

共孔径主被动高光谱三维成像实时处理框架

贺文静¹, 胡 坚¹, 陈育伟^{2*}, 潘苗苗¹, 朱运维¹, 何锐斌¹, 李传荣¹

- (1. 中国科学院空天信息创新研究院 中国科学院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;
2. 芬兰地球空间研究所 遥感与摄影测量实验室, 芬兰 02430)

摘要: 共孔径主被动高光谱三维成像技术是一种结合激光雷达主动探测和高光谱相机被动成像的新型遥感探测手段, 通过共光路设计, 降低了主被动数据配准难度, 使得实时融合生成三维高光谱影像成为可能。三维高光谱成像实时处理兼具数据密集和运算密集的特点, 可编程片上系统软硬件协同设计为其提供了解决方案。而目前软硬件划分多基于定性经验分析设计, 难以实现量化最优设计。针对该问题, 提出了一种采用基于权重法的多目标规划模型的可编程片上系统处理框架。该处理框架利用图论模型 *Ncut* 准则开展高内聚度、低耦合度的单元分割, 并对各单元的软件和硬件实现特性分别进行分析评估, 最终面向应用需求, 利用多目标规划模型求解最优的软硬件划分方案。利用该处理框架, 针对速率优先和功耗优先两种高光谱三维实时成像应用场景, 进行了软硬件划分方案的量化求解与分析, 结果表明, 在速率优先设计中, 相对于传统的设计, 处理速率提升了 43.4%, 而功耗降低了 53.5%。

关键词: 高光谱; 主被动; 软硬件协同; 多目标规划; SOPC

中图分类号: TP752.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200249

Real-time processing framework of common-aperture active and passive hyperspectral 3D imaging

He Wenjing¹, Hu Jian¹, Chen Yuwei^{2*}, Pan Miaomiao¹, Zhu Yunwei¹, He Ruibin¹, Li Chuanrong¹

- (1. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Department of Remote Sensing and Photogrammetry, Finnish Geospatial Research Institute, 02430, Finland)

Abstract: Common-aperture active and passive hyperspectral three-dimensional imaging technology is a new remote sensing detection method, which combines active LiDAR and passive hyperspectral cameras in a single framework with shared optical systems. Thus, the difficulty of heterogeneous data registration is reduced, and the generation of the 3D spectral image by real-time fusion becomes possible. The real-time 3D imaging is characterized by data-intensiveness and computing-intensiveness, and the software and hardware co-design framework for system-on-a-programmable-chip provides a feasible solution to it. At present, the hardware/software partitioning is mostly derived from qualitative and empirical analysis, and it is challenging to achieve a quantitative and optimal design. A system-on-a-programmable-chip processing framework using a multi-objective programming model based on object weight was proposed to tackle this problem. In this processing framework, the graph-theory-based model with *Ncut* criterion was used to achieve high cohesion and low coupling functional

收稿日期: 2020-06-25; 修订日期: 2020-08-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA22030202); 北京市科委国际合作项目 (Z181100001018036); 季华实验室项目 (X190211TE190); 中国科学院大学项目 (181811KYSB20160040); 上海市自然科学基金 (18590712600)

modules partitioning. Then, the performances of functional modules with software fulfilment and hardware fulfilment were thoroughly analyzed and evaluated. Finally, aiming at the design requirement, the proposed multi-objective programming model was used for the hardware/software partitioning scheme. Two optimal hardware/software partitioning schemes based on the speed-first criterion or the power-first criterion were solved quantitatively for different scenarios. The result shows that the speed-first design overperforms an empirical design with an increase of 43.4% in processing speed, a reduction of 53.5% in power consumption.

Key words: hyperspectral; active and passive; hardware-software co-design; multi-objective programming; SOPC

0 引言

近年来,利用遥感技术对观测目标的空间、几何、纹理、光谱等多维属性信息快速精准获取的需求日益增高。传统的激光雷达采用主动发射单一波长激光脉冲的方式探测目标,是一种普遍采用的高效地表三维信息的获取手段,而传统的被动式高光谱成像在高效获取目标纹理、光谱信息方面具有优势,如何实现三维空间信息与地物光谱信息的同时获取已成为当前研究的热点问题。

有些学者在将主动激光雷达和被动高光谱相机相结合的主被动复合探测技术方面开展了研究,设备中多个探测器往往利用独立光路成像^[1-2],通过后期数据处理实现数据融合,但是激光雷达与光学相机截然不同的成像机理,采用非共用光路和异步时序控制,增加了数据融合的难度和复杂性。Carl J.Legleiter 等人利用激光雷达强度图像中的结构特征实现与光学影像的融合^[3-4],这种在灰度层次上进行配准的方法,对激光点密度有一定要求。Buddenbaum、Wang 等人,对激光雷达全波形数据通过“立体像素化”和与高光谱数据进行地理配准^[5-6],这类基于点集的方法在影像不能生成立体像对的情况时不适用。综合来看,对于利用独立光路成像的数据配准,往往存在处理环节复杂、作业周期长、自动化程度低等弊端。部分研究者提出了主动式高光谱激光雷达技术,其中将多个单色激光器组合为主动光源的方式^[7]直接限制了光谱通道数量,不利于多谱段光谱信息的采集。芬兰地球空间研究所于 2010 年开始利用超连续谱激光源,设计了数种全波形高光谱激光雷达系统,可以同时获得目标光谱维和空间维信息^[8]。不过,受限于激光器出射能量,超连续谱高光谱激光雷达系统只适用于近距离探测。

