

# 高频地波雷达飞行小目标跟踪方法研究

郭汝江, 袁业术, 权太范

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 增大探测距离、快速精确跟踪是高频地波雷达探测飞行小目标所面临的主要困难. 本文提出了高频地波雷达飞行小目标跟踪(AWATT)系统. 该系统主要包括自适应改进 Hough 变换(AMHT)航迹起始、双门限快速联合概率数据关联(DTF JPDA)以及间接测量(IM)精度改善, 分别解决了低信噪比条件下, 对飞行小目标的提早预警、快速关联以及精确跟踪问题. 实验结果验证了该系统在跟踪预警飞行小目标中的有效性.

**关键词:** 高频地波雷达; 小目标; 跟踪

中图分类号: TN959.72 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)09-1586-04

## Study of Anti-Weak Aerial Target Tracking for High Frequency Surface Wave Radar

GUO Ru jiang, YUAN Ye shu, QUAN Tai fan

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** Increase of detection range and fast precision tracking are main difficulties in weak aerial target detection for High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR). An Anti-Weak Aerial Targets Tracking (AWATT) system for HFSWR is proposed. It consists mainly of Adaptive Modified Hough Transform (AMHT) track initiator, Double Threshold Fast Joint Probabilistic Data Association (DTF JPDA) and Indirect Measurement (IM) accuracy improving part. On the condition of low signal to noise ratio (SNR), it solves the problems of earlier warning, fast data association and precision tracking. The experimental results indicate the validity of it in tracking and early warning weak aerial targets.

**Key words:** HFSWR; weak targets; tracking

### 1 引言

高频地波雷达具备超视距探测飞行小目标的能力. 应用高频地波雷达探测飞行小目标的主要问题是提早预警、快速关联以及精确跟踪. 首先, 早预警意味着检测器门限应尽量降低, 而检测器门限的降低势必会带来大量的虚警. 传统的航迹起始方法在大量虚警背景下不能正常工作, 更不可能将飞行小目标正确起始出来. 而一种新的适应密集虚警背景的分批航迹起始方法, 只适合于笛卡尔坐标系下目标测量值<sup>[1,2]</sup>, 因此本文提出了一种适用于高频地波雷达起始飞行小目标的AMHT航迹起始方法.

其次, 传统的数据关联算法在大量虚警背景下将会出现巨大的计算量, 错误关联概率也会剧增, 因而要求数据关联算法在密集虚警背景下要具有快速性. 针对快速关联要求, 出现过次优JPDA算法、神经网络关联等快速算法<sup>[3,4]</sup>, 但是这些方法都以牺牲JPDA方法性能为前提. 对于飞行小目标数据关联算法, 本文提出了双门限JPDA方法. 该方法不会牺牲JPDA方法的性能, 同时还具有快速数据关联特性.

文中还针对高频地波雷达探测目标的方位精度、距离精度较差, 而径向速度精度相对较高的特点, 借助于误差分析理

论提出一种IM精度改善方法. 这使得在运用AIMM跟踪滤波方法跟踪机动目标时, 精度得到明显改善.

### 2 AWATT系统

AWATT是针对飞行小目标的运动速度快、雷达散射面积小的特点而设计的跟踪系统. 由AMHT航迹起始、双门限JPDA数据关联、AIMM跟踪滤波以及IM精度改善四个主要部分组成.

#### 2.1 AMHT航迹起始

飞行小目标属于雷达散射面积很小的弱目标, 因此针对该类目标的航迹起始问题为杂波中弱目标航迹起始问题. 改进Hough变换(MHT)方法在密集杂波背景下具有很好的性能, 同时它具有低数据关联虚警率、需要较短的计算时间. 由于高频地波雷达的测量值为极坐标形式, 并且MHT方法在极坐标情况下需要根据目标位置调整关联门限<sup>[5]</sup>, 因此我们采用了自适应关联门限的MHT方法(AMHT).

