

## 双机IRST系统协同自主引导搜索技术

刘涛<sup>1,2</sup>, 邵咏松<sup>3</sup>, 赵振宇<sup>1,2</sup>, 刘波<sup>1,2</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 3. 中国人民解放军驻六一三所军事代表室, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 双机IRST系统协同搜索是一种重要的无源探测手段。分析了双机IRST协同搜索关键问题,建立了自主引导搜索的数学模型,通过长机IRST系统探测到目标的角度信息,并利用IRST系统的探测距离范围限制计算目标在僚机机体系统中的角度范围,据此引导僚机IRST系统对目标存在区域进行搜索。对于僚机搜索范围提出顺序搜索和中心搜索两种搜索策略,仿真结果表明了引导搜索的有效性,中心搜索比顺序搜索效率更高,所需时间更短。其中,根据中心搜索策略提出的两种一次搜索方案的仿真结果验证了成功引导搜索的性质,对研究双机IRST自主引导搜索系统配置具有一定的参考价值。

**关键词:** IRST系统; 协同搜索; 自主引导

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)04-0023-05

## Double-Plane IRST System Cooperative Autonomous Guiding Search Technology

LIU Tao<sup>1,2</sup>, SHAO Yong-song<sup>3</sup>, ZHAO Zhen-yu<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>1,2</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

3. Military Deputy Office of PLA in No. 613 Institute, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The cooperative search with double-plane IRST system is an important passive detection method. Analysis is made to the key problems in double-plane IRST system cooperative search, and the mathematic model for autonomous guiding search is established. Through the target angle information detected by IRST system of the lead aircraft, the angle range of target in the wing aircraft's body axis system is obtained by using detection distance coverage limits of the IRST system. Then, the IRST system of the wing aircraft is guided to search the target area according to the angle range. Two search methods, sequential searching and central searching, are put forward for IRST system of the wing aircraft. The simulation result shows that the autonomous guiding search is effective, and the central searching is more efficient and takes less time. The successful guiding probability is verified by the simulation results of two schemes according to the central searching strategy. The conclusions are helpful for designing double-plane IRST guiding systems.

**Key words:** IRST system; cooperative search; autonomous guiding

### 0 引言

20世纪以来,雷达一直是主要的机载探测设备,在对地、海、空的作战中发挥着重要的主导作用。但由于近年来雷达隐身技术、反辐射导弹、电子干扰技术的发展和运用,雷达探测面临着日益严峻的考验。红外

搜索跟踪(Infrared Search and Tracking,IRST)系统作为一种无源探测设备在一些情况下对机载雷达探测起着辅助甚至替代作用<sup>[1-2]</sup>。由于IRST系统是无源探测,不向空中辐射能量,具有测角精度高、隐蔽性好和抗电子干扰能力强等优点<sup>[3]</sup>,然而却不能测量目标距离,因此双/多机交叉无源定位问题得到了大量的研究<sup>[4-5]</sup>。双机交叉无源定位需要两架飞机能同时探测到目标,在实际的战术应用中必然是先有一架飞机IRST系统探测到目标信息,然后引导另一架飞机搜索到目标。

收稿日期:2015-07-20

修回日期:2016-01-17

作者简介:刘涛(1990—),男,陕西宝鸡人,硕士,研究方向为航空火力控制。

本文研究的主要内容就是在双机IRST协同搜索中,一架飞机发现目标后引导指示另一架飞机快速搜索目标,从而达到协同探测的目的,为之后的跟踪、定位、攻击等一系列战术动作提供支持。

## 1 双机自主引导协同搜索问题描述

假设两架装备有IRST系统的飞机组成搜索编队对一片未知空域执行搜索任务,在 $t_0$ 时刻由长机IRST系统自主搜索到目标信息后,将其探测信息和平台状态信息通过数据链传送给僚机。由于长机IRST系统只能探测到目标的角度信息,因此,僚机也只能通过数据链得到空间中一条目标相对于长机的视线,僚机IRST系统需要在这条视线上搜索目标。根据IRST系统传感器的探测特性可知其最大和最小的探测距离,因此对于僚机的搜索范围可以缩小为空间的一条“线段”,以便于快速高效地搜索到目标。图1为双机IRST系统自主引导搜索示意图。

