

基于多处理板联合 SAR 成像的分布式计算模拟系统研究

杨 涛¹, 赵启钊^{1,2}, 孙光才^{1,2}, 李光伟¹, 费晓燕¹, 杨 军³, 刘会涛⁴

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071; 2. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071; 3. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710000; 4. 珠海纳睿达科技有限公司, 广东 珠海 519085)

摘要: 合成孔径雷达(SAR)卫星的探测范围有限, 全轨利用率不高, 并且单个卫星的计算和存储资源有限, 难以完成大量的星载合成孔径雷达数据处理。本文拟采用多处理板联合的数据处理方法, 针对星上分布式计算构建一种模拟系统, 以提高星上数据处理效率, 验证多处理板联合的数据处理方法在高效利用卫星计算与存储资源、提升单个卫星全轨利用率等方面的优点。本系统基于距离多普勒(range Doppler, RD)成像算法的多卫星分布式 SAR 实时处理方法, 并以现场可编程门阵列(FPGA)芯片为核心构建了分布式计算模拟系统。不同于传统的单个卫星 RD 算法处理过程, 该系统将处理过程分为三个阶段。每个阶段内运算任务被合理地分配给不同的数据处理单元。利用高分三号卫星(GF-3) SAR 原始数据进行成像处理, 以检验方法和系统的性能。

关键词: 合成孔径雷达; 距离多普勒成像算法; 现场可编程门阵列; 分布式计算模拟系统; 高分三号卫星

中图分类号: TN959.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)05-0054-08
DOI: 10.11759/hyxx20201106006

合成孔径雷达(SAR)以其独特的优势引起了雷达领域专家学者的广泛关注^[1]。它可以全天时、全天候工作, 具有高分辨率和远距离成像的特点。SAR 作为一种微波主动成像系统, 在军事和民用领域都显示出了卓越的价值。随着信息技术的不断发展和信号处理硬件设备的不断完善, 合成孔径雷达系统得到了迅速发展。合成孔径雷达成像技术的研究越来越受到人们的重视。

SAR 卫星轨道高, 运行稳定, 无运动误差^[2], 不受国家空域和气候的限制^[3]。由于这些优势, 星载 SAR 已成为各国研究和开发的遥感技术。自第一颗 SAR 卫星成功进入轨道以来, SAR 卫星已经发展了几十年。其观测能力也有了很大的提高。例如, 覆盖范围从几十公里扩大到几百公里^[4-5], 分辨率从几十米提高到几米甚至不到 1 m。中国于 2016 年发射的 GF-3 是一颗 C 波段多极化高分辨率遥感卫星, 具有 12 种工作模式, 分辨率可达 1 m^[6]。高分辨率卫星成像模式包括传统的条带成像模式和扫描成像模式, 以及海洋应用的波成像模式和全球观测成像模式^[7-9]。GF-3 卫星是一种高分辨率遥感卫星, 其主要技术指标达到或超过同类卫星的水平。因此 GF-3 数据的处

理已成为近年来研究的热点。

由于 SAR 卫星需要具有高时效性、广覆盖、高分辨率等特性, 因此其信息量大, 数据流密集^[10]。到目前为止, SAR 卫星在探测和实时数据处理方面还存在一系列问题。例如, SAR 卫星的角速度可能与地球自转的角速度不同。当 SAR 卫星探测地球的目标场景时, 星载雷达可能无法探测到该区域。

因此, SAR 卫星的全轨道利用率较小, 限制了其探测任务的效率。此外, 由于卫星的大小、重量和功率的限制, 单个卫星的计算和存储资源有限, 抑制了卫星的实时数据处理能力。近年来, 提高卫星数据处理能力和全轨道利用率已成为星载 SAR 实时成像亟待解决的问题。文献[10]和[11]通过单板实现了数据的实时处理。文献[12]构建了一种使用多个现场可编程门阵列(FPGA)芯片作为多个数据

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2021-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405600); 广东省引进创新创业团队项目

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1405600; Introduction of Innovation and Entrepreneurship Team Project in Guangdong Province]

作者简介: 杨涛(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事雷达信号处理研究, E-mail: taoyang@mail.xidian.edu.cn

处理单元的星载实时成像系统, 每个处理单元处理一块数据。该方法采用并行处理的方法对数据进行处理, 减少了 SAR 成像的时间。然而, 一个携带多个数据处理单元的单一卫星将增加它的体积、重量和功率。此外, 该系统不能提高卫星全轨道利用率。即将发射的“深圳一号”商业联网卫星采用激光通信实现数据传输, 这样可以实现网络化卫星之间的协同工作, 因此提高每颗卫星的检测响应能力和效率具有重要的研究意义。针对这些情况, 有必要基于多处理板联合的数据处理方法研究一种分布式计算模拟系统, 以验证多处理板联合的数据处理方法在高效利用卫星计算与存储资源、提升单个卫星全轨利用率等方面的优点。

