

衰落信道中不同集分割的多级 编码调制方案的性能研究

袁东风¹, 姚 旗¹, 王承祥¹, 曹志刚², J. B. Huber³

(1. 山东大学电子工程系, 济南 250100; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 3. 爱尔兰根大学电子工程系, 德国)

摘 要: 本文以 MLC 系统各等价信道的信道容量为依据^[1], 选用不同码长的 BCH 码系列作为 MLC 系统中各级的分量码, 通过计算机模拟, 比较了三种不同的集分割方法所构成的 MLC/MSD 方案, 分别在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道中, 8ASK 调制方式下的性能。模拟结果表明: UP 分割在 AWGN 信道中具有最好的性能; BP 分割可自适应于 AWGN 和 Rayleigh 衰落混合的移动衰落信道, 是 MLC 方案应用于移动衰落信道中的最佳集分割方案。

关键词: 衰落信道; 多级编码调制; 集分割方案

中图分类号: TN911 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2001) 05-0657-04

Performance Research on Multilevel Coding Schemes Using Different Set Partitioning Strategies for Fading Channels

YUAN Dong-feng¹, YAO Qi¹, WANG Cheng-xiang¹, CAO Zhi-gang², J. B. Huber³

(1. Dept. of Electronic Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China; 2. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Dept. of Electronic Engineering, Erlangen University, Germany)

Abstract: Based on the calculation for capacities of equivalent channels^[1], the performance of MLC (Multilevel coding)/MSD scheme with three different set partitioning strategies in AWGN and Rayleigh fading channels is simulated. In which BCH codes with different code lengths are chosen as component codes, and 8ASK modulation is used. Simulation results show that UP (Ungerboeck partitioning) set partitioning has the best performance in AWGN channels and BP (Block partitioning) is the best set partitioning strategy in fading channels. According to "capacity rule", BP is of good robustness in both kinds of channels to realize an optimum MLC system.

Key words: fading channel; multilevel coding; set partitioning strategies

1 引言

集分割方案的选取是设计多级编码调制(MLG Multilevel Coding)的关键, 直接影响着系统的性能。经典的集分割方法是 1982 年随着网格编码调制(TCM)技术的诞生由 Ungerboeck 首先提出的^[2], 简称为 UP(Ungerboeck Partitioning)。关于 TCM 的研究结果表明: UP 集分割方法在 AWGN 加性白色高斯噪声信道中的性能是最佳的, 它也被确定为设计 TCM 好码的判据和准则; 但结果也表明 UP 分割方法已不再是衰落信道中的最佳集分割方法和设计好码的准则和判据^[3]。随着 MLC 方案在衰落信道中研究的兴起, 人们开始关注到其它不同于 UP 的集分割方案的性能^[4,5]。

沿与 UP 集分割方案不同方向思索, 会出现什么结果?

有没有适用于衰落信道的、更为有效的集分割方案? 这是 MLC 研究者所关注的问题。

本文在对各种集分割方案分析的基础上, 根据 MLC 系统各等价信道的信道容量值^[1], 选用不同码长的 BCH 码系列作为 MLC 系统中各级的分量码, 通过计算机模拟, 比较了三种不同的集分割方案分别在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道中、8ASK 调制方式下的性能。

2 多级编码与信道容量规则

MLC^[1]包括三部分: 输入信源串/并转换、多级编码器、映射器。系统的核心在于具有 $M = 2^l$, $l > 1$ 个信号星座点的集分割方法, 即信号集 $A = \{a_m | m \in \{0, 1, 2, \dots, 2^l - 1\}\}$ 的二进制集分割, 以及对于信号点 a_m 的映射器: $m \rightarrow C$ 的定义方法。

收稿日期: 1999-11-08; 修回日期: 2000-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69872020); 东南大学移动通信国家重点实验室开放基金(No. W99001); 东南大学移动通信国家重点实验室访问学者基金(No. V-99004); 教育部《高等学校骨干教师资助计划》; 山东省自然科学基金(No. Y2000G14)

