

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.011

# 晶振误差特性及其对弹载卫星导航接收机的影响分析

韩舒文,原海军,左启耀,李 峰

(北京自动化控制设备研究所,北京 100074)

**摘要:**在卫星导航定位中,需要通过测量时间来计算伪距和伪距率,因此晶振的应用尤为重要。特别是当弹载卫星接收机工作在振动、高动态等恶劣的工作环境中时,晶振性能会明显恶化。提出了晶振长期稳定性、短期稳定性、相位噪声等误差特性的描述,以及这些误差特性对接收机捕获、跟踪、定位测速影响的仿真分析,并根据仿真结果提出了相应的晶振选型分析和应用方法,以使卫星导航接收机能够满足其工作要求。

**关键词:**晶振;卫星导航接收机;捕获;跟踪

中图分类号:TN702

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0066-06

## Analysis on Crystal Oscillator Error Characteristics and Its Effect on Missile Borne Satellite Receiver

HAN Shu-wen, YUAN Hai-jun, ZUO Qi-yao, LI Feng

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In the satellite navigation and positioning system, the pseudorange and pseudorange rate need to be calculated by measuring the time, so the application of the crystal oscillator is particularly important. Especially when the missile borne satellite receiver works in vibration, high dynamic and other harsh working environment, the performance of the crystal oscillator will be significantly worse. The paper describes error characteristics such as long-term stability, short-term stability and phase noise. And the effects of these error characteristics on acquisition, tracking and positioning accuracy are simulated and analyzed. According to the simulation results, the paper proposes relevant choosing analysis and application methods, in this way, the satellite navigation receivers can meet working requirements.

**Key words:** Crystal oscillator; Satellite navigation receiver; Acquisition; Track

### 0 引言

GPS(Global Positioning System,全球定位系统)在天文、气象、测绘、交通、军事、农业等各个领域都有着广泛的应用,可为全球范围内的用户提供全天候、精确的位置、速度和时间信息。GPS在解算位置速度信息时,需要精准的时间测量,包括卫星钟和本地钟两种时间信息。本地钟一般采用晶

振,精度要求不及卫星钟,钟差钟漂可以作为定位测速误差公共项进行消除。但本地钟(晶振)对卫星导航信号的捕获、跟踪性能影响是巨大的,尤其是在振动、高动态等恶劣工作环境中。本文介绍了晶振的长期稳定性、短期稳定性、相位噪声等误差特性,分析了晶振的长期稳定性对卫星导航接收机捕获性能的影响,针对长期稳定性可能造成卫星无法捕获的问题提出了长期贮存自标定方法;分析了

收稿日期:2016-12-15;修订日期:2017-01-16

作者简介:韩舒文(1993-),女,硕士,主要从事卫星导航定位方面的研究。E-mail:hanshuwen93@163.com

短期稳定性对跟踪性能的影响,指出短期稳定性是环路失锁的主要因素;分析了振动对于晶振及接收机性能的影响,提出了几种常见的减小晶振振动的设计方法;分析了晶振相位噪声对接收机抗干扰性能的影响,指出降低晶振相位噪声可以提高接收机的抗干扰能力。

## 1 常用晶振及性能指标分析

晶振在移动通信、研究及计量、星载、导航、弹载卫星接收机等通信和军工领域上的应用,使得市场对于高性能的晶振的需求日益增大。而在弹载卫星导航接收机中,晶振输出的本地时钟信号优劣将直接影响接收机性能的发挥<sup>[1]</sup>。目前,常用晶振主要分为:普通晶振(SPXO)、电压控制晶振(VCXO)、温度补偿晶振(TCXO)、恒温晶振(OCXO)、数字补偿晶振(DCXO)及原子钟。

