

基于GPU加速的FRB实时搜寻算法 研究与测试*

王 军^{1,2†} 陈卯蒸¹ 裴 鑫¹ 王志桥^{1,3}

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

摘要 新疆天文台接收机团组以南山25 m射电望远镜科研需求和计划建设的奇台110 m射电望远镜(QiTai radio Telescope, 简称QTT)关键技术研究为背景, 在原有的基于CPU (Central Processing Unit)的快速射电暴(Fast Radio Burst, 简称FRB)搜寻算法基础上, 研究了基于图形处理器(Graphics Processing Unit, 简称GPU)加速的FRB搜寻算法, 并搭建了相应的FRB实时搜寻系统平台. 对CPU系统和GPU系统进行了对比与分析, 测试结果表明: 在保证搜寻精度的基础上, 使用GPU加速的FRB实时搜寻算法相比CPU算法计算速度可提高35~45倍.

关键词 望远镜, 方法: 数据分析, 物理数据及处理

中图分类号: P162; **文献标识码:** A

1 引言

FRB又称快速射电暴, 是一种瞬时(毫秒量级)、随机、高流量的宽带射电爆发^[1]. 虽然持续的时间还不到1 s, 但它所包含的能量却比太阳在几天甚至几个月中累积发出的能量还多. 同时FRB还有很高的色散量, 目前已发现FRB的色散值基本都介于370~2000 $\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间, 远远大于银河系内的色散量.

由于FRB在研究星系间介质以及宇宙磁场等方面具有很重要的科学意义, 所以FRB搜寻及其后续研究成为继伽马暴和脉冲星之后天文学上又一个新研究热点. 自2007年天文学家首次发现FRB至2016年9月1日止, 全世界的射电望远镜仅发现17个FRB信号. 已发现的FRB及其具体参数如表1所示, 以Lorimer等人发现的FRB010724^[2]为例, 可以看出其色散值为375 $\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$, 信噪比为23 dB. 据天文学家早期估算这种信号1 d之内应该出现上千次, 但实际上, 科学家直到2012年才第2次发现这种信号.

2016-09-01收到原稿, 2016-10-07收到修改稿

*国家重点基础研究发展计划(2015CB857100)、中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费、国家自然科学基金项目(U1431230, 11403091, 11253001)资助

[†]wangjun@xao.ac.cn

表 1 已发现的FRB及其相关参数^a
Table 1 Parameters of known FRBs^a

Event	Telescope	Obs Freq /GHz	gl ^b /deg	gb ^b /deg	Obs Width /ms	DM ^b /(pc·cm ⁻³)	SNR ^b /dB	Peak Flux Density /Jy	Fluence /(Jy·ms)	Year	Software	Finder
FRB010125	Parkes	1.4	356.641	-20.020	9.40	790	17	0.30	2.82	2014	Dedisperse-all	S.Burke-Spolaor
FRB010621	Parkes	1.4	25.433	-4.003	7.00	745		0.41	2.87	2011	Destroy	E.F.Keane
FRB010724	Parkes	1.4	300.653	-41.805	5.00	375	23	30	150	2007	Seek	D.R.Lorimer
FRB090625	Parkes	1.3	226.443	-60.030	1.92	899.55	30	1.14	2.19	2016	Heimdall	D.J.Champion
FRB110220	Parkes	1.3	50.828	-54.766	5.60	944.38	49	1.30	7.28	2013	Dedisperse-all	D.Thornton
FRB110523	GBT	0.8	56.119	-37.819	1.73	623.3	42	0.60	1.04	2015		Kiyoshi Masui
FRB110626	Parkes	1.3	355.861	-41.752	1.40	723.0	11	0.40	0.56	2013	Dedisperse-all	D.Thornton
FRB110703	Parkes	1.3	80.997	-59.019	4.30	1103.3	16	0.50	2.15	2013	Dedisperse-all	D.Thornton
FRB120127	Parkes	1.3	49.287	-66.203	1.10	533.3	11	0.50	0.55	2013	Dedisperse-all	D.Thornton
FRB121002	Parkes	1.3	308.219	-26.264	5.44	1629.18	16	0.43	2.34	2016	Heimdall	D.J.Champion
FRB121102	Arecibo	1.4	174.950	-0.225	3.00	557.4	14	0.40	1.20	2014	Presto	L.G.Spitler
FRB130626	Parkes	1.3	7.450	+27.420	1.98	952.4	21	0.74	1.47	2016	Heimdall	D.J.Champion
FRB130628	Parkes	1.3	225.955	+30.655	0.64	469.88	29	1.91	1.22	2016	Heimdall	D.J.Champion
FRB130729	Parkes	1.3	324.787	+54.744	15.61	861	14	0.22	3.43	2016	Heimdall	D.J.Champion
FRB131104	Parkes	1.4	260.549	-21.925	2.08	779	30	1.12	2.33	2015	Heimdall	V.Ravi
FRB140514	Parkes	1.4	50.841	-54.611	2.80	562.7	16	0.47	1.32	2015	Heimdall	E.Petroff
FRB150418	Parkes	1.382	232.665	-3.234	0.80	776.2	39	2.20	1.76	2016	Presto	E.F.Keane

