

ATCMQAM 蜂窝系统数据容量分析

李 夏, 李建东

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室信息科学研究所, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出一种将引导码元辅助调制(PSAM: Pilot Symbol Assisted Modulation)与基于 M-QAM 的自适应 TCM 调制(ATCMQAM)相结合的自适应传输体制. 同时建立了一个基于 TDMA/FDMA 蜂窝小区的数据容量解析模型来分析该体制的性能. 数值仿真结果表明: 信噪比估计误差小于 3dB, 归一化运动距离小于 0.4λ (λ 载波波长)时, 该体制的数据容量比固定方式 4PSK 提高 80%.

关键词: 数据容量; 自适应传输; 网格编码调制 (TCM)

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 10-1310-04

Data Capacity of ATCMQAM in Cellular System

LI Xia, LI Jiandong

(National Key Laboratory on ISN, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: An adaptive transmission scheme based on PSAM (Pilot Symbol Assisted Modulation) and Adaptive Trellis Coded M-ary QAM (ATCMQAM) is proposed in this paper. In the following, an analytical model of data capacity in TDMA/FDMA cellular systems is developed for the performance simulation of the scheme. It is shown by simulation result that data capacity of ATCMQAM is 1.8 times that of fixed modulation with 4PSK employed if estimation error is within 3dB and normalized moving distance in a packet period is shorter than 0.4λ with λ being carrier wave length.

Key words: data capacity; adaptive transmission; TCM

1 引言

目前已投入使用的第一、第二代移动通信系统主要是为有连接的话音业务服务. 第三代移动通信系统还将提供无连接的分组数据业务. 而自适应传输是其物理层的关键技术之一^[1]. 其特点是: 根据信道当前状态自适应改变传输参数, 这样就能最大限度地挖掘信道传输潜力. 近几年来许多学者从不同方面围绕着自适应传输的具体应用做了许多工作, 文献[2]将基于 MPSK 的自适应传输 TCM 用于流星余迹通信. 文献[3, 4]分别探讨了自适应系统的传输速率控制策略以及蜂窝系统传输速率的最优方案. 文献[5, 6]采用引导码元辅助调制 PSAM 来克服多进制正交调制在无线传输中的幅度、相位畸变.

本文提出一种新的自适应传输体制用于无线通信, 它将 PSAM 与以 (2, 1, 7) 卷积码为核心的自适应 TCM 调制 (ATCMQAM: Adaptive TCMQAM) 相结合, 并采用文献[7]中提出的数据容量概念, 建立了以平坦 Rayleigh 衰落为传播特性的蜂窝小区数据容量解析模型来分析该体制的性能.

2 蜂窝小区数据传输特性

蜂窝小区中, 数据传输信道的质量受移动用户 MDU (Mo-

bile Data User) 所处位置的直接影响, 其时间变化规律与 MDU 移动特性有关.

2.1 信号功率的分布

较长区间内 MDU 的接收功率主要由路径损耗、阴影效应决定. 在一个小区内, x 表示一个给定的 MDU 的位置, 对于各向同性的小区, 它等于 MDU 与基站的距离. 如果只考虑路径损耗, 平均接收功率为 $S(x) = S_0 x^{-4}$, 式中 S_0 是移动台发送功率.

在短区间内信号受到快衰落的影响. 对于一个平坦 Rayleigh 衰落信道, 接收信号 $y = ce^j\theta s + N$, s 是发送信号, $ce^j\theta$ 是信道引起的乘性干扰. y 的幅度快衰落符合 Rayleigh 分布, 其概率密度函数 (PDF):

$$p(y) = \frac{y}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其幅度累积分布 (CDF):

$$P(y < a) = 1 - \exp(-a^2/2\sigma^2) \quad (2)$$

接收信号的信干比 Γ 的 PDF 为:

$$p_{\Gamma}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\Gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\Gamma}}\right) \quad (3)$$

其中 $\bar{\Gamma} = \bar{P}/N$, 即信噪比平均值, 接收信号的平均功率为

$$\bar{P} = 2\sigma^2.$$

2.2 信号功率的时间变化

移动信道的电平通过率为^[8]: 信号包络在单位时间内以正斜率通过某一规定电平 a 的平均次数, $N(a) = \sqrt{2\pi/\bar{P}} \cdot f_d \exp(-a^2/\bar{P})$, 其中 $f_d = \frac{v}{\lambda}$ 是移动台的最大多普勒频移, v 是移动台速度, λ 是载波波长, $\bar{P}$ 是平均接收功率. 信号包络 γ 的平均非衰落持续时间, 即 γ 保持不低于电平 a 的平均时间为 $T(a) = \frac{1 - P(r \leq a)}{N(a)}$, 将式(2)代入得:

$$T(a) = \frac{1 - P(r \leq a)}{N(a)} = \frac{\exp(-a^2/\bar{P})}{N(a)} = \sqrt{\frac{\bar{P}}{2\pi}} \frac{1}{f_d} \quad (4)$$

