

# 一种多普勒频移优化搜索的目标运动分析算法

李 龙<sup>1</sup>, 鞠 阳<sup>2</sup>, 燕雪峰<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100036)

**摘 要:**在多普勒频移空间里,由于搜索精度的不确定性,导致算法结果收敛缓慢或者计算效率降低。提出了一种改进的方位-线谱频移的目标运动分析算法,将滤波方程从非线性领域映射为形式简洁的线性领域,在对多普勒频率匹配时,将对搜索元素的目标函数最佳估计问题转化成一个多峰值非线性的优化问题,给出了一种新的优化搜索匹配算法。实验结果表明,此算法能够实现对目标的无源跟踪定位,降低了算法的时空复杂度,提高了计算效率和收敛精度,并减少了跟踪定位所用时间。

**关键词:**目标运动分析;多普勒频偏;多峰值;局部最优

**中图分类号:**TP391.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2015)07-0045-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2015.07.010

## A Target Motion Analysis Algorithm Based on Doppler Frequency Shift Optimization Search

LI Long<sup>1</sup>, JU Yang<sup>2</sup>, YAN Xue-feng<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China;

2. Systems Engineering Research Institute of China Shipping Industry, Beijing 100036, China)

**Abstract:** To solve the problem that the algorithm's slow convergence, or the lower computational efficiency caused by the uncertainty of the search accuracy in Doppler frequency shift space, an improved target motion analysis algorithm of bearing-line Doppler frequency shift is proposed. The filter equation is transformed from the nonlinear field to the simple linear form field. When the Doppler frequency is matched, a new optimized search matching algorithm is put forward, that the best estimation problem of the search element's objective function is transformed into a multi-peak and nonlinear optimization problem. Experimental results show that the algorithm can achieve the goal of passive tracking, decreasing the time and space complexity of the algorithm, improving the computational efficiency and convergence precision, and reducing the tracking time.

**Key words:** TMA; Doppler frequency offset; multi-peak; local optimization

## 0 引 言

目标运动要素解算是潜艇作战指挥和武器控制的核心内容,一直是水下作战系统的研究热点。在目标的探测和跟踪过程中,潜艇为了保持自身的隐蔽性,通常采用综合声纳被动工作方式。主动声纳主动发射水声信号并从水中目标发射回波中获取目标的参数信息,虽然能快速准确地得到目标位置,但是也非常容易暴露自身,成为攻击对象。而被动声纳通过接收和处理水中目标发出的辐射噪声或声纳信号,获得水中目

标的参数信息,其中方位信息比较可靠。在此基础上,研究人员提出了单阵被动纯方位算法<sup>[1-3]</sup>、非线性最小二乘滤波<sup>[4]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[5]</sup>、无味卡尔曼滤波<sup>[6-7]</sup>和粒子滤波<sup>[8]</sup>等,其实质是利用声纳多次观测来拟合目标的运动路线。然而,要实现这些算法的定位跟踪功能,观测站需进行某种机动运动,在复杂多变的海战环境下,机动可能会带来一定的危险,这给可观测性以及隐蔽性要求带来了一定的限制。

为了克服上述问题,研究人员又提出了多阵联合被动纯方位算法<sup>[9-12]</sup>,这需要多站同步工作和数据发

收稿日期:2014-08-04

修回日期:2014-11-06

网络出版时间:2015-06-23

基金项目:装备部预先研究项目(513030606)

作者简介:李 龙(1988-),男,硕士,研究方向为网络与分布计算;燕雪峰,博士,副教授,研究方向为计算机网络和分布交互仿真。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150623.1005.003.html>

送,严重依赖多站间的通信情况,限制了该系统的应用。在低频段内,舰艇辐射噪声线谱的功率和惯性较大,有较高的强度和稳定度,为估计目标运动要素提供了新的方向。文献[13]提出了一种基于多普勒频移<sup>[14]</sup>匹配的目标运动分析算法,不需要预先提取目标线谱即可估计目标运动参数,但观测平台的运动状态需为静止状态,这使算法的适用范围受到限制;在多普勒匹配阶段,严重依赖于搜索精度,精度的选择不当,会导致结果收敛缓慢,或者计算效率降低。

