

基于冗余信息的虚假点消除算法

陈 红¹, 蔡晓霞¹, 谭 坤², 贾占彪¹

(1. 解放军合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037; 2. 75731 部队, 广东 花都 510897)

摘要 复杂环境下多站多目标无源交叉定位存在虚假定位点问题, 随着测向站数目和目标数目的增加, 虚假点数量急剧增加, 正确关联的难度增大。针对这一难题, 提出了 2 种基于冗余信息的虚假点消除算法。通过有选择性地利用方位角或时差冗余信息进行数据关联, 从而保证了在一定测向数据正确关联率的基础上, 能够有效避免完全采用所有测向站的方位数据直接进行关联带来运算量大的问题。仿真证明了 2 种算法的有效性。基于时差冗余信息的虚假点消除算法由于利用了额外的时差冗余信息, 在时差测量误差小于 0.5 ms 的情况下, 其正确关联率均高于基于角度冗余信息的虚假点消除算法, 更适用于时差测量精度较高、目标间距较小, 而测向误差较大的场合。

关键词 无源定位; 冗余信息; 虚假定位点; 时差

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.01.010

中图分类号 TN975 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)01-0046-05

无源测向交叉定位是通过高精度的测向设备在 2 个以上的观测点对目标进行测向, 通过测向线的交点来确定目标的位置^[1]。对多目标辐射源交叉定位过程中, 测向线相交将产生大量虚假定位点, 而且虚假定位点的数量随着观测站和目标数目的增多急剧增多, 正确关联的难度增大^[2]。设有 N 个目标辐射源, M 台测向站对每个目标辐射源测向得到 M 条测向线, 对所有目标辐射源信号完成测向后共得到测向线的数目 $N_t = NM$ (不考虑虚警、漏检的情况), 共产生测向交叉点 $N_c = N_t(N_t - 1) - NM(N - 1)/2$, 而真实位置点最多只可能有 $NM(M - 1)/2$ 个。如何快速、准确地排除这些虚假定位点一直是多站测向交叉定位研究中的难点^[3-5]。

对目标辐射源采用所有测向站的方位测量数据直接进行关联的方法很多^[6-9], 虽然能够提高关联的正确率, 但会增加大量计算量, 难以满足系统实时性的要求^[10]。本文提出的 2 种基于冗余信息的虚假点消除算法通过有选择性地利用角度和时差冗余信息进行数据关联, 在保证一定测向数据正确关联率的基础上, 能够有效地避免完全采用所有测向站进行数据关联带来运算量大的问题。

1 基于角度冗余信息的虚假点消除算法

1.1 基本思想

基于角度冗余信息的虚假点消除算法首先对 2 个测向站的测向数据进行关联, 当目标辐射源数为 n 时, 至多会得到 n^2 个测向交叉点。然后, 通过把测向交叉点对应第 3 个测向站的示向角, 与第 3 个测向站测得的测向角进行比较, 认为在存在测向误差的情况下, 差值最小的测向交叉点与第 3 个测向站对应的测向角形成正确关联, 从而得到 3 个测向站测向数据的正确关联组合。该算法的优点在于既能利用 3 站测向信息提高数据关联的正确率, 又能避免完全采用 3 个测向站进行关联所带来计算量大的问题。

1.2 算法流程

* 收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2007AA111008A1); 安徽省自然科学基金资助项目(070412053)

作者简介: 陈 红(1965-), 女, 安徽东至人, 副教授, 主要从事通信与通信对抗技术研究. E-mail: hplanhf@126.com

1) 求出 2 测向站所有测向交叉点。

在测向区域内存在 n 个目标辐射源, 测向站 A 所观测的方位角按升序排列为 $(\theta_{A1}, \theta_{A2}, \dots, \theta_{An})$, 测向站 B 所观测的方位角按升序排列为 $(\theta_{B1}, \theta_{B2}, \dots, \theta_{Bn})$ 。

$$X_T = \frac{Y_2 - Y_1 + X_1 \tan \theta_1 - X_2 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (1)$$

$$Y_T = \frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2 (X_2 - X_1) - X_2 \tan \theta_1 + X_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \quad (2)$$

