

文章编号: 2095-4980(2020)03-0385-06

组网雷达干扰压制距离试验评估方法

李文臣¹, 李宏², 李文学³, 马飞², 汤博²

(1.西京学院 信息工程学院, 陕西 西安 710123; 2.中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;
3.31608 部队, 福建 厦门 361025)

摘要: 采用外场试验与数学仿真试验相结合的平行试验思想, 提出基于对抗场景仿真的组网雷达干扰压制距离试验评估方法。给出了基于空间态势和目标特性的组网雷达数据融合仿真模型; 建立了组网雷达干扰压制距离试验评估方法并给出了雷达电子战仿真评估推算系统EwserView; 最后结合软件系统给出了替代等效推算试验评估实例和评估界面。本方法可以解决基于试验态势的组网雷达对抗试验评估问题, 其可行性和有效性在试验中得到验证。

关键词: 组网雷达; 雷达对抗; 试验评估; 替代等效推算方法; 场景仿真

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018035

Test and evaluation method of netted radar blanket jamming distance

LI Wenchen¹, LI Hong², LI Wenxue³, MA Fei², TANG Bo²

(1.School of Information Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi 710123, China; 2.Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang Henan 471003, China; 3.Unit 31608 of PLA, Xiamen Fujian 361025, China)

Abstract: Based on the combination of outfield test and mathematical simulation experiment, a method for evaluating blanket jamming distance of netted radar based on operational scenario simulation is proposed. Firstly, the radar network data fusion simulation model is proposed based on the spatial situation and target characteristics. Secondly, the network radar blanket jamming distance test evaluation method is established. Thirdly, the radar electronic warfare simulation evaluation reckoning view system named EwserView is given. Finally, combined with this software system, the test evaluation example and interface of substitute equivalent reckoning method are offered. This method can solve the test evaluation problem of netted radar based on test situation, and the feasibility and effectiveness of this method are verified in experiments.

Keywords: netted radar; radar countermeasure; test evaluation; substitution equivalent reckoning method; countermeasure scenario simulation

组网雷达对抗是体系对抗, 组网雷达对抗双方的电子装备系统参数和战场空间态势是决定对抗效能的关键因素^[1]。其中, 战场空间态势包括干扰装置、被掩护目标和敌方雷达之间的空间拓扑结构、天线指向、天线波束宽度等。参加对抗的敌对双方的电子装备确定后, 战场空间态势就决定了最终的对抗效果。组网雷达对抗试验评估需要综合考虑装备系统参数性能和部署性能两方面, 另外还需考虑复杂电磁环境适应性试验需求^[2]。

在雷达对抗试验中, 当缺少期望配试雷达时, 通常选择参数相近的替代雷达, 通过期望配试雷达和替代雷达的雷达方程建立雷达对抗替代等效推算关系式, 将对替代雷达的压制距离推算到对期望雷达的压制距离^[3], 配试装备的选择和态势构建可参考文献^[4]。

干扰压制距离是评估雷达对抗的关键技术指标, 对于单部雷达和单部干扰机的雷达, 替代等效推算评估方法比较成熟, 但由于组网雷达对抗试验评估需考虑多雷达和多干扰机的空间态势影响, 目前其替代等效推算试验评估理论还不完善, 如何从替代雷达网试验结果推算到期望雷达网是一个技术难题。曾勇虎博士提出了雷达组网

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2019-04-24

基金项目: 陕西省重点研发计划重点资助项目(2020GY-082); 西安市科技计划资助项目(201805043YD21CG27(1))

作者简介: 李文臣(1972-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达与雷达对抗、电子系统建模仿真与评估、弹道导弹攻防对抗、测试系统集成等。email: leewench@163.com

