

星载干涉 SAR 中的基线问题

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: 基线在星载干涉 SAR 的系统设计和数据处理中起着非常重要的作用. 本文比较全面地阐述了空间基线在星载干涉 SAR 中的作用. 特别分析了星载干涉 SAR 中空间基线对 SAR 图像相关性、地距分辨率以及干涉 SAR 数据处理中的距离向平地效应和多视平均处理的影响. 讨论了星载干涉 SAR 空间基线的设计问题, 推导了空间最优基线的确定公式. 最后进行了计算机仿真, 仿真结果表明分析正确.

关键词: 基线; 星载干涉 SAR; 数据处理; 最优; 设计

中图分类号: TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0437-03

The Analysis of Baseline in Spaceborne Interferometric SAR

XU Hua-ping, ZHOU Yin-qing, LI Chun-sheng

(Dept of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Two-pass spaceborne interferometric SAR is used to produce three-dimensional terrain map by estimating the unwrapped interferometric phase and transferring the phase into terrain height. Baseline is very important for spaceborne interferometric SAR system design and data processing. In this paper, spatial baseline in spaceborne interferometric SAR was analyzed in many aspects. The statistical correlation between two SAR images from different satellite passes was presented. Influences of baseline on range flat ground frequency and multilook processing were discussed. The equation to determine the optimal spatial baseline was deduced. Finally, the results of computer simulating were presented to testify the correction of analysis.

Key words: baseline; spaceborne interferometric SAR; data processing; optimal; design

1 引言

干涉 SAR 是 1974 年由 Graham 提出^[1], 并被用于提取地形高度信息. 星载干涉 SAR 主要是通过卫星的两次飞行获得两幅 SAR 图像, 干涉后, 利用干涉相位来计算观测地形的高度信息. 基线被定义为两次飞行中天线的相对位置和时间关系: 它们的相对位置为空间基线, 相对时间为时间基线, 因为时间基线的问题比较简单, 文献中基线的研究通常针对空间基线. 在干涉 SAR 数据处理过程中, 基线起着至关重要的作用. 它决定了干涉 SAR 数据处理的可能性和精度问题.

已有文献对基线的讨论, 主要侧重于它对系统性能的影响: 文献[2]、[5]给出了基线对系统相关性的影响, 文献[3]讨论了基线与系统最优性能的关系, 文献[4]给出了极限基线的公式, 文献[7]、[8]分析了基线对系统频移的影响. 这些文献都是在讨论其它专题时引入了基线, 因此对基线的讨论比较单一. 本文比较全面、系统地分析了星载干涉 SAR 中基线对系统性能和数据处理的影响.

在基线对星载干涉 SAR 系统性能的影响方面, 本文重新推导了两幅 SAR 图像之间相关性的公式, 纠正了 Li^[2]在推导

中的错误, 使得依据相关性为零得到的极限基线确定公式与依据频谱偏移超过系统带宽^[8]得出的极限基线确定公式相一致; 文献[3]论述了星载干涉 SAR 中存在最优基线使得测高精度最高, 但没有给出最优基线的计算公式, 本文在该文献的基础上推导了最优基线的表达式. 关于基线对星载干涉 SAR 数据处理的影响, 在现有的文献中还未见讨论, 本文将基线与干涉 SAR 数据处理相联系, 推导了平地效应及极限平均视数与基线的关系式.

2 星载干涉 SAR 空间几何关系

图 1 给出了星载干涉 SAR 的空间几何关系. 地球曲面对于干涉 SAR 成像影响可以忽略, 因此近似地面为平面. 图中 A_1 、 A_2 分别表示两次飞行的天线位置, θ_1 、 θ_2 为雷达波束在点目标 P 处的本地视角, R_1 、 R_2 分别为从 A_1 、 A_2 两个天线到 P 的距离, H 为卫星高度, h 为目标高度, B 为星载干涉 SAR 的基线. 因为 $B \ll R_1$ 、 R_2 , 所以近似有

$$= (\theta_1 + \theta_2)/2 \quad \theta_1 - \theta_2, R = (R_1 + R_2)/2 \quad R_1 - R_2 \quad (1)$$

$$= -4 / \sin(\theta_2 - \theta_1) - (4 / \sin \theta_1) \cdot B \sin \theta_1 \quad (2)$$

$$= \theta_2 - \theta_1 \quad B \cos \theta_1 / R, \quad R = R_1 - R_2 \quad (3)$$

