

基于图形处理器的转变边缘传感器读取系统信号处理技术研究*

沈梦萍^{1,2)} 段然^{1)†} 张海燕^{1,3)} 张来宇²⁾ 马晓耘¹⁾ 刘飞¹⁾ 李蔚¹⁾

(1)中国科学院国家天文台,中国科学院500米口径球面射电望远镜重点实验室,100101,北京;

2)中国科学院大学天文与空间科学学院,中国科学院高能物理研究所,100049,北京;

3)河北省射电天文技术重点实验室,050081,河北石家庄)

摘要 针对转变边缘传感器读取系统的信号处理需求,在现场可编程逻辑门阵列信号处理模式的基础上,基于图形处理器、通用并行计算架构等平台进行信号仿真处理技术研究;将联合现场可编程逻辑门阵列与图形处理器的信号处理模式应用于TES的信号读取和处理中,简化了算法的复杂度,提高了信号处理系统的灵活性,并利用模拟信号,验证了将该处理模式应用于中国西藏阿里原初引力波探测实验的可行性。

关键词 信号处理;图形处理器;现场可编程逻辑门阵列;转变边缘传感器;原初引力波

中图分类号 P111.44

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021272

0 引言

天文学上引力波源大致分为天体物理和宇宙学起源2种,前者如激光干涉引力波天文台(laser interferometer gravitational-wave observatory, LIGO)所发现的双黑洞合并与双中子星合并的引力波事件,后者则被称为原初引力波。理论研究表明,探测原初引力波最好的方式是宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)的B模式偏振实验。截至目前,地面或空间实验还没有观测到原初引力波产生的B模式偏振。北天区存在着大面积的“低前景”区域,是天文学家寻找B模式偏振信号的重要窗口。由于处于绝佳的地理位置,中国西藏阿里是目前已知北半球最佳的CMB观测台址。西藏阿里原初引力波探测实验将是北半球第1个地面CMB偏振观测实验,将实现对北半球天区的CMB偏振信号的首次观测,打开北半球对原初引力波探测的新窗口,与南半球的宇宙河外偏振背景成像(background imaging of cosmic extragalactic polarization, BICEP)项目结合,实现对CMB偏振地面观测的全天覆盖^[1]。

原初引力波望远镜主要由转变边缘传感器(transition-edge sensor, TES)、制冷箱、读取系统等组成。TES是THz探测器的1种,THz波段占有CMB以

后宇宙空间近一半的光子能量,该波段在天文学研究中具有不可替代的作用。THz探测器主要分为相干和非相干探测器2大类^[2-3]。随着制备工艺与读取技术的成熟,不需要本振源的连续谱探测器——TES与动态电感探测器(kinetic inductance detector, KID)近年来开始占据主导地位。在低温读取方面, TES早期以时分复用(time division multiplexing, TDM)为主,后来在频分复用(frequency division multiplexing, FDM)方面与KID互相借鉴,由于具有复用系数更高的优势,在较大规模的探测器阵列中,已逐渐取代TDM技术;而在室温读取方面,则普遍采用现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)与数模转换器(digital to analog converter, DAC)、模数转换器(analog to digital converter, ADC)相结合的方式。

原初引力波信号极其微弱,探测原初引力波需要在适应苛刻的噪声、满足精度和稳定性要求下,读取数万个TES以达到灵敏度要求。阿里原初引力波项目可实现4~8 GHz带宽下千量级复用比探测器阵,总和 ≥ 1 万个TES的读取。而目前,我国没有大规模TES阵列读取系统实际应用案例。室温电子学读取系统是原初引力波望远镜所必需的关键环节,也是我国自主研制领域的核心技术。TES读取系统对于信号的

* 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1312704, 2020YFC2201700, 2021YFC2203204);中国科学院对外合作重点项目(114A11KYSB-20200029)

† 通信作者:段然(1985—),男,博士。研究方向:天文终端与探测器技术。E-mail: duanran@nao.cas.cn

收稿日期:2021-11-11

接收与处理有实时性的要求,大规模的探测器阵列也意味着拥有庞大的实时信号流,因此提高读取系统的信号处理速度十分重要.本研究将 FPGA、图形处理器(graphics processing unit, GPU)的处理模式联合应用于 TES 读取系统的信号处理中,取代原先仅用 FPGA 处理信号的模式,提升系统的实时信号处理速度与性能.

