

室内直射环境下白光 LED 的多输入多输出 信道相关性分析

付红双 朱义君

(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 可见光通信是一种工作在可见光谱范围内的新兴高速短距离通信技术。将白光 LED 作为光源的光无线网络中,通常使用强度调制/直接检测方式,忽略了信号的频率和相位信息,导致光无线信道的空间相关性比传统无线信道大得多。分析了影响光多输入多输出(MIMO)信道相关性的因素,并通过仿真验证了在特定条件下各因素对信道相关性产生影响的方式。在特定的场景内,根据信噪比和信道相关性的共同影响获得了最佳的收发端参数设置,从而得到了最佳的误码率性能。

关键词 光通信;信道相关;多输入多输出;白光 LED

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906002

Analysis of the Correlation of Optical Multiple-Input Multiple-Output Channel Using White LED Lighting in Indoor Line of Sight Environments

Fu Hongshuang Zhu Yijun

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

Abstract Visible light communication is a burgeoning technology that uses the visible spectrum for high-speed short-range data communications. Intensity modulation/direct detection is predominantly used in optical wireless in which white LEDs serve as transmitters, neglecting frequency and phase of signal. Therefore correlation in optical channel is much larger than that in radio frequency channel. The factors which influence the correlation of the optical multiple-input multiple-output (MIMO) channel are analyzed, and the way these factors influence the channel correlation is validated through simulation. According to the mutual influence of signal-to-noise rate and channel correlation, optimal parameters can be obtained in specific scene for optimal bit error rate.

Key words optical communications; channel correlation; multiple-input multiple-output; white LED

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 200.2605

1 引 言

在即将步入的 4G 通信时代,高速信息传输将在人们的生活中占有越来越重要的地位。由于可见光拥有超过 300 THz 的超宽频谱,可见光通信(VLC)是一种非常有潜质的高速无线通信方

案^[1-2],LED 工艺技术的发展使得 VLC 受到了广泛的关注。VLC 不占用无线电的频谱资源,无需申请频段,没有电磁干扰,特别适用于一些不适合射频无线传输的场合,例如机舱、矿下和医院的某些科室等。而且由于光线的易遮挡特性,两个房间内的信

收稿日期: 2013-02-25; 收到修改稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家 863 计划(2013AA013603)

作者简介: 付红双(1989—),女,硕士研究生,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: fuhs2011@sina.com

导师简介: 朱义君(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事可见光通信和通信中的信号处理等方面的研究。

E-mail: yijunzhu1976@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

号不会产生干扰,空间可复用性强,通信安全性好。另外,VLC可以在照明的同时实现通信,不用另外添加设备,建网成本小。

但是由于LED的调制带宽有限(一般值为35 MHz),单个LED实现高速通信还比较困难,自然地,多输入多输出(MIMO)技术被应用到VLC当中,在不增加频带的情况下用来实现高速的数据传输。文献[3]推导了使用激光作为发送光源时,MIMO光通信的信道容量。为了提高频带利用率,针对MIMO系统的强度叠加编码和比特交织编码被相继提出^[4-6],文献[7]中介绍了一种修正的奇异值分解(SVD)信道估计方法,来对MIMO信道进行更准确的估计。对于信道相关性的讨论,Mesleh等^[8]只给出了和信道相关性有关的两个因素:高度和半功率角,并没有进行深入地分析。为了克服MIMO信道的相关性,文献[9]提出了一种基于像素的成像MIMO模型,接收端利用成像透镜和CCD进行检测,在通信距离为2 m时,该模型的频带利用率可以达到1.7 kb/(s·Hz)。

用白光LED作为光源的光无线网络中,通常采

用强度调制/直接检测(IM/DD)调制解调方式,忽略了信号的频率和相位信息,导致光MIMO信道的空间相关性比传统无线信道大得多。所以对影响光无线信道相关性的因素进行分析,进而对收发端参数设置进行优化来减少或者完全消除信道的相关性,具有重要意义。而目前还没有文献针对信道相关性进行详尽地分析。由于信道矩阵的条件数表征了信道相关性的强弱,所以本文根据朗伯辐射模型,推导出各因素与信道矩阵条件数的关系,进而将通信和照明相结合,对参数进行优化。

