

室内可见光 MIMO 信道的空间相关性分析

肖帅芳^{*①} 黄开枝^① 钟州^① 季新生^{①②}

^①(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 该文针对室内可见光多输入多输出(MIMO)信道的空间相关性展开研究,基于朗伯辐射模型,建立了室内可见光 MIMO 信道模型;并基于该模型,分析了发送与接收空间相关性与空间距离参数的关系,给出了发送与接收相关系数的表达式,为室内可见光 MIMO 通信系统的布设提供了理论指导;信道矩阵条件数仿真验证了信道空间相关性随发光二极管(LED)间距的减小而增大、随光电检测器(PD)间距的减小而增大、随 LED 到 PD 垂直距离的增大而增大;信道容量仿真得出,随着 LED 与 PD 数量的增加,信道容量逐步提高,但随着信道空间相关性的增强,信道容量的提高逐步减小。

关键词: 无线光通信;室内可见光通信;多输入多输出;空间相关性;信道容量

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2117-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01492

Spatial Correlation Analysis of MIMO Channel in Indoor Visible Light Communication

Xiao Shuai-fang^① Huang Kai-zhi^① Zhong Zhou^① Ji Xin-sheng^{①②}

^①(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

^②(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper addresses the spatial correlation of MIMO channel with application to indoor Visible Light Communication (VLC). This study establishes a model for indoor VLC MIMO channel based on the Lambert radiation model, and then analyzes the effect on the spatial correlation of both transmit and receive channel by different distance parameters in this model. Thus, the mathematical expressions of the spatial correlation coefficients of both transmit and receive channel are derived, which can provide a theoretical guide to the layout of the indoor VLC MIMO system. The simulation results regarding the channel matrix condition verify that the channel spatial correlation becomes stronger with the decreasing of Light Emitting Diode (LED) spacing, PhotoDetector (PD) spacing, and the increasing of the vertical distance from LED to PD. In addition, the channel capacity simulation results show that the channel capacity can be enhanced by increasing the number of LED and PD, whereas the channel capacity gain can be reduced with stronger channel spatial correlation.

Key words: Optical wireless communication; Indoor visible light communication; MIMO; Spatial correlation; Channel capacity

1 引言

可见光通信(Visible Light Communication, VLC)是一种利用可见光波段的光作为信息载体、在白光发光二极管(Light Emitting Diode, LED)技术之上发展起来的新兴光无线通信技术。它利用白光 LED 发出的肉眼观察不到的高速调制光波信号来对信息调制和传输,然后利用光电检测器(Photo-

Detector, PD)等光电转换器件接收光载波信号并获得信息。VLC 作为一个全新的无线通信手段,引起国内外越来越多的关注,也是今后无线通信的一个重要方向^[1-3]。

室内 VLC 的目标是实现高速率数据传输^[4],但现有白光 LED 的调制带宽较低,只有几 MHz^[5],严重制约了通信速率的提高。将多输入多输出(MIMO)技术应用于室内 VLC,可以潜在地增加链路作用范围,克服通信链路被室内人员走动、家具的阴影而打断的问题,提高链路的可靠性;同时可以在不增加系统带宽及发射功率的条件下提高频谱利用率,

2013-09-29 收到, 2014-02-25 改回

国家 863 计划项目(2013AA013603)和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2013D09)资助课题

*通信作者: 肖帅芳 xiaoshuaifang@gmail.com

从而提高数据传输速率^[6]。文献[7]将 MIMO 应用于自由空间光信道中,文献[8-10]引入了非成像式多光源多接收系统和成像式多光源多接收系统,并实验验证了室内 VLC MIMO 系统能够获得较高的空间复用增益,文献[11]对室内光无线通信 MIMO 技术进行了性能分析。同时文献[8]提出,只有当室内 VLC MIMO 信道矩阵满秩时,才能获得满增益;若信道矩阵不满秩,即信道具有较强的空间相关性,则难以获得高的复用增益。而室内 VLC 采用强度调制与直接检测, MIMO 信道的空间相关性较强,很容易导致信道矩阵不满秩,无法获得较高的空间复用增益,影响系统传输速率的提高。目前,尚无文献对室内 VLC MIMO 信道的空间相关性进行过理论分析,信道空间相关性与空间距离参数(LED 间距、PD 间距、LED 到 PD 距离等)的关系还不明确,因此无法对室内 VLC MIMO 通信系统进行合理布设。

