

多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制解调器研究

靳 一 吴乐南 余 静 应鹏魁
(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘 要: 为改善随机极性的连续相位扩展二元相移键控(Extended Binary Phase Shift Keying with Continuous Phase, CP-EBPSK)调制信号的频谱利用率,提出了一种多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制方式。阐述了多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制原理。在数字冲击滤波器的基础上,分别给出了基于多路判决方式、贪婪判决方式和合理判决方式的解调器,并通过仿真对比和分析了 CP-EBPSK 调制、随机极性 CP-EBPSK 调制和多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制的功率谱、-60dB 带宽、频谱利用率和解调性能。仿真结果表明:1)在频谱结构不变的条件下,新的调制方式可使信息传输速率和频谱利用率成倍提高;2)若以 bps/Hz/SNR(dB)为综合指标,CP-EBPSK 系统为 1.18×10^{-3} ,随机极性 CP-EBPSK 系统为 7.01,而新的调制解调系统为 13.8。

关键词: 连续相位扩展二元相移键控调制;频谱利用率;数字冲击滤波器;多路判决;贪婪判决;合理判决

中图分类号: TN911.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)01-0010-07

Research on M-ary CP-EBPSK Modem with Random-polar

JIN Yi WU Le-nan YU Jing YING Peng-kui

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to improve the spectrum efficiency of random-polar modulated Extended Binary Phase Shift Keying with Continuous Phase (CP-EBPSK), a random-polar and M-ary CP-EBPSK modulation is proposed. The modulation principle of random-polar and M-ary CP-EBPSK is demonstrated. Based on the digital impacting filter, the demodulator on the basis of Multi-path decision method, greedy decision method and rational decision method is presented, respectively. The contrast and analysis of the power spectrum, the -60dB bandwidth, the spectral efficiency, and the demodulation performance among the CP-EBPSK, random-polar modulated CP-EBPSK, and the proposed modulation, are carried out. Simulation results show that: 1) under the premise of remaining the same spectral structure, the proposed modulation method can multiple the information transmission rate and spectral efficiency; 2) if taking bps/Hz/SNR(dB) as comprehensive indicator, CP-EBPSK is about 1.18×10^{-3} , random-polar modulated CP-EBPSK is about 7.01, and the proposed modem is 13.8.

Key words: Extended Binary Phase Shift Keying with Continuous Phase; spectrum efficiency; digital impacting filter; Multi-path decision; greedy decision; rational decision

1 引言

随着信息社会不断发展,高速、实时和可靠传输的无线通信业务对传输带宽提出了越来越高的要求,宽带和超宽带通信(Ultra Wide Band, UWB)成为当前的主流技术,但频谱利用率却并不高。鉴于频谱是有限的战略

资源,一类“超窄带”(Ultra Narrow Band, UNB)高效调制方式受到关注。从美国的 Walker^[1-2],到国内的吴乐南^[3]、郑国莘^[4-5]、周正^[6]和王红星^[7-8]等团队,先后对此技术展开了研究。其中,扩展的二元相移键控(Extended Binary Phase Shift Keying, EBPSK)调制^[3]、连续相位的 EBPSK(EBPSK with Continuous Phase, CP-EBPSK)调

制^[9]、随机极性的 CP-EBPSK 调制^[10]和随机极性 MCP-EBPSK (Modified CP-EBPSK, MCP-EBPSK) 调制^[11-12]在合法带宽内均呈现出了远高于现有调制方式的频谱利用率。然而,随机极性 CP-EBPSK 调制每个符号仅能携带 1bit 信息。如何充分利用单个码元周期内的位置信息来实现高阶调制,对成倍提升码率和频谱效率具有重要的理论研究价值和现实意义。

本文借鉴脉冲位置调制^[13-15] (Pulse Position Modulation, PPM) 的思想,提出了多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制方式,并研究了 3 种基于冲击包络的多路判决算法,证实了本文新公开的一种更合理,意在:保持频谱结构和发射功率不变的同时,利用多进制技术成倍提升随机极性 CP-EBPSK 通信系统的信息传输速率和频谱效率。

