

# 高阶 BOC 信号多区域鉴别器的无模糊多径抑制算法\*

田 丰<sup>1,2</sup>, 唐小妹<sup>1</sup>, 欧 钢<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;  
2. 中国西安卫星测控中心 佳木斯站, 黑龙江 佳木斯 154002)

**摘要:**传统的高阶 BOC 信号多径抑制算法的有效收敛区间较小,不利于信号的稳定跟踪,因此提出一种多区域鉴别器的高阶 BOC 多径抑制算法。在伪码误差为零的附近区域,采用优化的 QStrobe 多径抑制鉴别器,而在其他区域采用收敛区间较大的正交 BOC 鉴别器。利用卡尔曼滤波器对跟踪误差进行开环估计,判断误差所处区域并进行鉴别器的实时切换。对 BOC(15, 2.5) 和 BOC(14, 2) 信号的仿真结果表明,该算法能够实现无模糊跟踪,且 6 dB 衰减多径误差包络面积比传统 QStrobe 算法分别改善了 57% 和 51%。

**关键词:**二进制偏移载波;多径;全球导航卫星系统;多区域鉴别器;无模糊跟踪

中图分类号:TN96 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)03-039-06

## Unambiguous multipath mitigation algorithm with multi-region discriminator for high-order BOC signals

TIAN Feng<sup>1,2</sup>, TANG Xiaomei<sup>1</sup>, OU Gang<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Jiamusi Station, China Xi'an Satellite Control Center, Jiamusi 154002, China)

**Abstract:** The traditional multipath mitigation algorithms for high-order BOC (binary offset carrier) signals have a narrow effective convergence region, which is a weakness for stably tracking, therefore, a multi-region discriminator for multipath mitigation of high-order BOC signals was proposed. The optimized QStrobe discriminator was applied when code error was in the near zero region, which improved the multipath mitigation performance, while the QBOC discriminator was applied in the other regions which had an excellent convergence performance. The Kalman filter was utilized to estimate the tracking error with open-loop method for real-time switch of discriminator. Simulation Results of BOC(15, 2.5) and BOC(14, 2) signals show that the multi-region discriminator algorithm can eliminate the tracking ambiguity. In addition, compared with the traditional QStrobe algorithm, the 6 dB attenuated multipath error envelope area is improved by 51% and 57% respectively.

**Key words:** binary offset carrier; multipath; global navigation satellite system; multi-region discriminator; ambiguous tracking

现代化的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 采用了高阶二进制偏移载波 (Binary Offset Carrier, BOC) 的调制信号,能够显著提高跟踪精度和多径抑制性能<sup>[1]</sup>。但是,BOC 信号具有多个自相关峰,会导致跟踪收敛点模糊。文献[2-4]提出了多个消除跟踪模糊的算法,但是此类算法不适用于高阶 BOC 信号。文献[5]提出的双环路跟踪算法和文献[6]提出的正交二进制偏移载波 (Quadrature Binary Offset Carrier, QBOC) 跟踪算法虽然能有效地解决高阶 BOC 信号的跟踪模糊问题,但是其多径抑制性能较差;而 QStrobe 算法能够实现高阶 BOC 信号的无模糊跟踪,同时也能获得较好的

多径抑制性能<sup>[7]</sup>,但 QStrobe 鉴别器有效收敛区域较小,动态适应性较差。上述问题是 BOC 系统抑制性能研究的热点。

### 1 QBOC 和 QStrobe 算法原理

#### 1.1 信号模型

接收机接收的 BOC 信号模型如下<sup>[7]</sup>:

$$r(t - \tau_0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k g_{\text{BOC}}(t - \tau_0 - kT_c) \cos\theta_0 \equiv s(t - \tau_0) \cos\theta_0 \quad (1)$$

$$g_{\text{BOC}}(t) = g_{\text{BPSK}}(t) \text{sign}[\sin(2\pi f_{\text{sc}} t)] \quad (2)$$

$$g_{\text{BPSK}}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

\* 收稿日期:2015-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403413)

作者简介:田丰(1986—),男,湖南常德人,博士研究生,E-mail: amazetian@icloud.com;

