

# 基于到达时间和到达角度的室内联合定位算法

杨超超<sup>1</sup>, 陈建辉<sup>1\*</sup>, 刘德亮<sup>1</sup>, 郭希维<sup>1</sup>, 方正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>陆军工程大学石家庄校区导弹工程系, 河北 石家庄 050003;

<sup>2</sup>河北交通职业技术学院电气与信息工程系, 河北 石家庄 050035

**摘要** 针对室内复杂环境中无线信号在非视距传播时造成的定位精度低的问题, 提出一种门限比较加权法 (TCW)-Taylor 级数展开的联合定位算法。首先通过卡尔曼滤波器实时消除信号到达时间 (TOA) 测量值中的非视距误差, 然后然后在平滑过的 TOA 值和含测量噪声的信号到达角度 (AOA) 确定的定位区域内利用 TCW 计算目标节点的位置, 将计算结果作为 Taylor 级数展开的初值, 最后通过迭代求解实现第二次精细定位。仿真实验结果表明, 与传统的全质心-Taylor 级数展开定位算法和基于最小二乘法的 TOA/AOA 混合定位算法相比, 增加 AOA 约束条件和对不同的位置点赋予不同的动态权值定位, 可以使初始定位结果更加准确, 更加接近克拉默-拉奥下界。

**关键词** 遥感; 室内定位; 到达时间; 到达角度; 卡尔曼滤波; 混合定位

中图分类号 TN929.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.222802

## Indoor Joint Localization Algorithm Based on Time and Angle of Arrival

Yang Chaochao<sup>1</sup>, Chen Jianhui<sup>1\*</sup>, Liu Deliang<sup>1</sup>, Guo Xiwei<sup>1</sup>, Fang Zheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Missile Engineering, Shijiazhuang Campus, Army University of Engineering, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

<sup>2</sup>Department of Electrical and Information Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang, Hebei 050035, China

**Abstract** A joint localization algorithm based on the threshold comparative weighted (TCW) Taylor series expansion is proposed to address the problem of low positioning accuracy caused by the non-line-of-sight propagation of wireless signals in complex indoor environments. First, the non-line-of-sight error in the measured value of the time of arrival (TOA) is eliminated in real-time by Kalman filter. Then, TCW is used to calculate the location of the target node in the location area determined by the smoothed TOA value and the angle of arrival (AOA) of the signal with measurement noise. The calculated result is taken as the initial value of Taylor series expansion. Finally, the iterative solution is carried out to achieve the second fine positioning. The simulation results demonstrate that compared with the traditional centroid-Taylor series expansion location algorithm and TOA/AOA hybrid location algorithm based on the least-squares method, the initial location results can be more accurate and closer to the Cramer-Rao lower bound by adding AOA constraints and assigning different dynamic weights to different locations.

**Key words** remote sensing; indoor positioning; time of arrival; angle of arrival; Kalman filtering; hybrid positioning

**OCIS codes** 280.3400; 280.3420; 280.3640

## 1 引言

随着智慧城市的建设, 室内无线定位技术被广

泛应用在商场导购、展厅自主导游、智慧仓储和物流、紧急救援等服务中, 因此定位的精度和可靠性问题亟待解决。室内无线定位技术通过测量无线信号

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-05-07; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61601494)

\* E-mail: 17766099678@163.com

从移动终端(MT)到基站(BS)的到达时间(TOA)、到达角度(AOA)、信号到达时间差(TDOA)和接收信号强度(RSS)<sup>[1]</sup>来得到时间(距离)、角度和信号强度等物理信息,利用一个或多个参数<sup>[2]</sup>实现定位。超宽带(UWB)信号具有数据传输速率高、穿透性强、抗干扰能力强、多径分辨率较高等优势,特别是具有 GHz 量级的带宽,因此具有 ns 甚至亚 ns 级的时间分辨率,可以实现 cm 级的定位精度,被广泛应用于室内定位<sup>[3]</sup>。

