

基于SSK的室内VLPC系统设计及性能分析

王法松¹, 姜 雯¹, 李 睿², 史士杰^{1*}

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南郑州450001; 2. 河南工业大学理学院, 河南郑州450001)

摘要: 本文设计了一个多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)的三维室内可见光定位通信一体化(Visible Light Position and Communication, VLPC)系统, 该系统在接收端基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的三维可见光定位(Visible Light Position, VLP)算法获得定位数据, 同时估计信道状态信息(Channel State Information, CSI)并上传给发射端进行定向通信. 该系统的发射端基于空移键控(Space Shift Keying, SSK)的室内可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术实现系统的通信功能. 另外, 本方案可以完全避免通信与定位子系统之间的干扰. 同时, 通过推导定位误差的克拉美罗下界(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)和SSK-VLC的通信可达速率来评估本文提出的VLPC系统的性能. 仿真结果验证了本文所提方案的有效性.

关键词: 可见光定位; 可见光通信; 空移键控; 克拉美罗下界; 可达速率

基金项目: 国家自然科学基金(No.62101505); 河南省科技攻关(No.222102210003); 河南省重大科技专项(No.231100210100)

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)06-1809-08

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230540

Design and Performance Analysis of Indoor VLPC System Based on SSK

WANG Fa-song¹, JIANG Wen¹, LI Rui², SHI Shi-jie^{1*}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. School of Sciences, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In this paper, a multiple-input single-output (MISO) three-dimensional indoor integrated visible light positioning and communication (VLPC) system is proposed. The system obtains positioning data based on the received signal strength (RSS) three-dimensional visible light position (VLP) algorithm at the receiver; simultaneously estimates the channel state information (CSI) and uploads it to the transmitter for directional communication. The transmitter of this system is based on space shift keying (SSK) indoor visible light communication (VLC) technology to achieve the communication function of the system. Moreover, this scheme can completely avoid interference between communication and positioning subsystems. As a benchmark, we also derive analytical expression of the Cramér-Rao lower bound (CRLB) of the positioning error and the communication achievable rate of SSK-VLC of the VLPC system. The simulation results show the effectiveness of the proposed solutions.

Key words: visible light position; visible light communication; space shift keying; Cramér-Rao lower bound; achievable rate

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62101505); Key Technologies R&D Program of Henan Province (No.222102210003); Science and Technology Major Projects of Henan Province (No.231100210100)

1 引言

随着互联网的蓬勃发展, 在室内配置大量移动设备的物联网(Internet-of-Things, IoT)正在成为现实, 射频

(Radio Frequency, RF)通信中的频谱资源匮乏问题就显得更加突出^[1]. 由于可见光通信(Visible Light Communication, VLC)频谱资源丰富、设备简单和抗电磁干扰等优

势,被认为是6G有前途的候选技术之一^[2]. 另外,可见光定位(Visible Light Position, VLP)技术依靠照明设备获取低延迟的定位信息,已被广泛研究^[3]. 通信和定位功能是IoT应用的基础,因此,实现VLC和VLP一体化设计对于构建多功能6G无线网络至关重要^[4].

空移键控(Space Shift Keying, SSK)是一种直接和简单的空间调制(Spatial Modulation, SM)方案^[5],相比传统的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术能够有效避免信道间干扰(Inter-Channel Interference, ICI)^[6]. VLP中通常使用的三边定位法在三维定位时由于无法直接估计距离信息而失效. 因此,一些学者尝试解决此问题. 在文献[7]中提出通过接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)和到达角(Angle of Arrival, AOA)来寻找最可能的三维位置. 文献[8]将迭代二维三边测量和非线性最小二乘(Non-Linear Least Squares, NLLS)结合,在被发光二极管(Light Emitting Diode, LED)包围的投影区域内估计用户位置.

然而,目前对VLC和VLP的研究大多是独立的,研究一个通信、定位和照明三种服务都满足的单个基础设施,在功耗和成本方面有重要意义^[9]. 有部分文献分析了可见光定位通信一体化(Visible Light Position and Communication, VLPC)系统. 文献[10]将时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)技术引入VLPC系统中,其中时间资源被分成几个时隙,分别分配给VLC和VLP信号. 文献[11]提出基于定位信息进行VLC,并将VLPC系统功率分配转化为优化问题,设计中只考虑了单输入多输出(Single-Input Multiple-Output, SIMO)系统,因此不能应用于基于SSK调制的多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)结构.

本文设计了三维场景下的MISO-VLPC系统模型,该系统利用RSS对未知用户施行三维定位,然后基于定位信息实现信道状态信息(Channel State Information, CSI)估计,接着通过SSK-VLC下行链路对用户定向通信. 针对所考虑的系统,通过数学方法推导了其定位误差的理论克拉美罗下界(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)和SSK辅助通信的通信可达速率的解析上下界. 基于上述过程,所提方案可以有效地将VLC和VLP集成到单个系统中,并能利用所提三维VLPC一体化模型精确地估计用户位置和实现高速率通信. 仿真实验验证了系统的可行性和有效性.

