

基于多 LED 的高精度室内可见光定位方法

吴楠 王旭东* 胡晴晴 何荣希
(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

摘要: 针对可见光室内定位问题, 该文基于接收信号强度(RSS)定位技术, 提出一种利用多个 LED 发射端实现室内定位的方法, 即 MLED-RSS 定位算法。该方法在充分考虑 LED 拓扑结构对定位性能影响的基础上, 利用部署在室内的多个 LED, 合理选择其中 3 个 LED 作为发射节点, 采用改进的三边定位法获得定位目标位置信息。定位算法可以有效地解决可见光定位存在的遮挡效应。仿真实验表明, MLED-RSS 算法可以实现高精度定位。

关键词: 室内定位; 可见光通信; 接收信号强度; 三边定位法

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)03-0727-06

DOI: 10.11999/JEIT140725

Multiple LED Based High Accuracy Indoor Visible Light Positioning Scheme

Wu Nan Wang Xu-dong Hu Qing-qing He Rong-xi

(Information Science Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to apply Visible Light Communication (VLC) to indoor positioning, based on the Received Signal Strength (RSS) positioning technology, a scheme namely MLED-RSS positioning algorithm, utilizing multiple LED transmitters to achieve indoor positioning is proposed in this paper. In the proposed scheme, the impact of topology on positioning performance is fully considered, three LEDs are reasonably selected from the multiple LEDs deployed in the room as transmitted nodes to provide position coordinates, and then the improved trilateration method is used to obtain the target location information. MLED-RSS positioning algorithm can effectively solve the block or shadow effect existing in indoor visible location. Simulation results show that the MLED-RSS positioning algorithm can achieve high localization accuracy.

Key words: Indoor positioning; Visible Light Communication (VLC); Received Signal Strength (RSS); Trilateration method

1 引言

近年来, 随着无线传感器网络及物联网技术的迅速发展, 室内定位技术在智能机器人、大型商场导购等诸多领域中得到了广泛应用, 成为重点研究对象之一。过去的几年里, 对室内定位的研究主要停留在使用 GPS, RFID, 红外线, 超声波, WLAN 等技术。然而, 采用 GPS 信号进行室内定位时, 穿透建筑物墙壁后的射频信号非常弱导致定位误差过大。另一方面, 采用 RFID, 红外线, 超声波, WLAN 等技术手段定位时, 需要搭建复杂的定位设施环境, 不仅成本高, 定位精度和安全性也得不到有效保障^[1]。

LED 的发明为照明技术领域带来了新的革命。LED 几乎综合了各种传统光源的优势, 具有使用电压低、功率低、寿命长、易于小型化等优点。同时,

白光 LED 具有高速调制及响应时间短等特性, 从而使得 LED 的应用从照明领域扩展到了通信领域^[2], 能够同时实现照明和通信双重功能。基于白光 LED 的室内可见光通信(VLC)作为一种新兴的无线通信方式, 在电磁辐射、使用环境、安全性等方面与射频无线通信方式相比有明显的优势^[3]。基于这些原因利用可见光实现室内定位被认为是有效的选择^[4-6]。近期, 可见光定位技术得到了较为深入的研究。文献[7]提出了一种基于图像传感器的可见光定位系统, 可以实现测量接收端的位置和方向, 但需要额外的图像处理技术且数据速率受限于图像处理速率。在文献[8]中给出了一种利用 4 个 LED 通过 OOK 调制信号收发功率差估计传输距离的定位方案, 虽然可以取得一定精度但需要调制技术且背景光的影响较大。文献[9]提出的定位算法是基于指纹定位的思想, 需要大的训练集, 计算量大。常用的可见光定位技术主要是基于三角形法, 该方法需要估计发射端和接收端的距离。有很多方法可以实现测距如接收信

