

# 基于声学脉冲响应的室内建图算法研究

覃虹菱<sup>1</sup>, 王 玫<sup>1,2</sup>, 宋 浠 瑜<sup>1</sup>, 周 隰<sup>1</sup>, 罗 丽 燕<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室, 广西桂林 541004;

2. 桂林理工大学信息科学与工程学院, 广西桂林 541004)

**摘要:** 由于室内环境下噪声及混响干扰造成声学脉冲响应(Acoustic Impulse Response, AIR)的波达时间(Time of Arrival, TOA)模糊, 导致现有室内空间几何建图技术存在计算复杂等缺点, 提出一种基于 AIR 可信度判断与霍夫变换结合的定位和建图一步完成的方法。该方法基于到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)迭代估计声源位置并计算准确的 TOA, 随后基于声收发设备与一阶反射 TOA 关于反射面的椭圆约束关系, 结合可信度判断与霍夫变换, 筛选可信低阶 TOA 以实现室内反射面的二维位置估计。蒙特卡洛仿真结果表明, 在混响时间  $T_{60}$  为 0.134 7 s、AIR 误差标准差为  $22.7 \times 10^{-3}$  ms、大小为 10 m $\times$ 8 m $\times$ 4 m 复杂室内环境下, 墙面定位平均距离误差为 10.1 cm, 平均角度误差为 2.795 8°。在大小为 5.26 m $\times$ 3.5 m $\times$ 3.35 m 的真实房间中, 该方法可以实现声源与墙体位置的同时定位, 完成规则盒型房间的二维地图重构, 且墙面定位平均距离误差为 2.6 cm, 平均角度误差为 2.17°。

**关键词:** 声学脉冲响应; 室内定位与建图; 椭圆约束; 霍夫变换

中图分类号: TU112

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-02-0243-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.02.020

## Research on indoor mapping algorithm based on acoustic impulse response

QIN Hongling<sup>1</sup>, WANG Mei<sup>1,2</sup>, SONG Xiyu<sup>1</sup>, ZHOU Zou<sup>1</sup>, LUO Liyan<sup>1</sup>

(1. Provincial Ministry of Education Key Laboratory of Cognitive Radio and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. School of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** The existing indoor mapping technology has the shortcomings in high cost and high computational complexity, which is caused by the TOA (time of arrival) ambiguity of the acoustic impulse response (AIR) due to noise and reverberation in the indoor environment. To solve this problem, an indoor localization and mapping method based on combining AIR credibility judgment and Hough transform is proposed in this paper. Firstly, the method iteratively estimates the position of the sound source based on the Time Difference of Arrival (TDOA) and calculates the accurate TOA. Then, by using the elliptical constraint relationship between the acoustic transceiver and the first-order reflection TOA on the reflective surface and combining the credibility judgment and Hough Transform, the reliable low-order TOA is selected to achieve the two-dimensional position estimation of the indoor reflective surface. Monte Carlo simulation results show that in the complex indoor environment of 10m $\times$ 8m $\times$ 4m with reverberation time  $T_{60}$  of 0.134 7 s and AIR error standard deviation of  $22.7 \times 10^{-3}$  ms, the average distance error of wall localization is 10.1cm, and the average angular error is 2.795 8°. In the following experiments in a real room of 5.26 m $\times$ 3.5 m $\times$ 3.35 m, this method can realize the simultaneous localization of sound source and wall position, and complete the two-dimensional reconstruction of a box-type room. And the average distance error of wall localization is 2.6 cm, and the average angular error is 2.17°.

**Key words:** acoustic impulse response (AIR); indoor localization and mapping; elliptic constraint; Hough transform

## 0 引言

随着基于用户位置信息的相关技术的应用和

发展, 位置服务已经成为人们日常工作、生活所必须的一项基本服务需求, 常用于室内定位、机器人导航等<sup>[1-2]</sup>。这种技术应用时需要一个环境地图。传统的室内建图方法, 如基于视觉图像<sup>[3]</sup>、测距传感<sup>[4]</sup>的移动机器人即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)等都因为其特定的条件依赖, 未能得到推广。在室内环境中, 声信号的传播在一定程度上反映了室内布置和结构信息, 且相比电磁波、光波拥有更低的波速, 更适用于室内地图的创建<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2018-11-03; 修回日期: 2018-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61771151)、广西重点研发计划项目(AB17292058)、广西自然科学基金(2016GXNSFBA38014)、中国博士后科学基金(2016M602921XB)、广西高校无人机遥测重点实验室开放基金(WRJ2016KF01)资助项目

作者简介: 覃虹菱(1994—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为室内定位与建图。

通讯作者: 宋浠瑜, E-mail: songxiyu@guet.edu.cn

房间结构的混响特性会使得声学脉冲响应 (Acoustic Impulse Response, AIR) 中波达时间 (Time of Arrival, TOA) 存在高阶反射早于低阶反射的情况, 造成 TOA 模糊问题。文献[6]、[7]采用近墙单发单收方式避免 TOA 产生模糊, 但是完成多个反射面的估计需要单声源移动测量多次, 此位移过程中的累积位姿误差降低了其定位与重构性能。相对于单麦克风, 麦克风阵列在时域和频域的基础上增加了空间域, 对声音信息的处理能力增强<sup>[8]</sup>。文献[9]通过欧式距离阵 (Euclidean Distance Matrix, EDM) 将 AIR 中的一阶反射 TOA 分配到各个墙体来解决 TOA 模糊, 再基于声源、虚声源与反射面的几何位置关系完成反射面估计, 测量步骤简单但后续计算繁琐。基于收发设备与反射面之间的椭圆约束位置几何关系也可以直接定位反射面位置。文献[10]、[11]分别通过到达方向 (Direction of Arrival, DOA) 和近墙先验条件的方式解决 TOA 模糊问题。但前者仅适用于单反射面估计, 后者虽运用霍夫变换进行降噪处理, 但其采用的非迭代到达时间差 (Time Difference of Arrival, TDOA) 声源定位算法与集中型麦克风阵型的组合方式在低信噪比环境下定位精度较低, 并传递到后续的反射面估计。文献[12]以任意排布麦克风阵列方式布置大量锚节点, 结合地图映射的尺度变换 (Multi-dimensional Scaling with Map Matching, MDS-MAP)、EDM 和霍夫变换提出一种多路径辅助协同定位和映射 (Multipath-aided Cooperative Localization and Mapping, MCLAM) 算法来处理每组节点的数据, 实现复杂且计算量大。

