

杂波和干扰背景下机载预警雷达的作用距离

汪先超^{1,2}, 汤子跃¹, 朱振波¹, 连晓锋¹

(1. 空军预警学院, 武汉 430019; 2. 中国人民解放军93617部队, 北京 101400)

摘要: 在实战环境下的机载预警雷达信号检测中, 目标信号要与旁瓣杂波、噪声以及干扰信号相抗衡, 决定机载预警雷达作用距离的因素是目标信号功率与旁瓣杂波功率、噪声功率和干扰功率之和的比值, 其中, 不同地形和不同PRF工作模式下机载预警雷达旁瓣杂波功率的计算是个难点。在分析地海杂波特性的基础上, 在考虑雷达信号处理得益的情况下推导出机载预警雷达旁瓣杂波功率计算的通用公式, 并最终给出在杂波和干扰背景下机载预警雷达的作用距离方程。仿真实验结果表明了所推导的旁瓣杂波功率计算公式和作用距离方程的正确性。

关键词: 机载预警雷达; 杂波; 干扰; 信干比; 作用距离方程

中图分类号: TN959.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)11-0001-05

Operating Range of AEW Radar in Clutter and Jamming Environment

WANG Xian-chao^{1,2}, TANG Zi-yue¹, ZHU Zhen-bo¹, LIAN Xiao-feng¹

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. No. 93617 Unit of PLA, Beijing 101400, China)

Abstract: In signal detection of Airborne Early Warning (AEW) radar under actual combat environment, the object signal must contend against sidelobe clutter, noise and jamming. The ratio of signal to the sum of sidelobe clutter, noise and jamming determines the operating range of the AEW radar, in which the sidelobe clutter power calculation is most difficult under different terrain and different PRF working model. Considering the benefit of the radar signal processing, we derived the universal formula of sidelobe clutter power calculation based on the analysis of ground and sea clutter characteristics. The operating range equation of AEW radar under the clutter and jamming environment was also given. The simulation results demonstrate the correctness of the sidelobe clutter power calculation formula and the operating range equation.

Key words: airborne early warning radar; clutter; jamming; signal to jamming ratio; operating range equation

0 引言

机载预警雷达的主要用途是对来自低空和超低空的威胁获得最大反应时间, 因此, 机载预警雷达作用距离的计算成为设计机载预警雷达的基础工作而一直受到重视^[1-4]。同时, 掌握机载预警雷达在实战环境下的作用距离, 对于分析机载预警雷达的探测威力、评估战场态势都有着重要的意义^[5]。

目前有很多学者开展了对机载预警雷达作用距离的研究。文献[6-7]用目标与杂波的雷达截面积之比来表示信杂比, 得到检测因子与雷达作用距离的关系。该作用距离方程只适用于目标回波信号与主瓣杂波竞争的情况, 对于普遍采用PD体制的机载预警雷达, 其主瓣杂波比目标信号强得多, 当目标信号在时域和频域都与主瓣杂波重叠时, 机载预警雷达将无法检测到目标信号^[8-9], 因此, 在机载预警雷达信号检测中与目标信号竞争的只能是旁瓣杂波, 该作用距离计算方法不适用于机载预警雷达。文献[10]提出了一种不同杂波背景下机载预警雷达作用距离的换算公式, 该换算公式主要利用的是杂波功率的比值与杂波常数成正比, 与预警机高度的平方成反比这个特性。杂波

收稿日期: 2015-09-22

修回日期: 2015-10-23

基金项目: 中国博士后科学基金(2015M572779); 空军预警学院青年创新基金(2013QNCX0101, 2014QNCX0112)

作者简介: 汪先超(1980—), 男, 安徽庐江人, 博士, 助工, 研究方向为雷达信号与信息处理。

功率的比值与预警机高度的平方成反比的理论根据不足,且没有考虑杂波在距离和频域上重叠的情况,换算的精度有限。文献[11-12]根据不同的 PRF 工作模式(高 PRF 和中 PRF)分别推导典型杂波环境下机载预警雷达作用距离方程,该文献对于距离上和频域上的重叠次数的计算有误差,且没有考虑现代雷达普遍采用的脉冲压缩和相参积累所带来的信号处理得益。

