



第三届全国期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊
工信部优秀科技期刊 中国五大文献数据库收录期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

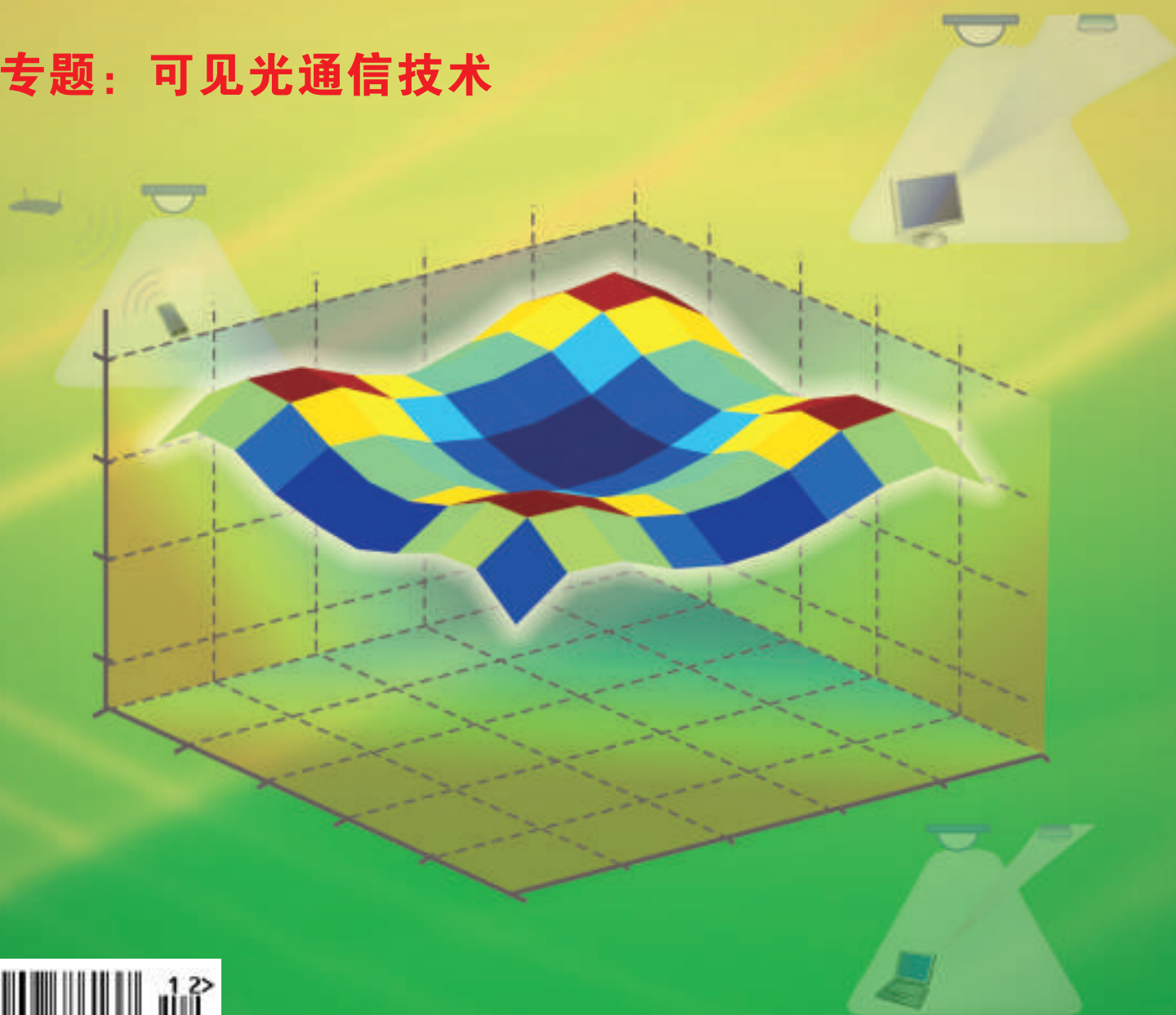
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2014年12月 • 第6期

专题：可见光通信技术



《中兴通讯技术》第6届编辑委员会委员名单

主 任 钟义信（北京邮电大学教授）

副主任 侯为贵（中兴通讯股份有限公司董事长） 糜正琨（南京邮电大学教授）

编委（按姓氏拼音排序）

- 艾 波** 中国联通学院党委书记,北京大学兼职教授,北京邮电大学兼职教授
- 曹淑敏** 工信部电信研究院院长、教授级高工
- 陈建平** 上海交通大学电子信息与电气工程学院电子工程系教授
- 陈 杰** 中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 陈前斌** 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长、教授
- 陈锡生** 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 程时端** 北京邮电大学网络技术研究院教授
- 高 文** 中国工程院院士,北京大学信息科学技术学院教授
- 葛建华** 西安电子科技大学通信工程学院副院长、教授
- 顾晓仪** 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授
- 郭云飞** 解放军信息工程大学副校长、教授
- 管海兵** 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长、教授
- 侯为贵** 中兴通讯股份有限公司董事长
- 何士友** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 洪 波** 中兴发展股份有限公司总裁
- 纪越峰** 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院执行院长、教授
- 江 华** 中兴通讯股份有限公司副总裁
- 蒋林涛** 工信部电信研究院科技委主任、教授级高工
- 雷震洲** 工信部电信研究院科技委副主任、教授级高工
- 李红滨** 北京大学科研部副部长,信息科学技术学院教授
- 李建东** 西安电子科技大学副校长、教授
- 李乐民** 中国工程院院士,电子科技大学通信与信息工程学院教授
- 李融林** 华南理工大学电子与信息学院教授
- 李少谦** 电子科技大学通信与信息工程学院院长、教授
- 李 星** 清华大学电子工程系教授,CERNET 网络中心副主任
- 马建国** 天津大学电子信息工程学院院长、教授
- 孟洛明** 北京邮电大学职称评审委员会主任,学术委员会副主任,网络与交换技术国家重点实验室主任、教授
- 糜正琨** 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 庞胜清** 中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 史立荣** 中兴通讯股份有限公司总裁
- 孙枕戈** 中兴通讯股份有限公司副总裁
- 孙知信** 南京邮电大学物联网学院院长、教授
- 谈振辉** 北京交通大学电子信息工程学院教授
- 唐雄燕** 中国联通网络技术研究院首席专家、教授级高工
- 田文果** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 童晓渝** 中电科软件信息服务有限公司董事、副总经理
- 王 京** 清华大学教授,清华大学信息科学与技术国家实验室副主任
- 王文东** 北京邮电大学软件学院党委书记兼副院长、教授
- 王晓明** 中兴通讯微电子研究院院长
- 王育民** 西安电子科技大学通信工程学院教授
- 韦乐平** 中国电信集团公司科技委主任、教授级高工
- 卫 国** 中国科学技术大学信息科学技术学院教授
- 邬贺铨** 中国工程院原副院长、院士
- 吴克利** 香港中文大学电子工程系教授
- 徐安士** 北京大学信息科学技术学院教授
- 须成忠** 美国韦恩州立大学电子与计算机工程系主任、教授,中科院深圳先进技术研究院首席科学家、云计算中心主任
- 续合元** 工信部电信研究院通信标准研究所总工、教授级高工
- 薛一波** 清华大学CPU&SOC 中心副主任,信息技术研究院研究员
- 杨义先** 北京邮电大学信息安全中心主任,灾备技术国家工程实验室主任、教授
- 杨 震** 南京邮电大学校长、教授
- 尤肖虎** 东南大学信息科学与工程学院院长、教授
- 乐光新** 北京邮电大学信息与通信工程学院教授
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网国家工程实验室主任、教授
- 张 平** 北京邮电大学网络技术研究院执行院长、教授
- 张同须** 中国移动通信集团设计院副院长兼总工
- 张智江** 中国联合网络通信有限公司网络建设部总经理、教授级高工
- 赵厚麟** 国际电信联盟(ITU)副秘书长、俄罗斯电信科学院院士
- 赵慧玲** 中国电信股份有限公司北京研究院总工程师、教授级高工
- 赵先明** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 郑纬民** 清华大学计算机系高性能计算研究所所长、教授,中国计算机学会理事长
- 钟义信** 北京邮电大学计算机学院教授
- 朱近康** 中国科技大学信息科学技术学院教授



目次

中兴通讯技术 总第119期 第20卷 第6期(卷终) 2014年12月

专题:可见光通信技术

- 02 基于可见光通信的室内光电混合网络组网关键技术 郭伟,于宏毅,刘建辉
08 应用于可见光通信的上行链路方案探讨 郑重,刘璐,胡薇薇
12 一种基于 CSMA/CA 的 VLC 系统多用户接入方法研究 尚韬,江涛,张颖
16 基于先进调制的高速可见光通信技术 迟楠,黄星星,王一光
21 基于 CSK 调制的可见光通信系统的盲检测算法研究 贾林琼,王俊波,陈明
25 基于多色 LED 的可见光通信联合调制技术 黄博扬,高谦,徐正元
29 适用于可见光通信的 LED 器件 朱石超,赵丽霞,杨华
33 用于 VLC 的 LED 半功率角优化布局方法研究 李昉,陈建平
36 散弹噪声干扰下的多电平调制可见光通信系统 汪后禹

专家视点

- 40 建设物联网:轻量级寻址技术不可或缺 孙知信,骆冰清

研究论文

- 44 大数据时代的移动终端技术演进 朱晓光,聂永霞

运营应用

- 48 大规模物联网中多层次立体异构网络拓扑研究 顾磊,黄辉林,钱昕

开发园地

- 52 网络功能虚拟化:基于虚拟化的中间件盒子 房爱军,汪军

系列讲座

- 57 无线体域网(3) 陈文

综合信息

- SDN 产业联盟正式成立(07) 云计算国际标准正式发布(43) 中国将建全球化量子通信
卫星网(56) 《中兴通讯技术》2015 年第 4—6 期专题征文(60) 《中兴通讯技术》第 20 卷
总目次(I)

办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英;
迎接挑战,把握世界通信技术动态;
立即行动,求解通信发展疑难课题;
励精图治,促进民族信息产业崛起。

期刊基本参数:CN 34-1228/TN*1995*b*16*64*zh*P*¥ 20.00*15000*14*2014-12

Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 20 No. 6 Dec. 2014

Special Topic: Visible Light Communication Technology

- 02 Key Technologies for Indoor Hybrid Network of Radio Frequency and Visible Light Based on Visible-Light Communication GUO Wei, YU Hongyi, LIU Jianhui
- 08 Analysis of Uplink Schemes for Visible-Light Communication ZHENG Zhong, LIU Lu, HU Weiwei
- 12 A Multi-User Access Technology Based on CSMA/CA in VLC Systems SHANG Tao, JIANG Tao, ZHANG Ying
- 16 High-Speed Visible Light Communication Based on Advanced Modulation Technology CHI Nan, HUANG Xingxing, WANG Yiguang
- 21 Blind Detection Algorithm for Visible Light Communication System with CSK Modulation JIA Linqiong, WANG Junbo, CHEN Ming
- 25 Joint Modulation Techniques Based on Multicolor LEDs HUANG Boyang, GAO Qian, XU Zhengyuan
- 29 Device Technology of Light Emitting Diodes Used in Visible Light Communication ZHU Shichao, ZHAO Lixia, YANG Hua
- 33 Optimization of LED SAHP for Indoor Visible Light Communication Systems LI Fang, CHEN Jianping
- 36 Multilevel Modulation Visible Light Communication System with Shot Noise Interference WANG Houyu

Expert View

- 40 Lightweight Addressing Technology of the Internet of Things SUN Zhixin, LUO Bingqing

Research Paper

- 44 Mobile Terminal Technology Evolution in the Age of Big Data ZHU Xiaoguang, NIE Yongxia

Operational Application

- 48 Large Machine-To-Machine Heterogeneous Network Architecture GU Lei, HUANG Huilin, QIAN Xin

Development Field

- 52 Network Function Virtualization Based on Virtualization Middlebox FANG Aijun, WANG Jun

Lecture Series

- 57 Wireless Body Area Network (3) CHEN Wen

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

邮购须知

本刊常年办理邮购订阅业务,欢迎订阅。订阅方法:从邮局汇款至编辑部,在汇款单上将订阅者的详细地址、收件人姓名及联系电话填写清楚,并在汇款单附言栏注明所购杂志期次及数量。

专题:可见光通信技术

专 | 题 | 导 | 读

发光二极管(LED)在给照明技术带来革命性变化的同时,也为短距离无线光通信技术提供了契机。事实上,LED是光通信最早使用的光源,后来逐渐被性能更为优异的激光二极管(LD)代替。随着各种智能手持终端的发展,用户对宽带无线接入需求越来越高。从移动性而言包含了多种方式,包括办公室、家庭、展厅等准静止场所,广场、车站等流动性场所以及飞机、高铁等高速移动的运载工具。其中,多数场所正在使用高效节能的LED代替传统的照明灯具。LED的光强变化对电信号具有很快的响应速度,经调制后可以有效地加载用户信息,从而实现集照明与通信于一体的可见光通信(VLC)。这是一种潜在的低成本宽带接入方式,可以作为宽带无线接入技术的一种补充。另外,还具有工作频段不受限制、无电磁干扰、安全性好(包括对人体的安全和传输内容的安全)等优点,是国际上研究与开发的热点之一。

可见光通信技术始于2000年左右,与Wi-Fi相呼应,被有些学者称作Li-Fi。其后,一些VLC联盟纷纷成立,如2003年10月日本成立了可见光通信联盟(VLCC),发布了可见光通信系统规范(VLCC-STD-001)和低速通信可见光ID应用规范(VLCC-STD-003)。欧盟的家庭吉比特接入计划将可见光通信、无线通信和电力线通信技术集为一体,来构建通信速率达1 Gb/s的家庭区域宽带通信网。对于短距离的小范围无线可见光通信,IEEE于2009年成立P802.15.7工作组,并于2011年12月发布IEEE 802.15.7-2011的VLC标准。中国在国家“863”计划的支持下,对可见光通信技术开展了深入研究并取得成果。2014年8月成立了中国可见光通信产业技术创新与应用联盟,以期推动可见光通信技术的发展。

可见光通信还处在探索与发展阶段,有许多技术问题有待研究解决与完善,包括:适合于高速大容量可见光通信的LED的研发、不同场合LED光源的优化布局、大容量调制解调技术、有效的上行方案、与无线接入的融合架构和协议、VLC技术规范 and 标准、VLC技术应用场景分析等。本专题旨在对可见光通信所涉及的相关技术进行探讨,为其发展壮大并走向应用提供技术积累。专题所收录的论文凝聚了作者的研究成果和工作经验积累,希望能给读者提供有益的启示与参考。在此,也对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢!

陈建平

2014年10月11日

本期专题策划人



陈建平

上海交通大学教授、博士生导师,上海交通大学211/985办公室主任,《中兴通讯技术》杂志编委;长期从事光纤通信、光子信息处理器件与技术的研究工作;作为首席科学家主持了国家“973”计划项目“超高速低功耗光子信息处理集成芯片与技术基础研究”,完成和正在承担基金项目10余项;获得国家教学成果二等奖、教育部科技进步三等奖和上海市自然科学二等奖各1项,已发表论文100余篇。

2014年第1—6期专题计划

1

社会网络技术、应用与市场

王玉峰 南京邮电大学通信与信息工程学院教授

2

第5代移动通信需求与技术探索

王京 清华大学信息技术研究院教授

3

网络以及功能虚拟化

虞红芳 电子科技大学通信与信息工程学院教授
李乐民 电子科技大学通信与信息工程学院院士

4

智慧城市

祁庆中 上海信天通信有限公司总经理

5

下一代无源光网络技术与应用

陈雪 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授

6

可见光通信技术

陈建平 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室教授

基于可见光通信的室内光电混合网络组网关键技术

Key Technologies for Indoor Hybrid Network of Radio Frequency and Visible Light Based on Visible-Light Communication

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0002-06

摘要: 针对可见光通信在室内的应用, 分析了采用可见光与无线射频构成光电混合网络的可行性, 提出了一种可行的网络架构; 指出了该网络架构组网中的关键技术问题, 并针对网络中的光源布局、多址接入、小区切换、异构网络融合等给出了技术路线。

关键词: 可见光通信; 光电混合网络; 媒体接入控制; 小区切换; 异构网络融合

Abstract: Color shift keying (CSK) is a modulation scheme proposed in IEEE 802.15.7. In view of the indoor application of VLC, the feasibility of constructing a hybrid wireless VLC network and WLAN is analyzed, and a kind of feasible network architecture is proposed. This paper points out the key technical problems of network and gives the technical route, including lighting layout, multiple access, cell handover and heterogeneous network integration.

Key words: visible light communication; hybrid network of visible light and radio frequency; medium access control; cell handover; heterogeneous network integration

郭伟/GUO Wei

于宏毅/YU Hongyi

刘建辉/LIU Jianhui

(中国人民解放军信息工程大学 信息系统
工程学院, 河南 郑州 450002)
(College of Information System Engineering,
PLA Information Engineering University,
Zhengzhou 450002, China)

可见光通信(VLC)是一种新兴的无线通信技术, 利用发光二极管(LED)响应速度快、稳定性强等特性, 将信号调制到LED上, 利用可见光进行数据传输。可见光通信技术具有绿色健康、覆盖灵活、兼容性强和灵活性好等突出优点, 是目前通信领域研究热点之一。

早在2000年, Keio大学的Masao Nakagawa利用LED照明灯实现了信息无线传输的室内通信系统^[1]。2003

年10月, 可见光通信协会(VLCC)成立, 发布了可见光通信系统规范(VLCC-STD-001)和低速通信可见光身份标识(ID)应用规范(VLCC-STD-003)。韩国三星电子于2011年推出可见光通信标准IEEE 802.15.7^[2]。同年, 爱丁堡大学教授哈斯提出光无线网络(Li-Fi)的概念, 让可见光通信进入全世界的视野。

欧盟的家庭吉比特接入计划集成可见光通信、无线通信和电力线通信技术来构建家庭区域宽带通信网, 使得通信速率达到了1 Gb/s。2011年, 德国海因里希-赫兹研究所的Jelena等人采用单个RGB型LED, 利

用波分复用、离散多音频(DMT)调制技术和雪崩光电二极管(APD)接收, 实现了803 Mb/s的传输速率^[3]。2013年, 复旦大学使用单载波频域均衡技术, 实现离线最高单向3.75 Gb/s的传输速率^[4]。2013年, 英国爱丁堡大学使用50 μm的微型LED, 已将LED灯的3种初始颜色的传输速率提升到每秒3.5 Gb/s, 使总速度达到10 Gb/s以上^[5]。

但目前针对可见光网络的组网技术研究还比较少。2008年, Klaus-Dieter Langer、Olivier Bouchet等人描述了采用无线射频与可见光混合结构的下一代本地网络, 通过独立的媒体访问控制(MAC)层控制, 实现了区域服务和异构网络的连通^[6-7]。2011年, 美国波士顿大学的Michael B. Rahaim等人提出一种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^[8]。2013年, 东南大学提出

收稿日期: 2014-09-12

网络出版时间: 2014-10-13

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA013603)

了一种由多个光接入点和一个调制方式为 OFDM 的无线接入点组成的混合网络,并设计了 MAC 协议^[9]。

本文在深入分析室内可见光通信特点的基础上提出了一种室内光电混合网络可行的网络系统架构,并分析了其中的关键技术问题,给出了初步的解决方案。

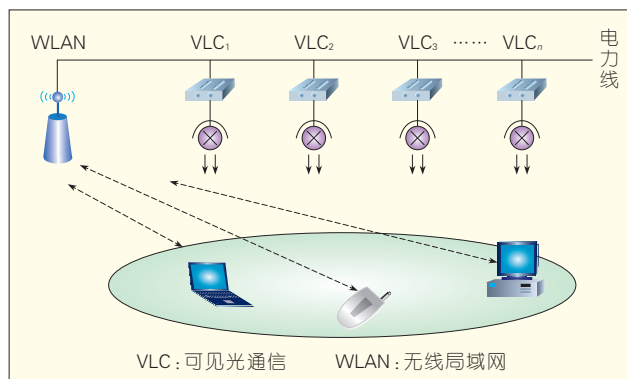
1 室内光电混合系统架构

室内是可见光通信重要应用场景。在该场景下,用户主要业务为以 Web 浏览、文件下载、高清视频点播等为代表的上下行非对称业务,其上下行业务量相差悬殊。以 WWW 浏览为例,一般上下行的数据量差异为 1:5 至 1:10,在文件传输协议(FTP)类的文件下载中,这个比例可达 1:20 至 1:100。由于可见光通信与照明密切结合,下行采用可见光链路可以有效解决频谱紧缺问题。上行链路可以采用如下的方式:

(1)采用光(可见光、红外)作为上行链路。该方式无需借助其他传输媒质即可实现双向通信,无需申请额外的频谱资源,且可见光和红外均不产生电磁干扰。可应用于医院、飞机、加油站等对电磁辐射敏感的场合。

(2)采用无线射频作为上行链路。该方式可以申请新的频谱资源作为 VLC 网络上行信道。也可以借助现有无线局域网作为其上行链路,实现异传输媒质协同组网。该方式适用于家庭室内广域接入、大型公共场所广域接入等场所。结合本文考虑的室内环境,上下行链路分别采用无线射频和可见光两种属性不同的媒质构成的异质网络。基本的网络架构为:一般来说,室内单个无线基站的信号覆盖范围很广,依具体环境数十米到百米不等。而一组 LED 阵列的灯光辐射范围约 2~5 m,为使两类信号的室内覆盖区域基本一致,需对 1 个无线热点配置 n 个 VLC 热点,形成 1WLAN+ n VLC 模式的光电混合网络架构,如图 1 所示。无线局域

图 1
混合网络架构
(1WLAN+ n VLC 模式)



网(WLAN)基站支持 Wi-Fi 协议,可以进行双向传输,因此无线射频可以作为与可见光并行的下行链路进行通信。

针对这种室内光电混合网络,在具体实现室内组网时,必须重点研究的关键技术是:

(1)光源布局优化问题

室内光源布局不仅影响照明,还对混合网络的通信能力影响巨大,需根据具体要求进行优化设计。尤其在大型商场超市、机场候机厅等室内复杂应用场景,多光源合理布局与优化将会提高网络资源利用率,均衡流量,减少拥塞。

(2)媒体接入控制技术

在目前的研究中,尚无完善的多址接入技术保证用户高效接入光电混合网络。而用可见光和无线射频同时作为室内通信的下行链路时,必须解决下行光电资源分配问题。

(3)移动终端的切换技术

室内用户低速游牧移动,可见光通信容易因遮挡或终端远离导致断开。为保证通信连续,快速的光电链路切换技术及终端水平切换技术是基本研究内容。

(4)异构网络融合技术

光电混合网络与室内其他异构网络共存,异构网络融合技术可以保证用户充分利用网络资源,实现效用最大化。

2 光电混合网络的光源布局

可见光通信中,照明与通信结

合。合理规范的室内 LED 光源布局可以使照明区域充分覆盖。但 LED 布设并非越多越好,LED 的数目越大,室内的照明度越高,系统接受到的光信号的功率也越大,由不同路径的可见光在同一光敏二极管(PD)上交叠造成的信号间干扰也越严重。因此必须针对室内光源布局进行合理优化设计。

2.1 网络覆盖最大化

室内光电混合系统中,LED 光源需要实现照明和通信的双重功能。根据国标 GB50034-2004 规定,室内环境下理想光照度的范围是 100 lx 到 500 lx 之间。满足通信要求的误比特率至少是 10^{-3} 。依据这个原则可以建立室内环境水平面上光照度和可见光信干噪比(SINR)的数学模型,对室内同一水平面上的接收光的信干噪比进行优化。优化的准则是尽量使室内照明盲区及通信盲区最小化,同时平面上各点的信噪比方差最小,从而获得可见光热点的最佳个数及位置分布。

室内布设 n 个 LED 灯时,室内 (x, y) 处总光照度为:

$$E_T = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1)$$

根据朗伯发射模型,其中第 i 个 LED 的光在该处的光照度 $E_i = \frac{I(0)}{D^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi)$, 其中 $I(0)$ 是 LED 灯中心信号强度, D 为 LED 灯与光敏二极管检测器间距,

$m = \ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$, $\phi_{1/2}$ 是 LED 灯的半功率角。

忽略可见光的散射,只考虑其直射光(LOS)信号,从 LED 到 PD 检测器的可见光信道直流增益为:

$$H(0) = \frac{(m+1)A}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (2)$$

其中 A 为 PD 检测器的面积, $T_s(\psi)$ 是光滤波器增益, $g(\psi)$ 是聚光器增益。

可见光聚光器的模型为:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & 0 \geq \Psi_c \end{cases} \quad (3)$$

其中 n 表示折射率, Ψ_c 表示接收器的视场角。

可见光接收功率 P_r 根据 LED 的发射功率 P_t 求得:

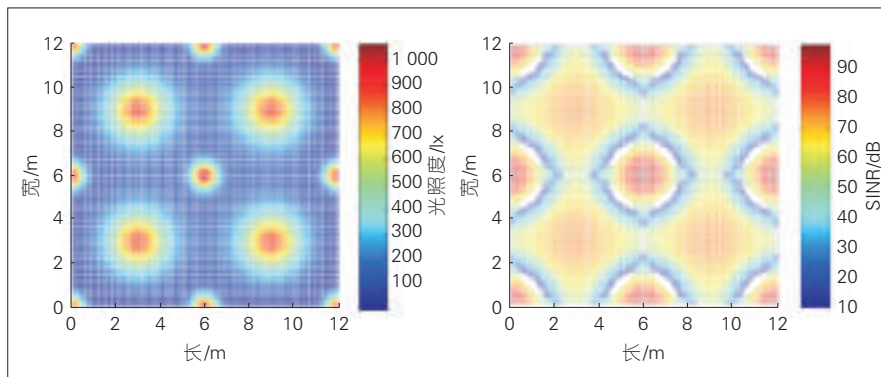
$$P_r = P_t \cdot H(0) \quad (4)$$

可见光信干噪比(SINR)的定义如下:

$$\text{SINR} = \frac{(rP_{t,x}H_x(0))^2}{\sum_{i \neq x} rP_{t,i}H_i(0)^2 + n_0W} \quad (5)$$

其中, r 是 PD 的反射系数, x 指相关接入点(AP), $P_{t,x}H_x(0)$ 是相关 AP 的接收功率, $P_{t,i}H_i(0)$ 是第 i 个干扰 AP 的接收信号强度, W 是 LED 的调制带宽, n_0 则是散射噪声的功率谱密度。

经过理论分析,影响光照度及 SINR 的参数主要有:可见光信号功率、LED 灯的半功率角、LED 灯的高度、光接收器的视场角。光源的优化布局如图 2 所示。通过计算推导及仿真模拟对相关参数进行优化设计,可以获得最优的室内 LED 阵列的布局设计:最佳光源分布形式为六角形分布、LED 灯个数为 13 时,可以使照明及通信盲区最小化。其中图 2(a) 是这种布局下光照度分布图,约 90% 以上是理想照明区域;图 2(b) 是该布局下 SINR 分布图,表示理想可见光通信区域高于 96%。对于不同的室内环境,应快速地建立光照度及信



▲图2 光源优化布局

干噪比分布模型,实现快速地智能布局,这是构建室内光电混合网络的前提。

2.2 网络容量最大化

在室内可见光热点布设时还应考虑网络容量优化问题,包含对于无线路由覆盖范围、人员聚集位置、局域通信能力等指标。

首先,室内无线信道复杂造成网络覆盖不均衡。室内网络中无线路由覆盖范围受到距离、障碍物等影响会出现不同程度信号强度减弱从而不能满足通信需求,因此在无线信号的通信盲区应适当布设可见光热点,从而完善通信网络,达到室内通信区域的无缝全覆盖。

其次,人员活动造成业务量分布不均衡。如图 3 所示,在室内不同区域,人员聚集数量差别很大,对于局域网通信能力的需求也不同,例如视频会议、机场候机厅等出人员密

集,下行业务量很大,在这些区域需要尽量多地布设可见光热点,从而满足用户正常的通信需求;而在个人办公室、卧室等处可以少量布设热点,满足基本照明需求和通信即可。

3 光电协同媒体接入控制技术

可见光 and 无线射频同时作为室内网络的下行链路时,媒体接入控制技术与单一无线网络不同。一方面,如何应充分利用两种信道资源进行协同传输;另一方面,如何克服可见光链路的脆弱性。

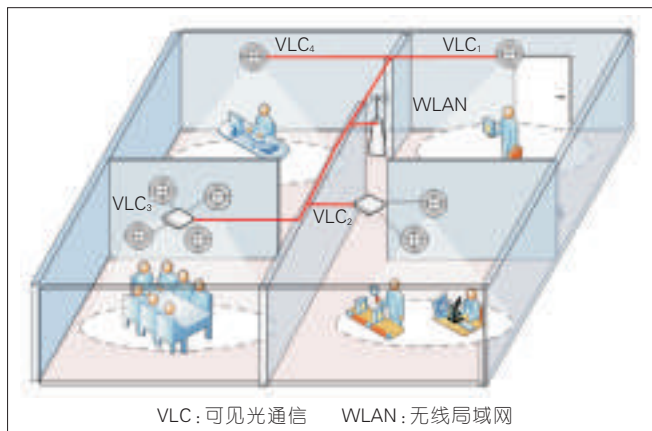
3.1 上行接入问题

室内通信系统上行接入技术主要有基于无线的多址技术、基于位置信息辅助的多址技术。

(1) 基于无线的多址技术

VLC-WLAN 网络中,可以利用无线电信道作为终端接入网络的控制

图3▶ 室内不同区域人员分布



信道。终端在接入网络时,可以借鉴基于 802.11 的 Wi-Fi 的成熟 MAC 机制^[12-13],在其基础上设计室内混合网络的接入控制。前述室内网络架构中,当 $n=1$ 时,网络退化为由 1 条射频(RF)链路和 1 条 VLC 链路构成,即所有用户处于一个 VLC 热点时。将控制信令和数据信令分离,其中控制信令采用无线射频信道发送,支持无线电协议如 IEEE 802.11 协议,可以使用户以较低的冲突概率高效接入网络。而数据信令经过相关的算法计算并分配后,通过无线射频和可见光两种信道进行并行传输。这种思想能在保证了多用户有效地接入网络的同时,大幅度地提升无线混合的网络容量和利用效率。这种多址接入技术无需重新设计新的协议,可以 Wi-Fi 协议基础上加以部分改进即可实现。

(2) 基于位置信息辅助的多址技术

室内通信系统中,VLC 热点不止一个,因此在不同 VLC 热点下的用户终端可以同时接收下行链路的数据。可以考虑借助不同热点下用户的位置信息进行多址接入技术设计。在不同 VLC 热点下的用户同时有通信需求时,根据所处位置的热点不同,在发起通信请求时,在控制信令上附加一段位置信息。中心接入点(AP)收到后,根据收到的控制信令,即可识别用户数据的所处位置和优先级,AP 同时与不同位置不同 VLC 热点的用户发起通信。而在同一个 VLC 热点下的用户,根据其业务优先级的不同,AP 优先分配给业务优先级高的用户可见光信道使用权,优先级低的用户可以分配无线信道,或随机退避一段时间。

3.2 光电链路协同分配

下行链路中,可见光和无线射频信道并行传输,根据两类信道带宽、传输速率等适用于不同用户的业务,可以对信道资源分配问题进行研究,光电链路信道资源分配问题可以视

为非线性的目标函数优化问题。建立针对用户时延最小化、信道丢包率最小及时延抖动最小化等为目标函数的数学模型。以矩阵论、博弈论、MATLAB 仿真软件等工具可以推导出在不同用户服务质量(QoS)要求时,业务传输占用的可见光信道和无线射频信道情况,从而优化信道配置、最大化资源效用^[14]。以时延最小化为例,建立目标函数, n 个用户接入网络,各自业务长度为 L_i ,按照一定比例分配到两种信道上传输,则系统的总时延:

$$\min T = \sum_{i=1}^n \max(\alpha_i L_i / R_v, (1 - \alpha_i) L_i / R_r) \quad (6)$$

其中, R_v 、 R_r 分别为两信道传输速率, α_i 、 $1 - \alpha_i$ 分别是用户 i 在 VLC 信道、无线射频信道上的业务比例。

约束条件是有效可用带宽 B 及各用户最小接入时延限制 τ_i :

$$s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^n \alpha_i L_i < B_v \\ \sum_{i=1}^n (1 - \alpha_i) L_i < B_r \\ \max(\frac{\alpha_i L_i}{R_v}, \frac{(1 - \alpha_i) L_i}{R_r}) < \tau_i \end{cases} \quad (7)$$

4 移动终端的切换技术

可见光的链路特殊性使其通信链路相对其他无线传输方式比较脆弱,VLC 信道受遮挡及远离效应的影响很大,通信过程很容易被障碍物遮挡,从而造成链路断开,这极大地影响了用户对于网络通信 QoS 的要求。

4.1 光电链路垂直切换

用户在可见光信道上通信时,因受到障碍物遮挡而导致链路断开,可以切换到无线信道上继续通信,链路恢复畅通后可以切换回 VLC 信道,即光电链路的垂直切换技术。切换包括 3 个阶段:切换发起、切换判决和切换执行。在切换发起阶段,需要检测接收信号强度(RSI),判断链路断开类型;在切换判决阶段,需根据链路断开类型(遮挡或远离)、断开时间

(长时断开或短时断开)和用户 QoS 要求等参数建立判决函数,决定是否立即执行切换或等待链路恢复。牛津大学 Jindong Hou 和 Dominic C. O'Brien 提出了一种基于模糊逻辑的垂直切换决策机制^[10],但判决参数未考虑用户 QoS 需求,模糊判决结果不理想。链路切换的关键内容就是切换发起和切换判决两个阶段,其中切换判决是切换机制的关键,也是研究的重点。

4.2 终端的水平切换

室内通信用户往往低速游牧移动,当因受到障碍物遮挡导致通信链路断开时,可以触发链路间的垂直切换机制,若进入新的 VLC 热点或小区,可以执行水平切换,从而保证用户继续保持高速通信能力。

水平切换包括在同一个小区内不同 VLC 热点之间的切换,不同小区间的切换两类。在同一个小区内不同热点间切换只需针对用户 QoS 需求及 VLC 热点网络参数,通过小区选择算法选择出理想的切换目标。而不同小区之间的水平切换不是单纯的水平切换,包含几个过程:用户离开一个小区进入另一个小区时,首先触发垂直切换到 WLAN 网络;再进入新小区的 WLAN 网络后认证连接;识别到 VLC 热点后再执行垂直切换到 VLC 网络。可简化为光电垂直切换—WLAN 水平切换—光电垂直切换。

小区选择算法是一个典型的多目标决策算法,需要综合考虑不同接入网络的信号强度、剩余带宽、上行链路视距径和用户 QoS 要求等多个方面的因素,做出最合理的目标网络选择决策^[15]。

构建相应的多属性判决效应函数如下所示,其中 N 是属性集合总数, M 是目标方案数:

$$U(A_i) = \sum_{j=1}^N w_j X_{ij}, i \in M \quad (8)$$

由于无线异构网络参数值无统一标准,为了消除量纲效应和尽可能

维持各参数值的变化信息,需要对其进行规范化。

用矩阵选择网络的参数值进行表示,如下式所示:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3n} \\ x_{41} & x_{42} & \dots & x_{4n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, n 表示候选小区网络, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别表示信号强度、剩余带宽、上行链路视距径和用户 QoS 要求。矩阵 X 的元素 x_{ij} 代表第 i 个网络第 j ($j=1, 2, 3, 4$) 个参数值。从 4 个参数 (x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4) 中每次选取 2 个参数 x_i 和 x_j , x_i 和 x_j 对网络选择的影响程度比值用 C_{ij} 表示,从而得到两两比较判断,并且按照重要程度评定等级,采用数学 1~9 个数表示其重要性。比较结果构成等级用于判断矩阵 $C = [c_{ij}]$, 这样判决矩阵可如下式所示:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & \dots & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & \dots & c_{44} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $c_{ij} > 0$, $c_{ii} = 1$ 且 $c_{ij} = 1/c_{ji}$, 然后利用方根法计算判断矩阵,得到评价参数的权重。具体操作如下:

(1) 计算判决矩阵每一行的积:

$$M_i = \prod_{j=1}^4 c_{ij} (i=1, 2, 3, 4)$$

(2) 计算 M_i 的 m 次方根: $w_i^* = \sqrt[m]{M_i}$

(3) 归一化处理: $w_i = \frac{w_i^*}{\sum_{i=1}^4 w_i^*}$

其中 w_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为信号强度、剩余带宽、上行链路视距径和用户 QoS 要求的标准化属性值。代价函数即为各属性权重和标准化属性值的乘积和,代价函数越大表明选择该小区越好。通过终端的水平切换技术可以用户因远离可见光热点导致通信被打断时还能继续通信,从而保证光电混合系统进行高速、高效的

通信。

5 室内异构网络融合

单一的通信接入技术往往针对特定的业务设计其网络架构、信令流程及管理体系,并拥有独立的资源管理模式,长此以往使得各个通信网络成为孤岛般的相对独立自治域。由于异构通信网络间缺乏有效的协调,系统间的干扰、重叠覆盖、单一网络业务提供能力有限等现实问题凸现,其解决方案就是网络间的互通融合。因此,异构融合网络体系和机理的确立,将是实现可见光通信异构网络高效可靠传输的关键。

在可见光通信网络与 Wi-Fi、蓝牙、Zigbee 等室内短距离接入技术融合方面, VLC、Wi-Fi 等末端网络独立地执行各自的物理层和媒体接入控制层通信协议,通过增加一个通用链路层 (GLL) 实现异构网络融合。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。

另外,秉承控制与数据层面分离的演进思路,分别定义控制平面和用户平面:在用户平面,基于不同接入技术的不同格式数据包通过转换处理,按照统一接口向上层提供给数据流;在控制层面,将各网络的下层反馈信息收集传递到协同资源管理单元,以进行动态的移动性管理和联合网络资源管理。

5.1 接入网络选择

在可见光通信异构网络融合环境下, IEEE 802.11 系列网络与可见光网络的参数,如接收信号强度、可用带宽、发射功率各有不同,多种网络的融合,使用户不再只由单一网络接入网络提供服务,而是无缝漫游于多种无线接入环境中。多模终端如何在多种无线技术并存的网络环境中始终保持接入最优网络是异构网络要研究的一个关键问题。在融合网络中,在性能、覆盖、数据速率和移动

性支持等方面各具特性,不同接入技术相互补充、融合和集成。当多模终端处于多种网络不同网络覆盖区域时,进行网络选择,保证终端接入最优网络的同时,也能有效利用全网的无线资源。

通用接入选择过程分为网络发现、接入判决、接入执行 3 个部分,网络发现过程中,配置有多种无线接口的移动终端寻找可以使用的网络,并记录每个网络的可用服务类型。接入判决过程中,移动终端确定接入的目标网络,接入算法基于多种参数如带宽、时延、抖动、丢包率等。其具体的判决算法与小区切换算法目标网络的选择方法类似。接入执行阶段,终端连接到接入选择阶段的目标。

5.2 网络资源管理

根据室内用户请求的业务类型特征、网络能力等,研究全新的联合网络资源管理机制,通过资源变化的不同粒度引入时间尺度上的智能方法,支持动态调整接入权限、智能联合会话和异构多连接协同传输,从而能实现多网络间及网络内的资源合理分配和使用,使网络效能最大化。

在可见光异构网络环境中,存在异构网络资源分配问题,针对此,首先从最大化异构网络系统容量角度出发,讨论网络效用最大化模型。利用模型将可见光与其他无线通信网络资源抽象化最优化问题来解决,并用函数变量表示异构网络中的资源要素。为分析网络系统的整体效益,以光电混合网络和 3G 网络资源为例讨论,引入网络效用函数:

$U_{i,l} = \sigma \log(ab)$ 表示网络 i 为连接 l 分配带宽 b 所获得的收益,系统的总收益为:

$$U_{tot}(m_i, c_i) = \sigma [N_1 \log(\frac{am_1}{N_1}) + N_2 \log(\frac{a(m_2+c_2)}{N_2}) + N_3 \log(\frac{a(m_3+c_3+B_i)}{N_3})] \quad (11)$$

其中, m_i 、 c_i 分别表示光电混合网络和 3G 网络为各个区域分配的带宽, $N_i = B/b_m$ 表示区域 i 的平均用户数, B 是区域 i 网络业务量的预测值, b_m 为平均每个用户的业务量, 基于此, 网络级资源分配最优化问题建模为:

目标函数 $\max U_{tot}(m_i, c_i)$, 约束条件 $m_1 + m_2 + m_3 = B_m, c_2 + c_3 = B_c$ 。

其中, B_m 、 B_c 分别表示光电混合网络、3G 网络的总带宽, 最优化模型中的约束条件表示为网络为各个区域的带宽之和等于该网络可用的总带宽。通过求解上述最优化模型可以获得使系统效益最大化的带宽分配方案。

6 结束语

全球绿色照明的推广和 LED 的发展使可见光通信技术引起广泛关注。目前针对可见光通信高速拓展技术的研究十分广泛, 但针对室内可见光组网及其关键技术的研究还没有受到重视。本文在分析了可见光通信应用在室内网络的可行性基础上, 介绍了一种可见光和无线射频混合的室内基本网络架构。针对这种光电混合网络架构, 对其光源布局技术分别从网络覆盖区域最大化和网络容量最大化为目标的方向进行了研究。在光电混合组网中, 媒体接入控制技术是重点, 本文分析了两种可行的上行多址接入技术和下行光电链路的协同分配算法。针对可见光通信容易受到遮挡和远离造成断开的情况, 提出了光电链路垂直切换技术和用户水平移动引发的小区切换技术。另外, 室内光电混合网络与其他基本网络的异构网络融合技术是完善室内通信系统, 保证通信质量的关键技术。本文针对用户对于异构网络的接入选择方法、异构网络的资源管理方案, 提出了一些基本技术方案。

随着 LED 照明和高速无线网络技术的发展, 可见光与无线射频融合

在室内组网方面的研究必将成为一个充满前景的研究方向。本文提出的一些组网方面的关键技术只是一些基本的解决方案, 还有更多技术细节有待进一步研究。

参考文献

- [1] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]// Proceedings of the PIMRC, 2000: 1325-1329.
- [2] IEEE P802.15.7. Part 15.7: PHY and MAC standard for short range wireless optical communication using visible light [S]. IEEE, 2011, 11.
- [3] JELENA V, CHRISTOPH K, et al. 803 Mbit/s Visible Light WDM Link based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2011: 1-3.
- [4] CHI N, WANG Y, WANG Y, et al. Ultra-high-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12 (1): 1671-1674.
- [5] TSONEV D, CHUN H, RAJBHANDARI S, et al. A 3 Gb/s Single-LED OFDM-based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μ LED [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 637-640.
- [6] OLIVIER B, MAMDOUH T. Hybrid Wireless Optics (HWO) [C]// Proceedings of the 6th CSNDSP, 2008: 283-287.
- [7] OLIVIER B, PASCAL P. Visible-light Communication System Enabling 73 Mb/s Data Streaming [C]// Proceedings of the IEEE Globecom Workshop on Optical Wireless Communications Conference, 2010: 1042-1046.
- [8] MICHAEL B R, ANNA M V. A Hybrid Radio Frequency and Broadcast VLC system [C]// Proceedings of the MCL Technical Report, 2011: 792-796.
- [9] BAO X, ZHU X, SONG T, et al. Protocol design and capacity analysis in hybrid network of visible light communication and OFDMA system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1770-1778.
- [10] HOU J, O'BRIEN D C. Vertical handover-

decision-making algorithm using fuzzy logic for the integrated Radio-and-OW system [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2006, 5(1): 176-185.