其中, $C = (c^0, c^1, \dots, c^{l-1})$, c^i 是第 i 级编码器输出的码元, $c^i \in (0, 1)$, $i \in \{0, 1, \dots, l-1\}$. 在 MLC 中的第 i 级信号点的子集由从根到子集的集分割树中的路径表示为:

$$A c^0 \dots c^i = \{a_m | m \leftarrow (c^0, c^1, \dots, c^i, x^{i+1}, \dots, x^{l-1}), x^i \in \{0, 1\}, j \in \{i+1, \dots, l-1\}\} \quad (1)$$

随着人们对 MLC 研究的不断深入, 采用多级译码 (MSD) 的 MLC 系统的信道容量的计算由文[4, 5] 提出, 并进而提出了“信道容量规则”. 给定一种含 2^l 个信号星座点 (可以是幅度点 MASK, 也可以是相点 MPSK) 的数字调制方案, 在 MLC 方案 (共有 l 级) 的第 i 个编码级选取其编码率 R^i 等于第 i 级等价信道的信道容量 C^i , 即有

$$R^i = C^i, i = 0, 1, \dots, l-1 \quad (2)$$

当在 MLC/MSD 设计中满足“信道容量规则”时, 按 Shannon 信息论中的信道编码定理, 即可实现在信息传输率小于等于信道容量时, 系统具有最佳的可靠性性能.

信道容量规则的基本思想就是要用 MLC 中各级的信道容量来表征各等价信道的传输特性, 而各等价信道容量的计算公式如下[4]:

$$\begin{cases} C^i = E_{x^0, \dots, x^{i-1}} \{C(A(x^0, \dots, x^{i-1}))\} - E_{x^i} \{C(A(x^0, \dots, x^i))\}, & i = 1, \dots, l-1 \\ C^0 = C(A) - E_{x^0} \{C(A(x^0))\}, & i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于具有 B 个信号星座点的信号空间或子空间, 当 B 个元素等概出现时, 其信道容量可由下式计算得出[5]:

$$C(B) = \frac{1}{|B|} \int_{y \in B} \sum_{a_m \in B} f_{y|a_m}(y) \log_2(f_{y|a_m}(y)) \left| \frac{1}{|B|} \sum_{a_m \in B} f_{y|a_m}(y) \right| dy \quad (4)$$

式中: $f_{y|a_m}(y)$ 是所讨论信道的概率密度函数 (pdf), 它是对信道不同错误特征的统计表征和描述.

3 集分割方案

集分割思想是编码调制方案的核心, 随着编码调制方案在移动衰落信道中研究的深入, 三种不同的对信号星座的集分割方法被提出. 1982 年, Ungerboeck 在 TCM 方案中首次提出了集分割思想——UP, 由此产生的最大最小欧式距离成为 AWGN 信道中好码设计的判据和准则. 近几年, 随着对移动衰落信道研究的兴起, 又一种集分割方案分组分割方法——BP (Block Partitioning) 诞生了. 这种方案的思想完全不同于 UP, 它在每一次集分割时使其子集的最小欧式距离保持不变. 这种集分割方案究竟能给编码调制方案在衰落信道中的性能带来什么, 还需要进一步探索, 但已证明它对于一类分等级 (可靠性) 广播系统是十分有效的[7]. 同样需要研究的第三种集分割方案易于想象到, 即是 UP 与 BP 的混合方案, 称之为 MP (Mixed Partitioning). 下面以 8ASK 数字调制下信号星座的集分割为例, 来说明三种不同的集分割方案.

3.1 UP 集分割

UP 集分割基本思想在于: 通过每一次集分割过程, 使子集的最小欧式距离不断增大, 以改善 TCM 的性能. 在分割后所成的子集中, 点与点之间的欧式距离不断加大, 无疑可提供

更好的功率有效性.

