基于副载波跟踪的 BOC 信号跟踪环路设计

杨再秀 黄智刚 耿生群

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对二进制偏移载波(BOC, Binary Offset Carrier)调制信号跟踪的模糊性问题,提出了一种新的基于副载波跟踪的环路结构. 通过增加副载波跟踪模块,对副载波和扩频码进行分离跟踪,解决了 BOC 信号跟踪的模糊性问题;针对副载波信号周期性的特点,以正弦波作为本地信号,利用锁相环实现对副载波的稳定跟踪. 通过软件仿真,分析对比了该环路的码跟踪误差、跟踪门限和平均失锁时间(MTLL, Mean Time to Lose Lock)等性能指标. 结果表明,新的环路结构能在保证跟踪精度的前提下,提高对弱信号的跟踪性能,具有较高的环路稳定性.

关 键 词: 二进制编移载波; 跟踪环路; 副载波跟踪; 码跟踪误差; 平均失锁时间

中图分类号: TN 961

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0245-04

Novel tracking loop of BOC signal based on subcarrier tracking

Yang Zaixiu Huang Zhigang Geng Shengqun

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to eliminate the tracking ambiguity of binary offset carrier (BOC) signal, a novel tracking loop based on subcarrier tracking was proposed. Compared with traditional tracking loop, the proposed architecture provides a subcarrier locked loop to track subcarrier. The innovative tracking loop architecture resolves the tracking ambiguity problem by tracking the subcarrier and spread spectrum code respectively. The subcarrier was synchronized with the local sinusoidal signal using phase lock loop (PLL), which exploits the periodic feature of the subcarrier of BOC signal. Figures of merit, such as code tracking error, tracking threshold and mean time to lose lock (MTLL) have been analyzed and evaluated through software simulations. Simulation results show that the novel tracking loop can improve the tracking performance of weak signal and enhance the tracking loop stability with little degradation in tracking accuracy.

Key words: binary offset carrier(BOC); tracking loop; subcarrier tracking; code tracking error; mean time to lose lock (MTLL)

新一代的 GPS 系统和 Galileo 系统的卫星导航信号将普遍采用二进制偏移载波(BOC, Binary Offset Carrier)调制技术. 与 BPSK(Binary Phase Shift Keying)调制方式相比,BOC 调制方式具有抑制多径干扰、提高定位精度等优点[1]. 但是,由于 BOC 信号自相关函数的多峰特性,使得跟踪环路可能错误地锁定在边锋上,即出现所谓的"假锁"现象(跟踪模糊性). 为消除 BOC 信号跟踪的模糊性,已提出了一些新的跟踪算法,如:边带处理法、峰跳法和双重估计技术(DET, Dual Estimate Technique)等.

边带处理法以扩频码作为本地信号,对 BOC 信号的上(下)边带分量进行跟踪. 该算法对 BOC 信号的稳定跟踪是以展宽相关峰为代价的,所以码跟踪精度将大幅下降. 峰跳法[2]通过比较主峰和边锋峰值,避免环路锁定在边锋上. 该算法除了采用典型的超前滞后环路外,还需要增加远超前和远滞后相关器对边锋进行跟踪. 峰跳法适用于

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2010CB731800)

作者简介: 杨再秀(1981 -),男,河北沧州人,博士生,yangzaixiu_cxy@126.com.

自相关函数边峰较少的 BOC 信号,而且对信噪比和接收机带宽比较敏感[3]. DET 算法将 BOC 信号的多峰自相关函数映射为无模糊的二维函数. 该技术可保证跟踪环路锁定在 BOC 信号相关函数的主峰上[3-4]. 但是,DET 算法未充分利用副载波的周期性,因此对于弱信号的跟踪稳定性较差.

根据副载波信号周期性的特点,本文提出了一种新的基于副载波跟踪的环路设计方案. 该环路采用正弦信号对副载波进行跟踪,实现了副载波和扩频码的分离跟踪处理,消除了跟踪环路的假锁现象,提高了环路稳定性. 文中分析了 BOC 信号的相关函数特性和无模糊跟踪原理,给出了新环路的结构框图,仿真分析了该环路的主要性能指标,并与 DET 算法进行了对比.