针对这一问题,本文对室内 VLC MIMO 信道的空间相关性展开研究。首先,基于朗伯辐射模型,给出了 MIMO 信道直流增益矩阵 \mathbf{H} ,建立了直射场景下的室内 VLC MIMO 信道模型。然后,对 \mathbf{H} 与 \mathbf{H} 的共轭转置求自相关,即可得到发送与接收相关矩阵,推导得到了发送与接收相关系数随 LED 间距与垂直距离的比值增大而减小、随 PD 间距与垂直距离的比值增大而减小的关系;并将发送 LED 到接收 PD 的距离转化为易于调整的 LED 间距、PD 间距和 LED 到 PD 的垂直距离,对上述关系式进行了简化,得到了信道空间相关性随 LED 间距增大而减小、随 PD 间距增大而减小、随 LED 到 PD 的垂直距离减小而减小的关系,为室内 VLC MIMO 通信系统的布设提供了理论指导。之后,采用信道矩阵条件数作为衡量信道空间相关性的指标,仿真验证了理论推导的结论,同时信道容量仿真得出, MIMO 系统的信道容量高于单输入单输出(SISO)系统,且随着 LED 与 PD 数量的增加, MIMO 系统的信道容量逐步提高,但随着信道空间相关性的增强, MIMO 系统信道容量的提升逐步减小。

2 信道模型

2.1 系统描述

室内 VLC MIMO 系统如图 1 所示。假设固定在天花板上的多光源发射机中有 N 个白光 LED 阵列,处于室内工作台上的接收机包含 M 个 PD。信息比特经过串并转换驱动 N 个白光 LED 发出光功率信号 $\mathbf{P}(t)$, $\mathbf{P}(t) = [P_1(t), \dots, P_i(t), \dots, P_N(t)]^T, 1 \leq i \leq N$,再经过室内 VLC 信道到达接收器。接收器中的 M 个接收 PD 将接收到的光功率信号转化为电流信号,并附加高斯白噪声信号 $\mathbf{n}(t)$, $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_j(t), \dots, n_M(t)]^T, 1 \leq j \leq M$,得到输出电流信号 $\mathbf{R}(t)$, $\mathbf{R}(t) = [R_1(t), \dots, R_j(t), \dots, R_M(t)]^T, 1 \leq j \leq M$ 。其中, $R_j(t)$ 可表示为

$$R_j(t) = r \sum_{i=1}^N P_i(t) \otimes h_{ji}(t) + n_j(t) \quad (1)$$

其中, \otimes 为卷积运算符, r 为光电转化系数, $h_{ji}(t)$ 为第 i 个白光 LED 到第 j 个接收 PD 的信道冲击响应。

2.2 信道建模

为得到室内 VLC MIMO 信道冲击响应,首先确定室内 VLC MIMO 传输链路,如图 2 所示。固定在天花板上的白光 LED 作为发射机,每个 LED 的发光机理采用朗伯辐射模型,辐射强度

$$R_0(\phi) = [(m+1)/2\pi] \cos^m \phi \quad (2)$$

其中, ϕ 为发射角, m 为朗伯辐射阶数, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \psi_{1/2})$, $\psi_{1/2}$ 为半功率发射角。接收机由滤光片、光集中器和 PD 组成。室内 VLC 信道存在直射链路和漫射链路,文献[12]实验测定了接收机收到的光信号功率中直射分量占 90%以上,漫射分量可以忽略,本文只考虑直射链路。则第 i 个接收机 PD 接收到第 j 个白光 LED 的光功率信号 $P'_i(t)$ 可表示为

$$P'_i(t) = \begin{cases} \frac{A_i}{d_{ij}^2} R_0(\phi_{ij}) T_f(\varphi_{ij}) g(\varphi_{ij}) \cos \varphi_{ij} P_j(t), & 0 \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_c \\ 0, & \varphi_{ij} > \varphi_c \end{cases} \quad (3)$$

