

采用发送功率加权分配策略的群小区架构容量与覆盖分析

许晓东 陶小峰 吴春丽 张平

(北京邮电大学无线新技术研究所 北京 100876)

摘要: 随着用户对高速率、高质量无线通信业务需求的不断增长,以及对多入多出、空时码、分布式天线等多天线信号处理技术的深入研究,探讨面向未来移动通信系统的小区构建方法成为必然的需求。该文介绍了一种广义分布式小区架构——群小区,群小区架构适应先进的物理层技术,能够充分利用多天线技术带来的优势,并且可以解决未来移动通信系统由于载频提高导致小区变小带来的频繁切换问题。该文介绍了群小区架构的概念、构建方法以及基于群小区架构的滑动切换策略,重点分析了群小区架构采用下行发送功率加权分配策略下的容量性能和覆盖性能。理论分析和仿真结果证明,与当前的小区架构相比较,群小区架构可以有效地提高系统容量,扩大覆盖范围。

关键词: 群小区; 发送功率加权分配策略; 中断概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1271-05

Capacity and Coverage Analyses for Group Cell with Weighted Transmission Power Allocation Scheme

Xu Xiao-dong Tao Xiao-feng Wu Chun-li Zhang Ping

(Wireless Technologies Innovation Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: With the increasing demand for high data rate and high quality of mobile telecommunication services, and the deeply research on multi-antenna techniques, the cellular concept and network topology for future mobile communication systems are necessarily researched. This paper introduces the generalized distributed cellular architecture-group cell, which is suitable for advanced physical techniques and solves the problem of smaller cells caused by higher frequency carrier. The concept and the structure of the group cell are described and slide handover strategy based on the group cell is introduced as well. The system performance of capacity and coverage with downlink weighted transmission power allocation scheme are focused both in theory and numerical simulation. Compared to traditional cellular structure, the simulation results verify that group cell architecture can improve the system capacity and enlarge the coverage area.

Key words: Group cell; Weighted transmission power allocation scheme; Outage probability

1 引言

近年来,随着网络和移动通信技术的不断发展,人们对高速率和高质量无线通信业务的需求显著增长。一方面,急剧增加的用户数与有限的带宽资源的矛盾日益突出,对多媒体业务需求的不断增长更加剧了这一矛盾。这就要求系统采用各种技术提高频带利用率。但是单纯提高频率复用因子的方法会增加系统中的干扰,同时现有的蜂窝移动通信系统^[1]在提供高性能高速率业务方面还存在很多问题,研制开发新一代的移动通信系统已经被提上议事日程。在研究开发新一代移动通信系统的过程中,正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)^[2],多输入多输出(Multi Input Multi Output, MIMO)^[3]和空时码(Space Time Code, STC)^[4]等技术由于在增加频谱效率、提高通信质量上的巨大潜力而在未来移动通信系统的设计中广被看好。但是

现有的蜂窝网络架构已经不能充分发挥多天线技术的优势,于是,如何在未来移动通信系统中广泛有效地应用上述技术成为了研究的重点。

另外,由于2GHz左右的频谱资源出现饱和趋势,目前的一个共识是在后三代(Beyond 3G, B3G)等下一代移动通信系统中将提高目前移动通信系统所使用载波频率。但是载频的提高将带来信号损耗增大,这就使得在相同发射功率的情况下蜂窝小区的半径进一步减小,即覆盖相同的区域内需要更多的小区。如果仍采用现有的小区结构以及切换策略,可以想象系统中的切换会非常频繁。频繁的切换不仅将降低系统的效率,而且也会造成切换失败概率增大以及系统性能的下降。

综合上述两个方面,现有的移动通信蜂窝网络架构面临着新的发展需求,未来移动通信系统中应用的蜂窝网络架构需要充分适应物理层先进技术并且能够有效解决由于载频提高导致小区面积减小而带来的频繁切换问题。基于现有的

