

振动对 BiSAR 频率基准源影响及其补偿技术研究

陈亮朋, 单庆晓

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:双站合成孔径雷达具有高分辨率、隐蔽性强等优点,但其严重依赖于收发系统的频率基准源。晶体振荡器因其突出的性能在合成孔径雷达中作为频率基准源得到广泛使用,但其受振动、冲击等影响较大。该文从分析晶振相位噪声特性开始,讨论了频率源稳定性对双站合成孔径雷达(BiSAR)成像的影响,并重点介绍了一种晶振加速度的全数字补偿技术,在 $4\text{ g}@15\text{ Hz}$ 下实现了 12 dB 的补偿效果。

关键词:晶体振荡器;相位噪声;数字补偿;加速度补偿;双站合成孔径雷达(BiSAR)

中图分类号:TN95

文献标识码:A

Study on the Impact and Compensation Technology of Crystal Oscillator on BiSAR

CHEN Liangpeng, SHAN Qingxiao

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: BiSAR has plenty of advantages, such as high imaging quality and easy concealing, but it seriously depends on frequency sources of the sender and receiver. As frequency source, crystal oscillator is widely used on composed aperture radar for its outstanding performance; but it is sensitive to vibration and impact and so on. This paper started with analyzing the noise characteristic of oscillator, and then the effect on SAR imaging of the stability of frequency sources was studied. An effective method for acceleration compensated was introduced, achieving improved compensation of 12 dB at $4\text{ g}@15\text{ Hz}$ phase noise.

Key words: crystal oscillator; phase noise; digital compensation; acceleration compensation; BiSAR

0 引言

双站合成孔径雷达(BiSAR)是指接收机和发射机分置在不同平台上的一种合成孔径雷达。作为一种新的雷达体制,其不但具有比单站 SAR 更优越的微波成像性能,还有隐蔽性好,抗干扰能力强,成本低,可长超视距工作等优点^[1-3]。

美国于 20 世纪 80 年代就提出了 BiSAR 概念,并于 1983 年进行了“战术双站雷达验证”的机载 BiSAR 实验,成功观察到隐蔽于丛林中慢速运动的假想敌对坦克目标,引起世界各国的关注。由于技术的复杂性,且正适单站 SAR 的飞速发展,随后关于双站 SAR 鲜见报道。直到 90 年代末,随着隐身技术、电子干扰和反辐射导弹技术的不断发展成熟,双站 SAR 技术重新进入人们的视野。2004 年,德国 FGAN 进行了前视双基 SAR 实验;2006 年,瑞典 FOI 进行了基于 CARABAS 和 LORA 系统的双站低频超分辨率 SAR 成像实验。我国对这方面的研究起步相对较滞后,但也取得了可喜的成效^[4-6]。目

前双站 SAR 在国防和经济建设中已发挥着重要作用,如通过双站 SAR 获取的高分辨率图像探索战场情况和进行地质勘探等。

虽然 BiSAR 具有诸多单站 SAR 无法比拟的优点,却也因此系统复杂性增加,主要有收发系统同步技术、运动误差补偿技术及成像算法 3 大难题。这三者同时都需要高稳定度的频率源为基础,石英晶振因其具有品质因数高,价格低等特点,广泛用于雷达设备。但是石英晶振具有对振动、冲击及温度等敏感的特点,如何提高晶振的频稳度具有重要的研究价值。本文在研究双站 SAR 成像的基础上,分析了各种类型误差对成像质量的影响,重点研究了频率漂移对成像的影响;对石英晶体振荡器受加速度的影响补偿进行了分析研究,提出了一种全数字算法补偿技术,较好地实现了对 BiSAR 频率基准的补偿。

1 晶振的相位噪声特性分析

晶体振荡器的主要技术指标之一是相位噪声,

收稿日期:2012-12-10

作者简介:陈亮朋(1988-),男,江西瑞金人,硕士生,主要从事时频测控技术的研究。E-mail:pop_nudt@163.com

其对 BiSAR 的同步系统具有极大的影响,分析晶振的相位噪声对研究高稳定性的晶振具有重要意义。

石英晶体振荡器在振动环境下,晶片上会产生应力弛豫效应,引起频率漂移^[7-10]。这种变化表现为变化的振动加速度频率对输出频率信号的角度调制,其调制效果由振动幅度和加速度灵敏度共同决定。图1为信号受振动调制示意图。

