

## LDPC 编码 AMC-OFDM 系统中的两种 MCS 选择准则

周明宇 李立华 路维佳 陶小峰 张平

(泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学) 北京邮电大学无线新技术研究所 北京 100876)

**摘要:** 该文提出低密度奇偶校验(LDPC)码的自适应调制编码正交频分复用(AMC-OFDM)系统,并详述了该系统的原理。针对传统 AMC 系统中调制编码方案(MCS)的选择准则对性能提升有限的问题,提出可用于该 AMC 系统的两种 MCS 选择准则,根据接收到的所有单元信号的后验 SNR 确定相应自适应块采用的 MCS。文章分析了这两种准则的吞吐量性能。仿真结果表明,把这两种准则应用于 LDPC 编码的 AMC-OFDM 系统中,能够带来比传统选择方法更高的吞吐量。

**关键词:** 低密度奇偶校验码; 自适应调制编码; 正交频分复用; 调制编码方案; 后验信噪比

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1635-05

## Two MCS Selection Rules in LDPC Coded AMC-OFDM System

Zhou Ming-yu Li Li-hua Lu Wei-jia Tao Xiao-feng Zhang Ping

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication of Ministry of Education at Beijing University of Posts and Telecommunications, Wireless Technologies Innovation Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A Low Density Parity Check (LDPC) coded Adaptive Modulation and Coding- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (AMC-OFDM) system is proposed, and its theory is given in detail. In order to solve the problem that the traditional Modulation and Coding Scheme (MCS) selecting rule improves the performance limitedly, two MCS selecting rules are proposed for the AMC system, in which MCS for an adaptive block is determined by the posteriori Signal-to-Noise-Ratio (SNR) of units in the block. Throughput performance is analyzed for the two rules. Simulation results show that they can bring to much higher throughput than the traditional method when applied in LDPC coded AMC-OFDM system.

**Key words:** Low Density Parity Check (LDPC) code; Adaptive Modulation and Coding (AMC); OFDM; Modulation and Coding Scheme (MCS); *A posteriori* signal-to-noise-ratio

### 1 引言

正交频分复用(OFDM)能够对抗信道的多径效应和消除符号间干扰<sup>[1]</sup>,低密度奇偶校验(LDPC)码技术拥有译码复杂度低、离香农限仅有 0.0045dB 性能差别等优良特点<sup>[2,3]</sup>,自适应调制编码(AMC)技术能够充分利用信道的变化,通过改变调制方式和编码速率带来更高的频谱利用率<sup>[4-9]</sup>,这些技术都成为下一代移动通信系统的关键技术,这三者的结合——根据信道变化自适应地改变调制方式和 LDPC 编码速率的 OFDM 系统,能够进一步增强系统性能。传统的 AMC-OFDM 系统多基于自适应块进行自适应调节,并根据自适应块中所有单元的后验信噪比(SNR)的最小者选择调制编码方案(Modulation and Coding Scheme, MCS),对于具有良好性能的 LDPC 码,这种 MCS 选择准则能带来的性能增益往往受到限制。

本文首先介绍了 LDPC-AMC-OFDM 系统的系统模型,

详细介绍了该系统的具体实现原理,并针对传统的 MCS 选择准则提升系统性能能力有限的问题,提出了两种基于后验 SNR 的 MCS 选择准则。最后将该准则应用于 LDPC 编码的 AMC-OFDM 系统中,给出仿真结果和分析。

### 2 系统模型

#### 2.1 LDPC-AMC-OFDM 系统结构

在这个 AMC-OFDM 系统中,整个频带  $B$  被分为  $N$  个子载波,子载波间隔为  $B/N$ ,设一帧中包含  $M$  个 OFDM 符号,按照文献[4]中的方法,把所有  $N$  个子载波划分为  $K$  个子带,每个子带包含  $N_s$  个子载波,则  $K = N/N_s$ 。这样,  $M$  个 OFDM 符号中的  $N_s$  个子载波构成一个自适应块,定义一个子载波为一个自适应单元,则一个自适应块包括  $M \times N_s$  个自适应单元,一帧中包含  $K$  个自适应块。LDPC-AMC-OFDM 系统结构框图如图 1 所示。