蜂窝网络架构, 已经有研究者提出了一些改进措施, 例如虚拟小区系统(Virtual Cell Network, VCN)^[6]、分布式无线通信系统(Distributed Wireless Communication System, DWCS)^[6]等。这些改进型的移动通信系统基于分布式网络概念, 小区的构建方法更加灵活, 可以在一定程度上提高系统容量以及覆盖范围, 代表了未来蜂窝网络架构的演进方向。本文介绍了一种广义蜂窝通信网络理论和构造方法, 广义分布式小区架构——群小区^[7, 8]。群小区架构结合了分布式天线系统在覆盖范围方面的优势以及MIMO等多天线技术在容量与频谱效率方面的优势, 可以提供更高的系统容量与更大的覆盖范围, 同时更有效地支持物理层多天线等各种先进技术的使用。而且基于群小区架构的滑动切换策略可以使用户始终处于小区的中心, 消除小区边缘效应, 可以解决目前3GPP, 3GPP2发起的面向3G增强系统(Enhanced 3G, E3G)演进中关于提高小区边缘用户性能的迫切需求^[9, 10]。群小区架构已经在中国 863 Future Technologies for Universal Radio Environment (FuTURE) B3G Time Division Duplex (TDD)项目硬件演示系统中得到验证及应用, 具有良好的发展前景。

本文在第 2 节介绍了群小区架构的定义、构成方法以及滑动切换的概念, 第 3, 第 4 节重点分析了采用发送功率加权分配策略的群小区架构的容量性能和覆盖性能, 第 5 节给出了与传统小区架构相比较的群小区架构容量性能和覆盖性能的系统级仿真结果, 最后总结全文。

2 群小区架构的定义与构建方法

在多天线发送技术的基础上, 群小区的定义为: 在地理位置上相邻的多个小区, 针对一个移动终端采用同一套资源(例如频率、码道、时隙等)进行通信, 而对其他终端分别采用不同的资源进行通信。群小区的组成结构如图 1 所示, 表示的是群小区架构在市区环境以及高速公路环境下的典型构建方式, 根据不同的应用环境, 群小区的结构、大小也可以不同。

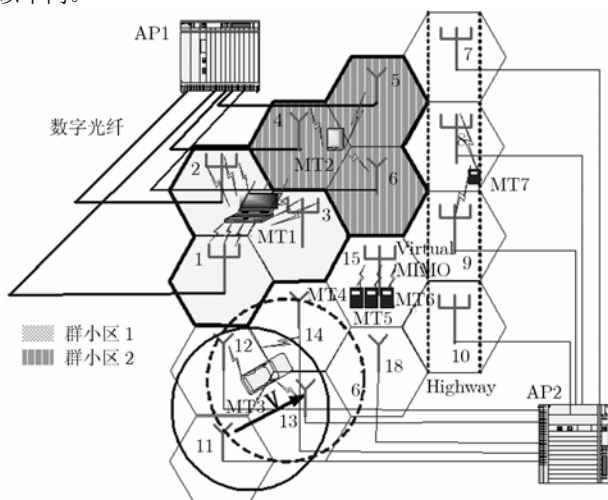


图 1 群小区架构示意图

参见图 1, 在一个典型的基于群小区架构的无线通信系统中, 每一个接入点(Access Point, AP)连接 N 个分离的天线单元(可以为单天线或天线阵)。典型的天线单元间距为十几米到几十千米, 其中天线单元和 AP 之间可以通过分布式光纤、同轴电缆等方式连接, 天线单元仅负责无线信号的收发, 信号处理功能由接入点完成。图 1 中 AP1 连接有 6 个天线单元, AP2 连接有 10 个天线单元。如果定义构成一个群小区的天线单元个数为 3, 那么 AP1 连接的天线单元可以构成 2 个群小区, 如由天线单元 1, 2, 3 构成的群小区 1 以及由天线单元 4, 5, 6 构成的群小区 2。这是固定群小区的组成结构, 构成一个群小区的天线单元不发生变化。

