

基于合成相关函数的 BOC(n, n) 型信号捕获算法

曹晓亮¹, 郭承军¹, 张鑫鑫¹, 赵玉磊², 陶益杰²

(1. 电子科技大学电子科学技术研究院, 成都 611731; 2. 中国人民解放军 95972 部队, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 针对 BOC 信号的自相关函数多峰性导致捕获模糊度的问题, 通过分析 BOC 自相关函数及已有的捕获算法, 结合并行码相位捕获的传统方法, 提出了一种新的基于合成相关函数的 BOC(n, n) 型信号的捕获算法。该算法利用 BOC(n, n) 信号自相关以及 BOC(n, n) 和 PRN 码互相关, 经移位 $\pm T_c/2$ 、求和、取模、平方运算而实现。理论和仿真结果表明, 该算法可以移除自相关函数的副峰, 显著提高主峰峰值并且保证自相关主峰宽度, 具有较好的捕获性能, 且计算量小, 易于实现。

关键词: BOC(n, n); 信号捕获; 并行码相位; 合成相关

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)03-0051-04

An Acquisition Algorithm Based on Combined Correlation Functions for BOC(n, n) Signals

CAO Xiao-liang¹, GUO Cheng-jun¹, ZHANG Xin-xin¹, ZHAO Yu-lei², TAO Yi-jie²

(1. Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. No. 95972 Unit of PLA, Jiuquan 735000, China)

Abstract: In order to solve the ambiguous acquiring problem for Binary Offset Carrier (BOC) modulated signals caused by multiple peaks of its autocorrelation function, we put forward a new acquisition algorithm based on combined correlation functions for BOC(n, n) signals through analyzing the autocorrelation function of the BOC modulated signal and the existing acquisition algorithms, and by use of the traditional acquisition algorithm of parallel code phase search acquisition. The algorithm is realized by adopting the autocorrelation of BOC(n, n) signal and cross-correlation of BOC(n, n) with Pseudo Random Noise (PRN) code, and through the operations of shifting $\pm T_c/2$, summing, modulus and squaring. The theoretic analysis and simulation results show that: The proposed algorithm can remove the related side-peak, significantly improve the main-peak value and keep the autocorrelation peak width, while having an ideal acquisition performance, less computation cost, and is easy to implement.

Key words: BOC(n, n); signal acquisition; parallel code phase search; combined correlation

0 引言

BOC(Binary Offset Carrier)调制作为全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)中的一种调制方式^[1],其功率谱的裂变性可以实现多个卫星信号之间的频谱兼容,提高信号的抗噪声、抗干扰以及抗多径能力;另一方面,其自相关函数的多峰性虽然可以提高定位的精度,但是容易造成信号在捕获时出

现模糊度,从而产生误捕获^[2]。因此,BOC信号无模糊捕获成了国内外导航信号处理领域研究的热点。

目前对BOC信号无模糊度捕获的算法很多,主要有直接处理法^[3]、BPSK-like法^[4-6]、解模糊通用模型法^[7]和合成相关函数法^[8]等。BOC信号直接处理法与BPSK捕获的方法类似,接收信号与本地产生BOC信号进行相关,该算法实现简单但不能处理自相关函数的多峰性产生的模糊度问题;BPSK-like法是将方波形式的副载波等效为正弦波,这样,BOC调制的信号可以近似为2个不同载波的BPSK调制的信号之和,从而消除模糊性,但增加了相关峰的带宽,捕获性能较低^[9];解模糊度通用模型法是通过构建本地辅助信号,利用接收信号

收稿日期:2016-03-10

修回日期:2016-04-27

作者简介:曹晓亮(1991—),男,江西九江人,硕士,研究方向为卫星导航。

与辅助信号的互相关函数来消除副峰,该方法可以适用于任意阶数的 BOC 信号,但不能完全消除副峰;合成相关函数法有自相关副峰消除技术 (Autocorrelation Side-Peak Cancellation Technique, AS-PeCT)^[10]、Filtered 相关法^[11]、副载波相位抵消技术 (Sub Carrier Phase Cancellation, SCPC)^[12] 等。ASPeCT 通过自相关函数平方与 BOC/PRN 互相关函数平方之差来消除副峰,但对副峰消除的不彻底。Filtered 相关法与 ASPeCT 类似,都是利用 BOC 信号与 PRN 码互相关来消除副峰,只是 Filtered 相关法还借用了 BOC 信号与 PRN 码互相关的超前和滞后两路结果。Filtered 相关法比 ASPeCT 副峰消除效果更好,但仍存在副峰消除不够彻底的问题,SCPC 利用 BOC 信号与 QBOC (Quadratic BOC) 信号互相关来消除波峰,但会造成相关峰的带宽变宽。

