DOI：10.13875/j.issn.1674-0637.2019-04-0292-09

局域无线时间同步系统伪码测距环路优化

湛小蕾[1,3]，刘音华[1,2,3]，张慧君[1,2]，李孝辉[1,2,3,4]

（1. 中国科学院 国家授时中心，西安 710600；
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室，西安 710600；
3. 中国科学院大学，北京 100049；
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 101048）

摘要：为实现局域无线时间同步系统多个时钟的同步，达到时间同步高精度的需求，基于双向伪码测距原理对伪码测距环路进行了跟踪精度的性能优化分析。首先通过分析局域无线时间同步系统下跟踪环路传统的实现结构，利用无电文调制的导频通道辅助数据通道的跟踪结构来优化环路。其次在给出影响码跟踪环测量误差的基础上，对环路的参数进行了分析与优化。最后结果表明双通道辅助跟踪结构，有助于增加跟踪积分时间，减小跟踪误差。同时低动态环路下载噪比的提高与窄环路带宽的减小均可减少码跟踪环的测量误差，从而提高跟踪精度和时间同步的精度。

关键词：无线时间同步；双向伪码测距；双通道辅助跟踪；跟踪精度；跟踪误差

Pseudo-code ranging loop optimization for local area wireless time synchronization system

ZHAN Xiao-lei[1,3], LIU Yin-hua[1,2,3], ZHANG Hui-jun[1,2], LI Xiao-hui[1,2,3,4]

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: In order to realize the local wireless time synchronization system and achieve the requirement of high precision for the time synchronization, this study optimized the tracking accuracy of the pseudo-code ranging loop based on the principle of bidirectional pseudo-code ranging. Firstly, the traditional implementation structure of the tracking loop in local wireless time synchronization system was analyzed, then the tracking signal structure of the auxiliary signal channel was optimized by the pilot signal channel without the message modulation to optimize the tracking loop structure. Secondly, based on the measurement error of the influence code tracking loop, the parameters of the loop which combined with the wireless time synchronization system were analyzed and optimized. The final results shown that the dual-channel auxiliary tracking algorithm was

收稿日期：2019-04-18；接受日期：2019-06-02
基金项目：中国科学院“西部之光”人才培养计划西部青年学者资助项目（XAB2016A05）
作者简介：湛小蕾，女，硕士，主要从事无线时间同步收发器处理研究。

helpful to increase the tracking integration time and reduce the tracking error. The improvement of the static loop downloading noise ratio and the narrow loop bandwidth can decrease the measurement error of the code tracking loop, thus the tracking accuracy and the precision of time synchronization can be improved.

Key words: wireless time synchronization; two-way pseudo-code ranging; two-channel auxiliary tracking; tracking accuracy; tracking error

0　引言

局域无线时间同步系统具有精度高、设备简单以及布置灵活等优点，在许多重要领域都有着迫切的应用需求和前景。例如，现代军事靶场、无线传感器网络以及大型建筑物内部等都需要点对点、甚至分布式的无线时间同步技术。因此，局域无线时间同步系统的设计与实现具有非常重要的意义。

而以上各领域中的不同系统是由非同源基站组成。当两地信号源无线传输时，非同源时钟导致不同设备所测得的结果存在钟差，无法进行统一的分析与处理。所以高精度无线时间同步作为一种能够为上述各领域场景提供技术支撑与便利的方法，适用于可视距离下的无线时间同步。

本系统是指在低动态环境下多个地面基站相互之间进行伪码测距处理后消除钟差的系统。主要应用于消除有限距离下两测距终端的钟差，对时间进行比对，并对钟进行调整，使两测距终端时间同步。在此环境下，为改善同步精度，基于双向伪码测距原理可知双向同步精度与跟踪环路精度息息相关。故通道的环路结构会导致跟踪环路无法正常工作，积分时间、环路带宽、载噪比等环路参数也会影响跟踪环路的测量误差与跟踪精度[1]。因此本文首先通过研究通道结构来改善跟踪精度，其次为适应低动态环境，本文分析了环路参数与跟踪环测量误差的关系，以便对环路进行优化，从而降低测量误差，改善同步精度。

