

分布式无线移动通信系统中远端天线单元动态选择方法研究

赵新胜 尤肖虎 朱定乾

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要 分布式无线移动通信系统是由多个远端天线单元(RAU)通过有线或无线传输方式连接到基站组成的系统,其远端天线单元的选择方案将影响移动通信系统的性能。该文在分析移动通信系统容量、信号传输可靠性和系统传输业务质量(QoS)保障的基础上,研究动态选择RAU的基本准则,探讨分布式无线移动通信系统中RAU的动态选择方法,并在蜂窝小区场景和曼哈顿场景中对一种面向系统容量优化的动态选择RAU方法的系统容量分布和RAU数量的选择结果进行仿真,仿真结果表明,采用此动态选择方法的系统具有较高的系统容量和平稳的小区容量分布。

关键词 分布式无线移动通信系统,远端天线单元选择准则,动态选择方法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)12-2334-05

An Investigation on Dynamic RAU Selection Method for Distributed Radio Mobile Communications System

Zhao Xin-sheng You Xiao-hu Zhu Ding-qian

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Distributed radio mobile communications system consists of Base Station (BS) and some Remote Antenna Units (RAUs) connecting with BS by wireline or wireless transmission. RAU selection scheme will influence the system performance. In this paper, RAU selection criteria are investigated based on the analysis of capacity, signal transmission reliability and QoS guarantee of mobile communications system. Dynamic RAU selection methods are explored for system performance optimization. The results of selected RAU number and system performance of a dynamic RAU selection method for system capacity optimization are studied by simulation work in cellular and Manhattan scenario. Simulation results show that the system with this dynamic RAU selection method has higher system capacity and stable capacity distribution.

Key words Distributed radio mobile communications system, RAU selection criterion, Dynamic selection method

1 引言

分布式无线移动通信系统是由多个远端天线单元(RAU)通过光纤、电缆或无线传输方式统一连接到基站而组成的系统,可提高系统无线信号的覆盖能力和系统容量,其远端天线单元可以根据环境需求灵活地放置在离移动台尽量近的位置上,使得移动通信系统可以较低的发送功率与移动台进行无线通信,因而具有较高的系统功率效率^[1]。针对分布式天线的网络结构在移动通信系统中应用已成为当前的研究热点^[2-5],其性能分析方法和提高系统性能的智能控制方法已引起关注^[6-10]。

RAU选择是在分布式无线移动通信系统中通过基站或移动台中系统控制方案静态或动态地选择与移动台通信的远端天线单元,使系统具有较好的工作性能。前人的研究主要是针对集中式多入多出(Centralized MIMO)天线系统,提出了各种保障无线链路频谱效率和传输可靠性的天线选择方

法^[11],在分布式天线网络结构中仅考虑静态RAU选择方法的系统工作性能^[6]。本文将针对分布式无线移动通信系统网络结构的特点,分析移动通信系统的基本要求,研究提高分布式无线移动通信系统工作性能的动态选择RAU方法。

本文的安排如下:第2节在介绍分布式无线移动通信系统网络结构的基础上,探讨面向系统性能优化的RAU选择问题;第3节根据移动通信系统性能要求研究RAU选择的基本准则,并研讨RAU选择方法;第4节通过在传统蜂窝小区和曼哈顿无线网络结构中仿真工作,分析动态RAU选择的结果和对系统性能的影响;第5节是研究工作的总结。

2 网络结构和问题分析

2.1 网络结构

在分布式无线移动通信系统中,远端天线单元仅进行射频信号的发送和接收,无线基带信号处理和系统控制方案均集中在基站完成,因此,在移动通信系统中可将与同一个基站相连接的多个远端天线单元所覆盖的地理范围定义为广义小区^[1]。由广义小区构成的分布式无线移动通信系统如图1所示。

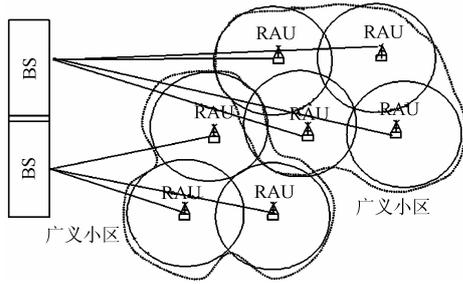


图 1 分布式无线移动通信系统

Fig. 1 Distributed radio mobile communications system

分布式无线移动通信系统的系统网络可以表述为 (M, L, N) , 其中 M 为移动台的天线数量, L 是与同一个基站连接的 RAU 数量, N 是一个 RAU 上天线数量。

