

文章编号: 2095-4980(2019)04-0636-05

典型雷达电磁环境效应特征数据模拟系统

艾小锋¹, 赵 锋¹, 王满喜²

(1.国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 2.电子信息系统复杂电磁环境效应重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 针对雷达系统复杂电磁环境效应, 在分析雷达面临复杂电磁环境的基础上, 研究电磁环境要素表征方法, 提出雷达信号处理和数据处理阶段电磁环境效应量化指标, 建立雷达电磁环境要素信号模型、雷达信号接收与处理、雷达数据处理模型, 给出雷达电磁环境效应数据模拟方法, 支持不同复杂电磁环境要素的参数化输入, 并动态仿真复杂电磁环境与雷达系统的作用过程, 输出各个节点的效应表征参数瞬态和统计值。初步结果验证了研究思路的正确性, 能够为建立复杂电磁环境要素与复杂电磁环境效应之间的映射关系提供大样本数据支撑。

关键词: 电磁环境; 效应特征; 雷达仿真

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0636

Data simulation system of electromagnetic environment effects on typical radar

AI Xiaofeng¹, ZHAO Feng¹, WANG Manxi²

(1.School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China; 2.State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: The complex electromagnetic environment effects on radar system is a hot topic at present. Based on the analysis of the complex electromagnetic environment for radar, the representation method of electromagnetic environment elements is studied, and the quantization index of electromagnetic environment effect on radar signal and data processing is put forward. Then, the signal model of radar electromagnetic environment and the radar signal receiving and processing, data processing model are established. The simulation method of radar electromagnetic environment effect is given, which supports the parameterized input of different complex electromagnetic environment elements. Dynamic simulation of the interaction between complex electromagnetic environment and radar system is realized, and the transient and statistical features of each node can be obtained. The preliminary results verify the correctness of the research ideas, which can provide a large sample data support for establishing the mapping relationship between the elements of complex electromagnetic environment and the effect of complex electromagnetic environment.

Keywords: electromagnetic environment; effect feature; radar simulation

电子信息装备复杂电磁环境适应能力是大家普遍关注的问题^[1], 20 世纪 30 年代, 国外在电磁环境和电磁环境效应方面就已开展大量研究, 形成了一系列标准和手册等指导性文件^[2], 但是未涉及复杂电磁环境效应的具体等级划分规则和限值标准, 尚未建立一套复杂电磁环境效应参数化表征和量化规范^[3]。国内多家单位在电子对抗的研究中分别开展了电磁环境效应机理与电子信息系统复杂电磁环境效应的研究工作, 取得了一些进展, 但通常局限于系统某一环节, 尚未建立系统全过程的综合效应普适性规律^[4]。

复杂电磁环境要素及效应的参数化表征体系通常比较抽象, 很难落到具体应用实处, 而对于特定的电子信息系统复杂电磁环境要素及效应的参数化表征通常要求很具体, 特别地, 适应于雷达系统复杂电磁环境效应机理逆向研究的参数化表征还需进一步探究。另外, 通过理论推导建立复杂电磁环境要素和效应之间的映射关系存在诸多困难, 而通过大量试验数据来建立统计模型是一条可行的途径。目前外场装备试验存在代价高、场景不够丰富、数据不足等问题, 可采用相干视频信号仿真方法^[5], 模拟出不同电磁环境要素下大量高逼真度的雷

收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401491; 61890541)

达系统电磁环境效应数据, 从而为建立复杂电磁环境要素和效应之间的映射关系提供数据支撑。

1 电磁环境要素参数化表征方法

复杂电磁环境要素表征是在对特定区域各种电磁信号的类型、属性和分布等情况进行定性和定量分析的基础上, 选取主要表征参数对电磁环境特性进行描述, 构建电磁环境要素样本空间的基向量。因此, 为了分析复杂电磁环境对电子信息系统产生的不同效应影响, 以及建立复杂电磁环境要素与电子信息系统复杂电磁环境效应现象之间的量化关系, 将复杂电磁环境按照不同信号样式分为背景信号、压制干扰信号、欺骗干扰信号、杂波信号等, 并建立包含不同样本的数学模型和参数表征样本集 X , 其中的每个样本 X_i 是按照频域、能量域和调制等域构建参数集, 建立不同参数下不同取值的数据组合。

上述四类电磁环境要素参数多样且表述不一, 如果用全要素描述则参数空间维数庞大。参数集大小由要素类型、要素取值区间和取值间隔确定, 是乘积关系, 因此, 需要精心设计尽量减少数据量, 否则后续使用非常困难。可采用理论推导和仿真分析相结合的手段, 基于雷达系统各个环节对电磁环境要素的敏感性分析, 筛选出各要素中影响雷达性能的关键因素, 从而降低电磁环境要素参数维数。

