

基于可见光通信的室内定位与定向系统

杨国伟, 黄兆标, 樊冰, 周雪芳, 毕美华

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对室内定位与定向系统, 提出了一种结合粒子群优化 (PSO) 和天牛须搜索 (BAS) 的 VLC 室内定位与定向算法, 通过 PSO 算法探索接收端的最优方向, 利用 BAS 算法对每个粒子当前方向下的最佳三维坐标进行搜索。首先在 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的室内空间和 40 dB 信噪比下进行仿真研究, 所提出的 VLC 室内定位与定向系统实现了平均定位误差 4.82 cm 和平均定向误差 2.24° 的性能指标。然后在 $0.9\text{ m}\times 0.9\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 的实验系统中, 实施了同时定位与定向的实验验证, 平均定位与定向误差分别为 5.32 cm 与 5.99° 。相比传统 VLC 室内定位方案, 所提 VLC 室内定位与定向系统不需要接收端高度和方向的先验知识, 大大降低了使用复杂度, 具有更加广泛的应用场景。

关键词: 可见光通信; 室内定位与定向; 接收信号强度; 粒子群优化; 天牛须搜索

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020217

Indoor positioning and orientating system based on visible light communication

YANG Guowei, HUANG Zhaobiao, FAN Bing, ZHOU Xuefang, BI Meihua

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: For the insufficient research on the simultaneously positioning and orientating system, a VLC positioning and orientating algorithm based on combining particle swarm optimization (PSO) and beetle antennae search (BAS) was proposed. The PSO algorithm was used to explore the optimal direction of the receiver and meanwhile the BAS algorithm was used to search the best three-dimensional coordinates of each particle in the current direction. Firstly, the indoor space of $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 5\text{ m}$ and the SNR of 40 dB were assumed in the simulation, the proposed VLC indoor positioning and orientating system could achieve the average positioning error of 4.82 cm and average orientating error of 2.24° . Then, in the laboratory space of $0.9\text{ m}\times 0.9\text{ m}\times 1.5\text{ m}$, the experimental demonstration was accomplished for the first time, and the average positioning and orientating errors of this experimental system were 5.32 cm and 5.99° , respectively. Compared with the traditional VLC indoor positioning schemes, the proposed VLC positioning and orientating system does not need the prior knowledge of the height and direction of the receiver, which greatly reduces the system complexity and is applicable to a wider range of applications.

Key words: visible light communication, indoor positioning and orientating, received signal strength, particle swarm optimization, beetle antennae search

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-08-19

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究计划基金资助项目 (No. 2017C31067); 国家自然科学基金资助项目 (No.61405051, No.61501157)

Foundation Items: The Zhejiang Provincial Public Technology Application Research Project (No.2017C31067), The National Natural Science Foundation of China (No.61405051, No.61501157)

1 引言

随着大型室内建筑逐渐增多,对室内定位的需求快速增长,各类室内定位方案成为当前研究的热点。由于电磁屏蔽、多径衰落、障碍物阻挡等因素影响,全球定位系统(GPS, global position system)无法应用于室内定位。因此,基于 Wi-Fi、蓝牙、射频识别(RFID, radio frequency identification)、超宽带等室内基站的无线定位方案逐渐发展起来,但是室内的电磁环境复杂且定位精度要求高,单类型无线定位方案无法兼顾定位精度、系统稳定性和运维成本,自身均有一定局限性^[1-2]。另外,一种无线光通信——可见光通信(VLC, visible light communication),以其绿色、抗电磁干扰、频谱资源丰富等优势得到迅速发展,同时基于 VLC 的高精度室内定位也得到了广泛研究。与其他无线通信方案相比,基于 VLC 的室内定位不受电磁干扰,系统稳定,定位精度高^[3-4]。同时,该 VLC 定位系统可以和智慧照明系统融合铺设,大大降低了建设与运维成本。

基于 VLC 的室内定位系统通常采用 LED 作为光源。LED 具有合适的调制速率,能在照明的同时实现通信与定位。在 VLC 室内定位系统中,一般采用几何测量法和基于图像的算法来进行定位。几何测量法一般采用到达时间(ToA, time of arrival)^[5]、到达角度(AoA, angle of arrival)^[6]、到达角差(ADoA, angle difference of arrival)^[7]、接收信号强度(RSS, received signal strength)^[8-9]来进行测距。其中,ToA、TDoA 要求设备具有严格的同步时钟周期,AoA 易受信号范围限制。而基于图像的定位算法相对复杂,硬件成本和功耗较高,其应用受到一定限制^[10-11]。

现有的大部分 VLC 定位系统都存在一些缺陷需要克服。例如,在基于 RSS 的定位系统中,为了简化定位模型,通常假设接收端保持竖直向上^[8-9]或倾角已知^[12]状态,接收端自身倾角未知或者变动将使 VLC 的定位精度下降。采用惯性测量单元(IMU, inertial measurement unit)来测量接收端的倾角,则会增加终端的复杂性,也会引入 IMU 抖动误差^[13]。对于基于图像的算法的 VLC 定位系统,有研究采用 ADoA 补偿倾斜角,但要求的 LED 布置密度较高,不适合实际照明场景^[10]。ToA 不受接收端的倾角影响,但要求接收端与发射机之间有严

格的时间同步,设备成本较高^[5]。

为了消除上述 RSS 定位系统中接收端倾角的影响,本文研究了一种基于 RSS 的 VLC 室内定位与定向系统,实现了接收端三维空间坐标和三维方向的探测,消除了传统三维定位系统中接收端方向对定位精度的影响。本文首先分析了融合接收端方向角的 VLC 定位模型;然后提出了一种基于粒子群优化(PSO, particle swarm optimization)和天牛须搜索(BAS, beetle antennae search)的融合算法,同时实现了定位与定向的功能;最后搭建了 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 空间内的实验系统,验证了所提定位与定向算法的有效性和整个系统的可行性。

