

虚拟阵的TOA定位算法

万 群¹, 杜亚平¹, 吕泽均²

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 中国西南电子技术研究所 成都 610036)

【摘要】为了改进经典的多维标度测量(MDS)定位法中一次测量一次定位的精度不高的缺陷,提出一种新的动态MDS虚拟阵定位算法,该算法简单,计算量小,便于实时处理。仿真结果显示在虚拟测量次数多于4次时,该算法性能明显优于Chan+虚拟阵定位算法及经典的MDS定位法,并且虚拟次数越多,该算法的性能越好。经典的MDS定位法相当于测量次数为1的无虚拟时的该算法。

关键词 定位; 多维标度测量; 到达时间定位; 虚拟阵

中图分类号 TN929.53

文献标识码 A

doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.01

TOA Location Algorithm Using Virtual Matrix

WAN Qun¹, DU Ya-ping¹, and LÜ Ze-jun²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Southwest China Institute of Electronic Technology Chengdu 610036)

Abstract A dynamic multi-dimensional scaling (MDS) algorithm is presented by modifying the classical MDS which uses instantaneous measurement for each location. The proposed algorithm is simple and computationally efficient and therefore allows real-time processing. It performs better when the number of measurement is more than four. Classical MDS is equal to the proposed algorithm when the number of measurement is only one.

Key words location; multi-dimensional scaling; time of arrival(TOA); virtual matrix

近几十年来,在星载、机载、舰载和车载有源雷达以及在声纳和无线通信中,利用到达时间(TOA)测量信息对静止目标进行定位一直是一个热门的课题^[1-2]。TOA定位通常采用两种方法,一种是通过泰勒展开方式将一组非线性方程近似为线性方程^[3],另一种是通过引入额外的变量将一组非线性方程转化为线性方程,然后应用最小二乘的方法直接解方程^[4-5]。前一类方法可以得到最优解,其缺点是计算量较大,有时很难得到精确的初始值,并且在传感器与目标处于某些几何位置时不能保证收敛。后一类方法相对计算量较小,可以实时处理,但是最优解依赖测距方信息。这两类方法的共同思路是把非线性方程转换为线性方程。与这两类经典的方法不同,文献[6-8]研究了基于子空间的定位法,文献[6]提出一种适用于3个基站的基于多维标度测量(MDS)的噪声子空间定位法,随后文献[7]发展了这种噪声子

空间定位法,并把文献[6]中的基站数扩展到不少于3个基站。文献[8]提出一种动态MDS定位法,通过将不同采样时刻的目标信息融合在一起来提高定位精度,适用于静止基站对运动目标的定位。

已知一组节点之间的距离,利用经典MDS法可得到这组节点之间的相对坐标。同理,利用经典MDS定位法,如果目标与传感器间距离以及传感器与传感器间的距离已知,便可得到目标的相对位置。然而在经典MDS定位中,只用到了1次TOA测量^[6],所以定位精度不高,文献[9]指出对位置估计进行时间滤波可提高定位精度。

本文利用虚拟阵和多次TOA测量值构造动态MDS矩阵,提出一种新的动态MDS算法来提高经典的MDS定位精度。经典的MDS算法在对三维目标进行定位时,传感器个数至少为4个,也就是说经典的MDS算法只适用于超定情况下^[10],而本文提出的虚

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(60772146); 国家863项目(2008AA12Z306)

作者简介: 万 群(1971-),男,教授,主要从事信号处理和雷达方面的研究。

拟阵MDS算法则没有此限制,只要虚拟测量次数多于3个,在传感器的个数只有一个的情况下,本算法也适用。经典的MDS算法利用一次测量给出一次定位,本算法多次测量都可以定位,并且虚拟测量次数越多,定位精度越高。经典的MDS算法仅适用于传感器静止的情况下^[6],本文算法适用于传感器运动的情况。经典的MDS算法相当于本文算法在运动速度为零时或无虚拟测量的情况。

1 经典MDS定位算法

假设传感器坐标为 $\mathbf{X}_i = [x_i \ y_i \ z_i]$, $i=1,2,\dots,N$ 。静止目标位于 $\mathbf{X} = [x \ y \ z]$, 利用传感器之间及传感器与目标之间的距离信息的平方构建矩阵 \mathbf{G} 和 \mathbf{h} :

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12}^2 & \cdots & d_{1N}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & \cdots & d_{2N}^2 \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ d_{N1}^2 & d_{N2}^2 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h} = [r_1^2 \ r_2^2 \ \cdots \ r_N^2]^T$$

