

室内可见光 MIMO 通信码间干扰分析与接收视场角优化

杨春勇, 吕云龙, 侯金, 陈少平

(中南民族大学 电子信息工程学院 智能无线通信湖北省重点实验室 武汉 430074)

摘要 针对可见光 MIMO 通信过程中多径时延造成的码间干扰对可见光通信系统性能影响问题,采用光线追踪分析方法建立了室内系统模型及码间干扰模型,讨论了多输入多输出的室内通信环境下,不同 LED 布局下光学天线视场角大小对系统码间干扰及误码率的影响。研究结果表明:当数据传输速率为 100Mbit/s 时,存在一种 LED 布局使整个接收平面能满足基本通信所要求的 10^{-6} 误码率阈值。在此结构的基础上分析可知,随着视场角的逐渐增大,接收平面的盲区会逐渐消失,但系统码间干扰会随之增加。在接收机视场角为 43° 时,平均信噪比最大并能达到室内最佳覆盖,此时能有效减小多径效应及码间干扰并提高系统传输性能。

关键词 可见光通信;多输入多输出;视场角;码间干扰

中图分类号 TN914 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)02-0085-06

Analysis of Inter-Symbol Interference and Optimization of Receiver Field-of-View in Indoor Visible Light MIMO Communication System

Yang Chunyong, Lü Yunlong, Hou Jin, Chen Shaoping

(Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless communication, College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract Aiming at the influence of the intersymbol interference caused by multipath delay on the performance of visible light communication system in visible light MIMO communication. Ray tracing method is adopted to establish the channel model and intersymbol interference model. The effects of various LED layout and antenna FOV to the system intersymbol interference and bit-error rate has been analyzed in indoor MIMO condition. Results show that there is a LED layout so that the entire receiving plane satisfies the basic communication requirements of 10^{-6} BER when the transmission rate is 100Mbit/s. On the basis of this layout, the receiving blind spot disappear slowly and the intersymbol interference increase with the increase of FOV. When the receiving angle is 43° , the average SNR reach maximum value and meet the best indoor coverage. Under this condition the multipath effect and the ISI can be effectively reduced and the system performance can be highly improved.

Keywords visible light communication; multi-input multi-output; filed of view; intersymbol interference

多输入多输出(MIMO)通信技术应用室内可见光(VLC)通信系统一方面有利于提高系统通信容量,另一方面也存在较大的码间干扰。围绕可见光 MIMO 通信系统的码间干扰问题,国内外的一些学者沿着光学天线设计的技术方向进行了较深入的研

究,取得了一些阶段性进展。

文献[1~3]研究了小视场角(FOV)分集接收系统性能,设计了一种半球形或多面体形的接收天线。这种天线虽然能给系统带来较高的光学增益,但是其天线体积较大。文献[4~6]讨论了 MIMO 成像

收稿日期 2016-12-20

作者简介 杨春勇(1975-)教授,博士,研究方向:光通信系统与网络、无线传感器网络和仪器仪表, E-mail: cyyang@mail.scuec.edu.cn.

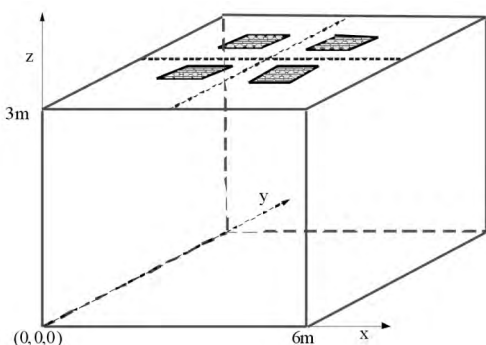
基金项目 国家自然科学基金资助项目(61002013、11147014);湖北省自然科学基金资助项目(2014CFA051)

分集接收机 相比非成像接收机,它体积更小,集成度更高,但这种天线在工程中实现也比较复杂.文献[7-8]利用宽视场接收天线提高增益,但其存在较严重的码间干扰问题.文献[9-11]通过讨论不同LED布局及FOV、传输速率对系统性能的影响,但并没有确定缓解码间干扰的视场角设计优化方向.

