

机载有源自卫干扰下雷达探测效能仿真^①

肖强, 张宏伟, 韩壮志, 罗浩

(军械工程学院 电子与光学工程系 石家庄 050003)

摘要: 随着现代电子战的快速发展, 机载自卫有源干扰成为了对抗雷达最有效措施之一, 严重威胁雷达探测效能与生存能力. 从作战效能评估需求出发, 选取探测概率作为定量评估指标. 首先把雷达探测过程分解成不同功能模块, 通过各模块的有机结合构建探测模型, 并详细介绍了各模块数学模型. 然后, 对雷达动态探测过程进行功能仿真, 并基于 HLA 平台开发仿真系统. 最后, 通过仿真, 能在线获得对应目标距离的探测概率, 并以此定量分析了有源自卫干扰下雷达探测效能. 仿真结果验证了模型和方法的可行性与有效性, 对雷达对抗研究提供一定的参考依据.

关键词: 有源自卫干扰; 雷达对抗; 评估指标; 探测效能

Simulation of Radar Detection Effectiveness Under Airborne Active Self-Defence Jamming

XIAO Qiang, ZHANG Hong-Wei, HAN Zhuang-Zhi, LUO Hao

(Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The airborne active self-protect jamming becomes one of the most effective defense measures with the rapid development of EW (Electronic Warfare). The detection effectiveness and survivability of radars in the battle is seriously threatened. According to the demands for assessing the detection effectiveness of radar, detection probability is selected as a quantitative evaluation index. Firstly, via the organic combination of different modules resolved from the detection process of radar, the detection model is established and the mathematical models are recommended in detail. Then functional simulation of the radar detection process is devised, and the system based on HLA is realized. Lastly, detection probability with its target distance is obtained online through the simulation, and it is used for assessing the detection effectiveness of radar quantitatively. The result indicates that this model and method is feasible and effective, and it could provide some reference material for the research to radar counter-counter measures.

Key words: airborne active self-protect jamming; radar counter; devaluation index, detection effectiveness

对雷达而言, 目标探测作为其首要任务, 同时全天候、远距离探测能力为作战系统完成后续战场侦察、截获、跟踪以及武器系统制导等任务提供根本保证, 故已成为敌方电子对抗的重点. 随着电子战愈演愈烈, 机载有源自卫干扰已成为了对付雷达最有效对抗措施之一, 严重威胁着雷达的探测效能, 甚至威胁着武器系统的生存能力^[1,2]. 为此, 雷达的探测效能已成为整个武器系统重要质量指标之一, 也成为现代雷达系统中一个研究热点. 在现实条件下, 实装试验涉及诸多

传感器、多种武器等之间的攻防对抗, 往往受场地限制且费时费工、难以重复, 而仿真技术成为解决上述问题的最佳方法. 所以, 利用仿真技术来对雷达探测效能进行分析评估是一个切实可行的方法.

由从现有的仿真系统来看, 雷达的探测作为防空攻防对抗大规模仿真的重要一环, 仿真过程复杂且对数据传输实时性和准确程度要求高, 导致了以往的仿真系统难以满足仿真需求. 鉴于上述问题, 本文以雷达系统功能级仿真为基础, 把雷达探测过程分解成不

^① 收稿时间:2014-03-02;收到修改稿时间:2014-04-14

同且相互关联的模块, 通过各模块的有机结合构建目标探测模型, 并详细介绍了各模块数学模型. 并在 HLA 平台上开发探测仿真系统, 对机载有源自卫干扰下的探测效能进行了研究, 为以后雷达作战效能试验、评估验证等研究提供了一个平台.

1 雷达探测效能仿真模型

雷达探测概率能够形象地反映三维空间目标的分布情况, 既能够便于人、机合理分工, 又能够使在线效能评估、辅助决策成为现实. 本文就是利用功能仿真方法, 在探测概率模型基础上, 把雷达探测过程按照功能划分成不同模块, 通过这些模块的有机结合, 构建一个整体的探测概率模型. 具体的仿真流程如图 1 所示.