现有关于机载预警雷达作用距离的研究还存在另一个问题是没有从实战环境出发,只考虑杂波背景下机载预警雷达的作用距离。现代电子战一般都有干扰机的存在,因此需要同时考虑杂波和干扰对机载预警雷达作用距离的影响。本文从实战环境出发,考虑目标信号与旁瓣杂波、噪声和干扰信号竞争的情况,引入雷达信号处理得益,推导出高、中和低 PRF 工作模式通用的旁瓣杂波功率计算公式,最终给出机载预警雷达在杂波和干扰背景下的作用距离方程。根据该方程可对实战环境下的机载预警雷达的探测性能进行准确评估,这对及时准确把握战场态势具有重要意义。

1 地海杂波的反射率模型

地海面的散射特性具有空间上的显著不均匀性和时间上的不稳定性^[13],为了简化计算,可用大面积空间上与较长时间上的平均值来表征某地形的散射情况^[14]。海面单位面积的散射特性常用单位面积的杂波雷达截面积(反射率)来表示。影响反射率的因素主要有地貌特征、雷达工作频率、擦地角、极化等。常用的地海杂波反射率模型是 Morchin 模型^[15],该模型考虑了不同地貌和海情的散射特性,对于沙漠、农田、丘陵和高山以及 1~5 级海情的杂波反射率都有较好的描述。Morchin 模型的表达式为

$$\sigma^0 = \frac{A\sigma_c^0 \sin \psi}{\lambda} + u(\cot \beta_0)^2 \exp\left[-\frac{\tan^2(B-\psi)}{\tan^2 \beta_0}\right] \quad (1)$$

式中: σ^0 为反射率; ψ 为擦地角;对于海杂波 $u=1$,而对于地杂波 $u=\sqrt{f_0}/4.7$, f_0 为雷达工作频率,单位为 GHz。其他参数见表 1。

表 1 中的 F_1, F_2 和 F_3 的表达式分别为

$$F_1 = 4 \times 10^{-7} \cdot 10^{0.6(s+1)} \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{2.44 \cdot (s+1)^{1.08}}{57.29} \quad (3)$$

$$F_3 = \begin{cases} (\psi/\theta_c)^k & \psi < \theta_c \\ 1 & \psi \geq \theta_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta_c = \arcsin(\lambda/4\pi h_c)$,对于海杂波 $h_c = 0.025 + 0.046 \cdot s^{1.72}$,对于地杂波 $h_c = 9.3 \cdot \beta_0^2$,这里 s_s 表示海杂波的海情等级(1~5 级)。在海杂波的情况下, k 的建议值为 1.9,在沙漠杂波的情况下, k 的建议值为 1。

表 1 地海杂波反射率的具体参数

Table 1 Parameters for the reflectivity of ground and sea clutter

地形	A	B	β_0	σ_c^0
海杂波	F_1	$\pi/2$	F_2	F_3
沙漠	0.00126	$\pi/2$	0.14	F_3
农田	0.004	$\pi/2$	0.2	1
丘陵	0.0126	$\pi/2$	0.4	1
高山	0.04	1.24	0.5	1