在已知 2 测向站位置坐标的情况下, 根据式(1)、式(2), 可求得所有测向交叉点的坐标, 并存入矩阵 \mathbf{K} 中, \mathbf{K} 中的元素为 (X_{ij}, Y_{ij}) , $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。对 \mathbf{K} 中的 n^2 个元素, 只有 n 个元素为真实测向值, 其余元素为虚假测向值。当 \mathbf{K} 中某一元素 (X_{ij}, Y_{ij}) 的取值超出测向站的测向范围, 可以将该元素删除, 以减小进行关联时的数据量。

2) 利用第 3 站测向值进行数据关联。

把矩阵 \mathbf{K} 中的 n^2 个元素分别与测向站 C 的坐标 (X_3, Y_3) 按照式(3)进行计算得到矩阵 \mathbf{K}' , \mathbf{K}' 中的元素表示测向站 A, B 的所有测向交叉点与测向站 C 对应形成的测向角。

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \arctan \frac{Y_3 - Y_{ij}}{X_3 - X_{ij}}, & \tan \alpha_{ij} \geq 0 \\ 180^\circ - \arctan \frac{Y_3 - Y_{ij}}{X_3 - X_{ij}}, & \tan \alpha_{ij} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

假设所有的工程误差都迭加到测向误差中, 将矩阵 \mathbf{K}' 中所有元素与测向站 C 的观测方位角 $(\theta_{c1}, \theta_{c2}, \dots, \theta_{cn})$ 逐一进行比较。显然, 当 3 测向站的测向误差均为 0 时, 矩阵 \mathbf{K}' 中有 n 个元素与测向站 C 的观测方位角相等, 这 n 个元素对应测向站 A, B 的测向角与测向站 C 相应的观测方位角就组成正确关联。但在考虑测向误差的情况下, \mathbf{K}' 中元素与测向站 C 的观测方位角可能不相等, 可以认为差值最小的测向交叉点与第 3 个测向站对应的测向角形成正确关联。假设测向误差服从正态分布:

$$\Delta \theta \sim N(0, \sigma^2) \quad (4)$$

定义测量误差矩阵 $\Delta \alpha_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 为 \mathbf{K}' 中元素 α_{ij} 与测向站 C 的观测方位角 θ_{ck} 的差值, 即:

$$\Delta \alpha_k = |\alpha_{ij} - \theta_{ck}|, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

依据最小误差准则, 即满足式(6)条件的测量误差矩阵 $\Delta \alpha_k$ 中的第 t 个元素 $\Delta \alpha_{k_t}$ 对应 3 站的测向角判为正确关联:

$$\Delta \alpha_{k_t} = \min(\Delta \alpha_{k_{ij}}), \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

2 基于时差冗余信息的虚假点消除算法

2.1 基本思想

基于时差冗余信息的虚假点消除算法是在利用示向度线完成交叉定位的基础上, 结合到达时差信息, 根据多测向站之间测量数据的相似度来进行最优匹配, 从而实现测量数据之间的进一步正确关联, 消除虚假定位点。

2.2 算法流程

1) 结合时差信息求出所有测向交叉点。

在图 1 中, 设目标 T 辐射的电磁波到达测向站 A, B 的时间差为 Δt , 测向站 A 测得的角度为 θ_1 , C 为光速, TA 表示目标 T 与测向站 A 之间的距离, 则有:

$$TA - TB = \Delta t C \quad (7)$$

$$TB^2 = TA^2 + AB^2 - 2 TA AB \cos \theta_1 \quad (8)$$

联立 2 式可得:

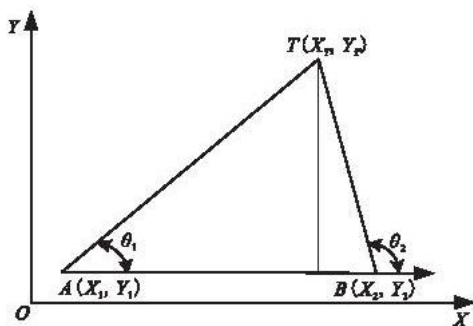


图 1 测向交叉定位原理示意图

ig. 1 The principle map of DF crossing - location

$$\overline{TA} = \frac{(\overline{\Delta tC})^2 - \overline{AB^2}}{2(\overline{\Delta tC} - \overline{AB\cos\theta_1})} \quad (9)$$

重新定义任一个交叉点的测向数据集 $s_{j_1, j_2} = \{\theta_{1, j_1}, \theta_{2, j_2}, \Delta t_{1, j_2}\}$, 由式(7) - (9)可以得出交叉点: $(x_{j_1, j_2}, y_{j_1, j_2}, T_{j_1, j_2}A)$ 。

