

6-4-2020

Modeling and Realization of Radar Signal Environment Based on SystemVue

Limin Liu

Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

Cheng Cheng

Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

Zhuangzhi Han

Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Realization of Radar Signal Environment Based on SystemVue

Abstract

Abstract: Aiming at the practical requirements of electronic reconnaissance subsystem in an electronic countermeasure simulation system, according to electronic reconnaissance forms and the distribution of two parties, a modeling method of radar signal environment was proposed. It provided the mixed signals source for electronic reconnaissance subsystem. The signal modeling principle was proposed, which defined the position information of radar platform and target platform in trajectory layer. The angle information was defined in antenna layer, which realized radar signal modeling in signal layer. The radar signal environment simulation system of electronic countermeasure was established based on SystemVue at last. It is approved that the method is correct and realizable by the simulation experiment.

Keywords

electronic countermeasure, radar signal, modeling, simulation, SystemVue

Recommended Citation

Liu Limin, Cheng Cheng, Han Zhuangzhi. Modeling and Realization of Radar Signal Environment Based on SystemVue[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1317-1326.

基于 SystemVue 的雷达信号环境建模与实现

刘利民, 程呈, 韩壮志

(军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 针对电子对抗仿真系统中的电子侦察子系统的实际需求, 并根据现代战争中电子侦察形式, 对抗双方战术布局, 提出了一种电子对抗中雷达信号环境的建模方法, 用于为电子侦察子系统提供混合信号源。介绍了信号建模原理, 在航迹层定义雷达平台、目标平台与接收机平台的位置信息, 在天线层定义角度信息以及在信号层对雷达信号建模, 并利用 SystemVue 软件实现了模拟雷达对抗信号环境。仿真结果证明了该方法的正确性与可实现性。

关键词: 电子对抗; 雷达信号; 建模; 仿真; SystemVue

中图分类号: TN391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 06-1317-10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201706022

Modeling and Realization of Radar Signal Environment Based on SystemVue

Liu Limin, Cheng Cheng, Han Zhuangzhi

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the practical requirements of electronic reconnaissance subsystem in an electronic countermeasure simulation system, according to electronic reconnaissance forms and the distribution of two parties, a modeling method of radar signal environment was proposed. It provided the mixed signals source for electronic reconnaissance subsystem. The signal modeling principle was proposed, which defined the position information of radar platform and target platform in trajectory layer. The angle information was defined in antenna layer, which realized radar signal modeling in signal layer. The radar signal environment simulation system of electronic countermeasure was established based on SystemVue at last. It is approved that the method is correct and realizable by the simulation experiment.

Keywords: electronic countermeasure; radar signal; modeling; simulation; SystemVue

引言

随着现代雷达体制的日益先进和雷达对抗技术的迅速发展, 雷达侦察的环境越来越复杂^[1-13]。雷达信号环境模拟仿真用于生成雷达侦察仿真系统所需的模拟混合信号, 并能够根据作战想定调整雷达信号形式、杂波干扰信号等。为了深入研究雷

达侦察算法以及开展相应试验, 拥有逼真的雷达信号环境是十分必要的, 所以对于雷达信号环境的建模仿真是具有实际意义的。

目前, 国内的许多研究单位也对雷达信号环境建模进行了研究。文献[2]中, 作者基于脉冲描述字(Pulse Describe Word, PDW)中的载频、脉宽和重复周期这三项对雷达信号环境进行建模, 并形成了PDW数据库, 但是由于现代雷达技术的飞速发展, 导致传统的脉冲描述字(载频、脉冲宽度、脉冲幅度、到达时间、到达角等)很难满足雷达侦察情报处理的需要; 文献[3]中, 作者利用迭代的方法实现了高通



收稿日期: 2015-07-16 修回日期: 2015-11-02;
基金项目: 国家自然科学基金(61101074);
作者简介: 刘利民 (1971-), 男, 河北冀州, 博士, 教授, 博导, 研究方向为网络计算机、计算机应用、系统工程; 程呈 (1991-), 男, 山西运城, 博士生, 研究方向为雷达信号处理, 盲信号分离。

<http://www.china-simulation.com>

• 1317 •

真的雷达信号环境模拟仿真,文中详细阐述了各个信号参数的建模方法,对比分析了同类方法的仿真效果,有效解决了变参数形式的雷达信号产生问题,但是对于雷达、目标平台的运动情况并未分析;文献[4]中,作者针对防空作战体制,建立了战场电磁环境态势图,对于雷达信号环境建模具有借鉴意义。仿真方法主要可分为功能仿真和信号仿真两大类,功能仿真主要是模拟雷达对抗侦察系统截获的雷达信号参数数据,利用脉冲描述字表述;信号仿真则还需加入包括相位等信息;其他的建模方法就在此就不一一阐述了。文献[14-15]中,作者利用复杂信号环境为背景,研究了 MIMO 雷达和无人机的相关性能,体现了复杂信号环境的应用需求。

本文提出了一种信号级的雷达信号环境仿真,该方法中的雷达信号环境建模方法是基于航迹层、天线层和信号层三个层面建立的,航迹层用于确定雷达平台和目标平台的航迹模式、坐标信息、速度、加速度,也就是说仿真的雷达和目标平台能够具有航迹信息;天线层根据航迹层产生的坐标信息控制雷达平台发射天线俯仰角和方位角,通过每一时刻的雷达平台和目标平台的相对位置,输出角度信息;信号层则是利用信号产生模块和发射模块,产生想定要求的各种模式的雷达信号,模拟雷达发射机将信号通过天线发射出去,并根据航迹层和天线层产生的相应信息,依照雷达回波^[6]产生模型产生混合信号。本次实现平台选择的是 SystemVue 软件仿真平台,由于 SystemVue 软件平台不仅拥有强大的雷达仿真模块库,而且能够进行射频仿真,使模拟出的雷达发射信号更逼真。

