超蜂窝网络分离方案设计与软件定义实现

陈晟^{1,2*}, 李永康^{1,2}, 汪广超^{1,2}, 王刘猛^{1,2}, 姜之源^{1,2}, 周盛^{1,2}, 牛志升^{1,2}

1. 清华大学电子工程系, 北京 100084

2. 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: chen-s16@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017-02-15; 接受日期: 2017-03-21; 网络出版日期: 2017-05-08

国家重点基础研究发展计划(973)(批准号: 2012CB316000)和国家自然科学基金(批准号: 61461136004, 61571265, 91638204)资助项目

摘要 针对移动通信网络数据业务急速增长带来的频谱资源紧张和系统能耗增加的问题, 超蜂窝网络架构通过控制覆盖和业务覆盖的适度分离, 引入基站的动态休眠和资源调度, 从而大幅度提高网络的频谱效率和能量效率. 但如何在不破坏用户终端协议栈的前提下实现蜂窝网络控制覆盖和业务覆盖的分离, 是需要解决的问题. 本文分析了 GSM 系统和 LTE 系统的主要信令流程及协议架构, 提出了相应的超蜂窝网络设计方案, 核心思路都是通过逻辑信道的划分实现基站功能的分离, 进而实现控制覆盖和业务覆盖的分离. 借助软件无线电设备, 搭建了超蜂窝网络实验平台, 对上述分离方案进行了初步的验证. 本文还结合云计算技术和软件定义网络技术, 设计了软件定义超蜂窝架构, 并搭建了相应的云化超蜂窝网络演示平台.

关键词 超蜂窝网络, 控制与业务覆盖分离, 软件无线电, 软件定义网络, 网络功能虚拟化

1 引言

近年来, 随着智能移动设备的普及和高速数据业务的兴起, 移动通信网络的数据业务量正经历着爆炸式增长. 思科公司白皮书^[1]指出, 2016 年全球移动数据业务增长量达 63%, 移动视频业务占总数据业务的比重高达 60%. 该报告还预测到 2021 年, 人均移动设备持有量将达到 1.5 个, 移动网络的连接速度将有超过 3 倍的增长. 急速增长的用户数量和网络容量需求对现有移动网络来说是一个巨大挑战. 一方面, 移动通信的频谱资源和站址资源趋于饱和; 另一方面, 巨大的能量消耗也成为制约网络容量进一步增长的瓶颈. 统计数据表明, 2014 年我国通信行业能源消费总量累计 671.06 万吨标准煤, 其中电力消费总量达 456.2 亿千瓦时, 占能源消费总量的 83.55%¹⁾. 随着 4G 业务的进一步扩张, 运营商部署的基站数目逐渐增多, 移动通信网络能耗还将大幅增加.

1) Analysis of Energy Saving and Emission Reduction in Communication Industry in 2014. <http://www.chinabgao.com/freereport/65905.html>. 2015.

引用格式: 陈晟, 李永康, 汪广超, 等. 超蜂窝网络分离方案设计与软件定义实现. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 529–543, doi: 10.1360/N112017-00040
Chen S, Li Y K, Wang G C, et al. System design and software-defined implementation for hyper-cellular network (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 529–543, doi: 10.1360/N112017-00040

图 1 超蜂窝网络控制与业务覆盖分离示意图

Figure 1 Sketch map for the separation of control coverage and traffic coverage in hyper-cellular network

针对以上问题, 文献 [2] 提出超蜂窝网络架构, 旨在通过控制覆盖和业务覆盖的适度分离引入基站的动态休眠和资源调度, 从而实现能效与谱效的联合优化. 在超蜂窝网络架构中, 基站分为两类, 一类为控制基站 (control base station, CBS), 提供大范围的控制覆盖, 实现和用户终端间的控制信令传输; 另一类为业务基站 (traffic base station, TBS), 提供小范围的业务覆盖, 即为用户终端提供高速数据传输业务. 如图 1 所示, 同一个控制基站覆盖范围内有多个业务基站, 我们可以根据业务量的大小进行动态的资源调度和基站休眠, 从而降低系统能耗并提高资源利用率.

学术界和工业界对蜂窝网络控制与业务覆盖分离问题也有较多关注. 文献 [3] 从用户终端的状态入手, 提出按照网络功能对基站的控制和业务信令进行分离的方法, 进而降低系统能耗, 实现绿色通信. 但是该方案仅给出了概念性的划分方法, 没有分析具体的信令流程. 此外, 该方案中终端需要和控制基站及业务基站分别完成同步工作, 这和现有的商用终端并不兼容. 文献 [4] 提出由宏蜂窝和虚拟蜂窝组成的新型蜂窝网络架构, 该方案中宏蜂窝保留完整的基站功能, 工作在高频带的虚拟蜂窝仅负责高速数据业务. 该方案的出发点是提高网络容量, 但没有将能耗作为考量指标, 宏蜂窝不仅需要提供大范围的射频覆盖, 还需要保留数据业务. 此外, 该方案中宏蜂窝和虚拟蜂窝间需要低时延的高速数据传输, 在非理想回程条件下系统的稳定性有待加强. 文献 [5] 提出面向异构网络的双连接架构, 该架构中小基站可通过不同的信道状态信息参考信号进行区分, 进而实现小区重选和资源分配. 但是该文献对基站的信道接口和系统的信令流程没有作具体分析, 也没有利用硬件设备进行验证.

