

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.02.004

双星 InSAR 时间同步误差对相位同步的影响

王艺媛, 王万林

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要:针对双星编队的 InSAR 雷达系统,提出了 SAR 与相位同步一体化的系统框架,在双星时间同步误差的基础上,提出了一种综合考虑时间同步误差、SAR 和相位同步发射及接收链路时延的双星相位同步设计方法,给出了相位同步补偿后的辅星回波信号相位和双星干涉相位,推导了两种时变相位误差功率谱密度,经过理论分析和仿真试验证明:相位同步补偿后,时间同步误差不影响相位同步精度,只影响辅星目标位置。辅星回波固定相位误差较大,但不影响成像,双星干涉固定相位误差为千分之几度,对干涉测高精度影响可以忽略,辅星回波和双星干涉时变相位误差与主星相近。

关键词:双星编队 InSAR; 时间同步误差; 相位同步; 固定相位误差; 时变相位误差

中图分类号:TN958; V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)02-0022-07

Influence of bistatic spaceborne InSAR time synchronization error on phase synchronization

WANG Yiyuan, WANG Wanlin

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract:For the InSAR radar system of bistatic spaceborne formation, a system framework integrating SAR and phase synchronization is proposed. Based on the bistatic time synchronization error, a bistatic spaceborne phase synchronization design method considering the time synchronization error, SAR and phase synchronization transmit and receive link delay is proposed. The slave satellite echo signal phase and interference phase after phase synchronization compensation are given, and two time-varying phase error power spectral densities are derived. Theoretical analysis and simulation experiments show that after phase synchronization compensation, the time synchronization error does not affect the phase synchronization accuracy, but only the target position of the slave satellite. The constant phase error of the slave satellite echo is large, but it does not affect the imaging. The constant phase error of the interference is a few thousandths of a degree, which has a negligible impact on the interferometric height accuracy. The time-varying phase error of the slave satellite echo and the interference is similar to that of the primary satellite.

Key words: bistatic spaceborne formation InSAR; time synchronization error; phase synchronization; constant phase error; time-varying phase error

0 引言

分布式双星干涉 SAR 系统是一种可以通过干

涉成像获得目标高程信息的分置运动平台雷达系统,通过合理配置收发双基的工作模式,可以增强

收稿日期:2022-07-15; 修回日期:2022-08-10

引用格式:王艺媛,王万林.双星 InSAR 时间同步误差对相位同步的影响[J].空间电子技术,2023,20(2):22-28. WANG Y Y, WANG W L. Influence of bistatic spaceborne InSAR time synchronization error on phase synchronization[J]. Space Electronic Technology, 2023,20(2):22-28.

隐蔽目标或者增强目标回波信号强度的能力。收发系统分置大幅提升了电子对抗能力,但同时带来三大同步问题也大大影响了系统的成像性能^[1-3]。其中,空间同步问题可以通过雷达平台的调整来解决,时间和相位同步问题则需要载荷解决^[4-5]。

双星编队体制多采用一发双收(主星发射信号,主辅星一起接收)的工作模式,雷达工作在一发双收干涉 SAR 模式时,频率偏差和相位噪声,辅星的接收雷达和主星的发射雷达不共频率源,导致频率偏差和相位噪声,进而引起时间同步和相位同步误差问题^[6]。收发平台频率源的任何频率误差或频率不稳定都将导致解调后的回波信号出现相位误差,导致雷达图像方位向位置偏移、主瓣展宽造成干涉测高精度的恶化等问题^[7-8]。

目前关于双基地 SAR 的系统同步理论研究,以及同步误差对于雷达系统误差和干涉高程测量影响的研究以及比较成熟。文献[9]提出了时间同步误差影响对于频率源稳定性和准确度的要求,指出线性时间同步误差是影响成像的主要因素,随机抖动项可以被忽略^[10],但仅针对星机双基地 SAR;文献[11]分析了同步误差对于成像和干涉测高性能的影响。已有的文献都很少涉及时间同步和相位同步的关系,时间和相位同步是同源的,归根结底都是收发分置导致的频率源差异引起的,所以二者之间存在必然的联系。

文章结构安排如下:第一部分建立双星 InSAR 的时间同步误差模型;第二部分介绍双星 InSAR 系统组成框图,分析双星 InSAR 系统相位;第三部分介绍考虑时间同步误差的相位同步方法,推导相位同步补偿后的辅星回波信号相位和双星干涉相位;最后给出了两种时变相位误差的测试仿真结果。

1 时间同步误差模型

单星 SAR 系统发射本振与接收本振由同一个晶振变频产生,是一个相干系统,不存在时间同步问题^[12-13]。对于双星 InSAR 的一发双收系统,发射本振与接收本振的晶振源分别安装在不同的两颗卫星上,由两个独立的晶振变频产生,因此,两星雷达系统时序必然存在时间同步误差,而两个本振的频率差是时间同步误差产生的根本原因^[14-16],双星 InSAR 收发信号时序如图 1 所示。

