

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

牛志升*, 周盛, 周世东, 钟晓峰, 王京

清华大学电子工程系, 清华大学信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084

* 通信作者. E-mail: niuzhs@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2012-06-25; 接受日期: 2012-07-29

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB316000), 国家自然科学基金(批准号: 61021001, 6092500)资助项目

摘要 各种信息技术在经历了几十年的发展之后逐渐都遇到了容量与能耗的瓶颈, 特别是蜂窝移动通信系统, 进一步提高网络容量受到了频谱资源和能耗的双重约束, 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. 本文面向未来移动通信技术的最新发展以及节能减排的战略要求, 以全网的能量效率为优化目标, 提出一种全新的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.

关键词 能量效率 频谱效率 控制信道 业务信道 超蜂窝

1 引言

众所周知, 能源危机与环境污染问题已经成为制约人类社会可持续发展的两个主要瓶颈. 作为世界上最大的发展中国家以及第二大的能源消费国, 中国也已经制定了“建设资源节约型和环境友好型社会”的国家战略, 并做出了“到 2020 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%”的郑重承诺. 为了实现这个目标, 信息技术责无旁贷, 要求我们必须从能效优先的角度重新审视现有的信息系统, 特别是网络规模和业务内容都在快速增长和急剧变化的蜂窝移动通信系统.

近年来, 移动通信网络用户数和业务量均呈快速增长态势. 国际电联最新数据显示, 截至 2010 年底全球手机用户已达 53 亿, 其中 9.4 亿为 3G 以上宽带用户. 我国则运行着世界最大规模的移动通信网, 拥有 8.6 亿用户, 其中 3 亿为手机网络用户, 占总网民的 2/3. 但这也仅仅意味着 64% 的移动用户普及率, 且 3G 用户仅占 0.47 亿, 距离发达国家的平均水平还差得很远. 因此可以预测, 在“十二五”期间, 随着信息产业与工业应用领域的进一步结合以及物联网时代的到来, 我国通信业务需求仍将有大幅度增长, 网络建设规模也将持续扩大. 已有数据显示^[1], 随着以 iPhone 为代表的智能多媒体移动手机的普及, 预计到 2015 年移动业务的需求量将达到目前的 100~1000 倍, 其中移动视频业务将会占到业务总量的 2/3.

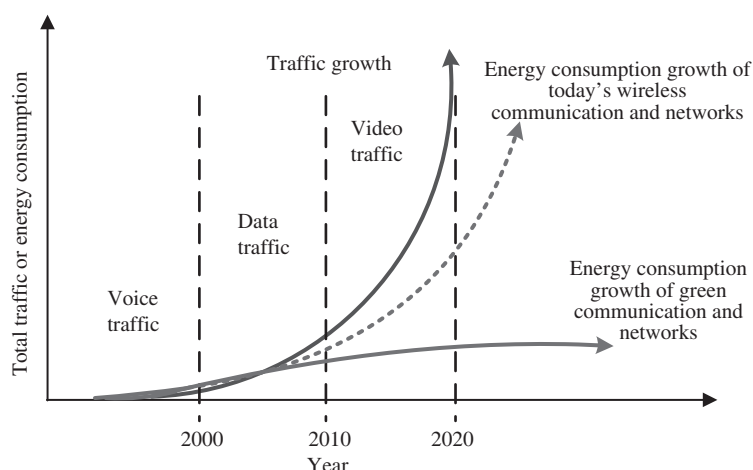


图 1 快速增长的业务量与能耗之间的矛盾

Figure 1 The contradiction between the rapid growth in traffic and energy consumption

很显然, 现有移动通信网络的容量远远无法满足如此高速增长的业务量需求. 一方面, 移动通信可用的频谱资源和站址资源等越来越少, 甚至趋于枯竭; 另一方面, 有限的频谱资源又被独立地分割到了功能各异的多种网络 (以下简称“异构蜂窝网络”) 中, 不仅资源难以得到充分利用, 各种无线网络的重叠与密集覆盖也使得无线电磁环境变得异常复杂, 客观上制约了网络容量的进一步扩大. 更要引起注意的是, 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. 统计数据表明, 2009 年我国三大电信运营商共耗电 289 亿度, 相比 2008 年增长超过 25%, 折合标煤近 1000 万吨. 这不仅意味着巨大的运行成本, 也带来了大量的碳排放, 对于像中国这样资源严重短缺和环境污染严重的发展中国家来说显然是难以可持续发展的. 也就是说, 如果沿用现有的无线传输技术和网络架构, 将所支持的移动业务量扩展 100~1000 倍则会需要相应比例能量的增加, 这是不现实的, 也是不被允许的. 因此, 未来移动通信与网络技术的发展必须要面对资源和能耗的双重约束, 要求在优化网络资源的同时大幅度降低单位业务量的能耗, 打造绿色通信与网络 (如图 1 所示).

纵观移动通信系统的能耗分布^[2], 网络部分实际上占到将近 90%, 终端部分仅占 10% 左右; 而在全部网络能耗中基站又占到了 80% 左右, 核心网部分仅占 20% 左右. 可见如何大幅度地降低基站部分的能耗是问题的关键. 目前运营商的网络规模非常庞大, 仅在中国就有超过一百万个基站在不间断地运行. 同时, 随着 3G 用户数的不断攀升以及未来 LTE 网络的建设, 新建基站数量还会不断增多, 使得基站能耗成为运营商未来节能减排工作的重点关注对象.

