

基于 PDW 的雷达信号环境建模与仿真研究

卢小勇¹, 闫抒升², 王晓军², 俞志强³

(1. 空军预警学院研究生管理大队, 湖北 武汉 430019; 2. 空军预警学院预警模拟训练中心, 湖北 武汉 430019;
3. 空军预警学院二系, 湖北 武汉 430019)

摘要: 在雷达电磁环境仿真系统中, 需要模拟生成描述雷达信号环境的脉冲描述字 (PDW) 数据, 以引导系统生成干扰信号环境数据。采用 PDW 对雷达信号环境进行描述, 结合雷达信号环境的 PDW 数学模型, 给出了基于 PDW 的模型框架, 并设计了雷达电磁环境仿真流程。最后归纳了生成 PDW 数据的处理方法, 给出了载频、重频和脉宽的模拟生成示例。

关键词: 雷达; 电磁环境; 建模; 仿真; 脉冲描述字

中图分类号: TN955⁺.1 **文献标识码:** A

Study on simulation and modeling about radar signal environment based on PDW

Lu Xiaoyong¹, Yan Shusheng², Wang Xiaojun², Yu Zhiqiang³

(1. Department of Graduate Management, Air Force Early-warning Academy, Wuhan 430019, Hubei, China;
2. Center for Early-warning Training & Simulation, Air Force Early-warning Academy, Wuhan 430019, Hubei, China; 3. No. 2 Department, Air Force Early-warning Academy, Wuhan 430019, Hubei, China)

Abstract: In the simulation system of radar electromagnetic environment, simulation and generation data of PDW which describes radar signal environment is needed to guides the simulation system to generate the jamming signal data. The radar signal environment is described by PDW. According to PDW math models of radar signal environment, model structure based on PDW is presented and system composing simulation flow of radar electromagnetic environment simulation is given. Finally, the handling methods of simulation PDW data are concluded and the simulation example of ratio frequency (RF), pulse width (PW), pulse repetition interval (PRI) are presented.

Key words: radar; electromagnetic environment; modeling; simulation; pulse describe word

0 引言

随着电子装备的广泛使用, 电子对抗日趋激烈。大功率辐射源之间电磁辐射的相互干扰, 使得电磁环境越来越复杂。运用实装模拟复杂电磁环境成本高、复杂程度低和技术可行性受限, 为此常采用电磁环境模拟仿真技术。目前国内外都很重视运用模拟仿真方法进行复杂电磁环境下的训练, 目的是使作战指挥员能熟练掌握战场电磁环境态势^[1], 以便提高指挥员指挥决策能力。本文采用基于功能仿真的方法对电磁环境进行仿真, 对 RF、PW、PRI 三项参数进行统一建模, 设计以 Matlab 为仿真平台的 PDW 模型体系框架, 模拟生成了以 Microsoft Access 2003 作为数据库

支撑 PDW 的脉冲数据流。

1 电磁环境特征分析

1.1 电磁环境的构成分析

电磁环境由三个要素组成, 分别是人为电磁辐射、自然电磁辐射和辐射传播因素^[2]。电磁环境特性分析主要从空域、时域、频域和能量域四个构成方面^[1-3]展开。电磁环境的空域特性表现在电磁信号在空间分布呈立体多向、纵横交错的电磁辐射态势。电磁环境的时域特性表现在电磁辐射信号随机性强、动态变化。电磁环境在频域特性表现为频谱互相重叠, 密集度高。电磁环境在能量域特性上表现为电磁信号功率强弱变化和能量密度分布不均。电磁环境的复杂性取决于以上四域交集组合的复杂程度, 因此, 对电磁环境的模拟, 需要从四域进行模拟, 通过不同模拟组合, 构成复杂电磁环境。

收稿日期: 2013-09-19; 2013-12-10 修回。

作者简介: 卢小勇 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事预警监视装备技术研究。

1.2 电磁环境仿真方法

对复杂电磁环境仿真,主要是为指挥人员建立一个尽量逼真的战场电磁环境。复杂电磁环境模拟有可视化显示方法和定量分析方法^[1]。复杂电磁环境可视化的表述形式采用图形、语音、文字数据等基本描述方法。该方法可照电磁辐射源、电磁辐射范围、电磁传播环境和电磁频谱全景等功能展开研究。定量方法主要是对战场上电磁辐射源数量、电磁信号强度、电磁信号密度和电磁信号参数等给出具体的数据,使指挥员更精确地掌握战场电磁环境信息资源。可视化方法和定量方法各有优缺点,最好的方法是两种结合起来,形成优势互补。

