

# 一种抗可见光蜂窝网小区间干扰的光学发射天线设计

金建力<sup>1</sup>, 路慧敏<sup>1</sup>, 陈丹阳<sup>1</sup>, 况 荡<sup>2</sup>, 于彤军<sup>3</sup>, 王建萍<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 中国移动通信集团江西有限公司, 江西南昌 330000; 3. 北京大学物理学院, 人工微结构物理和介观物理国家重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 本文提出了一种应用于可见光蜂窝网的自由曲面光学发射天线, 用于改善整个网络范围内的信号质量以提高系统的通信性能. 首先基于能量映射关系和斯涅尔定律, 设计了目标光分布区域为矩形的基于自由曲面透镜的光学发射天线, 应用该天线能使半导体发光二极管(LED)光源发出的光信号均匀分布在  $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$  的正方形范围内. 而后将设计的光学发射天线应用于可见光蜂窝网, 并进一步对网络接收区域的光信号质量和系统性能做了分析. 结果表明, 在一个  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间中安装有 16 个 LED 光源作为接入点, 采用所设计的自由曲面光学发射天线, 网络覆盖区域的光信号分布均匀度达到了 0.8 以上, 同信道干扰基本消除, 平均信干噪比为 12.6 dB, 系统具有较好的误码率性能, 能够有效地保证可见光蜂窝网的通信质量.

**关键词:** 透镜; 可见光蜂窝网; 自由曲面透镜; 可见光通信

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2021)10-1975-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210111

## Design of Anti-Cell Interference Optical Transmitting Antenna for Visible Light Cellular Network

JIN Jian-li<sup>1</sup>, LU Hui-min<sup>1</sup>, CHEN Dan-yang<sup>1</sup>, KUANG Dang<sup>2</sup>, YU Tong-jun<sup>3</sup>, WANG Jian-ping<sup>1</sup>

(1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. China Mobile Group Jiangxi Company Limited, Nanchang, Jiangxi 330000, China;

3. The State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A novel optical transmitting antenna based on free-form lens is proposed for visible light cellular network in order to improve the signal quality in the whole coverage area and communication performance of the system. Based on the energy mapping relation and Snell's law, the optical transmitting antenna based on free-form lens is designed to realize rectangle light receiving areas. Using this optical transmitting antenna, the light signal from light emitting diodes (LED) source can be distributed uniformly in a square area of  $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ . On this basis, a visible light cellular network with the novel optical transmitting antenna is applied, of which the quality of the receiving light signal and system performance are further investigated. It is demonstrated that in a  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  room with 16 LEDs using the designed optical antenna, the uniformity of light distribution in the light network coverage reaches 0.8. With the elimination of co-channel interference, the average signal to interference and noise ratio (SINR) is 12.6 dB, which can effectively improve the bit error ratio (BER) and ensure the communication performance of visible light cellular networks.

**Key words:** optical transmitting antenna; visible light cellular network; free-form lens; visible light communications

## 1 引言

随着社会的发展, 人类活动所产生的数据量正迅速增长, 对无线通信系统的容量要求也日益提升, 在这

样的背景下, 无线光通信技术受到了越来越广泛的关注<sup>[1,2]</sup>. 作为已得到广泛应用的重要光源之一, 半导体发光二极管(LED, Light Emitting Diode)具有功耗低、使

用寿命长、价格低廉等优点,因而在许多应用中发挥着重要的作用,如液晶显示、街道和隧道照明、室内照明等<sup>[3,4]</sup>.近年来,基于广泛应用LED光源的可见光通信引起了人们越来越多的关注,它兼具照明和通信功能,并且具有大带宽、高安全性、抗电磁干扰等优点<sup>[5]</sup>.随着数据流量和业务需求的爆炸式增长,可见光通信能够为室内网络接入提供一种更高速、更可靠、更节能的解决方案.为了实现高数据传输速率,文献<sup>[6]</sup>中给出了一种由小型光学通信单元组成的可见光蜂窝网,该网络通过在天花板上安装多个LED光源接入点实现通信覆盖,每个光源构成一个基站,进而实现对光分布区域用户的完全覆盖.

