



·高功率微波技术·

典型雷达装备带内连续波辐射效应试验研究*

任仕召, 魏光辉, 潘晓东, 赵凯, 杜雪

(陆军工程大学 石家庄校区 强电磁场模拟与防护技术国防科技重点实验室, 石家庄 050005)

摘要: 为掌握雷达装备在带内连续波辐射下的效应规律、揭示带内连续波对雷达的干扰作用机理,以某型频率步进雷达为受试对象,采用全电平辐照法对其进行电磁辐射效应试验研究。带内单频点电磁辐射效应试验结果表明,受试雷达在带内连续波辐射能量作用下,出现测距不准、目标回波电平受到压制等效应。测距误差随辐射干扰功率的增加不规则地变化,而目标回波电平随辐射功率的增加而逐渐减小。带内单频连续波辐射敏感度试验结果表明,受试雷达对带内电磁辐射能量非常敏感。在给定试验条件下,最小只需要 0.32 V/m (频差为 -0.1 GHz 时) 的辐射场强就能对受试雷达造成有效干扰。辐射频差超过 ± 0.16 GHz 后,临界干扰场强开始急剧增加,受试雷达的连续波电磁辐射效应表现出明显的选频特性。

关键词: 雷达; 连续波辐射效应; 目标回波电平压缩; 敏感判据; 敏感度门限

中图分类号: TN97 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190471

Experimental study on radiation effect of in-band continuous wave on typical radar equipment

Ren Shizhao, Wei Guanghui, Pan Xiaodong, Zhao Kai, Du Xue

(National Key Laboratory of Defense Science and Technology on EM Environment Simulation & Protection,
Army Engineering University(Shijiazhuang Campus), Shijiazhuang 050005, China)

Abstract: To study the effect regularities of radar equipment under in-band continuous wave radiation and reveal the interference mechanism of in-band continuous wave on radar, a certain step-frequency radar was used as the test object to establish a test platform. We use the full-level irradiation method to carry out experimental research on the interference effect of radar. The in-band single-frequency electromagnetic radiation effect test results show that the radar under test has the effects of inaccurate ranging and suppressed target echo level due to the continuous wave radiation energy in the band. The ranging error radiated interference power varies irregularly, and the target echo level gradually decreases with the increase of the radiated power. The in-band single-frequency continuous wave radiation sensitivity test results show that the radar under test is very sensitive to the in-band electromagnetic radiation energy, and the minimum required radiation field strength of 0.32 V / m (at a frequency difference of -0.1 GHz) is enough for causing effective interference to the equipment under test (EUT). After the radiation frequency difference exceeds ± 0.16 GHz, the critical interference field strength starts to increase sharply. The continuous wave electromagnetic radiation effect of the radar under test shows obvious frequency selection characteristics.

Key words: radar; continuous wave radiation effect; target echo level compression; sensitivity criterion; sensitivity threshold

雷达是利用电磁波进行目标探测的电子装备,作为众多武器装备系统的关键组成部分,在信息化战场中发挥着重要作用。高技术电子信息系统在武器装备中的大量应用,加之敌我双方释放的各种有意、无意电磁干扰,使得战场电磁环境非常复杂,战场上雷达装备的效能发挥和生存能力受到了严重威胁。雷达装备能否在复杂电磁环境下正常工作,将直接影响信息化武器装备的效能发挥乃至整个战争的胜负^[1-3]。因此,研究雷达在复杂电磁环境下的效应规律,对雷达的复杂电磁环境适应性进行试验和评估,具有重大的现实意义和军事应用价值。

* 收稿日期: 2019-12-17; 修订日期: 2020-02-13

基金项目: “十三五”装备预先研究项目(41409030301); 河北省自然科学基金项目(E2019506032)

作者简介: 任仕召(1988—), 男, 硕士研究生, 从事电磁环境效应实验评估技术研究; ren_walker@foxmail.com。

评价装备在战场复杂电磁环境下的适应性,理论上可以通过复杂电磁环境的构建和模拟,针对特定的电磁环境对装备逐一开展试验和评估。但战场电磁环境错综复杂、动态多变,难以准确模拟,这种方法的可用性、准确性受到诸多限制。连续波是复杂电磁环境最简单、最基本的信号形式。实验室条件下获取的装备单频、调幅等电磁辐射敏感度试验结果,虽不能直接用来评价装备在战场多源复杂电磁环境下的适应性和生存能力,但却真实反映了装备对不同频率、不同调制方式电磁辐射信号的耦合接收能力和自身的抗干扰、抗损伤特性^[4]。研究装备的单频连续波辐射效应,能够揭示装备的电磁辐射敏感基本规律,是评估装备在复杂电磁环境下适应性的先行工作。本文以 X 型频率步进雷达为试验对象,以单频连续波为辐射信号形式,采用全电平辐照法对典型雷达装备的连续波电磁辐射效应规律进行试验研究,为进一步开展雷达在多源、多频电磁环境下的适应性试验和评估工作奠定基础。

