

# 移动信道下采用软判决译码的自适应多级编码系统

隋爱芬<sup>1</sup>, 袁东风<sup>2</sup>, 张 锋<sup>2</sup>, 杨义先<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学 126 信箱信息安全中心, 北京 100876; 2. 山东大学电子工程系, 山东济南 250100)

**摘 要:** 基于信道容量规则和分组分割, 构造自适应于 AWGN 和 Rayleigh 两种信道特征的多级编码系统, 分量码选用删除型卷积码, 系统性能与未编码系统和 BCH 码为分量码的系统作比较. 在多阶段译码中提出利用信道状态信息的软判决支路度量计算公式, 比较软、硬判决译码对系统性能的影响, 为移动信道编码调制系统的最佳设计度量提供参考.

**关键词:** 自适应; 多级编码 (MLC); 信道容量规则; 分组分割 (BP); 软判决 Viterbi 算法

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 11-1694-03

## Robust Multilevel Codes with Soft Decision Decoding for Mobile Channels

SUI Ai-fen<sup>1</sup>, YUAN Dong-feng<sup>2</sup>, ZHANG-Feng<sup>2</sup>, YANG Yixian<sup>1</sup>

(1. P. O. Box 126, Beijing Univ. of Posts & Telecom., Beijing 100876, China;

2. Dept. of Electrical Eng., Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract:** Based on Capacity Rule and Block Partitioning (BP) strategy, a robust Multilevel Coding (MLC) scheme is proposed for AWGN and Rayleigh fading Channels using punctured convolutional codes. The system performance is compared with that of the uncoded 4ASK system and the MLC with BCH codes. The formulations for computing the soft decision metrics with Channel State Information (CSI) are presented for multistage decoding (MSD) and the performance comparisons are made for soft and hard decision decoding. The research can present some references for the optimal design of Multilevel Coding schemes.

**Key words:** multilevel coding; capacity rule; block partitioning; soft decision Viterbi decoding

### 1 引言

移动数字信道中的干扰往往是 AWGN 和 Rayleigh 衰落两种分布混合出现, 因此设计自适应于这两种信道特征的编码调制系统具有实际意义. (MLC) 系统<sup>[1]</sup>用不同级上的码(称为分量码)对不同信息位进行保护, 由于码率设计灵活、易于利用信道容量规则<sup>[2]</sup>及固有不等保护度的优点, 成为 CM 研究中的新热点. 本文基于 MLC/MSD 系统的等价信道容量<sup>[3]</sup>, 从两方面分析分组分割 (BP) 方案的自适应特性: 自适应于信道信噪比、自适应于 AWGN 和 Rayleigh 两种信道, 提出 AWGN 和 Rayleigh 信道下的自适应多级编码系统. 选取删除型卷积码为分量码构造该系统, 系统性能与未编码 4ASK 系统和分量码为 BCH 码的 MLC 系统作了比较.

译码方案是多级编码系统设计的一个重要内容. 文[2]证明信道容量规则+分量码采用最佳译码的多阶段译码 (MSD: Multistage Decoding) 技术可以达到信道容量. 软判决译码是一种渐近最佳的译码方案, 因此可以认为信道容量规则+分量码采用软判决译码的 MSD 技术是一种渐近最佳方案. 本文提出多阶段译码中利用信道状态信息的软判决支路度量计算公

式, 探讨了不同信道环境下软判决译码对系统性能的影响.

### 2 分组分割方案的自适应特性

经典的映射方法基于 UP<sup>[4]</sup>, 通过每一次集分割过程, 使

子集的最小欧氏距离不断增大. BP 的思想与 UP 相反. 第三种集分割方案是 UP 与 BP 的混合方案——混合分割 (MP: Mixed Partitioning), 本文采用的 MP 结构是 BPUPUP 结构. 前期我们分析计算了采用不同映射方案的三级 8ASK 调制 MLC 系统的等价信道容量<sup>[3]</sup>, 基于这一结果, 从两方面分析 BP 方案的自适应特性:

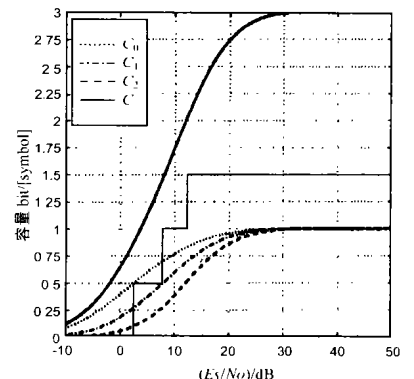


图 1 独立的 Rayleigh 信道下 BP 方案的等价信道容量

收稿日期: 2001-05-16; 修回日期: 2002-04-09

基金项目: 东南大学移动通信国家重点实验室开放基金 (No. W99001); 国家重点基础研究发展规划项目 (No. G1999035805); 国家杰出青年基金 (No. 69425001); 国家自然科学基金 (No. 69872020, 69882002, 60073049)

