

doi:10.3788/gzxb20134211.1277

# 基于 BD 预编码的多用户 MIMO 室内可见光通信系统

洪阳<sup>1</sup>, 陈健<sup>1</sup>, 王子雄<sup>2</sup>

(1 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

(2 香港理工大学 电机工程学系, 香港)

**摘要:**针对多用户室内可见光系统,提出了基于预编码算法的多用户多入多出系统模型,通过对发送信号的预处理,在发送端将多用户干扰消除,从而有效降低用户终端的复杂度和功耗.基于  $4 \times [2, 2]$  的室内多用户多入多出可见光通信系统,分析了块对角化预编码算法在室内可见光系统中的局限,并提出了相应的解决方案,即同一用户终端的不同光接收机采用不同的视场角.分析了用户终端的位置对系统信噪比、误码率性能的影响.数值模拟结果表明,当单个发光二极管芯片的发射功率为 10 mW 时,在室内大部分区域,系统在 100 Mb/s 的传输速率下能够达到  $10^{-6}$  左右的误码率性能.

**关键词:**可见光通信;白光二极管;多用户多入多出;块对角化预编码;视场角

**中图分类号:** TN929.1; TN911.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2013)11-1277-6

## Multi-user MIMO Indoor Visible Light Communication System Based on BD Precoding Algorithm

HONG Yang<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, WANG Zi-xiong<sup>2</sup>

(1 College of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(2 Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

**Abstract:** A precoding multi-user MIMO model was proposed for the multi-user indoor visible light communication system. The multi-user interference was eliminated by data pre-processing in transmitter, leading to the reduction of complexity and power consumption of terminals in the VLC system. Based on a  $4 \times [2, 2]$  indoor MU-MIMO VLC system, the limitation of block diagonalization precoding algorithm in VLC system was figured out. The corresponding solution by utilizing receivers with different field of view was analyzed. The impact of the terminals' location to BER and SNR performances of the proposed system was also investigated. Based on the numerical results of the proposed indoor VLC system, the terminals can achieve 100 Mb/s at a BER of  $10^{-6}$  in the most indoor area when single LED chip's power is 10 mW.

**Key words:** Visible light communication; White light-emitting diode; Multi-user MIMO; Block diagonalization precoding; Field of view

## 0 引言

与传统的照明设备相比,白光二极管(White Light-emitting Diode, WLED)具有功耗低、光电转

换效率高、使用寿命长等优点,被广泛地认为是下一代绿色照明产品<sup>[1-6]</sup>.可见光通信(Visible Light Communication, VLC)是一种将照明与数据通信相结合的无线光通信技术.目前,可见光通信的主要挑

基金项目:国家自然科学基金(No. 61271239)资助

第一作者:洪阳(1989-),男,硕士,主要研究方向为室内可见光通信技术. Email: hongyang\_njupt@139.com

导师(通讯作者):陈健(1967-),男,教授,博导,主要研究方向为光纤数字相干光通信及室内可见光通信. Email: chenjian@njupt.edu.cn

收稿日期:2013-03-25;录用日期:2013-07-19

战之一是其调制带宽较低,通常只有几 MHz<sup>[3]</sup>.但相关国际标准规定的照度使得接收到的信号具有较高的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)<sup>[4]</sup>.且对于典型室内环境而言,其照明通常由多个 LED 组成,因而利用多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术来实现高速可见光通信成为国内外学者的研究焦点<sup>[7-10]</sup>.目前,国内外的学者对于可见光 MIMO 系统已有了一定的研究.牛津大学的 Dominic C. O'Brien 课题组提出了非成像式和成像式两种可见光 MIMO 系统模型<sup>[7]</sup>,并通过实验研究了成像式 MIMO 系统的误码率(Bit Error Rate, BER)性能<sup>[8]</sup>.清华大学的徐正元课题组分析研究了成像光 MIMO 系统的容量<sup>[9]</sup>,复旦大学的迟楠课题组提出了一种基于副载波多路复用的 MISO-OFDM 系统,并分析了系统传输范围与 BER 的关系<sup>[10]</sup>.然而这些工作主要是讨论了系统中所有光接收机属于单个用户终端(单用户)的情形,对实际 VLC 通信系统而言,通常存在多个随机分布于室内的用户终端,每个终端均含有单个或多个光接

收机,与 LED 光源一起构成多用户 MIMO 可见光通信系统.