但上述设计的可见光蜂窝网络在实际应用中面临光接收面照度分布不均匀和小区间干扰严重的问题.LED光源的光辐射规律符合朗伯模型<sup>[7]</sup>,到达接收端时信号分布范围大且强度偏低,因此通用系统设计将导致接收信号覆盖范围小且分布不均匀<sup>[8]</sup>,严重影响可见光蜂窝网的通信性能.光小区的接收面功率分布均匀化是提升无线光通信系统性能的重要方式<sup>[9]</sup>.有研究提出了一种结合光照度均匀性与系统误码率(BER, Bit Error Ratio)两种指标的光源布局<sup>[10]</sup>,结果表明,该方法可有效兼顾照明均匀度和误码率.但该方法一般不考虑蜂窝网小区间干扰,并且在光源布局已固定的场所会存在应用困难的问题.另一种方式是引入经特殊设计的光学发射天线,从而提升接收面光强分布均匀度.光学天线设计方法具有低算法需求、无需改动原有光源布局和易于安装改造等优势,因此具备较强的应用潜力.有研究给出了针对圆形接收区域实现光照均匀分布的光学发射天线设计方案<sup>[11]</sup>,但实现较复杂.因此有研究对算法优化进行了探索,在降低透镜设计复杂度的同时,保持接近90%均匀度的照明效果<sup>[12,13]</sup>.

二次光学设计已经被证明能够有效提升可见光蜂窝网小区光接收面均匀度,但可见光蜂窝网络还面临着小区间干扰的问题<sup>[14]</sup>.处于相邻小区重叠带的用户将受到来自非目标光源的光功率干扰,从而导致通信性能下降.研究表明,可见光蜂窝网络在多个LED光源照明覆盖范围交界的中点处出现小区干扰上边界,在单一LED光源正下方处出现小区干扰下边界,小区干扰上边界处的系统通信性能会明显恶化<sup>[15]</sup>.传统的抗干扰多以正交码等信号处理手段进行,算法运行在用户接收端,导致了较高的接收端复杂度<sup>[16]</sup>.为解决这一问题,有研究提出采用多色LED的方式实现无干扰传输,接收端利用不同颜色滤光片可有效滤除来自其他色灯的干扰<sup>[17]</sup>,但该方式所支持的用户数量由LED颜色数决定,因此在实际场景中容纳用户有限,且单个用户滤光片一经配置难以更换,灵活性不足.由于可见光

蜂窝网络的小区干扰主要来源于重叠区域,因此探索一种无重叠区域的组网方式可在不引入额外复杂度的前提下实现抗小区干扰,矩形光接收面设计是一种较有潜力的方法.利用二次光学设计实现LED下矩形光接收面是LED照明领域的重要研究内容之一<sup>[18,19]</sup>.针对路灯目标光照区域为矩形的情形,有研究者给出了实现光均匀分布的光学透镜设计,但其算法和透镜实体结构相对复杂<sup>[20-22]</sup>,且基于矩形接收面的研究多只考虑通用照明场景,缺乏对可见光蜂窝网络的针对性优化及验证.

为在不引入额外复杂度的前提下实现可见光蜂窝网光接收面均匀化及抗小区干扰,本文提出利用二次光学设计实现均匀化矩形接收面,并以多个矩形接收面拼接的方式实现蜂窝组网,从而消除传统接收面重叠区带来的小区间干扰.该方法可实现光接收面照度均匀化,避免光源布局优化方法所带来的应用限制,同时具备抗小区干扰、布置灵活、组网便捷等优势.本文利用简化算法设计了一种能够实现正方形接收面的光学发射天线,将配以光学发射天线并合理布局的LED阵列作为接入点搭建可见光蜂窝网,在对接收区域光信号分布进行分析的基础上,进一步研究了接收端的信噪比分布以及系统的传输性能.应用该自由曲面光学发射天线,能够有效实现可见光通信网络中所有蜂窝的无缝覆盖,进而抑制小区干扰,提高系统通信性能.

## 2 光学发射天线设计

本文针对可见光蜂窝网应用,设计了自由曲面光学发射天线,以实现LED辐射光在矩形小区范围内的均匀分布.为了简化计算及降低配光难度,本文以LED点光源来进行光学发射天线设计.

### 2.1 光源与接收平面间的能量映射关系

自由曲面光学发射天线的设计可通过光源与接收面的能量对应关系实现.从LED光源发出的光线经过光学天线折射后变为出射光线照射到目标矩形平面.为方便起见,LED光源辐射采用极坐标系,光学天线与目标平面处采用笛卡尔坐标系.考虑到LED辐射光分布和矩形接收区域的轴对称结构,本文只针对四分之一光学发射天线外表面进行求解,进而通过扩展即可求出整个光学发射天线结构.LED辐射光与目标接收平面的能量映射关系如图1所示,即将四分之一LED光辐射范围的辐射角 $\theta$ 和极向角 $\gamma$ 分别划分成 $M$ 和 $N$ 份,并将四分之一矩形接收区域也划分成 $M \times N$ 份,实现光源辐射能量微单元和接收平面微区域一一对应.为方便起见,对微单元进行编号,并定义每一对光源辐射能量微单元与接收平面微区域共用同一个序号 $i$ ,其中 $i \in [1, M \times N]$ .

