



协同异构蜂窝层叠网络基础理论与关键技术^{*}

周明昕, 许晨, 杨坤, 余扬, 赵凯飞, 宋令阳

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘要: 从基础理论和关键技术两方面的研究进展与相关成果介绍首届国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 青年科学家专题项目——协同异构蜂窝层叠网络基础理论与关键技术。其中, 基础理论包括协同异构蜂窝层叠网络的体系架构、信道建模、网络容量域、连接性等问题; 关键技术包括协同异构蜂窝层叠网络的干扰管理、资源分配、空白频谱检测与利用等。研究表明, 协同异构蜂窝层叠网络下的 D2D (device-to-device) 通信由于其具有能够进一步增大频谱利用效率、提升系统容量等优点, 将发展成为下一代蜂窝网络支持的关键技术。

关键词: 协同异构蜂窝层叠网络; D2D 通信; 干扰管理; 无线资源分配

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.04.006

Collaborative Heterogeneous Underlying Cellular Networks: Fundamental Theories and Key Technologies

Zhou Mingxin, Xu Chen, Yang Kun, Yu Yang, Zhao Kaifei, Song Lingyang

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The research progress and contributions about the fundamental theories and key technologies of collaborative heterogeneous underlying cellular networks were introduced. The fundamental theories include the architecture, capacity region, connectivity problem of the collaborative heterogeneous underlying networks, while the key technologies consist of interference management, wireless resource management, and exploration and utilization of vacant radio-frequency spectrum. The current study shows that D2D communication in collaborative heterogeneous underlying cellular networks will become the key technology in the next-generation cellular communication systems because it can further improve the spectrum efficiency and system capacity in wireless communication networks.

Key words: collaborative heterogeneous underlying cellular network, D2D communication, interference management, wireless resource management

1 引言

无线网络技术高速发展导致许多新型的无线异构网络出现。如图 1 所示, 以 TDMA 为多址接入主要技术的第二代移动通信系统 (2G) 已经成熟, 以 CDMA 为物理层核心技术的第三代移动通信系统 (3G) 已经全面部署, 以

OFDMA 为多址接入的主要技术, 以 LTE 及 LTE-Advanced 为代表的第四代移动通信系统 (4G) 发展在稳步推进^[1]。显而易见, 多网共存的局面已经基本形成。各种新型增值数据业务如高速数据、流媒体等需求的不断增长, 给无线通信的发展带来了机遇, 也带来了前所未有的挑战。人们逐步认识到, 已有的和即将推出的系统在无线资源综合优化

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 青年科学家专题基金资助项目 (No.2013CB336700)

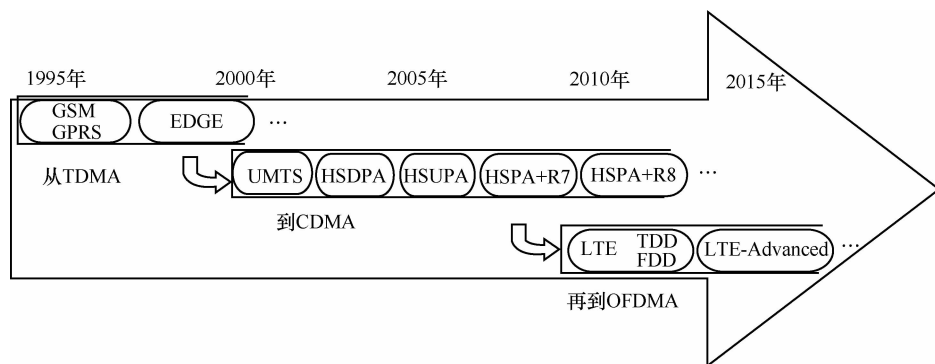


图1 无线通信发展历程

利用等方面存在局限性,不能很好地解决有限的频谱资源与迅速增长的业务需求之间的矛盾,由此产生的无线通信瓶颈问题日益突出。

尽管以无线 IEEE 802 协议为基础的无线局域自组织网络得到了广泛的发展,信息局部高效率流通问题得以解决,但是由于其使用非授权频谱,因此无法保证用户服务质量(QoS)^[2]。简而言之,未来移动通信网络的发展将会遇到两个显著的瓶颈问题:

- 数据流量需求大规模提升,但是无线网络带宽无法满足这种需求;
- 移动互联网和社会网络兴起,信息流向会呈现热点区域的局域化特点,但是现有的网络技术无法保证服务质量。

导致“瓶颈”问题的主要原因是当今的移动网络主要是以固定基础设施(例如基站)为“通信核心”,即接入点与终端间通信。如图2所示,根据香农定理,由于“固定基础设施数量以及接入信道”的限制,进一步开展容量提升研究的空间微乎其微,从而造成了网络容量的局限性,难以

支持井喷式增长的数据业务需求。但是,一方面,终端数量是巨大的,传统通信方式忽略了终端侧的充分连接,为满足不断增长的数据流量需求,解决无线通信瓶颈问题,异构层叠网络研究需要进一步突破原有的通信体系架构,提高无线频谱资源利用的有效性;另一方面,学术界和产业

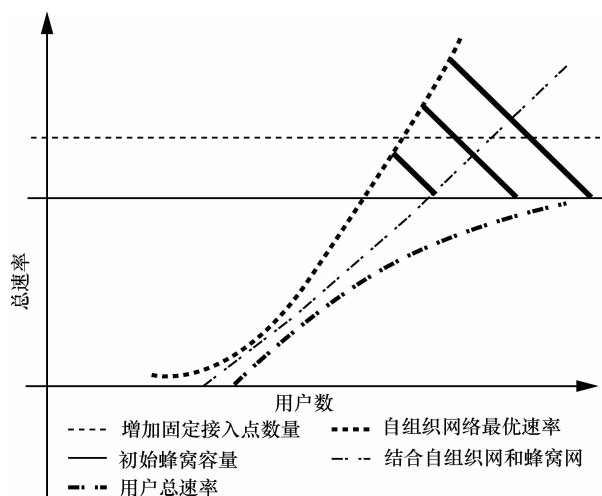


图2 网络容量

首席科学家

宋令阳 男,北京大学“百人计划”研究员、博士生导师,英国约克大学博士、挪威奥斯陆大学和美国哈佛大学博士后,2008-2009 年任英国飞利浦研究院高级研究员,2013 年国家重点基础研究发展计划(“973”计划)青年科学家专题项目(首届青年专题项目)首席科学家,获得 IEEE 通信学会亚太区杰出青年研究奖、国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金(首届)、北京市科技新星称号、北京市五四青年奖章。主要研究方向为多天线、协作通信以及同构和异构网络。