本文提出了预编码多用户室内可见光通信系统模型,能够有效降低用户终端的复杂度和功耗.分析了块对角化(Block Diagonalization, BD)预编码算法<sup>[11-12]</sup>在可见光系统中的局限并提出相应的解决方案,探讨了用户终端的位置对系统性能的影响.结果表明,该系统在室内 90% 以上区域均能达到较好的性能.

## 1 基于 BD 预编码的多用户 MIMO 室内可见光通信系统模型

图 1 为本文提出的基于 BD 预编码的多用户室内 VLC 系统模型,主要包含发送端、信道及用户终端三个组成部分.各用户终端的信息经过发送端的预处理后,由固定于天花板上 LED 阵列以可见光信号的形式发射出来,经信道传输后,用户终端的光接收机将接收到的光信号进行光电转换等处理,恢复出相应的信息,完成信息的传输.

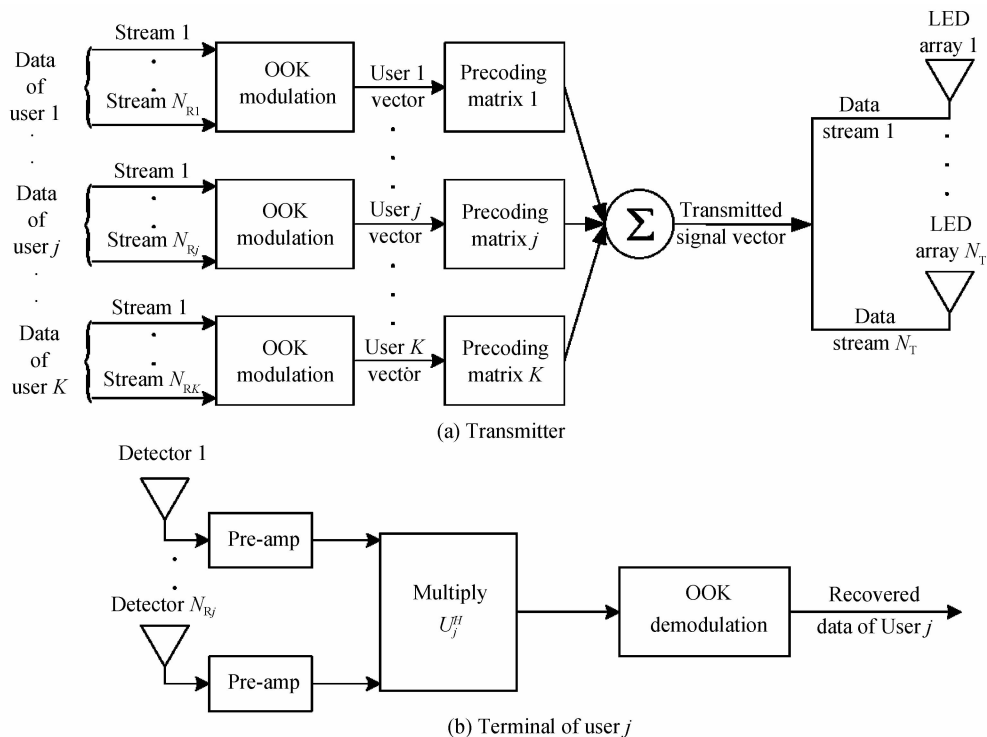


图 1 预编码 MU-MIMO 室内可见光通信系统的发送端和用户终端  $j$  的框图

Fig. 1 Schematic of transmitter and the  $j$ -th user terminal of the precoding MU-MIMO indoor VLC system

### 1.1 光发送机

对原始信号进行双极性开关键控(On-Off Keying, OOK)调制后,进行 BD 预编码,输出信号可表示为

$$f(t) = (f_1(t), \dots, f_{N_T}(t))^H = \sum_{j=1}^K F_j u_j \quad (1)$$

式中,  $u_j$  为用户  $j$  经 OOK 调制后的发送信号,  $K$  为

用户终端数目,  $N_T$  为 LED 阵列(光发射机)数目,  $F_j$  为通过 BD 预编码算法求得的相对应于用户  $j$  的预编码矩阵. BD 预编码算法<sup>[11]</sup>由 Q. H. Spencer 等提出,其核心思想为:设计合适的预编码矩阵  $F$ , 使得调制信号与  $F$  相乘后,每个用户的信号都处于其他用户的零空间内,从而达到消除多用户干扰(Multi-User Interference, MUI)的目的.本文主要