符合朗伯辐射模型的 LED 光源第  $i$  个辐射微能量单元的光通量  $\psi_i$  与四分之一辐射范围总光通量  $\psi_{\text{tot}}$  的比为

$$\alpha_i = \frac{\psi_i}{\psi_{\text{tot}}} = \frac{\int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} d\gamma \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I_0 \cos\theta \sin\theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} d\gamma \int_0^{\theta_{\text{max}}} I_0 \cos\theta \sin\theta d\theta} \quad (1)$$

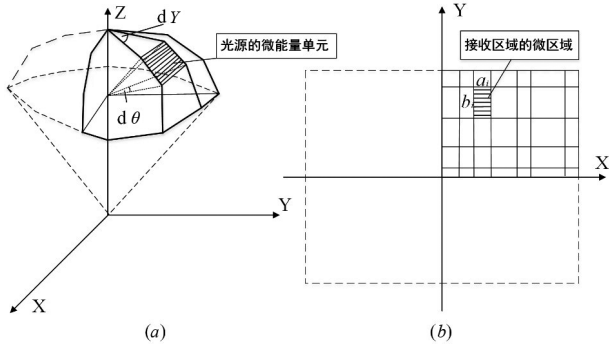


图 1 (a)光能量和(b)目标接收区域的能量映射关系示意图

其中,  $I_0$  为法向轴线上的 LED 辐射光强. 只需要接收微区域面积占整个接收平面面积的比例和对应的微能量单元占总能量的比例相同, 根据微分原理在接收区域范围内光能就会呈现均匀分布, 即

$$\frac{S_i}{S_{\text{tot}}} = \alpha_i \quad (2)$$

其中,  $S_i$  和  $S_{\text{tot}}$  分别是第  $i$  个矩形的面积和四分之一目标平面的面积. 为简化透镜设计过程, 将映射平面划分为边长相等的小矩形, 根据式(2)可求出第  $i$  个小矩形的对应的坐标边界  $(x_i, y_i)$  分别为

$$\begin{cases} x_i = \sqrt{\alpha_i} \times a + x_{i-1} \\ y_i = \sqrt{\alpha_i} \times b + y_{i-1} \end{cases} \quad (3)$$

从而可求得接收平面的每个微区域的坐标.

## 2.2 光学发射天线设计方法

在确定 LED 辐射光与接收区域的能量映射关系后, 根据斯涅尔定律, 可以构造出改变光线传输方向的光学发射天线外表面. 考虑到边缘射线原理<sup>[23]</sup>, 从光源光辐射边缘发出的射线对应于目标接收平面的边缘. 本文采用  $M + 1$  条曲线构造光学天线, 每条曲线包含  $N + 2$  个点. 简便起见, 在求解过程中先将  $\theta$  和  $\gamma$  等分, 即可得到 LED 辐射光的微能量单元的比例关系, 进而得到对应的接收平面的微区域的坐标.

从 LED 光源发出的光线  $I$  入射到光学天线外表面上的一点  $P$ , 经过光学天线折射后变为出射光线  $O$  照射到矩形平面上一点, 从而建立起入射光线  $I$  与出射光线  $O$  之间的对应关系, 根据斯涅尔定律和自由曲面构造算法可以求得  $P$  点坐标以及法向向量, 以此类推可以计算

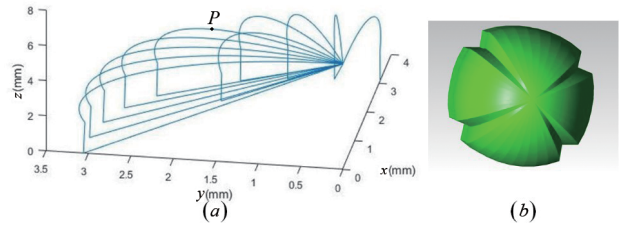


图 2 光学发射天线的结构(a)轮廓线(b)三维模型

出整个光学天线. 考虑到 LED 是点光源, 从 LED 处发出的光线经过光学天线内表面时方向基本不变, 设计时只考虑光学天线外表面的结构, 光学发射天线的外表面轮廓线为  $P$  点的集合, 可表示为

$$\sqrt{[1 + n^2 - 2 \times n(\vec{O} \cdot \vec{I})]} \cdot \vec{N} = \vec{O} - n\vec{I} \quad (4)$$

其中,  $n$  是折射率,  $\vec{I}$  和  $\vec{O}$  是入射光线和折射光线的单位矢量,  $\vec{N}$  是折射点处的单位法向矢量. 为了方便起见, 固定了光学发射天线的顶点和目标平面的中心. 基于入射矢量  $I_0$ 、折射矢量  $O_0$  和斯涅尔定律, 可以得到第一法向矢量  $N_0$ . 根据与前法向量平面垂直的相邻点向量, 得到天线外表面的第一条轮廓线. 从第一条轮廓线出发, 可以方便地得到所有轮廓线, 如图 2(a) 所示. 再由这些轮廓线构造光学发射天线的外表面, 进一步采用三维构造软件即可获得其实体模型, 如图 2(b) 所示. 可以看出, 得到的光学发射天线实体结构具有明显的对称性, 外观相对简单, 有利于进行实验制备.

