

SystemVue 在天气雷达模拟中的初步应用

王钱雨晨, 王旭, 何建新

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要: SystemVue 是安捷伦公司开发的专注于电子系统级(ESL)的 EDA 仿真环境。现阶段 SystemVue 主要运用在无线通信、航天、国防电子领域的系统架构以及技术创新上。SystemVue 对雷达系统的仿真应用主要集中在军事雷达领域,在气象雷达上的应用极少。SystemVue 在军用雷达上的仿真实例表明其具有优越的仿真性能,所以,可将 SystemVue 的应用扩展到对天气雷达的仿真和分析。天气雷达仿真对天气雷达的组网、标定、故障分析以及新算法验证都有着极大帮助。简要介绍 SystemVue 的仿真环境,以天气雷达信号处理中的 PPP 算法为例介绍了天气雷达组件的创建过程。在 SystemVue 上搭建了 PPP 组件的测试平台,并使用仿真的雷达回波信号对组件的性能进行测试。结果表明借助 SystemVue 平台有助于对天气雷达信号处理算法进行验证,后续可通过 SystemVue 构建软件雷达,进而实现对不同天气雷达系统的仿真和新算法的验证。

关键词: SystemVue; 天气雷达; 算法验证; PPP

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.002

0 引言

SystemVue 软件是安捷伦公司开发的专注于电子系统级(ESL)的 EDA 仿真环境。它有利于无线通信、航天、国防电子领域的系统架构的建设以及设计人员和算法开发人员在核心设计上进行技术创新。同时 SystemVue 软件也可以为以信号处理为硬件平台核心的射频、数字信号处理和 FPGA/ASIC 电路的实现提供依据。SystemVue 软件作为电子系统级设计和信号处理算法开发与实现的专用软件,完全可以取代通用的数字、模拟和数学运算软件。SystemVue 充分考虑各种射频效应,可以大大减少物理层设计的开发验证时间。

2012年,程文清^[1]利用 SystemVue 软件进行了分析无线通信原理的仿真实验教学。2014年,张杰等^[2]基于 SystemVue 的优点和美国一种典型对空搜索雷达的基本理论对雷达的发射信号和无杂波的点目标回波生成信号进行了程序设计及仿真结果验证。赵杨等^[3-6]介绍了 SystemVue 软件在军用雷达领域中的雷达系统仿真以及雷达组网仿真中的运用。张明皓等^[7-11]利用 SystemVue 软件进行了天气雷达模拟仿真,完成雷达仿真场景、目标、杂波和干扰仿真模型以及雷达主要分系统的建模仿真方法、原理以及过程。中国天气雷达正朝着双偏振,相控阵雷达的方向不断发展^[12]。新一代天气雷达产品被运用在强对流天气

观测预报中,以此不断提升气象雷达产品在天气观测预报业务中的有效利用率,从而为气象预报预警提供有价值的指导依据^[13-14]。

SystemVue 在军用雷达上的仿真实例表明其具有优越的仿真性能,所以可将 SystemVue 的应用扩展到对天气雷达的仿真和分析。对天气雷达进行仿真对天气雷达的组网、标定、故障分析以及新算法验证都有着极大帮助,同时可在不同雷达系统下对质控算法进行验证。

首先基于 Matlab 软件平台仿真天气目标的雷达回波信号;然后在 SystemVue 仿真软件平台上通过联合 C++ 软件构建脉冲对处理法(Pulse-Pair Processing, 简称 PPP)算法组件;再使用 SystemVue 仿真平台搭建对 PPP 组件进行测试的平台,结合仿真出的天气雷达的回波信号计算出天气雷达的基本产品(反射率因子,径向速度,速度谱宽);最后以设定的仿真参数值与组件计算结果为依据,对仿真的回波信号以及构建的算法组件进行验证。

