

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.2422-1 报告
(06/2019)

关于宽带通信的可见光

SM 系列
频谱管理



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的IPR政策述于ITU-R第1号决议中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R系列报告

（也可在以下网址获得：<http://www.itu.int/publ/R-REP/zh>）

系列	标题
BO	卫星传输
BR	用于制作、存档和播放的记录：用于电视的胶片
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余无线电以及相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
SM	频谱管理

注：本ITU-R报告英文版已由研究组按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版
2022年，日内瓦

© 国际电联 2022

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R SM.2422-1报告

关于宽带通信的可见光

(2018-2019年)

1 引言

ITU-R关于频谱管理的工作组提出了ITU-R 238/1号课题，该课题在2015年的无线电通信大会上获得通过。本报告的目的是了解（近距离）可见光通信（VLC）（更广泛采用的术语为：无线光通信）的使用方式，以及在何种程度上有助于缓解无线电频谱的拥塞。新技术的发展，结合可见光通信的使用，可以成为无线电频谱有效使用的可能性解决方案。

本报告讨论了下述主题：

- 在频谱使用方面，使用（近距离）可见光通信进行宽带通信的独特特性（技术和操作）；
- 使用（近距离）可见光通信（这可能包括：效率、干扰、健康风险、网络安全）的优缺点；
- 与宽带通信使用的可见光相关的新应用；
- 为了推动全球范围的（近距离）可见光通信的实施而面临的宽带通信发展的障碍（例如，监管、文化，和/或经济）；
- （近距离）可见光通信连接到当前电信系统的方式（固定和移动）。

2 可见光通信的发展历史

从远古时代到19世纪，所有可见光通信系统都依赖于人眼作为接收机。Alexander Graham Bell和Charles Sumner Tainter发明的光音机改变了可见光通信的属性。他们利用了硒电阻随光强度变化的事实，并通过将其连接到电话接收机以发送音频信号来使用此属性。到1950年，这些系统获得了进一步改善，然而，用于探测的大多数材料对红外线辐射有较高的敏感度，因此妨碍了可见光作为传输介质的使用。

发光二极管（LED）的使用开发了可见光通信使用方面新的兴趣点。具体而言，砷化镓（GaN）发光二极管[1]和白光发光荧光粉[2]的引入提供了可见光源，可以在更高的速度下进行调制，也不会丧失它们的主要照明作用。2004年，使用光电二极管的LED高速通信演示首次在日本进行。带有摄像头的手机的普及使它们成为了VLC接收机。研究人员开始使用液晶显示屏（LCD）和其他显示元件作为发射机。

日本的可见光通信联盟（VLCC）是研究VLC标准的第一个标准化组织。他们在2008年扩展了红外线数据协会（irDA）标准，使可见光频谱用于红外通信。

3 可见光和宽带

3.1 采用可见光的宽带应用可能性

在标准室内照明水平下，可见光无线接入速率从几b/s到超过10 Gbit/s。可见光通信有助于缓解低射频（RF）频段的拥塞，因为光谱可作为用于宽带通信的额外的频谱资源。

3.2 采用可见光的宽带通信的效率增益

可见光通信建立了定向光无线连接。例如，单个光链路可以源自天花板上直接指向地面的灯。其允许多用户共享相同链路。通过空间可重用性，许多VLC设备可同时容纳而不受干扰。

3.3 频谱使用

可见光通信使用可见光谱（波长在390和750 nm之间），并且可以使用照明和显示元件提供无线通信。

无线光通信（OWC）可帮助缓解较低射频（RF）频段的拥塞，因为光可作为用于宽带通信的额外的频谱资源。

3.4 受益于可见光通信的可行的应用/服务

可行的可见光通信应用可被归纳为以下三类：

- 图像传感器通信（ISC）。
- 低速率光电二极管接收机通信（LR-PC）。
- 高速率光电二极管接收机通信（HR-PC）。

关于低速率和高速率的定义，吞吐量阈值数据速率是在接收机的物理层输出端测量的1 Mbit/s。低于1 Mbit/s速率的吞吐量是低速率，高于1 Mbit/s速率的吞吐量是高速率。

图像传感器通信

ISC使得OWC将照明光源作为发射机，而将图像传感器作为接收机使用。可行性应用包括：

- 定位服务/室内定位和导航；
- 室内办公室/家庭应用（会议室、购物中心、博物馆、展览馆等）；
- 车载通信；
- 基于LED的标签应用；
- 点对（多）点/中继/通信；
- 医疗保健；
- 数字标识和基于位置的内容交付；

- 车载数据服务（飞机、火车、船只、公共汽车等）；
- 联网汽车和自动驾驶汽车；
- 水下/海边通信；
- 物联网（IoT）。

通过ISC进行观测的要求为：调光控制、电量控制、与环境光共存、与其他照明系统共存、与多个发射机和多个接收机（MIMO）同时通信、近点图像数据源、调制光源识别、低开销重复传输、图像传感器兼容性和定位。

MIMO通信可能包括MAC协议，因此启用相机的接收设备知道如何处理接收到的数据。ISC应支持光源作为近点光源时的通信，即，光源仅照亮少量图像像素。

ISC能够支持多个协调/非协调发射机和多个协调/非协调接收机之间的多个通信通道。

ISC应支持与各种摄像机的兼容通信，这些相机具有不同的图像感应采样率（读出时间）、分辨率和帧速率。具体而言，其支持恒定帧速率或可变帧速率；支持恒定分辨率或可变分辨率。

低速率光电二极管接收机通信

低速率光电二极管接收机通信要求光源作为发射机、低速光电二极管作为接收机。主要的应用与图像传感器应用类似。

LR-PC主要用于光标源（诸如LED标签和智能手机闪光灯等）作为发射机的应用。其可提供支持光源间切换的机制，允许用户获得持续的网络连接。

LR-PC可提供用于较高层开发和传输干扰协调技术的机制，并可支持链路修复机制以在不可靠信道保持连接并可降低连接延迟。

高速率光电二极管接收机通信

使用高速率光电二极管接收机将实现高速、双向、网络化和移动无线通信。该模式的主要应用如下：

- 室内办公室/家庭应用（会议室、购物中心、博物馆、展览馆等）；
- 数据中心/工业企业、安全无线（制造间、工厂等）；
- 车载通信；
- 无线回传（小单元回传、监视回传、局域网桥接）；
- 医疗保健；
- 车载数据服务（飞机、火车、船只、公共汽车等）；
- 联网汽车和自动驾驶汽车；
- 水下/海边通信；
- 物联网（IoT）。

