

Indoor Passive Location Algorithm Based on Differences of Signal Attenuations

LIU Zuoxue¹, KONG Deqiang^{2,3}, TIAN Zhanli⁴, KONG Dejing²

1. Department of Information Equipment, Institute of Command and Technology of Equipment, Beijing, China, 101416

2. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing, China, 101416

3. Unit 91404 of the Chinese PLA, Qinhuangdao, China, 066001

4. Fu Tong Electron, Qinhuangdao, China, 066000

e-mail: kdq669@126.com, lzx626@sohu.com, liyun669@126.com, and dk217@126.com

Abstract: Based introducing the basic principle of indoor passive location algorithm, the paper researched the TS-LS algorithm and its application in the passive position. Through the simulation of TS-LS algorithm, we found that the relative location of observation station and the source position have great impact on performance. After analysis the relationship between the positioning errors and the source position, this paper analysis the influence of the order of observation stations and the number of observation stations on the positioning performance, and propose a practical algorithm for passive location of the interior.

Key Words: interior passive location; differences of signal attenuations; TS-LS, GDOP

基于信号强度差的室内无源定位算法研究

刘作学¹, 孔德强^{2,3}, 田战丽⁴, 孔德敬²

1. 装备指挥技术学院 信息装备系, 北京, 中国, 101416

2. 装备指挥技术学院 研究生管理大队, 北京, 中国, 101416

3. 中国人民解放军 91404 部队, 秦皇岛, 中国, 066001

4. 秦皇岛富通电子, 秦皇岛, 中国, 066000

e-mail: kdq669@126.com, lzx626@sohu.com, liyun669@126.com, dk217@126.com

【摘要】介绍了信号强度差定位的基本原理, 研究了 TS-LS 算法并将其应用于基于信号强度差的无源定位中。通过 TS-LS 算法仿真, 发现观测站与信号源的相对位置对定位性能有很大的影响。在分析定位误差与几何位置关系的基础上, 就观测站计算顺序及观测站数目对定位性能的影响进行了分析, 提出了一种实用的室内无源定位算法。

【关键词】室内无源定位; 信号强度差; TS-LS; GDOP

随着社会竞争的深入, 国家安全机关、军队及商业机构都愈来愈重视信息情报的防护问题, 反无线窃听是其中的重要组成部分。快速、准确地实现无线窃听器的定位, 是反无线窃听技术当中的重要组成部分, 但是, 目前室内无源定位方面的研究严重滞后。文献^[1]对室内无源定位方法的选择进行了分析, 认为只有基于接收信号场强差的定位方法和测向交叉定位法适用于室内无源定位。文献^[2]对室内多站测向交叉定位算法进行了研究, 得出了有益的结论, 但是测向定位只适用于接收信号包络服从莱斯分布的情况之下。为了找出适用性更强的室内无源定位算法, 本文就基于信号强度差的无源定位算法进行了深入研究。

1 基于接收信号强度差定位

信号衰减模型^{[1],[3],[4]}可以归结为式 (1) 的通用形式:

$$A = k_1 + k_2 \log f - k_3 \log h_T - k_4 \log h_R + 10n \log d + X \quad (1)$$

其中, A 为路径损耗 (dB), k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为传播模型参数, f 为载波频率, h_T 、 h_R 分别为发射天线高度和接收天线高度, n 为路径损耗因子, X(dB) 为阴影衰落, 服从零均值的高斯随机分布。

假设两个观测站 (或同一观测站的不同位置) 的接收天线都能够收到同一信号源发射的信号, 两接收天线高度相同且两个传输路径处于同一环境, 则两传

输路径有相同的传播模型参数{ k_1, k_2, k_3, k_4 }，设两个接收天线到信号源的路径损耗分别为 A_1, A_2 ，则两路径接收信号损耗差值为：

$$A_1 - A_2 = 10n \log(d_1/d_2) + (X_1 - X_2) \quad (2)$$

其中， d_1, d_2 为信号源到接收天线 1, 2 的距离， X_1, X_2 代表了两条路径的阴影衰落。若 X_1 和 X_2 的方差为 σ^2 ，它们之间的相关系数为 ρ ，则 $X' = X_1 - X_2$ 服从方差为 $2\sigma^2(1-\rho)$ 的零均值高斯随机序列。用 k 表示 d_1, d_2 之间的比值，由 (2) 式可得：

$$k_{12} = d_1 / d_2 = 10^{(A_1 - A_2)/(10n) + X'} \quad (3)$$

其中，误差项 $X' = X_1 - X_2$ ，服从方差为 $2\sigma^2(1-\rho)/(10n)^2$ 的零均值高斯随机序列。

假设信号源位置坐标为 (x, y) ，接收天线的两个位置坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ，则由 (3) 式得：

$$\left(x - \frac{k_{12}^2 x_2 - x_1}{k_{12}^2 - 1}\right)^2 + \left(y - \frac{k_{12}^2 y_2 - y_1}{k_{12}^2 - 1}\right)^2 = \frac{k_{12}^2}{(k_{12}^2 - 1)^2} D_{12}^2 \quad (4)$$