2 系统模型

假设一个有 N_t 个发送端和 N_r 个接收端的光MIMO系统,系统框图如图1所示。首先,信息比特经过串并转换(S/P)生成 N_t 路数据流后分别对 N_t 个LED进行非归零开关键控(NRZ-OOK)调制。经过光信道后, N_r 个光电探测器(PD)将光信号转换成电信号,并且在此加入了噪声的影响,在迫零(ZF)检测后进行并串转换(P/S),进而恢复出原始的信息比特。

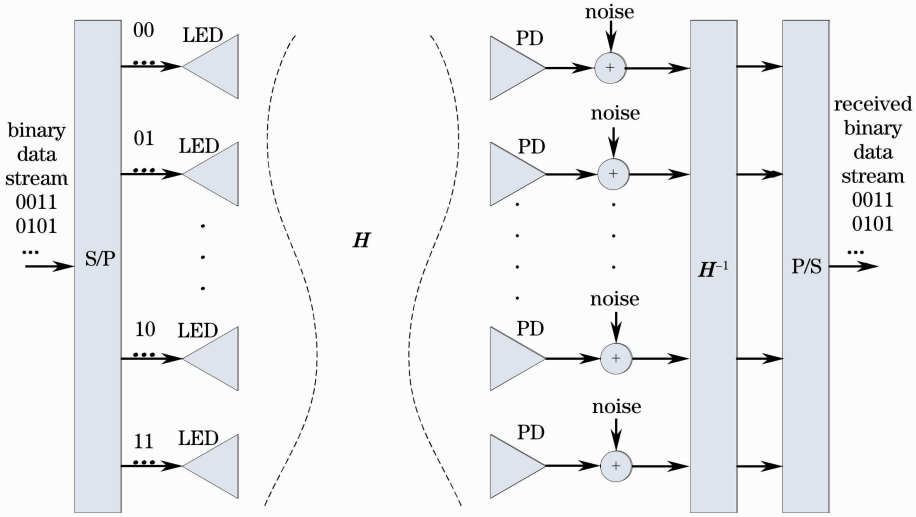


图1 光MIMO系统示意图

Fig. 1 Sketch map of optical MIMO system

信道矩阵 \mathbf{H} 中的元素是发送端和接收端之间的直流增益,第 j 个发送端到第 i 个接收端的直流增益为^[10]

$$\mathbf{H}_{i,j} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_{ij}^2} \cos^m \phi T(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (1)$$

式中 m 是LED的发光阶数,取决于LED的半功率角 $\phi_{1/2}$, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$ 。 A 是PD的物理面积, D_{ij} 是第 j 个发送端到第 i 个接收端之间的距离,

ϕ 是LED的发光角, ψ 是接收端光线入射角, $T(\psi)$ 是光学滤波器的增益, ψ_c 是接收器的视场角(FOV), $g(\psi)$ 是聚光器的增益,其表达式为

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

式中 n 表示聚光器的折射系数。

由于调制 LED 的信号只能是单极性的,下面对

$$P_e = \frac{M-2}{M} P\left(|n| > \frac{d}{2}\right) + \frac{2}{M} \frac{1}{2} P\left(|n| > \frac{d}{2}\right) = \left(1 - \frac{1}{M}\right) P\left(|n| > \frac{d}{2}\right) = \left(1 - \frac{1}{M}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right), \quad (3)$$

式中 $P(\cdot)$ 指事件发生的概率, σ_n 指噪声功率, $\operatorname{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp(-t^2) dt$ 。

信号功率 P_s 可以表示成

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (id) = \frac{(M-1)(2M-1)}{6} d^2, \quad (4)$$

由此可知

$$d^2 = \frac{6P_s}{(M-1)(2M-1)}. \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式得到满足 LED 单极性的要求的误码率

$$P_e = \left(1 - \frac{1}{M}\right) \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{3}{4(M-1)(2M-1)}} \rho\right], \quad (6)$$

