

一种空间目标 ISAR 成像显控终端的设计与实现

倪书爰 王俊岭 马幼鸣 郭宝锋

(北京理工大学 信息与电子学院 北京 100081)

摘要: 显控终端是雷达系统的重要组成部分,为雷达操作用户提供雷达系统控制操作与目标信息的显示。本文介绍了一种基于 VS2010 编译环境的空间目标 ISAR 成像显控终端。该显控终端使用专用硬件实现雷达目标回波信号的实时采集与接收,采用 CPU 与 GPU 异构并行处理机制完成回波数据的实时 ISAR 成像处理及结果显示。最终在通用 PC 上实现了包括系统参数设置、高速回波数据的实时接收与存储、实时 ISAR 成像处理及空间目标一维距离像、二维 ISAR 像的输出与显示。

关键词: 显控终端, ISAR 成像, GPU, 信息显示

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Design and implementation of space target ISAR imaging display and control terminal

Ni Shu'ai Wang Junling Ma Youming Guo Baofeng

(Beijing Institute of Technology School of Information & Electronics, Beijing 100081, China)

Abstract: The display and control terminal is an important part of a radar system. It provides radar system control operations and displays the target information for users. This paper introduces a display and control terminal for space target ISAR imaging based on VS2010. In order to receive the broadband echo signals in real time, this display and control terminal samples and receives radar target echo signals by using dedicated hardware. Besides, it uses CPU and GPU heterogeneous parallel processing to complete echo data ISAR imaging process and the displaying of imaging process result. Ultimately, this terminal achieves the setting of system parameters, the storage of the high speed real-time echo data, the real-time ISAR imaging process and the display and output of one-dimension distance image and two-dimension distance-orientation image on a common PC.

Keywords: display and control terminal; ISAR imaging; GPU; information displaying

1 引言

近年来,为了提高雷达目标信息的获取能力,各国对雷达成像技术的研究也随之发展起来。成像雷达不仅可以获取目标的位置与运动信息,也可获取目标和场景的图像。根据工作原理和成像方式的不同,成像雷达可以分位合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR),其中,逆合成孔径雷达成像是在合成孔径雷达技术的基础上发展起来的,一般指雷达不动目标运动的高分辨率的雷达,可以用来对空间运动目标进行远距离、全天时、全天候的跟踪与观察,可获取空间运动目标的运动信息与图像场景,大大提高了雷达对雷达目标信息的感知能力^[1]。雷达显控系统主要为操作用户提供雷达系统工作的控制、目标原始回波数据的数据处理和输出结果显示等功能。随着大规模集成电路

技术、计算机技术和先进的数字信号处理技术的飞速发展,雷达显控终端的研制已经由之前的模拟终端、模拟数字混合终端发展到了全数字终端的发展过程^[2]。计算机灵活的数字化数据处理过程、GPU(graphic processing unit)通用计算应用的普及以及强大的计算机软件基础为非合作目标成像雷达显控终端的设计与实现带来了极大的便利。同时,显控系统终端的软件化也使整个系统的兼容性和可扩充性更强,为雷达显控终端的实现提供了新途径。

本文设计的 ISAR 成像显控终端旨在获取空间目标雷达回波数据进行 ISAR 成像处理后输出的空间目标一维距离像和二维距离方位像。显控终端是在一台主机上采用专用硬件以及 GPU 处理器实现。显控终端通过显控界面设置雷达系统的工作模式并将工作模式参数传递到其他分系统,其他分系统按照显控界面传递的工作模式与参数进行相

应的工作,从而达到对雷达系统的控制功能;雷达模拟回波数据经数据采集子系统 ADC 采样后变成数字信号,再将数字回波数据传递到成像处理模块进行成像处理,并将成像结果进行实时显示。考虑到 ISAR 是一种具有很高的成像分辨率的雷达,其成像过程是一项大数据量的高密度计算的处理任务,因此成像处理过程采用 CPU (central processing unit)与 GPU(graphic processing unit)异构并行的高效处理机制实现,即 CPU 负责的是逻辑性较强的事务计算,GPU 主要负责高数据吞吐量、高存储器带宽、数据计算密度比较高的并行计算^[3]。此外,考虑到交互的随机性与频繁性,传统的面向过程的程序设计已经不能满足用户多项交互事件的响应,而 Windows 基于消息事件驱动的面向对象的程序设计以及 CPU 的多线程技术^[4],不仅能够灵活的响应用户发出的消息,还可以完成实时复杂的多任务的实时响应操作。