2 系统模型

本文考虑一个室内MISO-VLPC一体化下行链路系统,该系统要求在实现对用户定位功能的同时还可以实现通信功能,如图1所示. 在天花板有 N_i 个竖直向下且高度相同的LED作为发射器,将 $\mathbf{s}_j = (x_j, y_j, z_j)^T$ 记为

第 $j \in \{1, 2, \dots, N_i\}$ 个LED的已知坐标. 用户端安装一个竖直朝上的PD作为接收器,其坐标未知,记为 $\mathbf{u} = (x, y, z)^T$. 假设用一个能共享信息的中央控制器连接所有LED,上行链路反馈信息用红外模块实现,用户端配有计算位置坐标的处理器,并假设信道为拟静态,在每一时隙内信道状态保持不变. 为满足系统对定位和通信功能的需求,将系统的信息帧结构分为三部分:定位信息帧、反馈信息帧和通信信息帧. LED在定位信息帧部分发送用于定位的光信号,用户端由接收的光信号RSS值进行自身坐标估计;在反馈信息帧,通过上行链路将估计坐标反馈给中央控制器,然后发射端根据估计信息获取LED和PD之间的CSI;最后在通信信息帧部分,LED依据获取的CSI值向用户通信.

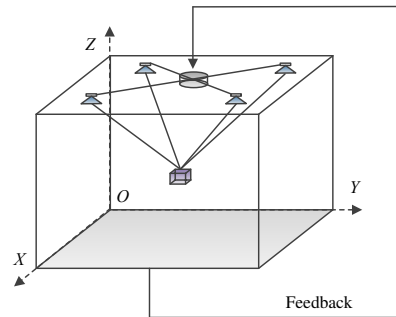


图1 MISO-VLPC系统

一般在VLC系统中,直射链路(Line-of-Sight, LoS)的信道增益要比非直射链路高得多^[12]. 在仅考虑LoS的环境下,根据朗伯辐射模型,第 j 个LED到PD之间的信道增益可由 h_j 表示^[13]:

$$h_j = \begin{cases} \frac{\eta TR}{2\pi d_j^2} (\tilde{m} + 1) A_{\text{Rx}} \cos^k(\phi) \cos \theta, & 0 \leq |\theta| \leq \Psi_{\text{FoV}} \\ 0, & |\theta| > \Psi_{\text{FoV}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, A_{Rx} 为PD的有效接收面积,朗伯发射阶数为 $\tilde{m} = -1/\log_2(\cos \Phi_{1/2})$, $\Phi_{1/2}$ 是LED的半功率角, d_j 代表第 j 个LED到PD的距离, ϕ 是LED的辐射角, θ 为PD的入射角, Ψ_{FoV} ($\Psi_{\text{FoV}} \leq \pi/2$)是PD的视场角, η 为LED的电光转换效率, T 是光学滤波器的增益, R 为PD的响应度. 可见,要获得用户的信道状态信息,必须获得其位置信息.

2.1 定位信息帧

假设在定位帧,各LED发射的定位功率 P_p 相同,则接收端接收到的来自第 j 个LED的功率可表示为 $P_{r,j}$:

$$P_{r,j} = P_p h_{p,j} \quad (2)$$

其中, $h_{p,j}$ 是第 j 个LED和用户之间的定位信道增益. 由式(1)和式(2)得到LED到PD的距离为

$$d_j = \sqrt{\frac{\eta TR(\tilde{m}+1)A_{\text{Rx}}P_p|z_j-z|^{\tilde{m}+1}}{2\pi P_{r,j}}} \quad (3)$$

同时,两者的水平距离为

$$r_j^2 = d_j^2 - (z_j - z)^2 \quad (4)$$

与二维定位不同,在三维定位时,式(3)中的 d_j 依赖于未知参数 z ,由于没有 PD 的高度和 PD 与 LED 的高度差作为先验知识,无法直接确定 LED 到 PD 的直线距离,所以经典的三边测量法失效.

根据空间几何特性,三维空间可表征为无数个平行的二维平面在第三个维量上的叠加.本文考虑采用三维的降维 VLP 定位算法^[14]估计用户高度.该方法与指纹定位法相比,不需要使用大量的内存存储,提高了执行效率.

该方法对定位区间的高度进行分层,每层高度限定在最小高度值 z_{\min} 和最大高度值 $z_{\max} < z_j$ 之间,分辨率为 Δz ,将距离公式转化为圆的方程,并在重叠面积最小值处找到 z 的估计值,过程如算法 1 所示.

算法 1 三维降维 VLP 定位算法

输入:测量 $P_{r,j}$ 值,给定参数 $\eta, T, R, \tilde{m}, A_{\text{Rx}}$ 和 LEDs 坐标

输出:估计值 \hat{z}

1. 初始化参数:面积最小值 S_{\min}
2. for ($z = z_{\min} : \Delta z : z_{\max}$)
3. 由式(3)和(4)计算 z 对应的 r_j^2
4. 根据 $r_j^2 = (x-x_j)^2 + (y-y_j)^2$ 求得以第 j 个 LED 为圆心、以 $|r_j|$ 为半径的圆并求解两两组合的交点和重叠面积 $S(z)$
5. if ($S(z) < S_{\min}$)
6. $S_{\min} = S(z); \hat{z} = z$
7. end if
8. end for

得到 \hat{z} 后,得到以下方程组:

$$\begin{cases} d_1^2 = (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (\hat{z}-z_1)^2 \\ \vdots \\ d_{N_t}^2 = (x-x_{N_t})^2 + (y-y_{N_t})^2 + (\hat{z}-z_{N_t})^2 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $z_1 = z_2 = \dots = z_{N_t}$.

