



LTE-Advanced 系统中的自适应调制技术

段红光, 胡利, 田枚

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 自适应调制技术是 LTE-Advanced 系统自适应调制编码 (AMC) 技术的一项重要研究内容。根据均方误差函数的下凸性, 在不同信道模型下, 通过迭代算法校正得到新型 MCS 等级 (包含 256QAM 高阶调制) 的通用 β 值, 并与传统 MCS 等级进行性能对比。仿真结果显示, 新型 MCS 等级在高信噪比时提供的系统吞吐量更高, 且优化后的 β 值使 CQI 估计更准确。

关键词: 自适应调制技术; LTE-Advanced 系统; 新型 MCS 等级; β 值

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017120

Adaptive modulation technology in LTE-Advanced system

DUAN Hongguang, HU Li, TIAN Mei

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China

Abstract: Adaptive modulation technology is an important research content of AMC technology in LTE-Advanced system. The β value of new MCS levels were studied, in which the higher order modulation 256QAM was used, then the general β value of new MCS levels by the iterative algorithm in several different channel models were obtained, according to the convexity of the mean square error function, and compared with the traditional MCS levels. The simulation results show that the new MCS levels provide higher system performance when SNR is high, and the optimized β value makes CQI calculation more accurately.

Key words: adaptive modulation technology, LTE-Advanced system, new MCS level, β value

1 引言

无线信道作为移动通信系统的重要组成部分, 同时也是制约移动通信性能的重要因素。因为无线通信信道的最大特点是复杂和多变, 通信过程中自然界的噪声、设备本身的噪声等, 都会使接收信号具有很大的随机性^[1]。

为了保证移动通信的质量, 又不增加通信成本, 使用的通信技术必须通用, 且能支持在不同无线环境中通信。LTE 系统中采用自适应调制编码 (adaptive modulation coding, AMC) 技术, 可以随着移动通信环境的变化, 根据信道条件和业务需求的变化情况, 动态地调整系统参数, 使用不同的调制编码方式、天线端口映射方式和天线

收稿日期: 2017-01-26; 修回日期: 2017-05-03

基金项目: 国家科技重大专项 03 专项基金资助项目 (No.2015ZX03001010-003)

Foundation Item: 03 Major Project of National Science and Technology Major Project (No.2015ZX03001010-003)

数目等, 保证系统频谱利用率、误码率和吞吐量等方面的平衡, 以使系统性能达到最优。

本文研究 AMC 技术的一个重要研究内容——自适应调制技术, 即在已知信道状态信息的前提下, 对调制编码方式 (modulation and coding scheme, MCS) 进行自适应选择。LTE-Advanced (以下简称 LTE-A) 系统中定义了 19 种 MCS 等级, 共分成 3 类, 本文主要研究第二类 MCS 等级^[2], 在自适应调制过程中通用 β 值的校正, 并通过仿真与第一类 MCS 等级进行比较。

2 自适应调制技术

2.1 自适应调制基本原理

AMC 技术包括两大内容: 一是 HRAQ 技术; 二是自适应 MCS 等级选择, 即自适应调制编码。通过对这两种技术的研究, AMC 能够极大地提高系统的传输效率, 增加系统的容量, 其基本原理是用户终端 (UE) 通过特定的方法对实时传播信道进行估计, 并通过反馈链路上报给 eNode B^[3]。

所谓自适应调制, 是指 LTE-A 移动通信系统中, 将不同的编码和调制方式, 组合成几种不同级别调制编码方案, 每一种级别的编码调制组合对应一个 CQI 值, 然后根据信道条件选择最合适的 MCS 等级。当信道条件较好时, 用户选择更高级别的 MCS, 反之用户选择较低等级的 MCS, 以保证通信质量良好。

2.2 LTE-A 中自适应调制的实现

LTE-A 下行链路自适应调制过程^[4]是: 信号在发送端依次经过 CRC 编码、Turbo 信道编码、加扰、信道交织、调制、层映射、预编码, 最后生成 OFDM 符号复用映射到不同的天线端口, 发送到无线信道中; 接收端对信号进行逆过程处理, 首先将多路 OFDM 符号解复用, 然后依次进行预编码译码、信道估计、解映射、解调、信道解交织、解扰、Turbo 译码、CRC 校验。用户终端通过信道估计, 使用一定的算法得到信道质量信息, 并通过信道质量指

