

## 无人机侦察任务计划计算

童颖飞, 吴庆宪, 姜长生, 陈婧  
(南京航空航天大学, 南京 210016)

**摘要:** 无人机任务计划系统根据不同的无人机性能、机载载荷、任务信息以及威胁信息,对无人机的飞行高度、速度、时间以及载荷使用进行合理的分配,以保证完成任务的总的任务代价最小。本文首先根据无人机侦察任务情况建立相应的代价函数,利用层次分析法对代价函数的各个因子进行加权求和;然后分别对各个因素进行模型的建立;最后利用计算仿真得到无人机的侦察任务计划。按照制定的任务计划,可以达到任务执行性能最优。

**关键词:** 无人机; 任务计划; 代价函数模型; 软件仿真

**中图分类号:** V279; TN956      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)03-0009-06

## Calculation on Scouting Mission Planning of UAVs

TONG Ying-fei, WU Qing-xian, JIANG Chang-sheng, CHEN Jing  
(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To make the cost of a mission minimum, the scouting mission planning system of a UAV should decide the height, velocity, time and payload of the UAV based on the its capability, payloads, the mission information and threat information. We established a cost function according to the scouting mission of the UAV, and obtained the weighted sum to each factor by using analytic hierarchy process (AHP). Then, we built up the corresponding models for each factor, and obtained the scouting mission plan of the UAV by simulation. This plan can make a UAV more effective in mission executing.

**Key words:** UAV; mission planning; cost function model; software simulation

### 0 引言

本文主要研究的内容是制定无人机的侦察任务计划,就是根据不同的无人机性能、机载载荷、任务信息,对无人机的飞行高度、速度、时间以及载荷使用进行合理的分配,以保证完成任务总的任务代价最小<sup>[1-3]</sup>。

无人机任务计划制定可以抽象为多指标决策问题:考虑侦察区域的特性以及无人机的飞行时间、路程等因素,经过简化后将问题归结成为 TSP 或者 VRPTW 问题。本文采用设置代价函数加权求和的方法进行寻优,在计算无人机安全代价时,将其折算进入飞行航程代价中,这就是在具体航路未知的情况下合理地考虑了威胁代价因素。

### 1 问题的描述

已知侦察任务信息如下:给出  $1, 2, 3, \dots, n$  个侦察

点,已知这  $n$  个点的位置信息和区域形状、整个战场的静态威胁信息以及无人机的机动性能限制,如最大航程、高度限制、速度限制、传感器的性能参数以及侦察精度要求等。在已知上述条件的情况下,合理分配各个任务区域的侦察顺序,计算出无人机在各个阶段的飞行时间、高度、速度<sup>[4]</sup>。

#### 1.1 代价函数的选取

对总代价的影响因素有:飞行的总时间、飞行的总路程、任务区域的侦察价值<sup>[5]</sup>。

因此代价函数选取为

$$J_k = \alpha[t_k] + \beta[L_k] + \gamma[P_k] \quad (1)$$

式中: $t_k$  为第  $k$  种情况预计执行任务的总时间; $L_k$  为第  $k$  种情况预计飞行的总路程; $P_k$  为第  $k$  种情况的侦察价值大小; $\alpha, \beta, \gamma$  为各个影响因素的权值。

#### 1.2 层次分析法

层次分析法(AHP)是于20世纪70年代中期提出的一种系统分析方法,该方法的基本思想是:先根据要求建立一个描述系统功能或特征的内部独立的递阶层次结构;通过两两比较因素的相对重要性,给出相应的比例标度;构造上层某要素对下层相关元素的判断矩



对于  $n_{th}$ , 在数据库中查出所有威胁中最小的威胁覆盖半径, 设为  $R_{thmin}$ , 那么在矩形内, 最多可以有的威胁个数  $n_{thmax}$  为

$$n_{thmax} = \begin{cases} \left\lceil \frac{R_{ij}^2}{2\pi R_{thmin}^2} \right\rceil, & R_{ij} \leq 500 \text{ km} \\ \left\lceil \frac{R_{ij}^2}{4\pi R_{thmin}^2} \right\rceil, & R_{ij} > 500 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整。