Gauss-Newton 法、Taylor 级数展开法、二步最大似然函数估计法和 PSO 算法<sup>[4-7]</sup>等已被用于室内定位,在测量值服从零均值高斯分布时效果良好。Taylor 级数展开法具有求解精度高、计算速度快等优点,但若初值选取不精确,会出现不收敛的问题。目前通常采用最小二乘法、全质心算法、Fang 算法和 Chan 算法等进行初值选取,这些算法均采用单参数定位,并且受环境影响大、对参数要求高,局限性很大。本文采用 TOA/AOA 混合定位算法计算初值,充分利用已有的无线通信网络测得的信号值进行定位估计,其定位精度更高,所需资源更少。在一定的误差范围内,使用 AOA 测量值辅助 TOA 进行定位,不仅可提高定位性能,还能在传感器稀疏时增加定位区域的覆盖面积。因此,对混合参数定位进行研究是室内无线定位技术的一个重要课题。

国内外学者对 TOA/AOA 超宽带混合定位方法进行了广泛的研究。Cesbron 等<sup>[8]</sup>首次提出利用单 BS 的 TOA 和 AOA 参数对移动目标进行定位;So 等<sup>[9]</sup>分析了视距情况下单 BS TOA/AOA 混合定位算法的精度;赵军辉等<sup>[10]</sup>提出利用 Gauss-Newton 迭代算法来进行 TOA 和 AOA 的混合定位;邓平等<sup>[11]</sup>将 Chan 算法应用到 TOA 和 AOA 的混合定位中,提高了定位精度;Deligiannis 等<sup>[12]</sup>引入两种混合的 TOA/AOA 技术——增强到达时间(E-TOA)和增强到达角(E-AOA),以优化定位估计精度;Chan 等<sup>[13]</sup>采用残差测试法对 BS 进行非视距识别,定位时只利用在视距下的 BS 进行;Bach 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于单次迭代质量的定位算法,该算法首先估计 MT 的初始位置,然后迭代使用加权最小二乘算法来细化具体位置,在整个算法中采用高斯分布来确定测量的可靠性。本文提出一种基于门限比较加权法(TCW)的 TOA/AOA 混合定位方法。该算法使用卡尔曼滤波器消除信号在非视距条件下传播 TOA 产生的测量值偏移量,以有效减小非视距误差。在定位过程中采用 TCW 对不同的位

置点赋予不同的动态权值来对目标进行定位,能极大提高初始位置的估计精度。

## 2 非视距误差的建模和缓解

### 2.1 非视距误差的指数模型

MT 的位置估计精度很大程度上取决于无线信道的传播条件。信号在遇到障碍物时发生反射或衍射,导致 TOA 和 AOA 的非视距误差虽然随环境的变化而随时变化(可以服从均匀分布、指数分布及 Delta 分布),然而在某一特定瞬间,可将其作为常量。为更好地研究非视距误差的影响,Ericsson 的一个定位技术研究小组提出提出了 T1P1 模型,并认为非视距引起的超量延时服从指数分布,表示为

$$f(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_{\text{rms}}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{\text{rms}}}\right), & \tau > 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, (1)$$

式中, $\tau$  为非视距传输时延。 $\tau_{\text{rms}}$  为信号的延时速度,是一个服从对数正态分布的变量,可以定义为

$$\tau_{\text{rms}} = T_1 d^\epsilon \zeta, (2)$$

式中: $T_1$  为  $d=1$  km 时  $\tau_{\text{rms}}$  的中值, $d$  为 BS 到移动节点的距离,单位为 km; $\epsilon$  为指数因子,取值为 0.5~1.0; $\zeta$  为阴影衰减因子,是一个对数随机变量。 $\lg \zeta$  是均值为 0、标准差为  $\sigma_\zeta$  的高斯变量, $\sigma_\zeta$  的取值为 2~6 dB。

