



能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究^{*}

牛志升, 龚 杰, 周 盛

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘 要:移动通信网的发展正面临以受限的频谱与能量大幅度提高网络容量的严峻挑战,需要从系统和网络的角度探索频谱与能量的高效利用机理与方法。提出一种全新的超蜂窝体系架构,将网络中的控制信令与业务数据传输在覆盖上进行适度分离,实现资源与业务的弹性匹配,联合优化频谱和能量效率,满足未来移动通信网大容量和低能耗的双重需求。分别介绍了超蜂窝体系架构下的网络能效理论、高能效的传输与网络协作、业务建模与高能效服务,最后给出了超蜂窝系统的演示验证平台。

关键词:超蜂窝网络;分离架构;网络能效;能量时延折中;业务空时分布;差异化服务

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.12.006

Research on Energy Efficiency and Resource Optimized Hyper-Cellular Mobile Communication System

Niu Zhisheng, Gong Jie, Zhou Sheng

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The development of wireless communication networks is now facing severe challenges from limited spectrum resources and stringent energy consumption constraints, which calls for system level theories and methods to efficiently utilize the spectrum and energy. A novel hyper-cellular mobile communication architecture was proposed, which decoupled the control signaling coverage and traffic service coverage, so that network resources can be smoothly matched with traffic variations. Via the decoupled architecture, spectrum efficiency and energy efficiency can be jointly optimized, meeting the twofold requirements of high capacity and low power consumption for future mobile communications. The network energy efficiency theory, energy efficient transmission and network collaboration technologies, spatial-temporal traffic modeling and green wireless services were introduced, and the demo system of the hyper-cellular architecture was proposed.

Key words: hyper-cellular, control and traffic decoupled architecture, network energy efficiency, energy-delay tradeoff, spatial-temporal traffic modeling, differential service

1 引言

无线蜂窝网络(wireless cellular network)是一种基于中心基础设施(infrastructure-based)的结构化无线接入网络,旨在为终端用户提供可靠的移动通信服务,是目前无

线通信网络的主体。30年来,随着无线传输技术的进步与硬件水平的提升,蜂窝网络实现了飞速发展。于20世纪80年代实现商用的第一代蜂窝移动通信系统(1G),是以频分多址(FDMA)为核心技术的模拟移动通信系统。它仅能支持低速率的语音业务,其系统设计的主要目标是保证

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2012CB316000)

语音业务的网络覆盖(coverage-oriented)。于 20 世纪 90 年代出现的第二代蜂窝系统(2G),实现了从模拟到数字的更新换代,发展出了如 GSM 等应用广泛的商用系统。2G 在支持语音业务的同时,已能提供较低速率的数据业务。随着蜂窝网络部署的成熟,2G 网络的设计思路逐渐从覆盖优先向容量优先(capacity-oriented)过渡。而近年来广泛投入使用的第三代蜂窝系统(3G),其目标已着重在支持大容量、高速率的无线传输技术上,以满足日益增长的多媒体数据业务需求。例如,3G 网络的代表性技术 HSDPA(high speed downlink packet access),可达到 14.4 Mbit/s 的下行数据业务峰值速率。目前,第四代蜂窝系统(4G)已开始商用,实现了部分区域的覆盖,且各大运营商正在加大部署力度。在中国,以时分双工 TD-LTE 制式为代表的 4G 网络可提供 100 Mbit/s 以上的数据速率,给用户带来流畅的数据传输、视频观看等体验。

然而,人们对带宽和速率的渴望是无止境的。未来移动通信的数据业务种类将不断丰富,速率需求也将加速增长,且呈现以下发展趋势:预计到 2020 年,网络业务量将增长 1 000 倍以上,接入网络的无线设备则将是目前的 100 倍甚至更多^[1]。不同的无线设备和业务共存,给网络提出了多样化的无线传输需求,包括更高速率(提高至少 100 倍)、更低时延(毫秒级)、更高的可靠性和安全性、更低功耗等。因此,无线网络的膨胀式发展对移动通信系统提出了更快、更高、更强、更节能的要求,给研究人员和工程师们带来了严峻挑战。为了应对这些挑战,无线通信领域已开始着眼于下一代移动通信系统——5G 的讨论与研究。欧盟在 FP7 框架下,于 2012 年启动了 METIS(mobile

and wireless communications enablers for 2020 information society)项目^[2],旨在建立起一个国际化的研发平台,探索未来移动通信系统的基础理论与设计方案。国内各大通信研究机构与高校也开展了 5G 研究,举办了多场 5G 技术研讨会。2013 年 2 月由工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部联合推动,成立了 IMT-2020(5G)推进组,成为聚合产学研力量、推动中国第五代移动通信技术研究和开展国际交流与合作的主要平台。

为了充分利用频谱资源,应对不断提升的容量需求,移动通信网将持续地向密集化方向发展。而传统蜂窝网络架构在干扰受限环境下难以有效提高频谱效率,而小区间合作也受到信息交互及信号处理复杂度等约束。同时,现有移动通信系统已经演变为高能耗产业,且随着 3G 之后对更高传输速率和更广区域覆盖的追求呈现快速增长态势。在全部网络能耗中基站占到了 80%左右,核心网部分仅占 20%左右。而由于传统蜂窝架构下的基站同时负责覆盖与业务服务,在网络负载较低时通过基站休眠的方式节能会带来覆盖问题。总之,传统蜂窝网络架构难以满足 5G 网络所提出的高速率、低时延、高可靠性、低能耗等多维指标,需要从网络架构的角度实现创新。本项目提出了一种全新的超蜂窝(hyper cellular network,HCN)体系架构^[3],其核心思想是将网络中的控制信令与业务数据传输在覆盖上进行适度分离。控制覆盖用于管理用户的接入请求,相对固定,是网络的骨架;业务覆盖用于对用户进行高速数据传输,灵活而高效。超蜂窝架构使得移动网络可根据网络的业务进行动态重构变为可能,在保证高服务能力的同时,实现低能耗。

首席科学家

牛志升 男,1985 年毕业于北方交通大学,1986 年国家公派赴日留学,1989 年和 1992 年分别获日本丰桥技术科学大学硕士和博士学位。1992-1994 年就职于日本富士通研究所,1994 年回清华大学电子工程系任教至今,1999 年晋升教授。目前担任清华大学信息科学技术学院副院长、博士生导师,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,同时兼任中国电子学会理事、中国通信学会信息通信网络专业委员会副主任、IEEE 通信学会理事会成员、IEEE 第十区执委会成员、IEEE Wireless Communications Magazine 编委、日本电子情报通信学会(IEICE)评议员。2007 年获选为 IEICE Fellow,2012 年获选为 IEEE Fellow。

本文将首先介绍超蜂窝体系架构的基本概念和特征,并针对超蜂窝架构下的三大科学问题,分别阐述本项目已开展的研究工作以及针对超蜂窝架构的软件无线电实验验证平台,最后给出研究小结和未来展望。

2 超蜂窝体系架构

超蜂窝架构是一种新的无线通信网络体系架构,其首先包括以下两个概念:

- 控制信道覆盖 (简称“控制覆盖”), 即保证网络控制信息能够被传递到所有用户的最小能量覆盖;
- 业务信道覆盖 (简称“业务覆盖”), 即保证用户业务需求能够被满足的最小能量覆盖。

