

基于回波幅度特征的拖曳式诱饵存在性检测

宋志勇* 肖怀铁

(国防科学技术大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

摘要: 诱饵的存在性检测是对抗拖曳式有源雷达诱饵干扰的前提,也是决定抗干扰效果的重要因素。该文基于雷达波束内诱饵存在导致的回波幅度特征变化,通过提取诱饵存在/不存在两种情况下雷达接收信号的幅度特征差异,推导了两种条件下雷达观测幅度的条件概率密度函数,在此基础上提出了基于回波幅度特征的广义最大似然存在性检测方法。结合不同干扰场景仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 目标检测; 拖曳式有源雷达诱饵; 存在性检测; 幅度特征; 广义最大似然

中图分类号: TN972

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1515-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01180

Detection of Presence of Towed Radar Active Decoy Based on Amplitude Characteristic

Song Zhi-yong Xiao Huai-tie

(National Key Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The detection of presence of decoy is the foundation of countering the Towed Radar Active Decoy (TRAD) and deciding the effect of ECCM. Based on the distinction of the amplitude characteristic on the condition of the decoy is present or not, the conditioned probability density functions (pdfs) of the measured amplitude are given. Generalized Maximum Likelihood (GML) detection of the presence of TRAD is developed with the amplitude characteristic. Simulation results with different condition illustrate the performance of the method.

Key words: Target detection; Towed Radar Active Decoy (TRAD); Detection of presence; Amplitude characteristic; Generalized Maximum Likelihood (GML)

1 引言

电子战技术、隐身技术的发展使得各种精确制导武器面临严重挑战。在众多干扰样式中,拖曳式有源雷达诱饵(TRAD)因其高效能、强可控性以及低成本等优点而备受关注,成为威胁对空导弹最为有效的手段。1999年对南斯拉夫作战中,美军在其B-1B轰炸机上装备的ALE-50拖曳式诱饵就成功诱偏了十枚锁定该机的导弹,其中仅一枚诱饵被导弹直接命中^[1]。

目前关于拖曳式诱饵干扰的研究主要集中在原理分析^[2,3],性能仿真^[4,5]和效果评估^[6]方面,关于抗干扰的研究则较少。其中文献[7]采用分数阶傅里叶变换结合长时间相参积累,利用目标和诱饵的多普勒差异进行分辨。但该方法需要2维搜索定阶,计算量大,难以满足实时性,并且没有解决诱饵检测问题。文献[8]从制导体制方面探讨了诱饵干扰对抗技术,但没有给出具体信号处理方法。文献[9]试图

从制导策略方面利用多普勒进行干扰对抗,但该方法对制导控制要求极高,同时也没有解决干扰存在的判定问题。事实上,当目标释放拖曳式诱饵后,导引头接收回波中同时包含了目标回波信号和诱饵干扰信号。与诱饵不存在时相比,诱饵的存在使得雷达接收回波的构成发生改变,回波特征发生变化。本文即是利用诱饵存在/不存在两种情况下雷达接收回波的幅度变化特征实现了拖曳式诱饵的存在性检测。

2 检测原理

拖曳式诱饵主要采用空间两点源干扰原理对导引头雷达实施角度欺骗。由于诱饵能够逼真地模拟目标的相关特性,使得二者在时域、频域和空域上的差异都很小,因而常规的信号处理方法无法对其进行检测和分辨。诱饵发射的干扰信号主要是通过数字射频存储技术(DRFM)对接收到的雷达发射脉冲进行采集、存储、调制放大、转发来产生的。诱饵释放后,雷达接收到的回波信号为目标回波与诱饵干扰的混合体,并且二者具有较高的相似性。目

2010-11-04 收到, 2011-03-09 改回

*通信作者: 宋志勇 zhiyongsong@163.com

前国外大量装备的拖曳式诱饵主要为第1代诱饵,其基本功能是利用DRFM实现信号的直接转发或应答。随着现代数字处理软硬件技术的发展,近年来广泛报道的各种新型诱饵在转发信号的同时能够结合脉内调制,RCS调制等复合手段,实现诱饵信号与目标回波的高度相似。然而新型诱饵目前大多还处于研制和实验阶段,还没有大量装备。因此本文从实战需要出发,主要研究第1代拖曳式诱饵干扰的对抗问题,对于新型诱饵则没有过多考虑。

