

一种分布式小卫星立体阵基线误差估计方法

徐青¹, 廖桂生¹, 刘颖¹, 梁璟²

(1. 西安电子科技大学 雷达信号处理重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 西安通信学院 通信装备管理系, 陕西 西安 710106)

摘要: 针对分布式小卫星立体阵中沿航向基线与垂直航向基线互相耦合及无法分别估计的难题, 提出了一种新的分布式小卫星立体基线误差估计方法. 在图像域, 利用图像配准方法分离两类基线, 并通过图像配准与子空间分解的方法分别对两类基线误差进行估计. 该方法操作简单, 运算量小, 估计精度达到了毫米级.

关键词: 分布式小卫星; 基线误差估计; 图像配准

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)04-0668-05

3-D baseline error estimation method for distributed small satellites

XU Qing¹, LIAO Gui-sheng¹, LIU Ying¹, LIANG Jing²

(1. Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. Dept. of Communication Equipment Management, Xi'an Communication Inst., Xi'an 710106, China)

Abstract: In 3-D distributed small satellites, the along-track baseline couples with the vertical-track ones, which makes it difficult to estimate them, respectively. A new 3-D baseline error estimation method for distributed small satellites is proposed in this paper. This method separates the two kinds of baselines through image registration in the field of the image and estimates the two kinds of baseline errors by image registration and subspace decomposition, respectively. The method is easy to operate with a small amount of computation. The mm-level precision can be achieved.

Key Words: distributed small satellites; baseline error estimation; image registration

天基雷达能从高空对较广区域进行观测, 不受国界、天气及人员条件限制, 具有很高的军事意义. 分布式小卫星与传统的单星天基雷达相比, 具有重量轻、体积小、研制周期短、成本低、发射灵活、抗摧毁能力强等一系列优点^[1]. 其可同时实现合成孔径雷达(SAR)成像、地面运动目标检测(GMTD)、干涉测高(InSAR) 3大功能. 根据不同功能, 需要小卫星群具有不同的编队构型^[2,3]. 其中 SAR 成像和 GMTD 要求小卫星群具有沿航向基线, 最佳构型为沿航向呈直线排列; InSAR 则需要分布式小卫星之间具有垂直基线. 为了满足各个功能的不同要求、减少成本, 要求小卫星群同时具有水平基线和垂直基线, 即为空间三维立体分布.

分布式小卫星基线误差的存在不可避免, 这会影响 3 大功能的实现. SAR 成像时, 利用分布式雷达的空间自由度抑制各小卫星 SAR 成像的多普勒模糊, 而误差的存在会影响各个小卫星回波数据的联合处理, 导致成像性能下降; 动目标检测时, 地面杂波对消性能受基线误差影响, 会导致动目标测速及定位的性能严重下降; 干涉测高时, 误差的存在也会严重影响高程测量的精度. 卫星基线误差的测量, 仅仅利用测量仪器和轨道控制设备很难达到足够的精度要求. 普通阵列误差校正的经典算法^[4]仅适用于阵列接收少于阵元数的若干个点源信号, 而小卫星分布式雷达接收的却是连片的地面反射回波, 因而该类方法不能直接应用于分布式小卫星的环境. 现有的针对分布式小卫星的阵列误差校正方法是基于线阵进行讨论的^[5]. 文^[6]给出了一种基于子空间分解的 InSAR 基线误差估计方法, 但是该方法并不适用于立体阵, 针对这一问题, 笔者提出了一

收稿日期: 2007-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(60472097); 教育部新世纪优秀人才基金联合资助

作者简介: 徐青(1979-), 女, 助教, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: xuqing@mail.xidian.edu.cn.

种在图像域、基于图像配准与子空间分解的分布式小卫星立体阵基线误差估计方法,该方法用图像配准的方式分离沿航向与垂直航向基线,然后分别用图像配准与子空间分解的方法对两类基线误差进行估计,适用于沿航向、垂直航向基线均较大的场合,操作简单,运算量小,估计精度较高.在此基础上,分析了相关因素对基线误差估计的影响.

1 信号模型

假设第 n 个小卫星的真实坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 仪器测量值为 (x_{n0}, y_{n0}, z_{n0}) , 阵元位置测量误差为 $(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$, 它们之间满足

$$(x_n, y_n, z_n) = (x_{n0}, y_{n0}, z_{n0}) + (\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) \quad (1)$$

图 1 以两颗星为例,给出同时具有水平基线和垂直基线的分布式小卫星编队坐标示意图.图中按照右手法则构成坐标系, X 轴为沿航向或方位向, Y 轴和 Z 轴为垂直航向或径向.