在HR-PC中，所有应用程序的连续数据流都应支持双向功能以及需要低延迟的短数据包传输。应包括支持自适应传输和具有来自相同光源（多接入）不同数据流的多用户通信的机制。

4 与可见光相关的频谱管理问题

相对于射频频谱中的频率，VLC具有显著不同的传播特性。因此，干扰出现的概率很低，光通信也无需受到频谱监管机构的管理。

IEEE 802认为光通信操作应该被归类为免许可证操作，并且不受排他性许可的限制。该观点在由荷兰无线电通信局[18]委托进行的一项研究中得到了证实。该研究的一项结论是：“在商用部署前仍有困难需要克服。我们建议更多关注国际电联或IEEE的标准化工作，而不是政府规章，并将政府监管主要限制于对健康危害、碳排放量和商业竞争的管控。标准化工作将不仅提高工业产品间的兼容性，也将提高已部署的技术间的兼容性。”遵守相关的关于人眼安全和灵敏度的当地健康和法规非常有必要。使用VLC或OWC的设备应遵守任何有关杂散RF发射的当地法规，并应避免对RF频段造成干扰。

用于光通信的频率通常以其波长表示。由于玻璃的吸收和散射特性，最广泛用于光纤通信的波长为1550 nm，该限制不适用于正常空气条件下的VLC。因此，可用的频率范围为1.4-2.5 THz或400-700 nm。

4.1 问题1：频率机会和频谱划分

频谱机会可通过无线电（如2.4/5/60 GHz）与无线光（室内和室外）的结合而增加：利用Wi-Fi和Li-Fi之间可能的协同作用，在室外场景中注意雾和阳光的缓解作用，见[9]和[10]。可从[18]中了解到，“无线光通信在以下场景中的部署格外令人关注：许多具有高带宽需求的用户接入密闭空间中的网络的场景或无法应用传统无线电技术或不能提供必要的服务水平的场景。将从潜在用户群、建筑行业、通信行业、设备制造商和解决方案供应商中选出的代表聚集到一起将有助于进一步推动标准和未来发展所需使用案例及要求的发展，也将有助于确定引入OWC最有利的利基市场。”

4.2 问题2：频谱规划原则

VLC系统通常采用（现有的）LED照明系统部署，其中，LED的可见光的强度经过调制以将无线数据信息传输到设备。这样的照明系统通常涉及用于覆盖较大的区域，因此通常可为该区域的多设备提供数据连接。因此，这些设备需要一种协议以共享LED系统的容量，即一种媒介访问控制协议。这样的MAC协议通常以较小的部分划分LED系统的总通信容量，其中每个有效设备获得一部分以与其他设备竞争，这揭示出：当一个设备需要更多容量时，另外一个设备获得的容量将减少。使用MAC协议共享资源意味着难以为设备提供有保证的容量。通过MAC协议建立到设备的链路意味着连接的建立需要经过与其他设备的协商。该协商过程需要花费时间，且结果不能保证。该协商时间还降低了用于数据传输的净可用时间，因此会降低网络数据吞吐量。此外，LED照明系统需要接通以支持数据传输。但这种照明状态并不总是需要的，例如，当房间已有足够亮的日光或用户更喜欢没有光或只有暗淡的光的环境时。因此，当仅需要通信且没有照明时，VLC系统可能会带来不需要的额外能耗。

另一种方法是使用多个受限光束来传输数据信息（示例见[4]）。每个光束作为单个设备且需要足够的精度去控制。这样，该光束的全部容量只用于一个设备，因此，不再需要MAC协议，该设备也无需与其他设备共享容量。因此，提供给一个设备的容量可以得到保证，且MAC过程不会耗费时间，网络的净吞吐量也得到了改善。此外，光束只提供给那些有需求的设备，且只限于那些地方；因此，光束能量的使用得到了优化，而数据通信的能耗也实现了最小化。光束优先使用波长大于1.4 μm 的光，因为这使使用高达10 mW的光束功率成为可能，且不会损害眼睛。红外光束的控制需要控制过程，首先注册设备是否请求服务，随后定位设备，并且利用该定位信息将光束控制到正确的方向，从而建立通信链路。红外光束控制系统在需要的地方和时间提供通信容量，因此以最节能的方式运转。

信道模型是对可用光谱进行“系统内”管理的常见方法，可通过具体应用的不同技术标准来进行管理。可多信息请见[17]。

4.3 问题3：国际和地区统一

可见光谱最好符合或遵循国际标准（即欧洲ETSI），任何系统和设备也应遵循各国的法律和法规。然而，重要的是可见光通信不会造成任何健康危害。其应以正确且安全的方式安装，因此不会造成任何有害电磁干扰（EMI）。

5 通过可见光进行短距离宽带通信的技术和操作特性

本节包括取自[16]的产品和原型内容。这些不一定是宽带应用，但包括在内以展示可用的技术。

5.1 可见光通信发射机

载波频率：载波频率将限制于可见光频段。

传输方式：ITU-R将为低数据速率和高数据速率通信提供多种物理可见光设备操作模式，以此在给定光源上优化可用光带宽的使用，以支持图像传感器通信、低速率光电二极管通信和高速率光电二极管通信。

眼睛安全与闪烁：调制光在光的频率和强度方面对人眼是安全的。此外，调制光不应刺激光敏性癫痫等疾病。

调光控制：该标准将支持所有应用的调光控制。

通信范围：通信范围取决于多种外部因素（信号放大、信号准直、源功率等）。这些是实施方面，仅作为指南提供。委员会将同意使用相同的信道模型来评估提议方案的性能功能。

与环境光共存：该标准将与环境光共存，环境光可以在发射机的表面上反射并且具有三种类型的可见光通信服务组。

与其他照明系统共存：该标准将与其他照明系统共存。

发射机识别：当接收机或发射机移动到另一个位置时，该标准将支持识别发射机的方案。接收可追踪发射设备的发射机识别。

5.2 可见光通信接收机

如果应用程序需要使用，VLC接收机测量可见光强度并解码传输的信息。

作为用户设备的一部分，一个OWC接收机应该是简化的和低成本的，且不需要繁琐的对齐，并能捕捉足够的光功率以实现高下行数据容量。因此，其应具有大视角和大光圈。然而，增加光电探测器的有效面积通常伴随着带宽的减少，正如“光学扩展量”原理（其描述了如何在角度和面积方面“扩展”光）揭示的那样，光圈乘以立体角不会减小。可用于扩大接收机孔径的鱼镜头，或诸如复合抛物面聚光器反射镜的非成像光学器件通常用于太阳能聚集。二维快速光电探测器阵列与各个电子前置放大器和求和级共同集成，可以保持较大的带宽[11]。或者，可通过将光收集功能与光检测功能分离，来分别优化这些功能。