当前主流室温电子读取技术是基于一种 FPGA 硬件——开源可配置开放架构计算硬件(reconfigurable open architecture computing hardware, ROACH),它是 2010 年左右被开发的探测器开源读取系统(open source readout, OSR).该技术在天文界最早为加州理工大学亚毫米波望远镜(caltech submillimeter observatory, CSO)所使用,为多波段亚毫米波 KID 相机(multiwavelength sub/millimeter KID camera, MS KIDC)开发了 ADC、DAC 和中频电路系统与之配合^[4].

近些年,随着 GPU 在工业界的高速发展, FPGA 与 GPU 的联合处理模式在射电天文实时终端领域得到了广泛的应用,然而在 TES 数字终端信号处理中 FPGA+GPU 的处理模式还未曾尝试.以往 TES 信号处理系统对信号的处理均是基于 FPGA 进行的,本文在基于 FPGA 的 TES 读取系统信号处理算法的基础上,研究了 FPGA+GPU 的信号处理算法在 TES 信号读取处理中的应用.

1 基于 FPGA 的 TES 读取系统信号处理流程

本章介绍基于 FPGA 的 TES 电子学读取系统的常规信号处理流程^[5].基于 FPGA 的转变边缘传感器读取系统中,信号产生、接收与处理流程如图 1 所示.图 1-a 为信号处理流程,在 FPGA 上对信号进行处理;图 1-b 为信号探测模块,其中超导量子干涉仪(superconducting quantum interference device, SQUID)是一种极灵敏的磁通传感器,可以检测任意能转换成磁通的极端微弱信号,ADC 和 DAC 作为桥梁连接信号探测模块和信号处理模块.

区别于传统射电望远镜电子学系统,例如中国天眼(five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST)电子学系统只接收馈源数据,原初引力波室温电子学系统需要对探测器阵同时进行激励与接收,形成一个闭环,并且不直接探测偏振信号,而是探测 CMB 的 B 模式偏振对闭环电路的相位信号的影响.

