

可见光通信中解调信号与基带信号关系的研究

陈文娟, 胡姗姗, 徐嘉远, 刘树钰, 薛德宽, 徐志杰, 刘冰

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 高精度可见光通信模型的建立是室内可见光通信系统设计与分析的重要基础。为了便于可见光通信系统中光源布局、发光二极管(LED)数目、发射端与接收端之间相对位置的确立和驱动电压的选择, 以距离平方反比定律为基础, 通过对光电二极管接收到的光强进行积分得到光通量, 首次将可见光通信系统中基带信号和解调信号建立定量关系。搭建可见光通信试验系统验证建立关系的正确性, 试验结果表明该模型的相对误差小于 0.1。

关键词: 可见光通信; 光场分布; 点对点通信模型

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)08-0007-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the relationship between demodulation signal and baseband signal in visible light communication

CHEN Wenjuan, HU Shanshan, XU Jiayuan, LIU Shuyu, XUE Dekuan, XU Zhijie, LIU Bing

(College of Science, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: The establishment of high precision visible light communication model is important for the design and analysis of indoor visible light communication system. In order to conveniently determine the layout of the light source, the number of LEDs, the relative position between the transmitter and the receiver in the visible light communication system, and select the driving voltage, the luminous flux is obtained, based on the distance inverse square law, by integrating the light intensity received by the photodiode, and the relationship is established between the baseband signal and the demodulated signal for the first time. A visible light communication experimental system was built to verify the correctness of the relationship, and the results show that the relative error of the model is less than 0.1.

Key words: visible light communication; light field distribution; point to point communication model

0 引言

可见光通信技术是利用发光二极管(LED)作为信号光源来传递信息的技术, 具有绿色环保、高速保密、无电磁干扰、通信带宽大和部署灵活等特点^[1,2]。目前,

收稿日期: 2019-03-12。

基金项目: 中国石油大学(华东)重点教学实验技术改革项目(SZ201822)资助; 中国石油大学(华东)国家级大学生创新创业训练项目(201810425093)资助; 中国石油大学(华东)常规教学研究与改革项目(JY-B201860)资助; 中国石油大学(华东)校级重点教学改革项目(JY-A201820)资助。

作者简介: 陈文娟(1969-), 女, 硕士, 中国石油大学(华东)物理演示实验室高级讲师, 重点教学实验技术改革项目负责人。主要从事可见光通信信号处理以及可见光通信系统设计等方面的研究。



可见光通信大多处于试验阶段, 系统传输信号的性能需要进一步提高。为优化室内 LED 数目、光源布局等系统参数, 需要探究可见光通信系统中不同位置处解调信号和基带信号之间的关系^[3-6], 现有的文献主要对可见光通信系统中光功率的分布进行了理论研究^[7-11], 并没有对可见光通信系统中解调信号与基带信号之间的关系进行深入的探究。本文基于距离平方反比定律建立可见光通信模型, 设计可见光通信系统并验证该模型的准确性。

1 可见光通信模型建立

可见光通信系统主要由发射端和接收端构成, 发射端和接收端的相对位置是影响信号传输质量的主要因素^[12,13], 建立可见光通信模型对研究系统传输质量具有重要作用。建立可见光通信系统中解调信号与

基带信号之间的定量关系, 可以通过基带信号求得接收端处于任意位置处的解调信号, 为可见光通信系统的设计提供可靠的理论基础。

1.1 基带信号与光通量关系

可见光通信系统中采用大功率 LED 灯作为信号发射源, 发射端调制驱动电路将待传输的模拟信号调制到 LED 灯上, 通过灯光的快速亮灭变化进行传输。根据白光 LED 的伏安特性关系以及辐射通量和驱动电流之间的关系可知光通量正比于电源电流。驱动电路一般采用分压式偏置电路驱动 LED 灯, 驱动过程中晶体管工作在线性区, 因此电源电流正比于信号电压, 则 LED 的辐射通量与其驱动电压呈线性关系, 白光 LED 的辐射通量值 $\Phi(t)$ 为:

$$\Phi(t) = \eta P(t) = \eta UI(t) = \eta U_{ps}(t) \quad (1)$$

其中, η 为光源发光效率, t 为时间, U 为 LED 两端的驱动电压, p 为调制系数, $P(t)$ 为 LED 消耗的电功率, $I(t)$ 为 LED 两端的电流。 $s(t)$ 为待传输的模拟信号。

