

扇形浮标阵跟踪反潜背景下无人机监听航路的研究

王庆江, 尹德强, 彭军, 单鑫, 梁勇

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

摘要: 航空反潜时, 无人机代替有人机对浮标阵进行监听是无人机在未来战场上的重要应用之一。以无人机独立执行监听浮标阵任务为背景, 在对跟踪搜潜时浮标阵的布设进行分析并提出无人机航路的代价函数后, 根据浮标阵的特点, 规划出无人机矩形监听浮标阵方案, 并对所规划航路的技术指标进行了分析, 最后, 通过仿真对此方案进行了验证。仿真结果表明方案可行, 为无人机监听浮标阵的实际应用提供了理论决策依据。

关键词: 航空反潜; 无人机; 跟踪搜潜; 监听浮标阵; 航路规划

中图分类号: V216.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0036-05

Routing Plan of UAVs in Buoy Monitoring Patrol for Searching Submarine

WANG Qing-jiang, YIN De-qiang, PENG Jun, SHAN Xin, LIANG Yong

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To monitor buoy array using UAV in place of manned aerial vehicle is one of important application of UAV in the battlefield of the future for airborne antisubmarine. The case when a UAV executes buoy array monitoring task independently was taken as the background. Analysis was made to the deployment of buoy array during submarine tracking and searching, and the cost function of UAV route was proposed. A rectangular monitoring scheme of the UAV was presented according to the characteristic of buoy array, and the technique index of the planned route was researched. Finally, this scheme was verified through simulation. The simulation result indicates that the scheme is feasible, which provides a theoretic decision-making basis for actual application of UAV in buoy array monitoring in the future.

Key words: aviation antisubmarine; UAV; submarine searching and tracking; buoy array monitoring; route plan

0 引言

航空反潜是指航空反潜兵力使用机载反潜武器、装备对敌潜艇进行搜索、识别、跟踪、攻击等反潜作战活动的统称^[1]。航空反潜装备主要包括无线电声纳浮标(简称浮标)、吊放声纳、磁探测仪等设备。其中,浮标是一种重要的反潜器材,使用时通常由多枚浮标组成浮标阵来进行对潜搜索。

无论在战时还是在平时时期,对任何发现的潜艇实施跟踪是航空反潜作战的主要内容之一;在战时,通过对敌潜艇的跟踪来获取其位置、航速、航向等参数,

从而为攻击做好准备;在平时时期,通过对敌潜艇的跟踪得到其性能和运动规律等第一手资料,从而为战时的作战使用提供依据^[1]。

对于跟踪反潜作战,目前的理论研究主要集中在浮标阵的布设^[2-4]、浮标阵的效能评估^[5-6]等方面,而对于监听浮标阵时的航路规划方面研究较少^[7]。因此,以跟踪搜潜为研究对象,重点研究无人机对浮标阵监听时航路的规划,就显得尤为必要。

为了突出研究重点,本文假设固定翼反潜机负责浮标阵的布设(见文献[1,3-5])、对无人机上传从浮标阵得到的潜艇信息的处理和对无人机的指挥,无人机只负责对浮标阵的监听并上传信息,从而形成“有人机-无人机协同反潜”的作战模式。

1 浮标阵的布设^[1,3]

跟踪搜潜是指与敌潜艇保持接触或在丢失接触时

恢复接触的战斗行动,跟踪反潜的特点是已获得了敌潜艇的位置和航向。无人机跟踪敌潜艇的方法主要分为连续保持接触和周期性保持接触两种方案。

1.1 连续保持接触

使用连续保持接触方案时,在敌潜艇航向前方布设垂直于敌潜艇航向的线形浮标阵,相邻浮标间的间隔(包括相邻层浮标阵之间的间隔和同一层浮标阵内相邻浮标之间的间隔)不大于两倍的浮标作用距离,以便在敌潜艇航线上形成连续的水声探测区,从而保证连续的测定敌潜艇的位置和航向,在最短的时间内发现敌潜艇航向、速度的变化、敌潜艇使用水声对抗器材的情况等。

一般情况下,敌潜艇航速小于6~8 kn(1 kn = 1.852 km/h)时才能与敌潜艇建立连续接触。连续保持接触方案中,线形浮标阵的浮标数量(即浮标阵的长度)取决于敌潜艇的机动情况。为了避免由于浮标可能出现故障而导致目标丢失,通常应在潜艇航向的前方布设两层以上浮标阵。如果相邻两层浮标阵均未发现目标,则认为目标接触丢失。这时,为恢复与目标的接触,应考虑以目标丢失点为圆心建立半圆形或圆形搜索浮标阵。使用连续保持接触方案时浮标阵布设如图1所示。

