

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2017.03.012

# 基于只测向的机载单站定位技术

许志伟<sup>1</sup>, 王运锋<sup>1</sup>, 张小琴<sup>2</sup>

(1. 四川大学计算机学院国家空管自动化系统技术重点实验室, 成都 610065; 2. 阿坝师范学院生化系, 汶川 623002)

**摘要:** 针对机载单站无源交叉定位技术中存在的虚假定位问题, 提出一种新的关联方法. 该算法先通过异面测向线距离进行测向粗关联, 排除大部分虚假定位组合, 减小运算量. 再利用基于不变量的关联方法进行测向细关联, 进一步排除虚假测向组合, 提取出真实目标的测向线组合进行交叉定位. 实验结果表明, 文中算法可以满足三维空间下对目标准确、快速的定位需求.

**关键词:** 无源定位; 最小二乘估计; 多目标; 数据关联; 正确相关率

**中图分类号:** TN953      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2017)02-0293-05

## Airborne single-station passive location technology only based on bearing method

XU Zhi-Wei<sup>1</sup>, WANG Yun-Feng<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-Qin<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science, Sichuan University, National Key Laboratory of Air Traffic Control Automation System Technology, Chengdu 610065, China;

2. ABa Teachers University, Chemical and Life Science Department, Wenchuan 623002, China)

**Abstract:** In this paper, a new association method is proposed to tackle the false location problem of passive cross location technology in airborne single station. This algorithm first performs rough data association by using bearing line distances on different surfaces to eliminate most false location combinations, thus reducing the amount of computation. Next the algorithm will carry out fine association by using invariant-based correlation method to further exclude false bearing line combinations and extract real bearing line combinations of target for cross location. Experimental results show that the proposed algorithm can meet the need for accurate and quick target location in three-dimensional space.

**Keywords:** Passive location; Least squares estimation; Mult target; Data association; Related correct rate

## 1 引言

随着电子信息装备在实战中的大量应用, 电磁空间的斗争愈来愈激烈, 无源定位技术正是在该背景下应运而生并不断发展, 由该技术具有作用距离远、隐蔽接收、不易被对方发觉的优点, 使得它在辐射源态势快速感知、电子干扰引导、雷达探测引导、火力打击引导等方面扮演着不可或缺的角色. 目前

常用的定位方法包括测向定位法, 角度变化率定位法, 相位差定位法以及多种方法联合的联合定位法<sup>[1,2]</sup>. 相比较而言, 角度信息由于其在复杂环境下较容易获得的优点常常被优先考虑应用在无源交叉定位技术中.

通过载机对目标进行连续测量, 在获得一定量的测向角度信息积累的基础上, 通过适当的数据关联处理便可以对目标进行定位. 但是随着测量周期

收稿日期: 2016-06-02

基金项目: 国家空管科研课题(GKG201403001); 四川省教育厅项目(14ZB0337)

作者简介: 许志伟(1990-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士生, 研究方向为雷达数据处理. E-mail: puchengho@163.com

通讯作者: 王运锋. E-mail: yfwang@scu.edu.cn

和目标数目的增多,将产生大量的虚假定位点,如何排除虚假定位点一直是无源交叉定位研究中的难题,与之相关的研究成果也日益增多<sup>[3-15]</sup>.目前,有效的数据关联算法有:最小距离法<sup>[4]</sup>、最大似然法<sup>[5]</sup>、拉格朗日松弛算法<sup>[6]</sup>和基于聚类复合弹性神经网络法等<sup>[7]</sup>.虽然方法很多,但是每种方法都有其应用的条件和优缺点,例如,最小距离法虽然计算量小,但是只能解决观测平台与目标连线两两不共面时的虚假点去除问题,而且准确率较低;最大似然法虽然准确率高,但计算量大,不适用于实时处理;基于聚类复合弹性神经网络法效果较好,但不论是聚类还是神经网络优化,都需消耗大量时间,亦不适于实时处理.本文在借鉴文献<sup>[3]</sup>的基础上,提出了一种新的数据关联算法.该算法首先根据异面测向线距离进行测向粗关联,排除掉大部分虚假定位组合;再利用基于不变量的关联方法进一步排除虚假定位组合,提取出真实目标的测向线组合进行交叉定位,保证了较高的正确相关率.

