

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.006

引用格式: 陈国平, 王丽. TRM-FMM 室内无线定位技术[J]. 电讯技术, 2014, 54(10): 1344-1348. [CHEN Guo-ping, WANG Li. TRM-FMM Indoor Wireless Positioning Technology[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(10): 1344-1348.]

TRM-FMM 室内无线定位技术*

陈国平^{1,2,**}, 王丽¹

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院 电工理论与新技术实验室, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 在室内多径环境下信号视距传播易受障碍物影响, 导致现有的一些室内定位技术对室内环境分布的估计较为困难。时间反转镜(TRM)室内无线定位技术可以有效地减少室内多径效应对信号的影响以及复杂环境造成的延时。但是, 若没有信号传输信道的信息, 常规 TRM 技术的定位精度就会大打折扣。针对该问题, 给出了一种基于快速行进算法(FMM)的 TRM 室内无线定位方法。该方法首先利用 FMM 和同时代数重建算法(SART)迭代更新计算室内环境分布, 然后使用估计结果进行 TRM 定位。仿真结果显示, 对于小型规模的目标物体定位误差约为 1.84 cm, 在未知室内信道信息的仿真环境下, 该方法比常规 TRM 技术的定位精度提高约 32.90 倍。

关键词: 室内无线定位; 快速行进算法; 时间反转镜; 同时代数重建算法

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2014)10-1344-05

TRM-FMM Indoor Wireless Positioning Technology

CHEN Guo-ping^{1,2}, WANG Li¹

(1. Electrical Theory and New Technology Lab, School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. School of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Signal will be affected when it propagates in indoor multipath environment, which causes it is difficult for some existing indoor positioning technologies to estimate the indoor environment distribution. Time Reversal Mirror(TRM) indoor wireless localization technology can effectively reduce the indoor multipath effect and the signal delay caused by a complex environment. However, the positioning accuracy of the conventional TRM technology will greatly decrease without signal propagation channel information. To solve this problem, the TRM indoor wireless positioning method based on Fast Marching Method(FMM) is presented. This method firstly uses the FMM and Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique(SART) to update the indoor environment distribution repeatedly, and then locates the target by TRM based on estimated model. The simulation results show that the positioning error can reach 1.84 cm for small target. Positioning accuracy can improve 32.90 times compared with that of conventional TRM when the indoor environment information is unknown.

Key words: indoor wireless positioning; fast marching method; time reversal mirror; simultaneous algebraic reconstruction technique

* 收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2014-07-22 Received date: 2014-05-09; Revised date: 2014-07-22

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ100520); 重庆市自然科学基金计划项目(CSTC, 2010BB2419); 重庆邮电大学科研基金项目(A2009-23)

Foundation Item: The Chongqing Municipal Education Commission for Scientific and Technological Research Project(KJ100520); The Natural Science Foundation of Chongqing(No. 61271190); The Scientific and Technological Research Projects of Chongqing University of Posts and Telecommunications(142102210506)

** 通讯作者: chengp@cqupt.edu.cn **Corresponding author:** chengp@cqupt.edu.cn

1 引言

室内无线定位在一些特定场合的实用性和必要性已经日趋显著,其应用前景非常广阔。毫无疑问,室内无线定位技术将会为人类未来的生活带来极大的便捷。然而,室内无线定位的环境不同于室外,室内环境存在严重的多径干扰以及非视距等造成的大量室内物体表面对信号的反射、折射^[1]等,致使 GPS 等室外定位系统在室内环境下有局限性。

为了精确定位室内目标,目前已研究出许多室内定位方法,如利用信号的接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)、到达角度(Angle of Arrival, AOA)、到达时间(Time Of Arrival, TOA)、到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)等^[2],这些方法需要测量信号强度、时间、角度等,且信道数据不稳定,误差在米数量级。以上方法精度不高的主要原因在于未知的室内信道,如果我们能够预测出室内环境模型,那么定位精度将会大大提高。对于室内环境,具体的信道参数分布反映的是房间环境的分布情况。在电磁学中,房间的环境分布与物体介电常数分布是一致的。为了估计室内环境分布,就需要研究一种新的估算室内介电常数分布的方法。

