

# 同频分布式 FuTURE TDD 第四代移动通信系统

刘宝玲<sup>1,2</sup>, 陶小峰<sup>1,2</sup>, 张 平<sup>1,2</sup>

(1. 北京邮电大学无线新技术研究所, 北京 100876; 2. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 针对第四代(4G)移动通信系统的基本需求,探讨了同频分布式 FuTURE 4G TDD 试验系统中的链路技术和同频分布式组网方案,给出了全链路方案设计参数以及基于可拓集合的软分数频率复用同频分布式组网方案.最后,结合外场测试环境,给出了现场实测误块率以及频率复用系数.

**关键词:** 第四代移动通信系统; TDD; FuTURE; 软分数频率复用; 外场测试

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-131-05

## Single Frequency Distributed FuTURE 4G TDD Mobile Communication System

LIU Bao-ling<sup>1,2</sup>, TAO Xiao-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping<sup>1,2</sup>

(1. *Wireless Technology Innovation Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;*

2. *Key Laboratory of Universal Wireless Communications (BUPT), Ministry of Education, Beijing 100876, China*)

**Abstract:** Based on requirements of the 4th Generation mobile communication system, link techniques and single frequency distributed networking in FuTURE TDD trial network are explored. The whole link parameters and single frequency distributed networking based on soft fractional frequency reuse, derived according to Extension set theory, are proposed. Finally, the BLER of the whole link and frequency reuse factor of the system are presented under the trial test scenario.

**Key words:** 4G; TDD; FuTURE; soft fractional frequency reuse; field test

### 1 引言

近年来,随着第三代移动通信系统(3G, 3rd generation)全球范围的商用,它所能提供的对数据业务以及非对称业务的支持能力均比第二代(2G, 2nd generation)系统有大幅度的提高,业务的多样性也大为扩展.但与此同时,用户对高速率、高质量无线通信业务又有了更高的需求.一方面,用户数的急剧增加(截至2007年3月末,中国移动电话用户数量已增至4.8065亿)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谱利用率.另一方面,一些新的关键技术,例如多人多出技术(MIMO, multi-input multi-output)、正交频分复用技术(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)、分布式天线(阵)技术(distributed antenna/antenna array)等,已经在理论与实践上均被证明可以进一步提高现有移动通信系统的整体性能.同时现有的蜂窝移动通信系统在提供高性能高速率的业务上尚存在很多需要改进的方面,所以,研制开发下一代移动通信系统(4G, 4th genera-

tion)已经被提上议事日程.

针对下一代移动通信系统的研究与开发,国际上许多国家与组织已经开展了相应的研发工作,例如国际电联(ITU, International Telecommunication Union)、无线世界研究论坛(WWRF, Wireless World Research Forum)、欧盟第六框架项目等.与此同时,一些国际标准化组织已经着手对4G以及3G演进系统(E3G, enhanced 3G)进行相应的标准化工作,例如3GPP的长期演进计划(LTE, long term evolution)<sup>[1]</sup>、3GPP2的空中接口演进计划(AIE, air interface evolution)<sup>[2]</sup>等.诺基亚、西门子、三星、摩托罗拉、NTT DoCoMo等公司已分别完成了4G的技术试验,也取得了不错的演示效果,有的峰值数据速率甚至达Gbit/s,但是这些试验仅限于室内环境或慢速移动,而且从公开的资料来看都属于点对点通信,没有涉及多用户、多基站、切换、同频组网、高速移动等移动通信核心问题.

中国于2001年开始了关于下一代移动通信系统的研究工作,基于863高科技计划形成了未来移动通信计划(FuTURE, future technologies for universal radio environment)<sup>[3]</sup>,负责中国4G移动通信系统的研究以及试验系

收稿日期:2007-06-11;修回日期:2008-01-16

基金项目:国家自然科学基金(No. 60496312, No. 60702051);国家863高技术研究发展计划(No. 2006AA01Z260, No. 2007AA01Z261);新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-05-0116)

系统的开发、测试工作. FuTURE 计划研究与开发的目标是面向未来 10 年无线通信领域的发展趋势与需求,研究下一代移动通信技术,建立相关关键技术验证系统,支持面向未来的无线通信新业务,并在 4G 标准化等方面发挥积极的作用. FuTURE 计划包括两个研究分支,其一为频分双工(FDD, frequency division duplex)系统,另一分支为时分双工(TDD, time division duplex)系统,本文将着重介绍 FuTURE TDD 第四代移动通信系统.

