研究文章



A190 卷。2020年2月12日第2期/《光通信与网络杂志》

LiFi中的室内网络概念和挑战介绍

HaraldHaas，\* Liav Yin，Chenv Chen，Stefan Videv，Damian Parol，

EnriauePoves、HamadaAlshaer和Mohamed Sufyan Islim

*爱丁堡大学工程学院数字通信研究所，LiFi研发中心，EH9 3JL，英国爱丁堡*

*\*通讯作者：h.haas@ed.ac.uk*

*收到日期：2019年7月15日；修订于2019年11月14日；2019年11月16日接受；发布于2019年12月16日（文件编号372526）*

**LiFi是一种网络化、双向的光无线通信。它用于通过利用可见光和红外光谱以非常高的数据速率连接固定和移动设备。综合起来，这些频谱资源比整个射频（RF）频谱大2600倍。本文提供了为什么LiFi是一种非常及时的技术背后的动机，特别是对于第六代（6G）蜂窝通信。它讨论并回顾了基本的网络技术，如干扰抑制和混合LiFi/Wi-Fi网络工作拓扑。我们还考虑将LiFi无缝集成到现有无线网络中，以形成跨光域和RF域的异构网络，并讨论负载平衡方面的含义和解决方案。最后，我们在软件定义的网络测试台中提供了真实世界的混合LiFi/Wi-Fi网络部署的结果。此外，还提供了在学校教室中部署LiFi的结果，这些结果表明，通过将流量卸载到LiFi，可以显著提高Wi-Fi网络性能。©2019美国光学学会**

https://doi.org/10.1364/JOCN.12.00A190

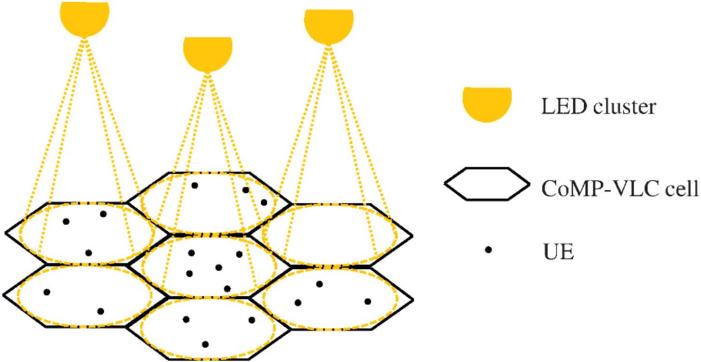
1. 引言：历史的视角

在亚历山大·格雷厄姆·贝尔发明电话之前，他已经在1880年演示了用阳光在200米以上传输语音的光电电话。阳光被连接到麦克风上的振动镜反射。在接收器上，一个中心有硒电池的抛物面镜捕捉到反射光的强度变化，并将其转换为电信号，连接到扬声器。强度变化与微型电话产生的波动电流成正比，因此他能够利用阳光无线传输模拟语音信号。大约20年后，发光二极管（LED）时代开始了[1]，100年后，研究人员在贝尔实验室开发了第一个主要使用LED的基于人造光的无线数据通信系统

[2]和IBM研究实验室[3]。20世纪80年代，IBM的研究人员开发了第一个基于红外光的网络无线网络，作为分布式计算机之间的互连[3]。Barry[4，5]为红外LED室内通信奠定了理论基础。与此同时，在1962年Holonyak发明了第一个发射可见光谱（红色）的LED后，人们开始大力开发蓝色LED[6]。然而，Nakamura及其同事花了31年时间才展示出第一个蓝色LED[7，8]。

这是白色LED拼图的最后一块，这一发展彻底改变了LED的应用格局，从仅仅的信号设备转变为照明设备，取代了能源效率极低的白炽灯泡。贝尔将光用于无线通信，但现在将人造白光用于数字无线通信并以非常高的传输速度，这一愿景明显更接近现实。Nakagawa和可见光通信联盟（VLCC）的同事在2000年左右开始使用白色高亮度LED进行数据通信。他们将其称为可见光通信（VLC）[9]，并将研究工作集中在应用研究[10]。该领域的其他研究集中在开发新技术以提高带限荧光粉涂层白色LED的数据速率[11]，[12]中报道了利用正交频分复用（OFDM）的高峰值因子进行强度调制/直接检测（IM/DD）的首次实验结果。另一类自由空间光通信是光学相机通信（OCC），它使用嵌入式相机传感器作为接收器[13-15]。OCC通常是单向（单工）通信，主要用例是室内定位和导航[16-19]。LiFi是VLC的一种特殊形式，描述了整个无线网络，支持

1943-0620/20/02A190-14期刊©2020美国光学学会



**图1。这里我们**展示了一个LiFi网络。每个光充当光学接入点，其为其照明区域/小区内的多个用户设备提供服务。用户也可以移动，当他们漫游时，会有不同的灯泡为他们服务。服务接入点的这种变化是无缝发生的。多个小区形成集群，小区边缘的UE可以由多个接入点提供服务，以避免干扰。这种技术被称为协作多点（CoMP）传输。

用户移动性、切换和多用户接入，是现有异构无线网络的一部分[20]（见图1）。

这种LiFi网络也被称为光学attocell网络[21]。光学attocell网络旨在解决射频（RF）通信中迫在眉睫的频谱危机[22]，其中重要的指标不是链路数据速率，而是数据密度。这被定义为每单位面积每秒的比特数。研究表明，LiFi网络可以将数据密度提高三个数量级，同时完全避免对现有基于RF的网络的干扰[23]。这意味着LiFi网络只是为现有的RF网络增加了容量。最重要的是，它可以使用现有的照明基础设施。从照明行业的角度来看，这一发展受到了欢迎，因为LED灯泡的使用寿命为20-30年，这意味着商业模式不可避免地必须从照明设备的销售转向服务，而光即服务（LaaS）已成为照明行业的主导商业主题。LiFi网络利用照明系统，将照明变成一个无线通信网络，有可能提供数百项服务。

LiFi技术的商业化取得了显著进展。一个重要因素是IEEE802.11bb任务组内正在进行的标准开发[24]。第一个标准版本的目标日期是2021年。这一新标准将确保LiFi与现有无线标准的无缝集成。此外，关于第六代（6G）技术的讨论已经开始。有一种观点认为需要新的频谱，这使得VLC和LiFi在6G的地图上出现了[25]。

贡献：

* 1. 本文综述了LiFi的网络技术。VLC的主要文献是物理层技术，主要是调制技术，以及理想实验室工作台环境中的实验点对点通信链路。VLC链路基本上是完全对齐的。在支持的LiFi网络中

用户流动性和移动终端的随机方向使得这些假设不再成立。此外，由于网络中有多个同时活动的链路，干扰会降低链路性能。然而，干扰的特性与RF网络不同。本文全面回顾了处理这些问题的技术。它展示了LiFi如何独特地提高无线网络性能。该论文特别展示了LiFi可以通过细胞致密化来提高区域光谱效率，这在RF中是不容易实现的。

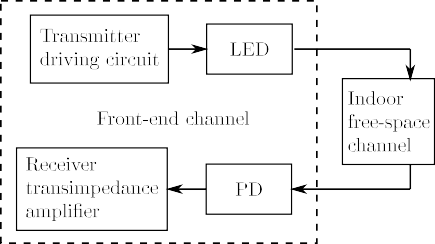
* 1. 本文提供了LiFi/Wi-Fi混合网络试验台的新实验结果，该试验台是作为英国TOUCAN（走向所有网络的终极融合）项目的一部分开发的。
  2. 据我们所知，这篇论文首次提供了在苏格兰一所学校进行的真实世界混合LiFi/Wi-Fi部署的实验结果。这些结果突出了集成LiFi网络的优势，这些优势源于其数据流量卸载能力。

我们相信所有这些贡献都是新颖的，与现有的关于LiFi网络和VLC的文献不同。本文中的实验网络结果为可以优化以提高无线网络性能的关键领域提供了新的见解。我们还注意到，其他光通信技术，如OCC、自由空间光学和更通用的VLC，并不是本文的重点，感兴趣的读者可以参考最近关于光无线通信这一更广泛主题的调查[26]。

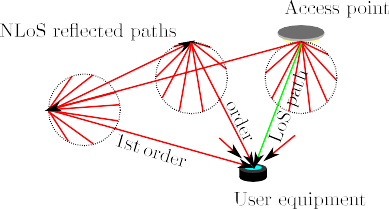
第2节总结了渠道模型。第3节介绍了LiFi网络的基本概念和挑战。干扰缓解方法在第4节中进行了讨论。第5节提供了基于不同网络部署的LiFi网络容量的见解。它展示了来自混合LiFi/Wi-Fi试验台的结果。最后，它报告了在学校部署的真实世界混合LiFi/Wi-Fi网络的测量结果。第6节是论文的总结。

