

基于法向量倾斜的可见光通信多输入多输出 信道解相关技术

张海勇, 朱义君, 张艳语

中国人民解放军信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450002

摘要 随着可见光通信多输入多输出(VLC-MIMO)系统收发端阵元数目增多、阵元间距减小以及传输距离增大,系统接收端信号间严重干扰、信道矩阵缺秩等问题逐渐凸显,导致系统的复用率降低、信道相关性增大。针对这些问题,提出以最小化最大干信比为优化目标;通过建立 VLC-MIMO 信道模型,分析收发端阵元法向量倾斜角度对信道相关性的影响;通过优化发光二极管(LED)法向量倾斜角度来减小信道相关性,并得到各个 LED 法向量的最佳倾斜角度。通过比较系统接收平面的光照度分布,发现所提出的优化方案能有效减小信号间干扰,与链路阻塞方式相比,该方案的误码率降低了 42 dB。

关键词 光通信; 信道解相关; 法向量倾斜; 迫零检测

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0506001

Multiple-Input Multiple-Output Channel Decorrelation Technique for Visible Light Communication Based on Normal Vector Tilting

Zhang Haiyong, Zhu Yijun, Zhang Yanyu

*Institute of Information System Engineering, The PLA Information Engineering University,
Zhengzhou, Henan 450002, China*

Abstract In visible light communication multiple-input multiple-output (VLC-MIMO) system, the increasing of sender and receiver elements, the decreasing of array element space, and the increasing of transmission distance cause a series problems of serious interference on receiver of the system and lack of channel matrix, and further lead to low reusing rate of the system and large channel correlation. To solve these problems, the minimizing of interference-to-signal ratio is taken as the optimization goal. The channel model of VLC-MIMO is established, and the effects of the normal vector tilting angles of sender and receiver elements on channel correlation are analyzed. The normal vector tilting angle of light-emitting diode is optimized to decrease the channel correlation, and the optimal tilting angle of the normal vector tilting angle of each LED is obtained. By comparing the illumination distribution on the receiving plane of the system, we find that the proposed scheme can effectively reduce the interference, and the bit error rate is reduced by 42 dB compared with that of the link-blocked system.

Key words optical communications; channel decorrelation; normal vector tilting; zero forcing detection

OCIS codes 060.2605; 140.7300; 200.2605; 200.4560

1 引 言

可见光通信(VLC)是一种具有很大应用前景的通信技术,1979年,Gfeller等^[1]对VCL进行了相关研究,之后Hanzo等^[2]对VLC在未来通信系统中的应用进行了研究。在VLC技术的发展过程中,现有研究的传输速率与VLC 400 THz的潜在频谱资源还有很大差距。目前有两种方法可用来提高传输速率:1)研究新型宽带发光二极管(LED),但是LED的带宽与发光效率相互矛盾,需要在材料和结构上实现突破;2)采

收稿日期: 2016-10-21; **收到修改稿日期:** 2017-01-07

基金项目: 国家 863 计划(2013AA013603)、国家自然科学基金(61271253)

作者简介: 张海勇(1991—),男,硕士研究生,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: xxgczhanghaiyong@163.com

导师简介: 朱义君(1976—),男,博士,教授,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: xxgczhu@126.com

用阵列传输、多灯并行工作的方法来提升传输速率。对于单个 LED 带宽受限的 VLC 系统,多输入多输出(MIMO)是提升传输速率的最为有效的方式之一^[3]。VLC-MIMO 未来的发展趋势是采用大规模微阵列结构来提升单位面积下 VLC 的传输速率,该结构可使传输速率达到 Tbit/(s·mm²)量级。当收发端阵列尺寸减小、传输距离变远以及接收机移动性增强,信道相关性也会随之增大^[4]。因此实现大规模微阵列 MIMO 的本质是要减小通信系统中信号间的干扰和信道相关性的问题。

