

星载 InSAR 均匀相位构形的空间基线稳定性*

刘 磊 郝晓宁

(国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

摘 要 星载 InSAR(干涉式合成孔径雷达)在对地观测任务中具有广泛的应用,其空间基线随卫星编队平台的运动而变化。本文基于卫星编队的构形原理,定义了星载 InSAR 均匀相位构形。根据干涉测量原理定义了相关基线及其稳定度,研究了不同均匀相位构形下星载 InSAR 的基线稳定性。

关键词 卫星编队 InSAR(干涉式合成孔径雷达)均匀相位 基线 稳定度

中图分类号 :V412.41 文献标识码 :A

Stability of Baselines of Spaceborne InSAR in Even Phase Configurations

LIU Lei XI Xiao-ning

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Spaceborne InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar), whose baselines may undergo complicated variations while the satellite formation flies in the space, is widely used in earth observation. Based on the principle of satellite formation, the even phase configuration for the spaceborne InSAR was defined. Then baselines and their stability were supplied from the principle of InSAR measurement, and the stability of spaceborne InSAR in different even phase configurations was addressed.

Key words satellite formation; InSAR; even phase; baseline; stability level

InSAR 技术可应用于多种对地观测任务,如地形测量和对地面目标的侦察等很多方面^[1]。不同的接收天线放在近距卫星编队中不同的伴随卫星上,就可以利用这些接收天线接收到的不同信号,干涉处理后形成目标的图像或相应信息,从而构成星载 InSAR,这也是卫星编队的一个重要应用方面。星载 InSAR 测量中,基线对测量的精度起着至关重要的作用,直接影响测量结果的精度。本文主要考虑 InSAR 测量中空间基线随时间的变化问题。

本文首先给出近距卫星编队中均匀相位构形的定义,根据 InSAR 测量的原理定义了相关基线及其稳定性,而且给出了一个作者认为可以较好地反映稳定性思想的指标——稳定度。在所给的稳定定义下,主要考虑在不同的均匀相位构形中,由于伴随卫星的不断运动,星间基线随时间不断变化的规律,研究不同编队构形中相关基线的稳定性。

1 均匀相位编队

研究编队飞行中的相对运动常用的方法有运动学法^[2]和动力学法^[3,4]。本文采用动力学法,由 Hill 方程推导得到一般卫星编队飞行的运动方程^[5]为

$$\begin{cases} x = A \sin(nt + \varphi) \\ y = 2A \cos(nt + \varphi) + C \\ z = B \sin(nt + \Psi) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 n 为中心星的平均运动角速度, t 为编队运动时间。参数 A 、 B 和 C 决定了编队构型的形状和大小。而卫星的相位角 φ 和 Ψ 决定了伴星在编队中的位置。 x 、 y 和 z 即伴星在相对运动坐标系中的

* 收稿日期 2005 - 09 - 20

基金项目:国家部委资助项目(5131701.1.1.6)

作者简介:刘磊(1980—)男,博士生。

位置。相对坐标系的原点在中心星质心, x 轴与中心星的地心矢量重合, 由地心指向其质心, y 轴在中心星的轨道面内垂直于 x 轴, 指向运动方向为正, z 轴由右手规则确定。

本文所要讨论的是较为常见的均匀相位编队, 即伴星相位角 φ 和 Ψ 取法相同, 且在 0° 和 360° 之间均分, 因此, 各颗伴星的 φ 和 Ψ 依次为

$$\begin{cases} \varphi_{i+1} - \varphi_i = 360^\circ/N, & 1 \leq i < N \\ \varphi_j = \Psi_j, & 1 \leq j \leq N \end{cases} \quad (2)$$

对该种类型的编队进行讨论也是满足实际情况的, 这是由相位均匀分布编队的优点决定的。从其构形特点看, 由于相位均匀分布编队中的不同伴星在同一干涉任务中所起的作用相同, 一颗星完全可以代替另一个星, 因而, 伴星间可以多次重复相同的相互关系, 在一个轨道周期内能够以较多的时间满足任务的需要。