考虑 AP2 内部发生的另一种情况, 随着移动终端的移动, 构成一个群小区的天线单元可以随着移动终端的移动发生动态变化, 群小区不再是固定的结构。例如图 1 中服务移动终端 MT3 的群小区(由天线单元 11, 12, 13 构成)随着 MT3 的运动动态改变为由天线单元 12, 13, 14 构成, 群小区的这种构成方式即为滑动群小区结构。滑动群小区的构成可以看作一个窗口滑动的过程。构成一个群小区的天线单元相当于一个动态变化的窗口, 这个窗口的大小、形状以及滑动的速度可以根据其服务的移动终端的运动方向及速度进行动态改变。当移动终端运动速度比较快时, 滑动窗可以大一些以跟随移动终端的移动, 减少其切换。而当移动终端的运动方向产生变化时, 滑动窗的方向也可以跟随其变化, 不同的移动终端会对应不同的群小区结构。

从群小区的定义中可以看出一个群小区内各个小区的信源是相同的, 所以可以联合在这个群小区内不同小区中的天线单元使用类似于 MIMO, STC, 分布式天线等技术的思想来实现。这样可以提高系统的抗干扰能力, 降低各小区接入点的复杂度, 减少切换次数, 提高系统容量。另外, 由于同一个群小区内各小区的信源相同, 因而移动终端在经过不同小区时并不需要进行切换, 只有出了这个群小区的覆盖范围时, 才需要进行群小区间的切换——群切换。群切换是将移动终端从与它通信的一个群小区切换到另一个群小区, 具体的切换方式与群小区的构成方式是对应的, 例如固定群小区架构下的固定群切换和滑动群小区架构下的滑动切换, 在滑动切换的情况下, 用户可以始终处于小区的中心, 如图 1 中 MT3 所处的情况, 从而小区边缘效应可以得到消除。

3 群小区架构的容量性能分析

容量分析用来评价系统可以容纳用户或者为用户提供服务的能力, 是系统性能分析的重要技术之一, 本文将使用香农容量从理论上分析群小区系统的性能, 并以仿真结果为辅助来说明基于多天线技术的群小区架构较传统蜂窝系统在系统容量上的提高。在以下的分析中, 将以下行链路为例, 分析群小区架构与传统小区架构相比较的容量性能。在研究群小区架构下行容量性能时, 群小区下行发射功率可以应用

每天线单元等功率发送策略, 或者采用发送功率加权分配策略^[8], 本文将主要针对采用发送功率加权分配策略的情况, 对群小区架构的系统容量性能做进一步的研究。

考虑多个群小区的情况, 假设每个群小区由 N 个天线单元构成, 此 N 个天线单元所在的位置分别为 $z_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, \dots, N$, 并且移动终端运动的轨迹设为 $z = (x, y)$ 。群小区中各天线采用发送功率加权分配策略时, 考虑 Raleigh 快衰落的信道容量可以表示为

$$C = B \log_2 \det \left(I + \frac{P_r}{N_0 B} \mathbf{H} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{H}^H \right) \quad (1)$$

其中移动台在下行链路接收的信号功率为 $P_r = \sum_{i=1}^N P_{t,i} L_i$, 其中 $P_{t,i}$ 为第 i 个天线单元的发射功率, L_i 为第 i 个天线单元到移动终端的路径增益, 包含了路径损耗、阴影衰落等, N_0 为噪声功率谱密度, B 为带宽。其中 \mathbf{H} 为信道特性, \mathbf{H} 表示共轭转置, $\mathbf{R}_{ss} = E(\mathbf{s}\mathbf{s}^H)$, \mathbf{s} 为发送信号。群小区架构的平均信道容量可以由式(1)进一步表示为

$$C_{\text{AVG}} = \iint_S p(x, y) B \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^N P_{t,i} L_i(x, y) / (N_0 B) \right) dx dy \quad (2)$$

其中 S 是群小区的覆盖区域, $p(x, y)$ 是移动终端所在位置 $z = (x, y)$ 的概率分布密度。

群小区架构应用下行发送功率加权分配方案后, 构成群小区各个天线单元可以根据当前与移动终端通信链路的路径损耗对其发射功率进行加权发送, 这样可以进一步提高群小区架构的容量性能。针对每一个移动终端所处的位置, 使用发送功率加权分配方案后移动终端接收的信号功率为 $P_r = NP_t \Psi$, 其中 Ψ 为功率加权因子, $\Psi = \frac{\sum_{i=1}^N L_i'}{\sum_{i=1}^N L_i}$ 。

