

星载寄生式 SAR 系统频率同步分析*

张永胜,梁甸农,董臻

(国防科技大学 电子科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要 针对星载寄生式 SAR 系统对地观测应用背景,详细分析了频率同步误差对双站 SAR 成像的影响,以法国提出的“干涉车轮”构形为例,对同步误差进行了仿真。提出了一种新的频率同步方法,该方法通过接收主星的直达波信号并进行相关处理,从而得到频率同步误差。计算机仿真结果表明该同步方法的准确性和有效性。

关键词 星载 SAR;寄生式 SAR;双基地;频率同步

中图分类号 :TN958 **文献标识码** :B

Analysis of Frequency Synchronization Error in Spaceborne Parasitic SAR System

ZHANG Yong-sheng, LIANG Dian-nong, DONG Zhen

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Based on the spaceborne parasitic SAR earth observation application, the author aimed to analyse the influence of the frequency synchronization error to the bistatic SAR imaging. The “interferometric cartwheel” configuration was employed as an example, to make computer simulation of the synchronization error. Therefore, a novel frequency synchronization method was presented. This method acquires the frequency synchronization error by the correlation processing to the “direct signal” which leaked from the SAR antenna side lobe. The simulation results indicate this new synchronization method is accurate and effective.

Key words spaceborne SAR; parasitic SAR; bistatic; frequency synchronization

星载寄生式 SAR 是近年来提出的一种具有吸引力的空间遥感技术^[1-3]:几颗装载了雷达接收设备的低成本小卫星(辅星)以一定编队构形伴随一颗传统遥感 SAR 卫星(主星)飞行,被动接收主星发射的电磁波回波。与传统星载 SAR 相比,星载寄生式 SAR 在提高图像分辨率、干涉测高(InSAR)以及地面运动目标指示(GMTI)方面具有明显优势。法国航天局(CNES)的“干涉车轮”(interferometric cartwheel)计划^[4]是该类系统的典型实例。星载寄生式 SAR 系统由于收发设备分置在不同的卫星平台上,接收机本振与发射信号载频间不存在相关性,它们间的频率不一致即频率同步误差必须加以消除。Cartwheel 系统设计时,并没有采用专门的同步方案,而是在整个雷达工作时间内接收机全部处于打开状态,连续记录数据,然后在地面上通过对数据的后续处理完成同步。本文对星载寄生式 SAR 系统的频率同步误差进行了详细分析,并提出一种新的频率同步方法。

1 星载寄生式 SAR 系统频率同步误差分析

考虑主星与任一辅星构成的双站 SAR 系统,主星 SAR 系统发射并接收信号,而辅星只被动接收主星 SAR 的回波。经主星接收机解调后的点目标回波信号可表示为

$$S_{rr}(t_r) = \text{rect}\left(\frac{t_r - t_{DT}}{T_0}\right) \exp[j\pi b(t_r - t_{DT})^2] \exp(j2\pi f_r t_{DT}) \quad (1)$$

而辅星接收机解调后的点目标回波信号可表示为:

* 收稿日期 2005 - 11 - 24

基金项目 国家部委基金资助项目(41307020203)

作者简介 张永胜(1977—),男,博士生。

$$S_{TR}(t_R) = \text{rect}\left(\frac{t_R - t_{DR}}{T_0}\right) \exp[j\pi b(t_R - t_{DR})^2] \exp[-j2\pi f_T t_{DR}] \exp[j2\pi(f_T - f_R)t_R] \quad (2)$$

式(1)(2)中,下标 T 和 R 分别指主星和辅星, f_T 为主星发射载频, f_R 为辅星接收机本振, b 为调频斜率, t 为时间, T_0 为发射脉冲宽度, t_D 为时延, 且有 $t_{DT} = \frac{2R_T}{c}$ 和 $t_{DR} = \frac{R_T + R_R}{c}$, 其中 R 为斜距, c 为光速。设发射载波信号为

$$f_T = f_0 [1 + \alpha_T(t)] \quad (3)$$

接收机的本振信号为

$$f_R = f_0 [1 + \alpha_R(t)] \quad (4)$$

其中 f_0 为晶振的标称频率, $\alpha_T(t)$ 和 $\alpha_R(t)$ 分别为发射载频和接收本振的相对频率误差函数。

取 t_0 和 t_1 两时刻发射信号经接收机解调后的剩余同步相位误差之差为^[5]

$$\phi_e = \int_{t_0}^{t_1} 2\pi(f_R - f_T)dt + \int_{t_1}^{t_1+t_{DR}} 2\pi f_R dt - \int_{t_0}^{t_0+t_{DR}} 2\pi f_R dt \quad (5)$$