2 雷达电磁环境效应表征方法

复杂电磁环境效应包括多种形式, 主要有能量效应、信息效应和管控效应, 本文主要考虑雷达系统的信息效应。雷达电磁环境效应表征是根据雷达系统环节进行分级, 对不同分级的输出效应现象进行参数化表示, 建立特征参数量化的样本集。根据雷达系统复杂电磁环境效应研究需求和不同功能, 可分为接收前端、信号处理单元和数据处理单元。为了建立不同模块与环境要素之间的映射关系, 将接收前端按照不同功能模块分为限幅器、低噪放、衰减器、混频器、滤波器、放大器和混频器等节点; 将信号处理单元按照不同功能模块分为数字下变频(Digital Down Conversion, DDC)、脉冲压缩、动目标显示(Moving Target Indication, MTI)及动目标检测(Moving Target Detection, MTD)、恒虚警检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)等节点; 将数据处理单元分为量测预处理、数据关联、跟踪、航迹等节点。

根据接收前端的不同节点所产生的效应现象不同, 建立不同节点效应现象的参数化表征样本集, 以此确定不同节点之间的效应现象因果关系, 并给出不同特征参数的测量方法。以同样方式, 建立信号处理单元和数据处理单元中不同节点所产生效应现象的参数表征样本集以及相应的测量方法, 并确定样本之间的定性或量化关系。具体实施方案如图1所示。

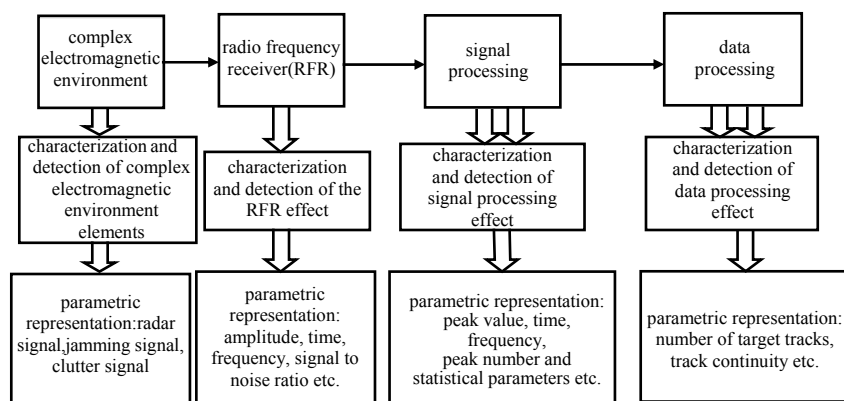


Fig.1 Scheme for characterization of electromagnetic environmental effects on radar system

图1 雷达系统电磁环境效应的表征实施方案

基于雷达系统每个节点的信号或数据, 提取相应的参数, 包括时域与频域、瞬态与统计量等, 作为雷达系统复杂电磁环境效应的表征参数, 从而可以检验雷达系统随电磁环境要素变化情况。原来雷达系统接收机测试已经有一些指标用于描述雷达系统本身特性^[6], 如信噪比、带宽等, 但这些指标会随外界环境变化而变化, 因此可以作为效应参数使用。雷达对抗效能评估通常基于点迹和航迹^[5], 这些评估指标恰恰反映了雷达系统在不同干扰条件下的性能, 因此本文在现有指标基础上, 根据环境要素类型, 增加相应指标, 构成一个新的指标体系, 综合反映雷达系统在复杂电磁环境信号下的效应特征。

3 信号处理电磁环境效应表征

通过理论分析和建模仿真,建立信号处理单元不同节点(数字下变频、脉冲压缩、MTI 及 MTD、CFAR)的效应现象特征样本集,根据不同节点的效应特征,建立不同效应现象的定性或量化描述。

首先,根据数字下变频得到同相正交(In-phase Quadrature, IQ)输出信号的特征,建立表征其效应现象特征的样本集,如幅值、均值、带宽等参数,以确定其与中频输出的量化关系。然后,根据脉冲压缩输出特征,建立表征其效应现象特征的时域样本集,如幅值、信噪比等参数,以确定其与 IQ 输出的量化关系。MTI 及 MTD 节点依此类推。最后,根据 CFAR 输出峰值特点,确定输出峰值数量与输入及设定阈值的量化关系。

4 数据处理电磁环境效应表征

首先,通过理论分析和建模仿真建立数据处理单元的效应现象表征方法,如是否有航迹显示、显示航迹数量、航迹是否中断等显示特征。然后,建立航迹显示特征与数据信号处理单元输出的量化关系。最后,通过航迹存储和离线分析,验证航迹显示特征与前面效应现象参数量化关系的有效性。

