

分布式无线电和蜂窝移动通信网络结构

尤肖虎, 赵新胜

(东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 研究了分布式无线电在蜂窝移动通信网络中的应用, 在分析蜂窝移动通信系统和相关技术发展趋势的基础上, 针对未来蜂窝移动通信系统将使用多人多出天线(MIMO)、多载波传输技术、光纤无线电技术、移动 IP 协议和 2GHz 以上的工作频段进行网络构架等需求, 探讨一种新型的广义小区式蜂窝移动通信网络结构、无线资源管理模型和切换算法。

关键词: 分布式无线电; 蜂窝移动通信系统; 广义蜂窝小区结构; 无线资源管理模型; 切换算法

中图分类号: TN929. 5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-016-06

Distributed Radio and Cellular Mobile Communications Network Architecture

YOU Xiao-hu, ZHAO Xin-sheng

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

Abstract: Distributed radio and its application in cellular mobile communications system are investigated. Based on the analysis of evolution trends of mobile communications system and related key technologies, a novel generalized cell structure, radio resource management model and handover algorithm for future mobile communications system are proposed to meet the requirement of new technology applications like MIMO, multi-carrier, radio over fiber, mobile IP and higher working frequency.

Key words: distributed radio; cellular mobile communications system; generalized cell structure; radio resource management model; handover algorithm

1 引言

随着无线通信系统不断发展, 无线频谱资源短缺与通信业务量增长之间的矛盾愈显突出, 通过对无线网络合理构架提高无线频谱资源利用率和系统功率效率和对频率、时间和空间等多维无线资源充分复用方法, 使无线通信系统的系统容量、频谱效率和无线宽带业务承载能力有数十倍提高已成为各无线通信系统技术标准研究发展的主要方向^[1]。移动通信系统为了满足无线信号全范围覆盖和有效利用无线频谱资源的网络设计需求, 通常可采用六边形等效全向天线无线信号传播特征并组成蜂窝小区形式无线网络结构^[2], 蜂窝式网络结构可降低无线信号发送功率和进行频率复用, 较大程度上方便了无线网络优化设计和无线资源充分复用。由于无线通信业务量增长和各种新业务的涌现, 旨在优化设计无线系统和网络体系结构的改进方法在系统的演进过程中应运而生, 并在各种无线通信系统技术标准中得到应用。其中, 分布式无线电是在蜂窝移动通信网络发展中为适应无线网络容量提高、覆盖范围扩大和多种无线业务增长等需求而形成的一种分布式无线网络系统。

分布式无线电是指通过光纤无线电等宽带传输技术^[3-5]

将移动通信网的基站(BTS)和远程天线单元(RAU)分开, 基站的无线信号和基带信号在不同的地理位置上处理使基站和天线由传统的集中放置的方法改变为分开放置, 基站的无线覆盖小区可由多个分散放置的天线组成。在无线网络进行规划设计时, 基站天线的布置可以根据无线信号覆盖和用户容量需求灵活地放置和延伸, 以便于通过无线信号覆盖范围的规划、频率/空间等无线资源的合理复用和不同位置多个天线的信号发送有效地抗击无线信号衰落等优化设计方法提高移动通信网的系统容量和服务质量(QoS)。

本文首先介绍了蜂窝移动通信系统网络结构的发展和分布式无线电在移动通信网中的应用, 对蜂窝移动通信系统和相关技术的发展趋势进行了系统地分析研究, 最后探讨一种能够适应各种无线通信技术发展的广义小区式蜂窝移动通信系统及其无线资源管理模型和切换算法。

2 蜂窝移动通信网络结构

蜂窝移动通信网络优化设计准则是提高系统容量、扩大无线覆盖范围、提供较好的业务传输质量保障、适应各种新业务发展、减少每个用户业务传输的网络代价和网络规划时要考虑网络系统演进或设备更新的适用性^[6]。在移动通信系统

