

引用格式: 闫世钊, 王性川, 赵成仕, 等. 一种时域频域综合处理消除射电干扰的方法[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 320-332.

# 一种时域频域综合处理消除射电干扰的方法

闫世钊<sup>1,2</sup>, 王性川<sup>1,2</sup>, 赵成仕<sup>1,3</sup>, 李祎丰<sup>1</sup>, 罗近涛<sup>1,3</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. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

**摘要:** 针对时域和频域无线电干扰的不同特征, 提出了一种时域频域综合处理的消除脉冲星观测数据中射电干扰的方法。利用中国科学院国家授时中心昊平 40 m 射电望远镜观测的脉冲星计时数据和单个脉冲观测数据, 对比分析了该方法与 PSRCHIVE 自动消干扰方法的效果。对计时观测数据消干扰结果表明, 当阈值  $k = 0.4$  时消干扰处理后信噪比达到最大, 约为 25.8, 比原始数据信噪比提高大约 3.8 倍, 比 PSRCHIVE 自动消干扰方法处理效果提高大约 3.3 倍。对单个脉冲数据消干扰结果表明, 消干扰处理后信噪比比处理前信噪比提高大约 5.8 倍, 比 PSRCHIVE 自动消干扰算法处理后信噪比提高约 1.8 倍。实验结果表明时域频域综合处理消除射电干扰的方法能够很好地消除无线电干扰信号对脉冲星观测数据的影响、提高脉冲星数据的信噪比、在一定程度上缓解了阈值选取带来的困难。

**关键词:** 脉冲星; 无线电干扰; 数据分析; 信噪比

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0320-13

## A method for eliminating radio frequency interference by synthetic processing in frequency domain and time domain

YAN Shi-zhao<sup>1,2</sup>, WANG Xing-chuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Cheng-shi<sup>1,3</sup>, LI Yi-feng<sup>1</sup>, LUO Jin-tao<sup>1,3</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

**Abstract:** According to the different characteristics of the radio interference in time domain and frequency domain, a method of eliminating the radio interference in the pulsar observation data is proposed based on time domain and frequency domain processing. The results of this proposed method and the PSRCHIVE automatic interference mitigation method are compared and analyzed using the timing observation data and single pulse observation data taken with the 40-meter radio telescope at the Hao-ping Observatory of the National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. When the threshold  $k = 0.4$ , the signal to noise ratio reaches the maximum of 25.8, which is about 3.8 times higher than the original data and 3.3 times higher than the

收稿日期: 2022-04-30; 接受日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11873050; 11973046); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目(XAB2021YN27)

PSRCHIVE automatic noise elimination method. The results of single pulse data radio frequency interference elimination show that the signal to noise ratio after eliminating radio frequency interference is about 5.8 times higher than that before, and 1.8 times higher than that after using PSRCHIVE's automatic radio frequency interference remove algorithm. Experimental results show that this method can eliminate the influence of radio frequency interference on pulsar observation data, and improve the signal to noise ratio of pulsar data, and alleviate the difficulty of threshold selection to a certain extent.

**Key words:** pulsar; radio frequency interference; data analysis; signal to noise ratio

## 0 引言

脉冲星是高速旋转的中子星，具有极高的密度和磁化强度，是研究极端物理条件下物质状态的天然实验室。由于脉冲星具有非常稳定的自转周期，因此脉冲到达时间（timing of arrival, TOA）可以作为脉冲星时钟，用于时频领域以及探测引力波等。目前，在地球上脉冲星的主要探测窗口是射电波段窗口，射电望远镜接收到脉冲信号以后必须要进行消色散、周期折叠等操作才能够获取稳定的积分脉冲轮廓，以应用于计时观测研究。人类生产和生活活动产生的无线电频率信号，例如通信和电子设备等严重影响射电天文观测，天文学家将这种无线电干扰称为射频干扰（radio frequency interference, RFI），根据观测中 RFI 的不同特征，可以将干扰大致分为脉冲式干扰、宽频带干扰或窄频带干扰<sup>[1]</sup>。脉冲星辐射信号非常弱，很容易受无线电干扰影响，观测数据的好坏关系到科学成果的质量甚至结论的真伪，开展 RFI 抑制和消除方法研究对射电天文发展具有重要理论意义与实际应用价值。

天文学家已经提出许多有效的消除射电干扰的方法，但是由于 RFI 的复杂性以及时变性等特点，很少有通用的射频干扰消除方法适用于所有台站的观测数据。目前 RFI 减缓方法分为 5 类<sup>[2]</sup>：① 采取积极主动的措施，通过监管或与当地相关部门协调设置无线电宁静区改变当地 RFI 环境，如 500 m 口径球面射电望远镜（FAST）电波环境保护措施<sup>[3]</sup>；或修改接收机系统观测频段将射频干扰排除在观测数据之外，例如明安图观测基地关于 RFI 预防、消减和检测<sup>[4]</sup>。该方案是目前常用的方法，用于避开强的、宽频段无线电干扰。② 空域消零或自适应空间滤波方法。通过使用阵列波束合成技术识别射频干扰源的方向，从而缓解连续的 RFI。例如，最大信噪比、线性约束最小方差、子空间投影、维纳滤波和多旁瓣消除等各种算法已经被研究应用<sup>[2]</sup>。③ 波形扣除，从望远镜输出数据中将 RFI “扣除”。例如已经提出的基于维纳滤波原理的“最小均方”算法<sup>[5]</sup>，缓解全球卫星导航系统（GLONASS）卫星引起的 RFI 的方法<sup>[6]</sup>。④ 反符合技术。根据间距较大的射电望远镜可以接收到同样的天文信号，但是接收到的 RFI 是不同的这一前提，有针对地消除 RFI 干扰。这项技术已经被应用在全天瞬态搜寻<sup>[7]</sup>和搜寻单次爆发的巨脉冲<sup>[2]</sup>。⑤ 时域和频域切除方法，从观测数据将 RFI 删除，其局限在于检测标记 RFI 和阈值的设置。例如目前已经开发并应用的基于形态检测技术的 RFI 检测方法<sup>[8]</sup>，基于卷积神经网络的干净信号和 RFI 分类标记方法<sup>[9]</sup>。此外，针对无法精确确定检测阈值、直接切除带来的观测带宽和时间被缩减等问题，戴伟等人<sup>[10]</sup>根据脉冲星信号和干扰信号的分布特点的不同，实现干扰信号的消除。由于该方法无法获得负熵的精确解，会导致部分弱射频干扰信号与脉冲无法区分。林天琪等人<sup>[11]</sup>利用 2 维离散小波变换对分离后的原始信号分量设置不同的阈值系数进行干扰的标记和消除。该方法在分解层数选择不合适时，会导致干扰信号误判问题。

