

引用格式：李辉，吴华兵，赵当丽. 晶振对飞行器时频同步系统的影响[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 163-171.

晶振对飞行器时频同步系统的影响

李辉^{1,2}, 吴华兵¹, 赵当丽¹

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 飞行器时频同步系统采用双向伪距测量, 伪距信息通过测量信号到达时间获得。由于晶振在飞行平台上处于振动和动态状态, 与地面静态场景受到的影响不同, 因此对晶体振荡器的选择和应用十分重要。本文介绍了晶振老化率、晶振频偏的影响, 构建了由各类误差源引起的跟踪环路误差模型。仿真结果表明, 振动引起的晶振相位噪声和阿伦偏差晶振相位噪声随环路带宽增大而减小, 随环路阶数增大而增大; 选用高稳定度, g 敏感度小的晶振可降低环路跟踪误差; 将阿伦偏差作为晶振选择的指标具有较大的实用意义。

关键词: 晶振; 动态接收机; 跟踪环路; 相位噪声

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-03-0163-09

The effect of crystal oscillator on the flight vehicle time and frequency synchronization system

LI Hui^{1,2}, WU Hua-bing¹, ZHAO Dang-li¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The flight vehicle time-frequency synchronization system uses bi-directional pseudo-range measurement, and the pseudo-range information is obtained by measuring the signal arrival time. The crystal oscillator is in vibration and dynamic state on the flight platform, which is affected differently from the static scene on the ground, so it is very important for the selection and application of crystal oscillator. In this study, the effects of crystal oscillator aging rate and crystal oscillator frequency bias are introduced, and the tracking loop error model caused by various error sources is constructed. The simulation results show that the phase noise of crystal oscillator caused by vibration and Allan's deviation decreases with the increase of loop bandwidth, and it increases with the increase of loop order; the selection of crystal oscillator with high stability and small sensitivity can reduce the loop tracking error; the Allan's deviation as the index of crystal oscillator selection has a greater practical significance.

Key words: crystal oscillator; dynamic receiver; tracking loop; phase noise

0 引言

飞行器时频同步系统主要在飞行器与地面站或飞行器之间实现高精度时间同步和频率同步。振荡器是接收机接收时间和工作频率的基础,受到成本、体积和功耗等因素的限制,飞行器上的接收机并不能像地面站那样,使用高稳定性和准确度的原子钟,而是使用较低级的晶体振荡器^[1]。晶振相位噪声会使中频信号产生偏移,影响接收机的捕获。在跟踪环路中,影响 NCO 信号的产生,导致跟踪环路相位误差进而影响多普勒值的测量^[2]。当接收机处于静止状态下,晶振导致的跟踪环路偏差很小。但是在动态状态下,会产生很大的环路误差,影响跟踪环路的稳定性,因此需要晶振具有较高的动态性能。

现有晶振误差理论主要围绕接收机跟踪环路构建,锁相环输出信号的相位噪声性能和晶体振荡器时钟信号的相位噪声性能密切相关。热噪声和振荡器相位噪声产生误差的因素相互冲突,因此必须在晶振噪声抑制和环路误差之间进行权衡。近年来晶体振荡器的性能有了很大的提高,但他们仍然是接收机中跟踪误差的主要来源。

本文首先介绍了晶振老化率、晶振频偏对接收机的影响;然后研究晶振的振动相位噪声和阿伦偏差相位噪声对接收机跟踪环路的影响;最后根据仿真结果,获得相应的改善策略,提供晶振选型的理论参考。

1 常用晶振及性能分析

频率源作为电子系统中的心脏,其输出频率的稳定性对各种仪器的工作性能有着至关重要的作用。晶体振荡器作为一种应用广泛的频率源,在通讯、雷达、航空航天、测试计量和仪器仪表等多个领域得到了广泛的应用^[3]。针对不同情况下对晶体振荡器指标的不同需求,石英晶体振荡器主要分为以下几种类型:普通晶振(PXO)、压控晶振(VCXO)、温补晶振(TCXO)、恒温晶振(OCXO)。

作为整体组成最为简单的一种晶体振荡器,普通晶体振荡器并没有采取任何的补偿措施,所以其技术指标相对来说会低一些,受温度、湿度等外部环境影响较大。

电压控制晶振是通过施加外部电压对输出频率进行控制的一种晶体振荡器。因为 VCXO 自身具备的优点,即频率稳定度高、频率可调等特性,在频率校准、调制等领域应用广泛^[4]。

