

移动衰落信道中设计多级编码(MLC)方案的一种非欧度量

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: 本文提出了在移动衰落信道中设计多级编码(MLC)方案的一种非欧度量:“信道容量规则”+“映射规则”。在 AWGN 信道中为:“信道容量规则”+“UP(Ungerboeck Partitioning)规则”;在 Rayleigh 衰落信道中为:“信道容量规则”+“BP(Block Partitioning)规则”。并在此理论指导下,选用不同码长的 BCH 码作为 MLC 系统中各级分量码,通过计算机模拟,比较了在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道中,采用 8ASK 调制方式、多级译码(MSD)、三种不同映射方法下的三级 MLC 方案的性能。

关键词: 移动衰落信道; 多级编码; 信道容量规则; 非欧度量

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 01-0032-04

A Non-Euclidean Metric for the Design of Optimal Multilevel Coding Scheme over Mobile 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: A non-Euclidean metric which is “capacity Rule” and “mapping Rule” for the design of optimal MLC scheme over mobile fading channels is proposed. For AWGN channels, it is “capacity rule” and “UP rule”. For Rayleigh fading channels, it is “capacity rule” and “BP rule”. Directed by this theory, the performance of three levels multilevel coding with multistage decoding (MLC/MSD) scheme in AWGN and Rayleigh fading channels is simulated. In which BCH codes with different code lengths are chosen as component codes, and three mapping strategies with 8ASK modulation are used.

Key words: mobile fading channel; multilevel coding; capacity rule; non-Euclidean metric

1 引言

编码调制(CM:Coded Modulation)是为提高数字传输系统的抗干扰性能而使编码与调制联合最佳的一种方案,它分别于1976年由Ungerboeck(TCM:Trellis Coded Modulation)^[2,3]和1977年由Imai,Hirakawa(MLC:Multilevel Coding)^[4]提出.近年来CM方案更多地应用于移动数字通信信道中.这是因为移动信道既频带受限,又功率受限,信道快衰落造成的长突发误码对传统的CM方案提出了挑战.

对TCM的研究结果^[5]表明:在AWGN信道中设计的好码并非衰落信道中的好码,Ungerboeck提出的最大最小欧氏距离的设计规则是AWGN信道中的最佳度量^[6],但却不适应于衰落信道^[7].如何寻找衰落信道中设计最佳CM方案的系统

参数?其设计的“度量”或“判据”是什么?这些都是CM方案研究者亟待解决的问题.

MLC与TCM相比具有明显的好处:率的可调整性,固有的不等保护度(UEP:Unequal Error Protection)特性及设计最佳CM方案时便于应用信道容量规则^[8]等.有关影响MLC系统性能的关键因素,许多文献中都做过很多尝试^[9-11],但都未找到适应于衰落信道的一种“度量”或“判据”.文献[8]给出了AWGN信道中MLC方案的各等价信道的信道容量,文献[1]又计算出了衰落信道中三种不同映射(集分割)方式下的各等价信道的信道容量.本文在此基础上,研究了MLC/MSD方案分别在AWGN和Rayleigh衰落信道中,采用8ASK调制方式、BCH码作分量码、不同映射方案下的性能,从而提出了一种适用于移动衰落信道设计MLC方案的非欧度量.

收稿日期:1999-09-21;修回日期:2000-04-12

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)

2 信道容量规则及其在 MLC 方案设计中的应用

2.1 多级编码(MLC)及等价信道^[8]

在 MLC 方案中,有三部分组成: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 ,映射器: $m \rightarrow C$ 的定义方法。

由于多级编码系统的映射是双射的,并且从信息论的意义上看是无损的,所以传输信号点 $a \in A$ 与接收信号点 $y \in Y$ 间的平均互信息 $I(Y; A)$ 就等于多级编码形成的地址矢量 $X = \{0, 1\}^l$ 与接收信号点间的平均互信息 $I(Y; X^0, X^1, \dots, X^{l-1})$, 即:

$$I(Y; A) = I(Y; X^0, X^1, \dots, X^{l-1}) \quad (1)$$

其中对应于传输和接收信号点,二进制地址矢量及其分量都是由大写字母符号表示的。将“链规则”应用于此平均互信息中^[12],可得:

$$I(Y; X^0, X^1, \dots, X^{l-1}) = I(Y; X^0) + I(Y; X^1 | X^0) + \dots + I(Y; X^{l-1} | X^0, X^1, \dots, X^{l-2}) \quad (2)$$