为了获得该方程组的解,其方程个数需在三个以上.也就是 LED 至少有三个且不在同一直线上,即 $N_t \geq 3$.接着将式(5)写成矩阵的紧凑形式:

$$A\mathbf{q} = \mathbf{b} \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{q} = [x \quad y]^T \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_{N_t} - x_1 & y_{N_t} - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_{N_t} - x_{N_t-1} & y_{N_t} - y_{N_t-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_{N_t}^2) - (x_1^2 + y_1^2) + (x_{N_t}^2 + y_{N_t}^2) \\ \vdots \\ (d_{N_t-1}^2 - d_{N_t}^2) - (x_{N_t-1}^2 + y_{N_t-1}^2) + (x_{N_t}^2 + y_{N_t}^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过最小二乘法^[15]求解式(6),可以最终估计出位置 $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})^T$,具体求解方程如下:

$$\mathbf{q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (10)$$

2.2 反馈信息帧

估计出 $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})^T$ 后,为实现进一步通信,通过反馈获得的用户位置计算每个 LED 到 PD 的 CSI 值,假设第 j 个 LED 和 PD 之间的 CSI 估计值记为 $\hat{h}_{c,j}$,则

$$\hat{h}_{c,j} = \frac{\eta TR(\tilde{m}+1)A_{\text{Rx}}|z_j - \hat{z}|^{\tilde{m}+1}}{2\pi \hat{d}_j^{\tilde{m}+3}} \quad (11)$$

其中, \hat{d}_j 是第 j 个 LED 到 PD 的距离估计,即 $\hat{d}_j = \|\mathbf{s}_j - \hat{\mathbf{u}}\|_2$,其中, $\|\cdot\|_2$ 是欧氏距离.

2.3 通信信息帧

本文采用 SSK-VLC 系统实现通信.与传统 MIMO 系统不同,SSK 在一个调制周期内只需激活一颗 LED 传递信息,其余 LED 进行照明,不仅避免多信道干扰,还保证了系统的低复杂度.LED 由偏置电流 $I_{\text{DC}} \in \mathfrak{R}_+$ 驱动来调整照明水平,为防止发生削峰失真,规定每个 LED 总电流的范围为 $[(1-\alpha)I_{\text{DC}}, (1+\alpha)I_{\text{DC}}]$, $\alpha \in [0, 1]$ 为调制指数.因此,信息承载信号 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_t}]^T$ 须满足 $\forall i, |x_i| \leq B$ 且 $B = \alpha I_{\text{DC}} \in \mathfrak{R}_+$ 的限制.当 LED 为 N_t 个时,SSK-VLC 系统的每个符号可传输 $\lfloor \log_2 N_t \rfloor$ 比特信息,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整.每个 LED 都规定一个约束强度因子 s ,因此发射端发送的通信符号向量 \mathbf{x} 为

$$\mathbf{x} = s[0, \dots, 1, \dots, 0]^T = s\mathbf{e}_\omega \quad (12)$$

其中, \mathbf{e}_ω 表示单位矩阵的第 ω 列, $\omega \in \{1, 2, \dots, N_t\}$,在不失一般性的情况下假设 \mathbf{x} 的平均功率为 $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = s^2 = P_c$,其中, P_c 为每次传输的通信总功率,假设定位功率和通信功率相等,即 $P_c = P_p$.

在 SSK-VLC 系统中,每个通信信息帧选择特定的 LED 发送信号后,用户端接收到的通信信号 y 可简化为

$$y = \mathbf{h}_c \mathbf{x} + w_c = s\mathbf{h}_c \mathbf{e}_\omega + w_c = s\mathbf{h}_{c,\omega} + w_c \quad (13)$$

这里 $\mathbf{h}_c = [h_{c,1}, h_{c,2}, \dots, h_{c,N_t}]$ 是 $1 \times N_t$ 维的通信信道增益向量, $\mathbf{h}_{c,\omega} = \mathbf{h}_c \mathbf{e}_\omega \in \mathcal{H}_c$, \mathcal{H}_c 表示 LED 和用户之间的 $N = 2^{\lfloor \log_2(N_t) \rfloor}$ 个所有可能信道状态的集合, $w_c \sim \mathcal{N}(0, \sigma_c^2)$.

为了确定激活 LED 的索引,以极大似然(Maximum Likelihood, ML)为基本原理的检测算法是室内 SSK-VLC 系统中性能最优的信号检测算法^[16].在 SSK 中,ML 遍历所有天线序列,然后从 N_t 根发射天线序列中选

择最优的一根,即

$$\hat{j} = \arg \min_{j \in \{1, 2, \dots, N_i\}} \|y - \mathbf{h}_c \mathbf{x}\|^2 \quad (14)$$

其中, \hat{j} 表示激活 LED 序号的估计值.

3 性能分析

3.1 定位性能分析

考虑采用 CRLB 分析定位性能^[17], CRLB 表示一个确定性参数的无偏估计方差的下限, 因此可以通过该点的 CRLB 推导出当前系统理论最佳定位性能.

在模拟环境中, 假设 LED 发射的光功率为 P_p , 则接收器接收到来自第 j 个 LED 的光功率为

$$P_{R,j} = h_{p,j} P_p + P_n \quad (15)$$

其中, P_n 是测量噪声功率, 服从均值为 0 方差为 δ_p^2 的高斯噪声. 因此, 测量噪声的 PDF 为

$$p_{j,\text{LoS}}(P_n | \mathbf{u}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_p^2}} \exp\left[-\frac{(P_{R,j} - h_{p,j} P_p)^2}{2\delta_p^2}\right] \quad (16)$$