温补晶振的频率输出随着温度的变化会发生一定的偏移,在某些高温或者低温下晶体振荡器甚至不能正常工作,所以需要采取相应的措施对温度进行补偿,使其在不同温度下能够输出稳定的频率^[5]。经过补偿后,该晶体振荡器能够在宽温范围内保持稳定的频率输出,基本上可以满足正常情况下各种频率源的需求,由于具有体积小、功耗小、电路简单、开机时间短、成本低等优点,在各个领域都得到了大量的应用^[6]。

恒温晶振,是将晶体谐振器放置于恒温槽中,通过降低环境温度的影响,得到优秀的频率准确度和稳定度,使其在日老化率指标上与铷原子钟相比也相差无几,因此又被称为高稳定度晶体振荡器。但是由于恒温槽的应用,使得恒温晶振占用体积相对过大,不适合用于移动设备之中^[7]。

晶体振荡器的主要性能指标有:频率准确度、频率稳定度(老化率、阿伦方差)、 g 敏感度、启动时间^[8]。除了上述主要参数外,晶振重要的性能指标还包括开机特性、负载电容、温度频差等。

选用四款 Rakon 晶振作为参考晶振如表 1 所示。实际应用时,需要根据每种晶体振荡器的独特性能、实际应用场景和时间精度的需求来进行选择。例如在无人机上,由于快速启动、小型化等要求,一般选用温度补偿晶振。

表1 四款 Rakon 晶振性能指标对比

性能指标	频率准确度	g 敏感度	阿伦偏差	老化率	启动时间
PXO	$\pm 2 \times 10^{-5}$	2×10^{-9}	$1 \times 10^{-6}/s$	$5 \times 10^{-6}/a$	5 s
VCXO	$\pm 1 \times 10^{-6}$	1×10^{-9}	$2 \times 10^{-10}/s$	$1 \times 10^{-6}/a$	15 ms
TCXO	$\pm 1 \times 10^{-6}$	5×10^{-10}	$1 \times 10^{-10}/s$	$1 \times 10^{-6}/a$	15 ms
OCXO	$\pm 5 \times 10^{-6}$	5×10^{-10}	$5 \times 10^{-12}/s$	$2 \times 10^{-8}/a$	3 min

2 晶振对接收机的影响

2.1 晶体老化引起的频率偏移

谐振频率随着晶体谐振器工作时间的延长而发生单调递增或递减的变化,这种变化我们将其称为晶体的老化^[9]。近些年来,随着对性能的需求提升,年老化率也开始慢慢成为评价晶体振荡器性能好坏的重要指标之一。在实际的应用中,为了保证系统或者设备能够正常的工作,一般都会给晶体振荡器设定一个预期的误差值,只要保证实际的偏差在这个误差范围内,系统都能够正常工作。然而由于受到老化的影响,随着系统设备使用时间的增加,频率偏移可能会超出所设定的误差范围,当晶振老化引起的频偏与接收机多普勒值的和超出了接收机捕获时载波多普勒搜索范围,会导致接收机无法正常的捕获到信号^[10]。

2.2 晶振频偏的影响

晶振作为接收机的频率基准,当它存在频率偏移时,会导致射频前端的中频偏移。它还会导致跟踪环路中的本地载波产生偏差,随着时间的推移,导致跟踪环路中的相位偏差越来越大。

设接收信号的标称载波频率为 f_T , 射频前端输出的中频为 f_{IF} , 晶振输出频率 f_0 , 则振荡器频率偏移为 f_x 时, 引起的中频偏移量 Δf_{IF} 为

$$\Delta f_{IF} = f_x \cdot \frac{f_T - f_{IF}}{f_0} \quad (1)$$

晶振的输出频率一般为 10 MHz, 设接收信号频点为 $f_T = 4188$ MHz, 中频选取为 46 MHz, 则 1 Hz 频偏引起的中频偏移量为 414.2 Hz。