5 雷达电磁环境效应数据模拟方法

雷达电磁环境效应数据模拟方法主要研究利用复杂电磁环境要素的参数化表征方法、雷达电磁环境效应表征方法,结合典型雷达系统工作过程来获取雷达电磁环境效应数据的方法。主要包括两方面的工作:雷达电磁环境效应数据产生模型研究;雷达电磁环境效应数据生成框架研究。

雷达电磁环境效应数据模拟主要完成大量雷达电磁环境效应仿真数据的生成,完成数据模拟初始设置后,数据生成过程中不需人工干预,复杂电磁环境要素参数按设定取值区间和步长循环设置,以数据表格式自动记录输入的复杂电磁环境要素参量值及对应的效应量化值。

6 总体框架

典型雷达电磁环境效应数据生成框架如图 2 所示,主要包括仿真参数设置模块、场景参数设置模块、复杂电磁信号产生模块、雷达信号级仿真模块以及复杂电磁环境效应表征模块。仿真参数设置主要完成蒙特卡罗仿真参数的设置(仿真次数、步长、采样、数据采集等参数);场景参数设置模块主要完成模型相关参数设置并完成战情解算工作;复杂电磁环境信号生成模块根据设定的战情参数,生成相应的复杂电磁环境信号;雷达信号级仿真系统模拟典型雷达从中频信号接收到信号处理、数据处理等工作流程;复杂电磁环境效应表征模块计算雷达各个处理节点的效应参数瞬态特征和统计特征,最后通过蒙特卡罗仿真记录复杂电磁环境要素参数和效应特征样本集。

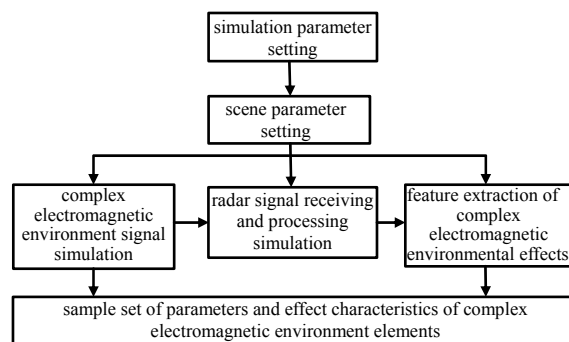


Fig.2 Data simulation of electromagnetic environment effect on typical radar

图 2 典型雷达电磁环境效应数据模拟

7 雷达信号接收与处理模拟

雷达信号接收与处理模拟由 2 个循环组成:第一个循环以雷达的处理间隔为单位,每次循环首先进行本次处理间隔内的波束调度,然后依次处理被安排的所有波束内回波信息;第二个循环在第一个循环内部,以雷达的单次照射驻留为单位,每次循环处理一次照射回波。对于单次波束照射驻留,主要完成单个波束驻留时间内,中频接收信号生成、信号接收、信号处理以及数据处理。

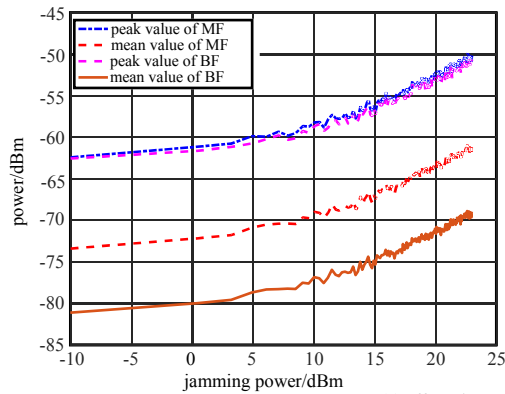
8 雷达电磁环境效应特征提取

复杂电磁环境效应特征提取模块根据采集的雷达系统各个节点的信号和数据,计算相应的复杂电磁环境效应表征参数。复杂电磁环境效应表征模块包括信号接收、信号处理、数据处理复杂电磁环境效应表征模块。信

