

文章编号: 2095-4980(2018)01-0057-08

单边带辅助 BOC 信号跟踪方法设计

修德明¹, 代长勇², 常 青¹

(1.北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 二进制偏移载波调制是现代化后的卫星导航信号的主要特征, 可以为用户提供更高性能的服务, 然而其相关函数的多侧峰特点也在跟踪过程中引入了误锁的风险。针对二进制偏移载波 BOC(1,1) 信号, 提出并设计了一种利用单边带处理方法的无模糊特点来辅助 BOC 直接跟踪的方法, 从而达到既消除误锁风险又可进行高精度信号跟踪的双重目的; 进而对该方法的实现结构进行简化, 并针对实现结构的不足做出相应改进。经测试, 该方法可以实现对信号的无模糊跟踪并达到了较高精确度, 证明该方法相关设计的有效性和实用性。

关键词: 二进制偏移载波; 无模糊; 跟踪; 单边带辅助

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0057

A design of single-sideband aided BOC tracking method

XIU Deming¹, DAI Changyong², CHANG Qing¹

(1.School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Binary Offset Carrier(BOC) modulation is the main feature in the signals of modernized Global Navigation Satellite System(GNSS), and it provides users with services of higher performance while introducing risks of false locks due to the multi-side peaks of the correlation function, to the procedure of tracking. A design of tracking method is proposed targeting at BOC(1,1) signals, in order to reduce the risks of false locks and achieve a high accuracy of tracking simultaneously by implementing a sideband tracking to aid a BOC tracking loop. A simplified version of structure and corresponding improvements are designed. The proposed method and design are verified to be able to track signals accurately without blurring.

Keywords: Binary Offset Carrier; no-blurring; tracking; single sideband aided

现代化后的全球卫星导航系统(GNSS)信号广泛地应用了二进制偏移载波(BOC)调制, 信号的主相关峰更窄, 有利于跟踪定位。然而与传统 BPSK 信号不同的是, BOC 信号存在着由相关函数多峰性造成的跟踪模糊问题。为了解决该问题, 一些比较成熟的跟踪方法已经被提出。单边带方法^[1]又被称为 BPSK-like 法, 采用传统环路结构完成信号无模糊跟踪, 但是跟踪精确度相对较低。跳峰法^[2](Bump-Jump)在跟踪过程中增加了更加超前的早码支路和更加滞后的迟码支路, 通过检测早码支路和更加滞后的迟码支路两路相关结果来判断是否发生了误锁现象。跳峰法在跟踪过程中保留了 BOC 信号窄相关峰的特点, 但是其对误锁情况的纠正会有一定的滞后, 且会发生伪距突变; 另外, 由于高阶 BOC 信号相关函数主峰与侧峰高度相近, 跳峰法在对高阶 BOC 信号进行跟踪时效果并不理想。自相关侧峰消除技术^[3](Autocorrelation Side-Peak Cancellation Technique, ASPeCT)通过处理信号与伪码的相关结果和信号与副载波调制伪码的相关结果, 构造无模糊的 ASPeCT 相关函数。然而该方法减小了码环的牵入范围, 一旦码相位误差超过其相关峰宽度(即 BOC 信号主相关峰的宽度), 跟踪环路可能发生失锁。其他跟踪方法还包括 2N 法^[4]、双估计法^[5]等。

以上几种方法都可以实现对 BOC 信号的无模糊跟踪。本文则重点考虑了一种通过对单边带 BOC 信号进行跟踪来辅助对完整 BOC 信号跟踪的思路和方法, 即单边带辅助 BOC 信号跟踪: 以无模糊的单边带跟踪与高精度的完整 BOC 信号直接跟踪这 2 种最为简单、熟悉的方法的合理结合, 互相取长补短, 完成对 BOC 信号无模糊的高精确度跟踪。

1 BOC 调制

BOC 调制通过在信号调制过程中引入副载波调制环节以提高信号的综合性能。通常用 $\text{BOC}(\alpha, \beta)$ 来描述 BOC 信号的基本特征, 其中 $\alpha = f_s/f_0$, $\beta = f_c/f_0$, $f_0 = 1.023 \text{ MHz}$, f_s 为副载波频率, f_c 为伪码速率。 $n=2\alpha/\beta$ 称为 BOC 信号的调制阶数。BOC 信号的副载波一般为正弦相位的方波 $\text{sign}(\sin(2\pi f_s t))$ 或者余弦相位的方波 $\text{sign}(\cos(2\pi f_s t))$ 。一个 BOC 信号可以表示为:

$$s(t) = AD(t-\tau)C_{\text{PRN}}(t-\tau)\chi(t-\tau)\cos(\omega t + \omega_{\text{Doppler}}t + \theta) \quad (1)$$

