

基于高程测量误差的分布式卫星 SAR 编队构形设计

李 芳^{①②} 王岩飞^① 闫鸿慧^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 卫星编队构形是影响分布式卫星 SAR 系统性能的重要因素之一。该文主要研究满足绕飞轨道条件下的分布式卫星 SAR 编队构形设计问题, 提出了基于高程测量误差最小的分布式卫星 SAR 编队构形设计方法。文中给出了分布式卫星 SAR 多组高程测量数据融合后的像素单元高程测量误差表示, 并提出了给定观测区域的高程测量误差表达式。在此基础上, 以观测区域的高程测量误差为优化目标, 采用遗传算法对分布式卫星初始编队构形进行优化设计。仿真试验验证表明, 通过该方法得到的初始卫星编队构形能够较好的降低给定观测区域内的分布式卫星 SAR 高程测量误差。

关键词: 分布式卫星 SAR; 干涉测量; 编队构形设计

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0808-05

Formation Optimization for Distributed Satellites SAR Based on Height Error

Li Fang^{①②} Wang Yan-fei^① Yan Hong-hui^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The key point of guaranteeing the distributed satellites system performance is to design the formation of the satellites appropriately. This paper studies the satellite formation optimization of distributed satellites system which moves on flying around orbit, and presents a new optimization method based on height-measure error. A composite pixel height error model after combining the multiple baseline measurements is presented, and the height error of the given scene is presented. Finally, the height error model of given scene is used to optimize the satellite formation of distributed satellites system by using genetic algorithm. The simulation results show that this method can decrease the height error of the given scene.

Key words: Distributed satellites SAR; Interferometry; Formation optimization

1 引言

卫星群编队构形是影响分布式卫星 SAR 功能实现的重要因素之一^[1,2], 合理设计卫星编队构形是分布式卫星 SAR 系统设计的关键步骤。

分布式卫星 SAR 编队构形设计需要考虑两方面的因素: 一方面卫星群必须符合分布式卫星相对运动规律, 另一方面编队卫星构形必须满足分布式卫星 SAR 系统功能的要求。目前, 国内外有关分布式卫星相对轨道运动规律的研究中常用的是基于轨道设计本身考虑的方法^[3,4], 在考虑到分布式卫星 SAR 系统性能方面的研究还较少, 如文献[5]给出并比较了几种常用的编队构形, 分析了不同编队构形的系统性能。

本文在考虑绕飞轨道的基础上, 结合分布式卫星 SAR 干涉测量时的高程测量误差对编队构形进行设计。首先针对分布式卫星 SAR 系统特点, 给出分布式卫星 SAR 干涉测量的理论模型; 在此基础上给出融合多条基线得到的高程测量

数据后的像素单元高程测量误差, 并进一步分析对于给定观测区域的高程测量误差; 利用遗传算法, 以给定观测区域内高程测量误差最小为目的, 对分布式卫星 SAR 编队构形进行设计; 最后针对两种常见的分布式卫星编队形式进行仿真计算。

2 分布式卫星 InSAR 高程测量误差模型

2.1 分布式卫星 SAR 干涉测量原理

分布式卫星 SAR 干涉测量几何关系如图 1 所示, OXYZ 为相对运动坐标系如图 2 所示。以小卫星 1 和小卫星 2 形成的干涉为例, 则根据图 1 所示几何关系, 计算可得干涉相位和目标高程^[7]

$$\phi_{12} = \frac{2\pi}{\lambda} (B_x \cos \gamma \sin \theta + B_y \sin \gamma \sin \theta - B_z \cos \theta) \quad (1)$$

