

车内多 LED 光源阵列分布通信系统信道研究

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: 针对特种车内狭小空间布局受限这一问题, 提出基于功率均衡策略的光源阵列优化结构, 构建由车内壁反射导致多路径传播而引起的码间串扰的模型, 研究多径传输延迟对光通信系统信噪比的影响, 分析均方根时延扩展与最大传输速率间的相关特性, 仿真计算系统的误码率性能。仿真结果表明: 在 2 m×2 m×1.5 m 车内空间, 优化结构下的光功率范围为 -0.73~0.56 dBm, 均匀光照率达到 80.5%。考虑多径反射引起码间串扰时系统信噪比均值为 20.92 dB, 误码率的最大值为 1.47×10^{-6} , 在运用 OOK 调制技术下该系统最大数据传输速率的范围 107.8~373.3 Mbps。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; 脉冲响应; 信道建模

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0922006

Research on optical channel of multiple LEDs lighting arrays distribution communication system in 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. An optimal scheme of lighting layout was proposed based on optical power evenly distribution principle. Inter symbol interference model caused by the multipath dispersion from the reflection of floor in vehicle was built. The influence of multipath propagation delay on optical communication system was investigated. The relevant characteristic between the root mean square delay spread and max data rate was analyzed. Meanwhile, the Bit Error Rate (BER) was calculated by the simulation software. Simulation experiments proved that the optimizing layout scheme was valid as follows: the received optical power ranged from -0.73 dBm to 0.56 dBm in 2 m×2 m×1.5 m space size, uniform illumination rate was 80.5%, the average Signal Noise Ratio (SNR) was 20.92 dB. Moreover, the max data rate can be improved from 107.8 Mbps to 373.3 Mbps OOK at a BER of up to 1.47×10^{-6} , which meet the international illumination standards and the actual data communication in a special vehicle.

Key words: visible light communication; layout of lighting; impulse response; channel modelling

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51507190); 陆军部装备部重点实验室项目

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

白光 LED 具有功耗低、绿色环保、使用寿命长、且调制性能好、响应灵敏度高优点。将 LED 照明技术与无线通信技术进行有效的结合,促进了一种新型可见光通信技术 (Visual Light Communication, VLC) 的发展^[1-2]。相比于传统无线射频技术其具有传输速率高、保密安全无辐射、频谱资源无需认证,节能环保等诸多优点^[3-4]。且适用于各种场景数据信息接入技术需求,VLC 技术逐渐在武器装备中应用,对信息综合运用能力和战斗保障能力的提高具有重要作用。

可见光通信技术研究热点主要集中在提高 LED 调制带宽,高效的调制技术、高速光通信技术、减小 LED 非线性等应用方面^[5-7]。对可见光通信系统光源布局,脉冲响应、信道模型等表征可见光通信系统信道特性的研究较少。

参考文献[8]中 Toshihiko Komine 团队针对室内 5 m×5 m×3 m 环境中 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,对室内信噪比的分布进行仿真,没有对多径传输引起的信道时延等参数的理论分析。参考文献[9]在室内 5 m×5 m×5 m 环境下,从直射链路下接收光功率与光源布局优化的角度对信道特性进行研究,并提出运用均方差理论对 4 个 LED 光源布局进行优化。参考文献[10]对室内可见光通信系统多径效应特性进行研究,提出一种适用于高带宽的可见光通信脉冲响应算法。通过对收发器间功率延迟损耗进行仿真分析,得出该算法能够有效地计算反射功率和时延扩展。参考文献[11]构建典型的室内正方形光源布局通信模型,针对正方形四点 LED 阵列进行研究,定量分析了反射对室内光功率、光照度和信噪比的影响。

上述关于光源布局的研究均是基于典型室内环境下。文中是针对军用某型特种车辆内部空间,在满足车内通信性能要求的基础上,来研究其光源的均匀分布策略,进一步提高照明均匀度,避免信号盲区。

文中采用补偿策略提出基于功率补偿的五阵列光源布局结构,在参考文献[9]基础上,运用功率均衡技术从反射链路角度对其进行优化布局,并对该光源布局下的光通信信道进行建模与仿真分析,验

