

# 星载晶振短稳对导航增强系统 PPP 精度的影响分析

刁文婷, 郑 戈, 王冬冬  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 分析星载恒温晶振(Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO)短稳对导航增强系统精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)精度的影响。本文首先介绍了 OCXO 短期频率稳定度的概念, 然后根据其短稳特性进行噪声反演, 最后建立了基于 OCXO 短稳噪声反演的系统 PPP 定位模型, 将短稳量级不同的 OCXO 反演噪声引入模型并对系统最终 PPP 定位精度进行分析比较。实验表明: 在无控制段调校星上时频的情况下, 选用短稳量级为 E-13 的 OCXO 在中长观测时间段内 (<1 000 s) 可满足系统厘米级的定位需求。该分析可为低轨导航增强系统的时频指标设计提供一定参考。

**关键词:** 恒温晶振; 短期频率稳定度; 精密单点定位

**中图分类号:** V474.2+5; TP752

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-1000(2023)03-0031-09

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20230222001

**引用格式:** 刁文婷, 郑戈, 王冬冬. 星载晶振短稳对导航增强系统 PPP 精度的影响分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 31-39.

## Analysis of impact of crystal oscillator short stability on PPP accuracy of navigation enhancement system

DIAO Wenting, ZHENG Ge, WANG Dongdong  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To analyze the effect of Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO) short-stability on the accuracy of Precise Point Positioning (PPP) of navigation enhancement system. Firstly, this paper introduces the concept of OCXO short-term frequency stability, and then inverts the noise according to its short-term stability characteristics. Then, the PPP positioning model of the system based on OCXO short-term stability noise inversion is established, and OCXO inversion noise with different short-term stability magnitude is introduced into the model, and the final PPP positioning accuracy of the system is analyzed and compared. The experimental results show that the OCXO with the short-stability order of E-13 can meet the centimeter-level positioning requirements of the system in the medium and long observation periods (<1 000 s) without the control section to adjust the on-board time-frequency. The analysis can provide some reference for the time-frequency index design of LEO navigation enhancement system.

**Keywords:** Constant temperature crystal oscillator; Short-term frequency stability; Precise point positioning

**Citation:** DIAO Wenting, ZHENG Ge, WANG Dongdong. Analysis of impact of crystal oscillator short stability on PPP accuracy of navigation enhancement system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 31-39.

## 引 言

基于精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术的低轨导航增强系统凭借其快速变化的星座几何构型所产生的丰富定位资源, 可实现分钟内的精密定位收敛与解算, 达到导航增强厘米级定位的标准, 成为国家综合 PNT(Positioning, Navigation and Timing, PNT)建设的新兴领域。而

星载频率源的稳定性对低轨导航增强系统的精密定位有着至关重要的影响。目前, 低轨导航增强系统可采用高性能恒温晶振(Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO)替代传统卫星导航系统的原子钟作为星上唯一基准源。而选取什么指标的晶振可满足导航增强系统的定位精度, 是目前研究的重点方向。

有关恒温晶振作为导航增强系统星载频率源

的研究, 文献[1]介绍了我国低轨卫星“珞珈一号”的在轨试验情况, 试验表明卫星搭载高性能 OCXO 代替原子钟能够联合现有的 GNSS 提供增强导航服务, 由此验证了这一方法的可行性。文献[2]介绍了一种利用 GNSS 信号驯服 OCXO 的方法, 可通过 GNSS 信号对 OCXO 的频率准确度进行校准, 使得 OCXO 的频率准确度和长期稳定度得到很大程度的提升。此外文献[3]提出了一种基于 Ka 星间链路的导航星座守时方法, 通过星间链路建立时间比对网络, 进行星座整网时间同步, 可实现星间时间基准天稳达  $6 \times 10^{-15}$  的守时效果。由此可见, 借助 GNSS 信号驯服恒温晶振技术与星间时频传递技术, 可有效削弱 OCXO 长期频率稳定度对导航系统定位的影响, 而有关 OCXO 短期频率稳定度对导航增强系统定位精度影响方面的研究还有待开展。

针对上述情况, 本文分析了星载晶振短稳对导航增强系统 PPP 精度的影响, 通过 OCXO 短稳指标进行噪声反演, 并将模拟的晶振噪声影响附加到系统 PPP 定位模型中, 仿真结果表明: 选用不同量级的晶振会对导航增强系统 PPP 定位精度产生较大的影响, 在不考虑控制段对星上时频进行校正的前提下, 选用 E-13 量级的晶振更能满足导航增强系统厘米级的定位需求。

## 1 OCXO 短期频率稳定度及其噪声反演

### 1.1 OCXO 短期频率稳定度

晶振频率稳定度表征晶振在给定时间段内产生频率偏差的统计特性。OCXO 短期频率稳定度, 简称短稳, 通常指 1 000 s 以内时间段的频率偏差波动, 其可以在频域表征, 也可以在时域表征<sup>[4]</sup>。影响 OCXO 短期频率稳定度的因素主要为晶振内部的随机噪声, 其噪声过程可以在频域用幂律谱模型来表示, 即:

$$S_y(f) = h_a f^\alpha \quad (1)$$

式中:  $f$  表示傅里叶频率;  $S_y(f)$  表示频率偏差谱密度;  $h_a$  表示幅度,  $\alpha$  表示幂率谱指数。

此幂律谱噪声模型通常包括五种独立噪声过程, 依次为频率随机游走噪声、频率闪烁噪声、频率白噪声、相位闪烁噪声和相位白噪声, 呈线性叠加关系, 即:

$$S_y(f) = h_{-2} f^{-2} + h_{-1} f^{-1} + h_0 + h_1 f + h_2 f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_{\alpha=-2}^2 h_\alpha f^\alpha \quad (2)$$

