基于多DSP的机载SAR距离徙动校正实现方法

王 格,李盘虎,蔡 猛,王希冀,王春燕

(上海无线电设备研究所,上海201109)

摘 要:针对机载合成孔径雷达(SAR)数据量大、运算复杂、实时性能要求高等问题,提出了一种基于多片多核 DSP 并行的方式实现机载 SAR 距离徒动校正的方法。重点介绍实现过程中的片间及片内并行和同步处理、数据交互、数据分配,距离徒动校正的距离向脉冲压缩和惯导补偿,以及多普勒中心估计实现的具体步骤,利用点仿 真和实测数据验证了该方法的有效性,并提出优化模块,进一步提高运算的实时性。

关键词:多片DSP;多核DSP;距离徙动校正;机载合成孔径雷达(SAR);硬件实现
中图分类号:TN 911.73
文献标志码:A
DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.005

Implementation of Range Cell Migration Correction for Airborne SAR Based on Multi-DSPs

WANG Ge, LI Panhu, CAI Meng, WANG Xiji, WANG Chunyan (Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In view of the shortcomings of airborne synthetic aperture radar (SAR) imaging such as large amount of data, complex computation, and high real-time performance requirements, an implementation method of range cell migration correction for airborne SAR is proposed based on parallel multi-chip and multi-core DSPs. First, the technology involved in the implementation process is given, e.g., the parallel and synchronous processing, data interaction, and data distribution of inter-chips and inter-cores. Then, the implementation algorithm of range cell migration correction for airborne SAR is described in detail. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is proved by simulation and experimental data. Besides, an optimal module is put forward to further improve the real-time performance of DSP processing.

Key words: multi-chip DSP; multi-core DSP; range migration correction; airborne synthetic aperture radar (SAR); hardware implementation

0 引言

鉴于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)出色的全天时、全天候成像能力,其在精确制 导领域已经获得了越来越广泛的应用^[1-5]。数据量 大、运算复杂、实时性能要求高等是机载SAR成像 的显著特点,但是受雷达空间限制,雷达上无法装 载大规模的信号处理设备,对机载SAR成像的应用 造成一定困难^[6-11]。为解决该应用难题,在FPGA+ DSP成像处理架构中通常用高性能DSP器件负责 成像算法的实现^[12-14]。但是随着机载SAR技术要 求的逐渐提高,传统单核DSP或者单片多核DSP已 经越来越难以满足工程应用的需求^[15-16]。多核DSP 是新一代八核高性能浮点数字信号处理芯片,其超 高的运算能力、丰富的高速接口和存储空间,为机 载 SAR 的工程实现提供了便利^[17-18]。本文介绍了 一种通过两片多核DSP并行、每片DSP八核并行方 式的机载 SAR距离徙动校正工程实现方法。

1 多DSP的并行与传输

由于多核DSP具备高效的浮点计算能力、八核 的并行架构及丰富的外设接口,因此广泛应用于

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-04-03

基金项目:上海自然科学基金资助项目(19ZR1453800)

作者简介:王 格(1994—),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为SAR成像算法及DSP硬件实现。

SAR成像领域^[19-20]。

1.1 并行与同步

片的并行:两片多核DSP标记为DSP0和DSP1, DSP0作为主DSP,DSP1作为从DSP;主DSP在兼 具数据处理任务的同时,额外承担与主控DSP和FP-GA的通信任务,具体有与主控DSP通信负责接收成 像参数,与FPGA通信负责接收成像原始回波。

核的并行:八核并行处理架构为主从式^[19],即 核0作为主核,负责任务分配以及与外部设备的通 信与数据交互。核0通过SRIO接口与外部设备建 立连接。核1~核7作为从核,平等地位且相互之间 不会产生直接的通信和数据交互。

核间同步:基于信号量模块实现多核同步,使 用2个同步函数,即同步函数A、B,2个同步函数分 别占用8个硬件信号量。通过控制硬件信号量的占 用和释放实现多核同步,2个同步函数交替使用。 硬件信号量实现核间同步的具体流程如图1所示。



1.2 数据接收与传输

主DSP接收主控DSP的成像参数,接收FPGA 发送的成像原始回波数据,均采用中断触发方式进 行,系统中FPGA将中频采样、预处理后的基带数据 发送到一固定存储区,同时向主DSP(DSP0)发送门 铃,主DSP(DSP0)响应中断进行数据接收和提取。 主从DSP内部的数据传输通过EDMA进行。

