

# 基于可见光通信的时分复用组网下移动目标定位方法

陈 勇<sup>1</sup>, 李逸超<sup>1</sup>, 刘焕淋<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

<sup>2</sup>重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065

**摘要** 为了减小室内可见光定位中存在的噪声和时延对定位精度的影响,提出了一种室内发光二极管(LED)可见光定位算法。引入蜂窝拓扑结构进行可见光室内定位,自适应选取 LED 信标节点。研究噪声对接收光功率的影响,采用均值模型对接收光功率进行校正。传统的可见光时分复用定位系统时延过长,易出现时钟同步错误。为满足高精度实时定位,采用改进的时分复用组网系统。通过小区划分,选取网络源中心节点;通过竞争申请时段,重复利用部分时段,解决了帧长与 LED 节点数量的矛盾。仿真结果表明,该算法可以有效减小目标移动和时钟同步错误对定位精度的影响,提高了室内定位系统的实时性与稳健性。

**关键词** 光通信; 可见光定位; 均值模型; 时钟同步; 时分复用; 发光二极管

中图分类号 TN929

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1006003

## Moving Target Positioning Method Based on Visible Light Communication in Time Division Multiplexing Network

Chen Yong<sup>1</sup>, Li Yichao<sup>1</sup>, Liu Huanlin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

**Abstract** To reduce the influences of noise and time delay on positioning accuracy in indoor visible light positioning, a new indoor light-emitting diode (LED) visible light positioning algorithm is proposed. A honeycomb topology structure is introduced to locate the indoor visible light, and its beacon node is selected adaptively. The influence of the noise on the received optical power is studied, and a mean model is used to correct the received optical power. However, the time delay of conventional time division multiplexing system is too long, and thus the clock synchronization error occurs easily. In order to meet the high precision real-time positioning, an improved time division multiplexing network system is used. A network source center node is selected through the cell division. The partial time slot is reused through time slot competing so that the contradiction between the frame length and the number of LED nodes is solved. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the influences of target moving and clock synchronization error on positioning accuracy, and improve the real-time performance and the stability of the indoor positioning system.

**Key words** optical communications; visible light positioning; mean model; clock synchronization; time division multiplexing; light emitting diode

**OCIS codes** 060.3735; 070.2025; 070.4790

收稿日期: 2017-03-27; 收到修改稿日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(61071117)、重庆市研究生科研创新项目(CYS15172)

作者简介: 陈 勇(1963—),男,博士,教授,主要从事可见光通信及传感检测方法方面的研究。

E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn

# 1 引 言

在大型室内停车场、商场等区域,应用室内定位技术并根据移动终端的位置信息,可以获取用户的行为数据,从而可以帮助用户规划线路,因此室内定位技术具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

现有技术中,全球定位系统(GPS)应用最为广泛,但由于墙壁对于信号的遮挡,定位误差通常达到数米至数十米<sup>[3]</sup>。无线局域网(WLAN)、红外线定位往往需要搭建复杂的定位设备,能耗较高<sup>[4-5]</sup>。基于发光二极管(LED)的可见光通信技术无需频段申请即可解决频谱资源紧张的问题,具有能耗低、安全性高和无需搭建复杂的室内通信设备的优势<sup>[6-8]</sup>。通过多光电器件(PD)联合定位<sup>[9]</sup>可以提高定位精度,有效地解决接收端角度旋转的问题,但采用多个PD时价格高昂,通过增加LED的数量可提高定位精度。目前使用较广泛的定位方法有三边测量法,包括到达角度(AOA)算法、到达时间(TOA)算法、到达时间差(TDOA)算法和接收信号强度(RSS)算法<sup>[10-12]</sup>。其中,AOA算法可直接测量接收端的方向与角度,但需要将接收端部署于各LED发射方向的相交位置<sup>[13]</sup>。TOA算法需要发射端与接收端保持严格的时钟同步,这在实际场景中难以做到。TDOA算法不需要发射端与接收端的时钟同步,但需要接收端之间时钟同步,Zhang等<sup>[14]</sup>提出了异步室内定位,解决了TDOA需要发射端之间时钟同步的问题,但存在约5%的概率产生时隙重合。联合运用AOA算法与RSS算法进行计算<sup>[15]</sup>,在接收端不仅可计算出接收功率的大小,并且可采用向量的形式计算出传输距离,从而实现三维定位;但是该联合算法复杂度高,计算时间过长,难以实现实时定位。Lim<sup>[16]</sup>研究了移动目标定位系统,但是系统时延内目标的移动会增加定位误差。Gu等<sup>[17]</sup>研究了RSS算法中信道脉冲响应对于定位精度的影响,采用MMC算法降低多阶链路对信号功率的影响。Zhao等<sup>[18]</sup>采用图像传感器结合极大似然估计法进行室外车辆定位,然而难以将LED交通灯的部署用于不同场景中。当LED节点数较多时,采用模块编码方案可以有效减小系统时延,但所适用的LED节点数受到限制<sup>[19]</sup>。