$$h = H_0 + \Delta H - r_0 \cos \theta \quad (2)$$

式中 (θ, γ) 分别表示像素单元中心对应原点 O 的高度角和方位角; R_x, R_y 为地面分辨单元大小; B_x, B_y, B_z 为小卫星 1 和

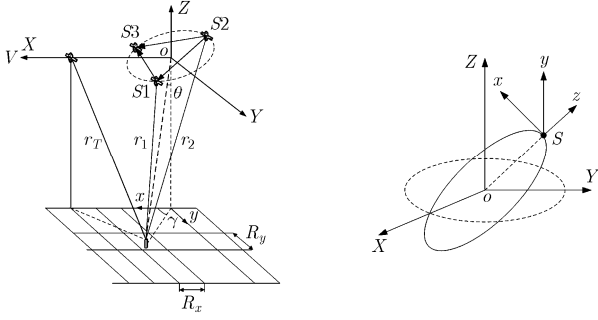


图1 分布式卫星 SAR 干涉几何关系示意图 图2 相对运动坐标系

小卫星 2 之间基线矢量(如图 1 所示)在 X, Y, Z 轴上的投影; H_0 为坐标原点 O 的高度; ΔH 为基线中心与坐标原点 O 的高度差; r_0 表示分布式卫星中心与像素单元中心间的斜距。

2.2 高程测量误差

根据图 1 所示分布式卫星 SAR 构形, 设小卫星 1, 小卫星 2 之间的基线矢量为 \mathbf{B}_1 , 小卫星 2, 小卫星 3 之间的基线矢量为 \mathbf{B}_2 , 小卫星 1, 小卫星 3 之间的基线矢量为 \mathbf{B}_3 ; 对同一像素单元, 基线 \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 和 \mathbf{B}_3 高程测量结果分别为 h_1 , h_2 和 h_3 , 对应干涉相位分别为 ϕ_1 , ϕ_2 和 ϕ_3

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= H_0 + \Delta H_1 - r_0 \cos \theta \\ h_2 &= H_0 + \Delta H_2 - r_0 \cos \theta \\ h_3 &= H_0 + \Delta H_3 - r_0 \cos \theta \end{aligned} \right\},$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} (B_{1x} \cos \gamma \sin \theta + B_{1y} \sin \gamma \sin \theta - B_{1z} \cos \theta) \\ \phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} (B_{2x} \cos \gamma \sin \theta + B_{2y} \sin \gamma \sin \theta - B_{2z} \cos \theta) \\ \phi_3 &= \frac{2\pi}{\lambda} (B_{3x} \cos \gamma \sin \theta + B_{3y} \sin \gamma \sin \theta - B_{3z} \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

若将某一时刻 3 组高程测量值写为矩阵形式 $\mathbf{Y} = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T$, 且设地面真实高程值为 h , 则测量值 \mathbf{Y} 与真实值 h 之间的关系可写为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} h + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \mathbf{H}h + \mathbf{n} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{H} = [1 \ 1 \ 1]^T$, 系统噪声 $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T$ 服从均值为零、协方差矩阵为 \mathbf{R} 的随机分布^[8]。

由于 h 是未知的确定参量, 因此可把它看作是均值为 h , 协方差矩阵趋于无穷的高斯随机变量。根据确定参数估计原理, 可利用加权最小二乘估计对 h 进行估计, 取权值为 \mathbf{R}^{-1} 可使估计误差矩阵最小^[9], 此时 h 的估计值为

$$\hat{h}_{LSW} = [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \quad (5)$$

估计方差为

$$\hat{\sigma}_p^2 = E \left\{ e(\mathbf{h}, \hat{h}_{LSW}) e^T(\mathbf{h}, \hat{h}_{LSW}) \right\} = [\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \quad (6)$$

像素单元高程测量误差即为估计方差的平方根

$$e_{h_p} = \sqrt{[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1}} \quad (7)$$

式(7)给出了单个像素单元的高程测量误差表示, 虽然对于 3 颗小卫星组成的分布式卫星系统来讲, 其中两条基线矢量可推出第 3 条基线矢量, 但这里要保证系统的稳健性, 即只要任何两颗卫星运行均能获得最佳的高程测量精度, 因此充分考虑 3 条基线获得的信息。

对于给定的观测区域来讲, 观测时间可能较长, 而由于各小卫星的相对位置随时间不断变化, 因此观测区域内不同时间观测到的目标将具有不同的测量误差, 此时像素单元高程测量误差将不再适合分析观测区域的高程测量性能。本文将整个观测区域的数据按方位向时间分为若干段, 取每段数据中对应区域中心附近的特征像素单元高程测量误差作为该段数据的高程测量误差, 而整个观测区域的高程测量误差可用各段数据高程测量误差的均方根表示。

