

# 一种主/被动雷达协同探测跟踪算法

章 钊, 周 峰, 张亮亮

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 为了提升地面防空武器系统对于干扰目标的探测跟踪能力, 结合装备武器系统主/被动雷达的技术特点, 以及其良好的优势互补性, 研究设计了一种主/被动雷达协同探测跟踪模式, 并基于交互式多模型算法和不敏滤波算法在处理强机动目标和非线性问题上的优势, 以及系统实时性要求的考虑, 提出了一种改进的自适应交互式多模型不敏滤波算法。通过 Monte Carlo 仿真, 与主/被动雷达单独跟踪效果相比较, 其性能得到了较大改善, 也进一步验证了主/被动雷达协同探测跟踪模式及改进算法的有效性和优越性。

**关键词** 无源时差定位; 主/被动雷达; 协同模式; 交互式多模型算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.012

**中图分类号** TN953 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0051-05

## Research on Active and Passive Radar Synergistic Detection and Tracking Algorithm

ZHANG Zhao, ZHOU Feng, ZHANG Liang-liang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To advance the system campaign efficiency for air defense weapon system located on the ground, based on the technique characteristic and the good mutual complementation for active and passive radar in new weapon system, a synergistic work model for active and passive radar is put forward. Moreover, based on the superiority of interactive multi-model (IMM) algorithm and unscented kalman filter (UKF) in dealing with the strong maneuvering target and the nonlinear filter problem, and considering the real-time requirement for tracking system, a self-adaptive IMM-UKF algorithm is put forward and designed. Through the Monte Carlo simulation, performance of it has been improved compared to that of work alone model, and the results demonstrate that the synergistic work model and the updated algorithm are effective and superior.

**Key words:** TDOA location; active and passive radar; synergistic model; interactive multi-model (IMM) algorithm

近年来, 基于异类传感器的优势互补性, 异类传感器融合系统越来越受到重视, 并被广泛应用于机载传感器系统中, 如对于典型的作战飞机, 其传感器系统主要包括机载雷达、电子支援措施(EMS)、红外传感器等。为了在保证跟踪精度的前提下尽量减

少雷达的开机时间, 提高自身的隐蔽性, 需要对各传感器进行协同管理, 以实现各传感器之间的协同工作。针对协同管理策略方面, 国内外学者作了一些研究, 如文献[1-3]对同类多传感器管理采用协方差控制策略进行了较深入的研究; 文献[4-6]针对主动

收稿日期: 2012-10-10

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8007)

作者简介: 章 钊(1990-), 男, 安徽庐江人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理研究。E-mail: zhangzhao0907@163.com

雷达和红外跟踪系统,研究了一些关联、滤波和估计算法;文献[7]主要给出了一种基于残差分析判别法的航迹质量管理策略准则;文献[8]提出了雷达间歇辅助红外的融合系统,利用雷达开机工作时所获得的目标状态信息,在雷达关机后,利用曲线拟合的方法拟合出目标的运动轨迹,以解决红外距离不可观测性的问题;文献[9]针对主/被动雷达协同跟踪系统提出了采用交互式多模型的顺序融合算法。可见在主/被动传感器协同探测跟踪模式中,研究较多的为机载传感器系统,且被动传感器大多数都认定为红外和ESM,而针对地面防空武器系统主/被动雷达之间的协同探测跟踪方法研究较少。基于此,文中以干扰飞机为技术需求,研究主动雷达和基于无源时差(Time Difference of Arrival, TDOA)技术的被动雷达系统的协同探测跟踪方法,以实现对于干扰目标更好的探测与跟踪,为提升地面防空武器系统体系作战效能发挥重要作用。

## 1 TDOA 技术

无源时差定位<sup>[10]</sup>是利用主站和辅站之间接收到辐射源信号的到达时间差来定位的。对于三维空间定位,则至少需要4个站形成3个单边双曲面来产生交点,而此交点就是目标的位置。4站中有一个是中心站,其余都是副站。其模型见图1。

