

基于复子载波信号无模糊跟踪的组合环路设计

罗显志¹, 赵宏伟², 闫浩²

(1. 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室, 河北 石家庄 050081;
2. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘要:复子载波信号是指采用方波复指数函数作为子载波调制的BOC信号, 目前已经被广泛应用于全球卫星导航系统。复子载波信号的自相关函数存在多个相关值, 在信号同步时会产生信号误捕和跟踪到旁峰的问题。为此, 提出了一种适用于复子载波信号的组合跟踪环结构, 其中主环采用常规的BPSK-like算法实现信号的初始同步, 辅助环分别采用双重估计跟踪算法和旁峰消除算法, 与主环共同完成高精度跟踪。首先给出双重估计跟踪算法和旁峰消除算法在此组合环结构下的实现。然后利用仿真数据从跟踪精度和抗多径能力两方面对辅助跟踪环的性能进行分析, 并利用实测数据对此环路结构的实用性进行检验。仿真和实测数据跟踪结果表明, 提出的辅助组合跟踪结构切实可行并具有较好的抗噪声和抗多径性能。

关键词:全球卫星导航系统; BOC信号; 复子载波; 组合跟踪环; 自相关函数

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2018)01-0176-06

现代卫星导航系统中, 为了充分利用分配的频段, 并实现多系统之间的兼容性与互操作, 提高系统性能, 一类基于二进制偏移载波调制(binary offset carrier, BOC)信号得到了广泛应用。

BOC调制信号是在伪码调制的基础上增加方波子载波调制, 相对于传统的BPSK信号, BOC信号的频谱主瓣向对应频率中心进行了分裂和搬移, 并且其自相关函数更加尖锐, 这使得码相位跟踪精度更高, 抗多径干扰性能也得到了相应提高。

然而, 由于子载波的调制, 使得BOC信号的自相关函数具有多个相关峰值, 从而带来了模糊跟踪的问题, 即信号的跟踪环路会锁定到自相关函数中主峰之外的旁峰上。锁定在旁峰上会带来较大的码相位估计误差, 造成环路跟踪精度下降甚至无法定位, 因此接收机在捕获信号时必须具备识别主峰、消除跟踪模糊性的能力。

根据调制的子载波的不同, BOC信号衍生出多种调制形式, 如采用复子载波调制的AltBOC信号, 已经被应用于欧盟Galileo和我国的北斗系统^[1]。本文把这种采用复子载波调制的AltBOC信号称为

复子载波信号, 重点研究AltBOC信号的跟踪方法。

目前, BPSK-like算法是一种常用的跟踪方法。它从功率谱角度将BOC(m, n)信号看作是2个关于载波频率对称分布的BPSK(n)信号的和, 对主瓣进行滤波处理, 然后按照BPSK的处理方法完成捕获跟踪。BPSK-like算法去除了模糊性, 但同时也破坏了原有相关峰的尖锐形状, 失去了高跟踪精度和抗多径优势, 且引入了信噪比损失^[2]; 文献[3]根据AltBOC信号上下边带所采用的复子载波具有共轭对称性这一特点, 提出了一种联合跟踪算法。但是, 这种算法需要2个前提条件: ①导频通道未调制比特符号; ②上下边带相位延迟的差异可以忽略。但实际上, 导频通道通常会调制二次码, 同时上下边带由于中心频率有差异, 因此通过电离层等传播途径后的相位延迟不应该被忽略^[4]。

此外, 文献[5]提出了SCPC(sub carrier phase cancellation)算法, 它将接收信号分别与本地正弦子载波和具有正交相位的余弦子载波信号进行相关, 并取相关结果的平方和, 得到较宽的单峰输出。该方法虽然去除了模糊性, 但是性能下降得太多, 实际

