

# 最大相干波束同步方法及其性能验证研究

张永俊<sup>1</sup>, 黄海风<sup>2</sup>, 张永胜<sup>2</sup>, 梁甸农<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 61886 部队, 北京 100084; 2. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 波束同步是分布式 InSAR 系统的关键技术之一. 本文提出一种基于最大相干系数的星载分布式 InSAR 系统波束同步方法. 分析了该波束同步方法下, 双站多普勒中心频率的计算方法及双站图像信噪比的损失. 进而从干涉图像对去相干、干涉处理中的独立视数以及干涉时刻配准误差的影响几个方面指出该方法相对于传统波束同步方法的优势, 并进行了 InSAR 全流程信号级仿真验证. 仿真结果表明, 该方法可以有效提高分布式 InSAR 系统的测高定位精度.

**关键词:** 分布式 InSAR; 波束同步; 相干系数; 性能分析; 系统仿真

**中图分类号:** TN955      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 08-1564-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.011

## Maximum Coherence Illumination Synchronization Method and its Performance Verification

ZHANG Yong-jun<sup>1</sup>, HUANG Hai-feng<sup>2</sup>, ZHANG Yong-sheng<sup>2</sup>, LIANG Dian-nong<sup>2</sup>

(1. The 61886 Unit of PLA, Beijing 100084, China; 2. College of Electronic Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Illumination synchronization is the key technology for distributed interferometric SAR systems. A novel illumination synchronization method based on the maximum coherence is proposed. Then, the Doppler centroid frequency and the image SNR loss of bistatic mode SAR are analyzed theoretically. The advantages of the method compared with the traditional illumination synchronization method are presented by analyzing the effect of the interferometric image pair coherence, the number of independent looks for interferometric phase estimation and the error of interferometric coregistration time. A simulation which contains full process of InSAR system is carried out, The simulation results indicate that this method can improve the interferometric performance of the distributed InSAR system effectively.

**Key words:** distributed InSAR (interferometric SAR); illumination synchronization; coherence; performance analysis; system simulation

## 1 引言

分布式 InSAR 系统是近年来被广泛研究的一类空间对地观测系统, 可以快速、大范围、高精度地获取全球数字高程模型 (DEM-Digital Elevation Model), 在军用和民用方面都有着广阔的发展前景<sup>[1~5]</sup>. 波束同步是分布式 InSAR 系统面临的一个关键问题, 传统波束同步方法以回波信噪比最大化为准则, 通过调整卫星姿态或者天线指向使两颗卫星的波束中心指向同一点来实现<sup>[6~8]</sup>.

一般的, 用于定位测高的分布式 InSAR 系统具有一定长度的垂直有效基线和沿航迹基线, 在传统波束同步方法下, 前者造成基线去相干, 后者造成多普勒质心去相干, 它们以噪声形式降低系统的干涉相位精度, 进而

影响到定位测高精度<sup>[9]</sup>. 本文提出了一种最大相干波束同步方法, 以回波信噪比的微小损失为代价, 换取主辅图像对相干系数的提高, 同时增加多视处理时的有效视数, 进一步研究发现, 在某些特殊情况下, 该方法还可以消除干涉时刻配准误差对测高定位的影响, 提高系统的干涉相位精度和测高定位精度.

## 2 最大相干波束同步方法原理

与传统方法相比, 最大相干波束同步方法的新颖之处在于不要求主辅星波束中心同时指向地面同一点. 该方法要求主辅星分别按照各自的导引规律将波束照射在同一个测绘带内, 导引后主辅星回波多普勒中心频率相同, 此时, 多普勒质心去相干等于 0. 一般情况下, 同

步后的波束在方位向不完全重叠,辅星双站图像信噪比会有所下降,由此引起热噪声去相干的增大.针对适用于进行 InSAR 测量的紧密卫星编队,多普勒质心去相干减小的程度要远大于热噪声去相干的增大,系统总的相干系数呈增大趋势,所以称这种方法为最大相干波束同步方法.在本文中,我们以全零多普勒导引律<sup>[10,11]</sup>为例介绍该波束同步方法,通过全零多普勒导引后,主辅星的多普勒中心频率同时为零,有利于后续的干涉处理.

图 1 为两种波束同步方法的对比.由于 SAR 天线距离向波束宽度远大于方位向波束宽度,一般情况下,主要考虑方位向波束同步问题.传统波束同步方法一般流程如图 1(a)所示,其中辅星的姿态和天线指向需要根据主星的姿态和天线指向计算.图 1(b)为最大相干波束同步方法流程,其中  $\theta_{y1}$ 、 $\theta_{y2}$ 、 $\theta_{\rho1}$ 、 $\theta_{\rho2}$  分别为主辅星的偏航角和俯仰角,此时,辅星姿态和天线指向与主星无关,主辅星分别导引,完成波束同步.为了行文方便,在下文中,将传统波束同步方法称为波束同步方法 1,将最大相干波束同步方法称为波束同步方法 2.