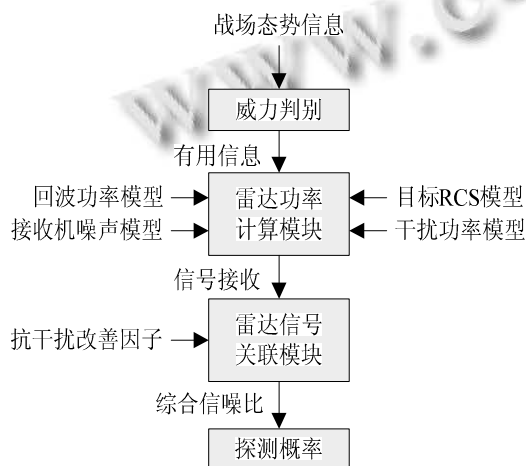


图 1 探测仿真流程

2 主要数学模块

2.1 威力判别模块

由于雷达通常是在一定距离、俯仰角和方位角三维空间范围内来探测目标的, 只有战场目标位置参数满足在雷达威力范围内的几何条件时, 该目标才有可能被探测. 通常在进行威力判别时, 需要进行两方面的考虑, 一方面是雷达与目标几何关系解算, 另一方面是威力判别条件的给定.

2.1.1 雷达与目标的几何关系

由于目标位置是在大地直角坐标系下给定的, 因而在威力判别之前需要坐标转换将目标位置转换成天线阵面坐标系下的坐标, 从而完成目标相对雷达的距离和角度的计算, 具体运算不再介绍.

2.1.2 判别条件

在进行威力判别时主要分为距离和角度上的判别: 距离上是保证目标在雷达的距离测量范围之内; 角度上是判断目标是否处于雷达的波束范围内.

距离判别主要是从雷达测距的远值和雷达测距的近值来考虑. 通常测距远值指雷达的直视距离和雷达的最大作用距离两者较大的一个, 测距近值指雷达最小作用距离.

在理想情况下, 雷达接收的回波信号功率 P_r 必须超过接收机灵敏度 $S_{i\min}$, 理论上雷达才能可靠的探测到目标信号, 否则, 探测不到目标. 由于雷达天线采用收发一体化模式, 故天线发射增益和接收增益相等, 雷达对目标的最大作用距离一般表示为^[3]:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 S_{i\min}} \quad (1)$$

式中 P_t 为雷达的发射功率, G_t 为雷达天线增益, λ 为信号波长, R 为雷达到目标距离, σ 目标的雷达截面积 RCS(由具体实际情况决定), L 指雷达综合损耗因子.

实际应用中, 接收机灵敏度 $S_{i\min}$ 通常表示为:

$$S_{i\min} = k T_0 B_R N_F D_0 \quad (2)$$

式中, k 为波耳兹曼常数, T_0 为接收机参考温度, 取 $T_0 = 290^\circ$, B_R 为接收机瞬时带宽, N_F 为噪声系数, D_0 为检测因子.

由于作用距离受噪声因素影响, 再加上环境因素影响, 故作用距离是一个统计量. 在仿真时可以根据雷达的不同体质、具体环境等来选择相应的雷达距离方程.

雷达直视距离是由于地球曲率的影响使得大气折射系数变化, 进而导致雷达发射的电磁波在大气中传播受到影响而引起的, 如图 2 所示:

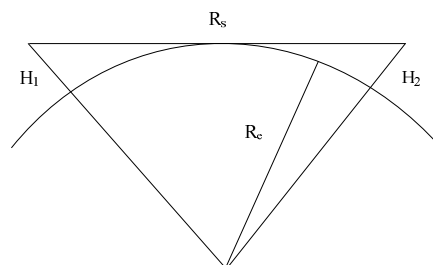


图 2 雷达直视距离

雷达天线架高度为 H_1 (m), 目标高度为 H_2 (m), 等效地球半径为 R_e (m), 一般取实际地球半径的 4/3 倍,

按照地球半径大约为 6370km 来计算, 可得雷达直视距离为

$$R_s = 4120(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \quad (3)$$

雷达理论上的最小作用距离是由脉冲宽度 τ 决定的. 雷达收发开关切换时间很短, 在不考虑切换时间的情况下, 其最小作用距离表示为:

$$R_{\min} = \frac{1}{2}c\tau \quad (4)$$

当距离上符合 $R_{\min} \leq R \leq \min(R_{\max}, R_s)$, 认为距离上判别成功.

从角度测量原理可知, 保证在目标距离上可探测的前提下目标处于雷达的波束作用范围内是实现成功角度测量的一个必要条件. 假定目标在天线阵面坐标系测得的目标位置是 $[R, \alpha, \beta]$, 雷达波束中心在天线方位坐标系下的坐标是 $[\alpha_0, \beta_0]$, 方位角和俯仰角的波束宽度分别是 α_{3dB} 和 β_{3dB} , 角度成功判别的条件是

$$\begin{cases} |\alpha - \alpha_0| \leq \alpha_{3dB} \\ |\beta - \beta_0| \leq \beta_{3dB} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 信号功率计算模块

2.2.1 目标回波信号功率计算模型

由雷达方程知, 回波信号功率计算公式一般描述为:

$$P_r = P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 R^4 L \quad (6)$$

2.2.2 接收机噪声模型

接收机噪声模型可以用一个服从均值为 0, 方差为 σ_n^2 正态分布的随机过程的样本函数来表示. σ_n^2 即噪声平均噪声, 其计算公式可表示为:

$$P_n = \sigma_n^2 = KTB_R N_F \quad (7)$$

2.2.3 机载有源自卫干扰功率模型

根据自卫干扰特点, 不难得知, 载机和干扰设备处于同一位置, 同时在雷达的同一波束主瓣内, 即雷达接收机天线增益为天线的增益 G_r , 干扰设备与目标的距离 R_j 与载机与雷达的距离 R 相等. 由此, 自卫干扰信号功率可表示为:

$$P_j = P_j G_j G_r \lambda^2 B_R / (4\pi)^2 R^2 L_r B_j \quad (8)$$

式中 P_j 为干扰设备发射功率, G_j 为干扰设备天线对雷达的增益, L_r 为干扰设备系统综合损耗, B_j 为干扰频宽.

2.2.4 目标 RCS 模型

目标 RCS 是定量地反映目标的散射特性的一个参量, 其大小对雷达探测能力有着直接关系. 为简化问题, 通常采用广泛使用的施威林(Swerling)起伏模型^[4]. 在对作战飞机这样复杂的目标使用计算机仿真时, 一般用 Swerling 模型中的 I 或 II 作为仿真模型. 其雷达目标瞬时的 RCS 数学模型可表示为:

$$\sigma = -\sigma_0 \ln x \quad (9)$$

σ_0 指雷达目标截面积的平均值, 单位 m^2 ; x 指服从 $[0,1]$ 均匀分布的随机数. 假设目标的平均截面积为 $3m^2$, 则 Swerling I 或 II 下目标 RCS 随仿真时间的随机近似于图 3.

