

• 光通信与网络信息 •

一种可见光通信光源布局模型及性能分析

王 丽^{1 2} 郭茂田¹ 田 辉²(1. 郑州大学 物理工程学院 郑州 450001;
2. 北京邮电大学 北京 100876)

摘 要: 在室内可见光通信系统中,为避免室内可见光通信中的覆盖盲区,需要根据房间的形状、大小来合理铺设 LED 灯,并在此基础上调节 LED 灯的发射功率,以达到最好的通信性能。目前对 LED 灯的布局研究大都是针对类似 5m×5m×3m 的室内空间场景,即平面是正方形的立体空间,其应用具有一定的局限性。本文研究非理想的室内空间场景,即平面是长方形的立体空间的灯源布局问题,提出将长方形平面建模为椭圆的思路,并进一步研究了其光源布局。仿真结果表明,采用所提出的椭圆形模型以及光源布局,可以有效改善室内空间的通信质量,使 SNR 波动缩小到 0.99dB,信噪比的品质因数达到 13.00dB。

关键词: 可见光通信; LED; 光源布局; SNR 波动

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **DOI 编码:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2016.03.092

A visible light communication light source layout model and performance analysis

WANG Li^{1 2}, GUO Mao-tian¹, TIAN Hui²

(1. Institute of Physical Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. National Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University Of Posts And
Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In the indoor visible light communication system, to avoid indoor coverage blind zone in visible light communication, need according to the shape and size of the room to rationally designed LED lights, and adjust the transmission power of LED lamp, in order to achieve the best communication performance. The current research on the layout of the LED lights are mostly for similar 5 m×5 m×3 m's interior space, the plane is square stereo space, its application has some limitations. In this paper, we study the non-ideal interior space scenes, the plane is a rectangle the three-dimensional space of the layout of the light source problem, put forward the ideas, will be rectangular plane modeling for elliptic and further study on its light source layout. Simulation results show that the proposed model of oval and light distribution, can effectively improve the quality of interior space communication, SNR fluctuation was reduced to 0.99 dB, SNR quality factor is 13.00dB.

Key words: visible light communication; LED; light source layout; SNR fluctuation

可见光通信技术是一种在白光 LED 技术上发展起来的新兴的无线光通信技术^[1]。可见光通信利用白光 LED 作为光源,较之白炽灯和节能灯,LED 具有效率高、价格低及寿命长^[2]等优点。基于白光 LED 的可见光通信(VLC)技术,可以以低价格同时实现照明和通信,只要有光照设备,就可实现高速传输,该技术适用于各种接入场景,无电磁干扰,绿色环保。由于可见光通信技术的众多优点,获得来自世界各国的学术界和工程界的广泛关注和支持,在短短十几年的时间里,取得了多个突破性进展,各种新的研究成果

也在不断涌现^[3-6]。

在基于白光 LED 的可见光通信系统中,光源(LED 照明灯)应满足照明和通信的双重需求^[7],设计过程中应考虑室内光照度的分布以及接收功率的分布,不同的室内光源功率分配方式和 LED 布局,将会导致不同的光照度和不同的光功率分布。由于接收功率的均匀度是影响系统性能的一个关键因素,所以需要室内 LED 阵列功率分配和光源的布局进行研究,使室内光功率分布尽可能趋于均衡,同时使室内的光照度达到国际照明标准。

一个优化的布局会使光强的初始分布比较均匀,室内信噪比波动小,从而可使移动终端的通信更加稳定。在实际应用系统中,为了使通信效果达到最优,须使房间内的光强分布大致不变,而且要尽量避免通信盲区(光照射不到的区域)的出现。为达到这个目的,必须根据不同的房间形状和大小以及分布设施的情况,设置 LED 灯的布局,在此基础上调节 LED 的功率,以期达到最好的通信性能。

收稿日期:2016-01-13

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”基金资助项目(2013AA013603)

作者简介:王丽(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为可见光通信。E-mail:961643314@qq.com;田辉(1963-),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为宽带无线通信网理论及工程。E-mail:tianhui@bupt.edu.cn

通信作者:郭茂田(1963-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为光学、光电子技术。E-mail:gmt@zhu.edu.cn

http://www.laserjournal.cn

文献[8]中,作者在研究光源布局时,指出,在 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 5\text{m}$ 的系统模型中,接收平面位于 $h=0.85\text{m}$ 处,当使用四只LED灯阵列,在天花板上对称分布时,当LED灯的 x, y 坐标分别为 $(2, 2), (3, 3), (2, 3), (3, 2)$ 时,LED灯的布局最佳。可是此情景下,角落处的接收功率较低,不能保证良好的通信质量。为了保证更好的照明效果和通信质量,文献[4]中采用系统模型为 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$,以 $16(4 \times 4)$ 个发射器,即LED灯组均匀地分布在天花板上的仿真场景,此方式虽然加入了更多的LED灯组,但是角落信噪比低的问题还是普遍存在。文献[9]针对角落通信质量差的问题,提出了一种新的LED布局模型,即4盏灯位于角处,然后使12盏灯以房间的空间中心为圆心,适当的距离为半径,均匀分布在一落个圆上。研究表明,当角落处的LED灯距离墙的位置为 0.1m ,并且由均匀分布的12个LED灯组组成的圆的半径为 2.2m 时,可以使此VLC系统具有比较均匀地分布照度和较小的SNR波动。