## 3 基于光学发射天线的可见光蜂窝网络

方便起见, 本文假设预构建的可见光蜂窝网覆盖区域是一个正方形的区域, 在  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$  的室内空间, 设置含有 16 个配以所给出光学发射天线的 LED 光源的阵列, 拟应用于  $4 \times 4$  个光蜂窝组成的低同信道干扰的全覆盖可见光通信网络, 如图 3 所示. 为了验证采用光学天线后该可见光蜂窝网络的通信性能, 本文设定的 LED 光源辐射功率为 1 W, 以避免接收平面出现过多零误码率不好呈现的问题. 为了满足照明需求, 可以考虑采用 LED 阵列(其中之一作为通信用)或是直接将 LED 功率增至 10 W, 即 LED 同时作为照明光源和光接入点, 在照明的同时, 能够满足光覆盖范围内的用户设备网络接入的需求.

为了评估应用所设计的光学发射天线的可见光蜂窝网络的性能, 本文进一步给出了接收信号的质量及相应的系统性能分析. 首先这里采用信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)来评估该网络内的接收信号质量. 由于该简易的网络结构不同小区间采用了相同的 LED 光源, 即相邻小区间将出现小区间干扰, 因此, 考虑小区间干扰情形下, 在可见光蜂窝网覆盖范围内, 第  $i$  个用户接收信号的信干噪比可以

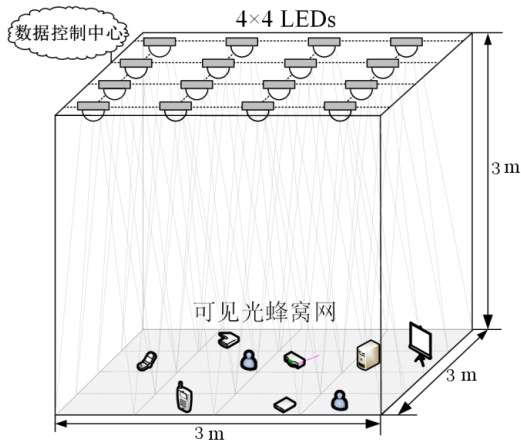


图3 基于新型光学发射天线的可见光蜂窝网模型

表示为

$$\text{SINR} = \frac{R_i^2 P_{ri}^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N R_j^2 P_{rj}^2 + \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2} \quad (5)$$

其中,  $R$  表示接收端光探测器的灵敏度,  $P_{ri}$  是第  $i$  个用户所处位置的光接收功率,  $P_{rj}$  是来自其他小区光源辐射的干扰功率, 而所有光接收功率  $P_r$  通过光线追迹软件 TracePro 计算的光通量以及探测器接收面积得到. 总噪声表示为散弹噪声  $\sigma_{\text{shot}}^2$  和热噪声  $\sigma_{\text{thermal}}^2$  的和<sup>[24, 25]</sup>.

$$\begin{cases} \sigma_{\text{shot}}^2 = 2qRP_r B + C_{\text{bl}} B \\ \sigma_{\text{thermal}}^2 = C_{\text{fr}} B^2 + C_{\text{ch}} B^3 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $q$  是电子电荷量,  $B$  是等效噪声带宽,  $C_{\text{bl}}$ 、 $C_{\text{fr}}$  和  $C_{\text{ch}}$  分别是与背景光电流噪声、反馈电阻噪声和 FET 信道噪声参数. 文中所有参数均由表 1 给出.

仿真中假定所有用户接收端均具有相同的结构, 根据所求得信干噪比, 可以得出采用开关键控 (On-Off Keying, OOK) 调制方式时, 用户处于不同位置的误码率 (Bit Error Ratio, BER) 性能为

$$\text{BER} = Q(\sqrt{\text{SINR}}) \quad (7)$$

表1 实验仿真参数

参数	名称	取值
$P_r$	光接收功率/dBm	3.0
$L$	LED 中心波长/ $\mu\text{m}$	0.546 1
$\Phi_{1/2}$	LED 半功率角/ $^\circ$	70
$A$	光电接收器面积/ $\text{cm}^2$	1
$B$	噪声带宽/MHz	100
$q$	电子电荷量/C	$1.602\ 189 \times 10^{-19}$
$R$	光电探测器灵敏度/(A/W)	0.53
$C_{\text{bl}}$	背景光电流噪声/(A <sup>2</sup> /MHz)	$9.184 \times 10^{-22}$
$C_{\text{fr}}$	反馈电阻噪声/(A <sup>2</sup> /MHz <sup>2</sup> )	$6.508\ 6 \times 10^{-35}$
$C_{\text{ch}}$	FET 信道噪声参数/(A <sup>2</sup> /MHz <sup>3</sup> )	$2.33 \times 10^{-30}$

即误码率符合互补累计分布函数(Q函数), 其他调制格式也有类似的误码率计算方式.

