

主星带辅星编队单基线 InSAR 定位、测高两种方法

黄海风, 梁甸农, 何 峰

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 该文对主星带辅星编队分布式 SAR(Synthetic Aperture Radar) 的空间几何关系和工作原理进行分析, 指出主星带辅星编队 SAR 用于干涉测高和定位具有星载双站、较大斜视, 空间基线等特点和难点, 不能基于经典干涉 SAR 几何下的测高方法进行分析. 提出基于多普勒中心频率和基于距离模型的两种定位和测高方法, 仿真验证了两种定位和测高方法的正确性. 指出由于多普勒中心频率方程只利用了合成孔径中心时刻附近的距离信息, 而距离模型方程可以利用合成孔径时间内的所有距离信息, 因此从定性角度来说, 基于距离模型的定位测高方法优于基于多普勒中心频率的定位测高方法, 仿真结果也说明了这一点.

关键词: 分布式合成孔径雷达; 主星带辅星编队; InSAR 测高; 空间基线; 距离模型; 定位

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)06-1084-04

Two Methods of Spaceborne Multistatic InSAR Geolocation and DEM Generation

HUANG Hai-feng, LIANG Dian-nong, HE Feng

(Electronic Science and Engineering College, The National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The article analyses the geometry and principle of spaceborne multistatic interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system. It is shown that conventional method of InSAR digital elevation model (DEM) generation can not be used here, because of the features of multistatic, large squint angle and space baseline of spaceborne multistatic InSAR system. Two methods of multistatic InSAR geolocation and DEM generation are presented: one is based on Doppler centroid equation, and the other is based on range model equation. Simulation results show that the two methods are correct. Doppler centroid equation only makes use of range values between target and satellites, which is nearby the centre of synthetic aperture, while the range model equation can use all range values. So the method based on range model equation is more excellent than another one, which is proved by simulation results.

Key words: distributed SAR; spaceborne multistatic formation; InSAR DEM generation; space baseline; range model equation; geolocation

1 引言

星载分布式 SAR 是将卫星编队和星载 SAR 技术相结合形成的新体制雷达系统. 目前, 国内外对这种新体制雷达系统仍处于概念研究阶段, 欧空局提出主星带辅星群体制分布式 SAR 概念系统(Interferometric Cartwheel“干涉车轮”计划^[1,2]), 系统主要完成 InSAR 测高、超分辨率成像和顺轨干涉洋流测速等任务, 以提升主星雷达的功能, 基本的工作原理是: 现有计划中的雷达装置发射雷达脉冲, 经地面反射, 被一个只有接收设备有效载荷的编队星群接收. 干涉车轮利用在距离向分离获取的数据可以通过干涉计算获得数字高程图(DEM), 其实现方法类似于双天线单通过干涉 SAR, 但复杂程度大大提高. 目前国内外公开文献都是基于经典干涉 SAR 测高几何(同距离高度平面)进行分析, 这与实际情况不符. 本文首先从主星带辅星编队 InSAR 几何关系出发, 分析其与经典情况的差异; 其次, 将文献[3]基于多普勒中心频率的精

确的地理编码方法推广到主星带辅星编队干涉定位、测高中; 再次, 给出基于距离模型的定位和测高方法, 其中距离模型采用精度较高的星载双基地等效平行轨迹距离模型; 最后分别对两种距离模型和两种定位、测高方法的性能进行仿真分析.

2 主星带辅星编队 InSAR 几何关系

经典星载干涉 SAR 的几何关系通常如图 1 所示, S_1 、 S_2 的距离-高度平面重合(正侧视或斜视), 基线落在此平面内, 这种二维几何给干涉测高处理带来很大简化. 在主星带辅星编队飞行 InSAR 中, 测绘带内散射点经大卫星雷达天线照射后向各方向散射, 分别被小卫星 S_1 、 S_2 的雷达接收, 波程差为散射点到两个小卫星距离差, 与散射点到主星的距离无关. 图 2 中所示为小卫星 S_1 的轨道坐标系下的几何关系: S_1 、 S_2 间的空间基线长度等于 B , 其方位角和高度角分别等于

