

短帧长 CCPM 信号优化设计及简化译码

戴晓洁, 詹亚锋

(清华大学 宇航中心, 北京 100084)

摘 要: 针对突发通信和卫星测控通信中对于短帧长、高性能和低复杂度的需求, 提出一种短帧长 C^2PM (coded continuous phase modulation) 系统的优化设计方案, 包括编码 GMSK 系统的优化设计及简化译码。对于编码 GMSK 系统, 采用简化解调器、优化卷积码生成多项式和匹配交织器的方式, 可实现系统参数优化。加性高斯白噪声 (AWGN) 信道下的仿真结果表明, 系统性能优于常用卷积码性能, 特别是在 10^{-5} 误比特率时, 略优于同帧长的 Turbo 码和 LDPC 码性能, 且无误码平底出现。对编码 GMSK 系统复杂度的分析结果表明, 该系统实现复杂度低于常用卷积码、同帧长 Turbo 码和 LDPC 码。

关键词: C^2PM ; 短帧长; 编码 GMSK 系统; 迭代解调译码

中图分类号: TN911.3

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)05-0121-05

Optimization design and simplified decoding for short frame CCPM

DAI Xiao-jie, ZHAN Ya-feng

(Space Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Considering the demand of burst communications, optimization and simplified decoding for coded GMSK system in short frame was focused on to give an optimum proposal of C^2PM system. Simplified demodulator, optimized generation polynomial of the convolution code and matched interleavers were discussed. Simulation results show that for coded GMSK system under AWGN, the performance is better than individual convolution code. Especially when BER is 1×10^{-5} , it performs better than Turbo code and LDPC code with the same frame length, and there is no error floor occurring. Finally, complexity analysis shows that the coded GMSK system has lower implementation complexity in comparison with the commonly used convolution code, Turbo code and LDPC code.

Key words: C^2PM ; short frame; coded GMSK; iterative demodulation and decoding

1 引言

连续相位调制(CPM)是一类具有相位连续、包络恒定的数字调制信号, 其频谱旁瓣衰减速度快, 产生的邻道干扰很小, 与 PSK 信号相比, 更适合在具有有限幅特性的 C 类放大器的非线性信道中使用, 尤其适用于移动通信、卫星通信、深空通信中。GMSK 信号是一种具有代表性的常用 CPM 信号, 第二代移动通信系统 GSM 采用了 $BT=0.3$ 的 GMSK

信号, CCSDS 标准也将其列入文献[1]中。 C^2PM 是含有信道编码的 CPM 信号, 因为 CPM 的连续相位特性可用网格图表示, 故可将其看作是网格编码调制的一种特例, 这样 C^2PM 可以等效为串行级联码系统。当采用软输入软输出 (SISO) 的迭代译码算法时, 系统可以获得超过原有信道编码的性能增益^[2,3]。

针对不同的应用延时需求, 信道编码可以分为极长码 (几万比特以上)、长码 (一万比特到几万比特)、中长码 (几千比特到一万比特)、短码 (几

收稿日期: 2012-04-07; 修回日期: 2012-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271265, 61032003, 61128001); 国家高技术研究发展计划 (“863 计划”) 基金资助项目(2012AA121605); 清华大学自主科研基金资助项目(2011Z05112)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271265, 61032003, 61128001); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA121605); Tsinghua University Initiative Scientific Research Program(2011Z05112)

百比特到几千比特)、极短码 (500bit 以下) 5 种。其中, 极短帧长信道编码技术是低速、实时、突发通信系统的关键技术, 在话音通信、卫星测控通信等诸多领域中有重大应用需求。很多传输标准中都考虑了极短帧长的应用, 例如, WCDMA 标准中最短帧长为 120bit^[4], cdma2000 标准中提到的最短帧长为 378bit, IEEE 802.16e 中最短帧长为 576bit。在话音传输中, 信道编码每帧所处理的数据量通常不超过 200bit, 如 JD-CDMA 无线移动系统中, 每帧的信息位长度为 192bit。因此, 极短帧长 C²PM 的优化设计非常具有现实意义^[5]。

