

文章编号: 2095-4980(2016)04-0541-04

## 合成孔径雷达回波模拟器

张玉宪<sup>1</sup>, 袁常顺<sup>2</sup>

(1.海军航空兵学院, 辽宁省 葫芦岛 125001; 2.北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 回波仿真是进行合成孔径雷达(SAR)研究的重要途径, 但其计算量巨大, 所需的时间较长。为了快速实现合成孔径雷达回波仿真, 采用现场可编程门阵列(FPGA)作为主处理芯片, 设计了专用于 SAR 回波信号模拟的实时数字信号处理板卡, 并在板卡上编程实现整个回波模拟算法。实际应用结果显示, 采用 FPGA 来实现 SAR 回波仿真, 可以在保证精确度的前提下, 大大加快仿真速度。

**关键词:** 合成孔径雷达; 回波仿真; 实时; 现场可编程门阵列

**中图分类号:** TN957.52<sup>+9</sup>

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201604.0541

## Simulator of the SAR echo based on FPGA

ZHANG Yuxian<sup>1</sup>, YUAN Changshun<sup>2</sup>

(1.Naval Aviation Academy, Huludao Liaoning 125001, China;

2.College of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The echo simulator is of great significance to the research on Synthetic Aperture Radar (SAR), whereas it costs massive computation. In order to realize fast simulation of SAR echo, the Field Programmable Gate Array(FPGA) is adopted as the kernel chip to design the digital signal processing board specially used in SAR echo simulation. The simulation algorithm is realized on the board by programming. The application result shows that the realization of SAR echo simulator based on FPGA can greatly accelerate the simulation speed and significantly reduce energy consumption.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR); echo simulator; real-time; Field Programmable Gate Array

合成孔径雷达是一种能实现高分辨、远距离、广范围的成像雷达, 具有很高的军事应用价值, 是近些年雷达研究的热点。合成孔径雷达不惧各种恶劣天气如大雾、大雨、沙尘暴和云层, 不受白天和黑夜的影响, 可以大大提高雷达的信息获取能力, 已成为战场侦察的主要手段<sup>[1-2]</sup>。SAR 回波仿真<sup>[3-7]</sup>就是模拟 SAR 的工作过程, 使用计算的方法产生回波数据, 利用仿真数据可以验证各种成像算法, 分析系统性能, 并对系统参数的选择具有指导作用。在 SAR 系统方案设计、成像处理算法研究、噪声和杂波抑制等场合, 需要有符合特定条件下的 SAR 原始回波信号, 这些数据通过雷达载体飞行获得往往不太实际, 所以通过模拟来获得所需要的原始回波信号是一个重要的解决手段。

传统的 SAR 回波模拟都是基于通用计算机平台进行回波信号模拟。例如在文献[8]中, 通过使用多台计算机利用对场景划分的方法进行 SAR 回波数据并行计算的仿真。但通用个人计算机(Personal Computer, PC)对数据量较大的自然场景的 SAR 回波仿真用时过多, 很难实现回波的实时模拟。从工程实现的角度, 文献[9]提出一种基于并行计算的有效原始数据产生方法。文献[10]提出一种基于显卡进行 SAR 回波仿真的方法, 在一定程度上可以加快运算速度。文献[11]设计出了一款基于现场可编程门阵列(FPGA)+数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)的多通道雷达回波模拟器, 该模拟器在计算的过程假设目标点在一个相干时间内不会移动, 从而简化了回波计算的复杂性, 但精确度不是很高。

为了快速实现 SAR 回波仿真, 本文采用高性能 FPGA 作为主处理芯片, 并在设计的数字信号处理板卡上编程实现了 SAR 回波仿真, 从而大大加快了仿真速度, 并且经验证实时性和计算精确度都较好。

## 1 SAR 回波仿真算法

目前实现 SAR 回波的模拟算法大体上来讲有 3 种：距离时域脉冲相干(Range Time Pulse Coherent, RTPC)算法、一维的频域快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法、二维快速傅里叶变换(2DFFT)算法。一维的频域 FFT 算法仿真精确度低；2DFFT 算法的运算效率最高，但其占用的存储空间比较大，且不能模拟移动平台的运动误差；RTPC 算法仿真精确度最高，所以在 SAR 回波仿真中选择该算法。

