

引用格式:李浩,罗近涛,潘之辰,等.一种基于 DSPSR 和 GPU 的脉冲星相干消色散基带数据处理技术[J].  
时间频率学报, 2021, 44(3): 204-214.

# 一种基于 DSPSR 和 GPU 的脉冲星相干消色散 基带数据处理技术

李浩<sup>1,2</sup>, 罗近涛<sup>1,3</sup>, 潘之辰<sup>4</sup>, 孙鹏飞<sup>1</sup>, 姜金辰<sup>4,5</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;

4. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101;

5. 北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 相比于非相干消色散, 相干消色散具有色散消除更彻底、可保留原始数据相位、时间分辨率信息等优势, 但同时具有运算量大、数据处理耗时长等问题。为实现脉冲星基带数据相干消色散处理, 对数据处理流程进行加速, 开发一种以 DSPSR (digital signal processing software for pulsar) 和 GPU (graphics processing unit) 为数据处理核心的脉冲星数据处理技术。利用高速共享内存实现对环形缓存区两路极化基带数据的读取, 结合图形处理器高性能计算技术, 使用 DSPSR 对基带数据进行相干消色散处理。数据处理结果表明, 相比于多线程非相干消色散系统, 此数据处理技术在数据处理速度方面具有更好的优越性, 并可获得更精细的脉冲轮廓。

**关键词:** 脉冲星; 相干消色散; 脉冲星数字信号处理程序包; 图形处理器; 脉冲星分布式采集和分析处理软件

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-03-0204-11

## A coherent de-dispersion processing technology on pulsar baseband data based on DSPSR and GPU

LI Hao<sup>1,2</sup>, LUO Jin-tao<sup>1,3</sup>, PAN Zhi-chen<sup>4</sup>, SUN Peng-fei<sup>1</sup>, JIANG Jin-chen<sup>4,5</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China;

3. Key Laboratory of Precise Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

4. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

5. Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Compared with incoherent de-dispersion, coherent de-dispersion has the advantages of more thorough dispersion elimination, and retaining the original phase information and the time resolution of the

收稿日期: 2021-04-21; 接受日期: 2021-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1931128; 11973046; 91736207; 42030105); 国家重点研发计划资助项目 (2017YFA0402602)

original data. However, it comes with challenges such as the massive computations and the longer data processing time. In order to realize a coherent de-dispersion processing of baseband data and accelerate the data processing, a pulsar data processing pipeline using DSPSR (the digital signal processing for pulsars) and GPU (graphics processing unit) as the data processing core is developed. Firstly, through the high-speed shared memory, the circular buffer is used to read the two-polarization baseband data. Combined with the high-performance computing technologies based on the graphics processor, the DSPSR is used to perform coherent de-dispersion, and folding process on the baseband data. Results from this pipeline show that compared with the multi-threaded incoherent de-dispersion system, this data processing technology has advantages in data processing speed and obtaining finer pulse profiles.

**Key words:** pulsar; coherent achromatic dispersion; digital signal processing for pulsars (DSPSR); graphics processing unit (GPU); processing software for pulsar distributed acquisition and data analysis (PSRDADA)

## 0 引言

脉冲星信号在传播过程中由于受到星际介质 (interstellar medium, ISM) 影响产生色散现象, 导致观测到的脉冲轮廓展宽, 需采用消色散技术对脉冲星数据进行处理。脉冲星消色散方法主要分为非相干消色散和相干消色散两种。非相干消色散在时域进行, 多通道滤波器将脉冲星信号等分为若干通道的窄带信号, 再将每个通道的信号经过平方检波后在时域上对齐相加, 补偿因色散而产生的时间延迟, 但是同一通道内色散无法消除<sup>[1]</sup>。相干消色散核心算法为快速傅里叶变换, 将时域数字信号变换到频域, 再使用星际介质传输函数进行处理, 消除整个通带内的色散。相比于非相干消色散, 相干消色散可消除带内色散, 效果更彻底, 并能够保留原始数据的相位关系、时间分辨率。已有学者研究表明, 在一定的观测频率之内, 相干消色散的效果优于非相干消色散<sup>[2]</sup>。

目前主流脉冲星数字终端系统由现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA)、图形处理器 (graphics processing unit, GPU)、中央处理器 (central processing unit, CPU) 三部分组成, FPGA 平台主要用于 ADC (analog to digital converter) 控制、数据流控制和信号预处理, GPU 负责消色散等核心算法的完成, CPU 用于数据传输、逻辑控制和文件读写<sup>[3]</sup>。FPGA 端输出的基带数据可保留脉冲星信号原始信息, 结合相干消色散技术可开展超高时间分辨率脉冲星辐射特性研究, 对于持续时间极短的快速射电暴 (fast radio burst, FRB) 搜寻以及脉冲星超短时标脉冲等研究有着重要意义。以中国 FAST 500 m 望远镜<sup>①</sup>、澳大利亚 Parkes 64 m 望远镜<sup>[4]</sup>、德国 100 m 口径 Effelsberg 望远镜<sup>[5]</sup>等为代表的大口径射电望远镜以脉冲星观测为主要科学目标, 宽带宽、超高时间分辨率和高频率分辨率数字终端技术成为发展趋势。