式中 ρ 代表接收端的平均信噪比(SNR, R_{SN})。

MIMO 系统接收信号矢量 \mathbf{y} 可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{H} 代表信道矩阵, \mathbf{x} 代表发送信号矢量, \mathbf{n} 是 N_r 维高斯噪声。使用 ZF 准则检测方法,得

$$\mathbf{H}^{-1}\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{H}^{-1}\mathbf{n}. \quad (8)$$

由矩阵条件数知识可得 ZF 检测前的信噪比和 ZF 检测后的信噪比关系为

$$\frac{\|\mathbf{x}\|_{\text{F}}^2}{\|\mathbf{H}^{-1}\mathbf{n}\|_{\text{F}}^2} \geq \frac{1}{\operatorname{cond}^2(\mathbf{H})} \frac{\|\mathbf{H}\mathbf{x}\|_{\text{F}}^2}{\|\mathbf{n}\|_{\text{F}}^2}. \quad (9)$$

式中 $\operatorname{cond}(\cdot)$ 为矩阵的条件数, $\operatorname{cond}(\mathbf{H}) = \|\mathbf{H}\|_{\text{F}}^2 \cdot \|\mathbf{H}^{-1}\|_{\text{F}}^2$, $\|\cdot\|_{\text{F}}^2$ 为向量的 2 范数。

由此可见,采用 ZF 检测的缺点是放大了噪声,降低了信噪比。条件数越大,信噪比降低的越多。结合(6)、(9)式可以得到 MIMO 系统采用 ZF 准则检测的误码率满足

$$P_e \leq \left(1 - \frac{1}{M}\right) \times \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{3}{4(M-1)(2M-1)}} \rho / \operatorname{cond}^2(\mathbf{H})\right]. \quad (10)$$

单极性多进制幅度键控(MASK)的误码率(BER)性能进行分析。假设 M 阶单极性信号的幅度分别为 $0, d, 2d, \dots, (M-1)d$, 则误码率为

3 空间相关性分析

在传统的无线信道中,通常两天线之间的距离大于半波长,即可认为两天线的信号是不相关的。由于在 VLC 中通常采用 IM/DD 方式,忽略了信号的频率和相位信息,所以光无线信道随天线位置缓慢变化。空域的相关性会使独立信道的个数减少,甚至在极限情况下,即所有的信道都相关,系统的信道容量降到单输入单输出(SISO)的容量水平^[11]。

信道相关是造成系统误码率性能下降的一个重要因素,而信道矩阵的条件数直接反映了信道的相关程度,信道矩阵的条件数越大,系统对噪声越敏感,即在相同的信噪比条件下,误码率性能越差。当条件数为 1 时, MIMO 信道最为理想,各子信道间没有任何相关性,此时可以看作是各独立信道进行并行传输。所以下面就以信道矩阵的条件数为指标对信道空间相关性进行分析。

为了分析方便并且不失一般性,考虑如图 2 所示的 2×2 MIMO 系统模型,两个 LED 之间的距离为 D_t , 两个 PD 之间的距离为 D_r , 接收端中心偏离发送端中心的角为 α , 两个发送端与两个接收端的距离分别为 D_1, D_2, D_3 和 D_4 , 发送平面与接收平

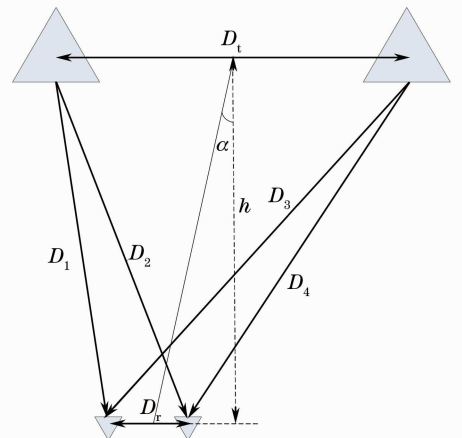


图 2 2×2 通信模型

Fig. 2 2×2 communication model

面之间的高度差为 h 。

则由(1)式可得归一化的相关信道矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^{m+3} \\ \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{m+3} & \left(\frac{D_1}{D_4}\right)^{m+3} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

