

基于双 PD 接收机的高精度室内可见光定位算法

王 群,马玲芳*

(江苏第二师范学院 物理与电子工程学院,南京 211200)

摘要:为解决常见的基于到达时间差(TDOA)的通信系统中发射机与接收机之间需要时钟同步的问题,提出了一种基于双光电检测器(PD)接收机的高精度室内可见光定位算法。算法使用 3 个能发射不同频率信号的发光二极管(LED)和 1 个带有 2 个 PD 的接收机,并充分考虑到了接收机的尺寸因素,利用接收信号到达的时间差来确定接收机在室内的三维位置信息。仿真结果表明:该算法可以确定接收机的水平坐标和高度信息,定位误差为 11 cm 左右,适用于绝大多数室内基于位置信息的服务。

关键词:室内定位;可见光;到达时间差;光电探测器

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)12-0029-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.12.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High accurate indoor visible light positioning algorithm based on receivers with double PDs

WANG Qun, MA Lingfang*

(College of physics and electronic engineering, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 211200, China)

Abstract: In order to solve the common problem of clock synchronization between transmitter and receiver in communication system based on time difference of arrival (TDOA), a high accurate indoor visible light positioning algorithm based on double photo detectors(PDs) is proposed in this paper. The algorithm uses three light emitting diodes(LEDs) with different transmitting frequency and one receiver with two PDs. Considering the receiver's scale, the time difference of arrival of the received signals is used to determine the three-dimensional location information of the indoor receiver. In a moderate model room, the proposed algorithm is analyzed via simulation. The simulation results show that the algorithm can determine the horizontal coordinates and height information of the receiver, with the positioning error is about 11 cm, which is suitable for various indoor location-based services.

Key words: indoor positioning; visible light; time difference of arrival; photo detector

0 引言

通信技术的不断发展改变了人们的生活习惯,日新月异智能设备(智能手机、智能眼镜、智能手表和智能机器人等)越来越多地出现在人们的居家生活

中。智能设备可以为人类提供各种各样的服务,但准确地获取位置信息是其提供精准服务的基础。全球定位系统(GPS)是当前应用最广泛的定位技术,但 GPS 很难应用于室内环境。与 Wi-Fi 或蓝牙等基于射频(RF)的室内定位方法相比,使用可见光通信进行室内定位在定位精度、对射频干扰的鲁棒性和建设成本等方面具有一定的优势,更适合于零售导航和货架级广告等许多室内基于位置信息的服务^[1-2]。

在可见光定位(VLP)技术^[3-7]中,已有许多关于多光电检测器(PD)接收机的 VLP 系统研究。YASIR M 等人^[8]提出基于接收信号强度(RSS)的定位算法,通过 3 个 LED 发射机和 4 个 PD 接收机,实现了精度为 60 mm 的三维定位。YANG S 等人^[9]采用了 1 个发射机和具有 3

收稿日期:2021-06-15。

基金项目:江苏第二师范学院“大学生创新创业训练计划”项目资助。

作者简介:王群(1999—),女,贵州铜仁人,本科生,主要从事室内可见光定位方面的学习和研究。曾在 2019 年获得社会实践先进个人奖,2020 年获得学校三等奖学金;2020 年成功申请并主持江苏第二师范学院“大学生创新创业大赛”项目。

*通信作者:马玲芳(1987—),女,南京邮电大学在读博士,主要从事可见光通信等方面的研究。



王群,马玲芳:基于双PD接收机的高精度室内可见光定位算法

个PD的接收机,通过基于信号强度指示(RSSI)的定位方法实现了对接收机的定位。WANG L等人^[9]提出了基于接收信号强度比值(RSSR)的定位方法,使用1个发射机和定向的PD阵列来进行定位。但是,到目前为止,还没有将到达时间差(TDOA)运用到多PD接收机定位系统中的案例。原始的TDOA是在到达时间(TOA)基础上的改进^[10],它利用信号传输时间差作为定位参量,避免了发射机和接收机之间必须严格同步的需求。但是,这种TDOA要求各发射机之间保证同步,其系统复杂度较高。为解决该问题,本文通过增加VLP系统中接收机上的PD数量,利用同一发射机与接收机上不同PD之间的时间差来进行定位。