其中 D_{12} 表示两定位点之间的距离。

因此，只要能够测试得到信号源到达接收天线的信号强度，每两个位置接收天线之间的路径损耗差就可以确定一个定位圆方程，求解所有定位方程构成的方程组，就可以得到移动台的位置 (x, y) 。

基于信号强度差的无源定位方法通过采用信号功率差来消除传播预测误差，使得在传播模型中代表环境的参数被抵消掉，从而抑制了由于传播模型误差导致的定位精度的下降。由文献[5]知，信号强度定位的定位误差主要来源除了传播衰减预测模型的预测误差，还有多径衰落和阴影衰落引起的误差。由于多径衰落误差可以通过对多次接收信号功率取均值来消除，所以，基于信号强度差定位的定位精度只受阴影衰落的影响。因此，在下面的定位性能仿真中，本文只考虑阴影衰落对定位精度的影响。

2 TS-LS 定位算法

根据前面的分析可知，每两个位置的接收天线之间的路径损耗差可以确定一个定位圆方程，此时如何求解信号源坐标就转化为圆定位的问题。最简单的方法就是对圆的交点坐标求均值（当两个圆不相交时，将两圆之间最短线段的中点作为交点），但是该方法精度较低。Caffery 在文献[6]中提出一种几何方法，由两个定位圆得到一条定位直线，求出任意一组互不相关定位直线的交点坐标，各交点的质心就是信号源位置，或者是基于定位直线方程，利用 LS 算法直接求出信

号源的最佳坐标。文献[7]中介绍一种性能更好的基于泰勒级数的最小二乘算法 (TS-LS)，本文将 TS-LS 算法应用到基于接收信号强度差的无源定位中。

假设在一定区域内有 $N+1$ 个测量站点，将任意两个站点测得的信号强度做差，可以得到 N 个独立的定位圆，当定位圆的个数 $N>3$ 时，形成 $N-1$ 条相互独立的定位直线，第 i 条直线的表达式为^[7]：

$$(x_i - x_s)x_s + (y_i - y_s)y_s = (D_i^2 - D_s^2 + x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2)/2 \quad (5)$$

其中， $i=2,3,\dots,N$ ， (x_i, y_i) 为第 i 个定位圆的圆心坐标， (x_s, y_s) 为目标位置坐标， D_i 为信号源与各定位圆圆心的距离。令：

$$\cos a_i = (x_i - x_s) / \left((x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 \right)^{1/2},$$

$$\sin a_i = (y_i - y_s) / \left((x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 \right)^{1/2},$$

$$d_i = \frac{(D_i^2 - D_s^2 + x_i^2 + y_i^2 - x_s^2 - y_s^2)/2}{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2},$$

则式 (5) 可表示为：

$$x_s \cos a_i + y_s \sin a_i = d_i \quad (6)$$

由 (6) 式可知，第 i 条定位直线可以用 d_i, a_i 两个参数表示，并且有： $d_i = d_{oi} + e_{di}$ ， $a_i = a_{oi} + e_{ai}$ ， $i=1,2,\dots,n$ ，其中 d_{oi}, a_{oi} 为真实值， e_{di}, e_{ai} 为测量误差。信号源的坐标点需满足：

$$x_s \cos(a_i - e_{ai}) + y_s \sin(a_i - e_{ai}) = d_i - e_{di} \quad (7)$$

令 $x_s = x_v + \delta_x$ ， $y_s = y_v + \delta_y$ ，将定位直线在 x_v, y_v 处一级泰勒展开，经近似处理得：

$$(\cos a_i) d_x + (\sin a_i) d_y$$

$$d_i - (x_v \cos a_i + y_v \sin a_i) - e_{di} \quad (8)$$

$$+ \left((d_y + y_v) \cos a_i - (x_v + d_x) \sin a_i \right) e_{ai}$$

由此，可以写成如下的矩阵形式：

$$Ad \cong z - e \quad (9)$$

$$\text{其中， } A = \begin{bmatrix} \cos a_1 & \sin a_1 \\ \cos a_2 & \sin a_2 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ \cos a_n & \sin a_n \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix},$$

$$z = \begin{bmatrix} d_1 - (x_v \cos a_1 + y_v \sin a_1) \\ d_2 - (x_v \cos a_2 + y_v \sin a_2) \\ \mathbf{M} \\ d_n - (x_v \cos a_n + y_v \sin a_n) \end{bmatrix}, \text{ 利用最小二乘算}$$

