基于多波束接收机的FRB实时搜寻终端设计

裴鑫^{1,2}, 李健^{1,2*}, 李时雨³, 牛晨辉^{4,5}

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008;

3. 北京师范大学天文系, 北京 100875;

4. 华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079;

5. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

*联系人, E-mail: lijian@xao.ac.cn

收稿日期: 2018-12-14; 接受日期: 2019-02-01; 网络出版日期: 2019-05-27

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)和国家自然科学基金(编号: U1531243, 11873082, 11473061, 11503075, U1431230)资助项目

摘要 快速射电暴(Fast Radio Burst, FRB)是一种偶发的、瞬时射电暴, 为了探测到更多的样本进行研究, 本文基于多波束接收机开发了一套实时搜寻终端, 该系统包括信号采集与处理、单波束信号处理、多波束信号合成与分析、探测结果存储与发布等单元, 可以对多路波束信号进行同时采集和分析, 利用多波束的信号参考效应消除干扰, 提高探测准确率. 在某射电望远镜上进行了观测实验, 通过捕捉脉冲星的单脉冲信号检验了FRB信号的探测功能, 结果表明该终端可实现准确、实时的FRB探测.

关键词 天文终端, 快速射电暴, 多波束接收机, 信号分析

PACS: 95.55.Qf, 95.75.Pq, 97.60.-s, 97.20.-w, 95.85.Bh

1 引言

快速射电暴(Fast Radio Burst, FRB)是近年来天文观测中发现的一种未知的、神秘的、短促而明亮的射电脉冲. 2007年, Lorimer等人^[1]在处理澳大利亚Parkes 64 m射电望远镜存档数据时首次发现. 随后, Parkes在对高银纬区域进行高时间分辨率宇宙巡天时又探测到4个FRB^[2], 但由于其他设备没有任何类似的发现, 人们猜测, 这台澳大利亚仪器可能一直在接收来自地球

或近地源的信号. 直到2014年, 在美国Arecibo 305 m射电望远镜的观测数据中也发现了1个案例^[3], 人们这才消除了关于这些无线电脉冲确实来自宇宙的怀疑. 2015年, 科学家在美国GBT 100 m射电望远镜的存档数据中发现了第一颗从线极化中探测到的FRB 110523^[4], 根据观测结果的色散量推算, 该FRB源离地球10–60亿光年, 此次发现观测到了其偏振信息, 具有里程碑式的意义. 2015年5月17日至6月2日, Arecibo观测到了重复爆发的FRB 121102^[5], 这是首次观测到

引用格式: 裴鑫, 李健, 李时雨, 等. 基于多波束接收机的FRB实时搜寻终端设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099508

Pei X, Li J, Li S Y, et al. Design of FRB real-time search backend for multi-beam receiver (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 099508, doi: [10.1360/SSPMA2018-00418](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00418)

FRB的重复爆发, 是FRB研究的重要进展, 有助于研究FRB的起源和爆发机制. 2018年, 突破聆听项目组报道了在GBT C波段接收机的观测结果^[6], 捕捉到了FRB 121102的21次重复暴发脉冲, 这是从重复FRB中检测到脉冲的最高频段, 根据观测处理结果, 平均的法拉第旋转量(Rotation Measure, RM)高达 $(9.359 \pm 0.012) \times 10^4 \text{ rad m}^{-2}$, 和Arecibo的观测结果一起表明, 这例重复FRB源可能位于高磁离子环境中^[7].

尽管目前对FRB的观测研究已经取得了一些成果, 但受样本数量的限制, FRB的物理机制、在宇宙中的具体来源等尚属未知, 其成因目前是天文研究的热点问题. 为了探测更多的样本来进行分析, 许多天文学家纷纷在各个望远镜上建立FRB搜寻系统, 对这种现象进行实时监测^[8-11].