^a Swinburne Pulsar Group, <http://www.astronomy.swin.edu.au/pulsar/frbcat/>.
^b gl: Galactic Longitude, gb: Galactic Latitude, DM: Dispersion Measure, SNR: Signal-to-Noise Ratio.

107

FRB在传播过程中,会受到自由电子等星系介质的干扰,不同波长的电磁波到达地球的时间也不相同,即出现脉冲展宽现象.但由于FRB的色散量范围很大,进行消色散和搜寻处理需要进行大量的浮点计算,这对实时搜寻系统的处理速度和处理能力提出了很高的要求.传统的基于CPU的处理系统难以实现对FRB的实时搜寻,因此需要研究基于CPU与GPU混合模式的搜寻系统,实现对FRB信号的实时高精度频谱分析、射频干扰(Radio Frequency Interference,简称RFI)消除、非相干消色散(Incoherent De-dispersion)和滤波搜寻等多功能处理,其中,CPU主要进行数据的传输、控制和缓冲等预处理操作,GPU则主要依靠其高性能浮点计算能力进行高度并行的数据处理^[3].

2 搜寻算法及数据处理

基于GPU加速的FRB实时搜寻主要包括数据缓存、射频干扰消除、消色散和滤波搜寻等步骤,其算法如图1所示.

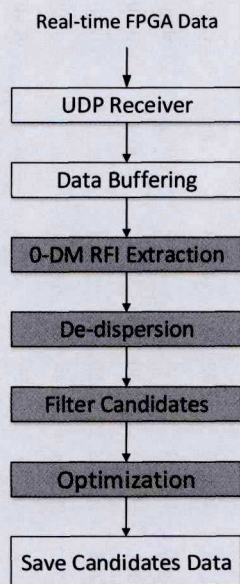


图1 FRB实时搜寻算法流程图. FPGA (Field-Programmable Gate Array)是现场可编程门阵列, UDP (User Datagram Protocol)是用户数据报协议.

Fig. 1 Flow chart of real-time search algorithm of FRBs. FPGA is the Field-Programmable Gate Array, and UDP is the User Datagram Protocol.

在图1中,灰底部分为在GPU中进行的处理过程.在FRB搜寻过程中,射频干扰消除、消色散和数据筛选等处理过程需要较高的浮点计算能力.因此需要采用并行算法,将这些需要进行大量计算的过程转移到GPU中,利用GPU在数据并行处理方面的天然优势,提高搜寻处理的速度,进而实现对FRB的实时搜寻.

