

F. Leberl 模型与干涉测量模型相结合的 InSAR 影像区域网平差

马婧^{1,2}, 尤红建¹, 胡东辉¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要:为解决西部测图中缺少控制点的问题,提出了一种新的干涉合成孔径雷达(InSAR)影像区域网平差方法.该方法将 F. Leberl 模型与干涉测量模型相结合,并采用交替趋近与 LDL' 稀疏矩阵分解技术求解大规模法方程.实验结果表明,与传统的基于 F. Leberl 模型的平差方法相比较,提出的方法精度更高.由于新模型中增加了三个定标参数,因此能够同时实现多航带幅度图像以及数字高程模型(DEM)的联合平差.最后结合实际机载 InSAR 系统参数对影响平差精度的因素进行了详细的分析.

关键词:InSAR; 三维区域网平差; F. Leberl 模型; 干涉测量模型; 交替趋近法; LDL' 稀疏矩阵分解法
中图分类号:P231, TP79 **文献标识码:**A

Block adjustment of InSAR images based on the combination of F. Leberl and interferometric models

MA Jing^{1,2}, YOU Hong-Jian¹, HU Dong-Hui¹

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to solve the problem of lacking control points during the process of western mapping, this paper presents a new method of block adjustment for interferometric synthetic aperture radar (InSAR) images. This method combines the F. Leberl model and the interferometric model. The alternative approximation method as well as LDL' split coefficient matrix method is also used to calculate the large scale normal equation. The experimental results show that the precision of block adjustment is higher with the new method compared with the traditional method based on F. Leberl model. By adding three calibration parameters, the block adjustment of amplitude images and digital elevation model (DEM) could be realized at the same time. At last, the factors that influence the precision of block adjustment are analyzed in detail by using the actual InSAR parameters.

Key words: InSAR; three-dimensional block adjustment; F. Leberl model; interferometric model; alternative approximation method; LDL' split coefficient matrix method

PACS: 84.40.Xb

引言

大区域多条航带的 SAR 数据校正或拼接时,往往会遇到重叠区域的三维坐标不一致的问题.可以借助控制点信息对影像逐一校正,但需要大量的控制点,这对于困难测区是难以实现的.而区域网平差

技术可以建立影像之间的约束关系,通过调整和精化外方位元素,实现稀少控制点条件下的多航带 SAR 影像校正及拼接.

目前,对 SAR 影像区域网平差的研究尚处于起步状态,加拿大的 Thierry Toutin 利用星载 SAR 影像进行降低控制点需求的试验^[1-2].针对机载 SAR,可

收稿日期:2010-12-08,修回日期:2011-06-12

Received date: 2010-12-08, revised date: 2011-06-12

基金项目:国家 863 项目(2007AA120302);国家自然科学基金(40701110)

Foundation item: Supported by The National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA120302); Supported by The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40701110)

作者简介:马婧(1984-),女,甘肃兰州市人,硕博连读生,主要研究领域为机载 SAR 图像及数据处理. E-mail: majingsnow@163.com.

以使用基于正射多项式模型的区域网平差方法^[3], 但该方法没有从机载 SAR 成像原理出发, 精度有限. 一些学者提出了基于 F. Leberl 模型的平差方法^[4-5], F. Leberl 是严密的 SAR 构象模型, 定位精度较高. 但平差后, 用计算得到的定位参数校正各景影像时, 还必须借助于 DEM 数据.

机载 InSAR 由于其能够获得高程信息的优点, 近年来成为研究热点. 目前对 InSAR 的三维平差技术的研究几乎没有. 三维联合平差技术在激光雷达点云数据航带拼接中已有较成熟的应用^[6], 但其成像原理与 InSAR 有较大区别, 并不能完全应用在 InSAR 区域网平差中. 本文结合 InSAR 成像特点, 提出了一种针对 InSAR 的区域网平差方法. 该方法将联合定标与传统的区域网平差相结合, 不仅能实现稀疏控制点条件下多航带 InSAR 幅度图像的校正及拼接, 得到数字正射影像图 (DOM), 而且可以同步实现多航带 DEM 数据的拼接, 这对于实现西部困难测区大面积控制点加密任务、大面积 SAR 影像拼接以及制作测区内 DEM 数据等工作具有重要意义.