式中 d_{ij} 表示第 i 个传感器与第 j 个传感器间的距离; r_i 表示第 i 个传感器与目标的距离(由TOA测量值与光速相乘得到); $[\]^T$ 表示矩阵的转置; $r_i = r_i^o + n_i$, 其中 r_i^o 表示目标与第 i 个传感器之间的真实距离, n_i 为测距噪声。

定义:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{h}\mathbf{e}_N^T + \mathbf{e}_N\mathbf{h}^T - \mathbf{G} \quad (1)$$

式中 \mathbf{e}_N 为 $N \times 1$ 的全1列向量。

构建矩阵:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 - \mathbf{X} \\ \mathbf{X}_2 - \mathbf{X} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_N - \mathbf{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x & y_1 - y & z_1 - z \\ x_2 - x & y_2 - y & z_2 - z \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N - x & y_N - y & z_N - z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{W}_M = \begin{bmatrix} d_{11}(0/0) & \cdots & d_{1N}(0/0) & d_{11}(0/1) & \cdots & d_{1N}(0/1) & \cdots & d_{11}(0/M) & \cdots & d_{1N}(0/M) \\ d_{21}(0/0) & \cdots & d_{2N}(0/0) & d_{21}(0/1) & \cdots & d_{2N}(0/1) & \cdots & d_{21}(0/M) & \cdots & d_{2N}(0/M) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1}(0/0) & \cdots & d_{NN}(0/0) & d_{N1}(0/1) & \cdots & d_{NN}(0/1) & \cdots & d_{N1}(0/M) & \cdots & d_{NN}(0/M) \\ d_{11}(1/0) & \cdots & d_{1N}(1/0) & d_{11}(1/1) & \cdots & d_{1N}(1/1) & \cdots & d_{11}(1/M) & \cdots & d_{1N}(1/M) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1}(1/0) & \cdots & d_{NN}(1/0) & d_{N1}(1/1) & \cdots & d_{NN}(1/1) & \cdots & d_{N1}(1/M) & \cdots & d_{NN}(1/M) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{11}(M/0) & \cdots & d_{1N}(M/0) & d_{11}(M/1) & \cdots & d_{1N}(M/1) & \cdots & d_{11}(M/M) & \cdots & d_{1N}(M/M) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1}(M/0) & \cdots & d_{NN}(M/0) & d_{N1}(M/1) & \cdots & d_{NN}(M/1) & \cdots & d_{N1}(M/M) & \cdots & d_{NN}(M/M) \end{bmatrix}$$

可得:

$$\mathbf{Q} = 2\mathbf{P}\mathbf{P}^T \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得矩阵 \mathbf{Q} 的秩为3, 因为 \mathbf{Q} 为对称矩阵, 对 \mathbf{Q} 进行奇异值分解:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{U}^T \quad (4)$$

式中 $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ 为由 \mathbf{Q} 的特征值构成的对角矩阵, 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4 \approx \dots \approx \lambda_N \approx 0$; $\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_N]$ 为由 \mathbf{Q} 的特征值对应的特征向量构成的矩阵, 其中, $\mathbf{U}_n = [u_4 \ u_5 \ \cdots \ u_N]$ 对应噪声子空间。

由式(3)、式(4), 可得:

$$\mathbf{U}_n^T \mathbf{P} \approx \mathbf{0}_{(N-3) \times 3} \quad (5)$$

则目标的位置为:

$$\hat{\mathbf{X}} = \frac{\mathbf{e}_N^T \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^T}{\mathbf{e}_N^T \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^T \mathbf{e}_N} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 一种虚拟阵MDS定位算法

假设 $k=0$ 时为传感器的真实时刻, 则 $k=M$ 时为传感器的 M 个不同的虚拟时刻, 第 i 个传感器的坐标为 $\mathbf{X}_{ik} = [x_i(k) \ y_i(k) \ z_i(k)]$, 速度为:

$$\dot{\mathbf{X}}_{ik} = [\dot{x}_i(k) \ \dot{y}_i(k) \ \dot{z}_i(k)]$$

$$i=1,2,\dots,N, \quad k=0,1,\dots,M$$

利用在真实时刻及不同虚拟时刻传感器间的距离信息的平方构建矩阵 \mathbf{W}_M 。矩阵 \mathbf{W}_M 中的 $d_{ij}(b/p)$ 表示在 $k=b$ 时刻时的第 i 个传感器与在 $k=p$ 时刻时的第 j 个传感器间的距离。构建矩阵 \mathbf{V} 。

