

室内多小区可见光通信系统孔径阵列接收机的优化设计

亢令川, 王超*, 穆昱, 朱义君

战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001

摘要 针对室内可见光通信系统存在小小区间干扰的问题,设计优化孔径阵列接收机。孔径阵列接收机由裸露的中心探测器和多个接收单元组成,并采用雪崩光电二极管作为探测器。优化问题以最大信干噪比为优化目标,干信比等于 0 为约束条件,在室内中心位置和遍历位置两种接收模式下,获得孔径阵列接收机的最佳结构参数。结果表明:与通用的角分集接收机和单个雪崩光电二极管相比,当优化的孔径阵列接收机位于室内中心位置时,其误比特率降低至少 10 dB 和 14 dB;当优化的孔径阵列接收机遍历室内位置时,其信干噪比提高约 6 dB 和 15 dB。

关键词 光通信; 可见光通信; 孔径阵列接收机; 小小区间干扰; 信干噪比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1106002

Optimal Design of Aperture Array Receivers for Indoor Multicell Visible Light Communication System

Kang Lingchuan, Wang Chao*, Mu Yu, Zhu Yijun

Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract Aiming at addressing the intercell interference in an indoor visible light communication system, aperture array receivers are designed and optimized herein. The aperture array receivers comprise a bare central detector and various receiving elements and use avalanche photodiodes as detectors. In the optimization problem, the maximum signal-to-interference-and-noise ratio is assumed as the optimization objective, and the interference-to-signal ratio is constrained to zero. The optimal structure parameters of the aperture array receivers are obtained under two receiving modes at the center of the room and ergodic positions. The results show that compared with generalized angle diversity receivers and a single avalanche photodiode, the bit error rate of the proposed receivers is decreased by at least 10 dB and 14 dB, respectively, in the center of the room. Furthermore, the signal-to-interference-and-noise ratio of the proposed receivers is improved by 6 dB and 15 dB, respectively, in ergodic indoor positions.

Key words optical communications; visible light communication; aperture array receiver; intercell interference; signal-to-interference-and-noise ratio

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 040.1240

1 引言

伴随 5G 业务广度和深度的不断扩展,室内设备和终端数量快速增长,使得高速、大容量的多用户通信需求不断增加^[1-3]。然而现有的射频无线组网将面临安全性、频带拥挤和电磁污染等挑战。基于

发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)将作为一个新的替代方案以解决射频无线通信存在的固有问题。VLC 具有内生安全性、高度的空间复用、兼顾照明且无电磁污染的优势^[4-6],因此以光为介质的室内高速通信具有应用价值。

在实际的室内环境中,VLC 系统通常由多个光

收稿日期: 2020-12-04; 修回日期: 2021-01-05; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61901524,61671477)

* E-mail: xxgcwangchao@163.com

小区组成,每个光小区由一个 LED 发射光束覆盖的区域组成。为了满足室内照明需求,各小区之间发生重叠,这造成室内 VLC 系统存在严重的小区间干扰(ICI)^[7]。当用户处于小区间的重叠区域时,接收的信干噪比(SINR)会大幅下降。目前,针对室内 ICI 的管理主要包括多路访问和空间分集两种方式^[8-9]。其中,空间分集技术结合发射端发出的可组合的多个信号和接收端通过多个探测器合并接收的信号实现干扰管理,阵列接收机是该技术的主要内容之一。

目前阵列接收机的主要形式为角分集接收机(ADR)。ADR 一般被设计为半球形或金字塔形,探测器被布置在其表面^[10]。Chen 等^[11]采用半球形 ADR,并结合不同的信号合并方案,提高了室内 VLC 系统的 SINR,但是作者并未考虑室内 VLC 系统的小区间视距(LOS)干扰。Chen 等^[12]提出一种通用的 ADR 结构,并优化 ADR 侧面探测器的倾斜角度,以降低室内 SINR 波动,但是没有研究接收机的定向接收效果。Palacios 等^[13]将 ADR 的应用场景置于地下矿井,提出了半十二面体 ADR 结构,然而作者只是在该场景下提出解决 ICI 的方案,并未优化接收机结构。因此,现有方案多是基于接收机底座的立体结构实现探测器的多角度接收,而且往往只是提出设计方案,而在结构优化上鲜有工作。