示 (CQI) 值反馈给 eNode B; eNode B 根据接收端反馈的 CQI 值, 实时更改下一帧数据的调制编码方式, 以保证系统性能一直保持在最优。

LTE-A 下行链路主要采用 QPSK、16QAM、64QAM、256QAM 4 种调制方式, 信道编码主要是 Turbo 编码, 表 1 和表 2 是 3GPP 标准 TS36.213 中定义的两类共 19 种 MCS 等级。本文主要研究表 2 中的 15 种 MCS 等级对系统性能贡献, 包括相应 β 值的校正, 并与表 1 中的相应 CQI 索引在自适应调制过程中的最优通用 β 值^[5]进行对比分析。

3 CQI 选择算法

3.1 理论依据

CQI 选择算法通常是先在单输入单输出 (single input single output, SISO) 系统的 AWGN 信道下通过大量仿真, 得到每个 CQI 值随信噪比变化时对应的 BLER 曲线, 并从曲线中找出 $BLER=0.1$ 时, 每个 CQI 对应的信噪比阈值, 再通过直线拟合方式得到 $BLER=0.1$ 时每个 CQI 与 SNR 的对应关系。根据表 1 中的 15 条 BLER-SNR 曲线^[6], 取得 $BLER=0.1$ 时的 SNR 阈值, 得到 CQI-SNR 的线性关系^[6,7]:

$$CQI = SNR + 4.5 \quad (1)$$

表 1 MCS 级别(调制阶数 2、4、6)

CQI 索引	调制方式	编码速率	编码效率
1	QPSK	78	0.152 3
2	QPSK	120	0.234 4
3	QPSK	193	0.377 0
4	QPSK	308	0.601 6
5	QPSK	449	0.877 0
6	QPSK	602	1.175 8
7	16QAM	378	1.476 6
8	16QAM	490	1.914 1
9	16QAM	616	2.406 3
10	64QAM	466	2.730 5
11	64QAM	567	3.322 3
12	64QAM	666	3.902 3
13	64QAM	772	4.523 4
14	64QAM	873	5.115 2
15	64QAM	948	5.554 7



表2 MCS 级别(调制阶数 2、4、6、8)

CQI 索引	调制方式	编码速率	编码效率
1	QPSK	78	0.152 3
2	QPSK	193	0.377 0
3	QPSK	449	0.877 0
4	16QAM	378	1.476 6
5	16QAM	490	1.914 1
6	16QAM	616	2.406 3
7	64QAM	466	2.730 5
8	64QAM	567	3.322 3
9	64QAM	666	3.902 3
10	64QAM	772	4.523 4
11	64QAM	873	5.115 2
12	256QAM	711	5.554 7
13	256QAM	797	6.226 6
14	256QAM	885	6.914 1
15	256QAM	948	7.406 3

其中,表1和表2中的每一种 CQI 索引对应的编码速率是码率乘以码长 1 024 后的结果。

在接收端,由于无线多径信道存在频率选择特性,当系统带宽较大时,各个子载波的信道可能具有不同的特性,造成信噪比的变化较大。因此,UE 需要通过某种函数进行等效信噪比映射,将所有时频资源粒子的信噪比映射成一个可以反映整体信道状态的信噪比。接收端将所得的等效信噪比与 AWGN-SISO 条件下仿真出来的 $BLER=0.1$ 时的信噪比阈值进行比较,从而选出满足 $BLER<0.1$ 时的最高 CQI 值。

3.2 等效信噪比映射函数

等效信噪比映射函数就是将所有子载波的信噪比通过式(2)^[7]计算出宽带信道的信噪比:

$$SNR_{\text{eff}} = \beta f^{-1} \left(\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R f \left(\frac{SINR_r}{\beta} \right) \right) \quad (2)$$

其中, R 为子载波数, β 为调节因子,与信道模型和调制方式都有关系, $f(x)$ 为信噪比映射的压缩函数, $f^{-1}(x)$ 是压缩函数 $f(x)$ 的逆函数。根据采用的压缩函数不同,等效信噪比映射法可分为指数等效信噪比映射 EESM 方法和互信息等效信噪比映射 MIESM 方法。因为 MIESM 需要计算每比特交织编码调制的信道容量,其计算量要