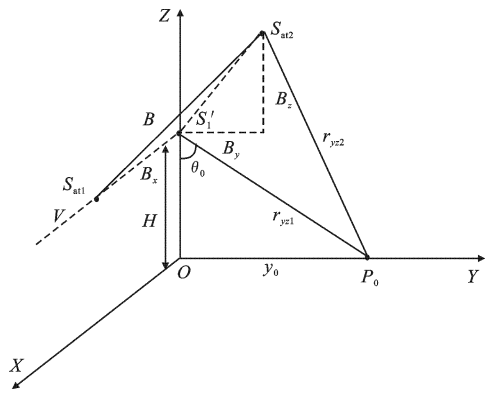


图 1 三维基线分布式小卫星编队坐标示意图

以第 1 颗卫星为参考,在某时刻第 n 颗卫星接收到的回波信号可以写为

$$s_n(\hat{t}, t_m) = \iint \sigma(x, y, z) h\left(\hat{t} - \frac{2r_n(x, y, z, t_m)}{c}\right) g\left(t_m - \frac{x - x_n}{V}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi r_n(x, y, z, t_m)}{\lambda}\right) dx dy \quad (2)$$

其中 \hat{t} 为距离快时间, t_m 为方位慢时间, V 为卫星速度. $\sigma(x, y, z)$ 表示地面散射单元 (x, y, z) 的反射系数, $g(t_m)$ 表示雷达的增益及传播时变特性,这里假定其对不同卫星是相同的, $h(\hat{t}, t_m)$ 为复发射信号, c 为光速, $r_n(x, y, z, t_m)$ 为该散射单元到第 n 颗卫星的距离

$$r_n(x, y, z, t_m) = \left((x - x_n - \Delta x_n - Vt_m)^2 + (y - y_n - \Delta y_n)^2 + (z - z_n - \Delta z_n)^2\right)^{1/2} \quad (3)$$

对于三维超大稀疏阵列而言,直接把三维位置误差分别估计是很困难的,因为这 3 个分量一般为相互耦合的,实际当中很难将 3 者分离,因此在这种情况下的阵列误差估计问题将变得更加复杂.如何将 3 者分离开来是笔者研究的重点.

2 阵列基线误差估计

2.1 沿航向基线误差估计

为方便讨论,以下均以图 1 中两颗卫星为例进行讨论,可很容易推广到多颗星.

通过对处理信号的各个中间状态的观察^[7],为了分离沿航向基线与垂直基线,从图像域来进行考虑.对于式(2),经过距离压缩和方位压缩,SAR 成像处理后的信号可以写为

$$s(\hat{t}, t_m; R_0) = C \text{sinc}_{a_r} \left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \text{sinc}_{a_a} \left[\Delta f_a \left(t_m - \frac{x - x_n}{V} \right) \right] \quad (4)$$

其中 Δf_r 为线性调频信号的频带, Δf_a 为多普勒带宽, R_0 为该点处于波束中心时的斜距.对于第 n 颗卫星而言,沿航向基线只存在于方位压缩后形成的 sinc 函数中,即式(4)中的第 2 项,决定了某一散射点在方位向出现的位置.通过第 2 项,可以看出经过 SAR 成像处理后的信号,沿航向基线只会影响地面散射点在 SAR 图像中的位置而不会影响其相位,即由于存在沿航向基线 B_x ,两颗小卫星的复图像沿航向存在一个像素偏移差为

$$\Delta x = B_x / (V / f_{pr}) \quad (5)$$

$$B_x = B_{x0} - \Delta B_x = (x_{10} - x_{20}) + (\Delta x_1 - \Delta x_2) \quad (6)$$

其中 f_{pr} 为脉冲重复频率.由式(5),(6)可得

$$\Delta B_x = (\Delta x \cdot V / f_{pr}) - (x_{10} - x_{20}) \quad (7)$$

可通过图像配准的方法来估计沿航向基线误差.通过沿航向图像配准,一方面可以估测出沿航向基线误差量 ΔB_x ,另一方面,将沿航向基线从信号信息中分离开来,从而只剩下垂直基线.图像配准方法要求选取配准精度高的,文[8]中给出了一种方法,只要选取合适的窗函数,就能得到千分之一乃至更高的配准精度.随着技

术的不断发展,将来还会有更多更优的图像配准方法出现,从而使笔者所提方法的实现变得更为容易.