本文充分考虑了麦克风阵元分布对声源位置估计精度的影响, 针对现有空间几何重构方案中声源定位方法的缺点, 利用基于 TDOA 最小二乘思想的列文伯格-马夸尔特算法 (Levenberg-Marquardt Algorithm, LMA)<sup>[13]</sup> 对声源位置进行估计, 并由此得到准确的 TOA 信息; 再利用一阶反射 TOA 建立收发设备与反射墙面之间的椭圆约束条件, 通过公切线算法 (Common Tangent Algorithm, COTA)<sup>[14]</sup> 对反射面进行初步估计; 最后加入不同声源位置的 AIR, 并利用可信度判断找到混响环境中的可信低阶多径 TOA, 通过霍夫变换降低噪声影响, 获得更为准确的墙面位置估计的修正结果。

## 1 系统模型

### 1.1 椭圆约束几何关系

假设声源与接收设备位于同一平面且与墙面

正交, 由菲涅尔反射定律可以得出三者的几何关系: 声源、接收设备和关于反射面的一阶反射距离都可以形成如图 1 所示的椭圆约束, 其中源  $r_s \triangleq (x_s, y_s)^T$  和接收  $r_i \triangleq (x_i, y_i)^T, i=0, \dots, M-1$  作为椭圆的焦点, 一阶反射距离作为椭圆的长轴, 反射点  $p=(x, y)$  既在椭圆上, 也在表示反射面位置的二维切线上。于是点  $p=(x, y)$  必须同时满足:

$$l_1x + l_2y + l_3 = 0 \quad (1)$$

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2} = Q_i^{\text{maj}} \quad (2)$$

一阶反射路径  $Q_i^{\text{maj}}$  为声源、接收设备分别到反射点的路径之和, 即  $Q_i^{\text{maj}} = \eta \cdot \tau_{i,1}$ , 其中  $\eta$  为声速。对于点  $\mathbf{x}=[x \ y \ 1]^T$ , 式(1)可表示为  $\mathbf{l}^T \mathbf{x} = 0$ , 其中反射面为  $\mathbf{l}=[l_1, l_2, l_3]^T$ 。同样地, 式(2)可参数化为  $\mathbf{x}^T \mathbf{C}_i \mathbf{x} = 0$ ,

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i & d_i \\ b_i & c_i & e_i \\ d_i & e_i & f_i \end{bmatrix} \text{ 称为椭圆的点圆锥矩阵, 其矩阵}$$

元素为

$$\begin{cases} a_i = Q_i^{\text{maj}2} - (x_s - x_i)^2 \\ c_i = Q_i^{\text{maj}2} - (y_s - y_i)^2 \\ b_i = -2(x_s - x_i)(y_s - y_i) \\ d_i = (x_i - x_s)(x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2 - Q_i^{\text{maj}2}) - 2x_s Q_{i,k}^{\text{maj}2} \\ e_i = (y_i - y_s)(x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2 - Q_i^{\text{maj}2}) - 2y_s Q_{i,k}^{\text{maj}2} \\ f_i = -(x_i^4 + y_i^4 + x_s^4 + y_s^4 + Q_i^{\text{maj}2})/4 + Q_i^{\text{maj}2}(x_i^2 + y_i^2 + x_s^2 + y_s^2)/2 + (x_i^2 x_s^2 + y_i^2 y_s^2 + x_i^2 y_s^2 + x_s^2 y_i^2 - x_i^2 y_i^2 - x_s^2 y_s^2)/2 \end{cases} \quad (3)$$

根据投影几何理论, 图 1 描述的椭圆几何约束关系可以表示为

$$\mathbf{l}^T \mathbf{C}_i^* \mathbf{l} = 0 \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{C}_i^* = \det(\mathbf{C}_i) \mathbf{C}_i^{-1}$ 。当且仅当式(4)成立时, 直线  $\mathbf{l}$  与椭圆  $\mathbf{C}_i$  相切。

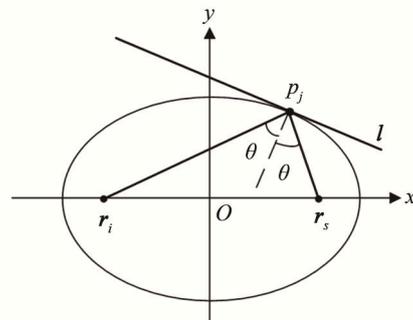


图 1 声收发设备及反射面关于一阶反射的椭圆几何关系  
Fig.1 Elliptic geometric relationship between acoustic transceivers and first-order reflections from the reflecting surfaces