欧钢(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: ougang@sina.com

其中,  $c_k$  为伪随机码(PN)序列,  $\tau_0$  为信号在空间的传播时延,  $\theta_0$  为载波相位,  $s(t)$  定义为基带信号模型,  $g_{\text{BOC}}$  和  $g_{\text{BPSK}}$  分别为 BOC 和二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制的符号波形,  $T_c$  为 PN 码周期,  $f_{\text{sc}}$  为副载波频率,  $\text{sign}(\cdot)$  为取符号位函数。对于 BOC( $m, n$ ) 信号, PN 码频率为  $n \times 1.023$  MHz, 副载波频率为  $m \times 1.023$  MHz。式(2)中采用正弦副载波。

## 1.2 QBOC 跟踪算法

QBOC 算法通过构造本地 BOC 信号和 QBOC 信号实现 BOC 信号的无模糊跟踪<sup>[6, 8]</sup>。其中 QBOC 信号的模型为:

$$s_q(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k g_{\text{QBOC}}(t) \quad (4)$$

$$g_{\text{QBOC}}(t) = g_{\text{BPSK}}(t) \text{sign}[\cos(2\pi f_{\text{sc}} t)] \quad (5)$$

假设信号的延时估计为  $\tau$ , 信号载波相位估计为  $\theta$ , 延迟估计误差  $\varepsilon = \tau - \tau_0$ , 载波相位估计误差为  $\theta_e = \theta - \theta_0$ 。QBOC 算法构造了如下的相关器:

$$I_1(\varepsilon) = \frac{1}{T} \int_0^T r(t - \tau_0) s(t - \tau) \cos\theta dt \quad (6)$$

$$= R_i(\varepsilon) \cos\theta_e$$

$$Q_1(\varepsilon) = \frac{1}{T} \int_0^T r(t - \tau_0) s(t - \tau) \sin\theta dt \quad (7)$$

$$= R_i(\varepsilon) \sin\theta_e$$

$$I_Q(\varepsilon) = \frac{1}{T} \int_0^T r(t - \tau_0) s_q(t - \tau) \cos\theta dt \quad (8)$$

$$= R_q(\varepsilon) \cos\theta_e$$

$$Q_Q(\varepsilon) = \frac{1}{T} \int_0^T r(t - \tau_0) s_q(t - \tau) \sin\theta dt \quad (9)$$

$$= R_q(\varepsilon) \sin\theta_e$$

其中,  $T$  为相干积分时间,  $R_i(\cdot)$  和  $R_q(\cdot)$  为输入信号分别与 BOC 信号和 QBOC 的互相关函数。QBOC 算法构造出无模糊的相关峰:

$$R(\varepsilon) = \sqrt{I_1^2 + Q_1^2 + I_Q^2 + Q_Q^2} = \sqrt{R_i^2 + R_q^2} \quad (10)$$

通过选择合适的早迟码间隔  $\Delta$ , 可以获得唯一稳定收敛点的 QBOC 算法鉴别器, 表达式如下:

$$d(\varepsilon) = R(\varepsilon - \Delta/2) - R(\varepsilon + \Delta/2) \quad (11)$$

## 1.3 QStrobe 抗多径算法

QStrobe 算法利用两组早迟码间隔 (E-L) 分别为  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的 QBOC 相关器, 构造一个无模糊的多径抑制鉴别器, 表达式如下<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon) = d_1(\varepsilon) - \beta d_2(\varepsilon) \\ d_i(\varepsilon) = R(\varepsilon - \Delta_i/2) - R(\varepsilon + \Delta_i/2), i = 1, 2 \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\beta$  为两组早、迟码的加权系数。

为了实现 QStrobe 的无模糊跟踪, 提出对鉴别器优化的目标如下<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} d_{\text{QStrobe}}(0) = 0, d'_{\text{QStrobe}}(0) \geq 0 \\ \forall d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon) = 0 \text{ 且 } \varepsilon \neq 0, d'_{\text{QStrobe}}(\varepsilon) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