2 系统结构

ISAR 成像雷达显控终端由数据采集单元、显控处理机以及成像处理机组成,如图 1 所示。为了满足系统设计的高速信号的高速实时数据采集与传输的要求,数据采集单元采用 FPGA 与 DSP 和高性能 ADC 实现,对宽带接收正交 IQ 信号进行模数转换,并将采集到的高速率回波数据经 PCI-E 总线接口传输给显控处理机。显控处理机是在一台主机上采用 Windows 系统软件的形式实现的,是整个系统的控制中心,不仅负责设置雷达系统的工作模式和成像方式,还承担着缓存和存储高速传输的原始回波数据,将原始回波数据经 PCI-E 总线实时地传输给 GPU 成像处理机以及实时显示成像处理结果等任务。此外显控处理机还具有实时对目标运行轨迹进行预报、监视各个分系统的工作状态以及网口通信等功能。鉴于 CPU 与 GPU 之间传输带宽、显存和内存需求量的要求,GPU 成像处理机需采用高性能显卡和内存量大、多核的 CPU 的服务器,以 CPU 与 GPU 异构并行的高效处理机制实时地完成对雷达回波数据进行 ISAR 成像并行运算,并将计算得出的一维距离像数据、二维距离-方位像数据从显卡传递到显控处理机进行实时显示。GPU 的 ISAR 成像算法采用 CUDA 软件编译环境编写程序实现的。系统实现 ISAR 成像所采用的算法是 RD(距离多普勒)算法^[5]。

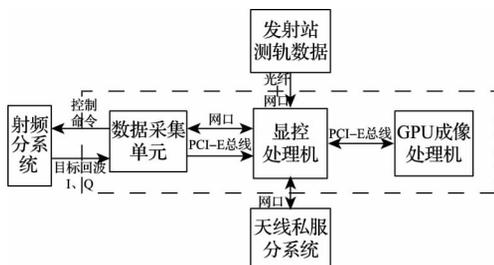


图 1 空间目标 ISAR 成像终端系统结构图

3 空间目标 ISAR 成像显控终端的实现

以卫星成像为例,发射站天线对准卫星并发射已经经过脉冲调制的高频 ISAR 调制信号,接收站根据轨道预报生成的波门将卫星反射到接收站的回波脉冲信号进行数字采样,并将采集的回波数据传输经显控处理机传输给 GPU 成像处理机进行成像。下面为每个模块的实现方法。

3.1 数据采集单元

数据采集单元接收宽带目标模拟回波信号,对宽带回波正交 IQ 信号进行模数转换,并将高速回波数据上传给显控处理机。如图 2 所示,主要由定时波门产生板卡(简称定时板)、数据采集板卡和 PCI-E 板卡组成。由于雷达发射的信号为脉冲调制信号,因此接收站需要利用发射站对目标观测的时间和位置信息对目标的运行轨迹进行预报,从而计算出每个脉冲对应的波门起始时刻位置,定时波门产生板卡根据显示控制处理机传输过来的脉冲波门起始时刻生成以后每个脉冲的波门信号和帧头参数,并将波门信号与帧头经 CPCI 接口传输给高速数据采集板卡,当采集板卡判断波门有效时,将 ADC 高速模数转换芯片采集的宽带数字回波信号缓冲到采集板卡上的 DDR3 中,当波门无效时,从 DDR3 的读出数据通过光纤传输到 PCI-E 板卡,PCI-E 板卡将接收到的数据再上传到显控处理机进行成像处理。在 PCI-E 板卡上设有 FPGA 和 PCI-E 接口,通过 FPGA 实现总线控制逻辑将回波数据传输给显控处理机。经过测试,当 PCI-E 板卡以 4M 缓存数据块上传时,PCI-E 板卡与显控处理机之间的数据传输速率最高,充分满足传输带宽的要求。