因此,我们给出了一种基于 TRM-FMM 的室内定位方法。首先用快速行进算法(FMM)结合同时代数重建算法(SART)来计算“黑盒”中的介电常数分布,也就是估计室内信道模型,并且可以直接有效地模拟室内物体介电常数分布情况,然后,利用该信道模型结合 TRM 技术来定位室内目标物体。仿真结果表明,该方法可以有效提高室内目标的定位精度。

2 FMM 算法用于更新室内模型

FMM 是由 Sethian 提出的 Eikonal 方程^[3]的一种数值解析方法,在路径规划等方面应用广泛。本文用来估计室内信道模型,计算室内信道参数分布的关键在于 Eikonal equation 数学方程的求解:

$$|\nabla T|^2 = \frac{1}{v^2} \quad (1)$$

其中, T 是从发射源到接收点的渡越时间,即信号从发射源到达接收点所用的时间(Time of Flight, TOF), v 是接收端的速度场的值。对于上式,我们在二维室内环境中的应用可以表示为

$$(\partial T/\partial x)^2 + (\partial T/\partial y)^2 = 1/v^2(x, y) \quad (2)$$

由于室内环境参数分布可由空间物体的介电常数 ε 和磁通率 μ 表示,那么,电磁信号传播速度场 v 和物体的 ε, μ 之间的关系如下:

$$v^2 = \frac{1}{\varepsilon\mu} \quad (3)$$

其中, ε, μ 是 $\varepsilon = \varepsilon(x, y)$ 和 $\mu = \mu(x, y)$ 的空间函数。显然,当我们知道了由 ε, μ 决定的电磁速度场 v 的分布情况时,就可以得到室内环境分布模型。

FMM 算法通过解方程(1)可以获得每个点的渡越时间。具体的过程如图 1 所示:图 1(a)中所示为开始行进点及其周围邻近点,首先将源毗邻的 4 个点作为窄带。然后,通过计算窄带中的每一个点的 TOF,选择在这条窄带具有最小时间增量的点(如图 1(b)所示),将该点从窄带中移除。按照该过程循环下去,直到计算出所有接收端的 TOF 结束遍历过程,最后根据计算出的 TOF,逆向搜索到起始点(如图 1(c)所示)。依次下去,我们得到在所有的相应传播路径的 TOF。这里,我们选取收发节点间幅值最大的信号所用的时间作为 TOF,这样就保证了 TOF 能够被快速有效地提取。

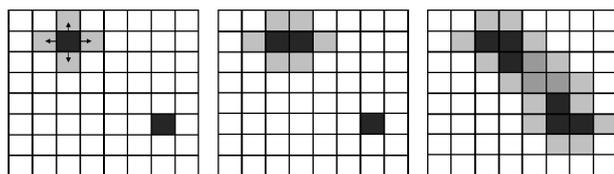


图 1 窄带快速行进方法及步骤

Fig. 1 Narrowband fast marching method and procedure

根据以上步骤得到传播路径以后,我们来更新速度场分布,其具体是通过 SART 方法来不断更新 TOF。SART 是一种代数迭代方法^[4],此方法通过以下方程来更新速度场 v :

$$v^k(x, y) = \frac{dx}{\frac{dx}{v^{k-1}(x, y)} + \frac{\Delta TOF_i}{L}} \quad (4)$$

其中, k 是当前迭代次数(最大 k 为设置的源的个数), dx 是一个网格的大小, L 是从发射源到第 i 个接收天线的射线路径的长度。 ΔTOF_i 的表示如下:

$$\Delta TOF_i = TOF_{col} - TOF_{sim} \quad (5)$$

式中, TOF_{sim} 是 FMM 计算的假设速度场的第 i 个接收天线的 TOF, TOF_{col} 是在接收天线 i 处测量得到的 TOF 数据。SART 更新完速度场分布后,依据公式(3)得到室内介电常数分布,即可得到室内信道

