

文章编号: 2095-4980(2018)06-1039-06

## 电磁信号环境仿真与可视化分析系统

安 红, 杨 莉

(中国电子科技集团公司第二十九研究所 电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

**摘 要:** 电磁信号环境仿真与可视化分析系统集成了战场电磁信号环境仿真功能和电磁信号可视化分析功能。一方面, 针对战场电磁环境的构成要素及其变化特征, 建立粗颗粒和细颗粒两种粒度的信号模型, 并建立信号的空间传播模型, 实现电磁信号环境的动态仿真; 另一方面, 综合利用计算机图形图像处理技术、高性能计算技术等, 实现战场电磁态势三维显示和电磁信号环境的可视化分析。本文对系统的功能、总体结构、软件结构、硬件结构和工作流程等方面进行了详细的介绍, 并对系统进行了应用实例分析。从应用效果看, 系统可作为电子战军官、操作员进行战场电磁态势分析以及电子侦察情报分析训练的仿真工具。

**关键词:** 电磁信号环境; 仿真; 可视化分析

**中图分类号:** TN974

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201806.1039

## Electromagnetic environment simulation and visualization analysis system

AN Hong, YANG Li

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, The 29th Research Institute of CETC, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** The electromagnetic environment simulation and visualization analysis system integrates the battlefield electromagnetic signal environment simulation function and the electromagnetic signal visualization analysis function. On the one hand, according to the composing elements of electromagnetic environment and their changing characteristics, two signal models of coarse particles and fine particles are established, as well as the signal spatial propagation model; and the electromagnetic signal environment dynamic simulation is realized based on these approaches. On the other hand, through computer graphics, image processing technology and high performance computing technology, the 3D display of battlefield electromagnetic situation and the visualization analysis of electromagnetic signal environment are realized. The functions of the system, the overall structure, the software structure, the hardware structure and the workflow are discussed, and an application of the system is introduced. From the application effect, the system can be used as a simulation tool for EW officers and EW equipment operators to conduct battlefield electromagnetic situation analysis and electronic reconnaissance intelligence analysis training.

**Keywords:** electromagnetic environment; simulation; visualization analysis

目前国内外对战场复杂电磁环境的定义已基本达成共识, 是指在战场上的一定时间、空间和频段范围内, 以雷电、静电、地磁场、宇宙辐射等自然电磁环境为背景, 以电子设备电磁辐射等有意、无意人为电磁活动为主体, 多种电磁信号密集交叠, 强度动态变化, 对电子信息系统、信息化装备和信息化作战产生显著影响的电磁环境。由于战场电磁环境越来越制约着电子信息武器装备作战效能的发挥, 世界各国都非常重视复杂电磁环境适应性研究条件建设, 为开展复杂电磁环境下武器装备的论证、研制和检测测试提供研究手段<sup>[1-3]</sup>。

由于战场电磁环境与受影响的客体密切相关, 例如雷达所关注的电磁环境与雷达侦察设备所关注的电磁环境是有较大差异的, 因此需要站在受电磁环境影响的客体角度, 对其所面临的电磁环境进行研究<sup>[4-8]</sup>。本文针对雷达侦察类设备, 包括雷达告警设备(Radar Warning Receiver, RWR)、电子战支援设备(Electronic warfare Support Measures, ESM)、电子情报侦察设备(Electronic Intelligence, ELINT)等, 所面临的战场电磁环境构成要素及其变化特征, 通过建立 2 种粒度的雷达辐射源信号仿真模型以及电磁信号空间传播模型, 实现对电磁信号环境的动态仿真, 同时综合利用计算机图形图像处理技术、高性能计算技术等, 实现对战场电磁态势的三维显示和电磁信号

收稿日期: 2017-09-15; 修回日期: 2017-11-10

环境的可视化分析,最终构建集战场电磁信号环境仿真与电磁信号可视化分析于一体的软件系统,重点介绍该软件系统的总体设计思路,并结合具体应用实例说明其所具备的电磁信号环境可视化分析能力。

