

无线光通信与物联网

张在琛^{1,2,3}, 尤肖虎^{1,2,3}, 党建^{1,2,3}, 吴亮^{1,2,3}, 朱秉诚^{1,2,3}, 陈绩^{1,2}, 汪磊^{1,2,3}

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学教育部移动信息通信与安全前沿科学中心, 江苏 南京 210096; 3. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘要: 无线光通信具有频谱免授权、电磁兼容性好等许多与射频无线通信截然不同的优良性质, 使其有望成为未来物联网差异化发展的重要技术驱动力。首先, 从无线光通信的光源和光学器件出发, 介绍了其基本原理和限制; 接着, 从信道建模、信号调制、阵列通信和高精度定位等角度探讨了无线光通信的若干关键技术; 在此基础上, 依据下一代物联网对峰值速率、感知精度、能量传输和安全保密等技术指标的需求, 分析了无线光通信如何使能下一代物联网; 最后进行了总结。

关键词: 无线光通信; 物联网; 光源; 阵列通信; 高精度定位

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00278

Optical wireless communication and internet of things

ZHANG Zaichen^{1,2,3}, YOU Xiaohu^{1,2,3}, DANG Jian^{1,2,3}, WU Liang^{1,2,3},
ZHU Bingcheng^{1,2,3}, CHEN Ji^{1,2}, WANG Lei^{1,2,3}

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

2. Frontiers Science Center for Mobile Information Communication and Security of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China

3. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: Optical wireless communication (OWC) entitles many advantageous properties such as unlicensed spectrum, high electromagnetic compatibility, compared with its radio frequency wireless counterpart, which enables it to be a potential important driving factor for the diverse developments of future internet of things (IoT). Starting from the optical sources and optical devices, some basic principles and limitations of OWC were introduced. Then, some key technologies, including channel modeling, signal modulation, array communication and high-precision positioning were discussed. Based on those and according to the requirements on peak data rate, sensing precision, energy transfer and security and confidentiality of the next generation IoT, the role of OWC as a technological enabler for next generation IoT was analyzed. Finally, related conclusions were given.

Key words: optical wireless communication, internet of things, optical source, array communication, high precision positioning

0 引言

无线光通信 (OWC, optical wireless communication) 使用光波作为信息传输介质, 具有与传统射频无线通信明显不同的特性, 包括极宽的免授权频谱资

源、视距定向传播、绿色安全、高电磁兼容性等。无线光通信按照光源相干性可分为相干通信和非相干通信, 按照使用的光谱可分为红外通信、可见光通信和紫外通信等, 是未来无线通信基础设施的重要组成部分, 可应用于蜂窝网、机载无线通信、电磁对抗以

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-06-30

通信作者: 尤肖虎, xhyu@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61960206005, No.61971136, No.62171127, No.61803211, No.62101127); 教育部科技领军人才团队项目 (No.2242022k30001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61960206005, No.61971136, No.62171127, No.61803211, No.62101127), The Science and Technology Leading Talent Team Project of Ministry of Education (No.2242022k30001)

及其他射频无线通信链路受限的通信环境^[1]。

作为无线通信的重要应用场景，物联网（IoT, internet of things）正在成为改变无线通信设计范式的主要驱动力之一。物联网以物与物的连接为核心任务，涵盖了生产、消费和管理等各环节，技术需求极度差异化。目前，物联网的无线传输技术主要以射频为主，例如采用 433 MHz/868 MHz/915 MHz 频段，面向中长距离传输的 LoRA 技术^[2]；采用 2.4 GHz 频段，面向短距离低速率数据传输的 ZigBee 技术等^[3]。此外，3GPP 提出的 LTE Cat.1 技术标准是面向物联网应用的，该技术标准能达到 5 Mbit/s 的上行速率和 10 Mbit/s 的下行速率^[4-5]。然而，鉴于下一代物联网应用的差异化程度更深，不同应用对峰值速率、感知精度、能量传输、安全保密等指标的需求不断强化，下一代物联网的部分技术需求和典型指标^[6-8]如图 1 所示，现有单一射频无线通信已难以持续满足上述需求，亟须引入新的无线传输技术。无线光通信自身的特殊性质使其有望应用于下一代物联网，并作为重要的技术补充手段，成为物联网进一步发展革新的重要技术驱动力。

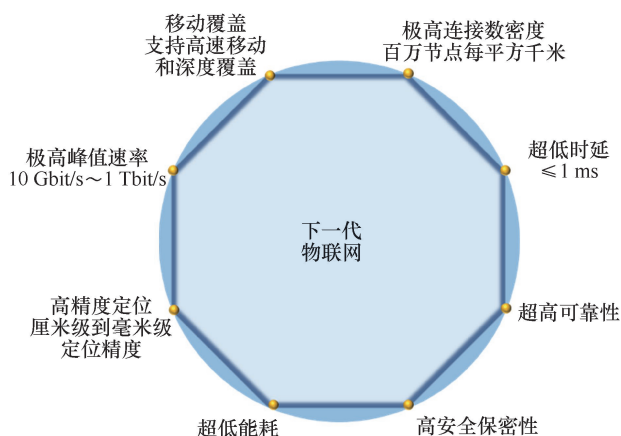


图 1 下一代物联网的部分技术需求和典型指标

本文将首先回顾无线光通信的器件和关键技术，在此基础上探讨其应用于未来物联网的潜在技术优势和面临的主要问题，为物联网应用的进一步发展革新提供技术路径参考。

1 无线光通信光源和光学器件

无线光通信网络作为无线传感网汇聚信息的传输通道，需要满足物联网在任何时间、任何地点、任何人、任何物都能顺畅通信的目的。光源和光学器件是无线光通信功能和性能的硬件基础，在不同的场景和需求需要不同的光学器件支持。以光源为

例，激光更适用于远距离、大容量、高保密性的通信场景，发光二极管更适用于室内的低成本短距离信息传输。而以振镜和可重构智能表面等代表的光场调制器件可以有效调制光场分布，使任意位置、任意分布的人或物体能够接收光源携带的信息。本节对无线光通信的光源和部分关键光学器件的特性进行阐述，旨在定性给出无线光通信的一些物理机制和限制，从而为其在物联网中的潜在应用提供参考。

1.1 发光二极管

发光二极管（LED, light emitting diode）是一种常用的发光器件，通过电子与空穴复合释放能量发光，其辐射角度大，因此是室内照明常用的光源。与传统的白炽灯、日光灯等照明光源相比，LED 具有节能、环保、使用寿命长等优势。此外 LED 可支持高速开关控制，非常适合用作无线光通信的光源，典型代表是可见光通信（VLC, visible light communication）技术，它以目前大规模部署的 LED 照明光源作为无线接入点，实现泛在的数据传输支持^[9]。早在 1999 年，香港大学的 Pang 等^[10]首次利用白光 LED 实现了基于 VLC 的无线音频传输。在此后的数十年时间里，人们陆续发展了多种基于 LED 的可见光无线通信方案，实现了高速数据传输^[11]。

目前制造白光 LED 主要有两种方案。一种是传统的荧光型 LED，由黄色荧光粉将蓝色 LED 发出的光转换成双波长的白光^[12]。其生产和封装技术较为简单，成本相对更低，是目前主流的白光 LED 生产技术。然而荧光层较长的时延会限制 LED 的调制带宽。通过在接收端进行蓝光滤波，可以改善调制带宽。白光 LED 的另一种制造方案是将蓝光（约 470 nm）、绿光（约 525 nm）、红光（约 626 nm）三色 LED 按照一定比例合成白光。为增大调制带宽，需要利用波分复用技术将 3 种波长光分开调制。

