

基于强度组合与距离加权的室内可见光定位算法研究

黄胜,宁博文*,向劲松,李长萍

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:对于室内可见光定位,非视距(NLOS)信道的能量会明显干扰接收信号强度(RSS)算法的精度。为了提高NLOS情况下的可见光定位性能,研究了NLOS传输散射功率对二维室内定位的影响。针对视距(LOS)与NLOS功率强度总和情况,提出一种接收功率强度组合与距离加权因子(ICDWF)相结合的室内定位算法。该算法将接收的功率通过数值的大小进行分组,通过RSS算法分别算出各组的估计坐标。然后引入一种以距离放大系数为基础的权重系数,最后将权重系数引入各组的坐标来得到最终的估计坐标。仿真结果表明:在所搭建的 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 室内环境中,该方案与传统RSS算法相比,在室内NLOS能量较高的区域平均误差降低了 0.23 m 。

关键词:可见光通信;室内定位;非视距传输;距离因子

中图分类号:TN929.12 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)08-0001-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on indoor visible light localization algorithm based on intensity combination and distance weighting

HUANG Sheng, NING Bowen*, XIANG Jingsong, LI Changping

(Institute of Communication and Information Engineering,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For indoor visible light localization, the energy of the non-line of sight (NLOS) channel can significantly interfere with the accuracy of the received signal strength (RSS) algorithm. In order to improve the visible light localization performance under NLOS, this paper studies the influence of NLOS transmission scattering power on two-dimensional indoor positioning. For the sum of line of sight (LOS) and NLOS power intensities, an indoor positioning algorithm combining receiving power intensity combination and distance weighting factor (ICDWF) is proposed. In this algorithm, the received power is grouped by the numerical value, and the estimated coordinates of each group are respectively calculated by the RSS algorithm. Then, a weight coefficient based on the distance amplification factor is introduced, and finally the weight coefficient is introduced into the coordinates of each group to obtain the final estimated coordinates. The simulation results show that compared with the traditional RSS algorithm, the average error of area with high NLOS energy is reduced by 0.23 m in the built-in $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ indoor environment.

Key words: visible light communication; indoor positioning; non-line-of-sight transmission; distance factor

0 引言

近年来,随着智能物流仓库、室内机器人定位等众多新兴领域的发展,对于室内定位技术的需求也在

收稿日期:2019-03-09。

基金项目:国家自然科学基金(61571072)资助。

作者简介:黄胜(1974-),男,博士,教授,CCF会员,目前主要从事室内可见光通信、光网络及视频处理方面的研究,作为主研人员参与完成国家科研项目2项,省部级项目6项。已发表学术论文60余篇,授权发明专利5项。

*通信作者:宁博文(E-mail: 18166435315@163.com)。



不断增长,全球定位系统(GPS)^[1]是目前最常用的定位方案,但在室内无法提供可用的定位服务^[2]。世界各地的学者、机构也提出了许多基于无线通信的室内定位技术,目前常用的室内定位方案有红外、蓝牙、WiFi、射频识别(RFID)、紫蜂协议(ZigBee)和超宽带(UWB)等,从定位精度方面,这些技术可以提供几十厘米至几米的精度^[3]。然而,对于常见的室内环境设施,这些系统均需要进行额外的硬件安装,从定位精度与硬件成本两方面考虑,上述方案均存在一定的局限性。

发光二极管(LED)的普及为可见光通信(VLC)的

发展提供了硬件基础。基于 VLC 的室内定位技术相较于其它无线射频类的方案有许多明显优势^[4]。对于采用 VLC 的室内定位方案, 通过接收端的不同设备可以分为两类: 光电探测器 (PD) 和图像传感器 (Image Sensor)。基于图像传感器的方案是通过图像传感器对频率不同的 LED 进行识别^[5], 也可以利用发射平面与成像平面的几何关系进行估计^[6]。目前, 常用的基于 PD 方案有监测信号的到达时间 (TOA)^[7]、到达时间差 (TDOA)^[8]、到达角度 (AOA)^[9,10] 以及接收信号强度 (RSS)^[11] 等。这几种算法, TOA、TDOA 与 AOA 都存在一定的局限性。RSS 算法是最直接简便、使用最广泛的方法, 由于室内可见光信道模型是已知的, 因此, 仅需要测试接收的信号强度即可计算出定位距离, RSS 算法也可以与 AOA 进行结合使用^[12,13]。近年来, 一些研究方案则从硬件上针对 RSS 算法进行改进, 如文献[14]采用了一种多角度接收器的方案, 利用不同接收器接收的光功率差值进行定位。然而从硬件方面改进的方案都需要增加额外的硬件条件, 增加了系统的复杂度。RSS 算法作为目前最常用的算法, 也存在一些弊端。虽然在 VLC 中, 视距传输 (LOS) 占绝大部分, 但是对于室内环境, 由于传播空间一般较小, 因此非视距 (NLOS) 引起的散射能量在传输中也不能忽略, 尤其是在室内的边角区域。目前, 对于室内散射部分的能量讨论较少, 采用 RSS 算法若不考虑散射的部分, 则定位效果会过于理想化, 与实际环境下的结果严重不符。

