

分布式星载干涉 SAR 中空间基线的分析和设计¹

徐华平 周荫清 李春升

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

摘 要 分布式星载干涉 SAR 可以同时实现三维地形成像、洋流成像和提高空间分辨率等 3 种 SAR 干涉成像,其系统基线设计需要同时考虑这 3 种 SAR 干涉成像对基线的不同要求,所以比较复杂.该文在给出分布式小卫星被动稳定编队飞行的空间构形和 3 种 SAR 干涉成像对系统基线要求的基础上,提出了分布式星载干涉 SAR 基线设计中存在着 3 个制约关系;给出了协调这 3 个制约关系的一种设计准则,并在此准则下对一个 L 波段的分布式星载干涉 SAR 进行了系统基线设计.

关键词 分布式,星载 SAR,干涉,基线,设计

中图分类号 TN958, TN951

1 前 言

分布式星载干涉 SAR 利用分布式小卫星技术实现 SAR 干涉成像.它采用一颗卫星发射信号,数颗卫星接收信号.不同卫星获得的 SAR 图像相结合可以获得多种产品^[1]:垂直基线干涉获得三维地形图像;沿轨迹基线干涉获得洋流等运动目标图像;垂直基线和沿轨迹基线引起的 SAR 图像之间的频谱偏移可以提高距离向和方位向空间分辨率.这 3 种 SAR 干涉成像能否实现以及性能如何,关键在于系统基线长度的设计是否合理.与常规单颗星载干涉 SAR 不同,分布式星载干涉 SAR 的基线设计必须兼顾这 3 种 SAR 干涉成像的要求.

现有的文献^[2-6]基本上都是讨论实现单颗 SAR 干涉成像的基线.关于分布式星载干涉 SAR 基线设计的讨论,只有文献[1]给出了以极限基线作为系统基线的情况.本文从最优的角度分析了三维地形成像、洋流成像以及提高空间分辨率对系统基线的要求;讨论了分布式星载干涉 SAR 基线设计时存在的矛盾;给出了分布式干涉 SAR 最优基线设计的准则,最后,根据给出的基线设计方法,对一个 L 波段分布式星载干涉 SAR 的系统基线进行设计.

2 分布式星载干涉 SAR 中小卫星被动稳定编队飞行的空间构形

如图 1 所示,分布式星载干涉 SAR 中,若干颗小卫星以空中某一点为中心,构成了一个特定的空间构形.按照这种构形,小卫星之间协同工作,共同完成三维测高、洋流成像和提高空

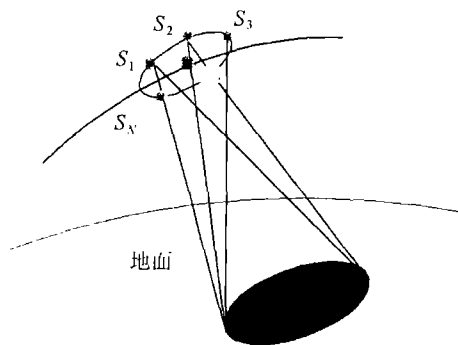


图 1 分布式星载干涉 SAR 中小卫星的空间几何关系

间分辨率的任务.从可实现的角度考虑,小卫星的编队飞行必须基本上不消耗燃料,采用被动稳定编队飞行^[7].

为了描述小卫星的绕飞轨迹(小卫星绕中心点的飞行轨迹),文献[7]中采用轨道动力学模型给出了绕飞轨迹空间编队为圆形的,第 k 个小卫星 S_k 在不消耗燃料、被动稳定编队飞行、并且满足初始绕飞条件下,相对于中心点的坐标方程为

¹ 2002-05-13 收到, 2002-12-26 改回

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= 2a \sin(\omega t - \phi_k) \\ y(t) &= a \cos(\omega t - \phi_k) \\ z(t) &= \sqrt{3}a \cos(\omega t - \phi_k) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 x 为中心点的飞行方向, y 为背离地心的方向, z 为垂直于中心点轨道方向。 $y_k(0), y'_k(0)$ 为 S_k 的初始绕飞条件, $a = \sqrt{y_k^2(0) + (y'_k(0)/\omega)^2}$, $\cos \phi_k = y_k(0)/a$, $\sin \phi_k = y'_k(0)/(\omega \cdot a)$, ω 为中心点的角速度。