RTPC 算法的基本原理是在发射连续脉冲的基础上，随着雷达平台的运动，在距离时域中按照脉冲顺序，生成每个脉冲的回波信号。RTPC 算法的基本工作步骤首先是产生一个脉冲的回波信号计算每个分辨单元的局部入射角和局部斜距，估计从散射单元返回到雷达的信号幅度、距离相位和多普勒相位。为方便下面的推导，首先给出一些变量的定义，其中  $n$  表示第  $n$  个发射脉冲， $m$  表示第  $m$  个距离门， $i$  表示地面第  $i$  个方位分辨单元， $j$  表示地面第  $j$  个距离分辨单元。表示慢变化空间变量的距离延迟函数的二阶泰勒级数展开式为：

$$R(x) = R_0 - \lambda f_{dc}(x - x_c) / 2v - \lambda f_r(x - x_c)^2 / 4v^2 \quad (1)$$

式中： $x_c$  是目标横过波束中心时的方位空间位置； $R_0$  是相应的斜距； $\lambda$  为波长； $f_{dc}$  和  $f_r$  分别是方位向调频信号的中心频率和调频斜率。多普勒相位历程函数为：

$$\varphi(x) = -j4\pi R(x) / \lambda \quad (2)$$

式中正体  $j$  为虚数单位。在实际计算中，对于第  $n$  个发射脉冲，将波束照射区域的地面目标分辨单元  $(i, j)$  的等效复散射函数映射到斜距方向，同时加入距离徙动产生的斜距偏移，所以有

$$R_{ij}(x_n) = R_{j,\min}(x_n) + \Delta R_{ij}(x_n) \quad (3)$$

式中： $R_{j,\min}(x_n)$  是对应第  $j$  个等距离行的最短斜距； $\Delta R_{ij}(x_n)$  是距离徙动偏移，可表示为：

$$\Delta R_{ij}(x_n) = -\lambda f_{dc}(x_n - x_{ij,c})^2 / 4v^2 \quad (4)$$

式中  $x_{ij,c}$  是地面分辨单元  $(i, j)$  横过波束中心时对应的方位位置。两者共同作用的结果使地面散射单元的目标落入到某一偏移的斜距距离门内，把  $R_{ij}(x_n)$  相对于距离门宽度取整，将得到最终的确定距离门

$$N_m = \text{int} \left[ \frac{R_{ij}(x_n)}{R_{m0}} \right] \quad (5)$$

对于等距离方向上的每个散射单元重复进行上述过程，得到相应距离门的复回波信号，而后进行相干叠加，在叠加过程中要考虑正确的多普勒相位。对于第  $n$  个发射脉冲，地面散射单元矩阵形成的第  $m$  个距离门回波调制函数为：

$$g(x_n, r_m) = \sum_{i,j} G_{i,j} \rho_{ij}^0 \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(x_n, r_m) \right] \quad (6)$$

式中： $i, j$  遍取照射范围内所有对第  $m$  个距离门回波有贡献的地面散射单元； $\rho_{ij}^0$  是分辨单元  $(i, j)$  的散射强度； $G_{ij}$  表示天线在分辨单元  $(i, j)$  处的增益。对测绘带上所有等距离行完成上述处理，将得到一个回波脉冲信号在距离门上的调制信号的值，此时各距离门上的回波调制信号已经完成了方位向回波的叠加，而不同的距离门对应不同的距离向时延，经过  $\delta(\cdot)$  函数调制完成距离向回波的叠加。回波调制函数再与发射信号  $s(x_n, r)$  相卷积得到第  $n$  脉冲的回波信号：

$$s_r(x_n, r) = \sum_{i,j} G_{ij} \rho_{ij}^0 \exp \left[ -j4\pi R(x_n, r) / \lambda \right] \cdot \delta \left[ r - R(x_n, r) \right] \otimes \frac{2}{cv} s(x_n, r) \quad (7)$$

式中  $\delta(\cdot)$  表示单位冲激函数。随着雷达平台的运动，每个脉冲覆盖的目标范围是变化的，在每个方位位置上都根据上述步骤计算雷达回波，从而得到整个仿真区域的目标的原始回波信号。其流程如图 1 所示。

## 2 系统结构

系统主要包括 2 个组成部分，分别是目标区域模型生成系统和 SAR 目标模拟器。SAR 目标模拟器的主要功能是实时接收仿真机的控制指令，并可根据 SAR 系统的参数、存储的地面目标信息以及仿真机输出的目标运动轨迹和姿态等，实时计算产生合成孔径雷达面目标回波信号，并具有干扰仿真能力。目标区域模型生成系统完成回波模拟以及目标散射系数图的产生，并将数据文件、仿真参数等信息通过通信接口传输到 SAR 目标模拟器中，其结构图和实时处理板卡分别如图 2 和图 3 所示。

