

基于电子对抗环境的导引头制导 干扰集成技术研究

田冠锁, 马 召, 段婧婧, 周国哲

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 在电子对抗环境中, 综合利用多种频谱资源能够拓展飞行器的功能。从分析电子对抗环境入手, 介绍了典型干扰的基本组成、特性和研究现状, 并初步阐述了电子对抗环境对飞行器造成的威胁。通过分析雷达制导技术和典型干扰技术, 结合雷达与电子战的一体化设计思路, 提出了飞行器雷达制导与干扰一体化设计方法。该方法利用飞行器雷达导引头在进行探测、制导的同时, 实现对高威胁辐射源的干扰。经分析, 该方法在拓展飞行器雷达导引头的功能方面具有重要的作用, 能够为优化飞行器总体设计提供支撑。

关键词: 制导; 干扰; 一体化

中图分类号: V44

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 03-0001-06

Research on Integrated Technology of Seeker Guidance Jamming in Continuous Electronic Countermeasure Environment

TIAN Guansuo, MA Zhao, DUAN Jingjing, ZHOU Guozhe

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In the electronic countermeasure environment, the use of a variety of spectral resources can expand the function of the aircraft. Beginning with the analysis of electronic countermeasure environment, this paper introduces the basic situation and research status of electronic countermeasure environment, and preliminarily expounds the typical electromagnetic threat environment. Based on the analysis of radar guidance technology and typical jamming technology, combined with the design idea of radar and Electronic Warfare (EW), an integrated design, capable of both radar guidance and jamming, is put forward. The use of aircraft radar seeker can achieve interference of high threat radiation source, as well as detecting and guiding at the same time. The technology plays an important role in expanding the function of the radar seeker of aircraft, and provides the support for optimizing the overall performance of aircraft.

Key words: Guidance; Jamming; Indication

0 引言

未来信息化战争将是“陆、海、空、天、电”

五维一体的联合作战, 电磁维度的争夺将贯穿战争全过程。未来战场上, 战场侦察、信息传输主要依靠卫星、预警机、侦察机和无人飞行器等设

收稿日期: 2018-07-21; 修订日期: 2018-12-03

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2016203B115)

作者简介: 田冠锁 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器电子对抗。E-mail: 459701487@qq.com

备支撑起的信息网络来提供。这种电磁环境效应直接影响飞行器的生存能力和使用效能。现代电子信息装备面临的战场环境十分复杂,主要体现在用频装备种类繁多,电磁环境复杂多变;装备部署统筹难度大,频率冲突加剧^[1],电子对抗环境已成为信息化战场的主要特征之一。在电子对抗环境下,合理、巧妙地利用复杂电子对抗环境,开展飞行器雷达制导干扰一体化技术研究,对提高飞行器的使用效能具有重要的意义。

飞行器雷达制导技术已广泛应用于寻的制导和成像制导,高峰^[1]给出了雷达寻的技术在精确制导武器中的应用,李耀国^[2]给出了飞行器雷达成像制导技术在目标识别上的应用。在雷达制导电子对抗方面,目前的研究主要集中在雷达抗干扰方面,来庆福等^[3]给出利用惯性辅助信息提升雷达制导的抗干扰能力。在雷达制导一体化方面,当前的研究热点主要集中在利用共享天线技术、宽带 T/R 组件技术、共用信号技术实现一体化设计的途径^[4-5]等方面。

本文在此基础上,从复杂电磁环境入手,在分析雷达制导技术与干扰技术的基础上,根据雷达系统和干扰系统的组成及功能相近的特点,提出共用一套硬件实现集成化设计的目的。鉴于相参干扰信号与雷达回波相似程度较高,本文提出了利用雷达指纹特点识别干扰信号回波与雷达信号回波。

1 电子对抗环境及制导干扰一体化现状

电子对抗环境是指电子战双方在感兴趣的特定区域内,由使用各自电磁能的电子战系统构成的信号特性和信号密度的总和。电子对抗环境主要包括自然环境和人为环境^[6]。

自然环境因素包括:雷电电磁辐射源、静电电磁辐射源、太阳系和星际电磁辐射源、地球和大气层电磁场。

人为环境因素包括:敌方针对雷达制导信号实施的压制式干扰或欺骗式干扰,战场上指挥系统、通信系统等无线系统发射的各种电磁信号。

1.1 电子对抗环境的特征

电子对抗环境的特征主要有交织性、动态性和对抗性^[7]等,其中涉及的辐射信号样式纷繁复杂、信号变换密集交叠、电磁能量跌宕起伏。

(1) 信号样式纷繁复杂

随着广播电视、无线通信、民用航空等民用

无线设备的广泛使用,以及测控通信、雷达制导、声纳探测等军用电子信息装备的发展,各种辐射源数量大量增加,电子信息系统的规模越来越庞大。复杂的电子信息系统产生了纷繁复杂的电磁信号样式。

