

# 看得见的无线通信技术 可见光通信\*

陈雄斌<sup>1,2,†</sup> 闵成彧<sup>2</sup>

(1 中国科学院大学 材料与光电研究中心 北京 100049)

(2 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室 北京 100083)

2020-02-22收到

† email: chenxiogbin@semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20201005

## Wireless communication that we can see ——visible light communication

CHEN Xiong-Bin<sup>1,2,†</sup> MIN Cheng-Yu<sup>2</sup>

(1 Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**摘要** 可见光通信作为新一代信息技术,除了为移动通信拓展频谱资源外,还具备高速、大容量、安全、节能的技术特点。现有射频通信的5G、6G技术方案能耗很高,而照明、显示用的LED已经无处不在,所以可见光通信将来可用于实现普适的万物光互连。商用照明的荧光型LED器件的带宽有限,通过均衡技术已经把可见光通信系统的3 dB带宽拓展到了600 MHz,单路二进制开关键控实时通信速率达到了1.39 Gbps。如果采用高阶调制和波分复用技术,多色LED光源的非实时通信总速率已经超过15 Gbps。灯光上网、灯光定位和智能家居系统等创新应用证明了可见光通信与照明或显示融合不是梦,预示看得见的光无线通信将引起更大的技术变革。

**关键词** 无线通信, 可见光通信, 半导体照明, 射频敏感, 节能减排

**Abstract** As a new generation of information technology, visible light communication not only expands the spectral resources for mobile telecommunication, but also has the characteristics of high speed, large capacity, security, and low energy consumption. The 5G and 6G technologies of wireless networks consume a great amount of energy, while light emitting diodes (LEDs) for lighting and display are everywhere, so visible light communication can be used to realize universal optical interconnection in the future. Although the bandwidth of fluorescent LED devices for commercial lighting is limited, the 3 dB bandwidth of visible light communication systems has been extended to 600 MHz through equalization technology, and the real-time communication rate of single on-off keying channels has been increased to 1.39 Gbps. If high-order modulation and wavelength division multiplexing technology are used, the total non-real-time communication rate of multi-color LED light sources can exceed 15 Gbps. Innovative applications such as visible light internet access, visible light positioning and smart home systems prove that the integration of visible light communication with lighting or displays is not a dream, and signify that visible optical wireless communication will bring about an even greater technological revolution.

**Keywords** wireless communication, visible light communication, solid state lighting, radio frequency sensitivity, energy saving and emission reduction

\* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFB0403605)、国家自然科学基金(批准号: 61875183)、中国科学院基金(批准号: GQRC19G03)资助项目

## 1 可见光通信的原理及技术背景

可见光通信技术(visible light communication, VLC), 是利用发光二极管(light emitting diode, LED)等可见光光源发出肉眼难以分辨的高速明暗变化光信号来传输信息。如图1所示, 以二进制开关键控(On-Off keying, OOK)信号传输为例, 如果让光强“亮”代表数字通信中的“1”, 让光强“暗”代表数字通信中的“0”, 则可见光通信系统的调制深度决定了灯光的“明”、“暗”状态变化的大小。可见光通信系统的通信速率则影响灯光的“明”、“暗”状态变化的快慢。因为人眼有视觉残留, 对于老式电感整流的日光灯的50 Hz工频闪烁都不大敏感, 通常液晶显示器的刷新频率做到75 Hz就已经算高端了。对于可见光通信系统来说, 只要调制深度较浅、通信速率较高, 则通信时人眼就感觉不到这种光强的变化, 但是电子设备却能检测到这些微弱的光强变化实现数字通信, 这就是可见光强度调制方式的通信原理。灯泡、电视机背光源等LED器件能在不影响原有照明、显示功能的前提下实现无线通信功能, 这的确是一件令人兴奋的事情。于是, 科研人员不断提高LED器件的通信速率、系统的稳定性, 大众则期待未来用一盏照明灯提供照明、通信甚至无线供能等诸多服务。众所周知, 为了实现高速通信, 通信技术从电通信演进到了光通信; 为了实现移动通信, 通信技术从有线通信演进到了无线通信。可见光通信作为一种无线光通信技术, 它兼具了光通信的高速以及无线通信的灵活这两大优点, 加上“可见”带来的操控便捷性, 使其成为了一项备受期待的无线通信新技术。《“十三五”国家科技创新规划》中把可见光通信技术列为了新一代信息技术<sup>[1]</sup>。