2 均匀相位编队的空间基线稳定性

InSAR 空间基线^[6]随时间变化的稳定性可以体现为基线在尽可能长的工作时间内保持在标称长度的一定范围。这个标称长度和基线在其左右变化的范围由具体的任务和数字信号处理对基线的要求而定。本文研究中不限定这个标称长度, 而是用某段工作时间内基线的平均长度代替。主要限定基线在该段工作时间内可接受的变化范围, 研究基线有多长时间在该范围之内, 因为基线变化的稳定性与卫星编队的大小, 即基线的长度无关。

如上所述, 这里给出一个自定义的基线稳定性指标——基线的稳定度, 具体定义为

$$\eta = \frac{t\{ |L - L_m| \leq L_m \cdot d\% \}}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中, η 即为基线的稳定度。 T 为基线的一段工作时间, L 为基线长度, L_m 为 T 时间内基线的平均长度, $d\%$ 为所限定的基线长度在 L_m 左右变化的最大幅度, $t\{ |L - L_m| \leq L_m \cdot d\% \}$ 为基线长度保持在 L_m 左右 $d\%$ 的时间。

本文讨论的三星均匀相位编队 ($N=3$) 的相位角由 (2) 式限定, 编队基线的稳定性完全取决于编队参数 A 、 B 和 C 。以下从基线稳定性定义出发, 分析编队的稳定度与这三个量之间的关系。

(1) 水平基线

考虑不同构形中的卫星所形成的编队, 即各颗星的 A 、 B 和 C 不等的编队。由于水平基线仅与各颗星的 A 、 C 有关, 所以只需要考虑这两个量变化对水平基线稳定性的影响。此时, 编队中任意两颗星 i 和 j 之间的水平基线^[6] $|AB|_{ij}$ 为

$$\begin{aligned} |AB|_{ij} &= |y_j - y_i| \\ &= |[2A_j \cos(nt + \varphi_j) + C_j] - [2A_i \cos(nt + \varphi_i) + C_i]| \\ &= |2A_j \cos(nt + \varphi_j) - 2A_i \cos(nt + \varphi_i) + C_j - C_i| \end{aligned} \quad (4)$$

很明显, 如果编队中各伴星的 A 和 C 相等, 则伴星间的水平基线稳定性将与 A 无关, 干涉车轮 (Cartwheel)^[7,8] 属于这一特例。考虑卫星编队实际情况, 可使各伴星的 A 相同, 分析各颗卫星 C 不同给水平基线稳定性带来的影响。同时, 假设 $A \neq 0$, 因为在 $A=0$ 的情况下, 必有 $C \neq 0$, 否则两颗卫星将会发生碰撞。干涉钟摆 (Pendulum)^[9] 即属于这一情况。

将各颗卫星的相位角 (2) 式代入 (4) 式, 可得到最大水平基线为

$$\begin{aligned} |AB| &= \max\{|AB|_{12}, |AB|_{13}, |AB|_{23}\} \\ &= A \cdot \max\left\{ \left| 2\sqrt{3}\sin nt + \frac{D_{13} - D_{12}}{A} \right|, \left| 2\sqrt{3}\sin(nt + 60^\circ) + \frac{D_{12}}{A} + 3 \right|, \right. \\ &\quad \left. \left| 2\sqrt{3}\sin(nt + 120^\circ) + \frac{D_{13}}{A} + 3 \right| \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $D_{ij} = y_{0j} - y_{0i}$ 。注意, 此处 $|AB|$ 不同于各颗星的参数 A 、 B 。

