

# 基于已知特性信道的 QAM 系统的仿真和性能分析

宋耀莲, 邵玉斌, 张起晶, 江晶

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 论述了正交幅度调制 (QAM) 的原理和特性, 并在已知特性的通信信道上进行 QAM 调制和解调仿真, 对具有符号间干扰 (ISI) 的信道进行线性均衡和判决反馈均衡来提高 QAM 调制解调的性能. 通过对得到的仿真结果进行比较和分析, 在理论上, 得到合理设计 QAM 系统的方法. 这些分析方法和得到的结论对工程中的 QAM 调制解调系统实现具有一定的价值.

**关键词:** 正交幅度调制; 线性均衡器; 符号间干扰; 信噪比; 调制解调

中图分类号: TN 915.05

文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2006)01-0057-05

## Simulation and Performance Analysis on the System of Quadrature Amplitude Modulation and Demodulation Based on the Known Channels

SONG Yao-lian, SHAO Yu-bin, ZHANG Qi-jing, JIANG Jing

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract** The basic theory and performance of the quadrature amplitude modulation and demodulation is described. Through the known channels, quadrature amplitude modulation and demodulation is simulated. When the intersymbol interference exists in the channels, it is necessary to adopt linear equalizer or decision-feedback equalizer to improve the performance of the system. Then the results are analyzed and compared in order to design the applicable system, which are valuable to the system of quadrature amplitude modulation and demodulation.

**Key words** quadrature amplitude modulation and demodulation; linear MSE equalizer; the intersymbol interference; signal-to-noise; modulation and demodulation

### 0 引言

在通信中, 数字基带信号不可能在诸如无线信道、光纤信道等传输媒质中直接传输. 与模拟信号一样, 必须经调制后才能在这些媒质中传输. 信号在传输过程中需要占用一定的带宽, 且数字信号传输比模拟信号传输对带宽的要求更高. 在通信高速发展的今天, 随着各种增值业务的不断产生, 对通信质量要求越来越高, 使信号传输对频带需求也越来越多, 但由于技术和频带资源等的限制, 要在有限的带宽内, 在不影响原有的业务的情况下, 实现传输大数据量的音频、视频信号, 必须采用特殊的调制方式来解决有限带宽和大量数据传输之间的矛盾. QAM 是相位和幅度联合的调制方式, 综合了幅移键控 (ASK) 和相移键控 (PSK) 的优点. 采用多进制正交幅度调制 (MQAM) 可以提高信息传输速率, 且 MQAM 在频带利用率和接收端误译码率等指标上, 比单一调制正弦波的一个参数的调制方式要优越得多, 有效地缓解了传输网络的带宽矛盾. 目前, QAM 在中、高速调制解调器中得到了广泛应用, 如: 在大、中容量的微波通信、非对称数字用户环路 (ADSL)、数字电视广播-有线方式 (DVB-C) 和视频点播 (VOD) 等等通信系统中使用. 本文在参考文献 [1] 的基础上, 对星座图映射理论进行了进一步改进, 用同一算法仿真实现任意进制的 QAM 星

收稿日期: 2005-07-15

第一作者简介: 宋耀莲 (1977~), 女, 硕士研究生. 主要研究方向: 通信系统与个人通信网络技术.

E-mail: syl719@163.com; songyao.lian.studen@sina.com

座图,并验证了公式(4)适合任意进制的 QAM 调制.同时,结合线性均衡和判决反馈理论,对已知特性的信道来仿真 M 进制 QAM,并对仿真结果进行分析.

## 1 正交幅度调制(QAM)原理

由信息序列  $\{a_k\}$  形成的两个分离的  $k$  比特符号同时加在两个正交载波  $\cos\omega_c t$  和  $\sin\omega_c t$  上,称为正交 PAM 或 QAM,调制信号波形可表示为<sup>[1,6]</sup>:

$$S_m(t) = P_m \cos\omega_c t + Q_m \sin\omega_c t \quad (1)$$

其中:  $m = 1, 2, \dots, M$ .  $M$  为正交幅度调制的调制状态数 ( $M = 2^n$ ,  $n$  为一正整数,表示每个码元代表的比特位数).调制信号式由两路相互正交的载波叠加而成的,两路载波分别被两组离散的振幅序列  $\{P_m\}$ 、 $\{Q_m\}$  进行幅度调制. MQAM 调制框图如图 1 所示.首先把输入序列经过串/并转换

