

# 一种末制导雷达有源干扰效果评估方法

林连雷, 姜守达

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨, linlianlei@hit.edu.cn)

**摘要:** 为了实现对末制导雷达有源干扰效果精确定量的评估, 根据末制导雷达的工作过程及其有源干扰的特点, 提出以干扰前后雷达的搜索时间比和跟踪误差比作为评估干扰效果的两个指标, 并分析了干扰前后雷达的搜索时间比、跟踪误差比与影响因素之间的关系. 根据评估指标与有效干扰的对应关系, 对其进行了归一化处理, 利用加权求和的方法得到综合的干扰结果. 仿真试验结果表明, 评估指标科学合理, 便于测量, 综合评估方法简单有效.

**关键词:** 干扰效果评估; 末制导雷达; 有源干扰

中图分类号: TN97

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)07-0112-05

## A evaluation method for active jamming effect on terminal guidance radar

LIN Lian-lei, JIANG Shou-da

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, linlianlei@hit.edu.cn)

**Abstract:** To accurately evaluate the jamming effect on terminal guidance radar under active jamming, according to the working process of terminal guidance radar and the characteristic of counteractive active jamming, the ratio of detecting-target-time and the ratio of tracing-error were adopted as indexes, and the relationship between indexes and influence factors and the evaluation methods were analyzed briefly. The indexes were treated by unitary quantification and weighted summation to get the synthetic results. The simulation results show that the evaluation indexes are scientific and easy to be measured, and the evaluation method is simple and effective.

**Key words:** jamming effect evaluation; terminal guidance radar; active jamming

对雷达对抗来说, 干扰效果是衡量雷达干扰设备对抗效能的一项重要的综合性指标, 它反映的是干扰对雷达工作的影响程度. 干扰效果是对抗双方都非常关心的问题, 科学合理地评估干扰效果对雷达干扰技术研究、雷达干扰装备论证、研制、试验鉴定等都具有重要的意义. 早期的干扰效果多采用定性的方式表示, 一般是由雷达操作人员根据雷达工作状态将干扰效果分为几个等级, 但这种方法受主观影响较大, 并且评估结果不够准确, 不能满足对抗双方对“干扰效果”深入了解

的需要. 近年来有学者提出了一些定量评估方法<sup>[1-8]</sup>, 文献[1-2]利用干扰效果因素  $Q_{ECM}$  评估功率型对抗的效果, 文献[3]利用发现概率损失、EMJ、发现距离损失和观测扇区损失综合评估遮盖性干扰效果, 文献[5]利用拖引时间和拖引成功率评估距离拖引的干扰效果, 文献[8]利用模糊综合评估法评估光电干扰对探测器的干扰效果. 相对于早期的定性评估, 这些方法能够更加客观、精确地反映干扰效果.

本文针对反舰导弹末制导雷达, 评估舰载有源干扰设备对其进行自卫式干扰的效果. 根据受干扰后雷达主要表现为对目标搜索时间加长和跟踪误差增大的特点, 提出利用干扰前后的搜索时间比和跟踪误差比作为指标, 并通过归一化和加权求和的方法得到综合的评估结果.

收稿日期: 2010-04-11.

基金项目: 航天支撑技术基金项目(2010-HT-HGD-16).

作者简介: 林连雷(1980—), 男, 博士, 讲师;

姜守达(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

1 评估指标

反舰导弹末制导雷达的主要任务就是发现并跟踪海面上的舰船目标,引导导弹对其进行攻击.末制导雷达在由探测、发现目标到自动锁定跟踪目标的过程中,依次经历了搜索、捕获和跟踪 3 个不同阶段.

为了定量评估末制导雷达的干扰效果,需要合理地选择评估指标,首先分析选取指标的原则:1)干扰效果虽然跟多种因素相关,但由于其反应的是干扰措施对雷达工作的影响程度,所以应该选择那些能够直接反映雷达受干扰前后工作性能变化的指标;2)干扰效果是多种因素综合影响的结果,所以选取的评估指标要尽可能多地反映影响因素,能够随影响因素的变化而变化;3)指标要容易测量,能够方便地在雷达端测量出;4)针对末制导雷达所面临的有源干扰,要求评估指标既能反映搜索段受干扰程度也能反映跟踪段的受干扰程度,既能反映遮盖性干扰的效果也能反映欺骗性干扰的效果.

根据以上分析,结合“时间准则”和“效率准则”,提出以搜索时间比和跟踪误差比作为评估末制导雷达有源干扰效果的指标.