2.1 信号导入与整理

首先将已经通过FPGA数据预处理模块处理的数据通过万兆以太网传输到计算机端, 因为FRB信号数据量巨大, 几乎不可能实现从网络接收端到GPU处理端的直接传输, 因此需要在计算机内存中开辟1个循环缓冲区. 数据通过循环缓冲区被覆盖写入到每1个周期中, 然后当接收到触发信号时, 之前未被覆盖的数据片段可以被处理、传输或者保存. 将数据临时存放在缓冲区中, 数据在内存中的写入和读取可以通过CPU的控制实现同时有序进行.

如图2所示, 循环缓冲区一般有2个指针, 分别为读指针和写指针, 其中, 读指针指向循环缓冲区中可以读取的数据地址, 写指针则指向循环缓冲区中可以写入新数据的地址, 写入进程和读出进程相互协作, 共享逻辑地址空间^[4].

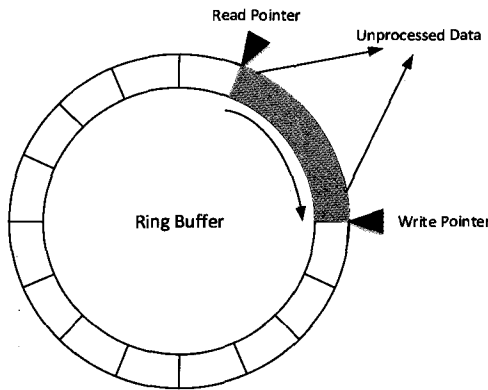


图 2 循环缓冲区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ring buffer

在数据传输过程中, 通过改变读指针和写指针的指向就可以控制循环缓冲区中的数据读取和写入过程. 循环缓冲区的读操作通常只会影响读指针, 而写操作也只会影响写指针. 在FRB搜寻过程中, 如果仅仅有1个读操作和1个写操作过程, 则不需要额外添加互斥保护机制就可以保证天线接收数据的正确性.

2.2 射频干扰消除

从宇宙深处传播到地球上的FRB信号在接收过程中很容易被地球上的电磁活动以及接收机本身的噪声所干扰, 造成接收信号的失真^[5]. 这会在很大程度上影响FRB的探测和搜寻, 因此对FRB信号进行前期的射频干扰消除处理是实现后期搜寻处理的基础和前提.

常用的天文信号消干扰方法有小波分析、高阶统计量法等, 其中小波分析去噪法可以同时进行频域和时域分析, 具有时频局部化和多分辨特性. 采用这种方法既能较好地去除射频干扰, 又能较好地保持信号的突变部分, 非常适合FRB这种瞬时突变信号.

对任意的函数或者信号 $f(x)$, 其小波变换定义为:

$$W_f(a,b) = \int_R f(x)\overline{\psi}_{a,b}(x)dx = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\overline{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \tag{1}$$

式中 ψ 为小波母函数, a 为尺度参数, b 为时间参数.

小波去噪实际上是特征提取和低通滤波功能的综合, 其流程如图3所示.

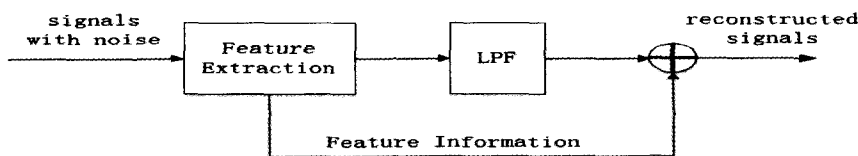


图3 小波去噪流程图. LPF (Low Pass Filter)是低通滤波器.

Fig. 3 Flow chart of wavelet-based de-noising. LPF is the Low Pass Filter.

将信号映射到小波域, 根据噪声和噪声的小波系数在不同尺度上具有不同的性质和机理, 对含噪信号的小波系数进行处理. 其实质是通过减小剔除噪声产生的小波系数, 实现对真实信号系数最大限度的保留.