(2) 信号变换密集交叠

在一定的空域、时域、频域上,大量电子信息系统同时集中使用,不同的工作任务将导致工作区域内的电磁信号高度密集和不断变化。另外,新体制以及特殊体制雷达的广泛使用,使得信号种类繁多、波形复杂。在用频设备集中的区域,局限的空间下形成了密集程度较高的辐射信号,这些辐射信号形成电磁环境敏感区,对区域内设备的正常工作造成较大的影响。

(3) 电磁能量跌宕起伏

随着电子信息装备性能的提升,发射功率越来越大。在电磁环境中,由于各种辐射源的随机分布,加上电磁波传播因素的影响,物理空间上的电磁信号能量在有些地方能量集中,有些地方能量分散。随着辐射源的运动和辐射能量的改变,电磁环境表现出实时动态变化的特性,同一位置的电磁能量、电磁信号频率可能时刻不同。

1.2 国内外研究现状

国外在雷达制导、干扰一体化方面已开展了大量的研究,并取得了工程应用。美国的 APG-81 机载火控雷达能够同时承担通信、制导、干扰、探测等任务,系统集成化程度非常高。美国的 AN/ASQ-239 机载专用雷达系统具备侦察、告警、态势感知、环境探测等功能,能够在复杂的电磁环境下,同时处理空中和空地的电子对抗作战任务,可以快速对敌方空中和地面的作战目标进行准确地探测、辨识、跟踪和打击,同时,该电子对抗系统还能够将机载有源电扫相控阵雷达作为一种定向能武器,对敌方雷达和无线传感器进行电子干扰攻击,形成非动能、高功率电磁脉冲软杀伤。

国内由于管理体制的历史原因,雷达、通信、干扰系统一直分属于不同的管理部门,有各自独立的规划与发展,没有作为一个整体系统进行综合、统一的考虑。因此,在雷达、通信、电子战一体化技术方面的发展较慢。当前主要集中在理论研究,在工程应用方面的研究相对较少。“十一五”期间,成都某研究所开展了“雷达干扰与探测一体化技术”预研项目研究,成都某高校开展

了“雷达、通信、电子战一体化新体制研究—雷达电子战一体化体制和共享信号研究”等相关技术研究，取得了较好的理论成果^[8]。

1.3 典型电磁威胁环境

典型电磁干扰威胁环境是研究飞行器雷达制导及干扰系统的重要依据。因此，开展典型电磁威胁环境的研究至关重要。

典型电磁干扰威胁环境主要包括远距离支援干扰、随行支援干扰、相互支援干扰以及自卫式干扰等。

远距离支援干扰是在飞行器作用范围之外，掩护自身突防。通常采用大功率压制干扰机，对目标搜索雷达进行干扰，使其无法测出方位和距离信息。

随行支援干扰与飞行器一起进入作战区域，因而其干扰效果比远距离支援干扰好，但容易受到对方的干扰和打击。因此，采用随行干扰时要特别注意对其保护。

相互支援干扰是飞行器之间相互配合，干扰对方的截获、跟踪雷达。该干扰的优点是通过空间功率合成，可以获得比较大的有效辐射功率。另外，该方法使用灵活，效能发挥显著。

自卫式干扰是飞行器为确保自身的安全及突防能力，干扰敌方的制导、探测雷达，降低或破坏制导系统的探测、跟踪和攻击能力。

综合上述多种干扰的特点可以看出，飞行器雷达制导干扰一体化技术与飞行器自身的飞行轨迹相关性较强，因此可以应用于近程相互支援和自卫式干扰方面。

2 飞行器雷达制导技术

飞行器雷达制导依靠雷达导引头来实现，雷达导引头的工作原理与地面雷达相同，其基本的雷达方程为^[9]

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2 F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