国内脉冲星数字化终端系统的研制已取得一系列进展。中国科学院新疆天文台依托 25 m 射电望远镜和 VLBI 记录终端 MK5A 系统, 开展脉冲星相干消色散观测系统研究<sup>[6]</sup>。中国科学院云南天文台以 ROACH2 平台和脉冲星数字信号处理程序包 (digital pulsar signal processing for pulsars, DSPSR) 为数据处理核心构建相干消色散观测系统<sup>[7]</sup>。中国科学院上海天文台 65 m 射电望远镜配备脉冲星数字化终端 (digital backend system, DIBAS), 同时具备相干与非相干消色散功能<sup>[3]</sup>。中国科学院国家天文台面向 FAST 开发了基于 ROACH2 平台的非相干数字化脉冲星终端<sup>[8]</sup>。中国科学院国家授时中心 40 m 射电望远镜 HRT 脉冲星观测系统使用 FPGA+GPU 架构, 可实现非相干消色散与相干消色散两种观测模式<sup>[9]</sup>。国际上, 美国 NRAO (National Radio Astronomy Observatory) 在 GUPPI (green bank ultimate pulsar processing

① <http://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/>

instrument) 系统的基础上, 研制硬件平台和性能指标更为先进的 VEGAS (versatile GBT astronomical spectrometer), 基本系统由 ADC, ROACH 系列 FPGA 平台与 GPU 处理集群组成<sup>①</sup>。德国 Effelsberg 射电望远镜 PSRIX 后端采用 ROACH 系列平台实现, GPU 集群进行数据处理<sup>[10]</sup>。澳大利亚 Parkes 射电望远镜的 BPSR (Berkeley Parkes Swinburne Recorder) 脉冲星数字终端系统采用 FPGA 平台和 CPU+GPU 架构, 数据处理后端采用开源软件 PSRDADA (processing software for pulsar distributed acquisition and data analysis) 实现数据缓冲区、DSPSR 实现实时相干消色散和 RFI 处理<sup>[11]</sup>。

结合相干消色散脉冲星观测系统发展趋势, 本文基于 CPU+GPU 架构, 开发一种以 GPU 和 DSPSR 为数据处理核心的相干消色散基带数据处理技术。利用高速共享内存原理实现最高两路极化基带数据输入, 后续解码、消色散、折叠等数据处理流程采用脉冲星数字信号处理程序包 DSPSR 结合 GPU 加速技术进行处理。数据处理结果以 PSRFITS 格式存储。面向 FAST 脉冲星观测系统海量数据相干消色散处理需求, 将此数据处理流程在 FAST 基带数据服务器集群上进行部署测试, 验证流程的正确性与可行性, 为后续宽带实时相干消色散脉冲星观测系统的开发提供技术储备。

## 1 相干消色散原理

脉冲星信号的色散效应是脉冲星辐射的电磁波在传播过程中, 由于受到星际介质影响, 不同频率的电磁波在星际介质中的传播速度不同, 高频分量先于低频分量到达, 导致接收到的脉冲轮廓展宽。为了消除色散效应的影响, 需要对数据进行消色散处理。相干消色散首先通过快速傅里叶变换 (FFT) 将时域信号变换到频域, 然后在频域内利用为星际介质函数 (Chirp 函数) 进行消色散处理, 最后经过反傅里叶变换 (IFFT) 变换到时域, 进行折叠等后续处理, 实现将不同频率成分的信号对齐到某一个频点。星际介质函数即传输函数  $H(f_0 + f)$  具体表达式<sup>[12]</sup>为

$$H(f_0 + f) = \exp \left\{ +i \frac{2\pi D}{(f + f_0)f_0} D_M f^2 \right\}, \quad (1)$$

式(1)中,  $D$  为星际介质色散常量,  $D_M$  (dispersion measure) 为星际介质的色散量, 其表达式为

$$D_M = \int_0^d n_e dl, \quad (2)$$

式(2)中,  $n_e$  为传播路径上的平均电子数密度,  $d$  为信号在星际介质中传播距离。星际介质色散常量  $D$ :

$$D \equiv \frac{e^2}{2\pi m_e c} \approx 4.15 \times 10^3 \text{ (MHz)}^2 \cdot \text{pc}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}. \quad (3)$$

式(3)中,  $m_e$  为电子质量。故未经 ISM 的脉冲星信号傅立叶变换  $V(f)$ <sup>[13]</sup>为

$$V(f_0 + f) = V_{\text{ISM}}(f_0 + f) H^{-1}(f_0 + f) T(f), \quad (4)$$

式(4)中,  $V_{\text{ISM}}$  为经过 ISM 的脉冲星信号傅里叶变换,  $T(f)$  为实际观测中滤波器带内幅度起伏的补偿函数。

## 2 DSPSR+GPU 数据处理技术

脉冲星数据进行相干消色散处理需进行大量的浮点运算, 相比于非相干消色散算法, 对计算机的性

① <http://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/>

能和运算能力要求更高,随着图形处理器高性能计算的发展,数字化相干消色散脉冲星终端技术研究成为新的趋势。本文构建的相干消色散数据处理流程如图 1 所示,利用高速共享内存,即环形缓存区 (ringbuffer) 实现基带数据的读写,包括数据输入、数据处理、数据输出 3 个部分。

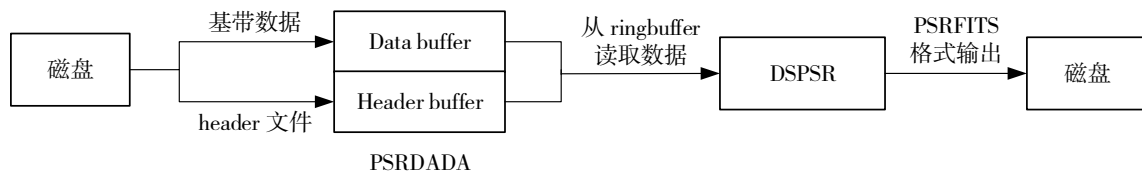


图 1 数据处理流程

首先从磁盘中读取基带数据、header 文件并写入环形缓存区,环形缓存区由两部分组成: Data buffer 和 Header buffer, Data buffer 用于存放基带数据, Header buffer 用于存放观测信息以及基带数据基本信息。然后 DSPSR 从环形缓存区读取基带数据和对应的信息,进行相干消色散、折叠等后续处理,并将处理结果存入磁盘。