似然函数 $L(\mathbf{u})$ 和对数似然函数 $\Lambda(\mathbf{u})$ 分别为

$$L(\mathbf{u}) = \prod_{j=1}^{N_i} p_{j,\text{LoS}}(P_n | \mathbf{u}) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Lambda(\mathbf{u}) &= \ln \prod_{j=1}^{N_i} p_{j,\text{LoS}}(P_n | \mathbf{u}) = \sum_{j=1}^{N_i} \ln p_{j,\text{LoS}}(P_n | \mathbf{u}) \\ &= N_i \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_p^2}} \right) - \sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{(P_{R,j} - h_{p,j} P_p)^2}{2\delta_p^2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

CRLB 的推导基于 $\mathbf{u} = (x, y, z)^T$ 的 Fisher 信息矩阵 (Fisher Information Matrix, FIM) 的逆矩阵, 即用户估计位置 $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})^T$ 的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 的下界:

$$\text{MSE} = \text{E} \left[(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2 + (\hat{z} - z)^2 \right] \geq \text{Tr}[\mathbf{I}(\mathbf{u})^{-1}] \quad (19)$$

其中, $\mathbf{I}(\mathbf{u})$ 是 FIM, 其具体形式为

$$\mathbf{I}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} Z^{xx} & Z^{xy} & Z^{xz} \\ Z^{yx} & Z^{yy} & Z^{yz} \\ Z^{zx} & Z^{zy} & Z^{zz} \end{bmatrix} \quad (20)$$

FIM 矩阵中各元素为

$$Z^{mn} = -\text{E} \left\{ \frac{\partial^2 \Lambda(\mathbf{u})}{\partial m \partial n} \right\}, \quad m, n \in \{x, y, z\} \quad (21)$$

由式(18)求得

$$\frac{\partial \Lambda(\mathbf{u})}{\partial m} = \frac{1}{\delta_p^2} \sum_{j=1}^{N_i} P_p (P_{R,j} - h_{p,j} P_p) \frac{\partial h_{p,j}}{\partial m} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Lambda(\mathbf{u})}{\partial m \partial n} &= \frac{1}{\delta_p^2} \sum_{j=1}^{N_i} \left(-P_p^2 \frac{\partial h_{p,j}}{\partial m} \frac{\partial h_{p,j}}{\partial n} \right. \\ &\quad \left. + P_p (P_{R,j} - h_{p,j} P_p) \frac{\partial^2 h_{p,j}}{\partial m \partial n} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

因此有

$$Z^{mn} = -\text{E} \left\{ \frac{\partial^2 \Lambda(\mathbf{u})}{\partial m \partial n} \right\} = \frac{1}{\delta_p^2} \sum_{j=1}^{N_i} \left(P_p^2 \frac{\partial h_{p,j}}{\partial m} \frac{\partial h_{p,j}}{\partial n} \right) \quad (24)$$

由式(1)计算得相关的微分项为

$$\frac{\partial h_{p,j}}{\partial x} = \frac{-C(\tilde{m}+3)(z_j - z)^{(\tilde{m}+1)}(x_j - x)}{d_j^{\tilde{m}+5}} \quad (25)$$

$$\frac{\partial h_{p,j}}{\partial y} = \frac{-C(\tilde{m}+3)(z_j - z)^{(\tilde{m}+1)}(y_j - y)}{d_j^{\tilde{m}+5}} \quad (26)$$

$$\frac{\partial h_{p,j}}{\partial z} = \frac{C(\tilde{m}+3)(z_j - z)^{(\tilde{m}+2)}}{d_j^{\tilde{m}+5}} - \frac{C(\tilde{m}+1)(z_j - z)^{\tilde{m}}}{d_j^{\tilde{m}+3}} \quad (27)$$

其中,

$$C = \frac{\eta TR(\tilde{m}+1)A_{R_x}}{2\pi} \quad (28)$$

根据式(19)、式(24)~(27)能够得到系统的 CRLB 的最终式.

3.2 通信性能分析

在通信系统中, 可计算可达传输速率来衡量通信性能^[18]. 对于输入为有限码集的 SSK-VLC 系统, 考虑采用平均互信息 (Average Mutual Information, AMI) 推导通信可达速率 R_c , 即在给定噪声水平下, 每个符号能可靠地传输到接收机的最大比特数.

接收信号的条件和无条件 PDF 由式(13)可分别表示为

$$p_{Y|h_c}(y|h=h_{c,l}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_c^2}(y-h_{c,l}s)^2\right) \quad (29)$$

$$p_Y(y) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_c^2}(y-h_{c,l}s)^2\right) \quad (30)$$

对于有限码集输入的 SSK-VLC 系统, 用 $\mathbf{I}(h_c; Y)$ 表示 LED 与接收端之间的 AMI, 且 $R_c = \mathbf{I}(h_c; Y)$. 由上面的 PDF 可推出:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(h_c; Y) &= \sum_{l=1}^N \int_y p_{Y,h_c}(y, h_{c,l}) \times \log_2 \frac{p_{Y|h_c}(y|h=h_{c,l})}{p_Y(y)} dy \\ &= \log_2 N - \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N \text{E}_{w_c} \left[\log_2 \sum_{k=1}^N \exp\left(\frac{w_c^2 - (w_c + \zeta_{l,k}s)^2}{2\sigma_c^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (31)$$

其中, $\zeta_{l,k} = h_{c,l} - h_{c,k}$ 对于给定的 $\zeta_{l,k}$, 可以看出 AMI 随信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 增加而递增, 当 $Q_c = 1/\sigma_c^2 \rightarrow \infty$

时,得到 $\lim_{Q_c \rightarrow \infty} I(h_c; Y) = \log_2 N$, 即AMI上界为 $\log_2 N$.

