

Turbo-CPM 系统在窄带低信噪比条件下的性能研究^①

赵旦峰^{②*} 薛睿^{③*} 肖春丽^{**}

(* 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

(** 中国移动通信集团黑龙江有限公司 哈尔滨 150040)

摘 要 为克服窄带低信噪比系统传统接收机中解调器与译码器之间缺少信息共享的弊端,将迭代检测原理应用到连续相位调制(Turbo-CPM)系统中,提出了一种基于软输入软输出(SISO)算法的迭代检测方法,探讨了 Turbo 分量码结构、交织深度、迭代次数和连续相位调制(CPM)指数等主要参数对系统性能的影响,为实际应用中系统参数的选择提供了参考依据。加性高斯白噪声(AWGN)信道下的仿真结果表明:在窄带低信噪比特定条件下,基于 Turbo 码的八进制部分响应 CPM(8M2RC)系统能够有效地改善系统的收敛性,降低地板效应出现的概率,提高系统的误比特率性能,同时兼顾了信息传输的有效性,提高了频带利用率。

关键词 Turbo 码, 连续相位调制(CPM), 窄带, 低信噪比(SNR), 迭代检测

0 引言

设计数字通信系统方案时,通常以应用背景为出发点,结合系统的技术指标在功率效率和带宽效率之间进行某种折衷。对于功率和带宽资源同等重要的系统来说,尤其对于窄带低信噪比的系统来说,寻找功率效率和带宽效率之间的最佳平衡点具有重要的现实意义。Turbo 码^[1]具有接近 Shannon 限的优异性能,在许多低信噪比系统中得到了广泛应用^[2,3]。功率有效性的提高是以引入冗余信息为代价的,冗余信息的引入实际上是降低了用户的带宽效率。提高带宽效率的有效途径是采用包络恒定的调制方式,而连续相位调制^[4](CPM)是一种具有恒定包络的调制技术,其信号相位连续,避免了频谱的泄露,使 CPM 具有较高的频谱利用率。这些优越的特性使 CPM 尤其适用于那些使用非线性功率放大器的系统中,如卫星通信系统、移动通信以及数传电台等^[5]。

CPM 可作为内码与其它纠错码结合构成串行级联编码调制系统^[6],早在 20 世纪 90 年代,里德索罗门码-连续相位调制(RS-CPM)系统就已经在美国军方应用,由于 RS 译码复杂度高,至今仍然没有降低译码复杂度的有效算法。目前,研究比较成熟的

是卷积码与 CPM 构成的串行级联系统(SCCPM)^[7],其在衰落信道下具有良好的性能^[8],但该系统的收敛门限大大高于 Shannon 限^[9]。为了降低收敛门限,本文将 Turbo 码与 CPM 进行级联,运用迭代原理对该系统进行检测,设计了基于软输入软输出(SISO)算法的迭代检测接收机,研究了主要参数对系统性能的影响,最后确定了 Turbo-CPM 系统在特定条件下的具体实现方案。

1 Turbo-CPM 系统模型

设 CPM 信号为

$$s(t, \alpha) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t, \alpha) + \varphi_0] \quad (1)$$

式中, $t \geq 0$, $\varphi(t, \alpha) = 2\pi h \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i q(t - iT)$, h 为调制指数, E 为符号能量, T 为符号周期, φ_0 为初始相位, f_0 为载波频率, $\alpha_i \in \{\pm 1, \dots, \pm(M-1)\}$, M 为调制进制数, $q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau$, $g(t)$ 是脉冲函数。

由文献[10]可知,CPM 可以分解为连续相位编码(CPE)与无记忆调制(MM)的组合。CPE 具有记忆和递归特性,因此可以把 CPE 看作码率为 1 的卷

① “十一·五”国防预研基金(4010607010102)和中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF100814)资助项目。

② 男,1961年生,教授,博士生导师;研究方向:信道编码,数字调制技术,通信信号处理等。

③ 通讯作者, E-mail: xuerui@hbeu.edu.cn

(收稿日期:2009-03-02)

