GALILEO 接收机中 BOC(1,1)信号的捕获

邢兆栋 张其善 杨东凯

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: BOC(1,1)(Binary-Offset-Carrier)信号相关函数中的零值会使接收机判定没有捕获到信号. 为了完全捕获到 BOC(1,1)信号,从副载波相位和码相位角度出发,提出了一种 3 路并行捕获方法. 通过数字仿真得到了 BOC(1,1)和扩频码的相关函数图,比较了二者相关函数的峰值. 推导了 BOC(1,1)相关函数的解析式,给出了相关函数中的零点位置和峰值位置,比较了 BOC(1,1)和扩频码的相关函数数值及捕获. 3 路本地 BOC 信号以其中一路相位为基准,另外 2 路相位分别超前、滞后该路. 给出了 3 路本地信号的生成方法及捕获的结构框图. 仿真结果表明,捕获码相位差在半个码片内时,BOC(1,1)信号的捕获率从 33.3% 提高到 100%,码相位捕获范围从 1/6 码片增大到 1/2 码片. 该方法可为跟踪环路提供相位信息,适用于BOC(n,n)信号的捕获.

关 键 词: 全球定位系统; 接收机; 导航; 相关器

中图分类号: TN 967.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0687-04

Acquisition for BOC (1,1) signal in GALILEO receiver

Xing Zhaodong Zhang Qishan Yang Dongkai

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The zero values in BOC(1,1)(binary-offset-carrier) signal correlation function could make the receiver judge that the signal was not acquired. From the sub-carrier phase and code phase viewpoint, an acquisition method with three parallel tags was proposed to acquire the BOC(1,1) completely. The BOC(1,1) and its spread code correlation function figure were drawn by digital simulation, and the correlation function peaks were compared. The analytic formula for BOC(1,1) autocorrelation function was deduced, the position for peak values and zero values were shown. The correlation function values and acquisition were compared between BOC(1,1) and its spread code. The phase in one tag served as benchmark, the other two tags phases were respectively earlier or later than the benchmark in three local BOC(1,1) signals. The generation method for three local BOC(1,1) signals and the acquisition method figure were shown. When the difference of code phase between the received and the local BOC(1,1) signal lies in the half code chip, the signal acquisition rate increases from 33.3% to 100%, and the code phase range increases from 1/6 to 1/2 chip width by simulation. The method can provide phase information to the track loop and adapt to acquisition for BOC (n,n) signal.

Key words: global positioning system; receivers; navigation; correlators

GALILEO 系统是欧洲建立的全球卫星导航定位系统,计划于 2008 年投入使用,我国已成为参加 GALILEO 计划的第一个非欧盟成员国[1]. GALILEO 系统采用码分多址 CDMA 扩频通信体

收稿日期: 2005-04-26

基金项目: 国家 863 资助项目(2004AA133020)

作者简介: 邢兆栋(1976-),男,山东济南人,博士生, xzd1231@126.com.

制[2],其 10 种信号有 4 种服务类型,其中 E2-L1-E1 频段上的 BOC(1,1)信号上的数据属于公开服务数据,类似于 GPS 系统的 C/A(Coarse/Acquisition)码信号,所以研究 BOC(1,1)信号的接收对研制民用 GALILEO 接收机具有重要意义[3,4].

扩频通信中信号淹没在噪声之下,信号捕获一般采用非相干能量检测,扩频码的自相关函数是判定信号是否捕获的依据. BOC 信号受副载波影响,其自相关函数具有多个峰值和零点,零点会使接收机判定信号不存在,但实际上信号已经捕获到. 目前 BOC 信号捕获方法的主要思路是:将 BOC 自相关函数的多峰波动性转变成类似扩频码自相关函数的单峰性,如 BPSK like 方法[5],仅取 BOC 信号的边带信号或取单独 2 个边带信号后再综合考虑的方法[6,7]. 但这使接收机结构复杂,且有 3 dB 或 1 dB 能量损失,定位精度下降. 消除副载波也是去除 BOC 相关函数多峰性的一种方法,如文献[8]对 GPS M 码(军用码)的跟踪环路中使用复制码技术,但仅能消除副载波相位在具体某个点的影响;文献[9]在一个通道里采用副载波和码 2 个相关器,但没有调整副载波相位,使得捕获搜索时要避开零点位置. 针对上述问题,本文对 GALILEO 系统中 BOC(1,1)信号的捕获展开了研究,提出了一种 3 路并行捕获方法.