## 2.1 共享内存技术

共享内存是 Unix 系统下一种高效的多进程间通信 (inter-process communication, IPC) 方式,多用于同一程序不同进程间的数据传输。进程可直接对内存进行访问、读写,不需要进行数据拷贝,是连接到共享内存的多个进程间共享和传递数据的有效方式。

共享内存中的数据可被连接到此共享内存的所有进程读取,此时进程间数据传输不再通过内核,可有效减少系统调用时间,提高数据传输效率。主流的共享内存实现方式有跨进程间通讯的基于 SYS V 的共享内存、基于 POSIX mmap 文件映射共享内存和基于 DMABUF 框架,可跨设备间通讯的共享内存两大类<sup>[4]</sup>。

脉冲星终端更宽带宽、更高时间分辨率的发展趋势,面临海量数据高速传输技术难题。FAST 19 波束接收机在 8 bits 采样下基带数据数据量为 38 Gbit/s, PSRFITS 格式数据量为 3 040 Mbit/s (4 k 通道, 50  $\mu$ s, 8 bits)<sup>[3]</sup>,海量数据快速处理成为基带数据处理难题,共享内存高效数据传输的优势,是解决海量基带数据处理的途径。

## 2.2 PSRDADA 简介

PSRDADA 是用于脉冲星基带记录的开源软件项目,提供灵活且易于管理的环形缓存区 (ringbuffer) 实现数据读写。可通过基于文本的套接字接口来控制读、写程序,以实现从 ringbuffer 中将数据写入磁盘阵列、将数据发送到节点阵列以及直接在 ringbuffer 中处理数据<sup>①</sup>。

在 PSRDADA 的逻辑中,环形缓冲区通常有一个指向 ringbuffer 中可读数据的读指针和一个指向可写缓存区的写指针,通过控制读、写指针实现缓冲区数据的输入和输出。在 PSRDADA 的具体实现中,写程序创建并锁定环形缓存区后,未被程序读取的数据区域定义为使用区域,通过将已读取数据区域标记为已清除,成为新的未使用区域且可被写程序识别,来构成逻辑上的循环。

## 2.3 脉冲星数字信号处理程序包

DSPSR 是一款开源、面向对象的数字信号处理软件包,可以选择性地利用多核处理器和通用图形处理单元进行射电脉冲星数字信号处理,旨在提高算法和数据的可移植性<sup>[13]</sup>,支持 CPSR, FITS, Mark5 等多种数据格式。DSPSR 还可实现多种模块化算法:如相干消色散、生成滤波器组、全极化检测、格式

① <http://psrdada.sourceforge.net/>

转换等。数据结果以 PSRFITS 格式输出, 可用于 PSRCHIVE 等软件进行后续数据处理。

DSPSR 通过共享内存区, 可直接从 RAM 中读取脉冲星数据。并可结合 GPU 加速特性进行并行运算, 提升消色散等数据处理效率。

## 2.4 GPU 加速技术

GPU 即图形处理器, 配备有高速内存以及大量算术逻辑单元 (arithmetic and logic unit, ALU), 是专为执行大量几何计算而设计的一种高度并行化多核处理器。相比于 CPU 采用串行架构, 功能模块较多, 能适应复杂运算环境的特点, GPU 可执行大规模并发计算, 拥有更强大的浮点运算能力。

CUDA (compute unified device architecture) 是 NVIDIA 公司推出的软硬件通用计算设备架构<sup>[15]</sup>, 采用标准 C 语言的拓展作为编程语言, 提供大量高性能计算指令。利用 CUDA 进行编程可采用新的计算架构来使用 GPU 提供的硬件资源, 使线程的创建和调度所占用的开销大大减少, 从而提升程序的运算效率。

GPU 的逻辑架构包括 thread, block 和 grid 三个部分, 如图 2 所示, GPU 执行计算可调用的最小单位为 thread, 数个 thread 共同组成一个 block, 一个 block 中的 thread 共用同一块共享内存, 并可快速实现数据同步。在物理层, GPU 硬件的核心组件为流式多处理器 (streaming multiprocessor, SM)。SM 资源主要包括 CUDA 核、共享内存、寄存器、乘加器等, 可以并行执行数百个线程, 资源数量越多则 GPU 的并行计算能力越高。

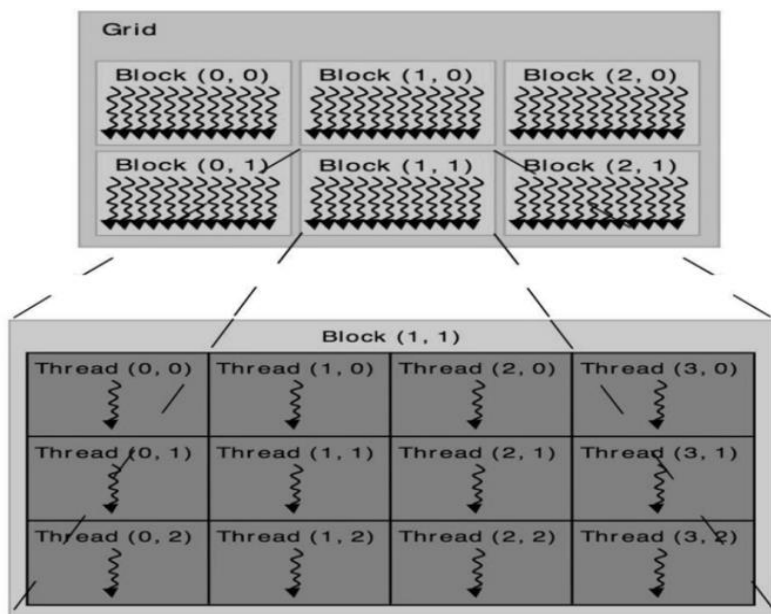


图 2 GPU 线程结构

脉冲星数据处理流程中, 消色散所需时间占比最大, 是影响数据处理效率最主要的因素<sup>[16]</sup>。随着 GPU 的可编程能力及并行处理能力不断提高, 应用范围迅速扩展, 可利用 GPU 高性能并行计算特性来满足海量基带数据的实时处理需求。本文利用 DSPSR 结合 GPU 加速技术对相干消色散算法进行加速, 提高数据处理效率。

