

基于正性约束的测向交叉定位方法

沈晓峰¹, 徐保根², 邹继锋¹, 万义和², 汤四龙², 杨万麟¹

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 同方电子科技有限公司 江西 九江 332007)

【摘要】传统的交叉定位方法将波达方向(DOA)的正切值作为斜率, 求出信号源的位置坐标的线性最小二乘解。由于正切值存在前向/后向的角度模糊, 在DOA测量误差较大的情况下, 将引入较大的交叉定位误差。针对该问题, 该文提出了一种利用DOA的正弦值和余弦值构建交叉定位方程组的算法, 且对信号源与观测站之间的距离参数进行正性约束, 避免了DOA前向/后向模糊。仿真结果表明, 在DOA测量误差较大的情况下, 该方法比传统的交叉定位方法更精确。

关键词 交叉定位; DOA估计; 角度模糊; 无源定位; 正性约束

中图分类号 TN95

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.007

A Positive Restriction Method Used in Crossing Location

SHEN Xiao-feng¹, XU Bao-gen², ZOU Ji-feng¹, WAN Yi-he², TANG Si-long², and YANG Wan-lin¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Tongfang Electronic Science and Technology Co.,Ltd. Jiujiang Jiangxi 332007)

Abstract Traditional cross-location method uses the tangent of direction of arrival (DOA) as slope to obtain a least square solution by solving a linear equation. Generally, using the tangent of DOA as slope makes the direction indistinct in 180° . If the measurement error of the DOA is low, traditional cross-location method performs well, and the direction indistinct in 180° has little influence on the result of the algorithm. But once we deal with a large measurement error situation, the direction indistinct in 180° will import additional prominent error, which will have big influence on the precision of location. Therefore, this article proposes a new method which uses the sine and cosine of the DOAs to form the cross-location equations, subject to the constraint of the positive distance to find a solution. This method has no direction indistinct in 180° and improves the precision of the location result. The simulation result by the computer verified the fact that the new proposed method has a better location result than the traditional method under large measurement error.

Key words cross-location; DOA estimation; indistinct in angle; passive location; positive restriction

无源定位方法中, 测向交叉定位方法发展较早, 研究较多, 以其原理简单、低成本易实现等特点, 在雷达和电子对抗领域得到了广泛的应用^[1-3]。

传统测向交叉定位利用两个或两个以上的位置已知观测站, 分别测出目标的方向, 利用最小二乘方法得出目标位置的最小二乘解^[4-6]。但该算法是对波达方向角(DOA)的正切值加以利用, 使测向交叉定位模型在方向上产生了 180° 模糊, 由于交叉定位算法的定位精度受测向误差的影响较大, 于是 180° 方向模糊导致了定位虚假点的产生, 一定程度上使定位的误差增大, 可靠性降低。测向交叉定位中大误差点的排除是提高测向交叉定位精度的有效手段, 研究者已经对这方面做了很多的研究, 如拉格朗日松弛算法、最大似然法、最小距离法^[7-9]; 另外,

还有利用数据的相关性原理提出的数据关联算法, 如马尔科夫链蒙特卡罗数据关联算法^[10], 但该方法需要进行迭代运算, 且迭代收敛缓慢; 文献[11-12]利用RSS(received signal strength)信息改善了密集杂波下多目标定位跟踪的性能, 提高了目标的可观测性和数据关联的精度, 但该算法的实现必须预先已知RSS信息, 且关联性能受噪声影响较大。这些方法都通过DOA的正切值进行运算, 仍然存在方向上的 180° 模糊。

为此, 本文提出一种新的交叉定位方法, 该方法计算出DOA的正弦和余弦值来代替正切, 并且利用测量点到目标距离为正这一信息, 对原有的算法模型加以修正, 添加目标与观测站距离为正这一约束, 增加目标到各个观测站的距离作为变量, 满足

收稿日期: 2013-10-09; 修回日期: 2014-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(61172140)

作者简介: 沈晓峰(1969-), 男, 博士生, 主要从事阵列信号处理、雷达系统仿真等方面的研究。

距离为正的条件下求出方程组的最优解。该算法对距离的正性约束消除了方向的180°模糊, 定位结果比原有的算法给出的结果更加精确。该算法对提高测向交叉定位算法的定位精度, 尤其是在复杂环境和近距离测角的情况下, 具有一定的意义。

1 交叉定位基本原理

以单目标二维平面的交叉定位为例, 设目标位于 $S(x_s, y_s)$, 两个观测站坐标分别为 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$, 测得DOA方向与x轴夹角为 θ_1 和 θ_2 , 如图1所示。

