

文章编号:1001-893X(2011)03-0041-06

# Galileo 接收机多径抑制方法的改进<sup>\*</sup>

包宋建

(重庆文理学院 电子电气工程学院, 重庆 402160)

**摘 要:**旁瓣是影响跟踪稳定性的重要误差来源。为解决这一问题,提出了一种改进旁瓣消除技术,与传统的旁瓣消除技术相比其在稳定性上具有一定的优势,有效改善了跟踪的稳定性。针对多径对 GNSS 系统影响这一问题,将改进的旁瓣消除技术与窄相关技术(NC)、高分辨率相关技术(HRC)和早迟坡度技术(ELS) 3 种多径抑制技术相结合,仿真结果证明改进后的多径抑制技术能有效提高跟踪的精度和稳定性。

**关键词:**全球导航卫星系统;多径抑制;旁瓣消除;跟踪精度;跟踪稳定性

**中图分类号:**TN967.1      **文献标识码:**A      doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.010

## Improvement of Multipath Mitigation Method for Galileo Receivers

BAO Song-jian

(College of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract:**Side-lobe is one of the most important error sources influencing the tracking reliability. In order to solve this problem, an improved side-lobes cancellation technology is proposed. Compared with traditional technology, this method has good reliability. For the propose of minimizing the influence of multipath on the GNSS (Global Navigation Satellite System), the improved side-lobes cancellation technology is combined with Narrow Correlator(NC) technology, High Resolution Correlator(HRC) technology and Early Late Slop(ELS) technology. The simulations prove that better tracking reliability and accuracy can be achieved with the improved method.

**Key words:**GNSS; multipath mitigation; side-lobes mitigation; tracking accuracy; tracking reliability

## 1 引 言

在新的卫星定位系统中,如现代的 GPS 和 Galileo 卫星定位系统,都采用了新的调制方式——BOC 调制。与传统的 BPSK 调制方式相比,BOC 调制信号具有更好的相关特性,可以为多个民用和军用用户提供更高的频谱资源利用率,因为可以很好地把 BOC 信号的频谱和其它调制信号的频谱分离开,如 C/A 码的 BPSK 调制方式。这种 BOC 调制方式是在扩频之后又调制了方波的调制方式,虽然这

种调制方式有抗多径和窄带干扰的能力<sup>[1]</sup>,但是由于自身信号结构的特点导致自相关函数的峰值不唯一,有很多个峰值,而且峰值的多少和 BOC( $m, n$ )信号的  $m$  和  $n$  的比值有关,把主峰之外的峰值都叫做旁瓣。正是由于这些旁瓣的存在,给信号的跟踪阶段带来了新的影响,产生多个失锁点(假锁点)。

为了消除这些影响,提高跟踪的稳定性,引入了旁瓣消除技术。现有的旁瓣消除技术有很多,如部分边带鉴相器技术<sup>[2]</sup>、峰跳技术<sup>[3]</sup>和模糊跟踪技术<sup>[4]</sup>,其中模糊跟踪技术效果较好,因为其它技术都严重展宽 BOC 信号自相关函数的峰值宽度,但是精

<sup>\*</sup> 收稿日期:2010-10-20;修回日期:2011-02-28

确的延迟跟踪需要陡峭的峰值,而模糊跟踪技术保留了陡峭的峰值特性,它利用 BOC 信号的自相关函数和 BOC 信号与 PRN 信号的互相关函数抵消的方法来达到旁瓣消除的目的。这种方法可以有效消除旁瓣带来的影响,但是其应用范围有限,而且增加了相关器的个数。对此,本文给出一种新的旁瓣消除技术,能够解决以上问题,减小旁瓣带来的影响。

## 2 Galileo 信号相关函数旁瓣消除方法的比较

### 2.1 传统旁瓣消除技术

文献[4]介绍了一种旁瓣消除技术——模糊跟踪技术(SM 技术),可以消除  $\text{BOC}(n,n)$  信号自相关函数的旁瓣,而且还可以提高多径抑制的能力,但是这种方法利用两个信道来消除相关函数的旁瓣,而且只能应用于  $\text{BOC}(n,n)$  信号。以  $\text{BOC}(1,1)$  信号为例,其自相关函数为

$$R_{\text{BOC}}(\tau) = \Delta_{T_c/2}(\tau) - \frac{1}{2} \Delta_{T_c/2}(\tau - \frac{T_c}{2}) - \frac{1}{2} \Delta_{T_c/2}(\tau + \frac{T_c}{2}) \tag{1}$$