1 BOC 信号的相关函数特性

BOC 调制信号是通过将扩频码与方波副载波相乘得到的,可表示为

$$s(t) = c(t)s_c(t) = c(t)\mathrm{sgn}(\sin(2\pi f_{sc}t)) \quad (1)$$

其中,$c(t)$ 为扩频码信号;$s_c(t)$ 为副载波;$\mathrm{sgn}(\cdot)$ 为符号函数;f_{sc} 为副载波频率. 可见,副载波信号是同频正弦信号的符号函数. 扩频码 $c(t)$ 的正弦调制(BPSK)信号如下:

$$s_L(t) = c(t)\sin(2\pi f_{sc}t) \quad (2)$$

BOC 信号 $s(t)$ 与 BPSK 信号 $s_L(t)$ 的互相关函数[5]记为 $R_{ss_L}(\tau)$,则

$$R_{ss_L}(\tau) = E[s(t)s_L(t+\tau)] \quad (3)$$

图 1 给出了有限带宽条件下 BOC(1,1)和 BOC(15,2.5)的自相关函数曲线,以及它们与相应 BPSK 信号的互相关函数曲线. 由图可见,在有限带宽条件下,互相关函数曲线与自相关函数曲线几乎完全重合. 考虑到实际接收机都是限带的,故利用 BPSK 信号来跟踪 BOC 信号是可行的.

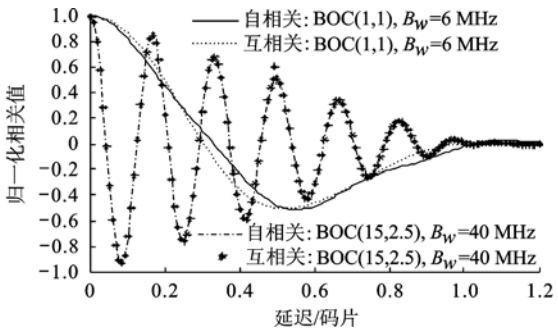


图 1 BOC 信号的相关函数

为了消除相关函数的模糊性,文献[3]中提出将 BOC 信号的扩频码和副载波作为二维的独立信号进行处理. 考虑到采用 BPSK 信号作为本地码,二维的互相关函数可表示为

$$R(\tau,\tau^*) = E[s(t) \times c(t+\tau)\sin(2\pi f_{sc}(t+\tau^*))] \quad (4)$$

其中,τ 表示扩频码延迟;τ^* 表示副载波延迟. 显然,式(4)中本地信号相对于 $s(t)$ 的 τ 和 τ^* 不一定相同. BOC(1,1)与 BPSK 信号的二维互相关函数如图 2 所示. 由图可见,对于固定的 τ^*,$R(\tau,\tau^*)$ 具有无模糊的正(或负)相关峰. 而对于固定的 τ,$R(\tau,\tau^*)$ 在 $\tau^* = n/(2f_{sc})$(n 为整数)时出现相关峰值.

