

# 基于 GPU 的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦

吴铮<sup>1,2</sup> 张磊<sup>1</sup> 李宁<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100039)

**摘要:** 对于高分辨率宽测绘带机载 SAR, 载机平台运动误差导致的相位误差具有严重的距离向空变性, 因此在距离向采用了分段相位梯度自聚焦(PGA)算法来提高聚焦性能。然而传统的基于 CPU 的处理平台已经不能完全满足大量回波数据和复杂算法的快速处理。论文中针对机载高分 SAR, 提出适用于机载高分 SAR 的改进的距离向空变 PGA 算法。基于 CPU+GPU 的协同架构, 改进的自聚焦算法和惯导运动补偿都得到了最大的并行优化。实验结果显示, 该改进方法在并行平台上能够达到 48 倍的加速比的提升。

**关键词:** 合成孔径雷达; 运动补偿; 自聚焦算法; 并行计算

**中图分类号:** TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Motion compensation and autofocus issues for airborne high-resolution SAR based on GPU architecture

Wu Zheng<sup>1,2</sup> Zhang Lei<sup>1</sup> Li Ning<sup>1,2</sup>

(1. Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** For the airborne ultra-wideband synthetic aperture radar (SAR), the motion errors caused by trajectory deviation are range-variant. This manuscript put up with an improved rang-variant stripmap phase gradient autofocus (SPGA) algorithm to solve the problem. With the increase of resolution for airborne SAR, the size of echo data and the complexity of imaging algorithm grow rapidly and the traditional computing platform cannot meet the requirement of fast imaging. This manuscript focuses on the improved motion compensation and autofocus issues using a collaborative architecture, combining central processing units (CPU) and graphical processing units (GPU). By taking advantage of compute unified device architecture (CUDA), the improved SPGA is much more efficient and robust, thereby making it operable to work with high efficiency. Experimental results show a speedup of about 48 times compared with a non-optimized CPU-based approach.

**Keywords:** SAR; motion compensation; PGA; parallel computing

### 1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种有源微波遥感成像系统,可以在能见度极差的气象条件下得到类似光学照相的高分辨率雷达遥感图像<sup>[1]</sup>。分辨率的提高可获得更多更真实的关于场景的详细信息,使得合成孔径雷达发挥更强大侦察和测绘能力<sup>[2]</sup>。但是由于载机平台运动误差导致的相位误差具有严重的距离向空变性,分辨率的提高和测绘带宽的增加将严重影响最终的成像效果。

对于机载高分 SAR 的应用不可避免地存在运动误差

的问题,运动补偿和最终的成像质量有着决定性的关系<sup>[3]</sup>。因此对于机载高分 SAR 系统的处理,一般都是在成像前后引入运动补偿和自聚焦算法来达到更加精确的成像效果。为了解决运动误差距离向空变性,提出了一种改进的条带相位梯度自聚焦(SPGA)算法。首先对图像在距离向进行分段,然后对每段图像进行 PGA 聚焦处理,最后对图像利用插值方法来实现相位误差的整合估计。

由于需要处理的雷达回波数据量特别大<sup>[4]</sup>,而且改进的距离向空变 PGA 算法复杂度又上升了一个等级,传统的串行处理技术难以得到快速处理效果。传统上采用

收稿日期:2015-03

FPGA 来实现实时并行信号处理<sup>[5]</sup>。英伟达公司推出 CUDA 运算平台为实现实时大场景机载高分 SAR 成像和运动补偿提供了可能<sup>[6]</sup>。

2005 年, M. Blom 率先将 GPU 通用计算引入到了合成孔径雷达信号处理的实现中, 基于 GPU 实现了一维快速傅立叶变换。在以后的时间里, 越来越多的成像算法被用到了 GPU 加速上, 并且取得了相对于 CPU 明显的加速效果<sup>[7-9]</sup>。T. Balz 在 2009 年实现了单精度和双精度雷达仿真系统的实时运算, 对于雷达仿真具有重大的里程碑意义<sup>[10]</sup>。上述所提到的所有的成像算法都是基于 GPU 实现的, 现在一般的工作站都采用的是 CPU+GPU 混合协同架构的模式, 上述只利用 GPU 对成像系统的性能造成极大的浪费。