当预警机的高度为 H 、斜距为 R 时,擦地角 ψ 和俯仰角 ϕ 如图 1 所示,且有如下关系式

$$\sin \psi = \frac{H}{R} - \frac{R^2 - H^2}{2RR_e} \quad (5)$$

$$\sin \phi = \frac{H}{R} + \frac{R^2 - H^2}{2R(R_e + H)} \quad (6)$$

式中: $R_e = 8490$ km,为地球的曲率半径。

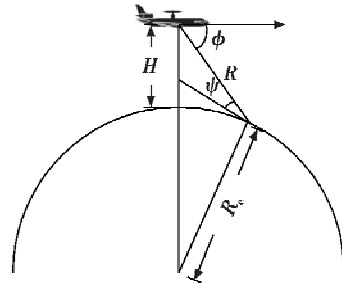


图 1 擦地角与俯仰角示意图

Fig. 1 Diagram of grazing angle and pitch angle

假如预警机的高度 H 为 10 km,雷达工作波长 λ 为 0.2 m,不同地貌下反射率和斜距之间的关系如图 2 所示。由图可见,海情 2 级的反射率最小,高山的反射率最大;海杂波的反射率比地杂波的反射率平均要小 30 dB 左右。

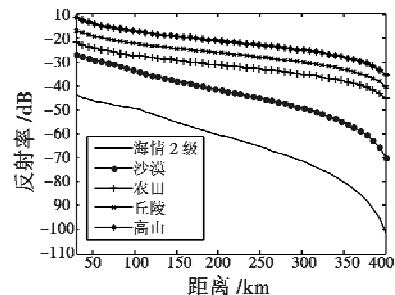


图 2 不同地貌下反射率和斜距之间的关系

Fig. 2 Relationship between reflectivity and distance under different landforms

2 机载预警雷达的作用距离

实战环境下决定机载预警雷达作用距离的因素是目标信号功率与旁瓣杂波功率、噪声功率和干扰信号功率之和的比值(简称信干比),要得到机载预警雷达的作用距离方程,关键是推导出旁瓣杂波和干扰信号

的功率计算公式。

2.1 通用旁瓣杂波功率计算公式

图 3 是等距离环和等多普勒线的示意图,其中,阴影部分为地海面散射单元, R 为散射单元所对应的视距, φ 为预警机飞行方向与散射单元的夹角, ϕ 为俯仰角, θ 为方位角, $d\theta$ 表示散射单元所对应的方位角变化, V_a 为预警机的速度。

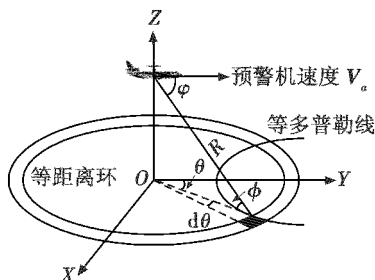


图 3 等距离环和等多普勒线示意图

Fig.3 Diagram of equal distance ring and equal Doppler line

图 3 中的散射单元的面积

$$A = R \cos \phi d\theta \cdot \Delta R \sec \phi = R \cdot \Delta R \cdot d\theta \quad (7)$$

式中: $\Delta R = c\tau/2$ 为距离门宽度所对应的距离; c 为电磁波传播速度; τ 为脉冲宽度。该散射单元的杂波雷达截面积为

$$\Delta \sigma_c = \sigma^0 A = \sigma^0 R \cdot \Delta R \cdot d\theta \quad (8)$$

该散射单元的多普勒频率为

$$f = \frac{2V_a \cos \varphi}{\lambda} = \frac{2V_a \cos \theta \cos \phi}{\lambda} \quad (9)$$

利用式(9),求 f 关于 θ 的微分,有

$$df = \frac{-2V_a \sin \theta \cos \phi}{\lambda} d\theta \quad (10)$$

结合式(8)和式(10),散射单元的雷达截面积为

$$\Delta \sigma_c = \frac{-\lambda \sigma^0 R \Delta R}{2V_a \sin \theta \cos \phi} df \quad (11)$$

等距离环上的散射单元的俯仰角 ϕ 是固定的,由式(9)知,旁瓣杂波的最大多普勒频率为 $f_{\max} = \frac{2V_a \cos \phi}{\lambda}$,且 $|\sin \theta| = \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}$ 。等距离环上的多普勒频率范围为 $[-f_{\max}, f_{\max}]$,对应的方位角范围为 $[0, \pi]$,故 $\sin \theta = \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}$,代入式(11),再由雷达方程可以求得一个散射单元的旁瓣杂波功率为

$$dP_{\text{SL}} = \frac{P_t G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \Delta \sigma_c}{(4\pi)^3 R^4 L_s} = \frac{-P_t G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \sigma^0 \Delta R}{(4\pi)^3 R^3 L_s \sqrt{f_{\max}^2 - f^2}} df \quad (12)$$