证优化后的光源布局的合理性。通过适用于车内可见光通信的脉冲响应算法,全面整体地分析影响可见光通信系统光照度,光功率、脉冲响应函数、信噪比、误码率、均方根时延扩展,最大数据传输速率等性能参数,重点对码间串扰(Inter Symbol Interference, ISI)对信噪比的影响和多径效应对信道干扰的影响进行研究。该研究对车内可见光通信系统设计具有一定的指导意义。

1 光源模型

在车内可见光通信系统中,光发射端为 LED 光源,光电探测器 PIN 作为光接收器。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^[11]:

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

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

光源的辐射强度(郎伯辐射模型)为:

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

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。

2 基于光功率均衡阵列位置优化

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。

建立车内空间为 2 m×2 m×1.5 m 的立方体模型。多数研究学者采用由 20 mW 的 LED 二极管组成的阵列光源,阵列尺寸为 0.59 m×0.59 m,总 LED 灯珠数为 3 600(60×60)^[10-11]。对于空间狭小、布线繁杂的特种车辆来说,LED 光源阵列过于巨大,且安装不便。文中采用 Philips Lumiled 公司的 LXHL-MW1D-00J 型 1 W 白光 LED 作为通信光源,该 LED 光源具有体积小、亮度高、通信效果好等优点。发射端 LED 总数为 36 只,分别采用功率均衡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 5 盏光源阵列位置坐标如图 1 所示。该布局下 LED 阵列对称分布,取 $x=y$ 。

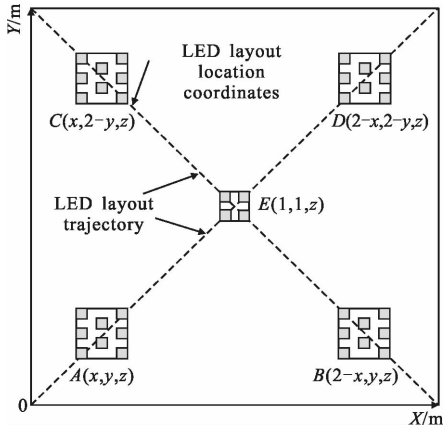


图 1 LED 阵列光源布局结构
Fig.1 Structure of LED lighting layout

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。如图 2 所示,在 $z=h$ 的平面上的每一点接收到的光功率 P_{ri} 等于 5 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。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就是中心补偿型 LED 布局结构下阵列光源的最优位置。

$$H(0)_{ref} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{Rp} \cos^m(\phi_i)}{2\pi D_{i,1}^2 D_{2,i}^2} \times \cos \gamma_{1,i} \cos \gamma_{2,i} \times \cos(\psi) \times T_s(\psi) g(\psi) & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi \geq \Psi_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: ϕ_i 为光源阵列发射角; $\gamma_{1,i}$ 为反射点入射角; $\gamma_{2,i}$ 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; $D_{2,i}$ 为反射点到最终接收点距离; $g(\psi)$ 为光集中器增益。

$z=h$ 平面上任一点 (x, y, h) 的接收功率等于 5 个 LED 阵列发射端直射功率加四周车内壁一次反射功率总和:

$$P_{ri} = \sum_{j=1}^{M=5} P_{sj} [H_i(0) + H_i(0)_{ref}] \quad (7)$$

接收平面每个网格所接收到的平均光功率为:

$$P_{rp} = \frac{1}{N} P_{rtotal} \quad (8)$$

式中: P_{rtotal} 为接收平面上接收光功率的总和, 每个网格光功率均方差为:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{ri} - P_{rp})^2}{N}} \quad (9)$$

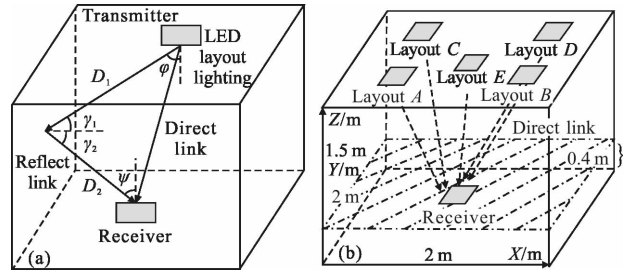


图 2 车内可见光通信直射与一次反射信道模型
Fig.2 Direct and first reflection channel model of visible light communication in vehicle

