

星机双基地 SAR 的时间同步误差分析

周 鹏¹,皮亦鸣²,戴永寿¹,李 芳¹

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院,山东东营 257061;2. 电子科技大学电子工程学院,四川成都 611731)

摘 要: 在星载双基地 SAR、机载双基地 SAR 已有成果的基础上,分析了星机双基地 SAR 中时间同步误差的影响.利用已有文献提出的一种时间同步误差模型,针对星机双基地 SAR 中误差的影响进行了定量分析,并进行了仿真验证.结果表明:按目前振荡源的实际频率准确度和稳定度,脉冲重复频率抖动的影响可忽略,线性时间同步误差是影响成像指标的主要误差源.最后,推导了实施同步方案后系统允许的“剩余同步误差”的量化指标要求.

关键词: 双基地 SAR; 星机双基地 SAR; 时间同步误差; 误差分析

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1467-04

Analysis of Time Synchronization Errors in Spaceborne/Airborne Hybrid Bistatic SAR

ZHOU Peng¹, PI Yi-ming², DAI Yong-shou¹, LI Fang¹

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: The impact of time synchronization errors on the spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR (SA-BSAR) is analyzed on the basis of several existing results applied to the spaceborne bistatic SAR or the airborne bistatic SAR. Quantitative error analysis, uniquely for the SA-BSAR system, is performed using an existing model for time synchronization errors. Several simulation experiments were carried out and the results indicate that in the SA-BSAR system, taking the practical accuracy and stability of the current oscillator into consideration, the impact of the pulse repetition frequency (PRF) jitter is trivial and the linear time synchronization error is proved to be the major error source. At last, the requirement on the residual errors is derived.

Key words: bistatic synthetic aperture radar (BSAR); spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR (SA-BSAR); time synchronization errors; error analysis

1 引言

星机双基地 SAR (Synthetic Aperture Radar) 是近年来新涌现出的一种双基地合成孔径雷达^[1~3]. 它由雷达卫星发射信号, 由飞机接收信号. 该系统具有一些独特的优点: (1) 将星载发射器安全性好与机载接收器灵活的优点结合在一起; (2) “远发近收”, 信噪比较高; (3) 除合作式的应用外, 只需对现有机载 SAR 设备进行一些简单改进, 就可以利用已有雷达卫星构成非合作式系统, 可大大节约成本. 由于上述优点, 该系统受到了越来越广泛的关注, 在国外已有实际试验开始付诸实施^[2].

与其它类型的双基地 SAR 类似, 时间同步是系统核心技术之一. 在时间同步误差的影响分析方面, 文献[4]最早指出, 双基地雷达对时间同步精度的典型要求是压缩后脉宽的若干分之一, 但其主要是针对探测雷达中的测距精度而言. 实际上, 在 SAR 系统中, 一般无需精确测距, 应主要关注时间同步误差对回波方位向线性

调频特性的破坏. 文献[5,6]分析了当完全依赖频率源自身稳定性实现同步时, 对频率源稳定度的量化要求. 文献[7]针对分布式星载 SAR, 重点分析了时间同步误差对干涉相位的影响. 文献[8]认为时间同步误差会给双基地 SAR 的回波带来相位误差. 文献[9,10]分析指出, 时间同步误差并不会对回波相位造成误差, 只是使回波在距离向出现“跨距离单元”的情况, 因而文献[4]中提出的“压缩后脉宽的若干分之一”的精度要求在 SAR 中仍然适用. 总体而言, 在时间同步误差的影响分析方面已有不少成果, 但并不以星机双基地 SAR 为专门的研究对象. 因此有必要根据其特点进行专门分析, 并推导“剩余同步误差”的量化指标要求.