文献[10]研究指出,当雷达发射多个不同频率的脉冲时,单个目标的雷达回波可以认为是符合swerling I或II模型的,即单个脉冲的回波幅度服从瑞利分布。对于第1代拖曳式诱饵,其干扰信号是通过雷达发射脉冲直接转发放大获得的。而通常雷达连续发射的数个脉冲之间的功率相差不大,因而在少数几个或十几个脉冲内,诱饵转发信号的放大倍数也是基本相同的,因此产生的干扰信号可以看作是多个幅度相对固定的脉冲回波。这样,当拖曳式诱饵干扰未发生时,波束内只存在一个瑞利目标,回波信号幅度服从瑞利分布。而当干扰发生时,波束内同时存在一个瑞利目标和一个固定幅度诱饵,雷达接收信号为目标回波与诱饵干扰的混合体,此时回波幅度不再服从瑞利分布,而是服从一种新的概率分布。幅度分布的差异即是诱饵存在带来的雷达回波特征的变化,也是直接用于诱饵存在性检测的本质特征。

3 观测幅度的概率分布

拖曳式诱饵的存在性检测问题实际上就是判断雷达接收到的回波信号是单独由目标构成还是由目标和诱饵共同构成的问题。因此根据波束内诱饵存在与否可建立如下假设检验:

H_0 : 诱饵不存在,回波中只包含目标,

H_1 : 诱饵存在,回波中同时包含目标和诱饵。

下面从概率分布的角度分析两种假设条件下雷达接收回波的幅度特征差异。

3.1 H_0 假设下的概率分布

H_0 假设下,回波中只包含瑞利分布的目标,则此时雷达接收的回波信号可表示为

$$s_I = \beta \cos \varphi + n_{sI}, \quad s_Q = \beta \sin \varphi + n_{sQ} \quad (1)$$

其中 β 为目标的幅度,满足参数为 β_0 的瑞利分布。 φ 为目标的相位,且在 $(-\pi, \pi]$ 间均匀分布, n_{sI}, n_{sQ} 为同相及正交支路噪声,且满足 $n_{sI}, n_{sQ} \sim N(0, \sigma_s^2)$ 。则从式(1)可以看出,当目标的幅度和相位一定时, s_I, s_Q 为联合高斯随机变量。

假设 A, ψ 分别为此时雷达接收机和通道的观

测幅度和相位,则和通道信号可表示为

$$s_I = A \cos \psi, \quad s_Q = A \sin \psi \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得 H_0 假设下回波观测幅度 A 的条件后验概率密度为

$$f(A | H_0, \beta_0, \sigma_s) = A / (\beta_0^2 + \sigma_s^2) \exp[-A^2 / 2(\beta_0^2 + \sigma_s^2)] \quad (3)$$

则 H_0 假设下目标信噪比 \mathcal{R}_R 以及接收回波的观测信噪比 \mathcal{R}_o 可分别表示为

$$\mathcal{R}_R = \beta_0^2 / \sigma_s^2, \quad \mathcal{R}_o = A^2 / 2\sigma_s^2 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)则可得 H_0 假设下观测信噪比 \mathcal{R}_o 的条件概率密度为

$$f(\mathcal{R}_o | H_0, \mathcal{R}_R) = 1 / (\mathcal{R}_R + 1) \exp[-\mathcal{R}_o / (\mathcal{R}_R + 1)] \quad (5)$$

当雷达发射 N 个独立脉冲信号时, H_0 假设下目标信噪比 \mathcal{R}_R 的最大似然估计可表示为^[11]

$$\hat{R}_R = Y_N - 1, \quad Y_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathcal{R}_{oi} \quad (6)$$

其中 \mathcal{R}_{oi} 为第 i 个子脉冲的观测信噪比。

3.2 H_1 假设下的概率分布

H_1 假设下,回波中同时包含一个瑞利目标和一个固定幅度的诱饵,回波信号可表示为

$$\left. \begin{aligned} s_I &= \alpha \cos \phi + \beta \cos \varphi + n_{sI} \\ s_Q &= \alpha \sin \phi + \beta \sin \varphi + n_{sQ} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 α, ϕ 为诱饵的幅度和相位, β, φ 为目标的幅度和相位。则 H_1 假设下 A 满足下式

$$f(A | H_1, \alpha, \beta_0, \sigma_s) = \frac{A}{\beta_0^2 + \sigma_s^2} I_0 \left(\frac{\alpha A}{\beta_0^2 + \sigma_s^2} \right) \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2(\beta_0^2 + \sigma_s^2)} [A^2 + \alpha^2] \right\} \quad (8)$$