基于该预编码算法来分析预编码室内可见光多用户多人多出 (Multi-User Multiple Input and Multiple Output, MU-MIMO) 系统的性能。

由于 LED 的驱动电流须保证非负,故对预编码后的信号加上直流偏置. 最终经 LED 阵列发射的信号可表示为

$$x(t) = (x_1(t), \dots, x_{N_T}(t))^H = \sum_{n=1}^{\text{LEDs}} P_{\text{LED}} (1 + m_1 f(t)) \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{LED}}$  为单个 LED 的功率,  $m_1$  为调制指数<sup>[13]</sup>, LEDs 为 LED 阵列包含的 LED 数目。

### 1.2 信道

光接收机所接收的可见光信号主要包括两部分:直射链路 (Line Of Sight, LOS) 部分和非直射链路 (Non-LOS) 部分. 研究表明,当接收机位于室内边缘位置时,接收到的非直射链路部分的信号最强,但此时仍比接收到的直射链路的信号至少低 7 dB<sup>[3]</sup>. 因此,本文假设室内墙壁,天花板等的反射足够弱,采用直射链路的信道直流增益来表示信道矩阵的系数(文献[7, 14]等均采用了类似的方法),即

$$(H)_{N_R \times N_T} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1j} & \dots & h_{1N_T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{i1} & \dots & h_{ij} & \dots & h_{iN_T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_R1} & \dots & h_{N_Rj} & \dots & h_{N_RN_T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $N_R = \sum N_{R_j}$  为所有用户终端包含的光接收机的数目,  $N_{R_j}$  为终端  $j$  的光接收机数目,  $h_{ji}$  为第  $i$  个 LED 阵列与第  $j$  个光接收机间的信道直流增益。

$$h_{ji} = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^{\text{LEDs}} A(m+1)}{2\pi d_{jik}^2} \cdot \cos^m(\phi_{jik}) g(\psi_{jik}) \cos \psi_{jik} & 0 \leq \psi_{jik} \leq \psi_c \\ 0 & \psi_{jik} > \psi_c \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $A$  为光接收机面积,  $d_{jik}$  为第  $i$  个 LED 阵列中的第  $k$  个 LED 与第  $j$  个光接收机的距离,  $\psi_c$  为光接收机的视场角 (Field of View, FOV),  $\phi_{jik}$  和  $\psi_{jik}$  分别为发射角和入射角,  $g(\psi)$  为聚光器的增益<sup>[15]</sup>,  $m = -\ln(2)/\ln(\cos(\phi_{1/2}))$  为朗伯光源的阶数,与半功率角  $\phi_{1/2}$  的大小相关。

### 1.3 光接收机

经可见光信道传输后,第  $j$  个光接收机将所接收到的光信号进行光电转换,滤除直流分量后,其输出信号可表示为

$$y_j(t) = \gamma m P_{\text{LED}} \sum_{i=1}^{N_T} h_{ji} f_i(t) + \sqrt{i_{n,j}^2} \quad (5)$$

式中,  $\gamma$  为光接收机响应,  $f_i(t)$  表示光接收机所接收

到的来自第  $i$  个 LED 阵列所发射出的光信号,  $\overline{i_{n,j}^2}$  为噪音的均方电流,主要包含散粒噪音和热噪音<sup>[15]</sup>, 即

$$\overline{i_{n,j}^2} = \sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \quad (6)$$

则第  $j$  个光接收机的输出信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{(\gamma m P_{\text{LED}} \sum_{i=1}^{N_T} h_{ji} f_i(t))^2}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2} \quad (7)$$

## 2 仿真结果与分析

本文采用的  $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$  的室内模型主要参考文献[1],即光发射机由 4 个 LED 阵列组成,每个阵列包含  $60 \times 60$  个 LED,光接收机的接收平面距地面高度为 0.85 m. 设有用户 1 和用户 2 两个终端,每个终端各有两个光接收机,与 4 个 LED 阵列一起构成  $4 \times [2, 2]$  的室内多用户 MIMO 可见光系统. 本文主要仿真参量见表 1。