1.3 DSP的片间数据通信

由于采用两片多核DSP并行处理,所以不可避 免在两片DSP间进行数据交换,涉及两片DSP间的 数据交互通过高速串口实现。高速串口是面向嵌 入式系统开发提出的高可靠、高性能、基于包交换 的高速互联技术,高速串口的传输速度为1Gbit/s。

2 实现方法

机载SAR的距离徙动校正包含距离向脉冲压 缩与惯导补偿、多普勒中心估计与校正2个步骤:脉 冲压缩与惯导补偿是补偿速度加速度引起的距离 向走动;多普勒中心估计是为了校正天线波束指向 偏差以及飞行速度偏差引起的多普勒中心误差。 在DSP实现过程中,两者均在距离频域方位时域实 现,所以在介绍DSP实现时将两者一起处理,具体流 程如图2所示。接收到原始回波数据,首先在距离向 做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT), 然后与惯导补偿因子和距离匹配函数相乘,再在距 离向做快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT),然后做多普勒中心估计与校 正,处理完毕。图中:Sref为与发射信号调频率相同 的线性调频信号; $H_1(f_r, t_m)$ 为由三维速度和加速度 引起的距离走动量,其中t_m为方位慢时间,f_c为距离 频域;f(î,t_m)为多普勒中心误差补偿函数。



首先进行距离向脉冲压缩和惯导补偿,由于 是在距离向处理,可以将原始数据在方位向分为2 块并分别交由2个DSP处理,每个DSP处理的数 据又可以平均分给八核处理。DSP0和DSP1的数 据分配及核间数据分配如图3所示,其中N_a为脉 冲数。



图 3 片间及核间数据分配 Fig. 3 Distribution of inter-chip and inter-core data

2.1 距离向脉冲压缩与惯导补偿

距离脉压与惯导补偿流程如下:1) 在程序初始 化时进行距离向加窗并生成距离匹配滤波系数;2) 根据惯导信息计算由三维速度、三维加速度引起的距 离走动量;3) 将各自对应的数据沿距离向做快速傅 里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),变换到距 离频域;4) 将各自FFT变换后的结果与匹配滤波系 数和距离走动量频域相乘;5) 对各自点乘后的数据 做快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT),变换到距离时域。参考式如下:

 $s' = I_{IFFT} \{ F_{FFT}(s) \cdot F_{FFT}(S_{ref}) \cdot H_1(f_r, t_m) \}$ (1) 式中:s'为距离脉压和惯导补偿校正后的雷达回波; s为雷达距离向回波向量; S_{ref} 为与发射信号调频率 相同的线性调频信号; $H_1(f_r, t_m)$ 为由三维速度和加 速度引起的距离走动量。

同时为了降低后续计算量,对处理后的数据只 截取存在目标回波的有效部分。

2.2 多普勒中心估计与补偿

多普勒中心估计与补偿的流程如下:1) 计算各 自对应的能量最大的距离门位置;2) 将得到的2个 距离门位置求和并取均值作为各自最终能量最大 值的距离门;3) 以2)中的位置为中心使用相关法得 到各自的多普勒中心估计值;4) 用多普勒估计值构 建相位函数用以补偿惯导信息不准确引起的误差。 具体公式如下:

$$s'' = s' \cdot \exp\left(-j2\pi f_{dc}t_{m}\right) \tag{2}$$

式中:s"为多普勒中心校正后的雷达回波;f_{dc}为与多普勒中心估计值;t_m为方位慢时间。

2.3 DSP实现过程中的数据流

DSP0接收到 FPGA 发来的原始回波数据,然 后将一半的数据通过高速串口发送至 DSP1, DSP0 和 DSP1分别并行处理一半数据,每片 DSP 内部数 据是平均分发八核进行处理,具体数据流如图 4 所 示。其中 N_a为方位向点数, N_r为距离向点数。





2.4 DSP优化处理

机载 SAR 成像工程实现过程中,优化处理是极 为重要的一个步骤,优化处理可以最大限度地提升 实时性。特别是机载平台的存储空间和资源十分 有限,因此机载成像的优化处理就显得举足轻重。 在实现过程中,主要采用了以下2种优化方法:

1)以涉及距离徙动校正为例,就运用到傅里叶 变换、傅里叶逆变换、复数向量点乘、复数向量求绝 对值、复数向量求指数,以及复数向量求共轭等很 多基础但又利用率很高的功能模块,其优化需求的 优先程度很高,完全可以将这些子功能写成独立的 子函数以供调用。