### 1.2 系统框图

即时定位与地图构建系统框图如图 2 所示。本

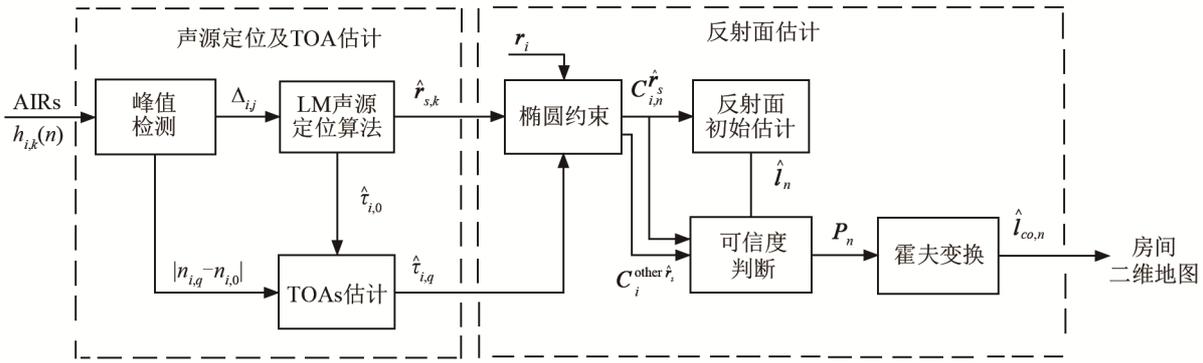


图 2 即时定位与地图构建系统框图  
Fig.2 Block diagram of simultaneous localization and mapping system

文工作涉及到图 2 中虚框所示的两个部分，其中， $k$  表示不同声源位置， $n$  表示房间中的不同反射面。

## 2 声源定位及 TOA 估计

房间内的声源  $r_s$  发出信号  $s(t)$ ，位于  $r_i$  的  $M$  个麦克风分别观测到接受信号  $x_i(t)$ 。于是有  $x_i(t) = s(t) * h_i(t) + n(t)$ ， $h_i(t)$  即 AIR 的室内声脉冲响应函数，可以表示为<sup>[7]</sup>

$$h_i(t) = \sum_{q=0}^Q \alpha_{i,q} \delta(t - \tau_{i,q}) + v(t) \quad (5)$$

其中： $Q$  是最大反射阶数； $\alpha_{i,q}$  为衰减系数； $\tau_{i,q}$  为第  $i$  个麦克风接收的第  $q$  阶反射的 TOA。直接路径的 TOA 定义为零阶反射，即  $\tau_{i,0}$ 。 $n(t)$  和  $v(t)$  都是加性高斯噪声。

由于设备之间存在异步问题，利用 TDOA 迭代定位算法可得到声源位置，再求出 AIR 中一系列反映各阶反射的准确 TOA。对于基于 TDOA 的声源定位，声源在阵列内部时，定位精度比远离阵列时的定位精度高<sup>[15]</sup>。采取分布式麦克风阵列的阵型，能够增大麦克风阵列的相对基线长度，提高声源定位的精度，同时也能够使反射点的分布更加分散，对反射面的位置估计不易产生角度误差。

由  $h_i(t)$  得到以  $r_0$  为基准的声源  $r_s$  到各接收点的 TDOA 观测值为  $\hat{d} = [\eta \cdot \Delta_{1,0} \quad \eta \cdot \Delta_{2,0} \quad \dots \quad \eta \cdot \Delta_{M-1,0}]^T$ ，其中  $\Delta_{i,j} \triangleq |\tau_{i,0} - \tau_{i,j}|$ 。LMA 算法<sup>[13]</sup>基于以下加权最小二乘误差函数：

$$\varepsilon(r_s) = [\hat{d} - d(r_s)]^T \Sigma_n^{-1} [\hat{d} - d(r_s)] \quad (6)$$

声源位置的迭代更新公式为

$$r_s^{(k+1)} = r_s^{(k)} + [\Phi^T(r_s^{(k)}) \Sigma_n^{-1} \Phi(r_s^{(k)}) + \lambda^{(k)} I]^{-1} \cdot \Phi^T(r_s^{(k)}) \Sigma_n^{-1} [\hat{d} - d(r_s^{(k)})] r_s^{(k)} + (A^{(k)} + \lambda^{(k)} I)^{-1} g^{(k)} \quad (7)$$

式中， $d(r_s)$  是以  $r_0$  为基准关于未知声源坐标  $r_s$  的 TDOA 函数； $\Sigma_n^{-1}$  为噪声功率矩阵； $\Phi(r_s)$  是大小为  $(M-1) \times 2$  的雅克比矩阵， $\Phi(r_s) = \nabla_{r_s}^T \otimes d(r_s)$ ，其中

$$\nabla_{r_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_s} & \frac{\partial}{\partial y_s} \end{bmatrix}^T。$$

声源位置  $\hat{r}_s$  求出后，准确的直达波时间为  $\hat{\tau}_{i,0} = |r_i - \hat{r}_s| / \eta$ ，其他阶反射波的 TOA 为  $\hat{\tau}_{i,q} = \hat{\tau}_{i,0} + |\tau_{i,q} - \tau_{i,0}|$ 。

## 3 反射面估计

### 3.1 反射面初始估计

多接收情况下，单个源与接收点之间会形成一组关于同一反射面的椭圆约束，这组椭圆的公切线则对应于反射面的位置。于是由式(4)有

$$\begin{cases} l^T C_0^* l = 0 \\ l^T C_1^* l = 0 \\ \vdots \\ l^T C_{M-1}^* l = 0 \end{cases} \quad (8)$$