本文提出了改进的基于距离向分段的条带 PGA 可以有效地应用于大场景高分辨率机载 SAR 成像系统中。然而由于距离向的空变造成的计算量的增大使得运算变得更慢, 本文提出的基于 CPU+GPU 的协同架构来实现运动补偿和自聚焦, 通过对系统的最大优化达到处理系统的最大加速比, 整体达到了 34 倍的加速比效果。

## 2 机载高分 SAR 运动补偿和改进自聚焦算法

运动是 SAR 的依据, 也是产生问题的根源<sup>[11]</sup>。机载 SAR 的飞行高度一般是在平流层以下的 7 000 m 左右高度, 在大气湍流的影响下很难沿着理想的轨迹航行, 运动轨迹的偏差因此导致了相位误差。针对运动误差的补偿大概有 2 种方法: 基于运动传感器测量和基于回波数据的自适应方法。前者主要依靠惯性导航单元(IMU)和全球定位系统(GPS)测量载机的实时精确位置。后者的方法

$$R_a(t_m) = \sqrt{(Vt_m + \Delta x(t_m) - x_n)^2 + (\Delta y(t_m) - y_n)^2 + (H + \Delta z(t_m) - z_n)^2} = R_i(t_m) + \Delta R(t_m) \quad (1)$$

式中:  $R_i(t_m)$  代表的是没有速度扰动时雷达到目标最短斜距,  $\Delta R(t_m)$  代表的是运动误差, 其中  $\theta$  代表的是视角。

$$R_i(t_m) = \sqrt{R_0^2 + (Vt_m - x_n)^2}$$

$$\Delta R(t_m) \approx \frac{2Vt_m + \Delta x(t_m) - 2x_n}{2} \cdot \Delta x(t_m) + \sin\theta \cdot \Delta y(t_m) + \cos\theta \Delta z(t_m) \quad (2)$$

通过对比理想斜距与实际带有扰动的斜距发现, 2 个附加因子被引入到运动误差, 该因子表明平台沿着  $y$  和  $z$  两个方向偏移, 这些偏移称之为瞄准线偏移(LOS)。

$$r_{los} = y \cdot \sin\theta + z \cdot \cos\theta \quad (3)$$

分 2 次通过解耦合来相位校正达到运动误差补偿的目的, 即常说的 1 次和 2 次运动补偿因子。如图 2 所示为运动补偿流程。

很多, 相位梯度自聚焦(PGA)是一种经典的基于回波数据误差的估计办法, 该算法的独特之处在于它不需要任何先验相位误差模型<sup>[12]</sup>。

### 2.1 基于传感器运动补偿

对于超宽带 SAR, 由于载机平台飞行轨迹不理想导致的航线误差如图 1 所示, 在图中  $X$  轴所示为理想的轨迹航线, 理论上认为载机的天线相位中心(APC)应该沿着直线运行运动, 而曲线①代表载机的实际航线。

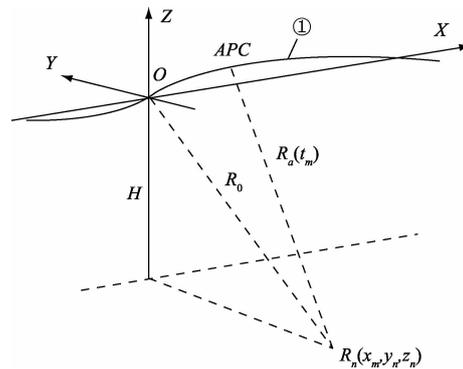


图 1 载机平台飞行轨迹示意

假设第  $n$  个散射点坐标为  $P_n(x_n, y_n, z_n)$ , 法平面与测绘带相交的直线在测绘带内有多多个点目标, 实际的 APC 航迹点可表示为  $[Vt_m + \Delta x(t_m), \Delta y(t_m), H + \Delta z(t_m)]$ , 而理想航迹点可以表示为  $[Vt_m, 0, 0]$ 。此处  $V$  和  $H$  分别代表平台速度和平台的高度。  $[\Delta x(t_m), \Delta y(t_m), \Delta z(t_m)]$  代表的是实际和理想航迹点的误差。因此在  $t_m$  时刻, 雷达的实际 APC 距离为  $R_a(t_m)$ :

