

Rayleigh 衰落信道中多级编码调制的不等错误保护

袁东风¹, 韩 冰², 曹志刚³

(1. 山东大学电子工程系, 济南 250100; 2. 东南大学电子工程系, 南京 210096; 3. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 本文研究了 Rayleigh 衰落信道中以信道容量规则为设计准则的多级编码调制系统的不等错误保护性能的实现及其改进. 在详细分析了多级编码调制的不等错误保护原理的基础上, 设计了一种针对 8ASK 调制的非均匀信号星座. 理论分析与计算机仿真均表明, 非均匀信号星座的设计能够增强多级编码调制系统的不等错误保护能力, 在不展宽频带的前提下有效地提高 Rayleigh 衰落环境下数字通信系统的传输质量.

关键词: 不等错误保护; 多级编码调制; 信道容量规则; Rayleigh 衰落信道

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04 0495-04

Unequal Error Protection of Multilevel Coded Modulation in Rayleigh Fading Channels

YUAN Dong-feng¹, HAN Bing², CAO Zhi-gang³

(1. Dept. of Electronic Engineering, Shandong Univ., Jinan 250100, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China;

3. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract: The unequal error protection of multilevel coded modulation based on capacity rule in Rayleigh fading channels is investigated. After the unequal error protection of multilevel coded modulation is discussed in detail, a non uniform signal constellation applied to 8ASK modulation is designed. Both theoretical analysis and computer simulation show that non uniform signal constellation can improve unequal error protection ability of multilevel coded modulation system. It improves transmission quality in Rayleigh fading environment and saves bandwidth at the same time.

Key words: unequal error protection; multilevel coded modulation; capacity rule; Rayleigh fading channels

1 引言

以信道容量规则为设计准则的多级编码调制^[1], 是一种将信道编码与调制技术结合的不展宽频带的高效编码调制方案, 该方案在频带受限的移动衰落信道中具有广泛的应用前景. 我们针对多级编码调制的前期工作主要包括: 系统的高效信号星座设计^[2]、自适应分等级广播^[3]和准最佳译码方案^[4]等方面. 本文研究的是多级编码调制的另一个具有很强的应用前景的特性: 不等错误保护.

在实际的数字通信传输系统中, 不同的数据对信道干扰的敏感程度往往是不一样的, 用户对不同数据的保真度要求也经常是不一样的, 因此, 如何实现对移动衰落信道中数据传输的不等错误保护这一课题有着很大的应用前景, 它是在下一代移动通信中, 高质量传输多媒体业务必须解决的关键问题之一. 近年来国内外已有许多研究学者开始关注这一研究领域, 并从不同的角度做了大量研究工作^[5, 6]. 本文在先期工作的基础上, 研究了基于信道容量规则的多级编码调制系统

的不等错误保护性能. 研究结果表明, 多级编码调制系统本身就能够提供不等错误保护, 而非均匀信号星座的设计则显著地改进了系统的不等错误保护的能力. 理论分析之后, 我们进行了计算机仿真, 并将该方法应用于 Rayleigh 衰落信道中的图像传输, 取得了十分理想的效果.

2 多级编码调制

多级编码调制的首次提出是在 1977 年^[7], 但是它受到广泛的关注则是在九十年代中期伴随着信道容量规则的提出和应用而开始的. 图 1 所示是一个三级编码、8ASK 调制系统的原理图. 在信道编码器部分, 各级编码器分别对相应的信息位独立编码, 编码后的码长相等, 各级编码器的独立性为数据传输的不等错误保护提供了可能.