积码,结合外部的 Turbo 码及随机交织器,构成了串行级联的 Turbo-CPM 系统,系统框图如图 1 所示。系统中,Turbo 码码率为 $R_c = k_c/p_c$,为便于多进制映射,取 p_c 为 $n_{\text{cpm}} = \log_2 M$ 的整数倍,Turbo 码编码后的信息序列经比特交织、符号映射输入到 M 进制 CPM,CPE 对输入信息进行连续相位编码后作为无记忆调制器 MM 的输入,MM 选择一个合适波形发送到信道。

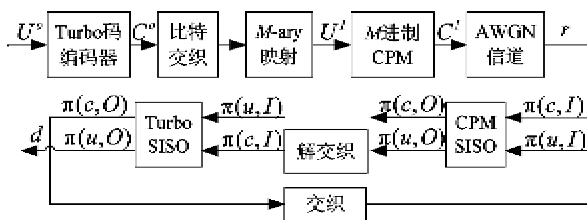


图 1 Turbo-CPM 系统模型

系统的解调与译码过程是通过 2 个基于 Log-MAP 算法的软输入软输出子系统 CPM-SISO 和 Turbo-SISO 迭代完成的, $\pi(c, O)$ 和 $\pi(u, O)$ 分别为码字和信息字输出概率, $\pi(c, I)$ 和 $\pi(u, I)$ 为先验概率。CPM 子系统的软输出序列 $\pi(u, O)$ 经解交织后作为 Turbo 码子系统的软输入, Turbo 码子系统的软输出序列 $\pi(c, O)$ 经交织后输入到 CPM 子系统, 反复迭代此过程数次, 最后一次迭代结果由 Turbo 码子系统作硬判决输出^[11]。

2 基于 SISO 算法的译码器设计

Turbo 码译码器的设计既要满足 SISO 算法的要求,又要使其输入输出信号的软信息满足迭代检测机制的要求。因此 Turbo 码译码器的设计是 Turbo-CPM 系统实现的关键因素。Turbo 码译码器的内部结构如图 2 所示。

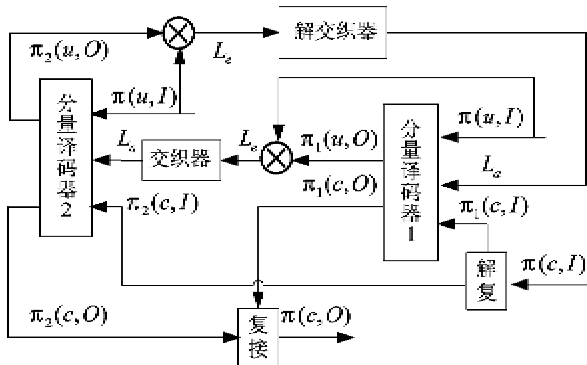


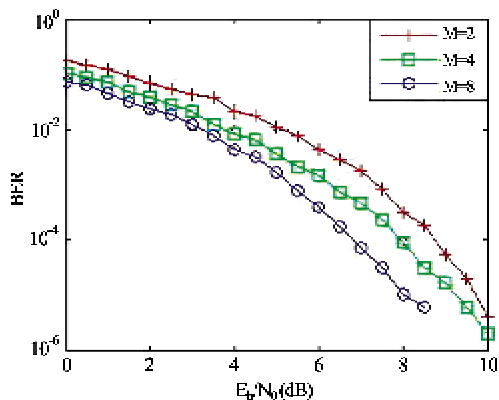
图 2 基于 SISO 算法的 Turbo 译码器结构图

从图 2 可以看出, Turbo 译码器由两个软输入软输出的 SISO 子译码器串行级联而成。解调器输出的码字先验概率序列 $\pi(c, I)$ 经过解复后, 分解成为两个 SISO 子译码器模块需要的输入序列 $\pi_1(c, I)$ 和 $\pi_2(c, I)$ 。子译码器 1 对第一个分量编码器进行最佳译码, 并将其输出的信息概率序列 $\pi_1(u, O)$ 与输入 $\pi(u, I)$ 点乘交织后作为先验信息送给子译码器 2, 子译码器 2 将其输出 $\pi_2(u, O)$ 与模块输入 $\pi(u, I)$ 点乘后解交织作为先验信息送给子译码器 1 进行下一次译码。经过迭代, 两子译码器的输出 $\pi_1(c, O)$ 和 $\pi_2(c, O)$ 复接后形成码字的输出概率序列 $\pi(c, O)$, 当 $\pi(u, O)$ 趋于稳定时, 对 $\pi(u, O)$ 进行硬判决, 即得到信息序列的逐比特最佳估计。

