

基于自相关副峰消除的多径抑制技术改进

王鲁杰,李立欣,张会生,张光龙

(西北工业大学 电子信息学院,陕西 西安 710129)

摘要: 为消除 Sine-BOC(1,1)信号自相关函数的旁瓣所引起的跟踪模糊问题,Oliver Julien 提出了自相关副峰消除技术。在此研究的基础上,将其与传统的窄相关和 Strobe 多径抑制技术相结合,并针对 Sine-BOC(1,1)和 CBOC(6,1,1/11)信号进行多径抑制性能分析。通过分析 EML 鉴别曲线过零点偏移情况和多径抑制能力可知,ASPeCT 技术不仅消除跟踪模糊,而且能够有效地提升窄相关和 Strobe 技术的多径抑制能力。

关键词: Sine-BOC(1,1); MBOC; ASPeCT; 窄相关; Strobe

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2014)04-0060-04

The improved of multipath mitigation technology based on ASPeCT

Wang Lujie, Li Lixin, Zhang Huisheng, Zhang Guanglong

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: To eliminate ambiguities tracking problem caused by autocorrelation function sidelobe of Sine-BOC (1,1) signal, Oliver Julien proposed autocorrelation side-Pink cancellation technique. Based on this research, and combined with the traditional narrow correction and Strobe multipath suppression techniques, multipath suppression performance of Sine-BOC (1,1) and CBOC (6,1,1/11) signals are analysed. In addition, with zero crossing point offset and multipath suppression capability of EML identification curve analysed, the conclusion that ASPeCT tracking technique can not only eliminates ambiguities tracking, but effectively enhance multipath suppression capability of narrow correlation and Strobe techniques are drawn.

Key words: Sine-BOC(1,1); MBOC; ASPeCT; narrow correlator; Strobe

卫星导航系统的误差源主要有卫星钟差和接收机钟差、卫星轨道误差、电离层延迟、对流层延迟、天线相位中心偏差、地球的影响(包括地球自转、相对论效应和固体潮汐)及地面环境的影响(包括多径误差和杂波信号干扰)。随着卫星导航系统的发展,以上大部分误差源可以通过建模、差分等方法消除,剩下多径成为主要的误差源之一^[1]。多径信号造成的测距误差可达米级^[2]。

随着 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗导航系统的投入使用,导航频段变得越来越拥挤。针对上述问题提出了 BOC 信号调制方式^[3]。通过分析 BPSK 和 BOC 信号的自相关函数可知,BOC 信号不仅有效地解决了频率拥挤问题,还具有比 BPSK 信号更为尖锐的自相关函数形式,从而被期望可以带来更高的跟踪精度和更优异的多径抑制性能^[4]。然而,Sine-BOC(1,1)信号的自相关函数却存在两个副峰,导致在使用传统的超前减滞后延迟锁定环跟踪时存在多个稳定跟踪点。

自相关函数边峰消除技术 ASPeCT (Autocorrelation Side-Pink Cancellation Technique)很好地解决了 Sine-BOC (1,1)信号的模糊跟踪问题,本文将其与窄相关和 Strobe 多径抑制技术相结合,生成 AT-窄相关和 AT-Strobe 多径抑制技术,并验证二者对 Sine-BOC(1,1)和 CBOC(6,1,1/11)信号跟踪环路鉴相函数过零点的校正能力和多径抑制能力。

1 BOC 和 MBOC 信号调制方式

1.1 BOC 信号模型

BOC 调制由 BPSK 信号和方波副载波的乘积构成,方波副载波可以是正弦或者余弦,选用不同的副载波将会产生不同的信号结构。BOC 信号可以用两个变量来描述,分别为扩频码速率 $f_c = 1/T_c (m \times 1.023 \text{ MHz})$ 和副载波频率 $f_s (n \times 1.023 \text{ MHz})$,其中 m 和 n 都为整数。BOC(n, m) 信号可以表示为:

$$s(t) = AC(\varepsilon)D(\varepsilon)S_c(\varepsilon)\cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (1)$$