其与扩频码的互相关函数为

$$R_{\text{BOC, PRN}}(\tau) = \frac{1}{2} (\Delta_{T_c/2}(\tau - \frac{T_c}{2}) - \Delta_{T_c/2}(\tau + \frac{T_c}{2})) \tag{2}$$

式中,  $\Delta_{T_c/2}(\tau - \alpha)$  是中心在  $\alpha$  的关于  $\tau$  的三角函数,三角函数的宽度为 1 chip,  $T_c$  是码片周期,  $\tau$  为码片延迟。

如式(1)和式(2)所示,  $\text{BOC}(1,1)$  信号自相关函数的旁瓣,和  $\text{BOC}(1,1)$  信号与扩频码的互相关函数得到的两个相关峰值的绝对值相同。因此,将两相关函数进行线性组合相加后可消除  $\text{BOC}(1,1)$  信号自相关函数的旁瓣。根据旁瓣消除的思想,把相关函数改写:

$$R_{\text{SM}}(\tau) = R_{\text{BOC}}(\tau) + \text{abs}(R_{\text{BOC, PRN}}(\tau)) \tag{3}$$

根据上述原理进行 Matlab 仿真,如图 1 所示。图 1 表示的是采用 SM 旁瓣消除技术时对  $\text{BOC}(1,1)$  信号相关函数的影响,其中虚线表示的是没有采用旁瓣消除技术时的  $\text{BOC}(1,1)$  信号的自相关函数,点横线表示的是  $\text{BOC}(1,1)$  信号和 PRN 码的互相关函数,将自相关函数与互相关函数的绝对值相加,得到

SM 技术时的相关函数(如图中实线所示)。由图不难看出,采用 SM 技术很好地削减了  $\text{BOC}(1,1)$  信号相关函数的旁瓣,但是也展宽了相关函数的峰值,而且还增加了相关器的个数。

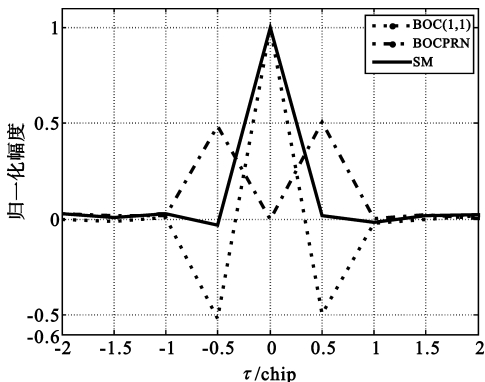


图 1 采用 SM 旁瓣消除技术时的  $\text{BOC}(1,1)$  信号的相关函数  
Fig.1  $\text{BOC}(1,1)$  signal correlation functions when SM side-lobe cancellation technology is adopted

### 2.2 改进旁瓣消除技术

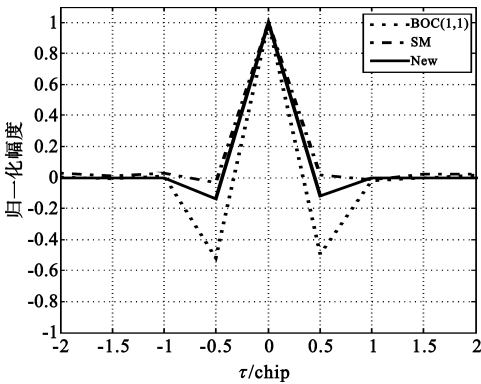
文献[4]中介绍的旁瓣消除技术虽然可以有效减小旁瓣,但是应用范围有限,只适用于  $\text{BOC}(n,n)$  信号,而且对只存在一条多径时的信道有明显的作用,对于多条多径时其旁瓣消除能力较差。本文基于  $\text{BOC}(1,1)$  信号,设计一种旁瓣消除方法,既可以很好地抑制旁瓣带来的影响,又适用于任何  $\text{BOC}(m,n)$  信号。其基本原理如下式所示:

$$R_{\text{new}}(\tau) = \frac{1}{(M-1)^N} \sum_{k=1}^{M-1} (a_k \cdot s_{k+1})^N \tag{4}$$