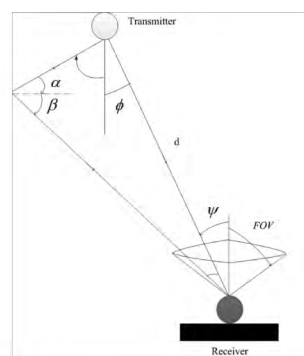
综合分析现有研究进展,VLC光学天线的设计与参数优化对增强光学增益、提高系统性能有一定作用,但这些研究均未明确MIMO环境下的FOV选择与系统性能优化之间的关系.本文针对此问题,依据设定的室内MIMO系统模型及码间干扰模型,采用光线追踪方法分析不同LED布局下的天线FOV与系统信噪比及误码率的关系,及其对系统码间干扰所产生的影响,通过确定最佳LED布局及接收天线FOV,从而获得在室内接收平面上得到较好的覆盖效果并减小多径效应对系统的影响.

1 系统模型

1.1 室内系统模型



a) 房间模型



b) 室内信道模型

图1 系统模型

Fig. 1 System model

1.2 接收机信噪比和误码率

设MIMO VLC系统具有 N_t 个LED发送端和 N_r 个光检测器,接收端的信号可以表示为:

$$y = Hx + n, \quad (1)$$

其中 $x = [x_1 \dots x_{N_t}]^T$ 和 $y = [y_1 \dots y_{N_r}]^T$ 分别是发送端和接收端信号矢量, n 为系统总噪声矢量, H 是信道矩阵^[13]:

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & \dots & H_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_r1} & \dots & H_{N_rN_t} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 H_{ij} 表示从 N_t 发射端到 N_r 接收端的直流增益,表示为:

为保证系统照明强度足够且房间光照分布均匀,采用多个LED阵列作为光源.将室内VLC系统设定在一个空的房间里,房间大小长宽高为 $6\text{m} \times 6\text{m} \times 3\text{m}$,模型如图1a)所示.4个LED阵列按正四边形分布安装在天花板对角线上,每个LED阵列中心之间的间距为 d_{TX} ,且每个阵列由 $16(4 \times 4)$ 个LED单元组成^[12].设定接收机平面离地面高为 0.8m ,4个间距为 d_{RX} 的接收机也成正四边形结构分布在接收平面上.为了便于讨论问题,选取接收平面上均匀分布的900个接收点进行仿真分析.

在室内VLC系统中,基于朗伯辐射模型建立两种信道链路模型,如图1b)所示.视距链路(LOS)和非视距链路(NLOS),图中 ϕ 表示发射光角度, ψ 为入射光角度,FOV为接收天线视场角, d 为LED与接收天线之间视距链路距离.据文献[10],LOS链路接收功率占总功率的95%,而NLOS链路中的一次反射部分占3.37%,因此本文仅讨论可见光经过直射和墙面一次反射到达接收机的情况.

$$H_{ij} = \sum_{LEDs} \{ H_d(0) + \int_{walls} dH_{ref}(0) \}, \quad (3)$$

其中 $H_d(0)$ 表示直射链路信道增益, $H_{ref}(0)$ 表示反射链路信道增益. $H_{ref}(0)$ 可表示为:

$$H_d(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi \geq \psi_c \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $m = \frac{\ln 2}{\ln \cos(\Phi_{1/2})}$ 为朗伯系数, $\Phi_{1/2}$ 为LED半功率角, A 为光电探测器的接收面积, d 为发射端到接收端的直射距离, ψ 是入射角, ϕ 是发射角, $T_s(\psi)$

是光滤波器增益 $g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c} & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \rho \leq \psi \leq \psi_c \end{cases}$ 是

光聚能器增益 μ_c 是接收机 FOV.

又, 一次反射信道增益 $dH_{ref}(0)$ 为:

$$dH_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2(d_1 d_2)^2} \rho dA_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cdot \\ \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \mu \leq \psi_c \end{cases}, \quad (5)$$

其中 d_1 为 LED 到反射点的距离 d_2 为反射点到接收机的距离 ρ 为墙面反射系数.

