

基于自制小波的 EBPSK 信号检测器^①

冯 媛^② 宋文慧 吴乐南

(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘 要 针对全新的高速高效调制方案——扩展的二元相移键控(EBPSK)调制的微小调制差别检测难题,在研究 EBPSK 调制波形及简单的冲击幅度检测的基础上,提出了一种基于自制小波的 EBPSK 检测器,其中自制小波是基于通过冲击滤波器后产生的冲击波形包络来构造的。通过仿真实验进行了与一些经典的小波检测器的比较,结果表明在加性高斯白噪声(AWGN)信道下,基于自制小波的 EBPSK 检测器性能更佳,在较低的信噪比条件下,仍能较好地检测出信号的位置和尺度,且算法实现复杂度较低。

关键词 自制小波,超窄带(UNB),扩展的二元相移键控(EBPSK),冲击滤波器,检测

0 引 言

可用无线频谱资源的稀缺性,已成为制约无线通信发展的主要因素之一,可提高频谱利用率的高效调制技术^[1-5]备受关注。扩展的二元相移键控(extended binary phase shift keying, EBPSK)^[5]是一类高效的但“0”、“1”波形不对称的调制方式,传统意义上的相关检测已非最优,经典的窄带滤波器^[6]更会将微小的调制信息“抹去”。对此, Walker 提出了“零群时延”晶体滤波器^[7],但石英晶体的稳定性、灵活性及可靠性都较差的缺点使其一直难以实用。东南大学信息科学与工程学院则在数字化零群时延滤波器^[8]的基础上发展了数字冲击滤波器^[9],可将信号的相位调制转化为寄生调幅,从而可以通过简单的门限判决^[8]来极大地简化接收机结构,但简单的门限检测仍非最优,尤其在低信噪比情况下检测性能不佳。

小波分析^[10,11]是一种有效的信号处理方法,同时小波函数的快速衰减性特别适合于信号瞬变的信息检测,因而本文尝试用小波来对冲击滤波器的输出波形进行检测,以克服简单门限检测的缺点,并为进一步提高检测性能而采用“自制小波”^[12],采用冲击滤波器输出波形的包络来构造更匹配的小波,以

达到更好的检测效果。本文基于自制小波的 EBPSK 信号检测器兼有冲击滤波器和小波检测器的优良特性,仿真表明,在加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)信道中,在较低的信噪比条件下仍可得到较好的检测性能。另一方面,在 EBPSK 系统中,接收端使用的特殊数字冲击滤波器有较好的抗多径衰落的功能^[13],本文讨论的自制小波检测是基于冲击滤波器的输出进行的,在此已经基本消除了多径,因而自制小波检测这一模块不考虑多径的影响,故本文仅讨论 AWGN 信道下的检测性能,对多径信道暂不做分析。

1 EBPSK 调制

BPSK 就是根据数字基带信号的两个电平,使载波相位在两个不同的数值之间切换的一种相位调制方法。设:(1)数据信息的符号宽度(即码元时间长度) T 持续了 $N \geq 1$ 个载波周期,即 $T = N/f_c$,其中 f_c 为载波频率;(2)跳变波形的时间长度 τ 持续了 K 个载波周期,即 $\tau = K/f_c$,且 $K \leq N$;(3)“0”和“1”所对应的调制波形分别为 $g_0(t)$ 和 $g_1(t)$,则 EBPSK^[5]统一表达式为

$$g_0(t) = A \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t < T$$

① 国家自然科学基金(60872075),863 计划(2008AA01Z227),广东省重大科技专项(2010A080402003)和中兴通讯产学研项目(8504000171)资助。

② 女,1979 年生,博士,副研究员;研究方向:通信信号处理;联系人,E-mail: feng_man@163.com (收稿日期:2012-03-26)

$$g_1(t) = \begin{cases} B\cos(2\pi f_c t + \theta), & 0 \leq t < \tau, 0 \leq \theta \leq \pi \\ A\cos 2\pi f_c t, & \tau \leq t < T \end{cases} \quad (1)$$

取 $N = 10, K = 2, f_c = 465 \text{ kHz}, A = B = 1, \theta = \pi$, 则其对应于码元“0”和“1”的调制波形如图 1 所示。根据式(1)选取适当的 θ , 加以 τ 的控制, 必要时再配合波形优化, 即可紧缩已调信号带宽^[14]。