### 1.1 技术起源

1880年, 贝尔用太阳做光源, 用硒光电池做探测器发明了光的无线电话。因为受限于当时材料和器件的约束, 该技术未能商用化。2000年, 日本庆应义塾大学 Yuichi Tanaka 等研究人员提出

用室内照明LED灯组建无线基站(wireless home link, WHL)的概念, 并论证了用照明LED灯来通信的可行性, 开启了可见光通信技术研究的新纪元<sup>[2]</sup>。2008年, 美国成立了由波士顿大学、Rensselaer理工学院、新墨西哥大学组成的智能照明中心, 开展可见光通信技术研究。2008年, 欧洲启动了OMEGA计划, 由法国电信 Orange Lab 牵头, 包含20多位工业界和学术界的成员, 如牛津大学、雅典大学、西门子公司等, 围绕高速的电力线载波、超宽带无线、红外通信、可见光学通信等技术开展研究。2008年末, 为了依托LED照明, 实现无线领域从电磁向光传输的演进, 时任中国科学院院长的路甬祥院士批示中国科学院半导体研究所整合所内优势研发力量, 启动了基于可见光通信的“半导体照明信息网”(solid state lighting information network, S2-link)的研究。

所以, 可见光通信技术的发展得益于半导体照明的推广, 它和半导体照明有着密不可分的联系。基于照明光源来复用实现通信功能, 是可见光通信技术的基础使命。

### 1.2 技术特点

LED的发光效率理论极限是350—450 lm/W, 实验室有人已经把LED的发光效率做到了303 lm/W, 所以LED在照明领域高效节能优点已经被大众接受。根据《2019年中国半导体照明产业发展蓝皮书》的统计, 2019年LED通用照明产品实现节电3069亿度, 减少碳排放2.4亿吨。基于LED光源的可见光通信技术在信息领域的优点正在逐渐被大家认知。因为现在的无线电频谱资源已经非常

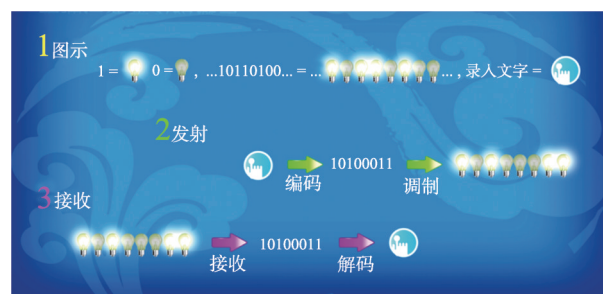


图1 基于可见光进行文本传输的基本原理

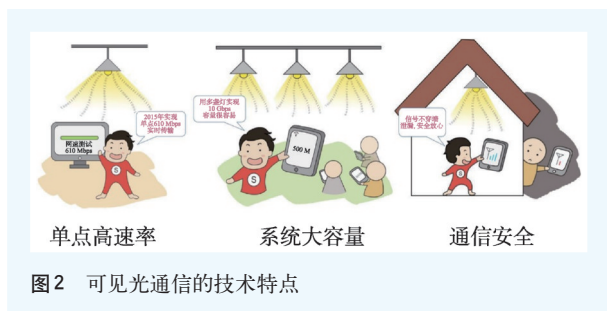


图2 可见光通信的技术特点

拥挤，待分配的频谱资源非常有限，要开展新的无线通信业务就需要拓展新的频谱资源，太赫兹、可见光频段是第6代移动通信中被大家看好的新频谱。

基于白光LED的室内可见光通信技术以可见光作为载波，以室内自由空间作为信道，同时具有光通信的高速和无线通信的便捷这两大优点，不过它的通信速率高不过光纤通信，移动便捷性好不过射频通信。但是随着移动接入终端用户数量的增多，基于频率、带宽共享原则的WiFi技术在人口密集区已经很难给无线用户提供满意的用户体验。而可见光通信技术可以简便地实现空间复用，能在人口密集区为用户提供独享的高带宽通信链路。所以和传统的无线射频通信技术相比，可见光通信具有如图2所示的高速、大容量、安全的技术优点。