2.2 垂直航向基线误差估计

在图像配准后,消除了沿航向基线的影响,卫星 1 相当于落在了 YOZ 平面上,由图 1 可知,两颗卫星对同一散射点 P_0 (假设其高度为 0) 成像所形成的相位差为

$$\Delta\varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi}{\lambda} (r_{yz2} - r_{yz1}) \quad (8)$$

其中 $r_{yz1} = (y_0^2 + H^2)^{1/2}$, $r_{yz2} = ((H + B_{z0} + \Delta B_z)^2 + (y_0 - B_{y0} - \Delta B_y)^2)^{1/2}$, 泰勒公式展开得

$$\Delta r = \frac{B^2 + 2HB_{z0} + 2H\Delta B_z + 2B_{z0}\Delta B_z - 2y_0B_{y0} - 2y_0\Delta B_y + 2B_{y0}\Delta B_y}{2r_0} + O(r_0) \quad (9)$$

其中 $B^2 = (B_{y0})^2 + (B_{z0})^2$, $O(r_0)$ 为展开时的高阶余项, $r_0 = (y_0^2 + H^2)^{1/2}$. 将式(9)代入式(8)得

$$\frac{\lambda r_0}{4\pi} \Delta\varphi_0 - \left(\frac{B^2}{2} + HB_{z0} - y_0B_{y0} \right) = (H + B_z)\Delta B_z + (B_y - y_0)\Delta B_y + O(r_0) \approx (H + B_z)\Delta B_z + (B_y - y_0)\Delta B_y \quad (10)$$

$$\frac{\lambda r_1}{4\pi} \Delta\varphi_1 - \left(\frac{B^2}{2} + HB_{z0} - y_1B_{y0} \right) = (H + B_z)\Delta B_z + (B_y - y_1)\Delta B_y + O(r_1) \approx (H + B_z)\Delta B_z + (B_y - y_1)\Delta B_y \quad (11)$$

下标代表不同散射点的对应值. 此时容易看出,用式(11)减式(10)后即可整理得到 ΔB_y

$$\Delta B_y = \frac{\lambda(r_1\Delta\varphi_1 - r_0\Delta\varphi_0)/(4\pi) + (y_1 - y_0)B_{y0} + (r_0O(r_0) - r_1O(r_1))}{(y_0 - y_1)} \approx \frac{[\lambda(r_1\Delta\varphi_1 - r_0\Delta\varphi_0)/(4\pi) + (y_1 - y_0)B_{y0}]}{(y_0 - y_1)} \quad (12)$$

将 ΔB_y 代入式(10) 即可得到 ΔB_z 的解.

下面分析一下相位差 $\Delta\varphi_0$ 的估计误差对垂直基线误差估计的影响. 式(10)可写成

$$\Delta\varphi_0 = \left[(H + B_z)\Delta B_z + (B_y - y_0)\Delta B_y + \frac{B^2}{2} + HB_{z0} - y_0B_{y0} \right] \frac{4\pi}{\lambda r_0} = f(\Delta B_y, \Delta B_z) \quad (13)$$

因此, $\Delta\varphi_0$, ΔB_y , ΔB_z 估计误差存在下面的关系

$$\sigma_{\Delta\varphi_0} = \frac{\partial f}{\partial \Delta B_y} \Delta B_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta B_z} \Delta B_z \quad (13)$$

为了分析 $\Delta\varphi_0$ 的估计精度对 ΔB_y , ΔB_z 估计精度的影响,分别求解偏导数,可得

$$\sigma_{\Delta B_y} = \frac{\lambda r_0}{4\pi(B_y - y_0)} \sigma_{\Delta\varphi_0} \quad , \quad \sigma_{\Delta B_z} = \frac{\lambda r_0}{4\pi(H + B_z)} \sigma_{\Delta\varphi_0} \quad (13)$$

$\sigma_{\Delta\varphi_0}$ 前的系数在一般情况下能达到千分之几的量级.

