

概率分析的机载预警雷达探测效能

马健^{1,2}, 樊养余¹

(1.西北工业大学电子信息学院,西安,710129; 2.空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要 机载预警雷达探测效能是指其完成预警探测使命的程度,探测效能的高低受雷达作用距离和发现概率的影响。在概率分析的基础上提出了一种度量机载预警雷达探测效能的方法:该方法首先构建了雷达发现概率与最大作用距离间的数学模型;其次对发现概率随作用距离变化曲线逐点归一化,得到发现概率的概率密度函数;对发现概率的概率密度函数积分得到概率分布函数,该函数具有实际物理意义,反映了预警雷达的探测效能,由此将作用距离的远近量化为探测效能的高低,从而得到了预警雷达探测效能随作用距离变化的曲线;最后以美军 E-2C 和 E-3B 预警雷达为例,对比分析了 2 种机载预警雷达对斯威林 I 型和斯威林 II 型起伏目标的探测效能,验证方法的有效性。

关键词 概率分析;预警雷达;作用距离;探测效能

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.001

中图分类号 V243.2;TN951 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0001-04

Study of Airborne Early Warning Radar's Detection Effectiveness Based on Probability Analysis

MA Jian^{1,2}, FAN Yangyu¹

(1.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The detection effectiveness of the airborne early warning radar refers to the degree to which the early warning radar accomplishes its mission of early warning and detection. The radar's detection effectiveness tends to be affected by its detection range as well as its detection probability. A method of evaluating airborne early warning radar's detection effectiveness is given based on probability analysis method. A mathematic model is first established between the radar detection probability and its maximum detection range. Then, the curve of detection probability with detection range is normalized and the probability density function of detection probability is calculated. After that, the probability distribution function is acquired through integrating the probability density function of detection probability, the function has actual physical meaning and it reflects the detection effectiveness of the early warning radar. Thus, the detection range is quantitatively converted into detection effectiveness, and the curve is drawn for the detection effectiveness that varies with the change in range. And finally, by taking E-2C and E-3B early warning radars

收稿日期:2015-02-04

基金项目:航空科学基金资助项目(20145596025)

作者简介:马健(1972-),男,江苏徐州人,博士生,副教授,主要从事雷达信号处理.E-mail:majianky@163.com

引用格式:马健,樊养余. 概率分析的机载预警雷达探测效能[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(5):1-4. MA Jian, FAN Yangyu. Study of Airborne Early Warning Radar's Detection Effectiveness Based on Probability Analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(5): 1-4.

for example, an analysis is done aimed at the targets of Swerling I and Swerling II through comparison to verify the validity of the proposed method.

Key words: probability analysis ; early warning radar ; detection range ; detection effectiveness

针对机载雷达探测效能研究主要有:①单、双基地雷达探测效能研究,主要应用效能评估方法讨论机载雷达系统的效能,或研究不同环境、目标等条件对机载雷达作用距离的影响^[1-4];②组网雷达协同探测效能研究,主要应用效能评估方法研究雷达组网后的作战效能^[5-7];③干扰条件下机载雷达探测、跟踪性能研究,主要讨论在干扰条件下雷达的作用距离、检测跟踪及抗干扰效能^[8-11]。以上研究主要针对雷达系统效能研究,或是对雷达作用距离及其影响因素的研究,而关于雷达作用距离对探测效能的影响研究尚未见到。本文研究了雷达作用距离对探测效能的影响,提出了一种将雷达作用距离量化为探测效能的方法,并以 E-2C 和 E-3B 预警机机载雷达为例进行仿真分析,验证所提方法的有效性。

1 探测效能分析

作用距离远预警时间长,则探测效能高,探测效能与作用距离间存在对应关系。以雷达检测概率为纽带,可定量映射出作用距离与探测效能的关系,从而得到不同作用距离所对应的探测效能。

1.1 雷达作用距离

预警雷达作用距离取决于雷达本身的性能,同时又和目标的性质及环境因素有关。预警雷达最大作用距离方程可表示为:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L k T_0 B_n F_n (S/N)_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中: P_t 为雷达发射机峰值功率; G 为雷达天线增益; λ 为工作波长; σ 为目标有效反射面积; L 为损耗因子; T_0 为标准室温; k 为波耳兹曼常数; B_n 为接收机带宽; F_n 为噪声系数; $(S/N)_{\min}$ 为最小输出信噪比。