除了超蜂窝网络架构, 许多研究也从其他方面为无线网络的发展方向提供了参考. 其中, 有一大类研究提出利用云计算技术改造蜂窝网络架构. 以中国移动研究院提出的 C-RAN^[6] 为例, 基站的基带单元利用云计算平台集中池化, 前端天线侧只保留远端无线射频单元. 更进一步, 随着虚拟化技术的不断发展, 基带单元功能可以采用通用处理器 (general purpose processor, GPP) 平台上运行在虚拟机 (virtual machine, VM) 内的软件应用实现, 形成虚拟基站 (virtual base station, VBS). 值得注意的是, 基于基带单元集中池化的无线接入网虚拟化技术, 近几年也已经被认为是网络功能虚拟化 (network function virtualization NFV) 的一个重要应用^[7]. 另一部分研究提出将软件定义网络应用到无线网中, 通过集中化的控制器, 让地理区域的全局效用优化成为可能^[8].

面对这些无线网络发展的新趋势, 我们希望解决以下两个方面的问题: 首先是在保留对现有用户

表 1 GSM 和 GPRS 协议栈下基站信道划分
Table 1 Base station channel division scheme for GSM and GPRS system

Channel	TBS	CBS
BCH (FCCH, SCH, BCCH)		✓
CCCH (PCH, RACH, AGCH)		✓
PACCH	✓	
TCH		✓
PDTCH	✓	

终端 (user equipment, UE) 兼容性的前提下, 实现蜂窝网络控制覆盖和业务覆盖的分离; 其次是将控制和业务分离架构与云计算技术和软件定义网络技术结合, 完成超蜂窝网络的软件定义实现. 本文的组织结构如下: 第 2 节将分别介绍 GSM 和 LTE 系统空中接口的划分情况和分离后的信令流程. 第 3 节将介绍超蜂窝网络实验平台的搭建工作以及初步的验证结果. 第 4 节将介绍软件定义超蜂窝架构的系统设计和相应平台的实现工作.

2 超蜂窝网络覆盖分离方案

为了在蜂窝网络中实现控制覆盖和业务覆盖的分离, 同时保留对现有用户终端的兼容性, 我们需要解决下面几个问题. 首先, 需要对现有蜂窝网络的空中接口进行划分, 减少控制基站和业务基站间的干扰. 其次, 控制基站和业务基站间存在回程链路限制, 需要为两类基站设计有效的通信协议, 在保证系统正常工作的前提下尽可能减少基站间的信令开销. 最后, 需要分析分离后的信令流程, 保证对现有通信终端的兼容性. 下面将分别对 GSM 系统和 LTE 系统中的典型信令流程进行分析, 探讨控制基站和业务基站保留的功能, 以得到具体的空口分离方案.

2.1 面向 GSM 和 GPRS 系统的控制与业务分离方案

2.1.1 GSM 和 GPRS 协议栈下的基站信道划分

首先对分离后控制基站和业务基站的功能进行分析. 在第二代移动通信系统中, 基站的功能主要包括同步、广播、寻呼、低速率数据传输和高速率数据传输等. 在超蜂窝网络分离架构下, 业务基站仅提供高速的数据业务服务, 不需要同步、广播和寻呼功能, 因此将这 3 个功能划归控制基站. 业务基站不保留同步功能, 为了保证和终端的正常通信, 业务基站将先和控制基站同步, 进而实现和终端的间接同步. 我们还将包括通话业务在内的低速率业务划入控制基站, 以简化业务基站的功能, 同时提高业务基站的休眠概率. 在终端发送业务请求前, 终端和业务基站之间没有数据交互, 因此需要将高速数据通信的接入功能划入控制基站, 将高速数据通信的服务功能划入业务基站.

在 GSM 和 GPRS 系统中, 每条逻辑信道传输的控制信令和数据均可以找到特定的物理信道, 因此可以在物理层实现超蜂窝架构的信道划分. 根据控制基站和业务基站的功能划分, 本文对逻辑信道进行了划分, 如表 1 所示^[9]. 其中 BCH (broadcast channel) 是广播信道, 可以细分为频率校正信道 (frequency correction channel, FCCH)、同步信道 (synchronization channel, SCH) 和广播控制信道 (broadcast control channel, BCCH), 负责广播和同步功能, 因此该信道属于控制基站. 公共控制信道 (common control channel, CCCH) 可以细分为寻呼信道 (paging channel, PCH)、随机接入信道 (random access channel, RACH) 和允许接入信道 (access grant channel, AGCH), 主要完成寻呼和数据业务的接