式中: P_t 为发射机输出射频频功率; G_{SL} 为指向散射单元的旁瓣增益; L_s 为系统损耗; dP_{SL} 为旁瓣杂波功率增量。

由图 3 可知,当 θ 不等于 0 和 π 时,等距离环与等多普勒线有对称的两个相交单元,因此,等距离环上一个多普勒频率单元的旁瓣杂波功率谱算式为

$$S_{\text{SL}}(f, R) = 2 \frac{dP_{\text{SL}}}{df} = \frac{-2P_t G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \sigma^0 \Delta R}{(4\pi)^3 R^3 L_s \sqrt{f_{\max}^2 - f^2}} \quad (13)$$

对式(13)进行积分可得一个等距离环中的旁瓣总杂波功率为

$$P_{\text{SL}}(R) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\text{SL}}(f, R) df = 2 \int_0^{f_{\max}} \frac{2P_t G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \sigma^0 \Delta R}{(4\pi)^3 R^3 L_s \sqrt{f_{\max}^2 - f^2}} df = \frac{P_t G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \sigma^0 \Delta R}{32\pi^2 R^3 L_s} \quad (14)$$

机载预警 PD 雷达在杂波背景下探测目标,采用不同 PRF 工作模式可能存在距离上或频域上的重叠,也可能同时存在距离上和频域上的重叠。距离上的重叠使得一个距离内的杂波功率是多个距离相差为 R_u 的等距离环上杂波功率的和, $R_u = c/2f_r$ 为不模糊距离。距离上重叠的次数为

$$K = \text{int} \left(\frac{R_{\text{cmax}} - R_{\text{cmin}}}{R_u} \right) \quad (15)$$

式中, R_{cmax} 和 R_{cmin} 分别表示旁瓣杂波起作用的最大距离和最小距离。 R_{cmax} 一般取预警机的视线距离,即 $R_{\text{cmax}} = 4.12\sqrt{H}$ km;预警机正下方有高度线杂波,如果目标落入高度线杂波,将无法检测到目标信号^[16], R_{cmin} 的一般取值为 $R_{\text{cmin}} = H/\sin \alpha$,其中 $\alpha = \arctan(h/L)$, h 为天线距离机翼的高度, L 为机翼的长度,如图 4 所示。相应的多个等距离环的斜距表达式为

$$R_i = R |R_u + \left[i + \text{int} \left(\frac{R_{\text{cmin}}}{R_u} \right) \right] R_u \quad i = 0, \dots, K \quad (16)$$

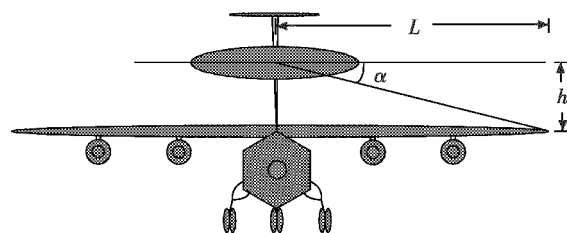


图 4 预警机正视图

Fig.4 Front view of early warning airplane

在斜距为 R_i 的等距离环上,如果旁瓣杂波在频域上产生重叠,重叠的次数为

$$K_i = \text{int}(2f_{\max}/f_r) + 1 \quad (17)$$

式中, $f_{\max} = (2V_a \cos \phi_i)/\lambda$ 。由式(6)可以求得 $\phi_i = \arcsin[H/R_i + (R_i^2 - H^2)/(2R_i(R_i + H))]$ 。

