

可见光通信中白光 LED 阵列光源的光功率分布研究

杨 森 华为技术有限公司 深圳 518129
于庆龙 南京邮电大学硕士研究生 南京 210003

摘要 :本研究提出了一种在考虑室内反射光影响条件下白光 LED 阵列光源的辐射模型,并对光辐射功率分布进行软件仿真,仿真结果表明室内一次反射脉冲和二次反射脉冲对光功率分布的影响是很大的。继而在考虑反射光的情况下,通过计算和仿真,给出了白光 LED 阵列的内部 LED 灯的分布和阵列之间的最佳位置分布。

关键词 :可见光通信 白光 LED 阵列光源 光功率分布 阵列最佳分布

可见光通信技术相对于现在的射频技术,有着通信速度快、相干干扰低、安全性高、辐射低、不占用频谱资源等优点。近几年随着 LED 的逐渐普及,可见光通信技术将在未来几年成为室内通信,三网融合的最好选择。在可见光通信技术中,调制光脉冲的功率分布,传输信道的容量、干扰等特性是很关键的一部分。LED 调制光波首先是要满足基本的照明需要,光照度要求为 300~1500lx。其次是满足通信,室内各点的信号强度和光功率的分布有关。因此,对 LED 阵列的研究的目的是如何的满足照明和通信需要,以及优化照明和通信系统。以往的研究仅仅针对了无反射情况下 LED 阵列的设计,并且认为阵列内部 LED 灯采用立体分布要优于平面分布。

本文给出一种考虑室内反射脉冲情况下的辐射模型,用数据和仿真图像证明了反射脉冲的影响。继而在这种模型中,分析找出最佳的 LED 阵列,并且证明了阵列内部 LED 灯的立体分布性能不及平面分布。

一、反射脉冲对光辐射功率分布的影响

白光 LED 的照射模型可以用朗伯辐射模型来模拟。

单个 LED 的照射模型示意图如图 1,光源在屋顶 S 处:

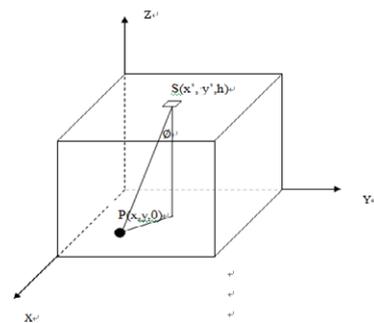


图 1 单个 LED 的照射模型示意图

(1) 朗伯辐射模型下的光辐射功率分布为:

$$R(\phi) = \frac{n+1}{2\pi} P_S (\cos \phi)^n \quad \phi \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (1)$$

其中,朗伯辐射序数 $n = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2})$, $\theta_{1/2}$ 表示光源的半角强度功率,即在这个角度上的辐射功率是中心功率的一半,其大小影响波束的聚散。 n 的数值越大,光束分布越集中,本文就不再阐述,所有 n 取值为 1。 P_S 为光源中心线方向上的辐射强度, ϕ 为光源的出射角。建立三维直角坐标系,设探测面距离 LED 的高度为 h ,LED 在坐标系中的 x, y 坐标分别为 x' 和 y' 。则探测面上任一点 $P(x, y)$ 所对应的出射角 ϕ 为:

$$\phi = \arctan(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}/h) \quad (2)$$

带入上式, 得到朗伯模型中光辐射功率分布在直角坐标系中的公式为:

$$R(x, y, h) = \frac{n+1}{2\pi} P_s \{\cos[\arctan(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}/h)]\}^n \quad (3)$$

(2) 朗伯辐射模型下的光照度分布为:

$$E(\theta, \psi) = I_0 (\cos \theta)^n \cos(\psi) / d^2 \quad (4)$$

此公式表示距离光源为 d 、光线入射角 ψ 处的光照强度。 I_0 为光源中心线方向的发光强度, θ 为光源的出射角, 不难知 $\psi = \theta$ 。

$$\cos \theta = h / [h^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

将 $\cos \theta$ 带入上式, 得到朗伯模型中光照度分布在直角坐标系中的公式为:

$$E(x, y, h) = I_0 h^{n+1} / [h^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2]^{\frac{n+3}{2}} \quad (6)$$

(3) LED 参数:

本文模型中采用的光源为 Philips Lumiled 公司的 LXHL-MW1D-00J 型 LED。参数见表 1。

1. 不考虑反射脉冲

根据表 1 可知, 一个 LED 提供的发光功率是有限, 所以为了达到照明和通信要求, 我们要将 LED 排成阵列 (12 × 12), 来加强发光强度和功率。在此, 我们建立一个 8.0 × 8.0 × 3.0 (单位 m) 的房间模型, 如图 2 所示。4 个相同的 LED 阵列分布在天花板对称的 4 个位置。为了方便计算, 取房间地面中心为坐标原点, 4 个 LED 阵列坐标为 (-2, -2, 3) (-2, 2, 3) (2, -2, 3) (2, 2, 3)。

平面分布图如图 3 所示。

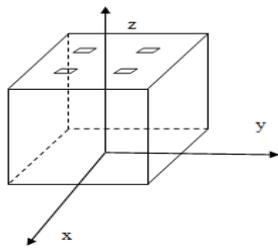


图 2 房间模型

表 1 LXHL-MW1D-00J 型 LED 参数

参数	取值
单个 LED 尺寸	20mm
LED 中心发光功率	1W
LED 中心发光强度	45cd

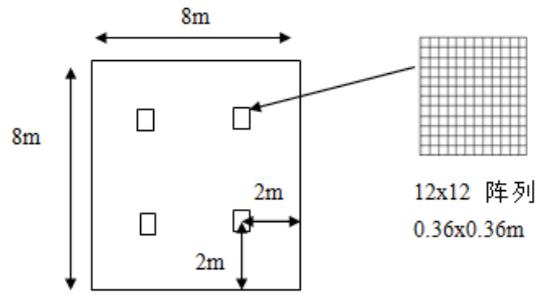


图 3 LED 阵列分布

每个 LED 阵列中心发光功率为 144W, 发光强度为 6480cd (坎德拉)。光照度和光功率分布都遵循叠加原理。即 $E = \sum E_i$, $R = \sum R_i$ 。

$$E(x, y, h) = \sum_{i=1}^4 I_0 h^2 / [h^2 + (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]^2 \quad (7)$$

$$R(x, y, h) = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\pi} P_s \cos\{\arctan[\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/h]\} \quad (8)$$

仿真图像如图 4 所示:

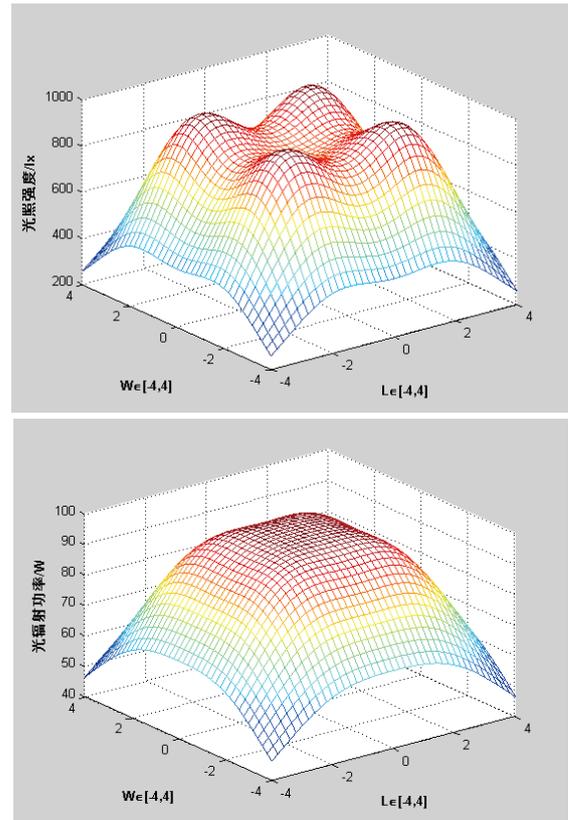


图 4 LED 阵列光照度和光辐射功率分布

$$E_{\max} = 959.5 \text{ lx} \quad E_{\min} = 259.2 \text{ lx}$$

$$R_{\max} = 97.1 \text{ w} \quad R_{\min} = 46.21 \text{ w}$$

2. 考虑反射脉冲

现在除了考虑 LOS (直射视距链路), 也将经过室内墙面一次反射形成的漫射视距链路考虑在内。我们选取的模型不变, 参考面依旧是地面 ($h=0$ 处)。由于只考虑一次反射, 所以天花板和地面的反射无需考虑。所考虑的只有 4 个墙面。查阅资料可知, 石膏墙面的反射率 $n=0.8$ 。

