

基于 DRFM 组件的宽带雷达抗干扰 仿真测试系统设计

袁兴鹏

(中国人民解放军 91336 部队 秦皇岛 066326)

摘要: 抗干扰性能是雷达的重要战技指标,干扰环境的逼真度直接影响雷达的作战效能评估。通过分析现代雷达系统抗干扰性能测试需求,采用数字射频存储方法构建了雷达抗干扰测试系统,并对系统的功能和原理进行设计和介绍;同时,通过对目标及回波、欺骗干扰、背景杂波以及压制性干扰进行数学建模,并依托数字射频存储系统,给出了各种干扰信号仿真实现方法。经过仿真测试应用,本文给出的宽带雷达抗干扰仿真测试系统设计方案,能够产生满足各类雷达装备测试需求干扰信号环境,为检验复杂电磁环境下雷达抗干扰性能提供了支撑。

关键词: 雷达测试;干扰环境;数字储频;数学模型

中图分类号: TN820.12 文献标识码:A 国家标准学科分类代码: 510.1025

Designs of radar anti-jamming simulation test system based on DRFM

Yuan Xingpeng

(Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: Anti jamming performance is an important technical index of the radar, and the fidelity of the jamming environment directly affects the operational efficiency evaluation of radar. According to the demand of modern radar anti-jamming test, a simulation test system of radar anti-jamming based on DRFM is designed, and the system function is described. At the same time, target echo, deception jamming, passive clutter and masking jamming mathematical models are constructed; each kind of jamming signal realization method based on DRFM is given. The results of simulation and test show that the radar anti-jamming simulation test system design scheme presented in this paper can meet the needs of all kinds of required jamming signals and the requirement for testing various radar systems, which provides method for the inspection of radar anti-jamming performance under the complex environment.

Keywords: radar test; jamming environment; DRFM; mathematical model

1 引言

在信息化条件下的战场上,雷达是获取威胁目标信息、引导导弹武器攻击最主要的预警探测装备,能够快速、精确地获取各种战场威胁目标信息,是现代战场的千里眼。而随着各种新体制雷达的出现,雷达干扰技术也在相应发展,雷达受到的干扰的威胁数量越来越多、样式越来越复杂。抗干扰能力是评价雷达战术性能的一项最为重要指标,在雷达生产研制调试过程中,为了系统全面测试雷达的抗干扰能力,需要研制出相应的干扰测试系统^[1]。

随着数字射频存储(DRFM)技术越来越多的被应用

于雷达干扰装备,这就使干扰技术、战术的发展也出现了质的飞跃。基于数字储频的雷达干扰装备,通过截获雷达的探测波射频信号,并对侦收的信号进行存储、复制和变换处理,转发生成了与原雷达发生的信号相关的干扰信号,由于生成的干扰信号与原信号相关度较高,因此对于相参等新体制雷达干扰效果最佳。目前,大部分抗干扰测试系统功能单一,只满足装备的单一性能指标的测试,构建的雷达抗干扰环境还存在模型逼真度不够、缺少战术性的问题。针对以上情形,本文针对新体制雷达的抗干扰性测试需求,提出了基于 DRFM 组件的宽带雷达抗干扰仿真测试系统设计方案,该方案采用宽带 DRFM 组件,依托

该方案构建的系统能够生成雷达测试过程中所需的目标回波、欺骗/压制干扰以及杂波等环境,为雷达抗干扰测试提供了支撑^[2]。

2 雷达抗干扰测试需求

2.1 抗干扰试验方法

目前,雷达抗干扰试验主要有内场静态测试、外场地面测试和外场实际对抗测试3种测试模式。在3种试验模式下都需要构建接近于实际工作时的射频电磁环境。构建的试验环境包括:目标、干扰、杂波等与被试雷达紧密相关的环境。在实际试验时,无论哪种抗干扰测试模式,都需要干扰模拟装备构造相应的可调、可控目标及干扰环境。具体的雷达抗干扰测试配置如图1所示。

