

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108196

室内可见光通信的脉冲响应及矢量编码算法模型^{*}

刘星辰 王利民 张帅 李治

(国网信息通信产业集团有限公司 北京 102211)

摘要: 在变电站等室内可见光通信(VLC)系统中,发光二极管(LED)光源通过多径色散从发射端经过光通道传输到接收端。文章基于以白光为主的发光二极管特性,通过 MATLAB 仿真建模,将室内不同反射面的反射率纳入模型,提出了信道脉冲响应算法。仿真信号传输过程引入了直流偏压矢量编码(DCO-VC)技术,采用 M 位脉冲幅度调制(M-PAM)作为调制方案,通过调节脉冲幅度调制参数来调整系统数据传输效率和准确率。同时,仿真模型中引入了小区间干扰以验证信号传输在干扰存在情况下的表现。研究表明,调制参数越高,系统数据传输效率越高,对信号功率强度的要求也更高;调制参数较低时,系统传输效率相对较低,但同等信号功率条件下传输准确率更高,小区间干扰存在时仍能有效输出。因此实际应用中当信噪比低于 35 dB 时,应采用 2PAM 或 4PAM 调制方式保证传输准确率;信噪比高于 40 dB 时可按实际需求采用 8PAM 及以上调制方式提升传输速率。

关键词: 无线光通信;矢量编码;小区间干扰;脉冲幅度调制

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Impulse response and vector coding modelling for indoor visible light communications

Liu Xingchen Wang Limin Zhang Shuai Li Zhi

(State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: In indoor visible light communication (VLC) system, the data carried by light-emitting diode (LED) light is transmitted through the optical channel through multipath dispersion. Different indoor reflective surfaces are incorporated into the model through MATLAB simulation modeling, and the channel impulse response algorithm is proposed. Direct current biased optical vector coding (DCO-VC) technology is introduced in the system. The DCO-VC system uses M-ary pulse amplitude modulation (M-PAM) as modulation scheme, to adjust the system data transmission efficiency and accuracy. Intercell interference is introduced into the simulation model. Studies have shown that the higher the modulation parameter is, the higher the data transmission efficiency of the system is. When the modulation parameters are lower, the transmission efficiency of the system is relatively reduced, but the transmission accuracy is higher and the system can still output effectively in the presence of inter-cell interference. In real application, when the system signal-to-noise(SNR) ratio is lower than 35 dB, 2PAM or 4PAM modulation should be applied to ensure the transmission accuracy. When the SNR ratio exceeds 40 dB, use the 8PAM modulation to increase the transmission rate.

Keywords: visible light communication; vector coding; intercell interference; pulse amplitude modulation

0 引言

可见光通信(visible light communication, VLC)是一种以可见光为信息载体以实现高效无线数据传输的新兴技术。VLC 利用白光发光二极管(light emitting diode, LED)光源作为信号发射器,通过对可见光幅值的调节来传递信息,在

实际应用中能够实现照明和数据传输同时进行。LED 光谱范围较广,波长 380~750 nm (频率为 400~800 THz),目前可见光波段带宽仍是一个不需要授权认证的自由频谱^[1]。

VLC 无线通信是一种低功耗、低碳排放的绿色技术,具有良好的可持续性和可观的发展前景。当前无论国外还是国内,大多数对于可见光通信技术的研究还处于实验室

收稿日期:2021-10-26

* 基金项目:变电站交流剩余电流检测装置及系统研发(52680020002J)项目资助

试用阶段,尚未形成规模化的应用。VLC 技术对人体健康安全,不存在电磁辐射危害。在室内 VLC 应用中,由于可见光无法穿透墙壁,信息不会在其他房间内被检测或干扰,因此它的数据传输具有局域、安全、准确的特点。VLC 技术与传统的射频通信相比有多个显著的优势,可以应用于水下通信、有害环境、医院、机场等传统射频通信尚存不足的场景。产业结构方面,国内外都已积极展开高速远距离可见光通信技术研发^[2-3]。技术阶段成熟时可在国内开展可见光通信的规模化试点应用,以尽早占领应用产业链结构先机。面对我国“碳达峰,碳中和”计划,可见光通信技术满足高效传输、绿色节能、智慧互联的典型需求。以前沿可见光通信技术为牵引,遵循绿色共生原则,在智慧电力物联网的基础上依托泛在电网系统实现室内末端网络的深度融合,能够促进这一新兴产业的发展。