α, β ; S_1 地心距为 H_0 , OS_1T 平面与 S_1 轨道面之间二面角为 Ψ , S_1 运动方向与视线方向夹角为斜视角 φ , 如果采用表 2 的典型几何参数, 主星和辅星相距约 200km 时, 斜视角 $\varphi \approx 98.3^\circ$, 可见偏离正侧视的情况较大. T 与 S_1 间的距离 r_1 和下视角 θ 决定了 T 的地心距 h . 本文假设主星的方向向天线方向图相对于波束中心对称, 辅星天线方位向尺寸小, 其增益相对主星天线小且主瓣宽得多, 主星和辅星波束同步, 因此收发天线的方位向合成功率方向图与主星方位向天线方向图形状相同, 多普勒中心频率与主星天线波束中心对应, 目标 T 位于主星的距离-高度平面内(OST 平面). 成像过程中, 目标在雷达不同方位上的回波经方位向聚焦后压缩到该距离-高度平面上, 双站单视复图像中的保留相位 $\frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_{s1}$ ($r_{s1} = r_s + r_1$) 对应的就是目标位于天线距离-高度平面时的斜距 r_s . 由于主星与辅星相距较远(大于极限基线), 因此主星 SAR 图像与辅星图像相关性为零, 在主星带辅星编队 SAR 干涉测高中无法利用主星的图像信息, 这说明辅星与目标的距离是未知的, 并且是斜视的, 故而不能直接得到图 1 几何中的 r_1, r_2 , 实际的几何关系不是图 1 中的一个平面内的几何关系, 而是图 2 所示的空间几何关系. 正是由于主星带辅星编队 SAR 的双站、较大斜视、空间基线等特点给成像和干涉处理带来很大困难.

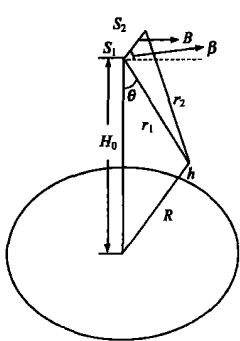


图 1 经典星载干涉 SAR 几何关系

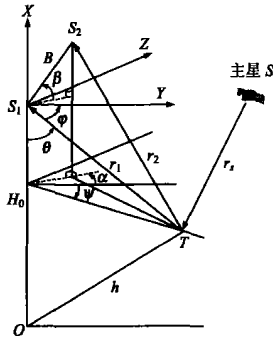


图 2 主星带辅星编队飞行 InSAR 几何关系

3 基于多普勒中心频率的定位、测高方法

在地心惯性坐标系下, 在主星合成孔径中心时刻, 卫星 S_1 位置用 r_{s1}^i , 速度矢量用 V_{s1}^i 表示; 卫星 S_2 位置用 r_{s2}^i , 速度矢量用 V_{s2}^i 表示; 主星 S 位置用 r_s^i , 速度矢量用 V_s^i 表示; 目标位置用 r_T^i , 速度矢量用 V_T^i 表示, 则有:

$$|r_T^i - r_{s1}^i| + |r_T^i - r_{s2}^i| = r_{s1} \quad (1)$$

$$|r_T^i - r_{s2}^i| - |r_T^i - r_{s1}^i| = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi \quad (2)$$

$$f_{dcl} = - [(V_T^i - V_{s1}^i) \cdot (r_T^i - r_{s1}^i) / |r_T^i - r_{s1}^i| + (V_T^i - V_s^i) \cdot (r_T^i - r_s^i) / |r_T^i - r_s^i|] / \lambda \quad (3)$$

$$h = |r_T^i| \quad (4)$$

式(1)建立了在主星合成孔径中心时刻, 目标与主星和辅星之间的距离和方程, r_{s1} 通过双站 SAR 成像得到. 式(2)建立了目标与两辅星的距离差与绝对干涉相位的关系, $\Delta\phi$ 通过相

位解缠得到. 式(3)建立了多普勒中心频率与卫星、目标位置和速度矢量的关系, 其中多普勒中心频率可以采用成熟的杂波锁定方法估计. 三颗卫星的位置和速度矢量假设通过测量系统精确得到, 静止目标的位置和速度矢量可相互表示($V_T^i = \Omega_C \times r_T^i$, Ω_C 为地球角速度矢量), 因此由式(1)~(3)可以对静止目标定位, 进而由式(4)容易得到目标的绝对高程 h .