1.1 搜索时间比

1.1.1 定义

无干扰时,末制导雷达开机后处于搜索段的时间很短,很快就能发现目标;存在干扰的情况下,会使雷达的搜索时间加长,所以搜索时间的增加程度可以反映干扰效果.搜索时间比的定义为:受干扰后雷达处于搜索状态的时间的增加量与无干扰情况下的搜索时间之比,即

$$K_{st} = \frac{T_{sj} - T_{s0}}{T_{s0}}.$$

其中  $T_{s0}$  是无干扰情况下雷达的搜索时间,  $T_{sj}$  是受干扰后雷达处于搜索状态的总时间. 为了能够统一评估遮盖性干扰和欺骗性干扰的效果,规定雷达除跟踪真实目标以外的时间均为对真实目标的“搜索时间”,所以对于遮盖性干扰来说,搜索时间就是雷达工作于搜索段的时间,而对于欺骗性干扰搜索时间包括搜索段的时间和雷达跟踪假目标的时间. 在雷达工作过程的不同阶段,搜索对干扰效果的影响是不同的,越靠近末段,干扰效果越好. 所以定义搜索时间

$$T_s = \int_0^1 t(x) \cdot w(x) dx.$$

其中:  $t(x)$  为搜索状态函数,当雷达处于搜索状

态时  $t(x) = 1$ ;当雷达处于跟踪真实目标状态时  $t(x) = 0$ .  $w(x)$  为权重函数,在归一化的  $[0,1]$  区间内单调递增并且积分值为 1. 在本文中选取如式(1)所示的对数函数作为权重函数,即

$$w(x) = A_0 \cdot \lg(x + 1). \tag{1}$$

搜索时间比  $K_{st}$  的值越大,说明雷达发现真实目标需要的搜索时间越长,表示干扰效果越好.遮盖性干扰会因造成雷达检测概率下降而导致搜索时间加长,而欺骗性干扰会“以假乱真”而导致雷达跟踪到假目标,所以  $K_{st}$  既能反映遮盖性干扰的效果也能反映欺骗性干扰的效果.

1.1.2 与影响因素关系

搜索时间比  $K_{st}$  属于“时间准则”范畴的指标,雷达对真实目标的搜索时间由雷达、目标、干扰机以及对抗态势和环境等多种因素综合决定.下面简单分析在遮盖性噪声干扰的情况下  $K_{st}$  与干扰发射功率  $P_j$  之间的关系.

假设雷达为常规体制,无抗干扰措施.在噪声干扰的情况下,雷达接收的信噪比为(由于干扰信号往往很强,接收机内部噪声  $N_0$  可忽略):

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_j + N_0} \approx \frac{P_i G_i \cdot s \cdot B_j}{P_j G_j \cdot 4\pi R^2 \cdot B_s}. \tag{2}$$

式中,  $P_j$  和  $P_s$  分别为雷达接收到的干扰和信号的功率,  $P_j$  和  $P_i$  分别为干扰机和雷达发射功率,  $G_j$  和  $G_i$  分别为干扰机和雷达的天线增益,  $B_j$  和  $B_s$  分别为干扰机和雷达的带宽,  $s$  为目标雷达反射面积. 根据 Neyman-Pearson 检测准则,在一定虚警率的情况下发现概率  $P_d$  为

$$P_d = \int_{U_T}^{\infty} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) dr. \tag{3}$$

式中,  $r$  为信号加噪声的包络,  $I_0(x)$  是零阶修正贝塞尔函数,  $U_T$  为检测门限电平,  $\sigma$  为噪声方差,  $A$  为信号振幅. 根据信号和噪声之间电压比与功率比的关系:

$$\frac{A}{\sigma} = \left(\frac{2S}{N}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{4}$$

由式(2)可知,噪声干扰下雷达接收机的信噪比随雷达与目标间距离的减小而增大;由式(3)和(4)可知,发现概率  $P_d$  随信噪比的增加而单调增加. 综合以上分析并结合检测概率与信噪比关系曲线,可以得到如图 1 所示的检测概率与末制导雷达飞行过程的位置关系曲线.