针对上述 BOC 信号捕获的问题,提出了一种基于合成相关函数的 BOC(n, n)型信号的捕获算法。该算法结合传统的并行码相位的方法,利用 BOC(n, n)型信号自相关以及 BOC(n, n)和 PRN 码互相关,经移位 $\pm T_c/2$ 、求和、取模、平方运算而实现。算法中新的相关函数的副峰完全消除,主峰明显提高,相关函数的主瓣宽度和 BOC(n, n)型信号自相关函数的一致。因此,提出的算法具有较好的捕获性能。

1 BOC 调制技术原理

与传统的卫星导航系统 BPSK 调制方式不同,BOC 调制是在 BPSK 调制之前进行了一次副载波调制,其调制过程如图 1 所示,由于导航数据的周期远大于 PRN 码,所以图中没考虑。BOC 调制信号的通用表达式为 $\text{BOC}(f_s, f_c)$ ^[13],其中, f_s 表示副载波频率, f_c 表示 PRN 码速率。在卫星导航系统中, f_s 和 f_c 是 1.023 MHz 的倍数^[14]。

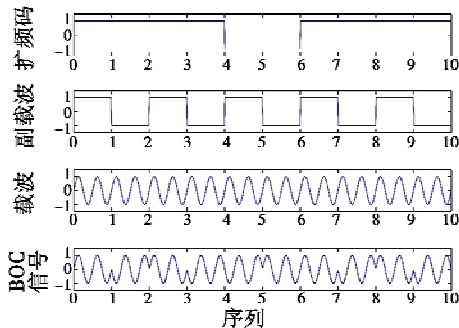


图1 BOC 调制过程

Fig. 1 Process of BOC modulation

BOC 信号的一般表达式为

$$S_{\text{BOC}}(t) = \sqrt{2P}c(t)\cos(\omega t)d(t)s_c(t) \quad (1)$$

式中: P 表示信号的功率; $c(t)$ 表示扩频码; ω 表示载波频率; $d(t)$ 表示导航数据; $s_c(t)$ 表示副载波,其形式为

$$s_c(t) = \text{sgn} \sin(2\pi f_s t + \varphi) \quad (2)$$

式中: sgn 表示符号函数; f_s 表示载波频率; φ 表示初始载波相位。本文研究的是当 $\varphi = 0^\circ$ 时的 BOC 信号即 sine-BOC。

由于 BOC(n, n)型信号的特性相同,BOC(n, n)型信号以 BOC(1,1)型为例。从图 2 中可以看出,与 BPSK 不同,BOC 信号的频谱主瓣在中心频点的两侧,这是由于副载波引起的频谱搬移。从图 3 中可以看出,与 BPSK 调制方式不同,BOC 自相关函数存在两个副峰,而 BPSK 只有一个主峰,这就表明捕获时存在模糊度的问题。但同时 BPSK 调制的信号主瓣的宽度明显大于 BOC(1,1),这体现了 BOC 调制信号的捕获精度高的特性。

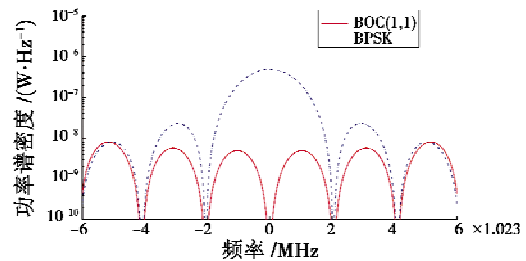


图2 BPSK 和 BOC(1,1)型信号功率谱密度

Fig. 2 PSD of BPSK and BOC(1,1) signal

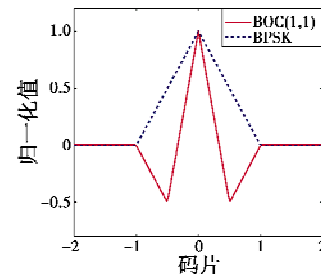


图3 BPSK 和 BOC(1,1)型信号自相关函数

Fig. 3 ACF of BPSK and BOC(1,1) signal

2 新的捕获算法

通过对合成相关捕获的结构分析,提出了一种新的捕获结构,通过完全消除副峰来达到捕获无模糊度,其数学表达式为

$$X^{\text{proposed}} = |X(\tau) + |X(\tau)||^2 \quad (3)$$

式中: $X(\tau) = X_{\text{BOC}}(\tau) + X_{\text{BOC/PRN}}(\tau + \frac{T_c}{2}) - X_{\text{BOC/PRN}}(\tau - \frac{T_c}{2})$; $X_{\text{BOC}}(\tau)$ 表示 BOC 的自相关函数; $X_{\text{BOC/PRN}}(\tau)$ 表示 BOC 与相应 PRN 码的互相关函数。