LED 光源发散性好，在照明的同时，能为物联网提供短距离泛在通信功能，通过对接收信号强度的处理，还可以实现物联网节点的高精度定位功能（见第 2.4 节）。

1.2 激光器

与前述 LED 光源不同，激光是由粒子在谐振腔内受激辐射而产生的光源，由于谐振腔对光振荡方向的限制，激光束具有很高的方向性。因此，激光无线通信具有保密性好、传输速率高、抗干扰能力强、带宽大等优势，特别适合复杂电磁环

境下抗干扰、高保密、高速率的数据传输^[13]。自由空间光(FSO, free space optical)通信是一种具有代表性的点对点激光无线通信技术,是实现星间、星地、空地、空海链路等大容量无线通信的重要途径之一^[14]。激光无线通信中常用的激光器包括气体激光器、固体激光器和半导体激光器。气体激光器发射功率大,但其体积过大且寿命短。固体激光器具有工作寿命长、稳定性好等优点,但其体积较大、效率低,常用于远距离星间或星地通信。半导体激光器结构简单、成本低,配合光放大器可满足大多数激光通信的功率要求,因此在激光通信中广泛使用^[15]。

激光二极管(LD, laser diode)是一种典型的半导体激光器。在不考虑照明的情况下,室内无线光通信可利用LD实现高速数据传输。得益于LD的大调制带宽,使得系统可获得超过10 Gbit/s的数据传输速率^[16]。垂直腔面发射激光器(VCSEL, vertical-cavity surface-emitting laser)是一类重要的激光二极管。VCSEL从垂直于衬底面发射出激光,典型结构主要包括中心的有源区与两侧的布拉格反射镜,自1979年被提出以来,其由于独特的特点和优异的性能得到了快速的发展。与传统的边发射激光器相比,VCSEL具有多方面的优势,包括:发射角小,具有圆对称的场分布,与光纤的耦合效率更高;谐振腔较短,纵模间隔大,易实现单纵模工作;垂直腔面出射,可紧密且精确地排布成二维的光源阵列;体积小,量子效率高,激发阈值低等^[17-18]。这些优势使VCSEL在光网络、高度并行的光互连等方面都具有很好的应用前景。

除上述高速、远距离通信场景外,激光的高指向性还使其很容易实现射频难以做到的大功率无线传能功能,使其在具有无线充电需求的物联网场景中有较大的应用潜力。

1.3 可重构智能表面

无线光通信的一个重要需求是实现每个光束在二维方向上的精确控制。传统的机械式光束偏转技术存在结构复杂、功耗高、机械惯量控制复杂等难以克服的缺陷,因此非机械式光束控制技术在无线光通信中具有不可替代的作用^[19]。可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)即一种有竞争力的光场调制器件,可实现光束的精确控制。在射频通信中,RIS也称智能反射面,被认为是6G通信系统有前景的技术之一,它的表面集成有大量

无源反射元件,通过软件编程的方式调整元件的电容、电阻、电感等参量,对入射信号的反射相位和幅度进行控制,从而智能地配置无线传播环境,达到提高无线通信系统性能的目的^[20-21]。在光学频段,RIS的一种代表器件即液晶空间光调制器(SLM, spatial light modulator)。SLM是一种光相阵列,内部液晶分子一般为向列相液晶分子,其形状为棒状结构,分子排列方向一致。向列相液晶呈现单轴晶体的特性,即平行和垂直液晶分子长轴方向的折射率不同。给向列相液晶层加电后,液晶分子会重新取向,使单轴晶体的光轴方向发生改变,产生电致双折射效应^[22]。相位型SLM的工作原理正是利用电致双折射效应,改变入射光相位时延,从而实现对外射光携带相位的控制。而振幅型SLM的工作原理是利用液晶的旋光效应改变通过液晶的光束的偏振态来实现光振幅调制^[23]。

在SLM上加载由程序控制的反射或透射式光栅相位,可以实现对光束偏折方向的控制。根据光栅衍射公式,光束的衍射角度 $\theta \approx \lambda/d$,其中, λ 是光束的波长, d 是光栅的周期。在SLM上加载的光栅周期越小,其调制的光束偏折角越大。市面上成熟的SLM仪器其最小像素尺寸在数个微米。因此,对于可见光和近红外光通信,利用SLM进行光束偏转的角度会受到一定限制^[24]。2012年,Feng等^[25]提出了一种基于SLM光束偏转和相位调制技术的自由空间光通信链路,实现了偏转角度为 3° 且调制带宽为1.25 GHz的长距离自由空间无线光通信。2015年,Xu等^[26]提出了一种通过调节相控单元电压切换边界电场来调节相位的光栅模型,能实现衍射效率大于32%且角度达到 12.1° 的光束偏折。

SLM可以精确地调制光场,并且容易实现一个入射激光束分裂为多个不同方向的激光束,从而实现多个物联网节点的同时覆盖,本文第3.4节即探讨了SLM在多用户光移动通信中的应用。

1.4 振镜

利用电驱动精密调节的二维反射镜,可以在光源和接收器之间进行有效的光束控制。二维反射镜是自适应光学中重要的能动光学元件,最初被用于光学系统中校正光路的倾斜误差、稳定光束指向等。随后二维反射镜也被用于光束扫描、光束定位、目标跟踪等领域。二维反射镜常见的驱动包括压电陶瓷驱动和音圈电机驱动等。压电陶瓷驱动的反射镜具有扫描角度小、谐振频率高的特点,需要补偿

迟滞和蠕变的固有缺陷^[27]。音圈电机驱动的二维反射镜具有扫描角度大、谐振频率低的特点^[28]。将二维反射镜和高灵敏度、高响应速度的传感器结合，可以构成高精度的光学跟踪系统，具有高的角度分辨能力。在光通信中可用于实现高速、精密的光束控制和目标跟瞄功能^[29]。

近年来，基于微电子机械系统（MEMS, micro-electro-mechanical system）的微型反射镜被用于红外光通信的光束调制，实现了大角度的点对点光束调制效果。2013年，Brandl等^[30]利用MEMS实现了大角度（ $12^\circ \times 12^\circ$ ）的点对点光束调制效果，以及高速率（3 Gbit/s）、长距离（7 m）、低误码率（ $< 10^{-9}$ ）的信息传输。MEMS微镜通常是在硅基片上制造可移动的微型反射镜，其大小一般在几百微米到几毫米范围。单一的硅基片上能承载大量的微型反射镜，因此可以采用标准的半导体工艺来制作和封装这种微型反射镜阵列。采用各种电子启动技术，如电磁、静电、压电等方法，可以将这些微镜从一个位置偏转到另一个位置，从而对入射光产生指向调制效果^[31]。基于MEMS的微镜具有调制速度快、体积小、易于大规模集成等优点^[32]。