在其他影响因素不变的情况下,在同一位置的检测概率  $P_d$  随干扰功率  $P_j$  增大而减小,在同一干扰功率下在末制导雷达从开机点  $A$  飞向目标  $B$  的过程中检测概率  $P_d$  越来越大. 假设当  $P_d > P_{d0}$

时雷达即能稳定地发现目标,对于无干扰和干扰功率为  $P_{j1}$ 、 $P_{j2}$  的发现目标点分别为  $C$ 、 $D$  和  $E$ ,而搜索时间分别为  $T_{s0}$ 、 $T_{sj1}$  和  $T_{sj2}$ . 可以看出因为  $P_{j1} < P_{j2}$ , 所以  $T_{sj1} < T_{sj2}$ ,  $K_{st1} < K_{st2}$ . 图2给出了噪声干扰下干扰功率与搜索时间比  $K_{st}$  的关系示意图,由图2可知,随着干扰功率的增加搜索时间比  $K_{st}$  从0逐渐增大并趋近于固定值  $N$ .

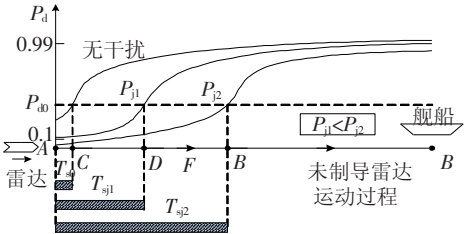


图 1 不同干扰功率下搜索时间变化

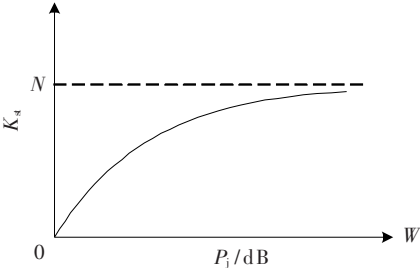


图 2 噪声干扰下  $K_{st}$  与干扰功率  $P_j$  的关系图

1.2 跟踪误差比

1.2.1 定义

末制导雷达的主要功能就是精确的跟踪目标,干扰会使雷达对目标的跟踪误差增大,所以跟踪误差可以反映干扰效果. 跟踪误差比的定义为:受干扰后与无干扰情况下雷达对目标的各种跟踪误差相对增加量之和

$$K_{te} = \sum_{i=1}^M \alpha_i \frac{\delta V_{ij} - \delta V_{i0}}{\delta V_{i0}}.$$

跟踪误差比反映的是干扰造成的雷达对真实目标跟踪误差的增大程度,值越大干扰效果越好. 式中  $M$  为雷达的跟踪种类数,  $\alpha_i$  为各类型跟踪误差比的权重,  $\sum \alpha_i = 1$ . 对于典型的两坐标末制导雷达  $M = 2$ ,跟踪误差包括距离跟踪误差和方位跟踪误差,所以

$$K_{te} = \alpha_1 \frac{|\delta V_{rj} - \delta V_{r0}|}{\delta V_{r0}} + \alpha_2 \frac{|\delta V_{bj} - \delta V_{b0}|}{\delta V_{b0}}. \quad (5)$$

式中:  $\delta V_{r0}$  和  $\delta V_{b0}$  分别为无干扰情况下距离和方位跟踪误差,  $\delta V_{rj}$  和  $\delta V_{bj}$  分别有干扰情况下距离和方位跟踪误差,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为距离跟踪误差比和方位跟踪误差比的权重. 对于末制导雷达,方位信息相对更加重要,所以可以令  $\alpha_1 < \alpha_2$ , 例如  $\alpha_1 = 0.3$ 、 $\alpha_2 = 0.7$ . 与搜索时间指标类似,在末制导雷达工作过程的不同阶段,相同的跟踪误差引起的

干扰效果是不同,越靠近末段干扰效果越好. 所以跟踪误差定义为

$$\delta V = \int_0^1 e(x) \cdot w(x) dx.$$

其中,  $e(x) = (V_{rd}(x) - V_r(x))^2$  为跟踪误差函数,  $V_{rd}(x)$  为雷达的距离波门位置或波束指向的方位,而  $V_r(x)$  为目标距雷达的真实距离或目标的真实方位.  $w(x)$  与式(1)中相同,为权重函数.

1.2.2 与影响因素关系

跟踪误差比  $K_{te}$  属于“效率准则”范畴的评估指标,在欺骗性干扰下,即使雷达能跟踪真实目标,但由于假目标的干扰也会增大对真实目标的跟踪误差. 而遮盖性的噪声干扰则会因导致雷达接收机信噪比的降低而增大对真实目标的跟踪误差. 下面简单分析在不考虑其他因素时,噪声干扰下跟踪误差比  $K_{te}$  随干扰功率  $P_j$  变化的情况.