为方便问题讨论, 采用 RC MIMO 技术^[14, 15]. 即所有发射机在同一时间发射相同的信号, 利用 RC 结合 M 进制脉冲幅度调制 (M-PAM) 能够实现频谱效率为 $R = \log_2(M)$ bit/s/Hz, 同时接收端采用最大比合并 (MRC) 算法进行信号合并接收^[16]. 基于以上技术方法应用, 接收机误码率、信噪比可表示为:

$$BER_{RC} = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\frac{1}{M-1} \sqrt{\frac{SNR}{2}}\right), \quad (6)$$

$$SNR = \frac{E_s}{N_0 N_t} \sum_{n_r=1}^{N_r} \left(\sum_{n_t=1}^{N_t} H_{n_r n_t} \right)^2, \quad (7)$$

其中 $E_s = \sum_{n_r=1}^{N_r} (r I_{TX}) T_s$, T_s 为符号周期 $N_0 = (\sigma_{thermal}^2 + \sigma_{shot}^2 + r^2 p_{isi}^2) / B$, r 为光电转换效率 p_{isi} 为码间干扰功率 B 为带宽. 其中散粒噪声为:

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{R(Signal)})B + 2qI_{bg}I_2B, \quad (8)$$

表 1 系统参数

Tab. 1 Parameters of the system

Discription	Parameters	Value
Room Size	(x, y, z)	(6m, 6m, 3m)
Surface reflectivity of the walls	$\rho_{west} = \rho_{north} = \rho_{south} = \rho_{ceiling}$	0.7
Spatial position of the transmitters	The ceiling diagonal	
Spatial position of the receivers	Plane of table	($x, y, 0.8$ m)
The height of table	Δh	0.8 m
Transmitted optical power of one LED	I_{TX}	1W
Effective detector area of a PD	A	1.0 cm ²
Gain of an optical filter	$T_s(\psi)$	1.0
Refractive index of compound parabolic lens	n	1.44
Background light current	I_{bg}	1200 μ A
Noise bandwidth factor	I_2	0.562
Noise bandwidth factor	I_3	0.0868
Absolute temperature	T_k	298 K
Open - loop voltage gain	G	10
Fixed capacitance	η	112 pF/cm ²
FET transconductance	g_m	30
FET channel noise factor	Γ	1.5

在室内可见光 MIMO 系统中, 为分析 FOV 和

热噪声为:

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi^2 k T_k}{G} \eta A_R I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma}{g_m} \eta^2 A_R^2 I_3 B^3. \quad (9)$$

1.3 码间干扰模型

为便于研究空间信道传输时延, 忽略信号在电缆中的传输时延. 房间模型中的天花板上的光信号分别经过不同的路径到达接收端, 它们之间的时延有可能会造成两个脉冲符号的重叠或交叉, 导致接收端无法正确抽样出信号, 误码率进一步增加, 进而限制了通信速率和质量. 也即码间干扰 (ISI) 由多径传输造成的. 本文用信噪比和误码率评估系统性能. 接收功率不仅包含信号功率, 还包括码间干扰功率, 均考虑统计到噪声功率之中. 为便于分析, 假定 ISI 功率为: 信号到达接收机的时间与第一个到达接收机信号的时间差小于符号周期的一半, 判定为信号功率, 其他的视为 ISI 功率.

$$P_{R(Signal)} = \sum_j P_R (t_j \leq T/2), \quad (10)$$

$$P_{R(ISI)} = \sum_j P_R (t_j > T/2), \quad (11)$$

其中 j 为信号路径个数, T 为符号周期.

2 实验与讨论

为有效评估不同 LED 阵列分布下的接收机 FOV 与系统码间干扰之间的关系, 按照系统模型配置相关参数, 如表 1 所示.

ISI 的关系, 设定 LED 间距为 3 m, 接收机间距为

0.1 m, 传输速率为 100Mbit/s, 频谱效率 $R = 2$. 分别仿真了 FOV 为 40° 、 50° 、 60° 、 70° 时的室内接收平面

上 ISI 的分布如图 2 a)、b)、c)、d) 所示.