式中， P_r 为接收信号的功率（天线端）， P_t 为发射信号的功率（天线端）， G_t 为发射天线功率增益， G_r 为接收天线功率增益， σ 为雷达目标截面积， λ 为波长， F_t 为从发射天线到目标的方向图传播因子， F_r 为从目标到接收天线的方向图传播因子， R 为雷达到目标的距离。

传统雷达导引头的发射机和接收机通过双工器和天馈系统的和差器相连接，天线的幅相分布

是固定的，天线的波束指向需要由机械伺服系统来完成，天线的方向图无法改变，其组成示意图见图 1。因此，它在性能上存在诸多不足之处。其扫描速度较小，机械伺服系统无法实现边跟踪边扫描^[10]，无法实现导引头功能的拓展。

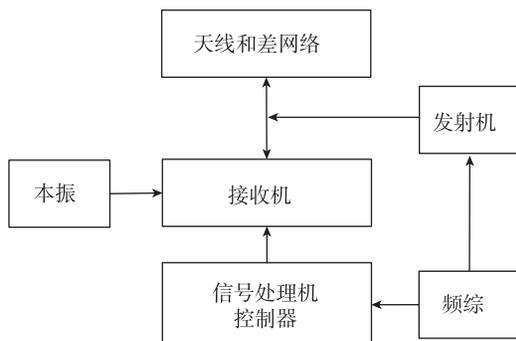


图 1 传统机械雷达组成示意图

Fig. 1 Composition sketch of traditional mechanical radar

相控阵雷达导引头突破了传统雷达导引头的限制，其天线系统本身与传统雷达导引头类似，但是每个天线单元都有一个移相器和衰减器，可以进行天线口面幅度和相位分布调整，实现电扫描和方向图的捷变。天线系统采用强制馈电方式，每个天线单元都有单独的 T/R 组件、移相器和衰减器，每个发射模块的功率直接由天线单元辐射，形成空间功率合成的方向图，其组成示意图见图 2。因导引头的功率不受天馈系统和双工器的限制，只受飞行器电源的约束，可以最大限度地提高发射功率。

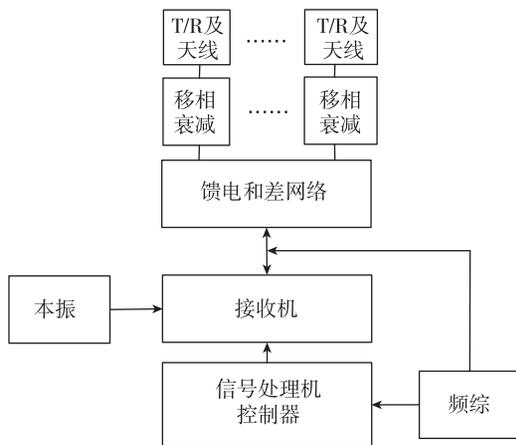


图 2 相控阵雷达导引头组成示意图

Fig. 2 Composition sketch of phased array radar seeker

通过上面的对比分析可以看出，与传统机械雷达导引头相比，相控阵雷达导引头在波束扫描

速度、发射功率方面均具有较大的优势，为拓展导引头的功能，开展雷达制导与干扰一体化设计方面奠定了基础。

3 干扰技术

干扰技术包括无源干扰技术和有源干扰技术。无源干扰技术主要包括箔条、角反射器等；有源干扰技术包括压制式干扰和欺骗式干扰，具体干扰样式有单音干扰、多音干扰、调幅干扰、调频干扰、脉冲干扰和转发干扰^[11]。为了与雷达进行一体化设计，下面对有源干扰技术进行介绍。

3.1 有源压制干扰

有源压制干扰包括噪声压制干扰和相位噪声调制干扰。噪声压制干扰是利用微波放大器将高斯白噪声进行放大，作为干扰信号发射出去。相位噪声调制干扰是在相位上调制高斯白噪声，实现对信号的干扰。

通过采用数字射频存储器 (DRFM) 技术，将接收到的射频输入信号进行存储处理，并采用噪声调制技术，在雷达发射信号处，采用 2 路正交信号作为噪声压制干扰信号的载波，其数学表达式为^[12]

$$S_j(n) = A(n)e^{j\varphi(n)} = A(n)\cos\varphi(n) + jA(n)\sin\varphi(n) \quad (2)$$