1　双向伪码测距原理

局域无线时间同步系统是指在两地面站安装信号发射装置和接收装置进行测距信号互发互收的系统。利用伪码测距原理在两测距终端分别以自身时钟为基准发射前向测距信号和反向测距信号。其中一端通过跟踪计算得到本地伪距，并从跟踪到的电文中解析出异地伪距。该测距方法中，前向测距信号和反向测距信号路径相同但方向相反，可最大限度地消除由传播路径延迟引起的误差，从而实现两测距终端的高精度时间同步[2–4]。双向单程伪码测距如图 1 所示。

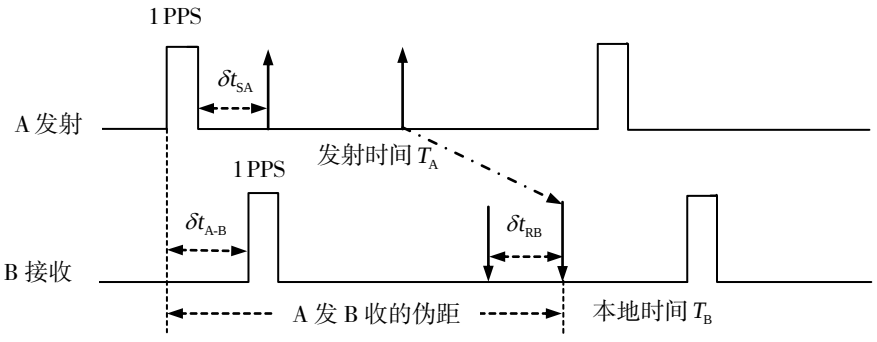


图 1　双向单程伪码测距

如图 1 所示，设 r 为 A、B 两端的真实距离，光速为 c，δt_{SA} 为 A 端的发射通道时延，δt_{RB} 为 B 端接收通道时延，$\delta t_{\mathrm{A\text{-}B}}$ 表示 A、B 两端时钟的钟差，两端都以 1 PPS 上升沿为计时起点且 T_{B} 、T_{A} 分别表示 B 端的本地时间和 A 端的发射时间，那么根据无线传输，本地时间减去发射时间后只剩下电波的传输时延和两地的钟差，故可得到式（1）：

$$T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}}=\frac{r}{c}+\delta t_{\mathrm{SA}}+\delta t_{\mathrm{RB}}-\delta t_{\mathrm{A\text{-}B}}。\tag{1}$$

根据伪码测距原理，可得伪距 $\rho=(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})\times c$。设 $\delta t_{\mathrm{B\text{-}A}}=-\delta t_{\mathrm{A\text{-}B}}$，同理，A、B 两地互发互收的伪距方程如下式（2）和（3）所示：

$$\rho 1=r+(\delta t_{\mathrm{B\text{-}A}}+\delta t_{\mathrm{SA}}+\delta t_{\mathrm{RB}})\times c\,,\tag{2}$$

$$\rho 2=r+(\delta t_{\mathrm{A\text{-}B}}+\delta t_{\mathrm{SB}}+\delta t_{\mathrm{RA}})\times c。\tag{3}$$

两地的钟差可以通过伪距与两地的几何距离、收发通道时延求差得到。式（2）和（3）等号两边分别求差，得到时差双向计算公式，如式（4）和（5）所示：

$$\rho 1-\rho 2=2\delta t_{\mathrm{B\text{-}A}}\times c+(\delta t_{\mathrm{SA}}+\delta t_{\mathrm{RB}}-(\delta t_{\mathrm{SB}}+\delta t_{\mathrm{RA}}))\times c\,,\tag{4}$$

$$\delta t_{\mathrm{B\text{-}A}}=\frac{\rho 1-\rho 2}{c}-(\delta t_{\mathrm{SA}}+\delta t_{\mathrm{RB}}-(\delta t_{\mathrm{SB}}+\delta t_{\mathrm{RA}}))\,,\tag{5}$$

式（4）和（5）中，$\rho 1$、$\rho 2$ 分别代表 A 端和 B 端的伪距测量值。

在 A、B 两地的无线收发装置相同的情况下，式（5）中的收发通道时延差几乎可以忽略不计。因此，可以计算得到两地的钟差 $\delta t_{\mathrm{B\text{-}A}}$。已知限制伪码测距精度的因素有两个：伪码码元宽度和接收机的跟踪精度[5]。在低动态速度为 10 m/s 环境下，为达到时间同步精度为 ns 级以下的指标，本文通过减小码宽采用 5.115 MHz 的码元信号来增大测距精度，同时通过分析码环路以及优化跟踪环路参数来提高跟踪精度。