1 PPP 算法原理

PPP 算法最初由 Rummler 提出,算法简单,能对雷达回波信号进行实时分析而又具有一定精度,所以普遍被认为是一种雷达信号实时处理的较好方法。天气雷达中使用 PPP 算法对雷达回波进行信号处理,得到雷达基本产品(反射率因子、径向速度和速度谱宽)。

由于在计算反射率因子时要考虑到雷达系统的增

益,大气的衰减以及目标距离衰减等因素,反射率因子的计算公式为

$$Ref(i) = ECHO(i) + 20 \times \log_{10} RK + RK \times ATMOS + SYSCAL \quad (1)$$

其中, $ECHO(i)$ 为目标的回波功率(单位: dB), RK 为目标到雷达之间的距离(单位: km), $ATMOS$ 为大气衰减因子(单位: dB/km), $SYSCAL$ 为雷达系统增益常数(单位: dB)。

根据 PPP 算法原理径向速度的计算公式为

$$Vel(i) = \frac{\lambda}{4\pi T} \tan^{-1} \frac{Q(t)I(t+T) - I(t)Q(t+T)}{I(t)I(t+T) + Q(t)Q(t+T)} \quad (2)$$

其中, λ 为雷达波长, T 为两个采样脉冲之间的时间间隔, $I(t)$ 为雷达回波的 I 信号, $Q(t)$ 为雷达回波的 Q 信号。

谱宽的计算公式为

$$\sigma_{fd}^2 = \frac{2}{(2\pi T)^2} \left[1 - \frac{|R(T)|}{R(0)} \right] \quad (3)$$

其中, σ_{fd} 为多普勒频率的标准偏差即为速度谱宽。 $R(T) = A(t)A(t+T)$, $R(0) = A(t)^2$ 。 $A(t)$ 为回波信号复振幅。

2 创建 PPP 组件

PPP 组件的创建过程如下:

第一步,打开 SystemVue 仿真软件建立模型组件库,确定组件库的名称以及文件所属位置。

第二步,确定组件库名以及所属位置之后,通过 Visual Studio 2013 编程软件建立组件。在建立的创建组件的工程文件 CMakeLists.txt 中添加文件内容,创建所需组件。添加内容如图 1 所示。



(a)确定组件名为RSP_HCD_PPP_C (b)添加实现组件功能的文件

图1 添加内容

第三步,设置组件的输入以及输出端口参数。

输入端口参数: $Input_I$ (I 数据输入端口), $Input_Q$ (Q 数据输入端口)。

输出端口参数: $Output_Ref$ (反射率因子输出端口), $Output_Vel$ (径向速度输出端口), $Output_Wid$ (速度谱宽输出端口)。

第四步,在 .h 文件中声明组件的输入、输出端、中间变量以及子函数。在 .cpp 文件中对 IQ 数据进行处理得到雷达的基数据产品。

第五步,设置组件的初始值,如表 1 所示,然后生成图 2 所示的 RSP_HCD_PPP_C 组件。

表1 PPP 组件配置参数表

名称	默认值	介绍
Nranbin	10	一个径向包含的距离库个数
Nswp	32	一个径向包含的脉冲个数
RanBinLen/km	1	距离库的长度
PULSEWIDTH	窄脉冲(0)	脉冲宽度,0:窄脉冲;1:宽脉冲。
CLUTTERCEN SORCONTROL	不滤波(0)	点杂波滤波控制参数,0:不滤波;1:滤波
NOISE/w	0.01	噪声功率
RANGREVISED	1	距离订正参数,0:不订正;1:订正
ATTENUATIO NREVISED	1	衰减订正参数,0:不订正;1:订正
TCN	1.1	点杂波抑制门限
ATMOS/(dB/km)	0.0093	大气衰减系数
SYSCAL/dB	0	系统增益常数
RANGE0/km	0.5	第一个距离库分辨单元的起始距离
OPERFREQUENCY/GHz	3	雷达工作频率
PRF/Hz	1000	脉冲重复频率