针对上述问题,研究者提出了共孔径的主被动高光谱三维成像探测方案^[9],将推帚式激光雷达和线阵高光谱成像仪采用共光路一体化集成设计,并通过共光路光轴对准和同步时序控制,在信号获取端实现测距和高光谱数据的匹配。该设计方法,不仅突破了主动式高光谱激光雷达系统中的光谱通道数据、探测距离等限制,而且利用系统中的像素级匹配关系降低了数据配准的难度,使数据的实时融合处理成为可能,可以满足灾情监测、应急响应等高效性应用需求。因此,共孔径主被动高光谱三维成像系统可搭载各种航空/航天平台,为用户实时、直观地展示观测目标的立体多光谱影像。虽然共光路设计降低了异质数据配准难度,但是要实现激光雷达点云与高光谱影像的像素级融合处理依然存在数据量大、运算复杂的特点^[10-11],这对处理系统的计算性能提出了巨大挑战。

高性能嵌入式设计是实现共孔径主被动高光谱三维成像实时处理(简称为“三维成像实时处理”)的有效途径,其中 FPGA + DSP 多处理器并行是一种常用方式。伴随着集成电路的飞速发展,集成了 FPGA 和 ARM 的可编程片上系统(SOPC)应运而生,传统的将硬件和软件独立开展设计的设计方法已难以充分发挥 SOPC 体系优势。研究者开始关注软硬件协同设计,综合考虑算法特性、软硬件功能及资源等因素,使系统运行在最佳状态^[12]。其中,软硬件划分方法对系统性能会产生决定性影响。目前,软硬件划分多基于人工经验开展定性分析,评价标准大多仅考虑时间因素,难以兼顾功耗、硬件面积等多重指标约束开展量化分析求解。

文中面向三维成像实时处理的要求,提出一种 SOPC 处理框架,首先利用图论模型分析算法单元的内聚度和耦合度,实现合理的单元分割;然后分别对

利用软件资源 ARM 和硬件资源 FPGA 实现的情况进行时间、功耗、资源等性能评估;最后建立了基于权重法的多目标规划模型,针对两种应用场景完成了软硬件划分问题求解。

1 三维成像实时处理概述

共孔径主被动高光谱三维成像设备由高光谱成像仪、激光雷达系统、全球定位系统 (GPS)、惯性测量单元 (IMU) 和三维成像实时处理系统构成。其中,高光谱成像仪获取观测目标的高光谱影像;激光雷达系统测定发射点到地面反射点的斜距;GPS、IMU 分别测定飞行平台的位置信息和姿态信息;三维成像实时处理系统接收上述数据,开展高速数据处理,实时生成三维立体影像。

三维成像实时处理过程中,首先利用激光雷达扫描时刻的位置姿态信息、测距数据,采用线阵推帚式机载激光雷达三维点云解算模型,求解激光脚印的三维空间坐标;然后,依据时间同步和像点匹配关系,利用内插方法通过激光点云计算像点高程值;最后利用共线方程解算像点的大地三维坐标,并赋以该像点的光谱信息,最终生成三维多光谱立体影像。三维成像实时处理系统选用了 Xilinx 公司的 ZYNQ-7020 芯片,与大部分 SOPC 类似,该芯片内部集成了 ARM Cortex-A9 双核处理器和可编程逻辑资源。

2 三维成像实时处理系统设计

2.1 算法单元分割

对于复杂算法,为了实现合理的软硬件划分,首先要开展单元分割,将算法划分成若干个功能相对独立的单元。使用图论模型可以有效的表达算法的拓扑结构,加权有向图可以更好地反映算法的细节特点,既反映数据流向,又量化的表示数据流量,有助于对算法进行分割。在算法的加权有向图中,将算法的各个函数抽象成顶点,将各个函数之间的数据通信关系抽象为边,数据通信量用边的权重表示,箭头的指向与数据流的方向一致的。

一个合理有效的单元分割应该满足:使得分割后的子图内顶点的耦合度相对其他分割是最高的,而子图间耦合度是最低的。近年来,许多研究人员提出了在图分割问题中评价分割效果好坏的标准,例如最小

割、最小直径、 k -center、 k -median 准则等。Shi 和 Jitendra Malik 提出了一种衡量分割效果的 Normalized Cut ($Ncut$) 准则^[13]。 $Ncut$ 标准既考虑一个图里面处于相同模块内顶点间的耦合情况,又考虑图中不同模块间顶点的耦合情况,是一种较为理想的评价分割质量的标准。假设 $V(G)$ 划分为两个子集 A 和 B 。 $Ncut$ 准则定义如下:

$$Ncut(A, B) = \frac{Cut(A, B)}{Assoc(A, V)} + \frac{Cut(A, B)}{Assoc(B, V)} \quad (1)$$