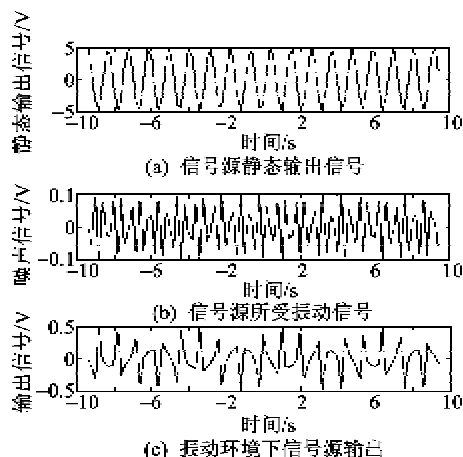


图1 信号受振动调制示意图

石英晶振在振动环境下可表示为

$$f(a) = f_0(1 + \Gamma a) \quad (1)$$

式中: $f(a)$ 为振动下的输出频率, a 为加速度敏感度的合成矢量; f_0 为静态条件下的输出,标定为载频; Γ 为加速度灵敏度。

由式(1)可知,当晶体振荡器的安装方式已知时,如果振动方向与晶振敏感方向正交,则振动对晶振产生的频率偏移 $(f(a) - f_0) = 0$ 。但在实际中,振动的方向与大小均是随机的,且晶振的振动敏感矢量也难以确认。

假定随机振动为简谐振动,给出振动波形为

$$a = A \cos(2\pi f_v t) \quad (2)$$

式中: A 为加速度峰值矢量; f_v 为随机振动频率。

结合式(1)、(2)可得

$$\begin{aligned} f(a) &= f_0(1 + \Gamma \times a) \\ &= f_0[1 + \Gamma \times A \cos(2\pi f_v t)] = \\ &= f_0 + f_0 \times \Gamma \times A \cos(2\pi f_v t) \end{aligned} \quad (3)$$

令 $\Delta f = f_0 \times \Gamma \times A$ 表示振动对信号产生的频偏峰值。

如图1所示,随机振动对谐振器在的调制效果可从输出电压来观察,可表示为

$$\begin{aligned} V(t) &= V_0 \{ J_0(\beta) \cos(2\pi f_0 t) + \\ &J_2(\beta) \cos[2\pi(f_0 + f_v)t] + \\ &J_1(\beta) \cos[2\pi(f_0 - f_v)t] + \dots \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &J_2(\beta) \cos[2\pi(f_0 + 2f_v)t] + \\ &J_2(\beta) \cos[2\pi(f_0 - 2f_v)t] + \dots \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\beta = \Delta f / f_v = (f_0 \times \Gamma \times A) / f_v$ 为调制指数。

振动导致谐振器第 n 个边带功率与载波功率的比值为

$$L_n^v = 20 \log(J_n(\beta) / J_0(\beta)) \quad (5)$$

当 $\beta < 0.1$ 时, $J_0(\beta) = 1$, $J_1(\beta) = \beta/2$,由于在 $n \geq 2$ 后, $J_n(\beta)$ 值相对较小,故有

$$L_1^v = 20 \log[(\Gamma \cdot A) f_0 / (2 f_v)] \quad (6)$$

由式(6)可看出, L_1^v 为第一个边带功率与载波功率的比值,可作为衡量振动对输出信号的调制量,由于 f_0 和 f_v 为假定已知量,所以振动对信号的调制可看成主要由振动幅度和加速度灵敏度决定,而与静态条件下的相位噪声无关。假定 $G(f)$ 为随机振动的加速度功率谱密度函数,则晶振的相位噪声为

$$\begin{aligned} L(f) &= 20 \log \frac{\Gamma f_0}{f_v} \sqrt{\frac{G(f)}{2}} = \\ &= 10 \log \frac{(\Gamma f_0)^2 G(f)}{2 f_v^2} \end{aligned} \quad (7)$$