2 环路结构分析与优化

局域无线时间同步系统的发射端采用 5.115 MHz 的伪码以及 5 kb/s 的数据率。若在发射通道中采用传统单一的信号调制方式，即扩频码上调制时间同步电文数据，然后在载波信号上调制扩频码信号，那么接收通道在数据跟踪时，相干积分过程会受到电文数据比特位翻转的限制，故最大预检积分时间只能与电文比特时间一致，所以只能设为 0.2 ms，否则就不能保证跟踪环路锁定。且 0.2 ms 的预检积分时间使信道载噪比降低，误码率增大，使传输数据在接收端难以解调。传统单一的通道跟踪结构如图 2 所示。

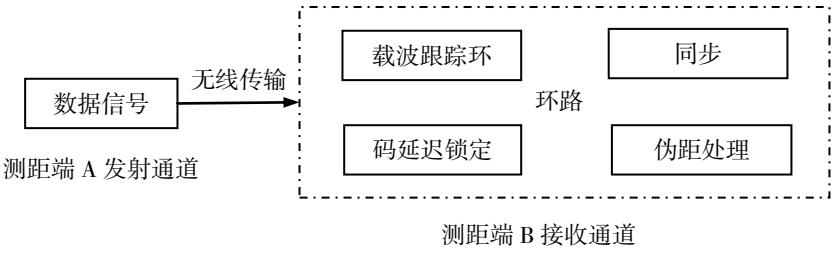


图 2 传统单程测距信号环路模型

对比图 2 的传统环路，为增大载噪比并成功解调数据，在无线时间同步跟踪环路中，采用双通道辅助环路结构。双通道辅助环路结构中发射的中频信号由不调制任何数据电文的导频信号和数据信号组成，且两者严格同步。因此在仅跟导频通道信号的条件下，不受电文比特翻转的限制，预检积分时间变长，使跟踪通道载噪比增大，从而提高跟踪精度。下图 3 则为导频通道与数据通道整个跟踪环路的设计结构。

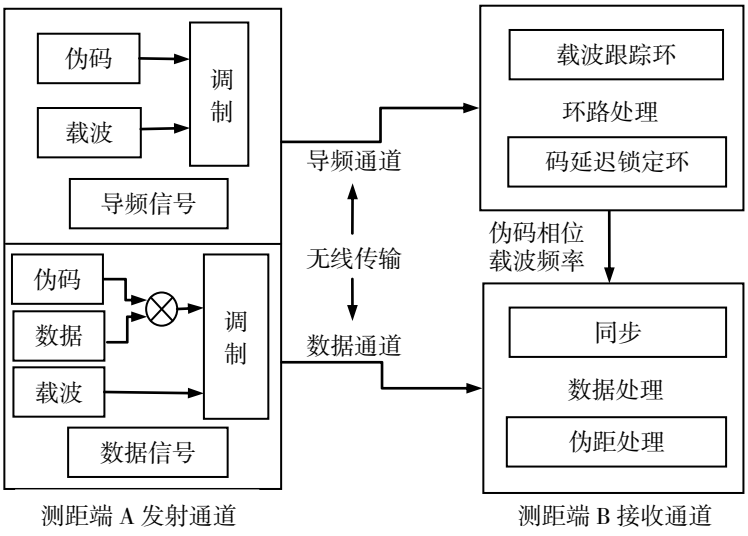


图 3　无线时间同步系统单程测距信号环路模型

如图 3 所示，测距端 A 的发射通道中包含同相的导频和正交的数据两条信号支路，其中两条信号支路中的伪码采用码分多址的方式。在测距端 B 的接收通道，由于预检积分时间较长，能够在高载噪比的条件下跟踪导频支路信号，计算出本地载波频率以及相位。然后，数据支路通道根据本地载波频率以及相位进行数据解调以及伪距处理。

3　环路参数选择

在信号收发处理器中，伪距观测量是根据码跟踪环环路对发射信号的同步跟踪而获得的。因此，码环路的跟踪误差是伪距测量误差的直接来源。所以在低动态环境下，选择合适的环路参数使伪距测量误差可满足指标要求，对地面基站之间的收发信机测距准确度和稳定度也至关重要。与此同时，可通过式（5）求出更加精确的钟差，从而对两地的时钟进行调整。