接收端通过信道估计获得信道的衰落情况,并从而确定第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 个自适应块采取的 MCS 为  $MCS_k$ ,以信令的形式反馈回发送端。本文重点考查 AMC 方法,因此假设信令反馈无误,并不考虑反馈时延的影响。发送端首先对

2006-12-07 收到, 2007-05-25 改回

国家自然科学基金(60496312), 2005-2006 华为科技基金和北京邮电大学研究生创新项目资助课题

信源比特加上循环冗余码(Cyclic Redundancy Code, CRC), 然后按照  $MCS_k$  对应的码率和调制方式对第  $k$  个自适应块的数据进行 LDPC 编码和调制; 形成 OFDM 符号后发送出去。其中 CRC 用于统计误块率(Block Error Rate, BLER)。在接收端, 首先获取所有子载波上的信号; 对于第  $k$  个自适应块的数据, 根据信道估计的结果, 并按照  $MCS_k$  对应的调制方式和码率对信号进行解调和译码, 最后恢复出原始信号。

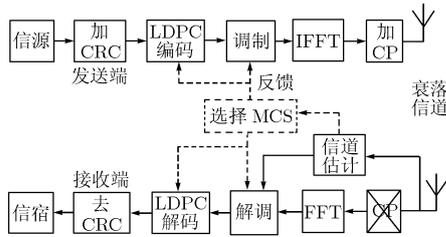


图1 LDPC-AMC-OFDM 系统结构框图

2.2 信道模型

衰落信道的时域冲击响应为

$$h(\tau, t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l) \quad (1)$$

其中  $L$  表示多径数,  $\tau_l$  表示第  $l$  条径的时延,  $h_l(t)$  是在  $t$  时刻第  $l$  条径的信道衰落, 第  $l$  条径的平均功率为  $P_l$ , 满足

$$\sum_{l=0}^{L-1} P_l = 1。$$

本文中所采用的信道模型为 3GPP 协议通用的典型城市信道模型(TU 模型)<sup>[10]</sup>, 其时域冲激响应的平均幅度如图 2(a) 所示, 共由 12 条独立的径组成, 信道的频域衰落如图 2(b), 2(c) 所示。

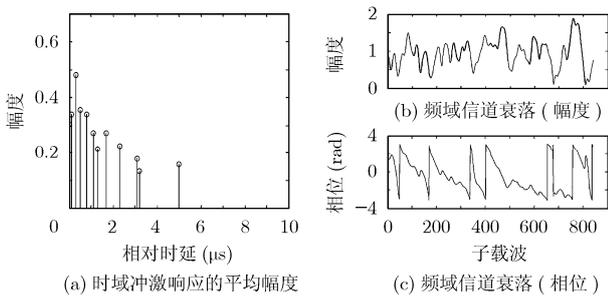


图2 12 径的 TU 信道

假定信道的时域冲激响应在一个 OFDM 符号内保持不变, 第  $j$  个 OFDM 符号的第  $i$  个子载波上收到的信号  $R_{i,j}$  可以表示为

$$R_{i,j} = S_{i,j} H_{i,j} + n_{i,j} \quad (2)$$

其中  $S_{i,j}$  表示发送端已调频域符号,  $H_{i,j}$  表示频域的信道衰落,  $n_{i,j}$  表示加性高斯白噪声, 并且  $E[|n_{i,j}|^2] = \sigma^2$ 。

3 LDPC-AMC-OFDM 原理

3.1 LDPC 码

LDPC 码的很多优良特点使得其得到快速发展。首先, 译码复杂度较目前通用的 Turbo 码低, 这使得其可以通过多次迭代译码拥有更佳的性能, 广泛应用于系统的下行链路中; 较高码率的 LDPC 码的性能良好; LDPC 码无错误地板; 由于 LDPC 码的特殊码结构, 在其编码过程中不需要交织器。

本文采用的 LDPC 码是 802.16e 系统中采用的一种非规则的 LDPC 码<sup>[11]</sup>, 码长为 576, 译码算法是一种经典的和积(Sum-Product, SP)算法, 译码最大迭代次数为 50 次。