编码之后的码符号必须经过调制成为离散的信号点之后才能在信道中传输. 各级码符号的组合与信号点之间的对应关系又叫做信号集分割, 常见的分割方式有三种: 自然分割、

收稿日期: 1999-12-06; 修回日期: 2000-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69872020); 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); 东南大学移动通信国家重点实验室访问学者基金(No. V-99004)

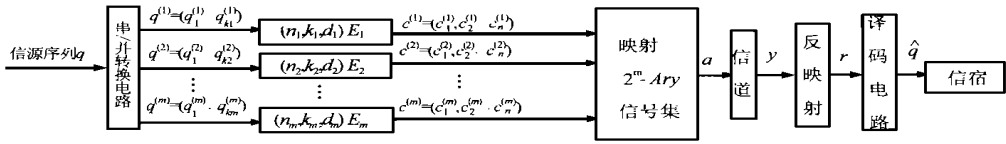


图1 多级编码调制系统原理图

分组分割和混合分割, 本文采用分组分割, 因为已有研究结果表明, 分组分割是 Rayleigh 衰落环境下的最佳分割方案^[2]. 分组分割的三级编码 8ASK 调制的 8 个信号点与三级码符号的对应关系如图 2 所示, 从图中可以直接看出多级编码调制的不等错误保护特点.

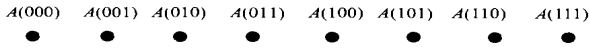


图2 8ASK 分组分割信号星座图 $A(x^0 x^1 x^2)$

信号在经过信道传输后, 必然受到噪声的影响使接收端的解调器发生错误判决, 其中发生相邻信号点的判决错误的可能性最大. 由图 2 可以看出, 对第 0 级来说, 前 4 个信号点的 x^0 均为 0, 后 4 个信号点的 x^0 均为 1, 所有相邻信号点中只有第 4 个信号点与第 5 个信号点对应的 x^0 发生变化, 这说明如果某一信号由于噪声的影响而落入相邻信号点的判决区, 导致解调器判决错误, 则只有第 4 个信号点落入第 5 个信号点的判决区或者相反的时候, 第 0 级的码符号 x^0 才会出错, 而对于其余可能的 12 种情况, x^0 不会出错.

对第 2 级的码符号 x^2 , 从图 2 中可以看出, 只要传输信号落入相邻信号点的判决区, 则 x^2 必然发生错误, 即 x^2 的错误概率为 1. 采用同样的分析方法, 可知第 1 级的码符号 x^1 的判决错误概率介于 x^0 与 x^2 之间. 因此, 对于采用分组分割的等码率三级编码调制系统来说, 第 0 级的错误保护度最高, 第 1 级次之, 第 2 级的最低.

3 信道容量规则

信道容量规则是最近提出的一种多级编码的设计依据^[8]. 所谓信道容量规则, 就是指多级编码系统的信道容量, 等于各等量信道的信道容量之和, 用公式表示就是:

$$C = \sum_{i=0}^{l-1} C^i, \quad i = 0, 1, \dots, l-1 \quad (1)$$

根据香农信息论中的信道编码定理, 只要各级码率 R^i 无限接近其信道容量 C^i , 即 $R^i = C^i$, 则理论上可以达到无误码传输. 文中在仿真中选取码率就是以该定理为依据.

等量信道的信道容量的计算十分简单. 首先用 $A_c e^{j\theta}$ 表示所有信号点的一个子集, $C(A_c e^{j\theta})$ 是这个子集的信道容量; 再令经过多级编码形成的地址矢量为 $X = (x^0, x^1, \dots, x^{l-1})$, 经过映射之后的信号集为 $A = \{a_m | m \in \{0, 1, 2, \dots, 2^l - 1\}\}$, 而接收信号集为 $Y = \{y_m | m \in \{0, 1, 2, \dots, 2^l - 1\}\}$. 从信息论的角度看, 从 X 到 A 是一个无损变换, 所以传输信号 $a \in A$ 与接收信号 $y \in Y$ 间的平均互信息为:

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

再将链规则^[9]应用于此平均互信息中, 有:

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

$$+ I(Y; X^{l-1} | X^0 X^1 \dots X^{l-2}) \quad (3)$$

又因为有:

$$I(Y; X^i, \dots, X^{l-1} | X^0 \dots X^{i-1}) = I(Y; X^i | X^0 \dots X^{i-1}) + I(Y; X^{i+1} \dots X^{l-1} | X^0 \dots X^i) \quad (4)$$