1.2 雷达发现概率

预警雷达检测采用奈曼-皮尔逊准则,对于 Swerling I 型和 Swerling II 型起伏目标,发现概率分别为式(3)和(4),虚警概率均为式(5)^[12-13]。

$$P_d = \left(1 + \frac{1}{N\chi} \right)^{N-1} e^{-T/(1+N\chi)} \quad (2)$$

$$P_d = e^{-T/(1+\chi)} \sum_{i=0}^N \frac{1}{i!} \left(\frac{T}{1+\chi} \right)^i \quad (3)$$

$$P_{fa} = 1 - I \left(\frac{T}{\sqrt{N}}, N-1 \right) \quad (4)$$

式中: T 是检测门限; N 是脉冲积累数目; χ 是 N 个采样的信噪比均值; $I(\cdot, \cdot)$ 是不完全伽马函数的皮尔逊形式。

由式(1)可知雷达作用距离 R_{\max} 和信噪比有关,由式(2)和(4)可知发现概率 P_d 也与信噪比有关,因此通过信噪比可建立发现概率与作用距离关系,对于 Swerling I 型起伏目标发现概率与信噪比关系为:

$$P_d = f(\chi) = \left(\frac{1}{1+N\chi} \right)^{N-1} e^{-T/(1+N\chi)} \quad (5)$$

由式(1)雷达方程可令:

$$\chi = \frac{A\sigma}{R^4}, \quad A = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 L k T_0 B_n F_n} \quad (6)$$

将 χ 、 R 视为随机变量,根据式(5)、(6)可得 Swerling I 起伏目标发现概率与作用距离关系式:

$$P_d = g_R(R) = f \left(\frac{A\sigma}{R^4} \right) \left| \left(\frac{A\sigma}{R^4} \right) \right| = -\frac{4A\sigma}{R^5} \left(\frac{1}{1 + \frac{NA\sigma}{R^4}} \right)^{N-1} e^{-T/(1 + \frac{NA\sigma}{R^4})} \quad (7)$$

同理可得 Swerling II 型起伏目标发现概率与作用距离关系式为:

$$P_d = g_R(R) = f \left(\frac{A\sigma}{R^4} \right) \left| \left(\frac{A\sigma}{R^4} \right) \right| = -\frac{4A\sigma}{R^5} e^{-T/(1 + \frac{A\sigma}{R^4})} \sum_{i=0}^N \frac{1}{i!} \left(\frac{T}{1 + \frac{A\sigma}{R^4}} \right)^i \quad (8)$$

取 $P_{fa} = 10^{-6}$ 、 $\sigma = 0.1$, 给定参数 A 的值后可根据式(7)和(8)绘出同一部雷达对起伏类型分别为 Swerling I 和 Swerling II 型目标的发现概率,曲线见图 1。图中横坐标为作用距离 R , 纵坐标为发现概率 P_d , 该图反映在虚警概率 P_{fa} 和目标反射截面积为定值时,雷达对不同起伏类型目标的发现概率。由图可见雷达对 Swerling II 型目标发现概率明显高于对 Swerling I 目标的发现概率。