3.2 BP 集分割

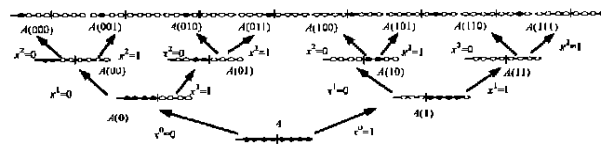


图 1 8ASK 的 BP 分割示意图

图 1 所示为 BP 集分割树结构图. 图中圆黑点表示信号子集. 在集分割树中, 我们令始于第 i 级的两个分支所对应的编码比特为 $x^i = 0$ 或 1 , 此 x^i 代表与 MLC 方案中第 i 级关联的标志. 三个编码比特 ($x^0 x^1 x^2$) 将唯一确定对应的子集. 例如, 此信号星座上自左边数第二点被标记为: $x = (x^0 x^1 x^2) = (001)$. BP 与 UP 完全不同的构思导致每次集分割后汉明距离越小的点之间的欧式距离也越来越小, 但是也正是因为 BP 与 UP 有完全不同的构思以及已证明的 UP 在衰落信道中不是最佳的集分割方法的结论, 才使 BP 集分割方案在衰落信道中的探索更具有深入研究的价值. 在不同信道中计算出的三种不同集分割方案信道容量的结果也已证明[1]: BP 分割是一种可自适应 AWGN 与 Rayleigh 衰落两种信道的最佳方案, 它与 MLC 配合可组成移动衰落信道中最佳的调制编码方案. 因为在典型的移动快衰落信道中造成严重干扰的原因中往往是 AWGN (Gaussian 分布) 和 Rayleigh 衰落共存的, 所以所选的编码方案必须具有“鲁棒性”.

3.3 MP 集分割

MP 是由 UP 和 BP 两种方法混合而成. 两种方法可以改变顺序, 交叉使用, 构成不同的 MP 方案用于不同的传输场合, 如分等级的传输以及不等保护度要求的传输等等. 本文采用的 MP 结构是 BP—UP—UP 结构, 即: 第一步集分割时是按 BP 规则, 第二、三步分别按 UP 进行. 另外几种 MP 方案将在以后的研究工作中涉及到.

根据对不同集分割方案下的信道容量的计算结果, MLC/MSD 方案的各级码率设计值依信道容量规则可一一得到, 表 1 给出了 8ASK 调制、三种不同集分割方案下的 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道的最佳码率设计值[1], 此时 $R = 2 \text{ bits/symbol}$.

表 1 由信道容量规则得出的 8ASK 调制、MSD 译码方式下的各级率设计值 ($R = 2 \text{ bits/symbol}$)

	AWGN 信道	Rayleigh 衰落信道
UP	$C_0 = R_0 = 0.1818$	$C_0 = R_0 = 0.3125$
	$C_1 = R_1 = 0.8182$	$C_1 = R_1 = 0.75$
	$C_2 = R_2 = 1$	$C_2 = R_2 = 0.9375$
BP	$C_0 = R_0 = 0.85$	$C_0 = R_0 = 0.8125$
	$C_1 = R_1 = 0.7$	$C_1 = R_1 = 0.6875$
	$C_2 = R_2 = 0.45$	$C_2 = R_2 = 0.5$
MP	$C_0 = R_0 = 0.85$	$C_0 = R_0 = 0.8475$
	$C_1 = R_1 = 0.25$	$C_1 = R_1 = 0.35$
	$C_2 = R_2 = 0.9$	$C_2 = R_2 = 0.8025$

4 计算机仿真及结果分析

依照表 1 中的码率设计值, 本文对采用 8ASK 调制方式,

各分量码选取码长为 127、不同码率的 BCH 码构成的三级 MLC/MSD 方案, 进行了在 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道的计算机仿真, 以研究不同集分割方案对 MLC 性能的影响。

4.1 AWGN 信道中 UP、BP、MP 方案的性能比较

图 2 仿真结果给出了选取 $n = 127$ 长的 BCH 码, 作为分量码的三级 MLC/MSD 方案在 AWGN 信道中, 分别按 UP、BP、MP 三种不同集分割方案但均符合各自信道容量规则下设计出的方案的性能比较。三种方案的总码率 R 相同均为 2bits/symbol, 以便在同等的频带有效性下比较其功率有效性, 也为了易于同未编码的 4ASK 作比较。由图中比较分析可见:

(1) 在相同的频带有效性 2bits/symbol 下, 按各自的信道容量规则设计的三种集分割方法构成的 MLC 方案相比, UP 分割在 AWGN 信道中具有最好的性能, 这同迄今为止的许多结论是一致的。MP 分割的性能略好于 BP 分割的性能, 但二者相差不多;

