

引用格式: 王性川, 严婕, 李祎丰, 等. 利用射电暴发信号测量系统间时延的研究[J]. 时间频率学报, 2024, 47(3): 159-170.

利用射电暴发信号测量系统间时延的研究

王性川^{1,2}, 严婕³, 李祎丰^{1,2}, 赵成仕^{1,2,4}, 罗近涛^{1,2,4}

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 西安交通大学, 西安 710049;
- 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

摘要: 利用中国科学院国家授时中心吴平站的射电望远镜, 开展基于 PSR J0534+2200 发射的巨脉冲信号测量两个观测系统之间时间延迟的研究。两个时间频率参考信号不同的观测系统同时对射电望远镜接收到的 PSR J0534+2200 脉冲星信号进行独立观测, 一共观测 4 次, 共观测 4.5 h。经测量, PSR J0534+2200 发射的同一巨脉冲信号在两个系统中到达时间不同, 巨脉冲到达时间之差即为两个系统之间的时间延迟。采用三次样条内插法和高斯拟合法对巨脉冲的轮廓拟合, 将拟合轮廓的峰值相位作为巨脉冲的到达时间。通过对测量系统时延的误差统计, 结果表明: 利用原始轮廓的峰值相位测量系统误差均方根小于 $57 \mu\text{s}$, 三次样条内插法测得均方根误差小于 $13 \mu\text{s}$, 高斯拟合法测得均方根误差小于 $7 \mu\text{s}$ 。相较于利用原始轮廓的峰值相位测量系统误差, 采用三次样条内插法以及高斯拟合法对于系统延迟的精度分别提升了 3.9 倍和 8.6 倍, 为利用射电暴发信号进行高精度的时间同步打下基础。

关键词: 脉冲星; 巨脉冲; 互相关; 三次样条内插法; 高斯拟合

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-03-0159-12

Research on measuring time delay between systems using radio burst signals

WANG Xing-chuan^{1,2}, YAN Jie³, LI Yi-feng^{1,2}, ZHAO Cheng-shi^{1,2,4}, LUO Jin-tao^{1,2,4}

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
- Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
- Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: Using the radio telescope at Haoping Station of the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences, the study on measuring the time delay between two observation systems using the giant pulses from PSR J0534+2200 is carried out. PSR J0534+2200 was observed for four times with two observation systems with different time and frequency reference signals simultaneously and independently. The total observing time is 4.5 hours. The arrival time of the same giant pulse signal transmitted by PSR J0534+2200 is

收稿日期: 2023-05-08; 接受日期: 2023-06-18

基金项目: 平方公里阵列射电望远镜 (SKA) 专项 (2020SKA0120200)

different in the two systems. The difference in the arrival time of the giant pulse is considered to be the time delay between the two systems. The cubic spline interpolation method and Gaussian fitting method are used to fit the profile of the giant pulse, and the peak phase of the fitted profile is taken as the arrival time of the giant pulse. The analysis of the error of the measuring system time delay shows that the root mean square error of the measuring system using the peak phase of the original profile, cubic spline interpolation, and the Gaussian fitting are less than $57 \mu\text{s}$, less than $13 \mu\text{s}$, and less than $7 \mu\text{s}$, respectively. Compared to the method using the peak phase of the original profile to measure the system error, the accuracy of the system delay using the cubic spline interpolation method and Gaussian fitting method has been improved by 3.9 and 8.6 times, respectively, laying the foundation for high-precision time synchronization using radio burst signals.

Key words: pulsar; giant pulses; cross correlation; cubic spline interpolation method; Gaussian fitting

高精度的时间传递在国防建设、航空航天等领域发挥着重要作用。时间传递一般是指通过测量和计算,得到位于异地的两台钟的钟差^[1]。目前高精度的时间传递技术主要包括:全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)共视和双向卫星时间频率传递技术(two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT)^[2]。这种授时手段主要用于地面用户。执行深空探测任务的航天器,距离地球遥远,与地面通信延迟大,通过现有技术进行时间传递难度大。如何实现远距离高精度的时间同步和保持是难题。因此,在没有导航卫星支持的条件下,如何保证航天器的时间精度是时间同步系统设计的热点问题^[3]。

来自脉冲星的单脉冲、巨脉冲以及快速射电暴都是典型射电暴发事件。巨脉冲是脉冲星辐射中最突出的射电暴发现象,一般认为能量超过平均脉冲能量的十倍及以上的单脉冲为巨脉冲^[4]。1968年 Staelin 等人^[5]意外探测到了来自 PSR J0534+2200 脉冲星方向上的巨脉冲。2003年 Hankins^[6]发现了 PSR J0534+2200 脉冲星发射的脉冲宽度短于 2 ns 的巨脉冲,并且持续时间越短的巨脉冲流量密度往往越大。快速射电暴是在射电波段短暂出现的暴发现象,它的持续时间一般是若干毫秒,流量密度可以达到央斯基(Jy)量级^[7]。有的快速射电暴呈现一定的暴发周期性,如 FRB 180 916 可能存在一个 16.35 d 的暴发周期,快速射电暴的周期较长^[8]。

PSR J0534+2200 脉冲星发射的巨脉冲持续时间短,暴发次数多,平均约 4 s 就会有一个巨脉冲被探测到^[9]。PSR J0534+2200 脉冲星发射的巨脉冲能量高,个别巨脉冲的峰值流量密度能够达到几

千甚至几百万央斯基,利用小型天线也可以探测到^[10]。这些巨脉冲持续时间短,一般在几纳秒到几微秒,脉冲宽度窄,为实现高精度的时间同步提供可能。Ilyasov 等人^[11]提出了利用脉冲星的巨脉冲实现时间同步和比对的方法,该方法需要中等尺寸的射电望远镜、低噪声放大器以及高速记录设备等,可以进行地球之外距离,甚至外太空的时间同步。Rodin 等人^[12]通过比对巨脉冲在地球和月球之间的时间延迟,提出了一种基于互相关的巨脉冲到达时间比对算法,建立了月球与地面观测站之间巨脉冲到达的时延模型。

为探究利用射电暴发事件时间同步的可行性,本文将 PSR J0534+2200 脉冲星发射的巨脉冲作为共视事件,中国科学院国家授时中心吴平站射电望远镜观测到的同一路信号通过功分器进入两个观测系统,测量两个观测系统之间同一巨脉冲的到达时间延迟。不考虑传播路径的影响,对两个观测系统时间进行比对,测量两个系统之间的时间延迟,并评估该方法的精度。两个观测系统的时间是由不同的秒脉冲信号提供的,PSR J0534+2200 脉冲星信号中包含的巨脉冲在两个观测系统中的到达时间不同,采用三次样条内插法和高斯拟合法对轮廓数据拟合,将拟合得到的巨脉冲的峰值相位作为巨脉冲的到达时间,将巨脉冲的到达时间差作为两个观测系统之间的系统时延。

1 观测

吴平站 40 m 射电望远镜于 2014 年建成,天线为卡塞格林式,装配有 L 波段和 S 波段接收机。

2015 年底利用 L 波段观测系统平台，配置基于 Roach2 的脉冲星消色散终端，建成脉冲星观测系统，可记录搜寻模式和计时模式观测数据，在 2019 年 11 月之前采用右旋单极化的接收模式，此后升级为双圆极化接收模式。