## 4 结果分析和讨论

首先给出为目标场景专门设计的基于自由曲面透镜的光学天线结构, 天线选用 SCHOTT-BK7 材料, 对目标波长光的折射率 1.51872, 吸收系数 0.0002001, 其半径和厚度分别约为 3 mm 和 5 mm. 针对文中涉及的实验场景, 通过光线追迹软件 TracePro 对目标接收平面的光分布情况进行分析. 图 4 给出了配以光学发射天线的 1W 单个 LED 光源的辐射光分布情况. 光学发射天线将原本为朗伯分布的 LED 光源辐射光线限制在了边长约为 0.8 m 的正方形区域, 与目标形状一致. 相对出光率超过 84%, 极大地提高了系统给的光能利用率. 定义均匀度为最小光强与平均光强的比值, 在边长约为 0.8 m 的范围内, 其光分布均匀度可达 0.8 以上. 因而该光学发射天线在提高光能利用率的基础上, 能够使 LED 的辐射光大部分均匀分布在目标区域, 有利于通信性能提升.

为实现可见光蜂窝网约 3m × 3m 区域的光信号均匀分布, 根据配以光学发射天线的单个 LED 光分布特点, 可将网络接入点设计为相应的 4 × 4 光源阵列. 本文进一步分析了图 5 给出的基于光学发射天线的可见光蜂窝网的光信号在目标区域的分布情况, 并与无光学天线时的光分布进行了对比, 如图 5 所示. 无光学发射天线时, 由于单个 LED 光源的光分布范围大且不均匀, 在可见光蜂窝网的覆盖区域内光信号分布呈现较为明显的不均匀性, 在 3m × 3m 范围内的均匀度约为 0.5, 并且每个 LED 光源的光辐射区域具有明显的重叠, 如图 5(a) 所示. 而当光源阵列配以设计的光学发射天线后, 在目标平面上形成了一个正方形的光分布区域, 超过 91% 的光线分布在该正方形区域内, 即系统具有较高的光能利用率. 从图 5(b) 可以看出, 在边长接近 3 米的正方形区域内, 光照均匀度达到 0.8 以上, 满足了在接收平面光信号均匀分布的预期, 如果去除边缘光信号覆盖则更加均匀, 均匀度高达 0.9 以上. 此外, 在不同光源的光分布区域间不存在明显的相交和缝隙, 有希望实现可见光蜂窝网同信道干扰消除及无盲区通信.

为得到基于光学发射天线的可见光蜂窝网的通信性能, 本文应用上述得到的光分布结果进一步分析了该网络模型的信干噪比情况. 图 6 给出了采用所设计自由曲面光学发射天线前后可见光蜂窝网的信干噪比值在目标区域的分布对比, 其中色轴的黄色部分代表信干噪比相对较高区域, 蓝色部分代表信干噪比相对较低的区域. 在使用光学发射天线之前, 由于不同 LED 光源的光辐射区域互相重合, 形成严重的同信道干扰,

