

特种车内可见光通信系统光源布局优化

赵梓旭, 宋小庆, 贾胜杰, 魏有财, 王慕煜

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 针对特种车内空间狭小、光源布局受限这一问题, 对光照度及接收光功率进行了理论分析, 对光源阵列位置下光照度及光功率的直射和一次反射的分布模型进行了分析与仿真。在光照度需求的约束条件下, 根据光功率分布均匀原则提出了特种车辆内部由 5 个阵列光源形成中心补偿形布局的优化方案。仿真结果表明, 在 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 的狭小空间内, 运用该光源布局方案可得到平均接收光功率值为 -0.5 dBm 时的光照度范围为 $333.74\sim 466.44\text{ lx}$, 均匀光照率为 79.5% , 可同时满足车内照度与数据通信需求。

关键词: 可见光通信; 光源布局; 均方差

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0122001

Optimization layout of lighting for VLC system in special vehicle

Zhao Zixu, Song Xiaoqing, Jia Shengjie, Wei Youcai, Wang Muyu

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Due to the special vehicle's narrow space, lighting layout is limited and the difficulty is increased. Based on the theoretical analysis of illumination and received optical power, both the direct and the first reflection models of illumination and received optical power were developed. In illumination demand constraint conditions, an optimal scheme of rectangular lighting layout for narrow vehicle space was proposed based on optical power evenly distribution principle. Simulation experiments proved that the optimizing rectangular layout scheme is valid as follows: the average received optical power was obtained about -0.5 dBm and the illumination range was $333.74\sim 466.44\text{ lx}$ in $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ space size, uniform illumination rate was 79.5% , which meet the international illumination standards and the actual data communication in a special vehicle.

Key words: visible light communication; layout of lighting; standard deviation

收稿日期: 2016-05-09; 修订日期: 2016-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(NO.51507190); 陆军部装备部重点实验室项目(2014zx28)

作者简介: 赵梓旭(1989-), 男, 博士生, 主要从事可见光通信方面的研究。Email: aafezxx@163.com

通讯作者: 宋小庆(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆综合电子系统方向与可见光通信方面的研究。Email: swxq@vip.sina.com

0 引言

相对于传统照明技术,LED 光源具有功耗低,绿色环保,使用寿命长的特点。可见光通信(Visual Light Communication, VLC)将 LED 照明技术与通信技术有效地结合在一起^[1-3],相比于传统无线射频技术具有传输速率高、保密安全无辐射、频谱资源无需认证,节能环保等诸多优点^[4]。

单点光源难以满足整个室内通信的要求,通常室内通信采用多点光源分布形式。为了满足多点光源的照明均匀以及通信性能的稳定性需求,学者们从光源布局、功率以及发射角等方面纷纷提出了优化策略^[5]。光源布局对车内光通信系统光照特性与通信性能影响很大,逐渐成为研究者们研究的重点之一^[6-7]。文中主要从光源布局角度进行优化设计。

参考文献[8]对室内 5 m×5 m×3 m 环境中视距内直射链路下 4 个相同 LED 阵列光源在固定位置的光照度与光功率进行分析计算。参考文献[9]针对室内 5 m×5 m×5 m 环境下,分析计算了视距内直射链路下接收光功率与光源布局关系,并首先提出了运用均方差理论,对 4 个 LED 通信光源布局进行优化的方法。参考文献[10]针对室内 5 m×5 m×3 m 环境,运用均方差理论,提出基于光照度均衡的四个相同阵列 LED 光源分布的优化方法。参考文献[11]运用边缘功率补偿法对非常规空间 LED 阵列边缘功率分布不均匀性进行了有效的补偿。此外,也有学者提出通过增加 LED 阵列数目,立体光源阵列分布结构等方法改善光源照明及光通信的性能。

文中针对特种车辆内部 2 m×2 m×1.5 m 的狭小空间,对视距内直射加一次反射链路下的光照度分布及接收光功率进行了仿真研究,运用了均方差理论对 5 种不同拓扑结构的 LED 光源阵列布局进行了优化设计,并在此基础上,运用功率补偿策略,对 LED 阵列的灯珠数目及物理位置进行了进一步调整和优化,得出了基于中心补偿型的光源布局结构。仿真结果表明:该中心补偿型光源布局结构满足车内狭小空间的光源均匀照明需求,可有效降低信噪比波动,提高通信性能的稳定性。