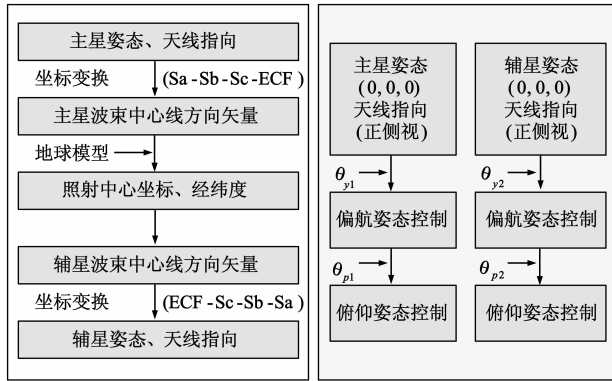


图 1 传统波束同步方法和最大相干波束同步方法比较

### 3 波束同步方法性能分析

考虑主星发射、主辅星同时接收的一发两收双星编队,假设在两种波束同步方法中,主星天线波束指向一致,则由于辅星天线指向不同,会对双站图像信噪比、双站图像多普勒中心频率以及方位向分辨率等产生影响,这些影响会改变干涉图像对相干系数、独立视数、干涉时刻配准误差影响等,进而影响到测高定位精度.

在进行 InSAR 处理时,一般假定在均匀场景条件下,通过多视处理来描述干涉相位处理过程,当独立视数  $N_{\text{look}}$  比较大且相关系数较大时,可以用克拉美罗界来近似计算干涉相位误差均方差  $\sigma_{\phi}$ ,系统总相干系数  $\gamma_{\text{Total}}$  和干涉相位误差关系为<sup>[2]</sup>:

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{1 - \gamma_{\text{Total}}^2}{2 \cdot N_{\text{look}} \cdot \gamma_{\text{Total}}^2}} \quad (1)$$

相对高程误差  $h_{\text{relative}}$  可以写为:

$$h_{\text{relative}} = \sqrt{2} \cdot h_{\text{amb}} \cdot (\sigma_{\phi} / 2\pi) \quad (2)$$

其中,  $h_{\text{amb}}$  为模糊高度.可以看出,相干系数和独立视数越大,干涉相位误差越小,则引入测高定位误差越小.

为了分析两种波束同步方法的性能,应用如表 1 所示的紧密编队构形卫星轨道参数及雷达参数对两种方法分别进行仿真分析.

表 1 紧密编队的卫星轨道参数及雷达参数

| 参数          | 主星             | 辅星             |
|-------------|----------------|----------------|
| 轨道半长轴(m)    | 6900000.000000 | 6900000.706159 |
| 轨道倾角(度)     | 97.500000      | 97.496572      |
| 偏心率         | 0.001000       | 0.000962       |
| 升交点赤经(度)    | 100            | 99.993872      |
| 近地点幅角(度)    | 90             | 85.678559      |
| 真近点角(度)     | 0              | 4.328955       |
| 测绘带中心下视角(度) | 35             | 35             |
| 雷达载波波长(m)   | 0.03125        |                |
| 方位向天线长度(m)  | 4.8            |                |
| 脉冲重复频率(Hz)  | 3200           |                |
| 距离向天线长度(m)  | 1              |                |
| 方位向处理带宽(Hz) | 2700           |                |

在该组轨道构形下,InSAR 系统的垂直有效基线长度为 500m,沿航迹有效基线长度为 1000m.

#### 3.1 干涉图像对去相干

在 InSAR 测高定位中,干涉图像对去相干作为局部干涉条纹质量的重要评价标准,是一个非常关键的量值,直接影响到干涉相位误差的大小.

在两种波束同步方法下,相干系数的变化主要体现在热噪声去相干和多普勒质心去相干上,其余去相干不变.

##### 3.1.1 热噪声去相干

系统的热噪声去相干由主辅星信噪比共同决定<sup>[2]</sup>,两种波束同步方法下,主星自发自收,波束指向不变,主图像信噪比不变,但辅星接收来自主星的回波,其波束指向的不同会导致双站图像信噪比产生变化,从而使热噪声去相干发生改变.

两种波束同步方法下,辅星雷达有效天线方向图可以分别表示为<sup>[9]</sup>:

$$G_e(\varphi) = \left\{ \frac{\sin[\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)]}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin[\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)]}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)} \right\}^2 \quad (3)$$

$$G_e(\varphi) = \left\{ \frac{\sin[\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)]}{\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin[\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi - \Delta\theta_r)]}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi - \Delta\theta_r)} \right\}^2 \quad (4)$$

其中,  $L_t$ 、 $L_r$  分别为主星方位向天线尺寸和辅星方位向天线尺寸,  $\lambda$  为雷达载波波长,  $\varphi$  为方位向离轴角,  $\Delta\theta_r$  为两种波束同步方法下, 辅星波束指向变化的角度, 如图 2 所示. 可以看出, 对方法 1 来说, 合成后天线方向图的峰值为 1, 而对方法 2 来说, 该峰值小于 1.