2014-05-29 收到, 2014-10-09 改回

国家自然科学基金(61371091)资助课题

*通信作者: 王旭东 wxd@dlmu.edu.cn

号强度(RSS)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)^[10]、到达角度(AOA)^[11]等。AOA 技术可以达到很好的精度估算,但在接收器侧需要部署图像传感器阵列,这是非常昂贵的。对于室内环境,发射机和接收器之间的较短距离导致信号的传输时间很短,对发射机与接收器的时钟精度及同步要求很高,使得 TOA 和 TDOA 技术难以实现。因此,RSS 技术是使用可见光进行室内定位的解决方案之一。文献[12]提出了一种采用 RSS 技术的可见光室内定位系统,该系统‘采用且仅采用’3 个 LED 作为发射机发射不同载波信号,接收端根据接收到的信号强度估计目标与发射机的距离,并且获得了误差约为 6 cm 的定位性能。然而,仅使用 3 个定位光源导致定位节点(PN)在区域边缘定位精度下降。此外,当信源被遮挡(例如,人走动)时,文献[12]的系统无法完成定位功能。在文献[13]中,作者提出了一种基于 VLC 的简单室内定位方法,并对实现跟踪预测的 Kalman 和粒子滤波算法的性能进行了仿真分析,但这种跟踪性能对距离估计初始值精度要求较高,而算法中距离估计采用的传统三边定位法其精度和抗遮挡能力都很难满足要求。

本文针对上述定位算法存在的问题,提出了一种利用多个 LED 发射端实现室内定位的方法,即 MLED-RSS 定位算法。结合室内照明 LED 布局实际情况,在充分考虑 LED 布局拓扑结构对定位性能影响的基础上,利用冗余的 LED,合理选择 3 个 LED,采用改进的三边定位法获得精确的定位目标位置信息。引入多个 LED 发射端,有效提高了室内定位的精度,较好地解决了遮挡问题,提高了定位算法的可靠性、稳定性和适用性。仿真实验表明,所提算法的定位误差可以小于 3.5 cm。

2 VLC 定位原理

2.1 系统模型

考虑可见光室内定位系统采用 3 个 LED 作为发射节点时的情况,LED 布局采用等边三角形的拓扑结构,系统模型如图 1 所示^[12]。设 3 个 LED 发射端 Tx_i ($i=1,2,3$) 的坐标分别为 $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$ 和 $C(x_3, y_3, z_3)$, 并设用于定位的 3 个 LED 中任意两个 LED 之间最长的距离为 CS。发射端平面距地面高度为 H 。定位节点(PN)位于照明辐射区域 $A'B'C'$ 内。

采用三边定位算法的系统,为了计算 PN 的坐标,接收端至少需获得 3 个互不干扰的参考信号,这里利用基于白光 LED 的 VLC 传输定位参考信息。为保证相邻 LED 发出的信号在 PN 上能被分开而且

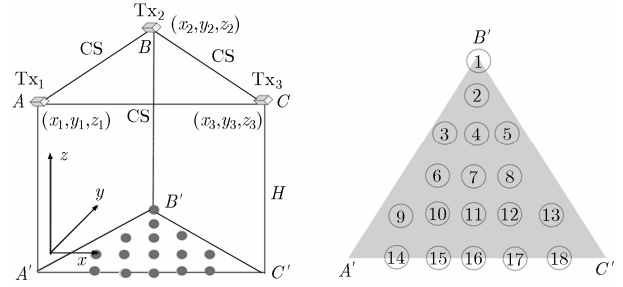


图 1 3LED 定位系统模型

各个信号之间不会引起干扰,可以采用载波分配(CA)、波分复用(WDM)、时分复用(TDM)及码分复用(CDM)等技术。定位时发射端 Tx_i 发送各自的位置坐标。假设 PN 的坐标为 (x_e, y_e, z_e) , 且利用 RSS 可以获得 PN 与发射端 Tx_i 的距离分别为 (d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}) , 则三边定位的等式为

$$\left. \begin{aligned} d_{c1}^2 &= (x_1 - x_e)^2 + (y_1 - y_e)^2 + (z_1 - z_e)^2 \\ d_{c2}^2 &= (x_2 - x_e)^2 + (y_2 - y_e)^2 + (z_2 - z_e)^2 \\ d_{c3}^2 &= (x_3 - x_e)^2 + (y_3 - y_e)^2 + (z_3 - z_e)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

通过求解上述方程,可以获得 PN 的位置坐标。对于发端共面且 2 维平面定位情况,即 $z_1 = z_2 = z_3$, $z_e = 0$, 此时,PN 坐标 (x_e, y_e) 可以通过求解两个线性方程即可。

