

干涉合成孔径雷达基线的估计

胡庆东 毛士艺

(北京航空航天大学电子工程系, 北京, 100083)

ESTIMATION OF INTERFEROMETRIC SAR BASELINE

Hu Qingdong, Mao Shiyi

(Department of Electronics Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘 要 研究了对于干涉合成孔径雷达系统有重要影响的基线的估计方法。根据多飞干涉合成孔径雷达系统的特性,基线在平台的运动过程中是变化的。为了充分利用现有的资料,首先根据干涉系统的轨道参数计算基线参数,然后利用有限的参考点信息,如角闪烁器,形成迭代算法,从而实现准确估计基线在运动中特征的目的。意大利 Etna 火山口数据的处理结果验证了本文提出算法的可靠性。

关键词 干涉合成孔径雷达 基线 估计 轨道参数 迭代

中图分类号 TN957.52, V243.2

Abstract The baseline is the key factor in InSAR systems, which will decide the accuracy of the target height calculated from the InSAR. For a two-pass InSAR system, the parameter of baseline will change during the flying. And it should be estimated differently. The common way for calculating the Baseline is based on the DEM. Unfortunately, DEM is always difficult to obtain. To use the available data fully, this paper first calculates the baseline by the geometry of orbits. Then depending on the key points, e.g. reflection corners, this paper shows an iterative way to refine the baseline. The raw data of Etna in Italy, has been used to verify this algorithm.

Key words InSAR, baseline, estimation, orbit geometry, iteration

干涉合成孔径雷达(InSAR)利用 2 幅或 2 幅以上雷达的复回波信号,在反映目标幅度的同时利用相位信息提取雷达天线到的目标距离差以获得目标的高度。利用雷达信号的相位信息是 Graham^[1]在 1974 年首先提出的,利用雷达信号的相干性可以获得相位差干涉条纹图像,相位差经相位展开(unwrapping)处理可得到距离差,从而根据干涉系统几何关系得到目标高度等信息。其中位于空间不同位置的雷达天线之间的距离称为系统基线。对于采用单一天线、多次飞行的单发单收合成孔径雷达系统称为多飞方式,一般为星载系统所采用;而采用 2 部天线一部负责发射两部同时接收的单发双收合成孔径雷达系统称为单飞方式,一般多为机载系统所采用。

干涉合成孔径雷达的系统分析证明基线的长度及其倾角是决定目标高度精度的关键因素。对于单飞方式天线是固定的,基线长度及倾角在运动过程中保持不变。而对于多飞方式,基线决定于运动平台之间的距离,并且运动过程中平台之间的关系不可能保持不变。这要求在精确计算某一点处基线参数的同时,应估计出基线在运动过程中的变化关系。现有的对于

多飞方式的 InSAR 系统基线的估计依赖于地形高度 (DEM) 数据的迭代处理, 如 Seymour^[2] 与 Singh^[3] 等。然而许多情况下测绘带的 DEM 数据是未知的, 并且这些方法大多并未给出基线的改变等参数。基于现状, 首先根据卫星轨道参数估计出 InSAR 系统的基线及其变化, 然后利用测绘带中的特征点, 如角闪烁器等采用迭代算法提高基线的长度及倾角的估计精度。

1 干涉合成孔径雷达基线及影响

干涉合成孔径雷达系统的几何关系^[4]如图 1 所示, 其中: ϕ 为经相位展开后的干涉相位值; H 为平台的飞行高度; r_0 为到目标点的斜距; r_c 为到图像中心的斜距; θ 为到 p_1 的下视角与图像中心下视角的差; θ_d 为到高度为 Z_0 的 p_2 点的下视角与图像中心的差; B_{para} 为基线 B 在斜距方向的投影; B_{perp} 为基线 B 在斜距垂直方向的投影。干涉合成孔径雷达系统存在如下关系^[4]