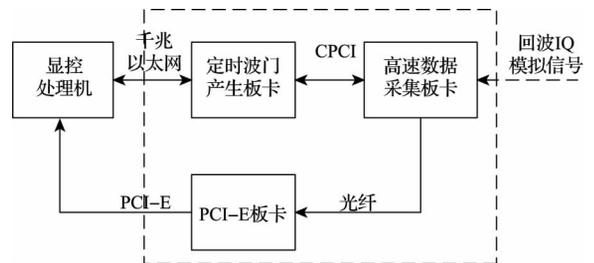


图 2 数据采集单元的组成

定时板采用 FPGA 和 DSP 实现,DSP 从网口接收显控处理机发送过来的波门起始时刻、脉冲重复周期和脉宽等参数,然后将参数通过 EMIFA 接口发送给 FPGA 处理,FPGA 则将收到的波门起始时刻与 GPS 计时器输入的 GPS 时间进行匹配,若匹配上则按照所给脉冲重复周期与脉宽的产生波门信号。考虑到回波信号 IQ 为 500 M 左右的超宽带模拟信号,根据奈奎斯特采样定律可知采样频率要大于等于 1 G,采用 e2V 公司的 EV10AQ190 型号的超高性能 ADC 芯片。可允许的模拟信号输入带宽范围为 4 MHz~3.2 GHz,采用分辨率为 10 bit,可工作于三种采

集模式:单通道 5GSPS、双通道 2.5GSPS 和四通道 1.25GSPS,采用四通道 2.5GSPS 工作模式即可满足指标要求,考虑到采集板的数据接收与缓存的复杂性,其时序逻辑控制采用 FPGA 实现。

3.2 显控处理机

在雷达系统中,为了实现人机交互,显控处理机是雷达系统设计中必不可少的一环。显控处理机一般是指显控软件,主要为雷达操作员提供雷达系统工作模式和参数的设置与目标信息的显示,包括显控界面与后台控制程序两部分功能。软件技术的飞速发展为显控处理机采用软件形式的设计带来了很大的便利,因此在显控终端中,显控处理机是在一台通用主机上基于 Windows 系统和 VS2010 编译环境采用软件的形式实现的。由于雷达信号接收与处理具有并行性和实时性等特点,要求显示控制处理机必须同时响应多个任务的并行请求。例如显控处理机不仅要接收回波数据,还要求在接收回波数据的同时能够将成像处理机的输出结果显示到界面上,与此同时可能还要响应系统键盘的输入与鼠标的点击等消息请求。如果采用传统的面向过程的程序设计方法则多个任务只能串行才能完成,不能满足实时并行触发的要求,Windows 基于消息事件驱动的面向对象的程序设计方法和 CPU 的多线程处理机制则能够充分解决这一问题。在本文中,显控处理机正是采用这种方法实现的,显控处理机采用的通用微机具有 32 个核的 CPU 和 64G 的内存,因此可以真正实现多线程的并行触发响应与高数据量的数据缓冲功能。此外,实现分系统的网口通信方法是基于 Window 系统的网络通信 SOCKET 技术^[6]。通用微机上还具有 PCI-E 接口和千兆以太网口等对外接口,不仅能够完成高速回波数据的实时传输,还能完成与其他分系统的网口通信与数据交换功能。如图 1 所示,显控处理机对雷达回波数据的接收是通过 PCI-E 总线接口实现,而显控终端与发射站以及天线伺服系统的数据交换则是通过千兆以太网口通信实现的。