近 5 年,共发表 SCI 收录文章 50 余篇,授权国际专利 5 项,申请国内专利 22 项,出版 4 部英文著作,论文成果引用累计近 1 000 次,获得 5 个国际学术会议的最佳论文奖,担任 3 个顶级学术期刊编委。其中,“小区内多点协作技术”转化为国际专利,并成为第四代移动通信标准的重要内容。

界已经发现协同异构蜂窝层叠网络可以大大提升无线频谱利用率。近年来,在异构网络中异构层叠的概念已经在基站侧得到了广泛的应用,例如宏小区、微小区、家庭基站等网络的同频融合的实现,成为异构网络资源优化的有效手段^[1,3]。关于终端通信方面,2009年诺基亚公司提出了两个D2D(device-to-device)的方法,为面向多终端层叠网络的发展提供了参考依据^[5,6],而2011年高通公司提出将D2D技术在3GPP会议中立项也彰显了此研究工作的重要性^[7]。

另外,经过多年的研究与发展,资源协同的概念已经深入渗透到无线通信的新技术研究中,如空时频编码探索了空间、时间、频率三域协同,取得了有意义的理论成果;MIMO-OFDM融合了多天线和OFDM抗多径能力,成为无线环境下提高频谱效率的有效手段^[4]。MIMO-OFDMA系统中资源协同和跨层优化已经广泛采用,基于多载波/多天线宽带无线网络已经向着多射频多信道的复杂系统发展^[4],其突出特征就是无线资源的多域性,即无线网络资源可分别从时间域(时隙)、频率域(子载波)、空间域(天线)、功率域(功率)、用户域(多用户)及网络域(多网络)进行调度与控制的特点实现多域协同优化。

可以看出,上述传统的多域协同优化忽略了终端侧的充分连接,通过在传统蜂窝网络中引入D2D通信,将其作为蜂窝移动通信系统的下层进行工作,可与宏小区、微小区、家庭基站等异构层叠蜂窝网络使用相同的频谱资源,以提高系统吞吐量^[3,8,9]。采用蜂窝网频段,从通信发起时到连接建立后,D2D设备间通信始终受基站控制,以保持处于网络受控的状态,随时可进入蜂窝通信模式。基站作为蜂窝链路和D2D链路的资源控制中心,可同时对D2D发射端的传输参数(例如发射功率和通信时长)设置约束,限

制其对蜂窝接收端造成的同频干扰。

然而,现有关于D2D的层叠网络研究都刚刚起步,并没有考虑局域网的架构,大多基于无线资源的简单分割,或者是技术方案的简单叠加,对于如何有效地加入现有移动蜂窝网络,提高频谱资源利用的有效性和网络无缝性仍然是当前宽带无线通信发展所迫切需要解决的问题。

本文主要介绍本项目在协同异构蜂窝层叠网络的基础理论和关键技术方面的相关研究成果。

2 协同异构蜂窝层叠网络的基础理论

为了实现D2D-LAN(device to device local area network)技术的核心目标,即采取网络优化、信息处理等手段,填补从物理层、媒体访问控制(media access control,MAC)层、网络层到应用层的理论与实际之间的空白,设计无线蜂窝网络的架构和协议,解决数据流量激增问题。现阶段已经出现了关于D2D-LAN的基础理论研究成果。

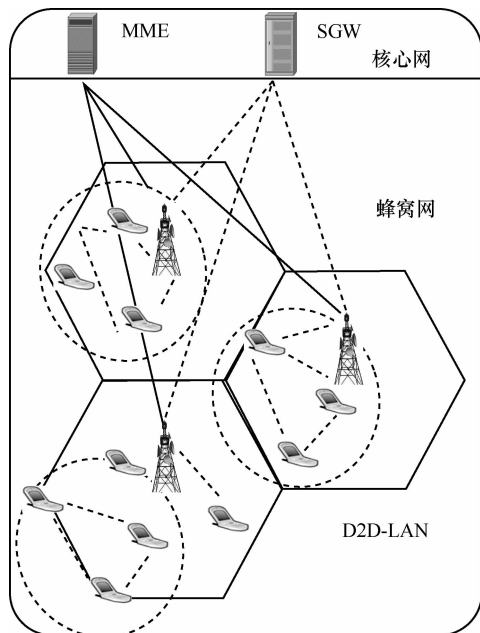
2.1 协同异构蜂窝层叠网络的体系架构

以动态层叠为特点的未来蜂窝网络体系结构是异构无线网络发展的关键问题,可以为面向多用户、多业务、高数据流量的发展和实现空间、频率、时间、功率、终端等资源综合利用,增加基于授权频谱通信的D2D通信,构建支持高效动态组网、资源协同利用及网络无缝配合的蜂窝局域层叠通信体系框架,研究信息容量限、自由度等网络要素之间的相互关系,支持并推动基础理论与应用的发展等需求提供办法。如图3所示为D2D-LAN系统的主要架构。在TDD(time division duplex,时分双工)系统中,D2D用户发送和接收信号时在不同的时隙均使用相同的频段。现有研究主要针对以下几个方面:D2D和蜂窝网络之间的互联

项目简介

协同异构蜂窝层叠网络的3个关键科学问题为:新型的异构动态拓扑层叠网络体系框架理论;高效无线网络传输机理与抗干扰理论;网络资源跨层优化机理与节能方法。

“973”计划“协同异构蜂窝层叠网络基础理论与关键技术”项目面向国家在信息领域方面的重大需求,主要针对“智能协同网络理论研究”方向中的异构网络资源认知和协同调度方法、动态适配机制以及跨网资源高效利用等方面开展深入研究,通过引入终端直通层,创建新型的异构蜂窝层叠通信体系框架,通过合理地利用包括空间、频率、时间、信号、功率、终端、网络等资源最大限度地提高频谱效率和资源共享系统容量,重点研究逼近性能容量限的网络传输机理与干扰应对策略以及跨层资源高效共享机理和节能方法,在此基础上构建适应未来高数据流量的无线通信基础理论与技术新体系。