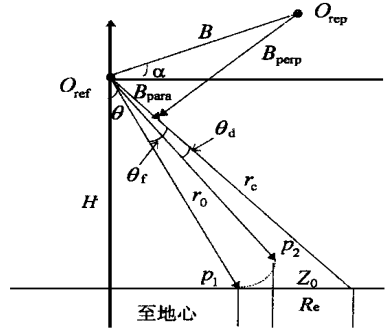


图 1 干涉 SAR 系统几何的关系图

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{B^2}{2r_0} - B \sin(\theta - \alpha) \right] \quad (1)$$

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

基线各参数之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} B^2 &= B_{perp}^2 + B_{para}^2 \\ B_{perp} &= B \cos(\theta - \alpha) \\ B_{para} &= B \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

目标高度精度与基线参数之间的关系为

$$\frac{\partial h}{\partial B} = \frac{r_0 \sin \theta}{B \cot(\theta - \alpha)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = -r_0 \sin \theta \quad (5)$$

按照表 1 所示的系统参数计算可看出, 当目标的高度测量精度为 1m 时, 基线长度须保持 10^{-4} 精度, 而天线倾角 α 必须保持在 10^{-6} 精度。实际处理中将基线长度与倾角统一在对于 B_{perp} , B_{para} 的影响中。

表 1 干涉合成孔径雷达系统计算参数表

雷达载频	9.6GHz
基线 B	60m
基线倾角 α	0°
下视角 θ	60°
平台高度 H	220km

根据上述计算可以看出, 基线是决定干涉系统精度的关键参数, 应当准确得到并且实时地计算相应方位向的基线参数。

2 基于轨道几何关系的基线估计

根据干涉形成的基本条件, 平台在飞行过程中应当尽量保持平行, 即基线保持不变。在此条件下获得的 SAR 图像之间的相干叠加才能产生高质量的干涉条纹。由此, 可以根据两次飞行过程中平行轨道在相同方位向上所对应天线之间的距离计算基线。具体的计算过程如下:

首先进行图像之间的对准, 使相同的像素点一一对应, 从而可以保证在相同的方位向上

计算基线。同时由于平台在飞行轨迹之间可能存在一定的夹角, 为了准确获得飞行过程中基线的变化, 必须计算多点的基线以跟踪基线的变化。在轨道的参数文件中仅提供少数几个位置点的位置及速度矢量, 这是难以满足精确计算基线的要求, 因此必须对重复轨道 O_{rep} 进行插值。为提高计算精度, 根据平台飞行轨迹的弧线特性, 插值是按弧线完成的。这由各矢量的空间几何关系确定的轨道所在圆的参数来实现。由于基线是轨道之间最短的距离, 首先在插值后的重复轨道 O_{rep} 中寻找与参考轨道 O_{ref} 中的某一确定点 M_i^{ref} 之间距离最近的 2 点 p_1, p_2 (插值后这 2 点之间的距离较短, 其弯曲程度在地球的半径尺度下可忽略, 因而其连线可视为直线), 对应的直线方程 l_{ref} 为

$$\frac{x - x_{p1}}{x_{p2} - x_{p1}} = \frac{y - y_{p1}}{y_{p2} - y_{p1}} = \frac{z - z_{p1}}{z_{p2} - z_{p1}} = k_i \quad (6)$$

以点 $M_i^{ref}(x_i, y_i, z_i)$ 的速度矢量方向为法向量的并过该点可确定一平面 S

$$v_x(x - x_i) + v_y(y - y_i) + v_z(z - z_i) = 0 \quad (7)$$

由此可确定该平面与重复轨道上 2 点连线 l_{ref} 的交点 o , 可以证明该点位于确定 l_{ref} 的 2 点之间。此时重复轨道 O_{rep} 上的点 o 与参考轨道点 M_i^{ref} 之间的距离则为该方位向处基线 B 的长度, 同时可根据平台高度矢量 H_0 与斜距方向之间的夹角确定天线的下视角 θ , 从而得到基线的参数 B_{perp}, B_{para} 。依据同样的方法可以确定出几个方位向上点所对应的基线及其倾角, 从而可以确定基线在平台运动过程中的变化情况参数 dB_{perp}, dB_{para} 。