(2) 在小信噪比下 ($E_b/N_0 < 9\text{dB}$), 三种集分割方案的性能基本相同; 但信噪比增大 ($E_b/N_0 > 9\text{dB}$) 时, 三者间性能差距开始拉大。MP 集分割的性能优于 BP 的性能, UP 分割性能最好, 如图 2 所示。当 $P_b = 10^{-4}$ 时, UP 集分割的性能比 BP、MP 的性能好 2.3dB;

(3) 由于 MASK 调制方式是幅度调制, 在噪声干扰不大的信道中(如 AWGN 信道), 未编码的 4ASK 的性能已经不错。如图 2 所示, 仅有 UP 集分割方案的性能相对未编码的 4ASK 有编码增益 ($E_b/N_0 > 10.5\text{dB}$ 时)。故采用 8ASK 调制方式的 MLC 方案在 AWGN 信道中, 选取 MP、BP 分割的意义不大, 这也同时证明了集分割方法对于多级编码调制方案的重要作用。

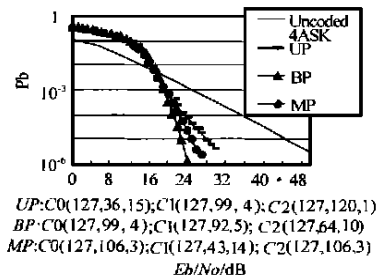


图 3 Rayleigh 信道, 8ASK, MSD 译码, UP、BP、MP 的性能比较

图 5 给出 BP 集分割在 AWGN 信道中, 当码长 $n = 255$ 时分别按 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道的码率要求设计的 MLC 方案的性能差异, 进一步验证 BP 分割的“鲁棒性”。图中

4.2 Rayleigh 衰落信道中 UP、BP、MP 方案的性能比较

在 Rayleigh 衰落信道下, 对码长 $n = 127$ 的三级 MLC/MSD 方案的性能进行了计算机模拟, 并给出了 UP、BP、MP 三种不同分割下均符合各自“容量设计规则”时的性能比较。模拟结果如图 3 所示。三种方案的总码率 R 相同均为 2bits/symbol, 且给出了未编码的 4ASK 的曲线以作比较。由计算机仿真结果可见:

(1) 由前面的分析已知, UP 集分割是 AWGN 信道中的最佳集分割方案, 但它在 Rayleigh 衰落信道中已不是最佳的了。BP 分割由于其思路与 UP 完全不同, 因此有可能会成为在衰落信道中的最佳集分割方案, 这一结论在本部分得到了证明。如图 3 所示, 按 BP 映射后实现了 MLC 系统在 Rayleigh 衰落信道中的最佳性能;

(2) 按“信道容量规则”设计的 MLC 系统, 性能改善明显, 有较高的编码增益; 相对于未编码的 4ASK 而言, 当 $P_b = 10^{-5}$ 时, 在 BP 分割下, 有 21.5dB 的编码增益。

4.3 BP 集分割方案在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道中的鲁棒性

依照三种不同集分割方案下的信道容量的计算结果^[1], 并参考表 1 的码率设计结果, 我们从信道容量的观点容易发现: 对于不同信道特征情况, BP 集分割方案最具“自适应”性和“鲁棒性”, 因为无论信道是 AWGN 还是 Rayleigh 衰落的, 几乎可以对 MLC 中的三级码率设计进行相同的选择。这一发现对设计最佳的、具有自适应 AWGN 和 Rayleigh 两种信道的 MLC 编码调制方案是非常有意义的。本文的计算机模拟结果也同时验证了这一结论。

图 4 给出了 BP 集分割在 Rayleigh 衰落信道中, 当码长 $n = 255$ 时的计算机模拟结果。也即在 Rayleigh 衰落信道中, 比较分别按 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道的码率要求设计的 MLC 方案的性能差异, 观察 BP 集分割方案“自适应”性。图中 CODE1 为按在 Rayleigh 信道情况下要求的各级码率设计出的方案; CODE2 则为按在 AWGN 信道情况下要求的各级码率设计出的方案。由图可见, 采用 BP 分割时, 按 AWGN 时的码率值设计出的多级编码方案可以很好的适用于 Rayleigh 信道的抗干扰中(即性能差别不大)。

