

文章编号: 2095-4980(2019)06-0976-05

机载雷达功率管理的应用

吴继礼, 刘 平, 孟卫刚, 胥 杰

(中国人民解放军 93995 部队 74 分队, 陕西 西安 710306)

摘 要: 为适应当前装备更新换代, 更好发挥作战效能, 从雷达应用的角度研究了空战中有源干扰条件下的功率管理措施。以实训数据为基础, 采用数值模拟方法, 分析机载雷达功率管理对电子战侦收的影响, 得出雷达“隐身”距离、雷达最大探测距离以及电子战最大侦收距离三者之间呈等比关系。在此基础上对比分析了雷达“隐身”距离与“烧穿”距离之间的关系, 得出本机雷达具备明显信号隐身优势时应尽早采取功率控制措施, 在均势状态下慎用甚至不用功率管理, 以避免雷达同干扰对抗过程中丧失能量优势, 导致抗干扰能力显著降低。研究结果为机载雷达使用提供一定的参考依据。

关键词: 雷达对抗; 低截获雷达; 功率管理; 电子支援措施

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0976

Application of airborne radar power management

WU Jili, LIU Ping, MENG Weigang, XU Jie

(74 Unit, 93995 Troop of PLA, Xi'an Shaanxi 710306, China)

Abstract: In order to be more adaptable to the upgrading of airborne equipment and enhance the capability of the fighters, the power management of airborne radar under active interference condition in air-to-air combat is researched from the pilots' point of view. The effect of radar power management on electronic warfare interception is analyzed firstly. According to the numerical simulation results based on flight training data, the mismatch range of target Electronic Support Measure(ESM), the tracking range of the radar and the interception range by the target ESM compose geometric series. Then the relation between the mismatch range and burn through range is discussed. It is concluded that power management measures should be taken on condition that the radar is superior to the target ESM obviously, otherwise the measures should not be taken in case of radar losing energy advantages over the target interference.

Keywords: radar counter; Low-Probability-Interception(LPI) radar; power management; Electronic Support Measure

当前机载火控雷达正由机械扫描雷达向有源相控阵(Active Electronic Scanned Array, AESA)雷达更新换代, 典型代表有美军四代机 F-22 搭载的 AN/APG-77 雷达, F-35 配备的 AN/APG-81 雷达, 欧洲台风战机 CAPTOR-E, 俄罗斯“甲虫-AE”雷达等^[1]。AESA 雷达除具有大带宽、高功率、波束敏捷、抗干扰能力强等优势外, 还具备发射低截获波形、实施功率管理的功能, 为新的空中应用提供了可能^[2-6]。文献[2]分析了功率管理引发告警器失配的问题并提出解决方案。文献[3]在文献[2]基础上研究了通过降低峰均比导致接收机失配, 并定量分析了模拟空战场景。文献[4]以 APG-77 为例研究了机载雷达功率管理对电子战侦察接收机灵敏度要求以及侦收阵列的部署应对方案。文献[5]分析了不同的截获因子及不同工作模式下射频辐射的风险。文献[6]对当前射频隐身的技术特点、主要矛盾进行归纳, 并预测了其发展趋势。

综合来看, 当前研究主要集中在雷达与电子战侦收之间的对抗, 关注点为射频隐身信号处理算法与实现的技术手段。本文拟从雷达应用的角度出发, 以干扰环境为背景, 研究运用功率管理进行射频隐身与“烧穿”的策略, 为空中使用提供一定的参考依据。

1 功率管理下的射频“隐身”

1.1 功率管理对侦收灵敏度的影响

空战中有源干扰主要来自机载自卫干扰,以瞄准式、欺骗式干扰为主。实施干扰之前必须对目标信号进行截获和分析,获取目标雷达信号参数。雷达探测目标基本方程为^[7]:

$$P_{rd} = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

式中: P_{rd} 为雷达接收到回波信号功率; P_t 为发射功率; G_t 为雷达天线增益; λ 为信号波长; σ 为目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS); R 为目标距离。式中忽略了大气传播衰减因子。

