

引用格式:许锡锴,徐磊,陈辉.预警机引导单机多目标攻击方案决策研究[J].电光与控制,2019,26(7):46-50. XU X K, XU L, CHEN H. On decision-making for single-to-multiple attack guided by AWACS[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7):46-50.

预警机引导单机多目标攻击方案决策研究

许锡锴, 徐磊, 陈辉

(中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京 100041)

摘要: 主要对预警机引导现代战机进行单机多目标攻击的方案决策问题进行研究,分析了由预警机进行决策和引导的优势,给出了决策路线和求解方法。在对目标进行威胁和价值评估的基础上,首先确定首攻目标和剩余各目标权重,然后构建占位决策目标函数,再根据占位决策结果求解最优攻击航线。仿真算例表明,所提方法可充分发挥预警机的情报优势,引导战斗机隐蔽接敌,以优势占位捕获、打击多个目标,尤其是在目标分散距离较远的情况下。

关键词: 预警机; 多目标攻击; 攻击排序; 占位决策; 航线规划

中图分类号: E926.37 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.009

On Decision-Making for Single-to-Multiple Attack Guided by AWACS

XU Xi-kai, XU Lei, CHEN Hui

(China Academy of Electronics and Information Technology, CETC, Beijing 100041, China)

Abstract: This paper mainly studies the decision-making problem of Airborne Warning and Control System (AWACS) when guiding modern fighters to attack multiple targets, analyzes the advantages of decision-making and guidance by using AWACS, and gives a decision-making route and solution. Based on the threat evaluation and value evaluation to the target, the first target to be attacked and the weights of the rests are determined. Then, the objective function of the occupation decision is constructed to solve the optimal attack route. The simulation result shows that the proposed method can give full play to the intelligence advantage of AWACS, guide the fighter to approach the targets stealthily, and capture and strike the scattered targets in dominant positions.

Key words: AWACS; multi-target attack; attack sequencing; decision of occupation; route planning

0 引言

新型战斗机可挂载先进超视距空空导弹,具备隐身及多目标攻击能力,可同时或连续制导多枚导弹对中远距空域中分散的多个目标实施打击。一般来说,单机多目标攻击是以技术优势对付数量优势,它是克敌制胜、夺取制空权的一种重要手段。但是,要完成多目标攻击并不容易,需要同时对空中多个目标进行跟踪、识别、火控计算和对多枚导弹同时进行制导^[1]。在多目标攻击导引方面,现有文献多关注于战斗机自身机载雷达及火控系统对本机的导引,典型的方法有多目标重心加权瞄准法^[2]、多目标可攻击扇区瞄准法^[3]等。本文主要考虑战斗机在预警机的引导下实施多目

标攻击,其攻击方案的决策与航线飞行引导主要由预警机指挥与控制系统完成。预警机凭借自身态势探测与信息综合等能力优势,可在较大范围内探测并跟踪空中多个分散目标,利用数据链引导战斗机进行多目标攻击,大幅提高战斗机多目标攻击的作战效能。

预警机引导战斗机实施多目标攻击,主要是要将战斗机引导到开雷达搜索目标、发射导弹的最佳位置。预警机发现多个目标后,根据已知的目标当前时刻以及前一系列时间点处的运动参数,预测目标未来一段时间内的运动轨迹^[4],进而做出多目标攻击引导方案决策,战斗机根据预警机所给的攻击方案和飞行航线实施追踪与战术占位。在预警机的引导下,战斗机高速飞向指定区域,此阶段机载雷达可一直处于关闭状态,因而具有较好的隐蔽性。当战斗机按照占位方案到达预定位置,目标进入机载雷达视距,机载雷达立即开机,战斗机在预警机的协助下搜索发现目标后,可按照预警机建议的

收稿日期:2019-01-21

修回日期:2019-03-25

作者简介:许锡锴(1982—),男,江苏沛县人,博士,高工,研究方向为指挥控制技术及相关信息系统开发等。

攻击顺序对多个目标实施火力打击。

由预警机引导战斗机进行多目标攻击的优越性尤其体现在目标分散距离较远、战斗机自身雷达无法一次性捕获所有欲攻击目标的情况下。在这种情况下,预警机可综合考虑探测到的所有可攻击目标位置及其运动轨迹,引导战斗机以最优路径依次完成对多个分散目标的攻击。

