

雷达常见干扰及抗干扰应对方案分析

金毅仁¹

JIN Yiren

摘要

雷达干扰与雷达抗干扰是雷达技术领域的两大核心研究方向，二者互为矛盾又相互促进，共同推动技术发展。文章围绕雷达的有源干扰与无源干扰形式，详细阐述了在雷达天线、发射机、接收机及信号处理等关键环节采用的抗干扰应对措施，并结合具体雷达型号，开展了抗干扰实现方案的相关设计。雷达天线部分采用副瓣对消、副瓣匿隐辅助天线技术；接收机部分运用多接收通道、频率捷变等技术；发射机部分针对捷变策略，实现发射频率、脉冲宽度、重复周期的在线编辑，并采用掩护脉冲技术；信号处理部分则对副瓣对消、副瓣匿隐进行相关处理，同时通过脉冲压缩、恒虚警（CFAR）、动目标显示（MTI）、动目标检测（MTD）等技术抑制干扰信号。目前该型号雷达已投入实际应用，在常规运行及任务执行过程中，展现出良好的抗干扰性能。

关键词

有源干扰；无源干扰；副瓣对消；副瓣匿隐；频率捷变；恒虚警；脉冲压缩；动目标显示；动目标检测

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.12.027

0 引言

随着科技不断进步，雷达技术也得到快速发展。同时，雷达生存的电磁环境日益恶劣，出现了各种干扰手段对抗雷达目标观测，使雷达无法观测、跟踪目标或无法获取目标的错误参数信息。

雷达目前不仅要在电磁环境中发现目标、识别目标，还要保证自身在复杂的电磁环境中得以生存。面对形式多样的雷达干扰技术，雷达抗干扰技术应运而生。雷达对抗恶劣电磁环境的能力，是判断雷达技术性能的准则之一，也是当前

雷达发展的重要趋势^[1]。

1 概述

电子对抗ECM技术采用相关技术破坏雷达的正常工作，使其不能正常探测和跟踪目标；或采用某些措施掩盖真实目标，或制造虚假目标对雷达观测进行迷惑，从而对雷达观测进行干扰^[2]。

按照雷达干扰信号产生的方式来划分，可以分为有源干扰和无源干扰。在对雷达进行有源干扰时，干扰方通过干扰设备发射电磁波信号或转发电磁波信号，对雷达观测产生干扰或欺骗^[3]；在对雷达进行无源干扰时，干扰方释放干扰物，如箔条、诱饵等，通过干扰物改变雷达电磁波信号的传播路

1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所 安徽合肥 230088

题，引入 VMD 变分模态、FE 模糊熵技术融合的电网故障预测方案，结合改进 CNN-SVM 卷积神经网络模型对故障相电压 / 电流信号分量特征作出提取分类，可大幅提升故障诊断的精准性与可靠性。

参考文献：

- [1] 李立江, 林海, 王佳, 等. 基于行波理论的输电线路故障诊断方法研究 [J]. 软件工程, 2022, 25(7): 9-14.
- [2] 刘辉, 李永康, 高放, 等. 基于小波散射协同 BiLSTM 的输电线路故障诊断 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 165-172.

[3] 瞿海保, 王兴志, 葛敏辉, 等. 基于改进卷积神经网络的输电线路故障诊断方法 [J]. 电气自动化, 2021, 43(2): 105-108.

[4] 闫伟. 智能诊断方法在电力变压器故障识别中的应用 [J]. 石化技术, 2020, 27(9): 241-278.

【作者简介】

程开文（1990—），男，湖北黄冈人，本科，工程师，研究方向：输电线路。

夏婕（1990—），女，江西九江人，硕士研究生，工程师，研究方向：电力电子。

（收稿日期：2025-10-22 修回日期：2025-12-10）

径,从而对雷达观测产生干扰。

根据雷达干扰信号的性质来划分,可以分为压制性干扰和欺骗性干扰。在对雷达进行压制性干扰时,干扰方通过干扰设备发射大带宽的干扰信号,或者在雷达观测空域布置或投掷大量干扰物,使得雷达目标回波信号湮没在干扰信号当中,无法对目标信号进行识别辨认;在对雷达进行欺骗式干扰时,数字射频存储器 DRFM 干扰设备获得雷达发射信号后,将雷达发射信号恢复并调制转发,干扰设备能逼真地模拟出雷达回波信号,从而使得雷达在观测中无法有效获得真实目标的相关参数^[4]。