3.1　码环跟踪误差

在局域无线时间同步系统中，码环的跟踪误差主要是由两部分组成：热噪声造成的热噪声颤动误差以及由多普勒或设备间相互运动引起的动态应力误差[6]。由于该系统是在低动态环境下测试，设置动态速率为 10 m/s。码环经验方法门限是由环路所有的误差源造成的抖动的 3σ 值，其值不允许超过鉴别器线性牵引范围的一半所计算的，所以码跟踪环的跟踪门限值经验确定方法为：跟踪误差的码片的 3σ 颤动不能超过码片数表示的相关器间隔[7−11]，即：

$$3\sigma_{\mathrm{DLL}} = 3\sigma_{\mathrm{tDLL}} + R_e \ , \tag{6}$$

$$3\sigma_{\mathrm{DLL}} = 3\sqrt{\frac{4F_1 d^2 B_L}{C/N_0}[2(1-d) + \frac{4F_2 d}{T(C/N_0)}]} + R_e \leqslant d \ , \tag{7}$$

式（6）和（7）中，σ_{DLL} 为码跟踪误差的均方误差；σ_{tDLL} 为的 1σ 热噪声码跟踪颤动；R_{e} 为跟踪码环的动态应力误差（静态环境下忽略）；F_1 和 F_2 为码跟踪环鉴相相关因子，一般取值为 1/2；C/N_0 为载噪比（rad/Hz）；B_L 为环路滤波器带宽；T 为环路更新时间间隔；d 为超前和滞后伪码码片间隔。

由于码片速率比载波速率低的多，通常利用载波环测得的多普勒频移辅助码环，以消除码环中的动态误差，这有利于码环在非常窄的噪声带宽下进行伪距测量，进一步降低码环的热噪声颤动[12]。因为码片的最大相关是 0.5 码片，取码片间隔 $d=0.5$，根据以上因子可简化得到二阶码跟踪误差造成时间抖动公式为

$$\sigma_{\mathrm{DLL}}=\sqrt{\frac{B_L}{2C/N_0}\left[1+\frac{1}{T(C/N_0)}\right]}\quad（码片）。\tag{8}$$

因环路采用导频辅助数据结构，故可将积分时间提高，本文选取积分时间 $T=1\,\mathrm{ms}=1\times10^{-3}\,\mathrm{s}$；当取码环路带宽 $B_L=0.5\,\mathrm{Hz}$ 时；因为码环误差随载噪比的升高而降低，根据实验经验值，取载噪比为 50 dB，即式中 C/N_0 的取值转化成功率之比为 10^5；因此计算得到码测量误差为 $\sigma_{\mathrm{DLL}}=0.002\,24$ 码片，已知码片宽度对应的时间为 $\dfrac{\sigma_{\mathrm{DLL}}}{F_c}$，$F_c=5.115\,\mathrm{MHz}$ 为伪码的码片速率；c 为光速，可以计算得到的码测量误差时间为 0.438 ns。在忽略其他因素导致的测距误差下，理论情况总的测距误差精度适用于同步系统之中。不同环路参数下二阶码环跟踪环测量误差与载噪比的关系如图 4 所示。