可见光的光波频率约为百THz量级，WiFi的电波频率约为GHz量级。一般来说光通信比电通信的通信速率要快，且因为频率相差很大，光通信也不容易受到电磁信号干扰。WiFi使用的IEEE 802.11b/g/n标准的工作频段为2.4 GHz，IEEE 802.11a/ac/n标准的工作频段为5 GHz。日常生活中许多电气设备辐射的射频信号也正好覆盖WiFi的相同频段，如：微波炉、蓝牙设备、无绳电话、电冰箱等，所以WiFi无线网络肯定会受到影响。如果在无线环境中存在多台无线设备，则还有可能产生频道冲突、无线信号串扰的问题。通常，如果距离无线设备及通信电缆线路100 m内有无线电发射塔、电焊机、电车或高压电力变压器等强信号干扰源，则也有可能对无线信号或设备产生强干扰，影响有效通信速率。因为光波的通信带宽比电磁波的通信带宽要高，所以可

见光通信比传统射频无线通信更具速率优势。现在，可见光通信单点高速率的优点已经初步体现。

为了实现宽带大容量的无线通信，无线基站技术的发展方向是提高蜂窝小区的复用度。因为光的空间复用性比电的空间复用性要好，能建立比无线电更小的无线光小区，故可以在给单个用户提供高速实时通信的同时，通过众多非常小的无线光通信小区组网实现无线光网络系统的超大容量。可见光通信利用LED的透镜或灯罩把光局限在很小的区域，故可以通过分割非常多的热点小区来提高整个系统的通信总容量，在一个几十平米的房间内实现数十Gbps的无线容量已经没有技术难点。

可见光通信的信号可见易控，靠灯珠的透镜、灯具的灯罩和使用场景的窗帘等遮挡物就可以灵活控制信号覆盖区域，同时能通过肉眼观察信号覆盖区域，并能有效防止信息泄露。一般现在的无线路由器能穿两堵混凝土墙，要是辐射功率大的路由器则信号穿墙更厉害。虽然银行账号和密码等信息会经过加密后传输，但是只要数据包能被人截获，就有可能被破解。倘若黑客搭建一个WiFi钓鱼热点，无线用户从服务集标识(service set identifier, SSID)上判断以为是合法的路由器，实际上连接的是别人的钓鱼热点，通信数据很容易就被抓包，加密数据被破解只是时间长短的问题了。灯光不穿墙，穿窗帘都不行，只要你用自己的眼睛看好了，光没有外泄，再牛的黑客也没办法抓包，用户不再担心“第三只耳朵”，能享受前所未有的心理安全感，能满足大家日益增长的通信安全需求。随着大家对通信安全性的关注度不断增加，可见光通信抗电磁干扰以及防信号泄露的技术优势也会更加受到重视。

除了高速、大容量、安全的优点外，可见光通信的“低能耗”优点也开始显得越来越重要。中国电信技术创新中心副主任杨峰义在中国通信学会举办的“2019天线射频系统与5G通信专题研讨会”上表示，目前困扰5G发展的一大难题是功耗。根据他的报告，2018年中国三家移动通信运营商的移动基站共耗电270亿度，总电费240亿元。在同样覆盖情况下，预计5G的网络能耗将达

到2430亿度，电费达到2160亿元。2019年，随着5G在中国的商用，5G高能耗的问题已经成为了大家担忧的话题。可见光通信可以利用照明、显示LED来复用实现通信功能，近似于“零能耗”通信。根据中国照明学会提供的统计数据，2016年中国照明用电约7318.7亿度，2017年中国照明用电约7963.3亿度(功率大)。2017年，中国LED灯在用数量约为93.6亿只(数量多)。如果利用室内灯泡充当可见光通信的无线基站来做高速大容量的无线光通信，在照明节能基础上的通信节能意义也非常大。