式中: $Cut(A, B) = \sum_{u \in A, v \in B} w(u, v)$, $Assoc(A, V) = \sum_{u \in A, t \in V} w(u, t)$, $Assoc(B, V) = \sum_{u \in B, t \in V} w(u, t)$ 。在该定义中, $Ncut(A, B)$ 的值越小,表示该分割越合理,反之则越不合理。

将三维成像实时处理算法用加权有向图表示其拓扑关系,如图 1(a) 所示。依照 $Ncut$ 准则,对处理算法运用二分法,采用深度遍历的方法搜索解空间,通过最小择优的原则选取每次二分法的最优分割,直到获得适度的单元规模,取得单元分割结果如图 1(b) 所示,共分为 6 个单元,每个单元由若干子函数构成。将图 1(b) 归纳为图 1(c) 所示,各单元的功能简述如下:

单元 M1: 旋转矩阵计算,利用激光雷达激光扫描时刻的平台 GPS/IMU 数据,完成从激光传感器坐标系到 WGS84 大地坐标系进行坐标变换的旋转矩阵和平移参数计算。

单元 M2: 大地坐标解算,实现激光点从激光扫描坐标系到地心坐标系的坐标转换。

单元 M3: 高斯投影,用于实现目标点从 WGS84 大地坐标系到高斯平面直角坐标系的转换。

单元 M4: 外方位元素计算,利用光学相机成像时刻的平台 POS/IMU 数据,解算影像的外方位元素。

单元 M5: 高程内插,根据激光雷达与光学相机的同步对应关系,部分光学影像像点具备对应的三维坐标,利用这些像点的三维坐标,在沿轨和穿轨方向上利用经线性内插方法,计算获得每一个像点的物方坐标高程值。

单元 M6: 共线方程解算及融合,根据光学影像像点坐标及对应高程、影像的外方位元素,再结合系统内参数,按照共线方程解算出每个像点的大地坐标,然后对每个像点赋予光谱值,获得多光谱三维立体影像。

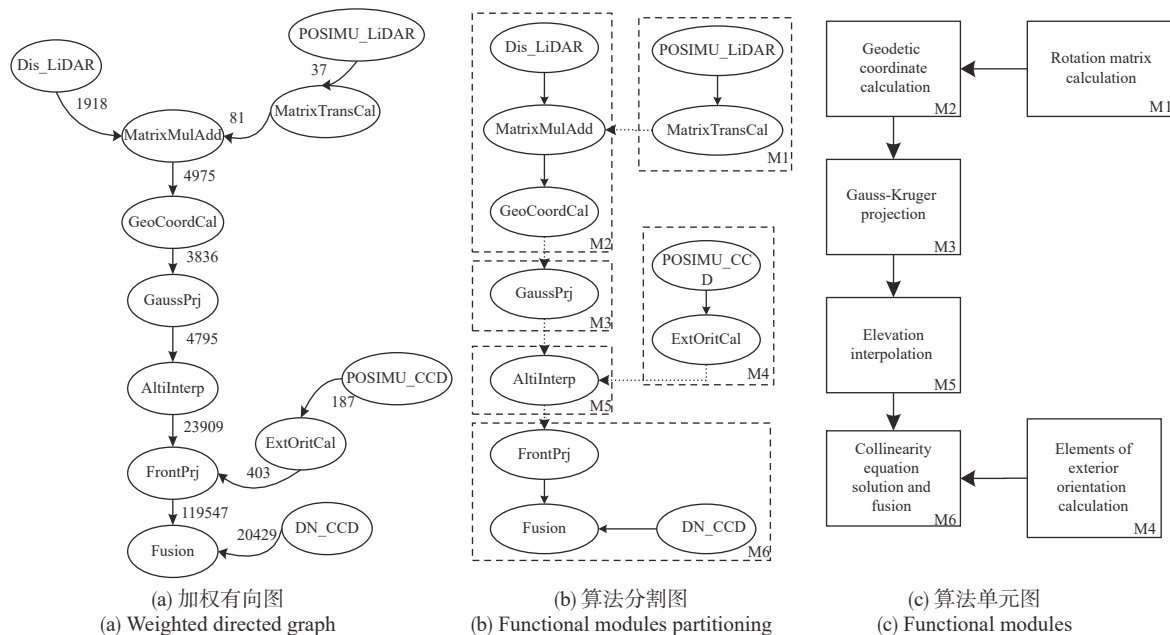


图 1 三维成像实时处理算法单元分割

Fig.1 3D imaging real-time processing functional modules partitioning

2.2 算法的软件和硬件实现

基于单元分割结果, 将各单元分别映射到 ARM 处理器利用软件实现、映射到可编程逻辑中构建硬件模块来实现, 并对软件实现和硬件实现的性能进行了评估, 然后利用多目标规划模型开展了划分方案求解和分析。

2.2.1 软件实现

将三维成像实时处理算法各单元程序移植到 ARM 平台, 并完成程序优化和评估。在机载飞行验证试验数据中, 选取 20 s 的数据作为实验数据。高光光谱数据选取 R、G、B 三个波段数据, 选取 3 000 扫描行, 像元数为 2 000, 数据量化位数为 14 bit。激光雷达数据选取 600 行, 像元数为 360, 数据量化位数为