1 建模方法

下面就按照航迹层、天线层和信号层三个层面的建模方法进行详细阐述。包括各个层面的模块组成、数学原理、数据形式及数据类型。

1.1 航迹层建模

航迹层负责产生各个平台的航迹信息,包括路

线(位置信息)、速度、加速度等。在本次雷达信号的环境建模中存在雷达平台、目标平台以及接收机平台,需要说明的是,建模过程中目标平台为雷达告警接收机平台,所以目标平台与接收机平台的航迹相关信息相同。根据想定,雷达平台在地面静止,雷达告警接收机平台在空中以 $trace(x,y,z,v,a,t)$ 的航迹进行运动^[9]。其中, x,y,z 为雷达告警接收机平台的坐标; v 为 t 时刻的速度; a 为 t 时刻的加速度。建立雷达平台模块和目标模块(雷达告警接收机模块),如图 1 所示。

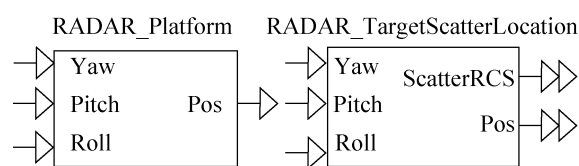


图 1 雷达、目标平台
Fig. 1 Radar and target platforms

图 1 所示的是雷达、目标平台模块,输入为横滚角(Roll)、俯仰角(Pitch)和航向角(Yaw)。这三个角度信息为欧拉角,用来描述刚体自身角度,影响的是目标的散射面积,是运动平台运行的关键参数之一^[10]。对于雷达平台而言,输入为零。雷达平台模块的输出为雷达的坐标信息;目标平台模块的输出为目标散射面积和目标的坐标信息。以雷达平台为中心建立空间直角坐标系,定义航向角为 ψ ;俯仰角为 θ ;横滚角为 φ 。旋转矩阵定义为:

$$R_{int1/mv} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{int2/mv} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{b/int2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

式中: $R_{int1/mv}$ 为运动平台与 Z 轴的旋转矩阵; $R_{int2/mv}$ 为运动平台与 X 轴的旋转矩阵; $R_{b/int2}$ 为运动平台

与 Y 轴的旋转矩阵。通过三个旋转矩阵就能求得在运动目标航迹中的任意一点位置, 目标的空中姿态。求出空中姿态后, 就能结算出此刻的目标平台的散射截面积(RCS)。由于目标平台的 RCS 随时间剧烈起伏, 因此在雷达检测领域通常把动态的 RCS 当成一个统计变量处理, 利用概率密度函数(PDF)来描述^[11]。典型的描述目标起伏 RCS 的模型包括: 对数正态分布的 PDF, 威布尔分布的 PDF, 瑞丽分布的 PDF, 卡方分布的 PDF 等。根据文献[11]的仿真结果, 本次只利用对数正态分布的概率密度函数对目标平台的 RCS 进行建模。对数正态分布的 PDF 定义为:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\sigma) - \ln(\mu)}{s} \right)^2} \quad (2)$$

式中: σ 为目标的 RCS; μ 为均值; s 为标准差。通过对目标平台的欧拉角进行建模, 就可以得到目标

平台的 RCS 信息。在不同的要求下, 也可直接利用目标平台模块中的 RCS 参数对目标的散射面积进行定义。两模块的具体参数如表 1、2 所示。

从表 1、2 中可以看出, 对于雷达和目标平台的建模考虑了两平台的航迹信息 (Trajectory_Mode), 该参量的初始值为平台不动, 针对该背景的情况: 雷达平台为静止, 目标平台运动, 所以雷达平台的航迹信息就利用航迹参数的初始值, 而对于目标平台的建模, 航迹模式是通过调取文件读取航迹信息。而两平台建模参数中, 位置信息(Position_Initial)是通过经度、纬度和高度规定的, 雷达平台的坐标是根据仿真前的想定决定的, 目标平台的坐标是根据预设航迹决定的。而雷达与目标平台所产生的坐标信息、目标的散射面积作为天线层的输入, 指导天线层中的雷达发射天线产生高低角和方向角信息。

表 1 雷达平台模块参数

Tab. 1 Parameters of radar simulation platform

名称	描述	初始值	单位
Trajectory_Mode	平台的航迹模式包括自动产生以及用户定义(通过 FileName 调取文件读取航迹)	无航迹	
Position_Initial	坐标信息包括精度、纬度和高度	[0, 0, 0]	deg、m
Velocity_Initial	平台速度信息	0	m/s
Accelerate_Initial	平台加速度信息	0	m ² /s
FileName	文件名(用户定义的航迹文件)	0	
TimeStep	仿真时间间隔	10e-9	s

表 2 目标平台模块参数

Tab. 2 Parameters of target simulation platform

名称	描述	初始值	单位
Trajectory_Mode	平台的航迹模式包括自动产生以及用户定义(通过 FileName 调取文件读取航迹)	无航迹	
NumberOfTarget	目标数量	1	
Position_Initial	坐标信息包括精度、纬度和高度	[0, 0, 0]	deg、m
RCS	目标散射面积(若为多目标, 以向量形式表示)	1	
Velocity_Initial	平台速度信息	0	m/s
Accelerate_Initial	平台加速度信息	0	m ² /s
FileName	文件名(用户定义的航迹文件)	0	
TimeStep	仿真时间间隔	10e-9	s