1.2 传输信道中光照度分布

LED 属于朗伯辐射光源, 根据朗伯辐射体的辐射规则, LED 光源的远场光强呈角分布, 输出光强和角度关系近似为余弦分布^[14,15], 所以发光强度 $I(\theta)$ 与角度 θ 之间的关系为:

$$I(\theta) = \eta U_{ps}(t) \frac{(m+1)}{2\pi} \cos^m \theta \quad (2)$$

在 $\eta U_{ps}(t)$ 恒为 1 情况下, 本文利用 Matlab 对朗伯系数 m 分别为 1、3、5、7 时不同角度上的发光强度和 LED 灯表面发光强度分布进行数值模拟并对光强进行归一化处理, 结果如图 1 所示。

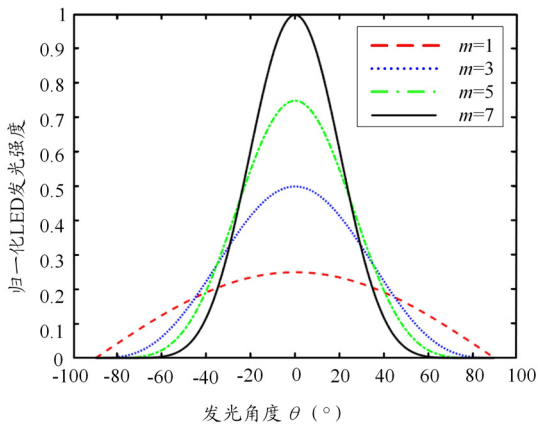


图 1 不同朗伯系数的 LED 发光强度分布

通过上述模拟可知, m 值的大小表征白光 LED 灯的发光指向性, m 值越大 LED 灯发光指向性越高, 发

光越集中。

对于空间中任一点的光照度, 首先令 LED 光源的位置 $(0,0,0)$ 为坐标原点, 则空间中任意位置 $R(x,y,z)$ 的光照度 E_R 为:

$$E_R = \frac{I(\theta) \cos \varphi}{r^2} = \frac{\eta U_{ps}(t) \frac{(m+1)}{2\pi} z^{m+1}}{(x^2+y^2+z^2) \frac{m+3}{2}} \quad (3)$$

其中, φ 为 LED 光源发出的光束光轴与该点到 LED 光源连线所成的角度, r 为该点到 LED 光源的长度。由式(3)计算可得: 当朗伯系数较低时, E_R 随空间分布的方差较小, LED 灯发光较为均匀, 室内不存在光照盲区, 适用于可见光通信; 当朗伯系数较高时, 房间中心的光照度偏高, 而房间四角处存在光照盲区, 不适用于可见光通信。因此, 可见光通信系统中最好采用朗伯系数较低的 LED 灯作为光源。

2 解调信号与基带信号的关系

2.1 正对情况下解调信号与基带信号的关系

LED 信号源和光电二极管正对的情况下传输效果最好, 研究这一情况下的传输效果, 对可见光通信的优化具有重要的意义。LED 和光电二极管正对时示意图如图 2 所示。

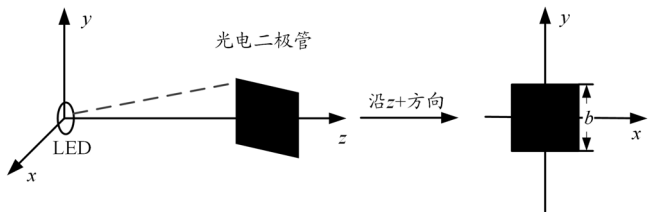


图 2 LED 和光电二极管正对示意图

当 m 为 1 的 LED 光源正对边长为 b 的正方形光电二极管时, 接收端解调出来的信号 $r_1(t)$ 为:

$$r_1(t) = \beta R_f P = \beta R_f \frac{\Phi_r}{K_m} = \beta R_f \frac{1}{K_m} \eta U_{ps}(t) \frac{b}{\pi} \times \frac{4}{\sqrt{b^2 + 4z^2}} \arctan\left(\frac{b}{\sqrt{b^2 + 4z^2}}\right) \quad (4)$$

其中, β 为接收端的电路放大倍数, R_f 为光电二极管的电流响应度, K_m 为光功当量, Φ_r 为光电二极管接收到的光通量, P 为发射端 LED 的辐射功率。

2.2 平行情况下解调信号与基带信号的关系

LED 可见光通信系统中 LED 信号源与光电二极管多为平行放置(非正对)如图 3 所示, 则该情况下边长为 b 的正方形光电二极管接收到的光通量 Φ_r 为:

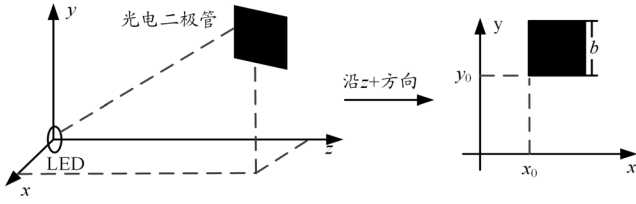


图3 LED和光电二极管平行示意图

$$\Phi_r = \eta U_{ps}(t) \frac{(m+1)}{2\pi} z^{m+1} \int_{y_0}^{y_0+b} \int_{x_0}^{x_0+b} \frac{1}{(x^2+y^2+z^2)^{\frac{m+3}{2}}} dx dy \quad (5)$$