为了提高FRB的探测效率, 很多望远镜都装配了多波束观测系统. 例如, 澳大利亚Parkes 64 m射电望远镜基于L波段13波束接收机开发了多波束FRB实时搜寻系统^[12], 该系统对13波束双极化信号进行采样和预处理, 数据通过10 Gb高速以太网传输至Berkeley Parkes Swinburne Recorder (BPSR), 采用Heimdall软件对内存缓冲区中的数据进行实时分析, 实现了FRB的实时搜寻观测.

我国已经建设完成的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)配备了19波束L波段接收机^[13], 即将建设的新疆奇台110 m射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)也规划了多台多波束接收机^[14]. 这些大口径射电望远镜具有极高的灵敏度, 再配备多波束接收机以增大视场, 如果用来进行FRB观测, 事件探测概率将大大提高.

比起传统的单波束观测系统, 多波束系统可以同时接收多个波束的信号, 观测视场也会增加很多倍, 在同样时长的观测中, 探测到FRB的概率也会增加. 然而, 多波束接收机在进行FRB观测时, 信号也由单路增加为多路, 数据量增加 N 倍, 计算复杂度也至少增加 N 倍, 在对 N 路信号进行综合辨识时, 处理方法与单波束接收机又有所区别.

本文将基于多波束接收机设计信号采集与处理系统, 根据FRB信号特征开发实时在线识别程序, 利用多波束信号参考特性消除干扰信号, 提高FRB识别准确率. 为了验证系统的功能, 本文基于某射电望远镜进行了观测实验.

2 FRB信号特征分析

FRB是一种持续时间极短(毫秒量级)、流量高(一般在几百毫央至几个央斯基之间)、具有偏振特性的射电爆发. FRB爆发的宽带信号在宇宙空间传播时受空间尘埃、自由电子等影响, 频率高的电磁波比频率低的电磁波先到达地球, 脉冲信号因此出现延展甚至消失的现象, 称之为色散现象, 这与脉冲星信号的空间色散现象基本相同. 表征色散程度的色散量(Dispersion Measure, DM)可由式(1)进行表示:

$$DM = \int_0^D n_e ds. \quad (1)$$

色散量的物理定义是电子数密度在视向路径上的积分, n_e 是电子数密度, s 表示视向路径, D 为快速射电暴的距离, 单位是秒差距/立方厘米($\text{cm}^{-3} \text{ pc}$).

目前观测发现的FRB色散量主要分布在 $100\text{--}2000 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ 之间, 是银河系内脉冲星色散量的数10倍. 因此, 在对FRB搜寻时需要查找较脉冲星更广泛的DM区间, 对于每个DM参数都要进行消色散处理和疑似样本识别, DM值的粗略查找后还要针对疑似值进行精细计算, 计算量巨大.

FRB在等离子体中传播时会受到电子散射的影响, 形成多路径传播, 从而会使脉冲展宽, 脉冲宽度也会随频率而变化, 如式(2)所示:

$$W \propto DM^2 / \nu^n. \quad (2)$$

脉冲宽度 W 与DM的平方成正比, 与频率的 n 次方成反比, 根据NE2001模型^[15], n 取4–4.4之间, 根据目前的观测结果, 脉冲宽度一般为几毫秒.

3 软件设计

3.1 软件系统总体架构

如图1所示, 软件系统主要由信号处理单元(1– N)、高速数据交换单元、计算节点(1– N)、头节点、网络发布单元和存储单元等组成. 其中, 信号处理单元(1– N)对 N 路多波束信号进行采集和频域变换, 输出原始电压和处理后的功率谱数据. 通过高速数据交换单元将2种类型的数据都传输至计算节点(1– N). 计算节点(1– N)接收所有波束的功率谱数据, 按照要求进行格式化, 然后输出至内存, 每个计算节点对单个波束的数据进行实时搜寻, 并将候选体结果存储至磁盘, 每个计

图 1 FRB搜寻终端软件系统架构

Figure 1 Software architecture of FRB search backend.