商用白光 LED 以照明功能为主,其结电容较大,将 LED 调制带宽限制在 35~200 MHz,可见光无线通信技术需要在保证大功率输出的前提下提升光源调制带宽,通过其驱动电路的优化提升其信息传输能力。另外,LED 光源在长距离通信时色散的非线性效应会导致信号出现畸变现象,需要通过对信号预处理消除畸变影响,提高调制效率。除此之外,在采用多个 LED 光源组成的发信端时,系统接收到的由不同路径造成的符号间干扰较大,应用中要考虑室内信干噪比分布,避免盲区^[4]。在 VLC 技术实际应用当中,应对不同的环境快速实现智能化分布是目前研究中需要解决的一项问题。本文将通过仿真模拟出室内光线反射模型研究推算出光信号的多通道响应,选择合适的信号编码调制方式,减少胞间干扰及传输过程白噪音干扰,确保信号准确传输。同时引入信号小区间干扰,模拟室内多小区场景。这项研究可以通过引入精确的信道响应算法以及新型信号调制方式研究其对室内光通信的信号传输效率,吞吐量以及抗干扰能力的影响。

1 室内光通信多通道信道建模

1.1 室内光通信信道响应模型

VLC 系统由 LED 发射源、光通道和光子探测器 (photon detector, PD) 组成。利用预处理调制后输入的电信号给 LED 供电,产生光信号,光线通过光通道传输,由接收端的光电探测器检测,产生添加了噪声的电信号。光通道信道模型如图 1 所示。

在 VLC 光通道模型中,房间大小设置为长 5 m,宽 5 m,高 3 m。如图 2 所示,在房间屋顶对称位置设置两个发射源。两个接收器设置在 0.7 m 高的桌子上。白色发光二极管的辐射功率广泛分布在可见光谱上(从 380~780 nm)。功率谱分布 (PSD), 记为 φ , 表示白光 LED 光源^[5] 单位波长的辐射功率。光谱反射率 $\rho(\lambda)$, 是反射率随波长变化的函数。不同的反射面根据不同材质、颜色、纹理及其它物理特征有不同的光谱反射率,随着波长的变化,反射系数的变

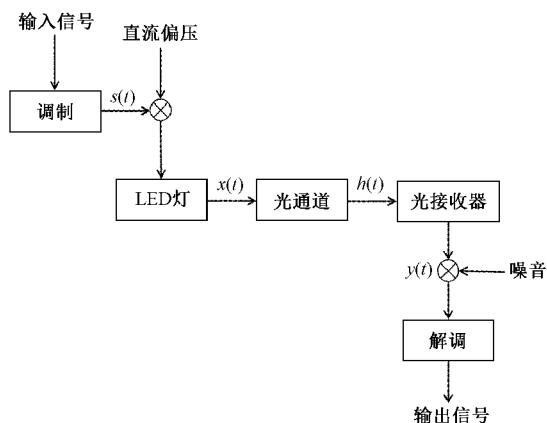


图 1 光通道信号传输流程

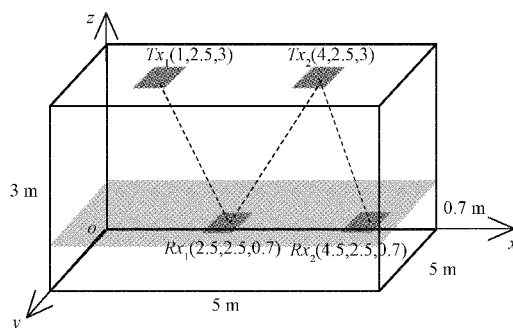


图 2 室内光通信通道模型

化范围在 0.1~0.8 之间。

在室内环境中,接收到的光信号由于墙壁和其他物体的反射而经历时间弥散。大多数反射通常是漫反射,并大都很好地符合朗伯辐射模式,假设室内材料或室内装置是完全散射的。漫反射光通道模型的脉冲响应计算是基于文献[6]中使用的递归算法。图 3 为室内可见光通过由视距 (light of sight, LOS) 路径和多个漫反射路径组成的混合链路进行传输的示意图。视距是光信号从光源直接传输到接收器的直射路径,漫反射路径是光线被墙壁或物体反射到接收器的反射路径。

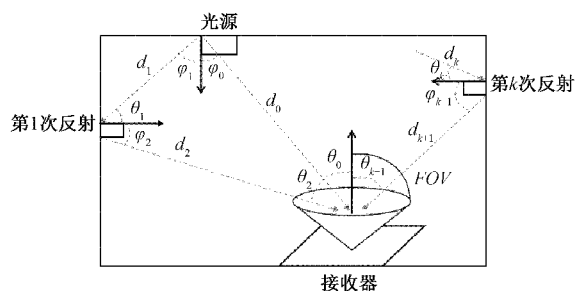


图 3 室内光线反射示意图

本系统中直射路径和反射光线通过第 k 个反射面到光电接收器的多路径传播如图 3 所示,定义辐照角为 φ , 入射角为 θ , LED 的可视角度为 120° 。FOV (field of view) 是接

