

文章编号: 2095-2163(2019)05-0102-09

中图分类号: TP393.08

文献标志码: A

基于 LightFidelity 的可见光无线通信方法研究

李晓坤, 邵娜, 陈虹旭, 杨婧宇, 郑永亮, 杨磊

(黑龙江恒讯科技有限公司国家博士后科研工作站, 哈尔滨 150090)

摘要: 可见光无线通信 (LiFi) 是一种以白光 LED 为基础进行数据传输的新型无线光通信技术, 因成本低廉、不受电磁干扰、丰富的频谱资源、颇高的安全性和节约能源等优点, 引起了国内外学者的高度关注和持续研究。LightFidelity 利用可见光来实现无线通信, 即利用电信号控制发光二极管 (LED) 发出肉眼看不到的高速闪烁信号来传输信息。据相关学者的调查研究发现, 可见光无线通信拥有在实现照明功能的同时进行数据通信的一箭双雕的特性, 将在未来的通信领域中占据极其重要的地位并产生深远影响, 具有不可估量的市场潜力。该技术通过改变房间照明光线的闪烁频率进行数据传输, 只要在室内开启电灯, 无需 WiFi 也能轻松连接互联网, 使得无线信号不稳定、上网速度慢、WiFi 热点供不应求等问题得以缓解。本文对创建 LiFi 网络所需的要素和面临的挑战进行了简要概述, 对基于 LightFidelity 的可见光无线通信方法进行了相关研究, 主要介绍的方法有确定性方法和蒙特卡罗方法。

关键词: 可见光; 无线通信; LED 照明; 确定性方法; 蒙特卡罗方法

Research on visible light wireless communication methods based on LightFidelity

LI Xiaokun, SHAO Na, CHEN Hongxu, YANG Jingyu, ZHENG Yongliang, YANG Lei

(Heilongjiang Hengxun Technology Co., Ltd. Postdoctoral Programme, Harbin 150090, China)

[Abstract] Visible Radio Communication (LiFi) is a new type of wireless optical communication technology based on white LED. Because low cost, no electromagnetic interference, abundant spectrum resources, high security and energy saving, scholars at home and broad pay more and more attention and do sustained research on LiFi. LiFi uses visible light to communicate wirelessly, using electrical signals to control high-speed flickering signals from light-emitting diodes (LEDs) that are invisible to the naked eye. According to the investigation and research of relevant people, the visible wireless communication has the characteristics of "one kill two birds with one stone" in data communication; realizing illumination & wireless communication. It will occupy an important position and have far-reaching influence in the future communication field, and has immeasurable market potential. This technology transmits data by changing the flicker frequency of room lighting. As long as the lights are turned on indoors, it can easily connect to the Internet without WiFi, which alleviates the problems of unstable wireless signals, slow Internet access and short supply of WiFi hotspots. This paper gives a brief overview of the key elements and challenges in creating LiFi network, and studies the LightFidelity-based visible light wireless communication methods, the main methods introduced are deterministic method and Monte Carlo method.

[Key words] visible light; wireless communication; LED lighting; deterministic method; Monte Carlo method

0 引言

可见光无线通信 (简称 LiFi), 又称“光保真技术”。是由英国爱丁堡大学电子通信学院移动通信系主任、德国物理学家 Harald Hass, 汉译哈拉尔德·哈斯教授发明的利用诸如灯泡发出的光的可见光波谱进行数据传输的新型无线传输技术。LightFidelity 利用可见光来实现无线通信, 即利用电信号控制发光二极管 (LED) 发出的肉眼看不到的高速闪烁信号来传输信息。借助 LED 灯等已铺设好

的设备, 通过在灯泡上植入一个微小的芯片形成类似于 AP (WiFi 热点) 的设备, 使终端随时能接入网络。该技术通过改变房间照明光线的闪烁频率进行数据传输, 只要在室内开启电灯, 无需 WiFi 也能轻松连接互联网, 使得无线信号不稳定、上网速度慢、WiFi 热点供不应求等问题得以缓解。

可见光无线通信是利用快速的光脉冲无线传输信息的。不同的传输速率在光中会有相对应的不同编码, 使信息传输命令得以执行。例如 LED 开用 1 表示, 关用 0 表示, 快速开关的同时相应的信息得以

基金项目: 中小企业创新基金 (2017FF1GJ023); 专利优势示范企业基金 (2017YBQCZ029); 国家自然科学基金 (81273649)。

作者简介: 李晓坤 (1979-), 男, 研究员级高级工程师, 教授, 硕士生导师, 系统集成高级项目经理, CCF 高级会员, 主要研究方向: 虚拟化、人工智能、生物特征识别等; 邵娜 (1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 虚拟化、云计算、人工智能等。

通讯作者: 邵娜 Email: sn@newhx.com.cn

收稿日期: 2019-06-02

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

传递^[1]。由于 LED 的发光强度很强,人眼不会注意到光的快速变化,不同波长的光可用一个单独的数据通道进行传输,而同样波长的光波可以双向传输,大大提高了光传输数据的速率。

IR 网络需要专用的基础设施,而 VLC 只需要修改现有的照明系统,从而可以节省成本。重要的是,人类用户所需的照明水平导致的链路余量比 IR 系统高出许多数量级,因而使用简单的组件就可以实现较高的数据传输速率和较大的覆盖范围。可见光无线通信的诸多优点推动了该领域的快速发展。