式中: A 为信号幅度; τ 为信号延迟; $D(t-\tau)$ 表示导航数据电平; $C_{\text{PRN}}(t-\tau)$ 表示伪码; $\chi(t-\tau)$ 表示副载波; $\cos(\omega t + \omega_{\text{Doppler}}t + \theta)$ 表示载波; ω 为载波频率; ω_{Doppler} 为多普勒频偏; θ 为载波初相位。

由于信号结构中多了一层副载波, 卫星信号的相关函数形状与频谱形状不再仅仅取决于伪码特性。

由图 1~图 2 可见, GPS L1C 频点上所播发的 BOC(1,1)信号的相关函数具有明显的多峰性, 其鉴相曲线存在多个过零点, 如果直接套用对传统 BPSK 信号的跟踪方法, 则很有可能发生跟踪环误锁于侧峰位置的情况, 使最终的伪距测量值产生固定的偏差。以 GPS L1C 信号为例, 如果跟踪环错误锁定在侧峰位置, 伪距测量值会有约 146 m 的固定偏差, 对于导航系统来说是绝对无法容忍的。

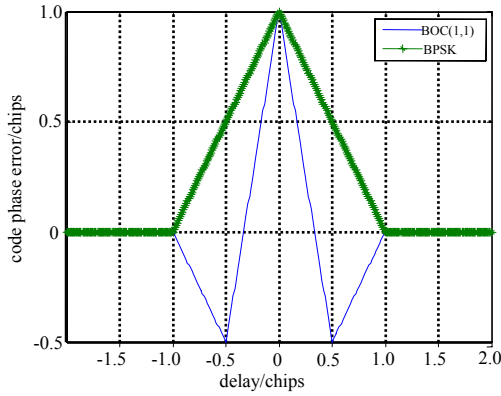


Fig.1 Auto-correlations of BOC(1,1) and BPSK
图 1 BOC(1,1)与 BPSK 的自相关函数

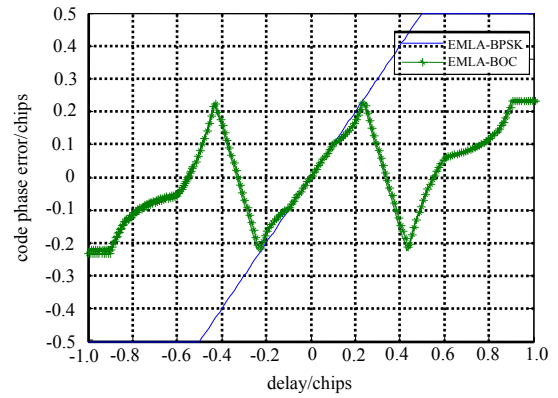


Fig.2 Phase detection curves of BOC(1,1) and BPSK
图 2 BOC(1,1)与 BPSK 的鉴相曲线

2 对 BOC 信号的单边带处理方法

边带处理方法最早针对 BOC 信号捕获而提出, 其同样可用于信号跟踪。将副载波 $\chi(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_s t))$ 进行傅里叶级数展开, 得到:

$$\chi(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_s t)) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sin(k\pi/2)}{k\pi} \sin\left(2\pi f_s t - \frac{(k-1)\pi}{2}\right) = \frac{2}{\pi} \sin(2\pi f_s t) + \frac{2}{3\pi} \sin(6\pi f_s t) + \frac{2}{5\pi} \sin(10\pi f_s t) + \dots \quad (2)$$

通过忽略高次项, 将方波形式的副载波近似看作频率为 f_s 的单频正弦波, 容易理解副载波对原信号的频谱搬移作用。BOC 信号被搬移至载频两侧的边带都完整地包含了定位所需的导航信息。因此, 可以考虑通过滤波器选取某一边带(上边带或下边带)的 BOC 信号, 再使用类似于传统 BPSK 信号跟踪环的结构进行进一步的处理。单边带处理方法的基本原理如图 3 所示。

此时跟踪环并不需要在本地产生副载波调制的伪码, 而只需要调整本地载频使之对应于单边带信号的频率, 并将测距伪码直接与信号进行相关, 就可以得到类似于传统 BPSK 信号的无模糊的相关函数, 从而实现对 BOC 信号的无模糊跟踪。