超蜂窝架构的基本思想是通过控制覆盖和业务覆盖

的适度分离,动态地分配网络资源,在保证网络容量需求的前提下大幅度降低网络能耗。控制覆盖只负责极低速率的网络控制信号的传递,以保证用户接入请求的可达性,并不承担实际业务的接入,因此可以以较低的能量覆盖较大的区域。业务覆盖的能量及其相应的网络资源只有在有实际业务需求时才予以分配,并根据不同业务需求动态地调整覆盖模式和范围。通过对控制覆盖和业务覆盖进行适度的分离,如图 1 所示,网络只需以较低的能量维持一个控制覆盖,而当有数据服务需求时唤醒相应的业务覆盖,有效减少网络低负荷时系统空转的能耗,从而实现能效与资源的联合优化。换句话说,超蜂窝网络是一种控制覆盖与业务覆盖可按需在时域和空域上独立进行动态调整的智能网络。

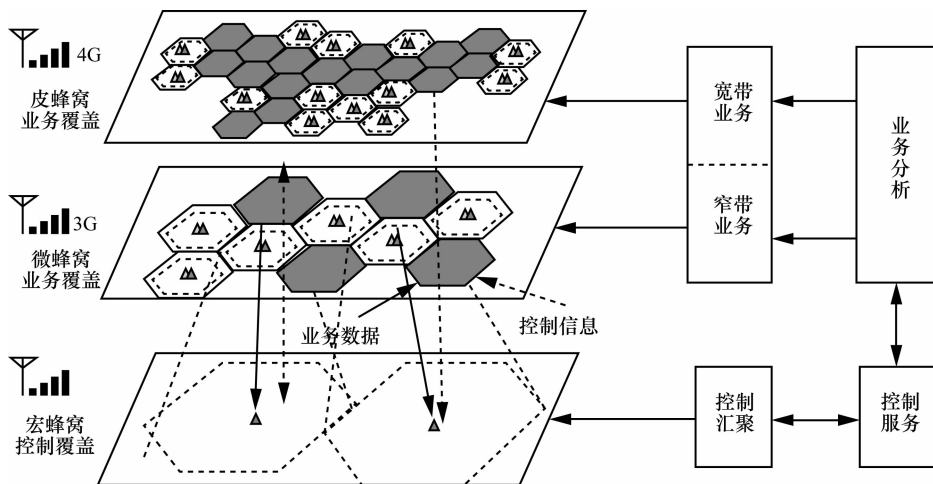


图 1 超蜂窝系统中控制覆盖与业务覆盖分离原理

首席科学家

长期从事通信话务理论、排队论、通信网络的流量控制与性能分析、无线网络的资源分配及跨层优化、通信与广播融合网络、绿色通信与网络等研究,在休假排队模型、多维无线资源分配的博弈论对策、密集无线网络的认知协作资源管理以及无线机会网络的多维分集技术等方面取得了突出成果。发表多篇 SCI 期刊论文和 IEEE/ACM 系列主流国际会议论文,并应邀担任第 43 届 IEEE 世界通信大会 (ICC2008) 程序委员会主席,第 15 届亚太地区通信会议 (APCC2009) 和第 5 届移动通信与网络国际会议 (WiCom2009) 大会主席。曾获得亚太地区通信会议 APCC'07/09/13 最佳论文奖,中国电子学会科技进步奖 (2008)、国家杰出青年科学基金资助 (2009)、第 25 届国际通信流量大会最佳学生论文奖 (2013)、第二届 IEEE 通信学会亚太杰出论文奖 (2013)。

超蜂窝网络的主要特征如下。

- 网络的柔性覆盖(coverage on-demand):将网络的控制覆盖和业务覆盖适度分离,即以较大蜂窝保证无缝的控制覆盖,业务覆盖则根据需求动态布置和启用。
- 资源的弹性匹配(resource on-demand):基于用户分布在时域和空域上的动态特性弹性地配置网络资源,通过网络间的协作引入基站协作休眠机制,多个同构或异构小区形成一个簇,用户根据实际需求及网络状况动态地选择一个合适的小区进行接入,即弹性接入。
- 业务的适度服务(service on-demand):未来移动通信的业务种类和服务质量需求会越来越多样化,但现有网络基本上还是针对某种特定业务优化的,难以同时满足各类不同业务的需求,或是为了满足最苛刻业务的需求而浪费大量的频谱与能量。主动利用多业务之间的需求差异性和用户群体行为的趋同性动态地调整服务模式(实时/软实时/非实时,单播/多播/广播等),通过适度的服务提高能效。

因此,在超蜂窝体系架构下,网络资源和能量通过与业务需求的和谐互动^[4],可以在保证网络无缝覆盖和高频谱效率的同时大幅度降低整体能耗^[5]。图 2(a) 给出了随着网络业务在时间上的潮汐涨落情况,动态调整网络资源分配以适配业务需求的示例;图 2(b) 给出了根据网络业务在空间上的非均匀分布情况,使低负载区域的基站进行休眠以适配业务需求的示例。

超蜂窝架构的设计与实现首先需要从理论上解决以下科学问题。

- 科学问题 1 网络能效成因关系与高能效覆盖机理:经典信息论主要关注有效辐射能量与信道容量之间的关系,但蜂窝网络的整体能耗中基站辐射能量只占一小部分,为此需要从网络综合能耗的角度探索能效的成因关系以及高能效覆盖的机理。
- 科学问题 2 异构蜂窝网络的高能效资源匹配机理:网络中业务量的时空分布呈现出越来越大的动态特性,使得现有异构网络中时空上相对独立的频谱与能量资源都无法得到充分利用。为此需要针对异构蜂窝网络环境建立高能效的弹性资源匹配机理。
- 科学问题 3 多样性需求业务的高能效服务机理:未来移动通信的业务种类和服务质量需求会越来越多样化,但现有网络基本上还是针对某种特定业务优化的,难以同时满足各类不同业务的需求,或是为了满足最苛刻业务的需求而浪费大量的频谱与能量。为此需要针对多样化的业务需求分别建立高能效的服务机理。

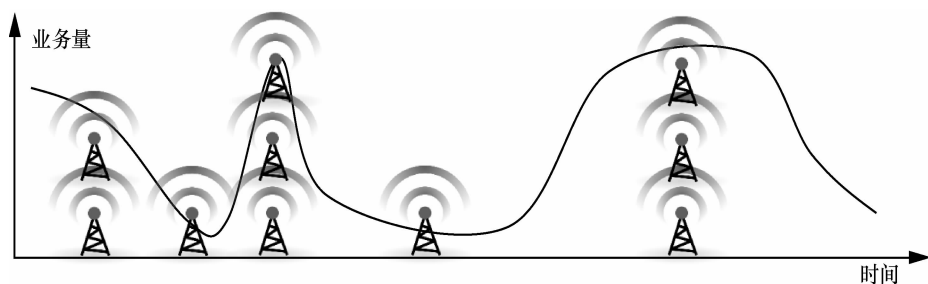
为了解决以上科学问题,本项目从以下 3 个方面进行研究,取得了阶段性突出进展。具体将在以下的章节中阐述。

(1) 网络能效与柔性覆盖基本理论

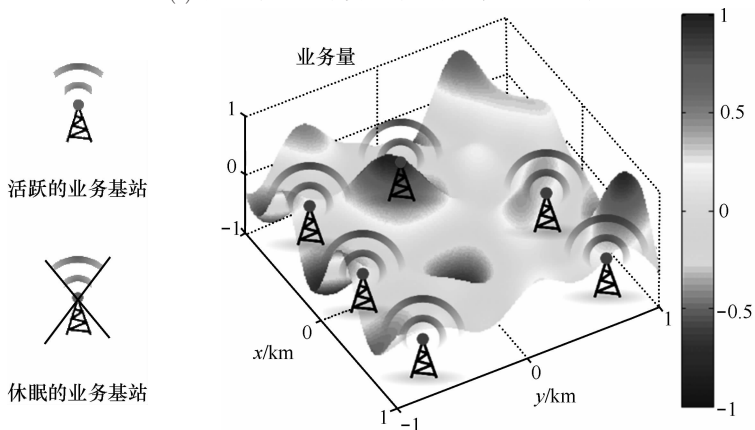
明确网络能效的定义,分析网络能效与网络覆盖能力、频谱效率、用户群体行为、业务特征及其服务质量要求之间的成因关系,探索超蜂窝网络的能效极限,给出网络能效与系统容量的协同优化方法。建立网络能效与频谱效率、网络能效与业务时延之间的互换关系。在网络能效理论的基础上,建立兼顾能效与容量的智能柔性覆盖与控制