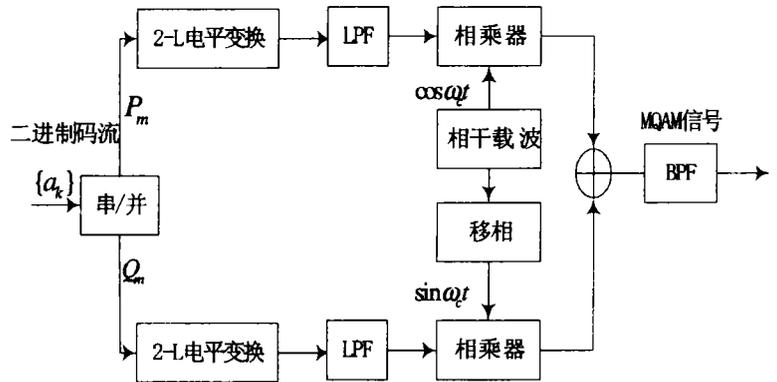


图1 MQAM调制器

Fig.1 MQAM modulator

分成两路,在根据星座图进行  $2-L$  电平转换,其中  $L = \sqrt{M}$  是每路的电平幅度个数,然后进行低通滤波和载波调制,把两路调制后的信号相加就是公式(1)所示的调制信号.图 2 是 MQAM 解调框图.假设信道是理想信道,在无噪声的情况下,图 2 的输入是经过信道的已调信号分别与两路正交载波相乘,两路信号分别表示为如公式(2)、(3)所示<sup>[5]</sup>.然后两路信号分别进行低通滤波除去高次谐波,再经抽样判决得到  $L$  个电平后,经  $L-2$  电平转换得到相应的二进制序列,最后把两路二进制序列进行并/串转换得到输出信号.

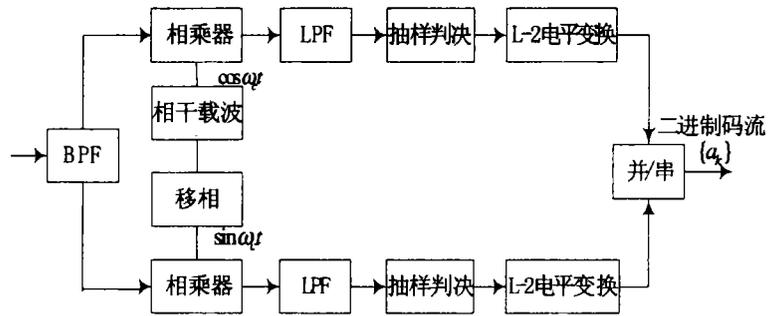


图2 MQAM解调器

Fig.2 MQAM demodulator

$$P(t) = S_m(t) \cos\omega_c t = (P_m \cos\omega_c t + Q_m \sin\omega_c t) \cos\omega_c t = \frac{1}{2}P_m + \frac{1}{2}P_m \cos 2\omega_c t + \frac{1}{2}Q_m \sin 2\omega_c t \quad (2)$$

$$Q(t) = S_m(t) \sin\omega_c t = (P_m \cos\omega_c t + Q_m \sin\omega_c t) \sin\omega_c t = \frac{1}{2}Q_m - \frac{1}{2}Q_m \cos 2\omega_c t + \frac{1}{2}P_m \sin 2\omega_c t \quad (3)$$

## 2 MQAM 系统仿真

由于 QAM 的错误概率主要取决于信号点间的最小距离,所以需要了解信号点星座图<sup>[1]</sup>.调制信号矢量端点在信号空间的坐标系中的分布图称为调制星座图,其中的信号矢量端点称为星象点.常规的信号星座图为矩形和十字型,本文以矩形星座图为例,进行仿真和分析<sup>[2,3]</sup>.如图 3 和图 4 所示,若  $n$  为偶数,则星座图是正方形,若  $n$  为奇数,则星座图为长方形.星座图上的每个点由相位和正交方向上的不同电平表示.星座图越大,则每个符号代表的比特数越多<sup>[1][4][5]</sup>.但是检测电平和相位也越困难.由图 5 可知:要达到与