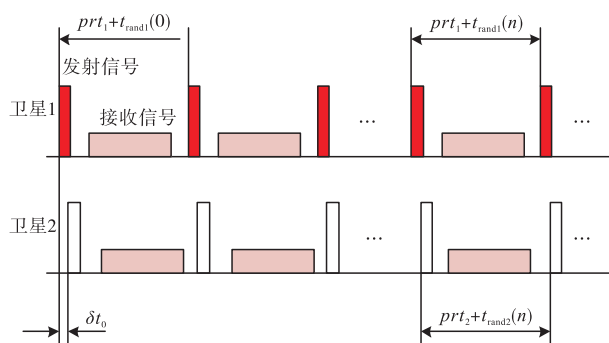


图 1 双基地 SAR 收发信号时序图

Fig. 1 Timing diagram of bistatic SAR signal

时间同步误差由固定的时间差 δt_0 和变化的收发脉冲重复周期之差组成,后者又分为随时间线性变化的确定误差和随机误差两项,因此,总的时间不一致性误差为:

$$\delta t = \delta t_0 + \alpha t + t_{\text{rand}}(t) \quad (1)$$

式(1)中, δt_0 为两星时间同步导致的常数项, αt 为两星频率偏差导致的线性项, $t_{\text{rand}}(t)$ 为两星频率偏差导致的随机项,可以表示为:

$$\alpha = \frac{\Delta \text{prt}_1 - \Delta \text{prt}_2}{\text{prt}} = \frac{f_0}{f_1} - \frac{f_0}{f_2} = \frac{\Delta f_2 - \Delta f_1}{f_0} \quad (2)$$

式(2)中, f_0 为标称频率, Δf_1 和 Δf_2 分别表示两星雷达的频率偏移。随机项不具备积累性,只有在频率源稳定度很低时有较大的影响。 δt_0 由两星时间同步误差产生, αt 则由两星频率同步误差产生,时间同步是指两星同时接收相同或不同的导航卫星信号进行时钟驯服,频率同步是指两星同时接收相同或不同的导航卫星信号和本地晶振进行锁相^[17],由于导航卫星的频综和时间都是高精度、高稳定,接收相同或不同导航卫星信号均能满足双星 InSAR 需求,为了分析方便,本文将总的时间不一致性误差 δt 统称为同步时间误差。

2 考虑时间同步误差后的相位同步

2.1 双星 InSAR 系统及原理

双星 InSAR 系统组成框图如图 2 所示,除 SAR 天线和相位同步天线外,雷达和相位同步收发通道均进行统一设计,中频调频源、发射上变频通道、接收下变频、数据采集均为共用通道,雷达和相位同步的功放、低噪声放大各自独立,雷达和相位同步的发射信号完全一样,这样设计不仅有助于相位同步,还有助于主星内定标和从主星发射到辅星接收的全链路内定标。

系统调频源采用中频宽带线性调频信号 (linear frequency modulation, LFM) 波形存储技术, 即根据带通采样定理按照一定的采样频率存储合适的中频宽带 LFM 信号波形, 在雷达系统脉冲时序控制下通过 DA 回放, 这等效为在 DA 回放时刻, 由第一发射本振 f_{01} 将基带 LFM 信号正交调制上变频到中频 f_{01} 。并且, 不难证明卫星 1 发射本振 f_{01} 与晶振信号、采样时钟及接收本振 f_{01} 均相干。数据采集采用直接中频采样, 采样频率仍然满足带通采样定理, 应用直接数据下变频技术将中频宽带 LFM 信号变换为基带 LFM 信号, 这等效为在 AD 采集时刻, 由第一发射本振 f_{01} 将中频 f_{01} 宽带 LFM 信号正交解调

下变频到基带信号。另外, DA 时刻即发射脉冲起始时刻就是发射上变频到 f_{01} 时刻, AD 时刻是回波信号或同步信号到达 AD 采样器件时刻, 而不是接收脉冲起始时刻, 接收脉冲起始时刻只是处理器开始将 AD 采集的信号取出进行处理、存储时刻, 即采样窗起始时刻信号, 这等效为在 AD 采集时刻, 由第一发射本振 f_{01} 将中频 f_{01} 宽带 LFM 信号正交解调下变频到基带信号。另外, DA 时刻即发射脉冲起始时刻就是发射上变频到 f_{01} 时刻, AD 时刻是回波信号或同步信号到达 AD 采样器件时刻, 而不是接收脉冲起始时刻, 接收脉冲起始时刻只是处理器开始将 AD 采集的信号取出进行处理、存储时刻, 即采样窗起始时刻。

