

Radio Tomographic Imaging Based on Improved Ellipse Weight Model

Hengkuan Xu¹, Wei Ke^{1,2}, Kunliang Yu¹

¹Jiangsu Key Lab on Opto-Electronic Technology, Nanjing Jiangsu

²Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Jiangsu

Email: 976476554@qq.com

Received: May 17th, 2018; accepted: Jun. 4th, 2018; published: Jun. 11th, 2018

Abstract

Radio Tomographic Imaging (RTI) is one of the main methods of Device Free Localization (DFL), so it has wide application prospects. This paper proposes a double-layer ellipse weight model based on Fresnel diffraction theory to improve the imaging quality of RTI and to overcome the deficiency of the existing elliptical weight model. The indoor and outdoor experimental results verify that the positioning performance of the proposed method is better than that of the existing RTI methods.

Keywords

Device-Free Localization, Radio Tomographic Imaging, Fresnel Diffraction Theory

基于改进椭圆权重模型的无线层析定位方法

许桁宽¹, 柯 炜^{1,2}, 于坤良¹

¹江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京

²江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京

Email: 976476554@qq.com

收稿日期: 2018年5月17日; 录用日期: 2018年6月4日; 发布日期: 2018年6月11日

摘 要

射频层析成像(Radio Tomographic Imaging, RTI)技术作为免携带设备定位(Device-free localization, DFL)的主要方式之一, 具有广泛的应用前景。本文针对现有RTI技术中椭圆权重模型的不足, 基于菲涅耳衍射理论提出了新的权重模型: 双层椭圆阴影权重模型, 它提高了RTI成像质量, 也提升了免携带设

备定位的定位精度。室内外实验结果表明, 该方法的成像质量和定位精度都要优于现有RTI方法。

关键词

免携带设备定位, 射频层析成像, 菲涅耳衍射理论

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

与传统定位方式要求定位目标必须携带与定位系统相匹配的定位设备(如 GPS 接收机、手机等)不同, 免携带设备定位(Device-free localization, DFL)无需定位目标携带任何定位装置, 也无需定位目标主动参与定位过程[1] [2], 因此 DFL 在人员搜救、非法入侵检测、特殊情况下的老人照料等传统定位方法无法实现的定位领域可以发挥重要作用。相比于现有的基于摄像头, 超宽带雷达, 红外和超声波等技术的免携带设备定位[3] [4] [5], 基于无线传感器网络的 DFL 技术因其成本低、通用性好并能够穿透墙壁、烟雾进行定位等优点成为当前 DFL 领域的一个研究热点。同时, 随着研究的深入, 相关技术已经推广到了人体姿态识别和心率测量等[6]。因此, 免携带设备定位技术及其衍生技术有着广阔的应用前景。

目前基于无线传感器网络的 DFL 方法大致可以分成 3 类, 即指纹定位方法[7] [8]、射频层析成像方法(Radio Tomographic Imaging, RTI) [9] [10]和几何定位方法[11] [12]等。其中 RTI 方法最早由犹他大学的 Neal Patwari [9] [10]等人提出, 通过在目标区域的边缘布置若干收发节点, 根据每个节点接收到的信号强度(Received signal strength, RSS)的变化来反映目标的影响, 并借鉴医学 CT 思想用反演图像的方式呈现出定位结果, 该方法由于其直观性强而受到较多关注。RTI 方法的核心是通过一个阴影权重模型, 构建 RSS 值变化与目标位置之间的关系, 然后通过正则化方法反演出位置图像。因此, 阴影权重模型成为决定 RTI 成像质量的关键因素之一, 因而也成为 RTI 研究的重点之一。从最早 Zhang 等人提出的矩形模型开始到广泛应用的椭圆模型[9] [10], 都只单纯考虑了链路长度对于权重的影响, 忽略了被定位目标与链路之间的距离关系。更为重要的是, 这些模型认为椭圆内所有格点的权重相同, 也不符合实际情况。为此, Hamilton 等人提出了一种以包含目标的最小椭圆面积的倒数为权重值的 IAEM 模型[13], 一定程度上克服了原椭圆模型的缺点。最近菲涅耳衍射理论被越来越多地考虑, 马鞍模型(SaS) [14]和衍射模型[15] [16]中均将菲涅耳衍射理论作为建模依据。但这些模型给出的不再是单纯的权值, 而是具体的 RSS 变化量, 已无法直接用到现有 RTI 方法中。