对上式的解释是:二进制数字矢量 $(X^i, i = 0, 1, \dots, l-1)$ 在物理信道上的传输可视为在 l 个等价信道上的并行传输。等价信道 i 由等价映射器 i (只要传输数字 $X^0 \dots X^{i-1}$ 是已知的)和通信传输的噪声信道组成。

2.2 信道容量规则(Capacity rule)

给定一种含 2^l 个信号星座点(可以是幅度点 MASK,也可以是相位点 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:

$$R^i = C^i, i = 0, 1, \dots, l-1 \quad (3)$$

此即“信道容量规则”。按 Shannon 信息论中的信道编码定理,众所周知: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能。只要使各级的码率工作在 MLC 方案信道容量限上,容量规则可给各级提供最大的传输率,并且具有任意小的误码率,因此要设计具有最佳功率有效性和频率有效性的 MLC 方案,就必须依赖于信道容量规则。

由互信息的“链规则”(chain rule)可推导出等价信道的信道容量的计算公式如下:

$$\begin{cases} C^i = E_{x^0 \dots x^{i-1}} \{ C(A(x^0 \dots x^{i-1})) \} - E_{x^0 \dots x^{i-1}} \{ C(A(x^0 \dots x^{i-1})) \}, \\ i = 1, \dots, l-1 \\ C^0 = C(A) - E_{x^0} \{ C(A(x^0)) \}, i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

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^[13]:

$$C(B) = \frac{1}{|B|} \int_{y \in Y} f_{y|a_m}(y) \log_2 \left(\frac{f_{y|a_m}(y)}{\frac{1}{|B|} \sum_{a_m \in A} f_{y|a_m}(y)} \right) dy \quad (5)$$

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

2.3 在 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道中不同集分割方案

下的信道容量

集分割方案是多级编码系统的一个重要组成部分,不同的集分割方案影响着多级编码系统的性能。目前常用的共有三种不同的集分割方案:经典的 UP(Ungerboeck Partitioning)集分割^[3]、BP(Block Partitioning)集分割^[11]、MP(Mixed Partitioning)集分割。UP 经典集分割方法在 AWGN 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;BP 与 UP 有完全不同的构思,且是一种可自适应 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;MP 是 UP 与 BP 的混合。由前面所述,可分别计算出在不同信道下,采取三种不同集分割方式时的各等价信道的信道容量^[11],由信道容量规则,表 1、表 2 分别给出了 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道下,三种不同集分割方案、8ASK 数字调制、采用 MSD 译码,总率为 $R = 2.5$ bits/symbol 和 $R = 2$ bits/symbol 时的各级率设计值。

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 ($R = 2.5$)

	AWGN 信道	Rayleigh 衰落信道
UP	$C_0 = R_0 = 0.5$	$C_0 = R_0 = 0.59$
	$C_1 = R_1 = 1$	$C_1 = R_1 = 0.91$
	$C_2 = R_2 = 1$	$C_2 = R_2 = 1$
BP	$C_0 = R_0 = 0.95$	$C_0 = R_0 = 0.9$
	$C_1 = R_1 = 0.85$	$C_1 = R_1 = 0.85$
	$C_2 = R_2 = 0.7$	$C_2 = R_2 = 0.75$
MP	$C_0 = R_0 = 0.875$	$C_0 = R_0 = 0.925$
	$C_1 = R_1 = 0.625$	$C_1 = R_1 = 0.65$
	$C_2 = R_2 = 1$	$C_2 = R_2 = 0.925$

表 2 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 ($R = 2$)

	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	$C_0 = R_0 = 0.85$	$C_0 = R_0 = 0.8475$
	$C_1 = R_1 = 0.25$	$C_1 = R_1 = 0.35$
	$C_2 = R_2 = 0.9$	$C_2 = R_2 = 0.8025$