基于最小二乘思想设立成本函数  $J(l) = \sum_{i=0}^{M-1} \|l^T C_i^* l\|^2$ ，

使用 COTA 算法<sup>[14]</sup>可得到反射面  $\hat{l}$ ：

$$\hat{l} = \arg \min_m J(l_m), \quad l_m \in \bar{L} \quad (9)$$

### 3.2 可信度判断与霍夫变换结合的修正估计

由于 AIR 中的 TOA 信息受噪声和混响干扰，式(9)得到的结果不能保证对应于真实的反射面。充分利用声传播的多径 TOA 信息，并采用可信度判断与霍夫变换结合的方式，可避免 TOA 模糊问题的复杂求解，提高反射面估计的鲁棒性。具体步骤如下：(1) 通过在声场中不同位置放置声源，得到更多数据来源。(2) 将声源靠近反射面，以保证 AIR 中直达之后的第一个脉冲即为来自该反射面的一阶反射，用于 3.1 节中的初始估计；(3) 选取 AIR 中除直达外的多径

TOA，通过可信度判断剔除与指定反射面无关的 TOA 项，得到可信反射点集合，再利用霍夫变换的点线转换特性得到修正后更接近真实反射面的位置估计。

### 3.2.1 可信度分析

借助 3.1 节中对指定反射面的初始估计  $\hat{l}_n$ ，得到候选多径 TOA 对应椭圆的可能反射点集合  $P_n=[p_0 p_1 \dots p_{V_r}]^{[14]}$ 。由于噪声的存在，这些反射点可以是多径 TOA 形成的椭圆与  $\hat{l}_n$  的切点  $p_T$  或相离、相交情况下椭圆离  $\hat{l}_n$  最近的切点  $p_{T\alpha}$  和  $p_{T\beta}$ ，直线椭圆位置关系与反射点选取如图 3 所示。

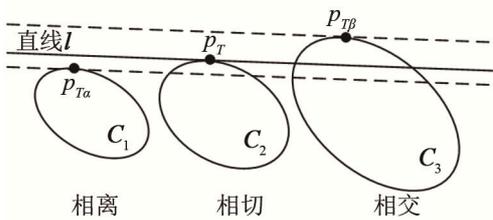


图 3 直线椭圆位置关系与反射点选取  
Fig.3 Position relation between line and ellipse and the selection of reflection points

在环境噪声干扰下， $\hat{l}_n$  大多出现不同程度的角度倾斜，多径椭圆与  $\hat{l}_n$  相交的情况较多。为了避免误差传递现象的出现，本文按图 4 所示的流程选取

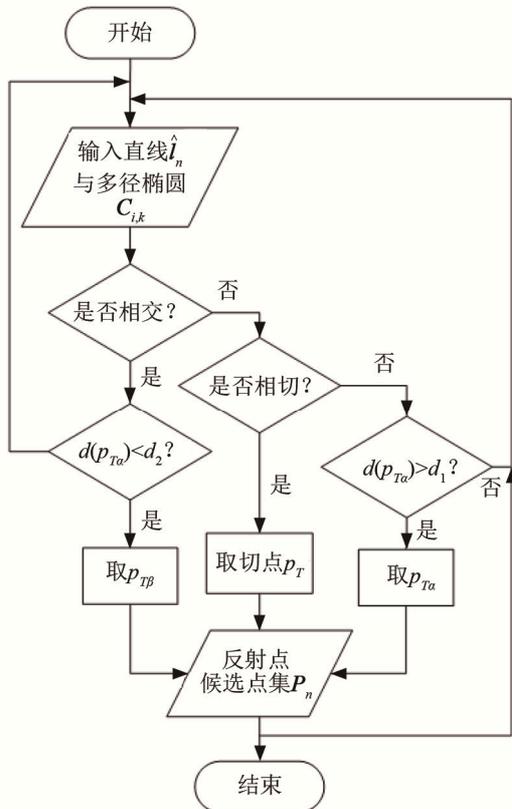
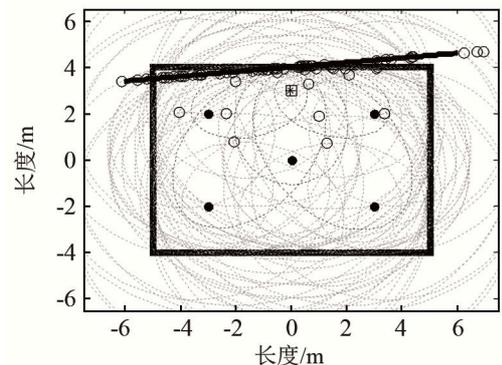


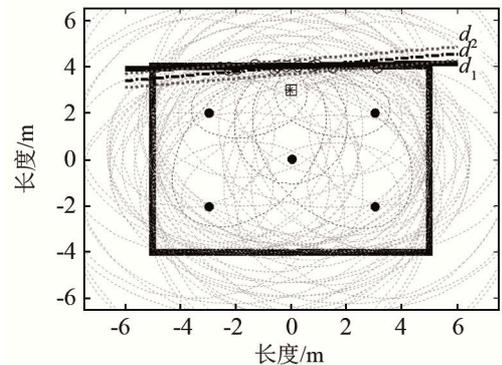
图 4 反射点候选点集选取流程图  
Fig.4 The flow chart for selecting candidate point set of reflection points

反射点候选点集。如图 5(a)所示，如果选取交点  $p_\alpha$ 、 $p_\beta$ ，这样得到的大部分反射点仍在  $\hat{l}_n$  (黑色点横线上)，霍夫变换的结果仍为  $\hat{l}_n$ ，造成误差传递<sup>[16]</sup>。

使用距离  $d(p)=\|p-\hat{r}_s\|+\|p-r_i\|$  与阈值  $d_1$ 、 $d_2$  限制反射点候选点集  $P_n$  的选取。超出阈值  $d_2$  范围的被视为无效的高阶反射，小于阈值  $d_1$  范围的反射与该墙体的位置估计无关，在  $d_1 \sim d_2$  范围内选取最近的切点为可能的反射点。如图 5(b)所示，此时选取的反射点候选集  $P_n$  避免了修正过程中关于初始估计  $\hat{l}_n$  的误差传递，得到更接近真实值的反射面位置 (黑色实线)。



