

一种基于 IoT 控制的小区功率控制方法

李中年^{①②} 郑毅^② 王亚峰^② 杨大成^②^①(华中师范大学电子与信息工程系 武汉 430079)^②(北京邮电大学无线理论与技术实验室 北京 100876)

摘要: 该文针对 OFDMA 蜂窝系统中上行干扰特性, 提出了基于 IoT 控制的小区功率控制方法。该方法通过相邻小区相互交换干扰信息, 对传统的功率控制进行修正, 并根据调整原则和调整步长, 提出了 4 种控制方法, 使得系统 IoT 更稳定, 吞吐量更高。仿真证实了这 4 种控制方法都优于传统未加 IoT 控制的功率控制方法, 其中基于固定比较对象的自适应调整步长的功率控制方法最优。

关键词: OFDMA; 功率控制; 小区间干扰; IoT(干扰噪声)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2703-05

An Inter-cell Power Control Method Based on IoT

Li Zhong-nian^{①②} Zheng Yi^② Wang Ya-feng^② Yang Da-cheng^②^①(Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)^②(Wireless Theory and Technology Lab, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: Considering the uplink inter-cell interference in the OFDMA cellular system, an inter-cell power control method based on IoT is proposed. This method gives an amendment on the traditional power control through the exchange of the interference of the neighbor cells, and in accordance with the adjustment principle and adjustment step, four power control methods are put forward, which can make IoT more stable and have higher throughput. The simulation results show that all these four methods are superior to the traditional power control method, in which, the adaptive step power control combining with fixed target IoT is optimal.

Key words: OFDMA; Power control; Inter-cell interference; IoT(Interference over Thermal)

1 引言

近年来, 相比于 CDMA 技术, OFDM 技术有着高频谱性能和天然的抗多径能力, 以 OFDM 为核心的无线通信系统受到广泛关注, 例如 LTE, UMB 和 WiMAX 系统。在 CDMA 系统中, 由于所有用户都占用同一频段, 存在“多址干扰”和“远近效应”, 功率控制必不可少。而在以 OFDMA 为多址方式的蜂窝小区, 用户占用不同的频段, 除了无线信道时变性带来的频率偏移导致的子载波不正交, 用户之间基本上没有相互干扰。系统的上行干扰主要体现在小区间的同频干扰, 并且此种干扰呈近似对数正态分布^[1]。因此 OFDMA 系统中的功率控制不仅需要平衡本小区内部各用户的吞吐量, 还需要考虑小区之间的相互干扰。本文针对 OFDMA 上行系统, 提出了一种基于系统干扰的小区功率控制方法, 通过相邻小区间交换干扰信息, 使得系统的干扰稳定, 吞吐量更高。

2 传统的功率控制

在未来高速无线系统中, 数据业务占主导, 怎样用较小的发射功率来获得较大的吞吐量是功率控制首先要解决的问题。在 OFDMA 小区内, 由于各用户使用频带正交, 没有干扰。功率控制对小区内用户来说, 只需提供满足传输速率的最小发射功率。根据不同用户的业务需求不一样的特性, 文献[2,3]提出了部分路损补偿的功率控制方法。即在功率控制中, 只补偿一部分路径损耗。单个用户对应的功率控制公式为

$$\text{TxPower}_{\text{dBm}} = \min(10 \lg(M) + \Gamma_{\text{dB}} + I_{\text{dBm}} + \alpha \cdot \text{PL}_{\text{dB}}^{\text{serv}}, \text{Tx}_{\text{dBm}}^{\text{max}}) \quad (1)$$

其中 I_{dBm} 为当前系统的干扰, 即整个蜂窝网络中其它小区对此小区的干扰; M 为 OFDMA 系统中为该用户分配的资源块个数; Γ_{dB} 为系统中最高的目标 SINR; $\alpha \in (0,1)$ 为平衡因子; $\text{PL}_{\text{dB}}^{\text{serv}}$ 为服务小区的路径损耗; $\text{Tx}_{\text{dBm}}^{\text{max}}$ 为最大发射功率。与之对应, 用户对应的目标信噪比 γ_{dB} 为

$$\gamma_{\text{dB}} = \Gamma_{\text{dB}} - (1 - \alpha) \text{PL}_{\text{dB}}^{\text{serv}} \quad (2)$$