2 时间同步误差模型

时间同步误差一般包括两部分^[7]. 其中之一是收、发初始触发信号间的时间差 Δt_0 . 另一部分是收发脉冲重复间隔 (Pulse Repetition Interval, PRI) 之差, 又包括

确定性和随机性误差两种形式. 确定性误差是指实际脉冲重复间隔偏离标称值的偏差, 而随机性误差则是由频率源的随机抖动造成的. 即有^[7]:

$$\text{PRI}_{s(a)}(\xi) = \text{PRI} + \Delta\text{PRI}_{s(a)} + \text{rand}_{s(a)}(\xi) \quad (1)$$

式中, 下标 s 代表卫星, 下标 a 代表飞机, $\text{PRI}_{s(a)}$ 为发射(接收)雷达脉冲间的实际间隔(注: 为简化起见, 发射机和接收机使用统一的式子表示), PRI 为标称重复间隔, $\xi = m \times \text{PRI} (m = 0, 1, \dots)$ 为方位向时间, $\Delta\text{PRI}_{s(a)}$ 为实际重复间隔与标称值间的偏差, $\text{rand}_{s(a)}$ 为随机误差. 值得注意的是, 由确定性偏差所引起的误差将随着时间的增加线性累积. 因此, 综合两部分误差, 系统的时间同步误差可表示为^[7]:

$$e(\xi) = \Delta t_0 + \alpha \cdot \xi + \text{rand}(\xi) \quad (2)$$

其中:

$$\alpha = \frac{\Delta\text{PRI}_a - \Delta\text{PRI}_s}{\text{PRI}} \quad (3)$$

$$\text{rand}(\xi) = \text{rand}_a(\xi) - \text{rand}_s(\xi) \quad (4)$$

式(2)为所导出的时间同步误差模型, 它由三部分组成: 第一项为收、发初始触发信号间的固定时间差, 第二项为线性积累误差, 第三项为随机误差.

第一项误差主要引起测距误差, 该误差过大会导致回波数据丢失. 在 SAR 系统中, 通常并不需要精确测距, 因此只要能保证回波的返回时间不落在接收机“回波采样窗”以外, Δt_0 的影响可忽略. 第二项和第三项是需要进行处理的主要误差. 其中, 第二项误差的影响总是存在的, 而第三项误差由于并不具备积累性, 一般只有在频率源稳定度比较低或所需要的相干处理时间特别长时才有较大影响^[9].

3 时间同步误差的影响分析及仿真

卫星发射的距离向信号可表示为:

$$S_t(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau}{\tau_p}\right] \cdot \exp(j\omega_c \tau + j\pi k_r \tau^2) \quad (5)$$

式中, τ 为距离向时间, τ_p 为脉冲宽度, ω_c 为信号载频, k_r 为距离向信号的调频斜率, s_t 为发射信号. 当存在时间同步误差 $e(\xi)$ 时, 在以发射信号为基准的时间坐标系中, 不同脉冲时回波在接收机“回波采样窗”中所处

的位置会发生漂移, 图 1 给出了这种现象的示意图.

根据图 1, 某点目标的二维射频回波信号 S_r 可表示为: $S_r'(\xi, \tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau - R_{\text{sum,ref}}/c - e(\xi)}{\tau_\omega}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_d}{\tau_p}\right] \cdot \exp[j\omega_c(\tau - \tau_d) + j\pi k_r(\tau - \tau_d)^2]$ (6)

式中, $R_{\text{sum,ref}}$ 为基准距离, c 为光速, τ_ω 为回波采样窗的长度, τ_d 为回波的延迟时间.

为简化起见, 假设接收机本振不存在误差, 则解调后的回波信号 S_r 可表示为:

$$S_r(\xi, \tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau - R_{\text{sum,ref}}/c - e(\xi)}{\tau_\omega}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_d}{\tau_p}\right] \cdot \exp[-j\omega_c \tau_d + j\pi k_r(\tau - \tau_d)^2] \quad (7)$$

观察上式发现, 时间同步误差并不影响回波信号相位, 主要是使目标在“回波采样窗”中所处位置发生了不希望的偏移. 设距离向的参考函数为:

$$S_{r,\text{ref}}(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau}{\tau_p}\right] \cdot \exp(j\pi k_r \tau^2) \quad (8)$$