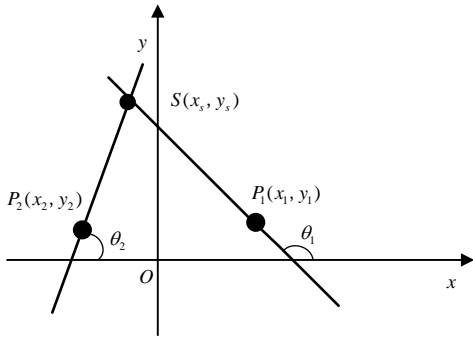


图1 两站式测向交叉定位

计算 θ_1 和 θ_2 的正切值, 并以两个观测站坐标 P_1 、 P_2 和斜率 $\tan \theta_1$ 、 $\tan \theta_2$ 可以构造点斜式直线方程组, 整理得到:

$$x_s \tan \theta_k - y_s = x_k \tan \theta_k - y_k \quad k=1,2 \quad (1)$$

由简单的求解直线方程就可以计算出目标的位置 $S(x_s, y_s)$, 如果存在3个或3个以上的观测站, 得到的直线方程数大于2个, 如 $M \geq 3$, 有:

$$x_s \tan \theta_k - y_s = x_k \tan \theta_k - y_k, \quad k=1,2,\dots,M \quad (2)$$

然后令:

$$A = \begin{bmatrix} \tan \theta_1 & -1 \\ \tan \theta_2 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \tan \theta_M & -1 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1 \tan \theta_1 - y_1 \\ x_2 \tan \theta_2 - y_2 \\ \vdots \\ x_M \tan \theta_M - y_M \end{bmatrix}$$

式中, M 为观测站的个数。利用最小二乘估计方法可求解出一个最小二乘结果:

$$Ax = b \quad (3)$$

$$x_{LS} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

但是这种算法的缺陷在于 $\tan \theta$ 表示的方向存在180°的模糊, 如图2a所示, 观测站 $P_3(x_3, y_3)$ 处测

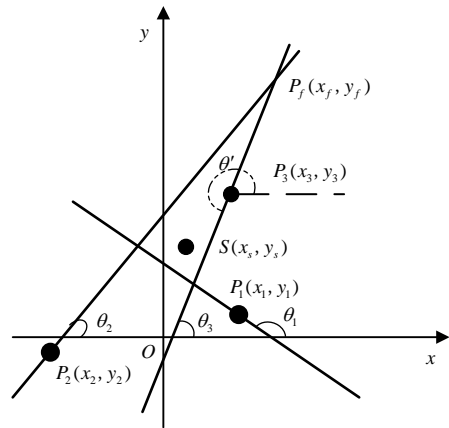
得方位角为 θ' , 经过计算正切后, 方位角变为 θ_3 , 在多观测站测量时, 角度的180°模糊甚至会产生一些虚假的交叉定位点, 见图2a中的 $P_f(x_f, y_f)$, 影响定位精度。因此, 对角度的180°模糊进行消除可以有效地提高定位精度。

2 正性约束算法

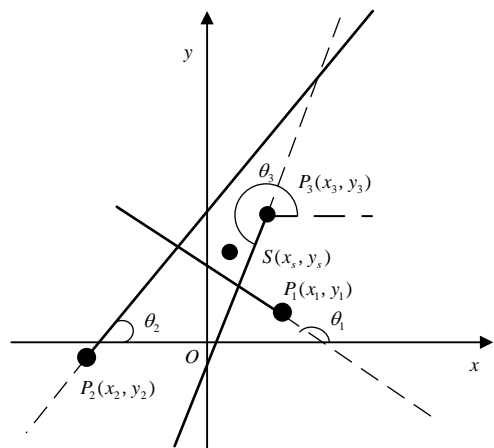
本文提出一种能够消除方向180°模糊的交叉定位算法, 用 $\sin \theta$ 和 $\cos \theta$ 构造方程如下:

$$\begin{cases} \cos \theta_k = \frac{x_s - x_k}{r_k} \\ \sin \theta_k = \frac{y_s - y_k}{r_k} \end{cases} \quad k=1,2,\dots,M \quad (5)$$

式中, $k=1,2,\dots,M$; r_k 是目标到观测站的距离, 且 $r_k \geq 0$ 。于是构造出消除了180°方向模糊的测量模型如图2b所示, 图中的方位角 θ_i 保持了原来的测量值, 消除了180°的方向模糊, 避免了虚假定位点的产生。



a. 传统



b. 正性约束

图2 两种方法的交叉定位模型
通过整理式(5), 得到:

$$\begin{cases} x_k = x_s - r_k \cos \theta_k \\ y_k = y_s - r_k \sin \theta_k \end{cases} \quad k=1,2,\dots,M \quad (6)$$