成像过程中的方位向压缩相当于对方位向天线波束主瓣增益的积累过程. 设两次成像过程中, 仅波束同步方法不同, 回波噪声可以认为是相同的, 在这种情况下, 波束同步方法 2 相对于波束同步方法 1, 双站图像

$$SNR_{\text{loss}} = \frac{\int_{-\theta/2}^{\theta/2} \left\{ \frac{\sin[\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)]}{\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin[\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi - \Delta\theta_r)]}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi - \Delta\theta_r)} \right\}^2 d\varphi}{\int_{-\theta/2}^{\theta/2} \left\{ \frac{\sin[\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)]}{\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin[\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)]}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)} \right\}^2 d\varphi} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,  $\Delta\theta_r$  不等于零时, 即空间编队构形存在沿航迹基线时, 双站图像信噪比就存在一定的损失. 此时, 热噪声去相干可以写为:

$$\gamma_{\text{Thermal}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(1 + SNR_1^{-1})(1 + (SNR_2 - SNR_{\text{loss}})^{-1})}} \quad (6)$$

在表 1 的编队构形及雷达参数下进行仿真, 可以得到双站图像信噪比损失随着沿航迹基线变化的规律如图 3 所示; 考虑典型场景, 设不存在信噪比损失时单双站图像信噪比均为 10dB, 则热噪声去相干随着沿航迹基线长度变化规律如图 4 所示.

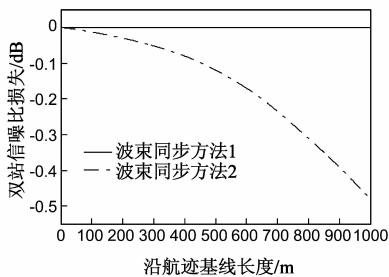


图3 双站图像信噪比损失随着沿航迹基线变化规律

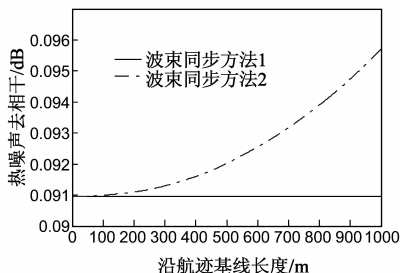
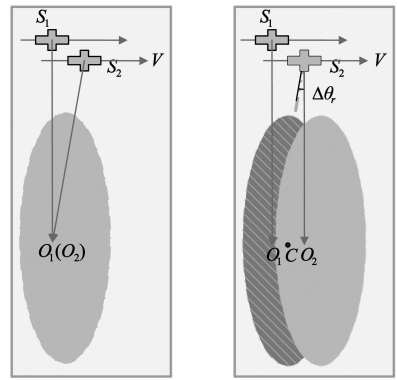


图4 热噪声去相干随着沿航迹基线变化规律

一般情况下, 紧密编队的卫星构形沿航迹基线大于 200m, 小于 1000m<sup>[5]</sup>, 对应的双站图像信噪比损失小于 0.5dB, 由此引起的热噪声去相干的损失小于 0.005,



(a) 传统波束同步方法 (b) 最大相干系数波束同步方法  
图2 两种波束同步方法函数示意图

信噪比损失可以写为:

$$\text{基本可以忽略不计。}$$

从上述分析可以看出, 方法 2 相比于方法 1, 由于双站天线方向图峰值降低, 会造成辅星双站图像信噪比的微小损失, 引起热噪声去相干的减小, 但在一般的紧密编队构形下, 对热噪声信噪比的减小非常小, 基本可以忽略不计.

### 3.1.2 多普勒质心去相干

多普勒质心去相干由主辅图像的多普勒中心频率存在差异造成, 随着干涉图像对多普勒中心频率差  $\Delta f_{DC}$  的增加而线性减小, 可以写为:

$$|\gamma_{DC}| = \begin{cases} 1 - |\Delta f_{DC}|/B_A, & |\Delta f_{DC}| \leq B_A \\ 0, & |\Delta f_{DC}| \geq B_A \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $B_A$  是方位向处理带宽.

对于一发两收体制的双站合成孔径雷达, 主星自发自收, 其单站多普勒中心频率可以写为:

$$f_{DC1} = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{V_{st1} \cdot R_1}{R_1} \quad (8)$$

辅星仅接收回波, 其双站多普勒中心频率可以写为:

$$f_{DC2} = \frac{V_{st1} \cdot R_1}{\lambda R_1} + \frac{V_{st2} \cdot R_2}{\lambda R_2} \quad (9)$$

其中,  $V_{st1}$ 、 $V_{st2}$  分别为主辅星相对于地面目标点的速度矢量,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为主辅星到地面目标点的斜距矢量,  $R_1 = |R_1|$ ,  $R_2 = |R_2|$ .