算节点的特定磁盘空间映射至头节点. 头节点根据时间信息汇聚所有计算节点同一时间的数据进行并发信号合成, 候选体探测与分类子单元采用一定策略对多波束信号进行处理, 判别候选体, 实时绘图和触发子单元对候选体进行成图, 链接至网络发布单元进行发布, 同时通过修改Redis数据库键值进行触发, 通知存储单元此数据为候选体, 存储单元从相应计算节点内存中读取数据写入到快速磁盘阵列.

3.2 信号处理单元设计

信号处理单元(1-N)由N个信号采集和频域变换单元组成, 主要完成对N个波束的信号采集和预处理, 可输出原始电压与功率谱数据, 如图2所示, 基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)进行设计, 所有N个单元的设计基本相同, 主要包括信号采样、多相滤波、复数FFT、相关计算、积分、量化、数据封装和网络发送等模块.

为消除FRB爆发的宽带信号在传输至地球的过程中受星际介质作用而造成的色散影响, 需要将采样后的时域信号首先变换至频域, 将总带宽为 ν 的信号分成 n 个带宽为 $\Delta\nu$ 的子通道, 然后再对每个子通道进行时延处理以消除色散. 同时, 当捕捉到疑似候选体事件后, 需要对原始数据进行详细的分析以获得更准确的信息. 因此, FPGA同时输出原始电压数据和积分后的功率谱数据.

采样模块对单个波束输出的双极化信号进行数字化采样; 多相滤波模块对采样数据进行频率通道划分以减小相邻通道干扰, 为快速傅里叶变换(Fast Fourier

图 2 基于FPGA的信号采集与频域变换单元设计

Figure 2 FPGA design for signal acquisition and Fourier transformation.

Transformation, FFT)做准备; 然后由复数FFT将信号变换至频域; 随后数据分为2个分支, 无需进行积分和功率谱计算的数据由数据封装1格式化后经网络发送1输出至数据交换网络. 另一路由相关计算模块对多通道频域数据进行相关运算, 以获得信号的偏振信息; 积分模块按照时间分辨率要求对数据进行累加, 以减小数据量; 量化模块根据数据类型要求进行数据位数截取; 最后由数据封装2格式化后经网络发送2输出至数据交换网络.

3.3 计算节点程序设计

计算节点(1-N)包括N个高速数据包接收与格式转换、内存、单一FRB信号搜寻等模块. 其中, 高速数据

包接收与格式转换模块从高速数据单元接收来自信号处理单元(1-N)的原始电压与功率谱两种类型的高速网络数据包, 并对信号进行一定的处理, 按照要求进行格式化, 然后将数据置于内存, 这里仅对功率谱数据进行实时处理.

为了使同一数据在多个并行运行的线程间共享, 这里采用了美国加州大学伯克利分校开发的高可获取共享处理流引擎(High Availability SHARED PIPELINE Engine, HASHPIPE¹⁾)技术, 开辟若干共享内存缓冲区, 通过查询缓冲区状态标识来执行相应操作, 实现了高速数据的实时、并行处理. 如图3所示, 高速数据包接收与格式转换模块包含3个线程: 数据包接收线程、数据处理线程和文件管理线程, 分别称为1, 2, 3号线程, 开辟2个缓冲区使数据在1, 2号和2, 3号线程间共享, 分别称为数据缓冲区a和b. 运行时, 1号线程接收来自计算机万兆网卡的高速网络数据包, 根据数据包格式提取头信息和有效数据, 并将数据放入缓冲区a. 2号线程从缓冲区a读取数据, 对数据进行一定的处理, 然后输出结果至缓冲区b. 3号线程从缓冲区b读取数据, 根据观测设置制作文件头信息, 对数据进行格式化, 然后输出文件头与数据至内存. 为了避免3个线程执行时间不同步导致的数据丢失, 可对数据缓冲区a和b开辟多个缓冲区块, 建立HASH表以标识各线程和缓冲区的处理状态, 各线程通过查询HASH表的状态以选择等待、执行、数据写入、数据读出等相应操作.

