

中国下一代移动通信研究

田金凤^{①②}, 郑小盈^{②③}, 胡宏林^{①②*}, 尤肖虎^{①③}

① 上海无线通信研究中心, 上海 200335;

② 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

③ 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

* 联系人, E-mail: hlhu@ieee.org

2011-10-13 收稿, 2011-12-30 接受

国家自然科学基金(61002017, 61072076, 61100238)、上海市青年科技启明星项目、上海市自然科学基金(09ZR1430500)和东南大学移动通信国家重点实验室开发课题基金资助

摘要 随着无线通信网络的迅速发展, 第四代移动通信(4G)正逐渐成为通信系统的主流技术. 4G 通信系统力图克服第三代移动通信(3G)的局限性, 为用户提供更高的带宽、更好的服务质量以及更低的资费. 本文讨论了 4G 网络中的关键技术, 并且着重调研了国内学者所开展的 4G 技术研究. 所调研的 4G 技术涉及多载波传输技术、多天线技术、载波聚合技术、中继技术、认知无线电技术、分布式天线系统、网络融合技术以及网络自优化技术. 上述 4G 关键技术为满足国际电信联盟(ITU)提出的高级全球移动通信标准(IMT-Advanced)提供了重要的技术支撑. 本文将详细介绍每一种技术的作用、研究内容和现有解决方案. 最后, 探讨了 4G 系统面临的挑战以及未来研究方向.

关键词

多载波传输
多天线技术
载波聚合
认知无线电
分布式天线
网络融合
网络自优化

随着人们对移动通信服务需求的与日俱增, 第三代移动通信系统(3G)已不再满足日益增长的高速多媒体数据业务需求, 这使得全世界通信业将目光投向第四代移动通信(4G). 4G 通信系统将采用更为先进有效的技术, 支持更为丰富灵活的业务, 以期解决现有 3G 系统存在的问题. 基于全面、安全的互联网协议(IP), 专家们期望 4G 可以真正实现在任何时间、任何地点向用户提供高速的数据服务, 支持包括语音、视频、广播多媒体以及互联网在内的多种业务. 因此, 4G 被理解为能提供“一直最好的连接”, 即一个用户可以在任何时间任何地点拥有最好的服务连接.

按照用户的需求和技术的发展, 无线通信网络演进分为多个阶段, 每一阶段都为移动通信带来了新的变革. 第一代移动通信系统(1G)利用模拟技术开展了商业移动语音服务, 建立了移动通信的基本架构, 解决了移动通信中的基本问题, 例如频带复用、漫游、移动状态下无中断通信等. 第二代无线通

信技术(2G)标志移动通信从模拟向数字的转变. 2G 系统基于电路交换架构, 具有较高系统容量, 系统的运营成本相对减少, 能为用户提供短信和低速率数据业务. 在 2G 架构下, 2.5G 利用分组交换技术将互联网引入无线个人通信中. 3G 系统是一种基于电路交换和分组交换的混合网络, 可以提供更高的网络容量, 同时能为用户提供更为多样的高级服务, 比如广域无线语音电话、视频电话、宽带无线数据等. 尽管 3G 系统能提供较高的数据速率, 仍然不能满足未来高性能应用的需求. 随着高性能应用对数据率需求的日益增长, 人们对 4G 网络产生了越来越浓厚的兴趣.

基于 IP 协议, 未来 4G 网络将是一个集成广播电视网络、无线蜂窝网络、无线局域网、蓝牙、卫星网络、有线网络的统一系统, 移动用户可以在不同接入技术间实现无缝漫游. 各种业务应用、各种系统平台间的互联将更便捷更安全、用户界面更友好, 用户可

以根据自身喜好配置移动终端、定制个性化应用程序。在 4G 网络中,快速的无线宽带传输使得随时随地的高速率连接成为可能,这样,视频消息、视频电话、移动电视、游戏等服务便可以随时随地使用。按照移动通信的演进趋势,4G 将具有更高带宽、更高速率(高速移动下最高可达 100 Mbit/s,低速移动下可达 1 Gbit/s)、更低延迟、更高频谱效率和更低实现代价,这种对 4G 网络的展望实际是对宽带互联网和 3G 移动网络当前发展的一种延伸。由于 4G 网络和终端的突出能力,4G 可以为用户带来全新的体验,并且带动可能的新应用领域发展,比如:虚拟临场和导航、远程求医和教学、远程通讯地学处理以及危机管理应用等。

作为联合国组织,国际电信联盟通过协调政府、公司、私营部门多方面力量来推进 4G 技术向前发展。为了满足移动用户对无线宽带服务需求的不断增长,ITU 发布了一份超全球移动通信 2000(超 IMT-2000)的无线接入技术的邀请函,这里超 IMT-2000 又称作高级全球移动通信(IMT-Advanced),也就是业界公认的 4G。官方在 4G 技术研究中的主要指导方针是 ITU 无线电通信部(ITU-R)提供的 IMT-Advanced 需求^[1],这份需求详细说明了 IMT-Advanced 未来发展的目标。现今,第三代合作伙伴(3GPP)项目中的长期演进增强(LTE-Advanced)技术和全球微波互联接入(WiMAX)版本 2 两个主要技术已经被官方认可为 4G 技术。前一技术是 3GPP LTE R8 的后向兼容增强技术,后一技术则建立在 802.16 m 标准上。

中国政府大力支持移动通信的发展,尤其是高技术研究发展计划(863, www.863.gov.cn)。2001 年,国家 863 计划启动了面向后三代/四代(B3G/4G)的移动通信发展研究计划(简称 FuTURE 计划)^[2],有力地支持了我国的国际标准化活动,并且创建了未来移动通信论坛(www.future-forum.org),组织国内的研发力量,积累了大量的研发成果,加速了我国移动通信的发展。其中,以时分复用(TD)为核心的演进路线得到了极好的贯彻,并且 TD-LTE-A 成功入选 ITU 的 4G 标准之一。自 2008 年起,为了更好地做好移动通信技术的演进工作,工业和信息化部启动了“新一代宽带无线移动通信网”国家重大专项(www.miit.gov.cn),针对多天线、载波聚合等关键技术开展研究,并且组织优势力量研发攻关基站、终端、芯片等产品,来进一步推进相关产业的发展。

1 关键技术

在电信行业,4G 已经快速发展成为一个有意义和有前景的研究课题,它需要新的先进技术来实现其鲜明的技术特征。目前,4G 的技术研发已经进入了实质阶段,本节将介绍 4G 研究中的一些关键技术和国内学者的相关研究成果,这些技术和成果可能对未来移动通信系统产生深远影响。

1.1 多天线传输技术

多媒体业务需求的不断增长要求通信系统支持高速率服务,但是多径所带来的符号间干扰(ISI)是高速通信发展的主要制约。针对此问题,多载波传输是一种有效的解决方法。作为一种带宽有效的多载波调制机制,正交频分复用(OFDM)将会成为未来通信系统的核心技术。OFDM 利用存在一定频率间隔的一组正交子载波并行传输数据,具有高频谱效率、低复杂度实现和抗多径衰落的优点。正是由于这些优点,OFDM 技术已经被多个数字通信标准所采纳,如:欧洲音视频广播标准、无线局域网(WLAN)、无线城域网等(WMAN)。另一方面,广义多载波(GMC)方法为各种多载波技术以及单载波技术建立了统一的描述方式。在 GMC 中,子载波间无正交性假设,因此 GMC 技术适用于高速移动场景或多普勒偏移和时延扩展较大的信道环境。

OFDM 信号在时间上表现出的较大幅度波动会产生高峰均比(PAPR)问题,而高峰均比会破坏子载波间的正交性、引入调制失真,以至于导致邻近信道间的高干扰和误比特率(BER)增高。就此问题,文献[3]提出了一种指数压缩机制,它通过调整输入信号的幅度,可以有效降低 OFDM 系统中不同调制方式以及不同子载波数时的峰均比,并且,这种非线性压缩变换方法可以改善峰均比、功率谱、BER 以及相位误差。除压缩机制外,部分传输序列和选择性映射是降低 PAPR 的两种常用方法。这两种方法均是通过在原信号产生多种表示方法,再选择具有最好 PAPR 性能的数据进行传输。近来,在 OFDM 码分多址接入系统(CDMA)中,文献[4]提出了一种联合扩频和逆快速傅里叶变换(IFFT)处理方法,以简化多个候选信号的产生。基于串行峰值抵消模式,文献[5]提出了一种改进的峰值抵消机制,它利用一种优化处理阶数来抑制干扰,以便消除传统方法中的峰值