利用数值法, 做出 (5) 式中一个轨道周期内 $|AB|$ 的稳定度与 D_{12}/A 和 D_{13}/A 的关系示意图可知, 在

大部分情况下基线的稳定性都近似为 100% ,但是在内部有异常区域。为了进一步细致观察该变化情况 给出取值区间进一步细化的局部示意图。

图 1 为 D_{12}/A 和 D_{13}/A 在 $[-70, 70]$ 内 ,最大水平基线 $|AB|$ 的稳定度的变化情况。图 2 为 D_{12}/A 和 D_{13}/A 在 $[-4, -2]$ 内 ,最大水平基线 $|AB|$ 的稳定度变化情况。由这两张图可以清晰地看出 ,在 $[-70, 70]$ 异常区域里同样存在着一个异常区域 ,该区域的中心点为 $(-3, 3)$, $|AB|$ 在该点的稳定性为 91.22% ,为局部最大值。在中心点处各卫星的 C 为零 ,由于上文假设各伴星的 A 值相等 ,所以中心点处对应的编队构形为三星均匀相位绕飞编队。此结果表明 ,三星均匀相位绕飞编队的稳定性可以达到局部最好。

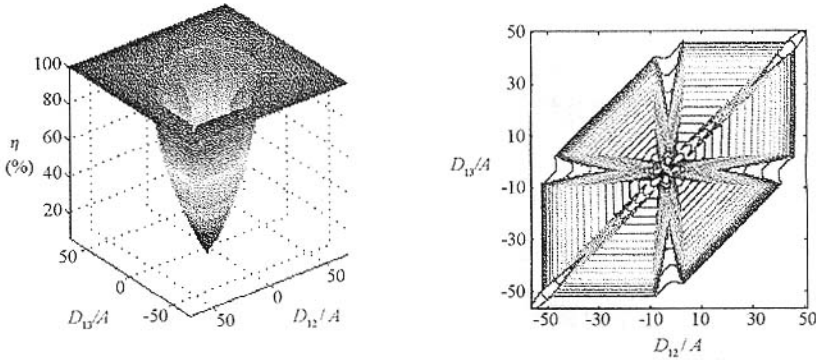


图 1 最大水平基线的稳定性

Fig.1 Stability of the maximum of horizontal baselines

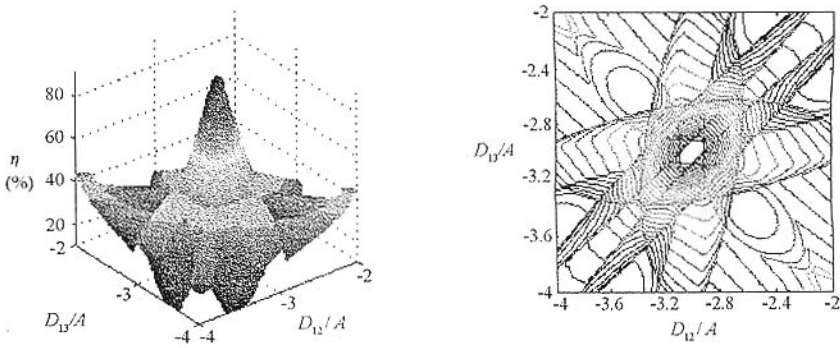


图 2 图 1 在 $[-4, -2]$ 内的局部图

Fig.2 Local plot in $[-4, -2]$ of Fig.1

同时 , $|AB|$ 的稳定度在整个区域的最小值为 5.4% ,对应于最小值的 D_{12}/A 的区间为 $[-5.63, -5.04]$, D_{13}/A 的区间为 $[-0.95, -0.36]$

(2) 垂直基线和有效垂直基线

在前述各颗卫星的相位角 φ 和 ψ 取法相同的假设条件下 ,由文献 6 中垂直基线定义式 $|S_i S_j|$ 结合三颗星的相位角 (2) 式可得到最大垂直基线为

$$\begin{aligned}
 |S_i S_j|_{\max} &= \max\{|S_1 S_2|, |S_1 S_3|, |S_2 S_3|\} \\
 &= \sqrt{\chi(A^2 + B^2)} \cdot \max\{|\cos nt|, |\cos(nt + 60^\circ)|, |\cos(nt + 120^\circ)|\}
 \end{aligned} \tag{6}$$