2 基于 RSS 的 VLC 定位系统模型

2.1 系统模型

在 VLC 定位系统模型中,采用 LED 光源作为定位参考发射源,采用光电探测器(PD, photo detector)作为接收端。LED 发射带有 ID(identity)信息的光信号,PD 感应光信号并将其转换为电流,处理器利用相应的 RSS 模型来计算接收端的位置。图 1 展示了 VLC 定位系统模型。接收端的三维空间坐标表示为 $\mathbf{r}_R \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$,三维方向表示为 $\mathbf{n}_R \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 。相应地,LED 光源的三维空间坐标和三维方向表示为 $\mathbf{r}_{S_m} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 和 $\mathbf{n}_{S_m} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$,其中 $m=1, \dots, K$, K 为 LED 光源的数量; ϕ_m 和 θ_m 分别为 LED 光源的辐照角和接收端的入射角, h 为发射端所在平面距地面的高度。

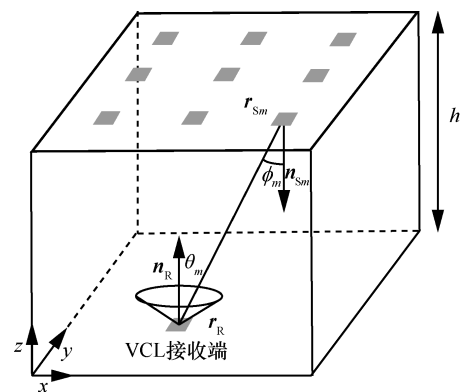


图 1 VLC 室内定位系统模型

在 VLC 定位系统中,多个 LED 光源的光信号在时域上是重叠的。因此,要实现 VLC 室内定位,首先要实现多址,可采用的方案有时分多址(TDMA, time division multiple access)^[14]、频分多

址 (FDMA, frequency division multiple address)^[15]、码分多址 (CDMA, code division multiple access)^[16] 等技术。本文采用 CDMA 技术, 以 Walsh 码作为扩频码, 来区分不同 ID 的 LED 光源; 采用开关键控 (OOK, on-off keying) 调制方式来调制每个 LED 光源的数据及其 ID 信息。接收端通过解扩、解调、抽样判决等操作, 可以获得 LED 光源的 ID 和 RSS。

2.2 光源模型

由于 LED 光源具有较大的光束角, 其辐射模式可视为朗伯 (Lambertian) 辐射模型。假设 LED 光源与接收端之间的距离 d 远远大于 PD 有效面积 A_R 和光源面积 A_S , 即 $d \gg A_R$ 且 $d \gg A_S$, 则 LED 光源和接收端可以视为点。在直射链路 (LoS, line of sight) 下, LED 光源的信道增益^[17-19]为

$$h_m(\mathbf{r}_R, \mathbf{n}_R) = \frac{(n+1)A_R}{2\pi d_m^2} T_s(\theta) g(\theta) \cos^n(\phi_m) \cos(\theta_m) \quad (1)$$

其中, A_R 为 PD 的有效面积; $d_m = \|\mathbf{r}_{S_m} - \mathbf{r}_R\|$ 为 LED 光源与接收端之间的距离; $T_s(\theta)$ 和 $g(\theta)$ 分别为滤波器增益和聚光器增益; n 为朗伯光源阶数, 与光源的指向性有关, 可表示为

$$n = \frac{-\log 2}{\log \left(\cos \left(\frac{\phi_1}{2} \right) \right)} \quad (2)$$

其中, ϕ_1 为 LED 光源的半功率角。令 ϕ 和 θ 分别为 LED 光源辐照角和接收端的入射角, 表示为

$$\cos(\phi_m) = \frac{\mathbf{n}_{S_m}^T (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m})}{\|\mathbf{n}_{S_m}\| \|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m}\|} \quad (3)$$

$$\cos(\theta_m) = -\frac{\mathbf{n}_R^T (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m})}{\|\mathbf{n}_R\| \|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m}\|} \quad (4)$$

通过自由空间传输后, PD 接收的光功率 P_m 可以表示为

$$P_m = P_{t,m} h_m(\mathbf{r}_R, \mathbf{n}_R) + P_{\text{NLoS},m} = \frac{C_m}{d_m^2} \cos^n(\phi_m) \cos(\theta_m) + P_{\text{NLoS},m}, \forall m \in \Omega_R \quad (5)$$

$$C_m = \frac{A_R P_{t,m} (n+1)}{2\pi} T_s(\theta) g(\theta) \quad (6)$$

其中, $P_{t,m}$ 为 LED 光源的发射光功率; C_m 可视为常数, 取决于 LED 光源和探测器的物理属性;

$P_{\text{NLoS},m}$ 为发射端 NLoS 信道信号的功率; Ω_R 为可以被接收端检测到的 LED 光源的集合, 表示为

$$\Omega_R = \left\{ m \left| \begin{array}{l} \left| \frac{\theta_m}{\theta_{\text{fov}}} \right| \leq 1, \left| \frac{\phi_m}{\frac{\pi}{2}} \right| \leq 1, \forall m = 1:K \end{array} \right. \right\} \quad (7)$$