尽管各种不同种类基站的能耗分布会有所不同, 但大体上可以分为射频前端、基带处理、功放、和配套设备 (电源、空调等) 四大部分, 其中占主导的实际上是比较固定的功放和配套设备部分, 占基站总能耗的 70% 左右^[2]. 也就是说, 即使小区中没有任何业务需求, 由于基站仍需要处于工作状态以保证网络的基础覆盖 (即保证用户可以随时随地地接入网络的信号覆盖), 基站也会消耗大量的能量. 据中国电信的测算, 现有蜂窝网络基础覆盖的能耗约占全网实际能耗的 50% 以上. 可见, 大幅度降低网络能耗的最直接、也是最有效的手段是尽量将尽可能多的基站置于休眠状态、甚至完全关闭. 但如此一来, 网络中的某些区域又会失去覆盖, 即造成所谓的“覆盖黑洞”, 这是不被允许的. 因此, 需要建立有效的基站协作机制, 通过相邻小区的覆盖扩展等技术来分流该小区的业务, 以使更多的基站能够

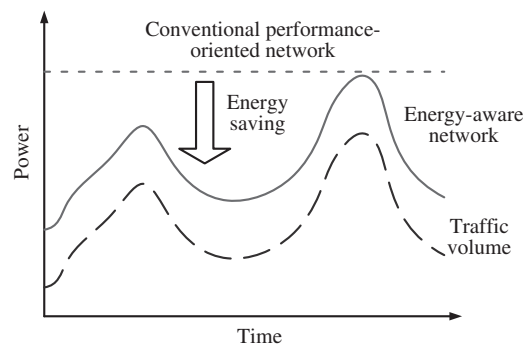


图 2 利用业务动态特性节省能量示意图

Figure 2 Illustration of using the dynamic traffic property to save energy

进入到休眠状态, 从而大幅度降低网络能耗。

更进一步地, 随着移动终端种类和功能的不断扩大, 用户在时域和空域上的分布以及业务种类都呈现出越来越大的不均匀性和不确定性, 因此为了保障用户在任何时间任何地点的接入需求, 蜂窝网络通常会按照峰值容量需求配备网络资源, 且保持在该状态不间断地运行。但实际上, 某个特定网络或是某个特定小区真正处于峰值流量的时长是非常短的, 且在空间上非均匀动态分布 (即所谓的“潮汐现象”^[3]), 使得很多小区在相当长的时间内处于过度覆盖状态, 浪费了大量的资源。同时, 不断涌现的数据和视频广播业务往往可以容忍一定的延时, 且具有更大的突发性 (不确定性), 因此网络不必总依照按照峰值流量进行工作。

综上所述, 现有蜂窝移动通信系统进一步提高网络容量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。

目前, 国内外对绿色通信与网络的研究也都是刚刚开始, 几个典型代表包括英国的 GreenRadio 计划¹⁾, 欧盟的 EARTH²⁾, C2Power^[4], TREND^[5], 以及跨国产学研联盟 GreenTouch 计划³⁾。但他们关注的仍然是设备节能技术或是单链路传输的功率效率问题, 真正从网络节能角度开展的研究还不多见, 特别是在基础理论方面, 还远没有形成一套较为完整的理论体系, 为此迫切需要建立一套以能效与资源优化为目标的移动通信系统基础理论体系。

为此, 我们将着眼于网络整体能耗, 面向高能效的网络覆盖、资源匹配、和业务服务, 提出一个超蜂窝网络 (HCN: hyper-cellular network) 的体系架构, 试图通过一种超越传统蜂窝网络的新架构构建一个能效优先与资源全局优化的大容量低能耗移动通信系统。这里, 超蜂窝网络架构的核心是将蜂窝网络的控制信道覆盖 (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, 以下简称“控制覆盖”) 和业务信道覆盖 (即保证用户业务需求能够被满足的最小能量覆盖, 以下简称“业务覆盖”) 进行适度的分离, 从而网络只需以较低的能量维持一个控制覆盖即可, 而业务覆盖的能量及其它网络资源只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, 从而实现能效与资源的联合优化^[6], 如图 2 所示。

1) <http://www.mobilevce.com/green-radio>

2) <http://www.ict-earth.eu/default.html>

3) <http://www.greentouch.org/>

2 现有蜂窝网络的架构约束及超蜂窝网络的提出

众所周知, 蜂窝网络的概念是为了提高频谱利用率而于 1940 年代提出的, 并于 1960 年代得到实际验证, 1980 年代得到广泛应用, 使得移动通信网的容量得到了大幅度提高, 带来了今天移动通信的繁荣. 但未来无线通信业务需求的发展趋势是业务总量和用户峰值速率均呈指数增长, 且业务类型及业务需求的动态范围不断扩大. 一方面, 随着智能手机与视频业务的大量出现, 用户对峰值速率的需求还在不断上升; 另一方面, 各种物联网应用的快速普及又会给网络带来海量的中低速率业务, 它们每次请求的业务量很小, 但却会很频繁. 如此两极分化的业务实际上都会消耗大量的基站能量.

由经典信息论可知: 在高频谱效率的点对点链路中, 对于给定的带宽, 无线传输容量的提高需要指数倍地提高传输功率, 即无线传输的频谱效率与能量效率是一对天然的矛盾. 因此, 要想在不牺牲频谱效率、甚至还需要提高频谱效率的前提下大幅度地提升能量效率, 即能效与资源的联合优化, 单靠物理层传输技术的提高是很难实现的. 为此, 我们需要从系统和网络的角度寻找解决途径.