车内光通信路径为视距内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:

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

式中: A 为 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); $H(0)_{ref}$ 为经过一次反射的信道增益^[12]:

式中: $N=2500$, 为所设定接收平面的网格数。

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, 来确定布局结构下最优 LED 阵列光源的位置, 表 1 为相应仿真参数。

表 1 仿真参数

Tab.1 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/m^2	1
Refractive index of a lens at a PD	1.5
Gain of an optical filter T_s	1
Reflection coefficient in vehicle ρ	0.6
Gain of an optical concentrator g	3

图 3 得出中心补偿型结构下阵列 A 的最优位置

为 $x=0.24\text{ m}, y=0.24\text{ m}$ 。其它 4 个阵列的最优位置可相应算出。阵列光源向车内顶端中心移动时,接收端光功率均方差先减小后增大, 即当接收光功率均方差值最小时,整个接收平面光功率最均匀。此时,接收光功率均方差为 -0.982 dBm 。

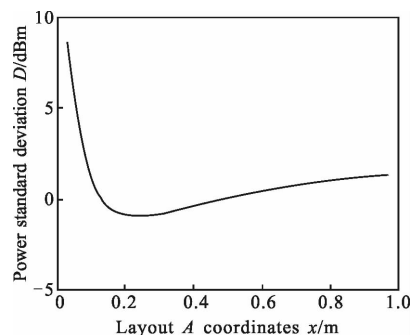


图 3 车内 LED 光源布局下接收光功率均方差值变化曲线

Fig.3 Standard deviation curve of received power for different LED layout in vehicle

最优位置下的直射光功率分布如图 4(a)所示,直射光功率最大值 -0.1014 dBm ,最小值为 -1.5061 dBm ,平均功率为 -0.5541 dBm 。图 4(b)为直射加一次反射链路下光功率分布情况,最大值 0.5576 dBm ,最小

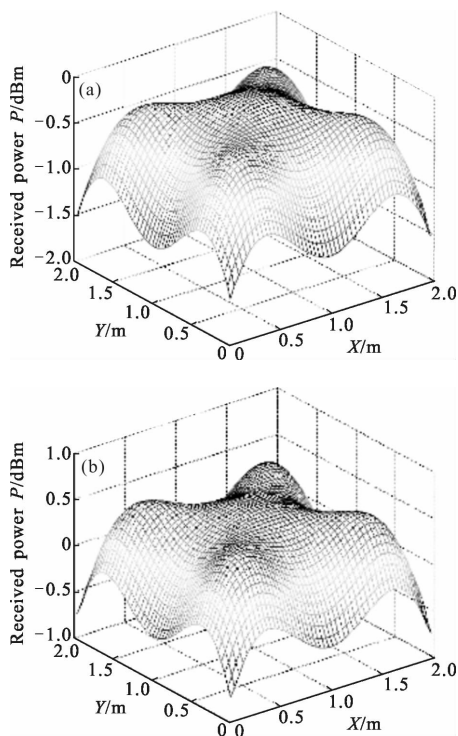


图 4 直射链路下光功率分布(a)和直射加一次反射链路下光功率分布(b)

Fig.4 Distribution of received optical power in LOS (a) and distribution of received optical power with first reflection (b)

值为 -0.7317 dBm ,平均功率为 0.207 dBm 。当考虑反射时,明显看出车内光功率分布有所增加。由反射导致的多功率信号的重叠会对通信系统性能带来一定得干扰,产生码间串扰,所以在实际可见光通信系统中还应当考虑由多径传播引起的码间串扰问题。

光照度公式为:

$$E(\theta, \psi) = \frac{I_0 \cos^m \theta \cos \psi}{d^2} \quad (10)$$

平面 $z=h$ (为接收器接收平面高度)上任意一点直射光照度为:

$$E(\theta, \psi) = \sum_{i=1}^4 \frac{I_0 \cos^m \theta_i \cos \psi_i}{d_i^2} \quad (11)$$