图 1 为吴平站脉冲星观测和数据记录流程图。天线接收从天体发射出的射电信号，经过极化器将射电信号分成两路信号，分别为左旋圆极化信号和右旋圆极化信号；经过低噪声放大器和滤波器，输出为左旋圆极化射频信号（left circular polarization radio frequency, LCP RF）和右旋圆极化射频信号（right circular polarization radio frequency, RCP RF）。通过 1 GHz 频率的本振信号将射频信号下变频为 800 MHz 带宽的中频信号（intermediate frequency, IF）。本文涉及的观测中，中频信号经过功分器被分成两路，进入两套基于 Roach2 的脉

冲星消色散终端系统。

两套终端系统的时间频率参考信号分别采用本地铯钟产生的 10 MHz 和秒脉冲信号（1 PPS）以及中国科学院国家授时中心保持的协调世界时 UTC（NTSC）在吴平复现后的 10 MHz 和 1 PPS 信号。对 UTC（NTSC）的复现是通过吴平与位于临潼的国家授时中心进行卫星共视比对，根据两地的共视比对时差调整吴平本地原子钟，然后复现出 UTC（NTSC）的 10 MHz 与 1 PPS。秒脉冲信号是具有准确上升沿的时钟同步信号，两套终端系统的时间保持与本地网络时间服务器同步，为秒脉冲信号赋予时间戳信息，两个终端系统之间的时间延迟为两个秒脉冲信号上升沿对应的相位差。两个终端系统的线路基本一致，硬件链路差异造成的时间延迟差异可忽略不计，同一巨脉冲的到达时间差主要是两个秒脉冲信号的时间延迟。

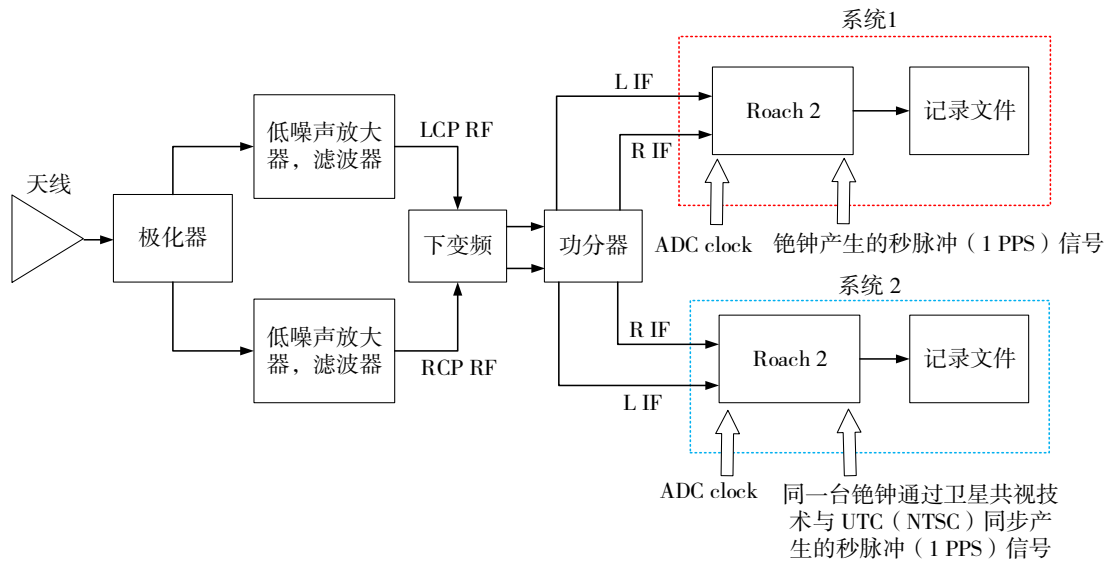


图 1 吴平站脉冲星观测和数据记录流程图

在 2022 年 8 月 9 日至 12 日，两个系统设置同样的观测参数同时对 PSR J0534+2200 脉冲星进行

了搜寻模式的观测，具体设定的观测参数如表 1 所示（本文出现的时间为北京时间）。

表 1 吴平站 2022 年 8 月 9 日至 12 日观测 PSR J0534+2200 脉冲星的参数

日期	中心频率 /GHz	时间分辨率 / μ s	通道数	有效观测带宽/MHz	瞬间探测到的最小流量/Jy	观测模式	起始时刻	观测时长 /s
8 月 9 日	1.4	81.92	1 024	650	7.9	非相干搜寻	09:57:48	4 906
8 月 10 日	1.4	81.92	1 024	650	7.9	非相干搜寻	09:23:14	3 893
8 月 11 日	1.4	81.92	1 024	650	7.9	非相干搜寻	09:48:41	4 409
8 月 12 日	1.4	81.92	1 024	650	7.9	非相干搜寻	09:50:04	2 999

射电望远镜的观测灵敏度计算公式为^[13]

$$S_{\min} = \frac{2\left(\frac{S}{N}\right)\beta\kappa(T_{\text{rec}} + T_{\text{sky}})}{\eta A \sqrt{n_p \tau \Delta f}} \quad (1)$$

式(1)中: $\frac{S}{N}$ (signal-noise ratio, SNR) 是最低探测的信噪比, β 是量化损失因子, κ 为玻尔兹曼常数, T_{rec} 是接收机噪声温度, T_{sky} 是背景温度, η 是天线效率, A 是天线面积, n_p 是天线极化数, τ 是时间分辨率, Δf 是观测时采用的有效带宽。本次观测采用的有效观测带宽约为 650 MHz, $(T_{\text{rec}} + T_{\text{sky}})$ 约为 100 K, 天线面积约为 1 250 m², 时间分辨率为 81.92 μ s, 天线效率约为 0.6, 采用 8 位采样量化 $\beta \approx 1$, n_p 为 1, 当信噪比等于 5 时, 吴平望远镜系统瞬间探测到的最小流量约为 7.9 Jy。

脉冲星距离地球很远, 天线接收到的脉冲星信号非常微弱, 并且由于星际介质的色散作用, 会造成高频信号比低频信号提前到达, 接收到的脉冲星信号轮廓会展宽, 甚至完全消失, 需要对观测的数据进行消色散处理。目前消色散处理的方法主要分为非相干消色散和相干消色散^[14]。非相干消色散采用的方式是将数据按照频率划分为多个通道, 根据高频信号比低频信号提前到达这一特点, 人为地平移通道信号来消除色散, 而相干消色散则是在频域上利用星际介质的传输函数进行消色散处理, 不需要分通道就可以将整个观测频带的色散全部消除^[15]。本次观测采用的是非相干消色散模式, 通道与通道之间通过平移信号可以将色散造成的延迟消除, 但是在单个通道内色散造成的延迟无法消除, 因此会将脉冲星信号轮廓展宽。频率为 ν_1 和 ν_2 ($\nu_1 > \nu_2$), 到达地球的时间延迟为^[16]

$$\Delta t(s) = D\left(\frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2}\right)DM \approx 4.15 \times 10^6 \text{ ms} \times \left(\frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2}\right) \times DM \quad (2)$$