项目简介

现有蜂窝移动通信系统进一步提高网络容量将受到频谱资源和能耗的双重约束,因此如何以受限的频谱与能量大幅度提高网络容量是一个巨大的挑战。为了应对该挑战,仅靠无线传输技术的改进和硬件实现水平的提高是远远不够的,需要从系统和网络的角度探索频谱与能量的高效利用机理与方法。“973”计划“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”项目面向国家建设资源节约型、环境友好型社会的战略需求,针对无线数据与视频业务的飞速发展及通信业务量的指数增长所带来的频谱与能耗瓶颈,研究并突破可使移动通信系统的能量效率大幅度提高的理论与技术,构建能效与资源优化的大容量移动通信系统。具体地,本项目提出了一个超蜂窝网络的体系架构,通过控制信道覆盖与业务信道覆盖适度的分离引入网络的柔性覆盖、资源的弹性匹配以及业务的适度服务机制,实现能效与资源的联合优化,满足未来 10~20 年移动通信对宽带大容量的迫切需求。



(a)时间维度下网络资源与业务需求的和谐互动



(b)空间维度下网络资源与业务需求的和谐互动

图2 利用业务动态特性节能示意

理论,研究控制覆盖与业务覆盖的分离机制,并分别研究控制覆盖的无线接入方法和动态业务覆盖小区形成方法,为超蜂窝网络体系架构下的物理层与链路层的能效优化提供理论基础。

(2) 能效优先的物理层传输方法与网络协作机制

研究多天线、多载波链路能量效率与频谱效率之间的理论关系,分析链路能量效率与功率、带宽、收发天线数等

无线资源以及与干扰、用户数和业务动态变化特性之间的内在联系,建立优化链路能量效率的无线传输理论模型。进一步,考虑节点间协作,建立同构蜂窝与异构蜂窝的小区之间或小区内多个传输节点之间的高能效协作机制,并在此基础上给出能效与资源联合优化方法。

(3) 用户群体及业务特征建模与高能效服务方法

通过对实际运营的移动无线通信系统中常见业务的

项目简介

“973”计划“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”项目旨在解决高能效无线通信网络的一系列关键科学问题:网络能效成因关系与高能效覆盖机理;异构蜂窝网络的高能效资源匹配机理;多样性需求业务的高能效服务机理。建立一套能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础理论体系,包括:网络能效理论及超蜂窝体系架构;超蜂窝网络的柔性覆盖与控制理论;能效优先的非协作传输理论与弹性接入机制;超蜂窝网络协作机制与资源优化方法;用户群体行为建模与高能效服务机制;业务需求认知与高能效差异化服务机制。突破一批关键核心技术,包括能效优先的无线传输技术、基于能量-时延折中的跨层调度方法、基于网络业务模型的网络部署与休眠机制等,涵盖从物理层到网络层的各个方面,使网络能效较现有水平有较大幅度的提高,并给出典型网络的低能耗设计及实验室演示验证系统。

采集和测量,分析移动网络中多种类型业务在时域和空域分布的动态特征以及内容属性等方面的变化规律,挖掘用户群体的行为模式,建立并针对不同的群体行为特征给出高效服务方法。基于不同业务之间在业务特征与服务需求上存在的差异,以按需适度服务的原则建立差异化的服务体系与评价方法,为高效移动通信服务系统的设计与优化提供理论基础。

3 网络能效理论

首先给出网络能效的定义,其次探讨网络能效理论的研究范畴和理论问题,并着重介绍网络能效理论体系下的能耗与时延折中理论以及超蜂窝网络部署理论。

3.1 网络能效的定义及网络能效理论

网络能效定义为:对于给定的频谱资源、网络覆盖范围、用户分布、业务模型及服务质量要求,网络承载的业务总量与所消耗总能量之比,即单位能量平均所承载的业务量(bit/J),或是用频谱和覆盖区域归一化后的单位面积和单位带宽的能量效率(bit/J/Hz/area)。与经典信息论中的比特能量效率不同,它从网络整体(一定的覆盖区域)的角度来定义,囊括了多条链路和多种传输手段,并且包括了网络中的所有设备能耗,而不仅是无线传输功率;它针对用户端接收到的业务量而定义,其意义比网络总容量更广泛,可反映出通过减少同一信息在网络中的传输次数或是将不同用户的信息融合为一路信息发送等手段来获取的能效增益。

基于上述定义,网络能效理论则表述为:网络能效与网络覆盖能力、频谱效率、用户分布、业务特性等的理论关

系,即在给定频谱资源和业务覆盖需求下的最小能量理论,建立该理论的目的是揭示以下问题,包括:(1)如何以最小的能量实现所需的网络覆盖及业务服务需求(2)网络能效与频谱效率之间存在怎样的理论关系(3)业务随机性和动态特性究竟会如何影响网络能效。已有工作主要围绕能耗与时延的理论折中关系与能效优先的超蜂窝网络部署原理而展开。

3.2 能耗与业务时延的理论关系

为了提高网络能效,无论是引入柔性覆盖、弹性接入,还是适度服务的机制都可能会给用户带来额外的时延。但究竟多大的时延能够换来多少的能量节省还是一个急需解决的基础理论问题。经典信息论一般只考虑某条链路上发射功率与传输时延之间的折中关系,未针对全网的总能耗与端到端时延(包括排队时延、处理时延等)来考虑。

为此,通过将信息论与排队论的结合,建立起一种休假排队模型,以随机服务的思想并从业务端对端性能的角度分析能量效率与业务时延及其抖动的理论关系,给出网络能效与可容忍时延之间的定量关系。与传统的传输能耗与传输时延的指数折中关系不同,在考虑电路功耗与基站休眠的情况下,能耗与时延并非永远是折中关系,在满足一定条件下可以实现能效与时延的“双赢”,即通过合理地设计系统及休眠参数可以同时实现能耗与时延的降低。

具体的,将移动网系统排队模型建模为一个带有服务器关断(close-down)和启动(setup)时间的休假(vacation)模型,如图3所示。考虑以下3种休眠策略。

项目简介

"973"计划"能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究"项目立足于超蜂窝网络的体系架构,着重研究控制覆盖与业务覆盖的分离机制与动态设计方法,建立超蜂窝网络的能量效率与各种网络资源之间的理论关系与评价方法,给出逼近其能效极限的资源优化配置方案,并针对未来移动通信系统给出其低能耗设计。通过本项目的实施,力求在绿色无线通信领域形成重大科技创新,取得一批重大的基础理论和关键技术创新成果,形成一套较为完整的能效与资源优化的移动通信系统基础理论体系,提供可应用于未来移动通信网络的实用性网络传输技术与方法,并依托清华信息科学与技术国家实验室(筹)建立一个具有国际前沿水平的绿色通信与网络研究基地,形成一个面向学术研究前沿的科研团队,引领国内外在该领域的研究,培养若干勇于创新的高层次研究人才和优秀中青年研究骨干。