再生问题。

OFDM 是宽带无线通信中一种极具发展前景的技术,然而,其性能却易受时频同步误差影响,导致严重的 BER 性能损失。在 OFDM 系统中,实现时频同步的方法很多,总体来说可分为两大类:数据辅助和盲估计,这两类方法可以独立地、也可联合地来实现时频同步。文献[6]针对时频同步问题给出了全面的调研。数据辅助的估计方法比如利用前导符号和训练序列,可以更快更准确地估计频偏,但是它需要额外的带宽来传输用以同步的信息,因此会降低带宽传输效率。相反,盲估计不需要额外的数据辅助,仅根据接收信号的一些特定特征(如空闲子载波、恒模和循环平稳性等)来纠正 OFDM 系统中的同步误差,常适用于高速率传输场景,但该类方法不适于精度要求严格以及估计范围宽的场景。文献[7]研究了实现全范围估计的空闲子载波分配所需的充分必要条件,并且进一步为频偏估计设计了一种分布式空闲子载波替换方法。为了分析时频同步误差对系统性能的影响,文献[8]研究了 OFDM 系统中归一化干扰功率(NIP)的上界,并设计了给定信道条件下达到特定 NIP 值的时频同步算法。对高斯白噪声(AWGN)信道下的多项式相消编码的 OFDM 系统,文献[9]使用两种标准评估了载波频偏对系统性能的影响。

此外,OFDM 可以与其他技术结合以进一步提升系统性能。一些以 OFDM 为基础的技术已经在相应的应用中显示其显著优势,如:矢量 OFDM(V-OFDM)、宽带 OFDM(W-OFDM)、快速低时延接入/无缝切换 OFDM 技术。而且,OFDM 调制还可与多址接入结合形成正交频分多址接入(OFDMA)技术,这不仅使得资源分配更为灵活,而且可以实现如跨层包调度^[10]的无线链路跨层优化方案。

GMC 原理框架统一了各种调制机制,吸引了大量学者的关注。Gao 等人^[11]提出了一种多天线系统 GMC 无线传输技术,并且简要介绍了其中几种关键技术,包括系统设计、时隙结构、前导设计、信道估计。在多载波 CDMA 系统中,文献[12]利用广义离散傅里叶变换(DFT)滤波器组设计了一种多载波传输机制的数字化实现方式。基于滤波器组理论,DFT 扩频广义多载波机制(DFT-S-GMC)被用于宽带无线系统的上行传输^[13]。文献[13]还给出了 DFT-S-GMC 和 DFT 扩频 OFDM(DFT-S-OFDM)机制在 PAPR 性能以及多用户干扰方面的性能比较。文献[14]讨论了非理

想正交原型滤波对 DFT-S-GMC 系统性能的影响,并进一步提出了单子带频域均衡(FDE)方法,分析了子带 FDE 带来的性能损失。

DFT-S-GMC 作为宽带上行传输的一种有效调制技术,在 3GPP 标准化中受到了热烈讨论。为了简化理解 DFT-S-GMC 技术的实现,文献[15]详细描述了用户设备发射端的组成模块,介绍了 DFT-S-GMC 发射机的关键数学基础。文献[16]给出了 DFT-S-GMC 和 DFT-S-OFDM 系统在峰均比、同步以及 BER 方面的性能比较。该提案表明 DFT-S-GMC 系统在频域具有更低的 PAPR 性能,其性能甚至好于 DFT-S-OFDM 系统。相比 DFT-S-OFDM 方式,这种机制对时频同步误差、多用户接入干扰具有更好的鲁棒性,同时其 BER 性能处于 DFT-S-OFDM 两种类型之间。文献[17]进一步证明了相比 DFT-S-OFDM 方式,DFT-S-GMC 传输方法对相位噪声更为不敏感。

1.2 多天线技术

无线宽带接入的挑战在于提供高服务质量(QoS)、长距离的高速无线传输。对 4G 宽带无线通信需求的不断增加,使得多天线技术在发射端和接收端的应用应运而生。作为近年来无线通信的一种有效革新,多天线技术可以获得复用增益、分集增益、天线增益,能显著提升系统容量、链路质量、扩大覆盖范围。相应地,对应于三种天线增益所采用的技术分别是:空间复用、空间分集、波束赋形。当多根天线同时使用在无线链路两端(基站和用户设备端)时,这样的技术称为多人多出(MIMO)通信方式。在 LTE-A 标准和 802.16 m 标准中,MIMO 机制有着相同的天线配置集:对下行,可选的发射天线数为 2, 4, 8, 接收天线数最小为 2;对上行,可选的发射天线数为 1, 2, 4, 最小的接收天线数为 2。

空间复用通过在与发射天线相关的并行空间信道上传输独立的信息流(通常称做层),极大地提高比特速率。最早的空间复用方法是由贝尔实验室发明的贝尔实验室分层空时技术(BLAST)。为了保证一定的误差性能,水平编码、垂直编码、对角编码(水平编码与垂直编码的联合方式)等信道编码方式常与空间复用联合使用,这些技术又分别称作水平分层空时码(H-BLAST)、垂直分层空时码(V-BLAST)、对角分层空时码(D-BLAST)。在这些空时码中,V-BLAST 结构由于其高频谱效率和低复杂性的优点在工业界

和学术界得到了广泛关注. 文献[18]研究了 V-BLAST 接收机的硬件实现. 文献[19]通过联合最大似然(ML)算法和迫零算法, 对 V-BLAST 机制提出了一种简化 ML 算法, 该算法比 ML 算法复杂度低但具有相同性能. 针对 V-BLAST 系统, 文献[20]对采用连续干扰消除技术的迫零接收机, 研究了发射相关对信噪比(SNR)损失以及决策误差传播的影响. 在文献[21]中, 作者分析了空间相关秩为 1 的莱斯衰落 MIMO 信道上空间复用的各态历经容量. 基于利用发射端统计信道状态信息, 文献[22]研究了联合相关 MIMO 信道上的统计本征模传输方法, 并且文献进一步基于凸优化技术, 设计了仅涉及信道统计信息的低复杂度功率分配方法.

相比于空间复用重在提升吞吐量, 空间分集则通过发射和/或接收冗余信号来对抗无线衰落信道, 以降低系统的传输错误率. 在产生冗余信号时, 发射分集常联合空时编码重构发射的空时码字, 以获得 MIMO 信道中可能的最大分集. 对使用多种不同空时码字的多用户 CDMA 系统, 文献[23]设计了瑞利衰落信道下一种低复杂度多用户接收机. 该接收机具有线性解码复杂度和良好的 BER 性能. 文献[24]针对协作 OFDM 系统提出了一种分布式空时频码(STFC)机制, 可以同时获得空间分集和多径(频率)分集. 空时块(STBC)码作为一种著名的空时码技术, 在性能和复杂度上实现了较好的折衷, 具有广阔的应用前景. 对相关信道干扰(CCI)未知的 STBC 系统, 文献[25]提出了一种基于斜投影的鲁棒线性接收机, 以恢复期望的 STBC 编码信号. 在存在相关信道干扰和噪声的多入单出(MISO)衰落信道下, 文献[26]分析了正交空时块码(OSTBCs)系统的容量.

多天线技术除可以实现高数据速率和低误差率外, 还可用来提升接收机 SNR 性能和抑制多用户场景的相关信道干扰, 后面这两种功能均可以通过波束赋形技术实现. 波束赋形实质是通过调节发射信号和接收信号的波束方向, 增强期望方向上的阵列响应, 通常, 也将这种技术解释为空域线性滤波. 在文献[27]中, 作者给出了波束赋形详细的综述调研. 近来, 通过利用子载波处理方法, 一种载波间干扰(ICI)消除的波束赋形机制可以在多径延迟信道下获得好的误符号率(SER)性能[28]. 文献[29]推导了发射波束赋形平均误符号率(ASER)的全上界, 它在非相关或弱相关场景是紧界, 在强相关场景是松界. 为

了利用多种多天线技术, 具有阵列增益或抑制相关信道干扰效果的波束赋形机制, 可以与空间复用或空间分集技术相结合, 以提升系统的整体性能^[30,31].

在增强基站(eNB)侧使用比终端侧更多的天线需要应用多用户 MIMO(MU-MIMO)技术, 该技术中接收天线分布在多个用户中, 基站可选择一组用户子集服务, 以最大化 MU-MIMO 系统的总吞吐量. 文献[32]针对 MU-MIMO 系统, 利用块对角化预编码提出了一种基于范数的用户选择改进算法, 来最大化总吞吐量同时保持低复杂度. 文献[33]研究了下行 MU-MIMO 系统两种微粒群优化调度算法, 两种算法使用不同的目标函数, 分别应用于不同容量和复杂度需求的场景. 在下行 MU-MIMO 系统中, 相关信道干扰和噪声是影响传输性能的两种主要因素. 为了抑制相关信道干扰和噪声, 文献[34]基于用户的信号泄漏噪声比(SLNR)提出了多用户 MIMO 系统中一种信道自适应功率分配机制, 该机制能极大地提高 BER 性能, 同时在总容量上仅有少量损失. 当在 MIMO 系统上行使用的天线数超过 4 时, 用户端实现多个发射功率放大器的复杂度和代价都很高, 为此, 利用多个用户天线协作上行传输的虚拟 MIMO 技术便应运而生, 在该技术中, 其系统性能^[35]和用户配对^[36]问题受到了广泛关注.