式中  $S_y(f)$  为频率偏差谱密度,  $h_2$  为相位白噪声项,  $h_1$  为相位闪烁项,  $h_0$  为频率白噪声项,  $h_{-1}$  为频率闪烁项,  $h_{-2}$  为频率随机游走项。

由于晶振随机噪声包含时变的噪声, 其频率的随机起伏并不呈平稳的正态分布, 因此在时域常用阿伦(Allan)方差取代传统的标准方差来表征频率稳定度<sup>[5]</sup>。Allan 偏差定义为 Allan 方差的平方根, 即:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (3)$$

式中  $y_i(1, 2, \dots, M)$  为相对频率测量值,  $M$  为测量数据的个数,  $\tau$  为取样间隔。

Allan 偏差也可以利用相位测量值定义如下:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2\tau^2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (x_{i-2} - 2x_{i-1} + x_i)^2} \quad (4)$$

式中  $x_i(1, 2, \dots, N)$  为相位测量值;  $N$  为测量数据的个数,  $\tau$  为取样间隔。

Allan 方差与幂律谱之间存在如下的时频域转换关系:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) |H(f)|^2 df \quad (5)$$

代入五种幂律噪声的过程积分, 得:

$$\sigma_y^2(\tau) = h_{-2} \frac{(2\pi)^2}{6} |\tau| + h_{-1} 2 \ln 2 + h_0 \frac{1}{2|\tau|} + h_1 \frac{1}{(2\pi\tau)^2} \{3[2 + \ln(2\pi f_h |\tau|)] - \ln 2\} + h_2 \frac{3f_h}{(2\pi\tau)^2} \quad (6)$$

式中:  $f_h$  为测量带宽的高端截止频率;  $|H(f)|$  为传输函数, 有  $|H(f)|^2 = \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$ ;

### 1.2 OCXO 短期频率稳定度的噪声反演

由于幂律谱模型只提供了影响晶振短期频率稳定度的噪声类型及采样间隔  $\tau$  下相邻两次频率差值的统计分布特性, 并不能直观地反映在采样时刻晶振频率的真实偏差。结合 OCXO 短期稳定度的时频域表征, 首先分析五种噪声对 Allan 方差各自的贡献并根据每种噪声的时频特性进行逐一的噪声反演, 以达到模拟晶振真实状态下噪声影响的效果。反演方法的具体步骤为<sup>[6]</sup>:

Step1. 获取五个典型时间间隔 $\tau$ 上的Allan方差值, 以便于Allan方差的分解与确定;

Step2. 结合公式(6), 利用最小二乘法求解 $h_{-2}, h_{-1}, h_0, h_1, h_2$ 的值, 以确定各噪声成分在给定取样间隔 $\tau$ 上的Allan方差。

Step3. 结合Step2中所得的各种噪声成分的方差, 反演各主要噪声的频率误差序列。对于相位白噪声、频率白噪声和频率随机游走噪声都可以结合各自Allan方差并根据公式(3)(4), 用方差为1的标准正态分布随机数来模拟各种噪声的相位数据与频率数据。

Step4. 闪烁噪声(即 $1/f$ 噪声)并不遵循正态分布的随机特性, 其功率谱呈幂函数特性, 可利用频谱处理技术, 对白噪声时间序列的幅值谱进行离散傅里叶变换(DFT)处理, 以获得一种在频域具有任意谱斜率的闪烁噪声序列<sup>[7]</sup>。

图1显示了闪烁噪声产生的程序流程图, 其主要分为三个步骤: (i)在时域产生白噪声信号; (ii)对白噪声信号进行DFT, 对幅值谱系数进行操作, 以获得所需的闪烁噪声信号的新频谱, 并最后进行IDFT; (iii)对闪烁噪声信号在时域进行信号调整, 以保证均值为0, 标准差为1, 得到归一化 $1/f$ 噪声序列为 $b_k$ 。由式(3)计算其双采样方差 $\sigma_b^2(\tau)$ , 则模拟频率闪烁噪声的频率数据可取 $y_k = [\sigma_{-1}(\tau) / \sigma_b(\tau)] \cdot b_k$ , 设 $c_k = b_k - b_{k-1}$ , 计算其双采样方差为 $\sigma_c^2(\tau)$ , 则模拟相位闪烁噪声的频率数据可取 $y_k = [\sigma_2(\tau) / \sigma_c(\tau)] \cdot c_k$

Steps5. 将五种噪声各自独立的相对频率误差进行线性叠加即可模拟晶振在指定时间间隔 $\tau$ 上总噪声的相对频率误差 $f'$ , 即:

$$f' = \Delta f f_0 \quad (7)$$

其中:  $f_0$ 为晶振的标称频率,  $\Delta f$ 为晶振偏移频率。

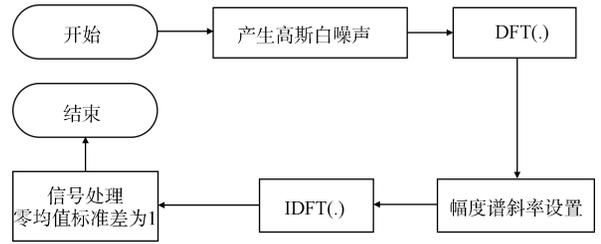


图1 闪烁噪声产生程序算法

Fig.1 Flicker noise generation procedure algorithm

## 2 精密单点定位原理

精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)是一种可实现厘米级定位的非差单点定位技术。该方法使用单台双频接收机, 结合IGS (International GNSS Service, 国际GNSS服务)发布的精密卫星轨道及精密钟差, 利用伪距和载波相位观测量进行坐标解算, 其基本定位原理为<sup>[8]</sup>:

$$P = \rho + c(dt_r - dT^i) + d_{\text{trop}} + \varepsilon_p \quad (8)$$

$$\lambda\phi = \rho + c(dt_r - dT^i) + d_{\text{trop}} + \lambda N + \varepsilon_\phi \quad (9)$$