### 2.2 卡尔曼滤波器缓解 TOA 误差

卡尔曼滤波器的基本方程为递推形式,利用前一状态不断预测和修正,并且在求解时不要求存储大量数据,非常适合实时数据处理和计算机实现。

为缓解和消除非视距误差,将 TOA 及其一阶导数和非视距误差 3 个量作为待估计的状态向量,并将它们表示成状态向量与测量向量之间的关系。设计卡尔曼滤波器的状态方程、测量方程的各个矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+1) &= \Phi \mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \Rightarrow \\ \begin{bmatrix} \tau_{\text{TOA}}(k+1) \\ \dot{\tau}_{\text{TOA}}(k+1) \\ b(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{\text{TOA}}(k) \\ \dot{\tau}_{\text{TOA}}(k) \\ b(k) \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_\tau(k) \\ \omega_b(k) \end{bmatrix}, \end{aligned} (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(k) &= \mathbf{H} \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \Rightarrow \\ \mathbf{Z}_{\text{TOA}}(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{\text{TOA}}(k) \\ \dot{\tau}_{\text{TOA}}(k) \\ b(k) \end{bmatrix} + n_m(k), \end{aligned} (4)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为系统在  $k$  时刻的状态向量;  $\mathbf{Z}$  为系统在  $k$  时刻的观测向量;  $\mathbf{Z}_{\text{TOA}}$  为 TOA 的观测向量;  $\omega_r$  和  $\omega_b$  为测量过程中的噪声误差;  $\mathbf{H}$  为观测矩阵;  $\mathbf{V}$  为观测噪声向量;  $\mathbf{W}$  为输入的白噪声向量;  $\tau_{\text{TOA}}$  为 TOA 值;  $\tau'_{\text{TOA}}$  为 TOA 值的一阶导数;  $k$  为时刻值;  $b(k)$  和  $n_m(k)$  分别为非视距误差和测量误差;  $\Delta$  为采样间距;  $\alpha$  为试验值<sup>[15]</sup>。卡尔曼滤波器消除非视距误差的方法具有实时性, 适合运动目标的定位和跟踪。

### 3 初始位置计算

#### 3.1 全质心算法

理想情况下, 根据 MT 所发信号到达 BS 的 TOA 可以计算出二者之间的距离, 测量到达不同 BS 的距离(二维空间下至少需要三个), MT 就位于以每个 BS 为圆心, 以距离为半径的多个圆的交点。如图 1 所示, 以三个圆为例展开分析, 当测距存在误差时三个圆不能相交于单个点, MT 处于三个圆的重叠区域。全质心算法是求公共区域的质心, 解析解均为实数解, 算法如下:

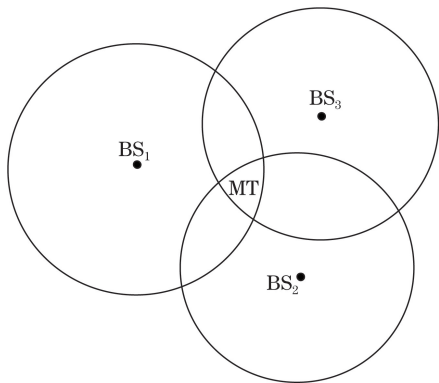


图 1 全质心算法示意图

Fig. 1 Schematic of the total centroid algorithm

假设 MT 的位置为  $(x_m, y_m)$ , 三个 BS 的坐标分别设为  $(x_1, y_1)$   $(x_2, y_2)$   $(x_3, y_3)$ ,  $d_1, d_2, d_3$  为 MT 与  $\text{BS}_1, \text{BS}_2, \text{BS}_3$  之间的距离, 表示为

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} \end{cases} \quad (5)$$

令  $R^2 = x_m^2 + y_m^2$ ,  $r_1^2 = d_1^2 - x_1^2 - y_1^2$ , 同理可表示出  $r_2^2$  和  $r_3^2$ , 则(5)式可以写成  $\mathbf{Q}\mathbf{x} = \mathbf{b}$  的形式, 即

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ -2x_3 & -2y_3 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ R \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix}.$$

最小二乘解为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{b}. \quad (6)$$

由此即可求得 MT 的坐标。

#### 3.2 门限比较加权法

设服务基站为  $\text{BS}_i$ , 与 MT 保持在视距通信, 由于白噪声的存在, AOA 的测量值服从高斯分布, 非视距误差使得三个以距离为半径的圆交于一片区域而不是一点。MT 位于由距离圆和角度边线的交点构成的几何图形上的某一点, 因此 MT 的位置求解问题就转换成最优估计问题。