很明显,不同路损的用户目标信噪比不同,如图1所示。对于小区边缘用户,其路损较大,对应的目标 SINR 相对较小,相应的吞吐量小;而对于小区内部用户,其路损相对小,对应的 SINR 相对较大,数据传送量大。这样就造成了小区内部用户对整个小区的吞吐量贡献大,从而能以较小的功率换取更大的吞吐量。 α 用来衡量内部用户和边缘用户的吞吐量,通过调整 α , 就可以平衡吞吐量与功率消耗。

OFDMA 蜂窝系统的频率复用因子一般为 1, 相邻小区间的同频干扰比较大,对小区边缘用户影响比较大,因此在功率控制中还需要考虑本小区到相邻小区的干扰。文献[4]中对上述功率控制公式作了改进,采用基于路损差的功率控制方式,其目标 SINR 为

$$\gamma_{dB} = \Gamma_{dB}^{\min} + (1 - \alpha) \cdot \Delta PL_{dB} \quad (3)$$

其中 $\Gamma_{dB}^{\min}$ 为归一化值,是系统最小的目标 SINR,而 ΔPL_{dB} 是本小区与最强邻小区的路损差,可以表示为 $\Delta PL_{dB} = PL_{dB}^{\text{neigh}} - PL_{dB}^{\text{serv}}$, PL_{dB}^{neigh} 是用户到最强邻小区的路损。其目标 SINR 如图 2 所示。

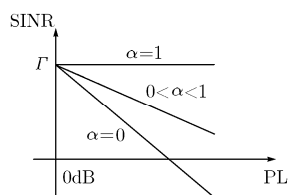


图1 基于部分路损补偿的功率控制方式

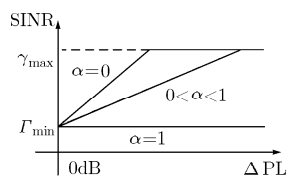


图2 基于路损差的功率控制方法

对应的功率控制公式为

$$TxPower_{dBm} = \min(10 \lg(M) + \Gamma_{dB}^{\min} + I_{dBm} + \alpha \cdot PL_{dB}^{\text{serv}} + (1 - \alpha) \cdot PL_{dB}^{\text{neigh}}, Tx_{dBm}^{\max}) \quad (4)$$

同样,小区内部用户的路损差 ΔPL_{dB} 较大,相应的 SINR 较大;而边缘用户的 ΔPL_{dB} 小,对应的 SINR 较小。路损差 ΔPL_{dB} 大意味着对邻小区的路损相对较大,如果采用高功率发送,对邻小区的干扰也不会大。 ΔPL_{dB} 小,说明到两个小区的路损差距不大,如果采用高功率发送,会对邻小区产生比较大的干扰。此种功控方式考虑了到对邻小区的干扰,相对于部分路损补偿的功率控制方法,较大地提高了系统性能^[4]。

3 基于 IoT 的功率控制

类似于 CDMA 系统中采用背景噪声提升 (ROT, Rise Over Thermal) 来描述干扰, OFDMA 系统中采用 IoT (Interference over Thermal) 来描述

干扰 I_{dBm} , 用如下公式来表示:

$$IoT = \frac{I + N}{N} \quad (5)$$

其中, I 是接收到的干扰, N 是噪声。尽管基于路损差的功率控制方式能提高小区的总的吞吐量,但是对于小区间的干扰 IoT 没有精确控制,不能保持 IoT 的稳定。一个系统保持相对稳定的干扰 IoT, 至少有如下两个优势:

(1) 有利于链路自适应和调度。稳定的 IoT, 使得前后调度周期的干扰大致相近, 干扰预测相对准确, HARQ 重传的次数相对较少, 有利于吞吐量的提高。

(2) 有利于系统规划。稳定的 IoT 可以很容易的算出系统容量和覆盖范围。一个小区的容量 C 可以表示为^[5]

$$C = \sum_{i=1}^N \Delta f \cdot \log_2(1 + \beta \cdot SINR_i) \quad (6)$$

其中 β 跟调制方式和误码率 BER 的大小有关, 是一个常数^[6]; Δf 为每个子载波的带宽; $SINR_i$ 为第 i 个子载波上的信噪比, 可以表示为

$$SINR_i = \frac{G_i \cdot P_i}{I_i + \Delta f \cdot N_0} \quad (7)$$

G_i 是第 i 个子载波的信道增益; P_i 是第 i 个子载波上的发射功率; I_i 是第 i 个子载波上的干扰。在估算系统容量 C 时, P_i 可以采用最大发射功率, G_i 从大尺度上服从一定的分布, 只要 I_i 相对恒定, 就可大致估计出整个系统容量。

基于以上两点, 系统 IoT 的稳定控制是整个网络中的功率控制核心。但是由于各个小区单独调度和功控, 并且干扰 IoT 是多个小区相互影响、相互作用的, 导致系统干扰 IoT 不稳定, 大幅波动。以两个相邻小区的为例, 如图 3 所示。

在确定发射功率时, 用户需要上报信道质量 (Channel Quality Index, CQI) 和缓冲区数据大小 (buffer)。CQI 可以确定调制编码等级 (Modulation and Coding Scheme, MCS)。用户的缓冲区大小和 MCS 等级决定了需要分配的资源块个数 M 。因此, 一个用户的发射功率取决于用户的信道质量 CQI, 分配的频率资源块个数 M , 路损差 ΔPL_{dB} 和其它

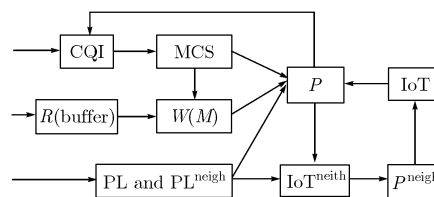


图3 相邻小区的功率控制的相互影响

小区对此小区的干扰 IoT 。一旦确定了在某个子载波 i 上的功率 P_i ，就会对相邻小区产生一个干扰

$$\text{IoT}_i^{\text{neigh}} = \frac{g_i^{\text{neigh}} \cdot P_i + N}{N} \tag{8}$$

其中 g_i^{neigh} 是用户在此子载波上到邻小区基站的信道响应。相应地，邻小区也可根据自己小区的类似信息，确定其小区子载波上的功率 P_i^{neigh} ，此功率会受到 $\text{IoT}_i^{\text{neigh}}$ 的影响。继而此功率 P_i^{neigh} 会对本小区产生干扰 IoT_i ，而这个干扰又会影响本小区的功率 P_i 。由此可见，这种影响是相互的、循环的，形成一种正反馈。当本小区提高功率 P_i ，就会使得相邻小区的干扰 $\text{IoT}_i^{\text{neigh}}$ 变大。邻小区用户为了得到相应的信噪比，会提升发射功率 P_i^{neigh} 。这样来自邻小区对本小区的干扰 IoT_i 会变大，从而又会使功率 P_i 更大，理论上导致了两个小区的功率不停地变大，反之亦然。因此需要打断此循环过程，需要对 IoT 进行控制，避免 IoT 无限增大或减小，提高系统的稳定性。

为了使 IoT 稳定，有多种方法，比如调度的方法^[7]，但是最直接的方法是引入小区间干扰控制，通过知晓邻小区的干扰，对功率控制进行修正，来打破此种正反馈现象。此修正方法需要相邻小区向本小区传递其干扰信息。由于 OFDMA 中功率控制是慢速的，控制频率在 10 ms-20 ms 之间，因此邻小区向本小区的干扰传递信息不是很频繁，因此方案是实用可行的，比如在 LTE 方案中，每 20 ms 传递一次小区的负载指示信息^[8]。有了邻小区的干扰信息，就可根据干扰信息对 IoT 进行控制，在基于路损差的功率控制中增添一项 IoT 的控制偏移量 ΔP_{OI} 。

$$\begin{aligned} \text{TxPower}_{\text{dBm}} = & \min(10\lg(M) + I_{\text{dB}}^{\min} + I_{\text{dBm}} \\ & + \alpha \cdot \text{PL}_{\text{dB}}^{\text{serv}} + (1 - \alpha) \cdot \text{PL}_{\text{dB}}^{\text{neigh}} + \Delta P_{\text{OI}}, \text{Tx}_{\text{dBm}}^{\max}) \end{aligned} \tag{9}$$