宽表面光栅耦合器（SGC）可以将与波导集成的入射光收集到快速光电二极管，以支持多Gbit/s OOK接收[12]。通过一系列SGC加之一个片上合路器，可以进一步扩展光圈而不会影响带宽。“光学扩展量约束”可以通过 λ 转换接收光并将其限制在荧光团掺杂的平板波导中来消除[13]。

特别是对于光束控制的OWC，需要定位和追踪用户设备。例如，可使用Wi-Fi技术、60 GHz天线方向图归零[14]或由廉价相机监控的用户设备上的红外LED标签等方法来实现定位和追踪。

无线光通信尤其适用于由于多种因素的组合而使无线电（或将要）不可用的环境：

- 频谱稀缺；
- 需要非常高的容量；
- 不愿意使用无线电技术；
- 立法；
- 需要在建筑物内进行无线传输。

光通信适用于不同的系统。其在这些系统中的实施取决于要求的传输范围。基于这些范围，OWC应用可被分为五类，分别为：

- 超短距离无线通信是应用于芯片到芯片通信的范围，其中OWC可以通过一种称为“自由空间光互连（FSOI）”的方式应用。它允许芯片之间通过光束直接互连。该应用可以解决当前基于铜的电互连具有的一些问题，如数据速率、电磁干扰和能耗。
- 短距离无线通信通常适用于无线体域网（WBAN）和无线局域网（WPAN）应用。它旨在收集和传输个人附近的数据。正在医疗保健领域部署使用OWC的新系统，它称作光WBAN（OWBAN），因为它可以为基于RF的WBAN提供安全且无干扰的替代方案。

中等距离无线通信是应用于无线局域网（WLAN）的范围。目前，此范围类别内的OWC系统可分为VLC和光束控制红外光通信。VLC通常构建于现有的LED环境照明系统，并将LED重用于数据调制。VLC系统因此覆盖较广的范围，在此范围内多用户终端需在合适的MAC协议下共享容量。光束控制红外光通信只提供设备间的直接连接。多光束可单独为房间内的用户终端服务，因此每个终端能得到有保证的容量，而不会与其他终端发生冲突。这些系统可替代或为当前系统（例如Wi-Fi）分流，因为与基于RF的WLAN相比，其工作在较高的频谱范围。中等距离无线通信的其他应用包括车辆间和车辆到基础设施的通信

长距离无线通信作用的范围为300 m到大约10 km。其因此适用于例如企业和城市市场的建筑物到建筑物的连接和无线城域网等场景。OWC采用一种称为“自由空间光通信（FSO）”的系统，它是发射机和接收机之间的直接光束连接。

超长距离无线通信作用的范围达到约84.000 km，因此最适用于航空和航天通信。超长距离无线通信采用类似FSO的系统，但系统仅使用非常窄的光束和真空信道来传输和接收信息，该系统称作光无线卫星网络FSO（OWSN FSO）。

在预测用于接入技术的具体应用方面已经做出了很多努力。但实际上，几年后什么是最重要的应用和设备很难预测。让我们想想“互联网”“智能手机”“平板电脑”和“导航系统”，这些应用的成功只有在投入使用后才能被预测。

应用的成功取决于全球设备/操作系统/固定和移动基础设施/现有应用生态系统组合的成功。

5.3 当前的标准化活动

IEEE 802.15工作组在2011年完成了关于“使用可见光的短距离无线光通信”的IEEE标准802.15.7-2011[3]。修订IEEE Std 802.15.7-2011的项目于2014年12月获得授权，项目名称为无线光通信（OWC），其包括LED-ID、光摄像机通信（OCC）和LiFi，该项目现在仍有效[6]。它打算使用10,000 nm至190 nm的光波长开发用于光透明介质的标准。2017年3月，工作组被重新划分。802.15.7m将继续研究光摄像机通信，而IEEE 802.15.13任务组成立了使用高速光电二极管[7]的“多兆比特/秒无线光通信（OWC）”项目。此外，IEEE 802.15车辆辅助技术（VAT）利益集团正在考虑将VLC作为通信选项。

IEEE 802.11工作组在2016年年底成立了关于光通信[8]的主题兴趣组（TIG），旨在确定使用光介质进行无线通信所带来的技术和经济机遇。2018年，小组的项目授权申请获得了批准。802.11任务组bb负责标准文件的制订。

ITU-T第15研究组负责制订光传输网、接入网、家庭网络、电力设施网络基础设施、系统、设备、光纤和光缆相关的标准。这包括相关的安装、维护、管理、测试、仪器仪表和测量技术以及控制面板技术标准，以推动向智能传输网络的演进，包括为智能电网应用提供支持。该研究组负责G.vlc标准，名称为“高速室内可见光通信收发器 – 系统架构、物理层和数据链路层规范”。

5.4 各国与VLC相关的活动

5.4.1 中国的VLC研究

华为、中国电信、三安光电、深圳艾比森、洲明科技、雪莱特和清华大学是中国的几家专注于开发基于VLC研究和产品的机构/公司。

5.4.2 日本的VLC研究

庆应义塾大学的Nakagawa实验室、松下电器、卡西欧、日本电器公司（NEC）和富士电机株式会社是日本的几家进行VLC研究与开发相关产品的机构/公司。

5.4.3 韩国的VLC研究

汉城国立科技大学、韩国国民大学、公州国立大学、南首尔大学、三星、LG和韩国电子通信研究院（ETRI）是韩国的几家进行VLC研究与开发相关产品的机构/公司。

5.4.4 荷兰的VLC研究

埃因霍温科技大学电信技术与电磁学系、电光通信集团、昕诺飞（Signify）（最近称为飞利浦照明），荷兰皇家电信（KPN）和KIEN也是VLC相关项目的合作伙伴。

5.4.5 土耳其的VLC研究

研究VLC的主要研究机构有：Tubitak Bilgem、Okatem、Ozyegin大学和伊斯坦布尔Medipol大学。Ford Otosan、Farba、Aselsan和土耳其电信是VLC相关项目的合作伙伴。