对于 BOC(1,1)有

$$X_{\text{BOC}}(\tau) = \text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) \quad (4)$$

$$X_{\text{BOC/PRN}}(\tau) = \frac{1}{2}\text{tri}_{-1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) \quad (5)$$

式中, $A \cdot \text{tri}_\alpha(\tau/l)$ 表示峰值高度为 A 、自变量为 τ 、中心为 α 、底部宽度为 l 的三角形函数。

将式(4)、式(5)代入式(3)得

$$X(\tau) = \text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) + \frac{1}{2}\text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_1\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1}\left(\frac{\tau}{l}\right) + \frac{1}{2}\text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) = 2\text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_1\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1}\left(\frac{\tau}{l}\right) \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)得

$$X^{\text{proposed}} = \left| X(\tau) + \left| X(\tau) \right| \right|^2 = \left| 2\text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_1\left(\frac{\tau}{l}\right) - \frac{1}{2}\text{tri}_{-1}\left(\frac{\tau}{l}\right) + 2\text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) + \frac{1}{2}\text{tri}_{1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) + \frac{1}{2}\text{tri}_{-1/2}\left(\frac{\tau}{l}\right) + \frac{1}{2}\text{tri}_1\left(\frac{\tau}{l}\right) + \frac{1}{2}\text{tri}_{-1}\left(\frac{\tau}{l}\right) \right|^2 = 16\text{tri}_0\left(\frac{\tau}{l}\right) \quad (7)$$

从式(7)中理论分析的结果可以得出,新提出的合成捕获结构在消除副峰的同时,使得主峰峰值增加了3倍。

由上述的理论分析,本文提出如图4所示的BOC(n,n)型信号捕获算法。

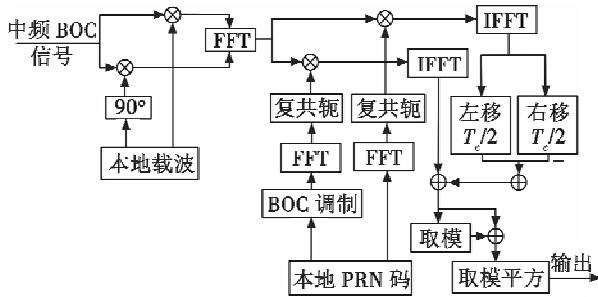


图4 改进的捕获算法

Fig.4 The improved acquisition algorithm

3 仿真分析

为了验证本文所提算法的有效性和性能,与本文中提到的合成相关函数捕获算法进行对比,比较的项目有相关函数、主峰宽度、比例峰值、计算量和检测概率。仿真中用的是BOC(1,1)型调制信号,信号的中频为9.548 MHz,采样率为38.192 MHz,PRN码长度为1023,时间长度为1 ms,载噪比(Carrier to Noise Ratio, CNR)为30~45 dBHz,统计的次数为100次。

图5为4种不同算法的主峰位置附近的相关包

络,与其他3种算法比较,本文算法副峰完全被消除,主峰的峰值明显高于其他算法,并且保持了与自相关函数相同的主瓣宽度,而其他3种算法都不能达到这些效果。因此,本文算法可以避免模糊度的捕获,利用BOC调制的特性,还可提高检测性能。

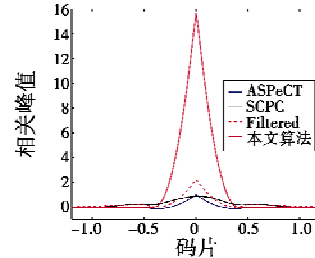


图5 4种算法下的相关峰值对比

Fig.5 Main-peak values of the four algorithms

比例峰值作为判定捕获的依据^[15],其定义为

$$P_o = \max(\text{abs}(X(\tau))) / \text{mean}(\text{abs}(X(\tau))) \quad (8)$$

式中, $X(\tau)$ 为得到的相关结果。对4种算法进行仿真,得到不同载噪比下比例峰值的仿真图,如图6所示。从图6中可以看出,本文算法的比例峰值高于其他3种算法,提高了0.5倍左右,可知本文算法具有更好的捕获性能。