## 2 可见光通信的技术路线

可见光通信按照LED光源的颜色分为单色LED通信、三基色或更多色LED通信、荧光型白光LED通信。通常，单色LED器件不含荧光粉，单个PN结的调制速率就是通信总速率；多色LED器件由发不同颜色光的多个PN结混成白光，也不含荧光粉，多个PN结的调制速率累加就是通信总速率；荧光型白光LED器件常用发蓝光的PN结外加黄色荧光粉组成，如图3所示，单个PN结发出的蓝光是信号光，激发的黄色荧光是噪声光，调制速率一般会低于单色LED。按照LED光源功率大小分为大功率LED通信、中功率LED通信、小功率LED通信。一般LED器件功率越小PN结面积越小、调制带宽越高、通信距离越短。可见光通信系统常用的半导体探测器是PIN管和APD管，采用APD探测器可以提高检测灵敏度，从而提高通信距离。可见光通信系统按照信号处理的实时性可分为实时传输系统和非实时传输系统，非实时传输系统的数据处理包含离线处理的环节，无法实现不间断的数据通信<sup>[3]</sup>。可见光通信技术研究最初集中在基于照明光源复用实现通信功能，后来为了强调光通信高速的优点，逐步弱化了照明约束，技术研究路线呈现百花齐放的态势，对系统的应用价值的理解也见仁见智。目前，该技术整体还处于新技术的研发及应用探索阶段。从技术研发的情况来看，围绕如何实现高速大容量的LED照明通信的技术研究以及核心器

件研发是研究热点，同时基于低速LED照明通信技术的创新应用研究也是大家关注的焦点。也就是说，可见光通信研究已经逐步分割成不计成本地追求高速大容量的可见光通信和借助已有LED光源低成本地复用实现创新应用这两大方向。

### 2.1 通过带宽拓展来提升通信速率

室内照明场景的可见光通信一般通信距离是米级，室外照明场景的可见光通信的距离可能还会更远。根据照明场景需求，一般需要若干颗LED组合来实现大功率的照明与通信复用，多颗LED灯珠高速调制的难度比单颗要高。2009年以前，可见光通信的学术论文报道的实时通信速率大多是Kbps量级到Mbps量级。为了提高可见光通信系统的速率，在LED器件带宽有限的条件限制下可以利用均衡技术提高系统的带宽，可以利用高阶调制技术提高系统频带利用率(频谱效率)，可以利用空间复用、偏振复用等进一步提高系统通信容量。

LED很早就被用做光纤通信的光源，功率一般是毫瓦量级，为了匹配石英光纤的低损耗窗口，光纤通信的LED光源为红外波段。半导体照明技术对LED灯的照度有要求，一盏灯的功率从几瓦、几十瓦到几百瓦不等。因此，半导体照明用到的单个LED器件的功率也从几十毫瓦、1瓦到几瓦不等。LED器件功率与PN结的面积成正比，LED的额定电功率越大，一般PN结的结

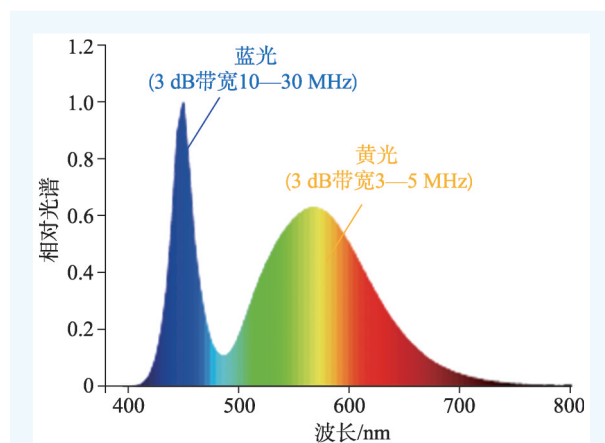


图3 荧光型LED的光谱及带宽

面积就越大,电功率为1 W的LED器件的结面积大小约1 mm<sup>2</sup>。LED器件在相同结构下,结面积越大,则其3 dB调制带宽越小。譬如,电功率为1 W的GaN基荧光型LED器件的3 dB带宽比光纤通信中LED器件的带宽要小很多,通常其黄色荧光的3 dB带宽约3—5 MHz,其蓝光的3 dB带宽约10—30 MHz。