中并不可取;文献[6]提出了“Bump-Jumping”方法,在传统的超前(E)、即时(P)、滞后(L)支路的基础上增加远超前(VE)和远滞后(VL)支路用于判断跟踪环是否锁定在主峰上。然而,在噪声和多径的影响下,主峰和旁峰的相对关系可能发生变化,对于多于 3 个相关峰的 BOC 信号,确定真正的主峰将变得困难;文献[7-8]通过设计 2 个本地辅助信号提出了一种无模糊跟踪算法,将接收信号分别与 2 个本地辅助信号进行相关,然后获得组合相关函数,再利用组合相关函数相消除旁瓣相关峰。但此方法仅适用于正弦相位的 BOC 信号。文献[9]针对双边带 BOC 信号,提出了一种双边带相关合并的跟踪方法,但这种方法只在应用于高阶 BOC 信号时才能获得较好性能。文献[10]提出了一种子载波辅助的双重估计算法,但只适用于 BOC(n, n)信号,文献[11]中提出的名为 SPCS (side-peak cancellation scheme) 的去模糊算法能适用于各种 BOC 信号,但其复杂度随着调制扩展比的增大而快速增加。

根据上述分析,目前的各种跟踪方法均不能很好地应用于复子载波信号。为此,本文提出一种组合跟踪环结构来跟踪复子载波信号,其中主环采用常规的 BPSK-like 算法来实现信号的初始同步,辅助环采用已有的跟踪算法,与主环共同完成信号的高精度跟踪。本文中的辅助环算法采用已有文献中提出的双重估计跟踪算法^[12]和旁峰消除算法^[11],然后以北斗 B1I 信号和 AltBOC 为例,从抗噪声和抗多径能力 2 个方面对这种组合跟踪环结构的性能进行了仿真,最后采用实测信号对算法进行验证。

1 复子载波信号跟踪模型

BOC 调制信号的子载波是方波正弦(余弦)函数,其作用是将 BPSK 信号频谱搬移到中心载频两侧;而复子载波调制信号的子载波是(1)式所示的方波复指数函数

$$e_r(t) = s_{sc-cos}(t) + js_{sc-sin}(t) = \text{sign}[\cos(2\pi f_s t)] + j\text{sign}[\sin(2\pi f_s t)] \quad (1)$$

式中, $s_{sc-cos}(t)$ 和 $s_{sc-sin}(t)$ 分别表示具有余弦相位和正弦相位的子载波。(1)式的作用是将 BPSK 功率谱向一边搬移。考虑到 2 个正交的子载波可以将 BPSK 功率谱分布独立地向两边搬移,因此复子载波调制信号的 2 个主瓣可以传输不同的信息。以 AltBOC 信号为例,标准 AltBOC 的基带信号模型可

表示为:

$$s(t) = [c_{aI}(t) + jc_{aQ}(t)][s_{sc-cos}(t) - js_{sc-sin}(t)] + [c_{bI}(t) + jc_{bQ}(t)][s_{sc-cos}(t) + js_{sc-sin}(t)] \quad (2)$$

式中, aI, bI 分别表示 AltBOC 信号上边带和下边带的数据通道(I 通道), aQ, bQ 分别表示上边带和下边带的导频通道(Q 通道), $c(t)$ 表示调制了比特符号的伪码, $s_{sc-cos}(t)$ 和 $s_{sc-sin}(t)$ 分别表示具有余弦相位和正弦相位的子载波。

以 aI 支路为例,其中频信号模型为:

$$s(t) = c_{aI}(t)[s_{sc-cos}(t) - js_{sc-sin}(t)] \cdot (\cos\omega_l t + jsin\omega_l t) = c_{aI}(t)[s_{sc-cos}(t) - js_{sc-sin}(t)]e^{j\omega_l t} \quad (3)$$

将复子载波信号近似为 BPSK 信号是一种常见的接收处理方法。这种方法简单可行,但是会展宽 BOC 信号的相关峰。接收信号的数学模型可以表示为

$$s(t + \tau) = c(t + \tau) \cdot [s_{sc-cos}(t + \tau) - js_{sc-sin}(t + \tau)]e^{j(\omega_l t + \theta)} \quad (4)$$