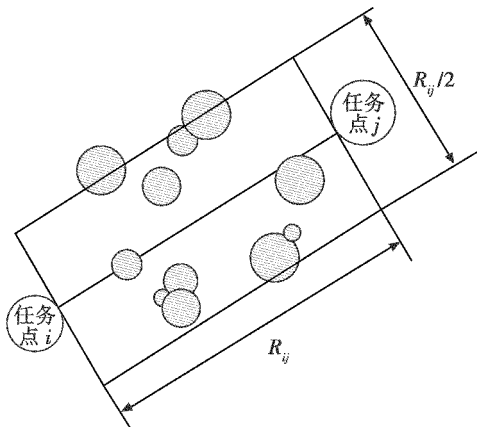


图3 任务区域间威胁分布图

Fig.3 The distribution of threats between two mission areas

这样, 威胁个数  $n_{th}$  的范围为  $[0, n_{thmax}]$ , 将威胁数目  $n_{th}$  归一化, 得到的归一化结果  $\tilde{n}_{th}$  为

$$\tilde{n}_{th} = n_{th} / n_{thmax} \quad (9)$$

对于威胁半径  $R_{th}$ , 在数据库中查出所有威胁覆盖半径的范围:  $[R_{thmin}, R_{thmax}]$ . 在矩形范围内, 每个威胁的范围为  $R_{thi}$ , 从而每个威胁的范围  $R_{thi}$  的归一化结果  $\tilde{R}_{thi}$  为

$$\tilde{R}_{thi} = \frac{R_{thi} - R_{thmin}}{R_{thmax} - R_{thmin}} \quad (10)$$

再求平均值, 可以得到在矩形区域内的威胁半径影响因素  $R_{th}$  的归一化结果  $\tilde{R}_{th}$  为

$$\tilde{R}_{th} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{th}} \tilde{R}_{thi}}{n_{th}} \quad (11)$$

威胁的重叠  $O_{th}$ : 在范围内, 如果威胁的重叠个数越多, 表明情况越复杂, 那么在飞行过程中的路线复杂程度就越大。定义所有的  $n_{th}$  个威胁全部重叠为 1, 所有的  $n_{th}$  个威胁全部不重叠为 0。设范围内威胁分布为  $n_{overlap}$  小块 ( $n_{overlap} \leq n_{th}$ ), 那么对每一小块重叠的威胁个数为  $n_{overlap_i}$ , 此块的威胁重叠因素  $O_{thi}$  归一化结果为

$$\tilde{O}_{thi} = n_{overlap_i} / n_{th} \quad (12)$$

对整个威胁的重叠情况的归一化结果为

$$\tilde{O}_{th} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{overlap}} \tilde{O}_{thi}}{n_{overlap}} \quad (13)$$

威胁的分布情况: 威胁分布离两个任务点之间直线越近, 那么无人机需要规避的就越多, 路径就越复杂。设每个威胁中心到直线的距离为  $L_{th}$ , 则距离的范围为  $[0, D_{max}]$

$$D_{max} = \begin{cases} R_{ij}/4 + R_{thmax}, & R_{ij} \leq 500 \text{ km} \\ R_{ij}/8 + R_{thmax}, & R_{ij} > 500 \text{ km} \end{cases} \quad (14)$$

则每个威胁的分布归一化结果  $\tilde{D}_{thi}$  为

$$\tilde{D}_{thi} = \frac{D_{max} - L_{thi}}{D_{max}} \quad (15)$$

范围内所有威胁的分布因素归一化结果为

$$\tilde{D}_{th} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{th}} \tilde{D}_{thi}}{n_{th}} \quad (16)$$

则总的威胁对飞行长度的影响函数为

$$J_{th} = \alpha \cdot \tilde{n}_{th} + \beta \cdot \tilde{R}_{th} + \gamma \cdot \tilde{O}_{th} + \varepsilon \cdot \tilde{D}_{th} \quad (17)$$