目前的星间高速激光数据通信技术尤其是双星间高速激光数据通信技术已经日趋成熟^[13]。并且, 采用较少的卫星构建的分布式系统稳定性较高, 总能找到一颗卫星作为主处理卫星。因此本文构建的分布式计算模拟系统采用 3 颗卫星联合的数据处理方法, 其中一颗卫星接收原始回波数据, 并在预处理后将处理任务分配给多个卫星, 图 1 为三卫星联合的数据处理系统工作示意图。

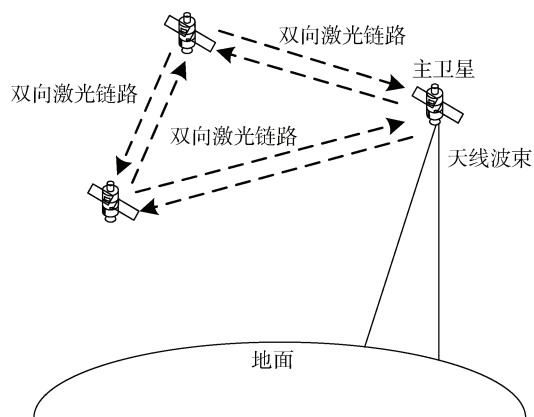


图 1 三卫星联合数据处理系统工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of joint data processing system for three satellites

本文构建的分布式计算模拟系统, 采用由 1 个 FPGA 芯片与两组 64 位的 DDR3 存储器互联而成的处理板, 每个板代表一个数据处理单元。将被处理的数据按照分布式计算原则合理分配到多个数据处理单元, 那么每个数据处理单元的处理任务小, 以便节省计算和存储资源。采用分布式处理, 节省了处理数据的时间, 缩短了图像数据处理周期^[14-15]。多卫星分布式处理方法避免了各卫星计算资源的闲置, 实

现了数据的快速处理。此外, 该系统还可以提高每颗卫星的全轨道利用率。同时, 本文选择了适用于多卫星分布式计算模拟系统的距离多普勒(range Doppler, RD)算法, 将子孔径分割与数据分布式处理相结合, 提出了一个实用的实时操作流程。

本文在第 1 节中首先对两种高效星载成像算法进行了比较。并描述了 RD 算法在各阶段的任务。在 2.1 节中, 根据分布式计算模拟系统各模块的功能描述了系统的设计。在第 2.2 节中分析了每个处理阶段的数据流。第 2.3 节详细计算了各阶段的处理时间, 验证了系统性能的有效性。第 3 节描述了在分布式计算模拟系统上处理 GF-3 数据的结果, 并将结果与通用 64 位计算机进行比较, 以验证方法以及模拟系统的有效性。与单板处理相比, 处理时间和资源的占用减少。

1 分布式数据处理算法

在选择星载实时 SAR 成像算法时, 不仅要考虑分辨率的精度^[16], 还要考虑计算量。较少的计算复杂度可以有效地缩短数据成像处理时间, 提高分布式数据处理系统的性能。此外, 单颗卫星还存在载荷有限、处理资源利用率低等问题。多卫星分布式数据处理系统可以克服这些限制。因此, 在构建分布式计算模拟系统时有必要选择一种适合于多卫星分布式数据处理方法的成像算法。

SAR 信号的点目标回波是距离向与方位向耦合的曲线。二维耦合对 SAR 成像处理的影响主要体现在距离徙动和聚焦深度两个方面。它需要对二维耦合进行解耦。通过调整方位匹配滤波器的参数, 可以克服聚焦深度的影响。距离徙动使点目标回波轨迹不在同一距离单元上, 而是沿曲线轨迹形成二维数据矩阵。曲线轨迹也随着距离的变化而变化。星载高分辨率 SAR 实时成像算法采用子孔径处理技术。数据积累不需要达到一个完整的合成孔径, 当一个子孔径数据积累到一定数量时就可以开始处理, 比全孔径处理更具实时性。 ω - k 算法和 RD 算法是高分辨率成像中常用的算法。

ω - k 算法可以在二维频域内直接进行脉冲压缩、相位补偿和 Stolt 变换^[17]。该方法不需要距离徙动校正, 图像质量较好。但是在 Stolt 变换过程中需要进行额外的插值, 这也增加了计算量, 降低了成像精度。