3 计算机仿真及结果分析

依照设计 MLC 方案的“信道容量规则”(表 1),选取码长 $n = 127$ 的 BCH 码为分量码,对采取 8ASK 调制方式、MSD 译码的三级 MLC 方案的性能进行了计算机模拟,验证是否按信道容量规则设计出的 MLC/MSD 方案是最佳的,同时也比较了三种不同集分割方案的性能。仿真结果如图 1~4。图 1、图 2

给出了在 AWGN 信道中的性能,总码率为 2.5bits/ symbol,图 3、图 4 给出了在 Rayleigh 信道中的性能,总码率为 2bits/ symbol. 在图 1、图 3 中,对应每一种集分割方案,均分别有三种 MLC/MSD 的设计方案,即 CODE1, CODE2, CODE3. 图 1 中 CODE1 和 CODE3 方案均不在“信道容量”设计规则上, CODE2 方案则满足表 1 中所给出的“信道容量规则”. 图 2、4 则比较了在满足各自“信道容量规则”情况下,采用三种不同集分割时 MLC 方案的性能.

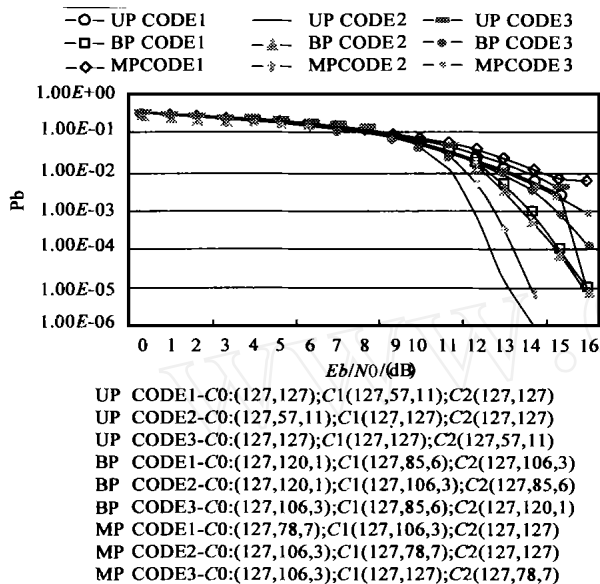


图 1 AWGN 信道,8ASK,不同分割,MLC/MSD 方案,不同率设计时的性能比较(CODE2 满足“信道容量规则”)

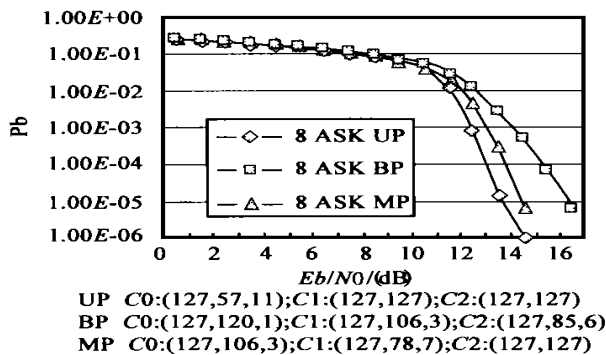


图 2 AWGN 信道,8ASK,MLC/MSD 方案,不同集分割满足信道容量设计规则的性能比较

3.1 AWGN 信道中 MLC 方案的非欧度量

由上面在 AWGN 信道中的计算机仿真结果图 1、图 2 可见:

(1)根据“信道容量规则”设计出的 MLC/MSD 多级编码方案,在相同的频带有效性时是性能最佳的. 如图 1 所示,对于任意的集分割方式, CODE2 的性能均优于 CODE1 和 CODE3 的性能,而且此性能优越性在 E_b/N_0 较大时表现的更为明显. 这从根本上改变了以往许多文献中在设计 MLC/MSD 方案时的“穷举法”和“试探法”,为系统选取最优方案给出了一个设计的“度量”或“判据”;

(2)由图 2 可见,在满足各自“信道容量设计规则”情况下,采用 UP 分割的 MLC 方案的性能是最好的. 所以本文提出的适用于 AWGN 信道的 MLC 系统的一种非欧度量:“信道容量规则”+“UP 映射”与 Ungerboeck 提出的欧氏度量(TCM 的 UP 规则)是一致的,即:只要 MLC 系统各级分量码的码率按“信道容量规则”设计,且采用 UP 映射,即可取得系统功率有效性与频带有效性的最佳.