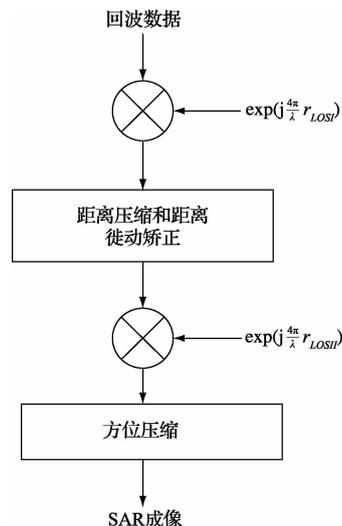


图 2 运动补偿流程

一次运动补偿因子  $r_{LOS I}$  表达如下所示,为校正给定参考距离的瞄准线误差所造成的相位,典型的参考距离就是成像中心的距离,其为:

$$r_{LOS I} = r_{LOS}(y_s, z_s, r_0) \quad (4)$$

一次运动补偿因子在距离压缩前后都可以进行。因为其对距离徙动的影响实在太小,因此距离徙动校正通常忽略这部分误差。

二次运动补偿主要是针对瞄准线偏差的距离变化部分的校正。所以可以得到如下公式:

$$r_{LOS II} = r_{LOS}(y_s, z_s, r') - r_{LOS}(y_s, z_s, r_0) \quad (5)$$

最后通过方位向压缩,可以得到 SAR 图像。

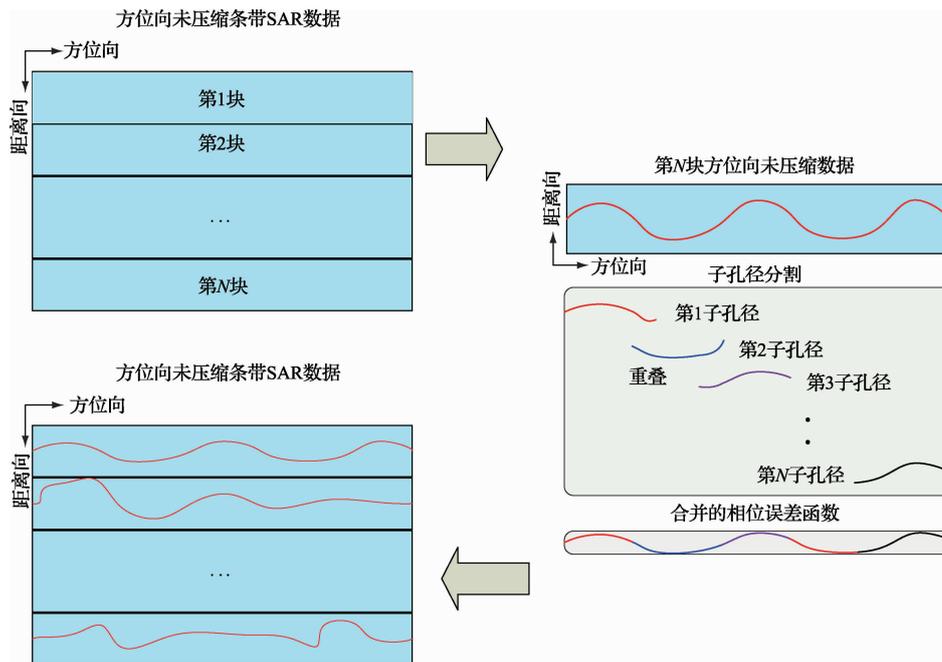


图3 距离向空变的 SPGA 算法子孔径分割示意

该文提出的基于 CPU+GPU 协同架构的距离向空变 SPGA 是一种用于条带 SAR 的自聚焦算法,相位梯度法是该算法的核心。SPGA 算法由于条带 SAR 回波数据不同于聚束式的特点,它的实现仍然有一定的不同点。

基于 CPU+GPU 协同架构的距离向空变 SPGA 的运算步骤如下。

第 1 步:距离向分块。首先假设在一个距离块内,所有的距离单元分享相同的相位误差。接下来就是对每一个距离块单独进行误差曲线的估计拟合。

第 2 步:目标 chirp 信号提取。从多个混叠的 chirp 信号中提取目标信号。点目标的选择依赖于对目标能量值的计算,最终从未聚集的图像中选出若干个点目标。