1 平差模型及平差方法

1.1 平差模型

本文在 F. Leberl 平差模型的基础上扩展了一个相位方程, 通过 Range-Doppler-Phase (RDP) 模型建立飞机位置、像点坐标、地面点坐标之间的关系:

$$(X_S - X_C)^2 + (Y_S - Y_C)^2 + (Z_S - Z_C)^2 - R^2 = 0, \quad (1)$$

$$V_X(X_S - X_C) + V_Y(Y_S - Y_C) + V_Z(Z_S - Z_C) = -\lambda R f_d / 2, \quad (2)$$

$$Z_C = Z_S - R \cos(\theta_1 - \theta_b), \quad (3)$$

其中, 式(1)、(2)是 F. Leberl 平差模型中的“距离-多普勒”方程组, 式(3)是干涉定标的相位方程. (X_C, Y_C, Z_C) 为影像坐标 (x, y) 所对应的地面坐标. (X_S, Y_S, Z_S) 为 t 时刻飞机的位置矢量. (V_X, V_Y, V_Z) 是 t 时刻飞机的速度矢量. R 是斜距, f_d 是多普勒中心频率, λ 是波长, θ_b 是基线角, θ_1 是回波到达的方位角. 运动补偿后, (X_S, Y_S, Z_S) 可表示为:

$$\begin{aligned} X_S &= X_{S0} + V_X t \\ Y_S &= Y_{S0} + V_Y t \\ Z_S &= Z_{S0} + V_Z t \end{aligned}, \quad (4)$$

而 θ_1 又可以表示为绝对干涉相位 φ 、斜距 R 、基线长度 B 和波长 λ 的函数:

$$\theta_1 = \arcsin(B/2R - \lambda\varphi/2\pi PB - \lambda^2\varphi^2/8\pi^2 P^2 BR), \quad (5)$$

标准模式下, $P = 1$, “乒乓模式”下, $P = 2$. 则三维定位参数可设为:

$$X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, V_X, V_Y, V_Z, B, \theta_b, \varphi.$$

1.2 平差方法

式(1)、(2)、(3)是非线性方程组, 使用泰勒公式对其线性化得到误差方程:

$$\begin{aligned} v_1 &= a_{11}\Delta X_{S0} + a_{12}\Delta Y_{S0} + a_{13}\Delta Z_{S0} + a_{14}\Delta V_X + a_{15}\Delta V_Y \\ &\quad + a_{16}\Delta V_Z + a_{17}\Delta B + a_{18}\Delta\theta_b + a_{19}\Delta\varphi + b_{11}\Delta X_C \\ &\quad + b_{12}\Delta Y_C + b_{13}\Delta Z_C - u_1 \end{aligned}$$

$$v_2 = a_{21}\Delta X_{S0} + \dots + a_{29}\Delta\varphi + b_{21}\Delta X_C + b_{22}\Delta Y_C + b_{23}\Delta Z_C - u_2$$

$$v_3 = a_{31}\Delta X_{S0} + \dots + a_{39}\Delta\varphi + b_{31}\Delta X_C + b_{32}\Delta Y_C + b_{33}\Delta Z_C - u_3,$$

$a_{1i}, a_{2i}, a_{3i} (i = 1 \dots 9)$ 分别是式(1)、(2)、(3)对 9 个定位参数求偏导; $b_{1j}, b_{2j}, b_{3j} (j = 1 \dots 3)$, 分别是式(1)、(2)、(3)对重叠区域上加密点地面三维坐标求偏导; u_1, u_2, u_3 是常数项. 对每一景影像上控制点和加密点分别列出以上 3 式, 那么由此建立了总误差方程:

$$V = \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ T \end{pmatrix} - U = \begin{pmatrix} A_C & 0 \\ A_T & B_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_C \\ U_T \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中, X 是各景影像定位参数修正值, T 是各加密点地面坐修正值. A_C 是与控制点有关的系数矩阵, A_T, B_T 是与加密点有关的系数矩阵. U_C 是与控制点有关的常数项, U_T 是与加密点有关的常数项.