式中,  $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$  通过层次分析法求得。  $J_{th}$  求出来的是一个 0~1 之间的数,  $J_{th}$  越大表示无人机经过这个区域所花费的代价越大。定义: 如果  $J_{th} = 0$ , 无人机将沿着两个任务区域之间的直线飞行, 飞行的航程为  $R_{ij}$ ; 如果  $J_{th} = 1$ , 无人机将沿着矩形的边飞行, 飞行的航程为  $1.5R_{ij}$  ( $1.25R_{ij}$ ); 如果  $0 < J_{th} < 1$ , 无人机的飞行航程即为

$$L_{ij} = \begin{cases} R_{ij} + 0.5 \cdot R_{ij} \cdot J_{th}, & R_{ij} \leq 500 \text{ km} \\ R_{ij} + 0.25 \cdot R_{ij} \cdot J_{th}, & R_{ij} > 500 \text{ km} \end{cases} \quad (18)$$

### 2.3 任务区域之间代价函数计算

设无人机在两个任务区域之间转移时的速度恒定, 为  $V_{ij}$ 。在不考虑地形遮蔽因素的条件下, 由  $L_{ij} = V_{ij} \cdot t_{ij}$  以及上一节得出的  $L_{ij}$  可以得出

$$t_{ij} = (R_{ij} + 0.5 \cdot R_{ij}) \cdot \left[ \alpha \cdot n_{th} \cdot \frac{2\pi \cdot (R_{rdmin}^2 - H^2)}{R_{ij}^2} + \right.$$

$$\left. \frac{\beta}{n_{th}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{th}} \frac{\sqrt{R_{thimax}^2 - H^2} - \sqrt{R_{rdmin}^2 - H^2}}{\sqrt{R_{rdmin}^2 - H^2} - \sqrt{R_{rdmax}^2 - H^2}} + \right.$$

$$\left. \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^{n_{th}} \frac{D_{max} - L_{th}}{n_{th} \cdot D_{max}} \right] / V_{ij} \quad (19)$$

式中:  $R_{rdmin}$  为威胁数据库中范围最小的威胁的最大探测半径;  $R_{rdmax}$  为威胁数据库中范围最大的威胁的最大探测半径。

从式(19)可以计算得出: 在不考虑地形遮蔽因素的条件下, 飞行速度  $V_{ij}$  不变, 随着飞行高度  $H$  的增加, 飞行的总时间  $t_{ij}$  减小; 飞行高度  $H$  不变, 随着飞行速度  $V_{ij}$  的增加, 飞行的总时间  $t_{ij}$  减小。

因此, 无人机在两个区域间飞行的时候, 飞行高度取最大值, 飞行时间、航程由式(19)可得。

### 2.4 任务区域内代价函数计算

待侦察的任务区域经常被分为矩形区域和圆形区

域,根据不同的任务区域的几何形状,无人机采取不同的侦察方式。

计算无人机在侦察区域内的飞行参数时,本文以侦察区域内无威胁为前提。无人机在侦察时候的高度确定首先要满足传感器对分辨率的要求,即不能飞得过高。对于 CCD 相机和红外行扫仪,应该满足

$$H \leq \frac{\gamma f \cos \theta}{d} \quad (20)$$

设传感器的成像时间为  $t_w$ , 航向重叠为  $O_c$  ( $53\% \leq O_c \leq O_{cmax}$ ,  $O_{cmax}$  为航向重叠的最大值), 那么无人机侦察机动的速度范围  $V_s$  为

$$V_s = \frac{d_p(1 - O_c)}{t_w} \quad (21)$$

矩形侦察区域一般采用扫描线侦察方式, 见图 4。

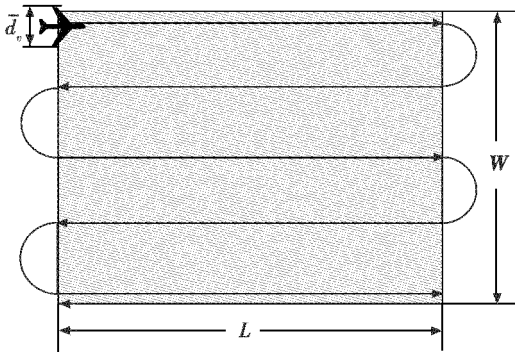


图 4 扫描线侦察示意图

Fig. 4 Sketch map of grating type reconnaissance

待侦察矩形区域的长、宽分别  $L$ 、 $W$ , 无人机的飞行速度为  $V_s$ , 传感器的成像宽度为  $\bar{d}_v$ , 则估算目标区域一次侦察的持续时间  $t_s$  为

$$t_s = \frac{L}{V_s} \left\lceil \frac{W}{\bar{d}_v} \right\rceil + \left( \left\lceil \frac{W}{\bar{d}_v} \right\rceil - 1 \right) \cdot \frac{\pi \bar{d}_v}{2V_s} \quad (22)$$