估计 MT 位置最直接和简便的方法以距离圆和角度边线的交点构成的几何形状的形心作为定位点。然而, 并不是所有交点在位置估计时都提供相同的权值信息。在无线通信信道中, 均方根时延扩展随 MT 与 BS 之间距离的增大而增大, 导致 MT 与 BS 距离越远, BS 检测 TOA 数据出现较大误差值的概率也越大<sup>[16]</sup>。为使算法更加精确, 本文提出 TCW, 根据所有交点距离坐标平均值(这一点称为平均 MT 位置)的远近, 将距离平方值的倒数作为权值, 实时根据权值进行动态调整来估计 MT 位置。以三个圆作示意图如图 2 所示, 具体步骤为:

1) 找出距离圆和角度边线所有可能的交点  $P_j$   $(x_j, y_j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为所有交点的数量。

2) 计算平均 MT 位置  $(\bar{x}, \bar{y})$ , 公式为  $\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i$ ,  $i=1, \dots, M$ ,  $M$  为 BS 的总数,  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个 BS 的坐标。

3) 计算任意两个交点  $P_m$  和  $P_n$  之间的距离  $d_{mn}$ ,  $1 \leq m, n \leq N$ .  $m, n$  为不同交点的序号,  $m \neq n$ 。

4) 将所有距离  $d_{mn}$  的平均值作为阈值  $D_{\text{thr}}$ 。

5) 设所有可能的交点  $P_j$  的初始权重  $I_j$  为 0, 即  $I_j = 0$ ; 比较  $d_{mn}$  和  $D_{\text{thr}}$  的大小, 如果  $d_{mn} < D_{\text{thr}}$ , 则  $I_m = I_m + 1$ ,  $I_n = I_n + 1$ ,  $1 \leq m, n \leq N$ 。

6) MT 位置  $(\hat{x}, \hat{y})$  的计算公式为

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{M, N} I_j \times x_i}{\sum_{i=1}^N I_j}, \hat{y} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{M, N} I_j \times y_i}{\sum_{i=1}^N I_j}. \quad (7)$$

### 4 Taylor 级数展开法

Taylor 级数展开定位算法在节点初始估计位置基础上进行迭代递归, 收敛得到最终的精确位置, 要求初始估计位置不能偏离实际位置太多, 否则不能保证收敛。初始位置可通过门限比较加权算法

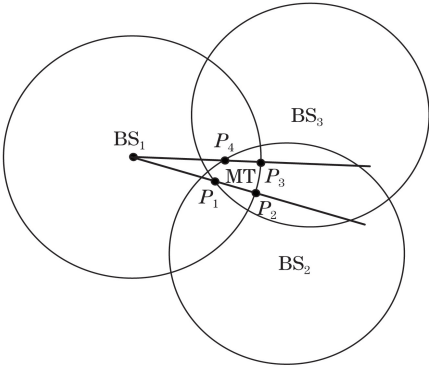


图2 AOA 辅助的 TCW

Fig. 2 TCW assisted by AOA

得到。

MT 到各个 BS 距离的真实值为  $d_i, i = 1, 2, \dots, N$ , 计算值为  $r_i = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2}$ , 所以  $d_i = r_i + \eta_i$ 。  $\eta_i$  是高斯白噪声, 服从均值为 0、方差为  $\mu$  ( $\mu$  是极小值) 的正态分布。

对函数  $f_i(x_i, y_i) = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2}$  在初始位置  $(x_0, y_0)$  邻域内进行 Taylor 级数展开, 忽略二阶偏导以上分量, 得<sup>[17]</sup>

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}\boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\eta}, \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2} - d_1 \\ \sqrt{(x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2} - d_2 \\ \vdots \\ \sqrt{(x_N - x_M)^2 + (y_N - y_M)^2} - d_N \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}} & \frac{y_1 - y_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}} \\ \frac{x_2 - x_0}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}} & \frac{y_2 - y_0}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_N - x_0}{\sqrt{(x_N - x_0)^2 + (y_N - y_0)^2}} & \frac{y_N - y_0}{\sqrt{(x_N - x_0)^2 + (y_N - y_0)^2}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_N]^T, \quad (12)$$

式中:  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为  $x$  和  $y$  的偏差。(8)式的最小二乘法估计解为  $\boldsymbol{\delta} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{h}$ 。