针对上述问题, 本文提出一种室内 LOS 与 NLOS 结合情况下基于强度组合与距离加权因子 (ICDWF) 的可见光定位算法。

1 VLC 定位系统原理

1.1 LOS 与 NLOS 信道模型

本文信道模型考虑室内 LOS 与 NLOS 结合的链

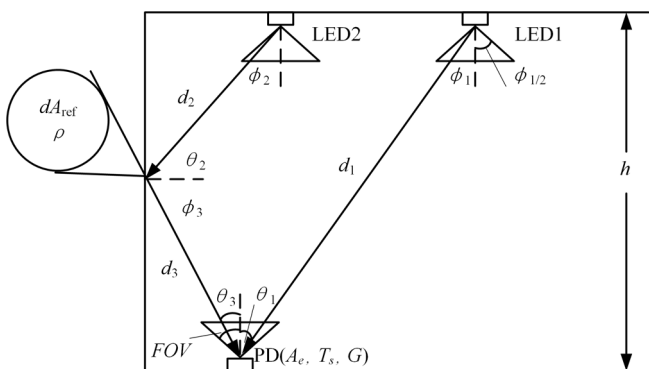


图 1 室内 VLC-LOS/NLOS 模型图

路, 如图 1 所示^[15]。其中, 发射端为 LED, 接收端为 PD。LED1 作为 LOS 传输的光源, 可视为朗伯模型的光源。对于 LOS 链路, 只考虑发射端到达接收端的直接接收强度, 忽略散射和遮挡, d_1 为 LED1 与 PD 间的直线距离; ϕ_1 是相较于 LED 平面法线方向的发射角; θ_1 为相较于 PD 平面法线方向的接收角; 对于接收端 PD, 其中, A_e 为有效接收面积; T_s 为滤波器的光学增益; G 为透镜的聚光增益, 与透镜折射率有关; FOV 是视场角; 房间的高度为 h 。

LED2 作为 NLOS 传输的光源, 其中, dA_{ref} 是反射点的面积元, ρ 是反射面的反射率, 对于室内环境, 天花板、墙壁和地面均有不同的反射系数^[15]。 ϕ_2 、 θ_2 分别是 LED2 发射角和相较于散射点平面法线的入射角, ϕ_3 、 θ_3 分别是散射点的发射角和 PD 的入射角。对于大部分室内平面来说, 该传输过程为漫反射, 因此 4 个角的数值可能互不相同。 d_2 、 d_3 分别是 LED2 到散射点与散射点到 PD 的距离。

当 LED 发射功率为 P_t 时, 接收端接收的总强度 P_r 可通过信道增益 H 来进行计算^[16]:

$$P_r = \begin{cases} P_t(H_{NLOS} + H_{LOS}), & \theta \leq FOV \\ 0, & \theta > FOV \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_{LOS} 代表 LOS 链路的信道增益, H_{NLOS} 代表 NLOS 链路的信道增益, θ 表示接收信号的入射角。

1.2 室内 RSS 算法原理

对于散射链路的能量, 由于其路径的随机性与复杂性, 单独进行逆向运算是无法实现的。因此, 只能通过 LOS 信道的模型及接收到的总信号强度来进行对 LED 距离的估计。假设接收端保持在同一高度, 通过式 (1) 可以计算出接收端 (未知坐标 (x, y)) 与第 i 个 LED (已知坐标 (x_i, y_i)) 的水平距离 r_i , 则二维平面上, 接收 PD 与各个 LED 有如下关系^[17]:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = r_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = r_2^2 \\ \vdots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = r_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