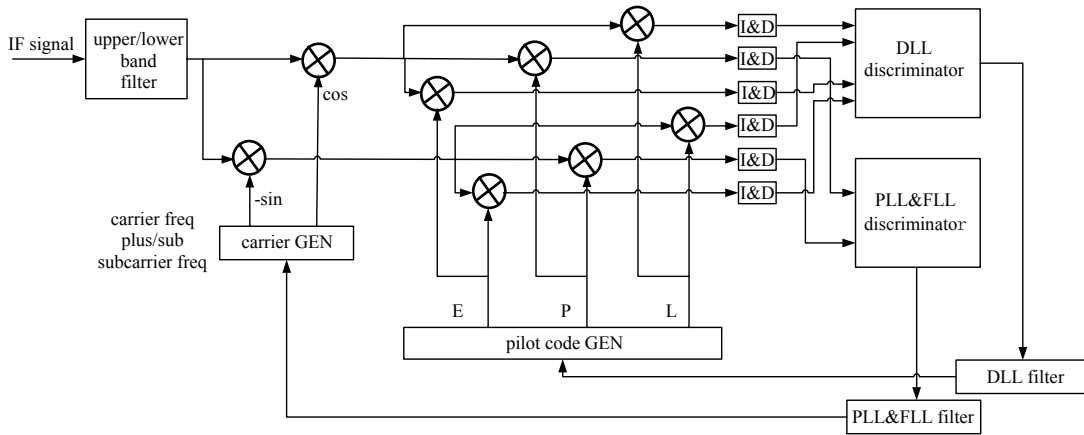


Fig.3 Architecture of SSB tracking
图 3 单边带跟踪结构

3 单边带辅助 BOC 信号跟踪方法

如果不考虑存在的误锁风险,那么对完整 BOC 信号的直接跟踪显然可以得到最佳性能,不过既然单边带方法可以消除跟踪模糊性,那么可以将二者结合起来,以实现优势互补。具体而言,BOC 信号直接跟踪过程中得到的鉴相曲线呈现明显的多零点特征,而单边带方法中得到的鉴相曲线形则与传统 BPSK 信号近似,如果将二者恰当地拼接,就有可能既保持 BOC 信号窄相关峰带来的高精度跟踪性能,又避免跟踪锁定于侧峰位置。

由此,本文设计一种单边带辅助 BOC 信号跟踪方法,利用单边带跟踪过程中得到的鉴相结果指导环路控制参数的更新,消除误锁风险。该方法的实现结构如图 4 所示。

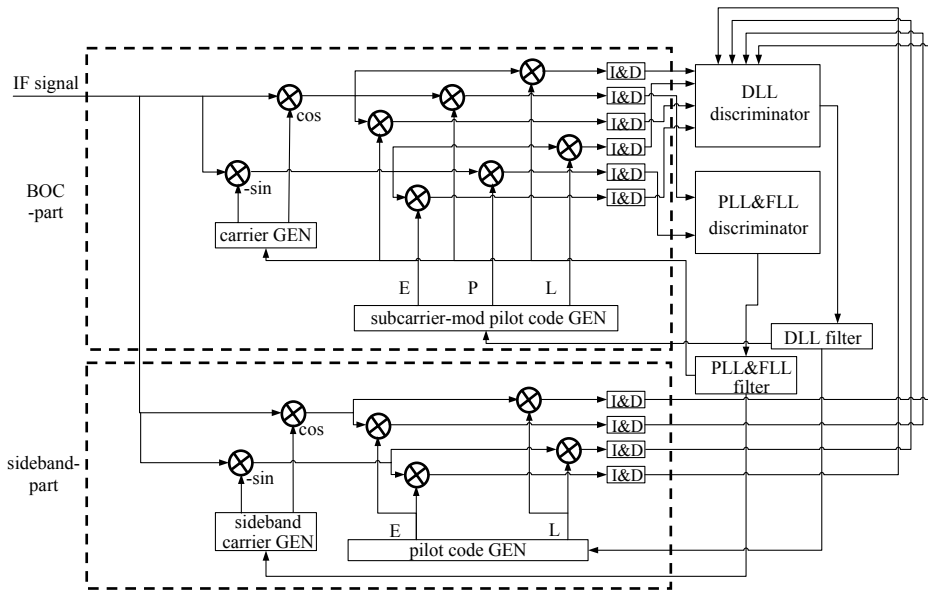


Fig. 4 Architecture of SSB-aided BOC tracking
图 4 单边带辅助 BOC 信号跟踪结构

该方法在对完整 BOC 信号直接跟踪的基础上增加了边带处理部分。边带部分的载波生成器生成单边带信号的载波,其频率为 $f_{\text{offset_carrier}} = f_{\text{carrier}} \pm f_s$, 其中 f_{carrier} 为 BOC 信号中频, f_s 为副载波频率,频率表达式中正号对应上边带信号,负号对应下边带信号,环路运行时可以选择某一边带进行跟踪。边带载波生成器的频率控制字调整受中频载波的环路滤波器输出结果的控制,因此其本身并不独立成为一个环路。边带部分中经载波剥离的基带信号同伪码直接相关。

码环鉴相器同时接收边带部分和 BOC 部分的相关结果并计算鉴相结果,当边带部分的鉴相结果的绝对值大于某一门限值时,将边带部分鉴相结果送入环路滤波器,否则将 BOC 部分的鉴相结果送入环路滤波器,以此实现鉴相曲线的拼接。以 BOC(1,1)信号为例,当环路由单边带跟踪模式转向完整 BOC 信号跟踪模式的门限值设为