其中, A_i 为第 i 个 PD 的检测面积; d_{ij} 为第 i 个 PD 到第 j 个白光 LED 的距离; ϕ_{ij} 为第 j 个白光 LED

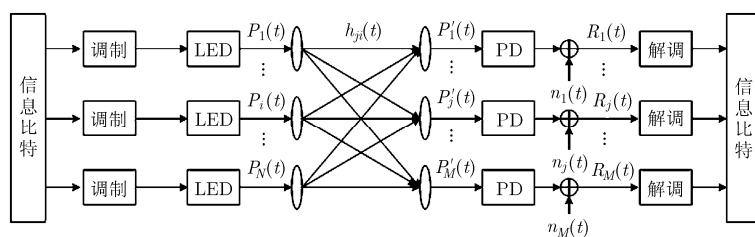


图 1 室内 VLC MIMO 系统

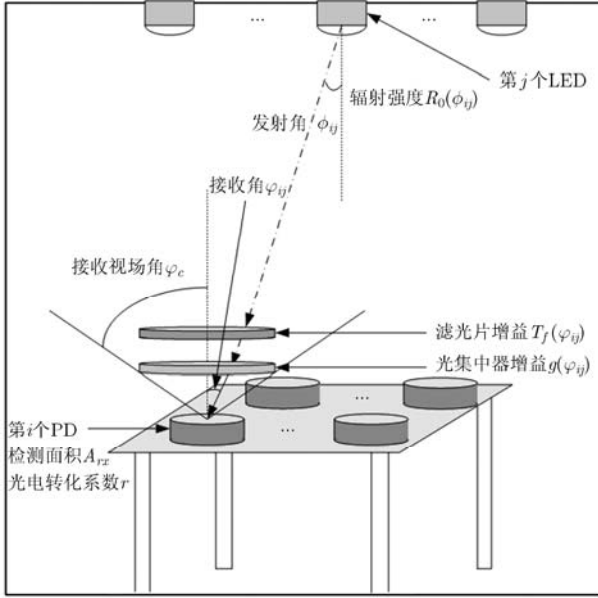


图2 室内 VLC MIMO 传输链路

到第 i 个 PD 的发射角； φ_{ij} 为第 i 个 PD 接收第 j 个白光 LED 的接收角； φ_c 为光集中器视场角； $T_f(\varphi_{ij})$ 为滤光片增益； $g(\varphi_{ij})$ 为光集中器增益。第 i 个白光 LED 到第 j 个 PD 的信道直流增益 h_{ij} 可以表示为

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{A_i}{d_{ij}^2} R_0(\phi_{ij}) T_f(\varphi_{ij}) g(\varphi_{ij}) \cos \varphi_{ij}, & 0 \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_c \\ 0, & \varphi_{ij} > \varphi_c \end{cases} \quad (4)$$

这样就可以得到 $M \times N$ 维的 MIMO 信道矩阵 \mathbf{H} 。

此外， M 维的噪声向量 $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_j, \dots, n_M]^T$ 可以建模为与 $\mathbf{P}(t)$ 独立的高斯白噪声，噪声功率 σ^2 为背景光噪声功率 σ_{bg} 与接收机热噪声功率 σ_{th} 之和^[13]，即

$$\sigma^2 = \sigma_{bg}^2 + \sigma_{th}^2 \quad (5)$$

通过计算信道矩阵 \mathbf{H} 的数学表达式和信道噪声 \mathbf{n} 的高斯白化处理，建立了室内 VLC MIMO 直射信道模型。因此，接收信号可以表示为

$$\mathbf{R} = r\mathbf{H}\mathbf{P} + \mathbf{n} \quad (6)$$

其中， $\mathbf{P} = [P_1, \dots, P_i, \dots, P_N]^T$ 表示 N 维发射光功率信号向量； $\mathbf{R} = [R_1, \dots, R_j, \dots, R_M]^T$ 表示 M 个接收电流信号向量。

由于采用强度调制与直接检测，信道矩阵 \mathbf{H} 中的元素不包含频率分量与相位分量，这会导致信道矩阵 \mathbf{H} 不容易满秩，即具有较强的相关性。通过求发送和接收相关矩阵的方法来分析室内 VLC

MIMO 信道空间相关性与信道矩阵 \mathbf{H} 中参数的关系，以期为室内 VLC MIMO 通信系统的布设提供理论指导。

3 信道空间相关性分析

定义从不同的白光 LED 到相同的 PD 间信道的相关性为发送空间相关性，从相同白光 LED 到不同 PD 间信道的相关性为接收空间相关性。发送空间相关性与接收空间相关性均可以由相关系数来描述，分别定义发送与接收相关矩阵 \mathbf{R}_t 和 \mathbf{R}_r 为

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} \rho_{11}^t & \rho_{12}^t & \cdots & \rho_{1N}^t \\ \rho_{21}^t & \rho_{22}^t & \cdots & \rho_{2N}^t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{N1}^t & \rho_{N2}^t & \cdots & \rho_{NN}^t \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} \rho_{11}^r & \rho_{12}^r & \cdots & \rho_{1M}^r \\ \rho_{21}^r & \rho_{22}^r & \cdots & \rho_{2M}^r \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M1}^r & \rho_{M2}^r & \cdots & \rho_{MM}^r \end{bmatrix}$$