文中在观测平台和目标均保持匀速直航运动的前提下,综合考虑目标方位的变化率以及多普勒线谱频移信息,先对方位信息进行滤波处理,然后对线谱的多普勒频移匹配通过局部最优与搜索元素的目标函数的最佳估计,将问题转化成一个多峰值非线性的优化问题,最终求得目标的运动参数信息,在收敛时间、收敛精度和计算效率等方面较以往同类算法一定的提高。

## 1 TMA 算法原理

在综合声呐被动跟踪过程中,观测平台与目标均保持匀速直航运动,且目标辐射噪声中含有窄带分量。观测平台在接收目标辐射噪声的过程中,通过波束形成可以提取目标的方位信息,对跟踪波束做频谱分析可以得到目标的时变频率偏移信息。文中研究的主要问题是根据观测平台探测到的目标方位序列和线谱频率偏移信息来估计运动目标的状态参数。

假定目标和观测平台都在同一个水平面上运动,以正东方向为  $X$  轴,正北方向为  $Y$  轴,观测平台发现目标时的所在位置为坐标原点  $O$ ,建立直角坐标系。在时刻  $t = i$ ,目标位于  $M_i$ ,观测平台位于  $W_i$ ,则目标相对于观测平台的方位为  $F_i$  以及多普勒频率为  $\bar{f}_i$ ,目标的方位测量序列和多普勒频率序列分别为  $\{F_0, F_1, \dots, F_n\}$ 、 $\{\bar{f}_0, \bar{f}_1, \dots, \bar{f}_n\}$ 。观测平台以速度  $v_w$ 、航向  $c_w$  作匀速直线运动,则观测平台的运动状态向量可记为  $\mathbf{X}_w = [x_w \ y_w \ v_{wx} \ v_{wy}]^T$ 。式中:  $x_w$  为观测器  $x$  轴的位置分量,  $y_w$  为观测器  $y$  轴的位置分量,  $v_{wx}$  为观测器  $x$  轴的速度分量,  $v_{wy}$  为观测器  $y$  轴的速度分量;同样,目标的运动状态向量可记为  $\mathbf{X}_m = [x_m \ y_m \ v_{mx} \ v_{my}]^T$ ,则目标与观测器之间的相对运动状态向量为  $\mathbf{X} = \mathbf{X}_m - \mathbf{X}_w = [x_i \ y_i \ v_x \ v_y]^T$ 。

在上述向量定义的条件,则  $t = i$  时刻目标的方位角测量方程为:

$$F_i = \arctan\left(\frac{x_i}{y_i}\right) + v_{F_i} \quad (1)$$

式中,  $\{v_{F_i}\}$  为高斯白噪声序列,偏差为  $\sigma_{F_i}^2$ ,  $F_i$  是无偏差值。

当目标和观测平台有相对运动时,假设在  $t = i$  时刻目标相对于观测平台的径向速度为  $v_i$ ,那么目标产生的噪声对于观测站将经历一个多普勒频移,此刻经过多普勒偏移后的频率为:

$$\bar{f}_i = f_T \left(1 + \frac{v_i}{c}\right) \quad (2)$$

其中,  $c$  为声音在水中的速度;  $f_T$  为目标线谱的频率值。当目标和观测平台作相向运动时,  $v_i$  的符号为 +, 当作背向运动时,  $v_i$  的符号为 -。由于径向速度  $v_i$  可用目标和观测平台的速度表示,则式(2)整理得:

$$\bar{f}_i = f_T \left(1 - \frac{v_{mx} - v_{wx}}{c} \sin F_i - \frac{v_{my} - v_{wy}}{c} \cos F_i\right) \quad (3)$$

由文献[15]可知,当观测平台处于静止状态,目标作匀速直线运动时,在  $t = i$  时刻有以下关系式:

$$\tan \Delta F_i = \frac{\bar{v}_t \sin(180^\circ - \bar{c} + F_0)}{D_0 - \bar{v}_t \cos(180^\circ - \bar{c} + F_0)} \quad (4)$$