式中, ω_l 为信号中频, τ 与 θ 分别表示码相位时延和载波相位时延。采用 BPSK-like 跟踪方法时,本地产生的载波频率是信号中频 ω_l 与子载波频率 ω_s 之差(或之和),相关结果可以表示为

$$R_{sc}(\tau) = \int s(t + \tau) \cdot c(t) e^{-j(\omega_l - \omega_s)t} dt = e^{j(\theta - \omega_s \tau)} \int c(t + \tau) c(t) \cdot \{ [s_{sc-cos}(t + \tau) - js_{sc-sin}(t + \tau)] e^{j\omega_s(t + \tau)} \} dt \quad (5)$$

从(5)式中的可以看到, BPSK-like 算法将正弦波和子载波进行了相关运算。由于恒包络 AltBOC 信号的子载波可以近似为一个正弦波,因此使用 BPSK-like 算法并不会产生明显的相关损耗。

BPSK-like 算法将复子载波简化为复正弦量,作为载波的一部分进行处理。如果能够恢复基带信号的复子载波,那么其自相关函数就可以呈现多相关峰特性。在使用 BPSK-like 算法跟踪时,跟踪环路通过不断地调整本地伪码相位,最终使得本地码和接收信号几乎是对齐的。码同步完成后,接收信号的模型可以表示为

$$s_{r,\theta}(t) = c(t)[s_{sc-cos}(t) - js_{sc-sin}(t)]e^{j[\omega_l(t-\tau) + \theta]} \quad (6)$$

载波跟踪完成后,本地产生的同步载波可以表示为

$$S_{carrier} = e^{-j[\omega_l(t-\tau) + \theta]} e^{j\omega_s t} \quad (7)$$

式中,复载波 $e^{j\omega_s t}$ 与伪码相位同步,并且频率 ω_s 和子

载波频率相等。

2 组合跟踪环结构

根据上述分析,跟踪算法应当包含一个完整的BPSK-like跟踪环路,该环路作为主环首先完成对信号的同步。然后,根据主环输出的载波相位和码相位信息,再产生一个辅助载波 $e^{-j\omega_d t}$ 用来恢复基带信号的子载波。利用恢复后的信号,结合现有的BOC无模糊跟踪算法,即可完成高精度跟踪,基于此,本文提出一种组合跟踪环结构,如图1所示。其中虚线部分表示辅助环模块,辅助环完成对BOC信号的高精度跟踪,并且可以动态地加载,实现灵活。

上述算法的核心是恢复子载波,而产生与伪码同步的载波是恢复子载波的关键。主环输出的码相位误差和载波相位误差都会残留在恢复出的子载波中,这会影响辅助环的跟踪精度。码相位误差通常比载波相位误差大得多,因此可以仅考虑码相位误差的影响。码相位误差过大会导致恢复子载波的相关峰发生畸变,从而使辅助环的跟踪产生较大偏差。一般情况下,主环的码相位跟踪精度可以达到1%码片(chips),对辅助环的影响并不显著。但是,在强干扰和强多径环境下都可能导致主环码跟踪产生较大偏差,严重时会使辅助环失效。本文将在仿真环节进一步讨论这一问题。

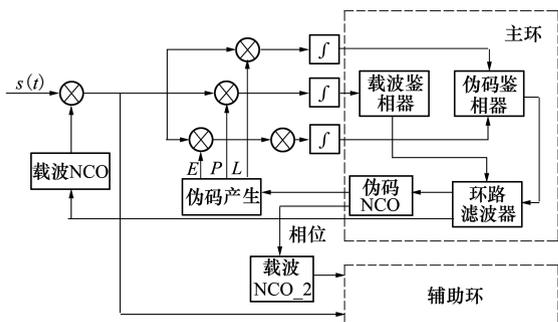


图1 基于辅助环的跟踪结构

图2和图3分别给出了基于双重估计(dual estimate)跟踪算法^[11]和旁峰消除算法(side-peak cancellation scheme, SPCS)^[12]的辅助环结构。图2结构简单,依赖主环码NCO产生的伪码,辅助环的跟踪结果存在模糊性,需要和主环输出的码相位进行组合。图3结构复杂,但跟踪稳定后可以独立运行并直接输出高精度的伪码相位,不再需要进行组合