式(2)中: $DM = \int_0^d n_e dl$ 是脉冲星的色散量, D 是色散常数, 其值约为 $4.15 \times 10^3 \text{ MHz}^2 \cdot \text{pc}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}$, 在接收频带确定的情况下, 通道内的色散造成的展宽与色散量的关系为^[15-16]

$$\tau(s) = \frac{8.3 \times 10^3 B_i(\text{MHz})DM}{\nu_{\text{MHz}}^3} \quad (3)$$

式(3)中: $B_i(\text{MHz})$ 是单个通道内的频带宽度, ν_{MHz} 是观测的中心频率, DM 是脉冲星的色散值。除了色散会对脉冲轮廓造成展宽之外, 星际介质的散射也会对脉冲轮廓造成展宽, 散射造成展宽为^[9]

$$t_{\text{scatt}}(s) = \left(\frac{DM}{1000}\right)^{3.5} \left(\frac{400}{\nu_{\text{MHz}}}\right)^4 \quad (4)$$

由于色散和散射造成的展宽, 再加上仪器设备的限制, 实际观测到脉冲星信号的宽度 W 为^[17]

$$W = (W_{50}^2 + \Delta t^2 + t_{\text{scatt}}^2 + t_{\text{samp}}^2)^{1/2} \quad (5)$$

式(5)中: 脉冲星发射的脉冲宽度常用 W_{50} 表征, 即脉冲星轮廓峰值流量强度的 50% 对应的脉冲轮廓宽度^[18]。 Δt 是色散造成的延迟, t_{scatt} 是散射造成的延迟, t_{samp} 是时间分辨率。

PSR J0534+2200 脉冲星的色散量为 $56.8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$, 本文观测设置的单通道的带宽为 0.781 5 MHz, 单通道内造成的色散延迟约为 134 μ s, 散射造成的时间延迟约为 0.3 μ s。对于半波全宽为 1 ns 的巨脉冲, 主要受通道内的色散展宽影响, 根据式(5)得出观测得到的脉冲宽度为 157.2 μ s。巨脉冲宽度由于色散效应和散射效应会对脉冲轮廓造成展宽, 但仍然很窄, 只有几个采样点。

2 观测数据处理与分析

正确区分射频干扰信号和巨脉冲信号是数据处理中重要的环节之一。我们使用 PRESTO (Pulsar Exploration and Search TOolkit) 软件来处理数据。PRESTO 软件是由 Scott Ransom 开发的脉冲星搜索和分析软件^[19], PRESTO 数据处理流程分为周期信号和单脉冲信号处理流程, 对于非周期的巨脉冲, 采用单脉冲信号处理流程, 图 2 是基于 PRESTO 的单脉冲搜索方法搜寻天体物理信号的数据流程图。它主要包括如下步骤: 数据收集、去干扰、消色散、单脉冲搜索、候选体选择等步骤。

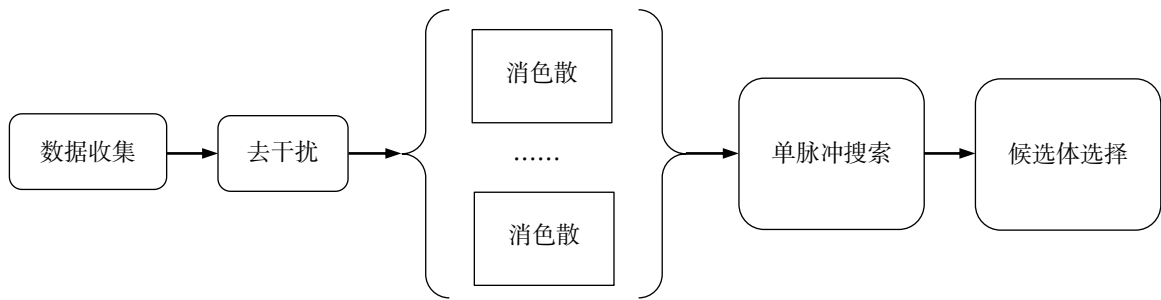


图2 基于 PRESTO 的单脉冲搜索数据流程图

射电望远镜收集数据后,首先要对数据做射频干扰的(RFI)消除,PRESTO中的`rfifind`命令可以识别数据中大部分的RFI,这部分的RFI可在后续数据处理中消除。根据澳大利亚望远镜国家设施(Australia Telescope National Facility, ATNF)提供的最新版脉冲星目录,PSR J0534+2200脉冲星的色散值约为 $56.8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$,将观测数据按照色散值为 $56.8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$ 处进行消色散处理,得到时间序列。再根据匹配滤波的方式对时间序列进行信噪比大于5为阈值搜索其中的单脉冲,找出的信号作为候选信号,记录在候选体文件中。候选体文件中,里面记录了单脉冲信号的信噪比、色散值、脉冲到达时间、脉冲到达时间对应的采样点以及脉冲宽度等信息。

在单脉冲搜索过程中,没有去掉的RFI会被当成候选信号,需要对候选信号做进一步的识别。脉冲星发出的信号会在实际色散值处强度最强,宽度最窄,随着逐渐远离实际的色散值,信噪比逐渐变弱,宽度逐渐变宽。而射频干扰信号一般为地面上的射电干扰源发出的,在 $0 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$ 处信号强度最强,随着色散值逐渐增大,干扰信号的信噪比可能会逐渐减弱或不变。根据这一特点,选取色散值为 $48\sim 66 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$ 范围,设置色散值步长 $0.2 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$,使用`prepdata`命令根据对应的90个色散值对数据进行消色散处理,得到多个消色散后的时间序列,根据脉冲星信号信噪比和宽度随色散值变化的特点,对候选单脉冲信号做进一步的识别和诊断,排除假的候选体信号,找出所有的巨脉冲信号。

根据上述方法,系统1中共探测到5746个信噪比大于5的巨脉冲,其中信噪比大于15的巨脉冲数量为799个。

3 射电暴发事件计算系统时延

Eilek等人^[20]在2007年分析巨脉冲宽度分布发现,巨脉冲的脉冲宽度越短,强度往往更强。巨脉冲的信噪比越高,对应的脉冲宽度往往越窄,计算巨脉冲的到达时间精度也越高。通过对PRESTO处理后得到的候选体文件中记录的脉冲宽度分析发现:信噪比大于10的巨脉冲数量为1854,平均脉冲宽度为 $241 \mu\text{s}$;信噪比大于15的巨脉冲数量为799,平均脉冲宽度为 $204 \mu\text{s}$;信噪比大于20的巨脉冲数量为431,平均脉冲宽度为 $203.4 \mu\text{s}$ 。综合考虑选取巨脉冲数量较多且脉冲宽度较窄的信号,将信噪比大于15的巨脉冲作为共视事件测量系统时延,为描述方便,下文指的巨脉冲均为信噪比大于15的巨脉冲。

根据PRESTO的单脉冲搜索方法找出信噪比大于15的巨脉冲之后,采用互相关法判断两个系统中的巨脉冲是否为PSR J0534+2200脉冲星发射的同一脉冲,找出两个系统中对应的巨脉冲,采用内插法和高斯拟合法对巨脉冲轮廓进行拟合,将巨脉冲拟合轮廓的峰值相位作为巨脉冲的到达时间,两个系统中巨脉冲的到达时间差即为两个系统之间的时间延迟,计算得出两种方法的系统时延,评估两种方法计算系统时延的精度。