普通晶振结构最为简单,毫秒级稳定度较高,但受温度变化影响较大,长期漂移量较大。

压控晶振具有频率可调的特点,主要应用于频率校准、调制等领域<sup>[2]</sup>。

温补晶振利用补偿电压发生器,通过产生随温度变化的频率,与补偿电压相补偿,改善晶振性能。该种晶振具有体积小、功耗小、电路简单、开机时间短、成本低等优点,按照补偿电压发生器的构成可分为模拟温补晶振、数字温补晶振和微处理器温补晶振。数字式温补晶振相对于模拟温补晶振,可在更宽的温度范围内获得更高的稳定度,但短期稳定度可能受影响,且体积较大。因此,国内外最广泛应用的仍为模拟温补晶振<sup>[3]</sup>。

恒温晶振(也称高稳晶振)的输出频率具有良好的频率-温度特性,是目前频率准确度、稳定度最好的振荡器,在短期稳定度、长期稳定度、相位噪声等指标

上具有非常优异的性能<sup>[4]</sup>,但也具有体积较大、成本相对较高、电路复杂度较高的缺点。

原子钟是目前世界上最准确的计时工具,可用于卫星导航接收机的芯片。原子钟具有体积小、功耗低、成本低、频率准确度高等优点<sup>[5]</sup>,但原子钟的短期稳定度和使用寿命不如晶振。

影响晶振的主要性能指标有:长期稳定性(老化率/年)、短期稳定性(阿伦方差)、抗振性能、相位噪声、耐高温性能、电源电压和负载变化、封装及工作环境等。其中,长期稳定性和短期稳定性分别影响卫星导航接收机对卫星导航信号的捕获和跟踪,抗振性能主要影响卫星导航接收机的捕获、跟踪、定位和测速,相位噪声则影响接收机的捕获、跟踪和测速。

对目前常用的 TCXO 和 OCXO 性能指标对比如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 TCXO、OCXO 性能指标对比  
Tab. 1 The comparison of performance indexes between TCXO and OCXO

性能指标	TCXO	OCXO
频率准确性	$2 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$
老化率/年	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-8}$
温度稳定度	$5 \times 10^{-7}$ ( $-55^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ )	$1 \times 10^{-9}$ ( $-55^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ )
短期稳定度 (阿伦方差)	$1 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-12}$
功耗/W	0.04	0.6
体积/ $\text{cm}^3$	10	20~200
价格/美元	10~100	200~2000

具体应用时,主要根据接收机对稳定度的要求及应用要求,结合各晶振类型的特点进行选用,如表 2 所示。

表 2 接收机稳定度要求对应的晶振选择建议

Tab. 2 The crystal oscillator choosing suggestions corresponding to the receiver stability requirements

稳定度要求	$< 0.1 \times 10^{-6}$	$< 0.5 \times 10^{-6}$	$0.5 \sim 5 \times 10^{-6}$	$> 5 \times 10^{-6}$
建议选用晶振	恒温晶振	数字补偿晶振	模拟温补晶振	压控晶振

此外,表中稳定度超过  $0.1 \times 10^{-6}$  时恒温晶振的选用,仅在接收机设备不需要快速启动的情况下可行。若接收机设备需要快速启动,则必须采用压控晶振或温补晶振。由于弹载卫星导航接收机对于快速启动和小型化的要求,国内研制生产卫星接收机的厂

家多数都选用温度补偿晶振。目前,尽管国内的晶振产业已经得到了一定程度的发展,但在高端产品上仍需要依靠对国外晶振的大量进口来解决工程应用问题,使产品向着小型化、集成化、高频率稳定度、低功耗、低噪声、能够快速启动的方向发展<sup>[7]</sup>。

## 2 长期稳定性对卫星导航信号捕获的影响

频率稳定度指的是由于噪声调制而引起的频率、相位随机起伏,代表频率的不稳定性。晶振的长期稳定性表现为晶振的年化率,给卫星导航接收机带来的频偏相对于短期稳定性来说影响较小。但随着卫星导航接收机贮存时间的增加,当频偏超过了接收机的多普勒捕获范围时,则会导致接收机无法捕获部分卫星,影响信号捕获。