技术与方法 Technique and Method

其中, $S_c(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_c t + \phi))$ 表示方波副载波, $\varepsilon = t - \tau / T_c$, A 表示信号幅度, $C(t)$ 是扩频码序列, $D(t)$ 是导航数据, τ 表示码延迟, f_0 表示载波频率, φ 是载波相位, ϕ 定义副载波是正弦 ($\phi = 0$) 或余弦 ($\phi = \pi/2$)。

1.2 MBOC 信号模型

MBOC(6,1,1/11) 调制信号是由标准的 BOC(1,1) 和 BOC(6,1) 复合而成, 其功率谱密度是指整个信号 (包括导频信道和数据信道) 的功率谱密度, 并由复合信号 BOC(1,1) 和 BOC(6,1) 的功率谱密度组合而成, 其功率谱密度表达式为^[5-6]:

$$G_{\text{MBOC}} = \frac{10}{11} G_{\text{BOC}(1,1)}(f) + \frac{1}{11} G_{\text{BOC}(6,1)}(f) \quad (2)$$

式中, $G_{\text{BOC}(1,1)}(f)$ 和 $G_{\text{BOC}(6,1)}(f)$ 分别为 BOC(1,1) 和 BOC(6,1) 信号的归一化功率谱密度。

BPSK、Sine-BOC(1,1) 和 CBOC(6,1,1/11) 的自相关函数如图 1 所示。

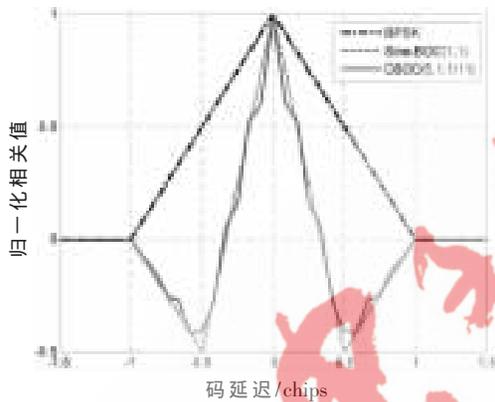


图 1 BPSK、Sine-BOC(1,1) 和 CBOC(6,1,1/11) 的自相关函数

2 自相关函数边峰消除技术 (ASPeCT)

由图 1 可知, Sine-BOC(1,1) 的自相关函数主峰较窄并且存在两个旁瓣。窄主峰说明 Sine-BOC(1,1) 信号能量集中, 便于捕获输出, 能够提高接收机的跟踪精度。但是两个旁瓣的存在使得接收机在捕获检测的过程中最大值和噪声基地的比值降低, 因此可能造成漏检情况的产生^[7-8]。而且旁瓣的存在也可能造成信号跟踪中出现“误锁”的情况。针对上述问题, 卡尔加里大学的 Oliver Julien 博士在参考文献[7]中首先提出了自相关函数边峰消除技术。其基本思想为: 首先求出 Sine-BOC(1,1) 信号的自相关函数和 Sine-BOC(1,1) 信号与伪随机码的互相关函数, 然后再计算二者的平方差, 从而得到合成的自相关函数, 其表达式如下:

$$R_{\text{ASPeCT}}(\tau) = R_B^2(\tau) - \beta R_{B/P}^2(\tau) \quad (3)$$

其中, $R_B(\tau)$ 为 Sine-BOC(1,1) 信号的自相关函数, $R_{B/P}(\tau)$ 为 Sine-BOC(1,1) 信号与伪随机码的互相关函数, β 为调节系数。其表达式可分别表示为:

$$R_B(\tau) = \text{tri}\left[\frac{\tau}{0.5}\right] - \frac{1}{2} \left[\text{tri}\left[\frac{\tau-0.5}{0.5}\right] + \text{tri}\left[\frac{\tau+0.5}{0.5}\right] \right] \quad (4)$$

$$R_{B/P}(\tau) = \frac{1}{2} \left[\text{tri}\left[\frac{\tau-0.5}{0.5}\right] - \text{tri}\left[\frac{\tau+0.5}{0.5}\right] \right] \quad (5)$$

其中, $\tau \leq 1$, $\text{tri}(x/y)$ 是宽度为 $2y$ 、中心 $x=0$ 处幅值为 1 的三角曲线。ASPeCT 技术的相关函数如图 2 所示。