根据文献[9],由噪声引起的常规体制雷达的跟踪误差的均方根  $\delta V$  为

$$\delta V^2 = \frac{K_n B_n}{(S/N)}.$$

其中,  $K_n$  对一给定的雷达为常数,  $B_n$  是系统噪声带宽,  $S/N$  为信号噪声比,代入式(5)可以得到(设  $N_{r0}$  和  $N_{b0}$  分别为无干扰时雷达距离跟踪系统和方位跟踪系统的噪声功率,  $P_{rj}$  和  $P_{bj}$  分别为干扰时雷达距离跟踪系统和方位跟踪系统的接收到干扰功率,  $S_r$  和  $S_b$  分别为干扰时雷达距离跟踪系统和方位跟踪系统的接收到干扰功率)

$$K_{te} = \alpha_1 \frac{\delta V_{rj} - \delta V_{r0}}{\delta V_{r0}} + \alpha_2 \frac{\delta V_{bj} - \delta V_{b0}}{\delta V_{b0}} = (\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2) \sqrt{P_j}.$$

在其他因素不变的情况下,  $C_1$  和  $C_2$  可以看作是常数,所以跟踪误差比  $K_{te}$  与干扰功率  $P_j$  的平方根成正比,即干扰功率越大跟踪误差越大.

2 综合评估方法

首先,对指标进行归一化处理,即根据各指标的特点选用合适的函数将评估指标映射到  $[0, 1]$  区间内;然后,采用加权求和的方式对映射后的值进行综合处理.

2.1 归一化处理

搜索时间比  $K_{st}$  和跟踪误差比  $K_{te}$  都是越大表明干扰效果越好,所以采用戒下型的正态分布函数将它们映射到  $[0, 1]$  区间内,具体函数如下.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < L; \\ 1 - e^{-\frac{(x-L)^2}{2\sigma^2}}, & L \leq x. \end{cases}$$

当  $x < L$  时,  $f(x) = 0$ , 所以  $L$  是无效干扰对

应的评估指标的上限值,当 $x > L$ 时干扰开始起作用. 令 $H = (L + 3\varepsilon)$ ,当 $x > H$ 时, $f(x)$  趋近于 1, 所以  $H$  对应的雷达完全失效的下限值. 区间  $[L, H]$  即是从轻度干扰到严重干扰的范围,对于搜索时间比  $K_{st}$  和跟踪误差比  $K_{te}$ ,要根据具体被干扰的雷达来分别确定  $L$  和  $H$  的值.

对于搜索时间比  $K_{st}$ ,  $L$  由在不影响雷达正常工作时所能允许的最长搜索时间确定,  $H$  由雷达失效情况下最短搜索时间确定. 例如,某雷达正常搜索时间为 500 ms,而其在末制导阶段的工作时间为 15 s,假设搜索时间小于 2 s 时不影响雷达工作,而用于搜索的时间超过 12 s 时雷达将不能工作. 则对于  $K_{st}$  的  $L = (1000 - 50)/50 = 19$ ,  $H = (15000 - 50)/50 = 299$ .

对于跟踪误差比  $K_{te}$ ,一般认为当跟踪误差大于无干扰时跟踪误差的 3 倍时<sup>[10]</sup>, 干扰开始有效,所以可以令  $L = 2$ .  $H$  由雷达所能允许的最大跟踪误差决定.

2.2 综合评估

对于归一化处理后的搜索时间比  $K'_{st}$  和跟踪误差比  $K'_{te}$ ,采用加权求和法进行综合. 综合评估结果为  $E_v$ .

$$E_v = \alpha_{st} \cdot K'_{st} + \alpha_{te} \cdot K'_{te}.$$

对于末制导雷达来说,处于搜索状态代表雷达完全不能跟踪真实的目标,所以  $\alpha_{st} > \alpha_{te}$ . 根据相关专家建议,本文设定  $\alpha_{st} = 0.6$ ,  $\alpha_{te} = 0.4$ . 综合处理后的定量干扰效果取值范围为  $[0, 1]$ , 值越大干扰效果越好.

3 仿真试验

利用某雷达对抗半实物仿真试验系统对本文提出的方法进行仿真试验. 有源干扰设备、雷达、目标和环境均采用模拟器实现. 干扰设备能够提供遮盖性干扰、欺骗性干扰以及组合干扰等多种干扰方式. 目标采用径向雷达由远及近的运动轨迹以模拟末制导雷达飞向目标的过程. 模拟的末制导雷达为固定频率雷达(载频为 17 000 MHz)和捷变频雷达(载频为  $(17\,000 \pm 100)$  MHz)、两坐标、非相参、水平极化、等效发射功率 60 kW、脉宽 0.5  $\mu$ s、重频 1 500 Hz. 目标模拟器模拟大型的舰船目标, RCS 为 1 000 m<sup>2</sup>. 为了模拟反舰导弹高速飞向舰船目标的过程,设定目标以 0.7 马赫的速度相对雷达由远及近的匀速运动,初始距离为 12 km. 干扰机用于舰载自卫,干扰功率可调,具有多种干扰方式.