值得注意的是, 波束同步方法 1 中, 主辅星波束中心同时指向测绘带中心同一点, 在图 2 中表现为  $O_1(O_2)$  点, 则式(9)中的  $R_1$ 、 $R_2$  分别为主辅星位置  $S_1$  和  $S_2$  到测绘带中心  $O_1$  处的斜距矢量. 而对于波束同步方法 2, 辅星回波由主辅星波束重叠区域贡献, 则辅星的双站多普勒中心频率等于该区域回波频谱的中

心,在该区域,辅星的双站多普勒中心频率线性变化<sup>[12]</sup>,因此,辅星的双站多普勒中心对应于重叠区中心处  $C$  点的回波多普勒,式(9)中的  $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$  分别为主辅星位置  $S_1$  和  $S_2$  到波束重叠区中心  $C$  处的斜距矢量。

存在一定的沿航迹基线  $B_{\text{along}}$  时,对传统的波束同步方法而言,主辅星干涉图像对多普勒中心频率差可以近似写为:

$$\Delta f_{DC} = \frac{V_{st1} \cdot B_{\text{along}}}{\lambda r} \quad (10)$$

此处  $r$  为平均斜距,  $r = (R_1 + R_2)/2$ 。

而对波束同步方法 2 而言,主辅星同时进行方位向的波束指向导引后,其主辅星多普勒中心频率相同,即多普勒频率差为 0。

根据式(7)以及上述分析,在表 1 参数下,可以画出多普勒质心去相干随着沿航迹基线长度变化的曲线如图 5 所示。

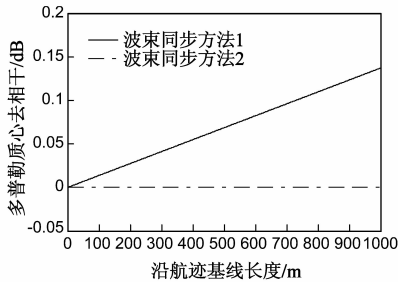


图 5 多普勒质心去相干随着沿航迹基线变化规律

对于沿航迹基线 1km,下视角在 20 度到 45 度之间变化的轨道构形来说,由于斜距随着下视角的变化,对应的多普勒中心频率从 440Hz 变化到 320Hz,其最大值对应于约 17% 的方位向处理带宽,在这种情况下多普勒质心去相干约为 0.17。图 5 中,下视角为 35 度,1km 沿航迹基线时,两种方法对应的多普勒质心去相干分别为 0.15 和 0。可以看出,在存在一定沿航迹基线时,波束同步方法 2 相对于波束同步方法 1 可以显著降低系统的多普勒质心去相干。

综合分析 3.1.1 小节和 3.1.2 小节可知,相对于波束同步方法 1,波束同步方法 2 增加了热噪声去相干,降低了多普勒质心去相干。由于热噪声去相干增加地非常少,可以忽略不计,所以波束同步方法 2 有效增加了系统的总相干系数,增强了干涉图像对的相干性。

### 3.2 独立视数

独立视数是干涉处理中一个非常重要的参数,从式(1)可以看出,干涉图像对去相干一定时,独立视数越大,干涉相位误差越小,则测高定位误差也越小。多视处理能取到的最大独立视数由 DEM 产品网格间距和谱滤波后地面分辨率决定,同时还和编队构形有关。

独立视数由方位向视数  $n_{az}$  和距离向视数  $n_{rg}$  相乘

得到,在两种波束同步方法下,谱滤波后方位向的地面分辨率不同,导致方位向视数  $n_{az}$  产生变化,而距离向视数  $n_{rg}$  不变,下面主要对方位向视数进行分析。

$n_{az}$  可以写为:

$$n_{az} = \frac{\Delta_{az} \cdot B_{a, \text{crit}} - B_{\text{along}}}{\rho_{az} \cdot B_{a, \text{crit}}} \quad (11)$$

其中,  $\Delta_{az}$  为 DEM 产品方位向网格间距,  $B_{a, \text{crit}}$  为方位向极限基线,  $\rho_{az}$  为谱滤波后方位向地面分辨率。  $\rho_{az}$  和  $B_{a, \text{crit}}$  可以分别通过式(12)和式(13)计算:

$$\rho_{az} = \frac{V_{st}}{B_A} \quad (12)$$

$$B_{a, \text{crit}} = \frac{B_A \cdot \lambda \cdot r}{V_{st}} \quad (13)$$

其中,  $V_{st}$  为卫星相对于地面目标的速度。

总的独立视数  $N_{\text{look}}$  可以写为:

$$N_{\text{look}} = n_{az} \cdot n_{rg} \quad (14)$$

从式(13)可以看出,当编队卫星空间构形确定后,方位向极限基线不变,则总的独立视数只跟方位向地面分辨率有关。

波束同步方法 1 和波束同步方法 2 中辅星雷达波束指向不同,会导致其回波多普勒频带不同,方位向地面分辨率的大小跟主辅星雷达回波公共多普勒频带的宽度有关。

方位向地面分辨率通过式(12)计算得到,考虑到主辅星雷达回波多普勒频谱偏移,式(12)将改写为<sup>[13]</sup>:

$$\rho_{az} = \frac{|V_{st}|}{B_A - \Delta f_{DC}} \quad (15)$$

从 3.1.2 小节分析可知,在波束同步方法 1 下,多普勒中心频率差较大,在波束同步方法 2 下,多普勒中心频率差为零,所以,波束同步方法 2 时方位向分辨率较高,独立视数较大。