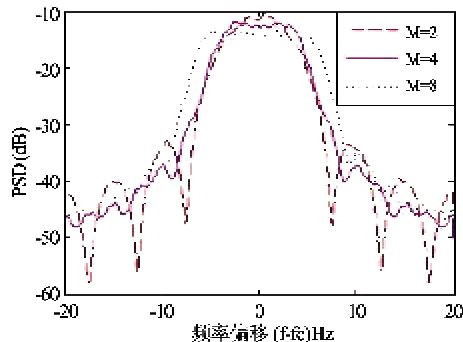
3 CPM 调制的实现方案

从式(1)可以看出,选择不同的进制数 M 、关联长度 L 和脉冲形状 $g(t)$, 可以产生无穷多种 CPM 信号, 这些参数对 CPM 调制的误比特率(BER)和功率谱密度(PSD)影响很大, 考察以上参数对 CPM 调制性能的影响, 然后确定 CPM 调制的具体实现参数。

图 3 为不同进制数 M 对 CPM 误比特率和功率

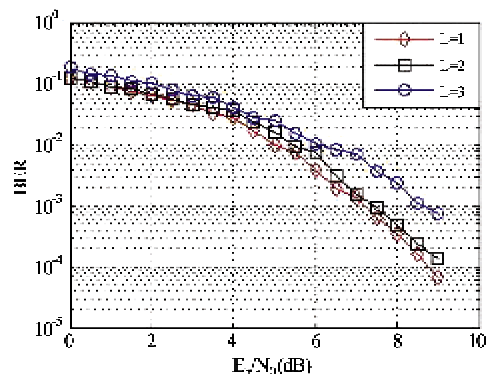


(a) 进制数 M 对 CPM 误比特率的影响

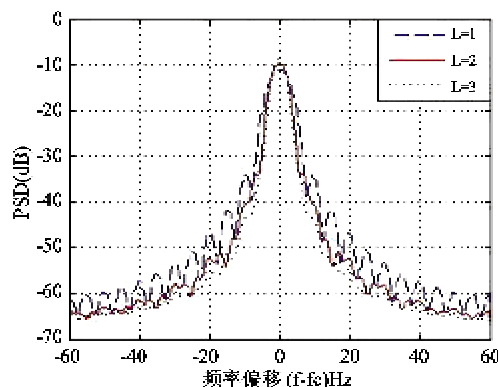
(b) 进制数 M 对 CPM 功率谱密度的影响图 3 进制数 M 对 CPM 性能 (PSD) 的影响

谱密度的影响。仿真中信息位帧长为 256bit, 脉冲波形为矩形(REC), 关联长度为 1 个码元周期, 调制指数为 1/2。从图 3 可以看出, 随着进制数 M 的增加, CPM 的误比特率减小, 但同时信号的频带利用率下降, CPE 的状态数急剧增加。为了使信息可靠高速地传输, 进制数 M 选为 8。

图 4 为关联长度 L 对 CPM 误比特率(BER)和功率谱密度(PSD)的影响, 仿真中信息位帧长为 256bit, 脉冲波形为 REC, 调制进制数 M 为 2, 调制指数为 1/2。从图 4 可以看出, 随着关联长度 L 的增加, CPM 信号占用频谱减小, 但误比特率和复杂度急剧增加, 为了兼顾频谱利用率和复杂度, 关联长度 L 选为 2 个码元周期。