因此本文针对上述问题, 依据菲涅耳衍射理论提出了一个新的阴影权重模型: 双层椭圆阴影权重模型。以此达到更精确描述 RSS 值变化与目标位置之间关系的目, 并将新模型运用到 RTI 中, 改善成像质量, 提高定位精度。

2. RTI 基本原理

2.1. RTI 原理简介

假设定位区域周围布置了 L 个无线节点, 一共可以组成 $M = (L - 1)L/2$ 条无线链路, 并且将定位区域划分为 N 个网格, 可以形象地将这些网格称为“像素”。相对于无目标时空区域, 当待测目标进入定

位区域时，会引起 RSS 值的变化：

$$y = Wx + n \quad (1)$$

其中 y 表示目标进入定位区域前后 RSS 测量的差值， W 是阴影权重矩阵， x 是像素点上的信号衰落值， n 为噪声。为了从测量数据中估计一个图像，通常需要在最小平方误差的情况下寻找最优解：

$$x_{LS} = \arg \min_x \|Wx - y\|_2^2 \quad (2)$$

可以通过设置等于零的梯度来得到最小二乘解，结果是：

$$x_{LS} = (W^T W)^{-1} W^T y \quad (3)$$

在吉洪诺夫正则化中，将能量项加到最小二乘公式中，从而得到目标函数：

$$f(x) = \frac{1}{2} \|Wx - y\|^2 + \alpha \|Qx\|^2 \quad (4)$$

其中 Q 是吉洪诺夫矩阵，它使一个解具有一定的期望性质。

由于图像是二维的，所以正则化应该包括在垂直方向和水平方向上的分量。矩阵 D_X 是水平方向的差分算子， D_Y 是垂直方向的差分算子。正则化函数可以写成：

$$f(x) = \frac{1}{2} \|Wx - y\|^2 + \alpha (\|D_X x\|^2 + \|D_Y x\|^2) \quad (5)$$

在求解过程中设置导数和等于零可得到结果：

$$x = (W^T W + \alpha (D_X^T D_X + D_Y^T D_Y))^{-1} W^T y \quad (6)$$

2.2. 现有椭圆模型的不足

现有的椭圆阴影权重模型是以一对收发节点为焦点构成一个椭圆，椭圆外部的像素点权值设为 0，椭圆内部的像素点权值依据下式计算得到：

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{d}} & \text{if } d_{ij}(1) + d_{ij}(2) < d_i + \lambda \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中 d_i 表示第 i 条链路长度， $d_{ij}(1)$ ， $d_{ij}(2)$ 分别为像素点到两节点的距离， λ 为椭圆短轴长度， i 为链路序号， j 为像素点序号。

该权值的计算依据在于：链路越长，当该条链路与其它链路相交时的权重就应该越低。一般来说，目标遮挡一条短链路对 RSS 值产生的影响要大于遮挡一条长链路产生的影响[9]，因此有一定的合理性。但是，许多实验表明仅仅依靠链路的长短来确定权值是不够的。由于人距离收发节点的远近不同会导致对链路不同的影响，因此对于同一条链路，将椭圆内所有像素设为同样的权值是不符合实际情况的，也会导致定位效果的变差。

3. 双层椭圆阴影权重模型

菲涅耳衍射理论认为空间任意一点处的辐射场，是包围波源的任意封闭面上产生的所有次波在该点所产生场叠加结果[17][18]。通过菲涅耳半波带法可以将链路周围的区域划分为若干个菲涅耳区，这些菲涅耳区是以收发节点为焦点的旋转椭球。若某点到收发节点的距离之和与链路长度相差 n 个半波长，则该点为第 n 菲涅耳区的边缘，而该椭球的短半轴长称为最大第 n 菲涅耳半径，如图 1 所示。

通过菲涅耳半波带法可以论证：某点的场主要取决于第一菲涅耳半波带，90%的能量都在第一菲涅耳区内传播[17][18]。因此，可以认为当目标遮挡住链路的第一菲涅耳区时，视为有效遮挡。而当目标处在第一菲涅耳区外部时，可以认为对链路测量值的影响很小，此时权值和椭圆模型一样均设为 0。下面重点分析像素在第一菲涅耳区内的权值设定。