- [11] 陈特, 刘璐, 胡薇薇. 可见光通信的研究 [J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(1): 49-52.
- [12] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2000, 18(3): 535-547.
- [13] BIANCHI G, TINNIRELLO I. Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis [J]. IEEE communications letters, 2005, 9(8): 765-767.
- [14] 徐晶, 杨宗凯, 袁巍. 一种异构多接口无线网络的信道分配算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(5): 1053-1056.
- [15] 吴琼, 鲜永菊, 徐昌彪, 覃华忠. 认知无线电中基于多属性判决的目标切换信道选择 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(27): 158-160.

作者简介



郭伟, 中国人民解放军信息工程大学信息工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为无线网络、可见光通信。



于宏毅, 西安电子科技大学博士毕业; 中国人民解放军信息工程大学信息工程学院教授、博士生导师; 主要研究方向为无线网络、通信中的信号处理。



刘建辉, 中国人民解放军信息工程大学信息工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为无线网络、可见光通信。

综合信息

SDN 产业联盟正式成立

由工信部电信研究院联合业界 15 家单位共同发起的 SDN 产业联盟 2014 年 11 月 6 日宣布成立, 该联盟将秉承“开放、创新、协同、落地”的宗旨, 聚焦 SDN 商用实践, 推动 SDN 产业发展。联盟由中国电信、中国移动、中国联通、工信部电信研究院、百度、阿里巴巴等 33 家成员组成, 将定位于全球 SDN 产业的推动。

(转载自《中国信息产业网》)

应用于可见光通信的上行链路方案探讨

Analysis of Uplink Schemes for Visible-Light Communication

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0008-004

摘要: 基于对采用射频、可见光、780 ~ 950 nm 红外光作为可见光通信上行链路的分析,提出了采用 1 550 nm 激光作为可见光通信上行链路的全新方案,在典型室内应用场景下,与下行的可见光链路共同构成一套波分双工全光通信链路,其上行链路可达 1 Gb/s。1 550 nm 激光上行链路同样具有速率高、无电磁干扰、与保密性好等与可见光通信相一致的特点,可以成为可见光通信上行链路候选方案之一。

关键词: 可见光通信;发光二极管;上行链路;激光

Abstract: This paper analyzes the features and feasibility of the uplink utilizing wireless radio frequency, visible light, and 780–950 nm infrared light for visible-light communication. In addition, a novel uplink scheme employing 1550 nm laser and avalanche photo diode is presented. This scheme maintains the advantages of high-speed, no electromagnetic interference, and enhanced security. The simulation results indicate that this uplink can achieve a data rate of 1 Gb/s.

Keywords: visible light communication; light-emitting diode; uplink; laser

郑重/ZHENG Zhong

刘璐/LIU Lu

胡薇薇/HU Weiwei

(北京大学 区域光纤通信网与新型光通信
系统国家重点实验室,北京 100871)
(State Key Laboratory of Advanced Optical
Communication Systems and Networks,
Peking University, Beijing 100871, China)

白光发光二极管(LED)相比于传统光源具有更高的发光效率,绿色环保,正在逐步成为主要的照明光源。可见光通信将通信信号加载至室内照明白光LED上,通过高速光照强度变化来进行数据通信^[1]。可见光通信无需新的电磁频谱许可,也不会引入对其他设备的电磁干扰,还具有通信速率高、保密性好等优点^[2-3]。室内白光照明LED一般固定于天花板特定位置,通过可见光对室内各终端进数据广播,构成可见光通信的下行链路。现有的报道中多是此类单

向可见光传输链路,然而一个完整的通信系统必须具有协同工作的上行链路。截至目前,可见光通信数据速率最高已经达到 10 Gb/s^[4]。为与可见光通信下行链路数据速率相匹配,上行链路需要具备较高的速率。此外,可见光通信系统一般面向短距离无线移动接入系统,因此上行链路也需为无线链路,且具有可移动性^[5]。

1 可见光通信研究现状

在可见光通信研究的早期阶段,牛津大学的 O'Brien 和爱丁堡大学的 Harald Haas 组都已考虑到上行链路会是可见光通信的重要挑战之一,并指出射频、红外光等可以作为上行链路。波士顿大学的 TDC Little 等提出

并分析了 Wi-Fi 与可见光广播系统相融合的方案,在该方案中, Wi-Fi 与可见光广播通信链路协同工作,相比于两者单独工作,实现了更高的传输速率^[6]。台湾国立交通大学 C. W. Chow 组通过时分双工(TDD)的方式,实现了双向可见光通信^[7]。与之对应,复旦大学迟楠组展示了以 RGB 3 色 LED 中红绿 2 个通道作为下行,蓝色通道作为上行的波分双工(WDD)可见光通信系统^[8]。意大利比萨圣安娜高等学校的 Cossu 等展示了可见光与 850 nm 波段红外光共同组成的双向 400 Mb/s 点对点链路,但该链路为点对点链路,与实际场景所需的上行链路仍有差距^[9]。在此研究基础之上,本文提出了以 1 550 nm 激光作为上行链路的全新方案,在典型室内应用场景下,该方案至少可以提供 1 Gb/s 的上行链路速率,且具有安全性高、保密性好等诸多优点。

2 现有上行链路技术方案

现有研究已提出无线电波与无线光波两大类上行链路用于可见光

收稿日期: 2014-09-05

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA013602), 国家自然科学基金(61320106001)

通信系统,无线电波主要以 Wi-Fi 为典型方案,而光波方案中又可以按照波段分为 380 ~ 780 nm 间的可见光波段与 780 ~ 950 nm 间的红外光上行链路。各方案示意图如图 1 所示。我

时可见光通信系统为原有的 Wi-Fi 系统提供了额外的数据带宽,将大大提高整个系统的吞吐量^[6]。

现有的射频技术如 Wi-Fi 等已有成熟的技术标准,经过补充与融合,

非对称业务有很好的动态灵活性。

与时分双工相对应,在文献[8]中,作者展示了波分双工的可见光双向通信链路。文中的 LED 为 RGB 3 色 LED,分别在红(R)、绿(G)两个通道上加载了 32/64QAM-OFDM 下行信号,而蓝色(B)作为上行通道,加载了 32/64QAM-OFDM 信号,在 66 cm 的自由空间中实现了下行 575 Mb/s 与上行 300 Mb/s 的传输速率。文章指出探测器前端的滤光片能够很好地抑制不同波长通道间的干扰,因此可以构成可见光波段内的波分双工系统。但是 3 色 LED 只有 R、G、B 3 个固定通道,无法像 TDD 方式一样灵活分配上下行速率。

室内可见光通信下行链路利用天花板上固定的照明 LED 发射信号,是在照明的基础上完成通信,然而当终端也使用可见光作为上行信号时需要利用 LED 向空间中发出一定强度的光照,有时 LED 发出的光并不是环境照明所必须的,甚至会对身处其中的人们产生视觉干扰,因此利用可见光作为上行链路只能用于某些特殊场景。采用时分双工或波分双工的可见光系统更适用于点对点间的双向通信,在 IEEE 802.15.7 标准中也提出了利用可见光通信的双向点对点链路形式^[12]。

2.3 780 ~ 950 nm 红外光上行

采用 780 ~ 950 nm 红外光的上行链路与可见光上行链路类似,如图 1(c)所示。780 ~ 950 nm 红外光是早期红外通信技术的主要波段,该波段与硅基探测器的峰值波段相吻合,具有较高的探测效率。红外 LED 成本低廉,驱动电路简单,因此早期的低速红外通信链路多选择 LED 而非激光二极管(LD)作为光源,但是红外 LED 发光谱较宽,调制带宽仅有数兆赫兹,可达到的数据速率较低。此外红外 LED 发射功率半角大约在 15° 到 30° 之间,远小于可见光 LED 的发射功率半角,因此光束较为集中^[13],



▲ 图 1 现有上行链路技术方案

们将在下面各小节中介绍各方案并讨论其技术特点。

2.1 射频上行

传统无线通信系统利用射频作为载波来传递信息,可见光通信仍然可以采用射频作为上行链路,如图 1(a)所示。目前室内无线局域网(WLAN)应用与部署最为广泛、技术最为成熟的是 Wi-Fi,即 IEEE 802.11 系列协议^[10]。Wi-Fi 技术包括 IEEE 802.11 a/b/g/n/ac 等适用于 WLAN 的协议标准,旨在为用户提供无线宽带数据接入^[11]。现有移动终端大都安装有 Wi-Fi 模块,Wi-Fi 热点也已广泛部署,然而当用户数据量不断增长时,接入信道时产生碰撞的几率与退避等待时间都在不断增加,因此可以由可见光通信系统来承载下行链路数据,而 Wi-Fi 用作上行链路。可见光通信一般为视距(LOS)链路,当接收机与 LED 发射源之间有障碍物遮挡时,Wi-Fi 也可以短时间提供下行传输,以保证服务质量(QoS)。由此可以将可见光通信与 Wi-Fi 进行深度融合,共同组成异构网络。由屋顶的 LED 提供其覆盖范围内的下行链路,组成一个个微微小区,而 Wi-Fi 提供整个大范围的覆盖与上行链路。此

大都可以作为可见光通信的上行方案,由于原系统下行数据由可见光系统分担,上行传输吞吐量可大幅提高。当可见光接收机处于被遮挡位置时,射频链路可以短暂提供下行传输,以保证数据业务的实时性,甚至可以进行深度融合组成异构网络。然而采用射频上行方式将会与现有的系统产生干扰,占用已经十分拥挤的频谱资源;此外,射频上行会有电磁辐射,将无法用在电磁敏感环境,可见光通信的保密性也会大大减弱。因此,为保持可见光通信的优点,上行链路可以回归光波作为载波,与可见光通信系统构成全光无线通信网络。

2.2 可见光上行

可见光通信系统下行是利用白光照明 LED 灯进行数据传输,因此上行亦可以利用可见光波段传输数据,如图 1(b)所示。在文献[7]中,作者演示了 40 个 LED 阵列作为下行,1 个单独的 LED 作为上行的时分双工的可见光通信链路。上下行链路经过精确同步与添加保护时间间隔后,上下行间和墙壁反射的干扰得到了抑制。时分双工系统可以灵活地配置上下行和每个用户的时隙长度,对于

780 ~ 950 nm 波段内的红外光与可见光相接近,也是人眼较为敏感的波段,需要严格限制发射功率。红外通信标准主要由红外数据组织(IrDA)制订,最早的版本为1996年制订完善的IrDA通信协议,定义了最高速率为4 Mb/s的半双工连接标准。之后IrDA又相继制订了速率达1 Gb/s的Giga-IR标准。由于受发射功率限制,这些标准定位于移动终端的点对点间的直接传输,通信距离大多在1 m以内,难以直接用作室内可见光通信上行链路^[14]。

在文献[9]中, Giulio Cossu 等人使用中心波长在850 nm处的红外LED作为可见光通信的上行链路,以RGB 3色LED中蓝色通道作为可见光通信的下行链路,该实验中上下行均采用了离散多音频调制(DMT),接收端采用雪崩光电二极管(APD)探测器,其前端分别放置了473 nm(带通10 nm)和805 nm长波通滤光片,构成波分双工系统,前置滤光片消除了上下行间的干扰,且抑制了背景噪声,实现了2 m距离间的400 Mb/s双向通信。

780 ~ 950 nm 红外通信受人眼安全以及成本限制,大都采用红外LED。红外LED成本低廉,发射机结构简单,便于移动终端使用。但是受红外LED调制带宽限制,上行链路速率较低。另一方面,红外LED光束较为集中,需要进行简单的瞄准并限制发射功率在人眼安全范围内,因此终端的移动性与链路质量会受到限制。

3 1 550 nm 激光上行新方案

在目前的研究基础之上,我们提出了采用1 550 nm激光作为载波的全新可见光通信上行链路方案,与下行的可见光链路共同构成一套波分双工全光通信链路,如图2所示。

相比于780 ~ 950 nm波段上行链路采用的红外LED仅有的数兆赫兹响应带宽,1 550 nm波段的激光器拥有可达数百兆赫兹到数十吉赫兹的

图2
1 550 nm 激光上行链路方案



响应带宽^[15],可以达到更高的传输速率。1 550 nm波段的探测器为InGaAs材料,相比于硅基的780 ~ 950 nm探测器具有更高探测效率,可达0.75 ~ 0.95 A/W。此外1 550 nm激光器还具有较窄的谱线宽度,因此在接收机前端可以通过窄带滤光片将绝大部分背景干扰光滤除。

虽然1 550 nm波段已经远离可见光范围,但是对于无线激光上行链路,必须考虑人眼安全功率范围。根据国际电工委员会(IEC)规定,用于上行链路的激光器必须为1类或1M类激光产品,对于1 550 nm波段来说,在10 s的接触时间内,1 000 W/m²为安全接触量,约是780 ~ 950 nm波段接触量的40倍^[16],因此,1 550 nm波段可以具有更大的发射功率以达到更好的链路质量。

上行链路可以有直射链路、扩散链路和散射链路3种方案^[17]。直接链路由激光器直接对准位于屋顶的APD探测器。这种方式光束较为集中,具有很高的能量效率与链路质量。然而直接链路需要精确的瞄准机制,发射结构会比较复杂。扩散链路在激光器前端放置一个光学扩散透镜,将激光器出射光的功率半角扩散至15°至30°,此时在建立链路时,不再需要精确的对准,发射装置可以得到简化。以上两种链路都是LOS链路,路径损耗较小,具有较高的能量效率,且背景噪声很低。与之相对应的第3种是非视距(Non-LOS)链路,激光器发出的光并不直接对准接

收机,光束经过墙壁或天花板的散射到达接收机,因此无需瞄准机制。Non-LOS链路具有很高的鲁棒性和移动性,当室内有障碍物或者人员走动产生遮挡时,依旧能保持链路畅通。然而Non-LOS链路具有较大的路径损耗,需要在确保人眼安全的前提下,适当增加发射功率,能量效率较低。综上所述,扩散链路具有较高的能量效率,且无需复杂的瞄准结构,较为适用于可见光上行链路,下面我们对其进行具体分析。

图3为1 550 nm激光上行链路示意图,假设在一个6.0×6.0×3 m³的屋子内,接收机位于天花板中心位置。在发射端,激光器经过透镜进行扩束,用朗伯模型对其进行建模^[13]:

$$R_{\theta} = \frac{(m+1)}{2\pi} \cos^m \phi \quad (1)$$

其中 m 与功率半角 $\phi_{1/2}$ 的关系为 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$ 。对于是直接链路,仅计入LOS链路损耗而直接忽略由屋顶和墙壁散射造成的其他多径光束,因此接收光功率可以表示如下:

$$P_r = \begin{cases} \eta_r \eta_R P_t \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

其中 η_r 和 η_R 为发射机与接收机光学前端的透过率, P_t 为发射功率, A 为探测器的有效接收面积, ψ_c 为可视角(FOV), ϕ 为偏离角, ψ 为发射机与接收机连线与垂直方向间的夹角。

为提高接收灵敏度,我们采用

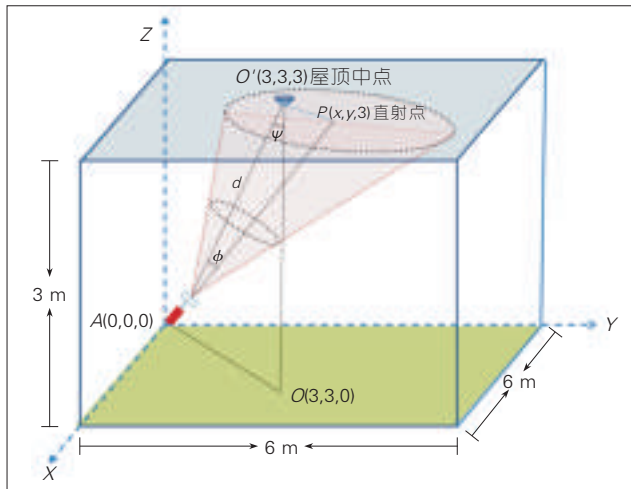


图3
上行链路示意

APD作为探测器,那么接收信号 S 可以表示为:

$$S = R^2 P_r^2 M^2 \quad (3)$$

其中 R 为光电探测效率, M 是APD的雪崩增益。

对于LOS链路,由于忽略了多径信号影响,码间串扰(ISI)同样可以忽略,因此接收信号的噪声可以看做是由散弹噪声和热噪声相加而组成的白噪声,其方差可以表示为:

$$N = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \quad (4)$$

散弹噪声由APD探测器引入,其表达式为:

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = [2eRP_r M^{2+x} + 2e(I_{\text{amb}} + I_d)M^{2+x}]B \quad (5)$$

其中 e 为电子常数, x 是雪崩增益因子, I_{amb} 是背景光电流, I_d 为探测器的暗电流, B 为接收带宽。热噪声由电子的随机热运动产生,为简化处理,热噪声可以由热噪声密度(i_{amp})与带宽的乘积来计算:

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = i_{\text{amp}}^2 \cdot B \quad (6)$$

由公式(1)到公式(6)可以得到信噪比的表示为:

$$SNR = \frac{S}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2} = \frac{R^2 P_r^2 M^2}{[2eRP_r M^{2+x} + 2e(I_{\text{amb}} + I_d)M^{2+x} + i_{\text{amp}}^2]B} \quad (7)$$

根据公式(7)和香农公式,考虑上行发射机位于屋内角落处(0,0)处最不利情境下,可得直射点位于天花板不同位置时链路的理论容量,结果如图4所示。仿真所用的参数见表1。

由仿真结果可知:在500 MHz的带宽条件下,上行链路在大约12.3 m²的瞄准误差范围内速率可达1 Gb/s,这将与可见光下行系统相匹配,构成全光双工链路。如果进一步扩展激

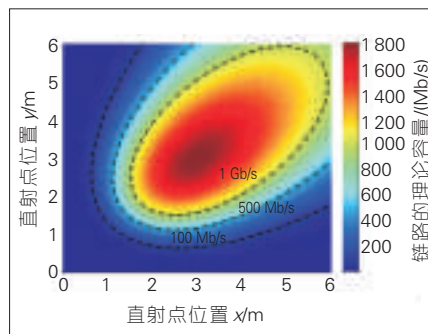


图4 直射点位于天花板不同位置时链路的理论容量

表1 仿真参数

参数	值	参数	值
P_r	10 mW	M	30
$\phi_{u/2}$	15°	x	0.7
ψ_c	60°	I_{amb}	10 μA
A	10 cm ²	I_d	30 nA
$\eta_r \eta_k$	0.7	i_{amp}	5 pA/√Hz
R	0.9 A/W	B	500 MHz

光器的调制带宽至数吉赫兹,上行链路速率甚至可以与下行速率对等达到数吉比特每秒。虽然1550 nm激光器成本较高,但随着技术进步,其成本将会逐渐下降至可接受范围。

4 结束语

以Wi-Fi为代表的室内射频技术是现有的成熟技术方案,作为可见光通信上行链路时,通过与可见光下行链路进行协作,大大提高了链路总容量。Wi-Fi能够提供数百兆比特每秒的上行链路数据,在一般互联网业务中,能够与可见光通信10 Gb/s的下行数据速率相匹配,或进一步与可见光通信进行深度融合组成异构网络。然而采用射频上行方案都会引入电磁干扰,且保密性较差,难以体现出可见光通信系统无需占用新的频谱与保密性好等特点。与射频对应的光波上行的方案中,可见光上行方案中可见光不再是照明光的一部分,有时会成为视觉干扰,只能用于一些特定场景。而780~950 nm波段的红外光无视觉干扰,但仍旧靠近可见光波段,人眼对其敏感,因此采用红外LED作为发射源,受调制带宽与发射功率限制,覆盖范围与传输速率有限。在现有研究基础之上,我们提出采用1550 nm激光作为载波的全新可见光通信的上行链路方案,与下行的可见光链路共同构成一套波分双工全光通信链路,初步分析其上行链路可达1 Gb/s,与可见光下行链路的速率相匹配。1550 nm激光上行链路由于其速率高与保密性好等特点,可以成为可见光通信上行链路候选方案之一。

参考文献

- [1] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2004, 50 (1): 100-107.
- [2] O'BRIEN D, ZENG L, LE M H, et al. Visible light communications: Challenges and possibilities [C]//Proceedings of the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International

下转第20页

一种基于 CSMA/CA 的 VLC 系统多用户接入方法研究

A Multi-User Access Technology Based on CSMA/CA in VLC Systems

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0012-004

摘要: 针对可见光的通信距离较短和带宽有限的特点,提出了一种多终端组网的可见光网络模型,对于室内可见光通信(VLC)系统多用户接入碰撞问题,我们分析了这种网络模型的特点,提出了一种基于载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)的多用户接入方法,给出了多用户接入时碰撞概率和系统吞吐量的表达式,并进行了相应的仿真。仿真结果表明模型和接入方法合理有效。

关键词: 室内可见光通信;多用户接入;载波侦听多路访问/冲突避免

Abstract: Visible light is only used to communicate over a short distance, and the bandwidth is limited. In this paper, we propose a network model based on multi-terminal networking. To address the multi-user access collision problem, we analyze the network model and propose a multi-user access method based on CSMA/CA. We give the mathematical formulas for collision probability and system throughput and run corresponding simulations. The results show that multi-user access based on CSMA/CA is a reasonable and effective method.

Key words: indoor VLC; multi-users access; CSMA/CA

尚韬/SHANG Tao
江涛/JIANG Tao
张颖/ZHANG Ying
(西安电子科技大学 综合业务网国家重点
实验室,陕西 西安 710071)
(State Key Lab of Integrated Service
Networks, Xidian University, Xi'an 710071,
China)

由于具有亮度高、寿命长、性能稳定、节省能源等优点,发光二极管(LED)灯已成为未来主要的照明方式。随着LED照明技术的发展,2000年,日本KEIO课题组提出了白光LED用于家庭通信的基本思想^[1],并在2004年,首次公布了基于白光LED的无线通信技术的基本原理和信道模型^[2]。相比于其他的无线通信方式,可见光通信(VLC)具有成本效益高、免执照、抗电磁干扰、高传输速

率及安全性好等优点。VLC已被建议取代Wi-Fi作为提供室内手机、IPAD等设备高速接入网路的技术方案,特别是在一些禁止电磁波信号的环境,如在医院和飞机上。目前,基于LED灯的室内可见光通信引起了广泛的关注^[3-5],并取得了一定的研究进展(如在光源调制带宽^[6]、波分复用(WDM)^[7]、光源布局^[8]、克服多径效应^[9]等技术,以及IEEE关于VLC统一标准IEEE 802.15.7^[10]等方面的进展)。

实现室内可见光网络需要适合的全双工通信方式。上下行链路都采用可见光时^[11],链路之间的相互干扰难以满足通信的要求,需要采用一定技术进行光信号的分离。即使可

以分离光信号^[12],整个系统的带宽也会受到很大限制,此外,很难解决多用户情况下的信息干扰问题。一些学者提出上行链路用红外而下行链路用可见光的全双工方式以避免上下行链路间的相互干扰^[13]。

由于可见光的通信距离较短,单个可见光终端无法满足较大的室内空间。由于可见光带宽有限,对于多个可见光终端的网络,当每个可见光终端传输不同信息时,可以提高VLC的带宽利用率。传统的无线通信网络在组网时,用户上下行链路所对应的终端一般是固定不变的。在VLC系统中,当室内用户随意移动时,其所对应的可见光终端可能发生变化,且不同可见光终端下行链路传输不同的信息,使得用户组网时的接入问题变得更加复杂。

此外,单个可见光终端由若干LED灯和红外接收单元组成,由于红外接收单元个数有限,当多个用户在单个可见光终端下通信时,用户的接入碰撞问题将无法避免。日本的中川研究组为了区分不同用户终端的

收稿日期: 2014-09-05

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA010502), 国家重点基础研究发展(“973”)计划(2010CB328303), 国家自然科学基金(61172080)

红外数据信息,提出了一种碰撞检测技术^[4],能一定程度解决单个可见光终端情况下多用户之间上行链路干扰的问题,但并不适用于多个可见光终端的情况。

因此,对于室内多终端情况下的 VLC 组网,多用户接入技术的研究是迫切需要的。在这种情况下,本文提出了一种多终端组网的可见光网络模型,具体分析了这种网络模型的特点。在此基础上,提出了一种基于载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)的多用户接入方法,给出了多用户接入时碰撞概率和系统吞吐量的表达式,并进行了相应的仿真。仿真结果表明,本文提出的模型和接入方法是合理有效的。

1 室内 VLC 系统多用户接入方法

1.1 VLC 系统网络模型

室内 VLC 系统网络模型如图 1 所示。可见光终端由 A、B、C、D 表示。为了充分利用红外频谱,我们提出多波长红外通信,在此,设定每个终端的红外接收波长分别是 $\lambda_1 \sim \lambda_4$,每个可见光终端上有 3 个相同波长的红外接收器,用户只能与波长匹配的接收器进行红外通信;LED 灯之间通过红外互连。当某个红外接收器有多个用户同时需要接入时,将会发生接入碰撞。此外,为提高带宽利用率,4 个可见光终端的下行链路传输不同信息,并且红外通信的距离要比可见光通信距离远,这就使得用户在移动后,上行链路继续与原可见光终端灯连接,而下行链路由新的可见光终端所覆盖,即用户的上、下行链路由不同的可见光终端负责管理。例如,图 1 中用户 1 在初始时刻,其上、下行链路都由可见光终端 A 负责管理,而当用户 1 移动后,其上行链路仍然由 A 负责管理,而下行链路变为由 C 负责管理。这样,用户在接入系统时,必须提供自己的相对位置信息,以便下

行信息在可见光终端之间进行转发。

1.2 基于 CSMA/CA 的多用户接入方法

传统 CSMA/CA 技术采用二进制退避算法来避免信息碰撞,在其 4 次握手方案(请求发送/准备接收(RTS/CTS))中^[5],加入了网络分配向量(NAV),以获得信道保持忙状态的时间信息,降低无碰撞接入网络概率。

传统无线的 CSMA/CA 技术不能有效解决室内 VLC 网络模型的用户接入问题。其原因主要有以下几点:

(1) 用户无法侦听红外信道是否繁忙,因此不知道自己是否应该发送信息,无法避免用户接入网络碰撞。

(2) 用户的上下行链路一般由不同终端负责信息发送,需要经过终端间的转发用户才能收到 CTS 信息。

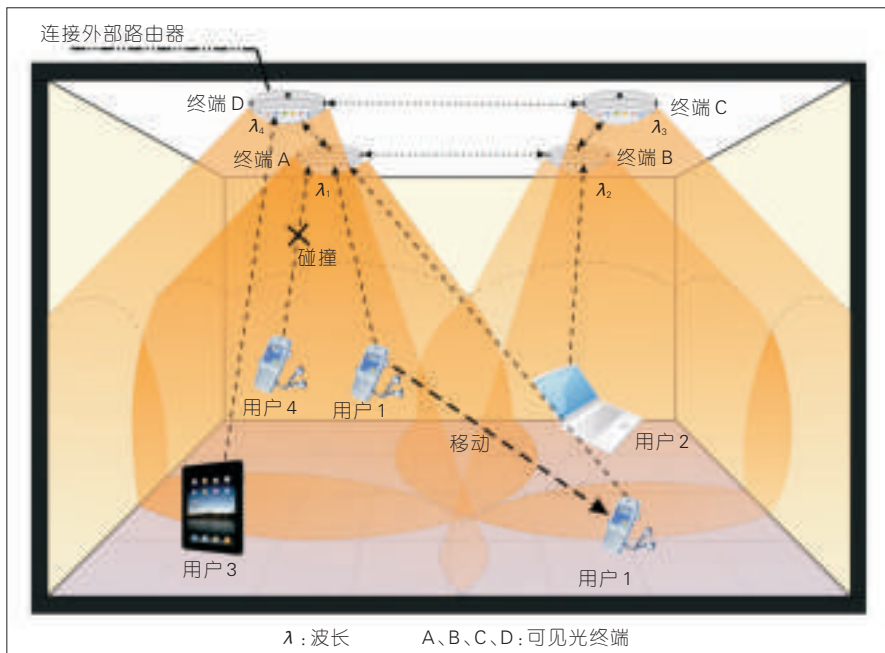
本文提出了一种改进的 CSMA/CA 方法,通过广播上行链路占用信息,用户获得接入等待时间,收到可以接入确认(ACK)信号,用户即可接入网络,终端通过广播 CTS 信息,寻找用户位置,建立用户完整链路信息,达到用户高效接入网络的目的。具体过程如下:

(1) 假设用户 S 上行链路由可见

光终端 A 管理,其所处任意位置,准备接入室内可见光系统,用户 S 会收到网络分配向量,知道信道保持忙状态的时间信息,当时间到后,用户接到 ACK 信息即可向终端 A 发送请求接入信息 RTS,预约信道。如果用户在分布式帧间间隙(DIFS)时间内没收到该信道被占用信息,用户可立即发送请求接入信息 RTS。

(2) A 收到 RTS 信息后,将 S 的地址存入路由列表,附上自己的地址后通过可见光下行链路发送 CTS 反馈信息,并通知其他终端,告知信道已被预约及预约的时间,其他终端将信息发送到所覆盖区域。若 A 没有收到 RTS 信息,说明用户 S 发送的 RTS 信息发生了碰撞, A 不会发送任何反馈信息,用户在一定时间内没有接受到任何反馈信息,即认为发送的 RTS 信息发生碰撞,此时用户启动碰撞退避算法,等待下次接入。

(3) 当用户 S 在 A 的可见光通信区域,用户 S 会即刻收到 A 的 CTS 信息和 A 的物理地址,用户 S 向 A 在次发送 RTS 信息,信息包括管理自己下行链路的终端 A 的物理地址,这时终端 A 获得用户 S 完整的上、下行链路

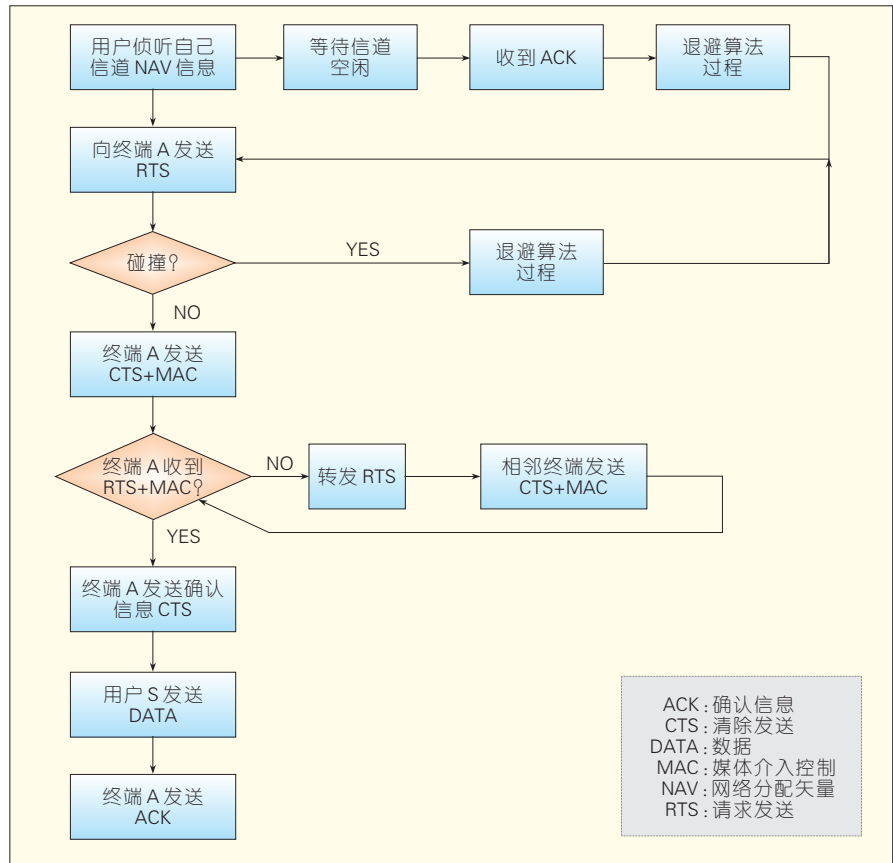


▲ 图 1 室内 VLC 系统网络模型

管理信息,终端 A 再次发送 CTS 信息告诉用户 S 发送数据信息,用户 A 完成室内 VLC 网络的接入,若用户在一定时间内没有收到终端 A 的 CTS 信息,即说明用户 S 不在终端 A 覆盖范围,则以广播方式同时向相邻的照明/通信终端 B 和 D 发送通告信息。

(4) B 和 D 收到此通告信息并分别附上自己的地址,通过可见光下行链路发送 CTS 信息。

(5) 若 S 收到 D 发送的上述消息,则向 A 发送 D 的地址信息, A 将获得 S 完整的上、下行路由信息,用户 S 完成网络接入,即 S 分别与 A 和 D 建立上行红外链路和可见光下行链路。若 S 在一定时间内没有收到应答信息,则通知终端 B 和 D 继续转发 RTS 信息。当用户处在终端 C 的可见光通信范围时,终端会收到终端 B 和 D 转发的 RTS 信息,终端 C 对于相同的 RTS 信息,任意处理一个即可。上述过程的流程如图 2 所示。



▲ 图 2 基于 CSMA/CA 方案的用户接入流程

1.3 用户碰撞概率和系统吞吐量

定义包发送概率为 τ , 碰撞概率为 p 。碰撞窗口为 W , W 由数据包发送失败的次数决定。在第一次发送时, W 设为最小碰撞窗口 CW_{\min} , 发送数据包不成功时 W 值加倍, 直到达到最大碰撞窗口 $CW_{\max} = 2^m CW_{\min}$, CW_{\min} 和 CW_{\max} 由物理层来指定。

最大退避次数为 m , 则包发送概率为:

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (1)$$

假设室内同一红外波长的用户数为 n , 且每个用户都有信息发送, 我们设计的可见光终端中, 有 3 个相同波长的接收器, 则碰撞概率为:

$$p = 1 - (1 - \frac{1}{3}\tau)^{n-1} \quad (2)$$

由于在室内可见光通信中, 传播时延可以忽略, 基于文献[15], 时间变量定义如表 1 所示。

N 个用户至少有一个数据包在发

▼ 表 1 时间变量定义列表

时间变量	数值
负荷量	8 184 bit
媒体介入控制头	272 bit
物理头	128 bit
确认信息	112 bit+物理头
请求发送	160 bit+物理头
清除发送	112 bit+物理头
时隙间隔	50 μ s
短帧间隔	28 μ s
帧间间隔	128 μ s

送的概率为:

$$p_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (3)$$

N 个用户至少有一个数据发送并成功的概率为:

$$p_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1} + C_n^2 \frac{2}{3} \tau^2 (1-\tau)^{n-2} + C_n^3 \frac{2}{3} \tau^3 (1-\tau)^{n-3}}{p_{tr}} \quad (4)$$

根据表 1 给出的时间数据, 我们

可以计算出成功接入时间为:

$$T_{succ} = P * (RTS/Rate_{tr} + SIFS + (CTS + hMAC)/Rate_{vLC} + SIFS + (RTS + hMAC)/Rate_{tr} + SIFS) + P * CTS/Rate_{tr} + CTS/Rate_{vLC} + SIFS + (hMAC + hPHY)/Rate_{tr} + Payload/Rate_{tr} + SIFS + P * ACK/Rate_{tr} + ACK/Rate_{vLC} + DIFS \quad (5)$$

其中, p 为转发次数, 则接入失败时间可表示为:

$$T_{fail} = RTS/Rate_{tr} + DIFS \quad (6)$$

归一化吞吐量为:

$$S = \frac{p_s p_{tr} (Header + Payload)/Rate_{tr}}{p_s p_{tr} T_{succ} + p_{tr} (1 - p_s) T_{fail}} \quad (7)$$

2 仿真结果与分析

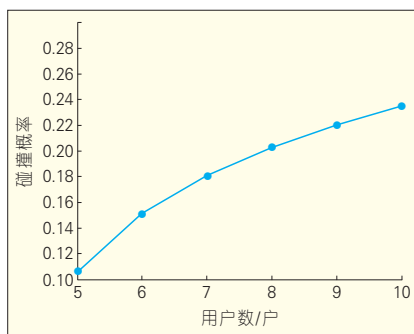
用户接入网络时发生碰撞概率的仿真结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 用户接入碰撞概率较小, 这是由于在一个照明-通信终端上含有 3 个相同波长的接收阵元的缘故, 随着集成技术的提高,

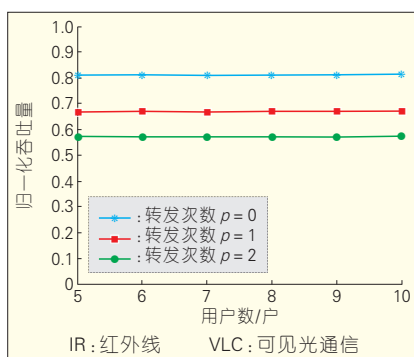
同波长接收阵元的增加,碰撞概率将会变得更小。

从图3也可以看出,随着用户的增多,接入网络的碰撞概率将会增大。例如,当用户数量为5个时,其接入碰撞概率为0.1左右;当用户达到10个时,其接入碰撞概率也只有0.24左右。

我们选取上行红外链路速率为10 Mb/s,下行可见光链路速率为100 Mb/s,对网络的吞吐量进行了仿真,结果如图4所示。可以看出,影响网络吞吐量的主要因素是用户接入过程中信息的转发次数 p 。当 $p=0$ 时,归一化吞吐量达到0.8左右,这种情况对应用户上行链路终端负责用户下行链路通信;当 $p=1$ 时, S 达到0.7左右,这种情况对应用户上行链路管理终端的相邻终端负责用户下行链路通信;而当 $p=2$ 时, S 达到0.6左右,这种情况对应用户上行链路管理终端对角终端负责用户下行链路通信。无论哪种情况,网络性能都很好,说明我们



▲ 图3 用户接入碰撞概率



▲ 图4 网络归一化吞吐量(上行红外链路速率为10 Mb/s,下行可见光链路速率为100 Mb/s)

提出的接入方法有效的。

3 结束语

室内 VLC 系统不仅可以提供高品质的照明,而且可以实现高速、可靠的数据通信。随着 LED 技术的发展,VLC 展现出巨大的应用前景。采用合理的全双工方式可以消除链路之间的干扰,即上行链路使用红外通信,下行链路使用可见光通信。基于上述方式,我们提出了一种 VLC 系统网络模型和新型的多用户接入方法,以符合室内 VLC 系统通信特点,同时满足用户移动通信要求。从用户接入碰撞概率和网络吞吐量的仿真结果可以看出,我们提出的多用户接入方法是合理可行的。

参考文献

- [1] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless Optical Transmissions with white colored LED for Wireless Home Links [C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on PIMRC, London, UK, 2000,(9): 1325-1329.
- [2] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Trans. Consumer Electron., 2004,50(1): 100-107.
- [3] O'BRIEN D. Indoor optical wireless communications: recent developments and future challenges [C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications IX, San Diego, CA, USA, SPIE, 2009,7464: 74640B-1-12.
- [4] HARUYAMA S. Progress of Visible Light Communication [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California, 2010:OThH2.
- [5] ZHENG Y, ZHANG M. Visible light communications—recent progresses and future outlooks [C]//Proceedings of the SOPO, Chengdu, June 2010,(6):1-6.
- [6] VUCICET J. 230 Mbit/s via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs [C]//Proceedings of the OFC/NFOEC, 2010:OThH3.
- [7] KHALID A M, COSSU G, CORSINI R, CHOUDHURY P, CIARAMELLA E. 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2012,4(5): 1465-1473.
- [8] ZENG L, LE-MINH H, O'BRIEN D, FAULKNER G, LEE K, JUNG D, OH Y. High data rate Multiple Input Multiple Output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting [J]. IEEE JSAC, 2009,27(9): 1654-1662.
- [9] SAHA N, MONDAL R K, LE N T, JANG Y M. Mitigation of interference using OFDM in visible light communication[C]//Proceedings

of the ICT Convergence (ICTC), 2012,(10): 159-162.