1. VLC和LIFI中的信道模型

决定VLC传输系统和LiFi网络性能的最重要因素之一是通信信道的质量。在非相干IM/DD光学系统中，传输信道通常由两部分组成。一部分与前端元件的滤波有关，第二部分与室内自由空间传播有关[27]，如图所示。第2（a）段。关于后者，有大量关于红外通道模型的文献[28，29]，但只有少数关于可见光通道模型的研究。在[30]中，与红外光谱相比，一些材料在可见光谱中表现出根本不同的反射特性。该工作展示了这些差异对渠道模型的影响。在此基础上，Uysal为IEEE 802.11bb光通信任务组开发了VLC参考信道模型[31]。



（a） （b）



**图2.（a）L** iFi信道框图。（b） 室内自由空间VLC通道示意图。

1. 光前端对VLC和LiFi信道的影响

非相干IM/DD光学无线系统的典型光学前端包括发射器处的LED和接收器处的光电二极管（PD）。此外，对于实际系统的设计，前端电子器件的影响，如发射器处的LED驱动器和接收器处的光学器件以及跨阻放大器，应包括在通道模型中；见图2（a）。这些器件具有低通特性，这会限制最大可实现的数据速率。通过测量短距离点对点链路的信道响应，可以通过实验获得指定VLC系统的前端信道[32]。确切的传递函数取决于实际设备。因此，在获得良好的参数化模型之前，很难通过通用模型来表征通道的这一元素。这需要更多的研究。许多研究人员试图使用简单的模型，使用曲线拟合技术来近似前端通道的特性[27，33，34]。与测量结果相比，这种方法显示出可接受的准确性，但非常耗时，并使比较研究变得困难。大多数现有的关于光无线信道的研究都考虑了朗伯辐射模式，因为它使用简单，并且被VLC研究界广泛接受。然而，许多研究[35，36]表明，一些LED灯在实践中产生的辐射模式与朗伯模型非常不同。此外，这些研究表明，在路径损耗和均方根延迟扩展方面的信道特性高度依赖于LED辐射模式。

1. 室内自由空间光传播对VLC和LiFi信道的影响

光信号在自由空间中传播时会经历相当大的衰减。此外，信号分量通过不同的路径到达探测器，包括物理效应，如反射和散射[37，38]。这些效应导致到达信号的不同时间延迟，从而导致独特的信道功率延迟分布。自由空间光传播中的主要通道分量是通过视线（LoS）路径的传输，如图所示。第2（b）段，可以通过简单的分析模型来表征[28]。由于大多数检测到的信号功率来自LoS路径，并且相应路径损耗的计算很简单

在许多VLC和LiFi研究中已经使用了仅具有LoS传输的传播。然而，来自非视线（NLoS）路径的检测信号功率已被发现在某些场景中具有重要意义[28]，尤其是在小型和反射性室内环境中。这种NLoS通道是由更复杂的光传播过程形成的。大多数周围物体相对于光信号的波长是不平滑的。因此，反射的光信号被散射，这导致了无数的反射传输路径，如图所示。第2（b）段。此外，通过NLoS路径的信号延迟和衰减在很大程度上取决于特定室内环境的特性，如房间大小、反射率和其他物体的适当性。已经提出了许多方法来模拟NLoS通道的响应[28，39]。在一种广泛使用的基于光线追踪的确定性方法中，假设一个空的长方体房间有六个内部反射表面（墙壁、地板和天花板）[28]。将表面分解为小单元，并考虑和评估每对表面单元之间的光传播相互作用。这种方法可以提供准确的NLoS信道响应结果，但计算是递归的，因此很耗时。计算时间与Nk成比例，其中N是表面元素的数量，k是反射的最高阶数。因此，计算复杂度随着反射次数的增加而急剧增加。实际上，只是

可以进行k≤3的模拟。为了提高通*信*效率和灵活性，许多变体

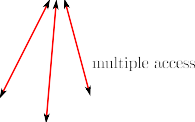
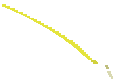
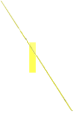
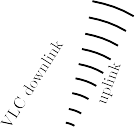
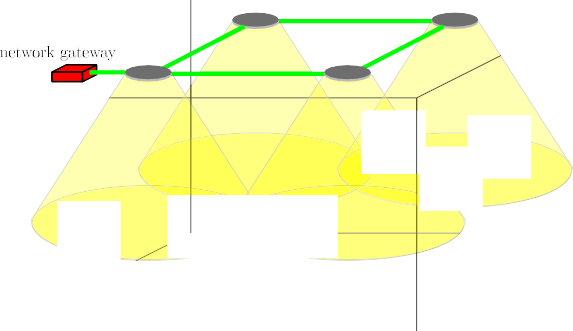
已提出[39-41]。特别地，基于蒙特卡罗的方法能够在几分钟内生成具有任何反射顺序的NLoS通道响应。这比确定性方法所需的计算时间要短得多。然而，这种方法的问题是会引入额外的模拟误差。这意味着模拟的信道脉冲响应在实际响应周围波动（它高估或低估了信道脉冲响应）。这种波动的重要性是由相对累积误差决定的。对于足够多的500000条射线，相对累积误差可以降低到大约0.01[42]。最近，有人提出了一种NLoS信道响应的频域计算[43]，它将递归运算转换为矩阵求逆运算。与上述两种方法类似，这种方法能够处理任何室内环境和发射机/接收机配置。通过使用

雅可比算法，运算次数与k成正比N2。因此，与确定性方法相比，计算时间显著缩短。为了用更简单的模型定义NLoS*通道*，提出了一种基于球体物理模型的NLoS信道响应表达式，有趣的是，最终表达式非常简单[29]。然而，它在一些室内配置中是准确的，但在其他一些配置中是不准确的[43]。这是因为它不符合实际发射机和接收机配置的影响。为了提高模拟精度，提出了一种基于商业光学设计工具Zemax的方法[44]。

在一些研究中，已经考虑了与VLC信道相关的特殊问题。例如，考虑了VLC信道对波长的依赖性[45]。提出了一种计算宽谱VLC系统室内自由空间信道的简单方法。此外，还考虑了阴影效应，这已经在几个初始研究中进行了研究[46-48]。研究发现，人体的影响主要取决于数据速率、身体反射率和接收器与身体的分离[47]。在[49]中，作者证明了随机阻塞事件可以通过瑞利分布来建模。还表明，被称为“蝇眼接收机”[50]的角分集接收机为链路阻塞提供了一个很好的解决方案。

1. LIFI网络

LiFi属于VLC的更大保护伞。VLC的大部分研究都集中在点对点通信上。此外，大多数VLC研究都假设可见光谱用于上行链路和下行链路通信。相比之下，LiFi包括更广泛的网络系统，包括多用户、双向、多播或广播通信。LiFi将可见光谱用于下行链路，而将红外光谱用于上行链路。LiFi是由多用户技术、资源分配算法和安全策略组成的生态系统实现的。这些重要的系统组件如图3所示。LiFi网络从一开始就被设计为与RF无线网络（如Wi-Fi）无缝工作，以实现异构网络中的高效、机会负载平衡和增强容量[51]。



**图3。LiFi**网络示意图。完整的LiFi网络包括下行链路、上行链路和回程连接。此外，该系统应提供切换功能、移动性支持和多址能力。

此外，LiFi网络包括形成超小型蜂窝网络的多个接入点（AP），以同时向多个移动用户提供高数据密度无线通信服务[20]。我们可互换地使用术语“移动用户”和“用户设备”（UE）。当用户在不同的光覆盖区域之间移动时，LiFi网络必须支持切换。

在LiFi网络中，建立AP和UE之间的双向连接，从而AP可以同时为多个用户服务。此外，AP和网络网关之间的回程连接对于实现AP合作和建立与外部网络的连接至关重要[52]。这些回程连接可以通过光纤、以太网供电或电力线通信提供[52，53]。LiFi下行链路搭载在现有的LED照明系统上。这是因为LED照明越来越受欢迎，并且已经证明通过LED进行多Gbps传输确实是可能的[54]。在LiFi网络中，需要上行链路连接来发送传输确认、信道状态信息（CSI）、上传文件以及启用语音和视频通话。由于在上行链路中使用可见光可能会对移动用户造成干扰，因此红外光谱的使用被认为最适合于该链路方向。这具有额外的优点，即在上行链路和下行链路之间没有干扰，并且可以建立同时通信。尽管对基于红外的上行链路进行了几项初步研究[55，56]，但还需要在这个方向上进行进一步的全面研究。此外，还可以考虑多种基于RF的通信技术，如蓝牙、ZigBee或Wi-Fi[57]。这些系统很容易获得，但它们可能会干扰现有的RF无线系统。然而，据报道，具有仅用于下行链路的VLC的RF/VLC混合通信系统能够卸载大量的数据业务[58]并表现出低延迟[59]。