ECM 压制距离试验替代等效推算方法^[5], 由于没有考虑空间态势和雷达天线参数的影响, 该评估方法适用范围受到限制, 不适用于随队支援干扰。

针对随队干扰特点, 本文充分考虑电子装备系统参数和空间态势对等效推算的影响, 提出了基于对抗场景仿真的组网雷达干扰压制距离替代等效推算试验评估方法。该替代等效推算理论模型及相关方法体现了外场试验与数学仿真试验有机结合的思想, 综合运用数学仿真手段将单部雷达替代等效推算模型加以扩展, 建立了组网雷达对抗替代等效推算方法; 并结合开发的雷达电子战仿真评估推算系统(Electronic warfare simulation evaluation reckon View, EwserverView), 给出了组网雷达对抗替代等效推算试验评估方法和实例。

1 组网雷达数据融合仿真模型

1.1 基于场景的雷达检测信噪比模型

设定多雷达数据融合系统均为三坐标跟踪雷达, 第 i 部雷达对目标的跟踪均适用最大天线增益, 第 i 部雷达接收目标回波信号功率为^[3,6]:

$$P_{RT,i} = \frac{P_{R,i} D_i G_{Rt,i} G_{Rr,i} \sigma \lambda_i^2}{(4\pi)^3 R_i^4 L_{Rt,i} L_{Rr,i}} \quad (1)$$

式中: R_i 为目标与雷达的距离; $P_{R,i}$ 为雷达发射峰值功率; D_i 为相关处理增益; $G_{Rt,i}, G_{Rr,i}$ 分别为雷达发射和接收最大增益; σ 为雷达探测目标的横截面积; λ_i 为波长; $L_{Rt,i}, L_{Rr,i}$ 分别为发射损耗和接收损耗。

假设第 j 个干扰机与第 i 部雷达满足通视条件, 且侦察信号强度大于接收机灵敏度, 干扰机可以对该雷达实施干扰, 第 i 部雷达接收的第 j 个干扰机信号功率为^[7]:

$$P_{R,i,j} = \frac{P_{J1} G_{Jt,j}(\phi_{j,i}) G_{Rr,i}(\phi_{i,j}) \lambda_i^2}{(4\pi R_{i,j})^2 L_{Rr,i} L_{Jt,j}} \quad (2)$$

式中: P_{J1} 为干扰机对单部雷达的有效干扰功率; $R_{i,j}$ 为第 i 部雷达与第 j 部干扰机的距离; $L_{Jt,j}$ 为第 j 个干扰机发射损耗; $G_{Jt,j}(\phi_{j,i})$ 为干扰机在雷达方向的天线增益; $G_{Rr,i}(\phi_{i,j})$ 为雷达在干扰机方向的接收增益。

第 i 部雷达接收到的信干比(Signal to Jamming Ratio, SJR)(或信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR))为:

$$SJR_i = \frac{P_{RT,i}}{P_i + \sum_j P_{R,i,j}} = \frac{\frac{P_{R,i} D_i G_{Rt,i} G_{Rr,i} \sigma \lambda_i^2}{(4\pi)^3 R_i^4 L_{Rt,i} L_{Rr,i}}}{kT_0 B_i F_{n,i} + \sum_j \frac{P_{J1} G_{Jt,j}(\phi_{j,i}) G_{Rr,i}(\phi_{i,j}) \lambda_i^2}{(4\pi R_{i,j})^2 L_{Rr,i} L_{Jt,j}}} \quad (3)$$

式中: $P_i = kT_0 B_i F_{n,i}$ 为接收机输出端噪声功率; k 为玻尔兹曼常数; T_0 为接收机输入端的等效噪声温度; B_i 为接收机噪声带宽; $F_{n,i}$ 为接收机噪声系数。

1.2 雷达探测概率

不同类型的雷达目标, 在相同发现概率情况下需要的 SNR 或 SJR 不同。工程中通常将雷达目标分为五类目标类型, 雷达的发现概率为^[8-9]:

$$P_d = \frac{m^m}{\Gamma(m)(SNR)^m} \int_0^{P_{fa}} \int_0^1 B^{\frac{m}{SNR}} (-\ln B)^{m-1} I_0(\sqrt{4\ln(z)\ln(B)}) dz dB \quad (4)$$