1 多目标攻击引导决策

预警机通过探测识别、信息综合,获取目标位置及运动状态数据后,引导受控战斗机对多个目标进行火力打击^[5]。引导前及引导过程中需要对战斗机的攻击顺序、攻击航线、占位及雷达开机时机等进行决策,达到提高攻击突发性、降低目标威胁同时最大化打击效果的目的。

1.1 目标攻击排序

在进行攻击引导前,首先需要对准备攻击的多个目标进行攻击排序,也就是根据空战态势评估,确定攻击目标的先后顺序^[6]。攻击排序主要依据目标价值和目标威胁。目标价值主要根据具体作战任务中的目标类型和在作战中的地位作用,由指挥系统加以评定;目标威胁包括目标对我方战斗机本身及其保护对象(如预警机、舰艇、要地等)的威胁。我方战机主动出击或目标对我方保护对象威胁较低时,重点考虑多目标攻击过程中目标对我方战机的威胁,主要包括两个方面^[7]:目标的空战能力及其与我机之间的战术几何关系(空战态势)。

空战能力评估的方法很多,最常用的是空战能力指数法^[8],主要考虑与空战有关的7个因素来衡量飞机空对空作战能力。

空战能力指数为

$$C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln \sum A_2] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (1)$$

式中: B 为机动性参数; A_1 为火力参数; A_2 为探测能力参数; ε_1 为操纵效能系数; ε_2 是生存力系数; ε_3 为航程系数; ε_4 是电子对抗能力系数。

空战能力威胁指数主要考虑敌机空战能力 C_i 与我机

$$\text{空战能力 } C_w \text{ 的比值,即 } T_{c_i} = \begin{cases} 0.2 & C_i/C_w < 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \leq C_i/C_w < 1 \\ 0.8 & 1 \leq C_i/C_w < 1.5 \\ 1.0 & C_i/C_w \geq 1.5 \end{cases}。$$

空战态势评估的因素很多,关键是3个因素:双方的方位航向(角度)、相对距离和飞行速度^[8]。相应威胁指数的算式如下。

角度威胁指数

$$T_{a_i} = \frac{|q_B| + |q_R|}{360}。 \quad (2)$$

距离威胁指数

$$T_{r_i} = \begin{cases} 0.5 & S_i \leq R_m, S_i \leq R_{m_i} \\ 0.5 - 0.2 \left(\frac{S_i - R_{m_i}}{R_m - R_{m_i}} \right) & R_{m_i} \leq S_i < R_m \\ 0.5 - 0.1 \left(\frac{S_i - R_{r_i}}{R_r - R_{r_i}} \right) & R_{r_i} > S_i > R_r \end{cases}。 \quad (3)$$

速度威胁指数

$$T_{v_i} = \begin{cases} 0.1 & V_i < 0.6 V_w \\ -0.5 + V_i/V_w & 0.6 V_w \leq V_i \leq 1.5 V_w \\ 1.0 & V_i > 1.5 V_w \end{cases} \quad (4)$$

其中: S_i 为目标距离; V_w 为我机速度; V_i 为目标机速度; q_B 为目标航向与目标线夹角(右偏为正); q_R 为目标前置角; R_r 为我机雷达最大跟踪距离; R_m 为我机导弹最大射程; R_{r_i} 为第*i*架敌机雷达最大跟踪距离; R_{m_i} 为第*i*架敌机导弹最大射程。

总的威胁指数可以采用直接线性加权模型,因此,第*i*个目标的总体威胁为

$$T_i = \lambda_1 \cdot T_{c_i} + \lambda_2 \cdot T_{a_i} + \lambda_3 \cdot T_{r_i} + \lambda_4 \cdot T_{v_i} \quad (5)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 为加权系数,总和为1。

设第*i*个目标的归一化价值为 W_i ,综合考虑目标威胁和目标价值,对第*i*个目标攻击的迫切程度可以表示为

$$\omega_i = \alpha_1 \cdot W_i + \alpha_2 \cdot T_i \quad (6)$$

式中: α_1, α_2 为加权系数,总和为1, $\alpha_1 = 0$ 时只考虑目标威胁, $\alpha_2 = 0$ 时只考虑目标价值。

按照各个目标的 ω_i 值从大到小进行排序得到攻击目标的先后顺序,其中 ω_i 值最大的确定为首要攻击目标, ω_i 同时可作为下文中计算剩余目标加权形心时的权重。