64 bit。总数据量约为 38.5 MB。

如表 1 所示, 利用分析工具采集软件运行信息, 包括各单的运行耗时、耗时占比、主要函数的调用次数, 其中函数的调用次数是衡量可并行性的一个重要指标。大地坐标解算单元对激光点逐点开展坐标系转换计算, 函数调用率高达 25 万余次, 有利于并行执行; 并且, 计算中存在大量开方、三角运算等, 单个运算执行需上百个时钟, 因此, 本单元耗时最长。共线方程解算及融合单元对每个影像像点进行坐标求解, 因此函数调用达到 575 万余次; 虽然主要为双精度浮点除法和乘法运算, 耗时占比也高达 28.26%。高斯投影单元实现每个激光点在高斯平面直角坐标系的投影, 并行度较高, 而计算中多为双精度浮点数据的乘

表 1 算法单元软件运行性能

Tab.1 Software performance of functional modules

| Functional modules | Subfunction calling | | Time/s | Time rate |
|--|---------------------|-------------|--------|-----------|
| | Subfunciton | Call counts | | |
| Rotation matrix calculation | MatrixTransCal | 666 | 0.03 | 0.44% |
| Geodetic Coordinate calculation | GeoCoorCal | 266365 | 3.32 | 42.95% |
| Gauss-Kruger projection | GaussPrj | 243085 | 1.11 | 14.30% |
| Elements of exterior orientation calculation | ExtOritCal | 3325 | 0.14 | 1.76% |
| Elevation interpolation | AltiInterp | 1 | 0.95 | 12.29% |
| Collinearity equation solution and fusion | FrontPrj | 575353 | 2.19 | 28.26 |

法、加法,因此,单元耗时仅为 14.3%。高程内插单元计算每个影像像点的高程值,涉及较多的双精度浮点除法和跳转指令,耗时约占 12.29%。在旋转矩阵计算单元、外方位元素计算单元中,针对不同成像时刻的位置姿态数据开展计算,也具有一定的并行性,且计算简单,因此耗时占比很小。

2.2.2 硬件实现

数据处理全部利用可编程逻辑来实现时能够获

得最佳的处理性能,但是这是以硬件资源消耗为代价的,尤其是对于双精度浮点运算、换取效果并不理想。文中将实时处理算法全部利用可编程逻辑资源实现,完成了硬件加速。如表 2 所示,统计了单元的硬件资源占用率,对比了软件和硬件实现的运行耗时、功耗,以及硬件运行相对于软件运行的加速比,从而为后续的软硬件划分奠定基础。

表 2 软件和硬件运行性能

Tab.2 Hardware/Software performance of functional modules

| Functional modules | Module lable | LUT | FF | DSP | BRAM | Software time/s | Hardware time/s | Software power/W | Hardware power/W | Speedup rate |
|--|--------------|-----|-----|-----|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------|
| Rotation matrix calculation | M1 | 3% | 1% | 1% | 1% | 0.034 | 0.007 | 1.836 | 1.351 | 4.86% |
| Geodetic coordinate calculation | M2 | 86% | 48% | 46% | 8% | 3.32 | 0.2 | 2.154 | 1.739 | 16.60% |
| Gauss-Kruger projection | M3 | 36% | 46% | 56% | 14% | 1.1 | 0.05 | 2.087 | 1.68 | 22.00% |
| Elements of exterior orientation calculation | M4 | 51% | 24% | 37% | 19% | 0.137 | 0.025 | 1.975 | 1.614 | 5.48% |
| Elevation interpolation | M5 | 8% | 2% | 13% | 0 | 0.95 | 0.06 | 1.757 | 1.372 | 15.83% |
| Collinearity equation solution and fusion | M6 | 22% | 12% | 19% | 2% | 2.19 | 0.19 | 1.869 | 1.454 | 11.53% |

由表 2 可见,大地坐标解算单元和外方位元素计算单元中,由于双精度浮点开发和三角运算的硬件实现会占用大量的可编程逻辑资源,因此这两个单元的硬件面积均较大;而大地坐标解算单元的可并行性较高,因此能获得较高的加速比,外方位元素计算单元的并行度较低,因此加速比也较低。高斯投影单元中,双精度浮点数据的乘法、除法可直接调用 DSP 实现,由于计算简单,因此资源消耗较少;且该单元的并行度较高,因此,综合导致该单元加速比高达 22。共线方程解算及融合单元为典型的重复、简单运算,因此资源消耗小,可并行性良好。旋转矩阵计算单元主要为矩阵的乘法和加法,运算简单,因此资源消耗最少,但是硬件加速效果较差。综上所述,因算法单元的运算及数据类型、可并行度的不同,在硬件资源消耗和计算速度提升方面均表现出了一定差异,因此对各单元进行定量评估从而指导软硬件划分是十分必要的。