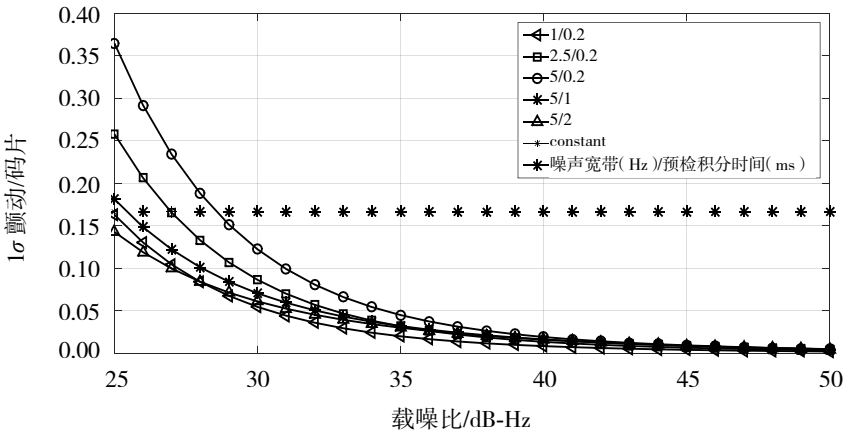


图 4 不同环路参数下二阶码环跟踪环测量误差与载噪比的关系

由图 4 可知，在低动态环境下码跟踪环码片颤动与载噪比、预检积分时间以及环路等效噪声带宽密切相关：载噪比随着预检积分时间的减小而增大，使得环路的 $1\,\delta$ 热噪声码跟踪颤动增加，从而导致测量误差增大；当测量误差限定在跟踪门限内时，测量误差随着环路带宽的减小而减小，随着预检积分时间的增大而减小。以下对预检积分和环路带宽进行分析与优化，减小热噪声，提高码环路的测距准确度的同时改善同步精度。

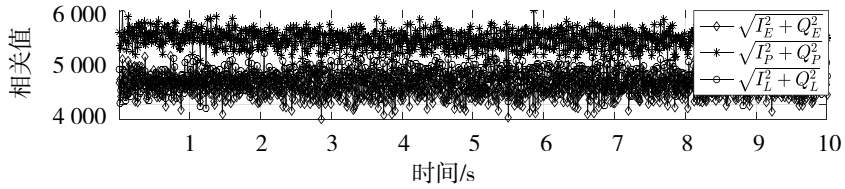
3.2 环路参数分析与优化

增加载噪比 C/N_0，减小环路带宽都会减小热噪声，增加预检积分时间会减小平方损耗，从而也减小了热噪声[13]。与此同时，预检积分时间可通过双通道辅助跟踪结构来增加，环路带宽可通过载波环辅助码环来减小，故为了减小热噪声提高测距精度，以下主要对预检积分时间和环路带宽参数进行了分析与优化[14]。

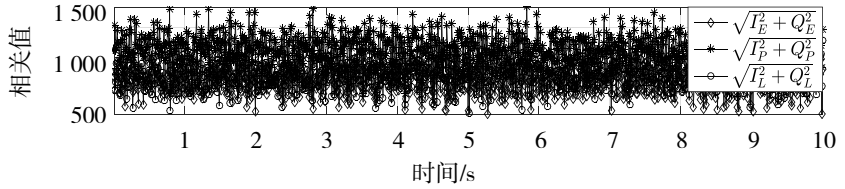
3.2.1 预检积分时间

与单通道的跟踪结构相比，双通道辅助跟踪结构因导频通道只调制伪码，故不存在数据的比特翻

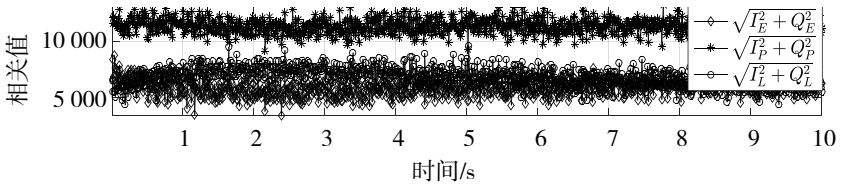
转问题。而双通道在不考虑比特翻转的情况下，可适当增加预检积分时间，提高信噪比，改善跟踪精度。图 5 对积分时间分别为 0.2 ms 的单通道、1 ms 的单通道及 1 ms 的双通道下的环路跟踪结果进行了分析。