本文采用最小二乘法^[18]求解式 (2) 即可求得最终的估计坐标 (x, y) 。

2 强度组合与改进距离加权因子 (ICDWF) 算法

对于仅考虑 LOS 链路的系统中, 上述方案一般可

以达到厘米级的理想定位精度,但在实际环境中,由于散射分量的存在,接收端接收的信号强度为 LOS 加散射分量的总和,采用上述方案直接进行位置估计会在散射分量较多的区域造成十分明显的误差。因此,本文以上述 RSS 算法方案为基础,提出了一种 ICDWF 的优化算法。

我们采用时分复用的方案使得每个 LED 在特定时段发送自己特定的 ID,其余时间则进行照明工作,如图 2 所示^[9]。这样使得接收端能够识别出接收的信号强度来自源于哪个 LED。

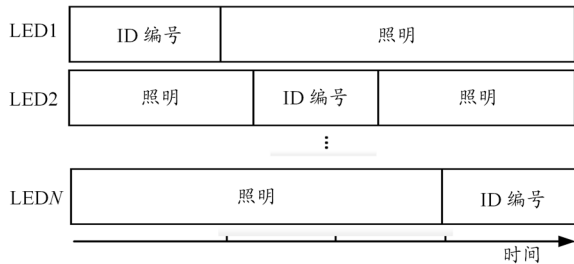


图 2 LED 复用原理示意图

假设室内有 N 个 LED,接收端收到的信号强度可用集合 $P_r=[P_1, P_2, \dots, P_N]$ 来表示。我们对接收到的信号进行强度筛选,选出强度值最大的前 2 个,即 $P_{\max1}$ 、 $P_{\max2}$,则集合中还剩余 $M=N-2$ 个信号强度。将 $P_{\max1}$ 、 $P_{\max2}$ 分别与剩余 M 个信号强度中的任一个进行组合,得到 M 组功率集合 $P_{r1}=[P_{\max1}, P_{\max2}, P_{S1}]$, $P_{r1}=[P_{\max1}, P_{\max2}, P_{S2}]$, $\dots$, $P_{rM}=[P_{\max1}, P_{\max2}, P_{SM}]$ 。

其中, $P_{S1}, P_{S2}, \dots, P_{SM}$ 为接收功率组合中剩余 M 个接收强度。分别对这 M 组功率采用 1.2 节中的 RSS 定位方法,可得到 M 组坐标 $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_M, y_M)]$ 。之后,采用一种加权因子对 M 组坐标进行计算。其系数定义如下:

假设第 m 组坐标使用了 K 个 LED 进行定位的坐标 ($m \in 1, 2, \dots, M$),与 K 个 LED 的距离可用集合表示为 $[d_1, d_2, \dots, d_K]$,我们选出其中最小的 d 值 $d_{\min}$,将距离集合中每个距离数值除以 $d_{\min}$,则距离放大系数 S_k 为:

$$S_k = \frac{d_k}{d_{\min}}, \quad k \in 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

其中, d_k 表示集合 $[d_1, d_2, \dots, d_K]$ 中的任意一个值,由此可知 $S_k \geq 1$ 。之后,对于使用了 K 个 LED 进行定位的第 m 组坐标权重系数 a_m 可表示为:

$$a_m = \frac{1}{\sum_{k=1}^K S_k d_k} \quad (4)$$

根据式(4)和之前得到的 M 组坐标,可得到最终的估计坐标为:

$$(\hat{x}_r, \hat{y}_r) = \left(\frac{\sum_{m=1}^M a_m \cdot x_{rm}}{\sum_{m=1}^M a_m}, \frac{\sum_{m=1}^M a_m \cdot y_{rm}}{\sum_{m=1}^M a_m} \right) \quad (5)$$

式(3)中的组合内部存在线性的可能,因此得到的坐标组数可能小于 M 组,我们只选取有效的非线性的坐标即可。由于定位所需一定数量的 LED,且无论距离近或远都能一定程度上提供位置信息,因此并不能直接舍弃掉某些 LED。