多天线技术无疑可以在频谱效率上带来很大增益, 同时它还可以利用协作传输方式增加小区边缘吞吐量. 协作多点(CoMP)发射和接收能使用户在一个公共通信区域同时与多个地理位置上分散的天线节点同时通信, 以便更有效地服务用户. 当多个节点工作于协作传输模式时, 支持可靠 CoMP 传输的功率分配机制^[37]是实现 CoMP 传输的一个关键问题, 此外, 在 CoMP 技术的研究领域, 还存在一系列问题, 包括信道估计与反馈、参考信号设计、循环前缀/OFDM 参数、以及回传方案. 而且, CoMP 技术在性能与复杂性之间所作的平衡取舍仍是一个尚未解决的问题.

1.3 载波聚合技术

由于终端尺寸、复杂度以及天线数代价等限制, 多天线技术所带来的传输性能增益是有限的. 为了支持更高的带宽(对单用户, 最高支持 100 MHz 带宽)、同时保持后向兼容性, 3GPP 标准组织在其

LTE-Advanced 标准中引入了载波聚合(CA)技术,将两个或更多的成员载波(成员载波可以分别位于非连续的频谱段)聚合成一个更宽的信道.这种聚合方式提供了扩展的带宽,可以获得期望的峰值速率、增加用户的平均速率.CA作为IMT-Advanced中的一种关键技术,吸引了包括中国移动、诺基亚、爱立信、华为、中兴等众多通信集团的广泛关注.

通常,CA可用于三种不同的频谱场景:带内连续CA、带内非连续CA、带间非连续CA.文献[38]列举了几种典型配置场景,包括针对单频带和多频带以及利用时/频分双工机制的连续和非连续载波聚合场景.并且,为实现灵活的带宽使用,LTE-A系统在频分双工机制下支持非对称载波聚合方式.在3GPP规范中,对一个eNB的成员载波定义了三种载波类型:后向兼容载波、非后向兼容载波、扩展载波.后向兼容载波支持当前LTE系统的所有特征,而只有LTE-Advanced用户才能接入非后向兼容载波,扩展载波是成员载波集的一部分,在该集合中至少有一个载波属于可以独立工作的载波,扩展载波的一个主要优点是可以节约控制信令负荷.协议中约定可以将所有载波配置成LTE R8兼容的载波,不要求所有载波必须后向兼容,而一个具有载波聚合能力的LTE-Advanced终端可以在多个成员载波上同时接收/发送.

LTE-Advanced R10的标准研究已经结束.R10中CA的标准研究主要集中在以下方面:载波间保护带宽、数据流聚合、控制信道和上行功率控制.对连续载波聚合,邻近成员载波所需频率间隔必须满足300 kHz的整数倍^[39].基本上,成员载波的聚合可以在协议栈的不同层实现,协议中最后采用每个成员载波使用一个传输块(无空间复用)和一个混合自动重传(HARQ)实体^[40]的机制.在控制信道设计中,载波聚合下控制信令的基本架构已经确定.TR36.814[40]规范了载波聚合场景下上行控制信令和下行控制信令的设计原则.对于载波聚合场景下上行功率控制的标准化工作,主要集中在功率极限问题、功率上升空间报告、TPC命令传输等方面.

近年来,CA的研究极为活跃.文献[41]的作者对CA标准化中关键问题的提案进行了详细总结.基于不同的调度器结构和不同的业务模型,文献[42]评估了载波聚合技术相对于独立载波机制所带来的性能增益.在使用CA技术的LTE-Advanced系统中,调

度机制的设计是决定性能的关键因素之一,文献[43]基于业务负荷均衡原则给出了相同频带下两用户分配方法,文献[44]研究了两频带上多带调度机制.文献[45]分析了独立随机用户调度和联合用户调度的QoS性能.为了抑制小区间干扰,文献[46]在使用载波聚合的下行CoMP场景中,将载波分配问题建模为图形着色问题,以最大化网络侧和用户侧两端的性能.文献[47]针对家庭基站推荐了一种使用自主载波管理方式的灵活载波聚合机制.

1.4 中继技术

IMT-Advanced系统的高带宽需求会导致谱功率密度的降低,此外宽频谱常位于传播衰减大的高频带,因此使用高频资源的室内宽带服务将引起较大衰落.为了解决该问题并提升吞吐量,通常在离用户较近的地方放置一个中转传输节点,以将信息可靠地传输到目的地,使用户获得高的数据速率,这种方式称作中继或者多跳网络,可看作是一种协作通信方式.目前,中继已经在自组织(ad hoc)网络、对等(peer-to-peer)网络、宽带蜂窝系统中得到了应用.它可以实现基站密集配置架构,从而扩大覆盖、提升吞吐量,此外,中继系统通常具有低代价、低功率消耗的优点.

随着通信系统的发展,中继技术在下一代移动通信系统的标准化(如3GPP LTE-Advanced标准和IEEE 802.16 m标准)中成为了一个重要的研究课题.标准定义了两种类型中继节点(RN),3GPP在LTE-Advanced系统中使用类型1和类型2两种中继,而在IEEE 802.16 m标准中则使用透明和非透明两种中继.文献[48]对这两个标准定义的中继类型进行了介绍和比较.对于中继的传输机制,过去十年提出了许多方案.放大转发中继首先放大接收信号后再转发到目的端(用户设备或增强基站),而解码转发中继则先解码信号再重新编码后进行转发传输.除这两种典型的传输机制外,还有一些其他传输方式,比如:压缩转发和解调转发.关于中继节点的频谱使用方式,中继与eNB之间的频谱资源使用有带内和带外两种方式.带内模式指eNB和中继之间的链路与中继与UE之间的链路在小区内使用相同的频带资源,而在带外模式下则使用不同的频带资源.

现今,学术界已经开始了对中继增强型网络代价与性能的评估.文献[49]基于公平分配原则分析了

中继的技术经济可行性. 对具有固定增益的放大转发中继的两跳通信系统, 文献[50]给出了 Nakagami-m 衰落信道下的中断概率和平均误符号率性能. 文献[51]研究了基于基础设施的车载中继网络的服务连接性和用户接入概率, 特别地, 该文献还分析了两种类型节点(基站和中继)的密度和覆盖范围对这些重要性能指标的影响. 在文献[52]中, 作者分析了具有解码转发中继的协作网络的性能, 其中的中继数目设置为一个二项式随机变量, 文中分析显示, 系统中的分集和编码增益都会受中继分布影响.

尽管有广泛的研究分析了不同中继网络场景中使用中继的可行性, 但是要在一个系统中使用中继还必须考虑多个因素. 在文献[53]中, 作者针对协作中继系统提出了一种新的前导结构和相应的时频同步算法. 基于一种简单的半正交前导结构, 文献[54]提出了双向中继网络中一种低复杂度信道估计方法, 以便在性能和计算复杂度上都保有优势, 这种方法同时节约了频谱资源. 此外, 中继网络中的资源分配策略需要在保障一定 QoS 需求的前提下设计中继选择方法^[55]、接入策略^[56]、功率分配算法^[57]等. 并且中继节点的引入使得切换过程变得更为复杂, 需要更多的信令负荷以及处理延迟. 针对基于 802.16 协议的中继网络, 文献[58]提出了一种快速切换机制, 该机制通过媒体接入控制(MAC)层的消息交互首先确定子网间切换, 来降低切换信令代价以及切换延迟.

此外, 中继节点性能还可以借助使用联合技术来进一步提高. 在 MIMO 中继网络中, 中继与多天技术结合, 能有效改善中断概率和误符号率性能^[59,60]. 对 MIMO-OFDM 中继通信系统, 文献[61]提出了一种优化的功率分配算法, 以提升系统容量和传输能力. 为了最大化两跳 MIMO 中继网络的信息速率, 文献[62]在假定已知信道状态信息下, 分别利用正则算法和拉格朗日算法提出了具有本地中继功率限制的两种优化中继机制. 针对多中继协作网络, 文献[63]基于 Jackson 序列模型设计了一种物理层与 MAC 层之间的跨层通信策略, 有效改善了吞吐量和延迟性能. 文献[64]设计了一种跨层分析模型来表征无线多跳环境下多跳延迟性能. 实际中, 中继协作可以以多种方式引入网络, 每一种方式在功率、带宽、数据处理以及经济方面都将有不同的折衷.