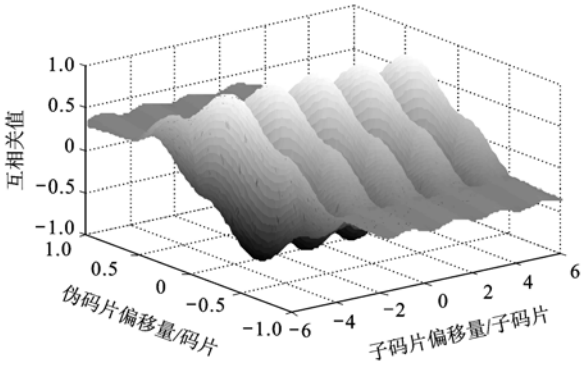


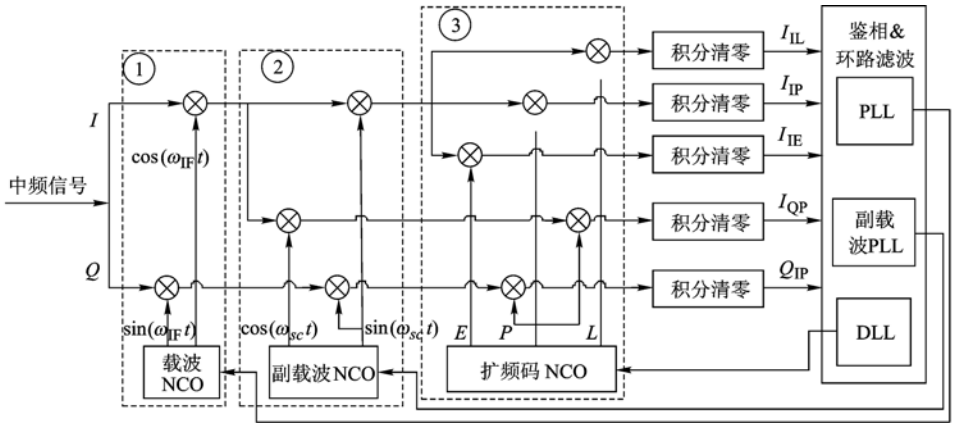
图 2 BOC(1,1)与 BPSK 信号的二维互相关函数

根据二维互相关函数 $R(\tau,\tau^*)$ 的特点,可将 BOC 信号的跟踪转化为两个独立的环节:扩频码跟踪环和副载波跟踪环. 扩频码跟踪环对应于 $R(\tau,\tau^*)$ 中 τ^* 固定的情况. 类似地,副载波跟踪环对应于 $R(\tau,\tau^*)$ 中 τ 固定的情况. 由前面的分析可知,当延迟 $\tau^* \neq 0$ 时副载波跟踪环可能出现多个相关峰. 但是,类似于载波跟踪,副载波跟踪过程中不会出现假锁,而只可能有 180°的相位模糊. 可见,采用扩频码和副载波分离跟踪技术可消除跟踪过程的模糊性[3].

2 BOC 信号跟踪环路

2.1 环路结构

新的 BOC 信号跟踪环路如图 3 所示,主要包括锁相环(PLL,Phase Lock Loop),扩频码跟踪环(DLL, Delay Lock Loop),副载波相位跟踪环(SPLL,Subcarrier Phase Lock Loop),积分清零单元,鉴相器和环路滤波器. 与传统的跟踪环路相比,增加了副载波跟踪环路,实现了副载波与扩频码的分离跟踪处理. 与 DET 算法利用码环来跟踪副载波不同,新环路充分考虑了副载波与正弦信号的相关性,采用锁相环(SPLL)来跟踪副载波信号. 环路中的副载波 NCO(Numerical Controlled Osciuator)产生频率为 f_{sc} 的正弦信号,实现对副载波的相位跟踪[5].



注:①—载波跟踪环;②—副载波跟踪环;③—扩频码跟踪环.

图 3　BOC 信号跟踪环功能框图

跟踪环路的中频输入信号可表示为

$$r(t) = s(t-\tau)\cos(\omega_{IF}t+\varphi) = c(t-\tau)s_c(t-\tau)\cos(\omega_{IF}t+\varphi) \quad (5)$$

其中,ω_{IF}是中频载波频率;φ 是输入信号的初相. 相应的载波 NCO 产生的本地信号分别为 $\cos(\omega_{IF}t+\hat{\varphi})$ 和 $\sin(\omega_{IF}t+\hat{\varphi})$,其中 $\hat{\varphi}$ 是本地载频的初相. 副载波 NCO 输出为 $\cos(\omega_{sc}t+\hat{\theta})$ 和 $\sin(\omega_{sc}t+\hat{\theta})$,其中 $\omega_{sc}=2\pi f_{sc}$,$\hat{\theta}$ 是初相. 扩频码 NCO 生成本地扩频码的即时(P),超前(E)和滞后(L)分量,即 $c(t)$,$c(t+D/2)$ 和 $c(t-D/2)$. 其中,D 是扩频码跟踪环的超前减滞后间隔,且满足 $D<T_c$(T_c 是扩频码的码片宽度). 积分清零器的输出为

$$I_{IP} = \frac{1}{T}\int_0^T r(t)\cos(\omega_{IF}t+\hat{\varphi})\sin(\omega_{sc}t+\hat{\theta})c(t)\mathrm{d}t = \cos(\Delta\varphi)\cos(\Delta\theta)R_c(\tau) \quad (6)$$

同理

$$I_{IE} = \cos(\Delta\varphi)\cos(\Delta\theta)R_c(\tau+D/2) \quad (7)$$

$$I_{IL} = \cos(\Delta\varphi)\cos(\Delta\theta)R_c(\tau-D/2) \quad (8)$$

$$I_{QP} = \cos(\Delta\varphi)\sin(\Delta\theta)R_c(\tau) \quad (9)$$

$$Q_{IP} = \sin(\Delta\varphi)\cos(\Delta\theta)R_c(\tau) \quad (10)$$

其中,T 是积分时间;$\Delta\varphi=\varphi-\hat{\varphi}$ 是载波的相位误差;$\Delta\theta=\omega_{sc}\tau-\hat{\theta}$ 是副载波的相位误差;$R_c(\tau)$ 是扩频码的归一化自相关函数.