1 基于 LightFidelity 的可见光无线通信方法

1.1 LiFiAttocell Networks

LiFi Attocell(LAC)网络概念如图 1 所示。房间由许多灯具点亮,在灯光照明模式下为用户提供照明和光学 AP。照明可以以房间主人不可见的高速调制,使用多种不同技术为每个灯具提供电力和数据,包括以太网供电(POE)和可编程逻辑操控器(PLC),提供光学下行链路^[2-3]。通过用户设备(UE)上的发射器来实现光学上行链路,通常使用 IR 源(因此其对用户是不可见的),以及靠近灯具的接收器。每一个灯具都充当无线 LiFi AP,由于来自单个光源照明受到高度限制,其可为小型区域提供高带宽密度。包含 AP 的灯具和仅供照明的灯具之间的平衡取决于网络的要求,但可能是所有灯具都包含 AP。与单个 AP 无线热点系统相比,这种蜂窝系统可以覆盖更大的区域并允许多个 UE 同时连接。在蜂窝网络中,无线传输资源的密集空间可以用于实现高数据密度,以每平方米每秒的比特数(bps/m²)为计量单位。因此,使用相邻信道链路的相邻区域相互干扰,这被称为同信道干扰 CCI^[4]。图 2 显示出了光学 Attocell 网络中的 CCI。

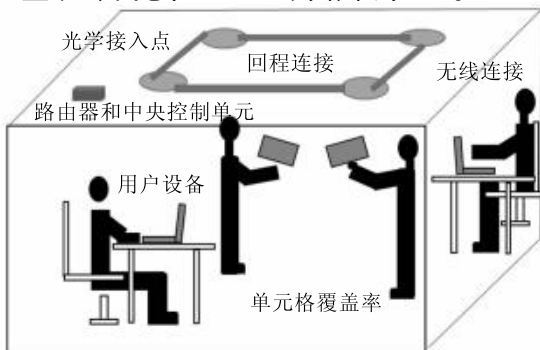


图 1 LiFi Attocell 网络的概念

Fig. 1 LiFi Attocell network concept

天花板上的灯充当形成移动网络的光学接入点。单个光源的接入点可以以双向的方式同时与多个终端通信。该系统具有移动性。当终端离开初始光接入点的覆盖区域并进入相邻接入点的覆盖区域时,启动切换。这意味着服务提供是无缝连接的。

先进的 CCI 缓解技术通常通过集中控制来操作多个 LiFi AP,如软件定义网络(SDN)服务器内的“管理程序”^[5]。中央控制器的主要任务是自动分配信号功率、频率、时间和波长资源;其它功能还包括实现多用户控制,以及移动终端从一个区域切换到另一个区域的过程等等。

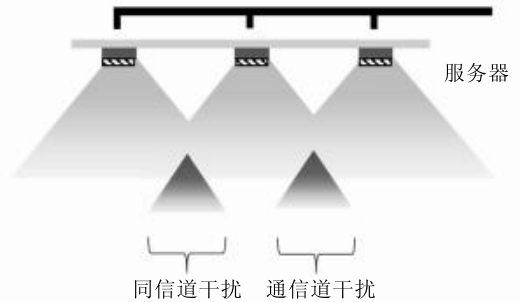


图 2 CCI 出现在相邻 AP 相同光谱重叠区域

Fig. 2 CCI appears in the same spectral overlap region of adjacent APs

与现有技术相比,LAC 网络具有许多优势。首先,与在所有方向上都有辐射信号的全向 RF 天线不同,LED 光源的构造方式是以固定的光功率进行定向辐射。因此,可见光信号的辐射被限制在有限的区域内。相比之下,RF 毫米波系统需要复杂且昂贵的天线波束形成技术来实现相同的目标。其次,LAC 网络可以通过修改现有的照明系统来实现。而构建具有相同 AP 密度的 RF 小型蜂窝网络会带来巨大的基础设施成本。此外,任何 LAC 网络都可以提供额外的容量,而不会干扰已经存在的 RF 网络。因此,LAC 网络可以以经济有效的方式增强第 5 代(5G)蜂窝系统^[6]。

从点到点的移动链接到基于可见光的全无线网络面临着一些挑战。在每个区域内,可以有許多用户,因此需要多种接入方案。必须考虑来自于在相邻区域中的通信信号的干扰,并且这很有可能是最显著的损害。提供上行链路(从 UE 到一个或多个 AP 的通信链路)需要与下行链路不同的方法。因为便携式设备需要的能耗低,并且设备上的上行链路可见光源可能会分散用户的注意力。

1.1.1 下行链路和上行链路传输

在蜂窝系统中,下行链路通信被定义为从 AP

到 UE 的数据传输^[7]。LAC 下行链路系统的基本设置如图 3 所示。来自固定装置的照明由数据进行强度调制,并传播到 UE 上的接收器。通常,光学元件用于将辐射集中到光电二极管(PD)上,光电二极管产生进一步放大的电信号来恢复数据。对于上行链路,通常优选 IR 链路,因为上行链路和下行链路之间的波长间隔允许通过适当的光学滤波同时进行双向通信。另外,UE 上的可见光源(通常是移动设备)会分散注意力。另一种可行的解决方案是使用传统的 RF 传输。研究表明,仅将 VLC 用于下行链路而 RF 用于上行链路的系统,显示出相对于仅使用 RF 网络的效率显著增益^[8]。

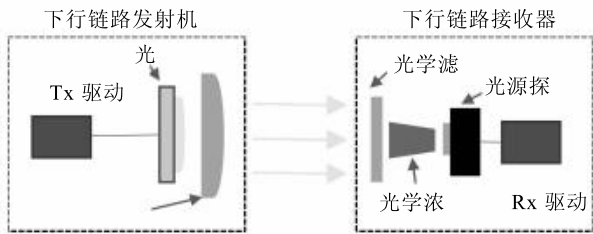


图3 LAC 下行链路传输系统中的关键组件

Fig. 3 Key components in the LAC downlink transmission system

1.1.2 干扰缓解

具有强方向性可见光源的光辐射图案限制了 AP 的覆盖区域内大部分辐射光的功率。因此,可以主要在边界处预期 CCI,但是由于光锥重叠,CCI 可能十分严重。因此,CCI 对具有一定密集空间的 LAC 网络中的下行链路提出了重要挑战。曾有学者提出了一种基于突发信令的干扰协调方案,将分集技术用于干扰管理。此外,还有关于分数频率复用(FFR)和联合传输(JT)以及用于 LAC 网络的角度分集发射机的研究。