式中: $\Gamma(m) = \int_0^\infty u^{m-1} e^{-u} du$; I_0 为零阶贝塞尔函数; P_{fa} 为雷达虚警概率; $B = \exp\left(\frac{-A^2}{2\sigma^2}\right)$, σ^2 为雷达系统的噪声功率, A 为目标的回波信号幅度, $A \in [0, \infty)$, 因此 $B \in [0, 1]$; $z = \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right)$, r 为目标回波的综合接收幅度包络(含系统噪声), 包络检波时目标检测门限 $r \in \left[\sqrt{-2\sigma^2 \ln(P_{fa})}, \infty\right)$, 因此 $z \in [0, P_{fa}]$ 。目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)平均值与起伏标准差之比为 \sqrt{m} , \sqrt{m} 越大, 则代表目标起伏越小; 反之, 起伏越大。当 $m=1$ 时, 目标 RCS 服从指数分布, 为 Swerling I、II 型目标; 当 $m=2$ 时, 目标 RCS 为 Swerling III、IV 型目标; 当 $m=\infty$ 时, 目标 RCS 为 Swerling V 型, 即不起伏模型。多个脉冲非相参积累, $m=N$ 个脉冲时, 为 Swerling II 型目标, $m=2N$ 个脉冲时, 为 Swerling IV 型目标。

1.3 组网雷达数据融合系统探测概率

组网雷达数据融合系统的融合发现概率是指由信息融合中心得出的对目标的综合发现概率。融合中心的融合准则包括决策融合、概率融合和决策-概率融合等^[10]。在决策融合中,融合中心采用秩 K 融合准则,假定 N 个局部检测器中至少有 $K(1 \leq K \leq N)$ 个检测器判定目标存在,则融合中心就判定目标存在。雷达组网融合中心一般采用 $K=1$ 融合规则进行点迹融合,雷达组网后的系统融合发现概率为^[11-12]:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{d,i}) \tag{5}$$

式中: $P_{d,i}$ 为第 i 部雷达的发现概率; N 为组网雷达总数。根据各雷达的信噪比,利用 $SNR \rightarrow P_d$ 计算式(4),可以得到各雷达的发现概率曲线,利用式(5)可以得到组网的发现概率曲线。

2 组网雷达替代等效推算试验评估方法

2.1 传统单部干扰机对单部雷达的干扰效果评估

传统单部干扰机对单部雷达的干扰效果评估是基于雷达和干扰机对视场景,即天线指向干扰机,干扰机天线指向雷达。单部干扰机对单部雷达的干扰压制距离评估流程如图1所示。

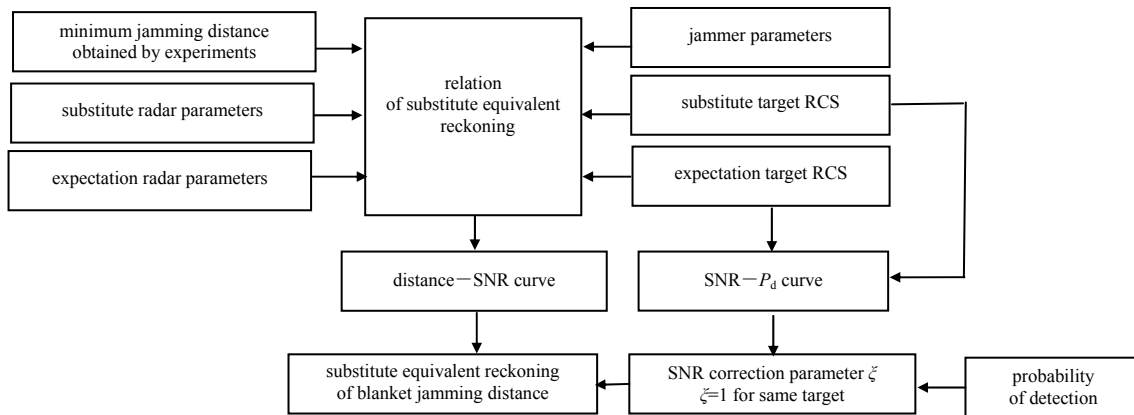


Fig.1 Flowchart of blanket jamming distance evaluation for single jammer versus single radar