目前对于LED灯的布局研究多采用的是,平面为正方形的立体空间的室内空间场景。但在会议室、公共大厅等室内可见光通信应用场景下,有可能是平面是长方形的立体空间,如何优化这类场景下的照明及通信性能,是本文关注的重点。

本文针对平面是长方形的立体空间的灯源布局问题,提出将长方形平面建模为椭圆的思路,并进一步研究了其光源布局。研究表明,此种布局,SNR波动相对较小,从而改善了通信性能。

1 现有系统模型及存在的问题

这里首先介绍LED的辐射特性。在研究白光LED辐射特性中,发光强度和发光功率是基本的研究对象。LED的发光强度随着辐射角度的变化而变化,因此接收端在与LED成不同角度时接收到的光强度是不同的。

在基于白光LED的通信系统中,白光LED的发光功率表示辐射光能。单个LED发射光功率主要是指中心发光功率,表达式为: $P_i(\varphi) = P_0 R_0(\varphi)$,其中, P_0 表示单个LED中心发光功率。此外,一般认为白光LED的辐射模型服从朗伯(Lambert)模型^[10]: $R(\varphi) = (m+1) \cos^m(\varphi) / (2\pi)$,它表示的是发光功率随发光角 φ 的朗伯分布情况,其中, m 值的大小表征了LED的发光指向性, m 值的大小决定白光光束方向性, m 值越大,光束方向性越好,即在直接视距中, m 可取得较大值,而在散射链路中,通常取 m 为1。发光功率单位为mW,此处为电信号单位。信道直流增益为:

$$H(0) = \frac{R(\varphi) \cos(\theta) A}{d^2} = \frac{(m+1) \cos^m(\varphi) A \cos(\theta)}{2\pi d^2} \quad (1)$$

式中, m 为光源的辐射模式, A 为光电探测器接收面积, d 为发送端与接收端之间的距离, θ 为入射角。平均接收光功率为:

$$P_r = H(0) P_t \quad (2)$$

式中, P_t 为LED灯的发射功率。检测到的输出电信号的SNR为:

$$SNR = \frac{s(t)^2}{P_{noise}} = \frac{(RH(0) P_t M_i f(t))^2}{P_{noise}} \quad (3)$$

式中, M_i 为调制指数, $f(t)$ 为OOK信号方式, $s(t)^2$ 为输出探测电信号的平均功率值, P_{noise} 为噪音功率,包括系统的背景噪音等等。

引入SNR波动的品质因数来评估整个系统用户的公平性,表示为:

$$Q_{SNR} = \frac{\overline{SNR}}{2 * \sqrt{\text{var}(SNR)}} \quad (4)$$

式中, \overline{SNR} 为SNR的均值, $\text{var}(SNR)$ 为SNR的方差。 Q 值越高,说明整个房间的SNR波动越均匀。

2 LED灯布局方案

已有模型^[11-14]是针对室内空间尺寸为 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$,即平面为正方形的立体空间,采用圆形的LED灯的布局方案^[9],并针对角落通信盲区的问题,在角落处也进行相应布局。即将12盏LED灯布局成一个圆形,通过调整圆的半径,并在四角布四盏灯,来保证通信质量。

但在如某些会议室、公共大厅等实际的室内可见光通信应用场景中,存在非正方形的立体空间,即不是像 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$ 建模的正方形立体空间。如对于平面为长方形的立体空间,采用已有的模型将会造成布局不均匀。因为圆可以覆盖到的位置是比较规整的正方形,而从圆到长方形短边的一段距离,存在一段盲区。因此,需要优化LED灯的布局模型,以保证盲区处的照明和通信需求。

本文针对 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$ 模型在实际应用场景中存在的问题,提出一种椭圆形的布局方案。方案可根据房间的尺寸大小,把灯的布局按照房间尺寸的变化进行成比例压缩。进一步并可根据长方形的不同的长短边,按比例调整椭圆的长短轴。针对四角的盲区,同样设置四盏LED灯。在某些室内空间环境下,本文所提方案可以转化为 $5\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$ 模型。

3 仿真结果与分析^[15-16]

基于上述分析,本文针对非标准系统模型,以 $5\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$ 为例,对LED灯的布局与SNR性能的关系进行仿真。根据SNR波动的大小,从选择最佳LED灯的布局。其中SNR波动越小,表示SNR分布越均匀,说明室内的空间通信质量越好。系统的仿真参数如表1所示。仿真结果如图1、图2所示。