1.1.3 多次访问

在一个蜂窝网络中,通常有多个 UE 位于同一个单元中。可以服务于多个 UE。被称为多用户访问(MA)的技术已经在蜂窝中开发了许多多址技术系统,如时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)、更高级的正交频分多址(OFDMA)和非正交多用户接入(NOMA),已经获得了广泛关注。

现在,有很多实验来研究网络 OWC 系统中的 MA。在 TDMA 中,给每个 UE 一个特定的时间进行传输。该方案可以直接用于基于强度调制(IM)/直接检测(DD)的 LAC 系统^[9]。在 CDMA 中,每个 UE 的信号用唯一的正交码“加密”,该正交码用作密钥,并且所有信号在相同时间和频率的信道上发送。

在接收器处,通过使用该特定链路的密钥从众多信号中过滤出所需信号。在 LAC 网络中许多正交码的设计可用于适应 CDMA、例如光正交码、单极 m 序列和 Walsh-Hadamard 码。然而,在基于光学正交频复用 O-OFDM 的 LAC 系统中,通过将不同组的正交子载波分配给多个 UE,使用 OFDMA 可以更自然地完成这一任务。已有研究人员发现 OFDMA 在多用户 VLC 系统中胜过 CDMA。如果相应的发射器由多色光源组成,则 VLC 的独特功能还可实现波分多址(WDMA)。在 WDMA 中,不同的 UE 由唯一的非干扰波长服务。

1.1.4 切换

切换是将正在进行的无线传输会话从当前 AP 转移到另一 AP 的过程。当移动终端移出当前 AP 的覆盖区域并移入到相邻 AP 的覆盖区域时,需要切换^[10]。如果传输信道受到干扰而严重降级或当前区域满载,则需要继续进行切换。这两种情况的切换通常被归类为在同一网络中的 AP 之间发生的水平切换。然而,通常存在多种接入技术,例如 WiFi, LTE(long term evolution) 和 LiFi。这意味着在不同位置存在不同类型的接入节点异构网络。如果 UE 正在从室内移动到室外,其中可能没有 LiFi 覆盖,则将触发从 LiFi 到 LTE 的无缝切换^[11]。不同系统 AP 之间的这种切换被归类为垂直切换。在这种混合系统中研究了具有切换的动态负载均衡方案。通常有 2 种类型的切换方案—硬切换和软切换。在硬切换过程中,UE 在连接到下一个 AP 之前应与当前 AP 断开连接,这更容易实现并且具有更低的硬件复杂度。但该服务可能会被硬切换方案中断。在软切换过程中,UE 保持连接到当前 AP,直到成功连接到下一个 AP 为止。软切换提供更好的用户体验,但需要更多的无线传输资源^[12]。随着区域面积的减小,预计切换频率会增加,增加的切换会话数会导致系统吞吐量的损失和服务质量的下降。在 LAC 网络中,切换开销特别重要,因为 LAC 网络由蜂窝网络中的最小区域构成。由于预期切换频率很高,为了拥有更好的服务质量,软切换是优选的,采用 LAC 网络的新的切换决策算法,可避免了乒乓效应。

1.1.5 回程连接

回程是 AP 与网络控制之间的通信链路。通常情况下,回程连接应能够提供可靠、高容量和低延迟的传输,以承载来自所有 AP 的无线接入流量。如果未来密集部署高速接入网络,回程容量需求将大

幅增加。回程问题的直接解决方案是增加光纤的部署, 提供最佳性能, 但成本很高。本文除考虑了基于以太网供电 (POE) 和电力线通信 (PLC) 的经济高效的回程^[13]外, 还提出了许多无线回程解决方案, 如毫米波、微波和自由空间光通信 (FSO)。LiFi 网络由单独的光学链路构成。

1.2 相关方法介绍

1.2.1 室内自由空间光传播

在室内空间中, 如果发射器和接收器之间没有障碍物, 则存在 LoS 信道。其次, 由于室内墙壁和其它物体的反射, 通道则由非视线 (NLoS) 部分组成^[14]。

1.2.2 通道 DC 增益

如图 4 所示, 定义光源为 T , 位置变量为 \vec{o}_s , 方向变量为 \vec{a}_s , 接受变量为 h , 位置变量为 \vec{a}_r , 方向变量为 \vec{o}_r , 还定义了 ψ_{FoV} 的 FoV 和物理面积 A_r 。考虑到光源作为原点, 某个立体角内的发射功率将入射到接收元件上。由于此立体角非常小, 因此可以用如下公式近似表示:

$$\Omega = \frac{A_r \cos(\psi)}{D^2} [sr], \quad (1)$$

其中, D 表示 S 和 R 之间的欧几里德距离。如果已知在光源处具有 Ω 的立体角和 φ 的辐射角, 那么其发射功率可以通过式 (1) 进行计算。接收元件 R 收集的功率可以确定为:

$$H_{DC} = \frac{(m+1) A_r}{2\pi D^2} \cos^m(\Phi) \cos(\psi) 1_{\psi \leq \psi_{FoV}}(\psi), \quad (2)$$