## 3 数据处理

本流程对基带数据的处理可分为基带数据的读取与写入、调用 DSPSR 读取数据、相干消色散处理、

折叠、PSRFITS 格式输出等 5 个步骤。基带数据的读写通过编写程序实现，通过在编译时添加相应的数据格式来实现 DSPSR 对 ringbuffer 中数据的读取，相干消色散、折叠等处理通过调用 DSPSR 实现，数据处理结果由 DSPSR 以 PSRFITS 格式保存。为提高数据处理速度，使用 GPU 对 DSPSR 的数据处理进行加速。

### 3.1 数据处理原理

在本数据处理流程中，环形缓存区为基带数据读写的接口，包含指针、唯一标识符（KEY）、内存块大小、内存块数量 4 个参数。这 4 个参数中，指针指向未使用的环形缓冲区句柄，通过此指针来实现对共享内存的访问，ringbuffer 的大小由内存块大小和内存块数量共同决定。程序通过指定命令及以上参数来对 ringbuffer 进行创建、连接、锁定、读取、重置等操作。如图 3 所示，对 ringbuffer 的使用以及数据处理流程步骤如下：

① 创建 ringbuffer，通过设置内存块大小以及内存块数量来控制 ringbuffer 大小，并为其指定唯一标识符 ‘KEY’。

② 写程序通过唯一标识符 ‘KEY’ 连接并锁定 ringbuffer，此时 ringbuffer 仅允许当前写程序进行访问。

③ 写程序通过命令行参数所指定的路径与文件名，读取 header 文件与基带数据文件，并对 ringbuffer 进行写操作。

④ 写程序通过判断是否读取到文件末尾以保证文件的连续读取，直至所有文件读取完毕。

⑤ DSPSR 通过唯一标识符 ‘KEY’ 连接并锁定到 ringbuffer，对基带数据进行读取并进行后续相干消色散、折叠等处理，并输出结果文件。此时 ringbuffer 仅允许当前读程序（DSPSR）进行访问。

⑥ 全部数据处理完成后，写程序会返回写入 ringbuffer 中基带数据文件总数、总大小以及平均传输速度到屏幕，然后通过对 ringbuffer 进行刷新，以释放内存。

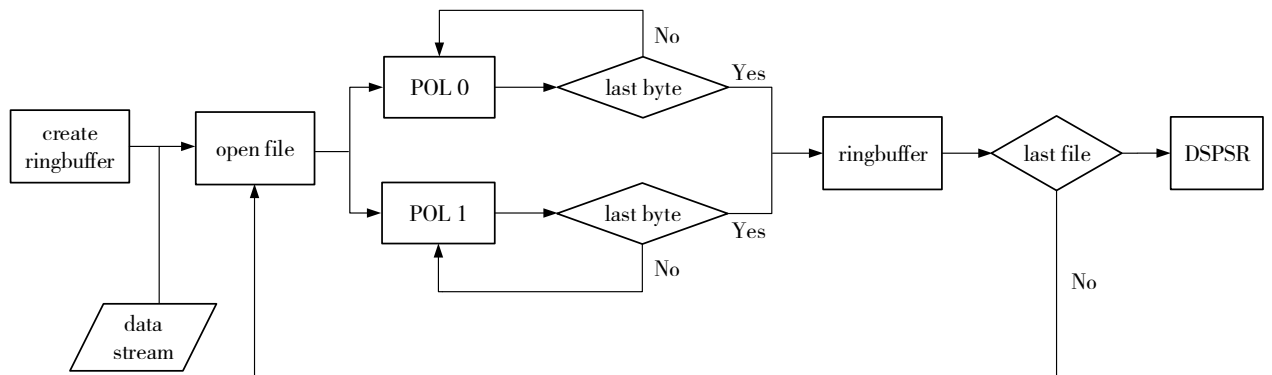


图 3 数据读取原理

处理两路基带数据时，需保证两路数据文件的数量、每个文件大小分别对应相等，目前实现两路极化各 2 048 个文件输入，根据服务器内存配置，可调整文件输入数量上限。在数据处理服务器内存容量允许的情况下，可通过指定不同的标识符 ‘KEY’ 创建多个 ringbuffer 来同时进行不同数据的读写操作。

### 3.2 数据处理方式

根据 pipeline 处理数据要求，使用 ringbuffer 前，需创建脉冲星观测信息文本文件，文件中包括观测频率、射电源名称、观测模式、极化、通道、带宽、中心频率、采样比特数、台站信息、数据大小等参数信息，并对参数信息根据实际观测情况进行修改，再将基带数据文件名按照指定格式保存到文本文件中。