模型。

3 TRM 基本原理

TRM 聚焦过程主要是利用以下格林函数的收发信道互易性原理^[5]：

$$G(x_r, x_s, t) = G(x_s, x_r, t) \quad (6)$$

式中, x_r 和 x_s 分别代表收和发的位置, t 是传输时间。若传播信道保持不变, 根据多路径补偿原理, 经过时间反转后的信号就会沿着原路径传播, 而且会在源位置实现时间和空间上的聚焦^[6]。

TRM 在减小多径效应的影响特别是在无线室内定位中具有独特的优势。具体原理如下: 假设信号 $x(t)$ 从源 $c_0(m_0, n_0)$ 处发出, 经过多径传输信道 $h(\tau, m_0, n_0)$ 到达接收点 R , 则阵列接收到的信号为

$$y(t) = x(t) * h(\tau, m_0, n_0) + n(t) \quad (7)$$

其中, $n(t)$ 为噪声, 仅与时间有关; * 表示卷积运算。那么, 我们将 $y(t)$ 时间反转后再次通过模拟信道 $h(\tau, m_i, n_i)$, 得到的输出信号为

$$\begin{aligned} z(t, m_i, n_i) &= y(-t) * h(\tau, m_i, n_i) = \\ &= x(-t) * h(-\tau, m_0, n_0) * h(\tau, m_i, n_i) + \\ &= n(-t) * h(\tau, m_i, n_i) = \\ &= x(-t) * R(\varepsilon, \rho, N) + n(-t) * h(\tau, m_i, n_i) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $R(\varepsilon, \rho, N)$ 表示 $h(\tau, m_i, n_i)$ 与 $h(\tau, m_0, n_0)$ 的相关函数, $\rho = m_0 - n_i, N = n_0 - n_i$ 。 $z(t, m_i, n_i)$ 中的信号分量经过两次卷积, 即两次通过信道。只有当 $m_i = m_0, n_i = n_0, R(\varepsilon, \rho, N)$ 取最大值, 为信道中各信号的同相叠加。这表明, TRM 聚焦过程是各信号的同相叠加, 而噪声则是非相干叠加, 噪声得以削弱, 从而有效减小了多径效应的影响。

4 仿真结果与分析

在该部分中, 我们做了大量的仿真实例证明了 TRM-FMM 技术的优良性能。在这些仿真中, 我们主要分析对比了常规 TRM 技术和基于 TRM-FMM 的室内定位方法的不同定位结果, 且验证了 TRM-FMM 方法的可靠性。

4.1 室内环境分布估计

如图 2 所示, 仿真模型是一个 4.8 m × 4.8 m 的房间, 室内环境简化为 3 个圆形物体, 代表室内不同介电常数的障碍物, 其具体参数设置可见表 1, 其中

ε 代表相对介电常数, ν 代表相对磁导率。

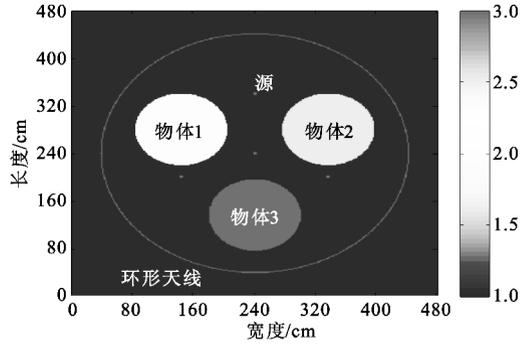


图 2 室内环境物体分布
Fig. 2 Objects distribution under indoor environment

表 1 室内物体参数设置
Table 1 Parameter setting of indoor objects

物体	坐标	大小 √cm	$\varepsilon / (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	$\nu / (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$
物体 1	(152, 288)	60	2.0	1.0
物体 2	(324, 288)	60	2.5	1.0
物体 3	(240, 140)	60	3.0	1.0