变量 D 、 Φ 和 ψ 可用如下方法计算:

$$D = \|\vec{a}_s - \vec{a}_r\|, \quad (3)$$

$$\cos(\Phi) = \vec{o}_s \cdot (\vec{a}_r - \vec{a}_s) / D, \quad (4)$$

$$\cos(\psi) = \vec{o}_r \cdot (\vec{a}_s - \vec{a}_r) / D, \quad (5)$$

其中, 运算符号 \cdot 代表点积运算。

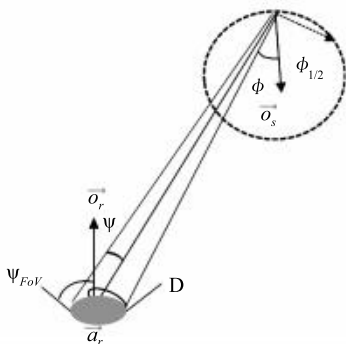


图 4 通道 DC 增益几何

Fig. 4 Channel DC gain geometry

1.2.3 视线通道脉冲反应

LoS 信道的设置如图 5 所示。具有指定的发射机 T_{TX} 和接收机 R_{Rx} 的 LoS CIR 可以根据公式 (6) 直接计算, 即:

$$h[0](t, T_{TX}, R_{Rx}) = \frac{(m+1)}{2\pi D^2} A_{pd} G_f G_c \cos^m(\Phi) \cos(\psi) 1_{\psi \leq \psi_{FoV}}(\psi) \delta(t - \frac{D}{c}). \quad (6)$$

其中, $\delta(u)$ 代表 Dirac delta 函数。注意, 公式 (1) 中的 A_r 等于在 LoS 信道中 PD 的实际物理区域 A_{pd} , 并且得到的 CIR 将通过滤波器损耗 G_f 和接收器侧的光聚集器增益 G_c 来缩放。

1.2.4 扩散通道脉冲反应

通常, 长方体的房间具有一定的尺寸, 内表面具有固定的反射率, 如图 5 所示。类似于石膏墙的室内表面会引起漫反射, 由镜子或窗户引起的镜面反射被认为是特殊情况 (在此, 仅关注由漫反射引起的通道)。基于射线追踪技术有 2 种流行的方法来计算由内部表面反射引起的 NLoS CIR^[15-16]。这 2 种方法分别称为确定性方法和蒙特卡罗方法。

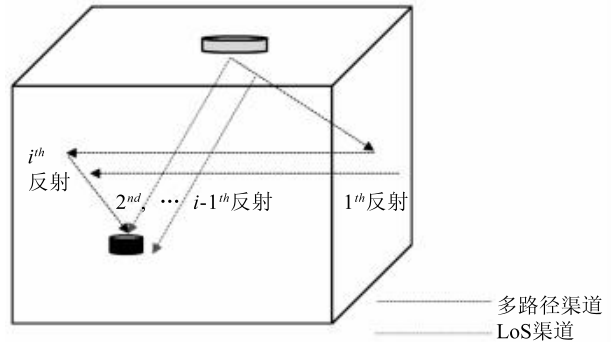


图 5 LoS 传播信道和 NLoS 多径传播信道的图示

Fig. 5 A graphical representation of the LoS and NLoS multipath propagation channels

1.2.5 确定性 NLoS CIR 计算方法

由于不同的反射次序, CIR 被多个分量分解, 如公式 (7) 所示:

$$h_{fs}(t, T_{Tx}, R_{Rx}) = \sum_{i=0}^{\infty} h^{[i]}(t, T_{Tx}, R_{Rx}), \quad (7)$$

其中, $h^{[i]}(t, T, R)$ 是 CIR 从 T 到接收元件 R 正在经历的 i 反射 ($i=0$ 时, 指的是 LoS CIR)。为了适应 CIR 的数值评估, 整个内表面被分成 N_e 块。位置矢量和每个区块的方向矢量分别表示为 \vec{a}_n 和 \vec{o}_n 。这些区块在相应的 NLoS 信道中处于发送和接收模式。在发送模式中, 第 n 个区块被视为具有辐射模

式的源元素 T_n ; 在接收模式中, 第 n 个区块被视为接收元素 R_n 。最大入射角可大至 $\pi/2$ ($\psi_{FOV} = \pi/2$), 接收块的物理面积为 ΔA 。接收功率应该通过 ρ_n 块的反射率来测量。经过 i 反射的 CIR 分量可以基于经历 $i-1$ 反射的 CIR 分量来计算。其公式如下:

$$h^{[i]}(t, T_{Tx}, R_{Rx}) = \sum_{n=1}^{N_e} h^{[0]}(t, T_{Tx}, R_n) \otimes h^{[i-1]}(t, T_n, R_{Rx}) = \frac{m+1}{2\pi} \sum_{n=1}^{N_e} \frac{\rho_n \cos^m(\Phi_n) \cos(\psi_n)}{D_n^2} 1_{\psi_n \leq \pi/2} h^{[i-1]}(t - \frac{D_n}{c}, \{\vec{a}_n, \vec{o}_n, 1\}, R_{Rx}) \Delta A. \quad (8)$$

其中, D_n , Φ_n 和 ψ_n 指 T_{Tx} 和 R_n 之间的量。随着 N_e 的增加 ΔA 相应减小, 该方法的准确度也随之增加。然而, 精确的 CIR 计算结果需要依靠很高的计算复杂度来完成, 因此需要花费很长时间来生成一个 CIR。

1.2.6 蒙特卡罗计算方法

利用蒙特卡罗计算方法, 在每个蒙特卡罗迭代中跟踪随机传播路径。通过多次重复跟踪传播过程, 可以产生稳定的 CIR 结果。

算法 1 利用蒙特卡罗法进行 CIR 模拟

- 1) Initialise $P_{opt,h}(t) = 0$ for all $t \in (0, t_{max})$
- 2) for $n_{iter} = 1, 2, \dots, N_{iter}$ do
- 3) Start to trace a photon with a unity power and a random direction, $\hat{T} = 0, \hat{P}_{opt} = 1$
- 4) while $\hat{T} < t_{max}$ do
- 5) Propagate the photon until it reach any obstacle with a traveling distance of $D, \hat{T} = \hat{T} + \frac{D}{C}$
- 6) Attenuate the power of the photon with the reflectance of the surface, $\hat{P}_{opt} = \rho \hat{P}_{opt}$
- 7) Calculate the CIR contribution to the receiver using (9)
- 8) Generate a new direction for the following propagation of the photon
- 9) end while
- 10) end for
- 11) Normalise the result CIR with N_{iter} as $h_{js}(t) = P_{opt,h} / N_{iter}$