根据 Log-Normal 阴影衰落模型, 对处在位置 $z = (x, y)$ 的所有移动终端, $L_{i,\text{shadow}} \sim N(0, \sigma^2)$, $i = 1, \dots, N$, σ 为阴影衰落的标准方差。在多群小区环境下, 由于阴影衰落在一定程度上影响着移动终端对小区的选择, 所以需要进一步考虑阴影衰落情况下的多群小区的情况。在移动终端对服务群小区的选择过程中, 需要用到等效路径损耗(Equivalent Path-Loss, EPL)^[8]。EPL表示为

$$L'_{k,\text{EPL}} = \sum_{i=1}^N L'_{k,i} = \sum_{i=1}^N L_{k,i} \times L_{i,\text{shadow}}$$

其中 $L'_{k,i}$ 是第 k 个群小区中的第 i 个天线单元与移动终端的路径损耗和阴影衰落共同作用下的值。

因此, 进一步可以得到平均信道容量:

$$C_{\text{AVG}} \approx \iint_{S, \text{EPL}_0 > \text{EPL}_k, \forall k=0} B \log_2 [1 + NP_t \Psi / (N_0 B)] dx dy / \left(\frac{9\sqrt{3}}{2} r^2 \right) \quad (3)$$

则群小区架构的遍历信道容量可以表示为:

$$E(C_{\text{AVG}}) \approx \frac{\iint_{S, \text{EPL}_0 > \text{EPL}_k, \forall k=0} [B \log_2 (1 + E(NP_t \Psi) / (N_0 B))] dx dy}{\left(\frac{9\sqrt{3}}{2} r^2 \right)} = \frac{\iint_{S, \text{EPL}_0 > \text{EPL}_k, \forall k=0} [B \log_2 (1 + NP_t \times e^{1/2} \times \Psi / (N_0 B))] dx dy}{\left(\frac{9\sqrt{3}}{2} r^2 \right)} \quad (4)$$

其中 S 表示所研究的群小区的覆盖区域, EPL_k 为第 k 个群小区的等效路径损耗, EPL_0 为 EPL_k 中的最大值。

4 群小区架构的覆盖性能分析

为了分析群小区架构相对于传统小区架构的覆盖性能, 本文将通过分析系统的中断概率^[11]来比较群小区架构与传统小区架构的覆盖性能。这里的系统中断概率定义为移动终端接收到的SNR小于目标SNR的概率。本文将以下行中断性能分析为例, 仍然采用下行发送功率加权分配策略。

在移动通信系统中, 移动信道受到3种因素的影响, 即大尺度衰落(即路径损耗), 阴影衰落以及快衰落。可以将受到这3种衰落影响的移动信道建模为Rayleigh-Log-Normal信道模型^[11], 基于Rayleigh-Log-Normal模型的功率分布函数可以表示为

$$f_\gamma(\gamma | u, \sigma) = \int_0^\infty \frac{1}{s} e^{-\frac{\gamma}{s}} \frac{10}{\ln(10)\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp \left\{ -\frac{(10 \log_{10} s - u)^2}{2\sigma^2} \right\} ds \quad (5)$$

基于式(5), 天线单元数目为1的传统小区架构的中断概率可以表示为:

$$P_{\text{otg}, N=1} = P\{\gamma < \gamma_{\text{req}} | \mu, \sigma\} = \iint_S E_\gamma(\gamma | s, u, \sigma) P\{s = (x, y) | \mu, \sigma\} ds \quad (6)$$

其中

$$E_\gamma(\gamma | r) = \int_0^\gamma \int_0^\infty \frac{1}{s} e^{-\lambda/s} \frac{10}{\ln(10)\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp \left\{ -\frac{(10 \log_{10} s - u)^2}{2\sigma^2} \right\} ds d\lambda = 1 - \int_0^\infty e^{-\gamma/s} \frac{10}{\ln(10)\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp \left\{ -\frac{(10 \log_{10} s - u)^2}{2\sigma^2} \right\} ds \quad (7)$$