针对上述问题,本文设计孔径阵列接收机(AAR)作为管理室内 ICI 的解决方案。该方案具有两个优势:一是 AAR 具有平面结构,更容易集成在小型设备中;二是 AAR 面向室内高速通信的需求,采用高灵敏度的雪崩光电二极管(APD)作为探测器。该解决方案分析 AAR 在室内中心位置和遍历位置两种接收模式下的干扰消除问题,以最大化 SINR 为优化目标,干信比(ISR)等于 0 为约束条件,优化 AAR 的结构参数。结果表明:当接收机位于室内中心位置时,优化的 AAR 的误比特率(BER)比通用的 ADR 降低了 10 dB,比单个 APD 降低了至少 14 dB;当接收机遍历室内位置时,优化的 AAR 的 SINR 比通用的 ADR 提高了约 6 dB,比单个 APD 提高约 15 dB。

2 室内多小区 VLC 系统 AAR 模型

2.1 接收机的结构

图 1 为 AAR 的结构示意图。AAR 由一个裸露的中心 APD 和多个接收单元(RE)^[14]组成,APD

和孔径均为圆形。中心 APD 位于 r_0 处,RE 位于以 r_0 为中心、半径为 r 的圆周上,且每个 RE 具有相同的光电性能,设第 n 个 RE 位于 r_n 处,其方位角为 Λ_n 。假设第一个 RE 的方位角 $\Lambda_0=0$,则第 n 个 RE 的方位角 Λ_n 表示为

$$\Lambda_n = \frac{n\pi}{2(N_r - 1)}, n = 1, 2, \dots, N_r - 1, \quad (1)$$

式中: N_r 为 AAR 包含的 APD 数量; $N_r - 1$ 为 RE 的数量。例如当 $N_r=5$ 时,4 个 RE 的方位角分别为 $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ 。

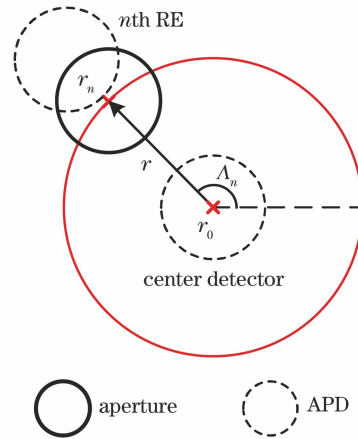


图 1 AAR 结构的示意图

Fig. 1 Diagram of AAR structure

图 2 为 RE 结构的示意图。假设 LED 方向竖直向下,AAR 方向竖直向上。图 2(a)表示 RE 的三维结构,APD 与不透明遮板平行且相距 l ,不透明遮板中有一个孔径,LED 发出的信号光穿过孔径在 APD 所在平面形成信号光斑。信号光的方向由 (θ, α) 表示,其中 θ 表示入射角, α 表示入射光的方向角。由于通信距离远大于接收机尺寸,因此可以认为到达小孔的信号光是平行光,信号光斑与孔径完全一致。RE 中孔径与 APD 在竖直方向并不是必须对准,使得 RE 定向接收一定视场内的信号光,且光斑中心到孔径中心在 APD 平面投影的距离 $l_{OE} = l \tan \theta$ 。图 2(b)表示 RE 的俯视图,孔径与 APD 在水平方向的相对位置由偏移距离 l_{OF} 和偏移角 β 表示,其中 β 与所在 RE 的方位角一致。当信号光斑与 APD 重叠时,系统实现信号传输。如图 2(b)所示,光斑与 APD 的重叠区域为 $GUHV$,面积为 A_{RE} ,该区域与光斑的半径 r_{EH} 、APD 的半径 r_{FH} 及光斑中心到 APD 中心的距离 l_{EF} 有关。为了简化表述,令 $r_{OQ} = r_1, r_{FH} = r_2, r_{EH} = r_3, l_{OF} = d, l_{EF} = D$,设 $r_1 = r_2 = r_3 = l$ 。通过几何运算,重叠面积 A_{RE} ^[14] 表示为

$$A_{RE} = \begin{cases} 2r_1^2 \arccos\left(\frac{D}{2r_1}\right) - \frac{D}{2}(4r_1^2 - D^2)^{1/2}, & 0 \leq D \leq 2r_1, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $r_1^2 \arccos\left(\frac{D}{2r_1}\right)$ 为扇形 EGH 的面积； $\frac{D}{2}(4r_1^2 -$