2.3 非相干消色散

FRB信号在宇宙传播过程中, 由于受到星系际介质的影响, 会导致信号的各个频率分量的群速度不同, 从而导致不同频率分量到达接收机的时间不同. 这点类似于光信号在光纤中的色散一样, 会导致脉冲展宽. 观测带宽越宽, 色散对信号的致宽平滑越厉害^[6], 信号强度减弱, 非常不利于FRB信号的搜寻. 因此, 消色散是FRB搜寻工作的重要组成部分. 星系际介质对观测中心频率为 ν_1 和 ν_2 上的FRB信号的脉冲展宽时间延迟 Δt 和DM的关系如下:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{e^2}{2\pi cm} \times DM \times \left(\frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2} \right) = 4.15 \times 10^6 \text{ ms} \times \left(\frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2} \right) \times DM, \quad (2)$$

其中, e : 电子电荷; c : 光速; m : 电子质量. 式中, DM表示为:

$$DM = \int_0^d n_e dl, \quad (3)$$

其中 n_e 为电子密度, l 代表射电信号所经的路径.

由上式可以看出色散值DM和天体距离的关系, 但一般天体距离难以直接测量, 需要针对不同的DM值进行测试. 由于FRB的DM值分布范围比较大, 已知的FRB的DM值一般介于370–2000 $\text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间, 消色散的区间范围比较大, 其计算量也非常巨大, 所以需要针对不同的处理系统设置合理的DM计算步长.

如图4所示, 基于GPU加速的FRB消色散算法的原理是将FRB信号的时间序列通过1个多通道滤波器组, 得到不同频率通道的多路信号. 最后根据色散公式计算出每个频率通道之间的时延, 对各通道信号补上相应的延时以后进行叠加, 从而消除色散^[7–10].

传统的CPU系统在消色散时需调用FFTW (Faster Fourier Transform in the West)函数库^[11], 它是1个基于CPU的快速傅里叶变换C语言程序集, 可以计算1维或多维实数和复数的离散傅里叶变换. 而GPU加速系统则使用cuFFT (CUDA Fast Fourier Transform)函数库, 它由CUFFT和CUFFTW 2个子库构成, 其中CUFFTW库是一个移植工具, 它可以使得基于FFTW库编写的程序能够运行在支持CUDA的GPU上. 而CUFFT则是

纯CUDA接口的快速傅里叶变换库. 通过采用cuFFT函数库, 可以充分利用GPU在浮点运算方面的巨大优势, 成倍提高数据的处理速度.

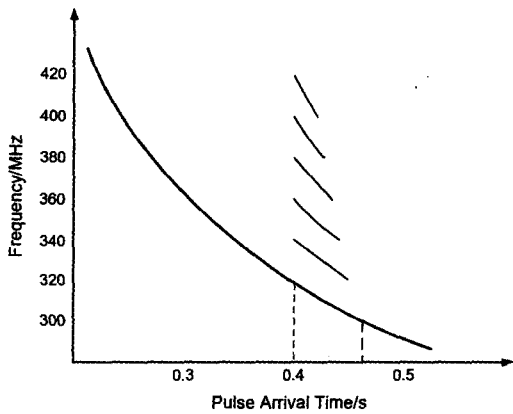


图 4 消色散原理图^[7]

Fig. 4 Schematic diagram of de-dispersion^[7]

2.4 初步检测和判别

经过消色散之后, 得到相应的数据, 需要针对每1个DM值产生的数据进行判别. 在检测器中, 预先排除已知的脉冲星干扰并设置合理的信噪比和时间阈值参数, 可以得到疑似的候选值.