RD 算法适用于星载 SAR 具有距离徙动的成像处理^[18-21], RD 算法流程图如图 2 所示。

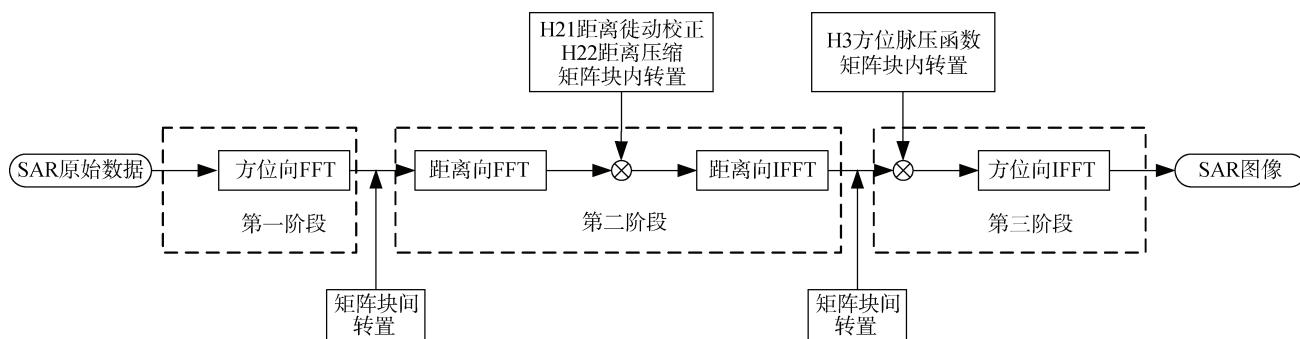


图 2 RD 成像算法流程图

Fig. 2 Flow diagram of RD imaging algorithm

在RD算法中引入徙动校正,对距离徙动进行处理。该算法不需要插值处理,算法结构简单。通过复杂乘法和快速傅里叶变换(FFT)/快速傅里叶逆变换(IFFT)就可以完成精确的成像处理。计算量大大减少。硬件系统采用实时RD算法进行多卫星分布式SAR成像处理,避免了数据的二维耦合。便于在多个处理节点之间实现数据流的分布式处理。由于RD算法操作规则简单,分布式数据处理系统采用RD算法作为成像算法。

由于硬件系统对数据进行连续处理,将RD算法按不同补偿函数可分为三个阶段。第一阶段分别对方位数据执行FFT操作,结束后,将数据按方位向分配给多个数据处理单元;第二阶段是使用多个处理单元进行距离FFT,通过乘以补偿项 H_{21} 和 H_{22} 完成脉冲压缩和距离徙动校正,然后进行距离向IFFT操作,结束后,将每块数据在距离向上分成3部分;为了保证方位向图像的连续,第三阶段根据分布式原理重新分配到多个处理单元中,每个处理单元通过在方位向中乘以一个补偿项 H_3 来执行方位脉冲压缩。最后,进行方位IFFT生成最终图像。此时完成整个RD算法流程,系统进行图像采集。

2 分布式计算模拟系统的实现

2.1 系统结构设计

为了实现实时处理,系统的处理单元需要具有较高的计算能力^[22-29]。在SAR实时成像的实际工程应用中,FPGA具有高性能计算、易于并行化处理的特点^[30-35]。该系统有3个FPGA板,代表3颗卫星的SAR数据处理单元。每个板的核心是一个XC7VX690T FPGA芯片,该芯片具有450个乘法器,

52 Mb RAM, 3 600 个DSP48, 80 个高速收发器。丰富的计算资源可以满足实时成像的要求。两组64位宽、2 GB容量的DDR3存储器与FPGA芯片并行连接。数据通过光纤通信模块在不同的板间传输,传输速率可达10 Gbps。目前卫星星间高速激光通信速率可以达到10 Gbps,而最新的OMG5光纤传输速率可达100 Gbps,因此在本模拟系统中采用光纤来模拟星间激光通信的方法是完全可行的。

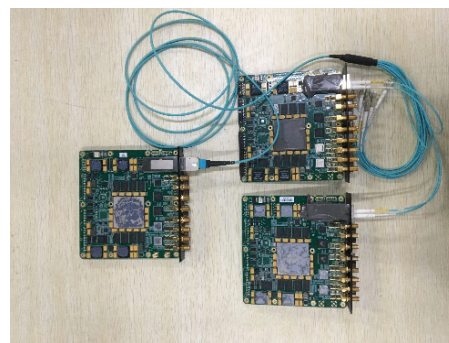


图 3 多卫星 SAR 分布式数据综合处理系统

Fig. 3 Distributed data processing system for Multi-satellite SAR

多卫星SAR分布式数据处理系统的模块如图4所示,主计算机存储原始的雷达回波数据和处理后的图像数据。使用三块FPGA板对原始数据进行成像处理。每个板由一系列功能模块组成。

各FPGA板的模块组成如图5所示。PCIe卡接收到雷达的原始数据,发送到DDR3存储模块进行数据转换。经过处理的图像将由PCIe模块传输到主机。数据处理模块对数据流执行三个阶段的处理,处理过程包括FFT、IFFT和相位补偿。补偿相位存储在数据处理模块的缓冲器中,它支持原始数据和中间数据的快速转换。光纤通信模块在各FPGA卡之