的发展过程中,为提高系统容量和业务承载能力,不仅在系统使用复杂的多址接入方式(FDMA、TDMA、CDMA、OFDMA)、功能强大的协议和有效的信源/信道编码等技术,而且不断地探讨无线网络覆盖的小区结构以及随之产生的小区间的频率复用、抗干扰技术和切换等技术^[7]。移动通信网络的小区(Cell)结构是针对无线系统在实际应用情况下无线射频信号传播特性进行合适的等效,并由多个等效小区组成群组(Cell Group)的方式组合形成全范围信号覆盖的无线网络结构。通过多小区形式的无线网络结构,稀缺的无线频谱资源能够得到复用,从而提高无线通信网络的容量。传统的蜂窝移动通信网络通常采用宏蜂窝(Macro-Cell)小区面向 1km~25km 范围内快速移动和大范围内信号传输为移动业务传输提供基本保障、微蜂窝小区(Micro-Cell)面向 30m~500m 范围内话务量较大的地区和较低移动速度的业务和微微蜂窝(Pico-Cell)小区用于面向 10m~30m 范围内移动业务和局部业务热点业务传输的三层蜂窝网络构架方法扩大无线信号无缝覆盖范围和提高系统容量。

无线网络拓扑结构的改进方法主要面向两个方面,一是为适应地理环境而采用非六边形小区结构,如宽广的区域采用大蜂窝结构、城市街区使用曼哈顿结构(Manhattan)、高速公路上使用队列结构(Row)和适应广场传播要求的四边形(Quadrangle)等网络拓扑结构。二是通过改变蜂窝结构的方法扩展网络容量,如将小区分裂成更小的小区以提高小区信道数量的小区分裂(Cell Splitting)、使用定向天线限定覆盖小区一部分以减小信号干扰比的划分扇区(Sectoring)等方法。为解决小区分裂导致各小区容量减小问题可使用宏小区与微小区共存的重叠小区结构(Overlaid Cell)^[8],为克服多个扇区增加了越区切换次数等缺点,采用将基站的定向天线设置在小区的顶点上形成的 Lee 微小区概念(Lee's Micro-Cell)^[9],也可以采用智能天线技术将多组独立天线组成天线阵列进行动态地调整波束方向,使每个用户都获得最大的主瓣并减小了旁瓣干扰的方法形成系统智能小区构架(Intelligent Cell)^[10]。

由于分布式无线电可将不同位置的基站天线接收和发送的信号集中到同一处进行基带处理,各种非传统的无线网络结构也随之出现,如根据地理位置和用户移动情况将几个天线各自的微区域(Micro-zone)组成一个移动安全区域(Movable Safety Zone),系统统一调配无线资源以减少邻道干扰和用户移动过程中的切换次数^[11],采用定向天线技术,在城市街区道路交叉点处使用四扇区交叉形状(Four-Sector Cross-Shaped)的天线排列形式,同时使用波束形成技术面向移动终端,在较大程度上减少了系统干扰,使系统容量成几倍增长^[12]。针对分组数据业务的传输特点,移动终端可使用整个资源带宽的虚拟小区(Virtual Cell)网络结构使系统具有业务传输吞吐量提高能力和更加平滑的系统切换^[13],在小区中将独立的天线改变为分布式天线结构的无线网络系统^[14],采用分布式天线、分布式基带处理器、分布式控制的分布式无线通信系统(DWCS)概念^[15]和针对移动通信中基站位置相对集中、多个天线组成一组特点的无线资源管理系统^[16]等方案。各种无线网络拓扑结构和相关技术的改进方法都在不同程度上提高了

移动通信网的系统容量。

3 蜂窝移动通信系统和相关技术的发展趋势

在蜂窝移动通信系统的研究、设计和网络规划发展历程中,无线小区结构、系统无线资源管理调配策略、空中接口的信号传输、网络互联互通等相关技术是随着无线基带处理技术、射频和天线技术、网络传输技术和传输协议等各方面的进步以及移动通信系统的宽带传输和系统覆盖的需求而不断地演进和发展。其中,分布式无线电在移动通信系统中应用使系统的研究和发展更加具有活力,原本较为复杂或不易实现的相关技术得到了新的认识,新技术可以得到合理的应用,使未来移动通信系统的发展具有更大的前景。