图1 单部干扰机对单部雷达的干扰压制距离评估流程

1) 输入期望掩护目标和替代目标的 RCS 统计模型,得到两目标各自 $SNR-P_d$ 曲线,插值得到两目标相同发现概率($P_d=0.5$)的 SNR 比值 ζ ,当两目标相同或统计模型相同时, $\zeta=1$;

2) 输入干扰机参数、替代雷达参数、替代目标 RCS 大小、试验得到的干扰压制距离(雷达与目标的最小干扰距离)和雷达与干扰机的距离,将这些参数代入式(3),忽略天线方向图角度信息,得到 SNR 或 SJR 表达式 X ;

3) 输入干扰机参数、期望配试雷达参数、期望掩护目标 RCS 大小,代入式(3),得到期望对抗态势的 SNR 或 SJR 表达式 Y ,式中干扰压制距离是待求的参数,由于该式中干扰压制距离不是线性解析式,可先得到距离-SNR 关系曲线,然后通过曲线插值的方法求取;

4) 将 SNR 比值 ζ 、表达式 X 和 Y 联立,得到待求的干扰压制距离。

实际应用中通常假定 $\zeta=1$,且不考虑接收机噪声,这样就可以简化为文献[3]中单部干扰机对单部雷达的干扰效果推算表达式。

2.2 多干扰机对组网雷达干扰效果评估

首先仿真得到试验布站条件下替代雷达和期望配试雷达(网)的发现概率曲线;通过外场试验获取各雷达的距离-发现概率曲线,并通过“数据融合系统”获取多雷达数据融合处理系统发现距离。对替代雷达仿真结果插值获取对应的发现概率 P_{d0} ,然后插值获取对抗对象雷达仿真结果 P_{d0} 的发现距离,即为期望雷达网的干扰压制距离 R_x 。多雷达数据融合系统的干扰压制距离评估流程如图2所示。

流程如下:

1) 应用数字仿真系统,给出相同试验环境的替代雷达网和期望配试雷达的目标探测融合数据;

2) 根据外场试验单部和多雷达数据融合系统试验结果,对仿真预测模型进行模型校验。如果仿真结果和试

验结果相近, 则说明仿真系统是正确的。也可以通过替代雷达间不同组网验证替代等效方法;

3) 将替代雷达替换为期望雷达, 仿真相同对抗过程的雷达组网融合数据;

4) 根据外场试验结果(最小发现距离)、替代雷达网仿真结果、期望配试雷达网仿真结果, 利用 $R-P_d$ 关系曲线求解外场试验结果对应的发现概率, 并利用该发现概率插值求得期望配试雷达网对应的发现距离(相同环境)。

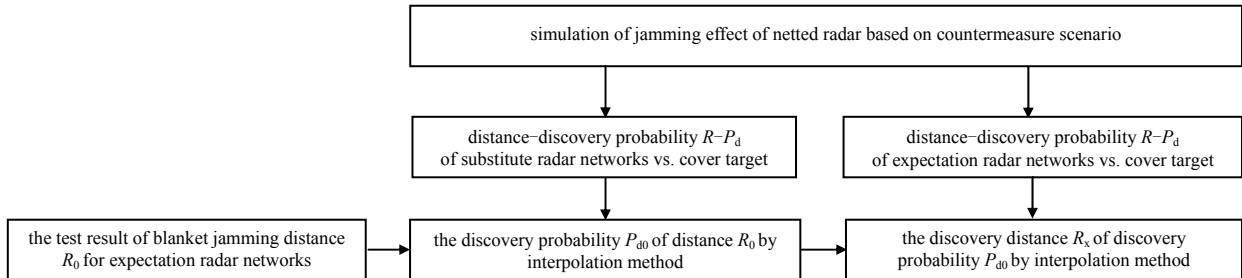


Fig.2 Evaluation flowchart of blanket jamming distance for multi-radar data fusion system