根据已发现的FRB特征, 并经过详细的计算推导, 天文学家对FRB的实时搜寻阈值参数一般设置如下:

$$DM \geq 1.5 \times DM_{MW}, \tag{4}$$

$$SNR \geq 10, \tag{5}$$

$$N_{beams} \leq 4, \tag{6}$$

$$\Delta t \leq 8.192 \text{ ms}, \tag{7}$$

$$N_{events}(t_{obs} - 2 \text{ s} \rightarrow t_{obs} + 2 \text{ s}) \leq 5, \tag{8}$$

DM_{MW} 代表银河系在指定搜寻方向上的总色散值, N_{beams} 代表候选信号附近相邻波束的数目, Δt 是脉冲宽度, $N_{events}(t_{obs} - 2 \text{ s} \rightarrow t_{obs} + 2 \text{ s})$ 代表在1个4 s的窗口内得到的疑似值总数^[1].

2.5 输出疑似值并进行精细判别

将经过初步判别后产生的疑似候选数据及相关信息(如色散值、方位、时间)保存到硬盘中, 然后缩小色散差值重复2.3-2.4节的步骤, 对疑似信号进行更精细的消色散过程, 确定相关参数的精确值, 以便进行后续的处理研究.

3 系统搭建与分析

在Linux (64位CentOS 6.4)系统下, 分别搭建基于CPU的FRB搜寻系统(PRESTO¹)和基于GPU加速的FRB搜寻系统(HEIMDALL²), 采用FRB010724、FRB010621^[12]和FRB010125^[13]的数据进行测试和比较. 程序运行的硬件环境为Intel Core Q9550型CPU和Nvidia GTX 760型GPU卡, 软件调用函数库分别为FFTW 3.3.4和cuFFT 6.5等.

3.1 系统加速比分析

针对目前已公开的FRB010724、FRB010621和FRB010125数据, 分别在CPU系统和GPU加速系统中进行时间测试对比. 首先采用60个DM测试值, 对比3个主要步骤的时间占用情况. 测试结果如表2所示. 其次, 基于不同的DM精度, 测试并分析CPU系统和GPU加速系统的总处理时间变化情况. 实验结果如图5所示.

表 2 CPU和GPU系统各步骤消耗的时间

Table 2 The time consuming of different steps of CPU and GPU systems

Name	System	RFI Extraction/s	De-dispersion/s	Filter/s	Total Time/s
FRB010724	CPU	74.080	62.385	484.064	620.529
	GPU	1.648	2.156	11.522	15.326
FRB010621	CPU	59.469	60.565	522.362	642.396
	GPU	1.438	2.242	11.257	14.937
FRB010125	CPU	18.512	12.855	98.806	130.173
	GPU	0.325	0.658	2.663	3.646

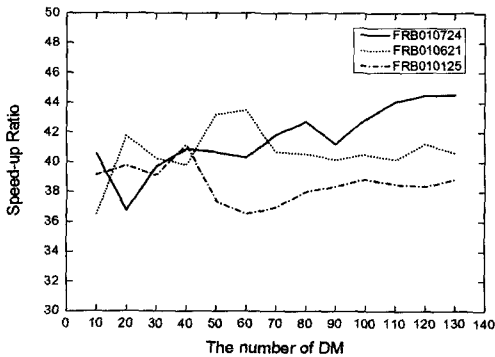


图 5 GPU搜寻系统相对CPU系统加速比

Fig. 5 Speed-up ratio of the GPU search system to the CPU system

通过以上图表我们可以看出, 采用基于GPU加速的FRB搜寻系统相比传统的CPU系统具有更大的优越性, 特别是在当数据量较大时, 采用传统CPU系统无法

¹ <https://github.com/scottransom/presto>
² <http://sourceforge.net/projects/heimdall-astro>

实现实时处理时, GPU加速系统显现出更加强大的优势.

3.2 搜寻精度分析

本文主要从信噪比方面比较CPU系统和GPU加速系统的搜寻精度, 图6、图7和图8分别为FRB010724、FRB010621和FRB010125在CPU系统和GPU系统上的初步搜寻结果. 其中左图为CPU系统的初步搜寻结果, 右图为GPU系统的初步搜寻结果.