1 系统模型

本文设计的室内VLP系统模型如图1所示。其中,用于照明和传输定位信息的3个LED灯(LED₁、LED₂和LED₃)垂直向下安装在天花板上,3个LED灯的坐标位置依次为(X₁,Y₁,H)、(X₂,Y₂,H)和(X₃,Y₃,H),H是天花板平面与地板的垂直距离。若位于接收机上的PD₁与PD₂之间的距离为2C,那么通常认为PD₁与PD₂的中点就是接收机的位置。如果这个中点的坐标用(x,y,z)表示,那么PD₁与PD₂的坐标可以表示为(x+Ccosθ,y+Csinθ,z)和(x-Ccosθ,y-Csinθ,z),θ为接收机偏离X轴的旋转角。

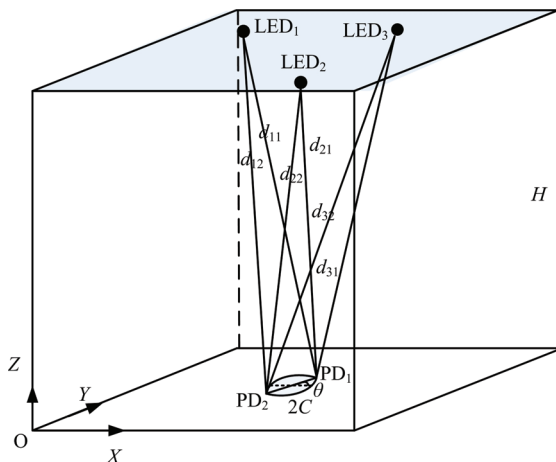


图1 VLP系统模型

一般地,发射机每个LED的发光强度符合朗伯辐射模型。若接收机采用简单的强度调制和直接检测技术,那么每个发射机的瞬时发射光功率 $p_i(t)$ 可以表示为:

$$p_i(t) = P_0 [1 + \cos(2\pi f_i t)] \quad (1)$$

其中, $i=1,2,3$, t 表示时间, P_0 表示LED的平均发射光

功率, f_i 表示发射机LED_i($i=1,2,3$)的发射信号频率。为识别不同LED发射的信号,令 f_i 不同,则所有LED可以同步传输数据。

在研究和分析过程中,与非视线链路(NLOS)相比,考虑到视线链路(LOS)通常占据主导地位^[9],因此发射机LED_i与接收机PD_j之间的直流增益 h_{ij} 可以表示为:

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}\cos^m(\varphi_{ij})\cos(\psi_{ij})T_s(\psi_{ij})g(\psi_{ij})}{2\pi d_{ij}^2}, & 0 \leq \psi_{ij} \leq FOV \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $j=1,2$; φ_{ij} 表示LED的辐射角; ψ_{ij} 表示接收机PD接收光线的入射角; m 是朗伯辐射阶数,它可以由 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \varphi_{1/2})$ 确定, $\varphi_{1/2}$ 是LED的半功率角; d_{ij} 是传输距离; A_{PD} 是接收机PD的有效检测面积; $T_s(\psi_{ij})$ 和 $g(\psi_{ij})$ 分别是接收机PD的光滤波器和光集中器的增益; FOV 为接收机PD的接收视场角。

在短距离LOS传输链路中,可以忽略多径色散的作用。此时,LOS链路表示为具有线性衰减和延迟的线性链路^[11]。因此,发射机的光信号被接收机的2个PD接收后,所转换的电信号可以分别用 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 表示为:

$$\begin{cases} r_1(t) = h_{11}s_1(t-\tau_{11}) + h_{21}s_2(t-\tau_{21}) + h_{31}s_3(t-\tau_{31}) \\ r_2(t) = h_{12}s_1(t-\tau_{12}) + h_{22}s_2(t-\tau_{22}) + h_{32}s_3(t-\tau_{32}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, h_{ij} 和 τ_{ij} 分别表示LED_i与PD_j之间的直流通路的增益和时间延迟, s_i 表示LED发射机所发出的光信号在PD中转换成的电信号。