1 连续波辐射效应试验系统

1.1 试验系统组成

典型雷达装备连续波辐射效应试验系统如图 1 所示,主要由信号发生器、功率放大器、定向耦合器、功率监测设备、背脊喇叭天线、射频连接电缆、光纤场强计和 X 型频率步进雷达(SFR)等组成。其中,信号发生器、宽带功率放大器、定向耦合器和背脊喇叭天线组成电磁能量辐射系统,通过改变信号源的频率、调制方式、输出功率和功率放大器的增益营造所需的电磁环境。频谱分析仪用来监测功率放大器的前向辐射功率。X 型频率步进雷达为效应试验的受试设备(EUT),雷达操作界面返回预先设定探测范围的一维距离像,距离像中显示目标的距离和电平。为了便于确定辐射敏感方向,拆除了受试雷达的伺服装置。光纤场强计用来监测 EUT 处的辐射场强。

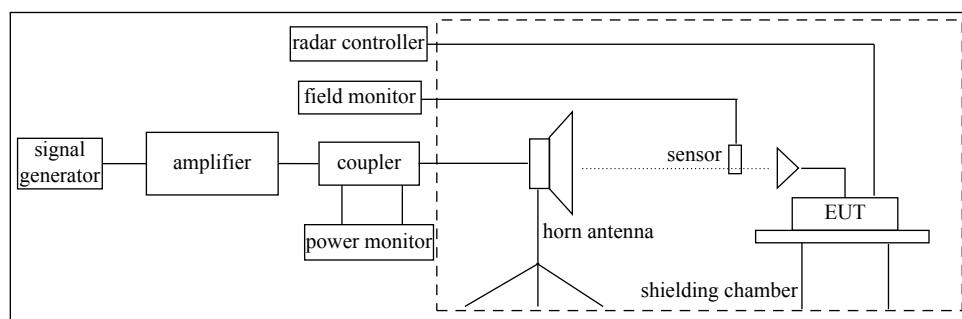


Fig. 1 Block diagram of the test system for continuous wave radiation effect on typical radar equipment

图 1 典型雷达装备连续波辐射效应试验系统框图

主要试验设备的具体参数如下:

信号发生器, ROHDE&SCHWARZ 公司 SMR 20 型信号发生器,能产生 1~20 GHz 的微波信号;

功率放大器, AR 公司 200T 型宽带功率放大器,工作频带 7.5~18 GHz,最大输出功率 200 W;

定向耦合器,使用与功放配套的定向耦合器,前向功率监测端口的耦合度为 50 dB;

辐射功率监测,采用 Agilent 公司的 E7405A 型频谱分析仪,频率范围 100 Hz~26.5 GHz;

辐射天线, BBHA 9120D 型双脊宽带喇叭天线,频率范围 1~18 GHz,增益 6.3~18 dBi;

场强计, Narda 公司 EMR-200 型场强计,场强计通过光纤连接到安装有配套监测软件的计算机,远程监测 EUT 处的场强。

1.2 频率步进雷达

频率步进(SFR)是一种具有高距离分辨率的雷达体制,它通过发射一串载频均匀跳变的单频相参脉冲合成大的信号带宽,从而获得高距离分辨率。雷达接收到的目标回波经过相参处理后,提取出目标频率响应特性数据,对数据进行离散逆傅里叶变换(IDFT)可以获得目标回波幅度的高分辨距离维分布^[5-6]。典型的频率步进雷达系统框图如图 2 所示。回波信号经过射频和中频处理后,由 ADC 器件采集同相和正交两个通道数据送往终端计算机,计算机对数据进行处理并成像。