本文所设计的显控处理机软件界面如图 3 所示。显控处理机分为 4 个功能区域:参数设置区域、系统运行区域、目标显示区域和状态显示区域。考虑到雷达系统中的参数指标繁多,本文中显控处理机中将参数设置区域分为 3 部分:系统参数设置、目标参数设置以及成像设置。系统参数设置主要是为了设置雷达系统的同步方式、信号模式和目标盲区范围;目标参数设置主要是为了选择雷达观测的目标对象以及设定目标轨道引导方式;成像设置主要是确定成像方式,图像更新率,成像积累时间以及成像窗口的大小,其中不同的成像方式对应的不同的成像算法。系统运行区域主要是控制系统的工作状态,包括系统复位、系统运行/停止、通道矫正、系统自检、模拟信号调试、系统退出以及参数下载。状态显示区域主要是为了检测系统终端各个单元是否工作正常和显示天线此时的指向状态与转动状态。若相应的状态为绿灯,则表示该功能单元正常工作,若

为红灯,则为故障状态。目标显示区域主要是为了显示成像处理结果的一维距离像、二维距离方位像,此处为了更好的观察成像质量,显控处理机还实现了对一维像、二维像的放大功能,通过用鼠标选择要放大的区域进行局部放大。

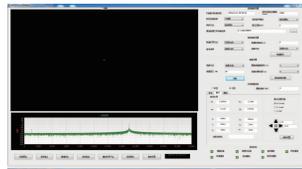


图 3 显控处理机界面

3.3 GPU 成像处理机

ISAR 是一种分辨率很高的雷达,其成像过程一般是一项大数据量的高密度的计算任务,要求处理器具有很高的传输带宽和处理速度。目前 GPU 在处理能力上和存储器带宽上相对于 CPU 有明显的优势,其最主要的优势就是能够进行并行计算,即多个数据执行同一个的运算。与此同时,随着 NVIDIA 推出的 CUDA(compute unified device architecture,统一计算设备架构),是一种将 GPU 作为数据并行计算设备的软硬件体系^[7]。开发人员并不需要借助于图形学 API,只需采用比较容易掌握的 C 语言便可进行程序开发,极大地缩短了开发人员的学习周期。本文中提到的 ISAR 成像是非相参雷达成像^[8],采用 CUDA 编程模型编写 RD 算法对应的成像代码,其成像处理流程如图 4 所示。

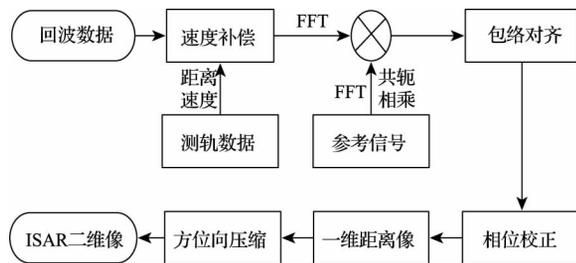


图 4 基于 RD 成像算法处理流程

由于目标为高速运动目标,回波会引入脉内多普勒,进而导致脉压结果主瓣展宽,因此在进行 ISAR 成像处理前首先就要对回波进行速度补偿,补偿所需的速度、距离信息可通过测轨数据以及轨道预报数据获得。将补偿后的数据转换到频域,与参考信号的 FFT 结果共轭相乘再进行 IFFT 就完成了脉冲压缩的过程,进而得到了目标的一维距离像。

后进行复数矩阵与向量相乘,再进行逆快速傅里叶。其中,在 CUDA 编程模型中进行 FFT 运算的可以直接调用库函数 cufftExecC2C 实现,复数矩阵向量相乘运算如下所示。

//内核函数的实现

```

__global__ void MatrixMultiplexVec( float2 * input_
matrix,
float2 * vector, int M, int N, float2 * result )
{
unsigned int tid = blockDim.x * blockIdx.x +
threadIdx.x;
if(tid<M) //防止线程访问溢出
{ for(int i=0;i<N;i++)
{
result[i * M + tid] = input_matrix[i * M + tid] *
vector[tid];
}
}
}

dim3 Grid(1,1,1); //设置网格的执行配置
dim3 Block(M,1,1); //设置线程块的执行配置
MatrixMultiplexVec<<<Grid, Block>>>(M, N,
Matix_data,
Vector_data,result_odata); //调用内核函数