假设分为 N 段, 则观测区域的高程估计误差即测量误差为

$$e_n = \sqrt{\left[\sum_N (\mathbf{H}^T \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H})^{-1} \right] / N} \quad (8)$$

式中 \mathbf{R}_n 为第 n 段数据噪声协方差矩阵。

2.3 高程测量误差与编队构形的关系

从式(3)可以看出, 分布式卫星 SAR 系统中, 干涉相位的测量误差、卫星间相对位置的估计误差、方位角的估计误差等均会影响到最终的高程估计误差。其中, 基线是影响分布式卫星 SAR 高程测量精度的重要因素之一, 而基线则是由卫星编队构形决定, 因此卫星编队构形的优劣将直接影响分布式卫星 SAR 系统的高程测量误差。

由式(7)和式(8)可知, 观测区域的高程测量误差主要通过数据的协方差矩阵 \mathbf{R} 来体现, 利用式(4)可得

$$\mathbf{R} = E \{ \mathbf{n} \mathbf{n}^T \} = \begin{bmatrix} E \{ n_1^2 \} & E \{ n_1 n_2 \} & E \{ n_1 n_3 \} \\ E \{ n_1 n_2 \} & E \{ n_2^2 \} & E \{ n_2 n_3 \} \\ E \{ n_1 n_3 \} & E \{ n_2 n_3 \} & E \{ n_3^2 \} \end{bmatrix} \quad (9)$$

协方差矩阵 \mathbf{R} 可通过小卫星相对位置估计误差、方位角估计误差、干涉相位估计误差和各基线分量的估计值得到, 具体计算可参见文献[10]的方法。

3 分布式卫星编队构形设计

在实际工作中, 分布式卫星 SAR 并非一直处于工作状态, 而是在很短的一段时间, 因此, 可以设计卫星编队构形在某一给定观测区域内满足精度要求, 可以证明, 初始编队最优的系统能够保证在整个观测时间内系统性能最优。本文将利用遗传算法^[9]对式(8)所示的给定观测区域的高程测量误差进行最小化, 从而设计对给定观测区域进行干涉测量前的最优的分布式卫星初始编队构形。

(1)优化目标 优化目标函数为式(8)所示的观测区域高程测量误差 e_h , 各时间段的卫星相对运动状态可通过分布式卫星相对运动方程求出。这里考虑满足绕飞轨道条件下的 C-W 方程^[3]

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 \cos \omega t - 2z_0 \sin \omega t \\ y &= y_0 \cos \omega t + (\dot{y}_0/\omega) \sin \omega t \\ z &= z_0 \cos \omega t + (1/2)x_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 ω 为卫星平均轨道角速度, (x, y, z) 为 t 时刻卫星在相对运动坐标系中的位置坐标, (x_0, y_0, z_0) 和 $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$ 分别表示 $t=0$ 时刻卫星在相对运动坐标系中的位置坐标以及速度分量。

(2) 优化设计变量及编码形式 理论上, 对于无外力推动下的自主编队形式的分布式卫星系统, 只要已知卫星的初始状态 (x_0, y_0, z_0) 和 $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$, 并且满足绕飞条件, 则根据方程(11)即可求出不同时刻卫星的相对运动状态, 从而确定分布式卫星的相对运动轨迹也就得到卫星编队构形。实际中, 分布式卫星 SAR 通常采用两种常见的编队: 相对运动轨迹在空间为圆形和相对运动轨迹在星下点为圆形^[3]。因此, 本文也主要针对这两种常见的编队形式进行优化设计。

相对运动轨迹在空间为圆形时, 相对运动方程可写为

$$\left. \begin{aligned} x &= (2\dot{z}_0/\omega) \cos \omega t - 2z_0 \sin \omega t \\ y &= \sqrt{3}z_0 \cos \omega t + (\sqrt{3}\dot{z}_0/\omega) \sin \omega t \\ z &= z_0 \cos \omega t + (\dot{z}_0/\omega)x_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

同样, 相对运动轨迹在星下点为圆形时, 有

$$\left. \begin{aligned} x &= (2\dot{z}_0/\omega) \cos \omega t - 2z_0 \sin \omega t \\ y &= 2z_0 \cos \omega t + (2\dot{z}_0/\omega) \sin \omega t \\ z &= z_0 \cos \omega t + (\dot{z}_0/\omega)x_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