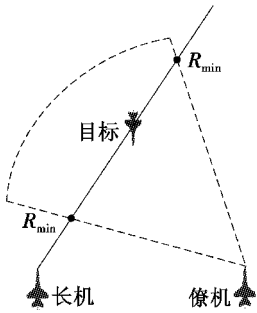


图1 双机IRST系统自主引导搜索示意图

Fig.1 Double plane IRST system autonomous guided search

## 2 双机IRST系统自主引导搜索模型建立及解算

### 2.1 坐标系定义及相互转换

#### 2.1.1 坐标系定义

载机地理坐标系 $(OXYZ)_E$ :坐标系原点 $O_E$ 位于载机质心, $X_E$ 轴沿经线切线方向指北, $Y_E$ 轴指向天, $Z_E$ 轴沿纬线切线方向指向东。

载机机体坐标系 $(OXYZ)_F$ :由 $(OXYZ)_E$ 绕 $Y_E$ 轴逆时针转过航向角 $\varphi$ ,绕 $Z_F$ 轴逆时针转过俯仰角 $\theta$ ,再绕 $X_F$ 轴逆时针转过横滚角 $\gamma$ 而得。

载机视线坐标系 $(OXYZ)_L$ :由 $(OXYZ)_F$ 绕 $Y_F$ 轴逆时针转过目标方位角 $v$ ,再绕 $Z_L$ 轴逆时针转过目标俯仰角 $\mu$ 而得。

#### 2.1.2 坐标系转换

载机地理坐标系转换到载机机体坐标系:从载机地理坐标系按 $y-z-x$ 的旋转方式逆时针旋转 $\varphi, \theta, \gamma$ ,得到载

机机体坐标系。转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{F,E} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi \\ \sin \gamma \sin \varphi - \cos \gamma \sin \theta \cos \varphi & \cos \gamma \cos \theta & \sin \gamma \cos \varphi + \cos \gamma \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \gamma \sin \varphi + \sin \gamma \sin \theta \cos \varphi & -\sin \gamma \cos \theta & \cos \gamma \cos \varphi - \sin \gamma \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

载机机体坐标系转换到载机视线坐标系:从载机机体坐标系按 $y-z$ 的旋转方式逆时针旋转 $v, \mu$ ,得到载机视线坐标系。转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{L,F} = \begin{bmatrix} \cos \mu \cos v & -\sin \mu \cos v & \sin v \\ \sin \mu & \cos \mu & 0 \\ -\cos \mu \sin v & \sin \mu \sin v & \cos v \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2 自主引导搜索模型

在双机IRST系统协同搜索中, $t_0$ 时刻长机探测到目标信息后得到目标的角度信息,假设目标与长机距离为 $R$ ,目标位置在长机视线坐标系下的矢量坐标为

$$(x_{LT}, y_{LT}, z_{LT})^T = (R, 0, 0)^T \quad (3)$$

将目标信息由长机视线坐标系转换到长机机体坐标系下,再由长机机体坐标系转换到长机载机地理坐标系下,即

$$(x_{FT}, y_{FT}, z_{FT})^T = \mathbf{M}_{F,L}(x_{LT}, y_{LT}, z_{LT})^T = \mathbf{M}_{L,F}^T(x_{LT}, y_{LT}, z_{LT})^T \quad (4)$$

$$(x_{ET}, y_{ET}, z_{ET})^T = \mathbf{M}_{E,F}(x_{FT}, y_{FT}, z_{FT})^T =$$

$$\mathbf{M}_{F,E}^T \mathbf{M}_{L,F}^T(x_{LT}, y_{LT}, z_{LT})^T \quad (5)$$

将式(1)、式(2)转移矩阵代入式(4)、式(5)可得目标在长机载机地理坐标系下的位置信息。

将长机载机地理坐标系下的目标信息转换到僚机载机地理坐标系下,即

$$(x'_{ET}, y'_{ET}, z'_{ET})^T =$$

$$(x_{ET} - (x'_0 - x_0), y_{ET} - (y'_0 - y_0), z_{ET} - (z'_0 - z_0))^T \quad (6)$$