众所周知, 现有蜂窝网络提高容量和降低功耗的主要手段就是不断地缩小蜂窝尺寸. 但这不仅会增加小区的密度, 占用更多的站址资源, 提高网络覆盖的成本, 而且也会加剧小区间业务量的不平衡, 并带来更多的小区干扰, 可见这条路径也很快就会走到尽头的. 究其原因, 这主要是源于现有基站的多重身份, 它不仅负责无线信号的收发, 还要负责收发信号的处理、本小区的资源调度、以及为本小区用户提供同步、唤醒、切换等控制服务, 即网络的控制覆盖与业务覆盖是紧密耦合在一起的 (以下简称“硬性覆盖”), 难以根据业务的动态特性进行柔性的改变.

另外, 现有蜂窝网络采用以基站为中心的静态设计理念, 通常根据业务的峰值流量和网络的无缝覆盖需求配备基站资源, 以保证用户在任何时间任何地点都可以获得满意的服务. 这对于以语音业务为主的宏蜂窝网络而言是可以接受的, 因为一般来讲每小区用户数足够多、且小区业务量在空间和时间上的起伏 (动态性) 不大, 完全可以通过静态的基站规划使每个基站接近满负荷工作, 基站的能耗损失不大. 但随着各种非话业务 (数据、视频等) 的大量涌现以及蜂窝尺寸的不断缩小, 使得每小区业务量在空间和时间上的起伏急剧加大, 如果仍然延续传统的静态设计方法, 将会导致许多基站在相当长的时间内处于低负载运行状态, 浪费大量的基站能量.

还有, 现有蜂窝网络的服务模式基本上是固定的, 针对不同种类的业务组建不同的网络 (如 GSM 主要针对语音业务、LTE 主要针对数据业务而设计与优化), 因此当不同种类的业务在同一个网络中传输时势必会造成网络资源和能量的浪费. 举例来讲, 如果数据业务要在语音网络中传输的话, 由于其突发性较大, 必然会导致其阻塞率的上升. 由于语音业务无法忍受任何延迟, 因此语音网络解决这个问题的唯一手段就是不断地提高传输容量, 这必然会导致能耗的增加. 但实际上, 一般来讲数据业务是可以容忍一定的延迟的, 因此网络完全可以通过缓冲的方式令其避开网络的繁忙期和信道的衰落期、或是等到用户移动到离基站较近区域时再开始通信的方式降低阻塞率, 这样就可以在不增加网络资源和能量的情况下获得满意的服务.

由此可见, 我们需要转变一味地追求小区内无线信道容量的思路, 而是着眼于通信系统所服务的对象 (即“用户”) 和通信系统所传递的对象 (即“信息”) 本身, 主动利用用户分布的动态性、业务特征的差异性、以及信息内容需求的群体趋同性等特征, 通过多小区协作和异构蜂窝网络融合等手段, 从网络的角度创建一套根据实际业务量与不同业务需求提供柔性覆盖和适度服务的能效优先设计理念和理论体系, 即在满足用户需求的前提下通过减少资源和能量的浪费来实现能效与资源联合优化. 排队论的知识告诉我们: 业务的动态性和差异性越大, 传统固定服务方式的浪费就越大, 我们所能得到的能效增益也就越大 (如图 2 所示).

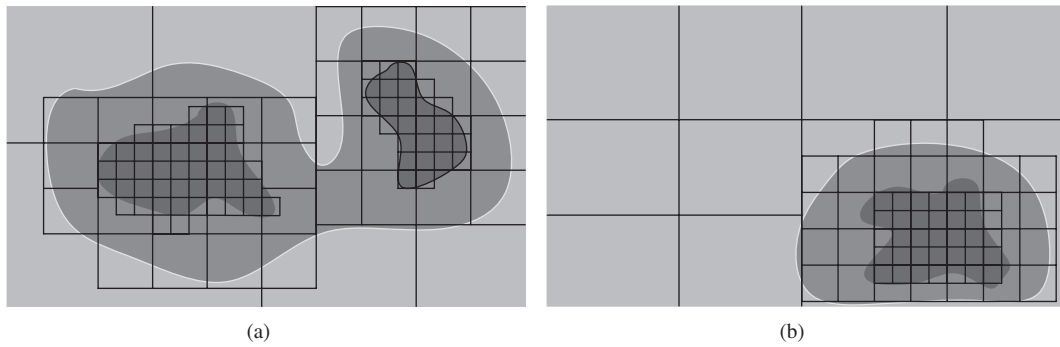


图 3 根据实际业务需求动态地调整覆盖模式与范围的柔性覆盖示意图

Figure 3 Illustration of dynamically tuning the coverage mode and region based on the instantaneous traffic requirement. (a) Daytime coverage; (b) night coverage

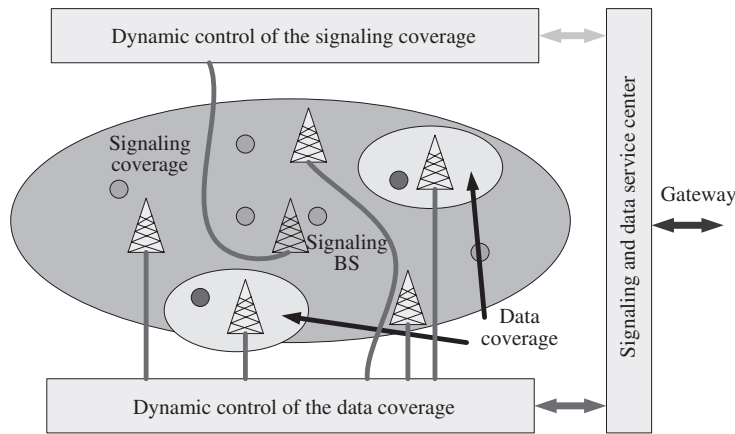


图 4 控制覆盖与业务数据覆盖分离解耦

Figure 4 The decoupling of the control signaling coverage and traffic data coverage

为了实现上述转变, 首先需要将现有蜂窝网络中紧密耦合在一起的控制覆盖和业务覆盖进行适度的分离, 否则的话两者相互制约, 无法灵活地应对环境与需求的变化. 然后在此基础上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, 从而实现能效与资源的联合优化. 这就是本文提出的超蜂窝网络的核心思想, 其主要特征可归纳为以下三点:

1) 基于控制覆盖与业务覆盖适度分离的柔性覆盖思路.