振镜能够以较低的成本对单一光束进行快速偏转，一方面能够对受到遮挡的物联网节点进行链路重建，另一方面也能够对移动节点进行跟踪。

2 无线光传输与定位关键技术

本节从无线光传输与定位关键技术角度出发，进一步对无线光通信进行阐述，无线光通信关键技术关系示意如图2所示。首先，介绍无线光通信信道模型，它是调制等其他技术的理论基础，也是高精度定位的重要理论依据。然后，介绍了无线光通信调制技术，它是大规模阵列通信技术的应用基础。接着，讨论了大规模阵列无线光通信技术，它是对现有各类调制技术的增强，能够显著提升系统的容量等指标。最后，讨论了高精度无线光定位，它可看成上述技术所能提供的一种关键服务，与物联网应用密切相关，本文还给出一种新的高精度定位方案。因此，这些关键技术是无线光通信使能物联网的重要甚至必要技术。本节将探讨这些技术如何对物联网的峰值速率和定位精度等多项关键性能指标产生影响，同时也将讨论它们所面临的一些亟待解决的问题。

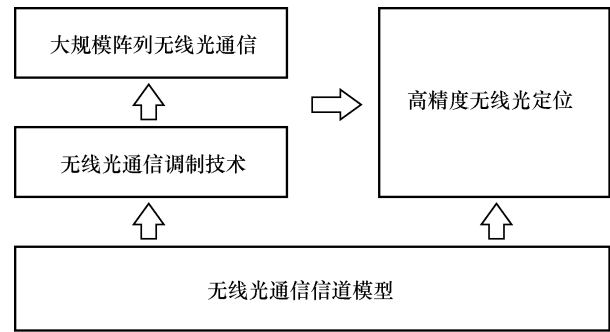


图2 无线光通信关键技术关系示意

2.1 无线光通信信道模型

无线光通信的信道模型可分为确定性信道模型和统计信道模型。对于短距离通信，光的视距传播（LoS, line-of-sight）路径占据主导地位，二阶以上的反射径衰落大，因此采用以往的射线追踪等确定性的建模方式往往能取得较精确的结果^[33-34]。确定性信道模型的典型例子是基于LED的室内可见光通信信道模型，一般使用Lambertian辐射模型对光源空间光强及反射体散射特性进行描述，得到不随时间变化的确定性信道模型^[35-36]。其中，Lambertian辐射模型的阶数对信道冲激响应的影响较大^[37]。当光源较多且随机分布时，上述确定性建模方法难以给出信道的统计信息。为此，近年来有文献提出将在射频信道建模中广泛应用的几何分布统计建模（GBSM, Geometry-based Stochastic Model）方法引入无线光通信。例如，2016年Al-Kinani等^[38]利用该方法在确定性建模的基础上引入了由散射体反射以及收发端移动等因素带来的信道的随机性。2018年，Wang等^[39]利用GBSM方法对地下矿井的无线光传播环境进行了刻画，分析了其信道特性。

当通信距离较长时，激光无线通信信道存在显著的随机衰落现象。其中，慢衰落由悬浮颗粒、雾、雨雪、沙尘等因素导致，通常可以通过路径衰落模型描述，其衰落系数为固定常数，与波长、链路距离、耗散系数等因素相关。快衰落由大气湍流和指向误差等因素导致。大气湍流是指大气不规则的随机运动，它会造成湍流中传输的光波的振幅和相位随之发生不规则的起伏，其相干时间通常为1~10 ms^[40]。快衰落系数为随机变量，其统计参数与波长、链路距离、高度、风速等多种因素相关，一般使用对数正态分布、Gamma-Gamma分布、对数正态-莱斯分布等进行建模^[41]。

水下光通信（UWOC, underwater wireless opt-

ical communication) 是水声通信的重要补充, 可用于解决后者带宽不足的问题, 尤其在水下中短距离通信或者水上-水下跨海面通信场景中具有技术优势。光信号在水下除了受到散射、湍流影响之外, 还会受到雾状层、盐度变化等因素影响, 因此水下光信道的建模比 FSO 信道更复杂^[42-43]。UWOC 的最大难点在于极高的信道衰减系数。在纯净海水中, 信道衰减系数约为 0.24 dB/m, 而在浑浊海水中, 信道衰减系数可激增至 9.42 dB/m。因此, 现有水下激光链路大多为几米到百米距离, 例如, 2021 年 Yang 等^[44]测得的水下激光链路距离为 100 m。

2.2 无线光通信调制技术

无线光通信按照调制信号的相位是否携带信息, 可分为相干调制和非相干调制。相干调制的光源主要是激光, 其原理与射频相干通信相同, 但采用的器件较为昂贵复杂。在无线光通信中, 更常用的是基于强度调制/直接检测 (IM/DD, intensity modulation/direct detection) 技术的非相干调制。信息调制在发射光信号的强度上, 因此需要满足真实性的要求。

从频率维度看, 调制方式主要包括: 以开关键控和脉冲幅度调制为代表的单载波调制、以直流偏置光正交频分复用和 2006 年 Armstrong 提出的非对称截断光正交频分复用为代表多载波调制, 以及上述调制方式的混合和叠加形式等^[45-49]。基于上述基本的调制方式, 目前已有一些利用 LED 进行无线光通信和组网的商用产品, 如 pureLiFi 公司的智能家居光无线组网产品等。

从空间维度看, 多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 技术能够有效利用空间资源, 大幅提升系统的频谱效率。MIMO 技术在射频无线通信中已经得到了大量的研究和应用^[50-53], 因而将其应用到无线光通信中同样值得研究。下面着重对 MIMO 技术在无线光通信中的应用进行说明。在发送端, MIMO 技术的实现形式主要有空分复用和空间调制两种。空分复用的原理与射频 MIMO 技术类似, 但是无线光通信主要采用 IM/DD 方式^[54-55], 射频无线通信中的 MIMO 空分复用技术不能直接应用到无线光通信中, 而需要着重考虑发送信号的正实性约束以及直流偏置与功率效率的权衡等问题。因此, 其预编码设计比射频更为复杂^[56-58]。同时, MIMO 无线光通信空间子信道的相关性较强, 基于空分复用的 MIMO 传输技术较难获得与射频

MIMO 同等程度的性能增益, 需要进一步研究适应 IM/DD 信道的无线光通信 MIMO 技术。空间调制每次使用多个天线中的一个或某几个进行通信, 受空间子信道之间相关性的影响较小^[59-61]。因此, 空间调制技术在 MIMO 无线光通信领域受到了很多关注^[62-66]。2012 年, Haas 等^[60]分析对比了无线光通信中的 MIMO 技术, 在相同信道条件下, 空间调制与多通道重复编码技术相比, 可以获得更好的误比特率性能。2019 年, Wu 等^[65]提出了一种新颖的光域空间调制方法。相较于光域空分复用传输技术, 仿真结果表明所提光域空间调制方法可以获得更优的误比特率性能。在 MIMO 无线光通信的接收端, 大致可分为两类信号接收方式: 一是采用非成像的多个独立的光电二极管 (PD, photodiode) 对多数据流进行接收^[67]; 二是采用成像传感器, 利用像素点解析多数据流^[68]。前者成本较低, 后者可看成一种阵列接收形式, 其信号解调除涉及通信外, 还涉及图像处理等相关技术。