2.3 基于多目标规划模型的软硬件划分

软硬件划分是软硬件协同设计的关键环节。如何充分利用软件和硬件的优势,不再仅单一考虑时间

约束,而寻求在时间、功耗、硬件资源等多个指标约束下寻求最优解决方案,成为软硬件划分的关键。在许多实际问题中,各个目标之间往往存在一定的竞争性,需要对多个子目标进行协调和综合权衡,尽可能使相对重要的目标处于最优状态。文中建立基于权重法的多目标规划,可以根据每个目标的重要程度,为每个目标函数设置权重,并将多个目标转化为单一目标函数,在给定的区域上求取最优解。基于权重法的多目标规划表达为以下形式:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n w_i f'_i(x) \\ s.t. x \in X \end{cases} \quad (2)$$

式中: w_i 表示单个指标评价函数的综合权重,且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。 $f'_i(x)$ 为归一化的指标评价函数:

$$f'_i(x) = \frac{f_i(x) - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad (3)$$

式中: $f_{i,\max}$ 和 $f_{i,\min}$ 分别为指标评价函数 $f_i(x)$ 的最大值和最小值。

面向三维成像实时处理应用需求,综合考虑时间、硬件资源、功耗三个评价指标,针对上述 6 个处

理单元进行分析, 权重模型可细化为:

$$\begin{cases} \min S = w_1 f'_t(x) + w_2 (f'_{\text{DSP}}(x) + f'_{\text{FF}}(x) + \\ f'_{\text{BRAM}}(x) + f'_{\text{LUT}}(x)) + w_3 f'_w(x) \\ s.t. \widehat{T} \geq f_t(x), \widehat{R}_{\text{DSP}} \geq f_{\text{DSP}}(x), \widehat{R}_{\text{FF}} \geq f_{\text{FF}}(x), \\ \widehat{R}_{\text{BRAM}} \geq f_{\text{BRAM}}(x), \widehat{R}_{\text{LUT}} \geq f_{\text{LUT}}(x), \widehat{W} \geq f_w(x) \end{cases} \quad (4)$$

式中: w_1 、 w_2 、 w_3 分别是时间消耗、硬件资源消耗和功耗 3 个评价指标的权重; $f'_t(x)$ 、 $f'_{\text{DSP}}(x)$ 、 $f'_{\text{FF}}(x)$ 、 $f'_{\text{BRAM}}(x)$ 、 $f'_{\text{LUT}}(x)$ 、 $f'_w(x)$ 分别为归一化的时间、数字处理器 (DSP) 资源、触发器 (FF) 资源、块状存储器 (BRAM) 资源、查找表 (LUT) 资源、功耗目标函数。目标函数表示为:

$$\begin{cases} f_t(x) = \sum_i^6 [t_{si} + x_i(t_{hi} - t_{si})] \\ f_{\text{DSP}}(x) = \sum_i^6 x_i R_{\text{DSP}i} \\ f_{\text{FF}}(x) = \sum_i^6 x_i R_{\text{FF}i} \\ f_{\text{BRAM}}(x) = \sum_i^6 x_i R_{\text{BRAM}i} \\ f_{\text{LUT}}(x) = \sum_i^6 x_i R_{\text{LUT}i} \\ f_w(x) = \sum_i^6 x_i W_i + W_{\text{PS}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_i 表示每个单元的实现方式, 硬件实现表示为 1, 软件实现表示为 0; t_{si} 、 t_{hi} 分别表示单元的软件运行

时间、硬件运行时间, $R_{\text{DSP}i}$ 、 $R_{\text{FF}i}$ 、 $R_{\text{LUT}i}$ 、 $R_{\text{BRAM}i}$ 分别表示 DSP、FF、LUT、BRAM 硬件资源的消耗量; W_i 表示单元的运行功耗; W_{PS} 表示 PS 端的固有功耗; \widehat{R}_{DSP} 、 \widehat{R}_{FF} 、 $\widehat{R}_{\text{BRAM}}$ 、 \widehat{R}_{LUT} 分别表示芯片中提供的 DSP、FF、LUT、BRAM 的资源; \widehat{T} 、 \widehat{W} 为系统设计能承受的最大运行时间、功耗。

为了保证数学模型的客观性和科学性, 权重的设置至关重要。文中结合德尔菲法和 T.L.Saaty 1-9 标度法^[14], 由专业人员结合其专业知识和应用需求, 通过二元比较量化的方式, 对各指标的相对权重进行打分建立判断矩阵, 然后利用“和积法”求解得到各个指标的组合权重值。

3 实验与分析

3.1 共孔径主被动高光谱三维成像系统

2018 年, 项目组研制完成机载共孔径主被动高光谱三维成像系统, 并在海南儋州岛屿开展了机载飞行验证, 飞行高度为 2 km。系统构成如图 2 所示。高光谱成像仪的谱段覆盖 400~950 nm, 光谱分辨率低于 5 nm, 波段数为 120, 像元数为 2 000, 视场角为 20°, 在 2 km 飞行高度下地面分辨率达到 0.4 m, 扫描行频设置为 150 Hz。激光雷达工作波长为 1 064 nm, 采用 360 像元的长线阵激光推扫, 激光发射脉冲宽度