不同台站的射电环境各不相同，利用中国科学院国家授时中心吴平 40 m 射电望远镜在 L 波段下的脉冲星观测数据开展消干扰算法的研究。在对各种消干扰方法深入研究的基础上，针对时域和频域切除方法中阈值选取和切除后数据缩减等问题提出了一种时域频域综合处理消除 RFI 的方法。根据时域和频

域干扰类型的不同,选取不同的处理方式,返回消干扰处理后轮廓信噪比最大的数据文件。分析比较了时域频域综合处理消除 RFI 方法和 PSRCHIVE 软件提供的消干扰方法处理吴平站脉冲星观测计时观测数据和单脉冲观测数据的效果和可行性。分析了该方法在处理计时观测数据和单脉冲观测数据时采用的脉冲星辐射窗口宽度之间的差异。

## 1 理论基础

时域频域综合消除方法在识别 RFI 时,首先需要确定干扰阈值范围和频域子通道内脉冲星信号区域。利用统计学方法确定阈值范围,利用傅里叶变换算法消除接收机底噪引起的误判,互相关技术确定每个频域子通道内脉冲星的信号区域。本文将首先介绍涉及算法的相关理论基础。

### 1.1 基于统计学方法的异常检测

RFI 干扰阈值范围的确定直接影响消干扰的效果,标定阈值过高,则消除干扰不彻底,标定阈值过低,则出现过度消干扰,导致消除有效信号。本文利用统计学中的  $3\sigma$  原则标记 RFI 信号。 $3\sigma$  原则也称为拉依达准则,基本原理是用置信概率 99.7% 作为标准确定一个区间,认为超过这个区间的样本是由粗差引起的,不是由随机误差引起的,将这样的值当作异常值<sup>[12]</sup>。

根据定理<sup>[13]</sup>可知,若随机变量  $x \sim N(\mu, \sigma^2)$  的正态分布,则有

$$P\{a < x < b\} = \varphi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \varphi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right). \quad (1)$$

可推出:

$$\begin{cases} P\{|x - \mu| < \sigma\} = 2\varphi(1) - 1 = 0.6826 \\ P\{|x - \mu| < 2\sigma\} = 2\varphi(2) - 1 = 0.9545 \\ P\{|x - \mu| < 3\sigma\} = 2\varphi(3) - 1 = 0.9973 \end{cases} \quad (2)$$

若随机变量  $x$  服从数学期望为  $\mu$  方差  $\sigma^2$  正态分布,取值落在  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  区间的概率为 0.9973,将此区间认为是随机变量  $x$  实际可能的取值区间。若随机变量服从正态分布,根据此  $3\sigma$  原则,将距离平均值超过 3 倍  $\sigma$  的样本认为是异常值。对于不服从正态分布的数据,可以用距离平均值  $k$  倍  $\sigma$  来描述,其中  $k$  值需要根据实际情况或经验来确定。

### 1.2 互相关算法

脉冲星辐射的信号在时域为周期性脉冲信号,有时一些干扰会出现在某一时间段内,在观测中表现为:在脉冲星轮廓的噪声部分出现相对流量值较高的脉冲。消除这类时域内干扰,首先需要确定脉冲信号辐射区域,将脉冲星信号部分和干扰部分区分开。本文将利用互相关算法确定脉冲信号窗口。

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。是一种通过与已知信号进行比较寻找未知信号特征的过程。两个信号序列的相关运算等价于一个信号向量在另一个信号向量上的投影,内积越大表示两者的相似度越高。当两路信号序列的互相关值到最大时对应的的时间偏移量,是两路信号的时间延迟量。由于脉冲星的模板脉冲的峰值流量相位点和辐射窗口已经确定,因此,可以根据互相关运算得到的时间延迟确定频域子通道内的脉冲星辐射窗口。

已知两个离散信号序列  $f(m)$  和  $g(m)$ , 有互相关函数表达式<sup>[14]</sup>:

$$R(\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} f[m-\tau] g[m], \quad m=0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

式(3)中:  $N$  是离散信号的长度,  $\tau$  是两个信号在不同时刻的延迟。

由式(3)可得,通过峰值检测出的对应延迟为

$$\tau = \arg\{\max[R(\tau)]\}。 \quad (4)$$

式(4)中:  $\arg\{\cdot\}$ 表示取函数的自变量,  $\max[\cdot]$ 表示取最大值。利用模板脉冲与频域子通道内的信号作互相关运算,确定频域子通道的脉冲星信号窗口。

### 1.3 傅里叶变换基本原理

本文将采用傅里叶变换算法消除频域内干扰,傅里叶变换是一种信号处理方法,可以将时域信号分解成各个频率分量的线性叠加,实现信号从时域到频域的变换,得到信号的所有频率信息。可以从频域的角度研究信号的变化特征,进而将非信号部分对应的频率滤除,再利用傅里叶反变换将经过频域处理后的信号反变换回到时域。

若函数  $f(t)$  是关于自变量  $t$  的周期函数,且  $f(t)$  满足狄利克雷条件,则该函数的傅里叶正变换为<sup>[15]</sup>

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt。 \quad (5)$$

对应的逆变换形式为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega。 \quad (6)$$

对于一组长度为  $N$  的有限长信号  $\{x_n\}_{n=0}^{N-1}$ ,离散傅里叶正变换为

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N}。 \quad (7)$$

式(7)中:  $n=0,1,\dots,N-1$ 。

对应的逆变换形式为

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]e^{j2\pi kn/N}。 \quad (8)$$

式(8)中:  $k=0,1,\dots,N-1$ 。

本文利用傅里叶变换滤除接收机本底噪声对通道响应的影响,更加准确地识别 RFI 对观测数据的影响。

## 2 时域频域综合消除 RFI 方法介绍

本文提出的时域频域综合消除 RFI 方法整体系统流程,如图 1 所示。该方法分两步消除脉冲星数据中的 RFI,具体为:① 时域干扰消除;② 频域干扰消除。其中,步骤①的处理目标是检测、消除宽频带,脉冲爆发式 RFI。步骤②的处理目标是检测、切除窄带 RFI。经消色散处理后得到的脉冲星时间-频率数据,依次进行时域干扰消除处理和频域干扰消除处理后得到消除 RFI 后的数据。

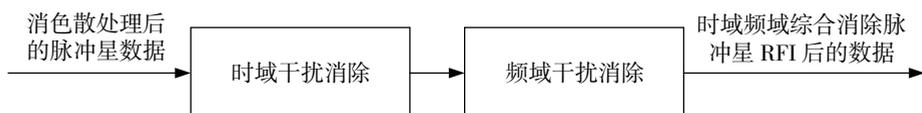


图 1 时域频域综合消除 RFI 方法系统框图

### 2.1 时域干扰消除方法

射电望远镜输出信号可以表示为<sup>[16]</sup>

$$x(t) = x_{\text{sig}}(t) + x_{\text{sys}}(t) + x_{\text{RFI}}(t) \quad (9)$$

式(9)中:  $x_{\text{sig}}(t)$  表示脉冲星信号,  $x_{\text{sys}}(t)$  表示系统噪声,  $x_{\text{RFI}}(t)$  表示 RFI 信号。没有处理前接收到的信号  $x(t)$  包含了大量噪声和 RFI, 为提高观测数据质量需要对  $x(t)$  作消干扰处理。