广义小区中移动台收到的信号为

$$\mathbf{Y}^{(i)}(\mathbf{d}) = \mathbf{H}^{(i)}(\mathbf{d})\mathbf{X}^{(i)} + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}^{(j)}(\mathbf{d})\mathbf{X}^{(j)} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{Y}^{(i)}(\mathbf{d})$ 是在 i 小区中移动台 M 个天线接收到的信号矢量, $\mathbf{X}^{(i)}$ 为 i 小区中 RAU 天线发送的信号矢量, $\sum_{j \neq i} \mathbf{H}^{(j)}(\mathbf{d})\mathbf{X}^{(j)}$ 是 i 小区中移动台接收到其它小区的干扰信号矢量, $\mathbf{H}^{(i)}(\mathbf{d})$ 为 i 小区中各 RAU 天线到移动台之间的信道传输函数矩阵, 包括路径衰耗和信道衰落, \mathbf{n} 表示加性高斯噪声, \mathbf{d} 为小区中 RAU 天线到移动台间的距离矢量。

2.2 问题分析

在分布式无线移动通信系统网络结构中, 由于广义小区中有地理位置分散的多个 RAU, 使得移动通信系统的无线资源在原有的频率、时间和码道的基础上增加了空间无线资源, 将对系统控制方案提出空间天线资源调配的需求, 通过合理设计系统控制方案可有效地利用空间天线资源提高系统工作性能。与传统的蜂窝移动通信系统相同, 分布式无线移动通信系统的主要性能指标为系统容量、无线信号传输可靠性和传输业务质量(QoS)保障。

对一个在广义小区中的移动台, 其上行信道各态历经容量为

$$C_{\text{ergo_up}} = E\{\log_2[\det(\mathbf{I}_{NL} + \mathbf{H}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{H}^H / M\sigma^2)]\} \quad (2)$$

下行信道各态历经容量为

$$C_{\text{ergo_down}} = E\{\log_2[\det(\mathbf{I}_M + \mathbf{H}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{H}^H / NL\sigma^2)]\} \quad (3)$$

其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{H} 表示小区中各 RAU 天线到移动台之间的信道传输函数矩阵 $\mathbf{H}^{(i)}(\mathbf{d})$, \mathbf{Q}_{xx} 是发送信号的协方差矩阵 $E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = \mathbf{Q}_{xx}$, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置, σ 表示加性高斯噪声和干扰叠加信号的方差。系统控制方案可采用多个 RAU 发送信号复用和 RAU 上多个天线发送信号复用的方法提高系统容量。

在分布式无线移动通信系统中可以通过天线分集的方法利用空间天线资源保障传输可靠性, 表示为天线分集增益 G , 有两种天线分集方法增强无线信号传输可靠性, 一是通过多个 RAU 之间的宏分集(Macro-Diversity)的信号传输方法

可减少路径衰耗的影响, 二是在 RAU 上多个天线之间的进行微分集(Micro-Diversity)的信号传输方法抗击无线链路信道衰落^[12]。针对传输业务质量(QoS)保障的性能, 分布式无线移动通信系统可面向移动台的各种不同业务 QoS 需求(即吞吐量, 传输时延等参数), 通过系统控制方法根据系统中无线信道状态信息(CSI)调度和分配小区中处在合适位置上和相应数量的 RAU 和天线, 保障移动台的各种业务的吞吐量和传输时延等要求。

分布式无线移动通信系统基站中系统控制方案可面向以上的 3 个方面性能进行系统性能优化设计, 与集中式天线系统不同, 由于多个 RAU 分布在广义小区中不同的地理位置, 将导致与移动台之间距离较远的 RAU 的信号不能正确地接收, 在多个 RAU 发送信号给一个移动台时, 如果没有合理地设计发送信号, 将产生较多的系统干扰。因此, 系统控制方案应合理地动态选择可以发送信号的 RAU 数量, 根据选择结果调整小区中各 RAU 的信号发送功率, 改变发送信号的协方差矩阵 \mathbf{Q}_{xx} , 优化分布式无线移动通信系统的工作性能。