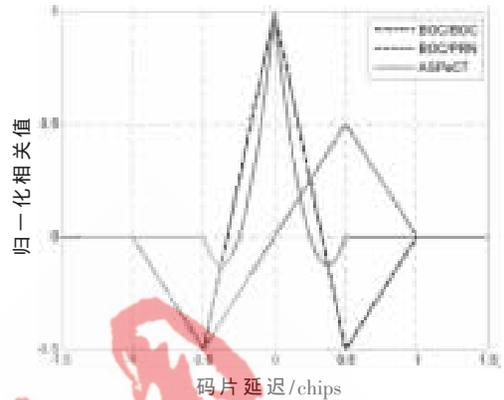


图 2 ASPeCT 技术合成的相关函数

如图 2 所示, Sine-BOC(1,1) 信号与伪随机码的互相关函数的正负峰值分别在 ± 0.5 码片的位置上, 与 Sine-BOC(1,1) 信号的自相关函数的两个副峰位置相对应且幅度也相同。运用式(3)可得到 ASPeCT 技术合成的自相关函数, 可以看出合成的自相关函数几乎不存在副峰。很好地消除了副峰所带来的漏检和模糊跟踪问题。

3 多径信号对码跟踪环路的影响

为了方便讨论, 不考虑导航信息且只考虑一路多径信号时, 接收机接收到的信号为^[9-10]:

$$S(t) = \sum_{i=0}^1 \alpha_i A_i(t) C(t - \tau_i) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_i) \quad (6)$$

其中, $i=0$ 表示接收信号为直达信号, $i=1$ 表示接收信号为多径信号; α_i 为幅度衰减系数; $A_i(t)$ 为第 i 路多径信号的幅度; $C(t)$ 为伪随机码; τ_i 为多径延迟误差; φ_i 为相位偏移。

传统 EML (Early Minus Late) 的鉴别器输出为:

$$S_{E-L}(\varepsilon) = \alpha_0 \left[R \left[\varepsilon + \frac{d}{2} \right] - R \left[\varepsilon - \frac{d}{2} \right] \right] \cos(\varphi_e) + \alpha_1 \left[R \left[\varepsilon - \tau_{d1} + \frac{d}{2} \right] - R \left[\varepsilon - \tau_{d1} - \frac{d}{2} \right] \right] \cos(\varphi_e - \varphi_{d1}) \quad (7)$$

其中, $\varepsilon = \hat{\tau}_0 - \tau_0$ 为本地伪码相位估计与直射信号的伪码相位差; $\tau_{d1} = \tau_1 - \tau_0$ 为伪码相位差; $\varphi_e = \hat{\varphi}_0 - \varphi_0$ 为本地载波相位估计与直射信号的载波相位差; $\varphi_{d1} = \varphi_1 - \varphi_0$ 为载波相位差; d 为相关器间隔; $R(\bullet)$ 为接收信号的自相关函数, 在本文中 $R(\bullet)$ 为 ASPeCT 技术的合成自相关函数。

由式(7)可以看到, 最后的 EML 鉴别器输出与直达信号和多径信号的 α 、 τ 、 d 以及 $R(\bullet)$ 有关。多径信号的存在会使得进入码跟踪环路的基带信号的相关函数发生畸变, 进而导致 EML 鉴别曲线的过零点发生偏移。AT-窄相关和 AT-Strobe 技术针对 Sine-BOC(1,1) 的鉴别曲线如图 3 和图 4 所示。

图 3 为码片间隔 $d=0.5$ 时, AT-窄相关和窄相关技术的 EML 鉴别曲线对比情况。对比结果为: 无论码延迟为多少, AT-窄相关的多径误差都比窄相关的小, 且前