其中, θ_{fov} 为接收端的视场角 (FoV, field of view)。

由于 NLoS 信道信号强度远小于 LoS 信号强度, 因此本文仅考虑 LoS 情况, 这不会影响本文论证结果。接收端的噪声可分为散粒噪声 (σ_{shot}^2) 和热噪声, 散粒噪声 (thermal) 来源于接收光功率引起的光电二极管波动, 热噪声来源于电子的随机运动。接收端的噪声服从高斯噪声分布 $\sigma_{\text{total}}^2 \sim \mathcal{N}(0, \omega)$ ^[20], 表示为

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \quad (8)$$

整个系统的信噪比 (SNR, signal noise ratio) 可表示为

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{LoS}}^2}{\sigma_{\text{total}}^2} \quad (9)$$

3 VLC 定位与定向算法

由于 VLC 三维定位与三维定向问题属于六元非线性方程组求解问题, 直接通过数学解析的方式来计算接收端的位置和方向较为困难。因此, 许多研究采用了 PSO、模拟退火 (SA, simulated annealing) 算法等全局优化算法来搜索数值最优解^[21-22]。

假设 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_R \\ \mathbf{n}_R \end{bmatrix}$ 为接收端的三维坐标和三维方向, 并设定适应度函数, 在六维空间中搜索坐标和方向, 将使适应度函数最优的值作为六元线性方程组的解, 即 \mathbf{x} 的最优解可表述为

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (10)$$

其中, $f(\mathbf{x})$ 为本文设计的适应度函数, 表示为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{m \in \Omega_R} (P_m^* - P_m)^2 \quad (11)$$

其中, P_m^* 为接收的来自第 m 号灯的实际 RSS, P_m 为通过光源辐射模型计算的理论 RSS, 可以表示为

$$P_m = -\frac{C_m \left(\mathbf{n}_{S_m}^T (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m}) \right)^n \mathbf{n}_R^T (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m})}{d_m^2 \|\mathbf{n}_{S_m}\| \|\mathbf{n}_R\| \|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{S_m}\|^{n+1}} \quad (12)$$

通过式(12)所示光源辐射模型得到理论 RSS 与实际 RSS 的差, 将其平方和作为适应度函数。

本文将 PSO 与 BAS 算法相结合来寻找六元线性方程组的最优解, 实现 VLC 同时定位与定向。PSO 是成熟的仿生算法, 在群体寻优方面有优异的表现。而 BAS 在单体搜索中表现灵活, 参数易调, 具有较好的收敛速度和精度。本文采用 PSO 在当前信息下搜索最佳的方向。在三维空间中生成 N_p 个粒子, 将粒子的三维坐标作为接收端的方向 \mathbf{n}_R 。粒子群根据更新策略向最优解的方向移动。在第 $t+1$ 次迭代时, 粒子的位置更新为

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^{t+1} = & w\mathbf{v}_i^t + c_1 \text{rand}(1)(\mathbf{n}_{Ri}^{\text{pBest}} - \mathbf{n}_{Ri}^t) + \\ & c_2 \text{rand}(1)(\mathbf{n}_R^{\text{gBest}} - \mathbf{n}_{Ri}^t), \forall i = 1: N_p \end{aligned} \quad (14)$$

其中, \mathbf{v} 为粒子速度, w 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速常数。上标 pBest 和 gBest 分别表示粒子的个体极值和粒子群体极值。对于已确定方向的粒子, 采用 BAS 算法来搜索在当前方向 \mathbf{n}_R 下粒子最优的三维坐标 \mathbf{r}_R 。

BAS 算法是基于天牛觅食原理的元启发式优化算法^[23], 其仿生原理是, 天牛通过其 2 条须所接收的气味强度差异来觅食。如果左须接收的气味强度大于右须接收的气味强度, 则天牛下一步向左移动, 否则向右移动。基于这个原理, 天牛可以有效地找到食物。在 BAS 中, 食物的具体位置为目标极值点, 食物气味强度为适应度函数, 天牛根据气味逐步逼近的方式来获得最优解。BAS 的数学模拟如下。天牛可在三维空间中任意方向移动, 用随机单位向量 $\mathbf{b} = \frac{\text{rnd}(3, 1)}{\|\text{rnd}(3, 1)\|} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 来描述。则天牛左须

和右须的坐标可以表示为

$$\mathbf{r}_{R,r} = \mathbf{r}_R^t + s^t \mathbf{b} \quad (15)$$

$$\mathbf{r}_{R,l} = \mathbf{r}_R^t - s^t \mathbf{b} \quad (16)$$

其中, \mathbf{r}_R^t 为天牛当前坐标, s^t 为天牛质心到须的距离, 表示为

$$s^t = c\delta^t \quad (17)$$

$$\delta^t = \eta\delta^{t-1} \quad (18)$$

其中, 下标 r、l 分别表示右侧和左侧, 上标 t 表示第 t 次迭代, c 为常数, δ 为天牛的步长, η 为步长衰减系数。天牛在 t 时刻的坐标表示为

$$\mathbf{r}_R^t = \mathbf{r}_R^{t-1} + \delta^t \vec{\mathbf{b}} \text{sign}(f(\mathbf{r}_{R,r}^t) - f(\mathbf{r}_{R,l}^t)) \quad (19)$$

其中, $\text{sign}(\bullet)$ 为符号函数。重复更新天牛左右须的位置并探测气味强度, 向气味强的方向移动即可获得每个粒子在当前 \mathbf{n}_R 下的最优解, 再根据式(13)和式(14)更新粒子的方向 \mathbf{n}_R 。最后由天牛去搜索最佳的坐标, 重复操作直到达到目标条件。