在算法的步骤 1) 中, 向量 $P_{opt,h}(t)$ 记录在时刻 t 处接收的光功率, 以最大延迟 t_{max} 进行初始化。步骤 3) 中, \hat{P}_{opt} 被定义为记录传播中光功率的损耗

量, 初始化为 $\hat{P}_{opt} = 1$ 。 \hat{T} 用来记录光线经过的时间, 初始化为零值。若传输时间未达到 t_{max} , 传播继续。对于从一个点到另一个点的传播, 计算每次的传播距离 D 。基于 D , 可以更新每次实验的传播时间 \hat{T} 。此外, 下一次传播的输出功率是由接触表面的反射率 ρ 引起的。使用公式(9)可以计算更新来自当前点的 CIR 光功率的矢量贡献。对于下一次传播, 生成新的随机方向。在算法步骤 3) 和步骤 8) 中, 每个方向发生的概率与沿该方向的辐射强度成比例。对于大量迭代的 N 次相同跟踪过程, 最终的 CIR 可以通过将 N_{iter} 次的 P_{opt} 标准化来计算。只要 N_{iter} 足够大, 就可以获得具有低噪声的精确 CIR。该方法计算复杂度较低, 但由于计算的随机性, 微小的模拟误差是不可避免的。

$$P_{opt,h}(\hat{t}) = P_{opt,h}(\hat{t}) + \frac{\hat{P}_{opt} A_{pd}}{\pi D^2} 1_{\psi_n \leq \pi/2}(\psi) \cos(\Phi) \cos(\psi). \quad (9)$$

1.3 调制

传输数据最简单方法是使用基于脉冲的方案, 例如开关键控(OOK), 其中二进制“1”表示有脉冲, 而二进制“0”则表示无脉冲。然而, 这不能有效地利用在较宽的频率范围内可用的 SNR, 而多级调制方案则实现了这一点。例如, 可以通过使用 OFDM 等多信道传输来实现, 这也是应用最为广泛的例子。因为在 OFDM 中, 可以独立地处理每个正交子信道, 并且借助最佳的比特负载和功率负载, 可以接近达到最大可用信道容量。OFDM 采用快速傅立叶变换(FFT)来复用多个并行信道。FFT 的计算效率很高, 从实用的角度看, 其使 OFDM 成为一种非常有吸引力的技术。基于沃尔什-哈达玛变换等其它正交变换, 研究人员提出了另一种多载波技术。另一类方法包括具有均衡的单载波调制、无载波幅度和相位(CAP)方案以及脉冲幅度调制(PAM)方案。这些方法在利用可见光的光纤传输中是非常有效的, 最大特点就是其实现的简单性。

2 基于 LightFidelity 的可见光无线通信的实验分析

2.1 点对点链路级系统

2.1.1 发射机

可见光通常由白色 LED 或红绿色和蓝色(RGB)LED 发光器的组合产生。低成本白光 LED 使用蓝色氮化镓(GaN)发射器, 激发黄色无机磷光

体。来自 GaN 器件直接发射的蓝光与黄光相结合以产生白光。虽然白光 LED 的调制带宽远远超过传统光源,但大面积发射器的大电容和黄色荧光粉的慢响应将白光 LED 的 3 dB 带宽限制在几 MHz^[17]。通过去除接收器侧由该黄色磷光体发射的信号,可以将 3 dB 调制带宽增加到 10 ~ 20MHz 的范围。

设计用于照明的 LED 相对坚固,并且可以通过增加一些电阻限制驱动电流来驱动电压源。偏压-T 通常用于将交流(AC)数据调制与直流(DC)偏压相结合,这样可以产生所需的照明水平,并确保始终以净的正信号驱动 LED。本方法中通过修改驱动电路来改善发射器带宽,模拟了预均衡和快速 LED 驱动器电路以及谐振均衡。实验发现,可以通过使用不同的结构来改变 LED 器件带宽,特别是减小 LED 的尺寸。比 LED 灯使用的有源区域小很多的有源区域的微 LED 可以显示几百 MHz 的带宽,同时发射 mW 的光功率。通过一系列调查发现,这些单个 LED 仅受接收器的限制,报告数据中速率最快的超过 8 Gbps。如果能够克服这种限制,单个 GaN 微 LED 能够以 11 Gbps 的速度进行传输^[18]。

虽然 LED 将提供绝大多数的普通照明,但是人们对基于激光照明和光源的研究兴趣也在日益增加。可以使用激光和小型荧光粉等为前灯和投影显示器创建极高亮度光源,由颜色的变换来控制照明。本实验还使用荧光板和激光以及钙钛矿颜色转换器论证了白色光源。尽管成本和复杂性都在增加,但 RGB LED 或激光源的使用为每个 LED 提供了独立调制的可能性和大幅提高数据速率的可能性,而且目前已经进行了许多高速率演示。