间传输数据。复位模块向系统提供复位信号,使系统返回到初始状态,它增加了系统的稳定性。时钟模块为光纤通信模块和 DDR3 存储模块提供时钟信号。

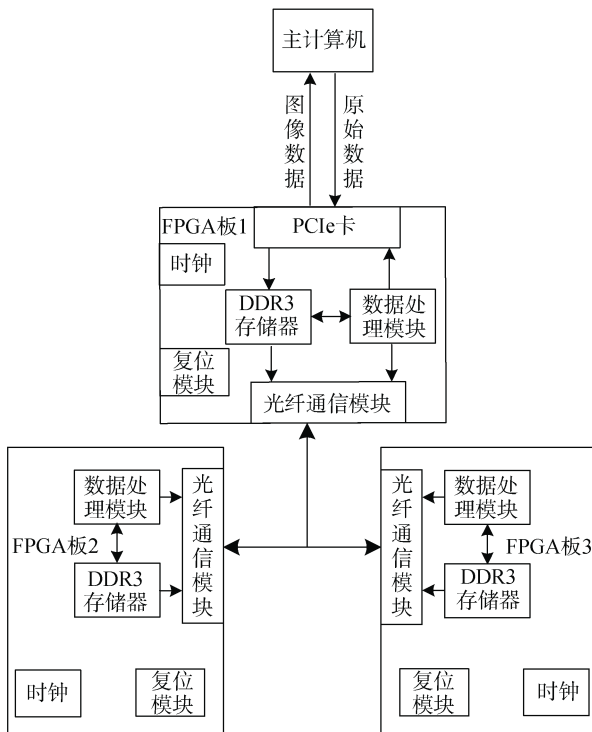


图 4 多卫星 SAR 分布式数据处理系统模块组成

Fig. 4 Distributed data processing module for Multi-satellite SAR

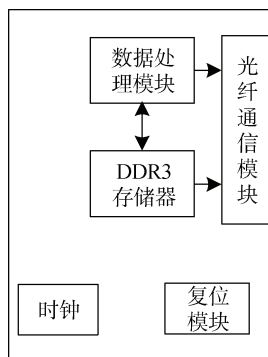


图 5 FPGA 板的模块组成

Fig. 5 The composition of FPGA board

该系统有 3 条独立的数据传输线路。一是数据分配线路,用于将回波数据发送到每个数据处理单元;二是用于传输成像结果的图像采集线路;三是系统控制线路,用于各单元之间的通信和控制。

2.2 系统中的数据流分析

在多卫星 SAR 数据分布式处理方案的实现中,

任意两板之间的数据传输均可通过高速光纤完成。主计算机通过 PCIe 将 SAR 原始数据发送给 FPGA 板 1, FPGA 板 1 接收原始数据后,经过处理后,将数据处理任务分配给包括 FPGA 板 1 在内的 3 个数据处理单元,这 3 个处理单元的处理任务在原理上是相同的。

第一阶段, FPGA 板 1 接收原始数据,然后进行方位向的 FFT,在方位向上将数据分为 3 个部分,并存储一部分数据。其余两部分的数据通过光纤传输到另外两个 FPGA 板上。第一个阶段的数据分布如图 6 所示。

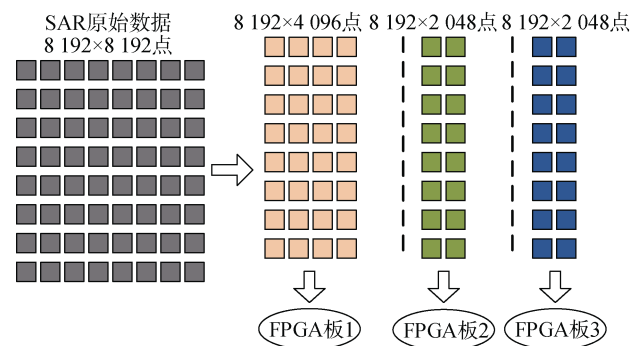


图 6 第一阶段数据处理流程图

Fig. 6 First stage of data processing

在第二阶段,对每个 FPGA 板中的数据进行距离向的处理。FFT 操作在距离向上执行。然后进行距离脉冲压缩和距离徙动校正,并完成对补偿项 H_{21} 和 H_{22} 的相乘。最后,在距离向执行 IFFT。处理任务完成后,将 FPGA 板 1 上 8192×4096 点的数据以及 FPGA 板 2 和 FPGA 板 3 上 8192×2048 点的数据分别划分为 3 个范围内的部分。FPGA 板的数据处理和划分流程图如图 7 所示。