其中 ΔP_{OI} 为系统根据实际 IoT 的干扰状况对功率控制方式的调整。与基于路损差的功率控制方法类似，这里主要根据最强邻小区的干扰信息来做调整。调整有多种方法，归纳为以下两个方面：调整策略(比较对象)和调整步长。

调整策略指：最强邻小区的 IoT 与哪个对象去比较。比较对象又可分为两类：(1)系统的目标 IoT (绝对比较)；(2)本小区的 IoT (相对比较)。如果最强邻小区的 IoT 比系统的目标 IoT 要小，说明邻小区受到的干扰偏小，需要增大本小区的发射功率，以增大本小区对邻小区的干扰。如果最强邻小区的 IoT 比系统目标 IoT 大，说明邻小区受到的干扰大，需要本小区降低发射功率来减小邻小区的 IoT 。此方法最为直接简单，但是系统的目标 IoT 为多大，

在实际系统运行中，可能尚不得知，因此我们考虑另外一种调整策略，即相对调整。用最强邻小区的 IoT 和本小区的 IoT 来比较，如果最强邻小区的 IoT 比本小区的 IoT 小，说明本小区对邻小区的干扰偏小，需要增大本小区的发射功率，反之亦然。

调整步长指：每次功率调整偏移的大小。也可分为两类：(1)固定步长，比如 0.5 dB，1 dB；(2)相对步长(自适应步长)，最强邻小区的 IoT 与系统目标 IoT 或本小区的 IoT 的差值。

综合起来分为以下 4 种组合情况：相对比较与绝对步长、相对比较与相对步长、绝对比较与绝对步长、绝对比较与相对步长，具体如表 1 所示。

表 1 4 种调整方式

绝对步长		相对步长
绝对比较	$\Delta P_{\text{OI}} = \begin{cases} -\Delta, & \text{IoT}_{\text{neigh}} > \text{IoT}_{\text{target}} \\ \Delta, & \text{IoT}_{\text{neigh}} < \text{IoT}_{\text{target}} \end{cases}, \Delta = \{0.5, 1, 1.5, \dots\} \text{dB}$	$\Delta P_{\text{OI}} = \text{IoT}_{\text{target}} - \text{IoT}_{\text{neigh}}$
相对比较	$\Delta P_{\text{OI}} = \begin{cases} -\Delta, & \text{IoT}_{\text{neigh}} > \text{IoT}_{\text{serv}} \\ \Delta, & \text{IoT}_{\text{neigh}} < \text{IoT}_{\text{serv}} \end{cases}, \Delta = \{0.5, 1, 1.5, \dots\} \text{dB}$	$\Delta P_{\text{OI}} = \text{IoT}_{\text{serv}} - \text{IoT}_{\text{neigh}}$

4 仿真与分析

为了比较以上 4 种控制方法，现采用 LTE 上行的仿真环境^[9]，如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	数值
带宽	5 MHz
载频	2 GHz
基站的噪声系数	5 dB
资源块个数	50
资源块频率间隔	180 kHz
小区布局模型	7 个正六边形小区，每小区 3 个扇区
站间距	500 m
HARQ	6 个 HARQ 进程，最大重传次数为 3
每扇区用户数	10
调度算法	正比公平算法(TTI = 1 ms)
路径损耗	$L = 128.1 + 37.6 \cdot \lg(R)$
阴影衰落	衰落的方差为 8 dB
穿透损耗	20 dB
天线增益	$A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2, A_m\right]$ $\theta_{3\text{dB}} = 70^\circ, A_m = 20 \text{ dB}$
业务模型	满数据业务(Full buffer)
用户最大信噪比	25 dB
用户最大传送功率	21 dBm
MCS 等级	QPSK $R=1/8, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4$ 16QAM $R=1/2, 2/3, 4/3, 4/5$
信道模型	SCME

系统采用3扇区基站, 7个基站, 共21个BTS。仿真时间为1.5 s, 前0.5 s为系统预热时间, 后面的1 s为统计时间。系统的初始IoT和目标IoT都设定为9 dB。未加IoT控制的系统平均IoT的CDF曲线如图4所示。