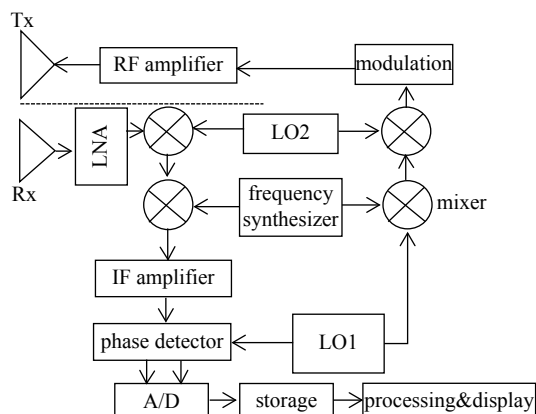


Fig. 2 Block diagram of the radar system under test

图 2 受试雷达系统框图

2 效应试验方法和结果

2.1 带内单频点连续波电磁辐射效应试验

首先进行带内单频点的连续波辐射效应试验。试验步骤如下：

Step 1 试验准备。按照 GJB 8848-2016^[7]方法 301 中全电平辐照法的要求配置试验系统,由于受试雷达最小探测距离的限制,综合考虑后,试验中辐射天线与受试系统间的距离取 4.7 m。试验系统配置完成后,测试 EUT 所在处的场均匀性,确保场均匀性满足 3 dB 要求。调整辐射天线的照射位置和极化方向,确定受试雷达的电磁辐射敏感方向。试验发现,当辐射天线对准雷达天线并且与雷达天线的极化方向一致时,雷达对辐射能量最为敏感。试验过程中,辐射天线固定为此敏感方向。为保证试验的准确性,测试前应对试验设备进行预热。

Step 2 确定试验频点。为了研究受试雷达的单频点电磁辐射效应规律,结合 GJB 8848-2016^[7]的要求,兼顾试验的工作量,选取 $f_1 = f_L + 0.05W_b$, f_0 和 $f_2 = f_U - 0.05W_b$ 三个代表性试验频点,其中 f_0 为受试雷达的中心工作频率, f_U , f_L 分别是雷达工作频带的上限和下限; W_b 为雷达的工作带宽。

Step 3 打开雷达主机和操作界面,在不施加连续波电磁辐射的情况下,测试雷达的工作状态。记录下此时雷达操作界面中的目标距离和目标回波电平,与预先标定的值和技术说明书中的指标进行比较,确保雷达处于正常的工作状态。

Step 4 打开信号源和功率放大器,设置信号源的频率 f_0 ,通过调整信号源的输出功率和功放的增益,由小到大增加效应试验的辐射功率 P_j ,直至达到试验系统的最大输出功率。每次调整辐射功率的数值,观察记录受试雷达状态和性能参数变化。

Step 5 关闭信号源输出,观察受试雷达工作是否正常。改变信号源的频率为 f_1 和 f_2 ,重复 Step 4,完成所有频点的试验。

f_0 频点连续波辐射效应试验结果如表 1 所示,表中 d 表示测得的目标距离,level 表示目标回波的电平值。

表 1 f_0 频点连续波辐射效应试验结果
Table 1 Results of experiments at frequency f_0

P_j/dBm	d/m	level/(dBm·V)	P_j/dBm	d/m	level/(dBm·V)
none	4.69	60.17	29.0	4.15	46.44
2.0	4.69	59.70	32.0	4.19	44.01
5.0	4.69	59.66	35.0	4.53	40.80
8.0	4.69	59.60	38.0	4.69	37.99
11.0	4.65	59.17	41.0	4.65	35.12
14.0	4.61	58.67	44.0	4.63	32.05
17.0	4.63	57.65	47.0	4.59	28.46
20.0	4.59	55.94	50.0	4.57	26.45
23.0	4.19	53.16	53.0	4.57	25.30
26.0	4.15	49.39			

分析表 1 中的数据,可以发现:(1)施加连续波电磁辐射后,受试雷达测得的目标距离值发生变化,但是目标距离的变化量随辐射功率的增加呈现出不规则的变化;(2)施加连续波电磁辐射后,受试雷达接收机中的目标回波电平发生变化,并且目标回波电平值随着辐射功率的增加而逐渐减小。

另外两个频点的试验结果呈现出相同的趋势。为了直观的分析目标回波电平值随着辐射功率的变化规律,将三个频点的试验结果绘制到一张图上,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,在所选三个试验频点上,受试雷达接收到的目标回波电平随辐射功率变化规律是一致的。当辐射功率较小时,目标回波电平随辐射功率变化非常缓慢;当辐射功率达到约 20 dBm 后,目标回波电平开始随辐射功率的增加而线性减小,直至功率放大器达到最大输出功率。试验过程中,受试雷达未出现死机、重启等效应。关闭辐射信号源输出后,雷达恢复正常工作状态。由于所选频点具有一定的代表性,可以推断当连续波电磁辐射的频率落在受试雷达的工作频带内时,将呈现出类似的效应规律。