2) 依据相似度最大准则进行数据关联。

当测向组合 s_{j_1, j_2} 对应真实目标, 且不考虑环境噪声和测向误差时, 应满足如下表达式:

$$\sqrt{(x_{j_1, j_2} - x_1)^2 + (y_{j_1, j_2} - y_1)^2} = \overline{T_{j_1, j_2}A} \quad (10)$$

式中 x_1, y_1 为测向站 A 的坐标。

当考虑测向误差时, 上式左右两边不相等, 定义测向站两测向数据的相似度 P_{j_1, j_2} :

$$P_{j_1, j_2} = \exp\left(-\frac{\text{abs}(\sqrt{(x_{j_1, j_2} - x_1)^2 + (y_{j_1, j_2} - y_1)^2} - \overline{T_{j_1, j_2}A})}{\sqrt{(x_{j_1, j_2} - x_1)^2 + (y_{j_1, j_2} - y_1)^2}}\right) \quad (11)$$

P_{j_1, j_2} 越接近 1, 测向站 A 的第 j_1 组数据与测向站 B 的第 j_2 组数据来自同一目标辐射源的概率越大, 即测向交叉点是真实目标的概率越大。反之, P_{j_1, j_2} 越接近 0, 测向站 A 的第 j_1 组数据与测向站 B 的第 j_2 组数据来自同一目标辐射源的概率越小, 即测向交叉点是虚假点的概率越大。

对于 M 个测向站, 可以设定 1 个主站, 其余 $M - 1$ 个为辅站。当检测概率为 1 时, 每个辅站的测向数据均可与主站产生 N^2 个测向交叉点, 分别计算各个交叉点的相似度 P , 可以构成 $M - 1$ 个 $N \times N$ 的相似度矩阵:

$$\mathbf{A}_{P_i} = (P_{1, j_2})_{N \times N}, i = 1, 2, \dots, M - 1 \quad (12)$$

对每个相似度矩阵 \mathbf{A}_{P_i} , 从第 1 行中选出相似度最大的一个元素对应一个目标辐射源, 然后删去该元素所在的行和列, 重复操作, 直至找出 N 个不同行不同列的元素, 对应于 N 个真实目标, 记为:

$$\mathbf{T}'_i = (P_{1_i}, P_{2_i}, \dots, P_{N_i}), i = 1, 2, \dots, M - 1 \quad (13)$$

把各个相似度矩阵筛选得到的元素按相同的序号组合成新的向量:

$$\mathbf{T}'_k = (P_{k_i})_{1 \times (M-1)} (k = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

即可得到所有测向站对应某个目标辐射源的测向数据的正确关联。

3 仿真分析与比较

假设无源测向交叉定位系统由 3 台测向站组成, 系统布局方式为: 站 1(10 km, 0), 站 2(90 km, 15 km), 站 3(120 km, 30 km), 各测向站的角度测量误差、时差测量误差都相等, 且各测量之间相互独立, 服从均值为 0 的高斯分布。

设目标辐射源数目为 5, 采用与文献[6-7]类似的十字编队仿真场景, 目标间距均为 d , 各目标的坐标分别为: 目标 1(80 - 2d km, 77 km), 目标 2(80 - d km, 77 km), 目标 3(80 km, 77 km), 目标 4(80 + d km, 77 km), 目标 5(80 + 2d km, 77 km)。

仿真 1: 设测向误差方差为 0.58 mrad(与文献[6-7]相同), 通过 1 000 次 Monte Carlo 实验的仿真结果见表 1。算法 1 表示基于角度冗余信息的虚假点消除算法, 算法 2 表示基于时差冗余信息的虚假点消除算法(时差误差为 0.5 ms)。

表 1 不同算法的正确关联率对比

目标间距/km	算法 1	算法 2	文献[6]算法	文献[7]算法
$d = 1$	0.513	0.759	0.015	0.25
$d = 2$	0.636	0.821	0.028	0.60

可见, 相同仿真条件下, 本文 2 种基于冗余信息算法的数据关联正确率均高于文献[6-7]的结果。

仿真 2: 设时差误差为 0.5 ms, 2 种算法经过 1 000 次 Monte Carlo 实验的仿真结果见图 2-3。图 2 给出了 2 种算法与测向误差的变化关系($d = 1$ km)。图 3 给出了 2 种算法随目标距离的变化关系(测向误差方差为 3 mrad)。