一个完整的LiFi网络由切换、多址和同信道干扰（CCI）协调组成，如图所示。3。切换有两种类型：水平切换和垂直切换。水平切换是指服务AP在相同的无线电接入技术（RAT）内的改变。垂直切换指的是属于不同RAT的服务AP的改变。例如，当没有一个LiFiAP能够提供可靠的链路或者用户的速度太高以致于小区中的停留时间太短而无法建立有意义的通信链路时，移动用户可以从LiFi接入点转移到Wi-Fi接入点。当用户放慢速度并进入轻负载LiFi AP的覆盖范围时，最好切换到该LiFi接入点，以减轻Wi-Fi网络的负担，从而实现更高效的操作（例如，确保更少的数据包冲突）[60]。Vegni[61]对LiFi网络中的水平切换方案进行了初步研究。除了水平切换之外，垂直切换也是保证连续连接的必要条件。Shufei[62]提出了一种基于不确定性度量预测的垂直切换方案，该方案显著减少了传输延迟。此外，由于电池尺寸较小和堵塞问题

在LiFi网络中，切换频率显著增加。因此，必须实施软切换或切换跳过方案[63]。切换跳过是指能够在不相邻的AP之间进行切换并省略导致不必要切换的AP的技术。为了提高LiFi网络的鲁棒性，已经提出了使用预扫描和接收信号强度（RSS）预测的快速链路切换方案[64]。随着对无线网络容量要求的不断提高，传输资源的密集空间复用成为必然。使用相同传输资源的无线链路将相互干扰。首先，相邻小区中的用户可以共享相同的传输资源。在这种情况下，这种干扰被称为CCI。在某些情况下，相同的传输资源被同一小区内的用户重用。这些用户之间的干扰被称为小区内干扰。通常，通过使用正交多址技术来处理小区内干扰。通过适当的干扰协调技术来减轻CCI。干扰协调技术将在第4节中讨论。

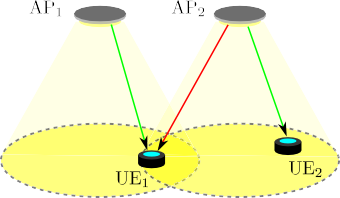
最近，有人提出使用以小区为中心的架构来建立多层异构网络，以支持极其密集的小区[65，66]。以小区为中心的方法根据用户需求动态调整网络拓扑。例如，如果LiFi AP的覆盖范围内没有用户，则该AP可以关闭其通信功能，仅充当普通灯泡。这意味着可以避免对相邻小区的干扰。LiFi中以细胞为中心的方法的动机源于细胞尺寸的径向收缩到半径为1至2m的范围。因此，在这些系统中，AP的负载变化很大[67]。基于以用户为中心的架构，将以AP为中心的原始小区转变为以主要用户集群为中心的虚拟小区。这可以通过动态合并和分解单元格来实现。为了实现这种以用户为中心的架构，用户位置必须是已知的，例如，Feng[68]已经考虑了用户定位。除了追求提高通信性能外，李还考虑了提高能效[69]。为了进一步提高LiFi网络的下行链路传输速度，一些研究小组考虑了使用单向相干信号传输和非常窄的波束控制相结合的无导线光学系统。最近的一项研究报告了超过400 Gbps的潜在链路数据速率[70]。在另一项研究中，使用了带光学漫射器的激光源，该激光源能够同时提供照明和无线通信[71]。在另一种设计中，中央处理的相干光信号通过光纤传输到光束控制系统，该系统进一步通过固定分级结构将相干信号无线引导到目标用户[72]。上行链路是使用RF系统来实现的。几个研究小组已经研究了这种使用准直光束转向的替代系统设计，以确保与使用散射光束的LiFi网络不同的覆盖范围[70，73，74]。然而，波束控制技术确实可以进一步提高LiFi网络中的空间重用，但这需要更多的工作来克服一些实际限制。例如，以低复杂度和高

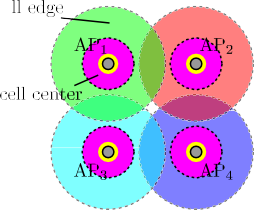
可靠性具有挑战性，尤其是当LoS链路中断时。此外，高速回程连接需要光纤连接，这增加了安装复杂性和成本。此外，这些系统设计不支持均匀照明。

1. 干扰协调技术

为了提高LiFi网络的总容量，需要传输资源的密集空间重用。因此，小区间干扰（CCI）成为决定LiFi网络整体性能的一个限制因素，如图所示。第4（a）段。已经对LiFi网络中的CCI进行了表征[75]。为了减轻CCI的负面影响，人们提出了各种干扰缓解技术[76-78]。

向争夺相同频谱资源的用户适当分配正交传输资源，例如时间、空间、频率和功率，已经在RF无线蜂窝网络中被广泛用于实现干扰协调。在LiFi网络中也考虑了几种类似的方法，包括额外的波长维度。其中一种方法称为静态资源分区。在这种方法中，可用的传输资源被分割成多个块。这些资源块以相邻AP总是使用不同资源块的方式分配给用户，如图4（b）所示。传输资源可以在时域[76]、波长域[79]或频域[80]中进行分割。这些资源块的分配是预定义的，并且计划在LiFi系统的操作期间不会改变。该方法能够以极低的复杂度有效地避免CCI。然而，每个AP只能使用一小部分传输资源，这导致系统频谱效率显著降低[81]。一种改进的静态资源划分方法，称为分数频率复用（FFR）[82]，已被认为可以减轻频谱效率的损失。在FFR中，用户被分类为小区边缘用户和小区中心用户。每个AP服务的所有小区中心用户共享一个资源块，因为他们经历了低CCI，如图所示。第4（c）段。以正交方式将不同的资源块分配给由相邻AP服务的小区边缘用户，以避免CCI。通过增加分配给中心用户的资源的比例，由于传输资源的重用率的增加，提高了整个系统的频谱效率。尽管固定资源划分方法简单，但当AP的负载不均衡时，它们表现出低效。为了避免这种资源分配效率的损失，已经考虑了动态资源分配方案[81，83]。在Ghimire进行的一项此类研究中，在部署在机舱中的正交频分多址时分双工（TDD）光无线网络中，传输资源在时域和频域中被划分为多个块[81]。每个UE广播固定功率的信号，该信号是网络范围内已知的参数。这种简单的功率信号是在一个被称为“忙突发”（BB）的迷你时隙中传输的。BB协议利用信道



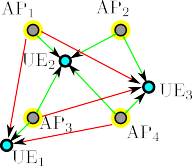


|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |

（a） （b ）（c）







（d） （e）

**图4.（a）C** CI的演示。（b） 静态资源分区。（c） 部分频率复用。（d） 与角分集发射机和接收机的干扰协调。（e） 协同多点联合传输。

TDD中的互易性。该方案的优点在于，任何潜在干扰方都可以基于接收到的BB信号功率来估计其将引起的干扰。潜在干扰者可以利用这些信息制定适当的传输策略。基于该BB信令，资源块被动态地分配给UE。已经表明，与静态资源分配方法相比，BB方法可以显著提高用户公平性和可实现的频谱效率。Bykhovsky考虑了具有四个AP的时分多址离散多音LiFi网络，并将动态资源分配公式化为具有最大-最小标准的优化问题[83]。通过适当的简化，可以获得传输功率分配和子载波调度的次优解。动态资源分配方案能够使分配解决方案适应瞬时AP负载条件。然而，它在AP侧需要CSI，并且计算复杂度高于静态资源划分方法。

除了借鉴RF蜂窝技术的方法外，还考虑了在发射机和接收机侧利用角度分集的LiFi网络中的独特方法[84]。在接收器侧，可以安装多个具有小视场和不同方向的PD检测器，以用作角分集接收器，如图所示。第4（d）段。来自标记AP的期望信号和来自其他相邻AP的CCI可以从不同方向入射到接收器，并且由不同的PD检测器检测。通过使用各种组合技术，可以在不损失频谱效率的情况下减轻CCI的影响。使用成像接收器，还可以实现可考虑的空间分集来抑制CCI[85]。在AP侧，可以在AP上安装多个窄波束宽度的光源，以形成角度分集发射器，如图所示。第4（d）段。在这样的系统中，面向期望UE的光源是活动的[86]。由于波束宽度较窄

CCI的传播仅限于一个非常有限的区域。使用角分集技术的干扰协调带来的性能改进是以增加硬件和算法复杂性为代价的。

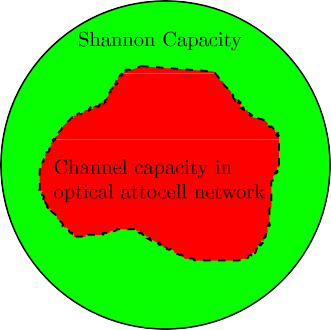
另一种有前途的干扰缓解方法是协调来自多个AP的传输，以便由多个AP为小区边缘用户提供服务，如图所示。第4（e）段。这在RF无线系统中被称为协作多点联合传输（CoMP-JT）。然而，这个概念可以更容易地部署在LiFi网络中，因为在基于IM/DD的系统中没有快速衰落效应。除了消除CCI和增强所需信号的好处外，由于存在多个LoS传输路径，阻塞的可能性较低[67，87]。特别是，基于CoMP JT的概念，李提出了一种改进的以用户为中心的矢量传输技术，该技术具有强制零预编码，以提供更好的带宽效率和灵活性[67]。另一方面，CoMP JT基于相邻AP之间的协调，这需要集中控制。