其中, λ 为雷达系统波长, $\Delta\phi$ 为两次飞行过程回波信号的相位差, 即干涉相位。

3 星载干涉 SAR 中的基线分析

3.1 基线对 SAR 图像相关性的影响

Li^[2]推导了星载干涉 SAR 两幅单视复图像的相关性。由于其推导中存在错误, 根据文献[2]中式(4f)和(4k)给出的相关性公式, 令相关性为零, 得到图 1 中星载干涉 SAR 的空间极限基线公式为 $B_c = (R / (2 r_r))$, 与 Catelli^[7]给出的结果不一致。根据文献[7]中的式(2), 空间极限基线的确定公式应为

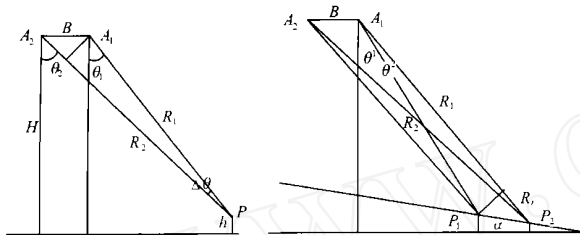


图 1 星载干涉 SAR 中的空间几何关系

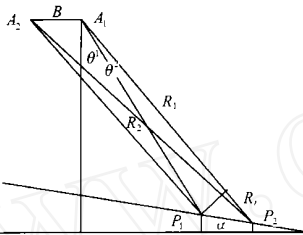


图 2 距离向相邻两点之间的相互位置关系

$$B_c = R / (2 r_r) \cdot \cos^2 \theta \quad (4)$$

下面推导两幅单视复图像的相关性, 纠正文献[2]中的错误。忽略图像之间的配准误差, (x_0, y_0) 处两幅图像之间的相关性为^[2]

$$E\{s_1 s_2^*\} = \int_0^a \left(\frac{\sin((x-x_0)/a)}{(x-x_0)/a} \right)^2 dx \cdot \exp(j \frac{4By}{R}) \cdot \int_0^r \left(\frac{\sin((y-y_0)/r)}{(y-y_0)/r} \right)^2 dy \quad (5)$$

其中, a, r 分别为方位向和地距向分辨率, x, y 分别表示方位向和地距向坐标, σ_0 为散射系数。

根据傅立叶变换的性质, 有

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin x}{x} dx = F\left(\frac{\sin x}{x}\right) \Big|_{x=0} = -\frac{1}{2} (|X| - 2) \Big|_{x=0} \quad (6)$$

其中, $F(\cdot)$ 表示对括号内的内容进行傅立叶变换, X 为 x 在频域的对应量。式(5)中第二个积分的内部含有相位项, 计算该积分的关键是给出相位项在频域引起的频移 $d(2By/R)/dy$ 。由于 R 斜距 R 随着地距 y 变化, 有 $R = R(y)$ 。因此直接计算 $d(2By/R(y))/dy$ 比较困难。这里应用 $y/R(y) = \sin \theta, 1/H = d \tan \theta / dy = \sec^2 \theta \cdot d\theta / dy$, 得

$$\begin{aligned} \frac{d(2By/R(y))}{dy} &= \frac{2B}{R} \frac{d \sin \theta}{dy} = \frac{2B}{R} \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dy} \\ &= \frac{2B}{R} \cdot \frac{H}{H} \cdot \frac{\cos^2 \theta}{H} \\ &= \frac{2B \cos^2 \theta}{R} \end{aligned} \quad (7)$$

将式(6)应用于式(5)中的第一个积分项, 式(6)和(7)应用于第二个积分项, 得

$$E\{s_1 s_2^*\} = \sigma_0 a r \left(1 - \left| \frac{2B-r}{R} \cos^2 \theta \right| \right) \exp(j \frac{4y_0 B}{R}) \quad (8)$$

根据式(8)得到的空间极限基线确定公式与式(4)相同。

3.2 基线对平地效应的影响

平地效应是指由高度不变的地面在干涉图像中引起的具有固定频率的干涉条纹。重复观测的星载干涉 SAR 在距离向的平地效应比较显著。式(2)给出了平地情况下干涉相位的计算式, 可看出式中的本地视角随斜距是变化的, 因此干涉相位也随斜距变化。因为斜距是时间的函数, 所以 $\Delta\phi$ 也是时间的函数, 利用 $\frac{d\Delta\phi}{dt}$ 对时间求导就可以得到距离向平地干涉条纹的频率。

$$f_{lat} = \frac{d\Delta\phi}{dt} = \frac{4}{R} \cdot B \cos \theta \cdot \frac{1}{R \tan \theta} \cdot \frac{c}{2} = \frac{2 \cdot c B \cos \theta}{R \tan \theta} \quad (9)$$