1 光源模型

在车内可见光通信系统中,光发射端为 LED 光源。假定 LED 光源的发光模型为理想的郎伯辐射模型, m 为郎伯辐射系数,LED 光源半功率角为 $\phi_{1/2}$ 。光源的辐射角度分布用如下公式表示^[1]:

$$R(\phi) = \begin{cases} \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) & \phi \in [-\pi/2, \pi/2] \\ 0 & \phi \geq \pi/2 \end{cases} \quad (1)$$

$$m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (2)$$

光源的辐射强度如下:

$$I(\phi) = P_t \frac{(m+1)}{2\pi} \cos^m(\phi) \quad (3)$$

当 $\phi=0$ 时, $I(0) = P_t (m+1)/2\pi$, $I(0)$ 为 LED 光源的中心发射光强。

图 1 表示当辐射功率为 1 W 时,在不同的郎伯辐射系数 m 下,辐射角度和辐射强度关系,在车内可见光通信系统中,既要考虑空间照明问题,又需考虑通信性能问题。当 $\phi=0$ 时,郎伯辐射模型的辐射强度为最大辐射功率。

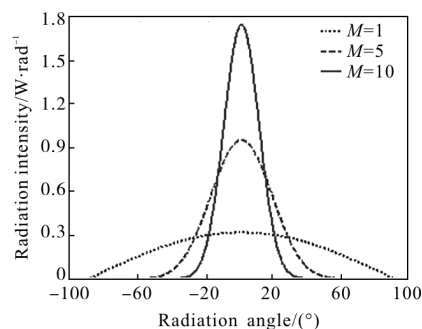


图 1 辐射角度和辐射强度关系曲线

Fig.1 Relation between radiation angle and radiation intensity

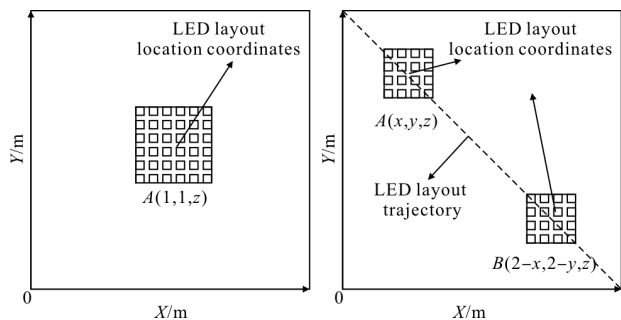
2 光源布局结构

建立车内空间为 $X \times Y \times Z$ (单位:m) 的立方体模型。对于空间狭小、布线繁杂的特种车辆来说,以选用体积小、亮度高、通信效果优的 LED 光源为目标。所以,文中采用 Philips Lumiled 公司的 LXHL-MW1D-00J 型 1 W 白光 LED 作为通信光源。