图 3 为一个源发射信号时 FMM 估计的 TOF 仿真结果。可以看出, 实际环境中的 TOF 由于受到障碍物的影响要比仿真的 TOF 大, 从其差值可以反映出室内传播信道信息。而没有障碍物影响的真空环境, 其 TOF 明显小很多, 传播比较快。利用多源更新的 TOF 信息, 经过 FMM 估计我们得到室内环境分布模型如图 4 所示, 3 个物体的位置、形状、介电常数值等都很清晰。物体 1 的介电常数峰值为 2.01, 物体 2 的为 2.49, 物体 3 的为 2.98, 图 4 估计的室内模型总体来说非常接近图 2 中室内物体分布的实际情况。为了进一步验证估计的模型可以有效提高室内定位的精度, 在 4.2 节中我们利用此模型结合 TRM 进行定位。

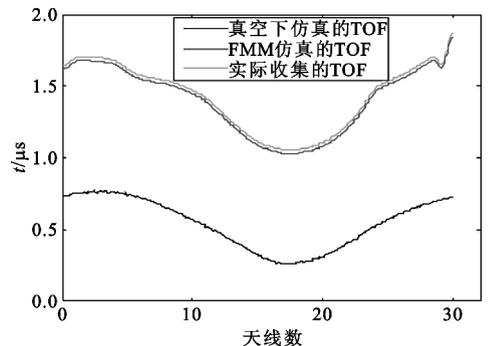


图 3 TOF 对比
Fig. 3 Comparison of TOF

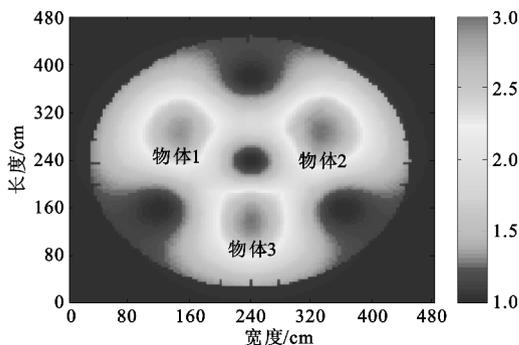


图 4 FMM 估计的室内信道模型

Fig. 4 Indoor channel model by FMM method

4.2 常规 TRM 方法和 TRM-FMM 方法定位结果

我们在房间中心位置(240,240)处设置一个主动信号源作为定位目标,将常规的 TRM 方法与 TRM-FMM 方法(基于图 4 预测的室内模型)相对比,得到定位结果如图 5 和图 6 所示。

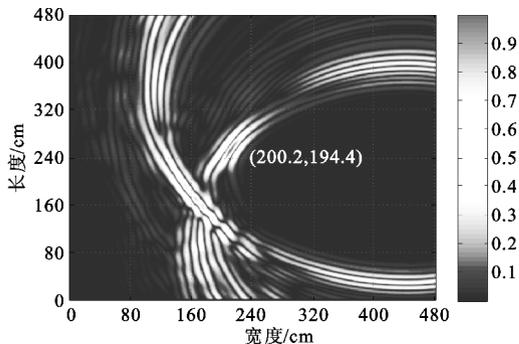


图 5 常规 TRM 方法未知室内环境定位结果

Fig. 5 Positioning result by general TRM method under unknown environment

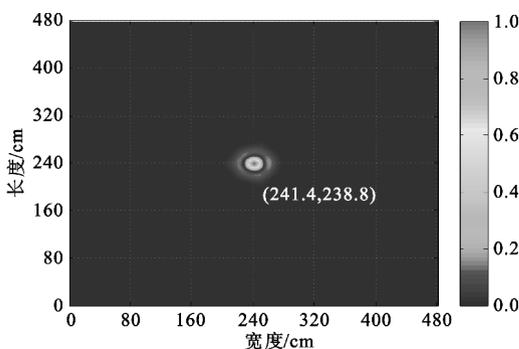


图 6 TRM-FMM 定位结果(基于图 4 估计的环境)