通过对网络中的控制信号和业务数据分别提供覆盖服务, 网络只需以较低的能量维持控制信号的覆盖以保证用户的可连通性即可 (“覆盖优先”), 而在网络覆盖得到了保障的基础上, 业务覆盖则可以根据实际业务需求柔性地进行布置 (“能效优先”), 并随时根据网络的状况及业务需求的变化调整其覆盖模式 (2G/3G/4G)、覆盖范围 (微蜂窝/皮蜂窝/微微蜂窝) 和服务方式 (单播/组播/广播). 图 3 给出了一个网络覆盖随业务量分布而动态改变的示意图, 其中方块的大小表示不同覆盖的小区, 背景颜色的深浅表示了业务量的大小 (颜色越深, 则业务量越大). 图 4 则给出了控制覆盖与业务数据覆盖分离的示意图.

传统以语音业务为主的网络, 由于语音业务本身的速率也较低, 将两者分离的必要性不大. 但未来移动通信系统中会出现大量的高速数据和视频业务, 使得这种分离变得越来越必要.

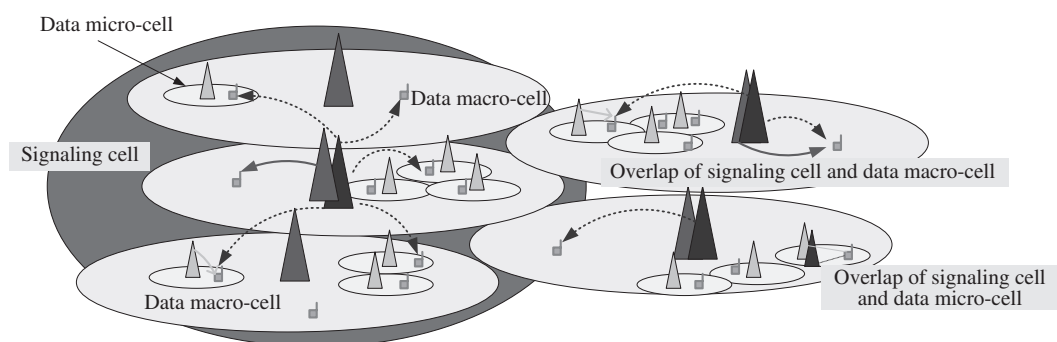


图 5 基于基站和网络协作的弹性资源匹配示意图

Figure 5 The flexible resource matching based on base station and network collaboration

2) 基于基站和网络协作的弹性资源匹配思路.

在超蜂窝网络的架构下, 由于同一业务覆盖的相邻小区之间以及不同业务覆盖的异构小区之间往往是密集和重叠覆盖的, 因此完全可以通过邻小区基站之间或是异构小区之间的协同传输来应对网络中业务量分布的时空起伏, 不必为每个小区都过度地匹配资源 (如图 5 所示). 也就是说, 多个相邻小区或是异构小区之间可以形成一个簇, 通过协同的方式为用户提供服务. 反过来, 用户则可以根据实际业务需求以及不同小区的负载状况等从某个簇中动态地选择一个合适的小区进行接入 (即“弹性接入”), 从而避免了网络资源和能量的浪费. 当然, 小区簇的形成也应该是动态的.

3) 基于差异化服务的按需适度服务思路.

如前所述, 无线数据和视频业务在业务特征上与语音业务差别较大, 例如不同类别的用户对数据和视频业务的需求存在较大差异, 用户启用数据和视频业务的随机性和突发性也非常大. 同时, 他们在业务需求上与语音业务也存在很大的差异, 例如, 数据业务可以忍受一定的延时, 视频业务则对延时抖动非常敏感. 如果此时仍然采用传统的归一化服务方式, 则势必会造成网络资源和能量的极大浪费. 另一方面, 无线数据和视频业务还会出现一定的群体性, 即很多用户在相同的空间范围和时间范围内可能会对网上的同一个数据或视频内容感兴趣, 而且越是热点的内容其群体趋同性越明显. 因此如果仍然沿用像语音那样的点对点服务模式, 同样的数据和视频内容会在网络中被多次重复传输, 浪费了大量的网络资源和能量. 特别是一般来讲数据和视频业务的数据量都是非常大的, 因此其所造成的浪费也是巨大的.

为了节省能量, 我们实际上可以主动利用业务内容的差异性和趋同性, 通过引入差异化服务机理来为不同的业务提供按需适度服务, 从而提高网络资源和能量的利用率, 如图 6 所示. 举例来讲, 如果业务可以容忍一定延迟的话 (非实时业务), 完全可以通过主动改变调制方式 (如从 64QAM 降到 QPSK) 等手段, 以一定的延时来换取能量效率. 实际上, 运用排队论的知识可知: 将非实时业务按照实时业务的方式进行服务的话, 在相同阻塞率的情况下需要大幅度地增加网络资源和能量. 反之, 针对趋同性的业务需求则可以通过引入多播或广播通道, 或是将广播网络融合到通信网络中, 将很多用户在一定时间内共同感兴趣的信息以广播或多播的方式分发下去, 从而减少同一信息在无线网络中的传输次数, 在减轻网络负载的同时大幅度地提高能量效率.