1.5 认知无线电技术

有限的频谱资源和低效的频谱使用现状促使了认知无线电(CR)技术的产生, 它以机会性方式利用现有无线频谱, 来提高有限频谱资源的使用效率. 认知无线电是一种自主无线装置, 可以感知周围环境, 并且能动态地适应其操作特性(如: 频带和波形), 以便在不干扰授权用户的前提下改善其自身性能. 这种技术可以最大化频谱效率, 并且为无线网络中日益增长的业务需求提供高效传输的支持.

CR 研究的进展得益于多个学科发展的结果, 例如: 软件无线电(SDR)、贝叶斯信号处理、博弈论以及跨层协议设计等. SDR 是认知无线网络的基础, 它通过运行在通用硬件平台上的软件模块来实现无线功能. 这种可编程技术能方便地增加新的无线特征和功能、不需要额外的硬件便可重配现有无线系统. 由于 4G 设备是无线标准的大集成, SDR 技术将是未来通信系统中一种代价有效的解决方案, 它可以在一个终端中使用不同软件模块实现不同接入策略. 此外, SDR 在克服用户设备的功率、尺寸、兼容性等限制方面具有突出优势.

建立在 SDR 平台上的认知无线装置, 是一种智能的环境感知无线设备, 能通过感知和自适应通信环境而自主重配置, 这种 CR 网络中的自适应能力可以通过频谱管理功能实现. 网络设备的认知能力可实现如下功能: 非授权用户监测空白频谱、选择空白频谱中最好的频带、与其他用户协作进行频谱接入、当前信道变差或授权用户出现时退出相应资源, 这些功能通常又分别称作: 频谱感知、频谱选择、频谱共享、频谱转换. 特别地, 频谱感知和频谱共享作为 CR 网络中的关键技术得到了广泛研究.

频谱感知是 CR 网络中有效使用频谱的基础, 能识别频谱使用状况. 这种感知技术通常又分为物理层感知和 MAC 层感知. 如文献[65]调研所述, 物理层频谱感知主要采用本地频谱感知方法来检测瞬时授权用户信号. 典型的本地频谱感知方法包括三大类: 能量检测、匹配滤波、特征检测. 特征检测主要包括基于循环平稳性、特征值以及小波分析的特征检测方法, 它们利用统计分析以及信号处理技术来感知授权用户. 为对抗噪声、衰落、阴影的影响, 协作感知作为一种 MAC 层感知方法自然而然成为提升检测性能的一种方案. 近来, 文献[66]提出了认知无线

网络中一种多用户协作感知机制,以获得空间分集增益,在该机制中,只有信道条件好的中继用来协作检测授权用户.伴随着协作感知技术的出现,一些问题如虚假信息攻击[67]和衰落信道导致的错误报告[68]等也随之出现.此外,MAC层频谱感知技术还可借助业务预测[69]和信道状态转换概率[70]来最大化频谱使用效率和保持CR用户的连接性.

由于未授权用户与授权用户共享频谱资源,因此有效的动态频谱共享机制对实现高频谱效率起着关键性作用.目前,有许多学者致力于设计新颖的频谱共享技术.基于公平性原则,文献[71]对集中式认知网络提出了一种具有低功耗的联合信道与功率分配的机制.基于贪婪选择机制,文献[72]利用李雅普诺夫优化方法最大化CR网络中授权用户空闲信道的使用效率.文献[73]基于弗罗贝尼乌斯范数,提出了一种MIMO CR网络中的频谱共享方法,以最大化CR用户的吞吐量和确保授权用户的服务质量.在平均发射和接收功率的共同制约下,文献[74]研究了衰落信道下频谱共享系统的各态历经容量.

此外,为实现基本的频谱管理功能,在认知无线网络中也提出了一些其他相关研究课题,包括公共控制信道设计^[75]、干扰管理^[76]、功率控制^[77]等.由于CR网络性能直接依赖于使用频带的特性,因此在文献[78]中提出了一种联合波束赋形、调度、功率分配的跨层综合解决方案,以在可容忍的干扰下实现较大的和速率吞吐量.除可以跨层协作外,认知网络中的中继传输能提升系统的传输可靠性、容量以及频谱使用效率.对认知中继网络,文献[79]研究了其中断概率最小化问题.和协作网络一起,认知网络展示了其在高效频谱使用和频谱共享方面的潜力,可以进一步增加信道容量.

1.6 分布式天线系统

未来无线系统的目标是为大量用户提供高数据速率,这就需要系统具有更高的系统容量.为了满足容量需求,分布式天线系统(DAS)已成为3G和4G通信系统中的主流网络架构,可使运营商不依赖于修建新塔或提供新的频谱,而是通过小基站组成的小型网络来提供更好的覆盖和提升网络容量.DAS系统是一种专门用于提供无线室内覆盖的由多个天线组成的网络.在该系统中,多根天线彼此间位于不同地理位置,但都与一个公共源相连.这种方式将发射

功率分散在空间分离的多根天线上,能像单天线一样提供相同面积的覆盖,同时又能降低总功率、提升可靠性.DAS技术可应用于室内和室外场景,室内场景主要为大办公建筑或商场提供增强信号的室内覆盖.

作为一种有效的无线网络结构,DAS在未来无线通信系统的应用受到了广泛关注.文献[80]综合全面地介绍了DAS,包括基本概念、协议、性能分析及其公开议题等.在文献[81]中,作者基于室内办公场景的测量数据,研究了DAS的功率覆盖和衰落特性.分析表明,相比传统的集中式天线系统,分布式天线系统能提供更为均匀的功率覆盖、更高的频谱效率、更好的通信性能.由于下行业务需求占统治地位,许多对DAS的容量研究都集中在下行DAS.基于随机矩阵理论,文献[82]对具有随机天线布局的DAS系统设计了一种针对其各态历经下行容量的有效近似方法.此外,通过两步近似,文献[83]提出了阴影Nakagami衰落信道下DAS系统下行信道容量的一种近似分析表达式.

在一个分布式天线系统中,分布式天线传输方法是实现容量提升以及SER性能提升的关键技术.针对每个分布式天线端口的接收SNR和用户的QoS需求,分布式无线通信系统的每一个移动基站可自适应选择天线传输模式,这种自适应选择方式能增加DAS中无线资源管理(RRM)的效率和灵活性^[84].为了优化DAS的下行信道容量,文献[85]针对曼哈顿峰窝场景的下行传输,提出了一种基于容量的远端天线单元(RAU)选择机制,这种机制结合了优化的容量和功率分配来实现.文献[86]提出了一种自适应分布式发射天线选择机制,以便在一个有限反馈波束赋形的DAS系统中最小化误符号率,该机制能根据大尺度衰落情况自适应地调整分布式发射天线数目.

此外,在将DAS应用到实际无线通信系统时还需要考虑一些其他相关方面.在既有大尺度衰落又有小尺度衰落的复杂信道环境下,文献[87]研究了具有随机天线布局的DAS系统中的下行功率分配算法.特别地,文中提出了一种低复杂度次优功率分配机制,其系统容量非常接近于经数值优化的最优值.通过引入扇区化分布式天线结构,文献[88]在DAS系统中提出了一种具有最优功率分配的实用波束转换算法,以获得重要的SINR增益和容量提升.文献[89]中的平方距离准则为天线位置设计的矢量量化提供了码书设计方法,该方法可以最大化小区平均各态

历经容量. 文献[90]为 DAS 系统引入了一种并行比例公平调度算法, 以便在平均吞吐量和公平性方面实现折衷.

结合 MIMO 技术的优点, 对于在每个远端无线单元具有多根天线的 DAS 系统, 可以协作使用分布式多天线来获得额外的分集增益和空间复用增益. 这种实现方式通常又称为分布式 MIMO(D-MIMO)或协作 DAS. 文献[91]介绍了协作 DAS 系统的概念和关键技术, 说明了使用协作传输机制的 DAS 系统可以在容量和发射功率上带来很高的性能提升. 对于具有分布式发射天线、集中式接收天线的 MIMO 系统, 文献[92]基于 ML 算法研究了该系统的载波频偏问题. 频谱效率是系统的一个重要性能指标, 文献[93]研究了复杂衰落信道下 D-MIMO 蜂窝系统中频谱效率的闭合式. 对具有多天线阵列的多用户 DAS 场景, 文献[94]分析和比较了四种下行传输方法, 在这些传输机制中, 块内对角化方法被证明是一种较好的折衷方法, 它在考虑功率受限下能以相对低的复杂度获得高的容量. 文献[95]研究了 D-MIMO 系统中天线相关对功率分配的影响, 并且基于大尺度衰落特性和天线相关性提出了一种低复杂度端口选择和功率分配机制.