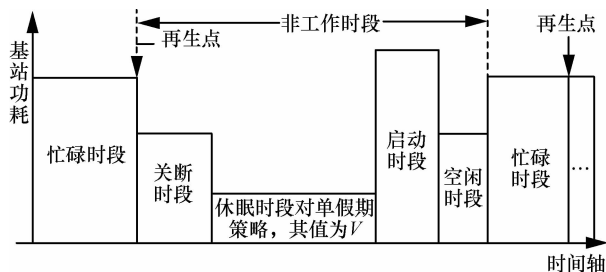


图3 单小区基站休假模型

- 单休假策略: 基站休假结束后立即返回服务状态。
- 多休假策略: 基站休假结束后, 如果队列中仍然没有任何服务需求时将再次进入休眠状态, 直至发现队列中有服务需求时为止。
- N 策略: 休假将在队列中积累到了 N 个服务需求时结束。

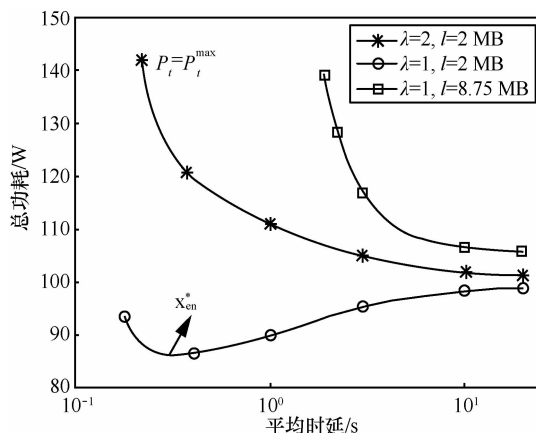
首先针对 N 策略, 理论分析得到了如下结论^[6]。

- 改变关断时段平均长度或唤醒门限值 N , 能量时延折中曲线存在线性折中关系。
- N 较小时, 缩短关断时段平均长度只微弱增加时延, 却可以换来极大的能效增益, 即 N 较小时平均关断时段应尽量短。
- 启动时长固定时, 能量时延折中曲线存在, 且 $N=1$ 为最优; 启动时长有突发性时, 能量时延折中曲线未必存在, 最优启动门限值 N 应该大于 1, 其最优值由式(1)给出:

$$N_{\text{delay optimal}} = \lambda E[S] (\sqrt{C_s^2 + 1/\lambda E[S]} - 1) \quad (1)$$

其中, λ 为用户到达率, $E[S]$ 和 C_s^2 为启动时间的均值和方差。进一步, 基于能耗时延折中关系, 考虑功率控制对

能效性能的影响^[7], 研究得到了类似的结论, 如图 4 所示。其中 l 是用户文件的平均长度, 是网络业务量的表征参数。在给定休眠门限、改变发射功率时, 功耗与时延之间不再是传统的单调关系, 而是受各种参数取值的影响, 在特定的情况下还存在能耗最优的速率点, 例如图 4 中对应于参数组 ($\lambda=1$, $l=2$ MB) 的曲线, 总功耗先是随着时延而下降, 而过了最优速率点之后, 由于电路功耗的存在, 总功耗反而随着时延上升。这一效应在低负载时较为明显, 对应于较重负载的另两条曲线则呈现出单调的功耗—时延关系。

图4 不同条件下服务速率变化时总功耗与时延关系 ($N=1$)

由于蜂窝网络业务的到达通常存在突发性, 故而进一步研究突发性业务对基站休眠的影响, 考虑两种突发性业务模型: 间歇泊松过程 (interrupted poisson process, IPP) 以及马尔可夫调制泊松过程 (Markov modulated poisson process, MMPP)。首先针对依 IPP 到达的业务, 研究发现:

学术团队

“973”计划“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”项目由清华大学牵头, 并由清华大学、电子科技大学、东南大学、北京邮电大学、浙江大学、中国科学技术大学、北京航空航天大学、中国电信、华为技术有限公司共同承担。项目分为 6 个课题展开研究。

课题一: 网络能效理论及超蜂窝体系架构。承担单位为清华大学, 主要研究内容包括: 网络能效建模与成因关系分析; 超蜂窝网络架构及其工作原理。

课题二: 超蜂窝网络的柔性覆盖与控制理论。承担单位为清华大学、华为技术有限公司; 主要研究内容包括: 控制覆盖与业务覆盖分离机制及优化研究; 柔性覆盖中控制覆盖的能效优化方法; 柔性覆盖动态小区形成方法研究。

· 当业务突发性越大时,休眠能够带来节能增益的范围越大,即休眠门限 N 可以取得相对更小的值。如图 5 所示,图中参数 β 表征业务突发性,其

数值越小,则业务突发性越大,因此由图 5(a)到图 5(d)业务的突发性增大,同时曲面上方的节能空间也变大。

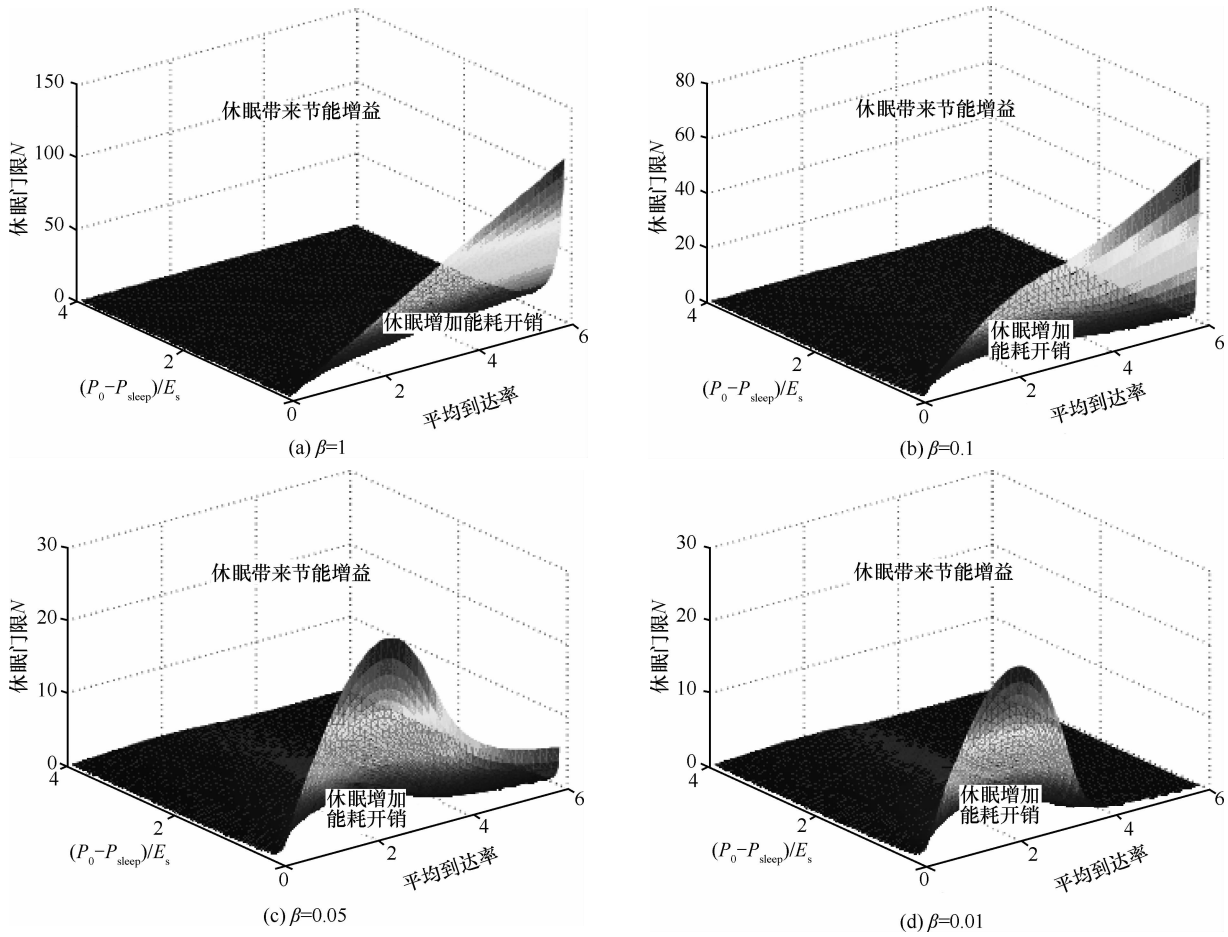


图 5 引入基站休眠能够带来节能增益的条件

学术团队

课题三:能效优先的传输理论与弹性接入方法。承担单位为电子科技大学、北京航空航天大学,主要研究内容包括:综合链路能效优化的传输机制及与频谱效率的理论关系;能效与资源联合优化的弹性接入机制;高能效传输与弹性接入机制演示验证系统。