图 2 GPRS 协议控制和业务分离后用户业务传输流程图
Figure 2 Flow chart of data service for GPRS system with separated architecture

入功能, 划入控制基站. 分组随路控制信道 (packet associated control channel, PACCH) 是分组数据传输的随路信道, 划入业务基站. 业务信道 (traffic channel, TCH) 是语音通信信道, 划入控制基站. 分组数据业务信道 (packet data traffic channel, PDTCH) 是数据包传输信道, 用于数据业务的传输, 划入业务基站. 分离后的用户业务流程如图 2 所示. 当用户要发起业务请求时, 用户向控制基站发出信道请求命令, 控制基站调度对应的业务基站对其进行服务. 选定业务基站后, 控制基站向该业务基站发起信道请求, 业务基站分配信道, 并将分配的信道信息发送给控制基站. 控制基站根据业务基站反馈的信道信息, 向用户下达立即指派命令, 用户按照此命令接入相应的信道. 最终用户和业务基站建立连接, 开始数据传输. 用户服务完毕后, 断开和业务基站的连接.

2.1.2 业务基站调度与休眠方案设计

在超蜂窝网络覆盖分离架构中, 控制基站汇聚了业务基站和终端的信息, 即具有覆盖范围内系统的全局信息. 基于该全局信息, 控制基站可以灵活的调度业务基站, 以改善终端的服务质量, 也可以根据网络的负载状况选择关闭部分业务基站, 以提高网络能效.

一个可能的调度方式是基于终端和业务基站之间的信道信息, 控制基站为业务基站选择信道状况最好的基站进行服务. 但在业务基站与终端建立连接前, 我们很难获得两者间的信道信息. 一个可行的解决方法是在信道请求中嵌入导频信息, 让业务基站监控信道请求并将计算得到的信道状况反馈给控制基站. 但是这种方法会破坏用户终端的透明性, 并且大量的信道状况信息会给 X2 接口带来很大的负担. 一个更实际的设计是基于业务负载的调度方法. 业务基站获取自身的业务负载信息, 汇聚到控制基站, 由控制基站实现业务基站间的负载均衡, 从而提高网络无线资源的利用率, 并降低用户的阻塞率^[10]. 图 3 给出了基于负载均衡的调度方案中的信令流程. 当有用户请求到达时, 控制基站计算各个业务基站的负载, 并选择一个低负载的业务基站作为新到达用户的服务基站.

控制与业务解耦后, 控制基站能保证全时全域的控制覆盖, 空闲的业务基站可以休眠. 控制基站具有网络的负载信息, 它可以决定哪一个业务基站在何时进入休眠状态. 文献 [11] 给出了一些基站休眠

图 3 业务基站调度的信令流程
Figure 3 Signaling procedure of scheduling TBS

策略, 在实际系统中, 控制基站可周期性根据业务负载状况和休眠算法决定其覆盖范围内业务基站的休眠和唤醒, 并通过后传网向业务基站发送相应的休眠或唤醒指令. 为了保证休眠的业务基站能够收到控制基站发送的唤醒指令, 我们为业务基站设计了休眠和唤醒模块, 该模块位于业务基站侧, 不随业务基站休眠而休眠. 该模块功能简单, 不会产生较大的能量开销.

2.2 面向 LTE 系统的控制与业务分离方案

接下来考虑 LTE 系统的控制与业务覆盖分离方案. 与 GSM 和 GPRS 系统相比, LTE 系统中的分离方案仅在协议架构和空口划分上有所不同, 业务基站的调度和休眠方案没有本质差别. 但是, 不同于 GPRS 系统物理信道和逻辑信道间单一的映射关系, LTE 系统的信道映射关系非常复杂, 我们无法在物理层实现控制和业务覆盖的完整分离, 因此我们需要让控制基站和业务基站分别保留不同的逻辑信道, 从而实现基站功能的分离. 下面将从 LTE 系统的信令流程出发, 分析 LTE 空中接口的划分方法.

2.2.1 LTE 系统超蜂窝网络信令流程分析

首先是小区同步流程. 终端通过接收基站广播的同步信号与基站完成时频同步, 获取基站的双工类型, 并对物理广播信道上的信息进行解码. 该流程属于控制覆盖, 因此控制基站保留同步信号 (synchronization signal, SS)、参考信号 (reference signal, RS) 和物理广播信道 (physical broadcast channel, PBCH). 业务基站关闭相应信号和广播控制逻辑信道 (BCCH), 利用 GPS 时钟等方法与控制基站保持同步, 这样终端和业务基站实现间接同步, 避免直接同步对终端协议栈的破坏.

其次是寻呼流程. 寻呼信令在寻呼控制信道 (paging control channel, PCCH) 上传输, 而网络的寻呼功能由控制基站负责, 因此控制基站保留寻呼控制信道, 业务基站关闭相应信道.