为了减小信道的相关性,国内外研究人员进行了许多研究。Wang 等^[5]在接收阵列上采用成像半球形透镜,从而可区分接收平面上各个 LED 的光斑;Chen 等^[6]提出利用鱼眼透镜成像质量高、成像尺寸小的特点来减小信道的相关性;针对收发端位置相对固定的系统,Fath 等^[7]采用链路阻塞(LB)的处理方法减小了信道的相关性;Nuwanpriya 等^[8-9]在大尺寸阵列 MIMO 系统中,将光电二极管(PD)的法向量 \mathbf{n}_{PD} 方向按锥体式分布(PR)和半球形分布(HR)^[8-10],从而减小了由接收端 PD 阵列的移动而导致的信道强相关;针对移动 VLC 环境的复杂多样性,张学彬等^[11]设计了一种变焦光学接收天线来减小空间干扰,使通信系统具有更高的信噪比和信道增益。但是这些研究的阵元数较少,阵元尺寸较大,限制了 VLC-MIMO 的应用。

针对信号间干扰强、信道相关性大等问题,本文建立了 9×9 的 VLC-MIMO 系统模型(LED 采用朗伯辐射模型),在该模型基础上分析了阵元法向量倾斜对信道相关性的影响。通常接收端采用迫零检测来降低复杂度,但 VLC-MIMO 系统中信道相关性较大,直接采用迫零检测算法时,系统性能无法得到保证。因此在分析信道相关性的基础上,通过优化阵元法向量倾斜角度来减小信号间的干扰,从而提升迫零检测的性能。以最小化最大干信比(ISR)为优化目标,优化 LED 法向量 \mathbf{n}_{LED} 的倾斜角度,当法向量倾斜角度达到最优时,系统误码率(BER)相比于 LB 方法可降低 42 dB。

2 信道模型

针对含 M 个 LED 发送端、 N 个 PD 接收端的 VLC-MIMO 系统,假设信道直流增益矩阵为 \mathbf{H} ,发射信号矩阵为 \mathbf{X} ,则接收信号矩阵 \mathbf{Y} 可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{X}_n, \quad (1)$$

式中 \mathbf{X}_n 为 n 维加性高斯白噪声,信道矩阵 \mathbf{H} 的表达式为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1j} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{i1} & \cdots & h_{ij} & \cdots & h_{iM} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & \cdots & h_{Nj} & \cdots & h_{NM} \end{pmatrix}_{N \times M}, \quad (2)$$

式中 $1 \leq i \leq N; 1 \leq j \leq M; h_{ij}$ 为第 j 个 LED 到第 i 个 PD 的直流增益, h_{ij} 可表示为

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{(m+1)S}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m \theta_{ij} \cos^k \varphi_{ij}, & 0 \leq \varphi_{ij} \leq \psi_c, \\ 0, & \varphi_{ij} > \psi_c \end{cases}, \quad (3)$$

式中 m 为 LED 的调制阶数, S 为 PD 的有效面积, d_{ij} 为第 j 个 LED 到第 i 个 PD 的传输距离, θ_{ij} 为 LED 法向量与传输光线的夹角(即 LED 发光角), φ_{ij} 为 PD 法向量与传输光线的夹角(即 PD 入射角), k 为 PD 的视场角系数, ψ_c 为 PD 的视场角。

由(3)式可知,信道增益与收发阵元的法向量方向有着密切的联系。在此基础上,采用优化收发阵元法向量倾斜角度的方法来改变法向量的方向,从而减小空间信号的干扰。空间信号干扰是指 PD 接收到的干扰信号的强度。第 i 个 PD 接收到的信号可表示为

$$y_i = h_{ii}x_i + \sum_{j=1, i \neq j}^M h_{ij}x_j + n_i, \quad (4)$$

式中 $h_{ii}x_i$ 为 PD 接收到的有用信号, $\sum_{j=1, i \neq j}^M h_{ij}x_j$ 为空间干扰信号之和, n_i 为第 i 路噪声, x_i 为第 i 路信号。该研究的主要目标是减小(4)式中 $\sum_{j=1, i \neq j}^M h_{ij}x_j$ 与 $h_{ii}x_i$ 的信号功率的比值,即减小接收信号的 ISR,使 $\sum_{j=1, i \neq j}^M h_{ij}x_j$

可以忽略。当每个 LED 发送信号的功率相等时,第 i 个 PD 上的 ISR 可表示为

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^M h_{ij}^2}{h_{ii}^2}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (5)$$

