

文章编号: 1672-2892(2011)03-0379-05

一种针对反舰导弹对抗的箔条布放优化仿真方法

蔡 蓓^{1,2}, 张为华¹

(1.国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2.中船重工集团公司 第710研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘 要: 建立了主动式雷达制导对抗仿真系统, 在仿真的基础上, 对影响决策的各种对抗条件的物理意义和影响过程进行了分析; 建立了基于统计的箔条对抗平均成功概率模型, 提出了一种干扰布放决策寻求方法, 有效地实现了雷达对抗最优化策略的求解。最后在仿真平台上进行大量的测试, 对预估结果进行了分析, 验证了仿真模型和决策分析方法的正确性。

关键词: 雷达对抗; 建模与仿真; 干扰弹布放; 决策优化

中图分类号: TN955⁺.3

文献标识码: A

Optimum decision making model for radar countermeasures

CAI Qian^{1,2}, ZHANG Wei-hua¹

(1.College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;
2.No.710 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Yichang Hubei 443003, China)

Abstract: The simulation platform of active radar confrontation is established. A statistic function of average successful probability in chaff defense is proposed, and a computing model is established to solve the optimum laying space according to the confrontation factors for tactics of chaff bomb effectively. Then the validity of simulation model and optimum method has been proved by lots of testing on the simulation platform.

Key words: radar countermeasures; modeling and simulation; decoy laying; decision optimization

舰船光电对抗研究中反舰导弹和舰船是2个相互对抗的实体,反舰导弹按照既定的制导方式对舰船进行跟踪和打击,舰船则针对反舰导弹制导方式制定相应的干扰策略,从而达到使反舰导弹丢失目标、舰船规避成功的目的^[1-2]。在两者的对抗中,尤其是舰船对导弹制导的干扰过程中,环境因素对其有重要的影响。对光电对抗的研究实际上就是模拟这些实体之间相互作用、相互影响的关系,制定对抗策略并进行效能评估。在以往的国内外研究中,大多仿真平台^[3]通过建立舰船和导弹模型,选定一组环境研究它们之间的对抗作用关系。对抗策略研究是一个典型的多学科交叉的优化问题和不确定性最优决策问题,影响因素多,包括受导弹技术特性及制导体制的影响,舰船平台特性的影响,干扰装备性能及干扰物的物理特性和布放特性的影响,气象、环境条件的影响,装备安装条件的影响,干扰资源的数量、分布和分配情况的影响等,目前仍缺乏有效的对抗策略寻优方法。

本文设计了一个舰船雷达对抗仿真系统,并在此基础上提出了最优布放空间的概念,对影响对抗决策的条件进行分析,建立了布放空间函数关系,提出了一种对抗策略概率优化求解算法。

1 舰船雷达对抗仿真系统

舰船雷达对抗仿真系统采用主动雷达导引头制导方式,实现舰船在存在摇摆和升沉等运行情况下,干扰弹的发射及海杂波、箔条干扰作用过程的仿真,并以导引头是否丢失目标为标准,实现干扰效果的评估,辅助分析战术使用原则。仿真系统总体上可分为4个互相作用的部分,如图1所示,即反舰导弹仿真、舰船目标仿真、对抗决策仿真和环境仿真。

主动式雷达制导模型采用基于基带信号的仿真方法,对雷达接收机输出的和、差通道基带信号进行仿真,在此基础上实现脉冲压缩、信号检测和目标距离、速度、角度跟踪过程的仿真。

在目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)建模时,考虑了低距离分辨力单点和高距离分辨力多点的

模型,同时也考虑了从不同角度观察目标时,目标 RCS 的起伏特性。结合目标的运动特性和制导雷达之间的位置关系,利用点目标的仿真模型仿真出雷达接收机处的目标基带回波信号。