处理。

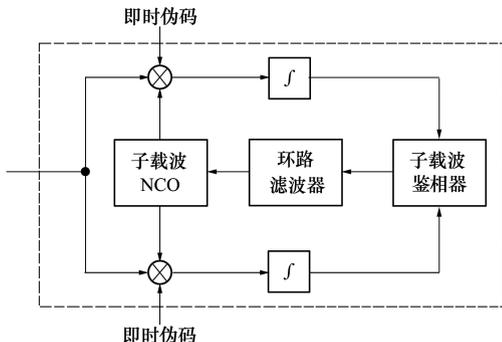


图2 基于双重估计跟踪算法的辅助环

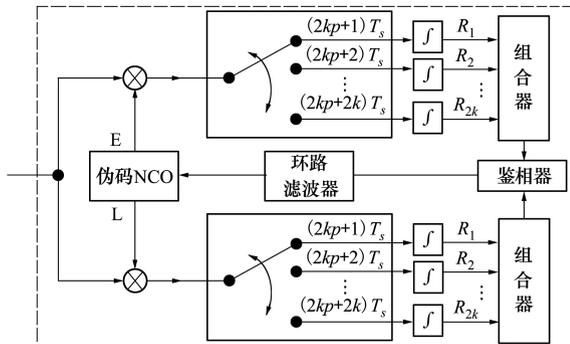


图3 基于旁峰消除算法的辅助环

3 性能分析

3.1 抗噪声性能

跟踪环路的抗噪声性能可以由不同噪声强度下的跟踪误差来衡量。在仿真中,产生仅包含高斯噪声的理想信号,并且载波和伪码的初始相位均为固定值。这样,仿真信号每个采样点的相位都是已知的,可以对跟踪结果进行检验。相干积分时间取10ms,相关器间隔取0.3码片,分别对B1I信号和AltBOC信号进行处理,跟踪结果如图4和图5所示。

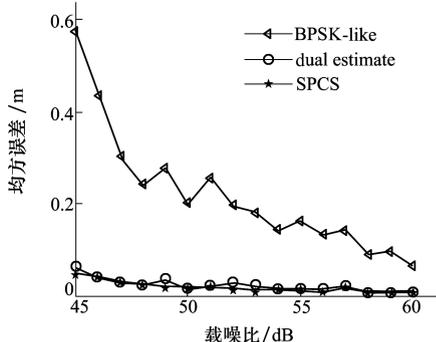


图4 B1I信号跟踪误差

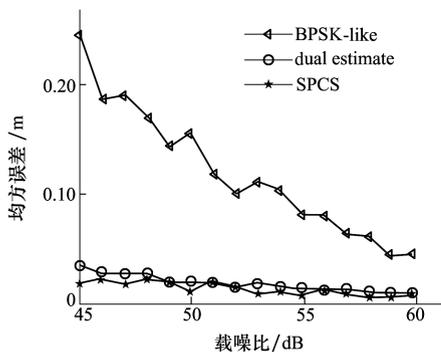


图 5 AltBOC 信号码跟踪误差

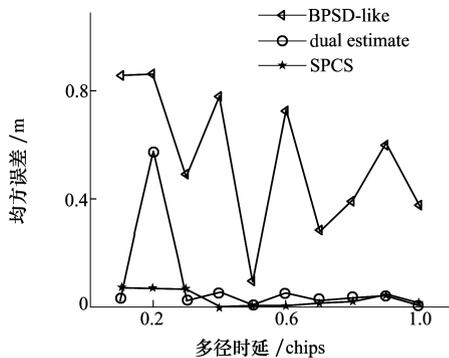


图 7 AltBOC 多径信号码跟踪误差

从结果中可以看到,与 BPSK-like 算法相比,本文提出的跟踪结构具有更好的抗噪声性能。随着信号载噪比的提高,跟踪环路输出的相位误差也随之减小。对于双重估计辅助结构和 SPCS 辅助结构而言,两者的抗噪声性能相近。

