



可见光室内环境下的组网策略研究^{*}

刘 阳¹, 赵 华¹, 黄开枝¹, 季新生^{1,2}

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要: 针对可见光通信研究主要集中在元件设计、物理层通信等领域, 对可见光室内组网的系统规划和设计研究较少这一特点, 阐述了可见光通信的技术特点和典型组网架构, 结合当前无线通信系统的演进和发展趋势, 提出了多小区分层覆盖、控制面与用户面分离、分布式与主从式并存的可见光室内组网策略, 并对可见光室内通信系统的光源布局、网络切换、接入控制等关键技术进行了研究和分析。

关键词: 可见光通信; 室内组网; 分层覆盖; 控制与用户分离

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.01.002

Research on the Networking Strategy in Indoor Visible Light Communication

Liu Yang¹, Zhao Hua¹, Huang Kaizhi¹, Ji Xinsheng^{1,2}

(1. National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The correlation studies mainly focus on the fields of elements design, physical layer communication, system planning and design on VLC network have not obtained enough attention yet. Therefore, the technical features of VLC and the typical network architecture were discussed, according to the evolution and development trend of the wireless communication system, some networking strategies for the indoor visible light networking were proposed, such as hierarchical cell coverage, control plane and user plane separation, distributed model and client-server model coexist in strategy. The key technologies of VLC system about the layout of lighting, network handover and access control were analyzed.

Key words: visible light communication, indoor networking, hierarchical cover, control and user separation

1 引言

当前, 随着 3GPP 和 LTE/LTE-Advanced 等通信标准的成熟渗透, 大范围的网络覆盖已基本得到解决, 如何利用有限的频谱资源满足随时增长的数据业务和对移动通信网容量的迫切需求逐渐成为新的研究热点。尤其在室内环境下, 人们的工作和娱乐需求导致流媒体、视频点播、在线

游戏等高速业务不断丰富, 对无线接入速率的要求越来越高。通过研究当前移动通信网运营状况发现^[1]: 室内场所吸收了超过 60% 的语音业务和 80% 的数据业务, 移动用户有近 70% 的时间都处在室内场所, 因此良好的室内无线数据服务将是未来移动通信网络获得成功的关键。

但是, 无线传输速率和系统容量的提升都面临诸多难题。一方面, 目前宏小区网络(包括微小区等), 受到基站传

^{*} 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2013AA013603), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助课题(No.2013D09)

输距离和不同障碍物对无线信号衰减等诸多因素影响,在室内场景下表现得不尽如人意。另一方面,由于工作在 2 GHz 频段,3G 系统无线信号绕射能力差、穿透损耗较大,单纯依靠宏蜂窝基站建设无法实现室内环境的理想覆盖;若采用专用室内分布系统,建设成本高、网络维护难度大;尤其在居民区,由于居民防范电磁辐射意识的提高以及对通信知识的欠缺,居民对于基站建设有较高的抵触情绪。因此,室内高速率、高质量和低成本的无线接入和覆盖是未来无线通信和移动通信领域所面临的重大挑战之一。

在这种应用背景下,基于 LED 的可见光通信(visible light communication, VLC)引起了人们的广泛关注和研究^[2-4]。可见光通信是一种新兴的光无线通信技术,通过对白光 LED 在照明时发出的人眼无法感知的高频率闪烁脉冲进行光强度调制,从而使传统的照明系统具有高速的通信能力。可见光通信在室内无线接入方面具有广泛的应用前景,而目前,对可见光室内组网的系统规划和整体设计尚未完全展开。丁德强等人提出一种利用可见光的无线局域网系统,包括其系统架构和关键技术设计,仿真结果表明可见光通信系统可以满足无线局域网内用户的通信需求^[5],基于仿真给出了可以改善误码率和接收功率性能的最佳阵元设计。翁晓东等人^[6]为了延长室内点与点之间的通信距离,设计了基于按需路由算法的光通信协议,并组建了自组织自恢复室内无线局域网系统。美国的 Michael 等人^[7]提出一种 Wi-Fi 与 VLC 相结合的室内混合通信系统,并在此基础上提出一种 Wi-Fi 和 VLC 网络的切换机制,实现了资源动态分配与系统吞吐量的优化设计。