再将僚机载机地理坐标系下的目标位置信息转换到僚机机体坐标系下,即

$$(x'_{FT}, y'_{FT}, z'_{FT})^T = \mathbf{M}_{F,E}(x'_{ET}, y'_{ET}, z'_{ET})^T \quad (7)$$

则目标在僚机机体坐标系下的方位和俯仰角分别为

$$v' = \arctan\left(-\frac{z'_{FT}}{x'_{FT}}\right) \quad (8)$$

$$\mu' = \arctan\left(\frac{y'_{FT}}{\sqrt{x'^2_{FT} + z'^2_{FT}}}\right) \quad (9)$$

当 $R = R_{\min}$ 和 $R = R_{\max}$ 时,按照式(3)~式(9)的方法分别计算出对应的目标方位角和俯仰角 $(v', \mu')_{\min}$ 和 $(v', \mu')_{\max}$ ,得到相对于僚机机体的搜索边界为:方位 $v'_{\min} \sim v'_{\max}$ ,俯仰 $\mu'_{\min} \sim \mu'_{\max}$ 。僚机机体坐标系下对于目标的搜索范围如图2所示,假设整个搜索区域 $\overline{ABCD}$ 为 $S$ 。

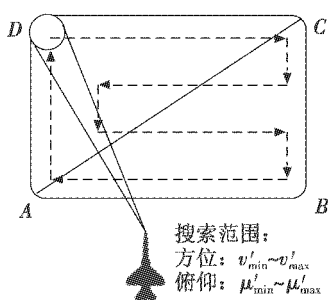


图2 僚机机体系下目标搜索范围示意图

Fig.2 Search range in wing plane coordinate system

不考虑探测误差,则目标存在于图2中由最小方位角和最小俯仰角确定的目标点到最大方位角和最大俯仰角确定的目标点的一条线段上,即图中所示线段AC。

### 2.3 僚机搜索策略

在僚机机体系系中确定了目标的角度范围(方位 $[v_{min}, v_{max}]$ ,俯仰 $[\mu_{min}, \mu_{max}]$ )后可控制IRST系统传感器对上述区域窄域搜索,一般的搜索方法是对搜索区域S采用顺序搜索策略依次进行窄域搜索。

根据红外探测特性,IRST系统的作用距离与探测目标的红外辐射强度、背景辐射亮度以及大气透过率息息相关。由于远距离目标红外辐射强度弱,IRST系统要想确定目标的存在,则需要确保目标成像达到一定的分辨率水平,因此很难在目标距其最大探测距离时就能确认目标,显然在目标接近载机过程中,距离很近时才能探测到目标也是一种小概率事件,因此可以认为目标与长机距离靠近边界值的概率小,而在靠近中心距离的概率大,据此提出中心搜索策略。

顺序搜索策略:对目标可能存在的区域S进行顺序搜索,由 $(v_{min}, \mu_{min})$ 到 $(v_{max}, \mu_{max})$ 以窄视场为最小搜索单位依次进行覆盖。这种搜索方式简单直观,但由于没有对探测到目标时目标与长机距离分布进行分析讨论,顺序搜索带有一定的盲目性,因此并不能做到快速搜索到目标。

中心搜索策略:通过对目标首次被探测到时的距离分布规律进行讨论,转换到僚机搜索区域S中,对目标存在概率高的区域进行优先搜索,然后搜索目标存在概率较低的区域。这种搜索方式相比于顺序搜索策略在理论上搜索效果更好,搜索目标更快。

## 3 双机IRST系统成功引导搜索概率的推导与求解

本文中的僚机搜索目标问题可用多元假设检验表示:假设整个搜索区域S被划分为M个(M由S的大小以及IRST系统窄域搜索宽度决定)不相交的独立分区 $S_m (m=1, 2, \dots, M)$ ,整个搜索区域内最多有一个目