$D^2)^{1/2}$ 为四边形 $EGFH$ 的面积。由余弦定理可知， D 表示为

$$D = \sqrt{l^2 \tan^2 \theta + d^2 + 2ld \tan \theta \cos(\pi + \alpha - \beta)}, \quad (3)$$

式中： $(\pi + \alpha - \beta)$ 表示 $\angle EOF$ 。

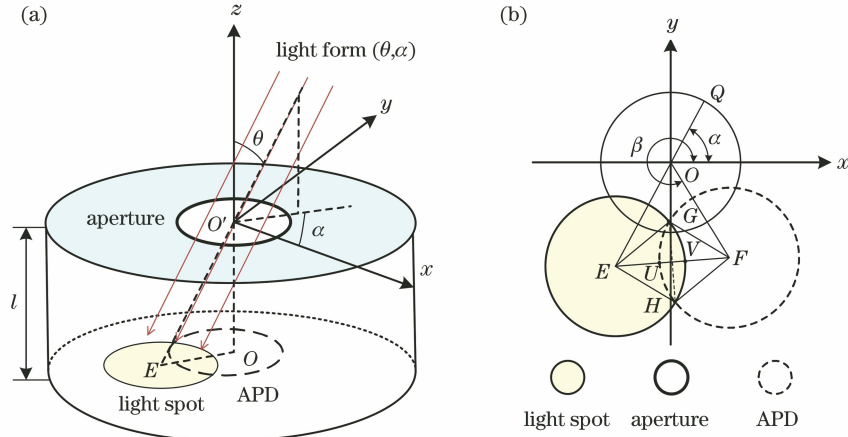


图 2 RE 结构的示意图。(a) 三维结构图；(b) 俯视图

Fig. 2 Diagram of RE structure. (a) Three-dimensional structure; (b) top view

2.2 信道增益

在室内多小区 VLC 系统中，墙壁反射造成的漫射分量远低于 LOS 分量，且相邻小区造成的 LOS 干扰是影响室内通信质量的主要因素，因此研究过程中只考虑 LOS 信道是合理的^[15-16]。LOS 信道遵循近朗伯模型。设天花板上的 LED 数量为 N_t 。第 i ($i = 1, 2, \dots, N_t$) 个 LED 和第 j ($j = 1, 2, \dots, N_r$) 个 APD 之间的 LOS 信道增益 h_{ij} 表示为

$$h_{ij} = \frac{(m+1)A_{ij}}{2\pi L_{ij}^2} \cos^m(\varphi_{ij}) \cos \theta_{ij}, \quad (4)$$

式中： L_{ij} 为第 i 个 LED 与第 j 个探测器之间的距离； φ_{ij} 为发射角， θ_{ij} 为入射角，且 $\varphi_{ij} = \theta_{ij}$ ；朗伯体阶数 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ ， $\Phi_{1/2}$ 为 LED 半功率辐射角； A_{ij} 为第 j 个 APD 接收第 i 个 LED 发射光信号的有效探测面积。中心 APD 的信道增益可以直接从(4)式获得。RE 的信道增益 h_{RE} 表示为

$$h_{RE}(d) = \begin{cases} \frac{(m+1) \cos^{m+1}(\theta)}{2\pi L^2} \left\{ 2r_1^2 \arccos\left[\frac{D(d)}{2r_1}\right] - \frac{D(d)}{2} [4r_1^2 - D(d)^2]^{1/2} \right\}, & 0 \leq D(d) \leq 2r_1, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

式中：因为接收机尺寸远小于通信距离，LED 到 RE 的距离 L 和入射角 θ 与 LED 到中心 APD 的一致。由(3)可得

$$D(d) = \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta + d^2 - 2r_1 d \tan \theta \cos(\alpha - \beta)}. \quad (6)$$

(5)式表示 RE 的信道增益 $h_{RE}(d)$ 是 d 的函数，表明改变 d ，能够改变 RE 接收信号的范围。当 AAR 位于小区干扰区域，通过优化 d 能够实现 RE 对干扰的消除。