2) 以自相关法估计多普勒中心的处理过程为 例,在 Matlab 算法进行算法仿真时通过调用共轭 指令很容易实现,但在 DSP则不然,由于涉及的数 据是沿距离向存储还是沿方位向存储的问题,在多 普勒中心估计前需要进行转置操作,将造成额外的 物理开销。在具体实现中,需避开数据转置和跳地 址取数,直接取相邻两列数据距离向相乘,大幅缩 短了处理时间,同时得到与算法设计一样的处理 结果。

3 仿真试验及结果分析

通过上述2种优化方法的处理,在机载SAR应用的情况下,已经基本可以补偿掉大部分距离徙动量,并将信号能量压缩到一个距离门内。为说明上述实现方法的有效性,通过点目标仿真数据进行验证,点目标数据仿真的具体参数见表1。雷达接收到的回波数据 Y_{N,×N},其中 N_r为距离门点数,取2048;N_a为脉冲积累个数,取4096。

表1 仿真参数 Tab.1 Parameters of simulation

雷达参数	数值
载频/GHz	10
脉冲宽度/μs	1
带宽/MHz	40
采样率/MHz	50
脉冲重复频率/Hz	2 000
北向速度/(m·s ⁻¹)	1 000
天向速度/(m·s ⁻¹)	-100
北向加速度/(m·s ⁻²)	10
天向加速度/(m·s ⁻²)	10
东向加速度/(m·s ⁻²)	-10

点目标仿真数据按照文中实现方法的处理结果 如图 5 所示。图 5(a)为直接距离向脉冲压缩后的回 波,可以看出在距离向有很明显的走动;图 5(b)为距 离走动校正后的回波,可以看出脉压后回波位于同 一单元;图 5(c)为多普勒中心补偿后的结果,计算的 多普勒中心估计值为 0.02 Hz。因为仿真数据中数 据是理想的,所以多普勒中心基本不需要补偿,但是 实测环境中由于装订的成像参数与实际情况不完全 一致,所以得到的多普勒中心值会比较大。



为进一步说明文中实现方法的有效性,对外场 实测数据进行处理,处理结果如图6所示。从距离 向脉冲压缩图像中可以看出,距离徒动量横跨多距 离单元,并且脉压效果良好,经过惯导粗补偿和多 普勒中心校正后,已经可以校正掉距离徙动,使信 号能量集中在一个距离单元内,计算的多普勒中心 估计值为291 Hz。



为说明算法的实时性,统计了2个模块 Matlab 处理时间和DSP处理时间,具体时间统计见表2。 表中可见,相比Matlab处理时间,DSP的处理时间 大幅缩短。

表2 Matlab和DSP处理时间统计 Tab. 2 Processing time of Matlab and DSP

模块	Matlab处理时间/s	DSP处理时间/s		
惯导补偿	0.351 59	0.058 714		
多普勒中心估计	0.223 45	0.044 636		

为说明优化算法的有效性,在DSP上以原始数 据点数2048×4096(距离单元数×方位单元数)、 信号处理板工作频率在1GHz为例,涉及的函数及 模块实时处理性能统计见表3。

Tab. 3	Processing	time	of	the	range	migration	
	correction n	nodule					
模块及函数名			时钟周期数				
复向量快速傅里叶变换			133 087				
复向量快速傅里叶逆变换			246 782				
生成距离向量波数域向量 W _r			41 943				
生成方位向时间向量T _a			25 820				
	196 034						
复	181 689						
距离脉压和惯导补偿模块			38 882 878				
多普勒	中心估计与校正	正模块	55 414 675				

4 结束语

针对机载SAR面临的数据量大、实时性高等一 系列实际问题,利用2片多核DSP实现了机载SAR 的距离徙动校正处理,通过并行处理提高DSP处理 的实时性能。介绍了实际应用中DSP硬件上相关 的数据传输和同步实现的底层技术,以及成像算法 中距离徙动校正的具体步骤。最后通过仿真试验 和实测数据,验证了成像算法方法的可行性、有效 性,以及在硬件上的使用情况。相信该方法在机载 SAR成像的工程应用领域会具有一定的参考价值, 后续将展开基于多DSP上的方位向成像研究。

参考文献

- [1] CUMMING IG, FRANK HW. Digital processing of synthetic aperture radar data [M]. Washington DC: Artechb House, 2005: 1-30.
- [2] WEIP, LIWC, LVYX, et al. An extended omega-K algorithm with integrated motion compensation for bistatic forward-looking SAR [C]// IEEE Radar Conference. 2015: 1291-1295.
- [3] LIZY, XING MD, YIL, et al. A frequency domain imaging algorithm for highly squinted SAR mounted on maneuvering platforms with nonlinear trajectory [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016,54(7):4023-4038..

(下转第45页)