大多数商业照明 LED 由多个芯片组成,这些芯片串联或并联布置作为产生具有更高输出功率的单个发射器。可以使用光学元件捕获尽可能多的来自 LED 广角发射的光并将其引导到所需的照明效果。LED 必须满足室内照明标准和生物安全标准。随着发射功率的增加,通常结合使用漫射元件以实现这一点。来自 LED 发射的光可以通过由广义朗伯定律定义的辐射图来建模^[19]。相对于给定的源位置和取向,可以采用如下公式计算具有辐射角 Φ 和辐射立体角 Ω 的接收光功率:

$$P_{opt,\Omega} = \Omega P_{opt} \frac{(m+1)}{2\pi} \cos^m \Phi, \quad (10)$$

其中, P_{opt} 是 LED 光源的总输出量, m 表示朗伯发射阶数,可由半功率半角来确定,并且, $m = -1/$

$\log_2(\cos[\Phi_{1/2}])$ 。

覆盖区域中所需的照明水平由用户的需求决定。用于工作目的任务区域所需的平均照度通常高于地面 0.75 m,不应小于 500 勒克斯。照度定义为每单位面积的入射光通量,并表示为 E_V ^[20]。假设为朗伯发射,并且峰值照度直接低于灯并且与灯匹配,则可以通过估计单个灯所需的功率来实现。光源发光的输出量可以通过 $\Phi_v = p_{opt} k_{e/v}$ 计算,其中 $k_{e/v}$ 表示发光效率,可按如下公式计算:

$$k_{e/v} = \frac{683 \int v(\lambda) \tilde{P}_{opt}(\lambda) d\lambda}{\int \tilde{P}_{opt}(\lambda) d\lambda}, \quad (11)$$

其中, $V(\lambda)$ 是针对波长 λ 的发光度函数, $\tilde{P}_{opt}(\lambda)$ 是灯的光谱辐射功率密度函数。对于给定的光输出通量 Φ_v ,可以基于公式(1)计算发射的光通量到 Ω 的立体角:

$$\Phi_{v,\Omega} = \Omega \Phi_v \frac{(m+1)}{2\pi} \cos^m(\Phi), \quad (12)$$

灯具正下方距离为 z 的照度计算方法如下:

$$\tilde{E}_v = \frac{A_r}{z^2} \Phi_v \frac{(m+1)}{2\pi A_r} [\cos(0)]^{m+1} = \frac{(m+1) \Phi_v}{2\pi z^2}, \quad (13)$$

其中, z 是光源与任务区域高度之间的垂直间距, A_r 是接收元件的物理区域。因此,平均的光辐射输出功率应为:

$$\bar{P}_{opt} = \frac{\Phi_v}{K_{e/v}} = \frac{2\pi \tilde{E}_v z^2}{(m+1) K_{e/v}}. \quad (14)$$

考虑到房间高度为 3 m,伴有 20° ~ 45° 的 $\Phi_{1/2}$ 角度,500 勒克斯所需光通量的最低感光度在 1 300 流明到 5 300 流明范围^[21]内。此功率与商用 LED 灯和用于办公室和公共区域照明的 LED 面板的规格一致。LED 光源的这种高光功率输出确保了足够的信号强度,以实现可靠的通信。住宅的 LED 灯的额定功率通常低于该水平(<1 000 流明),一般优先选择较低功率的光。

2.1.2 接收机

图 3 的右侧展示出了典型的接收器。使用光学元件接收光并将光集中到 PD,PD 将其转换为电信号,该电信号被预放大,然后进行数据恢复和信号处理。在某些情况下,光学滤波器被用于限制馈送到接收器的光谱。检测器或前置放大器的带宽、灵敏度和面积决定了接收器的整体性能,并最终决定了

通信信道的质量。小型探测器是比较理想的,因其具有低电容和高带宽,探测器面积的加倍增加了由相同因子接收的功率,这也相当于灵敏度的增加。

2.1.3 滤光片和聚光器

光学滤波器可用于切割 IR 和其它环境光源,以及阻挡来自商用 LED 的黄色磷光体转换的慢光。分析这种蓝色过滤产生的效果后发现,其可以实现适度的性能提升。理想情况下,光学聚光器接收来自宽视场(FoV)的光并将其集中到小 PD 上^[22]。然而,这种装置的光学扩展量有限,因此收集区域和 FoV 的乘积是常数。由于其 FoV 通常为 2π 球面度,所以系统的性能受 PD 区域的限制。光学聚光器的几何增益定义为:

$$G_c = \frac{n^2}{\sin^2 \psi_{FoV}} - 1 \quad \psi \leq \psi_{FoV}(\psi), \quad (15)$$

其中, n 表示内部折射率; ψ 是接收器的入射角; ψ_{FoV} 是接收器的 FoV。指标功能 $\psi_D(u)$ 定义为:

$$\psi_D(u) = \begin{cases} 1, & u \in D \\ 0, & u \notin D \end{cases}. \quad (16)$$

复合抛物面聚光器或更现代的设计显示,聚光率在光学扩展量极限的 50% 左右。然而,实验结果表明,基于荧光板太阳能聚光器的设计超过光学扩展量极限的测量增益预测将远远超过这些早期结果。

2.1.4 光电探测器和前置放大器

PD 和前置放大器的组合设置了接收器的灵敏度及其带宽。在自由空间应用中,由于需要大面积收集尽可能多的光,PD 的电容变得显著。因此,理想的前置放大器可提供高带宽并可承受高的输入电容。在 IR 应用的一些设计中已经解决了这些问题,并且在 VLC 中还必须考虑高动态的范围要求。PIN 和雪崩光电二极管(APD)结构均已用于 VLC 实验,APD 提供比其 PIN 更高的灵敏度(通常为 10 dB)。探测器的选择涉及面积、电容、带宽效应和光谱反应。

由于大多数有用信号在蓝色光束中携带,因此在该区域中提高灵敏度是有利的。高水平的信号提供了高性能与更广泛的接收器设计,所以这是一个有很大提升空间的领域。在互补金属氧化物半导体(CMOS)电路中集成探测器和放大器是一个越来越受关注的领域,已经有报告使用线性模式 APD 和 PIN 结构的设计^[23]。

除用作常规探测器的 APD 之外,单光子雪崩探测器(SPAD)也已用于 VLC,使用基于脉冲和 OFDM

的调制方案。SPAD 是光子计数探测器,与线性 APD 相比,产生的灵敏度提高一个数量级(对于类似的检测区域)。目前这些设备的死区时间、填充因子和暗噪声等问题使其仅能产生有限的收益。