3.1 互相关法判断两个系统中的巨脉冲是否为同一脉冲

互相关函数可以计算出两个时间序列在两个不同时刻上取值的相似程度。互相关系数是由互相关函数得出两个时间序列之间相似度的表征,已知两个离散信号序列 $f(X_i)$ 和 $g(Y_i)$,互相关系数的

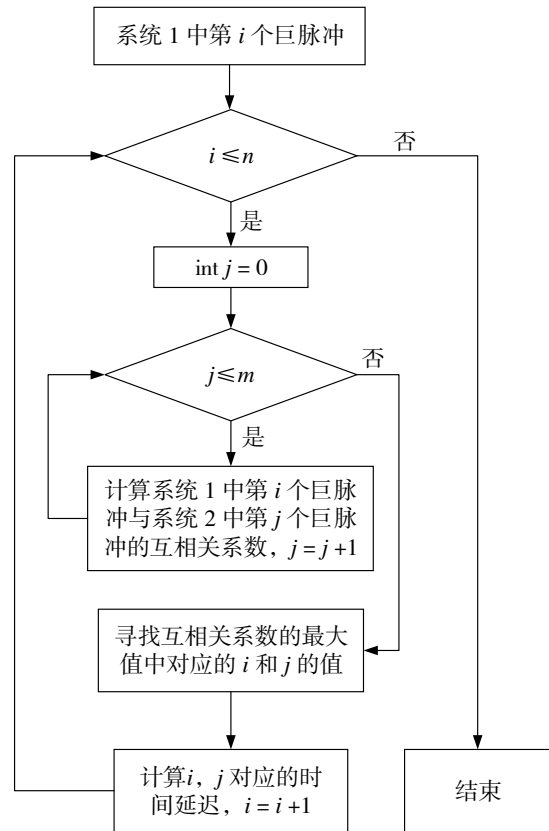
表达式^[21]为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

式(6)中： n 是离散信号的长度， \bar{X} ， \bar{Y} 分别为离散信号 $f(X_i)$ 和 $g(Y_i)$ 的平均值。互相关系数 r 越大，表明两者信号之间的相似程度越高。系统 1 的开始观测时间为 t_1 ，系统 1 中经过时间 Δt_1 巨脉冲到达，系统 2 的开始观测时间为 t_2 ，系统 2 中经过时间 Δt_2 巨脉冲到达，系统时间延迟等于巨脉冲到达时间之差，两个系统开始观测的时间已知，两个系统之间的时间延迟 τ 为

$$\tau = t_1 - t_2 + \Delta t_1 - \Delta t_2 \quad (7)$$

根据 PRESTO 单脉冲搜索方法找出信噪比大于 15 的巨脉冲，候选体文件中会记录每个巨脉冲信噪比、色散值、脉冲到达时间、脉冲到达时间对应的采样点以及脉冲宽度等信息。图 3 为根据互相关法判断两个系统中的巨脉冲是否为 PSR J0534+2200 脉冲星发射的同一脉冲的流程图。根据候选体文件记录的信息，以巨脉冲到达时间对应的采样点为中心，截取合适的宽度作为计算互相关系数的窗口，将系统 1 中的第 i 个巨脉冲所在的窗口数据与系统 2 中的每一个巨脉冲的窗口数据依次计算互相关系数，互相关系数最大值对应 i, j 为 PSR J0534+2200 脉冲星发射的同一巨脉冲。根据 i, j 的峰值相位可求出系统开始观测到巨脉冲到达经过多长时间，即可求式(7)中的 $\Delta t_1, \Delta t_2$ ，两个系统开始观测时间 t_1, t_2 是已知的情况下，即可计算出系统时间延迟 τ 。在观测期间，系统时间延迟 τ 不会在秒数量级发生变化，因此计算得到的多个时间延迟在秒数量级上应该一致。因此可以对系统 1 中 799 个巨脉冲通过互相关系数计算得到的系统时延结果进行统计分析，认为出现次数最多的系统时延即为实际的系统延迟，其余值则判断为互相关法识别失败。将实际时延的数量与时延的总数相除得到概率，概率越高，说明互相关识别出实际的系统时延数量越多，互相关识别同一巨脉冲越准确。



注：其中 n, m 分别为系统 1, 2 巨脉冲的数量

图 3 互相关法判断两个系统中的巨脉冲是否为 PSR J0534+2200 脉冲星发射的同一脉冲流程图

从时间序列中截取采样点的数量作为计算互相关系数的窗口对于实际时延的概率影响较大。以巨脉冲到达时间对应的采样点为中心，窗口宽度越窄，采样点过少，窗口数据不能完全覆盖巨脉冲轮廓，互相关得到的系统延迟概率越低，互相关识别同一巨脉冲效果差，窗口宽度越宽，窗口内的数据量越多，互相关得到的系统延迟概率越高，但计算所需的时间更长。图 4 中 (a) 为互相关计算所需时间与窗口宽度关系的折线图，可以看出选取的窗口宽度越宽，互相关计算所需时间越长，二者近似于线性关系。图 4 (b) 为系统延迟概率与窗口宽度的折线图，随着窗口宽度的增加，互相关计算的概率越高，在窗口宽度为 83 ms (对应 1 024 个采样点) 处达到最大值，随后即使增加窗口宽度，概率也没有增加，因此，综合考虑，选取窗口宽度 83 ms (对应 1 024 个采样点) 作为计算互相关系数的窗口。

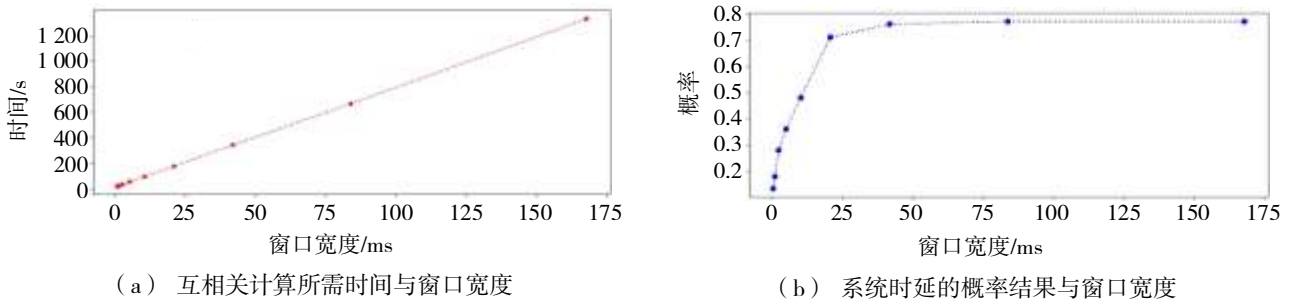


图 4 互相关计算所需时间与窗口宽度和时延的概率结果与窗口宽度

图 5 为窗口宽度为 83 ms (对应 1 024 个采样) 系统时延的概率分布统计图, 系统 1 中共探测到 799 个巨脉冲, 其中 629 个巨脉冲通过互相关系数计算得到的时间延迟约为 0.27 s, 占比约为 78%。经过检查系统 1 中的 629 个巨脉冲与系统 2 中对应的 629 个巨脉冲的前后顺序一致, 以及相邻两个巨脉冲之间的时间间隔一致, 使用互相关法能够识别 PSR J0534+2200 脉冲星发射的同一巨脉冲。大部分巨脉冲利用互相关法可以准确识别, 但仍有一小部