## 2 复杂环境下定位模型的建立

事实上,复杂环境下测向来源不仅包含直射信号,还常常包含辐射源在环境中散射产生的多径信号,这就是多径问题<sup>[16,17]</sup>.由于本文不把解决多径干涉问题作为研究重点,所以这里简化对多径问题的处理.借鉴文献<sup>[16]</sup>,本文假设测向源只包含直射信号和反射信号.并且都作为有效测向来源进行关联定位.根据已经存在的事实,每条测向信号能且只能来自一个目标,在不存在漏检的情况下,我们总能找到来自同一目标的两条直射信号,故反射信号即使能关联到某条直射信号,它们也一定不是最优的关联组合,所以基本不会对真实目标的定位产生影响,但是反射信号和反射信号可能满足关联条件,这样会产生一些虚假目标;当存在漏检情况时,需要经过两个以上的测向周期才能确定目标的位置,这种情况需要通过衡量强度因子来进一步确定哪些是真实目标.最后由于测向信号数量的增加,关联数据规模提高,对程序执行时间也有一定影响.

由此本文建立了三维定位模型.图 1 为三维交叉定位示意图.

设目标位置  $G(x, y, z)$ , 载机两个时刻的位置分别是  $A_1=(x_1, y_1, z_1), A_2=(x_2, y_2, z_2)$ , 其对目标  $G$  的角度测量信息分别为  $(\alpha_i, \beta_i), i=1, 2$ , 其中  $\alpha, \beta$  分别代表方向角、俯仰角, 测量方程可以

表示为

$$\begin{cases} \alpha_i = \text{tg}^{-1} \left( \frac{y - y_i}{x - x_i} \right), \\ \beta_i = \text{tg}^{-1} \left( \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \right), \end{cases} \quad i=1, 2 \quad (1)$$

利用三角变换将非线性方程组(1)转化为线性方程组如下:

$$\begin{cases} \sin \alpha_i x - \cos \alpha_i y = \sin \alpha_i x_i - \cos \alpha_i y_i, \\ \cos \alpha_i \sin \beta_i x + \sin \alpha_i \sin \beta_i y - \cos \beta_i z = \\ \cos \alpha_i \sin \beta_i x_i + \sin \alpha_i \sin \beta_i y_i - \cos \beta_i z_i, \end{cases} \quad i=1, 2 \quad (2)$$

将线性方程组(2)写成矩阵的形式如下:

$$HX = Y \quad (3)$$

其中:

$$H = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 & -\cos \alpha_1 & 0 \\ \cos \alpha_1 \sin \beta_1 & \sin \alpha_1 \sin \beta_1 & -\cos \beta_1 \\ \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 & 0 \\ \cos \alpha_2 \sin \beta_2 & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 & -\cos \beta_2 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 x_1 - \cos \alpha_1 y_1 \\ \cos \alpha_1 \sin \beta_1 x_1 + \sin \alpha_1 \sin \beta_1 y_1 - \cos \beta_1 z_1 \\ \sin \alpha_2 x_2 - \cos \alpha_2 y_2 \\ \cos \alpha_2 \sin \beta_2 x_2 + \sin \alpha_2 \sin \beta_2 y_2 - \cos \beta_2 z_2 \end{bmatrix}$$

$$X = [x, y, z]^T$$

据此,可求出最小二乘解如下所示:

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Y \quad (4)$$

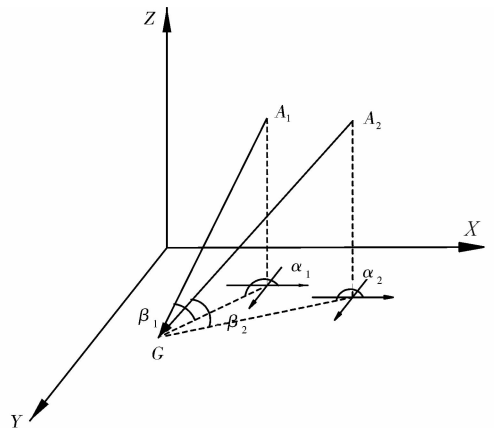


图 1 三维交叉定位示意图

Fig. 1 Three-dimensional cross orientation diagram

## 3 测向数据关联

下面考虑用交叉定位的方法,根据载机两个时刻的测向信息同时对  $M$  个辐射源的位置进行估计

的情况. 此时, 在正确测向的前提下, 有  $M^2$  种定位方法, 而其中只有  $M$  种排列组合是正确的, 其他组合均得到虚假定位点, 必须设法消除. 因此, 虚假定位点的排除是测向交叉定位法应用的前提.

这里采用两级关联算法来进行测向数据关联, 即先利用异面测向线距离进行测向粗关联, 排除掉大部分虚假定位组合, 减少下一级的计算量, 再利用基于不变量的关联方法进行测向细关联, 找出最有可能来自同一个目标的测向线进行交叉定位, 实现对三维空间多目标的定位.

### 3.1 测向粗关联

根据载机的位置和测向角度数据可以得到载机测向线, 当载机两个时刻的测向线来自同一目标时, 两条测向线可以交于空间内一点, 令

$$\begin{cases} p_i = \cos \alpha_i \cos \beta_i, \\ q_i = \cos \alpha_i \sin \beta_i, \quad i = 1, 2 \\ r_i = \sin \beta_i, \end{cases} \quad (5)$$

则测向线距离:

$$d_{12} = \pm \frac{\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ p_1 & q_1 & r_1 \\ p_2 & q_2 & r_2 \end{vmatrix}}{\sqrt{\begin{vmatrix} p_1 & q_1 \\ p_2 & q_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} q_1 & r_1 \\ q_2 & r_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} r_1 & p_1 \\ r_2 & p_2 \end{vmatrix}^2}} \quad (6)$$

由于存在测量误差, 实际上即使来自同一目标的测向线距离也不可能为零, 因此设定阈值, 满足阈值的测向线组合则添加到候选测向组合中. 测向线距离法方法简单, 计算量适中, 而且可以去除大部分虚假定位组合, 大大减小细关联阶段的计算量, 但由于受测向误差影响较大, 尤其在三维空间中更是如此, 所以适合粗关联阶段.

### 3.2 测向细关联

通过粗关联阶段得到的候选关联组合中仍然有一些虚假定位组合, 文献[3]中的处理方法是将每时刻载机的所有测向线进行编号处理, 按照已经存在的事实, 每时刻每条测向线只能来自一个目标, 即如果候选关联组合中存在虚假定位组合, 则必然存在同一测向线与两个或者更多测向线关联的情况, 把这些测向组合找到后选择最优的测向组合即被认为是真实测向组合, 这种情况在目标数量较少即测向线数量较少时实现比较容易, 但是当目标数量增多而且考虑到机载单站在实际定位过程中需要至少三个甚至更多周期才能准确定位目标的情况, 测向线数量会急剧增多, 并且当存在漏检、

干扰目标时, 无论测向角度信息的存储, 还是测向线匹配都变得越来越繁杂, 所以这种方法适用于理论分析而不适合于实时定位环境. 本文采用基于不变量的关联方法进行测向细关联, 具体方法如下:

载机两个时刻的位置可以确定一条直线  $A_1A_2$ :

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (7)$$

对于  $t_1$  时刻的载机位置  $A_1$  和对目标  $T$  的测向方位角、俯仰角  $\alpha_1, \beta_1$ , 由此可以确定直线  $A_1G$  为

$$\begin{cases} y - y_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 (x - x_1), \\ z - z_1 = \operatorname{tg} \beta_1 \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \end{cases} \quad (8)$$