考虑到可见光信号在自由空间传输中不同频率成分的信号衰减是不一样的,可见光信号传输有非线性失真,如果通过均衡或者预加重处理对通信链路中信号的非线性失真进行补偿,则可以拓展可见光通信系统的带宽,从而提高系统的通信速率。中国科学院半导体研究所的可见光通信研究小组提出了有源模拟均衡的可见光通信带宽拓展技术解决方案。2013年,研究小组利用室内照明最常用的1 W功率的商用荧光型LED做光源、PIN做探测器,通过在可见光接收机端增加有源均衡电路,补偿信号中高频分量的衰减,把系统的3 dB调制带宽从12 MHz提高到了151 MHz,基于简单的OOK调制,把实时通信的速率从50 Mbps提高到了340 Mbps<sup>[4]</sup>。2015年,研究团队在发射机端增加预加重电路,在接收机端增加有源均衡电路。如图4所示,在光源和探测器不变的前提下,基于简单的OOK调制,实时通信的速率提高到了610 Mbps,通信距离6.2 m,在没有加检错纠错的条件下2小时的平均误码率是 $3.5 \times 10^{-5}$ ,远低于前向纠错 $3.8 \times 10^{-3}$ 的误码率上限要求,通过了工业和信息化部中国泰尔实验室的检测。有源均衡的技术方案为国内外同行设计可



图4 荧光型LED单路实时传输系统测试链路

见光高速实时通信电路提供了参考,均衡技术在可见光通信系统中的应用潜能不断被挖掘。2016年,北京理工大学的研究团队用红绿蓝黄4色LED做光源、APD做探测器,采用NRZ-OOK调制技术,传输距离1.7 m,基于均衡技术分别实现了红光单路实时通信速率750 Mbps时,误码率为 $6.64 \times 10^{-8}$ ;绿光单路实时通信速率690 Mbps时,误码率为 $8.97 \times 10^{-7}$ ;蓝光单路实时通信速率730 Mbps时,误码率为 $5.81 \times 10^{-7}$ ;黄光单路实时通信速率650 Mbps时,误码率为 $6.59 \times 10^{-7}$ <sup>[5]</sup>。

中国科学院半导体研究所的可见光通信研究小组提出了用矢量拟合来设计混合桥T型网络均衡电路的通用设计方法。2019年,利用室内照明最常用的1 W功率的商用荧光型LED做光源、PIN做探测器,通过在可见光发射机端增加有源预均衡(预加重)电路,把系统的3 dB调制带宽从30 MHz提高到了600 MHz,基于简单的OOK调制,实时通信速率1.35 Gbps、传输距离0.12 m时系统原始误码率为 $8.8 \times 10^{-5}$ <sup>[6]</sup>。2020年1月,团队把该系统的单路实时传输速率提高到1.39 Gbps,传输距离从0.12 m拓展到3.1 m,原始误码率降到 $1.5 \times 10^{-5}$ 。

## 2.2 通过高阶调制和波分复用来提升通信速率

因为通信系统的总容量受很多因素影响,所以要提高某个房间内可见光通信系统的无线通信总容量也需要从多个方面努力。首先,我们在房间内尽可能多的安装可通信的LED灯,这就类似于移动通信中靠增加基站数量来提升有效面积内的通信容量。其次,可以使用多入多出(multi input multi output, MIMO)技术,利用成像通信把每盏灯里的若干颗灯珠的通信速率实现累加。此外,如果灯珠选用包含多个PN结的3基色或者4色甚至5色LED,如图5所示,则可以利用波分复用进一步提升通信速率。然后,每个PN结在调制带宽一定的前提下,可以利用高阶调制等技术提高频谱效率,提高通信速率。最后,还可以从LED器件层面来拓展每个PN结的调制带宽,从而提高通信速率。

2015年,中国科学院半导体研究所的可见光通信研究小组利用室内照明最常用的1 W功率的商用荧光型LED做光源、PIN做探测器,基于系统3 dB带宽为143 MHz的可见光通信收发模块,通过16QAM-OFDM的高阶调制,传输距离1 m,接收端不加蓝光滤光片,非实时通信速率(峰值速率)682 Mbps时根据接收端星座图的误差向量幅度(error vector magnitude, EVM)测算的误码率为 $2.5 \times 10^{-3}$ <sup>[7]</sup>。2019年,团队利用系统3 dB带宽600 MHz的可见光收发系统验证了利用多载波传输提高系统通信速率的可行性,利用20阶的无载波幅相(20-CAP)调制解调技术,将信道划分为多个频段进行频分复用,有效提升了信道的频谱效率,利用bit-loading技术调整子载波调制阶数,并引入成型技术抑制了信道非线性效应,在3 dB带宽600 MHz不变的条件下实现了2 Gbps的非实时通信速率(峰值速率),通信距离0.12 m,误码率 $3.8 \times 10^{-5}$ 。