式中, 观测值的电离层延迟误差通过双频信号组合消除,  $P$ 为无电离层伪距组合观测值;  $\lambda\phi$ 为无电离层载波相位组合观测值;  $\rho$ 为接收机与卫星间的几何距离;  $c$ 为光在真空中的传播速度;  $dt_r$ 为接收机钟差;  $dT^i$ 为卫星的钟差;  $N$ 为模糊度参数;  $d_{\text{trop}}$ 为信号传播方向的对流层延迟;  $\varepsilon_p$ 和 $\varepsilon_\phi$ 分别为两种组合观测值的多路径误差和观测噪声。

实际上, 精密单点定位PPP的过程是将接收机钟差、载波相位整周模糊度、对流层延迟等视为待估参数, 并针对各个参数选择适当的优化算法或模型, 配合观测值矩阵, 经过循环迭代, 直至解算到满足阈值的坐标的过程<sup>[9]</sup>, 其工作流程如图2所示:

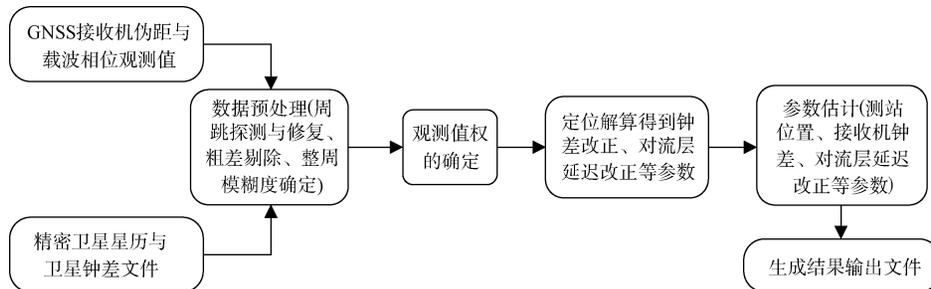


图2 PPP工作流程

Fig.2 Workflow of Precise Point Positioning

### 3 引入 OCXO 短稳噪声反演的 PPP 定位系统仿真模型

#### 3.1 引入 OCXO 短稳噪声反演的 PPP 定位模型

由于短稳指标只能为特定时间间隔上的频率偏差提供统计参考值, 因而仅通过单一短稳指标

来评估 OCXO 对 PPP 定位精度的影响不足以反映真实噪声环境下的定位影响程度。因而, 本文通过对 OCXO 短稳指标进行噪声反演, 建立了一种 PPP 系统定位模型, 来分析星载晶振短稳对导航增强系统 PPP 精度的影响, 系统模型如图 3 所示。

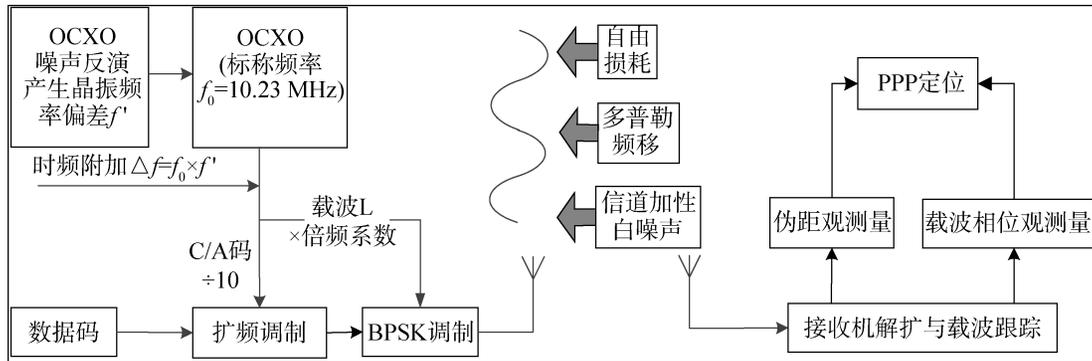


图 3 基于 OCXO 短稳噪声反演的 PPP 定位模型

Fig.3 PPP model based on OCXO short stable noise inversion

该方法根据 OCXO 的短稳指标进行合理的噪声反演并将模拟的晶振频率偏差  $f'$  附加于标称频率之上。受短稳影响的频率源经分频与倍频后不同程度地影响了数据码  $D(t)$ 、测距码  $C(t)$  与调制载波的传输频率。数据码  $D(t)$  通过测距码  $C(t)$  扩频及载波调制最终经发射天线发出。信号在星地链路中传输会经历自由空间衰减、多普勒频移  $f_D$  及信道加性白噪声的影响, 最终以埋于噪声基底的方式到达接收机。接收机射频前端将高频信号混频下变频为中频信号  $f_f$  送至基带信号处理模块。基带信号处理模块通过码环复制与信号相同的测距码实现信号的解扩并得到原始伪距观测量。同理, 接收机通过载波环跟踪复制近乎相同的信号载波从而得到原始载波相位观测量。伪距与载波相位观测量都被作为 GNSS 接收机的初始观测量应用到 PPP 定位系统中, 最终实现精密定位解算。