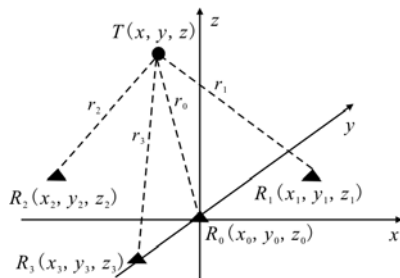


图1 4站被动雷达工作模型  
Fig.1 The work model for the four passive radars

在图1中,主站 $R_0$ 的坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ ,副站的坐标分别为 $R_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $R_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $R_3(x_3, y_3, z_3)$ ,辐射源的坐标为 $T(x, y, z)$ ,图中各站与目标的几何关系可以用以下方程组表示:

$$\begin{cases} r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \\ r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2, i=1,2,3 \\ \Delta r_i = r_0 - r_i = c\Delta t_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_i$ 为辐射源到各站之间的距离; $c$ 为电磁波传播速度; $\Delta t_i$ 为主站与各副站所对应的时差; $\Delta r_i$ 为距离差。

对式(1)整理化简后得:

$$(x_0 - x_i)x + (y_0 - y_i)y + (z_0 - z_i)z = k_i + r_0 \Delta r_i \quad (2)$$

式中:

$$k_i = \frac{1}{2} [\Delta r_i^2 + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) - (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)] \quad (3)$$

将式(2)中的3个方程写成矩阵形式,即:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (4)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 & -\Delta r_1 \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & z_0 - z_2 & -\Delta r_2 \\ x_0 - x_3 & y_0 - y_3 & z_0 - z_3 & -\Delta r_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ r_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

如果 $\mathbf{A}$ 是满秩,则目标的位置估计值为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F} \quad (7)$$

目前有很多文献研究关于式(7)的解法。常见的有Chan算法、泰勒级数展开法、Fang、SX、SI和DAC等算法,其中以Chan算法最为有效,在工程中应用最广。

## 2 主/被动雷达协同模式及算法设计

由于主、被动雷达在性能上的优势互补性,以及在工程上实现两者协同探测的可行性。为此,基于两点考虑:①干扰目标释放自卫式干扰、箔条干扰或受到远距离支援干扰的掩护,但干扰强度不足以让主动雷达工作失效;②干扰目标处于主/被动雷达的探测范围内,主/被动雷达能够正常工作。文中设计提出了一种主/被动雷达协同工作的模式,其结构见图2。

在图2中,被动雷达系统中的主站中心包括主接收站和指控车,协同控制中心分系统主要包括决策逻辑模块和融合节点模块。其中决策逻辑模块是整个融合系统的核心部分,见图3,它通过提取相关的估计值来判断选择哪一种融合方案对各个雷达跟踪数据进行融合处理,也就是权衡计算量和融合精度,在两者之间进行选择。决策逻辑模块包括2个决策统计距离 $D_1$ 和 $D_2$ 2个门限值 $T_1$ 和 $T_2$ , $D_1$ 和 $D_2$ 是通过提取必要的主/被动雷达跟踪信息计算得到的, $T_1$ 和 $T_2$ 是离线的设计参数,需要人为设定,其取值范围为 $[0, 1]$ ,它确定了该算法融合跟踪精度和计算量之间的平衡点。 $D_1$ 和 $D_2$ 参数设计可见文献[11]。