1.7 网络融合技术

当前的通信系统是一种异构集群网络, 包含固网、蜂窝网络、WLAN、WMAN、以及卫星系统等多种网络, 每个网络的适用终端以及交互方式都各不相同. 现今, 通信产业正处于由多网络、终端、服务并存的环境向基于一个公共安全 IP 平台的融合产业环境演进的关键时刻. 在融合的通信环境中, 用户能在任何时间任何地点, 自由、便捷地访问不同类型的通信服务(也可能是多个服务), 有效地提高系统带宽、互连网接入能力、覆盖面积以及用户服务等. 此外, 这种集成的统一架构还可以方便地支持未来科技发展的演进技术、提高各服务的独立市场竞争力.

对泛在网络的需求需要将各种无线解决方案集成到一个统一平台上, 这种集成主要是实现业务在无线和有线融合网络中的无缝互操作. 无缝互操作的概念即需要支持在多种通信系统中的相互协作以及对用户透明的无缝重配置, 这种可重配的互操作能为用户提供可靠服务、允许用户实现无缝透明的服务管理, 其实现方式可以在网络级、也可在用户

级、或者同时在网络级和用户级来实现. 在无缝的服务管理中, 无缝切换决策旨在依据用户意愿、网络条件等参数, 提供一直最好的连接服务.

当前的通信环境可分为无线、有线、电信和广播, 多样的通信系统为用户的使用带来了不便. 将多种网络融合到一起的时代正在到来, 统一的网络在带宽、功率消耗、频谱使用以及在提供多种混合服务上具有明显的优势^[96]. 基于融合平台, 用户和服务提供商都可以享受到更好的服务质量、更低的复杂度、廉价的资费以及便捷的付费方式. 通常, 融合技术包括多个方面的融合: 不同网络融合(例如: 固网与移动网融合、电信网广播电视网和互联网的三网融合)、不同技术融合(例如: 计算机、电子商务和通信技术的融合)、不同媒体融合(例如: 广播、卫星和蜂窝系统的融合)、不同服务融合等等.

所有不同网络的统一和融合是基于 IP 技术实现的. IP 技术提供了脱离特定网络的独立性, 并且与实际无线接入技术相兼容. 这种对各种无线协议的兼容性意味着低资费的革新时代已经到来. 由于当前系统使用的 IPv4 的地址池正在耗竭, 4G 网络已经采用 IPv6 替代 IPv4, 来实现高性能和可扩展的网络. IPv6 激发了多个领域的技术革新, 尤其是在接入框架、家庭网络 and 用户应用方面, IPv6 的创新作用尤为突出. 与 4G 最相关的 IP 技术演进是移动 IP 协议^[97], 它被认为是无线和有线网络平台融合的主要技术基础.

随着异构网络不可逆转的融合和协作趋势, 异构网络融合带来的一些问题也同时受到了关注, 如 QoS, RRM 和重配置问题. 文献[98]详细全面地研究了异构网络环境的 QoS 问题. 在异构网络下, 移动设备的资源管理需要有效的 RRM 机制. RRM 将涉及异构网络管理的所有方面, 包括接入管理、移动管理、安全管理、功率管理、位置管理等^[99]. 文献[100]研究了底层物理网络的资源重配置模型, 并且提出了将一种服务为导向的网络架构作为网络融合的原型.

1.8 网络自优化技术

下一代移动网络的自优化技术在致力于提高网络覆盖、容量和用户体验的同时, 也追求进一步降低网络的建设和维护成本. 标准化组织 3GPP 早已认识到研究自优化技术的重要性, 并且颁布了相关技术报告 TR36.902^[101]. 与此同时, 为了研究自优化技术, 多个项目已在世界范围内展开, 例如, SOCRATES

(www.fp7-socrates.eu) 和 Monotas(www.macltd.com). 在文献[102]中, Hu 等人介绍了 LTE 系统的自组织和自优化技术. 在文献[103]中, Feng 等人研究了如何在认知前导信道的协助下实现异构网络的合作. 该文献提出了多种自优化算法, 以解决重配置系统的调整问题, 降低系统的阻塞率, 提高系统的收益. 自优化技术的研究点包含但不限于以下几个方向: 覆盖和容量优化、移动鲁棒性优化和移动负载均衡优化.

相比前几代网络, 未来通信网络将提供更高的数据传输率, 因此网络容量优化是一个重要的研究课题. 由于网络覆盖和网络容量之间存在着此消彼长的关系, 因此在网规的过程中网络容量和网络覆盖这两个问题必须统一解决. 网络容量和覆盖优化作为用户用例也被列入了 3GPP 的技术报告 TR36.902 中. 该技术报告旨在保障连续覆盖的同时优化网络容量, 并且指出提供连续的覆盖在设计中应该具有更高的优先权. 在文献[104]中, 作者分析了天线参数的优化空间, 并且讨论了垂直扇区化技术作为容量优化手段的可行性. 该文献进一步采用了自调整天线系统来优化网络容量和覆盖.

在蜂窝网络中, 由于切换参数设置不合理而引起的不必要的切换、切换失败和无线链路失败会造成系统资源的浪费和用户体验的降低. SOCRATES 项目研究了如何通过调整 LTE 基站的切换参数来改善网络的性能, 例如降低掉话率、切换失败率和乒乓切换率. 在 SOCRATES 项目中, 系统监视多个切换相关的性能指标. 当任一性能指标超过系统预设的阈值时, 系统将相应地微调切换迟滞参数(hysteresis)和切换触发延迟时间(time-to-trigger). 最后, 通过渐进式的微调, 系统逼近最优的迟滞参数和触发延迟时间^[105]. 在文献[106]中, 通过统计一个测量时长内的乒乓切换次数和总的切换次数, 系统相应调整切换参数(包括 time-to-trigger、测量时长、hysteresis). 为了进一步提高切换性能, 该文献提出了一个基于用户移动速度的自调整式层 3 过滤器. 文献[107]通过增加一个备选访问路由器发现机制和设置层 2 的触发器来实现移动 IPv6 协议的增强. 此外还根据 QoS 需求的不同, 为不同服务设计不同切换过程, 最终降低了切换的延迟. 文献[108]提出了一种域内移动性管理机制, 该机制也通过采纳层 2 快速切换触发器, 小区边缘控制器, 和预注册机制来提高异构无线网

络的域内移动性管理性能.

在蜂窝网络中, 移动用户随机访问网络, 因此各个小区承载的负荷往往不均衡, 因此如何以较小的系统开销实现小区间的负载均衡和系统资源的有效利用是未来移动网络面临的关键问题之一. SOCRATES 项目为 LTE 系统研发了一个自优化负载均衡算法^[109]. 该算法通过监测小区负荷来渐进调整小区级别相关的切换偏移, 从而迫使位于小区边缘的移动用户从负荷高的小区切换到负荷低的小区. 算法设计的目标是寻找最优的切换偏移, 从而使得最大数量的移动用户能够切换到负荷低的小区, 而负荷低的小区不会拒绝这些切换请求. 文献[102]提出了一种对小区间切换进行惩罚的负载均衡算法. 该算法的目的是为了在达到系统负载均衡的同时, 减少所需的切换次数. 文献[110]中, 作者将负载均衡建模成一个系统效用函数最大化的问题, 并且将该优化问题转化成一个整型优化问题来求解. 该文献进而提出了一种次优的实用算法, 该算法能够通过一定数量的切换来取得较高的系统吞吐量.

2 挑战与展望

4G 系统的目标在于任何时间、任何地点都可为用户提供高质量服务, 其高性能需求为无线通信带来了许多严峻挑战. 多家服务提供商都拥有自己的协议, 协议之间互不兼容, 用户设备也难以兼容支持多个协议. 由于在 4G 中定义了太多的各不相同的机制, 反而使得要选择最合适的技术变得复杂, 同时也影响用户体验, 因此, 4G 系统必须首先解决通信制式全球统一的标准化问题. 新的异构系统结构, 如网状(mesh)网络、多跳网络、对等通信以及多标准网络, 是实现统一网络的又一大难题. 另外, 4G 系统所运用的各种核心技术还不完善, 而这些技术的完善是一个长期过程. 4G 在高容量、高速率和低延迟方面的需求要求物理层开发更先进的技术. 在 4G 系统中为不同类型业务提供 QoS 保障也是研究人员面临的另一挑战. QoS 建模与交换信令设计是一个融合系统面临的关键问题. 网络间切换(垂直切换)和网络内切换(水平切换)为时间和空间上的无缝服务提供了基础, 也是集成 4G 网络有待解决的重要问题之一. 除此之外, 资源分配、干扰抑制、安全性问题在异构网络环境下也变得更为复杂. 即便等到 4G 技术发展成熟, 由于其与 3G 技术共存, 4G 的发展仍将面临 3G 市场的冲击.