分巨脉冲互相关识别出错。原因主要有两个: 一是因为两个观测系统开始观测和结束观测的时间不同, 造成系统 1 中探测到了巨脉冲, 而系统 2 中没有探测到该巨脉冲。二是两个系统中都探测到了 PSR J0534+2200 脉冲星发射的同一巨脉冲信号, 但是该巨脉冲的轮廓和其他巨脉冲轮廓高度相似, 该巨脉冲的窗口数据与其他巨脉冲窗口数据计算得出的互相关系数最高, 互相关法识别出错。

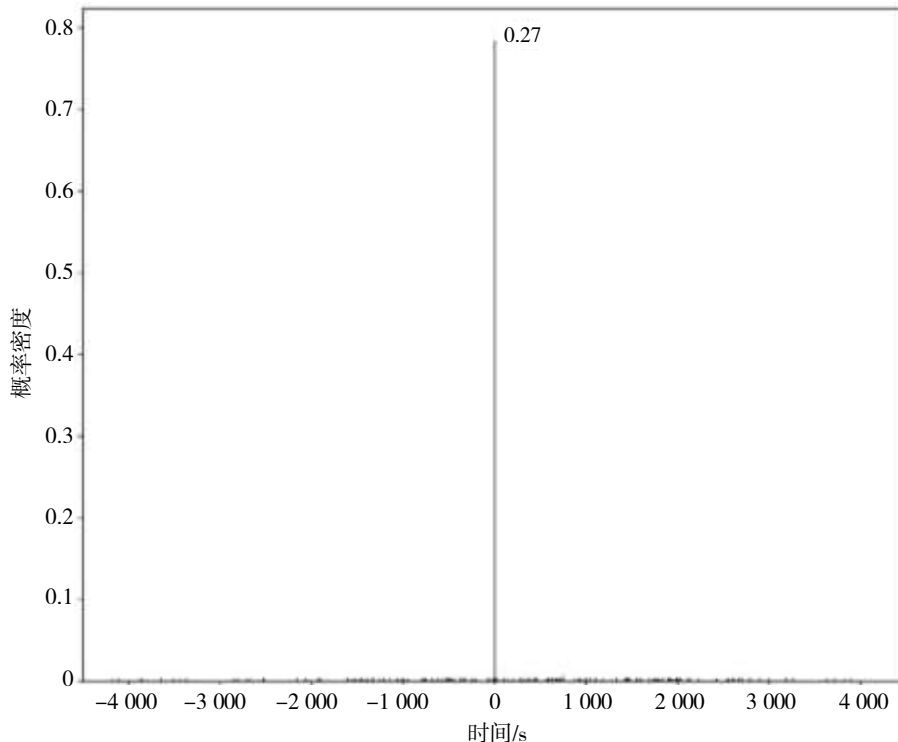
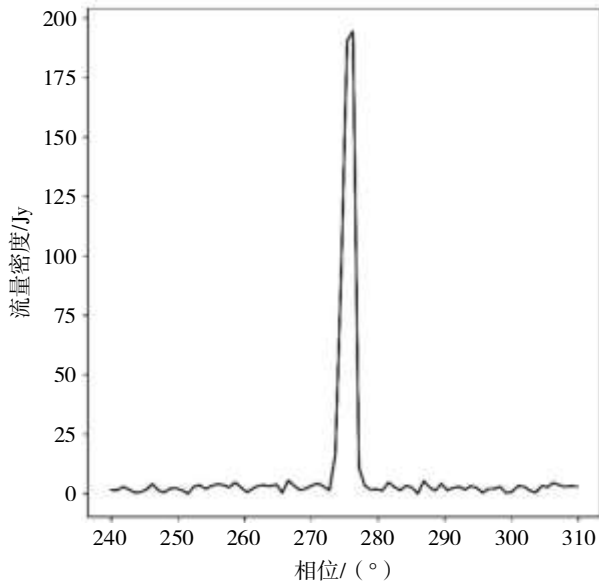


图 5 时间延迟概率分布统计图

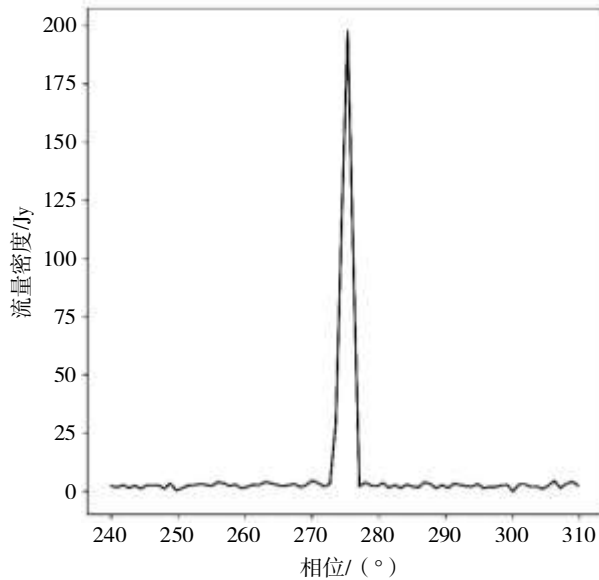
图 6 (a) 为系统 1 在 8 月 11 日 10:15:26.459 时探测到信噪比为 183 的巨脉冲轮廓, 图 6 (b) 为利用互相关法识别出和系统 1 对应的同一巨脉冲轮廓, 从图 6 中可以看出, 由于观测设备的时间

分辨率所限, 巨脉冲轮廓很窄, 只有几个采样点, 两个系统中同一巨脉冲的轮廓和脉冲宽度有所差别, 并不完全一致。通过对比两个系统中巨脉冲的到达时间发现: 在系统 1 的巨脉冲到达后, 经过

0.268 477 s 系统 2 对应的同一巨脉冲才到达, 两个巨脉冲的到达时间差为两个系统之间的时间延迟, 根据图 1 中的吴平站脉冲星观测和数据记录流程图可知, 两个系统之间的时间延迟为两个秒脉冲信号上升沿对应的相位差。



(a) 系统 1



(b) 系统 2

注: 8月11日10:15:26.459时探测到的巨脉冲, 系统1采用本地铯钟产生的原始10 MHz和1 PPS信号, 系统2采用复现UTC(NTSC)后产生的10 MHz和1 PPS信号

图 6 系统 1 和系统 2 探测到的巨脉冲轮廓

3.2 拟合巨脉冲的到达时间

本次观测设置的时间分辨率为 $81.92 \mu\text{s}$, 如果

以原始轮廓数据的峰值相位作为巨脉冲的到达时间, 对于高精度的系统时间延迟测量还达不到要求。为达到高精度的系统时间延迟的测量, 分别采用内插和高斯拟合的方式对巨脉冲的轮廓数据进行拟合, 将拟合之后的峰值相位作为巨脉冲的到达时间, 巨脉冲到达时间之差即为两个系统之间的时间延迟。