1.2 天线层建模

天线层负责解算雷达发射天线发射的主波束与目标之间的角度,包括方向角和高低角。设 t 时刻目标平台的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 按照航迹层规定的坐标表示形式, x 、 y 为经、纬度值(单位: $^\circ$), z 为目标平台高度值(单位: m), 则建立的数学模型如图 2 所示。

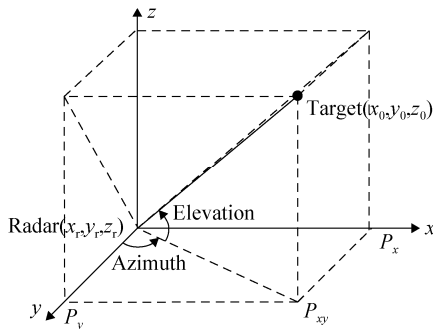


图 2 雷达天线主波束照射目标数学模型
Fig. 2 Model of radar main beam

图 2 中, 点目标(Target)在 xoy 平面的投影为点 P_{xy} , 点 P_{xy} 在 x 轴、 y 轴上的投影点分别是 P_x 、 P_y 。雷达平台坐标(大地 BLH 坐标)为 (x_r, y_r, z_r) , 首先进行坐标换算。根据文献[5]中提出的大地坐标与空间直角坐标之间的转换公式, 对雷达发射天线模块中的坐标进行相应的转换, 原理如下(以雷达坐标为例), 设雷达平台的直角坐标为 (X_r, Y_r, Z_r) , 则:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + z_r) \cos x_r \cos y_r \\ (N + z_r) \cos x_r \sin y_r \\ [N(1 - e^2) + z_r] \sin x_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N 为卯酉圈的半径, 计算公式为:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 x_r}} \quad (4)$$

式中: a 为地球椭球长半轴, 且 $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$; b 为地球椭球短半轴。根据 2000 国家大地坐标系规定, 地球椭球长半轴 $a=6\ 378\ 137$; 短半轴 $b=6\ 356\ 752.314\ 0$ (单位: m)。利用式(3)可以将雷达平台和目标平台的大地坐标转换成直角坐标, 则天线的方位角和高低角可以求出。设方向角为 $Azimuth$, 高低角为 $Elevation$:

$$Elevation = \arcsin\left(\frac{Z_0 - Z_r}{D}\right) \quad (5)$$

$$Azimuth = \arctan\left(\frac{|X_0 - X_r|}{|Y_0 - Y_r|}\right) \quad (6)$$

式中: D 为雷达平台与目标平台之间的之前距离, $D = \sqrt{(X_0 - X_r)^2 + (Y_0 - Y_r)^2 + (Z_0 - Z_r)^2}$ 。利用式(5), (6)求出雷达天线的高低角和方向角。天线模块的参数设定如表 3 所示。

表 3 天线模块输入、输出参数

Tab. 3 Input and output parameters of antenna module		
名称	描述	单位
RadarLoc	雷达平台坐标(大地坐标)	deg、m
TargetLoc	目标平台坐标(大地坐标)	deg、m
BodyRoll	雷达自身翻滚角	deg
BodyPitch	雷达自身俯仰角	deg
BodyYaw	雷达自身航偏角	deg
AntPitch	雷达天线自身俯仰角	deg
AntYaw	雷达天线自身航偏角	deg
Elevation	方向角	deg
Azimuth	高低角	deg

表 3 中, 输入的参数包括两平台的坐标信息(从航迹层获得)以及雷达平台本身的角度信息。根据上述介绍的数学原理求出天线的方向角与高低角并输出, 并将天线的方向角和高低角数据输入至信号层, 供信号层使用。在本次雷达信号的环境建模当中, 设置的雷达平台本身并没有倾斜角度, 即雷达平台本身的角度信息为零; 同时天线的角度信息也为零。认为雷达平台与目标平台在建模当中为点平台, 不考虑平台本身的角度偏移。

1.3 信号层建模

信号层负责产生雷达射频信号, 是雷达信号环境建模的关键。信号产生后, 根据天线层产生的角度数据, 将信号发射出去, 在空中经过杂波、干扰混合, 在目标平台处形成想要的雷达信号环境。雷达信号产生是根据雷达发射机的工作原理进行模拟仿真的, 包括预设信号产生模块、滤波器、混频器、放大器等相应模块, 最终实现雷达射频信号。模块设置如图 3 所示。

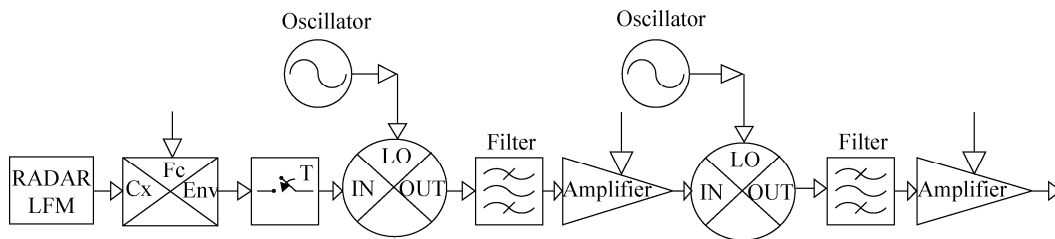


图 3 雷达射频信号产生单元设计
Fig. 3 Design of radar frequency signal generation unit

如图 3 所示, 该单元中雷达信号产生模块为线性调频(LFM)信号, 并将信号加上中频(60 MHz); 经过两次上混频, 使得信号频率升高, 达到射频要求; 两个放大器分别为中频、高频低噪声放大器, 用于提高雷达信号的发射功率; 由此产生的射频信号即可达到想定要求。雷达信号产生模块不仅仅能产生线性调频信号, 而且能够产生其他的像连续波、伪码调相、非线性调频等信号, 可以根据想定中不同的雷达平台形式, 设置不同的雷达信号形式。在信号产生模块中, 信号的脉宽、脉冲重复周期、带宽等都可以根据想定进行调整, 形成复杂的雷达信号。以线性调频信号为例, 雷达信号产生模块参数如表 4 所示。