满足上述条件的鉴别器即可实现无模糊跟踪, 而不要求  $d_1(\varepsilon)$  和  $d_2(\varepsilon)$  是无模糊的。

文献[7]给出了单边前端带宽  $B_f$  为  $17 \times 1.023$  MHz 时, BOC(15, 2.5) 的 QStrobe 算法最优参数:  $\Delta_1 = 1/15$ ,  $\Delta_2 = 1/5$ ,  $\beta = 0.2$ 。图 1 给出了其鉴别器  $S$  曲线, 从图中可以看出, 鉴别器在  $[-1, 1]$  码片误差范围内, 只存在一个稳定收敛点。但是, 当  $|\varepsilon| > 1/10$  时, 鉴别器输出较小, 因而当  $\varepsilon$  较大时, 会导致收敛速度较慢, 即 QStrobe 算法的动态性能较差。

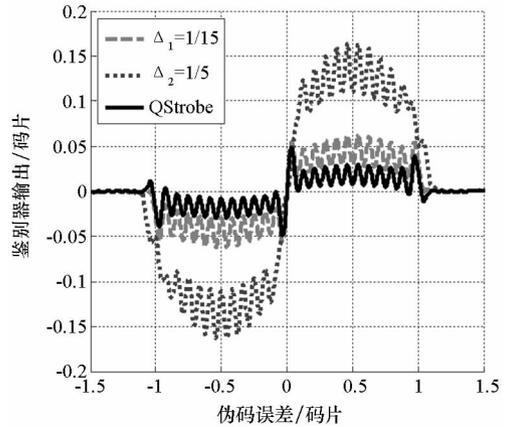


图 1 传统 QStrobe 鉴别器  $S$  曲线

Fig. 1  $S$  curve of traditional QStrobe discriminator

## 2 多区域鉴别器的多径抑制算法

QBOC 算法能在较大范围内实现 BOC 信号无模糊地跟踪, 但是其多径抑制性能较差<sup>[6]</sup>; QStrobe 算法具有较好的多径抑制性能, 但是有效的动态牵引范围较小。

### 2.1 多区域鉴别器设计

在跟踪 BOC 信号时, 多区域鉴别器把收敛区域划分为多个不同的部分, 当伪码跟踪误差在不同的区域时, 采用不同的鉴别器。把收敛区域划分为 2 部分, 分别采用 QBOC 和 QStrobe 鉴别器, 表达式如下:

$$d_M(\varepsilon) = \begin{cases} d(\varepsilon), & |\varepsilon| \geq \varepsilon_m \\ d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon), & |\varepsilon| < \varepsilon_m \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $d(\varepsilon)$  和  $d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon)$  分别为式(12)和式(13)中所示的 QBOC 和 QStrobe 鉴别器。  $\varepsilon_m$  应小于 QStrobe 鉴别器的有效收敛范围, 对于高阶 BOC

信号,可以选取  $\varepsilon_m = 1/10$  码片。

## 2.2 优化 QStrobe 参数

当  $|\varepsilon| > \varepsilon_m$  时,环路不再采用 QStrobe 鉴别器,放宽了对 QStrobe 收敛性的约束要求,即可对式(14)进行调整,优化 QStrobe 的设计参数:

$$\begin{aligned} d_{\text{QStrobe}}(0) = 0, d'_{\text{QStrobe}}(0) \geq 0 \\ \left[ \begin{array}{l} \forall d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon) = 0 \\ \text{且}(\varepsilon \neq 0 \ \& \ |\varepsilon| < k\varepsilon_m) \end{array} \right], d'_{\text{QStrobe}}(\varepsilon) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中,第2行约束条件的含义为:当  $|\varepsilon| < k\varepsilon_m$  时, QStrobe 鉴别器不存在模糊收敛点;当  $|\varepsilon| \geq k\varepsilon_m$  时,环路切换为 QBOC 鉴别器,因此 QStrobe 鉴别器可以出现模糊的收敛点。 $k$  为 QStrobe 模糊收敛点范围系数,通过选择  $k \geq 1$ 。 $k$  值越大, QStrobe 鉴别器无模糊收敛区域越大。