从 20 世纪 70 年代末期开始, CPM 信号成为大家研究的热点, 20 世纪 80 年代中期以后, C²PM 被证明可以在保证载波恒包络的情况下改善性能。文献[6]对 SCCPM 系统的理论性能进行了推导和计算, 并以 MSK 系统为例给出了仿真结果, 其中对 CPM 信号的分解采用连续相位编码的方式。文献[7]研究了 DPSK、 $\pi/4$ -DQPSK 等差分调制方式为内码的 C²PM 系统的性能, 表明内码码率为 1 且递归时, 不存在编码冗余, 可以通过迭代译码提升性能。文献[8]分析了递归和非递归的 GMSK 信号对卷积 GMSK 信号性能的影响。文献[9]对基于 Laurent 分解的卷积 GMSK 信号性能进行了仿真, 分析了状态数对性能的影响。以上文献的研究都集中在帧长为 2 048bit 以上的系统, 并未涉及短帧长的 C²PM 信号。本文重点研究短帧长情况下, 编码的 GMSK 系统的优化设计及简化译码, 以求给出一种复杂度低的 C²PM 系统的优化设计方案, 并将性能与同帧长的 Turbo 和 LDPC 码进行比较。

本文首先介绍 CPM 信号的分解模型和 C²PM 系统模型的整体框图, 参考有限长度块编码的香农限, 提出短帧长 C²PM 系统的优化设计目标。其次, 通过对编码 GMSK 系统的参数优化, 提出一种适合短帧长低信噪比情况的系统优化方案。最后, 在 AWGN 信道下进行系统仿真测试, 与无线通常用的 (171,133) 卷积码、同帧长 Turbo 码和 LDPC 码的性能进行比对, 并分析系统的实现复杂度。

2 信号模型

2.1 CPM 信号分解模型

一个传输 M 进制信息数据符号 $U \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 的 CPM 数字系统, 符号能量为 E , 符号周期为 T , 调制指数表示为 $h = K/P$, 其脉冲记忆长

度为 L , CPM 信号的基带复信号在符号间隔 $t = \tau + nT$ 期间可以表示为

$$s(t, u) = \sqrt{2E/T} \exp(\psi(t, u)), nT \leq t \leq (n+1)T \quad (1)$$

其中, $\psi(t, u)$ 为倾斜相位。

$$\psi(\tau + nT, u) = \left\{ 2\pi h \left[\sum_{i=0}^{n-L} u_i \bmod P \right] + 4\pi h \sum_{i=0}^{L-1} u_{n-i} q(\tau + iT) + W(\tau) \right\} \bmod 2\pi, 0 < \tau < T \quad (2)$$

$q(t)$ 表示 CPM 调制信号的相位脉冲函数, $W(\tau) = \pi h(M-1)(\tau/T) - 2\pi h(M-1) \sum_{i=0}^{L-1} q(\tau + iT) + \pi h(M-1)(L-1)$ 是与信息数据符号无关的函数。所以, 在第 n 个符号间隔内发送的信号完全由前 $L-1$ 个信息数据符号 $u_{n-L+1}, \dots, u_{n-1}$, 当前信息数据符号 u_n 和累计相位 $v_n = \left(\sum_{i=0}^{n-L} u_i \right) \bmod P$ 决定。因此, CPM 信号可以分解为一个无记忆调制器 (MM, memoryless modulator) 和一个连续相位编码器 (CPE, continuous phase encoder) 的联合^[10]。在每个符号周期内, CPE 生成码字向量 $c_n = [v_n, u_{n-L+1}, \dots, u_n]$, 送入 MM。由于 CPE 可以表示为一个有限状态的状态机, 因此可采用最大似然 (ML) 或者最大后验概率 (MAP) 方法在网格上进行解调。

2.2 C²PM 系统模型

C²PM 系统整体框图如图 1 所示, 原始数据信息经过信道编码、交织器, 送入 CPM 调制器, 信号经过 AWGN 信道后, 由最优滤波器输出软信息给迭代解调译码部分。译码器对于软信息的迭代处理采用 SISO 算法^[11], 主要分为 2 类, 一类是最大后验概率 (MAP) 译码算法和它的各种变形, 另一类是软输出维特比算法 (SOVA)。