3.2 备选 MCS 及其性能

AMC 系统根据信道状况决定每一个自适应块采用的 MCS, 设第  $k$  个自适应块的信噪比为  $SNR(k)$ , 备选的 MCS 总共有  $P$  种, AMC 系统根据  $SNR(k)$  选择调制编码方案, 按照式(3)进行

$$MCS(k) = \begin{cases} MCS_1, SNR(k) < Th_1 \\ MCS_2, Th_1 \leq SNR(k) < Th_2 \\ MCS_3, Th_2 \leq SNR(k) < Th_3 \\ \vdots \\ MCS_p, SNR(k) \geq Th_{p-1} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $MCS_p$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ ) 表示调制编码方案, 对应不同的调制方式或编码速率。  $Th_t$  表示信噪比门限值,  $Th_t < Th_{t+1}$  ( $t = 1, 2, \dots, P - 2$ )。

本文研究的 AMC 系统共有 8 种备选的 MCS, 其相关参数如表 1 所示。

在加性高斯白噪声(AWGN)信道下对这 8 种 MCS 的性能进行了仿真, 得到的仿真结果如图 3 所示。为了保证  $10^{-3}$  的误码率, 把这些方案达到误码率为  $10^{-3}$  时的信噪比值设置为门限, 最后得到的切换门限值如表 1 所示。

从式(3)可以看出, 由于门限值  $Th_t$  已确定, 因此影响 AMC 系统性能的主要因素就是  $SNR(k)$  的计算方法。基于

表1 备选 MCS 及切换门限值

$t$	调制方式	编码速率	吞吐量 $\rho_t$ (比特/符号)	切换门限 $Th_t$ (dB)
1	QPSK	1/2	1	4.50
2	QPSK	2/3	1.333	5.57
3	QPSK	3/4	1.5	8.12
4	16QAM	1/2	2	10.49
5	16QAM	2/3	2.667	11.83
6	16QAM	3/4	3	15.67
7	64QAM	2/3	4	17.23
8	64QAM	3/4	4.5	

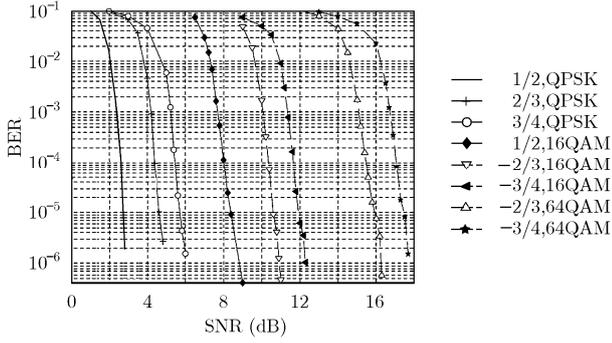


图3 8种MCS在AWGN信道下的误码率性能

SNR(k)的计算方法的不同,本文提出了两种新的MCS选择准则。

## 4 MCS选择准则

### 4.1 传统选择准则

从式(2)可见,  $R_{i,j}$  的后验信噪比  $\text{SNR}_{i,j}$  可以表示为

$$\text{SNR}_{i,j} = \frac{|S_{i,j} H_{i,j}|^2}{E[|n_{i,j}|^2]} = \frac{|S_{i,j}|^2 |H_{i,j}|^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

对于第  $k$  个自适应块, 传统的选择准则为了保证系统可靠性, 采用该自适应块中最小的  $\text{SNR}_{i,j}$  作为判断的标准, 即

$$\text{SNR}(k) = \min_{i \in \Phi_k} (\text{SNR}_{i,j}) \quad (5)$$

其中  $\Phi_k = \{(k-1)N_S + 1, (k-1)N_S + 2, \dots, kN_S\}$ 。

假设第  $p$  种 MCS 的吞吐量为  $\rho_p$  (单位: 比特/符号)。若采用传统 MCS 选择准则, 以  $\text{BLER}_{p,\text{conv}}$  表示选择第  $p$  种 MCS 的自适应块的误块率。从式(3)和式(5)可以看出, 采用传统选择准则的 AMC 系统的吞吐量为

