



专题：可见光通信

多光源可见光通信关键技术

王甫镇¹, 孙士渊¹, 王梦辉¹, 杨昉¹, 王小斐^{1,2}, 宋健^{1,2}

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 可见光通信技术主要基于发光二极管 (light emitting diode, LED), 依托现有照明网络基础设施完成信息传输与组网。针对室内多灯照明场景, 研究了照明约束下的星座图优化与功率资源优化; 并结合光学智能反射表面, 动态调控反射信道, 以提升系统传输数据率与覆盖范围。同时, 通过初步研究, 揭示了低频调制光信号的频闪效应对人体的影响, 意味着 LED 光生物效应需要在未来的信号设计中全面考虑。

关键词: 可见光通信; 发光二极管; 光学智能反射表面; 频闪效应

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023106

Key technologies of visible light communications with multiple LEDs

WANG Fubin¹, SUN Shiyuan¹, WANG Menghui¹, YANG Fang¹, WANG Xiaofei^{1,2}, SONG Jian^{1,2}

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

Abstract: Visible light communication (VLC), primarily based on light emitting diode (LED), supports the information transmission and networking through the existing infrastructure of the illumination network. The constellation optimization and the power resource optimization were investigated under lighting constraints with multiple LEDs for indoor environment. Moreover, the optical intelligent reflection surface was also researched to regulate reflection channels dynamically, improving both the transmission data rate and the coverage of the VLC system. In the meantime, the preliminary study revealed the flicker effect of low-frequency modulated optical signals on the human body, and the results suggest that the LED photo-biological effect should be considered comprehensively in the future signal design.

Key words: visible light communication, light emitting diode, optical intelligent reflecting surface, flicker effect

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-05-10

通信作者: 宋健, jsong@tsinghua.edu.cn

基金项目: 清华-佛山研究院项目; 清华大学精准医学研究院光医学实验室项目 (No.100010706)

Foundation Items: Project of Tsinghua Foshan Research Institute, Project of Photomedicine Laboratory, Institute of Precision Medicine, Tsinghua University (No.100010706)



0 引言

可见光通信 (visible light communication, VLC) 利用 380~780 nm 的可见光谱频段进行信息的无线传输。最常见的是对照明光源进行人体肉眼无法察觉的高速强度调制, 使之携带需要传输的信息, 接收端通过对光照强度变化的探测完成信息接收^[1]。可见光通信技术的深入研究以及普及性推广, 主要集中在过去这二三十年间。20 世纪 90 年代, 中村修二博士等人划时代地发明了蓝光发光二极管 (light emitting diode, LED), 该成果获得 2014 年诺贝尔物理学奖。这标志着人造光源发展历史上的第三次革命性飞跃, 而 LED 的产业化成功推广也极大程度地促进了可见光通信技术的发展。

基于 LED 的半导体照明技术具有电能光能转换效率高 (省电)、响应调节快、强度和色温均可调、使用寿命长、体积小等优点, 这些优点促进了其被快速推广。能源消耗数据分析表明, 当充分利用 LED 灯进行照明灯具替代后, 照明耗电量最终有望从之前 25% 的电力消耗降低至 4%, 这必将深刻地改变照明以及能源行业的整体发展进程。与此同时, 半导体照明器件 (特别是当前广泛使用的 LED) 作为光源, 具有良好的响应速度, 能够充分发挥可见光通信所具有的大带宽、高速率、无电磁辐射、可拓展性强等独特的性能优势, 未来有望成为 6G 通信、泛在通信等未来通信系统的重要组成部分, 并且可以与现有射频通信构成融合组网, 形成良好的技术和应用互补。

统计显示, 人们在室内逗留的时间越来越长, 对照明的依赖也越来越强。可以预见, 基于 LED 灯的照明网络将对人们的日常生产与生活产生更为广泛的影响。其直接的影响体现在照明方式及其舒适度上, 间接的, 而且是重要性越来越高的影响则是照明网络能够作为信息技术基础设施的重要组成部分之一, 为人们提供照明之外的相关