多普勒观测量需要载波相位观测量来进行提取:

$$\dot{\theta}^k = \frac{\theta_{k+1} - \theta_{k-1}}{2\Delta t} \quad (2)$$

式(2)中, θ_k 为某时刻的载波相位观测量, 此时多普勒值包含本地时钟偏差以及射频前端中频的偏移频率, 并非真实的多普勒^[11]。因此晶振频率高准确性和稳定性非常重要。

2.3 晶振对跟踪环路测量精度的影响

一般的跟踪环路结构图如图 1 所示, 主要包括数控振荡器(NCO)、积分器和带宽为 B_L 的环路滤波器。

PLL 跟踪环路误差主要有: 热噪声 σ_{PLL} 、振荡器噪声和动态应力误差 θ_c , 其中, 振荡器噪声又分为由振动引起的相位噪声 σ_v 和由阿伦偏差引起的相位噪声 σ_A 。如果所有误差源超过了一定的门限, 那么跟踪环路将会失锁, 信号将不再被跟踪。

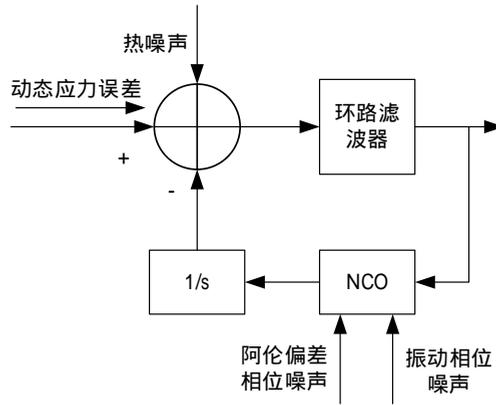


图 1 包含 4 种误差源的跟踪环路示意图

考虑所有这些误差源，则总的 PLL 抖动和其相应的经验跟踪门限值可用如下表达式^[12]计算：

$$\sigma_{\text{PLL}} = \sqrt{\sigma_{\text{PLL}}^2 + \sigma_{\text{V}}^2 + \sigma_{\text{A}}^2} + \frac{\theta_c}{3} \leq \frac{1}{4}\phi, \quad (3)$$

式(3)中， ϕ 表示鉴相器的鉴相范围。若载波鉴相器采用二象限反正切，则跟踪门限为 15° 或者 $\lambda/24$ ， λ 为载波波长；若载波鉴相器采用四象限反正切，则跟踪门限为 30° 或者 $\lambda/12$ 。以C波段($f_0 = 4188 \text{ MHz}$)信号为例，其波长 $\lambda = 0.07 \text{ m}$ ，则两种方式的跟踪门限分别为 2.9 mm 和 5.8 mm 。若总的PLL相位抖动超过这个门限，PLL将不能可靠地保持锁定，卫星信号将不再被跟踪。若总的相位抖动小于此门限，PLL可被认为是稳定的。

2.3.1 振动相位噪声

由振荡器相位噪声引起的PLL跟踪误差^[13]为

$$\sigma_{\text{V}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty G_\phi(\omega) |1 - H(\omega)|^2 d\omega, \quad (4)$$

式(4)中的积分变量 $\omega = 2\pi f$ 表示振动的弧度频率； $G_\phi(\omega)$ 是晶振单边带相位噪声谱密度；传输函数可表达为

$$|1 - H(\omega)|^2 = \frac{\omega^{2n}}{\omega_L^{2n} + \omega^{2n}}, \quad (5)$$

式(5)中： n 是PLL阶数； ω_L 是PLL特征频率。 $G_\phi(\omega)$ 可表示为

$$G_\phi(\omega) = (2\pi f_0)^2 k_g^2(\omega) \frac{G_g(\omega)}{\omega^2}, \quad (6)$$

式(6)中： k_g 是晶振的 g 敏感度($1/g$)； $G_g(\omega)$ 是单边振动谱密度(g^2/Hz)； f_0 是载波频率。将式(5)和(6)代入式(4)，一阶、二阶和三阶锁相环由振动引起的晶振相位噪声可分别表示为：

$$\sigma_{\text{V}}^2 = 2\pi f_0^2 \int_0^\infty \frac{k_g^2(\omega) G_g(\omega)}{\omega_L^2 + \omega^2} d\omega, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{V}}^2 = 2\pi f_0^2 \int_0^\infty \frac{k_g^2(\omega) G_g(\omega) \omega^2}{\omega_L^4 + \omega^4} d\omega, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{V}}^2 = 2\pi f_0^2 \int_0^\infty \frac{k_g^2(\omega) G_g(\omega) \omega^2}{\omega_L^6 + \omega^6} d\omega. \quad (9)$$