根据表 1 参数,得到两种波束同步方法下主辅星回波多普勒中心频率差以及公共多普勒频带如图 6、图 7 所示,可以看出,波束同步方法 2 情况下的公共多普勒频带宽度要大于波束同步方法 1 时的公共多普勒频带宽度,则波束同步方法 2 时方位向分辨率较高,能取到的独立视数也较大。图 8 是两种波束同步方法时方位向分辨率随着沿航迹基线长度变化的曲线,沿航迹基线越大,在波束同步方法 1 情况下的方位向分辨率越低。图 9 是独立视数随着沿航迹基线长度变化的曲线,此处假设波束同步方法 2 情况下能取到的最大独立视数为 25 视,随着沿航迹基线变长,波束同步方法 2 的独立视数不变,而波束同步方法 1 的视数变小,在沿航迹基线长度为 1000m 时,独立视数减小到仅有 21.5 视。独立视数减小导致干涉相位误差变大,进而使测高定位精度恶化。从 3.1 小节和 3.2 小节还可以看出,当沿航迹基

线长度等于零时,波束同步方法1和波束同步方法2一致,此时,双站图像信噪比损失为零,多普勒去质心相

干等于1,干涉图像对相干系数最大,且独立视数最大,测高定位精度最高,是InSAR系统的最优构形。

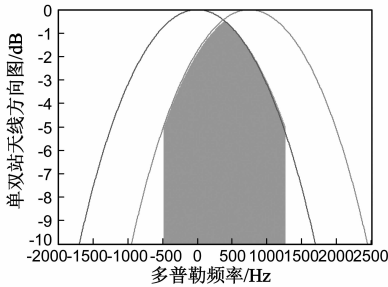


图6 波束同步方法1时主辅星回波公共多普勒频带

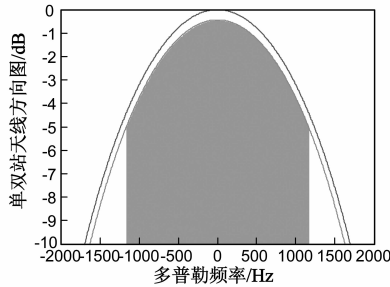


图7 波束同步方法2时主辅星回波公共多普勒频带

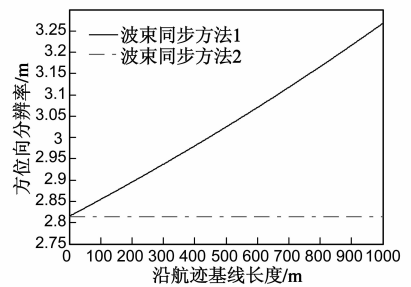


图8 方位向分辨率随着沿航迹基线变化规律

### 3.3 干涉时刻配准误差的影响

基线矢量是影响InSAR性能的非常关键的参量,一般通过对两颗卫星分别定位得到测量基线,再经过一系列转换得到干涉基线,其中部位修正环节、插值环节、GPS授时环节以及配准环节,都会对干涉基线精度产生影响。配准环节以主图像为基准,对主辅星图像进行精确配准,根据配准偏移量来确定主辅星分别对某一地面目标点成像的时刻 $t$ 和 $t + \Delta t$ 。SAR图像对进行配准时,配准误差不可避免,下面具体分析配准误差对

测高定位的影响。

如图10所示,设主辅星对 $P$ 点成像的时刻分别为 $t_0$ 和 $t_1$ 。以主图像为基准,对主辅图像进行精确配准,理想情况下,干涉基线就是主星在 $t_0$ 时刻SAR天线相位中心和辅星在 $t_1$ 时刻SAR天线相位中心的连线;考虑配准误差为 $\Delta\kappa$ 个像素, $P$ 点被错误地配准到 $P'$ 点,辅星对 $P'$ 成像的时刻为 $t_1 + \Delta t$ , $\Delta t = \Delta\kappa / PRF$ , $PRF$ 为脉冲重复频率,则引入的干涉基线误差等于 $\Delta t \cdot V_2$ , $V_2$ 为辅星速度矢量。

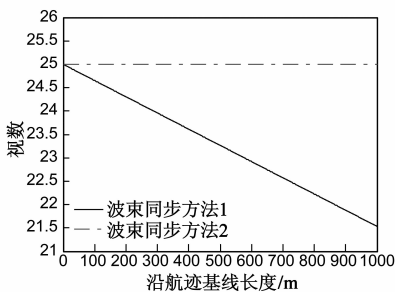


图9 独立视数随着沿航迹基线变化规律

在WGS-84坐标系下,对某一地面目标点 $P$ 进行InSAR测高时,基线误差到高程误差的传递系数为<sup>[14]</sup>:

$$\frac{\partial h}{\partial \mathbf{B}} = \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{D}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{P} - \mathbf{B} - \mathbf{S}_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中,

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \frac{P_x}{|P|} & \frac{P_y}{|P|} & \frac{P_z}{|P|} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} - \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{P} - \mathbf{B} - \mathbf{S}_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$P_x, P_y, P_z$ 为 $P$ 点的三维坐标。

根据前文分析,干涉基线误差为 $\Delta t \cdot V_2$ ,则由此引入的测高定位误差可以写为:

$$\Delta h = \frac{\partial h}{\partial \mathbf{B}} \cdot \mathbf{V}_2 \cdot \Delta t$$