然而,上述这些组网方案大多局限于本地的局域网通信,没有考虑与现有无线通信系统的融合问题。本文基于可见光通信自身的技术特点和网络架构,充分考虑可见光室内网络与现有异构无线通信系统的融合互补,提出了多小区分层覆盖、控制面与用户面分离、分布式与主从式并存的可见光室内组网策略,并对可见光室内通信系统的关键技术进行了研究和分析。

2 可见光通信的技术特点

可见光 LED 具有功耗低、寿命长、尺寸小、易驱动、绿色环保等优点,被视为第四代节能环保型的照明产品;同时,可见光 LED(主要是白光)的响应灵敏度非常高,具有良好的调制特性,可以进行超高速的数据通信。因此,可见光通信技术能满足下一代多媒体通信的要求,具有极大的

发展前景。与传统的射频通信和其他光无线通信相比,VLC 主要有以下突出优点。

(1) 绿色健康

- 可见光在照明时兼顾通信,开灯即通信。
- 可见光通信技术利用的是照明光源,与自然光一致,不会对人体产生任何电磁辐射,不会损害眼睛和视力。因此一般情况下无需限制发射功率,还可以通过增加发射功率来提高系统信噪比。

(2) 应用性强

- 可见光通信没有电磁干扰,除了一般短距离的无线应用环境,还能够完全应用于很多不适合采用电磁波通信的场景,如飞机、医院、空间站等对电磁干扰具有严格限制的场所。
- 无需申请无线频谱,由于受到无线电频谱管制,目前可用的无线电频谱已经非常有限,而可见光通信不占用无线电频谱资源,可作为频谱资源紧缺情况下的重要补充。
- 应用性强。

(3) 传输速率高

LED 的响应速度非常快,因此可以用 LED 进行高速数据通信。配以恰当的编码和驱动技术,LED 能够用于 100 Mbit/s 以上的高速数字通信。

(4) 带宽大

可见光带宽约为 300 THz(450~750 THz),远大于射频带宽(约 300 GHz),可用带宽资源十分丰富。

(5) 覆盖灵活

可见光通信技术由于采用照明光源作为信号源,只要在灯光照到的地方,利用专用的、能够接发信号功能的电脑以及移动信息终端,就可以进行数据传输,没有通信盲区,方便快捷。

(6) 兼容性强

可见光通信通过光以人眼无法感知的速度进行闪烁的方法传送数据,允许利用现有的照明和显示基础设施,实现照明/通信合一、显示/通信合一,充分提高现有基础设施的利用率。光信号发射和接收单元可以附加在现有室内设备中,如 LED、手机屏幕、摄像头等。

(7) 安全性好

可见光属于定向传输,在室内环境中很容易被窗帘、墙壁所隔绝,不会产生信号泄露,保密性好。

同时,可见光通信也存在着一些问题和不足,介绍如下。



- 传输距离较短。
- 链路脆弱,光信号容易被遮挡,也易受天气、其他光源的干扰。
- 移动性支持有待加强,终端移动后对光信号发送和接收影响很大,需要重新对准发送和接收单元,以保持有效的传输路径。

基于上述可见光通信的技术特点,本文设计了典型的可见光室内网络架构,并提出了室内可见光组网相关的关键技术和组网策略。

3 可见光室内组网的典型架构

可见光通信并非要完全替代已有无线接入技术,而是在室内环境中作为无线通信网络的一种有益补充。在当前异构无线网络大背景下如何与现有网络有效融合、优势互补,正是可见光室内组网需要深入研究和讨论的。