可见光信道是一个高信噪比的信道,噪声功率一般非常小,与信号功率相比可以忽略不计,因此可只考虑干扰信号对通信系统性能的影响。采用 ISR 来衡量干扰信号的强弱,能很好地简化问题。此外,ISR 与信干噪比(SINR)在高信噪比时为倒数关系。但是,当 VLC-MIMO 系统处在最理想的情况下时,通信系统的等效信道矩阵具有单位阵结构,即此时的干扰信号功率之和降到了 0,但该情况下未考虑通信系统的噪声,所以此时 SINR 的分母为 0,即此时的 SINR 没有意义。

图 1 为优化收发端阵元法向量倾斜角度后的点对点链路示意图。当 $0 \leq \varphi_{ij} \leq \psi_c$ 时,直流增益 h_{ij} 可表示为

$$h_{ij} = \frac{(m+1)S}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m(\theta_{ij} + \Delta\theta_j) \cos^k(\varphi_{ij} + \Delta\varphi_i), \quad (6)$$

式中 $\Delta\theta_j$ 为 LED 法向量的倾斜角度, $-\theta_{\max} \leq \Delta\theta_j \leq \theta_{\max}$, 其中 θ_{\max} 为 LED 的最大发光角; $\Delta\varphi_i$ 为 PD 法向量的倾斜角度, $-\psi_c \leq \Delta\varphi_i \leq \psi_c$ 。因此,优化目标函数为

$$\begin{cases} \min_{\Delta\theta_j, \Delta\varphi_i} [\max_{i=1}^N (\eta_i)] \\ -\theta_{\max} \leq \Delta\theta_j \leq \theta_{\max}, -\psi_c \leq \Delta\varphi_i \leq \psi_c \end{cases}. \quad (7)$$

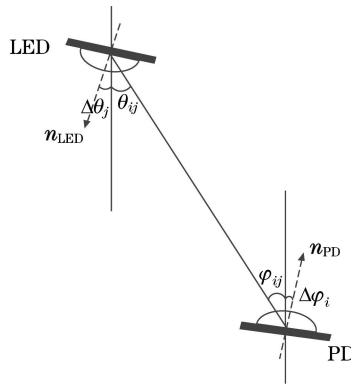


图 1 点对点链路示意图

Fig. 1 Schematic of point-to-point link

发送端采用单级 K 阶脉冲幅度调制(PAM)。由于 MIMO 系统接收端信道较多,复杂度较高,因而采用迫零检测。MIMO 链路可以视为多路平行信道,则系统的误码率 R_{BE} 可表示为^[12]

$$R_{BE} \approx \frac{2(K-1)}{R_H K} \sum_{i=1}^{R_H} Q \left[\sqrt{\frac{3\lambda_i R_{SN} \log_2 K}{(K-1)(2K-1)}} \right], \quad (8)$$

式中 R_H 为信道矩阵 \mathbf{H} 的秩, λ_i 为 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的第 i 个特征值(\mathbf{H}^H 为矩阵 \mathbf{H} 的共轭转置矩阵), R_{SN} 为每个链路发送端的信噪比, $Q(u) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_u^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 。

3 角度优化分析

以 9×9 的 VLC-MIMO 系统为例,在理论分析 VLC 系统通信性能的基础上,具体描述了如何通过优化收发阵元法向量倾斜角度来减小空间信号干扰。为此,收发阵元的分布方式均采用 3×3 的方阵分布,阵元间距均为 0.5 m 等距排布(图 2)。在此阵列的基础上,通过优化阵元法向量倾斜角度来减小空间信号间的干扰,并验证了优化阵元法向量倾斜角度对减小信号间干扰的有效性。

图 3(a)为系统空间模型,当收发阵列尺寸减小、传输距离增大时,信号间的干扰增大,信道相关性增大。图 3(b)为接收平面的光斑分布,在接收平面上,LED 的光斑严重重叠,信号间干扰非常强。因此,在线性检