（a） 0.2 ms 单通道跟踪结果



（b） 1 ms 单通道跟踪结果



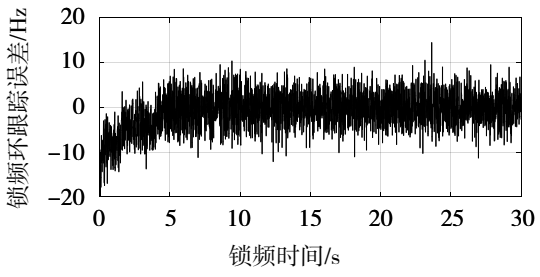
（c） 1 ms 双通道跟踪结果

图 5　不同积分时间下单通道和双通道跟踪结果

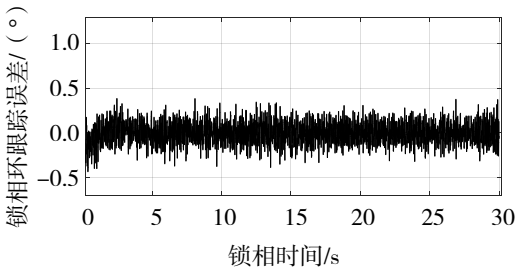
对图 5 分析可知，当设置预检积分时间为 0.2 ms，单通道跟踪成功，即时支路相关值与超前、滞后相关值比例为 1.3 倍，增大预检积分时间为 1 ms，由于比特翻转，单通道跟踪完全失锁，而双通道辅助跟踪环路在只跟导频通道的情况下即时支路相关值远大于超前、滞后支路相关值，比例为 2 倍。由公式（8）与图 4 可知增大预检积分时间的同时可提高环路的载噪比。但预检积分时间持续增加，环路参数更新率下降，多普勒偏移值无法及时获取，因此本系统的预检积分时间选取适当值为 1 ms。

3.2.2　环路带宽

基于无线时间同步伪码测距的基本原理，无线时间同步系统的同步精度只跟伪码跟踪环路有关，故本小节只对不同的码环路带宽进行比对。但在对码环环路带宽进行仿真的前提下对载波环环路带宽进行仿真，确定载波环路带宽。如图 6 所示，数据为同步系统的同步数据，动态设置为 10 m/s，锁频环带宽设为 10 Hz，锁相环设置为 15 Hz，可得到如下的跟踪结果[15]。



（a） FLL 鉴相器

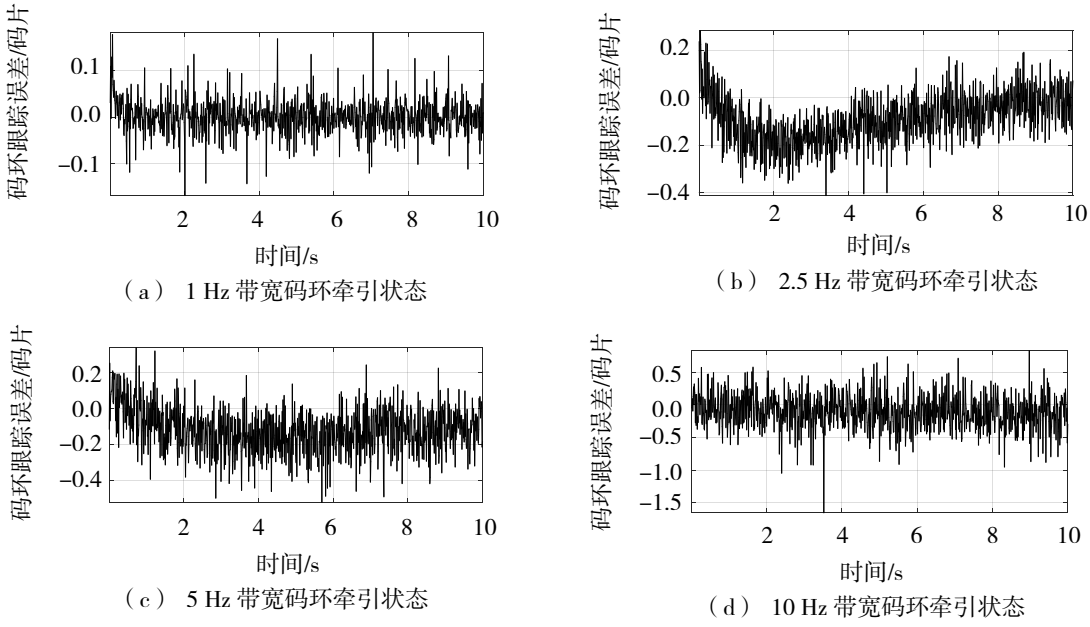


（b） PLL 鉴相器

图 6　载波跟踪环路曲线

图 6 中，锁频环消除了绝大部分不稳定状态，在含有噪声的情况下只剩下 5 Hz 左右的频率偏差。锁相环在此基础上能够稳定跟踪频率相位，使得剩余相位误差约等于 0。如果锁相环单独工作，可计算得到相位误差为 1.871 2°[16-19]。