标出现,则可用 $H_1$ 表示目标在S中出现,用 $P_1$ 表示 $H_1$ 发生的概率;用 $H_0$ 表示目标未在S中出现,用 $P_0$ 表示 $H_0$ 发生的概率;用 $h_{1,m} (m=1, 2, \dots, M)$ 表示目标在 $S_m$ 中出现, $h_{0,m}$ 表示目标没有在 $S_m$ 中出现,用 $P_{1,m}$ 表示 $h_{1,m}$ 发生的概率<sup>[6]</sup>。若事件 $H_1$ 发生,可根据最大后验概率法确定僚机传感器的分区搜索顺序,此时目标函数是目标在各个独立分区 $S_m$ 中出现的先验概率 $P_{1,m}$ ,其判据为求 $m_{max} (m_{max} \in \{1, 2, \dots, M\})$ ,使其满足

$$P_{1,m_{max}} = \max_{m \in \{1, 2, \dots, M\}} (P_{1,m}) \quad (10)$$

然后控制传感器首先对 $S_{m_{max}}$ 分区进行搜索。如果一次检测到目标则终止搜索,否则对剩余M-1个分区利用式(10)对 $m_{max}$ 进行更新,直至检测到目标。

设置僚机IRST系统窄域搜索范围正好覆盖一个分区m,依次对所有分区进行搜索。由于本文研究的是红外中远距搜索,且搜索速度非常快,因此目标在搜索过程中的运动可忽略不计。若目标在S中出现,则IRST系统有且只有一次覆盖到目标存在的子区域。用 $v'_T$ 和 $\mu'_T$ 表示长机引导搜索时目标在僚机机体系中的真实方位和俯仰角度, $H_{1,v}$ 表示目标真实方位 $v'_T$ 在 $[v_{min}, v_{max}]$ 中, $H_{1,\mu}$ 表示目标真实俯仰 $\mu'_T$ 在 $[\mu_{min}, \mu_{max}]$ 中。在一个搜索周期中,目标被成功引导搜索的概率可表示为

$$P_1 = P_r(H_1) = P_r(H_{1,v})P_r(H_{1,\mu}) \quad (11)$$

式中: $P_r(H_{1,v}) = P_r\{v'_{min} \leq v'_T \leq v'_{max}\}$ ;  $P_r(H_{1,\mu}) = P_r\{\mu'_{min} \leq \mu'_T \leq \mu'_{max}\}$ 。

假定IRST传感器的方位和俯仰探测误差均服从高斯分布,由长机探测得到的目标方位和俯仰分别为v和 $\mu$ , $v_T$ 和 $\mu_T$ 为长机机体系下目标的方位、俯仰真值, $\sigma_v$ 和 $\sigma_\mu$ 为探测误差标准差,则有 $v \sim N(v_T, \sigma_v^2)$ 和 $\mu \sim N(\mu_T, \sigma_\mu^2)$ <sup>[7-8]</sup>。

由于红外传感器测角精度较高,经仿真分析发现,除了目标在与长机临界距离(即 $R_{min}, R_{max}$ )情况下 $P_1$ 较低以外,其余距离下 $P_1$ 都接近1,因此本文重点研究僚机IRST系统在一次探测下检测到目标的概率

$$P_r = P_{1,m_{max}} \quad (12)$$

由于目标先验信息不足,直接推导目标在各个独立分区 $S_m$ 中出现的先验概率 $P_{1,m}$ 难度较大。一般认为,目标出现在中心区域的概率大于边界区域,根据上述经验可以对 $m_{max}$ 的确认提出两种方案:1)认为目标距离长机为 $[R_{min}, R_{max}]$ 中心值时被探测到的概率最大,即令 $R = (R_{min} + R_{max})/2$ ,将目标信息通过式(3)~式(9)的方法转换到僚机机体系中,以此作为僚机IRST系统的搜索中心,此中心即为 $m_{max}$ 的中心;2)认为目标存在于由 $R_{min}$ 和 $R_{max}$ 计算得到的区域S的中心分区概率最大,即 $m_{max}$ 的中心与S的中心重合。

通过式(11)中的方法对上述两种方案使用蒙特卡罗法进行多次仿真实验,得到不同目标位置下的僚机IRST系统一次成功引导搜索概率 $P_s$ 。

### 4 仿真及结果分析

#### 4.1 仿真条件设置

双机IRST系统协同搜索仿真实验中的传感器数据精度如表1所示。

表1 传感器数据精度  
Table 1 The sensor data precision

传感器	数据	精度	备注
GPS	平台位置/m	20	约定点地理坐标系
INS	航向角/mrad	2.0	由地理北极逆时针为正
	俯仰角/mrad	1.7	向上为正
	横滚角/mrad	1.7	右滚为正
IRST	方位角/mrad	1.5	目标在机体轴左侧为正
	俯仰角/mrad	1.5	目标在机体轴上方为正