(a) 多径 TOA 未经可信度判断



(b) 多径 TOA 经可信度判断后

图 5 多径 TOA 经可信度判断前后的反射点分布与估计结果  
Fig.5 Comparison between reflection point distribution and reflection localization with multipath TOA before and after credibility judgment

### 3.2.2 霍夫变换

霍夫变换可以将笛卡尔空间中的一个点映射成霍夫参数空间中的一条正弦曲线。给定直线  $l$  上的数点，在霍夫参数空间中，对应于这些点的数条正弦曲线将交于一点。因此，将椭圆的可能反射点集合  $P_n$  转换为霍夫参数空间中的正弦曲线，这些正

弦曲线经过最多的参数点  $(\rho, \theta)$ ，即代表笛卡尔坐标系中经过反射点集  $\mathbf{P}_n$  中最多点的直线，即反射面位置。霍夫变换示意图如图 6 所示。

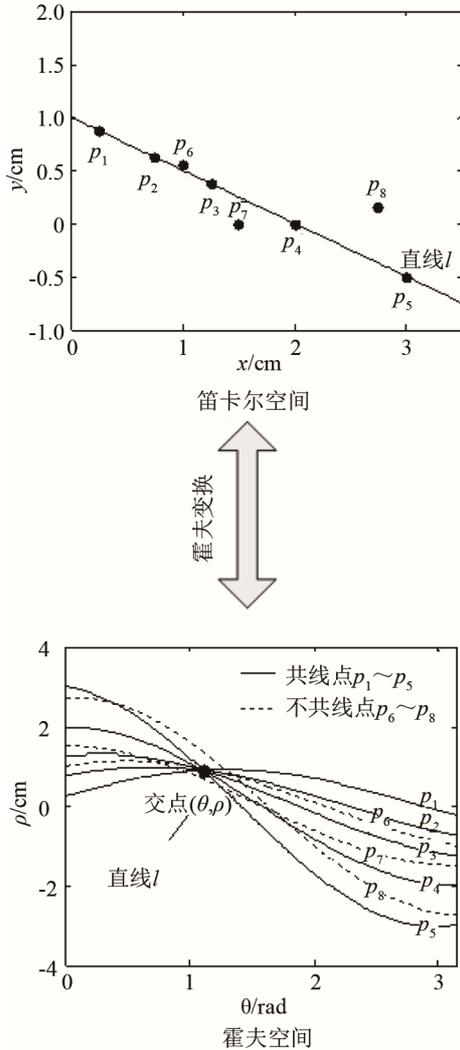


图 6 霍夫变换示意图  
Fig.6 Hough transform diagram

令  $\rho \in \mathbf{R}$  和  $\theta \in [0, \pi]$ ，对 3.2.1 中得到的候选点集  $\mathbf{P}_n$  中的每个点  $p_j = [x_j \ y_j]^T, j=1, \dots, V$ ，计算其在霍夫参数空间的曲线<sup>[17]</sup>：

$$\rho = x_j \cos \theta + y_j \sin \theta \quad (10)$$

式(10)的结果量化后存储在霍夫累加器  $A(\rho, \theta)$  中。当考虑单个反射面时，通过估计累加器空间中的最高计数单元  $(\hat{\theta}_{\max}, \hat{\rho}_{\max})$  来获得直线的参数：

$$\hat{\mathbf{l}}_h = [\cos(\hat{\theta}_{\max}) \ \sin(\hat{\theta}_{\max}) \ -\hat{\rho}_{\max}]^T \quad (11)$$

受到混响和强噪声影响的错误 TOA 信息在霍夫空间中的对应点不聚集在真实的峰值附近，获得较低的计数而被剔除。除此之外，量化过程和噪声的存在可能会使得出现多个局部峰值的现象，得到

聚集在真实墙面附近的  $H$  个候选  $\hat{\mathbf{l}}_{h,n}, h=1, \dots, H$ 。对这些候选，直接求取平均值，可得到最终解  $\hat{\mathbf{l}}_{co,n}$ 。

## 4 实验

给定参考声源位置  $\mathbf{r}_s$  和估计声源位置  $\hat{\mathbf{r}}_s$ ，声源定位误差为  $\varepsilon_s = \|\hat{\mathbf{r}}_s - \mathbf{r}_s\|$ 。反射面参数为  $\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$ ，则方向角为  $\alpha = \arctan(l_2/l_1)$ ，从原点  $(0,0)$  到反射面的距离为  $\kappa = |l_3|/\sqrt{l_1^2 + l_2^2}$ 。由此，单一反射面估计的误差为：距离误差  $\varepsilon_d = |\kappa - \hat{\kappa}|$ ，角度误差  $\varepsilon_a = |\alpha - \hat{\alpha}|$ ，其中带上标的为估计值。多个反射面的情况下的误差，是对上述两个误差分析标准取平均，即取四面墙的平均误差。