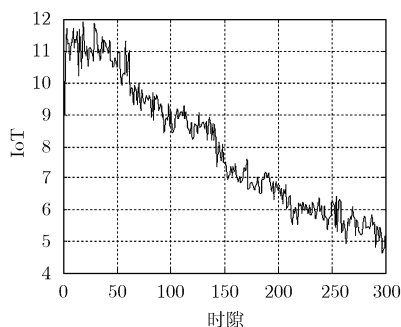


图4 没有IoT控制的算法

从图4看出, 21个BTS的平均IoT随着仿真时间的增大, 其值逐渐减小, 越来越偏离系统的目标IoT。即系统的IoT处于减小的正反馈中, 只要本小区的IoT减小, 就会使本小区用户的发射功率减小, 继而使相邻小区的IoT减小, 从而影响邻小区用户的发射功率减小, 造成邻小区对本小区的干扰减小, 形成不利的正反馈。

图5和图6分别是绝对比较和相对比较的IoT控制方法下的系统平均IoT的CDF曲线, 图5和图6中的(a), (b), (c), (d)和(e)分别表示绝对比较和相对比较下, 步长 ΔP_{OI} 为0.5 dB, 1 dB, 1.5 dB, 2.0 dB和2.5 dB的功率控制方法, 而图5和图6的(f)表示两种情况下的, 步长 ΔP_{OI} 采用相对步长的功率控制方法。图中横坐标参量均为时隙。

从图5看出, 在绝对比较的情况下, 每种功率控制方法的IoT曲线都比图4中的IoT曲线更加稳定, 方差更小。随着步长 ΔP_{OI} 的增大, IoT逐渐增大, 相应的方差也增大, 如表3所示。观察吞吐量, 可以发现吞吐量先升高, 然后下降。说明吞吐量受系统IoT的平均值和方差这两个因素制约。在方差相近的情况下, IoT的平均值越高, 吞吐量越高, 因为IoT代表了来自其它邻小区的干扰, 间接说明了整个系统的资源利用率。在IoT平均值相当的情况下, IoT方差越小, 吞吐量越高, 因为IoT方差小, 说明前后的干扰变化相对小, 对链路自适应是有利的, 即HARQ的重传相对较少, 吞吐量就相应得到提高。当 ΔP_{OI} 为2.5 dB时, 其IoT最高, 但是方差也是绝对比较中最大的, 其吞吐量最小。从图5的(e)也能

看出其IoT的波动范围很大, 说明每次调整的步长太大, 偏离了系统的目标IoT。而 ΔP_{OI} 在1.0 dB时, 其吞吐量最大, 但是离目标IoT值(9 dB)有一定差距。当 ΔP_{OI} 采用相对步长时, 如图5的(f)所示, 其IoT最接近系统目标IoT, 方差为第二小, 其总的吞吐量最大, 因此采用相对步长, 性能是最优的。

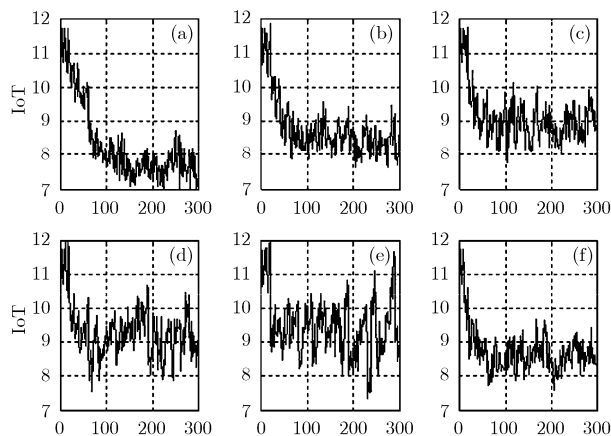


图5 绝对比较的IoT控制算法

在图6显示的相对比较中, 其平均IoT的变化趋势随着调整的步长不同而不同。当 ΔP_{OI} 为0.5 dB时, 平均IoT呈下降趋势; 随着调整步长的增大, 平均IoT变化趋势减小; 但当 ΔP_{OI} 为2.5 dB时, 平均IoT呈上升趋势。从表4中看出, IoT的平均值随着 ΔP_{OI} 的增大而增大, 但是方差变化无明显趋势, 但总的吞吐量先增大, 然后减小。分析原因在于相对比较是本小区的IoT值和最强邻小区的IoT值做比较, 而邻小区的IoT是受本小区的IoT的影响, 因此正反馈现象没有完全消除, 还有一定的关联。但是相对于未加控制的方法, 其性能还是占优的。