(a)系统模型

系统配置	
频率	授权
系统	时分双工
网络	蜂窝网和D2D-LAN
UE通信模式	蜂窝和D2D
拓扑结构	多小区
控制	核心网、eNB和移动终端

(b)配置

图3 D2D-LAN的系统模型和配置

普遍认为,无线网络编码是一种有效提升网络性能(主要是频谱效率)的方法。在对传统蜂窝网络不构成严重干扰的前提下,如何实现D2D网络中有效的数据传播成为实现D2D通信技术的阻碍之一。在新的场景中,功率控制、合作传输、多址接入等技术都需要进行进一步的研究。

D2D通信的引入使得正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)的网络优化问题变得更为复杂。由于多对D2D用户可与蜂窝用户同时存在,在这样的情况下,如何有效协调空间、时间、频率、功率和设备之间的关系显得尤为重要。此外,D2D通信面临的其他挑战还包括:有效服务的识别、D2D链路的无限资源分配和管理、自组织D2D链路、基于位置靠近的网络卸载以及D2D通信的容量和性能评估等。最后,无线社交网络、车载自组网或机器类型通信等许多基于D2D技术的应用也有深入研究的价值。

2.2 协同异构蜂窝层叠网络信道和干扰建模

任何通信系统的成功设计都需要精确且易于使用的信道模型,新兴的D2D-LAN通信系统也不例外。然而不同于传统的蜂窝通信系统,D2D-LAN通信系统的收发端高度都比较低,而且通信距离比较短,一般是在干扰受限的情况下工作。因而,现有的很多信道模型,甚至建模方法都不能直接应用于D2D信道建模。新颖的D2D信道建模方法和模型,受到越来越多的重视,也成为D2D通信系统快速和成功设计的关键一步和基石。

作为新兴的通信模式,D2D的信道测量和建模还处在非常初级的阶段。目前来说,学术界和工业界公认的观点是,D2D的信道模型可以通过选取合适的通信场景,将以前给出的针对蜂窝通信系统的经典模型,结合D2D通信

组网、运营商控制整个网络的方法以及模式转换、设备发现、同步、移动管理、安全等^[9,10]。

学术团队

“973”计划“协同异构蜂窝层叠网络基础理论与关键技术”项目由北京大学牵头,主要承担单位包括深圳大学、香港中文大学深圳研究院。围绕3个关键科学问题,本项目分为以下6个子课题。

课题一:异构层叠网络体系框架理论。承担单位为北京大学,负责人为宋令阳。主要研究内容包括:蜂窝异构层叠网络体系结构设计;满足层叠结构的协议原型设计;基于认知的动态无缝自组织网络研究。

课题二:层叠网络信道特性及干扰建模。承担单位为北京大学,负责人为程翔。主要研究内容包括:直通信道的非平稳特性以及深衰落研究;协同直通信道之间的空间相关特性研究;层叠网络干扰建模研究。

程翔,博士,英国赫瑞-瓦特大学和爱丁堡大学博士后,北京大学信息科学技术学院副教授。主要研究方向为无线信道的建模及仿真、车载通信网络技术、绿色通信技术、协同MIMO通信技术、第四代(4G)及超四代(B4G)移动通信技术等。

的特点,稍作修改后得到。比如,利用经典的 Rayleigh 模型、SCM 模型和 Winner II 模型等,稍作修改便应用到 D2D 的通信信道建模中。作为 D2D 通信系统研究的初期阶段,为了尽快得到较为精确的信道模型,方便 D2D 通信系统的初步设计和对比,上述观点和方法是正确的。但是,随着 D2D 通信系统的深入研究和设计,如何合理且全面地挖掘 D2D 通信信道的特性,结合 D2D 通信的特点进行更合理的建模,便成为一个急需攻克的难题。

由于 D2D 通信不同的研究方向,所需要的模型要求不同,例如理论分析需要尽量简单且易于分析的模型,而对于实际系统设计,需要设计出参数较多、更能反映实际情况的 D2D 信道模型,所以考虑了以下 3 种 D2D 信道模型。

(1)经典的抽头延迟线(TDL)建模方法生成了基于TDL的 D2D 信道模型,如图 4 所示,主要为了支持 D2D 通信系统资源配置和管理方面的工作。

(2)基于几何的统计建模方法生成了基于几何统计的 D2D 信道模型,如图 5 所示,主要为了支持 D2D 通信系统容量分析和物理层设计方面的工作。

(3)基于参数的统计建模方法,如图 6 所示,生成了基于参数统计的 D2D 信道模型,主要为了支持 D2D 通信系统平台搭建和性能分析方面的工作。

基于上面的工作,在全面梳理和分析现有建模方法和模型的基础之上,发现利用现有建模方法和模型生成的 D2D 信道模型都无法很好地呈现出 D2D 通信系统的特有性质。考虑到 D2D 通信系统收发端高度比较低、通信距离较近等特点以及 D2D 通信系统的复杂移动环境和协同设备(蜂窝网中的基站)周围环境所呈现出的互异性(non-homogeneous),D2D 通信信道往往呈现出较明显的非

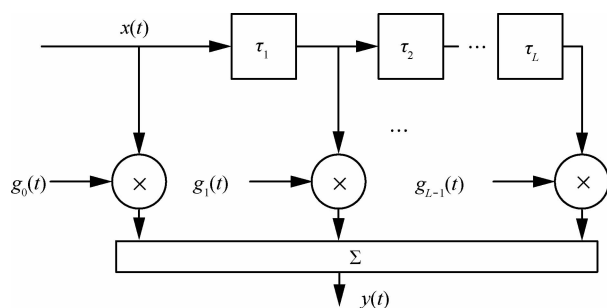


图4 基于TDL的D2D信道模型

线性。尝试提出一种新颖的信道建模方法,可以很好地捕捉到上述特性。为此,参考文献[11]引入 α - μ 分布来建模呈现非线性传播环境的直通信道的深衰落特性,以几何统计建模方法为主,结合参数统计建模参数化和系统化的优点,直接针对散射体建模,并考虑散射体和收发端移动轨迹,可以得到一种新颖的几何—参数统计建模方法^[11]。