根据式(1)可以确定直线  $A_1G$  上的一点  $(x_1 + \cos \alpha_1, y_1 + \sin \alpha_1, z_1 + \operatorname{tg} \beta_1)$ , 由  $A_1A_2$  和  $A_1G$  可以确定一个空间平面, 表示为

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x - x_1 - \cos \alpha_1 & y - y_1 - \sin \alpha_1 & z - z_1 - \operatorname{tg} \beta_1 \\ x - x_2 & y - y_2 & z - z_2 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 & \operatorname{tg} \beta_1 \\ x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} A_x = \lambda_3 \sin \alpha_1 - \lambda_2 \operatorname{tg} \beta_1, \\ A_y = \lambda_3 \cos \alpha_1 - \lambda_1 \operatorname{tg} \beta_1, \\ A_z = \lambda_2 \cos \alpha_1 - \lambda_1 \sin \beta_1, \end{cases} \quad \text{设} \quad \text{则该平面与水平}$$

面的夹角  $\varphi_1$  的正切值表示为

$$F_1 = \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\sqrt{\lambda_3^2 - 2\lambda_3 \operatorname{tg} \beta_1 (\lambda_2 \sin \alpha_1 + \lambda_1 \cos \alpha_1)} + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \operatorname{tg}^2 \beta_1}{\lambda_2 \cos \alpha_1 - \lambda_1 \sin \alpha_1} \quad (10)$$

同样, 根据直线  $A_1A_2$  和  $A_2G$  确定的平面与水平面的夹角  $\varphi_2$  的正切值表示为

$$F_2 = \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\sqrt{\lambda_3^2 - 2\lambda_3 \operatorname{tg} \beta_2 (\lambda_2 \sin \alpha_2 + \lambda_1 \cos \alpha_2)} + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \operatorname{tg}^2 \beta_2}{\lambda_2 \cos \alpha_2 - \lambda_1 \sin \alpha_2} \quad (11)$$

对于同一个目标,  $A_1A_2, A_1G$  和  $A_1A_2, A_2G$  确定的是同一个平面  $A_1A_2G$ , 因此  $F_1 = F_2$ ; 对于不同的目标  $F_1 \neq F_2$ , 称  $F_1$  和  $F_2$  为不变量. 当存在测量误差时, 即便来自于同一个目标,  $F_1, F_2$  也不一定相等, 但通常情况下来源于不同目标的  $F_1, F_2$  差距更大. 由于  $F_1$  只与  $A_1$  测量数据和直线  $A_1A_2$  有关,  $F_2$  只与  $A_2$  测量数据和直线  $A_1A_2$  有关, 因此

每个时刻均可以独立计算出  $M$  个不变量,然后比较不同测向线之间不变量的接近程度,最为接近的测向线即可认为来源于同一个目标。

通过上面两级关联后得到的候选关联组合基本能保证交叉定位后的点就是真实目标位置,但是实际测量中会受到测量误差,漏检以及干扰目标的影响,两个周期的测向数据交叉定位后仅可得到目标位置的可能点而不能确定哪些是真实目标,本文提出强度因子的概念,比如三个周期的测向数据两两交叉定位后得到三组目标位置信息,理想情况下我们的真实目标点会同时出现在这三组位置信息中,但是抛开漏检和干扰目标的影响,仅仅考虑存在测量误差条件下,三组位置信息中真实目标的数据也不可能完全相同,所以还要选取适当的坐标门限,规定坐标间距小于门限的点为同一个点,由第一组的点分别和第二组、第三组的点匹配,更新点的强度因子,强度因子大即出现频率高的点就是真实目标。