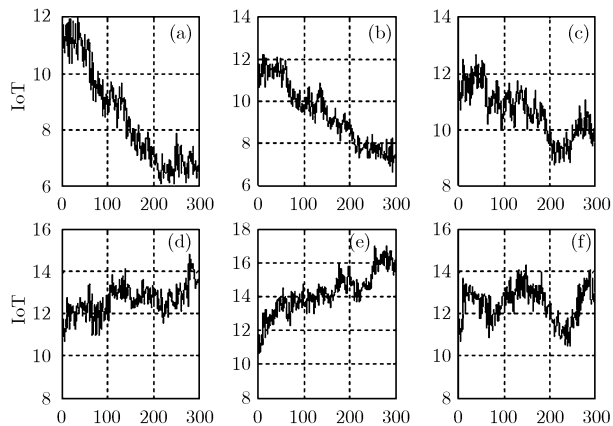


图6 相对比较的IoT控制算法

表3 绝对比较的性能对比

		绝对比较					
		0.5 dB	1.0 dB	1.5 dB	2.0 dB	2.5 dB	相对步长
IoT均值	6.76	7.73	8.48	8.91	9.21	9.35	8.61
IoT方差	1.21	0.37	0.37	0.44	0.55	0.82	0.38
吞吐量	340.27	351.86	360.93	358.75	358.39	348.47	361.37

表4 相对比较的性能对比

		相对比较					
		0.5 dB	1.0 dB	1.5 dB	2.0 dB	2.5 dB	相对步长
IoT均值	6.76	7.43	8.58	10.22	12.91	14.79	12.51
IoT方差	1.21	0.96	1.00	0.72	0.57	0.94	0.87
吞吐量	340.27	347.51	353.68	356.07	352.94	350.92	355.48

比较表3和表4,发现调整策略和调整步长的4种组合过程中,绝对比较和相对步长的组合的控制方法性能最优。并且所有组合的方法,其吞吐量都优于IoT未做控制的方法。

5 结论

本文针对OFDMA蜂窝小区中的上行干扰特性,提出了小区间功率控制的必要性。提出相邻小区以一定的频率交换相互的干扰信息,针对此干扰信息,对功率控制作调整。并且针对调整策略和调整步长,提出了4种基于IoT控制的功率控制算法,仿真验证结果表明这4种算法都优于未加IoT控制的算法,并且基于绝对比较的自适应步长算法是最佳的功率控制方式。

参考文献

- [1] Vieri I, Klein A, and Ivrlac M, *et al.* On uplink intercell interference in a cellular system[C]. IEEE International Conference on Communications, Istanbul, June 2006: 2095-2100.
- [2] 3GPP R4-060630, Power control for E-UTRA uplink coexistence study[S], May 2006.
- [3] 3GPP R4-060914, On selecting optimal power control parameters for E-UTRA uplink[S], September 2006.

- [4] Rao A.M. Reverse link power control for managing inter-cell interference in orthogonal multiple access systems[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Baltimore, Sept.30-Oct.3 2007: 1837-1841.
- [5] Lei Haipeng, Zhang Lei, and Zhang Xin, *et al.* A novel multi-cell OFDMA system structure using fractional frequency reuse[C]. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications conference, Athens, Sept. 3-7, 2007: 1-5.
- [6] Goldsmith A J and Chua Soon-ghee. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [7] Fodor G and Koutsimanis C. A low intercell interference variation scheduler for OFDMA networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Beijing, May 2008: 3078-3084.
- [8] 3GPP R1-080631, Draft report of RAN1#51 bis meeting[S], 2008.
- [9] 3GPP TR 25.814, Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) [S], 2006.

李中年: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为下一代无线宽带系统中的无线资源管理.

王亚峰: 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为移动通信.

杨大成: 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信.