2.3 大规模阵列无线光通信

与射频信号相比, 光信号的相干距离小得多, 因此能够在更小的空间范围内容纳更多并行信道, 从而提升系统容量。此外, 半导体发光器件易于高密度集成, 为通信系统提供了海量的空域资源。在光学器件的辅助下, 即使采用低频谱利用率的开关调制和单比特量化, 也能获得可观的通信速率, 并且外围器件数量、功耗、信号处理复杂度均显著降低。这使得大规模无线光 MIMO 系统对低成本、高速率要求的物联网应用具有很大的吸引力。基于这一思路, 2020 年 Wang 等^[69]展示了基于 LED 的阵列通信, 速率达到 1 Gbit/s。2022 年, Kazemi 等^[70]提出了利用大规模 VCSEL 阵列来发送数据, 当阵列规模较大时, 通信速率可达 Tbit/s 量级, 这凸显了大规模阵列光通信的巨大容量潜力。另一些研究基于透镜和发光阵列提出了光波束域多址 (BDMA, beam-domain multiple access) 技术, 为不同的用户分配独立的波束, 从而大幅提升了数据吞吐量^[71]。其中, 发光阵列还可以通过光纤簇、超表面或采用 MEMS 振镜等实现, 达到波束分配的目的^[72-73]。

同时, 激光由于波束窄, 因此能够精准地向接收端传递信号能量, 减少空间损耗, 从而获得比毫米波波束更高的能量效率 (单位: bit/J)。对于分布范围广、密度小且不便携带大容量电池的物联网节点, 激光通信的高能效性质有利于增加续航时间。

为了实现上述目标, 高速、高精度的跟瞄系统必不可少。针对短距离高移动性节点, 可以设计专门的跟瞄算法和系统来提升信道质量^[74]。另外, 近年来, 为了降低直达径约束, 文献[75]还引入光学 RIS 等新器件, 在直达径被遮挡时改变链路方向, 从理论上证明引入多个 RIS 后能够显著降低系统的中断概率。

2.4 高精度无线光定位

光信号的波长短, 基本沿直线传播, 使得光定位系统能够较容易地达到比射频定位更高的精度。现有的基于 LED 通信的典型定位算法包括最近邻 (Proximity)、到达时间/到达时间差 (TOA/TDOA, time of arrival/time difference of arrival)、接收信号强度 (RSS, received signal strength)、到达角 (AOA, angle-of-arrival)、指纹库算法等。

最近邻算法将信号最强的基站坐标作为用户的估计坐标, 实现简单但精度最低^[76]。TOA/TDOA 定位算法最早应用于射频定位系统, 该方法根据基站坐标和信号传播时间信息估计接收机坐标。然而, 对于室内场景, 光信号的传播距离仅为几米, TOA/TDOA 估计需要亚纳秒级的同步设备才能完成定位, 因此多限于理论研究而缺乏实验进展^[77]。RSS 光定位方法精度较高, 其原理是根据光强确定接收机和基站的距离, 从而确定接收机的位置。该算法对于接收机的姿态较为敏感, 一旦接收机随机倾斜, 将会导致光强估计不准, 进而造成很大的定位误差, 因此对于手持设备和非平坦场景并不适用^[78]。另外, RSS 要求准确知道 LED 的辐射模式, 实际系统中该信息通常不易获取^[79]。AOA 定位依赖摄像机、光传感器阵列和陀螺仪, 通过测量光信号的角度来估计接收机位置。这种方法能够达到厘米级精度且成本适中, 不需要信号同步单元和强大的处理模块。AOA 定位同样要求已知接收机姿态角, 否则将产生很大

的定位误差^[79-80]。因此, Zhu 等^[81]在 2017 年提出利用到达角度差 (ADOA, angle-difference-of-arrival) 来估计用户坐标, 从而允许接收机具有随机倾角。基于指纹识别的无线光定位方法通过匹配接收机收到的信号和数据库中预先测定的数据确定接收机位置^[82-83], 能够在多径干扰严重的环境下定位。但指纹类方法需要强大的处理器和完善的数据库, 因此成本较高。此外, 大部分基于复杂数据库的算法过度依赖机器学习或人工神经网络等复杂的信号处理工具^[84], 其定位误差计算式的推导难度大, 理论路线不清晰。

利用激光的高指向性, 预期能够达到更优的定位精度。一种可行的方法是复用激光测距仪或激光雷达的毫米级测距能力, 辅以激光的方向信息, 可勾勒出待定位目标表面多个点的空间坐标。利用激光测距仪或激光雷达进行目标定位原理示意如图 3 所示, 可利用激光测距仪或雷达估计出目标表面的 M 个点的空间坐标。利用这些表面空间坐标, 与已知的目标表面几何特征 $f(x,y,z;\mathbf{u})=0$ 进行匹配, 即可计算出目标的准确位置, 其中, $f(x,y,z;\mathbf{u})=0$ 是目标表面上的点 (x,y,z) 满足的空间约束关系, 它以待估向量 \mathbf{u} 作为参量, \mathbf{u} 是与目标位置和姿态有关的参数向量。此种定位方法要求被测表面不具有平移、旋转不变等性质, 以免产生定位模糊的问题。因此, 当表面为曲面形状时, 定位效果更好, 并且有利于同时估计出目标的姿态。

无线光定位技术使室内定位的精度从米级提升至厘米级, 且无线光定位系统的硬件成本比同类型的射频产品更低, 因此可应用在需要海量节点定位的工业物联网中。此外, 无线光和射频定位的融合能够充分发挥不同信号的传播优势, 显著提升现有系统在覆盖范围、定位精度、功耗等方面的指标。

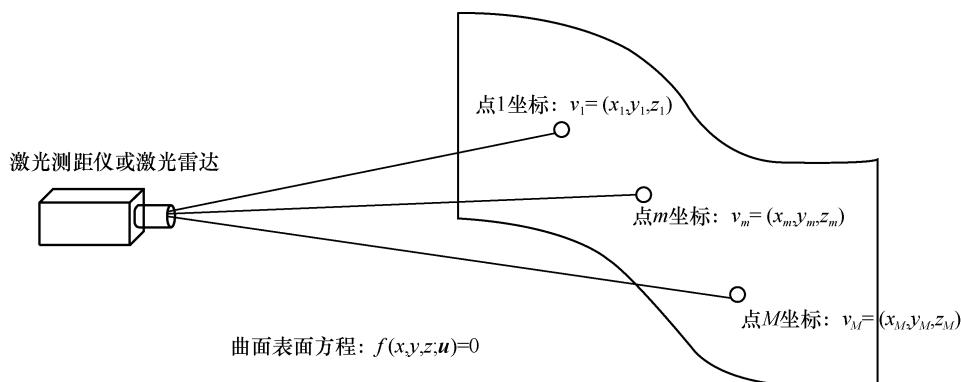


图 3 利用激光测距仪或激光雷达进行目标定位原理示意

3 无线光通信使能新一代物联网

正如中国移动研究院最新发布的《下一代物联网发展构想白皮书》所指出的, 新一代物联网将面向消费、生产、管理等诸多环节, 应用需求高度差异化, 其发展的主要驱动力之一就是技术的发展^[85]。作为一种具备独特优势的传输技术, 无线光通信有望从技术革新的角度促进新一代物联网的深度发展。本节以部分核心技术指标作为切入点, 分析无线光通信如何使能新一代物联网, 以及仍需要克服的技术挑战。值得指出的是, 在不同的应用场景中, 物联网可能同时关注多个技术指标。