- [10] RAJAGOPAL S, ROBERTS R D, LIM S K. IEEE standard 802.15.7. Standard for Short-Range Wireless Optical Communication using Visible Light [S].IEEE,2011.
- [11] WANG Y, WANG Y, CHI N, YU J, SHANG H. Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED [J]. Opt. Exp., 2013,21(1): 1203-1208.
- [12] KAMRAN R, JAMES P R. A Frequency Domain Method for Blind Source Separation of Convolutional Audio Mixtures [J]. IEEE Trans. on speech and audio processing, 2005, 13(5): 832-844.
- [13] RUFO J, QUINTANA C, DELGADO F, RABADAN J, PEREZ-JIMENEZ R. Considerations on modulations and protocols suitable for visible light communications (VLC) channels: Low and medium baud rate indoor visible light communications links[C]// Proceedings of the Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV. 2011,(1): 362-364.
- [14] LIN X. High-Speed Full-Duplex Multi-access System for LED-Based Wireless Communications Using Visible Light[C]// Proceedings of the International Symposium on Optical Engineering and Photonic Technology, OEPT 2009, Orlando, Florida USA, 2009,7.
- [15] BIANCHI G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535-547.

作者简介



尚韬,上海交通大学博士毕业;西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室教授、博导;主要从事新型光电子器件、无线激光通信及高速光纤通信领域的研究;已承担基金项目5项;已发表学术论文20余篇。



江涛,西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室在读硕士研究生,研究方向为室内可见光通信。



张颖,西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室在读硕士研究生,研究方向为室内可见光通信。

基于先进调制的高速可见光通信技术

High-Speed Visible Light Communication Based on Advanced Modulation Technology

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0016-005

摘要: 基于发光二极管(LED)调制带宽限制了可见光通信(VLC)系统传输速率这一问题,从VLC系统的先进调制技术出发,探讨了类平衡-正交频分复用、无载波幅相调制和频域均衡单载波调制3种调制技术。对这3种调制技术原理和实验结果的分析与讨论,验证了先进调制技术在提升VLC系统传输容量上的可行性。

关键词: 可见光通信; 正交频分复用; 无载波幅相调制; 频域均衡单载波调制; 类平衡探测

Abstract: We introduce three formats, based on advanced modulation, that improve transmission. These formats are quasi-balanced detection orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM), carrier-less amplitude and phase modulation, and single carrier-frequency domain equalization (SC-FDE). We determine the feasibility of these schemes for improving transmission in a VLC system. We analyze the principles of these three modulation formats and provide experimental results.

Key words: visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing; carrier-less amplitude and phase modulation; single carrier-frequency domain equalization; quasi-balanced detection

迟楠/CHI Nan
黄星星/HUANG Xingxing
王一光/WANG Yiguang
(复旦大学 通信科学与工程系, 上海
200433)
(Department of Communication Science and
Engineering, Fudan University, Shanghai
200433, China)

可见光发光二极管(LED)具有高亮度、高可靠性、能量损耗低和寿命长等许多优良的特性,可用于全色显示、交通信号指示和照明光源等,是公认的下一代绿色照明产品。此外,可见光LED还具有调制性能好、响应灵敏度高的优点,利用LED的这种特性,我们还可以将信号调制到LED所发出的可见光上进行传输。LED可以将照明与数据传输结合起来,促进了一种新型的无线通信技术,即可见光通信(VLC)技术的发展^[1]。VLC利用的可见光波段是未受到管制的频谱,无需授权即可使用。

收稿日期: 2014-09-02

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA013603), 国家自然科学基金(61177071、61250018)

与传统的射频无线通信技术相比, VLC具有如下优点^[2-4]:

(1)绿色通信,安全环保,没有射频电磁辐射,且LED发出的白光对于人眼安全。

(2)能够同时实现通信与照明。

(3)白光不可穿透墙壁等物体,因此可见光通信具有高度的保密性。

(4)可见光不受射频信号的电磁干扰,可以应用在电磁敏感环境中,如机舱、医院等。

(5)由于频谱无需授权即可使用,所以可见光通信应用灵活,可以单独使用,也可以作为射频无线设备的有效备份。

目前,VLC得到了全球研究者越来越多的关注^[5-13]。VLC技术已经取得迅猛发展,传输速率从最开始的几

十兆比特每秒^[5-6]到500 Mb/s^[7]再到800 Mb/s^[8],目前已经突破了吉比特每秒^[9-10]。随着与VLC相关系统器件的开发,系统通信速率还会有更高的提升。

但是VLC技术通信速率的提高也存在着很多限制因素,其中最主要的挑战是LED有限的调制带宽。目前,普通商用白光LED的3 dB调制带宽都低于10 MHz,这很大程度上限制了VLC系统的传输速率。为突破调制带宽这一“瓶颈”,许多技术都被应用到VLC系统,如系统多维复用技术^[11]、预均衡技术^[12]、后均衡技术^[13]等等,来提升VLC系统传输速率。采用先进调制技术,是克服可见光通信系统调制带宽限制,提升系统传输容量的有效方法。在VLC系统中,可以采用的先进调制技术包括类平衡探测-正交频分复用(OFDM)^[14]、无载波幅相调制(CAP)^[15]和频域均衡单载波调制技术(SC-FDE)^[16]。本文从提升VLC系统传输容量出发,分析这3种先进调制技术的特点与实现方式,实现了高速VLC传输系统。通过对这3种调制技术原理和实验结果的分析与讨论,验证了先进调制技术在提升

VLC系统传输容量上的可行性。

1 类平衡探测-正交频分复用技术

类平衡探测-正交频分复用技术(QBD-OFDM)结合类平衡探测编码技术和OFDM技术^[4]。

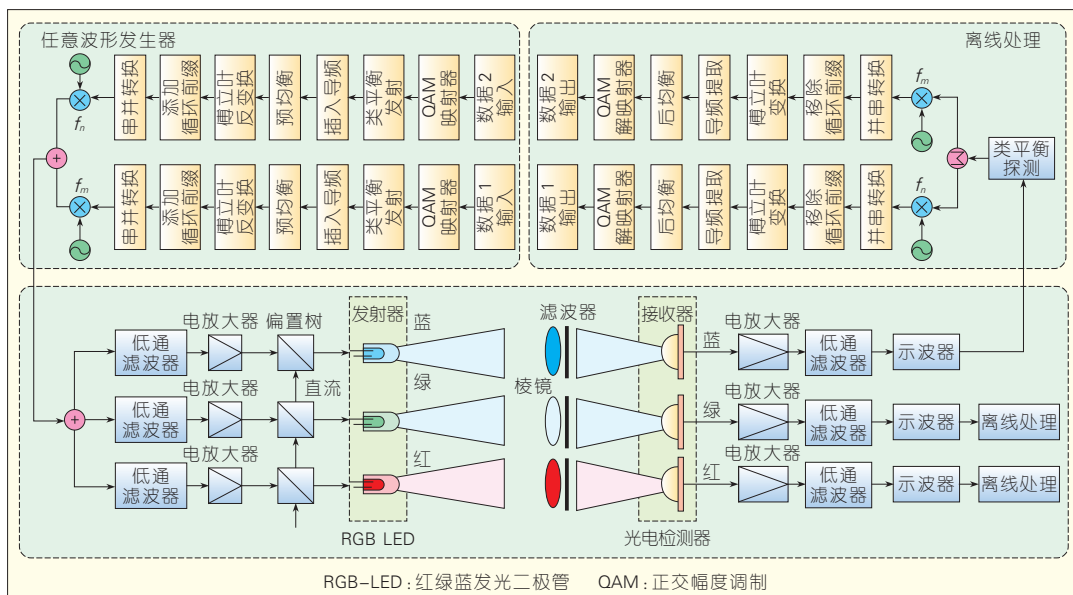
OFDM信号数据被分为多个数据块,每个数据块有两个符号的数据。在相同的数据块,第二个符号中的信号是和第一个符号中的信号在运算符上是相反的。经过理论推导,发现二阶互调制失真、直流电流、可以完全消除,而且接收机的灵敏度可以提高3 dB,因此可以提高信噪比。

我们采用QBD-OFDM技术,实现了可达到2.1 Gb/s实际物理数据速率,并使传输距离达到2.5 m。图1为所提出的QBD-OFDM实验的原理。实验中,QBD-OFDM信号由任意波形发生器(AWG)产生,经过低通滤波(LPF)、电放大器(EA)和偏置树(Bias Tee)后调制到红绿蓝发光二极管(RGB-LED)不同颜色的芯片上。经过自由空间传输后,在接收端由棱镜聚光后,用滤光片将3个波长的光分开,最后采用雪崩光电二极管(APD)探测器接收。然后进行后端的均衡与解调算法处理。

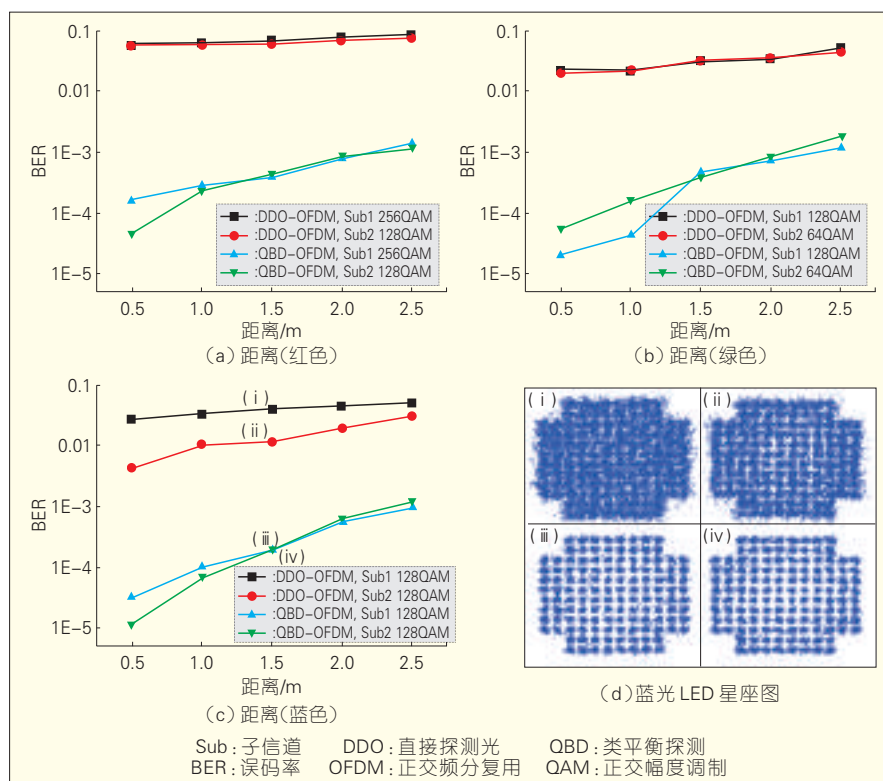
结合波分复用(WDM)和类平衡探测子载波复用,很好地利用了多色LED的波分复用,提供了更多的传输信道。利用类平衡探测技术很好地避免了OFDM提供更多子载波时的峰均功率比(PAPR)限制,有效提升了多色LED传输速度,提高了系统误码率(BER)性能,同时增加了可见光通信的传输距离。图2给出QBD-OFDM技术和直接探测光正交频分复

用(DDO-OFDM)技术的对比。两个子信道带宽为,Sub₁:6.25~56.25 MHz, Sub₂:56.25~106.25 MHz。每个子信道对应的调制阶数分别为,红光:256正交幅度调制(256QAM)和128正交幅度调制(128QAM),绿光:128QAM和

64QAM,蓝光:128QAM和128QAM。因此,红光、绿光和蓝光的数据速率分别为750 Mb/s、650 Mb/s和700 Mb/s,总数据速率达到2.1 Gb/s,实验距离可以达到2.5 m。在距离为0.5 m时,红绿蓝三色对应的Sub₁、Sub₂两个子



▲图1 QBD-OFDM VLC系统原理



▲图2 QBD-OFDM VLC系统所测得的BER和距离的关系

信道的 BER 提升为 25.6 dB、31 dB、30.3 dB、25.8 dB、21.8 dB 和 19.3 dB。当可见光通信系统的通信距离增加时,系统误码率会增加,这是因为距离增加导致系统接收到的光信号减弱,系统信噪比降低,误码率增加。继续增加距离会使 BER 超过前向纠错码的门限,为使距离增加,就要使系统的传输速率降低。蓝光 LED 采用 QBD-OFDM 和 DDO-OFDM 的对应的 Sub₁、Sub₂ 两个子信道的星座图如图 2(d) 的 (i)、(ii)、(iii) 和 (iv) 所示。

2 无载波幅相调制技术

无载波幅度相位调制 (CAP) 是正交幅度调制的一个变种多阶编码调制技术,可以使用模拟或数字滤波器,实现灵活的子带划分和高阶调制,减少了计算的复杂性和系统结构,在数字用户线路有着广泛的应用。

无载波幅相调制信号可以表示如下:

$$s(t) = a(t) \otimes f_I(t) - b(t) \otimes f_Q(t) \quad (1)$$

这里 $a(t)$ 和 $b(t)$ 是 I 路和 Q 路的原始比特序列经过编码和上采样之后的信号。 $f_I(t) = g(t) \cos(2\pi f_c t)$ 和 $f_Q(t) = g(t) \sin(2\pi f_c t)$ 是对应的整形滤波器的时域函数,它们形成一对希尔伯特变换对。

假设传输信道是理想的,在接收机端两个匹配滤波器的输出可以表示如下:

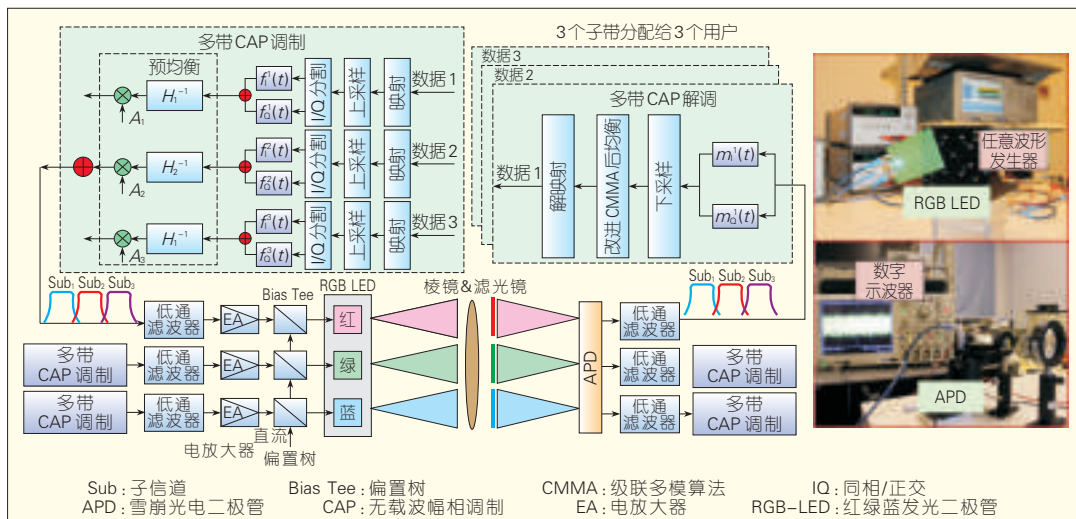
$$\begin{aligned} r_I(t) &= s(t) \otimes m_I(t) = (a(t) \otimes f_I(t) - b(t) \otimes f_Q(t)) \otimes m_I(t) \\ r_Q(t) &= s(t) \otimes m_Q(t) = (a(t) \otimes f_I(t) - b(t) \otimes f_Q(t)) \otimes m_Q(t) \end{aligned} \quad (2)$$

这里 $m_I(t) = f_I(-t)$ 和 $m_Q(t) = f_Q(-t)$ 是对应的匹配滤波器的脉冲响应。利用对应的匹配滤波器在接收端就可以解调出原始信号。

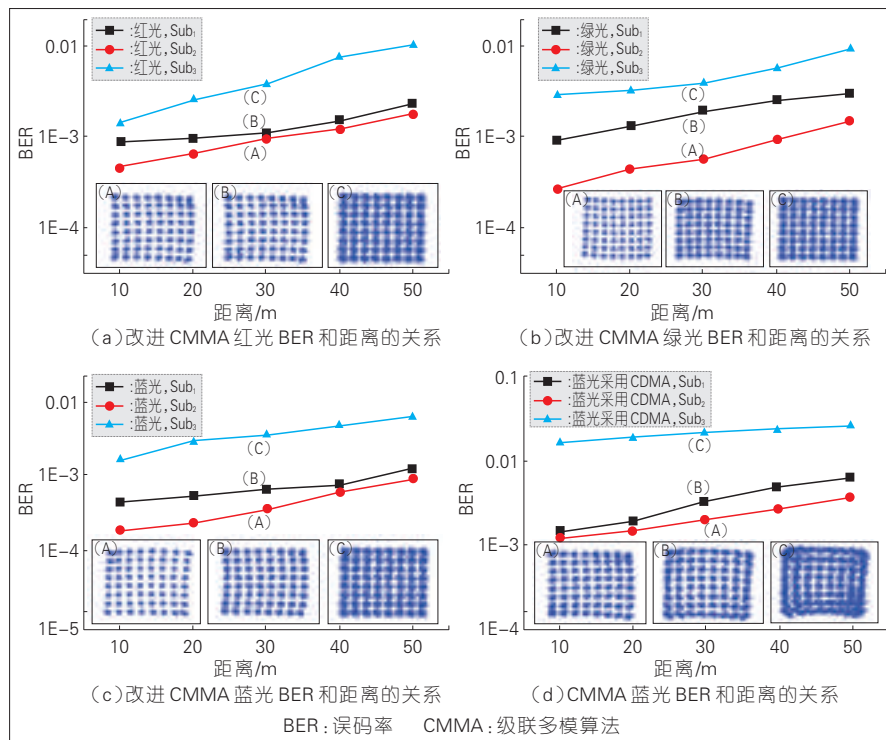
我们采用了无载波幅相调制技术,结合先进预均衡与后均衡算,后均衡算法采用改进级联多模算法 (CMMA),实现了 1.35 Gb/s 可见光传输系统实验^[15]。实验原理图和实验装置图如图 3 所示。

图 4(a) 到图 4(c) 为采用改进 CMMA 均衡算法所测得 BER 和距离的关系。实验中,每个波长上采用频

分复用技术,将不同用户的信号分别调制到 3 个子载波上,每个子载波调制信号带宽为 25 MHz,调制阶数为 64QAM,因此每个子载波的传输速率为 150 Mb/s,每个波长的传输速率为 450 Mb/s。在发射和接收的距离为 30 cm 时,经过波分复用后该系统总的传输速率达到 1.35 Gb/s。图 4(d) 对比了 CMMA 和改进 CMMA 的性能,



▲ 图 3 频分复用 1.35 Gb/s VLC 系统



▲ 图 4 CMMA 和改进 CMMA 性能对比

中兴通讯技术

- Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010 7th International Symposium on. IEEE, 2010: 621–625.
- [4] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]// Proceedings of the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000. The 11th IEEE International Symposium on. IEEE, 2000, 2: 1325–1329.
- [5] LE M H, O'BRIEN D. Faulkner et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 2008, 20(14): 1243–1245.
- [6] LE M H, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. 80 Mb/s visible light communications using pre-equalized white LED [C]//Proceedings of the ECOC 2008, 2008: 6.09.
- [7] VUCIC J, KOTTKE C, NERRETER S, et al. 513 Mb/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED [J]. Lightw. Technol. 2010, 28(24): 3512–3518.
- [8] CHI N, WANG Y Q, WANG Y G, et al. Ultra-high-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats [J]. Chinese Opt. Lett. 2014, 12(1):10605.
- [9] KHALID A M, COSSU G, CORSINI R, et al. 1 Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation [J]. IEEE Photon. J. 2012, 4(5): 1465–1473.
- [10] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, et al. 3.4 Gb/s visible optical wireless transmission based on RGB LED [J]. Opt. Express, 2012, 20(26): B501–B506.
- [11] WANG Y Q, YANG C, WANG Y G, et al. Gigabit polarization division multiplexing in visible light communication [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1823–1826.
- [12] FUJIMOTO N, MOCHIZUKI H. 477 Mb/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit [C]//Proceedings of the National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2013: JTh2A. 73.
- [13] LI H, CHEN X, HUANG B, et al. High Bandwidth Visible Light Communications Based on a Post-Equalization Circuit [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(2): 119–122.
- [14] WANG Y, CHI N, WANG Y, et al. High-speed quasi-balanced detection OFDM in visible light communication [J]. Optics express, 2013, 21(23): 27558–27564.
- [15] WANG Y G, TAO L, WANG Y Q, et al. High speed WDM VLC system based on multi-band CAP64 with weighted pre-equalization and modified CMA based post-equalization [J]. IEEE Communication Letters, 2013, 29(2): 2755–2759.
- [16] WANG Y, LI R, WANG Y, et al. 3.25 Gbps Visible Light Communication System based on Single Carrier Frequency Domain Equalization Utilizing an RGB LED [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2014: Th1F. 1.

作者简介



迟楠, 北京邮电大学博士毕业; 复旦大学通信科学与工程系教授、博导, 2007年亚太光通信会议 (APOC 2007) OSRT 国际研讨会和 ACP 2010 国际会议担任组委会主席, APOC 08、ICAIT09、ACP 2011、WOCC 2012、ACP 2013 技术委员会委员; 主要研究领域为可见光通信、相干光传输和光标记交换; 已发表学术论文 260 篇, 受国际会议特邀报告 15 次。



黄星星, 复旦大学通信科学与工程系在读硕士研究生; 主要从事可见光通信与信号处理方向研究。



王光一, 复旦大学通信科学与工程系在读博士研究生; 主要从事可见光通信与高速光纤通信中的先进调制与信号处理方向研究。

← 上接第 11 页

- Symposium on. IEEE, 2008: 1–5.
- [3] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art [J]. Communications Magazine, IEEE, 2011, 49(9): 56–62.
- [4] BBC News Li-fi' via LED light bulb data speed breakthrough [EB/OL]. (2014–09–01). <http://www.bbc.com/news/technology-24711935>.
- [5] 陈特, 刘璐, 胡薇薇. 可见光通信的研究 [J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(1): 49–52.
- [6] RAHAIM M B, VEGNI A M, LITTLE T D C. A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system [C]// Proceedings of the GLOBECOM Workshops. 2011: 792–796.
- [7] LIU Y F, YEH C H, CHOW C W, et al. Demonstration of bi-directional LED visible light communication using TDD traffic with mitigation of reflection interference [J]. Optics express, 2012, 20(21): 23019–23024.
- [8] WANG Y, SHAO Y, SHANG H, et al. 875-Mb/s Asynchronous bi-directional 64QAM-OFDM SCM-WDM transmission over RGB-LED-based visible light communication system [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2013: OTh1G. 3.
- [9] COSSU G, CORSINI R, KHALID A M, et al. Bi-directional 400 Mbit/s LED-based Optical Wireless communication for Non directed Line of Sight Transmission [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2014: Th1F. 2.
- [10] LEE J S, SU Y W, SHEN C C. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi [C]//Proceedings of the Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, 2007: 265–298.
- [11] ABDALLAH C T, Jordan R. Wireless Communications Networking: and An Overview [J]. IETF Technical Review 2002, 19 (1/2): 19–22.
- [12] IEEE 802.15.7. WPAN Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication [S]. IEEE, 2013.
- [13] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communications [C]//Proceedings of the IEEE, 1997: 265–298.
- [14] BORAH D K, BOUCOUVALAS A C, DAVIS C C, et al. A review of communication-oriented optical wireless systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 21 (1): 1–28.
- [15] SINGH C, JOHN J, SINGH Y N, et al. A review of indoor optical wireless systems [J]. IETE Technical Review, 2002, 19(1/2): 3–18.
- [16] IEC-60825. Safety of laser products [S]. IEC, 2007.
- [17] LANGER K D, VUCIC J. Optical wireless indoor networks: Recent implementation efforts [C]//Proceedings of the ECOC, 2010: 1–6.

作者简介



郑重, 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室、信息科学技术学院在读博士研究生; 主要研究方向为光通信。



刘璐, 北京大学博士毕业; 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室、信息科学技术学院副教授; 主要研究领域为可见光通信、卫星激光通信以及光电精密测控技术; 已发表学术文章 20 余篇, 申请发明专利 6 项, 已获授权 3 项。



胡薇薇, 中国科学技术大学博士毕业; 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室、信息科学技术学院教授、博士生导师; 主要研究领域为无线光通信、ROF 通信、光学相控阵等; 已发表学术文章 100 余篇, 出版著作 3 部, 获授权专利 3 项。

基于CSK调制的可见光通信系统的盲检测算法研究

Blind Detection Algorithm for Visible Light Communication System with CSK Modulation

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0021-04

摘要: 基于 IEEE 802.15.7 标准中色移键控 (CSK) 调制通信系统的检测方案, 利用 CSK 调制的特性, 提出了一种新的盲检测算法。该盲检测算法, 利用 CSK 调制信号的性质在没有信道信息的情况下也可以对 CSK 信号进行解调, 省略了信道估计模块, 简化了系统。仿真发现, 这种盲检测算法具有较好的误码率性能。

关键词: 可见光通信; 色移键控; 盲检测方案

Abstract: Color shift keying (CSK) is a modulation scheme proposed in IEEE 802.15.7. CSK is applicable to visible light communication systems with RGB LEDs. We propose a novel blind detection algorithm based on CSK modulation. This algorithm can demodulate a CSK signal by using the properties of CSK modulated signals in the absence of channel information. Simulation results show that the blind detection algorithm simplifies the system module and has better bit error rate performance.

Keywords: visible light communication; color shift keying; blind detection scheme

贾林琼/JIA Linqiong
王俊波/WANG Junbo
陈明/CHEN Ming

(东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏
南京 211100)
(National Mobile Communications Research
Laboratory, Northeast University, Nanjing
211100, China)

需要说明的一点是, IEEE 标准中提出的 CSK 调制方案并不仅限于红绿蓝 (RGB) 3 种颜色, 满足约束条件的 3 色 LED 都可以用于 CSK 调制。目前市场中最常见的 3 色 LED 灯是 RGB LED 灯, 因此, 本文中的系统模型以及调制解调算法都是以 RGB LED 为例说明的。

通信系统对信息传输速率的要求的提高与日益紧张的无线电频谱资源之间的矛盾使可见光通信成为未来室内通信的必然发展趋势。可见光通信系统最初是由日本 KEIO 大学的 Nakagawasu 所领导的课题组于 2000 年提出的, 2003 年他们成立了可见光通信协会 (VLCC)^[1-2]。在可见光通信系统中, 信号源发光二极管 (LED) 灯分为两种, 一种是黄磷激发发出白光的 LED 灯, 另外一种是由红绿蓝 3 原色合成的白光 LED 灯, 简称 RGB LED^[3]。文献[6-9]中介绍了可应

用于白光 LED 通信系统的不同调制方式。针对 RGB LED 通信系统, IEEE 标准提出了一种调制方案——色移键控 (CSK) 调制。IEEE 802.15.7 中详细介绍了 CSK 调制的系统模型、通信原理、星座点设计等内容^[4], 但是该标准并没有对 CSK 调制系统的检测方案做详细研究。在 CSK 的星座点优化与系统设计等相关文献[12-14]中, 检测方案都假设为最大似然检测。此外, IEEE 802.15.7 标准指出, CSK 调制系统中需要信道估计模块, 用来估计系统增益与多颜色信道之间的干扰。本文提出了盲检测算法, 利用 CSK 调制信号的性质在没有信道信息的情况下也可以对 CSK 信号进行解调, 简化了通信系统。

1 系统模型

IEEE 标准中 CSK 系统的系统模型如图 1 所示。

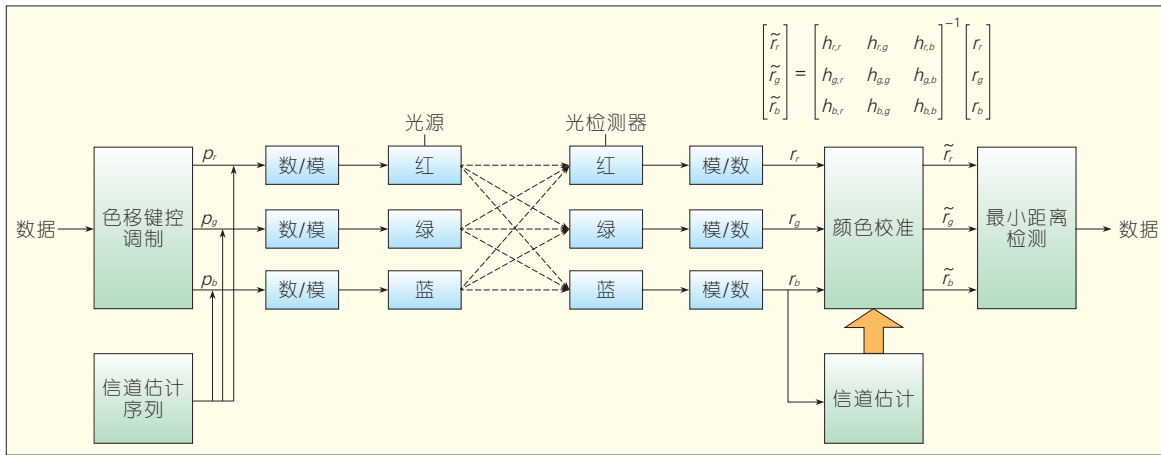
设色移键控 CSK 调制阶数为 M , M -CSK 调制的星座点集合为 A , $A = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 。 A 中的每个符号都是一个向量 $s_i = (p_r, p_g, p_b)$, p_r, p_g, p_b 分别代表了红绿蓝 3 色 LED 灯发光功率。设 P 为发送端的总平均发送功率。此外, 红绿蓝 3 色 LED 的各自的平均功率设为 p_c, p_c, p_c , 表示合成光的颜色为白光。

由于可见光通信系统兼具有照明和通信两项功能, 因此在在进行数据传输的同时需要保证该系统的照明功能。RGB LED 做光源的通信系

收稿日期: 2014-09-03

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2013AA013601), 国家自然科学基金 (61172077、61223001)

图1
CSK调制系统

统要保证正常的通信功能需要满足3个条件^[3]:

- (1) 没有闪烁
- (2) 光源的发光强度稳定
- (3) 光源的色彩稳定(一般希望光源保持在白光)

首先,通常人眼能感觉到的光源的闪烁频率 F 通常小于 200 Hz^[3],设可见光通信的符号周期为 T_s ,一般情况下 $1/T_s \gg F$,因此,人眼一般是不会到闪烁的。

其次,为使光源的发光强度保持稳定,CSK调制信号需要满足条件:

$$p_r + p_g + p_b = P \quad (1)$$

即任意时刻 RGB LED 的总功率的保持为 P 。最后,为了保证光源的色彩稳定性,CSK调制信号需要满足条件:

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i = (p_c, p_c, p_c) \quad (2)$$

将 CSK 调制系统的信道建模为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{r,r} & h_{r,g} & h_{r,b} \\ h_{g,r} & h_{g,g} & h_{g,b} \\ h_{b,r} & h_{b,g} & h_{b,b} \end{bmatrix} \quad (3)$$

信道 \mathbf{H} 中的元素 h_{ij} 表示 i 色光检测器与 j 色光源之间的关系。设红绿蓝 RGB 3 色光检测器的噪声为独立同分布的零均值高斯白噪声,即 $n_r, n_g, n_b \sim N(0, \sigma^2)$,噪声向量用 $\mathbf{n} = (n_r, n_g, n_b)$ 表示。则接收信号可以表示为:

$$\mathbf{r} = (r_r, r_g, r_b) = \mathbf{H}\mathbf{s}_i + \mathbf{n} \quad (4)$$

其展开形式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} r_r \\ r_g \\ r_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{r,r} & h_{r,g} & h_{r,b} \\ h_{g,r} & h_{g,g} & h_{g,b} \\ h_{b,r} & h_{b,g} & h_{b,b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_r \\ p_g \\ p_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_r \\ n_g \\ n_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 标准中的检测算法

IEEE802.15.7 标准中,假设信道矩阵 \mathbf{H} 可以通过信道估计模块估计出来且假设信道估计无误差,那么在接收端进行解调之前,先对接收信号 \mathbf{r} 进行信道校准,即:

$$\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{r} = \begin{bmatrix} h_{r,r} & h_{r,g} & h_{r,b} \\ h_{g,r} & h_{g,g} & h_{g,b} \\ h_{b,r} & h_{b,g} & h_{b,b} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_r \\ r_g \\ r_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后用校准后的数据 $\tilde{\mathbf{r}}$ 进行解调。CSK 信号解调算法为最小距离检测算法,即将与 $\tilde{\mathbf{r}}$ 欧几里得距离最近的星座点作为发送信号的估计。

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \max_{\mathbf{s}_i \in \mathbf{A}} \{ \|\tilde{\mathbf{r}} - \mathbf{s}_i\| \} \quad (7)$$

3 盲检测算法

本章首先讨论色移键控系统的信道 \mathbf{H} 的性质,然后根据信道性质确定相应的盲检测算法。

3.1 信道模型

假设可见光信号的直流增益 $H(0)$ (光功率衰落)在整个可将光光

谱频段平坦,具体算法见文献^[1]。CSK 调制系统用红(r),绿(g),蓝(b) 3 种不同颜色(波长)的光信号传输信息,假设信道是理想的(红-绿-蓝 3 色信道是正交的),那么信道可以 \mathbf{H} 表示为:

$$\mathbf{H} = H(0) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

但是,在实际通信系统中,由于光源的发射光谱与对应光接收器中滤光片的透光率不完全匹配,光检测器可能检测到其他光源发出的部分干扰信号,因此,不同颜色的信道之间存在干扰。

假设 CSK 通信系统的红绿蓝 3 色 LED 发光频谱与红绿蓝 3 色光检测器端的滤光片的透光率如图 2 所示,图中实线分别表示红绿蓝 3 色 LED 发射光的光谱 $S_r(\lambda), S_g(\lambda), S_b(\lambda)$,即 LED 在不同的波长下的光强度分布。发射光谱将光源光谱的峰值设为 1(即归一化处理)。光检测器部分的红绿蓝 3 色滤光片的透光率分别用 $R_r(\lambda), R_g(\lambda), R_b(\lambda)$ 表示,透光率表示对于不同波长的光可通过滤光片的比例,因此透光率都是小于 1 的实数。

定义 RGB 3 色信道的关系矩阵 \mathbf{H}_l 为:

$$\mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} h'_{r,r} & h'_{r,g} & h'_{r,b} \\ h'_{g,r} & h'_{g,g} & h'_{g,b} \\ h'_{b,r} & h'_{b,g} & h'_{b,b} \end{bmatrix} \quad (9)$$

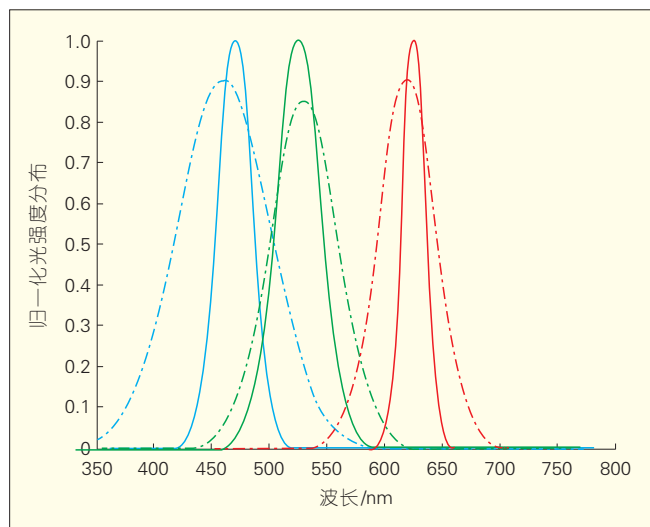


图2
RGB LED光源与RGB
滤光片的光谱特性

h'_{ij} 表示滤光片颜色为 i 的光检测器与颜色为 j 的光源之间的关系。 h'_{ij} 可以通过滤光片和光源的光谱特性粗略估计出来,如:

$$h'_{ij} = \frac{\int S_i(\lambda) R_j(\lambda) d\lambda}{\int S_i(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

综上,CSK调制的可见光通信系统的信道矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}(0) \mathbf{H}_l \quad (11)$$

需要说明的是,红绿蓝(RGB)LED和红绿蓝(RGB)滤光片的光谱特性主要由制造工艺与材料决定,其次还会随温度变化和使用时间的增长而浮动。因此在IEEE标准中,需要对信道矩阵进行估计。

3.2 理想信道中的盲检测算法

当CSK调制的可见光通信系统的信道矩阵为理想矩阵时,利用CSK调制信号的性质可以对接收信号进行盲检测。接收端的检测信号为 $r = (r_r, r_g, r_b)$, 那么接收信号的相对值可以表示为 $r^* = (r_r^*, r_g^*, r_b^*)$, 其中:

$$\begin{aligned} r_r^* &= \frac{r_r}{r_r + r_g + r_b} \\ r_g^* &= \frac{r_g}{r_r + r_g + r_b} \\ r_b^* &= \frac{r_b}{r_r + r_g + r_b} \end{aligned}$$

利用接收信号的相对值 $r^* = (r_r^*, r_g^*, r_b^*)$ 作为最小距离检测器的输入。检测结果为:

$$\hat{s} = \arg \max_{s_i \in A} \left\| r^* - \frac{s_i}{P} \right\| \quad (12)$$

其中, s_i/P 是在接收端已知的先验知识。

IEEE 802.15.7 标准中的CSK调制系统需要对信道 H 估计,因此该通信系统中需要设计信道估计模块,传输信号中需要插入信道估计序列,这使得系统复杂度提高,信息传输速率降低。

因此,当CSK的3色信道接近正交时,采用盲检测算法可以降低系统的复杂度并提高信息传输速率。

3.3 非理想信道的盲检测算法

对于非理想信道,即多色信道之间的干扰较大时,可以根据红绿蓝LED光源和红绿蓝3色滤光片的光谱性能估计信道关系矩阵 \mathbf{H}_l , 设估计值为 $\hat{\mathbf{H}}_l$, 然后用 $\hat{\mathbf{H}}_l$ 来补偿多色信道的干扰。补偿方法同。

$$\bar{r} = \hat{\mathbf{H}}_l^{-1} r^* \quad (13)$$

利用补偿过的信号相对值 \bar{r} 作为信号检测器的输入:

$$\hat{s} = \arg \max_{s_i \in A} \left\| \bar{r} - \frac{s_i}{P} \right\| \quad (14)$$

其中,红绿蓝LED光源和红绿蓝3色滤光片的光谱性能是CSK系统的硬件参数。信道关系矩阵的估计值 $\hat{\mathbf{H}}_l$ 是固定值,而真实的 \mathbf{H}_l 是虽时间变化的,4中的仿真研究了经过 $\hat{\mathbf{H}}_l$ 补偿的检测算法的性能。

4 仿真结果

下面给出4、8、16阶CSK调制信号在不同的检测算法下的误码性能曲线。

首先,当信道矩阵可以表示为时(即红绿蓝3色信道正交且等价),4、8、16阶的CSK调制信号分别用标准中检测算法和3.2中提出的盲检测算法解调时的误码率曲线如图3所示。

从图3中可以看出,盲检测算法的性能略次于标准检测算法的性能(2 dB左右)。但盲检测算法可以简化系统并省略信道估计序列。另外由于光通信系统中的光信噪比(OSNR)通常比较高,盲检测算法可以满足误码率的要求。因此,盲检测算法有一定的优势。

下面的仿真结果对比了非理想信道下的标准检测算法、3.2节中的盲检测算法和3.3节中提出的有信道关系矩阵 \mathbf{H}_l 做补偿的盲检测算法的误码率性能。假设对于非理想信道(3色信道不均衡且存在干扰),信道关系矩阵 \mathbf{H}_l 的估计值 $\hat{\mathbf{H}}_l$ 为:

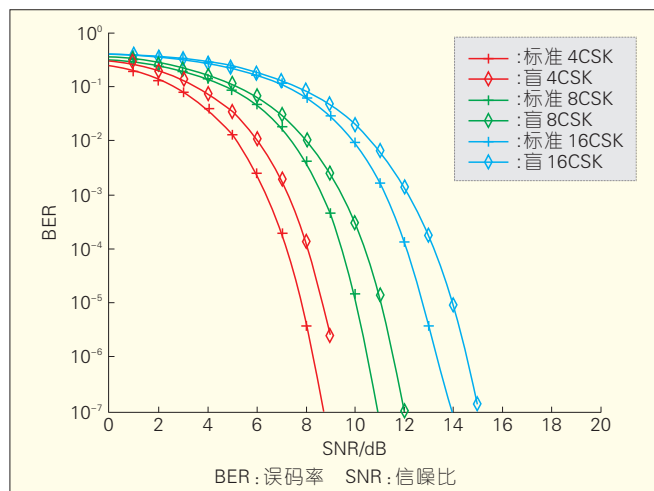
$$\hat{\mathbf{H}}_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.15 \\ 0 & 0.15 & 0.8 \end{bmatrix} \quad (15)$$

在仿真中假设信道关系矩阵的真实值 \mathbf{H}_l 与估计值 $\hat{\mathbf{H}}_l$ 的每个元素之间的误差服从 $(-0.5, 0.5)$ 的均匀分布。仿真结果见图4。

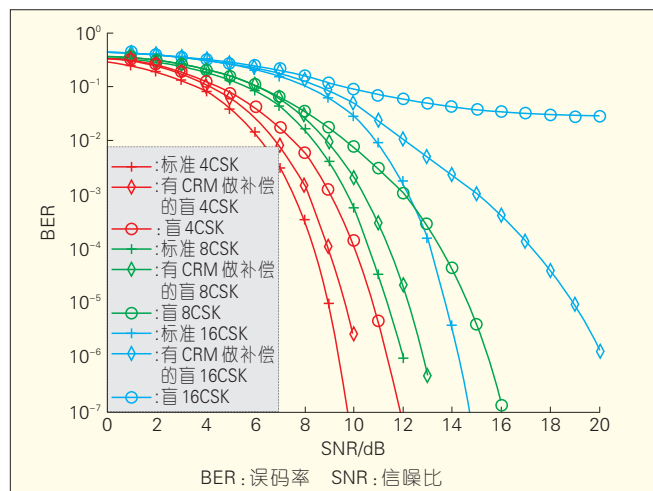
由图4可以看出,有信道关系矩阵(CRM)做补偿的盲信道检测算法虽然没有IEEE标准中原始的检测算法性能好,但是比3.2节中没有补偿的盲信道检测算法性能提高很多。

5 结束语

本文提出了理想信道中CSK调



▲ 图3 理想信道的误码性能



▲ 图4 非理想信道的误码性能

制信号的可见光通信系统的盲检测算法,简化了系统复杂度,提高了信息传输速率。另外本文对非理想信道进行建模并提出了信道关系矩阵的概念,在信道非理想的情况用信道关系矩阵对接收信号进行补偿,然后再进行盲检测。仿真结果说明,理想信道下CSK盲检测算法的性能大约比非盲检测差2 dB。非理想信道下,用信道关系矩阵进行补偿后的盲检测算法性能有了很大的提高。

因此,当可见光通信系统采用CSK调制时,如果LED光源与光检测器的滤光片性能较好,CSK信号的3色信道接近正交,那么完全可以用盲检测算法取代标准检测算法;如果LED光源与光检测器的滤光片性能一般,那么可以计算信道关系矩阵,在接收端对接收信号进行补偿,然后再做盲检测。

参考文献

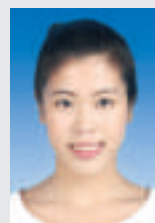
- [1] AKANEKAWA M, TANAKA Y, NAKAGAWA M. Basic study on traffic information system using LED traffic lights [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001,2(4): 197-203.
- [2] TOSHIHIKO K. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004,50(1):20-28.
- [3] RAJAGOPAL S, ROBERTS R, LIM S K. IEEE

- 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazine, 2012,50(2): 72-82.
- [4] ASSOCIATION I S. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light [S]. IEEE, 2011.
- [5] QUINTANA C, GUERRA V, RUFO J, RABADAN J, PEREZ-JIMENEZ R. Reading lamp-based visible light communication system for in-flight entertainment [J]. IEEE Trans. Consum. Electron., 2013,59(1): 31-37.
- [6] LEE K. Modulations for visible light communications with dimming control [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011,23(16): 1136-1138. doi:10.1109/LPT.2011.2157676.
- [7] NTOGARI G, KAMALAKIS T, WALEWSKI J W, SPHICOPOULOS T. Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible-light communications based on discrete multitone [J]. IEEE J. Opt. Commun. Netw., 2011,3(1): 56-65.
- [8] WU F M. 1.1 Gb/s white-LED-based visible light communication employing carrier-less amplitude and phase modulation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012,24(19): 1730-1732.
- [9] NEOKOSMIDIS I, KAMALAKIS T, WALEWSKI J W, INAN B. Sphicopoulos T. Impact of nonlinear LED transfer function on discrete multitone modulation: Analytical approach [J]. Lightw. Technol., 2009,27(22): 4970-4978.
- [10] ARNON S. The effect of clock jitter in visible light communication applications [J]. Lightw. Technol., 2012,30(21): 3434-3439.
- [11] DING J P. Evolutionary algorithm-based optimisation of the signal-to-noise ratio for indoor visible-light communication utilizing white light-emitting diode [J]. IET Optoelectron., 2012,6(6): 307-317. doi: 10.1049/iet-opt.2012.0044.
- [12] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, CORSINI R, CIARAMELLA E. Long distance indoor high speed visible light communication system based on RGB LEDs

[C]//Proceedings of the Asia Commun. Photon. Conf., 2012:1-3.