利用驻定相位原理, 可得距离压缩后的信号 $S_{r,rc}$ 为:

$$S_{r,rc}(\xi, r) = B \cdot \text{rect}\left[\frac{r - R_{\text{sum,ref}}}{c\tau_\omega}\right] \cdot \text{sinc}\left\{\frac{B[r - R_{\text{sum}}(\xi) + \Delta R_{\text{sum}}(\xi)]}{c}\right\} \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \cdot \frac{R_{\text{sum}}(\xi)}{c}\right] \quad (9)$$

式中, r 代表各距离单元的距离, R_{sum} 为发射机-目标-接收机间的距离和, B 为信号带宽, $\Delta R_{\text{sum}}(\xi) = c \times e(\xi)$ 为时间同步误差引起的目标“定位”误差. 显然, 由于不同脉冲下的 ΔR_{sum} 并不相同, 将使同一目标的回波在距离徙动校正后出现“跨越距离门”的情况, 从而与方位向参考信号的特性出现失配, 严重时成像效果恶化.

为更直观地观察时间同步误差对成像性能的影响, 采用文献[11]中的相位噪声模型进行了仿真. 该模型将功率谱等于 1 的高斯白噪声输入到如下频率响应的滤波器:

$$|H(f)|^2 = \begin{cases} S_\varphi(f), & f_i \leq |f| \leq f_h \\ S_\varphi(f_i), & |f| \leq f_i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

式中的 f_i 和 f_h 分别对应相位噪声理论中的低截止和高截止频率^[12], $S_\varphi(f)$ 为要模拟的振荡源的功率谱特性.

利用上述仿真模型, 设定 $f_i = 0.01\text{Hz}$ 和 $f_h = 1\text{kHz}$, 对振荡频率为 $f_{\text{osc}} = 10\text{MHz}$, 幂律谱模型^[12] 参数为 $a = -85$, $b = -90$, $c = -190$, $d = -120$, $e = -140\text{dB}$ 的相位噪声进行了模拟. 利用相位噪声理论中的公式, 可换算出上述参数对应的阿仑方差均方根约为 $\sigma_y(\tau = 1\text{s}) \approx 1 \times 10^{-11}$, 可认为是目前比较典型的振荡源频率稳定度的水平^[5]. 图 2 给出了某次仿真实验的结果. 其中, 图

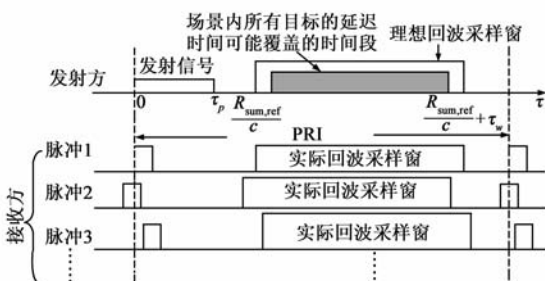


图1 时间同步误差对双基地SAR回波的影响

(a)表示理想功率谱,图(b)和图(c)分别为仿真出的收、发振荡源相位噪声的实际功率谱.从图中可看出,模拟功率谱与理想功率谱间的吻合度较好.

设定 PRF = 4kHz,利用仿真出的振荡源相位噪声和分频比可得到收、发触发信号的相位噪声,进而可模拟出 PRF 的实际抖动.图 3 中的(a)、(c)、(e)分别给出了当 $\sigma_y(\tau=1s) \approx 1 \times 10^{-11}, 1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-6}$ 时的仿真结果.从中可看出,当 $\sigma_y(\tau=1s) \approx 1 \times 10^{-11}$ 时检测不到 PRF 的抖动,当 $\sigma_y(\tau=1s) \approx 1 \times 10^{-8}$ 时抖动量级仅有 $\pm 2 \times 10^{-10}$ s 左右,当 $\sigma_y(\tau=1s) \approx 1 \times 10^{-6}$ 时抖动量级达到 $\pm 2 \times 10^{-8}$ s 左右.