通过式(11)和式(12)可以看出, 满足绕飞轨道条件下的两种编队飞行轨迹仅与 z_0 和 \dot{z}_0 有关, 因此本文所用遗传算法中优化设计变量由各小卫星在 z 轴上的相对运动状态 (z_0, \dot{z}_0) 组成。以本文提出的 3 颗小卫星组成的分布式卫星系统为例, 一个包含 N 个个体(Individual)的种群的“染色体”(设计变量的编码形式)可表示为

$$\text{chrom} = \begin{bmatrix} z_1 & \dot{z}_1 & z_2 & \dot{z}_2 & z_3 & \dot{z}_3 \\ z_1 & \dot{z}_1 & z_2 & \dot{z}_2 & z_3 & \dot{z}_3 \\ z_1 & \dot{z}_1 & z_2 & \dot{z}_2 & z_3 & \dot{z}_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1 & \dot{z}_1 & z_2 & \dot{z}_2 & z_3 & \dot{z}_3 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Individual 1} \\ \text{Individual 2} \\ \text{Individual 3} \\ \vdots \\ \text{Individual } N \end{matrix} \quad (13)$$

由于基线去相关的影响, 且已知 z_i 和 \dot{z}_i 与编队飞行的圆形轨迹半径或星下点圆形半径大小有关, 为保证分布式卫星 InSAR 干涉图质量, 将编队飞行轨迹的半径控制在临界基线大小的一半之内, 此外, 为了保证各小卫星安全运行, 各小卫星间的距离差控制在大于 100m。

4 仿真分析

下面对上文提出的编队优化设计方法进行仿真分析, 考虑满足绕飞条件下的相对运动轨迹在空间为圆形和相对运动轨迹在星下点为圆形两种常见的编队形式, 为便于说明优化效果, 分别在未对初始编队构形进行优化和利用遗传算法

对初始编队构形进行优化两种条件下进行仿真计算。

仿真中系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

发射信号卫星轨道高度	514km	信噪比	10dB
距离向分辨率	3m	测距误差	0.01m
发射信号波长	0.031m	方位角测量误差	0.01°
发射信号卫星视角	23°	小卫星相对位置估计误差	0.01m

假设给定观测区域内数据可分为 10 段, $N=10$ 。设各段数据对应特征像素单元与卫星群中心之间的斜距、视角以及方位角如表 2 所示。

表 2 特征像素单元对应分布式卫星系统中心斜距、视角和方位角

	斜距(km)	视角(°)	方位角(°)
1	559.11	23.17	82.16
2	558.97	23.14	82.15
3	558.61	23.05	82.12
4	558.09	22.93	82.07
5	557.65	22.82	82.03
6	557.58	22.80	82.02
7	557.94	22.89	82.05
8	558.48	23.02	82.10
9	558.89	23.12	82.14
10	559.10	23.17	82.16

(1) 不进行优化 在本次仿真时, 给定初始编队构形, 计算不同时间段像素单元高程测量误差和给定观测区域内的高程测量误差。假设小卫星 1、小卫星 2 和小卫星 3 在 z 轴的初始相对运动状态为

$$\begin{aligned} z_1 &= 605.6\text{m} & z_2 &= -302.8\text{m} & z_3 &= -302.8\text{m} \\ \dot{z}_1 &= 0\text{m/s} & \dot{z}_2 &= -0.5787\text{m/s} & \dot{z}_3 &= 0.5787\text{m/s} \end{aligned}$$