鉴相器单元处理积分清零器的输出信号,给出 PLL,SPLL 和 DLL 的跟踪误差. 跟踪误差通过环路滤波器进行降噪和平滑处理后,反馈控制对应的 NCO 模块,闭合跟踪环路.

2.2　环路鉴相器

由图 3 可见,新的 BOC 信号跟踪环将包括 3 个鉴相器. 由于本环路采用锁相环来跟踪副载波信号,因此 PLL 和 SPLL 可选用同类型的鉴相器,具体的鉴相器算法如下:

$$d_{PLL} = \arctan\frac{Q_{IP}}{I_{IP}} = \Delta\varphi \quad (11)$$

$$d_{SPLL} = \arctan\frac{I_{QP}}{I_{IP}} = \Delta\theta \quad (12)$$

这里选用二象限反正切鉴相器,该鉴相器对 180°相位不敏感,这就避免了导航电文比特跳变对 PLL 和 SPLL 的影响.

在本文的分析中,采用了两种码环鉴相器:超前减滞后功率(NELP,Noncoherent Early-Late Power)鉴相器和点积(DP,Dot Product)鉴相器

$$d_{DLL} = |I_{IE}|^2 - |I_{IL}|^2 = |R_c(\tau+D/2)|^2 - |R_c(\tau-D/2)|^2 \quad (\mathrm{NELP}) \quad (13)$$

$$d_{DLL} = (I_{IE}-I_{IL})\cdot I_{IP} = (R_c(\tau+D/2)-R_c(\tau-D/2))\cdot R_c(\tau) \quad (\mathrm{DP}) \quad (14)$$

在式(13)和式(14)中忽略了 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 的影响.

当采用传统环路跟踪 BOC 信号时,要求捕获精度在信号自相关函数主峰宽度范围内. 而采用新环路时,只要适当调整 DLL 的超前减滞后间隔,捕获精度只需在一个伪码宽度之内即可. 因此,采用新环路可大大降低对捕获精度的要求. 由于可以采用较大的码鉴相器间隔,也使得 DLL 能够处理更大动态范围和更低信噪比的信号.

3　仿真结果

本文通过对码跟踪误差、跟踪门限和平均失锁时间(MTLL,Mean Time to Lose Lock)等指标的仿真分析,评估新环路的跟踪性能. 由文献[6]的结果可知,DET 环路的性能整体上优于其他无模糊的 BOC 信号跟踪算法. 不失一般性,新环路仅

与 DET 算法的性能指标进行对比. 仿真过程中,相干积分时间设为 20 ms,采用二阶环路滤波器. 其中,载波和副载波跟踪环路滤波器带宽为 10 Hz,码跟踪环滤波器带宽为 1 Hz.

码跟踪误差是衡量环路跟踪性能的主要技术指标之一,文献[1]给出了其理论分析结果. 针对 BOC(1,1)和 BOC(15,2.5)码跟踪误差的仿真结果如图 4 所示(DLL 均采用 DP 鉴相器). 显然,新环路具有与 DET 算法相近的码跟踪误差性能. 特别地,对于低信噪比条件下 BOC(15,2.5)的跟踪,新环路的性能略优于 DET 算法. 这说明在低信噪比情况下,对于具有高频副载波的 BOC 信号,新环路具有较好的码跟踪精度.