以某型 BiSAR 系统为例,取其 $\Gamma = 1 \times 10^{-9} 1/g$, $f_0 = 120 \text{ MHz}$,假设其随机振动功率谱如图2所示,则通过仿真计算可得到其相应的相位噪声,如图3所示。

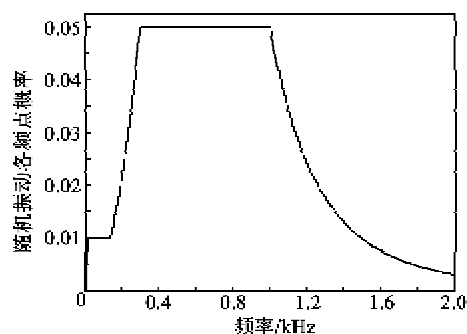


图2 某 BiSAR 随机振动环境条件

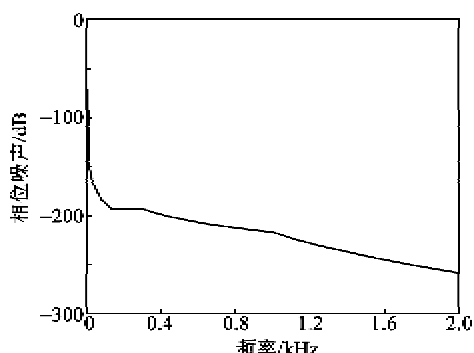


图3 其相应的相位噪声计算值

由图 3 可见,该系统在随机振动条件下,振荡器输出信号的相位噪声随着振动频率的增大而迅速增大,当振动达到一定频率后,输出信号的相位噪声变化相对缓慢,这主要是受晶体振荡器的晶片力频效应的限制。

2 频率源稳定性对 SAR 成像影响分析

由于 BiSAR 收发系统是分置的,具有相互独立的特点,因此需要一个同步系统来保证收发装置的相位和频率的一致^[4-5]。在公开的实验中,一般均采用高稳定性的独立频率源来实现相位的同步。因此,频率源本身在振动环境下产生的相位噪声对 BiSAR 性能具有直接的影响。

假定 BiSAR 接收机和发射机在振动环境下信号相位分别为

$$\varphi_T(t) = \omega_0 t + \phi_T(t) \quad (8)$$

$$\varphi_R(t) = \omega_0 t + \phi_R(t) \quad (9)$$

式中: ω_0 为相角速度; t 为时刻; $\phi_T(t)$ 和 $\phi_R(t)$ 为发射机和接收机的频率源在振动环境下的相位噪声。通过接收机后相位为

$$\varphi(t) = \omega_0 t_d + \phi_R(t) - \phi_T(t - t_d) \quad (10)$$

式中 t_d 为信号从发射机到接收机的时延。

所以有收发频率源的相位噪声产生的相位误差为

$$\varphi_e(t) = \phi_R(t) - \phi_T(t - t_d) = 2\pi f_0 (\delta_R - \delta_T) \cdot t_d = 2\pi \cdot \Delta f_0 \cdot t_d \quad (11)$$

式中 Δf_0 为发射机与接收机本振的频偏。

由式(11)可见,发射机和接收机频率源的频率偏移将使系统产生相位误差,相当于给回波信号增加一项非零的多普勒中心频率项,这将引起 SAR 横向压缩主瓣位置的明显偏离,严重影响 SAR 成像分辨率^[1]。文献[8]就 BiSAR 收、发系统频率基准源间的线性时变频率误差、固定频率偏差、随机起伏频率误差对系统成像的影响进行了较为深入的分析。由此可见,在实际中,如何实现分置收发系统基准频率在振动环境下的高稳定度具有重要的研究价值。

3 晶振的数字实时补偿技术研究

通常 SAR 所处环境具有复杂的振动因素,一般的机械隔振方法只能对 100 Hz 以上的振动有效,但即便 100 Hz 以内的振动对频率源的影响也很大。因此,本文提出一种基于加速度传感器的数字补偿技术,通过精确感知频率源的振动参数,采用有效的算法试图实现系统的加速度补偿,有效减小振动对