2 定位算法

本文提出的VLP算法原理图如图2所示。该算法由三部分组成。在第一部分,接收机接收到的信号经光/电转换后生成电信号 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$,这2个电信号依次被送入中心频率分别为 f_1 、 f_2 和 f_3 的带通滤波器

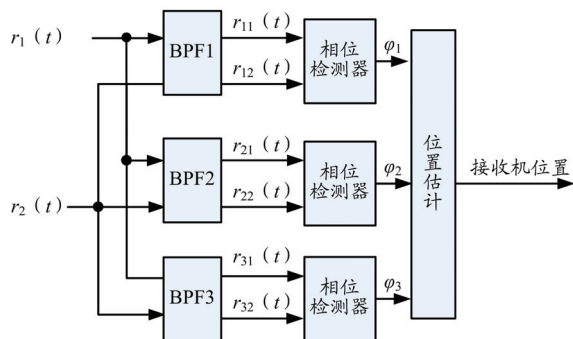


图2 VLP算法的流程图

BPF1、BPF2 和 BPF3, 即可分离出不同发射机发射的信号。滤波后的信号可以用传输距离 d_{ij} 和真空中的光速 c 表示为:

$$\begin{cases} r_{11}(t)=h_{11}P_0\cos\left[2\pi f_1\left(t-\frac{d_{11}}{c}\right)\right] \\ r_{12}(t)=h_{12}P_0\cos\left[2\pi f_1\left(t-\frac{d_{12}}{c}\right)\right] \\ r_{21}(t)=h_{21}P_0\cos\left[2\pi f_2\left(t-\frac{d_{21}}{c}\right)\right] \\ r_{22}(t)=h_{22}P_0\cos\left[2\pi f_2\left(t-\frac{d_{22}}{c}\right)\right] \\ r_{31}(t)=h_{31}P_0\cos\left[2\pi f_3\left(t-\frac{d_{31}}{c}\right)\right] \\ r_{32}(t)=h_{32}P_0\cos\left[2\pi f_3\left(t-\frac{d_{32}}{c}\right)\right] \end{cases} \quad (4)$$

在第二部分, 具有相同信号频率的已滤波信号分别被送入相应的相位检测器, 相位检测器输出的相位差 φ_i 可以表示为:

$$\begin{cases} \varphi_1=\varphi_{12}-\varphi_{11}=2\pi f_1\frac{d_{11}-d_{12}}{c}=2\pi f_1\frac{D_1}{c} \\ \varphi_2=\varphi_{22}-\varphi_{21}=2\pi f_2\frac{d_{21}-d_{22}}{c}=2\pi f_2\frac{D_2}{c} \\ \varphi_3=\varphi_{32}-\varphi_{31}=2\pi f_3\frac{d_{31}-d_{32}}{c}=2\pi f_3\frac{D_3}{c} \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, φ_i 是传输距离差 D_i 的函数, 即传输距离差 D_i 可以用相位差 φ_i 表示为:

$$\begin{cases} D_1=d_{11}-d_{12}=\varphi_1\frac{c}{2\pi f_1} \\ D_2=d_{21}-d_{22}=\varphi_2\frac{c}{2\pi f_2} \\ D_3=d_{31}-d_{32}=\varphi_3\frac{c}{2\pi f_3} \end{cases} \quad (6)$$

在第三部分, 位置估计单元用获取的距离差 D_i 来计算目标接收机的位置。为简化分析, 假设运行过程中接收机可以在陀螺仪的指导下水平旋转, 使得 PD_1 与 PD_2 的连线方向与 X 轴始终平行。此时, 传输距离 d_{ij} 可以写成与发射机位置和接收机位置相关的函数, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} d_{11}=\sqrt{(x-X_1+C)^2+(y-Y_1)^2+(z-H)^2} \\ d_{12}=\sqrt{(x-X_1-C)^2+(y-Y_1)^2+(z-H)^2} \\ d_{21}=\sqrt{(x-X_2+C)^2+(y-Y_2)^2+(z-H)^2} \\ d_{22}=\sqrt{(x-X_2-C)^2+(y-Y_2)^2+(z-H)^2} \\ d_{31}=\sqrt{(x-X_3+C)^2+(y-Y_3)^2+(z-H)^2} \\ d_{32}=\sqrt{(x-X_3-C)^2+(y-Y_3)^2+(z-H)^2} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 即可求出目标接收机的位置