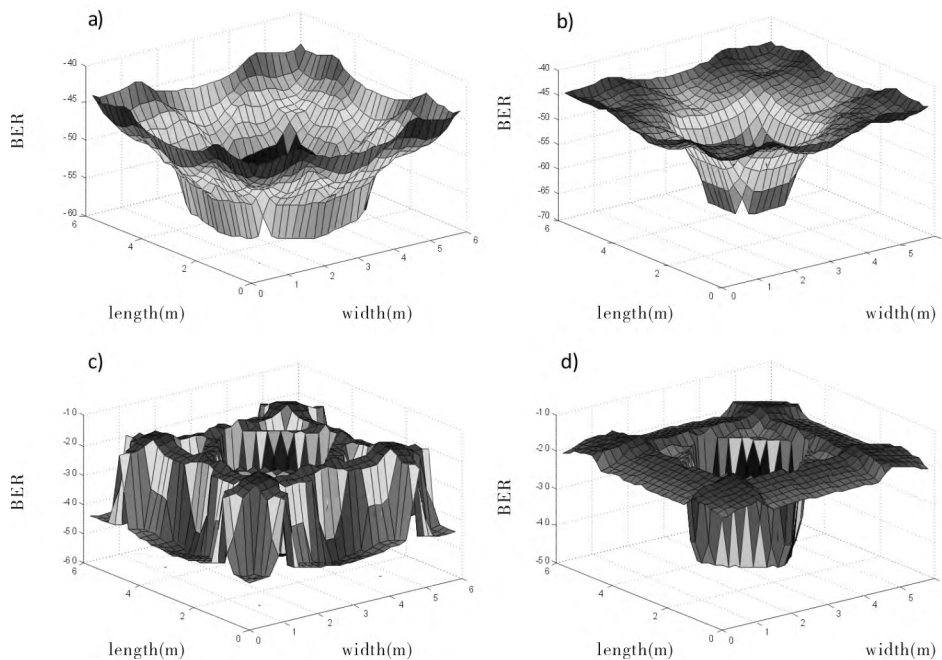


图2 LED 间距为 3m 时不同 FOV 下的 ISI 分布. FOV = a) 40° b) 50° c) 60° d) 70°

Fig.2 When spacing between LED is 3m the distribution of ISI under different FOV. FOV = a) 40° b) 50° c) 60° d) 70°

从图 2 中可以看出, 当 FOV 较小时, 处于 LED 源正下方区域内的信号码间干扰较小, 且房间中心位置会存在盲区. 为了确保通信系统均匀覆盖, 有必要在设计上保证室内无盲区接收. 随着 FOV 的增大, 盲区会逐渐消失, LED 正下方区域内的 ISI 逐渐增大, 室内中心位置和墙边的 ISI 则随之减小. 同样还可以进一步看到, 室内接收面平均 ISI 功率随着 FOV 变化发生的相应变化, 如图 3 所示.

小于 50° . 进一步图 4 在图 2、图 3 的工作基础上显示了几种不同 FOV 下的接收面误码率的分布, 可见这种分布与 ISI 功率分布存在近似规律, 这是因为 ISI 会影响系统误码率及通信可靠性. 为了使室内接收平面都能有较好的通信质量, 必须使接收端满足正常通信所需的性能阈值条件 $BER < 10^{-6}$, 这个是必要条件.

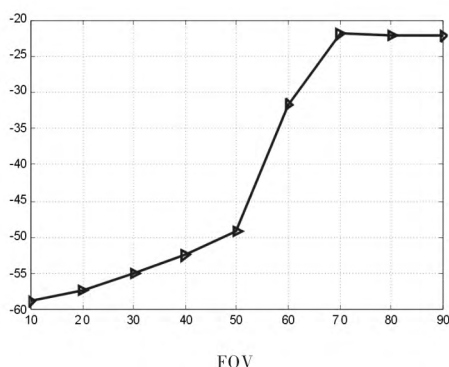


图3 平均 ISI 功率与 FOV 的关系

Fig.3 The relationship between the power of ave-ISI and FOV

图 3 反映了接收平面平均 ISI 功率随着 FOV 变化的数值关系. FOV 小于 50° 时, 两者关系较平缓; FOV 处于 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间时, ISI 功率会显著增强, FOV 大于 70° 时这种关系又会变的平缓. 综合来看, 为了使接收到的 ISI 功率尽可能小, FOV 适宜选择

根据以上分析 FOV 与 ISI、BER 的关系, 尽管可看出一定规律, 但还不能确定系统最优化码间干扰下的 LED 间距和接收机 FOV 的具体数值. 为此, 本文进一步仿真讨论接收平面上满足 $BER < 10^{-6}$ 阈值的接收机个数, 如图 5 所示, x 轴为 LED 间距一半 ($d_0 = 1/2d_{TX}$), y 轴为接收机 FOV, z 轴为接收平面上满足要求的接收机个数, 从图中看出某种条件下接收平面的 900 个接收机都满足基本通信需求. 自此对不同 LED 间距和接收机 FOV 下的接收面平均信噪比分布进行分析如图 6 所示. 其中最大的平均 $SNR = 54.7577\text{dB}$, 此时 $d_0 = 1.5\text{m}$, $FOV = 43^\circ$, 而且接收平面上的接收机都满足基本通信要求. 这里可确定 100Mbit/s 时的最佳接收机间距为 3m, 接收机 FOV 为 43° , 此时能最大化缓解多径效应带来的码间干扰问题, 并提高系统整体通信性能.