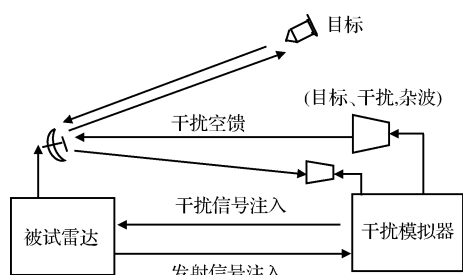


图1 雷达抗干扰测试配置

在进行内场静态测试、外场地面测试试验时,雷达放置在暗室或者露天环境,目标、杂波和其它干扰源通过注入的方式进行测试,干扰模拟器将注入的雷达信号进行复制后,按照试验要求等效模拟生成各种目标回波、各种样式的干扰以及环境杂波,并注入回波被测雷达接收机,完成各种指标的测试。其特点是试验环境可控、易组织,但目标模拟欠真实,适合静态指标和抗干扰算法测试和验证。

在进行外场实际对抗条件下的试验时,雷达放置在实际工作平台,目标、杂波和其他干扰源通过天线同发射机和接收机耦合,其主要威胁目标通过实验装备进行配试,干扰模拟器通过空间辐射接收被测雷达信号,并将接收的雷达信号进行复制后,按照实际作战对象模拟生成各种目标回波、各种样式的干扰以及环境杂波,并通过空间辐射回雷达,完成各种指标的测试。特点是目标、环境真实接近实战,但试验环境不可控、难组织,适合动态作战试验条件下的抗干扰指标测试^[3]。

2.2 测试环境仿真需求

复杂电磁环境下的雷达抗干扰性能指标体系主要包括抗干扰改善因子、识别概率,干扰条件下的精度指标、威力指标等,抗干扰措施下对有源噪声压制干扰、噪声掩护干扰、瞄准干扰、欺骗干扰等的干扰抑制能力。

以上这些测试项目,必须在雷达实际的工作环境下进行测试,这个环境包括雷达背景杂波环境、无源干扰以及有源干扰。雷达背景杂波环境主要由作战使用环境的地形、地貌、水文、气象等自然条件决定。根据对接收机作用

机理的不同,有源干扰又可分为噪声干扰和欺骗性干扰两大类。无源干扰主要依托无源干扰器材,其本身并不发射电磁波,而是通过对雷达发射的电磁波进行散射、反射、折射,形成雷达诱饵,或吸收电磁波,致使雷达无法探测正常目标^[4]。

针对雷达可能面临的典型干扰环境,在设计雷达干扰环境仿真系统时应模拟欺骗干扰信号、压制性干扰信号和雷达背景杂波等干扰信号,同时还应模拟目标回波信号,模拟的主要目标及干扰信号类型如表1所示。

表1 目标及干扰信号类型

干扰信号名称	形式(模拟内容)	说明
雷达背景杂波	地、海、云雨面分布或体分布散射信号,有一定的概率分布特征。	雷达辐射信号照射至这些散射体所形成的杂乱回波。
人为无源干扰	主要是箔条云(体分布)干扰信号,也有一定的概率分布特征。	
压制性有源干扰	噪声调频/调幅干扰; 各类幅度和频率调制的干扰; 连续/脉冲干扰。	瞄准窄带式和宽带阻塞式干扰。
欺骗性有源干扰	距离、角度和速度的欺骗。	转发式或回波式。
目标回波模拟	目标的距离、角度、幅度信息进行模拟	目标特性影响模拟精度

3 测试系统组成和工作原理

3.1 系统总体组成

基于数字储频(DRFM)雷达测试系统主要组成如下:接收天馈模块、侦察接收模块、数字储频(DRFM)模块、系统控制及数字信号处理单元、干扰资源模块、干扰调制单元、射频发射模块以及发射天馈模块组成,如图2所示。