### 4.1 数值仿真实验

仿真实验中，房间大小设定为  $10 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  的鞋盒型，5 个麦克风组成的阵列分别放置在房间中心和四角，阵列大小为  $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ，高度为  $1 \text{ m}$ 。混响环境房间中的  $h_i(t)$  模型来自基于镜像 (IMAGE) 方法<sup>[18]</sup>，且假设地板天花板全吸收，墙体反射系数为 0.6， $T_{60}$  为 0.134 7 s，声速  $\eta = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，采样频率  $f = 44.1 \text{ kHz}$ 。分别将声源放置在距不同反射面 1 m 的 4 个空间位置上，保证来自该反射面的一阶反射在其它反射面的反射之前到来。声源定位 LMA 算法的初值取任意一个非零数。霍夫变换的量化经验参数为  $d\rho = 1 \text{ cm}$ 、 $d\theta = 1^\circ$ ，范围为  $[-5 \text{ m}, 5 \text{ m}]$ 。阈值  $d$  为  $\hat{\mathbf{r}}_s$  与  $\mathbf{r}_i$  关于  $\hat{\mathbf{l}}_n$  的一阶反射距离，阈值  $d_1 = d - 5 \text{ cm}$ ， $d_2 = d + 5 \text{ cm}$ 。

为了研究算法在不同噪声情况之下的鲁棒性，根据式(5)模拟噪声干扰下的  $h_i(n)$ ，令

$$\hat{n}_{i,q} = n_{i,q} + \xi \quad (12)$$

其中， $\hat{n}_{i,q}$  为  $\tau_{i,q}$  的采样表示， $\xi$  是均值为 0、标准差范围为 0~10 个采样的高斯噪声(当声速  $\eta = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、采样频率  $f = 44.1 \text{ kHz}$  时，每 1 次采样产生的时间误差的标准差约  $22.7 \times 10^{-3} \text{ ms}$ ，距离误差的标准差约 0.77 cm)。经过 50 次蒙特卡洛模拟实验，观察实验结果。

不同噪声标准差情况下声源的平均定位误差如表 1 所示。

不同噪声标准差大小情况下的平均误差在以下 3 种情况下的对比结果如图 7 所示：未使用多径 TOA 的初始估计结果；加入 AIR 中一阶反射后的  $N=3$  个多径 TOA 后，有、无经过可信度判断的修正结果的对比结果。选取了  $N=3$  个多径 TOA，图 7(a) 未经过可信度判断剔除高阶反射与无关一阶反射时，受初步估计的  $\hat{\mathbf{l}}_n$  影响，存在误差传递的现象；图 7(b) 相

比图 7(a), 利用了可信度判断, 为霍夫变换选取了足够的且能反映反射面真实位置信息的反射点候选点集, 平均距离误差  $\bar{\varepsilon}_d$  和平均角度误差  $\bar{\varepsilon}_a$  相对于初始估计都有了明显降低。由图 7 还可以看出, 反射面位置估计的平均距离误差和角度误差都随着噪声的增大而增大; 充分利用多径 TOA, 虽不能完全避免噪声与混响的影响, 但通过可信度判断与霍夫变换结合的方式对初始估计进行修正, 可以得到更加准确的结果。图 7(b)在噪声  $\xi$  标准差取 10 个采样个数时, 初始估计的平均距离误差  $\bar{\varepsilon}_d$  为 15.69 cm, 平均

角度误差  $\bar{\varepsilon}_a$  为  $6.667^\circ$ ; 修正后的平均距离误差  $\bar{\varepsilon}_d$  降低到 10.10 cm, 平均角度误差  $\bar{\varepsilon}_a$  降低到  $2.80^\circ$ 。

4.2 真实场景实验

真实实验环境是一个大小为  $5.26\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 3.35\text{ m}$  的鞋盒型休息室。该房间较为空旷, 其中一面有较大的窗户, 不作估计。选用 Behringer ECM 8000 全向型麦克风 4 个、哈曼卡顿 aura studio 音响 1 个、M-AUDIO M-TRACK QUAD 4 通道外置声卡 1 个, 另外使用 1 台华硕笔记本控制收发及数据处理。麦克风接收阵列放置在房间四角, 阵列大小为  $3.46\text{ m}\times 2.1\text{ m}$ , 声源放置在距不同反射面  $0.5\text{ m}$  的 3 个空间位置上, 高度为  $1.2\text{ m}$ 。保证来自该反射面的一阶反射为 AIR 中直达之后的首达高脉冲, 后续选取  $N=3$  个多径 TOA。发射信号  $s(t)$  是带宽为  $16\sim 20\text{ kHz}$  的正弦扫频信号, 发射时长为  $0.3\text{ s}$ , 声速  $\eta=343\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 采样频率  $f=44.1\text{ kHz}$ , 接收信号经过带通滤波后计算其 AIR<sup>[19]</sup>:

$$\hat{h}(n) = \text{IFFT} \left\{ \frac{\text{FFT}[\hat{r}(n)]}{\text{FFT}[s(n)]} \right\} \quad (13)$$

实际环境中的 AIR 多为锯齿波形, 因此对其包络进行峰值检测, 其他参数设置参照 4.1 节。

真实房间的 AIR 波形图如图 8 所示。图 8(a)为

表 1 声源定位平均误差  
Table 1 Average error of sound source localization

噪声 $\xi$ 标准差/采样个数	平均声源定位误差 $\varepsilon_s/\text{cm}$
0	0.35
1	1.47
2	3.27
3	3.98
4	5.84
5	7.94
6	8.26
7	10.23
8	12.16
9	13.72
10	14.72

