

基于 CBOC 信号的导航接收机设计与实现

近年来,随着美国的 GPS 系统在军用和民用领域的成功应用,卫星导航系统受到了世界多个主要国家和组织的普遍关注。除了美国正在进行的 GPS 现代化计划以外,欧盟正在建设 Galileo 系统,俄罗斯正在对其 GLONASS 系统进行恢复和现代化改进,我国的北斗系统也在积极建设中。多个导航系统并存,一个首要的问题是导航信号的兼容共存。在无线电频率资源非常紧张的情况下,欧盟提出了新的信号结构 BOC(Binary Offset Carrier)调制,通过改变信号的频谱,达到与传统导航的 BPSK(Binary Phase Shift Keying)调制信号共享频率的目的,从而最大限度地利用有限的频谱资源。而后,美国和欧盟就 GPS 系统和 Galileo 系统共用民用信号体制达成协议,GPS 系统和 Galileo 系统将分别使用 MBOC 调制方式的两种实现,其中 Galileo 系统将在 E1 频点使用 CBOC 调制。

由于 BOC 信号的相关函数存在多个相关峰值,用于 BPSK 信号体制的接收方法不能直接用于接收 BOC 信号体制,近年来人们提出了很多种适用于 BOC 信号体制的接收技术:文献和文献提出的 BPSK-like(单边带)方法将 BOC 信号的频谱简化成类似 BESK 信号的形式后处理,该方法相对易于实现。文献提出的 bump-jump 方法,文献提出的 ASPeCT 方法占用的硬件资源都比较多,文献提出的 DE 方法占用的硬件资源适中,也不会损失接收机的灵敏度和测距精度等性能,但是增加副载波环路实现复杂,本文研究的多相关器算法硬件资源虽然多,但是实现简单,理论清晰,可修正性和兼容性很好。但是国内对 CBOC 信号的研究还多处于理论分析阶段,工程实现比较薄弱。由于 CBOC 信号是两个 BOC 信号的时域叠加,笔者以 Galileo 系统拟采用的 CBOC(6, 1, 1 / 11)信号着手,分析 CBOC 的时域特性,自相关函数以及功率谱密度函数。通过分析多相关器的算法,在现有的导航接收机的基础上完成 CBOC 导航接收机工程样机的实现。

1 CBOC 信号特性分析

1. 1 CBOC 信号生成仿真

CBOC(Composite BOC)通过 PN 码相同、副载波不同的两种 BOC 信号进行加权求和实现。本文研究的是 Galileo 系统提出的 CBOC(6, 1, 1 / 11)信号采用 BOC(6, 1)和 BOC(1, 1)两种副载波加权实现,加权是对功率的分配。BOC(1, 1)信号所占的功率百分比为 a , BOC(6, 1)信号所占功率百分比为 b 。通过这种加权之后,信号成为 4 电平信号。

CBOC 信号表达式为:

$$S_{\text{BOC}}(t) = d(t) \times PN(t) \{ a \times \text{sign}[\text{sig}(2\pi f_{\text{sub}} t)] + b \times \text{sign}[\sin(2\pi f_{\text{sub}} t)] \} \quad (1)$$

采用 Matlab 仿真 CBOC(6, 1, 1/11) 信号如图 1 所示。

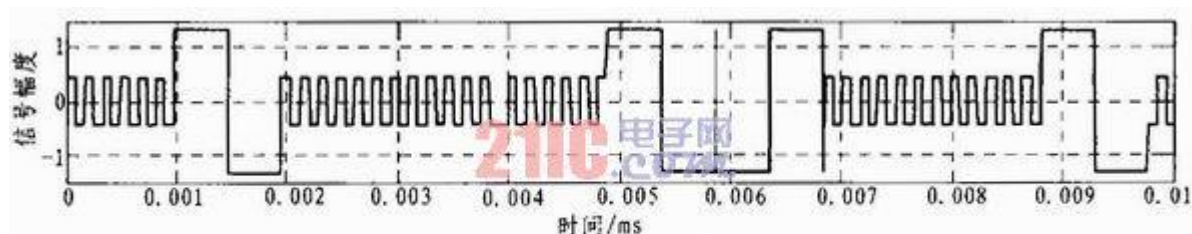


图 1 CBOC 信号时域波形

接收机设计的一个关键就是在本地端复制一个和发射端匹配的信号，而根据 Matlab 的仿真分析可知，CBOC 信号是四电平的信号，因此采用在接收端直接复制信号的方式会极大的增加了接收机设计的复杂度和实现的难度，这就要求必须寻找其他的方法恢复信号。