由

$$\begin{cases} V_s = \frac{d_p(1 - O_c)}{t_w} \\ t_s = \frac{L}{V_s} \left\lceil \frac{W}{\bar{d}_v} \right\rceil + \left( \left\lceil \frac{W}{\bar{d}_v} \right\rceil - 1 \right) \cdot \frac{\pi \bar{d}_v}{2V_s} \\ d_p = \frac{2 \sin 2\alpha_p}{\cos 2\varphi + \cos 2\alpha_p} H \\ \bar{d}_v = \frac{2 \tan \alpha_v \cos \varphi (1 + \cos 2\alpha_p)}{\cos 2\varphi + \cos 2\alpha_p} H \end{cases} \quad (23)$$

可以得到

$$t_s = \frac{C_0 + C_1 \cdot H - C_2 \cdot H^2}{C_3 \cdot H^2} \quad (24)$$

式中,  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为常数。

可以看出,在不考虑地形遮蔽因素的条件下,随着飞行高度  $H$  的增加,侦察所用时间  $t_s$  越小。因此,在满足传感器分辨率的基础上,飞行高度取最大值。

飞行的总路程为

$$L_s = V_s \cdot t_s \quad (25)$$

对于圆形侦察区域,一般采用扫描线的侦察方式,如图 5 所示。

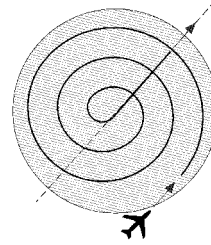


图 5 螺旋线侦察示意图

Fig. 5 Sketch map of spiral reconnaissance

由航向重叠率  $O_s$  和成像宽度  $\bar{d}_v$  可得航线间距  $D_r$  为

$$D_r = \bar{d}_v - \bar{d}_v \cdot O_s \quad (26)$$

认为轴线两端的航线是对称的,那么航线半圈的个数  $n_r$  为

$$n_r = 2 \cdot \left\lceil \left( \left( R_i - \frac{\bar{d}_v}{2} \right) / D_r \right) + 1 \right\rceil \quad (27)$$

式中,  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整。

每个航线半圈可以近似看成一个半圆,半径  $R_{rk}$  为

$$R_{rk} = [2 \cdot R_i - \bar{d}_v - (k - 1) \cdot D_r] / 2, k \in [1, n_r] \quad (28)$$

则在侦察区域内飞行的总航程  $L_{si}$  为

$$L_{si} = \sum_{k=1}^{n_r} \pi \cdot R_{rk} + R_i \quad (29)$$

由上面的第一种情况可以得到无人机侦察机动的速度范围  $V_s$  为

$$V_s = \frac{d_p(1 - O_c)}{t_w} \quad (30)$$

那么这种情况下,无人机的侦察持续时间  $t_{si}$  为

$$t_{si} = L_{si} / V_s \quad (31)$$

即

$$t_{si} = \frac{t_w \cdot \sum_{k=1}^{n_r} 2 \cdot \pi \cdot R_{rk}}{d_p(1 - O_c)} \quad (32)$$

## 2.5 侦察价值计算

首先,建立侦察价值等级的概念。假设现在有  $n$  个任务点,要安排侦察的次序。在侦察的时候,能快速发现有价值的目标很重要,对制定下一步的作战计划非常关键,因此,实际第一个被侦察的任务区域理论上存在的侦察价值最高,把这个价值记为  $n_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );第二个被侦察的任务点的侦察价值是次高的,记为  $n - 1$ ;同理,一直到最后一个被侦察的任务点,它的价值记为 1。同时,每个任务点都有其侦察价值,上