针对上述研究存在的问题,在RSS室内可见光定位算法的基础上,引入无线传感器网络中的蜂窝拓扑结构<sup>[20]</sup>,采用均值模型对接收光功率进行校正,减小了噪声对定位误差的影响。针对发光二极管-时分复用(LED-TDM)传统定位方法存在的大时延、时钟同步错误的不足,将蜂窝拓扑结构划分为多个小区,每个小区通过节点度数选取网络源中心节点,采用改进的时分复用定位系统,并通过网络源中心节点竞争时隙段,可有效提高室内定位精度。

## 2 定位模型与LED拓扑结构

### 2.1 光信道模型

LED向移动终端发送自身的标识符(ID)信息和位置信息,移动终端接收光信号,系统模型如图1所示。采用TDM进行传输,避免各LED传输的信号在接收端之间相互干扰。在直射链路中,采用直流增益来表示信道模型,其信道的直流增益为

$$H(0) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m \varphi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, \quad 0 \leq \psi \leq \psi_{FOV}, \quad (1)$$

式中 $d$ 为发射端至接收端的距离; $A_r$ 为光检测器的接收面积; $\varphi$ 和 $\psi$ 分别为发射角和入射角; $T_s(\psi)$ 为光滤波增益; $g(\psi)$ 为集中器增益; $m$ 为朗伯辐射的阶数, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ ,其中 $\Phi_{1/2}$ 为LED灯的半功率角; $\psi_{FOV}$ 为光接收机视角。接收端光功率满足

$$P_r = \hat{H}(0) \cdot P_t + N(t), \quad (2)$$

式中 $\hat{H}(0)$ 为实际信道直流增益; $P_t$ 为LED的发射功率; $N(t)$ 为噪声,可表示为

$$N(t) = \delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2 + \gamma^2 P_{\text{risl}}^2, \quad (3)$$

式中 $\delta_{\text{shot}}^2$ 和 $\delta_{\text{thermal}}^2$ 分别为散弹噪声和背景光噪声; $P_{\text{risl}}^2$ 为接收位置处受到的码间干扰功率; $\gamma$ 为光电转换效率; $P_{\text{risl}}^2 = \int_T^\infty [h(t) \otimes X(t)] dt$ ,其中 $h(t)$ 为信道的冲激响应, $X(t)$ 为发射光功率, $T$ 为信号周期。散弹噪声可表示为

$$\delta_{\text{shot}}^2 = 2q\gamma(P_{\text{rec}})B + 2qI_{\text{bg}}I_2B, \quad (4)$$

式中  $q$  为电荷容量,  $P_{\text{rec}}$  为接收位置处接收到的平均光功率与接收到的码间干扰功率之和,  $B$  为均衡噪声带宽,  $I_{\text{bg}}$  为背景电流,  $I_2$  为噪声带宽。传统情况下,  $I_2 = 0.562$ ; 在非阳光直射条件下,  $I_{\text{bg}} = 740 \mu\text{A}$ ; 在阳光直射条件下,  $I_{\text{bg}} = 5.1 \text{ mA}$ <sup>[14]</sup>。

当接收端视场角  $\psi$  处于  $0 \sim \psi_{\text{FOV}}$  之间时, 估测得到 LED 到接收端的距离为

$$d_{\text{est}} = \sqrt{\frac{(m+1)A_r \cos^m \varphi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi P_t}{2\pi P_r}} \quad (5)$$