实际工作中,信号按照多个通道合成,经过 DAC 后,输出一个由多个频率合成的信号.该信号产生 I 和 Q 这 2 路信号,经过信号探测模块(图 1-b)后由

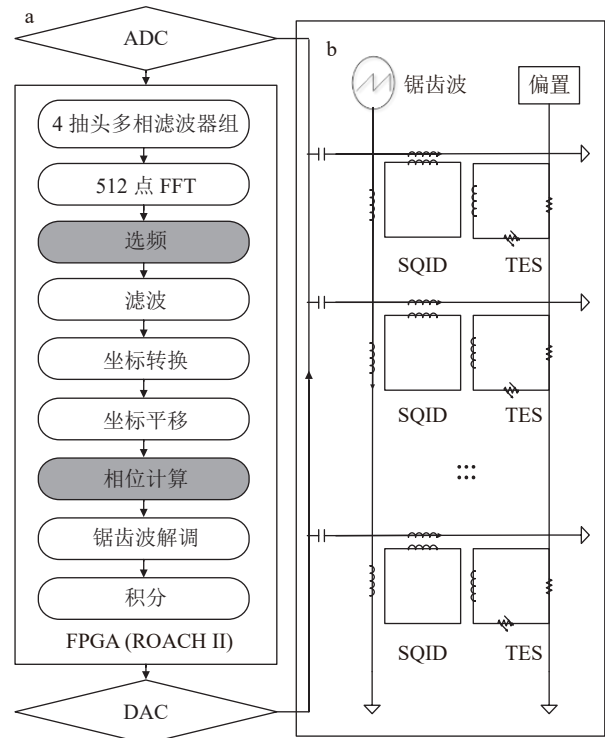


图 1 基于 FPGA 的 TES 读取系统信号处理流程

ADC 进行接收,之后传输到 FPGA 上进行相应的信号处理.由 DAC 输出的信号其相位是一个固定值,锯齿波对信号相位进行调制,作用到信号上便使信号的相位呈周期变化.当 TES 探测到偏振信号时,光子入射导致 TES 电路中磁通发生变化,该变化由 SQUID 探测到并最终传递到由 DAC 发出的频率合成信号上,致使合成信号的相位信号发生抖动^[5].通过在特定周期内对相位信号进行积分,分析该积分值是否发生变化进而判断相位信号是否发生抖动.

图 1-a 还展示了 I、Q 这 2 路信号传输到 FPGA 后的处理过程:信号进入 FPGA 后,先经过多相滤波器组(polyphase filter bank, PFB)和 512 点的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)处理,实现通道化;随后进行通道选择(选频),图 1-a 中所示流程选取了多个频率中的若干个频率通道. I、Q 这 2 路信号分别位于复平面上的实部和虚部,在进行进一步的滤波处理后,求解信号的相位信息.

信号进行滤波处理后,在复平面上得到一段谐振弧,对谐振弧进行拟合求出圆与圆心.由于 FPGA 本身的特性不适合进行非线性运算,不能直接由拟合得到的圆和圆心来获得相位信息,因此,先对圆心进行坐标平移,使圆心与坐标原点重合,再进行坐标转换,使轨迹的起始点位于 x 轴上,随后 FPGA 通过除法运算来求解相位.经过求相位处理后,求出的相位信息 θ 是一个随时间进行周期性变化的正弦信号.对求出

的相位信号进行锯齿波解调和特定周期长度的积分处理后, 将得到一个具体数值, 该值会一直保持不变, 直到 TES 探测到信号时该值发生变化。

由于 TES 探测到的信号可改变读取信号的相位信息, 因此探测到 CMB 的 B 模式偏振信息蕴含在读取信号相位的变化之中。从读取信号中解调出特定频率(选频)的相位信息(相位计算), 是转变边缘传感器原初引力波室温读取信号处理技术研究中的重要一步, 是后续进行锯齿波解调与积分处理, 从而得到 CMB B 模式偏振信号的前提。

本文在基于 FPGA 的转变边缘传感器室温读取系统信号处理算法的基础上, 研究基于 FPGA+GPU 的信号处理算法在 TES 室温信号读取处理中的可行性, 研究在 GPU 中进行快速傅里叶变换、选频与相位计算的过程。

2 基于 FPGA 与 GPU 的 TES 读取系统信号处理流程

第 1 章基于 FPGA 的 TES 室温读取系统信号处理流程中, 由于 FPGA 本身特性的限制以及算法复杂度的原因, 求解相位信息步骤复杂, 执行效率较低。借助 GPU 出色的并行处理能力与灵活的数学处理能力, 对原本复杂的数据处理流程进行优化, 极大地简化了算法的步骤和复杂度, 提高了计算效率。

近些年, 联合 FPGA 与 GPU 的处理模式在射电天文终端领域得到了广泛的应用, 但在 TES 的终端信号处理中还未曾尝试。

本文将部分 FPGA 的信号处理流程置于 GPU 上进行处理, 进而研究联合 FPGA 与 GPU 的信号处理模式在 TES 室温读取信号处理中的可行性, 为西藏阿里原初引力波探测项目大规模 TES 阵列读取系统打下研究基础(图 2)。