2018年,英国爱丁堡大学的哈斯教授团队用1颗红绿蓝黄的四色LED做光源,采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术,实现了4色波分复用总速率15.73 Gb/s的非实时可见光通信<sup>[8]</sup>。2019年,复旦大学的科研人员用1颗红绿蓝黄青的5色LED做光源,采用离散多音频(Discrete Multi Tone, DMT)调制技术实现了5色波分复用总速率15.17 Gbps的非实时可见光通信<sup>[9]</sup>。

### 2.3 高速实时通信的挑战

采用红绿蓝三基色或红绿蓝黄四色LED做光源,该类光源因为价格较贵,仅用于高端照明领域;因为一个LED器件内部封装了3颗或者4颗不同的LED芯片,故可以通过波分复用实现多路传输;因为没有荧光粉余晖对高速通信的不利影响,仅需解决高速调制驱动的难题;通常采用OFDM、DMT等高阶调制技术,实现通信系统的超高速。因为高速数据处理较为复杂,常利用任意波形发生器、存储示波器等设备来替代通信部件,通过收发一个数据帧,并采用数据的离线处

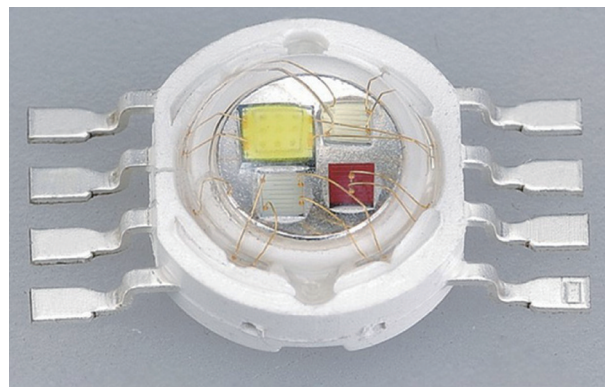


图5 4色LED灯珠(图片来源于铭洋光电网站)

理来简单估算通信性能,故难以实现数据通信的实时传输,通常用峰值速率来表征通信速率。若为此研发出整套的高性能专用芯片,才有机会实现实时通信。

OFDM技术在4G长期演进技术(long term evolution, LTE)中已经得到使用,是LTE三大关键技术之一,在5G仍然作为主要的调制方式。在移动通信中也早有商用的OFDM基带芯片,但是因为可见光通信中的LED光源属于自发辐射发光,光子的相位无法调控,造成可见光通信中的OFDM技术和射频无线通信中的OFDM技术有较大差异,需要对OFDM技术进行改进,所以可见光通信的OFDM基带芯片也需要重新研发。目前来看,可见光通信若采用OFDM等阶调制,基本上都是用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片来编程实现。因为FPGA芯片的高速处理能力有限,加上配套的A/D和D/A芯片的高速处理能力也有限,所以单路Gbps以上速率的高速OFDM可见光通信系统在专用OFDM基带芯片成功研发之前,一般都采用离线处理,无法做到数据的实时处理,也就无法实现实时通信。

## 3 可见光通信的应用

在技术发展的历史长河中,总是以满足购买者的应用需求为亘古不变的主流方向。购买者的需求可能是自发,也可以培育。因此,我把可见光通信技术的应用简单分为三大块:第一块应用

是电磁敏感区的无线通信,譬如:核电站、煤矿矿井、重点单位、电磁静默的军事环境等地区,这些地方电的无线通信技术不允许用,光的无线通信就具有不可替代性;第二块应用是基于原有照明网络希望能低成本增加通信功能,譬如:地铁站、商场、会议室等人口密集区;第三块是可见光通信技术的创新应用,譬如:灯光定位、身份识别、自给能通信。作为一项无线通信新技术,首先要挖掘创新应用需求,然后研发出原型演示系统,最后通过商业应用体现技术的使用价值。可见光通信的应用需求既包括数Gbps的高速无线通信需求,也包括若干个比特的身份识别码等低速应用需求。基于高速通信,可以做虚拟现实技术(virtual reality, VR)、人口密集区高速大容量上网等应用;基于低速可见光通信可以做车联网、灯光定位等应用。新技术的应用推广,需要科研人员确保技术稳定可靠,需要产品经理设计合适的产品形态,需要销售经理激发用户尝试新事物的兴趣,需要投资人找到新产品盈利的模式。这些条件的满足,对于可见光通信来说,还需要继续推进。