假设接收端与天花板平行, 可得

$$\cos \varphi = \cos \psi = H/d_{\text{est}}, \quad (6)$$

式中  $H$  为接收端端口(PN)节点至天花板的垂直距离。当朗伯辐射阶数  $m$  取 1 时, (4)式可简化为

$$d_{\text{est}} = 4 \sqrt{\frac{A_r H^2 T_s(\psi) g(\psi) P_t}{\pi P_r}} \quad (7)$$

利用发射光功率与接收光功率可以得到 LED 到接收端 PN 节点的距离, 基于 3 个 LED 可建立三阶矩阵, 并计算 PN 节点的水平坐标。

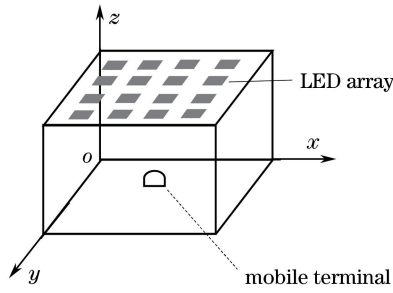


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

在实际场景中, 存在光线遮挡与多径效应, 导致噪声增加, 因此消除噪声可有效减小其对接收端光功率的影响。此外, 码间干扰与信道间干扰也会严重影响定位性能。在时分复用通信系统中, LED 在预先分配的时隙内传输光信号时, 存在一定的概率出现时钟同步错误, LED 节点的时隙同步错误如图 2 所示。假设 LED  $i$  与 LED  $j$  存在  $a$  的概率出现时钟同步错误, 则 LED  $i$  与 LED  $j$  传输光信号的信道直流增益为

$$\begin{cases} \hat{H}_i = H_i + aH_j \\ \hat{H}_j = (1-a)H_j \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $H_i$  与  $H_j$  分别为 LED  $i$  与 LED  $j$  未接收信道间干扰的信道直流增益。时钟同步错误的概率  $a$  取决于帧长度和分配时隙数量<sup>[21]</sup>。

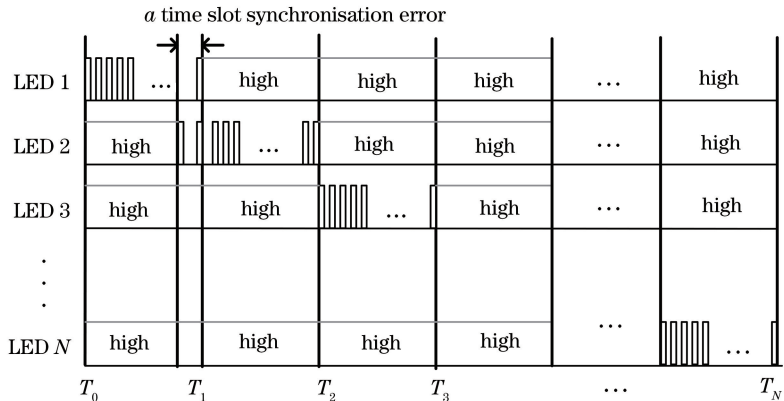


图 2 LED 节点时隙同步错误示意图

Fig. 2 Schematic of time slot synchronization error of LEDs

当帧长度达到 50 ms 以上且 LED 节点数量较少时,时隙保护间隔增加,时钟同步错误概率降低。由图 2 可见,当 LED 节点数量增加时( $N$  为 LED 节点数),分配时隙数量增加,时隙保护间隔的减小增加了时钟同步错误的概率。为保证时隙保护间隔,一般做法是增加帧长度,但这样会使定位系统的时延增加,从而导致定位系统难以应用于移动目标的实时定位。

### 2.2 基于蜂窝拓扑结构

通过对相关文献的分析可知,LED 节点之间的几何位置以及 LED 与接收端之间形成的几何关系对定位精度有很大的影响。为减小其影响,借鉴无线传感器网络中的蜂窝拓扑结构布局<sup>[16]</sup>,并将其引入 LED 室内定位中。蜂窝拓扑结构布局及小区划分示意图如图 3 所示。