FuTURE 4G TDD 试验系统采用了 3.5GHz 作为载波频率,使用了宽带 MIMO、OFDM、分布式天线(阵)等一系列关键技术,这对 FuTURE 4G TDD 试验系统的链路预算及组网等工作带来了挑战. 本文从 4G 系统的基本特征和需求入手,探讨了 FuTURE 4G TDD 试验系统中的链路技术和同频分布式组网方案. 最后,结合 MIMO 系统外场实测数据,对 FuTURE 4G TDD 试验系统的链路性能和组网性能进行了分析.

## 2 第四代移动通信系统的基本特征

第四代移动通信系统是面向 2010 年以后的移动通信系统,它将主要以移动数据服务为主,可以实现大范围覆盖、支持高速移动的移动通信系统<sup>[4]</sup>. 从技术的角度来看,4G 移动通信系统将 与 3G 系统有着根本性的区别,其核心网络可以以演进形式发展,但是空中接口是革命性的发展,4G 移动通信系统应具有以下的基本特征:

- 基于 IPv6/v4 核心网互连互通的全 IP 扁平网络架构;
- 适应高频段电波传播特性以及多天线技术的分布式蜂窝小区结构;
  - 更高的频谱利用率,同频组网;
  - 适合于分组突发业务的空中接口,峰值传输速率达到 100Mbps ~ 1Gbps,并且可以灵活调配无线资源,适用于大动态范围的业务;
  - 端到端 QoS 保证,提供优于现有电信级网络实时业务的 QoS;
  - 支持自组织、中继、多跳、可重构等特性.

4G 移动通信系统的实现,将可以满足人们在任何地点、任何时间与任何人通过任何方式进行通信的需要,并且可以支持多种形式的业务,如虚拟现实、视频会议、准确定位、高分辨率实时图像等. 4G 移动通信系统将应用一批先进的技术,包括 OFDM、MIMO、分布式网络架构等,以提供全新的空中接口,并为终端用户带来更好的使用体验;另一方面,4G 移动通信系统也需要采用高效的频率复用方法实现同频组网. 因此,本文将主要介绍 FuTURE 4G TDD 链路技术及同频分布式组网方案.

## 3 FuTURE 4G TDD 链路技术及同频分布式组网方案

### 3.1 FuTURE 4G TDD 试验系统链路技术

FuTURE 4G TDD 系统为实现峰值速率 100Mbps 以上的链路传输目标,在物理层使用了 OFDM、MIMO、高阶调制等一系列关键技术.

#### 3.1.1 OFDM 技术

在针对未来宽带化移动通信系统的研究开发过程中,OFDM 技术被公认为一种极具竞争潜力的多载波传输技术. 其将高速数据流分解为多个正交的低速数据流,使各个低速数据流在不同子载波上并行传输的特点,不仅可以有效克服频率选择性衰落信道带来的不利影响,还可以显著提高系统的频带利用率. 此外,OFDM 技术中循环前缀(CP, Cyclic Prefix)的设计具有很好的抗符号间干扰的能力,收发两端基于离散傅立叶变换(DFT, Discrete Fourier Transform)的处理方式更为该技术的实现提供了便利条件. 本系统载波频率 3.5GHz,带宽 20MHz(有效带宽 17.27MHz),子载波数为 1024,符号周期为 62 $\mu$ s,其中 CP 为 10.8 $\mu$ s.

#### 3.1.2 MIMO 技术

在频谱资源日趋紧张的今天,MIMO 技术以其有效增加系统容量、提高频谱利用率的特点而成为近年来学术界研究的热点. 该技术的提出成为无线通信系统中继对信号的频域、时域和码域信息充分利用后,再次对其空域信息进行探索的突破性进展. 研究表明,MIMO 技术在室内传播环境下的频谱利用率可高达 20 ~ 40bit/s/Hz<sup>[5]</sup>. 根据多天线利用方式的不同,MIMO 技术又可进一步分为基于空间分集的 MIMO 技术(如 STTC、STBC 等)与基于空分复用的 MIMO 技术(如 V-BLAST、D-BLAST 等). 前者通过多天线传输中信息的复制进一步增强系统性能,后者则利用多路并行传输的信道有效提高系统的频谱利用率.