如果不受 RFI 影响, 每个频域通道内应该只包含由接收机产生的随机噪声和脉冲星信号, 且噪声服从相同的高斯分布, 脉冲星信号服从有自由度为 2 的卡方分布<sup>[17]</sup>。根据这一原则分别处理每个频域子道内的非脉冲星信号部分。时域干扰消减的关键在于确定每个频域子通道内脉冲星信号辐射窗口的范围。Y. Song 等人<sup>[18]</sup>于 2021 年提出利用脉冲星到达时间模型计算频域子通道的脉冲相位和脉冲窗口宽度。本文利用互相关原理确定每个频域子通道内的脉冲窗口。利用  $k \times \sigma$  原则确定阈值范围, 即  $(\mu - k \times \sigma, \mu + k \times \sigma)$ ,  $k$  是阈值系数, 属于自然数。迭代处理连续数据流块的每个子积分的所有频域子通道。R. J. Lyon 等人<sup>[19]</sup>2016 年通过对观测数据分析, 认为在进行脉冲星干扰消除时  $k$  值的合理范围在 [1.8, 3] 之间。考虑到算法设计必须考虑的时间复杂度问题<sup>[20]</sup>, 进行时域干扰消除时阈值系数采用经验值  $2^{[21-22]}$ 。处理过程分 4 步进行, 具体是:

① 确定模板脉冲的辐射窗口。将本次观测获得的脉冲星数据按照周期折叠得到本次观测的模板脉冲轮廓, 根据模板脉冲轮廓得到脉冲星的辐射窗口。Y. Song 等人<sup>[18]</sup>使用脉冲星轮廓峰值流量强度的 10% 对应的脉冲轮廓宽度 ( $W_{10}$ ) 的 2 倍作为脉冲星的辐射窗口。本文实际处理时选取模板脉冲轮廓峰值流量  $W_{10}$  的 1.9 倍作为脉冲星辐射窗口宽度时, 处理效果最好。

② 确定频域子通道内脉冲星的辐射窗口。利用模板脉冲的辐射窗口数据与经过中值滤波处理后的子通道信号作互相关运算, 找到该频域子通道内脉冲星的辐射窗口。从公式(3)可知, 互相关运算的两路信号序列, 必须要求长度相同。利用互相关运算的思想, 选取模板脉冲窗口作为滑动窗口, 滑动步长取 1, 依次与中值滤波处理后的频域子通道内窗口长度相等的信号序列作互相关匹配运算。若频域通道内待匹配窗口序列长度小于滑动窗口长度, 在待匹配窗口序列末尾补零。把两者计算得到的内积大小作为两个序列的匹配度。选取匹配度最大时对应的相位点作为频域子通道的脉冲窗口起始点, 进而得到该频域子通道的脉冲窗口。

若某个频域子通道内脉冲星辐射窗口的开始相位点或结束相位点不在模板脉冲的辐射窗口相位点范围内, 判定为该频域通道内噪声的流量强度大于脉冲星信号的流量强度。用模板脉冲的辐射窗口相位点表示该频域通道内的脉冲星信号的辐射窗口。如图 2 是频域子通道内搜寻脉冲星辐射窗口的系统框图。

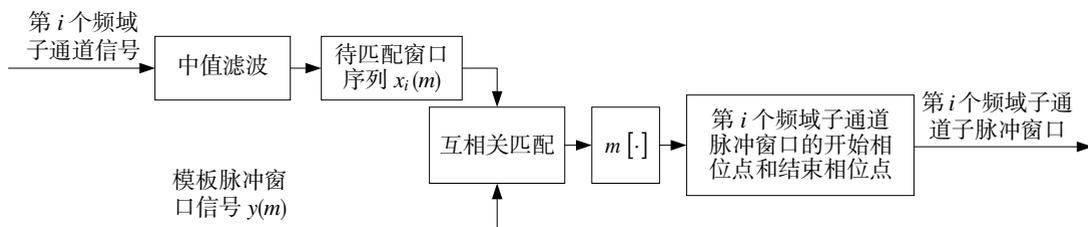


图 2 频域子通道内搜寻脉冲星辐射窗口的系统框图

③ RFI 检测、标记和处理。将频域子通道内脉冲星辐射窗口内的数据从该子通道数据中剔除, 得到该通道内的非信号数据。利用该频域子通道内非信号数据的均值和标准差, 确定阈值范围。将流量值超过阈值范围之外的相位点标记为 RFI 所在相位点, 用服从正态分布  $N \sim (\mu, \sigma)$  的随机数依次替代这些值, 更新非信号数据。计算更新后非信号数据的均值和标准差。按照上述同样的方法标记干扰相位点并更新非信号数据部分, 迭代执行直到非信号数据的均值和标准差不再变化, 表示此时该频域通道内的非信号数据部分服从正态分布。最后, 将脉冲星辐射窗口的数据放回到该频域通道内原始相位位置。此时