(a) 关联长度 L 对 CPM 误比特率的影响

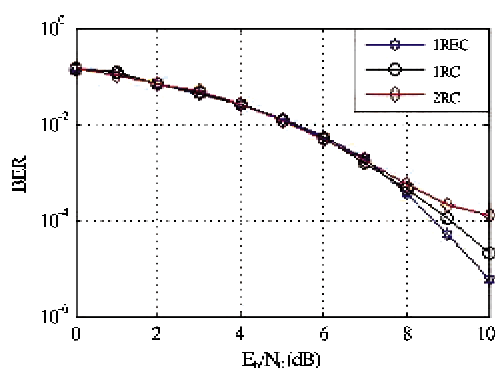


(b) 关联长度 L 对 CPM 功率谱密度的影响

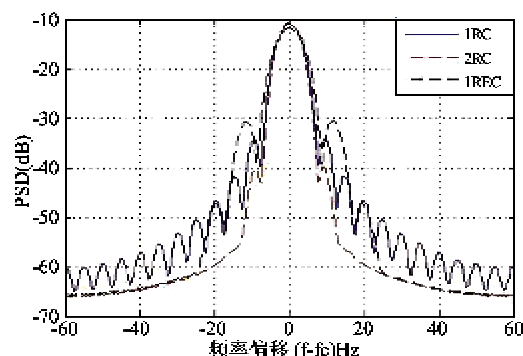
图 4 关联长度 L 对 CPM 性能的影响

图 5 为脉冲波形 $g(t)$ 对 CPM 误比特率(BER)和功率谱密度(PSD)的影响, 仿真中信息位帧长为 256bit, 调制进制数 M 为 2, 调制指数为 1/2。从图 5 可以看出, 在高信噪比区域, 矩形脉冲(REC)比升余弦脉冲(RC)具有更低的误比特率, 但 REC 占用的带宽较宽, 频谱利用率较低。为了提高系统的频带利用率, 脉冲波形 $g(t)$ 选为 2RC。

通过理论分析和仿真实验, 综合考虑误比特率性能、频谱利用率及实现的复杂度等因素, 本文认为



(a) 脉冲波形 $g(t)$ 对 CPM 误比特率的影响



(b) 脉冲波形 $g(t)$ 对 CPM 功率谱密度的影响

图 5 脉冲波形 $g(t)$ 对 CPM 性能的影响

进制数 M 为 8, 脉冲波形为升余弦脉冲(RC), 关联长度为 2 个码元周期的 CPM 调制兼顾了功率效率与带宽效率, 是实现可靠高速数传的较好选择。

4 系统仿真与结果分析

在确定了 CPM 调制方案的基础上, 对影响 Turbo-CPM 系统性能的参数进行仿真, 文中主要考虑了 Turbo 码的分量码结构、交织深度、迭代次数和 CPM 调制指数等参数。Turbo 码中卷积码的具体参数详见表 1, 其中各系统的信息位帧长为 256bit, 采用随机交织与格雷映射, 迭代次数为 8~12 次; CPM 信号采用复基带映射, 每个符号抽样 8~10 个点, CPM 的具体信号形式为 8M2RC; 信道模型采用加性高斯白噪声(AWGN)模型。

表 1 Turbo 中的卷积码参数

卷积码 码率	约束 长度	生成多项式 (八进制)			状态数	级联 CPM
2/3	$L=2$	10	04	15	4	8M2RC
	$L=3$	40	20	77	16	
	$L=4$	200	100	377	64	

从结构上看,系统中的 Turbo 码属于 PCCC 结构,PCCC 的性能主要取决于分量码(卷积码)的结构,取表 1 所示的不同状态数与约束长度的卷积码构成 Turbo 码。

图 6 为不同参数的卷积码构造的 Turbo 码级联 8M2RC 调制的系统在 AWGN 信道下误比特率曲线,其中,信息位帧长为 256bit,调制指数为 1/2,迭代次数为 8 次。为了提高信息传输速率,所有卷积码均采用 2/3 码率。从图 6 可以看出,所设计的迭代接收机能够有效地改善系统的收敛性,提高系统的误比特率性能,当 $E_b/N_0 = 2\text{dB}$ 时,误比特率达到 10^{-4} 数量级,系统的可靠性并不是随着卷积码约束长度的增加而变好,相反具有较少状态数的 (10,04,15) 卷积码具有最好的性能。这表面上看来与理论分析似乎矛盾,但在短帧情况下,状态数较多的卷积码存在收敛性问题,因此性能反而不如状态数较少的性能好,文献[12]对此做出了详尽的分析。

