

射电频率干扰的消减*

安 涛^{1,2†} 陈 骁¹ MOHAN Prashanth¹ 劳保强¹

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008)

摘要 一直以来, 射电天文装备不断得到升级和发展, 以使其具有更好的观测性能, 包括提高数据记录的时间和频率分辨率以及获得更高的接收和记录带宽等. 然而与之形成矛盾的是: 国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)仅为射电天文分配了非常有限的频谱资源, 导致的后果是射电观测设备不可避免地受到日益增强的非天文信号的影响, 后者的来源主要是人类的通信活动和日常生活, 这就构成了通常射电天文中所说的射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI). 射频干扰会降低数据质量甚至导致数据无效, 对科学结果的影响越来越严重. 对RFI消减的需求进行分析, 总结了RFI的特性、抑制和消减的技术和方案, 并介绍了一些有代表性的射电望远镜(或阵列)中采用的RFI消减方法; 还分析比较了4种常用方案, 即预防、预检测、预相关和后相关的优势和不足. 对RFI进行准确的识别和标记是减少数据损失从而有效提高数据质量的关键, 也是发展RFI消减技术的最终目的. 通过研究不难发现, 上述4种方案的组合运用将具有更高的实用价值. 近几年来, 随着高速数字信号处理和高性能计算的迅速发展, 依赖大量计算的实时模式下的预检测以及离线模式下从大型望远镜阵列所产生的大规模干涉相关数据中检测RFI已经成为可能.

关键词 望远镜, 射频干扰, 仪器: 探测器, 方法: 统计

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 引言

在射电天文中, 射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)广义上主要指由于人类生产活动和生活而产生的无线电信号, 包括电视信号、调频无线电传输、全球定位系统(GPS)、手机和飞机导航通讯等, 对接收微弱的天文信号造成了影响^[1], 导致数据丢失和数据质量的降低. 商用调频广播一般在87.5–108 MHz频率范围内, 会对低频射电天文信号造成持久污染. 电视广播信号同时处于窄带和宽带, 其频率范围跨

2017-02-27收到原稿, 2017-04-06收到修改稿

*中国科学技术部政府间国际合作专项(2016YFE0100300)、国家自然科学基金项目(11650110438)、中国科学院天文财政专项、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB23010300)、中国科学院国际博士后项目(2016PM024)和中国科学院青年创新促进会资助

[†]antao@shao.ac.cn

度广, 包括通常在40–80 MHz和160–230 MHz的甚高频(very high frequency, VHF)以及通常在470–960 MHz的超高频(ultra high frequency, UHF)频带, 其中VHF频率(包括调频无线电频带)也经常用于民用和军事通信, 例如对讲机信号的传输和接收. 而典型的手机通信信号都位于850 MHz、900 MHz、1800 MHz和1900 MHz附近的窄带中, 这是基于全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)的标准. 国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)¹的无线电通信部门协调全球的射频资源, 在建议框架中制订了频率分配和运行规则的综合清单, 包括电台允许的广播频段和功率、射电天文受保护的频段等. 表1列举了主要的RFI来源, 包括商用广播(Commercial FM), 移动通信(Mobile GSM), GPS, 全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS), 通信铱星系统(Iridium), 以及由Orbcomm公司运作的ORBCOMM卫星通信系统. 图1中举例展示了位于澳大利亚射电宁静区的默奇森宽场阵列(Murchinson Widefield Array, MWA)²中RFI占用的典型频谱^[2], 其中ORBCOMM波段的RFI占用率在33.4%.

表 1 低频射电天文观测中部分主要RFI来源

Table 1 Part of the main sources of RFI contamination at low radio frequencies

Part of RFI source	Frequency/MHz	Characteristic
Commercial FM	87.5–108	Narrow band, persistent
TV	40–80, 160–230, 470–960	Narrow and broad bands, persistent and transient
Mobile GSM	850, 900, 1800, 1900	Narrow band
Navigation satellites: GPS	1227.60, 1575.42	Characteristics, persistent
GLONASS	1602	Characteristics, persistent
Communication satellites: Iridium	1618.85–1626.5	Narrow and broad bands, persistent
ORBCOMM	137–138	Narrow and broad bands, persistent

上述已知的人造RFI信号对窄带频率信道的污染是持续的. 此外, 由闪电、电力传输电缆、电栅栏以及其他事件可能引起瞬时激增的强烈射电信号, 它们所引起的RFI是短暂的, 但是会污染多个信道, 因此其实际表现为宽带信号特性.