内插是离散函数逼近的重要方法, 利用它可通过函数在有限个点处的取值状况, 估算出函数在其他点处的近似值。本文采用三次样条内插法, 对巨脉冲轮廓数据每一个采样点区间 $[a, b]$ 都用三次多项式函数拟合, 三次多项式函数^[22]为

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3. \quad (8)$$

式(8)中: a_0, a_1, a_2, a_3 为多项式的系数, 三次多项式函数 $f(x)$ 需满足在 $[a, b]$ 区间上一阶导数和二阶导数连续, 计算简单, 稳定性好, 可以较好地描述大部分光滑曲线。采用三次样条函数对巨脉冲的轮廓数据进行数据插值, 随着内插的点数越多, 计算所需的时间也越多, 而利用内插法计算的系统时延与真值的均方根误差则先下降, 最后在插值点数为 99 时趋于稳定, 即使再增加内插点数, 均方根误差也不会下降。综合考虑, 在每个采样点之间插值 99 个点, 插值间隔 $0.81 \mu\text{s}$ 。

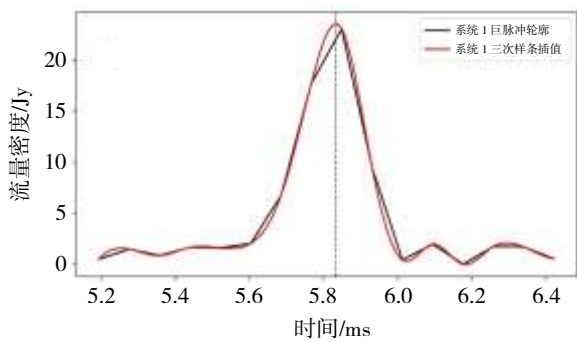
由于观测设备的时间分辨率所限, 探测不到 PSR J0534+2200 脉冲星巨脉冲的纳秒结构。本次探测到的巨脉冲宽度只有 2~4 个采样点。如图 3 所示本次观测到的 PSR J0534+2200 脉冲星巨脉冲轮廓呈单峰的高斯形状, 可以利用一个高斯模板函数来拟合轮廓数据, 计算出拟合轮廓的峰值, 从而得出系统时延。高斯拟合是通过高斯函数对观测数据进行函数逼近的拟合方法, 高斯模板函数的表达式^[23]为

$$y = a_1 \exp\left(-\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2. \quad (9)$$

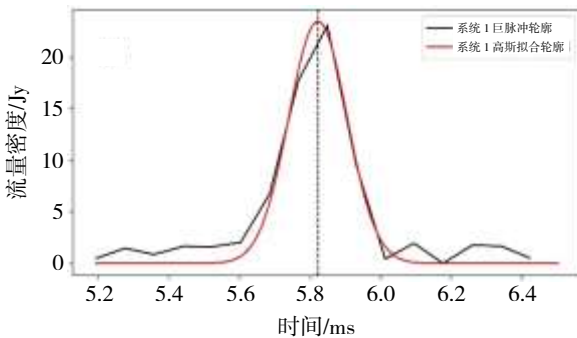
式(9)中: a_1, b_1, c_1 为待定参数, a_1 为巨脉冲的振幅, b_1 为振幅所对应的位置, c_1 为轮廓的半宽度, 高斯拟合就是寻求一条曲线 $y = f(x)$, 使得巨脉冲轮廓数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 与曲线的距离平方和最小, 即拟合轮廓与实际观测的巨

脉冲轮廓之间的残差最小，求解出的参数 b_1 为对应的峰值相位，即巨脉冲的到达时间。

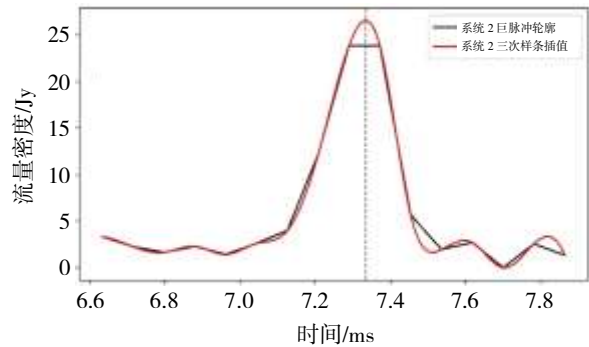
图 7 为 2022 年 8 月 11 日同一巨脉冲轮廓图，黑线表示系统原始的巨脉冲轮廓，红线表示插值或者拟合后的巨脉冲轮廓，竖直虚线表示拟合轮廓的峰值相位。图 7 (a) 为系统 1 同一巨脉冲插值 99 点的轮廓图，根据插值轮廓的峰值相位计算得出系统 1 中巨脉冲的到达时间为 $46\ 455\ 833\ \mu\text{s}$ ，图 7 (b) 为系统 1 中的同一巨脉冲高斯拟合后的轮廓图，通过拟合轮廓的峰值计算出的巨脉冲到达时间为 $46\ 455\ 822\ \mu\text{s}$ ，图 7 (c) 为系统 2 中同一巨脉冲插值 99 点的轮廓图，系统 2 中的巨脉冲到达时间为 $24\ 187\ 334\ \mu\text{s}$ ，图 7 (d) 为系统 2 中同一巨脉冲的高斯拟合轮廓图，系统 2 中的巨脉冲到达时间为 $26\ 187\ 317\ \mu\text{s}$ 。系统 1 开始观测的时间比系统 2 开始观测的时间早 22 s，根据式 (7) 得出三次样条内插法测得的系统延迟约为 $268\ 499\ \mu\text{s}$ ，高斯拟合测得的系统延迟约为 $268\ 505\ \mu\text{s}$ ，二者相差 $6\ \mu\text{s}$ 。通过对比两个巨脉冲的原始轮廓发现，由于设备的时间分辨率所限，同一巨脉冲的形状差别较大。



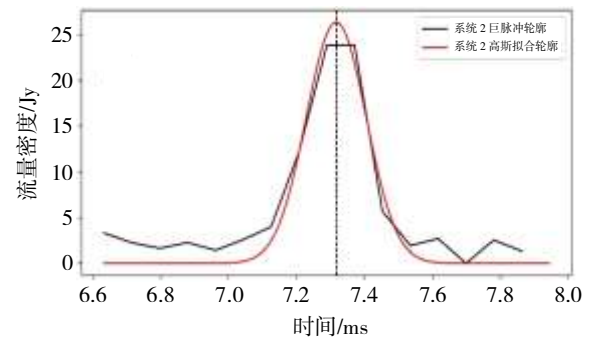
(a) 系统 1 中同一巨脉冲插值 99 点的轮廓图



(b) 系统 1 中同一巨脉冲高斯拟合后的轮廓图



(c) 系统 2 中同一巨脉冲插值 99 点的轮廓图



(d) 系统 2 中同一巨脉冲高斯拟合后的轮廓图

图 7 同一巨脉冲在两个系统的轮廓图

3.3 评估系统时延精度

为验证利用射电暴发事件测量系统时间延迟的准确性，分析三次样条内插法和高斯拟合法计算系统时延的精度，在 2022 年 8 月 9 日至 8 月 12 日，使用多通道高精度时间间隔测量仪 (MTIM-712) 接入两个观测系统的秒脉冲信号，测量两个秒脉冲信号的相位差，根据图 1 中的吴平站脉冲星观测和数据记录流程图，两个秒脉冲信号的相位差即为两个系统之间的时间延迟。多通道高精度时间间隔测量仪测量时差精度优于 $30\ \text{ps}$ ，远高于利用射电暴发事件测得的精度，因此可将多通道时间间隔测量仪测量结果作为真值，来评估两种方法的精度。图 8 是两种方法测量的巨脉冲时延值与实际的系统时延值，横坐标为北京时间，纵坐标是两种方法测得的时间延迟，绿色虚线表示多通道时间间隔测量仪测得的时间延迟。