3.1 可见光网络的组成结构

本文提出的室内可见光通信网络的具体结构如图1所示,由LED光源、终端、可见光适配器、可见光集线器及相应信号处理单元组成。可见光通信终端集成了可见光适配器,每个可见光适配器按照用户需要,或同时具有发射和接收功能单元,或只有接收功能单元。发射部分主要由LED光源和信号处理单元组成,而接收部分主要由光电检测器和信号处理单元组成。

可见光无线集线器是可见光通信网络中的核心部分。移动终端数据信息的电信号经过可见光通信集线器的简单处理后,被路由到各虚拟小区,采用时分、码分、频分等多种方式被调制为光信号,通过LED光源阵列以广播方式发送。可见光通信适配器包括了前向链路的光源发射器和反向链路的光电接收器,集合了发射和接收功能,负责将终端用户的信息调制成光信号和接收来自反向链路的光信号。

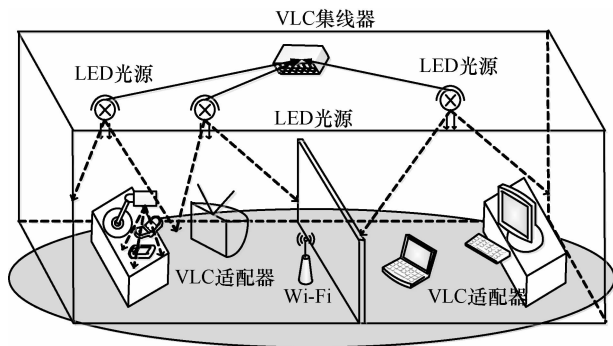


图1 可见光网络的组成结构

3.2 可见光网络架构

由于可见光网络中移动终端自身的限制,或者处于用户业务需求的考虑,部分终端同时支持可见光发送和接收,部分终端只支持可见光接收功能,发送端则采用其他无线接入技术。如图2(a)所示,可见光通信必须与现有无线通信技术深度融合、优势互补、互通有无,共同保障用户高速、可靠的业务需求。由此,可见光网络应支持3种网络拓扑:终端间双向对等拓扑通信、可见光接入点到终端的单向广播拓扑、终端到可见光接入点的双向星型拓扑。由于单向广播通信和对等通信可以看作星型网络的特殊通信模式,所以重点分析星型网络的组网技术。

根据可见光与其他无线接入技术的融合状况,对于同质网络,需要针对光信道的特点,研究其组网技术,设计新的协议栈;对于异质网络,由于其与现有网络的紧密结合,在研究其组网技术时应充分考虑对现有网络协议栈的兼容性,例如Omega项目提出的Inter-MAC解决方案^[9]。本文提出基于链路层融合的网络架构,在这种网络架构下,VLC、Wi-Fi等末端网络独立地执行相应PHY、MAC层通信标准。如图2(b)所示,在协议栈结构上,需增加一个通用链路层(generalize link layer, GLL),位于二层之上或部分取代二层的功能。其功能是为不同的无线接入机制提供统一的链路层处理。各无线网络的接入点统一汇聚到链路层,在链路层基于通用MAC协调模块实现用户业务的接入方式和资源分配,从而实现各无线网络间的互通融合。

4 可见光室内组网策略

可见光室内组网策略主要包括以下内容。

- 可见光与Wi-Fi等多种无线接入技术互补合作,实现多层小区覆盖,能够极大地提升网络传输速率和吞吐量。
- 实现控制信令与数据相分离,使得用户能够按需灵活选择无线接入技术,进一步优化了系统性能;同时使得网络切换快速便捷,对终端的移动性支持更好。
- 主从式与分布式节点关系并存,在室内范围内支持多种传播模式,具有一定的自组织性。

4.1 多小区分层覆盖

当前,移动通信网络的发展主要存在两大问题:一方面,无线频谱资源极度稀缺,难以满足用户日益增长的无线业务需求;另一方面,无线移动网络难以承载爆炸式数据流量增长。移动运营商主要通过建设宏蜂窝