式中，包络序列 $A(n)$ 服从瑞利分布，相位序列 $\varphi(n)$ 服从均匀分布。

采用相位噪声调制干扰信号为了可以有效地干扰相参雷达，该方法是将噪声信号直接调制到雷达发射信号上，其数学原理为

$$J(n) = s(n)\exp(jKu(n)) \quad (3)$$

式中， K 为相位噪声调制因子。

3.2 有源欺骗干扰技术

有源欺骗干扰主要包括：距离欺骗干扰和速度欺骗干扰。

雷达通过发射信号与回波信号之间的延时来测量目标距离信息。在进行距离欺骗时，通过干扰雷达信号回波的延时，将距离波门拖离真实目标回波，使雷达无法对目标进行稳定、实时、准确跟踪。利用 DRFM 技术延时控制电路控制 DRFM 电路中数据输出相对于数据存储的延迟时间，控制输出干扰信号相对于雷达发射信号的延迟时间，可以达到距离欺骗干扰的效果。在干扰过程中，延时时间周期性地变化，就可以对雷达的距离拖引进行有效干扰。

雷达对目标运动速度的测量是通过探测回波信号的多普勒频移来实现的。因此，对雷达的速度欺骗干扰可以通过在雷达发射信号上叠加多普勒频移 f_d 来实现。若假设雷达发射信号为

$$S(n) = A(n)\cos[2\pi j_0 n + \varphi(n)] \quad (4)$$

叠加了多普勒频移 f_d 之后的欺骗干扰信号为^[12]

$$S_j(n) = S_I(n)\cos[2\pi f_d n + \varphi(n)] - S_Q(n)\sin(2\pi f_d n) = A(n)\cos[2\pi(f_0 + f_d)n + \varphi(n)] \quad (5)$$

4 制导干扰一体化技术研究

4.1 系统组成

开展飞行器雷达制导、干扰一体化设计，需要在系统的发射端、接收端以及信号处理方面兼容雷达与干扰机的工作特点。雷达制导干扰一体化系统与雷达系统和干扰系统的组成类似，主要包括天线系统、侦察接收系统、发射系统、混频及检波系统。另外为了有效识别雷达回波与干扰信号，还需要有雷达指纹识别系统。

制导干扰一体化系统组成示意图见图 3。

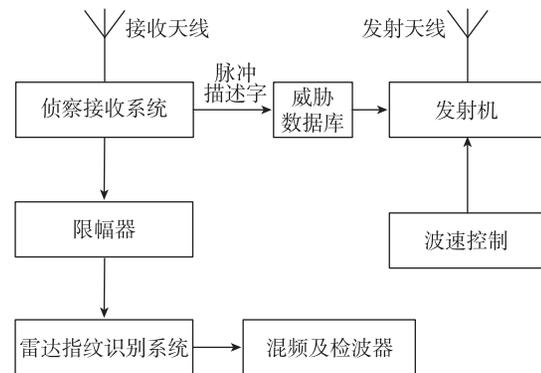


图 3 制导干扰一体化系统组成示意图

Fig. 3 Composition sketch of integrated guidance and jamming system

在该系统中，为了达到较好的干扰效果，需要使干扰发射信号与对方的雷达辐射信号一致。而干扰信号同时用于自身雷达制导，因此，自身的雷达回波信号与对方雷达的发射信号相似程度较高。需要通过雷达指纹特征提取系统获得自身的回波信号。

雷达指纹识别系统是制导干扰一体化的关键组成部分，用于识别对方雷达的辐射信号与自身雷达的回波信号。雷达指纹识别系统主要包括数据获取、无意调制、预处理、特征提取、分类器