3.1 峰值速率

在工业物联网场景中, 大量节点常需要同时上传海量数据。例如, 移动中的机器人等需要将采集到的高清视频实时上传至接入点进行后续处理, 系统吞吐量需求可超过 1 Tbit/s。为了满足高峰值速率需求, 现有系统主要使用有线连接或 Wi-Fi 技术。然而, 大量电缆的使用必然导致系统灵活性的下降, 且对移动的支持性弱、维护难度高。使用 Wi-Fi 技术虽然可以摆脱电缆, 但是由于它使用 IEEE 802.11 协议, 多个用户间需要竞争信道资源, 当用户数较多时, 上行带宽严重受限, 在 IEEE 802.11n 中, 最高数据速率仅有 600 Mbit/s, 即使使用最新的 IEEE802.11.ax, 最高速率也只达到 9.6 Gbit/s, 仍然难以满足 Tbit/s 量级的传输需求^[86]。

与射频系统中存在大量干扰不同, 激光具有高度定向传输性质, 当节点的激光入射方向不同时, 在接收端可由光学系统直接分离, 实现大容量多用户并行传输。为此, 可采用基于激光束的无线光接入方式, 通过构建密集的并行激光链路, 获得大量独立高速信道, 满足物联网节点的高速接入需求。基于光通信的宽频谱和高指向性特性, 还可以提升高速无线传输的能量效率。通过微机电偏转等方式, 可以实现高精度跟瞄^[73]。然而, 现有的激光跟瞄系统仍无法跟踪高速运动节点, 其闭环回路时延高, 算法尚不成熟。另外, 设计面向大规模阵列的低复杂度通信信号处理算法、提升阵列密度、缩小前端放大器面积等也是需要进一步解决的问题。为此, 可利用激光信道间相关性较低的特性, 简化预编码算法设计, 使用开关调制等低复杂度波形, 降低接收机所需的量化位数, 从空域而非时频域挖掘系统潜力, 进而获得高速且廉价的无线通信解决方案。同时, 跟瞄系统也应当具有足够的灵活

性, 能够自适应地识别可用子信道并动态切换并串/串并转换模式, 从而在仅有部分激光链路对准时提供非全速的数据传输。

3.2 感知精度

光信号波长极短且定向传播, 使其在用于环境感知方面具有与射频信号非常不同的特性, 可进行更加精细的感知, 感知结果可用于增强物联网的传输性能和业务能力。

使用光信号进行感知有多种实现形式。首先, 使用光学成像设备如双目摄像机等, 可利用景深信息获取空间环境分布, 能够取得非常精细的环境地图, 与其他环境地图互为补充, 同时使用深度学习等技术提取环境信息, 可用于自动驾驶、增强现实等物联网场景^[87]。其次, 基于激光雷达, 可实现高精度测距, 基于激光雷达的定位系统能够在 100 m 的测距范围内实现毫米级的高精度定位, 且不易受天气条件影响, 能够有效、准确地采集地表的三维坐标信息, 使激光雷达在定位、测绘、灾情监测、无人驾驶等领域有着巨大的应用价值和前景^[88]。进一步, 大量具备激光探测能力的节点可快速绘制和建模物理传播环境地图, 具有潜在应用价值^[89]。较早解决激光点图的三维地图构建问题的方法是在 2014 年由美国卡耐基梅隆大学的 Zhang J 博士等提出的, 即著名的 LOAM (lidar odometry and mapping) 算法^[90]。如今三维图优化理论框架趋于成熟, 在构建三维地图上具有较高准确性, 促进了激光雷达在构建三维地图领域的应用。

基于无线光通信的定位、通信一体化系统, 能够为物联网提供厘米级甚至毫米级的高精度定位服务。目前, 光定位系统采用的技术仍与射频系统相似, 主要技术有基于 TOA、AOA 和 RSS 的定位技术等^[91]。在射频中基于 AOA 和 TOA 的定位技术往往能取得比基于 RSS 定位更好的效果, 但是在光定位系统中因为光的视距链路较强, 且光信号沿直线传播, 实验和仿真结果显示基于 RSS 的定位技术也能取得较好的定位效果。如采用指纹库定位方法, 以光信号强度作为位置特征, 并利用深度学习技术进行分类, 仿真显示定位精度可以达到分米以下^[92]。文献[93]给出了一种基于频分多址的多用户同时定位和通信的系统, 其基本原理是将子载波划分为定位子载波和通信子载波, 基于频分多址的同时定位与通信系统子载波划分示意如图 4 所示, 使用 3 个或以上 LED 的定位子载波信息进行定位, 使用其余子载波进行通信, 从而隔离定位数据与通信数据之

间的干扰。实验结果显示在信噪比较高的情况下，定位误差可达到厘米级。此外，采用基于光电二极管阵列等的厘米/毫米级三维定位系统，可进一步实现小尺寸、低功耗、低成本的无线光定位和传输。

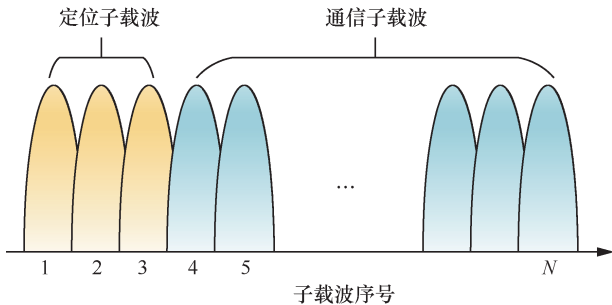


图 4 基于频分多址的同时定位与通信系统子载波划分示意

3.3 能量传输

激光作为高指向性的能量载体，能够为节点提供无线电能传送，这种能量传送既可以单独提供，也可以在通信的同时提供，有望应用于无线传感器网络等物联网场景中。与基于微波的无线充电方式相比，激光充电具有更高的能量传输和转化效率，其中转化效率可达 50%^[94-95]，且器件尺寸更小、成本更低、转换电路更简单。对于无法携带大容量电池，或无法更换电池的微型传感器网络节点，激光携能通信能够大大拓展物联网节点寿命。与基于电容、电感式的近场充电方式相比，激光充电的作用距离更远，可达数千米的量级^[96]。对于电池容量有限且需要滞空的无人机等物联网节点，远距离激光充电可大幅提升其续航时间。在室内场景下，也可以使用现有的激光跟瞄系统实现能量的精准传输。

然而，激光携能通信必须解决安全性问题。作为一种新型的无线传能方法，如何有效识别随机遮挡，防止高能激光对眼睛的伤害，仍需要进一步研究。

3.4 移动支持

尽管与射频无线通信相比，无线光通信尤其是激光无线通信对移动性的支持难度更大，但在一些特殊场景下，使用无线光通信仍然具有较大的优势和潜力。例如，对于无人机平台之间的通信，与射频无线通信相比，激光无线通信能够达到更高的传输速率和容量。此外，无线光通信受多普勒扩展影响更小，能够通过简单的信号处理方法抵消高速移动带来的载频偏移。无线光通信还具有成本低、不易受电磁干扰的优势。在车联网中，车与车、车与基础设施间使用无线光通信可以复用现有光学器件，从而降低系统成本^[97]。在有大量移动机器人的无人工厂等工业物联网场景中，使用无线光通信可以实现节点的灵活部署，且不易产生和受电磁干扰。在这些移动场景中进行高效激光无线通信时，仍然需要解决多用户光束产生、偏转和跟踪对准问题。