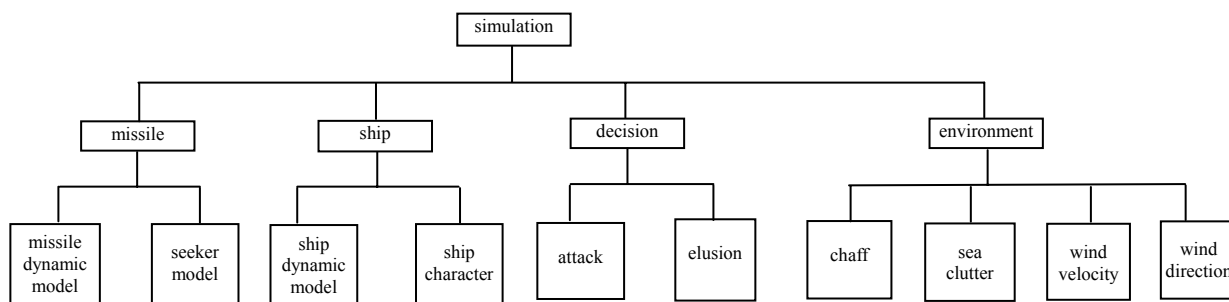


Fig.1 Radar simulation system framework

图1 雷达对抗仿真系统框图

根据干扰弹的发射参数、弹道参数和箔条云爆炸形成过程,计算箔条弹的空间布放位置,对箔条弹的布放过程进行仿真。根据干扰弹在爆炸后释放出的箔条云团在空中散布的运动形式,在对云团的空时分布密度进行计算的基础上,结合实际的环境特性,如风速等,对箔条云的散射特性和回波信号进行仿真。

对风速、风向、海浪的建模是通过叠加在舰船的摇摆和升沉等运动、箔条云的飘移和扩散运动中实现的。根据雷达的带宽、指向角和波束宽度,并考虑发射波束和接收波束的方向图特性,对同一距离单元上的杂波按照方位向进行网格划分,结合导弹的飞行状态参数,计算相应网格单元的杂波功率和多普勒频率,进而对所有散射单元的数据求和,得到对应距离分辨单元内的杂波仿真数据。

以图、表两种方式对干扰效果及各子模块的效能进行分析,最后形成作战系统作战效能的总体评估^[4]。

2 箔条干扰策略优化

2.1 箔条干扰策略的分析

箔条质心干扰是最常用的干扰方式之一^[5],如何根据敌反舰导弹的来袭方位、作战海域的海况,确定干扰弹的发射方案及舰船的机动规避方案,是箔条质心干扰防御敌反舰导弹战术运用需要解决的关键问题。

本文采取动态仿真的方法,基于箔条 RCS 与导弹威胁方向、干扰弹发射舷角、舰艇规避机动方向、作战海域的风速、风向等要素的关系,提出了箔条质心干扰时的发射优化原则。

如图2所示,目标舰船(其雷达截面积为 σ)和箔条诱饵(其雷达截面积为 σ')都在分辨单元内,末制导雷达跟踪两者形成质心点,质心点与舰船的偏角为 β_1 ,与箔条云的偏角为 β_2 ,则有:

$$\beta_1 = \frac{\sigma'}{\sigma + \sigma'} \beta_{12} \quad (1)$$

式中 β_{12} 为舰船与箔条云相对于导弹的张角。图2中 γ 为雷达的波门宽度。从

式(1)可知,当箔条云在波门内的 RCS 较大时,即 $\sigma' > \sigma$, $\beta_2 < \beta_1$,此时质心点偏向箔条云;反之,若 $\sigma' < \sigma$,则质心点偏向舰船。

对于采用前沿搜索的跟踪模式反舰导弹,使用在侧前方均匀爆开箔条云的方法,可使导弹跟踪的质心点逐渐偏向箔条云,达到质心干扰的效果^[6]。从上文的分析看出,箔条弹的布放主要需满足以下2点:1)箔条云在导弹的分辨单元内;2)箔条云在雷达分辨单元内的雷达面积比舰船的雷达面积大^[7]。

核心问题就是优化箔条干扰弹的布放位置,本文对箔条弹布放空间参数描述如下:

1) 空间的 RCS 总量:由于 RCS 在仿真过程中是一个动态变化的值,本文采取用箔条弹枚数 n 来具体描述 RCS 总量,即认为箔条弹的 RCS 值是随用弹量的增加而增加的,用弹量相同的情况下,认为二者的 RCS 量级是相同的。