振动功率谱密度情况如图2所示，假设所有的振动在整个频率范围都为均匀分布(白色振动噪声)，

积分区间可设为 $[0 \infty]$ 。然而在实际情况下，振动不会在整个频率范围都是均匀分布，积分区间可表示为 $\omega=[\omega_1 \omega_2]$ 。真实场景下振动的功率谱密度也不为常量^[14]。根据选择不同的积分区间，以及上面的简化模型（ g 灵敏度和振动谱密度都为常量）， ω_L 可通过 $\omega_{L,1} = 4B_L$ ， $\omega_{L,2} = 1.88B_L$ 和 $\omega_{L,3} = 1.2B_L$ 来分别计算一阶，二阶和三阶 PLL 振动相位抖动。结果分别为：

$\omega = [0 \infty]$ ：

$$\sigma_v^2 = \frac{\pi^2 f_0^2 K_g^2 G_g}{\omega_L}, \tag{10}$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\pi^2 f_0^2 K_g^2 G_g}{\sqrt{2}\omega_L} = \frac{0.53\pi^2 f_0^2 K_g^2 G_g}{\sqrt{2}B_L}, \tag{11}$$

$$\sigma_v^2 = \frac{2\pi^2 f_0^2 K_g^2 G_g}{3\omega_L} = \frac{0.52\pi^2 f_0^2 K_g^2 G_g}{B_L}, \tag{12}$$

$\omega = [\omega_1 \omega_2]$ ：结果可根据式（7）~（9）积分求得。

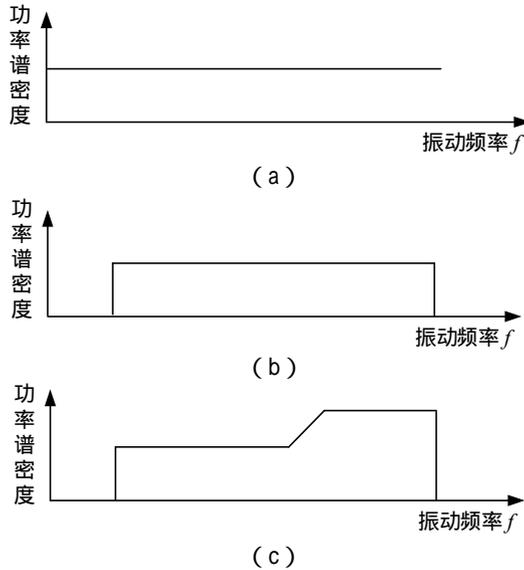


图 2 振动相位噪声功率谱密度示意图

2.3.2 阿伦偏差相位噪声

模型化阿伦偏差相位噪声引起的 PLL 抖动的方法与振动相位噪声相同，表示为

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_\phi(\omega) |1 - H(\omega)|^2 d\omega, \tag{13}$$

式（13）中， $S_\phi(\omega)$ 表示由晶振频率不稳定引起的相位噪声单边带谱密度，可用下式表示：

$$S_\phi(\omega) = (2\pi f_0)^2 \frac{S_y(\omega)}{\omega^2}, \tag{14}$$

式（14）中， $S_\phi(\omega)$ 为时钟参数 h_2 ， h_1 和 h_0 的函数，它们分别代表频率噪声中的随机游走噪声，频率闪烁和白噪声部分。与阿伦偏差 σ_y 有如下关系：

$$\sigma_y^2(T) = \frac{h_0}{2T} + 2 \cdot \ln 2 \cdot h_1 + \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot T \cdot h_2}{3}, \tag{15}$$

式（15）中， T 表示平均时间。与计算振动相位噪声一样，取单边带功率谱，则 $S_y(\omega)$ 表达式如下：

$$S_y(\omega) = \frac{2\pi^2 h_2}{\omega^2} + \frac{\pi h_1}{\omega} + \frac{h_0}{2}. \quad (16)$$

