理的条件下,直接根据干涉几何关系和地形高程获取干涉相位图,然后通过干涉处理得到高程数据. 以下结合一机载毫米波刚性三基线 InSAR 系统进行仿真,仿真用到的主要参数如表 1 所示. 仿真参数中基线长度的确定主要考虑到在实际应用中基线长度通常设计为互质的,以满足相位解缠的需要.

仿真场景设置为相对于参考平面高程为 0 m 的平地,场景中心有一半径为 25 m,相对平地高为 10 m 的圆锥. 场景真实的高程图如图 2(a) 所示,图中的 2 个三角标记表示 GCP 所在的位置,分别位于距离向的近端和远端,二者地间距为 980 m. 进行系统参数估计和校正前,使用表 1 中的参数反演高程,三基线得到的高程图分别为图 2(b)—图 2(d). 由于受到基线倾角偏差和干涉

相位偏差的影响,反演高程图中平地出现倾斜现象,且反演高程相对于高程真值误差较大.

表 1 三基线 InSAR 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of InSAR system with three-baseline			
载波频率/GHz	35	入射角/(°)	35
平台高度/m	3 000	参考平地高度/m	344
场景中心斜距/m	3 242	地距向幅宽/m	1 027
方位采样间隔/m	0.05	斜距采样间隔/m	0.25
参考基线倾角/(°)	0	基线倾角偏差/(°)	0.15
基线 1 长度/m	0.60	基线 1 干涉相位偏差/(°)	-60
基线 2 长度/m	0.40	基线 2 干涉相位偏差/(°)	30
基线 3 长度/m	1	基线 3 干涉相位偏差/(°)	-30
非 GCP 干涉相位		GCP 处干涉相位噪声标准	
噪声标准差/(°)	4	差/(°)	0.5

使用第 2 节中加权处理的方法进行系统参数

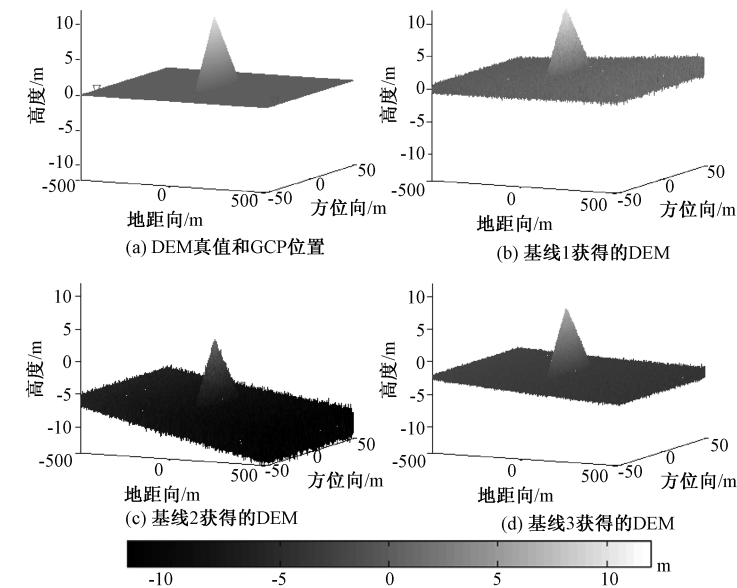


图 2 DEM 真值和参数估计与校正前的 3 基线 DEM

Fig. 2 DEM truth and DEM of each baseline before parameter estimation and correction

估计,迭代过程中若本次求解方程组得到的 2 个干涉相位偏差更新量均小于 0.1° 且基线倾角偏差更新量小于 0.001° 则停止迭代,停止迭代的阈值根据实际应用中系统参数的测量精度设定,阈值应小于测量精度. 为验证三基线联合参数估计的有效性,这里将联合估计和传统的单基线独立估计后的校正结果进行比较. 表 2 给出 2 种方法系统参数估计结果和不同基线高程间的 RMSE. 在参数校正后,三基线反演的 DEM 都较为准确,图 3 仅给出基线 3 的 DEM 结果. 可以看出,2 种方法估计得到的系统参数与反演的 DEM 都十分相近,而联合估计得到的系统参数更接近真值,且两两高程差较小,这验证了联合估计的有效性.