设晶振的十年频率漂移量为  $\Delta f_{\text{clk}}$ ,晶振的振动频率为  $f_{\text{clk}}$ ,载波频率为  $f$ ,则接收机的10年频偏  $\Delta f$  与上述各量间存在以下关系

$$\Delta f = f_{\text{clk}} \times \Delta f_{\text{clk}} \times \frac{f}{f_{\text{clk}}} \quad (1)$$

以  $f_{\text{clk}}=10\text{MHz}$ ,年化率为10年漂移  $\pm 5 \times 10^{-6}$  的 Rakon 晶振为例,对于高动态弹载卫星导航接收机,多普勒捕获范围一般为  $\pm 10\text{kHz}$ ,中轨 MEO 卫星的多普勒范围为  $\pm 2\text{kHz}$ ,载体速度  $1000\text{m/s}$ ,对应多普勒为  $\pm 5\text{kHz}$ ,则极限情况下,可由式(1)求得卫星接收机频偏为  $7.875\text{kHz}$ ,总频偏达到  $14.875\text{kHz}$ ,将超过接收机多普勒捕获范围,导致无法捕获部分卫星。

针对由于长期稳定性而导致的接收机无法捕获的问题,可对卫星接收机使用如图1所示的长期贮存自标定方法。该方法需要使用带有电压控制的晶振,系统启动后,先解调卫星星历和 P/N 码计算出本地钟漂,再将钟漂通过 D/A 转换器,对晶振的压控端电压进行调节,从而调整频率、减小频偏。



图1 长期贮存自标定方法示意图

Fig. 1 Self-calibration method for long-term storage

通过长期贮存自标定方法,每年对卫星导航接收机进行一次1min内的通电补偿,将年漂移量控制在  $1 \times 10^{-6}$  以内(即卫星接收机年频偏在  $1.575\text{kHz}$  以内),不会超出接收机的多普勒捕获范围,由此保障接收机对卫星导航信号的捕获性能。

## 3 短期稳定性对卫星导航信号跟踪的影响

GPS 接收机接收信号时将引入大量噪声,晶振受到外部的各种干扰,输出频率、相位均会发生一定的波动,在误差较大时可能会超出载波跟踪环的  $1\sigma$  经验门限,引起环路失锁。

PLL 跟踪环路误差主要有:热噪声  $\sigma_{\text{PLL}}$ 、振荡器噪声和动态应力误差  $\theta_e$ ,其中,振荡器噪声又分为由振动引起的颤动  $\sigma_v$  和由阿伦偏差引起的颤动  $\theta_A$ 。有数据调制时,其  $1\sigma$  经验门限可表示为<sup>[8]</sup>

$$\sigma_{\text{PLL}} = \sqrt{\sigma_{\text{PLL}}^2 + \sigma_v^2 + \theta_A^2} + \frac{\theta_e}{3} \leq 15^\circ \quad (2)$$

若误差源较大,则可能导致环路失锁。与其余误差源相比,PLL 热噪声较大,不可忽略。由反正切鉴相算法,热噪声  $1\sigma$  跟踪误差为

$$\sigma_{\text{PLL}} = \frac{360}{2\pi} \sqrt{\frac{B_n}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TC/N_0}\right)} \quad (3)$$

式中,  $B_n$  为载波环噪声带宽(Hz),  $C/N_0$  表示载噪比(Hz),  $T$  为预检测积分时间(s)。

由式(3)可知,增加环路阶数、预检测积分时间或是减小带宽,均可改善动态性能。在实际情况中,式中各变量均固定在一定范围之内,因此也可将 PLL 热噪声视为一个常量。

晶振的相位噪声分析较为复杂,与加速度灵敏度、晶振的振动功率谱密度和波段输入频率有关。若在随机振动调制频率之内,加速度灵敏度不变,则振动引起的晶振相位噪声可表示为

$$\sigma_v = \frac{360f_L S_v(f_m)}{2\pi} \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{P(f_m)}{f_m^2} df_m} \quad (4)$$