首先，对于同一条链路，在距离收发节点距离不同的位置对于 RSS 值影响是不同的。当人遮挡的面积占第一菲涅耳区某截面的百分比越大时，对 RSS 值的影响也越大。故下文讨论对于同一条链路，人在不同位置遮挡住的面积占第一菲涅耳区在该处的截面面积的百分比的变化情况，如图 2。

根据上图可以计算人遮挡住的面积占第一菲涅耳区在该处的截面面积的百分比 P ：

$$P = \frac{\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} * h + 4\pi r_1^2 * \frac{\arcsin \frac{h}{2r_1}}{360}}{\pi r_1^2} \tag{8}$$

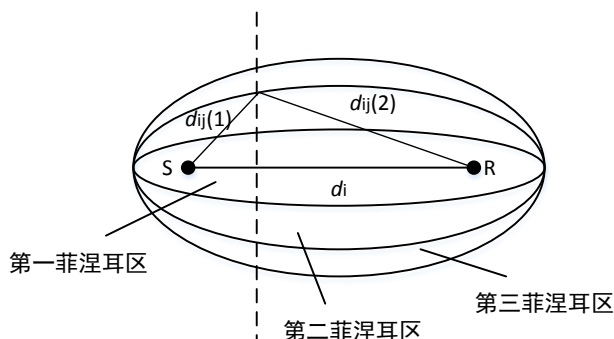


Figure 1. Fresnel zone schematic. S, R is the transceiver node
图 1. 菲涅耳区示意图。S, R 表示收发节点

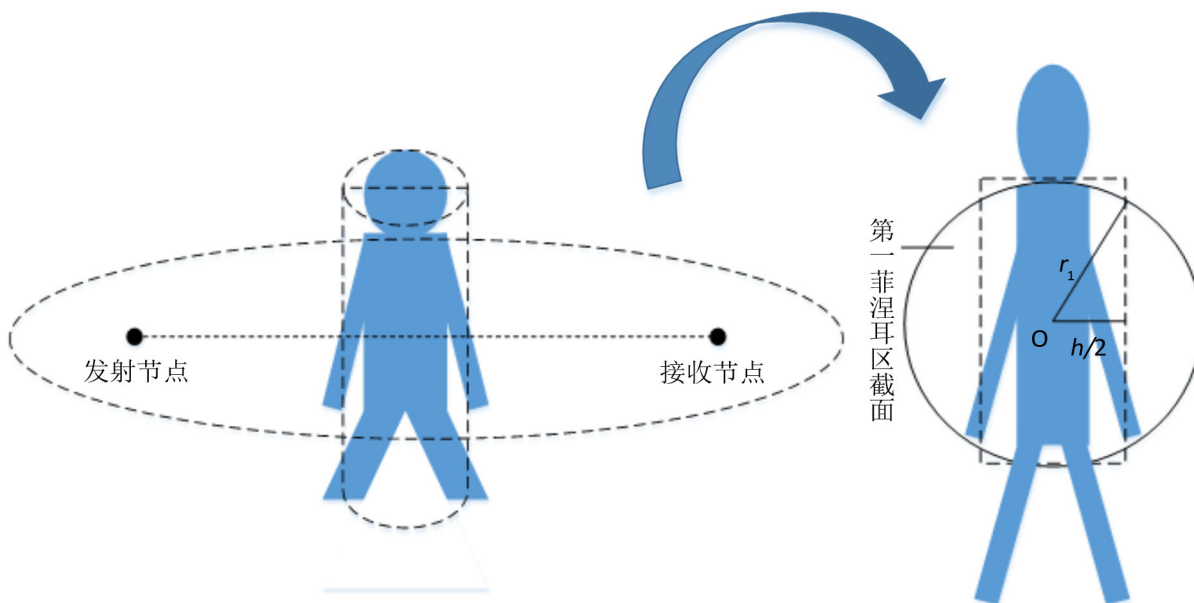


Figure 2. Think of the human body as a cylinder. The ellipse is the first Fresnel region. The body width of a person is set to h. In the section diagram, o is the center. r_1 is the first Fresnel radius