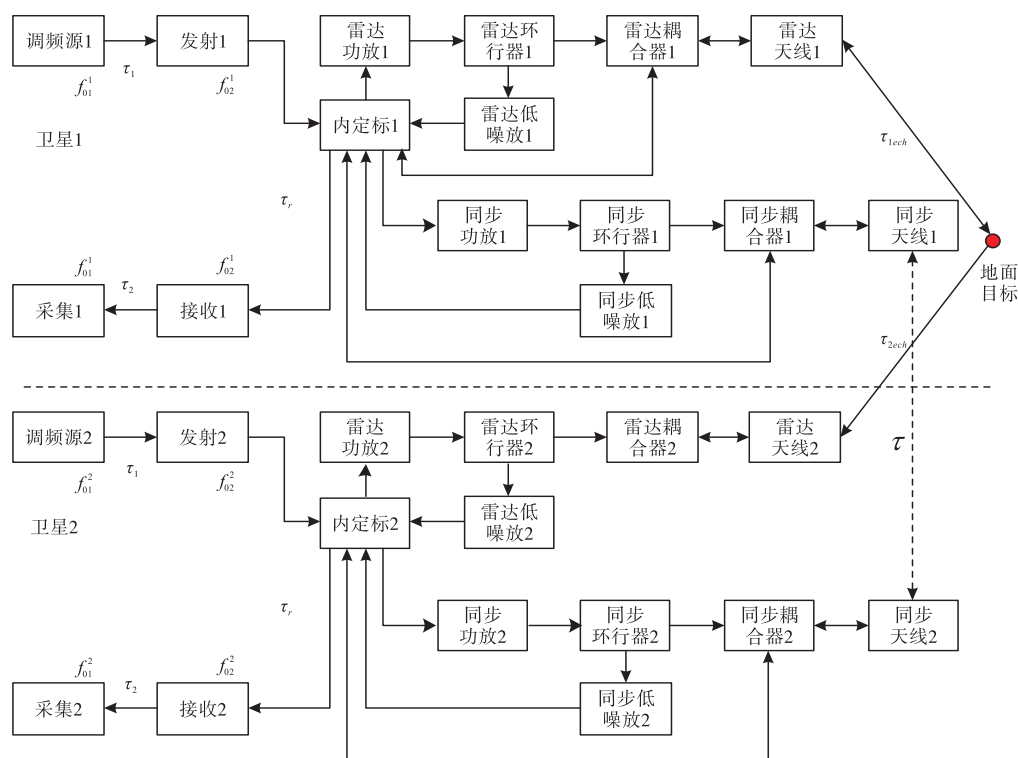


图 2 双星 InSAR 系统组成框图

Fig. 2 Block diagram of bistatic spaceborne InSAR

2.2 双星 InSAR 系统相位分析

如图 2 所示, 不失一般性, 假设双星从第一次上变频到第二次上变频系统硬件延时为 τ_1 , 第二次上变频到第一次下变频系统硬件延时为 τ_r , 第一次下变频到第二次下变频系统延时为 τ_2 , 卫星 2 相对于卫星 1 的同步时间误差为 δt , 卫星 1 发射及接收的双程延时为 τ_{1ech} , 卫星 1 发射卫星 2 接收的延时为 τ_{2ech} , 另外, 为了方便分析, 本文不考虑由双星编队时相对运动引起的多普勒频偏而引入的相位偏差, 这一相位差可以根据卫星星务提供的实时运动参数予以补偿。根据前面的分析结果, 双星的发射、

接收本振变频及时序关系如图 3 所示。

当双星 InSAR 成像时, 假设卫星 1 既发射又接收, 卫星 2 只接收。根据图 3 可见, 双星 InSAR 成像时, 卫星 1 两个发射本振引入的相位为:

$$\varphi_1(t) = 2\pi \int_{t_0}^t f_{01}^1(t) dt + 2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1} f_{02}^1(t) dt + \varphi_{ini1} + \varphi_{n1}(t) \quad (3)$$

式(3)中, φ_{ini1} 为卫星 1 晶振初始相位, $\varphi_{n1}(t)$ 为卫星 1 晶振相噪, t_0 为一为了不影响分析而假设的虚拟初始时间。卫星 1 两个接收本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t + \tau_{1ech}) &= 2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1+\tau_r+\tau_{1ech}} f_{02}^1(t) dt + \\ &2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1+\tau_2+\tau_r+\tau_{1ech}} f_{01}^1(t) dt + \varphi_{ini1} + \varphi_{n1}(t + \tau_{1ech}) \end{aligned} \quad (4)$$