第二阶段完成后,对 4 块板上的数据进行重新分配,使方位数据在各板上连续完整。经过脉冲压缩和方位向 IFFT 处理,完成了数据处理。这一阶段的数据处理和划分流程如图 8 所示。

随后,经过处理的每个 FPGA 板的图像数据通过光纤和 PCIe 卡发送到主计算机,在主计算机成像。

2.3 数据处理时间消耗分析

利用 GF-3 卫星 3 m 分辨率且点数为 8192×8192 点的数据验证分布式计算模拟系统的性能。该系统采用 100 MHz 时钟,双通道处理数据,利用仿真计算各个操作所用的时间。

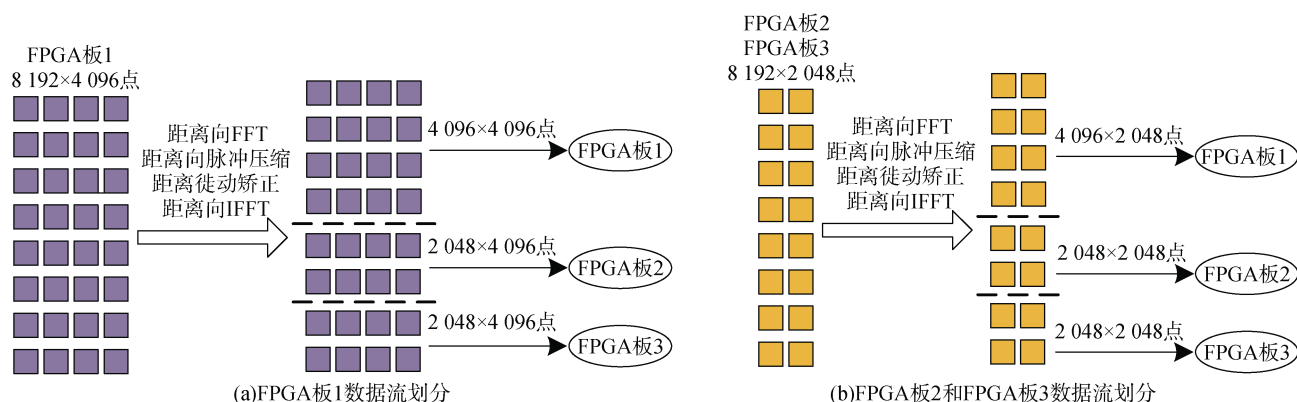


图 7 第二阶段数据处理流程图
Fig. 7 Second stage of data processing

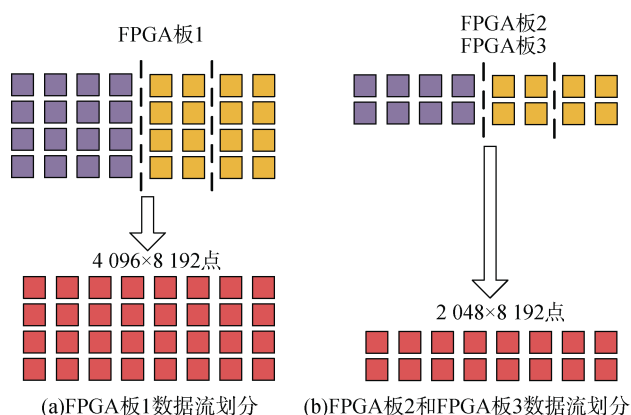


图 8 第三阶段数据处理流程图
Fig. 8 Third stage of data processing

第一阶段, 所有数据的处理全部在 FPGA 板 1 中进行, 此阶段主要工作时方位向的 FFT, 所耗费的时间就是 FFT IP 核进行 8 192 次 8 192 点长度 FFT 转换需要的时间, FFT 运算的结果设置为顺序输出, FFT IP 核进行一次 8 192 点的浮点类型数据转换需要 32 945 个时钟周期, 因此第一阶段 FFT 运算需要的时间约为 2.70 s, 在完成方位向的 FFT 运算之后, 数据需要被写入到 DDR3 中进行存储, 方便后续的分布式运算, DDR3 的写入速度为 11 GB/s, 因此数据全部写入 DDR3 所需要的时间为 0.045 s。由于后续的处理是分布式处理, 所以数据需要采用跳地址的方式从 DDR3 中读取并且通过光纤传输传送到其余两个子板卡中, DDR3 跳地址读取数据的速度为 1.1 GB/s, 一半数据采用跳地址读取的方式读取耗费的时间为 0.23 s。光纤传输数据的速度为 10 Gb/s, 光纤传输的速度不小于 DDR3 跳地址读取数据的时间, 因此, 数据分发到子板卡的时间为 0.23 s。所以, 第一阶段完成处理总耗时约为 3 s。