单一FRB信号搜寻模块的数据处理流程如图4所示, 这里采用Heimdall软件²⁾进行处理, 基于GPU并行计算提高运算速度.

首先, 从内存中读取单个波束的数据, 并将数据从

CPU内存拷贝至GPU内存.

由于通信基站、雷达、卫星和电子设备等辐射的电磁波会对射电天文观测频段造成干扰, 称之为射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI), 如不对这些干扰信号进行消除, 将影响信号的处理效果. 因此, RFI消除子模块先对这些数据在频率域进行干扰消除, 然后再输出至消色散子模块进行消色散计算.

在一个有限的带宽 B (MHz)、中心频率为 ν (GHz)内, 时间延迟量 t_{DM} (μs)与DM的关系为

$$t_{\text{DM}} = 8.3 \times B \cdot \text{DM} \cdot \nu^{-3}. \quad (3)$$

在两个被观测频率 ν_1 和 ν_2 之间的时间延迟 $t_2 - t_1$ 可由下式进行计算:

$$t_2 - t_1 = 4.15 \times \text{DM} \cdot \left[\left(\frac{\nu_1}{\text{GHz}} \right)^{-2} - \left(\frac{\nu_2}{\text{GHz}} \right)^{-2} \right] (\text{ms}). \quad (4)$$

消色散就是根据这个延迟量对每一个频率子通道的数据在时间上进行延迟或提前. 对于FRB搜寻来说, DM是未知的, 为了得到这个值, 可采用遍历的方法, 对每个DM值下的数据进行一次消色散计算, 然后找出效果最好的一组. 例如可假设DM的搜寻范围 Z 为 $100-5000 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$, 以 $1 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ 为间隔对每一个DM值进行频率通道内的消色散, 采用直接消色散算法, 在频率通道数 N_ν 、采样数 N_t 、色散量尝试数 N_{DM} 下的计算复杂度为

$$T_{\text{direct}} = O(N_t N_\nu N_{\text{DM}}). \quad (5)$$

而后再利用候选体搜寻模块对每一组色散值下的时域数据进行脉冲信号查找, 设置一阈值, 将信噪比超过该阈值的数据标识为快速射电暴候选体, 该阈值可

图3 (网络版彩图)高速数据包接收与格式转换设计图

Figure 3 (Color online) Design of high speed packets receiving and data formatting.

1) <http://w.astro.berkeley.edu/~davidm/hashpipe.git/>

2) <https://sourceforge.net/projects/heimdall-astro/>

图 4 (网络版彩图)单一FRB信号搜寻流程图

Figure 4 (Color online) Single FRB search pipeline.

根据射电望远镜的电磁环境来设置. 由于FRB的脉冲宽度未知, 为了检测持续时间大于采样时间的信号, 对每个时间序列应用一组匹配滤波器, 将采样数据与 $w_n=2^n$ 个点($0 \leq n \leq 12$)的矩形窗做卷积, 并用开方进行归一化, 然后将过滤后的时间序列继续通过程序的其他处理^[16].

最后将数据从GPU内存拷贝至CPU内存, 将候选体结果存储至特定磁盘位置, 每个计算节点的特定磁盘位置可通过网络映射至头节点.

3.4 头节点软件设计

头节点由并发信号合成、候选体探测和分类、实时绘图和触发等模块组成, 主要完成多个波束的数据合成与FRB信号进一步甄别. 并发信号合成模块根据时间信息汇聚所有计算节点同一时间的候选体数据, 候选体探测与分类模块采用一定策略对汇聚的多个波束信号进行判别, 采用多波束RFI识别方法, 去除虚假信号. 由于FRB信号一般为点源, 远小于射电望远镜的波束, 当主波束指向此类源时, 其他波束不会探测到相关信号. 但这种探测是非跟踪的, 即信号出现的位置是未知的, 有可能出现在相邻波束的中间位置, 这样, 多个波束都可能接收到信号. 一般在接收机设计时, 非相邻波束对同一信号进行探测时, 信号强度衰减至少在

30 dB以上, 基本是探测不到的. 而RFI信号的辐射角可能很大, 当辐射能量较强时, 多个波束都会接收到高于设定阈值的信号. 本文利用该原理进行RFI消除, 这里称之为多波束参考效应干扰消除.