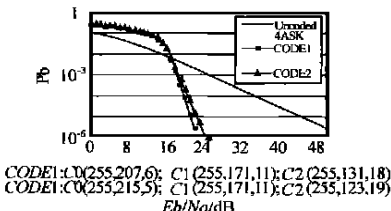


图 4 Rayleigh 信道, BP, 8ASK, MSD 译码, 不同码率设计的性能比较

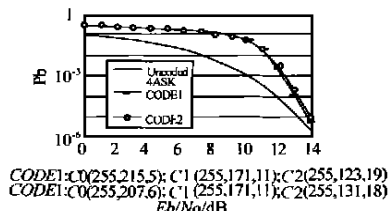


图 5 AWGN 信道, BP, 8ASK, MSD 译码, 不同码率设计的性能比较

CODE1 为按在 AWGN 信道要求下设计出的方案; CODE2 则为按在 Rayleigh 信道要求下设计出的方案。由图可见: BP 分割具有自适应不同信道特征的“鲁棒性”, 即按 Rayleigh 信道容量

要求设计出的方案性能与按在 AWGN 下设计出的方案的性能相比,无太大差异(变坏)。

5 结论

由以上分析及模拟结果,可得以下结论:

(1) 集分割方法的选取对于多级编码调制方案具有重要作用。在相同的频带有效性下,按各自的信道容量规则设计的三种集分割方法构成的 MLC/MSD 方案相比,UP 分割在 AWGN 信道中具有最好的性能,BP 分割则是衰落信道中的最佳集分割方案;

(2) BP 集分割方案对于不同的信道特征(AWGN 和 Rayleigh 衰落)最具“自适应”性和“鲁棒性”,所以“信道容量规则”加上 BP 集分割方法,构成了适用于移动衰落信道(既有 AWGN 噪声,也有 Rayleigh 衰落噪声)最优多级编码抗干扰方案的一种非欧度量。

参考文献:

- [1] D. F. Yuan, Z. G. Cao, D. W. Schill and J. B. Huber. Robust signal constellation design for AWGN and Rayleigh fading channels for softly degrading communication scheme using multilevel codes [J]. Chinese Journal of Electronics, 2000, 9(2): 115-121.
- [2] G. Ungerboeck. Channel coding with multilevel/phase signals [J]. IEEE Trans. on IT, 1982, 28(1): 55-67.
- [3] C. W. Sundberg and N. Seshadri. Coded modulations for fading channels: An overview [J]. ETT, 1993, 4(3): 309-324.
- [4] U. Wachsmann, R. F. H. Fischer and J. B. Huber. Multilevel codes: theoretical concepts and practical design rules [J]. IEEE Trans. IT, 1999, 45(5): 1361-1391.
- [5] J. Huber, U. Wachsmann. Capacities of equivalent channels in multilevel coding schemes [J]. Electronics Letters, 1994, 30(7): 557-558.

- [6] H. Imai and S. Hirakawa. A new multilevel coding method using error correcting codes [J]. IEEE Trans. on IT, 1977, 23(5): 371-377.
- [7] D. W. Schill. On hierarchical signal constellations for the Gaussian broadcast channel [J]. IEEE ICT'98, Greece, June, 1998.

作者简介:



袁东风 工学博士,1958年4月出生,山东大学信息科学与工程学院副院长、教授、博导,中国通信学会、中国电子学会高级会员,山东电子学会常务理事,山东大学青年学科带头人。1988年毕业于山东大学电子工程系通信专业硕士研究生毕业并获理学硕士学位,2000年1月于清华大学电子工程系通信与信息系统专业博士研究生毕业并获工学博士学位,1993至1994年赴加拿大 Calgary 大学电子与计算机工程系任访问教授,1998至1999年受德国 DAAD 资助赴德国 Erlangen 大学电子工程系任访问教授。已在多种学术刊物及国际会议上发表学术论文 140 余篇。主要研究领域有:纠错编码抗干扰技术、移动通信差错控制设计以及多级编码调制(MLC)、位交织编码调制(BICM)及 Turbo Code 技术等。



姚旗 1975年出生,2000年7月获山东大学电子工程系硕士学位。现在德国汉堡工业大学通信工程学院攻读博士学位。主要研究方向为移动通信纠错抗干扰及 MLC 技术等。已发表论文 30 篇。