比较式(2)和式(6)可知,方程的个数增加为原来的两倍,引入了 M 个新的未知数 r_k ,未知数个数变为 $M+2$,由交叉定位模型的求解思路,可以构造出新的线性方程组:

$$Qq_{LS} = h \quad (7)$$

式中,

$$Q = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_M & 0 & A_c \\ 0 & \mathbf{1}_M & A_s \end{bmatrix}; \quad q = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix}; \quad h = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix}$$

式中, A_c 和 A_s 分别是以 $-\cos \theta_k$ 和 $-\sin \theta_k$ 为对角线上元素的对角矩阵; $\mathbf{1}_M$ 是元素都等于1的 M 阶列向量。求解无约束线性最小二乘估计问题式(7),可得:

$$q_{LS} = (Q^T Q)^{-1} Q^T h \quad (8)$$

可以证明,式(8)中的目标位置 $S(x_s, y_s)$ 估计与式(4)中估计相同。

证明:式(8)为式(7)的最小二乘解,将式(7)展开并且写成式(5)的形式,得到 k 组式子:

$$\cos \theta_k = \frac{x_s - x_k}{r_k} \quad k=1,2,\dots,M \quad (9)$$

$$\sin \theta_k = \frac{y_s - y_k}{r_k} \quad k=1,2,\dots,M \quad (10)$$

因为对 r_k 没有约束,于是合并以上两个式子消去 r_k ,得到:

$$\tan \theta_k = \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} = \frac{y_s - y_k}{x_s - x_k} \quad k=1,2,\dots,M \quad (11)$$

将式(11)变形即得到式(2),求其最小二乘解即式(4),于是求式(8)中目标位置 $S(x_s, y_s)$ 的最小二乘估计等效于求式(3)的最小二乘解,即得到式(4)计算出的目标位置估计。

证毕。

由以上证明可知,如果不对最小二乘估计中的 r_k 进行约束,该方法和传统交叉定位算法就完全等效,而计算结果中出现了部分 $r_k < 0$ 的情况,意味着该算法允许目标的估计位置 $S(x_s, y_s)$ 位于观测站

DOA测量值的反方向。通过计算机仿真统计,3个观测站测量误差都为 $\pm 45^\circ$ 的情况下,最小二乘估计式(8)中出现 $r_k < 0$ 的概率大约为30%。为了充分利用测量信息,有必要增加约束 $r_k \geq 0$,将新的问题模型写成如下形式:

$$\begin{aligned} \hat{q} &= \arg \min_q \|Qq - h\| \\ \text{s.t. } &r_k > 0, \quad k=1,2,\dots,M \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)是一个凸优化求解问题,利用Matlab中的cvx工具包可以求得满足 $r_k > 0$ 的最优解,于是可以判断,加上正性约束后,该算法在角度上消除了 180° 的方向模糊,使得定位结果更精确。

3 计算机仿真验证

本节通过计算机仿真验证基于正性约束交叉定位算法提高定位精度的有效性。在仿真实验中,使用蒙特卡罗方法,每次随机产生待测目标和3个观测站的位置,由观测得到DOA信息分别使用最小二乘方法和正性约束方法进行对目标定位,统计并比较这两种方法的定位误差,主要步骤如下:

1) 在一个正方形区域内随机产生目标和观测站的位置,并通过目标和观测站的相对位置计算理想的DOA方向;

2) 给计算出的DOA角度叠加 $\pm 45^\circ$ 均匀分布的随机噪声作为观测站的方位角测量数据,如图3所示(在密集多径传播的市区环境,测向误差往往很大)。