第二阶段处理中, 相位复乘的时间可以忽略不计, 数据主要进行的是距离向的 FFT 和 IFFT 运算处理, 由于主板卡中的数据量最大, 所以耗费的时间也就最多。此阶段, 进行了一次 4 096 组 8 192 点数据类型为浮点的 FFT, 一次 4 096 组 8 192 点数据类型为浮点的 IFFT 运算, 参考第一阶段可以得出距离向 FFT 和 IFFT 运算耗费的时间共为 2.70 s。DDR3 跳地址写入数据的速度为 0.7 GB/s, 数据跳地址写入 DDR3 中的时间为 0.35 s。后续需要进行数据的方向向拼接, 主板卡中的数据量最大, DDR3 中跳地址写入数据的总量为 128 MB, 需要耗时为 0.18 s, DDR3 跳地址读取数据的总量为 128 MB, 需要耗时为 0.12 s。因此, 第二阶段处理总耗时约为 3.35 s。

第三阶段的处理中, 同样的主板卡中的数据量最大, 且数据在此阶段的处理为分布式并行处理, 主板卡需要进行 4 096 组 8 192 点数据类型为浮点的 FFT 运算, 参考前面两个阶段可以得出 DDR3 顺序读取数据需要耗费的时间为 0.023 s, FFT 运算耗费时间为 1.35 s。随后, 子板卡中的数据需要全部通过光纤传输依次传入主板卡中, 两块子板卡中的 DDR3 顺序读取数据的速度远大于光纤传输的速度, 因此需要按照光纤传输数据耗费的时间来计算数据拼接耗费的时间, 待拼接的数据量为 256 MB, 光纤采用的速度为 10 Gb/s, 可以得到数据拼接耗费的时间为 0.2 s, 数据上传至主计算机的数据量是 512 MB, 耗费的时间为 0.4 s。所以, 这一阶段耗费的时间为 1.973 s。

综上所述, 每帧图像的数据处理总时间约为 8.323 s。由于上述估计没有考虑软件调度对速度的影响, 实际消耗的时间约为 8.323~9.235 s。而用一个 FPGA 板 100 MHz 时钟处理 8 192x8 192 点数据时, FFT IP 核中数据执行 FFT 和 IFFT 操作的时间为 2.7 s, 4 次 FFT 运算的

总耗时 10.8 s, DDR3 读写数据的时间为 1.23 s。因此, 完成整个算法流程需要的时间为 12.03 s。显然, 分布式数据处理方法的加速效果是明显的。

3 实验结果

通过在模拟系统中对 512 MB 的实测数据进行处理, 得到清晰的图像, 验证了分布式系统的计算性能和稳定性。图 9 是通过分布式数据处理系统对 GF-3 实测数据进行处理的结果。3 幅图像包含 $24.6 \text{ km} \times 24.6 \text{ km}$ 的场景信息。图 9a 为多卫星分布式处理系统处理后的图像。在分布式数据处理过程中, 由于数据从浮点类型转换为定点类型^[27]造成了数据准确性的降低, 因此图像中的一些目标点显得有些模糊。图 9b 是在 64 位通用计算机上对同一场景进行成像得到的图像。图 9a 虽然是连续累积的, 但颜色要比图 9b 深。但是图 9a 中的主要目标可以被有效地呈现出来, 验证了多卫星分布式数据处理系统处理数据的有效性和准确性。

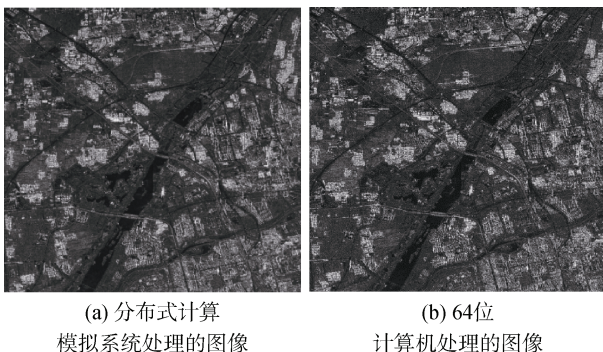


图 9 GF-3 数据处理结果图

Fig. 9 Data processing results of GF-3 in (a) Distributed computing simulation system and (b) 64-bit computer processing

注: 图像覆盖面积为 $24.6 \text{ km} \times 24.6 \text{ km}$ 。

4 结论

本文构建的分布式计算模拟系统按照分布式数据处理原理对星上 SAR 数据进行处理, 提高了各卫星的全轨道利用率, 大大缩短了数据处理时间。采用多星分布式数据处理系统对 GF-3 卫星数据进行处理, 得到清晰的 SAR 图像, 验证了该方法的实时性和高精度。在实际情况中, 空间卫星探测某一区域, 根据分布式原理将数据传输给多颗卫星。这使得无法探测到该区域的卫星能够处理该区域的信号数据。而由于每颗卫星的处理任务较小, 一个网络化的卫星