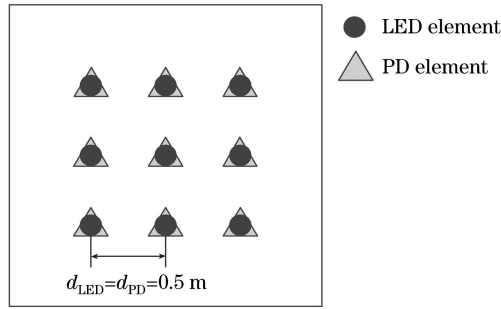


图 2 LED 阵元和 PD 阵元分布

Fig. 2 Distribution of LED array and PD array

测条件下,可通过优化阵元法向量倾斜角度来减小信号间的干扰,使信道矩阵具备稀疏结构。图 3(c)为优化后的光斑分布,由图可见,通过优化 LED 法向量倾斜角度,可大幅降低光斑间的叠加程度,从而减小信号间的干扰;此外,还可以通过优化 PD 法向量的倾斜角度来改变链路增益 h_{ij} ,构造稀疏信道矩阵,从而减小信号间的干扰。

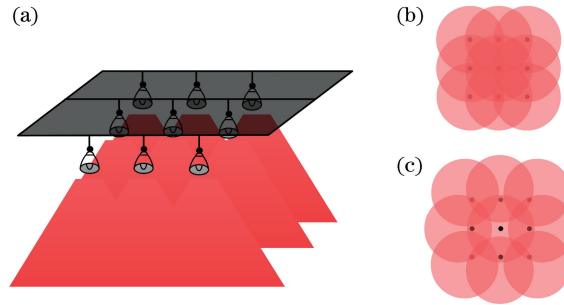


图 3 (a)系统空间模型;(b)接收平面的光斑分布;(c)优化后的光斑分布

Fig. 3 (a) Model of system space; (b) facula distribution on receiving plane; (c) facula distribution after optimization

由矩阵论可知,稀疏矩阵是指矩阵中数值为 0 的元素数目远多于非 0 元素数目的矩阵。对于 VLC-MIMO 系统的信道矩阵,假设矩阵每一行的不同元素表示每个 PD 接收到的不同 LED 信号的链路增益,矩阵每一列的不同元素表示每个 LED 发送的信号到达不同 PD 的链路增益。通过矩阵的初等变换,使等效信道矩阵中较大的元素集中在主对角线附近,此时可认为 PD 阵元与 LED 阵元一一对应,从而简化了信道问题的分析。在此基础上,进一步通过角度优化使等效信道矩阵具有稀疏结构,即每一个 PD 接收到的干扰信号个数非常少,则可很好地减小信号间的干扰,从而使系统的通信性能达到最佳。

针对 VLC 系统,法向量倾斜角度的优化存在两个选择对象,分别是 LED 和 PD。从工作原理出发,LED 和 PD 的法向量倾斜存在等价的物理意义,所以倾斜对象的选择需要进一步确定。分别倾斜接收端和发送端的法向量角度,比较各自优化时 ISR 的变化,从而确定所描述系统的优化对象。优化对象选择的具体方法是固定 LED(或 PD)的法向量方向,优化 PD(或 LED)的法向量倾斜角度,即 PD 阵列(或 LED 阵列)中心阵元不优化,其他 8 个阵元的优化方向是阵列中心到各个阵元的连线方向,即 $0 \leq \Delta\varphi_i \leq \varphi_c$ (或 $0 \leq \Delta\theta_j \leq \theta_{\max}$)。结合(7)式,具体优化步骤如下:

- 1) 将通信系统拆分为 LED 阵元和 PD 阵元两个对象,针对不同对象分别求解;
- 2) 优化 LED 阵元的目标函数为

$$\begin{cases} \min_{\Delta\theta_j} \left[\max_{i=1}^N \left(\eta_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^M h_{ij}^2}{h_{ii}^2} \right) \right], \\ -\theta_{\max} \leq \Delta\theta_j \leq \theta_{\max}, \Delta\varphi_i = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $h_{ij} = \frac{(m+1)S}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m(\theta_{ij} + \Delta\theta_j) \cos^k(\varphi_{ij});$

3) 将阵元根据空间特性分为中心阵元、顶点阵元以及边阵元 3 类, 倾斜角度分别为 β_0 、 β_1 和 β_2 , 取 $\beta_0 = \Delta\theta_5$ 、 $\beta_1 = \Delta\theta_1 = \Delta\theta_3 = \Delta\theta_7 = \Delta\theta_9$ 、 $\beta_2 = \Delta\theta_2 = \Delta\theta_4 = \Delta\theta_6 = \Delta\theta_8$, 再令 $\beta_0 = 0$, 以降低求解复杂度;