依据 3.1 节数据处理原理，首先创建指定大小的 ringbuffer，写程序根据 ‘KEY’ 值使用指定命令连

接到 ringbuffer, 将 header 文件及数据分别写入 header buffer 和 data buffer 中, 并输出 header 文件内容到屏幕。然后使用 DSPSR 相关命令读取 ringbuffer 中数据, 进行相干消色散、分通道、折叠以及 PSRFITS 格式输出等处理。通过修改 DSPSR 命令参数调整图形处理器以及中央处理器线程数的使用, 并对通道数、输出文件名及路径、积分时间等数据处理信息进行调整。所使用的脉冲星历文件由 Psrcat 软件生成, 采用 Tempo2 生成预报多项式进行折叠。最后刷新 ringbuffer, 清空共享内存区中数据。

为测试、验证数据处理流程的可行性与准确性, 在 FAST 基带数据服务器集群上安装配置此流程, 并使用 FAST 对脉冲星 PSR J0534+2200、PSR J1939+2134 观测所得的基带数据进行测试处理。

## 4 结果分析

本文所处理的基带数据观测信息为: 中心频率 1 250 MHz、带宽 500 MHz、双极化、8 比特采样。首先, 分别采用 3.2 节的数据处理方式和 DSPSR CPU 多线程方式对数据进行处理, 记录处理 1 s 观测时长的数据量所需时间, 结果如表 1 所示。根据 FAST 基带数据服务器集群配置信息, 本文介绍的数据处理流程处理 8 比特采样、观测时长 1 s 的双极化基带数据, 所需时间大约为 0.8 s, 与 CPU 模式下调用 32 线程处理时间 5 s 相比, 速度提升约 6.25 倍。FAST 基带数据服务器配置信息如表 2 所示。

表 1 数据处理信息和所需时间

观测时长/s	极化	方式	通道	所需时间/s
1	双极化	CPU (32 线程)	1 024	约 5
1	双极化	GPU	1 024	约 0.8

表 2 FAST 基带数据 GPU 配置信息

设备	参数
CPU	Inter(R) Xeon(R) CPU E5-2680@2.50 GHz
CPU Cores	12
GPU	TITAN XP
Global Memory	12 190 MB
Max threads/block	1 024
Max threads/core	2 048
FFTW	fftw-3.3.8
CUDA	Driver/Runtime version 9.0/9.0
CUDA Capability Major	6.1

其次, 使用 3.2 节的数据处理方式对 PSR J0534+2200 和 PSR J1939+2134 的总观测时长基带数据进行相干消色散处理, 处理结果如图 4 至图 7 所示。同时对 PSR J1939+2134 基带数据进行非相干消色散处理, 结果如图 8 所示。PSR J0534+2200 和 PSR J1939+2134 经过相干消色散处理后的数据信噪比分别