图 2-a 为基于 FPGA+GPU 的数据处理流程, 图 2-b 与图 1-b 相同, 均为信号探测模块。图 2-a 中, ADC 和 FPGA 对信号进行数字化处理, 并发出数据包, 进行数据预处理后, 将数据从中央处理器(CPU)传输至 GPU 中进行 FFT 和相位计算(图 2-a 中灰底部分), 最后对数据进行选频(图 2-a 中灰底部分)处理。

通用并行计算架构平台(compute unified device architecture, CUDA)^[6]提供了通用并行计算架构快速傅里叶变换库 CUFFT^[7], 极大地提高了 GPU 进行快速傅里叶变换的能力。因为 GPU 强大的计算能力, 相比 FPGA 更适合进行非线性运算, 原本在 FPGA 中求相位处理需要先进行较为复杂的坐标转换与坐标平移步骤均可省略, 使得整个流程得到简化与优化。

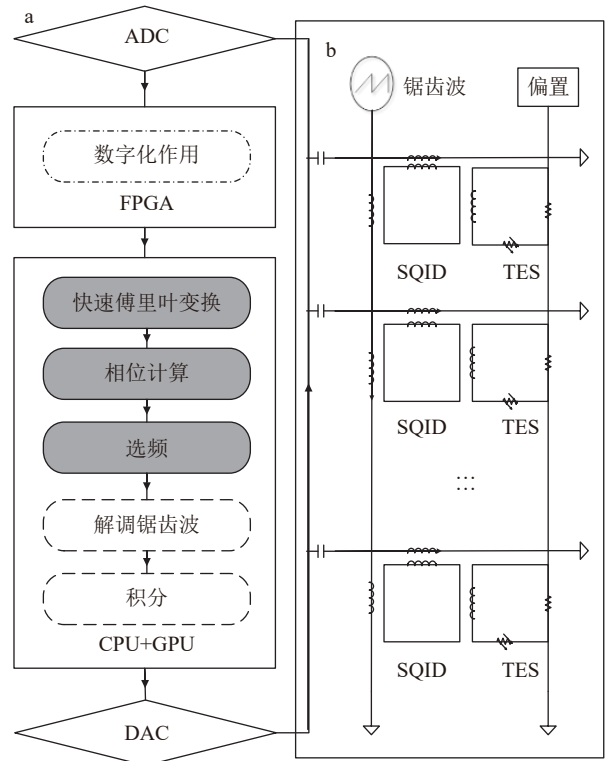


图 2 基于 FPGA+GPU 的 TES 室温读取系统信号处理流程

2.1 信号产生 本套系统中, DAC 工作频率为 4096 MHz, 循环读取 FPGA 数字序列存储模块上的数字序列, 该模块称为查找表(lookup table, LUT), 数字序列称为 buffer, 长度为 2^{19} 。ADC 采样频率为 512 MHz, 读取由 DAC 发出的模拟信号, 并封装成数据包。数字序列 buffer 由式(1)产生, 即

$$f(x) = A \cdot \cos((2\pi f_1 x)/f_s + \varphi(x)) + A \cdot \cos((2\pi f_2 x)/f_s) + A \cdot \cos((2\pi f_3 x)/f_s + \varphi(x)) + A \cdot \cos((2\pi f_4 x)/f_s), \quad (1)$$

式中: A 为 8190/4; 频率 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 分别为 8、128、144 和 160 MHz; $\varphi(x) = \sin((2\pi f_c x)/f_s)$; 采样频率 f_s 为 4.096 GHz; f_c 为 15.625 kHz。

数字序列 buffer 共有 2^{19} 个数值, 即 524288。式(1)中所设置的 4 个频率的信号幅值相同, 其中包含调相信号的频率为 8、144 MHz, 调相信号为 $\sin((2\pi f_c x)/f_s)$, 记为 $\varphi(x)$ 。

为简化硬件复杂度、减少各种不确定性因素的影响, 只采用单路实信号。

图 3 展示了由式(1)产生的 buffer 和 ADC 采样后的数据包中解析出的部分数据。由于数据包中解析出的数据幅度并不具有现实意义, 因此对解析出的数据进行归一化处理, 使最大值为 8190, 再与 buffer 中的数据进行比较。