4) 确定每一类阵元的方位角, 即确定仰角的优化方向, 此时有

$$\begin{cases} \min_{\beta_1, \beta_2} \left[\max_{i=1}^N \left(\eta_i = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^M h_{ij}^2}{h_{ii}^2} \right) \right]; \\ 0 \leq \beta_1, \beta_2 \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

5) 在仰角变化范围内, 利用 Matlab 优化工具箱中的最大最小化函数 fminimax 求得最佳值 η_{opt} 以及对应的 $\beta_{1\text{opt}}$ 和 $\beta_{2\text{opt}}$;

6) 优化 PD 阵元的目标函数可表示为

$$\begin{cases} \min_{\Delta\varphi_i} \left[\max_{i=1}^N \left(\eta_i = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^M h_{ij}^2}{h_{ii}^2} \right) \right], \\ -\psi_c \leq \Delta\varphi_i \leq \psi_c, \Delta\theta_j = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 $h_{ij} = \frac{(m+1)S}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m(\theta_{ij}) \cos^k(\varphi_{ij} + \Delta\varphi_i)$;

7) 重复步骤 3)~5), 同样得到优化 PD 阵元的 η_{opt} 、 $\beta_{1\text{opt}}$ 和 $\beta_{2\text{opt}}$;

8) 比较步骤 5) 和步骤 7), 得到两个 η_{opt} , 从而确定最佳优化对象和仰角的最佳值。

图 4、5 分别为优化 PD 和 LED 法向量倾斜角度(顶点阵元倾斜角度 β_1 和边上阵元倾斜角度 β_2) 所对应系统最大 ISR 的变化情况。图 4 为优化 PD 法向量的倾斜角度, 通信系统的最大 ISR 始终不变, 这是因为在 PD 阵列中, 中心阵元接收信号的 ISR 最大, 而优化 PD 法向量的倾斜角度无法改变中心 PD 阵元所接收到的 ISR; 图 5 为优化 LED 法向量的倾斜角度, 通信系统的最大 ISR 有明显的变化。通过以上比较, 可确定优化对象应为 LED 的法向量倾斜角度。

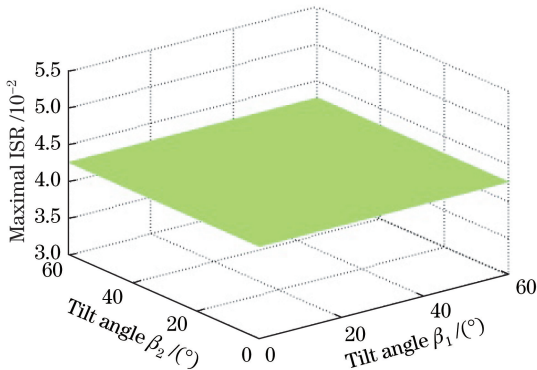


图 4 优化 PD 法向量方向时最大 ISR 的分布
Fig. 4 Distribution of maximal ISR when normal vector of PD is optimized

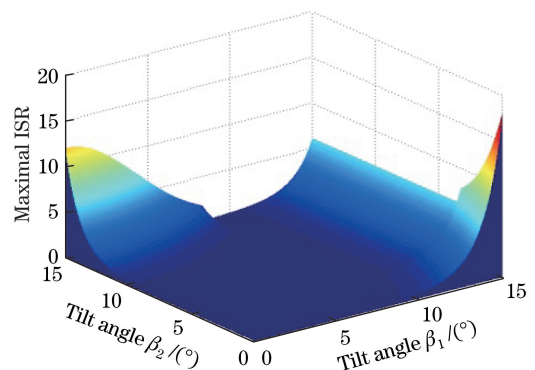


图 5 优化 LED 法向量方向时最大 ISR 的分布
Fig. 5 Distribution of maximal ISR when normal vector of LED is optimized

通过 Matlab 仿真得到的各个 LED 法向量倾斜角度的最优值如表 1 所示。表中的方位角 α 和倾斜角 β 如图 6 所示 ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$, $0^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$), LED 的法向量方向可由 α 、 β 共同确定。