- [13] DROST R J, SADLER B M. Constellation design for color-shift keying using billiards algorithms[C]//Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshops, 2010: 980-984.
- [14] MONTERIRO E, HRANILOVIC S. Constellation design for color-shift keying using interior point methods[C]// Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshops, 2012:1224-1228.

作者简介



贾林琼,东南大学移动通信国家重点实验室在读博士研究生;主要研究方向为可见光通信。



王俊波,东南大学移动通信国家重点实验室博士毕业;清华大学信息科学与技术国家重点实验室博士后,现工作于东南大学移动通信国家实验室;主要研究方向为无线光通信、数字通信、信号处理、信息论与编码。



陈明,南京大学数学系博士毕业;东南大学移动通信国家重点实验室教授;研究方向为信号处理与移动通信中的资源管理。

基于多色LED的可见光通信联合调制技术

Joint Modulation Techniques Based on Multicolor LEDs

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0025-04

摘要: 提出了一种针对广义色移键控(CSK)调制RGB 3色发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)星座图设计方法。为了实现通信与照明的结合,考虑了一些照明条件的约束:首先,LED产生的颜色和强度被限制以达到照明要求;其次,为了减小非线性效应的影响,每盏LED灯的功率被限制在线性范围;最后,利用奇异值分解(SVD)的预均衡来消除多径效应的影响和颜色间的干扰。仿真结果表明,相比于每路LED分别采用开关键控(OOK)调制的误码率,优化的星座图性能更优。

关键词: 可见光通信;星座图设计;多色发光二极管;色移键控

Abstract: In this paper, we propose a constellation design that uses RGB LEDs modulated by generalized color-shift keying (CSK) modulation to realize visible light communication (VLC). To achieve joint communication and illumination, we consider constraining some lighting conditions. First, the average color and power are constrained to meet the lighting requirements. Second, to minimize nonlinear effects, the power of each LED is constrained in its linear range. Third, a singular value decomposition (SVD)-based pre-equalizer is employed to mitigate the effects of multi-path and cross-talk between colors. Simulation results show that the bit-error rate of the proposed scheme is lower than that of a conventional scheme where OOK is used for each branch.

Key words: optical wireless communication; constellation design; multicolor LED; color shift keying

黄博扬/HUANG Boyang

高谦/GAO Qian

徐正元/XU Zhengyuan

(中国科学技术大学,安徽合肥 230027)
(University of Science and Technology of
China, Hefei 230027, China)

星座图的设计使得在最小欧式距离相同的情况下,能量最小。反过来说也就是在能量一定的情况下,能够使得欧式距离最大,即误码率最小。本文主要考虑的是在实际照明条件下的优化设计,采用了提供更均匀照明的经过反射后照明的方式^[8]。所要做的优化是在总的功率一定的前提下,在满足约束条件下使得最小欧式距离(MED)最大。室内可见光通信由于受到照明、通信要求以及LED本身的限制,在选择星座图的时候必需受到相关条件的限制。

本文分为以下几个部分。在第1部分给出了优化问题的目标函数和约束条件,第2部分根据约束问题给出了不同条件下的优化问题的解,第3部分比较了优化解与开关键控(OOK)的误码率结果,第4部分对文章进行了总结。

1 星座图设计优化

色移键控系统的示意图如图1所示。其中检测器是雪崩二极管探测器,符号检测器将接收到的信号还原为符号。

近年来,基于发光二极管(LED)的室内可见光通信逐渐受到关注^[1-2]。LED相比于一般照明,具有更高的电光转换效率,是能够满足绿色照明的一种光源,同时还能够提供高速无线通信服务^[3]。目前用于提供照明的LED主要有3种模式:蓝光LED加上黄色荧光粉、紫外LED加上多色荧光粉以及RGB 3色LED。相比于

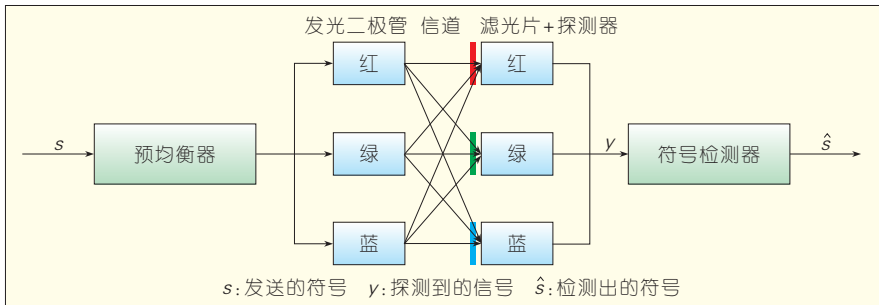
另外两种模式,RGB 3色LED由于不同的LED芯片能够独立调制,因此能够提供更高的传输速率。

IEEE 802.15.7 可见光通信标准中针对不同颜色LED灯提出了色移键控(CSK)的可见光通信调制方式^[4]。不少文章已经给出了关于色移键控下星座图的设计方法。Drost等人提出了基于billiard algorithm的星座图设计^[5]。Monteiro等人用内点法在颜色间干扰的约束下设计了星座图^[6]。Bai等人在一些照明条件下对星座图进行了精心设计^[7]。

收稿日期: 2014-09-03

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家重点基础研究发展
计划(“973”)计划(2013CB329201), 国家自
然科学基金(61171066)



▲图1 色移键控系统

经过预均衡的信号输入到RGB 3路LED灯中。我们采用的是反射式照明。反射照明是将LED灯先照射到一个漫反射界面上,再利用界面的反光进行照明的照明方式。这种照明方式的优势是能更有效地混合RGB 3色,使LED灯输出的颜色更加均匀,同时较LED灯直接照明,光强在空间分布上更加均匀。这种情况下,人眼感受到的颜色就不再是LED直接混合的颜色,而是通过界面反射之后的颜色。界面对不同颜色的光反射率不同,因此输出的颜色就应当作相应的调整。即使是一面白色的墙壁,在经过很长的时间之后也会出现墙壁发黄,即对于红光部分相对于蓝光部分的反射率增大。界面对RGB的反射率分别为 η_R 、 η_G 、 η_B ,反射矩阵为:

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_R & 0 & 0 \\ 0 & \eta_G & 0 \\ 0 & 0 & \eta_B \end{pmatrix}$$

经过信道矩阵为 H 的信道,接收的信号经过滤光片后的输出可以表示为 $y=Hs+n$,其中, n 是噪声,服从公式 $n \sim N(0, I \cdot N_0/2)$ 。通过滤光片后的信号被3个接收器接收,通过符号检测估计出发送符号。由于滤光片不是理想的滤光片,会有不同颜色间的串扰。信道矩阵可以写成:

$$H = \begin{pmatrix} 1-\epsilon & \epsilon & 0 \\ \epsilon & 1-2\epsilon & \epsilon \\ 0 & \epsilon & 1-\epsilon \end{pmatrix}$$

其中 $\epsilon \in [0, 0.5)$ 。通过奇异值分解(SVD), $H=USV^H$, U 和 V 都是酉矩阵, S 是对角阵。我们的预均衡就

是 $P=VS^{-1}$,后均衡是 U^H 。

光源发出的光经过界面反射后,一部分能够直接进入接收端,另一部分则会再经过一次或多次反射后才能被接收。室内的反射环境复杂,除了墙面的RGB大致相等的反射外,也会有不同颜色的物体反射不同颜色的光,使得RGB 3种颜色的光脉冲响应不同。经过多径信道后不同颜色LED的脉冲响应分别为 $h_R(t), h_G(t), h_B(t)$ 、 $h_i(t) = \sum_j \beta_{ij} \delta(t - \tau_j), i=R, G, B$ 。发出的信号 $s_i(t) = c_i \Pi(t/T_s)$ 。其中:

$$\Pi\left(\frac{t}{T_s}\right) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

经过信道 $h_i(t)$ 后接收端接收到的信号为 $y_i(t) = s_i(t) * h_i(t) = c_i \sum_j \beta_{ij} \Pi((t - \tau_j)/T_s)$ 。根据文献[9] Appendixb中的推导,并假设 $\tau_j \ll T_s$,预均衡是 $P_i = 1/\sum_j \beta_{ij}$ 。如果 $\sum_j \beta_{ij}$ 很小, P_i 很大,导致通过预均衡之后LED灯的光强过大,因此需要将 $\sum_j \beta_{ij}$ 归一化后再加入预均衡。约束中的预均衡应当改为:

$$P^* = P \begin{pmatrix} P_R = 1/\sum_j \beta_{Rj} & 0 & 0 \\ 0 & P_G = 1/\sum_j \beta_{Gj} & 0 \\ 0 & 0 & P_B = 1/\sum_j \beta_{Bj} \end{pmatrix} \quad (1)$$

定义 $P_T^* = I_8 \otimes P^*$ (克罗内克积)。

以每个符号3比特为例,定义一

个联合星座图矢量 $s_T = [s_1^T s_2^T s_3^T s_4^T s_5^T s_6^T s_7^T s_8^T]^T$,其中每个 s_i 是星座图中第 i 个符号:

$$s_i = [s_i^R s_i^G s_i^B]^T = J_i s_T \quad (2)$$

其中 J_i 是 3×24 的选择矩阵。

1.1 目标函数

我们的目标是最大化系统的误码率即最大化最小欧式距离 d_{\min} ,也就是最大化对于满足下面条件的 $d^{(0)}$:

$$s_T^T F_L s_T \geq d \quad (3)$$

其中 $F_{L(p,q)} = E_{pq}$, $E_p = e_p^T \otimes I$, e_p 是第 p 个分量为1,其余分量为0的向量。 $E_{pq} = E_p^T E_p - E_p^T E_q - E_q^T E_p + E_q^T E_q$, $L = 8(p-1) - p(p+1)/2 + q$, $p, q \in 1, 2, \dots, 8, p < q$ 。式(3)中的约束不是凸的,在 $s_T^{(0)}$ 处进行一阶泰勒近似展开:

$$s_T^T F_L s_T \approx 2s_T^{(0)T} F_L s_T - s_T^{(0)T} F_L s_T^{(0)} \triangleq g_L^{(0)}(s_T) \geq d \quad (4)$$

$s_T^{(0)}$ 是随机的初始点或者上一步到达的点。

1.2 颜色限制

LED灯按照不同的颜色比值混合后能得到不同颜色的光。室内照明的要求一般是要达到一定显色度的白光。也有一些场合会需要偏红色或者偏蓝色的照明,则需要提高红光或蓝光LED的相对功率。在高速通信的情况下,人眼对颜色变化的速度远不及信号变化的速度,因此在我们星座图的设计中,并不需要对每个符号的颜色进行限制,而是对所有符号RGB 3色的平均值限制,即:

$$\bar{s} = \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 J_i \right) s_T = \bar{J} s_T = [\bar{s}^R \bar{s}^G \bar{s}^B]^T$$

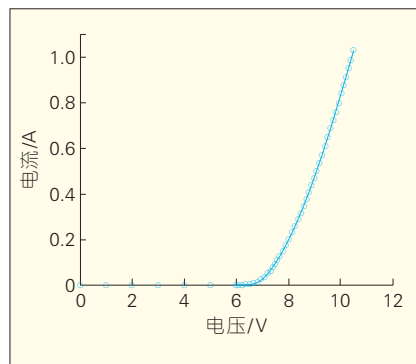
我们的目标颜色向量是 s_3 ,决定了

混合后的光的颜色和强度:

$$s_3 = \eta_j \bar{P}_T s_T \quad (5)$$

1.3 LED灯的线性范围

LED灯是一种非线性元件。在电压小于阈值电压时,电流近似为零,不发光;当电压大于阈值电压后,电压与电流也不是完全的线性关系。LED伏安特性曲线如图2所示,阈值电压约为6V,LED线性工作的区间大致在7V到11V,对于不同的



▲图2 LED伏安特性曲线

LED灯这个值可能不一样。这一项约束可以写为:

$$\begin{aligned} \max(K_j P_T s_T) &< V_{UP,j} \\ \min(K_j P_T s_T) &> V_{LOW,j}, \quad \forall j \end{aligned} \quad (6)$$

$V_{UP,j}$ 和 $V_{LOW,j}$ 是第 j 个灯的线性范围上下限, K_j 是一个 8×24 的选择矩阵,其第 i 行只有第 $j+3(i-1)$ 个元素为1,其余元素为0。

1.4 显色指数和发光效率约束

显色指数(CRI)表示光源的光照在物体上真实还原物体颜色的能力^[12]。发光效率(LEI)是光通量与功率的比值,衡量了光源产生可见光的能力^[13]。该功率根据前缀不同可以是光源的辐射通量,也可以是给光源提供的电能。通过选取适当的 s_3 ,可以满足CRI和LEI的约束^[14]。

1.5 约束问题

将上述的目标函数和约束条件

合起来,得到如下的优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{s_T, d} & d \\ \text{s.t. } & \eta_j \bar{P}_T s_T = s_3 \\ & g_L^{(0)}(s_T) \geq d \quad \forall l \\ & \max(K_j P_T s_T) < V_{UP,j} \\ & \min(K_j P_T s_T) > V_{LOW,j}, \quad \forall j \end{aligned} \quad (7)$$

通过求解该优化问题,就能得到在满足这些约束条件下使得误码率能达到最低的星座图。

2 仿真结果

利用Matlab的CVX工具箱,我们对不同墙面反射率和不同脉冲响应函数下的优化问题进行了仿真。为了得到最优解,每次优化随机初始化10次,每次停止的条件设定为连续循环的两次最小距离相差小于0.001。

2.1 信道平衡

每种颜色被接收到的能量相近,

例如,我们假设 $s_3 = 27 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}^T$ 。信道

串扰的参数 $\epsilon = 0.1$,界面反射率和信道对RGB 3种颜色都是相同的,即

$$\eta_R = \eta_G = \eta_B = 1, \quad \sum_j \beta_{Rj} = \sum_j \beta_{Gj} = \sum_j \beta_{Bj} = 1。$$

同时令 $V_{LOW,j} = 6$, $V_{UP,j} = 12$,适当地放大LED的范围,能够在可以容忍的非线性效应下得到更大的最小欧式距离。经过优化之后得到的星座图如下:

$$\begin{aligned} S(:,1:4) &= \begin{bmatrix} -13.62312 & -14.3228 & -17.5537 & -17.5537 \\ -3.5613 & 0 & -3.5613 & 3.5613 \\ 1.5992 & -3.1984 & 1.5992 & -1.5992 \end{bmatrix} \\ S(:,2:8) &= \begin{bmatrix} -10.3923 & -20.7846 & -16.8541 & -13.6232 \\ 0 & 0 & 0 & 3.5613 \\ 0 & 0 & 3.1984 & 1.5992 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

最小欧式距离为5.08。

2.2 信道不平衡

不平衡的信道意味着界面对不同颜色的反射率不同,并且不同颜色的脉冲响应也不同。我们假设 $\eta_R = 1$, $\eta_G = 0.9$, $\eta_B = 0.8$, 以及

$$\sum_j \beta_{Rj} = 1, \sum_j \beta_{Gj} = 0.9, \sum_j \beta_{Bj} = 0.8。$$

过优化之后的星座图如下:

$$\begin{aligned} S(:,1:4) &= \begin{bmatrix} -16.3708 & -20.7846 & -18.5814 & -16.4057 \\ -3.4365 & 0 & -1.9553 & -0.8513 \\ -0.6196 & 0 & -0.7805 & -1.7340 \end{bmatrix} \\ S(:,1:4) &= \begin{bmatrix} -18.3069 & -18.5699 & -16.3033 & -14.1638 \\ 1.0290 & 0 & -1.6589 & -3.4365 \\ -0.8534 & 1.7539 & 1.5625 & 1.1283 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

最小欧式距离为2.82。

2.3 界面与信道不同

由于室内可能有反射不同颜色的物体存在,直接从反射界面观察到的颜色与信道的脉冲响应不一定成比例。假设 $\eta_R = 1$, $\eta_G = 0.9$, $\eta_B = 0.8$,

$$\sum_j \beta_{Rj} = 0.8, \sum_j \beta_{Gj} = 0.9, \sum_j \beta_{Bj} = 1。$$

经过优化之后的星座图如下:

$$\begin{aligned} S(:,1:4) &= \begin{bmatrix} -13.0023 & -16.6277 & -12.7021 & -14.4547 \\ -0.9510 & 0 & -1.6876 & -1.6610 \\ -2.2431 & 0 & 2.3316 & 0.2027 \end{bmatrix} \\ S(:,1:4) &= \begin{bmatrix} -12.1714 & -13.8564 & -14.1760 & -14.7844 \\ -3.4365 & -3.4365 & 0.8631 & 0 \\ 0.3704 & -1.7146 & -0.6562 & 2.2809 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

最小欧式距离为2.56。

3 效果评估

我们计算了误码率随光学信噪比的变化。光学信噪比^[15]定义为 $\gamma_o = 10 \log_{10} P_o / \sqrt{N_b N_o}$ 。结果显示在图3、图4中。图3是误码率(BER)随信道颜色的变化, $\eta_R = 1$, $\eta_G = 1 - \delta$, $\eta_B = 1 - 2\delta$, $\sum_j \beta_{Rj} = 1$, $\sum_j \beta_{Gj} = 1 - \sum_j \beta_{Bj} = 1 - 2\delta$,表明了光学信噪比固定在10 dB的情况下,随着信道颜色偏移越大,为了得到目标颜色而使得误码率增大,我们使用奇异值分解的星座图的效果要优于使用迫零(ZF)检测的OOK的结果。图4是 $\delta = 0.1$ 时BER随着光学信噪比变化的结果。

环境中的颜色越不均衡,优化的星座图相对于OOK调制的效果就越好。这样使得在一些不均衡的环境中,如冷色调装饰的或者墙壁泛黄的房间中,我们仍然可以实现反射式照明与高速无线光通信的结合。同时,一旦室内环境发生改变,只需要重新

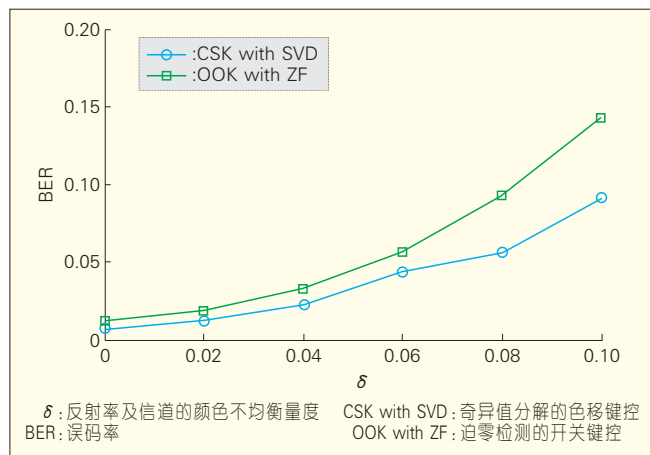


图3
OSNR为10 dB时BER
随信道变化

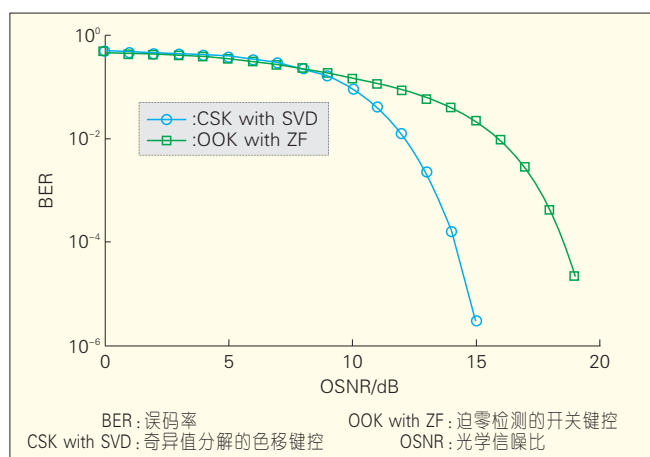


图4
δ=1时BER随OSNR
变化

计算星座图即可。

4 结束语

通过所提优化方法得到的基于色移键控的星座图与3色独立的OOK调制方式相比,相同信噪比下误码率更低。我们考虑了LED颜色和强度、LED非线性区域的约束。多径效应和颜色间的干扰采用奇异值分解的预均衡方法来消除。我们采用的广义色移键控针对的是长时间颜色的平均值进行约束,能够得到更高的自由度,从而能够获得性能大幅度的提升。

参考文献

- [1] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50:100-107.

- [2] MCKENDRY J J D, MASSOUBRE D, ZHANG S, et al. Visible-Light Communications Using a CMOS-Controlled Micro-Light-Emitting-Diode Array [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30:61-67.
- [3] 刘宏展, 吕晓旭, 王发强等. 白光LED照明的可见光通信的现状与发展 [J]. 光通信技术, 2009, 25(7):12-18.
- [4] IEEE 802.15.7. Visible Light Communication Task Group [S]. IEEE, 2009.
- [5] ROBERT J. DROST, BRIAN M. Sadler, Constellation Design for Color-Shift Keying Using Billiards Algorithms [C]//Proceedings of the 2010 IEEE GLOBECOM Workshops, Dec. 6-10, 2010, Miami, FL, USA. 2010:980-984.
- [6] ERIC M, STEVE H. Constellation Design for Color-Shift Keying Using Interior Point Methods [C]//Proceedings of the 2012 IEEE GLOBECOM Workshops, Dec. 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. 2012:1224-1228.
- [7] BAI B, HE Q F, XU Z Y, FAN Y Y. The color shift key modulation with non-uniform signaling for visible light communication [C]//Proceedings 2012 1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops (ICCC), Aug. 15-17, 2012, Beijing, China. 2012: 37-42.
- [8] 吴仍茂, 屠大维, 黄志华, 等. LED照明系统的光照均匀性设计 [J]. 光学技术 ISTIC PKU, 2009, 35(1):12-16. doi:10.3321/j.issn:1002-1582.2009.01.021.

- [9] GAO Q, MANTON J H, CHEN G, et al. Constellation Design for a Multicarrier Optical Wireless Communication Channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62 (3):214-225.
- [10] BEKO M, DINIS R. Designing. Good Multi-Dimensional Constellations [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 22 (1): 221-224.
- [11] ZEGHER K, GERSHO A. Pseudo-gray coding [J]. IEEE Trans. Commun., 1990, 38(12): 2147-2158.
- [12] CIE (1999). Colour rendering (TC 1-33 closing remarks) [S], Publication 135/2, Vienna: CIE Central Bureau, ISBN 3-900734-97-6.
- [13] ALLEN S. Photometry and Radiometry for Engineers [M]. New York: Wiley and Son. 1974.
- [14] ARTHUR D. Broadbent, A critical review of the development of the CIE1931 RGB color-matching functions [J]. Color Research & Application, 2004, 29(4): 267-272.
- [15] KAROUT J, AGRELL E, SZCZERBA K, et al. Optimizing Constellations for Single-Subcarrier Intensity-Modulated Optical Systems [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 4645-4659.

作者简介



黄博扬, 中国科学技术大学信息科学技术学院在读硕士研究生; 专业研究方向为无线光通信。



高谦, 美国加州大学河滨分校博士毕业; 中国科学技术大学信息科学技术学院副研究员, IEEE、OSA、SPIE 协会核心期刊审稿人, OSA 青年学者及青年教育基金审批人; 曾担任加州大学 UC-Light 研究助理; 主要从事无线光通信中信号处理、优化算法研究, 及全双工无线通信设计等。



徐正元, 美国史蒂文斯理工学院博士毕业; 中科院无线光电通信重点实验室主任, 中国科学技术大学无线光通信与网络研究中心主任, 国家“千人计划”特聘专家, 国家“973”项目首席科学家; 曾为加州大学终身教授和 UC-Light 研究中心主任; 主要从事无线光通信的理论和实验研究, 包括宽光谱无线光通信、定位导航、智能交通、宽带移动通信、无线光电异构系统等; 已发表学术论文 180 余篇, SCI 累计引用 1 000 多次, 单篇最高引用 230 多次。

适用于可见光通信的LED器件

Device Technology of Light Emitting Diodes Used in Visible Light Communication

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0029-004

摘要: 认为研究发光二极管(LED)器件调制特性以及在高速调制状态下的发光特性是提升新型可见光通信系统性能的关键问题之一, LED器件调制特性的提升可以显著拓展可见光通信系统的应用范围。基于LED器件的调频特性, 通过分析发光器件和封装的结构及其他关键光电性能, 提出建议: 通过降低RC时间以及载流子自发辐射寿命, 有效改善LED器件的响应速率, 提高LED的调制带宽。

关键词: 可见光通信; 发光二极管; 响应频率; 调制带宽; 照明

Abstract: The electronic and optical frequency characteristics of LEDs are key issues in a VLC system. After investigating the effect of light source and its package on the performance of VLC system, we make the following proposal: the RC time and carrier spontaneous recombination time of the LEDs need to be decreased in order to improve the modulation bandwidth of LEDs. When the LED modulation characteristics are improved, the VLC system can be more widely applied.

Keywords: visible light communication; light emission diodes; response frequency; modulation bandwidth; illumination

朱石超/ZHU Shichao

赵丽霞/ZHAO Lixia

杨华/YANG Hua

(中国科学院半导体研究所半导体照明研发中心, 北京, 100086)
(Institute of Semiconductor, R&D Center for Semiconductor Lighting, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)

1 LED器件的调制带宽及其测试

带宽一般指信号所占据的频带宽度。当描述信道时, 带宽指能够有效通过该信道信号的最大频带宽度。发光二极管(LED)的调制带宽则是器件在加载调制信号时, 能承载信号最大的频带宽度, 一般定义为LED输出的交流光功率下降到某一低频参考频率值得一半时(如-3 dB)的频率定为LED的调制带宽。LED的调制带宽是可见光通信系统信道容量和传输速率的决定性因素, 受到

器件实际的调制深度、伏安特性等因素的多方面影响。

LED器件调制带宽的测试, 通常都是对直流工作下的器件加载模拟信号(如正弦信号), 测量光功率信号随频率变化的曲线, 来确定带宽。

图1给出了一种器件调制特性测试系统^[1-3]。它主要包括信号发射端和接收端。在发射端, 信号发生器发出的信号被功率放大器放大, 以提高

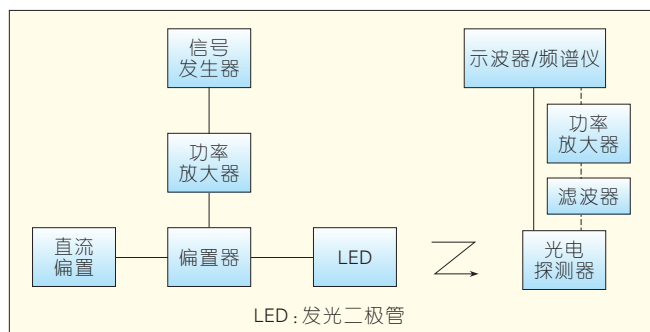
其调制深度; 随后, 信号加载到驱动LED的直流偏置上, 使得LED发出调制光信号; 在接收端, 光电探测器将光信号转换为电信号, 经过滤波放大, 输出到示波器上。

图2是另一种器件调制特性测试系统^[4-5]。系统的核心是网络分析仪, 它将信号产生、探测以及处理的功能集成在一起, 能够实现更高频率的测试。测量LED调制带宽, 主要关注网络分析仪的S21参数, 即网络分析仪的端口2的输入功率/端口1的输出功率。

2 影响因素及改善方法

一般来说, 影响LED调制特性的因素主要取决于以下两个方面^[6]: RC时间和载流子自发辐射寿命。LED

图1
器件调制特性测试系统组成



收稿日期: 2014-09-10
网络出版时间: 2014-10-20
基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA03A101); 国家国际科技合作项目(2013DFG52790, 2014DFG62280)

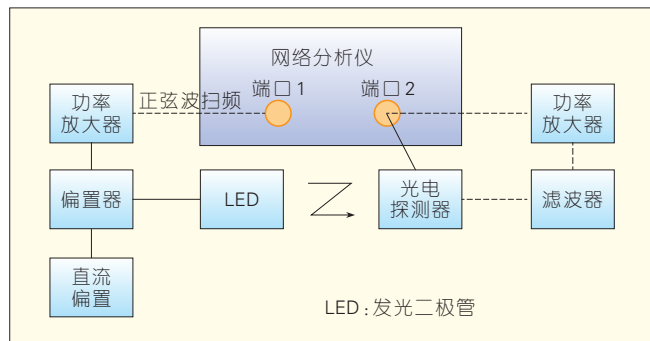


图2
器件调制特性测试
系统组成

的有源区是多量子阱结构,具有电荷限制作用,在响应过程中的上升下降时间称为RC时间,主要受到结电容影响,对信号具有延迟作用;而器件有源区内载流子自发辐射寿命直接影响载流子从复合到光子逃逸出器件的时间。

2.1 降低RC时间

图3所示为LED的小信号等效电路^[7]。这个小信号等效电路,实际上和阈值电压下的激光器的等效电路类似。因为在阈值电压下,激光器器件工作在自发辐射状态,受激发射过程还没有开始,所以LED也使用该等效电路^[8-11]。

其中, C 是结电容, R_0 是结电阻, R_s 是等效串联电阻, L 为引线等引起的寄生电感。研究人员通过实验测量及理论拟合,可以得到这些对应的关键参数^[7-8]。这里得到的电容和几何电容是一个量级的,电阻也和几何电阻相近。因此通过器件的尺寸设计可以有效调整等效电路参数进而提高器件带宽。

通过这种器件的尺寸设计来降低RC时间,从而改善LED调制带宽,是较为直观的一种方式。通过设计一组不同尺寸(结面积、p-GaN与结接触面积不同)的LED器件,研究尺寸对LED带宽的影响^[4]。有源区面积越大的器件,在相同电流密度下,具有较小的调制带宽。其原因主要是因为等效结电容更大,而且电容增大对带宽的影响比电阻减小的效果更加显著。这个结果和台湾成功大学

的J.-W. Shi等人^[6]的结果一致。图4给出实验器件A与B在不同驱动电流下的频率响应曲线。A器件p-GaN与结接触面积更大。

图4还反映了不同电流对LED带宽的影响,大电流下,载流子浓度增加,导致多量子阱内复合增强,载流子辐射复合寿命减小。

台湾清华大学的Chien-Lan Liao等人^[12]利用掺镓(Ga)的氧化锌(ZnO)薄膜GZO,有效地降低了结电容。图5显示具有电流限制层的蓝光LED结构示意图。由于将p型的

台湾中央大学的许晋玮等人^[13]通过串联的方式也有效提高了LED调制速率,其出发点也是基于对RC时间的优化。假如 N 个相同的LED串联,电阻值将线性增加 $R_{总}=N \cdot R$,而电容值线性降低 $C_{总}=C/N$ 。这样虽然RC时间没有发生变化。但是,一般器件都要外接负载,那么实际RC就是 $(N \cdot R + R_0) \cdot C/N$,因此,就小于单个相同面积LED的RC($RC + N \cdot R_0 C$),从而可以有效提高调制带宽。

2.2 降低载流子自发辐射寿命

可见光(VLC)通信系统一般都在大电流区域范围内,因此还需

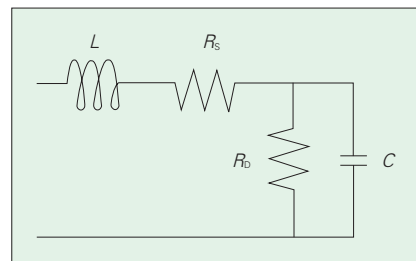


图3 LED的小信号等效电路

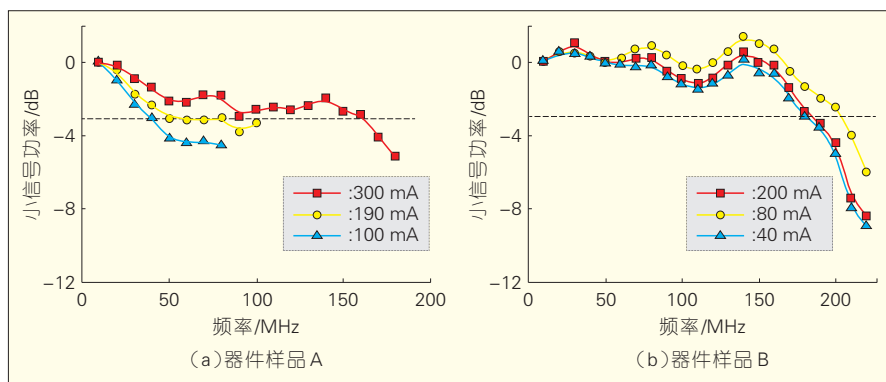


图4 两种不同尺寸器件在多个驱动电流下的频率响应曲线

GaN层刻出台面,在p型上做电极,能减小有效电容。而且电极采用环形结构,利用横向电阻大的GZO薄膜,实现对电流限制作用,使得电流主要在垂直方向传输,即GZO实现了与氧化锡(ITO)相反的功能,抑制了电流的扩展。因此,实际的结电容将会变小,从而实现LED调制带宽的提高。通过这种环形电极设计,该器件的3 dB带宽达到225 MHz。

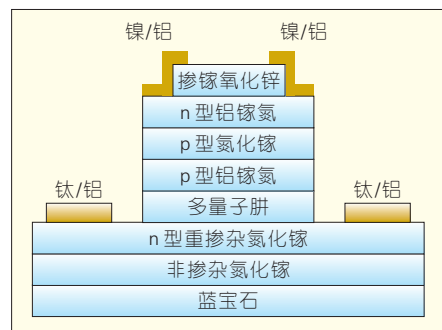
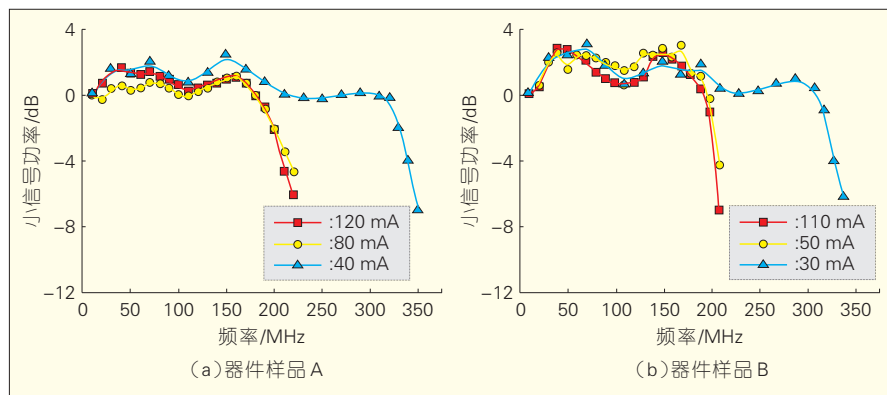


图5 采用GZO作电流限制层的外延片结构

要研究不同电流下频率响应。图6是不同电流下,器件频率响应曲线。外加驱动电流越大,电光转换(E-O)的3 dB带宽也会越大^[12-15]。从图6可以看出,120 mA下调制频率大约是40 mA下的2倍。主要因为激子复合几率正比于注入载流子密度^[6]。大电