3.1 发送空间相关性

\mathbf{R}_t 中的元素为 \mathbf{H} 的任意两列构成的列向量的相关系数，为方便起见，任取 \mathbf{H} 的两列进行分析。在 \mathbf{H} 中，第 i 列代表第 i 个白光 LED 到各 PD 的信道直流增益，可以用列向量 \mathbf{h}_i 表示， $\mathbf{h}_i = [h_{1i}, \dots, h_{2i}, \dots, h_{Mi}]^T$ ， M 为 PD 数目；第 j 列代表第 j 个白光 LED 到各 PD 的信道直流增益，可以用列向量 \mathbf{h}_j 表示， $\mathbf{h}_j = [h_{1j}, \dots, h_{2j}, \dots, h_{Mj}]^T$ 。 \mathbf{h}_i 与 \mathbf{h}_j 的相关系数为 ρ_{ij}^t ，则

$$\rho_{ij}^t = \frac{\mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_j}{\|\mathbf{h}_i\| \|\mathbf{h}_j\|} = \frac{\sum_{k=1}^M h_{ki} h_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^M h_{ki}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^M h_{kj}^2}} \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)，不失一般性，考虑接收角均小于接收器视场角，此时

$$\rho_{ij}^t = \frac{\sum_{k=1}^M \frac{A_k^2}{d_{ki}^2 d_{kj}^2} R_0(\phi_{ki}) R_0(\phi_{kj}) T_f(\varphi_{ki}) T_f(\varphi_{kj}) \cdot g(\varphi_{ki}) g(\varphi_{kj}) \cos(\varphi_{ki}) \cos(\varphi_{kj})}{\sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{A_k^2}{d_{ki}^4} R_0^2(\phi_{ki}) T_f^2(\varphi_{ki}) g^2(\varphi_{ki}) \cos^2(\varphi_{ki})} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{A_k^2}{d_{kj}^4} R_0^2(\phi_{kj}) T_f^2(\varphi_{kj}) g^2(\varphi_{kj}) \cos^2(\varphi_{kj})}} \quad (9)$$

一般地，假设滤光片增益 $T_f(\varphi)$ 与光集中器增益 $g(\varphi)$ 为常数，PD 的接收面积相同，取朗伯辐射阶数 $m=1$ ，则 $R_0(\phi) = (1/\pi) \cos \phi$ 。同时，假设接收器与发射器的法线均为铅垂方向，接收角与发射角相等， $\phi_{ki} = \varphi_{ki} = \arccos(d_h/d_{ki})$ ， d_h 为接收机与白光 LED

之间的垂直距离。此时,式(9)可简化为

$$\rho_{ij}^t = \sum_{k=1}^M \frac{1}{d_{ki}^4 d_{kj}^4} \left/ \left(\sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{1}{d_{ki}^8}} \sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{1}{d_{kj}^8}} \right) \right. \quad (10)$$

从式(10)可以看出,第*i*个LED与第*j*个LED之间的发送相关性与此两个LED到各PD的距离有关。为了简化分析,考虑室内典型的4×4 MIMO,如图3(a)所示。即固定在天花板上的发射机由4个LED组成,接收机包含4个PD。4个LED和4个PD均为正方形分布,正方形的中心都在室内中心线

上。设相邻LED之间的距离为 d_{LED} ,相邻PD之间的距离为 d_{PD} ,以正方形对角线为*x*轴和*y*轴,垂直方向为*z*轴,可建立空间坐标系,LED与PD的坐标分别如图3(b),图3(c)所示。此时,每个LED到4个接收PD的距离分别为: $[0.5(d_{LED} - d_{PD})^2 + d_h^2]^{1/2}$, $(0.5d_{LED}^2 + 0.5d_{PD}^2 + d_h^2)^{1/2}$, $(0.5d_{LED}^2 + 0.5d_{PD}^2 + d_h^2)^{1/2}$, $[0.5(d_{LED} + d_{PD})^2 + d_h^2]^{1/2}$ 。根据第*i*个LED与第*j*个LED的空间位置,考虑两个LED相邻的情况,此时式(10)可以化为

$$\rho_{ij}^t = \frac{\frac{2}{[0.5(d_{LED} - d_{PD})^2 + d_h^2]^2} (0.5d_{LED}^2 + 0.5d_{PD}^2 + d_h^2)^2}{\frac{1}{[0.5(d_{LED} - d_{PD})^2 + d_h^2]^4} + \frac{2}{(0.5d_{LED}^2 + 0.5d_{PD}^2 + d_h^2)^4} + \frac{1}{[0.5(d_{LED} + d_{PD})^2 + d_h^2]^4}} + \frac{\frac{2}{[0.5(d_{LED} + d_{PD})^2 + d_h^2]^2} (0.5d_{LED}^2 + 0.5d_{PD}^2 + d_h^2)^2}{\frac{1}{[0.5(d_{LED} - d_{PD})^2 + d_h^2]^4} + \frac{2}{(0.5d_{LED}^2 + 0.5d_{PD}^2 + d_h^2)^4} + \frac{1}{[0.5(d_{LED} + d_{PD})^2 + d_h^2]^4}} \quad (11)$$