本文所提 VLC 定位与定向算法如算法 1 所示。

算法 1 VLC 定位与定向算法

输入 $\mathbf{r}_{Sm}, \mathbf{n}_{Sm}, P_m, \forall m = 1: K$

输出 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{best}}, f_{\text{best}}$

- 1) 初始化参数 $w, c_1, c_2, N_p, V_{\text{max}}, \delta^0, \eta, c, T_{\text{out}}^{\text{max}}, T_{\text{in}}^{\text{max}}$
- 2) 生成每个粒子的初始位置 \mathbf{n}_R
- 3) while ($t_{\text{out}} < T_{\text{in}}^{\text{max}}$) do
- 4) for $n=1: N_p$ do
- 5) 生成天牛初始位置 \mathbf{r}_R^0
- 6) while ($t < T_{\text{in}}^{\text{max}}$) do
- 7) 生成随机单位向量 \mathbf{b}
- 8) 根据式(15)和式(16)计算天牛左右须的空间坐标
- 9) 计算天牛左右须的适应度函数 $f(\mathbf{r}_{R,r}^t, \mathbf{n}_R^t)$ 和 $f(\mathbf{r}_{R,l}^t, \mathbf{n}_R^t)$
- 10) 根据式(19)更新 \mathbf{r}_R^t 值
- 11) if $f(\mathbf{r}_R^t, \mathbf{n}_R^t) < f_{\text{best}}(n)$ then
- 12) $f_{\text{best}}(n) = f(\mathbf{r}_R^t, \mathbf{n}_R^t), \mathbf{r}_R^{\text{best}}(n) = \mathbf{r}_R^t$
- 13) end if
- 14) 根据式(17)和式(18)更新 s^t 和步长
- 16) end while
- 17) end for
- 18) 更新每个粒子的个体最优值 $\mathbf{n}_R^{\text{pBest}}$ 。
- 19) 更新粒子群群体最优值 $\hat{\mathbf{n}}_R^{\text{gBest}}$, 并记录其结果 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{best}}$ 和 f_{best}
- 20) 根据式(13)和式(14)更新每个粒子的空间坐标及其速度
- 21) end while
- 22) 返回结果 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{best}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{r}}_{\text{best}} \\ \hat{\mathbf{n}}_R^{\text{gBest}} \end{bmatrix}$

4 系统仿真与分析

4.1 系统仿真设计

为验证本文系统的可行性和性能, 本节首先进

行了仿真测试。在仿真中，设置了 3 m×3 m×5 m 的室内空间，并设 9 盏 LED 光源安装在天花板上，如图 1 所示。9 盏 LED 光源的空间坐标分别是 $A(0,0,5)$ ， $B(1.5,0,5)$ ， $C(3,0,5)$ ， $D(1.5,1.5,5)$ ， $E(1.5,1.5,5)$ ， $F(3,1.5,5)$ ， $G(0,3,5)$ ， $H(1.5,3,5)$ 和 $I(3,3,5)$ 。每个 LED 光源发送一个基于 CDMA 调制的唯一 ID 信息，并被接收端接收。

本文系统的其他仿真参数如下：LED 光源功率为 10 W；滤波器增益、聚光器增益均为 1；探测器的有效面积为 1 cm²；朗伯阶数为 1.5。本文通过 2 个方面来衡量系统性能：系统的定位误差 $\|r_R - \hat{r}_R\|$ 、系统的定向误差 $\arccos\left(\frac{n_R^T \hat{n}_R}{\|n_R\| \|\hat{n}_R\|}\right)$ 。

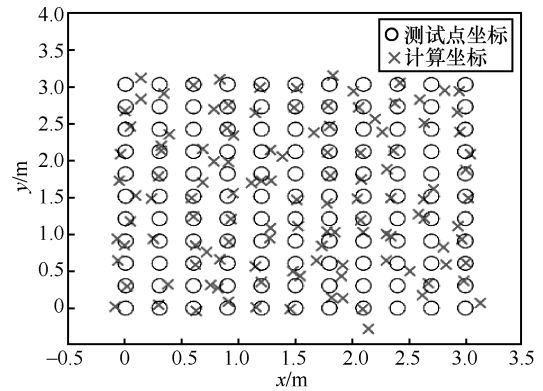
4.2 仿真结果

图 2 给出了 VLC 定位与定向算法收敛过程。接收端位于 (1.5,1.5,1) 处，方向向量为 (0.5,0.5,0.707)，信噪比为 40 dB。图 2 中每一个粒子的位置表示在该方向的最佳坐标，线段指向为该粒子的方向。随着迭代次数的增加，粒子逐渐向目标点处靠拢，线段指向也逐渐平行于参考方向。

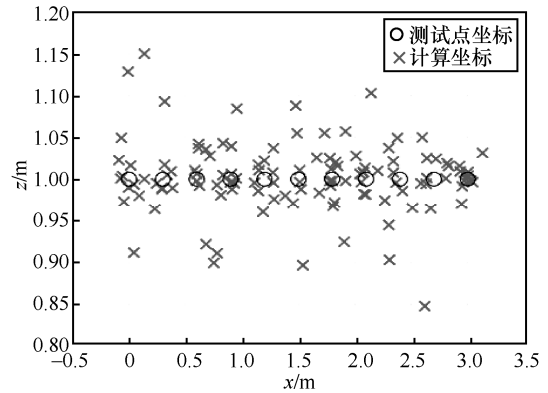
图 3 展示了在距地面高度为 1 cm 的平面内、信噪比为 30 dB 条件下的定位测试结果。平面上共生成了 11×11 个测试点，每 2 个测试点间距为 0.3 m。在保证测试点处于每盏 LED 光源 FoV 的条件下，随机生成各个测试点的方向。结果显示，系统平均定位误差为 15.25 cm，平均定向误差为 7.17°。误差主要因为噪声的干扰，使测得的 RSS 与理论 RSS 有较大的偏差，从而影响粒子的搜索过程。