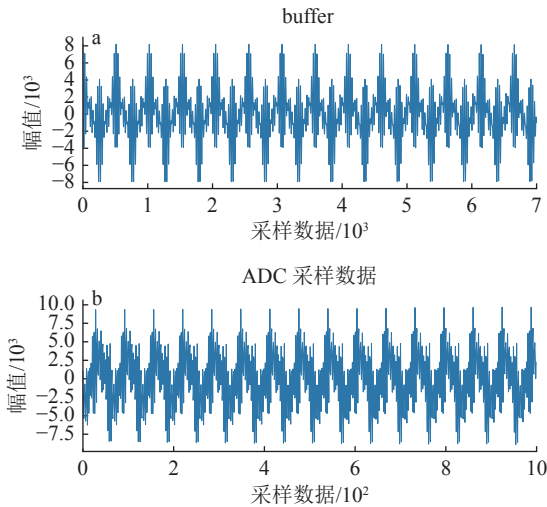


图 3 buffer 与 ADC 采样数据

由图 3 可看出, ADC 采样后的数据与 buffer 中的数据基本一致, 模拟数据成功地完成了数字化. 由于数据经过数字变模拟、模拟变数字等一系列的转换过程, 因此 2 种数据存在一定的差别, 这种差别在误差允许的范围內.

由第 1 章可知, 由于 TES 探测到的信号所改变的是读取信号的相位信息, 因此, 探测到的 CMB 的 B 模式偏振信息蕴含在读取信号相位的变化之中. 从读取信号中解调出特定频率的相位信息, 是 TES 原初引力波室温读取系统信号处理技术研究的重要一步, 也是后续进行调制解调与积分处理, 从而得到 CMB B 模式偏振信号的重要前提.

因此, GPU 算法研究中要选出特定的信号频率, 解调出其中蕴含的调相信息. 对于时域数据, 需要在进行 FFT 之后, 进行频率选择和求相位运算.

GPU 与 CPU 相互配合, GPU 负责处理高度并行的数据处理任务, 如 FFT 和求反正切运算, 运算完的数据从 GPU 传输到 CPU, 并在 CPU 上选取特定的频率及其相位信息.

2.2 FFT 使用 CUDA 提供的 CUFFT 库中的函数进行 FFT 计算. CUFFT 库是英伟达开发的专门用于进行傅里叶变换的函数库, 是 CUDA 为开发人员提供的多种运算库中的 1 个. 其全称为 CUDA fast Fourier transform, 提供了一系列的函数帮助英伟达产品使用者在 GPU 上进行 FFT 的相关运算.

对式(1)产生的数字序列 buffer 和 ADC 采样后的数据分别进行 1024 点 FFT, 结果如图 4 所示. 由于本实验只对单路实信号进行 FFT, 因此在频谱上频率相对中轴线呈对称分布, 中轴线右侧频谱为镜像值, 非实际存在的频率值, 故图 4 在频谱上只展示一半的计算结果.

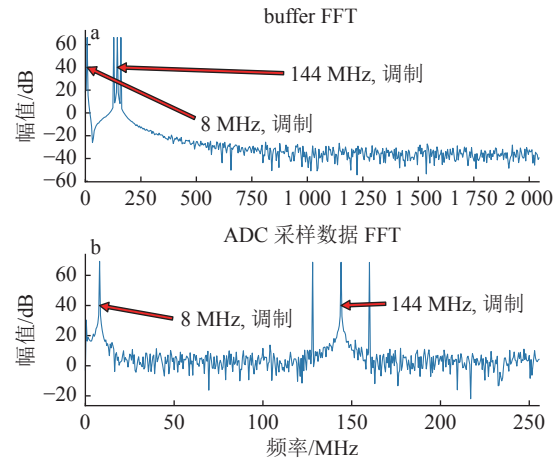


图 4 buffer 与 ADC 采样数据的 FFT 结果

图 4-a 为数字序列 buffer 进行 1024 点 FFT 后的结果. 快速傅里叶变换后求出式(1)中设置的 8、128、144 和 160 MHz 这 4 个频率. 图 4-a 中红色箭头指向频率 8 和 144 MHz, 是式(1)中进行相位信号调制的频率.