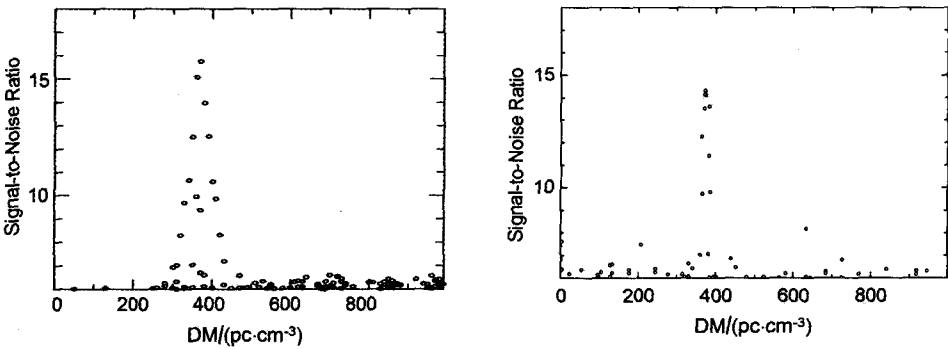


图 6 CPU (左)和GPU (右)系统对FRB010724搜寻结果图
Fig. 6 Searching results of CPU (left) and GPU (right) systems for FRB010724

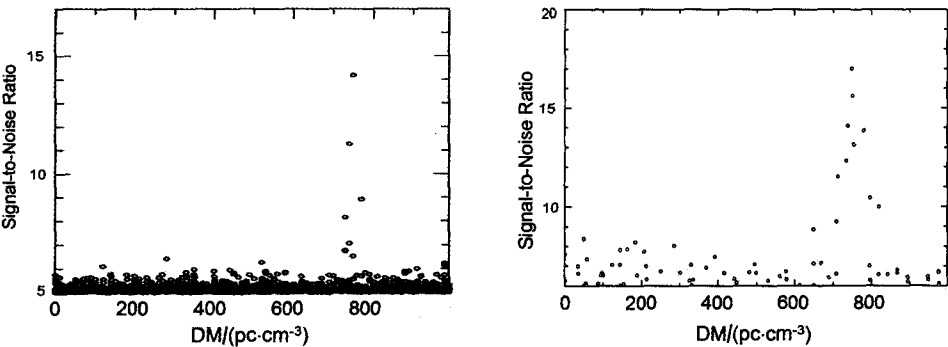


图 7 CPU (左)和GPU (右)系统对FRB010621搜寻结果图
Fig. 7 Searching results of CPU (left) and GPU (right) systems for FRB010621

通过对比可以发现, GPU系统相比CPU系统在搜寻精度方面差别不大, 每个FRB信号的2个子图均表明在相应的DM值处信噪比提高明显, 需要针对相应的DM值进行精细处理和分析.