经坐标变换为:

$$E(x, y, h) = \sum_{i=1}^4 \frac{I_0 h^{m+1}}{((x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + h^2)^{\frac{m+3}{2}}} \quad (12)$$

接收平面接收来自车内四壁一次反射下光照度为:

$$E_{\text{ref}} = \int_{\text{ref}} \sum_{i=1}^N \frac{\rho I(0) \cos^m \phi_i \cos r_{1,i} \times \cos r_{2,i} \cos \psi_i dA_{\text{ref}}}{\pi D_{i,1}^2 D_{2,i}^2} \quad (13)$$

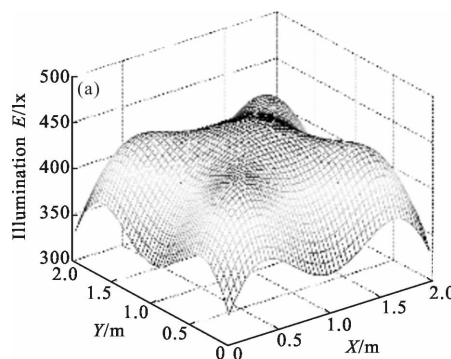
接收平面总的光照度为:

$$E_t = E(x, y, h) + E_{\text{ref}} \quad (14)$$

车内平面 $z=h$ 上每点的平均光照度为:

$$\bar{E} = \frac{1}{S} \iint_S E_t dx dy \quad (15)$$

图 5(a)为在最优阵列位置直射链路下,车内光照度分布最大值为 460.1289 lx ,最小值为 332.9745 lx ,平均值 414.1289 lx 。考虑一次反射时,图 5(b)光照度分布最大值为 535.5639 lx ,最小值为 398.0082 lx ,平均值 494.0360 lx 。国际照明委员会要求电子工业一般取 $300\sim 700\text{ lx}$,工业作业区内均匀光照率应大于 70%。考虑反射时最优光源阵列位置下的均匀光照



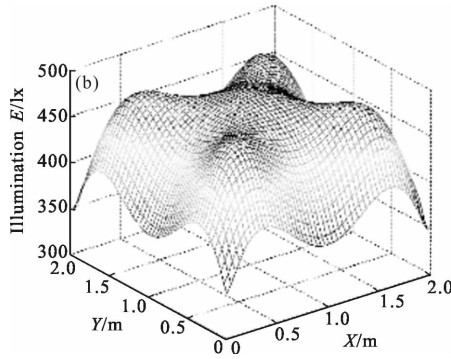


图 5 直射链路下光照度分布(a)和直射加一次反射链路下光照度分布(b)

Fig.5 Distribution of received illumination in LOS (a) and distribution of received illumination with first reflection (b)

率为 80.5%，所以文中设计的中心补偿型光源布局结构能够满足国际照明需求。

3 车内可见光通信信道建模

文中构建的可见光通信系统应用在某种军用车辆中。该车辆的内部空间可近似等效为 2m×2m×1m 长方体空间。运用强度调制/直接检测(IM/DD)的调制方式,车内光通信信道模型是基带线性系统,可由瞬时出入功率 $x(t)$ 、瞬时输出功率 $y(t)$ 和脉冲响应 $h(t)$ 表征。因此,车内可见光通信系统基带信道模型可以表示为:

$$y(t)=Rx(t)\otimes h(t)+n(t) \quad (16)$$

式中: R 光电二极管的光电转换效率; $n(t)$ 为总高斯白噪声; \otimes 为卷积。

3.1 脉冲响应模型

为计算反射光功率,运用一种基于可见光通信的脉冲响应计算方法,该脉冲响应算法既包括点光源的光功率谱密度,又具有反射介质的光谱反射系数。

$$h(t)=\sum_{n=1}^{N_{LED}} \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t; \Phi_n) \quad (17)$$

式中: N_{LED} 为所有的发射光源数目,每一个点光源的功率是相等的。 N 个光源经过 k 次反射后的脉冲响应为^[10]:

$$h^{(k)}(t; \Phi_n)=\int_S [L_1 L_2 \cdots L_{k+1} \Gamma_n^{(k)} \text{rect}\left(\frac{\theta_{k+1}}{FOV}\right) \times \delta\left(t-\frac{d_1+d_2+\cdots+d_{k+1}}{c}\right)] dA_{ref}, k \geq 1 \quad (18)$$