每进行一次迭代就要判断  $|\Delta x + \Delta y|$  是否小于阈值(设定为 0.05), 小于阈值就输出定位结果, 否则进入下一次迭代, 直到满足条件, 迭代过程结束。

## 5 实验与仿真

通过计算机仿真验证该定位系统的性能。假设有 4 个 BS 参与定位, 分布在面积为  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  大厅的 4 个角, 其中  $\text{BS}_1$  为服务基站, 并且  $\text{BS}_1$  与 MT 之间存在在视距路径。TOA 测量误差服从均值为 0、方差为 5 m 的正态分布。

### 5.1 消除 TOA 测量值中非视距误差方法的性能

为仿真非视距环境下 TOA 测量值中的非视距误差, 使用(4)式中描述的基于实测得到的统计指数模型, 参数设置  $\epsilon = 0.5, \sigma_\epsilon = 0.4$ ; 卡尔曼滤波器测量

方程中  $\alpha = 0.3$ , 信号采样间隔  $\Delta$  为 0.1 s。图 3 表示在实验中对 MT 运动时 20 s 内 200 个采样点的 TOA 测量值进行处理的结果。为直观表示, 这里将 TOA 值转换成距离测量值。蒙特卡罗仿真次数为 5000 次, 结果显示, 卡尔曼滤波器方法可更好地逼近真实的 TOA。误差基本在 0.9 m 以内, 非视距误差消除效果明显。

### 5.2 TOA/AOA 混合定位算法的克拉默-拉奥下界

由于克拉默-拉奥下界(CRLB)是所有无偏估计量均方误差的下界, 因此常被用于计算理论能达到的最佳估计精度及衡量算法的性能优劣<sup>[18]</sup>。求解 Fisher 信息的倒数即可得到 CRLB 下界。

使用文献[19]中的 TOA/AOA 混合定位算法的 CRLB 公式, 在上述实验条件下进行 1000 次实验, 计算平均值并绘制热力图, 结果如图 4 所示, 图中颜色越浅表示误差越大, 可以看出误差的下限



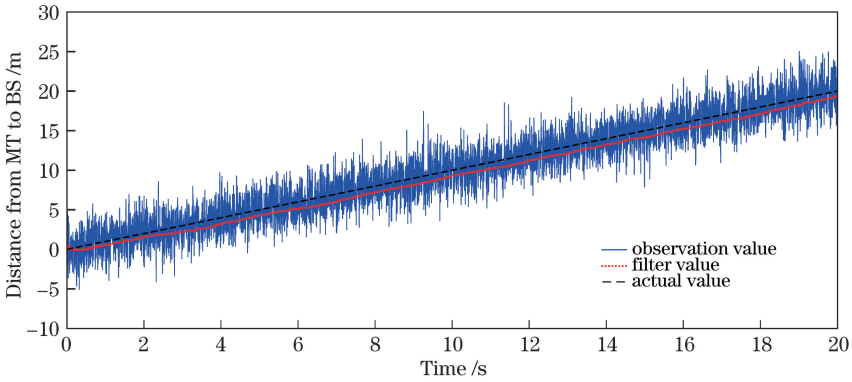


图3 卡尔曼滤波器消除 TOA 测量值中非视距误差仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of Kalman filter eliminating non-line-of-sight error in TOA measurement value