信息服务。考虑室内应用场景下多灯的存在, 以及多灯部署位置需要合理设计, 有必要将研究工作重点放在这种应用场景下系统所能提供的通信性能和覆盖效果。另一个值得关注的研究方向是类比于射频通信辐射对人体的影响, 研究照明 LED 被调制后, 所发出的可见光通信信号对人体的影响。

针对移动用户的高速通信需求, 第 1 节研究了可见光通信星座图优化方案, 目标是综合考虑室内可见光通信中的随机接收位置和空间调制技术, 优化星座图能够提升系统传输速率, 更适应可见光移动通信场景; 针对用户的照明和通信综合需求, 第 2 节研究了室内多灯部署优化方案, 进行多灯位置和功率资源优化, 目标是在较小的照明均匀性损失下提升传输速率, 实现照明性能和通信性能的折中; 针对可见光信号易受遮挡这一制约可见光通信发展的“痛点”, 第 3 节研究了光学智能反射表面 (optical intelligent reflecting surface, OIRS) 动态调控反射信道技术, 目标是以“准无源”的方式增强接收端信号功率, 从而改善障碍物遮挡带来的系统性能下降问题; 针对可见光信号的低频闪烁可能对人体造成的影响, 第 4 节初步研究了基于极低频率光信号的 LED 光生物效应, 目标是减少其对人体带来的负面影响, 并且探索如何利用其效应, 未来能有针对性地调节人的生理和心理状态。

1 室内多灯环境下的星座图优化

室内多灯 VLC 系统示意图如图 1 所示。多个照明 LED 灯部署在屋顶, 有需要时可作为 VLC 发射机, 而用户则携带配备光电二极管 (photo diode, PD) 的接收机。分析中假设接收高度不变, 水平位置允许随机移动。为此, 采用接收水平面上的均匀网格近似随机接收位置, 若接收网格足够密集, 则任意接收位置均可使用邻近格点插值近似。

可见光通信系统设计可借鉴传统无线通信技

术,但需要考虑以下不同之处:一是 VLC 系统大多采用强度调制/直接检测方式,要求时域可见光信号必须是非负实数信号,因此需要修正传统复数调制技术;二是可见光信道模型一般建模为关于收发相对位置的函数,而非直接作为随机变量,其随机性主要来源于随机接收位置。

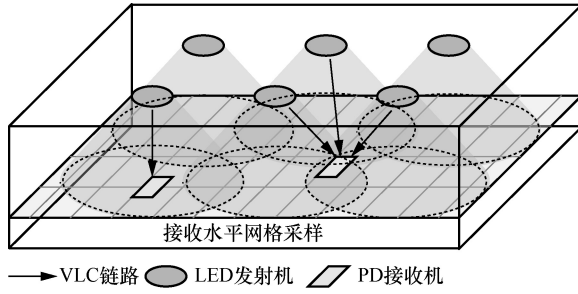


图1 室内多灯 VLC 系统示意图

可见光通信调制技术已有多种单载波和多载波方案满足非负实数约束,但实际应用中用于调制的星座图一般仍采用传统方案。在室内多灯 VLC 系统中引入广义空间调制(generalized spatial modulation, GSM)技术后^[2],可通过对星座图的优化提高数据传输速率,进一步提升可见光信号的自由度和信息承载能力。

本文以非对称限幅光正交频分复用(asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing, ACO-OFDM)技术为例^[3],结合 GSM 技术进行分析,而其他调制方式同理。接收信号可以表示为:

$$y = \frac{1}{2} \mathbf{h}^T \mathbf{x} + z \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}$ 、 y 和 $\mathbf{h}$ 分别为发射信号、接收信号和可见光信道, $z \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 表示方差为 σ^2 的加性白高斯噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)。 $\mathbf{x}$ 表示根据 GSM 原理得到的发射信号矢量, $\mathbf{h}$ 表示所有 LED 发射机到当前接收位置的可见光信道,可以由朗伯辐射模型^[4]得到。根据 ACO-OFDM 原理,接收端恢复的频域信号强度为原始信号的一半,因此存在系数 1/2。选择编码调