2 多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制

多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制利用 M 进制信息符号直接控制正弦载波的相位跳变时刻在单个码元周期内的位置实现信号调制,其在单个码元周期 $[0, NT]$ 内的表达式为:

$$S_0(t) = \sin \omega_c t \quad 0 \leq t < NT \quad (1.1)$$

$$S_k(t) = \begin{cases} \sin \omega_c t & 0 \leq t \leq (k-1)KT \\ \sin(\omega_c t + \xi \cdot \Delta \sin(\omega_c t)) & (k-1)KT < t < (k-r_g)KT, 1 \leq k \leq M-1 \\ \sin \omega_c t & (k-r_g)KT \leq t < NT \end{cases} \quad (1.2)$$

其中, k 为 M 进制信息符号,有 $M > 2$ 种不同的取值, $T = \frac{2\pi}{\omega_c}$ 为载波周期,码元周期 NT 持续了 $N > 1$ 个载波周期,非“0”码元的调制时段持续了 $K < N$ 个载波周期, $0 \leq r_g < 1$ 为符号保护间隔控制因子, $\xi \in \{-1, 1\}$ 决定了相位随机调制的极性, $0 < \Delta < 1$ 为调相指数, M, N, K, ξ 和 Δ 共同构成了改变信号带宽、传输速率和解调性能的“调制指数”。

3 解调器

3.1 冲击滤波器

数字冲击滤波器^[16]是一种特殊的无限冲击响应 (IIR) 滤波器,可将随机极性 CP-EBPSK 调制信号中微弱的相位跳变转化为幅度上的冲击,突出了“0”和“1”码元的调制波形差异,有利于解调。该冲击滤波机理同样适用于多元位置随机极性 CP-EBPSK 信号的解

调,只不过非“0”信息序列的冲击波形在单个码元周期内的位置不同。本文选用 1 对共轭零点和 3 对共轭极点的数字冲击滤波器,其传输函数为:

$$H(z) = \frac{1 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + a_3 \cdot z^{-3} + a_4 \cdot z^{-4} + a_5 \cdot z^{-5} + a_6 \cdot z^{-6}} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} b_1 &= -1.618495523346314, b_2 = 1.000000000000000; \\ a_1 &= -1.973401307621458, a_2 = 1.707892238042286, \\ a_3 &= -0.700903759306155, a_4 = 0.130496898023677, \\ a_5 &= -0.002568125322230, a_6 = 0.000019814679492. \end{aligned}$$

当载频 $f_c = 21.4$ MHz, 采样频率 $f_s = 214$ MHz, $N = 20, K = 2, M = 4$, 调相指数 $\Delta = 0.1$ 时,多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制信号经过式(2)所示的数字冲击滤波器并包络检波(即取绝对值和低通滤波)后,得到了如图 1 所示的冲击波形和输出包络(从上到下依次为信息序列、随机相位极性、调制波形、冲击波形和冲击包络)。可以看出,“0”码元和非“0”码元的冲击输出包络在幅度上有显著差异,而非“0”码元的冲击包络在单个码元周期的位置上也有显著差异,从而可在不同的冲击位置上采用门限判决来解调。

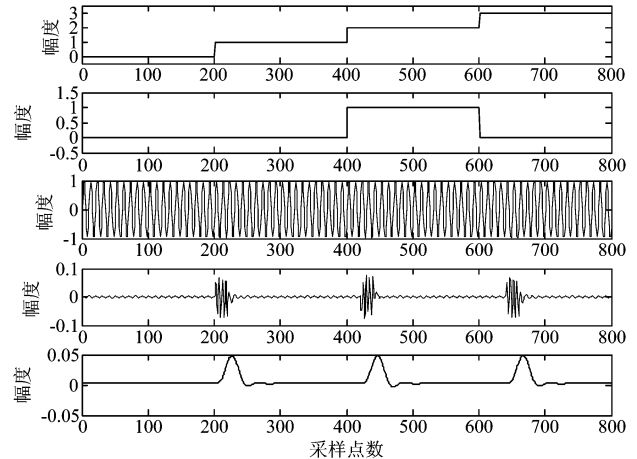


图 1 冲击滤波波形

Fig. 1 The output waveform of impacting filter

3.2 多路判决解调器

对图 1 所示的冲击包络输出可以直接幅度判决,解调器相当简单。文献[17]曾将多元位置相移键控 (M-ary Position Phase Shift Keying, MPPSK) 冲击包络分成 $M-1$ 路分别抽样判决,即在各路冲击包络最高点对冲击包络抽样,并将抽样值和预置门限进行比较,然后叠加各路判决结果作为最终输出,该解调器模型(图 2)同样适用于多元位置随机极性 CP-EBPSK 信号。