比 EESM 大得多^[8],因此本文主要采用 EESM 等效信噪比映射方法。

3.2.1 EESM 指数等效信噪比映射

EESM 映射方法是基于误差概率的 Union-Chernof 边界值,它的压缩函数为:

$$f(x) = \exp(-x) \quad (3)$$

那么其逆函数为:

$$f^{-1}(x) = -\ln x \quad (4)$$

如此,通过 EESM 得到等效信噪比就可表示为:

$$SNR_{\text{eff}} = -\beta \ln \left(\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \exp \left(-\frac{SINR_r}{\beta} \right) \right) \quad (5)$$

3.2.2 β 值的优化过程

β 值的优化是一个渐进的过程,根据均方误差函数的下凸性^[9]确定最佳 β 值的迭代算法,可以准确地得到某个信道模型下的 β 值。为了得到第二类 MCS 等级对应的通用 β 值,本文在典型信道模型 EPA5、EVA5、EVA70、ETU70、ETU300 中仿真出表2中每一种 CQI 值对应的 BLER-SNR 曲线,并在每一种信道模型中采样 N 个状态点,根据状态点的 BLER 值,计算得到等效信噪比和查表获得 $SINR_{\text{AWGN},i}$ 。详细的 β 值优化步骤如下^[9,10]。

步骤1 在每种信道模型下,仿真得到表2中所有 CQI 遍历所有信道状态的 BLER-SINR 曲线。

步骤2 针对某个 CQI 在每种信道模型下得到 N 个信道状态时的 BLER,然后通过查找得到 AWGN 下相应的信噪比 $SINR_{\text{AWGN},i}$ 。

步骤3 根据式(4)计算在每个信道状态下的等效信干噪比 $SINR_{\text{EESM},i}$,然后选择 β 值使其与 $SINR_{\text{AWGN},i}$ 的均方误差最小,如式(5):

$$\beta_{\text{opt}} = \arg \min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^N |SINR_{\text{AWGN},i} - SINR_{\text{EESM},i}|^2 \right\} \quad (5)$$

4 仿真结果及验证

4.1 新型 CQI-SNR 映射关系

本文在 SISO 系统中的 AWGN 信道下,通过

传输 5 000 子帧, 得到表 2 中 15 种调制编码组合的 BLER-SNR 仿真曲线, 如图 1 所示。

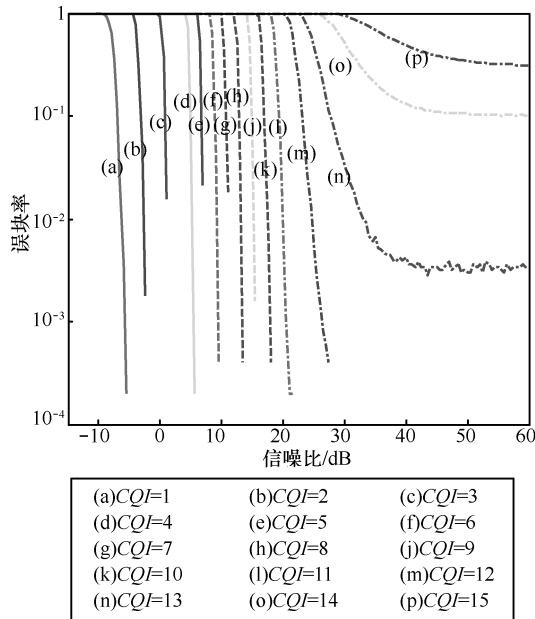


图1 第二类 SISO-AWGN 下的 BLER-SNR 仿真曲线

图 1 中从左至右对应的是表 2 中 CQI 值为 1~15 的 BLER-SNR 曲线。从图 1 中可以看出, CQI 为 14、15 时的两种调制编码组合的 BLER 曲线并不理想, 这是因为受到接收机性能的限制, 对高等级的 MCS 不能进行很好地解调和检测。所以本文只研究了 CQI 值为 1~13 的 MCS 等级, 并得到图 1 中 $BLER=0.1$ 时的 SNR 阈值为 $[-500, -6.964\ 3, -2.989\ 6, 0.639\ 4, 4.786\ 9, 6.860\ 6, 8.761\ 5, 10.662\ 4, 12.736\ 2, 14.809\ 9, 17.056\ 5, 19.303\ 0, 22.932\ 0, 27.597\ 9]$, 再通过直线拟合方式得到 CQI 与 SNR 的映射关系, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 表 2 中的 CQI 值与对应的 SNR 关系不再满足线性关系, 但是分段后的关系仍然可以近似看成线性的, 关系表达式为:

$$CQI = \begin{cases} 0.255\ 3 \times SNR + 2.763\ 2, & SNR \in (-\infty, 4.786\ 9) \\ 0.482\ 2 \times SNR + 1.858\ 3, & SNR \in [4.786\ 9, 19.303\ 0) \\ 0.241\ 1 \times SNR + 6.470\ 8, & SNR \in [19.303\ 0, 45] \end{cases} \quad (6)$$