式(6)中包含两类未知数 X 和 T , 一般采取消去一类未知数的等效误差方程求解未知数 X ^[7]:

$$X = (A'^T A')^{-1} (A'^T U'), \quad (7)$$

其中:

$$A' = A^T A - (A^T B) (A^T B)^{-1} (A^T B)^T$$

$$U' = A^T U - (A^T B) (A^T B)^{-1} (B^T U).$$

1.3 改进的法方程求解方法

三维平差时, 由于未知数的增加, 使得法方程系数矩阵规模增大: 若有 n 条航带, 每条航带有 m 景影像 (如图 1 所示), q 个加密点, 则法方程的系数矩阵的阶数为: $(9nm + 3q) \times (9nm + 3q)$. 当航带数和加密点个数较多时, 系数矩阵的条件数的次数会超过 10^{10} , 此时矩阵已近似病态, 若再使用等效误差方程求解定位参数, 会造成方程解不稳定甚至不收敛.

因此, 本文提出一种改进的法方程求解方法, 充分利用法方程系数矩阵是对称正定的稀疏矩阵的特点, 采用交替趋近法^[7]并结合 LDL' 稀疏矩阵分解技术^[8]求解定位参数. 由式(6)得:

已知加密点坐标时, $T = 0$, 此时误差方程为:

$$\begin{pmatrix} A_C \\ A_T \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} U_C \\ U_T \end{pmatrix} \text{ 简写为 } A_{CT} X = U_{CT}. \quad (8)$$

已知定位参数时, $X = 0$, 此时误差方程为:

$$B_T T = U_T, \quad (9)$$

求解定位参数的具体步骤为:

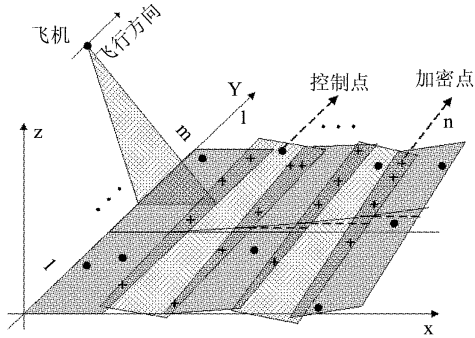


图 1 InSAR 影像区域网构成示意图(●控制点, + 加密点)
Fig. 1 The sketch map of the block configuration of InSAR images(● control point + tie point)

(1) 将各景影像的地面控制点和加密点坐标(分别为已知的和近似的)代入式(8). 得到法方程:

$$\begin{aligned} & (A_{CT}^T A_{CT}) X \\ & = A_{CT}^T U_{CT} \end{aligned} \quad (10)$$

将系数矩阵进行 LDL' 分解得:

$$\begin{aligned} A_{CT}^T A_{CT} & = \begin{pmatrix} 1 & L_1 & \dots & L_n \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_0 & & & \\ & D_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & D_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ L_1^T & 1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ L_n^T & \dots & & 1 \end{pmatrix} \\ & = LDL^T, \end{aligned} \quad (11)$$

则式(10)变为:

$$LDL^T X = A_{CT}^T U_{CT} \quad (12)$$

令:

$$Z = DL^T X, \quad (13)$$

将式(13)带入式(12), 则解上三角方程组有 $Z = L^{-1}(A_{CT}^T U_{CT})$.

$$\text{令: } Y = L^T X, \quad (14)$$

将式(14)带入式(13), 则解对角矩阵方程组有 $Y = D^{-1}Z$.