无线通信系统的蜂窝小区结构在移动通信系统中已得到广泛应用,提高系统无线频谱资源利用率和系统功率效率的小区构架方案和增加系统容量的各种技术层出不穷,主要使用的方法有蜂窝内改进、系统层次模型有所变化的整体改进和摒弃了传统的微小区结构的非蜂窝结构等。同时,在各种小区结构的系统中采用适当的无线资源管理策略可以提高系统容量。无线资源管理使用功率和速率控制、信道分配、调度、准入控制、切换控制、无线链路自适应、端到端的 QoS 等调配和管理算法,针对移动通信系统的多维无线资源使用进行优化设计。各种无线资源管理算法通常采用运算复杂度较低的静态方法或复杂度较高的动态方法实现无线资源的管理和调配,提高了系统性能^[20,21]。切换技术(Handover)是通过改变时隙、频道、码道或其他无线资源的方法保持移动用户不中断通信,可分为基于网络控制(NCHO)、基于移动终端辅助(MAHO)和基于移动终端控制(MCHO)^[27,28]的硬切换和软切换的方法,切换算法对蜂窝移动通信系统容量的提高、业务传输质量保障(QoS)和基站/移动终端的复杂度有较大的影响^[29-31]。

空中接口传输技术主要采用传统的多址接入方式提高无线链路传输吞吐量,同时还在进一步挖掘空间无线资源。多人多出(MIMO)天线技术能在不增加带宽情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率^[22,23]。理论和实践研究结果表明,MIMO 系统可将多径作为有利因素加以利用,系统的频谱效率随天线个数线性增长。MIMO 系统的空时处理技术是在空间域和时间域联合处理接收信号,利用信号的空间特征分开用户信号、多址干扰(MAI)以及多径干扰信号,因此具有空间信号处理技术和时间信号处理技术的共同优势。另一方面,分集技术可采用时间分集、频率分集、空间分集、极化分集、角度分集和多用户分集等发送/接收分集方法改善无线信道的多径衰落、多址干扰和符号间干扰(ISI),在移动通信系统中得到较好的应用^[32-34]。网络传输技术主要针对核心网的电路交换域和分组交换域的业务和接入网的信号传输进行容量规划设计。光纤无线电(RoF)等宽带传输技术为分布式无线系统的构架提供了便捷方法。分布式无线电能够使系统的基站天线根据实际地理位置和系统覆盖需求进行快速和灵活安置,不仅降低了射频信号发送功率带来系统性价比的提高,而且可以采用多个天线组成基站系统充分利用空间资源,进一步合理地进行系统网络规划。

未来宽带移动通信系统的发展趋势是无线接入网的空中接口数据传输能力达到高速移动环境下 100Mbps 和低速移动环境下 1Gbps 的传输速率^[35]. 为了实现此目标, 移动通信系统的工作频点将在 2GHz 以上, 无线系统物理层考虑使用能够线性增加系统容量的多人多出天线(MIMO)和并行方式传送信号以减少干扰的多载波传输等技术, 系统组网可采用使天线安置具有较大灵活性的分布式无线电技术, 业务传输承载协议将是能够平滑多网互联的 IP 协议. 在使用较高的工作频段缓解频谱资源的稀缺并引入各种新型的宽带传输技术突破空中接口和地面传输速率的瓶颈等方法进行无线系统组网的同时, 将出现由于工作频点变化和宽带传输技术应用带来的如下三个方面问题, 一是较高的系统工作频率将导致无线信号在空间传输中快速衰落, 表 1 给出了三个不同的工作频

点在自由空间衰落^[36]和城市街区衰落模型下^[37]链路预算结果. 由表 1 可知, 在保持同样覆盖范围的条件下 5GHz 工作频点基站所需发送功率比 800MHz 工作频点基站发送功率要大 16dB 左右, 若采用传统的三层蜂窝结构进行 5GHz 工作频点无线网络覆盖将导致很低的系统功率效率和较大的系统干扰. 二是降低基站天线发送功率将形成传统的小区分裂, 系统中多小区间的切换次数增多使系统信令开销加大和系统容量降低. 三是多人多出天线技术和多载波传输技术在移动通信网中使用给出了一个较有前途的应用场景. 针对上述问题, 未来移动通信网的网络结构设计需要考虑提高系统功率效率的天线系统组网方式, 降低系统干扰的无线资源调配方法、减少系统信令开销的切换算法和各种宽带传输技术的合理应用等.