2.2 信道模型

VLC 定位系统使用 LED 作为参考信号发射源,对于直射链路(LOS)传输环境,接收光功率 P_r 和发射光功率 P_t 之间的关系可表示为

$$P_r = P_t \times H(0) \quad (2)$$

式中 $H(0)$ 为信道的直流增益。若引入 Lambertian 辐射模型, $H(0)$ 可由式(3)给出。

$$H(0) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), \quad 0 \leq \psi \leq \text{FOV} \quad (3)$$

式中 d 为收发信机之间的距离,FOV 为光接收机视角(Field Of View)。 m 为辐射瓣的模式数,即 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \varphi_{1/2})$, 其中 $\varphi_{1/2}$ 是发射机半功率角。 A_r 为光检测器接收面积, φ 和 ψ 分别为辐射和接收角。 $T_s(\psi)$ 为接收端光学滤波器增益, $g(\psi)$ 为光学聚光器增益。显然,接收功率 P_r 与发射端的辐射模式(角度)和接收角度、传输距离及光检测器件(PD)有关。利用 RSS 信息进行定位是通过 P_r 得到距离的估计完成的,当考虑收发两端正对直射(入射角和发射角均为零)传输情况时,引入光功率常数 C_{opt} 来表示上述影响 P_r 的因素,则此时 P_r 可表示为

$$P_r = C_{\text{opt}} / d_{\text{LOS}}^2 \quad (4)$$

PD 输出电流与光接收功率 P_r 成正比,转换成射频功率 P_{RF} 后,可得到距离的估计为

$$d_{\text{LOS}} = (C_{\text{RF}} / P_{\text{RF}})^{1/4} \quad (5)$$

对应的 C_{RF} 为射频功率常数，与光电转换效率及光功率常数有关。显然，由式(5)得到的距离估计，不再受此前与接收光功率有关的因素影响。

2.3 距离估计

考虑一般情况，实际应用中发射角与入射角并不一定为零，此时，接收电功率 P_{RF} 可用式(6)表示。

$$P_{\text{RF}} = (C_{\text{RF}} / d_c^4) G_r(\varphi) G_i(\psi) \quad (6)$$

式中 $G_r(\varphi)$ 和 $G_i(\psi)$ 分别为 T_x 在发射角为 φ 和 PN 在接收角为 ψ 下的增益。由于接收电功率 P_{RF} 受角度的影响变小，导致估计距离 d_c 与真实值相比偏大。设 d_{ci} ($i=1, 2, 3$) 为考虑角度影响的第 i 条传输路径的估计距离，即有

$$d_{ci} = d_{\text{LOS}} \cdot (\alpha \cdot G_r(\varphi) G_i(\psi))^{-1/4} \quad (7)$$

式中 α 为多个 LED 照射引起接收端 PD 饱和引入的衰减系数^[14]，当利用 3 个 LED 照射时 $\alpha=1/3$ 。若直接用 d_{ci} 定位会使定位误差很大，所以需要由式(7)得到的估计距离进行校正。校正后的距离 d_{ci} ($i=1, 2, 3$) 为

$$d_{ci} = w_i d_{ci} \quad (8)$$

式中 w_i 为校正因子，设 $w_i < 1$ ，选取合适的 w_i ，则经过校正后的距离会逼近实际值。

由系统模型可知，发射端 T_x 和 PN 之间的距离不可能小于房屋的高度 H ，同时也不可能大于 $\sqrt{CS^2 + H^2}$ ，即 $H \leq d_{ci} \leq \sqrt{CS^2 + H^2}$ ，其中 CS 为任意两个 LED 之间最长距离。根据文献[12]，取 $w_i = (C_n / d_{ci})^n$ ， $0 \leq n \leq 1$ 。其中， n 和 C_n 分别为调整因子和常数，考虑上述两种极限情况，并且取 $\varphi_1 = \psi_1 = \arctan(CS/H)$ ，则可导出 n 和 C_n 分别为

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{\lg(G_r(\varphi_1) G_i(\psi_1))}{2 \lg(CS^2 + H^2) - \lg(G_r(\varphi_1) G_i(\psi_1)) - 4 \lg H} \\ C_n &= H \alpha^{\frac{n-1}{4n}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