由式(14)解下三角方程组, 得定位参数修正值:

$$X = (L^T)^{-1} Y \quad (15)$$

X 是一个大小为 $9 \times n \times m$ 的向量. 最后由 X 修正各景影像定位参数, i 代表影像的序号:

$$X_{30}^i = X_{30}^i + \Delta X_{30}^i, \dots, \varphi^i = \varphi^i + \Delta \varphi^i.$$

(2) 将修正的定位参数代入式(9). 同样对其法方程系数矩阵 $B_r^T B_r$ 进行 LDL' 分解, 并求得加密点地面坐标修正值 T . 修正各加密点坐标, j 代表加密点序号:

$$\begin{aligned} X_C^j & = X_C^j + \Delta X_C^j, Y_C^j = Y_C^j + \Delta Y_C^j, \\ Z_C^j & = Z_C^j + \Delta Z_C^j. \end{aligned}$$

(3) 重复第(1)与第(2)步, 直到定位参数与加密点地面坐标的修正值小于设定阈值.

(4) 将各景影像定位参数代入式(1)、(2)、(3), 计算目标点三维坐标, 输出拼接好的 DEM 及正射影像图 DOM.

基于 RDP 模型的 InSAR 三维平差流程图如图 2 所示.

2 试验数据及结果分析

2.1 试验数据

使用 2009 年在西安地区飞行的 pos 数据, 仿真了两组实验数据. 第一组数据: 三条航带, 模拟平缓地区, 高程 0 m, 坡度 0°, 图像分辨率 0.27 m, 7 个控制点, 16 个加密点, 135 个检查点; 第二组数据: 三条航带, 模拟起伏地区, 高程 200 ~ 400 m, 坡度 3° ~ 6°, 图像分辨率 0.27 m, 8 个控制点, 40 个加密点, 292 个检查点.

由于控制点分布在周边时, 控制力最强, 因此实验中控制点分布在第 1 和第 3 航带内非重叠区域的四角, 加密点分布在重叠区域上. 两种地形上控制点和加密点分布如图 3 所示.

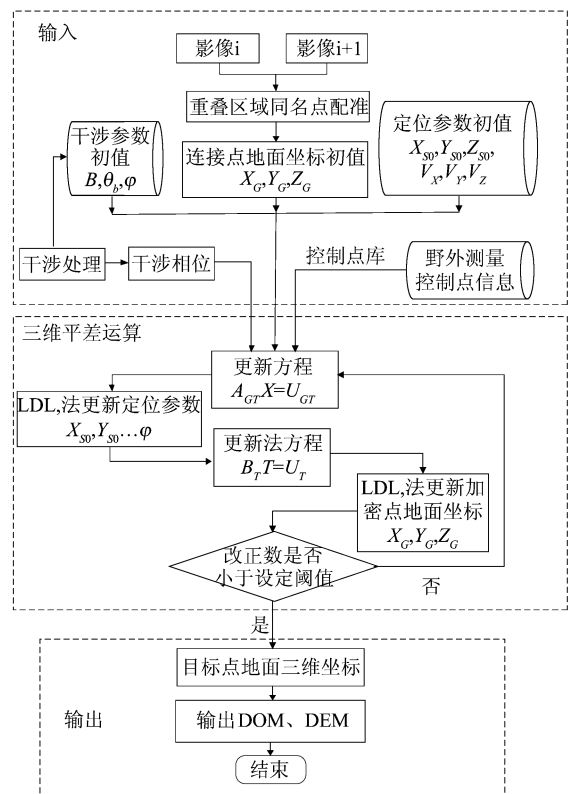


图 2 基于 RDP 模型的 InSAR 影像三维联合平差流程图
Fig. 2 Flow chart of three-dimensional block adjustment based on RDP model

