

基于无线通信基站的室内三维定位问题

郭成成, 周奇, 海港

摘要: 本文针对基于无线通信基站的室内三维定位问题, 分析了无线电信号在 LOS/NLOS 环境下的传播特点。根据基站与终端距离测量值的空间约束条件, 提出了从 TOA 测量数据中计算对应环境的非视距显著因子的方法, 进而确定对应的非视距环境参数。构造 TDOA (Time difference of arrival) 观测数据, 根据信号传播时延的指数模型抑制 NLOS 测距误差。在进行终端位置的最小二乘解算时, 通过奇异值分解 (SVD) 法解决法方程矩阵病态的问题, 从而构建出可用于不同环境的无线基站定位算法。进一步建立了迭代定权最小二乘算法, 解决了终端移动过程的定位问题, 通过与终端真实位置的比较, 验证了本文算法的有效性。

关键字: 无线室内定位 NLOS 误差抑制 TDOA 时延指数模型 空间几何约束 非视距显著因子

Indoor Three Dimensional Positioning Problem Based on Wireless Communication Base Station

Guo Chengcheng, Zhou Qi, Hai Gang

Abstract: Based on the indoor three dimensional positioning problem by using wireless communication base stations, propagation characteristics of the radio signals in the LOS/NLOS environment are analyzed in this article. According to the space constraint of distance measurement value, the relationship between the measured data and the NLOS significant factors of the corresponding environment is established, then corresponding NLOS environmental parameter is determined. TDOA (Time difference of arrival) observation data is constructed and the NLOS ranging error is suppressed according to the exponential model of signal propagation delay. In order to solve the pathological problem of the normal equation, the method of singular value decomposition (SVD) is used to solve the problem of the indoor positioning in different environment. We propose iterative least-square algorithm to solve the localization problem of terminal in moving process. The validity of the proposed algorithm in the article is verified by comparing with the real position of the terminals.

Keywords: Wireless Indoor Location NLOS Error Suppression TDOA Time-Delay Exponential Model Spatial Geometric Constraint NLOS significance factor

1 引言

随着无线通信网络和移动互联网的蓬勃发展, 提供基于地理位置信息的服务已经成为最具市场前景和发展潜力的业务之一。从传统的 GPS 导航, 到大众点评、微信等基于地理位置的消费信息服务和社交软件, 实现其功能的基础就是要通过手机、导航仪等终端设备收发信号, 来获得距离、角度等测量信息, 并利用定位算法将这些测量信息转换成坐标信息。

基于无线移动通信网络的定位是以获取用户手持终端 (包括手机或者平板等设备) 的位置为目标。而达成这一目标的手段是通过测量无线电信号的强度、传播时间、到达角等物理指标, 并将其转化成终端与基站之间的距离、角度等信息, 最终利用定位算法将距离、角度等信息转化成终端的坐标信息。本文基于终端到基站的原始时间测量数据, 分析不同情形下的终端定位问题, 取得了较好的定位效果。

作者简介: 郭成成, 男, 1994 年出生, 内蒙古乌兰察布人, 同济大学测绘与地理信息学院测绘科学与技术专业 2015 级硕士研究生, 主要研究方向为摄影测量与遥感。

2 原理与方法

无线电信号在大气中从 A 点向 B 点传播时，如果传播过程中存在一个没有遮挡的直达路径，那么，这种传播环境被称为视距传播环境(LOS)。如果在传播过程中，由于建筑物或树木的遮挡、反射、折射等物理现象，使得从 A 点到 B 点之间存在多条无线电信号的传播路径，这种环境被称为非视距传播环境(Non-line of sight, 简称 NLOS)。需要注意的是，在 NLOS 传播环境中，仍然可能存在着无线电波的直达路径，只不过相比于 LOS 传播环境，在 NLOS 环境下因为遮挡、反射和吸收等损耗，信号强度会在传播过程中变得较弱，如图 1 所示：