3 MLED-RSS 定位算法

在前文描述的定位系统中，3 个 LED 位于三棱柱的顶点，对于房屋内任意地点定位均需要利用这 3 个 LED 传输的定位参考信息。需要注意的一个问题是当定位环境存在信号遮挡时，三边定位法便失效了。同时，考虑房间内用于照明的 LED 布局 and 数量不仅局限于等边三角形以及多于 3 个这种实际情况，如图 2 所示。为此，本文提出了一种基于多个 LED 实现三边定位的方法。在室内空间多个可用 LED 中，通过设计的选取准则，选择 3 个 LED 作为参考信源实现定位，其关键是用于定位的 LED 拓扑结构的设计。

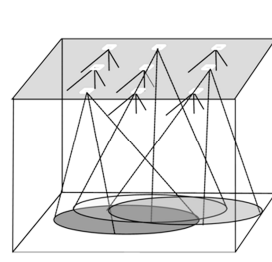


图2 房间多个LED照明布局

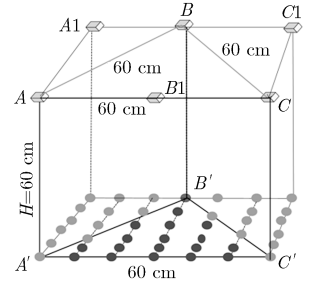


图3 算法应用模型

3.1 算法原理

考虑一种房间内有 6 个 LED 照明布局的情况，如图 3 所示，在 A, B, C 3 个 LED 的基础上再添加 3 个定位用的 LED ($A1, B1, C1$)。增加 3 个 LED 扩大了辐射面积，相应的定位区域也随之扩大。我们在原来 18 个定位点(深色圆点)基础上再增加 24 个定位点(浅色圆点)。

在多个 LED 条件下，可供选择的 LED 组合数为 20 种。合理选择定位单元是提高定位性能的关键，基于三边定位法的基本思想，提出两个原则。

(1) 满秩原则 根据此前的分析可知，定位过程是最终求解式(10)的线性方程为

$$\mathbf{V} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} (d_{c1}^2 - d_{c2}^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2) / 2 \\ (d_{c1}^2 - d_{c3}^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2) / 2 \end{bmatrix}$$

若 3 个 LED 的拓扑共线，则矩阵 \mathbf{V} 的秩为 1，此时，方程无解，无法定位。因此，选择 LED 时，首先必须要确保矩阵 \mathbf{V} 满秩，即 $\text{rank}(\mathbf{V}) = 2$ 。

(2) 强信号锐角三角形结构 基于文献[15]可知，三边定位时，三角形定位区域里存在一个较小角时，定位精度较差。文献[16]则证明了等边三角形的情况下定位性能最好。在此基础上，我们通过仿真，进一步验证了钝角三角形结构的定位误差比直角和锐角三角形的大。

因此，在满秩原则基础上，选择接收信号最强的 3 个 LED，使得构成的拓扑形状满足非钝角三角形要求。即构成的三角形三边满足 $a^2 + b^2 \geq c^2$ ，($a > b > c$)，其中 a, b 和 c 为 LED 之间的距离。

3.2 拓扑结构对性能的影响

下面针对矩阵 \mathbf{B} 满秩条件下，通过仿真方法验证 LED 拓扑形式对定位性能的影响。如图 4 所示，给定一个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的房间结构，设定布设的 LED 坐标分别为 LED1(2.5, 3.5, 3.0), LED2(1.5, 3.5,

3.0), LED3(1.5, 1.5, 3.0), LED4(1.5, 1.5, 3.0), LED5(2.0, 2.0, 3.0)和 LED6(1.0, 4.0, 3.0)。可知, 3 个 LED 构成的三角形的形状分为 3 类, 即 LED1, LED3, LED4 组成的锐角三角形; LED2, LED3, LED4 组成的直角三角形; LED2, LED4, LED5 组成的钝角三角形。

取位于 3 个三角形内的一个定位点, 记为 $P(2.5, 2.0, 0)$, 通过计算可以获得 3 种不同情况下的调整因子 n 和 C_n 的值, 即有锐角: $n=0.6839$, $C_n=264.2396$; 直角、钝角: $n=0.6670$, $C_n=261.5526$ 。根据计算出的 n 和 C_n 对 P 点定位, 对于同一个点定位, 锐角、直角、钝角情况下的误差分别为 0.1989 cm, 3.7251 cm, 8.5374 cm。可见, 钝角三角形时的定位误差明显大于锐角和直角时的情况。