等内容, 系统组成见图 4。

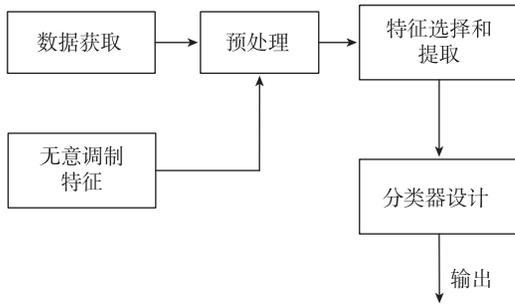


图 4 雷达指纹识别系统

Fig. 4 Radar fingerprint recognition system

4.2 雷达指纹识别的基本原理

在雷达干扰一体化发射系统的特征参数中, 相位噪声、脉冲顶部包络、载波频率偏移等特性与发射系统的硬件紧密相关, 具有唯一性, 可以应用于雷达指纹的识别^[13]。

下面以线性调频信号为例, 给出基于相位噪声的雷达指纹识别的基本原理。

假设线性调频信号为

$$x(t) = A(t) \sin(2\pi f_c t + k\pi t^2 + \varphi_0) \quad (6)$$

加入相位噪声后, 线性调频信号可表示为

$$x(t) = A(t) \sin[2\pi f_c t + k\pi t^2 + M \sin(2\pi f_m t)] \quad (7)$$

采用非参数化的双谱估计的直接估计法, 可以对雷达信号进行双谱估计, 获得雷达的指纹特征^[14]。

将接收到的数据 $\{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ 分为 K 段, 每段 M 个样本, 即 $N = KM$, 并减去每段的样本均值。数据的离散傅里叶变换系数为

$$X^k(\lambda) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} x^k n e^{-2\pi n \lambda / M} \quad (8)$$

将数据 $\{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ 的双谱估计进行 K 段双谱估计的平均值计算, 可得到

$$\hat{B}_D(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x^k \hat{b}_k(\omega_1, \omega_2) \quad (9)$$

式中, $\hat{b}_k(\omega_1, \omega_2)$ 为接收数据离散傅里叶变换的三重相关函数。

由直接估计法可以得到雷达信号的双谱, 通过双谱估计能够反映不同雷达信号的非高斯分布信息, 进而得到自身雷达的指纹特性。

4.3 工作模式

加装雷达制导干扰一体化系统的飞行器在飞

行过程中, 为达到较好的干扰效果, 采用相参压制干扰压制对方雷达。

飞行器飞行过程中, 首先使用侦察接收系统进行电子侦察的信号处理, 得出复杂电磁环境下多个辐射源脉冲到达时间、载频、脉冲宽度、幅度、到达角、脉内调制方式等脉冲描述字 (PDW), 并与飞行器内部的威胁数据库进行比对, 选出威胁程度最高的辐射源。然后, 利用射频转发的方式复制对方雷达的信号特征, 并发射出与其相同的雷达信号, 实现干扰信号与雷达信号的一体化设计。

接收到回波信号后, 通过限幅处理先进行粗分类识别, 再利用雷达指纹识别技术, 对飞行器自身的雷达回波进行脉冲压缩处理, 解算出回波信息, 获取外界物体的位置和速度特征。

4.4 仿真案例分析

加装雷达制导干扰一体化系统的飞行器在飞行过程中, 为达到较好的干扰效果, 采用相参压制体制干扰对方雷达。

制导干扰一体化系统接收到回波信号后, 通过限幅处理先进行粗分类识别, 再利用雷达指纹识别技术, 对飞行器自身的雷达回波进行脉冲压缩处理, 解算出回波信息, 获取外界物体的位置和速度特征。

假设对方探测雷达频率为 30GHz, 脉冲重复周期为 500 μ s, 脉冲持续时间为 50 μ s, 信号调制带宽为 10MHz, 则该信号的幅频特性见图 5。

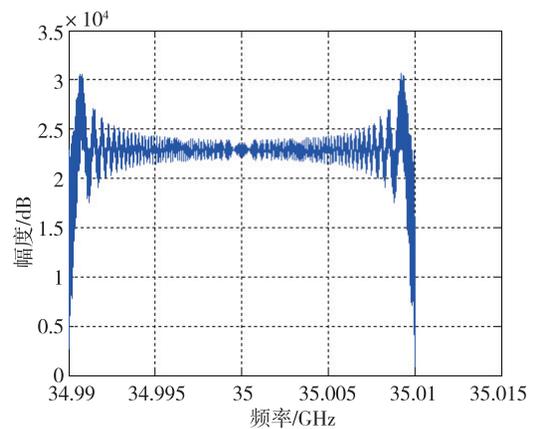


图 5 对方探测雷达的幅频特性

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristics of counterpart detection radar

飞行器制导雷达的相位噪声信息为 $[1, 10, 100, 1000, 5 \times 10^4, 5 \times 10^5, 5 \times 10^6, 5 \times 10^7, 2.5 \times 10^8, 3 \times 10^9, 9 \times 10^{10}]$, 单位为 Hz。飞行

器制导雷达经自身的相位噪声调制后,其幅频特性见图6。经双谱分析处理后,获取的等高线图见图7。从图7中可以看出,采用双谱分析,可以对飞行器制导雷达的回波和对方探测雷达的信号进行区分。