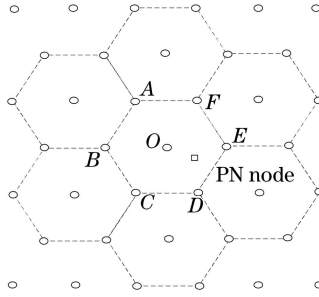


图 3 蜂窝拓扑结构布局及小区划分示意图

Fig. 3 Schematic of cellular topology layout and cell partition

在可见光 LED 室内定位中,为测得各个 LED 到 PN 节点的距离,接收端通常直接对接收到的光功率进行计算。然而目标移动和光线遮挡等因素在很大程度上增加了接收光功率的不确定性,同时在单次测量中,接收光功率因受到噪声影响出现较大的波动,因此测量距离较长时就会出现较大的误差。因此,考虑到单次测量接收光功率对最终定位结果的影响,在此提出一种均值模型。

#### 2.2.1 均值法计算

采用均值法计算接收光功率时,共接收  $n$  次来自同一 LED 的光信号,接收的光功率分别为  $P_{r1}, P_{r2}, \dots, P_{rn}$ ,各个  $P_{ri}$  的采集间隔为 0.02 s,则接收的平均光功率为

$$P_{r\_avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ri} \quad (9)$$

均值法可有效减小单次测量误差,使得各接收光功率相均衡。但当单次测量误差过大时,均值法会使接收光功率偏离正确的值。

#### 2.2.2 均值模型方法

同时考虑存在其他移动物体等干扰,对各组接收光功率样本进行加权求和,并提出均值模型方法。为避免均值相近样本的权值过大,设定阈值  $T_h$ ,则接收光功率权值为

$$\alpha_i = \frac{1/\{1 + \max[T_h, (P_{ri} - P_{r\_avg})]\}}{\sum_{i=1}^n 1/\{1 + \max[T_h, (P_{ri} - P_{r\_avg})]\}} \quad (10)$$

式中阈值  $T_h$  可表示为

$$T_h = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ri} - P_{r\_avg})^2}{n} \quad (11)$$

对各接收光功率进行加权求和,得到修正后的接收光功率为

$$P_{rest} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i P_{ri}}{n} \quad (12)$$

PN 节点位于  $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  的室内房间,LED 采用 TDM 系统并通过不同时隙向接收端发送信号。每个 LED 由单独的电路驱动,其发射光功率相同,采用 TDM 调制传输光信号。PN 节点位于高度为 1 m 的

垂直距离处,天花板的高度  $H=4$  m,根据文献[14]选取仿真参数,如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| Parameter   | Value               |
|---|---------------------|
| LED power /W  | 16                  |
| Modulation bandwidth $B$ /kHz                                     | 640                 |
| Receiver height /m  | 1                   |
| Field-of-view (FOV) $\phi_{\text{FOV}}$ /( $^{\circ}$ )           | 70                  |
| Physical area of photo-detector $A$ / $\text{cm}^2$               | 1                   |
| Gain of optical filter $T_s(\Psi)$                                | 1                   |
| Conversion efficiency $\gamma$ / ( $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ ) | 0.54                |
| Room size / $\text{m}\times\text{m}\times\text{m}$                | $8\times 8\times 4$ |
| LED number  | 39                  |
| Cell number   | 11                  |

为比较不同算法的室内定位性能,在房间内选取 50 个测试点,点间隔为 0.5 m,计算测试点的原始接收光功率、均值法光功率、均值模型光功率和定位误差。

图 4 为仿真实验所得均值法与均值模型算法下的定位误差分布。由图可见,均值法的定位误差约为 4~5 cm,定位误差分布不集中,误差方差较大,这是由于光线遮挡的情况对于接收光功率的干扰极大;均值模型算法的定位误差较均值法减小了约 2 cm,定位误差集中,且定位性能稳定。