收器视场角,它决定了入射光线是否能被接收到,矩形函数如式(1)所示。

$$\text{rect}\left(\frac{\theta}{FOV}\right) = \begin{cases} 1, & \left|\frac{\theta}{FOV}\right| \leq 1 \\ 0, & \left|\frac{\theta}{FOV}\right| > 1 \end{cases} \quad (1)$$

LOS 的脉冲响应可以用式(2)来定义:

$$h^0(t) = p_l L_0 \text{rect}\left(\frac{\theta_0}{FOV}\right) \times \delta\left(t - \frac{d_0}{c}\right) \quad (2)$$

式中: t 是时间变量, p_l 是 LED 灯的功率, θ_0 为直射光线入射角, d_0 为光源到 PD 的光传播距离, c 为光速, $\delta(t - d_0/c)$ 是光线传播的时延。 L_0 为 LOS 的路径损失, 可以根据式(3)得出。

$$L_0 = \frac{A_{PD}(m+1)}{2\pi d_0^2} \cos(\theta_0) \quad (3)$$

其中, m 为光的指向性, $m = -1/\log 2(\cos \varphi_{1/2})$; A_{PD} 是光子探测器的面积。

反射光的强弱与室内不同材质的墙壁和物体的反射率有关。定义为 $P_n = (\rho_1 \rho_2 \dots \rho_k) P$, 其中 $\rho_{(k)}$ 为反射面光谱反射率。

漫反射通道的脉冲响应由式(4)计算:

$$h^k(t) = \int p_n L_1 L_2 \dots L_{k+1} \text{rect}\left(\frac{\theta_{k+1}}{FOV}\right) \times \delta\left(t - \sum_{i=1}^{k+1} d_i\right) \quad (4)$$

式中: $\delta(\ast)$ 是光线传播的时延, θ_{k+1} 是第 k 次反射的入射角。 L_1, L_{k+1} 是路径损失, 如式(5)、(6)所示。

$$L_1 = \frac{A_{ref}(m+1)}{2\pi d_0^2} \cos^m(\phi_1) \cos(\theta_1) \quad (5)$$

$$L_{k+1} = \frac{A_{PD}}{\pi d_{k+1}^2} \cos^m(\phi_{k+1}) \cos(\theta_{k+1}) \quad (6)$$

理论上在室内 VLC 系统中有无量次的反射, 因此多径信道的时变信道脉冲响应可以表示为式(7):

$$H(t) = \sum_0^k h^k(t) \quad (7)$$

但由于色散的存在, 光线在传播过程中的功率显著降低, 多次反射后的光功率幅值非常有限, 对整个通道响应的影响几乎可以忽略。因此本研究只依次计算了光的直线传播和前 5 次反射信道响应。在 MATLAB 建模中采用迭代算法模拟了多径阶传播的信道响应。

根据式(5)和(6)模拟了视径信号的信道响应, 并分别用环路模拟了 5 种反射信号的响应。假设房间中有 N 个反射点, 光线在每次反射时都经过每个反射面, 那么接收端有 N^k 个计算元素。信道响应的值如图 4 所示在 MATLAB 中通过迭代累加算法得出。

时间离散通道是由时变通道响应 $h(t)$ 在符号率为 $R_s = 1/T_s$ 时建模的。查阅研究数据表明, 高速 LED 可以实现调制带宽 $B\omega = 50$ MHz。根据 Nyquist 方程计算, 则

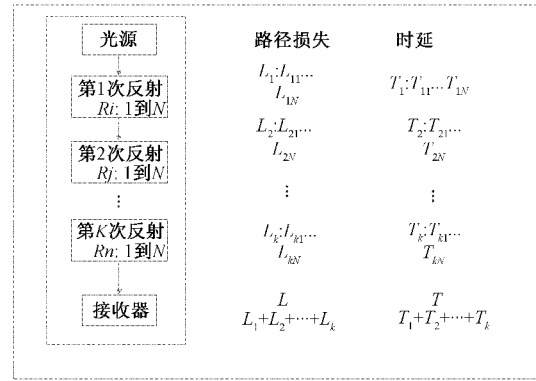


图 4 反射路径损失迭代算法

符号持续时间 $T_s = 1/(2B\omega) = 10$ ns。为了消除发射端信号码间干扰, 在 $H(t)$ 端应用矩形脉冲整形波形 P_t , 在接收端匹配对应的滤波器 P_r 。可由此计算出最终的离散时间信道响应 h , 如式(8)、(9)所示。

$$P_t = P_r = \frac{\text{rect}(t)}{\sqrt{T_s}}, \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (8)$$

$$h = P_t \times H(t) \times P_r \quad (9)$$

如图 5 所示, 发射机与接收机之间有 4 个光信号传输通道, 其离散时间通道响应分别定义为 $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ 。在信道模型中, 每个接收器分别通过两个信道接收来自两个发射机的信号。其中通过 h_{21} 和 h_{22} 传输的信号为胞间干扰信号。