课题四:超蜂窝网络协作机制与资源优化方法。承担单位为东南大学、中国科学技术大学,主要研究内容包括:高能效异构节点协同传输理论;超蜂窝网络能效与资源联合优化方法;网络节点协作算法的演示验证平台。



- 给定业务平均到达率后,业务突发性越大,总功耗越小,如图 6(a)所示;而只有在特性条件下,业务突发性越大,平均时延也越小,如图 6(b)所示。
- 时延增大时总功耗的渐近最小值仅与业务的平均到达率有关,而不受突发性的影响。
- 业务的相关性对系统总功耗并无明显影响,对于平均时延也仅在系统利用率较高时有一定影响。即对 MMPP 而言,突发性对功耗与时延的影响与 IPP 业务类似。

3.3 能效优先的超蜂窝网络部署原理^[8,9]

在未来超构蜂窝架构中,微小型基站的部署具有强随机性。在满足用户业务需求的前提下,即给定网络的吞吐量,考虑单位面积的能耗正比于基站密度,根据网络能效的定义,最优化网络能效等价于最小化基站密度。应用随

机几何和最优化理论,分析了异构蜂窝中最优频谱分配机制和相应的能效优先基站密度方案,在由双层(two-tier)随机节点构成的异构网络模型(如图 7 所示)中,得到如下结论。

- 同构网络下的最优基站密度存在一个上界和下界,其上界在信道衰落因子 $\alpha=4$ 时存在闭式解,且证明了在用户需求速率与系统带宽比值趋于零的极限情况下,上界与最优密度的比值趋于 1。
- 在全频重用机制下给出了异构网络的最优基站密度的闭式保守近似解,分析得到了基站类型选择准则,即存在一个微基站能耗的阈值($1/c$),当微基站与宏基站能耗之比低于该阈值时,优先部署微基站或是在保证覆盖下优先休眠宏基站;而高于该阈值时优先部署宏基站或是优先休眠微基站。

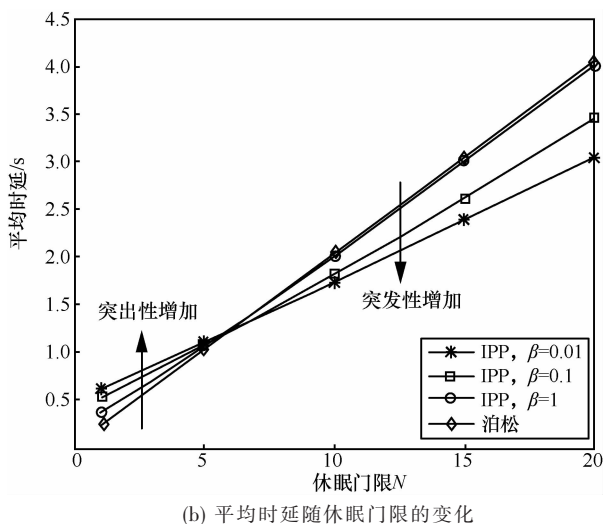
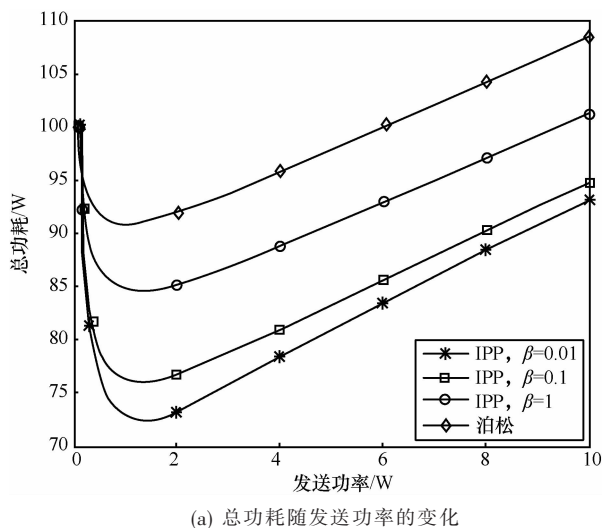


图 6 业务突发性对能耗和时延的影响

学术团队

课题五:用户群体行为建模与高能效服务方法。承担单位为北京邮电大学、中国电信股份有限公司,主要研究内容包括:移动无线网络业务采集与分析;多维度用户群体行为分析与建模;面向用户群体行为的高能效服务机理。

课题六:业务特征认知与高能效差异化服务方法。承担单位为浙江大学、清华大学,主要研究内容包括:业务特征感知与业务建模理论与方法;高能效的业务差异化服务机制与方法。

目前本项目已完成前 3 年的研究计划,阶段性地实现了人才的培养,促进了创新性高层次研究人才和领军人才成长,形成了一支研究水平高、创新能力强的科研队伍。

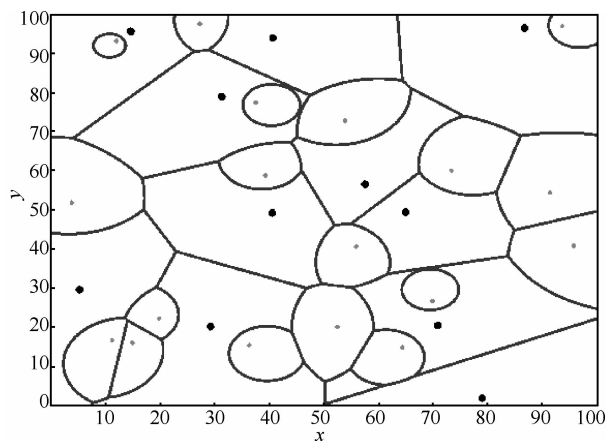


图7 双层随机节点的异构网络拓扑

- 提出了一种异构蜂窝网络部分频谱重用机制,即宏基站占用全部的系统频谱而微基站只占用部分(记为 $\gamma, \gamma \in (0,1]$,部分重用因子),反之亦可。当用户需求速率与系统带宽的比值趋于零时,该部分重用因子存在一个闭合的渐近表达式,即:

$$\lim_{W \rightarrow \infty} \gamma^* = \frac{u_m}{u_M} \frac{c\rho_M + \rho_m + \lambda_m}{c\rho_M + \rho_m + c\lambda_M} \quad (2)$$

其中, u_m 和 u_M 分别为微蜂窝及宏蜂窝用户的需求速率, W 是系统频谱的总带宽, ρ_M 是宏基站的密度, ρ_m 是微基站密度, λ_m 和 λ_M 是微蜂窝小区和宏蜂窝小区用户的密度。基于该极限表达式可设计部分频谱重用机制,其特点是只需要统计信息,简单易分布式实现,同时在用户需求相对较低时能取得接近最优的性能。