## 1 仿真系统总体设计

### 1.1 系统功能设计

电磁信号环境仿真与可视化分析系统实现的主要功能包括: a) 实现对各类仿真对象(包括平台、辐射源、侦察设备等)数据库的管理功能; b) 实现基于数字地图的战场电磁信号环境仿真场景想定功能; c) 实现对战场电磁信号环境的动态仿真功能; d) 通过网络在线接收或离线加载方式,实现基于仿真数据流的战场电磁信号环境多维度、多视角可视化分析功能。

### 1.2 系统总体结构设计

电磁信号环境仿真与可视化分析系统的总体结构框图如图 1 所示。由图可见,电磁信号环境仿真与可视化分析系统由 3 部分组成:电磁信号环境仿真场景想定及综合显控用于实现仿真运行前的战场电磁信号环境仿真场景想定功能;仿真运行过程中的系统管理控制功能及仿真场景三维态势显示功能;电磁信号环境仿真用于实现对战场电磁信号环境的动态仿真,并按照仿真时钟输出电磁信号环境仿真数据流。电磁信号可视化分析既可以通过网络接收和处理电磁信号环境仿真输出的数据流,综合运用各种图形化显示手段对战场电磁信号环境进行多维度、多视角的在线可视化分析,也可以对存储在磁盘阵列中的电磁信号环境仿真数据进行离线可视化分析。在电磁信号环境仿真与可视化分析系统研制过程中,需要重点解决的关键技术有电磁信号环境建模仿真技术、电磁信号环境分层可视化技术、电磁信号数据统计分析技术、高性能并行计算技术等。

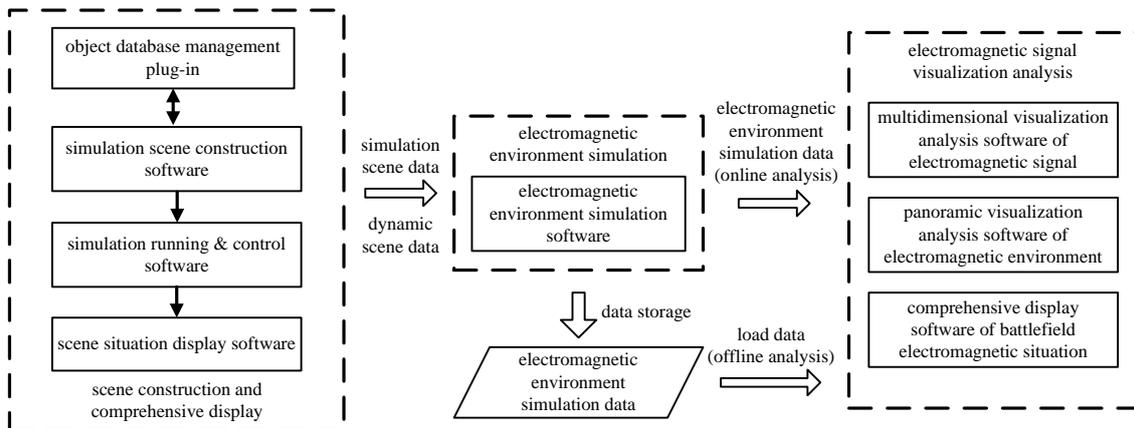


Fig.1 Overall structure diagram of electromagnetic environment simulation and visualization analysis system

图 1 电磁信号环境仿真与可视化分析系统总体结构框图

### 1.3 系统软件结构设计

电磁信号环境仿真与可视化分析系统是一个全数字分布式仿真系统,由电磁信号环境仿真场景想定及综合显控子系统、电磁信号环境仿真子系统和电磁信号可视化分析子系统组成,仿真系统软件功能结构框图如图 2 所示。

图中,对象数据库管理插件以人机交互方式实现对对象数据库中各个仿真对象数据表数据的增加、修改和删除操作,以表格方式提供对各仿真对象数据表内容的查询和浏览功能。对象数据库管理插件采用 Microsoft Visual C++对 Microsoft SQL Server 2005 数据库的访问功能进行函数封装,并以动态链接库(Dynamic Link Library, DLL)的软插件方式供仿真场景想定软件调用。