## 2.3 早迟码间隔选择

首先对 QStrobe 鉴别器的早迟码间隔进行选择。难以通过理论分析得出满足式(15)的具有最优多径抑制性能的参数,因此,采用数值仿真分析的方式,遍历搜索  $\Delta_1, \Delta_2$  和  $\beta$  值,当对应的多径误差包络面积最小时,则为最优参数。

通过数值分析,获得最优的  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  之后,为了节省相关器资源,可以令 QBOC 鉴别器的早迟码间隔  $\Delta = \Delta_1$  或  $\Delta_2$ , 实现与 QStrobe 相关器的共用,从而能够节省1组早迟码相关器。因此,只需要2组相关器即可实现本文的多区域鉴别器。

## 2.4 跟踪偏差的开环估计方法

为了实现在不同收敛区域的鉴别器切换,需要实时估计伪码偏差范围。利用 KF 对 QBOC 鉴别器的输出进行开环滤波,估计环路的跟踪偏差。KF 模型如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_k = \varepsilon_{k-1} + u_k \\ d_k = \varepsilon_k + n_k \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\varepsilon_k$  和  $d_k$  分别为  $k$  时刻的环路跟踪偏差和 QBOC 鉴别器输出,  $u_k$  为环路跟踪偏差的随机状态噪声,  $n_k$  为开环鉴相结果的观测噪声,通常  $\sigma_{u_k} \ll \sigma_{n_k}$ 。根据文献[9],采用标量 KF 滤波器即可实现对  $\varepsilon_k$  的估计。

当 KF 稳定收敛之后, KF 的预测方差和估计方差应该满足如下关系<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} P^-(k|k-1) = P^-(k-1|k-2) = \hat{P} \\ P(k|k) = P(k-1) = \hat{P} \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $P^-(k|k-1)$  为 KF 第  $k$  次的预测方差,  $P(k|k)$  为第  $k$  次的估计方差。因此,求解

式(17)可得到 KF 稳定收敛之后,跟踪偏差的估计精度为:

$$\sigma_{\text{KF}}^2 = \hat{P} = \frac{\sqrt{\sigma_u^2(\sigma_u^2 + 4\sigma_n^2)} - \sigma_u^2}{2} \approx \sigma_u \sigma_n \quad (18)$$

通过上述的分析可知,为了提高 KF 估计精度,可以采用两种方式:一是增加开环估计的积分时长,降低  $\sigma_n$ ;二是增加闭环估计的相干积分时长,同时降低  $\sigma_u$  和  $\sigma_n$  值。然而增加相干积分时间会降低环路的更新速率,为了满足接收机定位解算的更新速率,需要根据式(17)设计环路的相干积分时间。

## 3 性能分析

### 3.1 码跟踪精度

当环路实现收敛和稳定跟踪后,多区域鉴别器切换为 QStrobe 鉴别器进行跟踪。因而,码跟踪精度主要受 QStrobe 鉴别器的影响。文献[7]给出 QStrobe 算法的伪码跟踪精度如下:

$$\sigma_\varepsilon \approx \frac{\sqrt{2B_L T}}{d_{\text{QStrobe}}(0)} \sigma_\tau(\Delta_1, \Delta_2, \beta, N_0) \quad (19)$$

其中,  $B_L$  为码跟踪环路的噪声带宽,  $\sigma_\tau(\cdot)$  为 QStrobe 鉴别器输出的噪声标准差,  $N_0$  为输入信号的噪声功率谱密度。虽然  $\sigma_\tau(\cdot)$  可以通过理论分析得到其表达式,但是表达式过于复杂,文献[7]建议采用数值仿真的方法进行分析。

### 3.2 多径误差包络

在对多径抑制性能进行分析时,广泛采用单路多径模型<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{aligned} r(t) = s(t - \tau_0) \cos \theta_0 + \\ \alpha s(t - \tau_0 - \delta\tau) \cos(\theta_0 + \theta) \end{aligned} \quad (20)$$

其中:  $\alpha, \delta\tau, \theta$  分别为多径信号相对于直达信号的幅度比值、延迟和相位增量。

通常采用多径误差包络对多径抑制性能进行评估,即在给定固定延时的单路多径信号时,可能出现的最大多径误差。文献[13]给出了采用非相干鉴别器时,最大误差包络为:

$$d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon) \pm \alpha d_{\text{QStrobe}}(\varepsilon - \delta\tau) = 0 \quad (21)$$