表 1 三种工作频点在自由空间衰落和城市街区衰落模型下的链路预算

$f_c, h_m = 1.5\text{m}, h_b = 9\text{m}$ $G_r + G_t = 0, P_{tx} > -100\text{dBm}$		距离-功率 变化斜率(dBm)	1 瓦发射功率 覆盖范围(km)	500 米覆盖范围 发射功率(dBm)
$\lambda 1 = 0.375$ (0.8GHz)	自由空间衰落	$(P_{rx}) = (P_{tx}) - (30.4 + 20\lg d)$	151.35	-19.62
	Okumura-Hata	$(P_{rx}) = (P_{tx}) - (129.45 + 44.6 \lg d)$	9.8	12.02
$\lambda 2 = 0.15$ (2GHz)	自由空间衰落	$(P_{rx}) = (P_{tx}) - (38.4 + 20\lg d)$	60.255	-11.6
	Okumura-Hata	$(P_{rx}) = (P_{tx}) - (134.4 + 44.6 \lg d)$	1	16.975
$\lambda 3 = 0.06$ (5GHz)	自由空间衰落	$(P_{rx}) = (P_{tx}) - (46.395 + 20\lg d)$	23.988	-3.62
	Okumura-Hata	$(P_{rx}) = (P_{tx}) - (139.38 + 44.6 \lg d)$	0.75	21.955

4 广义小区式蜂窝移动通信网

由于分布式无线电具有天线发送功率小、无线网络结构灵活、基带信号可集中处理等特点, 能够适应未来移动通信系统以较小的发送功率传送无线信号的网络构架需求. 同时, 分布式无线网络结构使各天线与移动终端之间距离尽量短, 将在较大程度上提高系统的功率效率和减少系统干扰. 因此, 可进一步探讨分布式无线网络的小区结构、无线资源管理模型和切换方法, 使移动通信系统能够提高系统功率效率、充分利用无线资源、减小系统干扰和提高系统容量.

4.1 小区定义

在移动通信系统的无线网络结构设计时, 可将采用分布式无线电技术的移动通信系统无线接入网分为三个层面即远程天线单元(RAU)的覆盖范围、基站收发器(BTS)无线覆盖范围和移动通信网无线覆盖范围如图 1 所示.

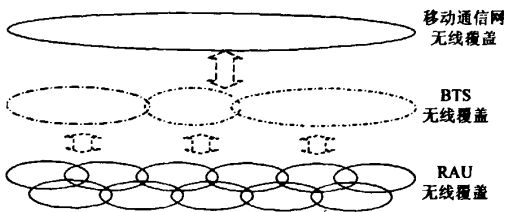


图 1 移动通信系统的无线接入网的三个层面

对上述无线接入网三个层面可作如下定义:

射频小区(RF-Cell): 无线接入单元(RAU)的无线信号覆盖范围, 通常一个射频小区无线信号覆盖在几十至几百米范围内. 可以根据实际应用环境的覆盖需求和用户业务量大小规划射频小区天线的位置和数量并组成分布式无线系统.

广义小区(GN-Cell): 由连接在同一个基站收发器(BTS)的一组射频小区构成无线信号的覆盖范围. 广义小区中分布的天线数量和广义小区覆盖范围的大小是可以随实际应用场景变化. 两个广义小区的组合形成广义小区式移动通信系统的网络结构如图 2 所示. 在广义小区式移动通信系统中, 可在各个层面上采用无线资源分配方法、小区切换方法和空时处理技术, 以便更好地进行网络规划、减少系统干扰和提高系统容量.

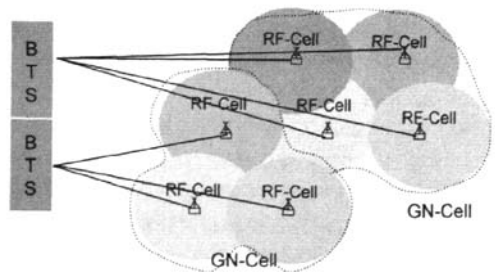


图 2 由广义小区式蜂窝移动通信系统的网络结构

4.2 无线资源分配模型和切换过程

为了保障广义小区式移动通信系统在保持系统无线资源复用能力和较高的系统容量等各种优势的条件下,进一步开发利用广义小区中多天线的无线空间资源,在广义小区式蜂窝移动通信系统中采用两级无线资源分配模型,如图 3 所示。