表 1 预编码多用户室内可见光 MIMO 系统参量  
Table 1 Parameters of precoding MU-MIMO indoor VLC system

Parameters	Values
Transmitter semi-angle/(°)	60
Background light current/ $\mu\text{A}$	5 100
Physical area of a PD/ $\text{cm}^2$	1.0
Refractive index of PD	1.5
Receiver pitch/m	0.1
PD responsivity/( $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$ )	0.4
Modulation index	0.2
Data rate/( $\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ )	100

考虑到实际系统中用户终端位置的多样性,为不失一般性,本文选取两种典型情形来分析系统的性能,即两个终端均位于 LED 阵列附近的情形与一个终端位于室内边缘,另一终端位于 LED 阵列附近的情形. 表 2 给出了上述两种情形的坐标. 考虑到实际系统中用户终端的移动性,本文接着探讨了用户终端的移动性对于系统的误码率、信噪比性能的影响。

表 2 用户终端在室内分布的位置

Table 2 Location of the decentralized user terminals

Scenario	User1; Receiver 1 & 2	User2; Receiver 1 & 2
1	(-1, -1), (-1.1, -1)	(-0.5, 0.5), (-0.6, 0.5)
2	(-1, -1), (-1.1, -1)	(1.3, 2.3), (1.4, 2.3)

由于手机等用户终端的微型化发展趋势,考虑到实际终端的尺寸(一般在  $10 \sim 15 \text{ cm}$ )等原因,用户终端的光接收机之间的距离应不大于 0.1 m,而光接收机可接收光信号的范围可表示为

$$r = d \tan(\text{FOV}) \quad (8)$$

对属于同一终端的光接收机而言,其接收到的

光信号基本相同,导致了用户信道矩阵的高度相关性,使得通过BD预编码算法求得的等效信道增益(奇异值分解求得的奇异值)相差较大,使得系统的BER性能很差.图2给出了用户终端的BER与单个LED功率的关系,当LED的功率为10 mW时,两个终端的BER仍在 $10^{-2}$ 左右.为此,本文提出同一用户终端的不同光接收机采用不同FOV的方案,通过该方案,同一用户终端的光接收机之间所接收到的光信号将有较大差别,能够有效降低他们之间的相关性.通过仿真分析一系列FOV组合对于系统性能的影响,表明该方案对于预编码室内可见光通信系统具有普适性.本文采用FOV为 $70^\circ$ 和 $50^\circ$ 的情形来分析研究该方案的可行性及其对系统的影响.如图2,当FOV分别采用 $70^\circ$ 和 $50^\circ$ 时,两个终端的BER性能都有了明显的提高,当LED功率为10 mW时,均可获得低于 $10^{-6}$ 的BER性能,相较于FOV均取 $70^\circ$ 的情况,用户终端的BER有明显降低.

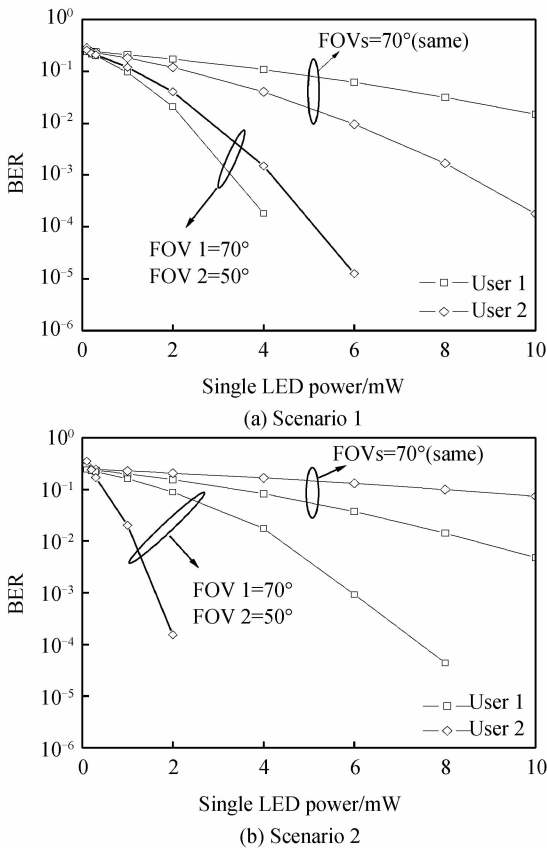


图2 LED发射功率与用户终端BER的关系  
Fig. 2 Relations between single LED power and BER performance of the terminals

为探讨用户移动性对系统性能的影响,分别假设用户1固定于室内靠近LED阵列的位置和固定于室内边缘两种情况,分析用户2的移动对于两个终端BER和SNR性能的影响,LED发射功率为10 mW,系统传输速率为100 Mb/s.