2.3 协同异构蜂窝层叠网络的网络容量研究

无线自组织网络的容量一直是人们关心的重要问题,2000年,美国UIUC的Kumar教授开创了大规模无线网络容量研究的先河,提出了网络信息论的研究框架,为更好地研究大规模无线网络的容量提供了基础。针对不同的应用场景和物理层假设,大规模网络的容量有待人们的深入分析。

以前的无线自组织网络的网络容量研究主要集中在对于理想传输模型的研究上,即假设当接收节点的信干噪比(SINR)大于某一界限时,接收节点可以无错地接收信号。参考文献[12]考虑了更为实际的传输模型,考虑了非零的错误概率,分析了具有传输不确定性的无线自组织网络多播容量。通过考虑节点多跳传输时接收(中继)节点的接收错误概率,分析其对大规模网络的多播吞吐量的影响。

学术团队

课题三:异构层叠网络的信息论容量域。承担单位为香港中文大学深圳研究院,负责人为陈名华。主要研究内容包括:蜂窝异构层叠网络的信息论容量区间;多用户协议以及有限反馈的容量;基于物理层抽象的大规模网络容量以及传输时延机理。

陈名华,博士,美国微软研究院博士后,香港中文大学深圳研究院研究员、香港中文大学副教授,主要研究方向为网络信息理论、网络编码和数据挖掘。

课题四:网络适配的信号传输机理与处理方法。承担单位为深圳大学,负责人为张胜利。主要研究内容包括:发送机协同传输理论与方法;面向动态拓扑结构的路由优化算法以及数据传播;基于物理层网络编码的干扰利用理论与方法。

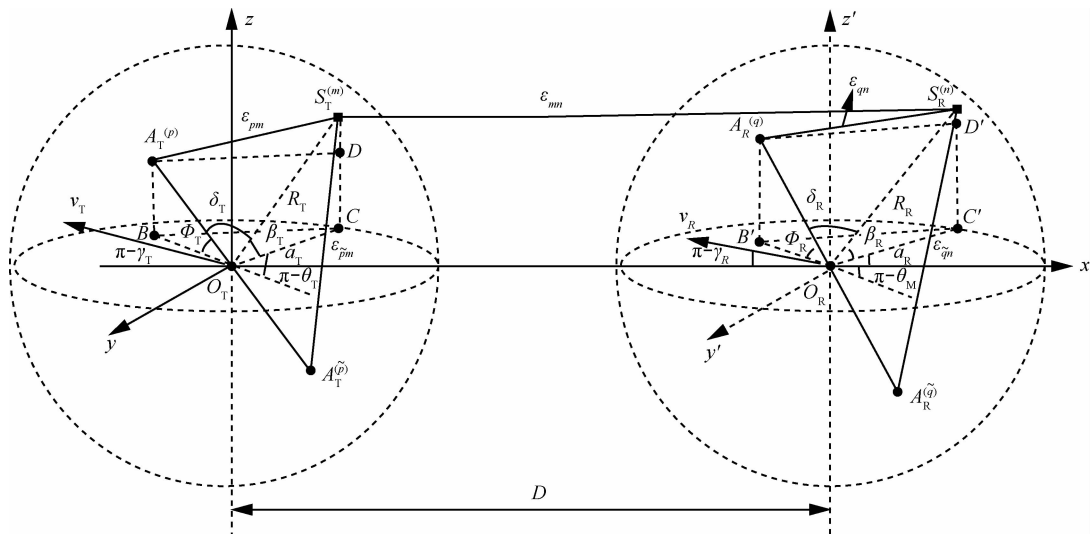


图5 基于几何统计的 D2D 信道模型

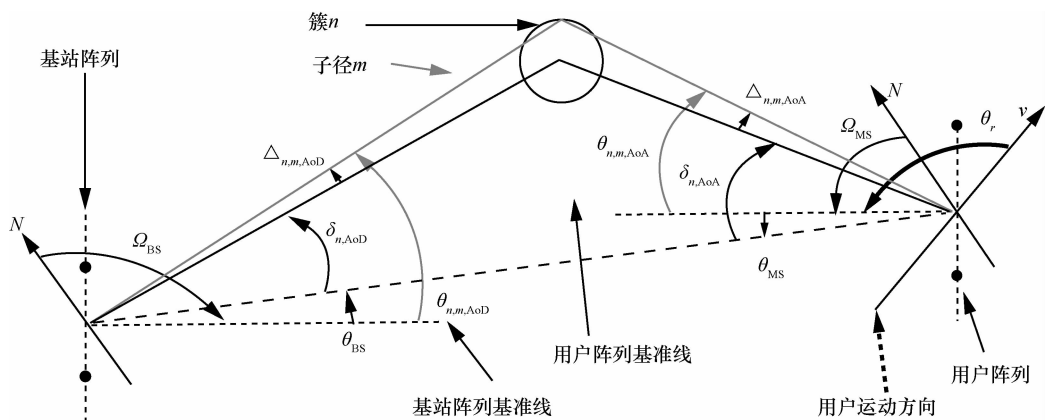


图6 基于参数统计的 D2D 信道模型

从理论上可以证明,非零的接收概率对网络的吞吐量具有积累效果,从而会影响网络的总体容量,进而,给出了一种新的调度策略克服这一影响,提高网络的多播吞吐量容量。

2.4 协同异构蜂窝层叠网络的连接性问题

在多跳环境下,任意两个 D2D 用户间存在一条可用于通信的多跳路径的概率是一个值得深入研究的问题。此项研

学术团队

张胜利,博士,深圳大学副教授,2009 年获深圳市高层次专业人才、地方级领军人物称号,主要研究方向为物理层网络编码、信息论、信道编码、无线局域网、协作通信等。

课题五:异构层叠网络跨层资源管理和优化机制。承担单位为香港中文大学深圳研究院,负责人为张颖珩。主要研究内容包括:支持层叠网络的协同资源分配和用户调度;面向多播和广播服务的有效资源分配研究;节能双跳蜂窝层叠网络资源分配研究。