目前已知的距离加权方案大多为引入距离因子 d_k 来对第 k 个 LED 所提供的位置信息进行权重的分配。从原理上来看,LED 距离越远,所占权重越小,则该组坐标对最终坐标的影响就越小。为进一步优化定准效果,本文将单个 d_k 称为第 k 个 LED 的权重因子, a_m 为第 m 组坐标的权重系数,以该组 LED 的权重因子集 $[d_1, d_2, \dots, d_K]$ 为基础,计算出了一组距离放大系数 $[S_1, S_1, \dots, S_K]$,其中 S 与 d 的下标相对应,将 $(S_k \times d_k)$ 整体作为新的权重因子代替常见的 d_k 。由式(4)可知,当 d_k 非最小值时, S_k 均大于 1,而最小值所对应的 $S_{\min}$ 则为 1。因此,对于该组 LED,保证了最近的 LED 权重因子 $d_{\min}$ 不变,而其余 S_k 均大于 1,相较于采用 d_k 为权重因子的方案,将权重因子进行了放大,权重系数 a_m 则会减小,从而进一步降低了权重因子集 $[d_1, d_2, \dots, d_K]$ 较大的 LED 组所得坐标的权重。

3 系统性能仿真结果及分析

3.1 系统环境及参数设置

系统的房间环境及 LED 坐标如图 3 所示。括号中数字为以房间左下角为原点 (0,0) 的 LED 坐标,4 个角 LED 相连的内部为内部区域,外部即房间的边缘为外部区域。系统的相关参数设置如表 1 所示。本文采用二维平面定位误差作为性能评价标准,定义如下:

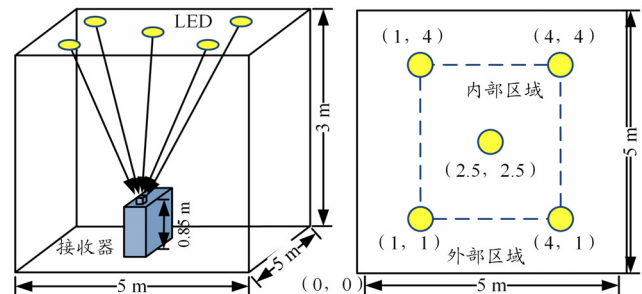


图 3 房间环境图及 LED 坐标

表 1 系统参数设置

参数	数值	参数	数值
房间大小	5 m×5 m×3 m	接收器有效面积	1×10 ⁻³ m ²
LED 坐标	(1,1)、(4,1)、 (1,4)、(4,4)、 (2.5,2.5)	反射面单位 面积 (墙面面积/格子数)	0.027 m ²
接收器高度	0.85 m	反射系数	0.8
LED 发射功率	45 W	T_s	1
LED 辐射半角	60°	房间格数	30×30=900
PD 视场(FOV)	70°	PD 透镜折射率	1.5

$$error = \sqrt{(x_{real} - x_r)^2 + (y_{real} - y_r)^2} \quad (6)$$

其中, (x_{real}, y_{real}) 为该点真实坐标, (x_r, y_r) 为该点估计坐标。

3.2 仿真结果及分析

在 LOS 链路的情况下, 房间的功率分布情况如图 4(a) 所示。可以看出, 接收的信号强度整体呈现为房间中心高, 四周边角低的分布。最高处在房间中心, 约为 16 mW, 并且向房间四周逐渐下降, 在接近墙的边角处达到最低, 约为 5.5 mW。中心与边角的接收功率强度有明显差别。

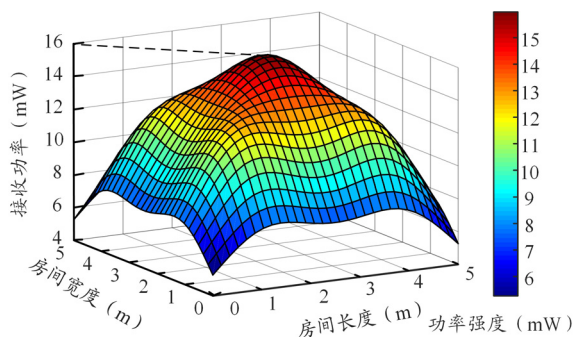
图 4(b) 为散射的房间功率分布图。可以看出, 与 LOS 链路的分布呈现完全相反的趋势。由于散射部分的 NLOS 增加了大部分功率集中在房间的墙壁附近, 最高约为 4 mW。而在房间的中心受到墙壁散射影响较小, 因此接收的散射功率最低, 约为 1.5 mW。对比图 4(a) 可知, 虽然在中心区域, LOS 功率分量占主导地位, 散射的功率占比较小, 但是在接近墙壁的边角处, 散射功率与 LOS 分量几乎相等。