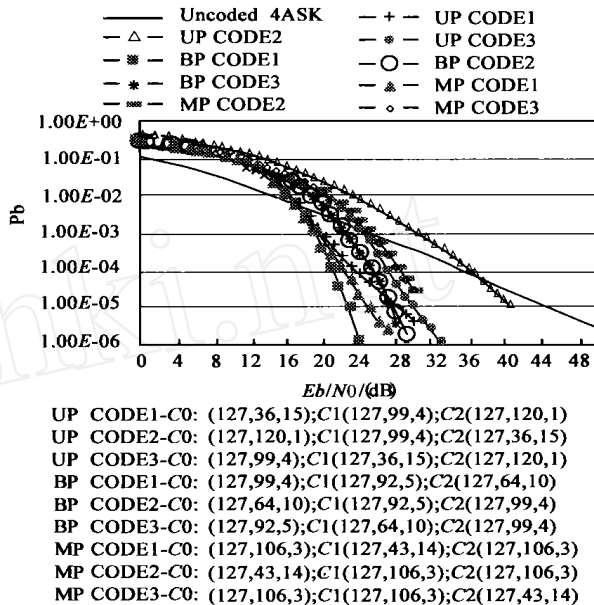


图 3 Rayleigh 信道,8ASK,UP 分割,MLC/MSD 方案,不同率设计时的性能比较(CODE1 满足“信道容量规则”)

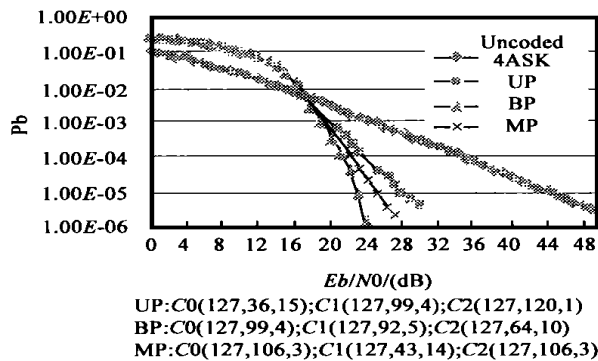


图 4 Rayleigh 信道,8ASK,MLC/MSD 方案,不同集分割满足信道容量设计规则的性能比较

3.2 Rayleigh 衰落信道中 MLC 方案的非欧度量

由上面在 Rayleigh 信道中的计算机仿真结果图 3、图 4 可见:

(1)同在 AWGN 信道中相似,“信道容量规则”得到验证. 不论采用何种集分割方法,当多级编码方案 MLC/MSD 的各级分量码的码率按“信道容量规则”设计时,系统的性能才是最优的,它为寻找最优多级编码系统在移动衰落信道中的“度量”或“判据”准备了必要的前提条件;

(2)同相同频带有效性的未编码 4ASK 曲线的比较可见:不按“信道容量规则”设计的方案,性能有可能比未编码的

4ASK还差,没有编码增益.如图3中的UP CODE2方案;

(3)由图4可见,在满足各自“信道容量规则”情况下,采用BP分割的MLC方案的性能是最优的.所以“信道容量规则”加上“BP映射”构成了适用于Rayleigh衰落信道的最优多级编码抗干扰方案的一种非欧度量.即:只要采用BP集分割对8ASK信号空间进行分割、映射,然后对多级编码方案的每一级分量码的率按“信道容量规则”要求的值进行配置与设计,即可达到最佳的纠错抗干扰效果.这一新的设计思路、设计规则,对多年来未得到很好解决的在衰落信道中的非欧度量问题是一种有意义的尝试;

(4)经过最优设计规则设计的系统,性能改善明显,有较高的编码增益:当分量码的各级码长为127时,采用BP分割,相对于未编码的4ASK而言,有大约21.5dB的编码增益.