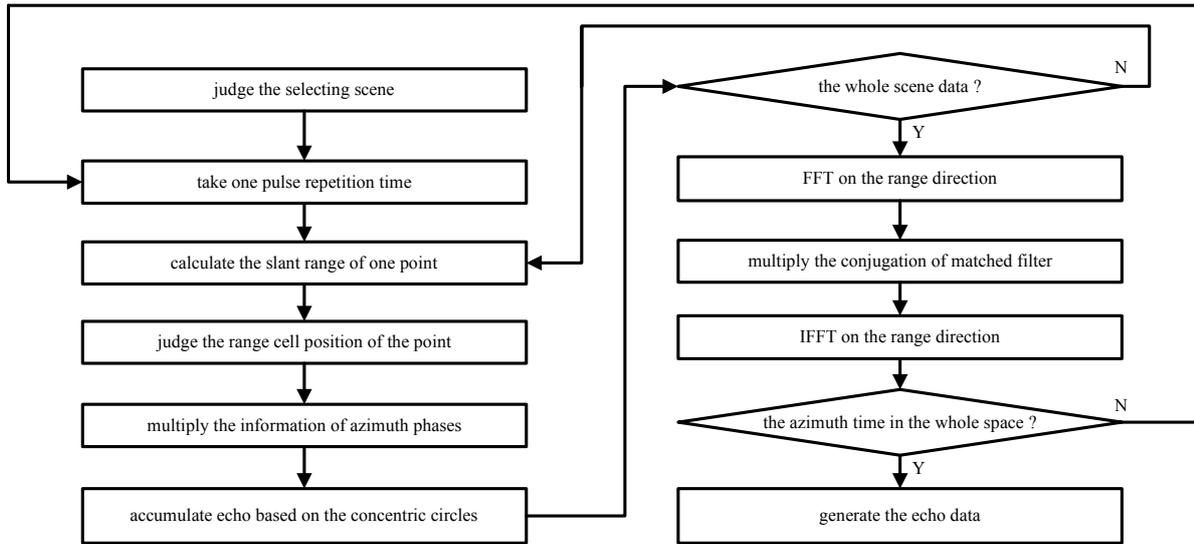


Fig.1 Flowchart of the RTPC algorithm  
图 1 距离时域脉冲相干法

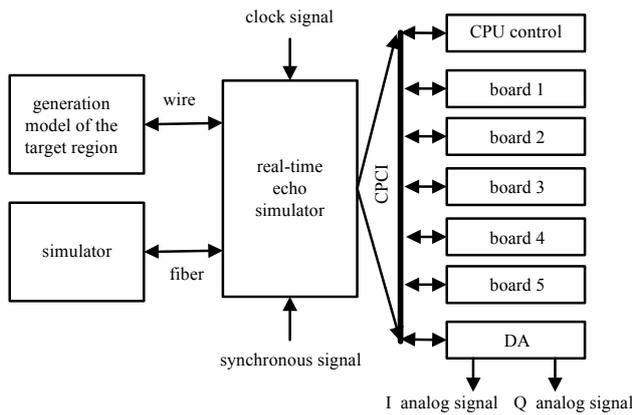


Fig.2 System structure  
图 2 系统结构



Fig.3 Real-time process board  
图 3 实时处理板卡

### 3 工作原理

监控单元通过网络从目标区域模型生成系统调入目标区域模型数据，或者从监控单元的本地硬盘文件中调入数据，将数据通过网络传送给回波信号生成单元。回波信号生成单元集成外设部件互连(Compact Peripheral Component Interconnect, CPCI)机箱的中央处理器(Central Processing Unit, CPU)主控板通过网络接收目标区域模型数据，将该数据通过 CPCI 总线以直接内存访问(Direct Memory Access, DMA)方式传送到各个计算板。同时主控板上的 CPU 经过预测和插值处理得到每个 PRI 时刻目标的位置信息，然后再根据波束照射角度确定回波计算区域，并进而确定整个计算阵列中每个处理单元需要计算的区域以及相关参数，从而完成了对并行处理单元任务的分配及调度。

计算板接收到数据后将数据存放在各板的本地缓存中。一次仿真过程中各计算板需要的全部目标区域模型数据可以事先一次性传入各计算板，仿真过程中不再需要传入模型数据。回波信号生成单元从仿真机接收初始仿真参数。初始仿真参数包含雷达载体位置信息、载体姿态信息、天线角度信息。各计算板根据这些信息，计算雷达天线照射区域，将照射区域内的目标区域模型数据调入各 FPGA 片内缓存存放。当各计算板收到启动计算信号后，开始计算回波。各计算板上的 FPGA 芯片计算结果在板内进行叠加，叠加结果通过底板总线接口送出。各计算板通过底板总线接口送出的计算结果在机箱内的数据叠加板进行叠加后与雷达发射信号进行卷积。并在同步触发脉冲的固定延迟处将计算的回波数据发出，转换为模拟基带 I/Q 信号。各计算板计算完第一个脉冲的回波数据后，计算下一个脉冲雷达照射区域，并根据照射区域的改变情况更新各 FPGA 内部存放的目标区域模型数据。数据更新后各 FPGA 可计算下一个脉冲的回波数据。