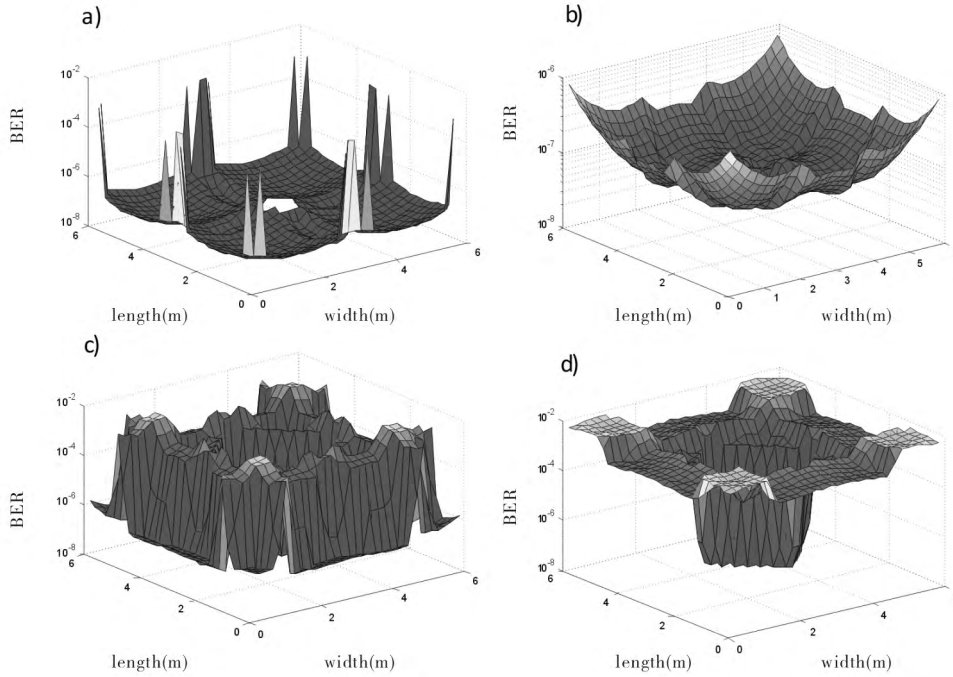


图 4 LED 间距为 3m 时,不同 FOV 下的 BER 分布. FOV = a) 40°b) 50°c) 60°d) 70°
 Fig. 4 When spacing between LED is 3m, the distribution of BER under different FOV. FOV = a) 40°b) 50°c) 60°d) 70°

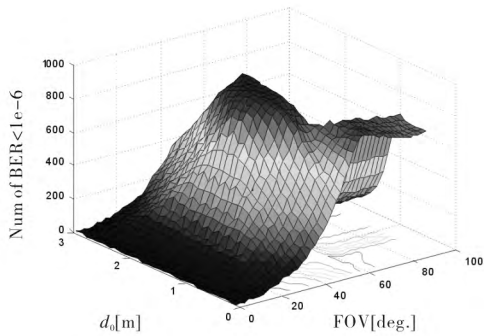


图 5 不同 d_0 及 FOV 下接收面上 $BER < 10^{-6}$ 的个数分布
 Fig.5 Distribution of number of $BER < 10^{-6}$ under different d_0 and FOV

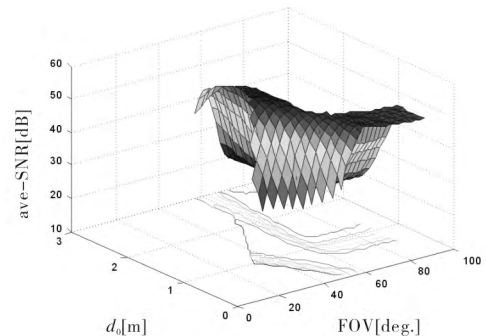


图 6 不同 d_0 及 FOV 下接收面上平均 SNR 分布
 Fig.6 Distribution of ave_SNR under different d_0 and FOV