张颖珩,博士,香港中文大学深圳研究院研究员、香港中文大学副教授,主要研究方向为资源分配和认知无线电。

课题六:协同异构层叠网络演示验证平台与建设。承担单位为北京大学,负责人为宋令阳。主要研究内容包括:验证动态拓扑层叠环境下协同传输的原理和方法;验证跨层资源优化机理和节能方法;验证与分析网络功能和性能,评估层叠结构对流量的影响。

究有利于了解在蜂窝系统中采用多跳 D2D 网络的可行性,同时亦对于维持网络连接性的功率控制提供了理论基础。

考虑图 7 中蜂窝系统和 D2D 网络共存的场景。圆心为蜂窝网基站, a 是小区半径。介于 D2D 传输对蜂窝系统造成的干扰,靠近基站的灰色区域内不能有 D2D 用户活跃。此区域半径 b 取决于基站的抗干扰能力和 D2D 用户的传输功率。另外, D2D 传输功率还直接决定了 D2D 用户的传输范围。

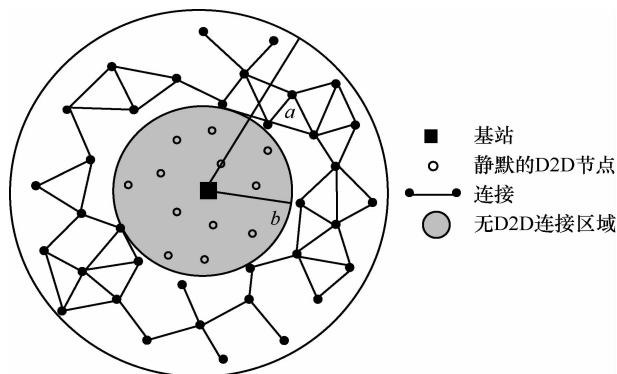


图 7 D2D 网络连接性问题

研究表明^[13], D2D 网络连接性和用户密度以及 $(a-b)/r_0$ 存在直接关系。图 8 显示, 当 $(a-b)/r_0 > 2$ 时, 网络连接性较强, 并且主要由用户密度 λ 决定, 与 $(a-b)/r_0$ 的具体取值关系不大; 相反, 当 $(a-b)/r_0 < 2$ 时, 网络连接性较弱, 并且随着 $(a-b)/r_0$ 取值的下降急速变差。

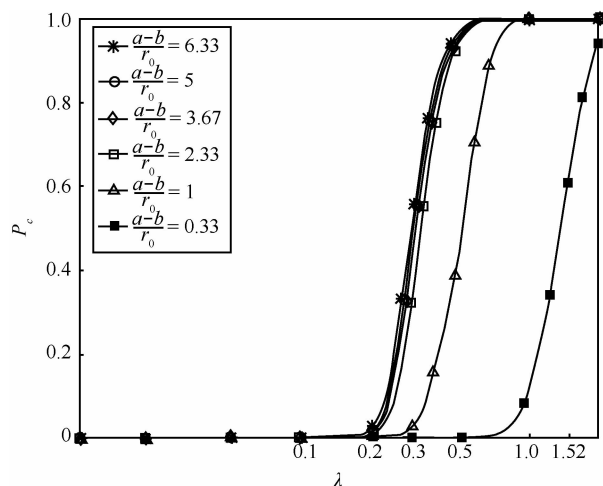


图 8 D2D 网络连接性与用户密度的关系

3 协同异构蜂窝层叠网络的关键技术

为了确保和已存在的蜂窝网络达成互通性, D2D-LAN 将面临亟待解决的重要问题, 比如 D2D 用户和蜂窝用户

之间的干扰管理、频谱资源分配等问题。下面给出这些重要问题的一些关键技术手段。

3.1 协同异构蜂窝层叠网络的干扰管理

3.1.1 干扰分析

在 D2D-LAN 系统中, 由于有频率复用和设备聚集的情况, D2D 网络在向用户提供覆盖服务的同时, 也辐射到邻近的移动用户, 带来不可避免的信号干扰。因此, 干扰信号的处理与协调是 D2D 系统的一个关键问题。根据系统中的具体干扰信号的特点, 可以将干扰分为 3 种: 相对干扰、已知干扰和其他干扰, 如图 9 所示。存在 3 种相应的干扰处理方案: 干扰利用、干扰消除与干扰抑制。由基站实时监测这 3 种情况, 并协调各个节点采用相应的传输方式与干扰处理方案。

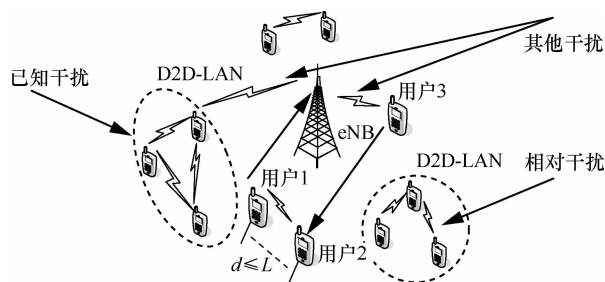


图 9 D2D 系统的干扰分类

3.1.2 干扰管理

(1) 干扰利用

如图 10 所示, 如果节点 A、B、C 处于非常接近的位置, 并且 A、C 希望通过 B 传输信号。在此情况下, 基站可以控制节点 A、B、C 采用物理层网络编码的传输方法, 利用干扰信号的叠加, 提高频谱效率。

针对此情况, 参考文献[14]提出一种新的物理层网络编码算法——信道采样物理层网络编码。该算法实现简单, 仅需要符号级时间同步和接收端信道信息, 算法复杂度与 VBLAST 算法相同。如果中继有 K 根天线, 两端有 1 根天线, 该算法可以得到理论上的最大分级增益 K , 并且该算法具有天然的安全性。

(2) 干扰消除

对于非双向传输, 干扰利用算法就不再适用。但是 D2D 系统中有一个特点, 就是节点聚集, 只有当节点非常接近的时候, 才适合用 D2D。此时, 当一个节点传输的时候, 信号通常会被其他节点监听到, 当此信号再次被发送时, 即成为一支干扰。但是由于节点聚集, 干扰的功率通常