卫星 1 信号解调到基带后,由发射本振、接收本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_{11}(t) &= 2\pi(f_0 + \Delta f_0^1)(\tau_r + \tau_{1ech}) + \\ &2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^1)(\tau_1 + \tau_2) + n_{\varphi 1}(t + \tau_{1ech}) - \varphi_{n1}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可见,卫星 1 既发射又接收,除了发射本振和接收本振因回波双程延迟而引入随慢时间变化的相位噪声外,其余相位均为常量,而且晶振初始相位已被抵消。卫星 2 两个接收本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_2(t + \tau_{2ech}) &= 2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1+\tau_r+\tau_{2ech}} f_{02}^2(t) dt + \\ &2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1+\tau_2+\tau_r+\tau_{2ech}} f_{01}^2(t) dt + \varphi_{ini2} + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, φ_{ini2} 为卫星 2 晶振初始相位, $\varphi_{n2}(t)$ 为卫星 2 晶振相噪。卫星 2 信号解调到基带后,由卫星 1 发射本振、卫星 2 接收本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_{21}(t) &= 2\pi(\Delta f_0^2 - \Delta f_0^1)(t - t_0) + 2\pi(\Delta f_{02}^2 - \Delta f_{02}^1)\tau_1 + \\ &2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^2)(\tau_1 + \tau_2) + 2\pi(f_0 + \Delta f_0^2)(\tau_r + \tau_{2ech}) + \\ &\varphi_{ini2} - \varphi_{ini1} + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n1}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可见,卫星 2 回波相位的第 1、2 项为双星晶振源不同而引入的随慢时间变化的相位,这部分主要影响卫星 2 成像及双星干涉,需要相位同步补偿消除,第 3、4 项为系统及回波延时而引入的常量相位,这部分不影响成像及干涉,第 5、6 项为双星晶振初始相位,这部分不影响成像,但影响绝对测高精度,否则每次开机均需要外场定标校正,也需要相位同步补偿消除,最后两项为随慢时间变化的相位噪声,另外,双星时间同步不影响卫星 2 回波信号相位。因此,由于双星晶振不同,发射、接收本振的频偏不同而引入随慢时间变化的相位,导致卫星既不能正常成像,也不能进行双星干涉测高,必须要进行相位同步来补偿随慢时间变化的相位。根据式(7),卫星 2 回波信号可以表示为:

$$\begin{aligned} s_r(t_a, t_r) &= \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_{ref} - \delta t(t_a)}{\tau_w}\right) \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_{2ech}(t_a)}{\tau_p}\right) \\ &\exp(j\varphi_{21}(t_a) + j\pi(t_r - \tau_{2ech}(t_a))^2) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, t_a 为方位慢时间, t_r 为距离快时间,

τ_{ref} 为基准距离对应的时延, τ_w 为采样时间长度, τ_p 为信号脉宽。

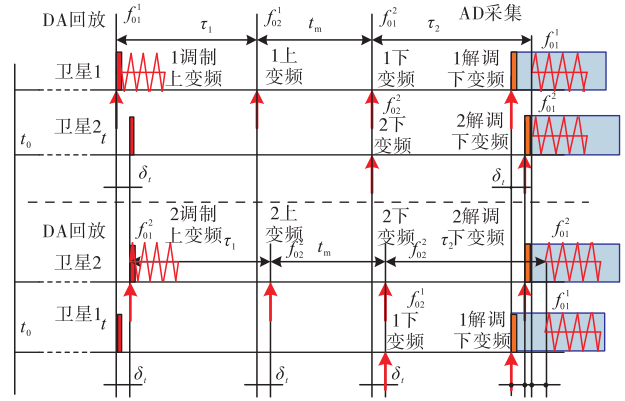


图 3 双星 InSAR 发射、接收本振时序图

Fig. 3 Diagram of bistatic InSAR transmission and reception oscillator

2.3 双星 InSAR 系统相位同步

对于分布式双星 InSAR 系统,一般采用双星按照一定的脉冲频率互发互收同步脉冲信号。根据图 3,双星同步卫星 1 发射、卫星 2 接收时,卫星 1 两个发射本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_1^{syn}(t) &= 2\pi \int_{t_0}^t f_{01}^1(t) dt + 2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1} f_{02}^1(t) dt + \\ &\varphi_{ini1} + \varphi_{n1}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

卫星 2 两个接收本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_2^{syn}(t + \tau) &= 2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1+\tau_r+\tau} f_{02}^2(t) dt + \\ &2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_1+\tau_2+\tau_r+\tau} f_{01}^2(t) dt + \varphi_{ini2} + \varphi_{n2}(t + \tau) \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中, τ 为双星间距离单程延时,卫星 2 同步信号解调到基带后,由发射本振、接收本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_{21}^{syn}(t) &= 2\pi(\Delta f_0^2 - \Delta f_0^1)(t - t_0) + 2\pi(\Delta f_{02}^2 - \Delta f_{02}^1)\tau_1 + \\ &2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^2)(\tau_1 + \tau_2) + 2\pi(f_0 + \Delta f_0^2)(\tau_r + \tau) + \\ &\varphi_{ini2} - \varphi_{ini1} + \varphi_{n2}(t + \tau) - \varphi_{n1}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