2) 空间的数量:为了提高寻优的效率,将布放空间分为3个,3个空间对应的箔条弹数目分布尽量均匀,设定不同的箔条弹总数 n 所对应3个布放空间的箔条弹枚数分别为 n_1, n_2, n_3 。

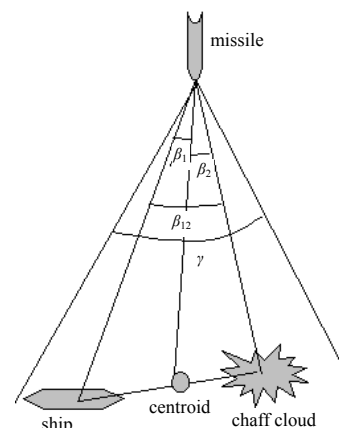


Fig.2 Chaff centroid jamming

图2 箔条弹质心干扰示意图

3) 空间的位置: 由于箔条的布放高度受弹道影响差别较大, 因此不能忽略其布放空间的高度, 在箔条弹布放空间的描述中, 每个箔条弹布放空间的位置都可以用质心位置极坐标 (r, θ, φ) 来描述。用 3 组参数 $(r_1, \theta_1, \varphi_1)$, $(r_2, \theta_2, \varphi_2)$ 和 $(r_3, \theta_3, \varphi_3)$ 分别描述 3 个箔条弹布放子空间的位置, 均位于舰船的侧前方。

2.2 箔条弹的布放成功概率建模

将影响干扰弹布放空间位置的因素分为 2 类: 1) 主观可控或基本不变的因素, 它们中的一部分可近似看作是常量, 如舰船的长、宽、高、舰船的最大速度与加速度等。本研究的寻优算法中, 常量的影响均被忽略掉。另一部分如导弹的制导模式、雷达的极化方式等导弹状态参数, 对确定不发生变化的导弹, 本文对这些参数采取不同时的分别测试、分别寻优; 2) 主观不可控或在不同的情况下可能变化的因素, 如导弹的来袭方向、来袭速度、来袭距离, 风速, 风向等, 则当作变量处理, 而这些变量是决策研究中的关键。

固定船向为正北 0° , 变化导弹来袭方向和风向来进行布放空间的寻优。另外, 仿真中的规避策略对于舰船的初始航向不作特别调整, 同时固定导弹来袭速度, 将其看作常量, 因此, 将箔条弹布放空间的影响因素缩小为 5 个, 得到简化的函数关系:

$$C_{(r_i, \theta_i, \varphi_i, n)} = f(\alpha_2, v_3, l_2, \alpha_1, v_1), i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: α_2 为导弹来袭方向; l_2 为导弹来袭距离; α_1 为风向; v_1 为风速; v_3 为舰船瞬时速度。其中各因素对箔条弹布放空间的影响分析如下:

导弹来袭方向 α_2 : 当导弹正对船头来袭时, $\alpha_2 = 0$ 。 α_2 一方面决定舰船 RCS 散射值, 因而决定箔条弹的最小 RCS 散射值, 即箔条弹的用弹量; 另一方面决定舰船的布放空间方向, 即舰船的逃逸方向, 此外, 来袭方向中舰船的朝向还将影响雷达距离波门对舰船 RCS 和箔条 RCS 的剪切。

导弹来袭距离 l_2 : 导弹的来袭距离影响雷达的距离波门大小。同时, 箔条弹会随风飘移, 其 RCS 散射值在一定时间内增大后会开始减小, 制导时间会对对抗结果有小的影响。

舰船瞬时速度 v_3 : 舰船的速度影响舰船的逃逸, 由于是在导弹视锥内向箔条弹相反方向逃逸, 因此舰船瞬时速度沿导弹来袭方向的分量和垂直于导弹来袭方向的分量更为直接地影响对抗结果或布放空间的选取。