0.2 码片时,可以得到拼接后的鉴相函数如图 5 所示,其中 $(-0.2, +0.2)$ 区间内的鉴相结果取决于对完整 BOC 信号的处理,此区间外的鉴相结果则取决于对单边带信号的处理。

很显然,边带部分的鉴相结果起到了监视跟踪状态的作用。当由于噪声或者动态等原因造成了跟踪的偏移时,边带部分可以帮助跟踪环路参数向正确的方向调整,恢复对正确码相位位置的跟踪;而当码相位误差恢复到一定程度之后,认为跟踪基本稳定,BOC 部分的鉴相结果接管对环路参数的控制,实现较高精确度的信号跟踪。通过 2 种跟踪环工作模式间的切换,码环鉴相器实现了对无模糊性的边带鉴相曲线和存在模糊性的 BOC 信号鉴相曲线的拼接,达到了消除误锁风险、同时保证跟踪精确度的目的。

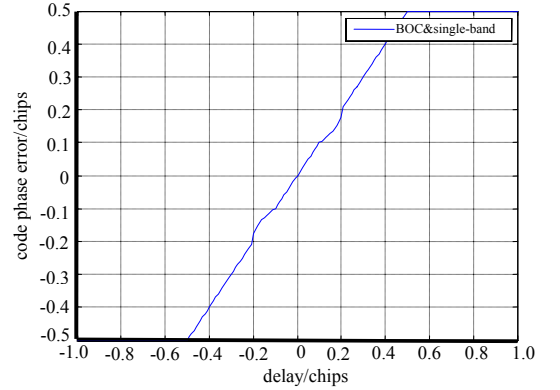


Fig. 5 Phase detection curve of SSB-aided BOC tracking
图 5 单边带辅助 BOC 信号跟踪鉴相曲线

4 单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的改进设计

4.1 简化的实现结构

在前一节的实现结构中,边带部分和 BOC 部分在结构上相对独立,但是它们的码产生器的频率控制字均是由码环鉴相器的输出结果及之后的环路滤波器来调整,边带部分的载波频率控制字更是完全依赖于 BOC 部分的中频载波环路的调整,二者关系紧密,故而可以将 2 个部分在结构上进行合并。合并后的简化结构如图 6 所示。

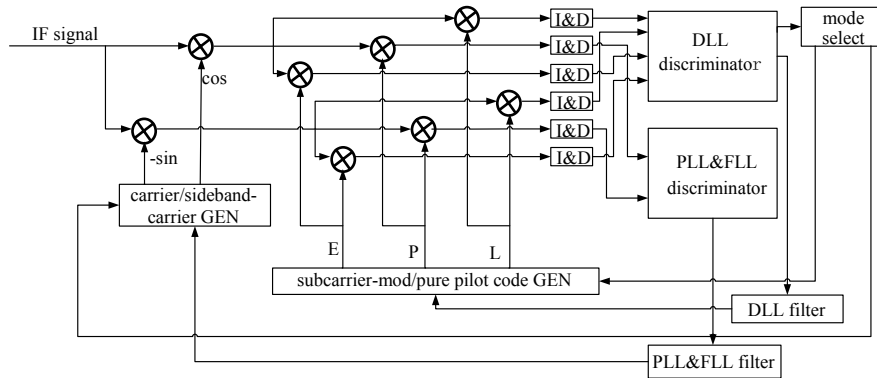


Fig. 6 Simplified structure of SSB-aided BOC tracking
图 6 简化的单边带辅助 BOC 信号跟踪结构

简化结构中,跟踪单边带信号和跟踪完整 BOC 信号这 2 种不同的工作模式共用一套结构。同完整结构采用的方法类似,码环鉴相器根据伪码鉴相结果的绝对值是否超过门限来决定跟踪环的工作模式。该结构启动后,在对单边带信号进行跟踪时进入码相关器的是未经副载波调制的伪码,对完整 BOC 信号进行跟踪时进入码相关器的则是副载波调制后的码序列;对单边带信号进行跟踪时进入载波相关器的载波的频率为 $f_{\text{carrier}} \pm f_s$,对完整 BOC 信号进行跟踪时进入载波相关器的则是中频载波,其频率为 f_{carrier} 。

4.2 载波跟踪相位补偿

对于单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的完整结构而言,无论码环鉴相器选择何种鉴相结果输出,载波环路的跟踪对象始终为中频载波;而对于简化结构,跟踪环工作模式的改变则可能会造成载波跟踪状态的突变,从而延长载波跟踪稳定所需的时间,严重者可能因为载波跟踪长时间无法稳定而影响码环的跟踪性能。