▲图6 不同电流对器件调制频率的影响

流下,注入的载流子浓度增加,因而激子复合几率增加,辐射复合载流子寿命降低,E-O快速响应。

影响载流子自发辐射寿命的因素很多,一般来说,外部因素主要是来源于注入载流子的浓度;而内部因素主要是由于器件自身的结构以及其他复合通道等。

伊利诺伊大学香槟分校的M. Feng等人^[16],通过一种类似异质结双极发光晶体管(HBLET)的LED将调制速率提高了一个量级,达到吉赫兹量级。HBLET是一种3端口发光器件(一个电输入端、一个电输出端、一个光输出端),器件中量子阱有源区合并到基区,提高了电学和光学的性质,而高速LED结构和HBLET相似。在60 mA驱动电流下,器件的E-O调制频率高达7 GHz,但是功率很小,大约仅为13.8 μW 。图7为器件(n-p-n结构)的结构示意图,可以看到发射极接负电压,基极和集电极(这个也叫漏极 Drain)接正极,这样发射结正偏,集电结反偏。因为基极和漏极同一电位,基极-漏极边界没有电荷分布积累,交流驱动下,在基区建

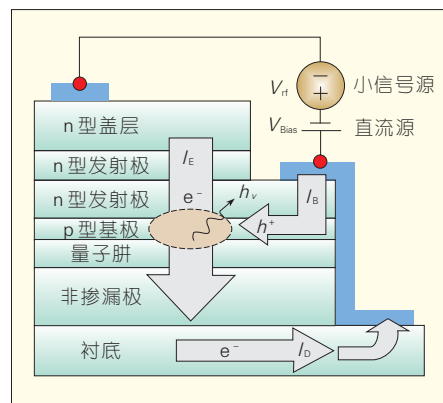
立动态的发射极与漏极的电荷分布。因此,基区的过剩载流子自发辐射复合的寿命就大于从发射极到漏极的传输时间,使得载流子还没有来得及复合,就被内建反向电场扫到漏极,仅保留快速的载流子复合发光,从而提高了调制速度。

图8给出了E-O的频率测试结果。调制频率非常高,并且随着电流的增加,调制速度提高,在60 mA时达到7 GHz。这个结果和塑料光纤发光二极管(POF-LED)结果相同。但是存在一个很大的问题是,器件的功率非常小,3 V的正向偏压下,驱动电流达到60 mA,所对应的光功率只有15 μW ,完全不适用于照明LED,不过该工作也提供了一种改进大功率LED带宽的思路。

材料中的载流子复合机制包括辐射复合、非辐射复合。表面等离激

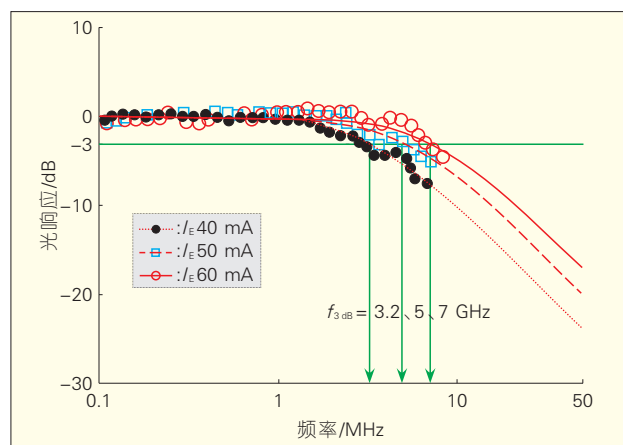
元耦合是除了前面两者外第3种能量传递通道也能够影响辐射复合载流子寿命,提高LED调制带宽。

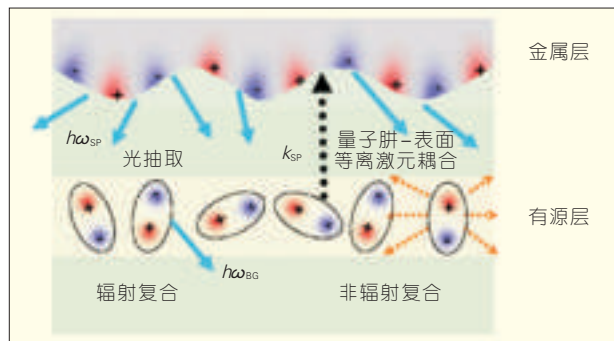
加州理工学院的Koichi Okamoto等人^[17]首次在LED上利用表面等离激元,得到出光增加的效果。文献[18]给载流子复合发射光子提供了一条新的技术途径。如图9所示,载流子复合的能量转换有多个途径,包括辐射复合、非辐射复合以及量子阱-表面等离激元(QW-SP)耦合。非辐射复合不能产生光子,能量最终以热的形式耗散掉了;辐射复合能够产生光子,产生的光子有一部分能够溢出器件,逃逸出的光子数能通过外量子效率反映。图9中黑色箭头表示QW-SP耦合的可能形式。载流子复合后能量没有直接转换为光子,而是耦合到距离比较近(30 nm左右)的表面等离激元中(SP),然后再以辐射的形式将能量放出到LED外面。这个



▲图7 高速Tilted-charge LED结构

图8
不同驱动电流 I_E 下的
频率特性(电荷倾斜分
布LED(25℃))





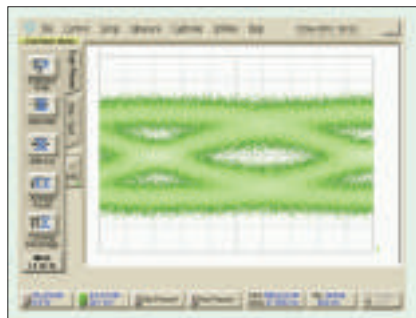
▲图9 电子空穴复合时QW与表面SP耦合

过程的速度远比辐射复合能量转换速度快。490 nm波长下,差异明显减小,这个是由于QW-SP耦合波长在蓝光,因此长波长的位置,能量耦合减弱,差异减小。

通过Al组分调控^[5]以及delta掺杂技术^[19],同样可以实现LED器件带宽的提高。Al组分调控,原理主要是改变能带结构,实现空穴的有效注入,调控极化电场,从而实现调制带宽的提高,300 mA工作电流下,带宽从23.5 MHz提高到25.5 MHz;delta掺杂技术,实现了载流子的大量注入,从而降低了载流子寿命,实现相同电流密度下,调制带宽的提高。图10给出了delta掺杂后器件的眼图。

3 结束语

随着光效的提高和成本的降低,LED已经被广泛地应用于信息显示和各种功能性照明。可见光通信利用了LED相比传统光源高光效和高响应速率的特点,在照明的同时,实现无线数据传输功能。常规的白光



▲图10 Delta掺杂的LED器件在40 mA的260 Mb/s眼图

LED器件调制带宽通常只有3~5 MHz,制约了可见光通信系统带宽的进一步提高,通过适当的调整材料和芯片的结构,优化器件工艺参数,引入表面等离子体等新的辐射复合机制等方式能够有效的提高LED器件调制带宽,进一步拓展可见

光通信系统的应用范围。

参考文献

- [1] ED L. Visible Light Communication and Research on Its Key Techniques [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006,27(2): 114-117.
- [2] ZHENG Y, ZHANG M. Visible Light Communications—Recent Progresses and Future Outlooks [C]//Proceedings of the 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2010:1-6.
- [3] 裴艳荣. 测试可见光通信系统中光源性能装置:中国,201210579519.0[P],2013-3-27.
- [4] PEI Y. LED Modulation Characteristics in a Visible-Light Communication System [J]. Optics and Photonics Journal, 2013,3(2):139-142.
- [5] ZHU S. Influence of AlGaIn Electron Blocking Layer on Modulation Bandwidth of GaN-Based Light Emitting Diodes [J]. ECS Solid State Letters, 2014,3(3):R11-R13.
- [6] SHI J W, SHE J K, CHEN C H, LIN G R, LAI W C. High-Speed GaN-Based Green Light-Emitting Diodes With Partially n-Doped Active Layers and Current-Confined Apertures [J]. IEEE Electron Device Letters, 2008,29(2):158-160.
- [7] SHATALOV M. Differential Carrier Lifetime in AlGaIn Based Multiple Quantum Well Deep UV Light Emitting Diodes at 325 nm [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002,41(2):L1146-L1148.
- [8] BAUREIS P. Compact modeling of electrical, thermal and optical LED behavior [C]//Proceedings of the 35th European Solid-State Device Research Conference, 2005. ESSDERC, 2005:145-148.
- [9] PINGREE L S C, SCOTT B J, RUSSELL M T, MARKS T J, HERSAM M C. Negative capacitance in organic light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 2005,86(7): 073509-073510.
- [10] WEISSER S, ESQUIVIAS I, TASKER P J, RALSTON J D, ROMERO B, ROSENZWEIG J. Impedance characteristics of quantum-well lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994,6(12):1421-1423.
- [11] ZHU C Y. Negative capacitance in light-emitting devices [J]. Solid-State Electronics, 2009,53(3):324-328.
- [12] LIAO C L, CHANG Y F, HO C L, WU M C. High-Speed GaN-Based Blue Light-Emitting Diodes With Gallium-Doped ZnO Current Spreading Layer [J]. IEEE Electron

Device Letters, 2013,34(5):611-613.

- [13] 王俊凯. 高速、高功率串联式可见光发光二极管 [D]. 台北: 国立中央大学, 2007.
- [14] SHI J W, HUANG H Y, SHEU J K, CHEN C H, WU Y S, LAI W C. The improvement in modulation speed of GaN-based Green light-emitting diode (LED) by use of n-type barrier doping for plastic optical fiber (POF) communication [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006,18(15):1636-1638.
- [15] ZHANG F, ZHANG C, TAN Z, ZHU T, XU J. Investigating high-speed modulation characteristics of quantum dots in red emitting quantum dot-light emitting diodes [C]//Proceedings of the 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008:1-2.
- [16] WALTER G, WU C H, THEN H W, FENG M, HOLONYAK N. Tilted-charge high speed (7 GHz) light emitting diode [J]. Applied Physics Letters, 2009,94(23): 231125-231126.
- [17] OKAMOTO K, NIKI I, SHVARTSER A, NARUKAWA Y, MUKAI T, SCHERER A. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaIn quantum wells [J]. Nature materials, 2004,3(9):601-605.
- [18] OKAMOTO K, NIKI I, SCHERER A, NARUKAWA Y, MUKAI T, KAWAKAMI Y. Surface plasmon enhanced spontaneous emission rate of InGaIn/GaN quantum wells probed by time-resolved photoluminescence spectroscopy [J]. Applied Physics Letters, 2005,87(7): 071102-071103.
- [19] ZHU S. The effect of delta-doping on Si-doped Al rich n-AlGaIn on AlN template grown by MOCVD [J]. Physica status solidi, 2014,11(3):466-468.

作者简介



朱石超, 中国科学院半导体研究所半导体照明研发中心在读博士研究生; 主要研究方向为适用于可将光通信的光电器件研究。



赵丽霞, 英国诺丁汉大学天文物理学院博士毕业; 工作于中国科学院半导体研究所半导体照明研发中心, 国家半导体照明标准专家组成员; 主要从事半导体材料及器件结构、光、电、热及可靠性等物理性能方面的探索。



杨华, 中国科学院半导体研究所微电子与固体电子学专业博士毕业; 中国科学院半导体研究所半导体照明研发中心副研究员; 主要从事LED芯片工艺、先进封装与新型应用的研发任务, 重点研究数字光源LED的封装、基础工艺途径及相应测试方法。

用于VLC的LED半功率角优化布局方法研究

Optimization of LED SAHP for Indoor Visible Light Communication Systems

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0033-03

摘要: 提出通过优化发光二极管(LED)半功率角的布局来提高室内可见光通信系统性能的方法。4种典型的LED布局方式的仿真结果表明,该方法对于提高可见光通信系统的信噪比、降低信噪比的波动有明显效果。对于均匀的LED布局方式,信噪比的波动从未优化时的5.2 dB大幅下降到0.3 dB。该方法不需要调节LED的功率,更适用于工程运用。

关键词: 可见光通信; 发光二极管; 优化布局

Abstract: This paper describes a method for optimizing the semi-angle at half power (SAHP) of a LED in order to improve indoor visible light communication. Four typical LED alignments are studied. The simulation results show that the proposed method increases SNR and reduces its fluctuation. Especially in the case of evenly distributed LED alignment, SNR fluctuation reduces significantly—from 5.2 dB to 0.3 dB. A distinguishing feature of this method is that the same power is used for each LED, which makes this method feasible for practical applications.

Key words: visible light communication; light-emitting diodes; alignment optimization

李昉/LI Fang

陈建平/CHEN Jianping

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)
(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

当有限。

在本文中,我们针对提高VLC系统信噪比及其均匀性,提出一种优化LED半功率角布局的方法,并给出基于非线性规划的求解方法。仿真结果表明,对于4种典型的LED布局方式,这种优化方法能有效提高VLC系统的信噪比、降低信噪比波动。在优化过程中LED光源功率是保持不变的,因此该方法在工程应用中更容易实施(包括安装和替换)。

1 室内VLC系统模型

正如文献[11]中提到的,不同的LED光源布局会对室内VLC系统的性能产生影响。为了评价LED的半功率角(SAHP)参数对于信噪比及其均匀性的影响,本文采用了4种较为典型的LED光源布局。如图1所示。为了便于比较,此4种布局所采用的LED个数都为144个,且每个光源功率都为1 W。对于布局(a)、布局(b)和布局(c)来说,每组分别有36、16和9个LED,相邻LED间隔为0.05 m。对于布局(d)来说,LED平均分布在天花板上。其他的VLC系

基于照明用发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)具有高速、低成本、低能耗和无频段限制等方面的优势,近年来引发了业界和学术界的关注^[1-8]。

为满足室内照明均匀性要求,通常采用大发射角的LED。但其多径效应会影响VLC系统性能,包括信噪比和带宽。为此,提出了多种优化方案,包括对LED布局、功率和发射角进行优化。

文献[9-10]采用遗传算法来优化

LED的功率以达到均匀照明同时降低均方根时延扩展性能。

文献[11]采用一种新的LED布局来减小信噪比的波动,仿真结果表明这种布局可以把信噪比的波动从14.5 dB减小到0.9 dB。

在文献[12]中,结合使用宽、窄两种发射角的LED以提高传输速率和均匀照明。

文献[13]通过在LED前放置光波形扩束器来扩展LED的覆盖区域,以均匀VLC接收端的功率分布。

文献[14]提出一种优化LED的半功率角(SAHP)的方法来提高可见光通信的性能。但是,由于其有限的优化参数和区域,使得性能提升效果相

收稿日期: 2014-09-08

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)规划(2011CB301700)

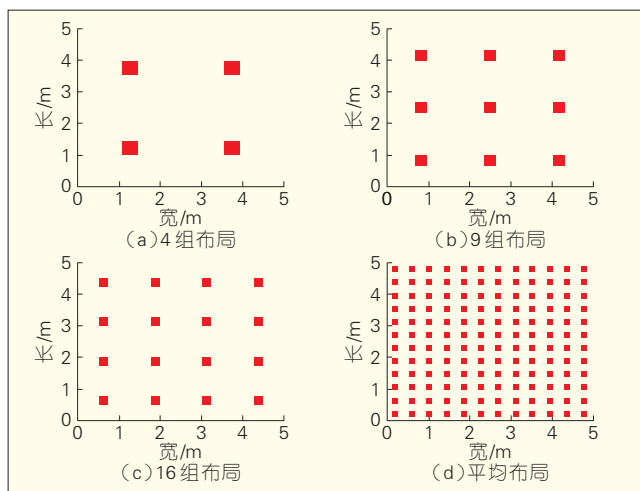


图1
4种不同LED光源布局

表1 VLC系统参数

环境	参数
房间尺寸(长×宽×高)	5×5×3 m ³
工作平面高度	0.85 m
探测器面积	10 ⁻⁴ m ²
探测器视场角	170°
探测器响应度	1 A/W

统参数列于表1中。

VLC系统探测器端接收到的信号的信噪比可以表示为^[15]:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{\gamma^2 P_{\text{rSignal}}^2}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 + \gamma^2 P_{\text{rSI}}^2} \quad (1)$$

其中 σ_{shot}^2 和 $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 分别是散弹噪声和热噪声的功率, γ 是探测器的响应度, P_{rSignal} 是接收到的信号功率, P_{rSI} 是接收到的码间干扰功率, 可分别表示为:

$$P_{\text{rSignal}} = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^{LEDs} h_i(t) \otimes X(t) \right) dt \quad (2)$$

$$P_{\text{rSI}} = \int_T^\infty \left(\sum_{i=1}^{LEDs} h_i(t) \otimes X(t) \right) dt \quad (3)$$

其中 $h_i(t)$ 是第 i 个LED的脉冲响应(只考虑可视光线), $X(t)$ 表示的是在一个码型间隔内传输的光脉冲。

我们采用文献[11]的 Q 参数来研究整个工作平面上不同接收位置的信噪比分布, 其定义为:

$$Q_{SNR} = \frac{\overline{SNR}}{2\sqrt{\text{var}(SNR)}} \quad (4)$$

其中, \overline{SNR} 和 $\text{var}(SNR)$ 分别为信噪比的均值和方差。 Q_{SNR} 表示了信噪比及其分布情况, Q 值越高, 表明信噪比分布越均匀。

2 优化过程和结果

2.1 优化过程

我们提出的优化方法, 是针对每一个LED的SAHP参数进行优化(称为个体优化), 使系统的 Q_{SNR} 达到最优。由于可用于优化的参数数量众多, 从而可以获得良好的优化性能。作为对比, 我们也采用了把所有LED取相同的SAHP, 将其作为一个参数来进行整体优化(WOP)的方法, 以比较不同优化方法的效果。该方法是对整个接收平面参数进行优化, 与文献[14]中只针对特定区域内参数进行优化相比具有更广的优化范围, 因此具有很好的优化效果。

我们的优化目标是要找到满足一定信噪比条件下(比如信噪比不小于13.6 dB^[15]), 使 Q_{SNR} 达到最大值的SAHP参数, 目标函数和相应的线性、非线性边界条件可以表示为:

$$\begin{aligned} \max & Q_{SNR}(\Phi_{1/2}(i)) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} SNR > 13.6 \\ 20^\circ \leq \Phi_{1/2}(i) \leq 80^\circ \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\Phi_{1/2}(i)$ 表示的是待优化的

第 i 个LED的SAHP参数。

优化过程可采用OptQuest非线性规划多点启动算法^[16]进行计算, 此算法能够计算出满足非线性边界条件下的全局最优化解。它由全局算法和本地算法两部分。在全局算法部分, 使用分散搜索算法^[17]来产生可能用于本地非线性规划求解器的起始点。在本地算法部分, 对于满足得分函数、Basin标准和约束条件的起始点, 运行本地非线性规划求解器。本地算法可以分为两个阶段, 分别执行 n_1 和 n_2 次叠代。在第一个阶段, 运行所有试验点的判决函数, 然后选择那些具有最优化Penalty函数的起始点, 来运行本地求解器。在第二个阶段, 本地求解器从满足距离过滤函数和价值过滤函数的其余点的子集部分开始运行, 以保证本地求解器只从占百分比很小的试验点中开始运行并且仍然有比较高的找到全局最优解的可能性^[16]。

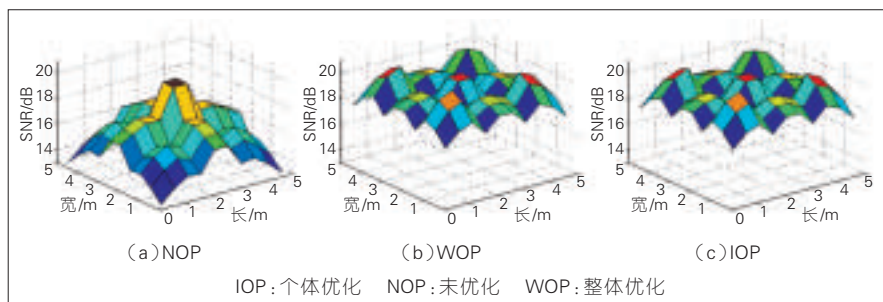
2.2 优化结果

我们计算了不同光源分布下, 个体优化(IOP)、整体优化(WOP)和未优化(NOP)的信噪比及其分布。对于NOP, 每个LED的SAHP设定为常用的宽角60°。下面为所计算结果。

对于图1(a)所示的4组布局, IOP与WOP的优化结果比较相近, 相对于NOP来说都有较大的改善, 如图2所示。因此, 对于这种布局, 采用何种优化方式可根据实际情况而定。由于WOP只有一个待定的参数, 优化过程更为简单。

对于9组和16布局, 情况与4组布局相似, 信噪比的均值从NOP时的13.6 dB和WOP时的20.6 dB, 提高到IOP时的21.6 dB。具体的结果列于表2中。

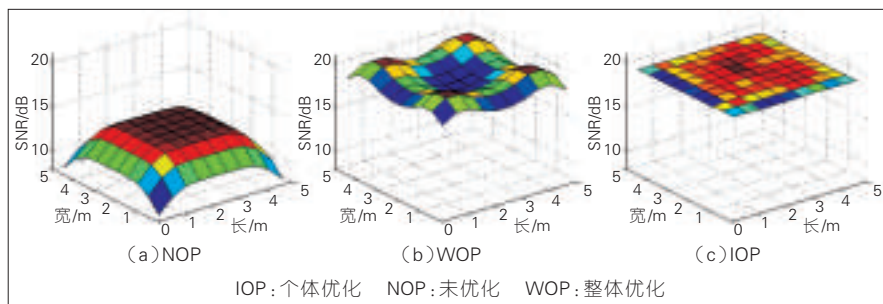
对于平均布局, IOP明显优于WOP, 如图3所示。IOP优化下的信噪比波动对于所有接收位置来说只有0.3 dB, 相应的 Q_{SNR} 高达148, 约为NOP和WOP的10倍。IOP情况下



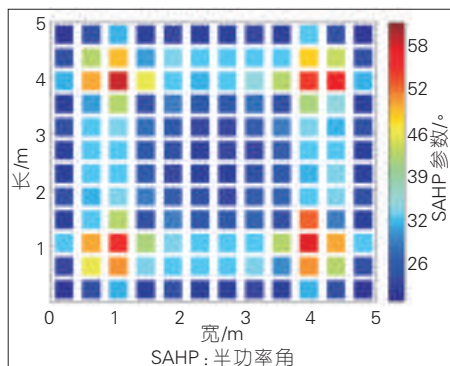
▲图2 4组LED光源布局的信噪比分布

▼表2 4种不同光源布局情况下的信噪比

布局		信噪比的优化值 QSNR	信噪比的优化值 Min	信噪比的优化值 Max	信噪比的优化值 Mean
4组布局	NOP	5.7	13.0	19.6	15.8
	WOP	11.9	17.4	20.6	18.9
	IOP	11.9	17.3	20.5	18.8
9组布局	NOP	3.8	10.2	18.0	13.6
	WOP	8.5	17.9	23.2	20.6
	IOP	13.8	20.6	23.5	21.9
16组布局	NOP	3.7	9.1	16.1	12.9
	WOP	6.3	17.0	22.8	18.5
	IOP	8.1	19.3	25.1	21.0
平均布局	NOP	4.1	8.2	13.4	11.9
	WOP	14.1	18.1	20.4	19.2
	IOP	148	19.2	19.5	19.4



▲图3 平均布局下的信噪比分布



▲图4 平均布局下的次优化的LED的SAHP参数分布

SAHP 参数的位置分布如图4所示, 其中同一SHAP参数用相同的颜色来表示。可以看出, 只有少量SAHP值为 60° , 大多数SHAP参数取值为在 20° 至 35° 范围内。因为比较小的SAHP值可以让LED的光线汇聚在一个比较小的范围内, 这样就可以减小码间干扰所带来的影响, 进而提高信噪比。

表2列出了有关信噪比的优化

值。这些结果显示, 用最大化 Q_{SNR} 参数来优化LED布局的方法是有效的。优化使得信噪比及其均匀性都得到了提高。通信分析最优化结果, 可以发现小SAHP的LED可以提供更均匀的通信性能。采用何种优化方式取决于LED的布局。对于均匀布局, 应采用IOP优化方法。对于其他布局(尤其是组数较少时), IOP与WOP均可采用, 后者的优化过程相对简单。本文提出的优化方法, 每个LED功率是保持不变的, 这一特点很适合于工程应用。无论是在安装还是以后替换时, 只需要替换具有相同SAHP参数的LED即可, 与那些需要改变光源功率的方法相比较更容易操作。

3 结束语

本文提出了一种优化LED半功率角布局的方法, 此方法能有效提高室内VLC系统的信噪比并且降低信噪比的波动。对于4种典型LED布局方式, 采用此优化方法后, 信噪比与其分布特性均得到提高。另外, 此方法不需要调节LED的功率, 因此更适合于工程应用。

参考文献

- [1] LEE Y U, KAVEHRAD M. Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network [J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions, 2012, 58(2): 1176-1184.
- [2] JANG H J, CHOI J H, GHASSEMLOOY Z, LEE C G. PWM-based PPM format for dimming control in visible light communication system [C]//Proceedings of the Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2012 8th International Symposium on, IEEE, 2012: 1-5.
- [3] STEFAN I, ELGALA H, MESLEH R, O'BRIEN D, HAAS H. Optical wireless OFDM system on FPGA: Study of LED nonlinearity effects [C]//Proceedings of the Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, IEEE, 2011: 1-5.
- [4] AZHAR A H, TRAN T A, O'BRIEN D. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications [C]//Proceedings of the GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE, IEEE, 2010: 1052-1056.
- [5] LE M H, O'BRIEN D, FAULKNER G, ZENG L,

→下转第51页

散弹噪声干扰下的多电平调制可见光通信系统

Multilevel Modulation Visible Light Communication System with Shot Noise Interference

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0036-04

摘要: 认为可见光通信系统中的散弹噪声对高电平的调制符号产生很大干扰,应当考虑调制电平之间的距离逐渐增加以提升系统性能。提出一种简单的设计准则,并通过数值结果验证了其几乎能达到最优方案的性能。数值结果显示,合理的电平设计将带来明显的性能提升。数值结果的比较发现照明需求将影响设计结果,这进一步说明了提出的简单设计准则的必要性。

关键词: 可见光通信; 信号相关噪声; 多电平调制

Abstract: Shot noise in visible-light communication systems greatly interferes with symbols in high-level positions. The distance between the level positions should be gradually increased in order to improve system performance. This paper proposes a simple design principle, and the numerical results show that it can almost achieve optimal performance. Redesign for the optimal level placements is needed when illumination requirement changes, which indicates the importance of a simple design principle.

Keywords: visible light communications; signal dependent noise; multilevel modulation

汪后禹/WANG Houyu

(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏
南京 211100)
(National Mobile Communications Research
Laboratory, Southeast University, Nanjing
211100, China)

种噪声最大的特点是噪声方差正比于接收光强。因此,使用IM/DD技术的系统将受到信号相关噪声的干扰。

然而,在以往的研究里,信号相关噪声通常被忽略了,信道模型建模为通常的加性高斯信道,噪声大小与信号无关。当热噪声占主导地位时,或者背景光比光信号强许多时这种考虑是合理。但是,在VLC系统中,光信号同时兼顾照明需求,接收信号的强度相当大,导致的散弹噪声不可被忽略^[8],甚至替代热噪声成为主导噪声^[9]。因此,文献[8]提出了一种更准确的信道模型,而本文也将基于此作进一步研究。

本文考虑的是多电平调制系统。早期的VLC系统采用开关键控(OOK)调制,由于LED的频率响应特性,调制带宽通常只有几至几十兆赫兹。为了进一步提高传输速率,一种简单而有效的方式是采用多电平调制。在以往情况下,例如主要噪声为热噪声的系统,调制电平的强度一般为等间隔分布,而判决边界则取两相邻电平的中点值。但是,在VLC系统中,由于散弹噪声的存在,不同强度的电平信号将受到不同强度的噪声

随着固态照明技术的发展,发光二极管(LED)将被广泛应用于大量的照明环境中。与传统的照明光源相比,LED的光强变化对电信号具有更快的响应速度,因此可见光通信(VLC)的概念被提出。与无线电通信系统相比,VLC系统^[1-2]有诸多优点:(1)其工作频段为可见光范围,无需许可并且不占用日益拥挤的无线电频段;(2)实现照明的同时传输信号,节省了能量,是一种绿色通信;(3)可见光信号不可穿透墙壁,使得

各个房间天然形成无干扰的小区,并且提高了通信的安全性;(4)在某些电磁敏感的场合可被用作无线通信的手段。总之,可见光通信是一项非常具有前景的技术。

在可见光通信系统中,受技术与成本的限制,主要的调制检测技术为强度调制/直接检测(IM/DD)^[3]。在发送端,LED随着电信号的电流变化改变发光强度,从而将电信号转化为光信号。在接收端,光电二极管根据收到的光强产生相应大小的电流,将光信号转变为电信号。然而,在接收端的“光-电”的转换过程中,一种加性高斯噪声——散弹噪声(Shot Noise)产生了^[4-7]。与常见的热噪声相比,这

收稿日期: 2014-10-08

网络出版时间: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金

(61172077, 61223001), 国家科技重大专项(2013ZX03003006)

影响,因此,更合理的电平分布应当是:电平之间的距离逐渐增加,与噪声大小相一致。此外,判决边界也应当重新考虑。

可以把电平选择视作星座设计问题。但是在有关的可见光/无线光通信系统星座设计的研究文献中,通常只考虑了信号独立噪声,而忽略了信号相关噪声的影响^[10-13]。设计方法通常是最大化最小欧式距离或者用填球法,最终设计的星座点是均匀分布的。显然,这种设计方法是不适合本文考虑的问题的。

在本文中,多电平的选择被考虑为一个最优化问题,最终我们提出了一个简单而有效的方法以获得最优解,进一步,通过数值结果验证了设计的有效性和必要性,并发现了更多的结论。

1 多电平调制可见光通信系统模型

考虑使用IM/DD技术,采用多电平调制的VLC系统。在发送端,每 n 个比特被映射为某符号 $s_i \in S \triangleq \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$,其中 S 代表所有符号的集合,而且 $M=2^n$ 。发送端根据符号值产生相应大小的电流,驱动LED发出不同光强,而接收端根据接收光强恢复电信号,进而判断符号,得到数据。由于散弹噪声与热噪声的共同作用,当发送符号为 s_i 时,接收符号 y 为:

$$y = \alpha(hs_i + \sqrt{hs_i}Z'_1) + Z_0 \quad (1)$$

其中 h 为传输损耗(亦包括了光电转换效率), α 为信号放大倍数,假设理想即满足 $\alpha h = 1$ 。 Z'_1 和 Z_0 为零均值实高斯变量,方差分别为 N'_1 和 N_0 ,大小由电路特性决定。为了表达的简便,令 $Z_1 = \alpha\sqrt{h}Z'_1$,则上述信道可写为:

$$y = s_i + \sqrt{s_i}Z_1 + Z_0 \quad (2)$$

这里 Z_1 方差为 $N_1 = \alpha^2 h N'_1$ 。在公式(2)中,高斯变量 $\sqrt{s_i}Z_1$ 和 Z_0 分别

代表了散弹噪声和热噪声的作用。根据高斯分布的可加性,接收符号的条件概率密度函数 $P(y|s_i)$ 为:

$$P(y|s_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{(y-s_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

其中 $\sigma_i^2 = s_i N_1 + N_0$ 。

关于电平符号 $s_1 \sim s_M$ 的取值有两个约束:

(1)由于光信号只有强度可被调制,因此所有 s_i 必须是非负实数。

(2)由于兼顾照明需求,所以要求信号平均强度为某定值 I 。可以用数学形式表达为:

$$0 \leq s_1 < s_2 < \dots < s_M \quad (4)$$

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i = I \quad (5)$$

本文将在以上约束下,考虑 $s_1 \sim s_M$ 的取值,使得系统的误符号率最小。

2 判决边界与系统误符号率

对于 M 阶多电平调制,需要 $M-1$ 个判决边界 $D_1 \sim D_{M-1}$ 。接收端根据以下准则进行符号判决:

$$\hat{s} = \begin{cases} s_1 & y < D_1 \\ s_i & D_i \leq y < D_{i+1}, i=2, \dots, M-2 \\ s_M & y \geq D_{M-1} \end{cases} \quad (6)$$

对于给定的 $s_1 \sim s_M$,最佳的 D_i 取值可根据下式得到:

$$P(D_i|s_i) = P(D_i|s_{i+1}), i=1, \dots, M-1 \quad (7)$$

将公式(3)代入并化简,可得:

$$\frac{(D_i - s_i)^2}{\sigma_i^2} = \frac{(s_{i+1} - D_i)^2}{\sigma_{i+1}^2} + \ln \frac{\sigma_{i+1}^2}{\sigma_i^2}, i=1, \dots, M-1 \quad (8)$$

其中 s_i 和 σ_i^2 均为已知数值,因此为关于 D_i 的二次方程。进一步分析易知方程必有两根,且一正一负,结合符号的非负性,从而可知 D_i 应取正根。

根据公式(8)得到的判决边界是最优的,但表达形式过于复杂,不利于做进一步分析。事实上,若忽略公

式(8)右边第二项,则可得形式相当简洁的 D_i 表达式:

$$D_i = \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i + \sigma_{i+1}} s_i + \frac{\sigma_i}{\sigma_i + \sigma_{i+1}} s_{i+1} \quad (9)$$

尽管公式(9)得到的是判决边界的次优选择,但实际上这样处理带来的性能损失相当有限,关于这点可以通过数值结果进行验证。

当判决边界确定后,发送符号 s_i 时的误判概率可被计算如下:

$$P_{e,i} = \begin{cases} Q\left(\frac{D_1 - s_1}{\sigma_1}\right) & i=1 \\ Q\left(\frac{s_i - D_{i-1}}{\sigma_i}\right) + Q\left(\frac{D_i - s_i}{\sigma_i}\right) & i=2, \dots, M-1 \\ Q\left(\frac{s_M - D_{M-1}}{\sigma_M}\right) & i=M \end{cases} \quad (10)$$

总体的误符号率 SER 是 $P_{e,i}$ 的平均,即:

$$SER(s_1, s_2, \dots, s_M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{e,i} = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M-1} Q\left(\frac{s_{i+1} - s_i}{\sigma_{i+1} + \sigma_i}\right) \quad (11)$$

其中最后一个等式由将公式(9)代入公式(10)得到。这里记号 $SER(s_1, s_2, \dots, s_M)$ 的含义是:系统误码率由且仅由 $s_1 \sim s_M$ 的数值确定(因为判决边界也是根据 $s_1 \sim s_M$ 确定的),其他系统参数 N_1 、 N_0 和 I 被认为已知。

3 电平选择

M 阶多电平调制中,符号 $s_1 \sim s_M$ 的取值可表述为如下最优问题:

$$\begin{aligned} \min_{s_i} & SER(s_1, s_2, \dots, s_M) \\ s.t. & \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i = I, \\ & 0 \leq s_1 < s_2 < \dots < s_M \end{aligned} \quad (12)$$

应当注意,将 $\sigma_i = \sqrt{s_i N_1 + N_0}$ 代入公式(11)后,目标函数可化为:

$$\frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M-1} Q\left(\frac{s_{i+1} - s_i}{\sigma_{i+1} + \sigma_i}\right) = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M-1} Q\left(\frac{1}{\sqrt{N_1}} (\sqrt{s_{i+1} + k} - \sqrt{s_i + k})\right) \quad (13)$$

其中 $k = N_0/N_1$ 。令 $t_i = \sqrt{s_i + k}$,则

原问题可化为:

$$\begin{aligned} \min_{t_i} & \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M-1} Q\left(\frac{(t_{i+1}-t_i)/2}{\sqrt{N_1/4}}\right) \\ \text{s.t.} & \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M t_i^2 = I + k, \\ & \sqrt{k} \leq t_1 < t_2 < \dots < t_M \end{aligned} \quad (14)$$

注意到问题公式(14)中,目标函数的形式可以看作“以 $t_1 \sim t_M$ 作为电平符号,中点作为判决边界,只存在热噪声(方差为 $N_1/4$)的通信系统的误符号率”。而且,功率约束条件也类似无线电系统的功率约束形式。因此,根据无线电系统中的情况,多电平调制采用等间隔分布的电平,可以考虑问题公式(14)以 $t_1 \sim t_M$ 等间隔分布作为解,但我们不能保证这是问题的最优解。

事实上,根据凸优化理论,问题公式(14)属于非凸问题,求其最优解将相当困难^[14]。另一方面,经过计算, $t_1 \sim t_M$ 等间隔分布将不满足Karush-Kuhn-Tucker条件(卡罗需库恩塔克条件,亦称KKT条件,是最优解的必要条件^[15]),因此这个解必然是次优的。然而,尽管不是理论的最优,这个解却十分具有工程意义。因为在满足通信要求的条件下(例如 $SE_R < 10^{-3}$,或 N_1 足够小),该次优解的性能将很接近最优解的性能。关于这点可以在数值结果中得到观察。

$t_1 \sim t_M$ 等间隔分布,即:

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \dots = t_M - t_{M-1} \quad (15)$$

这里关于 M 个独立变量有 $M-2$ 条等式,再结合功率约束等式以及 $t_1 = \sqrt{k}$ (即 $s_1 = 0$),可唯一确定所有 t_i ,进而得到 s_i ,即多电平符号的数值选择。

4 数值结果

本节的主要目的有二:

(1)验证公式(9)以及公式(15)的次优处理与最优解之间的性能差距很小。

(2)观察在不同场景参数下公式

(9)与公式(15)的调整带来的性能提升。

最优解的获得:给定的场景下(N_1, N_0, I),对 $s_1 \sim s_M$ 进行穷举搜索(ES),精度为0.0001,判决边界通过求解公式(8)得到,然后通过公式(10)以及均值得到误符号率,输出使得误符号率最小的结果,即最优的 $s_1 \sim s_M$ 。

下面,令调制电平数为4,照明需求 $I=1$ 。观察在不同的 N_1, N_0 数值下分别使用穷举搜索方法和按照准则公式(15)所得的 $s_1 \sim s_4$ 数值,结果如表1所示。

可见,二者十分接近,说明了公式(9)以及公式(15)的合理性。并且,随着 N_1 的减小(N_0 的减小以及 k 的增大),最优解与按照准则得到的结果越来越接近。实际上,对于不同的噪声参数,严格意义的最优解有微小不同,而按照准则公式(15)得到的结果其实是 $N_1 \rightarrow 0$ 时的最优解。由于可用的实际系统的 N_1 通常接近零(否则系统误判率会很高,参见公式(14)的目标函数),所以用准则公式(15)能得到近似最优解。

进一步,我们比较系统的误比特率性能(符号映射采用格雷码),考虑4种电平选择以及判决边界选择时、的情形:

(1)等间隔分布电平及中点判决边界。

(2)等间隔分布电平及按照公式(8)得到的判决边界。

(3)穷举搜索($N_0 = 10^{-2.5}$)得到的电平以及按照公式(8)得到的判决边界。

(4)按照准则公式(15)得到的电平及按照公式(9)的判决边界。

各场景下不同电平与判决设计方案的误比特率(BER)性能如图1所示。图1横坐标为热噪声方差 N_0 大小,同时 N_1 根据考虑的 $k=1/4, 1, 4$ 情况而确定,纵坐标为系统误比特率。

图1包含了丰富的结论:

(1)设计方案(4)的性能与最优方案(3)几乎重合,可以认为达到了最优的性能。

(2)单纯地调整判决边界带来的性能提升是很有限的,因此很有必要对调制电平重新选择。

(3)信号独立噪声所占比重越小($k=N_0/N_1$),越有必要进行电平和判决边界的重新设计,反之若系统噪声主要由信号独立噪声(如热噪声)主导,则重新设计带来的提升比较有限($k=4$ 则性能提升不到1 dB)。

下面考虑当调制电平增加后,重新设计是否能带来更多性能提升。图2展示了不同 k 值下8/16电平调制的性能曲线(分别采用传统与重新设计的电平和判决边界)。可以看出,在 $BER=10^{-6}$ 处,无论调制阶数为8还是16(或者4,见图1),性能均分别提升了数值(3.8 dB/2 dB/0.5 dB,当 $k=1/4, 1, 4$ 时)。因此,采用重新设计带来的性能提升主要与系统特性有关(两种噪声强度的比值 k),而与调制阶数没有太大关系。

最后,我们考虑不同的照明需求下的情况。不同照明需求下按照公式(15)进行电平选择的结果如表2所示。可以明显看出, $I=1, k=1/4$ 与 $I=4, k=1$ 的结果是相同的。对此的解释是,本质上看,电平选择是根据两种噪声成分的比值进行的。散弹噪声的平均方差为 IN_1 ,因此虽然 N_1 和 N_0 由系统特性本身决定,但不同

▼表1 按照准则公式(15)得到的结果与最优值的比较

N_0/N_1	穷举搜索($N_0 = 10^{-2.5}$)	穷举搜索($N_0 = 10^{-4}$)	本文所提准则
$k=1/4$	0,0.4764,1.2253,2.2983	0,0.4918,1.2455,2.2627	0,0.4923,1.2462,2.2615
$k=1$	0,0.5701,1.2804,2.1495	0,0.5786,1.2892,2.1322	0,0.5789,1.2895,2.1316
$k=4$	0,0.6287,1.3121,2.0592	0,0.6352,1.3175,2.0473	0,0.6355,1.3177,2.0468
$k=20$	0,0.6534,1.3252,2.0214	0,0.6593,1.3296,2.0111	0,0.6595,1.3298,2.0107

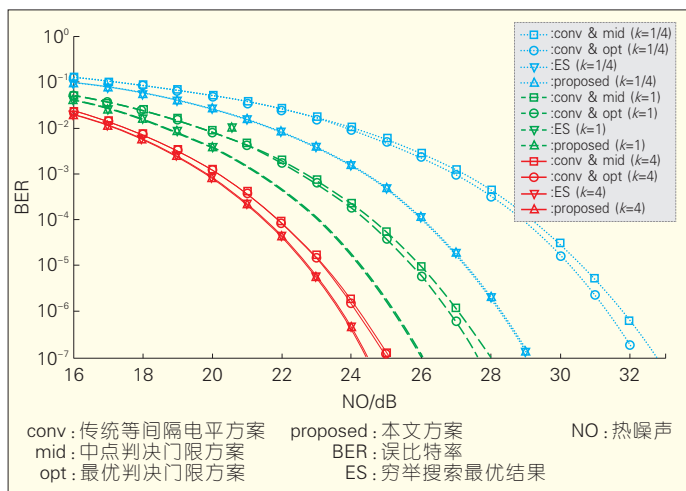


图1
各场景下不同电平
与判决设计方案的
误比特率性能

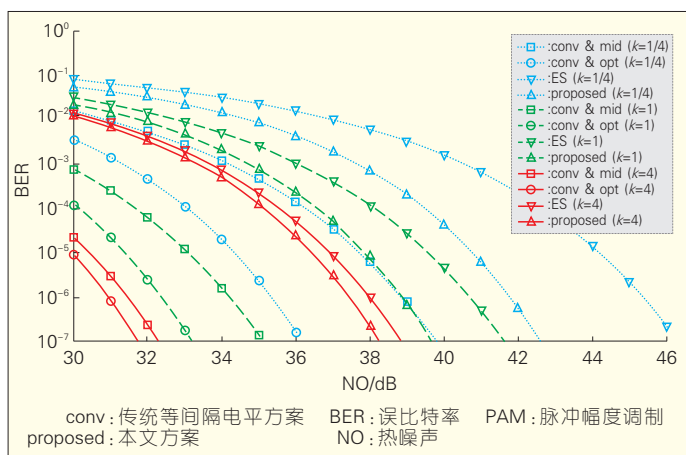


图2
不同调制阶数下
重新设计能带来的
误比特率性能提升
比较

表2 不同照明需求下按照公式(15)进行电平选择的结果

N_0/N_1	$l=1$	$l=4$
$k=1/4$	(0,0.4923,1.2462,2.2615) /	(0,0.4109,1.2054,2.3837) /
$k=1$	(0,0.5789,1.2895,2.1316) /	(0,0.4923,1.2462,2.2615) /
$k=4$	(0,0.6355,1.3177,2.0468) /	(0,0.5789,1.2895,2.1316) /
$k=20$	(0,0.6595,1.3298,2.0107) /	(0,0.6409,1.3205,2.0386) /

的照明需求将导致不同的噪声成分比值。所以当照明需求变化时,最优电平也需要重新选择。这一结论说明了提出简单设计准则公式(15)的必要。

5 结束语

采用IM/DD技术的可见光通信系统存在信号相关高斯噪声。基于此,本文对多电平调制方案做了研究,考虑了判决边界以及电平的选择。通过合理的近似处理,可以用较简单的

设计方法得到几乎性能最优的设计方案。此外,通过数值结果,可观察到性能的明显提升,说明了进行判决边界以及电平选择的必要性。

参考文献

- [1] JOVICIC A, LI J, RICHARDSON T, RESEARCH Q. Visible light communications: opportunities, challenges and the path to market [J]. IEEE Communication Magazine, 2013,51(12): 26–32.
- [2] HRANILOVIC S, LAMPE L, HOSUR S. Visible light communications: the road to standardization and commercialization [J]. IEEE Communication Magazine, 2013,51(12): 24–25.