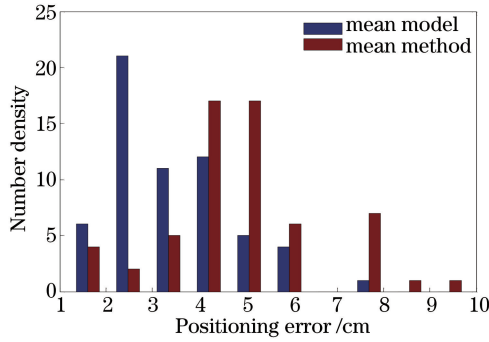


图 4 均值法和均值模型算法下的定位误差分布

Fig. 4 Location error distribution of mean method and mean model algorithm

然而,在实际的时分复用组网定位场景中,终端处于移动状态,且 LED 节点数量存在增加的可能性,导致帧长与 LED 节点数量产生矛盾。当 LED 节点数增加时,分配时隙数量增加,导致时隙保护间隔减小,从而增加了时钟同步错误的概率;增加帧长可以拓宽时隙保护间隔,但同时会增加时分复用定位系统的时延,由于终端处于移动状态,定位系统的高时延难以实现对移动目标的高精度定位。

### 3 改进的时分复用定位方法

均值模型与蜂窝拓扑结构并未充分考虑系统时延和时钟同步错误的情况,从而导致定位误差增加。此外,在大型房间内的时分复用组网系统下,当终端保持移动状态时,定位系统存在由时延带来的额外误差。当 LED 节点数量增加,分配时隙数增加,在帧固定的情况下,时隙保护间隔减小,出现时钟同步错误,而增加帧长会增加定位系统时延。为满足大型房间内移动目标定位的要求,在文献[22]的基础上,提出改进的时分复用定位方法。由(5)式可知,时钟同步错误会降低定位性能,而增加时隙保护间隔会减小时钟同步错误的概率。当房间尺寸和 LED 节点数量增加时,时隙分配过多会导致定位系统时延增加。基于图 3 并进行小区划分,每个正六边形结构为一个小区,即 7 个 LED 节点构成一个正六边形的小区,房间边缘区域额外构成小区。由于图 3 中  $O$  点处于小区中心位置,节点度数最高,因此选取  $O$  点作为该小区网络源的中心节点。每个小区根据节点度数选取小区对应的网络源中心节点,由网络源中心节点向网关申请时隙段。改进的 TDM 组网算法如图 5 所示。

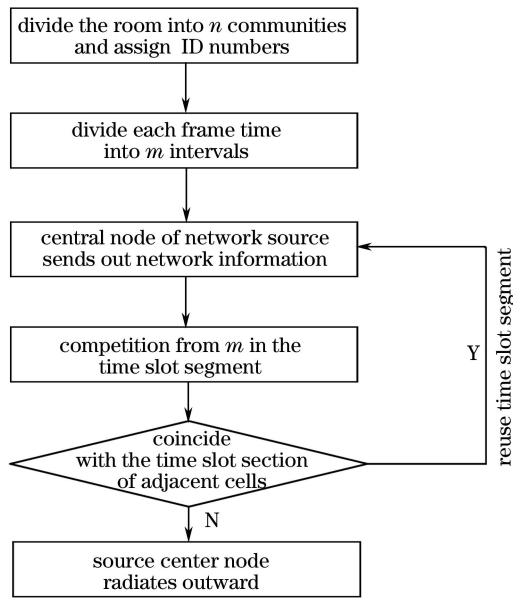


图 5 改进的 TDM 组网算法

Fig. 5 Improved algorithm of TDM network

算法的具体步骤为:1)将每帧时间划分为  $m$  个时隙段,网络源中心节点发出组网信息后,申请到  $m$  个时隙段中与相邻小区不重合的时隙段;2)时隙段申请成功后,时隙段划分为  $n$  个时隙, $n$  为小区内节点数, $n$  个节点共享一个时隙段,各 LED 节点按指定的顺序在各自时隙内发送光信号;3) 剩余小区中的网络源中心节点发出组网信息,如果相邻的两个小区竞争到同一个时隙段,ID 号小的小区优先获得该时隙,ID 号大的小区则更新时隙表头,继续发出组网信息。

改进的 TMD 组网方法在不增加帧长度或减小时延的前提下,利用时隙段重复利用的原则,降低了小区内 LED 时钟同步错误的概率,适用于实时定位中目标移动和光线遮挡的情况。