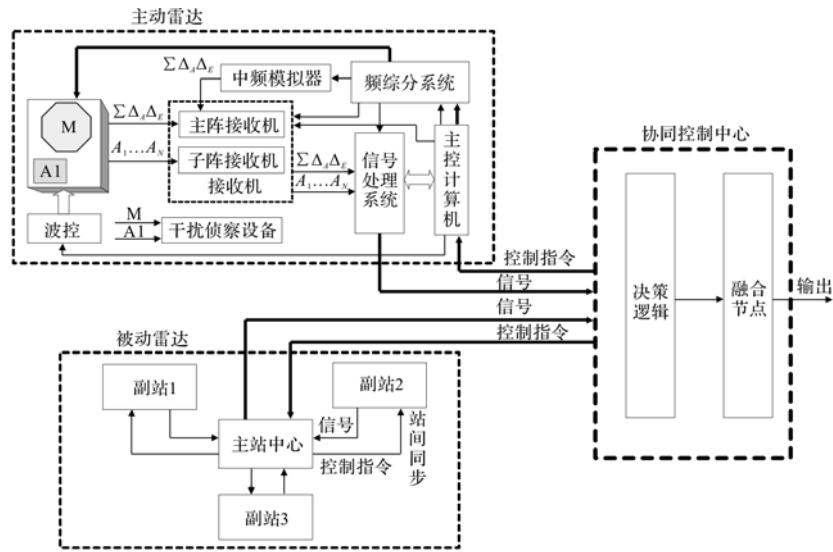


图 2 主/被动雷达协同模式 1 结构图

Fig. 2 The work model for the four passive radars

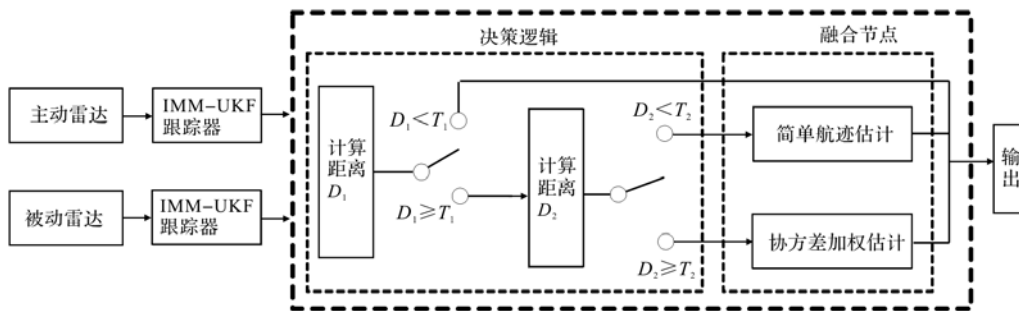


图 3 自适应 IMM-EKF 跟踪融合算法结构图

Fig. 3 The structure for the tracking and fusion algorithm of the self-adaptive IMM-UKF

结合图 2~图 3,我们提出了一种协同模式下的改进自适应IMM-UKF跟踪融合算法,其工作流程为:

步骤 1 主/被动雷达与各 IMM-UKF 滤波器并行工作,得到各自的目标状态估计值(即航迹 1、2);

步骤 2 目标航迹 1、2 在协同探测中心分系统中经时空配准预处理后送往决策逻辑模块;

步骤 3 决策逻辑模块首先计算统计距离  $D_1$ , 并将其与  $T_1$  进行比较,通过比较来确定是否需要各个雷达跟踪数据进行融合处理。如果  $D_1 < T_1$ , 意味着 2 个局部传感器所输出的 2 条航迹非常接近,无需在进行航迹融合计算,将其中之一作为航迹估计即可,否则需要作融合处理。 $D_2$  决定了融合节点选取何种算法,是简单航迹融合算法还是协方差加权航迹融合算法。若  $D_1 < T_1$  则意味着 2 条航迹的互协方差很小,甚至为零,采用简单航迹融合算法能够满足系统跟踪性能需求,反之则需采用协方差加权航迹融合算法;

步骤 4 根据步骤 3 最终的判断结果进行相应

数据融合处理。这 3 种结果为:①不作数据融合处理,选择航迹 1、2 中的之一作为全局估计输出;②采用简单航迹融合算法进行数据融合处理;③采用协方差加权的航迹融合算法进行数据融合处理;

步骤 5 状态估计输出。

### 3 仿真分析

为了验证自适应 IMM-UKF 融合跟踪算法针对主/被动雷达协同工作模式下的合理性,文中采用干扰飞机常见的转弯机动方式进行实验。设目标初始位置为(20,300,15)km,在初始的 1~100 s 内,目标沿 Y 轴以速度  $v=200$  m/s 在 X、Z 轴上作匀速直线运动;在 101~195 s 内,以半径  $r=6$  km、速度  $v=200$  m/s 在水平面上作转弯机动;在 196~295 s 内沿 Y 轴作匀速直线运动,真实运动轨迹见图 7。

采用 CV 和 CA 模型,状态噪声参数分别设为  $q_{CV}=100$ 、 $q_{CA}=10$ 。自适应 IMM-EKF 的参数  $\alpha=0.01$ 、 $\beta=2$ 、 $\kappa=0$ 。主动雷达距离、高低角和方位角误差标准差分别为:100 m、1 mrad 和 1 mrad。被动

雷达采用平行四边形布站方式,主站(0,0,0)、副站1(21.21,21.21,-0.05)、副站2(-21.21,21.21,-0.1)、副站3(42.42,0,0.1),主站与各副站之间距离差测量标准差  $\delta_{\Delta r_i} = 3$  m,相关系数  $\eta_{ij} = 0.5$ 。采用 MATLAB 6.0 编写仿真程序,蒙特卡罗方法仿真 100 次。初始模型概率  $u = (0.9, 0.1)$ ,马尔科夫转移矩阵  $P = [0.8, 0.2; 0.2, 0.8]$ 。设门限值  $T_1$  和  $T_2$  根据给定仿真数据分别设计为 0.3 和 0.6。