当多区域鉴别器实现稳定跟踪后,采用 QStrobe 鉴别器进行跟踪,因而其鉴别器特性即为 QStrobe 的鉴别器特性,可以用式(21)对其多径抑制性能进行评估。

## 4 算法仿真分析

在上述算法中, QBOC 鉴别器主要工作在环路收敛阶段,而接收机通常不会使用收敛阶段

的环路测量值进行定位解算,并且环路收敛时间通常较短,因此,不会影响到接收机定位解算的性能。而当环路实现收敛之后,采用 QStrobe 鉴别器,此时环路的 多径抑制和跟踪精度性能决定了环路整体的跟踪性能。因此,本算法与 QStrobe 环路具有相同的 多径抑制和跟踪精度性能。

#### 4.1 BOC(15, 2.5) 信号的仿真

BOC(15, 2.5) 信号已在 Galileo 的 E1 频点使用<sup>[14-15]</sup>。仿真场景的接收滤波器前端单边带宽  $B_f = 17.5 \times 1.023$  MHz。以多径包络面积最小为优化目标,根据式(15)的限制条件,通过数值遍历分析的方法,得到多区域鉴别器 QStrobe 的优选参数为: $\Delta_1 = 1/13, \Delta_2 = 10/43, \beta = 0.34$ 。

图 2 为给出了经多区域鉴别器算法改进的 QStrobe 鉴别器 S 曲线,同时还给出了传统的 QStrobe 鉴别器 S 曲线<sup>[7]</sup>。为了便于显示,对本文算法的 QBOC 鉴别器曲线缩小了 10 倍。从图 2 可以看出,当  $|\varepsilon| > 1/10$  时,鉴别器输出会导致发散的情况,因此,改进算法的 QStrobe 鉴别器只能实现在  $|\varepsilon| < 1/10$  的收敛。当跟踪误差超出此误差范围后,环路鉴别器切换为 QBOC 鉴别器实现环路收敛。

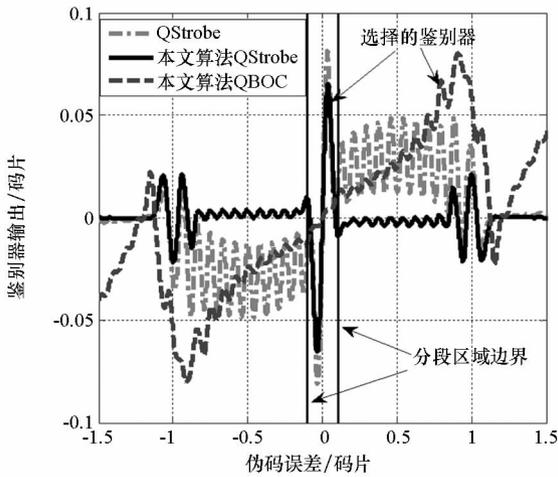


图 2 BOC(15, 2.5)的改进算法的鉴别器 S 曲线  
Fig. 2 S curve of proposed discriminator for BOC(15,2.5) signal

为了分析所提算法的多径抑制性能,采用传统 QStrobe 算法进行比对。图 3 为多径误差包络曲线图,其中多径信号的幅度比值  $\alpha = 1/2$ 。从图中可以看出,所提出算法的多径误差包络总面积明显小于传统算法。通过计算可知多径误差包络面积的性能改善达到 57%,且改进算法的多径误差包络最大值与传统算法基本相等。