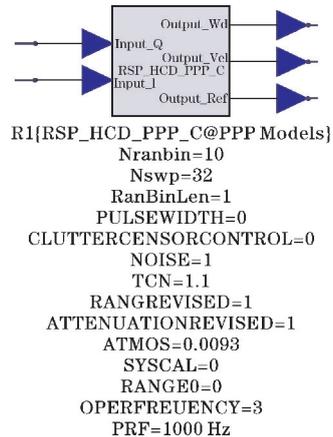


图2 PPP 组件图

3 组件测试

3.1 IQ 数据仿真

雷达接收到的回波信号是复信号,由实部与虚部组合而形成。IQ 数据即为雷达回波信号的实部与虚部(I 为实部, Q 为虚部)。

雷达接收机接收到的来自某一确定距离上的变化着的回波脉冲序列,相当于在有效时段内载波脉冲的幅度和位相受到了调制。这一调制过程是由于目标物的位置,散射特性和速度不同而造成的^[15]。调制函数对应的频谱为多普勒频谱(复频谱),可分为振幅谱和相位谱。假设多普勒功率谱为高斯分布。

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma f}} \sqrt{\frac{-(f_i - fd)}{2\sigma f^2}} \quad (4)$$

其中, $S(f)$ 为多普勒功率谱, f_i 为频率采样点, fd 为设定的信号频移, σ_f 为频率谱宽。

真实雷达回波中都会存在一定的噪声, 这一现象是不可避免的。为了让仿真的多普勒功率谱更加符合雷达回波信号的实际情况, 在式(4)上需要增加噪声功率谱密度以及随机化处理。

$$S(f) = -\ln(1 - SND) \left\{ \frac{P_r}{\sqrt{2\pi\sigma f}} \sqrt{\frac{-(f_i - fd)}{2\sigma f^2}} + cc \right\} \quad (5)$$

$$P_r = P_n \cdot 10^{(snr/10)} \quad P_n = f_s \cdot cc$$

其中, SND 为随机数序列(从 1 到设定的采样点数之间随机选择), cc 为设定噪声功率谱密度, f_s 为采样频率, snr 为信噪比, P_r 为回波功率, P_n 为每秒种白噪声总功率。

以上完成对多普勒功率谱的仿真, 接着要对多普勒的相位谱进行仿真。并假设多普勒的相位谱分布在 $(0, 2\pi)^{[11]}$ 。

$$\psi(f) = 2\pi \cdot SND \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)得到仿真的多普勒功率谱以及相位谱即可得出离散的复频谱的实部与虚部。

$$B_n = \sqrt{S(f)} \cos\psi(f), \quad C_n = \sqrt{S(f)} \sin\psi(f) \quad (7)$$

根据式(7)的复频谱的实部与虚部可得到离散的含有噪声的信号的复频谱。对信号的复频谱进行傅立叶反变换即可得到复时间序列。

$$St = \sum_{i=1}^m (B_n + iC_n) \quad (8)$$

由式(8)可以得到多普勒雷达接收机 IQ 信号通道接收到的 IQ 信号。

$$I_n = \text{real}(St) \quad Q_n = \text{imag}(St) \quad (9)$$

根据仿真设定值(采样点数)生成一个径向中多个脉冲中各距离库的 IQ 数据。

3.2 IQ 数据仿真结果

根据 IQ 数据仿真原理, 仿真出天气回波的 IQ 信号。在利用 Matlab 软件仿真雷达 IQ 信号之前需要对各仿真参数的数值进行设定, 仿真参数值可根据实际需求调整, 仿真参数初始值见表 2。

表 2 仿真 IQ 信号设定参数表

参数名称	默认数值
噪声功率谱密度(cc)	0.01
速度谱宽(dv)/Hz	20
信号频移(fd)/Hz	60
信噪比(SNR)/dB	60
雷达波长(lm)/cm	0.1
采样点数(m)	32
采样频率(f_s)/Hz	1000