3 超蜂窝网络面临的新挑战及其研究课题

如上所述, 我们提出了一个全新的超蜂窝网络架构, 通过控制信道覆盖与业务信道覆盖适度的分

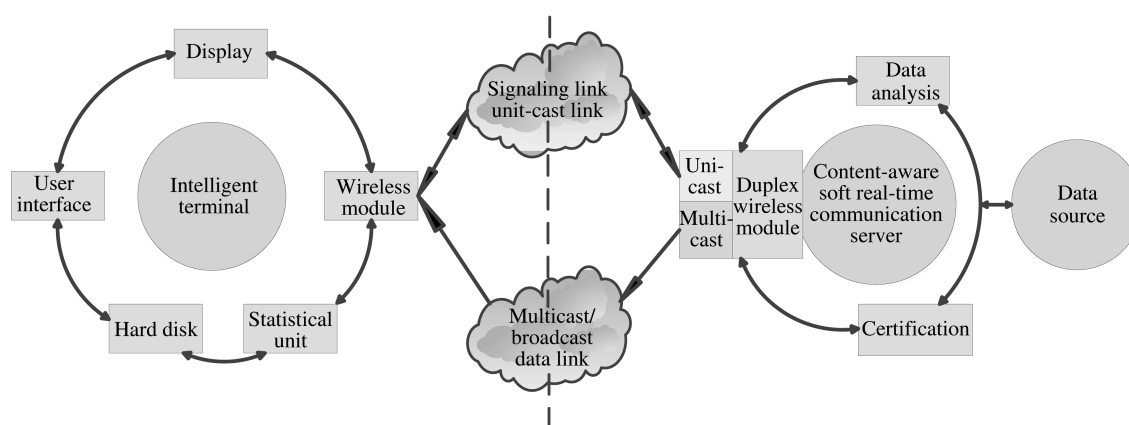


图 6 基于差异化服务的按需适度服务示意图

Figure 6 The differential based on-demand service

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. 为此, 我们需要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, 并针对多样化业务需求设计差异化适度服务机理. 具体地, 有以下六方面的研究内容与挑战.

3.1 网络能效建模及其成因关系分析

按照能效优先的原则重新审视无线通信与网络的体系架构与运行机理, 从网络整体能效的角度研究网络能量效率的成因关系, 并在此基础上建立能效与资源优化的移动通信系统体系架构与理论体系.

为了全面反映网络各部分的能耗, 首先需要给出一个“网络能效”的定义, 并分析其成因关系. 对于给定的频谱资源、网络覆盖范围、用户分布、业务模型及服务要求, 网络能效定义为: 网络承载的用户业务总量与所消耗的总能量之比, 即单位能量平均所承载的用户业务量 (bits/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 (bits/J/Hz/area). 很显然, 与经典信息论中的比特能量效率相比, 它有以下几个特征:

(1) 它是从网络整体 (一定的覆盖区域) 的角度来定义的, 不只是单条链路或是单个小区的能效. 因此在覆盖区域内通过更高效的频率复用、基站协作或是负载均衡等手段都有可能大幅度提高网络能效. 与此同时, 它关注网络所有设备的整体能耗, 包括协议与信号处理设备能耗、外围辅助设备能耗等, 而非仅仅是无线传输能耗.

(2) 它是针对实际承载的用户端业务吞吐量定义的 (bits 或是 erl), 而非网络内部各链路上的信息传输总量, 更非各链路上的总容量 (bits/s). 因此不仅可以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降低能耗, 还可以根据实际业务需求的变化自适应地匹配资源和能量 (即弹性接入和按需适度服务) 的方式提高网络能效.

由此可见, 网络能效是一个新的概念, 它可以有效地反映各种不同特性 (实时、非实时; 单播、多播等) 的业务以及业务实际需求的不均匀性和动态特性对网络能效的影响, 为研究大幅度提高能效的机理与方法指明了方向. 为此, 需要研究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 (以下简称“网络能效理论”), 包

括: 如何以最小的能量实现所需的网络覆盖及业务服务需求? 网络能效与频谱效率之间存在什么样的理论关系? 业务的随机性和动态特性究竟会如何影响网络能效? 具体地, 需要重点研究以下两个基础理论问题:

(1) 网络能效与频谱效率的理论关系. 如果只考虑单链路的发射功率, 则经典信息论告诉我们: 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, 则这种折中关系就会变得非常复杂, 至少不再单调. 进一步地, 如果将链路频谱效率也改成“网络频谱效率”, 即以给定的带宽在一定覆盖范围内所能传送的业务量, 则两者的关系会变得更加复杂, 至少不再是简单的折中关系, 因为我们完全可以通过频率复用、基站协作或是负载均衡等手段, 在不牺牲频谱效率的前提下提高能量效率. 同时, 可以将信息论与动态规划理论相结合, 以动态优化的思想并从系统的角度分析能量效率与频谱效率的关系, 借助 Markov 决策过程的理论与方法给出该动态规划问题的数值解.

(2) 网络能效与业务延时的理论关系. 如前所述, 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延时. 但究竟多大的延时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, 因为网络延时性能是度量服务质量和用户体验的重要指标, 而且额外的延时还会带来额外的处理能耗. 经典信息论一般只考虑某条链路上发射功率与传输延时之间的折中关系, 未针对全网的总能耗与端对端延时 (包括排队延时、处理延时等) 来考虑. 而且, 已有的结果大都只关注平均延时, 未能将延时抖动考虑进来. 实际上, 对于大部分实时业务而言, 延时的抖动是更重要的性能指标.

为此, 我们通过将信息论与排队论相结合, 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延时及其抖动的理论关系, 给出网络能效与可容忍延时之间的定量关系.