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x_1(0) - x & \cdots & x_N(0) - x & x_1(1) - x & \cdots & x_N(1) - x & \cdots & x_1(M) - x & \cdots & x_N(M) - x \\ y_1(0) - y & \cdots & y_N(0) - y & y_1(1) - y & \cdots & y_N(1) - y & \cdots & y_1(M) - y & \cdots & y_N(M) - y \\ z_1(0) - z & \cdots & z_N(0) - z & z_1(1) - z & \cdots & z_N(1) - z & \cdots & z_1(M) - z & \cdots & z_N(M) - z \end{bmatrix}^T$$

利用在不同时刻传感器与目标之间的距离信息的平方构建矩阵 \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = [r_1(0) \ r_2(0) \ \cdots \ r_N(0) \ r_1(1) \ \cdots \ r_N(1) \ \cdots \ r_1(M) \ \cdots \ r_N(M)]^T$$

式中 $r_i(p)$ 表示在 $k=p$ 时刻时第 i 个传感器与目标之间的距离; $r_i(p) = r_i^o(p) + n_i(p)$, $r_i^o(p)$ 表示在 $k=p$ 时刻的第 i 个传感器与目标之间的真实距离; $n_i(p)$ 为在 $k=p$ 时刻的TOA的测距噪声。

定义:

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\mathbf{e}_{MN}^T + \mathbf{e}_{MN}\mathbf{H}^T - \mathbf{W}_M \quad (7)$$

式中 \mathbf{e}_{MN} 为 $(M \times N) \times 1$ 的全1列向量。可得:

$$\mathbf{X} = 2\mathbf{V}\mathbf{V}^T \quad (8)$$

由式(8)可得矩阵 \mathbf{X} 的秩为3, 因为 \mathbf{X} 为对称矩阵, 对 \mathbf{X} 进行奇异值分解:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}_M \mathbf{A}_M \mathbf{U}_M^T \quad (9)$$

式中 $\mathbf{A}_M = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{MN})$ 为由 \mathbf{X} 的特征值构成的对角矩阵, 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4 \approx \cdots \approx \lambda_{MN} \approx 0$; $\mathbf{U}_M = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_{MN}]$ 为由 \mathbf{X} 的特征值对应的特征向量构成的矩阵, 选取 u_4, u_5, \cdots, u_{MN} 构成新的矩阵, 即构成噪声空间。

由式(8)、式(9), 可得:

$$\mathbf{U}_{MN}^T \mathbf{V} \approx \mathbf{0}_{(M \times N - 3) \times 3} \quad (10)$$

则目标的位置为:

$$\hat{\mathbf{X}} = \frac{\mathbf{e}_{MN}^T \mathbf{U}_{MN} \mathbf{U}_{MN}^T}{\mathbf{e}_{MN}^T \mathbf{U}_{MN} \mathbf{U}_{MN}^T \mathbf{e}_{MN}} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{1M} \\ \mathbf{X}_{2M} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{NM} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 仿真

对本文算法与经典的MDS方法、经典的Chan TOA定位法, 以及Chan+虚拟阵的方法进行比较。

场景一: 4个传感器的位置分别为: (300,100,150) m, (400,150,100) m, (300,500,200) m, (350,200,100) m。4个传感器的运动速度依次为: (30,-20,20) m/s, (-30,10,20) m/s, (10,-20,10) m/s, (10,20,30) m/s。目标位置为: (2 000,2 500,3 000) m, TOA测量噪声服从均值为0, 方差为 $0.25/c^2$ 的高斯分布, c 为光速。运行次数为1 000。经典的MDS方法、经典的Chan TOA定位法、Chan+虚拟阵定位法以及本文算法的RMSE比较如图1所示。

场景二: 传感器的位置和速度如表1所示, 目标

位置为: (300,325,275) m。TOA测量噪声服从均值为0, 方差为 $900/c^2$ 的高斯分布, c 为光速。运行次数为1 000。经典的MDS方法、经典的Chan TOA定位法、Chan+虚拟阵定位法以及本文算法的RMSE比较如图2所示。

由仿真可以得出, 利用经典MDS定位算法多次测量可得到多个定位值, 通过数据融合可适当提高定位精度, 但是多次测量需要一定的时间, 并且其定位精度还是不高。本文算法在大噪声情况下, 随着虚拟测量次数的增加, 精度比经典的MDS定位法和Chan+虚拟阵定位法有很大的提高。本文算法在虚拟测量次数多于4次后, 性能有明显的提高。