图 5 为 LOS 链路 with NLOS 链路的接收功率总和分布图, 最高为 17.2 mW, 最低为 6.5 mW。与图 4(a) 相比, 由于 NLOS 的能量的加入, 房间整体的功率分布变得更加平缓。

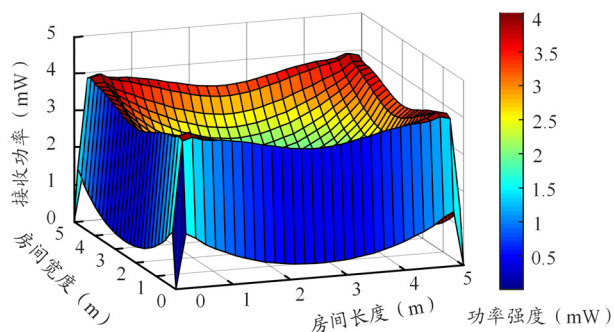
图 6(a) 为 RSS 算法的定位误差分布图, 可以看出, 房间中心附近的误差最小, 均为 0.1 m 内, 边角的误差较大, 最大处为 1.4 m 左右。通过比较图 4 与图 6 可知, 这是由于散射分量占比的逐渐增大导致了误差的提升, 因此在实际环境中, 散射分量是不可忽略的存在。图 6(b) 为本文 ICDWF 算法的误差分布图。可以看出, 最高约为 0.8 m 左右, 同样在房间的角落处, 相较于图 6(a) 的最高处 1.4 m 左右有明显的提升。

房间不同误差范围内的格数如图 7 所示, 可以看出, 与 RSS 算法相比, ICDWF 算法误差在 0~0.2 m 的

数量有明显提升, 误差大于 0.6 m 的数量大幅下降, 尤其大于 0.8 m 仅有 4 个点。因为误差大于 0.6 的区域



(a) LOS 链路



(b) NLOS 链路

图 4 接收光功率

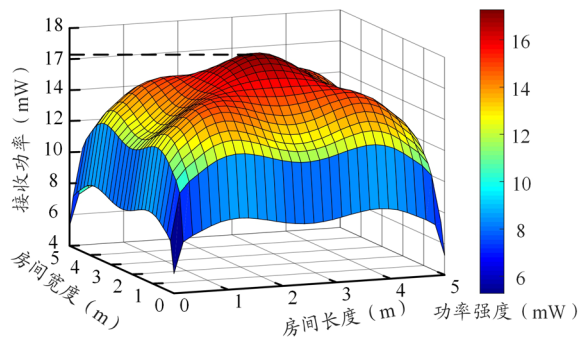
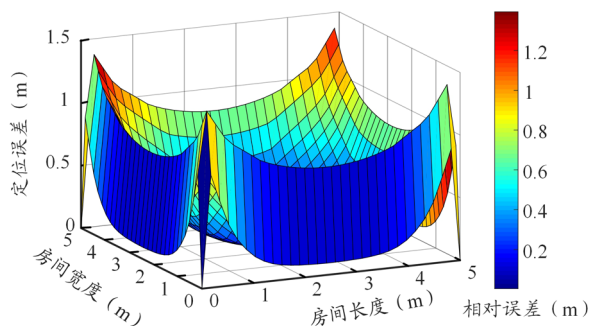
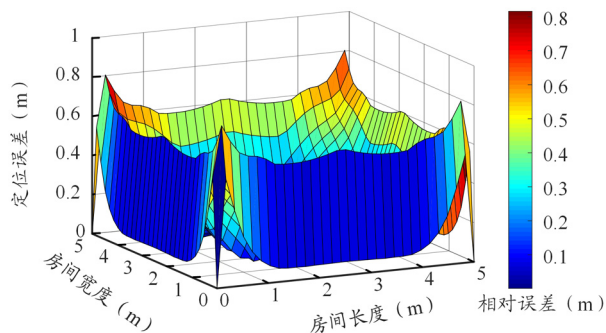