2.3 信干噪比

LED 发射的光信号经过自由空间传播后，到达

第 j 个 APD 的功率表示为

$$y_j = \sum_{i=1}^{N_t} (\mu \gamma \Gamma h_{ij} P_0)^2 + n_j, \quad (7)$$

式中： μ 为 APD 响应度； γ 为 LED 调制指数； Γ 为雪崩增益； P_0 为每个 LED 的平均输出光功率； n_j 为 APD 噪声功率。APD 噪声包括散粒噪声和热噪声，均建模为实值加性高斯白噪声，其方差^[17-18]表示为

$$\begin{cases} \sigma_{j,\text{shot}}^2 = 2ef[\mu(P_j + P_b) + I_d]\Gamma^2 B \\ \sigma_{j,\text{thermal}}^2 = \frac{4K_B T B}{R_L} \end{cases}, \quad (8)$$

式中:第 j 个 APD 接收的总光功率 $P_j = P_0 \sum_{i=1}^{N_t} h_{ij}$; P_b 为环境光功率; B 为带宽; e 为电子电荷量; I_d 为环境光引起的背景电流; f 为过噪声因子; K_B 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; R_L 为并联负载值。

假设第 i 个 LED 为第 j 个 APD 服务, 则第 j 个 APD 输出的 ISR 表示为

$$\zeta_{ij} = \frac{\sum_{i'=1, i' \neq i}^{N_t} h_{ij}^2}{h_{ij}^2} \quad (9)$$

第 j 个 APD 输出的 SINR 表示为

$$\eta_{ij} = \frac{(\mu\gamma\Gamma h_{ij} P_0)^2}{\sum_{i'=1, i' \neq i}^{N_t} (\mu\gamma\Gamma h_{i'j} P_0)^2 + \sigma_{j, \text{shot}}^2 + \sigma_{j, \text{thermal}}^2} \quad (10)$$

因为 AAR 中的多个 APD 可能接受同一个小区服务, 所以为了从多个接收信号中获得最终的输出信号, 需要进行信号的分集合并。本文不讨论信号合并对接收机结构的影响, 且选择最佳合并 (SBC) 是一个较优的信号合并方案^[12], 因此采用 SBC 作为 AAR 的信号合并方式。SBC 输出的 SINR 表示为 $\max_{j=1}^{N_t} (\eta_{ij})$, 当干扰完全消除时, 优化问题总结为

$$\begin{aligned} & \max_d [\max_{j=1}^{N_t} (\eta_{ij})] \\ & \text{s. t. } \zeta_{ij} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

3 干扰消除分析

以室内四个光小区场景为例, 在室内中心位置和遍历位置两种通信模式下描述如何通过优化 d 来消除 ICI 并提高 AAR 接收的 SINR 的情况。当接收机位于室内中心位置时, 4 个 LED 到达该位置的距离和入射角相等, 此时接收的 ICI 最强, 因此分析 AAR 在该位置的 SINR 能够更好体现其消除 ICI 的能力; 而分析 AAR 遍历室内各个位置时的 SINR 能够反映其在室内移动时的接收性能。图 3 是室内四个光小区布局图, 四个小区具有对称性, 因此将室内划分为四个区域, 分别由各自区域的 LED 为用户提供服务, 以此减小小区切换频率^[19]。由于研究每个小区具有等价意义, 因此以小区 1 为例, 分析 AAR 位于室内中心位置和遍历位置时参数 d 的优化。

3.1 AAR 位于室内中心位置

当 AAR 位于室内中心位置时, 4 个 LED 到接收机的入射角 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 \leq \Phi_{1/2}$, 入射光的方向角 $\alpha_1 = \frac{5\pi}{4}, \alpha_2 = \frac{3\pi}{4}, \alpha_3 = \frac{\pi}{4}, \alpha_4 = \frac{7\pi}{4}$ 。由于中心

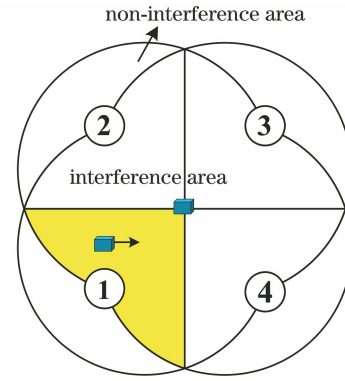


图 3 室内四个光小区布局示意图

Fig. 3 Layout of four indoor light intercells

APD 无法消除干扰, 因此 AAR 最终的输出信号来自某一个 RE。根据室内小区的对称结构, 当 AAR 接受小区 1 的服务时, 输出信号的 RE 的方位角 $\beta \in (0, \frac{\pi}{2})$ 。对于具有不同 RE 数量的 AAR, 其 RE 方位角的分布也不同。为了简化讨论, 分析 RE 的方位角 $\beta \in (0, \frac{\pi}{2})$ 的所有情况, 因此不同规模的 AAR 都属于其中的特例。则 (11) 式优化问题转换为