图3、4分别为当终端1固定于室内边缘位置(scenario 2)时,用户2移动至室内不同位置时对两个终端的BER和SNR性能的影响.总的来说,在室

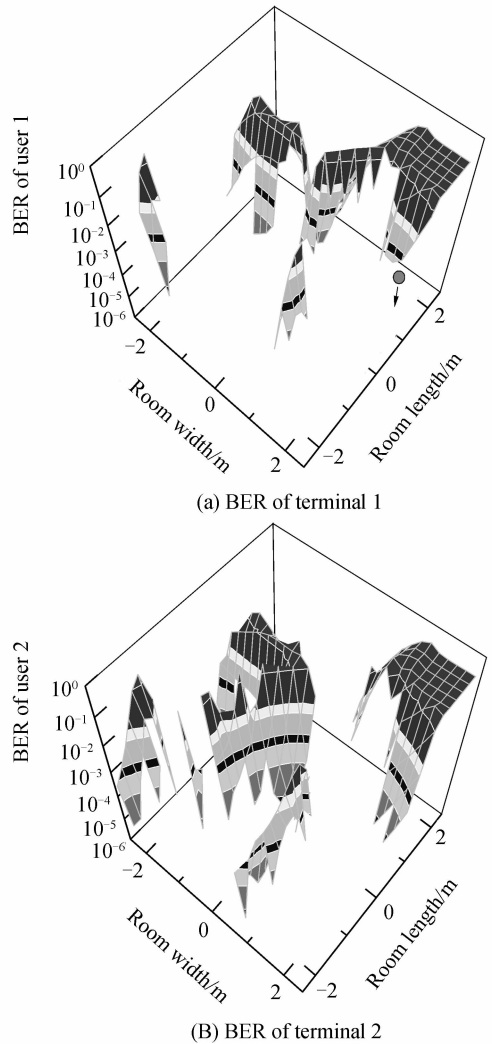
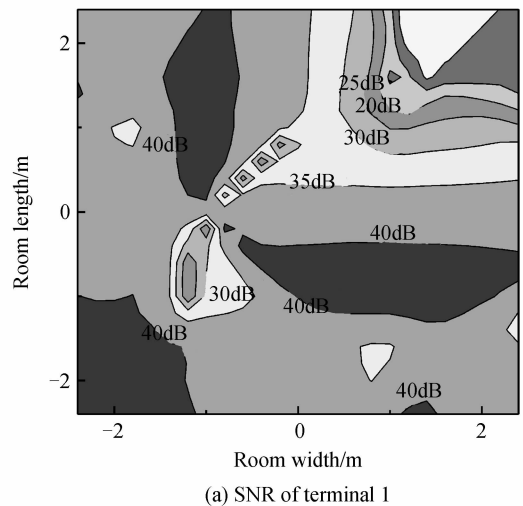


图3 用户1固定室内边缘位置时,用户2的移动对用户终端BER性能的影响  
Fig. 3 The impact of user 2's mobility to terminals' BER when user 1 is fixed in the corner



(a) SNR of terminal 1

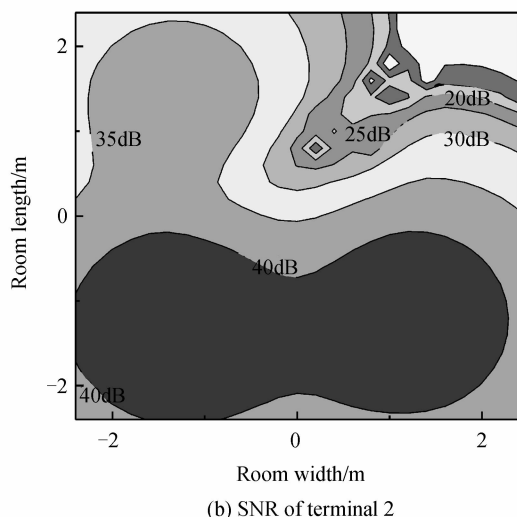


图 4 用户 1 固定室内边缘位置时,用户 2 的移动对用户终端 SNR 性能的影响

Fig. 4 The impact of user 2's mobility to terminals' SNR when user 1 is fixed in the corner

