

振动对遥感载荷频率基准的影响及数字补偿技术研究*

单庆晓¹, 纪龙蛰¹, 杨俊¹, 黄飞江²

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073;

2. 长沙学院 电子与通讯工程系, 湖南长沙 410073)

摘要: 振动会导致雷达上晶体振荡器的工作频率发生变化, 严重影响了雷达的工作性能。分析了振动对遥感卫星频率基准的影响机理, 提出了针对加速度 g 的数字补偿技术。实验证明该方法可有效降低频率基准的加速度敏感性, 在减小振动对频率基准影响方面具有广泛的应用前景。

关键词: 振动; 晶体振荡器; SAR; 数字补偿

中图分类号: TN919.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2013)01-0147-04

Effects of vibration on frequency source of remote sensing load and the research of digital compensation technique

SHAN Qingxiao¹, JI Longzhe¹, YANG Jun¹, HUANG Feijiang²

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Electronic and Communication Engineering, Changsha University, Changsha 410073, China)

Abstract: Vibration can influence the frequency stability of crystal oscillators in radar and worsen the working performance of the system deeply. Thus how vibration influences the reference frequency source on remote sensing satellites, brought up the digital compensating technique of acceleration g was analyzed. Some experiment results proved that this method can reduce the acceleration sensitivity of frequency source. This research has wide application potential for reducing the acceleration effects on frequency resource.

Key words: vibration; crystal oscillator; SAR; digital compensation

目前, 雷达卫星遥感逐渐成为遥感研究的热点问题。与传统的遥感方式相比, 雷达遥感具有不受天气影响、全天候、对地探测能力强等优势。同时, 由于合成孔径干涉雷达可以快速生成 DEM, 对水体、植物和冰川等地物的反射波有差异, 因此可以通过雷达遥感影像对地物进行分析。随着科技的进步, 世界各国都在大力发展雷达卫星遥感技术。

在雷达设备中作为核心部件的是晶体振荡器, 其工作性能的好坏直接影响到设备性能的优劣, 尤其影响接收机的灵敏度和选择性等方面技术指标。随着晶体振荡器的不断发展, 它的稳定度能达到 10^{-10} 以上, 高稳定的晶体振荡器已经在高精度的通信和雷达系统中广泛使用。但在复杂工作条件下, 振动对机载或者星载雷达设备的影响非常大, 严重干扰了各种任务的顺利执行。

1 振动对遥感卫星频率基准的影响

1.1 振动对星载雷达频踪器的影响

所谓的杂波下能见度, 指的是杂波超过信号

某一电平时仍能发现目标的能力。要在杂波环境下的动显雷达中获得对运动目标较高的检测概率, 除了要限制各种因素造成的频谱展宽外, 还要注意频综器的相噪, 因此频率偏离越大, 信号的强度越小。一般情况下, 不考虑其他因素, 仅频综器相位噪声这一项就能够把系统在杂波下的能见度限制在 40dB 以下, 而实际系统的能见度可能远低于此值。静态条件下满足低相位噪声的机载或星载频综器在振动条件下相位噪声将急剧恶化, 大大降低系统对动态目标的搜索精度。以低相噪晶体振荡器为基准源的雷达频综器也会在振动环境中失去赖以工作的前提和基础。

1.2 振动对合成孔径雷达成像的影响

振荡器的相位噪声是影响合成孔径雷达 (SAR, Synthetic Aperture Radar) 获得高分辨率图像的重要因素之一。

单基地 SAR 系统发射某一频率信号, 接收目标的反射信号并进行解调。振动将增大该频率的相位噪声。由于振动的随机性和不均匀性, 回波

* 收稿日期: 2012-06-29

作者简介: 单庆晓 (1973—), 男, 湖南衡阳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: tsingxiao@163.com

的相位噪声和当前的相位噪声不能抵消,将降低成像的分辨率。文献[3]基于两个独立非同分布的振荡器,机载 SAR 在静态条件和随机振动环境下,推导了星载机载混合 BiSAR (SA2BiSAR) 积分旁瓣比的计算公式。仿真结果表明在 X 波段需采取必要的隔振措施提高系统的抗振性能来满足成像的条件,但即使该雷达采用机械隔振的方法来减小振动的影响,仍无法完全消除振动带来的精度损失。

在振动频率范围之内,振荡器的输出相噪只与晶体的加速度灵敏度、振动的功率谱密度及其分布有关,与静态相噪几乎没有关系。这就使得人们将注意力转移到了如何降低振动灵敏度、如何减小振动强度的方向上来。遗憾的是,目前晶体谐振器的加速度灵敏度还不能达到 $10^{-11}/g$ 以下的量级。