图 2 多雷达数据融合系统的干扰压制距离评估流程

3 组网雷达干扰效果仿真评估软件系统

组网雷达干扰效果仿真评估系统以雷达对抗理论为基础, 采用功能仿真和场景仿真相结合的数学仿真方法, 实现对雷达对抗干扰效果的预测。仿真系统设计中要考虑电磁信号环境仿真、空间传播模型与战场态势可视化设计^[13]。基于雷达参数、干扰机参数、掩护目标 RCS 模型以及空间位置参数, 利用雷达干扰方程, 计算各雷达对掩护目标的检测信噪比, 并计算各雷达的发现概率, 然后按照数据融合准则获得多雷达数据融合处理系统的目标发现概率曲线(包括时间—发现概率、距离—发现概率等), 用于组网雷达对抗试验前对试验结果进行预测, 试验后能够对替代对象的干扰效果等效推算到对期望配试雷达的干扰效果。

组网雷达干扰效果仿真预测评估系统主控窗口具备战情文件管理功能、仿真预测过程控制、替代等效推算功能、数据和态势显示功能。其中替代等效推算功能包括单部预推、组网预推、雷达检飞推算。

预测显示窗口如图 3 所示, 输入参数内容包括雷达选择、目标选择、坐标类型选择、发现概率、组网雷达编号、单部雷达、组网雷达、波形显示控制、显示波形选择等。该显示窗口能够根据仿真计算过程显示各装备探测 SNR、波形、雷达参数和探测情况。

4 组网雷达干扰试验评估流程和实例

4.1 试验评估流程

组网雷达干扰效果试验评估流程如图 4 所示, 步骤如下:

- 1) 在战情编辑系统输入装备参数, 并根据雷达探测距离指标, 对雷达参数进行修正(修正雷达损耗);
- 2) 进行单部雷达对抗模式(雷达干扰机对视模式)干扰效果预测, 进行雷达布站研究, 并结合靶场条件和弹道设计, 制定试验环境条件;
- 3) 结合制定的试验战情, 进行多雷达数据融合系统环境模式干扰效果预测, 并对布站环境进行优化;
- 4) 按照实际试验环境, 进行多雷达数据融合系统环境模式干扰效果预测, 将替代雷达换成期望雷达, 重新进行多雷达数据融合系统环境模式干扰效果预测, 将两种战情获取的各雷达发现概率曲线存储为检测性能文件;
- 5) 利用外场试验数据进行雷达网数据融合处理, 获取实际试验环境内(不同雷达组合)雷达网探测性能;
- 6) 调用基于试验环境仿真的替代等效推算模块, 利用外场试验数据进行实际试验环境内(不同雷达组合)雷达网等效推算的模型验证;
- 7) 将实际替代雷达探测性能等效推算到期望配试雷达。

4.2 基于对抗场景的组网雷达干扰效果替代等效推算

基于试验环境仿真的多雷达数据融合系统预测与推算, 首先进行雷达对抗过程仿真, 获取各雷达的过程检测数据, 然后进行多雷达数据融合系统预测与推算, 如图 5 所示。由 1 号和 2 号雷达组网试验以及仿真结果、3 号和 4 号雷达的组网仿真结果, 推算到 3 号和 4 号雷达的试验结果。