内大部分区域,终端 1 和终端 2 均能获得低于  $10^{-6}$  的误码率性能,移动的用户终端 2 性能稍差,但当用户 2 移动至用户 1 的附近区域时,会导致不同用户的光接收机之间的相关性增强.此时,系统的信噪比明显降低,如图 4 所示,信噪比由 40 dB 左右降为  $\sim 20$  dB.同时,终端的 BER 也随之升高,约为  $10^{-2}$ .

图 5、6 为当终端 1 固定于室内靠近 LED 阵列的位置(scenario 2)时,用户 2 移动至室内不同位置时对两个终端的 BER 和 SNR 性能的影响.与用户 1 固定于室内边缘位置时(图 3、4 所示)相比,系统 BER 和 SNR 性能总体变化趋势与相近,但两个用户终端的 BER 性能均明显变差,其在室内获得低于  $10^{-6}$  BER 性能的区域面积有所减少.总体而言,对于用户 1 和用户 2,在室内大部分区域均能获得低于  $10^{-6}$  的较佳的误码率性能,信噪比基本在 40 dB 左右.

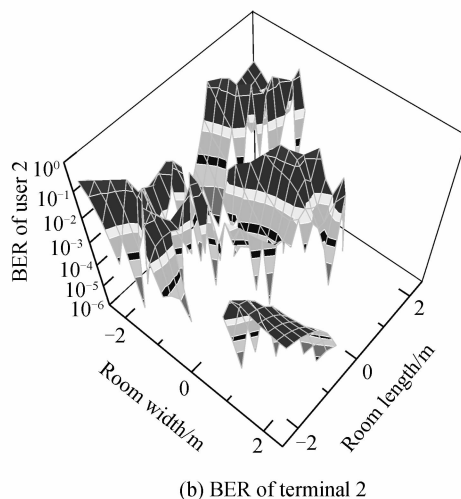


图 5 用户 1 固定于靠近 LED 阵列位置时,用户 2 的移动对用户终端 BER 性能的影响

Fig. 5 The impact of user 2's mobility to terminals' BER when user 1 is fixed near LED array

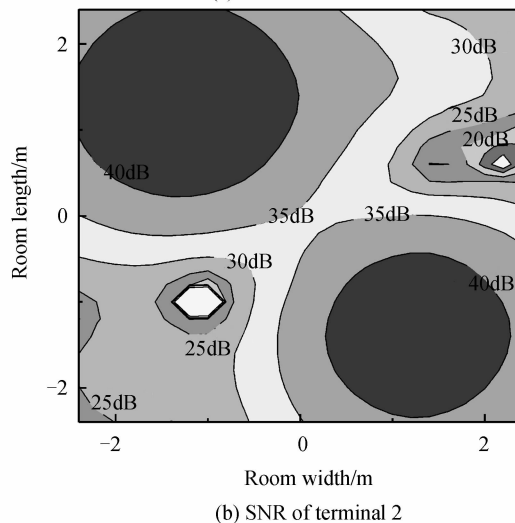
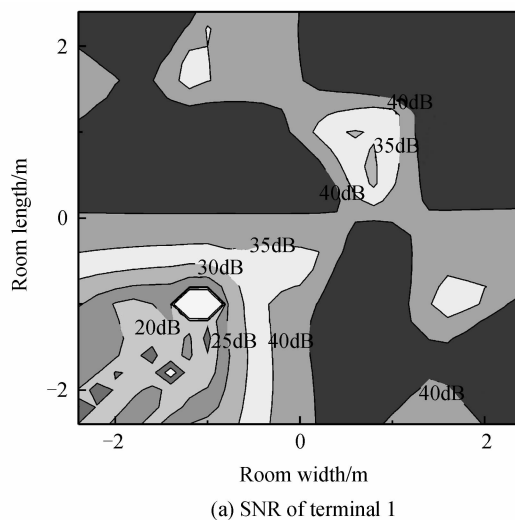
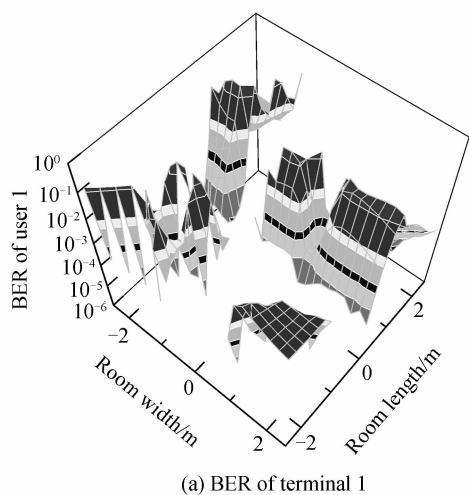