2.3 基于子空间分解的相位差估计

在对两颗卫星接收数据成像并进行配准之后,已经消除了沿航向的基线误差的影响,此时相当于将两颗卫星投影到了 YOZ 平面,如图 1 所示的 S_1 和 S_{a12} ,对在两幅场景中的同一像素 p (平坦地面上,高度近似为零)而言,两颗卫星接收的数据矢量可以写成为^[6]

$$\mathbf{X}(p) = \boldsymbol{\alpha}(\Delta\varphi_p)s(p) + \mathbf{n}(p) \quad (14)$$

其中 $\boldsymbol{\alpha}(\Delta\varphi_p) = [1, \exp(j\Delta\varphi_p)]^T$ 为该像素 p 到两颗卫星间的空间导向矢量, $s(p)$ 为该像素的复反射系数,在这里假设它是不随方位变化的, $\mathbf{n}(p)$ 为加性白噪声矢量. 对于成像后的数据,相邻方位单元的信号是满足独立同分布的随机变量(假设相邻方位像素的反射系数变化不大,可根据干涉相位的先验知识选取比较平坦的地面),可构造协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H \quad (15)$$

其中 \mathbf{X}_i 为第 i 次快拍数据. 对 \mathbf{R}_x 进行特征值分解,根据子空间概念,其最大特征值对应的特征矢量与阵列的导向矢量张成同样的信号子空间,从而通过求解其最大特征值所对应的特征矢量即可求解出 $\Delta\varphi_p$ 在 $-\pi \sim \pi$ 间的

主值 $\Delta\varphi'_p$. 要得到距离差需要的是真实的相位差, 利用解缠后的干涉相位和 $\Delta\varphi'_p$ 来得到相位差的精确估计, 即

$$\Delta\varphi_p = \Delta\varphi'_p + 2\pi \times \text{round}(\Delta\varphi_{\text{coarse}} / (2\pi)) \quad (16)$$

其中 $\text{round}(\cdot)$ 表示取四舍五入的运算, $\Delta\varphi_{\text{coarse}}$ 为解缠后的干涉相位, 它通常为相位差的粗略估计, 这里只是利用它来确定模糊的倍数. 通过解缠相位, 可得到相位差的精确估计.

2.4 基线误差估计步骤(以两颗星为例, 可很容易推广到多颗星)

(1) 利用文[8]中的方法对两幅复图像进行配准, 得出方位向偏移量 Δx , 并由式(7) 得到沿航向基线误差 ΔB_x ;

(2) 在配准好的复图像中根据干涉相位, 从图中选取两个距离不同、高度近似为零的点, 用基于子空间分解的方法得到相位差的估计值, 代入式(12), 得到 ΔB_y ;

(3) 将 ΔB_y 值代入式(10), 即可得 ΔB_z .

3 仿真结果与性能分析

下面通过仿真实验和分析来验证文中方法的有效性. 仿真中参数为: 参考卫星平台高度为 $H=750$ km, 卫星平台速度为 $V=7\,450$ m/s, 卫星下视角为 $\arccos(0.75)$, 雷达工作波长为 $\lambda=0.03$ m, 脉冲重复频率为 $f_{\text{pr}}=1\,490$ Hz. 选取的两个目标点在 Y 轴方向坐标分别为 646.440 km, 676.440 km. $B_x=200$ m, $B_y=160$ m, $B_z=120$ m. ΔB_x 估计误差为 0.005 7 m. 图 2 给出 ΔB_x 随沿航向配准误差的变化曲线. 图 3 为估计的垂直基线误差随信噪比的变化曲线.

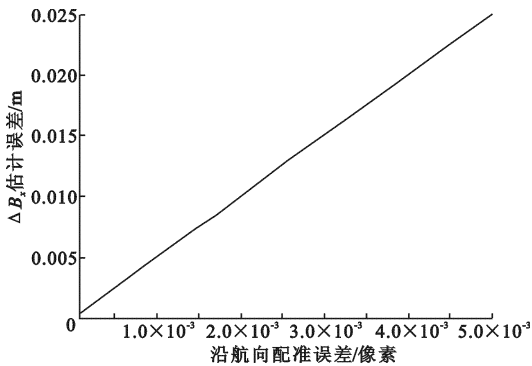


图 2 ΔB_x 随沿航向配准误差的变化曲线

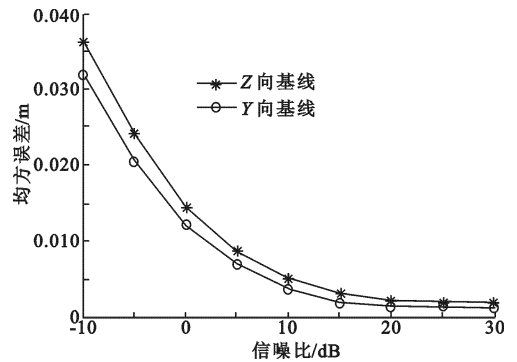


图 3 垂直基线误差随信噪比的变化曲线

在式(12)的推导过程中, 保留了对 Δr 进行泰勒展开时的误差项 $O(r_0)$, 在此对这一误差项对结果的影响作一分析. 在文中所示条件下, 以观测的距离条带宽度为 40 km 为例, 图 4 给出了用泰勒级数展开时形成的 Δr 的误差曲线, 图 5 给出了 ΔB_y 估计精度与两散射点选取的关系曲线.