采用 BP 映射的  $l$  级 MLC 系统, 等价信道容量满足:  $C^i \geq C^{i+1}, i = 0, \dots, l-2$ , 这种特性可用于构造时变信噪比 (SNR) 信道上的软降低传输方案. 以 Rayleigh 信道下 BP 映射 8ASK 的 MLC/MSD 为例 (图 1), 若各级码率均取为  $R^i = 0.5$ , 在高 SNR ( $> 12\text{dB}$ ) 时, 各级  $R^i$  小于相应的  $C^i$ , 均可无误传输, 系统可获得  $R^0 + R^1 + R^2 = 1.5$  比特/符号的无误传输; 中等 SNR ( $8\text{dB} < \text{SNR} < 12\text{dB}$ ) 时, 系统至少获得  $R^0 + R^1 = 1.0$  比特/符号的无误传输; 低 SNR ( $< 8\text{dB}$ ) 时,  $R^0$  小于  $C^0$  仍可无误传输, 减少了对后两级的误码传播. 可见这种方案自适应于信道状态 (瞬时 SNR). 按照信道容量规则选择各级分量码率, 必然会引入误码传播, 但第 4.1 节的仿真结果显示: BP 方案仍体现了良好的软降低特性, 性能优于 MP 和 UP 方案.

表 1 MLC/MSD 系统的等价信道容量 (总码率  $R = 2.5$  比特/符号)

	AWGN 信道	Rayleigh 信道
UP	$C^0 = R^0 = 0.5$ $C^1 = R^1 = 1$ $C^2 = R^2 = 1$	$C^0 = R^0 = 0.59$ $C^1 = R^1 = 0.91$ $C^2 = R^2 = 1$
BP	$C^0 = R^0 = 0.95$ $C^1 = R^1 = 0.85$ $C^2 = R^2 = 0.7$	$C^0 = R^0 = 0.9$ $C^1 = R^1 = 0.85$ $C^2 = R^2 = 0.75$
MP	$C^0 = R^0 = 0.875$ $C^1 = R^1 = 0.625$ $C^2 = R^2 = 1$	$C^0 = R^0 = 0.925$ $C^1 = R^1 = 0.65$ $C^2 = R^2 = 0.925$

表 2 BP 映射 MLC/MSD 系统的等价信道容量 (总码率  $R = 2.0$  比特/符号)

AWGN 信道		Rayleigh 信道	
	$C^0 = R^0 = 0.84$		$C^0 = R^0 = 0.82$
	$C^1 = R^1 = 0.69$		$C^1 = R^1 = 0.68$
	$C^2 = R^2 = 0.47$		$C^2 = R^2 = 0.5$

引用 AWGN 和独立 Rayleigh 信道下的信道容量<sup>[3]</sup>, 总码率  $R = 2.5$  比特/符号、 $2.0$  比特/符号的信道容量值分别示于表 1 和表 2. 可看出, 对 BP 方案无论信道是 AWGN 还是 Rayleigh 分布, 可以对 MLC 的三级码率进行几乎相同的选择, 而 UP、MP 则不具备这种特性. 这一发现对设计最佳的、具有自适应 AWGN 和 Rayleigh 两种信道的 MLC 方案非常有益.

### 3 软判决多阶段译码

多阶段译码 MSD 是一种准最佳译码方法<sup>[5]</sup>, Seshadri 等人针对 8PSK 调制的 MLC 系统, 提出基于符号的软判决 Viterbi 算法的 MSD 技术<sup>[6]</sup>: 寻找相应分割子集中与接收信号欧式距离最近的点, 计算译码器每符号欧式度量. 第  $j$  时刻, 第 0、1、2 级的每符号欧式度量分别是:

$$M_j(i) = \min_{k, b_0} |y_j - S_j(k/b_0 = i)|^2 \quad i = 0, 1 \quad (1)$$

$$M_j(i) = \min_{k/b_1 = i, b_0 = b_{0j}} |y_j - S_j(k/b_1 = i, b_{0j})|^2 \quad i = 0, 1 \quad (2)$$

$$M_j(i) = |y_j - S_j(k/b_2 = i, b_{1j}, b_{0j})|^2 \quad i = 0, 1 \quad (3)$$

本文将这一算法应用于另一种调制方案——8ASK 调制的 MLC 系统, 提出利用信道状态信息的支路度量计算公式, 例如第 0 级译码器每符号欧式度量为:

$$M_j(i) = \min_{k/b_0 = i} |y_j - \rho S_j(k/b_0 = i)|^2 \quad i = 0, 1 \quad (4)$$

其中  $\rho$  是相应的信道状态信息. 为提高系统性能, 本文还采

用了信道输出的限幅. 由于译码过程中, 信道软输出  $y_j$  被用于各级分量码的译码, 所以硬判决的 MSD 也能够应用信道输出软信息.