- [3] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-art [J]. IEEE Communication Magazine, 2011,49(9): 56–62.
- [4] KATZ J. detectors for optical communications: a review [J]. TDA Progress, 1983,42(75): 21–38.
- [5] AGRAWAL G P. Fiber-optic communication system (3rd edn) [M]. New York: Wiley, 2002.
- [6] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communication [C]//Proceedings of the IEEE, 1997,85(2): 265–298.
- [7] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 51(1): 100–107.
- [8] MOSER S M. Capacity results of an optical intensity channel with input-dependent Gaussian noise [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012,58(1): 207–223.
- [9] TSATMAS A, WILLEMS F M J, BAGGEN C P M J. The optical illumination channel [C]// Proceedings of the 19th Symp. Communication and Vehicular Technology in the Benelux, 2012.
- [10] KAROUT J, AGRELL E, SZCZERBA K, KARLSSON M. Optimizing constellations for single-subcarrier intensity-modulated optical systems [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012,58(7): 4645–4658.
- [11] GAO Q, MANTON J H, CHEN G, HUA Y. Constellation design for a multicarrier optical wireless communication channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014,62(1): 214–225.
- [12] DROST R J, SADLER B M. Constellation design for color-shift keying using Billiards algorithms [C]//Proceedings of the IEEE Globecom Workshops, 2010: 980–984.
- [13] MONTEIRO E, HRANILOVIC S. Constellation design for color-shift keying using interior point methods [C]// Proceedings of the IEEE Globecom Workshops, 2012:1224–1228.
- [14] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization [D]. U.K. Cambridge Univ. Cambridge, 2004.
- [15] LUO Z Q, YU W. An introduction to convex optimization for communications and signal processing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(8): 1426–1438.

作者简介



汪后禹,东南大学移动通信国家重点实验室在读博士研究生;研究方向为可见光通信中的调制解调技术及基带信号处理。

建设物联网:轻量级寻址技术不可或缺

Lightweight Addressing Technology of the Internet of Things

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0040-04

摘要: 认为实现物联网中任意物品的准确、高效、安全的寻址对建立真正意义上的互联互通泛在网络具有重要意义;轻量级IP寻址技术能够满足物联网的泛在互联需求,同时适用于物联网终端;基于IPv6编码的轻量级寻址策略在理论研究与实践应用两方面都取得了突破性的成果,将会成为未来物联网终端的重要寻址方式之一。

关键词: 物联网寻址; IPv6 协议; IP 寻址; 轻量级

Abstract: Addressing accurately, efficiently, and securely is important for establishing a true Internet of Things (IoT), which implies intercommunication between any objects in the network. The lightweight IP addressing technology is suitable for IoT terminals and supports ubiquitous demands. There have been recent breakthroughs in both the theoretical research and practical applications of IPv6-based coding and lightweight addressing strategies. IP-based addressing technology will be one of the important terminal-addressing strategies in the future.

Key words: addressing of internet of things; IPv6; IP addressing; lightweight

孙知信/SUN Zhixin
骆冰清/LUO Bingqing

(南京邮电大学, 江苏 南京 210003)
(Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003,
China)

- 物联网寻址技术是物联网核心技术之一
- 轻量级IP寻址技术能够满足物联网的泛在互联需求
- 寻址技术目标是实现物联网中任意物品准确、高效、安全的寻址

1 物联网与物联网寻址

按照国际电信联盟(ITU)的定义^[1],物联网主要解决物品到物品(T2T)、人到物品(H2T)、人到人(H2H)之间的互连。物联网把所有物品通过射频识别、无线传感设备等信息交互设备与互联网连接起来,实现人与物,甚至是物与物之间的信息交换和通信,是继计算机、互联网与移动通信网之后的又一次信息产业浪潮,受到各国政府、企业和科研机构的高度重视。

物联网实质上是在互联网基础上的延伸和扩展,目前仍处于起步阶

段。由于物联网中的感知数据无处不在,用户端将延伸和扩展到任何设备与物品之间。典型的物联网应用包括智能家居、智能交通、智慧医疗、智能电网等。这些应用虽然具有物联网的信息交换特征,但目前的物联网应用仅仅是实现了某个领域内物品互联,与实现真正意义上无处不在的物联网还有差距。其中很重要的一个原因在于如何将任意物品按某种编码方式接入物联网,如何实现物联网中任意物品的寻址以建立通信连接的问题并未得到解决。

物联网寻址技术作为物联网核心技术之一,在物品以特定方式接入互联网的基础上,实现物联网中任意物品准确、高效、安全的寻址,对它的研究和实践将从真正意义上构建一个互联互通的泛在网络^[2]。与互联网

中的寻址系统一样,物联网寻址平台将在物联网中起核心作用。物联网中的物品并不都只是被动发送信息,它们也可以接受消息并可进行远程控制,但目前的物联网信息交换仍处于局域范围内。物联网寻址系统的出现将打破目前物联网应用的局限性,将众多物联网信息孤岛相关联,真正实现全球范围内的互联互通。同时,物联网将客观世界的各种物体接入至虚拟的网络世界,这些物品数目将会相当庞大,每时每刻可能都会有大量的物品在物联网中交换信息,寻址系统必将成为物联网信息交换的重要枢纽。

物联网是一项能渗透人类活动各个领域的新型产业,小到对智能家电的远程控制与信息交换,大到物流供应链中对物品进行跟踪和追溯,物

收稿日期: 2014-09-12

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家自然科学基金

(60973140、61170276、61373135)

联网寻址都是整个过程中不可缺少的一部分。因此,分析和研究物联网资源寻址存在的特殊性,针对其特殊性研究符合物联网需求的资源寻址技术,从而确保其中联网物品的相关信息能够被高效、准确和安全的寻址、定位以及查询,具有现实意义。

2 物联网寻址技术发展现状

全球标准组织与研究机构对物联网寻址技术开展了一定的研究工作,但至今为止,仍然没有形成一个通用的技术标准。

业界与物联网相关主要规范有EPCglobal的电子产品代码(EPC)系列规范^[3]、泛在识别(UID中心的UID系列规范^[4]。它们主要解决的是供应链各环节信息的自动、实时识别问题,其寻址方式并非通用。此外,二者对物品的编码都提出了各自的规范,如何进行物品编码的统一处理也是物联网寻址需要解决的问题之一。

互联网工程任务组(IETF)中名为基于IPv6的低功耗无线个人局域网络(6LoWPAN)的工作组提出了一套基于IPv6的寻址方案^[5-6],对IPv6数据报文进行简化,以适应于感知设备的无线数据通信。但其寻址范围只局限于网络层以下,并不能构成一个完整的寻址模型。

欧洲电信标准协会(ETSI)^[7-8]、第三代合作伙伴计划(3GPP)^[9-10]、以及中国电子标签标准工作组也在积极推动物联网相关寻址标准的制订,但各标准组织还未形成统一国际标准。

由此可见,业界对物联网寻址的研究比较分散,一般针对具体应用展开,还没有形成一个完整通用的寻址框架。学术界对物联网的研究依据物联网的覆盖范围可以分为局域范围物联网与广域范围物联网研究,或称为闭环物联网与开环物联网研究。

大多数研究者对物联网的研究仍局限于局域范围内(闭环物联网),主要集中在射频识别(RFID)技术、无线传感器技术等方面^[11-12]。RFID

属于短距离的通信技术,是物联网感知层的重要支撑之一,但其通信过程本身几乎可以忽略寻址的过程;相对而言,无线传感技术的通信覆盖范围较广,其可扩展性也更强。但是目前传统无线传感网中的节点并非全局标识,而是通过分簇的方法对传感网中的节点进行管理,其中簇首节点通过广播的方式进行感知节点的发现和寻址。因此无线传感网中的寻址方式同样无法适用于物联网的寻址要求,即能够由互联网中的节点或终端直接对感知节点进行寻址和发现。

闭环物联网中的节点无法直接接入互联网,并不能完全满足物联网的寻址需求。因此,一些研究者开始对广域物联网(开环物联网)中的寻址问题展开研究,现有的一些跨域范围的物联网寻址研究涉及到RFID信息服务、寻址服务以及发现服务等。这些研究虽然使用了IP协议机制进行寻址,具备了广域互联的条件,但均未提及如何从互联网对物联网节点进行访问寻址,依然未能提出一套完整的对广域物联网节点进行寻址的可行方法,无法满足物联网的寻址需求。中科院孔宁博士对互联网资源寻址的层次迭代模型进行扩展,提出物联网资源寻址的通用层次模型,但该模型对寻址目标的描述还不够周全,且没有考虑感知设备性能的局限性,对物联网底层的寻址过程定义不够清晰,还需要进一步完善。

由此可见,学术界对物联网寻址的研究成果仍然较少,不够充分,至今还没有一个完善的物联网寻址模型作为物联网广域通信的底层技术支撑,而物联网寻址是连接人与物、物与物的枢纽,是实现真正意义上的物联网所必须解决的问题,因此物联网寻址研究具备较高的研究价值和创新性。

3 物联网轻量级IP寻址技术

从物联网寻址的发展问题可以窥探到物联网终端的海量、多样异

构、资源能量有限等特点限制了物联网环境下的端到端信息交换模式。然后基于IP的轻量级物联网终端寻址技术能够对不同的编码标准提供统一的寻址服务,对物联网终端进行高效、精确的轻量级寻址。

首先,从广域物联网的角度出发,物联网终端数量庞大,对于物联网终端的物品编码要求全球统一采用一种新式编码是不切实际的。即使EPC和泛在识别码(UCODE)的发展较为迅速,使用范围较大,但仍然无法做到全球统一。然而IP地址随着互联网的发展态势,已经渗入到了全球的各个角落。IP地址作为物联网终端的一种编码形式,具有统一性、互通性的先天优势。采用IP地址进行物联网终端寻址,无线传感器网络可以与互联网进行无缝连接,真正实现物联网环境下的端到端信息交换。同时,IPv6的地址空间庞大到足以每一粒尘埃分配一个IPv6地址,完全不用担心地址枯竭的问题。

其次,物联网终端具有多样异构性,构建完善的,无处不在的物联网无法要求所有的物品,传感器设备,个人电脑以及移动智能终端设备完全采用同样的编码方式与寻址模式。仅物品而言,物品信息的编码也不尽相同。因此,在物联网轻量级IP寻址模型中,物联网编码适配技术的研究可以满足物联网环境中不同物品编码的实际寻址需求。文献[13]中详细解释了移动智能设备的网络寻址与IP寻址技术。

最后,对物联网IP寻址研究一种轻量级的寻址架构是考虑到很大一部分物联网终端具有能量有限,存储与计算资源较弱的特点。采用轻量级的网络层寻址技术,能够有效降低终端的实际性能消耗,延长终端的使用寿命,继而维持网络的健壮性。

4 基于IPv6编码的寻址策略

物联网终端采用IPv6的编码方式具有如下优点:

• 可以自然的实现与互联网的互联互通。

• 可以为每一个物联网节点分配一个全球唯一的 IPv6 地址,不用担心地址枯竭的问题。

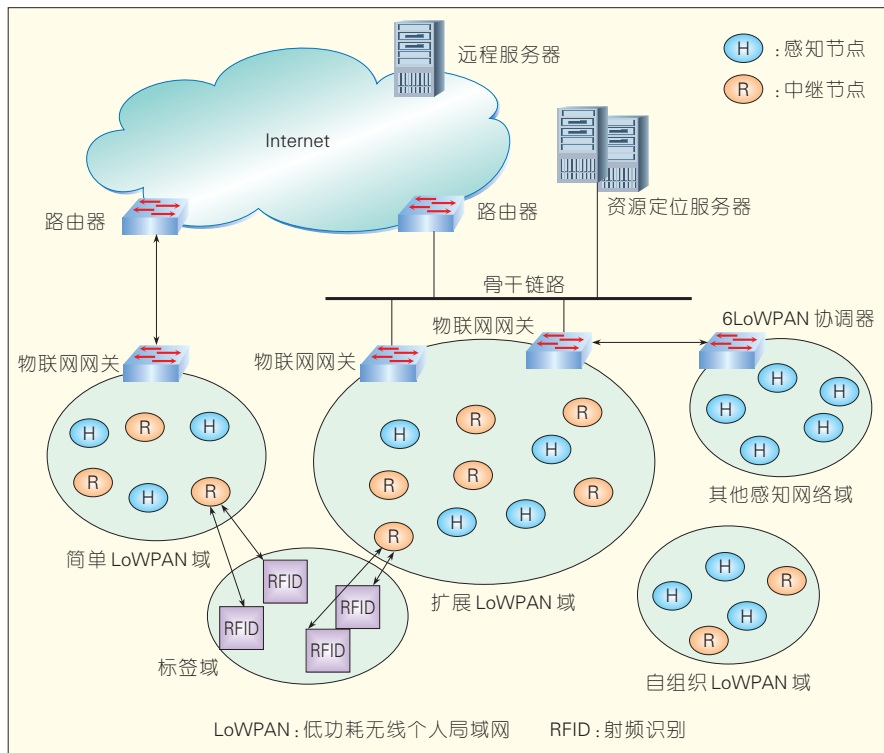
• 能够满足物联网地址自动配置功能的自组织性需求。

然而引入 IPv6 后的物联网同样面临一些亟需解决的问题,首先是物联网终端对 IPv6 协议的支持程度,IP 协议的复杂程度往往无法承载于低功耗传感节点上,同时由于 TCP/IP 各层协议首部较长,如何在去除冗余数据的同时保证良好的通信也是 IPv6 与接入网结合所需解决的重要问题。

IETF 6LoWPAN 由此应运而生,6LoWPAN 标准^[4]是构建在 IEEE 802.15.4 基础之上实现 IPv6 通信的协议,即轻量级的 IPv6 技术。具有低功耗、低成本的特性,且证明了将 IP 技术用于传感网络的正确性、高效性与现实性。同时 6LoWPAN 标准的轻量级 TCP/IP 协议栈及其嵌入式操作系统也逐渐推出,以解决轻型节点承载复杂 IP 协议的问题。

6LoWPAN 协议主要实现了在 IEEE 802.15.4 网络中运行简化了的 IPv6 协议,通过在链路层与 IP 层间添加适配层实现首部压缩与数据包的分片重装,很好地实现了 IPv6 网络与低功耗无线网络之间的协议适配。图 1 说明了由感知设备,物联网网关,资源管理平台以及若干物联网应用构成的基于 IPv6 的物联网轻量级编码寻址架构。架构采用 6LoWPAN 协议,在感知层采用虚拟域的划分方法将编码异构或协议异构的设备节点进行分类。物联网网关处于网络层,不同于互联网网关的概念,除了进行数据包在网络层的转发,还需要适应不同感知网络进行相应的地址转换。物联网资源管理平台针对物联网环境中终端的多样性,异构性,数量大等特点,结合终端资源寻址方式对资源进行有效的定位与获取。

基于此架构,通过直接寻址与间



▲ 图1 基于IPv6的物联网轻量级编码寻址架构

接寻址两种方式,可以实现对物联网资源的轻量级寻址。直接寻址方式适用于分配有 IP 地址的无线传感设备,这类设备具有一定的消息处理能力,通过分配的 IP 地址即可获得设备所采集到的环境信息;间接寻址适用于没有处理能力的物品节点,这类节点通常需要具有唯一编码的标签帮助查询物品信息,间接寻址过程包含了获取物品编码与利用物品编码查询物品信息两个过程。

然而,在轻型节点上要承载复杂的 IP 协议栈还需要轻量级嵌入式操作系统与简化的传输控制协议/网间协议(TCP/IP)栈。由瑞典计算机科学学院的 Adam Dunkels 和他的团队开发的 Contiki 系统^[5]是一个开源的、高度可移植的多任务操作系统,适用于联网嵌入式系统和无线传感器网络,已经应用在许多项目中。Contiki 系统同时支持 IPv4/IPv6 通信,包含轻量级 IPv6 协议栈、IPv4 协议栈,支持传输控制协议/数据报协议(TCP/UDP),还提供了线程、定时器、文件

系统以及完整的低功率无线通信机制。针对小内存微控制器设计,典型的 Contiki 配置只需要 2 KB 的随机存取存储器(RAM)和 40 KB 的系统固件(ROM)。Contiki 系统架构如图 2 所示。

在无线传感器设备上采用 Contiki 系统与轻量级 IPv6 (uIPv6) 协议栈可以满足无线传感器设备资源有限的寻址与信息交换需求。同时利用 6LoWPAN 协议,可以顺利地实施无线传感器设备的组网、寻址,以及与互联网主机之间的端到端数据通信。据此,对物联网终端采用 IP 编码,利用互联网寻址特性,对数量庞大、功耗低以及编码异构的物联网终端进行 IP 寻址已不是遥遥无期的设想,而是目前就可以实现的技术。

诚然,目前的实现方式在安全性、报头压缩方式、地址自动配置以及组网方面都面临着实际应用环境中的各种挑战与问题。但基于 IP 编码的寻址技术已经得到了学术界的关注与认可,对物联网资源的 IP 寻址

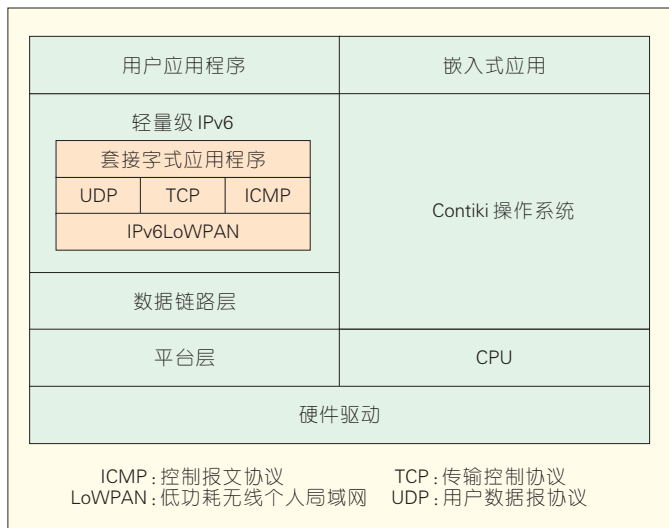


图2
Contiki 系统架构

将是未来重要的发展趋势。

5 结束语

物联网通过无线传感器技术与无线射频,标签编码等方式将物品与周围环境接入到互联网中,其目的是实现泛在的物物相连。物联网寻址目的即实现对物联网中的任意物品的准确、高效、安全的寻址。然而物联网终端的寻址问题已成为物联网建设发展的“瓶颈”问题。面对物联网终端特点以及物联网的寻址需求,轻量级的物联网 IP 寻址技术是解决其问题的重要方式之一。轻量级 IP 寻址具有将无线传感器网络与互联网进行无缝连接的自然优势,同时采用 IP 编码有益于形成统一的编码寻址标准。目前在理论与实践两方面,基于 IPv6 编码的轻量级寻址策略都得到了很好的研究与发展,将会成为

未来物联网终端的重要寻址方式。

参考文献

- [1] International Telecommunication Union. ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things [R]. ITU, 2005.
- [2] 张平, 苗杰, 胡铮, 田辉. 泛在网络研究综述 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(5):1-6.
- [3] DU C K, HAN S H. Integrating EPC global network with web services, Service Systems and Service Management [C]//Proceedings of the 6th International Conference, 2009:329-334.
- [4] SAKAMURA K. Ubiquitous ID Technologies [EB/OL]. (2014-05-01). <http://t-engine.onghu.com/en/articles/ubiquitous-id-technologies-2008/>.
- [5] IETF RFC 6775. Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs) [S]. IETF, 2012.
- [6] IETF RFC 4944. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks [S]. IETF, 2007.
- [7] ETSI TS 102 689. Machine-to-Machine communications (M2M), M2M service requirements, v1.1.1 [S]. ETSI, 2010.
- [8] ETSI Draft TS 102 690. Machine-to-Machine communications (M2M), Functional architecture, v0.6.2 [S]. ETSI, 2010.
- [9] 3GPP TR 22.868. Study on facilitating

machine to machine communication in 3GPP systems, v8.0.0 [S]. 3GPP, 2007.

- [10] 3GPP TR 23.888. System improvements for Machine-Type Communications (MTC), v1.0.0 [S]. 3GPP, 2010.
- [11] JUELS A, RIVEST R L, SZYDLO M. The Blocker Tag: Selective Blocking of RFID Tags for Consumer Privacy [C]//Proceedings of the 10th ACM Conference on Computer and Communications Security, 2003:103-111.
- [12] OH S W, BANG H C, HWANG J G. Light-weight RFID device interface for controlling RFID tag memory access [C]//Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2010:1516-1521.
- [13] 蒋林涛. 移动互联网中的若干问题研究 [J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(6):2-4.
- [14] IETF RFC 4919. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals [S]. IETF, 2007.
- [15] DUNKELS, A, GRONVALL B, VOIGT T. Contiki—a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors [C]//Proceedings of the Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on. 2004. IEEE, 2004:455-462.

作者简介



孙知信, 南京航空航天大学博士毕业, 汉城国立大学工学院博士后; 南京邮电大学物联网学院院长、教授、博导; 主要从事物联网、移动互联网、多媒体通信方面的研究; 已完成和正在从事基金项目近 30 项; 已发表论文 50 余篇, 其中 SCI 收录 5 篇、EI 核心版收录 20 篇。



骆冰清, 南京邮电大学物联网学院在读博士研究生; 主要从事移动互联网、无线传感器网络、物联网方面的研究; 已参与基金项目 12 项; 已发表论文 7 篇, 其中 SCI 收录 3 篇、EI 收录 4 篇。

综合信息

云计算国际标准正式发布

2014 年 10 月 23 日, 由中国等国家成员体推动立项并重点参与的 2 项云计算国际标准——ISO/IEC 17788: 2014《信息技术 云计算 概述和词汇》和 ISO/IEC 17789: 2014《信息技术-云计算-参考架构》正式发布, 这标志着云计算国际标准化工作进入了一个新阶段。

这是国际标准化组织、国际电工委员会与国际电信联盟三大国际标准化组织首次在云计算领域联合制定标准, 由 ISO/IEC JTC1 与 ITU-T 组成的联合项目组共同研究制定。中国作为这两项国际标准的立项推动国之一, 提交贡献建议 20 多项, 对加快标准研制做出了重要贡献。
(转载自《中国信息产业网》)

大数据时代的移动终端技术演进

Mobile Terminal Technology Evolution in the Age of Big Data

朱晓光/ZHU Xiaoguang¹, 聂永霞/NIE Yongxia²

(1. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057;

2. 中国移动通信集团广东有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518048)

(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

2. China Mobile Group Guangdong Co., Ltd. Shenzhen Branch, Shenzhen 518048, China)

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0044-04

摘要: 提出大数据服务推动了移动终端的技术演进, 其技术演进的目标是满足大数据时代的用户需求、提升用户体验。强调移动终端通过基于多管道技术的集成、多传感器技术集成、云计算与低功耗以及 HTML 5 等技术来推动移动智能终端技术演进。

关键词: 大数据; 移动终端; 多模; 多传感器; HTML5

Abstract: This paper describes how big data services promote the evolution of mobile terminal technology and how the goal of mobile terminal evolution is to satisfy the requirements of users and enhance their experience in big data era. This paper also emphasizes that multi-pipe technology integration, multi-sensor technology integration, cloud computing, and HTML 5 can promote the evolution of mobile smart

Keywords: big data; mobile terminal; multi-pipe mode; multiple sensor; HTML5

随着移动互联网、电子商务、社交媒体、网络视频、企业服务网以及物联网等服务的飞速发展, 尤其是近几年移动智能终端的快速普及和应用, 使全球的数据正在以几何速度呈爆炸性增长。互联网数据中心(IDC)报告指出, 2012 年全球已经开始进入大数据时代, 并在 2013 年全面引爆大数据, 而全球数据量大约每两年翻一番, 预测到 2020 年, 全球将拥有共计 35 ZB 的海量数据, 我们已

经迈进入了大数据时代^[1-2]。大数据有 4 个特征, 即超量、高速、多样性和价值。在大数据时代, 每个人都是数据的贡献者, 同时也是数据的消费者, 对每个用户来说, 要求有更好的体验, 即能在任意时间、任意地点接入, 并能通过移动终端任意呼叫和任意浏览地贡献和分享大数据服务, 因此大数据服务一方面将推动管道技术演进, 另一方面也推动移动终端的技术演进^[3]。

近几年, 移动终端最明显的演进是从功能型向智能型转变, 移动互联

网服务与其捆绑。作为大数据应用的重要输入输出, 移动终端产生与消费者密切相关的数据, 因此移动终端在大数据时代扮演重要的角色, 其演进方向也以用户需求与体验为核心和宗旨, 具体演进方向包括: 基于多种管道技术的多模化集成、多传感器集成、云计算与低功耗以及 HTML 5 技术在移动终端的应用等^[4]。

1 基于多管道技术的多模化集成

大数据时代的海量数据需要多种管道技术承载传送, 包括有线方式和无线方式, 而对于移动终端来说, 随着不同的无线接入技术演进及其网络部署, 像 2G 这种单一模式的终端已经不能满足技术进步和实际需求, 而 2G、3G、LTE 等多种技术集成成为必然趋势。随着智能终端的普及和移动互联网的需求, 移动技术向宽带化演进, 语音、短信仅仅是众多业务之一, 移动终端成为多种移动接入技术的集成, 移动用户根据无线网络的实际部署情况可以选择多种方式接入。

随着 Wi-Fi 技术的普及和应用, 作为有线接入的延伸, Wi-Fi 接入点(AP)不但可以作为单独的接入点方式让终端接入, 而且可以通过组网方式提供无线接入, 因此 Wi-Fi 接收终端成为各类终端的标准配置, 尤其在移动智能终端方面, Wi-Fi 已成为移动终端的主要接入方式之一^[5-6]。Wi-Fi 技术也在不断演进, 包括 802.11 系列标准的空口频谱带宽从 20 MHz、40 MHz 提高到 160 MHz; 使用频段也从 2.4 GHz 到 5 GHz, 再到 60 GHz; 多天线方面也从波束赋型到多用户多输入多输出(MIMO)及自适应波束赋型等。

图 1 所示为多模移动终端, 它可以接入多种无线网络, 包括 2G、3G、LTE 和 Wi-Fi 网络, 使移动终端通过不同管道技术为用户提供服务^[7]。

收稿日期: 2014-07-10
网络出版时间: 2014-08-21

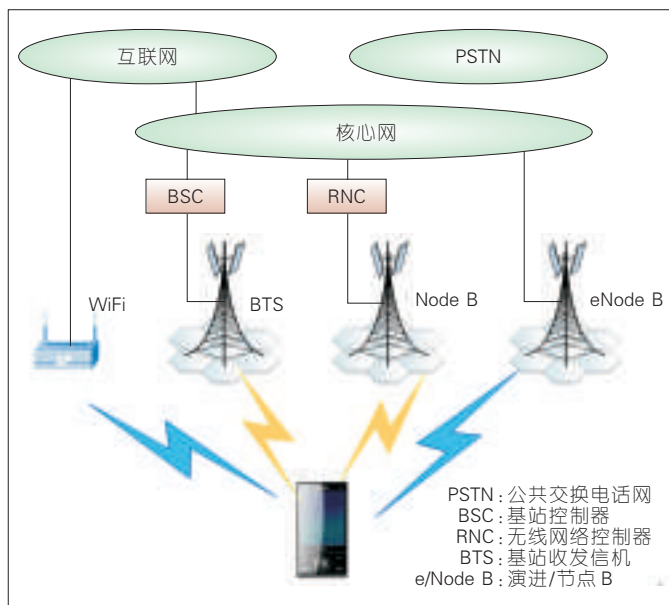


图1
多模移动终端接入多种网络

当前成熟的蓝牙、近场通信等技术也都集成到移动终端上,以适应不同应用场景下的服务需求,因此移动终端可以通过多种管道技术完成数据的接收和传送,即移动终端是基于多种管道技术的多模化集成。

当前,多模移动终端主要以多模双待机制为主。为了增强用户体验,多模多待将成为移动终端发展趋势,尤其到了LTE商用部署阶段,多模移动终端将同时监听2G、3G和LTE网络,以便于快速接收来自各个网络寻呼消息,避免网络间的互操作,这样可以随时随地接入网络。多模多待业务并发机制也将随着移动互联网需求提升而成为可能,即移动终端可以同时接入多种管道网络,实现多业务并发^[8]。

基于多管道技术集成的多模移动终端,根据管道网络实际部署情况可以接入多管道网络。当前网络的接入选择、资源调度等主要由无线网络系统侧负责,移动终端仅仅将检测的数据上报到网络系统侧,被动地接收网络侧决策和资源调度。这在多管道网络场景下,需要网络侧互联互通来协商,使接入过程复杂化。因此在多模多待多业务并发场景中,需要移动终端支持多管道接入功能,并由

终端根据各种无线网络覆盖、负荷等实际情况自主性选择服务网络,以最优质的服务质量向移动用户提供服务,提升用户体验。

2 多传感器技术集成

当前,移动智能终端作为最普及的消费品,其性能已经超出了最初的基本通信设备的性能,一方面其集成的功能越来越多,而通信仅仅是众多功能中一部分;另一方面为了提高用户体验,移动智能终端集成越来越多的传感器,并通过传感器将人的感官系统和神经系统与移动智能终端相连,使移动智能终端成为人的感官系统的延伸。通过这些传感器,如加速度传感器、磁力传感器、重力感应器、电子罗盘、陀螺仪、气压传感器、光线感应器、距离感应器、触摸屏、温度、红外、GPS等等,可以增强人机友好互动,提高移动终端的用户体验度。在大数据时代,移动终端需要通过传感器采集数据,再通过管道网络将数据传输到云端进行大数据处理,最后将处理结果反馈给用户。云服务让用户体验提升到一个新高度。图2所示为集成多传感器的移动智能终端人机交互以及通过移动通信管道传送到云端的大数据处理。

传感器既可以通过内置方式集成到移动终端中来提升用户体验,也可以通过外置方式连接到移动终端来增强其功能,如图3所示。随着智能终端应用软件生态系统的日益完善和传感器应用种类的不断增多,移动终端已经深度融入日常生活的每个方面。移动用户更加依赖移动终端,而移动终端也将有更多的应用来增强其感知能力和交互能力,如体检、游戏等需求,就需要利用移动终端上的传感器采集数据,增强移动终端的人性化、个性化、智能化服务。随着裸眼3D技术的需求,各类传感器也将集成到一起,未来移动智能终端的操作也更加多元化,有着更高的用户体验,实现更完美的人机互动。

3 云计算与低功耗

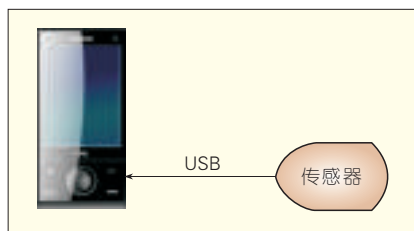
移动终端集成了多种移动通信接入技术和多种传感器,因此对移动终端的功耗提出了挑战,移动智能终端的目标是保质保量地向移动用户提供服务和体验,同时需要终端能在低功耗情况下完成多种服务。

当移动智能终端作为消费品已经超出了最初以通信功能为主的属性,一方面移动互联网的发展,使移动互联网服务内容与移动终端绑定;另一方面,由于云服务降低了移动终端的计算量和存储,简化了移动终端,同时使终端消费用户聚合到云计算服务平台上,云服务就降低了移动终端的复杂度,并将复杂的计算和存储等任务交由云端处理,这样也将终端功耗降低^[9]。图4所示为移动终端与云服务,其中移动终端向云端请求服务,云端响应并提供云服务^[10]。

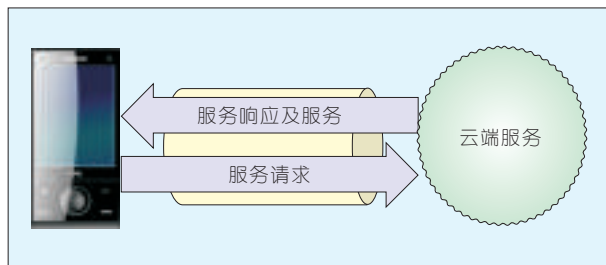
根据《MIT科技评论》报道,微软研究室正在开发一种全球定位系统(GPS)服务技术,即终端将冗重的GPS数据上传到云端,从而可解决移动设备的高功耗问题,此技术被称为Cloud-OffloadGPS,简称CO-GPS^[11]。移动智能终端中的GPS是整个设备中比较耗电的部分。通常情况下,为了



▲图2 集成多传感器智能终端的人机交互及大数据处理



▲图3 移动终端外置传感器



▲图4 移动终端与云服务

修正用户的位置, GPS传感器需要运行30 s或者更多的时间以从轨道卫星上获取必要的信息, 其中包括了大量的信号处理工作, 不但时间长, 而且还需要消耗掉1 J的能耗。现在, 利用CO-GPS技术不但可以在几毫秒之内获取原始修复数据, 而且所需要的能耗只为原来的0.04%。从另一个角度看, 这一项新服务的出现将会引发一个全新的基于GPS持续日志的服务, 如建立一个可不断更新的噪音污染数据库等。

云计算技术的发展, 移动终端通过承载管道逐步向云端延伸, 将复杂的大数据计算、庞大的大数据存储等都移向云端来处理, 而将移动终端“瘦”下来, 这不但降低终端功耗、延长了待机时间, 同时也提高用户体验, 因此移动智能终端与云计算的深度结合将是顺势所趋, 预计未来几年

内, 将有更多的移动终端应用将基于云端提供。

4 HTML 5 技术

移动互联网应用主要是基于操作系统提供服务的终端本地化应用, 这类应用呈现碎片化特点, 跨平台能力弱, 同一款应用产品需为不同终端、不同操作系统进行多次开发, 开发和维护成本大增。HTML 5 技术则解决了上述问题, 它基于 Web 平台, 其跨平台、不受限于终端类型和操作系统的特性使应用开发者不必再为同一款应用开发多种版本, 降低了开发和维护成本, 也将显著提高应用开发者的热情。同时用户在不同终端、不同操作系统下可以使用同一应用、享受相同体验, 也将更加高效、快捷, 极大促进各种移动互联网应用的推广与使用。

随着移动互联网的飞速发展, HTML 5 的技术优势^[12-13]也将会愈发体现。HTML 5 不仅能提供大多数现有需要插件和扩展可以完成的功能, 而且具备了图像增强、Web 数据存储和离线数据存储等新功能, 这使完整支持 HTML 5 的浏览器具有了更强的本地数据处理能力, 从而可以部分代替操作系统。HTML5 具有 8 个技术特征(图5所示)。

• 语义学: 作为 HTML 5 的前端和中心, 语义学能够赋予框架结构以意义, 同时更详尽的标签组合、资源描述框架、微型数据以及微型格式将

为用户打造一套数据驱动的网络。

• 离线存储: 在应用缓存、本地存储、索引数据库和文件应用程序接口的帮助下, HTML 5 应用甚至能在没有互联网连接的情况下运行。

• 设备接入: 地理定位仅仅是一个开始, HTML 5 能够让应用程序访问连接到计算机上的任何设备。

• 连结性: 更有效的连结性将能带来更为实时的聊天, 更快的游戏速度以及更好的沟通交流, 服务器与客户端之间的网络套接字和邮件摄像头将比以往更加便捷。

• 多媒体: 音频和视频是 HTML 5 的主要特征, HTML 5 无需插件即可在网页中嵌入多媒体内容, 使得应用程序与网站和睦共处。

• 3D 和制图: 在 SVG、Canvas、WebGL 和 CSS3 3D 效果的这些特性之中, 一定能找到让用户眼花缭乱、美不胜收的创意。

• 高性能: 使应用程序和网络在大量诸如 Web Workers 和 XMLHttpRequest 2 这样的技术下更加快速。

• 层叠样式表(CSS3): 在不牺牲讲义结构和性能的情况下, CSS3 作为一套规范集合, 提供了大量的新特征, 使得创建效果更加简便; 另外, Web 开放字体格式(WOFF)可以便捷地通过样式表自动下载字体, 解决了移动终端设备的有限字体集合问题。

HTML5 对于应用处理的增强主要涉及以下几个环节: 在计算方面, 能够实现多进程计算, 不再需要借助第三方计算环境, 大大增强了计算处理能力; 在存储方面, 解决了原 Cookie 存储空间过小的问题, 扩展了浏览器本地存储能力, 另外还加强了缓存的功能, 允许用户选择缓存的内容并实现离线应用, 使得 Web 应用可以在本地使用; 在图像处理方面, 能够提供平面和立体图像绘制能力, 促进 Web 游戏的开发; 在设备接口方面, 能够访问日历、通信录等移动终端资源; 在通信方面, 能够实现客户



图5
HTML5的主要技术特征

端与服务器间的全双工通信,降低网络数据传输带来的影响,同时还能够实现本地的安全跨源通信,丰富Web应用的功能。

由于HTML 5是一种真正开放的标准,可为用户提供更加一体化和自然的体验方式,伴随着技术功能的不断完善以及标准化工作的完成,HTML 5将成为互联网应用的主导技术,预计在2014年将快速发展^[14]。

HTML 5也得到移动终端厂商的大力支持。根据咨询公司Strategy Analytics 2011年底公布的研究数据显示,2011年全球支持HTML 5手机数量相比2010年增长208.3%,达到3.36亿部。预计到2013年,全球市场将拥有10亿部支持HTML 5技术的手机^[15]。咨询公司ABI Research也做出预计,2016年全球拥有支持HTML5技术的移动设备至少将达21亿部。

图6所示为HTML5在移动终端的应用,包括元素类型和属性、延伸用户交互概念、Web存储、平面动画、CSS3选择器、离线支持、帆布画、视音频流支持、地理位置应用程序接口、增强表格。

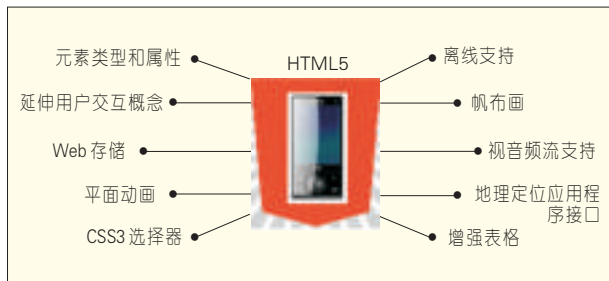


图6 HTML5在终端的应用

音频流支持、地理定位应用程序接口(API)和增强表格等,HTML 5使移动终端的功能和性能提升、用户体验增强。可以预见,基于HTML5技术的移动智能终端浏览器将成为主流,推动大数据时代移动终端的技术演进,打破基于操作系统的移动互联网服务主导地位,促使移动智能终端成本下降,从而实现从本地应用到网络应用的转变。

5 结束语

在大数据时代,移动终端是大数据的重要输入输出,一方面大数据的需求推动移动终端的演进,另一方面移动终端的演进也促进大数据应用的发展。移动终端在智能化的同时,其技术演进目标是提升用户体验,这包括基于多种管道技术的多模集成、多传感器集成、云计算与低功耗、HTML5技术等。无论是基于多管道技术的多模集成,还是多传感器集成,都使移动终端的硬件系统变得越来越“胖”,提高了移动终端的感知和交互能力;移动终端的低功耗需要移动终端将复杂的计算和较大的存储移向云端处理,简化终端的处理复杂度;基于HTML5技术的移动互联网服务不再受限于终端操作系统和终端类型,使移动互联网服务

从基于操作系统的本地应用升级到基于HTML 5浏览器的网络应用,因此HTML5将成为移动终端的重要开发平台而得到广泛应用。

参考文献

- [1] 郭贺钊. 大数据时代的网络技术与应用[R]. 北京: 中国通信标准化协会, 2012.
- [2] 朱晓光, 陈伟, 江华. 大数据时代的管道技术演进[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(4): 54-57.
- [3] 陈博, 顾昱霞. 移动终端HTML5Web应用技术与标准[J]. 电信网技术, 2012, 35(5): 5-9.
- [4] 孙毅, 葛雨明, STEPHEN H, ERYK D. 异构网络中多模终端业务流分发技术研究[J]. 计算机学报, 2010, 33(6): 1004-1013. doi: 10.37-24/SP.J.1016.2010.01004.
- [5] 朵灏, 刘臻, 田云飞. LTE多模终端技术研究[J]. 电信网技术, 2012, 35(4): 14-22.
- [6] 3GPP TS22.936 Multi-system terminals (Release 9)[S]. 2009.
- [7] 马满仓, 郑建勇, 郭静等. WLAN标准IEEE802.11ac/ad及前期关键技术[J]. 电信技术, 2012, 35(4): 75-77.
- [8] 谢大雄, 朱晓光, 江华. 移动宽带技术——LTE[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [9] 3GPP TS 36.300 E-UTRA and E-UTRAN[S]. 2009.
- [10] 3GPP TS 36.304 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode [S]. 2009.
- [11] 大数据史记2013: 盘点中国2013行业数据量[EB/OL]. (2014-06-20). <http://www.36dsj.com/archives/6285>.
- [12] 维克托·迈尔-舍恩伯格, 肯尼思·库克耶. 大数据时代[M]. 盛杨燕, 周海译. 杭州: 浙江人民出版社, 2012.
- [13] 李国杰, 程学旗. 大数据研究: 未来科技及经济社会发展的重大战略领域——大数据的研究现状与科学思考[J]. 中国科学院院刊, 2012, 25(06): 647-657.
- [14] 王元卓, 靳小龙, 程学旗. 网络大数据: 现状与展望[J]. 计算机学报, 2013, 33(06): 1126-1138.
- [15] 李建中, 刘显敏. 大数据的一个重要方面: 数据可用性[J]. 计算机研究与发展, 2013, 19(06): 1147-1162.