3 总结

本文依据所建立的室内 MIMO 可见光通信模型及码间干扰模型,分析了不同 LED 间距场景下的光学天线 FOV 与系统码间干扰、误码率之间的关系,并进行数值仿真计算.根据仿真结果,可确定在通信速率为 100Mbit/s、发射机间距为 3m、接收机 FOV 为 43°时,能使接收平面上的接收机都满足基本通信要求,且接收面平均 SNR 达到最大值,此时能最大化缓解 MIMO 系统多径效应带来的码间干扰的影响,提高系统传输性能,为 LED 布局及光学天线视场角的选择提供了有利的参考依据.之后的研究还可以在正交频分复用 (OFDM)、均衡或者成像透镜

接收机等方面来缓解系统码间干扰.

参 考 文 献

[1] Kong M, Liang Z, Zhang G. Optical receiving antenna design based on angle diversity technology [J]. Infrared & Laser Engineering 2012, 41(3): 750-754.
 [2] Mmbaga P F, Thompson J, Haas H. Performance Analysis of Indoor Diffuse VLC MIMO Channels Using Angular Diversity Detectors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1254-1266.
 [3] Nuwanpriya A, Ho S W, Chen C S. Indoor MIMO Visible Light Communications: Novel Angle Diversity Receivers for Mobile Users [J]. IEEE Journal on

- Selected Areas in Communications ,2015 ,33(9) : 1780-1792.
- [4] Zeng L , O'Brien D C , Minh H L , et al. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting [J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal on , 2009 , 27 (9) : 1654-1662.
- [5] Li B , Lai X , Wang J , et al. Performance analysis of the imaging receivers using a hemispherical lens for Visible Light Communications [C]//IEEE. International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. New Jersey: IEEE , 2013: 1-5.
- [6] Chen T , Zheng Z , Liu L , et al. High-Diversity Space Division Multiplexing Visible Light Communication Utilizing a Fisheye-Lens-Based Imaging Receiver [C]// IEEE. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. New Jersey: IEEE , 2015: 1-3.
- [7] Stefan I , Haas H. Analysis of Optimal Placement of LED Arrays for Visible Light Communication [C]//IEEE. Vehicular Technology Conference. New Jersey: IEEE , 2013: 1-5.
- [8] Wang T Q , Sekercioglu Y A , Armstrong J. Analysis of an Optical Wireless Receiver Using a Hemispherical Lens With Application in MIMO Visible Light Communications [J]. Journal of Lightwave Technology , 2013 , 31(11) : 1744-1754.
- [9] Gao M , Lan T , Zhao T , et al. Research on field of view of optical receiving antenna based on indoor visible light communication system [C]// ISOP. International Conference on Optical Instruments and Technology. New York: International Society for Optics and Photonics , 2015: 208-209.
- [10] Komine T , Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. Consumer Electronics IEEE Transactions on , 2004 , 50(1) : 100-107.
- [11] Choi S I. New Type of White-light LED Lighting for Illumination and Optical Wireless Communication under Obstacles [J]. Journal of the Optical Society of Korea , 2012 , 16(3) : 203-209.
- [12] 杨春勇 , 杨杰 , 侯金 , 等. 室内可见光通信遮挡场景下的可靠性评估 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版) , 2016 , 35(1) : 89-94.
- [13] Chen C , Basnayaka D , Haas H. Non-line-of-sight channel impulse response characterisation in visible light communications [C]// IEEE. International Conference on Communications. New Jersey: IEEE , 2016: 1-6.
- [14] Tran N A , Luong D A , Thang T C , et al. Performance analysis of indoor MIMO visible light communication systems [C]// IEEE. Fifth International Conference on Communications and Electronics. New Jersey: IEEE , 2014: 60-64.
- [15] Fath T , Haas H. Performance Comparison of MIMO Techniques for Optical Wireless Communications in Indoor Environments [J]. Communications IEEE Transactions on , 2013 , 61(2) : 733-742.
- [16] Tuyen L P , Bao V N Q. Comparison of diversity combining techniques for MIMO systems [C]// IEEE. The Asia Pacific Conference on Communications. New Jersey: IEEE , 2011: 295-300.