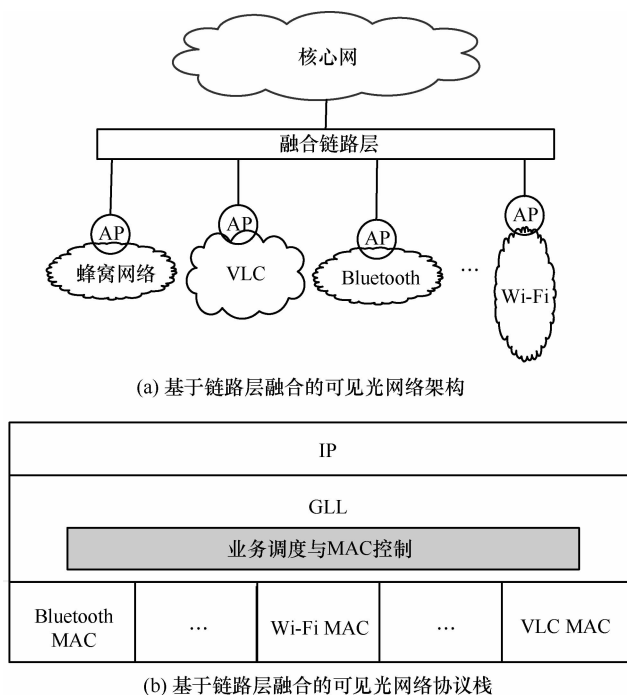


图2 基于链路层融合的可见光网络架构及协议栈

(Macrocell), 提供室外覆盖的微蜂窝(Microcell)/微微蜂窝(Picocell), 提供室内覆盖的家庭基站(Femtocell)以及Wi-Fi热点和分布式天线系统等手段为移动通信网络分流^[9-11]。尽管如此, 支持移动数据业务增长对于运营商而言仍是一个不小的挑战。结合可见光、Wi-Fi等无线接入技术建立多重覆盖的层次化虚拟小区成为一种解决思路。运营商可以根据家庭用户的需要, 因地制宜部署可见光虚拟小区来提升用户体验。同一房间内可见光可能存在干扰, 而不同房间内由于墙壁的隔绝, 几乎没有干扰。因此, 通过部署室内可见光虚拟小区, 系统总容量将呈现出线性增长的趋势, 使得高速的家庭无线覆盖成为可能。

基于此, 使用异构分层的网络小区进行重叠覆盖的网络密集化部署方式, 被认定是满足移动数据业务长期飞速增长需求的主要解决方案。多小区分层覆盖本意在承载用户业务, 与宏基站联合运行的虚拟小区(或叫微基站)被部署在宏基站覆盖范围内, 小区半径为20~50 m。虚拟小区的实际意义在于既能满足未来小区设计的基本需求, 又能兼顾设计实现的复杂度问题。但与一般的依靠空闲频段和小区间的干扰协调技术进行规划和部署的虚拟小区解决方案不同, 可见光虚拟小区不会对其他无线接入技术产生信号干扰, 传输速率高, 可以根据室内环境和用户需要灵活布置。这种多小区分层覆盖的方式能够极大地改善蜂窝

网络宏基站覆盖较弱区域的语音和宽带数据业务, 提高系统容量和可靠性。

4.2 控制面与用户面分离

空中接口的控制平面与用户平面相分离是异构分层网络设计完全脱离传统基站体系架构的第一步。这种结构能够在大幅提升无线网络容量的同时, 保证宏基站有效的移动性管理和网络覆盖。在一般的基于虚拟小区的异构分层无线组网增强方案中, 宏基站工作保持在现有频段上, 而虚拟小区被分配以较高的频段, 这样的配置使控制平面仍处于更可靠的宏蜂窝层的控制之下。与此同时, 系统容量因分离后的用户平面能够在高频段获得较大带宽而得到提升, 在设计方面也不需要虚拟小区层进行小区规划、配置和优化。