5.4.6 欧盟与中国合作

欧盟-中国无线光网（IoRL）合作研究项目由Eurescom GmbH管理，协作单位包括布鲁内尔大学、维维亚解决方案公司、莱斯特大学、巴黎高等电子研究所、Mostlytek、Issy Media、建筑研究学院、弗劳恩霍夫集成电路研究所、国家民主科学研究中心、Joda、华沙理工大学、Arcelik、RunEL、霍隆技术学院、智能基础设施创新中心基金会、清华大学、Leadpcom和上海飞乐/亚明。此项目为建筑物开发了5G网络功能虚拟化/软件定义的网络，其中混合VLC和毫米波无线电接入网络点集成在遍布各处的照明系统接入点内。

5.5 学术界、产业界和研究机构与VLC相关的活动

5.5.1 Basic6

Basic6是美国的一家初创公司，开发室内定位系统GeoLiFi，该系统使用商店的照明基础设施匿名向客户和员工提供邻近消息、产品信息、相关促销和可视化购物清单。同时，该解决方案还为零售商提供了诸如客户和员工参与度以及商店和部门停留时间等指标的详细分析。该公司致力于开发软件，并积极与其他为LiFi（例如OLED COMM[28]，法国凡尔赛Saint-Quentin-en-Yvelines大学的一家初创公司）提供硬件的照明公司合作。

5.5.2 弗朗霍夫海因里希赫兹研究所（HHI）的LiFi热点

弗朗霍夫海因里希赫兹研究所开发的LiFi热点允许安装专用的高速网络而无需安装电缆。该系统可在高达30 m的距离内提供高达1 Gbit/s的高数据速率，且其尺寸很小易于对齐同时安装成本低廉。原型已安装在德国迈瑙岛（康斯坦茨湖）的一间会议室。HHI还提供可见光通信组件，使用三种浅色（RGB）的自发白光LED，速度高达3 Gbits/s。

除了向一个方向发送数据的LiFi广播模块之外，弗朗霍夫IPMS开发的技术还提供了实时和双向“全双工”通信的可能性。

5.5.3 Hyperion科技

Hyperion科技是一家土耳其初创公司，开发先进的基于无线光通信的解决方案，为接入和回传级别的下一代无线网络提供支持。该公司参与了802.15.7r1标准化项目并陆续加入了802.11光通信和802.15.13无线光通信标准化组。

5.5.4 Lucibel

Lucibel是一家法国公司，专注于设计新一代基于LED技术的照明解决方案，已经开发并正在推广欧洲第一个完全工业化的LiFi灯：Ores LiFi[5]。Lucibel LiFi解决方案通过高达42 Mbit/s的双向线路速率部署了全无线网络。Lucibel LiFi系统在网络内提供高速移动连接，同时支持多路接入和“切换”。每个LiFi灯可同时为多个（最多八个）LiFi站提供服务。系统可实现的切换功能允许用户自动保持从一个灯到另一个灯的稳定连接。Sogeprom, Société Générale集团的主要房地产开发子公司，通过安装Lucibel原型，在其巴黎总部第一次试验了LiFi高带宽。微软也在其伊西莱穆利诺创新中心实施LiFi解决方案，以为其客户提供下一代无线连接。

5.5.5 Luciom

LUCIOM是一家成立于2012年10月的法国初创公司。公司有多种产品，例如：

- Geo VLC：具有不同功能的室内用低带宽发射机/接收机工具包。
- 具有LED LiFi互联网发射机和USB LiFi/红外加密狗的高数据速率解决方案，提供20 Mbit/s（下行链路）和5 Mbit/s（上行链路）的数据速率。

5.5.6 LVX系统

LVX系统是一家位于肯尼迪航天中心的美国公司，拥有专利技术，可提供高质量的LED灯系统，可安全地传输高速数据。他们最近与NASA签署了《空间法协议》。

5.5.7 pureLiFi

pureLiFi是一家由爱丁堡大学的哈斯教授于2012年成立的初创公司，经过四年的广泛研究，其旨在推广可见光通信技术。该公司首先开发了一种名为Li-Flame的吊顶式元件，它能够使用标准的LED灯进行10 Mbit/s下行链路和10 Mbit/s上行链路通信，通信范围可达3 m。pureLiFi现在将Li-Flame发展成为LiFi-X，这是一种于2016年世界移动通信大会上推出的新一代驱动器和接收机。LiFi-X提供连接任意支持LiFi的LED灯的接入点。它提供了40 Mbit/s下行链路和40 Mbit/s上行链路的全双工通信，并为每个LiFi接入点提供全移动性和多用户接入。

5.5.8 Velmenni

Velmenni是一家爱沙尼亚的初创公司，在爱沙尼亚塔林的各种办公室和工业环境中成功试用了LiFi技术，目前正在进行大量试点项目，以便在不同的工业环境中利用可见光通信（与空客合作在飞机上试验该项技术）。原型包括一个LED收发器和一个通过USB连接笔记本电脑的外部光电探测器接收机。系统在双工状态（上行链路和下行链路）工作，报告的数据速率高达1 Gbit/s。Tx-Rx之间的距离证实为几十厘米。但是，该原型发展成为商业产品还需要花费几年时间。

5.5.9 清华大学先进的集成可见光和电力线通信系统

清华大学是中国的国立大学。该大学专注于PLC和VLC关键技术的研发和产业化。经过几年的研发，清华大学提出了一个先进的集成可见光和电力线通信¹系统。此系统为电学和光学领域的信号处理提供了统一的框架。这一系统支持没有射频信号或在高射频灵敏度环境下的信息服务，如在深矿和电力隧道、发电站、飞机、工厂和医院等环境下。

此系统利用电力网络和照明网络之间的自然连接，以电力线通信（PLC）为骨干，基于LED的可见光通信（VLC）接入点，为移动业务提供支持。这一系统利用单频网络有效增加系统覆盖范围，显著减少因用户移动和物体遮挡造成的通信中断。该系统在传输中采用放大转发方式，降低了实现成本、功耗和灯具内的空间需求。