3 远端天线单元(RAU)选择

在集中式多入多出(MIMO)天线系统中, 天线选择方法的研究和设计目标是在保障 MIMO 系统能够提高系统容量和系统传输可靠性等优点的前提下, 尽量减少无线信号发送和接收过程中的工作天线数量, 降低系统成本, 其天线选择方法是通过选择具有较好信噪比(SNR)的无线接收和发送信道的方法保持系统中多天线复用和微分集性能^[11]。在分布式无线移动通信系统中, 各个 RAU 分散在小区不同的地理位置可提高系统的功率效率和灵活的无线信号覆盖, 多个 RAU 传输的无线信号之间具有较小的相关性, RAU 选择方法的设计目标是选择合适的 RAU 子集与移动台通信提高系统容量、无线链路的传输可靠性和传输业务质量(QoS)保障。

3.1 RAU 选择的基本准则

假设在分布式无线移动通信系统的广义小区中有 L 个远端天线单元, 系统控制方案选择发送信号的 RAU 子集 ω 包含 l ($l \leq L$) 个 RAU,

$$\omega = \{\text{RAU}_1, \dots, \text{RAU}_l\} \quad (4)$$

L 个 RAU 之间各种不同的组合使系统共有 K 个 RAU 子集可供选择,

$$\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_K\} \quad (5)$$

\mathbf{H}_ω 为选择到 ω 子集的无线信道传输函数子矩阵, 可以根据系统性能优化目标函数 $\Phi(\mathbf{H}_\omega)$ 进行 RAU 动态选择方案设计, 面向系统性能优化的 RAU 动态选择问题可表示为

$$\omega^* = \arg \max_{\omega \in \Omega} \Phi(\mathbf{H}_\omega) \quad (6)$$

ω^* 为面向系统性能优化目标的 RAU 选择结果。系统性能优化目标可面向系统容量、无线链路传输可靠性和传输业务质

量(QoS)保障。

在面向分布式无线移动通信系统的下行系统容量性能时, 目标函数为

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{H}_\omega) &= \text{Max}_{\omega \in \Omega} C_{\text{ergo_down}} \\ &= \text{Max}_{\omega \in \Omega} E\{\log_2[\det(\mathbf{I}_M + \mathbf{H}_\omega \mathbf{Q}_\omega \mathbf{H}_\omega^H / NL\sigma^2)]\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 \mathbf{Q}_ω 发送信号的协方差矩阵, 且 $\text{trace}(\mathbf{Q}_\omega) \leq P_i$, P_i 为发送信号总功率。发送信号功率可通过注水或平均方法在多个 RAU 上功率分配, 在被选择的 ω 子集中 l 个 RAU 进行平均功率分配时, 则

$$\mathbf{Q}_\omega = \begin{bmatrix} \frac{P}{l\sigma^2} \mathbf{I}_l & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\rho = P/\sigma^2$ 是接收信噪比(SNR), 包括信道噪声和系统干扰。

准则 1 分布式无线移动通信系统中, 与移动台通信的 RAU 子集可以按照寻找最大系统容量的方法进行选择。

在面向分布式无线移动通信系统的无线链路传输可靠性时, 目标函数为系统分集增益,

$$\Phi(\mathbf{H}_\omega) = \text{Max}_{\omega \in \Omega} G_\omega \quad (9)$$

G_ω 为 RAU 子集的分集增益。

准则 2 分布式无线移动通信系统中, 与移动台通信的 RAU 子集可以按照寻找最大分集增益的方法进行选择。

在实际系统中, 通常可采用系统容量和分集增益性能的设定目标进行折中设计^[12]。

准则 3 分布式无线移动通信系统中, 与移动台通信的 RAU 子集可以按照系统容量和分集增益性能的设定目标进行折中的方法进行选择。

由于在分布式无线移动通信系统中通信的移动台有各种不同业务的 QoS 要求, RAU 选择可以针对移动台的业务传输进行优化设计。

准则 4 分布式无线移动通信系统中, 与移动台通信的 RAU 子集可以按照移动台业务的 QoS 要求进行选择。

根据以上面向不同的系统性能优化目标的 RAU 动态选择准则, 移动通信系统的基站或移动台的系统控制方案可在每个时间周期(如时隙、帧长)内, 动态选择与移动台通信的 RAU 工作子集, 提高分布式无线移动通信系统的工作性能。