在极坐标下, 对于 $N$ 次扫描, 获得 $N$ 个点迹 $((r_i, \alpha_i), i=1, 2, \dots, N)$ , 其测量误差为独立零均值高斯白噪声, 标准差分别为 $\sigma_r$ 和 $\sigma_\alpha$ . 采用去偏转换测量方法<sup>[6,7]</sup>, 将点迹坐标变换到笛卡尔坐标系下为:

$$\begin{aligned} x_i &= r_i \cos \alpha_i (1 - e^{-\sigma_a^2} + e^{-\sigma_a^2/2}) \\ y_i &= r_i \sin \alpha_i (1 - e^{-\sigma_a^2} + e^{-\sigma_a^2/2}) \end{aligned} \quad (1)$$

对于每一对测量值  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ , 总能找到  $\theta = \theta^{(i)}$ , 使

$$\begin{aligned} \Delta \rho_i[\theta^{(i)}] &= \rho_{i+1}[\theta^{(i)}] - \rho_i[\theta^{(i)}] \\ &= (x_{i+1} - x_i) \cos \theta^{(i)} + (y_{i+1} - y_i) \sin \theta^{(i)} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

如果所有的  $N$  次测量值都在一条直线上, 则  $\theta^{(i)} = \theta_0, i = 1, \dots, N-1$ . 实际上, 每一个  $\theta^{(i)}$  都是通过搜索使  $|\Delta \rho_i(\theta)|$  最小的  $\theta_n$  而得到的, 定义为

$$\theta^{(i)} = \arg \min_l |\Delta \rho_i(\theta_n)|, \quad n = 1, 2, \dots, N_0 \quad (3)$$

对于  $\{(x_i, y_i), i = 1, \dots, N\}$ , 如果满足

$$|\Delta \theta^{(i)}| = |\theta^{(i+1)} - \theta^{(i)}| \leq \frac{r_i}{r_0} \phi_0 \quad (4)$$

则判断为点迹关联, 其中  $r_0$  为一个固定值、 $\phi_0$  为预先定义的可容忍值. 关联门限  $\frac{r_i}{r_0} \phi_0$  随着目标距离  $r_i$  自适应改变.

对于高频地波雷达, 我们能获得的信息还有径向速度  $v_r$ , 而且高频地波雷达测速精度相对较高, 利用这一信息也有助于排除虚警. 我们建立了一个附加的约束条件:

$$|2r_{i+1}v_r^{i+1} - r_i v_r^i - r_{i+2}v_r^{i+2}| < \Delta \quad (5)$$

其中  $\Delta$  为预定的值. 满足约束条件式(4)和式(5)的一对点迹为关联点迹.

连续四次关联成功则判断新航迹起始比三次关联具有更好的实验效果, 而五次关联所获得的效果提升并不明显<sup>[8]</sup>, 所以为了快速有效地起始航迹, 选择连续四次关联成功则判断新航迹起始.

2.2 DTF JPDA

JPDA 方法计算测量值  $Z_k$  对不同目标的关联概率. JPDA 算法的本质就是估计联合关联事件的条件概率

$$\theta = \bigcap_{j=1}^{m_k} \theta_{k_j} \quad (6)$$

其中

$$\theta_{k_j} \triangleq \text{量测 } j \text{ 来自目标 } t_j, j = 1, \dots, m_k; t = 0, \dots, T$$

$t_j$  为第  $j$  个测量值所关联目标的索引号<sup>[9]</sup>.

联合假设事件的总数会随着杂波密度和目标数的增加而急剧增加, 计算量难以忍受. 为此, 高频地波雷达检测器要求采用双门限方法: 第一门限为通常的门限值, 要求检测器虚警概率为  $10^{-6}$  量级; 第二门限为 AMHT 方法能够承受的门限值, 所要求的检测器虚警概率可达到  $10^{-3}$  量级. AMHT 方法针对的是通过两次门限共同获得的测量值进行航迹起始, 以便发现飞行小目标.