第 3 步:相位误差估计。先计算单点目标相位梯度,再对相位梯度求平均,最后计算相位误差。

第 4 步:迭代。通过不断的迭代来渐渐逼近最后的真

## 2.2 改进的距离向分块 PGA 算法

由于 PGA 算法是针对聚束模式推导而来,通过对方位向数据进行分块处理实现 PGA 算法对于条带 SAR 的自聚焦处理。然而对于高分辨率宽测绘带机载 SAR,相位误差具有严重的距离向空变形,因此本文提出的需要在距离向分段应用 SPGA 算法然后通过插值拟合以提高聚焦性能。因此在实际数据处理时,对距离和方位分别进行分块,各子块 PGA 完成后进行拼接,得到完整图像。图 3 所示为扩展的距离向空变的 SPGA 算法子孔径分割示意图。在子孔径划分步骤中,每个子孔径在头尾包含一定数量的重叠率来保证最后合并的数据和原始的数据相同。

实相位误差。

第 5 步:得到距离向分块的相位误差,通过拟合拼接得到最后补偿的相位误差。

在相位误差距离向拼接这一步骤,对于每一个距离单元的相位误差,采用插值拟合的方法来获得。通过前面的步骤,获得多组完全独立的相位曲线。如果把这些相位曲线完全独立地补偿到各自分块中,在分块边界会发生图像的错位。因此本文采用插值来拟合使得最后的自聚焦图像不会发生错位。每一距离向分块的相位误差如下所示:

$$\varphi_{e,1}(u), \dots, \varphi_{e,i}(u), \dots, \varphi_{e,l}(u) \quad (6)$$

式中:  $i$  代表的是沿着距离向第几块分块,因此距离单元  $n$  的相位误差可以由以下公式获得:

$$\varphi_e(n, u) = \text{interp}\{[r_{c,1}, \dots, r_{c,i}, \dots, r_{c,l}], [\varphi_{e,1}(u), \dots, \varphi_{e,i}(u), \dots, \varphi_{e,l}(u)], r_n\} \quad (7)$$

式中:  $r_{c,i}$  代表的是第  $i$  个分块中心斜距,  $r_n$  代表的是距离

单元  $n$  的斜距。

### 2.3 算法的可并行化分析

基于以上分析发现,基于传感器运动补偿算法本质上是复数相乘运算,而大量复数相乘使得数据具有并行性。不仅如此,方位向和距离向的处理也是独立的。基于以上优点,可以在 GPU 平台上利用 CUDA 技术并行实现基于传感器的运动补偿。

对于改进的距离向空变 SPGA 算法,可以看到在该架构中,子孔径相位误差的估计由于用到了迭代计算,不便于在 GPU 上并行,子孔径相位误差合并由于合并的块数远小于内核数,所以也放在 CPU 上利用 OpenMP 技术进行加速。至于子孔径分割,全孔径相位误差修正和方位压缩等步骤包含了大量的简单数值计算非常适合于 GPU 并行计算,因此利用 CUDA 对其进行加速。

图 4 所示为基于 CPU+GPU 协同架构的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦的完整流程。该流程图中主要分