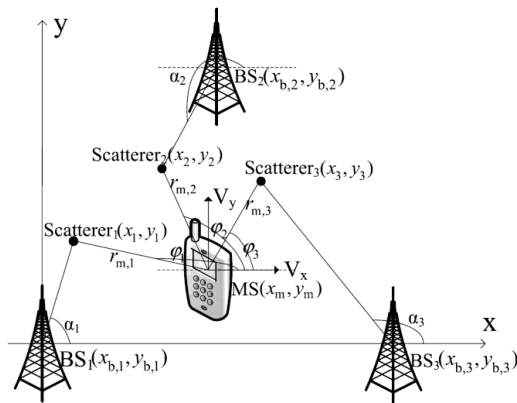


图 1 无线信号传播示意图

当无线电信号在基站与用户手持终端之间互相传播时，就可以计算基站与手持终端之间的距离，一种常用的测量方式是记录无线电信号从手持终端发出，直到基站接收到信号为止的无线电信号传播时间，将时间乘以无线电信号的传播速度，即得到基站与终端之间沿某条路径的距离。其中，信号在基站与终端之间的传播时间，被称为无线电信号的到达时间(Time of Arrival, 简称 TOA),如图 2 所示。

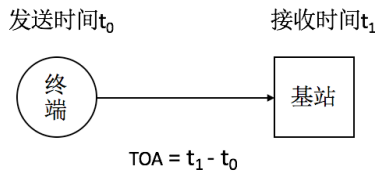


图 2 TOA 示意图

2.1 TDOA 观测值构造

通过对 TOA 观测数据进行差分，构造 TDOA (Time difference of arrival) 观测值，减弱了终端基站间时间测量误差的影响，有利于提高终端定位精度，TDOA 测量模型如图 3 所示：

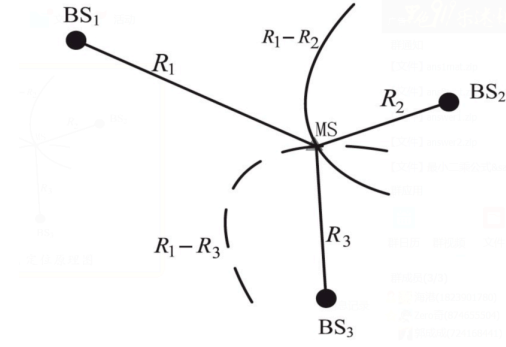


图3 TDOA 定位原理示意图

基站到终端的距离测量值满足式(1):

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = m^2, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中 (x, y, z) 为待求解的终端坐标, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个基站的三维坐标, m 为对应的 TOA 距离观测值。对于 $i=2,3,\dots$ 将式 1 减去 $i=1$ 的情况推导得:

$$2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1^2 - m_2^2 + k_2 - k_1 \\ m_1^2 - m_3^2 + k_3 - k_1 \\ \dots \\ m_1^2 - m_n^2 + k_n - k_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里:

$$k_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

以上可以表示为:

$$2Ax = b \quad (4)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} m_1^2 - m_2^2 + k_2 - k_1 \\ m_1^2 - m_3^2 + k_3 - k_1 \\ \dots \\ m_1^2 - m_n^2 + k_n - k_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则终端位置的最优无偏估值为:

$$x = \frac{1}{2} (A^T A)^{-1} A^T b \quad (6)$$

2.2 NLOS 环境下信号传播时延的指数模型

在实际环境特别是城市环境中,终端和基站之间信号的传播路径往往会被建筑物等散射体阻挡,信号只能以反射、折射等非视距(NLOS)方式进行传播,此时,从基站出发的信号路径距离必然比视距情况下的路径距离长,若仍用上述方法进行测量,得到的结果必然不准确,因此,必须考虑 NLOS 时延对 TOA 观测数据的影响。

在 NLOS 信道中,基站到终端的实际时延与测量时延有如下关系

$$\tau_{i,1} = \tau_{i,1}^0 + n_{i,1} + \tau_{NLOS,i,1} \quad (7)$$

其中, $\tau_{i,1}^0$ 是在 LOS 环境下的测量时延, $n_{i,1}$ 为系统的测量误差, $\tau_{NLOS,i,1}$ 为由 NLOS 引起的附加时延。NLOS 环境下常用的附加时延分布概率密度函数有指数、均匀和 delta 等分布。其中指数模型均方根误差最小, 故本文选用指数分布来对 NLOS 引起的附加时延进行建模。NLOS 传播引起附加时延的均值为:

$$E(t_{i,N}) = T_1 d_i^\epsilon e^{\frac{m_z + \sigma_z^2}{2}} \quad (8)$$

其中 d 以 km 为单位, 均方差以奈培为单位。显然, NLOS 传播引起附加时延的均值与移动终端与基站间的真实距离、信号传播环境有关。不同环境下的参数由 Greenstein 模型得出, 如表 1 所示:

表 1 典型环境的参数

| 无线环境 | $T_1(\mu s)$ | ϵ | $\sigma_z(dB)$ |
|------|--------------|------------|----------------|
| 繁华市区 | 1.0 | 0.5 | 4 |
| 一般市区 | 0.4 | 0.5 | 4 |
| 郊区 | 0.3 | 0.5 | 4 |
| 远郊 | 0.1 | 0.5 | 4 |