令 $x = d_{LED} / d_h$, $y = d_{PD} / d_h$, 则

$$\rho_{ij}^t = \frac{\frac{2}{[0.5(x - y)^2 + 1]^2} (0.5x^2 + 0.5y^2 + 1)^2 + \frac{2}{[0.5(x + y)^2 + 1]^2} (0.5x^2 + 0.5y^2 + 1)^2}{\frac{1}{[0.5(x - y)^2 + 1]^4} + \frac{2}{(0.5x^2 + 0.5y^2 + 1)^4} + \frac{1}{[0.5(x + y)^2 + 1]^4}} \quad (12)$$

由此,可以作出相关系数 ρ_{ij}^t 随*x*,*y*变化的3维曲线,如图4所示。从图中可以看出,*x*,*y*越大,相关系数 ρ_{ij}^t 越小,两个LED间的发送相关性就越小。而*x*与 d_{LED} 成正比例关系,与 d_h 成反比例关系,*y*与 d_{PD} 成正比例关系,与 d_h 成反比例关系,因此两个LED间的发送相关性随LED间距的增大而减小,随PD间距的增大而减小,随LED到PD垂直距离的减小而减小。

3.2 接收空间相关性

接收相关矩阵 \mathbf{R}_r 中的元素为 \mathbf{H} 的任意两行构成的行向量的相关系数,任取 \mathbf{H} 的第*m*,*n*行进行分析。第*m*行代表第*m*个PD接收各白光LED信息的信道直流增益,可以用行向量 \mathbf{h}_m 表示, $\mathbf{h}_m = [h_{m1}, \dots, h_{m2}, \dots, h_{mN}]$,*N*为白光LED的个数;第*n*行代表第*n*个PD接收各白光LED信息的信道直流增益,可以用行向量 \mathbf{h}_n 表示, $\mathbf{h}_n = [h_{n1}, \dots,$

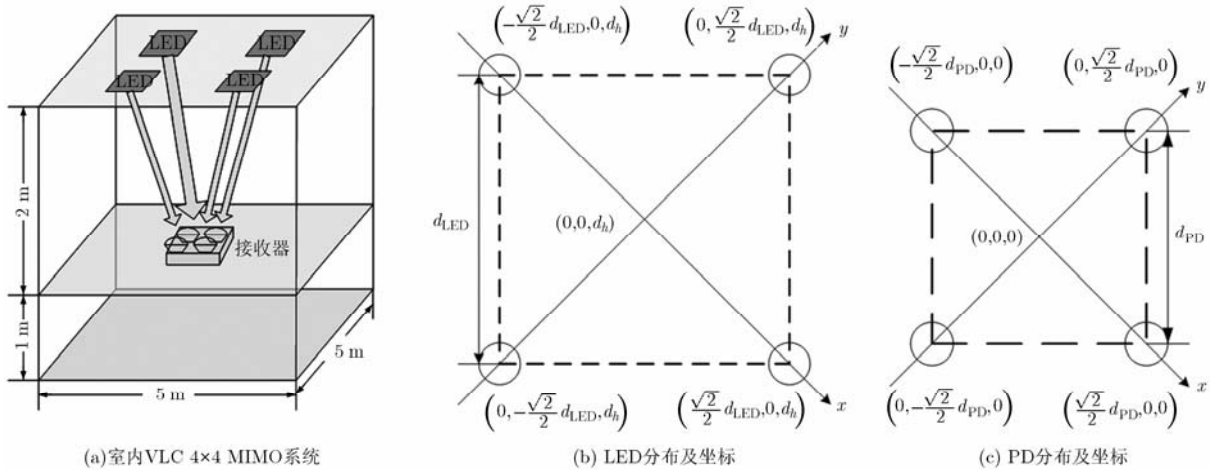


图3 室内VLC 4×4 MIMO系统空间分布

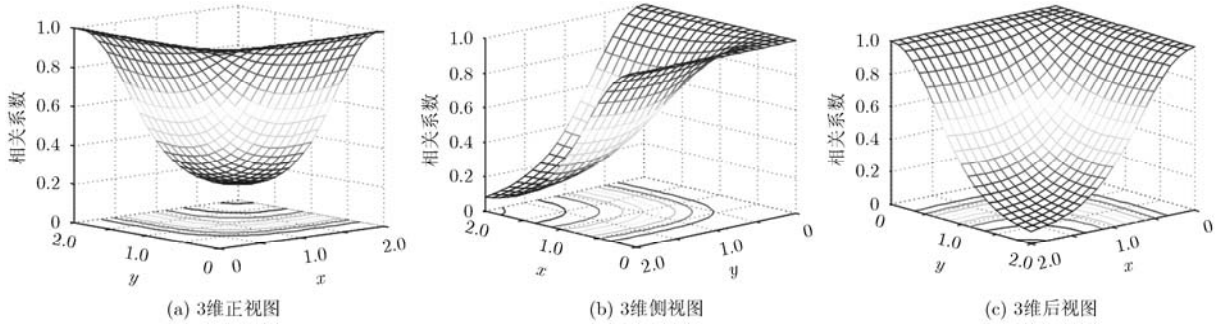


图4 相关系数随 x, y 的变化

$h_{n2}, \dots, h_{nN}]$ 。 h_m 与 h_n 的相关系数为 ρ_{mn}^r ，则

$$\rho_{mn}^r = \frac{h_m h_n^T}{\|h_m\| \|h_n\|} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{1}{d_{mk}^4 d_{nk}^4}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{d_{mk}^8}} \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{d_{nk}^8}}} \quad (13)$$