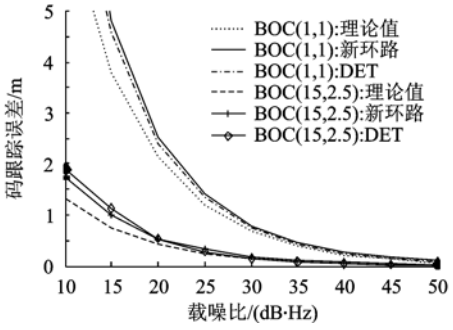


图 4 BOC 信号码跟踪误差比较图

跟踪门限是环路实现稳定跟踪的最低载噪比[6]. 图 5 给出了不同环路跟踪门限的仿真结果. 可见,新环路的跟踪门限低于 DET 算法 2 dB 左右. 另外,不同的 DLL 鉴相器对新环路跟踪门限的影响并不明显. 这说明,新环路的跟踪动态范围较大,而且对于 DLL 鉴相器的类型并不敏感.

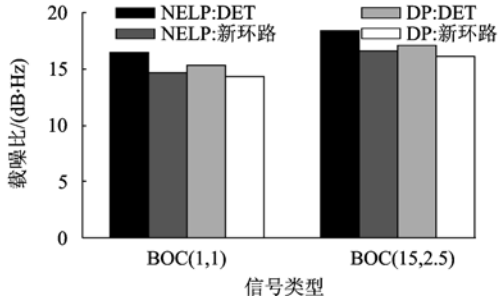


图 5 环路跟踪门限比较图

平均失锁时间(MTLL)利用文献[7]的改进模型进行仿真. 图 6 给出了针对 BOC(1,1)和 BOC(15,2.5)的仿真结果,其中 DLL 采用 DP 鉴相器,超前减滞后间隔 $D=0.2$ 码片. 正如所预期的,新环路的平均失锁时间优于 DET 算法,尤其对于平均失锁时间较低的 BOC(15,2.5)而言,新环路带来明显的性能提升.

以上仿真结果可知,由于充分利用了副载波周期性的特点,新环路可实现对具有高频副载波的 BOC 信号的稳定跟踪. 与 DET 算法相比,新环路具有更低的跟踪门限和更高的平均失锁时间.

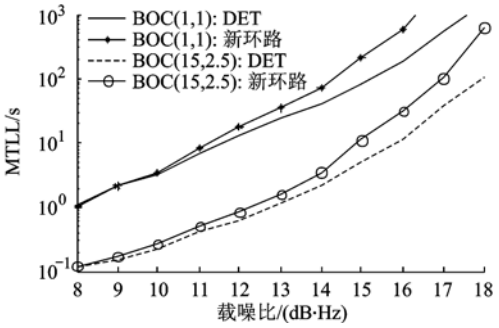


图 6 平均失锁时间比较图

4 结束语

针对 BOC 信号的结构特点,本文给出了一种新的基于副载波跟踪的环路结构. 该环路以正弦信号作为本地信号,对副载波信号进行跟踪,消除了 BOC 信号跟踪的模糊性. 与传统环路相比,新环路可大大降低对捕获精度的要求,而且能够处理更大动态范围和更低信噪比的信号. 对于信噪比较低和具有高频副载波的 BOC 信号,新环路在保证跟踪精度的前提下,提高了环路的稳定性. 因此,本文为 BOC 信号跟踪环路设计提供了一种有价值的参考方案.

参考文献(References)

[1] Betz J W. Binary offset carrier modulations for radio navigation [J]. Journal of The Institution of Navigation, 2001, 48(4): 227 – 246

[2] Fine P, Wilson W. Tracking algorithm for GPS offset carrier signal[C]// Proceedings of the ION 1999 National Technical Meeting. San Diego, CA: Institute of Navigation, 1999: 671 – 676

[3] Hodgart M S, Blunt P D, Unwin M. Double estimator-a new receiver principle for tracking BOC signals [J]. Inside GNSS, 2008, 3(3): 26 – 36

[4] 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

[5] Latour A, Grelier T, Artaud G, et al. Subcarrier tracking performances of BOC, ALTBOC and MBOC signals[C]//ION GNSS 2007. Fort Worth: Institute of Navigation, 2007: 769 – 781

[6] Anantharamu P B, Borio D, Lachapelle G. Pre-filtering, side-peak rejection and mapping: several solutions for unambiguous BOC tracking [C]//ION GNSS 2009. Savannah, GA: Institute of Navigation, 2009: 3142 – 3155

[7] Golshan A R. Post-correlator modeling for fast simulation and joint performance analysis of GNSS code and carrier tracking loops [C]//Proceedings of the ION 2006 National Technical Meeting. Monterey, CA: Institute of Navigation, 2006: 312 – 318

(编 辑:娄 嘉)