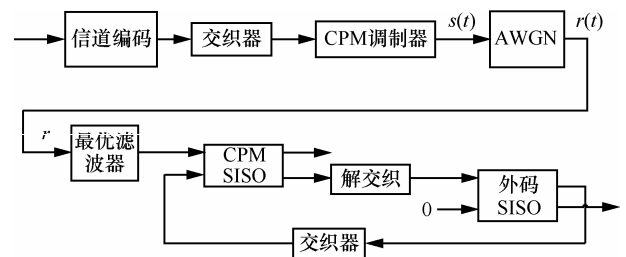


图 1 C²PM 整体框图

2.3 有限长度块编码性能界

图 2 给出了编码码率为 1/2, 误比特率为 10^{-4} , 信息位长度为 48bit、96bit、192bit 时的编码性能界^[12],

同时还给出了 (171,133) 卷积码的性能。可以看出, 当信息位长度为 192bit 时, 性能界为 1.8dB, 与 (171,133) 卷积码的性能之间存在 1.7dB 的改善空间。本文的主要工作是以 GMSK 调制和卷积编码为例, 优化短帧长 C²PM 的有关参数, 包括解调器、卷积编码、交织器的参数, 使得其性能在超越 (171,133) 卷积码性能的基础上, 接近性能理论界, 同时相对于同帧长的 LDPC 码和 Turbo 码具有更低的实现复杂度和更好的性能。

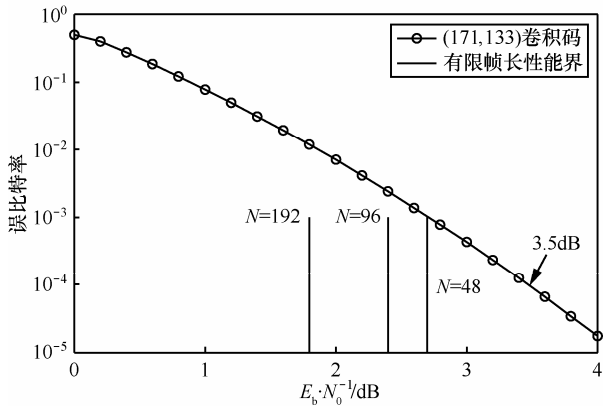


图 2 有限长度块编码性能界

3 参数优化

3.1 解调器简化

将 GMSK 调制采用 2.1 节中描述的 CPE+MM 分解方法表示时, MM 的状态数和调制参数之间是非线性的。例如脉冲记忆长度 $L=4$ 时, MM 中包含 5 个二进制元素, 解调网格状态数为 $2 \times 2^L = 32$ 个, 与 L 呈指数关系。分解模型如图 3 所示。

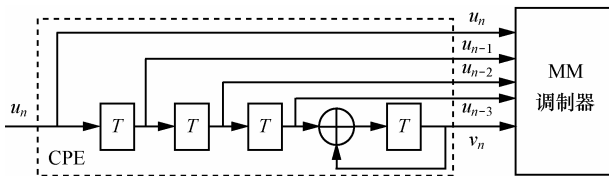


图 3 CPE+MM 表示的 GMSK 调制

文献[13]指出任何二进制恒包络相位调制信号都能分解成数目有限、时限的幅度调制脉冲 (AMP) 累加的形式 (Laurent 分解), 本文基于 Laurent 分解对于 GMSK 调制采用一种状态数少于 32 的方法来等效表示, 即可用一系列 AMP 的叠加来表示 GMSK 调制。

对于分解得到的 GMSK 信号, 第一个幅度调制

脉冲分量中包含了 99% 的信号能量, 所以可以用第一个 AMP 近似表示信号, 其他 AMP 分量的影响可以看成码间串扰。对接收端信号滤波器采用 Wiener 滤波器进行处理, 可以很大程度上简化接收端解调器的复杂度。

AMP 分解近似表示的 GMSK 基带信号为

$$\tilde{S}_{\text{GMSK}}(n) = \sqrt{\frac{E_s}{T}} \sum_{l=n-L}^n a_{0,l} g_{0,n-l} \quad (3)$$

其中, $g_{0,l}$ 为对应第一个 AMP 分量在第 l 个采样点处的值, $a_{0,l}$ 为对应于第一个 AMP 分量的输入数据。 $a_{0,l}$ 与信号源的信息数据符号 α_n 之间的关系为

$$a_{0,l} = \exp(j\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^l \alpha_i) = \prod_{i=0}^l j\alpha_i = j\alpha_l a_{0,l-1} \quad (4)$$