1.2 占位引导决策

攻击占位是空战取胜的先决条件^[9],对于多目标攻击来说,占位尤其重要。预警机依靠信息优势与决策优势,可正确引导我方战机占领有利阵位,进而形成对敌“辐射即截获,截获即开火”的攻击优势,使战斗机快速捕获、锁定、打击多个目标。

占位决策主要考虑超视距隐身多目标攻击对战斗机机载雷达和导弹的使用要求,包括决策战斗机雷达开机时的敌我相对距离、相对方位以及我机雷达扫描轴心方向。战斗机不能过早或过晚开启雷达,且雷达不能长时间开机,一旦开启就要快速稳定而且准确地探测并截获目标^[10],进而快速形成导弹发射条件。也就是说,雷达开机时,目标距离应小于雷达探测距离和导弹攻击距离二者中的较小者,目标方位角、俯仰角应

小于雷达最大探测方位角、俯仰角。除此基本要求外,对于多目标攻击还应当考虑以下两个重要决策原则:

1) 对首要攻击目标,应确保尽早捕获并发射导弹,导弹发射至导弹导引头截获目标之前,确保对首要目标的雷达照射,从而能够对已发射导弹进行指令校正;

2) 攻击首要目标的同时,应尽量使雷达可以捕获到更多的剩余目标,并尽量防止目标飞出雷达威力范围。

为尽早捕获、打击首要目标,同时提高打击的突然性,可采用前置点引导法,即引导我机在关闭雷达的状态下隐身接敌,在目标进入或即将进入我机导弹攻击区与雷达跟踪范围的交集时,提示我战斗机雷达开机,快速搜索、捕获首要目标并发射导弹实施打击。

在攻击首要目标的同时,对于剩余目标,可通过跟踪它们的加权形心,达到捕获多数重要目标的目的。 n 个目标的加权形心位置、航向、速度算式分别为^[3]

$$\begin{cases} M_p = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i M_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \\ K_p = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i K_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \\ V_p = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i V_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \end{cases} \quad (7)$$

式中: M_p 为形心位置; K_p 为形心航向; V_p 为形心速度; M_i 为第*i*个目标的位置; K_i 为其航向; ω_i 为目标*i*的权重(由前述目标威胁和价值决定)。

如图1所示,假设敌我机在同一水平面内,我机在位置 W 捕获位于 M 处的首要目标并立即发射超视距空空导弹,此时敌我航向分别为 K_m 和 K_w ,敌我速度分别为 V_m 和 V_w ,敌我航向夹角(进入角)为 θ 。设导弹发射至其捕获目标用时 T_c ,此时敌、我机沿各自航向分别飞至位置 M_1, W_1 。

设我机雷达可稳定探测跟踪的最大方位角为 φ ,为保证导弹捕获目标前我机对首要目标的持续照射,我机飞至位置 W_1 时,敌机位置 M_1 应位于我机雷达探测范围内,即满足

$$V_m T_c < \frac{S_{wm} \sin(\varphi - \sigma) - V_w T_c \sin \varphi}{\sin(\pi - \varphi - \theta)} \quad (8)$$

式中: S_{wm} 为敌我当前距离; σ 为目标离轴角。

与此同时,假设剩余目标的加权形心沿航向 K_p 从位置 M_p 移动到 M'_p ,为保证攻击首要目标后我机捕获

更多剩余目标,我机飞至位置 W_1 时,剩余目标形心位置 W'_p 应位于我机雷达探测范围内,即满足

$$V_p T_c < \frac{S_{wp} \sin(\varphi - \sigma_p) - V_w T_c \sin \varphi}{\sin(\pi - \varphi - \theta_p)} \quad (9)$$

占位决策还应尽量使我方战机对目标在迎头方向上攻击,迎头方向有利于战斗机雷达及早跟踪目标,且导弹射程也最远,比较容易实现突然攻击,达到快速歼敌之目的。另外,对于首攻目标,应确保目标离轴角 σ 小于导弹发射允许的最大离轴角 σ_{max} 。