对无干扰及有干扰情况分别进行实验,通过

干扰前后搜索时间和跟踪误差的对比得出干扰效果. 图 3 给出了无干扰情况下常规雷达的一次工作过程,图中“距离误差”和“角度误差”分别为雷达的距离跟踪误差和角度跟踪误差,由雷达跟踪的位置和目标真实位置相减得到;“工作状态”是雷达模拟器输出的工作状态数字信号,0 代表雷达处于搜索状态,1 代表雷达处于跟踪状态;“跟踪真目标状态”为根据度量方法得到的雷达跟踪真实目标的状态,0 代表雷达处于搜索状态或跟踪假目标的状态,1 代表雷达处于跟踪真实目标的状态. 图 4 给出了干扰功率为 40 dBW、干扰时机为全程干扰情况下瞄准式干扰对常规雷达的干扰效果图.

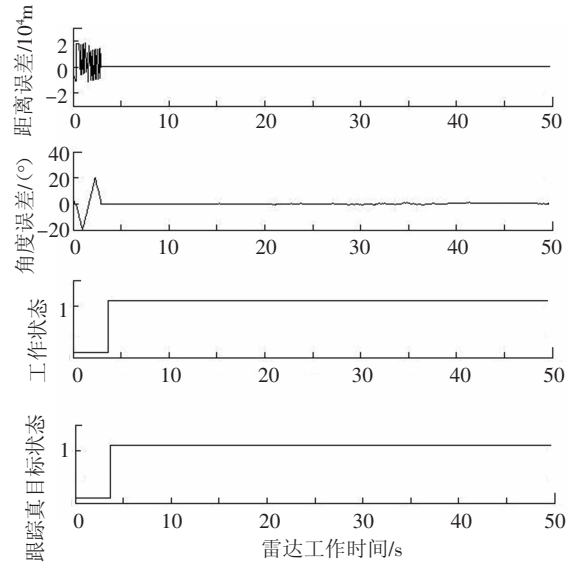


图 3 无干扰下常规雷达的工作过程

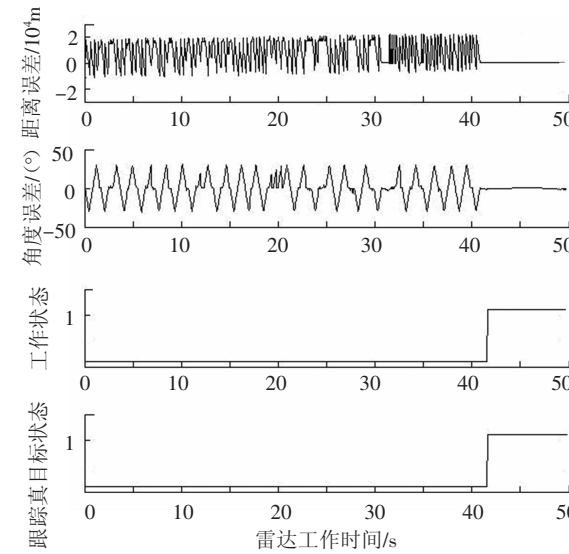


图 4 瞄准式干扰对常规雷达的干扰效果

对比图 3 和图 4 可以看出,在瞄准式遮盖干扰下雷达处于搜索状态的时间明显加长,只有到雷达工作过程末段,当目标与雷达之间距离很小时,雷达才能捕获并跟踪目标,并且角度跟踪误差

有变大的迹象.

表 1 和表 2 分别给出了干扰功率为 40 dBW、全程干扰情况下几种干扰效果的评估结果.