3.2 RAU 选择方法

RAU 选择方法分为静态和动态选择方法, 静态 RAU 选择方法是在分布式无线移动通信系统中基站与移动台之间的通信通过固定数量 RAU 进行无线信号传输, 动态 RAU 选择方法则根据系统性能优化或业务传输 QoS 要求选择可变数量 RAU 进行无线信号传输, RAU 选择可针对下行和上行无线传输链路面向系统性能或 QoS 要求进行。RAU 选择的系统控制过程可采用以下 3 种控制方式之一完成, 即移动台辅助基站控制方式、仅有基站控制方式和仅有移动台控制方式。

动态 RAU 选择将面向上行或下行无线链路传输方向的

系统性能优化或 QoS 要求的目标, 基于上节所述的选择准则, 采用合适的系统控制方式进行。例如, 采用移动台辅助基站控制方式时, 分布式无线移动通信系统基站的系统控制方案根据各个 RAU 到移动台之间无线信道状态, 动态调整 RAU 上的发送信号达到优化系统性能的目标, 移动台辅助基站控制方式的下行无线传输链路 RAU 动态选择方法可描述如下:

步骤 1 测量 RAU 到移动台之间的信道状态 移动台接收各个 RAU 发送来的导频信号, 测量无线信道的信噪比 SNR。在一定的窗口范围内, 对各 RAU 的 SNR 测量结果进行统计平均。将各个 SNR 的平均结果发送到基站。

步骤 2 根据准则寻找 RAU 子集 根据系统设计的要求和 RAU 选择准则, 计算满足要求的 RAU 子集。确定工作 RAU 子集。

步骤 3 通过 RAU 子集与移动台通信 对选择到的 RAU 子集的各 RAU 进行发送功率分配, 发送信号到移动台。

4 仿真分析

为了观察研究动态 RAU 选择方法对分布式无线移动通信系统性能的影响和 RAU 数量的动态变化情况, 对采用移动台辅助基站控制方式面向系统容量性能优化的选择准则(准则 1)的 RAU 动态选择方法和静态 RAU 选择方法进行仿真, 系统仿真场景如图 2 所示的蜂窝结构和 Manhattan 结构, 为了分析和研究工作的简洁性, 设定 RAU 和移动台的天线数目均为 1, 图中的网格部分为仿真研究观察区域(即移动台的移动范围), 系统仿真的参数设定和条件如表 1 所示。

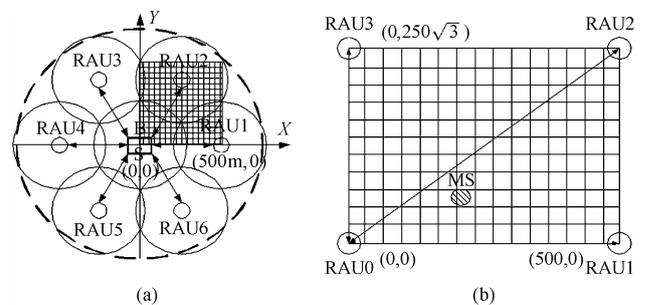


图 2 系统仿真场景 (a) 蜂窝结构 (b) Manhattan 结构

Fig.2 Simulation scenarios (a) Cellular structure (b) Manhattan structure

表 1 仿真的参数设定和条件

Tab.1 Parameters and conditions in simulation platform	
仿真参数和条件	设定值
传输方向	下行
网络拓扑结构	蜂窝结构: 7 RAU Manhattan 结构: 4 RAU
接收 SNR	10dB
路径损耗指数	4
无线信道	瑞利信道
控制方式	移动台辅助基站
动态 RAU 选择方法	准则 1
功率分配方式	在选择的 RAU 上平均分配
静态 RAU 选择方法	选择离移动台最近的固定数目 RAU

动态 RAU 选择方法是根据系统性能优化的准则动态调整与移动台通信的 RAU 数量, 静态 RAU 选择方法采用选择离移动台最近的固定数目 RAU 与移动台通信。图 3 和图 4 分别给出蜂窝结构场景和 Manhattan 结构场景中的基于优化系统容量准则动态 RAU 选择方法的 RAU 数量选择结果、下行容量性能分布和选择固定数目 RAU 的下行容量性能分布。