完成一个频域子通道的干扰消除工作。图 3 是检测、标记和处理频域子通道内 RFI 的流程图。

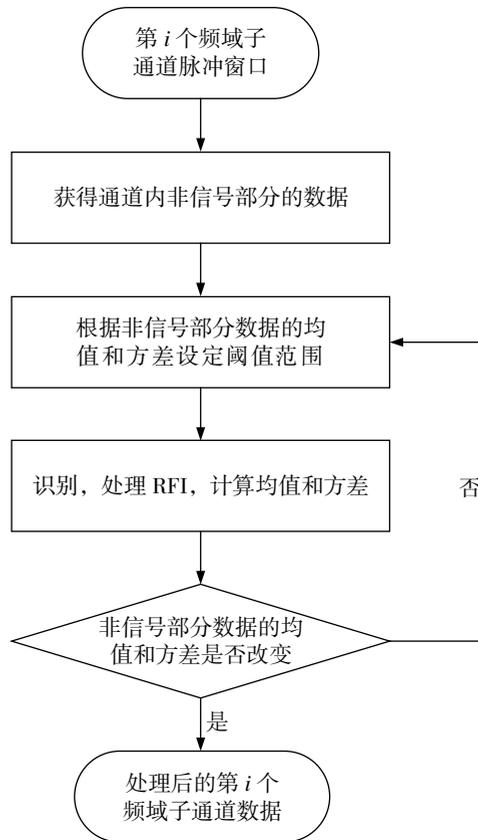


图 3 检测、标记和处理频域子通道内 RFI 流程图

④ 按照第 2、3 步，迭代处理每个子积分对应的的每一个频域子通道。

## 2.2 频域干扰消除方法

经过时域干扰消除处理后，宽带、脉冲式爆发干扰基本可以被消除，并保留数据中脉冲星信号部分。利用频域消除方法切除受 RFI 污染严重的频域子通道。国家授时中心吴平 40 m 射电望远镜采用的是数字化多通道消色散系统，接收机带宽被划分为多个频域子通道，由于脉冲星信号是宽带信号，可以利用频域子通道的静态响应值衡量该通道受无线电干扰影响的强弱。将脉冲星观测数据中每个频域子通道内的数据分别叠加，得到本次观测数据各频域子通道的响应值。频域子通道响应值反映了接收机不同频域子通道对输入信号的响应状态。相同时间段内，同一套脉冲星数字终端系统中的每个频域子通道输入的脉冲星信号能量和随机噪声能量相差不大，可以认为同一时间段频域子通道内的能量差主要是由 RFI 引起的。将通道响应中幅值变化较大的频域通道，标记为受 RFI 影响严重的频域通道，将该通道的权重置零。利用频域 RFI 干扰消除技术，可有效消除观测数据中受 RFI 污染严重的频域通道。

频域干扰消除处理流程如图 4 所示。同一块数据流的每一个频域子通道的本底噪声可以认为是固定的，利用傅里叶变换去除频域通道响应的基线，去除基线后的频域子通道的响应数据能够更加真实的反应出 RFI 对观测数据的影响。将每个脉冲星子积分数据的频域子通道响应数据进行傅里叶变换，根据信号特征将接收机系统产生的本底噪声滤除，再利用傅里叶逆变换将去除本底噪声的子通道响应的频域信号变换为时域信号。利用滤波处理前与滤波后的通道响应之间的差值作为样本数据。

根据样本数据，利用 2.1 节所述阈值原则，确定阈值范围。阈值系数的选取是影响干扰消除的关键因素，即便是同一套接收机系统，在不同时刻阈值系数的选择也有很大的差别。通常认为信号流量值与

总体平均值相差超过 2 倍标准差的样本点是 RFI<sup>[17]</sup>。V. Morello 等<sup>[23]</sup>于 2022 年提出了一种四分位数缓解 (inter-quartile range mitigation, IQRM) 离群点检测算法标记受窄带 RFI 信号影响的频域通道。根据经验选取阈值系数  $k = 3$  时, 不能很好的切除受强 RFI 污染的频域通道。本文根据消干扰处理后脉冲星轮廓信噪比 (signal noise ratio,  $S/N$ ) 动态的选择阈值系数。脉冲星轮廓信噪比计算方法是<sup>[17]</sup>:

$$S/N = \frac{1}{\rho_p \sqrt{W_{eq}}} \sum_{i=1}^{n_{bins}} (p_i - \bar{p})。 \quad (10)$$

式 (10) 中:  $\rho_p$  表示观测数据噪声部分的标准差,  $W_{eq}$  表示脉冲星轮廓宽度,  $p_i$  表示脉冲星数据第  $i$  个相位点的流量值,  $\bar{p}$  表示观测数据噪声部分的均值。

根据统计学方法检测异常值, 在数据处理时本文选取阈值范围[0.2, 3], 以 0.2 为步长, 迭代处理每个子积分数据, 将频域通道响应值在阈值范围之外的频域通道权重重置为零, 迭代处理每个子积分, 将处理后信噪比最大的脉冲星数据文件, 另存为新的 PSRFITS 格式文件并输出。利用本文计时观测数据实验结果显示, 当阈值系数  $k=0.4$  时, 消干扰处理后脉冲星轮廓信噪比达到最大值。