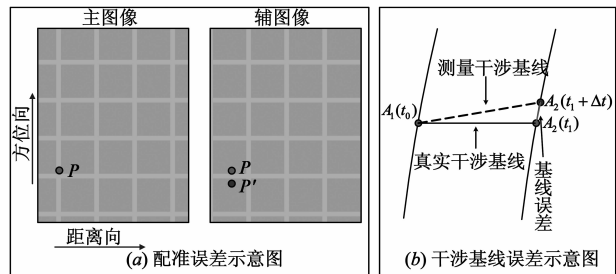


图10 配准误差到干涉基线误差示意图

$$= (\alpha_1 D_{13}^{-1} + \alpha_2 D_{23}^{-1} + \alpha_3 D_{33}^{-1}) \cdot \Delta t \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{S}_2) \cdot \mathbf{V}_2 \quad (19)$$

对比式(8)的多普勒中心频率可以得到:

$$\Delta h = (\alpha_1 D_{13}^{-1} + \alpha_2 D_{23}^{-1} + \alpha_3 D_{33}^{-1}) \cdot \frac{\Delta\kappa \cdot \lambda \cdot R_2}{2 \cdot PRF} \cdot f_{DC2} = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{DC2} \quad (20)$$

其中, $k_1 = (\alpha_1 D_{13}^{-1} + \alpha_2 D_{23}^{-1} + \alpha_3 D_{33}^{-1})$ 和InSAR干涉测量几何有关, $k_2 = \frac{\Delta\kappa \cdot \lambda \cdot R_2}{2 \cdot PRF}$ 和雷达参数有关。

从式(20)可以看出,干涉时刻配准误差对测高定位的影响和辅星多普勒中心频率是紧密相关的,它们的大小仅存在一个倍数关系。其倍数不仅和雷达参数有关,还和InSAR干涉测量几何相关,对于表1的参数, $k_1 = 0.01, k_2 = 0.32$ ,设配准误差为0.1个像素,则波束同步方法1时,由干涉时刻配准误差造成的高程误差 $\Delta h = 1.08\text{m}$ ,而在波束同步方法2时,该误差造成的高程误

差为 0。需要说明的是,  $k_1$  的大小对 InSAR 干涉测量几何的变化是非常敏感的, 而且其解析关系很难得到, 必须根据每个时刻卫星位置和地面目标位置之间关系数值计算得到。

综上所述, 配准误差对测高定位误差的影响和辅星多普勒中心频率呈倍数关系, 该倍数大小和 InSAR 测量的空间几何关系有关。在波束同步方法 1 中, 辅星多普勒中心频率不等于 0, 配准误差会引入一定大小的测高定位误差, 其大小和 InSAR 干涉测量空间几何关系相关; 在波束同步方法 2 中, 辅星多普勒中心频率为 0, 配准误差不会引入测高定位误差。

### 4 波束同步方法性能验证

利用分布式 InSAR 全过程仿真系统<sup>[15]</sup>, 分别对两种波束同步方法下的测高定位性能进行仿真和评估。该仿真系统可以在不同仿真环节分别注入卫星姿态误差、三大同步误差、状态测量误差等误差因素。系统仿真的流程以及主要误差的注入节点如图 11 所示。

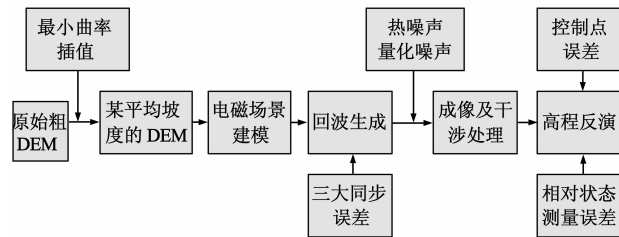


图 11 系统仿真流程

为了验证第三部分理论分析的正确性, 分别用分布式 InSAR 全过程仿真系统进行了两组实验。第一组实验为多普勒质心去相干影响验证实验, 第二组为 InSAR 测高定位性能影响验证实验。

#### 4.1 多普勒质心去相干影响验证实验

评估两种波束同步方法下多普勒质心去相干大小时, 为了隔离其他去相干因素, 选用了 Formation2 构形, 其轨道根数如表 2 所示, 沿航迹基线长度为 500m, 垂直有效基线长度为 0m。在该组构形下, 仅统计干涉图像对的相干系数, 不进行测高定位处理, 得到仿真结果如表 3 所示。

表 2 Formation2 轨道根数

| 参数       | 主星             | 辅星             |
|----------|----------------|----------------|
| 轨道半长轴(m) | 6900000.000000 | 6900000.307511 |
| 轨道倾角(度)  | 97.500000      | 97.500000      |
| 偏心率      | 0.001000       | 0.001001       |
| 升交点赤经(度) | 100            | 99.996936      |
| 近地点幅角(度) | 90             | 87.924574      |
| 真近点角(度)  | 0              | 2.079183       |