1. LIFI网络性能分析

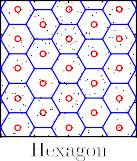
在本节中，将考虑并评估LiFi网络的性能。这被扩展到混合LiFi/Wi-Fi网络。最后，我们报告了在学校部署的真实世界混合LiFi/Wi-Fi网络的结果。通过两个网络之间的适当合作，在没有相互干扰的情况下，可以显著提高整体系统性能。

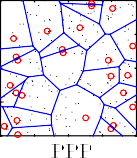
1. 蜂窝LiFi网络的容量

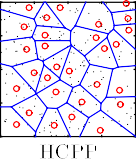
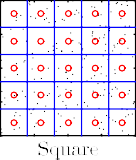
无线容量是LiFi网络中一个重要的系统性能指标。Shannon提出了假设高斯信号和噪声的通用通信链路[88]的信道容量界限。在基于IM/DD的光学无线系统的情况下，对光学



（a）





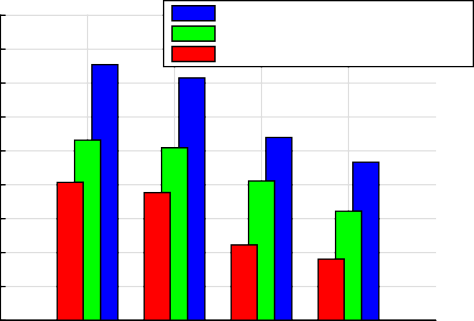


（b）

900

800

无编码自适应调制



香农容量

自适应编码调制技术

非编码自适应调制

平均下行链路数据速率[Mbps]

700

600

500

400

300

200

100

0

六角形正方形

（c）

HCPP PPP公司

**图5.（a）L** iFi网络中Shannon容量上限和信道容量之间的关系。（b） LiFi网络中的各种单元布局。（c）平均小区半径为2.5米、源半功率半角度为40的LiFi网络中的下行链路性能示例◦.

传输系统被强加，这为信号被约束为实数和非负的光链路提出了新的容量边界。许多工作已经提出了在存在噪声的情况下具有平均光功率和峰值光功率约束的基于IM/DD的光无线通信系统的更精确的容量边界[89，90]。特别是，马考虑了具有平均电力约束的两个用户的广播信道的可实现数据速率[91]。然而，这些研究考虑了点对点链路，并且只考虑了接收器处的噪声。为了分析LiFi网络，我们考虑了光电转换后接收器处的电信号，这些电信号是双极性的，并考虑了CCI在电域中的影响。因此，我们使用香农极限作为上限来估计LiFi网络的信道容量。如图6所示，如图5（a）所示，通过Shannon–Hartley方程计算的上限与LiFi网络的实际系统容量之间存在差距。

然而，这个上限有助于理解趋势和系统参数之间的基本关系及其对可实现数据率的影响。因此，我们将LiFi链路的上限定义为



Σ

*σ*2*H*02

0

2 2

*i*∈*ii*

*σ H* +*WN*

*i*

0

噪声项W N0的增加。因此，为了使用大的调制带宽，*需要*在高频区域中具有高信道增益的前端元件，并且来自标记AP的传输功率必须足够。

如第2节所述，信道增益项Hi-2不仅取决于前端元件，还取决于室内自由空间信道，这*与A*P的空间分布有关。Chen评估了LiFi网络的下行链路性能，研究了各种网络部署[21]。就CCI而言，六边形和泊松点过程（PPP）单元部署分别被用作最佳和最差情况。这是因为，一方面，在六边形蜂窝布局的情况下，AP之间的间隔最大化，这将强CCI的出现限制在蜂窝边缘的有限区域内。另一方面，在PPP蜂窝布局中，AP之间的分离没有限制。因此，由此产生的CCI更加明显。在LiFi网络部署在现有照明网络之上的假设下，在实际情况下，灯具的空间布局不太可能遵循优化的六边形网格或完全随机的PPP布局。因此，我们考虑两种额外的AP拓扑，它们可以模拟更多

1

*c*=2

*W*对数2

1+

*,* **(1)**

紧密实用的部署。一种是正方形网格布局，

第二种是遵循核心点工艺（HCPP）[92]的随机布局，如图所示。第5（b）段。下行链路

其中W表示*调*制带宽，σ2表示

具有各种AP布局的LiFi网络的性能是

来自第i个AP的电信号方差，以及

*i*

*Hi*2表示

如图5（c）所示。给出的结果与

从第i个AP到期望用户的信道增益。I是指使*用*相同传输资源的AP的集合，从而导致CCI，而*N*0是双面噪声功率谱密度。在i＝0的情况下，这对应于服务AP。在等式（1）中，对数函数中的有理项对应于-

10005000

012

对应于电信号与干扰加噪声比（SINR）。SINR越高，可实现的容量就越高。有多种方法可以提高SINR。通过检查

在SINR表达式中，适当的资源分配能够使CCI项i∈iσ2 Hi 2的值最小化。此外，希望最大化调制频带-

*i*

Σ

对数函数外的*宽度*W。然而，随着W的增加，由于前端低通特性，信道增益项Hi 2减小，这也导致

使用光谱高效直流光的LiFi网络

OFDM调制。数据速率计算基于实用的白色LED[93]。结果表明，可实现的平均下行链路数据速率范围为180至530Mbps，六边形和PPP小区部署的系统分别提供最高和最低的数据速率。方形网格网络实现的数据速率比六边形网络实现的略差。HCPP网络实现的数据速率高于PPP网络，但低于方形网格网络。

LiFi中的上行链路带来了一些额外的挑战。首先，调制技术的能效是关键，因为移动设备的操作受到电池的限制。因此，分层调制技术[94，95]，

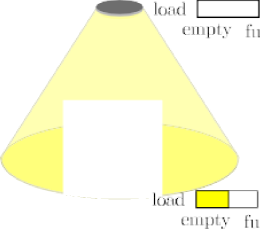
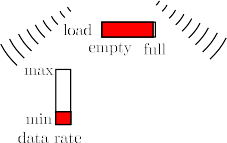
似乎最合适，因为它们实现了几乎为零的直流偏置，这是高速IM/DD系统中的主要能源消耗。第二，由于移动终端可以采取任何定向，定向传输可能产生显著的信噪比（SNR）波动。只有少数研究关注LiFi网络的上行链路[55，56]。用于开发鲁棒上行链路通信的主要原理是基于空间分集。空间多样性的有效性也已在可靠性是关键问题的工业环境中得到证明[96]。在最近的一项研究中，研究表明，通过考虑移动设备至少三侧的发射机，可以开发用于上行链路的全向发射机[97]。

1. 混合LiFi/Wi-Fi网络及其负载平衡技术

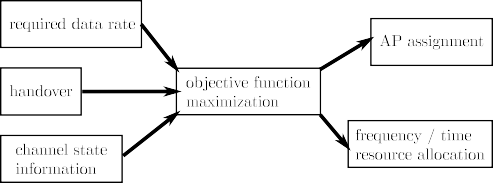
可以部署LiFi网络来卸载来自更高层RF网络（例如Wi-Fi）的流量。Wi-Fi技术使用低效的载波感应多址方案，并且带宽有限。在大的室内区域内，相同的光谱不能以与红外和可见光谱相似的密度重复使用。因此，Wi-Fi的总系统吞吐量有限，并且当有太多活动设备时，用户数据速率较低，如图所示。第6（a）段。相反，每个LiFi AP可以提供高速无线连接。然而，如图6（b）所示，在LiFi独立网络中，强阻塞和快速UE移动/旋转可能会导致UE和LiFi AP之间的连接变得不可靠。因此，合作

在Wi-Fi和LiFi网络之间，可以潜在地缓解每个系统的弱点，并提高整体系统性能[58]，如图所示。第6（c）段。此外，为未来的小蜂窝网络提出的以用户为中心的架构为实现这种跨网络技术协作提供了便利[67]。Ayyash[98]报道了一种原型混合网络，它显著提高了平均系统吞吐量。

这种混合网络中的有效负载平衡是主要问题之一[99]。根据信道、用户位置和速度以及负载条件，调整AP关联和传输资源的分配，以最大化给定的目标函数，如图所示。第6（d）段。混合LiFi/Wi-Fi网络中的负载平衡技术旨在联合分配LiFi和Wi-Fi系统的传输资源[100]。这形成了一个复杂的优化问题，并且已经研究了各种方法来解决这个问题。王将负载平衡挑战表述为一个混合整数非线性规划问题[101]。提出了一种联合优化算法和一种单独的优化算法，可以找到最优解，但计算复杂度较大。李在VLC/Wi-Fi混合网络中进行了另一项负载平衡优化研究，其中包括了VLC网络中的组合传输和矢量传输[76]。然而，计算复杂度极高。在王的后续研究中，提出了一种基于博弈论的分布式方法[102]，该方法要求较低的计算复杂度，但提供了一种解决方案