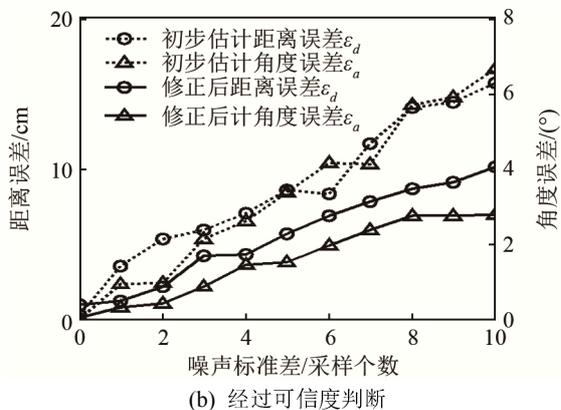
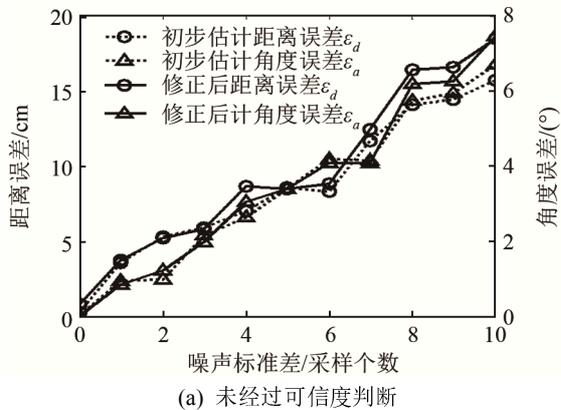


图 7 初始估计与加入 3 个多径 TOA 后的修正性能对比  
Fig.7 Comparison of reconstruction performances between initial estimation and after adding 3 multipath TOAs

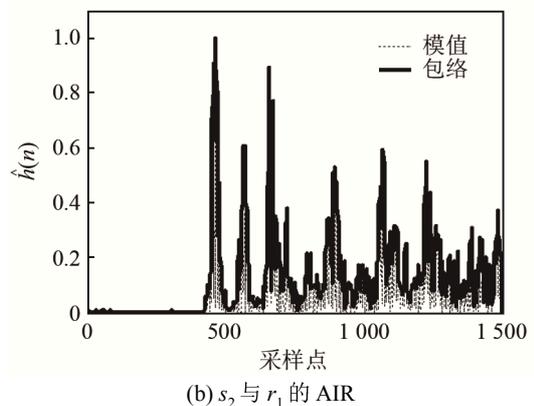
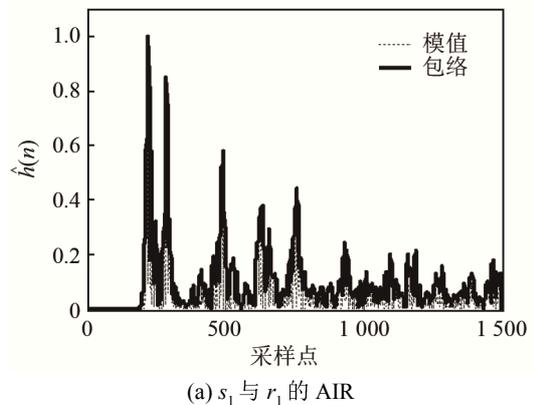
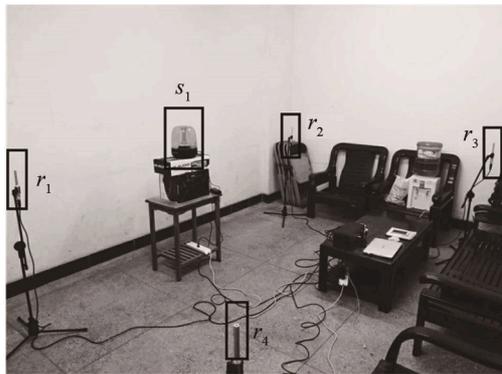


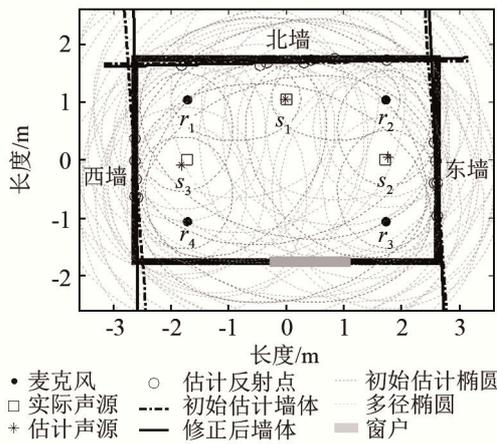
图 8 真实环境中不同收发位置的声学脉冲响应  
Fig.8 Acoustic impulse responses at different receiving and sending positions in real environment

声源位置  $s_1$  与麦克风  $r_1$  的 AIR，图 8(b) 为声源位置  $s_2$  与麦克风  $r_1$  的 AIR。其中虚线表示对应  $\hat{h}(n)$  的锯齿波形，实线表示包络。由图 8 可以看出，相近的墙体反射产生比直达略低的明显脉冲，而在后续的脉冲中并不能分辨出较远的墙体反射。由于  $s_1$  处于房间较空旷的区域， $s_2$  周围家具更多，因此图 8(b) 中的 AIR 相比图 8(a) 中，受到房间混响的影响明显更大。

真实房间的二维几何重构结果如图 9 所示。图 9(a) 为实际场景图，图 9(b) 为重构得到的平面地图。图 9(b) 中其中黑色表示实际物理位置，点横线表示初始估计，实线表示修正后的结果。由于真实房间中存在一扇较大的窗户，因此该窗户所在墙面不作估计。声源定位误差  $\epsilon_s$  如表 2 所示，墙体定位的距离误差  $\epsilon_d$  和角度误差  $\epsilon_a$  如表 3 所示。



(a) 真实实验场景图



(b) 真实环境二维重构结果

图 9 真实环境中的二维重构

Fig.9 Two-dimensional reconstruction in real environment

如表 3 所示，可信度判断与霍夫变换结合的修正方式能一定程度上减少误差；北墙相对于东墙与西墙的反射点分布更分散，因此角度误差更小；有效多径 TOA 的数量过少可能影响霍夫变换，导致修正结果更差，如北墙的角度误差。在此重构实验中，平均距离误差  $\bar{\epsilon}_d$  从 4.38 cm 降至 2.6 cm，平