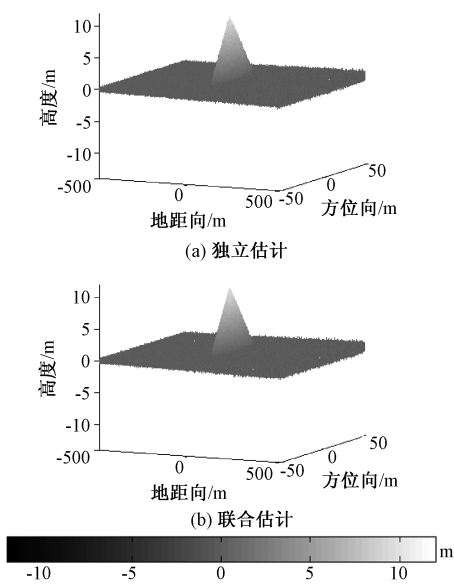


图 3 参数估计与校正后基线 3 的 DEM

Fig. 3 DEM of baseline 3 after parameter estimation and correction

表 2 参数估计结果与 DEM 的 RMSE

		估计结果/(°)				不同基线 DEM 的 RMSE/m		
		φ_{e1}	φ_{e2}	φ_{e3}	α_e	基线 1 和 2	基线 2 和 3	基线 1 和 3
参数估计与校正前		—	—	—	—	9.629 7	5.780 6	3.880 3
独立估计	基线 1	-62.559 4	—	—	0.158 0			
	基线 2	—	33.660 5	—	0.135 1	0.662 9	0.596 0	0.431 7
	基线 3	—	—	-34.613 0	0.156 9			
联合估计与校正		-61.827 9	28.761 1	-33.066 8	0.154 8	0.661 8	0.592 8	0.428 1

为了分析相位噪声对参数估计精度的影响,本文采用蒙特卡罗方法进行了 1 万次试验,每次试验更新干涉相位噪声,最后对所有的估计结果

进行统计. 图 4 与图 5 分别给出对 3 个相位偏差的估计误差和对基线倾角偏差的估计误差的统计直方图,表 3 给出以上参数的均值和标准差.

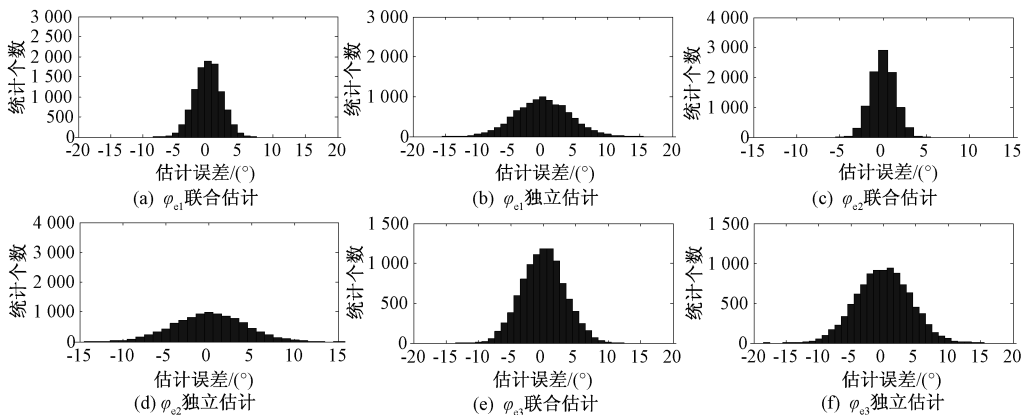


图 4 干涉相位偏差的估计误差

Fig. 4 Estimation error of interferometric phase offsets

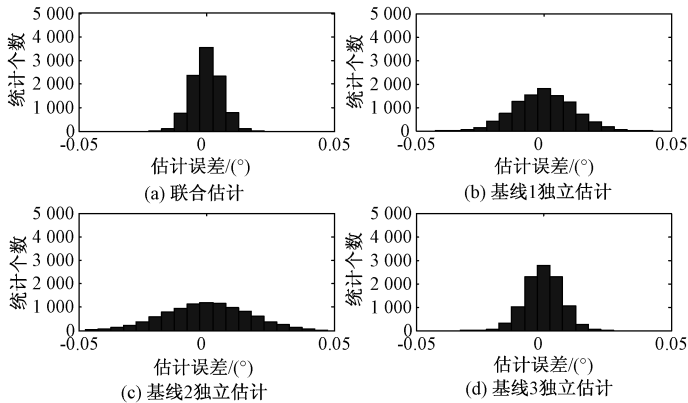


图 5 基线倾角偏差的估计误差

Fig. 5 Estimation error of baseline orientation angle offset

表 3 参数估计误差统计结果

Table 3 Statistic results of parameter estimation error

	均值/(°)				标准差/(°)			
	φ_{e1}	φ_{e2}	φ_{e3}	α_e	φ_{e1}	φ_{e2}	φ_{e3}	α_e
基线 1	-0.067 8	—	—	-1.868 9e-4	4.150 2	—	—	0.011 342
独立估计	—	0.062 2	—	2.339 6e-4	—	4.105 8	—	0.016 831
基线 3	—	—	0.042 6	6.986 2e-5	—	—	4.108 5	0.006 748
联合估计	0.016 4	0.012 6	0.029 0	5.084 6e-5	2.032 0	1.381 5	3.359 1	0.005 510