1 GALILEO 系统中的 BOC(1,1)信号

BOC 信号原理见图 1,其中,f_c 为扩频码速率,f_s 为副载波速率. 导航数据调制到扩频码后,再调制一矩形副载波,生成 BOC 信号,最后调制到导航信号频段的主载波上发射出去,与 GPS C/A 码信号的区别是引入了一矩形副载波. BOC 信号表示形式为 BOC(α,β),其中副载波速率是$\alpha\times$1.023 MHz,扩频码速率是$\beta\times$1.023 MHz[6,7]. GALILEO 系统的 BOC(1,1)信号位于 E2-L1-E1 频段,副载波速率是 1.023 MHz,扩频码速率是 1.023 MHz.

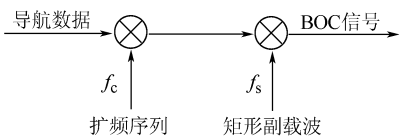

图 1 BOC 信号原理

BOC 信号的复数形式公式为[6,10]

$$s(t)=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta}\sum a_k u_{nT_s}(t-knT_s-t_0)C_{T_s}(t-t_0) \tag{1}$$

式中,$\{a_k\}$ 为数据调制后的扩频码单元大小;$c_{T_s}(t)$是副载波;周期为 $2T_s$;u_{nT_s}为扩频符号;θ 为相位,t_0 为初始时间. 因 GALILEO 系统的信号结构还未确定,可选一伪随机 PN(Pseudo-Random Noise Code)码替带 GALILEO 系统的扩频码,该扩频码和 BOC(1,1)的自相关函数以及 BOC(1,1)自相关函数绝对值的数字仿真结果如图 2 所示. 从图中可看出,BOC(1,1)信号的自相关函数及其绝对值均具有 3 个峰值,2 个零点,而扩频码自相关函数的仅有一个峰值.

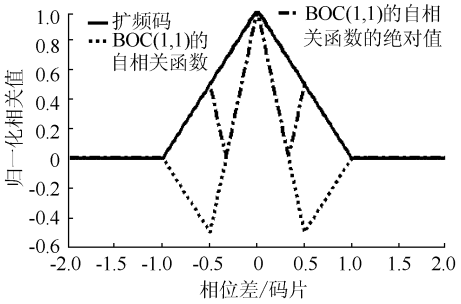

图 2 扩频码、BOC(1,1)的自相关函数和 BOC(1,1)自相关函数的绝对值

2 接收机中 BOC(1,1)的相位选取

当 $2f_s/f_c$ 为偶数时,BOC 调制的功率谱密度为[6]

$$G_{\mathrm{BOC}(f_s,f_c)}(f)=f_c\left(\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right)\sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f\cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right)}\right)^2 \tag{2}$$

式中,f_s 为副载波速率;f_c 为扩频码速率.

则理想情况下 BOC 信号的相关函数为

$$R_s(\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}G_{\mathrm{BOC}(f_s,f_c)}(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f\tau}\mathrm{d}f \tag{3}$$

对于 BOC(1,1)信号:

$$f_s=f_c \tag{4}$$

$$\frac{1}{f_c}=T_c \tag{5}$$

且

$$\omega=2\pi f \tag{6}$$

将式(2)、式(4)~式(6)带入式(3)中得:

$$R_s(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left(\sin c^2\left(\frac{\omega}{4f_c}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}-\sin c^2\left(\frac{\omega}{2f_c}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}\right)\mathrm{d}\omega=$$

$$\begin{cases}f_c\left(1-\dfrac{3|\tau|}{T_c}\right) & |\tau|<\dfrac{T_c}{2}\\ -f_c\left(1-\dfrac{|\tau|}{T_c}\right) & \dfrac{T_c}{2}\leqslant|\tau|\leqslant T_c\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