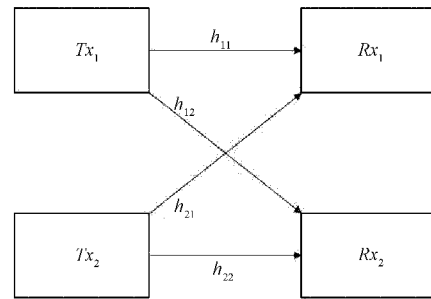


图 5 系统通道模型示意图

在发射源 T_{x1} 端输入信号 x_1 , T_{x2} 输入信号 x_2 , 引入加性高斯白噪声(AWGN), 接收机 R_{x1} 的输出信号 Y 由式(10)计算得出:

$$Y = R(x_1 * h_{11} + x_2 * h_{21}) + n \quad (10)$$

其中, “*”表示卷积, R 为接收器响应率, n 为高斯白噪声, 功率谱密度为 $\sigma^2 = N_0/2$ 。

1.2 矢量编码

直流偏压矢量编码(DCO-VC)是一种优化的信道划分技术, 在传输信号之前需要获取信道状态信息(channel state information, CSI)^[7-8]。由于在相对稳定的室内环境下, 多普勒效应不强, 因此信道的 CSI 并不难估计。M 位脉冲幅度调制(M-ary pulse amplitude modulation, M-PAM)方式是减少逆变器输出电压中所含低次谐波成分的有效方

法,同时又具有调整输出频率和输出电压的功能,用于本系统中对信号的调制与解调^[5]。

矢量编码的机制是对循环通道矩阵 \mathbf{H} 应用奇异值分解(SVD)。 \mathbf{H} 是离散时间通道响应 h 的一个 $N \times (N + \mu)$ 前缀循环矩阵,如式(11)所示。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \cdots & h_{\mu-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_0 & \cdots & h_{\mu-2} & h_{\mu-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h_0 & \cdots & h_{\mu-2} & h_{\mu-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, N 为子通道数, μ 为循环前缀(cyclic prefix, CP)长度。 \mathbf{H} 的奇异值分解为式(12):

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H \quad (12)$$

式中: \mathbf{U} 是 $N \times N$ 秩的酉矩阵, \mathbf{V} 是 $(N + \mu) \times (N + \mu)$ 秩酉矩阵, \mathbf{S} 是由 h 的奇异值组成的 $N \times (N + \mu)$ 秩对角矩阵, \mathbf{V}^H 是矩阵 \mathbf{V} 的共轭转置矩阵。

图 6 为矢量编码系统结构,信号调制过程采用 M 位脉冲幅度调制,脉冲幅度调制在调制过程中不产生复杂信号,以离散时间脉冲波作为载波。与目前多采用的正交调幅(QAM)不同,脉冲幅度调制方法是单维度的,也就是说它没有正交分量^[9]。通常一个 QAM 调制模式可以分解为两个正交的 PAM 调制模式,例如,16-QAM 调制相当于两个正交的 4-PAM 调制模式,64-QAM 调制相当于两个正交的 8-PAM 调制模式。PAM 使用离散时间基带模型作为调制器来传输信息符号,而解调过程则与调制过程逆向。

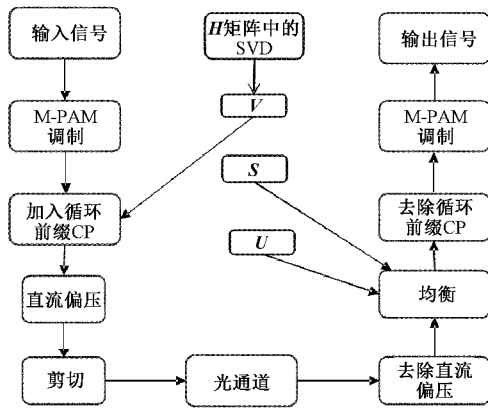


图 6 DCO-VC 系统结构

将输入的数据分组为符号 $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$, 在每个符号的末尾插入长度为 μ 的 CP, 可以表示为: $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N+\mu-1}]^T$ 。将矩阵 \mathbf{V} 应用于发射端预编码符号, 预编码信号 x 可描述为式(13):

$$x = \mathbf{V}\mathbf{X} \quad (13)$$

对信号 x 施加直流偏置, 产生真实的单极信号, 信号通过光通道传输到接收机。在接收端, 去除直流偏置后的接收信号可以表示为式(14):

$$y = \mathbf{H}x + n \quad (14)$$

考虑到该信道模型中引入了小区间干扰, 接收器 Rx_1

接收到从发射端 Tx_1 发出的信号 x_1 , 同时也接收到从发射端 Tx_2 发出的小区间干扰信号 x_2 。由于信号 x_1 预期是要传送到 Rx_1 的, 所以预编码向量 x_1 的计算方式由离散时间通道响应 h_{11} 的离散时间通道响应 $H_{11} = U_1 S_1 V_1^H$ 推导出 $x_1 = V_1 X_1$ 。同样地, 信号 X_2 是预期要传送到接收器 Rx_2 的, 它的预编码向量 x_2 通过离散时间通道响应 h_{11} 的离散时间通道响应 $H_{22} = U_2 S_2 V_2^H$, 推导 $x_2 = V_2 X_2$ 计算得出。