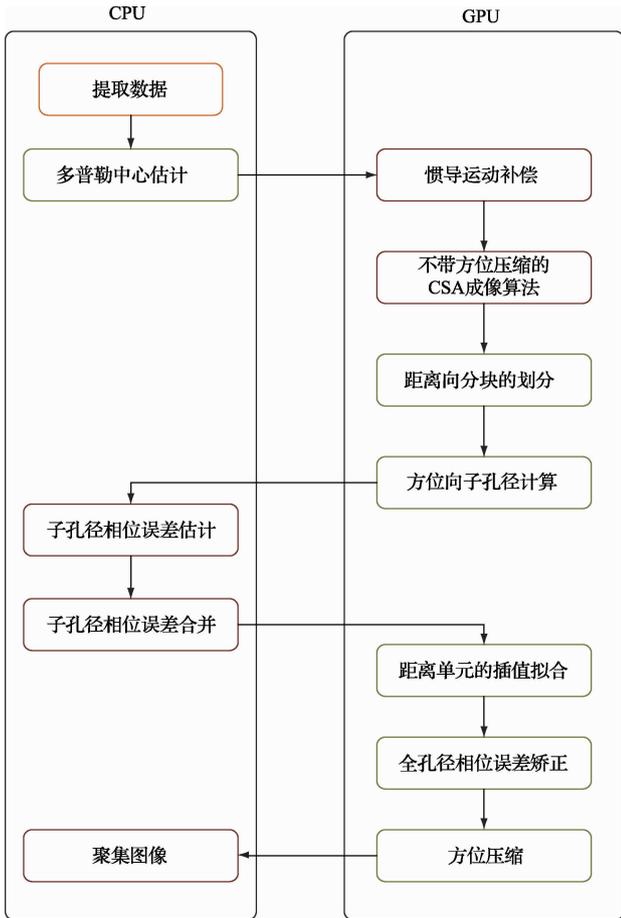


图 4 基于 CPU+GPU 协同架构的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦流程

为 3 个步骤:第 1 步为基于传感器的运动补偿,第 2 步为对分块应用 PGA 自聚焦算法,第 3 步为相位误差的拟合和相位误差的补偿。

## 3 CUDA 实现和优化

基于 CPU+GPU 协同架构的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦充分利用了 GPU 的计算特性,对于算法中的大规模运算交给 GPU 并行实现,并且某些步骤可以直接调用英伟达公司提供的 CUDA 函数库进行实现,例如 FFT 函数的实现就可以通过调用 CUFFT 库函数实现。CPU 端负责算法的整体架构以及一些不用于 GPU 的逻辑计算也交给 CPU 来执行。对于一些粗粒度的并行,采用 OpenMP 来执行,利用对于分块的数据在方位向进行子孔径划分和相位估计。而对于大量重复的可并行的数值计算采用 CUDA 来实现并行效果。

### 3.1 多线程和多 GPU 策略

CUDA 在执行的时候是让 host 里面的一个一个的 kernel 按照线程网格(Grid)的概念在 GPU 上执行。每一个线程网格又可以包含多个线程块(block),每一个线程块中又可以包含多个线程(thread)。在该并行成像系统中,每一线程块对应的是 SAR 数据块一组像素点。由于成像过程中每个计算过程都有关联性,但是对于回波的每个像素点是相互独立。因此依据每个像素点进行并行化实现加速比提升。对于高精度的机载高分 SAR 而言,回波数据是远远大于可以适用的显存的,一方面子孔径方法被引入的协同架构;另一方面采用多个 GPU 的方法来解决这一冲突。

“比在一个 GPU 上计算更好的,只有在 2 个 GPU 上计算。”本篇文章采用多 GPU 架构技术,通过独立的扩展 PCIe 卡槽,把两个计算显卡通过英伟达公司的 SLI 技术将它们连接。当通过 CUDA 运行时 API 来使用多个 GPU 时,要意识到每个 GPU 都需要由一个不同的 CPU 线程来控制。每个 GPU 都是由一个单独的 CPU 线程进行控制,函数 start\_thread() 将创建一个新线程,线程调用 routine() 函数,该函数参数传递为待传入 GPU 中数据。

### 3.2 CUDA 流技术

在并行系统的实现中利用流(stream)技术实现来实现异步并行。CUDA 流表示的是一个 GPU 操作队列,并且该队列中的操作以添加到队列的先后顺序执行。使用 CUDA 流可以实现任务级的并行,比如当 GPU 在执行核函数的同时,还可以在主机和设备之间交换数据,图 5 显示了这种异步并行方案的实现方式。