### 4 仿真与结果分析

本文选用文[7]中的  $(m-1)/m$  率删除型卷积码作为 MLC 的分量码, 码率范围从  $1/2$  到  $13/14$ , 母码选用  $(2, 1, 3)$  卷积码. 各级码率尽量接近相应的等价信道容量.

#### 4.1 三种映射方案的软判决译码性能比较

总码率为  $R = 2.5$  比特/符号, 分量码均采用软判决译码, 结果示于图 2、3. 可以看出:

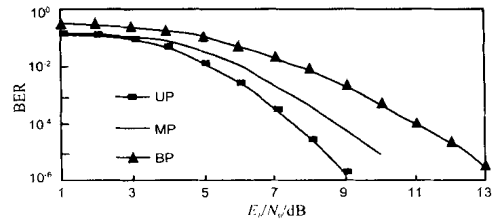


图 2 AWGN 信道下三种映射方案软判决译码性能比较,  $R = 2.5$  比特/符号

UP:  $R^0 = 0.5, R^1 = 1, R^2 = 1, R = 2.5$   
 MP:  $R^0 = 0.8333, R^1 = 0.6667, R^2 = 1, R = 2.5$   
 BP:  $R^0 = 0.9286, R^1 = 0.8889, R^2 = 0.6667, R = 2.4842$

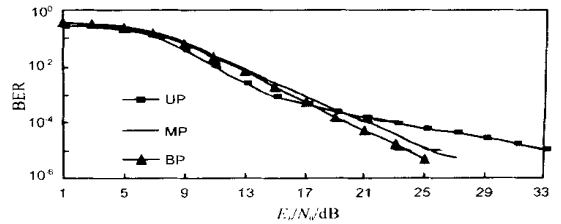


图 3 独立 Rayleigh 信道下三种映射方案软判决译码性能比较,  $R = 2.5$  比特/符号

UP:  $R^0 = 0.6667, R^1 = 0.8333, R^2 = 1, R = 2.5$   
 MP:  $R^0 = 0.9167, R^1 = 0.6667, R^2 = 0.9167, R = 2.5$   
 BP:  $R^0 = 0.9, R^1 = 0.8333, R^2 = 0.75, R = 2.4833$

(1) AWGN 信道下, UP 方案具有最佳性能, BER 达到  $10^{-5}$  量级时, 所需  $E_b/N_0$  仅为  $8.3\text{dB}$ , BP 方案性能最差, MP 方案性能介于二者之间.

(2) 独立 Rayleigh 信道下: 随信噪比增大, BP 方案取得最佳性能. 在移动信道中, 实际系统的信噪比要满足衰落信道的要求, 因此移动信道中在感兴趣的  $\text{BER} (< 10^{-4})$  范围内基于信道容量规则的 BP 方案性能最佳. BP 映射方案具有软降低特性. 而 UP 方案在高信噪比时出现 BER 的平台. 这一结果验证了 BP 方案自适应于信道信噪比的特性.

#### 4.2 卷积码为分量码的自适应 MLC 系统

基于信道容量规则和 BP 映射构造 8ASK 调制的自适应 MLC 系统, 总码率  $R = 2.0$  比特/符号, 各级码率:  $R^0 = 0.8333, R^1 = 0.6667, R^2 = 0.5$ , 性能与未编码 4ASK 系统作比较, 如图 4、5 所示. con HDD 表示三级均采用硬判决译码; con 1S 表示仅第 0 级采用软判决译码, con 2S 表示第 0、1 级采用软判决译

码; con 3S 表示三级均采用软判决译码. 可以看出: 曲线 HDD、1S 和 2S 之间间隔明显, 说明 BP 方案隐含误码传播, 软判决适合应用于 BP 方案. AWGN 信道下, 三级均采用硬判决译码时性能并不优于未编码 4ASK 系统. Rayleigh 信道下, 无论采用硬判决, 还是软判决, 性能均优于未编码 4ASK.

该系统在 Rayleigh 信道中采用软判决相比硬判决带来的增益高于 AWGN 信道, BER 为  $10^{-5}$  时, 当系统第 0、1 级采用软判决译码时, 在 AWGN 和 Rayleigh 信道中相比未编码 4ASK 系统可分别获得 3dB 和 24dB 的增益.