根据表 2 中的仿真参数仿真出 IQ 数据, 生成的回波功率谱如图 3 所示。

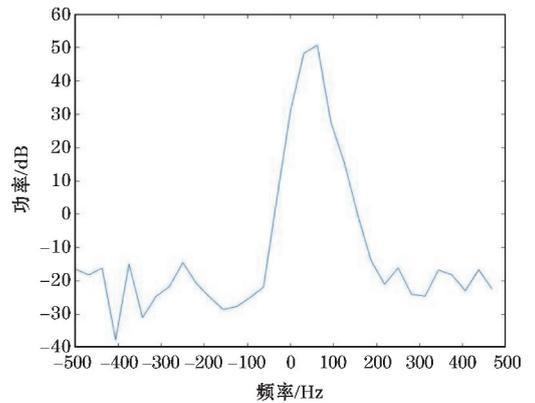


图 3 根据表 2 参数仿真的 IQ 信号的回波功率谱

3.3 PPP 组件测试

完成组件的构建之后需要对组件进行测试, 在 SystemVue 软件上搭建组件的测试电路, 如图 4 所示。测试电路有 2 个输入端和 3 个输出端。2 个输入端分别输入根据仿真出的雷达回波信号的实部数据(I 数据)和虚部数据(Q 数据)。3 个输出端分别输出通过组件计算出的雷达基数据产品(反射率因子、径向速度和速度谱宽)。

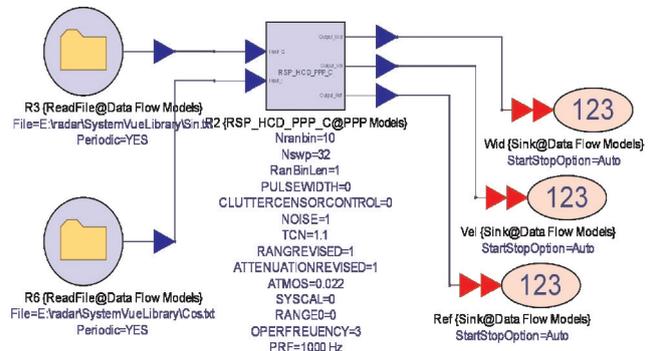
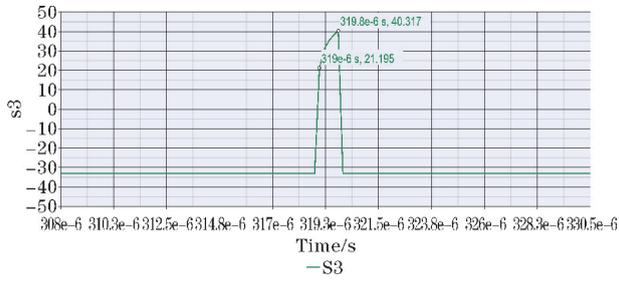


图 4 PPP 组件测试电路图

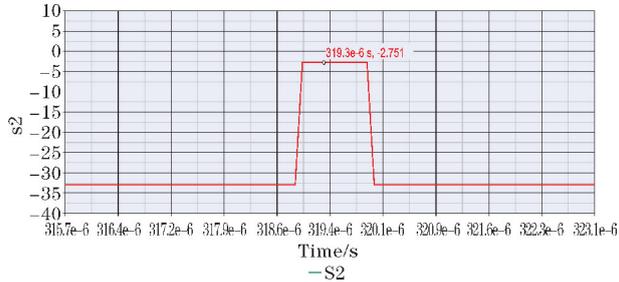
在完成配置参数设定以及测试电路构建之后, 运行测试电路进行 PPP 算法仿真, 根据输入 IQ 数据计算出雷达基数据产品。