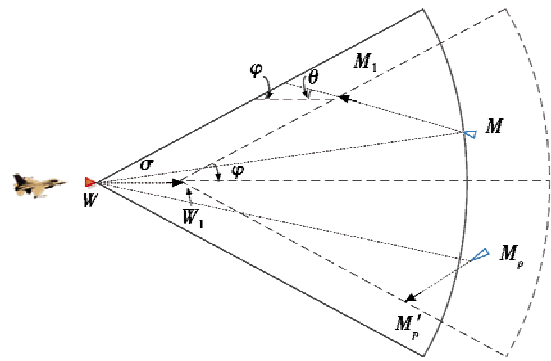


图1 多目标攻击占位示意图

Fig. 1 Fighting occupation for single-to-multiple attack

若假设对目标攻击的进入角越小(0° 为正对头),同时导弹离轴发射角越小,对目标击毁概率越高,则在方向占位上的决策目标函数可表示为

$$\begin{aligned} & \min(\theta + \sigma + \sigma_p + \theta_p) \quad (10) \\ \text{s. t. } & V_m T_c < \frac{S_{wm} \sin(\varphi - \sigma) - V_w T_c \sin \varphi}{\sin(\pi - \varphi - \theta)} \\ & V_p T_c < \frac{S_{wp} \sin(\varphi - \sigma_p) - V_w T_c \sin \varphi}{\sin(\pi - \varphi - \theta_p)} \\ & 0 \leq \sigma < \sigma_{max} \end{aligned}$$

在距离上的占位可取

$$S_{wm} = \min(R_1, R_m) \quad (11)$$

上述占位目标函数较易求解,这里不再详述。通过该占位决策,在对首攻目标进行攻击后,再对剩余目标进行攻击排序,确定下一个首攻目标,并采取同样的策略进行攻击占位。若剩余目标中有目标与当前首攻目标航向、距离比较接近,可考虑在攻击首要目标时同时攻击该目标,并在计算剩余目标加权形心时将其排除。

1.3 攻击航线求解

确定占位方向和占位距离后,对于首攻目标的攻击航线可用矢量法求解,通过求解我机与目标的相遇问题确定我机飞行航线。

如图2所示,假设敌我机当前分别位于 M, W 位置,敌机速度 V_m 、航向 K_m ,我机速度 V_w 、航向 K_w ,我机两次转弯半径 R_1, R_2 ,假设按照前述占位决策已确定占位距离为 d ,进入角为 θ ,通过求解我机摆位航向 K_2

及摆位平飞时间 t_2 ,即可确定我机航线。航线求解方法如下。

1) 建立矢量方程。

$$\overrightarrow{WO_1} + \overrightarrow{O_1W_1} + \overrightarrow{W_1W_2} + \overrightarrow{W_2O_2} + \overrightarrow{O_2W_3} + \overrightarrow{W_3M_1} = \overrightarrow{WM} + \overrightarrow{MM_1} \quad (12)$$

表示成复指数形式为

$$R_1 e^{i(K_1+n_1\pi/2)} + R_1 e^{i(K_2-n_1\pi/2)} + V_w t_2 e^{iK_2} + R_2 e^{i(K_2+n_2\pi/2)} + R_2 e^{i(K_3-n_2\pi/2)} + d e^{iK_3} = S_{wm} e^{iK_{wm}} + V_m t_m e^{iK_m} \quad (13)$$

2) 建立时间方程。

$$t_2 + \frac{Z_{ZW_1} R_1 + Z_{ZW_2} R_2}{V_w} = t_m \quad (14)$$

其中: $n_i = \begin{cases} -1 & \text{左转} \\ 1 & \text{右转} \end{cases}, i = 1, 2; n = \begin{cases} -1 & \text{从敌左侧进入} \\ 1 & \text{从敌右侧进入} \end{cases};$
 $K_3 = K_m - n\theta; Z_{ZW_1} = mc(n_1(K_2 - K_1)); Z_{ZW_2} = mc(n_2(K_3 - K_2)); mc(\cdot)$ 为主方向计算函数; K_{wm} 为我机至敌机方向。该方程组可通过牛顿法迭代求解,这里不再详述。

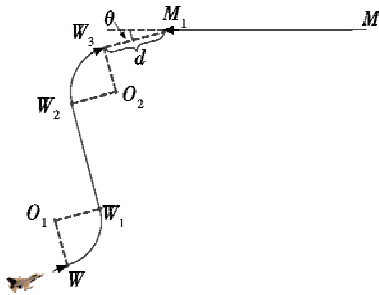


图2 攻击航线求解

Fig. 2 Calculation of the fighter's attack course

1.4 多目标攻击求解步骤

根据以上分析,多目标攻击求解的关键步骤可归纳如下:

- 1) 计算各目标威胁和价值并进行攻击排序,确定首攻目标和其余各目标的加权重;
- 2) 计算剩余目标中可与首攻目标同时攻击的目标(速度、航向、位置与首攻目标偏差小于阈值);
- 3) 求解剩余目标的加权形心位置和加权航向;
- 4) 根据占位决策目标函数求解结果,确定占位距离和方向;
- 5) 按照占位距离和方向计算我战斗机首攻航线;
- 6) 我战斗机到达指定占位,向首攻目标及可同时攻击的目标发射导弹并保持雷达照射直至导弹捕获目标;
- 7) 返回步骤1),对剩余目标继续攻击,直至导弹用完或达到预定攻击数量。

2 仿真算例

假设我方为一架具有多目标攻击能力的战斗机,

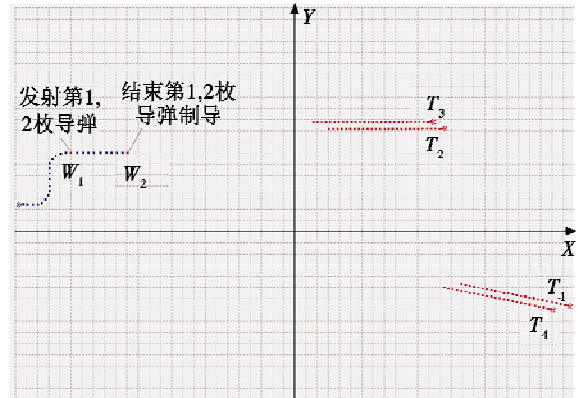
速度 $V_w = 330 \text{ m/s}$,空战能力指数 $C_w = 28.2$,雷达最大跟踪距离 $R_r = 120 \text{ km}$,相应水平扫描范围 $\varphi = 30^\circ$,携带4枚空空导弹,导弹最大射程 $R_m = 80 \text{ km}$,最大允许离轴发射角 $\sigma = 20^\circ$,导引头捕获距离 $R_c = 20 \text{ km}$,导弹最大飞行速度为 $V_c = 1000 \text{ m/s}$ 。4架目标机在同一水平面内匀速直线飞行(角速度为零)。目标作战能力参数及当前时刻的飞行状态如表1所示。

表1 目标态势及作战能力参数

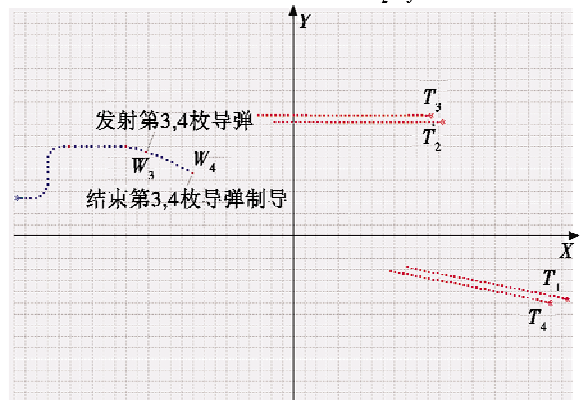
Table 1 Situation and fighting ability of the targets

目标	航向 $K_i/(^\circ)$	速度 $V_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷达跟踪距离 R_{r_i}/km	导弹射程 R_{m_i}/km	空战能力指数
T_1	290	285	120	70	20.7
T_2	270	310	110	60	16.8
T_3	270	315	120	70	20.7
T_4	290	290	110	60	16.8

如图3所示,使用仿真软件模拟我机及目标态势,实时解算我机多目标攻击航线,并对我机和目标运动进行推演(我机按解算航线运动,各目标沿各自航向运动)。



a 第一阶段,攻击 T_2, T_3



b 第二阶段,攻击 T_1, T_4

图3 战斗机同时攻击4个分散目标的航迹

Fig. 3 Track of the fighter when attacking 4 scattered targets

根据计算推演,我机攻击过程中,通过威胁评估确定首要攻击目标为 T_3 ,可同时攻击目标 T_2 ,引导我机

占位,在位置 W_1 发射 2 枚导弹,保持平飞至 W_2 结束导弹中段制导指令校正;接下来,对剩余目标,确定首要攻击目标为 T_4 ,可同时攻击目标 T_1 ,引导我机在 W_3 发射 2 枚导弹,而后保持平飞至 W_4 结束导弹中段制导指令校正,完成对 4 个目标的攻击。从攻击过程航线可以看出,本文提出的决策方法确保了对首要危险目标的攻击,同时兼顾其他目标并尽可能迎头以较小进入角攻击目标,攻击航线合理,符合设计目标。