下面简要分析环路工作状态的切换对载波跟踪的影响。将接收到的卫星信号表示为:

$$s(t) = AD_1(t) \cos(\int \omega t + \theta_1) \quad (3)$$

式中: $D_1(t)$ 为包含了电文、副载波和伪码的信号部分; $\cos(\int \omega t + \theta_1)$ 为载波; ω 为时变的载波角频率; θ_1 为未知的载波初相位。在此基础上,将副载波近似看作单频正弦信号,则有:

$$s(t) \approx AD_2(t) \sin(\int \omega_2 t + \theta_2) \cos(\int \omega t + \theta_1) \quad (4)$$

式中: $D_2(t)$ 为包含电文和伪码的信号部分; ω_2 为副载波频率; θ_2 为副载波的初相位, 其值与接收信号的初始码相位 delay 存在关系 $\theta_2 = (\text{delay} - \text{round}(\text{delay}))2\pi(\text{rad})$ 。

若选择跟踪上边带的信号, 则忽略掉下边带部分, 得到:

$$s(t) \approx AD_2(t) \sin(\int(\omega + \omega_2)t + \theta_1 + \theta_2) = \frac{A}{2} D_2(t) \cos(\int(\omega + \omega_2)t + \theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

由式(4)~式(5)可以比较得到, 当载波环从跟踪单边带信号载波转变为跟踪中频载波时, 在不考虑跟踪误差的情况下, 载波相位发生了从 $\int(\omega + \omega_2)t + \theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}$ 到 $\int\omega t + \theta_1$ 的突变, 变化幅度达到了 $\int\omega_2 t + \theta_2 - \frac{\pi}{2}$ 。

如果不对这一部分相位突变进行补偿, 载波环就很有可能出现之前提到的跟踪不稳定状况, 影响环路性能。因此, 可以考虑在载波产生器处设置相位补偿机构, 在跟踪环转变工作模式时(由跟踪单边带信号到跟踪完整 BOC 信号, 或者由跟踪完整 BOC 信号到跟踪单边带信号), 对载波数字控制振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)的相位进行相应调整, 从而保证载波跟踪在 2 种模式间的稳定过渡。

4.3 跟踪环工作模式切换控制

在之前的方案设计中, 当鉴相结果小于某一门限时认为应当对完整 BOC 信号进行跟踪, 否则认为应当对单边带信号进行跟踪。当接收信号的载噪比较低时, 鉴相结果的误差较大, 状态切换的依据不再可靠, 不合理的模式切换可能会造成码环跟踪的性能恶化。

针对这种情况, 可以令工作模式的切换不再仅仅依赖于 1 次鉴相结果。设计相应的控制结构来实现模式的切换, 其原理简述如下:

1) 跟踪环开始工作时首先进入单边带跟踪模式。

对单边带信号进行跟踪时, 如果码环鉴相器连续输出小于模式切换的门限相位差的鉴相结果, 则计数器连续加 1; 否则, 计数器立即置 0。

2) 若计数器计数值达到某一预设值, 则开始完整 BOC 信号跟踪模式, 计数器同时置 0; 否则, 继续单边带跟踪。

3) 在对完整 BOC 信号进行跟踪时, 如果码环鉴相器连续输出大于模式切换的门限相位差的鉴相结果, 则计数器连续加 1; 否则, 计数器立即置 0。

4) 若计数器计数值达到某一预设值, 则重新开始单边带跟踪, 计数器同时置 0; 否则, 继续完整 BOC 信号跟踪。

5 方法性能测试及分析

对本文设计进行相关测试以验证其性能。图 7 首先展示了单边带处理方法、单边带辅助 BOC 信号跟踪方法、双估计法和 ASPeCT 法的理论跟踪精确度^[6-8]。后 3 种方法都利用了 BOC 信号窄相关峰的特性, 因此达到了相近的较高的跟踪精确度; 单边带方法由于在码跟踪环中忽略了副载波的作用, 其跟踪精确度明显弱于其他方法。