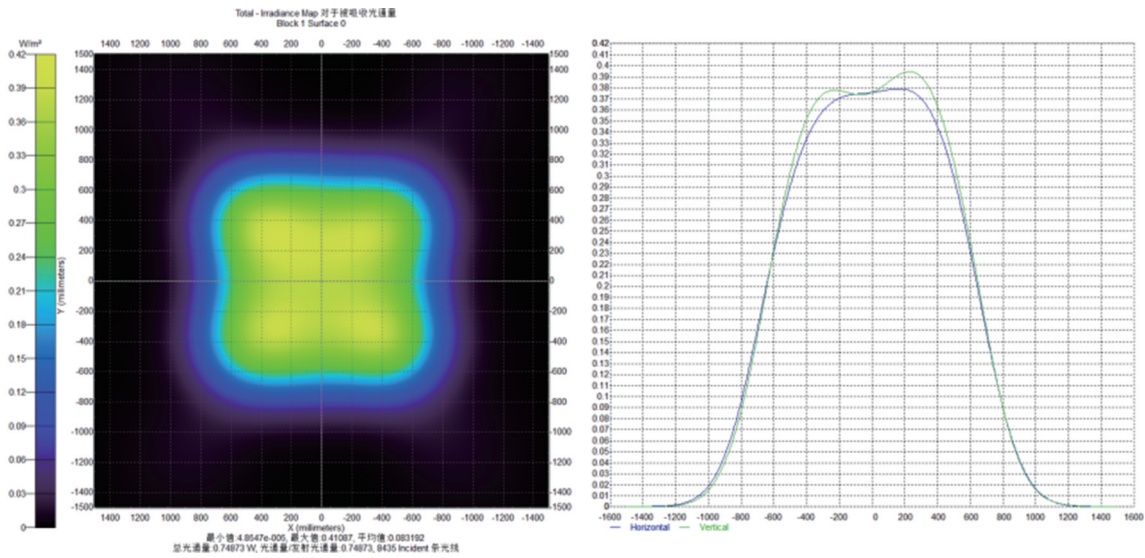


图4 基于自由曲面光发射天线的单个LED辐射光分布图

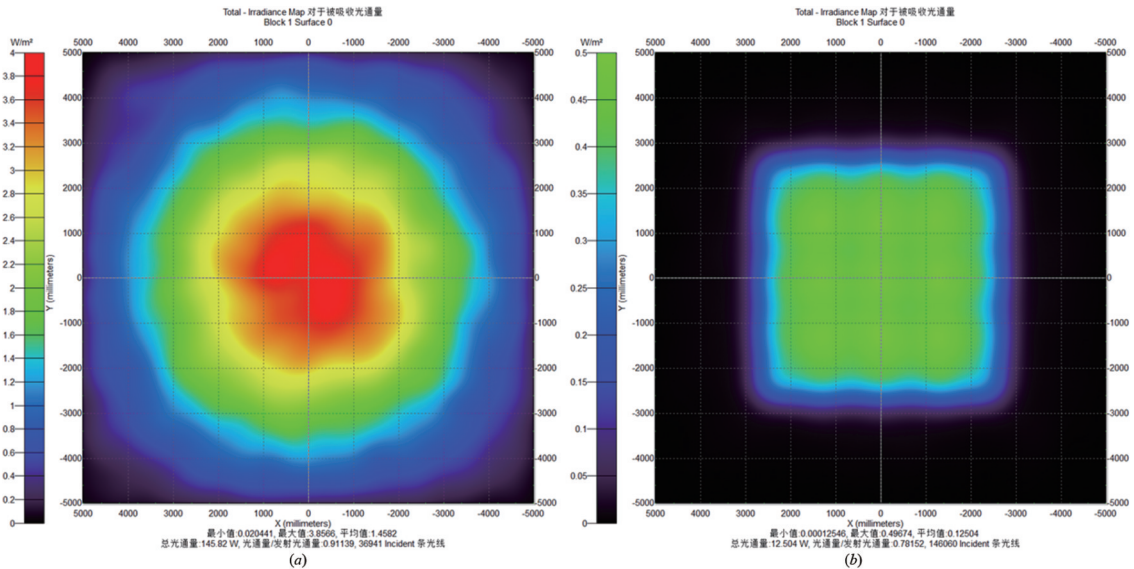


图5 可见光蜂窝网的光信号分布情况:(a)无光学发射天线;(b)基于自由曲面光发射天线

接收区域的信干噪比小于 0 dB,如图 6(a)所示,这将严重影响可见光蜂窝网的通信性能.然而在对 LED 阵列配以设计的光学发射天线后,从图 6(b)可以看出,由于每个 LED 光源的光分布区域各自分开,接收区域被分成  $4 \times 4$  个小区域,每个小区域都具有较高的信干噪比水平,说明自由曲面光学发射天线能够有效抑制可见光蜂窝网不同区域之间的同信道干扰.此外,在整个网络覆盖区域内的信干噪比都比较接近,平均信干噪比达到了 12.6 dB,为无盲区高质量通信提供了保证.因此,在没有采用任何编码技术的情形下,基于本文设计的光学发射天线,系统可直接区分出不同区域的信号,进而有效保证可见光蜂窝网的通信质量.

应用得到的可见光蜂窝网接收区域的信干噪比分布情况,本文也进一步对更为直观体现通信质量的误码

率性能给出了分析,图 7 展示了采用 OOK 调制方式时基于自由曲面光学发射天线的整个网络的误码率分布,由于误码率采用 Q 函数估计法,无法对过低 SNR 情况下的误码率分布进行较好的逼近,因此本文未给出无光学发射天线情况下的误码率分布图.可以看出,在  $3\text{m} \times 3\text{m}$  的正方形光信号接收范围内,尽管小区域边缘信干噪比下降导致了误码率略有上升,但整个可见光蜂窝网络整体误码率分布较为均衡,能达到差错控制编码门限误码率  $3.8 \times 10^{-3}$ .此外可以得出,该 OOK 调制可见光蜂窝网的平均误码率为  $8.93 \times 10^{-4}$ ,即使采用其他的包括高阶调制在内的复杂调制格式仍能够满足可靠通信需求.结果表明,采用本文设计的自由曲面光学发射天线,能够简便、可行地大幅度提升可见光蜂窝网的系统性能.