4 能效优先的物理层传输与网络协作

传统的蜂窝系统在物理层传输中主要关注于频谱效率(spectrum efficiency, SE),在超蜂窝架构下,还需进一步考虑能效效率(energy efficiency, EE)。若只考虑单链路的发射功率,则经典信息论指出:链路能效与频谱效率之间存在单调的折中关系。但如果额外考虑信息处理等能耗及基站休眠的可能性,则这种折中关系就会变得非常复杂,至少不再单调。实际上,SE与EE之间存在较强的耦合关系,需要进行联合分析与优化。对于典型的无线传输系统,包括MIMO-OFDMA、中继、分布式多天线、基站协作等,其SE-EE理论关系总结如下。

(1) MIMO-OFDMA^[10]

OFDMA系统可以利用信道的频率选择特性和多用户分集特性通过子载波、功率动态分配来提高SE和EE,

MIMO系统可以利用不同用户、不同天线间信道的随机性通过空间分集和复用来提高SE。把MIMO技术引入到OFDMA系统中可以提升系统的SE,但同时也因射频链路的增加而带来了额外的电路能量开销。实际上,在现有多天线系统的实现结构下,考虑电路功耗时,为了整体改善SE-EE曲线,增加频域资源比增加空域资源更有效。当多用户传输时采用的载波数之和小于系统的总载波数时,EE随着SE的增长而增加;反之,EE和SE之间存在折中关系。同时,联合配置空频资源比只配置空间资源或频率资源更有利于整体改善SE-EE曲线。

(2) 中继^[11]

中继系统的SE-EE关系很大程度上取决于电路功耗。当电路功耗为零时,EE随SE的增长而单调下降,当SE趋近于零时,EE达到最大值;当收发状态中电路功耗非零、空闲状态中电路功耗为零时,EE在低频SE区域内保持恒定,而在高SE区域内随SE增长而下降;当收发状态和空闲状态中电路功耗都非零时,系统存在一个非零的最优SE使得EE最大,SE无论过高或过低,都将导致EE趋于零。由于双向中继的EE并不总高于单向中继,实际中采用双向/单向混合中继传输策略,该策略当待传输数据量较大、发射能耗在总能耗中起主导作用时,系统的SE提高时EE下降,即二者存在折中关系,最优混合中继退化为双向中继;而当待传输数据量较小、电路能耗在总能耗中起主导作用时,系统的SE提高时EE也提高,二者同时增长,最优混合中继相对于双向中继和单向中继都有明显的能效增益。

(3) 分布式多天线^[12,13]

由于用户到天接单元的平均接入距离变短,在相同的发送功率和小区半径下,分布式天线的SE和EE性能都优于集中式天线,对实现频谱与能量资源双重优化的超蜂窝系统有重要意义。基于分布式天线的能效优先资源分配方案,其性能远优于传统分布式天线系统中功率分配方案。但同时发现,分布式多天线的能效性能受用户公平性需求的影响比较大,研究工作给出了分布式天线中SE-EE折中关系的定量描述,为在满足给定SE的前提下设计超蜂窝网络提供了理论指导。

(4) 基站协作^[14]

network MIMO是指由多个地理位置上独立的节点,通过共享数据进行联合编码传输,形成多天线传输模式。在超蜂窝架构下,基站关闭/休眠是适度服务的一种有效手段,利用network MIMO协同传输能够弥补休眠基站造成



的覆盖空洞。由于合作会带来额外的信号处理功耗和骨干网能耗,联合优化多基站功率分配、预编码、多用户调度和休眠策略时需要考虑这些额外开销。对于现有的 LTE 系统参数和能耗参数,系统的 EE 会随着多用户可达总数据率需求的提高而增长,不会出现 SE-EE 的折中。采用基站协作休眠机制可以提高能效,相对于基站不协同休眠系统增益的大小取决于具体的基站间的数据共享策略;与传统的基站休眠系统相比,基站协作休眠可以提供更高的频谱效率,对于包含对时延敏感和不敏感业务的混合业务场景,能效增益可达到 40%~100%。

5 业务特征、用户群体行为与高能效服务

在超蜂窝架构下,需要研究业务的时空分布和用户的群体行为,基于不同业务、不同用户群之间在业务特征与服务质量需求上存在的差异,实现需适度服务。

5.1 业务空时分布特征分析与建模

在业务特征方面,针对某省主要城市移动通信用户业务数据,分阶段、分步骤完成了多场景、多种类的数据采集和分析处理工作。根据已采集的千万量级移动通信用户业务数据,深入分析了典型公共移动通信网络的用户业务数据。通过对这一数据的深入分析与建模,得到了业务分布特性的一系列规律,主要包括以下几点。

(1)用户到达/离开时间间隔、小区内用户驻留时间、蜂窝小区单位面积内移动用户数目等服务幂律分布(power-law distribution)^[15];

(2)蜂窝网络中的业务密度分布根据时间和空间可由对数正态(Log-normal)分布或韦伯(Weibull)分布来近似,如图 8 所示;业务密度具有空间相关性和分形的特征,如图 9 所示;基站密度由对数正态分布来近似;农村地区和城市地区的基站密度和峰值业务密度分别存在线性函数

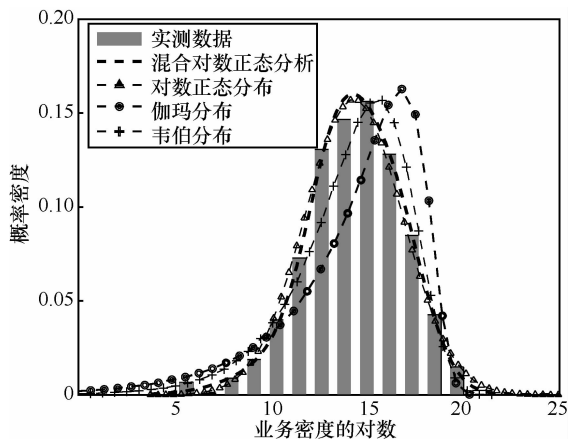


图 8 业务密度分布与模型拟合

和饱和函数关系^[16]。

以上规律可以用于蜂窝网络的理论分析和蜂窝网络性能仿真。其中,基于业务的空时分布特性,给出了可生成业务密度时空变化的数学模型以及联合生成基站位置和峰值业务密度的方法。同时还提出了分布式且具有低信令交互和计算复杂度的基站休眠机制,在密集的城市环境下分别在业务峰值时段和业务低流量时段节省 6%和 27%的能耗,而当空间相关性越小且业务密度方差越大时,越多的基站可以进入休眠状态。

5.2 用户群体行为建模与高能效服务^[17]

用户群体行为的定义为:用户在网络中以群体为单位,在活动规律、业务需求、接入频率、聚集特性等多维度下的行为模式和特征规律。如图 10 所示,用户在空间、内容等多个维度具有明显的群体行为规律,但传统的服务模式无法充分利用该规律。通过对用户群体行为进行建模,用户群体行为可用用户聚集系数进行定量描述,其表达式为