测试过程首先使用设定的初始值仿真出雷达回波信号(IQ 信号), 将 IQ 信号作为输入, 输入仿真组件计算出雷达基数据产品。得到图 5 所示结果。

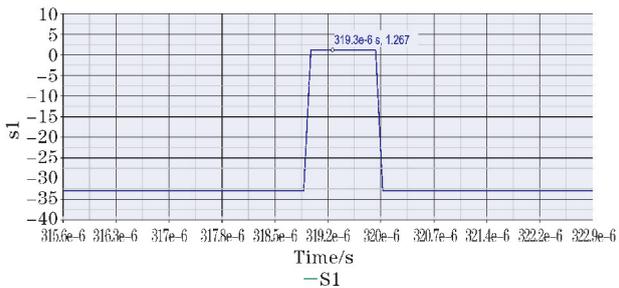
图 5 中低于最小噪声功率的数值为无效值, 赋值为 -33。图 5(a) 中计算出的反射率因子值因为添加了距离订正项, 所以会随着距离的增加而增大。



(a) 反射率因子图



(b) 径向速度图



(c) 速度谱宽图

图5 根据表2设定的参数值仿真出的信号得到的雷达基数据产品图

设置距离库数值为5(5个库的输入IQ相同),脉冲个数为32,计算出的基本产品数值如表3所示。径向速度换算公式: $f_d = -\frac{2V}{\lambda m}$ 。谱宽换算公式: $df = \frac{2}{\lambda m \times dv}$ 。参数含义对照表2。径向速度理论值:-3 m/s,谱宽理论值:1 m/s。

表3 根据仿真IQ信号设定参数表计算出雷达基本产品

距离库	反射率因子 /dBZ	径向速度/ (m/s)	速度谱宽/ (m/s)
1	21.095	-2.751	1.267
2	30.747	-2.751	1.267
3	35.193	-2.751	1.267
4	38.125	-2.751	1.267
5	40.317	-2.751	1.267

修改组件的配置参数验证组件性能以及组件配置参数是否有效。

修改仿真IQ的脉冲个数,在SystemVue软件系统

上运行仿真。在其他参数不变的情况下,将脉冲个数增加到64时计算结果如表4所示。

表4 改变脉冲个数组件的结果对比

	m/s	
脉冲个数	32	64
径向速度	-2.751	-3.181
速度谱宽	1.267	1.267

修改脉冲个数参数,随着脉冲个数的增加通过组件计算出的速度谱宽数值不发生改变。而径向速度的误差百分比从8.3%减小到6.03%。原因在于对径向速度进行计算时,脉冲积累个数增多,会提高回波信号的信噪比,提高估计准确度。

表5 修改雷达工作频率组件的结果对比

	m/s		
	X波段 (9.375GHz)	C波段 (5.6GHz)	S波段 (3GHz)
径向速度	-2.751	-3.279	-3.341
速度谱宽	1.267	1.109	1.208

将初始设定的S波段雷达的工作频率改为X、C波段雷达的工作频率之后(相应的输入仿真雷达回波信号的设定波长,也要根据雷达工作频率进行修改),计算出的径向速度,速度谱宽与S、C波段雷达计算出的径向速度,速度谱宽有一定偏差。然而,S、C以及X波段计算出的径向速度和速度谱宽,都接近于径向速度设定值-3 m/s以及速度谱宽设定值1 m/s。

表6 修改脉冲重复频率组件的结果对比

	取值1	取值2	取值3	取值4
脉冲重复频率/Hz	1000	200	500	1500
径向速度/(m/s)	-2.751	-3.038	-3.036	-3.008
速度谱宽/(m/s)	1.267	1.065	0.731	0.846

修改输入信号以及组件的脉冲重复频率。虽然计算出的结果有一些偏差,但是偏差在误差允许的范围之内。测试结果表明构建的组件满足理论要求。

4 结束语

首先简要介绍SystemVue的仿真环境,然后通过Matlab软件系统仿真出符合设定的仿真参数特性的雷达回波信号。接下来以天气雷达信号处理中的PPP算法为例介绍在SystemVue软件上结合C++软件创建天气雷达组件的过程。然后,在SystemVue上搭建了PPP组件的测试平台。最后,使用仿真出的雷达回波信号对在SystemVue软件上创建的组件的性能进行测试。