2 基于三维 MEMS 传感器的振动补偿技术

2.1 晶体振荡器对加速度敏感的机理分析

振荡器在振动条件下,其谐振腔的谐振频率随外界振动加速度发生变化,这种变化表现为振动加速度的变化频率对振荡器输出信号进行角度调制,其调制度由加速度灵敏度和振动量级决定。因此,振荡器在有加速度时的频率可以写成

$$f(\mathbf{a}) = f_0(1 + \mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{a}) \quad (1)$$

式中 $f(\mathbf{a})$ 是有加速度 \mathbf{a} 的谐振器频率, f_0 是无加速度时的谐振器频率,称之为载频, $\mathbf{\Gamma}$ 是晶体谐振器的加速度灵敏度矢量。

假定振动是一种简谐振动,加速度由下式给出

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

式中 \mathbf{A} 为峰值加速度矢量, f_v 为振动频率。

将(2)式代入(1)式,求得频率随时间的变化为

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

其中, Δf 是由于加速度 \mathbf{A} 产生的峰值频偏。

振动条件下的谐振器输出可以认为是按照调频的方式进行的,此时振荡器的输出电压为

$$\begin{aligned} V(t) &= V_0 [J_0(\beta) \cos(2\pi f_0 t) \\ &+ J_1(\beta) \cos(2\pi(f_0 + f_v)t) \\ &+ J_1(\beta) \cos(2\pi(f_0 - f_v)t) \\ &+ J_2(\beta) \cos(2\pi(f_0 + 2f_v)t) \\ &+ J_2(\beta) \cos(2\pi(f_0 - 2f_v)t) + \dots] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, f_0 是谐振器输出频率, f_v 是振动频率,定义 β 为调制指数,表示为

$$\beta = \Delta f / f_v = (\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{A}) f_0 / f_v \quad (5)$$

由振动引起的第 n 个边带功率与载波功率的比值由 L_v^n 表示为

$$L_v^n (\text{dBc}) = 20 \log(J_n(\beta) / J_0(\beta)) \quad (6)$$

当 $\beta < 0.1$ 时,可以给出一些近似值: $J_0(\beta) = 1$, $J_1(\beta) = \beta/2$, $J_n(\beta) = 0$, 可得

$$L_v^1(\beta) \approx 20 \log((\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{A}) f_0 / (2f_v)) \quad (7)$$

如果我们从频谱分析仪测得 $L_v^1(\beta)$, 便可以计算出

$$\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{A} = 10^{L_v^1(\beta)/20} \cdot 2f_v / f_0 \quad (8)$$

这也就说明了晶体振荡器在振动条件下的输出相噪实际上与静态相噪没有关系,只与加速度灵敏度、振动功率谱密度有关。

2.2 晶体振荡器对加速度敏感的实验观察

通过设计实验观察谐振器在振动条件下的输出频率情况。在本实验中,实验台提供了可进行调节的正弦振动及瞬时冲击,晶体振荡器的频率输出变化可通过频谱仪和示波器实时观察记录,对频率变化规律进行总结归纳,为补偿方案的设计提供参数。实验平台的实际搭建如图 1 所示。