$$\begin{aligned} \rho = & \rho_1 [1 - \text{BLER}_{1,\text{conv}}] P\left\{ \min_{i \in \Phi_k} (\text{SNR}_{i,j}) < \text{Th}_1 \right\} \\ & + \rho_2 [1 - \text{BLER}_{2,\text{conv}}] P\left\{ \text{Th}_1 \leq \min_{i \in \Phi_k} (\text{SNR}_{i,j}) < \text{Th}_2 \right\} \\ & + \dots + \rho_p [1 - \text{BLER}_{p,\text{conv}}] P\left\{ \min_{i \in \Phi_k} (\text{SNR}_{i,j}) \geq \text{Th}_{p-1} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $P\{\cdot\}$  表示概率。从式(6)可见, 在采用传统 MCS 选择准则的系统中,  $\text{SNR}_{i,j}$  变化范围较大的自适应块往往采用较低阶的调制编码方案, 从而使得系统吞吐量较低。这种准则对 AMC 系统吞吐量的提升能力很有限。为了进一步提升系统的吞吐量, 本文提出两种新的 MCS 选择准则。

### 4.2 新的 MCS 选择准则一

在一个自适应块中, 若所有  $\text{SNR}_{i,j}$  以某一比例高于  $\text{Th}_t$ , 则选择  $\text{MCS}_{t+1}$  为该自适应块的调制编码方案。具体实施方式如下:

对于第  $k$  个自适应块设  $\widehat{\text{SNR}}_m$  ( $m = 1, 2, \dots, N_S M$ ) 为  $\text{SNR}_{i,j}$  按照从大到小排序之后的信噪比序列, 即

$$\{\widehat{\text{SNR}}_m\} = \text{sort} \downarrow \{\text{SNR}_{i,j}\} \quad (7)$$

$\text{sort} \downarrow \{\text{SNR}_{i,j}\}$  表示对  $\text{SNR}_{i,j}$  进行降序排列。

设置百分比  $\eta$ , 并设

$$\text{SNR}(k) = \widehat{\text{SNR}}_{\lceil N_S M \eta \rceil} \quad (8)$$

其中  $\lceil \cdot \rceil$  表示对其中的数向上取整。

特别地, 当  $\eta = 100\%$  时, 有  $\widehat{\text{SNR}}_{\lceil N_S M \eta \rceil} = \min_{i \in \Phi_k} (\text{SNR}_{i,j})$

成立, 即传统选择准则是准则一的一个特例。

设当百分比为  $\eta$  时, 采用该准则选择第  $p$  种 MCS 的自适应块的误块率为  $\text{BLER}_{p,1}(\eta)$ 。则采用准则一的 AMC 系统的吞吐量为

$$\begin{aligned} \rho = & \rho_1 [1 - \text{BLER}_{1,1}(\eta)] P\left\{ \widehat{\text{SNR}}_{\lceil N_S M \eta \rceil} < \text{Th}_1 \right\} \\ & + \rho_2 [1 - \text{BLER}_{2,1}(\eta)] P\left\{ \text{Th}_1 \leq \widehat{\text{SNR}}_{\lceil N_S M \eta \rceil} < \text{Th}_2 \right\} \\ & + \dots + \rho_p [1 - \text{BLER}_{p,1}(\eta)] P\left\{ \widehat{\text{SNR}}_{\lceil N_S M \eta \rceil} \geq \text{Th}_{p-1} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

$\eta$  太大会导致选择高阶 MCS 的概率较小, 系统的吞吐量不能达到很高;  $\eta$  太小则会造成本  $\text{BLER}_{p,1}(\eta)$  较大, 同样影响吞吐量的提升。因此,  $\eta$  的选择存在折衷。

### 4.3 新的 MCS 选择准则二

在一个自适应块中, 对所有  $\text{SNR}_{i,j}$  设置一个权值, 以加权之后的  $\text{SNR}_{i,j}$  的和确定  $\text{SNR}(k)$ , 即根据下式确定:

$$\text{SNR}(k) = \sum_{i \in \Phi_k} f_{i,j} \text{SNR}_{i,j} \quad (10)$$

其中

$$f_{i,j} = \frac{\text{SNR}_{i,j}}{\sum_{i \in \Phi_k} \text{SNR}_{i,j}} \quad (11)$$