这一系统已在国家电网供电电缆的地下隧道中使用。

5.5.10 欧盟中国研究项目 – 无线光网络

无线光网络（IoRL）是欧盟-中国地平线2020 5G研究项目的联合项目，利用现有电灯接入点的普及性和可访问性、毫米波和VLC技术的宽带容量以及SDN/NFV的灵活性，为建筑物开发宽带通信解决方案。此项目从工业角度设计了一种电子足迹足够小的无线照明解决方案，可以集成到现有电灯照明系统和各种形式的消费产品。

6 进行可见光决策的其他相关问题（用户需求、社会经济问题）

考虑到眼睛安全，人眼可见的调制光应足够安全，包括光的频率和强度（例如，IEC 60825-1:2014），同时，调制光不应刺激诸如光敏性癫痫等的疾病。

眼睛安全问题与相关参考

人眼最脆弱的部分是位于眼睛后部的视网膜，它执行实际的视觉过程。可见光（明显的）到达视网膜，为了避免对视网膜造成任何（永久性）伤害，功率暴露应受限。在VLC中，LED系统设计用于照明，并且通常发出发散的光锥，在实际情况下不会损害视网膜。在光束控制通信中，可见光光束（诸如来自激光指示器的光束）明显可能造成损害；他们的功率应该保持在几分之一mW以下。然而，当使用红外线光束时，人眼的生理机能暗示光束的强度在到达视网膜之前被严重衰减（由角膜、晶状体、玻璃体）。因此，在超过眼睛安全限值之前可允许更高的功率；在超过1 400 nm的波长下，可以接受高达10 mW的连续功率。

¹ 电力线通信的另一术语是电力线电信（PLT）。

关于眼睛安全问题的标准在规范性文件IEC 60825和ANSI Z136中给出。[18]中的研究建议“对于无线光通信，眼部和皮肤安全是最重要的问题。尽管公众使用的无线光通信在大多数情况下是安全的，建议更仔细地检查在强光源附近进行安装和维护工作的人员的安全问题。”

接受与部署

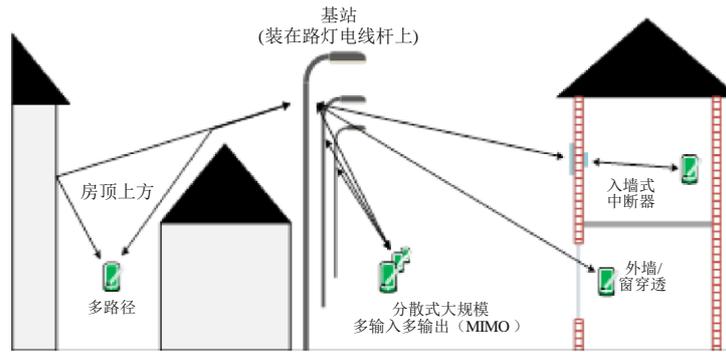
所有通信系统都应注重功能性和对于用户数据的保护。[18]中强调：“对于OWC的接受和部署将受益于与现有或正在出现的普及性无线标准（如Wifi）进行交互的清晰愿景，例如在认证、加密和接入点之间的无缝漫游领域进行交互。建议在可能的情况下推动现有解决方案的重用，例如在认证和信号加密方面。这样的重用将简化OWC和无线电通信技术间交互机制（如切换）的发展过程。此外，具有相对较小用户群的新型开发方式可以受益于具有大用户群的解决方案的改进”。

工业和制造业

在工业和制造业领域，现有的无线解决方案主要用于满足鲁棒性、安全性和低延迟的高要求。工业协议（即ProfiNet）为客户端分配定期网络访问，并确保在特定时间段内传输数据并实现低延迟。工业无线的吸引力还在于其容易部署且拥有较强的灵活性。基于VLC的解决方案可以为基于RF的解决方案提供如下益处：

- i) 密集部署的适用性：制造业属于密集无线场景，需要维护多链路并同时提供上述高质量服务。VLC可以以低延迟传输安全的无线通信，因为它在非常小的单元中有很好的传播条件。此外，VLC可在数据卸载方面作为RF系统的补充。
- ii) 与其他RF业务的共存：工业无线网面临的一个重大问题是如何与其他业务共存。在相同频谱下使用其他RF链路需要有协议的约束，诸如“先听后说”，这可能带来不可预见的延迟，因此与低延迟要求相矛盾。在工业无线网中使用专用频谱是一种方法。VLC可以作为另一种缓和当前局面的方法。需要注意的是，环境光会对VLC带来小幅干扰，这一点将在“VLC技术可行性”部分讨论。
- iii) 抗干扰的鲁棒性：攻击者可以通过简单的RF设备轻松地从工厂外较远的距离对在用的RF频谱造成阻塞。使用基于RF的无线链路代替电缆显然对连接的制造设备的安全操作具有潜在的不利影响。此外，强电磁干扰的存在可能不适合RF通信，例如在钢厂、核电站或发电厂。另一方面，VLC对RF干扰和EMI是无效的，传播被限制在了工厂内部。

