

BOC 调制信号的抗干扰性能研究^{*})

杨 力 薄煜明 田明浩

(南京理工大学控制科学与工程系 南京 210094)

摘 要 BOC 调制技术在扩频通信中的应用已日趋广泛。为此,本文在对 BOC 调制信号的功率谱和自相关特性进行深入研究,以及将其与 BPSK 调制相比存在的优势进行深入分析的基础上,以 BOC(10,5),BPSK(10,23)为例,进行了基于 FFT 的同步捕获环路的设计与仿真,并重点就不同干信比条件下两者的捕获性能进行了分析。结果表明,在一定条件下 BOC 调制信号具有更好的抗干扰能力,为进一步抗干扰技术的研究提供了理论基础。

关键词 BOC, 抗干扰, 干信比, 仿真

Research of Anti-jamming Characteristic for BOC Signal

YANG Li BO Yu-Ming TIAN Ming-Hao

(Department of Control Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210094)

Abstract Binary-Offset-Carrier waveforms will be applied widely in the spreading communication, so based on the deeply research on power spectra and autocorrelation characteristic of BOC waveforms and the deeply analysis on the advantage compare to the BPSK waveforms, the FFT in-phase acquisition ring has been designed and simulated, besides, the acquisition ability of this two waveforms on the different J/S is analyzed. The result shows that the BOC waveforms have the better anti-jamming ability in the given condition, and they also provide theoretical foundation for the further research of anti-jamming technical.

Keywords BOC, Anti-jamming, Jamming signal ratio, Simulation

1 引言

二进制偏移载波 BOC(Binary Offset Carrier)调制通常记为 BOC(f_s, f_c),其中 f_s 为亚载波频率, f_c 为扩频码速率。其功率谱密度形状由一些主瓣和副瓣构成,其扩频码是矩形脉冲,亚载波也是方波,因而其频谱是无限带宽的;其相关函数具有多个峰值。文[1]中分别给出了 BOC(10,5)、BOC(5,2)、BOC(8,4)的归一化频谱和归一化自相关函数。正是由于其独有的功率谱谱特性以及自相关多峰特性,在各卫星通信频段使用拥挤的今天,为信号的有效传输带来了很大的优势,进而使得 BOC 调制方式在民用及军用卫星通信中越来越受到关注。计划于 2008 年投入使用的 GALILEO 系统是欧洲建立的全球卫星导航定位系统,其 E2-L1-E1 频段上使用了 BOC(1,1) 信号;美国的 GPS 现代化计划中也选择了采用 BOC(10,5)调制的信号作为新的军用信号。

在现在的通信环境中除背景噪声外,通常还存在不容忽视的人为干扰,因此随着 BOC 调制方式的不断广泛应用,对其抗干扰性的分析显得尤为重要。目前,国内对 BOC 调制信号抗干扰性能的研究尚处于起步阶段。本文在充分分析 BOC 调制的特性及优势的基础上,展开了对其抗干扰性能的分析,并最终通过仿真进行了验证,为 BOC 调制信号接收系统抗干扰技术的研究奠定了基础。

1 BOC 调制信号特性及优势

1.1 BOC 调制信号的频谱与功率

BOC 调制是卫星导航系统的一种创造性服务,由于经过了方波调制,其信号有着特殊频谱。信号 $s(t)$ 与频率为 f_s 的亚载波相乘如式(1)所示,亚载波将原信号的频谱分裂成两部分,分别位于载波频率的左右两边,即信号功率并不是调制到载波频率的主瓣,而是调制到了载波频率两侧的旁瓣上。由于功率谱是实函数,因此经傅里叶变换后其频谱关系如式(2)所示。

$$S_s(t) = s(t) * \text{sign}(\sin(2\pi f_s t)) \quad (1)$$

$$S_s(f) \approx \alpha S(f) \otimes (\delta(f - f_s) - \delta(f + f_s)) \quad (2)$$

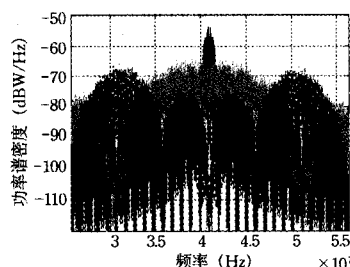


图 1 三种信号功率谱特性

目前扩频通信系统中,常采用 BPSK 调制方式,使得大部分功率集中在零频点处,而 BOC 调制可以使得大部分功率集中在零频点的两侧。图 1 示出码速分别为 1.023MHz 和 10.23MHz 的 BPSK 调制信号,以及 BOC(10,5)调制信号的功率谱特性曲线。可见,在卫星通信技术迅猛发展的今天,随着信号种类在逐渐增加,BOC 调制可以有效地实现频谱隔