卫星 2 发射、卫星 1 接收时,卫星 2 两个发射本振引入的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_2^{syn}(t + \tau_{sy}) &= 2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_{sy}+\delta t} f_{01}^2(t) dt + \\ &2\pi \int_{t_0}^{t+\tau_{sy}+\tau_1+\delta t} f_{02}^2(t) dt + \varphi_{ini2} + \varphi_{n2}(t + \tau_{sy}) \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中, τ_{sy} 为双星互发互收的时间间隔,卫星 1 两个接收本振引入的相位为:

$$\varphi_1^{syn}(t + \tau_{sy} + \tau) = 2\pi \int_{t_0}^{t + \tau_{sy} + \tau_1 + \tau_r + \delta t + \tau} f_{02}^A(t) dt + 2\pi \int_{t_0}^{t + \tau_{sy} + \tau_1 + \tau_2 + \tau_r + \delta t + \tau} f_{01}^A(t) dt + \varphi_{ini1} + \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau) \quad (13)$$

卫星 1 同步信号解调到基带后,由发射本振、接收本振引入的相位为:

$$\varphi_{21}^{syn}(t) = 2\pi(\Delta f_0^A - \Delta f_0^B)(t + \tau_{sy} + \delta t - t_0) + 2\pi(\Delta f_{02}^A - \Delta f_{02}^B)\tau_1 + 2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^A)(\tau_1 + \tau_2) + 2\pi(f_0 + \Delta f_0^A)(\tau_r + \tau) + \varphi_{ini1} - \varphi_{ini2} + \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau) - \varphi_{n2}(t + \tau_{sy}) \quad (14)$$

定义双星相位同步补偿信号相位为:

$$\varphi_c(t) = \frac{1}{2}(\varphi_{12}^{syn}(t) - \varphi_{21}^{syn}(t)) = 2\pi(\Delta f_0^A - \Delta f_0^B)(t - t_0) + \pi(\Delta f_0^A - \Delta f_0^B)(\tau_{sy} + \tau_1 + \tau_r + \tau + \delta t) + \pi(\Delta f_{01}^A - \Delta f_{01}^B)\tau_2 + \pi(\Delta f_{02}^A - \Delta f_{02}^B)\tau_1 + \varphi_{ini1} - \varphi_{ini2} + \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau)/2 + \varphi_{n1}(t)/2 - \varphi_{n2}(t + \tau_{sy})/2 - \varphi_{n2}(t + \tau)/2 \quad (15)$$

由式(7)、式(15)可得,经过相位同步补偿后,卫星 2 回波信号相位为:

$$\varphi_{21}^c(t) = \varphi_{21}(t) + \varphi_c(t) = 2\pi(f_0 + \Delta f_0^B)(\tau_r + \tau_{2ech}) + 2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^B)(\tau_1 + \tau_2) + \pi(\Delta f_0^A - \Delta f_0^B)(\tau_{sy} + \tau_r + \tau + \delta t) + \pi(\Delta f_{01}^A - \Delta f_{01}^B)(\tau_1 + \tau_2) - \varphi_{n1}(t)/2 + \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau)/2 + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n2}(t + \tau_{sy})/2 - \varphi_{n2}(t + \tau)/2 \quad (16)$$

由式(16)可见,通过相位同步补偿函数补偿后,卫星 2 回波信号相位除了相位噪声外,不再存在随慢时间变化的相位项,晶振的初始相位也被补偿抵消,可以与卫星 1 一样正常成像,另外,补偿后双星时间同步误差对卫星 2 回波信号相位影响很小,可以忽略。因此,卫星 2 回波信号可以表示为:

$$s_r(t_a, t_r) = \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_{ref} - \delta t(t_a)}{\tau_w}\right) \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_{2ech}(t_a)}{\tau_p}\right) \exp(j\varphi_{21}^c(t_a) + j\pi(t_r - \tau_{2ech}(t_a))^2) \quad (17a)$$

利用驻定相位原理,回波信号经过距离脉冲压缩后变为:

$$s_{r,rc}(t_a, r) = B \text{rect}\left(\frac{r - r_{ref}}{c\tau_w}\right) \text{sinc}\left(\frac{B(r - r_{2ech}(t_a) - \delta r(t_a))}{c}\right) \exp(j\varphi_{21}^c(t_a)) \quad (17b)$$

由式(5)、式(16)可得,经过相位同步补偿后,双星干涉后相位为:

$$\varphi_{in}(t) = \varphi_{21}^c(t) - \varphi_{11}(t) =$$

$$2\pi((f_0 + \Delta f_0^B)\tau_{2ech} - (f_0 + \Delta f_0^A)\tau_{1ech}) + \pi((\Delta f_0^A(t) - \Delta f_0^B(t))(\tau_{sy} - \tau_r + \tau + \delta t(t)) - (\Delta f_{01}^A(t) - \Delta f_{01}^B(t))(\tau_1 + \tau_2)) + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n2}(t + \tau_{sy})/2 - \varphi_{n2}(t + \tau)/2 - \varphi_{n1}(t + \tau_{1ech}) + \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau)/2 + \varphi_{n1}(t)/2 \quad (18)$$