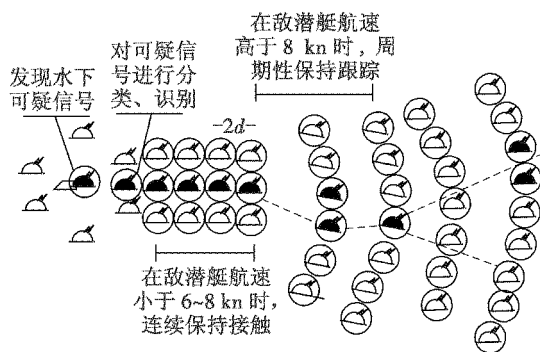


图1 浮标跟踪搜潜示意图

Fig.1 Diagram of tracking and searching submarine by buoy

1.2 周期性保持接触

当潜艇的航速较高时,在某些情况下很难或无法建立起连续保持接触,这时应该使用周期性保持接触的方案。

使用周期性保持接触方案时,一般相邻浮标阵之间距离应大于两倍的浮标作用距离,通常取3~5倍浮标作用距离。浮标阵的布设长度通常由潜艇的机动情况决定,一般应在垂直潜艇航向方向上按扇形阵、线形阵等模式布设浮标。如果目标航向变化不大,则应在潜艇航向左右的90°~120°扇面内布设浮标,如果潜艇航向变化较大,则应在潜艇航向左右的180°扇面内布设浮标。使用周期性保持接触方案时浮标阵布设见图1。

2 监听航路的规划

进行无人机监听航路规划时,首先要考虑环境和无

人机性能对无人机的约束,具体约束见文献[8]所述。

2.1 代价函数

无人机在航路规划过程中要考虑的代价因素很多,如路径长度、飞行时间、威胁体对无人机的威胁、飞行时的耗油量等,下面分别对其进行研究。

当无人机做匀速飞行时,无人机耗油量表示为

$$C_{oil} = t \times r_{oil} = \frac{D}{v} \times r_{oil} = \frac{D \times r_{oil}}{v} \quad (1)$$

式中: C_{oil} 为无人机按某条路径飞行时的耗油量; t 为无人机按某条路径飞行时的飞行时间; D 为无人机按某条路径飞行时此路径的长度; r_{oil} 为无人机按某种状态飞行时的耗油率; v 为无人机按某条路径飞行时的飞行速度。

假设无人机除了起飞、降落及从某种飞行状态变成另一种飞行状态时出现变速飞行外,都是在某一速度下做匀速飞行。对于变速飞行,可以认为无人机按平均速度飞行,从而将其变速飞行转化为匀速飞行。在某个飞行高度的匀速飞行状态下,无人机的耗油率与其飞行速度成正比。由式(1)可知:无人机在某个高度下做匀速飞行时,它的耗油量、飞行时间都与它所飞过的路径长度成正比,因此可以认为,无人机的飞行时间和耗油量是其路径长度的函数,由此可得

$$W_D = f(D, t, C_{oil}) = k \times D_i \quad (2)$$

式中: W_D 为无人机按第*i*条路径飞行时的路径代价; D_i 为无人机按第*i*条路径飞行时所飞路径长度; k 为常数; i 为任意两航路点间可能的飞行路径中的一条。无人机在不与威胁体碰撞的情况下,威胁体对无人机的威胁,用威胁代价 C_{th} 来表示威胁体对无人机的威胁,则无人机在任意两个航路点间按某一条路径飞行时它所付出的代价(路径代价和威胁代价)可表示为

$$W_i = k \times D_i + C_{th-i} \quad C_{th-i} = \begin{cases} \infty & \text{无人机与威胁体碰撞} \\ 0 & \text{无人机与威胁体无碰撞} \end{cases} \quad (3)$$

式中, C_{th-i} 为无人机按第*i*条路径飞行时的威胁代价。

无人机按某种方案从起点经过若干个中间航路点到达终点的过程中,总的飞行代价函数为

$$W = \sum_{j=1}^m W_{ij} = \sum_{j=1}^m k_j \times D_{ij} + C_{th-ij} \quad (4)$$