仿真场景想定软件用于在数字地图背景上以可视化方式实现对仿真场景数据的编辑,即在某个作战区域内部署各种雷达辐射源平台、雷达侦察设备平台,对平台运动轨迹进行规划,生成满足一定战场电磁信号环境复杂度要求的仿真场景数据并存储到可扩展标记语言(eXtensible Markup Language, XML)文件中。

雷达辐射源信号仿真模型是电磁信号环境仿真的核心模型,支持 2 种模型粒度,即粗粒度的脉冲级模型和细粒度的信号级模型。脉冲级模型根据仿真场景中雷达辐射源系统参数、发射信号波形参数、天线方向图及天线扫描参数等,按照仿真时间步进动态生成雷达辐射源信号的脉冲描述字数据流,脉冲描述字数据主要包括脉冲到达时间、载频、脉宽、脉幅、到达角、脉内调制类型及调制参数等;而信号级仿真模型则是对各种体制雷达发射信

号波形实现基于数字采样的建模, 仿真输出的是雷达射频/中频信号采样数据流。对雷达辐射源信号的仿真, 主要从雷达信号的脉内调制特性、重频特性、载频特性和发射天线扫描特性等方面对雷达信号进行建模, 并通过对载频、重频、脉内调制和天线扫描等不同类型间的有机组合来模拟目前绝大多数体制雷达辐射的信号。

电磁信号空间传播仿真模型主要实现各种典型环境条件下空间传播链路对电磁信号造成的衰减、延时和畸变效应的仿真, 并针对各种气象条件(如降雨、云雾、降雪等)建立相应的大气衰减统计计算模型。

在电磁信号环境仿真与可视化分析系统中, 以战场空间内指定地点的雷达侦察设备作为战场电磁环境的感知主体, 通过对侦察设备侦收处理过程的数据可视化分析来反映其所面临的战场电磁环境的细节特征及全景态势。因此对雷达侦察设备采用功能级建模方法, 实现其接收天线方向图调制、接收机及信号处理过程的行为仿真, 并根据侦察设备工作方式及工作参数, 通过仿真数据综合处理及存储模块, 在每个仿真时间步长内, 对仿真场景中各个雷达辐射源仿真输出的脉冲描述字数据流按照脉冲到达时间先后进行综合排序, 实现对场景指定地点处侦察设备所感知的战场电磁信号环境的动态模拟。将生成的电磁信号环境仿真数据通过网络发送给电磁信号可视化分析子系统软件, 并同时本地化存储以用于事后的离线可视化分析。

电磁信号可视化分析子系统软件以侦察设备对电磁信号环境感知能力为主, 综合运用各种手段从多个维度(时域、频域、空域、能量域、调制域等)、多个视角(全景、细节)对战场电磁信号环境进行信息分层可视化分析, 包括原始信号、全脉冲数据、辐射源特征数据和电磁态势等 4 个层面。