比较式(13)与式(10)可知， ρ_{mn}^r 与 ρ_{ij}^t 随距离参数的变化趋势一致。则两个 PD 间的接收相关性随 LED 间距与垂直距离的比值增大而减小，随 PD 间距与垂直距离的比值增大而减小。也可以得到，两个接收 PD 间的接收相关性随 LED 间距的增大而减小，随 PD 间距的增大而减小，随 LED 到 PD 垂直距离的减小而减小。

通过上面分析可知，室内 VLC MIMO 信道空间相关性随 LED 间距与垂直距离的比值增大而减小，随 PD 间距与垂直距离的比值增大而减小。也可以得到，室内 VLC MIMO 信道空间相关性随 LED 间距的增大而减小，随 PD 间距的增大而减小，随 LED 到 PD 垂直距离的减小而减小。

4 仿真与讨论

在室内 VLC MIMO 场景下，由于受屋子尺寸及接收机视场角的限制，LED 间距与垂直距离的比值和 PD 间距与垂直距离的比值不能任意增大，往往通过在一定范围内改变 LED 间距、PD 间距、LED 到 PD 的垂直距离等参数来减小 MIMO 信道的空间相关性，提升系统性能。为了验证 MIMO 信道的空间相关性与这些参数的关系，对室内 VLC MIMO 场景进行仿真，仿真参数如表 1 所示，参数的配置取自文献[14]。首先，针对室内 VLC 典型的 4×4 MIMO 场景，以信道矩阵的条件数为衡量信道空间相关性强弱的指标^[15]，仿真 LED 间距、PD 间距、LED 到 PD 的垂直距离等参数对室内 VLC MIMO 信道的空间相关性的影响；然后，仿真不同信道空间相关性下 MIMO 系统的信道容量，并与 SISO 系统的信道容量对比。

4.1 信道空间相关性仿真

以信道矩阵条件数为衡量信道空间相关性的指标，采用控制变量法，仿真信道矩阵条件数分别与 LED 间距、PD 间距、LED 到 PD 的垂直距离的关系。

假定 PD 间距固定为 1 m，LED 到 PD 的垂直距离固定为 2 m，可以得到信道矩阵条件数随 LED 间距的变化曲线，如图 5(a)所示。可见，信道矩阵条件数随 LED 间距的减小而增大。当 $d_{LED} > 0.5$ m 时，信道矩阵条件数随 LED 间距的减小缓慢增大；当时 $d_{LED} < 0.5$ m，信道矩阵条件数随 LED 间距的减小急剧增大，信道矩阵严重病态，信道空间相关性变得很强。

假定 LED 间距固定为 2 m，LED 到 PD 的垂直距离固定为 2 m，可以得到信道矩阵条件数随 PD 间距的变化曲线，如图 5(b)所示。可见，信道矩阵条件数随 PD 间距的减小而增大。当 $d_{PD} > 0.5$ m 时，信道矩阵条件数随 PD 间距的减小缓慢增大；当 $d_{PD} < 0.5$ m 时，信道矩阵条件数随 PD 间距的减小急剧增大，信道矩阵严重病态，信道空间相关性变得很强。

假定 LED 间距固定为 2 m，PD 间距固定为 1 m，可以得到信道矩阵条件数随 LED 到 PD 垂直距离的变化曲线，如图 5(c)所示。可见，信道矩阵条件数随 LED 到 PD 垂直距离的增大而增大，但信道矩阵条件数的变化范围较小。当 $d_h = 3$ m 时，信道

表1 室内 VLC MIMO 仿真参数

参数	数值	参数	数值
屋子的长×宽×高(m)	4×4×3	朗伯辐射阶数	1
LED 平均发光功率(W)	1	PD 光电转化系数(A/W)	0.4
接收视场角 FOV (°)	60	光集中器增益	1.5
半功率角 (°)	70	PD 检测面积(cm ²)	1.0
光滤光片增益	1.0	噪声带宽因子	0.562