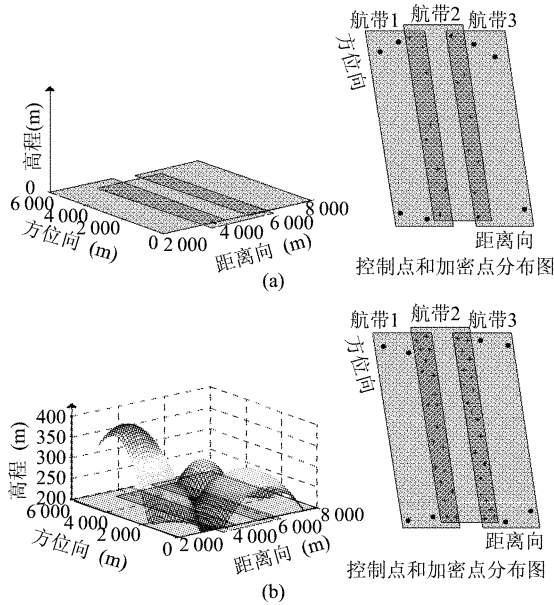


图3 控制点和加密点分布图 (a) 平缓地区 (b) 起伏地区
Fig.3 Distribution of control points and tie-points (a) smooth region (b) mountainous region

2.2 试验结果及分析

为评价该方法的有效性,分别采用本文提出 RDP 模型和传统的 F. Leberl 模型对两组仿真数据进行联合平差.两种方法平差后加密点三维坐标的均方误差分别如表 1 所示.

表 1 加密点精度
Table 1 The precision of tie points

加密点精度(m)		RDP 模型		F. Leberl 模型	
		平面	高程	平面	高程
平缓地区	航带 1,2 之间	0.094	0.095	0.207	0.276
	航带 2,3 之间	0.029	0.028	0.180	0.139
起伏地区	航带 1,2 之间	0.117	0.176	0.257	0.367
	航带 2,3 之间	0.125	0.145	0.276	0.273

从表 1 分析可知:

(1) 使用本文提出的方法计算得到的加密点精度要高于传统的区域网平差精度,不管是平缓地区还是起伏地区,该方法的平差精度都能保持在 1 个像素内.这主要因为引入相位方程后,对高程增加了一个约束条件,而高程的精度会直接影响平面坐标精度,因此针对 InSAR 影像,使用 RDP 模型要比使用传统方法的平差精度高.其次,使用了改进的方法求解法方程,该方法将原法方程系数阵分解成两部分交替迭代求解,因此减小了法方程系数阵的规模,且 LDL' 分解法能够加快解方程的速度,因此求解定位参数时要比传统的求解等效误差方程的方法更

稳定.

(2) 起伏地区上加密点误差大于平缓地区上加密点误差.地面高程未知时,运动补偿是以参考平面高度进行的,在起伏较大的区域会引起运动补偿误差,最终导致影像产生内部畸变.可以通过高程迭代来减小这种误差,但是仍然会有一定的残余误差.且高度越高,地形起伏越大,残余误差就越大.

最后,使用本文提出的方法对实际飞行数据完成了拼接.该实验数据来自山西长治地区,选取两条航带,每条航带 2 景影像.影像分辨率为 1 m,区域覆盖面积 102 m²,海拔 800 ~ 950 m.平差前斜距图像及平差后的 DEM 拼接图及 DOM 拼接图如图 4 所示.

从图 4(b) 和 (c) 可以看出,拼接后的 DEM 及正射影像图 DOM 在整个区域内连续且一致.统计检查点的平均误差后得:平面平均误差为 1.5995 m,高程平均误差为 2.2207 m.符合国家 1:50000 比例尺测图规范^[9].