如图5所示, 在一个13波束的排列示意图中, 事先根据识别策略制作一个有效掩码列表, 列出FRB信号在多波束中所有可能出现的情况, 这个掩码可以由13位二进制数字组成, 用0和1分别表示屏蔽和允许. 有效掩码列表的具体制作方法如下: (1) 允许所有单个波束探测到信号的情况, 掩码可由0 0000 0000 0001至1 0000 0000 0000, 1从最低位依次移至最高位; (2) 允许所有2个相邻波束探测到信号的情况, 例如波束1, 2或2, 3, 对应掩码为0 0000 0000 0011或0 0000 0000 0110; (3) 允许3个相邻波束探测到信号的情况, 例如波束1, 3, 4或6, 7, 12, 对应掩码为0 0000 0000 1101或0 1000 0110 0000; (4) 允许4个相邻波束探测到候选体的情况, 对应图5中组成菱形的最紧凑的4个波束, 例如波束1, 3, 4, 9或1, 6, 7, 12, 对应掩码为0 0001 0000 1101或0 1000 0110 0001. 但如果在相隔较远的波束中同时探测到了信号, 例如9和11, 这可能是由于RFI信号所致, 则候选体是虚假信号的概率增加, 这里将横向或纵向波束达到3个及以上的情况判定为虚假信号, 如图5所示, 3, 4, 8波束排列成一直线. 限定同时可以接收到FRB信号的最大波束数为4, 因为当波束个数超过4时, 波束的跨度就超过了3个.

处理时, 将接收到的信号也采用一序列二进制数字0和1进行标识, 称之为标识码, 如果在波束中检测到一个类似的信号, 则将其标记为1, 否则标记为0. 首先对标识码中1的个数进行判断, 如果超过4个, 则添加一个RFI标志. 如果1的个数不大于4个, 则将该标识码

图 5 多波束排列示意图

Figure 5 Arrangement diagram of multi-beam receiver.

与有效掩码列表进行同或运算, 如运算结果为1, 即相同, 则添加一个FRB候选体标志, 并结束此标识码运算, 如与有效掩码列表中所有掩码运算结果均为0, 则添加一个RFI标志.

例如, 标识码为0 0001 0000 1101, 可以和掩码匹配, 则将此信号标为FRB候选体. 又如, 标识码为0 0101 0000 1101, 探测到信号的波束个数超过4个, 则将此条数据标为RFI.

实时绘图和触发模块根据标识结果将候选体进行成图, 并将结果链接至网络发布单元进行发布, 同时通过修改Redis数据库键值进行触发, 通知存储单元此数据为候选体, 存储单元从相应计算节点内存中读取原始电压与功率谱两种类型数据写入到快速磁盘阵列.