在 LTE 系统中, 用户终端通过随机接入流程和基站完成上行时频同步^[12]. 由于业务基站的休眠性, 我们需要让控制基站实现随机接入功能. 控制基站接收到 UE 发送的随机序列后, 为 UE 分配初始上行资源, 并通过下行共享信道 (physical downlink shared channel, PDSCH) 向 UE 发送随机接入响应. 业务基站本身与控制基站同步, 因此理论上无需保留随机接入的相关信道, 但是由于物理随机接入

图 4 分离架构下的 RRC 连接建立流程

Figure 4 RRC connection setup process under separated architecture

信道 (physical random access channel, PRACH) 与物理上行共享信道 (physical uplink shared channel, PUSCH) 复用相同的物理资源, 我们并不能删除业务基站与随机接入相关的物理信道, 只能禁用相应的逻辑信道.

RRC (radio resource control) 连接建立流程发生在 UE 接入基站后, 数据业务建立前. 在超蜂窝架构中, UE 通过公共控制信道 (common control channel, CCCH) 发起 RRC 连接建立请求后, 控制基站会选择最优的业务基站, 将 RRC 连接建立请求消息转发给该业务基站. 由于业务基站不保留参考信号, 所以无法直接获得终端和基站间信道信息, 一个可能的解决方案是采用信道学习的方法, 利用终端到控制基站的信道信息估算终端到业务基站的信道信息, 从而选择合适的业务基站^[13]. 业务基站将分配的时频资源等信息通过基站间的有线接口返回给控制基站, 再由控制基站转发给 UE. 最后, UE 直接通过专用控制信道 (dedicated control channel, DCCH) 向业务基站发送连接建立完成信息, 完成 RRC 连接建立流程. 根据上述分析, 控制基站需要保留公共控制逻辑信道, 可以关闭专用控制逻辑信道; 而业务基站需要保留专用控制信道, 可以关闭公共控制信道. 修改后的 RRC 连接建立流程如图 4 所示.

UE 与业务基站建立 RRC 连接后, 还需要触发与演进分组核心网 (evolved packet core, EPC) 的连接, 并建立相应的信令无线承载 (signaling radio bearer, SRB) 和数据无线承载 (data radio bearer, DRB), 才能进行数据业务的传输. 这是由业务基站在收到 RRC 连接建立完成信息后进行的, 与之相关的信道是专用控制信道和专用业务信道 (dedicated traffic channel, DTCH), 这两条逻辑信道可以在控制基站中关闭, 但需要在业务基站中得到保留.

综合上述分析, 我们得到超蜂窝网络终端从入网到建立端到端连接的完整流程. 终端通过接收来自控制基站的同步信号和参考信号, 读取物理广播信道信息, 再向控制基站发送随机接入请求. 控制基站会选择业务基站转发该请求信息, 并将来自业务基站的 RRC 连接建立消息转发给终端. 接下来终端将和业务基站建立 RRC 连接, 进行后续的鉴权和建立承载流程.

表 2 LTE 超蜂窝网络架构下基站信道划分方法
Table 2 Base station channel division scheme for LTE system

Logical channel	Physical channel	Functionality	CBS	TBS
—	PSS, SSS, RS	Synchronization and channel estimation	✓	
BCCH	PBCH, PDSCH	Broadcast system information	✓	
PCCH	PDSCH	Paging	✓	
—	PRACH	Random access	✓	
CCCH	PDSCH, PUSCH	Transmit SRB0	✓	
DCCH	PDSCH, PUSCH	Transmit SRB1, SRB2		✓
DTCH	PDSCH, PUSCH	Transmit user data		✓

图 5 超蜂窝网络 LTE 协议栈与信令数据流
Figure 5 LTE protocol stacks and signaling flow in HCN

2.2.2 LTE 超蜂窝网络信道划分和协议架构

根据前文对 LTE 超蜂窝网络信令流程的分析, 本文给出按照逻辑信道划分的 LTE 系统控制与业务覆盖分离方案, 如表 2 所示. 控制基站和业务基站通过划分不同的逻辑信道来保留对应的基站功能, 从而实现终端和基站间空中接口的分离, 而基站间的通信通过有线接口完成.

接下来考虑分离后 LTE 系统的协议架构, 分析结果如图 5 所示. LTE 系统的协议栈可分为控制平面和用户平面^[12]. 首先考虑 LTE 接入网侧, 由于控制基站不保留高速数据传输业务, 因此可以让控制基站仅保留控制平面, 不保留用户平面. 另一方面, 业务基站显然需要保留用户平面, 同时在我们的方案中信令承载仍然建立在业务基站上, 以减少基站间传输延时对用户服务质量造成的影响, 因此业务基站也需要保留控制平面, 同时关闭部分逻辑信道. 接下来考虑 S1 接口, 即基站和核心网间的连

图 6 (网络版彩图) GSM 和 GPRS 超蜂窝网络实验平台实物图
Figure 6 (Color online) Practicality picture of GSM and GPRS platform in HCN

接, 该接口同样也可分为控制平面和用户平面. S1 接口的控制平面是基站和移动性管理实体 (mobility management entity, MME) 间的接口 (S1-MME), 用户平面则是基站和服务网关间的接口 (S1-U). 因为业务基站的可休眠性, 寻呼等控制流程只能借助控制基站完成, 因此控制基站需要和 MME 保持连接, 同时又因为控制基站不进行高速数据业务, 所以可以不保留 S1-U 接口. 此外, 为了减少终端在业务基站间切换的延时, 我们不希望在该切换流程中引入核心网, 因此业务基站将仅保留和服务网关的接口, 和 MME 的通信将借助控制基站完成.