^{*}) 国家高技术研究发展计划(863 计划)2006AA701213B。杨 力 博士生,研究方向为导航制导与控制;薄煜明 博士生导师,研究员;田明浩 博士生。

离;另外,接收机工作时,不但要接收来自多颗卫星的信号,而且要接收来自同一颗卫星的在特定频段内的数种信号。当要接收某一颗卫星的某一种信号时,其余的信号自然便可能对其造成干扰。一般用频谱隔离系数 K_{fs} 来表征这种干扰的程度,如式(3)所示。

$$K_{fs} = \int_{-B/2}^{B/2} \bar{G}_j(f) \cdot G_s(f) df \quad (3)$$

$\bar{G}_j(f)$ 为干扰信号的功率谱密度, $G_s(f)$ 为接收信号的功率谱密度。BPSK 调制信号的功率谱表示为

$$G_{\text{BPSK}(f_c)}(f) = \frac{A^2}{2\pi f_c} \cdot \left[\frac{\sin \pi f \frac{1}{f_c}}{\pi f \frac{1}{f_c}} \right]^2 \quad (4)$$

参照 BPSK 调制信号频谱公式的推广,可以得到 BOC 调制的归一化功率谱密度为

$$G_{\text{BOC}(f_s, f_c)}(f) = \frac{1}{4T_s} \left(\frac{\sin(\pi f T_s) \sin(4\pi f T_s)}{\pi f \cos(\pi f T_s)} \right)^2 = f_c \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right)} \right]^2 \quad (5)$$

其中 f_c 为扩频码速率, f_s 为亚载波频率。

经过计算,以 1.023MHz 的 BPSK 信号作为基准信号,BOC(10,5) 与 1.023MHz 的 BPSK 信号的频谱隔离系数为 -87.906dB,而 10.23MHz 的 BPSK 信号与 1.023MHz 的 BPSK 信号的频谱隔离系数为 -69.807dB,另外,BOC(10,5) 与 10.23MHz 的 BPSK 信号的频谱隔离系数为 -80.2dB。可见,相比于 10.23MHz 的 BPSK 信号,BOC(10,5) 有接近 18dB 的频谱隔离优势。因此,可以将较大功率 BOC 信号与 BPSK 信号同时发射,并做到两者不相互干扰,进而提高 BOC 调制信号的抗干扰能力。

1.2 BOC 调制信号的自相关与码跟踪

通常 CDMA 接收机的码捕获和码跟踪,都需要首先进行相关运算。另外,表征鉴相器跟踪性能的 S 曲线也是归一化相关函数的函数。因此信号的相关性能好坏尤为重要。理想情况下,BOC 信号的相关函数为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G_{\text{BOC}(f_s, f_c)}(f) e^{j2\pi f \tau} df \quad (6)$$

其中, $G_{\text{BOC}(f_s, f_c)}(f)$ 为 BOC 调制信号的功率谱密度函数。BOC 信号是将 PN 码进行一次方波调制后再进行载波调制,通常可认为 PN 序列与方波初始相对对齐,因此接收端两者的同步可以同时进行,即将本地 PN 码进行一次方波调制后再与接收信号进行相关运算。通过相应的捕获算法必定能够寻找到相关峰值,这样就完成了相关峰值的捕获。不同的是,普通的 BPSK 直扩序列的自相关波形只有一个峰值,而 BOC 信号的自相关波形存在多个峰值。

同样以上述三种信号为例,图 2 分别示出了三种信号的自相关函数曲线。可以得出 BOC(10,5) 调制信号存在 7 个相关峰值,且主相关峰较窄。三者主相关峰宽度关系为

$$W_{\text{BOC}(10,5)} = 0.286 W_{\text{BPSK}(10,23)} = 0.0286 W_{\text{BPSK}(1,023)} \quad (7)$$

另外,接收机在白噪声中最小可能码跟踪 RMS 误差 σ 可以表示为

$$\sigma = \frac{1}{2\pi \cdot \bar{B}_{\text{RMS}}} \sqrt{\frac{B_L}{\lambda \cdot C/N_0}} \quad (8)$$