其中,  $(\bar{v}, \bar{c})$  为相对速度和航向,将式(4)写成矩阵方程为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{A} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\text{其中, } \mathbf{X} = \begin{pmatrix} t_0 \cot \Delta F_0 \\ t_1 \cot \Delta F_1 \\ \vdots \\ t_n \cot \Delta F_n \end{pmatrix}; \mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_0 & 1 \\ t_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_n & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\cot(180^\circ - \bar{c} + F_0) \\ D_0 \\ \vdots \\ \frac{D_0}{v \sin(180^\circ - \bar{c} + F_0)} \end{pmatrix}; \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \vdots \\ \Delta t_n \end{pmatrix}, \Delta t_i \text{ 为观测误差。}$$

根据最小二乘准则,求参数  $\mathbf{A}$  最小二乘估计  $\hat{\mathbf{A}}$ :

$$\hat{\mathbf{A}} = (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{X} \quad (6)$$

根据式(6)可得到目标航向  $c_m$  的估计值,令搜索元素  $P = [v_m, c_m]^T$ ,则  $P$  的搜索空间范围为  $v_m \in (v_{\min}, v_{\max})$ 、 $c_m \in (\hat{c}_m - \delta, \hat{c}_m + \delta)$ 。搜索元素  $P$  的目标函数为

$$M(P) = \sum A_i \quad (7)$$

其中,  $A_i$  为  $t = i$  时刻多普勒频率  $\bar{f}_i$  对应的幅值,目标函数  $M(P)$  为各时刻的幅值叠加。当搜索元素  $P$  与目标运动参数匹配时,目标函数取最大值,可求得相对应的目标速度  $v_m$  和目标航向  $c_m$ ,联合其他公式即可得到目标其余参数信息。

## 2 多普勒频率空间搜索优化

在对目标线谱进行多普勒频移匹配时,通过对搜索空间的全局搜索,计算每个搜索元素的目标函数,得到一组重点搜索区域,将目标运动分析问题转化成一

个多峰值非线性的优化问题。多普勒频移匹配空间优化的基本思路,一共分两个阶段:

(1)在搜索空间内,随机产生初始群体的元素,每个元素均匀分布于搜索元素所在的搜索空间,相互独立并构成一个完整不可或缺的整体。假设每个元素为有质量的个体,其质量值的函数为该元素的目标函数,且与之呈反比例关系,那么元素目标函数值的倒数可以看作是该个体的质量值,因此目标函数越小的元素,其质量越大。

(2)根据各元素自身的质量大小以及当前所在位置,决定搜索元素中的质心所在位置;由于每个元素受质心引力的吸引,分散的元素向质心位置(优化问题的局部最优解)收敛,同时在质心处将再次按一定规律产生新的搜索元素进行多普勒频移寻优匹配。多普勒频率搜索空间优化的步骤如下:

步骤1:根据最小二乘滤波确定的搜索空间  $v_m \in (v_{\min}, v_{\max})$ 、 $c_m \in (\hat{c}_m - \delta, \hat{c}_m + \delta)$ ,此搜索空间为二维空间,将搜索空间均匀切分为若干个长方形小区间,取每个小区间的中心点为搜索元素  $P = [v_m, c_m]^T$ ;

步骤2:计算搜索元素  $P = [v_m, c_m]^T$  的目标函数,即  $M(P) = \sum A_{t_i}$ 。其中,  $A_{t_i}$  是搜索元素  $P$  的幅值函数,对应搜索元素  $P$  的幅度值,  $M(P)$  是搜索元素  $P$  各时刻所对应的预测频率幅值的叠加。当搜索元素  $P$  与目标运动参数匹配时,目标函数取最大值,从而确定最佳元素的位置  $P'$ ;

步骤3:对最佳搜索元素  $P'$  进行统计,得到一组聚类中心,判别是否满足终止条件(随着搜索精度的提高所有聚类中心将趋于一个稳定元素);如是则转步骤5,否则转步骤4;

步骤4:由步骤3确定的一组聚类中心  $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ,以各个聚类中心为中心,向外扩散确定搜索空间并提高搜索精度,转至步骤1继续迭代演化;

步骤5:根据最优的搜索元素位置  $P$ ,联立其他相关方程,最终得到相应的目标参数信息。

### 3 基于匹配空间优化 TMA 算法流程图

目标运动分析算法仿真系统流程如图1所示。先对观测平台所探测到的方位序列和时间序列进行最小二乘滤波处理,求解得到目标航向的估计值,联立海上目标的速度估计范围确定初始搜索空间,使用多普勒频率优化匹配搜索算法,在求解目标运动参数信息。