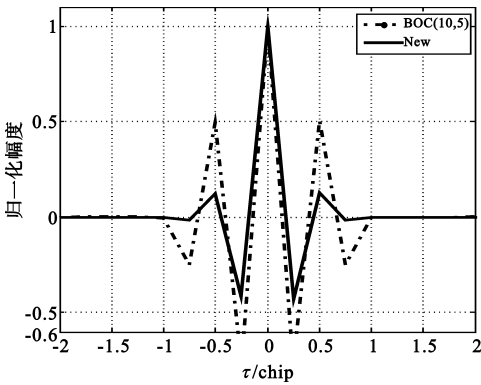
式中,  $M$  是非相干积分长度;  $a$  表示输入 BOC 码序列;  $s$  是本地 BOC 码序列;  $N$  是相关函数的指数次幂,指数越大旁瓣消除能力就越好,但是随着指数的增加相关函数的峰值宽度也会变宽,所以不能无限地增加指数,峰值变宽以后会影响跟踪精度,要折衷考虑,这里选取  $N$  为 3(当  $N$  取 5 时,对于  $\text{BOC}(1,1)$  信号来说采用新技术时的旁瓣消除能力与 SM 技术相同)。

图 2 为  $\text{BOC}(1,1)$  信号与  $\text{BOC}(10,5)$  信号的相关函数。图 2 中点横线表示的是采用传统旁瓣消除技术时对相关函数的影响,可以看出传统技术能够有效地抑制  $\text{BOC}(1,1)$  信号的旁瓣,但是同时也展宽了相关函数的峰值,但是影响不大,而对于高精度的

接收机而言,对其精度的提高还是有一定的影响;实线表示采用新技术后的 BOC(1,1)信号和 BOC(10,5)信号的相关函数图。由图 2 中 3 个相关函数的比较可看出,采用旁瓣消除技术能有效减小旁瓣,而且传统的旁瓣消除技术要优于本文提出的技术,但是却展宽了相关函数的峰值,无疑影响了跟踪的精度,而且传统的旁瓣消除技术还仅适用于 BOC( $n,n$ )。采用本文的旁瓣消除技术后,峰值斜率也优于传统的旁瓣消除技术,而且可以适用于任何的 BOC( $m,n$ )信号,所以采用新的旁瓣消除技术具有重要意义。



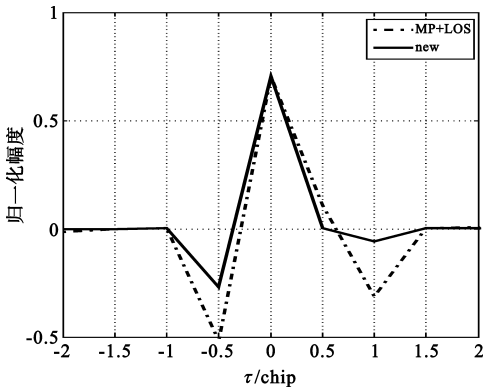
(a)BOC(1,1)信号的相关函数比较



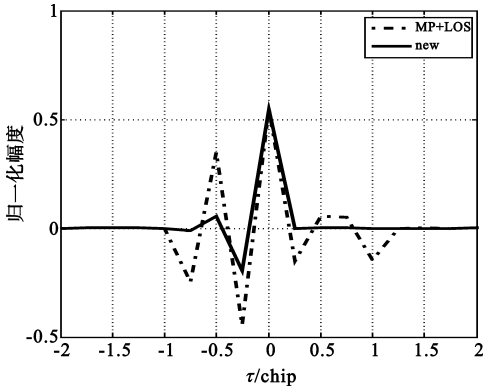
(b)BOC(10,5)信号的相关函数比较

图 2 BOC(1,1)信号与 BOC(10,5)信号的相关函数  
Fig.2 BOC (1,1) signal and BOC(10,5) signal correlation functions

图 3 为 BOC(1,1)信号与 BOC(10,5)信号的相关函数。由图不难看出,采用新技术后多径相关函数的旁瓣有了很大程度的削减,而且还保留了相关函数峰值的特性,尤其是对 BOC(10,5)信号,旁瓣的消除能力更强,应用到跟踪环路中更能够体现 BOC(10,5)信号在多径抑制方面的优势。