Fig. 6 Positioning result by TRM-FMM

(based on estimated environment in Fig. 4)

图 5 在未知室内环境信息下利用常规 TRM 方法定位目标物体,其反向 TRM 过程是凭借经验假设的均匀环境。从图中可以明显看出,定位后的能量是分散的,而在定位点(200.2, 194.4)处的能量较弱。图 6 利用 TRM 方法结合图 4 估计的室内环境分布信息来定位目标物体,可以看出,聚焦效果很

好,定位位置为(214.4, 238.8),该点处的能量是很强的。常规的 TRM 技术定位误差约为 60.53 cm,而 TRM-FMM 方法的定位误差约为 1.84 cm,定位的精度约提高了 32.90 倍。

图 7 为两种方法的重塑波形对比,很明显,TRM-FMM 方法的信号波形在源位置处分布比较集中,且波形又高又细。相比之下,仅用 TRM 方法的重塑波形很分散,且信号强度较弱。

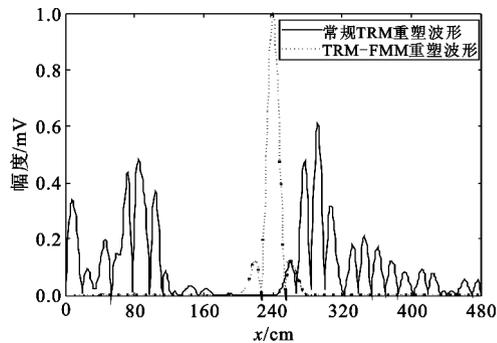


图 7 两种方法重塑波形对比

Fig. 7 Comparison of remodeling waveform by two methods

为了清晰对比两种方法的不同结果,我们给出表 2 的数据分析,其中 PSF (Point Spread Function) 代表点扩散函数。

表 2 两种方法定位结果对比

Table 2 Comparison of positioning results by two methods

方法	定位位置 /cm	重塑波形 /dB	PSF
TRM	(200.2, 194.4)	12.23	10.18
TRM-FMM	(241.4, 238.8)	1.48	6.24

4.3 改变目标位置后 TRM-FMM 方法定位结果

在 4.2 节中,目标位于房间的中心位置,由 TRM 的聚焦原理我们知道,当目标位于区域的中心位置时其定位结果要比目标位于其他位置的结果要准确。所以,为了进一步验证提出的 TRM-FMM 方法的通用性和可行性,我们随机定位位于(320, 160)处的目标,定位结果如图 8 所示。

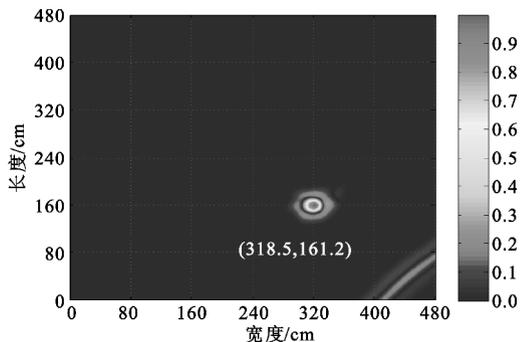


图 8 改变目标位置后 TRM-FMM 定位

Fig. 8 Positioning result after changing target location

定位位置为(318.5, 161.2), 误差为1.92 cm, 相比于目标位于中心位置时的定位精度下降了0.08 cm, 这个精度的下降是合乎常理, 因为这是 TRM 聚焦不可避免的客观因素。不过, 利用 TRM-FMM 方法使目标控制在1.92 cm 的误差范围内, 比常规 TRM 方法六十几厘米的误差要准确得多。

图9为10次 TRM-FMM 仿真后定位结果统计。可见, 仿真位置 and 实际位置非常吻合, 误差均在2 cm 以内, 相当小。因此, 无论目标处于房间的中心位置还是其他任何位置, TRM-FMM 方法都能准确定位其位置, 大大提高了定位精度, 进一步验证了该方法的通用性和可靠性。