由式(7)并结合图 2 得出:

1) 相位差在 1/2 码片和一个码片之间时,BOC 信号相关函数的绝对值和对应扩频码的相关函数相等;

2) 在 1/2 码片相位差范围内,BOC(1,1)相关函数低于其对应扩频码的相关函数,且在$\pm T_c/3$处相关函数为 0,在 0 和$\pm T_c/2$处有峰值;

3) 假设码相位差在$-T_c \sim T_c$内均匀分布,并以 GPS C/A 码捕获时要求的半个码片为原则,则仅$T_c/6$码相位差内相关值大于阈值,在$T_c/2 \sim T_c/6$之内的相关值均低于阈值,与扩频码半个码片内的捕获率为 100% 计,其捕获率为$\frac{T_c}{6}\Big/\frac{T_c}{2}=33.3\%$.

接收机采用非相干能量包络检测信号时,主要依据是 BOC(1,1)信号的自相关函数的绝对值. 若在捕获中通过调整副载波相位,则可使 BOC 信号自相关函数的零点处对应的相关函数与其扩频码的相关函数相同,同时提高了零点附近相位差的相关函数值,提高捕获率. 若同时调整本地扩频码相位,则可更加提高捕获率.

3　BOC(1,1)信号的捕获

GALILEO 接收机对 BOC(1,1)信号捕获时,也需要进行多普勒频移和码相位的二维搜索,这一点与 GPS C/A 码的捕获相同.

采用常用的串行搜索方法,本文设计了如图 3 所示的捕获框图,图中仅给出了同相路信号 I,正交路信号 Q 与 I 的过程相同. GALILEO 接收机接收的 BOC 调制信号在与载波剥离后,与本地 BOC 信号相关.

以一路本地信号的码相位为基准,引入超前和滞后$T_c/3$相位的 2 路副载波,并与超前和滞后的本地扩频码一起形成 2 路 BOC 信号. PN 码和副载波均由码 NCO(Numerical Controlled Oscillator)产生,P 代表即时路,EΔT 代表超前路,LΔT 代表滞后路.

信号检测采用$\sqrt{I^2+Q^2}$包络检测,3 路信号并行处理,最大值超过阈值,则初步认为捕获到 BOC 信号,其余的信号判决和搜索控制逻辑与 GPS C/A 码的相同,关于此方面的文献很多,本文不再论述.

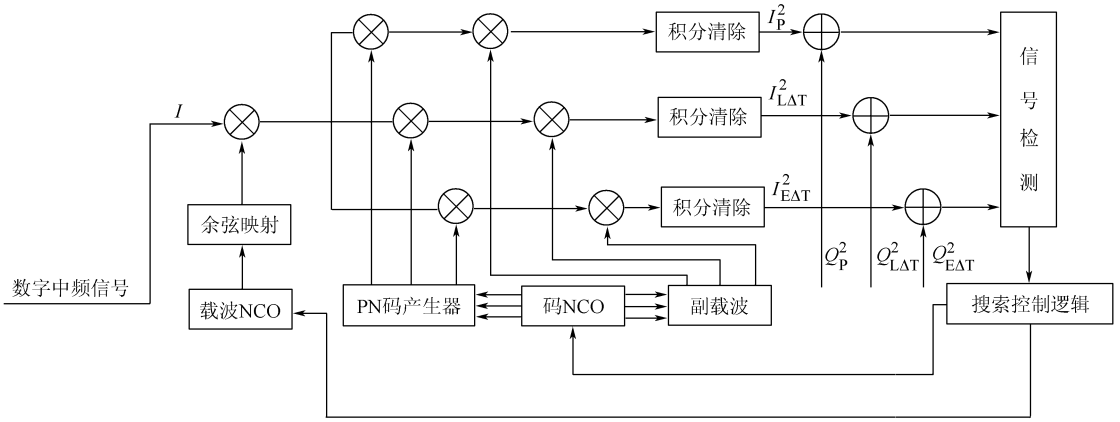

图 3　BOC(1,1)信号的捕获框图

4　仿真结果

在仿真过程中,假设 GALILEO 接收机本地信号与接收信号的载波已同步,本地 BOC 信号的扩频码超前接收信号的扩频码一个码片,接收机调整码 NCO,使本地和接收 BOC 信号的扩频码相位差从超前一个码片变为滞后一个码片,达到仿真任意相位差的目的,图 4 给出了 3 路信号的输出包络波形. 结合仿真数据结果可看出,本地码相位超前接收信号$T_c/2 \sim T_c/6$相位差时,由超前捕获路捕获到;本地码相位滞后接收信号$T_c/2 \sim T_c/6$相位差时,由滞后捕获路捕获到;本地码相位与接