基线越大, 则引起的距离向平地干涉频率越大, 平地效应越明显。

3.3 基线对多视平均的影响

多视平均是干涉 SAR 中抑制噪声的重要方法^[2]。多视处理时, 其平均视数不能超过极限平均视数, 否则后续相位展开的处理就不能正常进行^[6]。下面首先推导距离向极限平均视数与基线的关系。

如图 2 所示, θ_1, θ_2 为地面斜度, θ_1, θ_2 分别表示两个点目标 P_1, P_2 处的本地视角。两点处的干涉相位差约为

$$\Delta\phi = \frac{4B}{R} (\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1) = \frac{4B}{R} 2 \sin \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \cos \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \quad (10)$$

因为像素单元距离向尺寸 $R_r \ll R$, 所以令 $\theta = (\theta_2 + \theta_1)/2$, 有 $\theta_2 - \theta_1 = 2\theta$ 。由图 2 得

$$\theta_2 - \theta_1 = (R_r \tan(90^\circ - \theta) - R_r \tan(90^\circ - \theta - \theta)) / R \quad (11)$$

将式(11)代入式(10), 得

$$\Delta\phi = \frac{4B}{R} \cdot (R_r \tan(90^\circ - \theta) - R_r \tan(90^\circ - \theta - \theta)) \cos \theta \quad (12)$$

则距离向多视极限平均视数为

$$n_r = \lfloor (4B/R) \cdot (R_r \tan(90^\circ - \theta) - R_r \tan(90^\circ - \theta - \theta)) \cos \theta \rfloor \quad (13)$$

符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取符号内数字的整数部分。同样可以得到方位向的极限平均视数为

$$n_a = \lfloor ((2B/Rr_0) \cdot (2R_a \tan \theta \cdot H - R_a^2 \tan^2 \theta)) \rfloor \quad (14)$$

其中 R_r, R_a 表示像素单元的斜距向、方位向尺寸。

从式(13)和式(14)可以看出, 随着基线的增大, 极限平均视数减小, 更大地限制了多视平均的噪声抑制能力。

3.4 基线对干涉 SAR 地距向分辨率的影响

根据干涉 SAR 的基本原理以及 SAR 图像地距分辨率的定义式可以知道, 干涉 SAR 的地距向分辨率由 SAR 单视复图像距离向频谱的共同部分决定。根据文献[9]给出的干涉 SAR 图像与 SAR 单视复图像分辨率的关系式, 可以得到

$$r_{insar} = \frac{r}{1 - B/B_c} \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 干涉 SAR 的距离向分辨率随着基线的增加而变差。

4 星载干涉 SAR 的最优基线

星载干涉 SAR 中基线越大则相关性降低, 测高精度下降; 但是基线越大, 由相位差和基线本身长度的不确定性引起的高度的测量误差越小^[4]。这样就存在着使星载干涉 SAR 工作在最佳状态的最优基线。本文在 Mrstik^[3]工作的基础上, 推

导星载干涉 SAR 最优基线的表达式.

目标高度估计方差 σ_h 的确定公式为^[3]

$$\sigma_h = \sqrt{(\sigma_R \cos \theta)^2 + (R \sin \theta)^2 + (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \quad (16)$$

其中, σ_R 为斜距方差, σ_1 为闪烁效应引起的视角方差, σ_2 为相位展开误差引起的视角方差. 根据文献^[3], 有

$$\sigma_R = \sigma_r^{\text{insar}} / \sqrt{12}, \quad \sigma_1 = (0.6 \sigma_r^{\text{insar}}) / (R \tan \theta) \quad (17)$$

下面详细推导 σ_2 的计算式. 根据图 1 和式(2)、(3), 得

$$\sin \theta = \frac{R^2 + B^2 - (R + R)^2}{2RB} = \frac{R^2 + B^2 - [R - \sqrt{(4 - \dots)^2}]^2}{2RB} \quad (18)$$

通过计算 σ_2 对 B 的导数, 得

$$\frac{d\sigma_2}{dB} = \dots / (4 \cos \theta \cdot B) \quad (19)$$

又因为非模糊相位的估计误差为^[10]

$$\sigma_2 = (2 \sigma_r^{\text{insar}})^2 / 4 SNR^{\text{insar}} \quad (20)$$

因此有

$$\sigma_2 = \sigma_r^2 / 16 (B \cos \theta)^2 SNR^{\text{insar}} \quad (21)$$

其中 $SNR^{\text{insar}} = (BW - f_{\text{flat}}) / f_{\text{flat}}$, 为干涉图像的信噪比. $f_{\text{flat}} = f_{\text{flat}} / 2$, 为平地频率.