本文利用 Matlab 对空间中任意位置处光电二极管接收到的光通量进行数值模拟,结果如图 4 所示,通过设定接收端的位置信息 (x_0, y_0, z) ,可以获得任意位置处边长为 b 的正方形光电二极管接收到的光通量 Φ_r 。可见光通信中通信距离 r 远大于光电二极管 PN 结的边长 b 。在不需要高精度的计算中,光电二极管不同位置上的光照度可近似为相等,简化上述积分结果,求得近似的光电二极管接收到的光通量 Φ_r :

$$\Phi_r = \frac{\eta U_{ps}(t) \frac{(m+1)}{2\pi} z^{m+1}}{(x^2+y^2+z^2)^{\frac{m+3}{2}}} b^2 \quad (6)$$

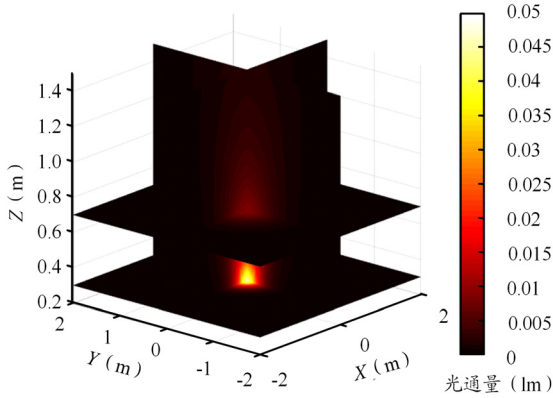
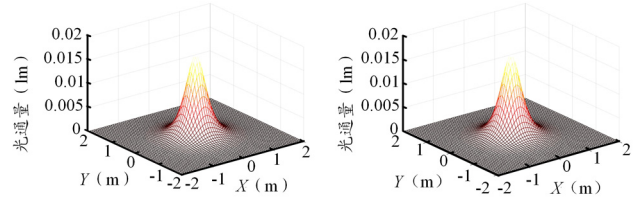


图4 任意位置光电二极管所接收的光通量

利用 Matlab 分别对光电二极管在不同位置接收到的积分光通量和近似光通量进行数值模拟,结果如图 5~图 7 所示。在通信距离较大的情况下(>0.5 m),光电二极管上由于位置不同接收到光通量的不同可以忽略不计,通过 Matlab 计算的结果发现精确的积分结果和近似结果误差在 10^{-4} 量级以下,可以忽略不计。

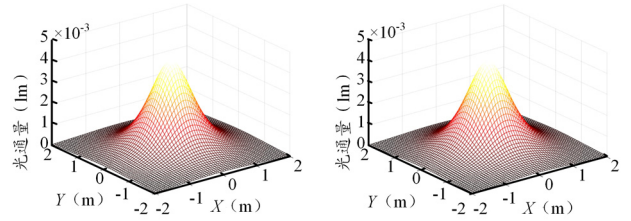
由式(6)可得平行情况下任意位置处接收端解调



(a) 积分结果

(b) 近似结果

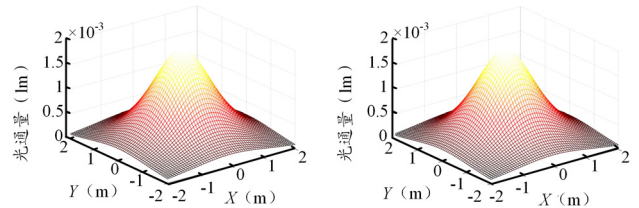
图5 距离LED灯0.5 m时光通量



(a) 积分结果

(b) 近似结果

图6 距离LED灯1 m时光通量



(a) 积分结果

(b) 近似结果

图7 距离LED灯1.5 m时光通量

出的信号 $r_2(t)$ 近似为:

$$r_2(t) = \beta R_r P = \beta R_r \frac{\Phi_r}{K_m} = \beta R_r \frac{\eta U_{ps}(t) \frac{(m+1)}{2\pi} z^{m+1}}{K_m (x^2+y^2+z^2)^{\frac{m+3}{2}}} b^2 \quad (7)$$

当 LED 信号源和光电二极管平行放置时,由式(7)可以得出理论上解调出的信号 $r_2(t)$ 和基带信号 $s(t)$ 呈线性关系,解调信号和基带信号之间不存在相位频率上的差别,可以实现任意信号的无线传输。