#### 3.2 OCXO 短稳噪声对 PPP 载波相位整数周的影响

OCXO 短期频率稳定度对 PPP 观测数据的影响主要体现在对载波相位观测值的影响。接收机在对卫星进行连续跟踪时, 相位观测值在不断增加, 计数器记录观测到的整周数  $\text{Int}(\phi)$ , 实际接收机锁相环用载波积分器来跟踪、记录由多普勒频移引

起的载波相位变化量, 并将其所保存的载波相位测量值  $\phi(n)$  分成周整数与周小数<sup>[10]</sup>。理论上载波积分器所积的是由多普勒频移引起的积分多普勒, 其瞬时输出即为瞬时多普勒频移, 实际上由于存在晶振短期频率稳定度的影响, 其积分实际为多普勒与短稳的共同结果, 而积分多普勒则反映了卫星与接收机之间距离的变化大小与方向, 所以晶振短稳噪声引起的频率偏移也被视为多普勒频移计入周数中, 从而对载波相位观测量产生影响。

积分多普勒为多普勒频移  $f_D$  对时间的积分, 即:

$$d\phi(t_k) = - \int_{t_0}^{t_k} f_D(t) dt \quad (10)$$

$d\phi(t_k)$  为从历元 0 到历元  $K$  这段时间内载波相位测量值的变化量。利用 Allan 方差反演恒温晶振噪声, 并以  $\tau$  秒为采样间隔采集晶振相对频率误差样本数据集  $f'$ , 则因晶振短稳对载波相位整数周的影响为:

$$N_r = f_0 \times \left( \int_{t_0}^{t_1} f'_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} f'_2 dt + \dots + \int_{t_{N-1}}^{t_N} f'_N dt \right) \quad (11)$$

其中  $f'_1, f'_2, \dots, f'_N$  为以  $\tau$  秒采样的晶振相对频率误差,  $t_0, t_1, \dots, t_N$  为以  $\tau$  秒为间隔的时间历元,  $N_r$  的单位为周。

### 3.3 OCXO短稳噪声对PPP载波相位小数周的影响

实际情况下,考虑OCXO短稳噪声产生的相对频率偏差 $f'$ 及多普勒频移 $f_D$ ,接收机在连续观测卫星时的接收信号为:

$$S_1(t) = A_1 D(t - \zeta) C(t - \zeta) \sin(2\pi(f + f_D + Kf_0 f')(t - \zeta) + \theta_0) + n_1 \quad (12)$$

其中 $A_1$ 为经自由衰减后的信号幅度, $f_0$ 为晶振的标称频率, $K$ 为调制载波的倍频系数, $\zeta$ 为信号从卫星端至地面接收机的链路传输时间, $\theta_0$ 为信号发射时刻的初相位, $n_1$ 为接收机端的信号噪声。

信号经射频前端处理下变频为中频 $f_F$ 后,接收机载波环复制载波信号为:

$$S'_1(t) = A_2 \sin(2\pi(f_F + f_\mu)t + \theta_0 + \theta_e - 2\pi(f_F + f_\mu)\zeta) + n_2 \quad (13)$$

其中 $f_F$ 为信号中频频率, $A_2$ 为接收机载波环复制载波的信号幅度, $f_\mu = f_D + Kf_0 f'$ 为时频与多普勒共同作用的频偏影响, $\theta_e$ 为接收机相位抖动误差, $n_2$ 为接收机复制载波信号噪声。

模拟卫星理想情况下的中频信号:

$$S(t) = AD(t)C(t)\sin(2\pi f_F t + \theta_0) \quad (14)$$

将模拟卫星信号与载波环复制载波相乘混频,并通过低通滤波器滤除高频成分,可得:

$$S(t) \cdot S'_1(t) = \cos(2\pi f_\mu t + \theta_e - 2\pi(f_F + f_\mu)\zeta) + n_3 \quad (15)$$

其中 $n_3$ 为经低通滤波器后的信号噪声。

求此信号相位即为附加OCXO短稳影响后的载波相位小数周观测值。

## 4 仿真分析

基于仿真模型,首先选取了短稳量级不同的晶振并根据其短稳指标利用Matlab仿真进行噪声反演,分析不同晶振的噪声变化趋势,然后建立星地信号传输链路环境并将噪声反演的时频影响附加到PPP定位模型中,最后分析晶振的短稳差异对PPP定位精度的影响。

### 4.1 OCXO噪声反演仿真

仿真选取三款秒稳量级不同的晶振,各晶振典型Allan方差参数如表1所示:

表1 各晶振典型Allan方差平方根值

Table 1 Typical Allan variance square root values for each crystal oscillator

晶振名称	典型Allan方差平方根值				
晶振1	2.0E-9/1 s	5.72E-9/0.1 s	4.62E-8/0.01 s	4.72E-9/10 s	1.47E-8/100 s
晶振2	1.0E-12/1 s	2.0E-12/10 s	5.0E-12/30 s	6.0E-12/50 s	8.0E-12/100 s
晶振3	3.0E-13/1 s	6.0E-13/10 s	7.0E-13/30 s	8.5E-13/50 s	1.0E-12/100 s