针对五种光源布局结构(见图 2(a)~(e)),发射端 LED 总数为 36 只,分别采用平均分配功率与中心补偿功率分配原则,进行光源的合理布局,LED 灯

珠彼此间隔 0.01 m, 车内空间模型近似为 2 m×2 m×1.5 m 的立方体。

阵列均为对称分布, 所以取 $x=y$, 每一种光源布局结构下 x 与 y 都有对应关系。如表 1 所示。

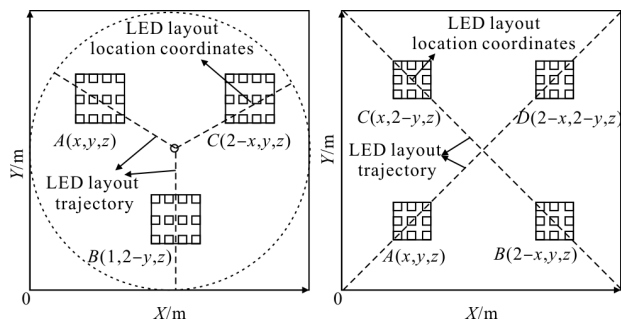


(a) 中心顶点结构

(b) 对角线结构

(a) Central vertex structure

(b) Diagonal line structure

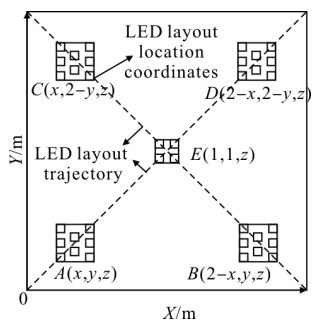


(c) 三角形结构

(d) 矩形结构

(c) Triangle structure

(d) Rectangular structure



(e) 中心补偿结构

(e) Central compensation structure

图 2 LED 阵列光源布局结构

Fig.2 Structure of LED array lighting layout

表 1 LED 阵列坐标 x 与 y 对应关系

Tab.1 Relationship between x and y coordinates of LED layouts

LED layout structure	Relationship x, y
Central vertex	$x=y=1$
Diagonal line	$y=2-x$
Equilateral triangle	$y=1.58375-0.625x$
Rectangular	$y=x$
Central compensation	$y=x$

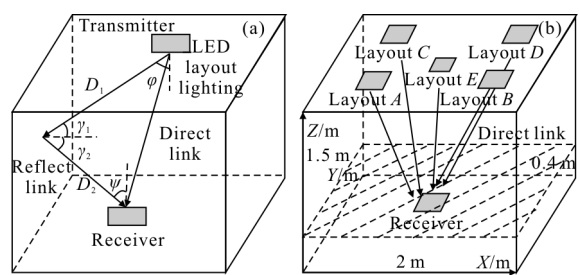


图 3 车内可见光通信直射(a)与一次反射信道模型(b)

Fig.3 Direct(a) and first(b) reflection channel model of visible light communication in vehicle

车内可见光通信链路长度较短, 且特种车辆构架多为钢化材质, 车内四壁对于 LED 光源必会产生反射效应。直射式链路, 一次反射, 两次反射下标准化脉冲响应分别为 95.16%, 3.57%, 1.27%^[8], 文中从直射和一次反射链路情况进行光源布局优化。

在 $z=h$ 的平面上, 每一点所接收到的光功率等于五个阵列相对于该点直射功率加上四周车内壁反射功率的总和。通过计算接收平面上接收光功率均方差来确定接收平面上光功率的均匀性。随着 LED 阵列位置移动, 接收到的光功率均方差也随之变化。均方差最小处的位置即为 LED 阵列光源布局的最优位置。

光通信路径为直射链路和一次反射链路, 接收光功率 P_r 与发射光功率 P_s 关系为:

$$P_r = [H(0) + H(0)_{ref}] \cdot P_s \quad (4)$$

$H(0)$ 为系统直射式信道直流增益^[8]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi) \times T_s(\psi) g(\psi) & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (5)$$

3 接收光功率模型

图 2(e) 为中心补偿型阵列结构, 相对前 4 种布局该结构最为复杂, 所以选该种阵列结构为例进行光功率模型分析计算, 其它 4 种布局结构与此类似。图 3(b) 为中心补偿型阵列光信道模型, 5 盏 LED 阵列的坐标分别为 $A(x, y, z)$ 、 $B(2-y, x, z)$ 、 $C(x, 2-y, z)$ 、 $D(2-x, 2-y, z)$ 、 $E(1, 1, z)$, 因该布局角落里 4 盏 LED

式中： A 是 PD 接收器有效的物理面积； d 为发射器与接收器的距离； ψ 为入射角； ϕ 为发射角； $T_s(\psi)$ 为光滤波器增益； $g(\psi)$ 为光聚能器增益； Ψ_c 为接收器视场角(Field of View, FOV)。 $H(0)_{\text{ref}}$ 为经过一次反射的信道增益^[8]：

$$H(0)_{\text{ref}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_R \rho \cos^m(\varphi_i) \times \cos \gamma_{i,1} \cos \gamma_2 \cos(\psi) \times T_s(\psi)g(\psi)}{2\pi D_{i,1}^2 D_{z,i}^2} & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (6)$$

式中： φ_i 为光源阵列发射角； $\gamma_{i,1}$ 为反射点入射角； γ_2 为反射点发射角； Ψ_i 为接收面入射角； ρ 为发射系数； $D_{i,1}$ 为发射点到反射点距离； $D_{z,i}$ 为反射点到最终接收点距离。 $g(\psi)$ 为光集中器增益：

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_c)} & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (7)$$