### 3.1 演示系统

可见光通信属于无线通信的应用新技术,所以该技术的创新应用挖掘以及应用演示系统的研

发具有重要意义。虽然通信的高速率是用户不变的需求,但是国内外关于10 Mbps以上速率的可见光通信应用演示系统的报道尚屈指可数。

2015年,中国科学院半导体研究所研发出了小型化的可见光百兆上网演示系统,该上网模块长100 mm、宽75 mm,采用1 W功率的商用荧光型LED做光源、PIN管做探测器,利用直接调制直接检测(intensity modulation with direct detection, IM/DD)技术(如图6所示),实现了高速上网。最高下载速率可达95.1 Mbps,平均下载速率超过90 Mbps。

2018年,该演示系统作为“基于LED的普适光通信”项目的代表性成果参加了由军委科技委发起,深圳市人民政府支持,中国科学院举办的第一届“率先杯”未来技术创新大赛,经过三轮比赛,最后获得大赛最高奖。2018年7月19—20日,100 Mbps可见光上网系统在深圳市市民中心一楼的展厅进行了公开展示,实现了帧率60 FPS的8 K视频在线直播演示,既激发了大众科技创新的热情,也推动了可见光通信技术的科普宣传。

为了测试不同速率等级可见光收发模块的实时通信性能,中国科学院半导体研究所基于1 W照明用荧光型LED和PIN探测器的可见光收发模块,结合500 Mbps电接口的千兆以太网转换器,在光学平台上实现了6.9 m的可见光上网。2019



图6 100 Mbps可见光上网系统实物及网速测试结果

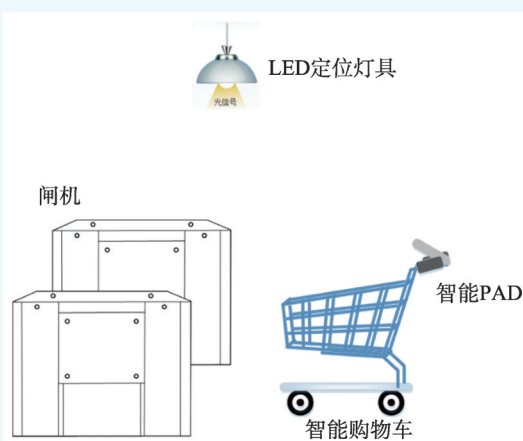


图7 超市可见光定位系统架构图(图片由华策公司提供)



图8 基于LED照明灯的可见光智能家居系统

年1月,该成果通过了信息产业专用材料质量监督检验中心的检测。因为数据带8B10B编解码功能,所以物理层500 Mbps的通信速率,在数据链路层对应上网业务的上下行速率分别为292 Mbps、294 Mbps。

### 3.2 商用系统

可见光通信的商用系统以低速通信应用为主,10 Mbps以上高速通信的商用系统较少。2019年10月29日,“中国之光网”报道,全球首架配备Li-Fi数据服务的商用飞机将于周三起飞,理论上可以为每个座位提供100 Mbps的通信速率,支持机内可见光通信局域网的网络游戏。法国航空公司结构制造商Latécoère已与照明巨头Signify(昕诺飞)公司(原飞利浦照明)以及韩国航空电子设备公司Huneed Technologies合作,为商业航空公司的Li-Fi进行“工业规模”开发。珠海横琴华策光通信科技有限公司采用LED光追踪技术实现了室内精准定位导航系统的商用。依托国家重点研发计划项目的资助,2018年,华策公司完成了对深圳沙井天虹商场约4500 m<sup>2</sup>卖场的灯具改造,安装LED定位T8灯管1500根,6寸LED定位面板灯260支,通过投放带灯光定位功能的智能购物车,如图7所示,实现了室内LED购物导航。2019年,华策公司在天虹商场的北京新奥店2700 m<sup>2</sup>卖场内实现了室内LED购物导航,在深圳人人乐超市8000 m<sup>2</sup>的卖场内安装了室内LED购物导航系统。