表 1 仿真参数

房间尺寸(长×宽×高)	5m×4m×3m
接收其距离地面高度	0.85m
墙面反射率	0.7
Led 半辐射角度	60°
光电探测器的物理面积	10 ⁻⁴ m ²
接收器视野角(FOV)	170°
光电探测器响应率	1A/W
调制指数	0.2

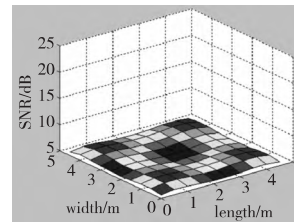


图 1 圆形分布仿真图

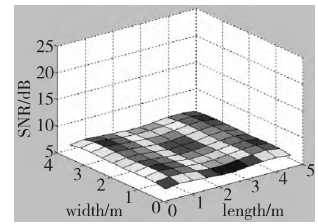


图 2 椭圆分布仿真图

表 2 当 X=2.2m 时, Y 取不同值的情况下, SNR 的各参数变化情况

Y(m)	1.76	1.66	1.86	1.96	2.0	2.1
SNR range(dB)	[6.43 7.60]	[6.43 7.76]	[6.42 7.51]	[6.40 7.41]	[6.38 7.37]	[6.35 7.27]
SNR fluctuation(dB)	1.17	1.33	1.09	1.01	0.99	0.92
Q-factor(dB)	10.77	9.52	11.97	12.83	13.00	12.91

在图 1 中,当 led 灯的布局为圆形时,圆的半径为 2.2m,角落的灯距离墙面 0.1m。此时,SNR 波动为 0.9dB, Q 值达到 12.2dB^[8]。根据不同的室内空间场景,将平面是正方形的立体空间变为平面是长方形的立体空间,所以需要把布局由针对正方形的圆形变为针对长方形的椭圆形,仿真结果如图 2 所示。如果按照按比例压缩的规则, $x=2.2$, $y=1.76$, 应该为最优解。而根据控制变量法,固定 x 或 y 的值,再改变另一个值,从参数来考查系统的最优解,由表 2 可以看出,当 $x=2.2$, $y=2.0$ 时, SNR 波动为 0.99 dB,而此时 Q 值为最大值。经仿真验证,可以得到系统最优解, Q 的取值可以达到 13.00 dB。

4 结语

本文针对诸如会议室、公共大厅等实际的室内可见光通信应用场景,提出一种椭圆的光源布局模型。该模型可通过调整长短轴,来适应变化的房间尺寸,并进行了仿真验证。仿真结果表明提出的光源布局模型可以改善系统的性能,使房间内不同位置的多个用户具有几乎相同的通信质量。同时,本模型也可适用于不同尺寸的非标准室内空间通信系统。

但是,本文是通过控制变量的参数考查得到的最优解,所以针对不同的房间尺寸,并不能简单的通过压缩比例的方式得到最优解。在后续的工作中,将继续研究以找到一种自适应的方式,使 LED 布局能够跟随房间尺寸而变化,找到二者之间的关系,从而得到最优解。总之,本文提出的椭圆布局方案,有一定的实际应用场景和价值,但仍有可进一步优化的空间。

参考文献

- [1] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, et al. Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting [J]. PIMRC 2001. The 12th IEEE International Symposium on, 2001 2: F81-F85.
- [2] Jupeng Ding, Zhitong Huang, and Yuefeng Ji, Evolutionary Algorithm Based Uniform Received Power & Illumination Rendering for Indoor Visible Light Communication [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012 29(6): 971-979.
- [3] T. Komine, & M. Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. Consumer Electronics, IEEE Trans, 2004, 50(1): 100-107.
- [4] Ding J. P. & Huang, Z. & Ji, Y. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications [J]. Communications Letters, IEEE, 2012, 16(4): 439-441.
- [5] T. Komine, & J. H. Lee, & S. Haruyama, et al. Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment [J]. Wireless Communication, IEEE Trans. 2009 8(6): 2892-2900.
- [6] Do, Trong-Hop. & Yoo, Myungsik. Optimization for link quality and power consumption of visible light communication system [J]. Photon. Netw. Commun. 2014 27: 99-105.
- [7] LANGER KD, GRUBOR J, BOUCHET O, et al. Optical wireless communications for broadband access in home area networks [J]. ICTON 2008: Proceedings 2008 4: 149-154.
- [8] 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.
- [9] W. Zixiong, & Yu, Changyuan, et al. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. OE 2012 20(4).
- [10] Weast R C, CRC Handbook of Chemistry and Physics [M]. Boca Raton: CRC Press, 1983.
- [11] 王永波. 室内可见光无线通信系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] 杨宇, 刘博, 张建昆, 等. 一种基于大功率 LED 照明灯的可见光通信系统 [J]. 光电子激光, 2011 22(6): 803-807.
- [13] 赵俊. 基于白光 LED 阵列光源的可见光通信系统研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2009.
- [14] 臧景峰, 朴燕, 等. 基于白光 LED 照明光源的室内 VLC 系统 [J]. 发光学报, 2009 30(6): 877-881.
- [15] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [16] 迟楠. LED 可见光通信技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.