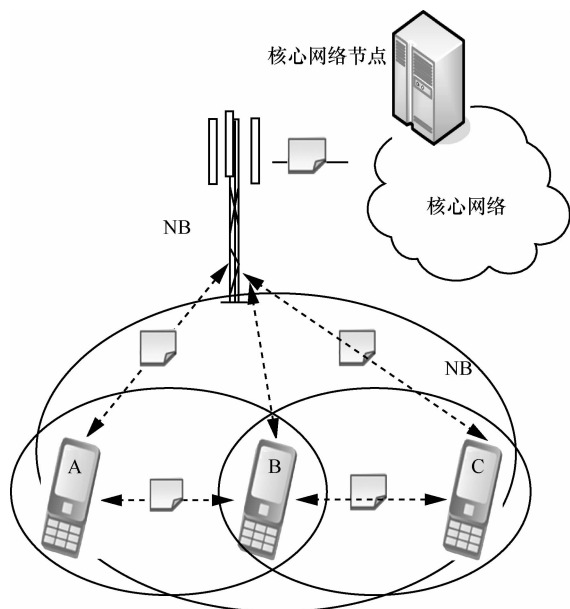


图 10 双向中继中的相对干扰

很大,普通的干扰消除算法不适用。因此可以从抽象出已知干扰信道,并对此信道做深入研究。

已知干扰信道模型如图 11 所示,即干扰数据已知,干扰信道未知的点对点传输信道。对该类信道,传统的做法是利用已知干扰信号估计信道系数,然后将此干扰减掉再检测目标信号。从信息论的角度,首先得到一个已知干扰信道的信道容量上界 $(1-1/K)\log(1+\frac{P_s}{\sigma^2}+\log(1+\frac{P_s}{\sigma^2+cP_i}))$, 其中, c 是一个给定常数, K 是数据分组的长度。而最近参考文献[15]提出了一种已知干扰消除算法 BKIC(blind known interference cancellation), 该算法可以达到的传输速率为 $(1-1/K)\log(1+\frac{P_s}{\sigma^2})$ 。在高信噪比区间或者大数据分组长度的时候,该可达速率无限接近上界。

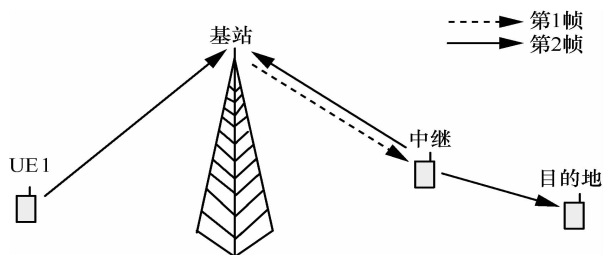


图 11 已知干扰信道

图 12 给出了不同信号功率下,传统算法和 BKIC 算法的可达容量。可以看到,传统算法的可达容量由于残留干扰的原因,很快就饱和了;而 BKIC 算法,其可达容量随着发送功率会一直增加。

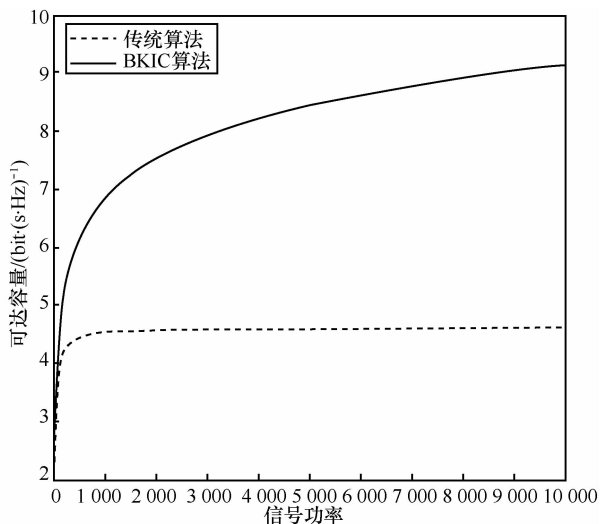


图 12 传统算法和 BKIC 算法的可达容量

(3) 干扰抑制

对于 D2D 系统中不能利用也不是已知的干扰,通常只能采取功率控制的方法。由基站计算各个节点的发送功率,从而保证整个小区所有节点都可以正确传输。

针对两条 D2D 链路情况,考虑这两条链路之间互相干扰及对基站的干扰,应用基站的功率控制算法。D2D 接收端可以使用高级干扰处理算法,比如串行干扰消除(SIC)等来提高性能,从而得出新的干扰控制结果。在 D2D 通信中,可以证明该算法可以接近理论上系统最大效用的上界。

3.2 协同异构蜂窝层叠网络的资源分配

3.2.1 频谱分配方式

频谱分配主要分为机会式(overlay)和覆盖式(underlay)两种方式。

在机会式频谱分配下,注册频谱的一部分被蜂窝用户占用,另一部分由 D2D 网络使用。D2D 用户占用与蜂窝用户正交的频段进行通信,这种方式虽然能够完全避免 D2D 用户与蜂窝用户之间的干扰,但对提高频谱复用率无效。

覆盖式频谱分配允许多个 D2D 用户和蜂窝用户在同一频段上工作,以此提高频谱效率。对于运营商来说, D2D 用户和蜂窝用户的同频分配更有利、更高效;但是从技术的角度出发,实现起来也更为复杂。总的来说,覆盖式频谱分配可以获得更好的系统性能,但是要求也更加复杂。

覆盖式方法需要有一个中央实体负责智能地通知每个通信单元(包括蜂窝用户和 D2D 用户)使用哪些子信道。但是,由于大量 D2D 用户的存在和有多个 D2D 用户和

蜂窝用户共享相同频谱的情况,导致了优化问题的复杂化;此外,用户和中央控制实体进行通信也会导致时延问题。在这种情形下,分布式而非集中式的资源分配方法(在这种方法中,D2D用户可以管理自己的子信道)更加适用。

分布式的资源分配可以采用非合作和合作两种解决方案。在非合作解决方案(即自组织方法)中,每个D2D用户仅以最大化自身吞吐量和QoS为目标自行选择子信道。但是,由于忽视分配结果对同频D2D和蜂窝用户产生的影响,可能受到由此带来的干扰的影响。而在合作的解决方案(即网络辅助式方法)中,D2D用户不仅考虑自身的吞吐量和QoS等目标,还能够通过收集到的子信道占用情况的部分信息,评估自身对其他同频用户造成的干扰情况,进而合理选择子信道。通过合作的解决方案,蜂窝用户和D2D用户的平均吞吐量、QoS及其整体性能均得到了优化。