图 5 链路总接收功率



(a) RSS 算法



(b) ICDWF 算法

图6 定位误差分布图

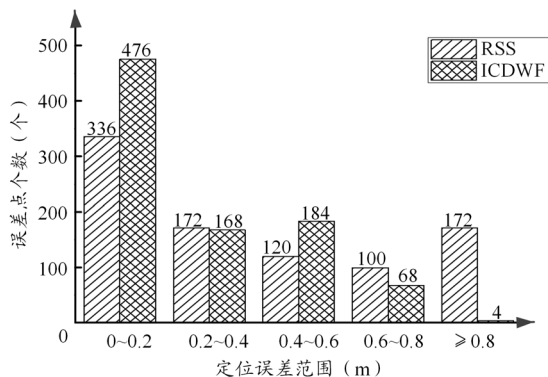
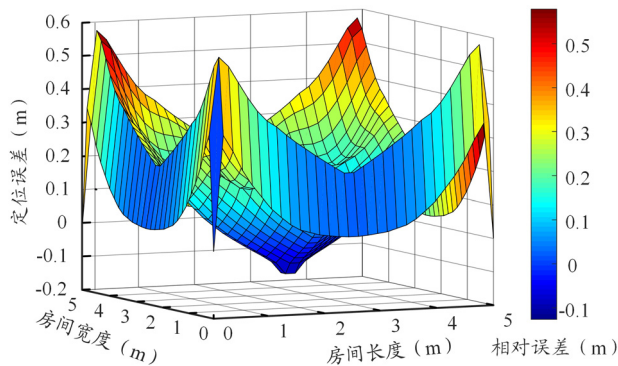
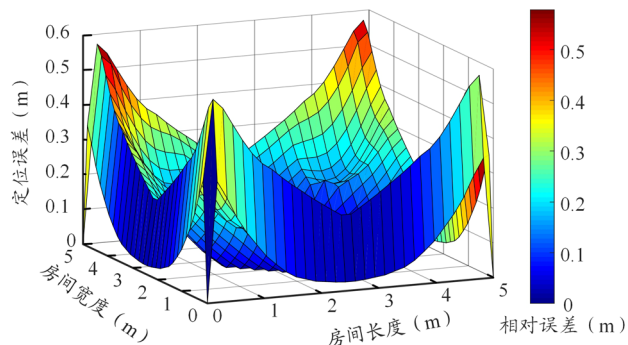


图7 定位误差点数统计图



(a) OS 前



(b) OS 后

图8 误差提升分布图

基本为房间的边角处,结合图6可以看出,在房间边角处(即受散射影响较大的地方),相较于RSS算法,采用ICDWF算法的定位性能得到了有效的提升,最大提升点约提高了42%。为了更直观地观察误差的提升,本文用图6(a)减去图6(b),得到两者误差的差值图如图8(a)所示。

从图8(a)可看出,定位精度在四角的提升最明显,误差最大降低约0.57 m。随着往房间中心靠近,提升逐渐变小。在房间的最中心区域,ICDWF算法使得误差反而变得更大,最中心处精度变化为-0.12 m。这是由于在最中心的点接收到的散射功率分量很小,而算法会让那些散射功率占主导的LED影响中间位置的定位精度。对于此问题,我们只需对两者进行最优选取(OS)即可,改进后的误差性能分布图如图8(b)所示。

表2统计了房间总区域、内部区域和外部区域分别在2种算法方案中的平均误差。可以看出,ICDWF算法在内部与外部的平均误差均有提升,其中内部的精度已经较高,而在容易收到散射影响的外区域平均误差降低了0.23 m,有效地降低了NLOS分量所带来的误差。在全房间的平均误差也有着0.17 m的性能提升。

表2 房间各区域及总体平均误差比较

房间区域	RSS 算法平均误差(m)	ICDWF 算法平均误差(m)
内部区域	0.13	0.07
外部区域	0.58	0.35
总区域	0.42	0.25

4 结束语

RSS算法作为目前最常用的算法,其定位精度与接收的功率强度有着紧密的联系。本文从室内LED的LOS与NLOS信道模型出发,首先验证了室内环境中NLOS信道的功率在房间的边角区域不可忽略,而后在考虑加入NLOS功率的情况下,提出了一种ICDWF定位算法。仿真结果表明:在5 m×5 m×3 m的室内环境中,ICDWF定位算法在室内外部区域的定位性能有着明显的提升,平均误差降低了0.23 m,最大提升点在房间的四角。对于室内的整体平均误差也有着约0.17 m的降低。该算法不需要在室内环境安装额外的硬件设施,对于一般室内环境均适用。