由于星机双基地 SAR 的距离分辨率最高可达 1m 左右^[2], $\pm 2 \times 10^{-8}$ s 量级的时间同步误差会造成明显的“距离单元偏移”,而 $\pm 2 \times 10^{-10}$ s 量级以内的误差则不会造成影响.为验证上述结论,以 TerraSAR-X 卫星和 PAMIR 机载雷达为例,进行了仿真.采用的参数为:卫星高度 515km,速度 7.6km/s,波束入射角 40°;飞机高度 3km,速度 100m/s,波束入射角 50°;载频 9.65GHz,带宽

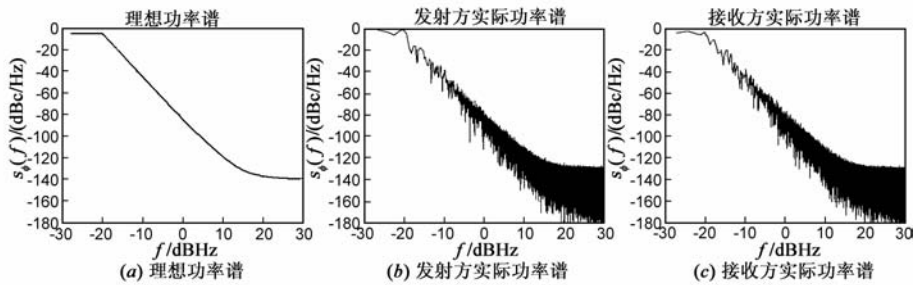


图2 振荡源相位噪声的理想功率谱和仿真功率谱

150MHz,合成孔径时间 1s.图 3 中的(b)、(d)、(f)给出了成像结果的等值线图.从图中可看出,当 $\sigma_y(\tau=1s)$ 优于 1×10^{-8} 量级时,成像效果良好;当 $\sigma_y(\tau=1s)$ 降到 1×10^{-6} 量级时,聚焦效果明显变差.当 $\sigma_y(\tau=1s)$ 等于 1×10^{-7} 量级时,时间同步误差约为 $\pm 2 \times 10^{-9}$ s,处于临界状态.因此可得出如下结论:当振荡源的频率稳定度高于 10^{-8} 量级时,PRF 抖动不会对星机双基地 SAR 造成大的影响.

根据式(2),除了 PRF 抖动误差以外,还需考虑线性时间同步误差.当收、发振荡源已长期运行但又未及时校准时,累计误差可能很大.显然,必须保证在合成孔径时间内不出现“跨越距离门”的情况,因此有:

$$c \cdot \left(\frac{\Delta f_{osc}}{f_{osc}} \cdot \xi_{int, b} \right) \leq \frac{1}{M} \cdot \frac{c}{2B} \quad (11)$$

式中, $\Delta f_{osc}/f_{osc}$ 为要求的频率源准确度, $\xi_{int, b}$ 为合成孔径时间, M 是一个大于等于 1 的、可设置的常数.对上式简单变换后,可得:

$$\frac{\Delta f_{osc}}{f_{osc}} \leq \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2B} \cdot \frac{1}{\xi_{int, b}} \quad (12)$$

上式表示的是当无需采用时间同步补偿方案时,实际振荡源应满足的要求.以 TerraSAR-X 和 PAMIR 的参数为例, $B = 150\text{MHz}$,取 $M = 3$, $\xi_{int, b} = 1\text{s}$ ^[2],可得: $\Delta f_{osc}/f_{osc} \approx 1 \times 10^{-9}$.为验证上述结论,分别对 $\Delta f_{osc}/f_{osc} = 1 \times 10^{-9}, 1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-7}$ 的三种情况进行了仿真,成像结果如图 4 所示.从图中可看出,当 $\Delta f_{osc}/f_{osc} = 1 \times 10^{-9}$ 时,成像效果良好;当 $\Delta f_{osc}/f_{osc} = 1 \times 10^{-8}$ 时,成像质量已有较大下降;当 $\Delta f_{osc}/f_{osc} = 1 \times 10^{-7}$ 时,已完全不能成像.以上结果说明,在给定参数的条件下,若振荡源的频率准确度优于 1×10^{-9} 量级(即:满足式(12)的要求),无需采用同步补偿方案;但若振荡源的频率准确度低于 1×10^{-9} ,则必须采用同步补偿方案,不能直接成像.对于 10^{-9} 量级频率准确度的要求,当振荡源已长期运行而又未及时校准时,有可能无法得到满足.因此,线性时间同步误差是星机双基地 SAR 时间同步方案中应处理的主要误差源.