比较而言,机会式频谱分配比较容易实现,但频谱效率较低。覆盖式频谱分配要求相对复杂,但可以获得更好的系统性能。采取合作的分布式资源分配无疑能获得最好的优化效果。

3.2.2 利用博弈论的资源分配算法实例

合理地选择资源分配方案对于减小同频干扰对D2D-LAN性能的影响有着重要作用。基于博弈论中反向迭代组合拍卖而产生的频谱资源分配算法或许能够作为频谱分配问题的一个良好解决方案^[6]。基于组合拍卖的资源分配机制通过允许竞拍者一次性收购若干资源组合包,以此激励竞拍者充分表达喜好,从而提升系统效率和拍卖收益。组合拍卖中存在的获胜者确定问题(winner determination problem, WDP)导致的NP难问题,通过采用迭代组合拍卖(iterative combinatorial auction, ICA)机制可以解决。ICA的设计,特别是集中式的ICA设计,通常基于要价机制。在ICA机制中,竞拍者被允许多次迭代提交竞标,拍卖者则计算临时分配结果,并在每一轮竞拍中要价。在反向迭代组合拍卖中,价格通过贪婪模式不断地进行更新;如果有竞拍者对竞购物品提交申请竞购,对应竞购物品的价格就固定;如果没有,则对应物品就会降价。

将反向迭代组合拍卖应用于频谱分配,其目标是解决任意数量的D2D通信链接复用同一蜂窝频段的问题。在这里,“物品包”指多个D2D用户对的组合;“竞拍者”是蜂窝信道在被D2D占用后可获得的额外的信道速率增益;

D2D通信需要耗费信令传输代价和同频干扰代价,被抽象为“代价”。为了避免来自D2D链路的干扰,蜂窝信道需要在D2D接入之前确保蜂窝系统的性能。因此,只有在代价不至影响本身性能的前提下,“竞购”才能够进行。这一过程迭代进行,直到所有的D2D通信链路均被“拍卖”,或者所有蜂窝信道都赢得了一个“物品包”,“拍卖”才算结束。

系统和速率随着资源量的增加而上升,不同D2D用户对数量的系统和速率如图13所示。在几种不同分配算法中,R-ICA(reverse ICA)代表反向迭代组合拍卖算法;穷举搜索最优选择(exhaustive optimal)算法给出了和速率的上界;简化R-ICA(reduced reverse ICA)算法限制了共享同一蜂窝信道的D2D用户对数量。从图13可以看出,R-ICA算法的性能远高于随机分配(random allocation);R-ICA算法相比最优选择而言,后者虽然能给出最高的系统和速率,但是当蜂窝资源量增大的时候,这种优势就微不足道了。

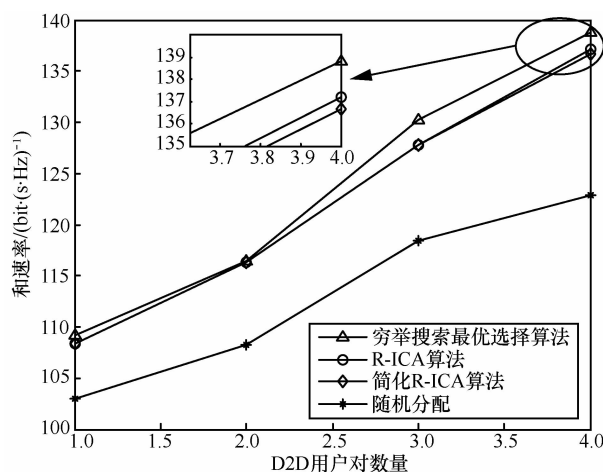


图13 不同分配算法得到的系统和速率

3.3 协同异构蜂窝层叠网络的室内频谱检测

D2D-LAN系统可以允许用户以自组织的方式接入:D2D用户自发性地通过发现频谱空洞进行自组织方式的通信。这种配置方式类似于认知无线电,它允许D2D用户感知周围环境,获取CSI、干扰以及蜂窝系统信息。这种分布式的方法能有效防止控制信令过载和时延,但自组织的通信形式可能会造成通信混乱。D2D的主要应用场景之一是室内通信,因而研究如何在室内使用空白频谱意义重大。

针对这一问题,香港中文大学联合美国微软公司研发了WISER系统^[7],能有效而低成本地检测室内的空白频谱,具体部署如图14所示,主要贡献如下。

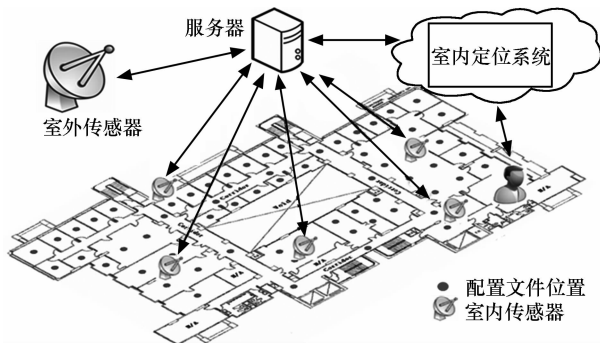


图 14 WISER 架构示意

- 提出了室内电视白频谱检测系统,称为 WISER,能够有效地检测室内额外的白频谱。这是世界上首个可以在不干扰现有频谱使用的情况下,成功检测到最多白频谱的系统。该白频谱检测系统可以用于任何建筑物内以检测电视白频谱,从而为更好的无线应用提供可能。
- 提出了基于信道和位置信息的聚合算法,能够显著减少 WISER 系统中传感器的使用数量,从而降低 WISER 的搭建成本,为将来的大规模应用提供基础。
- 利用研发设计的 WISER 原型机,在中国香港的室内和室外进行了大量的测量,测量结果表明,室外和室内各有大于 50% 和 70% 的电视频谱是白频谱。另外,室内白频谱分别呈现出关于地理位置的相关性和关于信道的相关性特点,这一分析结果提供了发掘和利用室内白频谱的切入点。