3.3 基于贪婪判决方式的解调器

为克服图2所示解调器的不足,可考虑一种带优先级的贪婪解调算法:若第1路判决结果为1,则最终判决结果为“1”码元;若第一路判决结果为0,则考虑第2路的判决结果,若第2路判决结果为1,则最终结果判为“2”码元;否则考察第3路的判决结果,依此类推。如果 $M-1$ 路判决结果均为0,最终判为“0”码元,故对应的解调器模型如图3所示(抽样判决器的工作原理与3.2节所述一致)。然而,该解调器依然存在缺陷,即当多路判决结果同时为1时,会将最终结果判决为最早出现1的那一路,实际上最终结果却有可能是判决结果为1的其他路。

3.4 基于合理判决方式的解调器

在上述分析的基础上,较合理的判决方式为:当出现多路判决结果为1时,则由当前冲击包络采样值最大的那一路作为最终判决结果。在此,仍以4元位置随机极性 CP-EBPSK 为例,当3路判决结果均为0时,最终判为“0”码元,若出现2路或3路判决结果均为1时,则选择当前冲击包络采样值最大的那一路作为最终判决,其解调器模型如图4所示。其中,3路不同的位同步脉冲(位同步脉冲位于各路冲击包络最高点所在的位置)分别对冲击包络抽样,得到3路不同的冲击包络抽样值,并与三者的最大值比较,如果与该最大值相等,则乘上相应的增益输出求和,而最大值与判决门限通过比较器($>$)比较是为了区分“0”码元和非“0”码元。

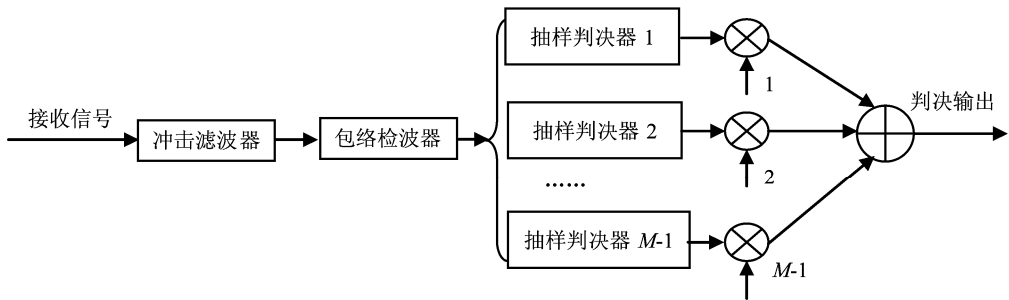


图2 多路判决解调器[17]

Fig. 2 Demodulator based on Multi-path decision method [17]

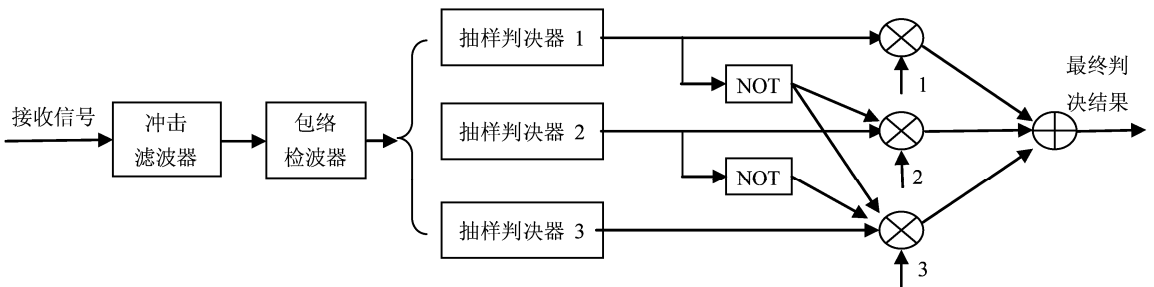


图3 基于贪婪判决方式的解调器 (M=4)