式中: L_1, L_2, L_{k+1} 为每一条路径的路径损耗; S 为所有反射面; A_{ref} 为每个反射点的面积微元; $\text{rect}(x)$ 为矩形函数。

接收光功率与图 2(a)中的光源与接收器间的距

离 D_k 平方根成反比。 $\Gamma_n^{(k)}$ 为 n 个光源经过 k 次反射后的功率:

$$\Gamma_n^{(k)} = \int_{\lambda} \Phi_n(\lambda) \rho_1(\lambda) \rho_2(\lambda) \cdots \rho_k(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

3.2 信噪比与误码率

通信系统中接收到信号功率 S 为:

$$S=R^2 P_{R(\text{Signal})}^2 \quad (20)$$

光通信中所有链路的光能量到达接收机的时间与第一个到达接收机的光能量的时间差小于等于码元周期一半时,即为信号光功率,反之为码间串扰引起的噪声功率。 $P_{R(\text{Signal})}$ 信号光功率计算如下:

$$P_{R(\text{Signal})} = \int_0^T \left(\sum_{n=1}^{LEDs} h^{(k)}(t; \Phi_n) \otimes X(t) \right) dt \quad (21)$$

式中: n 为 LED 光源的数目; T 为码元周期; k 为光波反射次数。

车内可内光通信系统中总的噪声包括散粒噪声 δ_{shot}^2 , 热噪声 $\delta_{thermal}^2$, 和由码间串扰引起的噪声 $R^2 P_{R(ISI)}^2$ 公式如下:

$$N=\delta_{shot}^2 + \delta_{thermal}^2 + R^2 P_{R(ISI)}^2 \quad (22)$$

码间串扰引起的噪声功率为:

$$P_{R(ISI)} = \int_T^{\infty} \left(\sum_{n=1}^{LEDs} h^{(k)}(t; \Phi_n) \otimes X(t) \right) dt \quad (23)$$

散粒噪声公式表达式为:

$$\delta_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{R(\text{Signal})} + P_{R(ISI)})B + 2qI_{bg}I_2B \quad (24)$$

式中: q 为电荷电量; B 是数据传码率; I_{bg} 为暗电流; I_2 为噪声带宽因子; γ 为光电转换系数。文中光接收端使用 PIN 光电二极管,忽略由漏电流产生噪声功率。热噪声公式表达式为:

$$\delta_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_k \eta A_R I_2 B^2}{G} + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma \eta^2 A_R^2 I_3 B^3}{g_m} \quad (25)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T_k 为绝对温度; η 为光电探测器的单位面积的固定电容; G 为开环电压增益; Γ 场效应管沟道噪声因子; g_m 为场效应管跨导。

$$SNR = \frac{R^2 P_{R(\text{Signal})}^2}{\delta_{shot}^2 + \delta_{thermal}^2 + R^2 P_{R(ISI)}^2} \quad (26)$$

系统误码率 BER 为:

$$BER=Q(\sqrt{SNR}) \quad (27)$$

式中: Q 函数为: $Q(x)=1/\sqrt{2\pi} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy$

3.3 均方根时延扩展与最大传输速率

通过均方根时延扩展来表征光通信信道的多径

色散与接收端多径效应的影响。当发射端,接收端及反射界面都固定好后,均方根时延扩展和脉冲响应也为定值,这与时变的无线射频系统不一样,无线射频的 D_{RMS} 被认为是随机过程的一个统计期望值。

平均时延扩展为:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}}{P_{rT}} \quad (28)$$

式中: P_{rT} 为多路径传输下接收端光功率,即所有直射信道下光功率与所有反射信道下光功率的和。

$$P_{rT} = \sum_{i=1}^M P_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} \quad (29)$$

式中: M 和 N 分别为从发射端到达指定接收端直射传输的路径数与反射路径数; $P_{d,i}$ 为第 i 个直射路径的接收光功率; $P_{ref,j}$ 为第 j 个反射路径的接收光功率。