在接收端平面 $z=h$ 上，任一点 (x,y,h) 的接收功率为 P_{ri} ：

$$P_{ri} = \sum_{j=1}^M P_{sj} [H_i(0) + H_i(0)_{\text{ref}}] \quad (8)$$

$M=5$ ，为 LED 阵列光源个数。光接收端接收到直射加一次反射的功率：

$$P_{ri} = (P_{sA} + P_{sB} + P_{sC} + P_{sD} + P_{sE}) [H_i(0) + H_i(0)_{\text{ref}}] \quad (9)$$

4 基于光功率均衡的阵列位置优化

4.1 光功率均方差最小处位置确定

(1) 光功率及均方差理论计算

特种车辆内光通信性能要求光接收器在固定空间内的任意位置移动时均能很好地接收到发送端传来的数据信息。为此，文中从光功率均衡的角度对 LED 阵列进行位置优化设计^[9]。

接收平面每个网格所接收到的平均光功率为：

$$P_p = \frac{1}{N} P_{\text{total}} \quad (10)$$

每个网格光功率均方差为：

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{ri} - P_p)^2}{N}} \quad (11)$$

式中： $N=2500$ ，为接收平面的网格数。

(2) 仿真分析

将接收端平面均分成 50×50 个网格，四周反射

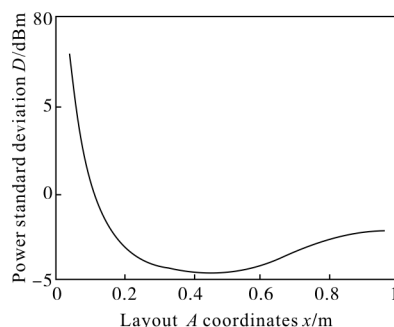
面均分成 25×50 个网格。每个接收端网格与反射面网格均有一个位置坐标，每个 LED 阵列光源的直流信道增益均与发射端、接收端、反射面位置坐标有关。计算 LED 阵列光源移动轨迹下接收平面每个网格上所接收到的直射加反射的光功率，求出平均接收光功率。计算 2500 个接收光功率样本的均方差，通过接收光功率均方差最小值，来确定 4 种布局结构下最优 LED 阵列光源的位置，表 2 为相应仿真参数。

表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

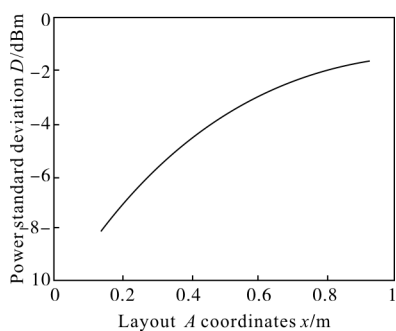
Parameters	Values
Semi-angle at half power/(°)	60
Transmitted optical power/W	1
Center luminous intensity $I(0)$ /cd	45
FOV at a receiver/(°)	60
Detector physical area of a PD A/cm ²	1
Refractive index of a lens at a PD	1.5
Gain of an optical filter $T_s(\Psi)$	1
Reflection coefficient in vehicle	0.8
Gain of an optical concentrator $g(\Psi)$	3

中心顶点型布局结构 LED 阵列无需移动，不存在优化其阵列位置。这里只对其它 4 种光源布局结构进行位置优化。如图 4 所示：对角线型结构下阵列 A 的最优位置为 $x=0.455 \text{ m}$, $y=1.545 \text{ m}$ ，接收光功率均方差为 -4.4 dBm 。三角形结构下阵列 A 的最优位置为 $x=0.134 \text{ m}$, $y=1.5 \text{ m}$ ，接收光功率均方差为 -8.24 dBm 。矩形结构下阵列 A 的最优位置为 $x=0.31 \text{ m}$, $y=1.69 \text{ m}$ ，接收光功率均方差为 -9.97 dBm 。中心补偿型结构下阵列 A 的最优位置为 $x=0.24 \text{ m}$, $y=1.76 \text{ m}$ ，接收光功率均方差为 -0.982 dBm 。