由此可求出给定信号星座点先验概率条件下的信道容量 C^i :

$$C^i = I(Y; X^i | X^0 \dots X^{i-1}) = I(Y; X^i \dots X^{l-1} | X^0 \dots X^{i-1}) - I(Y; X^{i+1} \dots X^{l-1} | X^0 \dots X^i) \quad (5)$$

其中的互信息 $I(Y; X^i \dots X^{l-1} | X^0 \dots X^{i-1})$ 可通过对 x^0, \dots, x^{i-1} 的所有可能的组合取统计平均而得到, 即:

$$I(Y; X^i \dots X^{l-1} | X^0 \dots X^{i-1}) = E_{x^0 \dots x^{i-1}} \{ I(Y; X^i \dots X^{l-1} | X^0 \dots X^{i-1}) \} \quad (6)$$

据此可进一步得出:

$$\begin{cases} C^i = E_{x^0 \dots x^{i-1}} \{ C(A(x^0 \dots x^{i-1})) \} - E_{x^0 \dots x^{i-1}} \{ C(A(x^0 \dots x^i)) \}, & i = 1, \dots, l-1 \\ C^0 = C(A) - E_{x^0} \{ C(A(x^0)) \}, & i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)即为等量信道容量的计算公式.

当 $l = 3$ 时, 对于 $i = 0, 1, 2$ 时的 C^i 分别为:

$$\begin{cases} C^0 = C(A) - E_{x^0} \{ C(A(x^0)) \}, & i = 0 \\ C^1 = E_{x^0} \{ C(A(x^0)) \} - E_{x^0 x^1} \{ C(A(x^0 x^1)) \}, & i = 1 \\ C^2 = E_{x^0 x^1} \{ C(A(x^0 x^1)) \} - E_{x^0 x^1 x^2} \{ C(A(x^0 x^1 x^2)) \}, & i = 2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{令} \begin{cases} C(A) = C \\ C' = E_{x^0} \{ C(A(x^0)) \} \\ C'' = E_{x^0 x^1} \{ C(A(x^0 x^1)) \} \\ C''' = E_{x^0 x^1 x^2} \{ C(A(x^0 x^1 x^2)) \} \end{cases} \quad (9)$$

则式(8)可改写为:

$$\begin{cases} C^0 = C - C' \\ C^1 = C' - C'' \\ C^2 = C'' - C''' \end{cases} \quad (10)$$

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^[8]:

$$C(B) = \frac{1}{|B|} \int_{a_m \in B} \sum_{y_l \in B} f_{y_l | a_m}(y) \log_2(f_{y_l | a_m}(y)) \left| \frac{1}{|B|} \sum_{a_m \in B} f_{y_l | a_m}(y) \right| dy \quad (11)$$

式中 $f_{y_l | a_m}(y)$ 是所讨论信道的概率密度函数, 它是对信道不同错误特征的统计表征和描述, AWGN 信道的概率密度函数服从标准的高斯分布, 而对于移动快衰落信道而言, 其幅度的概率密度函数服从 Rayleigh 分布. 因此由式(11)的数值计算, 可求得所有已知概率密度函数的信道容量^[2]. 采用分组分割的总码率为 2.5 比特/符号的三级编码 8ASK 调制系统第 0

级、第 1 级、第 2 级的信道容量分别为 $C_0 = 0.9$, $C_1 = 0.85$, $C_2 = 0.75^{[2]}$ 。从这种对码率的分配上可以看出, 信道容量规则对重点保护的级提供较大的码率, 对非重点保护的级提供较小的码率, 其目的是尽量使得各级的保护度趋于相等, 从而保证系统总的误码率达到最小, 但是却降低了系统的不等错误保护性能。图 3 所示为依据信道容量规则的多级编码系统的