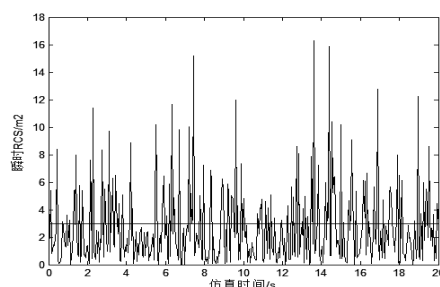


图 3 Swerling I 或 II 下 RCS 瞬时变化

2.3 雷达信号关联模块

雷达信号关联模块就是通过接收机接收到的信号间的耦合来决定着每一部雷达是否能够检测到目标. 此处, 采用综合信噪比来表示信号耦合关系. 由于本文主要研究有源自卫干扰对雷达探测效能的影响, 为简化模型, 暂不考虑无源干扰的影响, 雷达的综合信噪比可表示为:

$$S/R = \frac{P_r}{P_n + P_j / D_\alpha} \quad (10)$$

其中用 D_α 表示度量采取抗干扰措施前后的干扰效果, 抗干扰改善因子, 一般来讲, 雷达受作战环境、战场需求以及自身因素制约等影响, 故采取的抗干扰措施是不同且每一部雷达有多种干扰措施, 并且每种措施抗干扰效果不同. 可以用公式表示为:

$$D_\alpha = D_1 D_2 D_3 \dots D_n = \prod_{i=1}^n D_i \quad (11)$$

式中 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ 分别代表脉冲压缩、旁瓣对消、频率捷变、恒虚警处理、脉冲积累等多种抗干扰措施下的抗干扰改善因子.

2.4 探测概率计算

由于雷达总是在噪声和一定的干扰背景下来完成目标探测的,在加上目标回波受目标起伏等因素影响,故雷达的目标检测具有不确定性,符合一定的概率准则.通常在一定虚警概率 P_{fa} 下,以综合信噪比 S/R 为参变量来进行复杂的积分数值运算来获取近似检测概率,存在运算量大,影响仿真效率. North 提出一个比较准确的近似运算方法,其公式表示为^[5]:

$$P_d \approx 0.5 \times \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{S/R + 0.5}) \quad (12)$$

式中 $\operatorname{erfc}()$ 为补余误差函数,其表达式为:

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (13)$$

3 基于HLA的系统构建

3.1 交战场景想定

以典型的防空雷达对抗单携带干扰吊舱作战飞机为例,仿真中包括雷达和携带干扰吊舱的作战飞机两方,作战场景想定如图所示:

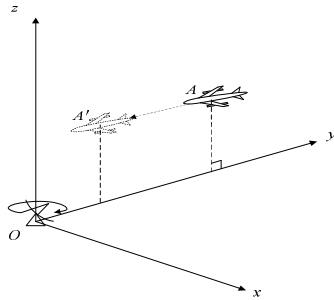


图 4 交战场景想定

雷达位于坐标原点 O,并对携带干扰吊舱的作战飞机连续探测跟踪.作战飞机沿 AA' 做水平匀速迎头飞行,其航迹高度和速度固定不变,且与 X 轴垂直,并施放有源自卫干扰进行对抗.

3.2 系统开发设计

由高层体系结构(HLA)是分布式交互仿真的最先进体系结构之一,在各种军事仿真被广泛支持和应用,已成为国际通用的标准建模与仿真技术框架.相对于传统方法,采用 HLA 构建的系统具有良好的交互性、互操作性、扩展性且支持不同粒度的仿真^[6].功能仿真不用考虑系统中每个点上的具体信号,忽略信号细节,感兴趣的主要是在给定条件下雷达对目标的探测概率,可使系统建模复杂度大大降低.故利用 HLA 平台

进行探测功能仿真是一个非常适用的选择^[7-9].

仿真中,整个联邦可以由三个联邦成员组成:管理控制,雷达,携带干扰吊舱的作战飞机.管理控制联邦成员主要是来控制管理仿真的开始、结束,公布的交互类主要为仿真时间 It.

携带干扰吊舱的作战飞机联邦成员主要完成飞行航迹和干扰模拟仿真.依据仿真要素需求,公布的对象类为干扰信息:干扰方式 Jam-Type,发射时间 Jam-time,发射功率 Jam-EmitPower,天线增益 Jam-AntennaPlus,干扰带宽 Jam-Band,发射频率 Jam-TansmitFrequency,以及作战飞机的瞬时 RCS 和航迹位置信息.此成员加入联邦并运行后,按照一定的时间间隔(步长)向雷达发送自身信息与干扰信息.本系统主要模拟干扰下雷达对作战飞机的探测过程,为更切合实际,可以选择发射时间 Jam-time 作为联邦运行时间,雷达最大探测数据率作为时间间隔.