在此假设 PD 的 FOV 为 90° , LED 的方向垂直向下, PD 的方向垂直向上, 故发射角和接收角相同。

由图 2 所示的 2×2 通信模型中的几何关系可以得到

$$D_1 = \sqrt{\left[\left(\frac{D_t - D_r}{2}\right) - h \tan \alpha\right]^2 + h^2}, \quad (12)$$

$$D_2 = \sqrt{\left[\left(\frac{D_t + D_r}{2}\right) - h \tan \alpha\right]^2 + h^2}, \quad (13)$$

$$D_3 = \sqrt{\left[\left(\frac{D_t + D_r}{2}\right) + h \tan \alpha\right]^2 + h^2}, \quad (14)$$

$$D_4 = \sqrt{\left[\left(\frac{D_t - D_r}{2}\right) + h \tan \alpha\right]^2 + h^2}, \quad (15)$$

$$\mathbf{H}^{-1} = \frac{1}{\left(\frac{D_1}{D_4}\right)^{m+3} - \left(\frac{D_1}{D_2 D_3}\right)^{m+3}} \times \begin{bmatrix} \left(\frac{D_1}{D_4}\right)^{m+3} & -\left(\frac{D_1}{D_3}\right)^{m+3} \\ -\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{m+3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

因此信道矩阵的条件数为

$$\text{cond}(\mathbf{H}) = \|\mathbf{H}\|_{\text{F}}^2 \cdot \|\mathbf{H}^{-1}\|_{\text{F}}^2 = \frac{1 + \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{2(m+3)} + \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^{2(m+3)} + \left(\frac{D_1}{D_4}\right)^{2(m+3)}}{\left(\frac{D_1}{D_4}\right)^{m+3} - \left(\frac{D_1}{D_2 D_3}\right)^{m+3}}. \quad (17)$$

由(11)~(17)式可知, 发送单元之间的距离、接收单元之间的距离、LED 的半功率角、发送平面和接收平面之间的距离(即高度)和接收端偏离中心的程度都会对信道矩阵的条件数产生影响。

4 仿真分析

仿真中都假设在图 3 所示的房间内(房间大小为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$), LED 阵列距离接收平面 1.75 m , 接收平面距离地面 0.75 m , 光源阵列的中心位于天花板的中心位置, 接收端能够获得全部的信道信息。采用蒙特卡罗仿真, 有 10^7 个发送的比特数据。

文献[12]指出在光信道的噪声中, 散粒噪声占有主要的部分, 且按照文献[12]中信噪比分析方法, 信噪比的值可表示为

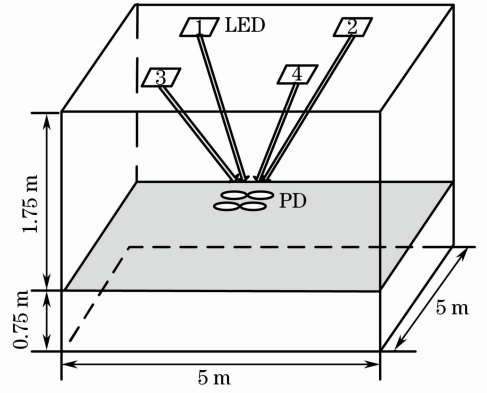


图 3 室内 VLC 收发端布局示意图

Fig. 3 Layout of indoor VLC transceiver

$$R_{\text{SN}} = \left[\frac{I_0 A}{D^2} \cos^m \phi \cos \psi \beta \gamma g(\psi) \right]^2 / N_0 B, \quad (18)$$

式中 I_0 为 LED 中心发光强度, N_0 为噪声的功率谱密度, B 为噪声带宽, β 是计算光功率所需的转换因子, 表示每流明的光强度代表的光功率, γ 是 PD 光电转换效率。