当目标信号落入旁瓣杂波区时,旁瓣杂波在其频带范围内是近似均匀分布的,旁瓣杂波经窄带多普勒滤波器后每个多普勒滤波器输出的杂波功率变为原来的 $1/M$, M 为旁瓣杂波带宽与窄带滤波器带宽之比^[17]。设窄带滤波器的个数为 Q ,则有

$$M = \frac{4V_a Q}{\lambda f_r} \quad (18)$$

综合式(14)、式(15)、式(17)和式(18),可以得到同一个距离门内的旁瓣杂波功率通用算式为

$$P_{\text{SL}}(R) = \frac{P_i G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \Delta R}{32 \pi^2 L_s M} \sum_{i=0}^K \frac{\sigma_i^0 K_i}{R_i^3} \quad (19)$$

式中, σ_i^0 表示斜距为 R_i 的等距离环上的反射率。

2.2 杂波和干扰背景下的作用距离方程

设干扰机的发射机输出射频功率为 P_j , G_j 为朝向目标的增益, 干扰信号入射到距离为 R_j 处目标的功率密度为

$$S_j = \frac{P_j G_j}{4 \pi R_j^2} \quad (20)$$

雷达天线接收到的功率为

$$S_{ij} = S_j A_r = \frac{P_j G_j A_r}{4 \pi R_j^2 L_j} = \frac{P_j G_j G_r \lambda^2}{(4 \pi)^2 R_j^2 L_j} \quad (21)$$

式中: A_r 为接收天线的等效面积; G_r 为雷达天线接收干扰信号时的增益, $G_r = \frac{4 \pi}{\lambda^2} A_r$; L_j 为干扰机系统损耗。

如果干扰信号从主瓣进入, 目标信号会被干扰信号淹没。因此, 主要考虑干扰信号从雷达天线旁瓣进入的情况, 即 $G_r = G_{\text{SL}}$ 。现代雷达多采用旁瓣对消或旁瓣匿影的方法抑制干扰机干扰^[18-19]。设干扰抑制比为 J_s , 则抑制后的干扰功率为

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{J_s} = \frac{P_j G_j G_{\text{SL}} \lambda^2}{(4 \pi)^2 R_j^2 L_j J_s} \quad (22)$$

雷达接收到的目标信号功率可由雷达方程得到, 即回波信号功率为

$$S = \frac{P_i G_{\text{ML}}^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4 \pi)^3 R^4 L_s} \quad (23)$$

式中: G_{ML} 为雷达主瓣天线的增益; σ_t 为目标的截面积。

现代干扰机多采用噪声压制性干扰, 考虑雷达信号处理后的得益, 杂波和干扰背景下的信干比为

$$R_{\text{s,j}} = \frac{D \cdot N \cdot S}{D \cdot N \cdot P_{\text{SL}}(R) + P_{ij} + N_0} \quad (24)$$

式中: D 和 N 分别表示雷达信号脉压处理和相参积累的得益; N_0 为机载预警雷达自身的噪声功率, $N_0 = k T_0 B F_n$, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, 是玻尔兹曼常数, $T_0 = 290$ K, 是标准温度, F_n 为接收机噪声系数, B 为接收系统噪声带宽。

由式(24)可确定机载预警雷达的作用距离方程, 将式(19)、式(22)和式(23)分别代入式(24), 得杂波和干扰背景下机载预警雷达作用距离方程为

$$R = \left[\frac{D \cdot N \cdot P_i G_{\text{ML}}^2 \lambda^2 \sigma_t}{R_{\text{s,j}} \left(D \cdot N \cdot 2 \pi P_i G_{\text{SL}}^2 \lambda^2 \Delta R \cdot \sum_{i=0}^K \frac{\sigma_i^0 K_i}{M R_i^3} + \frac{4 \pi P_j G_j G_{\text{SL}} \lambda^2 L_s}{R_j^2 L_j J_s} + (4 \pi)^3 k T_0 B F_n L_s \right)} \right]^{1/4} \quad (25)$$