1. 2 CBOC 自相关和功率谱密度

信号的自相关特性是信号捕获和跟踪算法选择的依据，BPSK 信号的自相关函数只有一个峰值，采用典型的 E—L 相关器架构可以很容易的锁住主峰，但是 CBOC 信号(如图 3 所示)除了主峰以外还有两个副峰，这样简单的采用 BPSK 的跟踪算法容易错锁，因此影响取得的观测量的值，进而影响定位结果。CBOC 信号的自相关函数和功率谱密度函数的 Matlab 仿真图如图 2 所示。

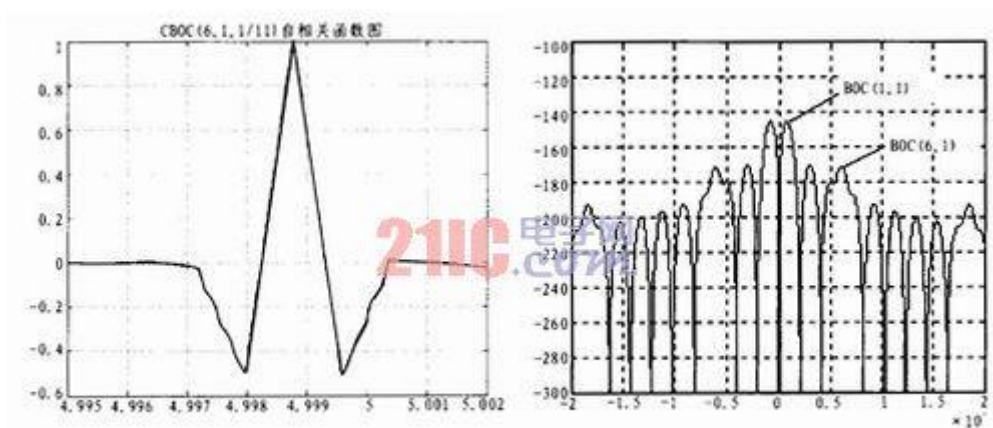


图 2 CBOC(6,1,1/11)的自相关函数和功率谱密度函数

CBOC 信号的自相关特性可以表示为：

$$R_{\text{MBOC}(6,1,\alpha\beta)}(\tau) \frac{\beta-\alpha}{\beta} R_{\text{BOC}(1,1)}(\tau) + \frac{\alpha}{\beta} R_{\text{BOC}(6,1)}(\tau) + \{s\} \cdot \sqrt{\frac{\beta-\alpha}{\beta}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot R_{\text{BOC}(1,1)\text{BOC}(6,1)}(\tau) \quad (2)$$

由仿真分析可知，CBOC(6, 1, 1 / 11)存在两个较大的副峰，且其与 BOC(1, 1)信号类似，因此在选择跟踪算法时可以仿照 BOC 的算法进行改进。在图 2 中，BOC(1, 1)和 BOC(6, 1)的频率谱峰清晰可见，因此可以根据射频带宽的大小选择适合的接收算法。

2 CBOC 信号接收算法

2.1 现有 CBOC 信号跟踪算法

现有 CBOC 跟踪算法对比如表 1 所示。

算法名称	特点	优点	缺点
Fishman & Betz	分别滤取 2 个边带	类似于 BPSK	需要滤波器,不完全是 BPSK,有实现损失
Martin & Heiries	滤取主瓣	类似于 BPSK	需要滤波器,不完全是 BPSK,有实现损失
ASPeCT 算法	利用 BOC 与本地伪码相关峰值	实现简单	只适合于 BOC(n,n)信号
Bump-Jump 技术	发现错锁立即纠正	有纠错机制防止错锁	硬件复杂,不适合于副峰值很多的 BOC 信号
二维码相位估计法	二维码相位搜索	不损失跟踪精度	两个本地 DCO,增加了复杂度
多相关器算法	大量相关器,鉴相方式采用加权实现	环路跟踪精度高	硬件资源占用较多