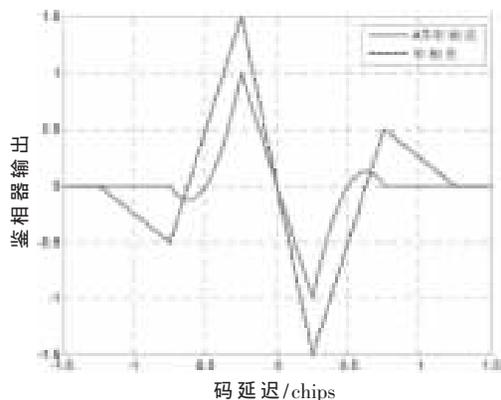


图3 AT-窄相关和窄相关技术的EML鉴别曲线

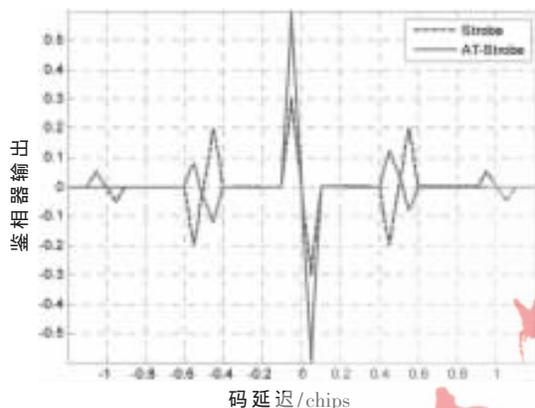


图4 AT-Strobe和Strobe技术的EML鉴别曲线

者的多径误差截止点也比后者小得多。图4为码片间隔 $d=0.5$ 时,AT-Strobe和Strobe技术的EML鉴别曲线对比情况。AT-Strobe技术所引起的多径误差只在码延迟为 $0\sim 0.1$ 码片时比Strobe技术大;在码延迟为 $0.4\sim 0.6$ 码片时,AT-Strobe技术引起的多径误差小,除这两个区间外AT-Strobe技术所引起的多径误差都为零,而Strobe技术在码延迟为 $0.9\sim 1.1$ 码片时仍然存在多径误差。

在 $\varphi_c=0$ 、 $\tau_{d1}=0.3$ chips、 $\alpha_1=-5$ dB、 $\tau_{d1}=0.3$ chips、 $\beta=1$ 的条件下,对Sine-BOC(1,1)和CBOC(6,1,1/11)信号进行EML鉴别曲线过零点偏移情况分析,结果如表1所示。在引入ASPeCT技术后多径信号所引起的码跟踪环路鉴别函数过零点偏移情况有了明显提高,尤其是对Sine-BOC(1,1)信号能完全消除多径信号引起的过零点偏移情况。

表1 码跟踪环路鉴别函数过零点情况

多径抑制算法	(单位:码片)	
	是否与ASPeCT技术相结合	
	不结合	结合
窄相关-BOC	0.075 00	0.004 35
窄相关-CBOC	0.020 11	0.006 12
Strobe-BOC	0	0
Strobe-CBOC	0.020 00	0.004 21

4 多径抑制能力分析

4.1 AT-窄相关技术

在早期的导航接收机中,由于受到技术因素的制

约,接收机内部的相关器间隔一般取一个码片的距离。随着技术的发展以及制造工艺的提高, Van Dierendonck等人提出窄相关技术。通过减小超前和滞后相关器的相关间隔,增强了环路的多径抑制能力,该技术已经在Novatel公司的产品中得以广泛运用。下面将利用AT-窄相关和窄相关技术对Sine-BOC(1,1)信号和CBOC(6,1,1/11)信号进行多径抑制能力分析,仿真结果如图5和图6所示。