坐标 (x, y, z) 。本文首先考虑 $|D_i|=0$ 的情况, 此时只能得到接收机 X 轴的坐标 $x=X_1=X_2=X_3$ 。这种情况只发生在发射机的 3 个 LED 安装在与 Y 轴平行的同一条线上, 且接收机正好运动到其中一个 LED 的正下方。在实际部署 LED 时, 由于需要兼顾照明的均匀性, 一般不会采用这种安装模式。因此, 本文可以认为 $|D_i|=0$ 的情况不会发生。然后考虑 $|D_i|\neq 0$ 的情况。由于在三角形中, 任意两边之差小于第三边, 因此 $|D_i|<2C$ 。此时将式(7)代入式(6), 可推导出下列方程:

$$\begin{cases} (x-X_1-C)^2+(y-Y_1)^2+(z-H)^2=\left(\frac{4C(X_1-x)+D_1^2}{2D_1}\right)^2 \\ (x-X_2-C)^2+(y-Y_2)^2+(z-H)^2=\left(\frac{4C(X_2-x)+D_2^2}{2D_2}\right)^2 \\ (x-X_3-C)^2+(y-Y_3)^2+(z-H)^2=\left(\frac{4C(X_3-x)+D_3^2}{2D_3}\right)^2 \end{cases} \quad (8)$$

通过解方程组(8)并丢弃不合理的根, 即可以得到接收机坐标 (x, y, z) 的值。

以上提出的基于 TDOA 和双 PD 接收机的三维定位算法考虑到了接收机尺寸的影响, 根据所检测到的不同 LED 与发射机 2 个 PD 之间的传输距离差, 即可得到目标接收机的三维位置信息。该算法不需要发射机与接收机, 或发射机与发射机之间严格同步, 易于实现、易于推广。

3 仿真分析

为了评估所提出的定位算法的定位准确度, 本文在一个 5 m(长)×5 m(宽)×3 m(高)的空房间中进行了仿真。考虑到房间光照的相对均匀性, 发射机的 3 个 LED 分别放置在 (1 m, 2 m, 3 m), (2 m, 4 m, 3 m) 和 (4 m, 3 m, 3 m) 的位置。发射机所发射的信号频率 $f_1=1$ MHz, $f_2=2$ MHz, $f_3=3$ MHz。仿真过程中设定发光 LED 的半功率角 φ_{12} 为 60° , 总发射功率为 60 W。接收机 PD 的接收视场角 FOV 为 85° , 有效检测面积 A_{PD} 为 1 cm^2 , PD 间距 $2C=20\text{ cm}$ 。仿真结果如图 3 所示。可以看出, 在绝大多数位置点上, 所提定位算法估算出的估计位置与接收机的实际参考位置几乎相同。

本文分析了接收机在不同高度情况下 VLP 算法的定位误差, 结果如图 4 所示。可以看出, 定位误差最大的地方发生在房间边缘处。在图 4(a)中, 最大定位误差为 10 cm, 而平均定位误差仅为 1.5 cm。图 4(b)中, 最大定位误差为 11 cm, 平均定位误差为 1.8 cm。