4 仿真结果

仿真条件设置为: LED 的半功率角为 60° , LED 的最大发光角 $\theta_{\max} = 15^\circ$, PD 的视场角为 60° , 系统传输距离为 2.25 m, PD 的物理有效面积 $S = 1 \text{ mm}^2$, 发送端光学系统的角度放大率为 $1/14$, 接收端光学系统的角度放大率为 2, PAM 的调制阶数 $K = 4$ 。

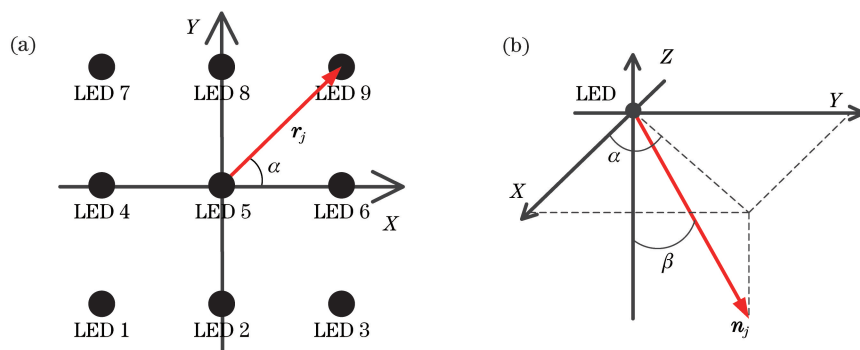


图 6 (a) LED 的位置向量;(b) LED 的法向量

Fig. 6 (a) Position vector of LED; (b) normal vector of LED

表 1 LEDs 法向量倾斜角度的最优分布

Table 1 Optimal distribution of normal vector tilting angles of LEDs

LED No.	Azimuth angle $\alpha / (^{\circ})$	Tilt angle $\beta / (^{\circ})$
1	225	3.0986
2	270	3.4977
3	315	3.0986
4	180	3.4977
5	—	0
6	0	3.4977
7	135	3.0986
8	90	3.4977
9	45	3.0986

所设 PD 的有效面积为 1 mm^2 , 通信系统的传输距离为 2.25 m , 由(6)式可知, 以上参数会使得信道增益非常小, 致使优化后的信道增益达到 10^{-4} 量级, 这时需要 80 dB 左右的信噪比来抵消信道衰减^[7]。因此, 当发送端信噪比 $R_{\text{SN}} = 110 \text{ dB}$ 时, 接收端的信噪比也仅为 30 dB 。

为了清晰反映各个 LED 信号间的干扰, 对 LED 阵列在接收平面的空间光照度分布进行的模拟仿真, 可得如图 7 所示的光照度分布图。由图可见, 信号间存在比较大的干扰, 通过计算可得此时最大 ISR 为 0.0425 。

当 LED 法向量倾斜角度均取最优值时, 空间光照度分布如图 8 所示, 与图 7 相比, 可以明显看出信号间干扰减小, 此时最大 ISR 降至 0.0175 , 性能提高了 2 倍以上。从照明角度考虑, 在满足照明要求(光照度在 $300 \sim 1500 \text{ lx}$)的情况下, 图 8 比图 7 的照明覆盖范围更广, 照度分布更均匀。

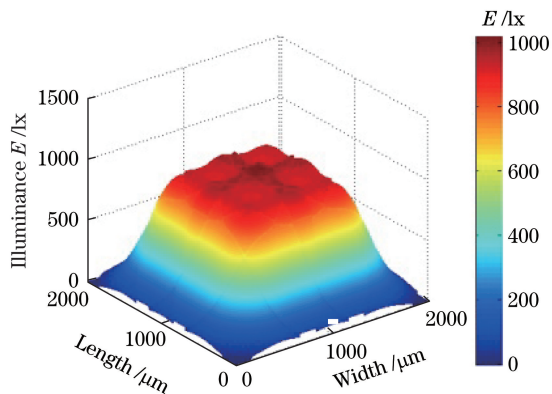


图 7 优化前接受平面的光照度分布
Fig. 7 Illumination distribution on receiving plane before optimization