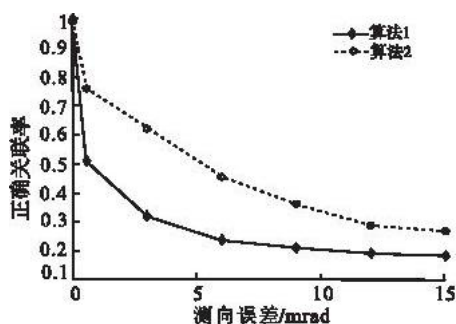


图 2 2 种算法正确关联率 ($d = 1 \text{ km}$)

Fig. 2 Correct association probability of two algorithms ($d = 1 \text{ km}$)

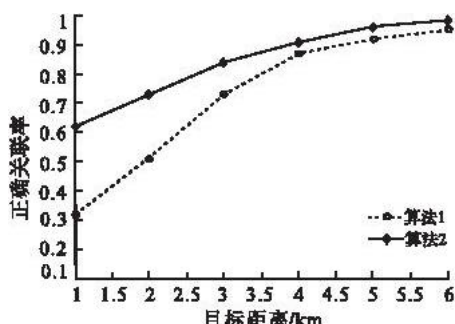


图 3 2 种算法正确关联率 (测向误差为 3 mrad)

Fig. 3 Correct association probability of two algorithms (DF error is 3 mrad)

可以看出,在测向站数目相同的仿真条件下,时差测量误差不大时,算法 2 得到的正确关联率高于算法 1,这是由于基于时差冗余信息虚假点消除算法除了利用相同的测向数据外,还利用了额外的时差冗余信息,从而提高了关联度。正因为算法 2 还需要利用时差信息进行关联计算,因此,关联时间大于算法 1,但 2 种算法的关联时间都比 3 测向站方位数据直接关联算法少^[10],见表 2。

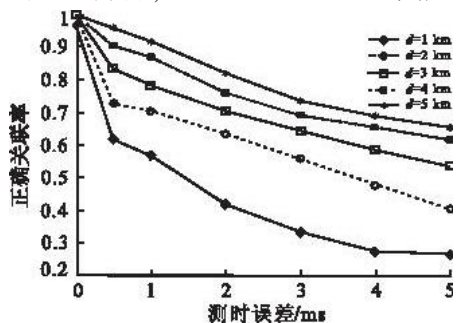
表 2 不同算法仿真时间对比

Tab. 2 Comparison with association time of various algorithms

算 法	算法 1	算法 2	3 测向站直接关联
仿真时间/s	0.666	1.416	2.6

仿真 3: 设测向误差方差为 3 mrad,基于时差冗余信息的虚假点消除算法随时差误差、及目标间距变化的仿真结果见图 4。

可以看出,正确关联率随着到达时差测量误差的增加而下降,尤其在目标辐射源空间距离 d 较小时下降明显,但 d 较大时,下降幅度不明显。图 5 是当时差误差增大到 2 ms 时 2 种算法的正确关联率,随着目标间距增大到 3 km 以上,算法 2 的正确关联率低于算法 1,由此可见,算法 2 适用于时差测量精度较高、目标间距较小的场合,但随着目标间距增大、测向误差减小、时差测量精度降低,基于时差冗余信息虚假点消除算法的优势将明显降低,甚至比基于角度冗余信息虚假点消除算法更差。



4 算法 2 的正确关联率 (测向误差为 3 mrad)

Fig. 4 Correct association probability of the algorithm No. 2 (DF error is 3 mrad)

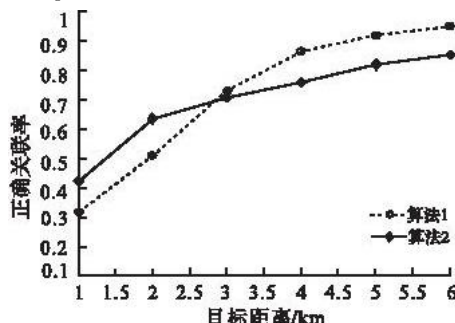


图 5 2 种算法正确关联率 (时差误差为 2 ms)

Fig. 5 Correct association probability of two algorithms (TDOA error is 2 ms)