针对雷达观测中可能出现的多种干扰问题,电子反对抗 ECCM 技术在雷达天线、发射、接收、信号处理系统等方面针对有源干扰和无源干扰提出了反干扰和自卫措施。

2 雷达抗干扰相关措施

雷达在进行正常工作时,常需要对抗外界对雷达产生的有源干扰和无源干扰。在有源干扰信号进入雷达接收机之前,常采用天线相关技术、工作频率快速变化等方式实现对有源干扰进行抑制,干扰信号进入接收机之后,采用处理技术使得雷达接收机输出的信号信噪比最优^[5]。雷达对抗无源干扰时,通过目标信号和干扰信号之间运动速度的不同,采用恒虚警 CFAR、动目标显示 MTI、动目标检测 MTD 等技术来抑制无源干扰。

2.1 雷达天线采用措施

(1) 减小雷达天线副瓣电平

在雷达天线设计中,通过缩小天线主波束的宽度,减小天线的副瓣电平,能有效降低噪声对雷达的干扰。目前,雷达大多采用低副瓣、超低副瓣天线。天线的第一副瓣低于 $-35\sim-30$ dB,远区副瓣低于 $-50\sim-45$ dB。

(2) 采用副瓣对消技术

副瓣对消技术在雷达天线设计时,采用主天线和辅助天线综合设计。由于辅助天线主瓣宽,增益较低,略大于主天线副瓣的增益,辅助天线接收目标信号较小,可认为辅助天线只接收干扰信号。将主天线接收到的信号与从辅助天线接收到的信号相减,达到抑制副瓣进入干扰信号的问题。一般一部雷达采用多个辅助天线应对多个方向的干扰源,实现多方向的干扰对消。

(3) 采用副瓣匿隐技术

副瓣匿隐同样采用辅助天线设计,辅助天线增益大于主天线副瓣增益。比较主天线和辅助天线进入的信号,小于辅助通道的信号,作为干扰信号处理。

(4) 变换天线波束极化方式

改变雷达天线波束极化的方式,可以有效改善干扰信号

对雷达的影响^[6]。当雷达波束的极化方向与干扰信号的极化方向正交时,可以将进入雷达的干扰信号大幅度降低,从而不形成有效的干扰。

2.2 雷达发射机采取措施

通过雷达噪声干扰背景下的雷达方程可知,雷达平均辐射功率和工作频带宽度是雷达发射机实现抗干扰的两个重要参数^[7]。

雷达发射机为了提高雷达反干扰的能力,除了可以发射高功率的射频信号以外,雷达发射机发射出去的射频信号也可以采用多样化的形式。通常采用的形式是:雷达发射频率可变、发射脉冲宽度可变、发射脉冲重复频率可变、发射信号的调制方式可变等。

2.3 雷达接收机采用措施

(1) 增加接收机工作带宽

雷达接收机应尽量增加工作带宽,雷达的工作带宽越大,雷达干扰设备的带宽也要相应增加,从而降低单位带宽上的干扰功率。

(2) 接收机大动态设计

当雷达目标信号有足够的强度时,接收机大动态范围设计能保证雷达从噪声干扰的背景下检测出目标。

(3) 多通道设计

接收机采用多通道设计,除了设计正常工作的接收通道,还需要增加另外的接收通道,比如说副瓣匿隐通道、副瓣对消通道实现雷达反干扰。

2.4 雷达信号处理采用措施

(1) 对应天线设计中的副瓣对消和副瓣匿隐,进行信号处理相关设计。

(2) 采用脉冲压缩技术

雷达在观测目标过程中,雷达发射脉冲的宽度越窄,则距离分辨力就越高;雷达发射脉冲越宽,则平均发射功率就越高,雷达探测距离就越大。为了兼顾雷达的探测距离和距离分辨力,雷达工作时,发射大时宽、大带宽信号,大时宽信号能提高雷达的探测距离,大带宽信号通过脉冲压缩技术变成窄脉冲信号,从而兼顾了雷达的距离分辨力。