## 4 仿真分析

利用文中算法对目标进行定位,研究影响算法性能的因素,并与单纯多维分配算法、分层关联算法进行定位性能上的比较。相关具体参数设置如下:载机以  $(-1600 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1000 \text{ m})$  为圆心,以  $3500 \text{ m}$  为运动半径,以  $0.0629 \text{ rad/s}$  为角速度做匀速圆周运动并对目标进行测向定位。9 个固定目标的位置分别为:

$$\begin{aligned} G_1 &(-1968.551 \text{ m}, -643.8290 \text{ m}, -11.97864 \text{ m}), \\ G_2 &(-1129.040 \text{ m}, -370.2406 \text{ m}, -10.24128 \text{ m}), \\ G_3 &(-1617.086 \text{ m}, 808.6344 \text{ m}, -46.81728 \text{ m}), \\ G_4 &(-1517.086 \text{ m}, -508.6344 \text{ m}, -22.81728 \text{ m}), \\ G_5 &(-1317.086 \text{ m}, -460.6344 \text{ m}, -16.81728 \text{ m}), \\ G_6 &(-1717.086 \text{ m}, 460.6344 \text{ m}, -5.81728 \text{ m}), \\ G_7 &(-1268.551 \text{ m}, 200.8290 \text{ m}, -11.97864 \text{ m}), \\ G_8 &(-1429.040 \text{ m}, 370.2406 \text{ m}, -12.24128 \text{ m}), \\ G_9 &(-1868.551 \text{ m}, 643.8290 \text{ m}, -11.97864 \text{ m}). \end{aligned}$$

目标在载机飞行过程中均在探测范围内。假定测量误差的主体分布服从均值为 0,方差为  $\delta$  的正态分布,定位精度表示目标位置的测量值和真实值的距离差,反映算法的性能。在实验过程中根据需求目标数量从以上目标中选取。

### 4.1 仿真实验

**仿真实验 1:**在不同测量误差下文中算法性能比较。在不同的测量误差下( $\delta$  分别为 0.5, 1, 2 单

位: mrad)算法性能如表 1 所示。

表 1 不同误差和目标数量对算法定位精度的影响  
Tab. 1 Effects of different errors and target quantity on the accuracy of algorithm positioning

目标数量	3			9		
误差 mrad	0.5	1	2	0.5	1	2
精度 m	0.9	2.4	4.1	1.0	2.51	4.2

**仿真实验 2:**在不同载机速度下文中算法性能比较。假定测量误差  $\delta = 0.5 \text{ mrad}$ ,在不同的载机速度(分别为  $220 \text{ m/s}$ ,  $250 \text{ m/s}$ ,  $290 \text{ m/s}$ )下算法性能如表 2 所示。

表 2 不同载机速度对算法定位精度的影响  
Tab. 2 Effects of different carrier aircraft speeds on the accuracy of algorithm positioning

目标数量	3			9		
速度 m/s	220	250	290	220	250	290
精度 m	0.8	0.7	0.71	0.73	0.67	0.6

**仿真实验 3:**在相同条件下文中算法和单纯多维分配算法、分层关联算法性能比较。针对不同的测量误差下( $\delta$  分别为 3, 5 单位: mrad),使用文中算法以及单纯多维分配算法、分层关联算法进行 500 次仿真实验,数据正确相关率和运行时间如表 3 所示。

表 3 不同算法正确相关率及运行时间  
Tab. 3 Correct correlation rate and run time of different algorithms

指标	算法		
	单纯多维分配算法	分层关联算法	文中的算法
$\delta = 3 \text{ mrad}$	97.1%	97.1%	98.2%
$\delta = 5 \text{ mrad}$	91.7%	91.3%	92.6%
时间 s	2.438	0.0339	0.0714

表 3 中,正确相关率 = 计算得到定位点个数 / 全部真实定位点个数;计算算法运行时间时不考虑载机探测周期。

### 4.2 结果分析

(1) 仿真 1 研究了测量误差的大小对文中算法定位精度的影响,从表 1 可以看出,随着测量误差的减小,测量的准确度增高,算法所获得的定位精度也就越高。同时还可以看出,目标数量的增加,对算法的定位精度可以认为没有影响,显示出算法在实战背景下同时定位多目标的能力。

(2) 仿真 2 研究了不同载机速度对文中算法

定位精度的影响,从表 2 可以看出,在其它条件相同的情况下,随着载机速度的提高,定位精度并没有明显的差别.同时还可以看出,目标数量的增加,对算法的定位精度可以认为没有影响.另外载机高速飞行势必对测量准确度产生影响,因此,选择满足测向定位需求的适当的速度进行飞行即可.