3 参数误差对平差精度的影响

由式(1)、(2)、(3)分析可知,采用 RDP 模型对 InSAR 影像进行三维联合平差时,影响平差精度的主要误差因素包括斜距测量误差、高程测量误差、多普勒频率测量误差、波长测量误差、飞机的位置与速度测量误差、相位噪声.为了研究各种参数误差对平差精度的影响,分别采用 RDP 平差模型,传统 F. Leberl 模型以及 GPS 导航系统直接定位模型进行实验.实验采用 2.1 节中的第二组数据. InSAR 系统参数及所加入的误差如表 2 所示.各参数误差对精度的影响如图 5 所示.

表 2 InSAR 系统参数及加入误差的均方差
Table 2 The InSAR parameters and mean square errors

参数	参数值	误差均方差
近地点斜距(m)	3527.5	0~100
航高(m)	3286.594	0~100
飞机位置(m)	各航带不一样	0~100
飞机速度(m/s)	113.2785	0~1
多普勒中心频率(Hz)	0	0~1
干涉相位(rad)	各控制点不一样	0~5

图 5 中,rms_X, rms_Y, rms_Z 分别是加密点沿距离向、方位向、高程方向的三维坐标平均误差.第 1 列是各参数误差对 F. Leberl 模型平差精度的影响,第 2 列是各参数误差对 RDP 模型平差精度的影响,第 3 列是各参数误差对 GPS 导航系统直接定位

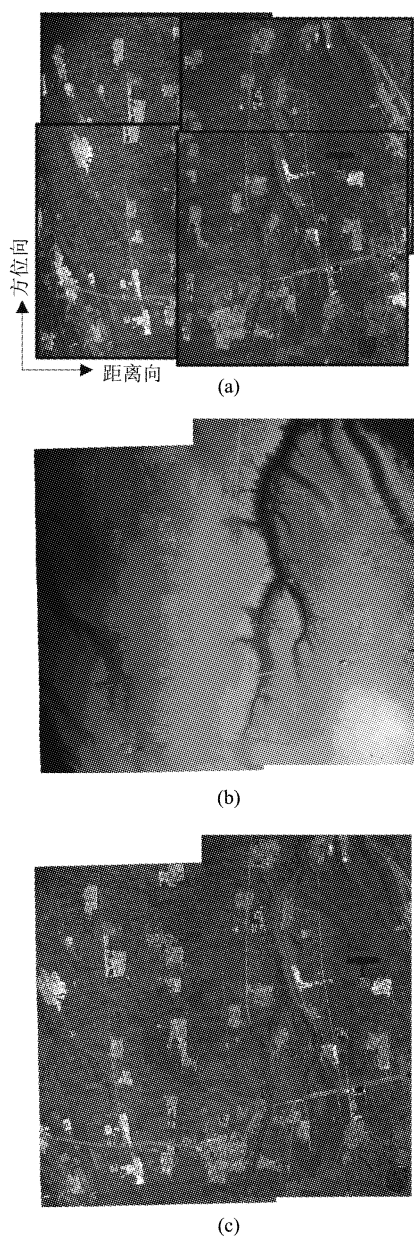


图 4 长测测区 InSAR 数据拼接结果 (a)平差前斜距图像 (b)平差后的 DEM 拼接图 (c)平差后的 DOM 拼接图
 Fig.4 The mosaic result of InSAR data acquired in Changzhi area (a) slant-range image before block adjustment (b) DEM mosaic result after block adjustment (c) DOM mosaic result after block adjustment

精度的影响. 由于只有 RDP 模型使用了干涉相位, 因此最后一行中只分析了相位误差对 RDP 模型平差精度的影响.