所以对于二阶和三阶锁相环而言（一阶积分不收敛），阿伦偏差噪声积分整理后分别为：

$$\sigma_A^2 = 2\pi^2 f_0^2 \left[\frac{\pi^2 h_2}{\sqrt{2}(1.88B_L)^3} + \frac{\pi h_1}{4(1.88B_L)^2} + \frac{h_0}{4\sqrt{2}(1.88B_L)} \right], \quad (17)$$

$$\sigma_A^2 = 2\pi^2 f_0^2 \left[\frac{\pi^2 h_2}{3(1.27B_L)^3} + \frac{\pi h_1}{3\sqrt{3}(1.27B_L)^2} + \frac{h_0}{6(1.27B_L)} \right]. \quad (18)$$

2.3.3 热噪声及动态应力误差

由热噪声引起的 PLL 抖动与跟踪环路阶数无关，与实际 PLL 的实现有关。对于非相干载波跟踪，由反正切鉴相算法，热噪声 1σ 跟踪误差为

$$\sigma_{PLL} = \frac{360}{2\pi} \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TC/N_0} \right)}, \quad (19)$$

式(19)中， C/N_0 表示载噪比(Hz)， T 为预检测积分时间(s)， B_L 为载波环噪声带宽(Hz)。

动态应力误差与环路阶数 n 以及噪声带宽 B_L 有关， λ 为载波波长，三阶锁相环可表示为

$$\theta_c = \frac{d^3 R / dt^3}{(1.27B_L)^3} \times \left(\frac{360}{\lambda} \right). \quad (20)$$

3 性能仿真分析

3.1 振动相位噪声

以无人机作为系统研究对象，飞行时处于动态运动中，其随机振动会引起晶振的振动相位噪声，为了说明随机振动对相位抖动的影响，假设平台接收机接收 C 频段信号（ $f_0 = 4188 \text{ MHz}$ ），晶振的 g 敏感度 $k_g = 1 \times 10^{-9}$ ($1/g$)，均匀分布的单边振动谱密度为 $G_g = 0.005$ (g^2/Hz)。振动在整个频率范围（ $\omega = [0 \infty]$ ）都为均匀分布（振动谱如图 2 (a) 所示），则相位抖动如图 3 所示，由图可知，在此状态下，振动相位噪声随着环路噪声带宽增大而减小；而环路阶数越大，振动相位噪声也越大，即对振动相位噪声的抑制能力更弱。

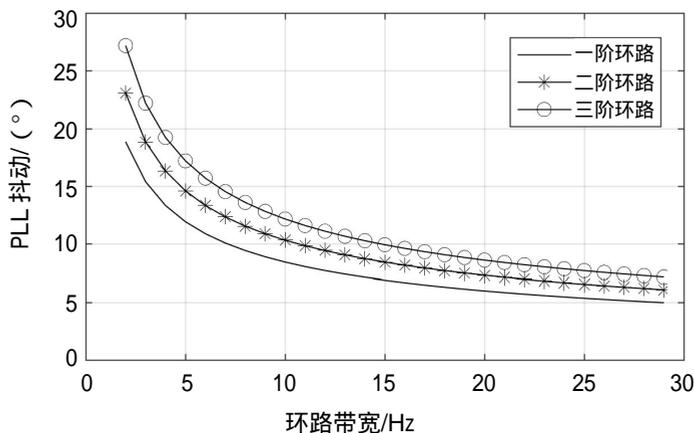


图 3 随机振动噪声与环路带宽的关系

图 3 反应的是振动频率在整个频率范围都为均匀分布的情况，相位抖动最大。然而实际情况下，振

动频率具有一定的范围。无人机在飞行时振动谱不包含非常低的振动频率（如图 2（b）所示），振动频率上限 f_2 只对相位抖动有边缘效应（高频振动仅对 PLL 的跟踪性能有影响），可设置频率上限为固定值 $f_2 = 2000 \text{ Hz}$ ，振动频率下限 f_1 作为变量来反应相位抖动。对于常用的二阶和三阶 PLL 结果如图 4 和 5 所示。由此可知：