255 比特的 BCH 码。依据信道容量规则, 三级对应的码字分别为: 第 0 级(255, 231, 3), 第 1 级(255, 215, 5), 第 2 级(255, 191, 8), 这三种码是最接近信道容量规则要求的码字。图 3 中 pb_0 、 pb_1 、 pb_2 和 pb 分别表示第 0 级、第 1 级、第 2 级的误码率和系统总的误码率。从图中可以看出, 三级的误码率依次升高, 但差别并不明显, 因此有必要设计新的方案来改善不等错误保护性能。

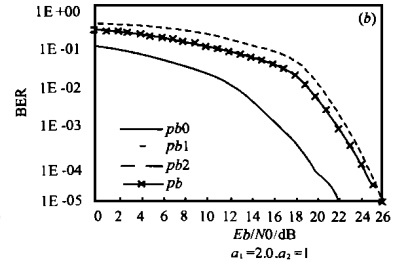
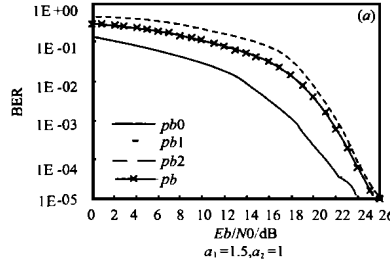
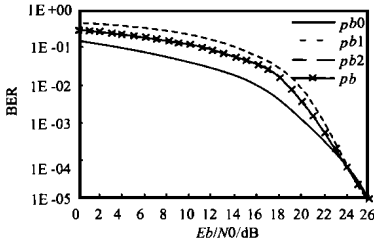


图 3 依据信道容量的多级编码调制的不等错误保护性能

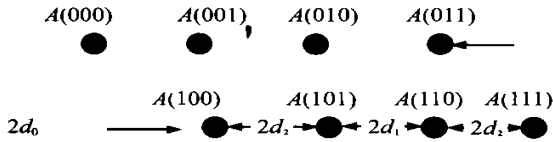


图 4 8ASK 非均匀分组分割信号星座图 $A(x^0, x^1, x^2)$

4 非均匀信号星座的设计

在保持平均信号功率不变的前提下, 如果人为地增大第 4 个信号点与第 5 个信号点之间的距离, 当发生相邻信号点的判决错误时, 信号点所对应的第 0 级码符号 x^0 的错误概率必将由于 4 个信号点与第 5 个信号点的间距增大而进一步降低; 同时, 由于前 4 个信号点与后 4 个信号点的间距都减小了, 信号点所对应的第 1 级码符号 x^1 和第 2 级码符号 x^2 的误码率将相应降低, 故非均匀信号星座的设计在降低了第 0 级的误码率的同时, 升高了第 1 级与第 2 级的误码率, 增强了不等错误保护能力。

图 4 所示为 8ASK 非均匀分组分割信号星座的示意图。定义 $a_1 = d_0/d_1$, $a_2 = d_1/d_2$, 非均匀信号星座的设计十分灵活, 信号点的间距可任意调整, 即 a_1 和 a_2 可以任意取值, 但是考虑到在满足基本的不等错误保护的前提下, 应尽量简化系统设计, 我们取 $a_1 > 1$, $a_2 = 1$, 从图中即表现为前四个信号点和后四个信号点的间距是均匀的, 只有第 4 个信号点与第 5 个信号点的间距增大。

5 仿真结果及分析

由于非均匀信号星座的设计改变了信号点的分布, 必然影响到信道容量的取值。但是, 由于分割方式并没有变化, 信道容量的变化不大, 因此我们的码率选取与均匀信号星座设计时相同。

图 5 为非均匀分割时各级误码率与总误码率的比较图, 图中的 pb_0 、 pb_1 、 pb_2 和 pb 的含义与图 3 相同。从图中可以看出: (1) 随着 a_1 的增大, 第 0 级的误码率(pb_0) 越来越小, 在误码率为 10^{-5} 时, $a_1 = 1.5$ 比均匀分割(图 3)有 2dB 的编码增