作者简介



朱晓光, 中兴通讯股份有限公司高级工程师; 长期从事通信产品研发、技术规划、综合方案等工作; 累计申请发明专利40余项。



聂永霞, 北京邮电大学硕士毕业; 广东移动深圳分公司高级网络规划主管; 主要从事核心网络规划工作。

大规模物联网中多层次立体异构网络拓扑研究

Large Machine-to-Machine Heterogeneous Network Architecture

摘要: 物联网中的多层次立体异构网络可以将机器所产生的数据局部收集至数据采集器并连接到基础设施网络和云端,为用户提供基于物联网的智慧信息服务。针对多层次异构网络的模型 HetNet,给出了多层次立体异构网络模型 HetNet 的时间延迟闭合式的一般情形。结果表明通过布置高效率数据采集器,信息可以从机器传输到云端,从而大幅降低平均延迟。这为下一代无线服务提供商的多层次异构物联网网络的设计提供了有力的支持。

关键词: 物联网;多层次立体异构网络;数据采集器;时间延迟

Abstract: In the machine-to-machine multilayer heterogeneous network, the data produced by a machine can be constellated to data aggregators and connected to the infrastructure network and cloud terminal. This can provide the intelligence information service based on the Internet of Things to the users. In this paper, our mathematical analysis provides general analytical closed-form end-to-end delay of HetNet, the model of multilayer heterogeneous network. The results show that by the arrangement of the high-efficiency data aggregator, the information can be sent from machine to cloud terminal and greatly reduce average delay. It also provides strong support for the design of multilayer heterogeneous network of wireless network service provider of next generation.

Key words: machine-to-machine; multi-layer heterogeneous network architecture; data aggregator; time delay

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0048-04

物联网^[1-7]指的是物与物间互相通信的网络,第三代合作伙伴计划(3GPP)也针对基于云服务的物联网通信发起了专门的会话^[8-10]。然而现有的组织网络拓扑如点对点自组织网络在大规模网络情况下延迟严重^[11]。因此基于大规模物联网设计一种能够实现高鲁棒性并能节约带宽和能源的网络拓扑结构就显得至关重要。

收稿日期: 2014-07-02

网络出版时间: 2014-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(91118008、11201344); 科技部“十二五”科技支撑项目(2014BAC16B01)

在文献[12]中,顾磊等人利用社会网络的方法构造了大规模物联网中多层次立体异构网络。他们提出为了克服传统网络架构所带来的延迟缺陷,服务提供商如移动运营商可以利用数据采集器(DA)进行网络优化。机器所产生的数据在局部被DA所收集,并且连接到基础设施网络和云端。这种多层次和多类型通信设备的网络结构就是多层次立体异构网络,如图1所示。多层次立体异构网络的底层是一些具有短距离通信能力的机器,上层是基础设施和云端,而中间层则是均匀分布在空间中

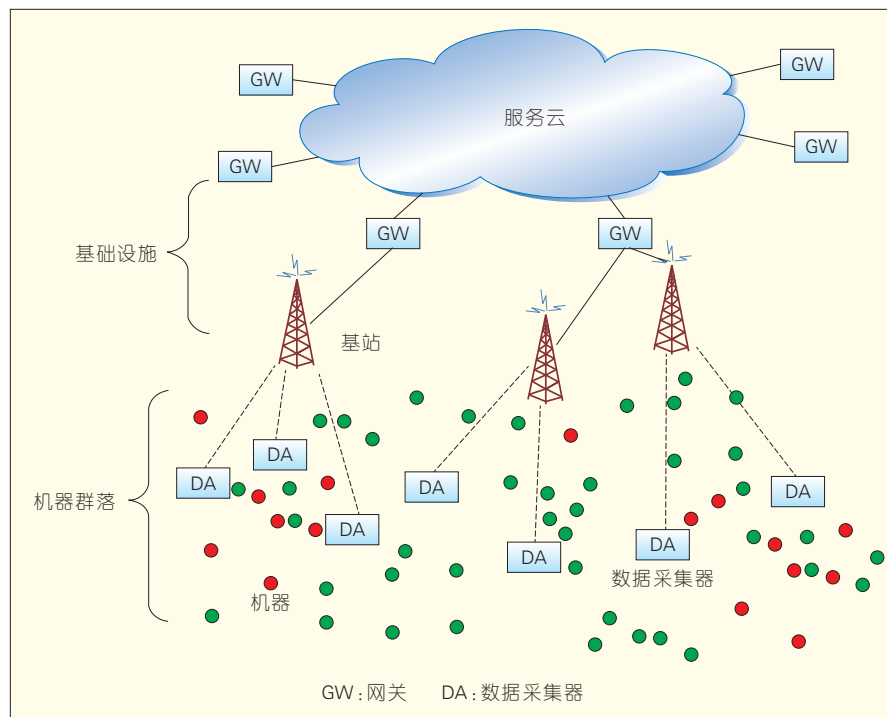
顾磊/GU Lei¹
黄辉林/HUANG Huilin²
钱昕/QIAN Xin³

- (1. 中国电信股份有限公司上海研究院, 上海 200122;
 2. 温州大学数学与信息学院, 浙江 温州 325035;
 3. 苏州工业职业技术学院, 江苏 苏州 215104)
- (1. Shanghai Research Institute of China Telecom, Shanghai 200122, China;
2. College of Mathematics and Information Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;
3. Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215014, China)

的DA,这种多层次立体异构网络拓扑的物联网能够将机器的数据和云端的人工智能完美地结合在一起。进一步的研究结果表明^[12],多层次立体异构网络在智慧城市的10亿级别的超大规模物联网中的时间延迟相较于点对点自组织网络可以缩短95%。

1 大规模物联网传输架构

在大型的机器(传感器)群落中,单个机器的能量是有限的,传输距离和速度会受到极大的限制,信息传递采用自组织、多跳或点对点的方式。因此这种单层次点对点自组织的网络结构是物联网最基本的形态,整个网络没有固定的基础设施,每个节点都是移动的,并且都能以任意方式动态地保持与其他节点的联系。在这种网络中,由于终端无线覆盖取值范围的有限性,两个无法直接进行通信的用户终端可以借助其他节点进



▲图1 基于云服务的大规模物联网多层次立体异构网络结构

行分组转发,同时每个终端的传输半径比较小,因而需要多次传递才能从发起端将信息传递到目标端,并且每个终端都被赋予了各自的功能,仅有少量能量是用于传输信息,因而传输的速率也受到了限制。

根据这些微观特性,这种单一层次的点对点自组织网络模型可以描述为:在单位平面上均匀分布 n 个机器,其分布服从泊松生成过程;每个机器能和半径 r 以内的机器相连,近似的泊松生成过程的每个点都和距离 r 以内的点有边相连;所构成的点和边的集合就是所对应的点对点自组织网络模型,这个模型也被称为随机几何图 (GRG)^[13]。需要注意这里顶点的生成和空间的分布都是随机的,因此所对应图也是随机的。最新的研究结果^[11-12]表明,当机器数量 $n \rightarrow \infty$ 时,点对点自组织网络模型的最大延迟和平均延迟都是 $\Theta(1/r)$ 。特别当物联网满足 $r \sim \sqrt{\log n/n}$,则最大延迟和平均延迟都是 $\Theta(\sqrt{n/\log n})$ 。因此这种网络拓扑在传输速度和传输范围上的缺陷就会造成在利用人工智能

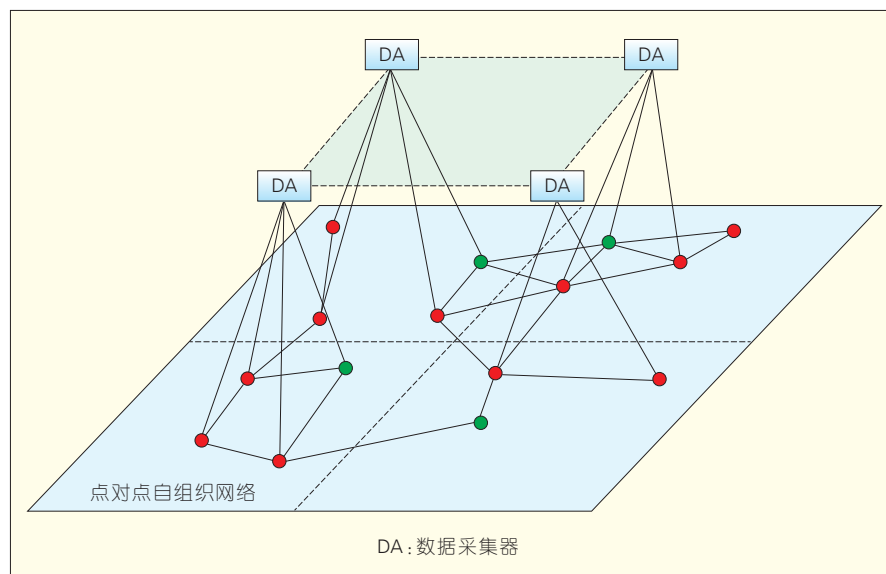
和云计算的协作上出现故障。为了克服这个缺陷并利用物联网给人类带来更好的服务,服务提供商如移动运营商可以利用数据采集器对网络传输进行优化和加速。这种多层次和多类型通信设备的网络结构就是多层次立体异构网络模型 HetNet^[12],如图2所示。多层次立体异构网络

模型的底层是机器群落,上层是能够连接到基础设施的数据采集器网络。机器群落由 $\text{GRG}(n, r)$ 描述。我们进一步地将 $[0, 1] \times [0, 1]$ 单位平面平分为 $m \times m$ 块。并且每一块中央都放置数据采集器。每个数据采集器随机连接 k 个机器。这里的参数 m 是用于度量数据采集器数量和密度,而参数 k 则代表单个数据采集器容量。在文献[12]中,顾磊等人证明了在 $k = 1$ 的特殊情形下,多层次立体异构网络模型的平均延迟都是 $\Theta(1/mr + m)$ 。然而对于一般的 $k > 1$ 的情况,目前还缺乏精确的数学分析结果,仅有通过数值模拟的经验公式。在下一节我们将针对一般的 k 进行分析并给出多层次立体异构网络模型平均延迟的一般闭合式分析表达式。

2 多层次立体异构网络模型分析

在第1节中我们给出了多层次立体异构网络模型 HetNet,在本节中将给针对该模型进行理论分析,并且对于一般 $k > 1$ 的情况给出网络延迟的闭合表达式。

首先需要计算从机器 D 的欧氏距离。 $U(S)$ 为 S 上的均匀分布, S



▲图2 大规模物联网立体异构网络模型

是 R^k 的一个连通子集, $\|\cdot\|$ 表示欧氏距离, 而 E 表示平均期望。令二维随机变量 X 表示 DA 在 $1/m \times 1/m$ 块内的位置, 而二维随机变量 Y_1, Y_2, \dots, Y_k 表示机器的位置。则可以得到关于欧式平均距离的引理:

如果随机变量 $Y_1, Y_2, \dots, Y_k \sim U([-a/2, a/2] \times [-a/2, a/2])$, 则有:

$$E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i\|) = \Theta(a 2k!! / (2k+1)!!) \quad (1)$$

如图 3 所示, 令区域 A 为半径

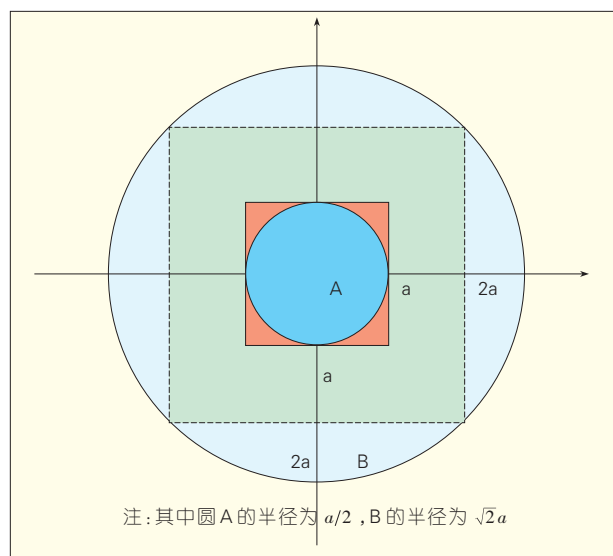


图 3
距离几何分析

$\sqrt{2}a$ 、圆心在 $(0,0)$ 的圆盘, 而 B 为半径 $a/2$ 、圆心在 $(0,0)$ 的圆盘。

由简单的微积分就可以看到, 如果 $Y_1, Y_2, \dots, Y_k \sim U(A)$ 以及 $Y_1^+, Y_2^+, \dots, Y_k^+ \sim U(B)$, 则有:

$$E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i\|) \geq E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i^+\|) \geq E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i^+\|) \quad (2)$$

给定 Y_1, Y_2, \dots, Y_k 的位置, 令区域 $D = [-a/2, a/2] \times [-a/2, a/2]$, 由于 $A \subset D$ 而且平均距离在小范围内更小, 因此可得出:

$$E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i\|) \geq E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i^+\|) \quad (3)$$

上界估计也类似可得, 综合即得到不等式(2)。再根据极坐标积分变化就得到:

$$E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i\|) = 2\sqrt{2}a\pi 2k!! / (2k+1)!! \quad (4)$$

以及

$$E(\min_{i=1 \dots k} \|Y_i^+\|) = a\pi 2k!! / (2k+1)!! \quad (5)$$

这里 $2k!! = 2k(2k-2)(2k-4)\dots 1$ 。

结合式(1)和式(5)可以得到多层次立体异构网络模型 HetNet 的对于一般 $k > 1$ 的网络平均延迟。

多层次立体异构网络模型 HetNet 的对于一般 $k > 1$ 的平均网络延迟是 $\Theta(2k!! / mr(2k+1)!! + m)$ 。由于机器之间的传输距离是 r 而且单位平面平分

界估计为 $O(2k!! / mr(2k+1)!! + m)$ 。下界估计则采用文献[12]中的定理 3 的估计技巧, 即对于任意小 $\varepsilon > 0$, 至少 $(1-\varepsilon)n(n-1)/2$ 点对的最短路径是通过数据采集器的, 由此可得所需结果。

图 4 给出了系统中机器数量 $n = 5000$, $r = 0.04$ 时, 不同参数 m 和 k 的时间延迟的数值模拟结果。

这里的参数 m 是用于度量 DA 的数量和密度, 而参数 k 则代表单个 DA 容量。可以看到在研究多层次立体异构网络模型 HetNet 中, 随着 m 的增大, 平均时间延迟先减小后增大。而随着 DA 容量 k 的提高, 机器到 DA 平均延迟可以大幅度缩短。实际上 DA 的数量以及单个 DA 的容量是决定底层机器和 DA 之间传输的关键参数。而通过这些 DA, 信息可以搭乘“高速公路”, 从而大幅降低平均延迟, 这也为下一代无线服务提供商的多层次异构物联网网络的设计提供了有力的支持。

3 结束语

物联网中的多层次异构网络可以将机器所产生的数据局部收集至 DA, 并且连接到基础设施网络和云端, 为用户提供基于物联网的智慧信息服务。

在文献[12]中, 顾磊等人提出了针对多层次异构网络的模型 HetNet 并给出了在 $k = 1$ 的特殊情形下, 多层次立体异构网络模型的平均延迟的闭合式分析表达式 $\Theta(1/mr + m)$ 。

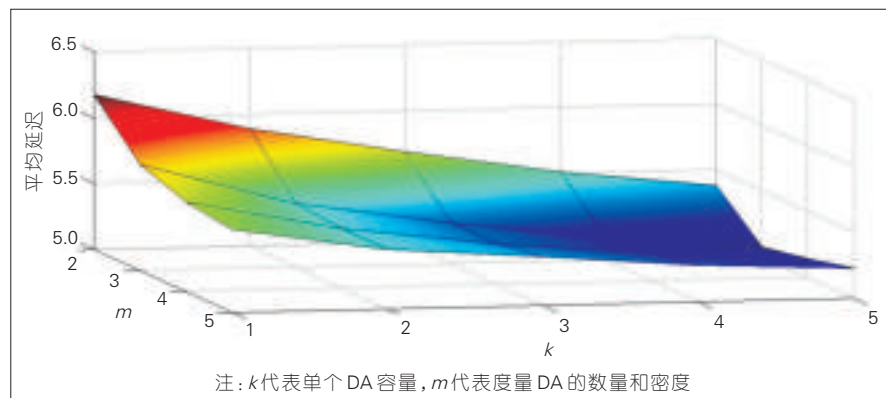


图 4 网络平均延迟对于不同参数 m 和 k 对比

然而对于一般 $k > 1$ 的情况, 目前还缺乏精确的数学分析结果, 仅有通过数值模拟的经验公式。文章对于一般 $k > 1$ 情况的给出了多层次立体异构网络模型的平均延迟闭合式的分析表达式 $\Theta(2k!!/mr(2k+1)!!+m)$, 这意味着随着 DA 容量 k 的提高, 机器到 DA 平均延迟可以大幅度缩短。

参考文献

- [1] LIEN S Y, CHEN K C, LIN Y. Toward ubiquitous massive access in 3GPP machine-to-machine communications in 3GPP [J]. IEEE Commun. Mag., 2011, 49(4): 66–74. doi: 10.1109/MCOM.2011.5741148.
- [2] LIEN S Y, CHEN K C. Massive access management for QoS guarantees in 3GPP machine-to-machine communications [J]. IEEE Commun. Lett., 2011, 15(3): 311–313. doi: 10.1109/LCOMM.2011.011811.101798.
- [3] LIEN S Y, LIAU T H, KAO C Y, CHEN K C. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2012, 11(1): 27–32. doi: 10.1109/TWC.2011.111611.110350.
- [4] ZHENG K, HU F, WANG W, XIANG W, DOHLER M. Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications [J]. IEEE Commun. Mag., 2012, 50(6): 184–192. doi: 10.1109/MCOM.2012.6231296.
- [5] KWON T, CHOI J W. Multi-group random access resource allocation for M2M devices in multicell systems [J]. IEEE Commun. Lett., 2012, 16(6): 834–837.
- [6] NIYATO D, XIAO L, WANG P. Machine-to-machine communication for home energy management system in smart grid [J]. IEEE Commun. Mag., 2011, 49(4): 53–59. doi: 10.1109/MCOM.2011.5741146.
- [7] CHEN K C, LIEN S Y. Machine-to-machine communications: technologies and challenges [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 18: 3–23. doi: 10.1016/j.adhoc.2013.03.007.
- [8] 3GPP. TR 22.868 Study on facilitating machine to machine, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [S]. 2009.
- [9] 3GPP. TR 22.368 Service requirements for machine-type communications, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [S]. 2009.
- [10] 3GPP. TR 23.888 System improvement for machine-type communications, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [S]. 2009.
- [11] LIN S C, GU L and CHEN K C. Providing statistical QoS guarantees in large cognitive machine-to-machine networks [C]// IEEE GLOBECOM Workshop on M2M, Anaheim, CA. 2012: 1700–1705. doi: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477841.
- [12] GU L, LIN S C, CHEN K C. Small-world networks empowered large machine-to-machine communications [C]// IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China. 2013: 1558–1563. doi: 10.1109/WCNC.2013.6554795.
- [13] PENROSE M. Random Geometric Graphs (Oxford Studies in Probability) [M]. Oxford: Oxford University Press. 2005.

作者简介



顾磊, 上海交通大学博士毕业; 中国电信上海研究院高级工程师, 复旦大学和台湾大学博士后出站; 现主要从事物联网及智慧城市的研究; 已主持或参与科研课题 5 项, 发表论文 10 篇。



黄辉林, 温州大学数学与信息科学学院讲师; 主要从事概率论极限理论和复杂网络理论研究; 目前主持国家自然科学基金青年基金 1 项, 已发表论文 10 余篇。



钱昕, 苏州大学电子与通信工程硕士毕业; 苏州职业技术学院讲师; 研究方向为 WSN、RFID 等; 主持参与市级以上科研课题 8 个, 已发表论文 12 篇。

← 上接第 35 页

- LEE K, JUNG D, OH Y. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization [J]. Photonics Technology Letters, IEEE 2008, 20(3): 1243–1245.
- [6] KOTTKE C, HILT J, HABEL K, VUCIC J, LANGER K D. 1.25 Gbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary [C]// Proceedings of the European Conference and Exhibition on Optical Communication, Optical Society of America, 2012.
 - [7] COSSU G, KHALID A, CHOUDHURY P, CORSINI R, CIARAMELLA E. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED [J]. Opt. Express 2012, 20(26): B501–B506.
 - [8] WU F M, LIN C T, WEI C C, CHEN C W, CHEN Z Y, HUANG K. 3.22-Gb/s WDM Visible Light Communication of a Single RGB LED Employing Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2013.
 - [9] DING J, HUANG Z, JI Y. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications [J]. Communications Letters, IEEE 2012, 16(6): 439–441.
 - [10] HIGGINS M D, GREEN R J, LEESON M S, HINES E L. Multi-user indoor optical wireless communication system channel control using a genetic algorithm [J]. IET communications 2011, 25(5): 937–944.
 - [11] WANG Z, YU C, ZHONG W D, CHEN J, CHEN W. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. Optics Express 2012, 20(4): 4564–4573.
 - [12] BOROGOVAC T, RAHAIM M, CARRUTHERS J B. Spotlighting for visible light communications and illumination [C]// Proceedings of the GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE, 2010: 1077–1081.
 - [13] WU D, GHASSEMLOOY Z, LEMINH H, RAJBHANDARI S, KAVIAN Y. Power distribution and Q-factor analysis of diffuse cellular indoor visible light communication systems [C]// Proceedings of the Networks and Optical Communications (NOC), 2011 16th European Conference on, IEEE, 2011: 28–31.
 - [14] WU D, GHASSEMLOOY Z, LE M H, RAJBHANDARI S, KHALIGHI M A. Optimization of Lambertian order for indoor non-directed optical wireless communication [C]// Proceedings of the Communications in China Workshops (ICCC), 2012 1st IEEE International Conference on, IEEE, 2012: 43–48.
 - [15] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on 2004, 50(2): 100–107.
 - [16] UGRAY Z, LASDON L, PLUMMER J, GLOVER F, KELLY J, MARTI R. Scatter search and local NLP solvers: A multistart framework for global optimization [J]. INFORMS Journal on Computing, 2007, 19(3): 328–340.
 - [17] GLOVER F. A template for scatter search and path relinking [C]// Proceedings of the Artificial evolution, Springer, 1998: 1–51.

作者简介



李昉, 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读博士研究生; 主要研究领域为基于 LED 光源的无线光通信技术。



陈建平, 上海交通大学博士毕业; 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室教授; 主要研究领域为光通信器件与系统; 先后主持基金项目 10 余项, 已发表学术论文 100 余篇。

网络功能虚拟化:基于虚拟化的中间件盒子

Network Function Virtualization Based on Virtualization Middlebox

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0052-05

摘要: 基于虚拟化的中间件盒子的模型, 采用 x86 架构的电脑硬件设备, 依托虚拟化平台构建了一种集成了路由器、语音服务器、虚拟桌面等服务的虚拟中间件盒子。该虚拟中间件盒子采用了中间件盒子的概念, 即在标准的服务器上运行开源的虚拟化平台, 如 XEN、KVM 等, 并运用网络功能虚拟化(NFV)的理念和软件定义网络(SDN)的理念进行控制管理, 最终实现为每个组织、企业、个人提供虚拟通信网络服务(网络功能虚拟化)和虚拟运营服务。

关键词: 虚拟化; 网络虚拟化; 软件定义网络; 网络功能虚拟化; 中间件盒子

Abstract: In this paper, we describe a virtualization-Middlebox-based model that has x86-architecture hardware based on platform virtualization to build Virtual Middlebox of integrated routers, voice server, virtual desktop service and other services. Virtual Middlebox incorporates the concept of Middlebox, which runs the open-source Platform Virtualization such as XEN and KVM. It manages using Network Function Virtualization (NFV) and software-defined networking (SDN). Finally it provides communications service of virtualization networks (NFV) and operational services for each organizations, enterprises and individuals.

Key words: virtualization; network virtualization; software-defined network; network functions virtualisation; middlebox

房爱军/FANG Aijun

汪军/WANG Jun

(中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京
210012)

(ZTE Corporation, Nanjing, 210012, China)

未来的通信网络是开放、共存和融合的, 它的硬件基础架构是通用、标准和开放的, 管理平台是融合、共存和开放的^[1]。传统通信网络的应用程序和通信协议用固定的配置绑定在网络硬件上, 由于缺乏基础硬件架构的开放性和业务应用运营的灵活性, 新的通信网络架构需要“推倒重来”地进行设计和规划。由于运营商网络通常是由数千类的通

信设备组成, “推倒重来”无论是设备投资(CAPEX), 还是运营成本(OPEX)都非常高^[1-4]。

本文构想了一种称为虚拟中间件盒子(Virtual Middlebox)的通信网络的通用设备^[3-6]。它采用了中间件盒子的概念, 即在标准的服务器上运行开源的虚拟化平台, 如 XEN、KVM^[5]等, 并运用网络功能虚拟化(NFV)的理念和软件定义网络(SDN)的理念进行控制管理, 最终实现为每个组织、企业、个人提供虚拟通信网络服务(网络功能虚拟化)和虚拟运营服务。希望为未来通信网络设计和架

构提供一些思路 and 想法^[6]。

网络功能虚拟化(NFV)的目标是通过改变传统的运营商网络架构, 利用通用标准的 IT 服务器、存储, 基于虚拟化的技术实现传统网络设备的功能, 如路由器、交换机、基站控制器、多业务接入服务器等。网络节点由软件进行控制和管理, 统一调度和使用标准的网络硬件资源。标准的 IT 通用硬件资源可以随时根据用户需求进行调配和优化, 用软件的管理平台实现按需分配的云化网络^[4]。欧洲电信标准协会(ETSI)定义了可以用虚拟化技术实现的设备网元。传统网络设备过渡到网络功能虚拟化的方案如图 1 所示。

1 虚拟化技术

1.1 虚拟化

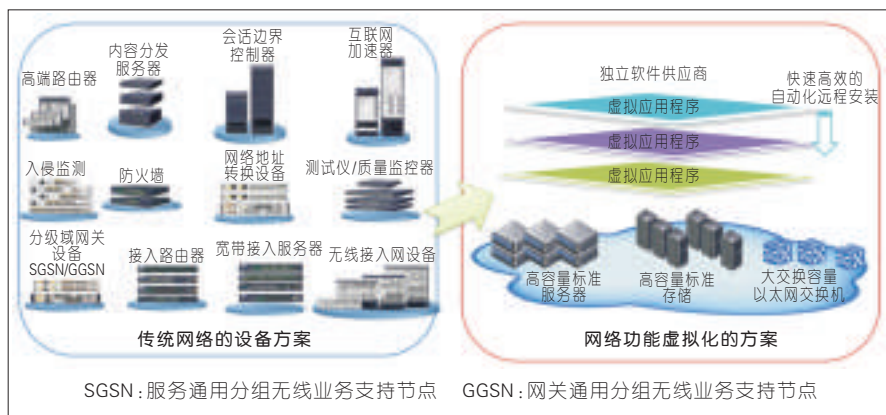
虚拟化是对 IT 硬件资源和基础网络资源的抽象和共享使用。这种共享概念是在 1960 年由 IBM 最早提出(IBM M44/44X 系统)^[8-9]。对虚拟机的架设和管理被称为平台虚拟化, 现在也被称为服务器虚拟化^[9]。

虚拟化概念是新的计算机领域

收稿日期: 2014-04-12

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX03002004)



▲图1 传统网络设备过渡到网络功能虚拟化的方案

的应用理念,它把IT硬件资源抽象为相互隔离的逻辑部分,每个逻辑部分创造了一套独立的IT系统环境,其中包括虚拟内存、虚拟硬盘、虚拟网卡和虚拟处理器等^[5]。这个逻辑的IT系统环境被称为虚拟机,整个系统常常称为虚拟化服务器或虚拟化主机。随着IT技术的发展,虚拟化已经是通信网络的重要组成部分,例如虚拟化技术在云计算中的应用、虚拟化服务器在网络中的部署和网络设备的虚拟局域网。与此同时,虚拟化技术在有线网络和无线网中得到了很好的发展,出现了网络虚拟化、无线虚拟化^[1]。

SDN是管理员,控制和管理整个网络。NFV是基于虚拟化的网络设备,提供灵活的组网和弹性的网络部署^[7]。

1.2 网络虚拟化

网络虚拟化,即通过虚拟技术共享网络硬件资源,为用户提供个性化定制化的网络通信服务,其中包括无线、有线服务^[2]。当前基于传统运营硬件资源构建的虚拟运营商服务,是通过把现有的硬件网络资源运用云计算的虚拟化技术共享给多个运营商使用。其中的硬件资源通过软件控制、隔离,根据适时用户量情况进行分配和收费。充分发挥硬件网络资源,减少重复网络基础建设和硬件投资(CAPEX),降低运营成本

(OPEX)提高运营商利润^[4-7]。

1.3 软件定义网络

SDN的理念主要是希望采用软件来控制网络,使得网络能力能够开放,让基于网络的创新能够更方便、更快捷。

通过控制平面与数据平面的分离,SDN架构将网络底层网络设施与网络应用抽象分离开来,从而实现构建可管理、可编程的、可动态改变的网络^[7]。本文认为未来网络将越来越依赖于软件,SDN这种新颖的、动态的网络架构将提高网络的延展性、灵活性和可管理性,从而实现网络变革并带来新一波的技术创新。

1.4 网络功能虚拟化

NFV提供了一种新的方式来设计,部署和管理网络服务。NFV从专有的硬件设备解耦网络功能,如网络地址转换(NAT)、防火墙、入侵检测、域名服务(DNS)、缓存等,这样专有的硬件设备就可以在软件上运行。

NFV的主要设计思路是硬件平台采用通用服务器,服务器之上运行虚拟化软件并生成虚拟机,各种网元以软件的形式运行在虚拟机当中^[4]。

1.5 中间件盒子

中间件盒子是一种提供多种应用服务的网络设备^[10],其中包括防火墙、路由、负载均衡和缓存功能等。

现在,越来越多的中间件盒子利用软件平台开发,提供各种网络服务,并可以部署在网络的任意位置。例如,在标准的PC机或服务器上安装Linux或Unix类操作系统,并根据用户需求部署防火墙、路由、负载均衡和缓存功能的应用包。简单配置之后,这就是一台可以提供多种服务功能的中间件盒子。

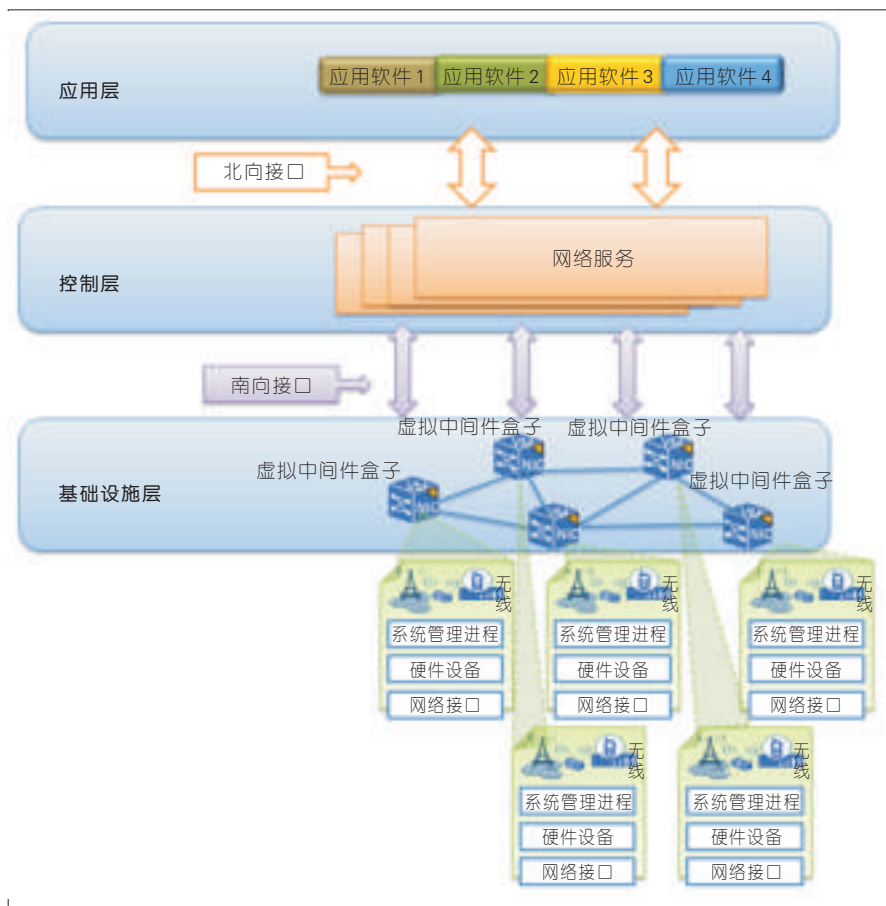
当虚拟化技术被广泛的应用的同时,中间件盒子的应用服务同样可以基于虚拟化。软件定义网络提供动态的网络管理和安全的隔离控制,网络功能虚拟化提供全新的网络功能和多样的应用场景。无限的功能扩展和丰富的部署场景,使得基于虚拟中间件盒子拥有非常广阔的应用空间^[6]。

2 构想架构的虚拟化网络

虚拟化技术在逐渐地融合着传统通信网络,不同的业务模式会有相对应的虚拟化技术应用场景,为用户提供全新的服务体验和经济收益。应用场景的差异,也产生了不同的虚拟化技术,如基于数据流的虚拟化、基于协议的虚拟化、基于光通信的虚拟化等^[1]。所有的虚拟化技术都是为了构建一个开放、共存和融合的通信网络,并取得了丰硕的成果,如虚拟化网络的软件定义网络、网络功能虚拟化等。

本文构想架构的虚拟化通信网络采用了SDN和NFV的理念,其核心理念是软件化通信网络,提高网络的创新、开放、便捷、灵活和标准化。

在这里的基于虚拟化的通信网络的系统架构,描述了虚拟化的通信网络基本组成和要素,其中主要有3个层面两大接口,包括逻辑上的应用层面的应用控制器、控制层的集中控制器和最底层的基础设施层(网络物理硬件资源层),以及北向接口和南向接口^[7]。一种构想架构的虚拟化通信网络如图2所示。该系统架构的特点有:



▲图2 构想架构的虚拟化通信网络

(1) 控制和转发的分离

通信网络设备通常有控制平面(信令)与转发平面(数据),在对这两个平面抽象化和逻辑化之后,分离成相对独立的两个部分。转发平面部分只负责业务数据的转发,控制平台只负责接收来自应用控制层的指令并传递给数据转发平面。

(2) 开放接口

未来通信网络最主要的特点是开放,只有提供了开放的接口,才会有更多的厂商和组织参与进来开发更好的系统应用。使用SDN的概念,提供与控制应用层对接的北向接口和与数据转发层对接的南向接口。这些接口是开放的可编程接口,如OpenFlow、OpenStack、Open Daylight^[7]。各平面之间相对独立,只需要关注自身的逻辑,而不需要关注底层平面业务实现细节,并通过开放的接口传递

信息。

(3) 集中控制

传统的通信网络很难有一个整体的网络状态视图,特别是上千节点的大型网络。逻辑上的集中控制平面可以控制多个转发平面(基础设施),或多个控制平面分布部署。整个物理网络的业务数据转发和控制都会被集中成全局数据,各网元的状态也很容易地呈现出来,不会出现各自为政的情况。

3 虚拟中间件盒子

当前,中间件盒子已经是由软件化平台构成,在应用了NFV和SDN技术,可以部署于网络的任何位置^[6],在网络中充当路由器、交换机和防火墙。NFV技术可以提供更为丰富的网络设备的功能,SDN技术可以满足更为灵活的配置和服务带宽的调配,

x86服务器的硬件架构的标准化和硬件成本的廉价,是支撑传统通信网络向未来智能的通信网络发展的重要因素^[6]。

实例展示了一个新的构架的中间件盒子,可以称之为虚拟中间件盒子,可以部署于x86架构的通用IT服务器或电脑中^[3]。虚拟中间件盒子的构思可以为传统的电脑生产商和服务器生产商提供新的市场机遇的思路,扩大了服务器和电脑在IT领域中的应用场景,不再只是应用于IT行业,还可以应用于通信行业。特别是在PC电脑市场需求不断减少的现在,通过部署虚拟化的软件平台,不改变硬件架构、增加额外设计成本,就可以构建功能强大的网络设备。

3.1 虚拟中间件盒子的架构

本实例是用虚拟化技术构建一台x86服务器的中间件盒子^[3],提供基本的语音服务和路由功能,实现基于虚拟化的通信网络初步模型。

整体的思路是在一台x86服务器或电脑上部署虚拟化平台XEN^[9],平台虚拟出4个虚拟机域(Domain)。根据每个虚拟机的功能和服务,分为Domain₀、Domain₁、Domain₂、Domain₃。Domain₀是基础虚拟机,提供整个虚拟平台的控制管理和系统调度。Domain₁、Domain₂、Domain₃分别提供语音服务(VoIP)、虚拟桌面和路由器(防火墙)功能的用户虚拟机械域。