假设  $\text{BLER}_{p,2}$  表示采用该准则时, 选择第  $p$  种 MCS 的自适应块的误块率。从式(3)和式(10)可见, 采用准则二的 AMC 系统的吞吐量为

$$\begin{aligned} \rho = & \rho_1 [1 - \text{BLER}_{1,2}] P\left\{ \sum_{i \in \Phi_k} f_{i,j} \text{SNR}_{i,j} < \text{Th}_1 \right\} \\ & + \rho_2 [1 - \text{BLER}_{2,2}] P\left\{ \text{Th}_1 \leq \sum_{i \in \Phi_k} f_{i,j} \text{SNR}_{i,j} < \text{Th}_2 \right\} \\ & + \dots + \rho_p [1 - \text{BLER}_{p,2}] P\left\{ \sum_{i \in \Phi_k} f_{i,j} \text{SNR}_{i,j} \geq \text{Th}_{p-1} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

## 5 仿真结果

为了显示上述 MCS 选择准则对系统性能的提升, 在所示的信道下进行了仿真。仿真参数如表 2 所示。一帧中包括 20 个 OFDM 符号, 所有 840 个子载波被分为 56 个子带, 每个子带包含 15 个子载波, 这样, 一帧包含 56 个自适应块, 每个自适应块中有 300 个自适应单元, 每个自适应块可以采用的 MCS 如表 1 所示。

首先对选择准则一进行考查。由于这种方法需要首先确定  $\eta$  的值, 因此在 LDPC 编码的 AMC-OFDM 系统中对不同的  $\eta$  值进行了仿真。图 4 显示了在  $\text{SNR}=10\text{dB}$  和  $\text{SNR}=\dots$

表2 仿真参数

载频	2.5GHz
带宽	10MHz
子载波间隔	11.16kHz
有用子载波数目	840
FFT 点数	1024
CP 长度	64 点 (5.6 $\mu$ s)
OFDM 符号长度	95.236 $\mu$ s
采样率	11.424Ms/s
衰落信道	12 径 TU 信道
移动速率	5km/h (最大多普勒频移为 11.57Hz)

20dB 的情形下,  $\eta$  不同时系统的吞吐量性能。如前分析,  $\eta$  太大会导致选择高阶 MCS 的概率较小而影响系统的吞吐量;  $\eta$  太小则会造成  $BLER_t(\eta)$  较大同样影响吞吐量提升。在其中的 SNR=10dB 和 SNR=20dB 两种情形下, 当  $\eta = 40\%$  时, 系统的吞吐量最高, 因此选择  $\eta = 40\%$ 。

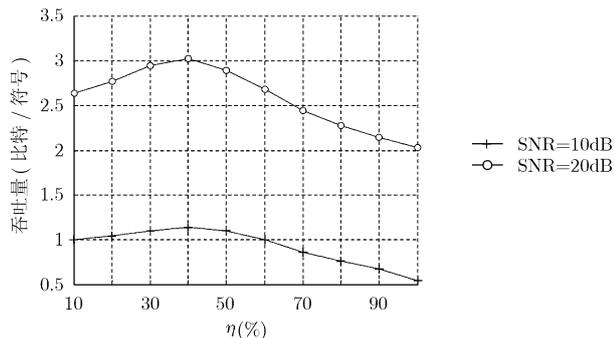


图4 在 SNR=10dB 和 SNR=20dB 时准则一采用不同  $\eta$  的吞吐量性能

图5了采用固定 MCS 以及采用 AMC 时该 LDPC 编码 OFDM 系统的吞吐量性能对比。相比于固定 MCS, 采用 AMC 能够在较多情形下为系统带来更佳的性能, 但由于 MCS 的选择是根据自适应块中后验 SNR 最小的单元进行, 因此提升吞吐量的能力有限, 在一些 SNR 值情况下吞吐量甚至低于固定 MCS 的吞吐量。图中也显示了采用两种新的 MCS 选择准则的性能对比, 其中准则一采用参数  $\eta = 40\%$ 。从图可见, 采用传统 MCS 选择准则时系统的吞吐量低于这两种新的准则; 当吞吐量为 2 比特/符号时, 准则二能够带来比传统准则优良约 3.5dB 的性能。若采用  $\eta = 40\%$  的准则一能进一步提升性能, 当吞吐量为 2 比特/符号时能够带来比传统准则优良约 5dB 的性能。这两种准则在绝大多数情形下都能够带来比固定 MCS 更优良的吞吐量。准则一的性能最好; 准则二虽然性能略低于准则一, 但不需要仿真确定参数, 比准则一更灵活。