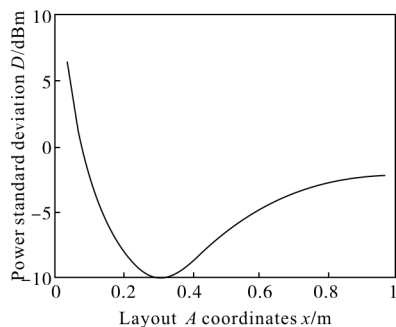


(a) 对角线结构

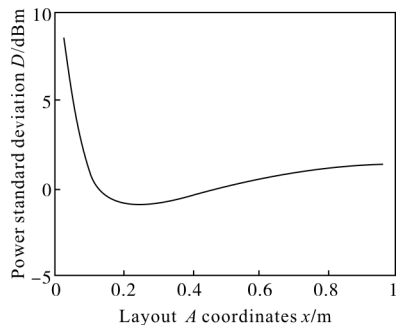
(a) Diagonal line structure



(b) 三角形结构
(b) Triangle structure



(c) 矩形结构
(c) Rectangular structure



(d) 中心补偿结构
(d) Central compensation structure

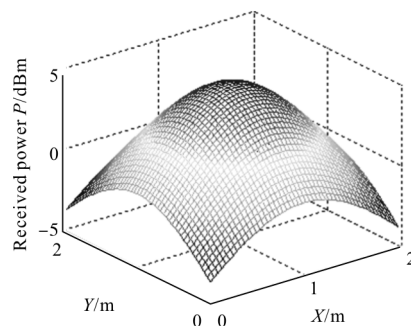
图 4 LED 光源布局下接收光功率均方差值变化曲线

Fig.4 Standard deviation of received power for different LED layouts in vehicle

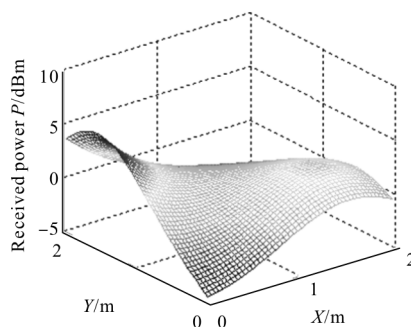
当 4 种阵列光源向车内顶端中心移动时, 接收端光功率均方差总体上先减小后增大, 即整个接收端平面所接收的光功率均匀度是先变小后变大。

4.2 最优阵列位置下光功率分布

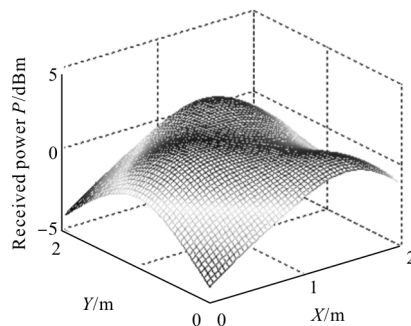
光功率均方差最小时, LED 阵列的位置即为最优的光源布局位置。根据公式(9)的理论分析模型, 仿真计算当光功率均方差最小时, 车内接收平面直射加一次反射链路下光功率分布情况如图 5 所示。



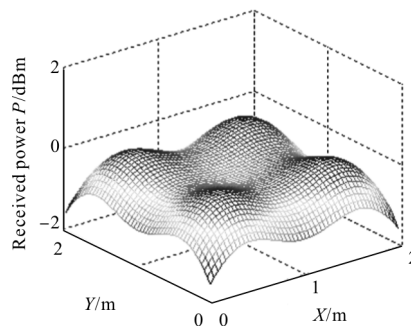
(a) 中心顶点结构
(a) Central vertex structure



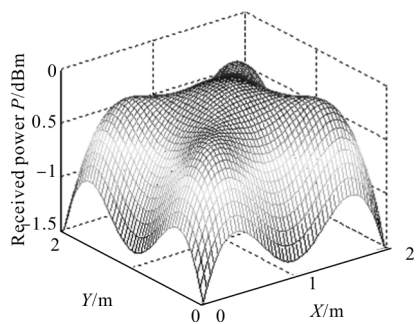
(b) 对角线结构
(b) Diagonal line structure



(c) 三角形结构
(c) Triangle structure



(d) 矩形结构
(d) Rectangular structure



(e) 中心补偿结构

(e) Central compensation structure

图 5 最优阵列位置时直射加一次反射链路下接收平面光功率分布

Fig.5 Distribution of received optical power for direct and first reflection at the optimal layout position