在 MIMO 技术的实际应用过程中,为满足不同传播环境的要求,需自适应地选择不同的 MIMO 传输方案,以达到链路整体优化的目的. 除 MIMO 技术与各种链路自适应技术(如 AMC、HARQ)的结合外,收发天线的选择及空时编码方案的灵活配置也是自适应 MIMO 系统应用过程中的关键性问题. 值得一提的是,由于 TDD 系统中上下行链路的传输在同一个频段上完成,其信道的对称性可以被充分的利用,从而节省了信息反馈等带来的时延及额外的系统开销.

图 1 给出了 FuTURE 4G TDD 试验系统的链路设计方案,其充分利用了 MIMO 技术与 OFDM 技术的优势,具备有效对抗多径的能力及高频谱利用率的特点. 链路设计同时采用了 Turbo 编译码技术,结合打孔及软解

调,成功实现了低功耗、高峰值传输速率的宽带无线接入.此外,在充分利用空域资源进行数据传输方面,引入自适应 MIMO 技术,并在接收端采用高性能、低复杂

度的 MIMO 检测技术<sup>[6]</sup>.FuTURE 4G TDD 试验系统的其余参数设计如下:基站 8 根天线,移动台 4 根天线,调制方式为 16QAM.

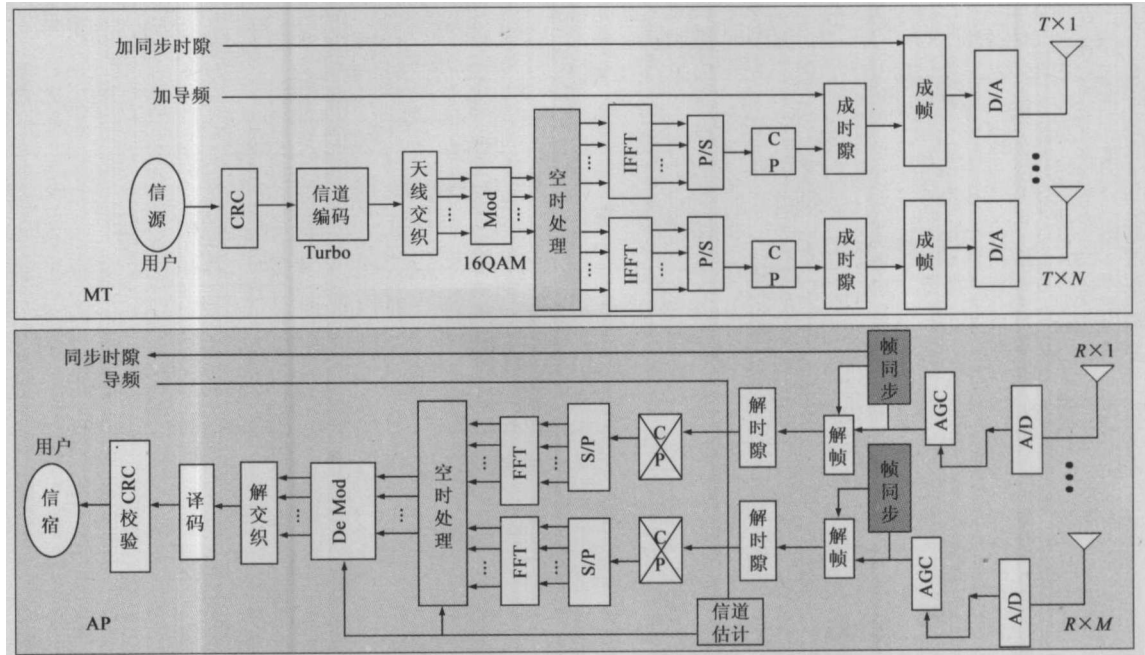


图 1 FuTURE 4G TDD 试验系统的链路设计方案

### 3.2 分布式 FuTURE 4G TDD 系统

现有蜂窝网络结构不能很好的满足 4G 系统需求,有人对此提出了一些改进措施.例如分布式天线系统 (DAS, Distributed Antennas System)<sup>[7]</sup>. 现有的研究表明,分布式天线是移动无线通信中可以采用的天线子系统形式之一.它突破传统蜂窝体制的限制,能获取更高的频谱效率和更大的系统容量. FuTURE 4G TDD 采用广义分布式天线架构<sup>[8]</sup>,地理位置相邻的多个小区中,天线(天线阵)间距为几十米到几十公里(见图 2). 每个接入点(AP, Access Point)通过光纤、同轴电缆等方式同时与多个小区中的天线(天线阵)相连,可以看成具有多个天线(天线阵)的基站.该架构具有集中式信号处理的

特点,并在增加系统容量、减少小区间切换等方面具有较明显的优势.其下行链路可以是分集也可以是复用的方式(复用是为了满足 MIMO 的需求).天线阵元可以是全向的,也可以是扇区的.当扇区内天线阵元数少至一根时,广义分布式天线系统退化为快速小区组选择系统<sup>[9]</sup>、软切换群系统<sup>[10]</sup>.