风向 α_1 : 对布放空间位置的影响主要表现在箔条云会随风飘移。

风速 v_1 : 对于舰船来说, 沿导弹来袭方向的风速分量和垂直于导弹来袭方向的风速分量会更为直接地影响箔条弹的布放空间。

引入干扰弹的平均对抗成功概率^[7], 对箔条弹 3 个布放空间集合的取值, 都用一个成功概率对其性能进行描述, 采用多次仿真的方法来确定对抗平均成功概率。在固定某一组布放空间分布和参数变量取值的情况下, 对参数变量加入随机噪声, 进行 N 次对抗, 如果在这其中舰船干扰成功了 M 次, 则对抗的成功概率为:

$$P = \frac{M}{N} \times 100\% \quad (3)$$

以舰船的外接轮廓为中心, 向各个方向延伸一段距离 l , 形成舰船的安全空间 Ω ^[8], 若弹目交会时导弹进入安全空间 Ω 中, 则认为制导成功, 对抗失败; 反之则认为制导失败, 对抗成功。

在仿真平台中, 参数来袭方向、导弹速度等的确定是基于实际监测测量的。而在实际中, 这个监测测量受环境、人为因素影响具有一定的误差, 因此需要在仿真测试过程中引入随机噪声来近似模拟实际中的测量误差, 如图 3。

成功概率 P 的函数关系如下所示:

$$P = f(C, \alpha_1, v_1, \alpha_2, l_2, v_3) \quad (4)$$

式中 C 为箔条弹布放空间的参数集合。

$$C = \{r_i, \theta_i, \varphi_i, n\}, i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

固定 C , 那么:

$$P = f(\alpha_1, v_1, \alpha_2, l_2, v_3) \quad (6)$$

参数加入测量误差带来的随机噪声, 可以得到成功概率 P 的观测值。从上面的分析不难看出, 通过这种方法可

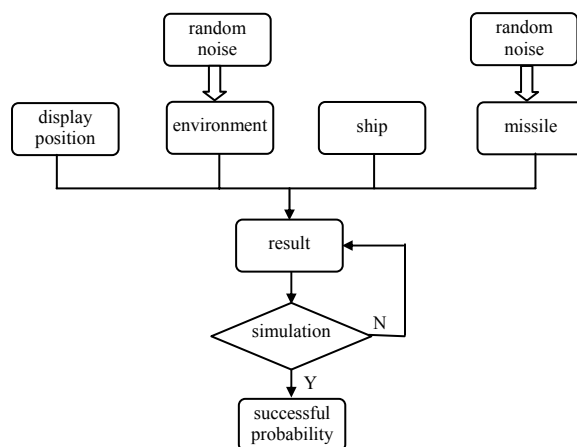


Fig.3 Implementation of simulation
图3 成功概率与导弹、环境因素之间的关系

以得到映射关系: $C \rightarrow P$, 这就是进行布放空间寻优的最基本依据。让布放空间进行变化, 成功概率 P 也就不断进行变化, 取定 P 最高时的布放空间为寻优结果即可。这样给出的结果在任何情况下, 舰船的干扰策略都是固定的, 从平均的意义上讲可能是最优的, 但却没有充分考虑到各种影响因素。

在已知对抗条件的情况下, 完全可以针对对抗条件对干扰策略进行优化, 即在确知雷达制导的 5 个影响因素 $\alpha_1, v_1, \alpha_2, l_2, v_3$ 时, 通过决策找到一个最优的箔条弹布放空间分布。对布放空间的寻优即是对箔条弹数目 n 和位置参数 $(t_1, \theta_1, \varphi_1), (t_2, \theta_2, \varphi_2)$ 和 $(t_3, \theta_3, \varphi_3)$ 的寻优。

2.3 箔条弹的布放空间的寻优求解

1) 对 n 的寻优

在前文的箔条弹干扰策略分析中提到, 箔条弹的 3 个布放空间作用相同且位置相邻或相近, 先假定 3 个布放空间的位置相同, 来确定箔条弹的用弹量, 即设 $t = t_1 = t_2 = t_3, \theta = \theta_1 = \theta_2 = \theta_3, \varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ 。对 t, θ, φ 作一定的离散化处理, 取值点如表 1 所示。