对于线性时间同步误差的影响,必须采用适宜的时间同步方案进行补偿.一种方法是估计出发送方的

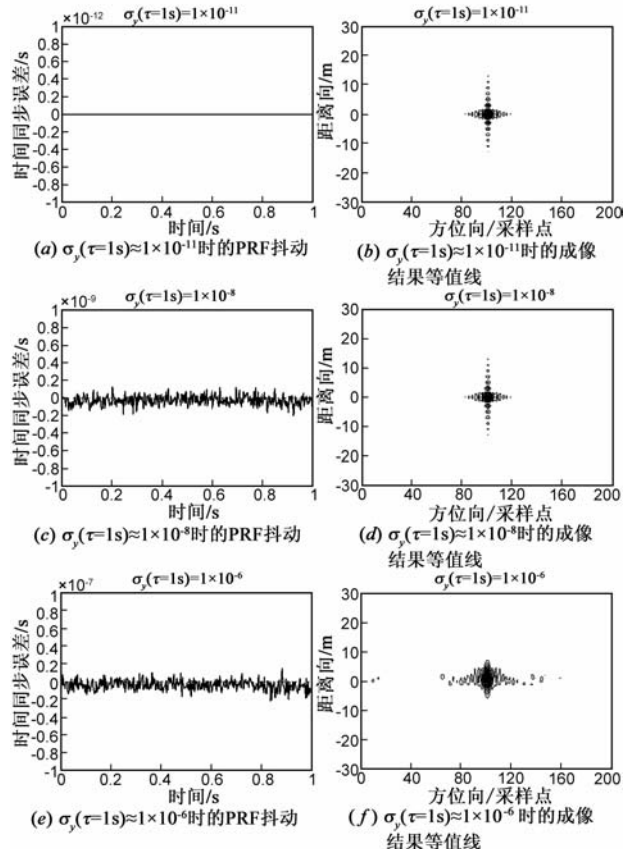


图3 PRF抖动的仿真结果及成像结果等值线

实际 PRI 后实施补偿,显然对 PRI 的相对估计精度应满足:

$$\frac{\Delta \text{PRI}}{\text{PRI}} \leq \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2B} \cdot \frac{1}{\xi_{\text{int},b}} \quad (13)$$

另一种方法是估计出发送方的触发同步脉冲后实施补偿,其优点是估计误差不会积累.这时有:

$$\Delta t_{e,\text{max}} \leq \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2B} \quad (14)$$

其中, $\Delta t_{e,\text{max}}$ 表示对发送方触发同步脉冲估计的最大允许误差.

4 结论

在星载双基地 SAR、机载双基地 SAR 已有成果的基础上,针对星机双基地 SAR 的特点对时间同步误差的影响进行了定量分析.通过分析和仿真表明,只要频率源稳定性和准确度的要求能分别达到 10^{-8} 量级和 $1/(M \times 2B \times \xi_{\text{int},b})$ 量级(典型值为 10^{-9} 左右),时间同步误差的影响基本可忽略.对于 10^{-8} 量级频率稳定度的要求,目前的振荡源可以满足^[5].但对于 10^{-9} 量级频率准确度的要求,当振荡源已长期运行而又未及时准时时,则不一定能满足.因此,PRF 抖动的影响可忽略,而线性时间同步误差是影响星机双基地 SAR 成像指标的主要来源.对于线性时间同步误差的影响,必须采用适宜同步方案补偿.若采用估计出发送方 PRI 后实施补偿的方法,对 PRI 的相对估计精度应满足 $1/(M \times 2B \times \xi_{\text{int},b})$ 量级.若采用估计出发送方触发同步脉冲后实施补偿的方法,则估计误差的最大值不能超过 $1/(M \times 2B)$.