式中: W 为无人机从起点飞到终点的飞行过程中,按某种方案飞行的总代价; j 为从起点至终点的飞行过程中路径段的数量,取值为1,2, ..., m 。

2.2 监听航路规划

由第1节可知,对潜跟踪时浮标阵多为线形阵或扇形阵,其中,以扇形阵最具代表性(当扇形阵中每一层浮标成线形排列时,就变成了线形阵),因此,本文只研究使用扇形浮标阵跟踪潜艇时无人机监听航路的规

划。在跟踪敌潜艇时的连续保持接触方案和周期性保持接触方案中,其扇形浮标阵中除每层浮标及每层浮标内部的距离不同外,其他参数类似,因此只研究一种扇形浮标阵即可。

跟踪搜潜时,监听无人机的数量由浮标阵的大小及无人机与浮标之间的监听距离(即无人机与浮标的通信距离) $D_{\text{通信}}$ 来决定。由于 $D_{\text{通信}}$ 为一个常值,因此浮标阵的大小决定了无人机的数量。当浮标阵较大时,无论无人机怎样飞行,某一时刻总有部分浮标不能与无人机通信从而导致敌潜艇可能逃出浮标阵,因此必须要多架无人机协同执行任务。本文主要研究单无人机的监听航路规划,而多无人机协同监听浮标阵的情况不再讨论。

扇形浮标阵的布置中,浮标阵是按圆心 O 为顶点、 θ 为扇面角、 L_i 为边长、以同层浮标中两浮标间距离 $D_{\text{浮标}}$ 和浮标阵中相邻浮标层之间的距离 $D_{\text{层距}}$ 为相邻浮标距离所组成的多层同心圆弧形浮标阵。

进行无人机航路规划时,假设每个浮标的作用距离为 $d_{\text{浮标}}$,无人机的转弯半径为 $R_{\text{机}}$ (最小转弯半径^[9]为 R_{min}),无人机的飞行高度为 H (H 不大于无人机的最大飞行高度),浮标段和无人机飞行路径的长度分别为 $L_{\text{浮标段}}$ 和 $L_{\text{飞行段}}$ 。由于无人机的飞行高度 H 远小于 $D_{\text{通信}}$,因此在规划无人机航路时 H 可以不予考虑。

在对扇形浮标阵进行监听时,无人机的飞行航路有两种:矩形监听航路和圆形监听航路。

矩形监听航路如图2所示。在扇形浮标阵 AOB 中,以浮标阵的中心为中心、以与 AOB 的角平分线垂直(或平行)为边,可得一个矩形(长方形或正方形) $EDCF$,此矩形即为无人机的监听航路。在 $EDCF$ 中,必须满足条件1(射线 OH 为扇面角 θ 的角平分线,并假设 $ED > EF$); $OH // ED // FC$,且 $OH \perp EF \perp DC$; $EB = FA \leq D_{\text{通信}}$,且 $OD = OC \leq D_{\text{通信}}$; $\min(EF, ED) \geq 2R_{\text{min}}$ 。

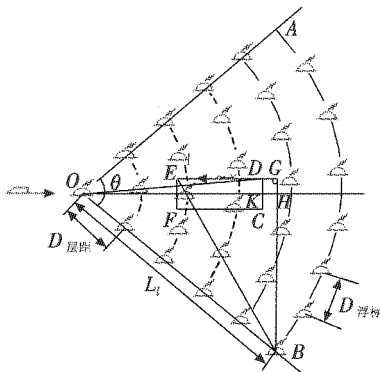


图2 无人机矩形监听航路示意图

Fig.2 Diagram of UAV with rectangular route

圆形监听航路如图3所示。在扇形浮标阵 AOB 中,以浮标阵的中心 D 为中心、以 R_c 为半径可得一个

圆,此圆形即为无人机的监听航路。圆形监听航路必须满足条件2: $AD = BD \leq (D_{\text{通信}} - R_c)$; $R_c \geq R_{\text{min}}$ 。