仿真结果表明:整个接收平面光功率分布最大值递减,最小值递增,平均值递减。其中,中心顶点型布局下,光功率分布最大值为 4.53 dBm,最小值-3.72 dBm,平均值为 1.37 dBm。当接收器移动到角落位置时该布局下接收光功率值很小,对通信系统性能影响很大。中心补偿型布局下光功率分布最大值-0.04 dBm,最小值-1.5 dBm,平均值-0.5 dBm。通过分析计算,可以得到五种光源布局最优位置下,光功率均匀度分别为 31%,32.2%,39.5%,76.7%,79.4%。可见,LED 灯珠总数量一定情况下,中心补偿型阵列下接收光功率均匀度最高,中心顶点型阵列最低。

5 光照度分析与验证

光照度公式为:

$$E(\theta, \Psi) = \frac{I_0 \cos^m \theta \cos \Psi}{d^2} \quad (12)$$

接收平面 $z=h$ 上任意一点直射光照度为:

$$E(\theta, \Psi) = \sum_{i=1}^4 \frac{I_0 \cos^m \theta_i \cos \Psi_i}{d_i^2} \quad (13)$$

经坐标变换为:

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 \frac{I_0 h^{m+1}}{((x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + h^2)^{\frac{m+3}{2}}} \quad (14)$$

接收平面接收来自车内四壁一次反射下光照度为:

$$E_{ref} = \int_{ref} \sum_{i=1}^N \frac{\rho I(0) \cos^m \varphi_i \cos \gamma_{1,i} \times \cos r_2 \cos \Psi_i}{\pi D_{i,1}^2 D_{2,i}^2} dA_{ref} \quad (15)$$

接收平面总的光照度为:

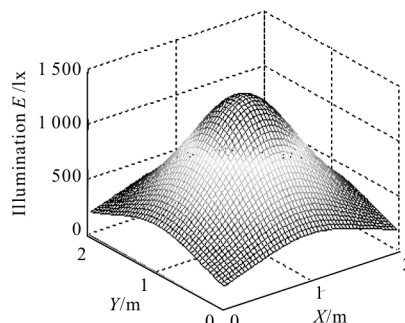
$$E_t = E(x, y, z) + E_{ref} \quad (16)$$

车内平面 $Z=h$ 上每点的平均光照度为:

$$E_t = \frac{1}{S} \iint_S E_t dx dy \quad (17)$$

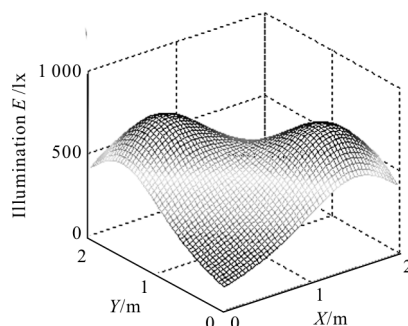
图 6 为 5 种光源布局结构中最优阵列位置时直射加一次反射链路下接收平面光照度分布仿真分析结果。

如图 6 所示:中心顶点结构,对角线结构,三角形结构下光照度最大值变化范围为 615.06 lx 至 1338.11lx,光照度最小值范围为 141.38 lx 至 200.11 lx,3 种结构下



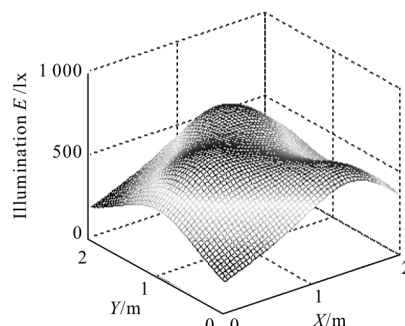
(a) 中心顶点结构

(a) Central vertex structure



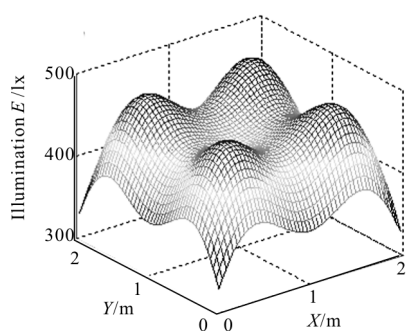
(b) 对角线结构

(b) Diagonal line structure



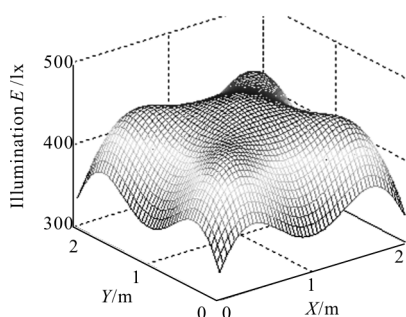
(c) 三角形结构

(c) Triangle structure



(d) 矩形结构

(d) Rectangular structure



(e) 中心补偿结构

(e) Central compensation structure

图 6 最优阵列位置时直射加一次反射链路下接收平面光照度分布

Fig.6 Distribution of received illumination for direct and first reflection at the optimal layout position