表 4 线性调频信号产生参数
Tab. 4 Generation parameters of LFM signals

名称	描述	初始值
Pulsewidth	雷达信号脉冲宽度	1e-5
PRI	脉冲重复间隔	1e-4
PRI_Combination	重复周期内的脉冲串数	1
Bandwidth	雷达信号带宽/ Hz	5e6
FM_Offset	频率调制开端/ Hz	0
SampleRate	采样率/ Hz	10e6

按照预先设定的想定内容, 结合表 4 中的线性调频信号设定参数, 设置具体的雷达信号。经过图 3 所示的雷达射频信号产生单元, 形成雷达发射信号。在整个仿真建模当中认为一个雷达射频信号产生单元就是一个雷达平台(因为无需考虑雷达的接收端), 且仿真过程中, 每一雷达平台是独立存在的。在射频产生单元中, 滤波器的滤波范围是根据特定型号的雷达发射机设定的, 滤波器的参数设计如表 5 所示。

表 5 滤波器参数

Tab. 5 Parameters of filter

名称	描述	初始值
FCenter	滤波器中心频率/ Hz	150e3
PassBandwidth	允许通过的带宽/ Hz	50e3
StopBandwidth	不允许通过的带宽/ Hz	100e3
OrderType	滤波器形状/ Hz	10e6
PassAtten	允许通过的边界幅值	3
StopAtten	不允许通过的边界幅值	50

滤波器包括低通、高通、带通和带阻滤波器, 而且滤波器的形状包括 IIR 和 FIR 两种, 其中对于 IIR 滤波器的设计包括“Bessel”、“Butterworth”、“Chebyshev I”、“Chebyshev II”、“Elliptic”和“Synchronously Tuned”六种; 对于 FIR 滤波器的设计包括“Parks-McClellan”、“Gaussian”、“Raised Cosine”和“Window”四种。对于这些滤波器的具体样式就不一一介绍了。在仿真过程中, 滤波器为巴特沃斯带通滤波器, 改变滤波器参数形成不同中心频率的滤波器应用于雷达射频信号产生单元当中。当雷达射频信号产生后, 将信号数据传输至雷达发射天线, 将信号发射出去。发射天线模块由雷达天线发射模块构成, 需要说明的是这个天线模块与天线层的发射天线模块不同。在天线层, 天线主要进行坐标转换、并求取角度信息; 而在信号层的天线, 主要是根据雷达信号产生单元产生的信号数据, 结合天线层得到的角度信息, 并沿着天线层得到的角度, 发射信号数据。信号层的发射天线模块参数信息如表 6 所示。

发射天线模块的输入包括: 雷达信号数据、目标方向角、目标高低角、波束方向角以及波束高低角。在本次仿真过程中, 对于发射天线发射出的波

束角度为 0；雷达信号数据为雷达信号产生单元产生的射频信号数据；目标的高低角和方向角为天线层求取的目标角度信息；模块的输出就是雷达信号。信号发射之后，输入至回波信号产生模块，利用回波产生模块产生到达目标的回波信号，对于目标平台而言就是雷达接收机截获的空域信号。又利用杂波生成模块产生空域杂波，得到空域混合信号。模块设置如图 4 所示。

表 6 发射天线参数

Tab. 6 Parameters of transmission antenna		
名称	描述	初始值
RadarWorkMode	雷达工作模式：跟踪、搜索	Tracking
Pattern	天线扫描模式	UserDefine
BeamAzimuthAngle	波束方向角/deg	0
BeamElevationAngle	波束高低角/deg	0
AntennaWidth	天线水平方向长度/m	5
AntennaHeight	天线垂直方向长度/m	5

需要强调的是，雷达回波产生模块 (RADAR_EchoGenerator) 是根据输入信号与目标平台之间的位置(距离)关系决定的，包括信号在传播过程中的幅度衰减、时间延迟都可以通过该模块进行计算。又因为在本文的背景下，雷达信号接收机与目标平台处于同一位置，所以产生的回波信号即可以认为是雷达平台发射至目标平台的信号。设雷达平台产生的信号 $u(t)$ 为：

$$u(t) = a(t)e^{j\Phi(t)} \quad (7)$$

式中： $a(t)$ 为信号幅度； $\Phi(t)$ 为信号初始相位。经过天线模块，产生的射频信号 $s(t)$ 为：

$$s(t) = u(t)e^{j\omega_c t} \quad (8)$$

传播至目标平台后，信号 $s'(t)$ 变为：

$$s'(t) = s(t - \frac{R(t)}{c}) \times k \times \sigma \quad (9)$$

式中： $R(t)$ 为雷达平台与目标平台之间的距离函数； k 为传播衰减系数； σ 为目标散射截面积； c 为光速。其中传播衰减系数 k 定义为：

$$k = \frac{P_r}{P_t \times \sigma} = \sqrt{\frac{G^2 \times \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}} \quad (10)$$

式中： G 为天线增益； λ 为波长； R 为此刻目标与雷达信号之间的距离。由式(9)就可以得到经过时间延迟、传播衰减后的雷达信号，此时的信号就是目标平台接收机处的信号环境。以上针对的航迹层、天线层以及信号层三个层面进行建模的方法只是针对一个雷达平台和一个目标平台，若在特定的要求下，需增加平台数量，只需按照上述建模方法进行重复，在此就不再赘述。