Fig. 3 Demodulator based on greedy decision method (M=4)

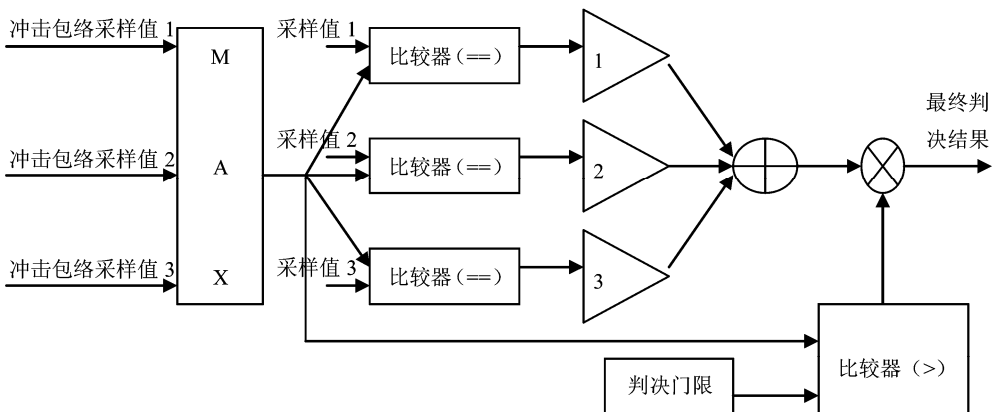


图4 基于合理判决方式的解调器 (M=4)

Fig. 4 Demodulator based on rational decision method (M=4)

4 调制特性仿真

首先,采用基于 Hamming 窗的 Welch 谱估计法对 CP-EBPSK 调制、随机极性 CP-EBPSK 调制和多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制 ($M=4$) 进行了功率谱估计。为保证谱估计精度,仿真采用 10 万个码元和 2^{26} 点 FFT,得到如图 5 所示仿真结果。可以看出:

1) 与 CP-EBPSK 调制相比,随机极性 CP-EBPSK 调制保持频谱结构不变,去除了更多的离散线谱,这与文献[10]的结果一致,验证了仿真的正确性;

2) 与 CP-EBPSK 和随机极性 CP-EBPSK 调制相比,多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制仍旧保持频谱结构不变,由于采用多进制技术,增强了调制信号的随机性,

去除了更多的离散线谱,降低了对相邻信道的干扰。

同时,按照美国联邦通信委员会 (FCC) 严格的 -60dB 带宽标准,统计了 $K=2$ 时三种调制方的 -60dB 带宽和频谱利用率,结果如表 1 所示。可以看出,与随机极性 CP-EBPSK 相比,多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制保持 -60dB 带宽不变的同时,因采用四进制技术使得信息传输速率提高了一倍,故频谱利用率也提高了一倍。

然后,分别在 $M=2, 4$ 和 6 时,对多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制信号进行了功率谱估计,得到如图 6 的仿真结果。可看出,进制数 M 越大,调制信号的随机极性越强,离散线谱的数量和幅度越低,对相邻信道的干扰也越小。