雷达电磁环境主要采用某一点(陆、海、空、天)处接收到的雷达脉冲信号的特征及其脉冲流密度来描述。对雷达电磁环境仿真的方法可分信号仿真和功能仿真^[2-3]。信号仿真模拟雷达发射、回波和干扰等信号^[4-5]的幅值信息和相位信息,而功能仿真只模拟幅值信息。两种仿真的逼真度都主要取决于数学模型建立的准确性以及仿真设计的合理性。但功能仿真以其易实现、成本低、较灵活和实时性强等优点而获得广泛运用。对雷达电磁环境进行功能仿真,利用计算机计算电磁环境数学模型,产生用 PDW 描述的电磁环境脉冲数据流,并不产生真实的视频信号和射频信号,而是以数据形式描述电磁环境。

2 雷达电磁环境建模与仿真

描述雷达脉冲特征的参数一般采用以下几项参数^[6-7]:脉冲载频(RF)、脉冲宽度(PW)、脉冲重复间隔(PRI)、脉冲幅度(PA)、脉冲的到达角(AOA)等,总称为脉冲描述字(PDW)。即 PDW 的组成为:PDW=(RF,PW,PRI,PA,AOA),当然,随着信息处理技术不断发展,描述雷达脉冲的参数在增加。由于对 PA 和 AOA 的研究较成熟^[2-3,6],而 RF、PW、PRI 研究较复杂,下面着重研究这三项参数模型。

2.1 雷达信号特征参数模型

雷达脉冲模型一般可从空域、时域、频域和能量域等方面进行构建,对其中频域载频 RF、时域的脉宽 PW 和脉冲重复间隔 PRI 三项参数^[2-3,6-7]统一建模如下。

$$k(n+1)=\begin{cases}k(n) & n_{x_{ij}}<N_{x_{ij}},k(n)<M_i \\ k(n)+1 & n_{x_{ij}}=N_{x_{ij}},k(n)<M_i \\ 1 & n_{x_{ij}}=N_{x_{ij}},k(n)=M_i\end{cases}\quad (1)$$

式中, $k(1)=1,n_{x_{ij}}=0$

本脉冲的 x 数学模型可建立为:

$$x_{ij}=x_{i0}+\delta_x\times r+\Delta x_i\times \Pi(-1,1)\quad (2)$$

式中, $x\in(\text{RF},\text{PRI},\text{PW})$ 表示脉冲载频、重复间隔、脉宽的数学模型。 n 为脉冲序列, δ_x 为 x 的容差范围,此参数通常由实际探测数据分析统计中获得; r 为均值为 0、方差为 1 的正态随机数; $\Pi(-1,1)$ 为 $[-1,1]$ 区间均匀分布的独立随机数。表 1 给出了载频 RF、脉宽 PW 和脉冲重复间隔 PRI 的常见工作模式。

以 x 为脉冲宽度为例,对以上模型进行详细说明。PW 有 5 种常见的变化模式,即 $i\in(1,2,3,4,5)$ 5 种变化模式,具体如表 1 所示。

- M_i 为以 i 变化模式时的 PW 值个数;

$N_{x_{ij}}$ 为当前信号在 PW 值上发射的脉冲总数;

$n_{x_{ij}}$ 为该信号在 PW 值上发射的脉冲数;

$k(n)$ 为本脉冲的 PW 的工作状态;

$k(n+1)$ 为下一个脉冲的 PW 的工作状态;

x_{ij} 为以 i 变化模式时的第 j 个 PW 值,则有 $1\leq j\leq M_i$;

x_{ij0} 为以 i 变化模式时的中心 PW;

Δx_i 为当前 PW 模式对应的 PW 变化范围,除捷变模式,其他模式 $\Delta x_i=0$ 。

表 1 部分参数的常见工作模式

部分脉冲参数	常见变化模式
脉冲载频 RF	1 RF 固定;2 RF 捷变;3 RF 驻留;4 RF 分组;5 RF 分集;6 RF 微变;7 RF 抖动
脉冲重复间隔 PRI	1 PRI 固定;2 PRI 驻留;3 PRI 分组;4 PRI 参差;5 PRI 跳变;6 PRI 抖动;7 PRI 滑变;8 PRI 排定
脉冲宽度 PW	1 PW 固定;2 PW 捷变;3 PW 驻留;4 PW 分组;5 PW 编码