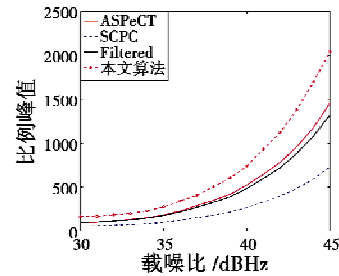


图6 4种算法的比例峰值对比

Fig.6 Peak to average power ratio of the four algorithms

在计算量方面,各个算法所需要的主要运算操作如表1所示。从表中看出,4种算法下的相关运算次数是相同的,主要不同在于取模平方和移位操作,相比移位操作,取模平方的计算更复杂,所以4种算法中本文算法的计算量更小。

表1 4种算法计算量对比

Table 1 Calculation cost of the four algorithms

捕获算法	所需的主要运算操作次数			
	取模平方	相关	移位	数乘
ASPeCT	2	2	0	0
Filtered	1	2	2	1
SCPC	2	2	0	0
本文算法	1	2	2	0

图7比较了4种算法在不同的载噪比下检测概率的特性,仿真用的捕获判定的方式是:选定相同的门限值,将最大非相关积分幅值与次大非相关积分幅值做

比较。从图7中可以看出,本文算法的检测概率比其他3种算法都高,而检测概率高,说明经捕获后的信号的信噪比也高,从而验证了本文算法具有较好的捕获性能。

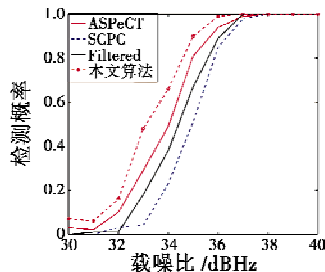


图7 4种算法下的检测概率对比

Fig.7 Probability of detection of the four algorithms

4 结束语

对于BOC(1,1)型信号捕获模糊度的问题,通过分析BOC信号的特性,提出了一种新的BOC(1,1)型信号捕获的算法。基于FFT对BOC/本地BOC、BOC/本地PRN两路相关结果移位 $\pm T_c/2$ 、求和、取模、平方的组合运算,得到新的相关函数。仿真结果表明,新的相关函数消除了原相关函数的副峰,增加了主峰,并且主瓣宽度和BOC(1,1)型信号自相关函数相同,进而提高了比例峰值和捕获精度,具有较好的捕获性能。相比其他类似的捕获算法,捕获速度快,减少了计算量,硬件实现简单,为卫星导航系统中的BOC(n,n)型信号捕获提供了新的捕获方法。

参考文献

[1] 郝建军,何秋生,李辉,等.伽利略系统BOC信号的特性及码跟踪方法研究[J].电光与控制,2007,14(7):140-143.

[2] BETZ J W. Binary offset carrier modulations for radio navigation[J]. Journal of the Institute of Navigation, 2001, 48(4):227-246.

[3] 王庆民,封欣,伍蔡伦,等. BOC 卫星导航信号直接解调的方法及实现[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009,49(4):570-573.

[4] MARTIN N, LEBLOND V, GUILLOTTEL G, et al. BOC(x,y) signal acquisition techniques and performances [C] // Pro-

ceedings of ION GPS/GNSS, 2003:188-198.

[5] ADINA B, ELENA S L, MARKKU R. BPSK-like methods for hybrid-search acquisition of Galileo signals[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2006:5211-5216.

[6] 樊子晔,陈佳品,李振波.用于BOC(1,1)信号捕获的非模糊算法[J].电光与控制,2009,16(5):34-38.

[7] 陈辉华,任嘉伟,贾维敏,等. BOC 信号解模糊通用模型的构建与应用[J].电子学报,2013,41(1):1-7.

[8] OLIVIER J, CANNON E M, GÉRARD L. A new unambiguous BOC(n,n) signal tracking technique [C]//Proceedings of the European Navigation Conference GNSS, Rotterdam, 2004:123-134.

[9] 杨力,潘成胜,薄煜明.基于相关重构的BOC调制信号捕获新方法[J].宇航学报,2009,30(4):1675-1679.

[10] JULIEN O, MACABIAU C, CANNON E M. ASPeCT: unambiguous Sine-BOC(n,n) acquisition/tracking technique for navigation applications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1):150-162.

[11] NUNES F D, SOUSA F M G, LEITAO J M N. Multipath mitigation technique for BOC signals using gating functions [C]//Proceedings of the Navitec Conference, ESA-ESTEC, 2004:651-664.

[12] 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.

[13] BETZ J W. The offset carrier modulation for GPS modernization [C]//Proceedings of ION GPS/GNSS, 1999:639-648.

[14] Navstar GPS Space Segment. IS-GPS-200 Global positioning system directorate systems engineering & integration interface specification [S]. Global Positioning Systems Directorate, 2011:23-36.

[15] ZHANG Y M, SU X, HUAN L H, et al. Performance evaluation of three BOC signal acquisition techniques [C]// International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), 2015:148-150.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