## 4 实验结果

### 1) 仿真参数设置

考虑到功能实现的稳定性和设计需求,本文设定 FPGA 工作的系统时钟频率为 100 MHz。本文所设计的 SAR 回波模拟器的系统参数:脉冲重复周期为 25  $\mu$ s,脉冲宽度为 10  $\mu$ s,载频为 16 GHz,采样频率 300 MHz,带宽为 100 MHz,飞行高度为 5 km,飞行速度为 110 m/s,方位向天线孔径大小为 1.5 m。

### 2) 仿真结果

根据前面的参数设置进行仿真,仿真采用 2 048 $\times$ 2 048 点的二维面目标,图 4 为 SAR 回波模拟器输出的 I 路和 Q 路模拟信号。FPGA 生成的 SAR 回波模拟信号经过数据采集板采样存储之后,通过千兆(Gbps)以太网回传给 PC 机,通过 MATLAB 对回传数据做成像处理。成像处理的结果与实际仿真的场景符合,验证了模拟器的正确性。

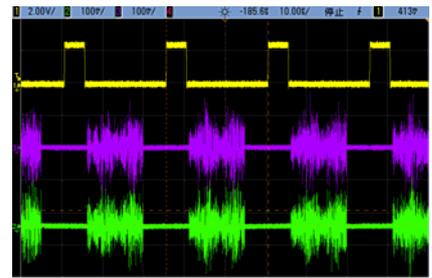


Fig.4 Analog I and Q signals of the SAR echo  
图 4 面目标回波模拟波形

## 5 结论

本文提出的基于 FPGA 的 SAR 回波仿真可以满足计算精确度的要求,并且可以大大提高仿真速度。基于 FPGA 的 SAR 回波模拟使用的硬件设备简单,功耗低,速度快,应用前景广阔。最后通过成像处理证明了该 SAR 回波模拟器的正确性。

### 参考文献:

- [1] HARGER R O. Synthetic Aperture Radar Systems: Theory and Design[M]. Academic Press, 1970.
- [2] NONAKA T,SASAGAWA T. Activities of the SAR application research committee of Japan[C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Munich,Germany:IEEE, 2012:4050-4053.
- [3] BRUNNER D,LEMOINE G,BRUZZONE L,et al. Building height retrieval from VH R SAR imagery based on an iterative simulation and matching technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,48(3):1487-1504.
- [4] KHWAJA A S,FERRO-FAMIL L,POTTIER E. SAR raw data simulation in case of motion errors[C]// 2008 IEEE Radar Conference. Rome:IEEE, 2008:1-5.
- [5] XIA W J,ZHU J H,ZHOU J J. A raw signal simulator for the side looking bistatic SAR[C]// 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming,China:IEEE, 2008:1266-1269.
- [6] LI J. The missile SAR echo signal simulation technology research[C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM). Taiyuan,China:IEEE, 2010,5:V5-469-V5-471.
- [7] ZHANG S,LONG T,ZENG T,et al. Research on echo simulation of space-borne bistatic SAR[C]// 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai,China:IEEE, 2006:1-4.
- [8] WEN Liang,ZENG Tao. Design and implementation of realtime SAR echo simulator for natural scene[C]// Information Management and Engineering Conference. Chengdu,China:IEEE, 2010:201-204.
- [9] CAO N,LU H,HU J R,et al. Efficient SAR raw data simulation based on parallel computation in hybrid domain[C]// World Congress on Computer Science and Information Engineering. Los Angeles,CA:IEEE, 2009:186-190.
- [10] BALZ T,STILLA U. Hybrid GPU-based single- and double-bounce SAR simulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009,47(10):3519-3529.
- [11] XU Chengfa,BAI Jingliang,WU Ronggang,et al. A general radar surface target echo simulator[C]// International Congress on Image and Signal Processing. Yantai,China:IEEE, 2010:3677-3680.

### 作者简介:



张玉宪(1982-),男,河南省驻马店市人,工程师,主要研究方向为自动控制及计算机仿真,以及教学保障管理.email:yuanchang61@126.com.

袁常顺(1987-),男,山西省太谷县人,在读博士研究生,主要研究方向为信号与信息处理和多目标跟踪。