矩阵条件数仅为 35, 信道空间相关性依然不是很强。可见, LED 到 PD 垂直距离对信道空间相关性的影响有限。

上述仿真验证了室内 VLC MIMO 信道空间相关性随 LED 间距的增大而减小, 随 PD 间距的增大而减小, 随 LED 到 PD 垂直距离的减小而减小。同时也得出信道空间相关性随这些参数的变化是非线性的, 当超过一定范围时, 信道空间相关性将急剧增强。在室内 VLC MIMO 系统布设时, 应该避免此种情况的出现。

4.2 MIMO 信道容量仿真

为了研究室内 VLC MIMO 在不同信道相关性下的信道容量情况, 仿真不同 LED 间距与 PD 间距下 2×2 MIMO, 2×4 MIMO, 4×4 MIMO 系统的信道容量, 并与 SISO 系统的信道容量对比, 如图 6 所示。可以看出, 在相同信道相关性下, MIMO 系统的信道容量高于 SISO 系统, 且 4×4 MIMO 系统的信道容量高于 2×4 MIMO 系统, 2×4 MIMO 系统的信道容量高于 2×2 MIMO 系统; 即随着 LED 与 PD 数量的增加, 系统的信道容量逐步提高。

当 LED 间距为 0.8 m, PD 间距为 0.8 m 时, 此时 MIMO 信道的空间相关性较弱, 在低信噪比下 4×4 MIMO 系统的信道容量相对于 SISO 系统提高

约 $2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, 在高信噪比下提高约 $4 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$; 当 LED 间距为 0.4 m, PD 间距为 0.4 m 时, 此时 MIMO 信道的空间相关性较强, 在低信噪比下 4×4 MIMO 系统的信道容量相对于 SISO 系统提高约 $2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, 在高信噪比下提高约 $3 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$; 当 LED 间距为 0.2 m, PD 间距为 0.2 m 时, 此时 MIMO 信道的空间相关性很强, 在低信噪比下 4×4 MIMO 系统的信道容量相对于 SISO 系统提高约 $2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, 在高信噪比下提高约 $2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。可以得出, 随着 MIMO 信道空间相关性的增强, 4×4 MIMO 系统信道容量的提升逐步减小, 这是因为 MIMO 信道空间相关性越强, 各空间子信道间的干扰越强, 接收器的接收信干噪比越低, 导致 MIMO 系统的信道容量有所下降。

上述仿真得到了室内 VLC MIMO 系统的信道容量高于 SISO 系统, 且随着 LED 与 PD 数量的增加, MIMO 系统的信道容量逐步提高。同时也得出随着信道空间相关性的增强, MIMO 系统信道容量的提升逐步减小。

5 结束语

本文针对室内 VLC MIMO 通信信道的空间相关性进行了分析, 推导出了发送和接收相关系数与发送 LED 到 PD 距离的关系式。在典型的室内 $4 \times$