考虑到实际的接收机有大有小, 因此本文将接收

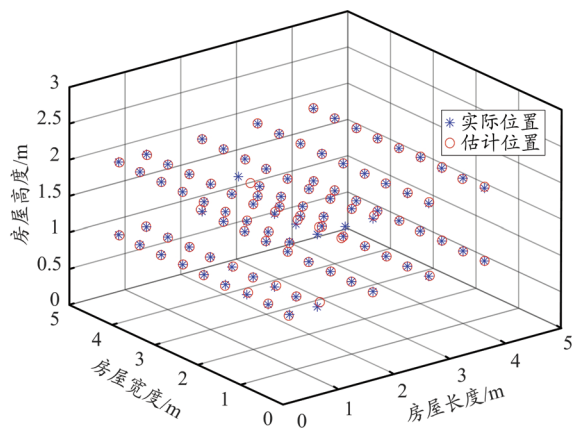
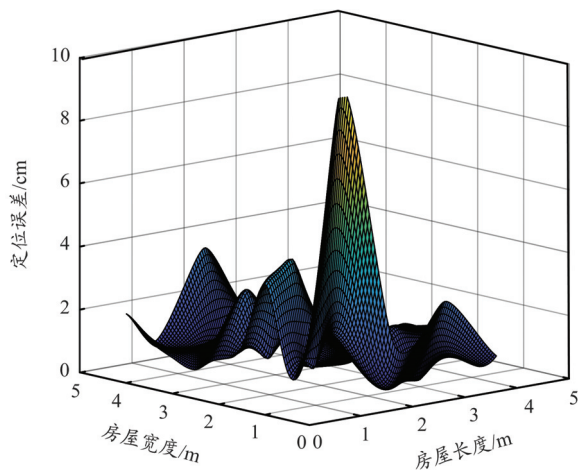
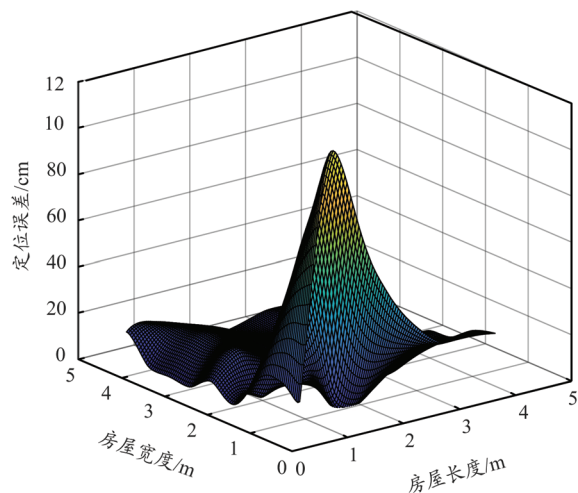


图3 VLP 算法的仿真结果



(a) 1 m 高平面上的定位误差



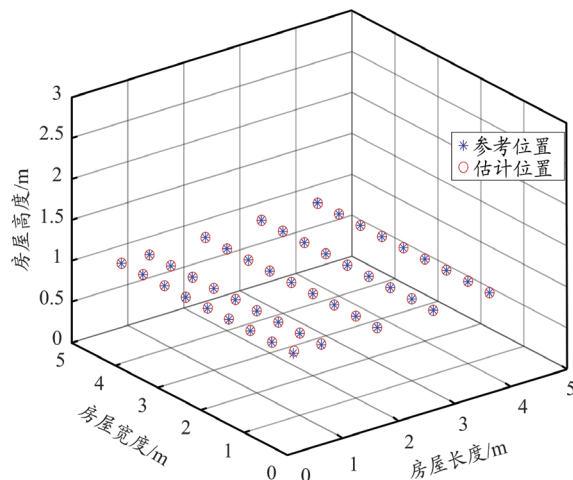
(b) 2 m 高平面上的定位误差

图4 VLP 算法误差

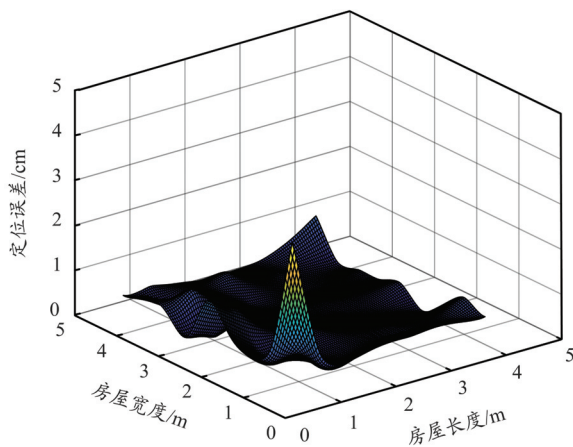
机 2 个 PD 间距改为 $2C=40$ cm, 在其它仿真参数不变的情况下对 VLP 算法的定位精度再次进行分析, 仿真结果如图 5 所示。可以看出, 在 1 m 高的平面上, 将 PD 间距增大为 $2C=40$ cm 时, 算法的最大定位误差小于