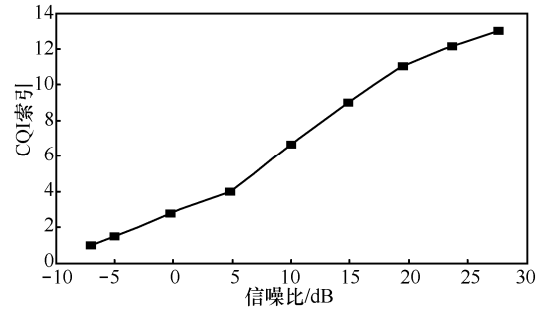


图2 CQI 与 SNR 的映射关系

4.2 EESM 中 β 值的校准

根据第 2.2.2 节描述的 β 值优化过程, 首先在 LTE-A 系统定义的信道模型 EPA5、EVA5、EVA70、ETU70、ETU300 下仿真, 分别得到 13 条 BLER-SNR 曲线, 对应表 2 中的 CQI 值 1~13; 然后针对每种 CQI 值, 在各信道模型中采样 N 种信道状态点, 根据步骤 2 和步骤 3 得到通用的最佳 β 值。图 3 为 β 值校准时采用的信道状态点, 并得到新型 CQI-SNR 关系映射的 EESM 等效信噪比的通用最佳 β 值为 $[5, 5.01, 0.84, 1.61, 3.87, 5.06, 6.4, 12.59, 23.33, 29.45, 33.05, 47.98, 48.09]$ 。

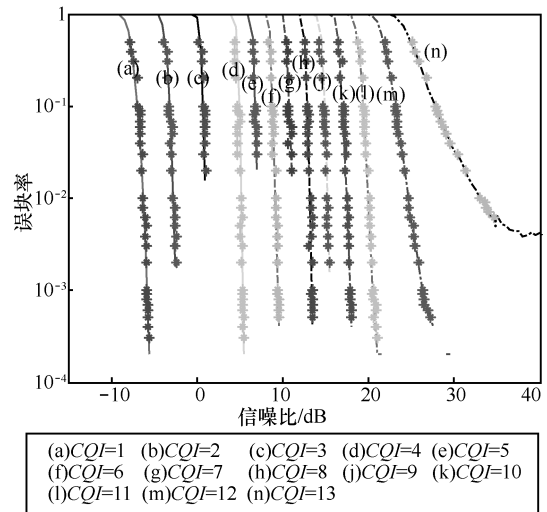
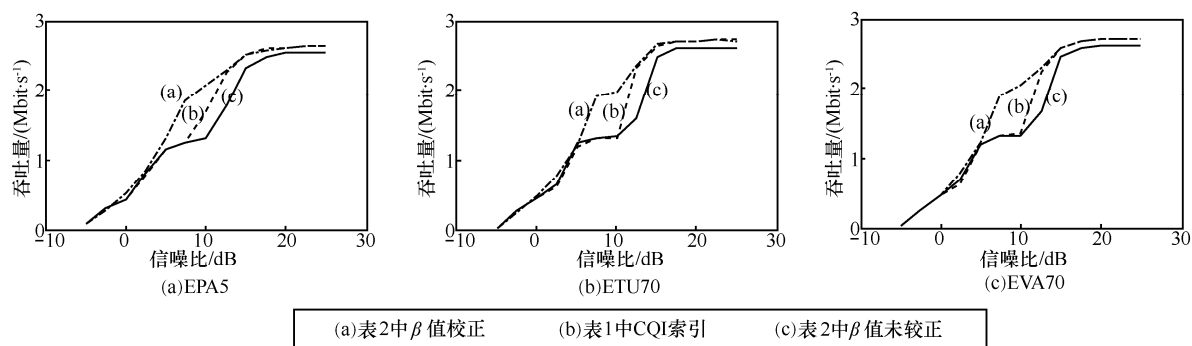