若参考坐标系采用 S_1 轨道坐标系, 在主星合成孔径中心时刻, 由图 2 中的几何关系可知: S_2 点的坐标为 $r_{s2}^s = (B \sin\beta, B \cos\beta \cos\alpha, B \cos\beta \sin\alpha)$, 散射点 T 坐标为 $r_T^s = (-r_1 \cos\theta, r_1 \sin\theta \cos\Psi, -r_1 \sin\theta \sin\Psi)$, 速度矢量 $V_T^i = M_{s1}^i \cdot V_T^i$ (M_{s1}^i 为地心惯性坐标系到 S_1 轨道坐标系的变换矩阵), 主星 S 的坐标为 $r_s^s = (x_s, y_s, z_s)$, 速度矢量 $V_s^i = M_{s1}^i \cdot V_s^i$, 则式(1)~(4)变为

$$|r_T^s - r_{s1}^s| + r_1 = r_{s1} \quad (5)$$

$$|r_T^s - r_{s2}^s| - r_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi \quad (6)$$

$$f_{dcl} = - [V_T^s \cdot r_T^s / r_1 + (V_T^s - V_s^s) \cdot (r_T^s - r_s^s) / |r_T^s - r_s^s|] / \lambda \quad (7)$$

$$h = \sqrt{H_0^2 + r_1^2 - 2H_0 r_1 \cos\theta} \quad (8)$$

与式(1)~(4)基于地心惯性坐标相比, 式(5)~(8)给出了目标 T 位置(相对于卫星 S_1 的球坐标)与基线矢量、干涉相位等参数的关系, 二者本质是一致的.

4 基于星载双站 SAR 距离模型的定位、测高方法

式(3)和(7)多普勒中心频率方程需要知道三颗卫星的速度矢量. 下文从另一个角度来解释干涉测高的原理, 从而得到式(3)或(7)的替代方程. SAR 成像实际是将三维目标投影到二维斜距平面上(即二维斜距图像), 图像上的任一像素点的灰度值由三维场景中具有相同距离迁徙曲线(用距离模型表示)的所有点目标的灰度值叠加而成, 因此 SAR 成像无法区分这些点目标, 或者说这些点目标的三维位置对于 SAR 图像来说是模糊的. 一般具有相同距离模型的所有点目标落在一条曲线上, 本文称之为模糊曲线. 例如, 机载 SAR 中, 飞机平台直线飞行, 可以将其等效为一直线雷达阵列, 点目标与各阵元的距离由距离模型来确定. 容易证明, 以各阵元为中心, 以阵元到点目标的距离为半径的球面相交后将形成一条圆弧, 因此机载 SAR 中目标的模糊曲线是一条圆弧线. 既然模糊曲线上的点与雷达的距离在孔径中任一时刻都相同, 因而距离变化率相同, 那么它们的多普勒特性也相同, 因而也可以从多普勒观点解释, 即雷达各收发位置的等多普勒圆锥面相交后也是圆弧线, 两种解释得到了相同的结论. 在经典星载正侧视干涉 SAR 中, 如果不考虑地球自转, 则目标的模糊曲线由以 S_1 为圆心, 以 r_1 为半径的球面与图示平面相交而成, 也是一段圆弧. 若考虑地球自转, 可以采用斜视等效距离模型来分析^[4]. 对于干涉 SAR 来说, 点目标对每个通道都有一条模糊曲线, 点目标所在位置正是两条模糊曲线的交点, 因此目标的三维坐标, 进而高度被唯一的确定. 仍然考虑图 1 的情况, 目标 T 既在以 S_1 为圆心, 以 r_1 为半径的圆弧上, 又在以 S_2 为圆心, 以 r_2 为半径的圆弧上, 因此可以确定目标 T 的高度. 上述分析说明目标的距离模型、多普勒方程或模糊曲线

是我们需要的替代方程,与多普勒中心频率方程相比,这种方法可以利用合成孔径时间内的所有距离信息,而多普勒中心频率方程只利用了孔径中心时刻附近的距离信息。

4.1 星载双站 SAR 距离模型

SAR 成像过程是根据距离模型将距离压缩后的回波信号校正到参考距离上,并在此参考距离上进行方位向压缩,因此距离模型精确与否,将直接关系到成像质量的好坏。在星载双基地 SAR 中,距离模型反映了在一个合成孔径时间里,地面点目标到发射天线相位中心和接收天线相位中心距离之和的变化规律,其复杂程度较单星 SAR 大大提高。