为了探讨跟踪环路的可行性，以及在不同环路阶数和环路噪声带宽等情况下的性能，在 Matlab 中对跟踪环路进行了仿真。下列仿真数据环路直接采用二阶锁频辅助三阶锁相跟踪环，伪码码速率选为 5.115 MHz，以及带纠错编码的 5 kb/s 电文来提高伪码跟踪精度。收到的仿真数据采样率为 62 MHz，信号功率为 0.5 W。不同带宽码环跟踪误差示于图 7。



（a） 1 Hz 带宽码环牵引状态

（b） 2.5 Hz 带宽码环牵引状态

（c） 5 Hz 带宽码环牵引状态

（d） 10 Hz 带宽码环牵引状态

图 7 不同带宽码环跟踪误差

由图 7 码跟踪环路噪声带宽对环路牵引状态的稳定分析可知：较宽的环路带宽能够使环路稳定较快，但是却存在较大的环路跟踪误差；反之较窄的环路带宽能够保证更高的环路跟踪精度和更小的稳态误差，但是却需要较长的稳定时间[20-24]。因无线时间同步系统侧重点在测距精度上，所以环路的稳定时间本文忽略不计。不同带宽码环跟踪误差结果示于表 1。

表 1 不同带宽码环跟踪误差结果

环路带宽/Hz	环路稳定时间/s	稳定跟踪误差（1σ）/码片
1.0	7.6	0.06
2.5	5.5	0.12
5.0	2.6	0.23
10.0	0.8	0.35

码环的跟踪误差是伪距测量误差的直接来源，选择合适的环路噪声带宽使伪距测量误差满足接收机的设计指标要求，是伪码跟踪环设计的重要环节[25-28]。在动态较小的收发信机中，通常要求码环跟踪误差小于 0.1 码片甚至更低，根据表 1 的仿真结果此时一般要求环路噪声带宽小于 5 Hz。

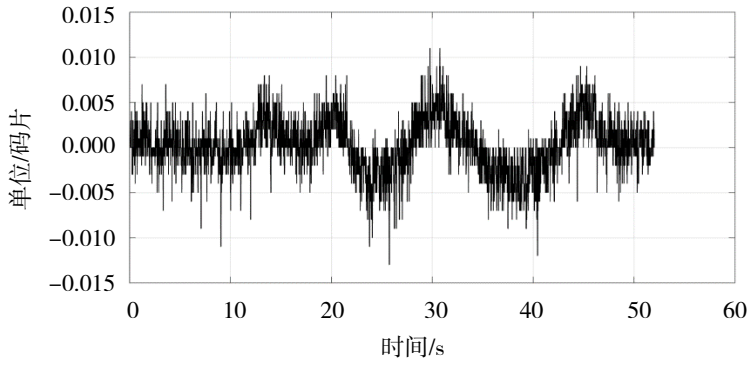


图 8　码环路带宽为 0.5 Hz 下伪码环路滤波器输出

按照上述环路参数，在低动态接收发信机中通过 DSP 向 Flash 写环路滤波器输出参数。从式（8）跟出来的码跟踪误差结果可知，伪码环路滤波器输出值的波动范围在−0.01 ~ 0.01 码片之间，符合表 1 得到的仿真结果，根据码片与码速率关系可计算出波动误差为−5 ~ 5 ns 之间。

4　结语

综上所述，本文在局域低动态环境下基于双向伪码测距原理对环路跟踪误差进行了分析与仿真。根据影响跟踪精度性能的关键性因素，可知单一环路结构或环路参数设计在局域低动态环境下并不能获得良好的跟踪性能，因此本文主要从环路结构与环路参数入手。通过以上环路结构的研究，提出了导频辅助数据通道的双通道结构，并将预检积分时间从 0.2 ms 提高到 1 ms，减小了平方损耗，从而减小了热噪声，最终减小了跟踪误差。与此同时，对跟踪环路的积分时间、环路带宽参数进行了性能仿真，提高载噪比与跟踪精度，最终改善同步精度。在对环路误差分析后，选取环路结构锁相环和锁频环带宽分别为 15 Hz 和 10 Hz，码环路采用环路带宽为 0.5 Hz 二阶码环。

参考文献：

[1] 黄波, 胡修林. 一种高精度系统时间同步方法[J]. 信息与控制, 2011(3): 347−351.

[2] 马红皎, 吴华兵, 李梦, 等. 一种双向测距与时间同步系统的设计与分析[J]. 时间频率学报, 2014, 37(1): 18−24.