图3 β 值校准时采用的信道状态点

4.3 性能分析

根据上述得到的新型 CQI-SNR 映射关系以及对应的 β 值, 在多径衰落信道模型下进行仿真, 并与直接使用表 1 中 CQI 为 1~13 的 β 值得到的仿真结果进行对比, 仿真参数见表 3。表 1 和表 2 中的

图4 表1和表2中的CQI索引及 β 值校正前后的性能对比

CQI索引及 β 值校正前后的性能对比如图4所示,图4(a)和图4(b)分别表示表2中CQI值为1~13对应的 β 值校正后和未校正的系统吞吐量,通过对比分析可知, β 值校正后的系统吞吐量更高,即CQI估计更准确。而图4(c)代表第一类MCS等级获得的系统吞吐量,从图4中可以看出,在0~25 dB,第二类MCS等级获得的系统吞吐量比第一类MCS等级高,在此区间第一类MCS等级采用的调制阶数为2或4或6,而第二类MCS等级采用的调制阶数为4或6或8。由此说明,在高信噪比时,信道条件较好且接收机性能优,采用高阶调制可以提高系统吞吐量。

表3 仿真参数

参数	取值
系统带宽/MHz	1.4
信道类型	EVA70、EPA5、ETU70
信道估计	LS
检测类型	SSD
反馈时延/ms	1
反馈周期/ms	5
天线配置	4×4, 相关
传输模式	TM9

5 结束语

本文研究LTE-A系统的自适应调制技术,对表1和表2中的调制编码组合进行仿真对比,发现表2的MCS等级得到的系统吞吐量比表1的高。再次证明,在相同信道环境下,接收机性能越高,使用的调制编码等级越高,系统性能也越好。且调节因子 β 值的校正使信噪比等效估计更加准确,即CQI选择更加符合信道条件。

参考文献:

- [1] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理(第六版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
FAN C X, CAO L N. Communication principles (sixth edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [2] 3GPP. 3rd generation partnership project, technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA): physical layer procedures (release 13): TS36.211 V12.8.0[S], 2015.
- [3] 张飞. TDD LTE系统下行链路自适应及MIMO模式切换技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
ZHANG F. TDD LTE system downlink adaptive and MIMO mode switching technology research[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2012.
- [4] 向建伟, 于秀兰, 景小荣. 毫米波大规模MIMO系统中低复杂度混合预编码方法[J]. 电信科学, 2016, 32(9): 10-15.
XIANG J W, YU X L, JING X R. Low complexity hybrid precoding method in mmWave massive MIMO system[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(9): 10-15.
- [5] LI X, FANG Q, SHI L. A effective SINR link to system mapping method for CQI feedback in TD-LTE system[C]//IEEE International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, August 20-21, 2011, Wuhan, China. New Jersey: IEEE Press, 2011: 208-211.
- [6] MEHLFÜHRER C, WRULICH M, IKUNO J C, et al. Simulating the long term evolution physical layer[C]//Proceedings of Elmar, September 14-16, 2011, Zadar, Croatia. New Jersey: IEEE Press, 2011: 141-144.
- [7] 谢灿, 任旭. TD-LTE系统中新型SNR和CQI映射方法[J]. 电视技术, 2013, 37(17): 209-212.
XIE C, REN X. New SNR and CQI mapping methods in TD-LTE system[J]. Television Technology, 2013, 37(17): 209-212.
- [8] ABDULHASAN M Q, SALMAN M I, NG C K, et al. Approximate linear minimum mean square error estimation based on channel quality indicator feedback in LTE systems[C]//IEEE Malaysia International Conference on Communications, November 26-28, 2013, Kuala Lumpur, Malaysia. New Jersey: IEEE Press, 2013: 446-451.
- [9] 王琛琛, 薛新华, 唐苏文, 等. EESM中最佳 β 值的确定[J]. 通信技术, 2009, 42(12): 215-216.
WANG C C, XUE X H, TANG S W, et al. Determination of op-

timal β value in EESM[J]. Communication Technology, 2009, 42(12): 215-216.

- [10] 柏森森. LTE 下行链路信道估计与自适应传输技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

BAI S S. Research on LTE downlink channel estimation and adaptive transmission technology[D]. Nanjing: Journal of Southeast University, 2015.

[作者简介]



段红光 (1969–), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生导师、正高级工程师, 主要研究方向为移动通信协议栈。



胡利 (1990–), 女, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为基于CSI-RS的信道状态信息测量。



田枚 (1991–), 女, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为同频干扰下的信道估计。