图 4 给出了在不同信噪比下系统的定位与定向仿真结果，其纵坐标分别为定位误差和定向误差累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 值。每次仿真生成 400 个测试点进行误差统计。当

信噪比为 20 dB 时，系统平均定位和定向误差分别为 36.11 cm 和 15.77°；当信噪比为 30 dB 时，系统平均定位误差和定向误差分别为 14.58 cm 和 6.79°；当系统的信噪比提升至 40 dB 时，系统平均定位和定向误差降低至 4.82 cm 和 2.24°。从定位与定向的仿真分析可知，信噪比对系统的定位性能有较大的影响。



(a) x-y 平面分布



(b) x-z 平面分布

图 3 定位测试结果

仿真计算的处理器为 AMD R5 3600，主频为 4.1 GHz。仿真中用到的参数如表 1 所示。在 VLC 定位与定向算法实验中，由于搜索维度较大，平均时间开销为 1.06 s。

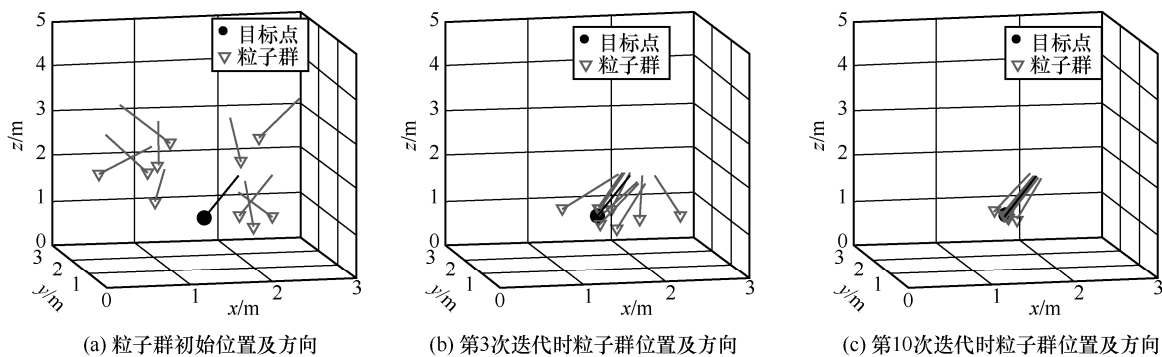


图 2 VLC 定位与定向算法收敛过程

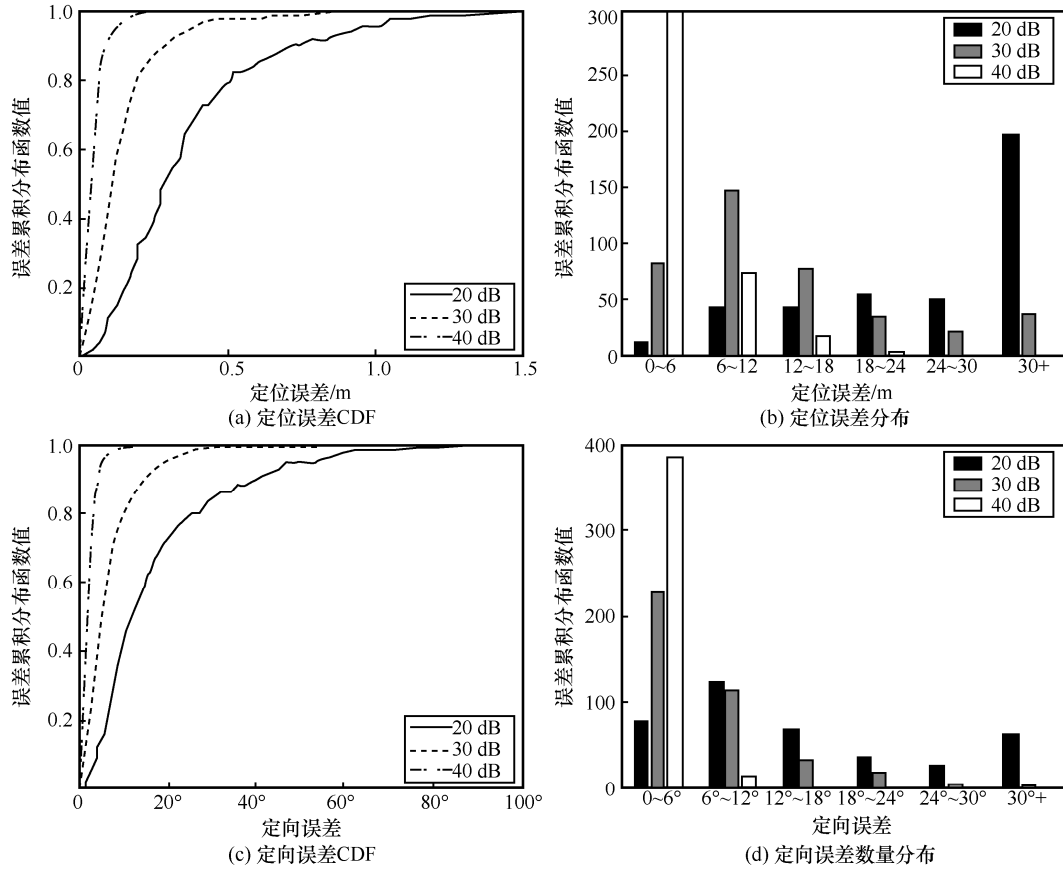


图 4 不同信噪比下定位与定向仿真结果

5 实验测试与分析

5.1 实验设计

本文 VLC 室内定位与定向系统的功能框架如图 5 所示。在发射端，采用 Walsh 码作为扩频码，对每个 LED 光源的 ID 信息进行扩频处理，并将扩频后的信息存储到乐鑫 ESP32 中，由 ESP32 驱动电路来控制 LED 光源的开关状态。接收端通过 PD 将光信号转换为电信号，再由接收端对采集到的数据进行相应处理。