根据对PPP组件的性能验证,表明SystemVue软

件可以方便的对雷达信号处理算法进行验证。将 SystemVue 软件运用到天气雷达模拟中是可行的。后续可通过 SystemVue 构建软件雷达,进而实现对不同天气雷达系统的仿真和新算法的验证。

参考文献:

- [1] 程文清. 基于 SystemVue 的无线通信原理仿真实验教学研究[J]. 中国现代教育装备, 2012(13): 50-54.
- [2] 张杰, 何强, 韩壮志. 基于 SystemVue 的某型雷达发射信号生成[J]. 现代电子技术, 2014, 37(21): 45-52.
- [3] 尚朝轩, 王品, 韩壮志. SystemVue 在雷达组网仿真系统中的应用[J]. 电光与控制, 2016(2): 79-82.
- [4] 郑昌艳, 何强, 张杰. 基于 SystemVue 的炮位侦察雷达炮弹回波信号生成[J]. 微型机与应用, 2016, 35(3): 81-83.
- [5] 谢涛, 陈丁. 基于 SystemVue 的雷达威力分析与评估[J]. 科技风, 2015(6): 83.
- [6] 赵杨, 尚朝轩, 韩壮志. SystemVue 在雷达系统仿真中的应用[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(1): 73-77.
- [7] 刘婧逸, 邱雪娜. 基于 SystemVue 的雷达模拟仿真技术[J]. 电子技术与软件工程, 2017(21): 94-95.
- [8] 张明皓, 束永江, 杨涛, 等. SystemVue 在有源阵列天线研究中的应用[J]. 电子设计工程, 2018, 26(24): 45-48.
- [9] 程林, 谢登召, 蒋东旭, 等. 基于 SystemVue 的脉冲多普勒雷达干扰仿真研究[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(2): 72-77.
- [10] 张杰, 何强, 韩壮志. 基于 SystemVue 的某型雷达发射信号生成[J]. 现代电子技术, 2014, 37(21): 45-48.
- [11] 姚国国. 基于 SystemVue 的相控阵雷达系统性能评估仿真技术[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(4): 75-79.
- [12] 汪章维, 杨安良, 丁华君, 等. 我国天气雷达的发展和趋势[J]. 浙江气象, 2019, 40(2): 7-10.
- [13] 杨柳. 强对流天气中新一代多普勒天气雷达产品的分析[J]. 现代农业, 2019(1): 103-104.
- [14] 于明慧, 刘黎平, 吴肿, 等. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象, 2019, 45(3): 330-344.
- [15] 高志球. 天气多普勒雷达回波信号处理的模拟试验[J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(4): 43-49.

A Preliminary Application of SystemVue on Weather Radar Simulation

WANG Qianyuchen, WANG Xu, HE Jianxin

(College of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: SystemVue is an Electronic System Level (ESL) EDA simulation environment developed by Agilent. At present, SystemVue is mainly used in wireless communication, system architecture and technological innovation of aerospace and defense electronics. SystemVue's simulation application for radar systems is mainly focused on military radars, rarely for weather radars. Simulation examples of SystemVue on military radars show that it has superior simulation performance, therefore the application of SystemVue can be extended to the simulation and analysis of weather radars. Simulation of weather radar are of great help to its networking, calibration, fault analysis and new algorithm verification. This paper first briefly introduces the simulation environment of SystemVue, and introduces the creation process of weather radar component using the PPP algorithm in weather radar signal processing as an example. Next, a test platform for PPP component was built on SystemVue, and the performance of the component was tested using simulated radar echo signals. The results show that the SystemVue platform can help to verify the weather radar signal processing algorithm, and that the software radar can be built through SystemVue to implement the simulation and new algorithm verification of different weather radar systems.

Keywords: SystemVue; weather radar; algorithm verification; PPP