制平均互信息(coded modulation average mutual information, CM-AMI)进行优化^[5],具体如下。

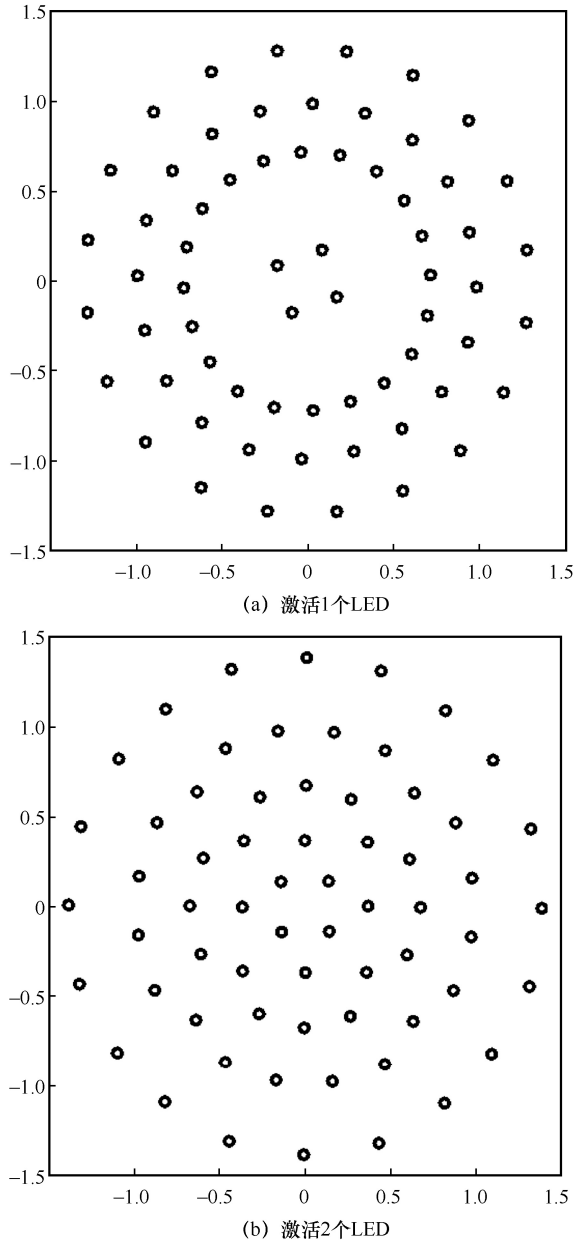
$$\begin{aligned} I(\mathbf{X}; Y) &= \mathbb{E}_{\mathbf{H}} \{I(\mathbf{X}; Y | \mathbf{H})\} = \\ &= \mathbb{E}_{\mathbf{H}} \{ \mathcal{H}(Y | \mathbf{H}) - \mathcal{H}(Y | \mathbf{X}, \mathbf{H}) \} = \\ &= \mathbb{E}_{\mathbf{H}} \{ \mathcal{H}(Y | \mathbf{H}) - \mathcal{H}(Z) \} = \\ &= -\mathbb{E}_{\mathbf{H}} \left\{ \int_{\mathcal{C}} f_{Y|\mathbf{H}}(y|\mathbf{h}) \log f_{Y|\mathbf{H}}(y|\mathbf{h}) dy \right\} - \log(\pi e) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}$ 、 Y 和 $\mathbf{H}$ 分别为发射信号、接收信号和可见光信道的随机变量。 $\mathbb{E}_{\mathbf{H}} \{\cdot\}$ 表示数学期望, $\mathcal{H}(\cdot)$ 表示随机变量的微分熵,而 AWGN 的微分熵可以计算为 $\mathcal{H}(Z) = \log(\pi e)$ 。 $f_{Y|\mathbf{H}}(y|\mathbf{h})$ 表示接收信号在给定可见光信道下的概率密度函数,可以根据发射信号和噪声的概率分布计算得到。