为 16.677 和 1 270.176，可以利用 Tempo2 和 PSRCHIVE 对数据进行计时等研究工作。

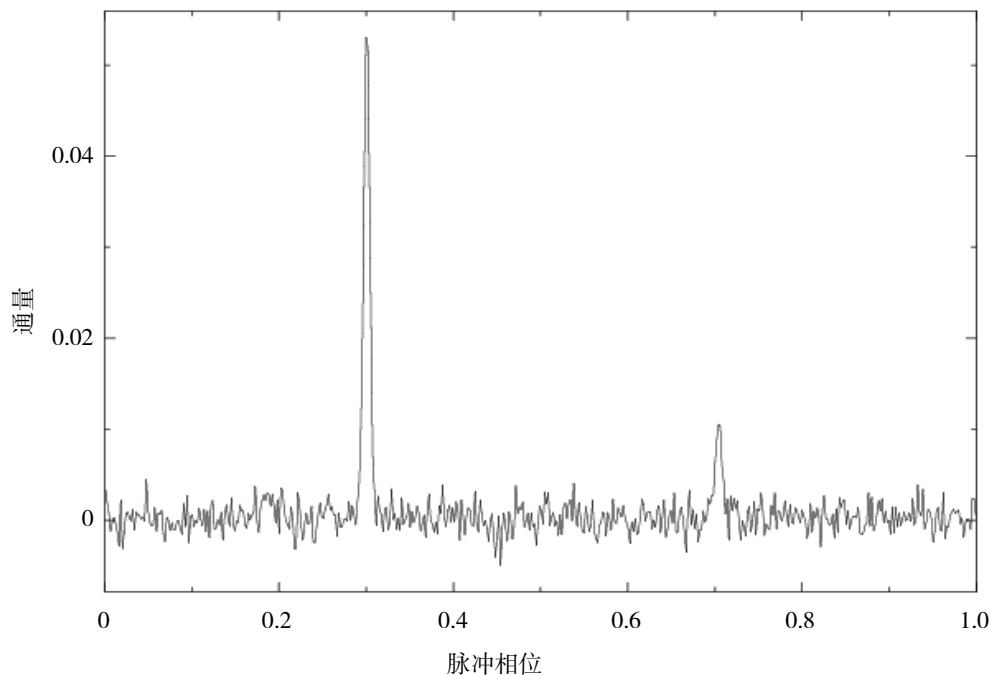


图 4 PSR J0534+2200 相干消色散脉冲轮廓图（中心频率 1 250 MHz，带宽 500 MHz，双极化）

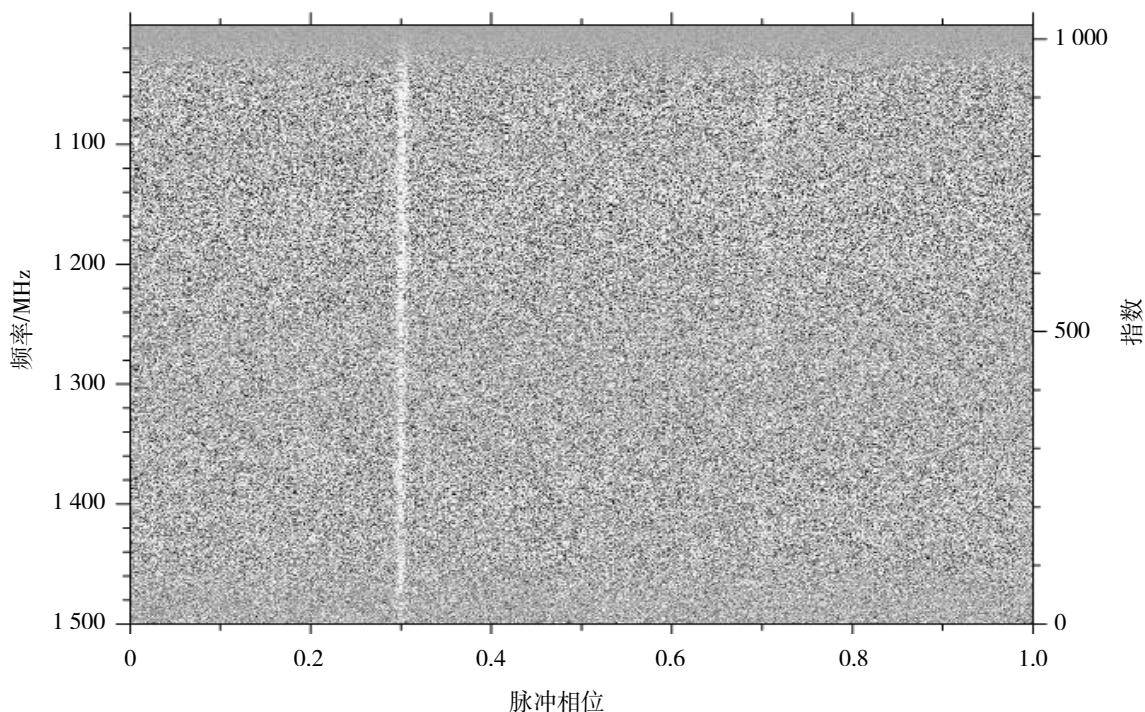


图 5 PSR J0534+2200 频率—相位图

从图 4 中可清晰看到 PSR J0534+2200 脉冲轮廓的两个主成分：分别位于相位 0.3 和 0.7 附近的主脉冲和中间脉冲。从图 5 的频率—相位图中可以看到经过相干消色散处理不同的通道已经对齐，消除了色散效应的影响。图 6 为 PSR J1939+2134 经过相干消色散处理后得到的脉冲轮廓图，可看到位于相位 0.2 附近主脉冲的精细结构，在频域图中也可看到该结构。图 7 显示各频率通道也已经对齐。



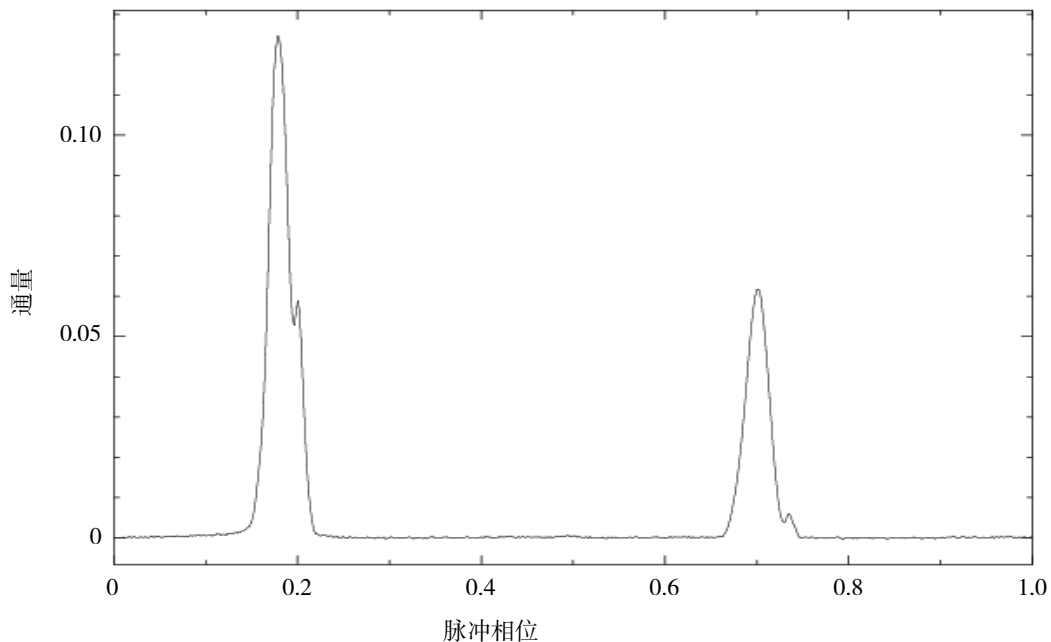


图 6 PSR J1939+2134 相干消色散脉冲轮廓图 (中心频率 1 250 MHz, 带宽 500 MHz, 双极化)