因此, FuTURE 4G TDD 试验系统中采用每个 AP 连接两个天线阵的分布式多天线系统构架,外场测试验证了基于该架构的 4G TDD 试验系统性能.

### 3.3 FuTURE 4G TDD 试验系统组网分析

针对 4G 系统的同频组网需求,我们基于可拓集合以及模糊集合理论,首次提出了软分数频率复用理论与方法:将所述无线蜂窝网络中每个小区的用户分为两组,一组为小区边缘用户,一组为小区中心用户;将整个可用频段分为两个不重叠的部分  $G$  和  $F$ ,将  $F$  分为 9 个频段  $f_1, \dots, f_9$ ,为小区边缘用户的可用频段;将每个小区边缘分为 12 个边缘区域,将这 12 个边缘区域分为两类,分别称为第一类边缘区域和第二类边缘区域,第一类边缘区域即两两相邻的 3 个小区交界处的边缘区域,第二类边缘区域即除第一类边缘区域的其它边缘区域.由于边缘用户所处的通信环境恶劣,虚线圆内的 9 个边缘区域是频率规划的主要研究对象.建立 9 个区域和 9 块频率之间物元模型的关联度矩阵如图 3. 其中  $a, b, c, d \in (0, 1)$ ;值越大表示区域使用频段的权值越高.通过简要分析,可以得出图 3 中 9 个边缘区域

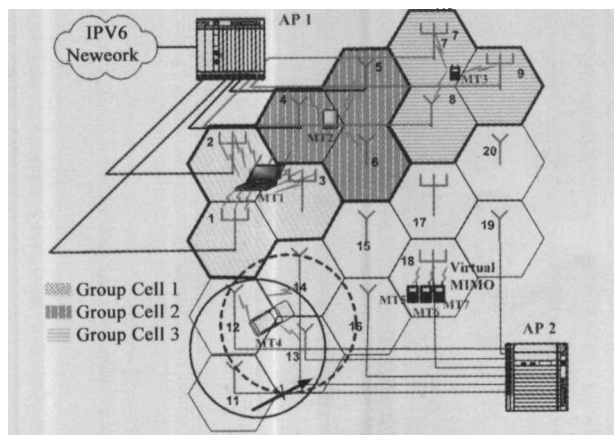


图 2 分布式多天线架构

的频率规划如表 1 所示:

表 1 频率集合与区域的映射关系

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>
形式 I	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub> f <sub>9</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>6</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub> f <sub>7</sub>	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub> f <sub>9</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub> f <sub>7</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>6</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub> f <sub>7</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>6</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub> f <sub>9</sub>
形式 II	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>6</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub>	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>6</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub> f <sub>7</sub> f <sub>9</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>6</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub> f <sub>7</sub> f <sub>9</sub>
形式 III	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>1</sub> f <sub>4</sub> f <sub>6</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>5</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>4</sub> f <sub>6</sub>	f <sub>3</sub> f <sub>7</sub> f <sub>9</sub>	f <sub>2</sub> f <sub>5</sub> f <sub>8</sub>	f <sub>1</sub> f <sub>7</sub> f <sub>9</sub>

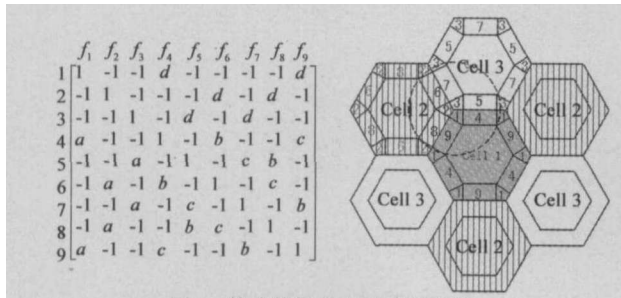


图 3 软分数频率复用系统模型

软分数频率复用表现形式 II 在理论上的频率复用系数为  $\alpha = \frac{1+q}{(3+q)k + (1+q)(1-k)}$ ,  $0 < q, k < 1$  (见图 6). 其中  $| \cdot |$  表示集合的势,  $u_2 = f_2 \cup f_6$ ,  $u_5 = f_8$ . 该方案在一定信噪比条件下能更有效地保障小区边缘用户的服务质量, 解决主要采用频分多址方式的下一代移动通信系统的小区同频组网问题, 提高有限频率资源的重利用率.