假设IRST系统中红外传感器的窄视场扫描宽度为 $10^\circ \times 10^\circ$ ,搜索单位时间为0.1 s,即搜索速度为 $(10^\circ \times 10^\circ)/0.1$  s。

地理坐标系原点设在双机中心点处,双机初始地理位置为长机(0 m,0 m,-5000 m),僚机(0 m,0 m,5000 m)。假设在引导搜索中目标与僚机距离满足僚机探测距离范围,可在目标相对长机不同距离和角度条件下进行仿真实验,对不同条件下搜索到目标所需时间和一次成功引导搜索概率进行分析。

#### 4.2 仿真结果分析

1) 设置目标在 $t_0$ 时刻与长机距离分别为30 km,40 km,50 km,60 km,70 km,方位角度分别为 $-30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 时,仿真计算两种搜索策略下的搜索效率。

① 从表2、表3中可以明显看出,中心搜索策略比顺序搜索效率更高,搜索到目标所需时间更短。

② 从表2中可以看出,在目标与长机距离相同情况下,目标在长机机体坐标系下的方位角越大,搜索到目标所需时间越短,分析可知是由于在双机相对位置不变的情况下,目标与长机距离一定时,目标的方位角决定了僚机对于目标存在区域的搜索角度范围大小。

表2 顺序搜索策略下搜索到目标所需时间

Table 2 The target search time needed in sequential search s

距离/km	$\gamma = -30^\circ$	$\gamma = -15^\circ$	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 15^\circ$	$\gamma = 30^\circ$
30	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2
40	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2
50	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3
60	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3
70	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3

表3 中心搜索策略下搜索到目标所需时间

Table 3 The target search time needed in central search s

距离/km	$\gamma = -30^\circ$	$\gamma = -15^\circ$	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 15^\circ$	$\gamma = 30^\circ$
30	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
40	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
50	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
60	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
70	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

2) 分别在方案1)和方案2)的作用下设置目标在 $t_0$ 时刻与长机距离范围为 $R_{\min} \sim R_{\max}$ ,方位角分别为 $-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ ,利用Matlab工具画出对应条件下的一次成功引导搜索概率。

① 图3与图4均表现出目标与长机距离靠近中间位置时一次成功引导搜索概率大,接近边界距离时概率降低,这与假设相符,即目标出现在中心区域的概率大于边界区域。

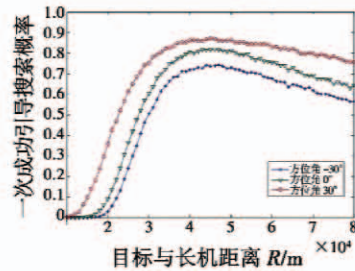


图3 方案1)作用下的一次成功引导搜索概率  
Fig.3 The successful guiding probability in scheme I

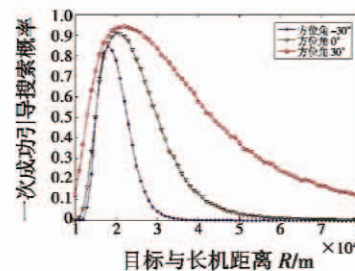


图4 方案2)作用下的一次成功引导搜索概率  
Fig.4 The successful guiding probability in scheme II

② 图3与图4均表现出目标相对长机方位角呈 $-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ 变化时一次成功引导搜索概率增大,这是由于在此方位角变化的过程中,由 $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 通过转换矩阵计算得到的僚机搜索区域 $S$ 减小,IRST系统窄域搜索宽度不变,则相同方案下一次探测的成功率增大。

③ 由于两种方案原理不同,仿真得出的两种一次成功引导搜索概率的表现有所不同,方案1)表现为目标距离长机为中远距时概率大,近距时概率小,而方案2)则在距离为20 km左右概率达到最大,远距时概率较小,在具体实施中可选择合适的方案。