晶振的影响,提高频率源的稳定度。

假设晶振对加速度的矢量敏感度为 k_g ,压控端的增益为 k_v ,所以实时补偿电压为

$$\Delta V = k_p \cdot \frac{k_g \cdot a}{k_v} \quad (12)$$

式中 k_p 为补偿系数。

补偿流程如图 4 所示。通过测量实验获取晶振三轴的 a ,经计算后得到补偿电压,将补偿电压通过数模转换芯片(DAC)反馈给晶振的压控端,从而实现晶体振荡器的加速度实时补偿。可见, k_p 对系统的补偿效果影响很大,所以一般在进行补偿前,应通过一些方法对晶振的补偿系数进行测试,选择最优化的补偿系数。同时由于要实现实时补偿,补偿系统时延应尽量小,因此必须使算法准确快速,优化算法对系统实现实时补偿具有重要意义。

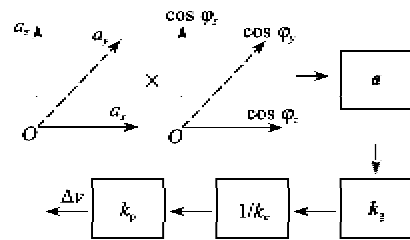


图 4 补偿算法流程图

理想的电压补偿效果应是频率零漂移,但实际中由于补偿存在时延,对晶振的加速度测量精度存在误差,对晶振的加速度敏感度也存在测量误差等因素。所以实际中的补偿效果如图 5 所示。

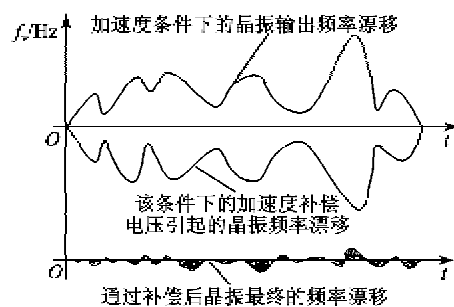


图 5 补偿后的频率漂移

本文设计的加速度补偿系统分为采集模块、计算模块和补偿网络,如图 6 所示。使用的恒温晶振(OCXO),其输出基准频率 $f_0 = 10$ MHz,电压控制增益 $k_v = 8 \times 10^{-7}$ Hz/V, $k_g = 5.06 \times 10^{-9}$ 1/g。

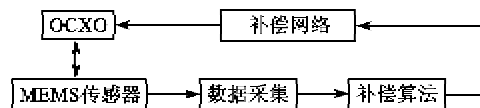
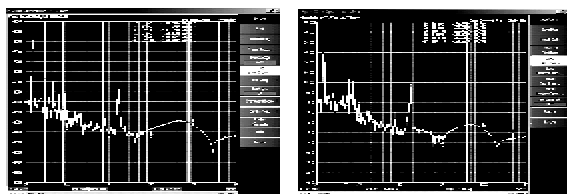
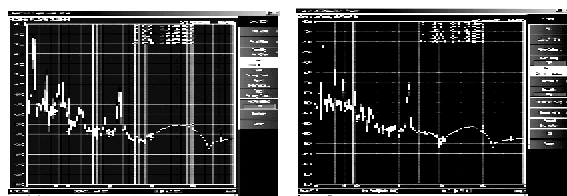


图 6 数字补偿系统结构图

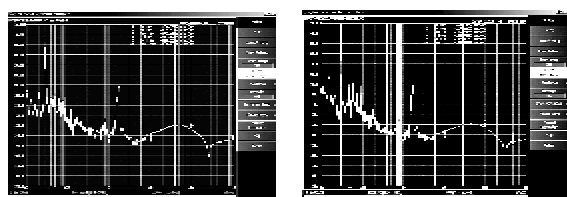
采用上述的加速度敏感度算法对 OCXO 进行补偿实验,通过实验测得本文所用的 OCXO 的敏感轴为 y 轴,且测得其最佳补偿系数 $k_p = 3.57$,通过安捷伦公司的 E5052B 信号源分析仪输出的相位噪声如图 7~9 所示,图中 G 为标定振动幅度, f 为标定振动频率。