(3) 仿真 3 比较了文中算法和单纯多维分配算法、分层关联算法的性能.从表 3 可以看出,在相同的条件下,文中算法关联正确率略优于其他两种方法,分层关联算法的运行时间较短,但与文中算法差别不大.在实际应用中,分层关联算法在粗关联阶段就要进行大量的逆矩阵运算,运算量大,过程复杂,需要存储大量的数据,无法满足实时定位需求.文中算法,存储的数据量少,运算相对简单,仅需要在细关联阶段进行少量的逆矩阵计算,计算量适中,计算复杂度与目标数量基本保持正比关系,能够在测量过程中进行实时定位,因此文中算法相比其他两种算法更具有实战应用前景.

通过仿真分析可知,测量误差是影响无源交叉定位性能的最主要因素,同时在实际应用中测量周期也是需要考虑的因素,因此可以根据仿真结论改变影响因素来进一步提高定位精度和运行时间.

## 5 结 论

针对无源交叉定位技术中虚假定位点的去除,本文提出了一种两级数据关联方法.为实现无源交叉定位技术的工程应用增添了一种新的解决途径.通过仿真分析可看出,本文所提出的方法具有较高的正确相关率,而且关联速度快、计算量适中.

### 参考文献:

[1] 王本才,侯慧群,张国毅.无源定位技术[J].舰船电子对抗,2006,29(6):20.  
 [2] 周振,王更辰.机载单站对机动目标无源定位与跟踪[J].电光与控制,2008,15(3):60.  
 [3] 姚怡,陈哨东.一种机载IRST组网多目标定位中的虚假点去除算法[J].科学技术与工程,2013,13

(27):7987.  
 [4] 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,1998,21(4):20.  
 [5] 修建娟,何友,车志宇,等.三维测向无源定位中的数据关联算法研究[J].计算机工程与设计,2009,31(2):329.  
 [6] 周莉,何友,王峰,等.多传感器多目标数据互联中的拉格朗日松弛算法研究[J].青岛大学学报,2004,17(4):29.  
 [7] 刘梅,权太范,姚天宾,等.多传感器多目标无源定位跟踪算法研究[J].电子学报,2006,34(6):991.  
 [8] Chummun M R, Kirubarajan T, Pattipati K R, et al. Fast data association using multidimensional assignment with clustering[J]. IEEE Trans AES, 2001, 37(3): 898.  
 [9] Zhou R, Bose N K. Multitarget tracking in clutter: fast algorithms for data association[J]. IEEE Trans AES, 1993, 29(2): 352.  
 [10] Reid D B. An algorithm for tracking multiple targets[J]. IEEE Trans AC, 1979, 24(6): 843.  
 [11] Danchick R, Newnam G. A fast method for finding the exact N-best hypotheses for multitarget tracking[J]. IEEE Trans AES, 1993, 29(2): 555.  
 [12] 王明辉,游志胜,赵荣椿,等.一个快速的被动式传感器数据关联算法[J].电子学报,2000,28(12):45.  
 [13] 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.  
 [14] 莫成坤,陈树新,吴昊,等.基于角度信息的递推最小二乘无源定位算法[J].计算机测量与控制,2014,22(9):2863.  
 [15] 刘宗香,谢维信,杨焯.被动传感器系统分层快速关联算法[J].电子学报,2004,32(12):2038.  
 [16] 张玉宪,魏少明.多径效应对无源定位性能的影响[J].电子测量技术,2009,32(7):18.  
 [17] Coutts S D. Passive localization of moving emitters using out-of-plane multipath[J]. IEEE Trans AES, 2000, 36(2): 584.