通过将对应的基站到终端的距离观测值减去 NLOS 指数模型均值来去除距离测量值中的 NLOS 影响, 得到抑制 NLOS 影响后的基站到终端距离值, 如式 9 所示。

$$d_i' = d_i - T_1 d_i^\epsilon e^{\frac{m_z + \sigma_z^2}{2}} \quad (9)$$

2.3 空间几何约束算法

根据终端与基站的空间几何约束关系对原始观测数据进行分析, 从观测数据中计算对应环境的非视距显著因子, 进而对观测数据进行纠正。如图 4 所示, 假设终端点 MS-i 到基站 BS-1, BS-2 的真实距离值为 L_2, L_3 , 基站 BS-1, BS-2 的距离为 L_1 。

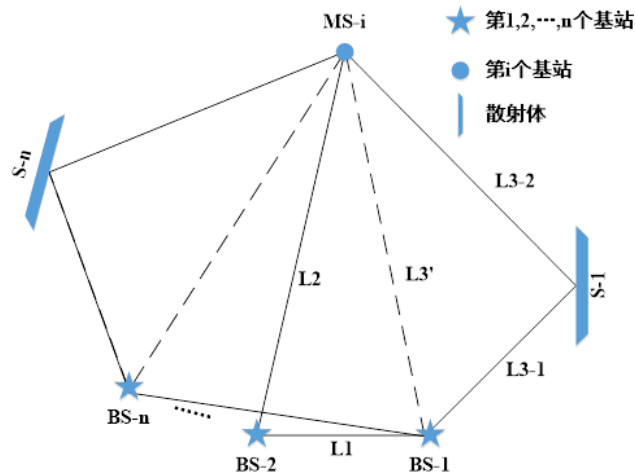


图 4 终端测量值的空间几何约束示意图

若 BS-1 到 MS-i 的距离观测值受 NLOS 影响, 其距离观测值 L_3' 会显著增大, 信号经过散射体 S-1 后折射到达 MS-i 路径变为 $(L3_1 + L3_2)$ 。对于 BS-1, BS-2, MS_i 三点构成的三角形, 其边长应满足三角约束关系, 所以当观测值

$$L3_1 + L3_2 > L_1 + L_2 \quad (10)$$

时，则可以确定 BS-1 到 MS-i 的距离观测值受到 NLOS 影响，统计满足上式的 TOA 观测值数量，即为当前环境的非视距显著因子。

| 空间几何约束算法 |
|---|
| 输入：基站位置数据集，TOA 测量值数据集，基站个数 N，终端个数 M |
| 过程： |
| 1. 计算各终端空间约束三角形个数 C_N^2 |
| 2. 设置循环变量 i、j 遍历终端及对应的约束三角形 |
| 3. 计算第 j 个三角形中两基站距离 d_{0j} |
| 4. 分别计算第 i 个终端到（4）中两基站距离 d_{1i}, d_{2i} |
| 5. 判断 d_{0j}, d_{1i}, d_{2i} 是否满足三角形约束，不满足则：输出变量=输出变量+1 |
| 输出：非视距显著程度因子 |

3 实验与结果

3.1 终端定位实验

根据部分样本数据的真值定位结果，利用终端定位算法确定其对应的最佳环境参数，进而分析观测数据最佳环境参数 T 与其对应的非视距显著因子的相关关系，结果如图 5 所示：