4 结论

本文以对信道容量规则 and 不同映射规则的分析为基础,提出了移动衰落信道中设计多级编码系统的一种“非欧度量”,即:“信道容量规则”+“映射规则”.并在此基础上,研究了MLC/MSD系统的性能.由模拟分析及结果,可得以下结论:

(1)在AWGN信道中,只要MLC系统各级分量码的码率按“信道容量规则”设计,且采用UP映射,系统的性能就能达到最佳.即:“信道容量规则”+“UP映射”构成了适用于AWGN信道的MLC系统的一种非欧度量:它可替代构造CM(包括TCM,MLC)好码的欧氏度量;

(2)在Rayleigh衰落信道中,只要采用BP集分割对8ASK信号空间进行分割、映射,然后对多级编码方案的每一级分量码的率按“信道容量规则”要求的值进行配置与设计,即可达到最佳的纠错抗干扰效果.所以“信道容量规则”加上“BP映射”可构成适用于Rayleigh衰落信道的最优多级编码抗干扰方案设计的一种非欧度量.

(3)以此为基础,提出一种新的、具有优良频带有效性和功率有效性、并可自适应移动衰落信道的MLC/MSD方案,其系统参数为: $n = 127$,8ASK-MLC/MSD,BP分割方式.MLC中三级分量码组成为: $C_0 = \text{BCH}(127, 99, 4)$, $C_1 = \text{BCH}(127, 92, 5)$, $C_2 = \text{BCH}(127, 64, 10)$.性能:在频带有效率为2 bit/symbol时,相比未编码的4ASK调制有21.5dB的编码增益(当 $P_b = 10^{-5}$ 时),结果可见图4.

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 and I. Csajka. On improving data-link performance by increasing channel alphabet and introducing sequence Coding [A]. Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory [C], Ronneby, Sweden, June 1976.
- [3] G. Ungerboeck. Channel coding with multilevel/phase signals [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1982, 28(1): 55 - 67.
- [4] H. Imai and S. Hirakawa. A new multilevel coding method using error

correcting codes [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1977, 23(5): 371 - 377.

- [5] C. W. Sundberg and N. Seshadri. Coded modulations for fading channels: an overview [J]. Europe Trans. Telecommun. (ETT), 1993, 4(3): 309 - 324.
- [6] E. Biglieri and et al. Introduction to Trellis-Coded Modulation with Applications [M]. New York: Macmillan, 1991.
- [7] C. Schegel and D. J. Costello. Bandwidth efficient coding for fading channels: code construction and performance analysis [J]. IEEE Journal on SAC, 1989, 7(9): 1356 - 1368.
- [8] U. Wachsmann, R. F. H. Fischer and J. B. Huber. Multilevel codes: theoretical concepts and practical design rules [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1999, 45(5): 1361 - 1391.
- [9] A. R. Calderbank. Multilevel codes and multistage decoding [J]. IEEE Trans. Comm., 1989, 37(5): 222 - 229.
- [10] N. Seshadri and C. W. Sundberg. Multilevel trellis coded modulations for the rayleigh fading channel [J]. IEEE Trans. Comm., 1993, 41(9): 1300 - 1310.
- [11] Lin Zhang and B. Vucetic. Multilevel block codes for rayleigh fading channels [J]. IEEE Trans. Comm., 1995, 43(1): 24 - 31.
- [12] R. G. Gallager. Information Theory and Reliable Communication [M]. John Wiley Sons, Inc., New York, 1968.
- [13] J. Huber and Udo Wachsmann. Capacity of equivalent channels in multilevel coding schemes [J]. Electron. Lett., 1994, 30(7): 557 - 558.
- [14] J. G. Proakis. Digital Communications [Z]. Third Edition, McGraw-Hill, 1995.

作者简介:



袁东风 博士,1958 出生,山东大学电子工程系教授,系主任,中国通信学会、中国电子学会高级会员,山东省电子学会常务理事.1988 年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,并有多篇文章被选入“国际学术榜”.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、多级编码调制(MLC)、位交织编码调制(BICM)及 Turbo Code 技术等.



姚旗 1975 出生,山东大学电子工程系硕士研究生.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.