针对多用户通信问题，可以采用基于 LED 的可见光通信或将激光进行扩束实现覆盖，也可以使用多束窄激光进行自动跟瞄以提升能量效率。激光光束的偏转问题可通过 MEMS、振镜等微机械系统或者光学 RIS 实现。光移动通信（OMC, optical mobile communication）技术采用光相阵列，能够将入射激光功率进行灵活分配，从而实现多个用户的覆盖。基于 SLM 的光移动通信光束分配示意图 5 所示^[98-99]。文献[100-101]进一步研究了当多个用户

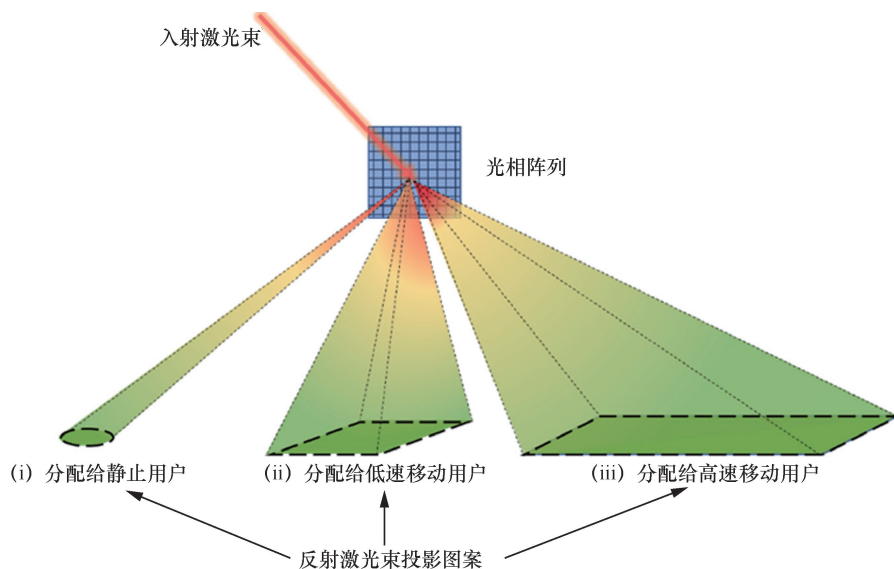


图 5 基于 SLM 的光移动通信光束分配示意

处于移动状态时,如何最佳分配多个激光束间的功率、波束形状、切换时间等问题,显示使用空间调制器的优势。值得指出的是,光相阵列可看成一种光学 RIS,是实现移动无线光通信的关键技术之一。该技术仍然需要解决初始对准接入和零级衍射等问题。

3.5 安全保密

光波一般不与射频电磁波和器件发生相互作用,具有优良的电磁兼容特性。利用该性质,在核电站、航天、医院等对电磁兼容性要求高的物联网场景,使用无线光通信能够有效降低电磁干扰,保证自身和其他节点设备的正常运作。同时,基于LED的无线光通信被认为对人体无害,具有绿色安全的特点。

相比于射频电磁波的开放传播性质,光的视距传播特性使得无线光通信又具有天然的保密特性。对于具有高保密性要求的物联网应用场景,利用无线光信号的视距传播特性和高方向性,能够构建不易被窃听的安全数据链路。

进一步,使用光作为载体,可以支撑无线通信场景中的量子保密通信。已有文献报道,在两架相距200 m的重约35 kg的无人机和地面之间构建了一个小型的量子通信网络,并向地面相距1 km的两个望远镜,分别发送一个光子,最终测得了高保真度的具有纠缠特性的光子对。该成果入选2021年中国光学领域十大社会影响力事件^[102]。这显示出基于无线光通信的量子无线通信网络的潜在价值。

同时,使用光作为安全保密的手段,也面临一些潜在的挑战。例如,光链路容易被遮挡,且会受到阳光乃至非合作方光源的干扰,将直接降低安全容量,因此需要进一步研究抗干扰的安全传输技术。在量子保密通信中,光仅被用于量子密钥的分发,并没有直接参与数据的传输,如何利用光的量子性质实现直接无线安全通信,仍具有很大的挑战性。

4 结束语

本文概述了无线光通信的基本特征,指出由于无线光通信具有与射频不同的独特传播和传输性质,包括频谱免授权、大容量、低成本、可复用现有基础设施、电磁兼容性好、保密性高等特性,有望使其成为使能下一代物联网的重要补充技术手段,在一些特殊场景下甚至是主导技术手段。接着,

对无线光通信所涉及的关键光学器件进行了介绍,阐明了它们各自在物联网中的应用场景。然后,分析了几种无线光通信的关键技术及其对物联网应用的支撑作用,最后,讨论了无线光通信如何在几个关键性能指标上使能下一代物联网。

根据以上讨论可知,由于未来物联网应用需求的高度差异化,在下一代物联网中引入无线光通信,是技术发展的重要趋势。在此过程中,受益于无线光通信技术自身的发展,物联网的核心指标将可能得到大幅提升。例如,系统峰值速率将突破10 Gbit/s并逐步迈向1 Tbit/s,节点定位精度将从现在的米级、分米级逐步提升至厘米级和毫米级,这些都将进一步拓宽物联网的应用场景。但同时,该领域也存在许多技术难题亟待解决,除文中已述问题外,当系统峰值速率达到1 Tbit/s后,所对应的基带处理和实时性保证将变得更加困难,而如何在移动过程中保持毫米级定位,仍然面临极大的技术挑战。这些问题的解决,既要依赖于无线光通信技术自身的演化发展,也需要与其他研究领域如人工智能等进行融合发展。因此,如何进一步发展无线光通信技术并解决其关键问题,使其真正使能下一代物联网,具有重要的研究意义和应用价值。

参考文献:

- [1] AYYASH M, ELGALA H, KHREISHAH A, et al. Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 64-71.
- [2] BOR M, VIDLER J, ROEDIG U. LoRa for the internet of things[EB]. 2016.
- [3] ERGEN S C. ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary[J]. UC Berkeley, 2004, 10(17): 11.
- [4] YANG J, SONG L, KOEPPE A. LTE field performance for IoT applications[C]//Proceedings of 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [5] 3GPP. Overview of 3GPP Release 8 [EB]. 2014.
- [6] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. 6G internet of things: a comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 359-383.
- [7] ZHANG L, LIANG Y C, NIYATO D. 6G Visions: mobile ultra-broadband, super Internet-of-things, and artificial intelligence[J]. China Communications, 2019, 16(8): 1-14.
- [8] KESHAV S, SHUI Y, DINH N, et al. A tutorial on next generation heterogeneous IoT networks and node authentication. IEEE Internet of Things Magazine, 2021, 4: 120-126.
- [9] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on

- Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [10] PANG G, KWAN T, CHAN C H, et al. LED traffic light as a communications device[C]//Proceedings of Proceedings 199 IEEE/IEEE/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems (Cat. No.99TH8383). Piscataway: IEEE Press, 1999: 788-793.
- [11] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [12] JUNGNICHEL V. Optical wireless in 5G[EB]. 2016.
- [13] 郑运强, 刘欢, 孟佳成, 等. 空基激光通信研究进展和趋势以及关键技术[J]. 红外与激光工程: 1-15.
ZHENG Y Q, LIU H, MENG J C, et al. Research progress, trends and key technologies of space-based laser communication[J]. Infrared and Laser Engineering: 1-15.
- [14] YAN L S, WANG F, WU W, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080005.
- [15] 李学良. 大气激光通信数字相干探测关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
LI X L. Researches on several key technologies for free space optical communication based on digital coherent detection[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [16] WANG K, YUAN Z S, WONG E, et al. Experimental demonstration of indoor infrared optical wireless communications with a silicon photonic integrated circuit[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 619-626.
- [17] IGA K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1201-1215.
- [18] LIU A J, WOLF P, LOTT J A, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 121.
- [19] AKAISHI A, TAKAHASHI T, FUJINO Y, et al. Development of optically controlled beam-forming network[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, E95.B(11): 3404-3411.
- [20] ZHAO J. A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs): towards 6G wireless communication networks[EB]. 2019, arXiv: 1907.04789.
- [21] 姚建文, 王楠. 智能反射面: 大有前景的 6G 技术[J]. 电信快报, 2020(7): 8-13.
YAO J W, WANG N. Intelligent reflecting surface: a promising technique for 6G[J]. Telecommunications Information, 2020(7): 8-13.
- [22] CHEN P, WEI B Y, HU W, et al. Liquid-crystal-mediated geometric phase: from transmissive to broadband reflective planar optics[J]. Advanced Materials, 2020, 32(27): 1903665.
- [23] HU W, CHEN P, LU Y Q. Photoinduced liquid crystal domain engineering for optical field control: preparation, properties, and applications[J]. Photoactive Functional Soft Materials: Preparation, Properties, and Applications, 2019: 361-387.
- [24] TAO J, YOU Q, LI Z L, et al. Mass-manufactured beam-steering metasurfaces for high-speed full-duplex optical wireless-broadcasting communications[J]. Advanced Materials, 2022, 34(6): 2106080.
- [25] FENG F, WHITE I H, WILKINSON T D. Holographic beam steering a directly modulated two-electrode high brightness tapered laser diode for optical wireless communications[C]//Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference. Washington, D.C.: OSA, 2012: 1-3.
- [26] XU D M, TAN G J, WU S T. Large-angle and high-efficiency tunable phase grating using fringe field switching liquid crystal[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12274-12285.
- [27] CHANG Q B, CHEN W S, LIU J K, et al. Development of a novel two-DOF piezo-driven fast steering mirror with high stiffness and good decoupling characteristic[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159: 107851.
- [28] 王福超, 王昱棠, 田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1997-2006.
WANG F C, WANG Y T, TIAN D P. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1997-2006.
- [29] 岳冰, 杨文淑, 傅承毓. 空间光通信中的快速倾斜斜镜跟踪实验系统[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 35-38, 42.
YUE B, YANG W S, FU C Y. Experiments on precision tracking system with a fast steering mirror in space laser communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3): 35-38, 42.
- [30] BRANDL P, SCHIDL S, POLZER A, et al. Optical wireless communication with adaptive focus and MEMS-based beam steering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(15): 1428-1431.
- [31] CHU P B, LEE S S, PARK S. MEMS: the path to large optical cross-connects[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(3): 80-87.
- [32] BRANDL P, SCHIDL S, POLZER A, et al. Optical wireless communication with adaptive focus and MEMS-based beam steering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(15): 1428-1431.
- [33] SARBAZI E, UYSAL M, ABDALLAH M, et al. Indoor channel modelling and characterization for visible light communications[C]//Proceedings of 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [34] MIRAMIRKHANI F, UYSAL M, PANAYIRCI E. Novel channel models for visible light communications[C]//SPIE OPTO. Proc SPIE 9387, Broadband Access Communication Technologies IX, [S.l.:s.n.], 2015, 9387: 150-162.
- [35] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communications[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [36] CARRUTHERS J B, KANNAN P. Iterative site-based modeling for wireless infrared channels[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(5): 759-765.
- [37] WU D, GHASSEMLOOY Z, LE MINH H, et al. Optimisation of Lambertian order for indoor non-directed optical wireless communication[C]//Proceedings of 2012 1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2012: 43-48.
- [38] AL-KINANI A, WANG C X, HAAS H, et al. Characterization and modeling of visible light communication channels[C]//Proceedings of

- 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [39] WANG J, AL-KINANI A, ZHANG W S, et al. A general channel model for visible light communications in underground mines[J]. *China Communications*, 2018, 15(9): 95-105.
- [40] DAVIS J, TANGO W. Measurement of the atmospheric coherence time[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1996, 108: 456.
- [41] AL-HABASH A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40: 1554-1562.
- [42] ZENG Z Q, FU S, ZHANG H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [43] COCHENOUR B M, MULLEN L J, LAUX A E. Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(4): 513-521.
- [44] YANG X Q, TONG Z J, DAI Y Z, et al. 100 m full-duplex underwater wireless optical communication based on blue and green lasers and high sensitivity detectors[J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127261.
- [45] GONZÁLEZ O, RABADÁN J, PÉREZ-JIMÉNEZ R, et al. Adaptive OFDM system for communications over the indoor wireless optical channel[J]. *IEEE Proceedings – Optoelectronics*, 2006, 153(4): 139-144.
- [46] WU L, ZHANG Z C, DANG J, et al. Adaptive modulation schemes for visible light communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(1): 117-125.
- [47] HUANG X, YANG F, SONG J, et al. Subcarrier and power allocations for enhanced ADO-OFDM with dimming control[C]//*Proceedings of ICC 2019 – 2019 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [48] DANG J, ZHANG Z C, WU L. Improving the power efficiency of enhanced unipolar OFDM for optical wireless communication[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(21): 1681-1683.
- [49] SUN Y Q, YANG F, GAO J N. Comparison of hybrid optical modulation schemes for visible light communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-13.
- [50] TELATAR E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, 10(6): 585-595.
- [51] PAULRAAJ A, ROHITA P, NABARR, et al. *Introduction to space-time wireless communications*[M]. Cambridge: Cambridge university press, 2003.
- [52] BIGLIERI E, CALDERBANK R, CONSTANTINIDES A, et al. *MIMO wireless communications*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [53] WU L, ZHANG Z, LIU H. Modulation scheme based on precoder matrix for MIMO optical wireless communication systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(9): 1516-1519.
- [54] WANG C X, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 122-130.
- [55] JOVICIC A, LI J Y, RICHARDSON T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(12): 26-32.
- [56] DANG J, WU M T, WU L, et al. Transceiver design for MIMO DCO-OFDM in visible light communication[M]//*Visible Light Communications*. Rijeka: InTech, 2017.
- [57] LI B L, WANG J H, ZHANG R, et al. Multiuser MISO transceiver design for indoor downlink visible light communication under per-LED optical power constraints[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-15.
- [58] HUANG N, WANG X D, CHEN M. Transceiver design for MIMO VLC systems with integer-forcing receivers[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(1): 66-77.
- [59] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. Spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2228-2241.
- [60] FATH T, HAAS H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(2): 733-742.
- [61] POPOOLA W O, POVES E, HAAS H. Spatial pulse position modulation for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(18): 2948-2954.
- [62] OLANREWAJU H G, POPOOLA W O. Effect of synchronization error on optical spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(12): 5362-5374.
- [63] MESLEH R, ELGALA H, HAAS H. Optical spatial modulation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(3): 234.
- [64] WU L, CHENG J L, ZHANG Z C, et al. Low-complexity spatial modulation for IM/DD optical wireless communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(6): 475-478.
- [65] WU L, SHEN Y T, ZHANG Z C, et al. Receiver algorithms for single-carrier OSM based high-rate indoor visible light communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(2): 1113-1126.
- [66] OLANREWAJU H G, THOMPSON J, POPOOLA W O. Performance of optical spatial modulation in indoor multipath channel[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(9): 6042-6052.
- [67] ZENG L B, O'BRIEN D C, MINH H L, et al. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white led lighting[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1654-1662.
- [68] MONDAL R K, SAHA N, JANG Y M. Performance enhancement of MIMO based visible light communication[C]//*Proceedings of 2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [69] WANG C F, LI G Q, HU F C, et al. Visible light communication for Vehicle to Everything beyond 1 Gb/s based on an LED car headlight and a 2×2 PIN array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(11): 110602.
- [70] KAZEMI H, SARBAZI E, SOLTANI M D, et al. A Tb/s indoor MIMO optical wireless backhaul system using VCSEL arrays[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(6): 3995-4012.