下面以 Cartwheel 系统为例仿真分析频率同步误差对寄生式 SAR 成像的影响。以欧洲航天局 (ESA) 的环境观测卫星 (Envisat) 为主星, 轨道高度 800km, 主星与辅星间距离 100km, 发射信号波长 5.6cm, 带宽 16MHz, 脉冲重复频率 2000Hz, 天线方位向尺寸 10m。各辅星的轨道参数可由相对运动动力学方程求出。图 1 为当频率源存在线性时变频率误差 ($\Delta f/f = 1.7 \times 10^{-9}t$) 时回波方位向脉压结果, 其中实线为无误差时的脉压结果, 虚线为有误差时的情形。从图中看出, 其主瓣明显展宽, 并且位置也发生了偏移。图 2 为存在正弦起伏相位误差 ($\alpha = 9 \times 10^{-9} \cos(100t)$) 时的结果, 可以看到出现了较高的成对旁瓣。

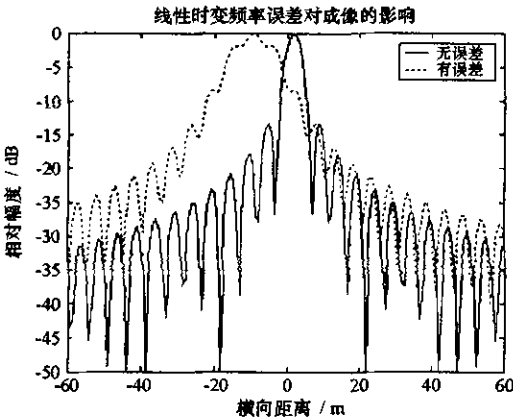


图 1 线性时变频率误差对成像的影响
Fig. 1 Effect of linear time-variant frequency error

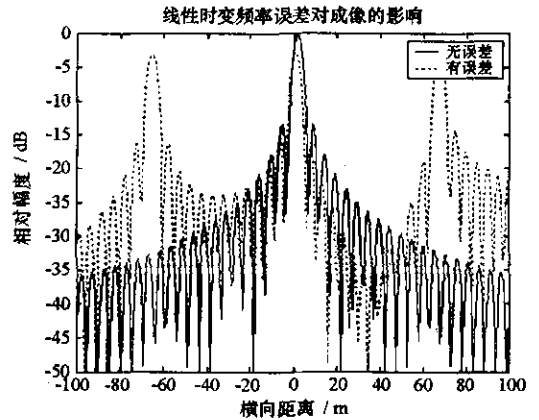


图 2 正弦起伏频率误差对成像的影响
Fig. 2 Effect of sinusoidal frequency error

2 一种新的星载寄生式 SAR 系统频率同步方法

现有双基地 SAR 频率同步方法主要有独立频率源同步法、锁相环同步法和综合同步法三种⁵⁻⁷。本文结合星载寄生式 SAR 系统的构形及工作特点, 提出了一种通过接收和处理主星直达波信号进行频率同步的新方法。

当主星向成像区发射信号时, 有一部分能量会从主星天线的旁瓣辐射到辅星, 并通过辅星天线的旁瓣进入接收通道, 即所谓的直达波信号。辅星接收机通过对直达波信号的解调及相关处理, 可以提取出主辅星间的频差, 从而达到频率同步的目的。

假设第 n 个脉冲的发射信号为

$$x_n(t) = s(t) \exp[j2\pi f_c(t + nT)] \exp(j\varphi) \quad (6)$$

这里 φ 为初相, T 为脉冲重复周期, $s(t)$ 为基带信号,

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_0}\right) \exp(j\pi bt^2) \quad (7)$$