3 3 种 SAR 干涉成像对基线的要求

3.1 三维地形成像对基线的要求

三维地形成像主要利用的是垂直于视线方向的基线 B_v (在本文中称之为垂直基线)。随着垂直基线长度的增大, 由相位差和基线长度本身的不确定性引起的高度测量误差减小; 但是垂直基线越长则相关性越低, 测高精度越下降^[2]。这样就存在着使测高不确定度最小的最优垂直基线。对于收发分置的分布式星载干涉 SAR, 这个最优垂直基线的长度为^[3]

$$B_{vopt} = \frac{-3pdB_W + \sqrt{(3pdB_W)^2 + (bc^2 - 4p^2d) \cdot 2d\bar{B}_W^2}}{bc^2 - 4p^2d} \quad (2)$$

其中 $p = c/(2R\lambda \tan \theta)$, $b = (133/300) \cos^2 \theta$, $d = (\lambda R \sin \theta / 2)^2$, θ 为雷达视角, R 为斜距, λ 为雷达系统波长, B_W 为雷达信号带宽, c 为光速。

3.2 洋流成像对基线的要求

洋流成像利用的是分布式星载干涉 SAR 的沿轨迹方向基线 B_x 。沿轨迹基线引起的两颗小卫星 SAR 回波之间的相位差为^[4]

$$\Delta \phi_a = (2\pi/\lambda)(u/V_s)B_x \quad (3)$$

其中 u 为动目标在斜距方向上的速度, V_s 为卫星运行速度。

干涉测速中为了防止速度模糊, 要求 (3) 式中的相位差必须在 $[-\pi, \pi]$ 之内。对运动速度在一定范围内的洋流进行成像时, 就要求沿轨迹基线的长度必须满足

$$B_x < [\lambda V_s / (2u)] \quad (4)$$

3.3 提高空间分辨率对基线的要求

本文中采用常用的分辨率改善因子来分析基线对分辨率提高的影响。分辨率改善因子定义为单颗卫星 SAR 图像的分辨率与提高后的分辨率之比。

提高距离向分辨率 根据距离向分辨率与带宽之间的关系, 可以知道距离向分辨率改善因子 α_r 为^[1,5]

$$\alpha_r = \rho_r / \rho'_r = 1 + [c/(\lambda \cdot B_W)] \cdot [B_v/(R \tan \theta)] = 1 + (B_v/B_{vc}) \quad (5)$$

ρ_r 为单颗卫星 SAR 的距离向分辨率, ρ'_r 为提高后距离分辨率, B_{vc} 为垂直基线的极限长度。

提高方位向分辨率 同样根据方位向分辨率与多普勒带宽之间的关系, 可以得出方位向分辨率改善因子为^[1]

$$\alpha_a \approx \rho_a / \rho'_a = 1 + [(V_s \cdot B_x)/(\lambda R \cdot B_{W_a})] \sin^2 \varphi = 1 + B_x/B_{xc} \quad (6)$$

φ 为等效斜视角, 即锥角。 B_{W_a} 为多普勒带宽。 ρ_a 为单颗卫星 SAR 的方位分辨率, ρ'_a 为提高后的方位分辨率。 B_{xc} 为沿轨迹基线的极限长度。

4 分布式星载干涉 SAR 基线分析与设计

分布式星载干涉 SAR 的系统基线与小卫星编队飞行的空间构形有关。本文主要分析绕飞轨迹空间为圆形的分布式小卫星的空间基线。

4.1 分布式星载干涉 SAR 中基线的特点

从 (1) 式可以看出, 编队构形空间为圆形的分布式小卫星绕飞轨迹平面与水平面夹角为 30° ^[7,8]。因此, 在编队构形空间为圆形的分布式星载干涉 SAR 中:

(1) 任意两颗小卫星之间的垂直基线和沿轨迹基线长度随时间周期性变化, 变化周期为轨道周期的二分之一。

(2) 垂直基线和沿轨迹基线长度具有正弦变化规律。

(3) 垂直基线和沿轨迹基线长度存在着定量关系, 它们的变化在相位上相差 90° , 最大值之比为

$$B_{vij\max}/B_{xij\max} = |\cos(\theta - 60^\circ)| \quad (7)$$

$B_{vij\max}$ 为垂直基线最大值, $B_{xij\max}$ 为沿轨迹基线最大值。

4.2 同时实现 3 种 SAR 干涉成像的分布式星载干涉 SAR 对基线的要求

对垂直基线的要求 垂直基线主要受三维成像地形高度精度和距离向分辨率改善因子的限制。三维地形成像要求垂直基线最好取 (2) 式给出的最优基线长度; 而提高距离向分辨率则希望垂直基线在满足 $B_{vij} \leq (2B_W \lambda R \tan \theta / c) = B_{vc}$ 条件下, 越长越好。