在没有特殊说明时均采用如表 1 所示的参数设置。

表 1 参数设置

Table 1 Parameters of simulation

Parameter	Value
Height, h / m	1.75
Distance between LEDs, D_t / m	2.5
Conversion factor, β	2.1×10^{-3}
Maximum luminous intensity, I_0 / cd	0.73
Semiangle of LED, $\phi_{1/2}$ / ($^\circ$)	70
Bandwidth of noise, B / MHz	20
Noise power spectral density, N_0 / (A^2/Hz)	10^{-22}
Field of view, ψ_c / ($^\circ$)	90
Receiver's area, A / cm^2	1
Refractive index, n	1.5
Gain of optical filter, $T(\psi)$	1
Photoelectric conversion efficiency of PD, γ / (A/W)	0.28
Distance between PDs, D_r / cm	10

4.1 收发端参数设置对信道矩阵条件数的影响

各因素对信道相关性的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出, 信道矩阵条件数, 即信道相关性, 随发送单元之间的距离、接收单元之间的距离增大而减小, 随着收发平面的高度差、接收端的偏移角度和半功率角的增大而增大, 这与理论分析相符。

4.2 综合信噪比和信道相关性对性能的影响

在 4×4 的光 MIMO 模型下采用 ZF 准则检测可以得到以下仿真结果。

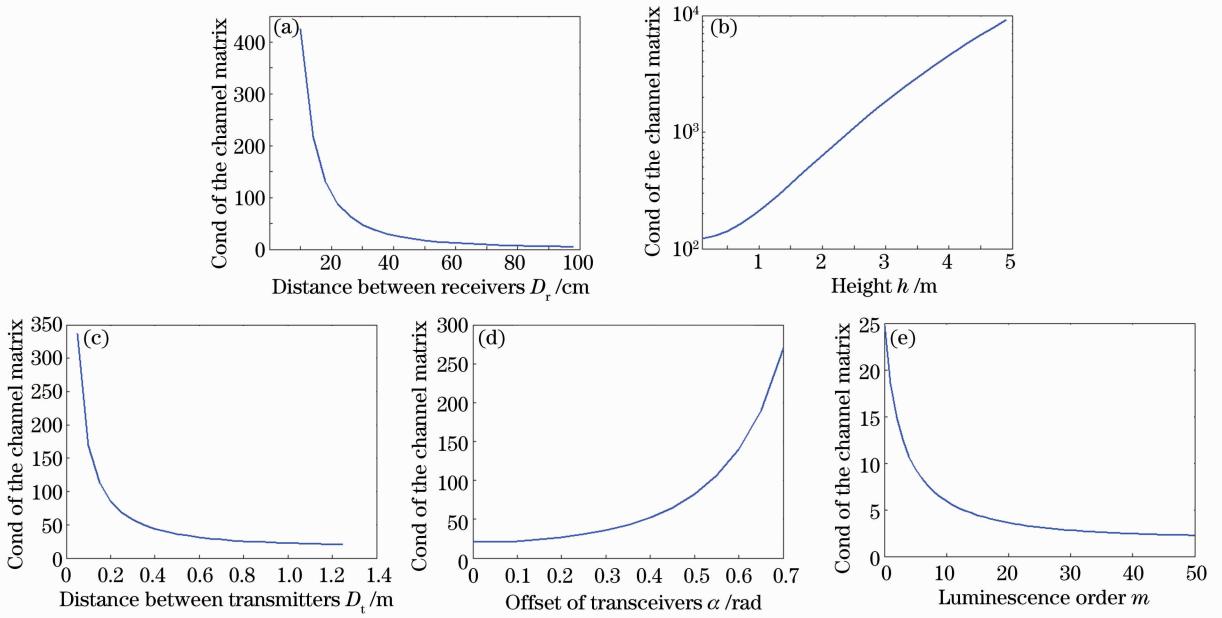


图 4 各因素对信道相关性的影响。(a)接收单元距离;(b)高度;(c)发送单元距离;(d)接收端偏移角度;(e) m 值
Fig.4 Effects of factors on channel correlation. (a) Distance between receivers; (b) height; (c) distance between transmitters; (d) offset of transceivers; (e) m