小星座图相同的 QAM 性能, 需要增加信道的信噪比, 星座图每增大一倍, 信噪比需要增加 4 dB 左右。

对于  $M = 2^n$  的矩形信号星座图, QAM 信号星座等效于在两个正交载波上的两个 PAM 信号, 每个具有  $\sqrt{M} = 2^{n/2}$  个信号点 (当  $n$  为偶数时),  $M$  元 QAM 的错误概率为<sup>[1]</sup>:

$$P_M = 1 - [1 - 2(1 - \frac{1}{\sqrt{M}})]Q(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{\zeta_{av}}{N_0}}) \quad (4)$$

其中,  $\frac{\zeta_{av}}{N_0}$  是平均符号信噪比 (SNR)。理论上公式 (4) 对于  $n$  为偶数时是精确的, 通过仿真结果可看到, 公式 (4) 对于  $n$  为奇数时也适用。图 5 是 MQAM 错误概率的理论值与理想信道中采用 MQAM 调制解调得到的仿真结果的比较, “\* ” 号是仿真得到的结果, “-” 是理论结果。通过比较可知,  $M = 4, 8, 16, 32, 64, 128$  时, 仿真结果与理论结果完全符合, 所以公式 (4) 适用于  $n$  为任意正整数的情况。同时由图 5 可以发现, 相邻两曲线间的距离近似相等, 相差大约 4 dB。一般数字调制方式下, 通常一个码元只携带 1 bit 的信息, 而 QAM 调制的调制信号幅度和相位都携带信息。对于  $M$  进制 QAM, 值越大, 所携带的信息量也越多, 但性能会逐渐下降, 所以要使 MQAM 系统有良好的性能必须增加信道的信噪比。例如: 16QAM 中一个码元携带 4 bit 的信息, 64QAM 中一个码元携带 6 bit 的信息, 大大提高了信道的利用率。但是由图 5 可知, 在  $M = 64$  的情况下, 要达到与  $M = 16$  相同的错误概率, 信道信噪比需要增加大约 8 dB。

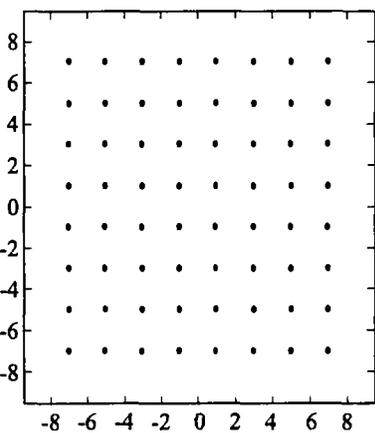


图3 M=64星座图  
Fig.3 M=64 constellation

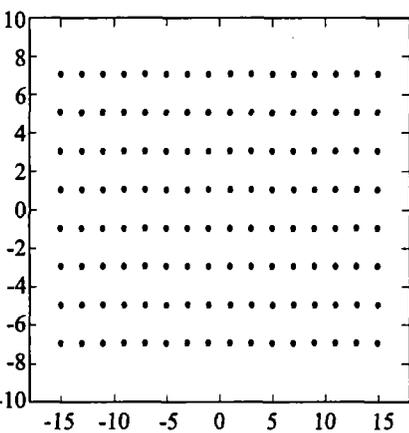


图4 M=128星座图  
Fig.4 M=128 constellation

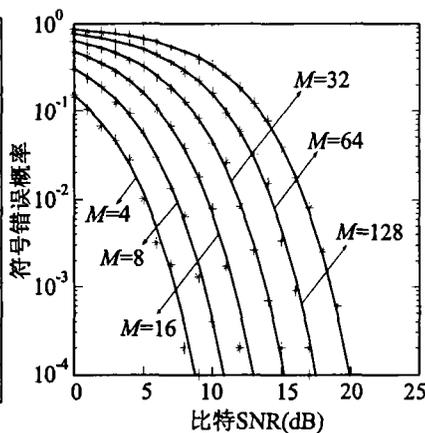


图5 M取不同值时的错误概率  
Fig.5 The error probability with different

虽然 QAM 调制具有充分利用带宽、抗噪声强等特点, 但在具有符号间干扰的信道中, 采用 QAM 调制时, 需要采用均衡技术来辅助, 否则无法进行 QAM 调制解调。本文针对三个已知谱特性不同的信道进行了  $M$  元 QAM 仿真, 通过仿真结果分析信道、均衡和 QAM 三者之间的关系。三个信道的冲激响应分别如图 6 所示<sup>[1]</sup>。