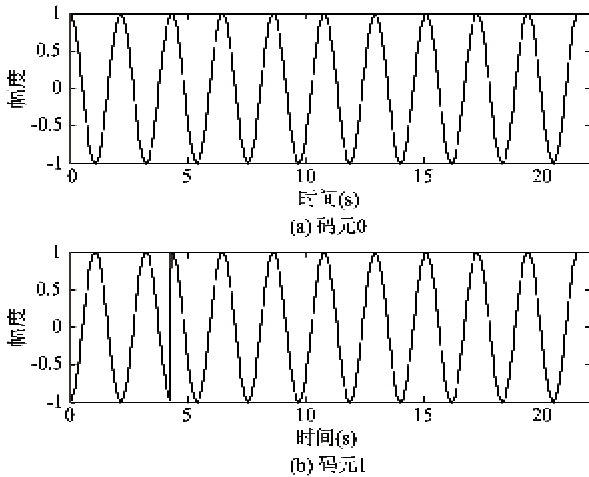


图 1 EBPSK 调制波形示例

2 EBPSK 解调

对于 EBPSK, 码元“0”和“1”的调制区间不再相

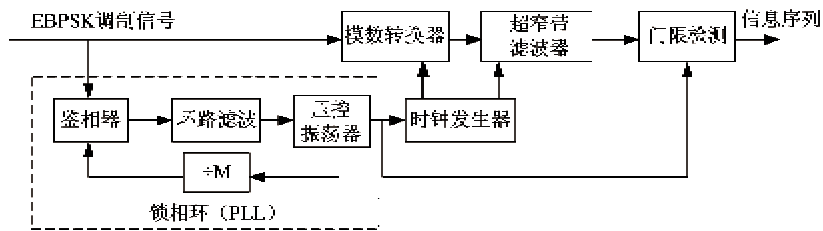


图 2 EBPSK 接收机

3 基于自制小波的检测器

图 2 所示的门限检测方法虽然简单, 但性能仍未最佳^[16], 至少冲击滤波输出的波形特征尚未有效利用。鉴于小波函数的快速衰减性特别适合于信号瞬变信息(或奇异性)的检测, 但若直接选常用小波, 则与 EBPSK 冲击输出波形总难最佳匹配。因此, 本文尝试“量身定做”: 通过信号的基本形状(“模式”)来构建特定的小波, 以进一步提高系统的检测性能。

等, 因而波形差异微小, 频谱利用率高; 但同时也导致传统的基于“0”、“1”码元分别对称匹配滤波的相关解调对其不再最优, 调制信息的可靠检测成为一大难题^[15]。为此, 文献[9]构思了数字冲击滤波器以突出信号特征, 并最大限度地去除噪声和干扰。图 2 为基于冲击滤波器的 EBPSK 接收机结构, 它将接收到的含噪 EBPSK 信号先通过冲击滤波器使其输出仅在“1”的相位跳变点处产生幅度冲击, 而对应码元“0”的相应位置上幅度则没有太大变化, 因而可通过对每个码元起始时刻的波形幅度检测实现“0”、“1”判决, 大大简化了基于锁相环(phase locked loop, PLL)的接收机结构^[5]。本文以 3 对共轭极点, 一对共轭零点的冲击滤波器为例, 其传递函数为

$$H(z) = \frac{1 - 1.6181733185991785z^{-1} + z^{-2}}{1 + \sum_{i=1}^6 a_i \cdot z^{-i}} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} a_1 &= -4.5781931992746454 \\ a_2 &= 9.6546659241157258 \\ a_3 &= -11.692079480819313 \\ a_4 &= 8.5756341567768217 \\ a_5 &= -3.6121554794765309 \\ a_6 &= 0.70084076007371199 \end{aligned}$$