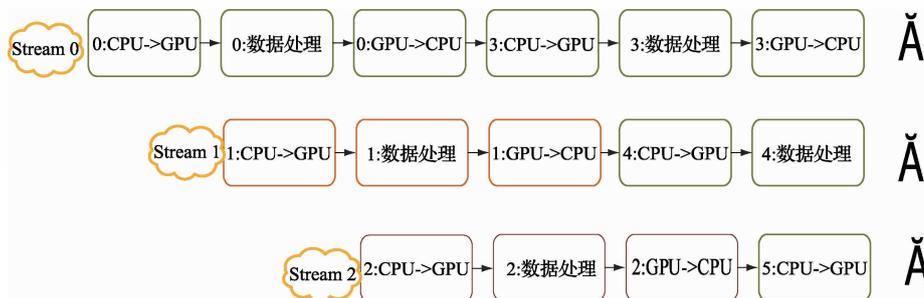


图5 利用 CUDA 流到达异步任务级并行

在并行系统的实现中,创建了3个流来实现任务级的并行,每个流负责处理一个单独的原始数据。因此当一个流在进行数据传输了同时,由于整个 kernel 函数处于空闲状态,因此另外一个流可以进行数据的计算。依此类推,把所有的数据都分块放到各个流上来处理,从而实现3个任务的并行处理实现。从上图也可以看出 GPU 核心部件一直处在忙碌,从而提高数据的处理速度和能力。

#### 4 实验结果

##### 4.1 仿真平台和系统参数

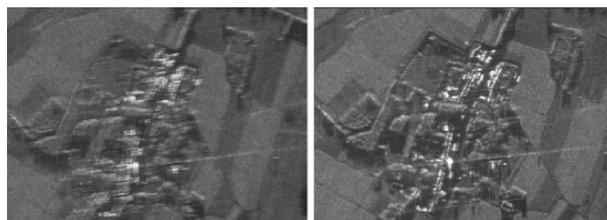
通过机载高分实测数据来检验这种新的基于 CPU+GPU 协同架构的处理平台的加速效果。仿真平台 CPU 为 Intel Xeon 2.6 GHz 带有 16 核的处理器,2 块英伟达 Tesla C2050 计算显卡搭载在平台上。系统环境为 Window 8.1, CUDA 版本为 CUDA5.5。载机平台系统参数如表 1 所示。

表 1 机载 SAR 系统参数

| 参数            | 数值                  |
|---------------|---------------------|
| 数据大小          | 65 536(a)×32 768(r) |
| 中心频率/GHz      | 9.6                 |
| 平台速度/m/s      | 140.9               |
| PRF/Hz        | 908.985 7           |
| 采样频率/MHz      | 250                 |
| 带宽/MHz        | 210                 |
| 脉冲宽度/ $\mu$ s | 110                 |

##### 4.2 成像结果

首先,通过实验来验证本文提出的距离向空变的 SPGA 算法有效性。通过对比图 6 所示机载 SAR 传统 PGA 和改进的距离向空变 PGA 自聚焦图像,可以看到左图使用传统的 PGA 算法的聚焦效果明显不如本文提出的算法聚焦效果好。



(a)代表传统PGA处理 (b)代表改进PGA处理  
图 6 高分机载 SAR 传统 PGA 和改进的距离向空变 PGA 自聚焦图像对比

最终成像结果如图 7 所示,对比了该并行系统与传统的基于 CPU 的成像系统发现,2 个系统的成像效果一样,但是并行系统运行时间大幅度减低,因此证明基于 CPU+GPU 的运动补偿和自聚焦算法的有效性。



图 7 基于 CPU+GPU 的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦结果

##### 4.3 加速比分析

对于该机载高分 SAR,采用的回波数据大小方位向×距离向为 65 536×32 768。表 2 所示记录了该系统不同步骤的运行时间。在该表中,分别比较了没有利用 CPU 并行技术运行时间,利用 CPU 并行技术 OpenMP 并行时间,利用 CPU+GPU 并行技术系统运行时间。

表 2 尺寸大小为 65 536×32 768 的回波数据在不同步骤运行时间

| 步骤      | CPU 无 OpenMP | CPU 有 OpenMP | CPU+GPU |
|---------|--------------|--------------|---------|
| MOCO(s) | 334.67       | 28.29        | 6.49    |
| PGA(s)  | 1 645.32     | 183.89       | 34.46   |

GPU加速比的定位为基于CPU的串行运行时间和基于GPU的并行运行时间的比值。因此可以得到图8,描述的是惯导运动补偿,改进的距离向空变PGA算法的加速比。不考虑数据传输时间,可以得到CPU并行可以得到大概10倍的加速比,而GPU并行大概可以得到48倍的加速比。