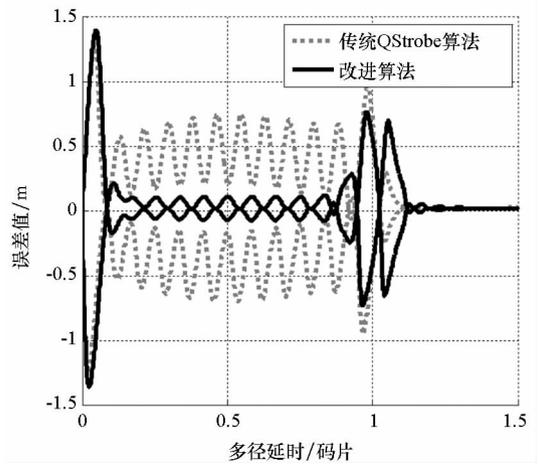


图 3 BOC(15, 2.5)改进算法的多径误差包络  
Fig. 3 Multipath error envelope of proposed algorithm for BOC(15, 2.5) signal

#### 4.2 BOC(14, 2) 信号的仿真

BOC(14, 2)是北斗卫星导航系统的 B1 频点的授权信号将采用的调制方式<sup>[16]</sup>。仿真场景设置为  $B_f = 16 \times 1.023$  MHz。经过优化,获得多区域鉴别器的 QStrobe 优选参数为: $\Delta_1 = 1/15, \Delta_2 = 1/5, \beta = 0.34$ 。此时,鉴别器曲线如图 4 所示。从图中可以看出,所提算法的 QStrobe 鉴别器的收敛区域约为  $|\varepsilon| < 1/10$ 。当  $|\varepsilon| \geq 1/10$  时,环路通过切换鉴别器为 QBOC 鉴别器重新实现收敛。

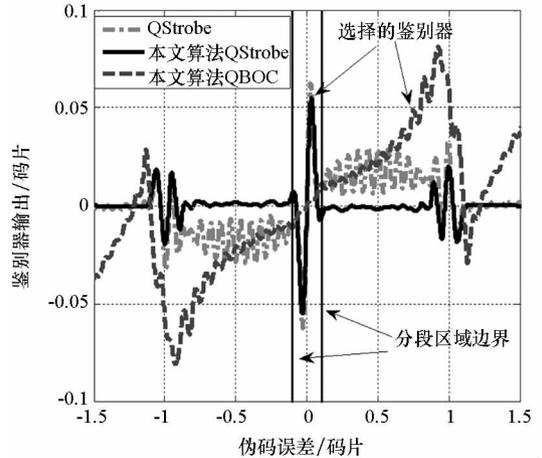


图 4 BOC(14, 2)的改进算法鉴别器 S 曲线  
Fig. 4 S curve of proposed discriminator for BOC(14,2) signal

图 5 为多径误差包络图,其中多径信号的幅度比值  $\alpha = 1/2$ 。从图中可以看出改进算法的多径误差包络总面积明显小于传统算法,多径误差包络面积的性能改善达到 51%。

#### 4.3 跟踪精度仿真

实现稳定跟踪后,跟踪精度由所采用的

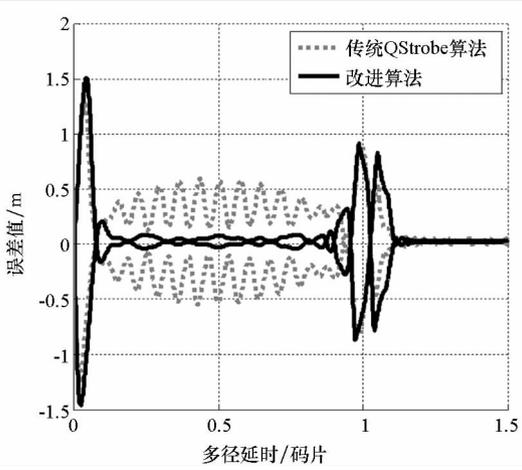


图5 BOC(14, 2)的改进算法的多径误差包络

Fig. 5 Multipath error envelope of proposed algorithm for BOC(14, 2) signal

QStrobe 鉴别器所决定。但是,本算法采用的最优参数与传统 QStrobe 算法不同,因而二者的跟踪精度会存在差别。

仿真场景中,码环路噪声带宽  $B_L = 2$  Hz,相干积分时间  $T = 1$  ms,进行了 1000 次测量方差统计。图 6 给出了仿真的精度结果,从图中可以看出,本算法的跟踪精度低于传统 QStrobe 算法,这是因为二者的鉴别器在伪码误差为零附近的斜率不相等造成的。但是,本算法的跟踪精度优于 QBOC 算法。