表 1 遮盖性干扰的归一化评估结果

| 雷达体制 | 瞄准干扰 | 阻塞干扰 | 扫频干扰 |
|------|------|------|------|
| 常规   | 0.94 | 0.40 | 0.35 |
| 捷变频  | 0.11 | 0.45 | 0.38 |

表 2 距离拖引干扰效果的归一化评估结果

| 雷达体制 | 抗干扰  | 单拖   | 双拖   |
|------|------|------|------|
| 常规   | 无    | 0.43 | 0.73 |
| 常规   | 前沿跟踪 | 0.01 | 0.42 |

从表 1 可以看出,对于固定频率的常规雷达,瞄准干扰的干扰效果最好;而对于捷变频雷达,阻塞干扰效果最好.从表 2 可以看出,在距离拖引干扰中,双拖干扰的干扰效果要优于单拖干扰,在采取前沿跟踪抗拖距干扰措施后,单拖和双拖干扰的效果均有明显下降.

图 5 为干扰效果随干扰功率变化图,实验中干扰持续末制导雷达的工作全过程.从图中可以,无论何种干扰对应何种雷达,干扰功率越大干扰效果越好.在 3 种干扰方式中,瞄准干扰对常规的固定频率雷达的干扰效果最好,而对捷变频雷达的干扰效果最差.当干扰功率较大时,阻塞干扰对常规雷达和捷变频雷达的效果均好于扫频干扰;但是当干扰功率较小时,由于阻塞干扰的功率密度太小,干扰效果反而不如扫频干扰.

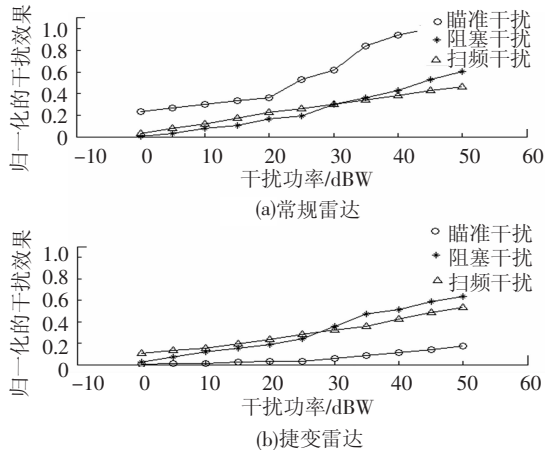


图 5 干扰效果随干扰功率变化图

从实验结果可以看出,利用本文提出的评估方法得到的干扰效果与理论及工程实践相一致,从而证明了评估方法的有效性.

4 结 论

1) 针对末制导雷达有源干扰效果的评估问题,本文提出了以搜索时间比  $K_{dt}$  和跟踪误差比  $K_{te}$  为指标的综合评估方法,两个指标分别体现了末制导雷达发现目标的能力和跟踪目标的能力,不但适用于遮盖性、欺骗性干扰效果的评估,而且能够评估组合干扰的干扰效果.

2) 半实物的仿真试验证明了该方法的合理性和有效性,但鉴于雷达对抗的复杂性和多样性,还需要对该方法做进一步的试验验证.

参考文献:

[1] LI Nengjing. Formulas for measuring radar ECCM capability[J]. IEE Proceedings, Part F: Communications, Radar and Signal Processing, 1984, 131(4): 417-423.

[2] 魏保华, 吕晓雯, 王雪松. 一种新的雷达有源干扰效果评估准则的研究[J]. 现代雷达, 1999, 21(6): 26-31.

[3] 黄高明, 刘勤, 苏国庆, 等. 雷达遮盖性干扰效果评估度量方法研究[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 10-13.

[4] POVETKO V N, STAROSTENKO V F, TOLSTIKHIN G N. Estimate of the effect of jamming on the efficiency of radar detection of ground targets with the shadowing effect of the underlying surface taken into account[J]. Telecommunications and Radio Engineering, 1995, 49(2): 62-66.

[5] 解凯, 陈永光, 汪连栋, 等. 距离波门拖引方案的分析建模与评估[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(8): 1158-1160.

[6] ZHU Weigang, ZHOU Yinqing, LI Chunsheng. A new index for effectiveness measure of jamming to synthetic aperture radar[C]// ICSP2006 Proceedings. Beijing: [s. n.], 2006: 16-20.

[7] SHEN Gui-ming, ZHU Wei-hua. Quantitative testing research of surveillance radar anti-jamming performance[C]//CIE International Conference of Radar Proceedings. Beijing: [s. n.], 2001: 255-259.

[8] XU Jie, ZHAO Shang-hong, WU Ji-li, et al. Integrated fuzzy evaluation method of photoelectric jamming to detector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(6): 30-34.

[9] BARTON D K. Radar System Analysis[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1964.

[10] 章耐芳, 罗荣根, 高明东. 对于末制导雷达抗干扰性能的考评方法[J]. 航天电子对抗, 1990(1): 61-67.

(编辑 杨 波)