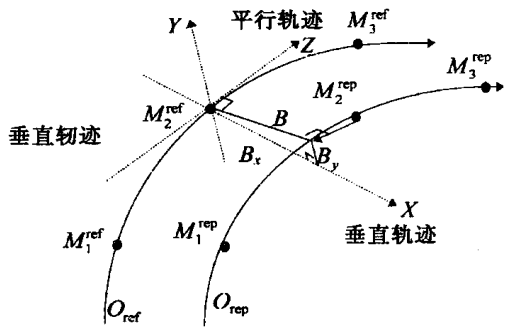


图 2 多飞方式卫星飞行轨道参数及基线关系图

3 基于参考点的基线修正

为了得到高度的准确值, 进一步提高基线计算的精度是必要的。通常基线精度的提高是通过已有的数字高度图 (DEM) 来完成的, 如 M. S. Seymour^[2] 等人首先将数字高度图与干涉相位图对准, 然后利用形成干涉相位的 SAR 图像之间的几何关系, 使得得到的干涉相位图与由数字高度图得到的结果之间的均方差最小, 从而形成迭代以求得最终的干涉系统的基线及其参数。K. Singh^[3] 等则基于数字高度图已知的条件下, 由傅立叶变换得到基线的参数。而大多情况下 DEM 数据难以获得, 只能根据某些特征点, 如角闪烁器等来实现来提高基线的计算精度。根据已知特征点的高度计算无模糊的相位值及对应相位展开后的值的差别建立基线参数方程, 从而计算基线的参数。

根据干涉 SAR 的几何关系及余弦定理 θ, H, r_c 及地球半径 R_e 之间有

$$\cos \theta = \frac{(H + R_e)^2 + r_c^2 - R_e^2}{2(H + R_e)r_c} \quad (8)$$

同理可以得到 θ_1 与 θ_2 为

$$\theta_1 = \arccos \left[\frac{(H + R_e)^2 + r_0^2 - (R_e + Z_0)^2}{2(H + R_e)r_0} \right] - \theta \quad (9)$$

根据 SAR 成象的原理, 空间位置不同但斜距相同点的回波位于同一距离门内, 在以斜距为参数的成象处理中是无法区分的, 即高度为 Z_0 , 斜距为 r_0 , 下视角为 θ 的点在图像中被表示成为高度与图像中心参考点高度相同, 下视角为 θ_i , 斜距为 r_0 的点。所以首先应将实际参考点参数转换到图像中对应点参数。

天线视角为 $\theta - \theta$ 时, 斜距为 r_0 , 与测绘中心高度相同的目标的相位差可以表示为

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{B^2}{2r_0} - B \sin((\theta_c - \alpha) + \theta_i) \right] = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{B^2}{2r_0} - B_{\text{para}} \cos \theta - B_{\text{perp}} \sin \theta_i \right] \quad (11)$$

斜距为 r_0 、高度 Z_0 的目标在天线视角为 $\theta_c - \theta$ 时对应的斜距差 l_z

$$l_z = B^2/2r_0 - B_{\text{perp}} \sin \theta_i - B_{\text{para}} \cos \theta \quad (12)$$

由于实际 SAR 成像是以斜距为坐标的, 此时高度为 Z_0 、斜距为 r_0 的目标点在 SAR 图像中的实际相位差须经过坐标转换。根据干涉图像经相位展开算法的相位值经坐标转换的相位差 ϕ_{uwp} 可以表示为

$$\phi_{\text{uwp}} = \phi_{\text{uwp}}^1 + \phi - (4\pi/\lambda)(B^2/2r_0 - l_z/r_0) \quad (13)$$