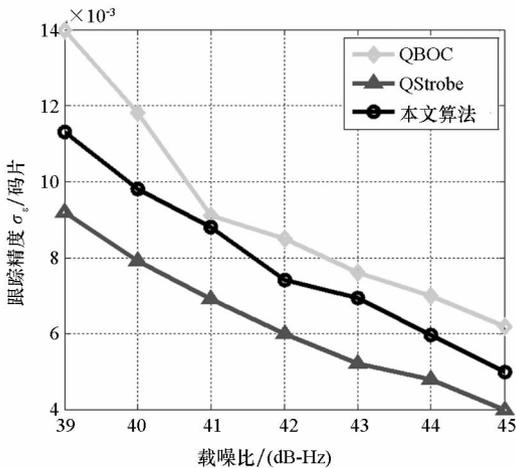


图6 BOC(14, 2)跟踪精度仿真结果图

Fig. 6 Tracking accuracy of BOC(14, 2) signal with different algorithms

#### 4.4 鉴别器切换仿真验证

利用 KF 对环路跟踪误差进行估计,判断是否切换鉴别器。采用上述精度分析的仿真场景,相干积分时间为 10 ms, KF 的更新时间为 30 ms,即将每 3 个 QBOC 鉴别器输出值的均值作为 KF

观测量。图 7 给出了信号载噪比为 35 dB-Hz 的仿真结果,图中鉴别器类型曲线为高表示运行 QBOC 鉴别器,为低表示运行 QStrobe 鉴别器。从图中可以看出,在仿真开始阶段,鉴别器工作在 QBOC 鉴别器,当跟踪收敛之后,鉴别器切换为 QStrobe 鉴别器。在 40 ~ 60 s 区间增加了强度  $\alpha = -6$  dB,延时  $\delta\tau = 0.1$  码片的多径信号。此多径信号导致了 KF 存在约 0.04 码片的估计偏差,但此偏差不会导致鉴别器切换,因此,环路依然工作在具有较高多径抑制性能的 QStrobe 鉴别器区间。在 80 ~ 83 s,模糊高动态场景增加了  $20 \text{ m/s}^2$  的加速度,此时会导致环路产生较大的跟踪偏差, KF 检测到跟踪偏差超出 QStrobe 鉴别器环路的收敛范围,环路切换为 QBOC 鉴别器,重新实现环路的收敛。从此仿真可以看出, KF 能有效地实现跟踪误差的估计,为鉴别器的正确切换提供高精度的判断依据。

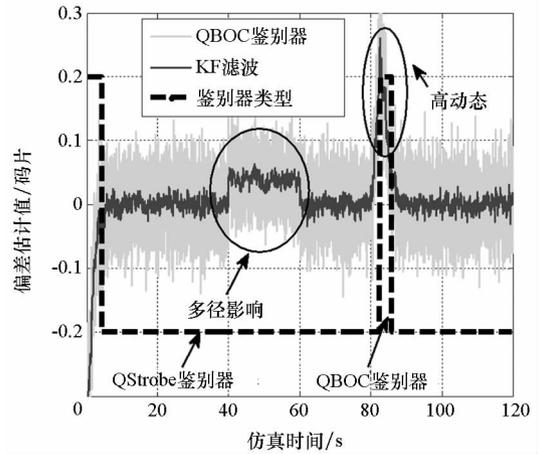


图7 BOC(14, 2)信号的鉴别器切换仿真的跟踪误差图

Fig. 7 Discriminator switch simulation of multi-region discriminator for BOC(14, 2) signal

## 5 结论

提出一种多区域鉴别器的多径抑制算法,不同鉴别器根据各自的特性工作在不同的收敛区域,从而提高环路的整体跟踪性能。

采用 QBOC 鉴别器进行收敛控制,采用 QStrobe 鉴别器进行多径抑制,解决了传统 QStrobe 算法有效收敛范围窄的问题;并且采用 KF 对跟踪偏差进行估计,实现环路状态的实时监测和控制。