DTF JPDA 方法首先在第一门限获得的测量值中进行数据关联, 如果找到目标, 就不再在第二门限检测获得的测量值中搜索小目标, 如果找不到目标, 再继续第二门限测量值中搜索小目标. 这样做的好处是既兼顾了飞行小目标数据关联, 又避免了 JPDA 方法的巨大计算量.

2.3 AIMM

AIMM 是一种具备自适应模型的交互多模型方法, 该模

型需要实时估计参数. 理论上它能涵盖所有的目标机动特性. AIMM 方法的特征是多模型的状态估计和方差矩阵通过马尔可夫链综合起来, 以适应目标机动状态的变化. 目标机动模型的总数通常为三个左右. AIMM 可以分成五个部分: 交互作用、滤波、模型概率计算、估计值综合以及偏差估计<sup>[10]</sup>. 其处理框图如图 1 所示:

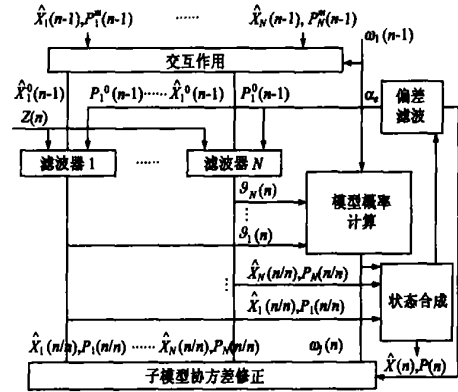


图 1 AIMM 框图

2.4 IM 精度改善

高频地波雷达目标探测精度中, 径向速度的探测精度较好, 而方位角度的探测精度较差. 目标运动过程中, 目标信息(径向距离、径向速度和方位角度)之间存在一种约束关系, 可以通过这种约束关系来均衡目标信息的探测精度, 也就是可以用间接测量值来代替直接测量值.

对于一个沿着直线运动的目标, 设它的运动速度为  $v(t)$ , 则目标在  $(t_1, t_2)$  时间内的运动距离为

$$\Delta R = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (7)$$

当目标的运动时间很短时,

$$\Delta R \approx \frac{v(t_1) + v(t_2)}{2} (t_2 - t_1) \quad (8)$$

则  $t_2$  时刻的目标距离可以表示为

$$R_{t_2} = \frac{R_{t_1} + R_{t_2}}{2} - \frac{v(t_1) + v(t_2)}{4} (t_2 - t_1) \quad (9)$$

通过函数随机误差计算公式, 可得

$$\sigma_{R_{t_2}} = \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_{R_{t_1}}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{R_{t_2}}^2 + \frac{(t_2 - t_1)^2}{16} \sigma_{v(t_1)}^2 + \frac{(t_2 - t_1)^2}{16} \sigma_{v(t_2)}^2} \quad (10)$$

对于高频地波雷达测量值  $(R, \theta, v_r)$ , 上式同样近似成立, 其中  $R$  为径向距离,  $v_r$  为径向速度,  $\theta$  为方位角度. 在通常情况下,

$$(t_2 - t_1) \sigma_{v_r} \ll \sigma_{R_{t_1}}, \quad \sigma_{R_{t_1}} = \sigma_{R_{t_2}} = \sigma_R \quad (11)$$

则有

$$\sigma_{R_{t_2}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_R < \sigma_R \quad (12)$$

可见, 通过式(9)间接测量所获得的径向距离精度得到了改善.

径向距离的间接测量公式是利用了已知的径向速度信息. 如果想通过同样的方法构造方位角度的间接测量公式, 就要知道角速度信息, 而高频地波雷达并不能测得这一信息, 因

而我们只能通过以下方程构造方位角度的间接测量公式:

$$\theta_{i_2} = \frac{\theta_{i_0} + \theta_{i_1} + \theta_{i_2}}{3} + \frac{\theta_{i_2} - \theta_{i_0}}{2} = \frac{5}{6}\theta_{i_2} + \frac{1}{3}\theta_{i_1} - \frac{1}{6}\theta_{i_0} \quad (13)$$