#### 4 FuTURE 4G TDD 试验系统性能测试

##### 4.1 测试场景

图 4 具体表示了 FuTURE 4G TDD 试验系统在上海外场试验网中支持移动性测试的两个分布式 AP 的布设情况. 试验网中共有 AP1 和 AP2 两个 AP 设备. 阶梯教室天线阵 (A1) 与金色阳光天线阵 (A2) 与 AP1 相连; 招待所天线阵 (A3) 与图书馆天线阵 (A4) 与 AP2 相连. 每处站址均架设 4 根天线. 图 4 下部蓝色线条构成的区域 (AP1 覆盖区域) 表示小区 1, 上部绿色线条构成的区域 (AP2 覆盖区域) 表示小区 2. 小区 1、2 使用同一段频率. 移动终端在小区 1、2 覆盖的范围内移动, 可实现同

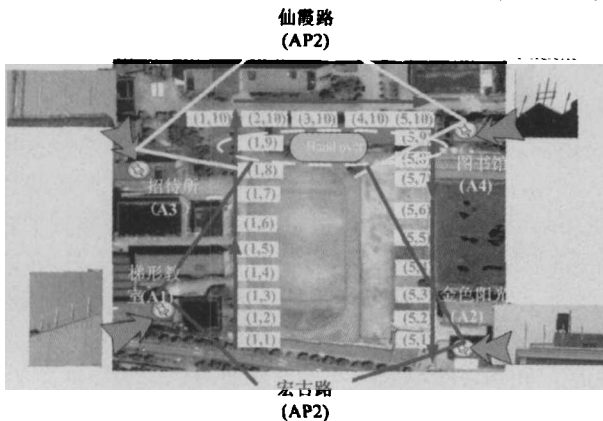


图 4 FuTURE 4G TDD 试验系统移动性测试环境

频分布式天线阵的组网方式下的切换. 天线阵方向参数见表 2:

表 2 天线阵方向参数

天线阵	水平角度	下倾角	天线阵间距(米)
A1	南偏东 75°	15°	200
A2	南偏西 75°	15°	200
A3	北偏东 75°	15°	200
A4	北偏西 75°	15°	200

##### 4.2 全链路性能

外场测试使用分布式 MIMO 链路进行试验外场环境的测量. 在每根天线最大 27dBm 的发射功率下, 大部分区域都可以达到理想情况的接收, 误块率 BLER (块长 4400 比特) 保持在 0.5% 以下, 相对应的误码率为  $10^{-6}$  以下; 树挡以及楼挡对 MIMO 系统有一定影响, 全链路性能如图 5 所示. 图 5 的坐标分别对应于图 4 中的坐标.

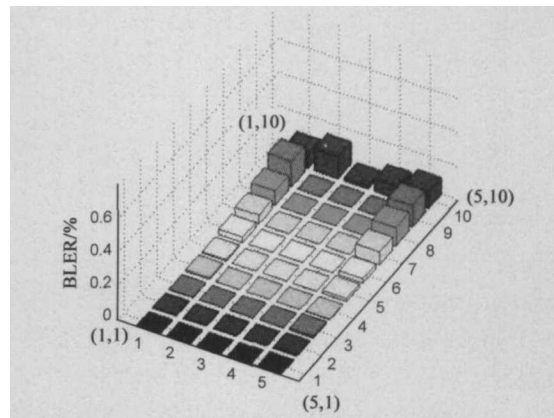


图 5 试验环境各处的全链路性能 (实测)

##### 4.3 组网性能

图 6 是三小区为一簇的软分数频率复用, 频率复用系数为 1/3 到 1. 软分数频率复用的简单形式——两小区簇 (cluster) 频率复用已经应用于 FuTURE 4G TDD 试验网中, 连接方式如图 4 所示. AP1、AP2 使用同一载波频率, 以软分数频率复用实施同频组网. 仿真结果表明 (见图 7), 随着用户分布和业务分布的不同 (也就是边缘频率与中心频率之比的不同), 在两小区同频组网的