3.2 抗多径性能

多径效应广泛存在于各种无线电系统中,对卫星导航系统的影响尤为严重,是接收机跟踪误差的一个重要来源。仿真时在直射信号中增加一条反射信号,并取直射信号和反射信号的功率比为 6 dB,接收环路的相关器间隔取 0.1 码片。图 6 和图 7 分别给出了 B1I 信号和 AltBOC 信号的多径时延与跟踪误差之间的关系。从结果中可以看到,本文提出的跟踪结构具有更好的抗多径能力,其中 SPCS 辅助环结构抗多径性能最好。值得说明的是,辅助环跟踪精度很容易受到主环跟踪精度的影响。如果将相关器间隔放大(例如取 0.5 码片),多径干扰对主环的影响更为严重,此时恢复子载波信号中包含了较大的相位误差,这将导致辅助环性能急剧恶化。因此提高主环的码跟踪精度对于整个环路性能改善具有重要意义。

3.3 基于实测数据的跟踪性能分析

本小节使用实测数据对辅助环跟踪结构的有效性进行检验。采用 Galileo-FOC FM1 卫星发射的 E5 频点信号,采样率为 250 MHz,中频为 46.795 MHz,接收带宽为 50 MHz。处理信号时使用基于双重估计跟踪的辅助环结构,相关器间隔取 0.1 码片,预检积分时间取 10 ms。对于实测信号而言,难以直接获得接收信号的准确码相位,可以从本地码相位抖动情况分析跟踪算法的性能。图 8 为主环和辅助环的鉴相结果,可以看到跟踪稳定后辅助环鉴相器的输出抖动更小,说明辅助环跟踪更为稳定。

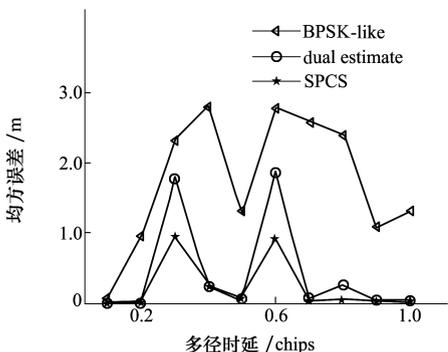


图 6 B1I 多径信号码跟踪误差

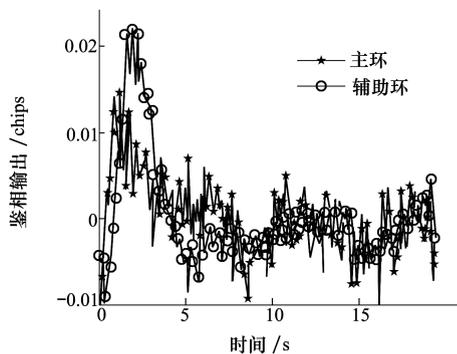


图 8 B1I 鉴相器输出

双重估计跟踪算法对主环和辅助环输出的码相位进行了组合,图 9 给出了主环码相位和组合码相位的跟踪情况。从图中可以看到,跟踪稳定后两者都稳定在零附近。主环码相位抖动大概为 ± 0.05 m,而组合码相位抖动在 ± 0.02 m 以内,具有更好的跟踪性能。因此,辅助跟踪环是一种有效的跟踪结构。

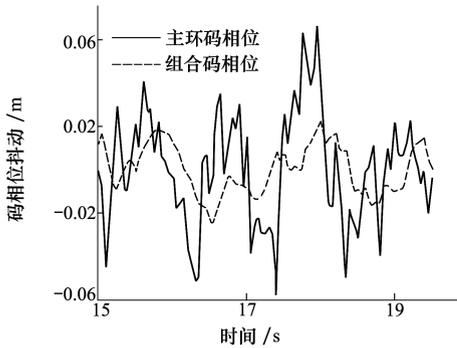


图9 码相位跟踪误差

4 结 论

针对复子载波信号,本文对现有跟踪方法进行了总结,指出了现有方法存在的问题,并提出了一种基于辅助环的跟踪结构。该结构可以使用多种无模糊跟踪算法,充分发挥 BOC 信号的优势。与相应的无模糊跟踪算法相比,辅助环结构的实现并不复杂,并且可以动态地加载和卸载,实现灵活。本文给出了基于双重估计跟踪算法和旁峰消除算法的辅助环结构,仿真和实测结果均表明,辅助跟踪环能够实现复子载波信号的处理并且具有较好的抗噪声和抗多径性能。