（a） （b）



（c） （d）

**图6.（a）W** i-Fi独立网络。（b） LiFi独立网络。（c） LiFi/Wi-Fi混合网络。（d） LiFi/Wi-Fi混合网络中的负载平衡。

仅渐近于全局最优。该方法在解决非常复杂的跨层优化问题时非常灵活。然而，这种启发式方法的易处理性很低，这使得分析评估和最优性证明变得困难。在最近的研究中，研究了在UE移动和旋转的动态条件下，LiFi/Wi-Fi混合网络中的负载平衡[103]。已经发现，与报告的解决方案相比，使用最佳负载平衡解决方案，用户服务质量可以提高80%[102]。请注意，服务质量是指用户满意度，定义为所获取的数据速率与所需数据速率的比率。除了最大限度地提高系统通信性能外，还考虑了节能的负载平衡。Kashef对RF/VLC混合网络中的负载平衡在能效方面的优化进行了研究[104]。已经发现，在异构RF网络中集成LiFi可以显著提高能效，但在这一领域还需要做更多的工作。

1. LiFi集成到混合LiFi/Wi-Fi软件定义的网络试验台

为了便于网络算法（如切换）的实验验证，我们开发了一个测试台，如图所示。7。试验台由六个LiFi atto电池和一个Wi-Fi AP组成。AP通过交换机互连到集中式软件定义网络（SDN）OpenDaylight控制器。这通过南向接口管理启用SDN的网络，同时支持北向上其代表性状态转移应用程序接口上的应用程序。LiFi接入和流量工程应用程序正在测试平台上运行，支持网络监控和管理、用户移动性和网络负载平衡。SDN控制器具有在AP上运行的软件代理，该软件代理定期向控制器发送AP的状态。这反过来将收集的网络状态暴露给开发的应用程序，以支持上述服务。

测试平台生成与用户、网络、流量和支持的服务相关的数据。由于测试台支持异构LiFi和Wi-Fi网络之间的垂直切换，因此可以跟踪用户在从LiFi到LiFi以及从LiFi到Wi-Fi的转换过程中的数据流。在移动设备上运行的高清晰度视频服务的水平和垂直切换的示例如图8所示。移动用户缓慢地从LiFi AP的中心移动到另一个LiFi美联社，穿过重叠区域。然后，它从LiFi AP移动到Wi-Fi AP。

该初步结果表明，水平切换的时间短于垂直切换的时间，如图8所示。在这两种切换事件中，用户都会经历短暂的服务中断，然而，由于服务以缓冲模式运行，这并不明显。

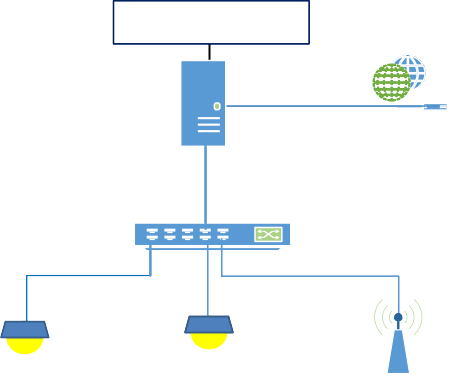
在图9中，当用户离开LiFi AP的中心时，绘制了SNR。SNR是通过系统级模拟和测量来确定的。LiFi AP在小区中心周围提供高SNR，可以利用自适应调制和编码技术来实现非常高的数据速率。它还显示了光信号的空间限制，可用于构建超密集无线网络（在1米范围内，信噪比下降了15dB）。在下一节中，我们将提供真实世界中学校LiFi网络部署的结果。

1. 真实世界的使用案例：课堂中的LiFi流量卸载

在本节中，我们展示了一个真实世界用例的结果，其中除了Wi-Fi网络外，还在教室中部署了LiFi网络。网络拓扑结构由八个LiFiattocell AP组成，如图10所示。LiFi attocell接入点与另外两个为七个教室提供服务的Wi-Fi接入点共存。Wi-Fi AP是商用的并且基于IEEE802.11ac标准。每个Wi-Fi AP可以支持300到867Mbps之间的数据速率，具体取决于操作模式和带宽。

SDN应用程序

SDN应用程序



SDN控制器和服务器

**电话：10.10.4.254**

爱丁堡大学（UoE）代理

**电话：129.215.61.0/24**

**AP运行**



**IP：10.10.4.15**

转换

**IP：10.10.4.21 IP：10.10-422 IP：10.104.23**

**无线接入点**

软件代理

s

**LiFi/WiFi收发器**

**双环磁性扫雷**

**二**

**故障因素**

**i**

**tt公司**

**LiF/WiFi收发器**



**用户设备3**

**U**

**s**

**d**

**e**

**i**

**c**

**3**

**t**

**t**

**r**

**任何一**

**LiFi/WiFi收发器**

**WiFi接入点**

**光照上网技术**

**用户设备1用户设备2**

**U**

**d**

**i**

**2**

**d**

**i**

**1**

**图7.实验SD** N支持的LiFi/Wi-Fi网络测试台图，LiFi研发中心，UoE。

**3**

**107 LiFi/WiFi混合网络中的切换事件管理**

**LiFi AP1之间的重叠区域**

**和LiFi**

**无线局域网AP 1AP2**

**信道接入**

**无线局域网AP2**

**信道接入**

**WiFiAP信道**

**无法访问LiFi AP**

**覆盖范围**

**平均视频流数据速率**

**2.5**

**平均视频流数据速率（bps）**

**2**

**1.5**

**1**

**0.5**

**0**

**0 10 20 30 40 50 60**

**测量时间（s）**

**图8.在用户设** 备从LiFi切换到LiFi和从LiWi-Fi切换到Wi-Fi期间测量的平均数据速率。

**35**

基于测量信噪比仿真的信噪比

s

**30**

**25**

**20**



**信噪比（dB）**

**15**

**10**

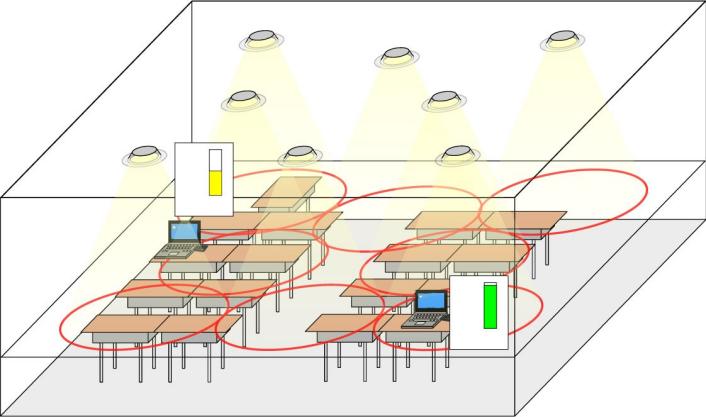
**5**

**0**

**20406080 100 120 140 160 180 200 220**

**距离（cm）**

**图9.在Li** Fi attocell下，在不同距离下基于模拟和测量的SNR。



**图10.2号教** 室中的LiFiAP和为两个教室服务的Wi-FiAP的网络拓扑。

Wi-Fi接入点部署在学校的走廊上。因此，每个AP通常为大量用户提供服务。这可能会导致众所周知的吞吐量下降，这是由于保留解析导致的MAC（介质访问控制）开销。

一个商用的LiFi系统被部署在一个教室里。每个LiFi AP可以支持直径在2.8米到3.5米之间的圆形覆盖区域。LiFi接入点以全双工模式运行，并支持部署的接入点之间的多用户接入和互联网协议切换。每个LiFi AP最多可支持八个用户，最大聚合数据速率为43Mbps。这对应于每个教室344Mbps的总最大聚合数据速率。我们注意到，接入点的数据速率明显低于实验室实验中报告的VLC传输速度。主要原因是这种概念验证系统使用了现成的未经修改的LED灯具，其电带宽在2MHz的范围内。这种在现实世界中进行概念验证演示的主要目的是展示使用同一系统的照明和无线网络的同时功能。未来的升级将包括在灯具内集成定制的光学组件，从而实现1和10 Gbps的聚合数据性能。后者将需要定制的灯具，这些灯具能够进行波分复用。

LiFi AP的安装受到现有荧光照明设备和现有火灾/烟雾探测器安装点的限制。LiFi灯具与现有基础设施一起部署。因此，教室内的一些区域没有被LiFi充分覆盖。图10显示了网络设置。因此，根据用户位置的不同，预计用户性能是可变的。理想情况下，LiFi AP将取代现有的照明基础设施，并将基于房间拓扑进行优化，以在照明和通信之间提供最佳折衷[105]。