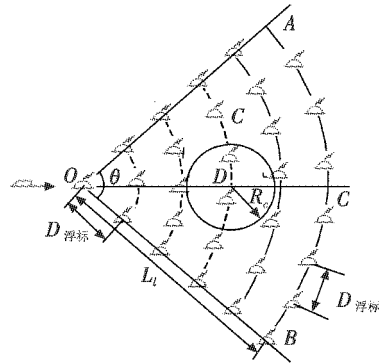


图3 无人机圆形监听航路示意图

Fig.3 Diagram of UAV with circular route

对于矩形监听航路,无人机在飞过矩形的4个角 C, D, E, F 时都是以圆弧进行转弯过渡。正方形是矩形的一个特例。由图2可知,当矩形航路4个角的过渡圆弧半径足够大,以至于圆弧可以彼此直接连接时,矩形监听航路就成了一个圆形监听航路,因此,本文只研究矩形监听航路。

2.3 监听航路分析

当单架无人机执行监听浮标阵任务时浮标阵的大小必然有限制,因此由图2可分析出扇形浮标阵的大小。

因为 $ED = EG - DG$

$$EG = \sqrt{BE^2 - (BH + HG)^2} =$$

$$\sqrt{BE^2 - (\sin(0.5\theta)L_i + HG)^2}$$

$$DG = KH = OH - OK = OH - \sqrt{OD^2 - DK^2} =$$

$$\cos(0.5\theta)L_i - \sqrt{OD^2 - DK^2}$$

所以 $\cos(0.5\theta)L_i = \sqrt{BE^2 - (\sin(0.5\theta)L_i + HG)^2} +$

$$\sqrt{OD^2 - DK^2} - ED$$

由以上推理可知,浮标阵的大小显然与扇面角 θ 和边长 L_i 成正比,下面分别讨论。

1) 扇面角 θ 为常值。当 θ 不变时,由上文可知,浮标阵的边长 L_i 与 BE, OD 成正比,与 HG, DK, ED 成反比,因此当 $HG = DK = 0.5ED = R_{\text{min}}$, $BE = OD = AF = D_{\text{通信}}$ 时,扇形浮标阵的边长 L_i 最大,此时矩形监听航路是个以 R_{min} 为半径的圆形,如图3所示。

2) 边长 L_i 为常值。当 L_i 不变时,由上文可知,浮标阵的扇面角 θ 与 BE, OD 成正比,与 HG, DK, ED 成反比,因此当 $HG = DK = 0.5ED = R_{\text{min}}$, $BE = OD = AF = D_{\text{通信}}$ 时,扇形浮标阵的扇面角 θ 最大,此时矩形监听航路是个以 R_{min} 为半径的圆形,如图3所示。

无人机进行航路规划时,假设浮标的作用距离为

$d_{\text{浮标}}$, 两浮标间的距离为 $D_{\text{浮标}}$, 无人机的转弯半径为 $R_{\text{机}}$ (最小转弯半径^[6]为 R_{min}), 无人机的飞行高度为 H (H 不大于无人机的最大飞行高度), 浮标段和无人机飞行路径长度分别为 $L_{\text{浮标段}}$ 和 $L_{\text{飞行段}}$; 浮标阵的层数为 M , 浮标的数量为 N 。由于无人机的飞行高度 H 远小于 $D_{\text{通信}}$, 因此在规划无人机航路时 H 可以不予考虑。

由1节、2.1节、2.2节可知, 当扇形浮标阵扇面角为 θ 、边长为 L_i , 且无人机按矩形监听航路飞行时, $M, N, L_{\text{浮标段}}, L_{\text{飞行段}}$ 以及发现潜艇概率 $P_{\text{发现}}$ ^[9] 分别为

$$\begin{cases} M = \text{int}\left(\frac{L_i}{D_{\text{浮标}}}\right) + 1 \\ N = \sum_{i=1}^M \left\{ \text{int}\left[\frac{\theta}{360}(i-1)\right] + 1 \right\} \\ L_{\text{浮标段}} = \sum_{i=1}^M \left(\frac{\theta}{360}\right) 2\pi D_{\text{层距}} \\ L_{\text{飞行段}} = 2(CD + DE) - 8R_{\text{机}} + 2\pi R_{\text{机}} \\ L_{\text{飞行段-min}} = 2\pi R_{\text{min}} \\ P_{\text{发现}} = \frac{2(D_{\text{浮标}} - d_{\text{浮标}})}{D_{\text{浮标}}} P_{\text{浮标完好}} P_{\text{识别}} + \\ \frac{2d_{\text{浮标}} - D_{\text{浮标}}}{D_{\text{浮标}}} [1 - (1 - P_{\text{浮标完好}} P_{\text{识别}})^2] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{浮标完好}}$ 为浮标技术完好率; $P_{\text{识别}}$ 为操作人员对接触识别的概率。