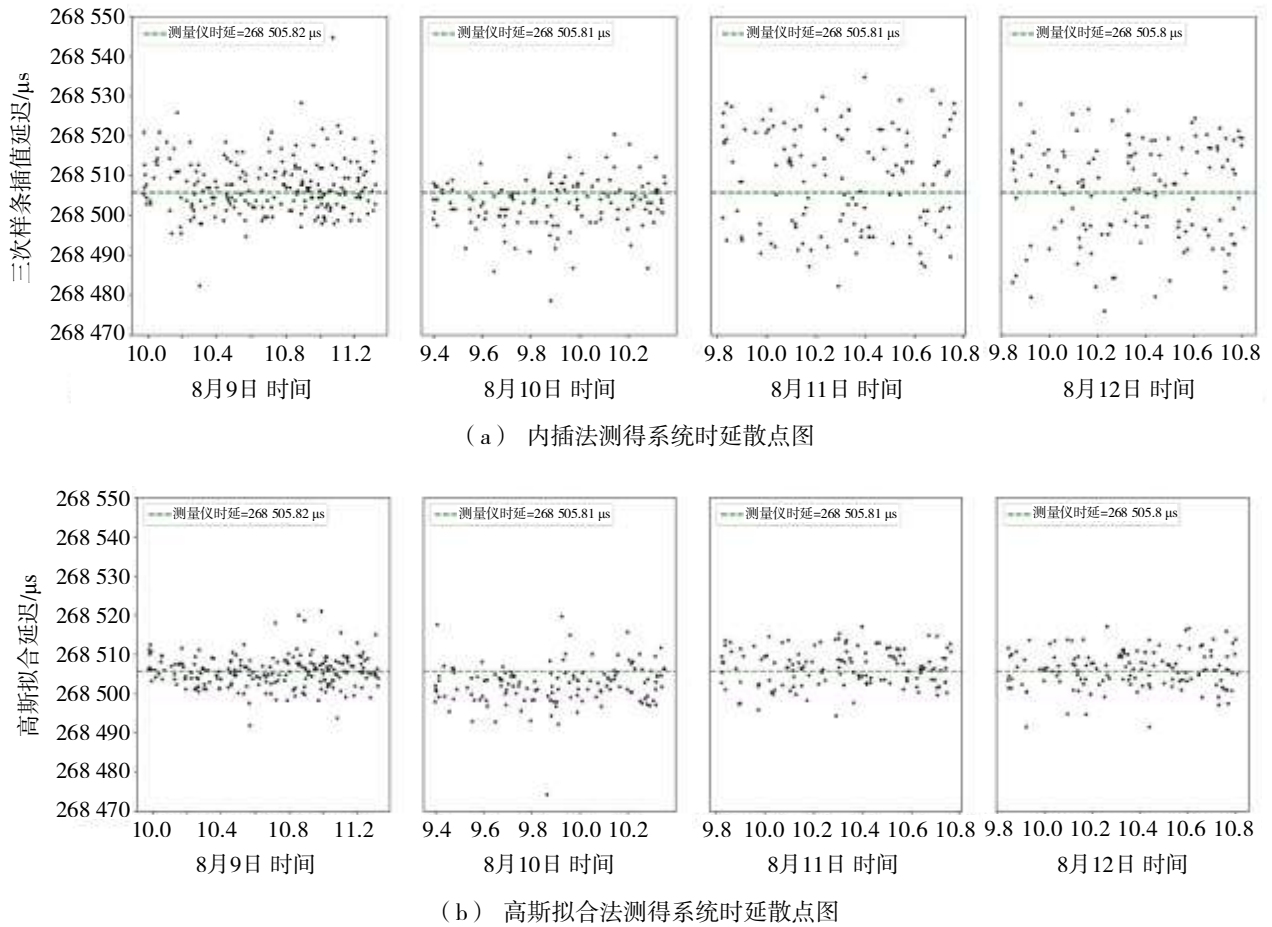


图 8 内插法测得系统时延散点图和高斯拟合法测得系统时延散点图

为便于比较,将系统延迟平均值中的较大的数字前缀扣除,即扣除 268.5 ms,则多通道时间间隔测量仪测得的系统延迟平均值为 5.8 μs ,三次样条内插法测得系统延迟的平均值为 6.4 μs ,高斯拟合法测得系统延迟的平均值为 5.2 μs 。三次样条内插法的最大误差为 38.9 μs ,高斯拟合法的最大误差为 31.5 μs 。

均方根误差表示观测值与真值偏差的平方与观测次数 N 比值的平方根,衡量的是测量值与真实值之间的偏差。均方根误差公式为

$$X_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - x_i)^2}{N}} \quad (10)$$

式(10)中: N 为测量系统时延的数量, X_i 为测量值,即根据巨脉冲到达时间测量得到的系统时延, x_i 为真值,即利用多通道时间间隔测量仪测量的系统时延,平均绝对误差是所有单个观测值与真

值偏差的绝对值的平均,平均绝对误差公式为

$$X_{\text{MAE}} = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - x_i|}{N} \quad (11)$$

式(11)中: X_i 为根据巨脉冲到达时间测量得到的系统时延, x_i 为利用多通道时间间隔测量仪测量的系统时延。

本文采用均方根误差以及平均绝对误差两种指标来评估两种方法测量结果的精度。表2为利用原始轮廓数据的峰值相位计算时延和内插法以及高斯拟合法计算时延的误差统计结果,从表2可以得出以下结论:利用原始轮廓测得系统时延的均方根误差小于 57 μs ,平均绝对误差小于 50 μs ;三次样条内插法测得均方根误差小于 13 μs ,平均绝对误差小于 12 μs ;高斯拟合法测得的均方根误差小于 7 μs ,平均绝对误差小于 5 μs 。对比3种方法的测量误差平均值发现:相较于利用原始轮廓数据的峰值相位计算系统时延,采用三次样条内插法和高

斯拟合法对于测量系统时延的精度分别提升了 3.9 倍和 8.6 倍，高斯拟合法测量精度优于三次样条内插法，两种方法将测量系统时延的精度从 $40\ \mu\text{s}$ 提高到 $10\ \mu\text{s}$ 以内。