大时宽大带宽信号经过脉冲压缩滤波器,得到高距离分辨力的窄脉冲信号。通常会在脉冲压缩滤波器后级联副瓣抑制滤波器来降低脉冲压缩后输出信号的副瓣。

(3) 采用恒虚警 CFAR 技术

恒虚警 CFAR 技术采用自适应门限代替固定检测门限,避免大量漏警和虚警现象的发生。自适应门限会随着雷达目标的噪声、地物杂波、干扰背景下等做自适应调整,保证虚警概率恒定。在不同噪声、地物杂波、干扰背景下,采用不

同的恒虚警检测器, 保证虚警概率恒定的同时, 获得较好的雷达目标检测效果。

(4) 采用 MTI 技术和 MTD 技术

动目标显示 MTI 技术采用各种滤波器, 如: 杂波对消器、MTI 滤波器等, 动目标检测 MTD 技术使用多普勒滤波器组, 对杂波信号进行抑制, 提高雷达信号从杂波中检测出来的能力。

3 某雷达抗有源干扰相关实现

某波段雷达的主要作战对象是弹药目标, 其特点为反射截面积积极小, 雷达探测区域杂波强。另外电子对抗在战争中的作用越来越重要, 该雷达面对的干扰主要包括有源和无源干扰。为实现对目标的有效探测, 对雷达的杂波抑制能力和抗有源干扰能力都提出了很高的要求。该雷达具备对雷达周围的电磁环境进行监测的能力, 当雷达遭受干扰时, 系统自动采取频率捷变、自适应滤波等抗干扰手段。

3.1 天线设计

(1) 副瓣对消

副瓣对消属于空域自适应滤波, 通过采用自适应副瓣对消技术, 设置一个高增益雷达主阵面, 多个低增益辅助天线, 辅助天线的天线增益与雷达主天线第一副瓣增益保持相当, 从而实现副瓣对消的处理^[8]。

(2) 副瓣匿隐

匿隐天线单元采用与主阵面一致的单元, 在主阵面左侧加 1 列多单元的直线阵作为匿隐天线。匿隐天线的天线增益大于主天线的副瓣增益, 对从主天线和匿隐天线进入的信号进行比较, 比进入匿隐天线信号小的信号, 均当作干扰信号不做输出处理。

副瓣匿隐技术通过比较匿隐天线的信号电平判断是否有干扰信号进入, 主天线的输出与匿隐接收通道的输出信号进行比较, 当匿隐天线的输出电平大于主天线的输出电平, 则判决此时存在脉冲式有源干扰并关断主天线的输出信号, 从而对抗脉冲式有源干扰。

3.2 发射设计

该雷达采取软件化设计思想, 根据工作参数的任意搭配具有多种波形组合, 并且针对高级用户, 开放了工作波形在线可编辑界面, 可以在线编辑雷达的抗干扰波形, 实现波形的脉冲宽度、重复周期 (满足雷达占空比前提下)、信号形式进行在线编辑, 针对平时和战时不同的使用要求, 按照相应的捷变规则自动变化雷达发射频率、脉冲宽度、重复周期及调制形式。

另外, 该雷达发射时在主脉冲波形里加入射频掩护脉冲, 射频掩护脉冲与主脉冲在同一个脉冲重复周期内, 其工

作频点和脉冲宽度均不同于主脉冲波形, 用射频掩护脉冲诱骗干扰机干扰射频掩护脉冲工作频带, 从而降低干扰机的干扰效果。

3.3 接收设计

该雷达系统在工作时, 可实时对雷达工作扇区内环境信号频谱特征进行分析。当雷达受到窄带干扰时, 可通过频率捷变, 将雷达工作频率迅速调整到不受干扰的频率, 避开干扰信号对雷达的影响^[9]; 当雷达受到宽带干扰时, 对干扰信号噪声频谱进行分析, 从当中选择受干扰影响较小的频率保证雷达继续工作。

在进行上变频通道设计时, 上变频通道输入来自波形产生的输出信号, 将其上变频至该雷达的发射频率, 放大后送给有源天线发射。上变频可在某范围内以步长 100 MHz 跳频, 保证发射信号中心频率可变。射频信道带宽 2 000 MHz。