3 超蜂窝网络分离方案的平台验证

我们使用软件无线电设备对前述分离方案进行验证. 本节借助开源软件项目搭建超蜂窝网络实验平台, 对分离架构和基站调度进行初步验证.

3.1 面向 GSM 和 GPRS 的超蜂窝网络覆盖分离方案平台实现

首先搭建运行 GSM 和 GPRS 协议栈的超蜂窝网络实验平台, 如图 6 所示. 该平台由一个控制基站和两个业务基站组成, 每个基站由一台运行开源 GSM 协议栈 OpenBTS 2.8 的台式机和一台软件无线电设备 USRP N210 来实现. 基站和基站间、基站和 USRP 间通过千兆以太网交换机相连, 每台基站连接一根 GPS 天线作为参考时钟.

在实现控制和业务分离前, 我们首先实现了控制基站和业务基站间的同步. 业务基站休眠会导致两类基站启动时间不同, 因此设计了一种同步方案, 让业务基站在启动时向控制基站发送同步请求, 控制基站获取自身的系统时间发送给业务基站, 业务基站根据获得的同步信息初始化基站时间, 从而实现两个基站间的时间同步.

我们在实验平台上对提出的分离方案进行验证. 实验平台的控制基站收到分组数据请求时, 会将信道请求信息发送给业务基站, 业务基站为用户分配信道资源, 并通过控制基站发送给用户, 最终和用户建立数据连接. 目前, 我们的平台可支持商用终端的通话、短信息和访问互联网的功能, 从而证明了分离架构的可行性.

图 7 (a) 分离延时开销分布; (b) 业务基站开启时间分布; (c) 业务基站关闭时间分布

Figure 7 (a) Distribution of separation delay cost; (b) distribution of setup time; (c) distribution of close-down time

表 3 系统能耗对比 (单位: W)

Table 3 Comparison of system energy consumption (Unit: W)

Component	No sleep	Half sleep	Null sleep
PC	346	319	129
USRP	41.4	13.8	13.8
Switch	21	21	21
Total	408.4	344.8	163.8

控制基站和业务基站之间的信令交互会产生额外的时延, 引入延时开销, 因此我们在平台上对该延时开销进行测量, 其累积分布如图 7 所示. 实验平台的平均信令开销是 0.36 ms, 标准差是 0.1 ms, 该开销远小于信道请求的重传等待时间, 因此我们的分离方案不会对系统的服务质量产生较大影响.

我们还在平台上实现了前文提出的基站调度算法. 当业务请求到达时, 控制基站会在两台业务基站中选择业务负载较小的进行服务, 使两台业务基站的业务负载趋于均衡. 同时我们也在平台上实现了基于业务负载阈值的基站休眠算法, 控制基站根据总共的业务负载量控制业务基站的休眠和唤醒. 由于 USRP 的开启和关闭无法通过软件控制, 我们设计了休眠和唤醒模块, 通过控制 OpenBTS 的运行和关闭来实现基站的休眠和唤醒. 图 7 给出基站唤醒和休眠所需的时间. 业务基站的平均休眠时间是 52 ms, 平均开启时间是 8 s, 开启时间包括业务基站的初始化时间和与控制基站的同步时间.

由于缺乏测量措施, 我们使用成分分析法测试基站休眠的性能. 我们计算 PC 机、软件无线电设备和交换机的功率, 得到测试平台的总功耗, 结果如表 3 所示. 无基站休眠时, 总功耗是 408.4 W, 只关闭业务基站的 USRP 和 OpenBTS (半休眠) 时, 总功耗是 344.8 W, 可以节省 16% 的能耗. 如果关掉业务基站的 USRP 和台式机 (全休眠), 则总能耗只有 163.8 W, 可节省将近 60% 的能耗. 从结果可以看出, 基站休眠可以提供较大的节能增益.

3.2 面向 LTE 的超蜂窝网络覆盖分离方案平台实现

我们的分离方案主要体现在 LTE 空中接口部分, 因此考虑利用开源平台 OAI (open air interface) 搭建 LTE 接入网^[14]. 在一台 Ubuntu 机器上运行 OAI 基站程序, 另一台 Ubuntu 机器上运行 OAI 终端程序, 并通过 USRP B210 设备发送和接收射频信号. 软件终端完成同步、随机接入、建立 RRC 连接和 RRC 连接重配置等流程后, 能够与软件基站构成局域网, 进行数据传输业务. 以此为基础展开分离工作. 如图 8 所示, 希望软件终端可以先和控制基站连接, 再通过基站间的信令转发, 最终和业务基

图 8 LTE 超蜂窝网络演示平台系统架构

Figure 8 System architecture of LTE demonstration platform in HCN

图 9 (网络版彩图) LTE 超蜂窝网络演示平台实物图

Figure 9 (Color online) Practicality picture of LTE demonstration platform in HCN

站形成局域网, 并完成数据传输. 图 9 为实验平台的实物图.