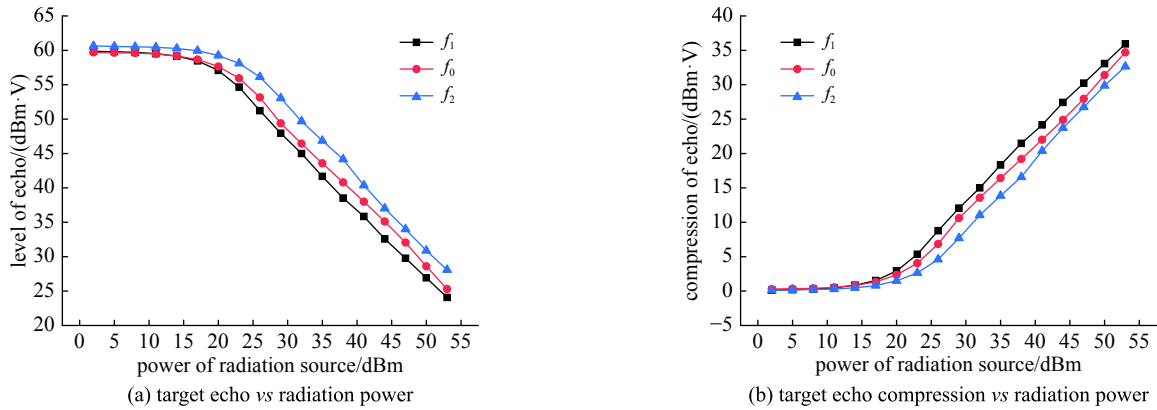


Fig. 3 Curves of target echo level and compression change with the radiation power

图3 目标回波电平和压缩量随干扰功率变化曲线

2.2 阻塞效应的敏感判据

在进一步研究装备的连续波辐射效应规律前,必须选取恰当的效应参量作为敏感判据。选择何种效应参量作为敏感判据一般遵循以下两个原则^[8]:一是敏感判据应能够准确反映装备的战技术参数变化;二是敏感判据应具备稳定性,满足试验的误差要求并且便于试验和测试。下面结合雷达工作原理和单频点效应试验结果,确定受试雷达阻塞效应的敏感判据。

分析图3中受试雷达效应参量随干扰辐射源功率的变化规律,发现当辐射干扰功率小于20 dBm时,目标的电平随干扰辐射功率的增加变化很小,受试雷达对干扰辐射功率不敏感,如果在这一区间选择敏感判据,临界干扰场强的测试容易引入较大误差。而在曲线的线性变化段,干扰源功率与目标电平的规律之间的关系是确切的,在这一区间选择敏感判据,试验的准确性有保证。因此,可以在单频试验结果曲线的线性变化区间选择敏感判据。具体选择目标回波电平压缩多少值作为雷达受到有效干扰的敏感判据,取决于雷达的具体应用场景和能接受的性能降级程度。

下面结合雷达方程,分析目标回波电平压缩量与雷达性能指标的关系。常用的雷达战技术参数有最大作用距离 R_{\max} (雷达威力)、检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 。根据雷达系统参数和目标雷达横截面积,可以推导出雷达最大作用距离 R_{\max} 的表达式^[9]

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \quad (1)$$

式中: P_t 表示发射功率; G 表示发射天线增益; A_e 表示接收天线的有效孔径; σ 表示目标的雷达横截面积; S_{\min} 表示最小可检测信号。实际上由于最小可检测信号 S_{\min} 的统计特性,在讨论作用距离时必须包括特定探测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 。在不指明检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 时,只讨论最大作用距离是没有意义的。

设 R_{\max} 为预定的检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 下雷达的最大作用距离。结合雷达方程,可以分析连续波电磁辐射干扰对 R_{\max} 的影响。对于距雷达 R_{\max} 处、雷达横截面积为 σ 的目标,到达雷达接收系统处的目标回波功率 P_r 是一定的。不施加电磁辐射干扰时,有 $P_r = S_{\min}$,雷达刚好可以探测到此目标。施加连续波辐射干扰后,由于连续波电磁辐射对雷达接收机的阻塞效应,使得接收机对有用信号的增益下降。原来可以检测到的最小可检测信号 S_{\min} 不再满足雷达系统的信噪比要求而丢失检测,雷达接收系统的最小可检测信号由 S_{\min} 增大为 $S_{j\min}$ 。而到达雷达接收系统处的目标回波功率 P_r 不变,因此有 $P_r < S_{j\min}$ 。此时雷达无法探测到 R_{\max} 处雷达横截面积为 σ 的目标,雷达的最大作用距离减小。