该方法首先由 Misiti 提出^[12], 基本思想是利用最小平方优化方法构建一个与给定模式近似的小波。最小平方优化的思想即选择最佳参数, 使得匹配小波函数值与原信号值之差的平方和最小, 表示为

$$\min \sum_{i=1}^n (psi_i - s_i)^2 \quad (3)$$

其中 psi 为匹配小波, s 为原信号值。

其具体实现又分为多项式逼近法 (polynomial) 与常数正交函数空间投影法 (orthconst)。算法必须

预先设置规则度(regularity),反映小波在边界的约束,可以选择“无”、“连续”和“可微”3种。一般地,多项式逼近法多适用于信号模式比较简单情况,而正交投影法则适用于信号模式较复杂的情况。

结合冲击滤波器的优点,本文考虑对通过冲击滤波器后产生的冲击波形包络进行自制小波构造。由于该波形特征比较复杂,故本文采用正交投影法来构造小波。具体的正交投影法的实现是较为常见的方法,众多参考文献^[10,12]中已有介绍,本文不再赘述。利用 Matlab 软件中现成 pat2cwav 函数即可完成特殊信号的小波构造,具体实现语句为: [psi, xval, nc] = pat2cwav (s, 'orthconst', 2, 'continuous'),其第二个参数选择为 orthconst 即为采用正交投影法来构造小波,对 EBPSK 信号通过冲击滤波器后的幅度冲击包络做 2 阶最小均方拟合,即可构造出特殊的自制小波。因此得到的自制小波是在满足容许性条件约束的前提下构造的,同时所构造的小波在满足边界规则的基础上,可最大限度地反映信号本身的特点。Xval 用于描述时间(x 轴), nc $\times$ psi 用于描述幅度(y 轴),图 3 给出了原始模式的幅度冲击包络以及由其构造的“专用”小波。

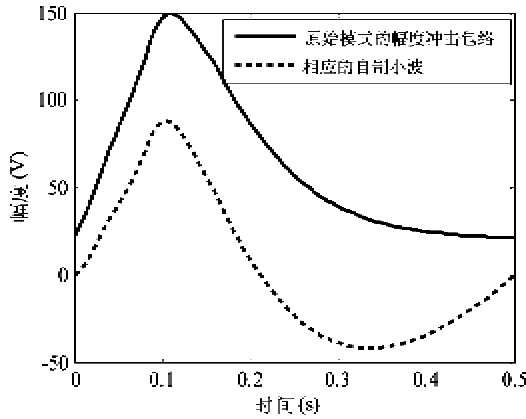


图3 冲击包络及其对应的小波

下面简单讨论本文提出的自制小波的数学依据。用满足容许性条件的自制小波 $\psi(t)$ 对信号 $s(t)$ 作分解:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

其中, $a, b \in \mathbb{R}$, 且 $a \neq 0$ 。称 a 为伸缩因子, b 为平移因子,则关于母小波 $\psi(t)$ 的连续小波变换系数为

$$\begin{aligned} C_{a,b} &= \langle f, \psi_{a,b} \rangle \\ &= |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{aligned} \quad (5)$$

则 $|C_{a,b}|^2 \leq \langle f, f \rangle \langle \psi_{a,b}, \psi_{a,b} \rangle$, 当且仅当 $f = K\psi_{a,b}$ (2^aw) 时, $C_{a,b}$ 有最大值。也就是说当信号的频谱与小波函数的频谱一致(匹配)时,可获得最大的小波系数。因此,本文构造的自制小波对于不同的信号,选择与之匹配的小波基函数,可使得信号的小波变换在小波域的输出最大。

4 系统仿真

本节通过计算机仿真验证本文提出的基于自制小波的检测器的有效性。仿真实验中,调制参数分别设为 $N = 10$, $K = 2$, $f_c = 10\text{kHz}$, $A = B = 1$, $\theta = \pi$ 。

图4所示为通过冲击滤波器的含噪 EBPSK 信号及自制小波对含噪 EBPSK 信号检测结果的比较。图4(a)给出了原始发送的 0、1 码元作为参照,图4(b)给出了含噪 EBPSK 信号通过冲击滤波器后的波形,其中仿真的信噪比选为 2dB。显然,此时冲击滤波器输出波形很差,仅幅度检测已无法判别 0、1 码元,因而可考虑用小波来提升 EBPSK 信号检测性能。图4(c)给出了自制小波对冲击滤波器输出