式中,  $f_m$  为随机振动调制频率(Hz),  $S_v(f_m)$  表示  $f_m$  函数的加速度灵敏度,  $P(f_m)$  为随机振动的功率谱密度( $g^2/\text{Hz}$ )。对于飞行器来说,其典型参数可取  $P(f_m)=0.05g^2/\text{Hz}$ ,  $S_v(f_m)=1 \times 10^{-9}$ 。

阿伦方差是短期稳定性的主要时域表征,是两次相邻频率差值的方差,其定义式为

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2} E[(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2] \quad (5)$$

其中,有

$$\bar{y} = \frac{\phi(t_k + \tau) - \phi(t_k)}{2\pi\nu_0\tau} \quad (6)$$

且  $\tau$  为采样间隔。阿伦偏差  $\sigma_A(\tau)$  为阿伦方差的均方根。

实际计算时,采用经验公式计算阿伦偏差,其中三阶 PLL 的短期阿伦偏差公式为

$$\sigma_A(\tau) = 2.25 \frac{\Delta\theta}{\omega_L\tau} \quad (7)$$

式中,  $\Delta\theta$  表示振荡器造成的鉴别器中的均方根颤动(rad),  $\omega_L=2\pi f_L$ , 采样间隔时间  $\tau = \frac{1}{B_n}$ 。

三阶 PLL 的阿伦偏差引起的振荡器颤动  $\theta_A$  可

表示为

$$\theta_{A3} = 160 \frac{\sigma_A(\tau) f_L}{B_n} \quad (8)$$

动态应力误差  $\theta_e$  与噪声带宽和载体加速度动态应力有关,表达式为

$$\theta_{e3} = 0.4828 \frac{d^3 R/dt^3}{B_n^3} \quad (9)$$

本文对三阶锁相环进行仿真分析,假设噪声带宽  $B_n = 30\text{Hz}$ , 预检测积分时间  $T = 4\text{ms}$ , 载噪比  $C/N_0 = 44$ , 功率谱密度  $20 \sim 2000\text{Hz}$  平坦, 振动灵敏度  $S_v = 1 \times 10^{-9} \text{parts/g}$ , 振动功率谱率  $P(f_m) = 0.005 \text{g}^2/\text{Hz}$ ,  $f_L = 1575.42\text{MHz}$ , 加加速度动态应力  $10\text{g/s} = 98 \text{m/s}^3$ 。则结合式(2)~式(9), 可得到随阿伦偏差变化的跟踪环路总误差曲线及阿伦偏差引起的振荡器颤动曲线如图 2 所示。

考察阿伦偏差具体为何值时会导致 PLL 失锁, 具体数值如表 3 所示。

表 3  $1\sigma$  误差随阿伦偏差变化

Tab. 3  $1\sigma$  error change with Allan bias

阿伦偏差	$1.41 \times 10^{-9}$	$1.51 \times 10^{-9}$	$1.61 \times 10^{-9}$	$1.71 \times 10^{-9}$	$1.81 \times 10^{-9}$	$1.91 \times 10^{-9}$	$2.01 \times 10^{-9}$
$1\sigma$ 误差	13.201	14.025	14.851	15.679	16.508	17.338	18.169

由表 3 可知, 阿伦偏差超过  $1.61 \times 10^{-9}$  时, 其引起的振荡器颤动则会导致 PLL 失锁。而由图 2 可知, 对于晶振而言, 跟踪环路的  $1\sigma$  误差曲线与由阿伦偏差引起的振荡器颤动误差  $\sigma_A$  曲线随阿伦偏差的增大而趋于一致, 表明阿伦偏差引起的误差  $\sigma_A$  为总环路误差的主要构成部分, 即短期稳定性是环路失锁的主要因素。因此, 根据短期稳定度进行晶振选型具有较大的实用意义, 选型时, 最好为接收机选用阿伦偏差不超过  $1.0 \times 10^{-9}$  的晶振。