文献[6]对 CM-AMI 的分析同时考虑了接收机随机位置和激活 LED 数量的影响,采用梯度下降算法优化星座图以提高 CM-AMI。通过蒙特卡罗随机方法对数学期望形式的代价函数和梯度进行逼近,可降低计算复杂度并加速收敛。

符号数量为 64 时,针对不同激活 LED 数量的星座图优化结果如图 2 所示^[6],假设屋顶高度为 5 m, LED 发射机数量为 4,构成 5 m×5 m 的水平正方形,法线方向均垂直向下。用户接收机接近地面——高度为 0 m,法线方向垂直向上,接收位置服从均匀分布。朗伯辐射模型中 LED 半功率辐射角为 60°、PD 视场角为 60°、有效接收面积为 1 cm²、内折射率为 1.5。

优化后星座图呈同心圆环结构,数值验证其可实现优于传统正交振幅调制(quadrature amplitude modulation, QAM)星座图的通信性能^[6]。分析发现,激活单个 LED 时优化的星座图中心较为稀疏,其平均欧氏距离更大。这是由于用户随机移动时,仅激活单个 LED 的可见光信道具有更小的均值和更大的方差,因此更需要增大平均欧氏距离提高 CM-AMI。激活 LED 数量变为 2 后,其均匀性显著增加。

图2 针对不同激活LED数量的星座图优化结果^[6]

2 照明约束下的平均可达速率优化

非均匀照明的接收光功率因其空间分布波动大, 会显著降低移动接收可达速率^[7]。故基于室内照明 VLC 系统进行通信性能优化时, 必须考虑照明均匀性这一实际约束。为此, 需要研究不同 LED 光源在强度叠加 (改善照明覆盖均匀性) 下, 如何通过功率分配实现照明和通信的联合优化。

采用 VLC 单频网架构^[8], 所有 LED 发射机同

频带同步发送相同信号, 多个 LED 发射机的信号在接收端直接叠加。采用均方根误差变异系数 (coefficient of variance of root mean square error, CV-RMSE) Q ——接收光功率的标准差和均值之比衡量照明均匀性^[9], 如式 (3) 所示。

$$Q = \frac{\sqrt{V}}{E} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_n^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_n \right)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_n} = \frac{\sqrt{N \sum_{n=1}^N g_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N g_n \right)^2}}{\sum_{n=1}^N g_n} \quad (3)$$

其中, E 和 V 分别为接收光功率的均值和方差, N 为接收格点数量, g_n 为第 n 个接收格点处的接收光功率。因 VLC 信道容量无法解析表示, 采用信道容量近似下界逼近可达速率^[10], 如式 (4) 所示。

$$C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} W \log \left(1 + \frac{e}{2\pi} \frac{\mathbf{h}_n^T \mathbf{h}_n}{\sigma^2} \right) = \frac{W}{2N} \sum_{n=1}^N \log \left(\mathbf{h}_n^T \mathbf{h}_n + \frac{2\pi\sigma^2}{e} \right) - \frac{W}{2} \log \frac{2\pi\sigma^2}{e} \quad (4)$$

其中, C 表示所有接收格点的平均可达速率, $\mathbf{h}_n$ 表示所有 LED 发射机到第 n 个接收格点处的可见光信道矢量, 噪声功率 $\sigma^2 = W\mu$, W 为信号带宽, μ 为噪声功率谱密度。

文献[11]通过对多灯部署和功率分配的联合优化, 实现了可见光系统照明效果和通信性能的改善。具体步骤如下。

步骤 1 优化照明均匀性, 得到均匀性约束下界。

步骤 2 优化平均可达速率, 得到均匀性约束上界。

步骤 3 选择合适的均匀性约束, 优化均匀照明约束下的平均可达速率。

均匀照明约束下的平均可达速率优化结果如图 3 所示^[11]。其中, 接收机高度为 0.85 m, 相邻接收格点距离为 0.025 m, 信号带宽为 20 MHz, 噪声