即 σ 分别与信号在接收机前端的均方根带宽 $\bar{B}_{\text{RMS}}$ 、码跟踪环的等效单边矩形带宽 B_L 、接收时的载噪比 C/N_0 有关。与

BPSK(10.23)相比,BOC(10,5) 调制信号自相关函数的主峰较窄,因此利用(6)式 BOC(10,5) 调制信号可以产生高的码跟踪精度。经计算,在白噪声中 BOC(10,5) 调制信号的 RMS 伪距测量误差仅约为 BPSK(10.23) 调制信号的 0.38 倍。因此,相比于 BPSK(10.23) 调制信号,BOC(10,5) 调制信号具有较强的码跟踪能力。

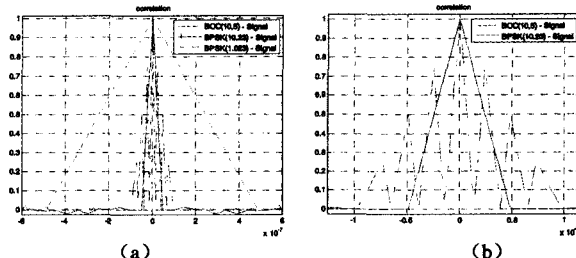


图 2 (a)BPSK(10.23)、BPSK(1.023)、BOC(10,5) 自相关函数, (b) 中心放大

2 BOC 调制信号抗干扰性能分析

目前已经有导航卫星应用了 BOC 调制技术,并且随着卫星通信的发展和通信频段信号的逐渐拥挤,BOC 调制技术将得到更为广泛的应用。因此,为对其民用或军用通信加以保障,其抗干扰性能的研究尤为重要。

从干扰样式上主要将干扰分为压制式干扰和欺骗性干扰两种^[2]。欺骗干扰是发射与真实信号相似的假信号,达到干扰真实信号的目的,通常分为产生式和转发式。但在未知真实信号码结构等信息时,产生式欺骗干扰难度较大,而转发式干扰又对转发延时等要求较高。压制式干扰包括连续波干扰、噪声带限干扰、相关干扰等多种方式,干扰方式不同干扰效果也不尽相同。其优点是无需掌握伪码序列结构、信号速率等技术参数,仅需掌握信号载频的中心频率,技术上较易实现,干扰代价也较低。虽然所需功率较高,但该方式在一定条件下是一种有效的干扰手段。

就压制而言,由于与 BPSK(10.23) 调制信号相同,BOC(10,5) 调制信号的等效矩形带宽也较大,具有良好的抗窄带干扰的能力。另外,由以上分析可知,BOC 调制信号能以较大的功率发射,进而在一定程度上提高了其抗压制干扰的能力。但是,BOC 调制信号是否在抗宽带干扰能力上占据同样的优势,将有待于进一步的研究。以下将对 BPSK 调制信号针对 BOC 调制信号的抗宽带干扰能力进行仿真验证。

3 BOC 调制信号抗干扰效果分析

3.1 抗干扰验证仿真设计

在扩频通信中各种可能存在的人为干扰,如噪声、窄带、宽带干扰^[3]等,对 BOC 通信系统的影响主要看干扰信号到底能在多大程度上影响 BOC 调制信号的接收和处理。随着计算机技术的发展,采用计算机建模仿真,是解决这一问题的有效途径。

对于 BPSK(10.23) 和 BPSK(1.023) 调制信号而言,可以通过式(8)计算出前者扩频增益比后者高出 10dB。因此,仿真计算主要以 BOC(10,5) 与 BPSK(10.23) 为主展开。

$$G_{d, \text{BPSK}(10,23/1,023)} = 10 \times \log(10.23\text{MHz}/1.023\text{MHz}) = 10\text{dB} \quad (8)$$

首先分别搭建了基于 FFT 的直接捕获技术的 BOC 调制

信号和 BPSK 调制信号的同步捕获环路,且捕获方法、带宽等参数设定相同。捕获算法流程如图 3 所示。干扰信号存在多种形式,例如锯齿波调频信号、噪声调频信号等,本文最终选择其中一种较为常见的干扰信号应用到仿真系统中。