设置时间间隔 $\tau = 1$  s,分别对三款晶振进行噪声反演,仿真分析晶振的五项噪声特性。图4、图5、图6分别给出了晶振1、晶振2以及晶振3模拟产生的 $\tau = 1$  s时的相位白噪声、频率白噪声、频率随机游走噪声、频率闪烁噪声、相位闪烁噪声各自单独的相对频率误差曲线以及线性叠加后总噪声的频率误差曲线。图中纵坐标表示的都是相对频率误差 $\Delta f/f_0$ ,无量纲<sup>[11]</sup>;横坐标的样本数乘以时间间隔 $\tau$ 即为观测时间 $t$ 。比较三种晶振的噪声反演结果,在以上给定的典型Allan参数下,相位白噪声、频率白噪声这两种噪声均呈现出均值为0的平均波动特性;频率闪烁噪声以及相位闪烁噪声波动起伏大但游走趋势较为平坦;三款晶振的频率误差中起支配作用的均为频率随机游走项。因而总噪声在相同的观测时间内也呈现出与频率随机游走噪声相近的波动特性。这也是接收机在

长时间连续跟踪卫星时,载波环积分多普勒中晶振噪声误差项能够积累的主要原因。

### 4.2 PPP定位精度影响分析

利用高保真卫星精确轨道仿真软件建立无时频影响的星地链路传输模型,确立以北京站站址作为接收机坐标,选取四颗低轨卫星,其轨道高度均为970 km,系统采用UTC协调时间,坐标系采用地心地固坐标系。根据仿真结果,可以获取无时频影响的伪距 $P$ 与载波相位观测值 $\varphi$ ,作为后续数据处理的基础值。

将4.1节OCXO噪声反演的相对频率偏差 $f'$ 引入模型中,考虑时频系统对载波相位整数周的观测影响可以结合式(11)来求取 $N_f'$ 。为了获取载波相位小数周观测值,仿真采用Matlab模拟实际接收机载波相位获取与采集过程,表2给出了接收机配置项的仿真参数,采集仿真框图如图7所示。