益; $a_1 = 2$ 比 $a_1 = 1.5$ 又有 2dB 的编码增益; (2) 第 1 级对 a_1 变化的反应不明显, 其误码率一直保持与总误码率近似相等。这也说明信号集的非均匀分割对系统总误码率的影响并不明显; (3) 在中信噪比区域, 第 2 级的非均匀分割的误码率要高于均匀分割的。如在信噪比为 20dB 处, 均匀分割时误码率约为 7.5×10^{-3} , $a_1 = 1.5$ 时误码率约为 9.5×10^{-3} , $a_1 = 2$ 时误码率约为 1.5×10^{-2} , 这说明, 非均匀分割是以降低低保护级的性能为代价, 来换取高保护级数据的高质量传输。

6 不等错误保护在图像传输中的应用

作为多级编码调制的不等错误保护的应用, 我们采用 256×256 个像素点的 Lenna 图像作为待传输的静态图像信源。在传输之前, 必须对图像根据不等错误保护的要求进行分割。假定图 6 中的正方形区域就代表文中的待传输图像, 将它分成了图示的三部分。其中, 空白部分对应图像中人物的面部及身体区域, 应将这部分送入第 0 级进行重点保护; 灰色部分对应图像中人物的服饰等装饰部分, 其错误保护的要求稍低于第一部分, 应将这部分送入第 1 级进行次重点保护; 剩余的两部分阴影区对应与人物无关的背景区, 对错误保护的要求最低, 应将这部分送入第 2 级进行非重点保护。当然这只是处理信源的一种较简单的方法, 实际上可以根据需要对信源进行任意的分割。

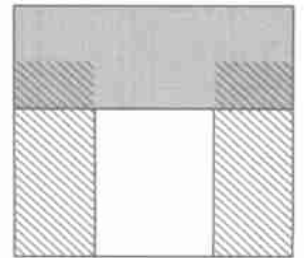


图 6 图像信源分割示意

在图像信源的传输中, 取中信噪比区域, $E_b/N_0 = 20$ dB。图 7(a)~(c) 显示的是均匀分割和两种参数的非均匀分割对图像信源的不等错误保护效果。均匀分割时, 图中人物面部的噪点明显少于其他两部分(图 7(a)), 这体现了 MLC 系统固有的不等错误保护能力; 在进行非均匀分割后, 人物面部的噪点进一步减少, 而另外两部分则有所增加(图 7(b)); 当 $a_1 = 2$ 时, 人物面部的噪点几乎全部消除, 这部分图像的质量非常

高,而另外两部分,尤其是图 6 所示的阴影区对应的部分噪点则明显增加了(图 7(c)).这说明非均匀分割增强了 MLC 系统的不等错误保护能力.图 8 显示的是没有对图像进行分割的

传输效果,此时噪点均匀地分布于整幅图像中.从这四幅图的比较中可以明显地看出,不等错误保护应用于 Rayleigh 衰落信道中的图像传输时产生了令人满意的效果.

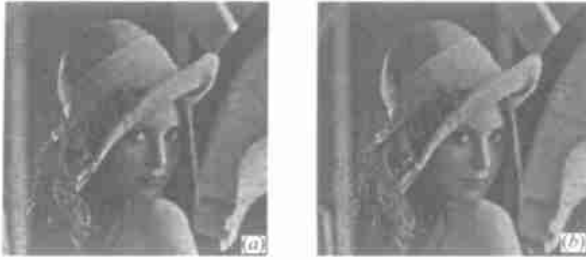


图 7 (a)均匀分割, (b) $a_1=1.5, a_2=1$, (c) $a_1=2, a_2=1$

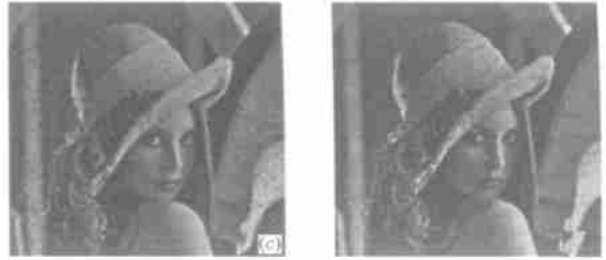


图 8 图像各部分等保护

为了进一步研究不等错误保护对图像的整体传输性能的影响,计算了这 4 幅图像的峰值信噪比,如表 1 所示.