功率谱密度为 10^{-21} A²/Hz, 单位房间面积的总发射功率为 44 mW/m²。为保证比较公平性, 总发射功率和房间面积成正比。分析可知, 存在照明约束的平均可达速率曲线会随着均匀性约束的放松而逐渐升高, 并逐渐逼近无照明约束情况。LED 发射机靠近房间边缘虽能改善照明均匀性, 但因有效覆盖面积减小而损失功率, 会降低平均可达速率。

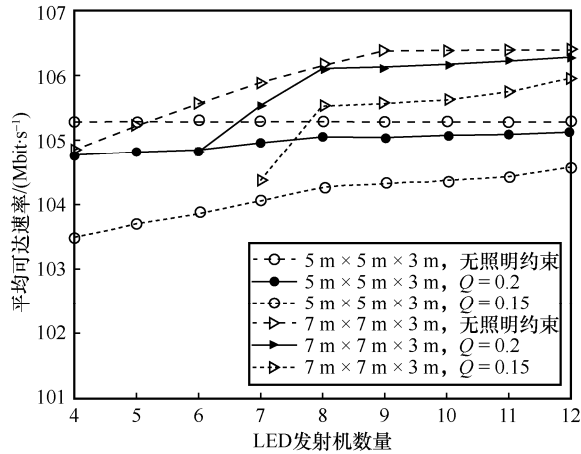


图3 均匀照明约束下的平均可达速率优化结果^[11]

3 光学智能反射表面

由空间内周期性排列的人工单元所构成的智能反射表面 (intelligent reflecting surface, IRS), 其中每个单元均可以对入射电磁波独立施加幅度控制与/或相位偏移, 从而完成对信号的被动波束成形。不同于中继, IRS 直接对入射原始信号进行处理, 不涉及信号的解调、基带处理和放大转发, 因此具有近乎无源与低时延的特点^[12]。相较于射频频段 IRS, 光频段 OIRS 除了可以由超表面单元构成, 还可以由微型电机驱动的镜面阵列, 或者由电驱动的液晶材料阵列构成, 并且可以灵活部署于可见光通信系统的发射端、接收端, 或者无线环境中, 以期提高可见光通信系统的性能。

目前已有大量工作对 OIRS 在可见光通信系统中的应用进行了研究, 并有一些硬件层面的实现与设计被用于 OIRS 的收发两端部署^[12]。而在无线信道特性方面, 电尺寸的大幅提高使得采用几何光学

分析 OIRS 反射信道变得精确^[13], 由此, 文献[13]和文献[14]分别对自由空间光通信与可见光通信中的 OIRS 反射信道增益进行了理论分析。基于 OIRS 信道模型, OIRS 辅助的可见光通信系统可以被建模为 OIRS 反射单元朝向 (对应光学超表面的相位不连续度) 的优化问题, 并有诸如粒子群优化、正余弦优化等启发式方法被提出^[12]。

特别地, 考虑光发射机与 OIRS 单元的尺寸一般远小于信号传输距离, 反射单元在检测平面的影响面积通常较小。因此, 一个 OIRS 单元通常只能与一组发射天线和接收天线构成反射光路, 而不与其他反射路径相互影响, 此时 OIRS 辅助的可见光通信系统可以简化为 OIRS 反射单元与发射机/接收机的关联优化问题^[15]。考虑多用户场景, VLC 网络由多个单 LED 基站组成, 第 k 个用户的接收信号为:

$$y_k = \left(\mathbf{h}_k^T \mathbf{P} \mathbf{t}_k + [\mathbf{H}_k \text{vec}(\mathbf{G})]^T \mathbf{P} \mathbf{t}_k \right) \tilde{s}_k + \mathbf{h}_k^T \mathbf{P} \sum_{i \neq k} \mathbf{t}_i \tilde{s}_i + \omega_k \quad (5)$$