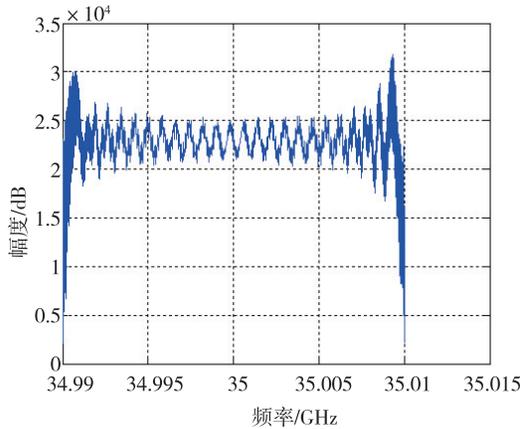


图6 飞行器制导雷达的幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristics of aircraft guided radar

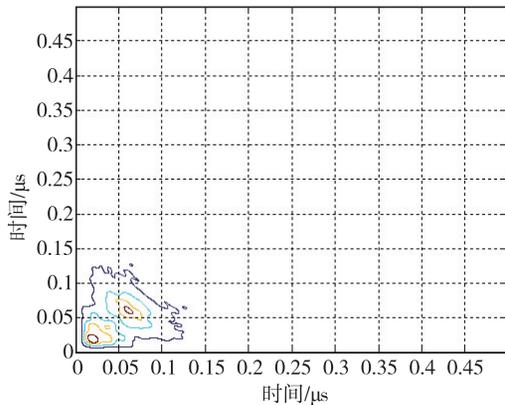


图7 双谱处理后的等高线图

Fig. 7 Contours after bispectrum processing

5 结论

本文从分析复杂电磁环境入手,介绍了复杂电磁环境的基本情况和研究现状,并在此基础上,初步阐述了典型电磁威胁环境。本文通过分析雷达制导技术和典型干扰技术,创新性地提出了制

导干扰一体化技术,实现利用雷达导引头进行探测、制导的同时,与干扰技术进行结合,实现对高威胁辐射的干扰。理论分析表明,该技术在拓展飞行雷达导引头的功能方面具有重要的作用。

参考文献

- [1] 高峰. 雷达寻的技术在远程精确制导导弹中的应用[J]. 上海航天, 2004 (5): 25-29.
- [2] 李耀国. 飞行器末制导雷达成像目标识别技术研究[J]. 飞航导弹, 2014 (12): 58-61.
- [3] 来庆福, 刘义, 赵晶, 等. 利用惯导信息的反舰末制导雷达抗干扰方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33 (4): 86-91.
- [4] 赵俊, 付林. 雷达与电子战一体化设计研究[J]. 雷达与对抗, 2015 (3): 1-4.
- [5] 俞成龙, 周红峰, 杨蕾, 等. 跟踪雷达与电子战设备一体化系统设计技术[J]. 舰船电子对抗, 2014 (4): 5-9.
- [6] 赵建忠, 徐廷学, 李海军, 等. 导弹技术保障中的复杂电磁环境及应对措施[J]. 装备环境工程, 2008, 5 (5): 53-57.
- [7] 唐朝京, 刘培国. 信息化战场复杂电磁环境分析[J]. 国防科技, 2007 (8): 25-28.
- [8] 张勇. 雷达与干扰一体化系统及其共享信号[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [9] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [10] 汤晓云, 樊小景, 李朝伟. 相控阵雷达导引头综述[J]. 航空兵器, 2013 (3): 25-30.
- [11] 田冠锁, 祝学军, 张阳, 等. 典型干扰场景下导弹飞行全过程电子对抗仿真系统设计[C]. 2016年全国电子战学术交流大会论文集, 2016: 1581-1589.
- [12] 李尚生, 付哲泉, 张军, 等. 相参雷达典型干扰信号产生及关键技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30 (4): 345-348.
- [13] 李娜. 雷达信号有意调制分析及指纹特征提取[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 16-35.
- [14] 熊永坤, 王瑞革, 赵丹辉. 关于雷达信号指纹特征识别的研究分析[J]. 电子元器件应用, 2012, 14 (4): 51-53.

引用格式: 田冠锁, 马召, 段婧婧, 等. 基于电子对抗环境的导引头制导干扰集成技术研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (3): 1-6.

Citation: Tian G S, Ma Z, Duan J J, et al. Research on integrated technology of seeker guidance jamming in continuous electronic countermeasure environment [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (3): 1-6.