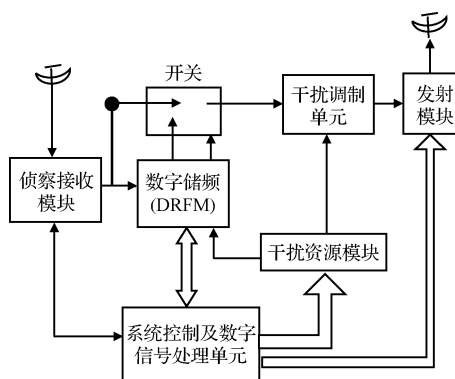


图2 基于DRFM的雷达抗干扰测试系统组成

侦察接收模块主要由接收微波变频模块组件、本振源、调制器等组成,接收相应频段的辐射源信号,并对信号进行放大、变频、限幅、中频放大,最后输出中频、视频等信

号,供数字信号处理调用。

数字储频(DRFM)模块是雷达干扰模拟测试系统的核心,将侦察系统模块下变频中频信号的进行高速 A/D 采样,数字化存储,然后 D/A 变换,滤波放大后形成所需要的基带信号。

系统控制及数字信号处理单元,对整个干扰测试系统进行控制,对侦察接收模块、数字储频、干扰生产进行控制和工作模式选择;对侦察接收的雷达环境信号进行处理,量化、采集后生成 PDW 字,并对 PDW 字中幅度、到达时间的进行数据处理,计算出雷达主瓣脉冲到达时间以及模拟欺骗目标雷达天线扫描周期。

干扰资源模块主要由目标回波模块、压制干扰模块、欺骗干扰模块以及杂波模块组成。干扰资源模块是干扰样式生产的关键,针对不同作战任务下各种体制雷达具体工作方式,配置相应的干扰资源使干扰效果最优。

干扰调制单元,在系统控制下接收干扰资源模块推送的干扰样式、参数等指令,与数字储频模块产生的基带信号合成,并对生成信号的数目、速度、距离进行调制。

射频发射模块主要由微波上变频模块组件、功率合成与控制等组成,对生成的回波/干扰信号进行上变频,并对输出的射频信号幅度进行控制,最后通过发射天馈模块发射出去^[5-8]。

3.2 系统主要功能和原理

抗干扰测试系统需要按照试验态势要求,实时产生与战情动态相关的雷达目标回波、压制/欺骗干扰以及背景杂波信号,具体功能要求如下:

1)能够模拟与各种体制雷达相对应的目标回波信号,包括目标回波的时延、多普勒频移、目标雷达截面积、幅度起伏、角闪烁、双程衰减及多路径效应;

2)能够模拟与不同类型雷达对应工作方式的各种干扰信号,包括瞄准、阻塞以及扫频干扰的带宽、功率等压制性干扰参数,距离、角度、速度以及目标数量等欺骗性干扰参数,RCS 等箔条干扰的参数。

3)能够模拟产生与实际战场环境一致的地面、海面以及气象杂波环境,包括相对应的杂波模型、杂波数据库等。

雷达干扰测试系统工作流程如下:系统侦收被测雷达信号,由侦察接收模块中的变频模块向下进行多级变频,生成中频信号后;输出给数字储频模块进行采样与处理,生成基带信号;干扰调制单元根据系统控制及数字信号处理单元的控制参数,与干扰信号进行基带合成,将干扰资源模块生成的干扰信号调制到回波信号中,最后通过发射模块的上变频模块对回波/干扰信号进行多级上变频,并对信号功率调整和放大,空馈至被测雷达,并与实际雷达回波一起进入雷达的目标检测和跟踪系统,导致雷达不能准确的测量目标的参数信息、检测真正的目标。