多普勒频率优化匹配搜索算法流程图如图2所示。一共分为2个阶段:

(1)由目标航向估计值和速度估计范围界定搜索空间,对搜索空间进行均匀切割,形成多个小区间,取

每个分区的中心为初始候选解,并计算所有候选解的目标函数值;

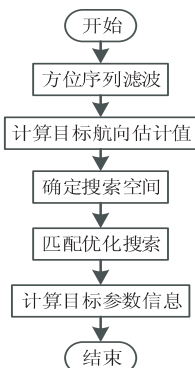


图1 仿真系统总体流程

(2)由阶段(1)得到一组聚类中心,判断聚类中心是否趋于稳定。若稳定,则停止迭代输出目标运动参数信息,否则在各聚类中心周围形成新的搜索空间,提高搜索精度,继续迭代搜索,直至稳定。

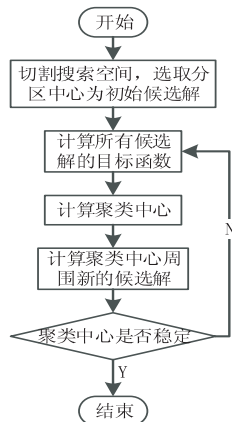


图2 搜索优化算法流程

## 4 仿真计算结果与分析

初始条件:假定目标和观测平台均作等速直航运动,在  $t_0(t_0 = 0)$  时刻位于  $M_0$ ,相对于位于  $W_0$  的观测平台的初始距离为  $D_0$ ,初始方位为  $F_0$ ;到  $t = i$  时刻目标位于  $M_i$ ,观测器位于  $W_i$ ,方位为  $F_i$ ,目标方位变化量为  $\Delta F_i$ 。若已知目标的运动速度为 18 节,航向为  $120^\circ$ ,初始方位为  $0^\circ$ ,位于观测平台的正北方向,观测平台的速度为 6 节,航向为  $0^\circ$ ,两者初始时刻距离间隔为 20 km。

### 4.1 方位序列滤波

根据方位序列和时间序列信息,利用最小二乘滤波算法计算目标航向的估计值。在初始条件下,滤波变化曲线图如图3所示,横坐标为时间(s),纵坐标为目标的航向滤波值( $^\circ$ )。在优化匹配搜索算法部分需要确定目标航向的搜索范围。通过对图3的观察,在初始态势下,大约在 500 s 时刻,最小二乘滤波求得的目标航向值变化趋于平滑,逐渐逼近目标实际航向值,

此时可认为进入多普勒频率匹配搜索阶段较为合理。在一般态势下,可通过判断滤波求解的目标航向值变化率来确定进入搜索阶段最佳时刻。

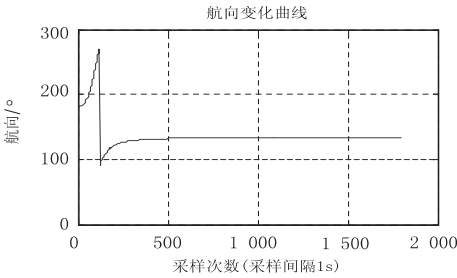


图 3 目标的航向估计值

4.2 匹配优化搜索算法

在这一部分中,在目标速度和航向  $v - c$  界定的空间里,采用匹配优化算法对搜索元素  $P$  进行最佳搜索。图 4 和图 5 分别为目标速度  $v$  和目标初始距离  $D_0$  的估计值变化曲线图。

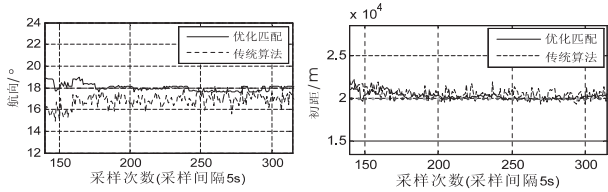


图 4 速度变化曲线图 图 5 初始距离变化曲线图

表 1 给出了在目标参数收敛后,目标参数信息的均方根误差。在匹配阶段,优化搜索算法第一步搜索时,概要估计出目标运动参数的一组候选解,在此基础上提高搜索精度,第二步仅搜索候选解所在重点区域,使结果精度和计算效率有了一定提高。从图中可以看出,文中优化算法求解的目标参数信息比较稳定,在真实值附近做微小波动。实验中,匹配优化搜索算法收敛时间为 725 s,较传统算法收敛时间 760 s 有了一定提高。从表 1 可以看出,较以往的传统算法,收敛速度和收敛精度都有所提高。