通过函数随机误差计算公式, 可得

$$\sigma_{\theta_{i_2}} = \sqrt{\frac{25}{36}\sigma_{\theta_{i_2}}^2 + \frac{1}{9}\sigma_{\theta_{i_1}}^2 + \frac{1}{36}\sigma_{\theta_{i_0}}^2} \quad (14)$$

通常情况下,  $\sigma_{\theta_{i_2}} = \sigma_{\theta_{i_1}} = \sigma_{\theta_{i_0}} = \sigma_{\theta}$ , 则有

$$\sigma_{\theta_{i_2}} \approx 0.857\sigma_{\theta} < \sigma_{\theta} \quad (15)$$

可见通过式(13)间接测量所获得的方位角度精度同样得到了改善。

IM 方法要求目标非机动。也就是当跟踪滤波器所获得的新息不发生突变时, 才可以采用这种 IM 精度改善的方法。要使快速飞行目标持续保持机动运动状态是比较困难的, IM 精度改善方法适用于非机动快速小目标。

### 3 实验

采集了一批合作飞行目标雷达数据, 用于高频地波雷达多目标跟踪的研究。一架小型飞机 A 以类似于巡航段巡航导弹目标的飞行特性, 沿着预定的路线和高度飞行了两次。另一架飞机 B 首先非机动飞行, 然后转弯机动飞行。

飞机目标运动特性如下:

(1) 事件 1, 小飞机

A 超低空朝向雷达站匀速直线飞行, 平均飞行速度 753km/h;

(2) 事件 2, 小飞机

A 超低空朝向雷达站匀速直线飞行, 平均飞行速度 746km/h;

(3) 事件 3, 飞机 B

首先掠海低空朝向雷达站飞行, 平均飞行速度

508km/h, 在 40km 处转弯机动飞行, 然后朝向雷达站径向匀速直线飞行。

常规跟踪系统采用的是连续方法进行航迹起始, JPDA 以及 AIMM 跟踪滤波, 框图如图 2(a) 所示。AWATT 系统框图如图 2(b) 所示。

两个跟踪系统的跟踪结果如下:

表 1 常规跟踪性能

常规跟踪	探测距离 (km)	距离精度 (km)	角度精度 (度)
事件 1	47.65	0.89	0.48
事件 2	52.72	0.45	0.68
事件 3	56.97	0.62	1.78

表 2 AWATT 跟踪性能

AWATT	探测距离 (km)	距离精度 (km)	角度精度 (度)
事件 1	53.36	0.66	0.43
事件 2	59.81	0.32	0.62
事件 3	62.31	0.49	1.61

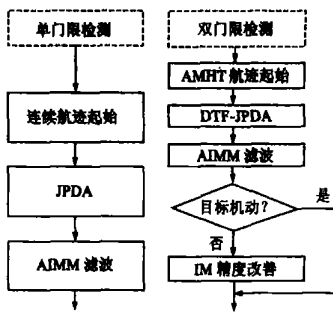


图 2

AWATT 系统对飞行小目标的探测距离普遍大于常规跟踪系统, 这是因为 AMHT 航迹起始方法的采用, 使检测器门限降低, 从而达到增大探测距离的效果。同时, AWATT 跟踪系统的跟踪精度也要优于常规跟踪系统, 这是采用 IM 精度改善方法的结果, 实验结果同理论分析结果相近。对于机动飞行目标, 跟踪精度相对变差, 这是因为 AIMM 跟踪滤波需要一段时间调整滤波器系数以适应目标机动。