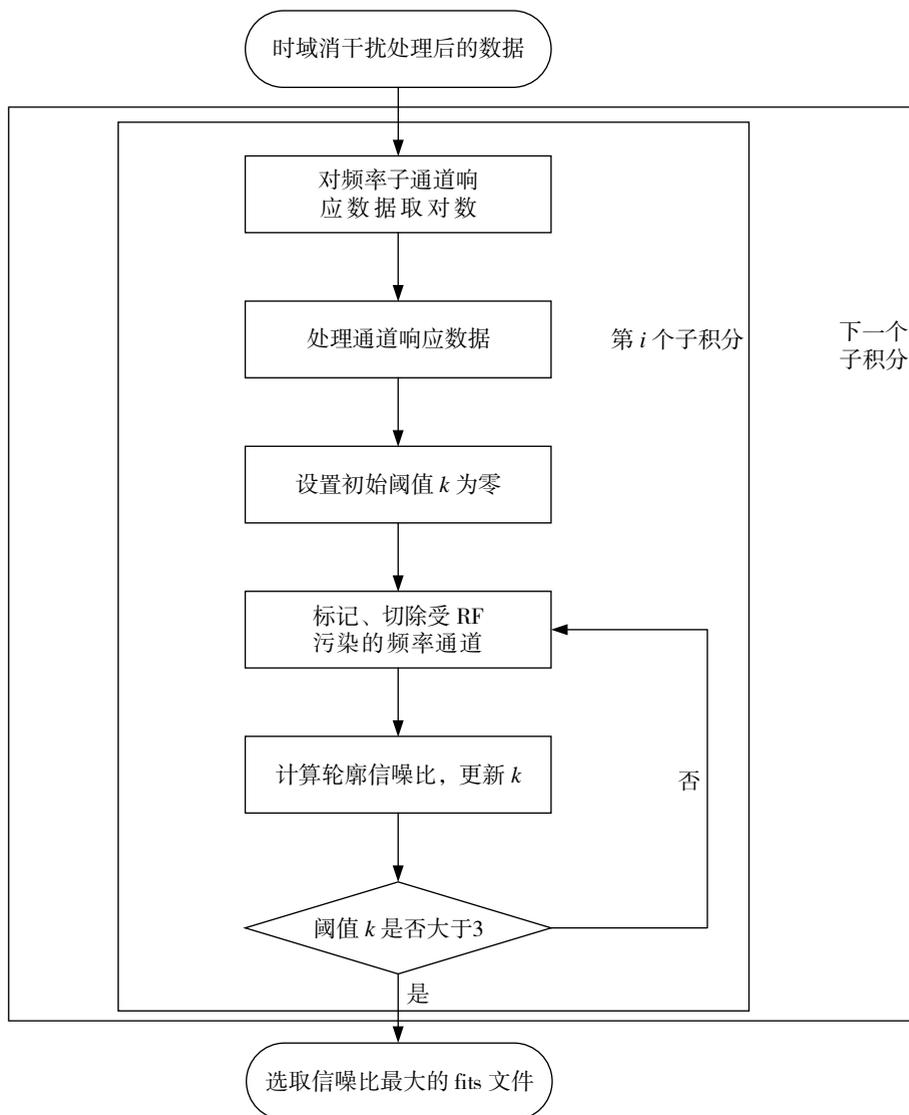


图 4 频域干扰消除处理流程图

### 3 PSRCHIVE 自动消干扰算法

PSRCHIVE<sup>[24]</sup>是目前被广泛应用于处理脉冲星数据的软件之一，可以满足不同用户的需求。针对消除脉冲星射电干扰，PSRCHIVE 提供了自动化消除射电干扰的方法。由于观测过程中受到的射电干扰一般都是动态变化的，针对窄带类型的射电频域干扰，该算法利用中值滤波前后频谱之间的差值动态标记、删除受射电污染严重的频域通道。选取 21 个频域子通道作为中值滤波器的滤波窗口。将超过 4 倍标准差以上的频域通道权重置为零。脉冲式干扰呈现宽带特征，自动切除频域通道会导致删除的频域通道或子积分过多。针对脉冲爆发式干扰，该算法利用中值滤波对未作消色散处理的脉冲星积分轮廓数据进行滤波处理，将滤波前后轮廓差值序列作为待处理数据。认为超过 4 倍数据标准差的样本点是 RFI，用未被标记的样本点中的中值与观测脉冲轮廓的差值替代。其中，中值滤波器的窗口是观测到的脉冲星辐射窗口占空比的 2%。

## 4 算法实验验证

### 4.1 实验数据

为验证本文方法处理计时观测数据和单脉冲观测数据的可行性和效果，采用国家授时中心吴平 40 m 射电望远镜脉冲星计时数据和单个脉冲观测数据，对比分析了本文方法与 PSRCHIVE 自动消干扰方法的效果。观测中采用的终端配置为 4 个极化方向，1 024 频率子通道，1 024 个相位点，时间分辨率是 10.24  $\mu\text{s}$ ，有效带宽范围是 1.1~1.75 GHz，数据存储格式为 PSRFITS。其中，计时观测数据是 2021 年对脉冲星 PSR J0332+5334 进行 2.9 min 的折叠模式观测数据。图 5 是脉冲星 PSR J0332+5434 计时观测数据平均脉冲轮廓图和频域子通道响应图。其中，图 5 (a) 是脉冲星平均脉冲轮廓图，图 5 (b) 是频域子通道响应图。从轮廓图中可以看出，本次观测受 RFI 影响严重，观测数据中非信号部分相对流量较高，波动较大，说明本次观测过程中存在很强的时域 RFI 干扰。从频域子通道响应图中可以看出，本次观测过程中，边带干扰较为严重，呈现窄带特征。在 1 200 ~1 300 MHz，1 600 ~1 700 MHz 频率范围内存在很强的频域干扰，呈现宽带特征。在 1 400 MHz 附近存在一个很强的窄带干扰，脉冲轮廓信噪比是 5.4。

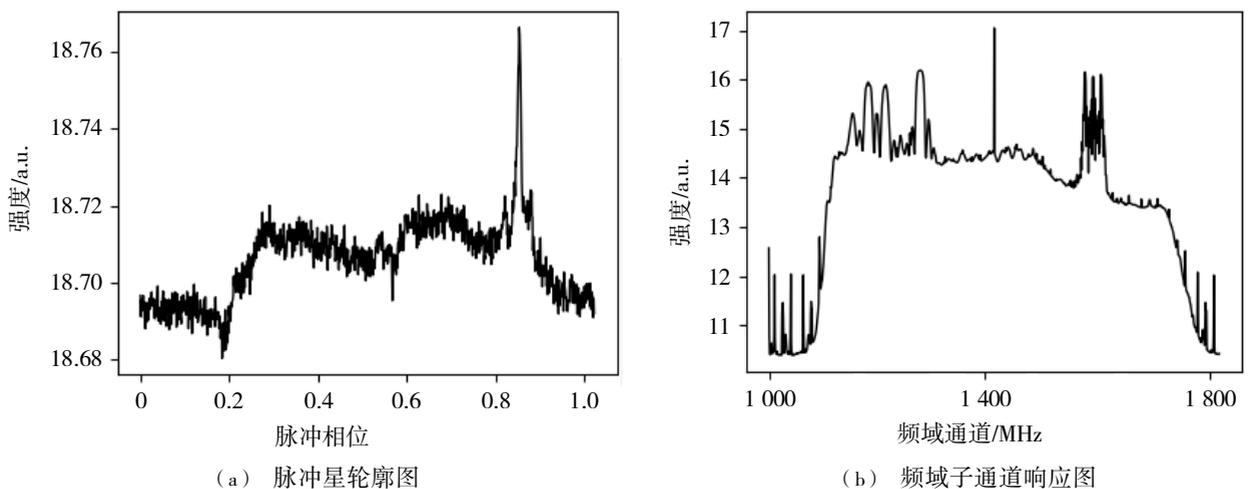


图5 脉冲星 PSR J0332+5434 计时观测数据消除射电干扰前脉冲星轮廓图和频域子通道响应图

单脉冲数据是 2021 年 6 月对脉冲星 PSR J0835-4510 进行搜寻模式观测获得的数据。从 PSRCAT<sup>①</sup> 获得脉冲星 PSR J0835-4510 脉冲星星历表，基于星历表利用 DSPSR<sup>[25]</sup>单脉冲数据处理模式，得到单脉

① <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

冲数据文件。如图 6 是本次观测得到的脉冲星 PSR J0835-4510 一个比较有代表性的单脉冲数据。其中，黑色实线是流量密度归一化后的单脉冲轮廓图，虚线是流量密度归一化后的平均脉冲轮廓图。从图 6 中可以看出，在脉冲星辐射窗口范围右侧有个相对流量值非常大的脉冲信号，没有进行消干扰处理前，无法确定脉冲窗口范围右侧的脉冲信号是否来自于单脉冲辐射。另外，在其他非信号部分存在大量小的脉冲式干扰，未作消干扰处理前脉冲轮廓信噪为 3.8。