为推导AMI下界,式(31)可写为

$$I(h_c; Y) = \log_2 N - \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N E_{w_c} \left[\log_2 \exp \left(\frac{w_c^2}{2\sigma_c^2} \right) \right] - \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N E_{w_c} \left[\log_2 \sum_{k=1}^N \exp \left(\frac{-(w_c + \zeta_{l,k} s)^2}{2\sigma_c^2} \right) \right] = \log_2 N - I_1 - I_2 \quad (32)$$

其中, I_1 为

$$I_1 = \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N E_{w_c} \left[\log_2 \exp \left(\frac{w_c^2}{2\sigma_c^2} \right) \right] = \log_2 e E_{w_c} \left(\frac{w_c^2}{2\sigma_c^2} \right) = \frac{1}{2} \log_2 e \quad (33)$$

利用 $\log(\cdot)$ 的凹性和 Jensen 不等式, I_2 的上界为

$$I_2 \leq \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N \log_2 \sum_{k=1}^N E_{w_c} \left[\exp \left(\frac{-(w_c + \zeta_{l,k} s)^2}{2\sigma_c^2} \right) \right] + \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N \log_2 \sum_{k=1}^N \exp \left(\frac{-(\zeta_{l,k} s)^2}{4\sigma_c^2} \right) \quad (34)$$

最后,将式(33)(34)代入式(32),可得AMI的下界:

$$I_L(h_c; Y) = \log_2 N - \frac{1}{2} (\log_2 e - 1) - \frac{1}{N} \times \sum_{l=1}^N \log_2 \sum_{k=1}^N \exp \left(\frac{-(\zeta_{l,k} s)^2}{4\sigma_c^2} \right) \quad (35)$$

由上述结果,最终能导出本文提出的VLPC系统 R_C 的上下界,以便对通信性能更好的进行分析.

4 仿真分析

本节将评估本文所提MISO-VLPC系统的性能. 考虑一个5(m)×5(m)×3(m)的室内环境,天花板上有 N_l 个LED,其法线方向与屋顶垂直,定位目标位于水平面上,且有一个垂直指向天花板的PD作为接收器. 考虑在两种系统配置下对系统性能进行分析,除非特别说明,假设两种配置方案的LED和PD的坐标如表1,其位置在图1中示出,即原点是点 O , OX 、 OY 和 OZ 是坐标方向. Φ_{l2} 和 Ψ_{FoV} 取值分别为 75° 和 90° , A_{Rx} 是 1 cm^2 , T 为常数1, R 取 $100 \mu\text{A}/\text{mW}$, η 取 $813.6 \mu\text{W}/\text{mA}$.

4.1 定位性能

图2绘制了三个不同测试点处的定位误差与SNR的关系,其中, $z=1 \text{ m}$, 定位功率为 2 W , 三个测试点的坐标为 $(0.5, 0.6) \text{ m}$ 、 $(1, 1.1) \text{ m}$ 、 $(2, 2.1) \text{ m}$, 由于房间的对称

表1 系统主要仿真位置参数设置 单位:m

4 LEDs	(x_i, y_i, z_i) 参数	9 LEDs	(x_i, y_i, z_i) 参数
LED1	(1.50,1.50,3.00)	LED1	(0.75,0.75,3.00)
LED2	(1.50,3.50,3.00)	LED2	(0.75,2.50,3.00)
LED3	(3.50,1.50,3.00)	LED3	(0.75,4.25,3.00)
LED4	(3.50,3.50,3.00)	LED4	(2.50,0.75,3.00)
—	—	LED5	(2.50,2.50,3.00)
—	—	LED6	(2.50,4.25,3.00)
—	—	LED7	(4.25,0.75,3.00)
—	—	LED8	(4.25,2.50,3.00)
—	—	LED9	(4.25,4.25,3.00)

性,对应的其他部分也获得相同性能. 由图2可以观察到定位误差随SNR的增加先快速下降,再缓慢减小,最后收敛到误差极限,这是因为在高SNR下,定位性能受噪声的影响很小甚至可以忽略,LED和PD之间距离的估计更加接近真实距离,从而得到更高的定位精度. 另外,在同一SNR下,靠近墙壁的位置由于距离LED相对较远而具有更大的定位误差.

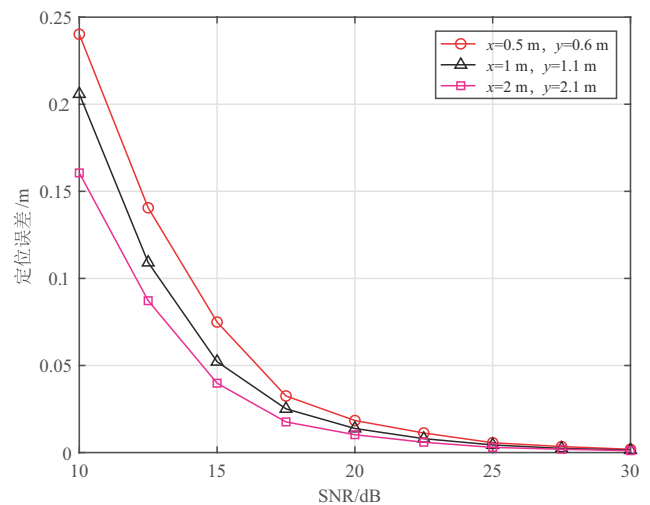


图2 用户在不同位置时定位误差与SNR的关系 $N_l=4$

图3是当测试点 $(1, 1.1) \text{ m}$ 在不同高度时三维VLPC系统的定位误差随SNR的变化曲线. 可见,曲线的形状与其原因和图2相似. 除此之外,在同一SNR下,PD高度越高,接收信号强度越大,VLP将实现更好的性能.