借用单星 SAR 的二阶距离逼近模型,由多普勒中心频率和多普勒调频斜率构造的双基地收发距离和的二阶距离逼近模型为:

$$R(t) = 2 * \left[\left(\frac{r_s + r_1}{2} \right) - \frac{\lambda}{2} \left(f_{DC} * t + \frac{1}{2} f_{R^*} t^2 \right) \right] \quad (9)$$

其中 r_s, r_1 分别为在合成孔径中心时发射卫星和接收卫星与目标的距离。二阶距离逼近模型虽可直接借用基于菲涅耳近似的单基地 SAR 成像算法,但在分辨率较高,斜视角较大的情况下,二阶距离逼近模型误差在合成孔径边缘造成的匹配相位误差很大,不能满足精确聚焦要求。

文[5]提出一种用平行直线轨迹近似实际卫星轨迹的星载双基地等效平行轨迹距离模型,该模型没有忽略三次以上各高次项,误差远小于二阶模型。

由于发射卫星和接收卫星长期伴随飞行,卫星轨道要素差别微小,在一个成像孔径的时间内两卫星近似平行同步飞行,用平行直线轨迹近似收发卫星实际飞行轨迹是合理的,模型几何关系如图 3 所示,此时地球静止,收发距离和表达式为:

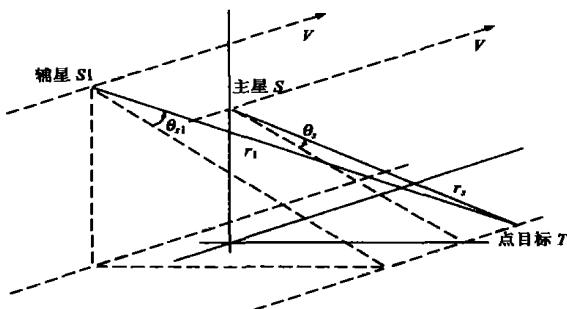


图 3 平行轨迹距离模型几何关系

$$R(t) = \sqrt{r_s^2 + V^2 t^2 - 2r_s \cdot V \cdot t \cdot \sin\theta_s} + \sqrt{r_1^2 + V^2 t^2 - 2r_1 \cdot V \cdot t \cdot \sin\theta_{s1}} \quad (10)$$

其中 r_s, r_1 定义同上, V 为等效同步飞行速度, θ_s, θ_{s1} 为等效发射斜视角和等效接收斜视角,大小在 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 之间,正值表示前侧视。文[5]给出了通过多普勒参数来估计 V, θ_s 和 θ_{s1} 的方法。

4.2 替代方程

由等效平行轨迹距离模型,点目标 T 满足距离方程:

$$|r_T^i - r_s^i(t)| + |r_T^i - r_{s1}^i(t)| = R(t) \quad (11)$$

$$\text{或} |r_T^i - (vt) \cdot n_i^i| + |r_T^i - r_s^i - (vt) \cdot n_i^i| = R(t)$$

其中, $R(t)$ 由式(10)确定, t 为慢时间, n_i^i 是速度方向单位矢量。事实上,从不同的距离模型将得到点目标 T 的不同距离方程,只是精度不同。当 t 变化时,式(11)成为一族方程组,此方程组无解析解(即模糊曲线无解析解),实际处理中可以将式(1)、(2)、(11)等价为如下非线性规划问题:

$$\begin{cases} \min_{t \neq 0} | |r_T^i - r_s^i(t)| + |r_T^i - r_{s1}^i(t)| - R(t) | \\ |r_T^i - r_s^i| + |r_T^i - r_{s1}^i| = r_{st1} \\ |r_T^i - r_s^i| + |r_T^i - r_{s1}^i| = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi \end{cases} \quad (12)$$

或最小二乘问题

$$\min_t \left\{ [|r_T^i - r_s^i(t)| + |r_T^i - r_{s1}^i(t)| - R(t)]^2 + [|r_T^i - r_s^i| - |r_T^i - r_{s1}^i| - \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi]^2 \right\} \quad (13)$$

5 仿真分析

5.1 平行轨迹距离模型与二阶逼近模型精度比较分析

表 1 计算了二阶逼近模型和平行轨迹距离模型在 5 米分辨率时,不同斜视角下的误差比较,表 2 列出了计算参数,该参数是根据 CNES 的 Interferometric Cartwheel 构形提出的^[2],以 Envisat 为设想 SAR 卫星。 $\phi = 90^\circ - \phi$ 是发射卫星距离高度平面与轨道面法平面的二面角,误差为在合成孔径边缘的最大误差。由表 1 知,二阶逼近距离模型随 ϕ 增大,相位误差大到足以引起严重散焦,而平行轨迹模型是一种较精确的等效距离模型,在大斜视角下误差仍能满足精确聚焦要求。