参考文献

- [1] Walterscheid I, Espeter T, Gierull C, et al. Results and analysis of hybrid bistatic SAR experiments with spaceborne, airborne and stationary sensors [A]. IGARSS' 2009 [C]. Cape Town: IEEE Press, 2009. II-238-II-241.
- [2] Rodriguez-Cassola M, Baumgartner S V, Krieger G. Bistatic TerraSAR-X/F-SAR spaceborne -airborne SAR experiment: description, data processing and results [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 781 - 794.
- [3] 周鹏, 皮亦鸣. 星机双基地 SAR 的两种波束同步方法 [J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1192 - 1197.
ZHOU Peng, PI Yi-ming. Two methods for beam synchronization in spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1192 - 1197. (in Chinese)
- [4] Willis N J. Bistatic Radar [M]. Boston: Artech House, 1991. 258 - 259.
- [5] Wei^β M. Synchronization of bistatic radar systems [A]. I-GARSS' 2004 [C]. Alaska: IEEE Press, 2004. III-1000-III-1003.

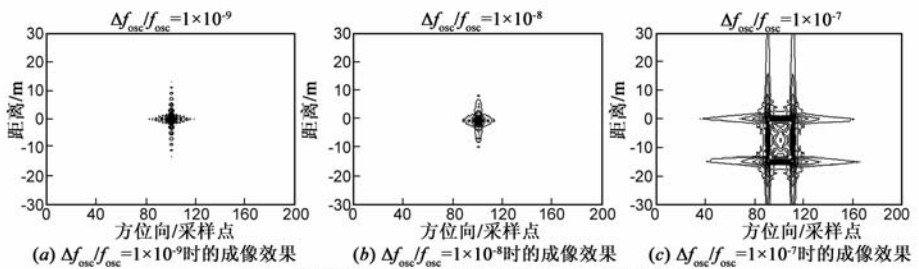


图4 线性时间同步误差对成像结果所造成的影响

- [6] Wei^β M. Time and frequency synchronization aspects for bistatic SAR systems [A]. EUSAR' 2004 [C]. Ulm: VDE VERLAG GMBH, 2004. 395 - 398.
- [7] Yongsheng Z, Diannong L, Zhen D. Analysis of time and frequency synchronization errors in spaceborne parasitic InSAR system [A]. IGARSS' 2006 [C]. Denver: IEEE Press, 2006. 3047 - 3050.
- [8] Zhang Xiaoling, Li Hongbo, Wang Jianguo. The analysis of time synchronization error in bistatic SAR system [A]. I-GARSS' 2005 [C]. Seoul: IEEE Press, 2005. 4619 - 4622.
- [9] 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.
- [10] Wang W Q, Ding C B, Liang X D. Time and phase synchronization via direct-path signal for bistatic synthetic aperture radar systems [J]. IEE Proc Radar Sonar Navigation, 2008, 2(1): 1 - 11.
- [11] Wang W Q. Analytical modeling and simulation of phase noise in bistatic synthetic aperture radar systems [J]. Fluctuation and Noise Letters, 2006, 6(3): L297 - L303.
- [12] Demir A, Mehrotra A, Roychowdhury J. Phase noise in oscillators: a unifying theory and numerical methods for characterizations [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(5): 655 - 674.

作者简介



周鹏 男, 1976 年 4 月出生于甘肃. 2008 年毕业于电子科技大学电子工程学院, 获得博士学位. 现为中国石油大学(华东)副教授, 从事双基地合成孔径雷达系统方面的研究工作.
E-mail: hdpuzp@sina.com



皮亦鸣 男, 1968 年 10 月出生于贵州. 现为电子科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 2005 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划. 研究领域包括雷达信号处理、图像的传输与处理、导航定位技术等.