$h = \frac{A}{A+B}$,如图 11 所示,曲线每个点代表 X%用户请求

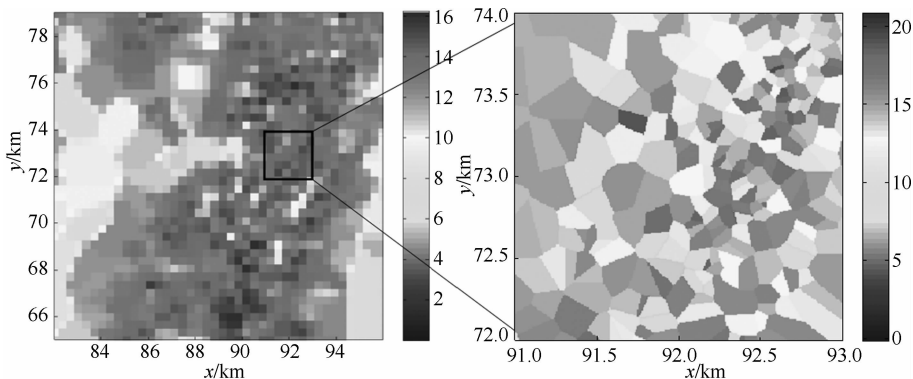


图 9 业务密度的空间自相关性

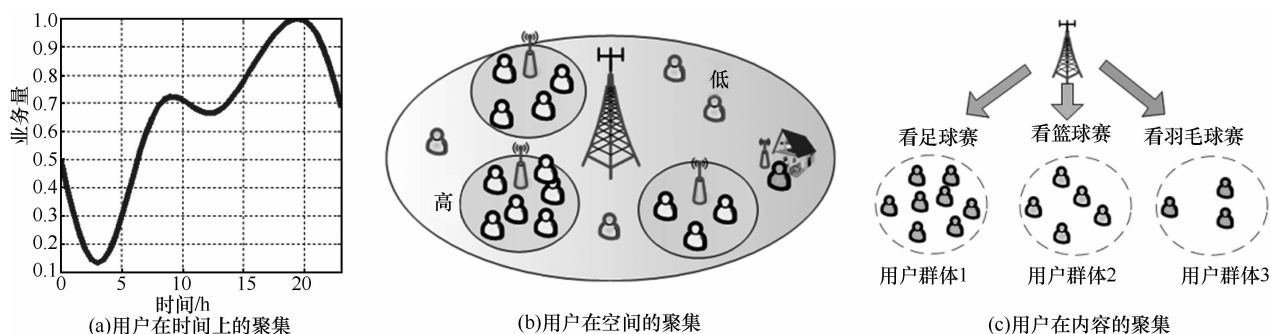


图 10 用户群体行为示意

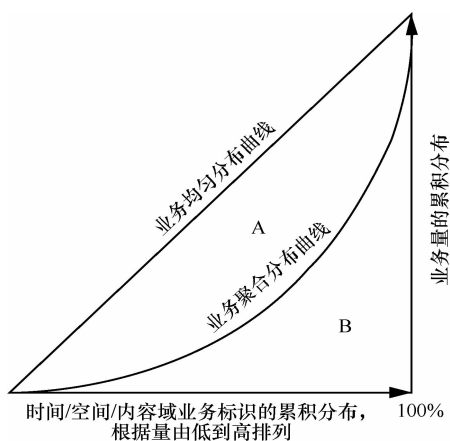


图 11 用户聚集系数示意

的业务量占总业务量的百分比。基于用户群体行为模型, 根据用户的空间聚合、内容聚合特性, 基于用户群体行为特性, 可优化设计网络服务模式, 包括以下几点。

(1) 面向用户群体行为的异构网络部署。在异构网络部署中, 随着网络总容量需求的增加, 应该优先增加微基站的发射功率, 容量到达一定程度之后, 则需要考虑增加微基站密度。随着用户聚集系数上升, 微基站的最优策略中增大发射功率的最大值减少, 在高用户聚集度的情况下, 最优能效的策略是应该倾向于增加微基站的密度。

(2) 基于时间窗口的业务内容聚合。对于非实时业务, 根据用户业务的趋同性, 将相同业务聚合到一起, 通过多播的服务方式代替部分单播的服务方式, 可以达到节省传输能量的目标。在用户业务的趋同性比例为 15% 时, 单播/多播混合传输方案能够降低能耗 34%, 能量效率提升 50%。

(3) 保证实时传输的用户业务聚合。对于实时业务, 由于用户业务的聚合特性, 也可以通过设计多播方案, 系统给最先到达的用户传输共享数据(多播), 后到达的用户也

接收该共享数据(多播), 并在到达之后接收增补数据(因为到达时间差而缺少的数据)。相比单播服务模式的能耗增长, 传输能耗从增长方式降低为增长方式。在实时业务聚合多播传输模式下, 业务的聚集性越强, 多播方案传输节能效果越明显。

6 平台验证

6.1 超蜂窝演示验证平台^[18]

基于通用软件无线电外设 USRP 和开放源代码 GSM 协议实现 OpenBTS 的软件无线电平台, 在世界上首次实现了超蜂窝架构的演示验证系统(如图 12 所示), 完成了满足语音业务和分组数据业务服务需求的控制与业务覆盖分离(见表 1)。通过对 GSM 协议信令交互进行分析, 从网络功能层次和逻辑信道层次上设计了控制与业务分离方案, 并在软件无线电平台上验证了其可行性与有效性, 相关结论可应用于下一步基于 LTE 协议栈的演示平台实

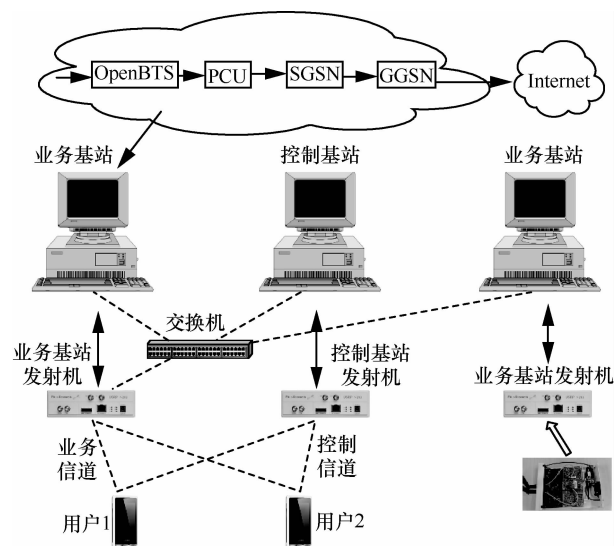


图 12 超蜂窝架构的演示验证系统



表 1 网络功能的分离方案

基站功能	数据基站	控制基站
同步	无	完全服务
广播控制	无	完全服务
接入控制	无	完全服务
寻呼	无	完全服务
数据通信	完全服务	无(或服务低速业务)

现。特别地,所提出的分离设计不改动用户侧信令接口,使得标准的商用终端可以不经修改,无缝地接入分离架构下的超蜂窝网络,这一对用户终端的兼容性和透明性对现实网络升级部署有显著的促进作用。

在分离架构平台基础上,进一步设计实现了以下功能。

(1) 控制基站指派下的多业务基站动态调度。

在业务基站密集部署的场景下,用户可以同时接收到多个业务基站的信号,此时控制基站可以根据网络状态、用户业务请求类型等,动态调配最优的业务基站进行服务。设计了基于信道状态、用户数、业务数据量的基站调度方案,并在平台上实现了以基站负载均衡为目标的基于业务数据量的调度算法,同时在真实无线环境中演示了网络决策的用户需求与业务基站的动态关联概念。

(2) 控制基站指派下的业务基站动态休眠与唤醒

在平台上实现了用户业务量感知的业务基站休眠机制,演示了如图 13 所示的场景:当网络中没有用户业务请求时,两个业务基站均处于休眠状态;如果有新的数据业

务请求到达,控制基站将唤醒一个业务基站为其服务;控制基站收集活跃业务基站上报的业务量信息,如果业务量超过预设阈值(可动态配置),则唤醒另一个业务基站服务新的业务请求;当业务量总和再次低于预设阈值时,其中一个业务基站会收到休眠指令进入休眠状态。通过业务基站的动态休眠,可以在满足用户服务需求的前提下,显著降低网络能耗,提高网络能效。