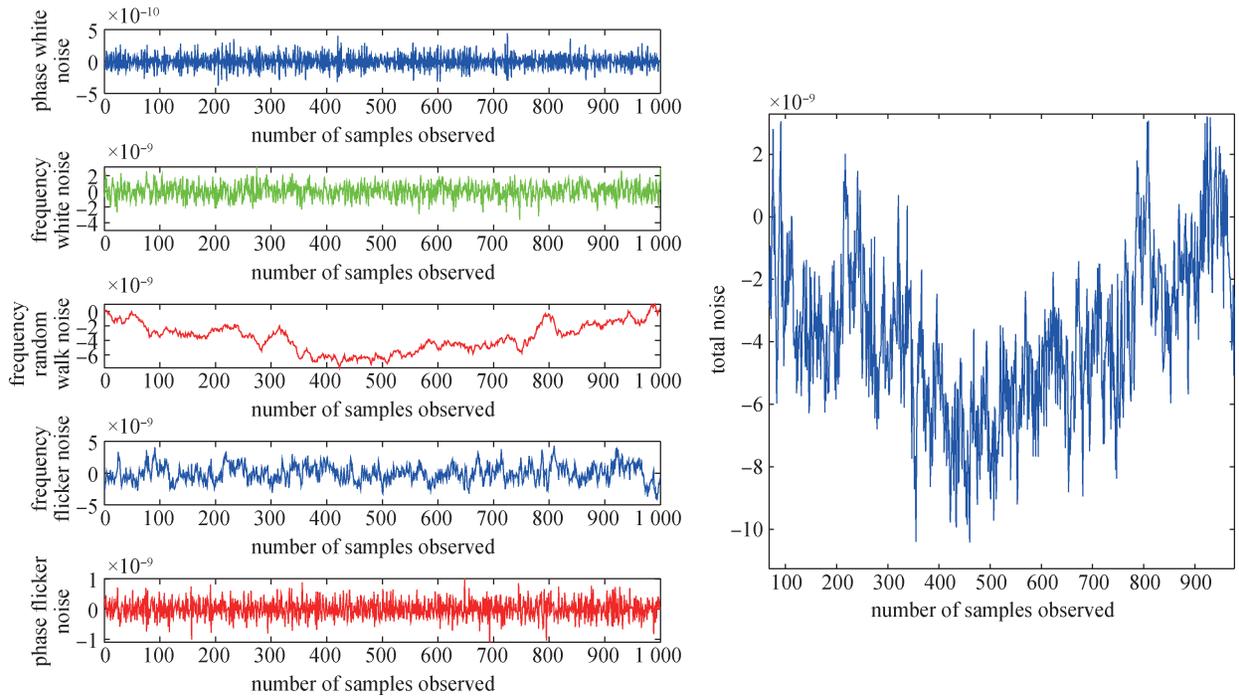


图 4 晶振 1 噪声反演结果

Fig.4 Inversion results of crystal 1 noise

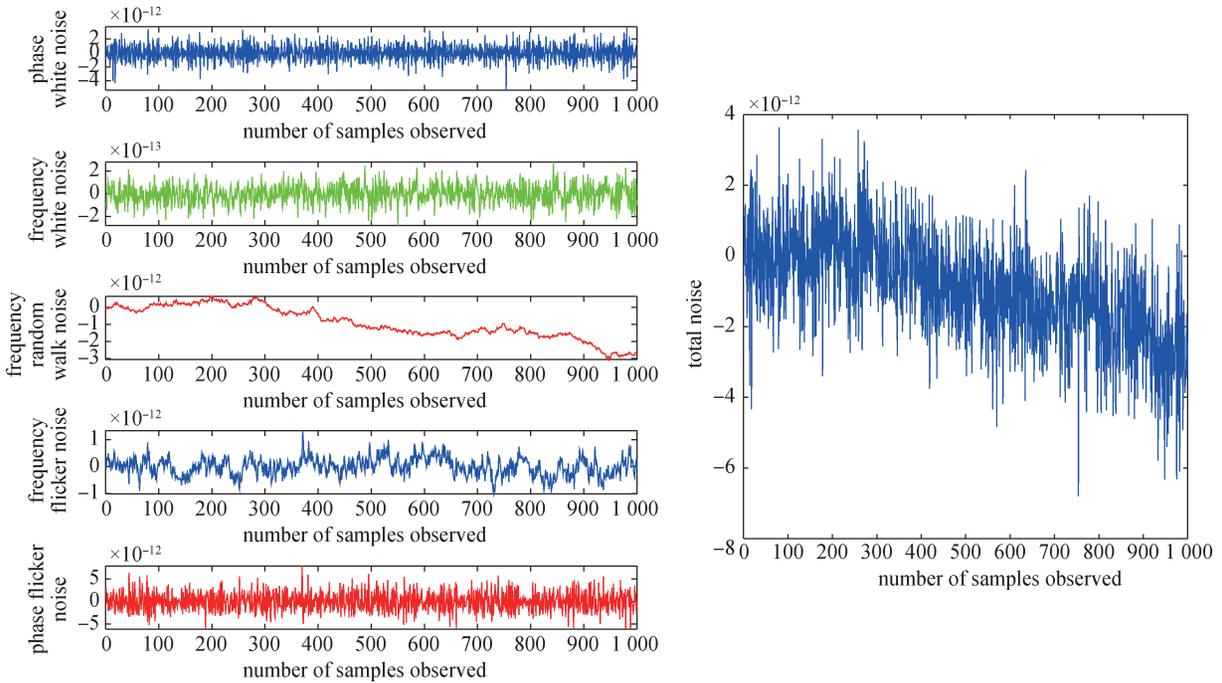


图 5 晶振 2 噪声反演结果

Fig.5 Inversion results of crystal 2 noise

考虑载波环对信号的相位测量存在相位抖动误差, 计算系统总相位抖动均方差  $\sigma_i$  为:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\text{PLL}}^2 + \sigma_v^2 + \sigma_A^2} \quad (16)$$

其中  $\sigma_{\text{PLL}}$  为载波环热噪声,  $\sigma_v$  为用户运动与接收装

置的机械颤动引起的接收机基准振荡频率的抖动,  $\sigma_A$  为本地晶振噪声引入的相位抖动噪声, 相关各项计算方法可参考文献[9]并代入表 2 中的接收机配置参数, 最终可得接收机总相位抖动均方差为  $10.17^\circ$ 。

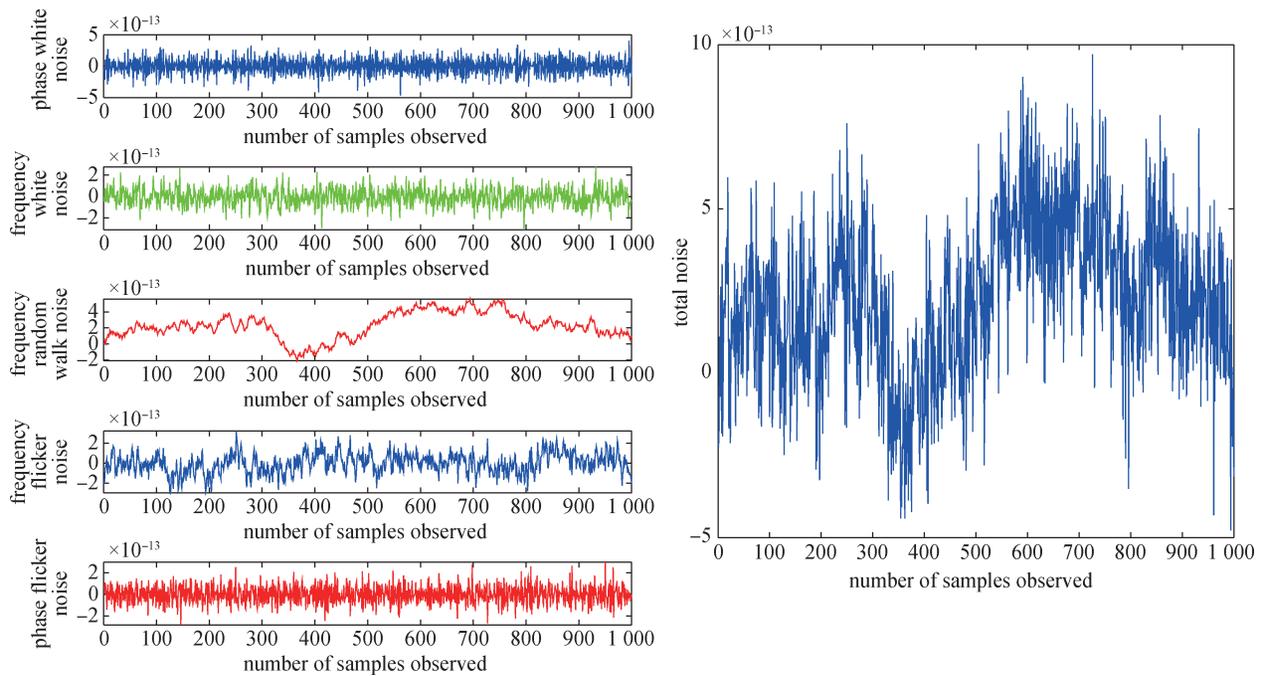


图6 晶振3噪声反演结果

Fig.6 Inversion results of crystal 3 noise

表2 接收机参数配置

Table 2 Receiver parameter configuration

参数名称	参数值
中频信号频率	5 M
信号采样频率	12 M
积分低通滤波器带宽 $B_L$	200 Hz
环路滤波器带宽 $B_C$	100 Hz
接收机 Allan 方差	$2 \times 10^{-9}$
载波环复制载波信噪比	15 dB