因此, 为了得到第一路脉冲流的复符号只需对信号源输出的信息数据进行差分编码即可。

依据 MMSE 准则, 对于 2.1 节中描述的 GMSK 调制, 接收端的解调滤波器参数可以通过计算常用 Wiener 滤波器的传输函数得到^[14], 图 4 为最优线性滤波器的时域波形, 图 5 为简化后的解调译码器的框图。

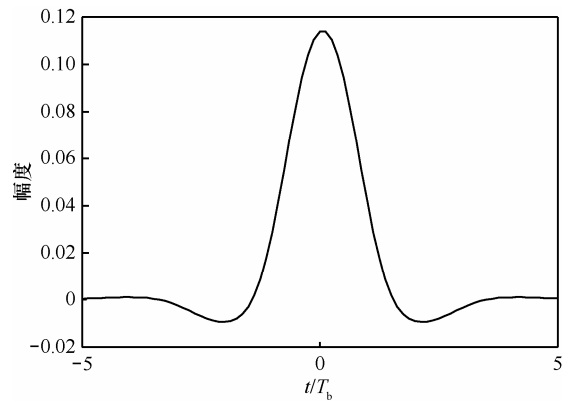


图 4 最优线性滤波器

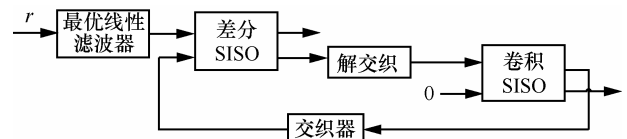


图 5 简化解调译码器

3.2 卷积码生成多项式优化

同串行级联码一样, C²PM 系统能够提供交织增益, 外码卷积码的自由距大小会影响交织增益^[6]。一般情况下随着外码自由距的增加, 性能得到提升。但在信噪比低时, 状态数多的卷积码反而会导致性能下降, 存在信噪比门限^[15]。

下面比较 4 种卷积码，生成多项式分别为 (2,3)、(5,7)、(23,35) 和 (171,133)，均为非递归、非系统卷积码，其自由距分别为 3、5、7、10。当信息位长度为 192bit 时，在 AWGN 信道下进行仿真，结果如图 6 所示。

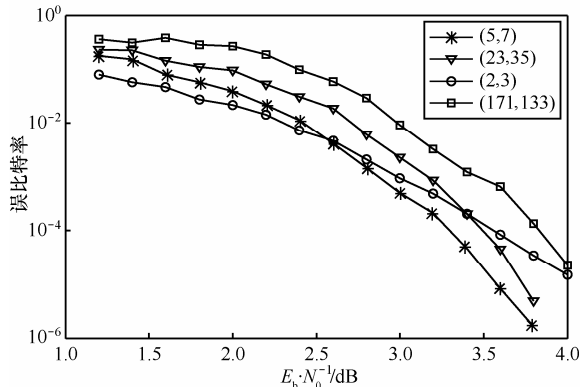


图 6 不同卷积码的误比特率曲线

从图 6 中可以看出，信噪比低于 2.6dB 时，状态数最少的 (2,3) 码性能最优。当信噪比高于 3dB 时，自由距大的 (23,35) 码的下降趋势更加明显。综合考虑短帧长和低信噪比 2 个因素，选择卷积 GMSK 系统的信道编码为 (5,7) 卷积码。

3.3 交织器优化

图 1 中在系统发送端，对编码后的数据进行一次交织，打乱了原有的发送顺序，起到随机编码的作用，有效地扩展了卷积码的码长。接收端译码时，交织器能够将 GMSK 的 SISO 输出的连续误码打散，因而，与未交织相比能够带来更多的编码增益。

常用的交织器有分组、比特翻转、随机、同余和 *s* 伪随机等方式^[16]，这里对随机交织器、*s* 伪随机交织器、同余交织器、cdma2000 标准中 Turbo 码交织器 4 种交织器在信息位长度为 192bit，AWGN 信道下，对卷积 GMSK 系统进行仿真。仿真结果如图 7 所示。

图 7 中的 4 条性能曲线表明，*s* 伪随机交织器性能最优。因此，本文研究的编码 GMSK 系统采用 *s* 伪随机交织器。

4 系统性能仿真

在第 3 节中，对编码的 GMSK 系统进行了参数优化，选择了适合短帧长、低信噪比条件下的传输系统参数。本节主要完成在 AWGN 信道下的系统仿真，并与同帧长的 Turbo 码和 LDPC 码的性能进行对比。