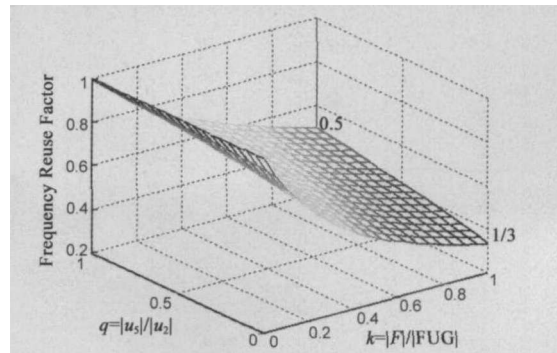


图 6 三小区簇 (cluster) 软分数频率复用的频率复用系数

情况下,频率复用系数变化区间为 $[0.5, 1]$ .实测描述如下:当移动终端 MT1、MT2 分别在 AP1、AP2 中移动到合适位置时(如:MT1 在阶梯教室附近,MT2 在图书馆附近),两个移动终端可以分别占用两个小区的全部频率资源,此时频率复用系数为 1;当移动终端 MT1 在阶梯教室附近、MT2 由小区 2 接近切换区域时,移动终端只可以使用一半的频率资源,此时频率复用系数为 0.5.

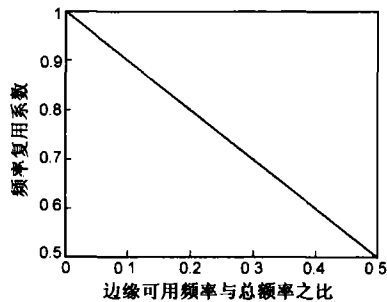


图 7 两小区簇 (cluster) 软分数频率复用的频率复用系数

## 5 小结

FuTURE 4G TDD 在基础理论与试验系统开发方面已经全面完成,并在上海成功构建出首个基于同频分布式无线网络、具有 4G TDD 移动通信基本特征的现场试验系统,试验系统采用了 3.5GHz 频段作为载波频率,使用了 MIMO、OFDM 等一系列关键技术,采用了软分数频率复用等先进的组网方案,试验系统支持 2 基站 2 用户的配置,支持多用户,支持高速移动,可提供高达 122 Mbps 的峰值数据速率、支持高速移动、提供包括清晰视频点播、高速数据下载、VoIP 等多项无线业务.

### 参考文献:

- [1] 3GPP. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)[S]. TR25. 913, 2005.
- [2] 3GPP2. cdma2000 Enhanced packet data air interface system-system requirements document[S]. 2005.
- [3] You Xiaohu, Chen Guoan, Chen Ming, et al. The FuTURE project in China[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(1): 70 - 75.

- [4] Zhang Ping, Tao Xiaofeng, Zhang Jianhua, et al. The visions from FuTURE beyond 3G TDD[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(1): 38 - 44.
- [5] G J Foschini, M J Gans. On the limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3): 311 - 335.
- [6] Tao Xiaofeng, Yu Zhuizhuan, Qin Haiyan, et al. New sub-optimal detection algorithm of layered space-time code[A]. IEEE VTC2002-Spring[C]. Birmingham, Alabama: 2002. 1791 - 1794.
- [7] A M Saleh, A J Rustakl, R S Roman. Distributed antennas for indoor radio communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(12): 1245 - 1251.
- [8] 陶小峰,戴佐俊,唐超,等.广义蜂窝网络结构及切换模式-群小区及群切换[J].电子学报,2004,32(12A):114 - 117. Tao Xiaofeng, Dai Zuojun, Tang Chao, et al. Generalized cellular network infrastructure and handover mode-group cell and group handover[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12A): 114 - 117. (in Chinese)
- [9] 3GPP. Fast sector group selection (FSGS) based on OFDMA for E-UTRA downlink[S]. R1-050788, 2005.
- [10] 3GPP2. KHLMNQRSUZ. LBC. FDD. Framework[S]. C30-20060627-054, 2006.

### 作者简介:



刘宝玲 女,1964年1月生于河北邯郸,北京邮电大学副教授,长期从事宽带移动通信系统通信电子电路的研究和设计,参加并主持了多项新一代移动通信项目,包括 863 项目、国家自然科学基金项目与企业合作项目,发表论文 10 余篇,申请专利 12 项,出版专著 3 部.主要研究方向:通信电子电路、高频电子电路.  
E-mail: blliu@bupt.edu.cn



陶小峰 男,1970年5月生于湖北黄冈,博士,北京邮电大学副教授,泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学)副主任,国家 863 计划通信技术主题 FuTURE 未来移动通信计划 TDD 特别工作组组长.主要研究方向为未来移动通信系统中的先进信号处理技术及新型网络架构. E-mail: taoxf@bupt.edu.cn