参考文献:

- [1] 谭述森,周兵,郭盛桃. 我国全球卫星导航信号设计研究[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2010, 40(5): 514-519
Tan Shusen, Zhou Bing, Guo Shengtao. Studies of Compass Navigation Signals Design[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, 40(5): 514-519 (in Chinese)
- [2] Martin N, Leblond V, Guillotel G. BOC(x,y) Signal Acquisition Techniques and Performances[C]//ION GPS/GNSS, Portland, USA, 2003: 188-198
- [3] Ren J, Jia W, Chen H, et al. Unambiguous Tracking Method for Alternative Binary Offset Carrier Modulated Signals Based on Dual Estimate Loop[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(11): 1737-1740
- [4] 阮航,郑舟,张磊,等. 电离层延迟估计下的 AltBOC 信号联合跟踪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(3): 353-357
Ruan Hang, Zheng Zhou, Zhang Lei, et al. An AltBOC Union Tracking Method Based on Ionospheric Delay Estimation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(3): 353-357 (in Chinese)
- [5] Heiries V, Roviras D, Ries L, et al. Analysis of Non Ambiguous BOC Signal Acquisition Performance[C]//Proceedings of ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, 2004: 2611-2622
- [6] Paul Fine, Warren Wilson. Tracking Algorithm for GPS Offset Carrier Signals[C]//ION NTM 1999, Diego, USA, 1999: 671-676
- [7] Yan Tao, Wei Jiaolong, Tang Zuping, et al. Unambiguous Combined Correlation Functions for Sine-BOC Signal Tracking[J]. GPS Solution, 2015, 19: 623-638
- [8] Yin B, Wang G, Qi Y J. Unambiguous Sine-Phased Binary Offset Carrier Modulated Signal Tracking Technique[J]. OPTIK, 2017, 132: 284-290
- [9] Feng T, Kai Z, Liang C. Unambiguous Tracking of BOC Signals Using Coherent Combination of Dual Sidebands[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1555-1558
- [10] Zhang Y, Lu W, Liu R, et al. Improving Tracking Accuracy with Subcarrier Assistance and Code Monitoring for BOC Modulated Signal[J]. Computers & Electrical Engineering, 2016, 53: 374-384
- [11] Lee Youngpo, Chong Dahae, Song Ickho, et al. Cancellation of Correlation Side—Peaks for Unambiguous BOC Signal Tracking[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5): 569-572
- [12] 任嘉伟,贾维敏,陈辉华,等. AltBOC 无模糊双重估计跟踪环路设计[J]. 华中科技大学学报, 2013, 41(7): 47-51
Ren Jiawei, Jia Weimin, Chen Huihua, et al. Unambiguous Dual Estimate Tracking Loops Design for AltBOC[J]. Journal of Huazhong University of Sci & Tech, 2013, 41(7): 47-51 (in Chinese)

Design of Unambiguous Combined Tracking Loop for GNSS Complex Subcarrier Signal

Luo Xianzhi¹, Zhao Hongwei², Yan Hao²

(1.State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China;
2.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Complex subcarrier modulation signal, is a kind of BOC signal which is used complex exponential function as subcarrier, has been widely applied in GNSS(Global Navigation satellite system). The existence of multiple correlation peaks of the autocorrelation function of the complex subcarrier signal, will cause the acquisition error and tracking to the side peak when the signal is synchronized. To solve this problem, an unambiguous combined tracking loop for complex subcarrier signals is proposed. In this loop architecture, the main loop completes the coarse synchronization with BPSK-like algorithm, and the assisted loop realizes the accurate tracking together main loop. In this paper, the dual estimate tracking algorithm and the side-peak cancellation scheme are employed respectively in the assisted loop. The performance of tracking accuracy and anti-multipath capability of the proposed architecture is analyzed, and the practicability is verified by using the actual collected data. Simulation and experimental results show that the tracking structure proposed in this paper is practical and has good performance of anti-noise and anti-multipath.

Keywords: GNSS; BOC signal; complex subcarrier; combined tracking loop; auto-correlation