因此, Rx_1 处接收到的信号 y_1 为式(15):

$$y_1 = H_{11}x_1 + H_{21}x_2 + n \quad (15)$$

其中 n 为加性高斯白噪声。接收端应用匹配的滤波器 U_1 :

$$U_1^H y_1 = U_1^H H_{11}x_1 + U_1^H H_{21}x_2 + U_1^H n \quad (16)$$

式(16)可以整理改写为:

$$U_1^H y_1 = U_1^H U_1 S_1 V_1^H V X_1 + U_1^H U_2 S_2 V_2^H V X_1 + U_1^H n \quad (17)$$

零强迫均衡器 SI 可以在 MATLAB 仿真中通过如下代码产生:

$$SI = pinv(S' * S) * S';$$

对 y_1 施加零力均衡后, 信号变为:

$$SI U_1^H y_1 = SI U_1^H U_1 S_1 V_1^H V X_1 + SI U_1^H U_2 S_2 V_2^H V X_1 + SI U_1^H n \quad (18)$$

式(18)可以重新整理为式(19):

$$Y_1 = X_1 + SI U_1^H U_2 S_2 V_2^H V X_1 + SI U_1^H n \quad (19)$$

DCO-VC 系统的吞吐量可由式(20)计算:

$$T = B \times (1 - P_e) \times R_s \times \frac{N_c}{N_T} \quad (20)$$

式中: B 为 M-PAM 符号中的位数, P_e 为报文错误率, $R_s = 1/T_s$ 是符号率, N_c/N_T 是携带数据的子信道与总子信道数量的比率。

1.3 循环前缀

为了消除传输信号码间干扰, 本研究将循环前缀(cyclic prefix, CP)应用到 VC 系统中。CP 为符号提供了保护间隔, 避免了符号间的干扰^[10]。CP 为符号提供了保护间隔, 避免了符号间的干扰。CP 的长度与信道脉冲响应(channel impulse response, CIR)相关。设 L_i 为输入信号的长度, L_H 是信道响应的长度, 则信号和信道响应的线性卷积长度是 $L_i + L_H - 1$ 。为了保证循环卷积与线性卷积的大小相同, 需要在信号中插入长度为 $L_H - 1$ 的循环前缀。

1.4 直流偏压

在室内可见光通信应用中采用了强度调制和直接检测(intensity modulation and direct detection, IM/DD)技术。为了消除光信道中由多径衰落引起的码间干扰(intersymbol interference, ISI), 系统引入了基于矢量编码(vector coding, VC)的多通道调制(multi-channel modulation, MCM)技术。由于 IM/DD 系统只传输真实的单极正信号, 所以在传统的多通道调制方案中, 在传输前应

该施加直流偏压(direct current, DC)。当采用 IM/DD 技术时,传输时须保证信号均为正实数。所以在传输前需要给信号增加直流偏压使负信号转为正值。如果有信号值仍然小于 0,那么它应该被默认为 0 并发送,这种方法叫做剪切。这样信号中的负值在传输时就被消除了^[11-12]。在图 7 中,(a)是信号直流偏压添加之前的离散点数值,(b)是信号添加直流偏压和剪切后。可以观察到,第 5 和 7 个信号在添加直流偏压之后仍小于 0,因此这两个点的值会在发送前被设置为 0。剪切过程会产生一种可以看作是信号失真噪声的干扰,这种失真可以通过增大直流偏压来消除。