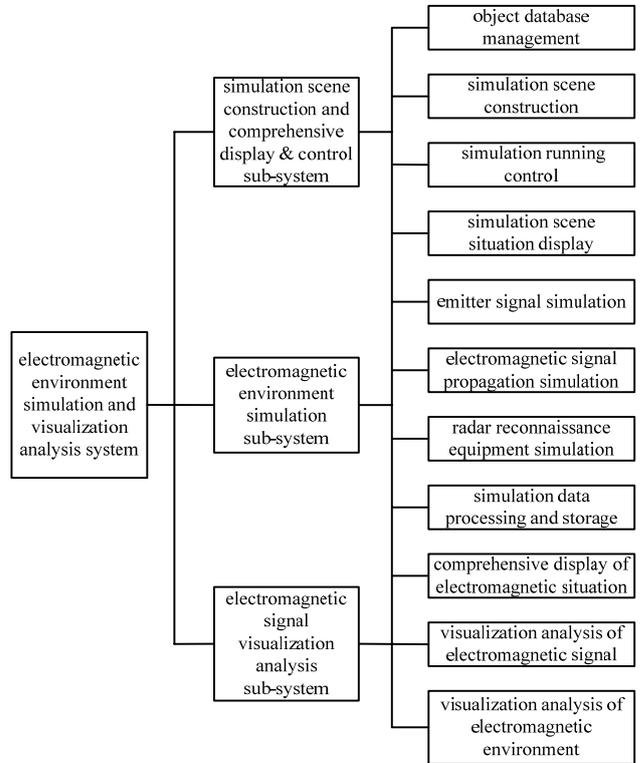


Fig.2 Software structure diagram of electromagnetic environment simulation and visualization analysis system

图 2 电磁信号环境仿真与可视化分析系统软件功能结构框图

### 1.4 系统硬件结构设计

电磁信号环境仿真与可视化分析系统采用基于客户端/服务器(Client/Server, C/S)的分布式仿真体系结构, 系统硬件配置结构框图如图 3 所示。构成 3 个子系统的各仿真软件通过高速局域网进行数据交互, 网络通信协议采用 TCP/IP 协议, 图 3 中计算机平台既可以是商用图形工作站, 也可以是配有高性能显卡的商用个人计算机。

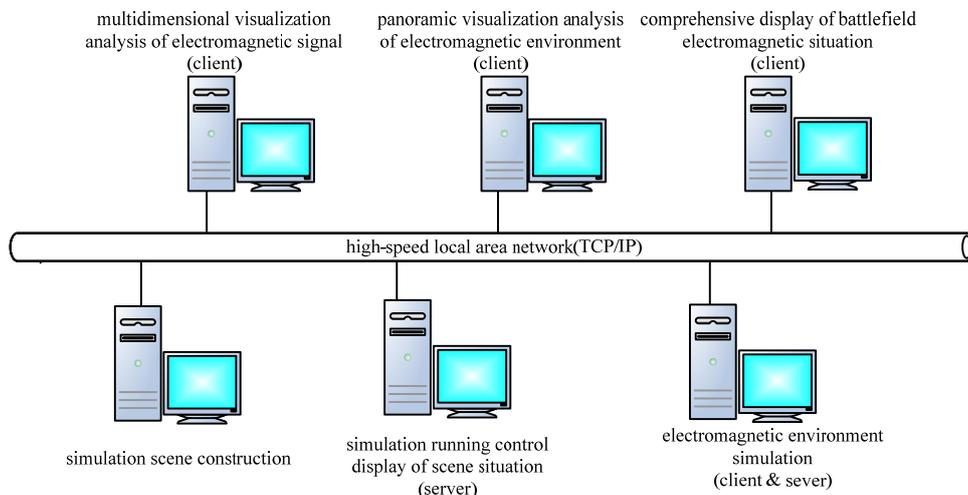


Fig.3 Hardware structure diagram of electromagnetic environment simulation and visualization analysis system

图 3 电磁信号环境仿真与可视化分析系统硬件配置结构框图

图 3 中, 仿真场景想定软件既可与仿真运行管控软件及仿真场景态势显示软件共同运行在一台计算机上, 也

可单独运行在另外一台计算机上。在电磁信号环境仿真与可视化分析系统运行前，首先要保证运行各子系统软件的计算机网络连接正确。其中，仿真运行管控软件是服务器，而电磁信号环境仿真软件则是客户端；同时，电磁信号环境仿真软件又是电磁信号多维度可视化分析软件、电磁环境全景可视化分析软件、战场电磁态势综合显示软件的服务器，即仿真系统采用了双层 C/S 结构。构成电磁信号可视化分析子系统的 3 个仿真软件在仿真系统运行过程中可以通过网络随时接入或退出，且在系统运行过程中，任何一个子系统软件都提供了人机交互功能，以实现仿真运行过程暂停/继续的控制能力。

### 1.5 系统工作流程设计

电磁信号环境仿真与可视化分析系统的工作流程如图 4 所示，分为仿真运行前的仿真场景设计、仿真运行过程中的电磁信号环境仿真与在线可视化分析、仿真运行结束后的电磁信号环境离线可视化分析 3 个阶段。