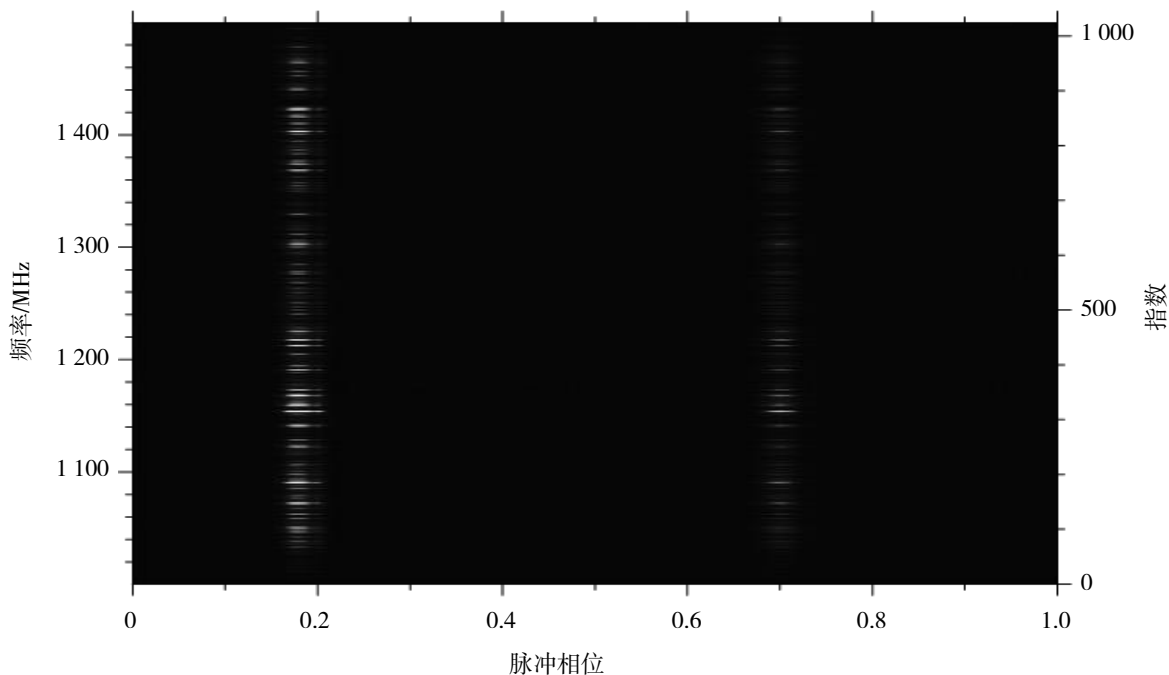


图 7 PSR J1939+2134 频率—相位图

为论证相干消色散在色散消除方面的优越性,对同样的 PSR J1939+2134 基带数据进行非相干消色散处理,结果如图 8 所示,信噪比为 945.754。可看到分别位于相位 0.2 和 0.7 附近的主脉冲和中间脉冲,与图 6 相干消色散处理结果一致,但无法获得位于相位 0.2 附近的主脉冲精细结构,说明该精细结构只有通过相干消色散处理才能获得,相干消色散相比于非相干消色散,对色散消除的效果更为彻底,可提高观测精度。

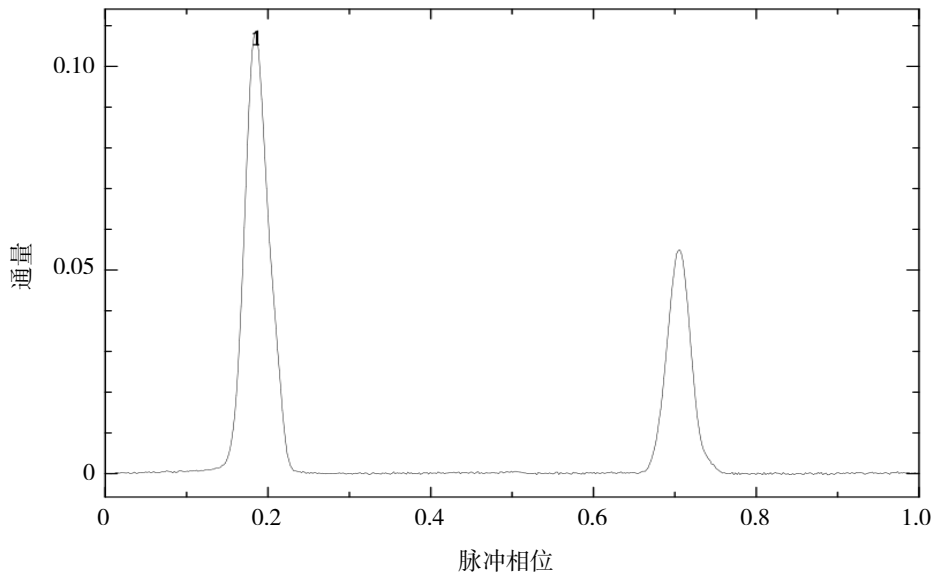


图8 PSR J1939+2134 非相干消色散脉冲轮廓图（中心频率 1 250 MHz，带宽 500 MHz，双极化）

最后，为验证本文所论述的数据处理流程的数据处理质量，根据 Australia Telescope National Facility<sup>①</sup> 的资料，与 Parkes 对 PSR J1939+2134 在 L 波段观测所得到的轮廓进行比较，结果如图 9 所示。图 9 所示为 Parkes 的 PDFB 终端系统对 PSR J1939+2134 在 1378 MHz 观测数据的相干消色散处理结果，可清晰看到位于相位 0.2 附近的主脉冲、相位 0.7 附近的中间脉冲以及主脉冲的精细结构，与图 6 中 FAST 观测数据处理结果一致，证明本数据处理流程的数据处理结果是符合要求的。