113

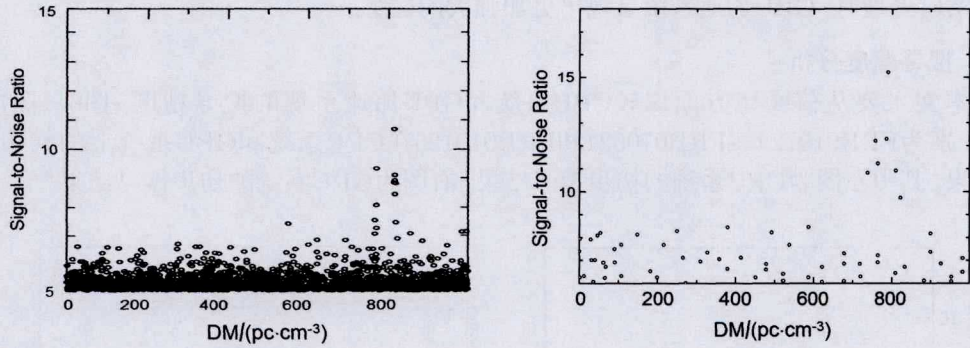


图8 CPU (左)和GPU (右)系统对FRB010125搜寻结果图

Fig. 8 Searching results of CPU (left) and GPU (right) systems for FRB010125

3.3 搜寻数据处理结果

以FRB010724为例, 采用GPU加速算法, 通过实验测试最终得到FRB010724数据及波形如图9所示, 与CPU系统所处理得到的结果完全一致. 从经过精细处理后得到的图9中, 可以清晰地看到FRB的脉冲特征参数及具体波形. 从图中可知, 在色散值为 $375 \text{ pc} \cdot \text{cm}^{-3}$ 处, 出现明显的脉冲信号. 将图9数据与Lorimer博士在论文“A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin”中对FRB010724的特征参数对比后可以确认, GPU系统搜寻结果与实际数据相吻合.

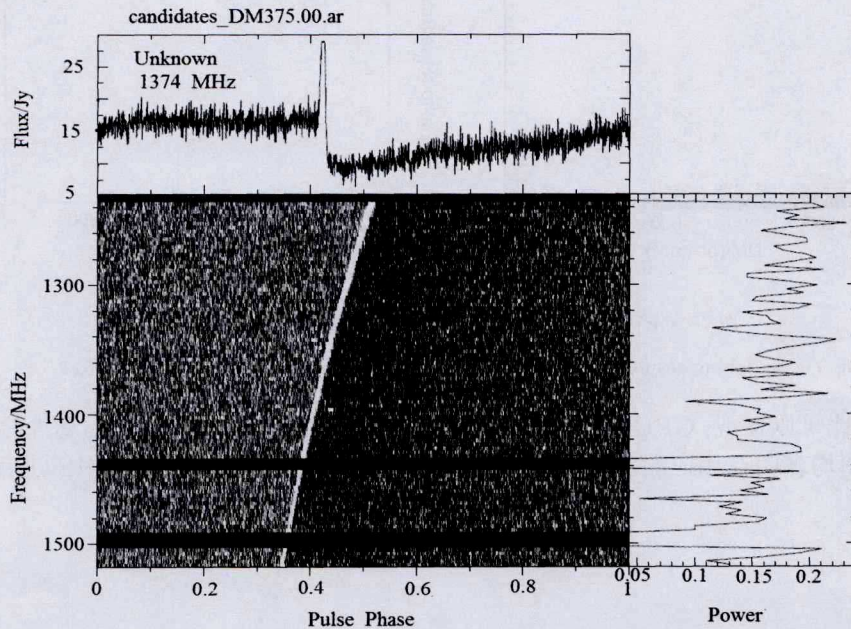


图9 FRB010724的最终搜寻结果图

Fig. 9 Final searching result of FRB010724

4 总结与展望

为了实现对FRB的实时搜寻,本文采用了基于GPU加速的FRB搜寻算法模型,在保证搜寻精度的条件下,极大地提高了FRB搜寻的速度,可以实现对FRB的实时搜寻.在保证计算精度的条件下,将GPU加速系统和CPU系统进行了对比.经过实验分析可知,相比经过优化的CPU搜寻系统,GPU系统计算速度仍可提高35–45倍左右.

由于FRB信号的射电流量比较大,20–30 m口径射电望远镜也可进行监测.新疆天文台南山25 m射电望远镜面形精度为0.4 mm、指向精度15",其L波段接收机工作频率为1381.25–1701.25 MHz,中心频率为1540 MHz,观测脉冲星能力达到0.5 mJy,观测RRAT (Rotating Radio Transients)的灵敏度约为3.4 Jy^[14],完全可以满足FRB的搜寻要求.计划建设的奇台110 m射电望远镜在建成之后将是全球最大的全向可动射电望远镜,相比南山25 m望远镜,QTT将具有更大的反射面口径和接收机带宽,同时QTT面形精度初期设计目标为0.3 mm、指向精度将达2.5"^[3].对FRB的持续搜寻和观测分析极其需要具有超强跟踪能力、超高灵敏度的可动式射电望远镜,QTT的高灵敏度结合FRB数字搜寻终端将可以开展高精度的FRB搜寻和观测研究.