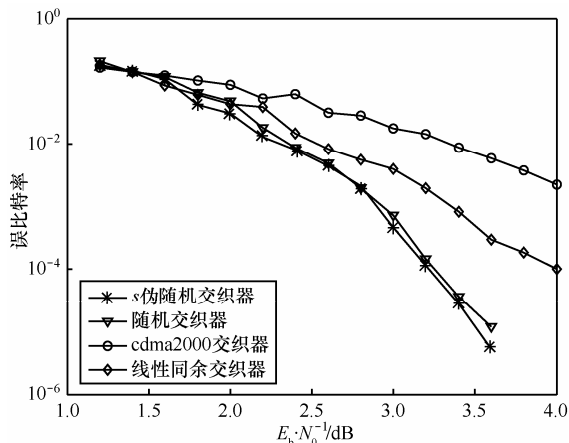


图 7 不同交织器性能对比

图 8 为编码 GMSK 系统同 Turbo 码性能的对比，Turbo 码的性能参考文献[5]。文献[5]中 Turbo 码的信息位长度为 192bit，两路均采用生成多项式 (5,7) 的卷积，交织器采用 12×16 的块交织，迭代次数为 10 次。

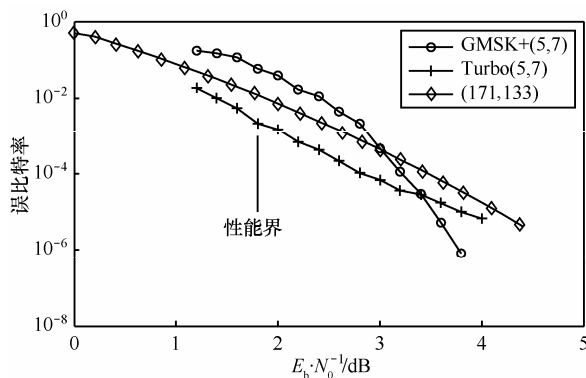


图 8 同 Turbo 码性能的对比

图 8 还给出了码率为 1/2、信息位长度为 192bit、误比特率为 10⁻⁴ 的香农限及 (171,133) 卷积码的性能，可以看出 Turbo 编码的性能下降趋势平缓，在 10⁻⁵ 的误比特率处出现译码平底。采用编码的 GMSK 系统，性能逼近 Turbo 码，且无误码平底出现。相比 (171,133) 卷积码，编码 GMSK 系统在 10⁻⁴ 的误比特率处有 0.2dB 的性能增益，在 10⁻⁵ 的误比特率处有 0.6dB 的性能增益。

图 9 为码率为 1/2，信息位长度为 186bit 条件下，编码的 GMSK 系统同 LDPC 码的性能对比，其中 LDPC 的性能参见文献[17]。文献[17]中给出了一种极短码长 LDPC 的编码方法，码率为 1/2，编码后长度为 372bit，该码字在性能上同其他码字相比局部性能更优，复杂度更低，易于工程实现。图

9 的性能曲线表明, 编码的 GMSK 系统性能与 LDPC 码性能近似, 在 10^{-5} 的误比特率处有 0.15dB 的性能增益, 且没有误码平底出现。

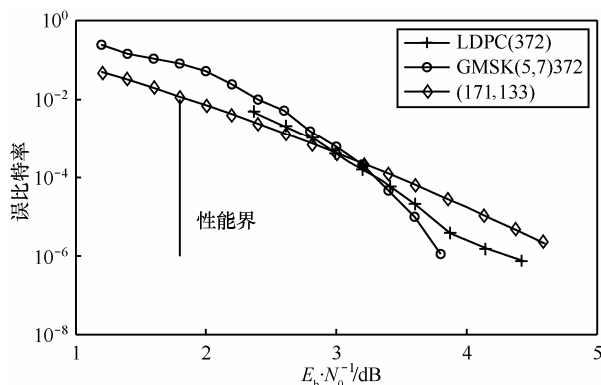


图9 同 LDPC 性能的对比如

5 复杂度分析

常用的软输入软输出算法有 BCJR、MAP、Log-map 和 Max-log-map 等, 其中 MAP 从 BER 角度上性能最优, 但复杂度高, Max-log-map 算法比 MAP 算法损失 0.1dB 左右, 但实现复杂度低。本文中提出的系统接收端译码采用 Max-log-map 算法。