反射率定义 通常将分界面上反射波的能量流 W' 与入射波的能量流 W 之比分别称为反射率 n 其数学表达式分别有如下形式:

$$n = W' / W$$

这个定义下, 可以推导出:

$$n = \text{反射光线辐射功率} / \text{入射光线辐射功率} = 0.8$$

因为只考虑室内周围 4 个面的反射, 我们则视每个墙面为一个镜面, 根据镜面成像的原理, 找出 4 个 LED 阵列相对各个墙面所成的一次像, 如图 4 所示。我们可将图中 16 个虚线描绘的 LED 阵列视为 16 个独立的 LED 阵列。它们在 $\{x, y | x \in [-4, 4], y \in [-4, 4]\}$ 中各点的辐射功率乘以反射率 0.8 就是一次反射光线的辐射功率分布 (如图 5 所示)。

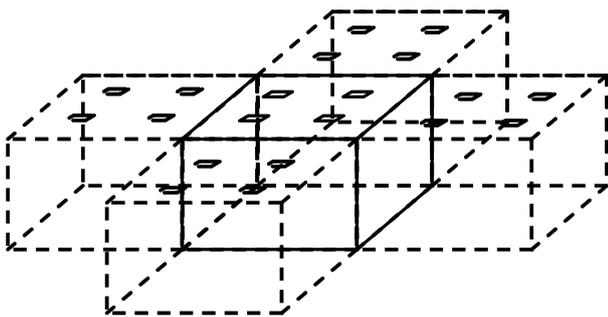


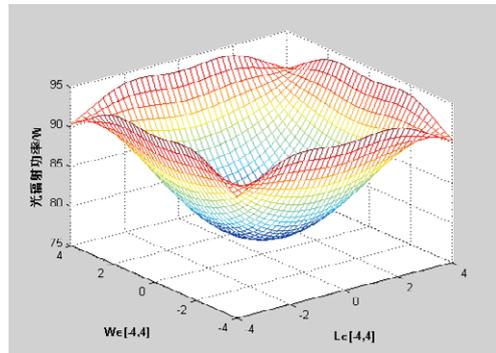
图 5 一次反射各 LED 阵列镜像点示意图

此时光辐射功率分布:

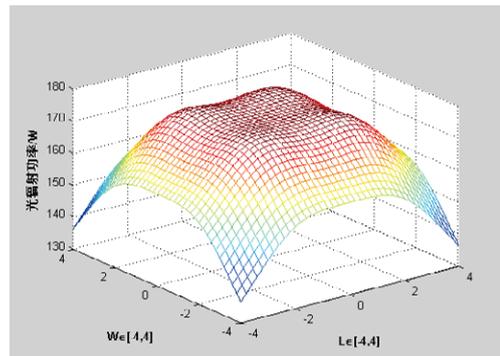
$$R(x, y, h) = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\pi} P_s \cos\{\arctan[\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} / h]\} + 0.8 * \sum_{i=5}^{20} \frac{1}{\pi} P_s \cos\{\arctan[\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} / h]\} \quad (9)$$

仿真图形如下:

只考虑漫射视距链路, 16 个 LED 一次反射“镜像阵列”在参考面上的光辐射功率分布如图 5(a)。直射和漫射都考虑情况下, 分布如图 6。



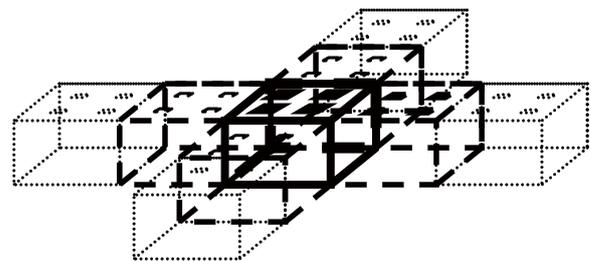
(a)