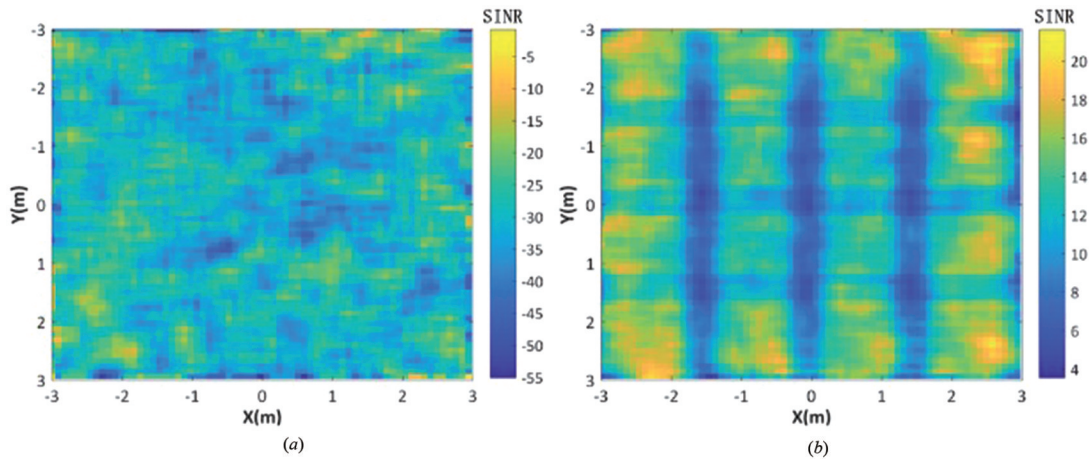


图6 可见光蜂窝网的信干噪比分布情况:(a)无光学发射天线;(b)基于自由曲面光发射天线

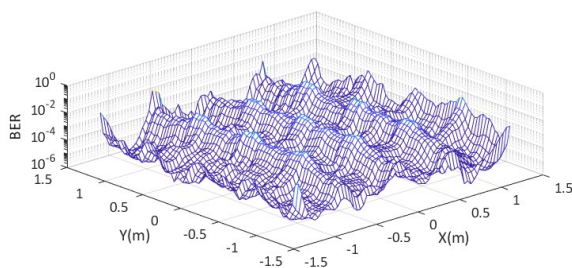


图7 基于自由曲面光发射天线的可见光蜂窝网的误码率分布

## 5 结束语

本文设计了一种适用于可见光蜂窝网的自由曲面光学发射天线. 采用该光学发射天线, LED光源的辐射光能够均匀地分布在矩形区域内. 将设计的光学发射天线应用于 $4 \times 4$ 个光蜂窝的可见光通信网络模型, 仿真结果表明, LED无缝覆盖区的分布均匀度达到0.8以上, 同时能够有效降低相邻光蜂窝之间的同信道干扰, 网络的平均信干噪比达到了12.6 dB, 进而提升了整个网络的通信性能. 未来将进一步优化光学设计算法, 并对不同方法所设计的透镜进行试制与实验分析, 从而进一步提升可见光蜂窝网络的通信性能.

## 参考文献

- [1] 陈丹, 雷雨, 柯熙政. 无线光自适应副载波MDPSK调制系统特性分析[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1748 – 1753.  
Chen D, Lei Y, Ke X Z. Performance analysis of wireless optical adaptive subcarrier MDPSK modulation system[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(7): 1748 – 1753. (in Chinese)
- [2] 王汝言, 王卓, 吴大鹏, 等. 基于训练序列与数据叠加的ACO-OFDM无线光通信系统时间同步方法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 162 – 166.  
Wang R Y, Wang Z, Wu D P, et al. A timing synchroniza-

tion method for ACO-OFDM optical wireless communications based on superposition of training and data[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 162 – 166. (in Chinese)