2009年,中国科学院半导体研究所研发出了可见光智能家居系统。2010年,可见光智能家居系统和可见光上网系统在上海世博会的两个展馆公开展示。2019年,中国科学院半导体研究所陈雄斌研究员为了把国家重点研发计划项目“可见光通信关键技术及系统研发”的成果产业化,研制出了如图8所示的“陈氏智能家居系统”。该系统的安装非常简单,如果家里已经覆盖WiFi网络,则只要换装“陈氏LED灯”,无需其他改造即可实现“换一盏灯步入智能生活”。该智能家居系统支持3种形式的智能家居控制方式:(1)利用

智能音箱语音控制智能家居LED灯的三段调光调色,控制电视的开关、换台、音量调节,控制空调的开关、直接调温,控制机顶盒的开关、换台、音量调节,控制遥控插座的开关,控制电扇等其他红外设备;(2)利用智能手机在全球各地联网后通过APP操控陈氏智能家居系统授权用户个人账户下的受控设备;(3)可以设置智能场景,比如晚上10:00自动关遥控插座,10分钟后自动关灯,日落后自动开灯(系统根据当地日落时间自动调整)。

2019年5月,陈氏智能家居系统在中国科学院半导体研究所的“中国科学院公众开放日”活动上公开预售。通过在Bilibili网上搜索“雁栖湖畔陈氏智能家居演示\_陈雄斌”或者直接搜索视频编号av67426633,可以观看陈氏智能家居系统的基本功能和使用效果的实景演示。

## 4 未来发展展望

现在,我们日常生活中的LED光源越来越多,可谓是无处不在。如果借助可见光通信技术,利用这些照明或其他显示的LED来复用实现无线通信,就能实现低成本的万物光互连,并有望构建高速、大容量的无线通信新体系。从已有研究成果来看,荧光型LED单路实时通信速率能做到1.39 Gbps,让我们对照明与通信的融合很有信心。中国的半导体照明市场大、基础好,这种基础优势是其他国家没有的。国内做可见光通信的团队很多,做出了许多代表国际最高水平的科研成果。将来,借助科技成果产业化的国家政策扶植,伴随产业界对高速、大容量、安全、低能耗无线通信技术的需求增加,可见光通信的商业化应用将越来越多。相信,只要科研界、产业界一起努力,定能实现可见光通信与照明或显示融合,灯光照到的地方就能自由通信。

致谢 感谢北京科技大学的金建力博士为单路2 Gbps非实时可见光通信系统的CAP调制性能验证承担了编解码及相关算法处理的工作。



### 参考文献

- [1] 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知. 中华人民共和国国务院公报, 2016(24)
- [2] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links. 13th IEEE International Symposium on Indoor and Mobile Radio Communications, 2000, 2: 1325
- [3] 陈雄斌, 毛陆虹, 迟楠. 可见光通信专用集成电路及实时系统. 北京: 人民邮电出版社, 2018, P.6—8
- [4] Li H L, Chen X B, Huang B J *et al.* IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(2): 119
- [5] Luo J, Tang Y, Jia H *et al.* Chinese Optics Letters, 2016, 14(12): 55
- [6] Min C Y, Chen X B, Mao X R *et al.* IEEE Photonics Journal, 2020, doi:10.1109/JPHOT.2020.2969413
- [7] Li H L, Zhang Y N, Chen X B *et al.* Opt. Commun., 2015, 354: 107
- [8] Bian R, Tavakkolnia I, Haas H. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2418
- [9] Zhou Y J, Zhu X, Hu F C *et al.* Photonics Research, 2019, 7(9): 1019



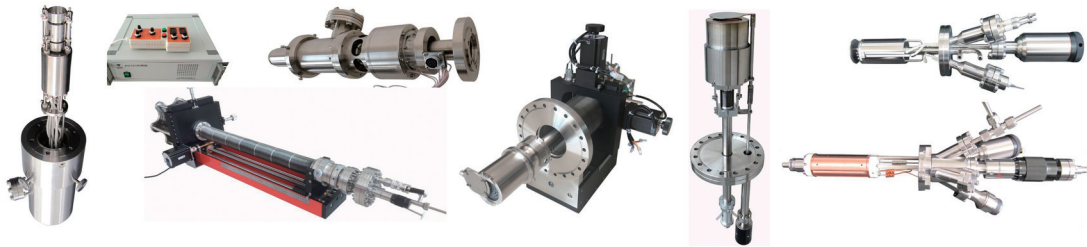
## 大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: [info@chi-vac.com](mailto:info@chi-vac.com) HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