$$\begin{aligned} & \max_d \left[\frac{(\mu\gamma\Gamma h_1 P_0)^2}{\sum_{i'=2,3,4}^{N_t} (\mu\gamma\Gamma h_{i'} P_0)^2 + \delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2} \right] \\ & \text{s. t. } \frac{\sum_{i'=2,3,4}^{N_t} h_{i'}^2}{h_1^2} = 0 \\ & \beta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

结合 (5)、(6) 式, (12) 简化为

$$\begin{aligned} & \max_d h_1 \\ & \text{s. t. } 0 \leq \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_1 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{5\pi}{4}\right)} \leq 2r_1, \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_1 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{3\pi}{4}\right)} \geq 2r_1, \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_1 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right)} \geq 2r_1, \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_1 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{7\pi}{4}\right)} \geq 2r_1, \\ & \beta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

因为 d 的范围由 (13) 式约束条件得到, 且 d 的范围与入射角 θ_1 和 β 取值相关, 因此需要讨论 θ_1 和 β 取值情况以确定 d 范围, 最终得到 $\max_d h_1$ 。依据 θ_1 和 β 的定义域, 讨论分为 4 种情况。

1) 当 $\beta \in (0, \frac{\pi}{4})$ 时, 此时 d 的取值范围表示为

$$r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)} \leq d \leq r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right)}. \quad (14)$$

情况 1: $\tan^2 \theta_1 \left[2 \sin^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] < 4, \beta \in (0, \frac{\pi}{4})$ 时, 由(5)式可知, 此时 h_1 是 d 的单调递减函数, 因此 $d_{\text{opt}} = r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)}$.

情况 2: $\tan^2 \theta_1 \left[2 \sin^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] \geq 4, \beta \in (0, \frac{\pi}{4})$ 时, 由(5)式可知, 此时 h_1 对 d 是凹面向上的函数, 因此 $d_{\text{opt}} = r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right)$.

2) 当 $\beta \in (\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ 时, 此时 d 的取值范围表示为

$$-r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)} \leq d \leq r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right)}. \quad (15)$$

情况 3: $\tan^2 \theta_1 \left[2 \cos^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] < 4, \beta \in (\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ 时, 由(5)式可知, 此时 h_1 是 d 的单调递减函数, 因此 $d_{\text{opt}} = -r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)}$.

情况 4: $\tan^2 \theta_1 \left[2 \cos^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] \geq 4, \beta \in (\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ 时, 由(5)式可知, 此时 h_1 对 d 是凹面向上的函数, 因此 $d_{\text{opt}} = r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right)$.

以上 4 种情况总结为

$$d_{\text{opt}} = \begin{cases} \begin{cases} r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)}, \tan^2 \theta_1 \left[2 \sin^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] < 4, \beta \in \left(0, \frac{\pi}{4}\right) \\ r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right), \tan^2 \theta_1 \left[2 \sin^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] \geq 4 \end{cases} \\ \begin{cases} -r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + r_1 \sqrt{4 - \tan^2 \theta_1 \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)}, \tan^2 \theta_1 \left[2 \cos^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] < 4, \beta \in \left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right) \\ r_1 \tan \theta_1 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right), \tan^2 \theta_1 \left[2 \cos^2 \beta + \sin^2\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right)\right] \geq 4 \end{cases} \end{cases}. \quad (16)$$

3.2 AAR 遍历室内位置

当 AAR 遍历小区 1 位置时, 4 个 LED 到 AAR 的入射角为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$, 入射光的方向角为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, 且入射光的入射角和方向角与 AAR 的位置相关。如图 3 所示, 当 AAR 位于非干扰区域时, 输出信号来自中心 APD。当 AAR 位于干扰区域的某一位置时, 输出信号的 RE 的优化问题由(11)式转化为

$$\begin{aligned} & \max_d h_1 \\ & \text{s. t. } 0 \leq \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_1 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_1 \cos(\beta - \alpha_1)} \leq 2r_1, \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_2 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_2 \cos(\beta - \alpha_2)} \geq 2r_1, \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_3 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_3 \cos(\beta - \alpha_3)} \geq 2r_1, \\ & \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta_4 + d^2 + 2r_1 d \tan \theta_4 \cos(\beta - \alpha_4)} \geq 2r_1, \\ & \beta \in [0, 2\pi]. \end{aligned} \quad (17)$$