3 仿真实验

仿真实验在沙漠杂波背景下进行, 由本文推导的杂波计算公式和作用距离方程, 生成高 PRF 和中 PRF 机载预警雷达作用距离和信干比的关系图。

选用的高 PRF 工作模式机载预警雷达的参数如下: 发射机功率 P_i 为 800 kW; 天线主瓣增益 G_{ML} 为 40 dB, 旁瓣增益 G_{SL} 为 -10 dB; 工作波长 λ 为 0.1 m; 接收系统噪声带宽 B 为 1 MHz; 接收机噪声系数 F_n 为 6 dB, 系统损耗 L_s 为 13 dB; 重复频率 f_r 为 25 kHz; 窄带滤波器个数 Q 为 128; 相参积累得益 N 为 128; 脉冲压缩得益 D 为 1。

选用的中 PRF 工作模式机载预警雷达的参数如下: 发射机功率 P_i 为 180 kW; 天线主瓣增益 G_{ML} 为 35 dB; 旁瓣增益 G_{SL} 为 -10 dB; 工作波长 λ 为 0.2 m; 接收系统噪声带宽 B 为 2.5 MHz; 接收机噪声系数 F_n 为 5 dB; 系统损耗 L_s 为 13 dB; 重复频率 f_r 为 6 kHz; 窄带滤波器个数 Q 为 64; 相参积累得益 N 为 64; 脉冲压缩得益 D 为 25。

另外, 预警机距离地面高度 H 为 10 km; 预警机速度 V_n 为 150 m/s; 防止目标信号与高度线杂波重叠, 取 $\alpha = 13^\circ$, $R_{\text{min}} = 44$ km; 目标的雷达截面积 σ_t 为 5 m^2 。

选用的噪声压制干扰机参数如下: 发射机功率 P_j 为 20 kW; 天线增益 G_j 为 25 dB; 雷达天线接收干扰信号的增益 G_r 为 -10 dB; 系统损耗 L_j 为 11 dB; 干扰机与预警机的距离 R_j 为 400 km; 干扰抑制比 J_s 为 20 dB。

图5和图6分别是采用高 PRF 和中 PRF 工作模式的机载预警雷达作用距离与信干比的关系图。按照雷达检测目标要求确定检测因子, 通过图5和图6可知对应的机载预警雷达的最大作用距离。如果要求的检测因子为 13 dB, 在无抑制干扰的情况下, 高 PRF 和中 PRF 工作模式下的机载预警雷达的作用距离分别为 420 km 和 400 km; 在有压制干扰的情况下, 高 PRF 和中 PRF 工作模式下的机载预警雷达的作用距离分别为 250 km 和 180 km。由此可知, 在有压制性干扰的情况下, 机载预警雷达的探测性能有明显下降。