设计接收通道共 8 路, 其中 4 路接收的回波为天线阵面 768 个单元合成后的信号, 另外 4 路分别接收来自匿隐天线和对消天线的回波。

该雷达接收机对跳频时间要求 $\leq 2 \mu\text{s}$, 系统窄带接收链路瞬时动态可大于 50 dB, 总动态可大于 70 dB。

3.4 信号处理设计

(1) 副瓣对消处理

利用辅助天线接收干扰信号, 通过信号处理的相关处理, 将主天线接收信号中的干扰信号对消掉, 从而起到抑制干扰的效果。

利用一组天线接收的干扰信号, 对消主天线接收信号中的干扰信号, 从而起到抑制干扰的效果。自适应天线副瓣对消如图 1 所示。

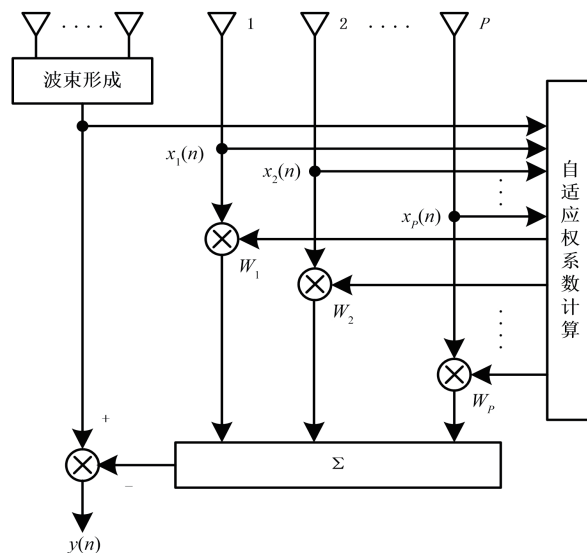


图 1 自适应天线副瓣对消处理

P 个辅助天线接收到干扰信号表示为:

$$\mathbf{x}(n) = [\mathbf{x}_1(n) \mathbf{x}_2(n) \dots \mathbf{x}_p(n)]^T \quad (1)$$

干扰信号的自相关矩阵为:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)] \quad (2)$$

自适应副瓣对消系数矢量为:

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Q}^* \quad (3)$$

式中: $\mathbf{C}$ 为常数。

主天线接收信号为 $\mathbf{x}_0(n)$; 干扰信号矢量为 $\mathbf{x}(n)$; $\mathbf{x}_0(n)$ 和 $\mathbf{x}(n)$ 的互相关矢量为 $\mathbf{Q}$, 其公式为:

$$\mathbf{Q} = E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}_0^*(n)] \quad (4)$$

自适应副瓣对消输出 $y(n)$ 为:

$$y(n) = \mathbf{x}_0(n) - \mathbf{W}^T \mathbf{x}(n) \quad (5)$$

通过系统自适应地调整辅助通道的增益和相位, 使辅助天线对干扰信号的响应与主天线对干扰信号的响应保持一致, 当主通道与辅助通道相减后, 干扰信号的输出趋向于零, 从而使得干扰信号对雷达目标信号产生最小的影响。

(2) 副瓣匿隐处理

通过比较主天线的输出与匿隐接收通道的输出信号, 当匿隐天线的输出电平大于主天线的输出电平, 则判决此时存在脉冲式有源干扰并关闭主天线的输出信号, 如图 2 所示。