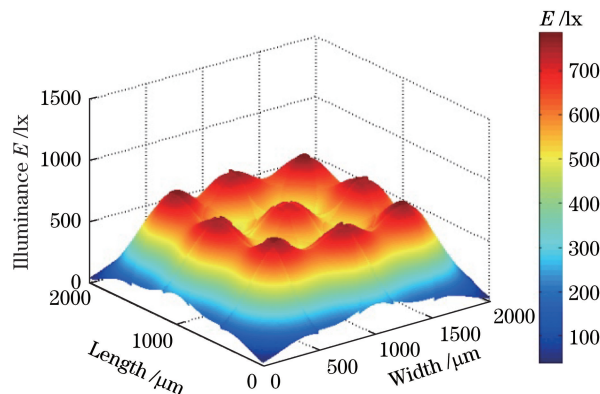


图 8 优化后接受平面的光照度分布
Fig. 8 Illumination distribution on receiving plane after optimization

在所建立的系统模型下,对不采用任何处理方式、采用 LB 以及采用上述优化方案 3 种情况进行理论仿真,得到的误码率分布如图 9 所示。由图可见,法向量倾斜角度取最佳值时的误码率比文献[4]中的 LB 方法的误码率降低了 42 dB。

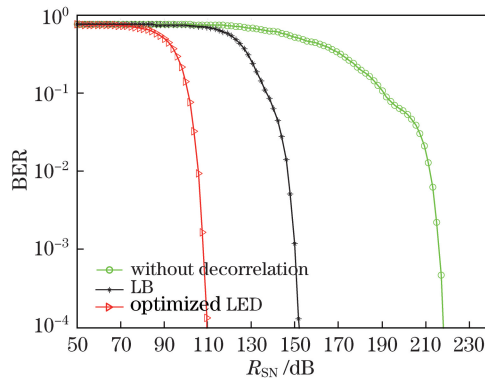


图 9 误码率比较

Fig. 9 Comparison of BER

5 结 论

针对 VLC-MIMO 通信系统中信道相关性较大的问题,以最小化最大 ISR 为优化目标,采用优化法向量倾斜角度的方法充分减小信道的相关性,信道矩阵趋于对角矩阵,从而提高了 MIMO 信道的复用增益。

然而,因阵列没有添加光学系统,致使尺寸过大而无法达到微阵列的要求,因此今后的研究方向可将所提方法应用到微阵列结构中。此外,所采用的解相关手段局限于阵列的物理空间结构,而没有同电学解相关手段相结合,因此下一步可联合采用电学手段来进一步减小信道相关性。

参 考 文 献

- [1] Gfeller F R, Bapst U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(11): 1474-1486.
- [2] Hanzo L, Haas H, Imre S, *et al.* Wireless myths, realities, and futures: From 3G/4G to optical and quantum wireless[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100: 1853-1888.
- [3] Jia Kejun, Hao Li, Yu Caihong. Modeling of multipath channel and performance analysis of MIMO-ACO-OFDM system for indoor visible light communications[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0706005.
贾科军, 郝 莉, 余彩虹. 室内可见光通信多径信道建模及 MIMO-ACO-OFDM 系统性能分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0706005.
- [4] Fu Hongshuang, Zhu Yijun. Analysis of the correlation of optical multiple-input multiple-output channel using white LED lighting indoor line of sight environments[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906002.
付红双, 朱义君. 室内直射环境下白光 LED 的多输入多输出信道相关性分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906002.
- [5] 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.
- [6] Chen T, Liu L, Tu B, *et al.* High-spatial-diversity imaging receiver using fisheye lens for indoor MIMO VLCs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(22): 2260-2263.
- [7] Fath T, Haas H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(61): 733-742.
- [8] 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.
- [9] Nuwanpriya A, Ho S W, Chen C S. Angle diversity receiver for indoor MIMO visible light communications[C].

Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014: 14998930.

- [10] Saff E B, Kuijlaars A B J. Distributing many points on a sphere[J]. The Mathematical Intelligencer, 1997, 19(1): 5-11.
- [11] Zhang Xuebin, Tang Yi, Cui Lu, *et al.* Design of a spherical optical zoom antenna using for mobile visible light communication[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0106004.
张学彬, 唐 义, 崔 璐, 等. 用于移动可见光通信的球面型可变焦光学接收天线[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0106004.
- [12] Proakis J G. Digital communications[M]. 5th ed. New York: Wiley, 2008.