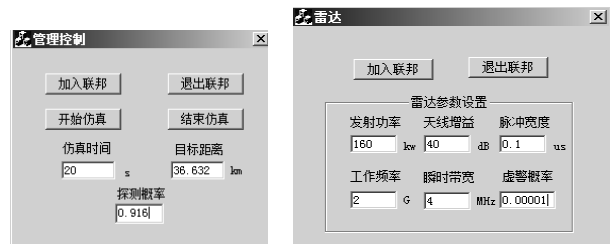
雷达联邦成员主要模拟雷达对携带干扰吊舱干扰飞机的动态探测过程.首先订购管理控制联邦成员信息:仿真时间 It,接着订购携带干扰设备的作战飞机联邦成员发送自身公布的对象类.根据作战飞机发送信息时刻 Jam-time,则雷达接收到作战飞机信息的时间为 TOA,即

$$TOA = \text{Jam-time} + R/c \quad (14)$$

其中 R 为雷达与作战飞机之间的距离, c 为电磁波传播速度.并且将 TOA 作为雷达联邦成员的运行时间.最后根据图 1 仿真流程完成探测过程,而后公布发现概率、目标距离给管理控制成员.

4 仿真算例与结果分析

在建立探测概率模型的基础上,实施具体的仿真实验.为了便于仿真参数更改和程序代码的开发,本仿真是基于 VC++ 对话框来完成的,并且为使系统仿真具有更好的可控性,每个联邦成员都设置了与其功能相应的按钮.联邦成员设置界面如图:

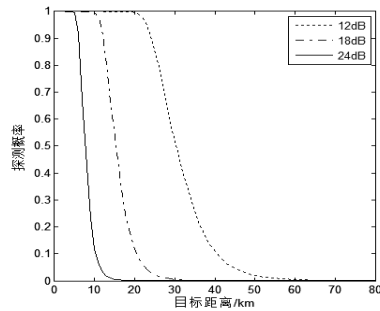


(a) 管理控制联邦成员

(b) 雷达联邦成员



(c) 携带自卫干扰吊舱的作战飞机联邦成员
图 5 联邦成员设置界面



(b) 干扰增益

图 7 变参数下的发现概率

仿真系统中联邦成员参数可以通过对话框进行实时在线更改, 可变的参数可根据具体需求和正确理论分析情况下任意修改。

防空雷达的主要默认参数为: 工作频率 2GHz, 脉冲宽度 0.1us, 天线增益 40dB, 发射功率 160Kw, 接收机瞬时带宽 4MHz, 主瓣宽度 2°, 虚警概率 10^{-5} , 综合损耗因子 6dB。在仿真实验时, 雷达采取一定的抗干扰措施, 且一直处于工作状态。敌作战飞机的默认参数为: 航迹高度 4000m, 目标截面积的平均值 (RCS) $3m^2$ 。假设敌方对雷达实施有源自卫干扰, 干扰形式为窄带瞄准式与宽带阻塞式。选取窄带瞄准式干扰, 主要默认参数为: 发射功率 5Kw, 干扰增益 12dB, 干扰频带为 4MHz, 工作频率为 2GHz。

此处, 为更直观的分析干扰吊舱对雷达探测效能的影响, 本文在主要在 0~80km 距离范围内进行了有干扰与无干扰下的以及单参量变化的仿真实验。在进行单参量变化实验时, 以干扰参数发射功率和干扰增益为例, 仿真结果如下图:

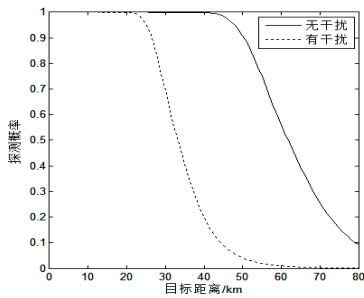
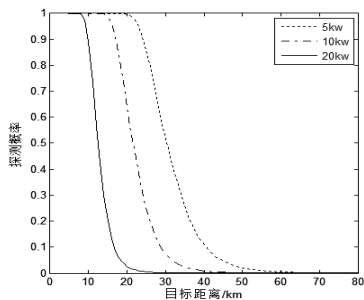


图 6 干扰对雷达发现概率的影响



(a) 发射功率

比较仿真结果, 分析如下:

① 从图 6 结果显示, 不难得知, 在不受机载有源自卫干扰时, 雷达探测系统的探测概率随着目标的靠近而成平缓上升趋势, 最终无限趋近于 1; 自卫干扰实施后, 在相同的探测概率下, 雷达的目标探测距离被明显压制; 在相同的探测距离下, 雷达对目标的探测概率也明显减小。但目标距离 8km 以下时, 雷达探测系统在受干扰前后探测概率几乎相等, 可知此情况下不再受干扰影响。可以得出, 自卫干扰的使用可以大大降低雷达的探测性能, 并且载机与雷达之间距离(航迹变化)也对自卫干扰的效能挥起到重要作用。

② 图 7 a)与 b)可以看出干扰信号的发射功率和干扰增益越大, 相应的探测概率缩减越快, 对雷达的干扰效果越明显。说明可以通过对干扰有关参数的管理控制来合理施放干扰信号。

③ 通过多次的仿真实验, 机载有源自卫干扰有效压制雷达, 使其难以发现目标, 能够取得较好的对抗效果, 但自卫干扰设备往往与载机在同一位置, 容易被雷达发现, 使载机过早暴露。

5 结语

本文在详细分析雷达动态探测过程基础上, 进行高内聚独立功能模块划分, 构建了特定环境下的探测模型并基于 HLA 开发了仿真系统, 完成了有源干扰下雷达探测效能仿真研究。结果表明, 用这样的模型和方法对雷达探测进行仿真并进行定量的探测效能评估是合理可行的。利用 HLA 构建雷达的探测功能仿真系统, 可以大大提高系统的仿真效率且能为雷达作战效能评估提供一个分析和研究平台, 表现出较好的适用性和灵活性。但仿真系统仅典型的对抗情景想定下来进行的机载有源自卫干扰下探测性能的仿真分析, 其

他作战情形,如飞行航迹变化、欺骗干扰等,在下一步研究中进一步开发。

参考文献

- 1 王国玉,汪连栋.雷达电子战系统数学仿真与评估(第 2 版).北京:国防工业出版社,2004.
- 2 朱华邦,洪庆根.火控雷达在有源干扰环境中作用距离评估.海空航空工程学院学报,2008,23(2):171-173.
- 3 丁鹭飞,耿富录.雷达原理(第 3 版).西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- 4 Adamy D. A First Course of Electronic Warfare. Beijing: Publish House of Electronic Industry, 2011.
- 5 盖世昌,许腾,等.复杂电磁环境下搜索雷达探测概率仿真分析.指挥控制与仿真,2011,32(2):81-83.
- 6 周彦,戴剑伟.HLA 仿真程序设计.北京:电子工业出版社,2002.
- 7 康锐,徐建成,等.机载干扰吊舱效能仿真研究.计算机仿真,2011,28(1):166-169.
- 8 范玉珠,张为华等.巡航弹飞行环境对跟踪照射雷达探测性能影响与仿真分析.系统仿真学报,2008,20(15):3927-3930.
- 9 孔德培,朱一凡.雷达探测的功能仿真实现.计算机仿真,2003,20(8):119-122.