无线异构网络的这种分层重叠覆盖的结构实现了控制平面和用户平面相分离。如图3所示, 在异构分层网络中, 移动终端和虚拟小区基站之间的无线接口仅保留用户平面的功能, 而控制平面则交由宏基站实现和管理。控制平面与用户平面相分离, 使得虚拟小区具有高度灵活性和自主性, 这种设计使得宏基站、虚拟小区基站、移动终端各有分工, 不仅简化了异构网络架构, 且易于实现, 还带来最小的信令开销。可见光与WLAN互补协作, 实现室内虚拟小区的高速无线数据覆盖; 移动蜂窝通信则完成更大范围内的网络覆盖, 保障基础的、可靠的网络控制和管理服务。

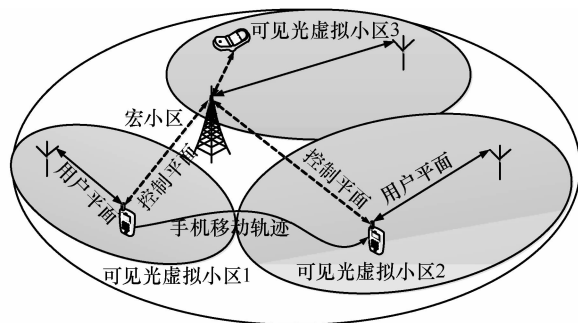


图3 异构分层网络下的可见光虚拟小区

控制信令与数据相分离带来的另一个好处就是使多模移动终端在异构分层网络环境下, 不只是简化和加速小区间的无缝切换, 且为不同接入技术间的负载均衡提供有效的技术支持。虚拟小区与传统蜂窝小区不同, 并没有小区特定的控制信息和控制信道, 对终端控制依赖于宏蜂窝的信令控制。虚拟小区通过控制与用户相分离, 在宏蜂窝的控制下完成虚拟小区之间的信道建立与释放等无线资源控制过程。由此, 宏小区和虚拟小区具有主从关系, 且完



成了有效的业务分工:宏基站发出控制信令,虚拟小区基于该信令为用户业务提供数据传输通路。

4.3 分布式与主从式并存

现阶段由于技术和设计限制,移动终端上的可见光接收器一般只具有接收功能,而没有同时集成发射功能。这使得可见光虚拟小区无法在用户移动终端上支持上行通信,往往需要移动通信系统、WLAN 等无线接入技术共同提供和保障家庭范围的移动通信服务。因此,如图 4 所示,可见光室内组网往往需要分布式与主从式结构并存。

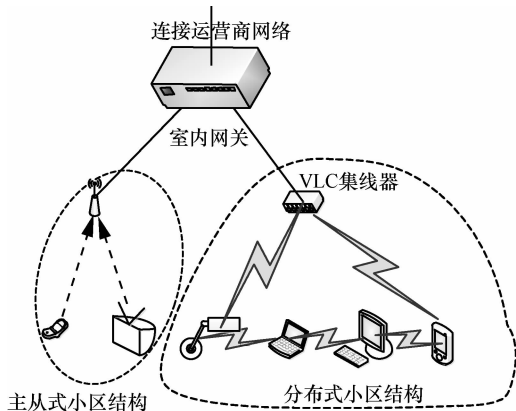


图 4 可见光室内混合式组网

与自组织网络不同,可见光网络中的分布式通信是受限的。因为可见光通信依靠光信号直射,对于移动性较高、光接收面积较小的终端在运动中往往会偏离初始的传播路径,这种情况下要完成可见光通信是非常困难的。因此,对于移动性较高的终端往往上行采用 Wi-Fi 或蜂窝网络,下行采用可见光通信,而对于室内位置固定或移动后固定的终端可以采用分布式通信结构。