黄胜, 宁博文, 向劲松, 等: 基于强度组合与距离加权的室内可见光定位算法研究

参考文献:

- [1] MISRA E. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance[M]. 2nd ed. Lincoln: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [2] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems [J]. IEEE Trans. Syst, Man, Cybern. 2007, 37(6): 1067–1080.
- [3] LUO J, FAN L, LI H. Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2871–2893.
- [4] ARMSTRONG J, SEKERCIOGLU Y, NEILD A. Visible light positioning: A roadmap for international standardization [J]. IEEE Commun. Mag., 2013, 51(12): 68–73.
- [5] XIE C, GUAN W, WU Y, et al. The LED-ID Detection and Recognition Method Based on Visible Light Positioning Using Proximity Method[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1–16.
- [6] PHAT H, MYUNGSIK Y. VLC-Based Positioning System for an Indoor Environment Using an Image Sensor and an Accelerometer Sensor [J]. Sensors, 2016, 16(6): 783–799.
- [7] SUN X, DUAN J, ZOU Y, et al. Impact of multipath effects on theoretical accuracy of TOA-based indoor VLC positioning system [J]. Photonics Research, 2015, 3(6): 296–299.
- [8] DO T H, YOO M. TDOA-based indoor positioning using visible light [J]. Photonic Network Communications, 2014, 27(2): 80–88.
- [9] KUO Y S, PANNUTO P, DUTTA P. Luxspose Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light [C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Sept. 7–11, 2014. Hawaii: ACM, 2014.
- [10] ZHANG R, ZHONG W D, KEMAO Q, et al. A Single LED Positioning System Based on Circle Projection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1–9.
- [11] YASIR M, HO S W, VELLAMBI B N. Indoor Positioning System Using Visible Light and Accelerometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(19): 3306–3316.
- [12] PRINCE G B, LITTLE T D C. A two phase hybrid RSS/AOA algorithm for indoor device localization using visible light[C]// Proceedings of Global Communications Conference, December 3–7, 2012. California: IEEE, 2012.
- [13] HOU Y, XUE Y, CHEN C, et al. A RSS/AOA based indoor positioning system with a single LED lamp[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, October 15–17, 2015. Nanjing, China: IEEE, 2015.
- [14] 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.
- [15] BARRY J R. Wireless Infrared Communications [M]. New York: Springer, 1994.
- [16] LEE K, PARK H, BARRY J R. Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15 (2): 210–219.
- [17] KIM H S, KIM D R, YANG S H, et al. An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 31(1): 134–144.
- [18] REICHENBACH F, BORN A, TIMMERMAN D, et al. A Distributed Linear Least Squares Method for Precise Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks [C]//International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, June 18–20, 2006, San Francisco, USA. San Francisco: IEEE, 2006.
- [19] ZHOU Z, KAVEHRAD M, DENG P. Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 1–6.

征稿简则

- 1、来稿文责自负,稿件刊用后如出现泄密、侵犯他人著作权等问题,本刊概不承担连带责任。
- 2、稿件内容必须与光通信密切相关(栏目有:光网络、光器件、光传感、光传输、可见光通信、无线光通信、量子通信、光纤光缆、光通信工程),稿件内容要真实、准确,且不得抄袭或重复发表。
- 3、本刊现已与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签署《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)正式出版我刊网络版。录用定稿网络首发之后,在后续的排版定稿、整期定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名、作者单位以及其学术内容,只允许修改少量文字或少量不影响研究结果和结论的数据。由于网络首发周期短,因此凡被录用的稿件不允许撤稿。按国家有关网络连续型出版物管理规定,网络首发论文视为正式出版论文,我刊编辑部与电子杂志社共同为论文作者颁发论文网络首发证书(论文作者可以从“中国知网”下载或打印)。
- 4、来稿一经本刊录用,该文章全部版权即转归本刊所有;稿件印刷版出版后,当月赠寄当期杂志 2 册;2 个月内向作者一次性支付各版次(网络版、光盘版和印刷版)稿酬。
- 5、来稿中的标点符号格式要注意规范,英文中的逗号、冒号、句号分别用半角加一空格(“,”、“:”、“.”),中文中的标点符号一律用全角。
- 6、来稿中的圆括号不分中英文,一律用全角。

《光通信技术》编辑部