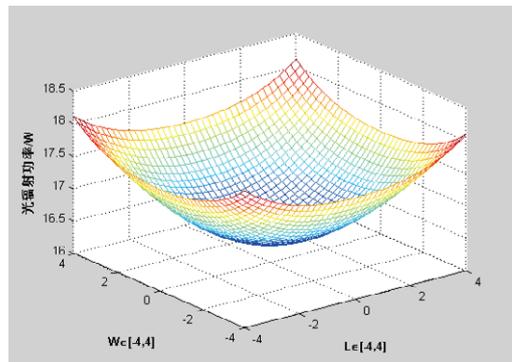
(b)

图 6

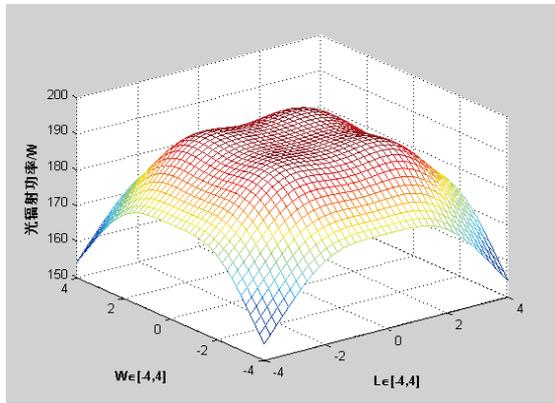
同理可得二次反射各 LED 阵列的镜像点示意图 7(a), 辐射功率分布表达式, 以及漫射链路光辐射功率分布图 7(b) 和整体功率分布图 7(c)。



(a)



(b)



(c)

图 7

分析图 5(a)(b) 和 6(b)(c) 可以得出:一次反脉冲对于室内光辐射功率的分布影响很大。对比图 3 和 5, 可以看出,考虑一次反射的情况下,室内各点的光辐射功率几乎增大一倍。而从图 6 中可以看出,二次反射对于室内光辐射功率的分布影响并不大。仿真结果表明在考虑最佳 LED 阵列布局的时候,一定要把一次反射脉冲的影响考虑在内,否则会造成很大误差。

3. 计算最佳 LED 阵列分布

判断是否为最佳 LED 阵列分布有两个条件:

1、室内各个点的光照度,光功率都达到照明和通信要求。

2、室内各点的光功率分布波动程度应该尽量小。

第一个条件我们可以通过控制 LED 数量来控制,因此,本文着重分析第二个条件。并且根据上一节的分析结果,将一次反射脉冲也考虑在内。本文将采用室内光功率分布的两个极值点(最大值和最小值)的差来衡量光功率分布波动的大小。即我们需要找出 4 个 LED 阵列处于什么位置时,室内光功率的极值点差值最小。根据图 2 和 4 的模型,我们设 $x_1=L$, 根据对称性,可得 $x_2=y_1=y_3=L, x_2=x_4=y_2=y_4=-L$, 同理可写出其余 16 个一次反射镜像点坐标。并令 $\Delta R=R_{\max}-R_{\min}$, 其中, ΔR 表示 $x_1=L$ 时,室内光功率的最大值 R_{\max} 和最小值 R_{\min} 的差。L 的取值受限与房间模型 $8.0 \times 8.0 \times 3.0$ (单位 m), $0 < L < 4m$ 。将以上数据带入公式(9),通过 MATLAB 仿真,得到 L 与 ΔR 关系如图 8:

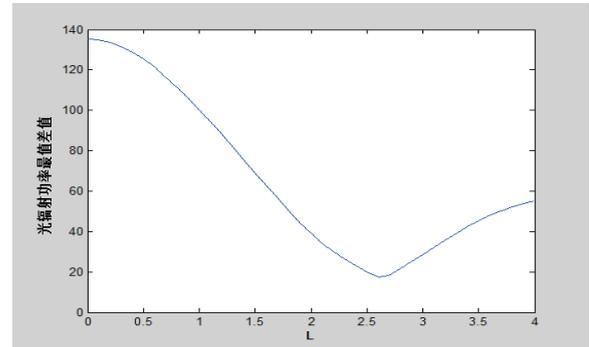


图 8 L 和光辐射功率最值的差的关系

当 $L=2.6$ 时,室内光辐射功率的最大值和最小值的差最小,为 17.2552w。这意味着此时室内各点的光辐射功率的波动范围最小。所以此模型室内 LED 的 4 个最佳位置是 $(2.6, 2.6), (2.6, -2.6), (-2.6, 2.6), (-2.6, -2.6)$ 。