在家庭基站使用中小型、独立的小区基站为房间内的用户提供服务。通过减小小区的服务范围来增加频谱的空间复用,提高用户的通信速率。但家庭基站需要通过固定网络接入核心网络,分配给家庭基站小区的资源也是固定和持续的。当 D2D(device to device,终端直通)^[12,13]在小范围实现本地通信时,不用接入核心网络,就能够有效实现业务分流,从而减轻核心网络的负载。在实际应用中,由于基站无法获知小区内不同用户之间通信链路的信道信息,所以基站不能直接基于用户之间的信道信息进行资源调度。而可见光小区中分布式通信能够分享小区内的所有资源,因此,D2D 通信用户对将有可能被分配到两种情况的信道资源:与正在通信的蜂窝用户相互正交的信道;与正在通信的蜂窝用户相同的信道。由于可见光是定向、短

距离传播,因此可见光终端直通对同小区的其他终端干扰较小,实现复杂度较低。

可见光分布式通信可以与小区用户共享资源来提高频谱的利用率。此外,它还能减轻蜂窝网络的负担、减少移动终端的电池功耗、增加比特速率、提高网络基础设施故障的顽健性等,还能支持新型的小范围点对点数据服务。相比于传统的蜂窝通信模式,D2D 技术不需要通过基站中转,因此减少了和基站通信的负担,并节省了所占用的通信资源,D2D 用户还可以与蜂窝网用户使用相同的频谱资源,使得通信速率和频谱效率获得大幅提高。基于 D2D 技术,终端辅助的协作中继通信,能进一步提高通信的质量。

5 可见光室内组网的关键技术

5.1 可见光光源布局

可见光由于自身的信号传播特点,无法穿透墙壁等遮挡物,仅能够支持直接照射范围内的短距离通信。现代家庭中的多个房间或较大房间往往需要多组光源才能实现有效覆盖,因而合理设计光源布局无疑是影响系统整体性能的一个关键因素。

单个 LED 发光强度和功率都较小,为了同时实现室内照明和通信双重功能,一般采用由多个 LED 模块组成的发光阵列。光源布局需要考虑两个方面:一是组成光源阵列内部的 LED 灯的排布(个数及排列),二是室内 LED 的整体布局(个数及室内分布)。在设计照明兼通信的室内光源时,通过两方面的合理布局可以使室内光分布同时满足照明和通信的需要。

对于光源阵列的分布,首先要根据室内照射范围、LED 间隔大小、直射距离等因素规划每个光源阵列所需的 LED 的总个数和排列。间隔过大或过小,直接影响光照分布的均匀性;直射距离和 LED 发光功率会影响光照强度。由于用户移动、障碍物的遮挡,会在表面形成“阴影”区域阻碍光信号的发送和接收,从而影响通信性能。必须根据室内空间、设施构成设计室内 LED 的整体布局,尽量避免形成照射盲区,使室内的光强度分布尽量均匀。一般来讲,光源阵列安装越多,越能够提高发送和接收功率,越能有效地改善“阴影”效应;但不同的光路径导致的 ISI 也会越发严重,影响传输性能。因此,要在增强光照强度以提升传输性能和减小多径的 ISI 之间实现最佳平衡,可见光光源的合理部署就显得尤为重要。

5.2 可见光网络切换技术

在室内可见光通信系统中,除了噪声干扰,还存在多光源信号折射、自然光、遮挡物等诸多因素的干扰。当移动终端从一个光源转移到另一个光源时,或者从室内可见光通信转移到室外无线通信时,网络切换不同于蜂窝网络下的切换过程。要保障终端能够及时有效地进行水平或垂直切换,需要以合理的预测触发机制提前进行测量和上层预切换,以减少切换时延。可见光通信网络的切换判决指标与传统室内无线接入网络有一定的差异性,其位置管理、异构网络切换指标的转换尺度、切换控制策略都需要重新设计。而且新型的可见光终端,不仅带来了业务的多样性,也打破了以往单一的人与人通信的应用场景,对切换提出了新的需求。因此,需要根据感知到的终端属性、业务需求及网络能力制定合适的“切换尺度”,基于预测触发快速高效地实现异构网络间的垂直切换。