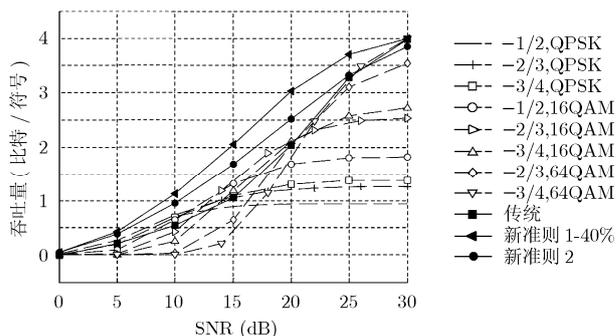


图5 固定 MCS、传统 MCS 选择准则以及两种新的 MCS 选择准则的吞吐量性能对比

## 6 结束语

本文首先提出了 LDPC 码的 AMC-OFDM 系统, 并详述了该系统的原理; 该系统结合了 LDPC, AMC 以及 OFDM 3 种技术, 能够同时拥有 3 种技术的优点。由于传统 AMC 系统中 MCS 的选择准则是根据自适应块中后验 SNR 最差的单元进行, 对性能提升有限, 因此本文提出了两种基于后验 SNR 的 MCS 选择方法, 根据接收到的各单元信号的后验 SNR 确定相应自适应块采用的 MCS。文章分析了这两种方法的吞吐量性能。通过仿真表明, 把这两种方法应用于 LDPC 编码的 AMC-OFDM 系统中, 能够带来比传统选择方法更高的吞吐量。方法一对系统吞吐量的提升能力很强; 方法二对系统吞吐量的提升不如方法一, 但该准则使用灵活, 在实际应用时系统可以根据不同需要选择采用。

## 参考文献

- [1] 王文博, 郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 2003, 第 1 章-第 2 章.  
Wang Wen-bo and Zheng Kan. Broadband Wireless Communication OFDM Technology. 1st Edition, Beijing: Posts & Telecom Press, 2003, Chapter1-Chapter2.
- [2] Gallager R G. Low-Density Parity-Check Codes. [Dissertation], MA: MIT. Press, 1963.
- [3] Young C S, David F G, and Richardson T J, *et al.* On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit. *IEEE Communications Letters*, 2001, 5(2): 58-60.
- [4] Zhou Mingyu, Li Lihua, and Wen Na, *et al.* Performance of LDPC coded AOFDM under frequency-selective fading channel. International Conference on Communication, Circuits and Systems, Guilin, China, June 2006, 2: 861-865.
- [5] Keller T and Hanzo L. Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2000, 49(5): 1893-1906.
- [6] Keller T and Hanzo L. Adaptive multicarrier modulation: A convenient framework for time-frequency procession in wireless communications. *in Proc. IEEE*, 2000, 88(5):

- 611-640.
- [7] Alamouti S M and Kallel S. Adaptive trellis-coded multiple-phase-shift keying for Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. on Communication*, 1994, 42(6): 2305-2314.
- [8] Goldsmith A J and Ghee C S. Adaptive coded modulation for fading channels. *IEEE Trans. on Communication*, 1998, 46(5): 595-602.
- [9] Zhang Yuling, Yuan Dongfeng, and Zhang Haigang. Adaptive LDPC for Rayleigh fading channel, Proceedings of Ninth International Symposium on Computers and Communication, Alexandria, Egypt, 2004, 2: 651-656.
- [10] 3GPP. TS 45.005. Radio transmission and reception (Release 7). 2006.
- [11] IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005 (Amendment and Corrigendum to IEEE Std 802.16-2004), IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1, 2006.
- 周明宇: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 Beyond 3G 系统中的链路自适应技术.
- 李立华: 女, 1976 年生, 副教授, 研究方向为 3G/Beyond 3G 关键技术、链路自适应技术、MIMO 技术、OFDM 技术、多用户检测等.
- 路维佳: 女, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为 LDPC 编码以及链路自适应技术等.
- 陶小峰: 男, 1970 年生, 副教授, 研究方向为 3G/Beyond 3G 关键技术、包括空时编码、MIMO、新型小区结构、群切换等.
- 张 平: 男, 1959 年生, 教授, 研究方向为 3G/Beyond 3G 关键技术、特别在多址技术、调制和编码技术等.