二、立体阵列和平面阵列比较

在一个 LED 阵列内部,LED 分布的位置以及排列对光辐射功率的分布有很大影响。常见的排列形状有矩形,圆形,球形,柱形等。本章节将探讨同样的 LED 数目情况下,立体球面排列和平面矩形排列性能比较。

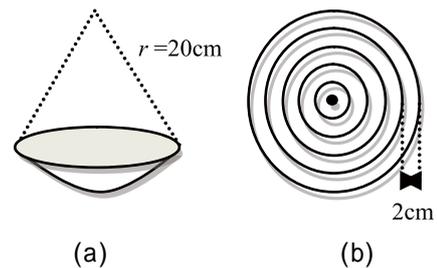


图 9 立体球面排列示意图

立体球面排列示意图如图 9 所示,(a) 是立体图,(b) 是在 (a) 下垂直仰视得到的图形,用来是以 LED 在 (a) 中的排列位置。排列方式如下:

1.LED 排列成环状,示意图如图 9(b) 所示。中心点和 5 个同心环上的 LED 数量分别为 1,6,18,30,42,54,一共 151 个。设 a_{ij} 表示第 i 层和第 j 个 LED 所对应的圆心角。

2. 球面半径 $r=20cm$ 。每个 LED 的指向和其所在位置的曲面弧度相关,始终保持 LED 中心轴指向和球面垂直。则同一圆环上的 LED 指向和垂直线夹角 ϕ 大

小相同,方向不同。夹角 ϕ 大小如下:第一层 $\arcsin(2/20)$;第二层 $\arcsin(4/20)$;第三层 $\arcsin(6/20)$;第四层 $\arcsin(8/20)$;第五层 30°

建立一个圆柱坐标系。设原点为地板中心,球面 LED 阵列位于天花板中间,如图 10(a) 所示。因为 led 发射角 $\theta < 90^\circ$, 为了方便计算,房间模型设置为 $6 \times 6 \times 3\text{m}$ 的房间(这种情况下,所有 led 的照射范围都能完全覆盖房间)。设 ϕ 为 LED 中心线和重力垂直线的夹角, θ 为 LED 发出的一道光线和 LED 中心线方向的夹角。

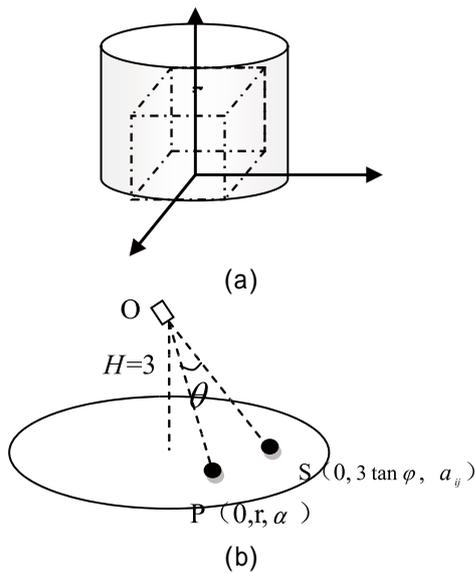


图 10 柱形坐标系下,阵列中一 LED 光照示意

图 10 (b) 表示立体阵列中某一个 LED 的其中一条光线 OP (交参考面于点 P $(0, r, \alpha)$) 的示意图。

根据公式 (1-4) 可得光照强度:

$$E(\theta, d) = I_0 (\cos \theta)^2 / d^2 \quad (10)$$

$$OP = d, I_0 = 45 \text{cd}, OS = H / \cos \phi = 3 / \cos \phi \quad (11)$$

在三角形 OPS 中,根据余弦定理可得:

$$\cos \theta = (\text{OS}^2 + \text{OP}^2 - \text{PS}^2) / 2 \times \text{OP} \times \text{OS} \quad (12)$$