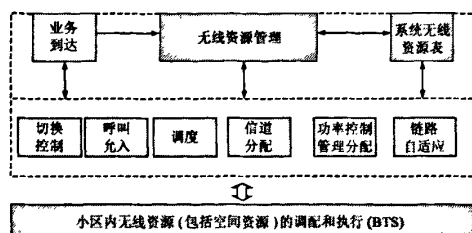


图 3 无线资源管理的两级分配模型

第一级无线资源分配:在基站控制器(BSC)中完成,负责整个系统中的频率、时隙、码道等资源在系统中的统一调度和复用,通过动态或静态的切换控制、呼叫允入、调度、功率控制和链路自适应等算法,针对系统的业务呼叫阻塞率、广义小区间切换阻塞率、各用户业务的传输吞吐量和时延、系统功率效率以及减少系统干扰等目标进行合理的规划设计。第二级无线资源分配:在基站收发器(BTS)中完成,根据 BSC 的无线资源分配结果给各个射频小区分配资源,负责广义小区内无线资源和空间资源的调配,广义小区内的无线资源分配可采用两种不同的方法,一是在广义小区内采用频率、时隙、码道复用的方法,如此能够提高系统容量但网络规划和信令系统较为复杂,二是广义小区内频率、时隙、码道不复用方法,多个移动终端可通过对频率、时隙、码道等资源的信道分配方法在广义小区中共享一个或多个射频小区,可使系统的网络规划和设计简单但系统容量较低。

在广义小区式移动通信系统的两级无线资源分配模型中,系统中的移动终端的切换过程可采用两层不同的切换方法。第一层是在广义小区之间根据移动终端接收的功率强度等参数采用频率、时隙、码道和天线等无线资源统一调整的方法完成传统的小区间切换,第二层是移动终端在广义小区内部时,由于移动终端可以采用空时处理方法同时与几个射频小区天线通信,BTS 检测各天线接收到移动终端的信号的平均能量选择与移动终端通信的几个射频小区天线,通过 BTS 中广义小区天线资源占用表的更新方法对天线空间资源的调整完成物理层快速切换(L1 层切换)过程,移动终端与系统网络之间无需信令交换即可完成空间资源间的切换,广义小区内部物理层快速切换过程和广义小区之间切换过程如图 4 所示。

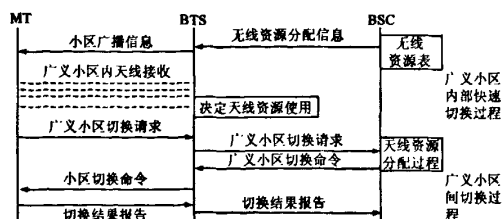


图 4 广义小区内部物理层快速切换过程和广义小区之间切换过程

4.3 系统干扰与性能分析

在广义小区式蜂窝移动通信系统中移动终端主要受到三种系统内部干扰信号影响,一是广义小区内其他相邻移动终端的多址信号干扰(I_{at}),二是广义小区内未与该移动终端处于通信工作状态的邻近天线干扰(I_{aa}),三是来自其他邻近广义小区的干扰(I_{agnc})。广义小区中用户 j 的比特能量于干扰比为:

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right) = \frac{pgP_j}{\sum_{i=1, i \neq j}^M P_i + I_{aa} + I_{agnc} + N} \quad (1)$$

其中 pg 是收发处理增益, P_j 是接收到用户 j 的功率, P_i 是接收到广义小区中其他用户的多址干扰信号功率, N 是噪声功率, M 为广义小区中最大用户数。假设系统采用理想功率控制,系统的判决门限为 $(E_b/I_0)_d$,则其他用户的 P_i 相等,广义小区中最大用户数为:

$$M-1 < \frac{pgP_j}{(E_b/I_0)_d P_i} - \frac{I_{aa}I_{agnc} + N}{P_i} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,小区用户容量受到系统内部各种干扰信号的影响。在广义小区式移动通信系统中,传统小区的集中式天线系统被多个射频小区组成的分布式无线系统所替代,传统小区中基站天线的总发送功率随着基站与移动终端距离增加快速增加的需求被分解成为多个短距离覆盖范围的射频小区发送功率的线性相加。通过合理地设定广义小区中射频小区的个数和各射频小区的发送功率,系统将具有较好的功率效率和较小的无线干扰信号强度。同时,在系统中采用的两级无线资源分配模型和两层切换算法使广义小区式移动通信系统能够在充分使用传统提高系统容量方法(如扇区划分、频率复用、小区呼吸等)的基础上增加了空间无线资源的利用率。另一方面,广义小区中分布式无线网络覆盖的系统结构可形成