考察更大的钝角情况, 选取 LED4, LED5, LED6 围成的钝角三角形, 对应的定位误差为 19.1085 cm, 显然钝角越大误差最大。选取三角形内的其他点进行定位估计, 其结果显示锐角和直角模型下的定位误差差别不大, 文献[12]给出的实验结果也符合这种趋势。

4 定位性能仿真及分析

为了验证 MLED-RSS 定位算法在提高定位精度及对抗遮挡等方面具有的优势。选取与参考文献[12]相同的定位条件与环境, $CS=60$ cm, $H=60$ cm, 3 个 LED 构成等边三角形定位区域内测试节点 18 个, 6 个 LED 布局构成矩形定位区域内设置测试节点 42 个。

通常 LED 安装在透镜里, 其辐射模式受透镜的形状、镜片的内部折射率和 LED 排列的影响。这种影响亦适用于接收器的效率, 因为它会导致接收器入射角的变化, 实验结果也说明了这一点。因此, 定位估计时, 对于 PN 接收的射频功率 P_{RF} 的仿真预测, 采用指数辐射特性, 即

$$G_r(\varphi) = \exp(-\varphi^{S_r}/k_r) \quad (11)$$

$$G_i(\psi) = \exp(-\psi^{S_i}/k_i) \quad (12)$$

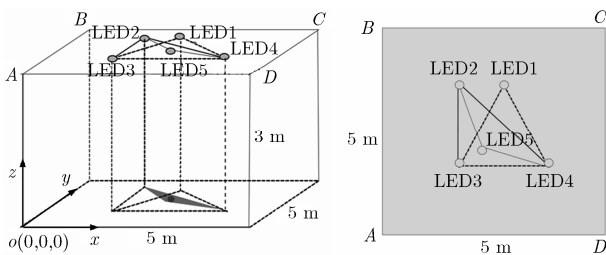


图 4 不同拓扑形式的三角形定位模型

式中 S_r 和 S_i 分别为对应 $G_r(\varphi)$ 和 $G_i(\psi)$ 的斜率常量, k_r 和 k_i 分别与发射机半功率角 $\varphi_{1/2}$ 和接收机半功率角 $\psi_{1/2}$ 有关, 即有 $k_r = (\varphi_{1/2})^{S_r} / \ln(1/2)$, $k_i = (\psi_{1/2})^{S_i} / \ln(1/2)$ 。选取 $S_r=2.3$, $S_i=1.6$, $\varphi_{1/2} = 50^\circ$, $\psi_{1/2} = 22^\circ$, $C_{RF} = 7.8 \times 10^3$ [$\text{cm}^4 \cdot \text{mW}$] [12]。

为衡量定位性能, 定义误差函数:

$$\text{er} = \sqrt{(x_e - x_c)^2 + (y_e - y_c)^2} \quad (13)$$

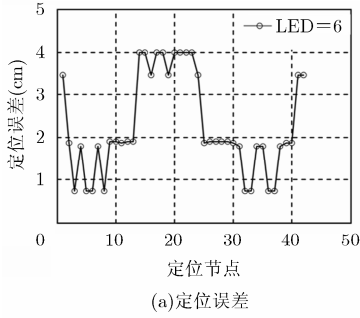
波动度函数(每个点的定位误差偏离平均定位误差的程度):

$$\text{DA} = (\text{er}_j - \text{er}_a)^2 \quad (14)$$

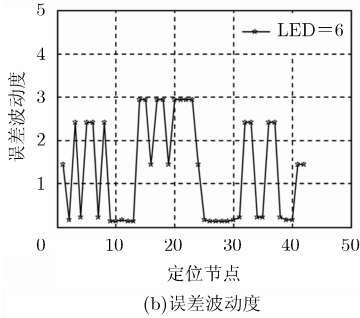
式中 (x_e, y_e) 和 (x_c, y_c) 分别为定位节点的估计坐标和准确坐标, er_j 为第 j 个定位节点的定位误差, er_a 为系统模型中所有定位点的平均定位误差。