图 1



SM.2422报告-01

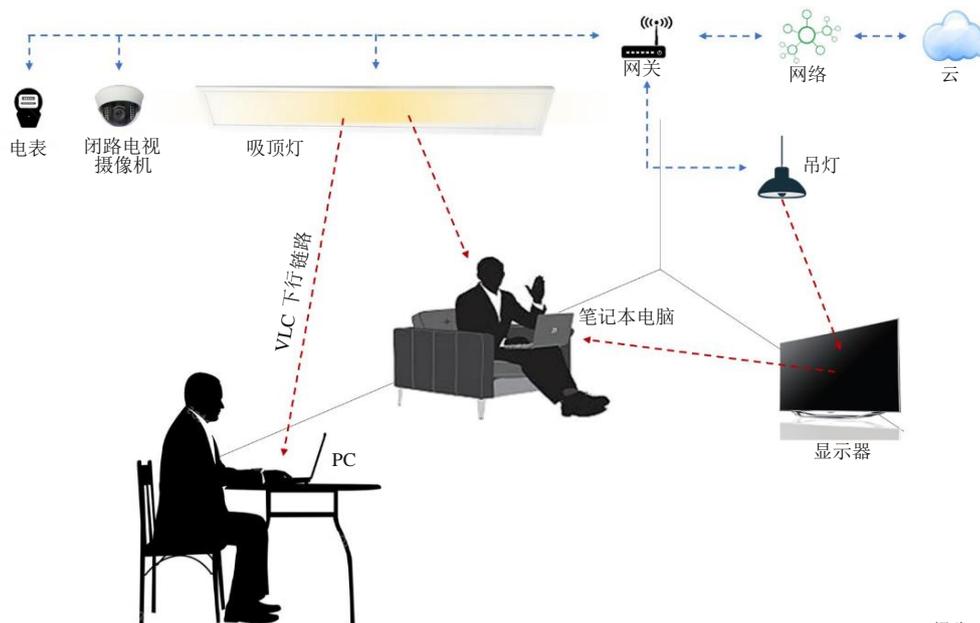
智能家居

目前，智能家居通过复杂的有线和无线连接，包括了多种家用电器、能源管理系统、医疗保健系统、先进的多媒体服务以及监控和安全系统。智能家居的联网设备可以以交互式 and 独立的方式操作，这些性能从多方面改善了居民的生活质量，例如，日常事务的自动化、健康服务的提供、合理化能源消耗、个人效率的提高、家庭安全的增强以及娱乐等。

智能家居使用本地无线网络方法，并基于诸如局域网（LAN）、体域网（BAN）或个人局域网（PAN）之类的标准，这些标准用于描述从12至100米的范围较小的网络，如蓝牙、ZigBee、WiFi、Z-Wave等。

VLC可用于连接传送敏感信息的设备，如闭路电视摄像机、婴儿监视器等，并且可以成为更为更加私密和安全的网络[19]。

图 2



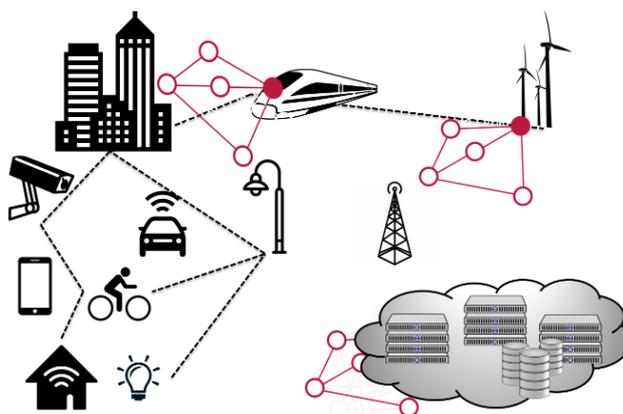
SM.2422报告-02

智慧城市地图（城市基因组）

城市伴随着复杂的机制不断发展。这不仅仅由于城市中居住的人，也因为这些居民本身就是复杂的“系统”。生活本身似乎通过颠覆性和指数性的发展变得越来越复杂。在这方面，技术发展，尤其是ICT领域的发展，发挥了重要作用。然而，作为主要目标的生活质量并不会受益。大量的机遇和显著的挑战是并存的。为了取得实质性的发展，需要采用一种完整的系统化方法，而增量、线性思维和设计是远远不够的。开发这样的方法的第一步应该的理解城市的“硬件”和“软件”之间的差别，它们分别对应人体或生物实体的“身体”和“思维”、或者“基因型”和“表现型”、“房屋”和“家庭”。前半部分是可察觉的，但后半部分不是。通常而言，前半部分被称作“基础设施”而后半部分被称作“上层建筑”。显然，基础设施和上层建筑是相互依存的，不能单独发挥作用。这便成为了一项挑战，因为基础设施属于技术科学的领域，而上层建筑方面的专业知识主要存在于阿尔法科学中。

在基础设施方面，ICT网络变得越来越重要。这也是无线和光子发挥核心作用的领域。可以预见，所有光学、光子网络都将是新一代光纤和光子集成电路（PIC）的主要组成部分。核心网和城域网中就是这种情况。靠近接入点，无线技术将发挥作用。作为一种未来发展方向，可以预见，网络端将会实现从固定到无线的过渡。这将成为公共设施中重要的一环，具体而言，其充当“路灯”的作用。请注意，仅荷兰就有近400万盏路灯。后者可以配置在光网状网络中。从路灯开始，使用所有750万所房屋和300.000栋建筑物的下一代多功能窗户中的中继器就可以实现带宽到家庭的传输或从家庭传输带宽。在房屋和建筑物内，VLC将成为未来应用最广的技术。

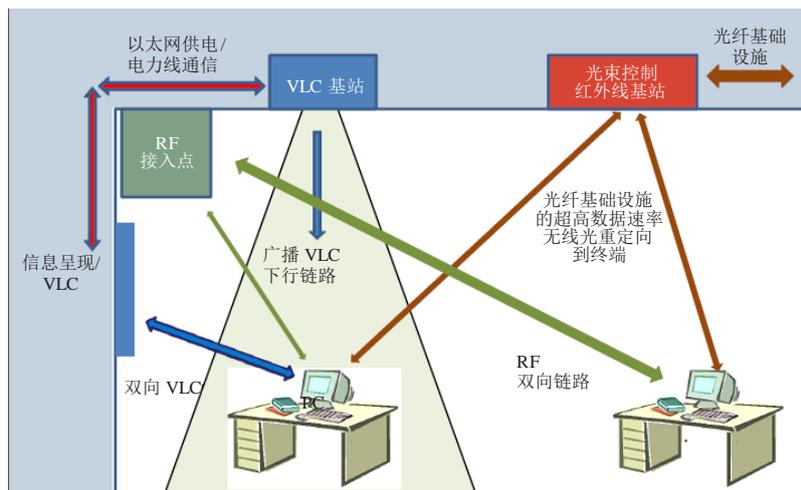
图 3



SM.2422报告-03

考虑到房屋和建筑物自身及他们如何通过更多物理基础设施在公共场所连接，我们可以明显发现，建筑环境学科方面的专业人才可以贡献自己的专业知识。作为一种近乎不合常规的发展产物，房屋、建筑物、公共基础设施和上层建筑可以被看作是具有身体和思维的生物，它们的基因型和表现型正在被研究。的确，如果今天人类基因组可以在一小时内以不到100欧元的价格测定，那么对于这些简单得多的物理结构来说有什么不可能呢？接下来又将有多少选择会实现呢！诸如能源、安全和可持续性标签一类的宏观参数将被更精确地计算出来，改进方案也将被设计并得到评估。