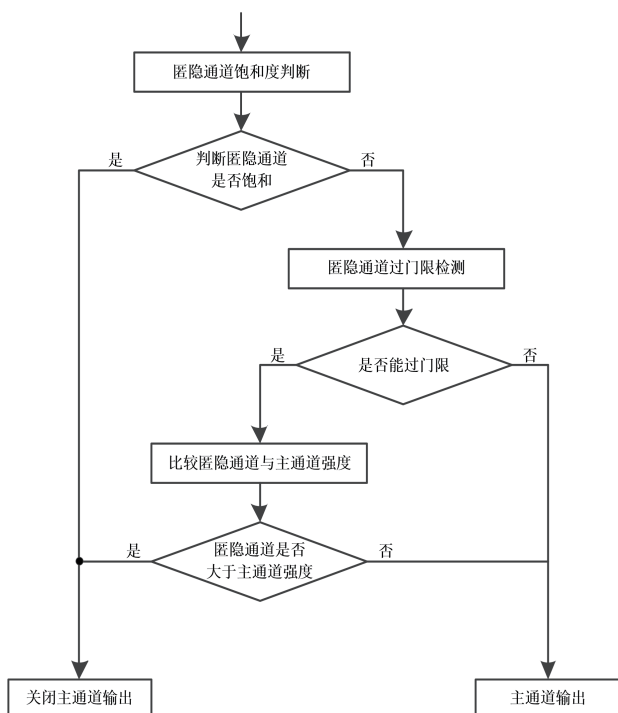


图2 副瓣匿隐处理流程

(3) 脉冲压缩处理

脉冲压缩常使用时域脉冲压缩方法和频域脉冲压缩方

法。本雷达采用频域脉冲压缩方法, 其公式为:

$$S_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s_i(n) e^{-j2\pi nk/N} \quad (6)$$

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi nk/N} \quad (7)$$

式中: $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

输出信号 $s_o(n)$ 为 $S_i(k)$ 和 $H(k)$ 乘积的逆离散傅里叶变换:

$$s_o(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_i(k) H(k) e^{j2\pi nk/N} \quad (8)$$

式中: $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

设计中采用高性能服务器作为硬件平台, 采用频域脉冲压缩方法运算效率较高, 如图 3 所示。

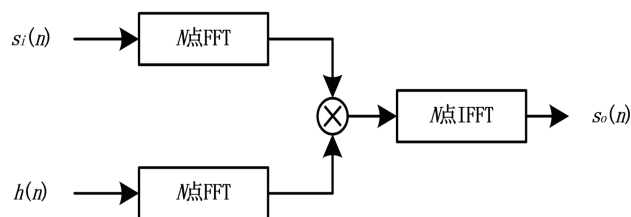


图3 频域脉冲压缩方法

脉冲压缩滤波器的输出信号容易形成较大的副瓣, 为了降低输出信号的副瓣, 在脉冲压缩滤波器后端级联加权函数的副瓣抑制滤波器。当然, 对于线性调频信号, 在采用加权处理降低输出信号副瓣的同时, 会引起信噪比的降低和主瓣的展宽, 从而降低雷达的作用距离和雷达的距离分辨力。

(4) 恒虚警处理

在杂波背景下, 当采用窄带滤波器组的方式抑制强杂波时, 避免检测时不同速度目标之间以及杂波与目标之间的相互影响, 同时可以消除多普勒旁瓣导致的虚警; 采用多普勒频率与时间两维方向的 CFAR 处理, 扩展为恒虚警处理, 可避免检测时不同速度目标之间以及杂波与目标之间的相互影响。两维的 CFAR 处理可以采用 CA-CFAR 或者 GO-CFAR、SO-CFAR 同时处理, 根据不同的杂波环境选择不同的处理方法。单元平均恒虚警如图 4 所示。

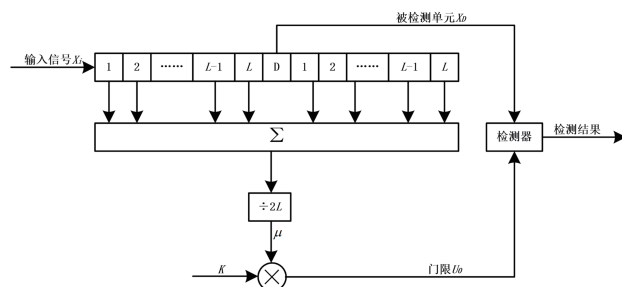


图4 单元平均恒虚警检测器

单元平均恒虚警 CA-CFAR 检测器设置 $2L$ 个参考单元, 所有参考单元中的 x 值求和再求平均得到被检测单元杂波下的均值 μ , 检测门限 $U_0 = K\mu$, 调整 K 的大小可改变检测门限。

两侧选大 / 选小恒虚警检测器设置选择开关, 选择两侧单元平均选大恒虚警 GO-CFAR 检测器和两侧单元平均选小恒虚警 SO-CFAR 检测器。如图 5 所示。