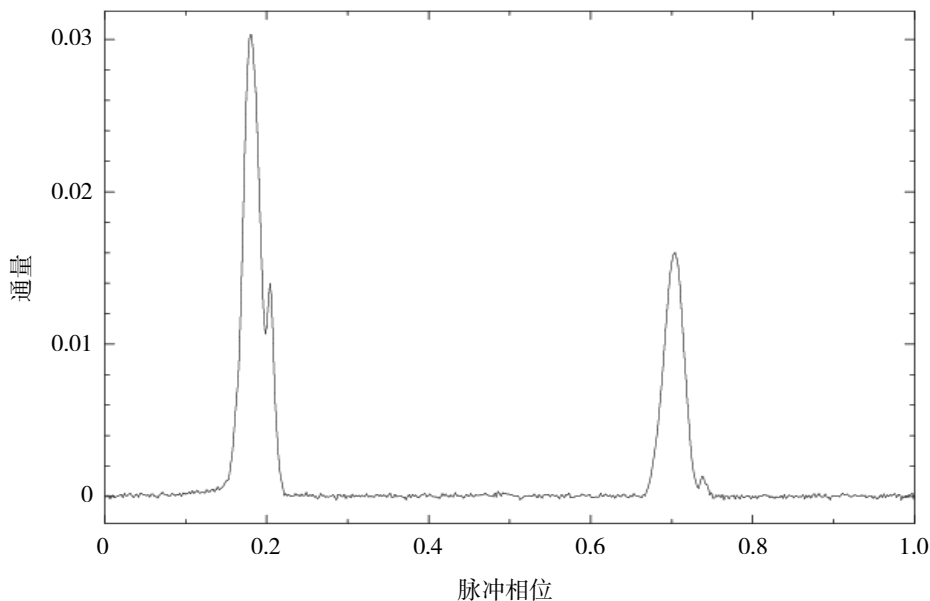


图9 Parkes 观测得到的 PSR J1939+2134 相干消色散脉冲轮廓图

## 5 结论

本文提出的基于 DSPSR 和 GPU 的脉冲星数据处理流程，可实现最高两路极化基带数据相干消色散

① <https://data.csiro.au/dap/public/atnf/pulsarSearch.zul>

处理。数据读取及处理方面结合高速共享内存技术和 GPU 加速技术,实现基于 CPU+GPU 异构系统的相干消色散基带数据处理技术,相比于非相干消色散,色散消除更彻底,可以获得更精确的脉冲轮廓。数据处理效率方面:在 TITAN XP 图形处理器配置下,对 8 bit 采样、观测时长 1 s 的双极化 PSR J0534+2200 基带数据进行处理,所需时间约为 0.8 s,与 CPU 模式下, DSPSR 采用 32 线程处理同样数据量的基带数据所需时间约 5 s 相比,本数据处理流程速度提升约 6.25 倍。在观测频率、带宽相近的条件下,将 PSR J1939+2134 数据处理结果与 Parkes 在 L 波段观测所得的轮廓图进行对比,本流程处理所得结果与 Parkes 处理结果相同,验证了此数据处理流程在脉冲星数据处理方面的可行性与准确性。本数据处理技术的开发,在实现相干消色散基带数据处理的基础上,提升了数据处理效率,为海量脉冲星基带数据实时处理以及国内开发相干消色散脉冲星终端提供数据处理方面的技术储备和技术参考。

在今后的工作中将继续研究 DSPSR 在 GPU 并行计算场景下的应用,进一步优化其数据处理速度,为实时宽带相干消色散的接收机做技术储备。并拓展基于 PSRDADA 共享内存技术的数据读写功能,如增加支撑更多数据格式,实现特定格式文件输出等。

**致谢:**感谢中国科学院国家天文台 FAST 现场工作人员对数据处理流程部署的大力支持和热情帮助,在此深表谢意。

## 参考文献:

- [1] 刘建伟,金乘进. 基于计算机集群的脉冲星相干消色散系统研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(13): 3612-3615+3620.
- [2] 黄玉祥,汪敏,郝龙飞,等. 脉冲星信号相干消色散与非相干消色散的比较研究[J]. 天文研究与技术, 2019, 16(1): 16-24.
- [3] 张海龙,张萌,聂俊,等. 脉冲星数字终端技术综述[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2019, 49(9): 15-28.
- [4] BAILES M. Precision timing at the Parkes 64-m radio telescope[J]. Radio Pulsars, ASP Conference Proceedings, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2003: 57-60.
- [5] HACHENBERG O, GRAHL B, WIELEBINSKI R. The 100-meter radio telescope at Effelsberg[J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(9): 1288-1295.
- [6] 刘立勇,艾力·伊沙木丁,张晋. 乌鲁木齐天文站建立脉冲星相干消色散观测系统[J]. 天文研究与技术, 2007, 4(1): 72-78.
- [7] 徐永华,李纪云,张颖倩,等. 相干消色散脉冲星观测系统的研究[J]. 天文研究与技术, 2015, 12(4): 480-486.
- [8] 南仁东,李会贤. FAST 的进展—科学、技术与设备[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2014, 44(10): 1063-1074.
- [9] LUO J T, GGAO Y P, YANG T G, et al. Pulsar timing observations with Haoping radio telescope[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(7): 187-192.
- [10] LAZARUS P, KARUPPUSAMY R, GRAIKOU E, et al. Prospects for high-precision pulsar timing with the new Effelsberg PSRIX backend[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 458(1): 868-880.
- [11] SARKISSIAN J M, CARRETTI E, STRATEN W V. The Parkes pulsar backends[J]. AIP Conference Proceedings, 2011, 1357(1): 351-352.
- [12] LORMER D R, KRAMER M. Handbook of pulsar astronomy[K]. 2012.
- [13] STRATEN W V, BAILES M. DSPSR: digital signal processing software for pulsar astronomy[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2011, 28(1): 1-14.
- [14] Microsystems S. Shared Memory[C]// System Interface Guide, [S.l.]: Iuniverse Inc, 2001: 106-107.
- [15] CHENG J, GROSSMAN M, MCKERCHER T. Professional CUDA C programming[M]. John Wiley & Sons, [S.l.]: Wrox, 2014.
- [16] 李佳功,徐永华,李志玄,等. 基于 Mark5B+GPU 脉冲星观测系统[J]. 天文研究与技术, 2014, 11(4): 335-342.