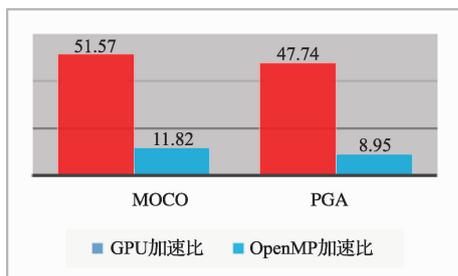


图8 惯导运动补偿、距离向空变PGA加速比分析

对于不同尺寸的回波数据的进一步分析表明,本文提出的基于CPU+GPU的运动补偿和自聚焦算法是健壮的和可扩展的。如图9所示,测试了不同数据尺寸对应的3种优化方法所耗费的时间。可以得到如下的结论,系统运行时间与回波数据尺寸大概呈一定的线性关系变化,但是当数据尺寸太小以至于GPU的显存可以容纳所有的数据的时候,就不需要引入分块的模式来解决有限的显存和较大的回波数据量的冲突,直接一次性的把回波数据存入显存,这样就可以达到更好的加速比效果。

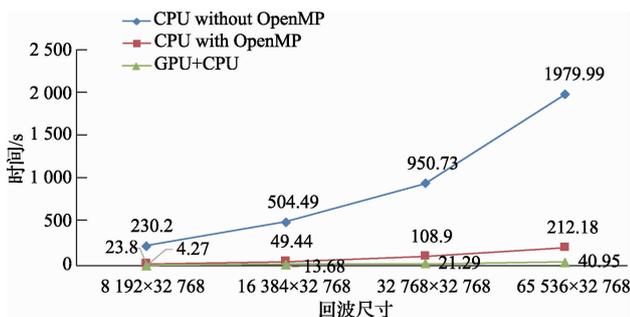


图9 不同数据尺寸对应优化方法所耗费的时间

## 5 结论

提出一种基于CPU+GPU协同架构的机载高分SAR运动补偿和距离向空变PGA算法,该运动补偿算法对于成像质量和自聚焦效果有着显著的提高,对于实际高分辨率宽测绘带机载SAR成像有着重要的意义。通过充分利用GPU并行计算能力,使得该补偿算法能够达到48倍的加速比的提升,对灾害实时检测和战场军情分析有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 雷斌,丁赤飏.一种基于SAR图像视觉特征的改进像素掩蔽方法[J].电子测量技术,2014,37(11):37-41.
- [2] 唐波,梁兴东,李炎磊.基于改进的扩展波数域算法的SAR实时成像方法[J].国外电子测量技术,2010,29(7):29-33.
- [3] 查正兴,鲁昌华,陶志颖,等.增强型Shearlet域SAR图像去噪[J].电子测量与仪器学报,2014,28(6):644-648.
- [4] 王康,叶伟,劳国超,等.一种基于压缩感知的宽带SAR信号侦察方法[J].国外电子测量技术,2014,33(4):40-43.
- [5] 李刚,程志峰.基于FPGA的实时电子稳像[J].仪器仪表学报,2013,34(1):8-13.
- [6] 张舒,褚艳利.GPU高性能运算之CUDA[M].北京:水利水电出版社,2009:16-18.
- [7] SHI J, MA L, ZHANG X. Streaming BP for non-linear motion compensation SAR imaging based on GPU[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2013, 6(4):2035-2050.
- [8] YANG H, DU Q, CHEN G. Unsupervised hyperspectral band selection using graphics processing units[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4(3):660-668.
- [9] LI J, LIU Y, HU Q R. Airborne SAR Motion Compensation and Imaging Based on GPU Architecture[C]. IET International Radar Conference, 2013:0168.
- [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] 阚晓博,宁宇.逆合成孔径雷达相位补偿算法研究[J].国外电子测量技术,2010,29(9):33-35.
- [12] BERIZZI F, MARTORELLA M, CACCIAMANO A, et al. A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation[J]. IEEE Transaction On Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10):3053-3062.

## 作者简介

吴铮,1990年出生,硕士研究生。主要研究方向为机载高分SAR成像及其并行计算。  
E-mail: bashkernel@163.com