其中, $\tilde{s}_k$ 和 ω_k 分别表示用户信息和 AWGN, $\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \dots, \mathbf{t}_K]$ 和 $\mathbf{P}$ 分别表示用户信息转移矩阵和基站功率分配矩阵, $\mathbf{H}_k = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_K]$ 和 $\mathbf{G}$ 分别表示 OIRS 的反射信道参数和关联矩阵。

由此, 可以得到 VLC 系统的瞬时频谱效率, 文献[15]通过交替优化变量 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{T}$ 的方式最大化系统频谱效率。OIRS 辅助 VLC 系统的瞬时频谱效率优化结果如图4所示^[15], 考虑存在4个LED发射机和4个用户的场景, 经过优化的 OIRS 辅助方案可以将系统频谱效率提高超过 20%, 体现出 OIRS 增强系统信息传输能力的作用。

进一步地, 考虑 OIRS 辅助的多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) VLC 系统, 基于 OIRS 的反射 MIMO 信道表示为:

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} (\mathbf{f}_1 \odot \mathbf{g}_1)^T \mathbf{h}_{1,1} & \cdots & (\mathbf{f}_1 \odot \mathbf{g}_M)^T \mathbf{h}_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{f}_K \odot \mathbf{g}_1)^T \mathbf{h}_{K,1} & \cdots & (\mathbf{f}_K \odot \mathbf{g}_M)^T \mathbf{h}_{K,M} \end{bmatrix} \quad (6)$$



其中, $\mathbf{G}=[\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_M]$ 和 $\mathbf{F}=[\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_K]$ 分别表示 OIRS 反射单元与发射机和接收机的关联矩阵。由此, 文献[16]通过联合优化 OIRS 系数、发射端基带预编码和接收端信号检测的方式, 最小化收发两端均方误差。OIRS 辅助 VLC 系统的均方误差性能如图 5 所示^[16], OIRS 部署于垂直墙面上, 此处的归一化均方误差小于 1/10, 几乎是 OIRS 远端位置均方误差的 1/10, 充分体现了 OIRS 在增强可见光通信差错性能方面的潜力。

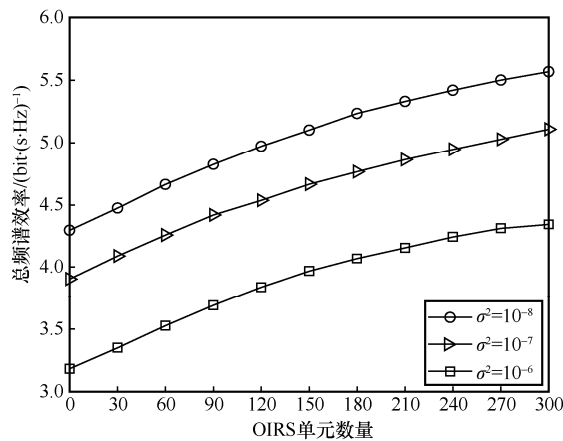


图4 OIRS 辅助 VLC 系统的瞬时频谱效率优化结果^[15]

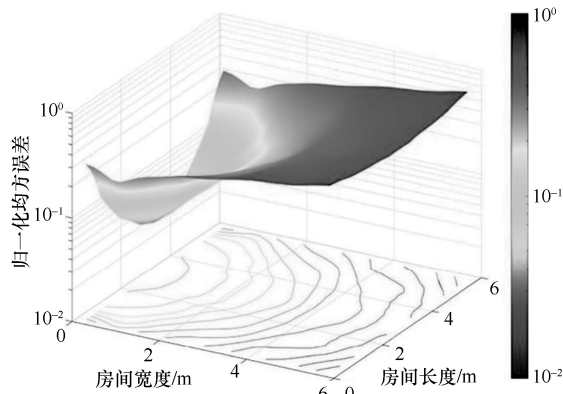
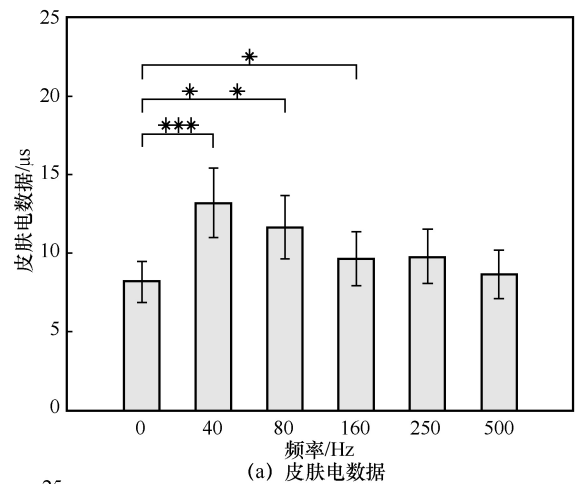