2 仿真实验

仿真想定：设某一防空作战单元中，存在 8 部雷达；一架作战飞机飞入防空区域，战机上搭载雷达告警接收机用于截获地面雷达信号。空域中同时存在着杂波和干扰，雷达发射信号在传播过程中任意混合。作战单元中有三部雷达(火控雷达)以三角形布置、另有三部(火控雷达)雷达以线性布置、剩余两部雷达(警戒雷达)单独布置。火控雷达的工作方式为跟踪，警戒雷达的工作方式为扫描。以作战飞机为中心，建立平面直角坐标系，战机的航行方向为 y 轴正方向， x 轴垂直于 y 轴并以战机右侧为正方向；雷达平台布置于坐标系的第一、二象限(各模块的具体参数在实验中介绍)。用本文提出的建模方法对此防空作战单元产生的雷达信号环境进行模拟仿真。

在 SystemVue 软件中的顶端设计如图 5 所示。

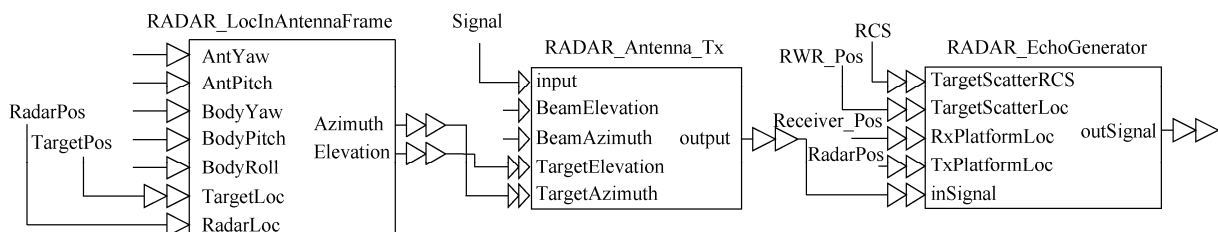


图 4 信号回波产生单元

Fig. 4 Radar echo generation unit

<http://www.china-simulation.com>

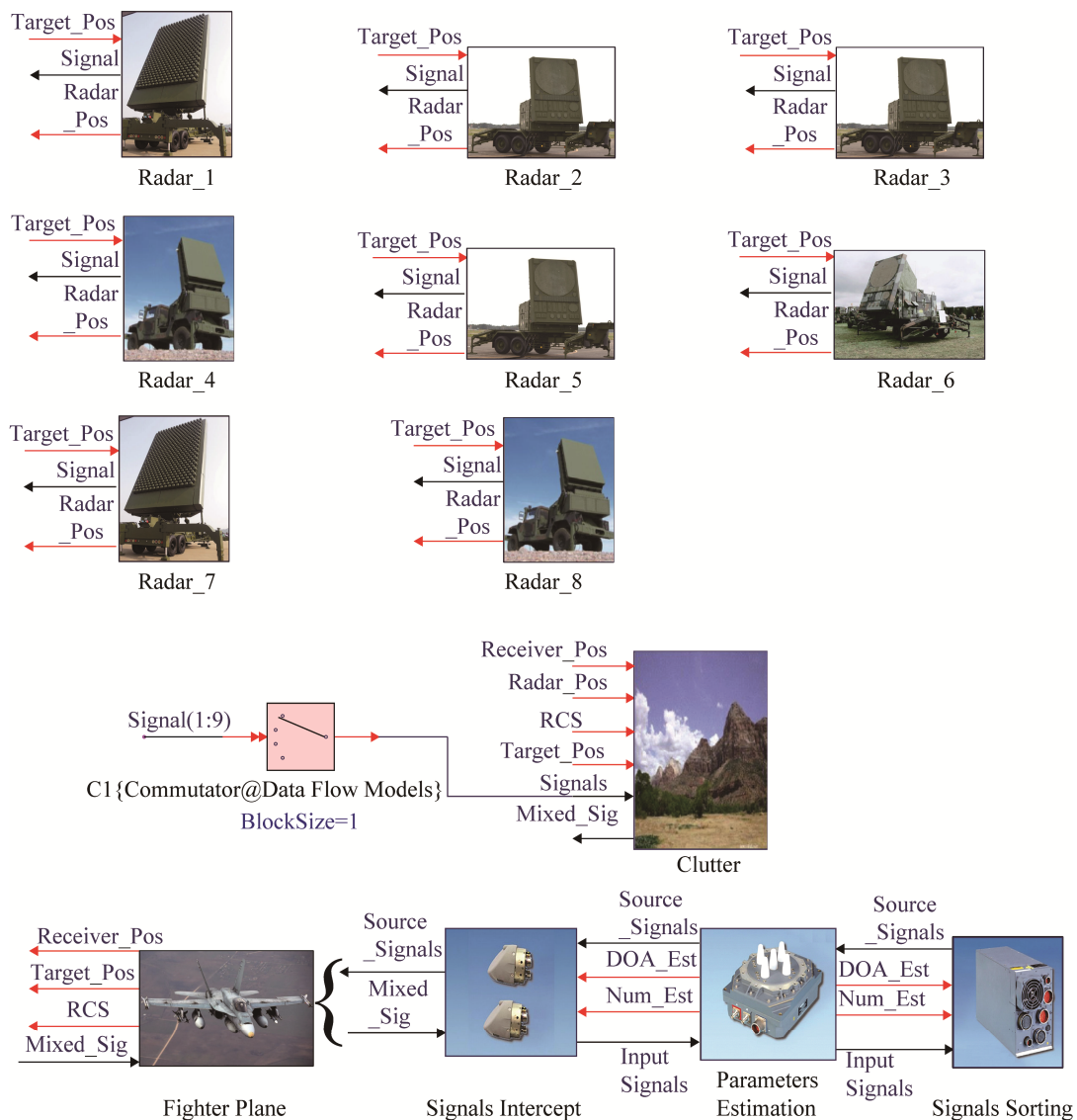


图 5 仿真测试界面

Fig. 5 Test interface of simulation

以战机为中心，设战机的坐标为 $Flight(0,0,1500)$ ；以三角形布置的三部火控雷达的坐标分别为 $R_Tri1(2,1,0)$ 、 $R_Tri2(1,0,500)$ 、 $R_Tri3(1,1,0)$ 。这三部雷达的发射信号均为线性调频信号^[8]，具体参数设定为：脉冲宽度 $[1e-5s, 5e-5s, 1e-4s]$ ；脉冲重复间隔 $[1e-4s, 2e-3s, 1e-3s]$ ；频带宽度 $[5e6\text{ Hz}, 5e6\text{ Hz}, 5e6\text{ Hz}]$ ；重复周期内的脉冲个数 $[1, 1, 1]$ 。以线性布置的三部火控雷达的坐标分别为 $R_Line1(-0.5,0.5,150)$ 、 $R_Line2(-1,1,0)$ 、 $R_Line3(-0.3,0.3,200)$ 。这三部雷达的发射信号也为线性调频信号，具体参数设定

为：脉冲宽度 $[5e-6s, 2e-5s, 5e-5s]$ ；脉冲重复间隔 $[1e-4s, 1e-4s, 1e-3s]$ ；频带宽度 $[5e6\text{ Hz}, 5e6\text{ Hz}, 5e6\text{ Hz}]$ ；重复周期内的脉冲个数 $[1, 1, 1]$ 。剩余两部雷达单独布置，坐标分别为 $R_Rand1(-1.2,0.1,0)$ 、 $R_Rand2(1.4,0.5,130)$ ，发射信号为脉冲信号，脉冲宽度 $[1e-5s, 5e-6s]$ ；脉冲重复间隔 $[1e-4s, 1e-5s]$ ，所有雷达射频信号的载频范围在 $8\sim 12\text{ GHz}$ 。杂波通过杂波产生模块产生，杂波遵循威布尔概率分布函数、柯西功率谱分布，频率为 10 GHz 。各雷达信号及杂波经过空域传播后，到达机载雷达告警接收机的时域波形如图 6 所示。