4 硬件实现

如图6所示, 本系统硬件部分主要由FPGA、100 M网络、10 Gb网络、头节点、计算节点、数据存储等几部分组成. FPGA部分基于美国伯克利大学CASPER³⁾组织设计的第3代天文信号处理平台ROACH2⁴⁾(Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware)进行设计, 内含一颗Xilinx Vertex 6 FPGA处理核心, 配备2块4端口的10 Gb/s网卡以供数据交换, 可选3 GS/s-8 bit, 5 GS/s-8 bit, 10 GS/s-4 bit等多款ADC信号采集卡以满足不同采样带宽和精度要求. 该平台自推出以来, 在天文领域得到了广泛的应用^[17-19], 本系统选择3 GS/s-8 bit ADC采集卡, 采用N台ROACH2对N波束、双极化信号进行采样与预处理, 通过10 Gb以太网网络将数据传输至计算节点进行后处理. 为了对FPGA进行控制和监测, ROACH2内嵌PowerPC控制器, 完成FPGA程序加载、寄存器读写等功能, 还可以利用头节点通过100M网络进行通讯. 计算节点由N台高性能计算机(High Performance Computer, HPC)组成, 用于FRB信号实时搜寻, 每台配备2颗Xeon E5-2650v4 CPU处理器(12核心24线程、主频2.2 GHz, 30 MB缓存), 配备2块GTX 1080 Ti高性能GPU(内含3584 CUDA核, 11 GB GDDR5X显存, 带宽484 GB/s), 256 GB内存, 8块8 TB存储, RAID6模式下

图6 (网络版彩图)FRB搜寻终端硬件架构

Figure 6 (Color online) Hardware architecture of FRB search backend.

存储空间可达48 TB. 头节点由一台普通PC机组成, 负责ROACH2监控, 多波束信号合成与处理, 信号存储与发布等.

5 观测实验

将该终端安装于某射电望远镜系统中, 采用19波束L波段双极化接收机进行观测, 频率范围为1050–1450 MHz, 利用10台ROACH2对19波束、2极化共38路信号进行数字化, 1–9号ROACH2中, 每台处理2个波束、2个极化共4路信号, 第10号ROACH2仅处理1个波束、2个极化共2路信号. 设置采样时钟为1000 MHz, ADC工作于第3奈奎斯特采样区间: 1000–1500 MHz, 采样精度为8 bit. ROACH2对信号进行多相滤波、4096点复数FFT变换、相关、积分、网络封装等处理, 然后通过4个10 Gb网口输出原始电压和功率谱数据, 由于FRB信号一般持续时间为数毫秒, 为了看清楚FRB信号的轮廓, 一般将积分时间设置为几十微秒, 这样, FRB脉冲就可由100个左右的采样点来描述, 这里采用64 μ s积分. ROACH2输出至单个计算节点的数据速率为2048 Mbit/s, 19个节点的数据总速率为38 Gbit/s. 频谱分辨率为0.12207 MHz, DM搜寻范围为100–5000 cm^{-3} pc, 搜寻脉宽可从1–128 ms, 所有参数都可根据实际需求进行调整.

为了检验系统是否正常工作, 利用信号发生器产生一个扫频信号, 通过简易天线发射出去, 该信号进

3) https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/Main_Page

4) <https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ROACH2>

入望远镜的旁瓣, 进而被多波束接收机捕捉, 最终由本终端系统采集和处理. 设置信号发生器输出功率为 -13 dBm, 扫描频率为 $1400\text{--}1050$ MHz, 扫描点数为 12 个, 扫描周期为 ~ 0.8 s. 图 7 是本终端对波束 1 进行处理的结果, 从上往下, 第 1 栏为消色散并将各频率通道进行叠加后的时域图, 可以看到明显的脉冲. 第 2 栏为消色散后的瀑布图, 可以看到各频点信号在时间轴的弯曲, 由于扫频信号为线性变化, 而消色散采用指数变化进行计算, 效果不是很好. 第 3 栏为未经消色散的瀑布图

图 7 (网络版彩图) Birdie 注入测试结果
Figure 7 (Color online) Test result of Birdie injection.

布图, 可以在中间部分看到明显的 12 个频点信号.

脉冲星的单个脉冲信号与 FRB 的信号相似, 都是从遥远的太空传输过来, 受星际介质的影响会产生色散, 但 FRB 的 DM 值一般更大, 为了对该系统进行测试, 选择了 DM (色散量) 值较大的脉冲星 B1900+01, 并对其进行了跟踪观测. 该源的周期为 0.7293058 s, DM 值为 $245.167\text{ cm}^{-3}\text{ pc}$, 1400 MHz 频段的流量为 5.5 mJy , 脉冲宽度为 9.9 ms . 对 FRB 搜寻的参数设置为: 信噪比大于 10, 最多可同时探测到信号的波束个数不大于 4, 最大脉冲宽度小于 16 ms , 每秒最多可探测事件小于 2.