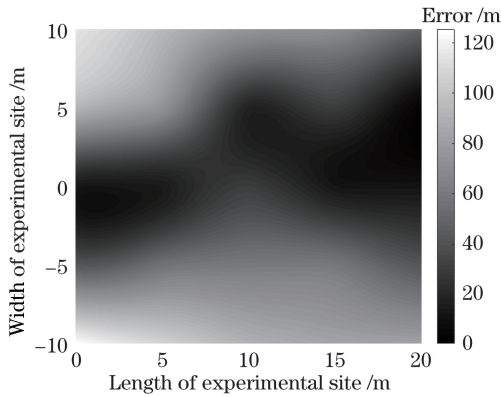


图4 TOA/AOA 混合定位算法的 CRLB

Fig. 4 CRLB of TOA/AOA hybrid localization algorithm

基本在 1.2 m 以内, 满足大部分室内定位的需求。

### 5.3 TCW-Taylor 级数展开的联合定位算法的性能

将本文 TCW-Taylor 级数展开算法、传统的全质心-Taylor 级数展开定位算法、基于最小二乘法的 TOA/AOA 混合定位算法在上述条件下进行 1000 次蒙特卡罗方法仿真, AOA 测量标准方差为  $1^\circ$ 。图 5 是各种定位方法定位误差的累积分布函数, 横坐标表示定位精度, 纵坐标表示达到某一精度的概率。结果表明, 由于本文算法在初值估算中提高了精度, 并且又经过 Taylor 级数精细化求解, 定位效果最好, 有 85% 的概率能达到 0.8 m 的定位精度, 92% 的概率达到 1.0 m 的精度, 接近 1.2 m 的 CRLB, 已经能够满足大部分室内定位应用场景的需求, 优于其他两种算法的性能。

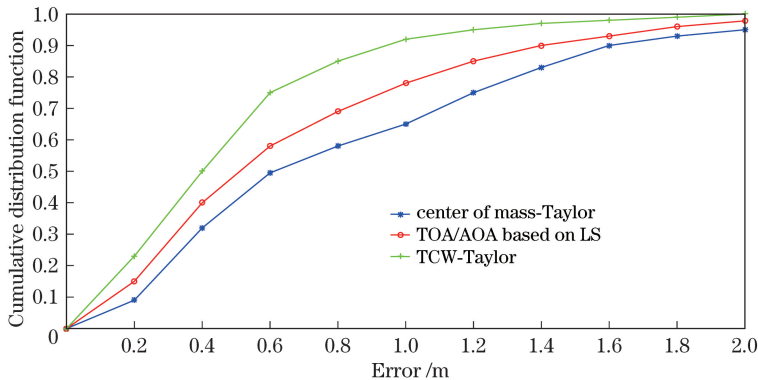


图5 三种定位方法定位误差的累积分布函数

Fig. 5 Cumulative distribution function of positioning errors of the three positioning methods

### 5.4 误差分析与优化

根据 UWB 信号的技术特性可知, 在实际的场景应用中, 无线脉冲波相较于惯导和视觉等技术受外界影响更大, 定位信息获取的误差来源主要有时钟同步误差和多径效应误差。UWB 定位模块一般通过晶振提供的时钟源确定自己的参考时钟, 晶振的频率偏差与漂移会导致最终系统时钟存在误差,

一种解决办法是采用对称双面双向测距方式<sup>[20]</sup>, 但时钟漂移这一系统误差仍然存在; 多径效应误差是由于遮挡和天线非全向辐射等造成 UWB 信号在空间沿着不同路径传播, 各分量到达接收端的时间不同导致原始定位信息提取不准而出现的定位误差。解决办法是优化天线设计, 提升天线的全向性性能, 及避免非视距情况发生, 比如将 BS 安装在房顶等

高处。同时还应考虑对计算速度和精度要求不同的应用场景需要设置不同的 Taylor 级数展开阈值等, 这些问题在仿真中没有涉及, 但是在实际应用时应当考虑。

## 6 结 论

采用一种基于 AOA 辅助 TOA 的门限比较法-Taylor 级数展开的联合定位方案来估计 MT 在室内的位置。为减小非视距误差的影响, 提高定位精度, 首先利用卡尔曼滤波对时间测量值进行平滑处理, 然后通过三个 TOA 圆与含误差的 AOA 射线交点的加权来对 MT 进行定位, 得到初始估计位置后再用 Taylor 进行二次精确迭代。仿真结果表明, 在 AOA 测量误差较小时, 本文算法与全质心-Taylor 级数展开定位算法和基于 LS 的 TOA/AOA 混合定位算法相比更加接近克拉默-拉奥下界, 位置估计准确性更高。