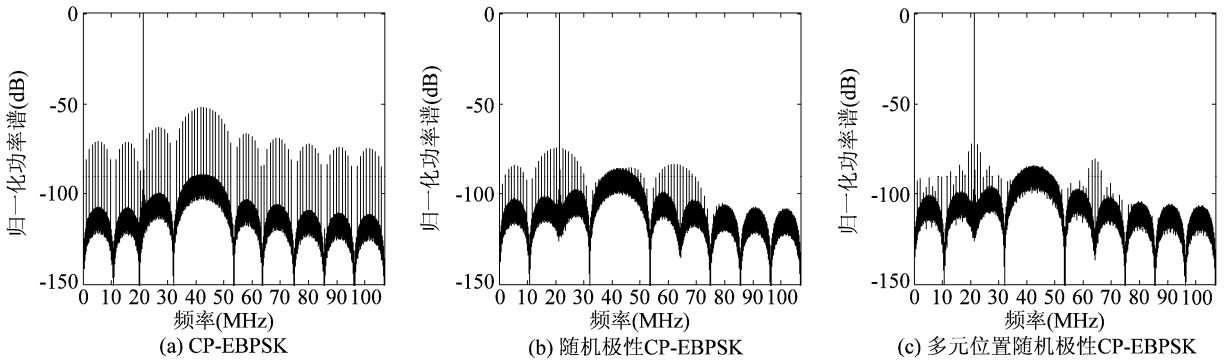


图 5 3 种调制方式的功率谱对比

Fig. 5 The comparison of power spectrum between three kinds of modulation methods

表 1 3 种调制方式的 -60dB 带宽和频谱利用率

Tab. 1 The -60dB bandwidth and spectrum efficiency of three modulation methods

带宽 (kHz)/频谱利用率 (bps/Hz)	$N=10$	$N=20$	$N=30$	$N=40$
CP-EBPSK	$3 * 10^4 / 0.07$	$2.78 * 10^4 / 0.04$	$2.64 * 10^4 / 0.03$	$2.46 * 10^4 / 0.02$
随机极性 CP-EBPSK	$8.97 / 238.6$	$4.49 / 238.3$	$2.99 / 238.6$	$2.22 / 241.0$
多元位置随机极性 CP-EBPSK	$8.97 / 477.2$	$4.49 / 476.6$	$2.99 / 477.2$	$2.22 / 482.0$

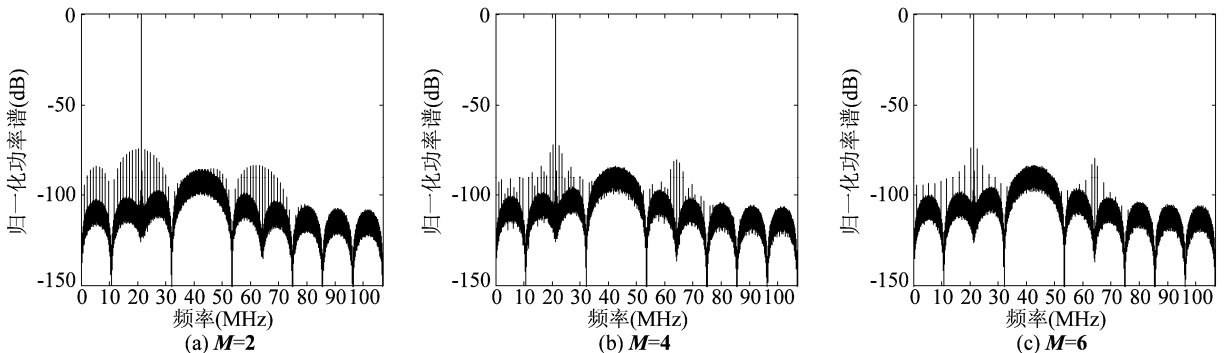
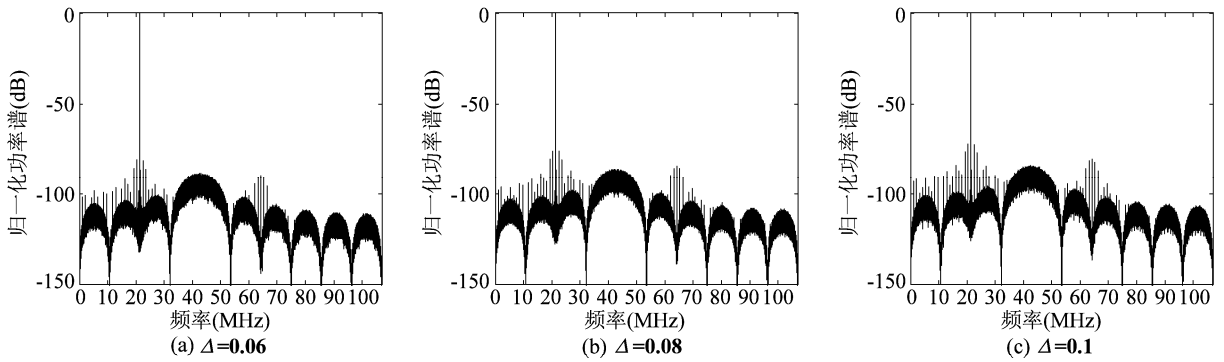