对沿轨迹基线的要求 沿轨迹基线长度主要与洋流成像和提高方位向分辨率有关。洋流成像要求沿轨迹基线长度必须满足 (4) 式; 而提高方位向分辨率则要求沿轨迹基线长度在满足 $B_{xij} \leq [(\lambda R B W_a) / (V_s \sin^2 \varphi)] = B_{xc}$ 条件下, 越长越好。

4.3 分布式星载干涉 SAR 中基线的设计方法

分布式星载干涉 SAR 基线设计中基线的选择不是独立的, 所以增加了基线设计的复杂度。从前面的分析可以看出, 这种基线之间不独立的、相互牵连的关系主要有 3 个:

(1) 垂直基线和沿轨迹基线之间的牵连。当垂直基线的最大值确定之后, 沿轨迹基线的最大值也相应确定。

(2) 三维地形成像和提高距离向分辨率对垂直基线的要求是一对矛盾。在最优垂直基线长度和极限垂直基线长度之间选择其长度: 取值越大则越有利于提高距离向分辨率, 反之则有利于三维地形成像。

(3) 沿轨迹基线长度的选取对洋流成像和提高方位分辨率的影响有可能相矛盾。当 $[(\lambda R B W_a) / (V_s \sin^2 \varphi)] < [\lambda V_s / (2u)]$ 时, 在 $B_x < [(\lambda R B W_a) / (V_s \sin^2 \varphi)]$ 范围内选取沿轨迹基线长度, 基线长度越长越好; 而当 $[(\lambda R B W_a) / (V_s \sin^2 \varphi)] \geq [\lambda V_s / (2u)]$ 时, 要满足洋流成像的要求 $B_x < [\lambda V_s / (2u)]$, 则提高方位分辨率的能力变差。

分布式星载干涉 SAR 的基线设计就是要如何能够正确协调上述 3 个关系, 使得系统的性能能够最好地满足用户要求。为了使得分布式系统能够同时兼顾 3 种 SAR 干涉成像, 本文给出侧重于三维地形成像的分布式星载干涉 SAR 空间基线设计准则:

(1) 在垂直基线长度最大值与沿轨迹基线长度最大值要求相矛盾时, 首先满足垂直基线要求。

(2) 在三维地形成像和提高距离向分辨率对垂直基线的最优要求相矛盾时, 一般首先满足最优性能较难实现的三维地形成像测高精度对垂直基线的要求。

(3) 提高方位分辨率主要针对陆地, 而洋流成像则针对海洋地形, 因此可以采用分时实现的方法解决洋流成像和提高方位分辨率对沿轨迹基线最优长度要求的矛盾。

根据上述准则, 给出分布式星载干涉 SAR 垂直基线和沿轨迹基线的取值范围分别为

$$B_{\text{vopt}} < B_{\text{vij}} < B_{\text{vc}} \quad (8)$$

$$B_{\text{xij(洋流成像)}} < \frac{\lambda V_s}{2u}, \quad B_{\text{xij}} < \min \left(B_{\text{xc}}, \frac{B_{\text{vij max}}}{|\cos(\theta - 60^\circ)|} \right) \quad (9)$$

在实际设计中, 可以根据用户对分辨率改善因子、测高精度和最小可检测速度的要求, 按照上述准则在 (8) 和 (9) 式所给的范围内选择基线长度。

5 设计实例和结果分析

利用前面的分析结果, 设计一个 L 波段分布式星载干涉 SAR 的基线。分布式干涉 SAR 中小卫星的雷达参数和中心点的轨道参数见表 1。要求系统测高精度优于 7m, 两颗卫星联合的距离向、方位向分辨率改善因子 >1.5。

表 1 L 波段分布式星载干涉 SAR 的有关参数

中心点轨道参数		雷达参数	
轨道高度	600 km	波长	0.20 m
轨道倾角	97.8°	带宽	57MHz
近心点角	90°	采样率	60.3MHz
偏心率	0	雷达视角	35°
升角点赤经	118°	脉冲重复频率	1900Hz
		天线尺寸	10m(方位)×4.5m(距离)