图5 OIRS 辅助 VLC 系统的均方误差性能^[16]

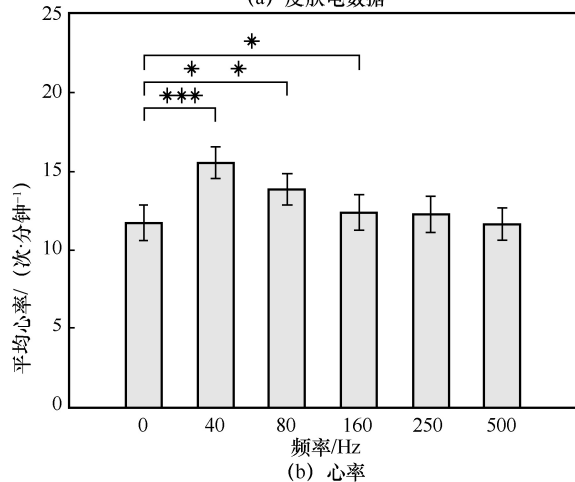
4 可见光通信信号对健康的影响

已有研究表明, 光刺激会影响人的生理状态, 光生物效应强度取决于光源的色温、光强和频闪效应等^[17]。LED 的发光强度波动就会带来频闪效应, IEEE 标准工作组发布的 IEEE PAR1789 标准揭示了

LED 的频闪效应与健康风险等级的关系^[18]。近期, 美国麻省理工学院的蔡立惠教授团队^[19]发现 LED 的频闪效应会影响神经退行性疾病, 缓解阿尔茨海默病症状的发展。因此, 笔者团队设计了一系列频闪光刺激临床试验, 采集受试者在不同频率的频闪光刺激下的皮肤电数据和心电图数据, 评估 LED 的频闪效应对人生理状态的影响。试验结果表明, LED 的频闪效应会使受试者的皮肤电数据和心率升高, 不同频率的频闪效应下受试者的皮肤电数据和心率如图 6 所示。皮肤电数据和心率反映了交感神经系统的功能, LED 的频闪效应可能会影响人体交感神经系统。由于人体生命活动的复杂性, 在后续的研究中, 笔者团队拟进一步引入脑电图、肌电图和血氧饱和度等生理指标, 目标是在多种生理指标之间建立相关性, 以综合评估频闪效应对人体生理状态的影响。



(a) 皮肤电数据



(b) 心率

图6 不同频率的频闪效应下受试者的皮肤电数据和心率

5 结束语

随着可见光通信中与组网相关研究工作的进展,照明网络与其他通信网络结合,将进化成为具备通信等功能的智能照明灯联网。该网络从通信角度上需要支持感知、通信、计算一体化的资源调度应用,并且也可以发挥可见光通信在未来无处不在的显示应用中的作用。此外,该网络还有望在健康领域、特别是与节律和神经系统相关的光医学健康等领域发挥独特作用,实现基于位置和场景的人本照明目标。为此,我们提出集成“感(知)通(信)(计)算显(示)(健)康”等功能的泛在光载融合网络,充分利用照明、电力、信息网络等现有基础设施,从技术、网络与应用等维度探索融合技术,借助数据采集与状态感知,以及高鲁棒性的信息传输和精准的分析决策,服务于人们的综合需求。