由以上分析, 蜂窝系统的无线信道质量变化具有时间相

3.2 ATCMQAM 方案及码率指定

基于 M 进制正交幅度调制 M QAM 的网格编码调制 (Trellis coded Modulation) 将纠错编码与调制相结合, 具有较高的频谱利用率. ATCMQAM 使用一个 $1/2$ 卷积码作为核心编码器, 其输出作为集分割的集选择; 与可变宽度未编码比特共同进行码元映射. 因此, ATCMQAM 有一个固定的状态转移网格, 每一次状态转移所包含的并行路径可能不同. 其结构如图 1 所示.

4 数据容量分析

影响自适应传输系统性能的因素有: 自适应传输方案、信道质量检测精度、数据传输中用户移动特性、信息速率调整策略、重传策略等等. 数据容量定义为每个信道的最大平均数据通过量, 用数据容量标准可对不同的方案进行合理比较.

4.1 数据容量模型

这里主要考虑单一小区、无功率控制的 TDMA/FDMA 系统. 由于数据业务对误码比较敏感, 所以双工信道中数据传输常包含一个认证、反馈、重传机制.

假设: $f(x)$ 表示移动用户的位置分布; 在小区中每一点的信道质量为 $\Gamma(x)$; 发送端估计为 $\hat{\Gamma}(x)$. 发送端采用数据速率指定算法 $Q[\hat{\Gamma}(x)]$, 自适应改变调制方式及编码方案, 从数据速率集合 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, $0 < q_1 < q_2 < \dots < q_n < \infty$ 中选择一种 q_i 作为发送使用. 式中 q_i 表示每符号所含的信息比特数目, 对应信道质量门限为 $\Gamma_{th} = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n\}$. 在 x 点取 q_i 的条件概率为:

$$p_i(x) = P\{Q[\hat{\Gamma}(x)] = q_i | x\} \quad (5)$$

只有分组传输期间所有点的信道质量都满足 q_i 对应的 Γ_i 的要求, 传输才是可靠的. 分组传输错误的概率为 $P_R(x, q_i)$, 这时 MDU 从 Q 中再选择一个用作重传. 一个简单、可靠的重传策略为: 每当 MDU 发现一个错误分组时, 它便以最低数据速率 q_1 (抗干扰能力最强) 再发送该分组. 如果考虑多次发送, 分组的平均速率实际上要小于它成功传输的速率. 用 $\alpha[Q[\hat{\Gamma}(x)]]$ 表示要重传的总速率. 假设重传肯定成功, 则平

关性.

3 PSAM 原理与 ATCMQAM

3.1 PSAM 原理

引导码元辅助调制 (PSAM) 是一种非常有效的平坦 Rayleigh 衰落补偿方法^[5, 6]. 它基于信道变化的时间相关性, 可以用来补偿信号经过无线信道后的幅度、相位畸变. 假设 PSAM 正确的补偿了 Rayleigh 衰落, 则无线信道成为时变高斯白噪声信道, 信道质量可以用信噪比来衡量, 信道质量的变化受最大多普勒频移与载波波长的影响. 这样就可以将在高斯白噪声信道中广泛使用的 M 进制正交幅度调制及其衍生调制方式应用于无线信道.

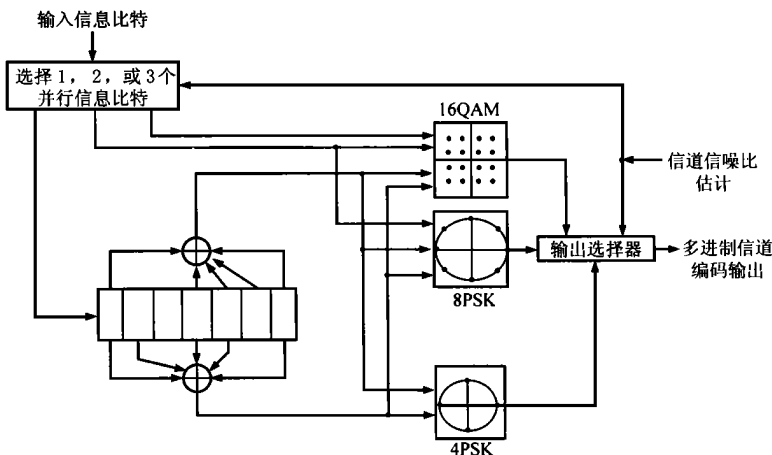


图 1 ATCMQAM 编码原理

均传输速率为:

$$\alpha[Q[\hat{\Gamma}(x)]] = \frac{Q[\hat{\Gamma}(x)]}{1 + Q[\hat{\Gamma}(x)]/q_1} \quad (6)$$