2.2 多相关器算法

随着卫星导航技术的发展，伪距的测量精度越来越高，人们发现多径误差对定位精度的影响在定位误差中所占的权重越来越大，因此，如果能够得到多径误差最优的码相位鉴别器，将能最大限度地抑制多径误差，从而显著提高定位精度。基于此点需求提出的多相关器方法是一种确定码相位鉴别器的方法，它在自相关函数的有效范围内放置许多相关器，并通过线性组合的方法，用这些自相关函数组合出最优的码相位鉴别曲线，从而达到减小多径误差的效果。这种抗多径的方法同样适用于 CBOC 信号，可以在基带只复制 BOC(1, 1)信号，然后通过相关值的线性组合实现最优的码相位鉴别。但是因为在设计中增加了相关器，因此增加了很多硬件资源，但是这些资源的增加还是可以通过诸如相关器复用等方式将硬件效率提升。

采用多相关器方法的接收机结构如图 3 所示。

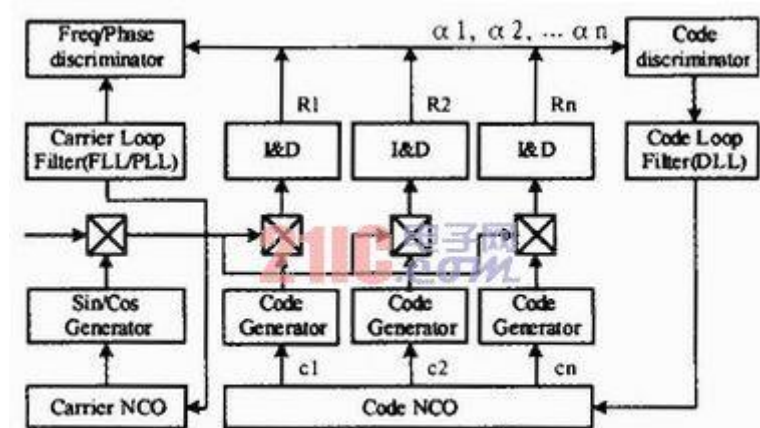


图 5 S-curve shaping 接收机实现方案

每一个相关器的自相关函数可以表示如下：

$$R^i(s_\mu) = \sum_{\mu=1}^{nf} s_\mu p_\mu r_\mu^i \quad (3)$$

其中 s_μ 表示卫星信号， p_μ 表示本地载波信号，表示第 i 个相位的本地复制码，这样就定义了一组相关器的自相关函数。定义自相关函数的线性组合为：

$$\tilde{D}(\tau) = \sum_{i=1}^N \alpha_i R^i(\tau) \quad (4)$$

最后，为使自相关函数的线性组合给出的鉴相曲线无限逼近理想的码鉴相曲线，可以使用最小二乘方法来完成最后的步骤：

$$\hat{\alpha}_i = \min \sum_l \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i R(\tau_l + d_l^{\text{ref}}) - \tilde{D}_{\text{ideal}}(\tau_l) \right)^2 \quad (5)$$

通过最小二乘方法求得的即为最优的自相关函数权值，从而构造出了与理想的码鉴相曲线无限接近的码鉴相曲线。

3 CBOC 信号导航接收机设计实现

3.1 导航接收机硬件平台

实现基于多相关器方法的接收机硬件平台如图 4 所示，硬件平台选用 FPGA 作为实现相关器的模块，利用 FPGA 的可编程特性，可以不改变硬件平台，而只

载波跟踪环路可以使用锁频环或者锁相环完成对载波相位和频率的跟踪。在采用方多相关器方法的接收机中,继承了 BPSK 接收机对载波跟踪环的跟踪方法,可以使用所有适用于 BPSK 接收机的鉴别器,在工程样机的实现中使用了三阶锁相环,鉴相采用四象限反正切的方式,三阶锁相环的实现这里不做讨论。

3. 4 接收机测试结果

在性能分析和算法仿真的基础上,使用 FPGA 和 DSP 处理器的基带处理架构实现 S—Surve shaping 方法,经过对接 Galileo 信号模拟器,完成了对 S—surve shaping 方法的功能验证,实现的跟踪环路可以稳定地完成对载波、副载波和码相位的跟踪。

4 结论

文中通过分析 CBOC 的时域特性,自相关特性以及功率谱密度函数,主要论述了一种基于 S—surve shaping 跟踪方法的 Galileo E1 频点 CBOC 信号接收机的工程实现,在明确 CBOC 信号结构的情况下,充分利用 Galileo 信号在系统设计上的兼容性以及成熟的硬件平台,并分析了使用简化的 CBOC 信号接收方法所带来的性能损失,在理论仿真的基础上,完成了接收机的工程实现,实际运行的结果验证了该方法的可行性。