算法	仿真参数	平均用时/ms
VLC 定位与定向算法	$T_{out}^{max} = 10, N_p = 10, T_{in}^{max} = 100,$ $w = 0.5, c_1 = 1, c_2 = 2,$ $\delta^0 = 0.5, \eta = 0.95, c = 5$	1 060
$n_R = [0, 0, 1]^T$ 下定位算法	$T_{out}^{max} = 1, N_p = 1, T_{in}^{max} = 200,$ $\delta^0 = 0.3, \eta = 0.98, c = 5.$	8.23

实验测试平台空间大小为 0.9 m×0.9 m×1.5 m。

9 盏 LED 光源固定在高度为 1.5 m 的铝架上，由 ESP32 周期性地发射带有 ID 信息的光信号，相邻 LED 光源之间的距离为 0.45 m。实验采用的 LED 光源的光束角为 100°，朗伯阶数为 1.5。

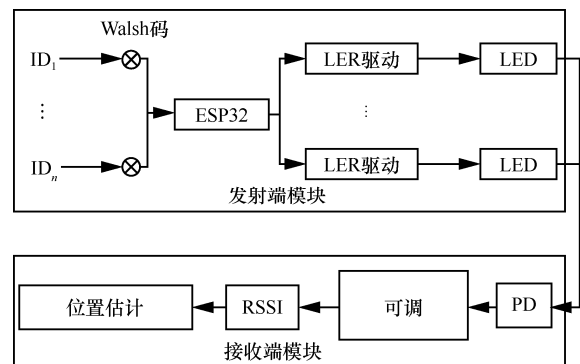


图 5 VLC 室内定位与定向系统功能框架

5.2 朗伯模型优化算法

由大量实验测试可知，定位误差产生的原因如下。1) 光源实际辐射模型与理论辐射模型有较大的差异。2) RSS 测量误差，环境光、电路噪声对混合信号解调有一定的影响。这 2 种因素导致实际 RSS 与理

想 RSS 之间存在较大偏差,严重影响系统的定位与定向性能。总体而言,辐射模型差异带来更大的定位误差影响,本文提出一种基于朗伯模型优化的补偿算法。

光源辐射模型(式(12))中主要参数为 C_m 。通常情况下,可在 LED 光源 FoV 内采集一个点的强度信息,通过式(12)来计算 C_m 。在获得 C_m 后可计算第 m 号 LED 光源在目标点的理论 RSS 值。然而,在实验过程中发现实际 LED 光源在不同区域的 C_m 并不一致。举例说明,图 6 中 Q_0 点测得的 C_m 并不能很好地描绘光源在 Q_3 点附近区域的光强变化关系。由于 C_m 的偏差会严重影响定位精度,本文采用一种基于朗伯模型优化的算法来进一步优化定位结果。首先将式(5)改写为

$$P_m = \frac{C_{m,r}}{d_m^2} \cos^n(\phi_m) \cos(\theta_m), \forall m \in \Omega_R, \mathbf{r} \in \mathbb{R}^{3 \times 1} \quad (20)$$

其中, $C_{m,r}$ 为第 m 号光源在 \mathbf{r} 处的 C_m 。其次,在定位区域中采取部分点作为指纹点。再次,在每个指纹点的信息中分离出所有 LED 光源的 RSS,并由此得到该指纹点处所有 LED 光源的朗伯模型初始参数的集合 C_r , 表示为

$$C_r = \{C_{m,r} | \forall m = 1:K\} \quad (21)$$

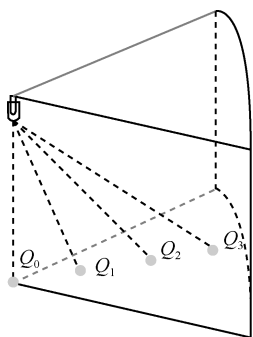


图 6 LED 光源在不同位置的辐射

最后,在定位阶段选取天牛离当前坐标最近的 k 个指纹点,将这 k 个指纹点的加权平均值作为该坐标的 C_r 。加权算式为

$$\begin{cases} \omega_i = \|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{\text{finger}}^i\| \\ w_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i} \\ C_{r_R} = \sum_{i=1}^k w_i C_{r_i} \end{cases} \quad (22)$$

基于朗伯模型优化算法采集少量的先验指纹点计算 C_{r_R} , 通过 C_{r_R} 即可准确描述目标区域 RSS 与接收端坐标、方向的变化关系,可有效补偿实际器件引入的误差,提高实际系统定位与定向精度。

5.3 实验结果及分析

在进行 VLC 定位与定向实验时,发射端采用 9 盏 LED 光源,分别在高度为 0 和 0.2 m 的测试平面进行实验,每个平面分别以 30° 的倾角设置 25 个点作为参考点,并采集 9 个指纹点用于朗伯模型优化算法。定位与定向结果如图 7 所示,优化前,2 个平面内 50 个测试点的平均定位误差为 10.47 cm,定向误差为 12.61° 。优化后,平均定位与定向误差降低至 5.32 cm 和 5.99° ,可以提高约 50% 的精度。