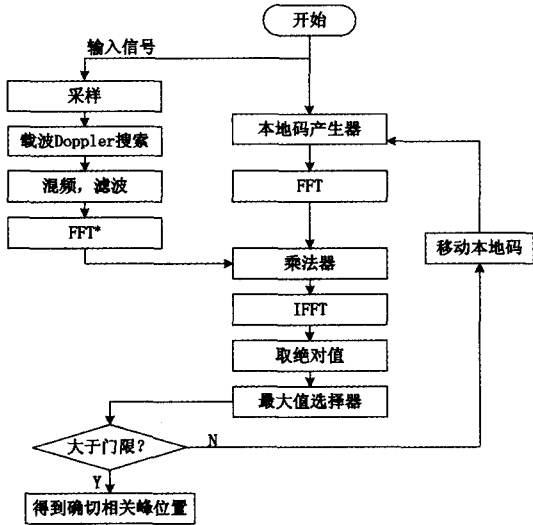


图 3 捕获算法流程

3.2 抗干扰仿真及效果分析

在 Matlab 7.1 环境下将经过直接序列扩频后的序列分

别进行 BOC(10,5)、BPSK(10.23)调制,产生 BOC 调制信号和 BPSK 调制信号。设定初始状态,信号分别带有载波 doppler 为 1000Hz,扩频码偏移 1000 个码片。设定理想状态只存在背景噪声。捕获处理的数据量分别为 3ms 数据。BOC 中频均选择 40.92MHz,BPSK 中频均选择 20.46MHz。另外,仿真中在加入干扰和高斯噪声前分别对 BOC 和 BPSK 调制信号功率单位化。

对于 BOC 调制信号,在没有施加干扰情况下,粗捕获阶段相关峰值出现在第 1000 个采样点左右,且可以把码偏移纠正到 1990 个码片左右;对于 BPSK 调制信号,在没有施加干扰情况下,粗捕获阶段相关峰值出现在第 1001 个采样点左右,且可以把码偏移纠正到 1992 个码片左右。

干扰选择宽带压制式干扰,即干扰信号对 BOC、BPSK 信号接收机接收带宽内实施全频覆盖。

BOC(10,5)与 BPSK(10.23)调制信号接收环路中,信号的捕获均采用了基于 FFT 的快速搜索的频域直接捕获技术进行信号的捕获^[4~6];在不同干信比的情况下,利用本文仿真的接收机对两种信号进行捕获,得到的捕获效果图分别如表 1、表 2 所列。表中 *a* 为干信比(单位:dB);*b* 为最大相关峰值位置(单位:采样点个数);*c* 为载波 doppler(单位:Hz);*d* 为本地码纠正偏移量(单位:码片个数)。

表 1 不同干信比情况下 BOC(10,5)调制信号接收环路捕获效果

a	0	29.54	31.82	32.04
b	1000	1000	1000	1071
c	1000	1000	1000	-1500
d	1990	1990	1990	404130

表 2 不同干信比情况下 BPSK(10.23)调制信号接收环路捕获效果

a	0	26.02	28.30	28.63
b	1001	1001	1001	560
c	1000	1000	1000	500
d	1992	1992	1992	937110

从仿真的结果可以看出,对于本系统所采用的干扰信号,当没有人为干扰或干信比较小时,两种接收系统均有很明显的相关峰值;当两种接收系统干信比分别达到 31.82dB 和 28.30dB 时,相关峰值已经很不明显;当两种接收系统干信比

分别达到 32.04dB 和 28.63dB 时,将完全压制信号,使得捕获失败。因此,利用本文搭建的仿真系统,对于宽带干扰而言,在同等条件下 BOC(10,5)调制信号比 BPSK(10.23)信号

(下转第 59 页)

大,重启事务不能满足其截止期的比率随之大大增加。

图8比较响应时间在不同协议之间的比较。可以看出,由于数据广播环境的缺点,OCC协议具有最长的平均响应时间,我们提出的协议由于较低的重启率和未满足事务截止期的比率,性能最好。

结论 在本文,我们结合乐观并发控制协议和时标排序协议提出了实时广播环境下的有效乐观并发控制协议,它支持不连接服务器的只读移动事务的自主执行,尽管移动更新事务不得不通过有限的上行带宽到数据库服务器做最后的验证,通过取消那些最终会夭折的事务,它还是节省了带宽的消耗。因此,通过把数据库服务器中更新事务执行写操作的数据对象实时包含在数据广播通道中,我们可以区分出严重冲突和伪造冲突,移动事务成功提交的可能大大增加。试验结果表明,移动只读事务满足弱一致性,更多事务能够满足截止期,我们能够获得更高层次的并发控制。