#### 4 振动条件下晶振对卫星接收机环路的影响

振动条件下将会引起晶振的相位噪声, 其表达式如式(4)所示。在进行短期稳定性对卫星导航信号跟踪影响的仿真时, 曾假设振动功率谱密度在  $20 \sim 2000\text{Hz}$  平坦, 不存在允差。实际情况下, 晶振将承受  $20 \sim 30\text{g}$  均方根加速度值, 振动功率谱密度允许  $\pm 3\text{dB}$  的允差, 困难时可将允差放宽至  $\pm 6\text{dB}$ 。随机振动的功率谱密度示意图如图 3 所示。

图 3 中曲线共分为 3 段, 各段斜率  $k$  可由式(10)表示

$$k = \frac{10 \lg(A_{i+1}/A_i)}{\log_2(f_{i+1}/f_i)} \quad (10)$$

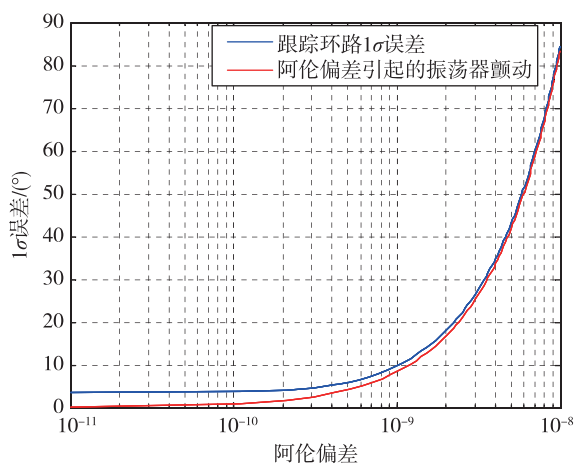


图 2 阿伦偏差引起的振荡器颤动曲线及跟踪环路  $1\sigma$  误差变化曲线

Fig. 2 Oscillator error and the  $1\sigma$  tracking loop error caused by Allan bias

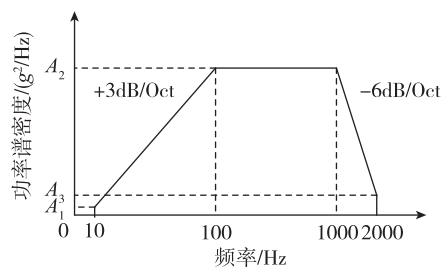


图 3 随机振动功率谱密度

Fig. 3 The power spectral density of random vibration

以第一段曲线为例,  $A_1$ 、 $A_2$  分别为第一段曲线在  $f_1 = 10\text{Hz}$  和  $f_2 = 100\text{Hz}$  的纵坐标, 设  $A_1 = 0.001 \text{g}^2/\text{Hz}$ , 则可由式(9)计算得到  $A_2 = 0.00992 \text{g}^2/\text{Hz}$ , 同理可得图 3 中有  $A_3 = 0.00249 \text{g}^2/\text{Hz}$ 。取加速度灵敏度为  $S_v(f_m) = 1 \times 10^{-9}$ , 则可通过式(4)得到不同的振动频率下由振动引起的晶振相位噪声, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 振动引起的相位颤动可控制在一定范围之内, 计算可知在此范围内不会造成锁相环失锁。即只要对晶振采取有效措施, 减小晶振的振动强度, 均可使接收机环路在一定振动频率范围内正常工作。可采取的减振措施包括:

- 1) 将晶振放置在印制电路板的固定螺钉附近,

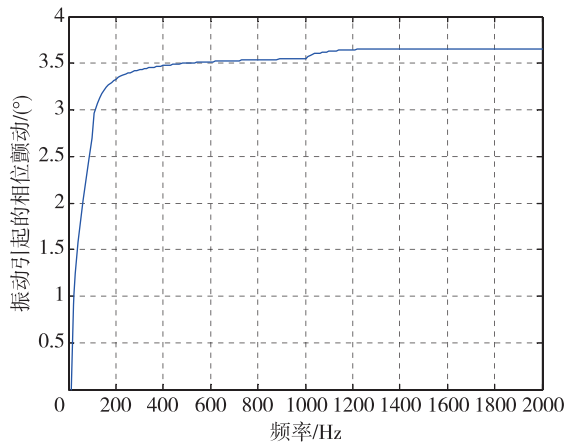


图4 不同振动频率引起的相位颤动

Fig. 4 Phase jitter caused by different vibration frequency

避免将晶振放置在振幅最大、对振动最为敏感的电路板中心区域,从而减小因电路板振动而引起的晶振振动。

2)在晶振与电路板之间使用阻尼胶,减小小振动量级。

3)对晶振单独加屏蔽罩,使晶振温度不随设备温度而变化,更接近于环境温度。但该方法只在调试时效果较为显著,实际弹载卫星接收机中,其密闭空间可直接保持环境稳定。

4)弹载卫星接收机上,当晶振有加速度时,其频率可表示为如下形式<sup>[9]</sup>

$$f(a) = f_0(1 + \Gamma \cdot a) \quad (11)$$

式中, $f(a)$ 为加速度为 $a$ 时的晶振振动频率, $f_0$ 为无加速度时的晶振振动频率, $\Gamma$ 为晶振的加速度灵敏度矢量。即当加速度方向平行于晶振的加速度灵敏度矢量时,晶振的频率变化最大。由此可知,将晶振放置为对加速度最不灵敏的方向与导弹最大加速度方向一致的形式,可减小因载体加速度而带来的晶振频偏。同理,也可考虑将晶振放置为其最大抗振方向与导弹最大振动方向一致的形式,减小载体振动带来的晶振频偏。

## 5 晶振相位噪声对卫星接收机抗干扰能力的影响

接收机载波环路的抗干扰能力可由干信比来衡量,具体可通过将干信比转化为载波环的跟踪阈值来计算。跟踪阈值为式(2)中 $1\sigma$ 经验门限 $\sigma_{PLL} = 15^\circ$ 时的信噪比。载波环跟踪阈值和干信比间存在如下转换关系<sup>[10]</sup>

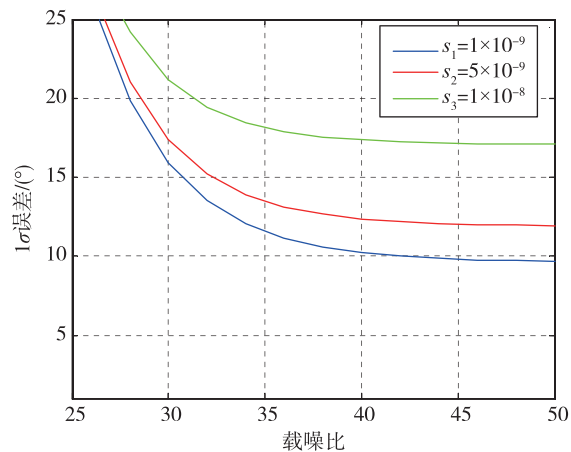
$$[c/n_0]_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{c/n_0} + \frac{j/s}{P \cdot f_c}} \quad (12)$$

式中, $[c/n_0]_{eq}$ 表示有干扰时的载噪比(Hz), $c/n_0$ 表示无干扰时的载噪比(Hz), $j/s$ 为干扰与信号的功率比, $P$ 为调整系数(窄带干扰取 $P=1$ ,宽带干扰取 $P=2$ ,本文取 $P=2$ ), $f_c$ 为码速率。以dBHz表示,则可将干信比表示为

$$\frac{J}{S} = 10 \lg \left[ P f_c \left[ \frac{1}{10^{[C/N_0]_{eq}/10}} - \frac{1}{10^{(C/N_0)/10}} \right] \right] \quad (13)$$

由式(13)可知,载波环跟踪阈值越大,由阈值反算出的干信比越小,接收机抗干扰性能越差;相反,载波环跟踪阈值越小,由阈值反算出的干信比越大,接收机抗干扰性能也就越强。