5 cm。与 PD 间距为 $2C=20$ cm 时的定位误差对比可以发现, 增大 PD 间距可以改善定位效果。这是因为, PD 间距越大, 2 个 PD 接收到的光信号之间的相位差就越大, 更便于精确地检测和提取。

本文将所提算法与其它多 PD 定位算法进行了简单的对比, 具体如表 1 所示。可以看出, 基于 RSS 的定位算法精度高于本文所提出的算法, 但是该算法相对



(a) 1 m 高平面上的仿真结果



(b) 1 m 高平面上 VLP 算法的定位误差

图5 PD 间距为 40 cm 时的定位仿真

表1 多 PD 定位相关工作的比较

定位原理	LED 数量/个	PD 数量/个	定位误差/cm	特点	相关文献
RSS	3	4	6	三维定位, 定位算法复杂	[6]
RSSI	1	3	15	二维定位, 只有 1 个发射机	[8]
RSSR	4	4	8	二维定位, 无需知晓接收机方位	[9]
TD OA	3	2	11	三维定位, 无需严格的时钟同步	本文

复杂, 比较难以实现。基于 RSSI 的定位算法相对来说比较简单, 但其定位误差为 15 cm, 即该算法的定位精度低于本文所提算法的定位精度。基于 RSSR 的定位算法定位精度较高, 且无需知晓接收机的方位角即可实现二维定位, 但该算法的定位复杂度也较高, 且没有进行三维定位。综上所述, 本文所提算法简单易实现, 精度高且能进行三维定位, 综合表现最好。

4 结束语

本文提出了一种基于双 PD 接收机的高精度室内定位算法, 该算法利用 3 个 LED 和具有 2 个 PD 的接收机, 结合接收机的尺寸大小, 通过检测 LED 到接收机上的 2 个 PD 之间的传输距离差来进行定位。由于该传输距离差是根据同一发射机的发射信号到接收机 2 个 PD 间的传输相位差得来的, 因此该算法不需要发射机与接收机或发射机之间的严格同步。本文从理论上对该算法进行了分析, 并通过仿真进行了验证。仿真结果表明: 该算法在 5 m×5 m×3 m 的房间中的最大定位误差在 11 cm 左右, 适用于各种基于室内位置信息的服务, 如智能手机导航、机器人巡线和仓库中的物流管理等。

参考文献:

- [1] YE-SHENG K, PAT P, KO-JEN H, et al. Indoor positioning with mobile phones and visible light[EB/OL]. [2021-02-18]. <http://dx.doi.org/10.1145/2639108.2639109>.
- [2] JOON-WOO L, SUNG-JIN K, SANG-KOOK H. 3D visible light indoor positioning by bokeh based optical intensity measurement in smartphone camera[J]. IEEE access, 2019, 7: 91399-91406.
- [3] BAI L, YANG Y, GUO C, et al. Camera assisted received signal strength ratio algorithm for indoor visible light positioning [EB/OL]. [2021-06-15]. https://www.medsci.cn/sci/show_paper.asp?id=17d78121a94c69f3.
- [4] CHINNAPAT S, TOMOAKI O, MASAO N. 6-axis sensor assisted low complexity high accuracy-visible light communication based indoor positioning system[J]. Ice Trans Commun, 2010, 93(11): 2879-2891.
- [5] QIU K, ZHANG F, LIU M. Let the light guide us: VLC-based localization[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2016, 23(4): 174-183.
- [6] YASIR M, HO S W, VELLAMBI B N. Indoor position tracking using multiple optical receivers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1166-1176.
- [7] LI Y, GHASSEMLOOY Z, MEMBER S, et al. A VLC smartphone camera based indoor positioning system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 1(1): 1-4.
- [8] YANG S, JUNG E, HAN S. Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1834-1837.
- [9] WANG L, GUO C. Indoor visible light localization algorithm with multi-directional PD array[EB/OL]. [2021-06-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8269149>.
- [10] EROGLUY Y S, GUVENCY I, PALAY N, et al. AOA-based localization and tracking in multi-element VLC systems[EB/OL]. [2021-06-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7120424>.
- [11] CARRUTHERS J B, KAHN J M. Modeling of nondirected wireless infrared channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10): 1260-1268.