国际电联只为射电天文分配了非常有限的频谱资源³, 而且射电天文业务(Radio Astronomy Service, RAS)实际上是一种被动(接收)业务, 很容易受到上述主动(发射)业务的影响. 实际工作中, 天文学家对宽带接收和记录数据的需求不断提升, 于是RAS系统的工作带宽不断增加, 因此来自主动业务的影响就是不可避免的. 随着射电天文仪器接收微弱天体信号能力(即望远镜灵敏度)的不断提升, 受到非天文信号的干扰也越来越强. 宽带、广播和通信中频谱的大量使用, 以及越来越多的大规模生产、经济和商业活动,

¹<https://www.itu.int>²<http://www.mwatelescope.org/>³<http://www.itu.int/publ/R-REP/en>, 编号ITU-R RA. 2126-1

低功率的人工宽带信号也变得越来越频繁, 这些都会产生射电天文数据中很难消除的噪声信号, 从而使已有的RFI问题变得愈发严重. 另一方面, 来自动态频谱接入(dynamic spectrum access, DSA)系统的使用会造成短暂RFI信号干扰, 该系统在当前一段时间内尚未授权使用的频谱间隙中操作, 大大推进了无线感知射电装备(如穿戴式、智能家居、自动驾驶汽车等)的广泛使用. 日益频繁的DSA频谱会改变RFI环境的特性, 并将导致整个射电天文学界不得不调整方法以适应新的RFI来源, 并减少其产生的RFI对数据的影响. 一些随时间变化的RFI信号会严重影响时域天文观测, 例如脉冲星、快速射电暴和射电瞬变源等天体的搜寻. 在瞬变源和脉冲星的观测期间如果发生了变化的并且不重复的RFI, 那么其很有可能会破坏这种独一无二的重要观测机会, 因为RFI会影响脉冲星的时序和数据的校准. 国际上曾经闹出一个经典乌龙, 澳大利亚Parkes望远镜探测到一些奇怪的信号, 命名为Peryton, 它曾被怀疑来自快速射电暴天体, 但最后的真相是来自望远镜附近微波炉的辐射.

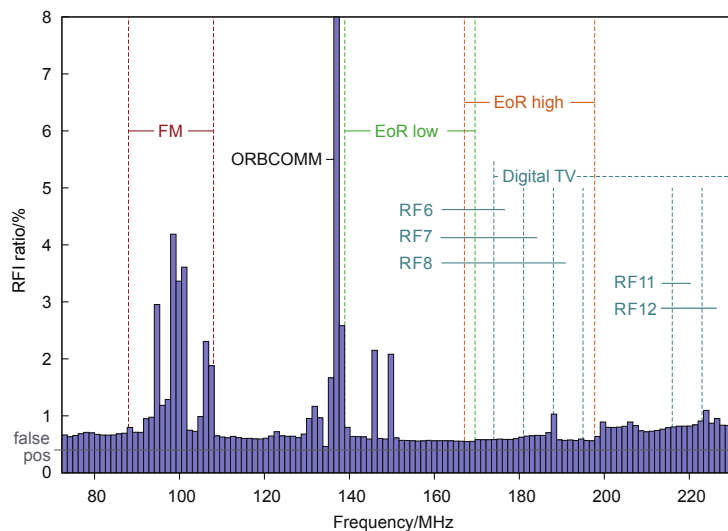


图1 MWA中RFI对低频的占用. 图中展示了主要的调频、通讯卫星和数字电视信号对宇宙再电离(Epoch of Reionization, EoR)观测的低频(EoR low)和低频(EoR high)波段的污染^[2]. 图中的水平灰线(false pos)表示RFI的误检率.

Fig. 1 RFI occupancy in the low frequencies with the MWA. It shows the contamination on EoR low and EoR high due to FM, communication satellite, and digital TV transmission signals^[2]. The horizontal gray line represents the false-positives rate of the RFI detection.

射电天文中的干扰消减旨在减少或消除分配给RAS以外的频带中主动业务所产生的影响. 在未得到分配和保护频带中开展射频干扰的消减研究是非常必要的, 正确识别RFI是对其进行消除的前提, 只有掌握了RFI的特性和必要的技术手段才可以在具有不同RFI水平和来源的工作环境中对望远镜装备进行相应的运行操作. 本文的第2节将重点讨论如何从接收到或校准过的信号的时频域分布中推测信号类型以及获得其形态特性. 第3节介绍不同数据获取环节采用的RFI抑制和消减方案, 包括预防和降低RFI的措施, 以及应用于接收信号(包括前相关和后相关)的消减措施. 第4节中介绍一些有代表性的观测站采用的RFI消减措施, 最后第5节进行了讨论并总结.