对图 1 曲线 $g_R(R)$ 上逐点用曲线所包围的面积作归一化,得到发现概率随距离变化的概率密度函数 $f_R(R)$, 见图 2。

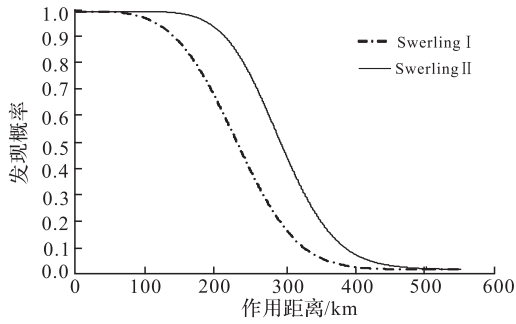


图 1 发现概率随距离变化曲线

Fig.1 Curve of detection probability with range

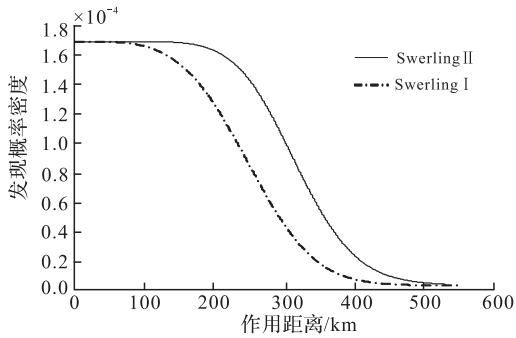


图 2 发现概率密度函数随距离变化曲线

Fig.2 Curve of detection's probability density function with range

1.3 探测效能

由概率密度函数与概率分布函数对应关系可知,对图 2 中的发现概率的密度函数曲线积分可得到发现概率的概率分布函数,图 3 中的曲线是概率分布函数,具有实际物理含义,如在曲线上任选一点 (100,0.34),该点表示雷达作用距离在 0 km 到 100 km 区间内,在所有距离上发现概率之和为 0.34。因此,图 3 中的曲线反映出雷达的探测效能,曲线上 (100,0.34)点表示当雷达探测 100 km 以内目标时,其探测效能为 0.34。这样处理将雷达的作用距离量化为效能。由图可得到以下结论:①随着雷达作用距离的增加,探测效能随之增加。这与实际相一致,即作用距离越远,预警时间越长,则探测效能越高;②在相同条件下目标起伏类型不同,探测效能也不同,对 Swerling II 型目标的探测效能优于对 Swerling I 型目标的探测性能;③当作用距离较近时,对 Swerling I 和 Swerling II 型目标的探测效能基本相同,但当作用距离逐渐增大时,对 2 类目标的探测效能的差别逐渐增大,这是由于距离近时目标的回波都较强,目标的起伏对雷达探测效能影响较小,而距离远时目标回波较弱,目标的起伏对探测效能影响较大;④当作用距离达到一定程度时(此处为 400 km 左右),探测效能趋于一定值。这是因为预警雷达作用距离达到这一距离时,对目标有充足的预警时间,能够保证引导战斗机进行有效拦截,完成预警

机的预警探测使命。这一点也为预警雷达战术指标制定提供参考,预警雷达在设计时最关心的就是作用距离定为多少千米合适,通过分析可知,作用距离太近不能完成预警探测功能,作用距离太远不仅增加研制成本而且对探测效能提升不大。预警雷达作用距离有一合适区间,在这一距离处既能有效完成预警探测使命,又能不增加研制成本。

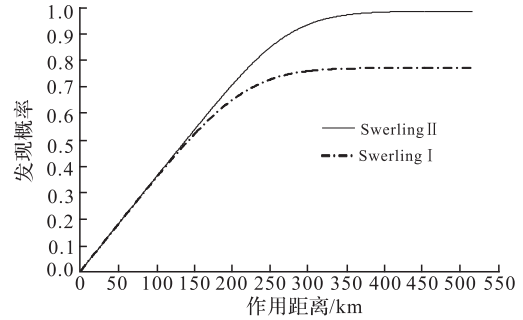


图 3 探测效能曲线

Fig.3 Curve of detection effectiveness

2 实例验证

下面以美军 E-2C 预警机 AN/APSI45 雷达以及 E-3 系列预警机 AN/APY-2 雷达为例,对所提评价方法进行仿真验证,2 型雷达性能参数见表 1^[14-15],其中作用距离是雷达对截面积(RCS)为 0.1 m² 目标的探测距离。

表 1 雷达性能参数

Tab.1 The parameter of radar

雷达型号	作用距离/km	平均功率/W	峰值功率/W	工作频率/MHz	脉冲宽度/ μ s	重复频率/Hz
AN/APSI45	270		10^6	400~450	13	300 Hz
AN/APY-2	320	10^4		3 200~3 400	1	30~100 KHz

根据上节探测效能求解过程进行计算仿真,得到目标的 RCS 为 0.1 m² 时,E-2C 和 E-3 预警雷达对 Swerling I 和 Swerling II 型目标的探测效能曲线,见图 4。由图得到以下结论:①总的变化趋势是 E-3 预警雷达探测效能优于 E-2C 预警雷达的探测效能,且随着距离增加这种优势更加明显,这是因为 E-3 雷达功率大于 E-2 雷达功率;②对于 Swerling II 型目标,2 型预警雷达探测效能相差在 10%左右,对于 Swerling I 型目标,两型预警雷达探测效能也在 10%,说明不同雷达对相同目标探测效能不同;③E-3 预警雷达对 Swerling I 和 Swerling II 型目标探测效能差在 20%左右,E-2C 预警雷达对 Swerling I 和 Swerling II 型目标探测效能差也在 20%左右,说明同部雷达对不同目标探测效能不同;④当目标类型相同时 E-3 和 E-2C 预警雷达探测效

能随距离增加逐渐稳定在一固定值,例如 E-3 预警雷达对 0.1 m^2 目标探测距离假如能达到 420 km 时,就有充足的预警时间,这种情况下其探测效能趋于 100%,即使再增加雷达功率提高作用距离对探测效能影响也很小。以上结论验证了所提方法的合理性。

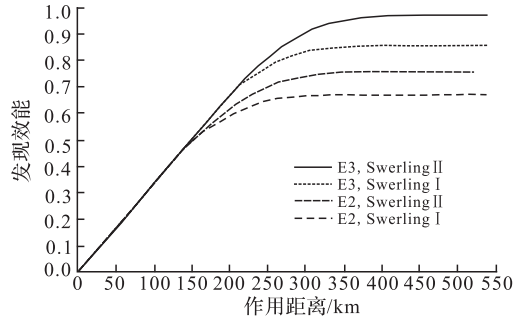


图4 探测效能对比曲线

Fig.4 The contrastive diagram of detection effectiveness

3 结语

本文研究了机载预警雷达作用距离与探测效能之间的关系,在概率分析的基础上得到了机载预警雷达探测效能随作用距离变化曲线,将雷达作用距离远近量化为探测效能的高低,并仿真验证了方法的有效性。本文提出的方法对于雷达战术指标论证、雷达威力评估、以及雷达作战效能评估都有一定参考意义。