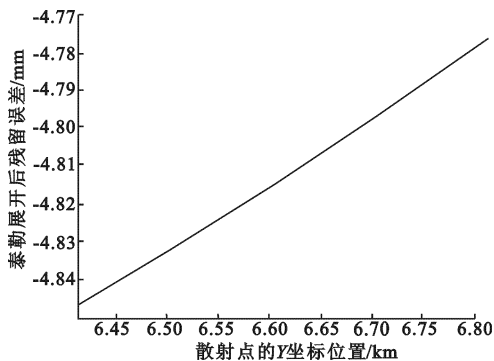


图 4 $O(r_0)$ 随散射点坐标值变化曲线

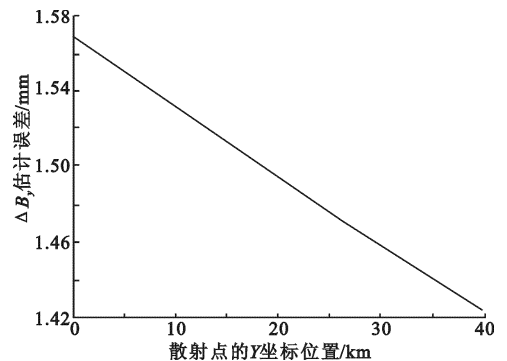


图 5 ΔB_y 估计精度与两散射点选取的关系曲线

4 结束语

针对分布式小卫星立体阵,提出了一种基于图像配准和子空间分解的三维基线误差估计方法,通过对成像公式的分析,利用图像配准将沿航向基线与垂直航向基线对回波信号的影响分离开来,然后分别用图像配准和子空间分解对两类基线的误差进行估计.理论分析与仿真实验表明该方法具有较好的估计精度,且操作简单、运算量小.

参考文献:

- [1] Martin M, Klupar P, Kilberg S, et al. Techsat 21 and Revolutionizing Space Missions Using Microsatellites [C]//15th American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference on Small Satellites. Logan: Utah State University, 2001: SSC01-1-3.
- [2] Li Zhenfang, Wang Hongyang, Su Tao, et al. Generation of Wide-swath and High-resolution SAR Image from Multichannel Small Spaceborne SAR Systems[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(1): 82-86.
- [3] Krieder G, Fiedler H, Mittermayer J, et al. Analysis of Multistatic Configurations for Spaceborne SAR Interferometry [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(3): 87-96.
- [4] Ng B C, See C M S. Sensor-array Calibration Using a Maximum-likelihood Approach[J]. IEEE Trans on AP, 1996, 44(6): 827-835.
- [5] Li Zhenfang, Bao Zheng, Wang Hongyang, et al. Performance Improvement for Constellation SAR Using Signal Processing Techniques[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(2): 436-452.
- [6] 刘颖, 廖桂生, 马仑. 基于子空间投影的干涉合成孔径基线误差估计[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(5): 678-681.
Liu Ying, Liao Guisheng, Ma Lun. A Baseline Estimation Method for INSAR Based Subspace Projection[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(5): 678-681.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005: 123-180.
- [8] 邵永杰. 多通道 SAR-GMTI 中的图像配准研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006: 28-32.
Shao Yongjie. Study on Image Registration in Multibaseline SAR-GMTI[D]. Xi'an: Xidian University, 2006: 28-32.

(编辑: 齐淑娟)

简 讯

☆ 2008年5月13日~14日,中国工程院信息与电子工程学部毛二可、李国杰、孙玉等3名院士在我校分别做了学术报告.毛二可院士是著名雷达、信息处理领域的专家,他在雷达系统及杂波抑制信号处理和雷达跟踪信号处理方面取得重大的研究成果,提高了中国雷达动目标显示、检测性能及跟踪的精度和速度.李国杰院士是计算机领域专家,他主持研制成功曙光一号多处理机、龙芯1号和龙芯2号CPU.李德毅院士是自动化和人工智能专家,他最早提出控制流-数据流图对理论和一整套用逻辑语言实现的方法,证明了关系数据库模式和一阶谓词逻辑的对等性,提出云模型和发现状态空间,用于不确定性知识表示和数据控制,在智能控制“三级倒立摆动平衡”实验中取得显著成效.

摘自《西电情况》2008.5.23