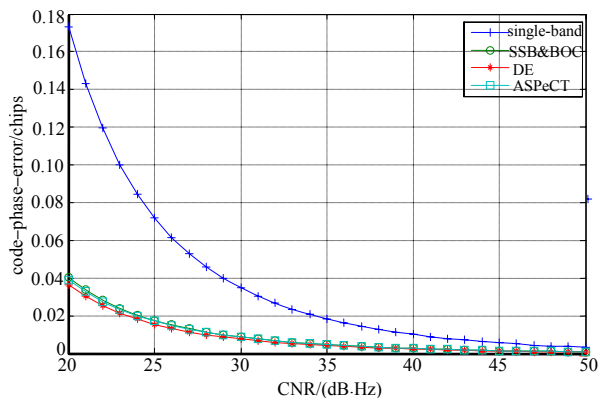


Fig.7 Theoretical tracking precision of some methods
图 7 不同跟踪方法的理论跟踪精确度

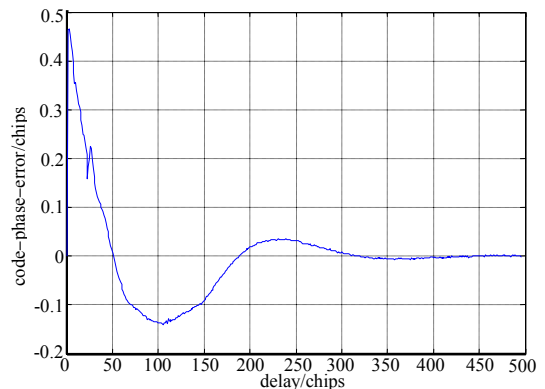


Fig.8 SSB-aided BOC tracking
图 8 单边带辅助 BOC 信号跟踪

单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的测试分析中, 将 BOC 部分早迟码相关间距设置为 0.2 码片, 边带部分早迟码相关间距设置为 1 码片, 鉴相器中状态切换门限设置为 0.2 码片。码环滤波器带宽设置为 2 Hz。跟踪信号为

BOC(1,1)信号,捕获码相位设为 2 000 码片,载噪比为 $45 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$ 。图 8 展示了单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的工作过程,码相位误差从初始的 0.5 码片逐渐稳定至 0 码片的正确位置。

在同样的信号条件且跟踪已经稳定的状况下,在第 100 个码周期时人为切换跟踪模式,考察模式切换对载波跟踪的影响。图 9 中为简化结构输出的载波相位误差,图 10 中为进行了相位补偿的简化结构输出的载波相位误差。在没有进行相位补偿时,跟踪对象由单边带向完整 BOC 信号切换之后,载波环已经跟踪稳定的相位误差突然被放大,故而要重新经历一个稳定的过程;而经过载波跟踪稳定结构的补偿,载波跟踪稳定的状态基本没有被破坏,实现了载波跟踪的稳定过渡。

将测试信号载噪比调整为 $34 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$,其余参数不变,考察工作模式切换控制结构的作用。

图 11 为单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的完整结构的跟踪恢复过程,此时环路并没有发生误锁,但是由于此时码环鉴相器的鉴相结果误差较大,以至于跟踪环路的工作模式出现了多次不应该出现的错误切换,在输出的码相位误差估计值上表现为多个毛刺。图 12 表示在对跟踪环的模式切换进行相应控制之后,环路可以避免很多不应当出现的工作模式变化,码相位误差的估计值输出更加稳定。