为了描述方便,定义雷达的最大作用距离损失率^[10]

$$r = \frac{R_{\max} - R'_{\max}}{R_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R'_{\max} 为雷达受到干扰后的最大作用距离。

由式(1)表示的雷达方程,可以分析目标回波电平压缩量与雷达最大作用距离变化的关系。当目标回波电平受到3 dB压缩时, R_{\max} 变为原来的84%,雷达最大作用距离损失16%;当目标回波电平受到6 dB压缩时, R_{\max} 变为

原来的 70%，雷达最大作用距离损失 30%；当目标回波电平受到 12 dB 压缩时， R_{\max} 变为原来的 50% 倍，雷达最大作用距离损失 50%。

本文在综合考虑受试雷达的使用场景和单频点试验结果后，选择目标回波电平压缩 6 dB，即最大作用距离损失 30% 作为 EUT 受到有效干扰的判据。注意，这里的目标回波电平指经雷达接收机处理后的电平。对于不同使用场景、不同重要程度的雷达装备，可以根据具体情况确定其干扰的敏感判据，分析问题的方法是一致的。

2.3 带内阻塞效应敏感度门限试验

敏感判据确定后，为了进一步研究受试雷达的带内连续波电磁辐射效应规律，对受试雷达进行了阻塞效应敏感度门限试验。试验准备工作与单频点试验相同。试验过程中，效应试验系统的照射位置和极化方向保持不变。采用变步长升降法确定受试雷达在不同频点的敏感度门限。具体试验步骤确定如下：

Step 1 试验频点确定。试验频点一般在 2 倍的工作带宽频率范围内等距选取 21 个试验频点。受试雷达的工作带宽为 200 MHz，选择的试验频点为 $f_0 \pm 20n$ MHz， $n=0, 1, 2, \dots, 10$ 。

Step 2 打开受试雷达，在不施加连续波辐射干扰的情况下进行测试，确认其工作状态正常，记录此时的目标回波电平值。

Step 3 选定连续波辐射源的频率，采用变步长升降法调节辐射源的辐射功率，直至目标的回波电平刚好下降 6 dB，记录此时光纤场强计的读数。

Step 4 关闭信号源输出，观察受试雷达工作是否正常。选择其他试验频点，重复 Step 3，完成所有频点的测试。

试验结果如表 2 所示，表中 Δf 表示试验频点与中心频率的频差， E_j 表示以目标电平下降 6 dB 为判据时不同频点的敏感度门限。

表 2 带内敏感度门限试验结果

Table 2 Results of in-band sensitivity threshold

$\Delta f/\text{GHz}$	$E_j/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	$\Delta f/\text{GHz}$	$E_j/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$
0	0.39	0.02	0.43
-0.20	2.54	0.04	0.45
-0.18	1.46	0.06	0.56
-0.16	0.63	0.08	0.68
-0.14	0.38	0.10	0.82
-0.12	0.33	0.12	0.82
-0.10	0.32	0.14	0.86
-0.08	0.35	0.16	1.86
-0.06	0.34	0.18	1.37
-0.04	0.35	0.20	5.37
-0.02	0.33		

根据试验结果绘制受试雷达的敏感度曲线，如图 4 所示。

对试验数据和受试雷达的敏感度曲线进行分析，可以得到如下结论：

(1) 受试雷达对带内电磁辐射能量非常敏感，在给定试验条件下，最小只需要 0.32 V/m (频差为 -0.1 GHz 时) 的辐射场强就能对受试雷达造成有效干扰。这是因为带内电磁辐射干扰落在雷达接收机的通带内，选通滤波器无法对其形成有效抑制，它与回波信号一起被接收链路中的放大器放大。

(2) 受试雷达的敏感频带并不严格等于雷达的工作带宽，由图 4 知该型雷达对敏感频段范围为 $(f_0 - 0.16 \text{ GHz}, f_0 + 0.14 \text{ GHz})$ ，大于雷达的工作带宽。频差 Δf 继续增大时，受试雷达的敏感