(a)多径对 BOC(1,1)信号相关函数的影响



(b)多径对 BOC(10,5)信号相关函数的影响

图 3 多径对 BOC(1,1)信号与 BOC(10,5)信号的相关函数的影响  
Fig.3 Effect of multipath on BOC (1,1) signal and BOC(10,5) signal correlation functions

3 改进多径抑制技术比较

旁瓣的消除可以有效提高跟踪的稳定度,将旁瓣消除技术和多径抑制技术结合则可以进一步提高多径抑制的能力。为了有效说明问题,把 NC 技术、HRC 技术、ELS 技术 3 种多径抑制技术分别与旁瓣消除技术进行结合,从跟踪精度和稳定性方面进行仿真分析。下面仅对改进 ELS 技术多径抑制进行描述仿真,其它两种略。

仿真条件为:多径是幅度为 0.5(假设直达信号的幅度为 1)的镜面反射信号;码跟踪的多径延迟范围为 0 ~ 500 m;载波跟踪的多径延迟范围为 0 ~ 1.5 chip;BPSK 信号的码速率为 1.023 Mchip/s,码长为 1 023 个码片,频率为 1.575 42 GHz;BOC(1,1)信号的码速率为 1.023 Mchip/s,码长为 1 023 个码片,频率为 1.575 42 GHz;BOC (10, 5) 信号的码速率为 5.115 Mchip/s,码长为 4 092 个码片,频率为 1.278 75 GHz;仿真环境为静态环境;仿真工具为 Matlab7.0 软件。

ELS 技术是基于估计相关函数中心峰值两侧的坡度信息来进行研究的多径抑制技术,由于其性能的优越性曾经用于 NovAtel's GPS 接收机中,被称为 MET(Multipath Elimination Technology)。由于 BOC 信号相关函数旁瓣的存在影响了其跟踪性能,同时为了提高跟踪的精度,对 ELS 技术进行改进,将其与新的旁瓣消除技术结合以达到提高跟踪精度的目的。为了能够有效地说明问题,便于多径抑制技术改进前后的对比,这里选取的相关函数的间隔与改进前的选取相同,如表 1 所示。

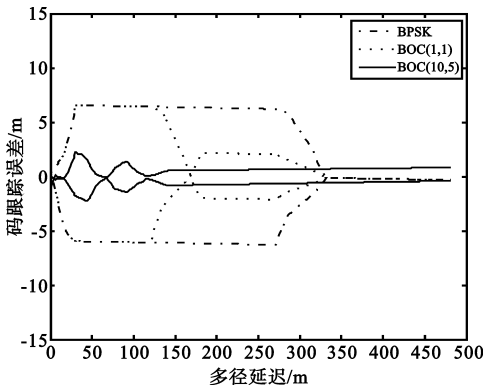
表 1 采用改进 ELS 技术时的相关函数的间隔

Table 1 Correlation function interval using improved ELS technology

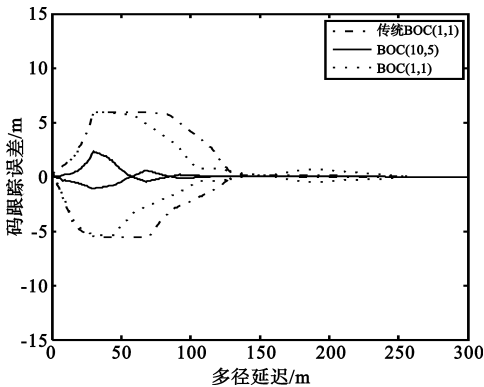
单位:chip

| 信号        | $\tau_1$ | $\tau_2$ | $\tau_3$ | $\tau_4$ |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| BPSK      | -0.2     | -0.1     | 0.1      | 0.2      |
| BOC(1,1)  | -0.2     | -0.1     | 0.1      | 0.2      |
| BOC(10,5) | -0.1     | -0.05    | 0.05     | 0.1      |