采用 AAR 在小区 1 各个位置的 d_{opt} 的均值作为遍历室内位置的 AAR 的结构参数, 表示为

$$\overline{d_{opt}} = E[d_{opt}(x, y)] = \iint_R p(x, y) d_{opt}(x, y) dx dy, \quad (18)$$

式中: $p(x, y)$ 建模为通信区域 R 内的均匀分布。由于(18)式的计算过于复杂而难以获得解析解, 本文通过产生多个随机室内位置来仿真 $\overline{d_{opt}}$ 的数值解。

4 仿真结果

多小区 VLC 系统建立在一个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的室内, 接收机所在平面的高度为 0.85 m 。室内三维直角坐标系原点建立在房间左下角, 坐标单位为 m , LED 的数量 $N_t = 4$, 坐标分别为 $(1.25, 1.25, 3), (1.25, 3.75, 3), (3.75, 3.75, 3), (3.75, 1.25, 3)$ 。仿真考虑了 4 种接收机, 即优化的 AAR、通用的 ADR、未优化的 AAR 和单个 APD, 4 种接收机使用的 APD 的探测面积相同, 且 APD 的视场角 (FOV) 为 $\pi/3$ 。其中优化的 AAR 考虑了 APD 数量 $N_r = 6, 7, 9$ 三种布局; 通用的 ADR 的 APD 数量为 $N_r = 6$, 其结构参数从文献[12]得到, 即侧面探测器的倾斜角为 51° ; 未优化的 AAR 中的 APD 数量 $N_r = 6$, 且参数 d 为 0 mm 。表 1 为室内多小区 VLC 系统的关键参数。

图 4 表示当 AAR 位于室内中心位置并接受小区

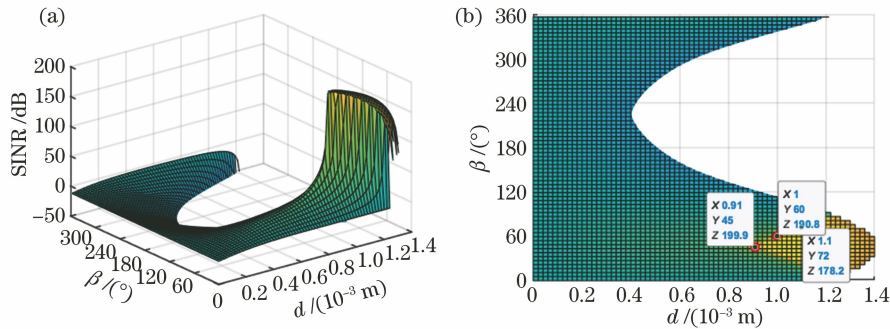


图 4 不同 RE 结构对应的 SINR 分布。(a) 三维图; (b) 投影图

Fig. 4 Distribution of SINR corresponding to different RE structures. (a) Three-dimensional view; (b) top view

当 LED 采用开关键控 (OOK) 调制, 接收机位于室内中心位置时, 优化的 AAR、未优化的 AAR、通用的 ADR ($N_r = 6$) 及单个 APD 的理论误比特率如图 5 所示, 横坐标 R_{SN} 表示发射端信噪比, 即 LED 上的平均信号功率除以接收机的噪声功率。由于探测器面积和通信距离等参数的影响, 信道增益达到 10^{-6} 量级, 需要 120 dB 的信噪比来抵消信道衰减, 因此当发射端信噪比 $R_{SN} = 140 \text{ dB}$ 时, 接收端信噪比仅为 20 dB 。以误比特率等于 10^{-4} 为例,

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
$\Phi_{1/2}/(^\circ)$	60
P_0/W	10
P_b/W	0.79×10^{-9}
γ	1
T/K	295
r_1/mm	0.5
r_2/mm	0.5
r/mm	3
l/mm	0.5
$\mu/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.45
R_L/Ω	1000
f	4
Γ	100
I_d/nA	10
B/MHz	100