面已经给出。这意味着应该把侦察价值最大的任务(第一个被侦察的任务区域)分配给实际侦察价值最高的任务区域,这样才能实现侦察价值的最大化。

设任务区域的排列是  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ , 各个任务区域的侦察价值分别为  $p_n, p_{n-1}, p_{n-2}, \dots, p_1$ , 那么整个侦察任务的总的侦察价值应该是

$$P_k = k_1 \cdot p_n + k_2 \cdot p_{n-1} + k_3 \cdot p_{n-2} + \dots + k_n \cdot p_1 \quad (33)$$

由式(33)可以得出不同侦察次序的侦察价值,进而代入总的代价函数进行寻优。

### 3 软件仿真结果分析

本文的仿真程序是以 MFC 中的对话框为框架,利用 C++ 编写的任务计划制定软件。

以某型无人机为例,性能参数如下:最快速度为 60 m/s,飞行最高高度为 8000 m,续航时间为 20 h。任务信息如表 1 所示。

表 1 任务信息

Table 1 Mission information

形状	中心坐标 (顶点坐标 1)	半径(顶 点坐标 2)	顶点 坐标 3	顶点 坐标 4	侦察价值
1 圆形	(10000, 10000)	9000			0.4
2 圆形	(100000, 60000)	8000			0.5
3 矩形	(30000, 10000)	(45000, 10000)	(45000, 90000)	(30000, 90000)	0.6
4 矩形	(25000, 50000)	(45000, 50000)	(45000, 35000)	(25000, 35000)	0.7

任务的起始点坐标为 (50000, 50000), 起始时间为 4:13 am。所携带的侦察传感器为 CCD 相机,传感器的俯仰角为 10°, 视场角为 30°, 传感器像元大小为 0.001 m<sup>2</sup>, 焦距为 0.1 m, 成像时间为 7 s, 水平视场角和垂直视场角均为 30°, 任务的侦察精度要求为 20 m。

在上述条件下,载入地形数据,经过软件仿真,得到对于 4 个任务区域的任务计划结果见图 6、表 2、表 3。

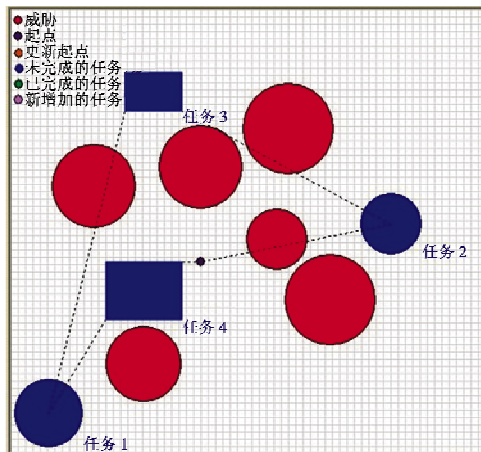


图 6 任务计划位置示意图

Fig. 6 Sketch map of mission plan

图 6 为任务区域以及威胁的位置示意图,图中的连线表示侦察顺序。表 2 和表 3 的数据为无人机在任务区域内和任务区域间转移的任务计划数据。由仿真结果可以看出,最佳的侦察顺序是 4-1-3-2,任务耗时 232.00 min,航程 746.19 km。

表 2 任务区域内任务计划

Table 2 Mission plan in the task area

任务序号	4	1	3	2
到达时间	4:17 am	5:15 am	6:30 am	7:10 am
侦察方式	扫描线	螺旋线	扫描线	螺旋线
飞行速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	49.82	50.40	49.75	50.14
离地高度/m	1732.05	1732.05	1732.05	1732.05
航线间距/m	1620.66	1596.53	1593.05	1551.69
航向重叠/%	51.78	51.21	51.85	51.46
旁向重叠/%	20.35	21.54	21.71	23.74
所用时间/min	45.49	47.76	17.22	39.11
离开时间	5:03 am	6:03 am	6:48 am	7:49 am

表 3 任务区域间任务计划

Table 3 Mission plan between the task area

侦察次序	起点-4	4-1	1-3	3-2
飞行速度/(m · s <sup>-1</sup> )	60	60	60	60
飞行高度/m	4746.59	4506.38	4656.38	4455.17
飞行距离/km	16.771	44.470	99.271	79.868
所需时间/min	4.658	12.353	27.575	22.186
返回时间	8:05 am			
总航程/km	746.19			
总耗时/min	232.00			