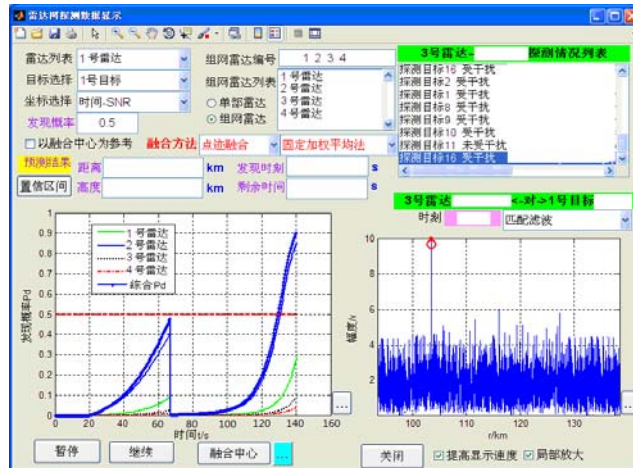


Fig.3 Display window of predictive evaluation result
图3 预测评估结果显示窗口

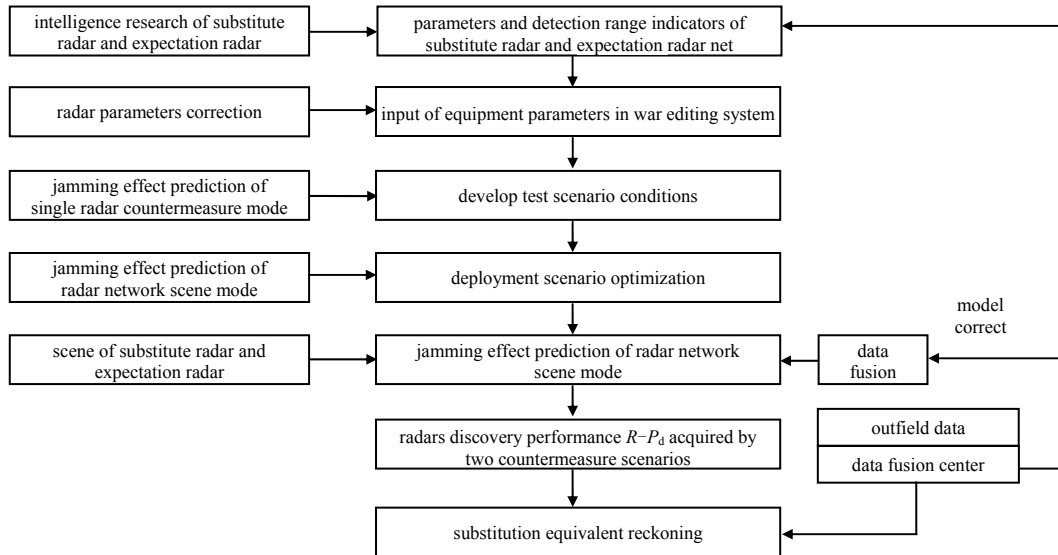


Fig.4 Test and evaluation flowchart of netted radar jamming effect
图4 组网雷达干扰效果试验评估流程

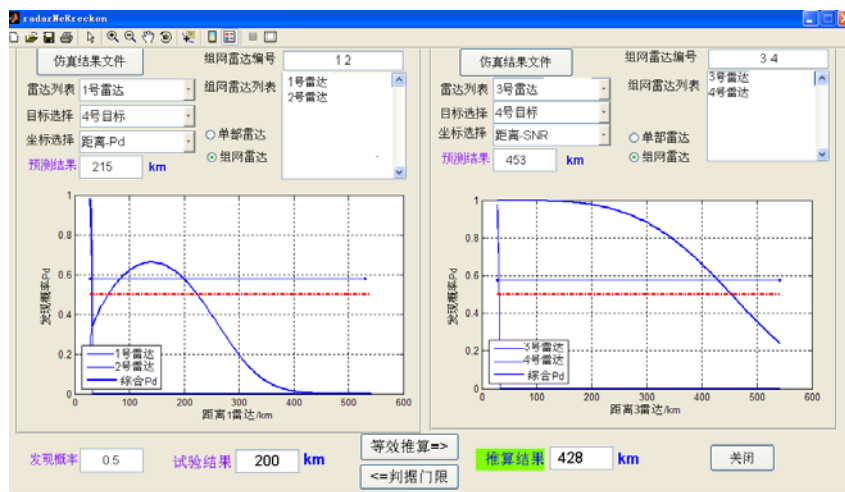


Fig.5 Substitute equivalent reckoning of netted radar jamming effect based on countermeasure scene
图5 基于对抗场景的组网雷达干扰效果替代等效推算

5 结论

组网雷达系统对抗条件下,作战双方电子装备空间态势是决定对抗效能关键因素。本文充分考虑电子装备空间态势,采用外场试验与数学仿真试验相结合的平行试验思想,提出了基于场景仿真的组网雷达干扰压制距离试验评估方法。该试验评估方法可以解决缺少期望配试雷达、难以构建空间态势的组网雷达对抗试验评估技术难题,是组网雷达对抗试验评估的重要手段。