利用绕飞轨道条件和相对运动轨迹空间为圆形以及相对运动轨迹在星下点为圆形的特点, 可分别计算得到两种编队形式下三颗小卫星的初始相对运动状态。

空间圆形轨道下给定卫星群初始相对运动状态:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0\text{m}, & \dot{x}_1 &= -1.3365\text{m/s}; & x_2 &= -1049.0\text{m}, \\ x_2 &= 0.6682\text{m/s}; & x_3 &= 1049.0\text{m}, & \dot{x}_3 &= 0.6682\text{m/s}; \\ y_1 &= 1049.0\text{m}, & \dot{y}_1 &= 0\text{m/s}; & y_2 &= -524.5\text{m}, \\ \dot{y}_2 &= -1.0024\text{m/s}; & y_3 &= -524.5\text{m}, & \dot{y}_3 &= 1.0024\text{m/s}; \\ z_1 &= 605.6\text{m}, & \dot{z}_1 &= 0\text{m/s}; & z_2 &= -302.8\text{m}, \\ \dot{z}_2 &= -0.5787\text{m/s}; & z_3 &= -302.8\text{m}, & \dot{z}_3 &= 0.5787\text{m/s} \end{aligned}$$

星下点圆形轨道下给定卫星群初始相对运动状态:

$$\begin{aligned}
x_1 &= 0\text{m}, & \dot{x}_1 &= -1.3365\text{m/s}; & x_2 &= -1049.0\text{m}, \\
\dot{x}_2 &= 0.6682\text{m/s}; & x_3 &= 1049.0\text{m}, & \dot{x}_3 &= 0.6682\text{m/s}; \\
y_1 &= 1211.2\text{m}, & \dot{y}_1 &= 0\text{m/s}; & y_2 &= -605.6\text{m}, \\
\dot{y}_2 &= -1.1574\text{m/s}; & y_3 &= -605.6\text{m}, & \dot{y}_3 &= 1.1574\text{m/s}; \\
z_1 &= 605.6\text{m}, & \dot{z}_1 &= 0\text{m/s}; & z_2 &= -302.8\text{m}, \\
\dot{z}_2 &= -0.5787\text{m/s}; & z_3 &= -302.8\text{m}, & \dot{z}_3 &= 0.5787\text{m/s}
\end{aligned}$$

卫星群初始编队构形分别如图 3 和图 4 所示。

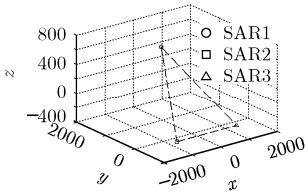


图 3 空间圆形轨道条件下未进行优化时卫星群初始编队构形示意图

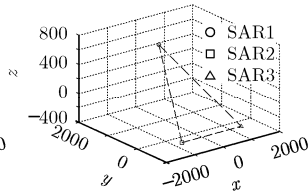


图 4 星下点圆形轨道条件下未进行优化时卫星群初始编队构形示意图

在给定初始编队构形条件下对给定观测区域进行观测, 各时间段的像素单元高程测量误差及观测区域的高程测量误差分别如图 5 和图 6 所示。图中实线为各时间段的像素单元高程测量误差, 虚线为观测区域的高程测量误差。

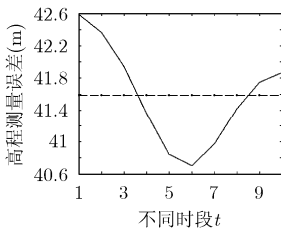


图 5 空间圆形轨道条件下未进行优化时各时间段像素单元高程测量误差及观测区域的高程测量误差

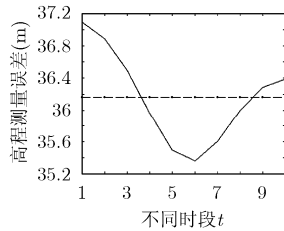


图 6 星下点圆形轨道条件下未进行优化时各时间段像素单元高程测量误差及观测区域的高程测量误差

从图 5 和图 6 可以看出, 在本次仿真中, 空间圆形轨道条件下各时间段像素单元高程测量误差约在 40.7m~42.6m, 误差非常大, 而观测区域的高程测量误差也达到 41.6m; 星下点圆形轨道条件下各时间段像素单元高程测量误差约在 35.36m~37.09m, 误差同样非常大, 观测区域的高程测量误差达到 36.16m。