表 3 两种波束同步方法时多普勒质心去相干结果

|               | 波束同步方法 1 |       | 波束同步方法 2 |     |
|---------------|----------|-------|----------|-----|
|               | 理论值      | 仿真值   | 理论值      | 仿真值 |
| 主星多普勒中心频率(Hz) | 0        | 0     | 0        | 0   |
| 辅星多普勒中心频率(Hz) | -162     | -163  | 0        | 0.5 |
| 多普勒质心去相干      | 0.061    | 0.065 | 0        | 0   |

表 3 中的多普勒中心频率理论值利用主辅星和地面目标点位置计算得到, 仿真值通过能量均衡法, 对回波进行评估得到, 图 12 为对回波进行估计的界面。

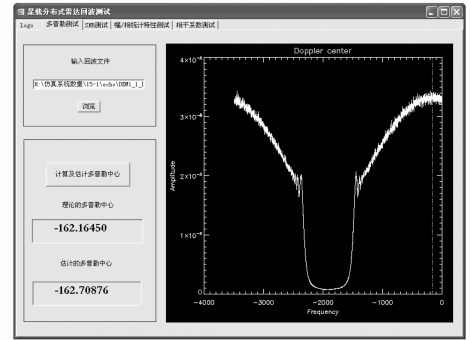


图 12 回波多普勒中心频率测试界面

#### 4.2 InSAR 测高定位性能影响验证实验

利用分布式 InSAR 系统全过程仿真平台, 对 X 波段一发两收双星紧密编队系统进行性能评估, 系统的轨道根数和雷达参数如表 1 所示, 针对自然场景进行了仿真实验, 得到如表 4 所示的仿真结果。

表 4 系统仿真性能评估结果

|               | 波束同步方法 1 | 波束同步方法 2 |
|---------------|----------|----------|
| 双站图像信噪比损失(dB) | 0        | 0.47     |
| 辅图像方位分辨率(m)   | 3.1      | 2.6      |
| 独立视数          | 27       | 32       |
| 相对相位误差标准差(度)  | 6.05     | 3.46     |
| 相对测高精度(m)     | 0.38     | 0.21     |
| 绝对测高精度(m)     | 0.96     | 0.15     |
| 相对平面精度(m)     | 0.52     | 0.27     |
| 绝对平面精度(m)     | 1.14     | 0.20     |

仿真中各个步骤得到的产品如图 13(a) ~ (e) 所示, 图 13(f) 和 (g) 分别为两种波束同步方法下绝对高程误差图。

根据表 3 和表 4 的结果以及前面理论仿真的结果对照可以得到以下结论:

(1) 实验 1 的理论分析结果和仿真处理结果吻合很好。对于沿航迹基线长度为 500m 的轨道构形, 在波束同步方法 1 下, 主辅星多普勒中心频率差大约为 -163Hz, 此时多普勒质心去相干为 0.065; 而波束同步方法 2 下, 主辅星多普勒中心频率差约为 0Hz, 此时多普勒质心去相干为 0。

(2) 对于实验 2, 沿航迹基线长度为 1000m, 双站图像信噪比损失理论分析结果和仿真处理结果吻合很

好,波束同步方法 2 相对于波束同步方法 1,双站图像信噪比损失大约为 0.5dB,在典型场景情况下,该信噪比损失对干涉图像对相干系数的影响非常小,可以忽略不计;结合多普勒质心去相干,波束同步方法 2 有效提高了干涉图像对的相干系数.

(3)实验 2 中,在两种同步方法下,方位向分辨率分

别为 2.6m 和 3.1m,对应的独立视数分别为 27 视和 32 视,可以看出,波束同步方法 2 相比于波束同步方法 1,提高了方位向分辨率,增大了独立视数.

(4)相干和独立视数的增大使得波束同步方法 2 时相位误差减小,测高定位误差减小.