```

对于维数为 $m \times n$ 的复数矩阵按列进行 FFT, 调用方式如下所示:

```

//分配 FFT 执行句柄
cufftHandle fft_plan;
//设置执行句柄为复数 FFT 运算模式
cufftPlan1d(&fft_plan, m, CUFFT_C2C, n);
//执行 FFT 运算
cufftExecC2C(fft_plan, (cufftComplex *) echo_data,
(cufftComplex *) echo_data, CUFFT_FORWD);
//释放 FFT 执行句柄
cufftDestroy(fft_plan);

```

由于采样时刻不完全精准, 脉冲压缩后的峰值位置是不恒定的, 为了实现方位压缩, 需要对每次一维距离像进行包络对齐^[9], 常用的包络对齐方法有包络最大互相关法、最小熵等, 本文采用的是累积最大互相关法, 该方法通过脉冲间的相关移位实现峰值包络的对齐。通过包络对齐处理, 各次回波的距离单元已基本对齐, 但各次回波中还保留了平动分量表现出来的初相, 而 ISAR 成像只需要目标的转动信息, 脉冲间的平动引起的初相对成像是中不利的, 因此需要消除该初相, 这就是相位校正。ISAR 常用的相位校正算法有单特显点法、多特显点法、多普勒中心法、PGA 算法^[10]。本文采用的是多普勒中心法^[11]。相位校正后对各个距离单元做 FFT 即可完成方位向的压缩, 得到 ISAR 二维像。

4 应用与分析

在某项目上采用 ISAR 成像显控终端进行 ISAR 成像

结果测试, 发射信号模式为线性调频信号, 成像积累时间为 5 s, 图像更新率为 2 s, 成像窗口为 20 km, 这种情况下, 回波为发射信号的延时, 脉冲压缩的结果为一个 Sinc 信号, 经过 RD 算法成像处理之后的结果为一个单一点目标, 如图 5 所示的成像处理结果, 图中的二维像和一维像是经过鼠标选择放大后的显示效果, 由图 5 可知, 图像得到了预期的效果。

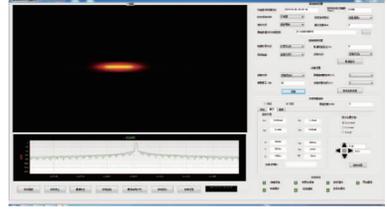


图 5 ISAR 成像结果截图

5 结 论

实验证明, 采用上述设计方法设计空间目标 ISAR 成像显控终端不仅实现了高速实时回波数据的高性能实时成像处理与显示功能, 还满足了调试方便、软硬件结构一体化的要求。采用了 GPU 处理器进行数据并行处理, 大大提高了系统的运算效率。此外采用该设计方法实现的显控终端还具有运行效率高、可移植性好, 可扩充性强等优点, 并且不同层次结构之间的接口设计还满足简练清晰并且满足实时性要求, 充分保证了系统各个部分的实时性响应。

参考文献

- [1] 郭睿, 臧博, 张龙, 等. 一种联合极化的距离瞬时多普勒 ISAR 成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 764-765.
- [2] 张乐峰, 虞华, 胡卫东, 等. 信息化雷达显控终端的设计与实现[J]. 现代雷达, 2009, 31(8): 33-38.
- [3] 李红豫, 滕军, 李祚华. 基于 CPU-GPU 异构平台的高层结构地震响应分析方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(13): 86-87.
- [4] 陈亮, 汪学刚, 周云. 多线程在场面监视雷达显控程序开发中的应用[J]. 科技信息, 2007(9): 98-99.
- [5] 郑波浪, 宋红军. 一种结合运动补偿的 RD 算法研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(6): 52-53.
- [6] 张慧敏, 陈升来, 郭丽红. 基于 Windows Sockets 的通信应用程序开发[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 692-693.
- [7] 金汉均, 梅红洋. 基于 CUDA 的图像图像快速并行细化算法的研究与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 75-79.
- [8] 叶昊儒. 相参雷达与非相参雷达的差异分析[J]. 现在电子技术, 2010, 33(3): 17-19.

(下转第 39 页)