考虑二阶载波锁相环的稳态跟踪误差  $\theta_e$  为:

$$\theta_e = \frac{1}{w_n^2} \frac{d^2 R}{dt^2} \cdot \frac{360}{\lambda} \quad (17)$$

其中  $\theta_e$  单位为  $^\circ$ ,  $R$  代表卫星与接收机之间的距离,  $\frac{d^2 R}{dt^2}$  为距离对时间的  $N$  次导数,  $\lambda$  为高频载波波长,  $w_n$  为环路特征频率, 相关参数可通过高保真卫星仿真软件报告获取。

载波环相位抖动误差与稳态跟踪误差作为载波 NCO 生成本地复制中频信号的总相位测量误差, 通过采集任意观测时刻的本地复制中频信号的相位, 可获取载波相位观测值的小数周  $\psi$ 。将仿真的载波相位小数周  $\psi$  与时频引起的整周数计数误差  $N_f$  附加到无时频误差的载波相位观测值中, 即可获得时频影响下的载波相位观测值  $\Phi$ 。

分别将在晶振 1、晶振 2、晶振 3 时频影响下的观测数据代入到 PPP 系统定位模型中, PPP 数据处理策略如表 3 所示。图 8 为选取晶振 1 作为星上频率源时, 接收机 PPP 定位收敛后的 1000 s 连续观测时间内 PPP 系统定位在 E(东)方向、N(北)方向、U(天)方向的距离偏差。由图可知, 选取秒稳为 E-9 量级的晶振即使在 10 s 的接收机连续观测时间内也只能达到米级的定位效果, 远不能达到厘米级的定位精度。在中长观测时间内, 如果没有

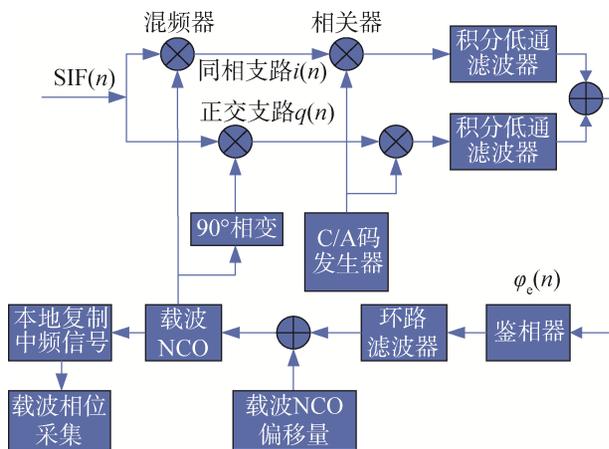


图7 载波相位获取与采集框图

Fig.7 Block diagram of carrier phase acquisition and acquisition

对星上时频进行及时的调整, 则此卫星难以满足定位的需求。

表 3 PPP 数据处理策略

Table 3 PPP data processing strategy

参数	处理策略
观测值	消电离层组合观测值
截至高度角	10°
采样间隔	10 s
卫星轨道	精确仿真轨道
卫星钟差	仅短稳造成的时频影响
接收机钟差	白噪声
对流层延时	Saastamoinen
卫星天线 PCV	改正
接收机天线 PCV	改正

图 9 为选取晶振 2 与晶振 3 作为星上频率源时, 接收机 PPP 定位收敛后的 1 000 s 连续观测时间内 PPP 系统定位的距离偏差。由图对比分析使用两款晶振作为星上频率源的 PPP 定位结果, 发现选取秒稳为 E-12 与 E-13 量级的晶振在卫星短期观测时间段内(100 s 内)在 E、N、U 方向均能达到系统定位 < 5 cm 的定位效果, 但在中长期观测时间段(500 s 内), 秒稳为 E-12 量级的晶振在 N、U 方向已不能

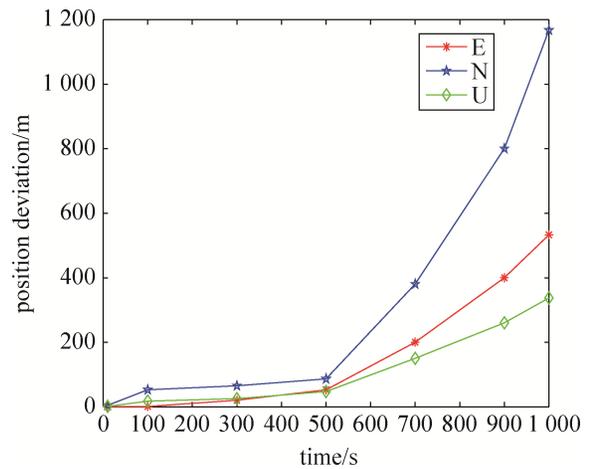


图 8 选取晶振 1 的 PPP 系统定位误差

Fig.8 The PPP system positioning error of crystal oscillator 1 is selected

达到厘米级的要求, 需要地面测控或星间链路对星上时频在中长段观测时间内作出纠正。而秒稳为 E-13 的晶振 3 在长期观测时间段内(1 000 s)仍能保持厘米级的定位效果。因而对于厘米级定位精度的要求, 若星上时间调整颗粒度在 100 s 内可以选用短稳为 E-12、E-13 的晶振。而选用量级为 E-13 的晶振 3, 在无星上时频调校的情况下, 其系统定位精度在中长段观测时间内表现更优。