4 结束语

复杂环境下的多目标辐射源定位一直是一个难以解决的问题,利用多测向站获取的目标方位信息对多目标进行交叉定位时存在大量的虚假定位点,通常的做法是对所有测向站的方位测量数据直接进行关联,虽然能够提高关联的正确率,但会增加大量计算量,难以满足系统实时性的要求,如何快速、准确地排除虚假定位点对于侦察方尤为重要。本文提出的基于冗余信息的虚假点消除算法通过有选择性地利用方位角或时差冗余信息进行数据关联,在保证一定测向数据正确关联率的基础上,能够有效避免采用所有测向站进行数据关联带来运算量大的问题,仿真证明了两种算法的有效性。基于时差冗余信息虚假点消除算法由于利用了

额外的时差冗余信息,在时差测量误差小于0.5 ms的情况下,其正确关联率均高于基于角度冗余信息的虚假点消除算法,更适用于时差测量精度较高、目标间距较小,而测向误差较大的场合。

参考文献:

- [1] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
HU Laizhao. Passive location[M]. Beijing:National defense industry press,2004. (in Chinese)
- [2] 刘海军,张学义,顾尔顺. 测向交叉定位系统多目标数据关联研究[J]. 现代防御技术,2007,35(2):89-91.
LIU Haijun, ZHANG Xueyi, GU Ershun. Study on measurement data association of passive location system based on direction of arrival[J]. Modern defence technology, 2007, 35(2):89-91. (in Chinese)
- [3] 何友,王国宏,陆大金,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000.
HE You, WANG Guohong, LU Dajing, et al. Multisensor information fusion with application[M]. Beijing:Publishing house of electronics industry,2000. (in Chinese)
- [4] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and data association[M]. New York:Academic press,1988.
- [5] Krishna R Pattipati, Yaakov Bar Shalom. A new relaxation algorithm and passive sensor data association[J]. IEEE Trans on AC, 1992, 37(2):198-213.
- [6] 王成,李少洪,黄槐. 测向交叉定位系统的多目标测量数据关联[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(9):104-106.
WANG Cheng, LI Shaohong, HUANG Huai. Multi-target measurement data association for passive location systems based on direction of arrival[J]. System engineering and electronics,2002,24(9):104-106. (in Chinese)
- [7] 辛云宏,杨万海. 被动多站多目标的测量数据关联算法研究[J]. 宇航学报,2005,26(6):748-752,797.
XIN Yunhong, YANG Wanhai. A method of the passive multi-sensor multi-target measurement data association[J]. Journal of astronautics,2005,26(6):748-752,797. (in Chinese)
- [8] Bishop Adrian N, Pathirana Pubudu N. Localization of emitters via the Intersection of bearing lines;a ghost elimination approach[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2007,56(5):1-5.
- [9] 刘海军,王丽娜,李陟. 测向交叉定位及数据关联技术研究[J]. 计算机工程与设计,2007,28(3):657-660.
LIU Haijun, WANG Lina, LI Zhi. Study on target location and measurement data association of passive detection system based on direction of arrival[J]. Computer engineering and design,2007,28(3):657-660. (in Chinese)
- [10] LIU Hang, DOU Lihua. Research on data association for passive sensor based on the redundant information[C]//Proceedings of the 25th Chinese control conference. Harbin:IEEE press,2006:7-11.

(编辑:徐楠楠)

Study of Algorithm for Eliminating Ghost Based on Redundant Information

CHEN Hong¹, CAI Xiao-xia¹, TAN Kun², JIA Zhan-biao¹

(1. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China; 2. Unit 75731, Huadu 510897, Guangdong, China)

Abstract: The ghost problem exists in multi-DF station multi-target passive cross-location under complicated environment. The number of ghost is increased rapidly and the correct association is more difficult along with the increasing DF station and target. Aimed at this problem, two algorithms of eliminating ghost based on redundant information are presented. By associating data with azimuth angle or TDOA redundant information selectively, high computation burden can be avoided effectively when associating directly with azimuth angle data of all DF stations, based on ensuring certain association probability. Computer simulations show that these two algorithms are effective. Because of using additional TDOA redundant information, the correct association probability of eliminating ghost algorithm based on TDOA redundant information is higher than that of eliminating ghost algorithm based on azimuth angle redundant information when the TDOA error is lower than 0.5ms. The eliminating ghost algorithm based on TDOA redundant information is more adapted to the occasion with high TDOA precision, low space between targets, and big DF error.

Key words: passive location; redundant information; ghost; TDOA