## 4 实验与仿真

为验证改进的系统定位性能,选取 50 个采样点,采样间隔为 0.5 m,房间尺寸为 8 m×8 m×4 m,其仿真参数与表 1 相同。

### 4.1 时钟同步错误分析与消除

为提高系统的定位精度、减小时延并使定位系统更好地应用于实际移动目标位置服务场景,提出改进的时分复用定位方法。图 6 为不同 LED 数量下两种 TMD 定位系统的时延。计算两种定位方法时延,其中时分复用通信时延  $T$  与带宽  $B$ 、分配时隙数  $N$  的关系为

$$T = \frac{2N(\lg N + 1)}{B} \quad (13)$$

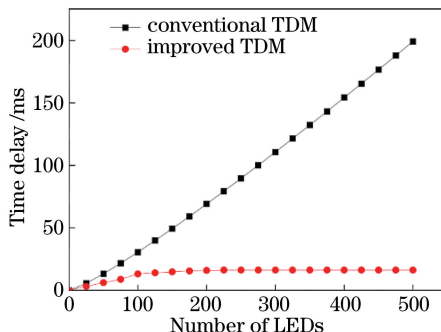


图 6 不同 LED 数量下两种 TMD 定位系统的时延

Fig. 6 Time delay of two TMD positioning systems with different numbers of LEDs

由图 6 可知,LED 节点数量越多,改进的时分复用定位系统实时性越高。当 LED 节点数量超过 100 时,改进的时分复用定位系统时延稳定,保持在约 12 ms,然而传统的时分复用定位系统时延会超过 35 ms 并持续上升。假设手持终端以  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度移动,则系统时延会造成至少 3.5 cm 的定位误差;而改进的定位系统排队时延约为 12 ms,由时延造成的误差约为 1.2 cm,因此优化系统排队等待时延可减小约 2.3 cm 的误差量。

为对比改进/传统的时分复用定位方法,研究时钟同步错误对定位误差的影响。时钟同步错误会导致采样时隙内不同 LED 的光信号产生重叠,使得定位性能恶化。图 7 为物体静止时改进/传统的时分复用定位系统的定位误差比较。由图 7 可知,在相同室内环境下,改进的时分复用定位方法中,不相邻的小区重复利用时隙段,在相同帧内分配的时隙段更少,增加了时隙保护间隔,从而降低了时钟同步错误产生的概率。

图 8 为改进/传统的时分复用定位系统误差分布图,由图可见,改进的时分复用定位方法比传统的时分复用定位方法的定位性能更加稳定,其中定位误差方差(DER)更小,这是由于改进的定位方法有效地抑制了时钟同步错误。改进的定位系统降低了时钟同步错误的概率,使定位误差平均减小了 0.7 cm。需要注意的是,该仿真并没有考虑定位时延对定位误差的影响,且在产生时延期间,终端的移动方向与速度难以预测。

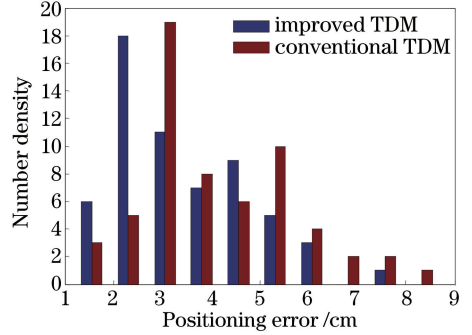
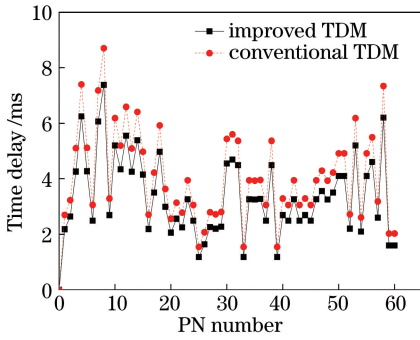


图 7 物体静止时改进/传统的 TMD 定位系统的定位误差比较

图 8 改进/传统的 TMD 定位系统的定位误差分布图

Fig. 7 Comparison of positioning error of improved and conventional TMD positioning systems when object is static