图 8 是探测到的 2 次单脉冲信号, 每幅图从下往上依次为: 未经消色散的瀑布图、消色散后的瀑布图和将各频率通道累加后的时域图. 从图中可以看出, 实时搜寻到的脉冲信号 DM 值为 $244.71\text{ cm}^{-3}\text{ pc}$, 信噪比分别为 1048.41 和 925.69, 周期在 0.7 s 左右, 与 B1900+01 的参数非常接近.

6 讨论和结论

本系统可对多波束信号进行实时采集和处理, 提高 FRB 的探测效率, 并采用一定的多波束 RFI 消除策略, 提高 FRB 的探测准确率. 该系统灵活度高, 通过修改参数可适应更高 DM 值和更短爆发持续时间的 FRB 探测. 系统可扩展性强, 可通过增加 FPGA 和 HPC 的规模处理更多波束的信号. 观测实验表明, 该系统可准确捕捉脉冲星的单脉冲信号, 对于辐射流量更高的 FRB

图 8 (网络版彩图) 脉冲星单脉冲测试结果
Figure 8 (Color online) Test result of pulsar single pulse.

信号, 也同样适用. 为了检验多波束接收机对RFI的排除能力, 试观测中开启了7个波束, 并将最多可同时探测到信号的波束个数设置为不大于4. 由于观测时望远镜跟踪脉冲星目标源, 主波束始终指向脉冲星, 加之观测台址的无线电环境较好, 仅在主波束探测到了候选体,

这也符合第3.4节中分析的多波束参考效应干扰消除策略, 更详细的RFI排除能力检验需要在后续的观测中进行定性或定量的实验. 本系统稍加变换即可用于FAST或即将建设的QTT进行多波束FRB实时探测, 相关经验也可对多波束数字终端的设计和开发提供参考.

致谢 感谢加州大学伯克利分校Vishal Gajjar, Jeff Cobb, Dan Werthimer, Eric Korpela, Sabrina Berger和北京大学李柯伽等人在系统开发过程中给予的帮助, 感谢中国科学院国家天文台岳友岭、段然、朱岩、张馨心等人在观测实验过程中给予的帮助.