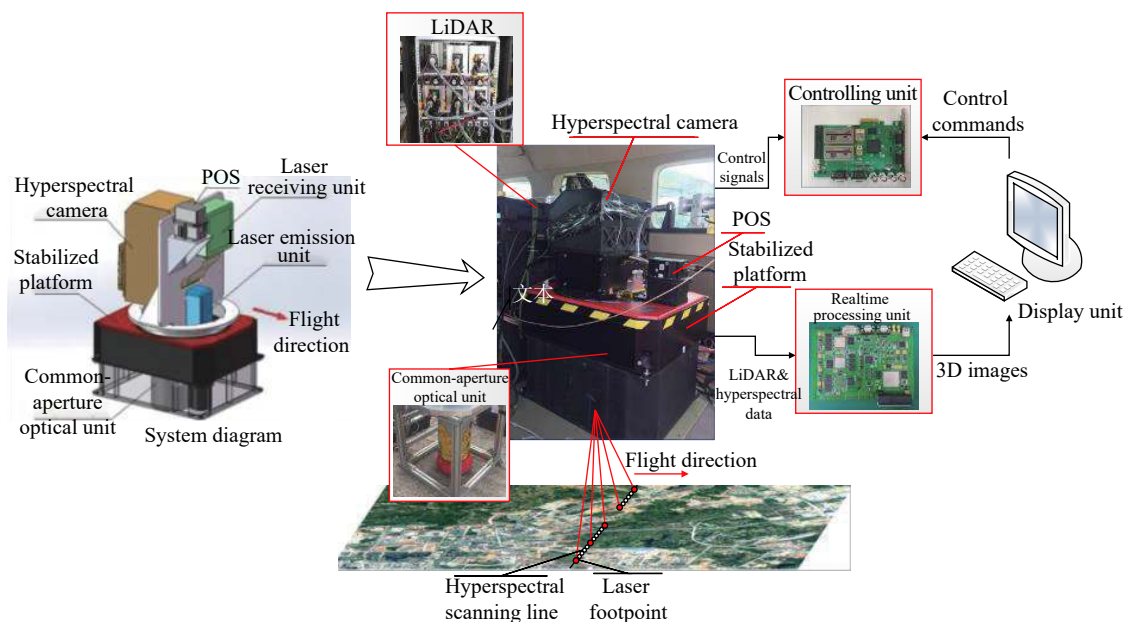


图 2 共孔径主被动高光谱三维成像设备图

Fig.2 Common-aperture active and passive hyperspectral 3D imaging equipment diagram

10 ns, 单路能量 300 μ J, 扫描行频设置为 50 Hz, 每秒可以获得 18000 个三维测量值。共光路光学单元用于接收来自地面目标的辐射和激光回波, 并通过分色棱镜将高光谱与激光波段光线分离。POS 传感器提供观测平台的厘米精度的位置信息和精确的姿态信息。综合控制单元对以上各探测器进行指令、同步控制等。实时处理单元接收上述传感器的输出数据, 开展高速数据处理, 实时生成包含完整多光谱信息的三维影像。

3.2 软硬件划分结果分析

文中针对速率优先、功耗优先两种应用场景需求, 然后利用多目标规划模型求解了软硬件划分方案。

应用场景一: 在机载快速响应遥感系统中, 处理速率为首要关注目标, 通过德尔菲法和 T.L.Saaty 1-9 标度法计算指标权重 w , 其中时间权重为 $w_1 = 0.728$, 硬件资源权重为 $w_2 = 0.179$, 功耗权重为 $w_3 = 0.092$ 。

应用场景二: 在供电能力有限的无人机搭载观测系统的应用中, 功耗成为首要关注目标。采用同样方法计算指标权重: 时间权重为 $w_1 = 0.191$, 硬件资源权重为 $w_2 = 0.213$, 功耗权重为 $w_3 = 0.595$ 。

基于软件和硬件的性能评估结果, 利用公式 (4)

求解软硬件划分方案, 解空间如图 3 所示。图中以可编程逻辑中的重要资源 LUT 为例, 横坐标表示 LUT 的占用率, “o”型点表示耗时特性, 对应左侧纵坐标, “*”型点表示功耗特性, 对应右侧纵坐标。图中标识了 6 组划分方案, 每条“...”虚线连接的“o”型和“*”型点标志一组方案, 详细信息见表 3, 其中“划分编码”表示 6 个算法单元的实现方式 (0 表示软件实现, 1 表示硬件实现), 编码从高位到低位分别对应单元 M1 到 M6, 加速比定义为全软件实现耗时与该方案实现耗时的比值。