假设目标对雷达实施自卫干扰,干扰之前需对雷达信号进行侦收,则侦察接收机收到雷达信号的强度为^[8]:

$$P_{ri} = \frac{P_t G_t^2 G_i^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \quad (2)$$

式中 G_i 为侦察天线接收增益。因此有

$$\frac{P_{ri}}{P_{rd}} = \frac{G_i}{G_t} \times \frac{4\pi R^2}{\sigma} \quad (3)$$

注意到变换过程无附加约束条件,只要是自卫干扰,式(3)对所有距离、所有非零发射功率恒成立。

假设雷达最大探测距离为 R_{dm} ,对应的最大发射功率为 P_{tm} ,电子战系统最大侦收距离为雷达最大探测距离的 ρ 倍,即 ρR_{dm} 。记 S_D, S_I 分别为雷达、电子战最小检测功率,则有

$$S_D = \frac{P_{tm} G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{dm}^4} \quad (4)$$

$$S_I = \frac{P_{tm} G_t^2 G_i^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 \rho^2 R_{dm}^2} \quad (5)$$

无干扰环境中,雷达通过对跟踪目标回波信噪比和距离的测量,可以统计出目标RCS特性,进而采取自适应功率算法控制辐射功率^[9-10],实现射频“隐身”功能。当雷达以最大功率管理(即最低辐射)探测时,理想情况是通过控制发射功率,保持接收功率恒定在检测灵敏度,此时有

$$P_{rd} \equiv S_D \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)可得

$$P_{ri} = \frac{G_i}{G_t} \times \frac{4\pi R^2}{\sigma} S_D \quad (7)$$

由式(7)可知,在雷达采取最大功率管理措施的情况下,自卫电子战系统接收到的信号功率与距离成平方率关系。为实现对雷达信号的有效侦收,要求接收机灵敏度随双方距离减小而不断提高(数值减小)。图1为功率管理下电子战接收机灵敏度随距离的变化。图中横轴为归一化的目标距离,数值1.0表示最大探测距离;纵坐标为电子战侦收所需灵敏度。图中曲线显示,在雷达不采取功率管理措施,始终保持最大发射功率时,电子战侦收灵敏度随距离增大呈平方率倒数减小,相对距离0.2处所需灵敏度为-20 dBm;在雷达最大探测距离处所需灵敏度约为-35 dBm。当雷达实施功率管理时,电子战侦收系统灵敏度随距离靠近不断提高。双方接近到最大探测距离的0.2时,所需灵敏度大约是-50 dBm。

1.2 功率管理实现射频“隐身”

根据式(7),令 $P_{ri}=S_I$,得雷达最大功率管理情况下电子战侦收的失配距离,即雷达“隐身”距离:

$$R_{im}^2 = \frac{S_I}{S_D} \times \frac{G_t}{G_i} \times \frac{\sigma}{4\pi} \quad (8)$$

再联合式(4)~(5)得 $\frac{S_I}{S_D} = \frac{G_t}{G_i} \times \frac{4\pi}{\sigma} \times \frac{R_{dm}^2}{\rho^2}$, 代入式(8)有

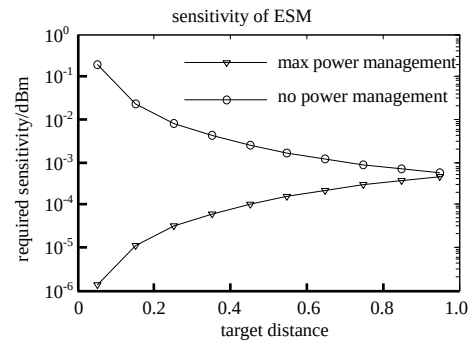


Fig.1 Required sensitivity with maximum power management and without power management