(2)利用遗传算法进行优化 下面计算两种编队形式下的最优初始编队构形。利用表 1 和表 2 参数, 可计算得到临界基线大小约为 2422.5m, 则计算中编队飞行轨迹的半径大小控制在 1211.2m 范围内, 从而 z_i 控制在-605.6m~605.6m 范围内; \dot{z}_i 控制在不进行优化时相对速度最大值的 2 倍内, 即 $-2 \times 1.3365\text{m/s} \sim 2 \times 1.3365\text{m/s}$ 。利用遗传算法, 种群大小 20, 迭代次数 100。迭代过程中观测区域的高程测量误差变化曲线分别如图 7 和图 8 所示。

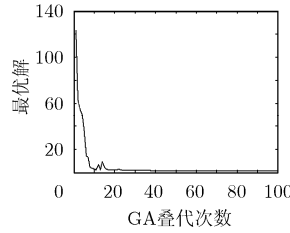


图 7 空间圆形轨道条件下优化过程中观测区域的高程测量误差变化曲线

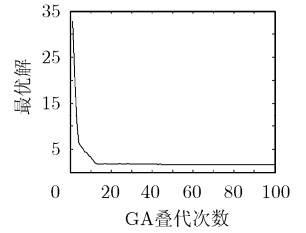


图 8 星下点圆形轨道条件下优化过程中观测区域的高程测量误差变化曲线

经过运算所得最优初始编队构形分别如图 9 和图 10 所示。

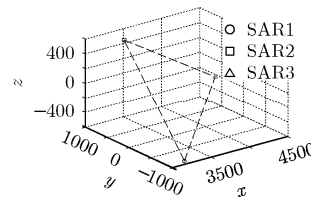


图 9 空间圆形轨道条件下所得最优初始编队构形示意图

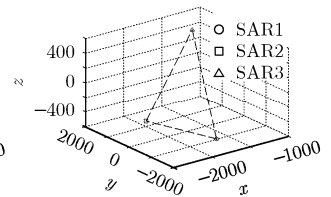


图 10 星下点圆形轨道条件下所得最优初始编队构形示意图

此时可以分别得到小卫星 1, 小卫星 2 和小卫星 3 初始相对运动状态。

空间圆形轨道下优化后的卫星群初始相对运动状态:

$$\begin{aligned}
x_1 &= 3166.2\text{m}, & \dot{x}_1 &= 1.2362\text{m/s}; & x_2 &= 3434.1\text{m}, \\
\dot{x}_2 &= -1.1052\text{m/s}; & x_3 &= 4153.2\text{m}, & \dot{x}_3 &= -0.0629\text{m/s}; \\
y_1 &= -970.2\text{m}, & \dot{y}_1 &= 3.0255\text{m/s}; & y_2 &= 867.4\text{m}, \\
\dot{y}_2 &= 3.2815\text{m/s}; & y_3 &= 49.4\text{m}, & \dot{y}_3 &= 3.9687\text{m/s}; \\
z_1 &= -560.1\text{m}, & \dot{z}_1 &= 1.7468\text{m/s}; & z_2 &= 500.8\text{m}, \\
\dot{z}_2 &= 1.8946\text{m/s}; & z_3 &= 28.5\text{m}, & \dot{z}_3 &= 2.2913\text{m/s}
\end{aligned}$$

星下点圆形轨道下优化后的卫星群初始相对运动状态:

$$\begin{aligned}
x_1 &= -1688.1\text{m}, & \dot{x}_1 &= 1.2429\text{m/s}; & x_2 &= -2408.2\text{m}, \\
\dot{x}_2 &= 0.4791\text{m/s}; & x_3 &= -1370.2\text{m}, & \dot{x}_3 &= -1.1773\text{m/s}; \\
y_1 &= -1126.4\text{m}, & \dot{y}_1 &= -1.8626\text{m/s}; & y_2 &= -434.2\text{m}, \\
\dot{y}_2 &= -2.6573\text{m/s}; & y_3 &= 1066.9\text{m}, & \dot{y}_3 &= -1.5119\text{m/s}; \\
z_1 &= -563.2\text{m}, & \dot{z}_1 &= -0.9313\text{m/s}; & z_2 &= -217.1\text{m}, \\
\dot{z}_2 &= -1.3286\text{m/s}; & z_3 &= 533.5\text{m}, & \dot{z}_3 &= -0.7559\text{m/s}
\end{aligned}$$