在某一对抗参数 $\alpha_1, v_1, \alpha_2, l_2, v_3$ 下, 设定箔条弹数量 n ($5 \leq n \leq N$), 对 t, θ, φ 作枚举, 并不断增大 n , 对每 1 组 (n, t, θ, φ) 的组合进行蒙特卡洛仿真, 得到相应的对抗成功概率 $P(n, t, \theta, \varphi)$ 。当箔条弹用弹量不足时, 对抗成功概率很小, 或随箔条弹的用弹量增加而显著增大。当箔条弹用弹量充足时, 即箔条弹布放空间的 RCS 散射值已经足够大时, 对固定位置的箔条弹布放空间, 对抗成功概率会趋于稳定。由此, 为了限制仿真的时间复杂度, 对 n 作如下限制: 设 $5 \leq n \leq N$, 对某一 (t, θ, φ) , 若 $P_{n-2} > P_n \times 0.95$ 且 $n \geq 10$, 或 $P_n > 95\%$, 则不再增大 n , 结束对该组 (t, θ, φ) 的用弹量寻优。即对某一 (t, θ, φ) , 当箔条弹数量增大, 对抗成功概率的增长不明显, 或对抗成功概率已经大于 95%, 认为箔条弹的用弹量已经充足。

寻优系统记录下对抗成功概率最大的情况 $P_{\max}(n, t, \theta, \varphi)$ 时的 n 和 (t, θ, φ) 。

2) 对 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 寻优

n 确定后, 根据前述的原则, 将 n 枚箔条弹分为 3 组, 即确定了 n_1, n_2, n_3 。然后对 3 个布放空间位置的寻优, 先对 3 个空间的 θ 角寻优, 再对 φ 角寻优, 最后对 t 寻优。

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 均在 θ 附近取值并在 θ 的取值表中: $(\theta - 10) \bmod 360 \leq \theta_1, \theta_2, \theta_3 \leq (\theta + 10) \bmod 360$ 。

取 $t = t_1 = t_2 = t_3, \varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$, 对 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 作枚举, 对每 1 组 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的组合作蒙特卡洛仿真, 得到相应的对抗成功概率 $P(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 。寻优系统记录下对抗成功概率最大的情况 $P_{\max}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 时的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 即得到 3 个布放空间的 θ 角。

3) 对 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 寻优

取 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 = \varphi \pm 2$ 且在取值表中, 取 $(n, t, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \varphi)$, $t = t_1 = t_2 = t_3$, 对每一组 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 作蒙特卡洛仿真, 得到相应的成功概率 $P(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 。寻优系统记录下对抗成功概率最大情况 $P_{\max}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 时的 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, 即得到 3 个布放空间的 φ 角。

4) 对 t_1, t_2, t_3 寻优

取 $t_1, t_2, t_3 = t \pm 0.2$ 且在取值表中, 取 $(n, t, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$, 对每一组 t_1, t_2, t_3 作蒙特卡洛仿真, 得到相应的成功概率 $P(t_1, t_2, t_3)$ 。寻优系统记录下对抗成功概率最大情况 $P_{\max}(t_1, t_2, t_3)$ 时的 t_1, t_2, t_3 。即可得到最终的包含 3 个子空间参数的坐标 $(n, t_1, t_2, t_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 。根据箔条弹布放空间的分组得到 3 个布放空间各自对应的箔条弹数目, 确定箔条弹的最优布放空间。寻优过程的输入输出描述如图 4 所示。

通过分析干扰弹的干扰策略, 确定了对抗方案和干扰弹的布放范围, 然而, 严格上来讲, 干扰弹的布放空间在区域内的取值应该是连续的, 可枚举的数量为无穷

表 1 弹各布放空间的参数取值

Table 1 Probable value of the space position			
parameters	probable values		
t	0.5	0.7	0.9
θ	60	70	80
φ	16	18	20