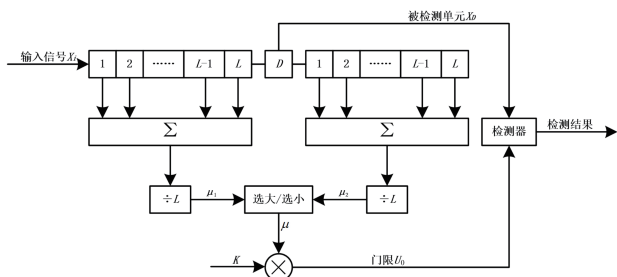


图 5 两侧选大 / 选小恒虚警检测器

单元平均恒虚警 CA-CFAR 检测器适用于均匀杂波背景, 在杂波边缘会出现虚警上升的现象, 在多目标环境下检测器的检测性能下降; 两侧单元平均选大恒虚警 GO-CFAR 检测器在均匀杂波背景和杂波边缘有较好的检测效果, 在多目标环境下检测器的检测性能下降; 两侧单元平均选小恒虚警 SO-CFAR 检测器在多目标环境下检测效果较好, 在均匀杂波背景和杂波边缘检测性能下降。

杂波统计特征符合高斯分布, 幅度概率密度符合瑞利分布时, 可采用上述恒虚警检测器。当雷达杂波统计特征是非高斯分布的, 在进行恒虚警处理时, 需要采用非高斯杂波背景下的恒虚警检测器。

(5) MTI 和 MTD 处理

针对不同的使用场景, 本雷达可采用 MTI 及 MTD 技术, 将目标从杂波背景下检测出来。I/Q 信号形成和波束、方位差波束、俯仰差波束, 信号经过脉冲压缩、MTI、MTD、CFAR 处理后, 进行点迹处理和参数估计, 具体如图 6 所示。

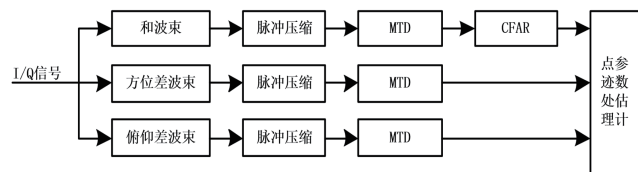


图 6 MTI 和 MTD 处理

在 MTI 处理过程中, 采用低通 FIR 滤波器进行设计, 有效抑制杂波, 并保证目标信号能正常通过。在设计中常采用特征矢量法对滤波器进行设计。设计中通过对杂波自相关矩阵的特征分解, 获得最小特征值, 并利用最小特征值所对应的特征矢量形成滤波器系数, 最大限度地对杂

波进行抑制。

在 MTD 处理过程中, 采用优化的 FIR 滤波器代替传统的对消器级联 FFT 滤波器结构。超低副瓣滤波器组通过切比雪夫加权, 实现高主副瓣比, 同时通过修改滤波器组中滤波器的个数, 改善主瓣展宽的问题^[10]。

4 结语

对雷达实施干扰及雷达如何抵制干扰, 是雷达电子对抗中一个关注的焦点, 也是世界各国在雷达领域重点研究的问题。本文针对雷达有源干扰和无源干扰问题进行了介绍, 并对如何对抗干扰的措施进行了相关描述。结合某波段雷达, 对抗干扰问题开展了相关设计。在设计中, 采用了副瓣对消、副瓣匿隐、频率捷变、脉冲压缩、恒虚警、MTI、MTD 等技术。目前, 该雷达已经投入实际使用, 应用效果良好。

参考文献:

- [1] 王小谟, 匡永胜, 陈忠先, 等. 监视雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [2] 张永顺, 童宁宁, 赵国庆. 雷达电子战原理 (第三版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- [3] 周红平, 王子伟, 郭忠义. 雷达有源干扰识别算法综述 [J]. 数据采集与处理, 2022, 37(1): 1-20.
- [4] 姚杰平. 雷达抗有源干扰的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [5] 周利华. 雷达干扰信号分析技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [6] 赵国庆. 雷达对抗技术 (第二版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [7] 张洋, 杨超, 谭世川, 等. 雷达干扰六要素 [J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(5): 57-61.
- [8] 张祖稷, 金林, 束咸荣, 等. 雷达天线技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [9] 王跃鹏, 同武勤. 现代雷达电子对抗技术 [J]. 现代防御技术, 2005(2): 53-55.
- [10] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

【作者简介】

金毅仁 (1978—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 计算机控制技术, email: 66975461@qq.com.

(收稿日期: 2025-06-29 修回日期: 2025-12-05)