对直达波信号进行解调,解调后的信号表示为

$$\begin{aligned} y_n(t) &= x_n(t - \tau) \exp[j2\pi f_d(t + nT)] \exp[-j2\pi f_R(t + nT)] \\ &= s(t - \tau) \exp(-j2\pi f_T \tau) \exp(j2\pi \Delta f t) \exp(j2\pi \Delta f nT) \exp(j\varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\tau = \Delta R/c$ 为直达波信号的时延, ΔR 为主星与辅星间的距离, $\Delta f = f_T - f_R + f_d$, 其中 f_d 是由于主星和辅星的相对运动而引起的直达波与发射信号的多普勒频移。由主星和辅星的轨道根数可以分别计算出主星和辅星的速度矢量,从而得到多普勒频移 f_d 。只要得到 Δf 的值,就得到了接收机本振 f_R 与载波 f_T 间的频率差。

$y_n(t)$ 的频谱为:

$$Y_n(f) = \text{rect}\left(\frac{f - \Delta f}{bT_0}\right) \exp[-j2\pi(f - \Delta f)\tau] \exp\left(-\frac{j\pi(f - \Delta f)^2}{b}\right) \exp(j\theta_n) \quad (9)$$

其中 $\theta_n = 2\pi \Delta f nT - 2\pi f_T \tau + \varphi$ 。对上述信号在距离向进行脉冲压缩,脉压结果的时域表达式为

$$z_n(t) = (bT_0 - \Delta f) \text{sinc}(bT_0 - \Delta f)(t - \tau + \Delta f/b) \exp[j\pi \Delta f(t - \tau + \Delta f/b)] \exp(j\beta_n) \quad (10)$$

其中 $\beta_n = 2\pi \Delta f nT + 2\pi(f_d - f_R)\tau - \frac{\pi \Delta f^2}{b} + \varphi$ 。从(10)式可知,脉压结果的最大值出现在 $t - \Delta f/b$ 时刻,而该点的相位就只剩下 β_n 一项。显然, β_n 是 n 的线性函数,斜率为 $2\pi \Delta f T$ 。所以只要对不同脉冲周期内接收到的信号(n 不同)脉压后的相位进行处理,提取出斜率,就可以估计出 Δf 。用这个差值(去除多普勒频移 f_d 后)不断对本地频率进行修正,就可以实现主星和辅星间的频率同步。上述方法的具体流程如图 3 所示。

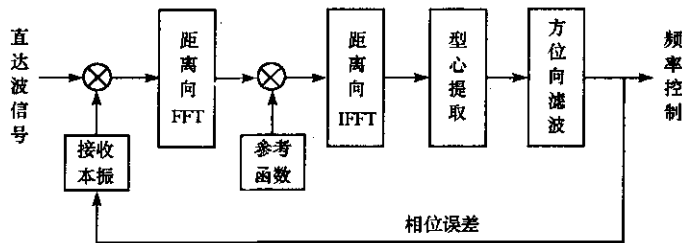


图 3 频率同步原理流程图

Fig.3 Theory of the frequency synchronization

仍然以 Cartwheel 参数为例仿真分析该频率同步方法的效果。分别设定主星与辅星间的频率误差为 150Hz、300Hz、600Hz 和 900Hz,利用本文提出的频率同步方法仿真得到的频率同步误差如表 1 所示,可以看到,由该方法得到的主、辅星间频差值与设定值十分吻合(由于星间多普勒频移可根据轨道根数实时得到,所以本仿真中未包括多普勒频率误差),可很好地达到同步目的。

表 1 频率同步方法精度

Tab.1 Precision of the synchronization method

设定误差/Hz	150	300	600	900
β_n/rad	0.4712	0.9425	1.885	-3.4558
$\Delta f/\text{Hz}$	149.998	300.007	600.014	899.985

3 结束语

讨论了星载寄生式 SAR 系统的频率同步问题。在分析了同步误差对成像影响的基础上,提出了一种新的频率同步方法,该方法通过对直达波信号进行相关处理,得到主星与辅星间的频差,较好地解决了发射载波与接收本振间的频率同步问题。