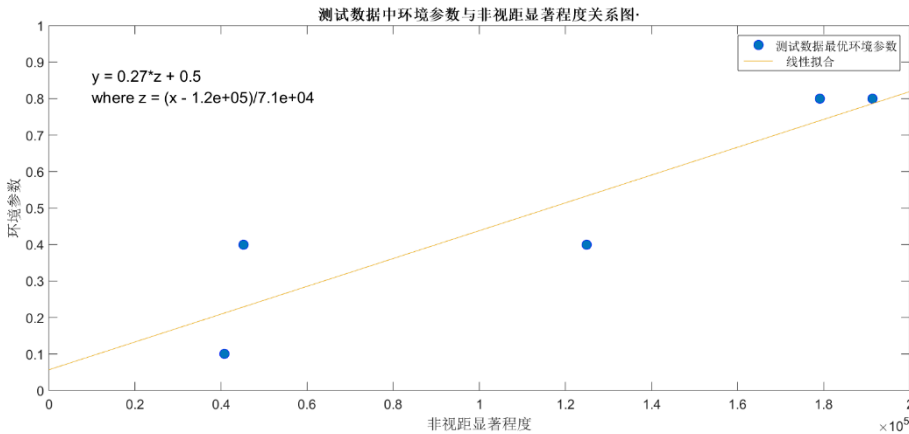


图 5 样本数据的环境参数与非视距显著程度

二者近似线性相关，利用一元线性回归得出观测数据对应的最佳环境参数 T 与其对应的非视距显著因子 x 的关系方程：

$$T = 0.2723x + 0.5 \quad (11)$$

线性模型拟合效果较好。根据原始观测数据确定非视距显著因子，进而确定 NLOS 误差抑制的指数模型参数，进而进行基于最小二乘技术的终端定位，其解算流程如图 6 所示：

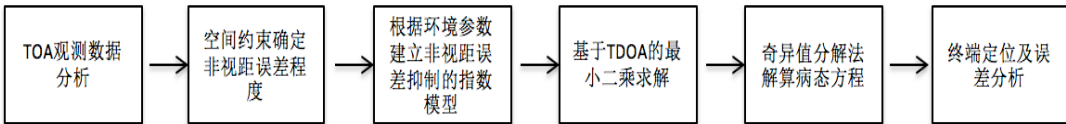


图 6 基于基站的室内定位流程图

基于上述流程，计算终端坐标定位结果如图 7 所示：

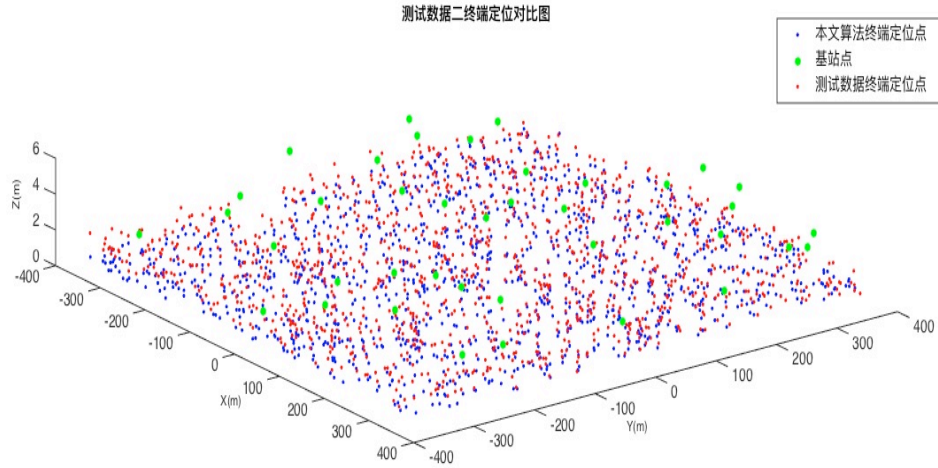


图 7 终端估计位置与真实位置分布图

对定位结果进行精度分析，计算得位置中误差 4m，精度较高，验证了本文方法的有效性。本文模型对测试数据的终端定位结果与真值的偏差直方图分布如图 8 所示（单位：米）。

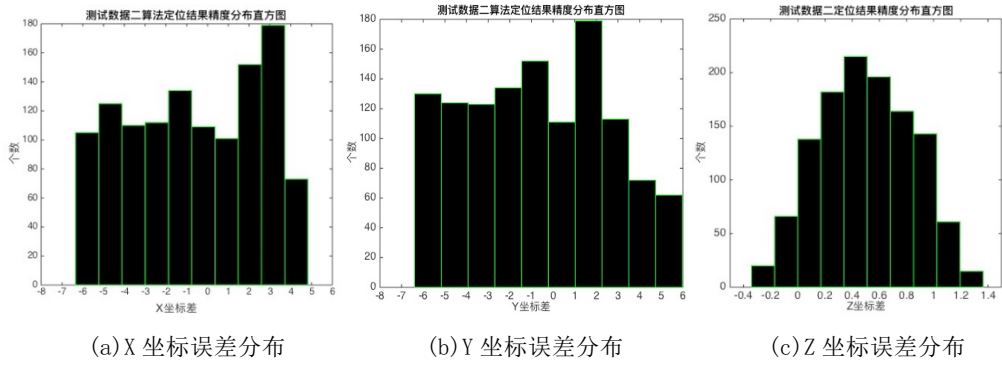


图 8 定位结果误差分布直方图

3.2 移动轨迹确定

利用带权迭代最小二乘算法计算移动终端位置，首先对所有基站数据以等权的方式进行一次最小二乘计算，然后根据计算出的终端位置估计值到各个基站的远近，给每个测量值定权，权的大小和距离成反比，然后进行最小二乘迭代计算。利用上述算法确定的不同 TOA 观测数据文件对应的终端移动轨迹如图 9 所示。