参考文献:

- [1] 陈永光,李修和,沈阳. 组网雷达作战能力分析与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2006. (CHEN Yongguang, LI Xiuhe, SHEN Yang. Analysis and evaluation of netted radar operational capability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.)
- [2] 符淑芹,彭燕,薛原. 雷达装备复杂电磁环境适应性试验需求分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5): 868-870. (FU Shuqin, PENG Yan, XUE Yuan. Electromagnetic environment simulation and visualization analysis system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):868-870.) DOI:10.11805/TKYDA 201805.0868.
- [3] 王国玉,汪连栋,阮祥新,等. 雷达对抗试验替代等效推算原理与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (WANG Guoyu, WANG Liandong, RUAN Xiangxin, et al. Principle and method of substitute equivalent reckoning in radar countermeasure test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.)
- [4] 李宏,李文臣,袁翔宇. 弹道导弹突防干扰试验评估方法研究[J]. 航天电子对抗, 2014,30(5):6-10. (LI Hong, LI Wenchen, YUAN Xiangyu. Study on penetration jamming test and evaluation methods of ballistic missile[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014,30(5):6-10.) DOI: 9/j.issn.1673-2421.2014.05.002.
- [5] 曾勇虎,王国玉,汪连栋. 雷达组网ECM压制距离试验替代等效推算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007,29(4):548-550. (ZENG Yonghu, WANG Guoyu, WANG Liandong. Substitute equivalent reckoning method for ECM test of radar netting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007,29(4):548-550.) DOI:10.3321/j.issn:1001-506X.2007.04.012.
- [6] 王国玉,汪连栋,王国良,等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. (WANG Guoyu, WANG Liandong, WANG Guoliang, et al. Mathematical simulation and evaluation of radar electronic warfare system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.)
- [7] 李文臣,黄烽,杨会民,等. 雷达噪声干扰和多假目标干扰效能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013,8(4):403-406. (LI Wenchen, HUANG Feng, YANG Huimin, et al. Efficiency analysis of radar noise jamming and multiple false target jamming[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2013,8(4):403-406.) DOI:10.3969/j.issn.1673-5692.2013.04.015.
- [8] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [9] 杨英科,李宏,李文臣,等. 目标起伏特性对雷达检飞试验的影响及应用[J]. 现代雷达, 2013,35(2):22-25. (YANG Yingke, LI Hong, LI Wenchen, et al. Influence and application of target movement characteristics on radar flight test[J]. Modern Radar, 2013,35(2):22-25.) DOI:10.3969/j.issn.1004-7859.2013.02.007.
- [10] 王国良,申绪润,汪连栋,等. 基于秩K融合规则的组网雷达系统干扰效果评估[J]. 系统仿真学报, 2009,21(23):7678-7680. (WANG Guoliang, SHEN Xurun, WANG Liandong, et al. Effect evaluation for noise blanket jamming against netted radars based on rank-K information fusion rules[J]. Journal of System Simulation, 2009,21(23):7678-7680.)
- [11] 赵志超. 导弹防御雷达网数据融合技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010. (ZHAO Zhichao. Research on data fusion technology of missile defense radar network[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2010.) DOI: 10.7666/d.d138328.
- [12] 张政超,李文臣,李宏. 组网雷达检测概率研究[J]. 电子信息对抗技术, 2013,28(6):29-34. (ZHANG Zhengchao, LI Wenchen, LI Hong. Probability of radar network detection[J]. Electronic Warfare Technology, 2013,28(6):29-34.) DOI: 10.3969/j.issn.1674-2230.2013.06.006.
- [13] 安红,杨莉. 电磁信号环境仿真与可视化分析系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):1039-1044. (AN Hong, YANG Li. Electromagnetic environment simulation and visualization analysis system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):1039-1044.) DOI:10.11805/TKYDA201806.1039.