(1) 无遮挡的情况 利用 MLED-RSS 算法进行定位估计, 图 5(a)和图 5(b)分别给出了定位误差性能及误差波动度。可以看出定位区域内每个测试点的定位误差均小于 4 cm, 波动方差均小于 3。测试点的平均定位误差为 1.4895 cm, 小于文献[12]的 2.8657 cm; 平均波动方差为 1.3100, 小于文献[12]的 1.5973。针对等边三角形定位区域内的 18 个节点, 图 6(a)和图 6(b)分别给出了本文算法及文献算法的定位误差和波动度。可以看出大部分点的定位误差小于原来的定位误差, 只有个别点的误差稍微大于原来的情况, 但平均误差为 1.4319 cm, 小于改进前的 2.1344 cm, 平均波动度为 1.4261, 也小于改进前的值。

(2) 存在遮挡的情况 假设只有一个信号 Tx_1 被遮挡, 引入遮挡衰减系数 M 来描述由于遮挡导致接收功率下降的程度, M 越小, 表示遮挡越严重。若无遮挡情况下接收的射频功率为 P_{RF} , 则 MP_{RF} 表示有遮挡时的射频功率。图 7(a)和图 7(b)分别给出了有遮挡影响时 3LED 和 6LED 定位算法的性能仿真结果。遮挡衰减系数 M 分别选取 -20 dBm, -15 dBm, -10 dBm, -5 dBm 及 0 dBm, 其中 $M=0$ dBm 表示没有遮挡。由图 7(a)看到, 随着 M 的减小, 即遮挡程度增大, 定位误差也持续增大。在完全遮挡情况下, 定位节点完全收不到信号, 定位误差会变得无穷大, 即无法定位。这是在假设只有一个信号被遮挡的情况下得到的仿真结果, 若存在两个信号被遮挡, 定位误差会更大。

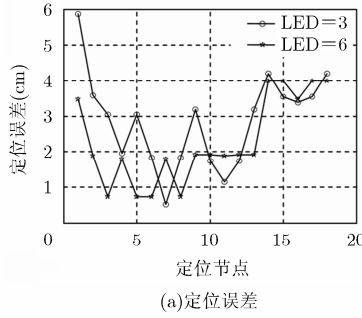


(a) 定位误差

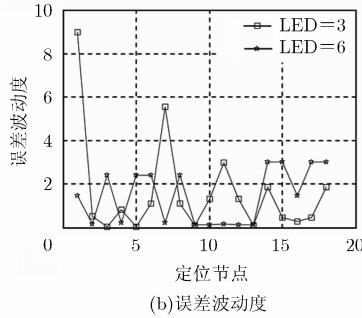


(b) 误差波动度

图5 无遮挡环境 MLED-RSS 定位性能

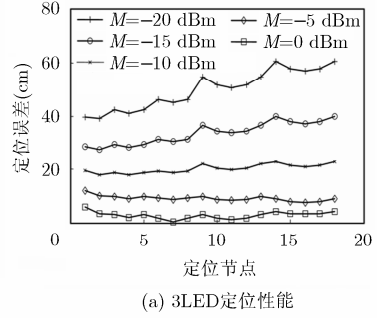


(a) 定位误差

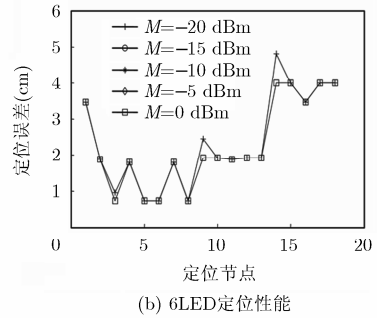


(b) 误差波动度

图6 3LED 和 6LED 定位性能比较



(a) 3LED 定位性能



(b) 6LED 定位性能

图7 遮挡对定位精度的影响

表 1 给出了两种定位算法定位时，各节点的平均定位误差值。可以看出，3LED 算法的定位性能受室内定位环境的遮挡衰减影响很大，而 6LED 定位算法对遮挡影响并不敏感，由图 7(b)也可以看到，针对不同的遮挡衰减系数，各节点定位误差差别不大，其中 $M=-20$ dBm, -15 dBm, -10 dBm 及 -5 dBm 时误差曲线完全重合，为清晰所见，图中仅给出 $M=-20$ dBm 与 $M=0$ dBm 时的性能对比结果。出现此结果的原因在于 6LED 定位算法中选择最强的 P_{RF} ，当 Tx_1 信号被遮挡，定位单元将摒弃 Tx_1 ，因此定位误差不再对 M 变化敏感。显然，采用 MLED-RSS 算法的定位系统即使在有遮挡的情况下也可以取得很好的定位精度。