由以上假设, 数据容量可以由下式表示 (积分区间 X 表示小区中所有位置的集合):

$$C = \int_X f(x) \sum_{i=1}^n [q_i (1 - P_R(x, q_i)) + \alpha[q_i] P_R(x, q_i)] \cdot p_i(x) dx \quad (7)$$

式中 $p_i(x)$ 与信道质量分布与信息速率调整策略有关; 信道检测精度、用户移动特性影响重传概率 $P_R(x, q_i)$; 重传策略直接确定 $\alpha[Q[\hat{\Gamma}(x)]]$.

4.2 性能分析

这里, 主要分析估计误差与用户移动性对性能的影响.

4.2.1 估计误差对性能的影响 估计误差 δ 的存在会从两个方面降低性能: 估计值小于实际值时就不能充分发挥信道潜力; 反之则会导致误码越限, 引起重传.

一般假设 δ (以分贝 dB 为单位) 为零均值、方差为 τ 的正态分布随机变量, 其概率分布为

$$p_{\Delta}(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\tau^2}\right) \quad (8)$$

累积分布函数为

$$P_{\Delta}(\Delta \leq \delta) = 1 - Q(-\delta/\tau) \quad (9)$$

其中 Q 函数为:

$$Q(a) = \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (10)$$

设: $\Gamma_0 = 0$, $\Gamma_{n+1} = \infty$, $q_0 = 0$. 用 p_{ji} 表示: 实际信噪比 $\Gamma_{real} = \gamma$, $\gamma \in [\Gamma_j, \Gamma_{j+1})$; 信噪比估计值为 $\Gamma_{est} = \gamma 10^{\delta/10}$, 且 $\Gamma_{est} \in [\Gamma_i, \Gamma_{i+1})$ 的概率.

$$\begin{aligned} p_{ji} &= \int_{\Gamma_j}^{\Gamma_{j+1}} p_{\Gamma}(\gamma) p(\Gamma_i < \gamma 10^{\delta/10} < \Gamma_{i+1}) d\gamma \\ &= \int_{\Gamma_j}^{\Gamma_{j+1}} p_{\Gamma}(\gamma) p_{\delta}(10 \log_{10} \frac{\Gamma_i}{\gamma} \leq \delta \leq 10 \log_{10} \frac{\Gamma_{i+1}}{\gamma}) d\gamma \\ &= \int_{\Gamma_j}^{\Gamma_{j+1}} p_{\Gamma}(\gamma) \left| Q\left(-10 \log_{10} \frac{\Gamma_i}{\gamma}\right) - Q\left(-10 \log_{10} \frac{\Gamma_{i+1}}{\gamma}\right) \right| d\gamma \end{aligned} \quad (11)$$

p_{ji} 也可以看做是由于估计误差的存在, 系统本应该采用调制方式 q_j , 而实际速率指定算法得到的对应调制方式为 q_i 的概率. 由此, 信道容量式(7)中:

$$p_i(x) = \sum_{j=0}^n p_{ji}, P_R(x, q_i) = \sum_{j=0}^{i-1} p_{ji} \quad (12)$$

再将不同的 τ 值带入式(7)计算, 就可以分析估计误差对信道容量的影响.

4.2.2 用户移动性的影响 即使初始信道估计准确, 用户在一次分组传输过程中的移动距离过长, 实时信道质量与估计时相比有很大下降, 这也将引起误码超限, 导致重传. 设用户从基站沿径向向小区边缘移动, 速度为 v , 方向、速度在分组传输期间不变. 每个分组的传输时间为 T_{packet} . 用归一化距离 $d = vT_{packet}$ 来度量在一次分组传输过程中用户移动的距离. 因此, 一个分组需要重传的条件概率为:

$$P_R(x_0, q_i) = P_r\{q_i > \min_{x \in A} Q[\Gamma(x)] | x_0, Q[\Gamma(x_0)] = q_i\} \quad (13)$$

用户初始位置为 $x = x_0$, 信道质量估计值为 $\Gamma(x_0)$; A 是 MDU 在传输过程中所经历的所有位置; $\min_{x \in A} Q[\Gamma(x)]$ 表示 A 中所有位置信道质量对应的传输方式的最小值.