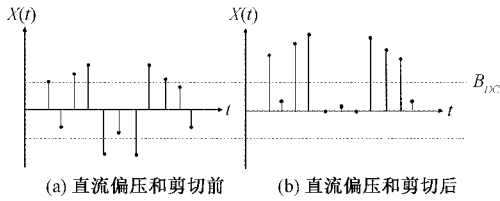


图 7 直流偏压和剪切示意图

然而,由于系统的功耗会随着直流偏压的增加而增加,因此直流偏压的值不可能无限增长。应该通过引用合适的直流偏置,将剪切失真抑制在一个合理的范围内。经过剪切后的单极信号可以表示为式(21):

$$X_u(t) = x_b(t) + B_{DC} + n_{clipping} \quad (21)$$

B_{DC} 代表需要加到信号上的偏压,可以由式(22)计算:

$$B_{DC} = K \sqrt{E[x_b^2(t)]} \quad (22)$$

式中: $E[x_b^2(t)]$ 为双极信号的平均功率, K 为可调节的比例系数。

2 仿真研究

2.1 信道响应

本文提出了基于朗伯漫反射的室内 VLC 通信布局信道响应模型,VLC 系统设置在一个尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的房间内,接收器所在高度为 0.7 m ,房间左下角设置为三维直角坐标系原点,坐标单位为 m ,两个 LED 坐标分别为 $(1, 2.5, 3)$, $(4, 2.5, 3)$,两个接收器分别位于 $(2.5, 2.5, 0.7)$, $(4.5, 2.5, 0.7)$ 。仿真反射模型参数如表 1 所示。

表 1 反射模型参数

参数	数值
房间尺寸	$5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$
接收器表面面积 A_{PD}/cm^2	1
半功率角, $\varphi_{1/2}/(^{\circ})$	60
接收器视场角 $\text{FOV}/(^{\circ})$	85
白光 LED 主波长/ nm	576
LED 光源功率/ W	1
光电二极管响应率 $R/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.4
调制带宽 B_{BW}/MHz	50

信道响应模型中,为了模拟真实房间中的情况,假设房间反射面有石膏和塑料两种材质。每个反射面的反射率如表 2 所示。

表 2 各表面反射率参数

反射面	南	北	东	西	桌面	天花板
材料	石膏	石膏	塑料	塑料	塑料	石膏
反射率 ρ	0.81	0.81	0.12	0.12	0.63	0.4

信道延迟扩展是多径光信道的一个特征,通常用均方根延迟 τ_{rms} 和平均超额延迟来量化,如式(23)所示。

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (23)$$

其中,

$$\bar{\tau} = \left(\sum_{i=0}^{T-1} |h_i|^2 \tau_i \right) / \left(\sum_{i=0}^{T-1} |h_i|^2 \right) \quad (24)$$

$$\overline{\tau^2} = \left(\sum_{i=0}^{T-1} |ht_i|^2 \tau_i \right) / \left(\sum_{i=0}^{T-1} |ht_i|^2 \right) \quad (25)$$

式中为 $t = i$ 时刻的通道响应为时间变量。均方根时延与多径码间干扰有关,当 τ_{rms} 小于信号符号持续时间的 10% 时,出现码间干扰的几率极小。信道延迟扩展与房间大小、发射机和接收机的位置有关^[13]。表 3 所示为仿真房间内各信道的信道时延分布。

表 3 各信道的信道时延分布

房间大小	可见光通道	均方根时延/	平均接入时延/
		ns	ns
(5, 5, 3)	h_{11}	0.253	0.003 8
	h_{12}	0.706	0.040 7
	h_{21}	0.253	0.003 8
	h_{22}	0.118	0.002 4

施加脉冲整形后的信道脉冲响应是时间离散的信道响应,符号持续时间 $T_s = 10\text{ ns}$ 。表 3 可见各发射器与对应的接收器之间均方根时延都较小,较大概率不会出现严重的码间干扰。图 8 为信道各次反射脉冲响应的仿真结果。结果显示,直射路径的响应信号功率最强,反射路径信号依次减弱,直至可以忽略不计。为了减少调制过程中的码间干扰,将多径信道响应添加一个方形滤波。图 9 为滤波后各信道的离散时间信道响应。

2.2 单基带调制模式下的系统性能

本系统中 M-PAM 调制方案采用不同的调制子信道数,对于矢量编码系统,分别采用了 2、4、8、16、32 位 PAM 模式。在 M 位调制方案中,调制模式的数目越多,表示一个信息符号中二进制位数越多,数据的传输速率就越高,即系统吞吐量就越高。一般来说,系统信噪比越高,输出信号的比特误码率越低,意味着信息传输准确率越高。由于调制模式参数的增加会导致相邻符号之间的差值减小,信号