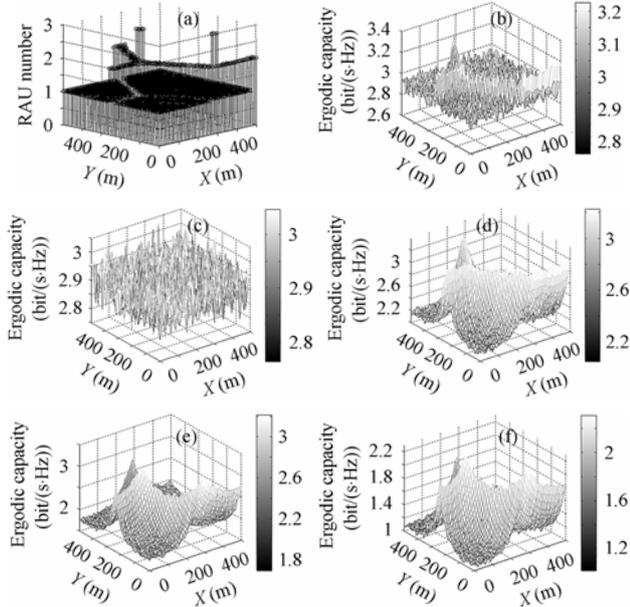


图 3 蜂窝结构场景中 RAU 选择结果和性能 (a) 动态选择的 RAU 数量 (b) 动态选择 RAU 容量性能分布 (c) 选择 1 个 RAU 容量性能分布 (d) 选择 2 个 RAU 容量性能分布 (e) 选择 3 个 RAU 容量性能分布 (f) 选择 7 个 RAU 容量性能分布

Fig. 3 RAU selection result and performance in cellular scenario

(a) RAU numbers by dynamic RAU selection (b) Capacity distribution by dynamic RAU selection (c) Capacity distribution by selecting 1 RAU (d) Capacity distribution by selecting 2 RAU (e) Capacity distribution by selecting 3 RAU (f) Capacity distribution by selecting 7 RAU

图 3(a)和图 4(a)分别给出了在蜂窝结构场景和 Manhattan 结构场景的动态选择 RAU 子集的选择结果, 从图中可以看出, 移动台在仿真研究观察区域内移动时, 大多数情况下选择单个或两个 RAU。图 3(b)和图 4(b)分别给出了在蜂窝结构场景和 Manhattan 结构场景移动台在研究区域内移动时动态选择 RAU 子集的容量性能分布, 图 3(c)和图 4(c)给出了在蜂窝结构场景和 Manhattan 结构场景中选择距离最近的一个 RAU 通信的容量性能分布, 传输容量在移动台的移动区域内较为平稳。图 3(d)–3(e)和图 4(d)–4(e)给出了各种场景下选择距离最近的多个 RAU 固定数量的容量性能分布, 图中显示出在选择固定数量的多个 RAU 时, 仅有移动台在中心位置时容量达到最大值, 随着移动台离中心位置越远容量呈现减小的趋势。

从仿真结果可以看出, 面向系统容量优化的动态 RAU 选择方法的容量较高, 同时下行传输容量在移动台的移动区域内具有较为平稳的特性。另一方面, 图中显示出选择的

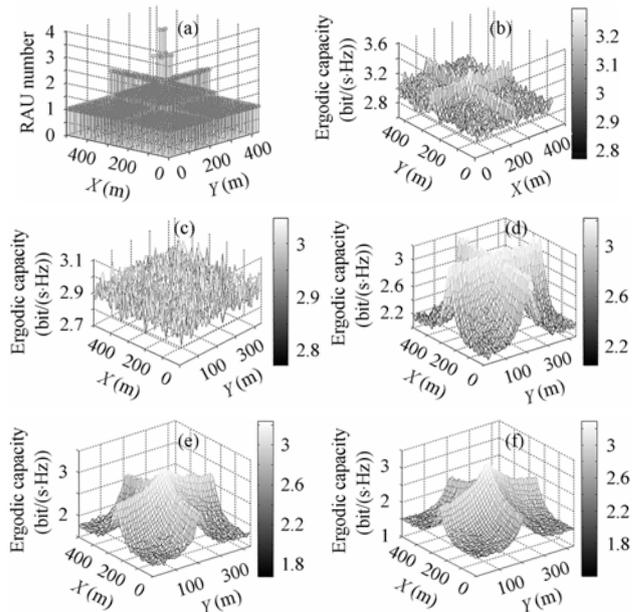


图 4 Manhattan 结构场景中 RAU 选择结果和性能 (a) 动态选择 RAU 结果 (b) 动态选择 RAU 容量性能分布 (c) 选择 1 个 RAU 容量性能分布 (d) 选择 2 个 RAU 容量性能分布 (e) 选择 3 个 RAU 容量性能分布 (f) 选择 4 个 RAU 容量性能分布