图 2. 将人近似视为圆柱体站在链路中，椭圆为第一菲涅耳区，人的体宽设为 h，截面图中 o 为圆心， r_1 为第一菲涅耳半径

以下文使用的实验场景为例，链路最重大约是 2 m，最重大约是 72 m，与此对应的最大第一菲涅耳半径为 0.21 m 到 0.556 m。若把人的体宽取为 0.3 m，则 P 关于 r1 的函数图像如图 3，可见在此范围内，函数是单调下降的。

对于一条链路，收发节点处对应的第一菲涅耳半径最小，逐渐扩大到链路中点对应的最大菲涅耳半径，根据上图可知，随着第一菲涅耳半径的扩大，P 越来越小，因此对 RRS 值的影响也越小，故可将像素点权值的大小设为该点对应的第一菲涅耳半径的平方成反比。同时，考虑到对于同一条链路某位置的一个横截面，当人偏离链路时，遮挡的面积占截面百分比比人恰好在链路上时更小，对信号传播的影响也越小。因此，结合菲涅耳半波带法不难发现，越远离链路的位置传输的能量越小，对信号传播的影响也越小。综合这两点：在同一截面，越靠近链路的位置对 RSS 值影响越大，应赋予更高的权值。由此引入传播主区的概念，对第一菲涅耳区靠近链路和远离链路的区域的权值进行划分。传播主区是指第一菲涅耳区中面积占三分之一的空间区域，又称最小菲涅耳区，它对电波传播起主要作用。因此通过赋予传播主区区域内的像素更大的权值来对第一菲涅耳区内的像素进一步划分，按照第一菲涅耳区域内权重的赋值方法，得到了新的权重模型：

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{r_0^2 * d_i}} & \text{if } D \leq r_0 \\ \frac{1}{\sqrt{r_1^2 * d_i}} & \text{if } r_0 < D \leq r_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中， r_0 为第 i 条链路对应的最小菲涅耳半径， r_1 为第 i 条链路对应的第一菲涅耳半径， D 为该像素点到链路的投影距离。菲涅耳半径的计算可参考文献[18]中的已有公式。

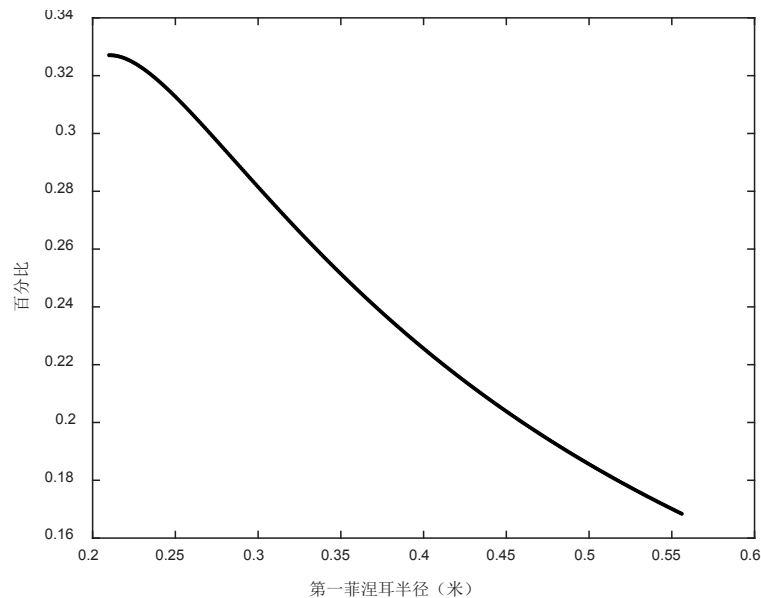


Figure 3. The graph is a function image of P, and the x-coordinate is the first Fresnel radius, from 0.21 m to 0.556 m

图 3. 图为百分比 P 的函数图像，横坐标为第一菲涅耳半径，从 0.21 m 到 0.556 m

4. 实验结果

为全面衡量本文方法的有效性, 本文同时用室外和室内的实验数据对不同模型进行了对比研究。其中, 室外数据选取犹他大学实验组的实测数据(数据来源: <http://span.ece.utah.edu/rti-data-set>), 在 6.4*6.4 (米) 区域的网络周围均匀布置 28 个节点测量得到的, 通信频率为 2.4 GHz。室内数据是在南京师范大学行健楼大厅测得, 使用 TI 公司的 CC2530 模块组建定位网络, 通信频率也为 2.4 GHz, 实验范围为 5*5 m 的区域, 在周围均匀布置 20 个收发节点。图 4 为实验环境图片。