为使 4G 稳步、可持续发展,一些研究领域有待取得进一步突破.在 4G 系统中,实现高频谱效率和对抗高频率选择性是其主要技术目标,因此将现有的物理层先进研究成果结合应用到未来无线系统中是非常重要的.基于此,对物理层先进技术及其未来发展趋势的综合调研和分析将有助于推动实现泛在宽带无线的能力.先进的物理层技术包括:新的编码调制机制、联合信道估计、多址接入技术、超宽带系统、以及硬件设计等等.如前所述,4G 系统为无线资源管理技术带来了机遇的同时也为其带来了新的挑战.实现异构网络融合与智能化是一项复杂的系统工程,RRM 算法(如接入控制、负荷控制、切换控制)是其中的一个重点研究内容.另外,由复杂网络环境引入的干扰也会影响 4G 系统的性能,因此,在新的配置场景下的干扰抑制研究也具有重要意义.另外,由于许多网络协议已经存在一些内在的协作,故采用多种形式的协作,如不同网络、不同节点、不同层以及不同技术之间的协作,将是未来通信系统的一种有效解决方案.

此外,绿色通信致力于提高通信系统的能耗效率,是当前的研究热点.驱动绿色通信研究的根本动力来自于全球对于降低工业二氧化碳排放量的需求,并且能源开销的降低最终可以节约通信网络的建设和运营成本.文献[111]通过设计一种动态的间断式接收机制来调整移动设备接收端的休眠时间,从而解决了移动设备的节电问题.文献[112]从能效的角度对各种通信网络展开讨论,并且总结了一系列的节能模型和相应的解决途径.2009年,中国举办了以“绿色无线技术和系统”为主题的黄山会议^[113].在这次会议上,来自学术界和工业界的研究人员讨论了协作式分布 MIMO 系统、基于内容的软实时传输设计和感知技术.该会议还指出了未来通信网络将从追求数据传输率的最大化转向追求最佳的能耗效率.值得指出的是,绿色通信的研究还处于萌芽阶段,未来的研究之路仍然很长.

计算机网络和移动通信在人们生活中应用的普遍性,催生了物联网(IoT)概念的成形.物联网产业被认为是世界信息产业发展道路上的下一次浪潮,引起了工业界和学术界的高度重视.物联网是在互联网基础上延伸和扩展的一种网络,其用户端延伸和扩展到了任何物体,这些物体可以全面感知、可靠传输、智能处理信息.到目前为止,许多研究机构已

在多个项目中广泛开展了这一领域的研究.物联网的主要技术包括:物物通信、微控制器、射频自动识别(RFID)技术、传感器、定位技术等.标准化方面的工作主要集中在 RFID 频率、阅读器与标记的通信协议、标记与标签上的数据格式几个方面.除这些技术方面外,其市场价值也是值得关注的.从 2006 年开始,在中国政府的大力支持下,国内一些研究机构已经开始了 IoT 领域一项意义深远的项目.值得一提的是,在不久的将来要实现“任何时间、任何地点、为任何人(物)提供连接性”的物联网技术,将是相关领域跨学科协作的结果.

未来网络的目标是通过任意设备、在任意时间地点提供连接.为实现这一目标,服务提供商需要提供巨大的数据传输管道.为了减轻 4G 系统中沉重的计算负担,通过计算机网络来按需提供计算资源的云计算模式可应用于 4G 服务中,这种新计算方式已在中国的学术界和工业界受到广泛关注.国务院将云计算指定为“十二五”规划中的一项重要策略技术.国内电子信息领域的先进研究所和企业已在云计算的多个方面取得了进展,包括:核心技术、应用方案、服务模式等.在中国,中国移动和中国联通也已经对基于云计算的服务表示了极大的兴趣.可以很确信地预测,云计算与 4G 的结合将是未来网络发展的一种趋势.

3 结论

本文综述了 4G 系统的关键技术,尤其介绍了中国学者在 4G 发展中的研究与成果.4G 无线网络可为用户提供更广的服务类型和更有效、可升级、可靠的无线服务.在 4G 关键技术中,OFDM 和认知无线电可以提高频谱效率,而多天线技术、分布式天线系统和载波聚合则侧重于实现容量提升和高数据速率,4G 系统的覆盖增强和更高的小区边缘数据速率需求可由中继技术来实现.4G 系统的网络融合需要跨多个通信协议进行协作,而网络自优化则有助于系统总体性能提升和促进新无线服务的引入和配置.目前,中国学者们已对这些 4G 关键技术作出了重大贡献,然而这些技术中仍有一些问题尚未解决,有待进一步研究.我们相信将来的研究成果一定能解决这些问题,并将新服务统一到 4G 网络中,真正实现可在任何时间、任何地点、为任何人或物提供服务.

参考文献

- 1 ITU-R Rec M.2134. Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). 2008
- 2 You X H, Chen G A, Chen M, et al. The FuTURE project in China. *IEEE Commun Mag*, 2005, 43: 70–75
- 3 Jiang T, Yang Y, Song Y H. Exponential companding technique for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Trans Broadcast*, 2005, 51: 244–248
- 4 Ren Z Y, Zhang H L, Guo K. A novel method for the improvement of power efficiency in high peak-to-average-power ratio communication systems. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 1697–1702
- 5 Dan L L, Xiao Y, Ni W, et al. Improved peak cancellation for PAPR reduction in OFDM systems. *IEICE Trans Commun*, 2010, E93.B: 198–202
- 6 Ai B, Yang Z X, Pan C Y, et al. On the synchronization techniques for wireless OFDM systems. *IEEE Trans Broadcast*, 2006, 52: 236–244
- 7 Shu F, Berber S, Wang D M, et al. ML integer frequency offset estimation for OFDM systems with null subcarriers: Estimation range and pilot design. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 2567–2575
- 8 Shu F, Cheng S X, Lee J, et al. Analysis of time and frequency synchronization error for wireless systems using OFDM. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2005, 48: 379–396
- 9 Zhou P, Zhao C M, Shi Z H, et al. Performance evaluation for PCC-OFDM systems impaired by carrier frequency offset over AWGN channels. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2008, 51: 320–336
- 10 Wang J B, Chen H M, Chen M, et al. Cross-layer packet scheduling for downlink multiuser OFDM systems. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2369–2377
- 11 Gao X Q, You X H, Jiang B, et al. Generalized multi-carrier transmission technique for beyond 3G mobile communications. In: *Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2005 Sept 11–15, Berlin. Washington DC: IEEE, 2005. 972–976
- 12 Gao X Q, You X H, Sheng B, et al. An efficient digital implementation of multicarrier CDMA system based on generalized DFT filter banks. *IEEE J Sel Area Comm*, 2006, 24: 1189–1198
- 13 Zhang X D, Li M Q, Hu H L, et al. DFT spread generalized multi-carrier scheme for broadband mobile communications. In: *Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2006 Sept 11–14, Helsinki. Washington DC: IEEE, 2006. 1–5
- 14 Li M Q, Zhang X D. Performance analysis of DFT spread generalized multi-carrier systems. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2385–2396
- 15 3GPP R1-051134, SHRCWC & RITT. On the implementation of DFT-S-GMC. TSG-RAN WG1 Meeting #42bis, 2005
- 16 3GPP R1-051135, SHRCWC & RITT. Performance comparison between DFT-S-GMC and DFT-S-OFDM. TSG-RAN WG1 Meeting #42bis, 2005
- 17 3GPP R1-051385, SHRCWC. Further simulation results of DFT-S-GMC in comparison with DFT-S-OFDM, TSG-RAN WG1 Meeting #43, 2005
- 18 Wang Q, Tao X F, Zhang P, et al. Low complexity hardware implementation of V-BLAST receiver. In: *Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008 May 11–14, Marina Bay. Washington DC: IEEE, 2008. 1355–1359
- 19 Pan W, Jiang Z J, Du Z F, et al. Analysis of a reduced-ML algorithm in BLAST. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2008, 51: 2094–2100
- 20 Guo H Y, Zhou Z G, Hu H L. Transmit correlation effect on SIC-ZF receiver for V-BLAST system. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2290–2295
- 21 Jin S, Gao X Q, You X H. On the ergodic capacity of rank-1 Ricean-fading MIMO channels. *IEEE Trans Inf Theory*, 2007, 53: 502–517
- 22 Gao X Q, Jiang B, Li X. Statistical eigenmode transmission over jointly correlated MIMO channels. *IEEE Trans Inf Theory*, 2009, 55: 3735–3750
- 23 Yu X B, Dong T, Bi G G. Performance of multiuser CDMA system with space-time block coding in MIMO Rayleigh fading channels. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2296–2307
- 24 Yang W W, Cai Y M, Wang L. Distributed space-time-frequency coding for cooperative OFDM systems. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2424–2432
- 25 Fan J C, Yin Q Y, Wang W J. Robust linear receivers for STBC systems with unknown co-channel interference. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 1067–1074