系统可以在每颗卫星携带少量计算和存储资源的情况下完成大量的数据处理工作。系统将流水线处理与并行处理相结合, 将计算任务合理地分配给多个数据处理单元。在不到 8.323 s 的时间内完成 GF-3 数据成像覆盖面积 $24.6 \text{ km} \times 24.6 \text{ km}$ 。使用更少的计算存储资源和更快的数据处理速度, 该系统有利于实现多颗卫星协同成像。它比传统的成像系统具有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] LIU L, JIANG L M, LI H Z. Improved SMB speckle filtering of polarimetric SAR data with synergistic use of orientation angle compensation and spatial majority rule[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(6): 1508-1514.
- [2] SUN G C, XING M D, XIA X G, et al. Robust ground moving-target imaging using deramp-keystone processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(2): 966-982.
- [3] ROTH A. TerraSAR-X: A new perspective for scientific use of high resolution spaceborne SAR data[C]//N Listed. 2003 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. Berlin: IEEE, 2003: 4-7.
- [4] SUN G C, XING M D, XIA X G, et al. Multichannel full-aperture azimuth processing for beam steering SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(9): 4761-4778.
- [5] ZUO S S, XING M D, XIA X G, et al. Improved signal reconstruction algorithm for multichannel SAR based on the doppler spectrum estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(4): 1425-1442.
- [6] SUN G C, LIU Y B, XING M D, et al. A real-time imaging algorithm based on sub-aperture CS-dechirp for GF3-SAR data[J]. Sensors, 2018, 18(8): 10-13.
- [7] 丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 等. 高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 11-16. DING Chibiao, LIU Jiayin, LEI Bin, et al. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system[J]. Journal of Radars, 2017, 6(1): 11-16.
- [8] Sun G C, XING M D, XIA X G, et al. A unified focusing algorithm for several modes of SAR based on FrFT[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(5): 3139-3155.
- [9] SUN G C, XING M D, WANG Y, et al. Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,

- 2011, 8(6): 1036-1040.
- [10] LIU J, CHEN L, LIU Y, et al. Design of spaceborne SAR imaging processing and fast verification based on FPGA[C]//J Isnard. International Radar Conference. Xi'an: IET, 2013: 1-5.
- [11] GAO L N, LONG T. Spaceborne digital signal processing system design based on FPGA[C]//ANTONIO J P. 2008 Image and Signal Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2008: 577-581.
- [12] 郭勐, 简方军, 张钦, 等. 基于FPGA实现的星载SAR实时成像系统研究[J]. 计算机研究与发展, 2007(3): 497-502.
- GUO Meng, JIAN Fangjun, ZHANG Qin, et al. FPGA-based real-time imaging system for spaceborne SAR[J]. Journal of Computer Research and Development, 2007(3): 497-502.
- [13] 闫坤. 星间光通信链路复合跟踪稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YAN Kun. Study on the stability of composite tracking in inter-satellite optical communication link[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] 闫鸿慧, 王岩飞, 于海锋, 等. 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基SAR成像方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 771-774.
- YAN Honghui, WANG Yanfei, YU Haifeng, et al. An imaging method of distributed small satellites bistatic SAR based on range distance compensation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(5): 771-774.
- [15] 谢宜壮, 朱柏承, 汪精华. 星载SAR实时成像处理系统结构设计[J]. 兵工学报, 2010(S2): 33-37.
- XIE Yizhuang, ZHU Bocheng, WANG Jinghua. System structure design of spaceborne SAR real time imaging process[J]. Acta Armamentarii, 2010(S2): 33-37.
- [16] 詹学丽, 王岩飞, 王超, 等. 一种基于脉冲压缩的机载条带SAR重叠子孔径实时成像算法[J]. 雷达学报, 2015(2): 199-208.
- ZHAN Xueli, WANG Yanfei, WANG Chao, et al. Research on overlapped subaperture real-time imaging algorithm for pulse compression airborne strip SAR system[J]. Journal of Radars, 2015(2): 199-208.
- [17] 胡玉新, 丁赤飏, 吴一戎. 基于 ω - k 算法的宽测绘带星载SAR成像处理[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1044-1047.
- HU Yuxin, DING Chibiao, WU Yirong. The wide swath spaceborne SAR imaging based on ω - k algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1044-1047.
- [18] 黄岩, 李春升, 陈杰, 等. 高分辨星载SAR改进Chirp-Scaling成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38.
- HUANG Yan, LI Chunsheng, CHEN Jie, et al. Refined ChirpScaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 35-38.
- [19] RANEY R K, RUNGE H, BAMLER R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1994, 32(4): 786-799.
- [20] 葛成东. 基于FPGA的星载SAR实时成像处理关键技术设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- GE Chengdong. Design and implementation of spaceborne SAR real-time imaging processing based on FPGA[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [21] 雷万明, 刘光炎, 黄顺吉. 基于RD算法的星载SAR斜视成像[J]. 信号处理, 2002, 18(2): 172-176.
- LEI Wanming, LIU Guangyan, HUANG Shunji. The squint imaging of spaceborne SAR in RD algorithm[J]. Signal Processing, 2002, 18(2): 172-176.
- [22] MALANOWSKI M, KRAWCZYK G, SAMCZYNSKI P. Real-time high-resolution SAR processor using CUDA technology[C]//KRZYSZTOF K. Radar Symposium. Dresden: IEEE, 2013: 673-678.
- [23] PFITZNER M, CHOLEWA F, PIRSCH P. FPGA based architecture for real-time SAR processing with integrated motion compensation[C]//CORUCCI L. 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). Tsukuba: IEEE, 2013: 521-524.
- [24] 张宁宇. 基于DSP的前斜视机载SAR实时信号处理技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHANG Ningyu. Study on real-time signal processing technology for airborne forward-squint SAR based on DSPs[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [25] 陈亮, 龙腾. 星载合成孔径雷达实时快视成像系统[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(6): 545-548.
- CHEN Liang, LONG Teng. Spaceborne SAR real-time quick-look system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(6): 545-548.
- [26] 倪玉峰. 基于多DSP的SAR图像实时处理系统设计与算法实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- NI Yufeng. Multi-chip DSP based SAR image real-time processing system design and algorithm implementation[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [27] JIN T, WANG H X, LIU H W. Design of a flexible high performance real-time SAR signal processing system[C]//ZHANG S. 2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP). Chengdu: IEEE, 2016: 513-517.
- [28] SUN Y Q, YANG J, YAO D. An evaluation system for SAR real-time processing system[C]//ZHANG J. IET International Radar Conference 2013. Xi'an: IET, 2013: 1-4.
- [29] 李志华. 基于FPGA的微型SAR实时成像处理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