- 若不考虑低频振动，则振动相位噪声明显降低；
- 若不考虑低频振动，则相位抖动与环路阶数以及环路噪声带宽无关。

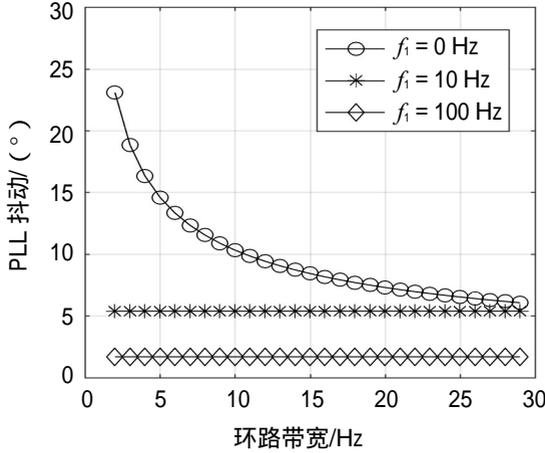


图 4 二阶 PLL 忽略低频振动环路带宽对随机振动噪声的影响

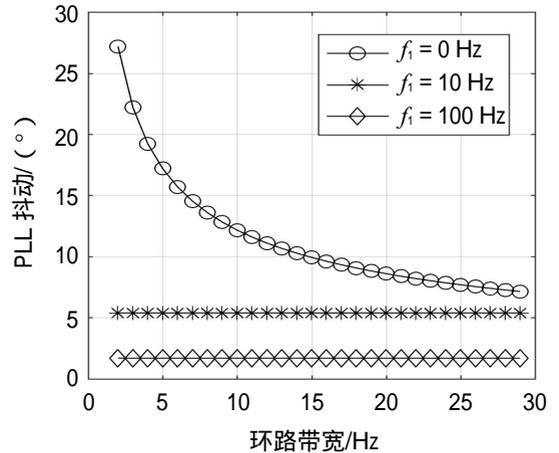


图 5 三阶 PLL 忽略低频振动环路带宽对随机振动噪声的影响

由式（7）~（12）可知，振动相位噪声与 g 敏感度成正比，因此，另外一种降低随机振动影响的可行方法是最小化振荡器的 g 敏感度。若 g 灵敏度减小 2 倍，则噪声大约可降低为原来的 1/2，结果如图 6 和图 7 所示。由此可知，如果接收机参考时钟 g 敏感度减小，则振动相位噪声可明显降低。

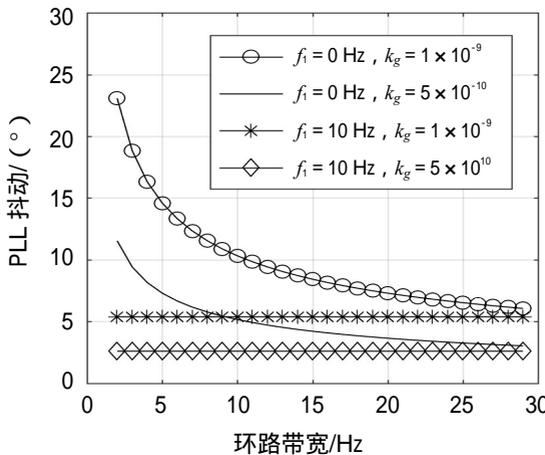


图 6 二阶 PLL 不同 g 敏感度对随机振动噪声的影响

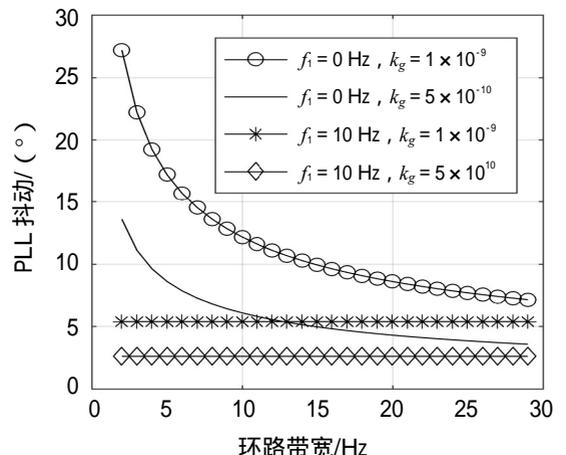


图 7 三阶 PLL 不同 g 敏感度对随机振动噪声的影响

3.2 阿伦偏差相位噪声

阿伦偏差相位噪声与载波频率 f_0 、环路噪声带宽 B_L 、时钟参数（ h_2 、 h_1 、 h_0 ）有关。时钟参数可用于计算一定周期的阿伦偏差，反应振荡器的频率稳定度，两种常用类型晶振时钟参数如表 2 所示。由图 8 可知，阿伦偏差相位噪声引起的相位抖动与环路噪声带宽 B_L 有关，噪声带宽越小，PLL 的相位抖动越大，也可看出三阶比二阶 PLL 相位抖动更严重一点。图 9 给出了基于不同时钟参数的三阶 PLL 阿伦偏差噪声。由此推断出两种可行的方法减小阿伦偏差相位噪声的影响，从而改善 PLL 的跟踪性能。