图 11 和图 12 分别给出在优化后的初始编队构形条件下, 两种编队形式下各时间段像素单元高程测量误差以及观测区域的高程测量误差。图中实线为各时间段像素单元的高程测量误差, 虚线为观测区域的高程测量误差。

从图 11 中可以看出, 在所得最优初始编队构形条件下, 空间圆形轨道条件时观测区域的高程测量误差为 1.50m, 星下点圆形轨道条件时观测区域的高程测量误差为 1.30m。比较图 5、图 6 和图 11、图 12 可以看出, 通过对观测区间初始时刻编队构形进行优化, 空间圆形轨道条件下各时间段段

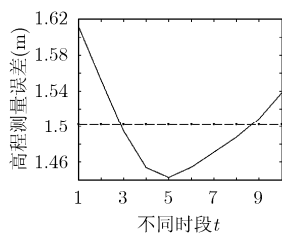


图 11 空间圆形轨道下最优编队构形对应不同时间段的像素单元高程测量误差及观测区域的高程测量误差

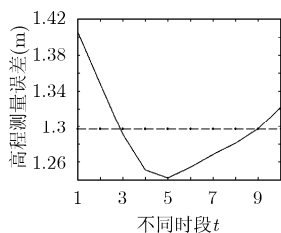


图 12 星下点圆形轨道下最优编队构形对应不同时间段的像素单元高程测量误差及观测区域的高程测量误差

素单元高程测量误差可以明显地减小至 1.44m-1.61m, 观测区域的高程测量误差从 41.6m 减小至 1.50m; 星下点圆形轨道条件下各时间段像素单元高程测量误差减小至 1.24m-1.41m 观测区域的高程测量误差从 36.16m 减小至 1.30m。

5 结束语

分布式卫星 SAR 编队构形是影响分布式卫星 SAR 干涉测量性能的一个重要因素, 对最终的高程测量误差起到关键性的作用。

本文首先给出了在分布式卫星平台下的 SAR 干涉相位估计及高程测量公式; 然后利用分布式卫星 SAR 系统能够同时得到对同一目标区域的多组干涉测量值的优点, 提出了一种基于复合 InSAR 系统的像素单元高程测量误差, 并分析了给定观测区域内的高程测量误差表示式; 最后利用遗传算法以观测区域内的高程测量误差为优化目标进行编队构形优化设计。

通过对一组雷达卫星参数的仿真结果表明, 本文提出的编队构形优化设计方法能显著的改善分布式卫星 SAR 的高程测量误差, 从而有效地提高系统的干涉测量性能。

参考文献

[1] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: potential and challenges[J]. *IEE Proc. Radar Sonar*

Navig., 2006, 153(3): 184-198.

- [2] Krieger G, Moreira A, and Fiedler H, *et al.* TanDEM-X: Mission concept, product definition and performance prediction [C]. European conference on synthetic aperture radar, Dresden, Germany, 2006.
- [3] 张玉锷. 卫星编队飞行的动力学与控制技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2002.
- [4] Frayssinhes E and Lansard E. Mission analysis of clusters of satellites [J]. *Acta Astronautica*, 1996, 39(5): 347-353.
- [5] Krieger G and Fiedler H, *et al.* Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(3): 87-96.
- [6] Rodriguez E and Martin J M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars [J]. *IEE Proceedings-F*, 1992, 139(2): 147-159.
- [7] Maybeck P S. Stochastic Models, Estimation, and Control[M]. London: Academic Press, 1979, Vol.I: 114-122.
- [8] 沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. 信号统计分析与处理. 合肥. 中国科学技术大学出版社, 2003: 365-369.
- [9] Houck C R, Joins J A, and Kay M G. A genetic algorithm for function optimization: A matlab implementation[R]. NCSU-IE TR 95-09: 1995.
- [10] 李芳, 王岩飞, 等. 分布式卫星 SAR 沿航迹干涉编队构型优化. 电子与信息学报. 2007, 29(6): 1433-1436.

Li Fang and Wang Yan-fei, *et al.* Formation optimization for distributed satellites SAR along-track interferometry. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(6): 1433-1436.

李芳: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为分布式卫星 InSAR 系统理论及其信号处理等。

王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。

闫鸿慧: 男, 1975年生, 博士, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、信号处理。