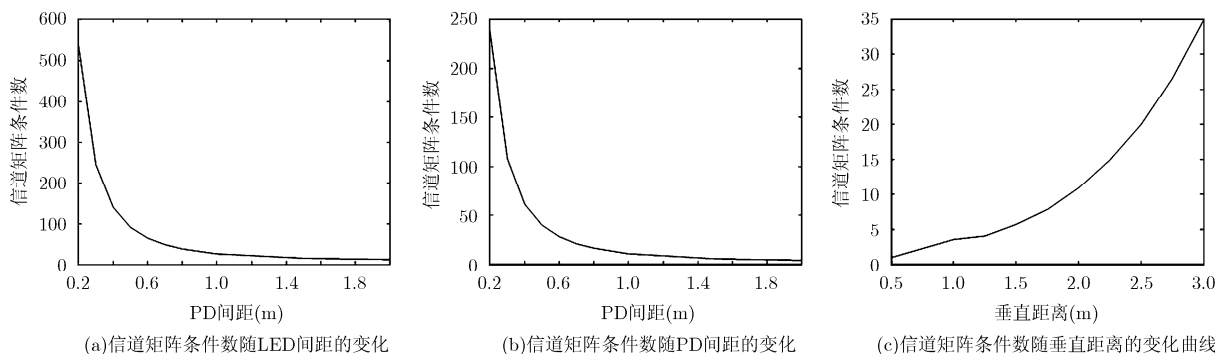


图5 信道空间相关性与 LED 间距、PD 间距以及 LED 到 PD 垂直距离的关系

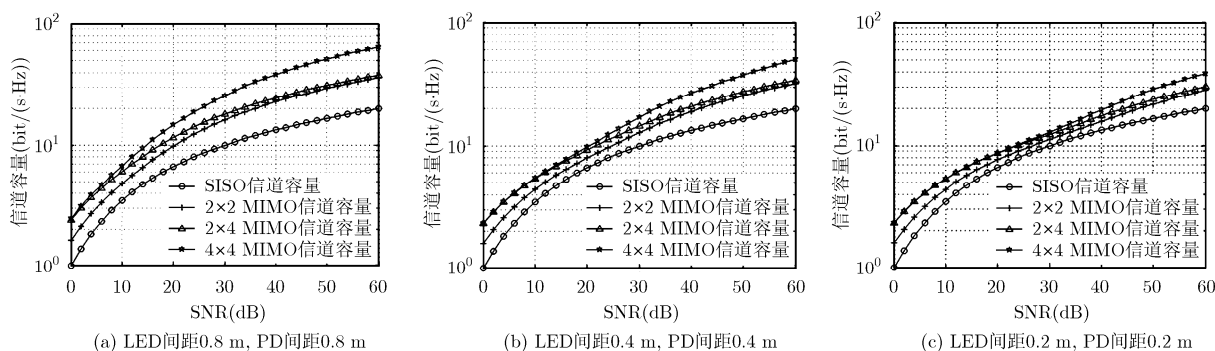


图6 不同信道空间相关性下 MIMO 信道容量变化曲线

4 MIMO 场景下, 将发送 LED 到接收 PD 的距离转化为易于调整的 LED 间距、PD 间距和 LED 到 PD 的垂直距离, 对上述关系式进行了简化, 给出相关系数随这些参数变化的曲线, 得到了信道空间相关性随 LED 间距增大而减小, 随 PD 间距增大而减小, 随 LED 到 PD 的垂直距离减小而减小的关系。然后在这种场景下, 对信道空间相关性进行了仿真, 信道矩阵条件数随 LED 间距、PD 间距和 LED 到 PD 的垂直距离的变化趋势与关系式一致。信道容量仿真得出, MIMO 系统的信道容量高于 SISO 系统, 且随着 LED 与 PD 数量的增加, MIMO 系统的信道容量逐步提高, 但随着信道空间相关性的增强, MIMO 系统信道容量的提升逐步减小。室内 VLC 系统具有丰富的空间资源, 而信道较强的空间相关性导致无法获得高的复用增益, 限制了系统传输速率的提高。如何更好地利用室内 VLC 系统的空间资源, 获取更高的复用增益有待进一步去研究。

参考文献

- [1] Elgala H, Mesleh R, and Haas H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(9): 56–62.
- [2] Saadi M, Wattisuttikulij L, Zhao Y, et al. Visible light communication: opportunities, challenges and channel models[J]. *International Journal of Electronics & Informatics*, 2013, 2(1): 1–11.
- [3] Schmid S, Corbellini G, Mangold S, et al. LED-to-LED visible light communication networks[C]. Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile Ad hoc networking and computing, Bangalore, India, 2013: 1–10.
- [4] Vucic J and Langer K D. High-speed visible light communications: state-of-the-art[C]. Proceedings of the IEEE Optical Fiber Communication Conference and Exposition, and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, USA, 2012: 1–3.
- [5] Minh H L, O'Brien D, Faulkner G, et al. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(15): 1063–1065.
- [6] Renzo M D, Haas H, and Grant P M. Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: a survey[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(12): 182–191.
- [7] Wilson S G, Brandt-Pearce M, Cao Q, et al. Free-Space optical MIMO transmission with Q -ary PPM[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(8): 1402–1412.
- [8] O'Brien D. Multi-Input Multi-Output (MIMO) indoor optical wireless communications[C]. Proceedings of the Forty-Third IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2009: 1636–1639.
- [9] Zeng L, O'Brien D, Minh H L, et al. High data rate Multiple Input Multiple Output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1654–1662.
- [10] O'Brien D. Optical multi-input multi-output systems for short-range free-space data transmission[C]. Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing, Newcastle, UK, 2010: 517–521.
- [11] Fath T and Haas H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(2): 733–742.
- [12] Komie T. Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100–107.
- [13] Takase D and Ohtsuki T. Optical wireless MIMO communications (OMIMO)[C]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, Dallas, USA, 2004, 2: 928–932.
- [14] Zeng L, O'Brien D, Minh H L, et al. Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system[C]. Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, Shanghai, China, 2008: 678–682.
- [15] Tran T A and O'Brien D. Performance metrics for Multi-Input Multi-Output (MIMO) visible light communications[C]. Proceedings of the IEEE International Workshop on Optical Wireless Communications, Pisa, Italy, 2012: 1–3.

肖帅芳: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为可见光通信与通信信号处理。
 黄开枝: 女, 1973年生, 教授, 研究方向为宽带移动通信与异构无线网络安全、可见光通信与通信信号处理。
 钟州: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为信道编码与信息论安全、可见光通信与通信信号处理。
 季新生: 男, 1968年生, 教授, 研究方向为无线通信安全与防护技术、通信与信号处理、可见光通信等。