(下转第 110 页)

现有的各种 SVM 规则提取算法都还存在着不同的缺陷,如算法的复杂度较高,知识的表示形式单一等。我们相信,随着规则提取研究的不断深入,SVM 技术将会得到更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] Tickle A , Andrews R , Mostefa G , et al. The Truth Will Come to Light : Directions and Challenges in Extracting the Knowledge Embedded within Trained Artificial Neural Networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks ,1998 ,9(6) :1057 - 1068 .
- [2] Núñez H , Angulo C , Català A. Rule Extraction from Support Vector Machines[A]. In : Proceedings of the 2002 European Symposium on Artificial Neural Networks[C] ,2002 :107 - 112 .
- [3] Núñez H , Angulo C , Català A. Support Vector Machines with Symbolic Interpretation[A]. In : Proceedings of the VII Brazilian Symposium on Neural Networks[C] ,2002 :142 - 147 .
- [4] Fu X J , Ong C J , Keerthi S. Extracting the Knowledge Embedded in Support Vector Machine[A]. In : Proceedings of 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks[C] ,2004 :291 - 296 .
- [5] Wei L , Qi J J , Zhang W X. Knowledge Discovery of Decision Table Based on Support Vector Machine[C]. In : Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C] ,2003 :1195 - 1200 .
- [6] 魏玲 祁建军 张文修. 基于支持向量机的决策系统知识发现[J]. 西安交通大学学报 2003 ,37(10) :995 - 998 .
- [7] Barakat N , Diederich J. Learning-based Rule-extraction from Support Vector Machines[A]. In : Proceedings of the 14th International Conference on Computer Theory and Applications[C] ,2004 :247 - 252 .
- [8] Diederich J , Barakat N. Hybrid Rule-extraction from Support Vector Machines[A]. In : Proceedings of 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems[C] ,2004 :1270 - 1275 .
- [9] Barakat N , Diederich J. Eclectic Rule-extraction from Support Vector Machines[J]. International Journal of Computational Intelligence ,2005 ,9(1) :59 - 62 .
- [10] Melnik O , Pollack J. Using Graphs to Analyze High-dimensional Classifiers[A]. In : Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks[C] ,2000 :425 - 430 .
- [11] Chen Y X , Wang J Z. Kernel Machines and Additive Fuzzy Systems : Classification and Function Approximation[A]. In : Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems[C] ,2003 :789 - 795 .
- [12] Chen Y X , Wang J Z. Support Vector Learning for Fuzzy Rule-based Classification Systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems ,2003 ,11(6) :716 - 728 .
- [13] Chen Y Y , Feng H Z. A Kernel Method for Fuzzy Systems Modeling and Approximate Reasoning[A]. In : Proceedings of the IEEE 22nd International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society[C] ,2003 :307 - 311 .
- [14] 陈永义. 支持向量机方法与模糊系统[J]. 模糊系统与数学 ,2005 ,19(1) :1 - 11 .

(上接第 87 页)

参考文献:

- [1] 何峰 梁甸农 刘建平. 星载寄生式 SAR 系统干涉信号模型与相对高程测量性能分析[J]. 国防科技大学学报 ,2005 ,27(3) :72 - 76 .
- [2] Homer J , Kubik K , Mojarrabi B , et al. Passive Bistatic Radar Sensing with LEOS Based Transmitters[A]. IGARSS IEEE International Conference [C] ,2002 :438 - 440 .
- [3] Antonio M. A Bistatic SAR for Earth Observation[A]. Proceedings of SPIE[C] ,2000 :4173 .
- [4] Massonnet D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,2001 :506 - 520 .
- [5] 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 .
- [6] Aguasca A , Broquetas A , Fdez de Muniain J , et al. Remote Bistatic Receiver Synchronization Using DLL Techniques[A]. International Radar Conference[C] ,1992 :489 - 492 .
- [7] 杨振起 张永顺 骆永军. 双基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社 ,1998 .