参考文献:

- [1] RAJAGOPAL S, ROBERTS R D, LIM S K. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 72-82.
- [2] LE T M, KIM S. Novel bit mapping for generalized spatial modulation in VLC systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(15): 1257-1260.
- [3] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(7): 1063-1072.
- [4] LEE K, PARK H, BARRY J R. Indoor channel characteristics for visible light communications[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 217-219.
- [5] AN Z C, WANG J, WANG J T, et al. Mutual information and error probability analysis on generalized spatial modulation system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3): 1044-1060.
- [6] WANG F B, YANG F, SONG J. Constellation optimization under the ergodic VLC channel based on generalized spatial modulation[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 21202-21209.
- [7] WANG F B, YANG F, SONG J. Constellation optimization for visible light communication under ergodic optical channel[C]//Proceedings of ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [8] SONG J, DING W B, YANG F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(2): 299-308.
- [9] PAL S. Optimization of LED array for uniform illumination over a target plane by evolutionary programming[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8221-8227.
- [10] JIANG R, WANG Q, HAAS H, et al. Joint user association and power allocation for cell-free visible light communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1): 136-148.
- [11] WANG F B, YANG F, PAN C Y, et al. Joint illumination and communication optimization in indoor VLC for IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(21): 20788-20800.
- [12] ABOAGYE S, NDJONGUE A R, NGATCHED T M N, et al. RIS-assisted visible light communication systems: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 251-288.
- [13] JAMALI V, AJAM H, NAJAFI M, et al. Intelligent reflecting surface assisted free-space optical communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(10): 57-63.
- [14] ABDELHADY A M, SALEM A K S, AMIN O, et al. Visible light communications via intelligent reflecting surfaces: metasurfaces vs mirror arrays[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020(2): 1-20.
- [15] SUN S Y, YANG F, SONG J, et al. Joint resource management for intelligent reflecting surface-aided visible light communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6508-6522.
- [16] SUN S Y, YANG F, SONG J, et al. Intelligent reflecting surface for MIMO VLC: joint design of surface configuration and transceiver signal processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, (99): 1.
- [17] 郝洛西, 曹亦潇, 崔哲, 等. 光与健康的研究动态与应用展望[J]. 照明工程学报, 2017, 28(6): 1-15, 23.



HAO L X, CAO Y X, CUI Z, et al. Research trends and application prospects on light and health[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(6): 1-15, 23.

[18] WILKINS A, VEITCH J, LEHMAN B. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update[C]//Proceedings of 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway: IEEE Press, 2010: 171-178.

[19] IACCARINO H F, SINGER A C, MARTORELL A J, et al. Gamma frequency entrainment attenuates amyloid load and modifies microglia[J]. Nature, 2016, 540(7632): 230-235.

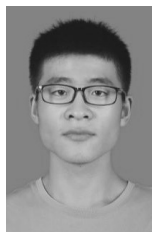
[作者简介]



王甫滨（1995—），男，清华大学电子工程系博士生，主要研究方向为可见光通信、可见光-射频融合系统和光电融合信号处理技术。



孙士渊（1997—），男，清华大学电子工程系博士生，主要研究方向为可见光通信、智能反射表面。



王梦辉（2000—），男，清华大学电子工程系硕士生，主要研究方向为光健康。



杨昉（1983—），男，博士，清华大学电子工程系副教授，主要研究方向为可见光通信、电力线通信、数字电视地面广播等。



王小斐（1980—），男，清华大学电子工程系、清华大学深圳国际研究生院工程师，主要研究方向为计算神经科学。



宋健（1966—），男，博士，清华大学电子工程系、清华大学深圳国际研究生院教授，宽带多媒体传输技术实验室主任、数字电视系统国家工程实验室（北京）主任，主要研究方向为数字电视地面广播、无线通信、电力线通信、可见光通信等。