所提算法的 QStrobe 鉴别器无须在整个收敛域工作,所以其优选参数选择范围更广,能极大地提升多径抑制性能。相对于传统 QStrobe 算法,

所提算法对 BOC(15, 2.5) 和 BOC(14, 2) 信号分别降低 57% 和 51% 的多径误差包络面积。

## 参考文献 (References)

- [1] Irsigler M, Hein G W, Eissfeller B. Multipath performance analysis for future GNSS signals [C] // Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2004: 225 - 238.
- [2] Yao Z, Lu M. Side-peaks cancellation analytic design framework with applications in BOC signals unambiguous processing [C] // Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2011: 775 - 785.
- [3] Julien O, Macabiau C, Cannon M, et al. 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.
- [4] Fine P, Wilson W. Tracking algorithm for GPS offset carrier signals [C] // Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 1999: 671 - 676.
- [5] Hodgart M S, Blunt P D, Unwin M. Double estimator—a new receiver principle for tracking BOC signals [J]. Inside GNSS, 2008, 3(3): 26 - 36.
- [6] Ward P W. A design technique to remove the correlation ambiguity in binary offset carrier (BOC) spread spectrum signals [C] // Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 2003: 146 - 155.
- [7] 张锴, 刘瀛翔, 倪少杰, 等. QStrobe: 一种高阶 BOC 卫星导航信号的无模糊多径抑制算法 [J]. 宇航学报, 2012, 33(11): 1674 - 1680.  
ZHANG Kai, LIU Yingxiang, NI Shaojie, et al. QStrobe: an unambiguous multipath mitigation algorithm for high order BOC satellite navigation signals [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(11): 1674 - 1680 (in Chinese)
- [8] 刘瀛翔, 唐小妹, 王飞雪. 基于 QBOC 码的 BOC 信号码跟踪环路性能分析 [J]. 全球定位系统, 2009, 34(4): 20 - 24.  
LIU Yingxiang, TANG Xiaomei, WANG Feixue. Analysis for performance of code tracking loop for BOC signals using QBOC code [J]. GNSS World of China, 2009, 34(4): 20 - 24. (in Chinese)
- [9] 刘福生, 罗鹏飞. 统计信号处理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.
- LIU Fusheng, LUO Pengfei. Statistical signal processing [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [10] Tang X M, Zhang Y H, Li B Y, et al. The performance of optimized carrier tracking loop in weak signal [C] // Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), 2012: 1495 - 1499.
- [11] Garin L, van Diggelen F, Rousseau J M. Strobe & edge correlator multipath mitigation for code [C] // Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1996), 1996: 657 - 664.
- [12] 张锴, 李井源, 张勇虎, 等. 带限信道中准相干码相关参考波形技术多径抑制性能分析 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 64 - 69.  
ZHANG Kai, LI Jingyuan, ZHANG Yonghu, et al. Multipath mitigation performance evaluation of quasi-coherent code correlation reference waveform technique in band-limited receiver channels [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(2): 64 - 69. (in Chinese)
- [13] 唐祖平, 胡修林, 黄旭方. 卫星导航信号设计中的抗多径性能分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(5): 1 - 4.  
TANG Zuping, HU Xiulin, HUANG Xufang. Analysis of multipath rejection performance in GNSS signal design [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009, 37(5): 1 - 4. (in Chinese)
- [14] Blunt P, Weiler R, Hodgart S, et al. Demonstration of BOC(15, 2.5) acquisition and tracking with a prototype hardware receiver [R]. Surrey Space Centre Martin Unwin Surrey Satellite Technology Limited, 2007.
- [15] Hein G W, Irsigler M, Rodriguez J A, et al. Performance of Galileo L1 signal candidates [C] // Proceedings of European Navigation Conference GNSS, 2004.
- [16] 谭述森, 周兵, 郭盛桃, 等. 中国全球卫星导航信号基本框架设计 [J]. 中国空间科学技术, 2011, 31(4): 9 - 14.  
TAN Shusen, ZHOU Bing, GUO Shengtao, et al. Research on COMPASS navigation signals of China [J]. Chinese Space Science and Technology, 2011, 31(4): 9 - 14. (in Chinese)