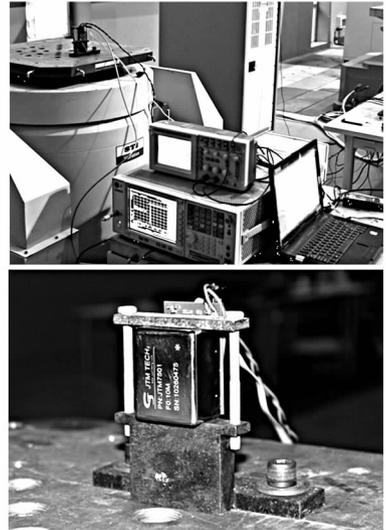


图 1 正弦振动实验平台

Fig. 1 The vibration platform

当晶体振荡器处于静止状态下时,晶振输出频谱如图 2 所示,从图中可以看出,此时晶振输出的是位于载频处较为纯净的谱线。

在有加速度的情况下,晶振输出频谱图发生了如图 3 所示的变化,在载频两侧对称位置处产生了边带调制,呈现出较为明显的与振动条件有关的谱线特征。

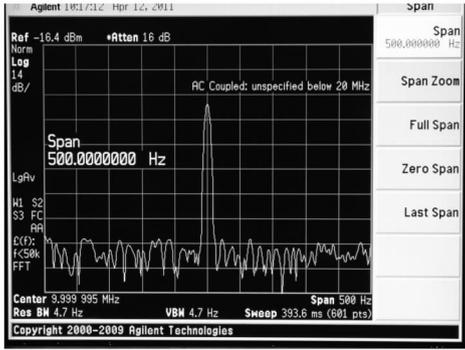


图 2 静止条件下晶振输出频谱图

Fig. 2 The output spectrum in static condition

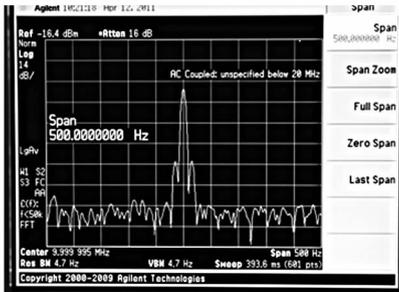


图 3 未补偿的振动条件下晶振输出频谱图

Fig. 3 The output spectrum without compensation

2.3 数字实时补偿原理

为了减小加速度对晶体振荡器输出频率的影响,我们采用对现有 VC-OCXO(压控恒温晶振)进行数字补偿的方法,试图提高晶振在振动环境下得频率稳定度。这样可以使得雷达在动态环境中也能够有一个稳定的频率参考源进而提高雷达的工作性能。

假设电压控制效益为 k_v ,加速度敏感矢量效益为 k_a ,则实时产生的补偿电压为

$$\Delta v = k_p \cdot \frac{k_a \cdot a_m}{k_v} \quad (9)$$

式中 k_p 为比例系数,其取值决定了补偿的效果。

数学运算过程如图 4 所示。图 5 显示了补偿的结果, f_{v1} 为由加速度引起的频率漂移。 f_{v2} 为由影响 f_{v1} 的补偿电压 ΔV 引起的频率漂移, f_{vc1} 为补偿后的频率漂移,可以看出,它比补偿之前的频率漂移要小得多。

2.4 样机研制与实验测试

加速度数字控制器由 FPGA、MEMS 加速度传感器、D/A 转换器和 OCXO(恒温晶振)组成,如图 6 所示。OCXO 的参数为: $f_0 = 10\text{MHz}$, $k_g = 5.06 \times 10^{-9}$, $k_v = 8 \times 10^{-7}$ 。MEMS 加速度传感器体积小,动态范围大,可以实时测量三个相互垂直轴向上最大 8g 的加速度,并以数字信号形式与

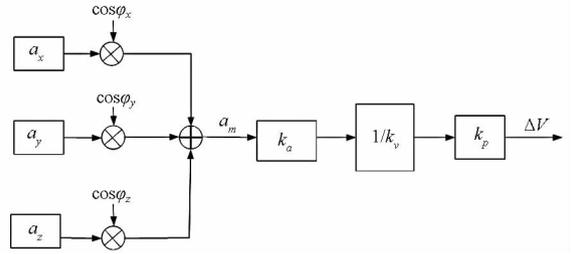


图 4 数学运算图

Fig. 4 The mathematical calculation

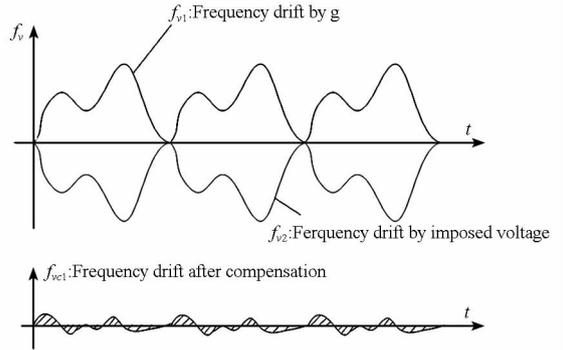


图 5 补偿后的频率漂移

Fig. 5 The frequency shift after compensation

FPGA 进行通信。为了控制时延和数字化误差,采用了 12 位高速 D/A 转换器,将 FPGA 输出的数字信号转换为模拟补偿电压信号并实时施加在 OCXO 的压控端,抵消由于加速度导致的频率偏移。

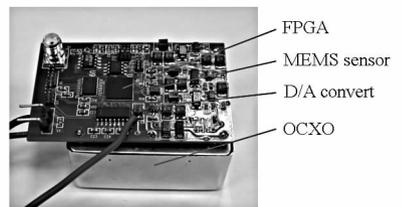


图 6 加速度数字控制器

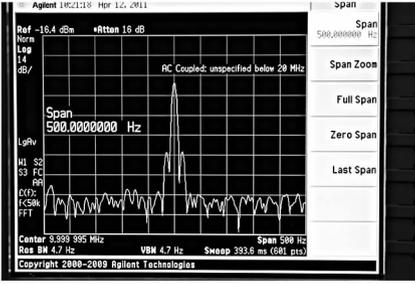
Fig. 6 The acceleration digital controller