### 参 考 文 献

- [1] Zhao C H, Zhang H M, Song J. Fingerprint based visible light indoor localization method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0806002.  
赵楚韩, 张洪明, 宋健. 基于指纹的室内可见光定位方法[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0806002.
- [2] Dong W J, Wang X D, Wu N. A hybrid RSS/AOA algorithm for indoor visible light positioning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 050603.  
董文杰, 王旭东, 吴楠. 基于 RSS/AOA 混合的室内可见光定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050603.
- [3] Zhu G. UWB principle and interference[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.  
朱刚. 超宽带(UWB)原理与干扰[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [4] Li W J, Fu J. The design and implementation of distributed laser location system based on TDOF technology [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(9): 1438-1446.  
李文江, 符建. 基于 TDOF 的分布式激光定位系统设计及实现[J]. 传感技术学报, 2017, 30(9): 1438-1446.
- [5] Gao Z J. Research on WDAM-UWB system ranging localization and error mitigation technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.  
高志杰. 波分多址超宽带系统测距定位及误差校正技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [6] Li Y, Wang M, Yu X Y. Indoor location algorithm based on ZigBee [J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(6): 180-184.  
李尧, 汪明, 于晓谕. 基于 ZigBee 室内定位算法[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(6): 180-184.
- [7] Zhao Q, Wang J D, Liu Y X, *et al.* System error correction based on particle swarm optimization in TOA indoor location [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(8): 189-192, 197.  
赵强, 王敬东, 刘云霄, 等. 基于粒子群 TOA 室内定位的系统误差修正[J]. 电子测量技术, 2017, 40(8): 189-192, 197.
- [8] Cesbron F, Arnott R. Locating GSM mobiles using antenna array [J]. Electronics Letters, 1998, 34(16): 1539-1540.
- [9] So H C, Shiu E M K. Performance of TOA-AOA hybrid mobile location [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2003, E86-A(8): 2136-2138.
- [10] Zhao J H, Zhao C. Improved hybrid ToA/AoA location algorithm in NLoS environments for wireless sensor networks [J]. Zhongguo Tongxin, 2011, 8(8): 106-110.  
赵军辉, 赵聪. 无线传感网中 NLoS 环境下的 ToA/AoA 改进混合定位算法[J]. 中国通信, 2011, 8(8): 106-110.
- [11] Deng P, Liu L, Fan P Z. An improved hybrid TOA/AOA location algorithm [J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(4): 54-57.  
邓平, 刘林, 范平志. 一种改进的 TOA/AOA 混合定位算法[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(4): 54-57.
- [12] Deligiannis N, Louvros S, Kotsopoulos S. Optimizing location positioning using hybrid TOA-AOA techniques in mobile cellular networks [C] // Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Mobile Multimedia Communications, August 27-29, 2007, Nafpaktos, Greece. Brussels: ICST, 2007.
- [13] Chan Y T, Tsui W Y, So H C, *et al.* Time-of-arrival based localization under NLOS conditions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 17-24.
- [14] Bach W, Dam D, Evers L, *et al.* An iterative quality-based localization algorithm for ad hoc networks [C] // In Proceedings of the International Conference on Pervasive Computing, August 26-28, 2002, Zurich, Switzerland. Germany: Springer,

- 2002: 55-61.
- [15] Liu J, Li J. TDOA/AOA hybrid wireless location method in NLOS situation [J]. Journal on Communications, 2005, 26(5): 63-68.  
刘磊, 李静. 一种在非视距环境中的 TDOA/AOA 混合定位方法[J]. 通信学报, 2005, 26(5): 63-68.
- [16] Deng P. Investigation of mobile station location in cellular network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.  
邓平. 蜂窝网络移动台定位技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [17] Chen J X, Ren J. The improved Taylor series indoor positioning algorithm based on RSSI[J]. Journal of North China University of Technology, 2016, 28(3): 25-29.  
陈金星, 任进. 基于 RSSI 的改进泰勒级数室内定位算法[J]. 北方工业大学学报, 2016, 28(3): 25-29.
- [18] Shen R, Zhang J, Wang D. Indoor location method and the cramer-rao bound estimation based on visible light communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090604.  
沈芮, 张剑, 王鼎. 基于可见光通信的室内定位算法及相应参数估计克拉美罗界[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090604.
- [19] Feng K T, Chen C L, Chen C H. GALE: an enhanced geometry-assisted location estimation algorithm for NLOS environments [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 199-213.
- [20] Yang Z, Wu C S, Liu Y H. Location-based computing: localization and localizability of wireless networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.  
杨铮, 吴陈沫, 刘云浩. 位置计算: 无线网络定位与可定位性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.