4.1. 定位效果图的比较

首先通过 RTI 成像图直观地感受三种模型的定位效果。图 5 的(a) (c) (e)分别是室外环境中椭圆模型、马鞍模型、双层椭圆模型在(0.91, 2.74)位置的定位图(单位: 米), (b) (d) (f)是室内环境中椭圆模型、马鞍模型、双层椭圆模型在(1,2)位置的定位图(单位: 米)。

由上图比较可以发现, 在室外定位情况下, 双层椭圆模型相较于椭圆模型, 定位目标被框定在更小的范围内, 相较于马鞍模型, 背景较为清晰。在室内定位情况下, 由于墙壁的反射等原因, 背景相较于室外更为复杂, 但双层椭圆模型依然能成功实现定位, 且效果良好。

4.2. 室外定位数据结果比较

为了更全面反映定位性能, 本小节给出不同模型经过多次实验后的统计结果。通过选取若干个位置作为样本, 每个位置选取 50 组测量数据, 每一组数据都用 RTI 成像, 把亮度值最高的像素点所在位置作为定位目标位置, 再计算与真实位置之间的距离作为误差, 对于同一样本的 50 组数据的误差取平均作为样本的误差。

室外数据随机选取了 14 组样本, 在定位过程中, 椭圆模型和马鞍模型都存在因为伪目标亮度高于目标而出现定位失败的情况, 表 1 中的数据是在除去这些定位误差较大的位置之后计算所得, 数据都是用样本的误差进行计算的。由此看出双层椭圆模型在直接取最亮点定位时效果较好, 优于马鞍模型, 且相比椭圆模型精度提高明显。这是因为利用本文提出的模型进行反演, 所得成像结果的背景较为简单, 伪目标较少, 而椭圆模型和马鞍模型的背景较为复杂, 可能会有一些伪目标的亮度值过高, 导致定位失败。