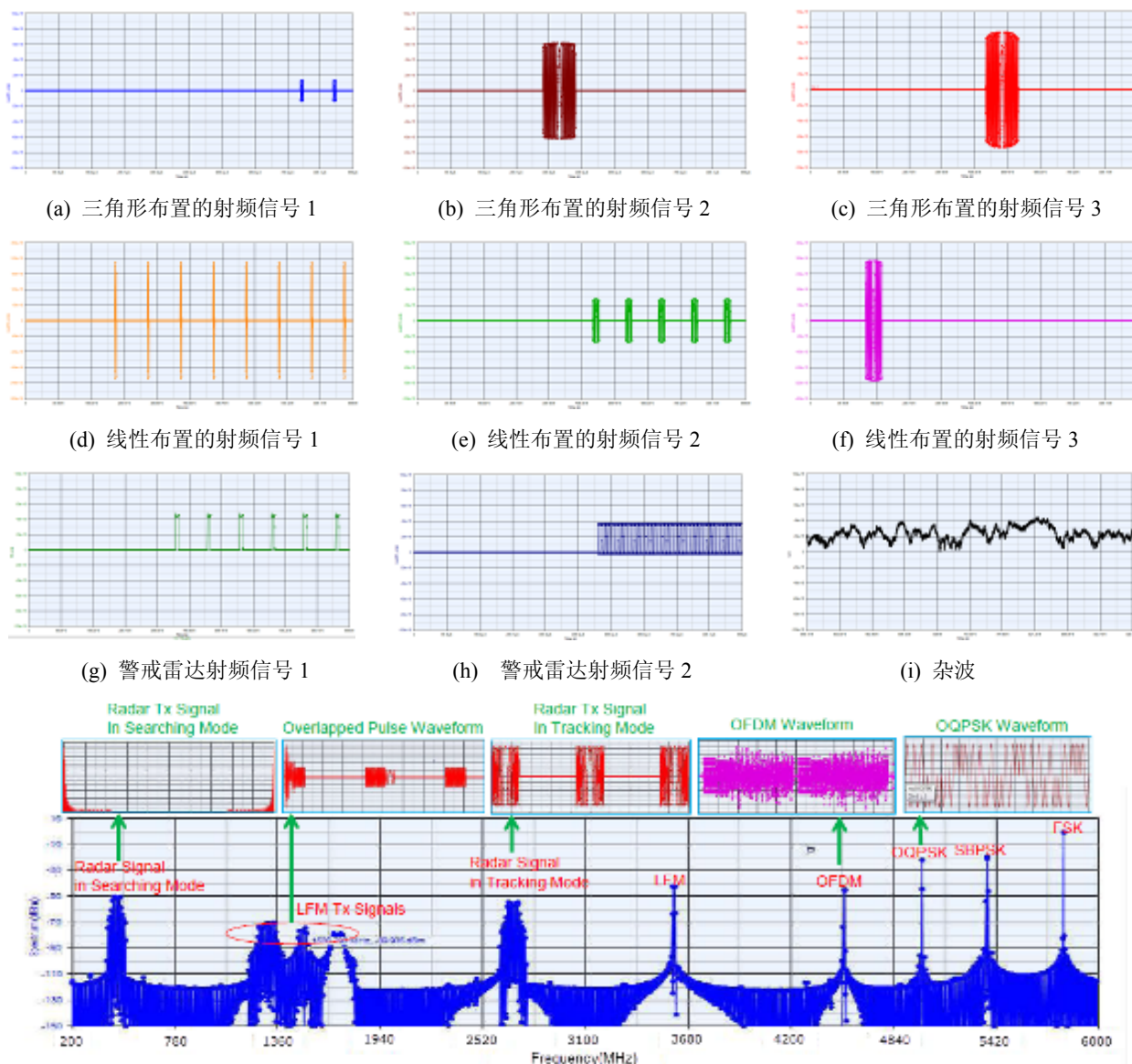


图 6 雷达、杂波信号&频谱
Fig. 6 Radar signal, clutter and signal spectrum

图 6 中，横坐标为时间(0~999e-6s)，纵坐标为幅度(-1e-13~1e-13)。图 6(j)中的混合信号包括了搜索状态下的雷达发射信号；线性调频信号；跟踪时雷达发射信号；OFDM 信号以及通信领域中的编码信号，仿真出的宽带混合信号符合现代战场复杂信号环境的特点，说明了该方法能够仿真出战场复杂雷达信号环境。从图 5 中可以看出，基于 SystemVue 软件进行的雷达信号环境模拟能够实现宽频带的信号环境，又根据雷达平台与战机平台

不同的位置关系，到达战机平台的信号的时延也不同，图(a)-(h)中都可以体现出来；而且传播过程中信号幅度必然衰减，到达战机处(雷达告警接收机)的雷达信号幅值已经减小至 e^{-13} 量级(雷达信号产生单元的幅值为 1)。在目标平台接收到的混合信号如图 7 所示。

图 7 显示的是不同杂波幅度(信杂比不同)情况下的混合雷达信号模拟情况，在仿真实验过程中，仅仅考虑空域杂波，并未考虑空域中的干扰情况。

在现实情况下, 战场信号环境还包括各种形式的干扰: 压制干扰、瞄准式干扰、多点干扰、欺骗干扰和扫频点干扰。图 8 中对四种形式的干扰进行了仿真。干扰对准的频率为 1 000 MHz, 源信号为线性调频信号。针对不同的干扰形式, 相对应的参数也

需要做相应调节。实现方法也有所不同, 干扰都是利用高斯白噪声实现的, 只是在产生噪声的频段有所区别。例如: 压制干扰属于全频段干扰, 所以高斯白噪声覆盖全频段; 对于瞄准式以及其他形式干扰, 噪声只是覆盖感兴趣的频点或频段处。