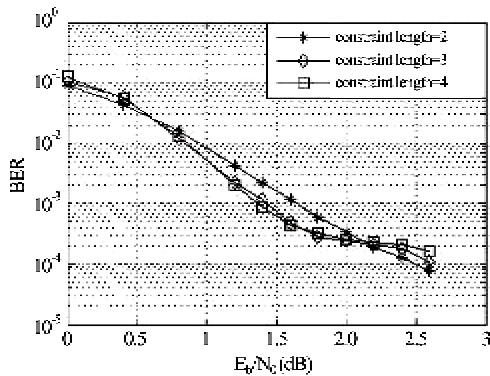


图 6 卷积码对 Turbo-CPM 系统性能的影响

交织器是决定 Turbo 码误比特率(BER)性能的关键因素之一,基于同一原理,交织器对 Turbo-CPM 系统同样具有重要的影响。图 7 为交织深度对 Turbo-8M2RC 系统误比特率的影响,其中 Turbo 码的分量码采用 (10,04,15) 卷积码,调制指数为 1/2,迭代

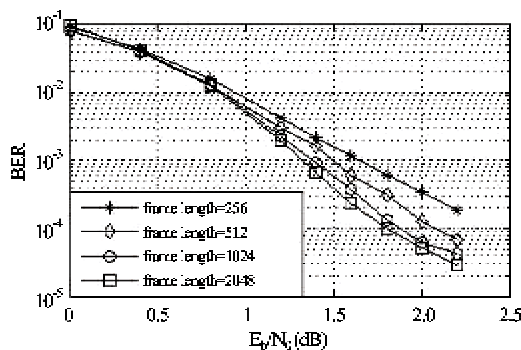


图 7 交织长度对 Turbo-CPM 系统性能的影响

次数为 8 次。从图 7 可以看出,系统的 BER 曲线随交织深度的增加而迅速下降,当误比特率为 10^{-4} 时,采用随机交织可以获得约为 0.5dB 的增益,但交织深度增加到一定数值以后,误比特率性能的改善趋于缓慢,系统的时延加剧。

Turbo-CPM 系统采用迭代解调译码的方式来优化系统性能,因此迭代次数是决定系统性能的关键因素之一。图 8 为迭代次数变化时 Turbo-8M2RC 系统的误比特率曲线,其中 Turbo 码的分量码采用 (10,04,15) 卷积码,信息位帧长为 256bit,调制指数为 1/2。从图 8 看出,当信噪比较低时,采用迭代接收机系统的 BER 随迭代次数的增加而迅速下降,并在一定迭代次数后趋于收敛,迭代 6~8 次后,继续进行迭代所带来的增益是非常小的。

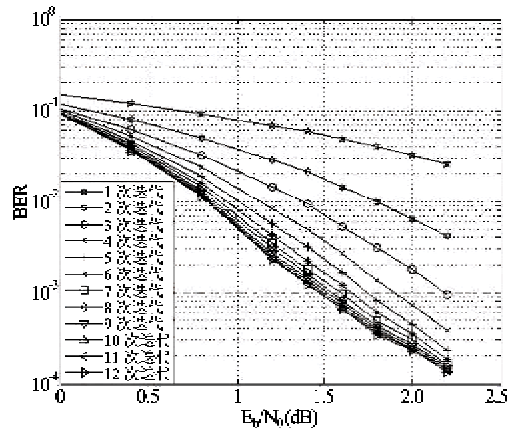


图 8 迭代次数对 Turbo-CPM 系统性能的影响

调制指数是 CPM 调制的重要参数之一,对 CPM 信号的带宽和误比特率性能有着重要影响。图 9 为调制指数变化时 Turbo-8M2RC 系统的误比特率曲线,其中信息位帧长为 256bit, Turbo 码的分量码采用 (10,04,15) 卷积码,迭代 6 次。从图 9 看出,系统的误比特率性能随调制指数的增大而提高,但提高

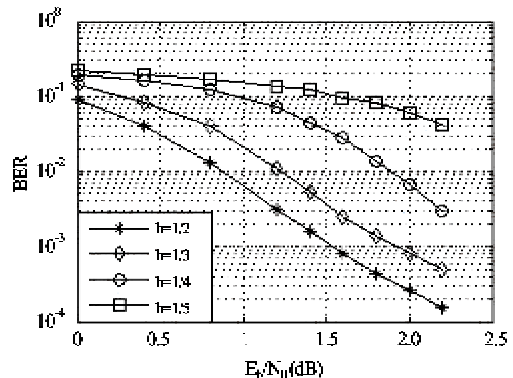


图 9 调制指数对 Turbo-CPM 系统性能的影响

的幅度逐渐减小,当 $E_b/N_0 = 2\text{dB}$ 时, $h = 1/2$ 系统的误比特率可达 10^{-4} 数量级。随着调制指数的增大,系统的带宽利用率降低,复杂度也有所增大。