由文献 6 中有效垂直基线定义式可求得编队中任意两颗星 i 和 j 间的有效垂直基线为

$$|S'_i S'_j| = |S_i S_j| \cdot |\cos(\Theta - \phi_{ij})| \tag{7}$$

式中 , Θ 为干涉测量的正侧视下视角 ,本文中取 40° , ϕ_{ij} 为垂直基线 $|S_i S_j|$ 与 z 轴的夹角。

同样 ,利用各颗卫星的相位角 φ 和 ψ 取法相同的假设 ,可得到最大的有效垂直基线为

$$\begin{aligned}
 |S'_i S'_j|_{\max} &= \max\{|S'_1 S'_2|, |S'_1 S'_3|, |S'_2 S'_3|\} \\
 &= \sqrt{\chi(A^2 + B^2)} \left| \cos\left(\Theta - \arctan\left(\frac{A}{B}\right)\right) \right| \cdot \max\{|\cos nt|, \\
 &\quad |\cos(nt + 60^\circ)|, |\cos(nt + 120^\circ)|\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

由(6)式和(8)式不难看出,最大垂直基线和最大有效垂直基线的稳定性与 A 和 B 无关,用数值法可以得出其稳定度为91.22%。这表明,对于三颗 A 、 B 值相同的卫星组成的编队,如果各颗卫星的相位角 φ 和 ψ 的取法相同,且为均匀相位,那么编队的最大垂直基线和最大有效垂直基线的稳定度与 A 、 B 值无关。

理论上,还可以研究 A 、 B 值不同的卫星组成的编队,或者是相位不均匀编队,研究其相关基线随时间变化的稳定度。不过,如果变量取得太多,将给理论分析带来极大的困难。而且,InSAR的多个接收天线从构造和性能上来说是一样的,应该配置在均匀相位编队的不同伴星上,如此才可以尽可能多地重复相同的基线。最重要的是,从定性分析上说,编队中不同卫星的相对运动轨迹的形状和大小越接近,星间基线随着编队运动的变化趋势就越接近,最大基线的稳定性自然就越好。因此,本文认为不一定要分析 A 和 B 值相互差别较大的卫星组成的编队,或者是相位极不均匀的编队。

3 结论

(1)当三颗卫星在编队中处于均匀相位且 A 值相等的情况下,各卫星的 C 为零,即组成绕飞编队时,稳定性可以达到局部最好。

(2)对于三颗 A 、 B 值相同的卫星组成的均匀相位编队,编队的最大垂直基线和最大有效垂直基线的稳定度与 A 、 B 值无关。

(3)定性分析认为,均匀相位卫星编队和相对轨迹较为接近的卫星组成的编队具有稳定性较好的基线。

参考文献:

- [1] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京:国防工业出版社,2003:214-245.
- [2] 肖业伦,等. 编队飞行卫星群的轨道动力学特性与构形设计[J]. 宇航学报,2001,21(1).
- [3] 张玉银. 卫星编队飞行的动力学与控制技术研究[D]. 国防科技大学,2002.
- [4] 郗晓宁,王威,高玉东. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2003:242-267.
- [5] 刘磊. 星载干涉式合成孔径雷达卫星编队构形设计[D]. 国防科技大学,2004.
- [6] 何峰,梁甸农,刘建平. 星载双基地SAR空间几何关系和信号模型[J]. 系统工程与电子技术,2004,25(10).
- [7] Massonet D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing,2001,39(3).
- [8] Massonet D, Thouvenot E, Ramongassié S, et al. A Wheel of Passive Radar Microsats for Upgrading Existing SAR Projects[J]. In Proc. 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2000), 1000-1003, Inst. of Elec. and Electron. Eng., Piscataway, N.J., USA, 2000.
- [9] Fiedler H, Krieger G, Jochim F, et al. Analysis of Bistatic Configurations for Spaceborne SAR Interferometry[J]. EUSAR 2002.