将式(17)、(21)代入式(16), 并对 B 求导, 令导数为零, 得到最优基线的确定公式为

$$B_{\text{opt}} = \frac{-3adBW + \sqrt{(3adBW)^2 + (bc^2 - 4a^2d) \cdot 2dBW^2}}{bc^2 - 4a^2d} \quad (22)$$

其中有

$$a = \frac{c}{R \sin \theta}, \quad b = \frac{133}{300} \cos^2 \theta, \quad d = \left(\frac{R \sin \theta}{4} \right)^2 \quad (23)$$

若考虑地形坡度的影响, 只需将式(23)中的 b 修正为

$$b = \frac{1}{12} \cos^2 \theta + 0.36 \frac{\sin^2 \theta}{\tan^2(\dots)} \quad (24)$$

在设计星载干涉 SAR 的基线时, 其长度必须小于极限基线, 并且最好接近于最优基线.

5 计算机仿真与结果

采用最优基线, 对圆锥地形进行 L 波段星载干涉 SAR 回波信号仿真. 两幅 SAR 单视复图像干涉处理后, 其干涉相位图如图 3. 图 4 给出了它去平地后的相位图, 反映出了圆锥地形特性.

基线超过极限基线时, 干涉 SAR 数据处理将无法进行. 图 5 给出了基线大于极限基线时的干涉相位图. 可以看出干涉条纹不能正确反映出地形特性.

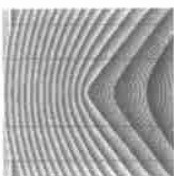


图 3 干涉相位图



图 4 去平地后的干涉相位图

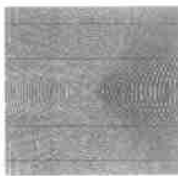


图 5 基线过大时的干涉相位图

6 结论

根据本文对星载干涉 SAR 基线的分析, 可以得到以下结论:

- (1) 基线的存在是两幅 SAR 图像进行干涉的基础, 它在干涉 SAR 中的起着至关重要的作用.
- (2) 基线影响星载干涉 SAR 中单视复图像之间的相关性, 基线越大, 相关性越差.
- (3) 基线会引起干涉 SAR 中的平地效应, 基线越大, 平地频率也越大.
- (4) 随着基线的增大, 它对多视平均抑制噪声性能的限制也越强.
- (5) 基线会导致干涉 SAR 的地距分辨率降低, 基线越大, 地距向分辨率越差.
- (6) 在基线设计时必须满足小于极限基线的要求, 且越接近最优基线, 高度测量的精度越高.

参考文献:

- [1] Graham L. C. Synthetic interferometric radar for topographic mapping [J]. Proc of the IEEE, 1974, 62(6): 763 - 768.
- [2] Li F K, et al. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Trans, 1990, GE-28(1): 88 - 97.
- [3] Mrstik V, et al. Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Trans, 1996, GE-34(1): 219 - 228.
- [4] Zebker H A et al. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar [J]. IEEE Trans, 1994, GE-32(4): 823 - 836.
- [5] Zebker H A, et al. Decorrelation in interferometric radar echoes [J]. IEEE Trans, 1992, GE-30(5): 950 - 959.
- [6] 徐华平, 等. 干涉 SAR 中相位图的噪声抑制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(1): 16 - 19.
- [7] Prati C, et al. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys [J]. IEEE Trans, 1993, AES-29(1): 135 - 143.
- [8] Gatelli F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry [J]. IEEE Trans, 1994, GE-31(4): 855 - 864.
- [9] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Trans, 2001, GE-39(3): 506 - 520.
- [10] Spagnolini U. 2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation [J]. IEEE Trans, 1995, GE-33(3): 579 - 589.

作者简介:



徐华平 女, 1977 年出生于陕西渭南, 在读博士研究生, 主要从事信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 星载干涉 SAR、SCANSAR 模式的实现方法等.

周荫清 (见本期 385 页)