## 5 结束语

本文主要研究了在双机IRST系统中自主引导协同搜索的问题,长机在没有目标距离信息的情况下根据红外传感器的探测距离参数确定目标存在的范围,并引导僚机进行搜索。仿真实验采用了对目标存在区域的顺序搜索和中心搜索方式,两种搜索方式都能成功搜索到目标,而基于目标存在概率分布提出的中心搜索方式效率更高,所需时间更短。同时,在目标不同位置条件下进行了一次成功引导搜索概率的数值计算,对成功引导搜索随目标位置变化规律进行了验证,为双机IRST自主引导搜索系统配置提供了一定的参考。

### 参考文献

- [1] 牟达,王建立,陈涛. 红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 93-95. (MU D, WANG J L, CHEN T. Analysis for operating range of IR search & track system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 93-95.)
- [2] 王国华,毛大鹏,刘洵,等. 机载光电跟踪系统搜索策略研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 1014-1018. (WANG G H, MAO D P, LIU X, et al. Study of search strategy on airborne optical tracking system[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 1014-1018.)
- [3] 白学福,梁永辉,江文杰. 红外搜索跟踪系统的关键技术和发展前景[J]. 国防科技, 2007(1): 34-36. (BAI X F, LIANG Y H, JIANG W J. Key techniques and prospects of infrared search and tracking systems[J]. National Defense Science & Technology, 2007(1): 34-36.)
- [4] 吴巍,王国宏,李世忠,等. 双机被动定位系统的最优传感器配置研究[J]. 光电工程, 2011, 38(10): 51-56. (WU W, WANG G H, LI S Z, et al. Optimum sensors deployment of double-plane passive system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(10): 51-56.)
- [5] 李富栋. 机载红外搜索与跟踪系统的现状与发展[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 409-412. (LI F D. Status and development of airborne IRST systems[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 409-412.)
- [6] 杨秀珍,何友,鞠传文. 目标检测中的传感器管理方法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2805-2808. (YANG X Z, HE Y, JU C W. Study on methods of sensor management used in target detection[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(12): 2805-2808.)
- [7] 王国宏,何友,毛士艺. IRST对3D雷达引导性能分析[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1-4. (WANG G H, HE Y, MAO S Y. Performance analysis of using an IRST sensor cueing a 3D radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1-4.)
- [8] 王国宏,毛士艺. ESM对2D雷达引导性能分析[J]. 航空学报, 2002, 23(4): 298-301. (WANG G H, MAO S Y. Performance analysis of an ESM guiding a 2D radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(4): 298-301.)
- [9] (上接第11页)
- [10] 饶彬,王雪松,丹梅,等. 球坐标系下具有抗干扰能力的弹道导弹跟踪算法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1944-1949. (RAO B, WANG X S, DAN M, et al. Ballistic missile tracking algorithm with anti-jamming capability in spherical coordinates[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1944-1949.)
- [11] 赵艳丽,王雪松,王国玉,等. 多假目标欺骗干扰下组网雷达跟踪技术[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 454-459. (ZHAO Y L, WANG X S, WANG G Y, et al. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range false-target deception jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 454-459.)
- [12] LI L, SUN J Q, ZHU Y, et al. Dim target tracking base on GM-PHD filter[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7202(1): 286-294.
- [13] WANG W G, SUN Z W, LI C M, et al. Study on dim target detection and discrimination from sea clutter[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(2): 183-192.
- [14] YANKOWICH S W, FAROOQ M. Hough transform based multisensor, multitarget track initiation technique[J]. Optical Engineering, 1998, 37(7): 2064-2077.
- [15] KABAKCHIEV C, GARVANOV I, DOUKOVSKA L, et al. TBD netted radar system in presence of multi false alarms[C]//The 6th European Radar Conference, Rome Italy, 2009: 509-512.
- [16] 赵志超,饶彬,王雪松,等. 基于概率网格 Hough 变换的多雷达航迹起始算法[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2209-2215. (ZHAO Z C, RAO B, WANG X S, et al. Multi-radar track initiation algorithm based on probabilistic grid Hough transform[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2209-2215.)