根据表 1 中选取的参数进行仿真,图 4 为改进前后 ELS 技术的码跟踪误差包络图。



(a)改进前

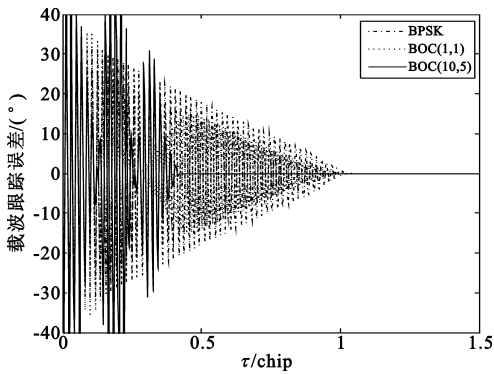


(b)改进后

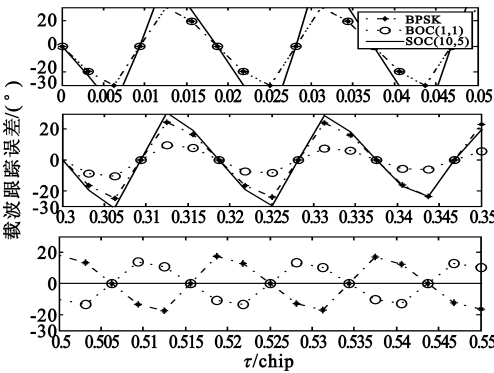
图 4 改进前后 ELS 技术码跟踪误差包络

Fig.4 ELS technical code tracking error before/after improvement

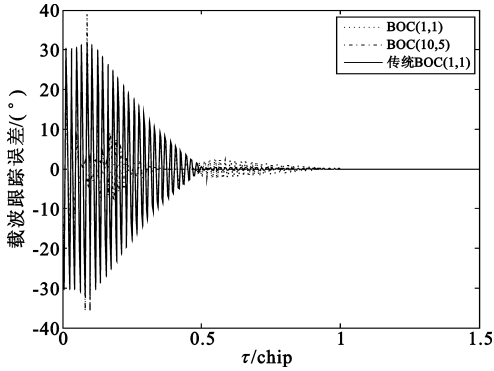
假设只有一条多径(镜面反射信号)存在,本地载波频率和卫星的频率相同。图 5 表示的是采用改进前后 ELS 技术时的多径载波跟踪误差。



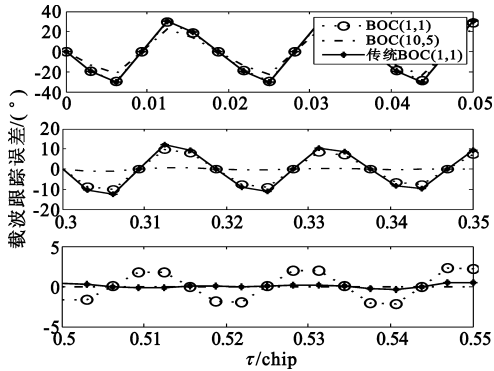
(a)采用 ELS 技术时的载波跟踪误差



(b) (a) 的局部放大图



(c)采用改进 ELS 技术时的载波跟踪误差



(d) (c) 的局部放大图

图 5 采用 ELS 技术和改进 ELS 技术时的载波跟踪误差与其局部放大图

Fig.5 ELS tracking error and the improved ELS tracking error and partial enlargement

图 4(a)为采用改进前 ELS 技术时的码跟踪误差包络图,(b)为采用改进后 ELS 技术时的码跟踪误差包络。采用旁瓣消除技术后和改进前相比,3 个信号的码跟踪误差有一定的减小,而且对中长延迟多径的抑制能力有较高提升,特别是 BOC(1,1)信号。BOC(1,1)信号经过旁瓣消除后,其码跟踪误差包络为0 m时的多径延迟可以达到100 m,与改进前300 m相比有了很大的提高。BOC(10,5)信号在消除了旁瓣的影响后,提高了多径的抑制能力,特别是在中多径和长延迟多径延迟存在时。对于 BOC(1,1)信号来说,传统技术的旁瓣消除技术和新技术相比,传统技术在中长延迟多径的抑制能力上要稍稍优于新技术,但是在短延迟多径的抑制能力上新技术要优于传统技术,而且采用新技术时,BOC(1,1)信号在中长延迟多径存在时的码跟踪误差包络接近于0.5 m,误差较小。