根据直方图和表 3 中的统计结果显示,各个参数的估计误差近似服从均值为 0 的高斯分布,使用三基线联合估计方法,估计误差的标准差小于单基线独立估计的结果,且基线越短,该现象越明显.联合估计误差的标准差较小,说明在相同的干涉相位噪声影响下,相比于独立估计,联合估计的精度更高,且在求解方程组中考虑了系统参数间的关系,避免了独立估计时基线倾角偏差不一致与干涉相位偏差不满足式(2)对应的物理关系的问题.

4 结束语

本文研究机载刚性三基线 InSAR 系统参数的估计问题,提出一种三基线联合参数估计方法,并通过仿真验证了在存在干涉相位噪声的情况下,该方法相比于传统的单基线系统参数估计方法能够获得更高的估计精度.

InSAR 系统获取地物高程的本质是在确定几何关系下实现对干涉相位测量.由于目前实际工作中 GCP 的高程精度只能到几个厘米,其高程误

差也可转化为干涉相位误差,本文在参数估计精度分析中主要考虑干涉相位噪声的影响,虽使问题简化,但从物理概念上讲也具有合理性.

从本文仿真结果看,对干涉相位偏差的估计精度约为 3.36° ,和 InSAR 系统设计的干涉相位测量精度相当(对应本文非 GCP 干涉相位噪声标准差).但值得注意的是,对基线倾角偏差的估计精度约为 0.005° ,低于目前 POSAV610 的精度水平.由于本文 GCP 的参数精度已很高,处理模型也较为理想,这说明 InSAR 系统参数间的耦合作用会制约其参数估计精度,要进一步提高系统参数估计精度,除研究新的 InSAR 定标方法外,对基线倾角偏差的估计还要综合考虑结构设计和机械安装因素.

参考文献

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88:333-382.
- [2] Mallorqui J J, Rosado I, Bara M. Interferometric calibration for DEM enhancing and system characterization in single pass SAR interferometry [C] // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International. IEEE, 2001: 404-406.
- [3] 王彦平,彭海良,云日升.机载干涉合成孔径雷达定标中的定标器布放[J].电子与信息学报,2004,26(1): 89-94.
- [4] 李品,王东进,陈卫东.基于定标器高程差的 InSAR 参数定标[J].中国科学院研究生院学报,2009,26(1): 91-96.
- [5] Mao Y, Xiang M, Han Y, et al. Weighted joint calibration for interferometric SAR [J]. Systems Engineering and Electronics, Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(5): 761-771.
- [6] Yun Y, Zeng Q, Jiao J, et al. Calibration of airborne interferometric SAR data by external dem without artificial calibrators[C] // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International. IEEE, 2012: 4 501-4 504.
- [7] 潘舟浩,刘波,张清娟,等.三基线毫米波 InSAR 的相位解缠及高程反演[J].红外与毫米波学报,2013,32(5): 474-480.
- [8] Espeter T, Nies H, Loffeld O. A new approach for kalman filter based phase unwrapping applied to multi-baseline InSAR [C] // EUSAR 2014 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Proceedings of VDE, 2014: 1-4.
- [9] 张福博,刘梅.基于频域最小二乘 APES 的非均匀多基线 SAR 层析成像算法[J].电子与信息学报,2012,34(7): 1 568-1 573.
- [10] Schmitt M, Stilla U. Compressive sensing based layover separation in airborne single-pass multi-baseline InSAR data [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2013, 10(2):313-317.
- [11] 潘舟浩.机载毫米波三基线 InSAR 数据处理技术研究[D].北京:中国科学院电子学研究所,2014.
- [12] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005: 278-290.
- [13] 邢保玉,杨福芹,郭增长.基于牛顿迭代法的干涉 SAR 基线估计[J].测绘工程,2007,16(6): 9-11.
- [14] 马振华,刘坤林,陆璇,等.现代应用数学手册计算与数值分析卷[M].北京:清华大学出版社,2005: 486-494.
- [15] 张贤达.矩阵分析与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:341-344.
- [16] 王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测量[M].北京:科学出版社,2002: 57-59.