由式(18)可得,通过相位同步补偿函数补偿后,双星干涉相位除了相位噪声外,不再存在随慢时间变化的相位项,晶振的初始相位也被补偿抵消,每次开机无需外场定标校正。补偿后双星时间同步误差对干涉相位影响也很小,可以忽略。

此外,在分布式 SAR 情况下,接收平台利用发射平台雷达信号直达波进行相位同步,而不是应用双向互发互收方法。此时,相位同步补偿信号为:

$$\varphi'_c(t) = \varphi_{21}^{syn}(t) = 2\pi(\Delta f_{01}^B - \Delta f_{01}^A)(t - t_0) + 2\pi(\Delta f_{02}^B - \Delta f_{02}^A)(t + \tau_1 - t_0) + 2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^B)(\tau_1 + \tau_2 + \tau_r + \tau) + 2\pi(f_{02} + \Delta f_{02}^B)(\tau_r + \tau) + \varphi_{ini2} - \varphi_{ini1} + \varphi_{n2}(t + \tau) - \varphi_{n1}(t) \quad (19)$$

由式(7)、式(19)可得,经过相位同步补偿后,卫星 2 回波信号相位为:

$$\varphi_{21}^{c'}(t) = \varphi_{21}(t) - \varphi'_c(t) = 2\pi(f_0 + \Delta f_0^B)(\tau_{2ech} - \tau) + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n2}(t + \tau) \quad (20)$$

由式(20)可见,通过相位同步补偿函数补偿后,卫星 2 回波信号与卫星 1 一样,除了相位噪声外,信号相位均不随慢时间变化,完全可以正常成像。由式(5)、式(20)可得,经过相位同步补偿后,双星干涉后相位为:

$$\varphi'_{in}(t) = \varphi_{21}^{c'}(t) - \varphi_{11}(t) = 2\pi((f_0 + \Delta f_0^B)\tau_{2ech} - (f_0 + \Delta f_0^A)\tau_{1ech} - 2\pi(f_0 + \Delta f_0^B)\tau_r + (f_{01} + \Delta f_{01}^B)(\tau_1 + \tau_2)) - 2\pi(f_0 + \Delta f_0^B)\tau + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n2}(t + \tau) - \varphi_{n1}(t + \tau_{1ech}) + \varphi_{n1}(t) \quad (21)$$

由式(21)可见,通过相位同步补偿函数补偿后,双星干涉相位除了相位噪声外,不再存在随慢时间变化的相位项,晶振的初始相位也被补偿抵消。但是,通过比较式(18)和式(21),除了回波延时相位、相位噪声外,式(18)的剩余相位非常小,可以忽略,而式(21)中因系统延时、双星间距离延时等引入的剩余相位第 2、3 项非常大,不容易补偿消除,会严重影响测高精度。另外,直接接收直达波还存在如下问题,发射平台只有一付雷达发射天线,接收平台不但有雷达回波接收天线,还需要有直达波接收天线,在接收回波和直达波之间需要切

换,这样接收通道低噪放不能共用,因此,很难实现从发射平台发射源到接收平台接收、采集的内定标,很难实现高性能成像,关于双星间内定标方面的问题,将另文讨论。

3 相位同步后相位误差

由式(16)可知,影响卫星 2 成像的相位为:

$$\varphi_{err}^{SAR}(t) = \frac{1}{2}(\varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau) - \varphi_{n1}(t) + 2\varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n2}(t + \tau_{sy}) - \varphi_{n2}(t + \tau)) \quad (22)$$

由式(18)可知,影响双星干涉的相位为:

$$\begin{aligned} \varphi_{err}^{in}(t) = & \pi((\Delta f_0^1(t) - \Delta f_0^2(t))(\tau_{sy} - \tau_r + \tau + \delta t(t)) - \\ & (\Delta f_{01}^1(t) - \Delta f_{01}^2(t))(\tau_1 + \tau_2)) + \varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \\ & \varphi_{n2}(t + \tau_{sy})/2 - \varphi_{n2}(t + \tau)/2 - \varphi_{n1}(t + \tau_{1ech}) + \\ & \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau)/2 + \varphi_{n1}(t)/2 \quad (23a) \end{aligned}$$

式(23a)中,第 1 项由时间同步误差、相位同步时延及系统时延等因双星频偏引入的相位误差,通过分析,可以忽略。其余皆为晶振相位噪声引入的相位误差,为一随机相位误差变量,因此,影响双星干涉的相位简化为:

$$\begin{aligned} \varphi_{err}^{in}(t) = & \frac{1}{2}(2\varphi_{n2}(t + \tau_{2ech}) - \varphi_{n2}(t + \tau_{sy}) - \varphi_{n2}(t + \tau) - \\ & 2\varphi_{n1}(t + \tau_{1ech}) + \varphi_{n1}(t + \tau_{sy} + \tau) + \varphi_{n1}(t)) \quad (23b) \end{aligned}$$