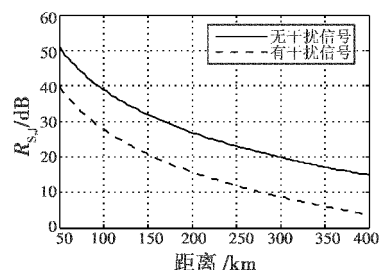


图5 高 PRF 工作模式下作用距离与信干比关系图

Fig. 5 Operating range vs signal to jamming ratio under high PRF work mode

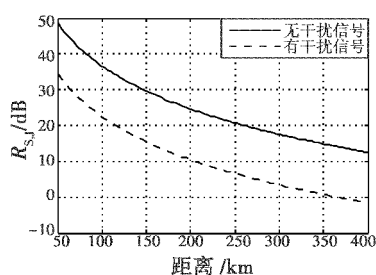


图 6 中 PRF 工作模式下作用距离与信干比关系图

Fig. 6 Operating range vs signal to jamming ratio under medium PRF work mode

4 结束语

现代电子战中一般都存在干扰机,机载预警雷达在对抗地海杂波的同时,还要对抗干扰。现有的关于机载预警雷达作用距离的研究或多或少存在问题:很多只考虑杂波背景下的作用距离,没有同时考虑干扰对作用距离的影响;对与目标信号竞争的旁瓣杂波功率的计算,很多研究没有考虑距离上和(或)频域上的重叠,还有对重叠次数的计算存在误差;没有考虑雷达信号处理带来的得益。本文从地海杂波反射特性入手,在考虑雷达信号处理得益的情况下,推导出不同地形和不同 PRF 工作模式下通用的旁瓣杂波功率计算式,给出了机载预警雷达在杂波和干扰背景下的作用距离方程,最后,利用仿真实验验证了本文提出的旁瓣杂波功率计算式和作用距离方程的正确性。本文的研究结果对分析实战环境下机载预警雷达的探测性能具有重要参考意义。

参考文献

- [1] 陆军, 郇能敬, 曹晨. 预警机系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. (LU J, LI N J, CAO C. Introduction to airborne early warning systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.)
- [2] 韩伟, 汤子跃, 朱振波. 利用地理信息的机载预警雷达空地目标分类[J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 45-49. (HAN W, TANG Z Y, ZHU Z B. Road information based air/ground target classification for airborne early warning radar[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(6): 45-49.)
- [3] 贺静波, 刘晓东. 雷达作用距离的分形特性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(1): 53-55. (HE J B, LIU X D. Studies on fractal features of radar range[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(1): 53-55.)
- [4] 汪先超, 汤子跃, 朱振波, 等. 基于多普勒盲区的低空突防航线规划[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1531-1535. (WANG X C, TANG Z Y, ZHU Z B, et al. Flight planning of low-altitude penetration based on Doppler blind zone[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(7): 1531-1535.)
- [5] 郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于区间数的预警机作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 1007-1010. (GUO H, XU H J, LIU L. Measurement of combat effectiveness of early-warning aircraft based on interval number[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(5): 1007-1010.)
- [6] 孔庆颜, 陈重, 胡冰. 地杂波背景中的雷达距离方程的研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 442-445. (KONG Q Y, CHEN Z, HU B. Research on radar range equation in land clutter environment[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(3): 442-445.)
- [7] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. (DING L F, GENG F L, CHEN J C. Principle of radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [8] MERTENS M, NICKEL U. GMTI tracking in the presence of Doppler and range ambiguities [C]//The 14th International Conference on Information Fusion, Chicago, 2011: 1369-1375.
- [9] 杨正, 曹志耀, 方胜良. 机载脉冲多普勒预警雷达海地杂波功率计算[J]. 现代雷达, 2007, 29(3): 12-13. (YANG Z, CAO Z Y, FANG S L. Calculation of sea/land clutter power for airborne PD early warning radar[J]. Modern Radar, 2007, 29(3): 12-13.)
- [10] 刘华, 刁东生. 杂波下机载雷达探测距离评估技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 317-319. (LIU H, DIAO D S. Research on performance evaluation of airborne radar detection in clutter[J]. Journal of CAEIT, 2009, 4(3): 317-319.)
- [11] 邓有为, 王晟达, 甘轶, 等. 地杂波背景中机载预警雷达作用距离分析[J]. 微计算机信息, 2009, 25(1): 152-154. (DENG Y W, WANG S D, GAN Y, et al. Analysis of AEW range in land clutter environment[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(1): 152-154.)
- [12] RANDIG G W. A simple method to determine airborne radar detection performance in clutter [C]//IEEE National Radar Conference, 1993: 103-112.
- [13] 刘锦辉, 廖桂生, 李明. 对运动目标约束的机载前视阵雷达杂波谱补偿方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 910-916. (LIU J H, LIAO G S, LI M. Moving target constraint clutter compensation method for forward-looking airborne radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(5): 910-916.)
- [14] 罗毅, 刘国岁. 机载预警雷达杂波模型[J]. 电子学报, 2000, 38(9): 117-119. (LUO Y, LIU G S. Clutter model for airborne early warning radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 38(9): 117-119.)