参考文献(References):

- [1] 陈世国,沈齐. 基于灰色理论的机载预警雷达效能评估技术[J].现代雷达,2008,30(7): 28-33.
CHEN Shiguo, SHEN Qi. An Evaluation Technique Based on Grey Theory for AEW Radar Effectiveness[J]. Modern Radar, 2008, 30(7): 28-33. (in Chinese)
- [2] 周芳. 预警机雷达下视探测性能仿真方法[J].火力与指挥控制, 2013, 38(3): 76-80.
ZHOU Fang. Method for Detection Performance Simulation under Down Looking AEW Radar[J]. Fir Control & Command Control, 2013, 38(3): 76-80. (in Chinese)
- [3] 刘华,刁东生. 杂波下机载雷达探测距离评估技术研究[J].中国电子科学院学报, 2009, 4(3): 317-319.
LIU Hua, DIAO Dongsheng. Research on Performance Evaluation of Airborne Radar Detection in Clutter[J]. Journal of CAEIT, 2009, 4(3): 317-319. (in Chinese)
- [4] Woodbridge K, Banahan C P. Dynamic Range and Coverage Issues for A Mobile Bistatic Radar System[J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar, Navigation, 2004, 151(4): 221-224.
- [5] 刘健,辛永平. 主成分分析的雷达组网作战效能评价模型[J].火力与指挥控制, 2011, 36(6): 35-38.
LIU Jian, XIN Yongping. Study on Evaluation Model for Net-

- worked Radar Operational Effectiveness Based on Principal Component Analysis [J]. Fir Control & Command Control, 2011, 36(6): 35-38. (in Chinese)
- [6] 张培珍,杨根源,张杨,等. 雷达组网效能量化评估模型[J].现代防御技术, 2010, 38(5): 5-10.
ZHANG Peizhen, YANG Genyuan, ZHANG Yang, et al. Quantitative Evaluation Model for Radar Net Effectiveness [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(5): 5-10. (in Chinese)
- [7] 朱莹,王鹏刚,姜占宾. 干扰条件下雷达探测距离的建模和分析[J]. 现代雷达, 2006, 28(7): 12-14.
ZHU Ying, WANG Penggang, JIANG Zhanbin. Modeling and Analysis of Radar Detection Range in Jamming [J]. Modern Radar, 2006, 28(7): 12-14. (in Chinese)
- [8] 郭晋媛,黄俊. 模糊层次法评估机载雷达抗干扰效能[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 151-153.
GUO Jinyuan, HUANG Jun. Anti-jamming Effectiveness Evaluation of Airborne Radar Basen on Fuzzy AHP [J]. Electronics Optics Control, 2007, 14(4): 151-153. (in Chinese)
- [9] Kirubarajan T, Shalom Y, Blair W D, et al. IMPDAF for Radar Management and Tracking Benchmark with ECM [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115-1132.
- [10] Elgamel S A, Soraghan J. Empirical Mode Decomposition Based Monopulse Processor for Enhanced Radar Tracking in the Presence of High Power Interference [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2011, 5(7): 769-779.
- [11] Kreucher C, Shapo B. Multitarget Detection and Tracking Using Multisensory Passive Acoustic Data [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(2): 205-218.
- [12] 张晓波,曹晨. 机载预警雷达最优探测波长研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(3): 263-266.
ZHANG Xiaobo, CAO Chen. A Study on Airborne Early Warning Radar Optimal Detection Wavelength [J]. Journal of Chian Academy of Electronic and Information Technology, 2011, 6(3): 263-266. (in Chinese)
- [13] 张昆辉. 机载雷达手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 252-267.
ZHANG Kunhui. Airborne Radar Handbook [M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 2013: 252-267. (in Chinese)
- [14] 张宝祥,吉永刚,李青. 舰载预警机预警探测效能分析[J]. 飞机工程, 2009(1): 75-78.
ZHANG Baoxiang, JI Yonggang, LI Qing. Research on the Early Warning and Detecting Efficiency of Carrier AEW&C [J]. Aircraft Engineering, 2009(1): 75-78. (in Chinese)
- [15] 陆军. 世界预警机概览 [M]. 北京: 电子科学研究院, 2010: 30-70.
LU Jun. World Early - warning Aircraft Overview [M]. Beijing: Academy of Electronic and Information Technology, 2010: 23-62. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)