图 4-b 为 ADC 采样的数据进行 1024 点 FFT 后的结果, 采样信号为数字序列 buffer 经过 DAC 后转换成的模拟信号.

图 4-a 与 b 的频率精度差来源于 DAC 与 ADC 不同的采样频率. 由 2.1 节可知, DAC 的工作频率为 4.096 GHz, 而 ADC 的采样频率为 512 MHz, 因此数字序列 buffer 与 ADC 采样的数据进行 FFT 后的结果频率精度存在 8 倍的差距.

与图 4-a 中相同, 图 4-b 中求出式(1)中设置的 4 个频率值, 并且 4 个信号的频率值幅度与图 4-a 中基本一致, 单位为 dB. 由图 4-b 可明显看出, 红色箭头指向的 8 与 144 MHz 频率明显区别于 128 与 160 MHz 频率, 存在相位信号调制现象.

在真实场景中, 激励信号的频率数量为 10^3 量级, ADC 采样数据的 FFT 结果数量远 >4 , 对求出的所有频率值逐个进行分析工作量庞大, 难以进行, 因此在数量众多的频率中选取更有科学研究价值的频率值十分重要.

2.3 选频与求相位处理 由于 TES 室温读取电子学系统中激励信号一般设置为 1712 个, 因此真实场景中 ADC 采样数据做 FFT 后, 频率数量为 10^3 量级. 在频率数量众多, 并且数据源源不断读入并做实时 FFT 的情况下, 选取特定频率值的信号进行分析与存储十分重要.

由 2.2 节可知, 图 4 中 FFT 结果共有 4 个频率值, 其中 8 和 144 MHz 带调制信号, 128 和 160 MHz 不带调制信号. FFT 和求相位运算均是在 GPU 上进行的,

随后数据传输至 CPU 上, 进行特定频率的选择等操作。

在 CPU 上分别选择带调制信号的频率 8 和 144 MHz, 以及不带调制信号的频率 128 与 160 MHz, 此时各频率信号均已在 GPU 上完成求相位计算, 因此确定将要选取的频率值后便可得出该频率值的相位信息。

真实场景中, 终端系统处理实时数据, 选取频率后得到的相位是一种数据流, 称为相位流(图 5)。

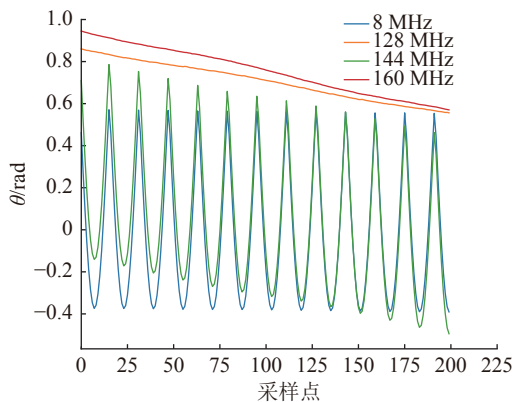


图 5 求各频率的相位流

图 5 中, 蓝色和绿色曲线分别为 8 和 144 MHz 信号的相位流; 橙色和红色曲线分别为 128 与 160 MHz 信号的相位流。带调制频率与未调制频率的相位信息差别明显, 带调制信号的相位流呈明显周期性变化。

由式(1)可知, 8 和 144 MHz 拥有相同频率的调制信号。可判断, 解调出的 2 个频率的相位信号周期基本一致, 没有调制的 128 与 160 MHz 解调出的相位流基本呈一直线, 无明显周期性变化, 与设置基本一致。