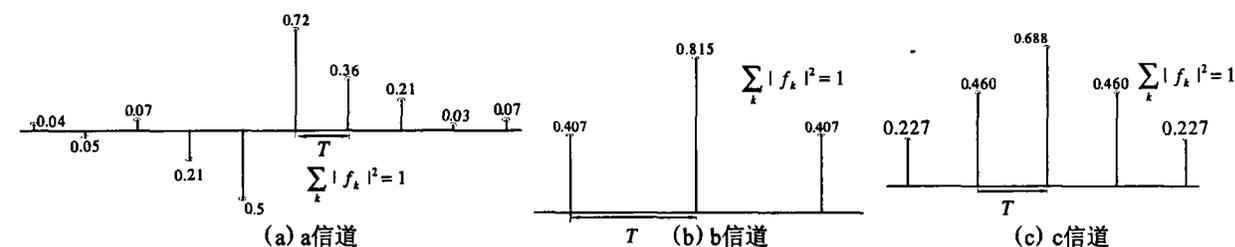


图6 3种离散时间信道特性

Fig.6 Three discrete-time channel characteristics

图 7 是信道 a b c 通过线性均衡后, 进行  $M = 64$  的 QAM 调制解调得到的仿真结果, 可知对于特性较

好且无谱零点的信道 a 来说, 得到的结果接近理论值, 而对具有谱零点的信道 b 和 c 来说, 在信噪比较小的情况下, 性能很差, 完全不能进行通信. 虽然信道 b 具有一个谱零点, 而信道 c 具有两个谱零点, 但在信噪比小的情况下, 二者差别不大, 随着信噪比的增加, 大约在 30 dB 左右, 信道 b 和信道 c 的 MQAM 性能开始变好. 以信道 c 为例, 与信道 a 相比, 其性能相差大约 34 dB. 且信道 b 在线性均衡条件下的 QAM 系统的性能比信道 c 的好. 因此, 在线性均衡条件下, 特性较好且无谱零点的信道的  $M$  元 QAM 系统的性能也较好, 特性差的信道需要高的信噪比, 在实际通信中难以实现, 所以线性均衡不能满足性能差的信道的通信要求.

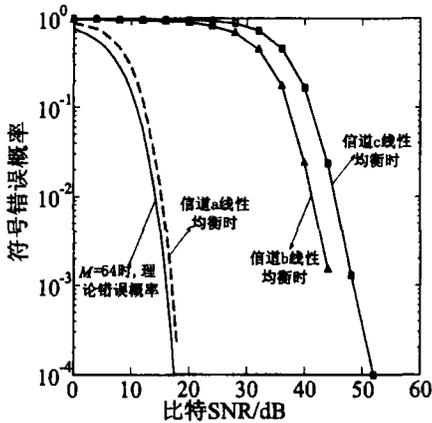


图7 三信道64QAM线性均衡比较  
Fig.7 Performance of 64QAM linear MSE equalization of three channels

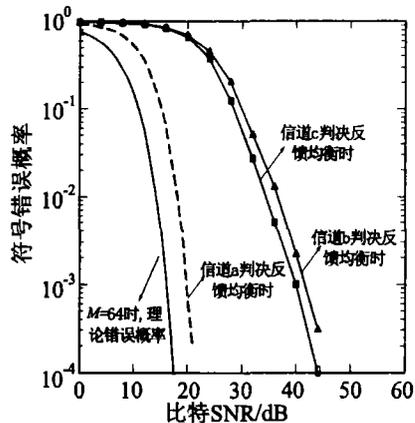


图8 三信道64QAM判决反馈均衡比较  
Fig.8 Performance of 64QAM decision-feedback equalization of three channels

由于在线性均衡情况下, 信道 b 和信道 c 的  $M$  元 QAM 性能较差, 为了提高信道 b 和信道 c 的 QAM 性能, 需要采用更复杂的均衡技术, 在这里采用判决反馈均衡技术. 仍以  $M = 64$  的 QAM 调制解调为例进行仿真, 得到的结果如图 8 所示, 可见信道 b 和信道 c 的 QAM 性能都提高了很多. 信道 a 在判决反馈均衡情况下, 虽然 QAM 系统性能仍比较好, 但比在线性均衡情况下下降了大约 5 dB. 信道 b 和信道 c 在判决反馈均衡情况下, 性能较好的信道 b 的 QAM 性能不如性能最差的信道 c. 由图 9 可以看到, 信道 c 在判决反馈情况下的 64QAM 系统性能, 比相同条件下线性均衡时的性能好 10 dB 左右. 因此, 在 QAM 系统中, 对信道进行判决反馈均衡时, 特性较好的信道的性能不一定好.