由于双星采用两个独立的同一型号晶振, $\varphi_{n1}(t)$ 、 $\varphi_{n2}(t)$ 为两个独立的随机量,所以,经过相位同步补偿后,卫星 2 回波相位误差、双星干涉相位误差的功率谱函数分别为:

$$\begin{aligned} S_{\varphi_{err}}^{SAR}(f) = & m^2 S_{\varphi}(f) (\sin^2(\pi f(\tau + \tau_{sy})) - \sin^2(\pi f(\tau - \tau_{sy})) \\ & 2\sin^2(\pi f(\tau_{sy} - \tau_{2ech})) + 2\sin^2(\pi f(\tau - \tau_{2ech}))) \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\varphi_{err}}^{in}(f) = & m^2 S_{\varphi}(f) (2\sin^2(\pi f(\tau_{sy} + \tau - \tau_{1ech})) + \\ & 2\sin^2(\pi f\tau_{1ech}) + 2\sin^2(\pi f(\tau_{sy} - \tau_{2ech})) + \\ & 2\sin^2(\pi f(\tau - \tau_{2ech})) - \sin^2(\pi f(\tau_{sy} + \tau)) - \\ & \sin^2(\pi f(\tau_{sy} - \tau))) \quad (25) \end{aligned}$$

式(24)、式(25)中, $S_{\varphi}(f)$ 为晶振相位噪声功率谱函数, m 为晶振频率至射频中心频率的倍频数。

4 仿真验证

1) 非时变相位误差分析。仿真条件:卫星 1 为主星,卫星 2 为辅星,第一本振为 1.4 GHz,第二本振为 8.2 GHz,射频中心频率为 9.6 GHz,晶振频率为 100 MHz,晶振频率准确度为 1×10^{-11} ,稳定度为

$1 \times 10^{-11}/6 \text{ ms}$,双星时间同步误差为 30 ns,测量精度为 3 ns,系统延时 $\tau_1 = 50 \text{ ns}$, $\tau_2 = 50 \text{ ns}$, $\tau_r = 60 \text{ ns}$,同步延时 $\tau = 10 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_{sy} = 50 \text{ } \mu\text{s}$ 。双星 InSAR 每次最长工作时间为 120 s 后,便作一次时间同步。根据式(16)、式(18)可得卫星 2 回波、双星干涉相位误差分别如表 1、表 2 所列。

表 1 卫星 2 回波非时变相位误差

Table 1 Non-time varying phase error of slave satellite echo

序号	名称	取值	误差/(°)
1	$\pi(\Delta f_0^1 - \Delta f_0^2)$	34.56°/s	/
2	$\pi(\Delta f_{01}^1 - \Delta f_{01}^2)$	5.04°/s	/
3	$2\pi(f_{01} + \Delta f_{01}^2)$	$5.04 \times 10^{11} \text{ }^\circ$	/
4	$\tau_1 + \tau_2$ 标定误差	100 ps	50.4
5	τ_{sy}	50 μs	17280×10^{-7}
6	τ_r	60 ns	20.74×10^{-7}
7	τ	10 μs	3456×10^{-7}
8	δt	5.4 ns	1.87×10^{-7}
9	τ_1	50 ns	2.52×10^{-7}
10	τ_2	50 ns	2.52×10^{-7}
总计	/	/	50.4

表 2 双星干涉非时变相位误差

Table 2 Non-time varying phase error of interference

序号	名称	取值	误差/(°)
1	$\pi(\Delta f_0^1 - \Delta f_0^2)$	34.56°/s	/
2	$\pi(\Delta f_{01}^1 - \Delta f_{01}^2)$	5.04°/s	/
3	τ_{sy}	50 μs	17280×10^{-7}
4	τ_r	60 ns	20.74×10^{-7}
5	τ	10 μs	3456×10^{-7}
6	δt	5.4 ns	1.87×10^{-7}
7	τ_1	50 ns	2.52×10^{-7}
8	τ_2	50 ns	2.52×10^{-7}
总计	/	/	2.0863×10^{-3}

由表 1、表 2 结果可知,相位同步补偿后,卫星 2 回波非时变相位主要由第 1 本振和系统时延标定误差造成,为 50.4°,误差虽然较大,但不影响成像。相位同步时延造成的双星干涉非时变相位误差最大,双星时间同步误差造成的相位误差最小,但总误差仅为 0.002°,可以忽略不计,而且回波相位误差最大项也得到完美补偿。比较式(16)、式(18)、式(20)和式(21)可知,对于互发互收同步方法,回波相位误差大,干涉相位误差小,既可以成像,又可以干涉测高,对于直达波同步方法,回波相位误差小,干涉相位误差大,只能成像,不能干涉测高,而且还不能进行内定标实现高精度成像。