一个简单的例子如下:

假设某个用户以速率为 λ 的 Poisson 过程对网络随机地产生服务请求, 并要求服务请求的阻塞率不超过 P_B . 网络则为其分配相应的资源和能量提供服务, 并假设用户占用该资源的时间也是随机的, 服从负指数分布.

(i) 如果该服务要求严格的实时性, 则网络只能通过不断增加网络资源 (即提高服务速率 μ_1) 来保证指定的 P_B , 则该服务系统可以等效为一个 M/M/1(0) 排队模型, 根据排队论中的爱尔兰公式可以求得 $P_B^{(1)} = \rho_1 / (1 + \rho_1)$, 其中 $\rho_1 = \lambda / \mu_1$.

(ii) 但如果该服务可以容忍一定的延时 (假设缓冲区容量为 k), 则该服务系统可以等效为 M/M/1(k) 排队模型. 根据排队论可以求得 $P_B^{(2)} = \rho_2^{k+1} (1 - \rho_2) / (1 - \rho_2^{k+2})$, 平均等待时间 $W = (1 + \rho_2 + \dots + \rho_2^k - k\rho_2^{k+2}) / (1 - \rho_2^{k+2})$, 其中 $\rho_2 = \lambda / \mu_2$.

(iii) 令 $P_B^{(1)} = P_B^{(2)}$, $\mu_1 = s\mu_2$, 则可以求得 $s = (1 - \rho_2^{k+1}) / [(1 - \rho_2)\rho_2^k]$, 它相当于如果将该非实时业务按照实时业务来服务时所增加的服务能力.

(iv) 例如, 如果 $k = 2$, $\rho_2 = 0.5$, 则 $s = 7$, $W_2 = 1.7\mu_2^{-1}$, 即实时服务系统的服务率 (能力) 需要增加到原来的 7 倍才能保证同等的阻塞率, 或者说通过 1.7 倍于平均服务时间的延时近似换取了 7 倍的服务能力!

(v) 进一步地, 如果将 k 扩大到 8, $\rho_2 = 0.5$ 保持不变, 则 $s = 511$, $W_2 = 1.9\mu_2^{-1}$, 即仅仅通过 1.9 倍于平均服务时间的延时近似换取了 511 倍的服务能力!

根据信息论的知识可知: 对于给定的带宽, 服务能力的提高需要通过提高信噪比来实现, 即 7 倍服务能力的提高需要近似提高 27 倍发射功率才能换取. 由此可见, 以较小的延时可以换来较大幅度的功率效率. 当然, 这只是一个简单的定性说明例子, 具体多少延时能够换来多大的能效需要进一步

研究.

本方向上几个代表性前期工作包括文献 [6~9] 等.

3.2 超蜂窝网络的柔性覆盖与控制理论

针对未来移动通信业务在时域和空域上大范围动态变化、且服务质量要求越来越两极分化的矛盾, 深入挖掘网络覆盖的能效潜力, 建立兼顾能效与容量的智能柔性覆盖与控制理论, 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. 主要研究内容包括:

(1) 控制覆盖与业务覆盖分离机制及优化研究: 通过控制覆盖与业务覆盖在业务级、设备级、协议级的逐级分离, 研究两种覆盖的合作机制和演进方法, 探索在公共控制覆盖基础上的异构业务覆盖机理和控制方法, 以及公共控制覆盖的异构实现方法.

(2) 柔性覆盖中控制覆盖的能效优化方法: 探讨未来无线接入对控制信道需求的发展趋势, 研究系统同步、信道估计、定位、寻呼、随机接入等控制功能在超蜂窝架构下的能效优化机制与方法, 给出控制覆盖强度的理论描述.

(3) 柔性覆盖动态小区形成方法研究: 研究下行动态功率控制和天线形态调整在动态小区形成中对容量和能耗的影响, 以及在不同信道条件下分布式天线协作覆盖虚拟小区成形方法, 建立分布式覆盖容量与虚拟小区形态、回程链路能耗、处理能耗、传输能耗之间的折中关系, 进一步研究动态小区构建的能效优化准则、优化方法以及规模化实现方法, 探索新型天线和新频段在动态小区覆盖形成方面的解决途径.

本方向上几个代表性前期工作包括文献 [10] 等.

3.3 能效优先的传输理论与弹性接入方法

研究超蜂窝网络中非协作的传输理论与接入技术, 即假定各蜂窝小区基站不交互信息、不使用中继协作或用户协作机制完成无线传输.

(1) 综合链路能效优化的传输机制及与频谱效率的理论关系: 针对非协作蜂窝网络, 分别考虑不存在小区间干扰时的单小区多用户及存在小区间干扰时的多小区多用户系统, 研究多天线、多载波系统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.

(2) 能效与资源联合优化的弹性接入机制: 针对具有高频谱效率的 MIMO 和 OFDMA 技术, 研究高能效无线传输与资源分配的优化准则; 提出能充分利用信道/干扰/业务的动态变化特性、满足网络和服务质量要求的高能效最优接入方法; 分析高能效资源分配与接入机制对系统频谱效率的影响及其与系统参数和信道环境间的关系; 研究低复杂度、高能效的最优接入算法.

本方向上几个代表性前期工作包括文献 [11~13] 等.

3.4 超蜂窝网络协作机制与资源优化方法

针对复杂的干扰环境及动态的业务需求, 研究超蜂窝网络的协作机制与资源优化方法, 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.