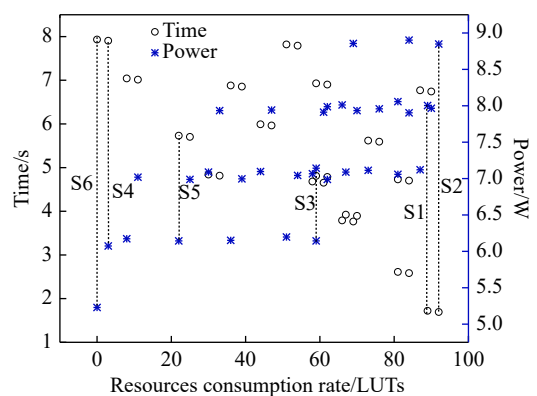


图 3 软硬件划分方案

Fig.3 Hardware/Software partitioning schemes

表 3 软硬件划分方案示例

Tab.3 Examples of hardware/software partitioning schemes

| Solutions | Partitioning code | LUT | FF | DSP | BRAM | Time/s | Power/W | Speedup rate |
|-----------|-------------------|-----|-----|-----|------|--------|---------|--------------|
| S1 | 010011 | 89% | 62% | 78 | 10% | 1.721 | 8.003 | 4.61% |
| S2 | 110011 | 92% | 63% | 79% | 11% | 1.694 | 8.848 | 4.68% |
| S3 | 010000 | 59% | 48% | 46% | 8% | 4.811 | 6.143 | 1.65% |
| S4 | 100000 | 3% | 1% | 1% | 1% | 7.904 | 6.073 | 1.00% |
| S5 | 000001 | 22% | 12% | 19% | 2% | 5.731 | 6.144 | 1.38 |
| S6 | 000000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.931 | 5.228 | 1.00% |

对于应用场景一, 方案 S1 为最优解, 将大地坐标解算、高程内插、共线方程解算及融合单元均利用硬件实现, 其余单元利用 ARM 软件实现, 硬件资源中的 LUT、DSP 占用达到 80% 左右, 硬件资源得到充分利用, 功耗约为 8W, 处理速率约为 22.37MB/s, 相对于全软件实现加速比达到 4.61。相对于方案 S1, 方案 S2 增加旋转矩阵计算单元利用硬件实现, S2 相对于 S1 的耗时减少约 1.5%, 但是功耗增加约 10.6%。由于

该单元规模较小, 其占用资源、耗时均较小, 因此代表 S1、S2 两种方案耗时特性的“o”点在图中位置比较接近, 求解空间中存在多个类似情况。

对于应用场景二, 方案 S3 为最优解, 仅将大地坐标解算单元利用硬件实现, 其余单元均利用 ARM 实现, 资源占用率和功耗都控制在相对较低水平。在方案 S6 中, 将全部功能均利用 ARM 实现, 此时功耗是最低的。相对于 S6, 方案 S1 的速度提升了 1.61

倍,但是功耗仅增加 17.5。方案 S4 中仅将旋转矩阵计算单元利用硬件实现,相对于方案 S6,功耗增加 16%,但是处理速度仅提升 0.3%。方案 S5 中仅将共线方程解算及融合单元利用硬件实现,其功耗与 S3 相近,但其加速比约为 1.38,低于 S3 的 1.65。

3.3 三维成像实时处理性能分析

在高性能嵌入式系统设计中,采用多个高性能处理器并行设计是一种主流方法,比如将 FPGA 和 DSP 联合使用在很多设计中被广泛采用。2018 年利用 FPGA+DSP 的经验方案实现了三维成像实时处理^[1],该设计中 FPGA 作为系统的数据和任务管理中心,

DSP 负责核心的三维成像处理任务,系统的处理速率和功耗如表 4 所示。对比可见,在采用该处理框架构设计时,处理速率提升了 43.4%,而功耗降低了约 53.5%,主要原因,一方面是 SOPC 中资源得到充分利用,尤其是大量可编程逻辑被用于并行加速;另一方面,对于三维成像实时处理这种数据密集型运算,SOPC 内部的高速互联有利于提高通信效率降低传输耗时。另外,在利用 SOPC 实现高性能、低功耗处理的同时,由于芯片数量的减少,也降低了系统的设计复杂性和板卡面积,有利于缩短设计周期。

表 4 处理系统设计方案对比

Tab.4 Performance of processing systems

| Design scheme | Processors | Processor numbers | Processing rate/MB·s ⁻¹ | Power/W |
|---------------|---------------------------------|------------------------|------------------------------------|---------|
| SOPC | ZYNQ-7020 | 1 chip | 22.37 | 8.003 |
| FPGA+DSP | FPGA: XC7K420T DSP: TMS320C6678 | FPGA:1 chip DSP:1 chip | 15.6 | 17.2 |

利用该框架构设计的实时处理系统,对机载验证试验中采集的数据进行处理,三维影像如图 4(a) 所示,红框区域的地物影像如图 4(b) 所示,在该区域内选取 5 种典型地物,其光谱曲线如图 4(c) 所示。

4 结 论

文中针对共孔径主被动高光谱三维成像实时处理的科学问题,研究了基于 SOPC 的处理框架构,建立了基于权重法的多目标规划模型,实现 SOPC 硬件划分方案的简单、高效地求解。结合图论模型 *Neut* 准则,进行算法单元分析与单元分割,并分别分析了各算法单元利用软件资源 ARM 和硬件资源 FPGA 实现时的时间、功耗、资源占用等特性,最终利用多目标规划模型求解满足系统约束指标的软硬件划分方案。结果表明,该方法能够综合顾及时间、功耗、资源等多物理约束,利用权重灵活调节约束条件的优先级,量化地求解软硬件划分问题;相对于传统的 FPGA + DSP 多个处理器并行的设计方法,采用软硬件协同设计框架构时,系统处理速率提升了 43.4%,而功耗降低了 53.5%。文中利用激光雷达和高光谱成像仪共光路集成的三维成像处理开展方法论论证,但是该处理框架构也适用于其他共孔径多传感器复合观测系统中的数据融合处理。