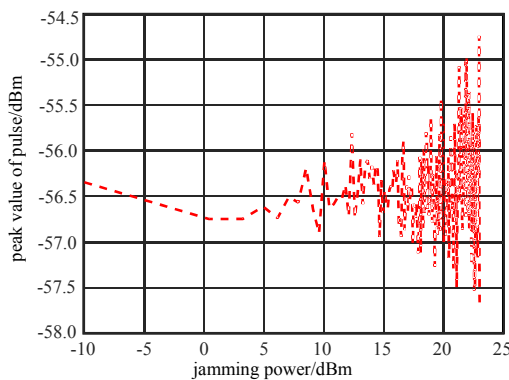
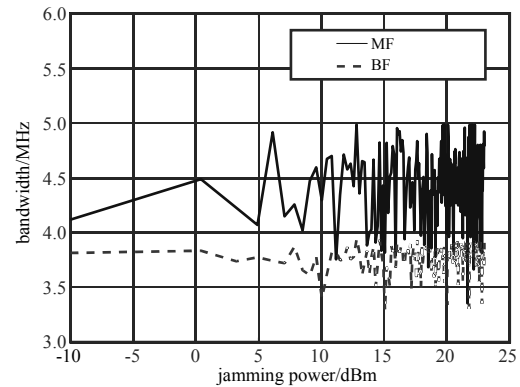
号接收复杂电磁环境效应表征模块根据雷达仿真系统中频回波和数字下变频信号计算相应效应参数；信号处理单元复杂电磁环境效应表征模块根据雷达仿真系统信号处理各个环节的信号和数据计算出相应的效应参数；数据处理单元复杂电磁环境效应表征模块根据雷达仿真系统数据处理各个环节的数据计算出相应的效应参数。

9 仿真试验与结果分析

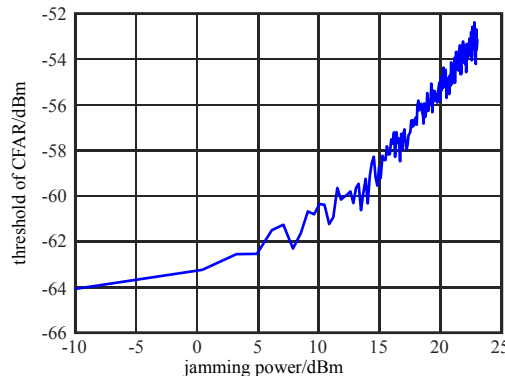
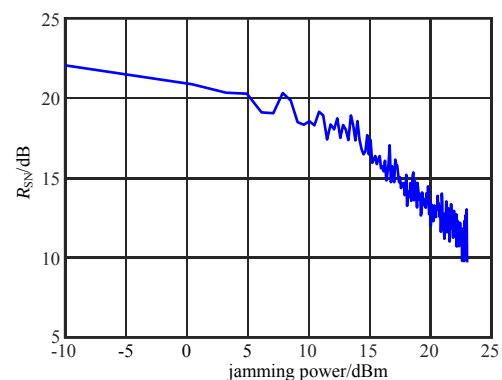
以压制干扰为例：雷达为机械扫描雷达，工作频率 3.15 GHz，峰值功率 360 kW，波束宽度方位 2° ，仰角：余割平方至 30° ，天线增益 28.5 dB，扫描速率 6 rpm，脉冲宽度 100 μs ，信号带宽 1 MHz，脉冲重频 2 ms，干扰样式为噪声调频，干扰功率 -10~22 dBm。数据模拟系统经 100 次蒙特卡洛仿真后得到中频以下各个节点效应特征数据分别如图 3 所示。可以看到，随着噪声干扰功率的增加，中频接收信号和基带信号最大值、均值都在增加，中频带宽随功率增加逐渐接近于 5 MHz，这正是雷达接收机带宽，而基带信号带宽约 4 MHz，体现了低通滤波器的作用；脉压后目标所在距离单元的峰值随干扰并不上升而是起伏，与噪声干扰无脉压得益一致，而信噪比随干扰功率增加而下降；检测门限随干扰功率增加而增加，检测概率随干扰功率增加而减小；点迹航迹误差随着干扰功率增加而增加，点迹虚假率只计算了目标方向的虚假点，而虚假航迹是机械扫描一周的统计结果，因此虚假航迹高一些。总之，随着噪声干扰功率的增加，各个节点的效应特征数据发生相应变化，且变化规律符合理论认识，这些效应特征正确反映了噪声干扰对各个环节的影响。



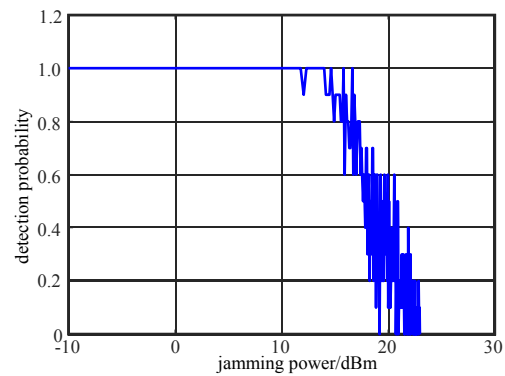
(a) effect characteristics of signal receiving stage