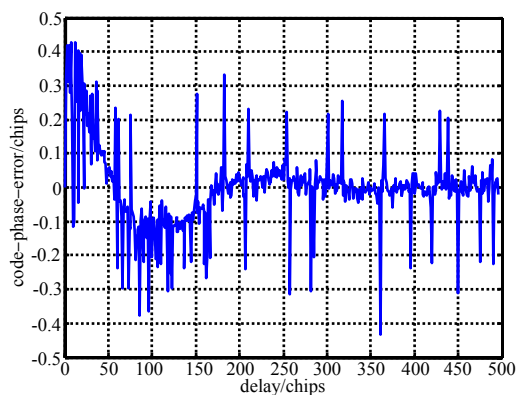


Fig.11 Tracking of entire structure without control of mode selecting

图 11 未经模式切换控制的完整结构跟踪

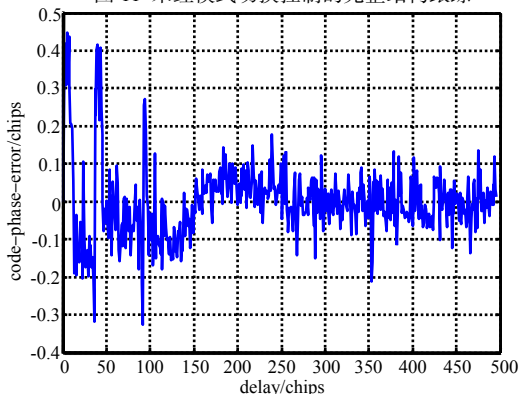


Fig.13 Tracking of simplified structure without control of mode selecting

图 13 未经模式切换控制的简化结构跟踪

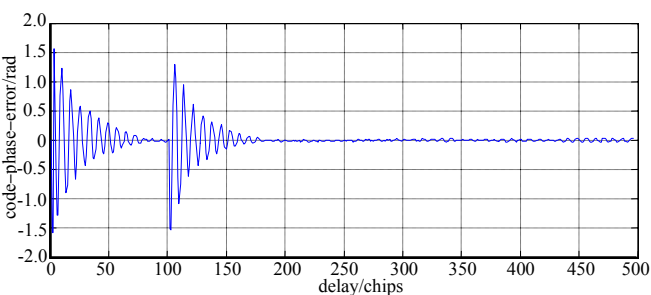


Fig.9 Carrier tracking without compensation of carrier phase

图 9 未经相位补偿的载波跟踪

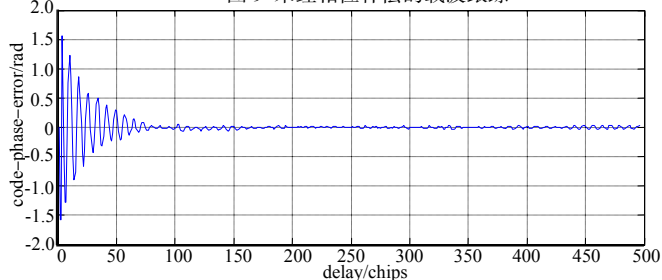


Fig.10 Carrier tracking with compensation of carrier phase

图 10 进行相位补偿的载波跟踪

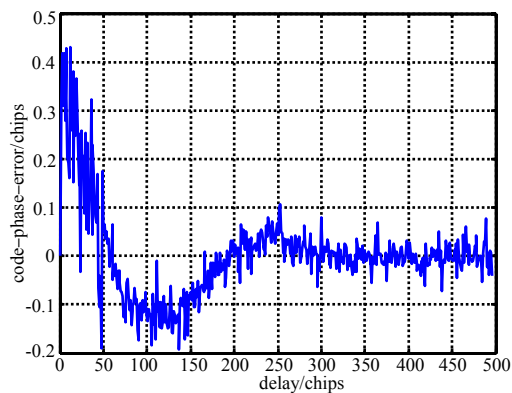


Fig.12 Tracking of entire structure with control of mode selecting

图 12 进行模式切换控制的完整结构跟踪

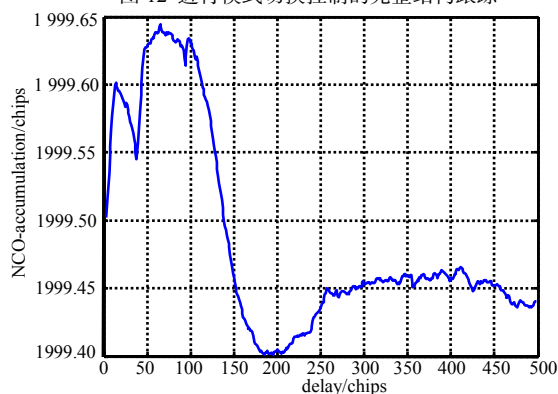


Fig.14 Tracking of simplified structure without control of mode selecting

图 14 未经模式切换控制的简化结构跟踪中的码 NCO 计数值

图 13、图 14 表示简化结构(未进行载波相位补偿)在处理信噪比较低的信号时,较大的噪声和环路工作状态

切换造成的载波跟踪不稳定都会使跟踪环路工作性能发生恶化,最终表现为误锁在侧峰位置。而图 15、图 16 中显示,在对跟踪环的模式切换进行相应控制后,简化结构(未进行载波相位补偿)已经可以避免误锁的发生。

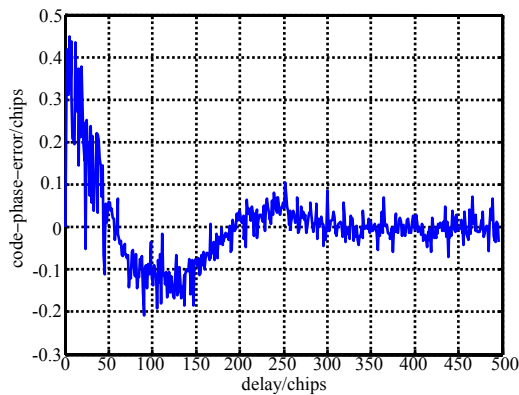


Fig.15 Tracking of simplified structure with control of mode selecting

图 15 进行模式切换控制的简化结构跟踪

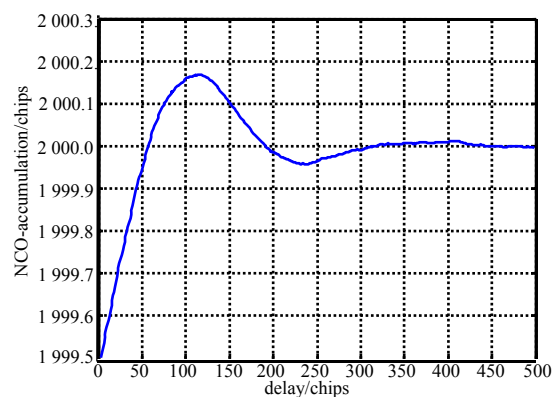


Fig.16 Count value of code NCO in tracking of simplified structure with control of mode selecting