我们搭建的 LTE 软件基站选择频分双工为双工方式, 运行频带为 band 7, 下行载波频点为 2680 MHz, 上行载波频点为 2560 MHz, 带宽为 5 MHz, 采用 normal CP 作为前缀方式. 为了实现控制基站和业务基站间同步, 一个基本前提是两者使用相同的时钟. 此处使用 Octoclock 时钟源为两个基站对应的 USRP 设备提供相同的时钟信号和参考信号, 并通过基站间的通信协议确保时钟同步和帧同步. 我们对 RRC 连接建立流程进行了修改, 实现了控制基站和业务基站间终端相关信息的转发. 基站间的信息通过 UDP 协议传输, 考虑到协议中 RRC 连接建立定时器 T300 的最小值为 100 ms, 分离架构所引入的传输延时可以忽略不计.

运行修改后的程序. 控制基站可以将 RRC 连接建立请求消息转发给业务基站, 并将业务基站提供的 RRC 连接建立消息发送给终端, 终端接收到该消息会返回 RRC 连接完成消息, 但业务基站无法接收到该消息. 分析上述问题的成因可能是业务基站和终端不同步. 事实上, 在 LTE 系统中, 不仅需要时钟同步和帧同步, 还需要保证载波同步. 我们的载波是利用锁相环生成的, 与设定的载波频率会产生一定的偏差. 在我们的测试中, 终端每次和基站完成同步后确定的频点都有所不同, 终端同步时需要在指定载波频点范围内进行搜索, 如果不进行频率搜索将无法完成同步或者随机接入流程. 综上,

终端和基站间需要严格的载波同步,但无法保证控制基站和业务基站间不存在频率偏差,所以也无法保证终端和业务基站间的载波同步,最终导致业务基站无法接收到终端的反馈消息.由于软件终端对于载波频偏的敏感程度相对较高,未来工作将考虑使用商用终端接入软件基站,并进行分离架构验证.

4 软件定义超蜂窝架构的设计与实现

前面章节考虑将无线接入网空中接口的信令与数据进行解耦,以实现系统的资源调度和基站的动态休眠,提高网络能效.但传统移动网络引入超蜂窝架构后,仍然面临扩展性不够好和资源利用不够充分的问题,这是基站的固定部署造成的.为了解决该问题,本文提出软件定义超蜂窝架构,下面将进行具体介绍.

4.1 软件定义超蜂窝架构

第 1 节提到,可以利用云计算技术将基带单元集中池化架构应用在无线接入网部分^[6],通过采用开放的 IT 平台取代专有硬件系统,进一步提升蜂窝系统的灵活性.基带单元集中池化可以节省站址并降低部署成本,还可以实现资源的统计复用以降低运营成本.这些优势已经在 C-RAN 的现网部署测试中得到了验证.

基于此,将云计算技术和虚拟化技术引入到分离架构中,提出软件定义超蜂窝架构 (software-defined hyper-cellular architecture, SDHCA)^[15].图 10 展示了 SDHCA 的主要特点.首先是控制和数据的分离,体现在以下 3 个层面:空中接口层面,控制基站与业务基站分别负责控制覆盖与业务覆盖;在物理设施层面,实现网络功能的软件与进行数据传输与转发的硬件得以分离;软件定义前传网络的控制平面与数据平面也被分离.其次,控制基站作为无线接入网控制器,管理其覆盖范围内的移动用户、业务基站以及前传网络.控制基站拥有覆盖范围接入网络的全局信息,可实现频谱、能量、基站等网络资源的全局优化,完成动态业务需求的弹性匹配.最后是虚拟化的软件定义网络功能.利用虚拟机中运行的软件应用,系统可实现空口控制、服务分析与聚合、基采样生成、前传网控制平面等诸多网络功能.

4.2 云化超蜂窝网络实验平台

基于上述架构,我们设计并搭建了云化超蜂窝网络实验平台,演示了容器中虚拟基站和虚拟核心网等概念.