由图 5 中的比较可以看出,采用改进后 ELS 技术和改进前相比,信号的锁相速度明显提高,而且载波跟踪也更加稳定了。当多径延迟超过0.5 chip时,信号的载波跟踪误差都趋于0°(改进前,延迟要达到1 chip时跟踪误差才会为0°)。BOC(10,5)信号相对于 BOC(1,1)信号,其锁相速度快,而且误差包络小,多径抑制能力较强,稳定性较高。对于 BOC(1,1)信号,在多径延迟较小时,采用改进技术时载波跟踪误差小于传统技术,锁相速度也要快于传统技术,但是由于采用改进技术时旁瓣并没有完全消除,因此在中长延迟多径延迟时,载波跟踪有一些波动,但是误差较小。

### 4 改进后多径抑制方法的比较

仿真结果显示,经过旁瓣消除技术改进后的多径抑制技术都显著提高了其多径抑制的能力,尤其是 BOC(10,5)信号,经过旁瓣消除后其多径抑制能力更强。无论采用哪种多径抑制技术,BOC(10,5)信号的多径抑制能力都是最优的,经过旁瓣消除技术后其跟踪精度又得到了提高,稳定性也得到很大的改善。由于传统的旁瓣消除技术存在适用范围有限,只能应用于 BOC( $n,n$ )信号,展宽了相关函数的峰值宽度,影响了跟踪的性能,而且需要两个信道分别进行相关函数的运算,增加了相关器的数目,提高了硬件的复杂度等缺点,所以采用新的旁瓣消除技术不仅能够提高其旁瓣消除能力,和已有的旁瓣消

除方法相比,还具有以下优势:

- (1)相关器的个数只是已有方法的一半,软硬件实现较为简单;
- (2)适用于任何 BOC 信号,而不仅仅局限于 BOC( $n,n$ )信号;
- (3)信号相关函数峰值两侧的斜率要大于传统的旁瓣消除技术。

但是新技术也存在一些不足,由于进行了幂次运算,增加了数据的运算量和算法复杂度。表 2 所示为采用 3 种改进多径抑制技术时的码跟踪统计误差。

**表 2 采用 3 种改进多径抑制技术时的码跟踪统计误差**  
Table 2 Code tracking statistical error of the three improved multipath suppression technology

| 多径抑制技术 | 调制方式        | 均值/m     | 标准差      |
|--------|-------------|----------|----------|
| 宽相关    | BPSK        | 35.349 2 | 22.645 5 |
|        | BOC(1,1)    | 35.512 9 | 22.740 6 |
|        | BOC(10,5)   | 15.521 5 | 32.195 5 |
| NC     | BPSK        | 4.002 7  | 3.274 3  |
|        | BOC(1,1)    | 1.750 2  | 3.584 3  |
|        | BOC(10,5)   | 0.518 5  | 1.688 0  |
| HRC    | BPSK        | 0.859 9  | 1.539 8  |
|        | BOC(1,1)    | 0.505 36 | 1.573 7  |
|        | BOC(10,5)   | 0.269 0  | 0.902 1  |
| ELS    | BPSK        | 3.703 9  | 2.716 8  |
|        | BOC(1,1)    | 1.102 3  | 2.915 4  |
|        | BOC(10,5)   | 0.085 8  | 1.371 0  |
| 改进 NC  | 传统 BOC(1,1) | 1.102 8  | 1.724 3  |
|        | BOC(1,1)    | 0.882 9  | 1.563 8  |
|        | BOC(10,5)   | 0.195 0  | 0.582 1  |
| 改进 HRC | 传统 BOC(1,1) | 0.661 2  | 1.300 8  |
|        | BOC(1,1)    | 0.606 9  | 1.246 2  |
|        | BOC(10,5)   | 0.237 9  | 0.630 7  |
| 改进 ELS | 传统 BOC(1,1) | 0.917 6  | 1.598 0  |
|        | BOC(1,1)    | 0.624 2  | 1.306 5  |
|        | BOC(10,5)   | 0.065 8  | 0.254 6  |

由表 2 可以看出,改进后的码跟踪误差包络要小于改进前的误差,进一步提高了多径的抑制能力,提高了跟踪的精度。从表中不难得出以下结论:对于 BPSK 信号和 BOC(1,1)信号来说,多径抑制技术的性能优劣排列为 HRC、ELS、NC、传统;对于 BOC(10,5)信号来说,多径抑制技术的性能优劣排序为 ELS、HRC、NC、传统。