表 1 两种距离模型误差比较(C 波段)

角 ϕ	二阶模型 距离误差(m)	二阶模型 相位误差	平行轨迹模型 距离误差(m)	平行轨迹模型 相位误差
0°	0.004	26.10°	3.5×10^{-5}	0.22°
10°	0.010	64.59°	9.2×10^{-5}	0.59°
20°	0.015	95.61°	1.47×10^{-4}	0.94°

表 2 星载双基地 SAR 系统主要参数

系统卫星参数		系统雷达参数	
卫星轨道高度	800km	发射信号波长	5.6cm
纬度幅角差	0.98°	发射脉冲带宽	16MHz
轨道倾角差	0°	发射脉冲宽度	25μs
升交点赤经差	0°	脉冲重复频率	2000Hz
观测区纬度	南纬 60°	波束中心视角	30°

5.2 两种定位测高方法性能比较分析

采用表 2 的参数,且斜视角 $\phi = 98.3^\circ$,假设多普勒中心频率误差取典型值 10Hz,卫星位置测量误差服从 $N(a, 0)$ 高斯分布,图 4 示出了两种定位测高方法的性能随 a 的变化情况,测高误差量级也反映了定位误差量级,因此图中只画出测高误差均方差的变化。另外,由于多普勒中心频率误

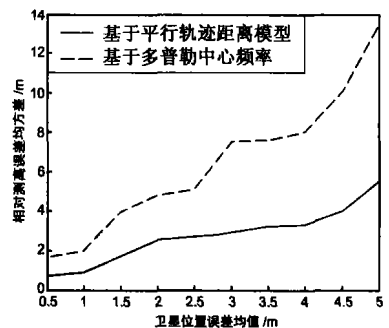


图 4 两种方法测高性能及其比较

差属于系统误差, 对绝对高程精度影响很大, 因此考虑相对高程测量性能. 图中结果说明基于距离模型方法的测高误差小于基于多普勒中心频率方法, 并且两种方法的测高误差随卫星位置测量误差的增大而增大. 仿真结果表明两种定位、测高方法是正确的. 由于多普勒中心频率方程只利用了合成孔径中心时刻附近的距离信息, 而距离模型方程可以利用合成孔径时间内的所有距离信息, 因此从定性角度来说, 基于距离模型的定位测高方法优于基于多普勒中心频率的定位测高方法, 仿真结果也说明了这一点, 不过其运算量较大.

6 结束语

本文研究主星带辅星编队单基线 InSAR 定位和测高的方法, 提出基于多普勒中心频率和基于距离模型的两种方法, 给出了两种定位测高方法的性能比较. 下一步工作包括测高精度分析、多基线干涉测高、星间测量基线与干涉基线一致性研究等.

参考文献:

- [1] D Massonnet. The interferometric cartwheel: a constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined [J]. *Int J Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2413– 2430.
- [2] G Krieger, M Wendler. Comparison of the interferometric performance for spaceborne parasitic SAR configurations[A]. 4th European Conference on Synthetic Aperture Radar [C]. Germany: VDE VERLAG GMH, 2002. 467– 470.

- [3] Mora O, et al. Direct geocoding for generation of precise wide area elevation models with ERS SAR data[J]. *ESA SP*, 2000, (478): 449– 455.
- [4] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. *电子学报*, 2000, 28(3): 35– 38.
Huang Yan, Li Chun sheng, Chen Jie, et al. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(3): 35– 38.
- [5] 何峰, 梁甸农, 董臻. 适于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法[J]. *电子学报*, 2005, 33(6): 1011– 1014.
He Feng, Liang Diannong, Dong zhen. A Wavenumber domain algorithm for spaceborne bistatic SAR imaging with large squint angle[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1011– 1014.

作者简介:



黄海风 男, 1976 年出生于江西弋阳, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向为干涉 SAR、分布式 SAR 系统理论等. E-mail: haifeng0728@vip. sina. com.

梁甸农 男, 1936 年出生于湖南涟源, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事超宽带雷达系统理论、分布式 SAR 系统理论及自适应信号处理、谱估计、空间信息获取与处理等研究工作.