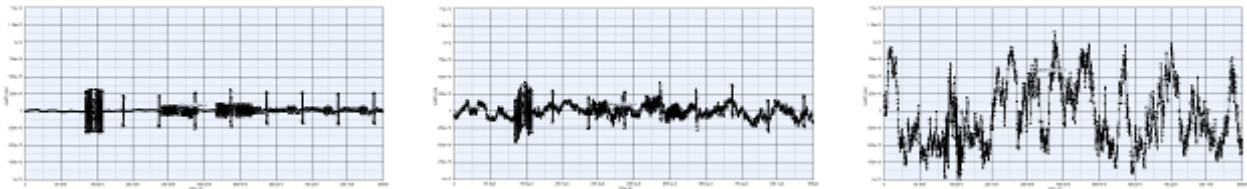


图 7 不同信杂比条件下的混合雷达信号模拟

Fig. 7 Radar signal simulation under different signal to clutter ratio

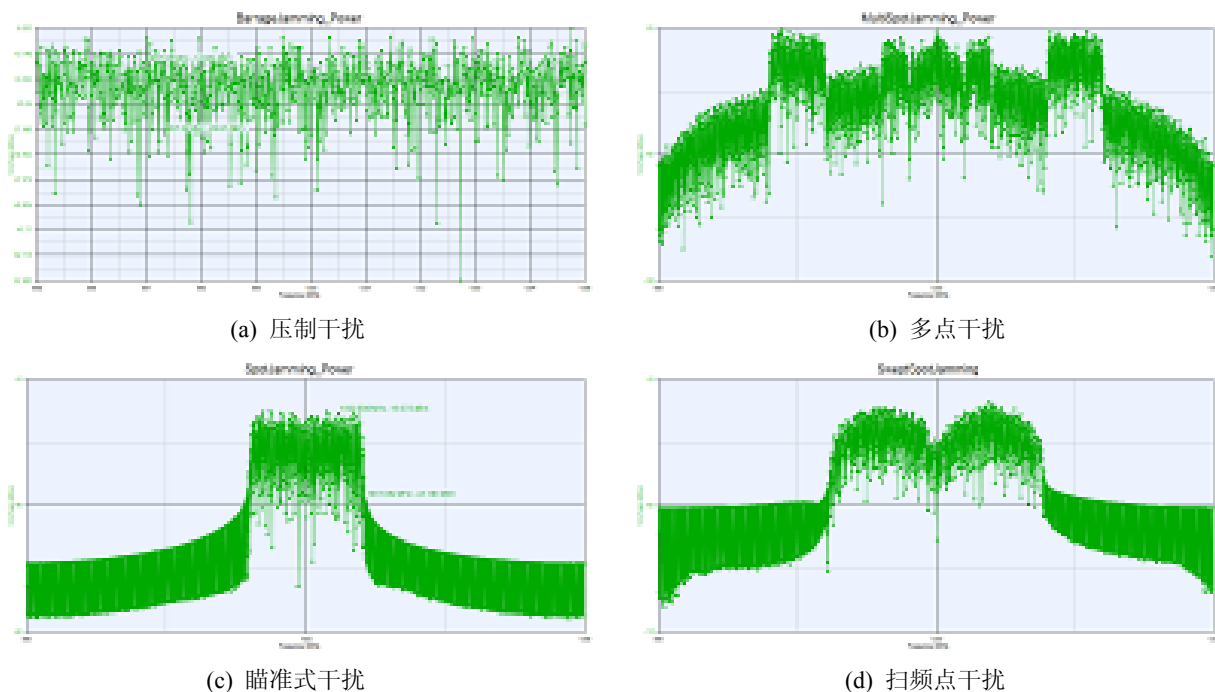


图 8 信号环境中不同干扰频谱

Fig. 8 Different clutter spectrums

3 结论

本文的主要成果是提出了一种基于 SystemVue 软件实现雷达信号环境的建模方法。设置了航迹层、天线层以及信号层并对每一层的建模方法进行了详细的阐述。航迹层产生雷达平台与目标平台的位置信息; 天线层得到发射天线与目标平台之间的角度信息; 信号层则是依照想定产生相应的雷达发射信号及杂波干扰等, 通过天线向特定位

置进行辐射, 最终实现目标平台接收端接收到的雷达信号环境。文章的第三节, 通过建模方法在 SystemVue 软件中实现了仿真实定中的雷达信号环境, 并对结果进行分析, 说明了该建模方法的可行性与优越性, 同时 SystemVue 软件平台能够将信号数据形成数据文档, 供其他仿真软件使用。该方法的提出以及实现为解决雷达信号环境仿真问题提供一种新思路, 具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 石紫璇, 顾浩, 朱士龙. 雷达侦察数据的建模与仿真验证研究 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(12): 5-8, 85. (Shi Zixuan, Gu Hao, Zhu Shilong. Modeling and simulation validation of radar reconnaissance data [J]. Computer Simulation, 2009, 26(12): 5-8, 85.)
- [2] 卢小勇, 闫抒升, 王晓军, 等. 基于 PDW 的雷达信号环境建模与仿真研究 [J]. 航天电子对抗, 2014, 30(1): 58-61. (Lu Xiaoyong, Yan Shusheng, Wang Xiaojun, et al. Study on simulation and modeling about radar signal environment based on PDW [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014, 30(1): 58-61.)
- [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. (Wang Hai. Study on simulation of high fidelity radar signal environment based on iterative method [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(4): 897-901.)
- [4] 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 defence warfare [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(2): 258-262.)
- [5] 黄谟涛, 翟国君, 管铮, 等. 空间直角坐标和大地坐标的转换 [J]. 解放军测绘学院院报, 1998, 15(3): 164-168. (Huang Motao, Zhai Guojun, Guan Zheng, et al. On the use of the transformation formulae between rectangular and geodetic coordinates [J]. Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping, 1998, 15(3): 164-168.)
- [6] 卢剑奇. 雷达回波信号建模与仿真研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006. (Lu Jianqi. Research on modeling and simulation for radar echo [D]. Zhengzhou, China: PLA Information Engineering University, 2006.)