### 4.3 与 BCH 码为分量码的 MLC 系统的性能比较

图 4、5 同时给出了分量码为 BCH 码的 MLC 系统性能, 分量码分别为 (127, 106, 3) (127, 85, 6) (127, 64, 10), 总码率  $R = 2.0$  比特/符号, 可以看出: AWGN 信道下, 卷积码为分量码的 MLC 系统无论采用软、硬判决译码, 性能均优于 BCH 码为分量码的系统, Rayleigh 信道下,  $E_b/N_0$  低于 20 dB 时, 卷积码为分量码的 MLC 系统无论采用软、硬判决译码, 性能均优于 BCH 码为分量码的系统; 在  $BER = 10^{-4}$  时, con 3S 系统所需  $E_b/N_0$  比 BCH 系统低 6dB.

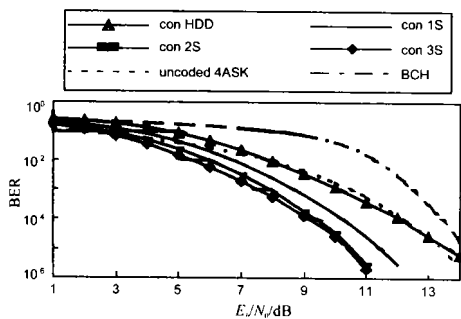


图4 AWGN 信道下自适应 MLC 系统性能  
 $R = 2.0$  比特/符号, 8ASK, BP 映射

图中 con、BCH 分别表示分量码为卷积码、BCH 码

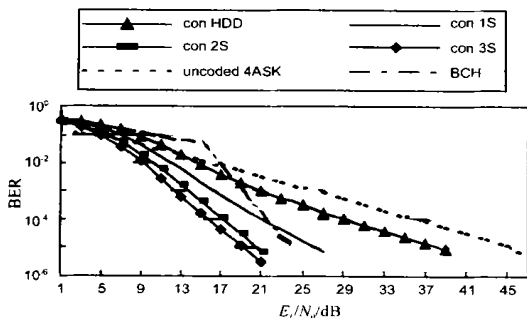


图5 独立 Rayleigh 信道下自适应 MLC 系统性能  
 $R = 2.0$  比特/符号, 8ASK, BP 映射

图中 con、BCH 分别表示分量码为卷积码、BCH 码

## 5 结论

本文基于信道容量规则和 BP 思想构造的 8ASK 调制 MLC/MSD 系统, 采用删除型卷积码作分量码, 具有软降低特性, 可以自适应于信噪比的变化、自适应于 AWGN 和 Rayleigh 两种信道.

基于信道容量规则设计 MLC 系统, AWGN 信道下, UP 方案性能最佳; 移动信道中  $BER < 10^{-4}$  BP 方案性能最佳. 软判决译码可以有效降低误码传播, 适合应用于 BP 方案. 采用硬判决译码时, 多级编码方案是利用信道软信息的有效方式.

AWGN 信道下, 卷积码为分量码的 MLC/MSD 系统无论采用软、硬判决译码, 性能均优于 BCH 码为分量码的系统.

Rayleigh 信道下, 卷积码为分量码的系统当两级或三级分量码采用软判决译码时, 性能优于 BCH 码为分量码的系统.

### 参考文献:

- [ 1 ] H Imai, S Hirakawa. A new multilevel coding method using error correcting codes [ J ]. IEEE Trans Inform. Theory, 1977, 23( 3 ): 371-377.
- [ 2 ] U Wachsmann, R F H Fischer, J B Huber. Multilevel codes: Theoretical concepts and practical design rules [ J ]. IEEE Trans Inform. Theory, 1999, 45(5): 1361- 1391.
- [ 3 ] Dong-feng Yuan, Zhi-Gang Cao, D W Schill, J B. Huber. Robust signal constellation design for AWGN and rayleigh fading channels for softly degrading communication schemes using multilevel codes [ J ]. Chinese Journal of Electronics, 2000, 10( 2 ): 115- 121.
- [ 4 ] G Ungerboeck. Channel coding with multilevel/ phase signals [ J ]. IEEE Trans Inform. Theory, 1982, 28(1): 55- 67.
- [ 5 ] T Woerz, J Hagenauer. Multistage coding and decoding for a M-PSK system [ A ]. GLOBECOM' 90 [ C ]. San Diego, California: GLOBE COM, . 1990.
- [ 6 ] N Seshadri, G E W Sundberg. Multi level trellis coded modulations for the rayleigh fading channel [ J ]. IEEE Trans Commun. , 1993, 41( 9 ): 1300- 1310.
- [ 7 ] Yutaka Yasuda, Kanshiro Kashika, Yasuo Hirata. High rate punctured convolutional codes for soft decision viterbi decoding [ J ]. IEEE Trans Commun. , 1984, 32( 3 ): 315- 319.

### 作者简介:



隋爱芬 女, 1974 年生于山东省东营市, 2000 年毕业于山东大学, 获通信与信息系统专业硕士学位, 现为北京邮电大学博士生, 发表论文 20 篇, 研究方向为移动通信纠错抗干扰、编码调制技术和信息安全.