表 1 峰值信噪比

图像	图 7(a)	图 7(b)	图 7(c)	图 8
PSNR	27.226	26.561	25.172	28.859

峰值信噪比 PSNR 可以用下式计算:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(\text{峰值} - \text{峰值})^2}{MSE} \quad (12)$$

其中 MSE 表示每一个象素点的平均误差值:

$$MSE = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [f(x_i, y_j) - f'(x_i, y_j)]^2 \quad (13)$$

通过表 1 可以看出,随着 a_1 的增加,信号的峰值信噪比是下降的,这点从图 5 中也可以看出.尽管如此,当 a_1 介于 1.5 与 2 之间时,峰值信噪比的下降与不等错误保护的改善相比可以忽略,另外,采取中值滤波,可以模糊噪点与信号点的界限,从而进一步改善接收图像的直观显示效果.

本文的研究对象为静态图像,如何将 MLC 系统的不等错误保护应用于动态压缩图像的传输中是我们正在研究的课题.

参考文献:

- [1] Wachsmann, U., et al. Multilevel codes: Theoretical concepts and practical design rules [J]. IEEE Trans., 1999, IP 45(5): 1361-1391.
- [2] Yuan D. F., Cao Z. G., Schill D. W. and Huber, J. B., 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.
- [3] Schill D. W., Yuan D. F., Huber J. B. Efficient hierarchical broadcasting using multilevel codes [A]. Proc. of IEEE ITW'99 [C]. Greece, June 1999.

- [4] 袁东风, 韩冰. 多级编码的两种不同译码方法的性能比较 [J]. 山东大学学报(自然科学版), 1999, 34(4): 71-79.
- [5] Salim Manji and Narayan B. Mandayam. Variable rate channel coding and enhanced interleaving for image transmission using an outage criterion [A]. Proc. of IEEE WCNC'99 [C], USA, 1999.
- [6] Cao L. and Chen C. W. Multiple hierarchical image transmission over wireless channels [A]. Proc. of IEEE WCNC'99 [C], USA, 1999.
- [7] H. Imai, S. Hirakawa. A new multilevel coding method using error-correcting codes [J]. IEEE Trans., 1977, IP 23(3): 371-377.
- [8] Huber J. B. and Wachsmann U., Capacities of the equivalent channels in multilevel coding schemes [J]. IEE Electronics Letters, 1994, 30(7): 557-558.
- [9] Cover T. M. and Thomas J. A. Elements of Information Theory [M]. John Wiley & Sons, New York, 1991.

作者简介:



袁东风 1958 年 4 月出生,工学博士,山东大学电子工程系教授,博士生导师.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.1993~1994 年赴加拿大 Calgary 大学任访问教授,1998~1999 年赴德国 Erlangen 大学任访问教授.已在多种学术刊物及国际会议上发表论文 140 余篇.主要研究领域有:信息理论与技术、纠错编码抗干扰技术、最新编码调制结合抗干扰(TCM、MLC、MSD)技术、时空编码调制(Space-Time Coded Modulation)技术、Turbo Code 技术、移动多媒体图像传输环境下的不等保护度研究(UEP)等.

韩冰 1975 生,2000 年 7 月于山东大学电子工程系通信专业获工学硕士学位,现为东南大学电子工程系博士研究生.主要研究方向为移动通信、扩频码分多址技术等.已在国际会议和国内核心期刊上发表论文多篇.