均方根时延扩展:

$$D_{RMS} = \sqrt{u^2 - (u)^2} \quad (30)$$

$$u^2 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2 + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}^2}{P_{rT}} \quad (31)$$

在运用 OOK 调制技术,不采用均衡技术时最大可能数据传输速率 R_b 与 D_{RMS} 有如下关系^[12]:

$$R_b \leq 1/(D_{RMS}) \quad (32)$$

4 信道仿真与性能分析

根据构建的车内可见光通信系统信道模型,对直射链路和一次反射链路下信噪比,均方根时延扩展与最大传输速率等参数指标进行仿真分析,研究多光源阵列下多径效应对系统性能的影响。仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

Parameters	Values
Data rate B /Mbps	100
Boltzmann's constant k	1.380 66e-23
Background light current I_{bg} /mA	5.1
Absolute temperature T /K	295
Open-loop voltage gain G_{ol}	10
Fixed capacitance η /pF·cm ⁻²	112
FET channel noise factor Γ	1.5
FET transconductance g_m /ms	30
Noise bandwidth factor I_2	0.562
Noise bandwidth factor I_3	0.086 8
Bit period/ns	10
Electronic charge q	1.602e-19
Detector responsivity $R/(A \cdot W^{-1})$	0.54

图 6 为在考虑码间串扰的影响下,LOS 直射链路和一次反射链路中,优化布局结构下信噪比分布情况。图 6(a)中信噪比最大值为 62.68 dB,最小值为 11.88 dB,均值为 57.34 dB。图 6(b)中信噪比最大值为 26.51 dB,最小值为 10.38 dB,均值为 20.92 dB。可见,考虑车内壁反射的情况下的信噪比均值比 LOS 链路下的均值降低了 63.5%,说明在系统传码率为 100 Mbps 时,车内多径反射产生的码间串扰影响了系统的通信性能。仿真计算一次反射链路存在码间串扰时系统 BER 的最大值为 1.47×10^{-6} ,光通信要求系统的误码率不能高于 10^{-3} ,所以文中建立的车内可见光通信系统能够满足通信的需求。

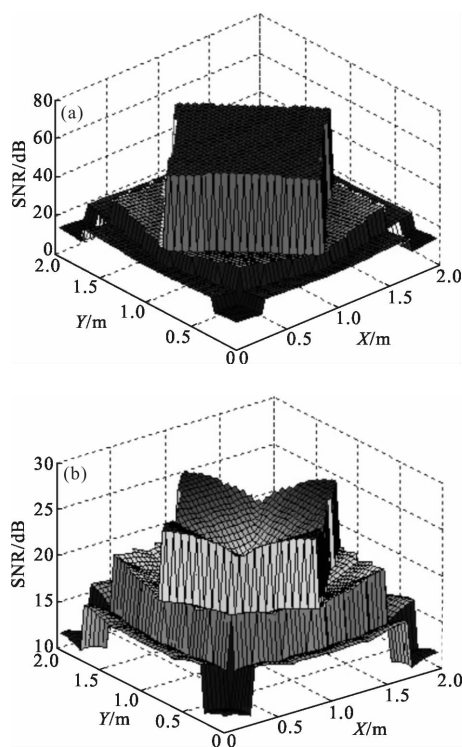


图 6 考虑码间串扰的直射链路下光信噪比分布(a)和考虑码间串扰的直射加一次反射链路下光信噪比分布(b)

Fig.6 Distribution of SNR with ISI (directed light) (a) and distribution of SNR with ISI (reflected light) (b)

均方根时延扩展能够准确地预测码间串扰 ISI 引起的信噪比的损失。图 7 为车内每一个位置的 DRMS 分布情况,其变化范围为 0.26~0.88 ns,平均时延扩展的变化范围为 3.69~4.69 ns,可见在 LED 阵列下方的位置,均方根时延扩展值较大,其他地方值分布较小,证明在 LED 阵列光源下方及其附近的点所接收到信号因多径所引起的延迟干扰较大,其