在可见光网络环境下,在发现当前所在可见光基站信号变弱需要立即切换时,必须能够及时发现新的可接入基站并选择合适的接入方式。为避免不必要的反复切换,可见光网络切换首先要设定合适的光信号强度,在准备切换之前基站先对移动终端的光信号进行跟踪和记录,结合多种切换因素(终端移动轨迹、光信号分布强度)判决是否需要切换。

如果判决需要切换,如图3所示,这需由终端与宏基站在高层的控制平面完成信令交互,协商并通知终端选择切入的虚拟小区;同时,宏基站与其覆盖下的虚拟小区在用户平面完成同步,最后由虚拟小区和用户在数据层面实现无线业务。由于小区驻留和小区重选都是在宏基站层进行的,对于活动于所在小区的移动终端来说,可见光虚拟小区的微基站是透明的,不需要监控虚拟小区中无线业务的任何寻呼过程,从而减少小区规划、配置和优化方面的工作量。此外因为虚拟小区不用保留用户平面的控制信道进行测量和解码,使得UE的能耗降低,终端的续航时间延长。移动终端只有在注册、切换或者宏基站发起相关过程进行虚拟小区发现时,才需要与宏基站进行信令交互。

5.3 可见光网络接入控制

第4.1节提到可见光网络实行多小区的分层覆盖,支持终端同时以多种方式接入,能够有效地增加系统容量,但同时也带来了网络接入控制的问题。

由于可见光通信是有向空间信道,且上、下行信道不

独立,在空间上易重叠的情况,需重点考虑如何在存在下行干扰的情况下实现定向上行接入。可以研究基于角度感知的定向接入协议,通过推导可见光通信的发散角和发射仰角,分析各种通信方式(直视通信/非直视通信)的覆盖范围,通过维护仰角邻居列表,实时协调仰角和通信范围,最终达到克服下行干扰的强定向上行接入。

在可见光异构网络中不同的物理技术会经历不同的信道衰落,在发送端可以灵活配置一个或多个异构接入链路进行协同传输,而在接收端进行多链路的合并则可以获取空间分集及异构分集增益,使得不同特性的业务流通过不同的网络疏导,同一业务流根据全网状态进行迁移,从而提高整个系统的资源利用率。这种情况下,多模终端向多个AP同时请求一个或多个业务,由室内网关在高层将业务数据分流到合适的AP上,最终发送给请求用户。当用户增多,移动性增强,多连接控制显得越发重要:需要综合考虑用户当前可选择接入的AP、业务类型和QoS要求、网络负载状况等,为终端建立(或撤销)合适的异构接入链路。

因此,要实现可见光异构网络的多连接控制,要求多AP配合实现链路层的协作通信,需要基于光信号感知信息,针对空闲态和不同业务分流特征的用户需求,分别进行合理的矢量分解,即合理地分配合适的业务量到合适的链路上传输,以最大化异构网络分集增益。

6 结束语

可见光通信有着绿色健康、速率高、无干扰等优点,是当前无线通信技术发展的一个重要方向。可见光通信在小区网络的控制下与小区用户共享资源,减轻蜂窝网络的负担、减少移动终端的电池功耗、增加比特速率、提高网络基础设施故障的顽健性等,还能支持新型的小范围点对点数据服务,从而在提升网络吞吐量的同时,提高系统频谱的利用,有效地实现数据分流和负载均衡,保障用户无线业务的服务质量。

随着LED照明和4G、5G无线网络技术的演进,可见光通信应与之融合发展以获取更大的应用空间,可见光室内组网无疑是一个充满前景的研究点。本文基于可见光通信的技术特点和典型组网架构对其关键技术进行了研究和分析;结合当前无线通信系统的演进和发展趋势,提出了相应的可见光室内组网策略。当然,可见光室内组网如何与现有的异构无线网络深度融合、优势互补,涉及接入