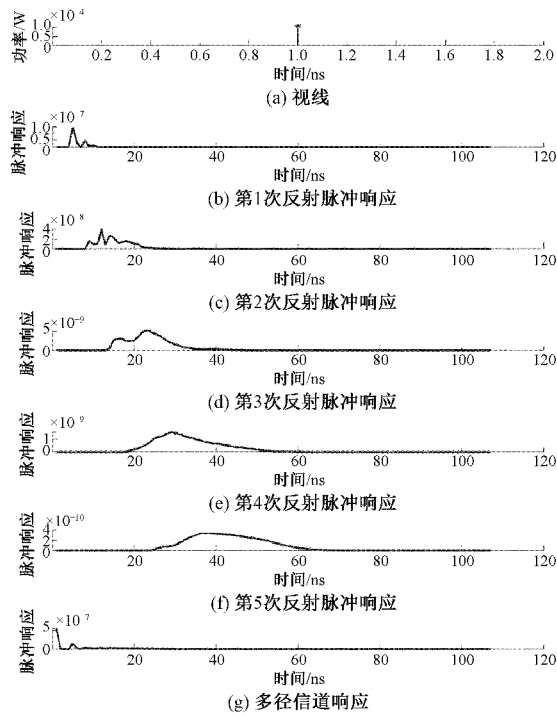


图 8 多径通道脉冲响应

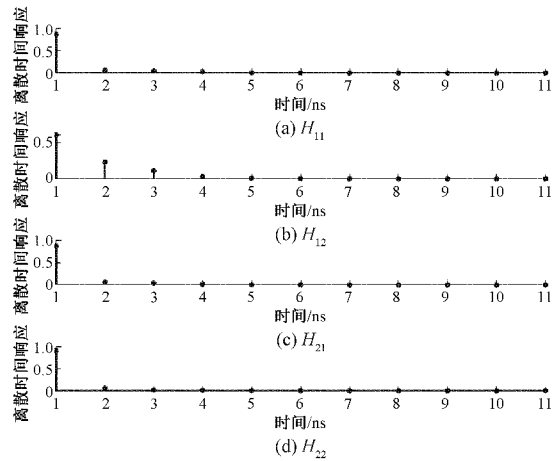


图 9 房间中 4 个光通道的离散时间通道响应

传输过程中的抗干扰能力则会随之降低,使得接收端解调后更难获得所需信号。因此,当增加调制方式时,需要更高的信噪比,即更强的信号功率来达到准确有效的信号输出。仿真结果用系统吞吐量 and 比特误码率来量化各方案的数据传输速率和准确率。

图 10 和 11 是当房间中只有一个 LED 光源作为发射器时的系统表现。分析可得出,随着调制参数增高,系统输出的吞吐量也依次增大,同时吞吐量达到峰值时的所对应的信噪比也依次增高。这意味着调制参数越高,系统数据传输效率越高,对于信号功率强度的要求也越高;调制参数较低时,同等信噪比条件下误码率更低,精确度更高,系统能够在干扰较大的情况下运行。

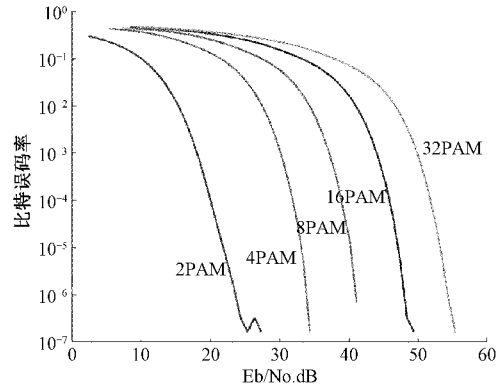


图 10 DCO-VC 系统 2、4、8、16、32 PAM 模式下误码率

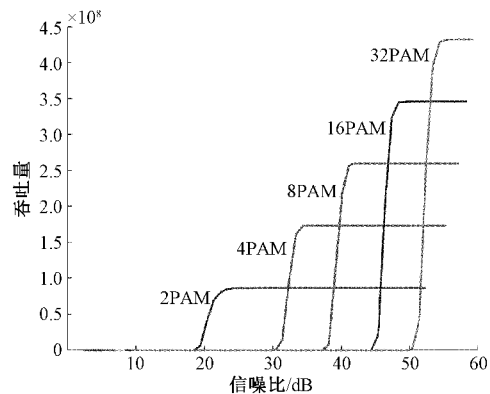


图 11 DCO-VC 系统 2、4、8、16、32PAM 模式下吞吐量

图 12 和 13 分别是引入干扰信号后系统在不同调制参数下的吞吐量和比特误码率。当干扰存在时,接收器需要从接收到的信号中提取到期望的信号,当误码率低于 10^{-4} 时系统才能产生较为理想的吞吐量。图 13 中可以看出, 2PAM 和 4PAM 调制参数可以达到有效的吞吐量输出,而 8~32PAM 系统吞吐量则达不到。因此在系统引入小干扰的情况下,采用较低的调制参数可以得到理想的信号输出。