4.3. 室内定位数据结果比较

室内实验中随机选取了 13 个样本, 用三种不同的模型进行定位。表 2 展示了三种模型的定位误差。

从这些结果可以看出, 在室内复杂环境下, 本文提出的双层椭圆模型依然可以成功实现定位, 并且相较于其他模型, 在定位精度上具有较明显的优势。

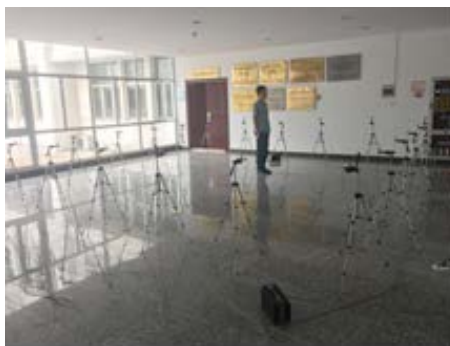


Figure 4. Single measurement chart
图 4. 单人测量图

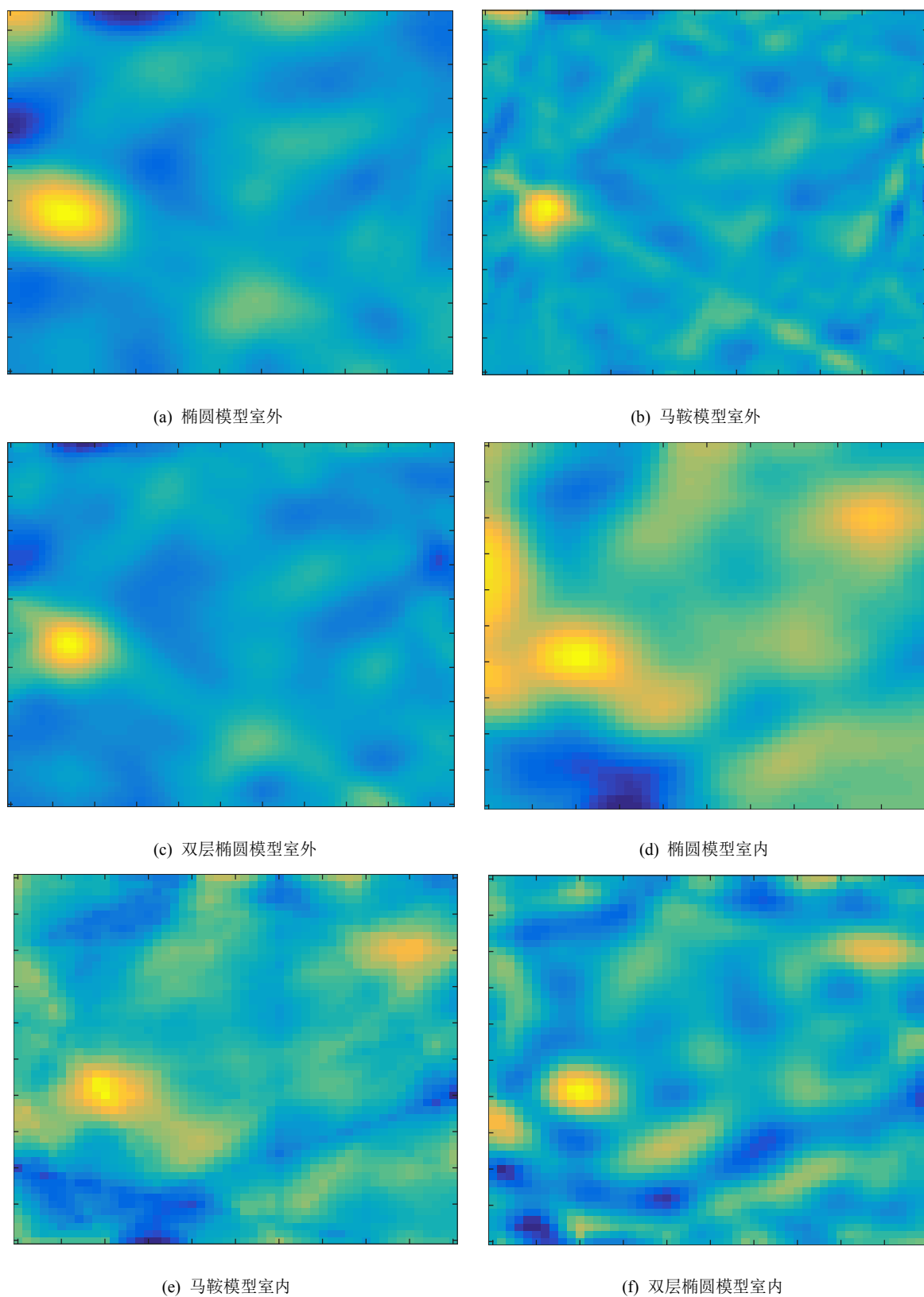


Figure 5. Comparison of three models in indoor and outdoor environment

图 5. 三种模型在室内室外环境的定位图比较

Table 1. Comparison of three model positioning errors of outdoor data
表 1. 室外数据三种模型定位误差比较

	均值	中值	最大值	标准差
椭圆	0.23 m	0.24 m	0.35 m	0.09 m
马鞍	0.21 m	0.16 m	0.43 m	0.09 m
双层椭圆	0.19 m	0.17 m	0.43 m	0.08 m

Table 2. Comparison of three model positioning errors in indoor data
表 2. 室内数据三种模型定位误差比较

	均值	中值	最大值	标准差
椭圆	1.81 m	1.12 m	4.09 m	1.49 m
马鞍	1.20 m	0.57 m	4.36 m	1.42 m
双层椭圆	0.90 m	0.28 m	3.04 m	1.05 m

5. 结论

本文针对现有 RTI 方法中权重模型的不足, 提出了基于菲涅耳衍射理论的双层椭圆权重模型。通过对第一菲涅耳区和第零菲涅耳区内的像素点赋予不同权重, 以及对距离收发节点远近不同的像素点赋予不同的权重, 来提高 RTI 的成像质量和定位性能。室内外实验结果表明, 该方法的成像质量和定位精度都要优于现有 RTI 方法。