从以上仿真可以看出,所设计的基于 SISO 算法的迭代检测接收机可以有效地提高 Turbo-CPM 系统在窄带低信噪比条件下的误比特率性能。在满足信息可靠传输的同时,要兼顾信息传输的有效性,综合考虑功率效率、带宽效率、系统的复杂度以及实时性。最后确定了 Turbo-CPM 系统的具体实现方案,即信息位帧长为 1024bit, Turbo 码的分量码采用 (10, 04, 15) 卷积码,码率为 $2/3$,调制指数为 $1/2$,迭代次数为 8 次。

5 结 论

CPM 作为一种具有诸多优点的调制技术,自问世以来就成为通信领域研究的热点。将性能优异的 Turbo 码与 CPM 进行级联,运用迭代原理进行检测,是提高 CPM 系统性能的一种全新思路。AWGN 信道下的仿真结果表明:在窄带低信噪比系统中,所提出的基于 SISO 算法的迭代检测方法能够有效地改善收敛性,提高系统的功率效率和可靠性,同时兼顾了带宽效率,提高了频带利用率。通过对不同系统参数的实验仿真,给出了系统性能与参数之间的关系,为实际应用中系统参数的选择提供了参考依据。

参考文献

- [1] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. In: Proceedings of the International Conference on Communications, Geneva, Switzerland, 1993. 1064-1070
- [2] 张桂华,姬红兵,胡家淦等.深空通信中 Turbo 码编译码设计与仿真.系统仿真学报,2008,20(17):4676-4680
- [3] 晏裕春,蒋宇中,韩郁.低信噪比通信系统中 Turbo 码应用仿真.微计算机信息,2006,22(1):238-240
- [4] Sundberg C E. Continuous phase modulation. *IEEE Communications Magazine*, 1986, 24(4): 25-30
- [5] 李丹.基于多元 LDPC 码的 CPM 编码调制系统的性能研究:[硕士学位论文].西安:西安电子科技大学,2007. 8
- [6] Wilson G. Convolutional coding combined with continuous phase modulation. *IEEE Trans on Commun*, 1985, 33(1): 20-29
- [7] Moqvist P, Aulin T. Serially concatenated continuous phase modulation with iterative decoding. *IEEE Trans on Commun*, 2001, 49(11): 1901-1915
- [8] 韩志学,毕文斌,张兴周等.Turbo CPM 系统在衰落信道下的性能研究.哈尔滨工程大学学报,2007,28(1):87-92
- [9] Divsalar D, Dolinar S, Pollara F. Iterative turbo decoder analysis based on density evolution. *IEEE Journal on Selected Areas in Commun*, 2001, 19(5): 891-907
- [10] Rimoldi B E. A decomposition approach to CPM. *IEEE Trans Inform Theory*, 1988, 34(2): 260-270
- [11] 韩志学.连续相位调制短波瞬间通信系统关键技术研究:[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,2007. 63-64
- [12] Brink S. Convergence of iterative decoding. *Electronics Letters*, 1999, 35(13): 1117-1119

Performance study of Turbo-CPM systems in a narrow-band and low SNR environment

Zhao Danfeng*, Xue Rui*, Xiao Chunli**

(* School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(** China Mobile Communication Group Heilongjiang Corporation Ltd., Harbin 150040)

Abstract

In order to solve the problem of shortage of information sharing between the demodulator and the decoder in a traditional receiver of a narrow-band and low signal to noise ratio (SNR) communication system, the paper proposes an iterative detection method based on the SISO algorithm. Then the effect of the Turbo code structure, interleaver length, iterative number and the continuous phase modulation (CPM) index on the performance of a Turbo-CPM system is studied, to provide the reference basis for practical application. The simulation results in the additive white Gaussian noise (AWGN) channel show that the 8-ary partial response CPM (8M2RC) system based on the turbo code can improve the iterative convergence, and reduce the error-floor and improve the bit error rate (BER) performance effectively under the special condition of narrow-band and low SNR. Meanwhile, the system can also improve the band efficiency in the aspect of effectiveness of information transmission.

Key words: Turbo code, continuous phase modulation (CPM), narrow-band, low signal to noise ratio (SNR), iterative detection