Fig. 8 Positioning error distribution diagram of improved and conventional TMD positioning systems

在考虑终端移动与时钟同步错误的情况下,改进/传统的时分复用下均值模型定位方法对比如表 2 所示。性能指标分别为采样点的定位误差均值(MDE)与 DER。根据文献[17],通常在室内定位时选取背景电流  $I_{bg} = 5.1 \text{ mA}$ 。为比较不同背景光噪声下两种定位方法的性能,将背景光强度电流增加一倍,即  $I_{bg} = 10.2 \text{ mA}$ 。由表 2 可知,该状态下改进的 TMD 定位方法性能同样优于传统的 TMD 定位方法。

表 2 改进/传统的 TMD 下均值模型定位方法对比

Table 2 Comparison of mean model positioning methods with improved and conventional TMD

| Method           | $I_{bg} = 5.1 \text{ mA}$ |      | $I_{bg} = 10.2 \mu\text{A}$ |       |
|------------------|---------------------------|------|-----------------------------|-------|
|                  | MDE                       | DER  | MDE                         | DER   |
| Improved TMD     | 3.395                     | 1.94 | 4.009                       | 5.868 |
| Conventional TMD | 5.204                     | 2.59 | 2.706                       | 4.371 |

#### 4.2 终端移动误差分析与优化

图 9 为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  移动速度下改进/传统的 TMD 定位系统的定位误差对比。在表 1 的仿真环境下,当终端以  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度移动,RSS 定位算法在定位移动目标时存在定位时延,时延带来的额外误差由时延与移动速率的乘积组成。采用上述时分复用的算法可将由时延带来的误差减小约 1.1 cm。时钟同步错误概率的降低可使定位精度增益提升约 0.7 cm,因此与传统的时分复用系统下均值模型算法相比,改进的时分复用组网系统的定位误差平均减小了 1.8 cm。

当终端移动速度为  $0 \sim 500 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、步长为  $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,若终端每次以匀速移动,则相同仿真环境下系统时延为 11 ms,假设由时延带来的误差为时延与移动速度的乘积,采用传统的时分复用组网方法,随着速度的增加定位误差会增大。

改进的时分复用组网方法在不增加帧长度、减小时延的前提下,利用时隙段重复利用的原则,降低了小区内 LED 的时钟同步错误的概率,因此改进的时分复用组网方法的定位误差基本保持稳定,如图 10 所示。

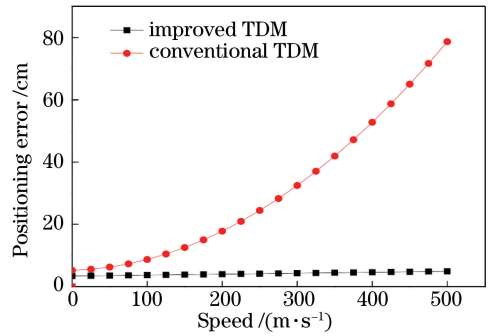
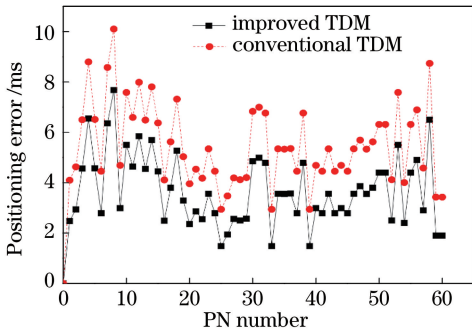


图 9  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  移动速度下改进/传统的 TMD 定位系统的定位误差

图 10 终端在  $0\sim 500\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  移动速度下的定位误差

Fig. 9 Positioning error of improved and conventional TMD positioning systems at moving speed of  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 10 Positioning error of terminal at moving speed of  $0\sim 500\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$