而

$$\int_0^\infty e^{-\gamma/s} \frac{10}{\ln(10)\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(10 \log_{10} s - u)^2}{2\sigma^2} \right\} ds = \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \exp \left\{ -\gamma 10^{-(\sqrt{2}\sigma x + \mu)/10} \right\} dx$$

借助 Gauss-Hermite 积分方法^[11], 有

$$F_{\gamma}(\gamma | r) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \{1 - \exp(-\gamma 10^{-(\sqrt{2}\sigma x + \mu)/10})\} dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{N_H} A_i g(x_i, \gamma | \mu, \sigma) \quad (8)$$

其中 $g(x_i, \gamma | \mu, \sigma) = 1 - \exp\{-\gamma 10^{-(\sqrt{2}\sigma x + \mu)/10}\}$, 所以

$$P_{\text{otg}, N=1} = P\{\gamma < \gamma_{\text{req}} | \mu, \sigma\} = \iint \frac{p(s)}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{N_H} A_i g(x_i, \gamma | \mu, \sigma) ds \quad (9)$$

假设具有 N 个天线单元的群小区架构发送端的发送 SNR 为 γ_i , 那么移动终端接收到的分集信号可以表示为 $\gamma_{\text{rec}} = \gamma_t \sum_{i=1}^N \Psi_i G_i$, 其中 G_i 为第 i 个天线单元到移动终端的路径增益, Ψ_i 为第 i 个天线单元的发送功率加权因子, 采用发送功率加权分配方案后, 其加权因子 $\Psi_i = 10^{-\mu_i/10} / \sum_j 10^{-\mu_j/10}$ 。令 $\gamma_t = 1$, 通过式(5)-式(9), 多

天线单元的群小区架构中断概率可以表示为:

$$P_{\text{otg}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\pi^{N/2}} e^{-\sum_{i=1}^N x_i^2} \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N e^{-\eta \phi_i} \prod_{k \neq i} \frac{\phi_k}{\phi_k - \phi_i} \right\} \cdot dx_1 dx_2 \dots dx_N \quad (10)$$

其中 $\phi_i = 10^{-(\sqrt{2}\sigma x_i + \mu_i)/10} / \Psi_i$ 。

5 数值分析与仿真结果

根据第 3, 第 4 节的理论分析, 结合系统级仿真, 可以得到群小区架构与传统蜂窝架构的容量和覆盖性能比较, 其中仿真参数如表 1 所示, 仿真结果参见图 2 和图 3。其中群小区架构和传统小区架构的系统中断概率的分析计算是采用 Gauss-Hermite 积分进行计算得到的。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	设置
群小区中天线的数量	1, 2, 3
群小区个数	9
天线间距	500m
载波频率	5.3GHz
AP 总发射功率	13dBw
系统总带宽	20MHz
典型热噪声	-156dBw
阴影衰落标准方差	5dB

图 2 比较了传统小区架构、固定群小区架构和滑动群小区架构的系统容量, 其中群小区架构分别应用了下行各天线单元等功率发送策略以及发送功率加权分配策略。为了保证比较的公平性, 在仿真中群小区架构每个群小区总的发送功率与传统小区结构中基站的发送功率相同。可以从信道容量的 CDF 曲线上看出, 相对于传统小区结构, 采用等功率发送策略的固定群小区架构的系统容量平均可以提高 20%左右, 而滑动群小区架构相对于固定群小区架构可以进一步提