4 基于 DRFM 的干扰信号建模与实现

基于 DRFM 的抗干扰测试系统通过将截获的雷达信号存储于在数字储频模块的存储器中,经过脉冲时延、频移、干扰调制后,生成干扰信号。在上述过程中,各种样式干扰信号的产生需要相应的模型支持,同时需要依托相应的功能模块来实现^[8-12]。针对不同信号建模和仿真特点,在建模时将目标及干扰信号类型分为目标回波/欺骗干扰信号、压制性干扰信号和无源杂波干扰信号 3 大类进行仿真。

4.1 目标回波/欺骗干扰信号仿真

目标回波主要和目标与雷达的距离、方位以及大小相关,因此,典型的雷达的点目标回波数学模型如下:

$$S_r(t) = S_i(t - \tau)e^{j2\pi f_d t} \left[\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right]^{1/2} \gamma \quad (1)$$

式中: $\tau = 2R(t)/c$ 为目标距离延时, γ 为反射系数; $[G^2 \lambda^2 / ((4\pi)^3 R^4)]^{1/2}$ 为回波衰减, $f_d = 2v/c$ 为目标回波多普勒频移。

目标回波特性模拟就是在侦收的雷达发射信号基础上,按照试验场景设置要求,对信号进行距离延时、多普勒频移、幅度调制等参数变化来实现,通过仿真天线的测向特性来实现目标方位模拟,通过设置施威林起伏模型来实现目标的幅度特性模拟。

基于 DRFM 的目标/欺骗干扰原理如图 3 所示,首先对侦收的被测试威胁雷达信号进行采集、储存,控制系统实时解算生成目标运动航迹,按照干扰信号要求给出反应目标距离延迟、频率延迟以及角度等参数控制信息,最后 DRFM 按要求产生具有相应的速度和距离等信息的目标回波或欺骗干扰信号^[13-15]。

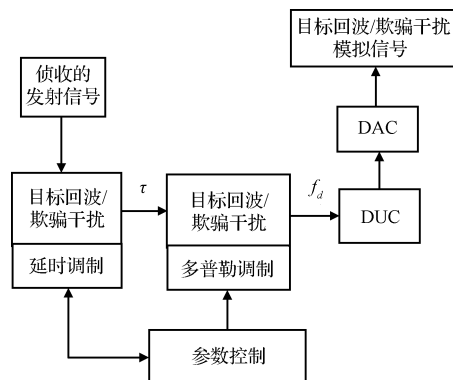


图 3 目标回波/欺骗干扰模拟模块原理

如图 4 中所示为实际目标回波信号,脉冲重复周期 800 μs ,脉冲宽度 0.5 μs ,信号带宽 5 MHz,采样频率 80 MHz,如图 5 中所示为假目标干扰与目标回波混合信号,其中假目标延迟时间 2 μs ,距真目标 300 m。通过上图

可以看出,假目标干扰进入雷达接收机,一方面在能量上压制真实目标回波,另一方面在设定假目标距离间隔较大时可以给出多个距离上的假目标,可以使得雷达跟踪某一个假目标,造成信号处理工作异常,从而使得雷达不能跟踪真实目标,形成有效干扰。

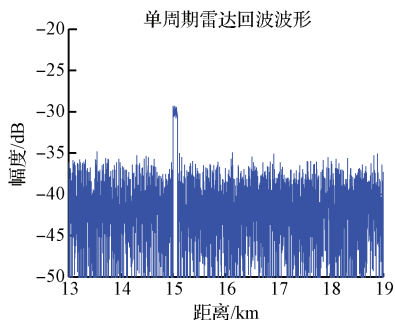


图4 实际目标回波信号

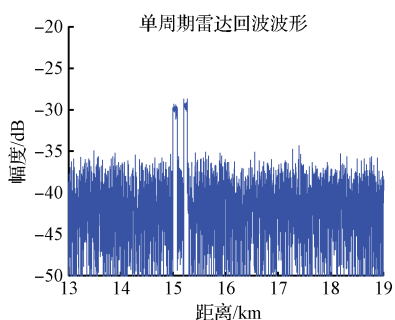


图5 距离欺骗假目标信号

4.2 压制性干扰信号仿真

压制性干扰是利用噪声、类噪声信号在频域和功率域遮盖有用信号,使雷达无法正常对目标信息进行有效检测,一般主要包括瞄准式、阻塞式和扫频式等3种工作方式。压制性干扰的信号形式主要包括噪声幅度调制、噪声频率调制、噪声相位调制等,以噪声调频为例,其模型如下:

$$J(t) = U_j \cos(\omega_j t + 2\pi K_{FM} \int_0^t U(t') dt' + \varphi) \quad (2)$$

式中: U 为信号幅度, ω 为干扰信号载频, K_{FM} 为调频斜率。

基于DRFM压制性干扰生成,首先对侦收的被试威胁雷达信号进行正交相干检波,经AD变换后把信号的全部数字信息完整地储存起来;干扰时,从DRFM存储器中读出数字雷达信号信息,按照选择的样式进行噪声调制,被调制的噪声干扰信号通过大功率功放放大,经天线发射进入被测试雷达接收机。在一定的信干比条件下,这类噪声干扰能够取得达成较为明显的干扰效果。

如图6中所示为实际目标回波中频信号,中心频率为40 MHz,如图7中所示为窄带噪声调制干扰,干扰信号带宽为40 MHz。通过上图可以看出,噪声压制干扰信号完全淹没雷达实际目标回波信号,形成有效干扰。

4.3 无源杂波干扰信号仿真

无源杂波主要是由地面、箔条云反射,大气折射等形

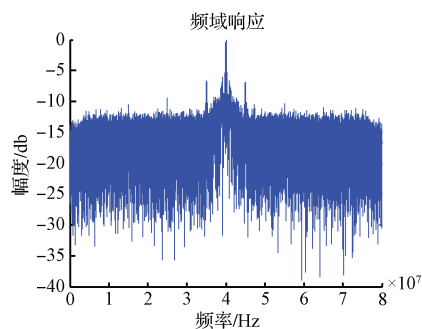


图6 实际目标回波中频信号

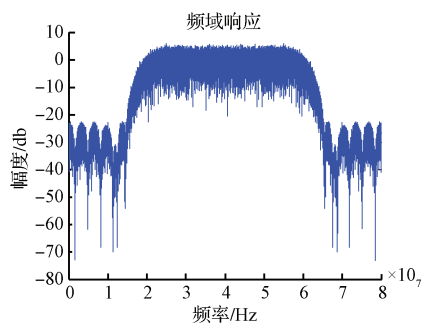


图7 窄带噪声压制干扰信号

成,包括面(地物、海面等)杂波、气象(云雨等散射)杂波、无源箔条干扰等。无源杂波与信号反射面、传输介质特性相关,因此,复杂的随机起伏是杂波信号主要特点。一般从幅度统计特性、功率谱特性两个方面进行无源杂波描述与建模,仿真时需要对其幅度分布、功率谱特性进行仿真模拟。

面杂波的幅度分布特性主要与地形、雷达工作方式等紧密相关,雷达的工作方式主要包括雷达工作频率、脉宽、极化方式等,一般采用Weibull分布来对面杂波幅度进行建模。面杂波的功率谱特性主要是由于各散射点的回波因平台运动导致信号多普勒频移而形成的,其表现为信号谱的展宽。一般采用高斯谱进行面杂波功率谱进行建模。

箔条干扰、气象杂波(云雨雾雪等)一般采用瑞利分布的高斯模型对其幅度概率分布进行建模。

基于DRFM杂波干扰信号产生,首先对接收到的发射信号进行中频采集,实时获取DRFM中的雷达中频发射脉冲波形,通过调用杂波数据库(存储预先计算的杂波基带数据),经变换后得到同时满足幅度分布和功率谱分布的数字基带杂波数据,数字基带杂波数据与DRFM模块获取的雷达发射波形经过卷积后,最后通过微波上变频、天馈发射模块输出杂波信号^[16-19]。