由式(4)可知,为研究晶振相位噪声对卫星接收机抗干扰能力的影响,需要通过改变晶振的加速度灵敏度和振动的功率谱密度来改变晶振的相位噪声。假设相干积分时间为 $T=1\text{ms}$ ,环路带宽为 $B_n=30\text{Hz}$ ,取加速度灵敏度分别为 $s_1=1 \times 10^{-9}$ , $s_2=5 \times 10^{-9}$ , $s_3=1 \times 10^{-8}$ 时的相位噪声进行仿真分析,可得到如图5所示的不同加速度灵敏度下的 $1\sigma$ 误差变化曲线。

图5 不同加速度灵敏度下的 $1\sigma$ 误差变化曲线Fig. 5 The  $1\sigma$  error variation under different acceleration sensitivity

结合仿真结果可以求得,当加速度灵敏度为 $s_1=1 \times 10^{-9}$ 时,跟踪阈值为 $30\text{dBHz}$ ,对应的干信比为 $32.93\text{dB}$ ;当加速度灵敏度为 $s_2=5 \times 10^{-9}$ 时,跟踪阈值为 $32\text{dBHz}$ ,对应的干信比为 $30.826\text{dB}$ ;而当 $s_3=1 \times 10^{-8}$ 时,则会超出 $1\sigma$ 误差的门限,造成锁相环失锁。由此得出结论:加速度灵敏度越大,相位

噪声越大,随之引起的  $1\sigma$  误差以及跟踪阈值也就越大,反算出的干信比随之减小,接收机的抗干扰性变差。因此,晶振选型时应尽量选用加速度灵敏度较小的晶振( $s \leq 1 \times 10^{-9}$ ),从而提高接收机的抗干扰性能。

## 6 结论

本文通过结合锁相环测量误差的相关理论,对影响接收机捕获、跟踪、抗干扰能力的晶振长期稳定度、短期稳定度、振动频率以及相位噪声等特性进行了仿真分析。仿真结果表明,最好为接收机选用阿伦偏差不超过  $1.0 \times 10^{-9}$ 、加速度灵敏度较小的晶振。该结论为弹载卫星接收机中晶振的合理选型提供了理论参考。此外,针对晶振中由于长期稳定性差而导致接收机无法捕星的问题,提出了长期贮存自标定方法;为保障接收机环路在一定振动频率范围内正常工作,总结了几种减振设计方法。

### 参考文献

- [1] 王俐聪. 振动条件下晶振的相噪分析及其抗振设计[D]. 成都:电子科技大学, 2007.
- [2] 阎玉英, 马京路, 刘晓方. 压控晶体振荡器的设计[J]. 无线电通信技术, 2007, 33(2):58-60.
- [3] 黎荣林, 黎敏强. 高稳定度低相位噪声温补晶振芯片设计[J]. 半导体技术, 2016(1):32-36.
- [4] 秦玉浩, 朱虹, 杨磊. 10MHz 高稳晶振仿真技术研究[J]. 空间电子技术, 2015, 12(4):50-53.
- [5] 杜润昌, 杨林, 赵海清. 芯片原子钟的现状与发展[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(2):34-38.
- [6] 孙成城. 高稳定度晶体振荡器的低老化及补偿问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- [7] 伍华林, 吕延, 吕明. 石英晶体振荡器的发展趋势研究[J]. 价值工程, 2013, 32(5):295-296.
- [8] Kaplan E D. GPS 原理与应用(第二版) [M]. 寇艳红, 译. 北京:电子工业出版社, 2007:134-140.
- [9] 李铎, 陈皓, 杨科. 晶体振荡器的抗震设计[C]//中国电子学会第十四届电子元件学术年会. 2006:305-308.
- [10] 秦红磊, 柴璐璐, 丛丽. GPS/INS 超紧组合抗干扰性能分析[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(1):333-337.