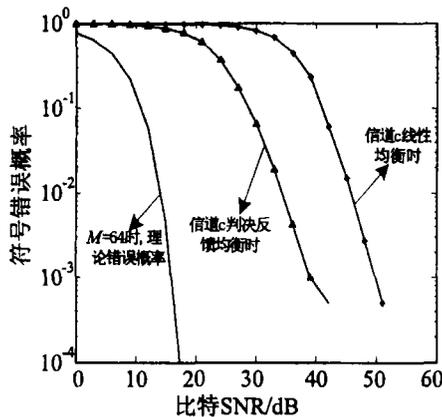


图9 信道c线性均衡和判决反馈均衡比较  
Fig.9 Performance of linear MSE and decision-feedback equalization of three channel c

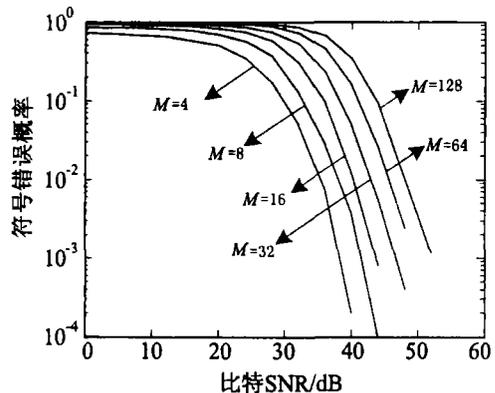


图10 信道c在M取不同的值时的错误概率  
Fig.10 The error probability with different M of channel c

图 10 是信道 c 在线性均衡条件下,  $M$  取不同值时的错误概率. 图 10 与图 5 比较可知,  $M$  元 QAM 系统的性能无论是采用线性均衡, 还是采用判决反馈均衡, 都具有理想信道下 QAM 系统性能的特点. 随着  $M$

的增大, 信息的传输速率提高, 但性能下降, 需要增加信道信噪比; 相邻两曲线间距离近似相等.

### 3 结论

QAM 调制能有效地提高频谱利用率, 调制效率高, 但是信息传输速率越高, 即  $M$  越大, 要求传送途径的信噪比就越高. 所以高速率的 QAM 调制是以牺牲信噪比为代价的. 对不同特性的具有符号间干扰的信道进行 QAM 调制解调时, 得到的性能也不同. 如果仅对信道进行均衡, 判决反馈均衡一定优于线性均衡. 对于特性好的信道来说, 判决反馈均衡性能比线性均衡性能的优势不明显. 无论采用线性均衡, 还是判决反馈均衡, 都是特性好的信道的性能好. 但是在 QAM 系统中进行均衡则不同: 特性好且无谱零点的信道用判决反馈均衡, 性能反而不如线性均衡的性能. 对于特性好的信道, 采用复杂的均衡技术不一定得到好的效果, 但是特性好的信道的判决反馈均衡还是比特性差的信道好得多. 对于特性差且具有谱零点的信道, 信道特性不能完全决定 QAM 系统性能的优劣, 与跟信道冲激响应长度等有关. 要根据实际情况选取合适的均衡技术来改善信道, 或者综合 QAM 和均衡技术的性能选取合适的信道. 总之, 对于特性差的信道, 必须采用复杂的均衡技术, 系统才能得到良好的性能. 因此, 均衡在 QAM 系统中很重要, 系统的复杂性主要来自于均衡器的设计.

### 参考文献:

- [1] PROAKIS J.G. 数字通信·第 3 版 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [2] 约翰·G·普罗克斯, 马苏德·萨勒赫. 现代通信系统 [M]. 刘树棠译. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [3] 龙腾, JOHN M C, 刘峰. xDSL 技术与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [4] 章倩苓. 高性能宽带 QAM 调制/解调器的 VLSI 结构设计研究 [EB/OL]. 复旦大学. 万方数据库.
- [5] 罗伟雄. 16QAM 调制与解调的实现 [EB/OL]. 北京理工大学. 万方数据库.
- [6] CAHN C R. Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication System [J]. IRE Trans Commun, 1960, CS-8: 177-195.
- [7] CAMPOPIANO C N, GLAZER B G. A coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Scheme [J]. IRE Trans Commun, 1962, CS-10: 90-95.