根据式(4),同理可得诱饵信噪比为 $\mathcal{R}_F = \alpha^2 / 2\sigma_s^2$ 。将其代入式(8)可得 H_1 假设下观测信噪比的概率密度函数为

$$f(\mathcal{R}_o | H_1, \mathcal{R}_F, \mathcal{R}_R) = \frac{1}{\mathcal{R}_R + 1} I_0 \left(\frac{2}{\mathcal{R}_R + 1} \sqrt{\mathcal{R}_o \mathcal{R}_F} \right) \cdot \exp \left[-\frac{\mathcal{R}_o + \mathcal{R}_F}{\mathcal{R}_R + 1} \right] \quad (9)$$

当雷达导引头发射 N 个独立脉冲信号时,可获得 H_1 假设下 $\mathcal{R}_F, \mathcal{R}_R$ 的最大似然估计为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathcal{R}}_R &= Y_N - 1 - \sqrt{\frac{2N-1}{N-1}} Y_N^2 - V_N \\ \tilde{\mathcal{R}}_F &= \sqrt{\frac{2N-1}{N-1}} Y_N^2 - V_N \\ Y_N &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{\mathcal{R}}_{oi}, \quad V_N = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \mathcal{R}_{oi}^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

4 幅度 GML 检测

由式(5), 式(9)可知: H_0, H_1 两种假设下观测信号 \mathcal{R}_o 的概率密度分布不一样, 即两种假设下回波信号的幅度特征不相同。文献[11]研究认为: 随着目标信噪比的增加, 固定幅度目标与瑞利目标之间的 J-散度距离(J-divergence distance)逐渐变大, 即信噪比越高, 两类目标的差异越大, 越容易区分; 而瑞利目标与 Swerling III 或 IV 型目标的 J-散度距离比较小, 可分性较差, 这一点文献[12]进行了详细的分析, 具体结论如图 1 所示。根据拖曳式诱饵干扰原理, 通常干扰压制比(诱饵信号功率与目标回波功率的比值) K 取 $2 \sim 10$ [5]。因此当诱饵存在时, 雷达接收回波信号中诱饵干扰成分所占比重远大于目标回波成分, 即固定幅度的回波占据了雷达接收回波信号的主体部分。则由图 1 的结论可知, H_1 与 H_0 两种假设下的雷达接收回波之间的 J-散度距离比较大, 即在回波幅度特征上两种假设是具有可分性的。

对于诱饵的存在性检测, 根据两种假设下观测幅度的概率分布可建立如下广义似然比

$$T(\{\mathcal{R}_{oi}\}_{i=1}^N) = \frac{\prod_{i=1}^N f(\mathcal{R}_{oi} | H_1, \mathcal{R}_F = \tilde{\mathcal{R}}_F, \mathcal{R}_R = \tilde{\mathcal{R}}_R)}{\prod_{i=1}^N f(\mathcal{R}_{oi} | H_0, \mathcal{R}_R = \tilde{\mathcal{R}}_R)} \quad (11)$$

其中 $\tilde{\mathcal{R}}_R, \tilde{\mathcal{R}}_F, \tilde{\mathcal{R}}_F$ 分别由式(6), 式(10)计算获得, N 为雷达发射的独立脉冲数目。

将式(5)和式(9)代入式(11), 对其取自然对数并利用贝塞尔函数的一阶近似展开, 可得

$$\begin{aligned} \bar{T}(\{\mathcal{R}_{oi}\}_{i=1}^N) &= \ln \left[\frac{\prod_{i=1}^N \{f(\mathcal{R}_{oi} | H_1, \tilde{\mathcal{R}}_F, \tilde{\mathcal{R}}_R)\}}{\prod_{i=1}^N \{f(\mathcal{R}_{oi} | H_0, \tilde{\mathcal{R}}_R)\}} \right] \\ &\approx \ln(Y_N) - \ln(\tilde{\mathcal{R}}_R + 1) + 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\mathcal{R}_{oi} + \tilde{\mathcal{R}}_F}{\tilde{\mathcal{R}}_R + 1} \\ &\quad - \frac{1}{2} \ln(2\pi) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{\mathcal{R}_{oi} \tilde{\mathcal{R}}_F}}{\tilde{\mathcal{R}}_R + 1} \right) \\ &\quad - \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{2\sqrt{\mathcal{R}_{oi} \tilde{\mathcal{R}}_F}}{\tilde{\mathcal{R}}_R + 1} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