- 26 Yue D W, Wang Q. Capacity of orthogonal space-time block codes in MISO fading channels with co-channel interference and noise. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 1697–1703
- 27 Van Veen B D, Buckley K M. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE Signal Proc Mag*, 1998, 5: 4–24
- 28 Zhang Y, Li J D, Pang L H. Intercarrier interference alleviation beamforming for OFDM with space diversity. *J Electron (China)*, 2010, 27: 321–327
- 29 Zhu P C, Tang L, Wang Y, et al. An upper bound on the SER of transmit beamforming in correlated Rayleigh fading. *IEEE Trans Commun*, 2010, 58: 457–462
- 30 Shu F, Li L H, Tao X F, et al. A spatial multiplexing MIMO scheme with beamforming for downlink transmission. In: *Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2007 Sept 30–Oct 3, Baltimore. Washington DC: IEEE, 2007. 700–704
- 31 Lin M, Li M, Yang L X, et al. Combined adaptive beamforming with space-time block coding for multi-antenna communications. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2008, 51: 2062–2073
- 32 Zhu Y T, Tang Z H, Zhu J K. An improved norm-based user selection algorithm for multiuser MIMO systems with block diagonalization. In: *Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2007 Sept 30–Oct 3, Baltimore. Washington DC: IEEE, 2007. 601–605
- 33 Hei Y Q, Li X H, Yi K C, et al. Novel scheduling strategy for downlink multiuser MIMO system: Particle swarm optimization. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2279–2289
- 34 Wang J, Wang X T, Guo Y L, et al. A channel adaptive power allocation scheme based on SLNR precoding for multiuser MIMO systems. In: *Proceedings of the 72nd IEEE Vehicular Technology Conference*, 2010 Sept 6–9, Ottawa. Washington DC: IEEE, 2010. 1–4
- 35 3GPP R1-051422 Nortel. UL virtual MIMO system level performance evaluation for E-UTRA. TSG-RAN1 WG1 #43, 2005
- 36 Chen X, Hu H L, Wang H F, et al. Double proportional fair user pairing algorithm for uplink virtual MIMO systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2008, 7: 2425–2429
- 37 Zhang H, Xu X D, Li J Y, et al. Multicell power allocation method based on game theory for inter-cell interference coordination. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2378–2384
- 38 3GPP TR 36.912. Feasibility study for further advancements for E-UTRA (LTE-Advanced). Technical Report TR 36.912 v9.3.0, 2010
- 39 3GPP TR 36.808. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Carrier aggregation base station (BS) radio transmission and reception. Technical Report TR 36.808 v1.0.0, 2010
- 40 3GPP TR 36.814. Further advancements for E-UTRA. Technical Report TR 36.814, v 9.0.0, 2010
- 41 Yuan G X, Zhang X, Wang W B, et al. Carrier aggregation for LTE-advanced mobile communication systems. *IEEE Commun Mag*, 2010, 48: 88–93
- 42 Chen L, Chen W W, Zhang X, et al. Analysis and simulation for spectrum aggregation in LTE-Advanced system. In: *Proceedings of the 70th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2009 Sept 20–23, Anchorage. Washington DC: IEEE, 2009. 1–6
- 43 Zhang L, Liu F, Huang L, et al. Traffic load balance methods in the LTE-Advanced system with carrier aggregation. In: *Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2010 July 28–30, Chengdu. Washington DC: IEEE, 2010. 63–67
- 44 Meucci F, Cabral O, Velez F J, et al. Spectrum aggregation with multi-band user allocation over two frequency bands. In: *Proceedings of IEEE Mobile WiMAX Symposium*, 2009 July 9–10, Napa Valley. Washington DC: IEEE, 2009. 81–86
- 45 Zhang L, Wang Y Y, Huang L. QoS performance analysis on carrier aggregation based LTE-A systems. In: *Proceedings of IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing*, 2009 Dec 7–9, Shanghai. New York: Curran Associates, 2009. 253–256
- 46 Bian H L, Guo C L, Feng C Y. An ICSGC algorithm for carrier assignment in downlink coordinated multi-point with carrier aggregation. In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*. Washington DC: IEEE, 2010. 934–938
- 47 Li J, Liu Y, Duan J, et al. Flexible carrier aggregation for home base station in IMT-advanced system. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2009 Sept 24–26, Beijing. Washington DC: IEEE, 2009. 1–4
- 48 Yang Y, Hu H L, Xu J, et al. Relay technologies for WiMAX and LTE-Advanced mobile systems. *IEEE Commun Mag*, 2009, 47: 100–105
- 49 Timus B, Soldati P, Zander J. Implications of fairness criteria on the techno-economic viability of relaying networks. In: *Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2009 April 26–29, Barcelona. Washington DC: IEEE, 2009. 1–5
- 50 Zhao R, Li C G, Wang H R, et al. Performance analysis of fixed gain relaying systems in Nakagami-m fading channels. *Chin J Electron*, 2011, 39: 162–167

- 51 Ng S C, Zhang W X, Zhang Y, et al. Analysis of access and connectivity probabilities in vehicular relay networks. *IEEE J Sel Area Comm*, 2011, 29: 140–150
- 52 Lin W, Wu G, Zhang L, et al. Performance analysis of cooperative networks with random decode-and-forward relaying. In: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications*, 2008 Sept 25–27, Dalian. Washington DC: IEEE, 2008. 526–531
- 53 Cheng Y S, Jiang Y X, You X H. Preamble design and synchronization algorithm for noise ratios cooperative relay systems. In: *Proceedings of the 70th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2009 Sept 20–23, Anchorage. Washington DC: IEEE, 2009. 1–5
- 54 Hu F, Zhang H, You X H, et al. Low complexity channel estimation for novel bi-directional relaying schemes. In: *Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2009 April 26–29, Barcelona. Washington DC: IEEE, 2009. 1–5
- 55 Li Y, Zhang R F, Wang C G, et al. A distributed relay selection algorithm for cognitive radio ad-hoc networks. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Network and Service Management*, 2010 Oct 25–29, Niagara Falls. Washington DC: IEEE, 2010. 439–442
- 56 Jiang F, Tian H, Zhang P. An adaptive random access strategy for multi-channel relaying networks. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2406–2414
- 57 Zhang G P, Yang K, Ding E J. Power allocation scheme for selfish cooperative communications based on game theory and particle swarm optimizer. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 1908–1912
- 58 Li Y, Wang Y, Zhao W L, et al. A fast handover scheme in IEEE802.16 relay networks. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks*, 2010 Jan 22–24, Sanya. Washington DC: IEEE, 2010. 243–247
- 59 Cao L, Yang D C, Yang H W, et al. Asymptotic performance of amplify-and-forward MIMO relaying with transmit antenna selection. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 2631–2641
- 60 Zhao R, Yang L X, Zhu W P. Transmission scheme and performance analysis for decode-and-forward MIMO two-way relay systems. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2308–2316
- 61 Zhou M U, Li L H, Wang H F, et al. Optimal power allocation for MIMO-OFDM relaying systems. *Chin J Electron*, 2009, 37: 26–30
- 62 Fu Y H, Yang L X, Zhu W P. Optimal amplify-and-forward relaying schemes for two-hop MIMO relay networks. *Chin J Electron*, 2010, 19: 717–722
- 63 Xu X R, Zheng B Y. Novel multi-relay cross-layer cooperative communication strategy based on Jackson queuing model. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 842–853
- 64 Chen Y, Yang Y, Darwazeh I. A cross-layer analytical model of end-to-end delay performance for wireless multi-hop environments. In: *Proceedings of IEEE Globecom 2010 Conference*, 2010 Dec 6–10, Miami. Washington DC: IEEE, 2010. 5–10
- 65 Yucek T H, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Commun Surveys Tutorials*, 2009, 11: 116–130
- 66 Zhu J, Zheng B Y, Zou Y L. Detection time analysis for the multiple-user cooperative spectrum sensing scheme in cognitive radio networks. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 1915–1925
- 67 Xu F M, Zheng X F, Li X Q, et al. Partial cooperative spectrum sensing schedule in cognitive network. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2332–2341
- 68 Yue W J, Zheng B Y, Meng Q M, et al. Robust cooperative spectrum sensing schemes for fading channels in cognitive radio networks. *Sci China Inf Sci*, 2011, 54: 348–359
- 69 Yuan G X, Grammenos R C, Yang Y, et al. Performance analysis of selective opportunistic spectrum access with traffic prediction. *IEEE Trans Veh Technol*, 2010, 59: 1949–1959
- 70 Sun Y Z, Hu H L, Liu F Q, et al. Dynamic spectrum access based on MAC-layer spectrum sensing and prior channel pre-allocation strategy. *IEICE Trans Commun*, 2010, E93.B: 609–619
- 71 Che Y L, Chen J, Tang W B, et al. A two-step channel and power allocation scheme in centralized cognitive networks based on fairness. In: *Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008 May 11–14, Marina Bay. Washington DC: IEEE, 2008. 1589–1593
- 72 Guo K Q, Sun L X, Li Y, et al. Channel-aware and queue-aware joint-layer resource optimization for cognitive radio networks. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 2576–2583
- 73 Rong M, Zhu S H, Li F. Spectrum sharing based on Frobenius norm in cognitive radio networks. *Chin J Electron*, 2011, 39: 95–100
- 74 Wang P, Chen X, Zhou S D, et al. On ergodic capacity of spectrum-sharing systems in fading channels. *IEICE Trans Commun*, 2009, E92.B: 1904–1907
- 75 Han C, Wang J, Yang Y L, et al. Addressing the control channel design problem: OFDM-based transform domain communication system in cognitive radio. *Comput Netw*, 2008, 52: 795–815