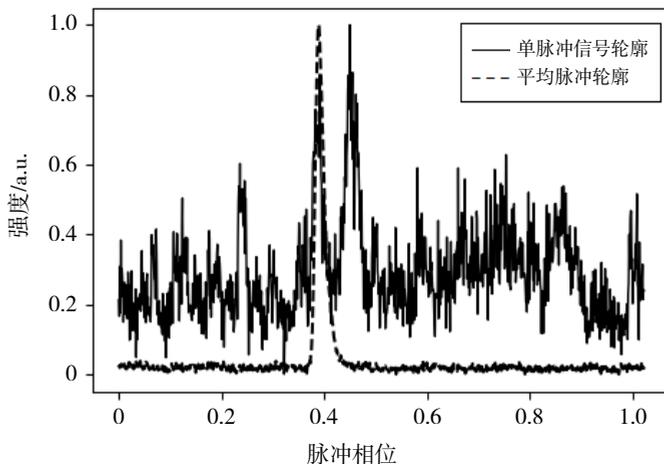


图 6 脉冲星 PSR J0835-4510 的一个单脉冲信号轮廓和平均脉冲轮廓图

## 4.2 结果及分析

### 4.2.1 计时观测数据消干扰效果验证

利用本文提出的时域频域综合消除 RFI 信号方法处理计时观测数据。消除 RFI 后积分轮廓信噪比随阈值系数  $k$  的变化情况，其结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出，信噪比随阈值系数  $k$  的整体变化趋势是先增大后减小。阈值系数  $k = 0.4$  时，信噪比达到最大为 25.8，比原始数据信噪比提高大约 3.8 倍。出现这种变化趋势的原因可能是，当  $k$  小于 0.4 时，选取的阈值范围较小，被标记切除的频域通道较多，导致损失了过多脉冲星信号。当某一个频域子通道内脉冲星信号相对较强时，该频域通道会被误标记为受 RFI 影响严重的通道切除，导致脉冲轮廓  $S/N$  减小。随着  $k$  值的增大阈值范围扩大，被标记切除的频域通道变少，当信噪比到达最大之后受弱 RFI 污染的频域通道未被切除，导致  $S/N$  下降。

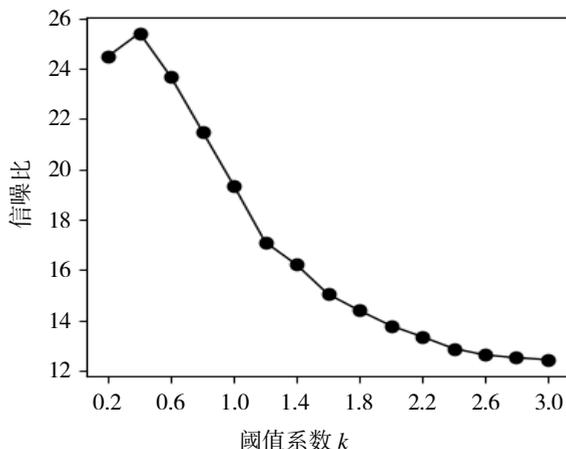


图 7 时域频域综合消干扰方法消除 RFI 后积分轮廓信噪比随阈值系数  $k$  的变化情况

利用本文提出的消干扰方法处理后脉冲星轮廓与频域子通道响应，其结果如图 8 所示。从脉冲星轮廓图 8 (a) 中可以看到，处理后很好的缓解了非信号部分起伏程度，提高了轮廓信噪比。但是削弱了脉冲信号的相对强度和本底噪声，是频域干扰消除处理将受 RFI 污染严重的频域通道的权重置零处理的

原因。从通道响应图 8 (b) 中可以看出, 利用本文方法处理后通道响应值整体变小, 这是因为时域干扰消除处理后使得非信号部分的能量整体减弱, 有效缓解了有效带宽内的宽带干扰和窄带干扰, 通道响应曲线变得更加平滑。

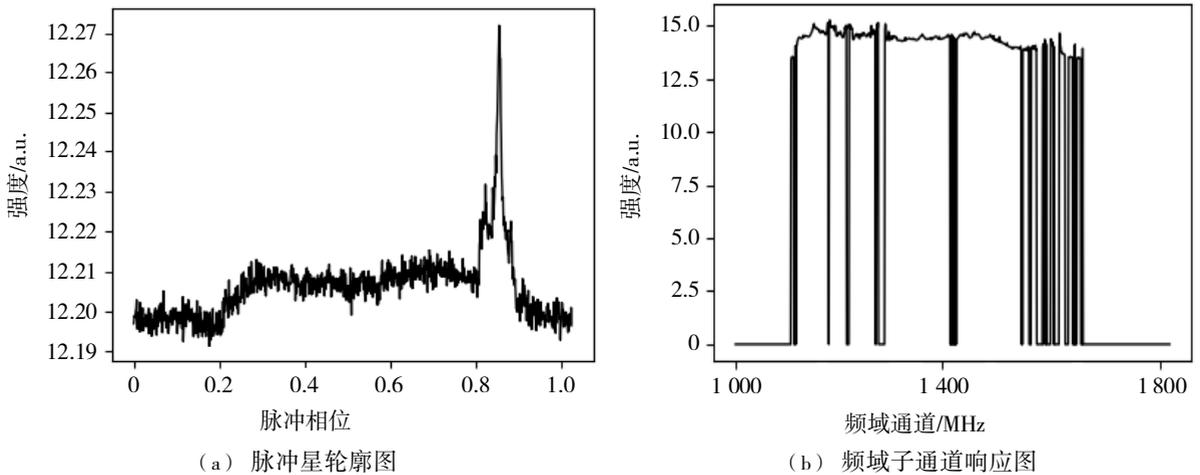


图8 本文方法处理后脉冲星轮廓图和频域子通道响应图

利用 PSRCHIVE 软件提供的自动消干扰方法处理计时观测数据, 处理后脉冲星平均脉冲轮廓和频域子通道响应如 9 图所示。其中图 9 (a) 是处理后脉冲星轮廓图, 图 9 (b) 是频域子通道响应图。处理后轮廓信噪比为 6, 与消干扰处理前相比信噪比变化不明显, 没有利用本文方法处理后信噪比提高的效果好。从处理前后轮廓对比可以看出, 处理后非信号部分的随机波动没有太大改善, 脉冲星轮廓部分的细节与处理之前相比没有明显变化, 削弱了脉冲信号的相对强度, 这表示 PSRCHIVE 自动消干扰算法没有很好地消除本次观测数据中存在的时域 RFI 信号。对比前后的频域子通道响应图可以看出, 处理后消除了接收机边带干扰, 在一定程度上缓解了接收机有效带宽内存在的窄带干扰, 宽带干扰消除效果不理想, 从图中可以看出宽带干扰仍然明显。