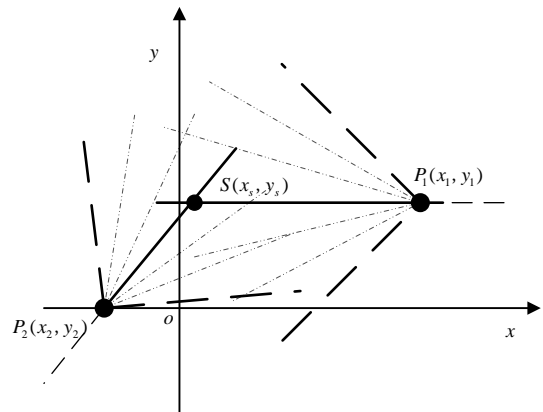


图3 精确测量数据叠加均匀分布的测角噪声

3) 利用生成的3个观测站角度测量数据,分别解出普通最小二乘方法的定位结果和使用正性约束算法得到的定位结果,并分别计算出定位误差。

4) 使用蒙特卡罗方法,将步骤1)~步骤3)重复10 000次。

两种方法的定位误差概率如图4所示(横坐标定位误差是相对值,所以没有度量单位),分别将两种

算法相对定位误差在30%、40%、60%范围内的概率列入表1, 以便比较。可以判断, 正性约束算法比传统算法的定位结果更精确。

经过仿真统计, 未加约束的传统算法单次定位平均时间为 1.749×10^{-5} s, 在相同条件下正性约束算法为 1.787×10^{-5} s, 可见两种算法实时性相当。

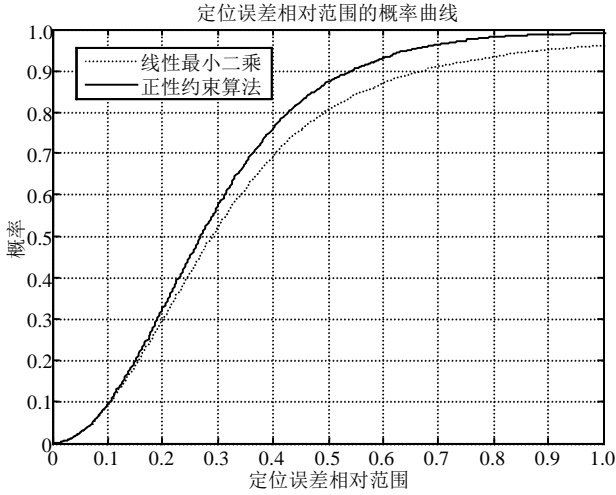


图4 定位误差相对范围的概率曲线

表1 两种算法相对定位误差范围的概率比较

算法	误差范围 ≤30%	误差范围 ≤40%	误差范围 ≤50%	误差范围 ≤60%
最小二乘	0.512	0.688	0.801	0.864
正性约束	0.591	0.772	0.885	0.939

4 结束语

本文利用观测站到目标的距离参数为正这一特征, 增强了基于最小二乘的测向交叉定位求解问题中的约束。这种基于正性约束的交叉定位算法避免了原有算法的180°方向模糊问题, 减少了虚假的交叉定位节点, 改善了定位精度。

参 考 文 献

[1] 张正明. 辐射源无源定位研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2000.
ZHANG Zheng-min. Study of target passive location[D]. Xi'an: Xidian university, 2000.

[2] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
ZHAO Guo-qing. Radar countermeasure theory[M]. Xi'an: Publishing House of Xidian University, 1999.

[3] 王小谟, 匡永胜, 陈忠先, 等. 监视雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
WANG Xiao-mo, KUANG Yong-sheng, CHEN Zhong-xian, et al. Surveillance radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.

[4] FARINA A. Target tracking with bearings only measurements[J]. Signalprocessing, 1999, 78(1): 61-78.

[5] GAVISH M, WEISS A J. Performance analysis of bearing-only target location algorithms[J]. IEEE Trans AES, 1992, 28(2): 817-827.

[6] TORRIERI D J. Statistical theory of passive location systems[J]. IEEE Trans AES, 1984, 20(1): 183-198.

[7] LECADRE J P, JAUFFRET C. On the convergence of iterative methods for bearings-only tracking[J]. IEEE Trans AES, 1999, 35(3): 801-817.

[8] TAFF L G. Target localization from bearings-only observations[J]. IEEE Trans AES, 1997, 33(1): 2-9.

[9] 李立萍, 孟静, 陈天麒. 一种排除无源交叉定位虚假交点的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(4): 20-23.
LI Li-ping, MENG Jing, CHEN Tian-qi. A new method for eliminating false intersection points in passive cross location[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(4): 20-23.

[10] KARLSSON R, GUSTAFSSON F. Markov chain Monte Carlo data association for multi-target tracking[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(3): 481-497.

[11] 康莉, 谢维信, 黄敬雄. 一种基于蚁群算法的多目标跟踪数据关联方法[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 586-589.
KANG Li, XIE Wei-xin, HUANG Jing-xiong. ACA based data association method for multi-target tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 586-589.

[12] 章飞, 周杏鹏, 陈小惠. 基于幅值信息的联合概率数据关联粒子滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 453-457.
ZHANG Fei, ZHOU Xing-peng, CHEN Xiao-hui. Joint probabilistic data association particle filter algorithm based on amplitude information title[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 453-457.

编辑 税红