- [3] 陈雄斌, 闵成或. 看得见的无线通信技术——可见光通信[J]. 物理, 2020, 49(10): 688 – 696.  
Chen X B, Min C Y. Wireless communication that we can see——visible light communication[J]. Physics, 2020, 49(10): 688 – 696. (in Chinese)
- [4] 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光LED数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2536 – 2540.  
Ding D Q, Ke X Z. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2536 – 2540. (in Chinese)
- [5] 丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC系统的光源布局设计与仿真研究[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 131 – 134.  
Ding D Q, Ke X Z, Li J X. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(1): 131 – 134. (in Chinese)
- [6] Kazemi H, Safari M, Haas H. Multi-hop wireless optical backhauling for liFi attocell networks: bandwidth scheduling and power control[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 99: 1 – 1.
- [7] 郝宏刚, 杜志华. 一种高效均匀复合型菲涅尔透镜设计[J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 1 – 4.  
Hao H G, Du Z H. Design of a high efficiency and homogenized compound Fresnel lens[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(11): 1 – 4. (in Chinese)
- [8] 吴楠, 杨爱英, 冯立辉, 等. 可见光通信中光学天线的研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 151 – 158.  
Wu N, Yang A Y, Feng L H, et al. Research of optical antenna technology in visible light communication[J]. Journal

- of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(2): 151 – 158. (in Chinese)
- [9] 田棋杰, 张建华, 张缓缓, 等. 长出瞳距离轴四反光学天线的设计研究[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1822001.  
Tian Q J, Zhang J H, Zhang H H, et al. Design of off-axis four-mirror optical antenna with long exit Pupil distance[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1822001. (in Chinese)
- [10] 赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 49 – 57.  
Zhao L, Peng K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 49 – 57. (in Chinese)
- [11] 方靖岳, 张海良, 贾红辉, 等. 非视线散射大气光通信的光学天线[J]. 应用光学, 2008, 29 (02): 198 – 202.  
Fang J Y, Zhang H L, Jia H H, et al. Optical antenna for non-line-of-sight scattering atmospheric optical communication[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 198 – 202. (in Chinese)
- [12] Ding Y, Liu X, Zheng Z, et al. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958 – 12966.
- [13] Ding Y, Liu X, Zheng Z, et al. Secondary optical design for LED illumination using freeform lens[J]. Illumination Optics, 2008, 71030K.
- [14] 亢令川, 王超, 穆昱, 等. 室内多小区可见光通信系统孔径阵列接收机的优化设计[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 71 – 78.  
KANG L C, WANG C, MU Y, et al. Optimal Design of Aperture Array Receivers for Indoor Multi-Cell Visible Light Communication System[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41 (11): 71 – 78. (in Chinese)
- [15] 郎磊, 贾倩. 室内可见光蜂窝网络信道特性研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(01): 81 – 85.  
Lang L, Jia Q. Investigation of channel characteristic of indoor optical cellular communications network based on visible light[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(01): 81 – 85. (in Chinese)
- [16] Agha Y A, Zhang Z C, Abdeldime M, et al. Mitigation of inter-cell interference in visible light communication[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2015, 31(4): 437 – 442.
- [17] Bian R, Tavakkolnia I, Haas H. 15.73 Gb/s visible light communication with off-the-shelf LEDs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2418 – 2424.
- [18] 李建鹏, 郭震宁, 张佳宁, 等. 用于大型广告灯箱的LED一次透镜设计与仿真[J]. 照明工程学报, 2017, 28(03): 86 – 90.  
Li J P, Guo Z N, Zhang J N, et al. Design and simulation of LED first lens for large advertising light boxes[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(03): 86 – 90. (in Chinese)
- [19] 刘典宏, 张晓晖, 张爽. 快速实现矩形准直光束的高集光效率LED透镜设计[J]. 发光学报, 2017, 38(7): 960 – 966.  
Liu H D, Zhang X H, ZHANG Shuang. Fast design of high optical collection efficiency LED lens for rectangular Collimated Beam[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(7): 960 – 966. (in Chinese)
- [20] Wang K, Chen F, Liu Z, et al. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 413 – 425.
- [21] 陈琛, 张晓晖. 支撑曲面法设计自由曲面照明透镜[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(3): 71 – 74.  
Chen C, Zhang X H. Design LED illumination lens using supporting surface method[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(3): 71 – 74. (in Chinese)
- [22] Wang K, Liu S, Chen F, et al. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(10): 105501.
- [23] Situ W, Han Y, Li H, et al. Combined feedback method for designing a free-form optical system with complicated illumination patterns for an extended LED source[J]. Optics Express, 2011, 19(105): A1022 – A1030.
- [24] Lu H, Hong Y, Chen L, et al. On the study of the relation between linear/nonlinear PAPR reduction and transmission performance for OFDM-based VLC systems[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 13891 – 13901.
- [25] 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.

#### 作者简介



金建力 男, 1992年生, 河北衡水人. 北京科技大学博士生, 主要研究方向为面向可见光通信、6G关键技术.

E-mail: b20180309@xs.ustb.edu.cn



路慧敏(通信作者) 女, 1978年生, 辽宁新民人. 博士, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为可见光通信、光学器件设计.

E-mail: hmlu@ustb.edu.cn