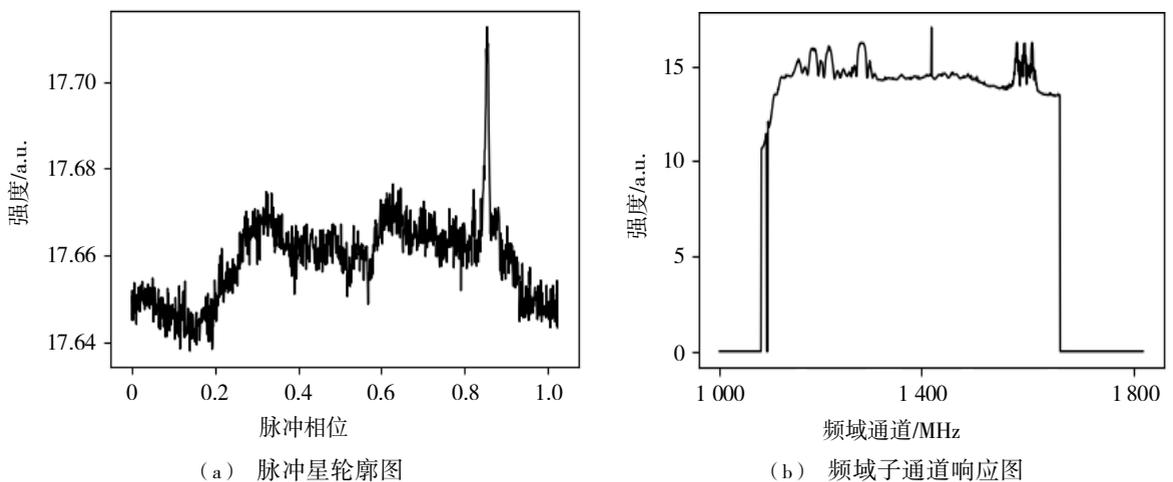


图9 PSRCHIVE 自动消干扰处理后的脉冲星轮廓图和处理后的频域子通道响应图

通过上述分析可以看出, 本文提出的时域频域综合消干扰算法消除宽频带和窄频带干扰后, 从消干扰处理后信噪比提高角度看, 信噪比最大达到了 25.8, 优于 PSRCHIVE 自动消干扰算法处理后得到的信噪比 6。从消干扰处理后数据损失方面来看, 本文提出的消干扰方法比 PSRCHIVE 自动消干扰方法处理后损失的要少。可以根据实际情况需求, 结合积分轮廓信噪比随阈值系数  $k$  的变化情况, 选择最佳阈值系数处理后数据文件作为最终结果。通过这一策略可以在一定程度上弥补消干扰处理后原始数据损失过

多带来的问题。

#### 4.2.2 单脉冲数据消干扰效果验证

脉冲星辐射的单个脉冲信号，其辐射流量强度、脉冲轮廓和相对辐射相位等都是随机变化的。单脉冲结构最能表征脉冲星辐射的具体过程，单个脉冲消干扰需要尽量保留脉冲的细节信息。因此，如何确定脉冲信号窗口，是利用本文提出的消干扰方法处理单脉冲的关键。

在进行脉冲星观测时，为了得到信噪比良好的脉冲星轮廓，需要积累长时间的观测数据，包含了许多单个脉冲数据。对每个单脉冲进行消干扰，将有效提升积分轮廓信噪比，因此，实现单脉冲消干扰的自动化很有必要，利用单个脉冲数据对比分析了本文提出的消干扰方法与 PSECHIVE 自动消干扰方法的效果。本次处理采用标准脉冲轮廓窗口  $W_{10}$  的 1.5 倍作为频域子通道内的脉冲星辐射窗口时消干扰效果最好，是由于同一观测频域下单脉冲信号辐射窗口比平均脉冲信号辐射窗口窄。

利用时域频域综合消干扰方法处理后的脉冲星轮廓如图 10 所示。与处理前的脉冲星轮廓图对比可以看出，处理后脉冲星辐射窗口右侧的强 RFI 信号和其他相位上的 RFI 信号被消除。消干扰处理后脉冲轮廓信噪比约为 26，相比消干扰处理前约提高 5.8 倍。与消干扰处理前相比，信噪比有显著提高，非信号部分的随机波动特征和相对流量明显变小。

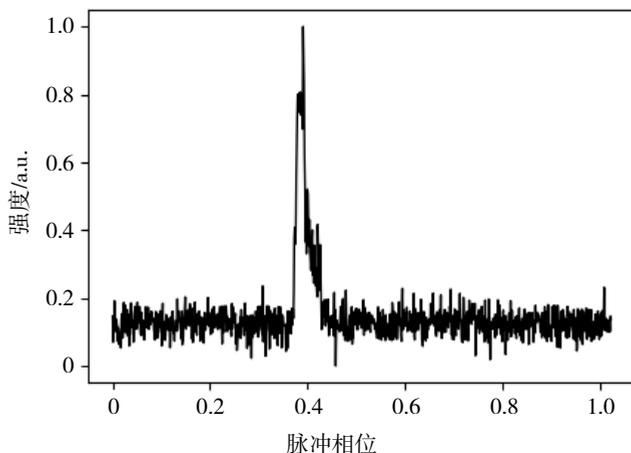


图 10 时域频域综合消干扰方法处理后的单脉冲轮廓图

利用 PSRCHIVE 自动消干扰方法处理后，脉冲星数据轮廓如图 11 所示。与消干扰处理前的脉冲星轮廓图对比可知，靠近脉冲星辐射窗口右侧流量值相对较大的脉冲是由 RFI 导致的，处理后被消除。其他非信号部分的干扰基本被消除。利用自动消干扰方法处理后单脉冲的轮廓信噪比为 9.4，比消干扰处理前约提高 1.5 倍。

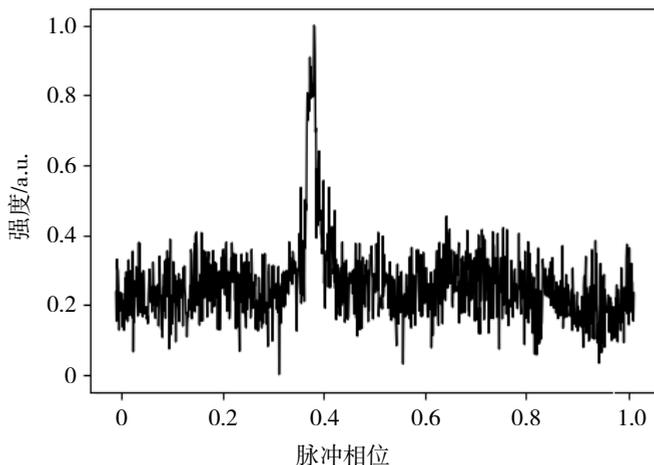


图 11 利用 PSRCHIVE 自动消干扰方法处理后脉冲星轮廓

从单脉冲消干扰处理效果可以看出,利用本文方法对单脉冲数据进行消干扰处理时,频域子通道的脉冲星辐射窗口采用的是脉冲星标准脉冲轮廓窗口  $W_{10}$  的 1.5 倍,比处理计时观测数据时采用的标准脉冲轮廓窗口  $W_{10}$  的 1.9 倍较窄。处理后脉冲星信号部分的轮廓细节比 PSRCHIVE 自动消干扰算法更加突出,非信号部分比 PSRCHIVE 自动消干扰算法更加平稳。相比 PSRCHIVE 自动消干扰算法处理后信噪比大约提高 1.8 倍。从图 10 和图 11 可以看出,利用时域频域综合处理消除 RFI 后脉冲星信号轮廓下降沿部分信息保留程度,不如 PSRCHIVE 自动消干扰方法丰富。