图 5 给出了接收单元之间的距离对系统性能的影响。从图中可以看出,随着接收单元距离的增加,信道相关性降低,系统性能变好。当接收单元的距离大于 6 cm 时,系统误码率小于 10^{-3} ,此时可以满足基本的通信需求。

以得知,最佳高度随半功率角的增大而减少,如图 7 所示。

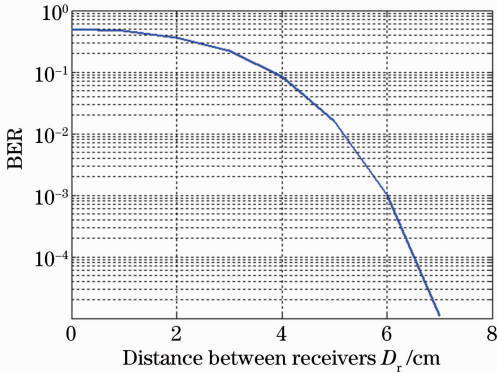


图 5 接收单元之间的距离对误码率的影响
Fig.5 Effect of the distance between transceivers on BER

图 6 为收发端位置都固定时(接收端中心位于发送端中心的正下方,即偏移角度为零),发送平面相对接收平面的高度对误码率性能的影响。高度较低时,由于接收端光功率较小,导致信噪比较低,系统性能较差;高度较高时,信道相关性的增大和信噪比的减小共同作用使得误码率性能下降;故存在使系统性能达到最佳的高度值,即最佳高度值,从图 6 可以看出最佳高度值约在 1 m 处。而且由分析可

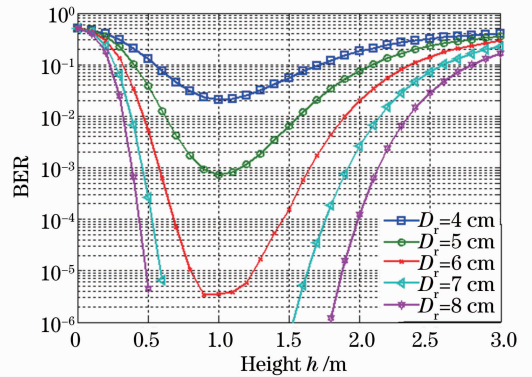


图 6 收发平面之间的高度对误码率性能的影响
Fig.6 Effect of the height between transceivers on BER

图 8 中给出了在发送端位置固定时,系统误码率随接收端位置变化的曲线,图中曲线上的数字代表了接收端在该曲线范围内时的最大误码率。不难看出,接收端越是偏离发送阵列的中心位置,系统的误码率越高,这是因为接收端的中心位置越是偏离发送阵列的中心位置,信道的相关性越高且信噪比越低,故误码率性能越差。从图 8 可以看出,为了完成通信的基本功能,要求误码率小于 10^{-3} ,接收端位置不能超出图中的浅蓝色区域,即不能超出图中标有 10^{-3} 的曲线范围。