一是增加环路噪声带宽 B_L ，然而增加噪声带宽热噪声也同时增大，从而降低信号的 C/N_0 ，也就导致接收机的跟踪不稳定更容易失锁，因此在高 C/N_0 环境下可通过增加环路噪声带宽来抑制 PLL 相位抖动。二是选择准确度和稳定度更好的晶振作为接收机的时钟源。

表 2 TCXO 和 OCXO 的时钟参数

类型	h_{-2}	h_{-1}	h_0
TCXO	2.00×10^{-20}	1.00×10^{-20}	1.00×10^{-20}
OCXO	2.51×10^{-22}	2.51×10^{-23}	2.51×10^{-26}

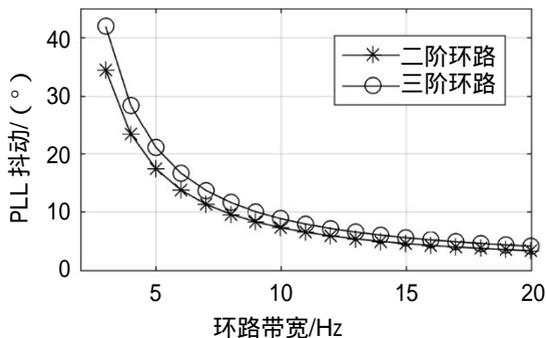


图 8 环路带宽对阿伦偏差噪声的影响

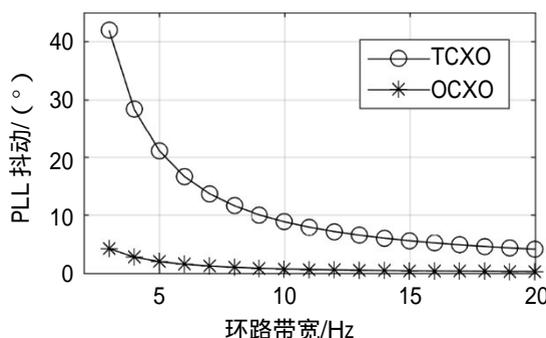


图 9 时钟参数对阿伦偏差噪声的影响

实际情况下，厂商给出的指标为阿伦偏差值，因此一般用经验公式确定阿伦偏差相位噪声，三阶 PLL 公式如下^[15-16]：

$$\sigma_A = 160 \frac{\sigma_a f_0}{B_L} \quad (21)$$

式 (21) 中， σ_a 为阿伦偏差值。由图 10 三阶 PLL 的阿伦偏差相位噪声所示，当噪声带宽逐渐变窄时，而阿伦偏差相位噪声会逐渐占据误差的主导地位。假设环路带宽 $B_L=20$ Hz，预检时间 $T=1$ ms， $C/N_0=40$ Hz，忽略低频振动， g 敏感度为 5×10^{-10} ，加速度动态应力 $1g/s=9.8$ m/s³，采用二象限反正切。则根据式 (3) 和 (21)，可得到跟踪环路 1σ 误差及阿伦偏差相位噪声误差如图 11 所示。