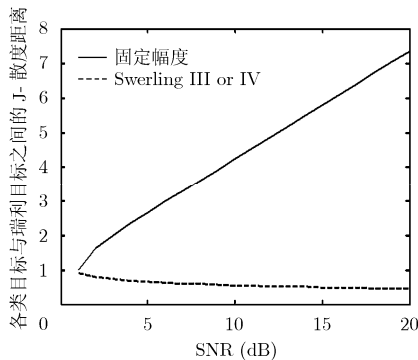


图 1 各类目标与瑞利目标之间的 J-散度距离特性

根据虚警要求确定相应门限 λ , 则可以得到拖曳式诱饵存在性检测的 GML 判决准则为

$$\sigma(\{\mathcal{R}_{oi}\}_{i=1}^N) = \begin{cases} H_0, & \bar{T}(\{\mathcal{R}_{oi}\}_{i=1}^N) \leq \lambda \\ H_1, & \bar{T}(\{\mathcal{R}_{oi}\}_{i=1}^N) > \lambda \end{cases} \quad (13)$$

根据上述算法可以建立雷达导引头拖曳式诱饵存在性检测流程如图 2 所示。

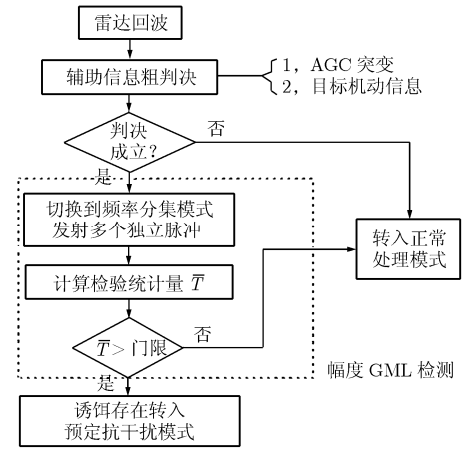


图 2 拖曳式诱饵存在性检测流程图

图 2 中, 回波信号先经过粗判决, 再进行相关处理。粗判决的目的是利用辅助信息, 如诱饵存在引起回波功率陡增导致的 AGC 突变、其他设备或途径获得的目标机动信息以预估诱饵释放等, 预先粗略判断发生诱饵干扰的可能以便选择处理模式, 剔除不必要处理代价, 确保导引头工作的连续性。粗判决成立后, 转入幅度 GML 检测。当检验统计量超过设定门限时, 判定诱饵干扰存在, 转入预定抗干扰模式。粗判决不成立或者检验统计量没有超过门限, 则判定没有发生干扰, 转入正常处理模式。

5 仿真实验

仿真实验 1 设目标为 Swerling II 型, 目标与诱饵始终位于导引头雷达波束内, 诱饵干扰信号的幅度在一次仿真中固定不变, 大小由压制比 K 确定。考察不同脉冲个数下虚警概率与检测门限的关系。目标信噪比 $R_R = 7$ dB, N 表示检测使用的独立脉冲个数。

从图 3 可得, 检测中所使用独立脉冲个数越多, 相同虚警概率对应的检测门限值越小。

仿真实验 2 参数设置同实验 1, 考察幅度 GML 检测算法的检测性能与目标信噪比之间的关系。仿真中设置的检测门限对应的理论虚警概率为 0.01, 干扰压制比设定为 $K=4$ 。目标信噪比 R_R 取 $0 \sim 13$ dB。结果如图 4 所示。从图中可以看出, 虽然

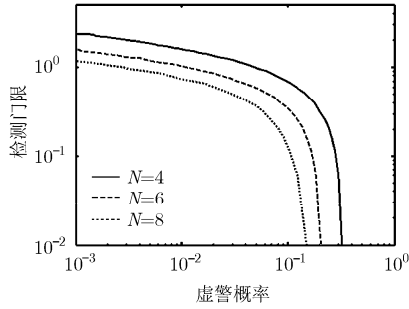


图 3 虚警概率与检测门限的关系 ($R_R = 7$ dB)