- 76 Le V B, Lin Y W, Wang X M, et al. A cell based dynamic spectrum management scheme with interference mitigation for cognitive networks. In: Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference, 2008 May 11–14, Marina Bay. Washington DC: IEEE, 2008, 1594–1598
- 77 Wang P, Zhao M, Xiao L M, et al. Power allocation in OFDM-based cognitive radio systems. In: Proceedings of IEEE Globecom 2007 Conference, 2007 Nov 26–30, Washington DC. Washington DC: IEEE, 2010. 4061–4065
- 78 Xi W, Yin C, Yue G. Joint beamforming and scheduling in the downlink of cognitive radio networks. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2324–2331
- 79 Yue W J, Zheng B Y, Meng Q M, et al. Optimal power allocation for cognitive relay networks: Amplify-and-forward versus selection relay. *Sci China Inf Sci*, 2011, 54: 861–872
- 80 Hu H L, Zhang Y, Luo J J. Distributed Antenna Systems: Open Architecture for Future Wireless Communications. Boca Raton: CRC Press, 2007
- 81 Hu X W, Zhang Y, Jia Y Z, et al. Power coverage and fading characteristics of indoor distributed antenna systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Communications and Networking in China, 2009 Aug 26–28, Xian. Washington DC: IEEE, 2009. 1066–1069
- 82 Feng W, Li Y Z, Zhou S D, et al. Downlink capacity of distributed antenna systems in a multi-cell environment. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications & Networking Conference, 2009 April 5–8, Budapest. Washington DC: IEEE, 2009. 847–851
- 83 Chen H M, Chen M. Capacity of the distributed antenna systems over shadowed fading channels. In: Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference, 2009 April 26–29, Barcelona. Washington DC: IEEE, 2009. 1–5
- 84 Hu H L, Weckerle M, Luo J. Adaptive transmission mode selection scheme for distributed wireless communication systems. *IEEE Commun Lett*, 2006, 10: 573–575
- 85 Zhao X S, You X H, Zhu D Q, et al. A capacity-based RAU selection scheme for downlink transmission in distributed antenna system. In: Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, 2006 July 3–6, Vancouver. Washington DC: IEEE, 2006. 485–490
- 86 Zhang N B, Kang G X, Guo Y Y, et al. Symbol error rate analysis and antenna selection in limited feedback distributed antenna systems. In: Proceedings of the 72nd IEEE Vehicular Technology Conference, 2010 Sept 6–9, Ottawa. Washington DC: IEEE, 2010. 1–5
- 87 Feng W, Zhang X J, Zhou S D, et al. Downlink power allocation for distributed antenna systems with random antenna layout. In: Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference, 2009 April 26–29, Barcelona. Washington DC: IEEE, 2009. 1–5
- 88 Wu T, Kwon Y H, Zhang J Y, et al. Distributed antenna systems with power adjusted beam switching. In: Proceedings of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference, 2010 May 16–19, Taipei. Washington DC: IEEE, 2010. 1–5
- 89 Wang X Z, Zhu P C, Chen M. Antenna location design for generalized distributed antenna systems. *IEEE Commun Lett*, 2009, 13: 315–317
- 90 Jiang Z J, Wu J, Wang D M, et al. Parallel proportion fair scheduling in DAS with partial channel state information. *IEICE Trans Commun*, 2009, E92.B: 2312–2315
- 91 You X H, Wang D M, Sheng B, et al. Cooperative distributed antenna systems for mobile communications. *IEEE Wirel Commun*, 2010, 17: 35–43
- 92 Deng K, Tang Y X, Lei X, et al. Estimation of carrier frequency offsets for MIMO systems with distributed transmit antennas. *J Electron (China)*, 2007, 24: 455–461
- 93 Wang D M, You X H, Wang J Z, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO cellular systems in a composite fading channel. In: Proceedings of International Conference on Communications, 2008 May 19–23, Beijing. Washington DC: IEEE, 2008. 1259–1264
- 94 Wang Y, Sun K, Chen Z X. Comparison of downlink transmission strategies for distributed antenna systems with multi-antenna arrays. *J China Univ Posts Telecommun*, 2010, 17: 44–50
- 95 Zhang N B, Kang G X, Guo Y Y, et al. A low-complexity port selection and power allocation scheme in distribution MIMO systems. *J Electron (China)*, 2010, 27: 145–150
- 96 Choi J. 4G, Solution for convergence? *IEEE MTT-S Inter Micro Symp Dig*, 2006: 843–846
- 97 Perkins C. IP Mobility Support. IETF RFC 2002, 1996
- 98 Marchese M. QoS Over Heterogeneous Networks. Chichester: John Wiley & Sons, 2007
- 99 Narang N, Mittal R. Network management for next generation networks. In: Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Computing and Communications. New York: Curran Associates, 2000. 1–4
- 100 Hu Y X, Lan J L, Wu J X. Providing personalized converged services based on flexible network reconfiguration. *Sci China Inf Sci*, 2011, 54: 334–347
- 101 3GPP TR 36.902. Self-configuring and self-optimizing network use cases and solutions. Technical Report TR 36.902 v9.3.0, 2010

- 102 Hu H L, Zhang J, Zheng X Y, et al. Self-configuration and self-optimization for LTE networks. *IEEE Commun Mag*, 2010, 48: 94–100
- 103 Feng Z Y, Liang L T, Tan L, et al. Q-learning based heterogeneous network self-optimization for reconfigurable network with CPC assistance. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 52: 2360–2368
- 104 Yilmaz O. Self-optimization of coverage and capacity in LTE using adaptive antenna systems. Master's Thesis. Helsinki: Aalto University, 2010
- 105 Jansen T, Balan I, Turk J, et al. Handover parameter optimization in LTE self-organizing networks. In: *Proceedings of the 72nd IEEE Vehicular Technology Conference*, 2010 Sept 6–9, Ottawa. Washington DC: IEEE, 2010. 1–5
- 106 Zhang H J, Wen X M, Wang B, et al. A novel self-optimizing handover mechanism for multi-service provisioning in LTE-Advanced. In: *Proceedings of International Conference on Research Challenges in Computer Science (ICRCCS 2009)*. Washington DC: IEEE, 2009. 221–224
- 107 Zhou Y, Yuan J, Wang Y, et al. Service-oriented FMIPv6 framework for efficient handovers in 4G networks. In: *Proceedings of IEEE Globecom 2007 Conference*, 2007 Nov 26–30, Washington DC. Washington DC: IEEE, 2010. 4478–4482
- 108 Liu X, Jiang L, He C. Performance evaluations of an IDMP-based macro-mobility management in heterogeneous wireless networks. *Chin J Electron*, 2009, 18: 530–534
- 109 Lobinger A, Stefanski S, Jansen T, et al. Load balancing in downlink LTE self-optimizing networks. In: *Proceedings of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference*, 2010 May 16–19, Taipei. Washington DC: IEEE, 2010. 1–5
- 110 Wang H, Ding L H, Wu P, et al. Dynamic load balancing and throughput optimization in 3GPP LTE networks. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC 2010)*. Washington DC: IEEE, 2010. 939–943
- 111 Xu H B, Tian H, Huang B, et al. An improved dynamic user equipment power saving mechanism for LTE system and performance analysis. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 2075–2086
- 112 Xu J, Liu C, Yang Y, et al. An overview of energy efficiency analytical models in communications networks. In: *Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP 2010)*. Washington DC: IEEE, 2010. 21–23
- 113 尤肖虎, 王京, 张平, 等. 对绿色无线移动通信技术的研究和思考. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39: 1009–1015