2.2 仿真体系设计

雷达源环境仿真子系统包括雷达实体模型、雷达信号样式模型、基础模型。各模型与雷达源环境仿真子系统体系结构层次图关系如图 1 所示。

首先,在最底层即数据层之上,是基础模型层,该层是该子系统实现的基础与核心,为整个系统提供模型支撑,提供基础模型为信号样式模型层调用,基础模型包括载频模型、脉宽模型、重频模型、到达时间模型、到达角模型、幅值模型等;基础模型层之上是信号样式模型层,该层的信号模型需要基础模型层提供基础模型支撑,规划信号样式模型,为雷达实体模型层提供信号模型库以供调用;最后是雷达实体模型层,实体模型是对实体雷达装备的模拟,该层在仿真控制层的控制下,规划和管理下层的模型库。



图 1 仿真模型体系结构图

2.3 仿真流程设计

电磁环境仿真流程如图 2 所示。先对电磁环境脉冲描述字的单个参数进行描述,然后再从单部雷达到多部雷达进行描述,从而模拟出复杂的雷达电磁环境信号脉冲数据流。

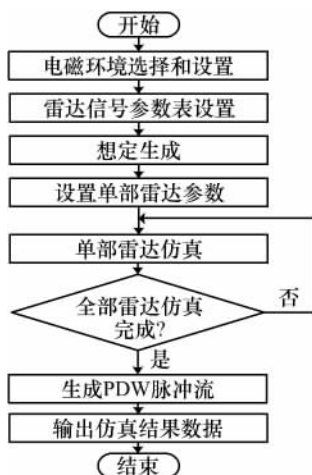


图 2 电磁环境仿真流程图

2.4 生成数据处理

电磁环境是由该点处接收到的雷达脉冲特征以及脉冲流密度来描述的。在仿真时间内依次计算每部雷达的脉冲各参数数学模型,将生成的脉冲数据存储起来,最后按到达时间进行排序,得到整个仿真时间内的 PDW 流,从而得到多部雷达的脉冲信号。

1) 排序处理

多部雷达的脉冲信号生成后,再将多路脉冲序列融合成一路有序的脉冲序列。不同雷达脉冲的到达时间有先有后,要融合成一路脉冲,需要按脉冲到达时间(TOA)的先后顺序对多路脉冲序列进行排序。具体方法可参见文献[8]中的归并排序的 PDW 排序算法和快速排序的 PDW 排序算法。

2) 重叠处理

现代电子战,雷达面临的电磁环境极为复杂,雷达脉冲密度可高达每秒数百万个脉冲。模拟如此高密度的脉冲发生脉冲重叠的概率非常大,脉冲丢失现象也很严重。一般按某一参数(脉宽、重频、功率、到达时间)优先级进行取舍处理。

3) 数据存储

利用仿真模型对某想定下的雷达电磁环境进行了仿真试验,采用 Matlab 作为软件仿真平台,以 Microsoft Access 2003 作为数据库支撑。对多部雷达形成的复杂电磁环境进行模拟,分别存入一个对应的数据表中,最后把数据表融合成为一个数据总表,对数据表进行排序、重叠处理后,即可得到一个描述电磁环境 PDW 数据库。

3 仿真结果与分析

下面以想定某型雷达的参数 RF、PW、PRI 的生成为例,对模拟数据进行说明。RF、PW、PRI 在对于变化模式下的模拟数据直方图如图 3~6 所示。

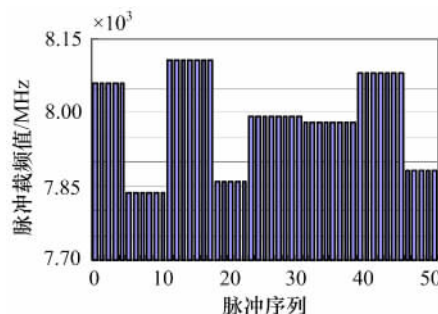


图 3 RF 捷变模式模拟数据

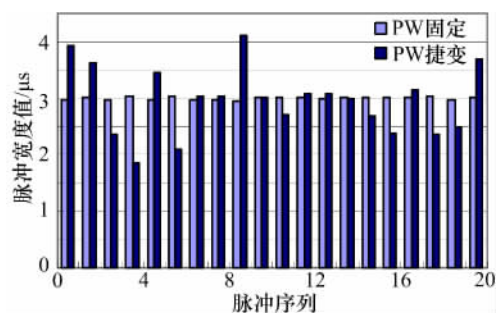


图 4 PW 固定/捷变模式模拟数据

图 3 为 RF 在捷变模式下模拟生成数据图,横坐标为脉冲序列,纵坐标为 RF 值,它的频率值个数以及在每个频率值上工作脉冲个数都可以通过人机交互界面设置。以上模拟数据是中心频率在 8000MHz,设置 8 个频率值,在每个频率值有 4~8 个随机生成的脉冲。