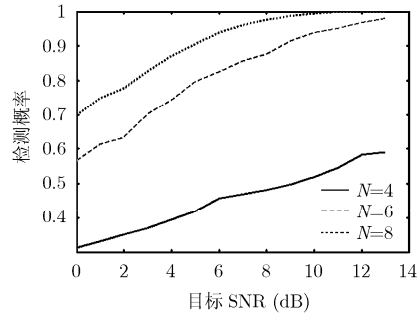


图 4 检测概率与目标信噪比的关系

由于压制比 K 固定使得回波中诱饵的固定幅度成分所占的比重没有发生变化，但是随着目标信噪比的增加，回波总的信噪比也随之增大，因此导致检测概率也随之增加。当目标信噪比为 5 dB 时，使用 6 个独立脉冲可以达到 70% 的检测概率，8 个独立脉冲则可以实现 85% 的检测概率。当目标信噪比增大到 7 dB 时，使用 6 个和 8 个独立脉冲可以分别达到 80% 和 90% 的检测概率。当信噪比达到 10 dB 及以上时，使用 6 以上脉冲获得的检测性能已经能够满足对诱饵正确检测的要求。从图中还可看出，脉冲数过少，即使目标的信噪比很高也很难获得比较好的检测性能。

仿真实验 3 参数设置同实验 1，考察各种干扰压制比、不同脉冲个数条件下检测算法的性能。 R_R 、 R_F 分别为目标和诱饵的回波信噪比， N 为脉冲个数，蒙特卡罗仿真 10000 次。

从图 5 可以看出，随着压制比的增加，检测概

率逐渐增大。当 $K=1$ 时，算法的检测概率很低。主要原因是： $K=1$ 时目标与诱饵的功率相等，因此在雷达接收回波中固定幅度的回波并不占优。根据文献[11]，这种情况下 H_1 与 H_0 两种假设之间的 J-散度距离很小，二者可分性不强，导致检测概率较低。 $K=2$ 时，即诱饵功率为目标 2 倍时，回波中的诱饵干扰成分大于目标成分，检测性能得到一定提升。此时在 0.03 的虚警水平下，使用 6 个脉冲可以达到 70% 的检测概率。当压制比增大到 $K=4$ 时，回波中诱饵成分逐渐占据了主体，两种假设之间的可分性随之增强。此时在 0.01 的虚警水平下，使用 6 个脉冲可以达到 80% 的检测概率。当压制比进一步增大到 $K=8$ 时，此时诱饵干扰功率远大于目标回波功率，接收回波中固定幅度成分已经占据了绝大部分，并且回波总信噪比很高，因此检测性能得到很大提高。此时使用 4 个脉冲在 0.01 的虚警水平下就可以达到 75% 的检测概率，而使用 6 个或 8 个脉冲时，