表2 误差统计结果

单位： μs

日期	原始轮廓求得 均方根误差	原始轮廓求得 平均绝对误差	三次样条求得 均方根误差	三次样条求得 平均绝对误差	高斯拟合求得 均方根误差	高斯拟合求得 平均绝对误差
08-09	30.18	27.90	7.12	5.26	3.97	2.93
08-10	47.50	36.80	6.63	4.82	6.26	4.81
08-11	54.80	46.20	12.78	11.15	4.66	3.83
08-12	56.70	49.90	12.07	10.29	4.83	3.79
误差平均值	47.30	40.20	9.65	7.88	4.93	3.84

4 结语

根据吴平 40 m 天线终端，两个观测系统同时对 PSR J0534+2200 脉冲星脉冲星进行观测，选取信噪比大于 15 的巨脉冲作为共视事件，根据互相关法判断两个系统中的巨脉冲是否为 PSR J0534+2200 脉冲星发射出的同一脉冲信号，利用同一巨脉冲的到达时间之差测量两个系统的时间延迟。利用巨脉冲的到达时间测量两个系统之间的时延结果与时间间隔测量仪器测得的结果对比，证实该方法可行，两个观测系统之间的时间延迟即为两个系统中的秒脉冲信号相位之差。

为达到更高精度的系统时延测量，采用内插法和高斯拟合法对巨脉冲的轮廓数据进行拟合，将拟合后轮廓的峰值相位作为巨脉冲的到达时间。两种方法测量系统时延与利用原始轮廓数据的峰值相位测得结果对比发现：采用三次样条内插法和高斯拟合法对于测量系统时延的精度分别提升了 3.9 倍、8.6 倍。

由于硬件设备配置所限，观测的时间分辨率为 $81.92\ \mu\text{s}$ ，实际巨脉冲的峰值相位与原始轮廓的峰值相位之间相差较大，因此利用原始轮廓的峰值相位计算的系统时延误差结果差别较大。内插法和高斯拟合法虽然提高了测量系统时延的精度，但其本质上是根据现有的巨脉冲采样点对实际巨脉冲轮廓峰值相位的估计和拟合，因此会出现拟合的峰值相位和实际峰值相位相差较大的情况，两种方法不可避免地给测量的系统延迟结果带来误差，使得测

量值围绕时间间隔测量仪测得的结果上下波动。

脉冲星观测系统的时间频率参考一般由当地原子钟提供，通过测量两个系统之间的时间延迟可以计算出原子钟钟差。测量系统时延精度的提高意味着能够以更高的精度计算原子钟钟差，从而可以实现更高精度的时间传递。本文基于 PSR J0534+2200 脉冲星发射的巨脉冲信号测量两个系统之间的时间延迟，为利用射电暴发信号进行高精度的时间传递和时间同步打下基础。

如果想实现更高精度的系统时间延迟的测量，还需要更高精度的时间分辨率。在现有的非相干消色散模式下，提高时间分辨率，数据率变高，现有的数据接收端的服务器在接收数据过程中出现频繁的丢包现象，并且目前使用的存储服务器无法实时将数据完整记录下来。受限于现有的硬件配置和观测模式，目前时间分辨率最高为 $81.92\ \mu\text{s}$ 。如果需要更进一步的提升，可以采用相干消色散模式，通过降低通道数量，在数据率变化不大的情况下，提升时间分辨率。另外，采用相干消色散模式可以消除整个通道内的色散，相比非相干消色散，相干消色散的效果更好，得到的脉冲宽度更窄更真实，理论上利用峰值相位计算得到时延精度会更高。

本文利用射电暴发事件在两个系统中到达时间的不同来测量系统之间的时间延迟，为利用射电暴发事件进行时间同步打下基础。本次实验是在单天线的条件下完成的，无需考虑传播路径造成的时间延迟，且两个观测系统接收到的同一巨脉冲轮廓和信噪比大致相同，因此能够采用互相关法识别脉

冲星发射的同一巨脉冲。如果两个天线之间距离较远,两地的射电环境不同,两个观测系统接收到的巨脉冲轮廓和信噪比会有较大区别,是否能够继续采用互相关法还需要进一步的实验研究。并且由于两地之间的位置不同,巨脉冲到达的时间也不同,还需要建立两地的时延模型,改正由于传播路径不同造成的时间延迟,这些都需要更多的实验来论证。

参考文献:

- [1] 杨旭海,李孝辉,华宇,等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 1-10.
- [2] 李志刚,李焕信,张虹,等. 卫星双向法时间比对的归算[J]. 天文学报, 2002, 43(4): 422-431.
- [3] 孙泽洲,孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 785-791.
- [4] JOHNSTON S, STRATEN W V, KRAMER M, et al. High time resolution observations of the Vela pulsar[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2001, 549: L101-L104.
- [5] STAELIN E L, REIFENSTEIN E C. Pulsating radio sources near the crab pulsar nebula[J]. Science, 1968, 162(3861): 1481-1483.
- [6] HANKINS T H, KERN J S, WEATHERALL J C, et al. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the crab pulsar[J]. Nature, 2003, 422(6928): 141-143.
- [7] 李龙彪,黄永锋,耿金军,等. 快速射电暴的观测及理论研究进展[J]. 天文学进展, 2017, 35(4): 429-447.
- [8] The CHIME/FRB Collaboration. Periodic activity from a fast radio burst source[J]. Nature, 2020, 582(7812): 351-355.
- [9] KONG J L, ESAMDIN A, ZHAO C S, et al. Observations of giant pulses of the crab pulsar[J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2008, 8(3): 277-284.
- [10] 吴理歌,闫振,沈志强,等. Crab 脉冲星巨脉冲研究进展[J]. 天文学进展, 2015, 33(3): 301-318.
- [11] ILYASOV Y P, KONDRATIEV V I, ORESHKO V V, et al. Giant pulsar pulses for precision comparison of clocks[J]. Measurement Techniques, 2009, 52(10): 1047-1054.
- [12] RODIN A E, ORESHKO V V, FEDOROVA V A. Comparison of terrestrial and lunar time scales by giant pulsar impulses[J]. Astronomy Reports, 2021, 65(11): 1136-1144.
- [13] 艾力·海里且木·尼左木丁,艾力·伊沙木丁,刘志勇,等. PSR J0034-0721 强单个脉冲的观测研究[J]. 天文学报, 2010, 51(3): 253-262.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 吴鑫基,乔国俊,徐仁新. 脉冲星物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2018.
- [17] 阿地里·托合提. 脉冲星强单个脉冲的观测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- [18] 徐钧,韩金林,王陈,等. 脉冲星脉冲宽度的测量方法[J]. 天文学报, 2011, 52(3): 180-189.
- [19] RANSOM S M. New search techniques for binary pulsars[D]. Cambridge: ProQuest Dissertations and Theses, 2011.
- [20] EILEK J A, ARENDT P N, HANKINS T H, et al. The radio-loud plasma in pulsars[C] // Proceedings of the 270. WE-Heraeus Seminar on Neutron Stars Pulsars and Supernova Remnants, Garching bei München: Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, 2002: 262.
- [21] JULIUS S B, ALLAN C P. Random Data Analysis and Measurement Procedures[M]. New York: Wiley, 1971.
- [22] 陈浩,华灯鑫,张毅坤,等. 基于三次样条函数的激光雷达数据可视化插值法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 831-837.
- [23] 唐冲,惠辉辉. 基于 Matlab 的高斯曲线拟合求解[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(8): 1262-1263+1297.