法求信号源的坐标，有：

$$d = (A^T A)^{-1} A^T z \quad (10)$$

将求得的 δ_x 、 δ_y 代入式 $x_s=x_v+\delta_x$ ， $y_s=y_v+\delta_y$ ，即可求得信号源坐标。

3 TS-LS 算法性能分析

在研究基于接收信号强度差的无源定位理论及 TS-LS 算法的基础之上，本节首先五站的 TS-LS 定位算法进行性能仿真。仿真条件为：观测站坐标分别为 (1,1)m、(5, 1) m、(19, 18) m、(1, 5) m、(2, 2) m；信号源位置坐标为(1,3)；传播损耗因子为 3；不同位置阴影衰落的相关因子为 0.2^[8]。为消除阴影衰落引起的随机误差，做了 10000 次的随机实验。仿真结果如图 1 所示，TS-LS4, TS-LS4 分别代表对四站、五站进行 TS-LS 运算的绝对定位误差。

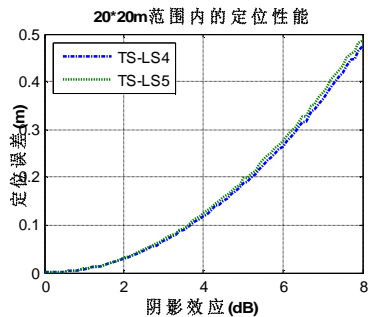


Figure 1. Orientation performance of TS-LS algorithmic
图 1. TS-LS 算法的定位性能

由图 1 可知，在这样的仿真条件下，TS-LS4 的定位性能比 TS-LS5 的定位性能还好。通过对这一反常现象分析发现，观测站与信号源的相对位置对基于信号强度差的无源定位的定位性能有很大的影响。下面就室内区域内的定位误差进行分析。

本文用 GDOP 来描述定位误差与几何位置关系，二维条件下的 GDOP 可表示为： $GDOP = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$ ，其中， σ_x 、 σ_y 分别表示 x 方向、y 方向上的定位误差。在下面所有的仿真中，都假设阴影效应 X'' 为 0.03^{[5],[10]}。为了使整个空间的定位性能更加均匀，我们将观测站均匀分布，坐标分别为(1,1)m、(19,1) m、(10,10) m、(1,19) m、(19,19) m、(10,5)m、(10,15)m，各站点所对应的序号分别为①、②、③、④、⑤、⑥、⑦，如图 2 所示。

首先讨论五个观测站的条件下 TS-LS 的 GDOP 分布情况。仿真分析发现，式 (10) 中矩阵 A、z 的数据计算顺序对定位结果有影响。图 2 中的站点具有对称性，它们的计算顺序有：(1) ①→②→③→④→⑤；

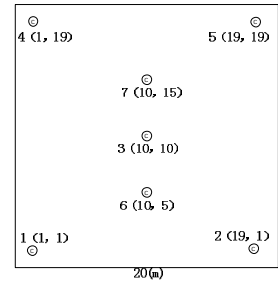


Figure 2. Sketch map of disposing measurement station
图 2. 布站示意图

(2) : ①→②→⑤→④→③ ; (3) : ③→①→②→④→⑤ ; (4) : ①→⑤→③→④→② ; (5) : ①→②→④→⑤→③ ; (6) : ③→①→②→⑤→④。六种计算顺序仿真得到的

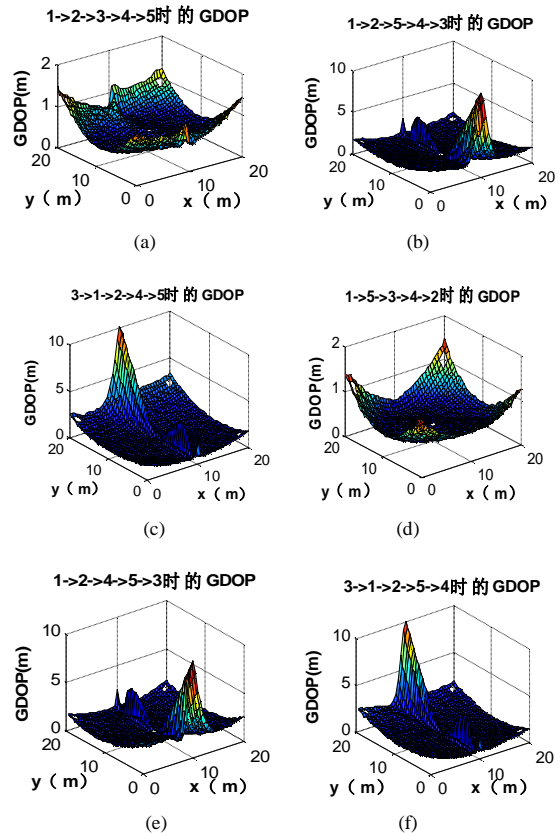


Figure 3. GDOP distributing of TS-LS algorithmic with five measurement station
图 3. 五站时 TS-LS 算法 GDOP 分布