若是降低任务精度要求为 40 m, 则各个任务区域内的侦察时间分别变为 19.33 min, 24.24 min, 9.67 min, 19.17 min。这是由于精度要求降低,无人机在侦察时可以飞得更高,从而传感器覆盖面积增大,侦察时间自然会缩短,结果符合理论推断。

若改变侦察顺序,则不同的侦察顺序的航线信息如表 4 所示。

表 4 不同侦察次序的任务计划

Table 4 Mission plans of different order

侦察次序	4-1-3-2	2-1-3-4	1-4-2-3
总航程/km	746.19	796.41	762.41
总耗时/min	232.00	245.95	236.51
总代价	0.252	0.647	0.371

由表 4 的结果可知得出的侦察次序满足最优性。

### 4 结束语

目前,国内的无人机任务规划研究主要是在航路规划方面,对于任务计划制定的研究并不多。本文从任务的代价函数出发,建立了各个环节的模型,仿真出针对特定任务的任务计划制定内容,此研究对无人机的任务规划系统的完善有一定帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 叶媛媛, 闵春平, 朱华勇, 等. 基于整数规划的多UCAV任务分配问题研究[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 548-552.  
YE Y Y, MIN C P, ZHU H Y, et al. Multiple UCAV mission assignment based on integer programming[J]. Information and Control, 2005, 34(5): 548-552.
- [2] AIGHANBARI M. Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environments[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [3] 魏瑞轩, 李学仁. 无人机系统及作战使用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
WEI R X, LI X R. UAV systems and operational use[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [4] 陆琛. 无线数据链指挥下无人机侦察打击一体化系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2010.  
LU C. Research on the reconnaissance and strike integrated system of UAV based on wireless digital information link[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [5] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.  
DING M Y, ZHENG C W, ZHOU C P, et al. UAV route planning[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [6] 林伟廷. 高空长航时无人机侦察任务规划问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.  
LIN W T. Research on high altitude and long endurance unmanned aerial vehicle reconnaissance mission planning[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [7] 雷厉. 侦察与监视[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
LEI L. Reconnaissance and surveillance[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- (上接第 8 页)
- ZHANG X Y, WANG G H, WANG N, et al. Track association of radar and ESM sensors with systematic errors at different sites[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(3): 30-35.
- [6] 李世忠, 王国宏, 吴巍, 等. IMM-EKF 雷达与红外序贯滤波跟踪机动目标[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(1): 39-42.  
LI S Z, WANG G H, WU W, et al. Research on maneuvering target tracking via infrared sensor and radar sequence filtering based on IMM-EKF[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(1): 39-42.
- [7] 刘兆磊, 王国宏, 张光义, 等. 机载火控雷达距离拖引目标的交互式多模型跟踪方法[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 465-469.  
LIU Z L, WANG G H, ZHANG G Y, et al. An IMM tracking algorithm on RGPO target in airborne fire control radar[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 465-469.
- [8] 唐尧, 杜自成, 段芳芳, 等. 机载雷达对地动目标跟踪研究[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(1): 9-14.  
TANG Y, DU Z C, DUAN F F, et al. Research on ground moving target tracking of airborne radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(1): 9-14.
- [9] 李波, 杜春鹏. 运动平台进行杂波跟踪的方法分析[J]. 电子科技, 2012, 25(2): 48-50.  
LI B, DU C P. Analysis of clutter tracking based on the moving platform[J]. Electronics Science and Technology, 2012, 25(2): 48-50.
- [10] 李彬彬, 冯新喜, 王朝英, 等. 杂波环境下多被动传感器单目标跟踪算法[J]. 电光与控制, 2012, 19(18): 11-14.  
LI B B, FENG X X, WANG C Y, et al. An algorithm for single target tracking with multiple passive sensors in clutter[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(18): 11-14.
- [11] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
ZHOU H R, JING Z L, WANG P D. Maneuvering target tracking[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [12] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.  
HE Y, XIU J J, ZHANG J W, et al. Radar data processing with application[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.