5 结论

室内定位技术已经被广泛地应用到各行各业，正迅速改变着人们的日常生活。如何能提高定位技术的准确度从而更好地满足人们的需求是定位技术

发展迫切需要解决的问题。本文提出了基于 RSS 定位技术，合理利用室内多个 LED 进行室内精确定位的 VLC 定位方法(MLED-RSS)，该方法可以在很大程度上提高室内定位的精确度、稳定性、及复杂环境下定位的可能性。仿真分析验证了算法可以获得小于 3.5 cm 的定位误差性能。同时也验证了算法在解决 VLC 定位遮挡问题时的有效性。MLED-RSS 定位方法可以作为未来 LED 照明环境下室内定位的有效选择方案。

参 考 文 献

- [1] Gallagher T, Li B, Dempster A, *et al.* A sector-based campus wide indoor positioning system[C]. IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, 2010: 1-8.
- [2] Hiraku O, Takuya I, Takaya Y, *et al.* Erasure coding for road to vehicle visible light communication systems[C]. IEEE on Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, 2011: 75-79.
- [3] Thomas Q, Wang Y, Ahmet S, *et al.* 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.
- [4] Panta K and Armstrong J. Indoor localization using white LEDs[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(4): 228-230.
- [5] Yang S, Jung E, and Han S. Indoor location estimation based on visible light communication using multiple optical receivers[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(9): 1834-1837.

表 1 不同遮挡条件下两种定位算法的平均定位误差

衰减系数 M (dBm)	-20	-15	-10	-5	0
3LED 定位 误差(cm)	49.9307	33.5800	20.1340	9.1346	2.8675
6LED 定位 误差(cm)	2.3549	2.3549	2.3549	2.3549	2.2627

- [6] Yang S, Kim D, Kim H, *et al.* Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, 55(6): 1385-1389.
- [7] Yoshino M, Haruyama S, and Nakagawa M. High-accuracy positioning system using visible light and image sensor[C]. IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando Florida, 2008: 439-442.
- [8] Zhang W and Kavehrad M. A 2-D indoor localization system based on visible light[C]. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, Seattle, 2012: 80-81.
- [9] Vegni A M and Biagi M. An indoor localization algorithm in a small cell-based lighting system[C]. IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2012), Sydney, 2012: 1-7.
- [10] Jung S, Hamm S, and Park C. TDOA-based optical wireless indoor localization using ceiling lamps[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(4): 1592-1597.
- [11] Horiba M, Okamoto E, Shinohara T, *et al.* Improved NLOS detection scheme for hybrid-TOA/AOA-based localization in indoor environments[C]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), Sydney, 2013: 37-42.
- [12] Kim H, Kim D, Yang S, *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.
- [13] Ganti D, Zhang W, and Kavehrad M. VLC-based indoor positioning system with tracking capability using kalman and particle filters[C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, 2014: 476-477.
- [14] Kim H, Kim D, Yang S, *et al.* Analysis of inter-cell interference and crosstalk in carrier allocation based visible light communication[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/ NFOEC), Los Angeles, CA, 2012: 1-3.
- [15] Sarrate J, Palau J, and Huerta A. Numerical representation of the quality measures of triangles and triangular meshes[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2003, 19(7): 551-561.
- [16] 孙佩刚, 赵海, 韩光洁, 等. 混沌三角形定位参考点选择算法[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(12): 1987-1995.
- Sun Pei-gang, Zhao Hai, Han Guang-jie, *et al.* Chaos triangle compliant location reference node selection algorithm[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2007, 44(12): 1987-1995.
- 吴楠: 男, 1979年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为现代移动通信系统、可见光通信系统(包括MIMO, OFDM、信道编码、协作通信、自组织网络)等.
- 王旭东: 男, 1967年生, 博士, 教授, 主要研究方向为 MIMO 无线通信、空间调制、光无线通信.
- 胡晴晴: 女, 1989年生, 硕士生, 研究方向为可见光通信与可见光定位.