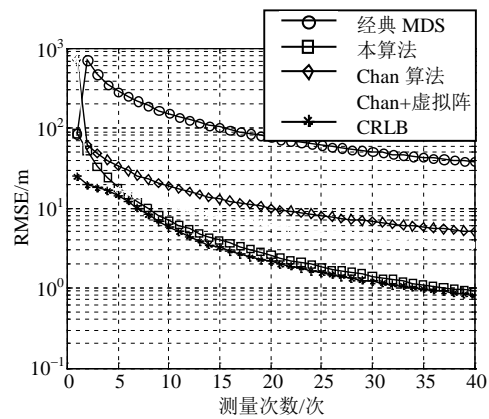


图1 慢速移动传感器测量次数与定位误差的关系

表1 传感器的位置和速度

i	x_i/km	y_i/km	z_i/km	$\dot{x}_i/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	\dot{y}_i	\dot{z}_i
1	25	25	800	7.8	0	0
2	25	-25	700	7.8	0	0
3	-25	25	750	7.8	0	0
4	-25	-25	850	7.8	0	0

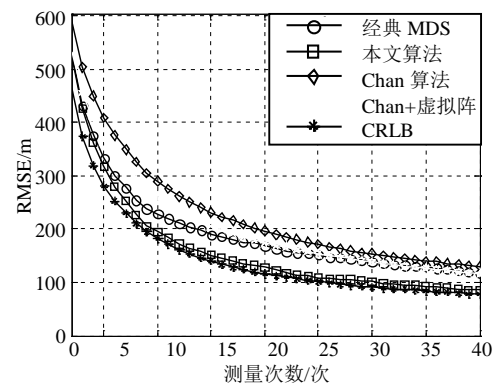


图2 快速移动传感器测量次数与定位误差的关系

4 结 论

经典的MDS定位算法中,传感器和目标都是静止的,没有利用到速度信息,所以定位精度不高。当传感器有运动速度时,本文改进了经典的MDS算法,在虚拟测量次数多于4次后,本文算法比经典的MDS算法性能有明显的提高,并且虚拟测量次数越多,本文算法的性能越好。在相对大的噪声环境中本文算法的定位精度也比Chan+虚拟阵的算法高。

参 考 文 献

- [1] RAY P S. A novel TOA analysis technique for radar identification[J]. IEEE Trans on AES, 1998, 3(34): 716-721.
- [2] VENKATRAMAN S; CAFFERY J Jr, YOU H Y. A novel TOA location algorithm using LOS range estimation for NLOS environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(5): 1515-1524.
- [3] FOY W H. Position-location solutions by taylor-series estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, 12(2): 187-194.
- [4] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [5] HO K C, XU W W. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(9): 2453-2463.
- [6] WAN Q, LUO Y J, YANG W L, et al. Mobile localization method based on multidimensional similarity analysis[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). Philadelphia: IEEE, 2005: 1081-1084.
- [7] SO H C, FRANKIE K W. A generalized subspace approach for mobile positioning with time-of-arrival measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 55(10): 5103-5107.
- [8] CHEN Z X, WAN Q, JIANG B, et al. Dynamic multidimensional scaling algorithm for mobile location[C]//TENCON 2006, IEEE Region 10 Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2006: 1-4.
- [9] CHEN P C. A cellular based mobile location tracking system[C]//Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th. Houston, TX: IEEE, 1999.
- [10] CHEUNG K W, SO H C. A multidimensional scaling framework for mobile location using time-of-arrival measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 460-470.

编辑 税 红

· 我校科研成果专利介绍 ·

微波泄漏检测仪

微波泄漏检测仪是用于测量电子设备特别是微波设备电磁波泄漏的一种专用仪器,是近场测量仪,具有灵敏度高、响应快、全方位探头、数字显示、可交直流供电、便携式、最大值锁定等特点,使得测试仪器不仅能测连续波泄漏,同时能测量脉冲泄漏信号,满足各种辐射源电磁波泄漏的测量要求。

主要技术指标:

- (1) 三维全供心立体探头;
- (2) 分辨率: $01 \mu\text{W}/\text{cm}^2$;
- (3) 工作频率: $2\ 450 \pm 50 \text{ MHz}$;
- (4) 校准点: $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$;
- (5) 校准误差: 不大于1.0 dB;
- (6) 测量不确定度: 不大于2.0 dB;
- (7) 量程: $2 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。

微波泄漏检测仪主要工作于2 450 MHz微波窗口电子设备的电磁波泄漏,解决了电磁波辐射对人体危害的防护测量、对空间通信干扰测量等问题。其应用领域为微波设备研制单位、生产厂家、销售部门、使用单位、劳动保护部门、环保部门、技术监督部门等单位。在环境监测、劳动保护、电磁兼容测试、生物电子效应研究、出入境检疫、质量技术监督以及微波能应用研究、销售和生产企业也有广泛的应用领域。