6.2 基于校园网的差异化服务平台

建立了基于云计算的大数据日志平台架构,实现了清华大学校园网内的用户数据通信业务的采集与分析系统^[9]。系统同时采集了校园网内的业务内容数据和网络传输数据,获得用业务服务的内容标识、用户标识、时间信息、地理信息等采集记录约 8.5 TB,支撑大数据基础下的业务分析与建模。在典型校园网业务数据采集与分析系统支持下,完成了校园内青年学生用户对视频业务的访问特征分析,给出了业务内容的时空分布描述,根据学生用户在不同时段对不同业务的差异化需求,提出了一套差异化服务方案,包括:多播推送方法,通过优化推送传输半径提高了传输能效;针对用户差异性的热点内容预测方法,以支持实现软实时业务服务模式;动态混合分级视频的重传保护传输方法,根据传输结果反馈实时按需分配传输资源,提高视频传输的抗分组丢失能力;用户能效优化的可分级视频机会多播算法,进一步结合用户预缓存,提高多播推送的多用户增益。

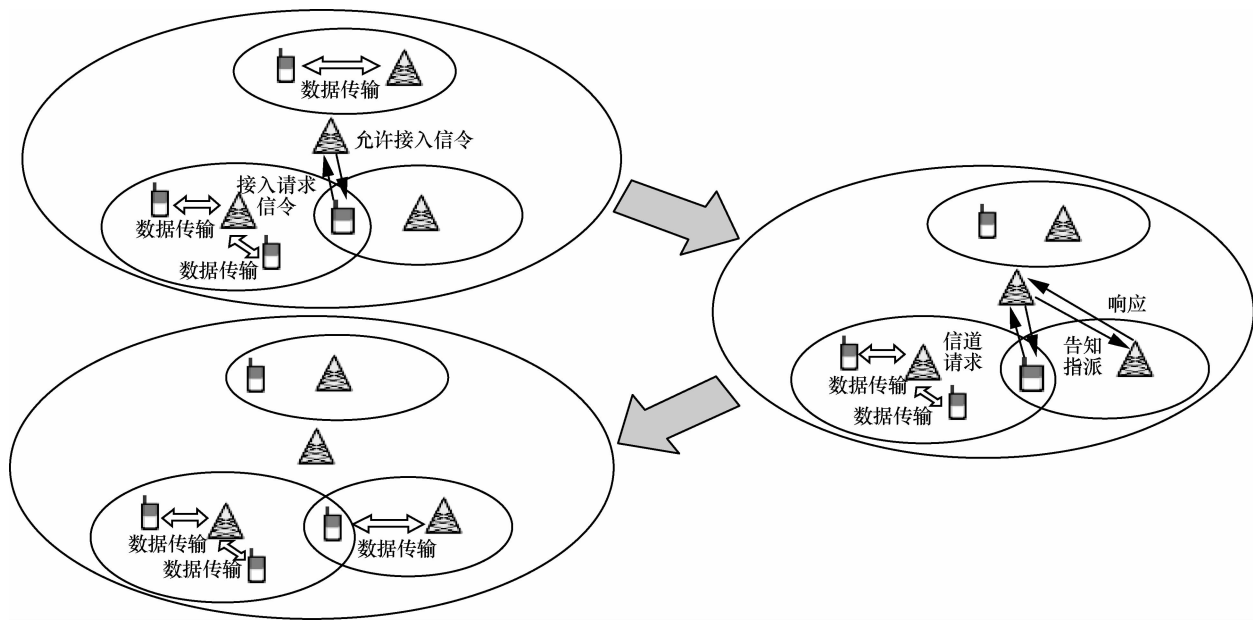


图 13 动态基站休眠与唤醒

7 结束语

本文立足于超蜂窝网络体系架构,阐述了控制覆盖与业务覆盖适度分离的超蜂窝系统核心原理,建立了超蜂窝网络能效理论框架,并在这一框架下研究了能量与时延折中关系理论,证明了利用时延换取能效的可行性,同时给出了超蜂窝网络部署优化的理论原则。在网络能效理论的指导下,进一步给出了能效优先的物理层传输方法和网络协作机制以及基于业务特性的高能效服务方法,实现了用户的弹性接入和差异化服务。最后,在软件无线电平台上搭建了超蜂窝演示系统,设计实现了分离架构,并在校园网中验证了差异化服务方法的网络能效增益。

超蜂窝网络体系的架构设计与能效理论研究,为未来 5G 网络的设计实现给出了一条切实有效的技术路线,使得利用有限的频谱资源和能量资源满足 5G 网络的多维业务需求成为可能。所取得的理论成果对网络优化设计具有重要的指导意义。

参考文献

- Nakamura T. Future radio access toward 2020 and beyond. NTT DOCOMO INC, 5G Forum, 2013
- METIS. <https://www.metis2020.com/>, 2014
- 牛志升,周盛,周世东等.能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战.中国科学:信息科学,2012,42(10):1191~1203
- Niu Z S. TANGO: traffic-aware network planning and green operation. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5): 25~29
- Wang Z X, Zhang W Y. A separation architecture for achieving energy-efficient cellular networking. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2014, 13(6): 3113~3123
- Guo X Y, Zhou S, Kumar R P, *et al.* Optimal wake-up mechanism for single base station with sleep mode. Proceedings of 25th International Teletraffic Congress (ITC25), Shanghai, China, 2013
- Wu J, Zhou S, Niu Z S. Traffic-aware base station sleeping control and power matching for energy-delay tradeoffs in green cellular networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4196~4209
- Cao D X, Zhou S, Niu Z S. Optimal combination of base station densities for energy-efficient two-tier heterogeneous cellular networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4350~4362
- Cao D X, Zhou S, Niu Z S. Improving the energy efficiency of two-tier heterogeneous cellular networks through partial spectrum reuse. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4129~4141
- Xu Z, Yang C, Li Y G, *et al.* Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(2): 564~575
- Sun C, Yang C. Energy efficient hybrid one-way and two-way relay transmission. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(8): 3737~3751
- He C L, Sheng B, Zhu P C, *et al.* Energy and spectral efficiency tradeoff for distributed antenna systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5): 894~902
- He C L, Li Y G, Zheng F C, *et al.* Energy-efficient resource allocation in OFDM Systems with distributed antennas. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(3): 1223~1231
- Han S, Yang C, Molisch A F. Spectrum and energy efficient cooperative base station doze. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 285~296
- Zhou X, Zhao Z F, Li R P, *et al.* Human mobility patterns in cellular networks. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10): 1877~1880
- Lee D H, Zhou S, Niu Z S, *et al.* Spatial Modeling of Traffic Density in Cellular Networks. IEEE Wireless Communications, 2013, 21(1): 80~88
- Zhang X, Zhang Y, Yu R, *et al.* Enhancing spectral-energy efficiency for LTE-advanced heterogeneous networks: a users social pattern perspective. IEEE Wireless Communications, 2014(2)
- Zhao T, Yang P K, Pan H M, *et al.* Software defined radio implementation of signaling splitting in hyper-cellular network. Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop of Software Radio Implementation Forum (SRIF 2013), HK, China, 2013
- Du Z, Fu X L, Zhao C, *et al.* University campus social network system for knowledge sharing. Computer Science and Information Systems, 2013, 9(4): 1721~1734

[作者简介]



牛志升,男,博士,清华大学教授、博士生导师,信息学院副院长,中国电子学会理事、中国通信学会信息通信网络专业委员会副主任、IEICE Fellow, IEEE Fellow, 主要研究方向为通信话务理论、排队论、通信网络的流量控制与性能分析、无线网络的资源分配及跨层优化、通信与广播融合网络、绿色通信与网络等。

龚杰,男,博士,清华大学博士后研究员,主要研究方向为绿色通信与网络、动态能量获取与资源优化等。

周盛,男,博士,清华大学助理教授,主要研究方向为多天线系统跨层优化、蜂窝网合作传输、绿色通信与网络等。

(收稿日期:2014-12-06)