本文在方向向量为(0,0,1)情况下做三维定位实验。实验中采用 A、C、G、I 这 4 盏 LED 光源,并保持接收端竖直向上,在高度为 0 的测试平面上,采集 25 个测试点,并采集 5 个指纹点用于优化算法。表 2 对比了本文算法与文献[8,23]算法的三维定位精度。在相同迭代次数下进行比较,实验结果表明本文优化算法有更高的定位精度。

图 8 展示了本文算法实验定位结果。在优化前,系统的定位误差为 3.84 cm,经优化后平均定位误差减小至 1.55 cm。

从图 7 和图 8 可得,本文提出的 VLC 室内定位与定向系统具有较高的精度,可提供厘米级的三维定位服务。

6 结束语

本文设计了一种基于 VLC 的三维定位与定向系统,采用 CDMA 编码 ID 来解决码间干扰问题,并提出了一种结合 PSO 与 BAS 的同时定位与定向算法。相比于传统 VLC 室内定位系统,所提定位算法精度不受接收端方向变动影响,并提供接收端的三维位置和三维方向,具有更广泛的适用性。仿真分析结果表明,所提 VLC 定位与定向系统在 40 dB 下可实现 4.82 cm 的定位精度和 2.24° 的定向精度。在实验系统中,引入一种补偿实际系统误差来提高定位精度的优化算法,通过采集适当指纹点信息来估计光源辐射模型的参数,再由所估计的辐射模型计算出精确坐标。在 $0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的空间中,测试结果表明优化后的实验系统能够将平均定位和定向误差降低至 5.32 cm 和 5.99° ,特别是接收端保持竖直向上时可实现 1.55 cm 平均定位误差。本