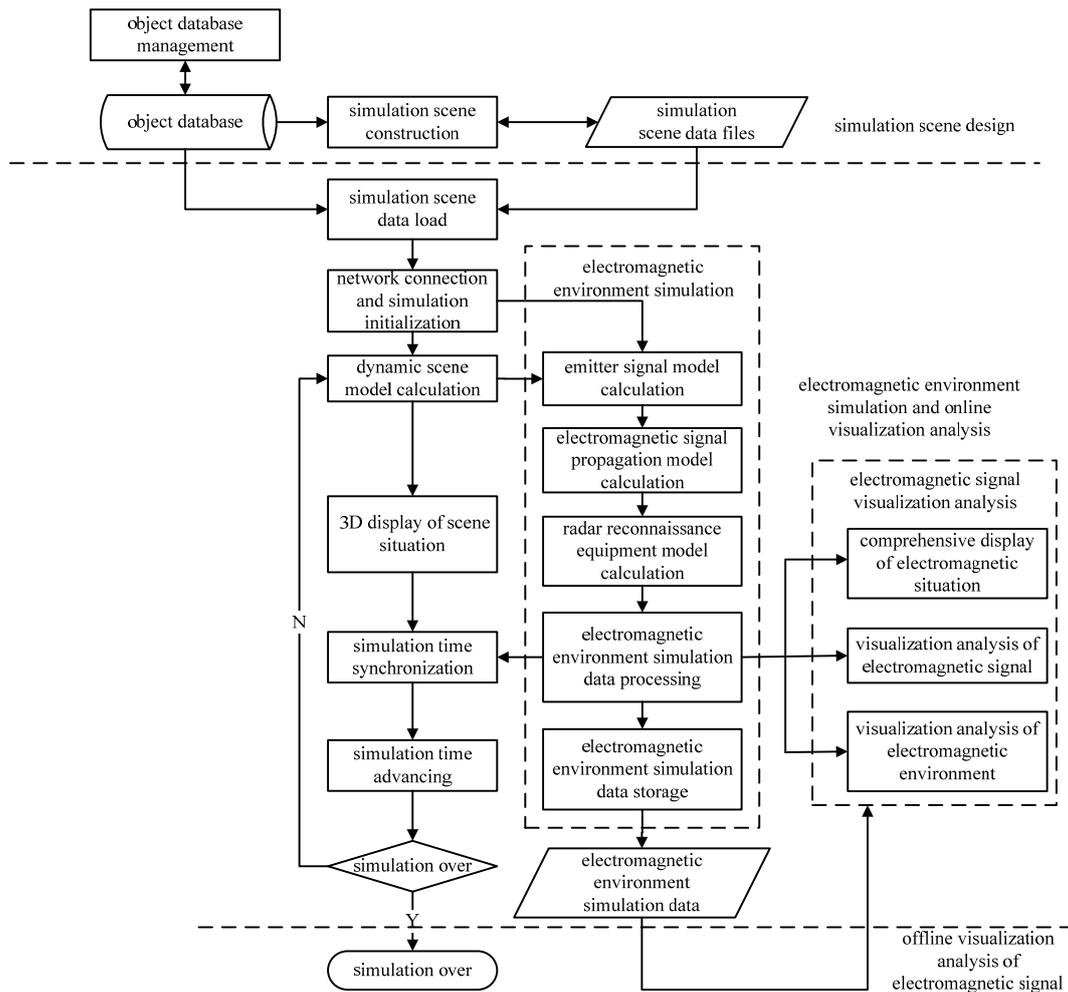


Fig.4 Flowchart of electromagnetic environment simulation and visualization analysis system