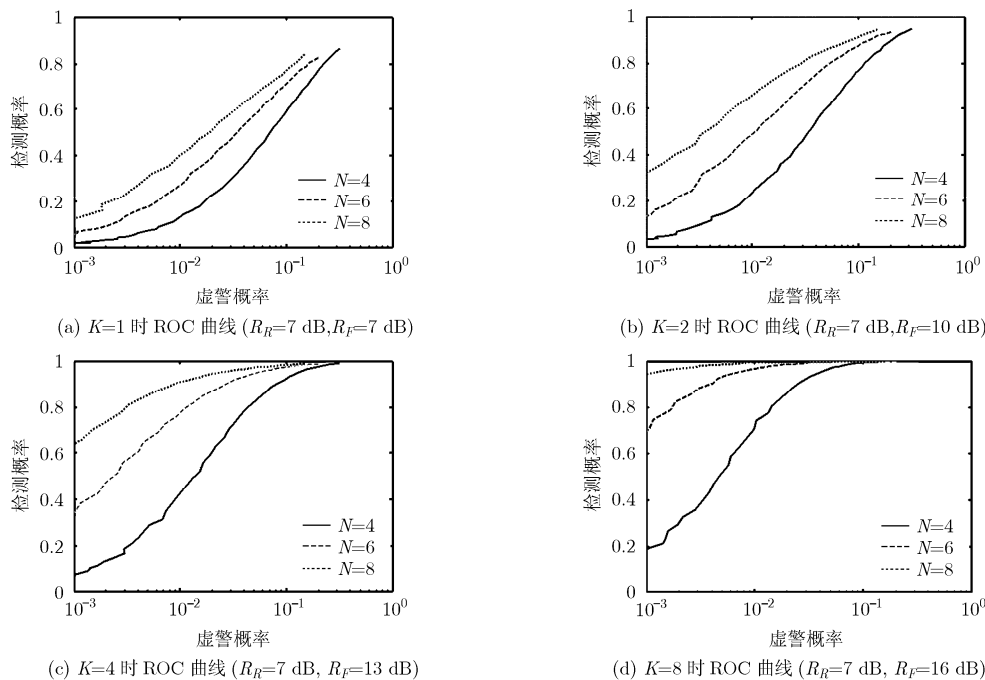


图 5 不同压制比条件下的检测器 ROC 曲线

检测概率已经达到 90%, 此时完全能够实现对拖曳式诱饵的正确稳定检测。

6 结束语

波束内存在/不存在拖曳式诱饵, 这两种情况下雷达回波的构成以及幅度特征是不相同的。本文通过分析目标和诱饵的回波特性, 提出了幅度 GML 检测算法, 建立了存在性检测流程。仿真实验表明本文提出的方法能够实现典型场景下拖曳式诱饵的检测。同时应该看到, 目前各国正在研制的各种新型诱饵已经能够利用先进技术实现信号的 RCS 调制, 即能够逼真模拟目标回波的 Swerling 分布。对于这类新型诱饵, 幅度 GML 检测算法将受到巨大挑战。因此针对新型诱饵的存在性检测需要挖掘新的差异特征。波束内诱饵与目标同时存在带来的角闪烁效应和距离闪烁效应就是很有潜力的可用特征, 将在后续工作中进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 张文俊译. 新一代先进诱饵发挥出巨大作用[J]. 电子侦察干扰, 2001, (2): 39-42.
 - [2] 耿艳, 白渭雄, 苗松娟. 两点源对单脉冲雷达角度欺骗干扰的仿真与分析[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(7): 151-157.
Geng Yan, Bai Wei-xiong, and Miao Song-juan. Simulation and analysis of the angle deception jamming of dual sources on monopulse radar [J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35(7): 151-157.
 - [3] 侯向辉, 刘晓东, 李仙茂. 拖曳式诱饵诱骗防空导弹探讨[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 40-43.
Hou Xiang-hui, Liu Xiao-dong, and Li Xian-mao. Discussion of towed decoy deceiving air-defence missile [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2010, 33(1): 40-43.
 - [4] 白渭雄, 李爱飞, 李树斌. 雷达诱饵的干扰仿真及分析[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(4): 53-57.
Bai Wei-xiong, Li Ai-fei, and Li Shu-bin. Simulation and analysis of radar decoy jamming [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2008, 23(4): 53-57.
 - [5] 白渭雄, 唐宏, 陶建峰. 拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰分析[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(6): 39-42.
Bai Wei-xiong, Tang Hong, and Tao Jian-feng. Analysis of towed decoy jamming on monopulse radar [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2007, 22(6): 39-42.
 - [6] 范文同, 王星, 叶广强. 机载拖曳式有源诱饵作战效能研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(3): 10-12.
Fan Wen-tong, Wang Xing, and Ye Guang-qiang. Combat effectiveness study for airborne towed radar active decoy [J]. *Modern Electronic Technique*, 2010, 33(3): 10-12.
 - [7] 李阳, 温靖, 刘鹤. 基于长时间相参积累的拖曳式诱饵分辨算法[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(7): 618-621.
Li Yang, Wen Jing, and Liu He. Resolving towed decoy based on long-term coherent integration [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(7): 618-621.
 - [8] 白渭雄, 焦光龙, 付红卫. 拖曳式诱饵对抗技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 579-582.
Bai Wei-xiong, Jiao Guang-long, and Fu Hong-wei. Study on antagonistic technology of towed decoys [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(3): 579-582.
 - [9] 廖云, 何松华, 张军. 脉冲多普勒雷达抗拖曳式干扰方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(5): 325-328.
Liao Yun, He Song-hua, and Zhang Jun. Method research on monopulse Doppler radar countering towed decoy jamming [J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(5): 325-328.
 - [10] Blair W D and Brandt-Pearce M. Unresolved Rayleigh target detection using monopulse measurements [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(2): 543-552.
 - [11] Blair W D and Brandt-Pearce M. Discrimination of targets and RGPO echoes using frequency diversity[C]. Proceeding of the 28th Southeastern Symposium on: System Theory, Cookeville, USA, 1996: 280-284.
 - [12] Blair W D and Brandt-Pearce M. Estimation and discrimination for swerling targets[C]. Proceeding of the 29th Southeastern Symposium on: System Theory, Baton Rouge, USA, 1997: 509-513.
- 宋志勇: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理与抗干扰技术。
肖怀铁: 男, 1966 年生, 教授, 研究方向为雷达目标识别、智能信息处理。