图 6 用户 1 固定于靠近 LED 阵列位置时,用户 2 的移动对用户终端 SNR 性能的影响

Fig. 6 The impact of user 2's mobility to terminals' SNR when user 1 is fixed near LED array



### 3 结论

本文提出一种多用户 MIMO 室内可见光通信系统,结合预编码技术,在发送端将多用户干扰消除,能够有效降低可见光系统中用户终端的复杂度和功耗.提出同一用户终端的光接收机采用不同 FOV 的方法来降低用户终端信道矩阵的相关性,弥补了 BD 预编码算法在可见光系统中的局限.此外,分析了用户移动性对系统性能的影响.仿真结果表明,在 LED 发射功率为 10 mW 时,系统能够以 100 Mb/s 的传输速率在室内大部分区域获得较佳的性能.在后续研究工作中,将分析本文提出的方案对实际可见光通信系统的影响.

#### 参考文献

- [1] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Transactions on, Consumer Electronics*, 2004, **50**(1): 100-107.
- [2] DING Yi, ZHEN Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1486-1490.  
丁毅,郑臻荣,顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1486-1490.
- [3] O'BRIEN D, LE-MINH H, KYUNGWOO L, *et al.* Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system [C]. *Proceedings of ICCSC*, 2008, 678-682.
- [4] HAO Hong-gang, WANG Wen-liang, LUO Yuan, *et al.* LED spectrum modulation technique based on optical coating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1081-1085.  
郝宏刚,王文梁,罗元,等. 基于光学薄膜的 LED 光谱调制技术 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1081-1085.
- [5] HUA Wei, XIANG Wei-dong, DONG Yong-jun, *et al.* Spectra characteristics of new developed Ce, Pr doped YAG phosphor for white LED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 907-911.  
华伟,向卫东,董永军,等. 白光 LED 用新型 Ce, Pr 掺杂的 YAG 单晶荧光材料的光谱性能研究 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 907-911.
- [6] CHEN Jian, YU Chang-yuan, WANG Zi-xiong, *et al.* Indoor optical wireless integrated with white LED lighting: Perspective & challenge [C]. 10th International Conference on Optical Communications and Networks, 2011.
- [7] ZENG L, O'BRIEN D, LE-MINH H, *et al.* High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting [J]. *Journal of Selected Areas in Communications*, 2009, **27**(9): 1654-1662.
- [8] DAMBUL K D, O'BRIEN D, FAULKNER G. Indoor optical wireless MIMO system with an imaging receiver [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(2): 97-99.
- [9] ZHANG Xie, CUI Kai-yun, ZHANG Hong-ming, *et al.* Capacity of MIMO visible light communication channels [C]. *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, 2012, 159-160.
- [10] WANG Yi-guang, ZHANG Ming-lun, WANG Yuan-quan, *et al.* Experimental demonstration of visible light communication based on sub-carrier multiplexing of Multiple-Input-Single-Output OFDM [C]. *OECC*, 2012, 745-746.
- [11] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. *IEEE Transactions on, Signal Processing*, 2004, **52**(2): 461-471.
- [12] 邱玲,许杰,刘蓓,等. 多用户、多小区 MIMO 通信技术 [M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [13] NEOKOSMIDIS I, KAMALAKIS T, WALEWSKI J W, *et al.* Impact of nonlinear LED transfer function on discrete multitone modulation: analytical approach [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(22): 4970-4978.
- [14] WANG Zi-xiong, YU Chang-yuan, ZHONG Wen-de, *et al.* Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM OFDM visible light communications [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(14): 13418-13427.
- [15] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communications [C]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, **85**(2): 265-298.