如果 T_{packet} 时间内信道能保持不低于可靠传输所需要的电平 a , 就可以认为传输可靠. 即, 最大传输时间小于对应 a 的非衰落持续时间, 将式(4)代入, 得到最大移动距离为:

$$d_m(a) = vT(a) = \sqrt{\frac{\bar{P}}{2\pi}} \frac{\lambda}{a} \quad (14)$$

d_m 与 $\bar{P}$ 、 a 以及载波波长有关. 由此, 式(13)改写为:

$$P_R(x_0, q_i) = P_r\{d_m(a) < d, Q[\Gamma(x_0)] = q_i\} \quad (15)$$

5 数值计算

考虑用户在一个蜂窝小区内均匀分布: $f(x) = 2x/R^2$; 用户与基站距离在 $(0.1 \sim 1)R$ 之间; 发射功率应使小区边缘平均信噪比不低于 11dB (采用 4PSK 调制, 对应误码率为 10^{-4}).

ATCMQAM 采用 (2, 1, 7) 64 状态卷积码做核心编码器, 结构如图 1. 本文以它为核心所构成的 ATCMQAM 包含 5 种方式, 其性能如表 1 所示. 同时, 为了进行对比分析, 在表 1 中还列出了 M 进制方型 QAM 的信噪比与传输的误码率之间的关系.

系:

表 1 误码率 $P_e = 10^{-4}$ 各调制方式对应的信噪比 E_s/N_0

调制方式	Γ_{th} (dB)	调制方式	Γ_{th} (dB)	每码元信息比特
TCM4-PSK	4	BPSK	10	1
TCM8-PSK	8.5	4PSK	11	2
TCM16-QAM	12.5	8QAM	16	3
TCM32-QAM	15.5	16QAM	19.2	4
TCM64-QAM	19.5	32QAM	22	5
		64QAM	25	6

5.1 理论上限

数据容量的理论上限是指, 无传输错误 (即, $P_R(x_0, q_i) = 0$) 的数据容量, 在此数据容量归一化为每码元包含的信息比特数 (单位: bits/sym). 仿真结果表明: 在这种小区、信道模型下, 固定方式 4PSK 可达到 $C_{4PSK} = 1.47$ bits/sym, 基于 M-QAM 的自适应传输系统 AMQAM 的数据容量 $C_{AMQAM} = 2.75$ bits/sym, 而 ATCMQAM 可以达到 $C_{ATCMQAM} = 3.25$ bits/sym. 与固定方式相比, 数据容量分别提高 80%、120%. 与此同时, 理想的自适应功率控制只能使 $C_{4PSK} = 2$ bits/sym. 可以预计, 如果采用更高的星座图, ATCMQAM 数据容量还可以进一步提高.

5.2 估计误差影响

这里同时考虑了 PSAM 与信噪比的估计误差, 对 τ 在 0~6dB 的范围内, ATCMQAM 的数据容量变化进行了研究, 结果如图 2 所示. 作为比较, 在图 2 中用虚线和星型线画出了 C_{AMQAM} 与理想 4PSK 的信道容量. 可以看出 $\tau = 6$ dB 时, $C_{ATCMQAM}$ 容量下降已超过 10%.

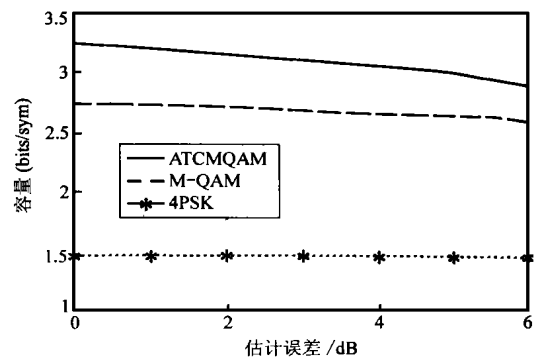


图 2 数据容量与估计误差关系

5.3 用户移动性

当估计误差一定时, 系统数据容量的下降主要是因为在一帧传输中移动距离过长, 使得信道状态与初始时发生了很大变化. 从式(13)~(15)出发, 对一次分组传输中移动距离与系统数据容量的关系进行了仿真, 结果如图 3 所示. 从图中可以看出: 当 $\tau = 3$ dB, 移动距离 $d = 0.3\lambda$ 时, 系统容量下降约 10%; 当 $d = 0.4\lambda$ 时, 系统容量下降约 20%, 达到 2.6 bits/sym, 比 4PSK 提高近 80%; 当 $d = \lambda$ 时, $C_{ATCMQAM}$ 与 C_{4PSK} 基本一致. 对比 $C_{ATCMQAM}$ 与 C_{AMQAM} 曲线, 可以看出 ATCMQAM 方案对用户移动性的适应力更强.