4 结 论

本文建立基于动态贝叶斯网络的弹道目标识别模型,能够有效融合 4 种特征信息,及时判定目标发射症候。经过仿真分析,本文模型能够有效判读发射症候,且具有一定的稳定性,对反导系统中的症候识别具有一定的参考意义。然而,本文中并没有考虑在实际系统中如何执行所提出方法,这也是下一步重点研究的方向。

参 考 文 献

- [1] CALLAN R. 人工智能[M]. 黄厚宽,田盛丰,译. 北京:电子工业出版社,2002:84-124. (CALLAN R. Artificial intelligence[M]. Translated by HUANG H K, TIAN S F. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 84-124.)
- [2] WANG Q, GAO X G, CHEN D Q. Pattern recognition for ship based on Bayesian networks[C]//The 4th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007:84-688.
- [3] 姜维,李一军. 基于贝叶斯网络推理的导弹目标类型识别[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(6): 1264-1270. (JIANG W, LI Y J. Missile target type identification with Bayesian network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(6): 1264-1270.)
- [4] 周跃,罗小明,池建军. 基于贝叶斯网络的远程预警雷达作战运用效果评估[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(8):40-43. (ZHOU Y, LUO X M, CHI J J. Operational effectiveness evaluation of remote early warning radar based on Bayesian network[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(8): 40-43.)
- [5] 肖秦琨. 基于动态贝叶斯网络的自主优化机制研究[D]. 西安:西北工业大学,2007. (XIAO Q K. Research on autonomous optimization based on DBN[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.)
- [6] KEVIN P M. Dynamic Bayesian networks: representation, inference and learning[D]. Berkeley: University of California, 2002.
- [7] 马国普,沙基昌,陈俊良,等. 动态贝叶斯网络与黑板机制结合的协同决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2590-2594. (MA G P, SHA J C, CHEN J L, et al. Coordination decision-making based on dynamic Bayesian network and blackboard mechanism[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2590-2594.)
- [8] 王爽,郭军海,张艳. 基于动态贝叶斯网络的弹头目标融合识别方法[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(2): 70-74. (WANG S, GUO J H, ZHANG Y. Fused warhead recognition based on dynamic Bayesian network model[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(2): 70-74.)
- [9] 田永旺,肖兵. 基于动态贝叶斯网络的弹道导弹态势评估模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(6): 24-27. (TIAN Y W, XIAO B. Ballistic missile situation assessment model based on dynamic Bayesian network[J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(6): 24-27.)
- [10] 马跃龙,詹武. 基于贝叶斯网络动态推理的信息融合方法探讨[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(3): 67-69. (MA Y L, ZHAN W. Active inference based on Bayesian network for information fusion[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(3): 67-69.)
- [11] 张伟豪,陈怀新,崔莹,等. 基于动态贝叶斯网络的战斗目标综合推理识别[J]. 电讯技术, 2012, 52(6): 893-897. (ZHANG W H, CHEN H X, CUI Y, et al. Fusion inference identification of combat targets based on dynamic Bayesian network[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(6): 893-897.)
- (上接第 5 页)
- [15] MORCHIN W C. Airborne early warning radar[M]. London: Artech House, 1990.
- [16] MENG X D, WANG T, WU J X, et al. Short-range clutter suppression for airborne radar by utilizing prefiltering in elevation[J]. IEEE Geoscience and Remoting Letters, 2009, 6(2): 268-272.
- [17] 付莹,汤子跃,孙永健. 基于 IMMEPF 的多普勒盲区目标异类多传感器联合跟踪[J]. 电光与控制, 2013, 20(5): 88-93. (FU Y, TANG Z Y, SUN Y J. Heterogeneous multi-sensor joint tracking of target hidden in blind Doppler zone based on IMMEPF[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(5): 88-93.)
- [18] DEMAIO A, FARINA A, GINI F. Performance analysis of the sidelobe blanking system for two fluctuating jammer models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 1082-1091.
- [19] DAVID A, NATHAN R. Sidelobe blanking with expanded models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 790-805.