均角度误差  $\bar{\epsilon}_a$  从 2.89° 降至 2.17°。

表 2 真实环境声源定位误差

Table 2 Error of sound source localization in real environment

声源	$\epsilon_s$ /cm
$s_1$	0.67
$s_2$	7.06
$s_3$	12.36
均值	6.7

表 3 真实环境墙体估计误差

Table 3 Error of reflector localization in real environment

墙体	$\epsilon_d$ /cm		$\epsilon_a$ / (°)	
	初始	修正后	初始	修正后
北墙	6.24	2.19	1.38	2.82
东墙	4.7	3.28	4.08	2.79
西墙	2.19	2.34	4.15	0.92
均值	4.38	2.6	2.89	2.17

## 5 结论

针对现有室内建图技术存在的高成本、高计算复杂度等缺点，本文提出了一种基于 AIR 的定位与建图一步完成的方法。该方法首先在异步情况下通过声源定位得到准确的 TOA；再根据椭圆几何约束关系，通过 COTA 算法对反射面进行初始估计；最后通过可信度判断与霍夫变换结合的方式筛选多径 TOA，对初始估计进行修正。蒙特卡洛模拟实验和真实房间实验表明，该方法能够在存在噪声及混响的室内环境中重构房间二维几何地图，且通过可信度判断与霍夫变换结合的方式提升了算法的鲁棒性。

原始的霍夫变换需要大量的候选点集支撑，但大量选取多径 TOA 也加大了计算量。下一步将对霍夫变换算法进行改进，加强其在少量数据情况下的抗噪能力；或是选择并改进筛选可信低阶 TOA 的方法，使其更加高效。

## 参 考 文 献

- [1] KOLODZIEJ K W, HJELM J. Local positioning systems: LBS applications and services[M]//Local Positioning System, LBS Applications and Services, 2006: 101-158.
- [2] 赵锐, 钟榜, 朱祖礼, 等. 室内定位技术及应用综述[J]. 电子科技, 2014, 27(3): 154.  
ZHAO Rui, ZHONG Bang, ZHU Zuli, et al. Overview of indoor positioning technology and application[J]. Electronic Science & Technology, 2014, 27(3): 154.
- [3] FUENTES-PACHECO J, RUIZ-ASCENCIO J, RENDÓN-MANCHA J M. Visual simultaneous localization and mapping: a survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2015, 43(1): 55-81.
- [4] 刘建华, 刘华平, 杨建国, 等. 测距式传感器同时定位与地图创建综述[J]. 智能系统学报, 2015, 10(5): 655-662.

- LIU Jianhua, LIU Huaping, YANG Jianguo, et al. Overview of simultaneous location and map creation of ranging sensors[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2015, **10**(5): 655-662.
- [5] 吴硕贤, 赵越喆. 室内声学与环境声学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003.
- WU Shuoxian, ZHAO Yuezhe. Room acoustics and environmental acoustics[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2003.
- [6] MOORE A H, BROOKES M, NAYLOR P A. Room geometry estimation from a single channel acoustic impulse response[C]// *Signal Processing Conference*. IEEE, 2014: 1-5.
- [7] MARKOVICA D, ANTONACCI F, SARTI A, et al. Estimation of room dimensions from a single impulse response[C]// *Applications of Signal Processing To Audio and Acoustics*, IEEE, 2014: 1-4.
- [8] 石婷. 麦克风阵列声源定位算法研究综述[J]. *科技视界*, 2016(27): 274-274.
- SHI Ting. Review of research on microphone array sound source localization algorithm[J]. *Science and Technology Vision*, 2016(27): 274-274.
- [9] DOKMANIĆ I, DAUDET L, VETTERLI M. From acoustic room reconstruction to slam[C]// *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2016: 6345-6349.
- [10] REMAGGI L, JACKSON P J B, COLEMAN P, et al. Room boundary estimation from acoustic room impulse responses[C]// *Sensor Signal Processing for Defence*, IEEE, 2014: 1-5.
- [11] ANTONACCI F, FILOS J, THOMAS M R P, et al. Inference of Room Geometry From Acoustic Impulse Responses[J]. *IEEE Transactions on Audio Speech & Language Processing*, 2012, **20**(10): 2683-2695.
- [12] NASERI H, KOIVUNEN V. Cooperative simultaneous localization and mapping by exploiting multipath propagation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, **65**(1): 200-211.
- [13] MENSING C, PLASS S. Positioning algorithms for cellular networks using TDOA[C]// *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings*. IEEE, 2006: IV-IV.
- [14] FILOS J, CANCLINI A, THOMAS M R P, et al. Robust inference of room geometry from acoustic measurements using the hough transform[C]// *Signal Processing Conference*, 2011, European. IEEE, 2010: 161-165.
- [15] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 基于 TDOA 定位的阵列布放结构研究[J]. *导航定位与授时*, 2017, **4**(6): 29-36.
- JIN Bonan, XU Xiaosu, ZHANG Tao, et al. Research on array placement structure based on TDOA positioning[J]. *Navigation and Timing*, 2017, **4**(6): 29-36.
- [16] 覃虹菱. 基于声学脉冲响应的麦克风阵列室内几何重构关键技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2019.
- [17] DUDA R O, HART P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. *Cacm*, 1972, **15**(1): 11-15.
- [18] ALLEN J B, BERKLEY D A. Image method for efficiently simulating small - room acoustics[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2016, **65**(S1): 943-950.
- [19] FARINA A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique[J]. *Proc. Conv. Audio Eng. Soc. Paris*, 2000, **24**: 18-22.