然而, 144 与 8 MHz 信号的相位流相比较具有明显的倾斜度, 同时, 128 与 160 MHz 信号的相位流也呈现一定的倾斜。并且, 128、144 和 160 MHz 信号的相位信号倾斜度随着频率的增加而增加。以上结果暗示 8 MHz 信号的相位也可能具有一定的倾斜, 但在当前尺度下并不明显。

综合分析可知: 1) 无论有无调相, 高频信号的相位流斜率高于低频信号的相位流斜率; 2) 基于现有设置, 由于发射端 DAC 与接收端 ADC 驱动的时钟属于不同的来源, 没有锁定在共同的时钟源上, 导致二者不同步, 从而造成信号的频飘。频飘幅度随着频率的增加而增大。

3 结论

本文在原有的基于 FPGA 的 TES 读取系统信号处理算法的基础上, 研究了基于 FPGA+GPU 的信号处理算法在 TES 室温信号处理中的应用。在 TES 的数字终端信号处理中, 这种处理模式还未曾得到过尝试。

根据 TES 原初引力波室温读取系统信号处理的需求, 利用 ADC 和 FPGA 对模拟信号进行数字化处理, 随后利用 GPU 对数字化后的信号进行 FFT、求相位和选频处理, 充分利用了 GPU 的多线程特性与灵活的数学处理能力。将 FPGA 与 GPU 进行连接, 实现硬件与软件的协同处理, 进一步研究联合 FPGA 与 GPU 模式在 TES 终端信号处理中应用的可行性。

原来基于 FPGA 的 TES 室温读取系统信号处理流程, 需要对信号进行坐标转换与坐标平移后才可求解特定频率信号的相位信息。现在基于 GPU 利用通用并行计算架构, 不需要经过复杂的坐标转换与坐标平移便可对信号进行求相位处理, 极大地简化了算法的复杂度, 提升了算法的计算效率。

除了算法复杂度的优化外, FPGA+GPU 的模式可在 GPU 集群上灵活调整 FFT 运算长度, 从而满足不同科学目标对时间分辨率的要求。例如, 与快速射电暴等暂现源相比较, 原初引力波探测对时间分辨率的要求更高, 可以通过 GPU 编程调整 FFT 运算长度, 提高时间分辨率, 相比而言, 只用 FPGA 的模式不需要更改 FPGA 上电子元件的排布。由此可见, FPGA+GPU 的模式比基于 FPGA 的处理模式更加灵活, 系统可灵活调整、升级和拓展, 并且在 FPGA 与 GPU 之间的数据传输过程中可对数据进行复制, 分发到科学目标不同的 GPU 集群上进行不同的数据处理, 达到充分利用望远镜观测时间的目的。

4 参考文献

- [1] 张新民, 苏萌, 李虹, 等. 原初引力波与阿里探测计划[J]. 现代物理知识, 2016, 28(2): 3
- [2] 李婧, 张文, 缪巍, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测技术发展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 122
- [3] ZMUIDZINAS J, RICHARDS P L. Superconducting detectors and mixers for millimeter and submillimeter astrophysics[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(10): 1597
- [4] DUAN R, MCHUGH S, SERFASS B, et al. An open-source readout for MKIDs[C/OL]//Proceedings of SPIE: the international society for optical engineering 7741, 2020:1 [2021-10-15]. <https://doi.org/10.1117/12.856832>
- [5] GARD J D, BECKER D T, BENNETT D A, et al. A scalable readout for microwave SQUID multiplexing of transition-edge sensors[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2018, 193(3/4): 1
- [6] NICKOLLS J, BUCK I, GARLAND M, et al. Scalable parallel programming with CUDA[J]. Queue, 2008, 6(2): 40
- [7] NVIDIA. cuFFT: CUDA Toolkit documentation [EB/OL]. [2021-06-08]. <https://docs.nvidia.com/cuda/cuffit/index.html>