改进的时分复用定位方法有效地应对了时钟同步错误和终端移动的问题,能消除实际应用中的噪声干扰。

## 5 结 论

提出了一种基于多个 LED 均值模型的室内定位算法。引入蜂窝拓扑结构进行可见光定位,并自适应选取 LED 节点进行 RSS 定位,采用均值模型对接收光功率进行校正,以减小噪声影响。针对应用场景中存在系统时延和时钟同步错误的问题,采用改进的 TMD 组网系统,通过各个小区的网络源中心节点竞争时隙段,重复利用时隙段,考虑光照分布的同时增加定位覆盖。在不同的背景光强度下,改进的 TMD 定位系统的定位性能优于传统的 TMD 定位系统,提升了室内定位系统的实时性与稳健性,为提高可见光通信的室内定位精度提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Song X, Li X, Tang W C, *et al.* A hybrid positioning strategy for vehicles in a tunnel based on RFID and in-vehicle sensors[J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 23095-23118.
- [2] Wu Y I, Wang H, Zheng X J. WSN localization using RSS in three-dimensional space - A geometric method with closed-form solution[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4397-4404.
- [3] Byrnes H F, Miller B A, Morrison C N, *et al.* Brief report: Using global positioning system (GPS) enabled cell phones to examine adolescent travel patterns and time in proximity to alcohol outlets[J]. *Journal of Adolescence*, 2016, 50: 65-68.
- [4] Leu J S, Yu M C, Tzeng H J. Improving indoor positioning precision by using received signal strength fingerprint and footprint based on weighted ambient Wi-Fi signals[J]. *Computer Networks*, 2015, 91: 329-340.
- [5] Gioia C, Borio D. Stand-alone and hybrid positioning using asynchronous pseudolites[J]. *Sensors*, 2014, 15(1): 166-193.
- [6] Lee K, Park H, Barry J R. Indoor channel characteristics for visible light communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 217-219.
- [7] Chen Yong, Yin Hui, Liu Huanlin. Adaptive channel estimation for MIMO-OFDM visible light communication system [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0906003.  
陈勇, 尹辉, 刘焕淋. MIMO-OFDM 可见光通信系统的自适应信道估计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0906003.
- [8] Kim J Y, Kim J S, Kang G T, *et al.* An indoor positioning system for mobile robots using visible light communication and fuzzy logic[J]. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 2016, 22(2): 75-82.
- [9] Xu W, Wang J, Shen H, *et al.* Indoor positioning for multiphotodiode device using visible-light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-11.
- [10] Kim J S, Park H, Lee W C. Indoor positioning system based on augmented reality using pedestrian dead reckoning and visible light communication[J]. *Journal of Korean Institute of Information Technology*, 2016, 14(1): 189-194.
- [11] Liu Y, Hsu C W, Chen H Y, *et al.* Visible-light communication multiple-input multiple-output technology for indoor



- lighting, communication, and positioning[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 120502.
- [12] Wei L, Zhang H M, Yu B Y, *et al.* High-accuracy indoor positioning system based on visible light communication[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(11): 110501.
- [13] 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*, 2013, 31(1): 134-144.
- [14] Zhang W Z, Chowdhury M I S, Kavehrad M. A synchronous indoor positioning system based on visible light communications[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(4): 045105.
- [15] Lee D, Choi K, Kim K D, *et al.* Visible light wireless communications based on predistorted OFDM[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1767-1770.
- [16] Lim J. Ubiquitous 3D positioning systems by led-based visible light communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(2): 80-85.
- [17] Gu W J, Aminikashani M, Deng P D, *et al.* Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2578-2587.
- [18] Zhao X, Lin J M. Maximum likelihood estimation of vehicle position for outdoor image sensor-based visible light positioning system[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(4): 043104.
- [19] Hou Y N, Xiao S L, Zheng H F, *et al.* Multiple access scheme based on block encoding time division multiplexing in an indoor positioning system using visible light[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(5): 489-495.
- [20] Li H, Luo Z, Zhang N, *et al.* Integrated design of cellular composites using a level-set topology optimization method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, 309: 453-475.
- [21] Nadeem U, Hassan N U, Pasha M A, *et al.* Indoor positioning system designs using visible LED lights: Performance comparison of TDM and FDM protocols[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(1): 72-74.
- [22] Li Jibo, Liu Xiguo, Wang Hongxing, *et al.* Improved ultraviolet communication time division multiplexing network method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105003.
- 李济波, 刘锡国, 王红星, 等. 改进的紫外光通信时分复用组网方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105003.