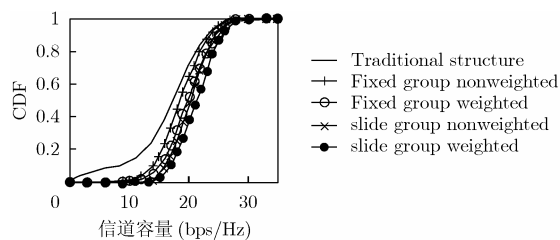


图 2 群小区架构与传统小区架构信道容量比较

高 20%左右。而应用加权功率发送策略后, 群小区架构的系统容量相对于应用等功率发送策略的群小区架构有大约 7%的进一步提高。

图 3 给出了群小区架构在下行采用加权功率发送方案的情况下小区半径和系统中断概率关系曲线, 这张图从完成覆盖的角度说明了群小区架构相对于传统小区架构($N=1$)的优势。从仿真结果中可以看出, 在保证总发射功率相同的情况下, 固定群小区架构与滑动群小区架构的覆盖性能相比传统小区架构均有进一步的提高。在保证 10^{-2} 中断概率的情况下, 大小为 3 的固定群小区和滑动群小区覆盖的小区半径可以提高到 470m 和 610m。由此得出, 相对于传统小区架构, 覆盖同样的区域时, 采用群小区架构可以有效地降低天线密度, 从而降低网络建设需要的成本。使用大小为 2 的固定群小区架构可以使天线密度降低 1/4, 而使用滑动群小区架构可以进一步降低到 1/2。

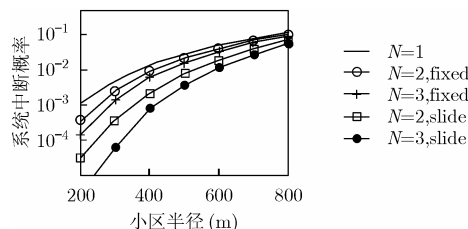


图 3 发送功率加权分配策略下群小区架构与传统小区架构覆盖性能比较

6 结束语

构建在多天线技术基础上的广义分布式小区架构使群小区能够充分发挥多天线技术的优势, 为未来无线通信系统的关键技术提供了应用环境, 可以大幅度地提高系统容量和覆盖范围。另外, 基于群小区的系统可以有效地减少越区切换次数, 提高切换性能和资源利用率, 滑动切换策略更可以使用户始终处于小区中心, 消除小区边缘效应, 为无线资源的联合优化和系统性能的提高提供了新的解决方案。群小区架构已经在中国 863 Future 3G TDD 系统中得到了应用, 随着对下一代无线通信系统研究的进一步深入, 群小区架构将具有更加光明的应用前景。

参考文献

- [1] Ware H. The competitive potential of cellular mobile telecommunications. *IEEE Communications Magazine*, 1983,

- 21(8): 16-23.
- [2] Stuber G L, Barry J R, and McLaughlin S W, *et al.* Broadband MIMO-OFDM wireless communications. *Proc. IEEE*, 2004, 92(2): 271-294.
- [3] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communication*, 1998, 6(3): 311-335.
- [4] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, 1 (2): 41-59.
- [5] Cayirci E and Ersoy C. Application of 3G PCS technologies to rapidly deployable mobile networks. *IEEE Network*, 2002, 16(5): 20-27.
- [6] Zhou Shi-dong, Zhao Ming, and Xu Xi-bin, *et al.* Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 108-113.
- [7] Zhang Ping, Tao Xiao-feng, and Zhang Jian-hua, *et al.* The visions from FuTURE Beyond 3G TDD. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(1): 38-44.
- [8] 陶小峰, 戴佐俊, 唐超, 等. 广义蜂窝网络结构及功换模式——群小区及群切换. *电子学报*, 2004, 32(12A): 114-117.
- [9] 3GPP. TR25.913. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN). 2005.
- [10] 3GPP2. cdma2000 Enhanced packet data air interface system - System Requirements Document. 2005.
- [11] Roh W and Paulraj A. Outage performance of the distributed antenna systems in a composite fading channel. 56th IEEE Vehical Technology Conference, Canada, 2002: 1520-1524.
- 许晓东: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为广义蜂窝网络架构、无线资源管理策略、3G演进及其标准化。
- 陶小峰: 男, 1970年生, 博士, 副教授, 主要从事MIMO、空时码、广义蜂窝网络结构及切换模式的研究, 现为中国科技部863未来移动通信FuTURE计划TDD特别工作组组长。
- 吴春丽: 女, 1982年生, 硕士生, 研究方向为广义蜂窝网络架构、无线资源管理策略、3G演进及其标准化。
- 张平: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 中国C3G总体组专家成员, 国家863未来移动通信FuTURE计划项目总体组成员, 2005年担任国际无线研究论坛(WWRF)副主席, 研究方向为无线新技术的理论和应用。