FRB搜索平台工作具有重要意义,特别是继续其在单天线(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope简称FAST, QTT)和综合口径(Square Kilometre Array, SKA)中的应用. FRB实时搜寻是FRB研究的基础和重要组成部分,本次实验采用OFFLINE数据进行处理.在后续的研究中需要采用ONLINE数据,对系统的实时性做进一步测试.随着FAST、QTT和SKA的建设,需要进一步完善FRB搜索平台的建设,尤其是针对未来SKA巡天观测,需要开发相应的搜寻终端.

参 考 文 献

- [1] Petroff E, Bailes M, Barr E D, et al. MNRAS, 2015, 447: 246
- [2] Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. Science, 2007, 318: 777
- [3] 王娜. 中国科学G辑, 2014, 44: 8
- [4] 姚章俊, 陈蜀宇, 卢尧. 计算机工程, 2012, 38: 8
- [5] 汪丽. 毫秒脉冲星平均脉冲消色散和去噪方法研究. 西安: 西安理工大学, 2008: 9-21
- [6] 刘立勇, 艾力·依沙木丁, 张晋. 天文研究与技术, 2007, 4: 1
- [7] 程肖肖, 肖为民. 中国科学院上海天文台年刊, 2014, 35: 70
- [8] Magro A, Karastergiou A, Salvini S, et al. MNRAS, 2011, 417: 2642
- [9] 李佳功. 基于GPU的脉冲星相干消色散技术的研究和应用. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 9-14
- [10] 刘建伟, 金乘进. 科学技术与工程, 2009, 9: 13
- [11] 刘东亮, Paul Demorest, 南仁东. 科学技术与工程, 2010, 10: 8
- [12] Keane E F, Kramer M, Lyne A G, et al. MNRAS, 2011, 415: 3065
- [13] Burke-Spolaor S, Bannister K W. ApJ, 2014, 792: 19
- [14] Hu H D, Esamdin A, Yuan J P, et al. A&A, 2011, 530: 67

The Research and Test of Fast Radio Burst Real-time Search Algorithm Based on GPU Acceleration

WANG Jun^{1,2} CHEN Mao-zheng¹ PEI Xin¹ WANG Zhi-qiao^{1,3}

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046)

ABSTRACT In order to satisfy the research needs of Nanshan 25 m radio telescope of Xinjiang Astronomical Observatory (XAO) and study the key technology of the planned QiTai radio Telescope (QTT), the receiver group of XAO studied the GPU (Graphics Processing Unit) based real-time FRB searching algorithm which developed from the original FRB searching algorithm based on CPU (Central Processing Unit), and built the FRB real-time searching system. The comparison of the GPU system and the CPU system shows that: on the basis of ensuring the accuracy of the search, the speed of the GPU accelerated algorithm is improved by 35–45 times compared with the CPU algorithm.

Key words telescopes, methods: data analysis, physical data and processes

关于表彰《天文学报》(2014—2016年)优秀审稿人的通知

2014—2016年期间, 广大审稿专家对提升《天文学报》期刊学术质量和影响力作出了巨大贡献. 为了进一步提高专家们的积极性, 提升《天文学报》的学术水平和影响力, 结合专家们对刊物的关注程度、审阅论文质量及数量, 《天文学报》编辑委员会评选出19位优秀审稿人.

本次评选出的专家名单如下(按姓名音序排列, *表示专家兼任《天文学报》编委):

陈鹏飞*	邓李才*	冯珑珑*	韩金林*	胡小工
季江徽*	李向东*	李孝辉	廖新浩*	刘佳成
罗阿理	王晓彬	吴庆文	吴雪峰	熊大闰
赵长印*	郑宪忠	周济林*	朱 紫*	

《天文学报》编辑委员会