为了进一步分析系统性能,接着考虑配备完全相同的9个LED,LED坐标见表1. 从图4和图5中可以看到,不管是测试点位于同一平面的不同位置还是同一位置的不同高度,系统的定位误差大致趋势都与4个LED时相似,随着SNR的增大而减小. 在该配置下,随着LED数目的增加,其组合类别数目增多,与用户的平均距离变近,基于RSS的VLPC定位系统在对用户定位时,估计误差相对减小.

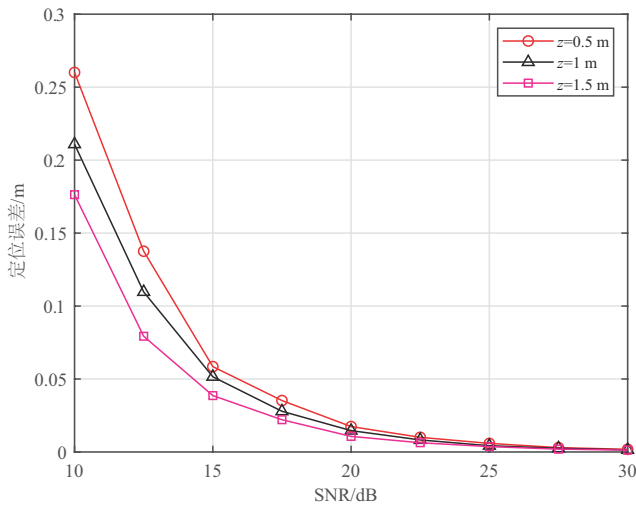


图3 用户在不同高度时定位误差与SNR的关系 $N_t=4$

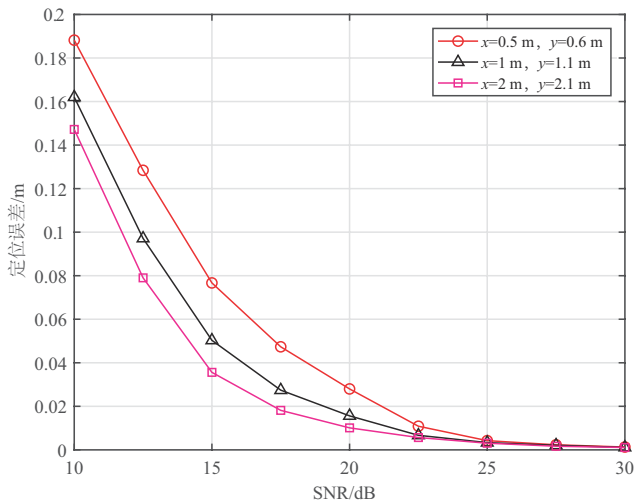


图4 用户在不同位置时定位误差与SNR的关系 $N_t=9$

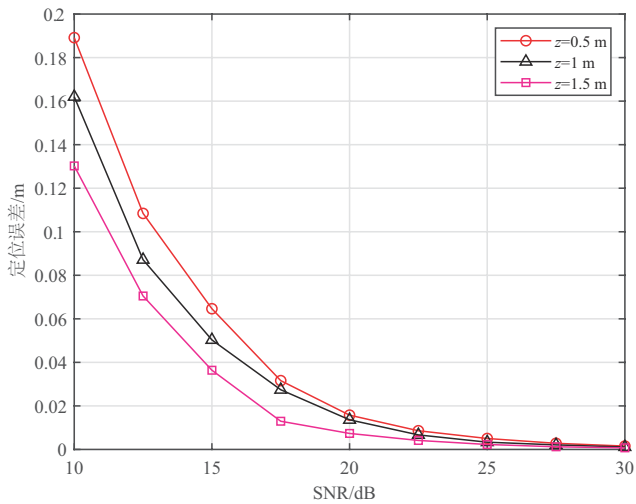


图5 用户在不同高度时定位误差与SNR的关系 $N_t=9$

为了更好的说明系统的定位性能,图6展示了MISO-VLPC系统的定位误差分布,其中SNR=15 dB,4

个LED的位置固定,如表1,接收器的位置在1 m高度的平面上.由于待测点的高度和水平位置都是根据接收到的信号强度计算的,随着用户位置向LED中心靠近,系统的定位误差随之减小.另外,因为LED位置分布对称,定位误差在房间内也有对称性.

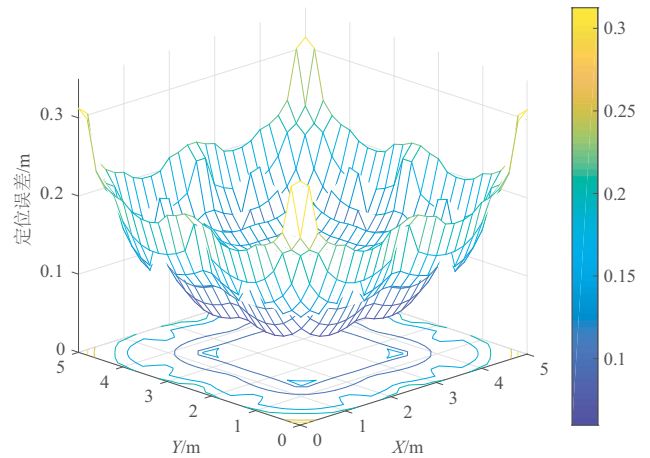


图6 用户在同一高度下定位误差分布

接着,本文研究了LED发射功率对VLPC系统定位精度的影响,不失一般性,考虑在4个LED的配置下进行分析.图7描述了定位误差的CRLB的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)曲线与发射功率的关系.当发射功率为2 W、4 W和6 W时,统计 $z=1$ m平面上676个测试点定位误差的CRLB,90%定位误差的CRLB分别在0.036 m、0.010 m和0.0047 m以内.也就是说,LED数量不变时,定位功率越大,定位精度越高.