图 4 电磁信号环境仿真与可视化分析系统工作流程图

图 4 中，电磁信号环境仿真子系统根据仿真场景中的仿真对象参数以及当前时刻各个辐射源平台与侦察设备平台间的相对空间位置关系，通过雷达辐射源信号仿真模型、电磁信号空间传播仿真模型和雷达侦察设备仿真模型解算，以及电磁信号环境仿真数据综合处理后，生成当前仿真时间步长内的电磁信号环境仿真数据流，通过网络发送给电磁信号可视化分析子系统，同时将仿真数据流保存到本地磁盘中供电磁信号离线分析的数据加载使用。

## 2 仿真系统应用实例

结合具体仿真场景设计，重点介绍电磁信号环境仿真与可视化分析系统所具备的电磁信号环境可视化分析能力。图 5 是仿真场景想定软件界面，可按照雷达侦察试验要求，通过人机交互方式对电磁信号环境仿真场景进行编辑。在图 5 所示仿真场景中部署了 4 部雷达辐射源平台和 1 部雷达侦察设备平台，平台敌我属性用不同颜色区

分,平台型号从已挂载平台数据库中人工选取,对平台运动轨迹提供曲线拟合和圆周运动 2 种设置方式。曲线拟合方式中,平台的各个关键航迹点可通过鼠标在地图上点击选取,航迹点的经度、纬度、高度和速度可人工进行修改或设置,各关键航迹点之间采用最小二乘法进行曲线拟合,航迹拟合的结果显示在地图上;平台上的雷达辐射源开关机设置,可在平台的各个航迹点上进行开机或关机状态选择。当平台设置为圆周运动方式时,圆心坐标可通过鼠标在地图上点击选取,平台的飞行高度和速度通过人机界面进行手工输入,飞行方向可选择顺时针或逆时针运动;平台上的雷达辐射源开关机设置,可在以正北方向为 0° 顺时针旋转 360° 角度上进行开机或关机状态选择。

在仿真运行阶段,首先加载仿真场景想定阶段生成的仿真场景 XML 文件并建立与其他子系统软件的网络连接,然后以时钟同步与事件驱动相结合方式通过网络数据交互实现各仿真软件的协同运行控制。在仿真过程中,雷达侦察设备所感知的电磁信号环境在时间、空间、频谱、能量域上的动态特性可通过以下四类人机交互界面实现信息分层的可视化分析功能。

图 6 是电磁信号时频域可视化分析界面,主要针对当前仿真时间步长内侦察设备接收到的所有雷达辐射源信号(指时域叠加后的混合信号),提供频段信息、波形图和频谱图的动态显示和分析功能。

图 7 是全脉冲数据可视化分析界面,以侦察设备侦收的全脉冲数据的视角,提供对电磁信号从时间特征、频度特征、时频特征、分布特征 4 个维度进行可视化分析功能。时间特征是指雷达信号脉冲参数(载频、脉宽、脉幅、到达角、脉内调制类型)与脉冲到达时间的关系;频度特征是指对雷达信号脉冲参数(载频、脉宽、脉幅、到达角、脉内调制类型)出现的频度进行统计;时频特征是指雷达信号脉冲到达时间及脉宽与信号频率的关系,通过时频瀑布图进行动态表征;分布特征是对雷达信号脉冲数量随时间变化的关系进行统计,以及雷达信号脉冲数量在频域、能域、空域、频域&空域等各个维度上的分布特征进行统计。

图 8 是辐射源特征可视化分析界面,以侦察设备侦收的(以及结合其他手段获取的)辐射源特征数据的视角,提供对雷达辐射源从空间分布、强度分布、数量分布、数量统计 4 个维度进行可视化分析功能,各个维度的统计计算结果以极坐标图、曲线图、直方图等各种方式进行动态显示。