Signal processing of TES readout system based on GPU

SHEN Mengping^{1,2)} DUAN Ran¹⁾ ZHANG Haiyan^{1,3)} ZHANG Laiyu²⁾
MA Xiaoyun¹⁾ LIU Fei¹⁾ LI Di¹⁾

(1)National Astronomical Observatories Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory of Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China; 2)University of Chinese Academy of Sciences, School of Astronomy and Space Science, Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China; 3)Hebei Province Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, 050081, Shijiazhuang, Hebei, China)

Abstract To meet requirements of signal processing of transition-edge sensor (TES) readout system, for field programmable gate array (FPGA) signal processing mode, signal simulation is conducted based on graphics-processing-unit (GPU), compute-unified-device-architecture (CUDA) and other platforms. Signal processing mode of combined FPGA and GPU is applied to signal readout and processing of TES, simplifying complexity of algorithm execution and improving flexibility of signal processing system. The feasibility to apply this processing mode to primordial gravitational waves detection experiment in Ali, Tibet, China was verified.

Keywords signal processing; GPU; FPGA; TES; primordial gravitational waves

【责任编辑:陆有忠】

2022 年首都前沿学术成果报告会（化学生物学） 在北京师范大学成功举办

为服务北京国际科技创新中心和高水平人才高地建设,充分发挥学术交流在推动科技创新、服务区域经济社会发展方面的作用,突出前沿科技、交叉融合,促进高水平科技自立自强,2022年4月28日,首都前沿学术成果报告会(化学生物学)在北京师范大学成功举办。中国科学院院士、北京师范大学教授、北京化学会理事长方维海,中国科学院院士、清华大学教授、中国化学会超分子化学专业委员会主任王梅祥出席报告会。北京市科学技术协会党组成员、副主席孟凡兴,北京师范大学化学学院院长范楼珍教授参加会议并致辞,报告会由北京化学会秘书长孙根班教授主持。

报告会邀请清华大学化学系主任、Organic & Biomolecular Chemistry 副主编刘磊教授,北京大学教授、交叉学位分会主席、中国化学会化学生物学专业委员会主任、ACS Chemical Biology 执行主编陈鹏,北京大学教授、Chemical Science 副主编焦宁,国家纳米科学中心研究员、纳米生物效应与安全性实验室副主任李乐乐作报告,展示目前国内化学生物学前沿领域的高水平研究成果,深入讨论相关前沿技术的攻关难点和产业化问题。报告会邀请方维海院士,王梅祥院士,北京师范大学教授、ACS Sensors 副主编毛兰群,北京师范大学教授、北京化学会理事范楼珍,北京师范大学教授、北京化学会理事和监事长卢忠林参加讨论并与报告人交流。《北京师范大学学报(自然科学版)》编辑部主任范林参加会议。

学术成果报告交流环节由卢忠林和毛兰群教授分别主持。报告人刘磊教授、陈鹏教授、焦宁教授、李乐乐研究员分别作了“使用化学方法合成蛋白质”“活细胞化学反应的开发与应用”“活性分子修饰改造及创新药物发现”“时空选择性分子成像”主旨报告。这4个报告是经过文献数据定量分析和同行评议,从数千篇论文中遴选出来的,展示了化学生物学最前沿的进展。与会专家与报告人,报告人之间,线上及现场观众与报告人进行了充分的交流互动,现场气氛热烈。

本次报告会由北京市科学技术协会主办,由北京化学会、北京师范大学化学学院、北京师范大学科协(筹)、北京科技社团服务中心承办,由《北京师范大学学报(自然科学版)》、北京科学技术期刊学会协办。本次报告会全程在线直播,超2万人次线上观看,关注广泛,反响热烈,充分发挥了北京高端领军人才资源优势,为链接产业界与学术界的合作交流搭建了重要平台。