图1 最大功率管理与无功率管理状态下所需侦收灵敏度对比

$$R_{\text{lm}} = \frac{R_{\text{dm}}}{\rho} \quad (9)$$

即当雷达采取最大功率管理措施时,电子战侦收失配距离由雷达无功率管理措施时电子战侦收与雷达探测最大作用距离比值决定。具体为电子战接收机失配距离(即雷达“隐身”距离)、雷达最大探测距离以及电子战最大侦收距离三者之间呈等比关系。对应于图1,假设电子战侦察接收机设计指标是雷达满功率最大探测距离的1.5倍时,对应灵敏度约为-37 dBm。而当雷达采取最大功率管理后,电子战侦收失配距离下降到雷达满功率作用距离的1/1.5。当双方距离小于这一值后,如果雷达继续以最大功率管理状态探测目标,则目标机无法检测到对方雷达信号,雷达实现射频“隐身”。

2 雷达对有源干扰“烧穿”效应

假设有源干扰功率为 P_J ,发射天线增益为 G_J ,在频率、方向、时间和极化都与雷达对准的理想情况下,进入雷达的干扰功率为:

$$P_{\text{rj}} = \frac{P_J G_J G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \quad (10)$$

相应干信比为:

$$K_J = \frac{P_{\text{rj}}}{P_{\text{rd}}} = \frac{P_J}{P_t} \times \frac{G_J}{G_t} \times \frac{4\pi R^2}{\sigma} \quad (11)$$

可见,在对抗双方处于远距离时,干扰能量占优,雷达主要借助频率捷变、脉冲压缩等手段对抗有源干扰。其中扩频发射加脉压接收既是新体制雷达实现射频隐身的主要方法,也是抑制有源干扰的重要手段^[11]。在距离接近之后,干信比降低,能量优势成为雷达对抗有源干扰的重要方式。当距离近到一定程度,干信比低于有效干扰所需最低值 K_{J0} (通常称为压制系数)时,干扰不再有效,雷达将“透过”干扰检测到目标,此即为雷达对有源干扰“烧穿”状态,记烧穿距离为 R_B ,则^[12]

$$R_B = \sqrt{K_{J0} \frac{P_{\text{tm}} G_t}{P_J G_J} \times \frac{\sigma}{4\pi}} \quad (12)$$

“烧穿”状态雷达占有绝对优势,因此希望“烧穿”距离越大越好。但雷达与干扰技术进步往往是相互借鉴,共同提高,因此“烧穿”距离不会太远,通常在几百米至几十千米范围^[13]。

3 “烧穿”与“隐身”的决策分析

在中近距离上,作为雷达使用方,有2种截然相反的手段应对干扰:一是减小功率,实施射频隐身;二是增大功率,实现“烧穿”。图2显示了雷达在最大功率管理与满功率2种状态下压制比随距离的变化曲线。图中横轴仍为归一化的目标距离,纵轴为到达雷达接收机的干扰信号与回波信号功率比值。从图中看出变化趋势与图1正好相反,功率管理导致干信比随距离接近迅速增大。即功率管理是以降低雷达与干扰对抗中的能量优势为代价,在使用过程中有一定的风险。

假设电子战天线收发增益相同, $G_t = G_J$,联合式(8)和(12)有

$$\frac{R_{\text{lm}}}{R_B} = \sqrt{\frac{P_J}{P_{\text{tm}}} \times \frac{S_t}{S_D} \times \frac{1}{K_{J0}}} \quad (13)$$

式(13)的结果分3种情况讨论:

1) $R_{\text{lm}}/R_B \sim 1$

通常情况下雷达占据孔径优势,发射功率比干扰功率大1~2个数量级;雷达接收已知信号,可以采用匹配滤波器接收及脉冲相干累积,灵敏度比电子战接收机高几个数量级;电子干扰占有单向传播优势,在雷达接收端干扰信号强度可以做到远高于雷达回波信号,足以抵消发射功率和天线孔径方面的劣势。雷达为适应强干扰环境,必须在干信比 K_J 极大的情况下仍能够工作,最终结果是 R_{lm} 与 R_B 相差并不大。此时功率管理作用不明显,加上对相干干扰的检测和识别本身也是一大难题^[14-15],盲目采用功率管理并不能使雷达信号隐身,反而会导致雷达作