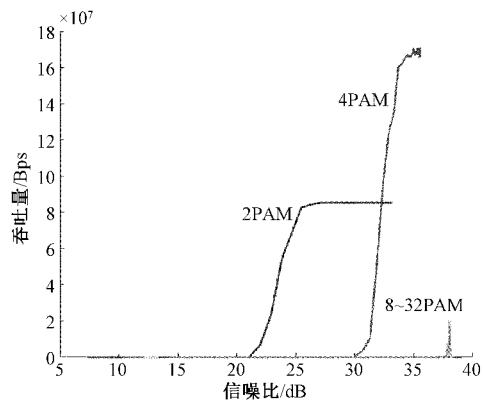


图 12 引入小干扰后系统 2、4、8、16、32PAM 模式下吞吐量

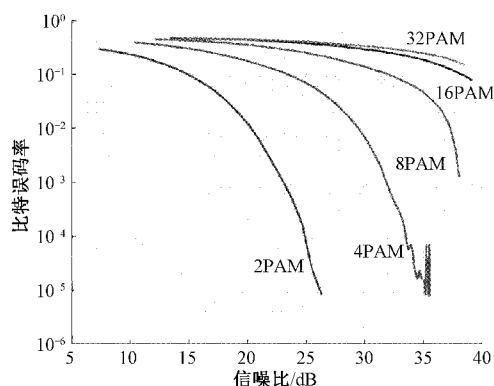


图 13 引入小小区间干扰后系统 2、4、8、16、32PAM 模式下比特误码率

3 结 论

本研究提出了基于朗伯漫反射为原理的 VLC 信道响应算法。分析了室内多径色散射的特点,并仿真了室内光通信信道脉冲响应,以及引入小小区间干扰后的信道响应。矢量编码系统采用 M-PAM 调制方案,应用 5 种不同的调制参数。研究发现,较高的调制方式可以提高系统的数据传输效率,但对信噪比的要求较大,抗干扰能力较差。因此,当系统环境条件良好时,噪音干扰较小,为了提高系统传输效率,应采用较高的调制参数。而当噪声条件较差时,为了保证数据的稳定传输,可以采用较低的调制参数。同时,调制参数越高也意味着系统功耗越大。实际应用中系统信噪比低于 35 dB 时,应采用 2PAM 或 4PAM 调制方式保证传输准确率;信噪比高于 40 dB 时可采用 8PAM 及以上调制方式提升传输速率。在短距离室内 VLC 系统中,引入小小区间干扰后,干扰信号比较强,解调时很难得到正确的信号。在进一步的相关研究中,可以对系统采用干扰消除技术,以识别并消除接收端的干扰信号,提高信号传输效率^[14-15]。

参考文献

- [1] JOVICIC A, LI J, RICHARDSON T. Visible light communication: Opportunities, challenges and the path to market[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26-32.
- [2] 丁举鹏,易芝玲,王劲涛,等. 医疗无线光通信技术: 进展,原型及展望[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2021: 1-19[2021-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210706.1354.004.html>.
- [3] KHAN L U. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges[J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 78-88.
- [4] 槐利,张敏娟,林清,等. 一种基于白光 LED 的室内通

信方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 13-17.

- [5] 何怡刚,程彤彤, FARHAN A, 等. 大规模 MIMO 系统下的低复杂度迫零预编码技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 140-146.
- [6] LEE K, PARK H, BARRY J R. Indoor channel characteristics for visible light communications[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 217-219.
- [7] 宋小庆,王慕煜,邢松,等. 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 106-115.
- [8] CISEK G, ZIELINSKI T P. Frequency-domain modeling of OFDM transmission with insufficient cyclic prefix using toeplitz matrices[C]. 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference, Chicago, IL, USA, 2018: 1-5.
- [9] 张华娣,楼华勋. MQAM 信号调制方式自动识别方法[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 200-211.
- [10] 李静,王永亮,段海龙,等. LED 可见光的虚拟仪器通信系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(10): 901-904.
- [11] CAI J F, CHEN M, HUANG N, et al. DC bias and power optimization for AV-DCO-OFDM in optical wireless communication[J]. Optics Communications, 2020, 473: 125951.
- [12] MORTADA B, GHANEM H, HAMMAD R, et al. Optical wireless communication performance enhancement using Hamming coding and an efficient adaptive equalizer with a deep-learning-based quality assessment[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3677-3688.
- [13] 郭心悦,李鑫. 基于 MIMO-OFDM 调制的室内 VLC 自适应传输方案研究[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 35-40.
- [14] 亢令川,王超,穆昱,等. 室内多小区可见光通信系统孔径阵列接收机的优化设计[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 71-78.
- [15] 刘建开,岳殿武,赵正铎. 基于角度分集接收机的多小区多用户 MIMO-VLC 系统[J]. 光通信技术, 2019, 43(11): 37-42.

作者简介

刘星辰,工学硕士,工程师,主要从事电力行业智能终端、物联传感研究等。

E-mail: lxncncpu0617@163.com

王利民,工学硕士,工程师,主要从事电力行业配电、用电终端研究等。

E-mail: wlmin_mail@163.com