3 结束语

新型战机的隐身多目标攻击是热点问题,也是一个复杂的问题,本文给出了一种预警机引导新型战机进行单机多目标攻击的占位决策、航线求解的思路和方法。仿真结果表明,预警机引导单机多目标攻击,可充分利用预警机的情报与指控优势,提高攻击决策的预见性,增加隐身攻击的突然性,对于提升单机多目标攻击的效果具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 王海青. 飞机多目标攻击试验探讨[J]. 飞机设计, 2006(2):72-77.
- [2] 王红,高晓光,何建华. 多目标攻击中的飞机操纵[J]. 西北工业大学学报,1997,15(2):273-277.
- [3] 蓝伟华. 空对空多目标攻击载机攻击航线求解逻辑[J]. 电光与控制,2007,14(3):16-18.
- [4] 赵磊,李仁松,常国任. 预警机引导战斗机空战目标分配模型[J]. 指挥控制与仿真,2008,30(5):34-36.
- [5] 祁炜,李侠,蔡万勇,等. 空袭中预警机阵位选择及航线规划[J]. 火力与指挥控制,2016,41(12):64-68.
- [6] 李永宾,张凤鸣,李俊涛. 基于组合赋权方法的多目标攻击排序[J]. 火力与指挥控制,2006,31(9):37-42.
- [7] 谢希权,李伟仁. 单机多目标攻击逻辑的对策型决策[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(7):28-31.
- [8] 兰俊龙,赵思宏,寇英信,等. 多机协同多目标攻击空战战术决策[J]. 电光与控制,2010,17(12):17-19.
- [9] 王丕宏,姜长生,杨承. 歼击机空战占位的模糊神经网络方法[J]. 电光与控制,2001,8(3):21-25.
- [10] 蒲小勃,缪炜星. 超视距空战中机载雷达的使用策略研究[J]. 电光与控制,2012,19(6):1-4.
- [11] LI S, ZENG T, LONG T, et al. Maneuvering target tracking based on multistatic system Doppler measurements [C]//International Conference on Signal Processing, IEEE, 2002:1484-1487.
- [12] EHRMAN L M, LANTERMAN A D. Extended Kalman filter for estimating aircraft orientation from velocity measurements [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2008, 2(1):12-16.
- [13] 李红伟,王俊,刘玉春. 粒子滤波和多站 TOA 的外辐射源雷达跟踪方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(11):2263-2267.
- [14] BECKER K. Three-dimensional target motion analysis using angle and frequency measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1):284-301.
- [15] 林文凤. 阵列快速 DOA 估计算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [16] ROGOZHNIKOVE V, POKAMESTOV D A, ABENOV R R. Decrease in the computational complexity of the signal processing algorithms for passive radars using the signals of illuminators of opportunity [C]//International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, IEEE, 2016:168-172.
- (上接第 35 页)
- [4] OLSEN K E, ASEN W. Bridging the gap between civilian and military passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 32(2):4-12.
- [5] WANG F, LI H, ZHANG X, et al. Signal parameter estimation for passive bistatic radar with waveform correlation exploitation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(3):1135-1150.
- [6] SCHUPBACH C, O'HAGAN D W, PAINE S. Electronic attacks on DVB-T-based passive radar system [C]//IEEE Radar Conference(RadarConf18), 2018:417-422.
- [7] O'HAGAN D W, SETSUBI M, PAINE S. Signal reconstruction of DVB-T2 signals in passive radar[C]//IEEE Radar Conference(RadarConf18), 2018:1111-1116.
- [8] SANTI F, PIERALICE F, PASTINA D. Multistatic GNSS-based passive radar for maritime surveillance with long integration times: experimental results [C]//IEEE Radar Conference (RadarConf18), 2018:1260-1265.
- [9] 石林艳,蒋柏峰,王宏,等. 非合作探测技术与电子侦察技术的综合应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017,12(4):383-388.
- [10] 万显荣,梁龙,但阳鹏,等. 移动平台外辐射源雷达实验研究[J]. 电波科学学报,2015,30(2):383-390.