2 RFI特性

RFI的特性可被用于对其进行识别以及随后的消除或数据校正. 无论是强RFI信号还是弱RFI信号, 要么影响多个相关信道(宽频带), 即其分布非常分散; 要么只影响某些狭窄的特定信道(窄频带)^[3]. 根据其来源以及在1 d中的观测时间的不同, RFI可以是瞬时的或者是长时间持续的. 对于瞬时RFI, 必须采取相应措施将其与真实的瞬变天体源(例如快速射电暴或射电瞬变源)所产生的信号区别开. 此外, RFI还有可能以脉冲式爆发(振幅高、时间间隔短)的形式出现, 其可能是持久重复出现并随时间变化的, 或者也可能非常短暂. 大多数RFI的幅度比潜在的天文信号和随机噪声高得多, 但有些弱RFI信号与真实天体信号(例如脉冲星)的强度相差不多, 很容易导致误判. 从以上分析可以看出: 简单地从时间和频率上的直接表象很难识别RFI. 实际上, 人类活动产生的RFI与天体信号的重要区别在于接收数据在时间-频率域上的离散变化特征: 由于天体信号(例如脉冲星信号)穿过了大量的星系际和星际介质, 因此将会被经过该路径上的冷等离子体和气体云散射, 其频率 ν 被离散的程度和信号的到达时间 τ 有关, 即通常所说的色散关系, ν 与 τ 的关系是 $\tau \propto \nu^{-2}$ ^[4]. 相比之下, 人类活动产生的RFI信号主要是由于地球电离层的反射以及介入的地球大气相互作用, 因此没有或仅轻微地发生色散. 色散量成为区分人工信号和天体信号的一个重要判据. 此外, 真实的天文信号通常被干涉仪或配备有多波束系统的望远镜中的主波束检测到, 而大多数直接和间接(比如反射)的RFI信号则主要从主动业务的旁瓣耦合中检测到. 在对RFI进行分辨时必须特别小心, 否则很容易出错, 例如第1章中提到的, 在研究Perytons (显示出非幂律特性的强短脉冲)的性质和来源时, 相关信号却被证实为来自地面人类活动的干扰(见Kulkarni等^[5]和Petroff等^[6]).

对于合成后干涉相关数据的RFI性质, 也可以根据它们的形态来研究. 如果其形态由宽带(离散的或强度高的分布)和窄带的水平和垂直包络组成, 可以判断主要由上文中描述的地面源的人工信号引起. 另外, 包络也可以在时频域中呈现出弯曲, 通常由诸如GPS (频率为1.575 GHz和1.228 GHz, 参见Offringa等^[7])的卫星传播通信信号中的多普勒频移引起, 并不是真实的天体信号的色散. 这些形态特征可以是瞬时的(紧密聚集的)或持续的(因此非常分散、松散的聚集), 一些示例如图2和图3所示, 分别展示了MWA数据中数字电视信号产生的持续性宽带RFI, 以及国际低频阵列(Low-Frequency Array, LOFAR)观测数据中的RFI特征.

3 RFI消减方案

RFI的抑制和消减方案可以根据具体观测站所处的位置和主要RFI来源因地制宜制订, 通用的RFI消减方案可以根据RFI信号在数据流中出现的阶段而大致分为4个环节: (1)观测站预防, 即观测站在选址、建造和运行期间采取的射电频率保护条令、预防和监管措施; (2)预检测, 通常指的是接收机系统中使用的预检测方法, 可以屏蔽掉已知的强RFI信号; (3)预相关, 在将接收数据发送到相关处理机之前, 对接收数据基于硬件或软件进行实时消减操作; (4)应用于干涉数据的后相关方案, 包括对干涉合成数据的实时和离线处理. 强RFI在以上4个环节都容易识别, 而弱RFI必须在数据干涉合成提高信噪比以后即环节(4)才能识别.