物理硬件的架构是分为两个部分,x86硬件部分和网络接口卡部分。x86硬件部分是通用IT服务器或电脑,本实例用的是PC电脑^[5]。网络接口卡部分可以理解为服务器的扩展槽位,用于物理网络功能的扩展,如与传统网络对接的以太网接口,提供无线接入服务的天线接口等,本实例中间件盒子天线是一个无线接入点(AP)。

虚拟中间件盒子系统的架构基于虚拟化技术,采用SDN^[7]的基本概念,分为3个平面:应用、控制和网络

硬件资源。虚拟中间件盒子采用软件实现网络的功能,共享本地或网络的硬件资源,并通过集中的控制管理和系统调度,按需求提供网络资源;采用硬件资源平面与控制平面相分离的SDN理念,用控制平台来管理应用系统控制,为用户提供灵活的、通用的、开放的服务。虚拟中间件盒子的系统架构如图3所示。

3.2 虚拟中间件盒子的组成

虚拟中间件盒子是采用开源的XEN的虚拟化平台,构建虚拟的网络设备环境。虚拟环境^[11]称为虚拟机。虽然整个硬件平台是x86架构,但虚拟化平台创建的虚拟机环境可以根据网络设备需求而配置,当前可以支持的处理器有Intel、PowerPC、ARM、MIPS等^[12]。

3.3 实例的硬件设备和软件列表

搭建虚拟中间件盒子需要x86硬件平台、操作系统、虚拟化服务平台、应用软件和网络环境。详细的硬件设备和软件如表1所示。

搭建虚拟中间件盒子首先是硬件设备的基础系统的安装,使用CentOS操作系统的U盘或CD引导PC机,然后选择安装操作系统。根据安装提示信息创建用户名和密码,并安

▼表1 实例的硬件设备和软件

分类	描述	备注
管理虚拟机械域(Domain ₀)	虚拟化平台XEN4.2.4版本(XEN是开源的虚拟化平台) CentOS-6.4-x86_64(CentOS是开源的Linux类的操作系统)	提供虚拟化功能和中间件盒子的管理平台
用户虚拟机械域(Domain ₁)	Elastix-2.5.0-BETA2-i386(Elastix是开源的统一融合语音平台)	可以提供IP语音交换机、电子邮件、及时通信和传真等功能
用户虚拟机械域(Domain ₂)	操作系统 Win7	虚拟桌面的操作系统
用户虚拟机械域(Domain ₃)	路由器平台pfSense-2.1(是开源的路由器/防火墙系统平台)	提供路由器、防火墙、动态主机地址服务器(DHCP)和域名服务(DNS)等功能
硬件设备	台式电脑(x86 PC)(Dell Desktop、Intel Core i7-4770处理器(3.4 GHz)、16 GB内存、2TB硬盘) 网络(无线接入采用TOTO Link无线网关)	硬件设备组成和网络设备信息
软件应用	Android应用: Sipdroid-3.4.apk	VoIP客户端软件

装操作系统,直到提示安装成功。随后,登录到CentOS,并安装虚拟化服务平台XEN,直到提示安装成功。其次是创建虚拟机,根据实例规划的系统架构创建3个虚拟机,每个虚拟化的硬件配置分别是单核处理器、内存、硬盘和网卡。网卡的IP地址是静态,并参考图4的地址信息进行配置。最后一步是安装3个虚拟机的服务和应用,每个虚拟机械域单独把对应的系统平台配置成系统引导,并按照提示信息安装,直到提示安装成功。

按照应用服务的操作手册进行简单的配置之后,虚拟中间件盒子就

可以提供服务了。虚拟中间件盒子的组成如图4所示。虚拟中间件盒子提供的服务主要有:

(1) 路由器和防火墙服务

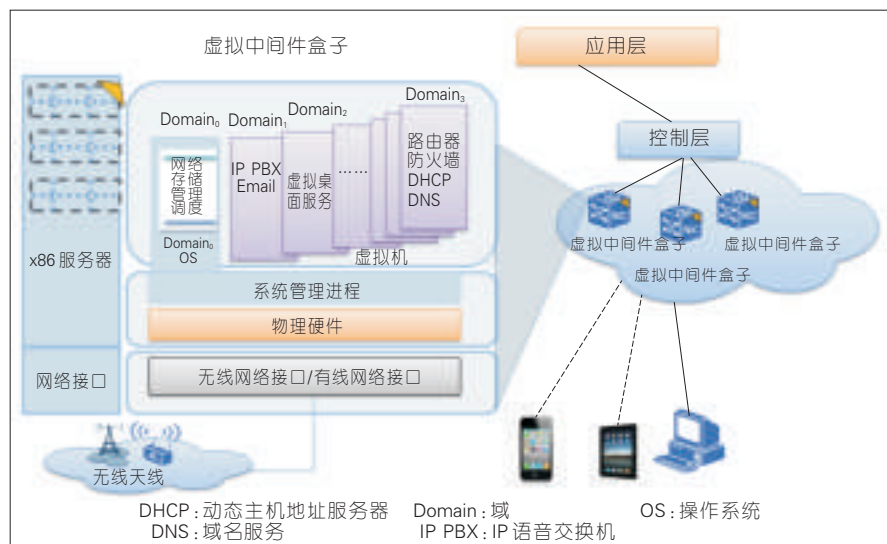
PfSense系统提供Web界面的管理和配置,输入服务器的IP地址登录之后,就可以根据提示信息进行路由、防火墙的配置。如DHCP服务配置、DNS服务配置、虚拟专用网(VPN)配置、NAT配置等。

(2) 虚拟桌面服务

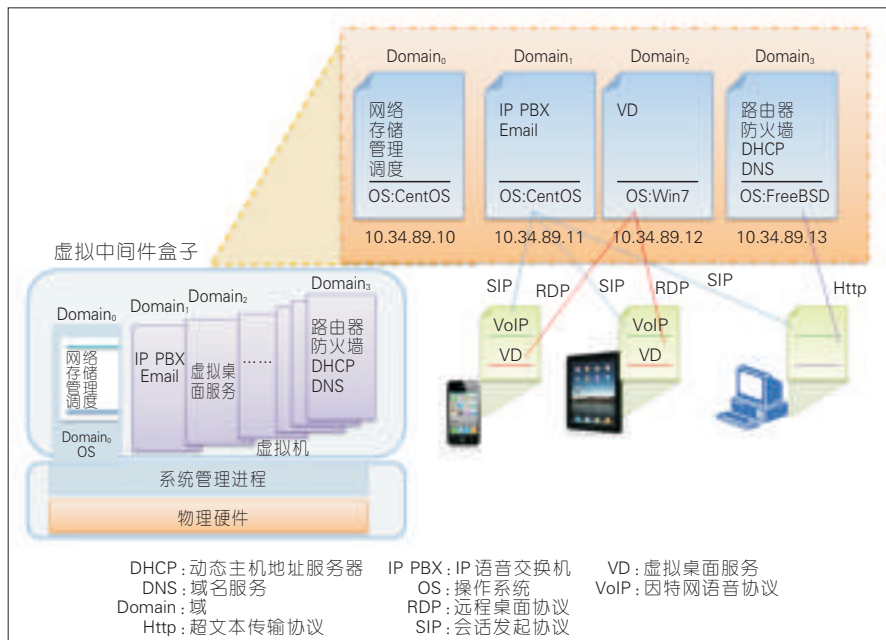
虚拟桌面服务(VD)可以提供智能终端和PC,并随时随地的登录到服务器自由使用虚拟化资源。真实物理PC一样的使用感受,享受自带设备(BYOD)的体验^[13]。快速、安全且经济实惠的扩展方式,可以满足不断变化的需求,可以更高效率地工作,简化传统PC机安全、应用程序更新和补丁程序更新以及灾难和恢复的管理。

(3) 语音服务

在智能终端和PC机上安装客户端软件,并通过内部的无线网络注册到用户虚拟机械域Domain₁的IP语音交换机(IP PBX)服务中。IP语音交换机的解决方案可以提供企业和部门的内部语音通信和视频通信服务,并通过中继网关设备与传统的公共交换电话网(PSTN)通信,用会话发起协议(SIP)与运营商网络核心网的软



▲图3 虚拟中间件盒子的系统架构



▲ 图4 虚拟中间件盒子的组成

交换互通业务。客户端有硬件IP电话和客户端软件。

4 结束语

虚拟化技术和相关概念已经成功地应用在通信网络中,本文通过虚拟化的中间件盒子的实例化,提出了更为多样化的网络功能虚拟化网络设备想法,为企业和个人提供更为丰富的应用场景。如中小企业中的语音、网站服务等,家庭中的虚拟桌面和物联网控制中心等。

NV、NFV和SDN技术已经被越来越多的ICT厂商和运营商接受,虚拟化将是未来通信网络发展的重要趋势之一^[7]。利用x86服务器或PC机创建虚拟中间件盒子,用于构建虚拟化的通信网络,为传统服务器和PC

机厂商提供了新的市场机会,但在短期内通信网络还是无法完全脱离传统网络设备的支撑,如光传输设备、无线基站设备等。未来还有很长的路要走,有很多的问题需要研究和解决,并不是简单的安装一套虚拟化软件就可以完成的。

参考文献

- [1] WEN H. Wireless Virtualization [M]. Springer Briefs in Computer Science, 2013. doi: 10.1007/978-3-319-01291-9_1, 2013.
- [2] WEN H, TIWARY P K. Tho Le-Ngoc: Current Trends and Perspectives in Wireless Virtualization [J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 49(9): 56-62.
- [3] ANTONIO M. it:Future Edge ICT Networks [J]. IEEE Comsoc Mmtc E-Letter, 2012, 7(7): 5402-5409.
- [4] Network Functions Virtualisation (NFV). Network Operator Perspectives on Industry Progress, ETSI [EB/OL]. (2014-04-01). http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper2.pdf.

- [5] CHARLES G. A performance analysis of Xen and KVM hypervisors for hosting the Xen Worlds Project [EB/OL]. (2014-04-01). <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3243&context=etd>.
- [6] AARON G, ROBERT G, JUNAID K. Design and Implementation of a Framework for Software-Defined Middlebox Networking [R]. SIGCOMM, Hong Kong, 2013.
- [7] Open Networking Foundation: Open Flow-enabled SDN and Network Functions Virtualization, ONF Solution Brief [EB/OL]. (2014-04-01). <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-sdn-nfv-solution.pdf>.
- [8] IBM M44/44X, Simulated multiple 7044 virtual machines [EB/OL]. (2014-04-01). http://en.wikipedia.org/wiki/IBM_M44/44X.
- [9] Virtualization, Hardware virtualization [EB/OL]. (2014-04-01). <http://en.wikipedia.org/wiki/Virtualization>.
- [10] Types of middleboxes. Available [EB/OL]. (2014-04-01). <http://en.wikipedia.org/wiki/Middlebox>.
- [11] XenServer Features [EB/OL]. (2014-04-01). <http://www.xenserver.org/overview-xenserver-open-source-virtualization/open-source-virtualization-features.html>.
- [12] x86 series, Available [EB/OL]. (2014-04-01). <http://en.wikipedia.org/wiki/X86>.
- [13] Bring your own device (BYOD) [EB/OL]. (2014-04-01). http://en.wikipedia.org/wiki/Bring_your_own_device.

作者简介



房爱军,北京邮电大学硕士毕业;中兴通讯股份有限公司商务技术部二级主任工程师;主要研究IP网络和网络虚拟化,对承载网和网络虚拟化有多年的了解和研究。



汪军,南京航空航天大学硕士毕业;中兴通讯股份有限公司中心研究院系统架构部总工;主要从事网络运营、核心网产品研发,核心网平台规划以及下一代网络技术研究,主要方向包括数据中心网络、软件定义网络。

综合信息

中国将建全球化量子通信卫星网

2014年11月4日,2014量子通信、测量和计算国际学术大会上获悉,中科院“量子科学实验卫星”工程目前进展顺利。中国将在第一颗量子科学实验卫星顺利发射后,进一步开展研究,到2030年建成全球化的量子

通信卫星网络。

基于在中国青海湖等地进行的多项成功实验,量子科学实验卫星的主要技术攻关已经完成,目前正在建造卫星的工作,项目整体正稳步推进。

(转载自《中国信息产业网》)

无线体域网

3

陈文/CHEN Wen

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

[编者按]无线体域网是个人健康信息采集与传输的重要手段之一,具有重要现实意义和产业化前景,受到工业界、学术界和标准化组织的广泛关注。另外,IEEE 802.15.6 协议标准是目前国际上公认的一款适用于健康信息采集的未来超短距无线体域网协议标准。讲座将分3期对该技术进行介绍:第1期讲述无线体域网的背景、研究动态和技术特征;第2期对无线体域网的频段选取、信道建模、MAC层协议、通信技术和数据处理技术特征进行介绍;第3期介绍无线体域网的节点设计、数据采集和应用场景问题。

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 06-0057-03

9 无线体域网的节点设计

无线体域网(WBAN)的无线传感节点按照其与人体位置的分布可大致分为4类:

(1)分布在人体体表的传感器节点,通常为可穿戴式,如心动电流描记仪、集成化脉搏传感器、体温传感器、指环式心率感知器、脉搏率检测传感器。

(2)植入人体体内的传感器节点,如心脏起搏器、胰岛素泵。

(3)置于人体内膜表面的传感器节点、位于人体周围较近距离的传感器节点(即可吸入的传感器节点),如吸入式药丸摄像机、吸入式药丸温度测量仪。

(4)位于人体周围较近距离的传感器节点,如脑电图扫描仪。

无线体域网的无线传感节点按其监测目的可大致分为5类:

(1)位移传感器,用以监测血管内外径,心房、心室尺寸,骨骼肌、平

滑肌的收缩等。

(2)速度传感器,主要用于测量血流速度、排尿速度、分泌速度、呼吸气流速度等。

(3)振动(加速度)传感器,应用于监控各种生理病理声音,如心音、呼吸音、血管音、搏动、震颤等。

(4)力传感器,应用于检测肌收缩力、咬合力、骨骼负荷力、粘滞力等

(5)压强传感器,主要用于测量血压、眼压、心内压、颅内压、胃内压、膀胱内压、子宫内压等。

此外,还有流量传感器、温度传感器、电学传感器、辐射传感器、光学传感器等。

在无线体域网系统中,将上述的各种传感器与无线收发芯片及MCU芯片集成,设计超低功耗、传输速率高、安全可靠的终端及中继节点是系统实际应用和产业化的核心。

9.1 基于无线体域网的天线形式及分析与设计

基于无线体域网的天线形式及分析与设计的主要目的是考察人体组织的电磁特性,分析人体组织对天线特性的影响,选择合理的天线形式

及布置方式,提高信号传输效率,降低吸收率(SAR)。实现体内及体表天线快速、精确的分析与优化设计;降低天线载体不确定性及测试环境的影响,寻找合理的横向、纵向性能比较方式,提高天线测试方法的精确性与客观性;结合小型化、高效率、低SAR值等要求,设计适用于血压计、心电图仪、脑电图仪、胶囊胃肠镜以及网关等无线体域网节点的一体化天线。每个节点依据功能不同,可分为单工/双工,都需要发射无线信号,都需要天馈系统来完成微波信号的放大/接收。一般的射频器件体积较大,难于满足要求,需要把天线和微波射频器件一体化设计,减小体积,降低损耗。

9.2 双向通信的中继及超低功耗的终端节点设计

双向通信的中继及超低功耗的终端节点设计的主要目的是实现多个人体医疗数据采集无线传感器节点将采集的数据发送给协调器节点,同时接受协调器节点发送的控制命令帧。协调器节点可以和上位机连接,通过Internet与远程控制中心连

收稿日期: 2014-05-10

网络出版时间: 2014-10-12

基金项目: 国家自然科学基金中法合作项目(61161130529)

接,也可通过节点上的 Wi-Fi 模块或 GPRS/3G 模块以无线的方式连接远程控制中心。当医疗采集传感器节点与协调器节点距离较远时,它们的无线数据传输会通过中继节点进行。中继节点本身不产生数据,只转发无线传感器节点或协调器节点的数据。无线传感器节点采用电池供电,为节省功耗,节点采用休眠模式。

9.3 医疗监测传感器节点设计

医疗监测传感器节点设计的主要目的是实现人类的医疗数据采集系统,特别是患者监测系统。其对设计者来说一直是比较大的挑战。因为必须从非常大的共模电压及噪声中提取出非常微弱的电信号。以心电图采样传感器为例,由于心脏壁收缩所引起的动作电势将电流由心脏传播到整个人体,所传播的电流在人体的不同部位产生不同的电势,通过电极可以在人体体表感应得到。该电势属于交流信号,带宽为 0.05 ~ 100 Hz,有时还能高达 1 kHz。而电势通常处于 1 mV 的峰峰值,并夹杂于大量的外部高频噪声中。该噪声将产生 50/60 Hz 的固有模式干扰(与电极信号混淆)以及共模模式电压干扰(共模至所有电极信号)。心电信号具有如下主要特征:

- 微弱性:人体体表的心电信号很微弱,一般只有 0.05 ~ 5 mV。在采样中必须通过放大器适当放大,同时必须进行滤波等抗干扰处理。
- 低频特性:人体心电信号的频谱范围在 0.05 ~ 100 Hz,频率比较低。
- 高阻抗特性:作为心电的信号源,人体源阻抗一般较大,可达几千欧姆至几十千欧姆,这将给心电提取放大带来误差和失真。

由于其输入阻抗很高,容易受到噪声的干扰,因此需要设计如何尽可能屏蔽输入回路及裸露的小信号部分。否则噪声将窜入信号输入模块,使得波形带有较多的噪声。另外,心电图采样传感器内含精密放大器和

高精度模数变换器,在电路设计的时候需要考虑电源的滤波,并且采用对电源噪声不敏感的电路结构,还需使得电源有足够的驱动能力,并且有尽可能小的纹波。

除心电图(ECG)采集无线传感器节点外,血压测量、脉搏及血氧测量无线传感器节点等的设计还有其不同的特征。其中血压测量传感器节点将由 ARM 公司的 MCU、电磁气阀、充气袖袋、压力传感器、放大电路、数据采集电路、无线传输模块等构成,而脉搏血氧模块中的传感器单元拟采用双光束脉搏测量探头来设计。这些传感器所采集到的数据将会通过前述的无线网络传送到监测中心或远程医疗中心。

10 无线体域网的数据采集系统

无线体域网中传感器节点(或设备)所要监控的人体(生理)信号分为 3 类^[11-14]:

(1) 连续型时变生理信号

一般为各种波形居多,如肌电图和脉搏波等,对应的传感器(设备)包括脑电图扫描仪、视觉传感器、听觉传感器、心动电流仪、心电图仪、聚偏二氟乙烯(PVDF)压电脉象传感器、心脏起搏器和吸入式药丸摄像机。

(2) 离散型时变生理信号

如体温、血压和血氧饱和度等生理参数值,对应的传感器(设备)包括吸入式药丸温度测量仪、胰岛素泵、肺功能传感器、葡萄糖检测传感器、出汗量检测传感器、指环式心率感知器、血氧饱和度传感器、体温传感器、非入侵血压监测仪和脉搏率检测传感器。

(3) 人体活动及动作信号

用于监控病人的日常活动或人体活动,对应的传感器包括人体活动传感器、加速度传感器、动作传感器、耳戴式活动识别传感器和螺旋仪。

对于无线体域网数据融合框架的设计需要完成以下功能:

(1) 对于数据传输量的控制

由于进行数据发送和接收时对于电能的消耗远远大于进行运算所消耗的电能,因此需要对于数据传输量进行控制。而对于数据传输量的控制是在保证系统能正常正确运行的前提下进行。

(2) 对于融合算法的要求

对于不同类型节点需要采取不同的数据融合算法,例如对于采集节点处的融合算法必须简单,需要不影响到数据采集,不会导致未进行处理的数据积压的情况出现,而对于簇头节点乃至汇聚节点,是进行功能性的融合,需要解决数据正确性和对命题支持性程度的融合。

(3) 数据融合过程中需要重视上下文信息的作用

上下文感知会对被监护者的状态进行判断,例如利用监护者身上体动传感器的数据可以判断出被监护者的运动状态,即静止、运动状态之一,这些状态值会对生理指标产生影响,最终也会影响到融合的结果。

采集节点处采集到的数据类型有 3 种:正常数据、错误数据以及异常数据。

(1) 正常数据

正常数据是指符合采集对象数值变化的规律性以及变化趋势的数据。例如人的体温,正常人值一般在 36 ~ 37 °C 左右,不同个体之间存在少许差异,而且受内、外因素的影响会有一些波动,下午体温比早晨体温要稍高一点,剧烈运动或者进餐以后体温也会略微升高,但是波动范围一般不超过 1 °C。

(2) 错误数据

错误数据一般由传感器节点的失效或者环境恶劣等因素引起,正常的传感器节点会产生错误数据,偏离正常的数据范围;失效的传感器节点也会产生任意的读数,这两种数据都是错误数据。错误数据是没有规律的,具有任意性。

(3) 异常数据

异常数据是除了正常数据和错误数据以外的数据,这时,传感器节点可以正常采集数据,没有失效,但是采集到的数据不是在正常范围之内,比如发烧会导致温度高于正常范围等等。这种数据的特点是具有短暂性,短时间内数据脱离正常范围,例如发烧的时候体温高于正常范围,退烧以后体温又会回到正常范围。

11 无线体域网的典型应用场景

无线体域网的最典型应用是在医疗领域,包括人体传感器网络和人(健康)状况监控等。人体传感器主要是采集人体的一些重要的数据信息,如心率、脑电图(EEG)、心电图(ECG)、体温、血压,以及某些化学物质的水平,如血液中的氧气和药物等数据传送到控制中心,控制中心分析这些数据,并进一步判断被监测人体的身体状况。目前研究认为,人体上或者内部大约可以部署10~20个各类传感器。由于传送的大部分为数据业务,因此所要求的数据传输速率比较低,一般低于10 kb/s。人体感应及保健医疗传感器通过生命体征/音频/视频信号供长期的个人健康状况检测。最常见的场景为医院中监测重症病人、医院外监测普通病人以及监控老人的身体状况。以无线的方式监测病人,病人可以摆脱有线仪器的困扰,可以给医院和病人带来极大的便利。医院病人的监控一般采用星型拓扑,数据信息传送到病人身边的监控器,当出现异常情况时,该监控器能发出警报。此外,在医院外部或者家里对病人或老人的监测和医院里采用的拓扑是一样的,所不同的是:监控器被一个数据收集器或者网关所取代,如PDA、手机等。这样,在人体身上构建一个微型的无线体域网,病人就可以自己监控自己的身体状况,并及时将身体状况信息通过现有的蜂窝网络/Wi-Fi传送到远程的监控中心。由此可见,无线体域网是

无处不在的医疗保健网络的一部分,可以通过广域空中接口连接到后端医疗保健机构的基础设施,给病人带来更大的自由空间,提高了效率和监控的实时性。

除了在医疗领域的广泛应用之外,无线体域网在人们的日常生活中也起着重要的作用。现今社会,残疾人越来越受到关注,无线体域网在残疾人中备受欢迎。如在一个眼疾病人的身上穿戴一个无线体域网,就可以为该病人实时地提供路况信息,提供导航和定位功能。对于一个耳聋病人,在公共场所,如地铁或公交上,无线体域网可以将声音放大或者将信息通过身体上的小显示器显示出来供病人查看。电子支付是无线体域网用于残疾病人的另外一种应用场景。当盲人乘坐地铁或者去超市购物,在超市或地铁的出入口处安置具有体域网功能的传感器,当盲人出入时,身体上的中央控制单元就会检测到盲人靠近出入口处的传感器,中央控制器就会把盲人的电子支付卡信息传递到足部传感器,然后这些信息通过足部传感器传递到出入口处的传感器,这样出入口处的传感器就可以检测并验证盲人的信用卡信息,从而提供更快更便捷的服务。

无线体域网除了帮助残疾人解决生活上的不便以外,还可以为更多的人提供诸如体育运动强度监测,危险区域信息监测等。在比较危险的场合,如消防、探险及军事场合,通过无线体域网可以提供警示信息,从而可以及时采取对抗措施,避免不必要的人员伤亡。如消防员出入高温、有毒气体的环境,如果温度和有毒气体的浓度超出危险阈值,携带在身体上的设备就会发出警示信息,提示消防员该采取什么措施急救;登高探险员,在高原缺氧环境下也可以携带无线体域网设备,用来提示空气的稀疏度对人体的危害;通过无线体域网还可以将重要的军事情报发送到控制中心或者远程指挥军队作战。在运

动员身上构建人体域网络,用来监测运动员训练时的身体状况,以控制训练的强度。这些应用在我们的日常生活中起着不可或缺的作用。

无线体域网技术除了医疗和保健中的应用,近年来已逐步向其他领域发展。在娱乐、体育运动、军事、建筑等领域都有广泛的应用。目前已有的无线交互舞蹈表演系统,运动反应时的测量系统、战士生理状态监控及救助、真实环境下防跌倒监控等都是比较成功的例子。当今,航天事业的蓬勃发展,也使得无线体域网有了重要的应用空间。我们可以设想,在航天员的身上安置一个无线体域网,在太空仓的某些设备装置无线体域网的传感器,这样可以将一些重要的航空信息及宇航员的身体状况通过卫星通信的方式返回到地面的控制中心。当前的登月计划为人体域网络提供了广阔的应用空间。

随着传感器技术和无线网络传输技术的发展,无线体域网系统会在今后的医疗领域、健康监控、体育运动及娱乐、军事及航空航天领域等有着越来越广泛的应用,其社会价值和经济效益都是非常可观的。(续完)

参考文献

- [11] IEEE Std 802.15.6-2012. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks [S]. IEEE, 2012.
- [12] ASTRIN A W, LI H B, KOHNO R. Standardization for Body Area Networks [J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, E92.B(2):366-372.
- [13] 陆凯. 无线体域网(WBAN)通信关键技术研究 [D]. 南京邮电大学硕士学位论文, 2009.
- [14] 情景感知在体域网上的应用 [EB/OL]. (2014-05-01). <http://wenku.baidu.com/view/3cf36926de80d4d8d15a4fcd.html>.

作者简介



陈文,上海交通大学电子信息与电气工程学院责任教授、信号处理与系统研究所所长,桂林电子科技大学电子工程与自动化学院院长;主要研究方向为网络编码、协作通信和绿色通信等;先后主持国家“973”课题、子课题,负责国家级基金20余项;已发表IEEE期刊论文51篇、IEEE国际会议论文100余篇。

2015年第4—6期专题征文

第4期

软件定义光网络

专题策划人

复旦大学信息科学与工程学院 迟楠 教授

光通信网络领域在软件可编程方向发展迅速。在光软件定义网络(SDN)技术中,不同容量和频谱分配方案产生的可编程的光信号,通过光纤链路进行高速传输,已经成为了研究的关注热点。光SDN主要采用可重构的光分差复用器(ROADM)实现,或是利用光控制平台来互联动态切换的端到端波长链路。在下一代光骨干网络中,SDN具有重要地位,其关键技术包括:软件定义光收发机、完全可编程的光表示层、辅助控制平台的网络自动化、多网络层次集成、网络设计和建模等。

专题文章范围主要包括:

- 软件定义的光收发器
- 可编程光层
- 网络自动化
- 多层集成(分层分组和电路交换,并行数据包和电路交换、混合)
- 网络设计和建模(GMLPS、OpenFlow)
- 相关应用

第5期

虚拟运营业务及网络

专题策划人

工业和信息化部电信研究院通信标准研究所 续合元 总工

工业和信息化部第一批向京东、迪信通、巴士在线等11家民营企业发放了首批虚拟运营商牌照,允许其从基础电信业务经营者购买移动通信服务,并按照相关规定自主运营;第二批8家虚拟运营商的名单紧随出炉;第三批虚拟运营商牌照再度亮相。那么未来这些虚拟运营商的业务如何发展(包括业务发展方向/商业模式/与传统运营商的竞合关系等)、虚拟运营对

网络运营商和移动通信网有什么需求和影响、政策和监管如何适应虚拟运营的要求等问题,都需要进一步探讨和研究。

专题文章范围主要包括:

- 国际虚拟运营的现状和发展趋势
- 中国虚拟运营的背景和现状
- 中国虚拟运营的业务发展
- 虚拟运营对网络运营商和移动通信网有什么需求和影响
- 电信运营商如何在4G网络上开展虚拟运营业务
- 政策和监管如何保障虚拟运营商更好地开展业务

第6期

移动群智感知和协同计算

专题策划人

北京邮电大学软件学院 王文东 教授

移动群智感知和协同计算是目前移动互联网技术领域的一个研究热点,利用移动智能终端(智能手机、移动的车辆)上越来越多的感应设备(摄像头、麦克风等)向应用后台上报信息,在后台/云端进行协同计算形成结果,而在这个信息获取和计算的过程中,如何用最少的投资获取最多的信息(博弈论),如何采集最少的信息能够满足最大的地域信息覆盖(数据融合),如何根据采集到的若干离散信息构造完整的地域信息描述(信息补全),如何激励移动终端积极主动地提交信息(激励一致性),积极移动到关键地域(轨迹预测等)采集并上报信息等一系列问题均是目前理论研究和开发的关键。

专题文章范围主要包括:

- 移动群智感知与协同计算的概念(包括移动群智感知与协同计算涉及的典型网络架构和主要关键技术)
- 信息的移动群智感知和采集
- 信息的融合补全、数据的群智协同计算
- 移动群智感知的效益和效用技术、激励一致性技术
- 移动群智用户的多种轨迹预测技术
- 移动群智感知的隐私保护技术
- 典型试验和应用介绍等

2015年第1—6期专题计划

期次	专题名称	专题策划人
1	自组织异构小基站网络	北京邮电大学网络技术研究院 张平 教授
2	移动云计算和云服务	中国联通网络技术研究院 唐雄燕 首席专家
3	移动互联网安全技术	北京航空航天大学电子信息工程学院 刘建伟 教授
4	软件定义光网络	复旦大学信息科学与工程学院 迟楠 教授
5	虚拟运营业务和网络	工业和信息化部电信研究院通信标准研究所 续合元 总工
6	移动群智感知和协同计算	北京邮电大学软件学院 王文东 教授

《中兴通讯技术》第20卷总目次

卷·期·页

卷·期·页

一、卷首特稿

M-ICT 产业发展动态及值得关注的

要点 孙枕戈 20-1-02

二、专题

专题：社会网络：技术、应用与市场

社会网络大数据分析框架及其

关键技术 易成岐, 鲍媛媛, 薛一波 20-1-05

微博社交网络中用户群体关系挖掘

与群体行为分析 黄涵霞, 胡燕萍, 孙知信 20-1-11

基于代理的社会网络信息传播

与控制模型 徐名海, 糜正琨, 司亚雄 20-1-14

基于社会网络的精确营销策略

及方法 鲍媛媛, 易成岐, 薛一波 20-1-20

以用户为中心的社会

多媒体计算 桑基韬, 查正军, 徐常胜 20-1-26

车联社交网络：机遇、挑战

和应用 何宗键, 曹建农, 郑俊浩 20-1-31

移动群智感知应用 陈荟慧, 郭斌, 於志文 20-1-35

社交网络中盈利机制和业务

模型研究 汤婧, 蔡敏敏, 王玉峰 20-1-38

专题：第5代移动通信需求与技术探索

5G 业务需求分析及技术

标准进程 王志勤, 罗振东, 魏克军 20-2-02

基于热点城区测算中国 2020 年

移动通信频谱需求 黄标, 王坦 20-2-05

面向未来移动通信的超蜂窝

网络架构 赵明, 许希斌, 牛志升 20-2-11

面向 5G 基于 C-RAN 宏微协作的极简

数据载波设计 陈亚迷, 李刚, 崔春风 20-2-17

采用网络编码的双向中继信道中软

信息的传输方法 卢科学, 许进, 张帅 20-2-22

大规模 MIMO 无线通信

关键技术 尤力, 高西奇 20-2-26

压缩感知技术在未来移动通信

系统中的应用 王喜瑜, 鲁照华, 陈宪明 20-2-29

第5代移动通信测试技术 杨旸, 王浩文, 许晖 20-2-33

专题：网络以及功能虚拟化

网络虚拟化的过去、现在

和未来 温涛, 虞红芳, 李乐民 20-3-02

网络虚拟化及网络功能虚拟化

技术探讨 赵慧玲, 解云鹏, 史凡 20-3-08

移动核心网应用 NFV 的关键问题

探讨及实践 陈炜, 韩小勇, 尼凌飞 20-3-12

无线网络虚拟化架构

与关键技术 冯志勇, 冯泽冰, 张奇勋 20-3-16

基于软件定义网络的多区域网络

虚拟化模型 罗萱, 马塞, 金耀辉 20-3-22

弹性光传输基础设施上动态透明

虚拟网络嵌入 徐浩煜, 汪亮友, 朱祖勃 20-3-26

虚拟网络的服务迁移

技术研究 慈松, 于冰, 韩言妮 20-3-32

集中与分布：协同虚拟

网络映射 丰旻, 廖建新, 王敬宇 20-3-36

专题：智慧城市

国家智慧城市试点与标准化

建设探索 万碧玉, 姜栋, 周微茹 20-4-02

智慧城市关键技术研究 顾磊, 王艺 20-4-07

交通 2.0

——智慧交通的关键 王涤宇, 付超贤 20-4-11

智慧医院体系研究及

关键技术应用 陆晋军, 丁富强, 郑荣 20-4-16

大数据时代大型城市智慧化

应用平台的实践与思考 吉鸿雁, 马新文 20-4-21

基于智慧理念的城市公共安全

评估与建设 孙鹏, 沈伟岗 20-4-25

智慧城市将成为新型

城镇化的先导 宋俊德, 李玉省 20-4-29

智慧城市顶层设计相关探讨 王艺 20-4-33

专题：下一代无源光网络技术与应用

超密集波分复用无源

光网络技术 胡卫生, 郑宏军, 罗清龙 20-5-02

正交频分复用无源

光网络 何永琪, 林邦姜, 李巨浩 20-5-06

光接入网络中的数字信号处理技术 余建军 20-5-09

无源光网络的运行、维护

与管理 沈成彬, 蒋铭, 王波 20-5-17

下一代无源光网络节能

关键技术 赵继军, 冯楠, 任丹萍 20-5-23

环树型 TWDM-PON 动态资源

调度方法研究 张治国, 胡新天, 陈雪 20-5-29

下一代无源光网络的标准进展 程强, 苟书智 20-5-34

软件定义光接入网 赵永利, 吴家林, 张杰 20-5-38

专题: 可见光通信技术

基于可见光通信的室内光电混合网络
组网关键技术 郭伟, 于宏毅, 刘建辉 20-6-02
应用于可见光通信的上行链路
方案探讨 郑重, 刘璐, 胡薇薇 20-6-08
一种基于 CSMA/CA 的 VLC 系统
多用户接入方法研究 尚韬, 江涛, 张颖 20-6-12
基于先进调制的高速可见光
通信技术 迟楠, 黄星星, 王一光 20-6-16
基于 CSK 调制的可见光通信系统的
盲检测算法研究 贾林琼, 王俊波, 陈明 20-6-21
基于多色 LED 的可见光通信联合
调制技术 黄博扬, 高谦, 徐正元 20-6-25
适用于可见光通信的
LED 器件 朱石超, 赵丽霞, 杨华 20-6-29
用于 VLC 的 LED 半功率角
优化布局方法研究 李昉, 陈建平 20-6-33
散弹噪声干扰下的多电平调制
可见光通信系统 汪后禹 20-6-36

三、专家视点

M2M 的业务范畴及其技术发展 续合元 20-1-44
移动的代价: 无线通信有线化 卫国 20-2-36
大数据的前世、今生和未来 薛一波 20-3-41
从电磁场观点审视宽频带的
无线通信 马建国, 蔡彦丽, 庄晴光 20-4-37
软件定义光网络的机遇与挑战 纪越峰 20-5-42
建设物联网: 轻量级寻址技术
不可或缺 孙知信, 骆冰清 20-6-40

四、研究论文

异构融合网络体系
技术 雷小燕, 李鹏翔, 霍玉臻 20-1-54
移动智能终端操作系统
技术发展 王跃, 许志远, 严珏玮 20-2-45
遗传算法在用户感知评估
建模中的应用 罗荣慧, 马志斌 20-2-49
CAN 总线通信控制协议的
仿真与性能分析 曹剑馨, 梁庚 20-3-48
LTE-A CSI-RSRP 测量
算法研究 辛雨, 倪佳, 胡留军 20-4-47

智慧协同标识网络 张宏科, 陈哲 20-4-53
软件定义数据中心网络研究 杨旭, 周桦, 李勇 20-5-50
大数据时代的移动终端
技术演进 朱晓光, 聂永霞 20-6-44

五、运营应用

基于云平台下的 OTT TV 的技术方案
与发展趋势 吕达, 徐火顺 20-1-48
LTE FDD 的覆盖增强技术 李强华, 王彬 20-2-41
利用后台实时跟踪及多载波解决
全覆盖高铁网络质量 梁松柏, 魏宁, 韩广平 20-3-44
通用引导架构在 IMS 网络中的
应用研究 缪永生, 盛国平, 张宝健 20-4-40
一种基于曲线相似度进行业务流量
监测的方法 葛良 20-5-44
EV-DO 网络承载小流量长在线业务的
性能分析及优化 何晓明, 曹维华, 贺晓东 20-6-45
大规模物联网中多层次立体异构
网络拓扑研究 顾磊, 黄辉林, 钱昕 20-6-48

六、开发园地

智能终端中热 IP 核的通信方法 周本文, 郭凯 20-1-59
分布式链路聚合技术
及其应用 魏月华, 杜玉强, 黄璐 20-2-53
基于 SBB 2.0 扩展的计算存储
融合系统 马千里, 袁磊峰, 王朝营 20-3-52
2.65 GHz 双级高效、高增益 F 类开关
功率放大器设计 周鹏, 王建利, 邬海峰 20-3-55
基于 CPLD 的 FPGA 从并快速
加载方案 李春雨 20-4-57
一种实现 CSFB 的方法研究 朱玉娜 20-5-55
网络功能虚拟化: 基于虚拟化的
中间件盒子 房爱军, 汪军 20-6-52

七、系列讲座

智能无线电技术(1) 宋腾辉, 窦峥, 林云 20-1-63
智能无线电技术(2) 宋腾辉, 窦峥, 林云 20-2-58
智能无线电技术(3) 宋腾辉, 窦峥, 林云 20-3-58
无线体域网(1) 陈文 20-4-60
无线体域网(2) 陈文 20-5-58
无线体域网(3) 陈文 20-6-57

《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊,通过介绍、探讨通信热点技术,展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

二、稿件基本要求

1. 投稿约定

- (1) 作者需登陆《中兴通讯技术》投稿平台: www.zte.com.cn/paper,并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右的时间。

2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用WORD文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:题名、作者姓名、作者单位、中文摘要、关键词(4~8个)、英文摘要、正文、参考文献、作者简介。
- (4) 中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5) 摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性,采用第三人称的写法。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家和国际标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7) 图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8) 参考文献以20条左右为宜,未公开发表的资料不宜列入。所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。主要种类参考文献的书写格式为:
 - 期刊[序号]作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 起止页码.
 - 书籍[序号]作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
 - 论文集中析出文献[序号]作者. 题名[C]//论文集编者. 论文集名(会议名). 出版地: 出版者, 出版年(开会年): 起止页码.
 - 学位论文[序号]作者. 题名[D]. 保存地点: 保存单位, 授予年.
 - 专利[序号]专利所有者. 专利题名. 国别: 专利号[P]. 出版日期.
 - 国际、国家标准[序号]标准编号, 标准名称[S].
- (9) 作者原则上不超过3人,超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10) 提供2寸正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100kB)。
- (11) 尽可能标注出研究课题的资助基金或资助项目名称。
- (12) 作者姓名中含有多音字时,应标注作者姓名的汉语拼音。
- (13) 提供联系方式,如:通信地址、电话(含手机)、Email等。

3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2) 为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的版权(包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版)。作者获得的稿费包括版权酬金。如对此持有不同意见,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号国轩凯旋大厦1201室, 邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356, 联系邮箱: magazine@zte.com.cn

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: www.zte.com.cn/paper

中兴通讯技术

ZHONGXING TONGXUN JISHU

双月刊 1995 年创刊 总第 119 期
2014 年 12 月 第 20 卷第 6 期

主管:安徽省科学技术厅
主办:安徽省科学技术情报研究所
中兴通讯股份有限公司
编辑:《中兴通讯技术》编辑部

总编:孙枕戈
副总编:赵今明
常务副总编:黄新明
责任编辑:杨勤义
编辑:徐烨, 卢丹, 朱莉, Paul Sleswick
排版制作:余刚
发行:王萍萍
编务:王坤

ZHONGXING TONGXUN JISHU

《中兴通讯技术》编辑部
地址:合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 12 楼
邮编:230061
网址: www.zte.com.cn/magazine
投稿平台: www.zte.com.cn/paper
电子信箱: magazine@zte.com.cn
电话: (0551)65533356
传真: (0551)65850139

出版、发行:中兴通讯技术杂志社
发行范围:全球发行
印刷:合肥中建彩色印刷厂
出版日期:2014 年 12 月 10 日
刊号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
广告经营许可证:皖合工商广字 0058
定价:每册 20.00 元, 全年 120.00 元