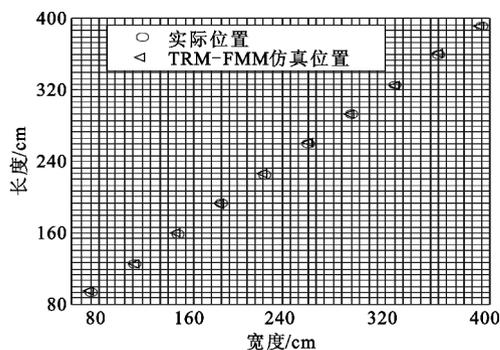


图9 多次仿真结果

Fig.9 Many times simulation results

以上仿真设置的环形天线数量为30, 当天线数量增加时 FMM 估计的室内模型会更接近于真实环境, 那么 TRM-FMM 定位结果精度会更高。当天线数量减少时, FMM 同样具有有效性, 只是定位精度会略微降低。本文旨在阐述 FMM 方法估计室内环境的有效性, 进一步的实现也是我们下一步的研究工作。

5 结束语

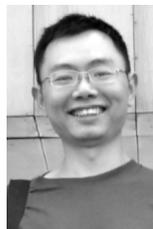
本文给出了一种新的无线室内定位方法——TRM-FMM 室内定位技术。由于常规的 TRM 方法无法获得室内信道信息, 这种方法理论和仿真分析的精度只有60 cm左右。所以, 我们提出利用 FMM 算法迭代计算电磁介电常数分布来估计室内环境模型, 同时结合 TRM 方法定位目标物体。大量的仿真验证表明, 该算法具有较高的可靠性以及稳定的定位精度, 其定位精度能稳定在2 cm以内, 比仅用

TRM 方法提高了30多倍。该方法具有可靠性高、效率高以及复杂度低的特点, 为室内定位提供了一种新的研究思路。如何在真实环境中具体实现室内小物体的精确定位是我们未来的工作重点, 该方法在室内定位应用中将会有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Mautz R. Indoor positioning technologies [D]. Habil: ETH Zürich, 2012.
- [2] 徐盈. 室内定位系统设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
XU Ying. Design of indoor positioning system [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [3] Sharifi M, Kelkar M. Novel permeability upscaling method using Fast Marching Method [J]. Fuel, 2014, 117: 568-578.
- [4] Lin Y, Samei E. An efficient polyenergetic SART (pSART) reconstruction algorithm for quantitative myocardial CT perfusion [J]. Medical Physics, 2014, 41(2): 021911.
- [5] 许世宏, 梁伟洋. 干扰环境下的信号调制识别 [J]. 电讯技术, 2014, 54(6): 726-729.
XU Shi-hong, LIANG Wei-yang. Signal modulation recognition in interference environment [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(6): 726-729. (in Chinese)
- [6] 朱晓章, 赵志钦, 张胤, 等. 基于时间反转的室内射频定位方法评估 [J]. 电子科技大学学报, 2013(6): 869-874.
ZHU Xiao-zhang, ZHAO Zhi-qin, ZHANG Yin, et al. Evaluation of indoor radio location method based on time reversal [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013(6): 869-874. (in Chinese)

作者简介:



陈国平 (1976—), 男, 重庆合川人, 博士, 副教授, 主要从事蜂窝网无线定位系统、电磁/声学被动源定位与成像、高功率微波源等领域的研究, 已发表学术论文 20 余篇;

CHEN Guo-ping was born in Hechuan, Chongqing, in 1976. He is now an associate professor with the Ph. D. degree. His research concerns

cellular wireless positioning system, electromagnetic/acoustic passive source location and imaging, high power microwave source. He has published more than 20 papers.

Email: chengp@cqupt.edu.cn

王丽 (1989—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事室内无线定位技术研究。

WANG Li was born in Linyi, Shandong Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns indoor wireless positioning technology.