参考文献

- 1 Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin. *Science*, 2007, 318: 777–780, arXiv: [0709.4301](#)
- 2 Thornton D, Stappers B, Bailes M, et al. A population of fast radio bursts at cosmological distances. *Science*, 2013, 341: 53–56, arXiv: [1307.1628](#)
- 3 Spitler L G, Cordes J M, Hessels J W T, et al. Fast radio burst discovered in the Arecibo pulsar ALFA survey. *Astrophys J*, 2014, 790: 101–110, arXiv: [1404.2934](#)
- 4 Masui K, Lin H H, Sievers J, et al. Dense magnetized plasma associated with a fast radio burst. *Nature*, 2015, 528: 523–525, arXiv: [1512.00529](#)
- 5 Spitler L G, Scholz P, Hessels J W T, et al. A repeating fast radio burst. *Nature*, 2016, 531: 202–205, arXiv: [1603.00581](#)
- 6 Gajjar V, Siemion A P V, Price D C, et al. Highest frequency detection of FRB 121102 at 4–8 GHz using the breakthrough listen digital backend at the green bank telescope. *Astrophys J*, 2018, 863: 2–9, arXiv: [1804.04101](#)
- 7 Michilli D, Seymour A, Hessels J W T, et al. An extreme magneto-ionic environment associated with the fast radio burst source FRB 121102. *Nature*, 2018, 553: 182–185, arXiv: [1801.03965](#)
- 8 Barsdell B R, Bailes M, Barnes D G, et al. Accelerating incoherent dedispersion. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 422: 379–392, arXiv: [1201.5380](#)
- 9 Karastergiou A, Chennamangalam J, Armour W, et al. Limits on fast radio bursts at 145 MHz with Artemis, a real-time software backend. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 452: 1254–1262, arXiv: [1506.03370](#)
- 10 Bannister K W, Shannon R M, Macquart J P, et al. The detection of an extremely bright fast radio burst in a phased array feed survey. *Astrophys J*, 2017, 841: L12, arXiv: [1705.07581](#)
- 11 Wang J, Chen M Z, Pei X, et al. The research and test of fast radio burst real-time search algorithm based on GPU acceleration (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2017, 58: 18-1–18-11 [王军, 陈卯蒸, 裴鑫, 等. 基于GPU加速的FRB实时搜寻算法研究与测试. *天文学报*, 2017, 58: 18-1–18-11]
- 12 Petroff E, Bailes M, Barr E D, et al. A real-time fast radio burst: Polarization detection and multiwavelength follow-up. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 447: 246–255, arXiv: [1412.0342](#)
- 13 Dunning A, Bowen M, Castillo S, et al. Design and laboratory testing of the five hundred meter aperture spherical telescope (FAST) 19 beam L-band receiver. In: 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Montreal, 2017
- 14 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 783–794]
- 15 Cordes M J, Lazio W J T. NE2001. I. A new model for the galactic distribution of free electrons and its fluctuations. arXiv: [astro-ph/0207156](#)
- 16 Barsdell B R. Advanced Architectures for Astrophysical Supercomputing. Dissertation for Doctoral Degree. Melbourne, Australia: Swinburne University, 2012
- 17 Pei X, Li J, Yuan J P, et al. The progress of pulsar backend development based on ROACH2 (in Chinese). *Progr Astron*, 2017, 35: 244–254 [裴鑫, 李健, 袁建平, 等. 基于ROACH2的脉冲星终端研制进展. *天文学进展*, 2017, 35: 244–254]
- 18 Pei X, Li J, Chen M Z, et al. A design of a digital correlator for microwave holography based on the ROACH platform (in Chinese). *Astronom*

Res Technol, 2015, 12: 54–62 [裴鑫, 李健, 陈卯蒸, 等. 基于ROACH的微波全息法相关机设计. 天文研究与技术, 2015, 12: 54–62]

- 19 Pei X, Nie J, Chen M Z, et al. Realization of dual-channel real-time correlator based on heterogeneous architecture (in Chinese). Comput Eng, 2016, 42: 42–53 [裴鑫, 聂俊, 陈卯蒸, 等. 基于混合架构的双通道实时相关器实现. 计算机工程, 2016, 42: 42–53]

Design of FRB real-time search backend for multi-beam receiver

PEI Xin^{1,2}, LI Jian^{1,2*}, LI ShiYu³ & NIU ChenHui^{4,5}

¹ *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

² *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

³ *Astronomy Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

⁴ *College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;*

⁵ *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

Fast radio burst (FRB) is an occasional and instantaneous radio burst. In order to detect more samples for research, this paper develops a real-time search digital backend based on multi-beam receiver. The system includes data acquisition and processing, single-beam signal processing, multi-beam signal synthesis and analysis, detection results storage and distribution. It can collect and analyze multi-beam signals simultaneously. Multi-beam signal reference effect is used to eliminate radio frequency interference and improve detection accuracy. Observation experiments were carried out on a radio telescope. The function of FRB detection was tested by capturing the single pulse signal of a pulsar. The result shows that the digital backend can achieve accurate and real-time FRB detection.

astronomy backend, fast radio burst, multi-beam receiver, data analysis

PACS: 95.55.Qf, 95.75.Pq, 97.60.-s, 97.20.-w, 95.85.Bh

doi: [10.1360/SSPMA2018-00418](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00418)