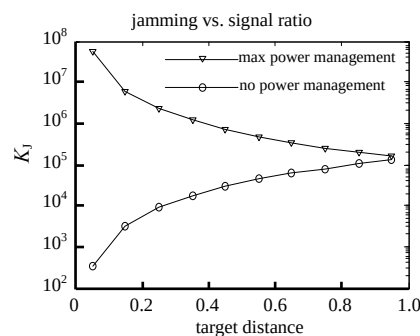


Fig.2 Jamming to signal ratio with maximum power management and without power management
图2 最大功率管理与无功率管理状态下干信比对比

用距离降低或跟踪虚假目标, 在对抗干扰的过程中处于劣势, 因此在应用中不推荐使用。

2) $R_{\text{Im}}/R_{\text{B}} \gg 1$

该状况发生在目标机相对于攻击机存在代差, 目标机电子战接收机灵敏度低, S_{I} 与 S_{D} 相差大, 在攻击机雷达采用功率管理和低可探测信号之后, 目标机在很远距离上就无法侦收雷达信号。作为攻击方, 则建议尽早采用功率管理手段, 尽可能低地降低被对方侦收的概率, 特别是当本机具备隐身能力, 而对方是常规目标时, 更有利于发挥自身优势, 在对方未察觉情况下完成攻击。如果我机是防御方, 则应该在不同距离上部署多个目标, 如能将无人机抵近敌方, 有人机靠后, 利用无人机实施干扰压制, 将会有效破解对方隐身攻击企图, 逼迫对方雷达满功率运行, 一定程度弥补代差不足。

3) $R_{\text{Im}}/R_{\text{B}} \ll 1$

这种情况通常比较少见。但如果对抗双方均装备有多功能AESA雷达, 通过雷达孔径侦收和干扰, 干扰功率与雷达发射功率在一个数量级, 干扰侦收灵敏度也远高于常规电子战接收机, 则信号隐身距离与“烧穿”距离都会非常小, 可能出现 $R_{\text{Im}}/R_{\text{B}} \ll 1$ 情况。但这种情况讨论二者比值意义不大, 这时由于雷达相比于电子战处于守势, 应当果断放弃功率管理, 结合有源和无源探测手段, 充分利用本机多种传感器, 综合战场网络信息做出攻防决策。

4 结论

AESA雷达的普及为空中应用提供了更多的样式, 本文只针对功率管理这一项展开研究。综合来看, 当本机雷达具有明显的信号隐身优势时, 主要采取功率管理; 当双方均势时, 应当谨慎采用; 当我方处于劣势时, 应果断放弃功率管理。为便于分析, 论文做了大量简化, 应用过程中雷达和电子战系统工作状态要复杂得多, 能否探测到目标也是一个概率问题。实际应用中应当注意广泛搜集数据, 全面分析, 制定出周密科学的方案。

参考文献:

- [1] 李红卫, 蔡金元, 王玉田. 机载有源相控阵雷达的作战优势、性能对比及军事应用[J]. 国防科技, 2015, 36(6): 69-73. (LI Hongwei, CAI Jinyuan, WANG Yutian. The operational advantage, performance comparison and military application of airborne APAR[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(6): 69-73.)
- [2] 李健伟, 刘璘, 吴宏超, 等. 机载有源相控阵雷达给告警器带来的威胁[J]. 雷达与对抗, 2014, 34(2): 14-18. (LI Jianwei, LIU Lin, WU Hongchao, et al. Threats to radar warning receiver that airborne active phased array radars bring[J]. Radar & ECM, 2014, 34(2): 14-18.)
- [3] 肖鹏, 吴宏超, 肖卫华, 等. 功率管理对LPI雷达低截获性的影响[J]. 雷达与对抗, 2014, 34(4): 9-12. (XIAO Peng, WU Hongchao, XIAO Weihua, et al. Effects of power management on low probability of intercept performance of LPI radar[J]. Radar & ECM, 2014, 34(4): 9-12.)
- [4] 吴流丽, 柳征, 贺青, 等. 机载AESA雷达可探测性分析[J]. 航天电子对抗, 2015, 31(5): 50-54. (WU Liuli, LIU Zheng, HE Qing, et al. Analysis on the detection capability of the airborne AESA radar[J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2015, 31(5): 50-54.) doi:10.3969/j.issn.1673-2421.2015.05.013.
- [5] 冯博宇, 王瑛, 安航, 等. 机载雷达射频隐身性能风险的计算模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 73-77. (FENG Boyu, WANG Ying, AN Hang, et al. Computational model of radio frequency risk on stealth performance of airborne radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(1): 73-77.) doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.12.
- [6] 王谦喆, 何召阳, 宋博文, 等. 射频隐身技术研究综述[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1505-1514. (WANG Qianzhe, HE Zhaoyang, SONG Bowen. Overview on RF stealth technology research[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6): 1505-1514.) doi:10.11999/JEIT170945.
- [7] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 3版. 南京电子技术研究所, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010. (SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 3rd ed. Translated by Nanjing Research Institute of Electronics Technology. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [8] 司易才, 司伟建. 现代电子战导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013: 9-10. (SI Yicai, SI Weijian. Introduction to modern EW[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013: 9-10.)
- [9] 许姣, 张贞凯, 田雨波. 目标跟踪时的雷达分级功率自适应控制[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(1): 72-76. (XU Jiao, ZHANG Zhenkai, TIAN Yubo. Adaptive control algorithm of radar hierarchical power for target tracking[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2018, 32(1): 72-76.) doi:10.3969/j.issn.1673-4807.2018.01.014.

- [10] 高智敏,周中良,潘勃,等. 跟踪状态下射频隐身功率实时控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2018,43(2):44-48. (GAO Zhimin,ZHOU Zhongliang,PAN Bo,et al. Real time control method for RF stealth power at target tracking[J]. Fire Control & Command Control, 2018,43(2):44-48.) doi:10.3969/j.issn.1002-0640.2018.02.010.
- [11] 朱晓芳,郑坤,王宏,等. 有源噪声干扰对脉压的干扰效应分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):417-424. (ZHU Xiaofang,ZHENG Kun,WANG Hong,et al. Analyzing jamming effect on pulse compression of active noise interference[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):417-424.) doi:10.11805/TKYDA 201703.0417.
- [12] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012. (ZHAO Guoqing. Principle of radar countermeasure[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2012.)
- [13] 唐永年. 雷达对抗工程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012:80. (TANG Yongnian. Radar counter measure engineering[M]. Beijing:Beihang University Press, 2012:80.)
- [14] 刘振,隋金坪,魏玺章,等. 雷达有源干扰识别技术研究现状与发展趋势[J]. 信号处理, 2017,33(12):1593-1601. (LIU Zhen,SUI Jinping,WEI Xizhang,et al. The development and prospect of radar active jamming recognition[J]. Journal of Signal Processing, 2017,33(12):1593-1601.)
- [15] 曹兰英,罗美芳,吴建. 基于信息论的脉冲压缩雷达 DRFM 干扰检测技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3): 431-435. (CAO Lanying,LUO Meifang,WU Jian. Detection of DRFM jamming for pulse compression radar based on information theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):431-435.) doi:10.11805/TKYDA201803.0431.

作者简介:



吴继礼(1981-),男,四川省名山县人,中
校教员,主要从事电子战教学与研究工
作.
email:wujili926@126.com.

刘平(1966-),男,四川省射洪县人,教授,
主要研究方向为空中领航.

孟卫刚(1985-),男,陕西省武功县人,教员,
主要从事电子战教学与飞行模拟软件开发工作.

胥杰(1980-),男,四川省雅安市人,上校
教员,主要从事电子战教学与研究.