余分布点均方根时延小,所引起多径干扰较小。

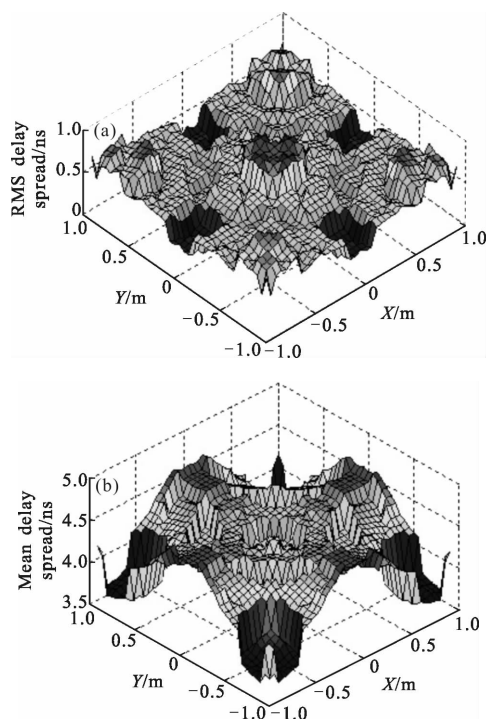


图 7 均方根时延扩展(a)和平均时延扩展分布(b)
Fig.7 Root mean square (a) and mean delay spread (b)

如图 8 所示,根据公式(32)算出最大数据传输速率 R_b 的范围为 107.8~373.3 Mbps。如果改用 OFDM 调制技术或其它能够抵抗码间串扰的调制方式,其最大可能数据传输速率将会比 OOK 调制方式下的最大数据传输速率要大。

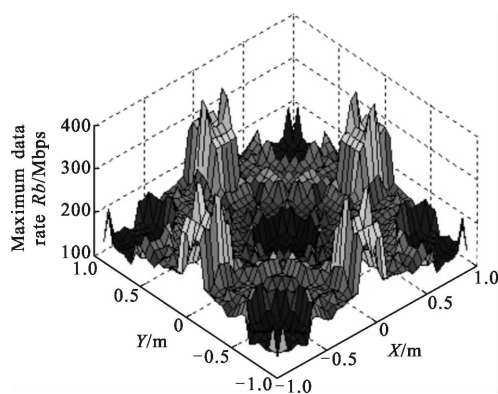


图 8 最大数据传输速率
Fig.8 Maximum data transmission rate

5 结论

文中开展了基于功率均衡算法的车内狭小空间中 LED 光源布局优化设计,实现了光功率和光亮度

分布最均匀前提下的 LED 光源布局,均匀光照率达到 80.5%,满足车内实际照明需求。在此基础上,运用适用于车内可见光通信的脉冲响应算法,对信噪比、误码率、均方根时延扩展、最大数据传输速率等信道表征进行建模与仿真分析。结果表明,基于该模型能够有效分析狭小空间内光通信系统中多径传播引起的码间串扰对系统通信性能的影响,且能够利用均方根时延扩展衡量多径色散效应对信道的影响程度,为研究基于狭小空间内的可见光通信系统性能分析提供理论指导。

参考文献:

- [1] Fritz R Gfeller, Bapst U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, 67(11): 1474-1486.
- [2] Dominic O'brien, Zeng Lubin, Hoa Leminh, et al. Visible light communications: challenges and possibilities [C]// Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE 19th International Symposium on. IEEE, 2008: 1-5.
- [3] Chen Hongda, Wu Chunhui, Li Honglei, et al. Advances and prospects in visible light communications [J]. *Journal of Semiconductors*, 2016, 37(1): 011001.
- [4] 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)
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] Mohammed S A, Mossaad Steve Hranilovic. Visible light communications using OFDM and multiple LEDs [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(11): 4304-4313.
- [7] Deng P, Kavehrad M, Kashani M A. Nonlinear modulation characteristics of white LEDs in visible light communications [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2015, 22: 937-939.
- [8] 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. (in Chinese)
- 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] Kwonhyung Lee, Hyuncheol Park. Indoor channel characteristics for visible light communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 217–219.
- [11] 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.
- [12] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications[J]. *IEEE Proceeding*, 1997, 85(2): 265–298.