图 4



SM.2422报告-04

观察可被发掘或馈送到房屋、建筑物和公共基础设施的数据，显而易见，数据科学中心是发挥关键作用的中心环节。将原始数据提炼为信息、知识和新的智慧将为基础设施和上层建筑、网络和服务、房屋和家庭带来数不清的应用。他们需要通过一种安全的方式来设计。同样地，可使用复杂自适应系统图和矩阵理论对能对所遇到的复杂系统进行建模的方法进行研究。

上述内容通过一种完整的系统方法，为智慧城市提供了整体现实场景模型。

在用户需求和社会经济方面需要更多的研究，因为应用领域非常多样化并且没有进行充分探索。如[18]中所述：“建议促进（国家）工业研发与学术研究之间的密切联系，因为正在探索的OWC技术仍然存在很多差异。对于可能成功的技术的早期识别、促进技术间的融合和交互将促进工业化发展并将加速市场推广。”

关于VLC设备在建筑物和办公室的实际布局方面也进行了研究，如[18]中所述：“OWC没有被替代，其正作为用于建筑物内通信基础设施的其他传输技术（如Wifi）的补充，其中，OWC可以从Wifi中卸载需要大量带宽的应用程序。考虑到与当前Wifi技术的共存，我们建议设计和建造办公室、公共空间和房屋，这样便可充分发挥OWC的潜力，尤其在创建适应足够的OWC接入点和回传的固定（有线）基础设施方面。将数据传输与使用以太网电缆（以太网供电）的光无线接入点供电相结合越来越引人注目，因此建议出于建造目的给予其充分关注。”

联网汽车和自动驾驶汽车

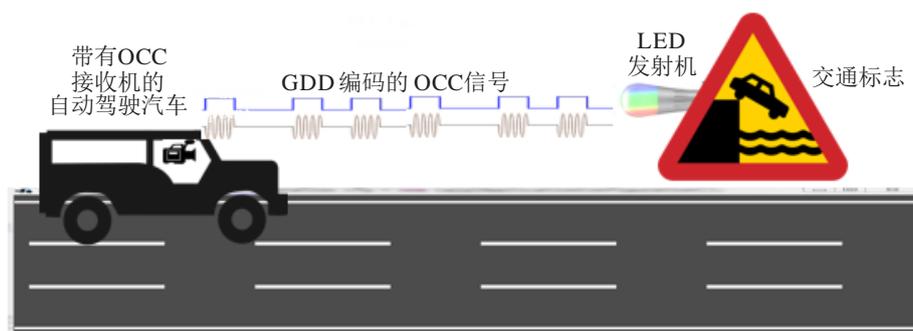
VLC可应用于联网汽车和自动驾驶汽车。通常，司机在驾驶时会看交通标志，而自动驾驶汽车可通过图像识别技术识别交通标志，但有时会产生误解。联网汽车和自动驾驶汽车在这方面的一个示例是使用图形数据字典（GDD）识别交通标志。GDD的开发旨在为ISO TC204创建的现有道路交通标志和象形图的传输编码提供通用基础。它的编码系统已经发展成一种独立语言，使得数据能够被解释，而不用考虑语言或地区差异。这是为了支持智能交通系统消息。需要采用一种方法将现有的大量道路交通标志和象形图描述为功能组 – 这是通过信息元素实现的。

在发射机部分，设计了一种建议的GDD数据编码器（生成器）。编码的数据可通过两种类型的发射机进行传输，一种是简单地将LED信号发射机与现有的交通标志一起安装，LED传输适合特定交通标志的编码数据。这种简单的发射机类型的优点是可被应用于现有的每个交通标志。每个标志间的唯一差异是从中传输的独特编码数据。

在接收机部分，GDD接收机由带有图像传感器和数据解码单元的摄像机组成。这些图像可以在光学相机镜头后面的图像传感器上感测，并且接收通过光学摄像机通信传输的数据[20]。

图 5

从交通标志接收OCC信号的自动驾驶车辆



SM.2422报告-05

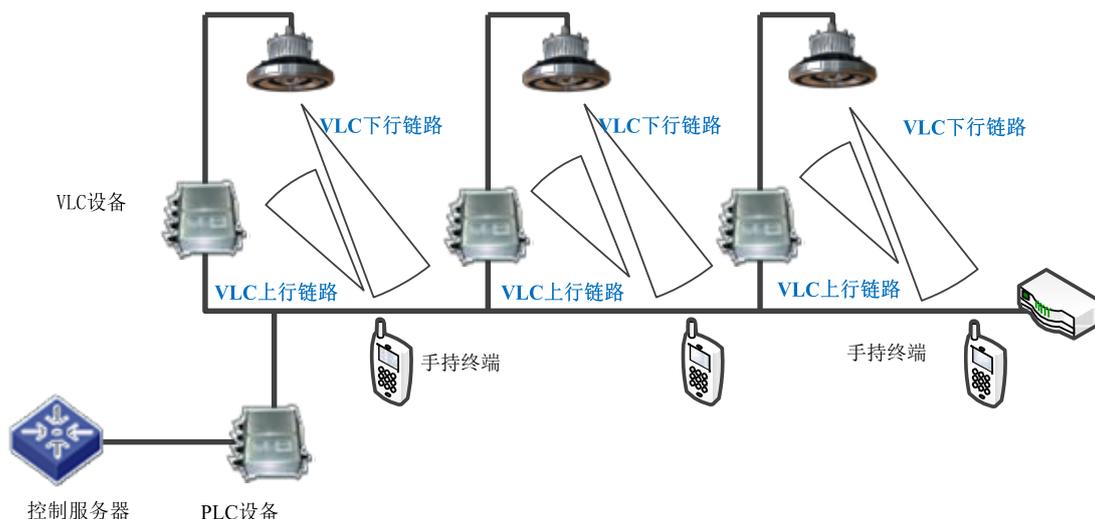
智能采矿和隧道监控的信息传递

可见光通信技术能够支持通信、数据交换和定位功能，在智能采矿和隧道监控中有广泛应用。

鉴于矿井或隧道位于地下几十到几百米的深度或长度超过一公里，因此提出了上述通信功能要求。由于矿井或隧道的结构和电缆的物理特性，无线信号的衰减非常大，且有线系统的布线非常困难。为了开展维护工作，检查员需要定期与控制中心人员进行沟通。同时，在发生连接故障或事故时，相关方绝对有必要联系控制中心进行故障排除和救援。可见光通信不受矿井或隧道结构的影响，因为它使用照明设备进行信息获取或交换（更具体而言，结合电力线通信和可见光通信）传输语音和视频信息，并保持与控制中心的实时通信。