2.2 光学无线信道

通信信道包括电信号将发送器上的数据调制成接收器处的电信号通道。通过单个信道的信噪比(SNR)来测量接收信号的质量。在有网络的情况下,信号与干扰加噪声比(SINR)用于表征通信链路。

2.2.1 带宽

VLC 系统的前端元件引入了低通反应。另外,由于室内环境具有反射的特点,接收器收集源自多个路径的信号,这导致频率的选择性传输特性。合并通道相当于串联连接的多个滤波器。光发射机、光接收机前端,自由空间信号传播,都可以建模为独立的滤波器。这里组合通道的属性可以通过其脉冲响应,其表达式如下:

$$H(f) = \int_0^\infty h_{fe}(t) \otimes h_{fs}(t), \quad (17)$$

其中, $h_{fs}(t)$ 表示室内环境中自由空间光传播引起的信道脉冲响应(CIR); \otimes 表示数学卷积; $h_{fe}(t)$ 表示受前端元素影响的 CIR。通过 CIR $h(t)$ 的知识,可以使用傅里叶变换计算相应的频率:

$$H(f) = \int_0^\infty h(t) \exp(-j2\pi ft) dt = H_{fe}(f) H_{fs}(f). \quad (18)$$

2.2.2 实验分析

图 6 显示了在上述实验结果中针对频率 f 的归一化信道增益。这些系统的 3 dB 带宽范围为 10 ~ 60 MHz 之间^[24]。由于许多 VLC 系统的运行数据速率比 3 dB 带宽大许多倍,通道滚降速率的模型在确定整体性能时非常有用。对于 LED,带宽取决于电流密度,因此当电流水平变化时,带宽也会发生动态变化。在接收器处,简单的一阶反应通常是较为合理的近似,但具有传输时间限制的高偏置的大面积检测器可以改变这一点。

根据前端元件相对于频率的影响而近似归一化的信道增益,本文建立的模型如下:

$$|H_{fe}(f)|^2 = \exp\left(-\frac{f}{F_{fc}}\right). \quad (19)$$

其中, F_{fc} 控制前端元件的频率, F_{fc} 的值越高,调制带宽越宽。

利用具有恒定能量的随机二进制相移键控(BPSK)符号组成的导频序列来执行信道估计。对

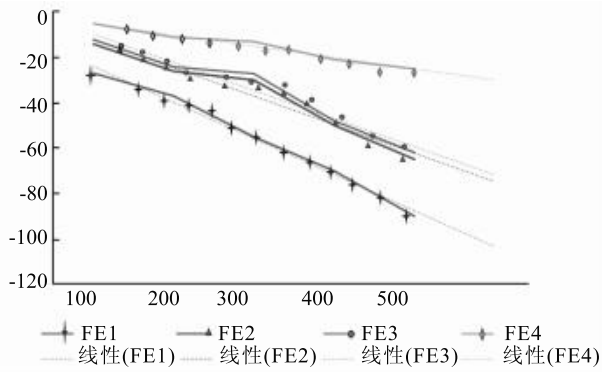


图6 由前端器件滤波引起的归一化通道增益

Fig. 6 Normalized channel gain caused by front-end device filtering

于不同频率子载波,通过误差矢量幅度估计获得的相对信道增益和绝对 SNR 值在图 6 中示出。信道衰减紧跟 μ LED 的频率分布,其在 3d 频率下发生 3-dB 衰减。系统中的其余元件保证具有至少 500 MHz 频率的平坦带宽。其中增益因子在子载波达到 220 之后突然下降,其对应于约 540 MHz 的频率。通信信道的估计 SNR 曲线紧跟估计的频率曲线。这表明系统中的加性高斯白噪声(AWGN)在通信带宽内是均匀分布的。低频子载波的 SNR 值略低于预期。这归因于来自环境光的低频噪声和基线漂移效应。然而,这些子载波上的 SNR 足以成功完成通信。

3 结束语

无线数据通信已成为私人 and 商业生活中必不可少的实用工具。有超过 70 亿智能手机主要用于个人通信,智能手表、健康追踪器和数字眼镜等可穿戴设备的数量正急剧增加。这些新兴科技将推动围绕虚拟现实(VR)、增强现实(AR)的高应用定义视频流的工业发展。未来,还将有 1 000 亿台物联网(IoT)设备巩固人们的智能家居和智能城市^[25]。本文对基于 LightFidelity 的可见光无线通信方法进行了相关研究,主要介绍的方法有确定性方法和蒙特卡罗方法,对相关方法建立了模型并进行了相应的实验,得出了系统中的加性高斯白噪声(AWGN)在通信带宽内是均匀分布的结论。

随着节能型 LED 白光的出现,固态照明(SSL)在照明行业中越来越受欢迎。预计未来几十年,基于 LED 的照明基础设施将取代传统照明基础设施。这个趋势为创建新颖的组合照明和无线通信网络提供了机会。