将 d, I_0, θ 带入 $E(\theta, d) = I_0 (\cos \theta)^2 / d^2$, 得到一般形式的光照度表达式:

$$E(\phi, \alpha_j, r, \alpha) = \frac{I_0 \cos^2 \phi [H^2 / \cos^2 \phi + (H^2 + r^2) - [r^2 + (H \tan \phi)^2 - 2Hr \tan \phi \cos(\alpha - \alpha_j)]]^2}{4H^2 (H^2 + r^2)^3} \quad (13)$$

$$\alpha_j = 2\pi j / [(2i - 1) * 6] \quad (14)$$

设 E_i 表示第 i 层的光照度分布,根据光叠加原理,

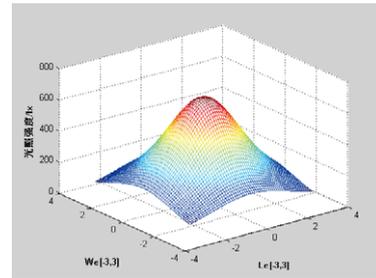
有 $E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5$

$$E_0 = \frac{I_0 \{\cos[\arctan(r/H)]\}^2}{H^2 + r^2} \quad (15)$$

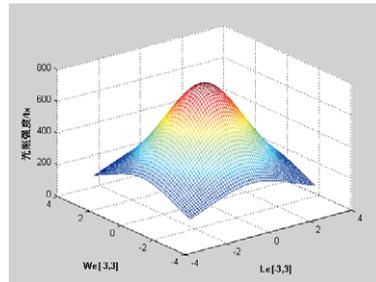
其余所有 LED, 利用编程语句:

for i=1:1:5;

for j=0:1:(2*i-1)*6; 循环语句来计算仿真,得立体 LED 阵列照射图像为图 11(a), 同样 LED 个数的平面阵列照射图像为图 11 (b)。



(a)



(b)

图 11 立体 LED 阵列照射图像

(a) 中,光照度最大值 657.82lx , 最小值为 88.60lx ; (b) 中,光照度最大值 755.0lx , 最小值为 145.3lx 。可见平面 LED 的照射特性要优于立体 LED 阵列。

四、结 语

通过计算分析,反射脉冲对光功率的分布和光照度的分布影响是不容忽视的,尤其是一次反射脉冲,影响很大,二次脉冲的影响就小很多。本文还给出了可见光通信中 LED 阵列外部之间的最佳分布。除此之外,还借助软件仿真,证明了立体 LED 阵列的照射特性要逊于平面 LED 阵列。但本文考虑的模型是空旷无窗的室内,而实际应用中会有窗外来的自然光的干扰,以及各种家具的不规则反射,因此实际应用中还要针对房间尺寸,门窗位置等环境因素做适当调整。



参考文献：

- [1] 金伟. 室内可见光通信系统信道研究 [D]. 南京邮电大学硕士论文, 2011.
- [2] Toshihiko Komine, and Masao Nakagawa. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights. [J].IEEE Transactions on Consumer, 2004, (1) 100~107.
- [3] Zeyu Wu, Jimmy Chau, Thomas Little. Modeling and Designing of a New Indoor Free Space Visible Light Communication System. [C] // 2011 16th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC), 2011, 72~75.
- [4] Komine Toshihiko, Nakagawa Masao. Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication[J].IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, (1) 71~79.
- [5] Komine Toshihiko, Haruyama Shinichiro, Nakagawa Masao. A study of shadowing on indoor visible-light wireless communication utilizing plural white LED lightings[J].Wireless Personal Communications, 2005,(1) 211~222.
- [6] 霍彦明, 吴淑梅, 潭峻廷, 封丽华. 基于 MATLAB 的 LED 阵列的研究与仿真 [J]. 应用光学, 2009, (2) 45~47.
- [7] 杨宇, 刘博, 张建昆, 陈雄斌, 陈弘达. 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,(6) 803~807.

Studies on the Optical Power Distribution of the White LED Array Source in the Visible Light Communication

Yang Sen

(Huawei Technology Co. Ltd. Shenzhen, 518129)

Abstract: A white LED array source radiation model, considering the effects of reflecting beams indoors, is proposed to prove the great influence of bounce light impulse on the whole optical power distribution. Based on the calculation and simulation of this model, the paper provides reader with the best distribution of the LED arrays.

Key words: visible light communication, white LED array source, optical power distribution, the best distribution of the arrays

(责任编辑:徐振强, 张志华, 责任译审:徐振强)