在实际使用中, 特定浮标的探测距离和技术完好率通常是确定的, 操作人员的识别概率在一定技术条件下也变化不大, 可用机载计算机来解算不同条件下的发现概率。

由式(4)可知, 无人机监听一次时, 飞行的路径长度 L_s 和飞行代价 W_s 为

$$\begin{cases} L_s = L_{\text{飞行段}} \\ W_s = \sum_{j=1}^m W_{ij} = L_s = L_{\text{飞行段}} \end{cases} \quad (6)$$

3 仿真及分析

3.1 仿真条件

假设有无人机按1节所述的扇形浮标阵布设浮标, 无人机按2节所述的矩形航路飞行。进行仿真时, 假设条件如下所述。

1) 巡逻区域: 巡逻区域是一个 100 km 宽的海域, 扇形浮标阵的布设范围为顶点 (50 000 m, 15 000 m), 扇面角 $\theta = 90^\circ$, 边长 $L_i = 40$ km。

2) 浮标阵模型: 浮标声纳的作用距离 $d_{\text{浮标}} = 2$ km, 浮标与无人机的通讯距离 $D_{\text{通信}} = 40$ km, 相邻浮标间距离 $D_{\text{浮标}} = 1.7d_{\text{浮标}}$, $D_{\text{层距}} = 3d_{\text{浮标}}$ 。浮标的 $P_{\text{浮标完好}} = P_{\text{识别}} = 0.8$ 。

3) 无人机模型: 无人机的巡逻速度 $V_{\text{机}} = 150$ km/h, 转弯半径 $R_{\text{机}} = R_{\text{min}} = 5$ km, 飞行高度 $H = 100$ m。

4) 潜艇模型: 潜艇位于阵的顶点, 速度 $V_{\text{潜}} = 8$ km。潜艇以固定的、垂直于浮标阵的方向进入浮标阵。

3.2 仿真结果

无人机按2.2节所述方法监听浮标阵时, 有两种方案: 方案1, 无人机按正方形的航线飞行 (见图2), $EF = ED = 20$ km; 方案2, 无人机按长方形的航线飞行 (见图2), $2EF = ED = 20$ km。

根据3.1节所述条件及上述两种方案, 可得无人机监听航路的仿真结果, 如图4、图5所示。

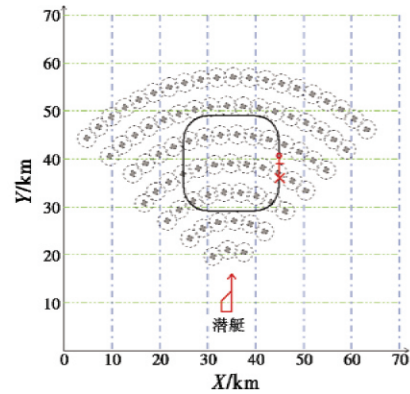


图4 方案1的仿真结果

Fig.4 Simulation result of UAV with scheme 1

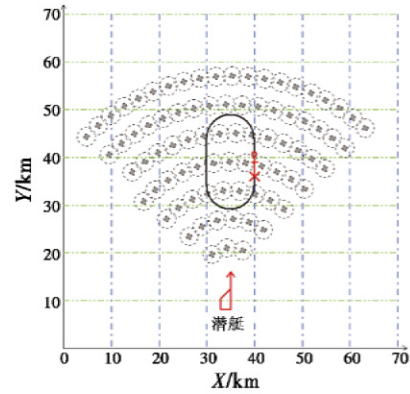


图5 方案2的仿真结果

Fig.5 Simulation result of UAV with scheme 2

3.3 结果分析

首先分析方案1和方案2是否可行。根据条件1可得: 方案1, $EB = 42.4264$ km $> D_{\text{通信}} = 40$ km, $\min(EF, ED) = 20$ km $> 2R_{\text{min}} = 10$ km; 方案2, $EB = 37.9758$ km $< D_{\text{通信}} = 40$ km, $\min(EF, ED) = 10$ km $= 2R_{\text{min}} = 10$ km。