上述的仿真证明了本文提出的MISO-VLPC系统的定位性能,接下来将分析基于SSK调制的VLPC系统的通信性能.

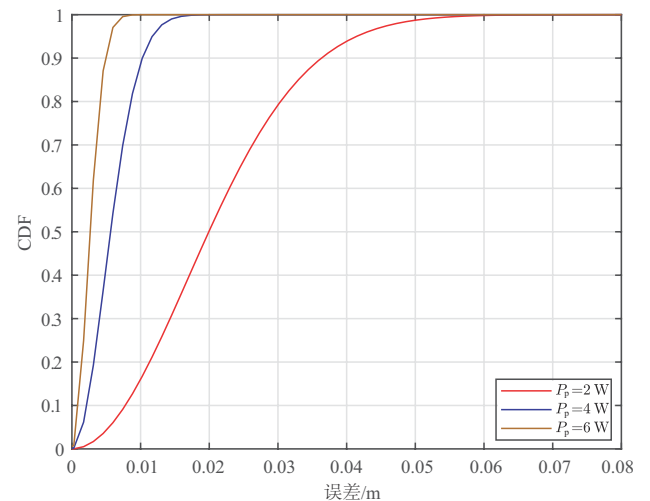


图7 不同发射功率下CRLB的CDF

4.2 通信性能

为了评估系统的通信性能,首先考虑接收器的不同位置 and 不同高度对系统 BER 性能的影响. 由于在定位部分已经验证过4个LED和9个LED都可以有效对用户定位,下面的讨论中仅考虑4个LED时的BER性能.

从图8和图9中可以看出,同一SNR下,由于偏离发送端中心位置会增加信道相关性,当用户接近墙壁时,与其他位置相比BER性能较差. 同时还能观察到,MISO-VLPC系统的BER性能还会随用户与LED之间高度差变化,这是因为ML检测算法的性能受到信道相关性的影响.

下面给出系统可达传输速率的仿真分析,针对用户位置为(2,2.1,1)m进行讨论. 从图10可得当SNR增加时, $\mathbb{I}(h_c; Y)$ 和 $\mathbb{I}_L(h_c; Y)$ 值先随SNR上升,然后在高

SNR时趋于常数. 也就是说,随着SNR和LED数量的增加,通信系统可以可靠传输的最大比特数逐步增加. 除此之外,还可以看出在高SNR和低SNR时, $\mathbb{I}(h_c; Y)$ 和 $\mathbb{I}_L(h_c; Y)$ 的差值约为 $(\log_2 e - 1)/2$.