4 结束语

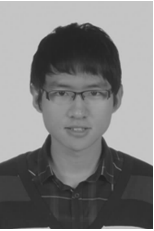
当今投入使用的移动网络主要是以基站为通信核心的具有固定设施的网络,而忽略了终端侧的充分连接。在协同异构层叠网络下引入 D2D 通信技术,将其作为蜂窝移动通信系统的下层进行工作,可与宏小区、微小区、家庭基站等异构层叠蜂窝网络使用相同的频谱资源,在原有无线通信网络基础上进一步增大频谱利用效率、提升系统容量。目前的研究表明,D2D-LAN 技术将发展成为下一代蜂窝网络支持的关键技术。D2D-LAN 也将应用近年来无线通信中的先进技术以保证网络性能,这些技术包括无线网络编码、效用优化、拥塞和接入控制、博弈理论、物理层安全等,D2D 通信技术表现出能够获得系统高容量和充分利用无线资源的巨大潜力。

参考文献

- 1 3GPP.<http://www.3gpp.org>
- 2 David K, Dixit S, Jefferies N. 2020 vision the wireless world research forum looks to the future. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2010,5(3):22~29
- 3 Zhang J, Roche de la G. Femtocells-Technologies and Deployment. Hoboken: Wiley, 2010
- 4 Zhang Y J, Letaief K B. An efficient resource allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems. IEEE Transactions on Communications, 2005,53(1): 107~116
- 5 Yu C H, Doppler K, Ribeiro C, *et al.* Performance impact of fading interference to device-to-device communication underlying cellular networks. Proceedings of IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC), Tokyo, Japan,2009
- 6 Jnis P, Koivunen V, Ribeiro C, *et al.* Interference-avoiding MIMO schemes for device-to-device radio underlying cellular networks. Proceedings of IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC), Tokyo, Japan,2009
- 7 Laroia R, Li J, Park V, *et al.* Toward proximity-aware internetworking. Toward Proximity-Aware Internetworking, 2010, 17(6):26~33
- 8 <http://wireless.pku.edu.cn/home/songly/973project/home.html>,2014
- 9 Song L Y, Xu C, Han Z. Resource Management for Device-to-Device Underlay Communication. Berlin: Springer, 2014
- 10 Song L Y, Han Z. Device-to-device communications and networks. Proceedings of IEEE Globe Communication Conference (Globecom), Atlanta, USA, 2013
- 11 Cheng X, Yao Q, Wen M, *et al.* Wideband channel modeling and ICI cancellation for vehicle-to-vehicle communication systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013(8)
- 12 Zhang G, Wang L. Multicast capacity of Ad Hoc networks with transmission uncertainty. Proceedings of ICCD D2D Workshop (Invited), Xi'an, China, 2013
- 13 Yao L, Zhang Y J. On the connectivity of underlay Ad-Hoc D2D networks. Proceedings of IEEE ICCD, Xi'an, China,2013
- 14 Zhang S, Zhou Q, Kai C, *et al.* Full diversity physical-layer network coding in two-way relay channels with multiple antennas.IEEE TWC, 2014(4)
- 15 Zhang S, Liew S, Wang H. Blind known interference cancellation. IEEE JSAC, 2013(8)
- 16 Xu C, Song L Y, Han Z, *et al.* Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: a reverse iterative combinatorial auction based approach. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue "on Peer-to-Peer Networks", 2013, 31(9):348~358

17 Ying X, Zhang J, Yan L, *et al.* Exploring indoor white spaces in metropolises. Proceedings of ACM MOBICOM, Miami, FL, USA, 2013

[作者简介]



周明昕,男,北京大学信息科学技术学院博士生,主要研究方向为多天线技术、全双工通信、软件无线电和未来通信系统,已发表 IEEE 论文 3 篇,包括期刊文章 2 篇、会议文章 1 篇,撰写并申请国际、国内专利 3 项。



许晨,女,北京大学信息科学技术学院博士生,主要研究方向为无线资源分配和管理、博弈论、优化理论、未来通信系统,已发表 IEEE 论文 7 篇,包括期刊文章 1 篇(SCI 收录)、会议文章 6 篇,撰写并申请国际、国内专利 5 项,向国内 3GPP 标准工作组提案 2 项。



杨坤,男,北京大学信息科学技术学院博士生,主要研究方向为物理层网络编码、协作通信以及全双工通信,已发表 IEEE 文章 2 篇,撰写并申请专利 1 项。



余扬,男,北京大学信息科学技术学院硕士生,主要研究方向为室内协同定位、Android 编程以及 GUI 设计,已撰写并申请专利 2 项。



赵凯飞,男,北京大学信息科学技术学院硕士生,主要研究方向为远程通信设备硬件电路设计以及无线传感器网络定位,已撰写并申请专利 1 项。



宋令阳,男,博士,挪威奥斯陆大学和美国哈佛大学博士后,北京大学“百人计划”研究员、博士生导师,2013 年国家重点基础研究发展计划(“973”计划)青年科学家专题项目首席科学家(首届青年专题项目)、获得 IEEE 通信学会亚太区杰出青年研究奖、首届国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金、北京市科技新星称号以及北京市五四青年奖章,主要研究方向为多天线、协作通信以及同构和异构网络。

(收稿日期:2014-03-24)



·简讯·

2014 年 2 月通信业主要指标完成情况(二)

指标名称	单位	本月末到达	比上年末净增	本月净增
固定电话用户合计	万户	26 487.8	-210.7	-92.6
公用电话用户	万部	2 197.9	-35.5	-10.0
城市电话用户	万户	18 362.3	-94.5	-126.0
住宅电话用户	万户	10 404.6	-69.7	-68.1
农村电话用户	万户	8 125.5	-116.2	33.4
住宅电话用户	万户	6 492.2	-151.2	-39.6
移动电话用户合计	万户	123 977.7	1 066.4	450.7
其中:3G 用户	万户	42 978.6	2 817.5	1054.8
互联网拨号用户	万户	462.8	-22.3	-6.7
互联网宽带接入用户	万户	19 217.2	326.3	100.0
其中:xDSL 用户	万户	10 636.2	-80.3	-52.9
移动互联网用户	万户	83 904.9	3 148.7	151.2
固定电话普及率	部/百人	19.7		
移动电话普及率	部/百人	90.8		

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)