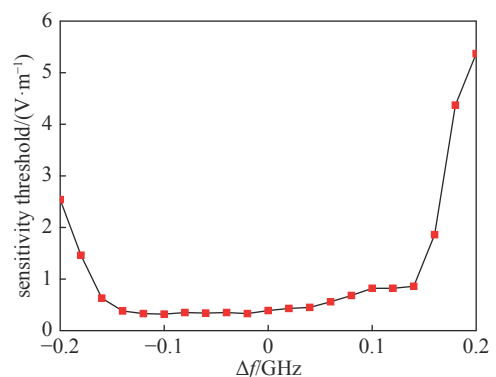


Fig. 4 In-band sensitivity curve of the radar under test

图 4 受试雷达的敏感度曲线

度门限值开始急剧升高。频差 Δf 为 0.2 GHz 时,敏感度门限比带内最小值高出约 30 dB。

(3)带内敏感度门限值会有一些的起伏,对雷达接收机链路进行分析后,认为这是由雷达接收机中带通滤波器的纹波和 LNA 放大器的平坦度起伏引起的。

3 结 论

本文采用全电平辐照试验方法,研究了典型雷达装备的带内连续波电磁辐射效应,得出下列结论:

(1)在给定的试验条件下,对受试雷达施加带内连续波电磁辐射后,雷达出现测距不准、目标回波电平受到压制等效应。但没有出现死机、重启等工作状态改变的效应。关闭电磁辐射源后,雷达恢复正常工作。雷达测得的目标距离随连续波辐射功率的增加呈不规则变化。目标回波电平随连续波辐射功率的增加先缓慢减小,在辐射功率达到一定值后开始线性减小。

(2)综合分析受试雷达的带内单频点的效应试验结果、工作原理和使用场景后,确定以目标回波电平压制 6 dB 作为受试雷达的连续波阻塞效应敏感判据。

(3)通过单频电磁辐射敏感度试验发现,受试雷达对带内电磁辐射能量非常敏感。在给定条件下,最小只需要 0.32 V/m(频差为-0.1 GHz 时)的辐射场强就能对受试雷达造成有效干扰。辐射频差超过 ± 0.16 GHz 后,临界干扰场强开始急剧增加。频差 Δf 为 0.2 GHz 时,敏感度门限比带内最小值高出约 30 dB,受试雷达的连续波电磁辐射效应表现出明显的选频特性。

参考文献:

- [1] 刘尚合,孙国至.复杂电磁环境内涵及效应分析[J].装备指挥技术学院学报,2008(1):5-9. (Liu Shanghe, Sun Guozhi, et al. Analysis of the concept and effects of complex electromagnetic environment[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008(1): 5-9)
- [2] 刘尚合.武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J].装备指挥技术学院学报,2005(1):4-9. (Liu Shanghe. Effect of electromagnetic environment to weaponry and its trend of development[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2005(1): 4-9)
- [3] 王满玉,程柏林.雷达抗干扰技术[M].北京:国防工业出版社,2016. (Wang Manyu, Cheng Bolin. Radar anti-jamming technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016)
- [4] 魏光辉,潘晓东,万浩江.装备电磁辐射效应规律与作用机理[M].北京:国防工业出版社,2018. (Wei Guanghui, Pan Xiaodong, Wan Haojiang. Feature and mechanism of electromagnetic radiation effects for equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018)
- [5] 毛二可,龙腾,韩月秋.频率步进雷达数字信号处理[J].航空学报,2001,22(s0):16-25. (Mao Erke, Long Teng, Han Yueqiu. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(s0): 16-25)
- [6] 崔应留,罗文茂,王德纯.频率步进雷达机动目标运动参数估计及成像[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2016,17(6):512-519. (Cui Yingliu, Luo Wenmao, Wang Dechun. Motion parameters estimating and imaging of maneuvering targets in stepped-frequency radar[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 17(6): 512-519)
- [7] GJB 8848-2016.系统电磁环境效应试验方法[S].2016. (GJB 8848-2016. Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S]. 2016)
- [8] 李伟.通信装备带内电磁辐射效应建模与预测方法研究[D].石家庄:陆军工程大学石家庄校区,2018:21-28. (Li Wei. Modeling and forecasting research on in-band electromagnetic radiation effect for communication equipment[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Campus, AEU, 2018: 21-28)
- [9] Skolnik M I. Introduction to radar systems[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [10] Cui R, Pan J, Zhu J. Research on jamming effect evaluation method of AN/TPY-2 radar using set pair approach degree[C]//Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Information Processing and Cloud Computing. 2019: 55.