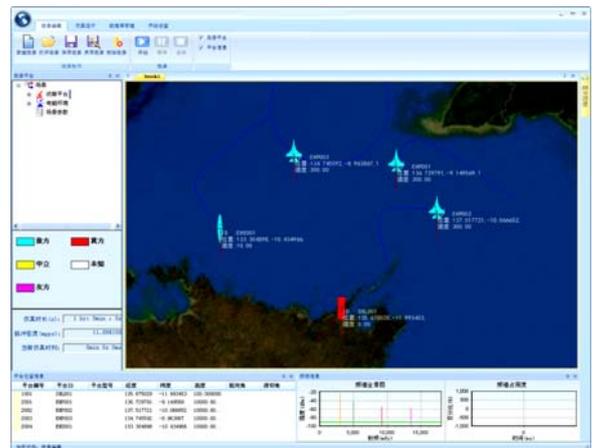


Fig.5 Software interface of simulation scene construction  
图 5 仿真场景想定人机交互界面

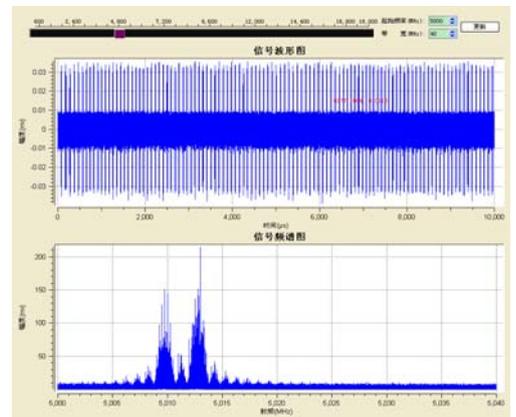


Fig.6 Software interface of visualization analysis of electromagnetic signal  
图 6 电磁信号波形及频谱可视化分析界面

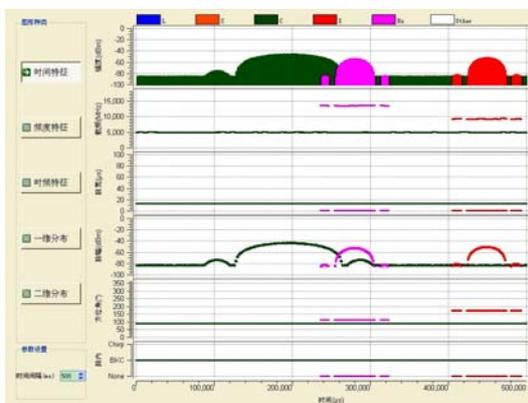


Fig.7 Software interface of visualization analysis of the temporal distribution characteristics  
图 7 全脉冲数据的时间特征可视化分析界面

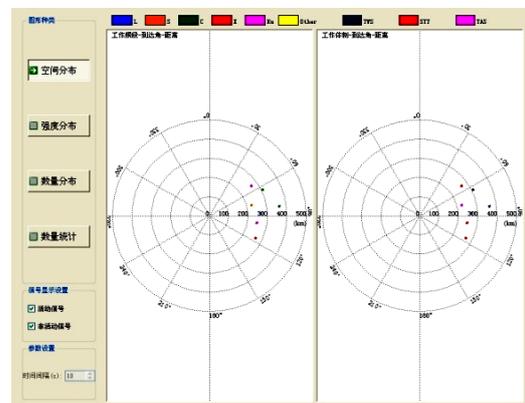


Fig.8 Software interface of visualization analysis of the spatial distribution characteristics  
图 8 辐射源的空间分布特征可视化分析界面

图 9 是战场电磁态势综合显示界面,对雷达侦察与其他手段获取的信息综合后所能感知的战场电磁态势进行三维全景动态显示,包括对辐射源平台三维实体模型绘制、平台运动轨迹显示、雷达探测空域、天线扫描及信号能量辐射效果的显示,还包括对电磁信号环境频谱全景图和电磁频谱占用度随时间变化的动态显示等,图中辐射源及其探测区域绘制颜色根据其所在不同频段确定。

### 3 结论

电磁信号环境仿真与可视化分析系统中,脉冲级与信号级 2 种模型粒度相结合的数字建模技术使电磁信号环境仿真结果具有更好的实用价值,不仅能作为电磁信号可视化分析研究所需要的数据源,还能作为电子侦察设备关键算法性能检验和系统功能测试所需要的虚拟数据源。同时,通过应用计算机图形处理技术,系统以雷达侦察感知视角提供的电磁信号环境分层可视化分析能力,可作为电子战军官、电子战设备操作员进行复杂电磁环境下的战场电磁态势分析判断以及电子侦察情报分析训练的仿真工具。