从图 5 可以得出, 使用 GPS 导航数据直接定位时, 定位误差对参数的敏感度最大, 其中速度误差的影响最显著, 当速度误差 0.1 m/s 时, 定位误差为 2.7 m. 因此要使用 GPS 导航系统直接定位, 必须保证惯导系统具有很高的精度; 采用传统的 F. Leberl

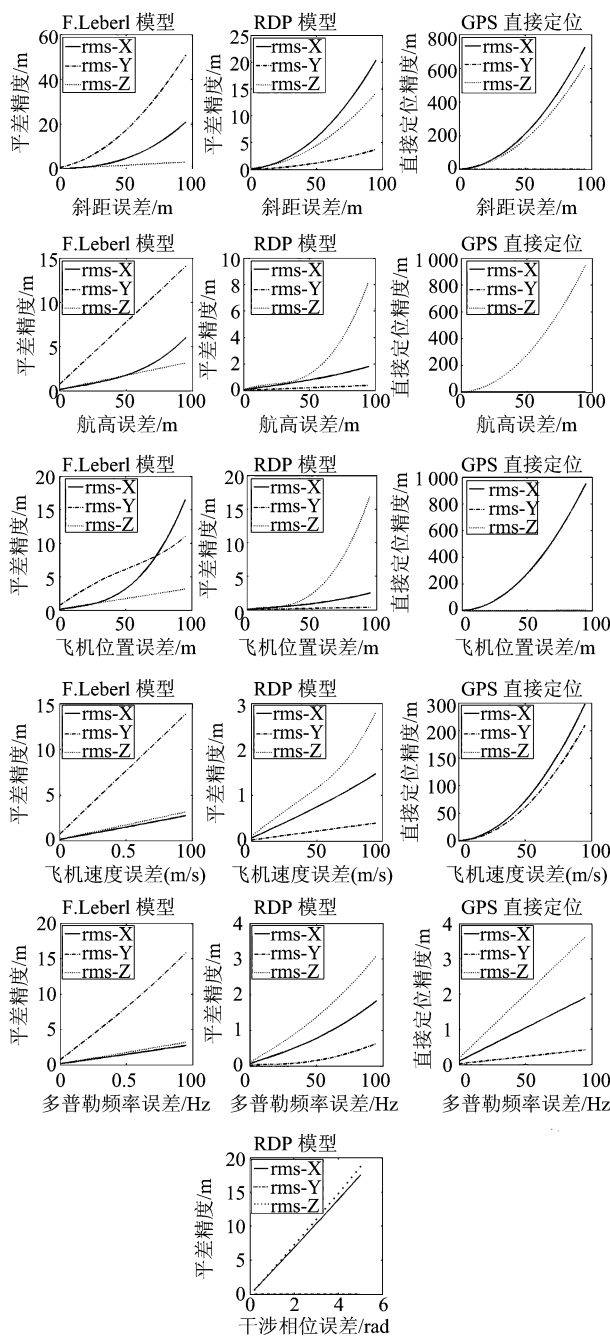


图 5 参数误差对平差精度及直接定位精度的影响
 Fig.5 The effect of parameter's error on precision of block adjustment and GPS direct localization

模型与 RDP 模型平差后, 平差精度对各参数的敏感度都明显下降, 前者对航高和飞机位置的敏感度与后者近似, 但对斜距的敏感度是后者的约 2.4 倍, 对飞机速度的敏感度是后者的 5 倍, 对多普勒频率的敏感度是后者的 5 倍. 这说明 RDP 模型平差法更加稳定, 这也验证了 2.2 节中的结论; 相位误差会直接导致 RDP 模型的高程误差, 而高程误差又会导致平面误差.