图 6 M 取不同值时的功率谱对比

Fig. 6 The comparison of power spectrum between different M

图7 Δ 取不同值时功率谱对比Fig. 7 The comparison of power spectrum between different Δ

最后,分别在 $\Delta=0.06, 0.08$ 和 0.1 时,对多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制信号进行了功率谱估计,得到如图7的仿真结果。可看出, Δ 取值越小,线谱幅度越小,对相邻信道干扰越小,但解调性能也将越差。这是由于 Δ 取值越小,相位跳变的角速度越小,调制波形所携带的信息越少所致。

5 解调性能仿真

通过仿真对比 CP-EBPSK、随机极性 CP-EBPSK 和多元位置随机极性 CP-EBPSK 的解调性能,并分析进制数 M 和调相指数 Δ 对解调性能的影响。

1) 体制对比

首先,在 AWGN 信道,采用 100 万个码元对多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制信号在 3 种不同解调方式下的解调性能进行了仿真,结果如图 8 所示。可以看出,采用合理判决方式的解调器解调性能更优,验证了第 3 节的理论分析。

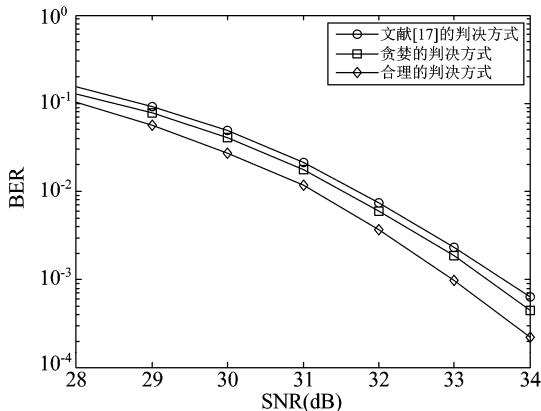


图8 不同判决方式的误码率对比

Fig. 8 BER of different decision methods

然后,对 CP-EBPSK、随机极性 CP-EBPSK 和采用合理判决方式的多元位置随机极性 CP-EBPSK 进行了解调性能仿真,其误码率特性如图 9 所示。可看出,与 CP-EBPSK 和随机极性 CP-EBPSK 相比,多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制的解调性能降低了约 0.5dB 。倘若在误码率为 10^{-4} 和带宽标准为 -60dB 带宽时,以 $\text{bps}/\text{Hz}/\text{SNR}(\text{dB})$ 为综合指标,CP-EBPSK 系统为 1.18×10^{-3} ,随机极性 CP-EBPSK 系统为 7.01 ,而多元位置随机极性 CP-EBPSK 系统则为 13.8 。

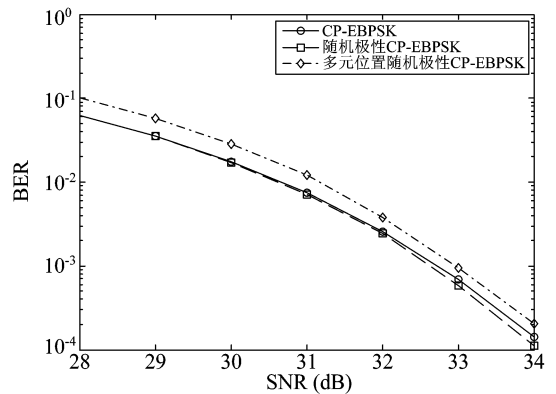


图9 误码率对比

Fig. 9 The comparison of BER performance

2) M 和 Δ 对解调性能的影响

最后,分别在 $M=2, 4$ 和 6 时,对多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制进行了解调性能仿真,得到了如图 10(a) 的误码率曲线。可以看出 M 取值越大,相邻码元的冲击包络干扰越严重,故解调性能越差。同时,分别在 $\Delta=0.06, 0.08$ 和 0.1 时对多元位置随机极性 CP-EBPSK 调制进行了解调性能仿真,得到了如图 10(b) 的误码率曲线。可看出, Δ 取值越小,其解调性能越差,故 Δ 的取值需同时兼顾频谱利用率和能量利用率。