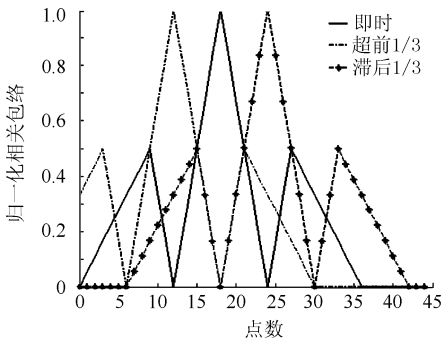

图 4　3 路信号输出相关包络

收信号相位差在 $T_c/6$ 内时,由即时路信号捕获到. 该捕获方法消除了 BOC(1,1)信号相关零点的影响,以扩频码相位衡量时,由原来的 $T_c/6$ 增大到 $T_c/2$,使半个码片内的捕获率达到了100%.

5 结束语

本文设计的 BOC(1,1)信号捕获方法,通过接收机中3路相关信号输出的相关值来判定信号是否捕获到,在半个码片相位差范围内,3路相关信号中仅有一路超出阈值,可得接收信号相对本地信号的相位差是1/6、超前或滞后1/2~1/6码片,避免了 BOC(1,1)信号的2个相关零点的影响,可为跟踪环路提供相位信息. 3路本地信号与接收信号相关过程中,仅是本地信号的码相位、副载波相位不同,易于基于软件无线电方法设计的卫星导航接收机实现. 该方法适用于卫星导航系统中 BOC(n,n)信号的捕获.

参考文献 (**References**)

[1] 赵静. 中国正式加入伽利略(GALILEO)计划[J]. 太空探索, 2005(1):6-7
Zhao Jing. China formally joins GALILEO plan[J]. Space Exploration, 2005(1):6-7(in Chinese)

[2] Hein G W, Godet J, Issler J, et al. Status of Galileo frequency and signal design[C]//International of Navigation GPS. Portland:ION,2002:266-277

[3] Hein G W,Irsigler M, Rodriguez J A A, et al. Performance of Galileo L1 signal candidates[C]//Europe Navigation Conference GNSS. Netherlands: EUGIN, DGON, 2004

[4] Julien O, Cannon M E, Lachapelle G, et al. A new unambiguous BOC(n,n) signal tracking technique[C]//Europe Navigation Conference GNSS. Netherlands: EUGIN, DGON, 2004

[5] Martin N, Leblond V, Guillotel G, et al. BOC(x,y) signal acquisition techniques and performances[C]//International of Navigation GPS/GNSS. Oregon: ION, 2003:188-198

[6] Betz J W. Binary offset carrier modulations for radionavigation[J]. Navigation,2001,4(48): 227-246

[7] Fischer S, Berberich S, Heim J, et al. Simulation & verification of new architectures for Galileo navigation signal demodulation[C]//International of Navigation GPS/GNSS. Oregon: ION, 2003:2021-2030

[8] Ward P W. A design technique to remove the correlation ambiguity in binary offset carrier (BOC) spread spectrum signals[C]//International of Navigation 59th Annual Meeting/CIGTF 22nd Guidance Test Symposium. New Mexico: ION, 2003:146-155

[9] Dierendonck A J, Schumpert V M, Fenton P. Acquisition, tracking and mitigating multipath using the proposed split spectrum C/A-code at L2[C]//International of Navigation GPS. Tennessee: ION, 1998:1895-1903

[10] Betz J W. The offset carrier modulation for GPS moedernization[C]//International of Navigation NTM. California: ION, 1999:639-648

(责任编辑:陈 琛)