[3] 李梦, 马红皎. 载波相位平滑伪距算法在双向测距与时间同步系统中的应用[J]. 时间频率学报, 2014, 37(4): 213−220.

[4] 马红皎, 李梦, 吴华兵, 等. 双向测距与时间同步系统中设备时延标定的研究[J]. 时间频率学报, 2015, 38(1): 30−37.

[5] 唐军, 谢澍霖, 王卫星. 航天扩频测控通信系统中伪码测距方法及精度分析[J]. 电讯技术, 2006(4): 91−95.

[6] 郭庆, 曾宏波. 卫星测控系统中伪随机码测距方法分析[J]. 通信技术, 2003(10): 41−43.

[7] 夏俊. GPS 接收机伪码测距方法及误差分析[J]. 电讯技术, 2010, 50(8): 26−29.

[8] 李柏渝, 陈雷, 李彩华, 等. 通道非理想特性对导航接收机伪码测距零值的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2138−2143.

[9] 仇梦跃, 吴涛, 马宏, 等. 伪码测距中码跟踪环的设计与实现[J]. 装备学院学报, 2006, 17(4): 83−86.

[10] 李俊生. 伪码测距算法研究与仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.

[11] 史明霞, 李辉, 沈汀. 伪码测距延迟锁定环路（DLL）性能分析[J]. 微计算机信息, 2006, 22(4): 130−131.

[12] GARRISON J L, BERTUCCELLI L, MOREAU M C. GPS code tracking in high altitude orbiting receivers[C]//Position Location and Navigation Symposium, [S.L.]: IEEExplore, 2002.

[13] 李鹏, 米红, 郑晋军, 等. 导航信号相位噪声指标分析[C] // 第二届中国卫星导航学术年会电子文集, 上海: 中国卫星

导航学术年会组委会, 2011.

[14] 宋帅, 王新龙. GPS 接收机跟踪环的抗干扰性能研究与分析[J]. 航空兵器, 2011(6): 29–35.

[15] 潘曦, 聂玉平. 精确打击武器中高动态 GPS 跟踪算法及改进研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(12): 1443–1447.

[16] 张玮, 刘睿, 刘新艳, 等. 高动态 GPS 接收机载波跟踪环路抗干扰性能研究[C] // 中国通信学会第六届学术年会论文集(下), 广州: 国际工业出版社, 2009.

[17] 罗璟, 裘正定. 高动态 GPS 接收机中载波环路的设计[J]. 铁路计算机应用, 2008, 17(2): 42–44.

[18] 田瑞丰, 李健, 刘峰. 新增 S, C 波段导航信号对载波环路测量误差的影响分析[J]. 数字通信世界, 2013(S2): 84–86.

[19] 马路, 石立国, 王竹刚. FLL 辅助 PLL 载波跟踪环路误差分析[J]. 测控技术, 2014, 33(9): 131–135.

[20] 赵鸿, 彭碧玉, 王宏卓, 等. 中频数字载波跟踪环路分析与计算[J]. 通信技术, 2009, 42(11): 43–45.

[21] 沈锋, 赵丕杰. 扩频导航接收机全数字伪码跟踪环性能研究[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(6): 701–705.

[22] 孙慧萍, 张丽, 王利红, 等. GPS 软件接收机码跟踪环的参数设计[J]. 山西大同大学学报（自然科学版）, 2018(2): 10–12.

[23] 周密, 张晓玲. GPS 接收机数字码跟踪环性能研究[J]. 全球定位系统, 2004, 29(2): 32–37.

[24] 李豹, 曹可劲, 马建国. GPS 软件接收机跟踪环路设计[J]. 电子设计工程, 2010, 18(2): 4–6.

[25] 左启耀, 袁洪, 林宝军. 高动态环境下 GPS 信号跟踪环路优化算法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 166–171.

[26] 瞿智, 杨俊, 杨建伟. 大误差条件下单频干扰引起的伪码跟踪误差研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 222–228.

[27] 李星, 王飞雪, 欧钢, 等. 卫星导航系统中多址干扰引起的伪码跟踪误差的分析[J]. 信号处理, 2008, 24(5): 885–888.

[28] 胡辉. GPS 接收机伪距测量方法研究[J]. 全球定位系统, 2008(4): 22–26.