因此, 虽然方案1和方案2都是按2节所述方法规划航路, 但前者不可行 (因为这时需要两架以上无人机同时工作), 后者可行 (只需一架无人机即可完成任务)。

方案1需要两架以上无人机的主要原因是 $EB > D_{\text{通信}}$, 即方形航线的顶角附近与相应浮标阵的边界距

离过大,从而导致两者的通讯中断。

总之,无人机航路应尽量分布于浮标阵角平分线附近,且越扁平越好。

4 结束语

本文在介绍了跟踪搜潜时浮标阵布设的基础上,详细分析并讨论了无人机跟踪搜潜时监听航路的规划问题,提出了无人机矩形监听航路方案,最后通过仿真进行了验证,这为今后无人机在实际中执行跟踪搜潜任务提供了理论基础。

扇形浮标阵只是跟踪搜潜中浮标阵布设的一种,当布设其他浮标阵时,无人机的监听航路显然不同,研究其他浮标阵监听方案并比较优劣是今后研究的方向。

参 考 文 献

- [1] 丛红日,吴福初. 航空反潜战术[M]. 烟台:海军航空工程学院出版社,2008:1-15,99-102. (CONG H R, WU F C. Tactics of airborne anti-submarine[M]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008:1-15,99-102.)
- [2] 杨日杰,周旭,曾海燕. 被动全向声纳浮标跟踪潜艇时优化布放方法[J]. 指挥控制与仿真,2011,33(5):80-83. (YANG R J, ZHOU X, ZENG H Y. Optimal deployment of passive omnidirectional sonobuoys in the underwater target tracking [J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(5):80-83.)
- [3] 滕俊,邵晓方,吴昊. 潜艇跟踪过程中声呐浮标的作战使用[J]. 舰船科学技术,2012,34(8):90-94. (TENG J, SHAO X F, WU H. Research on tactical operation of sonobuoy in tracking submarine [J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(8):90-94.)
- [4] 杨日杰,周旭,张林琳. 主动全向声纳浮标跟踪潜艇优化布放方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(10):2249-2254. (YANG R J, ZHOU X, ZHANG L L. Optimal deployment of active omni-directional sonobuoys in underwater target tracking [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(10):2249-2254.)
- [5] 许爱强,盛沛,谭勳. 机载浮标搜潜系统搜潜效能评估模型[J]. 兵工自动化,2011,30(8):43-45. (XU A Q, SHENG P, TAN X. A model for evaluating submarine reconnaissance effectiveness of air-borne buoy submarine reconnaissance system [J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(8):43-45.)
- [6] 宋伟健,唐金国,王雷,等. 直升机反潜作战效能评估模型研究[J]. 海军航空工程学院学报,2012,27(6):709-713. (SONG W J, TANG J G, WANG L, et al. Research on combat effectiveness evaluation model of helicopter anti-submarine [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(6):709-713.)
- [7] 严俊,金晓南. 固定翼反潜机浮标阵监听飞行航路规划研究[J]. 航空电子技术,2010,141(4):7-10. (YAN J, JIN X N. Research on the routing plan of monitoring sonobuoy array of ASW fixed-wing aircraft [J]. Avionics Technology, 2010, 141(4):7-10.)
- [8] 王庆江,高晓光,符小卫. 无威胁情况下任意两点间的无人机路径规划[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(9):2157-2162. (WANG Q J, GAO X G, FU X W. Path planning of UAV between two random points without threats [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9):2157-2162.)
- [9] 赵晓哲,沈治河. 海军作战数学模型[M]. 北京:国防工业出版社,2004:97-98. (ZHAO X Z, SHEN Z H. Mathematical model for naval combats [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:97-98.)

下 期 要 目

POS 辅助图像定位
 便携式红外系统检测仪
 甚长基线近区时差测向联合定位及特性分析
 基于侦校雷达的多测距实时数据融合方法研究
 基于边沿方向特征的地面时敏目标识别方法
 四旋翼飞行器姿态估计方法
 反舰导弹饱和攻击时差规律研究
 航空无线信道建模与仿真
 基于粒子群优化的导弹分数阶控制器设计

空域-小波域联合滤波的红外复杂背景抑制
 时间触发以太网可用于航空电子系统
 带有干扰观测器的分数阶滑模控制
 复杂电磁环境信号分形特性验证
 高精度稳定平台伺服控制系统仿真实现
 雷达仿真运行效率优化方法研究
 双波段红外光学系统无热化设计
 使用插值法滤波的单站无源定位算法
 空间目标可视条件与可见光特性分析