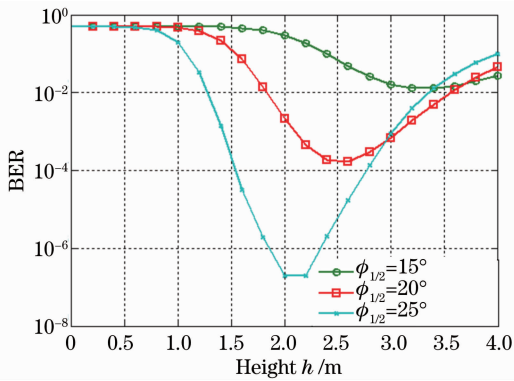


图 7 半功率角对最佳高度值的影响

Fig. 7 Effect of semiangle of LEDs on optimal height

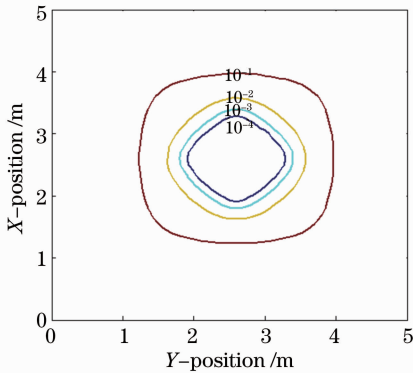


图 8 接收端相对位置变化对系统性能的影响

Fig. 8 Effect of relative position of transceivers on the system performance

5 结 论

得到了光 MIMO 信道的误码率和信道矩阵条件数的关系,指出了光信道较传统的无线信道空间相关性较大的特点,根据 LED 朗伯辐射模型分析了影响光 MIMO 信道相关性的主要因素,发现减小发送端之间的距离、减小接收端之间的距离、增大半功率角、增加高度或者增加接收端偏离中心的程度都可以增加信道矩阵的相关性,使信道矩阵的条件数增大。通过 Matlab 仿真对上述分析进行了验证,得到了相同的结果。当然,在实际系统实现时,除了要考虑参数设置对信道相关性的影响之外,还要考虑这些参数对信噪比分布的影响。适当地优化模型的参数设置并利用光信道信噪比较高的特点可以实现较高的数据传输速率。接下来的工作重点是在此研

究基础上进一步拓展光 MIMO 的适用范围。

参 考 文 献

- 1 J M Khan, J R Barry. Wireless infrared communications [C]. Proceedings of IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- 2 D C O'Brien, L B Zeng, H L Minh, *et al.*. Visible light communications: challenges and possibilities [C]. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. 1-5.
- 3 Wang Huiqin, Cao Minghua, Chen Haiyan, *et al.*. Channel capacity of optical multiple input multiple output system without background noise [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306003.
王惠琴,曹明华,陈海燕,等.无背景噪声时光多输入多输出系统的信道容量[J].光学学报,2012,32(3):0306003.
- 4 Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Meng Wen, *et al.*. Analysis of free space optical multiple input multiple output communication based on intensity superposition coding at different modulations [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206001.
赵顾颢,赵尚弘,蒙文,等.多调制方式下的强度叠加编码多发多收大气光通信系统性能分析[J].光学学报,2012,32(2):0206001.
- 5 Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Free space optical multiple-input multiple-output communication based on intensity superposition code [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706002.
赵顾颢,赵尚弘,李勇军,等.基于强度叠加编码的空间光多输入多输出通信[J].光学学报,2011,31(7):0706002.
- 6 Hu Hao, Wang Hongxing, Xu Jianwu, *et al.*. Bit interleaved product coded pulse position modulation with iterative demodulation for free-space optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806004.
胡昊,王红星,徐建武,等.无线光通信中一种迭代解调的比特交织乘积编码脉冲位置调制[J].光学学报,2011,31(8):0806004.
- 7 Xu Jianwu, Wang Hongxing, Hu Hao, *et al.*. Modified adaptive SVD estimating algorithm about MIMO-FSO channels [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1105001.
徐建武,王红星,胡昊,等.修正的 MIMO-FSO 信道自适应 SVD 估计算法[J].中国激光,2011,38(11):1105001.
- 8 R Mesleh, H Elgala, H Hass. Optical spatial modulation [J]. J Optical Communication Networks, 2011, 3(3): 234-244.
- 9 S Hranilovic, F R Kschischang. A pixelated MIMO wireless optical communication system [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2006, 12(4): 859-874.
- 10 T Komine, M Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- 11 Huang Tao, Yuan Weichao, Yang Ruizhe, *et al.*. MIMO Technology and Application [M]. Beijing: China Machine Express, 2006.
黄韬,袁伟超,杨睿哲,等. MIMO 相关技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2006.
- 12 J Grubor, S Randel, K D Langer, *et al.*. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting [J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(24): 3883-3892.

栏目编辑:王晓球