3 实验结果验证

本文对可见光通信过程中基带信号和解调信号之间的关系建立数学模型,为验证该数学模型的准确性,搭建 LED 可见光通信系统。该系统发射端采用 XLamp XHP35 LED 灯,最大工作电流 $I=1.05$ A,发光效率 $\eta=172$ lm/W,调制电路采用恒压变流方式对 LED 灯进行调制,基带信号电压 $s(t)$ 与调制电流 $I_m(t)$ 的关系为 $p = \frac{I_m(t)}{s(t)} = 0.3$; 接收端采用 BPW21R 光电二极

管,电流响应度 $R_r=0.816$ A/W,接收端前置放大倍数

陈文娟,胡姗姗,徐嘉远,等:可见光通信中解调信号与基带信号关系的研究

$\beta_1=1500$,主放大电路放大倍数 $\beta_2=400$,接收端电路总放大倍数 $\beta=6\times 10^5$ 。

为了简化验证该模型的复杂度,本文采用电压值固定为 2 V 的基带信号加载至发射端,将接收端放置在不同位置,测量接收端的实际解调信号,并与理论值进行误差分析,衡量所建立模型的准确性。

实验时,将接收端和发射端正对放置,在传输距离为 0.3~1.5 m 范围内每隔 0.2 m 测量接收端解调出的信号电压值,每个数据点测量 10 次,取其平均值,结果如表 1 所示。

表 1 接收端解调出的信号电压与传输距离关系表

传输距离(m)	信号电压(V)	理论电压(V)	误差(V)
0.3	21.93	21.44	0.49
0.5	7.82	7.72	0.1
0.7	4.19	3.94	0.25
0.9	2.56	2.38	0.18
1.1	1.82	1.6	0.22
1.3	1.35	1.14	0.21

从表 1 可知,实际解调出来的信号电压均大于理论电压,主要原因是测量过程中由于桌面不能避免光的反射使得测量值偏大。

根据测量值与理论值计算其相对误差(对相对误差求平均值),通过计算可得该模型的相对误差平均值为 0.08。因此,该模型的精确度较高,具有较强的实际应用价值。

4 结束语

在基于白光 LED 的室内可见光通信系统中,发射端的基带信号与接收端的解调信号之间的关系确立是提升室内可见光通信质量的基础。本文对发射端基带信号和接收端解调信号建立定量关系,在通信条件

确定的前提下可以通过基带信号计算出任意位置处接收端解调信号的理论值。利用该关系对可见光通信系统中光源布局、发射端与接收端之间相对位置和驱动电压等参数的确定具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张杨,商艳婷,易重桂,等.基于绿光 LED 的水中无线光通信实验教学系统设计[J].实验技术与管理,2018,35(9):96-99.
- [2] 魏有财,宋小庆,赵梓旭,等.室内 VLC 白光 LED 调制带宽拓展[J].红外与激光工程,2018,47(9):199-205.
- [3] 杨欣华.可见光通信系统建模与实验研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [4] INAN B, LEE S C J. The impact of LED transfer function nonlinearity on high-speed optical wireless communications based on discrete multitone modulation [C]. Optical Fiber Communication 2009, March 22-26, 2009, San Diego, USA. Piscataway: IEEE, 2009, 234-236.
- [5] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-Light communication system using LED lights [J]. IEEE Trans.on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [6] 吕游.可见光通信信道估计技术研究[D].南京:东南大学,2017.
- [7] 陈述,凌六一,黄家伟,等.室内可见光通信 LED 光源布局及优化[J].光通信技术,2018,42(10):56-59.
- [8] 赵梓旭,宋小庆,贾胜杰,等.特种车内可见光通信系统光源布局优化[J].红外与激光工程,2017,46(1):238-245.
- [9] 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.
- [10] 杨明.可见光通信中基于蝙蝠算法的功率分布优化研究 [D].长春:吉林大学,2018.
- [11] 陈勇,沈奇翔,刘焕淋.室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J].中国激光,2018,45(5):184-191.
- [12] 许瑞宁.MIMO-VLC 系统收发机设计[D].南京:东南大学,2018.
- [13] 肖华,吕毅军,徐云鑫,等.传统白光 LED 与远程荧光粉白光 LED 的发光性能比较[J].发光学报,2014(1):66-72.
- [14] 王云,蓝天,李湘,等.复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析[J].物理学报,2015,64(12):253-260.
- [15] 陈颖聪.可见光通信中白光 LED 空间光强分布的研究[D].广州:华南理工大学,2017.

2020 年征订启事

光通信技术 月刊

邮发代号: 48-126

定 价: 16 元/册;192 元/年

订 阅: 全国各地邮局

为增强读者的阅读舒适感,从 2019 年起,《光通信技术》全刊采用铜版纸彩色印刷。