当我们采用加速度数字控制器对振动条件下的晶体振荡器进行加速度数字补偿时,补偿效果如图 7 所示,经过补偿后相位噪声的优化情况列于表 1 中。

以 4g, 15Hz 情况为例,对比图 7(a)与图 2 可以看出,振动导致晶振输出的相位噪声增大了近 25dB,由式(8)可以计算出晶振的加速度敏感度为

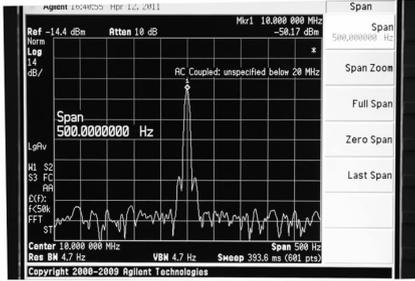
$$\Gamma = \frac{2f_v}{a \cdot f_0} \cdot 10^{\frac{L}{20}} \approx 3.13 \times 10^{-9}/g \quad (10)$$

经过加速度控制器数字补偿以后,晶振输出相位噪声比未补偿条件下要降低约 12dB,由此计算出加速度敏感度为



(a) 无补偿时晶振频率输出

(a) The frequency output without compensation



(b) 补偿系数 $k_p = 4$ 时晶振频率输出

(b) The frequency output when $k_p = 4$

图 7 正弦振动下实验结果

Fig. 7 The experiment result under sinusoidal vibration

表 1 补偿前后载噪比的比较

Tab. 1 The phase noise contrast after compensation

g_{\max} (g)	f_v (Hz)	$L_v^1(\beta)$ (dB)	$L_v^1(\beta)$ (dB) 补偿后
4g	15	-47.6	-59.5
4g	30	-54.6	-60.2
6g	300	-66.2	-71.5

$$\Gamma = \frac{2f_v}{a \cdot f_0} \cdot 10^{\frac{L_v}{20}} \approx 7.94 \times 10^{-10} / g \quad (11)$$

与不加补偿相比,晶振的加速度敏感度降低了一个数量级,可见,加速度数字补偿的方法能给晶振输出频率带来良好的补偿效果。

3 结论

目前,我们对石英晶体振荡器的加速度效应进行数字实时补偿,试制了样机,并进行了初步实验,结果表明,数字补偿可明显减小加速度对晶体振荡器频率输出的影响。数字补偿电路可嵌入恒温晶振内部,在现有晶振封装基础上直接改装设计,便于批量生产以及推广使用。目前该方法已申请专利,相关的深入研究正在进行中。该产品具有体积小、质量轻、成本低、方便操作与控制等特点,在航空航天领域具有广泛的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 王全龙,赵海清. 机载雷达频综器的相位噪声及其对杂波下能见度限制[J]. 电讯技术, 2000(4): 1-5. WANG Quanlong, ZHAO Haiqing. The phase noise of frequency synthesizer for radar and visibility's limitation in the background of clutter[J]. Telegraphic Technology, 2000(4): 1-5. (in Chinese)
- [2] 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, 6(3): 182-185. YANG Yonghong, PI Yiming. Impact of oscillator phase noise on spaceborne-airborne biSAR under vibration perturbing[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(3): 182-185. (in Chinese)
- [3] 张升康,杨汝良. 振荡器相位噪声对双站 SAR 成像影响分析[J]. 测试技术学报, 2008, 22(1): 7-12. ZHANG Shengkang, YANG Ruliang. Analysis of oscillator phase noise effects on bistatic SAR imaging[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(1): 7-12. (in Chinese)
- [4] 张直中. 机载和星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 20-50. ZHANG Zhizhong. Instruction of airborne and spaceborne SAR [M]. Beijing: Press of Electronic Industry, 2004: 20-50. (in Chinese)
- [5] 杨铭. 某机载雷达频综器中晶体振荡器的振动环境适应性研究[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(5): 33-35. YANG Ming. Research of vibrating environmental adaptability of the crystal oscillator in an airborne radar frequency synthesizer[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38(5): 33-35. (in Chinese)
- [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(2): 168-175. SUN Jia. Analysis of Developing Trend of Foreign SAR Satellite [J]. Journal of Equipment Command Technology, 2007(2): 168-175. (in Chinese)
- [7] 王跃宇,于登云,曲广吉. 遥感卫星颤振响应分析的实用方法[C]//中国航天年度技术信息交流会, 2003. WANG Yueyu, YU Dengyun, QU Guangji. Method of remote sensing satellite vibration respond analysis [C]//China Aerospace Technology and Information Communication Conference, 2003. (in Chinese)
- [8] 倪维平,边辉,严卫东. TerraSAR-X 雷达卫星的系统特性与应用分析[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(1): 29-33. NI Weiping, BIAN Hui, YAN Weidong. The system characters and application analysis of terraSAR-X radar satellite [J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(1): 29-33. (in Chinese)
- [9] Roth A, Werninghaus R. Status of the terraSAR-X mission [C]//Proceedings of IGARSS, 2005.
- [10] Filler R L. The acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators: A review [C]//IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988: 297-305.
- [11] Bloch M, Mancini O, McClelland T. Acceleration "G" compensated quartz crystal oscillators [C]//IEEE Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, 2011.