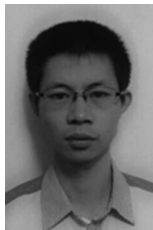


融合、业务融合和网络融合 3 个方面,有许多技术细节还有待进一步深入研究。

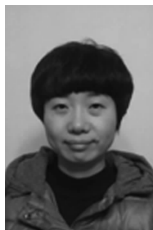
参考文献

- 1 Carlaw S. IPR and the Potential Effect on Femtocell Markets. ABI Research, 2008
- 2 骆宏图,陈长缨,傅倩等. 白光 LED 室内可见光通信的关键技术. 光通信技术, 2011, 35(2): 56~59
- 3 胡国永,陈长缨,陈振强. 白光 LED 照明光源用作室内无线通信研究. 光通信技术, 2006, 30(7): 46~48
- 4 茹小波. 室内可见光局域网的研究. 大众科技, 2012, 14(4): 69~72
- 5 丁德强,柯熙政. 一种基于可见光通信的无线局域网系统设计与仿真. 西安理工大学学报, 2007, 23(1): 114~117
- 6 翁晓东,燕奇,宋占伟等. 基于 LED 光通信的按需路由协议实现. 吉林大学学报, 2010, 28(6): 545~551
- 7 Rahaim M B, Vegni A M. A hybrid radio frequency and broadcast VLC system. Proceedings of GLOBECOM Workshops, Houston, USA, 2011
- 8 OMEGA Deliverable D5.4. Inter-MAC protocols performance report. <http://www.ict-omega.eu/fileadmin/documents/deliverables.html>, 2010
- 9 肖竹,李仁发,易克初等. 两层异构网络中 Femtocell 研究进展与展望. 通信学报, 2013, 34(2): 156~169
- 10 田桂宾. Femtocell 关键技术及组网应用. 电信工程技术与标准化, 2011(8)
- 11 李玥,彭木根. 基于虚拟小区的分层异构无线组网方案. 电信科学, 2013, 29(1)
- 12 芦旭,郭伟,杨莹. 终端直通技术中通信系统模式的研究. 通信技术, 2012, 45(3): 86~88
- 13 王彬,陈力,张欣等. 在 LTE-Advanced 网络下的 Device-to-Device 通信. 现代电信科技, 2010(10)

[作者简介]



刘阳,男,国家数字交换系统工程技术研究中心博士研究生,主要研究方向为无线网络组网技术、可见光通信。



赵华,女,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为无线网络安全、可见光通信。



黄开枝,女,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心副教授、硕士生导师,主要研究方向为无线网络安全、无线通信。



季新生,男,国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师,主要研究方向为电信网安全、无线网络安全。

(收稿日期:2013-07-30)

(上接第 7 页)

一定能实现,同时将带动我国集成电路产业的跨越式发展和本土通信产业走向全球市场。

参考文献

- 1 Chen S Z, Wang Y M, Ma W G, et al. Technical innovations promoting standard evolution: from TD-SCDMA to TD-LTE and beyond. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(2): 60~66
- 2 王映民,孙韶辉. TD-LTE-Advanced 移动通信系统设计. 北京:人民邮电出版社, 2013
- 3 陈山枝,秦飞. LTE-Hi——无线移动宽带网络演进路线. 电信科学, 2012, 28(11)

[作者简介]



陈山枝,男,博士,大唐电信科技产业集团副总裁,电信科学技术研究院副院长、教授级高级工程师、博士生导师,IEEE 高级会员,工业和信息化部通信科技委员会常委,中国通信学会常务理事、会士,曾任国家“863”计划专家组成员、国家重大专项的专家组成员等,曾获 2001 年度国家科学技术进步二等奖、2012 年度国家科学技术进步一等奖、第九届光华工程科技奖、2012 年度中国通信学会科学技术进步一等奖等荣誉,目前主要研究方向为无线移动通信、物联网和应急通信。

(收稿日期:2013-12-15)