开展了一项测量活动，目的是比较LiFi和Wi-Fi网络的性能，并评估总的总数据速率。用户数据速率被用作性能度量。22名学生同时接入了Wi-Fi网络，相邻的两个教室都只提供Wi-Fi服务。相邻教室的学生人数是一样的。基于不同目标数据率的无约束尽力而为数据率进行了两次测试：

* 每个用户1Mbps的目标数据速率，以及
* 每个用户3Mbps的目标数据速率。

LiFi和Wi-Fi网络实现的用户数据速率的累积分布函数（CDF）如图所示。11为1Mbps和3Mbps的数据速率目标，而在图12中报告了没有目标的数据速率。图11中的结果表明，大多数用户都达到了目标数据速率。然而，由于LiFi AP的低时间位置，一些用户达不到目标数据速率。图12表明，LiFi网络中有一些用户的数据速率相当高，最高可达20Mbps。它还表明，尽管给定的LiFiAP的最大数据速率比部署的Wi-Fi AP的最高数据速率低大约10倍，但在LiFi网络中用户峰值数据速率更高。LiFi和Wi-Fi网络的平均数据速率如表1所示。结果表明，LiFi网络在“尽力而为”的平均数据速率方面优于Wi-Fi网络，

1



无线局域网1 Mbps

无线局域网3 Mbps

WiFi1Mbps

WiFi3Mbps

0.8

0.6

CDF公司

0.4

400

300

由于LiFi流量卸载导致的WiFi数据速率百分比激增[%]

200

0.2

100

0

0.5 1 1.5 2 2.5 3

数据速率[Mbps]

0

0 2 4

6 8 10

**图11.基于1M** bps和3Mbps数据速率目标的Wi-Fi和LiFi用户的数据速率的CDF。

每个用户的目标数据速率[Mbps]

**图13.相邻教室** 的Wi-Fi聚合数据速率激增。

1

0.8

0.6

CDF公司

0.4

0.2

0

无线局域网

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

数据速率[Mbps]

1. 结论

本文表明，建立基于自由空间光通信的未来蜂窝系统是可能的。在这种情况下，它强调，为了实现这一目标，自由空间光通信的重点必须从VLC中的点对点链路级数据速率改进转移到优化无线网络中的数据密度。它

**图12.假设没** 有数据速率目标的Wi-Fi和LiFi用户的数据速率的CDF。

**表1.Wi-Fi 和LiFi网络实现的平均数据速率**

表明LiFi可以显著改善Wi-Fi网络

通过卸载数据流量。这有可能将目前只有在光纤通信中才能实现的数据速率扩展到最终用户，当然，最终用户是我们的移动设备。然而，为了实现这一愿景，将需要新的光学设备。同时，本文表明，可以显著提高数据密度

**模拟用户目标数据速率**

**LiFi用户平均用户数据速率**

**[Mbps]**

**Wi-Fi用户平均数据速率[Mbps]**

将LiFi与Wi-Fi结合使用。这是因为LiFi

允许小区致密化中的阶跃变化改进，从而实现传输资源的根本重用。这是一个

尽最大努力6.245 .57

1百万磅0 .940 .95

3百万英镑 2.50 2.79

如图12所示。然而，研究结果也突显出，与目标数据速率为3Mbps的Wi-Fi网络相比，LiFi网络的表现稍逊。这是由于位于LiFi attocell边境地区和教室死点区域的表现不佳的用户设备实现了低数据率。

这项概念验证研究的一个间接但相当重要的结果是，邻近的只有Wi-Fi的教室的数据速率激增。这是因为将数据流量卸载到LiFi。相邻教室的数据速率增益如图所示。13针对不同的目标日期速率。

这显示了LiFi网络卸载流量的能力。这一功能在学校和机场等密集环境中尤其有益。结果还表明，在这种情况下，在教室的小面积内可以实现频率重用增益。我们未来的工作将旨在将第5节中描述的实验室试验台中开发的基于SDN的动态负载平衡算法应用于真实世界的用例，例如课堂中的LiFi网络。

由于需要连接到互联网的设备数量不断增加，这是一个重要的功能。定义超越智能手机时代的移动设备将需要在数据速率、延迟和能效方面进行逐步改进，例如在增强和虚拟现实设备中。然而，在我们未来的智能家居和智能城市中，将有更多的智能机器类型设备和大量传感器，所有这些都将依赖于可靠和高速的无线连接。在商业背景下，LiFi将使照明行业能够将其商业模式扩展到电信行业，反之亦然。LiFi提供了重大的经济机遇，但与此同时，为了充分利用红外和可见光领域的大量未经许可的光谱，改进LiFi系统也面临许多有趣的科学挑战。

基金工程与物理科学研究委员会（EP/R00701/1）；沃尔夫森基金会。

鸣谢。这项工作得到了工程和物理科学研究委员会（EPSRC）在Harald Haas的既定职业奖学金（EP/R07101/1）、INITIATE（EP/P003974/1）和

TOUCAN（EP/L0020009/1）以及英国皇家学会沃尔夫森基金会。

参考信息

1. N.Zheludev，“LED的生命和时代——100年的历史”，《国家光子学》189-192（2007）。
2. 朱和甘斯，“高速红外本地无线通信”，IEEE通讯。杂志25（8），4-10（1987）。
3. F.R.Gfeller和U.Bapst，“通过扩散红外辐射进行无线内部数据通信”，Proc。ieee671474-1486（1979）。
4. J.R.Barry、J.M.Kahn、E.A.Lee和D.G.Messerschmitt，“用于无线网络的高速非定向光通信”，IEEE网络。5，44–54（1991年）。
5. J.M.Kahn和J.R.Barry，“无线红外通信”，Proc。ieee85265-298（1997）。
6. N.Holonyak、S.F.Bevacqua、C.V.Bielan、F.A.Carranti、B.G.Hess和S.J.Lubowski，“Ga（As1-xPx）p-N结的电学性质”，Proc。IEEE 51364（1963）。
7. S.Nakamura，T.Mukai和M.Senoh，“高功率GaN p-n结蓝光发射二极管”，Jpn。J.应用。物理。1998年1月30日至2001年2月30日（1991年）。
8. H.Amano、M.Kito、K.Hiramatsu和I.Akasaki，“用低能电子束辐照（LEEBI）处理的Mg掺杂GaN中的p型导电”，Jpn。J.应用。物理。2012年12月28日至114年12月（1989年）。
9. Y.Tanaka、T.Komine、S.Haruyama和M.Nakagawa，“利用多个白色LED作为照明的室内可见通信”，载于第12届IEEE个人、室内和移动无线电通信国际研讨会论文集（2001），第2卷，

第81–85页。

1. Y.Tanaka、S.Haruyama和M.Nakagawa，“用于无线家庭链路的白色LED无线光传输”，载于《第12届IEEE个人室内和移动无线电通信国际研讨会论文集》（2000），第2卷，第1325–1329页。
2. J.Grubor、S.C.J.Lee、K.D.Langer、T.Koonen和J。

W.Walewski，“磷光白光LED的无线高速数据传输”，载于《第33届欧洲光通信会议和展览会论文集》（2007），第1-2页。

1. M.Z.Afgani、H.Haas、H.Elgala和D.Knipp，“使用OFDM的可见光通信”，载于IEEE第二届网络和社区发展试验台和研究基础设施国际会议论文集（2006），

第129-134页。

1. N.T.Le、M.S.Ifthekhar、Y.M.Jang和N.Saha，“光学相机通信综述：挑战与机遇”，IET光电子。9172-183（2015年）。
2. M.Kinoshita、T.Yamazato、H.Okada、T.Fujii、S.Arai、T.Yendo和

K.Kamakura，“基于图像传感器的I2V-VLC、V2I-VLC和V2V-VLC移动发射机的运动建模”，载于IEEE全球经济研讨会（GC Wkshps）（2014），第450–455页。

1. 罗、张、加塞姆洛伊、黎明、蔡、唐、彭、韩，“基于RGB LED的光学相机通信的实验演示”，IEEE Photon。J.7904212（2015）。
2. S.Cincotta、A.Neild、C.He和J.Armstrong，“使用孔径和象限光电二极管的可见光定位”，载于IEEE全球经济研讨会（GC Wkshps）（2017），第1-6页。
3. H.Steendam、T.Q.Wang和J.Armstrong，“使用接收信号强度测量和基于孔径的接收器进行室内可见光定位的理论下限”，J.Lightwave Technol。35109-319（2017）。
4. A.A.Al Hameed、S.H.Younus、A.T.Hussein、M.T.Alresheed和