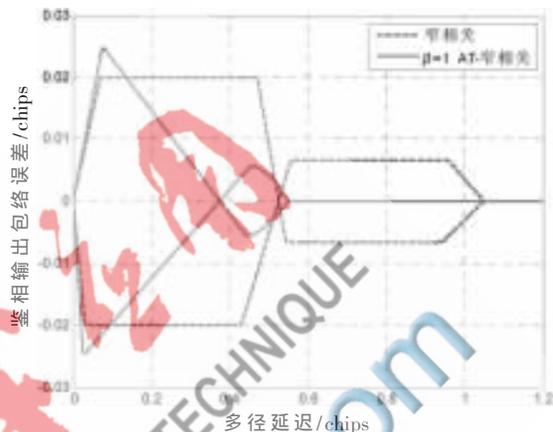


图5 Sine-BOC(1,1)信号AT-窄相关多径包络误差曲线

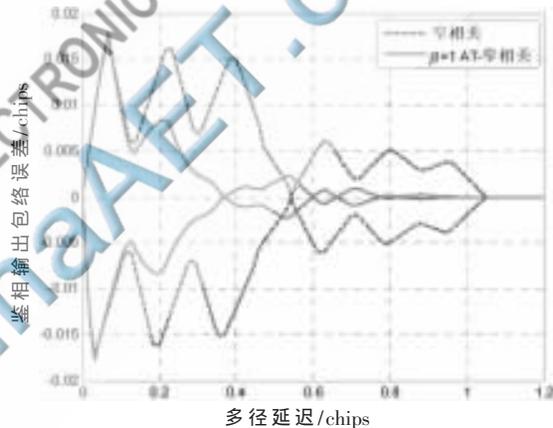


图6 CBOC(6,1,1/11)信号AT-窄相关多径包络误差曲线

仿真条件为:载波完全同步,只考虑算法对多径信号的抑制能力;多径信号相对直达信号的衰减系数为 -3 dB,不考虑射频前端带宽的影响,码片间隔取 0.1 ,调节系数 β 取值为 1 。

由图5知,针对Sine-BOC(1,1)信号,AT-窄相关与窄相关技术相比:(1)当 $|\tau|<0.1$ 码片时,两者的多径抑制能力基本相同;(2)当 $0.1<|\tau|<0.5$ 码片时,AT-窄相关技术的多径抑制能力强;(3)当 $0.5<|\tau|<1.04$ 码片时,AT-窄相关的多径误差为零,而窄相关技术不为零。

由图6知,针对CBOC(6,1,1/11)信号,AT-窄相关与窄相关技术相比:(1)当 $|\tau|<0.14$ 码片时,两者的多径抑制能力完全相同;(2)当 $0.14<|\tau|<0.8$ 码片时,AT-窄相关技术的多径抑制能力强;(3)当 $0.8<|\tau|<1.04$ 码片时,AT-窄相关的多径误差为零,而窄相关技术不为零。

4.2 AT-Strobe技术

传统Strobe技术利用两组相关器,一组称为窄相关

技术与方法 Technique and Method

器,另一组称为宽相关器,并且宽相关器的相关间隔为窄相关器的两倍。Strobe技术的鉴相函数输出表达式为:

$$S_{\text{Strobe}}=2(E1-L1)-(E2-L2) \quad (8)$$

运用AT-Strobe和Strobe技术对CBOC(6,1,1/11)信号进行多径抑制能力仿真,仿真结果如图7和图8所示。

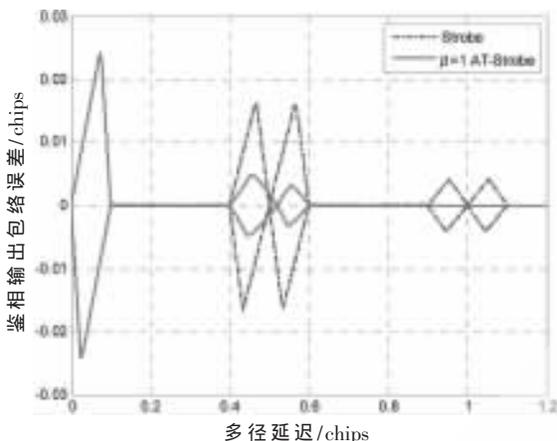


图7 Sine-BOC(1,1)信号AT-Strobe多径包络误差曲线

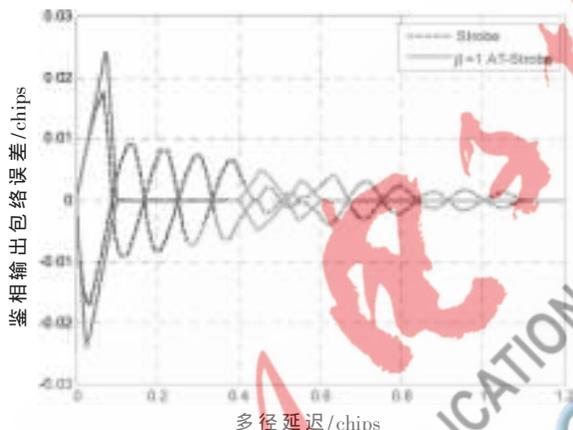


图8 CBOC(6,1,1/11)信号AT-Strobe多径包络误差曲线

由图7知,针对Sine-BOC(1,1)信号,AT-Strobe技术和Strobe技术相比:(1)当 $|\tau| < 0.4$ 码片时,两者的多径抑制能力完全相同;(2)当 $0.4 < |\tau| < 0.6$ 码片时,AT-Strobe技术的多径抑制能力强;(3)当 $|\tau| > 0.6$ 码片时,AT-Strobe的多径误差为零,而Strobe技术在 $0.9 < |\tau| < 1.1$ 时仍然存在误差。

如图8,针对CBOC(6,1,1/11)信号,AT-Strobe技术只在 $|\tau| < 0.1$ 和 $0.4 < |\tau| < 0.6$ 时存在多径误差;而Strobe技术在 $|\tau| < 1.1$ 的区间内一直存在多径误差。与图7对比可知,AT-Strobe技术对CBOC(6,1,1/11)信号的多径抑制能力基本可以达到对Sine-BOC(1,1)信号的多径抑制能力,也就是说将ASPeCT技术与Strobe技术结合后有效抑制了CBOC(6,1,1/11)的高频分量。

卡尔加里大学的Oliver Julien提出的自相关函数边峰消除技术很好地解决了Sine-BOC(1,1)信号自相关函数的副峰所引起的模糊跟踪问题。本文提出将ASPeCT

技术与传统的窄相关和Strobe技术相结合,并针对Sine-BOC(1,1)和CBOC(6,1,1/11)信号进行码跟踪环路过零点偏移和多径抑制能力分析。分析结果表明:(1)在引入ASPeCT技术后多径信号所引起的码鉴别器过零点偏移情况有了明显提高,尤其对Sine-BOC(1,1)信号能完全消除多径信号引起的过零点偏移情况;(2)将ASPeCT技术应用到窄相关和Strobe技术后,二者的多径抑制能力显著提高,尤其对CBOC(6,1,1/11)信号多径抑制能力基本可以达到对Sine-BOC(1,1)信号的抑制能力。

参考文献

- [1] 寇艳红.GPS原理与应用(第2版)[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [2] BRAASCH M.Optimum antenna design for DGSS ground reference stations[A].Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the ION[C], 1994.
- [3] BETZ J W.Binary offset carrier modulations for radionavigation[J].NAVIGATION:Journal of The Institute of Navigation, 2002, 48(4): 227-246.
- [4] BETZ J W.The offset carrier modulation for GPS modulation[C].Proceedings of ION NTM'99 and 19th Biennial Guidance Test Symposium, Washington: Institute of Navigation, 1999: 639-648.
- [5] HEIN G W, BETZ J W, AVILA-RODRIGUEZ J A, et al. MBOC: the new optimized spreading modulation recommended for GALILEO and GPS LIC[C].2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium. Coronado(San Diego), CA: IEEE/ION, 2006: 883-892.
- [6] AVILA-RODRIGUEZ J A, HEIN G W, WALLNER S, et al. The MBOC modulation: the final touch to the Galileo frequency and signal plan[C].Proceedings ION GNSS 2007. Fort Worth: ION GNSS, 2007: 1515-1529.
- [7] OLIVIER J, MACABIAU C, CANNON M E, 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): 150-161.
- [8] OLIVIER J.Design of galileo L1F tracking loops[D].Alberta, Canada: University of Calgary, 2005.
- [9] IRSIGLER M, RODRIGUEZ J A, HEIN G W.Criteria for GNSS multipath performance assessment[C].Proceeding of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach, California, ION-GNSS, 2005: 13-16.
- [10] MISRA P, ENGE P.Global positioning system: signals, measurements and performance[M].Lincoln, Mass, USA: Ganga-Jamuna Press, 2006.

(收稿日期: 2013-10-25)

作者简介:

王鲁杰,男,1987年生,硕士,主要研究方向:卫星导航系统中的多径抑制算法。