1 服务时, 不同结构参数的 RE 对应的 SINR 分布情况。依据前文分析, 当 AAR 接受小区 1 服务时, 其输出信号的 RE 的方位角 $\beta \in (0, \frac{\pi}{2})$, 与图 4(a) 所示的 SINR 分布一致。当 $N_r = 6, 7, 9$ 时, AAR 中输出信号的 RE 的方位角 β 分别为 $\frac{2\pi}{5}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{4}$, 由(14)~(17)式可得, d_{opt} 分别为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}, 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}, 0.91 \times 10^{-3} \text{ m}$, 对应的 SINR 分别为 $178.2 \text{ dB}, 190.8 \text{ dB}, 200.4 \text{ dB}$, 与图 4(b) 的仿真结果基本一致。

优化的 AAR 随着 RE 数量的增加性能逐步提升; 与通用的 ADR ($N_r = 6$) 相比, 优化的 AAR 的误比特率降低了 10 dB ; 同时, 与未优化的 AAR 和单个 APD 相比, 优化的 AAR 的误比特率降低至少 14 dB 。

图 6(a) 表示当 $N_r = 6, 7, 9$ 时, AAR 在室内各个位置的 d_{opt} 的累计分布函数 (CDF) 曲线。仿真中, 均匀分布随机产生 2500 个室内位置, 并计算接收机在每个位置的 d_{opt} , 最终统计计算 d_{opt} 的 CDF。

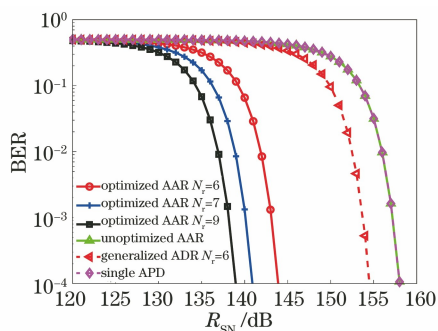


图 5 4 种接收机位于室内中心位置时的理论误比特率比较

Fig. 5 Comparison of theoretical BER of four receivers in the center of the room

图 6(a) 中 CDF 曲线的阶梯形状表示采集的 d_{opt} 并非连续的, 这是因为随机产生的室内位置是离散的。



图 6 AAR 遍历室内位置时 d 的优化。(a) AAR 遍历室内位置的 d_{opt} 的 CDF; (b) $\overline{d_{opt}}$ 与不同 APD 数量的关系

Fig. 6 Optimization of d when AAR traverses indoor positions. (a) CDF of the d_{opt} for the AAR in ergodic indoor positions; (b) relationship between $\overline{d_{opt}}$ and number of different APDs

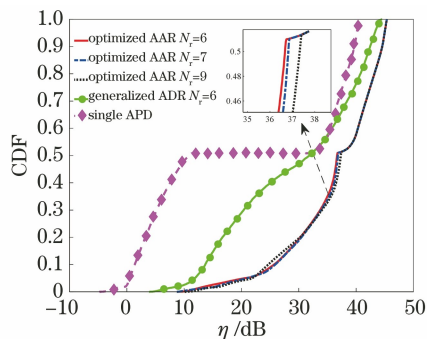


图 7 优化的 AAR、通用的 ADR 和单个 APD 在室内接收的 SINR 的 CDF

Fig. 7 CDF of SINR received by optimized AAR, generalized ADR, and single APD indoor

5 结 论

为解决室内多小区 VLC 系统的 ICI 问题, 设计优化了 AAR 的结构参数, 充分改善了 AAR 在室内的 SINR 性能。优化过程中, 以最大 SINR 为目标、

对图 6(a) 中的 d_{opt} 求均值得到图 6(b), 可知, 当 $N_r=6, 7, 9$ 时, $\overline{d_{opt}}$ 分别为 $6.685 \times 10^{-4} \text{ m}$, $6.018 \times 10^{-4} \text{ m}$, $5.761 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。