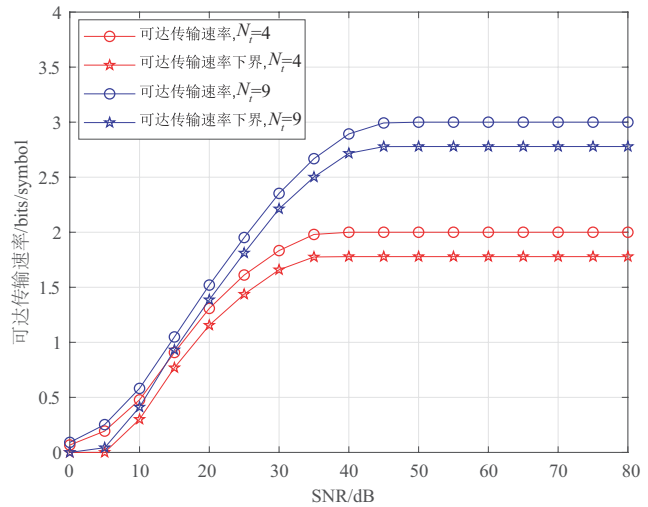


图10 通信可达传输速率与SNR的关系

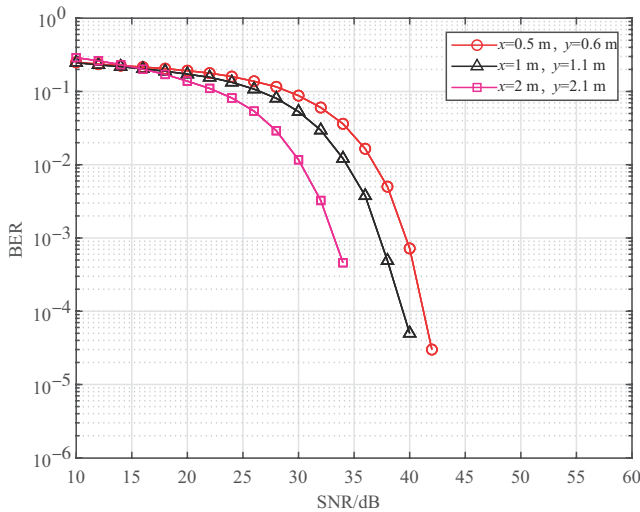


图8 用户在不同位置时的BER性能

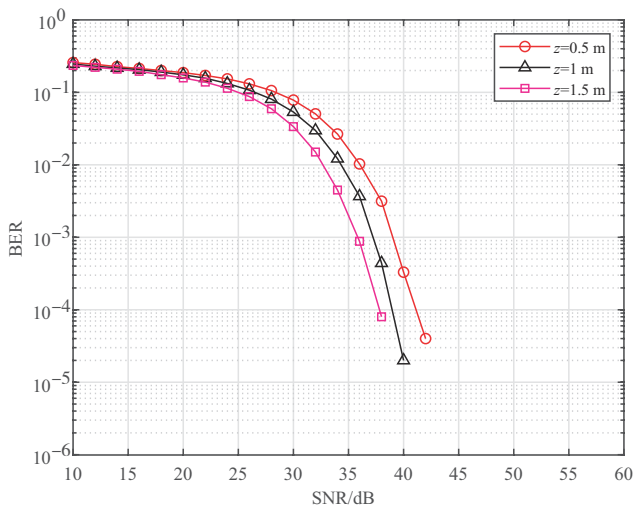


图9 用户在不同高度时的BER性能

5 结论

为了满足对室内定位和通信功能的需求,本文提出了一种在三维空间中适用的MISO-VLPC系统方案. 对于所考虑的系统,在三边测量和RSS的辅助下,在接收器处提供定位功能. 根据在反馈信息帧部分获得的接收器位置信息,执行由SSK调制辅助的通信功能. 此外,还分别推导了CRLB和基于SSK调制信号的可达速率表达式,通过对这两个系统衡量指标的仿真实验,验证了提出的MISO-VLPC系统的性能.

参考文献

- [1] WU X, SOLTANI M D, ZHOU L, et al. Hybrid LiFi and WiFi networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 1398-1420.
- [2] 赵雄文, 张钰, 秦鹏, 等. 空地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 1-17.
ZHAO X W, ZHANG Y, QIN P, et al. Key technologies and development trends for a space-air-ground integrated wireless optical communication network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 1-17. (in Chinese)
- [3] MAHEPALA M, KOUZANI A Z, JOORDENS M A. Light-based indoor positioning systems: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8): 3971-3995.
- [4] MUMTAZ S, MENON V G, AL-DULAIMI A, et al. Guest editorial: Special issue on enabling massive IoT with 6G: Applications, architectures, challenges, and research direc-

- tions[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5111-5113.
- [5] LU M, WANG F, LI R, et al. Physical layer security for indoor GSM VLC[J]. Digital Signal Processing, 2023, 132: 103824.
- [6] WANG F, LIU C, WANG Q, et al. Optical jamming enhances the secrecy performance of the generalized space-shift-keying-aided visible-light downlink[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 4087-4102.
- [7] YANG S H, KIM H S, SON Y H, et al. Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(14): 2480-2485.
- [8] PLETS D, ALMADANI Y, BASTIAENS S, et al. Efficient 3D trilateration algorithm for visible light positioning[J]. Journal of Optics, 2019, 21(5): 05LT01.
- [9] MEMEDI A, DRESSLER F. Vehicular visible light communications: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 161-181.
- [10] LIN X, ZHANG L. Intelligent and practical deep learning aided positioning design for visible light communication receivers[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(3): 577-580.
- [11] MA S, YANG R X, LI B, et al. Optimal power allocation for integrated visible light positioning and communication system with a single LED-lamp[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(10): 6734-6747.
- [12] WANG T Q, SEKERCIOGLU Y A, ARMSTRONG J. Analysis of an optical wireless receiver using a hemispherical lens with application in MIMO visible light communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1744-1754.
- [13] MARSHOUD H, KAPINAS V M, KARAGIANNIDIS G K, et al. Non-orthogonal multiple access for visible light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 51-54.
- [14] LI N, QIAO Y, ZHANG T, et al. Dead-zone-free three-dimensional indoor positioning method based on visible light communication with dimensionality reduction algorithm[J]. Optical Engineering, 2018, 57(3): 036114.
- [15] HUANG Y, BENESTY J, ELKO G W. An efficient linear-correction least-squares approach to source localization[C]//Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. Piscataway: IEEE, 2002: 67-70.
- [16] 左婷, 王法松, 张建康, 等. 室内可见光通信系统中基于压缩感知的空移键控信号检测方法[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 36-44.
- ZUO T, WANG F S, ZHANG J K, et al. Space shift keying signal detection approach based on compressed sensing in indoor VLC system[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 36-44. (in Chinese)
- [17] KESKIN M F, SEZER A D, GEZICI S. Localization via visible light systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(6): 1063-1088.
- [18] HRANILOVIC S, KSCHISCHANG F R. Capacity bounds for power-and band-limited optical intensity channels corrupted by Gaussian noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(5): 784-795.

作者简介



王法松 男, 1979年3月生于河南潢川, 工学博士, 教授. 2002年获中国地质大学(武汉)学士和硕士学位, 2013年获西安电子科技大学博士学位, 研究方向为可见光通信、稀疏信号处理.
E-mail: iefswang@zzu.edu.cn



姜 雯 女, 1999年7月生, 河南周口人. 现为郑州大学电气与信息工程学院硕士研究生. 研究方向为可见光定位与通信.
E-mail: iezzuwjiang@163.com



李 睿 女, 1979年7月生于河南郑州, 副教授. 研究方向为优化理论与算法及其应用.
E-mail: slxlrui@haut.edu.cn



史士杰 男, 1986年12月生于河南柘城, 工学博士, 副教授. 于2009年2016年分别获中国矿业大学学士、博士学位, 研究方向为无线通信、物联网、通感算一体化. 中国电子学会会员编号: E190068561M.
E-mail: iesjshi@zzu.edu.cn