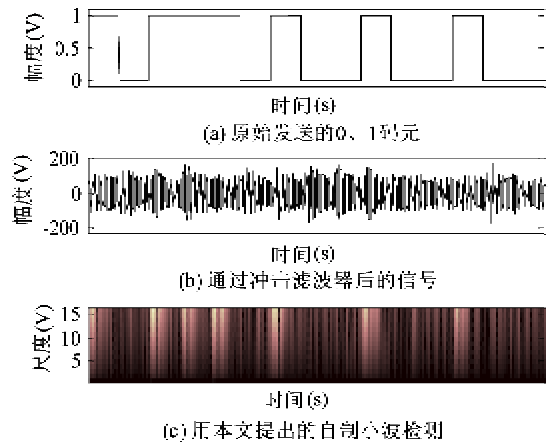


图4 通过冲击滤波器的含噪 EBPSK 信号及自制小波对其的检测结果($\text{SNR} = 2\text{dB}$)

信号做一维连续小波分解的结果。为了验证所构造小波的优势,选取了 Meyer 小波、sym2 小波及 db2 小波等经典的小波在同等条件下进行了性能对比,结果如图5。

直观可见,图4(c)中有很多亮条,说明信号与小波很好地进行了匹配。通过对比图4(a)中的原始发送数据,可见亮条位置恰好对应于发送的码元 1 的起始位置,即码元 1 对应的调制波形中存在相

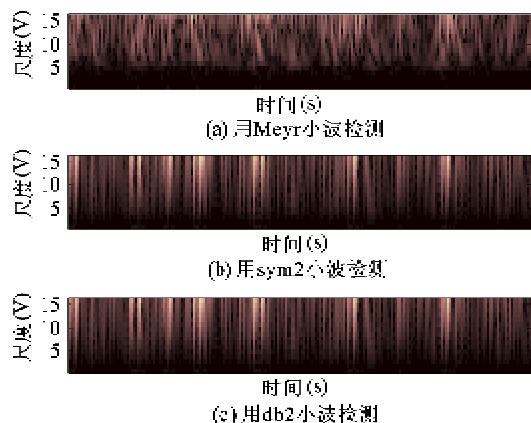


图5 经典小波对含噪 EBPSK 信号的检测结果 (SNR = 2dB)

位跳变的部分,也就是通过冲击滤波器以后产生幅度冲击的位置;而对应于码元 0 的位置由于冲击滤波输出幅度不变,因此对应处为黑色,显然依此即可清楚地分辨 0、1 码元,即可在比经典幅度判决更低的信噪比下完成 EBPSK 检测。图 5 表明, Meyer 小波结果最差,肉眼根本无法分辨 0、1 码元; sym2 小波和 db2 小波性能相当,虽均可见亮条出现,但太不清晰,检测效果明显差于本文提出的自制小波。

虽然上述主观判断已可说明本文提出自制小波检测方法的优越性,但为了公平起见,图 6 给出了本文提出的自制小波检测器在 AWGN 信道下所得到的客观的误码率性能曲线,并将其与简单的幅度检测结果以及几种经典小波检测结果进行了比较。显然,本文提出的自制小波能够较好地检测出信号的位置与尺度,其误码率性能最优,幅度检测次之,而经典小波由于与信号模式失配,检测效果较差。

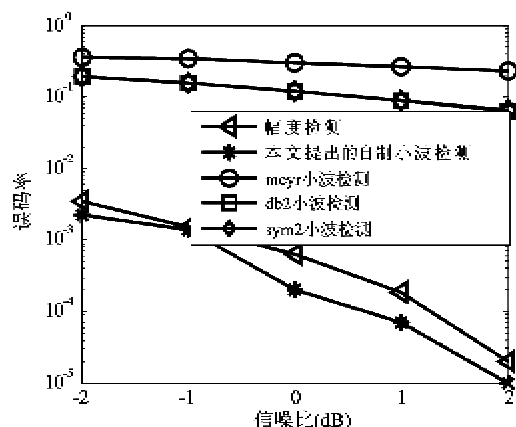


图6 误码率性能

从计算复杂度上看,自制小波和其它经典小波基本相当,差别仅在于经典的小波函数是已知的,有

确切的表达式;而自制小波函数则是根据信号的基本形状(“模式”)并按照上述规则构造的,例如本文中所述的原始信号为通过冲击滤波器后的波形包络,有效地利用了其波形特征。因此对于给定的某种波形,当构造好相应的自制小波函数之后,其小波检测的复杂度与经典小波就完全一致。