将表 1 中的参数分别代入 (5) 式和 (2) 式, 得到其垂直基线的极限长度和最优长度分别为 38.98km 和 11.30km。根据 (6) 式, 提高方位向分辨率所希望的沿轨迹基线长度为 30.32km; 而由 (4) 式知道, 对洋流成像, 则需要 250~750m 的沿轨迹基线^[6]。

根据 (8) 式, 可以在 [11.303km, 38.979km] 之间选择垂直基线长度。垂直基线是引起测高误差的一个主要因素, 这里要求其引起的测高误差必须小于测高精度的 50%, 即 3.5m。图 2 给出了由于垂直基线引起的高度均方根值。可以看出空间基线长度为 21.3km 引起的高度误差为 3.5m。另外, 由于要求分辨率改善因子大于 1.5, 所以基线长度必须大于极限基线长度的一半, 即垂直基线长度大于 19.49km; 沿轨迹基线长度大于 15.16km(根据 (7) 式, 则要求垂直基线长度最大值大于 13.74km)。因此这里取垂直基线长度的最大值为 21km。

3 颗卫星是可以实现稳定基线的最少卫星数目, 下面分析在上述基线设计条件下, 近心点角均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 内的 3 颗小卫星绕飞轨迹空间为圆形的分布式系统实现三维地形成像、洋流成像和提高分辨率的性能。

通过选取不同的图像组合, 用于三维成像的垂直基线如图 3 所示。在此选择下, 基线引起的高度均方差不超过 3.5m。提高距离向分辨率的基线选取如图 4 所示, 理论上距离向分辨率改善因子在 [1.47, 1.54] 内变化。

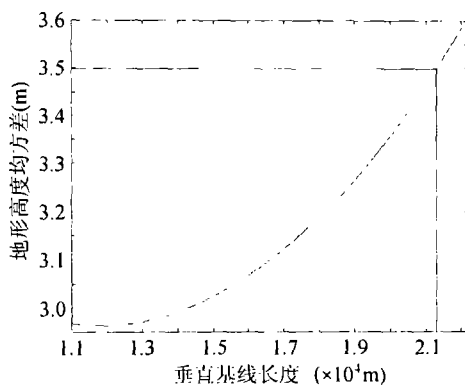


图 2 地形高度均方差随垂直基线长度的变化

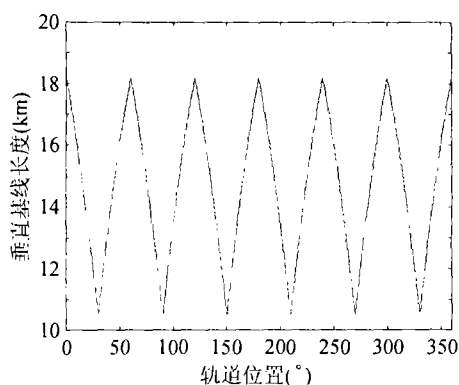


图 3 三维地形成像选择的在一个轨道周期内的垂直基线长度

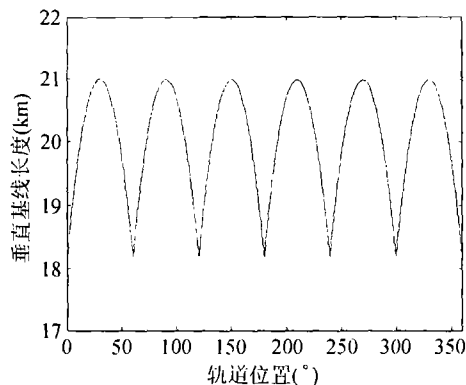


图 4 提高距离向分辨率选择的垂直基线在一个轨道周期内的变化

选择用于提高方位分辨率的基线如图 5, 得到一个轨道周期内方位分辨率改善因子在 $[1.66, 1.76]$ 范围内。采用分时的方式实现洋流成像, 要求沿轨迹基线长度在 $[100\text{m}, 800\text{m}]$ 范围内变化, 则不变轨情况下一个轨道周期内能够进行洋流成像的时间段见图 6, 纵轴为 1 表示可以进行洋流成像, 为 0 则不可以。能够洋流成像的时间段占整个轨道周期的 6.7%。