下面, 用上述结果来分析两个具体系统, 其载频为 900MHz 与 2GHz. 假设 MDU 移动距离为 0.4λ , 分组传输时间

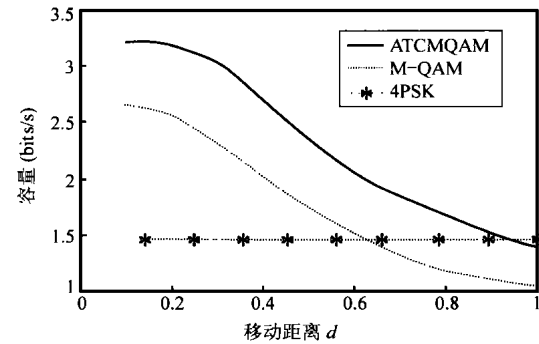


图 3 数据容量与移动距离关系
(注: 横坐标用载波波长 λ 归一化)

$T_{packet} = d/v$. MDU 速度与帧长的对应关系如表 2 所示.

表 2 移动速度与最大帧长

移动速度/(m/s)	1	10	20	40
分组长度 T_{packet} (ms) (2GHz)	60	6	3	1.5
分组长度 T_{packet} (ms) (0.9GHz)	132	13.2	6.6	3.3

6 结论

本文首先提出一种将 PSAM 与基于 M-QAM 的自适应 TCM 调制相结合的自适应传输体制(ATCMQAM), 将有线传输中广泛使用的网格编码调制引入无线通信. 随后建立了一个基于 TDMA/FDMA 蜂窝小区的数据容量解析模型来分析该体制的性能. 仿真结果证明该方案能有效地提高系统数据容量. 同时可以看出: 自适应多址接入方案要求对信道估计的延迟尽量短; 单个分组传输时间尽可能短; 更适合, 载频较低的中、低速移动环境. 而采用 ATCMQAM 体制可以大幅度拓展自适应技术的应用范围. 本文所建立的解析模型也可以加以改进推广, 来分析其它自适应传输方案.

参考文献:

[1] Sanjiv Nanda, et al. Adaptation techniques in wireless packet data services [J]. IEEE Comm. Magazine, 2000, 38(1): 54- 64

[2] Jay M Jacobsmeyer. Adaptive trellis coded modulation for bandlimited meteorburst channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1992, 10(3): 550- 561.

[3] Javad Razavilar, et al. Optimal rate control in wireless networks with fading channels [A]. IEEE 49th Vehicular Technology Conference [C], 1999: 807- 811.

[4] Peter Mahn. Optimal data rate in cellular systems [A]. IEEE 49th Vehicular Technology Conference [C], 1999, 1856- 1860.

[5] S Sampeii, T Sunaga. Rayleigh fading compensation for QAM in land mobile radio communication [J]. IEEE Trans. on Vehicular Tech. , 1993, 42(2): 137- 147.

[6] James K Carvers. An analysis of pilot symbol assisted modulation for rayleighfading channels [J]. IEEE Trans. on Vehicular Tech. , 1991, 40(4): 686- 693.

[7] Theresa A Fry, et al. Data capacity of TDMA/FDMA systems with adaptive modulation [A]. IEEE 48th Vehicular Technology Conference [C], 1998: 929- 933.

[8] 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信(第二章) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1995.

作者简介:



李 夏 男. 1970 年生于山东省济南市. 1998 年于山东大学获得理学硕士学位, 现在西安电子科技大学攻读通信与信息系统博士学位, 主要研究方向为无线个人通信、移动通信.



李建东 男. 1962 年生于江苏省阜宁县. 西安电子科技大学教授、博士生导师、通信工程学院院长、中国通信学会会士、中国电子学会高级会员、IEEE 高级会员、第一届和第四届 863 个人通信技术专业专家组成员, 总装备部和电子科学研究院通信与导航专家组成员. 主要从事: 个人通信、移动通信、分组无线网、自组织网络、软件无线电、宽带无线 IP 技术、战术互联网等方面的研究.