表 2 系统的功率效率和系统容量比较

小区方式	功率效率	小区干扰	小区容量
集中式天线系统 (传统蜂窝小区)	$P_t = P_r \times G_t \times d^{\alpha}$ 快速增加	$I_{at} + I_{ac}$ 较大的干扰功率强度	$M-1 < \frac{pgP_j}{(E_b/I_0)_d P_i} - \frac{I_{aa} + N}{P_i}$
分布式天线系统 (广义小区)	$P_{t1} + P_{t2} + \dots + P_{tm}$ 线性叠加	$I_{at} + I_{agnc} + I_{ac}$ 较小的干扰功率强度	$M-1 < \frac{pgP_j}{(E_b/I_0)_d P_i} - \frac{I_{aa} + I_{agnc} + N}{P_i}$ 干扰小,多天线系统容量增加

分布式多天线 (Distributed MIMO) 系统, 采用多个射频小区天线的复用/分集方法^[32]或多天线间的机会通信的方法^[33]将使广义小区容量随着多天线的合理应用而线性增加. 广义小区式蜂窝移动通信系统与传统蜂窝移动通信系统的功率效率和系统容量比较如表 2 所示.

5 结束语

随着移动通信系统使用更高的工作频段, 功率受限的分布式无线电网在系统的发展过程中得到不断完善和广泛应用, 在分布式无线网络构架下的各种无线资源 (尤其是空间无线资源) 的开发利用将成为减少系统干扰和提高系统容量的合理途径, 进一步探讨移动通信系统的系统网络结构、空中接口的宽带传输技术、无线资源调配机制等各种技术将能有效地缓解无线频谱资源短缺与通信业务量增长之间的矛盾.

参考文献:

- [1] F Adachi. Challenges for Broadband Mobile Technology[A]. Proc 12th International Conference on Antennas & Propagation[C]. Exeter, U.K: (ICAP 2003), 2003. 1-4.
- [2] V H MacDonald. The cellular concept[J]. The Bell System Tech. Journal, Jan, 1979.
- [3] D M Fye. Design of fiber optic antenna remoting links for cellular radio applications[A]. IEEE Proceeding of VTC90[C]. 1990. 622-625.
- [4] Winston I Way. Optical fiber based microcellular systems: an overview[A]. IEEE International Microwave Symposium, Workshop on Wireless Communications via Lightwave[C]. Atlanta, Ga, June, 1993.
- [5] R Ohmoto, H Ohtsuka, H Ichikawa. Fiber-optic microcell radio systems with a spectrum delivery scheme[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1993, 11(7): 1108-1117.
- [6] J Sarnecki, C Vinodrai, A Javed, P O' Kelly, K Dick. Microcell design principles[J]. IEEE Communications Magazine, 1993, 31(4).
- [7] R Steele, J Whitehead, W C Wong. System aspects of cellular radio[J]. IEEE Communications Magazine, 1995, 33(1).
- [8] Xavier Lagrange. Multi-tier cell design[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(8): 60-64.
- [9] W C Y Lee. Smaller cells for greater performance[J]. IEEE Communications Magazine, 1991, 29(11): 19-23.
- [10] W C Y Lee. Applying the intelligent cell concept to PCS[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(3): 672-679.
- [11] Ho-Shin Cho, Sang Hyuk Kang, Dan Keun Sung. A movable safety zone scheme in urban fiber-optic microcellular systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(4).
- [12] Ho-Shin Cho, Jae Hoon Chung, Dan Keun Sung. Four-sector cross-shaped urban microcellular systems with intelligent switched-beam antennas[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(2).
- [13] H J Kim, J P Linnartz. Virtual cellular network: a new wireless communications architecture with multiple access ports[A]. VTC '94[C]. 1994.
- [14] K J Kerpez. A radio access system with distributed antennas[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1996, 45(2): 265-275.
- [15] Shidong Zhou, Ming Zhao, Xibin Xu, Jing Wang, Yan Yao. Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, March 2003.
- [16] M Berg, S Pettersson, J Zander. A radio resource management concept for 'bunched' personal communication systems[A]. Proc. Multi-access Mobility and Tele-traffic for Personal Communications Workshop MMT'97[C]. 1997.
- [17] L J Meyer. Using fiber optics with analog RF signals[A]. Proc. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. 1989. 398-400.
- [18] Yoshihara Okamoto, Ryoichi Miyamoto, Masayuki Yasunaga. Radio on fiber access network systems for road-vehicular communication[A]. The IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)[C]. 2001.
- [19] CPRI Specifications V1.1. Common public radio interface[S]. 2004. 5.
- [20] J Zander. Trends in resource management future wireless networks[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. 2000. 159-163.
- [21] L Badia, M Lindstrom, J Zander. An economic model for the radio resource management in multimedia wireless systems[A]. 3rd Workshop on Applications and Services in Wireless Networks[C]. 2003.
- [22] P W Wolniansky, G J Foschini, G D Golden, R A Valenzuela. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[A]. IEEE Proceedings URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics[C]. 1998. 295-300.
- [23] G J Foschini, M J Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6: 311-335.
- [24] A Goldsmith, A J Syed, Jindal Nihar. Capacity limits of MIMO channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(5): 684-702.
- [25] Volker Jungnickel, Volker Pohl, Clemens von Helmolt. Capacity of MIMO systems with closely spaced antennas[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(8).
- [26] Rick S Blum, Jack H Winters, Nelson R Sollenberger. On the capacity of cellular systems with MIMO[J]. IEEE Communications Letters, June 2002, 7(8).
- [27] N D Tripathi, J H Reed, Van Landinham. Handoff in cellular systems[J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(6): 26-37.
- [28] Olle Grimlund, Bjorn Gudmundson. Handoff strategies in microcellular systems[A]. IEEE VTC[C]. 1991.
- [29] Miltiades E Anagnostou, G C Manos. Handover related performance of mobile communication networks[A]. Proceedings of IEEE 44th Veh Tech Conf, VTC 94[C]. 1994. 111-114.
- [30] Tao Xiaofeng, Ni Li, Dai Zuojun, Liu Baoling, Zhang Ping. Intelligent group handover mode in multicell infrastructure[A]. PIMRC2003[C]. 2003, Beijing, China.
- [31] Tao Xiaofeng, Shang Dan, Ni Li, Zhang Ping. Group cells and slide handover mode[A]. ICCT 2003[C]. 2003, Beijing, China.
- [32] S M Alamouti. A simple transmitter diversity scheme for wireless communications[J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1998, 16: 1451-1458.
- [33] Pramod Viswanath, David N C Tse, Rajiv Laroia. Opportunistic beam-forming using dumb antennas[J]. IEEE Transactions on Information

Theory, 2002, 48(6).

- [34] Ho-Shun Cho, Jae Kyun Kwon, Dan Keun Sung. High reuse efficiency of radio resources in urban microcellular systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(5).
- [35] Recommendation ITU-R M. 1645.
- [36] Kaveh Pahlavan, Prashant Krishnamurthy. Principles of wireless networks: a unified approach[M]. Pearson Education.
- [37] Dongsoo Har, Howard H Xia, Henry L Bertoni. Path-loss prediction model for microcells[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(5).
- [38] Krister Raith, Jan Uddenfeldt. Capacity of digital cellular TDMA system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(2).
- [39] Andrew J Viterbi, Audrey M Viterbi, Ephraim Zehavi. Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(2-4): 1501 - 1504.
- [40] H Haas, S McLaughlin, G J R Povey. Capacity-coverage analysis of the TDD and FDD mode in UMTS at 1920 MHz[J]. IEE Proceedings of Communications, 2002, 149(1).

作者简介:



尤肖虎 男, 1962 年 8 月出生, 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. E-mail: xhyu@catt.ac.cn.



赵新胜 男, 1963 年 10 月出生, 东南大学无线电工程系移动通信国家重点实验室教授, 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.