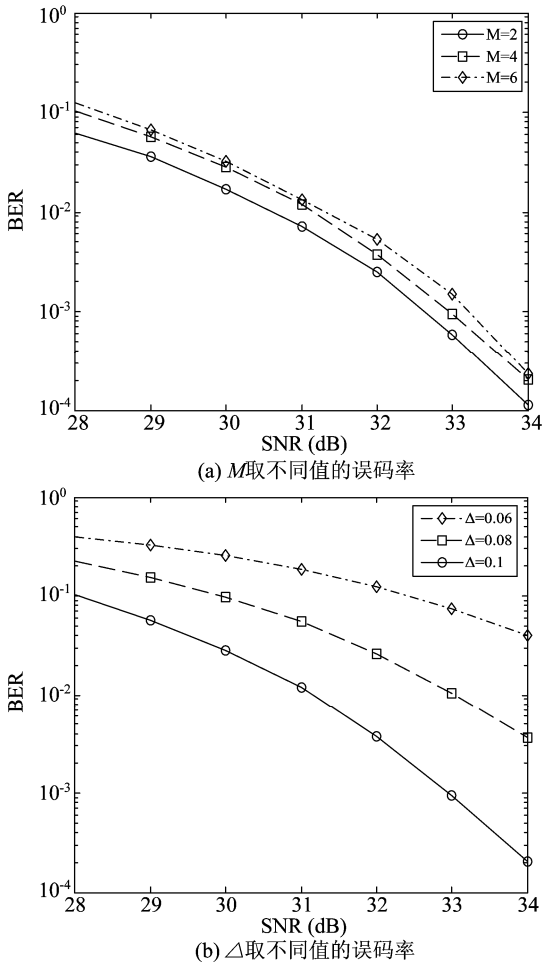


图 10 误码率性能对比

Fig. 10 The comparison of BER performance

6 结论与展望

研究表明:

1) 保持频谱结构不变的同时,新的调制方式去除了更多的离散线谱,降低了对相邻信道的干扰。更重要的是,由于采用了多进制技术,使得信息传输速率和频谱利用率成倍提升;

2) 在误码率为 10^{-4} 和带宽标准为 -60dB 带宽时,以 $\text{bps}/\text{Hz}/\text{SNR}(\text{dB})$ 为综合指标,CP-EBPSK 系统为 1.18×10^{-3} ,随机极性 CP-EBPSK 系统为 7.01,而多元位置随机极性 CP-EBPSK 系统为 13.8;

3) 新的调制方式在 AWGN 信道中传输性能较差,可考虑引入性能较好的非规则 LDPC 码来改善其传输性能,使其率先应用于同轴电缆、光纤等有线信道;