(1) 高能效异构节点协同传输理论: 给出协作开销及相应回程能耗的模型, 建立发射能效与协作开销、以及能效与协作基站或天线站数目之间的理论关系, 研究不同载荷下的动态协作理论以及降低传

输开销和基带复杂度的方法, 从而确立在动态协作下能效与系统容量、传输开销、基带处理复杂度之间的理论关系. 对于基于小区内天线站的多点协作, 建立小区内干扰与系统能效的理论关系. 对于基于中继的协作系统, 建立能效与中继密度、传输开销及系统载荷的理论关系.

(2) 超蜂窝网络能效与资源联合优化方法: 研究超蜂窝网络资源的优化配置方法, 并通过学习和预测链路层、网络层、以及用户业务的动态特性, 实现在能效优先条件下网络资源与用户需求的实时自适应匹配, 从而建立基于能效优先的动态资源匹配理论.

本方向上几个代表性前期工作包括文献 [14~16] 等.

3.5 用户群体行为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能效服务方法.

(1) 移动无线网络业务采集与分析: 研究移动无线网络中业务数据采集和测量方法, 研究移动网络多业务在时间、空间和相关性方面的特征分析, 给出多种典型业务的流量分布函数以及多类型业务统计模型.

(2) 多维度用户群体行为分析与建模: 通过业务特征分析, 研究用户以群体为单位在活动规律、业务需求、接入频率、用户关联关系、聚类特性等多维度下的行为模式和特征规律, 对业务内容上的相关性及用户群体行为的趋同性等进行分析, 通过概率统计和数据挖掘等手段对用户群体行为进行认知与数学建模, 指导超蜂窝的资源配置.

(3) 面向用户群体行为的高能效服务机理: 建立用户群体行为与网络高能效的内在联系, 研究面向用户群体行为的高能效服务机理与智能动态适配技术, 构建面向用户群体行为的高能效服务体系.

本方向上几个代表性前期工作包括文献 [17~19] 等.

3.6 业务特征认知与高能效差异化服务方法

基于不同业务之间在业务特征与服务质量需求上存在的差异, 按照按需适度服务的原则建立差异化的服务体系与评价方法, 为高能效移动通信服务系统的设计与优化提供理论基础.

(1) 业务特征感知与业务建模理论与方法: 基于业务抽象化的感知方法, 从业务的实时/非实时的时间特性^[11]、点对点/点对多点/广播的传输特性、以及人与人/人与机器/机器与机器的参与者特性等多个角度对业务进行特征分析、分类与建模, 并据此进行网络流量中的业务类型测量, 给出不同类型业务的行为模型.

(2) 高能效的业务差异化服务机制与方法: 基于用户行为的统计趋同性和业务需求差异性的特点, 结合单播、多播与广播等多种传输手段, 设计面向不同类别业务的差异化服务机制, 实现资源与能效的联合优化. 具体包括: 具有实时大容量对称特征的业务; 具有软实时高速率特征的业务; 具有周期性低速率特征的业务等.

本方向上几个代表性前期工作包括文献 [20,21] 等.

4 结论

本文面向未来移动通信技术的最新发展以及节能减排的战略要求, 以全网的能量效率为优化目标,

提出了一种全新的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. 具体地讲, 超蜂窝网络通过控制覆盖与业务覆盖的适度分离 (decoupling), 并在保证控制覆盖永远在线的前提下实现了业务数据的按需覆盖 (coverage-on-demand, 及只在有业务需求并根据业务的具体需求提供适当的覆盖方式)、网络资源的按需匹配 (resource-on-demand, 即只在有业务需求并根据业务的具体需求匹配适当的网络资源)、以及服务机理的按需选择 (service-on-demand, 即根据业务需求的趋同性及差异性选择适当的服务机理) 来实现能量的按需分配 (energy-on-demand), 从而实现以受限的频谱和能量资源满足未来 10~20 年移动通信对宽带大容量的迫切需求. 同时论述了超蜂窝网络面临的新挑战及可能的研究课题, 并给出了最新研究进展.

致谢 感谢国家重点基础研究发展计划 (“973”) 项目 (2012CB316000) 参研单位负责人李焯教授、杨晨阳教授、郑福春教授、张文逸教授、王文博教授、张宏刚教授、陈巍副教授、梅承力博士、以及张舜卿博士对本论文的贡献, 同时感谢邬贺铨院士、周炳琨院士、毕光国教授、董孝义教授、马建峰教授、崔大付教授、曹志刚教授、谈振辉教授、朱近康教授、尤肖虎教授、李少谦教授、朱洪波教授、卫国教授等对本文的指导.

参考文献

- 1 Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2010-2015. <http://www.cisco.com/>
- 2 Huawei. Huawei energy saving white paper. www.huawei.com/cn/file/download.do?f=4744
- 3 Oh E, Krishnamachari B, Liu X, et al. Towards dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 56-61
- 4 Rodriguez J. C2Power: cognitive radio and cooperative strategies for power saving in multi-standard wireless devices. FP7 ICT Objective 1.1. *The Network of the Future*. January, 2010
- 5 Neri F. TREND: towards real energy-efficient network design. Network of excellence proposal. FP7-ICT-2009-5. April, 2010
- 6 Niu Z S. TANGO: Traffic-aware network planning and green operation. *IEEE Wirel Commun Mag*, 2011, 18: 25-29
- 7 Berry R A, Gallager R G. Communication over fading channels with delay constraints. *IEEE Trans Inform Theory*, 2002, 48: 1135-1149
- 8 Niu Z S, Zhang J N, Guo X Y, et al. On energy-delay tradeoff in base station sleep mode operation. In: *IEEE 13th International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Singapore, 2012. to appear
- 9 Wu J, Yang Z X, Zhou S, et al. A traffic-aware dynamic energy-saving scheme for cellular networks with heterogeneous traffic. In: *IEEE 13th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Jinan, 2011. 357-361
- 10 Chen Y, Zhang S Q, Xu S G, et al. Fundamental tradeoffs on green wireless networks. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 30-37
- 11 Xu Z K, Yang C Y, Li G Y, et al. Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems. In: *IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, 2012. 1-6
- 12 Xu Z K, Yang C Y, Li G Y, et al. Energy-efficient power allocation between pilots and data symbols in downlink OFDMA systems. In: *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, Houston, 2011. 1-6
- 13 Gong J, Zhou S, Niu Z S. Queuing on energy-efficient wireless transmissions with adaptive modulation and coding. In: *IEEE International Conference on Communications*, Tokyo, 2011. 1-5
- 14 Niu Z S. Collaborative radio resource management for green. In: *Proceedings of IET International Conference on Wireless, Mobile, and Multimedia Networks (ICWMMN'10)*, 2010. keynote
- 15 Niu Z S, Wu Y Q, Gong J, et al. Cell zooming for cost-efficient green cellular networks. *IEEE Commun Mag*, 49: 74-79