## 5 结语

本文提出了一种时域频域综合处理的射电频域干扰消除方法,利用中国科学院国家授时中心吴平 40 m 射电望远镜观测得到的计时观测数据和单脉冲观测数据对比分析了该方法与 PSRCHIVE 提供的自动化消干扰方法的效果。利用时域频域综合处理的 RFI 消除方法处理计时观测数据后信噪比最大约为 25.8,比 PSRCHIVE 自动消干扰方法处理后提高大约 3.3 倍,在消除射电干扰和提高信噪比方面取得了较好的效果,在信噪比提高方面优于 PSRCHIVE 提供的自动化消干扰方法。处理计时数据时,时域处理阶段选取模板脉冲轮廓峰值流量 1.9 倍的  $W_{10}$  作为频域子通道的脉冲星辐射窗口宽度消干扰处理后效果最好。在频域处理阶段当阈值系数  $k$  取 0.4 时,信噪比达到最大。在数据保留方面可以根据消除 RFI 后积分轮廓信噪比与阈值系数  $k$  的变化情况,动态选取阈值系数来弥补该方法在消干扰处理后数据损失的问题。

由于脉冲星单个脉冲的特殊性,在消除 RFI 过程中单个脉冲数据比计时观测数据更加复杂。利用脉冲星 PSR J0835-4510 的单脉冲观测数据验证了本文方法在消除脉冲星单脉冲 RFI 方面的可行性和效果,结果表明当选取的脉冲星辐射窗口为模板脉冲轮廓  $W_{10}$  的 1.8 倍宽度时,该方法处理后信噪比有显著提高,约为 26,比 PSRCHIVE 自动消干扰算法提高约 1.8 倍。处理后主峰脉冲部分的细节与自动消干扰处理后相似,在脉冲轮廓下降沿底部位置基本保留了脉冲轮廓的细节,保留程度不如自动消干扰处理后丰富。这部分细节是脉冲星自身辐射信息,还是由噪声导致的,还需要使用更高灵敏度的设备,进行更高时间分辨率的观测,对 PSR J0835-4510 的辐射机制进行深入研究后确定。

通过分析可以看出,本文提出的消干扰方法依然存在阈值选择的问题。根据经验阈值范围[1.8, 3],在频域消除 RFI 过程中选取阈值 2,根据信噪比最大值为原则动态确定最佳阈值,可以在一定程度上缓解阈值选取带来的困难。本文在实现自动化消除单脉冲 RFI 方面作出了尝试。在单脉冲消干扰过程中,阈值的选取小于经验阈值范围,可以为单个脉冲的消干扰提供参考。

致谢：感谢平方公里阵列射电望远镜（SKA）专项（2020SKA0120200）的支持。

## 参考文献：

- [1] OFFRINGA A R, GRONDE V D J J, ROERDINK J. A morphological algorithm for improving radio-frequency interference detection[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 539(2): A95.1-10.
- [2] SERIES R A. Techniques for mitigation of radio frequency interference in radio astronomy[J]. *Rep. ITU-R RA*, 2013: 2126-1.
- [3] 胡浩, 张海燕, 黄仕杰. FAST 电波环境保护措施[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(2): 152-157.
- [4] 耿立红, 刘东浩, 苏仓, 等. 明安图观测基地复杂电磁环境和干扰消减措施[J]. *天文研究与技术*, 2019, 16(4): 410-421.
- [5] BARNBAUM C, BRADLEY R F. A new approach to interference excision in radio astronomy: Real-time adaptive cancellation[J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 116(5): 2598-2614.

- [6] ELLINGSON S W, BUNTON J D, BELL J F. Removal of the GLONASS C/A signal from OH spectral line observations using a parametric modeling technique[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2001, 135(1): 87.
- [7] KATZ C A, HEWITT J N, COREY B E, et al. A survey for transient astronomical radio emission at 611 MHz[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2003, 115(808): 675-687.
- [8] BHAT N D R, CORDES J M, CHATTERJEE S, et al. Radio frequency interference identification and mitigation using simultaneous dual-station observations[J]. *Radio Science*, 2005, 40(5): 1-11.
- [9] AKERET J, CHANG C, LUCCHI A, et al. Radio frequency interference mitigation using deep convolutional neural networks[J]. *Astronomy and Computing Elsevier*, 2017(18): 35-39.
- [10] 戴伟, 尚振宏, 徐永华, 等. 基于独立成分分析的射频干扰信号消除方法[J]. *天文研究与技术*, 2019, 16(3): 268-277.
- [11] 林天琪, 吴亚军, 朱人杰, 等. 基于小波变换的射频干扰消除方法的研究[J]. *天文学报*, 2021, 62(3): 93-102.
- [12] 张敏, 袁辉. 拉依达(PauTa)准则与异常值剔除[J]. *郑州工业大学学报*, 1997, 18(1): 84-88.
- [13] 朱永生. 实验物理中的概率和统计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 于悦. 基于 LFM 信号互相关函数的子样本时延估计算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [15] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2001.
- [16] FRIDMAN P A, BAAN W A. RFI mitigation methods in radio astronomy[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, 378(1): 327-344.
- [17] LORIMER D R, KRAMER M. *Handbook of pulsar astronomy*[J]. Cambridge: Cambridge University, 2012.
- [18] SONG Y, LIU Z, WANG N, et al. An algorithm for mitigating transient RFI in pulsar observation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 922(2): 94.
- [19] LYON R J, STAPPERS B W, COOPER S, et al. Fifty years of pulsar candidate selection: from simple filters to a new principled real-time classification approach[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 459(1): 1104-1123.
- [20] OFFRINGA A R, BRUYN D A G, BIEHL M, et al. Post-correlation radio frequency interference classification methods[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 405(1): 155-167.
- [21] CRAFT H D, COMELLA J M, DRAKE F D. *Submillisecond radio intensity variations in pulsars*[M] // *Pulsating Stars*, Boston: Springer, 1968: 31-33.
- [22] ROMANI R W, NARAYAN R, BLANDFORD R. Refractive effects in pulsar scintillation[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1986, 220(1): 19-49.
- [23] MORELLO V, RAJWADE K M, STAPPERS B W. IQRM: real-time adaptive RFI masking for radio transient and pulsar searches[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 510(1): 1393-1403.
- [24] STRATEN W V, MANCHESTER R N, JOHNSTON S, et al. Psrcache and psrfits: Definition of the stokes parameters and instrumental basis conventions[J]. *Public of the Astronomical Society of Australia*, 2010, 27(1): 104-109.
- [25] 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.