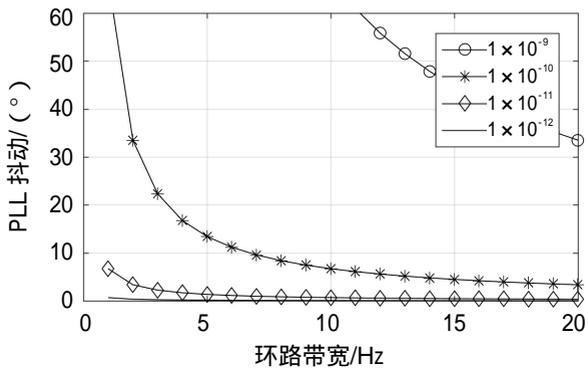


图 10 三阶 PLL 的阿伦偏差相位噪声

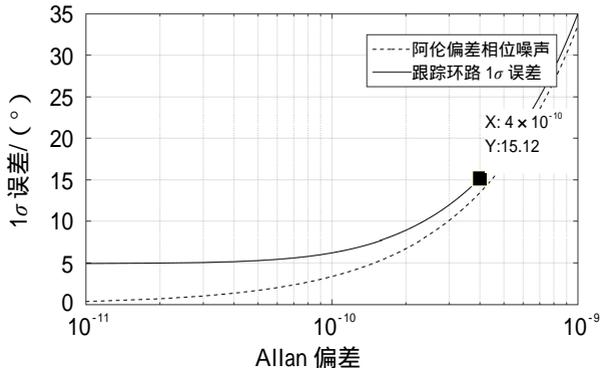


图 11 阿伦偏差引起的相位噪声及跟踪环路 1σ 误差

结果表明，跟踪环路的 1σ 误差与阿伦偏差相位噪声误差 σ_A 随阿伦偏差的增大而增大，趋于一致。由此可知，接收机 PLL 误差的主要根源是晶振的阿伦偏差（短期稳定性），对于接收机来说，将阿伦偏差作为晶振选择的指标具有较大的实用意义。由图 11 可知当阿伦偏差超过 4×10^{-10} 时，产生的相位噪声会导致 PLL 失锁。因此，考虑到其他噪声影响因素，最好选用 1×10^{-10} 量级或更好的晶振，这样不会妨碍可靠的 PLL 工作。

4 结语

本文根据接收机跟踪环路误差的相关理论,对晶振振动相位噪声、阿伦偏差相位噪声进行仿真分析。结果表明,振动引起的晶振相位噪声和阿伦偏差晶振相位噪声随环路带宽增大而减小,随环路阶数增大而增大;在不考虑低频振动的情况下,振动相位噪声明显降低,其相位抖动与环路阶数以及环路噪声带宽无关;当噪声带宽逐渐变窄时,阿伦偏差相位噪声会逐渐占据误差的主导地位,是 PLL 失锁的主要因素;应选择稳定度高, g 敏感度小的晶振。在实际的飞行器时频同步系统中,以上述结论可作为理论参考,综合考虑系统动态、载波频率、振动要求、 g 敏感度、重量体积等因素进行晶体振荡器的选择。

参考文献:

- [1] 冯雪阳. 基于 GPS 秒脉冲的恒温晶振驯服和自适应保持技术研究[实现][D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] 宋东风. 高动态环境中 INS 辅助 GNSS 接收机测速误差分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [3] 王嘉琛, 樊多盛, 肖波, 等. 基于晶振的远程时间同步参考源性能分析[J]. 时间频率学报, 2020, 43(4): 270-278.
- [4] 王振凯. 基于晶体谐振器等效参数的老化补偿研究与系统实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [5] 王宏兴. 高阶温度补偿晶体振荡器设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [6] 江金光, 唐亚男, 李姗姗. 基于单片机的晶振温度补偿系统设计[J]. 压电与声光, 2016, 38(3): 492-496.
- [7] 叶羽铭. 一种压控温补晶体振荡器(VCTCXO)的设计和实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [8] 谢亦龙. 星载晶体振荡器抗振设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [9] 孙成城. 高稳定度晶体振荡器的低老化率及补偿问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [10] 赵岩, 李智奇, 周渭, 等. 晶体振荡器的频率稳定性和老化特性研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 267-275.
- [11] WANG X, JI X, FENG S, et al. A high-sensitivity GPS receiver carrier-tracking loop design for high-dynamic applications[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 225-236.
- [12] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [13] PARKINSON B W, JR J J S, AXELRAD P, et al. Global Positioning System: Theory and Applications[M]. Volume I. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996.
- [14] TREES H L V. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part II: Nonlinear Modulation Theory[M]. USA: Wiley, 2002.
- [15] 韩舒文, 原海军, 左启耀, 等. 晶振误差特性及其对弹载卫星导航接收机的影响分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 66-71.
- [16] 卡普兰. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.