共孔径主被动高光谱三维成像技术有着广阔的应用前景,集成电路的飞速发展也推动着三维成像实时处理的不断进步,进一步研究多核同构、同构核和

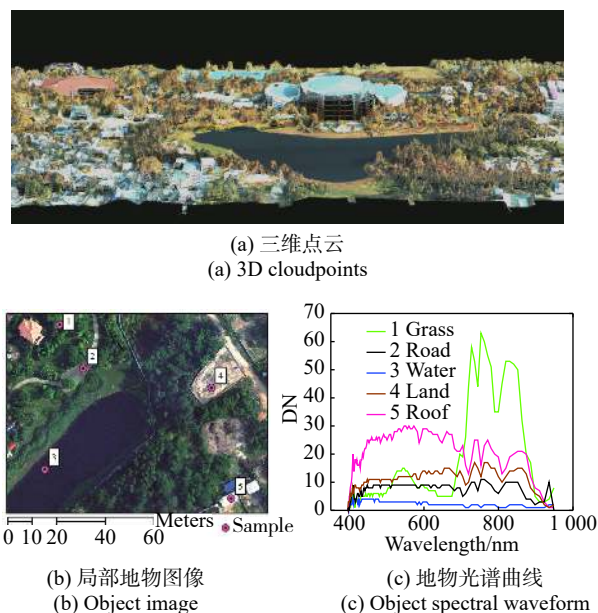


图 4 共孔径主被动高光谱三维成像结果(海南儋州)

Fig.4 Common-aperture active and passive hyperspectral 3D imaging results (Dan Zhou, Hai Nan Province)

异构核减的并行运算,对三维成像实时处理性能的提升也具有积极意义。

参考文献:

- [1] Barenz J, Baumann R, Imkenberg F, et al. All solid state imaging infrared/imaging LADAR sensor system[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004, 5459: 171-179.
- [2] Baker I, Owton D, Trundle K, et al. Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications[C]// Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008: 84.
- [3] Legleiter C J. Remote measurement of river morphology via fusion of LiDAR topography and spectrally based bathymetry [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2012, 37(5): 499-518.
- [4] Khodadadzadeh M, Cuartero A, Li J, et al. Fusion of hyperspectral and lidar data using generalized composite kernels: A case study in Extremadura, Spain[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2015.
- [5] Buddenbaum H, Seeling S, Hill J. Fusion of full-waveform lidar and imaging spectroscopy remote sensing data for the characterization of forest stands [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(13): 4511-4524.
- [6] Wang Hongzhou, Craig Glennie. Fusion of waveform LiDAR data and hyperspectral imagery for land cover classification [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 1-11.
- [7] Steven Hancock, Philip Lewis, Mike Foster, et al. Measuring forests with dual wavelength lidar: A simulation study over topography [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 161: 123-133.
- [8] Chen Yuwei, Räikkönen E, Kaasalainen S, et al. Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source [J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 7057-7066.
- [9] Mi Xiaofeng, Li Chuanrong, Su Guozhong, et al. Research on LiDAR and CCD images fusion algorithm [J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(10): 113-114. (in Chinese)
米晓峰, 李传荣, 苏国中, 等. LiDAR 数据与 CCD 影像融合算法研究[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(10): 113-114.
- [10] He Wenjing, Hu Jian, Niu Jingyu, et al. An embedded multi-core parallel model for real-time stereo imaging[C]//International Conference on Graphic and Image Processing, 2017: 10615.
- [11] He Wenjing, Hu Jian, Zhou Chuncheng, et al. A hierarchical model for embedded real-time stereo imaging[C]//SPIE High-Performance Computing in Geoscience and Remote Sensing Remote Sensing, 2018: 1079209.
- [12] Ouyang Aijia, Peng Xuyu, Liu Jing, et al. Hardware/Software partitioning for heterogenous MPSoC considering communication overhead [J]. *Int J Parallel Prog*, 2017, 45: 899-922.
- [13] Kannan R, Vempala S, Vetta A. On clusterings: good, bad and spectral[C]//Symposium on Foundations of Computer Science, 2004: 367.
- [14] Chunan A, Feidong F. A supplement to saaty's consistency theory of judgment matrix in the analytic hierarchy process[C]// International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2017: 603-607.



第一作者简介: 贺文静 (1986-), 女, 高级工程师, 硕士。主要从事遥感图像高速并行处理技术研究, 包括主被动立体影像实时处理技术、层次化异构多处理器并行技术、可编程片上系统的软硬件协同和可重构阵列技术等。Email: hewenjing@aoe.ac.cn



通讯作者简介: 陈育伟 (1976-), 男, 研究员, 博士。现为芬兰地球空间研究所摄影测量与遥感部电子学首席科学家, 主要从事激光雷达技术及应用方面的研究。目前已发表学术论文 180 余篇, 其中 SCI 期刊论文 67 篇, 并担任 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing、IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems、IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 等多个国际期刊的审稿人。Email: Yuwei.chen@nls.fi