GDOP 分布分别对应于如图 3 中的(a)~(f)。

在图 3 所示的六种情况中，第一、四种计算顺序所对应的定位效果较好，在大部分区域的定位精度都小于 1 m。因此，在分析六站、七站定位的 GDOP 时，

仅对第一种计算顺序进行分析, 对应的观测站的坐标分别为图 2 中的 ①→②→③→④→⑤→⑥、①→②→③→④→⑤→⑥→⑦。六站、七站的定位 GDOP 分别如图 4 中的(a)、(b)所示。

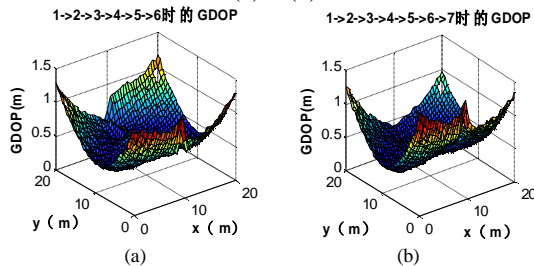


Figure 4. GDOP distributing of TS-LS algorithmic with six and seven measurement station
图 4. 六站、七站时 TS-LS 算法 GDOP 分布

将图 4 与图 3 中的(a)比较可知, 随着观测站数的增加, 定位性能略微提高, 但是性能改善很有限。因此, 工程应用中建议选取五站来实现无源定位。

4 结束语

基于信号强度差的定位方法最初是针对 GSM 网络中手机终端定位提出的, 本文创造性地将该思想应用到室内无源定位中。通过对 TS-LS 算法的仿真分析发现, 只要选取合适的计算顺序, 均匀分布的五站就能实现室内信号源的粗略定位。本文得出的结论在反无线窃听、干扰源查处等方面都将有广泛的应用前景。

致谢

在论文的撰写过程中, 刘作学教授做了全程指导并提出了建设性的修改意见, 田战丽和孔德敬对论文

的修改、绘图、排版做了大量细致的工作, 在此对他们付出的辛勤工作致以诚挚的谢意。最后, 我要把最诚挚的谢意献给我操劳一生的父母。

References (参考文献)

- [1] 刘旭光. 孔德强. 郜中华等. 室内无源定位技术研究[J]. 测控技术. 2009 年 5 月: 144-147.
Liu Xu-guang Kong De-qiang Gao Zhong-hua. Study on the Indoor Passive Location Methods [J]. Measurement & Control Technology, MAY 2009: 144-147.
- [2] 孔德强. 刘作学. 崔灿. 室内多站测向交叉定位性能分析[J]. 测控技术. 2009 年 5 月: 160-163.
Kong De-qiang Liu Zuo-xue Cui Can. Analyse of Orientation Capability Indoor Cross-direction System[J]. Measurement & Control Technology, MAY 2009: 160-163.
- [3] Ding-Bing Lin, Rong-Terng Juang, Hsin-Piao Lin, Cheng-Yi Ke. Mobile Location Estimation Based on Differences of Signal Attenuations for GSM Systems[J]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE, 2003vol.1:77-80.
- [4] Ding-Bing Lin, Rong-Terng Juang. Mobile Location Estimation Based on Differences of Signal Attenuations for GSM Systems [J]. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 54, NO. 4, JULY 2005: 1447-1454.
- [5] 刘林. 非视距环境下的无线定位算法及其性能分析[D]. 西南交通大学. 2007 年 2 月: 43-54.
Liu lin. Wireless Positioning Algorithms and Their Performance Analysis under NLOS Environment[D]. Southwest Jiaotong University. February 2007: 43-54.
- [6] Caffery, J. J., Jr. A new approach to the geometry of TOA location [J]. Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd: 1943_1949 vol.4.
- [7] Foy, W. H. Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on: 187-194.
- [8] Sorensen, T. B. Slow fading cross-correlation against azimuth separation of base stations [J]. Electronics Letters. 21 Jan. 1999: 127-129.