图 4 给出了 PW 的固定和捷变两种模式的模拟数据图。横坐标为脉冲序列,纵坐标为 PW 值,它的 PW 值个数以及在工作脉冲个数都可以在

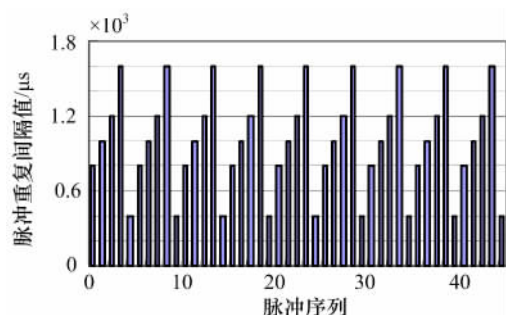


图5 PRI 参差模式模拟数据

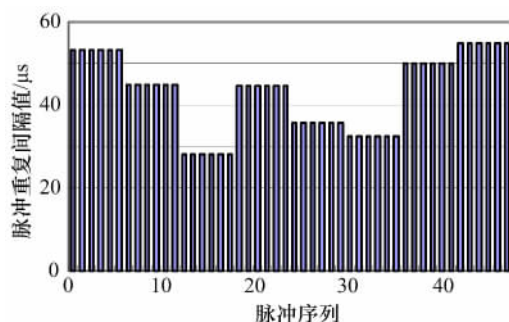


图6 PRI 分组模式模拟数据

人机交互界面设置。以上模拟数据是中心脉宽在 $3\mu\text{s}$ 的固定和捷变模式下的模拟数据。

图5~6给出了PRI的参差和分组两种模式的模拟数据图。横坐标为脉冲序列,纵坐标为PRI值,它的PRI值个数和在每个PRI值上工作脉冲个数都可以在人机交互界面设置。其中图5为PRI参差模式,有5个PRI值组成的参差模式;图6为PRI分组模式,包括8个PRI值,每个PRI上包括6个脉冲。

4 结束语

本文以电磁环境模拟训练系统研究需求为背景,

从空域、时域、频域、能量域四个构成方面分析电磁环境特性。采用PDW对电磁环境进行描述,以功能仿真的方法对电磁环境进行仿真,归纳了PDW部分参数的数学模型,给出电磁环境PDW仿真流程,设计了基于PDW的雷达信号参数模型框架结构,采用Matlab作为仿真平台,模拟生成了以Microsoft Access 2003作为数据库支撑PDW的脉冲数据流。在电磁环境仿真系统中,生成的PDW数据流用于引导干扰信号的仿真。■

参考文献:

- [1] 屈兵超,文若鹏.现代战场复杂电磁环境[M].沈阳:白山出版社,2010.
- [2] 赵晶,刘义,来庆福,等.防空作战电磁环境建模与仿真[J].系统仿真学报,2012,24(2):258-262.
- [3] 王海.基于迭代方法的高逼真雷达信号环境仿真研究[J].系统仿真学报,2012,24(4):897-901.
- [4] Yoann P, Marc B, Michael I. Signal level simulator for netted text radar waveforms evaluation[C]. A&E Systems Magazine,2010;27-29.
- [5] Marc B, Michael I. A signal level simulator for multistatic and netted radar systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2011,47(1):178-186.
- [6] 卢小勇,闫抒升,王晓军,等.电磁环境模拟雷达脉冲宽度建模与仿真研究[J].空军预警学院学报,2013,27(2):112-114.
- [7] 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.
- [8] 李望.基于PCI的雷达视频信号模拟器软件系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2007:21-24.

(上接第50页)

参考文献:

- [1] 李侠.现代雷达技术[M].北京:兵器工业出版社,2000:341-350.
- [2] Maisel L. Performance of sidelobe blanking systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968,4(2):174-180.
- [3] David A, Shawn S. Sidelobe Blanking with Integration and Target Fluctuation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2002,38(3):1023-1037.
- [4] David A, Nathan R. Sidelobe blanking with expanded models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2011,47(2):790-805.
- [5] Demaio A, Farina A, Gini F. Performance analysis of the sidelobe blanking system for two fluctuating jammer models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2005,41(3):1082-1091.
- [6] Shnidman DA, Toumodge SS. Sidelobe blanking with integration and target fluctuation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 3(38): 1023-1037.
- [7] 夏涌,杨辉,刘磊山.基于FPGA的旁瓣匿影工程化实现[J].空军雷达学院学报,2007,21(4):286-288.
- [8] 陈霄恒.脉冲压缩雷达旁瓣匿影干扰技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
- [9] 杨万海.雷达系统建模与仿真[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007:70-72.