图 16 进行模式切换控制的简化结构跟踪中的码 NCO 计数值

表 1 为单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的完整结构与简化结构在乘法器和加法器消耗上的比较,其中乘法器主要消耗在相关运算(下变频和码相关)之中,加法器主要消耗在积分清除运算之中:设计的简化结构达到了减小资源消耗的目的。

表 1 完整结构与简化结构的资源消耗比较

Table1 Comparison of resource consumption between entire structure and simplified structure

	carrier multiplier	code multiplier	adder
SSB&BOC entire structure	4	10	14
SSB&BOC simplified structure	2	6	11

6 结论

本文介绍了单边带辅助 BOC 信号跟踪方法的思路和相关设计,对实现结构进行了优化和完善,以 BOC(1,1)信号为测试对象,验证了该方法及其改进结构的有效性,在伪码跟踪环路存在偏移的情况下实现了对信号的无模糊跟踪。因为直接采用了对完整 BOC 信号的跟踪,该方法在跟踪精确度上最大限度地逼近了 BOC 信号的设计性能;而由于单边带跟踪的无模糊性,应用此方法时,捕获阶段可以采用简单的单边带技术得到粗略的码相位,而在跟踪阶段完成环路的进一步收敛和对码相位的进一步准确锁定,从而减少捕获部分的实现复杂度。相较于跳峰法,该方法避免了跟踪码相位从侧峰位置向主峰位置的突变,跟踪结果更加稳定;相较于 ASPeCT 方法,该方法具有更大的码环牵入范围,并且具备向高阶 BOC 信号跟踪发展的潜力,这也是今后对该方法进一步完善的主要方向。

参考文献:

- [1] LOHAN E S,BURIANN A,RENFORA M. Low-complexity unambiguous acquisition methods for BOC-modulated CDMA signals[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2008,26(6):503-522.
- [2] FINE P,WILSON W. Tracking algorithm for GPS offset carrier signals[C]// Proceedings of U.S.Institute of Navigation Ntm. San Diego,CA,USA:[s.n.], 1999:671-676.
- [3] JULIEN O,CANNON M E,LACHAPELLE G,et al. A new unambiguous BOC(n,n) signal tracking technique[C]// Proceedings of the European Navigation Conference GNSS. New York:SpringerVerlag, 2004:104.
- [4] FANTE R L. Unambiguous tracker for GPS binary-offset-carrier signals[C]// Proceedings of the 2003 ION National Technical Meeting. Albuquerque, New Mexico:[s.n.], 2003.
- [5] HODGART M S,BLUNT P D. Dual estimate receiver of binary offset carrier modulated signals for global navigation satellite systems[J]. Electronics Letters, 2007,43(16):877-878.
- [6] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [7] JULIEN O,MACABIAU C,CANNON M E,et al. ASPeCT:unambiguous Sine-BOC(n, n) acquisition/tracking technique for navigation applications[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2007,43(1):150-162.

- [8] TANG Z P,ZHOU H W,XIU Lin H U,et al. Research on performance evaluation of compass signal[J]. Scientia Sinica, 2010, 40(50):592–602.

作者简介:



修德明(1991–), 男, 河北省承德市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航.email: xiudeming@buaa.edu.com.

代长勇(1985–), 男, 济南市人, 工程师, 从事信息集成、指挥系统方向研究.

常 青(1962–), 男, 天津市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信、卫星导航.

(上接第 50 页)

- [23] UPADHYA P C,SHEN Y C,DAVIES A G,et al. Terahertz time-domain spectroscopy of glucose and uric acid[J]. Journal of Biological Physics, 2003,29(2–3):117–121.
- [24] HEYDEN M,BRUENDERMAN E,HEUGEN U,et al. Long-range influence of carbohydrates on the solvation dynamics of water-answers from terahertz absorption measurements and molecular modeling simulations[J]. Journal of the American Chemical Society, 2008,130(17):5773–5779.
- [25] 李佳宇,孙萍,邹韵,等. 提取葡萄糖多晶光学参数的迭代和遗传算法比较分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016,36(12):3875–3880. (LI Jiayu,SUN Ping,ZOU Yun,et al. Comparison of iterative and genetic algorithms used to extract glucose polycrystalline optical parameters[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(12):3875–3880.)
- [26] 李飞,张元志,王贻坤,等. 基于实数遗传算法的混浊介质光学参数提取[J]. 光学学报, 2013,33(12):198–206.(LI Fei,ZHANG Yuanzhi,WANG Yikun,et al. Optical parameter extraction of turbid media based on real coded genetic algorithm[J]. Acta Optics Sinica, 2013,33(12):198–206.)

作者简介:



解怡君(1993–), 女, 山东省济宁市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光谱与成像.email:201521140056@mail.bnu.edu.cn.

孙 萍(1963–), 女, 长春市人, 教授, 主要研究方向为太赫兹光谱与成像、生物医学光子学、数字全息.