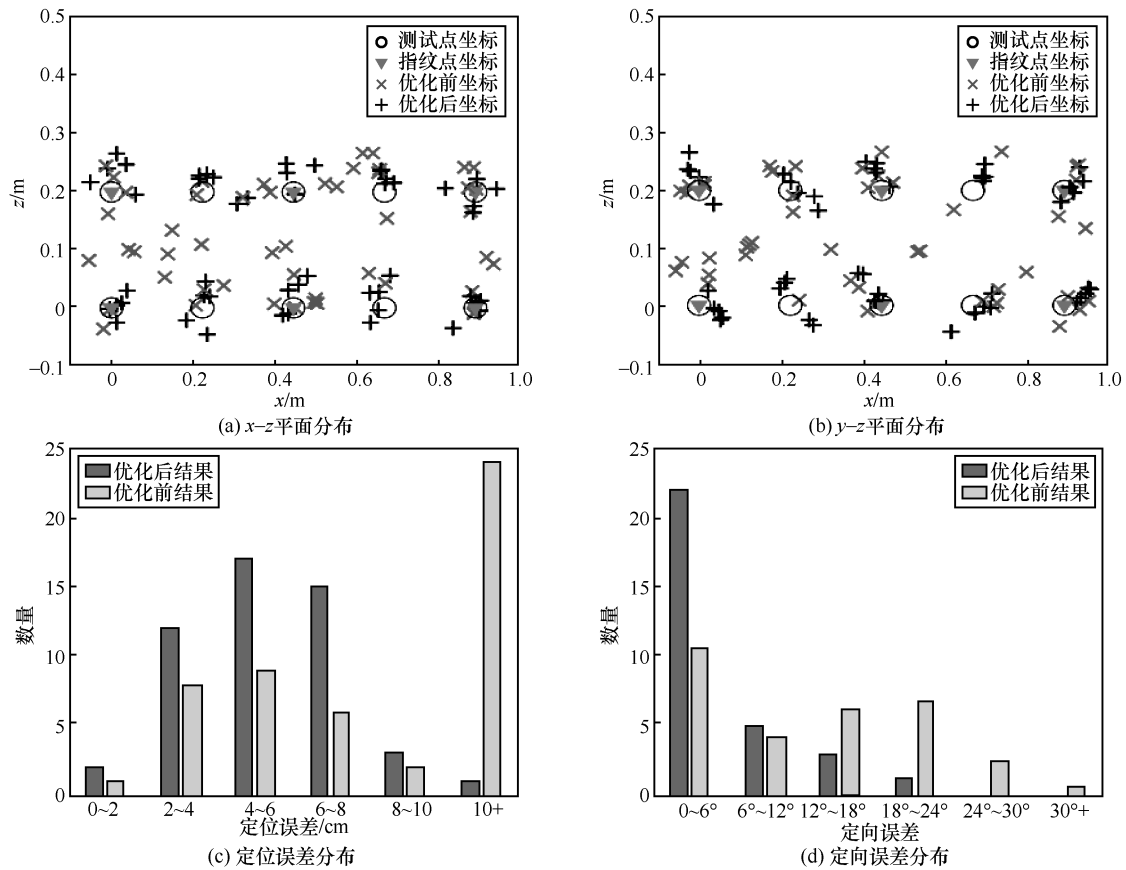


图 7 三维定位与定向结果

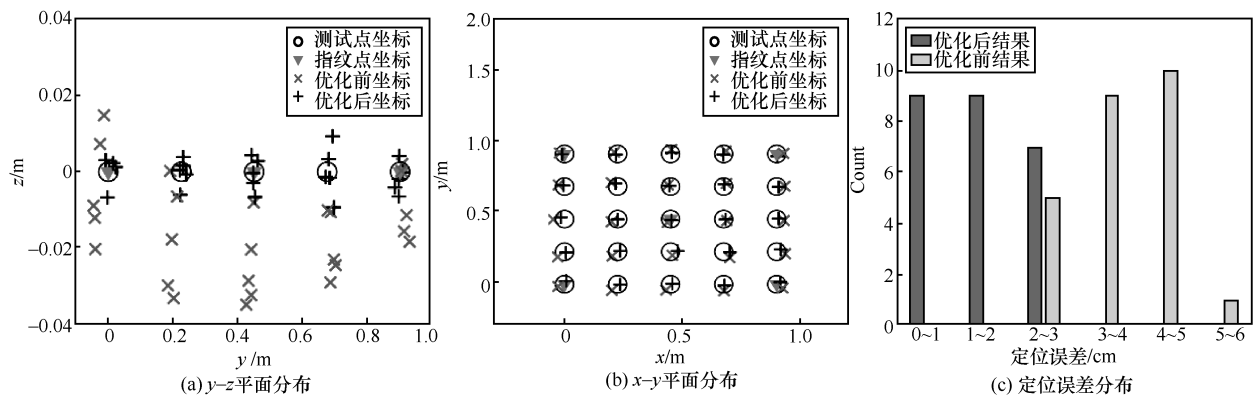


图 8 三维定位分布

文提出的 VLC 室内定位与定向系统具有较高的定位精度，使 VLC 系统具有较好的应用前景。

表 2 定位性能比较

算法	平均定位误差/cm
PSO	4.40
SA	4.24
本文算法	3.84

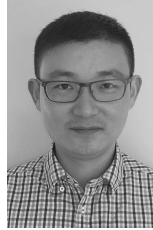
参考文献:

[1] 周牧, 蒲巧林, 田增山. 室内 WLAN 定位中位置指纹优化的接入点部署方法[J]. 通信学报, 2015, 36(S1): 30-41.
 ZHOU M, PU Q L, TIAN Z S. Location fingerprint optimization based access point deployment in indoor WLAN localization[J]. Journal on Communications, 2015, 36(S1): 30-41.

[2] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(6): 1067-1080.

- [3] LUO J, FAN L, LI H. Indoor positioning systems based on visible light communication[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4):2871-2893.
- [4] DO T H, YOO M. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems[J]. Sensors, 2016, 16(5): 678.
- [5] WANG T Q, SEKERCIOGLU Y A, ARMSTRONG J. Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(20): 3302-3308.
- [6] EROGLUY Y S, GUVENCY I, PALAY N, et al. AoA-based localization and tracking in multi-element VLC systems[C]//Wireless and Microwave Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [7] ZHU B, CHENG J, WANG Y, et al. Three-dimensional VLC positioning based on angle difference of arrival with arbitrary tilting angle of receiver[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1): 8-22.
- [8] CAI Y, GUAN W, WU Y, et al. Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using particle swarm optimization[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-20.
- [9] 汤晓峰, 杨国伟, 樊冰, 等. 基于 K-means 聚类的可见光通信室内定位系统的研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32(5): 24-31.
- TANG X F, YANG G W, FAN B, et al. Indoor positioning system of visible light communication based on K-means clustering algorithm[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2019, 32(5): 24-31.
- [10] ZHU B, CHENG J, YAN J, et al. VLC positioning using cameras with unknown tilting angles[C]//Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [11] RAHMAN M S, HAQUE M M, KIM K, et al. Indoor positioning by LED visible light communication and image sensors[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2011, 1(2): 161-170.
- [12] KIM D, PARK J K, KIM J T, et al. Three-dimensional VLC positioning system model and method considering receiver tilt[J]. IEEE Access, 2019, 7: 132205-132216.
- [13] YASIR M, HO S, VELLAMBI B N, et al. Indoor positioning system using visible light and accelerometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(19): 3306-3316.
- [14] HOU Y, XIAO S, ZHENG H, et al. Multiple access scheme based on block encoding time division multiplexing in an indoor positioning system using visible light[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(5):489-495.
- [15] 柯熙政, 张棋雯. FSO-WOFDM 系统的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 247-253.
- KE X Z, ZHANG Q W. Experimental study on FSO-WOFDM system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 247-253.
- [16] QIU Y, CHEN S, CHEN H, et al. Visible light communications based on CDMA technology[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 178-185.
- [17] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [18] 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 536-2540.
- DING D Q, KE X Z. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 536-2540.
- [19] 陈少钦, 杨国伟, 李志鹏. 多束涡旋光波串扰分布失真的相位补偿研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32(2): 64-68.
- CHEN S Q, YANG G W, LI Z P. Phase compensation for crosstalk distribution distortion of multiple vortex beams[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2019, 32(2): 64-68.
- [20] ZHANG W, CHOWDHURY M I, KAVEHRAD M, et al. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications[J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 045105.
- [21] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]// International Conference on Networks. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1942-1948.
- [22] SUMAN B, KUMAR P. A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization[J]. Journal of the Operational Research Society, 2006, 57(10): 1143-1160.
- [23] JIANG X Y, LI S. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. International Journal of Robotics and Control, 2017, 1: 1-3.

[作者简介]



杨国伟 (1984-), 男, 浙江杭州人, 博士, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线光通信、光与无线融合的泛在互联与定位技术等。



黄兆标 (1996-), 男, 浙江温州人, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为室内定位技术。



樊冰 (1979-), 女, 河南许昌人, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为室内定位和无线传感网络技术。

周雪芳 (1976-), 女, 江西丰城人, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为光纤激光器、光纤传感技术和 THz 信号源等。

毕美华 (1981-), 女, 山东济宁人, 博士, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为光与无线融合接入、新型光接入网系统的物理层安全、可重构的智能的数据中心网络系统等。