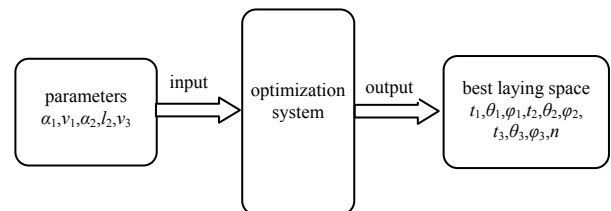


Fig.4 Description of input-output relationship
图 4 箔条弹寻优系统仿真流程的输入输出描述

大,因此需要对布放空间先作离散化处理,设定仿真条件,再采用多次仿真的方法得到干扰弹的最优布放空间。在仿真中,给定布放空间所有可能的取值情况,然后分别确定每一种情况下的干扰成功概率,取成功概率最高的一个或几个布放空间分布作为相应条件下的寻优结果。

3 实验结果

在导弹来袭方向、风速风向全随机的情况下,测试500次。仿真得到打法的整体成功概率为49.8%,对数据进行统计分析,并进行线性拟和,可以得到干扰成功概率随导弹来袭方向、风速、风向、干扰距离的分布,如图5~图8所示。

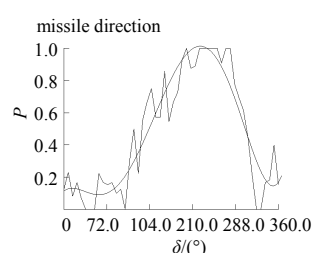


Fig.5 Distribution by missile direction
图5 随导弹来袭方向的分布

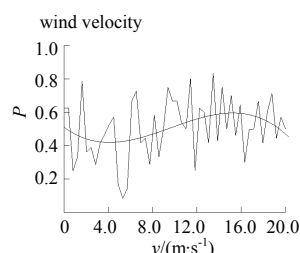


Fig.6 Distribution by wind velocity
图6 随风速的分布

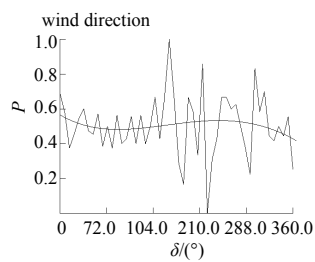


Fig.7 Distribution by wind direction
图7 随风向的分布

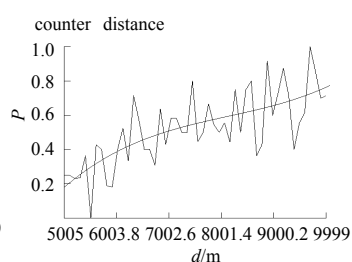


Fig.8 Distribution by distance
图8 随干扰距离的分布

根据上述分布,通过建立一个由导弹来袭距离、导弹来袭方向、舰船瞬时速度、风向、风速决定的布放空间描述函数,利用概率统计的函数即可求解最优布放空间。

4 结论

通过对与对抗相关的各种条件和影响因素的分析,建立了一个主动式雷达制导对抗仿真系统;提出了一种解决雷达对抗最优化策略求解的干扰布放决策寻求方法。通过在设计的仿真平台上几十万次的仿真测试,对预估结果进行了分析,验证了仿真模型和决策分析方法的有效性。

参考文献:

- [1] Yildiz K, Pace P E, Tummala M. Electronic Attack Against Boost-Phase ICBM Defense System[C]// 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Hawaii: [s.n.], 2005, 2: 1889-1895.
- [2] Fowler C A. National missile defense[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002, 17(1): 4-12.
- [3] 张继勇, 董应权. 光电对抗仿真测试系统综述[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(S2): 985-988.
- [4] 徐敬, 于小娟. 舰船箔条质心干扰仿真研究[J]. 舰船电子对抗, 2001, 2: 10-12.
- [5] 徐敬. 箔条质心干扰对抗反舰导弹的决策仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 4831-4834.
- [6] 李敬. 箔条弹干扰原理与形成机理[J]. 舰船电子对抗, 2003, 26(3): 15-19.
- [7] GAO Donghua, SHI Xiuhua. Evaluation for Success Probability of Chaff Centroid Jamming[J]. Journal of China ordnance, 2008, 4(1): 22-25.
- [8] 吴晓进. 超视距雷达及其防空应用[J]. 信息与电子工程, 2003, 1(2): 75-78.

作者简介:



蔡 蓓(1971-), 男, 湖北人, 在读博士研究生, 研究方向为光电对抗. email: caiqian71@tom.com.

张为华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞行器设计.