4) 如何在恶劣的信道条件下,如多径衰落信道和短波信道实现高速、可靠的传输也有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Walker H R. VPSK and VMSK Modulation Transmit Digital Audio and Video at 15 Bits/sec./Hz [J]. IEEE Transactions on Broadcast Engineering, 1997, 43(1): 96-103.
- [2] Walker H R. Digital Modulation Device in a system and Method of using the same [P]. US Patent 6445737, 2002.
- [3] Wu L N, Feng M, Qi C H, He F. Recent patents on ultra narrow band modulations [J]. Recent Patents on Signal Processing, 2011, 1(1): 36-47.
- [4] 郑国莘, 杨卫英. 甚小线性调频键控调制的超窄带通信方法[P]. 2010. 9, 发明专利号: ZL200710047472. 2. Zheng G X, Yang W Y. Very minimum chirp keying modulated ultra-narrow band communication method. Chinese Patent ZL200710047472. 2, 2010. 9. (in Chinese)
- [5] 郑国莘, 杨卫英. 每符号两比特的甚小线性调频键控的超窄带通信方法[P]. 2008. 10, 发明专利号: CN101296208. Zheng G X, Yang W Y. Very minimum chirp keying modulated communication method in 2 bits/symbol [P]. Chinese Patent CN101296208, 2008. 10. (in Chinese)
- [6] Li B, Zhou Z, and Zou W X. RPPK modulation with high data rates [J]. SCIENCE CHINA: Information Sciences, 2010, 53(2): 344-354.
- [7] 王红星, 王洪利, 毛忠阳, 赵志勇. 基于循环谱特性的扩展二元相移键控解调算法 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 935-939. Wang H X, Wang H L, Mao Z Y, Zhao Z Y. The demodulation algorithm for EBPSK based on cyclic spectrum characteristic [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(5): 935-939. (in Chinese)
- [8] 王红星, 王洪利, 张磊, 毛忠阳. EBPSK 及其优化调制信号的二阶循环平稳特性分析 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(1): 42-46. Wang H X, Wang H L, Zhang L, Mao Z Y. Cyclostationarity analysis on EBPSK and its optimization [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(1): 42-46. (in Chinese)
- [9] He F, Wu L N. Analysis of power spectrum of continuous phase waveforms for binary modulation communications [C]. ICUMT 2009, St. Petersburg, Russia, 2009: 1-5.
- [10] 张宇, 应鹏魁, 吴乐南. 伪随机调制的 CP-EBPSK 通信系统 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 4(2): 209-213. Zhang Y, Ying P K, Wu L N. Pseudo-random Modulated

- CP-EBPSK Communication System [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition). 2012, 42(2): 209-213. (in Chinese)
- [11] 靳一, 吴乐南, 冯嫚, 邓蕾. 一种随机极性 MCP-EBPSK 调制解调器[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1647-1652.
Jin Y, Wu L N, Feng M, Deng L. An MCP-EBPSK modem with random-polar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(7): 1647-1652. (in Chinese)
- [12] 靳一, 吴乐南, 冯嫚, 邓蕾. 一种多元位置随机极性连续相位调制解调器[J]. 电波科学学报, 2012, 27(5): 1-7.
Jin Y, Wu L N, Feng M, Deng L. An M-ary and continuous modem with random-polar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(5): 1-7. (in Chinese)
- [13] Song, S. H., Zhang, Q. T. CDMA-PPM for UWB Impulse Radio[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1011-1020.
- [14] Tang, Q., Yang, L., Giannakis G. B., Qin, T. Battery Power Efficiency of PPM and FSK in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1308-1319.
- [15] Song, S. H., Zhang, Q. T.. TH-CDMA-PPM with Non-coherent Detection for Low Rate WPAN [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(2): 446-451.
- [16] 冯嫚, 高鹏, 吴乐南. 超窄带调制信号的特殊滤波分析与仿真[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 227-230.
Feng M, Gao P, Wu L N. Analysis and simulation of special filtering based on ultra narrow band modulated signal[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(2): 227-230. (in Chinese)
- [17] 应鹏魁, 吴乐南. 一种新的 MPPSK 调制解调器实现结构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 204-208.
Ying P K, Wu L N. New scheme of MPPSK modem [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 42(2): 204-208. (in Chinese)

作者简介



靳一(1984-),男,河南人,东南大学信息科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为通信信号处理。

E-mail:john.0216@163.com



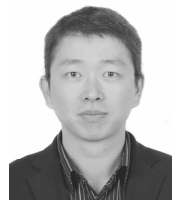
吴乐南(1952-),男,安徽人,东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师,中国电子学会会士,中国通信学会和中国计算机学会高级会员,主要研究方向为通信信号处理和多媒体信息处理。

E-mail:wulun@seu.edu.cn



余静(1986-),女,蒙古人,东南大学信息科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为通信信号处理。

E-mail:yangyangwodi@126.com



应鹏魁(1987-),男,浙江人,东南大学信息科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为通信信号处理。

E-mail:yingpengkui@hikvision.com