J.M.H.Elmirghani，“LiDAL:光检测和定位”，IEEE Access 7，85645–85687（2019）。

1. B.周，A.刘和V.刘，“具有未知功率发射的可见光通信系统的联合用户位置和方向估计”，IEEE Trans。无线通讯。185181–5195（2019）。
2. H.Haas，L.Yin，Y.Wang和C.Chen，“什么是LiFi？”J.光波技术。第341533-1544页（2016年）。
3. C.Chen，D.A.Basnayaka和H.Haas，“光attocell网络的下行链路性能”，J.LightwaveTechnol。34137-156（2016）。
4. 思科视觉网络指数，“2017-2022年全球移动数据流量预测更新”，白皮书（2019），https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/controllel/serviceprovid[er/visualnetworking-in](http://www.cisco.com/)dex vni/white-paper-c11-738429.html。
5. I.Stefan、H.Burchardt和H.Haas，“VLC和RF毫微微蜂窝网络之间的区域频谱效率性能比较”，IEEE国际通信会议（ICC）（2013），

第3825–3829页。

1. IEEEP802.11-光通信任务组，“IEEE 802.11光通信TG的现状”（2019），http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb\_update.[htm。](http://www/)
2. E.Calvanese Strinati、S.Barbarosa、J.L.Gonzalez Jimenez、D.Ktenas、N.Cassiau、L.Maret和C.Dehos，“6G：下一个前沿：从全息信息到使用亚太赫兹和可见光通信的人工智能”，IEEE Veh。技术。Mag.14（3），42-50（2019）。
3. M.A.Khalighi和M.Uysal，“自由空间光通信综述：通信理论视角”，IEEE Commun。调查。教程162231–2258（2014）。
4. H.Le Minh、D.O'Brien、G.Faulkner、L.Zeng、K.Lee、D.Jung、Y.Oh和E.T.Won，“使用后均衡白色LED的100Mb/s NRZ可见光通信”，IEEE Photon。技术。莱特。21063-1065（2009年）。
5. J.R.Barry、J.M.Kahn、W.J.Krause、E.A.Lee和D.G.Messerschmitt，“室内无线光信道的多径脉冲响应模拟”，IEEE J.Sel。区域公社。11367-379（1993年）。
6. V.Jungnikel、V.Pohl、S.Nonnig和C.vonHelmolt，“无线红外通信信道的物理模型”，IEEE J.Sel。区域公社。20631-640（2002年）。
7. E.Sarbazi、M.Uysal、M.Abdallah和K.Qaraqe，“可见光通信的室内信道建模和表征”，第16届国际透明光网络会议（2014），第1-4页。
8. M.Uysal、F.Miramirkhani、T.Baykas和K.Qaraqe，“室内环境的IEEE 802.11bb参考信道模型”（2018），https://www.researchgate.net/publica[tion/327572](http://www.researchgate.net/publication/327572598_IEEE_)598\_IEE[E\_80211bb\_参考\_通道\_模型\_室内环境。](http://www.researchgate.net/publication/327572598_IEEE_)
9. J.Vucic、C.Kottke、S.Nerreter、K.D.Langer和J.W.Walewski，“513 Mbit/S基于DMT的可见光通信链路-白色LED的调制”，J.Lightwave Technol。283512–3518（2010年）。
10. L.Zeng、D.O'Brien、H.Le Minh、K.Lee、D.Jung和Y.Oh，“通过在室内可见光通信系统中使用均衡来提高数据速率”，载于第四届IEEE国际通信电路与系统会议（ICCSC）（2008），第678–682页。
11. J.J.D.McKendry、D.Massoubre、S.Zhang、B.R.Rae、R.P.Green、E.Gu、R.K.Henderson、A.E.Kelly和M.D.Dawson，“使用CMOS控制的微型发光二极管阵列的可见光通信”，J.Lightwave Technol。30，61-67（2012年）。
12. 丁，C.-L.I，和Z.Xu，“具有不同源辐射模式的室内光无线信道特性”，IEEE光子。J.8790115（2016）。
13. H.Chen和Z.Xu，“OLED面板辐射模式及其对VLC通道特性的影响”，IEEE Photon。J.107901410（2018）。
14. F.Miramirkhani、O.Narmanlioglu、M.Uysal和E.Panayirci，“VLC的移动信道模型及其在自适应系统设计中的应用”，IEEE Commun。莱特。21035-1038（2017）。
15. M.Uysal、F.Miramirkhani、O.Narmanlioglu、T.Baykas和E.Panayirci，“可视光通信的IEEE 802.15.7r1参考信道模型”，IEEE Commun。杂志55（1），212–217（2017）。
16. F.J.Lopez Hernandez、R.Perez Jimenez和A.Santamaria，“用于快速计算漫射IR无线室内信道上脉冲响应的光线跟踪算法”，Opt。工程392775-2780（2000）。
17. J.B.Carruthers和P.Kannan，“无线红外信道的迭代站点建模”，IEEE Trans。天线道具。第50759–765页（2002年）。
18. F.J.Lopez Hermandez和M.J.Betancor，“DUSTIN:计算IR无线室内信道脉冲响应的算法”，Electron。莱特。第331804-1806页（1997年）。
19. O.Gonzalez，S.Rodriguez，R.Perez Jimenez，B.R.Mendoza和A.Ayala，“使用基于蒙特卡罗的射线追踪算法对室内无线光信道上模拟脉冲响应的误差分析”，IEEE Trans。公社。53124-130（2005年）。
20. H.舒尔茨，“室内无线光通信信道的频域模拟”，IEEETrans。公社。第642551-2562页（2016年）。
21. F.Miramirkhani和M.Uysal，“可见光通信的信道建模和表征”，IEEE Photon。J.7，1-16（2015）。
22. K.Lee、H.Park和J.R.Barry，“可见光通信的室内信道特性”，IEEE通讯社。莱特。15217-219（2011年）。
23. T.Komine和M.Nakagawa，“利用多个白色LED照明的室内可见光无线通信阴影研究”，载于《第一届无线通信系统国际研讨会论文集》（2004），第36-40页。
24. C.Le Bas、S.Sahuguede、A.Julien Vergonjanne、A.Behlouli、P.Combeau和L.Aveneau，“人体对移动可见光通信链路的影响”，载于《第十届通信系统、网络和数字信号处理国际研讨会论文集》（2016），第1-6页。
25. 董，尚，高，李，“随机阴影下VLC信道建模研究”，IEEE光子。J.9，7908416（2017）。
26. P.Chvojka、S.Zvanovec、P.A.Haigh和Z.Ghassemlooy，“动态室内环境中可见光通信的信道特性”，J.Lightwave Technol。331719–1725（2015年）。
27. M.Kavehrad、M.I.S.Chowdhury和Z.Zhou，“使用LED阵列和蝇眼接收器进行光无线通信的MIMO技术”，载于《短程光无线》（Wiley，2015），第169-191页。
28. T.D.C.Little和M.Rahaim，“混合RF-VLC HetNets的网络拓扑”，载于IEEE夏季专题会议系列（SUM）（2015），第163–164页。
29. K.Chandra、R.V.Prasad和I.Niemegiers，“5G室内通信的架构框架”，载于国际无线通信和移动计算会议（IWCMC）（2015），第1144-1149页。
30. H.Ma，L.Lampe和S.Hranilovic，“室内多用户下行链路的混合可见光和电力线通信”，J.Opt。公社。净值。9635-647（2017年）。
31. R.Bian、I.Tavakkolnia和H.Haas，“15.73 Gb/s可见光与现成LED的通信”，J.Lightwave Technol。372418–2424（2019年）。
32. M.T.Alresheedi、A.T.Hussein和J.M.H.Elmirghani，“具有IR源和波束控制的VLC系统中的上行链路设计”，IET Commun。11311-317（2017）。
33. E.S.S.Edirisinghe、P.H.R.S.Karunarathna、D.M.T.B.Dissanayake和G.M.R.I.Godaliyada，“双向可见光通信系统的设计和实施”，载于IEEE第十届国际工业和信息系统会议（ICIIS）（2015），第519–524页。
34. P.Pérez-Nicoli、F.Silveira、X.Zhang和A.Amara，“双向VLC系统中的上行链路无线传输概述”，载于IEEE国际电子、电路和系统会议（ICECS）（2016），第588-591页。
35. M.B.Rahaim、A.M.Vegni和T.D.C.Little，“混合射频和广播可见光通信系统”，IEEE GLOBECOM研讨会（2011），第792-796页。
36. S.Shao、A.Khreishah、M.B.Rahaim、H.Elgala、M.Ayyash、T.D.C.Little和J.Wu，“室内混合WiFi VLC互联网接入系统”，载于IEEE第11届移动自组织和传感器系统国际会议（2014），第569–574页*。*
37. Y.Wang、S.Videv和H.Haas，“混合Li-Fi和Wi-Fi网络中的动态负载平衡与切换”，IEEE第25届个人、室内和移动无线电通信年度国际研讨会（PIMRC）（2014），第548–552页。
38. A.M.Vegni和T.D.C.Little，“VLC系统与协作移动设备的切换”，载于国际计算、网络和通信会议（ICNC）（2012），