#### 参考文献:

- [1] 吴迎年,张霖,张利芳,等. 电磁环境仿真与可视化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009,21(20):6332-6338. (WU Yingnian,ZHANG Lin,ZHANG Lifang,et al. Survey on electromagnetic environment simulation and visualization[J]. Journal of System Simulation, 2009,21(20):6332-6338.)
- [2] 肖昌达,杨萃. 复杂电磁环境对电子装备的影响[J]. 舰船电子对抗, 2008,31(3):17-20. (XIAO Changda,YANG Cui. Influence of complicated electromagnetic environment on electronic equipment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008,31(3):17-20.)
- [3] 汪连栋,胡明明,高磊,等. 电子信息系统复杂电磁环境效应研究初探[J]. 航天电子对抗, 2013,29(5):23-25. (WANG Liandong,HU Mingming,GAO Lei,et al. Preliminary research of complex electromagnetic environment effects on electronics and information system[J]. Spaceflight Electronic Countermeasure, 2013,29(5):23-25.)
- [4] 赵晶,刘义,来庆福,等. 基于脉冲流描述的战场电磁环境态势显示方法[J]. 微波学报, 2010,26(5):1-6. (ZHAO Jing,LIU Yi,LAI Qingfu,et al. Situation displaying of battlefield electromagnetic environment using pulse flow description[J]. Journal of Microwaves, 2010,26(5):1-6.)
- [5] 戴大鹏,李仙茂,林桐,等. 复杂电磁环境下电磁频谱可视化研究[J]. 舰船电子对抗, 2012,35(6):31-35. (DAI Dapeng,LI Xianmao,LIN Tong,et al. Research into the visualization of electromagnetic spectrum in complex electromagnetic environment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012,35(6):31-35.)
- [6] 金芳,程芳,彭伯浩,等. 战场电磁环境可视化探讨[J]. 通信对抗, 2011(1):43-46. (JIN Fang,CHENG Fang,PENG Bohao,et al. Research on visualization of battlefield electromagnetic environment[J]. Communication Countermeasure, 2011(1):43-46.)
- [7] 方程,刘晓静,屈林,等. 战场电磁环境可视化及系统设计[J]. 舰船电子工程, 2008,28(2):8-11. (FANG Cheng,LIU Xiaojing,QU Lin,et al. Research on the visualization electromagnetic environment based on GIS[J]. Ship Electronic Engineering, 2008,28(2):8-11.)
- [8] 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. (ZHAO Jing,LIU Yi, LAI Qingfu,et al. Modeling and simulation of battlefield electromagnetic environment in aerial defense warfare[J]. Journal of System Simulation, 2012,24(2):258-262.)

#### 作者简介:



安红(1968-),女,呼和浩特市人,研究员,主要从事系统建模与仿真研究工作.email:liyappleand@163.com.

杨莉(1980-),女,贵州省凯里市人,高级工程师,主要从事系统建模与仿真研究工作。

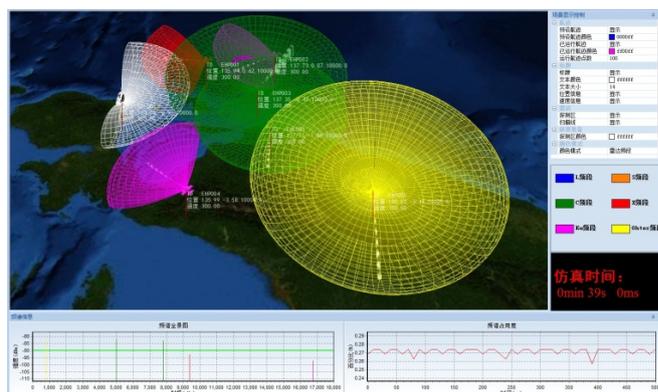


Fig.9 Software interface of comprehensive display of battlefield electromagnetic situation

图 9 战场电磁态势综合显示界面