为了对比分析自适应 IMM-UKF 算法的性能,文中同时针对主动雷达和被动雷达分别采用 IMM-UKF 算法进行仿真。

由图 4~9 和表 1 可以看出,针对目标作转弯机动,主/被动雷达协同探测跟踪模式下的自适应 IMM-UKF 算法的跟踪滤波效果明显好于主/被动雷达单独工作时的 IMM-UKF 算法跟踪效果,但同时也带来了计算量上的成倍增加。针对 IMM-UKF 算法,文中采用了 CV 模型和 CA 模型,由图 8~9 可以看出,在目标做转弯机动时,CA 模型概率大于 CV 模型,说明此阶段主要由 CA 模型匹配跟踪,而当目标作匀速运动时,主要由 CV 模型来匹配目标运动,这正好体现了多模型算法的独特优势,也与实际理论相符合。当然,为了进一步提高系统跟踪精度,机动目标模型可以选择 CS 模型或者“当前”统计模型。

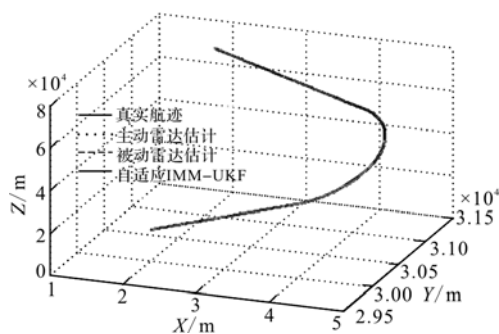


图 4 估计曲线

Fig. 4 The filtering curve

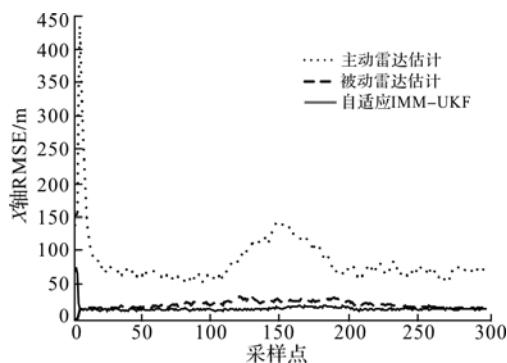


图 5 X轴位置估计误差

Fig. 5 The RMSE of X axis position

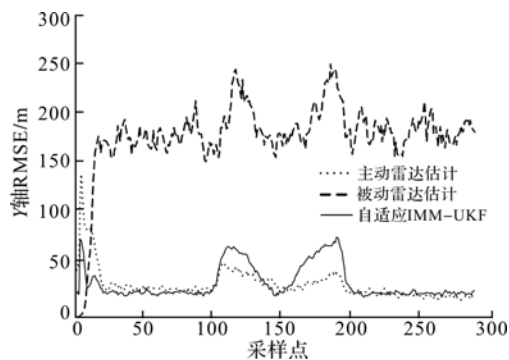


图 6 Y轴位置估计误差

Fig. 6 The RMSE of Y axis position

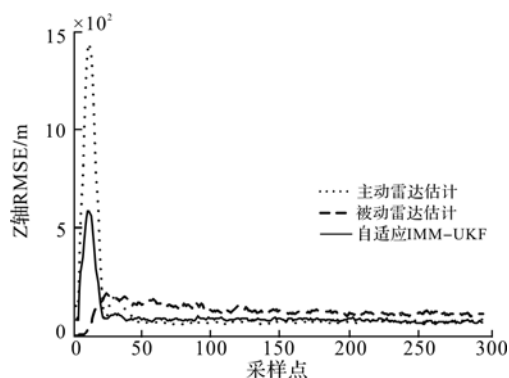


图 7 Z轴位置估计误差

Fig. 7 The RMSE of Z axis position

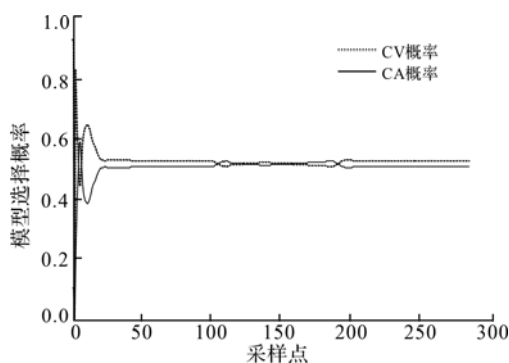


图 8 主动雷达模型概率值

Fig. 8 The model probability for active radar

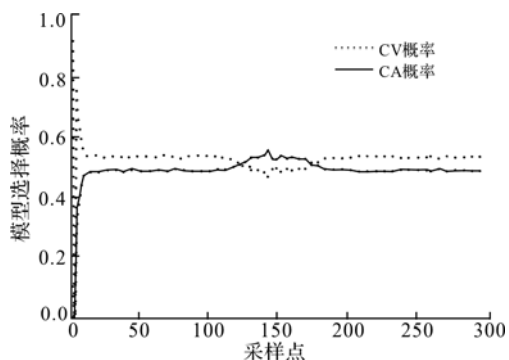


图 9 被动雷达模型概率值

Fig. 9 The model probability for passive radar

表1 跟踪性能比较

Tab.1 The comparison for tracking capability

估计算法	RMSE/m			时间/s
	X	Y	Z	
主动雷达估计	84.472 3	34.073 4	117.237 8	19.271 3
被动雷达估计	20.693 7	192.965 1	119.511 1	19.334 9
自适应 IMM-UKF 估计	14.914 5	36.014 0	92.450 5	38.729 7

## 4 结语

文中提出了主/被动雷达协同探测跟踪模式,并设计了一种自适应 IMM-UKF 算法,通过仿真实验进行了验证分析,结果表明基于 TDOA 技术的被动雷达系统和主动雷达协同探测模式针对干扰目标具有较好的探测跟踪效果,同时也验证了文中提出的自适应 IMM-UKF 算法具有一定的合理性,能够满足大多数跟踪系统精度要求。对于精度要求更高的系统,可以采用性能更优的滤波算法,如粒子算法,但同时也会带来复杂的计算量。为此,需要考虑各方面因素,综合选取性价比比较高的算法以满足系统总体性能要求。

### 参考文献(References):

- [1] Kalandros M. Managing multiple sensor resources using covariance control techniques for tracking systems with data association [D]. Boulder: University of Colorado, 2000.
- [2] Kalandros M, Pao L Y. Covariance control for multi-sensor systems [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems, 2002, 38(4):1138-1157.
- [3] Kalandros M, Pao L Y. Multisensor covariance control strategies for reducing bias effects in interacting target scenarios [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems, 2005, 41(1):153-173.