图 7 表示优化的 AAR、通用的 ADR 和单个 APD 在室内接收的 SINR 的 CDF, 其中优化的 AAR 的参数 $\overline{d_{opt}}$ 由图 6(b) 得到。通过仿真接收机在房间中所有可能的位置, 并计算各个位置接收的 SINR, 最终统计确定 SINR 的 CDF。结果表明 $N_r=6, 7, 9$ 时, 优化的 AAR 的 SINR 十分接近, 这与 $\overline{d_{opt}}$ 选择有关, 因为 d_{opt} 的均值只能体现参数分布的整体特征, 无法保证接收机在室内所有位置实现最佳的接收性能。尽管如此, 优化的 AAR 仍然表现出比通用的 ADR ($N_r=6$) 和单个 APD 更好的性能, SINR 分别提高了约 6 dB 和 15 dB。

ISR 等于 0 为约束条件, 优化结构参数 d 。通过分析 AAR 在室内中心位置和遍历室内位置接收的 SINR 的优化问题, 得到最佳的结构参数。优化的 AAR 相较通用的 ADR 及裸露的单个 APD, 无论在特殊位置或者遍历位置, 都表现出更好的 BER 性能和 SINR 性能。然而优化过程也存在一些问题, 当接收机遍历室内位置时, 无法获得最佳结构参数的解析解, 只能通过仿真获得数值解。

参 考 文 献

[1] Mushfique S I, Alsharoa A, Yuksel M, et al. Optimization of SINR and illumination uniformity in multi-LED multi-datastream VLC networks [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(3): 1108-1121.

[2] Soltani M D, Purwita A A, Zeng Z H, et al. Modeling the random orientation of mobile devices: measurement, analysis and LiFi use case [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 67 (3):

- 2157-2172.
- [3] Chen Q R, Zhang T. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0406003.
陈泉润, 张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0406003.
- [4] Rong X C, Wang C, Ren J W, et al. Visible light communication system based on embedded hard drive indicator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1806004.
荣新驰, 王超, 任嘉伟, 等. 基于嵌入式硬盘指示灯的可见光通信系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1806004.
- [5] Gismalla M S M, Abdullah M F L. Optimization of received power and SNR for an indoor attocells network in visible light communication[J]. *Journal of Communications*, 2019: 64-69.
- [6] Chen C, Basnayaka D A, Purwita A A, et al. Wireless infrared-based LiFi uplink transmission with link blockage and random device orientation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1175-1188.
- [7] Cui K Y, Quan J G, Xu Z Y, et al. Performance of indoor optical femtocell by visible light communication [J]. *Optics Communications*, 2013, 298/299: 59-66.
- [8] Bai X W, Li Q, Tang Y Q, et al. Low-complexity spectrum resource allocation algorithm for indoor ultra-dense visible light communication networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0906007.
白向伟, 李青, 唐燕群, 等. 低复杂度室内超密集可见光通信网络频谱资源分配算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0906007.
- [9] Abdalla I, Rahaim M B, Little T D C, et al. Interference in multi-user optical wireless communications systems [J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2020, 378(2169): 20190190.
- [10] Nuwanpriya A, Ho S W, Chen C S, et al. 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.
- [11] Chen Z, Basnayaka D A, Wu X P, et al. Interference mitigation for indoor optical attocell networks using an angle diversity receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 3866-3881.
- [12] Chen C, Zhong W D, Yang H L, et al. Reduction of SINR fluctuation in indoor multi-cell VLC systems using optimized angle diversity receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(17): 3603-3610.
- [13] Palacios Játiva P, Cañizares M R, Meza C A A, et al. Interference mitigation for visible light communications in underground mines using angle diversity receivers[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 367.
- [14] Wang T Q, He C W, Armstrong J, et al. Performance analysis of aperture-based receivers for MIMO IM/DD visible light communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1513-1523.
- [15] Rahaim M, Little T D C. Interference in IM/DD optical wireless communication networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(9): D51-D63.
- [16] Zhang Q, Yue D W. Design of indoor receiver using multiple-input and multiple-output ACO-OFDM visible light communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0106001.
张琦, 岳殿武. 室内 MIMO ACO-OFDM 可见光通信系统接收机设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0106001.
- [17] Gao M J, Li C, Xu Z Y, et al. Optimal transmission of VLC system in the presence of LED nonlinearity and APD module saturation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1-14.
- [18] Zhang L, Chitnis D, Chun H, et al. A comparison of APD- and SPAD-based receivers for visible light communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2435-2442.
- [19] Chen C, Basnayaka D A, Haas H, et al. Downlink performance of optical attocell networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 137-156.