- 16 Niu Z S, Zhou S, Hua Y, et al. Energy-aware network planning for wireless cellular system with inter-cell cooperation. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 1412–1423
- 17 Chen H, Zhang X, Wu Y, et al. Performance analysis of traffic behavior in base station network - from complex network's perspective. In: *Proceedings of IEEE Wirless Communication and Networking Conference (WCNC)*, 2011. 1068–1073
- 18 Zhang X, Huang Y, Wang W B. An energy-efficient opportunistic multicast scheduling based on superposition coding for mixed traffics in wireless networks. *EURASIP J Wirel Commun Netw*, 2012: 129
- 19 Huang Y, Wang W B, Zhang X, et al. An energy efficient multicast streaming transmission scheme with patching stream exploiting user behavior in wireless network. In: *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, 2012. 1–5
- 20 Chen P P, Zhong X F, Wang J. Soft real-time service and green communications. *J Univ Sci Technol China*, 2009, 10: 1016–1021 [陈萍萍, 钟晓峰, 王京. 软实时服务与绿色通信. *中国科学技术大学学报*, 2009, 10: 1016–1021]
- 21 Wang X L, Liu X, Niu Z S. On the design of relay caching in cellular networks for energy efficiency. In: *IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, 2011. 1–6

Energy efficiency and resource optimized hyper-cellular mobile communication system architecture and its technical challenges

NIU ZhiSheng*, ZHOU Sheng, ZHOU ShiDong, ZHONG XiaoFeng & WANG Jing

Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*E-mail: niuzhs@tsinghua.edu.cn

Abstract After developing for many decades, all kinds of information technologies gradually come across the bottlenecks of capacity and energy consumption, especially in the cellular mobile communication system, where it is a great challenge to increase the network capacity under the dual constraints of limited spectrum resources and energy consumption. It is far from enough by only improving the wireless transmission technologies and hardware implementation level, and we must investigate efficient mechanisms and methods of spectrum and energy utilization from the view of the whole system. This paper is intended for the development of future mobile communication technologies and the strategic requirements of energy saving, in which a novel framework of hyper-cellular system is proposed and the energy efficiency of the whole cellular network is optimized. By separating the coverage of control channel and data channel, the mechanisms of soft coverage, soft resource matching, and service on-demand are introduced, the energy efficiency and network resources are jointly optimized, and the urging requirements of broadband and large capacity in the next 10–20 years will be satisfied.

Keywords energy efficiency, spectrum efficiency, control channel, data channel, hyper-cellular network



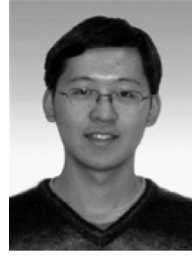
NIU ZhiSheng graduated from Northern Jiaotong University, in 1985, and got his M.E. and D.E. degrees from Toyohashi University of Technology, Japan, in 1989 and 1992, respectively. He was with Fujitsu Laboratories Ltd., Japan, during 1992–1994, and joined with Tsinghua University in 1994 where he is now a Professor at the Department of Electronic Engineering. His major research interests include queueing theory, traffic engineering, mobile

Internet, radio resource management of wireless networks, and green communication and networks. He is an editor of IEEE Wireless Communication Magazine, a distinguished lecturer of IEEE Communication Society, and the fellow of IEEE and IEICE.



ZHOU ShiDong received Ph.D. degree from Tsinghua University in 1998. He received his B.S. and M.S. degree from Southeast University, Nanjing in 1991 and 1994, respectively. From 1997, he worked as a Lecturer in Tsinghua University until he became an Associate Professor in 1999. From 2004, he has been working as a Professor in Tsinghua University. His current research interests include channel coding,

channel sounding and modeling, and adaptive transmission techniques. He is a co-author of more than 70 technical papers and 24 authorized patents.



ZHOU Sheng received his B.S. and Ph.D. degrees in Electronic Engineering from Tsinghua University, in 2005 and 2011, respectively. He is now a postdoctoral scholar in Department of Electronic Engineering at Tsinghua University, Beijing. From January to June 2010, he was a visiting student at Wireless System Lab, Electrical Engineering Department, Stanford University, CA, USA. His research interests

include cross-layer design for multiple antenna systems, cooperative transmission in cellular systems, and green wireless cellular communications.



ZHONG XiaoFeng received his Ph.D. degree in Information and Communication System from Tsinghua University in 2005. And he has been an Assistant Professor in Department of Electronic Engineering of Tsinghua University, where he focuses on the MAC and Network protocol design and resource management optimization for wireless ad hoc network, cooperation network and cognitive radio network. Prof. Zhong

has published more than 30 papers and owns 7 patents.