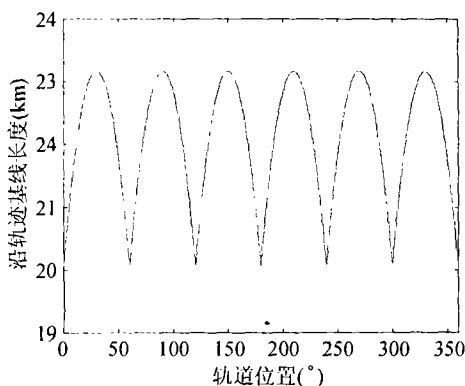


图 5 提高方位分辨率选取的沿轨迹基线长度在一个轨道周期内的变化

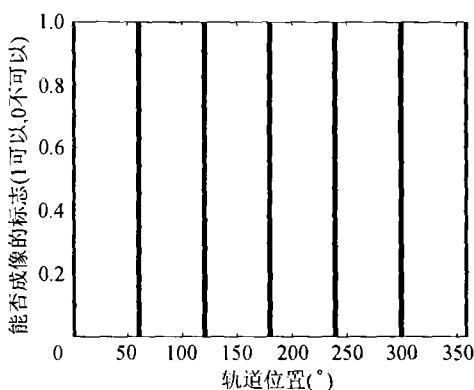


图 6 一个轨道周期内, 可以进行洋流成像的时间段

6 结束语

本文给出了地面三维成像、洋流成像和提高分辨率对干涉基线的要求, 提出了在分布式星载干涉 SAR 同时实现 3 种 SAR 干涉成像时基线设计中存在着垂直基线和沿轨迹基线最大值之间, 三维地形成像和提高距离向分辨率的最优垂直基线之间, 洋流成像和提高方位分辨率的最优沿轨迹基线之间的 3 个制约关系。根据这 3 个制约关系, 本文给出了分布式星载干涉 SAR 基线设计的一种准则, 该准则优先满足最优性能最难实现的 SAR 干涉成像的最优基线要求, 并且能够最大限度地兼顾 3 种 SAR 干涉成像对系统基线的要求。仿真结果证明这种方法可以为分布式星载干涉 SAR 系统基线设计提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] D. Massonnet, Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing(J), 2001, GRS-39(3), 506-520.
- [2] F. K. Li, R. M. Goldstein, Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing(J), 1990, GRS-28(1), 88-97.
- [3] 徐华平, 周荫清, 李春升, 星载干涉 SAR 中的基线问题, 电子学报 (J), 2003, 31(3), 437-439.
- [4] T. L. Ainsworth, *et al.*, INSAR imagery of surface currents, wave fields, and fronts, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing(J), 1995, GRS-33(5), 1117-1123.
- [5] F. Gatelli, *et al.*, The wavenumber shift in SAR interferometry, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing(J), 1994, GRS-32(4), 855-864.
- [6] R. E. Carande, Estimating ocean coherence time using dual-baseline interferometric synthetic aperture radar, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing(J), 1994, GRS-32(4), 846-854.
- [7] 林来兴, 小卫星编队飞行及其轨道构成, 中国空间科学技术 (J), 2001, 21(1), 23-38.
- [8] 陈杰, 合成孔径雷达系统星地一体化关键技术研究, [博士论文], 北京航空航天大学, 2002 年 1 月.

BASELINE ANALYSIS AND DESIGN FOR
DISTRIBUTED SPACEBORNE INTEFEROMETRIC SAR

Xu Huaping Zhou Yinqing Li Chunsheng

(Dept. of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Distributed Spaceborne Interferometric SAR(DSI-SAR) can be explored to implement three possibilities of the coherent combination of SAR images, which are DEM, ocean current imaging and improving resolution in range and azimuth. So the baseline design for DSI-SAR is more complicated than that for INSAR. In this paper, formation flying of small satellites and geometry of DSI-SAR are discussed and the requirements of three SAR coherent combinations for baselines are analyzed. Furthermore, three performance trade-offs in DSI-SAR baseline design are presented. According to these trade-offs, a method to design baseline is given and applied to an L-band DSI-SAR.

Key words Distributed, Spaceborne SAR, Interferometry, Baseline, Design

徐华平: 女, 1977 年生, 博士生, 主要从事信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 干涉 SAR, SCANSAR, 分布式小卫星等方面的研究工作.

周荫清: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号与信息处理, 雷达系统仿真, 高分辨率雷达成像, 电子对抗, 时空二维自适应信号处理, 分布式小卫星等方面的研究工作.

李春升: 男, 1963 年生, 教授, 博士, 主要从事信号与信息处理, 高分辨率雷达成像, 时空二维信号处理, 时变谱估计等方面的研究工作.