对于信息位长度为 N 的编码 GMSK 系统, 发送端只需一个卷积编码器, 而对于同帧长的 Turbo 码, 则需要 2 个卷积编码器。接收端的迭代译码采用 Max-log-map 算法, 不存在指数运算和对数运算, 经过滤波采样后信号帧长度为 $2N$, 简化后的 GMSK 的 SISO 状态数为 2, 运算量为 $3 \times 2N \times 2$ (需要计算前向度量、后向度量和外信息), 卷积码 SISO 的状态数为 4, 运算量为 $3 \times N \times 4$, 每次迭代运算量为 $3 \times 2N \times 2 + 3 \times N \times 4 = 24 \times N$ 。对于 Turbo 码, 2 个译码 SISO 分量相同, 状态数均为 4, 每次迭代运算量为 $2 \times 3N \times 4 = 24 \times N$ 。所以, 编码 GMSK 系统同 Turbo 码相比, 发送端实现复杂度低, 运算量小, 接收端译码运算量相同。

LDPC 编码的复杂度为 $O(n^2)$, 编码 GMSK 系统的编码器为 $O(n)$, 因此, 同帧长下的编码 GMSK 系统比 LDPC 码更容易实现。

6 结束语

本文针对短帧长情况下编码 GMSK 系统的优化设计及简化译码问题进行了研究, 给出了一种

C^2PM 系统的优化设计方案。利用 C^2PM 信号具有的级联码性质, 采用迭代解调译码方法, 使信道编码性能在原有基础上得到提升。仿真测试结果表明, 当信息位长度为 192bit, 误比特率为 10^{-5} 时, 编码 GMSK 系统比常用的 (171,133) 卷积码有 0.6dB 性能增益, 比同帧长的 Turbo 码和 LDPC 码分别有 0.3dB 和 0.15dB 的性能增益, 且无误码平底出现。另外, 编码 GMSK 系统的实现复杂度小于同帧长的 Turbo 码和 LDPC 码, 非常适合于短帧长、低信噪比的工作环境。

参考文献:

- [1] CCSDS. 413.0-G-1. Bandwidth-Efficient Modulations, Washington, DC, USA: CCSDS Secretariat, Office of Space Communication (Code M-3), National Aeronautics and Space Administration[S]. 2003.
- [2] NARAYANAN K R, STUBER G L. Performance of trellis-coded CPM with iterative demodulation and decoding[J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49:676-687.
- [3] AMAT A G I, NOUR C A, DOUILLARD C. Serially concatenated continuous phase modulation for satellite communications[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8:3260-3269.
- [4] 3GPP. TS 25.212 V3.5.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Multiplexing and Channel Coding (FDD) (Release 1999)[S]. 2000.
- [5] JUNG P. Comparison of Turbo-code decoders applied to short frame transmission systems[J]. IEEE Select Areas Commun, 1996, 14(3): 530-537.
- [6] MOQVIST P, AULIN T M. Serially concatenated continuous phase modulation with iterative decoding[J]. IEEE v 3-0. on Communications, 2001, 49(11):1901-1915.
- [7] NARAYAN K R, STUBER G L. A serial concatenation approach to iterative demodulation and decoding[J]. IEEE Trans Comm, 1999, 47(7): 956-961.
- [8] PHOEL W G. Iterative demodulation and decoding of coded GMSK [A]. MILCOM 2001[C]. Washington, D C, 2001. 1170-1174.
- [9] SHANE M R, WESEL R D. Reduced complexity iterative demodulation and decoding of serial concatenated continuous phase modulation[A]. Communications, ICC 2002, IEEE International Conference on [C]. New York, 2002. 1672-1676.
- [10] RIMOLDI B. A decomposition approach to CPM [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1988, 34:260-270.
- [11] LI B, BAI B M, HUANG M Y. A robust non-coherent iterative detection algorithm for serially concatenated CPM[A]. Proc of 6th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing[C]. Piscataway, NJ, USA, 2010. 334-338.
- [12] POLYANSKIY Y, POOR H V, VERDU S. Channel coding rate in the finite blocklength regime[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2010, 56: 2307-2359.

(下转第 135 页)