第126–130页。

1. 梁，田，范，白，“一种新的可见光通信和LTE混合系统中的垂直切换算法”，载于IEEE第82届车载技术会议（VTC2015秋季）（2015），第1-5页。
2. X.Wu和H.Haas，“LiFi的切换跳过”，IEEE Access 7，38369–38378（2019）。
3. T.Nguyen、M.Z.Chowdhury和Y.M.Jang，“在可见光通信网络中使用预扫描和RSS预测的新型链路切换方案”，EURASIP J.Wireless Commun。净值。2013年，293（2013）。
4. F.Boccardi、R.W.Heath、A.Lozano、T.L.Marzetta和P.Popovski，“5G的五个颠覆性技术方向”，IEEE Commun。杂志52（2），74-80（2014）。
5. R.Zhang、J.Wang、Z.Wang、Z.Xu、C.Zhao和L.Hanzo，“异构网络中的可见光通信：为以用户为中心的设计铺平道路”，IEEE无线通信。2015年8月22日至16日。
6. 李，金，张，王，徐，韩佐，“用户至上：可见光网络中以用户为中心的集群形成干扰抑制”，IEEE Trans。无线通讯。15，39-53（2016）。
7. S.Feng，X.Li，R.Zhang，M.Jiang，andL.Hanzo，“混合定位辅助非晶细胞辅助用户中心可见光下行链路技术”，IEEE Access 4，2705–2713（2016）。
8. 李，霍，张，韩佐，“以用户为中心的可见光通信实现节能可扩展视频流”，IEEE Trans。绿色公社。净值。1，59–73（2017）。
9. A.戈麦斯，K.施，C.金塔纳，R.马赫，G.福克纳，P.贝维尔，

B.C.Thomsen和D.O'Brien，“400 Gb/s室内光无线通信链路的设计和演示”，J.Lightwave Technol。345332-5339（2016年）。

1. F.Zafar、M.Bakaul和R.Parthiban，“基于激光二极管的可见光通信：走向千兆级通信”，IEEE Commun。杂志55（2），144–151（2017）。
2. K.Wang、A.Nirmalathas、C.Lim和E.Skafidas，“4×12.5 Gb/s

室内应用的WDM光无线通信系统，”J.Lightwave Technol。1988年至1996年（2011年），第29页。

1. T.Koonen、J.Oh、K.Mekonnen和E.Tangdiongga，“使用转向铅笔束的超高容量室内光无线通信”，载于国际微波光子专题会议（MWP）（2015），第1-4页。
2. A.T.Hussein、M.T.Alresheedi和J.M.H.Elmirghani，“采用光束控制和计算机生成全息图的20 Gb/s移动室内可见光通信系统”，J.Lightwave Technol。335242–5260（2015年）。
3. M.Rahaim和T.D.C.Little，“可见光通信网络中的光干扰分析”，载于IEEE国际通信会议研讨会（ICCW）（2015），

第1410-1415页。

1. X.Li，R.Zhang和L.Hanzo，“混合可见光通信和WiFi中的协同负载平衡”，IEEE Trans。公社。631319–1329（2015年）。
2. A.A.Qidan、M.Morales Cespedes和A.G.Armada，“WiFi在基于盲干扰对准的LiFi混合网络中的作用”，载于IEEE第87届车载技术会议（VTC Spring）（2018），第1-5页。
3. D.Miras、L.Maret、M.Maman、M.Laugeois、X.Popon和D.Ktenas，“具有小区间干扰管理的高数据速率LiFi集成系统”，载于IEEE无线通信和网络会议（WCNC）（2018），第1-6页。
4. 崔，权，徐，“可见光通信室内光毫微微小区的性能”。公社。298-299，59–66（2013）。
5. 金，金，杨，孙，韩，

“基于载波分配可见光通信的小区间干扰缓解和室内定位系统”，载于第五届国际信号处理和通信系统会议（ICSPCS）（2011），第1–7页。

1. B.Ghimire和H.Haas，“光无线网络中的自组织干扰协调”，EURASIP J.Wirel。公社。净值。2012年，131（2012）。
2. C.Chen、S.Videv、D.Tsonev和H.Haas，“基于DCO OFDM的光attocell网络中的部分频率复用，”

J.光波技术。33，3986–4000**（2**015年）。

1. D.Bykhovsky和S.Arnon，“可见光通信系统中的多址资源分配”，J.Lightwave Technol。321594–1600（2014年）。
2. K.-H.Park和M.-S.Alouini，“用于室内MIMO-VLC系统的角度辅助反射镜分集接收机的优化”，IEEE全球通信会议（GLOBECOM）（2016），

第1-6页。

1. O.González、M.F.Guerra Medina、I.R.Martín、F.Delgado和

R.Pérez-Jiménez，“用于多用户可见光通信中公平资源分配的自适应WHTS辅助SDMA-OFDM方案”，J.Opt。公社。净值。827–440（2016年）。

1. Z.Chen，D.A.Basnayaka和H.Haas，“使用角度分集发射的光attocell网络的空分多址”，J.Lightwave Technol。352118–2131（2017年）。
2. R.Bai，H.Tian，B.Fan和S.Liang，“VLC网络中基于协调传输的干扰抑制”，载于IEEE第82届车载技术会议（VTC2015秋季）（2015），第1-5页。
3. C.E.Shannon，“通信的数学理论”，贝尔系统。《技术期刊》第27379–656页（1948年）。
4. A.Lapidoth，S.M.Moser和M.A.Wigger，“关于自由空间光强度信道的容量”，IEEE Trans。《信息理论》第54449–4461页（2009年）。
5. A.Chaaban，Z.Rezki和M.S.Alouini，“关于强度调制直接检测光广播信道的容量”，IEEE Trans。无线通讯。153114–3130（2016年）。
6. 马，杨，李，董，顾，李，“可见光通信网络中SISO信道和广播信道的封闭式可实现率”，光波技术杂志。352778-2787（2017年）。
7. J.G.Andrews、F.Baccelli和R.K.Ganti，“蜂窝网络中覆盖率和速率的易处理方法”，IEEE Trans。公社。593122–3134（2011年）。
8. A.M.Khalid、G.Cossu、R.Corsini、P.Choudhury和E.Ciaramella，“通过使用速率自适应离散多色调调制在磷光白色LED上进行1-Gb/s传输”，IEEE Photon。J.41465–1473（2012年）。
9. H.Elgala和T.D.C.Little，“SEE-OFDM:用于光学IM/DD系统的频谱和节能OFDM”，IEEE第25届个人、室内和移动无线电通信年度国际研讨会（PIMRC）（2014），第851–855页。
10. Q.王、宋、柯克伦、博兰德、庄、谢、，

A.J.Lowery、A.J.Lowey和A.J.Loweri，“基于FPGA的分层/增强型ACO-OFDM发射机”，光纤通信会议（2017），论文Tu3D.6。

1. P.W.Berenguer、P.Hellwig、D.Schulz、J.Hilt、G.Kleinpeter、J。

K.Fischer和V.Jungnikel，“实时光无线通信：工业生产环境中的现场试验”，载于欧洲光通信会议（ECOC）（2018），

第1-3页。

1. C.Chen、R.Bian和H.Haas，“LiFi中无线红外上行链路传输的全向发射机和接收机设计”，载于IEEE国际通信研讨会（ICC研讨会）（2018），第1-6页。
2. M.Ayyash、H.Elgala、A.Khreishah、V.Jungnini、T.Little、S.Shao，

M.Rahaim、D.Schulz、J.Hilt和R.Freund，“WiFi和LiFi在5G中的共存：概念、机遇和挑战”，IEEE通讯。Mag.54（2），64–71（2016）。

1. 马和张，“LiFi和WiFi混合网络的QoE驱动优化负载平衡设计”，IEEE通讯。莱特。22354–2357（2018）。
2. M.Obeed、A.M.Salhab、S.A.Zummo和M.-S.Alouini，“混合VLC/RF网络功率分配和负载平衡的联合优化”，J.Opt。公社。净值。10553–562（2018）。
3. 王，巴斯纳亚卡，吴，哈斯，“混合LiFi/RF网络中负载平衡的优化”，IEEE Trans。公社。651708–1720（2017年）。
4. 王，吴，哈斯，“室内混合LiFi/RF网络中具有阴影效应的负载平衡游戏”，IEEE Trans。无线通讯。162366–2378（2017年）。
5. Y.Wang和H.Haas，“混合Li-Fi和Wi-Fi网络中的动态负载平衡与切换”，J.Lightwave Technol。334671-4682（2015年）。
6. M.Kashef、M.Ismail、M.Abdallah、K.A.Qaraqe和E.Serpedin，“混合RF/VLC异构无线网络的节能资源分配”，IEEE J.Sel。区域公社。34883–893（2016年）。
7. I.Stefan和H.Haas，“用于可见光通信的LED阵列的最佳布置分析”，IEEE第77届车载技术会议（VTCSpring）（2013）。