图 11 展示了云化超蜂窝网络实验平台的系统架构,它由如下几个层次组成.首先是最底层硬件层,它由基于通用处理器的云计算服务器、远端无线射频单元以及前传网络设备(如光纤、交换机等)组成.此外,还可以使用通用接口(如 PCI express)连接硬件加速器,加速某些计算密集型任务(如无线协议物理层所需的 FFT、Turbo 译码等).在硬件层之上是操作系统层,宿主系统位于该层.更具体地说,这一层属于宿主系统的内核空间.宿主系统的内核(kernel)将硬件层的各种设备抽象成软件可用的源,并且提供上层虚拟化所需的原语与接口.再上一层是虚拟化层.我们把该层软件称为容器管理程序(container manager, CM),它基于操作系统层内核提供的原语,负责为上层应用提供虚拟环境(即容器),并管理容器的资源需求.具体地,它可以创建、销毁并更新容器,保证更新时的一致性,还会为容器中运行的各种应用程序动态地分配资源,实现资源的统计复用.系统最上层为应用层,由不同类型的应用程序构成,其中包括虚拟基站,它通过运行在容器中的软件应用实现各种基站功能.虚

图 10 (网络版彩图) 软件定义超蜂窝架构示意图 [15]

Figure 10 (Color online) Schematic diagram of software defined cellular architecture [15]

拟基站可以是已有蜂窝标准协议栈的实现, 也可以是包括控制基站和虚拟业务基站在内的新型基站. 蜂窝系统的核心网元也可以用虚拟化的软件应用实现, 即虚拟核心网 (virtual core network, VCN). 此外, 移动云端应用也可以在这一层创建, 为移动终端用户提供比传统的互联网云更好的服务质量.

在 3.1 小节工作的基础上搭建了云化超蜂窝网络实验平台, 该平台所用的主要软硬件如表 4 所示. 对照图 11 中的系统架构, 硬件层采用了 IBM x3650 服务器作为云计算服务器, USRP N210 作为远端无线射频单元, 以及一个千兆以太网交换机作为前传网络设备, 多个 USRP N210 之间的同步通过 GPS 校准晶振 (GPS-disciplined, oven-controlled oscillator, GPSDO) 实现. 操作系统层使用 Ubuntu 14.04.1 LTS 操作系统, 它搭载了 3.13.0-43-generic 版本 Linux 内核. 在虚拟化层, 我们基于 Docker 实现容器管理, Docker 通过 Linux 内核的 cgroups 接口实现动态的资源分配. 应用层主要用到了开源的 GSM/GPRS 软件平台 OpenBTS 和开源的 LTE 软件平台 OAI. 图 12 给出了平台的实物图.

我们成功地在通用处理器平台上的 Docker 容器中运行了 OpenBTS 虚拟基站, 同时演示了虚拟核心网的概念. 在最初的实现中, 包括鉴权、消息队列等进程与 OpenBTS 基站进程共享同一个容器, 不过这些非基站进程本质上属于核心网. 因此在后续实现中, 我们将它们从虚拟基站所在的容器中分离出来, 放到另一个容器中. 两种实现方案下, 演示系统都可以正常工作, 支持商用终端的接入、语音通话以及短消息收发. 我们还在容器中运行了 OAI 基站和 OAI 核心网, 完成了 LTE 商用终端在虚拟核心网上的注册.

图 11 云化超蜂窝网络演示平台系统架构^[16]
Figure 11 System architecture of cloud-based demonstration platform in HCN^[16]

图 12 (网络版彩图) 云化超蜂窝网络演示平台实物图
Figure 12 (Color online) Practicality picture of cloud-based demonstration platform in HCN

表 4 云化超蜂窝网络演示平台软硬件组成

Table 4 Software and hardware of cloud-based demonstration platform in HCN

Layer	Software / Hardware
Application	OpenBTS, Asterisk, OAI
Virtualization layer	Docker 1.2.0
Operating system layer	Ubuntu 14.04.1 LTS (Kernel 3.13.0-43-generic)
Hardware layer	USRP N210, IBM x3650

本文在搭建的实验平台上完成了分离可行性验证和负载均衡验证,并评估了基站休眠性能.本小节工作的结果和 3.1 小节类似,此处不再赘述.

5 结论

本文分析了蜂窝网络中控制与业务覆盖分离问题的难点,并对现有的信令与数据分离方案的优缺点进行总结,在此基础上从蜂窝网络的典型信令流程出发,提出面向 GSM 系统和面向 LTE 系统的超蜂窝网络控制与业务覆盖分离方案.两个方案的思路都是通过划分控制基站和业务基站的逻辑信道,实现基站功能的分离.我们还尝试使用软件无线电设备对上述方案进行验证.借助 OpenBTS 和 Open Air Interface 开源软件项目,我们分别搭建了面向 GSM 系统和面向 LTE 系统的超蜂窝网络演示平台,初步验证了分离机制的可行性和基站调度休眠机制的有效性.最后,结合云计算技术和软件定义网络技术,设计并实现了软件定义超蜂窝架构.