- [7] 罗宏, 许小剑, 黄培康, 等. 目标宽带雷达特征信号的建模与预测 [J]. 电子学报, 1999, 27(9): 41-44. (Luo Hong, Xu Xiaojian, Huang Peikang, et al. On the modeling and prediction of wideband radar signals [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(9): 41-44.)
- [8] 方标, 黄高明, 高俊. LFM 宽带雷达信号的盲压缩感知模型 [J]. 航空学报, 2014, 35(8): 2261-2270. (Fang Biao, Huang Gaoming, Gao Jun. A blind compressed sensing model for linear frequency modulated wideband radar signals [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(8): 2261-2270.)
- [9] Xu Jing, He Minghao, Han Jun, et al. A comprehensive estimation method for kernel function of radar signal classifier [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(1): 218-222.
- [10] 贾瑞才. 重力/地磁辅助的欧拉角无迹卡尔曼滤波姿态估计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3280-3286. (Jia Ruicai. Attitude estimation base on gravity/magnetic assisted Euler angle UFK [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3280-3286.)
- [11] 庄亚强, 张晨新, 张小宽, 等. 典型隐身飞机动态 RCS 仿真及统计分析 [J]. 微波学报, 2014, 30(5): 17-21. (Zhuang Yaqiang, Zhang Chenxin, Zhang Xiaokuan, et al. Statistical analysis and simulation of typical stealth aircraft dynamic RCS [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(5): 17-21.)
- [12] G H 戈卢布, C F 范洛恩. 矩阵计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. (Gene H. Golub, Charles F. Van Loan. Matrix Computations [M]. Beijing, China: Science Press, 2001.)
- [13] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析 [J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27. (Yang J Y. Development laws and macro trends analysis of radar technology [J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 19-27.)
- [14] 隋凯凯, 李宏, 李欣欣. 杂波加噪声环境下 MIMO 雷达检测性能分析 [J]. 计算机系统应用, 2013, 22(9): 230-233. (Sui K K, Li H, Li X X. MIMO radar detection performance analysis in clutter and noisy environments [J]. Computer Systems and Applications, 2013, 22(9): 230-233.)
- [15] 焦彦维, 侯德亭, 周东方, 等. 无人机在复杂电磁环境下的效能评估 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 073201. (Jiao Yanwei, Hou Deting, Zhou Dongfang, et al. Efficiency evaluation of unmanned aerial in complex electromagnetic environment [J]. High Power Laser and Papticle Beams, 2014, 26(7): 073201)