表 1 参数误差均方根比较

算法	速度/节	航向/°	初距/m
传统算法	1.053 8	1.130 5	352.741
匹配优化	0.422 7	0.205 2	166.812

5 结束语

文中利用测量的方位序列和多普勒线谱频移信息,根据目标运动分析算法原理和最小二乘方差法,将滤波方程从非线性领域映射为形式简洁的线性领域,在对多普勒频率搜索匹配时,给出了一种新的优化搜索匹配算法。仿真结果表明,该方法能够实现对目标的无源跟踪定位,降低了算法的时空复杂度,提高了计算效率,在目标运动参数的收敛时间和收敛精度等指

标上均有所改进。

参考文献:

[1] Jauffret C, Pillon D, Pignol Annie-Claude. Bearings-only maneuvering target motion analysis from a nonmaneuvering platform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1934-1949.

[2] Zhang Yunjun, Guo Zhongxu. Bearings-only target motion analysis via instrumental variable estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(11): 5523-5533.

[3] 王 彪, 曾庆军, 解志斌, 等. 基于水声传感器网络的目标纯方位运动分析[J]. 中国造船, 2011, 52(1): 90-96.

[4] 董志荣. 纯方位系统 TMA 非线性最小二乘法-工程数学模型与算法[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(2): 4-7.

[5] Wang Xingbo, Fu Minyue, Zhang Huanshui. Target tracking in wireless sensor networks based on the combination of KF and MLE using distance measurements[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(4): 567-576.

[6] 刘 健, 刘 忠. UKF 算法在纯方位目标运动分析中的应用[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 222-226.

[7] 赵 侃, 漆德宁. 基于 UKF 滤波的 FDOA 和 TDOA 联合定位跟踪算法[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(5): 127-129.

[8] 侯崇明, 袁广林, 王 健. 基于粒子滤波和仿射变换的鱼目标跟踪算法[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(4): 135-138.

[9] Han Shuping, Xu Zhaopeng. Passive tracking of maneuvering target based on bearings - frequency of two sonar sensors [C]//Proc of IEEE international conference on electronics, communications and control. [s. l.]: [s. n.], 2011: 2174-2177.

[10] Chen Hui, Han Chongzhao, Lian Feng. Three-dimensional target motion analysis using angle - only measurements [C]//Proc of IEEE international conference on signal processing, communication and computing. [s. l.]: IEEE, 2013: 1-6.

[11] 许兆鹏, 韩树平. 多基阵纯方位非机动目标跟踪可观测性研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(12): 57-59.

[12] Wang Xu, He Zishu. Target motion analysis in three-sensor TDOA location system[J]. Information Technology Journal, 2011, 10(6): 1150-1160.

[13] 万 瑾, 宋志杰. 基于方位和线谱频移的 TMA 新算法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(8): 58-61.

[14] Shames I, Bishop A N, Smith M, et al. Analysis of target velocity and position estimation via Doppler - shift measurements [C]//Proc of IEEE Australian control conference. [s. l.]: IEEE, 2011: 507-512.

[15] 赵海彬, 吴小勇, 宋志杰. 依据观察器方位序列估算目标运动参数的方法[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(2): 72-74.

# 一种多普勒频移优化搜索的目标运动分析算法

作者：[李龙](#)，[鞠阳](#)，[燕雪峰](#)，[LI Long](#)，[JU Yang](#)，[YAN Xue-feng](#)

作者单位：[李龙, 燕雪峰, LI Long, YAN Xue-feng \(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京, 210016\)](#)，[鞠阳, JU Yang \(中国船舶工业系统工程研究院, 北京, 100036\)](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015 (7)

引用本文格式：[李龙](#).[鞠阳](#).[燕雪峰](#).[LI Long](#).[JU Yang](#).[YAN Xue-feng](#) 一种多普勒频移优化搜索的目标运动分析算法

[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015 (7)