- [4] Cui N Z, Xie W X, Yu X N, et al. Multisensor distributed extended Kalman filtering algorithm and its application to radar/IR target tracking[C]//Proceedings of SPIE the international society for optical engineering 3086. Washington: SPIE press, 1997: 323-330.
- [5] Huyssteen D V, Farooq M. Performance analysis of bearing only target tracking algorithm[C]//Proceedings of SPIE the international society for optical engineering 3365. Washington: SPIE press, 1998: 139-149.
- [6] Maltese D, Lucas A. Data fusion: Principles and applications in air defense[C]//Proceedings of SPIE the international society for optical engineering 3374. Washington: SPIE press, 1998: 329-336.
- [7] 程咏梅,潘泉,张洪才. 红外/雷达传感器协同跟踪算法研究[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(3):20-23. CHENG Yongmei, PAN Quan, ZHANG Hongcai. Study on infrared and radar sensor synergistic tracking algorithm[J]. Fire control and command control, 2001, 26(3):20-23. (in Chinese)
- [8] 李安平,敬忠良,胡士强. 基于有源辅助的被动跟踪系统[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12):2048-2051. LI Anping, JING Zhongliang, HU Shiqiang. The passive tracking system with active assistance [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2005, 39(12): 2048-2051. (in Chinese)
- [9] 陈玲,李少洪. 基于无源时差定位系统的机动目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1):18-21. CHEN Lin, LI Shaohong. Algorithm of maneuvering target tracking with TDOA passive location system [J]. Systems engineering and electronics, 2005, 27(1):18-21. (in Chinese)
- [10] 徐振鲁. 时差法多站无源定位及其信号处理技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011. XU Zhenlu. Research on signal processing technology of difference time multi-station passive location[D]. Nanjing: the university of aeronautics and astronautics, 2011. (in Chinese)
- [11] 王卫乔. 主/被动复合制导数据融合技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. WANG Weiqiao. Study on the data fusion techniques of active/passive compound guidance [D]. Xi'an: Xidian university, 2010. (in Chinese)

(编辑:田新华)