5 结论

针对 EBPSK 调制信号微小的“0”、“1”波形差异,本文基于冲击滤波器输出波形的包络,构造了一种自制小波并用于 EBPSK 信号检测。仿真表明,这种自制小波可比直接选用一些经典的小波函数波形更匹配,并在较低的信噪比下仍能较好地检测出信号的位置和尺度,具有最优的误码率性能,为 EBPSK 系统性能的进一步提升提供了一种可行的方案。

未来的研究目标是进一步讨论衰落信道下的 EBPSK 系统性能,并利用新的小波方法来改善自制小波的性能,例如自制双正交小波^[17]等。

参考文献

- [1] Walker H R. VPSK and VMSK modulation transmit digital audio and video at 15 bits/sec/Hz. *IEEE Transactions on Broadcast Engineering*, 1997, 43(1): 96-103
- [2] Ji W L, Zheng G X, Bao M Q, et al. Ultra-narrowband wireless communication technology based on QVMCK modulation. In: *Proceedings of the 2008 China-Japan Joint Microwave Conference*, Shanghai, China, 2008. 185-187
- [3] 郑国莘等. 一种甚小线性调频键控的超窄带广播通信调制方法. 发明专利公开号: CN101753495A, 2010.6
- [4] Li B, Zhou Z, Zou W X. RPPK modulation with high data rates. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(2): 344-354
- [5] Feng M, Wu L N. Throughput-efficient wireless system and blind detection via improved particle filtering. *High Technology Letters*, 2009, 15(2): 192-197
- [6] Oppenheim A V, Willsky A S. *Signals and Systems*. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009
- [7] Walker H R. Ultra narrow band modulation textbook [EB/OL]. [2009-04-02]. <http://www.vmsk.org>
- [8] 马力,冯嫄,吴乐南. EBPSK 数字接收滤波器设计. *科技创新导报*, 2008, 28-29
- [9] 冯嫄,高鹏,吴乐南. 超窄带调制信号的特殊滤波分析

- 与仿真. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 227-230
- [10] David F W. An introduction to wavelet analysis [M], 2002, Birkhauser
- [11] 李利, 司锡才, 柴娟芳. 基于双尺度连续小波变换的二相编码信号识别. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1432-1435
- [12] Misiti M Y, Misiti G, Oppenheim J M, et al. Wavelets and Their Applications, Italy: Kluwer Academic Publishers, 1992
- [13] Feng M, Wu L N. Research on anti-fading performance of EBPSK system. In: Proceedigns of the 2nd International Symposium on Information Science and Engineering (ISISE), 2009: 561-564
- [14] 张士凯, 吴乐南. EBPSK 调制波的正交性及功率谱分析. 应用科学学报, 2008, 26(2): 127-131
- [15] Proakis John G. Digital Communications. Fourth Edition. McGraw-Hill Book Company, Inc., 2001
- [16] Wu L N, Feng M. On BER performance of EBPSK-MO-DEM in AWGN channel. *Sensors*, 2010, 10 (April): 3824-3834
- [17] Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets. *Applied and computational harmonic analysis*, 1996, 3: 186-200

A novel EBPSK signal detector based on custom wavelet

Feng Man, Song Wenhui, Wu Lenan

(The Institute of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract

Aiming at the key difficult problem of detecting ting modulation differences of the extended binary phase shift keying (EBPSK) modulation, a novel high-speed and high-efficiency modulation scheme, this paper proposes a new EBPSK signal detector based on custom wavelets, and the custom wavelets are constructed in the light of the envelop of impacting filtered EBPSK modulation waveforms. The custom wavelet based detector was compared with the ones based on typical wavelets by simulation, and the results showed that the proposed custom wavelet based detector exhibited the best performance over additive white Gaussian noise (AWGN) channels. The detector can also well detect the position and scale signals in low SNR cases, and its computational complexity is lower.

Key words: custom wavelet, ultra narrow band (UNB), extended binary phase shift keying (EBPSK), impacting filter, detection