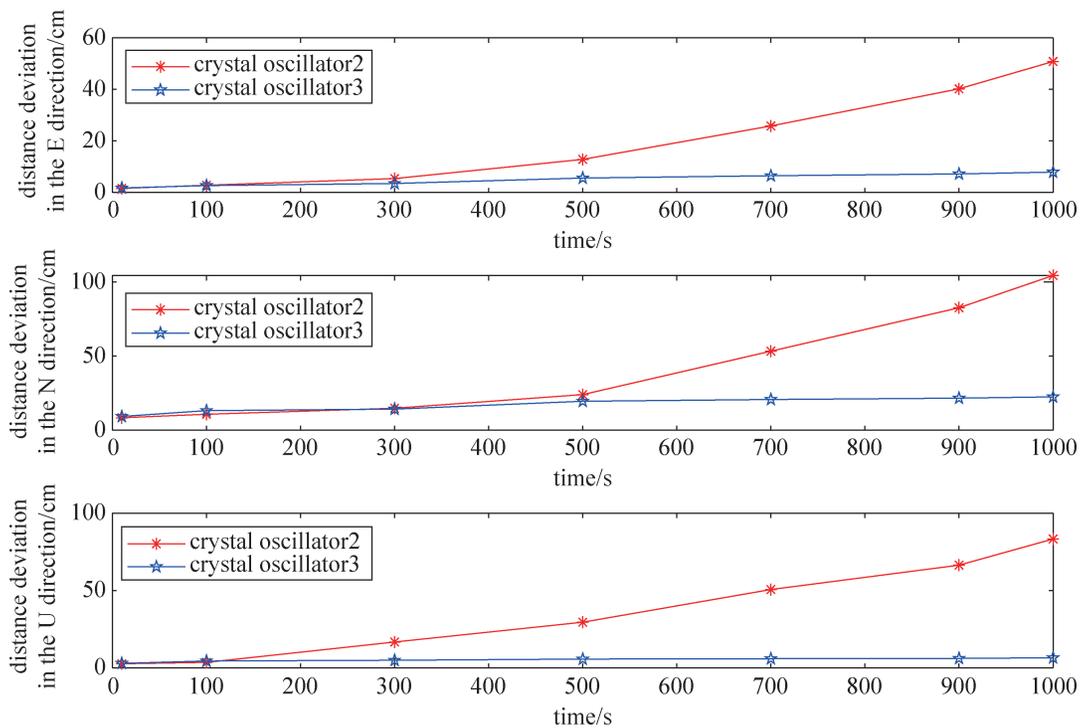


图 9 选取晶振 2 与晶振 3 的 PPP 系统定位误差

Fig.9 The PPP system positioning errors of crystal oscillator 2 and crystal oscillator 3 are selected

## 5 结束语

本文通过建立基于OCXO短稳噪声反演的PPP定位模型来分析星载晶振短稳对导航增强系统PPP精度的影响。系统仿真结果表明：选用短稳量级为E-9的晶振，不能满足系统PPP定位的需要；选用短稳量级为E-12、E-13的晶振，其在短期观测时间段内(100 s内)均可达到厘米级定位精度的要求；而选用E-13量级的晶振在中长段观测时间内(1 000 s内)表现更佳。由此可见，该分析可在用户给出定位需求时，提出合理的时频指标约束，为整个时频系统的设计提供指标参考，方便对导航增强时频系统进行更高质量的设计。

### 参考文献

- [1] 张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.  
ZHANG Xiaohong, MA Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087. DOI:10.11947/j.AGCS.2019.20190176.
- [2] 鲁刚, 何在民, 王璐璐, 等. GNSS快速驯服高稳晶振的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2022, 30(8): 31-35.  
LU Gang, HE Zaimin, WANG Lulu, et al. Design and implementation of GNSS for fast taming high stable crystal oscillators[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(8): 31-35.
- [3] SUN L, HUANG W, GAO S, et al. Joint timekeeping of navigation satellite constellation with inter-satellite links [J]. Sensors, 2020, 20(3): 670.
- [4] 李孝辉. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 张军. 导航高精度时频基准源生成技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [6] 寇艳红, 张其善. GPS接收机中晶振误差的模拟方法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(8): 1319-1324.  
KOUYanhong, ZHANG Qishan. A method for simulating the crystal oscillator errors in GPS receiver[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(8): 1319-1324.
- [7] Zhivomerov H. A method for generating colored noise[J]. Romanian Journal of Acoustics and Vibration, 2018, 1(1): 14-19.
- [8] 张小红, 刘经南. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 19-22.  
ZHANG Xiaohong, LIU Jingnan. Application of precise positioning in airborne survey[J]. Geomatic and Information science of Wuhan University, 2006, 31(1): 19-22.
- [9] 张提升, 郑建生, 章红平, 等. GNSS接收机晶振参数对载波相位测量的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(12): 1413-1417.  
ZHANG Tisheng, ZHENG Jiansheng, ZHANG Hongping, et al. Oscillator effects on carrier-phase measurements in GNSS receiver[J]. Geomatic and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(12): 1413-1417.
- [10] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [11] 谭俊雄, 郭文飞, 胡宁松, 等. 利用精密单点定位技术评估晶振频率稳定度[J]. 电讯技术, 2019, 59(5): 606-611.  
TAN Junxiong, GUO Wenfei, HU Ningsong, et al. Evaluation of crystal frequency stability using precision point positioning technology[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(5): 606-611.

### [作者简介]

刁文婷 1997年生，硕士研究生，主要研究方向为微小卫星载荷系统设计。

郑戈 1976年生，博士，研究员，主要研究方向为微小卫星载荷系统设计。

王冬冬 1982年生，博士研究生，高级工程师，主要研究方向为微小卫星载荷系统设计。

(本文编辑：潘三英)