- [71] SUN C, GAO X Q, WANG J H, et al. Beam domain massive MIMO for optical wireless communications with transmit lens[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(3): 2188-2202.
- [72] YOU Q, LI C, XIAO X, et al. Programmable 1.47 bit/s (92 Gb/s x 16) optical wireless broadcasting system empowered by a single spatial light modulator and a modified RSS algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19373-19383.
- [73] GLUSHKO B, SHAR A, MEDINA M, et al. MEMS-based tracking for an indoor optical wireless communication bidirectional link[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(5): 550-553.
- [74] ZHANG K H, ZHU B C, ZHANG Z C, et al. Tracking system for fast moving nodes in optical mobile communication and the design rules[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(4): 2716-2728.
- [75] WANG H B, ZHANG Z C, ZHU B C, et al. Performance analysis of multi-branch reconfigurable intelligent surfaces-assisted optical wireless communication system in environment with obstacles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 9986-10001.
- [76] NAKAJIMA M, HARUYAMA S. New indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013, 2013: 37.
- [77] ARMSTRONG J, SEKERCIOGLU Y A, NEILD A. Visible light positioning: a roadmap for international standardization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(12): 68-73.
- [78] LV H C, FENG L H, YANG A Y, et al. High accuracy VLC indoor positioning system with differential detection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-13.
- [79] FANG J B, YANG Z, LONG S, et al. High-speed indoor navigation system based on visible light and mobile phone[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-11.
- [80] KIM J Y, YANG S H, SON Y H, et al. High-resolution indoor positioning using light emitting diode visible light and camera image sensor[J]. *IET Optoelectronics*, 2016, 10(5): 184-192.
- [81] ZHU B C, CHENG J L, WANG Y J, et al. Three-dimensional VLC positioning based on angle difference of arrival with arbitrary tilting angle of receiver[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(1): 8-22.
- [82] VONGKULBHISAL J, CHANTARAMOLEE B, ZHAO Y, et al. A fingerprinting-based indoor localization system using intensity modulation of light emitting diodes[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, 54(5): 1218-1227.
- [83] KONINGS D, FAULKNER N, ALAM F, et al. Field light: device-free indoor human localization using passive visible light positioning and artificial potential fields[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(2): 1054-1066.
- [84] CHEN Y R, GUAN W P, LI J Y, et al. Indoor real-time 3-D visible light positioning system using fingerprinting and extreme learning machine[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 13875-13886.
- [85] 中国移动通信研究院. 下一代物联网发展构想白皮书[R]. 2021. China Mobile Communication Research Institute. Development conception of next generation internet of things white paper[R]. 2021.
- [86] PERAHIA E, GONG M X. Gigabit wireless LANs[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2011, 15(3): 23-33.
- [87] DAVISON A J, REID I D, MOLTON N D, et al. MonoSLAM: real-time single camera SLAM[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(6): 1052-1067.
- [88] KIM B W, JUNG S Y. Vehicle positioning scheme using V2V and V2I visible light communications[C]//*Proceedings of 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [89] SCHMUCK P, CHLI M. Multi-UAV collaborative monocular SLAM[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 3863-3870.
- [90] 周治国, 曹江微, 邸顺帆. 3D激光雷达SLAM算法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 13-27.
- ZHOU Z G, CAO J W, DI S F. Overview of 3D lidar SLAM algorithms[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 13-27.
- [91] ZHANG W, KAVEHRAD M. Comparison of VLC-based indoor positioning techniques[C]//*SPIE OPTO. Proc SPIE 8645, Broadband Access Communication Technologies VII*, San Francisco, California, USA. 2013, 8645: 152-157.
- [92] TRAN H Q, HA C. Fingerprint-based indoor positioning system using visible light communication—A novel method for multipath reflections[J]. *Electronics*, 2019, 8(1): 63.
- [93] LIN B J, TANG X, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental demonstration of an indoor VLC positioning system based on OFDMA[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-9.
- [94] 周玮阳, 金科. 无人机远程激光充电技术的现状和发展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(6): 784-791.
- ZHOU W Y, JIN K. Status and trends of laser powered unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(6): 784-791.
- [95] GEISZ J F, FRANCE R M, SCHULTE K L, et al. Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(4): 326-335.
- [96] JIN K, ZHOU W Y. Wireless laser power transmission: a review of recent progress[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3842-3859.
- [97] TURAN B, GURBILEK G, UYRUS A, et al. Vehicular VLC frequency domain channel sounding and characterization[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Vehicular Networking Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [98] ZHANG Z C, WU L, DANG J, et al. Optical mobile communications: principles and challenges[C]//*Proceedings of 2017 26th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [99] ZHANG Z C, DANG J, WU L, et al. Optical mobile communications: principles, implementation, and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 471-482.
- [100] GAO J J, DANG J, ZHANG Z C, et al. Rate analysis of intensity modulated broadcast optical mobile communication system with user mobility[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 1-12.

[101] DANG J, GAO J J, ZHANG Z C, et al. Performance of optical mobile communications with user mobility and multiple light sources[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021: 5573946.

[102] 重磅发布!2021 中国光学领域十大社会影响力事件[EB]. 2021. Heavy release! 2021 top ten social influence events in China's optical field[EB]. 2021.

[作者简介]



张在琛（1975-），男，博士，东南大学、网络通信与安全紫金山实验室教授，主要研究方向为6G移动通信系统、无线光通信和量子信息技术等。



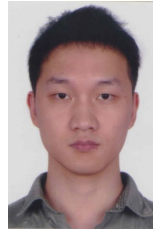
尤肖虎（1962-），男，博士，东南大学移动通信国家重点实验室主任，主要研究方向为无线移动通信与信号处理。



党建（1985-），男，博士，东南大学、网络通信与安全紫金山实验室副教授，主要研究方向为光无线通信技术和大规模移动通信技术。



吴亮（1984-），男，博士，东南大学、网络通信与安全紫金山实验室副教授，主要研究方向为MIMO传输技术、感知通信一体化技术、无线定位技术、无线光通信技术。



朱秉诚（1988-），男，博士，东南大学、网络通信与安全紫金山实验室副研究员，主要研究方向为无线光定位、无线光通信和移动通信技术。



陈绩（1991-），男，博士，东南大学副研究员，主要研究方向为无线光通信、智能光子计算、超构光子学和先进成像技术等。



汪磊（1988-），男，博士，东南大学、网络通信与安全紫金山实验室副研究员，主要研究方向为微纳光子超表面、光子智能芯片和6G新空口技术等。