其中: ϕ_{uwp}^1 是根据相位展开算法得到的无模糊相位差值。

根据式(13)可以计算得到与关键点对应的相位展开值与根据基线参数得到的对应参考点的绝对相位差之间的关系

$$Ax = B \quad (14)$$

其中:

$$x = [B_{\text{para}}^c \quad dB_{\text{para}} \quad B_{\text{perp}}^c \quad dB_{\text{perp}}]^T; \quad B = [\phi_{\text{uwp}} \quad \phi_{\text{uwp}}^1 \quad \dots \quad \phi_{\text{uwp}}^1]^T_{1 \times n};$$

$$A = \frac{4\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin \theta_i^0 & \sin \theta_i^0 dr^0 & \cos \theta_i^0 & \cos \theta_i^0 dr^0 \\ \sin \theta_i^1 & \sin \theta_i^1 dr^1 & \cos \theta_i^1 & \cos \theta_i^1 dr^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin \theta_i^{n-1} & \sin \theta_i^{n-1} dr^{n-1} & \cos \theta_i^{n-1} & \cos \theta_i^{n-1} dr^{n-1} \end{bmatrix}_{n \times 4}$$

因此数值计算中易产生奇异矩阵, 而奇异值分解法具有良好的数值性态^[5,6], 采用奇异值分解法将矩阵 A 可分解为

$$A = U \Sigma V^T, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma & 4 \\ \mathbf{0} & n-4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中: $U_{1 \times 4}$, $V_{1 \times n}$ 是正交阵; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_0 \quad \dots \quad \sigma_3)$, $\sigma_0 \quad \sigma_1 \quad \dots \quad \sigma_2 > 0$

从而可以得到 x 即基线参数的最小范数解。

至此, 完成修正基线参数的一个循环, 当两次计算得到的基线参数差值小于某一误差限时, 则可求得系统基线各参数值。

4 实例分析

根据上述算法计算得到的意大利 Etna 山脉火山口的数字地形高度图如图 3 所示; 图 3(a) 是地形的拓扑投影图像; 图 3(b) 是高度三维图。与现有意大利 Etna 山脉的结果对比说明利用本算法计算得到的数字高度图像是可靠的。其中高度是相对高度, 与实际高度之间存在误差, 可以通过关键点参数得以校正。

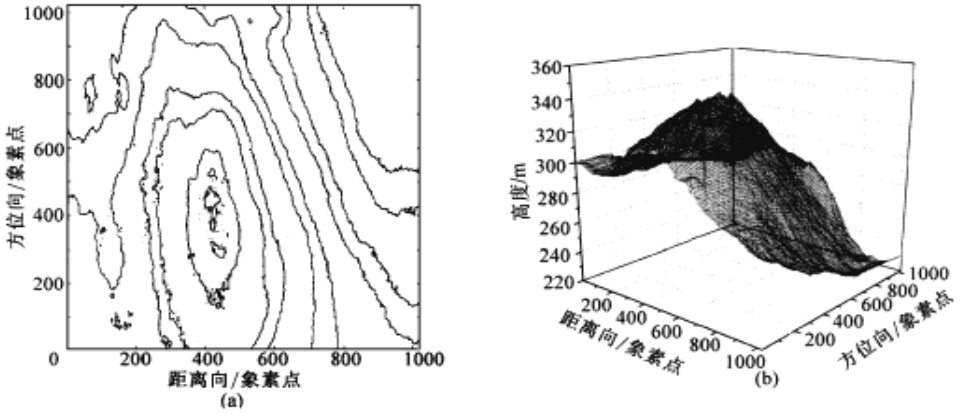


图 3 Etna 山脉数字地形高度图及地形拓扑图

(a) 地形拓扑投影图像; (b) 高度三维图

参 考 文 献

- 1 Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 763 ~ 768
- 2 Seymour M S, Cumming I G. An iterative algorithm for ERS baseline estimation. *Fringe96 Workshop on ERS SAR Interferometry* ESA, 1996
- 3 Singh K, Stussi N, Keong K L, *et al*, Baseline estimation in interferometric SAR. in 3rd ERS symposium, Florence, ESA, 1997, <http://florence97.res-symposium.org/>, 1997
- 4 Griffiths H. Interferometric synthetic aperture radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1995, 247 ~ 256
- 5 蒋正新, 等. 矩阵理论及其应用. 北京: 北京航空学院出版社, 1987. 117 ~ 125
- 6 徐树方. 矩阵计算的理论与方法. 北京: 北京大学出版社, 1995. 206 ~ 210