### 4 结论

本文提出了一种高频地波雷达针对飞行小目标的 AWATT 方法, 增大了对飞行小目标探测距离、提高了跟踪精度。在航迹起始部分, AWATT 跟踪系统采用的是适合于高频地波雷达测量值的 AMHT 航迹起始方法, 它能够适应大量虚警背景, 从而使检测器可以降低检测门限, 更早的预警飞行小目标; 在数据关联部分, DTF JPDA 方法只在通常门限获得的检测点迹中搜索不到目标时, 才在第二门限检测获得的点迹中搜索目标, 这样既不会损失 JPDA 方法的关联性能, 又具有快速关联特性; 在跟踪滤波部分, AIMM 适用于跟踪机动和非机动飞行小目标, IM 精度改善方法利用了探测精度相对较好的径向速度信息, 通过间接测量获得了飞行小目标径向距离和方位角度的精度改善。

### 参考文献:

[ 1 ] Kiril M. Alexiev. Multiple target tracking using Hough Transform PMHT algorithm[ A ]. 2002 First International IEEE Symposium Intelligent Systems[ C ]. Bulgaria: st Constantine Resort, 2002. 227- 232.

[ 2 ] G Binias. Target track extraction procedure for OLP1 antenna data on the basis of Hough Transforms[ J ]. IEE Proc Radar, Sonar, Navigation, 2002, 149( 1 ): 29- 32.

[ 3 ] Akiyo Yanbe, Masayoshi Ito, Y oshio Kosuge. A suboptimization method of multi target tracking algorithm msup 3JPDA[ A ]. SICE 2002[ C ]. Osaka, 2002.

[ 4 ] Henk A P Blom, Edwin A Bloem. Combining IMM and JPDA for tracking multiple maneuvering targets in clutter[ A ]. The 5th International Conference on Information Fusion[ C ]. July 8- 11, Annapolis, MD, USA: ICIF, 2002.

[ 5 ] Guo Ruijiang, Zong Chengge, Yuan Yesu, Quan Taifan. Track initiator for multiple target tracking in polar coordinates based on Modified Hough Transform[ A ]. ISIST 2004[ C ]. Xi'an: ISIST, 2004.

[ 6 ] Don Lerro, Yaakov Bar shalom. Tracking with unbiased consistent converted measurements versus EKF[ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(3): 1015- 1022.

[ 7 ] 杨春玲, 余英林, 刘国岁. 转换坐标卡尔曼滤波算法分析[ J ]. 计算机工程与设计, 2001, 22(5): 76- 78.

Yang Chunling, Yu Yinglin, Lin Guosui. Converted measurement Kalman filter algorithm analysis[ J ]. Computer Engineering and Design, 2001, 22(5): 76- 78. (Chinese Source)

[ 8 ] H Leung, Z Hu, M Blanchette. Evaluation of multiple target track initiation techniques in real radar tracking environments[ J ]. IEE Proc Radar, Sonar, Navigation, August 1996, 143( 4 ): 246- 254.

[ 9 ] Lang Hong, Shan Cong. Bias phenomenon, and compensation in multiple

target tracking algorithms[ J]. Mathematical and Computer Modelling, 2000, 31(9): 147- 165.

- [ 10] Murat Efe, Derek P. Atherton. A tracking algorithm for both highly maneuvering and nonmaneuvering targets[ A]. Proceedings of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision & Control[ C]. California USA: San Diego, 1997. 3150- 3155.

#### 作者简介:



郭汝江 男, 1977 年出生于黑龙江省鹤岗市, 2001 年获得哈尔滨工业大学通信与信息系统专业硕士学位. 博士研究生, 研究方向为近代信号处理、多目标跟踪、高频地波雷达数据处理. E-mail: guorj@rice.hit.edu.cn.



袁业术 男, 1951 年出生于黑龙江省绥化地区, 1978 年毕业于哈尔滨工业大学无线电工程系雷达专业, 1993- 1994 年在英国 Leeds 大学访问学者, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达总体设计、雷达信号处理与检测.



权太范 男, 1949 年出生于吉林省, 1977 年毕业于清华大学电机系, 1983 年获得哈尔滨工业大学自动控制专业硕士学位, 教授, 博士生导师, 哈尔滨工业大学电子工程技术研究所负责人, 研究方向为近代信号处理、数据融合、神经网络—模糊推理融合等. E-mail: quantf@hit.edu.cn.