Fig. 4 RAU selection result and performance in Manhattan scenario

(a) RAU numbers by dynamic RAU selection (b) Capacity distribution by dynamic RAU selection (c) Capacity distribution by selecting 1 RAU (d) Capacity distribution by selecting 2 RAU (e) Capacity distribution by selecting 3 RAU (f) Capacity distribution by selecting 4 RAU

RAU 数量越多, 系统的容量越小, 是由于恒定的总发送信号功率在多个位置分散的 RAU 上平均分配, 与移动台距离最近的 RAU 发送信号功率变小, 与移动台距离较远的 RAU 信号功率经过路径衰耗后到达移动台时的信号功率也较小, 而降低了容量性能。

与此仿真过程类似, 对基于面向信号传输可靠性(准则 2)、面向系统容量和分集增益性能的设置目标进行折中设计(准则 3)和面向移动台 QoS 要求(准则 4)的动态 RAU 选择方法, 也可以得到面向各自性能优化目标的结论。

5 结束语

本文研究了动态选择 RAU 的基本准则, 探讨了分布式无线移动通信系统中 RAU 的动态选择方法, 并在蜂窝小区场景和曼哈顿场景中对面向系统容量优化的动态选择 RAU 方法和静态选择 RAU 方法进行仿真, 得出了在分布式无线移动通信系统中动态 RAU 选择和静态 RAU 的容量性能分布结果, 仿真结果表明, 动态 RAU 选择方法具有较好的性能。

参考文献

[1] 尤肖虎, 赵新胜. 分布式无线电和蜂窝移动通信网络结构. 电子学报 2004, 32(12A): 16–21.
 [2] Kerpez K J. A radio access system with distributed antennas. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1996, 45(2): 265–275.

- [3] Clark M V, Willis T M, Greenstein L J, Rustako A J, Erceg V, Roman R S. Distributed versus centralized antenna arrays in broadband wireless networks. *IEEE Vehicular Technology Conference Rhodes, Greece, May 6-9, 2001*: 33–37.
- [4] Chen Xiao-Cong, Fang Wei, Yang Lie-Liang. Performance of multiple-input multiple-output wireless communications systems using distributed antennas. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, 30 May-1 June 2005, Stockholm, Sweden, 5*: 3142–3146.
- [5] Roh W. High performance distributed antenna cellular networks. [Ph.D dissertation] Stanford University April 2003.
- [6] Choi W, Andrews J G, Yi C. Capacity of multicellular distributed antenna networks. *International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005, 13-16 June 2005 Hawaii, USA 2*: 1337–1342.
- [7] Roh W, Paulraj A. Outage performance of the distributed antenna systems in a composite fading channel. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Vancouver, BC, Canada, Sept. 2002*: 1520–1524.
- [8] Sørensen T B. Intelligent distributed antenna systems: Assessment by measurement and simulation. [Ph.D. dissertation] Aalborg University, Denmark, 2003.
- [9] Shen Cong, Dai Lin, Zhou Shidong, Yao Yan. A novel spectrally efficient transmit diversity scheme in MIMO-DAS. *Military Communications Conference, 2003, Boston, USA, 13-16 Oct. 2003 Vol.1*: 638–642.
- [10] Ni Zhi, Li Daoben. Impact of fading correlation and power allocation on capacity of distributed MIMO. *Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication, 2004. Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium, Vancouver, Canada, 31 May-2 June 2004 Vol.2*: 697–700.
- [11] Sanaye S, Nosratinia A. Antenna selection in MIMO systems. *IEEE Communications Magazine*, 2004 42(10): 68–73.
- [12] Zheng Li-zhong, Tse N C. Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple-antenna channels. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003 49(5): 1073–1096.
- 赵新胜: 男, 1963 年生, 教授, 主要研究方向为移动通信与网络技术, 目前主要从事 3G/B3G 移动通信系统研究和开发工作.
- 尤肖虎: 男, 1962 年生, 东南大学无线电工程系主任, 移动通信国家重点实验室主任, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 国家 863 计划未来移动通信总体专家组组长, 主要研究方向为未来宽带移动通信理论与技术、智能信号处理与通信.
- 朱定乾: 男, 1979 年生, 硕士生, 研究方向为移动通信与网络技术.