如图8中所示为实际无源杂波干扰波形,图中为某一时刻末制导雷达在某一角度产生的地物杂波。在仿真时,根据当前战情入射角从杂波数据库中取出杂波数据,产生与实际地形相匹配的杂波波形,这些强烈的杂波远远大于末制导雷达跟踪门限,导致实际回波被淹没,形成有效干扰。

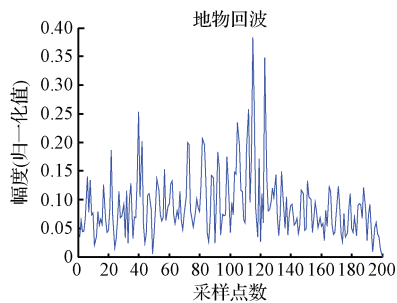


图8 地物杂波波形

5 结论

本文以宽带数字射频存储技术为基础,在雷达抗干扰测试需求的基础上,对雷达抗干扰仿真测试系统进行设计,并对各种干扰信号的模型和仿真方法进行了描述,系统能够模拟生成目标回波、欺骗干扰、压制干扰以及杂波干扰,为检验复杂电磁环境下的抗干扰性战技指标创造了条件,有助于雷达装备的研制、评估和改进,同时也可作为雷达兵的抗干扰能力训练提供支撑。

参考文献

[1] 王宇. 雷达抗干扰试验系统中的干扰信号环境设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
 [2] 焦淑瑜,张建军. 复杂电磁环境下火控雷达试验方法研究[J]. 火控雷达技术,2012,41(1): 72-75.
 [3] 张建科,党立坤. 数字储频技术发展刍议[J]. 电子信息对抗技术,2010,25(4):39-43.
 [4] 翁永祥. 数字储频技术的研究与实现[D]. 上海:上海交通大学,2007.
 [5] 韩俊宁. 准数字示样的 DRFM 技术[D]. 西安:西安电子科技大学,2006.

[6] 包飞. DRFM 系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
 [7] 张志俊. 注入式雷达目标模拟器控制软件设计与实现[D]. 大连:大连理工大学,2013.
 [8] 冯震. 电子战中 DRFM 的设计与应用[D]. 南京:南京理工大学,2008.
 [9] 钱伟,薛艳峰. 机载雷达干扰机信号产生单元设计[J]. 微计算机信息,2010,26(5-1):123-124.
 [10] 王福红. 对高重频和连续波信号的 DRFM 干扰技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
 [11] 郭琳. 线性调频雷达的干扰技术及其实现[D]. 上海:上海复旦大学,2012.
 [12] 王国玉,汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
 [13] 杨文隽. 雷达干扰模拟器的设计及研究[J]. 国防技术基础,2010(11):53-55.
 [14] 沙卫梅. 机载有源相控阵雷达目标及电磁环境模拟器研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
 [15] 张玉芳. 基于 DRFM 的雷达干扰技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
 [16] 韩红斌,李相平,赵振波,等. 双点源相干干扰的研究与实现[J]. 国外电子测量技术,2011,30(9):33-35.
 [17] 赵立,谢军伟,盛川,等. 基于数字射频存储的雷达干扰环境仿真[J]. 计算机仿真,2014(10):35-39.
 [18] 李建勋,樊晓光,谢黎. 基于统计模型的杂波仿真[J]. 现代电子技术,2010,33(15):11-14.
 [19] 富雷雷. 基于数字射频存储器的干扰调制研究[D]. 成都:成都电子科技大学,2007.

作者简介

袁兴鹏,1976 年出生,硕士,高级工程师,主要研究方向为雷达对抗仿真等。
 E-mail: xp-yuan@163.com