2) 时变相位误差分析。仿真条件:晶振频率为

100 MHz, 幂律谱模型参数为 $a = -85$ dB, $b = -90$ dB, $c = -190$ dB, $d = -120$ dB, $e = -140$ dB, 卫星 1 回波时延 $\tau_{1ech} = 5.08$ ms, 卫星 2 回波时延 $\tau_{2ech} = 5.09$ ms, 其余同非时变相位误差分析。仿真结果如图 4 所示, 相位同步后, 卫星 2 回波、干涉相位噪声与卫星 1 相近, 无明显恶化, 不会影响卫星 2 成像和双星干涉测高。

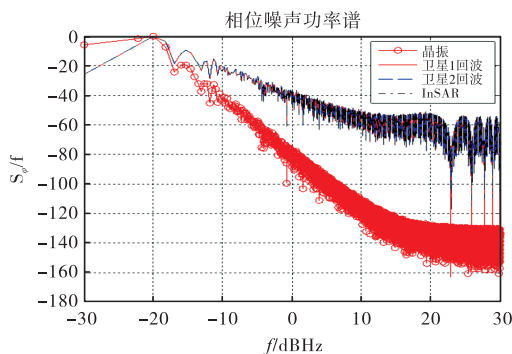


图 4 相位同步后相位噪声分析结果

Fig. 4 Phase noise analysis results after phase synchronization

5 结论

双星编队 SAR 通过一发双收的方式获取高精度的干涉测量结果, 对相位同步精度具有很高的要求。双星编队体制下由于频偏不同引入随慢时间变化的相位影响了正常成像和测高, 相位同步必须考虑时间同步误差的存在。本文给出了双星 InSAR 的系统组成及其原理, 说明了相位同步补偿后, 不论是应用双向互传还是直达波方法, 均可以实现正常成像, 时间同步误差影响可以忽略, 最后给出了两种相位误差的测试仿真结果, 证明了本文理论分析的正确性, 以便在系统设计中充分考虑同步的影响, 为系统设计提供指导。

参考文献:

- [1] CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic aperture radar: Systems and signal processing[M]. New York: Wiley, 1991: 3-7.
- [2] KRIEGER G, YOUNIS M. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 424-428.
- [3] WANG W Q, YANG Y W, CAI J Y. Extracting phase noise of microwave and millimetre-wave signals by decon-

volution[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 2006, 153(1): 7-12.

- [4] YOUNIS M, METZIG R, KRIEGER G, et al. Performance prediction and verification for the synchronization link of TanDEM-X[C]//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007: 5206-5209.
- [5] YOUNIS M, METZIG R, KRIEGER G. Performance prediction of a phase synchronization link for bistatic SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 429-433.
- [6] JIAO Y, LIANG D, LIU K, et al. The synchronization transceiver design and experimental verification for the LuTan-1 SAR satellite[J]. Sensors, 2020, 20(5): 23-27.
- [7] RODRIGUEZ-CASSOLA M, BAUMGARTNER S V, KRIEGER G, et al. Bistatic TerraSAR-X/F-SAR spaceborne-airborne SAR experiment: Description, data processing, and results[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 781-794.
- [8] WANG W Q. Clock timing jitter analysis and compensation for bistatic synthetic aperture radar systems[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2007, 7(3): L341-L350.
- [9] 周鹏, 皮亦鸣, 戴永寿, 等. 星机双基地 SAR 的时间同步误差分析[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1467-1470.
- [10] 何志华, 何峰, 张永胜, 等. 分布式 SAR 时间同步误差的影响分析与试验验证[J]. 宇航学报, 2011, 32(6): 1373-1378.
- [11] 何志华, 何峰, 黄海风, 等. 分布式 SAR 相位同步误差的影响分析与试验验证[J]. 宇航学报, 2012, 33(3): 353-357.
- [12] 孟喆, 刘光炎. 多基站星载 SAR 相位同步链路误差分析[J]. 现代雷达, 2015, 37(2): 8-12.
- [13] 李航舰, 王宇, 邓云凯, 等. 分布式星载 SAR 系统时间同步和波束同步误差分析[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 244-253.
- [14] 陈娟, 常军, 王礼麒. SAR 成像系统重频抖动的影响及补偿[J]. 电讯技术, 2015, 55(7): 787-791.
- [15] 张永胜, 王敏, 梁甸农, 等. 星载寄生式 InSAR 系统频率同步误差分析[J]. 信号处理, 2007, 23(6): 927-931.
- [16] 周良将, 梁兴东, 丁赤飏. 一种双站 SAR 同步方法及同步系统设计[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(Z1): 305-309.
- [17] 史晶晶, 陶孝锋, 孙召, 等. 基于 GEO 卫星的导弹天基数据链频率同步技术研究[J]. 空间电子技术, 2021, 18(3): 70-74.

作者简介: 王艺媛(1999—), 陕西商洛人, 硕士研究生在读。主要研究方向为双基地星载 SAR 的系统同步技术。E-mail: m18091412726@163.com