参考文献

- 1 Alonso R, Korth H. Database systems issues in nomadic computing. In: Proc. of the ACM SIGMOD Conference, Washington D C, June 1993. 388~392
- 2 Imielinski T, Badrinath B R. Mobile wireless computing: challenges in data management. *Communications of the ACM*, 1994, 37(10):18~28
- 3 Stabjivic J A, Son S H, Hansson J. Misconceptions about real-time databases. *Computer*, 1999, 32(6):29~37
- 4 Pitoura E, Bhargava B. Building information systems for mobile environment. In: Proc. of the 3rd international conference on information and knowledge management, 1994. 371~378
- 5 Garcia-Molina H, Wiederhold G. Read-only transactions in a distributed database. *ACM Transactions on Database Systems*, 1982, 7(2):209~234
- 6 Barbara D. Certification reports: supporting transactions in wireless systems. In: Proceedings of 17th International Conference on

Distributed Computing System, USA, 1997. 466~473

- 7 Acharya S, Alonso R, Franklin M, et al. Broadcast disks: data management for asymmetric communication environments. In: Proceedings of the ACM SIGMOD Conference, 1995. 199~210
- 8 Herman G, Gopel G, Lee K C, et al. The datacycle architecture for very high throughput database systems. In: Proceedings of the ACM SIGMOD Conference, 1987. 97~103
- 9 Shanmugasundaram J, Nithrakashyap A, Sivasankaran R, et al. Efficient concurrency control for broadcast environments. In: ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 1999. 85~97
- 10 Lee V C S, Lam K W, Kuo T-W. Efficient validation of mobile transactions in wireless environments. *Journal of Systems and Software*, 2004(1):183~193
- 11 Pitoura E, Chrysanthos P K. Scalable processing of read-only transactions in broadcast push. In: Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Distributed Computing System, 1999. 432~439
- 12 Pitoura E. Supporting read-only transactions in wireless broadcasting. In: Proc. 9th Workshop on Database and Expert Systems Applications, Vienna, Austria, August 1998. 418~422
- 13 Pitoura E, Chrysanthos P K. Exploiting versions for handling updates in broadcast disks. In: Proc. 25th Int. Conf. on Very Large Data Bases, Edinburgh, UK, September 1999. 114~125
- 14 Bernstein P A, Hadzilacos V, Goodman N. Concurrency control and recovery in database systems. Addison-Wesley, 1987
- 15 Lee V C S, Lam K W, Son S H. Concurrency control using timestamp ordering in broadcast environments. *The Computer Journal*, 2002, 45(2): 410~422
- 16 Li Guohui, Yang Bing. Efficient Optimistic Concurrency Control for Mobile Real-Time Transactions in a Wireless Data Broadcast Environment. In: Proc. of 11th IEEE Int Conf. on Embedded and Real-time Computing Systems and Applications, August 2005. 443~446
- 17 Bober P M, Carey M J. Multiversion Query Locking. In: Proceedings of the VLDB Conference, Vancouver, Canada, August 1992. 497~510

(上接第35页)

的抗干扰性至少高出 3.41dB。

结论 BOC调制方式应用逐渐广泛,因此对其抗干扰性的研究势在必行。本文对比于目前扩频通信中常见的BPSK调制方式,分析研究了BOC调制的功率谱和自相关特性及其存在的优势;在其潜在的干扰中,以阻塞式压制干扰为例,开展研究并进行仿真验证。通过仿真最终得出,基于本文所设计的信号同步环路,在同等条件下BOC(10,5)调制信号比BPSK(10,23)信号的抗干扰性至少高出 3.41dB,为进一步的BOC调制信号抗干扰技术的研究提供了理论和仿真验证基础。

参考文献

- 1 邱致和. GPS M码信号的BOC调制[J]. *导航*, 2005, 3(1)

- 2 谭显裕. GPS在导航战中的作用及其干扰对抗研究[J]. *现代防御技术*, 2001(6):42~47
- 3 Betz J W. Effect of Jamming on GPS M Code Signal SNIR and Code Tracking Accuracy[J]. In: Proceedings of ION 2000 National Technical Meeting, Institute of Navigation, January 2000
- 4 Wolfert R, et al. Direct P(Y)-Code Acquisition under a Jamming Environment[J]. In: IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium, April 1998. 228~235
- 5 Davenport R G. FFT Processing of Direct Sequence Spreading Codes Using Modern DSP Microprocessors. In: Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1991, 1:98~105
- 6 邢兆栋, 张其善, 杨东凯. GALILEO接收机中BOC(1,1)信号的捕获[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(6)