表 3 更清晰地显示了传统旁瓣消除技术和新旁瓣消除技术的区别,可见采用新技术时多径抑制能力有一定的提高。

| 表 3 采用旁瓣消除技术前后的载波跟踪统计误差                                                                 |             |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------|----------|
| Table 3 The carrier tracking error before/after using side-lobe cancellation technology |             |          |          |
| 多径抑制技术                                                                                  | 调制方式        | 均值       | 方差       |
| NC                                                                                      | BPSK        | 0.033 25 | 119.89   |
|                                                                                         | BOC(1,1)    | 0.032 93 | 95.505   |
|                                                                                         | BOC(10,5)   | 0.026 80 | 189.278  |
| HRC                                                                                     | BPSK        | 0.033 54 | 9.193 20 |
|                                                                                         | BOC(1,1)    | 0.031 40 | 5.136 5  |
|                                                                                         | BOC(10,5)   | 0.026 33 | 6.172 8  |
| ELS                                                                                     | BPSK        | 0.047 11 | 11.944 6 |
|                                                                                         | BOC(1,1)    | 0.045 49 | 10.073   |
|                                                                                         | BOC(10,5)   | 0.044 12 | 9.082 7  |
| 改进 NC                                                                                   | 传统 BOC(1,1) | 0.031 15 | 10.786 2 |
|                                                                                         | BOC(1,1)    | 0.030 05 | 8.164 3  |
|                                                                                         | BOC(10,5)   | 0.023 82 | 5.574 7  |
| 改进 HRC                                                                                  | 传统 BOC(1,1) | 0.029 47 | 7.888 6  |
|                                                                                         | BOC(1,1)    | 0.029 14 | 4.996    |
|                                                                                         | BOC(10,5)   | 0.022 67 | 4.665    |
| 改进 ELS                                                                                  | 传统 BOC(1,1) | 0.038 52 | 8.578 3  |
|                                                                                         | BOC(1,1)    | 0.035 49 | 7.889 0  |
|                                                                                         | BOC(10,5)   | 0.034 57 | 7.026 4  |

表 3 的数据对比更突出了进行旁瓣消除的重要性以及本文给出的旁瓣消除新技术的优势,表明不但在精度上有提高,还明显地提高了跟踪的稳定性,更加体现采用旁瓣消除技术的必要性。改进后的多径抑制技术和改进前相比,跟踪的稳定性有大幅度提高,对于 BOC(1,1)信号采用改进后 NC 技术时的

稳定性比改进前提高 1 个数量级,采用其它改进技术信号的稳定性都有不同程度的提高。从表中还可以看出,新的旁瓣消除技术比传统技术的稳定性更好,多径抑制能力也较强。

参考文献:

[1] BETZ J. Design and performance of code tracking for the GPS M code signal [EB/OL]. [2010 - 09 - 11]. <http://www.mitre.org/work/tech-papers/tech-papers-00/betzcodetracking>.

[2] PHILIP A B, RONALD L F. Code tracking performance for novel unambiguous M-code time discriminators[C]//Proceedings of Institute of Navigation(ION) National Technical Meeting 2005. San Diego, CA: Omnipress, 2005: 293 - 298.

[3] FINE P, WILSON W. Tracking algorithm for GPS offset carrier signals [C]//Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of the Institute of Navigation. San Diego, CA: 1999: 671 - 676.

[4] JULIEN O, MACABIAU C, CANNON M, et al. BOC signal acquisition and tracking method and apparatus: US, 0270997A1[P]. 2005 - 12 - 02.

作者简介:

包宋建(1974 - ),男,重庆永川人,2010 年获工学硕士学位,现为讲师,主要研究方向为嵌入式控制系统及视频编码技术。

BAO Song-jian was born in Yongchuan, Chongqing, in 1974. He received the M.S. degree in 2010. He is now a lecturer. His research interests include embedded control system and video coding technology.

Email: bsj126@126.com



关于本刊编辑部授权中国知网优先数字出版的通知

根据期刊出版业态创新的需要,为了寻找新的发展空间和经营模式,争取成果首发权,提高期刊的国际竞争力,本刊编辑部已授权中国知网(www.cnki.net)对本刊所录用稿件优先数字出版。作者投稿时需按本刊网站“相关下载”栏目中“《电讯技术》数字优先出版论文模板.doc”格式进行排版。

谢谢支持与合作! 让我们为《电讯技术》的发展而共同努力、携手共进!

《电讯技术》编辑部