(a) 无补偿时晶振相位噪声 (b) $k_p=3.57$ 时的晶振相位噪声
图 7 简谐振动($G=4\text{ g}$, $f=15\text{ Hz}$)下的相位噪声



(a) 无补偿时晶振相位噪声 (b) $k_p=3.57$ 时的晶振相位噪声
图 8 简谐振动($G=8\text{ g}$, $f=15\text{ Hz}$)下的相位噪声



(a) 无补偿时晶振相位噪声 (b) $k_p=3.57$ 时的晶振相位噪声
图 9 简谐振动($G=8\text{ g}$, $f=30\text{ Hz}$)下的相位噪声

表 1 为补偿前、后相位噪声比较。将该 OCXO 置于预先设定的简谐振动台上,由图 7~9 可看出,该 OCXO 在进行数字补偿后,其相位噪声相比无补偿条件下明显小。在 $G=4\text{ g}$, $f=15\text{ Hz}$ 条件下,当 $k_p=3.57$ 时,谐波相位噪声降低了近 12 dB,可见数字补偿对该晶振具有良好的补偿效果。

表 1 补偿前、后相位噪声比较

振动条件	相位噪声/dB	
	无补偿	$k_p=3.57$
$G=4\text{ g}$, $f=15\text{ Hz}$	-47 dB	-59 dB
$G=8\text{ g}$, $f=15\text{ Hz}$	-41 dB	-53 dB
$G=8\text{ g}$, $f=30\text{ Hz}$	-48 dB	-53 dB

4 结束语

本文在对晶体振荡器相位噪声特性进行深入分析的理论基础上,简要分析了频率源稳定性对 SAR 成像的影响;并结合研制的数字补偿系统主要分析了数字补偿技术在晶振中的应用效果。综上所述,

数字补偿技术应用于晶体振荡器对振动条件下的晶振具有良好的加速度补偿效果。目前相关深入的研究正在开展中,由于数字补偿所使用的元器件可实现高度集成,故可将其进一步集成于 OCXO 中,实现加速度补偿 OCXO 的小型化,低功耗化。

参考文献:

- [1] WILLIS N J. Bistatic radar [M]. London: Artech House, 1991.
- [2] 刘锐. 机载双站 SAR 同步误差分析及仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [3] 杨永红, 皮亦鸣. 在振动环境下相位噪声对星机 BiSAR 的影响[J]. 雷达科学与技术, 2008(3): 182-201.
YANG Yonghong, PI Yiming. Impact of oscillator phase noise on spaceborne-airborne BiSAR under vibration perturbing[J]. Radar Science and Technology, 2008(3): 182-201.
- [4] 王增宇. 接收机固定双站 SAR 成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [5] 况凌. 双基地合成孔径雷达及其仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [6] 孙佳. 国外合成孔径雷达卫星发展趋势分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007, 18(1): 37-70.
SUN Jia. Analysis of the SAR satellite development tendency in the world[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2007, 18(1): 67-70.
- [7] 赵声衡, 赵英. 晶体振荡器[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 汤子跃, 张守融. 频率源稳定性对 BiSAR 成像的影响研究[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(1): 100-106.
TANG Ziyue, ZHANG Shourong. Influence of the frequency instability on the bistatic-SAR imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(1): 100-106.
- [9] FILLER R L. The acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators; A review[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988, 5(3/35): 297-305.
- [10] FRY S. Acceleration sensitivity characteristics of quartz crystal oscillators[R]. Mechanicsburg, PA: Greenray Industries, 2006.
- [11] 况凌, 沈晓峰, 杨万麟. 频率源稳定性对双基地 SAR 的分辨率影响[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(2): 165-168.
KUANG Ling, SHEN Xiaofeng, YANG Wanlin. Influence of frequency stability on Bistatic SAR resolution[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(2): 165-168.