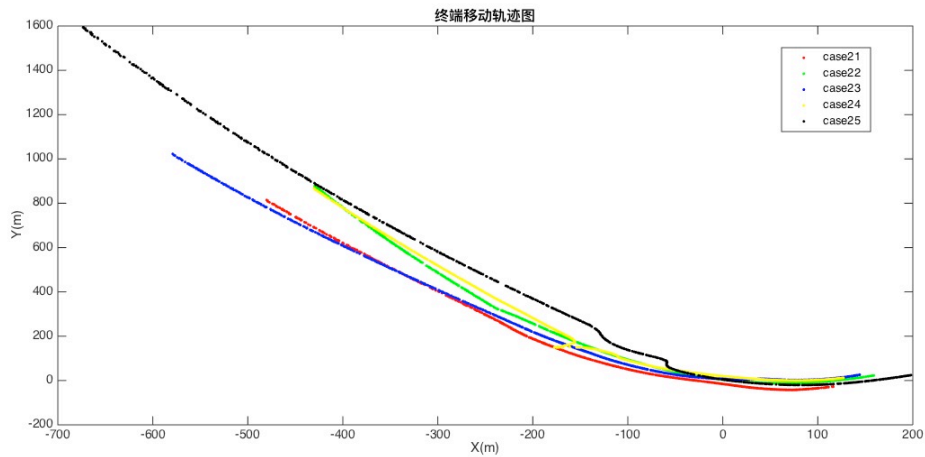


图 9 终端移动轨迹

5 个文件中 case022 点位精度最高，中误差只有 3.3m，其所处的环境也是 5 个文件中受 NLOS 影响最小的，5 个文件平均点位中误差 13.3m，不同文件对应的终端的点位中误差如表 2 所示。

表 2 不同环境点位中误差

| | case021 | case022 | case023 | case024 | case025 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 点位中误差 | 15.2775 | 3.0387 | 8.3724 | 7.963 | 31.852 |

4 总结与展望

本文针对基于无线通信基站的室内三维定位问题，分析了 LOS/NLOS 环境的 TOA 测量数据特点，通过时延的对数指数模型抑制 NLOS 测距误差，构建出可用于不同环境的无线通信基站室内定位算法。通过构建 TDOA 测量数据，削减了钟差的影响；建立空间几何约束，解决了基于 TOA 测量数据的终端采样环境参数确定的问题；通过病态方程奇异值截断解法，解决了最小二乘法方程系数矩阵奇异的问题，提高了解的稳定性与精度。对于不同的数据和场景均能构建较为契合的定位算法，但是没有一个方法能够同时解决所有问题，个别情况下，本文算法的定位精度仍然不高，室内无线三维定位算法的普适性和正确率仍是未来研究的重点。

参考文献

[1] 吴晨烨.NLOS环境中基于TDOA和TOA的无线定位研究[D].南京邮电大学,2014.

[2] 程相波,冯光焰,孙雪峰等.NLOS环境下几种TOA定位算法的性能比较[J].无线电工程,2010,40(4):35-37.

[3] 田孝华,廖桂生.一种有效减小非视距传播影响的TOA定位方法[J].电子学报,2003,31(9):1429-1432.

[4] 陈健,卓永宁.一种基于TOA的定位优化算法[J].无线电通信技术,2010,36(4):52-54.

[5] 邓平.蜂窝网络移动台定位技术研究[D].西南交通大学,2002.

[6] N. J. Thomas, D. G. Cruickshank and D. I. Laurenson, "A robust location estimator architecture with biased Kalman filtering of TOA data for wireless systems",*Proc. IEEE Int. Symp. Spread Spectrum Tech. Appl.*, pp. 296-300.

[7] M. McGuire and K. Plataniotis, "Dynamic model-based filtering for mobile terminal location estimation", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 52, no. 4, pp. 1012-1031, Jul. 2003.

[8] K. Yu, J. P. Montillet, A. Rabbachin, P. Cheong and I. Oppermann, "UWB location and tracking for wireless embedded networks", *Signal Process.*, vol. 86, no. 9, pp. 2153-2171, Sep. 2006.