图 6

VLC-PLC系统和控制服务器



信息交换的要求包括固定传感器的数据传输和移动应用的数据传输。该系统可以将在线监测、视频监控、电缆接头的红外温度传感器集成设备、温度、风机、水泵、接地电流、火情、煤气与入侵报警和管道防御等感应设备结合，在线实时传输监测数据。监控数据的定期传输将更准确和及时地识别并帮助排除故障。此外还可以缩短抢修时间，减少相应损失。在此过程中，巡检人员可以利用该系统与控制中心保持数据交换和服务交互，从而大大提高在线监测的自动化水平以及巡检效率。

建筑物中用于媒体和娱乐的无线光网络

建筑物中的无线网络遭受拥塞、干扰、安全问题、传播受限和室内定位精度差的困扰。无线光网络（IoRL）项目开发了一种更安全、更可靠、可定制的智能建筑网络，能够可靠地从遍布建筑内的接入点提供更高的吞吐量（楼内 $> 10 \text{ G bps}$ ）且延迟小于 1 ms ，同时最大限度地减少干扰和有害的电磁辐射暴露，并提供小于 10 cm 的定位精度。因此，这一网络解决了建筑物中的宽带无线接入的问题，并确定了国际电联的全球标准。楼宇业主将受到激励，为其物业实现这一解决方案寻找资金以增加楼宇的价值，进而刺激楼宇宽带网络产品市场的发展，造福社会并增加全球的国内生产总值。IoRL项目正在开发一个便携式概念验证演示器，作为全球解决方案标准化的基础，同时利用VLC的宽带容量、毫米波、NFV/SDN技术的灵活性以及现有电灯接入点的可用性。此方案展示了如何将重新进行工业设计的VLC和毫米波无线光解决方案集成到现有电灯，使其成为建筑物内各房间的通用电磁接入点，并在项目的最后一年展示了其在家庭、博物馆、火车站和超市中的运行状况。

7 结语

OWC、标准化活动和现有光产品的发展显示了VLC已成为一项对解决无线电频谱分流具有诸多益处的成熟技术。

可以得出如下结论：VLC设备及VLC频谱的管理不是一项监管任务，而是应该按照技术标准进行组织的任务。参与VLC研究的标准化组织和参与传统无线电应用研究的标准化组织应开展紧密合作以获取更大的益处。

参考文献

- [1] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, “Candela Class High Brightness InGaN/AlGaIn Double Heterostructure Blue Light Emitting Diodes”, *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994.
- [2] J. S. Kim, *et al.*, “White-light Generation Through Ultraviolet-emitting Diode and White-emitting Phosphor”, *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 17, pp. 3696-3698, 2004.
- [3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.7: “Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light”, in IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp. 1-309, Sept. 6, 2011.
- [4] A.M.J. Koonen, C.W. Oh, K. Mekonnen, Z. Cao, E. Tangdionga, “Ultra-high capacity indoor optical wireless communication using 2D-steered pencil beams”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20):7482669.
- [5] Jaesang Cha *et al.*, “A new band plan for IEEE802.15.7m”, Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/17/15-17-0174-00-007a-a-new-band-plan-for-15-7m.pdf>
- [6] IEEE 802.15.7r1 Short-Range Optical Wireless Communications Task Group http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm
- [7] “Multi-Gigabit per Second Optical Wireless Communications (OWC) with Ranges up to 200 meters” <https://development.standards.ieee.org/get-file/P802.15.13.pdf?t=92735500003>
- [8] http://www.ieee802.org/11/Reports/1ctig_update.htm
- [9] M. Ayyash *et al.*, “Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges”, in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016.
- [10] D. Schulz *et al.*, Long-Term Outdoor Measurements Using a Rate-Adaptive Hybrid Optical Wireless/60 GHz Link over 100 m”, Proc. ICTON 2017 (invited).
- [11] A.M. Khalid *et al.*, “10 Gbps indoor optical wireless communication employing 2D passive beam steering based on arrayed waveguide gratings”, Proc. IEEE Summ. Top., TuC2.3, Newport Beach (2016).
- [12] J. Zeng *et al.*, “A 5Gb/s 7-Channel Current-mode Imaging Receiver Front-end for Free-Space Optical MIMO”, Proc. IEEE MWSCAS, Cancun (2009).
- [13] Z. Cao *et al.*, “200 Gbps OOK Transmission over an Indoor Optical Wireless Link Enabled by an Integrated Cascaded Aperture Optical Receiver”, Proc. OFC, PDP Th5A.6, Los Angeles (2017).
- [14] S. Collins *et al.*, “High gain, wide field of view concentrator for optical communications”, *Opt. Lett.*, p. 1756-(2014).
- [15] A.M. Khalid *et al.*, “Bi-directional 35-Gbit/s 2D Beam Steered Optical Wireless Down-link and 5-Gbit/s Localized 60-GHz Communication Uplink for Hybrid Indoor Wireless Systems”, Proc. OFC, Th1E.6, Los Angeles (2017).
- [16] Ivica Stevanović, “Light Fidelity (LiFi)” Federal Office of Communications OFCOM Licences and Frequency Management Division Radio Technology Section, December 14, 2016.

- [17] <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0746-01-007a-tg7r1-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.pdf>
- [18] Optical Wireless Communication: options for extended spectrum use, Stratix and Technical University of Eindhoven commissioned by the Dutch Radiocommunications Agency (Agentschap Telecom) Ministry of Economic Affairs and Climate policy, December 2017.
- [19] <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0492-05-007a-technical-considerations-document.docx>
- [20] GDD based Automatic Traffic Sign Recognition Using CamCom Technology, IEEE 15-18-0031-00-0vat, 2018. 1.

其他参考文献

- R. D. Roberts, S. Rajagopal and S. K. Lim, “IEEE 802.15.7 physical layer summary”, *IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 772-776, Houston, TX, 2011.
 - T. Baykas *et al.*, “Let there be Light Again! An Amendment to IEEE 802 Visible Light Standard is in Progress” *IEEE COMSOC MMTC E-Letters* March 2016.
 - M. Uysal, *et al.* “TG7r1 CIRs Channel Model Document for High-rate PD Communications”, Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0747-00-007a-tg7r1-cirs-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.zip>
 - I. Stevanovic “Light Fidelity”, Report OFCOM Switzerland.
-