- LI Zhihua. Research of mini-SAR real-time imaging based on FPGA[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [30] 曹海洋. SAR 自聚焦算法研究及其 FPGA 实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- CAO Haiyang. Research on SAR autofocus algorithms and FPGA-based implementations[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [31] NI C, HU X, ZHANG Z M, et al. Spaceborne SAR real-time echo simulation platform based on VPX[J]. Journal of Electronics (China), 2014, 31(3): 193-199.
- [32] 刘昕, 朱锡兴, 朱敏慧. 一种改进的 SAR 自动聚焦算法[J]. 电子科学学刊, 1997(6): 792-796.
- LIU Xin, ZHU Xixing, ZHU Minhui. An advanced autofocus algorithm for SAR[J]. Journal of Electronics, 1997(6): 792-796.
- [33] 张竺君. 基于 FPGA 的可变点 FFT 处理器的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- ZHANG Zhujun. Design and implementation of variable point FFT processor based on FPGA[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [34] 杨方. 基于 TMS320C6678 的多核 DSP 并行处理应用技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- YANG Fang. Study on multi-core DSP parallel processing technology based on TMS320C6678[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [35] 李晓飞. 基于 FPGA 的 SAR 实时成像实现技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- LI Xiaofei. Research on realization technology of SAR real-time imaging based on FPGA[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.

Distributed computing simulation system based on a multi-processing board combined with SAR imaging

YANG Tao¹, ZHAO Qi-zhao^{1, 2}, SUN Guang-cai^{1, 2}, LI Guang-wei¹, FEI Xiao-yan¹, YANG Jun³, LIU Hui-tao⁴

(1. Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China; 4. Zhuhai Naruida technology Ltd., Zhuhai 519085, China)

Received: Nov. 6, 2020

Key words: synthetic aperture radar; range-Doppler algorithm; distributed data processing; field-programmable gate array; Gaofen-3

Abstract: Synthetic-aperture radar (SAR) satellites have a limited detection range, low full-orbit utilization rates, and limited computing and storage resources on a single satellite, making performing many spaceborne SAR data-processing tasks difficult. This paper uses the data-processing method of multi-processing boards to build a simulation system for onboard distributed computing to improve the efficiency of data processing. It verifies the advantages of multi-processing boards' data-processing methods in the efficient use of satellite computing and storage resources and in improving the full-orbit utilization rate of a single satellite. This system is based on the range-doppler (RD) algorithm of the multi-satellite distributed SAR real-time processing method and on the field-programmable gate array (FPGA) chip. Unlike the traditional single-satellite RD algorithm, this system divides the process into three stages. The computing tasks are appropriately assigned to different data-processing units within each stage. Original data of the Gaofen-3 SAR satellite are used for imaging processing in order to test the performance of the method and system.

(本文编辑: 杨 悦)