参考文献

- [1] 张振中. LiFi 可见光无线通信技术分析[J]. 湖南邮电职业技术学院学报,2015,14(3):19-21.
- [2] NI Wei, LIU Renping, COLLINGS I B, et al. Indoor cooperative small cells over ethernet[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(9):100-107.
- [3] PAPAIOANNOU A, PAVLIDOU F N. Evaluation of power line communication equipment in home networks[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(3):288-294.
- [4] MCDONALD V H. The cellular concept[J]. Bell Syst. Tech. J., 1979:15-49.
- [5] SIMEONIDOU D E, NEJABATI R, CHANNEGOWDA M P. Software defined optical networks technology and infrastructure: Enabling software-defined optical network operations[C]// Optical Fiber Communication Conference/ National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). Anaheim, California United States:IEEE, 2013, 2013:1-3.
- [6] 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.
- [7] RAHAIM M B, VEGNI A M, LITTLE T D C. A hybrid radio frequency and broadcast visible light communication system[C]// Proc. of 2nd IEEE Globecom 2011 Workshop on Optical Wireless Communications. Houston, Texas, USA: IEEE, 2011:1-11.
- [8] CHEN Zhe, SERAFIMOVSKI N, HAAS H. Angle diversity for an indoor cellular visible light communication system[C]// 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC SPRING). Seoul, South Korea:Spring, 2014:1-5.
- [9] LI Xuan, ZHANG Rong, WANG Jiaheng, et al. Network-centric and user-centric multi-user scheduling in visible light communication aided networks[C]// 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London:IEEE, 2015:5120-5125.
- [10] LI Baolong, WANG Jiaheng, ZHANG Rong, 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.
- [11] WANG Yunlu, HAAS H. Dynamic load balancing with handover in hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(22):4671-4682.
- [12] TIPMONGKOLSILP O, ZAGHLOUL S, JUKAN A. The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2011, 13(1):97-113.
- [13] GE Xiaohu, CHENG H, GUIZANI M, et al. 5G wireless backhaul networks: Challenges and research advances[J]. IEEE Netw, 2014, 28(6):6-11.
- [14] PISCHELLA M, BELFIORE J C. Power control in distributed cooperative OFDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5):1900-1906.
- [15] MARSHOUD H, KAPINAS V M, KARAGIANNIDIS G K, et al. Non-orthogonal multiple access for visible light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1):51-54.
- [16] LIN L, POPOOLA W O, XU X, et al. Performance evaluation of

- non-orthogonal multiple access in visible light communication [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2016, 64 (12): 5162-5175.
- [17] MARSH G W, KAHN J M. Channel reuse strategies for indoor infrared wireless communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45 (10): 1280-1290,.
- [18] DIMITROV S, HAAS H. Principles of LED Light Communications; towards Networked Li-fi [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [19] MIAO Guowang, ZANDER J, SUNG K W, et al. Fundamentals of Mobile Data Networks [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2016.
- [20] AHMED A, BOULAHIA L M, GAITI D. Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: a state-of-the-art and a classification [J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2014, 16 (2): 776-811.
- [21] VERMA L, FAKHARZADEH M, CHOI S. Backhaul need for speed: 60 GHz is the solution [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22 (6): 114-121.
- [22] SCHULZ D, JUNGnickel V, ALEXAKIS C, et al. Robust optical wireless link for the backhaul and fronthaul of small radio cells [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34 (6): 1523-1532.
- [23] MINH H L, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. Won, 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21 (15): 1063-1065.
- [24] MINH H L, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20 (14): 1243-1245.
- [25] TIAN Pengfei, MCKENDRY J J D, GU E D, et al. Fabrication, characterization and applications of flexible vertical InGaN micro-light emitting diode arrays [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (1): 699-707.
- [26] RAPPAPORT T S, SUN Shu, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! [J]. *IEEE Access*, 2013, 1 (1): 335 - 349.
- [27] JIANG Junyi, HUO Yongkai, JIN Fan, et al. Video streaming in the multiuser indoor visible light downlink [J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 2959-2986.
- [28] KARP S, O'NEILL E L, GAGLIARDI R M. Communication theory for the free-space optical channel [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58 (10): 1611-1626.
- [29] WANG Ke, NIRMALATHAS A, LIM C, et al. Full-duplex gigabit indoor optical wireless communication system with CAP modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28 (7): 790-793.

(上接第101页)

- [2] 艾学轶, 吴彦文, 汪亭亭. 复杂背景下基于肤色分割的人脸检测算法研究 [J]. *计算机工程与设计*, 2010, 31 (14): 3268-3273.
- [3] HSU R L, ABDEL-MOTTALEB M, JAIN A K. Face detection in colour images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24 (5): 696-706.
- [4] BASILIO J A M, TORRES G A, PÉREZ G S, et al. Explicit image detection using YCbCr space color model as skin detection [C]// *Proceedings of the 2011 American Conference on Applied Mathematics and the 5th WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications*. Puerto Morelos, Mexico: ACM, 2011: 123-128.
- [5] 王海川, 张立明. 一种新的 Adaboost 快速训练算法 [J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2004, 43 (1): 27-33.
- [6] TREFNÝ J, MATAS J. Extended set of local binary patterns for rapid object detection [C]// *Proc. of the Computer Vision Winter Workshop*. Nové Hradky, Czech Republic: Czech Pattern Recognition Society, 2010: 1589-1596.
- [7] 万丽. 基于肤色及 AdaBoost 算法的人脸检测技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
- [8] 左登宇. 基于 Adaboost 算法的人脸检测研究 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.
- [9] LI Haoxiang, LIN Zhe, SHEN Xiaohui, et al. A convolutional neural network cascade for face detection [C]// *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 5325-5334.
- [10] 刘侠, 李苏, 李廷军. 一种改进的 Adaboost 算法的人脸检测分类器 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2009, 10 (2): 76-80.
- [11] 郭磊, 王秋光. Adaboost 人脸检测算法研究及 OpenCV 实现 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2009, 14 (5): 123-126.
- [12] TERRILLON J C, SHIRAZI M N, FUKAMACHI H, et al. Comparative performance of different skin chrominance models and chrominance spaces for the automatic detection of human faces in color images [C]// *4th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2000)*. Grenoble, France: dblp, 2000: 1-9.
- [13] BI Ping, ZHAO Heng, LIANG Jimin. Variant pose face detection based on multi-classifier fusion [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21 (20): 6469-6478.
- [14] Samuel K, Partha N. The interaction of stability and weakness in AdaBoost [R]. Chicago: University of Chicago, 2001.
- [15] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a Boosted cascade of simple features [C]// *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*. Vancouver, Canada: IEEE Computer Society, 2001: 1-9.