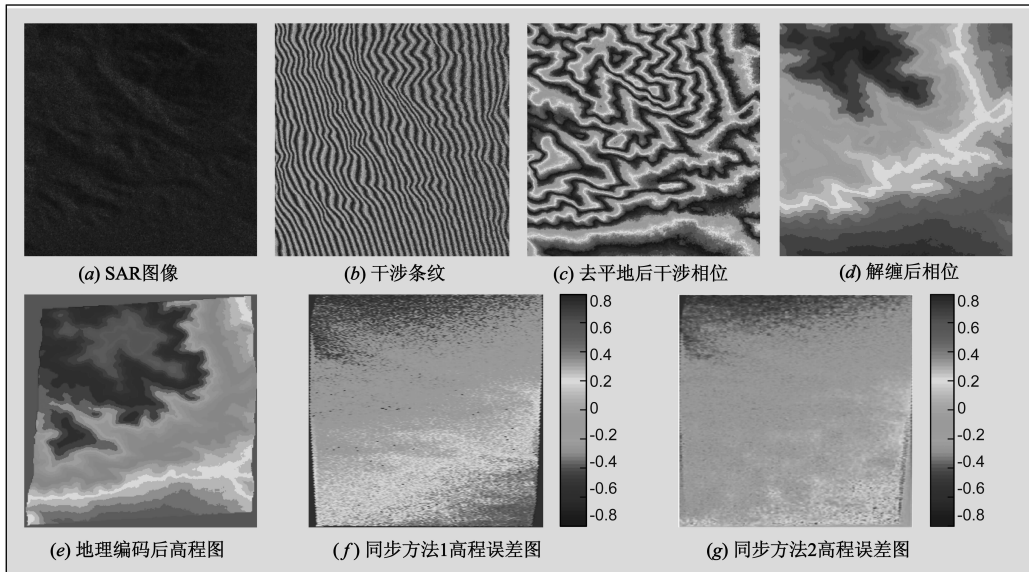


图13 系统仿真结果及两种同步方法下高程误差

## 5 结论

本文提出一种基于最大相干系数的波束同步方法,从热噪声去相干、双站方位向分辨率、独立视数以及干涉时刻配准误差影响等几个方面分析了该方法与传统波束同步方法的异同,并进行了数值仿真.从分析和仿真结果可以看出,相对于传统波束同步方法,该方法主要具有以下几条优点:

(1)构成紧密编队的两颗卫星按照各自的波束指向规律进行波束导引,降低了卫星姿态、波束指向协同工作难度.

(2)提高了干涉图像对的相干系数;双站方位向分辨率得到了提高,增大了相位处理时的独立视数,减小了干涉相位误差;由于辅星多普勒频率等于零,由干涉时刻配准误差引入的高程误差为零;总之提高了 InSAR 处理精度.

综上所述,可以看出,基于最大相干系数的波束同步方法是一种适用于紧密编队飞行的星载 InSAR 系统的波束同步方法,理论分析和仿真结果说明了该方法对提升系统性能的有效性.

## 参考文献

[1] M Bartsch, D Miller, M Zink. TanDEM-X: Mission Overview and Status[A]. IGARSS'07[C]. Barcelona, Spain, 2007. 23 -

28.

- [2] G Krieger, A Moreira, H Fiedler, I Hajnsek, M Werner, M Younis, M Zink. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2007, 45(10): 3317 - 3341.
- [3] JIAO Ming-lian. A Review on Latest Interferometric Synthetic Aperture Radar Researches[A]. WCSE '09[C]. Fujian, China, 2009. 19 - 21.
- [4] G Krieger, A Moreira. Bi- and multi-static SAR: Potentials and challenges[J]. Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 184 - 198.
- [5] J H Gonzalez, M Bachmann, G krieger, H Fiedler. Development of the TanDEM-X calibration concept: analysis of systematic errors[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2010, 48(2): 716 - 726.
- [6] M D Errico, A Moccia. Attitude and antenna pointing design of bistatic radar formations[J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 2003, 39(3): 949 - 960.
- [7] W Q Wang. Approach of adaptive synchronization for bistatic SAR real-time imaging[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2007, 45(9): 2695 - 2700.
- [8] 黄海风, 梁甸农. 非合作式星载双站雷达波束同步设计[J]. 宇航学报, 2005, 26(5): 606 - 611.  
Huang Haifeng, Liang Diannong. Beam synchronization design strategies of noncooperative spaceborne bistatic radar[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 606 - 611. (in Chinese)

- [9] 张永胜. 星载分布式 InSAR 测高性能的理论及系统仿真评价方法[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1273 - 1278.  
Zhang Yongsheng. Theoretic and simulation experimental performance evaluation methods of spaceborne distributed InSAR system[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1273 - 1278. (in Chinese)
- [10] H Fiedler, E Boerner, J Mittermayer, G Krieger. Total zero doppler steering—a new method for minimizing the doppler centroid[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 141 - 145.
- [11] 张永俊, 黄海风, 张永胜, 梁甸农. 椭圆轨道全零多普勒导引律研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 937 - 940.  
Zhang Yongjun, Huang Haifeng, Zhang Yongsheng, Liang Diannong. Research on elliptic orbit total zero doppler steering [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(4): 937 - 940. (in Chinese)
- [12] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] 楼良盛, 汤晓涛, 牛瑞. 基于卫星编队 InSAR 空间同步对系统性能影响的分析[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2007, 32(10): 892 - 894.  
Lou Liangsheng, Tang Xiaotao, Niu Rui. Analysis of influence

on system performance from InSAR space synchronization based on formation satellites[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(10): 892 - 894. (in Chinese)

- [14] E Sansosti. A simple and exact solution for the interferometric and stereo SAR geolocation problem[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004, 42(8): 1625 - 1634.
- [15] 路兴强, 余安喜, 王敏, 梁甸农. 小卫星分布式雷达仿真系统的集群技术实现[J]. 现代雷达, 2006, (8): 1 - 3.  
Lu Xingqiang, Yu Anxi, Wang Min, Liang Diannong. A simulation system for distributed spaceborne radar based on PC cluster[J]. Modern Radar, 2006, (8): 1 - 3. (in Chinese)

### 作者简介



张永俊 男, 1982 年生于陕西咸阳, 工程师, 博士, 主要研究方向为干涉 SAR、星载分布式 SAR 系统理论与三同步技术等.

E-mail: yj\_zhang@nudt.edu.cn