(b) effect characteristics of pulse compressing stage



(c) effect characteristics of detection stage



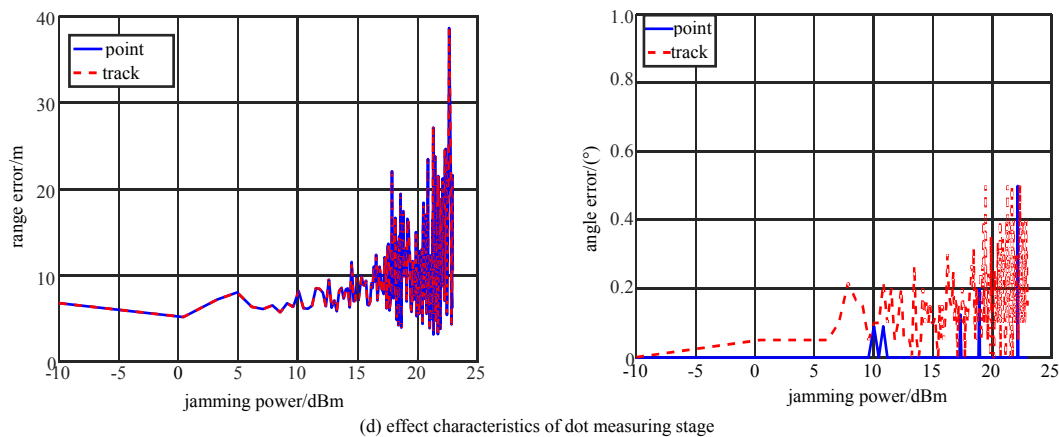


Fig.3 Effect characteristics of each processing stage
图 3 各个阶段效应特征

10 结论

本文分析了雷达系统可能面临的几种类型环境,并筛选相应的关键参数来描述不同环境。然后将雷达系统划分为不同节点,并针对每个节点提出相应的效应指标。最后采用相干视频信号级仿真方法构建了雷达电磁环境效应数据模拟系统,可以灵活输入不同环境参数,得到不同条件下的效应指标,不仅有助于评估雷达的环境适应能力,而且可为建立复杂电磁环境要素与复杂电磁环境效应之间的映射关系提供大样本数据支撑。但目前系统尚不完善,效应指标体系还需进一步提炼。另外,雷达系统中频信号模拟的实时性也是值得关注的问题,为获得海量仿真数据,需遍历各种环境要素参数,可采用分布式仿真、图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)加速等方法。

参考文献:

- [1] 符淑芹,彭燕,薛原. 雷达装备复杂电磁环境适应性试验需求分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):868-874. (FU Shuqin,PENG Yan,XUE Yuan. Analysis on requirements of the complex electromagnetic environment adaptation test for radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):868-874.)
- [2] 汪连栋,曾勇虎,申绪润. 电子信息系统复杂电磁环境效应研究路线图 V1.0[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. (WANG Liandong,ZENG Yonghu,SHEN Xujian. Study road map V1.0 for complex electromagnetic environmental effects on electronic and information system[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2013.)
- [3] 董俊,蒲秀英,韩慧,等. 电磁环境分形特性分析与量化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):428-432. (DONG Jun,PU Xiuying,HAN Hui,et al. Fractal characteristics and quantification method of electromagnetic environment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):428-432.)
- [4] 李廷鹏,王满喜,彭丹华,等. 基于 GRNN 和 PNN 的复杂电磁环境效应机理分析[J]. 现代电子技术, 2018,41(23):145-148. (LI Tingpeng,WANG Manxi,PENG Danhua,et al. GRNN and PNN based mechanism analysis of complex electromagnetic environment effects[J]. Modern Electronics Technique, 2018,41(23):145-148.)
- [5] 赵锋,艾小锋,刘进,等. 组网雷达系统建模与仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2018. (ZHAO Feng,AI Xiaofeng,LIU Jin, et al. Modeling and simulation of netted radar system[M]. Beijing:Publishing House of Electronic Industry, 2018.)
- [6] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012. (CHEN Boxiao. Analysis and design of modern radar system[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2012.)

作者简介:



艾小锋(1983-),男,四川省安岳县人,博士,副研究员,主要研究方向为双/多基地雷达信号处理、雷达电子战仿真与评估等.email: anxifu2001@163.com.

赵 锋(1978-),男,南京市人,博士,副教授,主要研究方向为雷达电子战仿真与评估等.

王满喜(1978-),男,河南省确山县人,博士,副研究员,主要研究方向为电磁环境效应等.