未来的工作有以下几个方向.首先,将尝试在 LTE 演示平台中引入核心网和商用终端,以获取更好的验证效果.其次,希望将网络功能虚拟化技术应用到云化超蜂窝网络平台,实现网络功能的动态

重构。最后, 软件定义前传网络的概念已被提出, 但在实现过程中面临着实时性和同步等方面的挑战, 有待进一步解决。

参考文献

- 1 Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016–2021. White Paper. 2017. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf>
- 2 Niu Z S, Zhou S, Zhou S D, et al. Energy efficeincy and resource optimized hyper-cellular mobile communiation system architecture and its technical challenges. *Sci Sin Inform*, 2012, 42: 1191–1203 [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: 1191–1203]
- 3 Xu X Q, He G N, Zhang S Q, et al. On functionality separation for green mobile networks: concept study over LTE. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 82–90
- 4 Kishiyama Y, Benjebbour A, Nakamura T, et al. Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems. *IEEE Wirel Commun*, 2013, 20: 12–18
- 5 Zakrzewska A, Lopez-perez D, Kucera S, et al. Dual connectivity in LTE HetNets with split control- and user-plane. In: *Proceedings of IEEE Globecom 2013 Workshop — Broadband Wireless Access*, Atlanta, 2013. 391–396
- 6 China Mobile. C-RAN: the road towards green RAN. White Paper, 2011, 2. http://labs.chinamobile.com/report/view_59826
- 7 Chiosi M, Clarke D, Willis P, et al. Network functions virtualisation: an introduction, benefits, enablers, challenges and call for action. In: *Proceedings of SDN and OpenFlow World Congress*, Darmstadt, 2012. 22–24
- 8 Gudipati A, Perry D, Li L E, et al. SoftRAN: software defined radio access network. In: *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN'13)*, Hong Kong, 2013. 25–30
- 9 Zhao T, Yang P K, Pan H M, et al. Software defined radio implementation of signaling splitting in hyper-cellular network. In: *Proceedings of the 2nd Workshop on Software Radio Implementation Forum*, Hong Kong, 2013. 81–84
- 10 Zhao T, Wang L M, Zheng X, et al. HyCell: enabling GREEN base station operations in software-defined radio access networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015
- 11 Wu J, Wu Y Q, Zhou S, et al. Traffic-aware power adaptation and base station sleep control for energy-delay tradeoffs in green cellular networks. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, 2012. 3171–3176
- 12 Holma H, Toskala A. *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011
- 13 Liu J, Deng R, Zhou S, et al. Seeing the unobservable: channel learning for wireless communication networks. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, 2015
- 14 Nikaein N, Marina M K, Manickam S, et al. OpenAirInterface: a flexible platform for 5G research. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2014, 44: 33–38
- 15 Zhou S, Zhao T, Niu Z S, et al. Software-defined hyper-cellular architecture for green and elastic wireless access. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 12–19
- 16 Zhao T. Energy efficient resource allocation of virtual base stations under cloud-based architecture. Dissertation for Master Degree. Beijing: Tsinghua University, 2015 [赵涛. 云架构下虚拟基站的高能效资源分配. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2015]

System design and software-defined implementation for hyper-cellular network

Sheng CHEN^{1,2*}, Yongkang LI^{1,2}, Guangchao WANG^{1,2}, Liumeng WANG^{1,2}, Zhiyuan JIANG^{1,2}, Sheng ZHOU^{1,2} & Zhisheng NIU^{1,2}

1. *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), Beijing 100084, China*

* Corresponding author. E-mail: chen-s16@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract The rapid growth of traffic data in mobile networks has led to a shortage in spectrum resources and a significant increase in energy consumption. In order to solve these problems, hyper-cellular networks provide dynamic sleep and resource scheduling schemes for base stations through careful separation of control coverage and traffic coverage, thus greatly improving network spectral and energy efficiency. However, how to separate network control coverage and traffic coverage without destroying existing terminal protocol stacks is a problem that still needs to be solved. We analyze the signaling flow and protocol architecture of GSM and LTE systems, and then propose a separation scheme for these systems in a hyper-cellular architecture. The basic idea is to accomplish the separation of base station functionality by dividing the logical channel, thus achieving separation of control coverage and traffic coverage. With the aid of software radio equipment, we build an experimental platform to verify the proposed solutions. Combined with other technologies such as cloud radio access networks and Software Defined Networks, we propose a software-defined hyper cellular architecture and create a cloud-based demonstration platform.

Keywords hyper-cellular network, split control and traffic coverage, software radio, software defined network, network function virtualization

Sheng CHEN was born in 1995. He received his Bachelor's degree from Tsinghua University, Beijing, in 2016. He is currently studying at Tsinghua University for a Ph.D. degree. His research interests include software defined radio and wireless communications.

Yongkang LI was born in 1993. He received his Bachelor's degree from Beijing Jiaotong University in 2015. He is currently studying at Tsinghua University for a Master's degree. His research interests include software defined networks and network function virtualization.

Guangchao WANG was born in 1992. He received his Bachelor's degree from Beijing Jiaotong University in 2015. He is currently studying at Tsinghua University for a Ph.D. degree. His research interests include network reconfiguration and vehicular networks.

Liumeng WANG was born in 1991. He received his Bachelor's degree from Tsinghua University, Beijing, in 2014. He is currently studying at Tsinghua University for a Ph.D. degree. His research interests include cloud radio access networks and network function splitting.