的均匀光照率分别为 31%, 28%, 39.1%, 国际照明委员会要求电子工业一般取 300~700 lx, 工业作业区内均匀光照率应大于 70%, 照度过低会引起工作者困倦, 照度过高会使人眼疲劳和发生疼痛。所以, 前 3 种结构不太适合车内的照明需求。矩形结构与中心补偿型结构的光照度均值和最小值均达到 300 lx 以上, 其均匀光照率分别为 77.3% 与 79.5%。可见, 中心补偿型光源布局光功率均匀性更好一些, 光源利用率更高。此布局下 LED 光源阵列最优位置坐标通过计算可得: A (0.24 m, 0.24 m, 1.5 m), B (1.76 m, 0.24 m, 1.5 m), C(0.24 m, 1.76 m, 1.5 m), D(1.76 m, 1.76 m, 1.5 m), E(1 m, 1 m, 1.5 m)。该位置最终确定为车内 2 m×2 m×1.5 m 空间下可见光通信最优光源布局阵列位置。

6 结论

针对车内空间狭小、布局受限等问题, 提出一种优化车内光源布局结构的方法。该方法运用功率均

衡理论从阵列个数、空间布局、阵列位置等角度对五种布局结构光源位置进行优化, 并仿真计算最优阵列位置下直射加反射光照射度、光功率分布情况。最后, 文中确定了由 36 只 LED 灯珠组成的 5 阵列中心补偿型结构为最优光源布局结构。在该布局结构下, 车内通信性能最优, 且照明效果满足国际工业照明标准的前提, 其光照度分布最均匀。文中论述在可见光通信领域中, 对于光源布局技术具有理论指导意义, 且在工程推广中更具有实际的参考价值。

参考文献:

- [1] Barry J. Wireless Infrared Communications[M]. Boston: Kluwer Academic Press, 1994.
- [2] Dominic O'brien, Zeng Lubin, Hoa Le Minh, et al. Visible light communications: challenges and possibilities [C]// Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE 19th International Symposium, 2008: 1-5.
- [3] Chen Siyuan, Wang Zhixin, Xiao Jiangnan, et al. Research on the road-to-vehicle system utilizing LED-based visible light communication [J]. *China Light & Lighting*, 2015(1): 13-17. (in Chinese)
- [4] 陈思源, 王智鑫, 肖江南, 等. 基于 LED 可见光通信的车联网系统研究进展[J]. *中国照明电气*, 2015(1): 13-17.
- [5] Xu Ning, Xu Dantong. Simulating and optimizing of fresnel lens in visible light communications [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(5): 629-636.
- [6] Li Fang, Chen Jianping. Optimization of LED SAHP for indoor visible light communication systems [J]. *Zte Technology Journal*, 2014, 20(6): 33-35. (in Chinese)
- [7] 李昉, 陈建平. 用于 VLC 的 LED 半功率角优化布局方法研究[J]. *中兴通信技术*, 2014, 20(6): 33-35.
- [8] Kwonhyung Lee, Hyuncheol Park. Indoor channel characteristics for visible light communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 217-219.
- [9] Ding Yi, Xu Ning, Tu Xinghua, et al. Experimental investigation optical power distribution of indoor visible light communication [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(3): 379-384. (in Chinese)
- [10] 丁毅, 徐宁, 涂兴华, 等. 室内可见光通信光功率分布的实验研究[J]. *量子电子学报*, 2014, 31(3): 379-384.
- [11] 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.

- [9] Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 131-134.
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.
- [10] Shen Zhenmin, Lan Tian, Wang Yun, et al. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2496-2450. (in Chinese)
沈振民, 蓝天, 王云, 等. 基于 LED 灯的室内可见光通信系统仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2496-2500.
- [11] You Chunxia, Zhang Shen, Zhai Yanrong. A new optimization method of light source for visual light communication in mine working face [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(2): 333-338. (in Chinese)
游春霞, 张申, 翟彦蓉. 煤矿工作面可见光通信光源优化设计新方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43 (2): 333-338.