基金项目

高等学校博士学科点专项科研基金(20133207120007); 国家自然科学基金(61405094); 江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放基金(KDXS1408); 江苏省大学生创新创业训练计划(201610319082X)。

参考文献

- [1] Youssef, M., Mah, M. and Agrawala, A. (2007) Challenges: Device-Free Passive Localization for Wireless Environments. *Proceedings of the 13th annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Montréal, 9-14 September 2007, 222-229. <https://doi.org/10.1145/1287853.1287880>
- [2] Wilson, J. and Patwari, N. (2010) RF Sensor Networks for Device-Free Localization: Measurements, Models, and Algorithms. *Proceedings of the IEEE*, **98**, 1961-1973. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2052010>
- [3] Tomioka, Y., Takara, A. and Kitazawa, H. (2012) Generation of an Optimum Patrol Course for Mobile Surveillance Camera. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, **22**, 216-224. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2011.2159449>
- [4] McCracken, M., Bocca, M. and Patwari, N. (2013) Joint Ultra-Wideband and Signal Strength-Based Through-Building Tracking for Tactical Operations. *Proceedings of the IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking*, New Orleans, 24-27 June 2013, 309-317. <https://doi.org/10.1109/SAHCN.2013.6645000>
- [5] Kim, S.J. and Kim, B.K. (2011) Accurate Hybrid Global Self-Localization Algorithm for Indoor Mobile Robots with Two-Dimensional Isotropic Ultrasonic Receivers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **60**, 3391-3404. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2126890>
- [6] Savazzi, S., Sigg, S., Nicoli, M., Rampa, V., Kianoush, S. and Spagnolini, U. (2016) Device-Free Radio Vision for Assisted Living. *IEEE Signal Processing Magazine*, **33**, 45-58. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2496324>
- [7] Sabek, I., Youssef, M. and Vasilakos, A.V. (2015) ACE: An Accurate and Efficient Multi-Entity Device-Free WLAN Localization System. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **14**, 261-273. <https://doi.org/10.1109/TMC.2014.2320265>
- [8] Xiao, J., Wu, K., Yi, Y., Wang, L. and Ni, L.M. (2013) Pilot: Passive Device-Free Indoor Localization Using Channel

- State Information. 2013 *IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems*, Philadelphia, 8-11 July 2013, 236-245. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2013.49>
- [9] Wilson, J. and Patwari, N. (2010) Radio Tomographic Imaging with Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **9**, 621-632. <https://doi.org/10.1109/TMC.2009.174>
- [10] Wilson, J. and Patwari, N. (2011) See-Through Walls: Motion Tracking Using Variance-Based Radio Tomography Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **10**, 612-621. <https://doi.org/10.1109/TMC.2010.175>
- [11] Zhang, D., Liu, Y., Guo, X., *et al.* (2013) Rass: A Real-Time, Accurate, and Scalable System for Tracking Transceiver-Free Objects. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, **24**, 996-1008. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.134>
- [12] Talampas, M.C.R. and Low, K.S. (2016) A Geometric Filter Algorithm for Robust Device-Free Localization in Wireless Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **12**, 1670-1678. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2433211>
- [13] Hamilton, B.R., Ma, X., Baxley, R.J., *et al.* (2014) Propagation Modeling for Radio Frequency Tomography in Wireless Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Process*, **8**, 55-65. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2013.2287471>
- [14] Wang, J., Gao, Q., Pan, M., *et al.* (2016) Toward Accurate Device-Free Wireless Localization With a Saddle Surface Model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **65**, 6665-6677. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2476495>
- [15] 刘凯, 夏然, 柴柯. 结合菲涅尔理论的免携带设备定位研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(2): 297-302.
- [16] Wang, Z., Liu, H., Xu, S., *et al.* (2015) A Diffraction Measurement Model and Particle Filter Tracking Method for RSS-Based DFL. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **33**, 2391-2403. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2430517>
- [17] Rappaport, T.S. (1999) *Wireless Communication: Principles and Practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [18] Athanasiadou, G.E. (2007) Incorporating the Fresnel Zone Theory in Ray Tracing for Propagation Modelling of Fixed Wireless Access Channels. *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens, 3-7 September 2007, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2007.4394753>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3983, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjwc@hanspub.org