斜距测量误差由系统延时误差造成,它与雷达系统时钟的精确度、触发脉冲的波形以及触发开关的灵敏度等因素有关;飞行高度测量误差由脉冲时延测量的系统误差、与信噪比有关的随机误差和地形起伏导致.随着飞机高度的增加,平差精度下降;飞机位置与速度测量误差与导航系统的精度有关,在平差过程中,由于位置与速度作为定位参数不断迭代更新,因此它们对平差结果的影响很小;多普勒频率误差是由于一定时间长度的飞行任务中,受到机载运动平台的震动以及 SAR 系统设计的影响,雷达天线的指向与飞行成像轨迹之间的夹角不能稳定地保持 90° ,只是呈现为一个近乎于直角的夹角.因此多普勒频率对平差精度有一定的影响.干涉相位误差经过滤波后已基本消除,但仍然存在少量随机噪声,这主要是由接收机噪声,图像配准误差及其他因素变化造成的.因此选取使用 RDP 模型进行平差时,要保证控制点处的相位是准确的,不要将控制点选在建筑物、电线杆等相位容易出错的位置.

4 结论

(1) 提出的 RDP 区域网平差模型充分利用 In-SAR 能够由干涉相位获得高程信息的特点,采用“距离-多普勒-相位”方程组联合平差.计算法方程时,提出了交替趋近与 LDL' 稀疏矩阵分解法相结合的方法,减小了法方程系数矩阵的规模,消除了病态矩阵的影响,且提高了计算速度.与基于 F. Leberl 模型的平差方法相比较,本文提出的方法计算得到的加密点精度更高.

(2) 本文提出的方法使用交替趋近求解方法,除了能够求得加密点三维坐标,同时也求得了各景影像的定位参数,由于增加了 B, θ_b, φ 三个参数,因此由定位参数可以直接计算图像上任何点(未参与平差运算)的三维坐标,即可以直接制作大区域的 DEM、DOM 等高级产品.而传统的平差方法求出定位参数后,还要借助已有的低一级的 DEM 数据,才能生成高级产品.

(3) 地形对平差结果有一定影响,地势越高,起伏越大的地区,平差精度越低.

(4) 与传统的基于 F. Leberl 模型的平差方法相比较,基于 RDP 模型的交替趋近平差法对各参数的敏感度更低,因此计算结果更可靠.

REFERENCES

- [1] Toutin T. Path processing and block adjustment with RADASAT-1 SAR images[J]. *IEEE transaction on Geoscience and Remote sensing*, 2003, **41**(10): 2320 - 2328.
- [2] Toutin T. Block bundle adjustment of IKONOS In-track images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(4): 851 - 857.
- [3] HUANG Guo-Man, YUE Xi-Juan, ZHAO Zheng, et al. Block adjustment with airborne SAR images based on polynomial ortho-rectification [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*(黄国满, 岳昔娟, 赵争, 等. 基于多项式正射纠正模型得的机载 SAR 影像区域网平差. *武汉大学学报*), 2008, **33**(6): 569 - 572.
- [4] XING Shuai, XU Qing. Combined bundle block adjustment of variant satellite remote sensing images [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(邢帅, 徐青. 不同类型卫星遥感影像的联合区域网平差方法. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(4): 297 - 302.
- [5] PANG Lei. Study of the triangulation method from airborne synthetic aperture radar images [D]. Qingdao, Shandong University of science and technology(庞蕾. 机载合成孔径雷达空中三角测量方法的研究. 青岛: 山东科技大学), 2006.
- [6] Bretar F, Pierrot-Deseilligny M, Roux M, et al. Solving the strip adjustment problem of 3D airborne lidar data: IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2004[C]. Anchorage, AK, [s. n.], 2004, vol. 7: 4734 - 4737.
- [7] WANG Zhi -Zhuo. *Principles of photogrammetry*[M]. *Surveying and Mapping Press*(王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社), 1984: 72 - 96.
- [8] XI Mei-Cheng. *The method of numerical analysis*[M]. University of Science and Technology of China Press(奚梅成. 数值分析方法. 合肥: 中国科学技术大学出版社), 2003: 189 - 190.
- [9] GB 12340-90. 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000 photographic maps-specification for aero photogrammetric office operation [S]. China Standard Press(GB 12340 - 90. 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000 地形图航空摄影测量内业规范. 北京: 中国标准出版社), 1998.