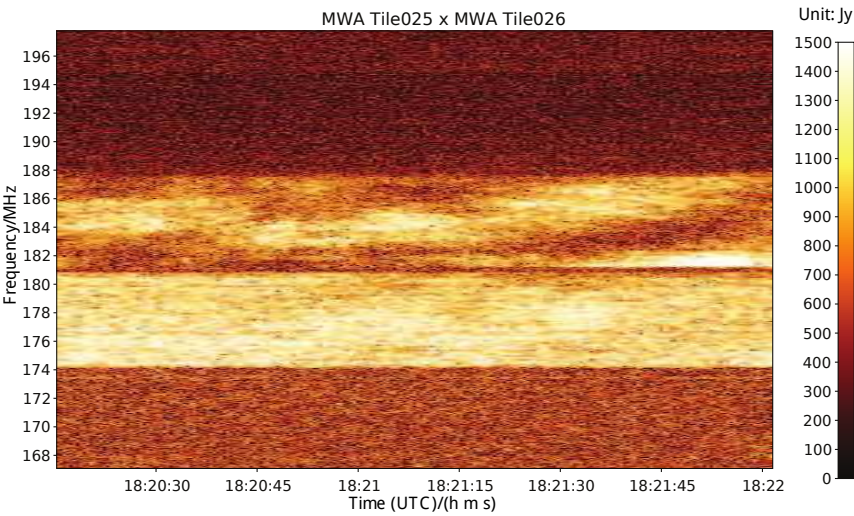


图 2 MWA数据中数字电视信号产生的持续性宽带RFI^[2]. 颜色表示可见度数据的强度.

Fig. 2 A persistent broadband RFI from digital TV signals in the MWA data^[2]. The color scale represents the intensity of the visibility data.

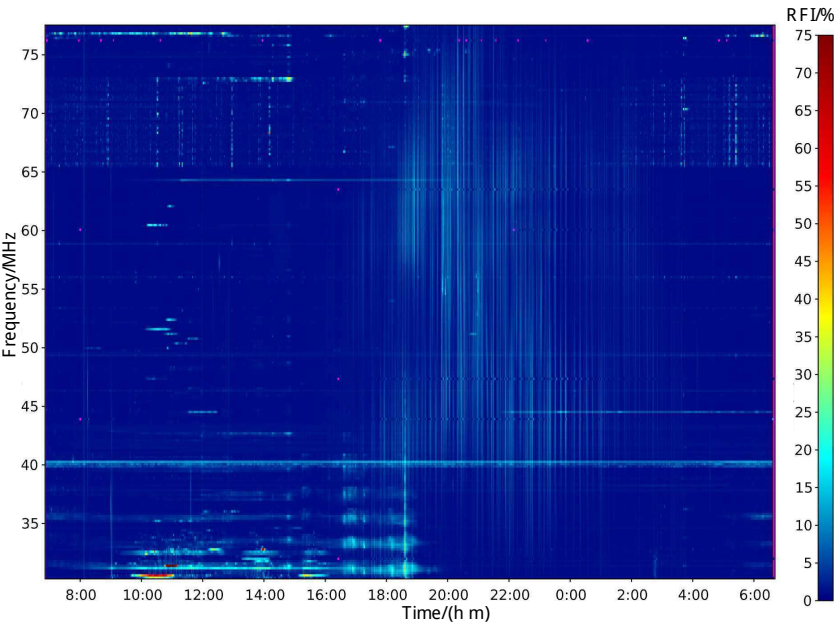


图 3 在荷兰LOFAR阵的观测数据中, 窄带和宽带RFI (红色和浅蓝色条带、亮点)在10–80 MHz低频测量中同时呈现出持续和瞬态特性^[8].

Fig. 3 The narrowband and broadband RFIs show persistent and transient characteristics in the low frequency measurements within 10–80 MHz made by the LOFAR of the Netherlands^[8].

在实施上述一种或多种技术时需要重点考虑的几个关键问题为: (1)如何对RFI信号的强度进行量化以便设置判别阈值? 根据接收数据是否为连续谱或者谱线量化的方法有所不同; (2)如何避免混入虚假信号即确保检测的准确性? (3)如何定量评估RFI消减

方案的实施效果? (4) RFI消减技术实施的技术可行性, 包括硬件的成熟度和成本、组装和实施时间, 对大规模数据采用超算的高性能计算成本以及对该技术系统进行长期维护的成本估算. Fridman和Baan^[1]对单天线望远镜和干涉测量阵列采用的不同方案进行了比较, 评估各自的检测效率和相对优势, 国际电联报告以及Baan^[9]等也详细讨论了这些方案.

在这里再次强调一点, 实施这些方案的主要目的是尽量减少因为RFI造成的数据损失, 也就是说, 在不损失太多天文信息的前提下, 对RFI进行识别、标记和有效消除. 基于这个目的, 在处理RFI环节中, 显然越早处理越好. 因为越早处理干扰问题, 对数据的损害越小, 建立后续系统的复杂度越低, 执行下游方案的成本也越低.

3.1 预防方案

预防性或前瞻性的工作包括寻找没有或者很少受到RFI影响的地理环境来建造望远镜设施. 通常在没有人类居住的区域效果好, 然后针对已有的和未来将建设的望远镜设施规划出一个射电频率保护区, 也称无线电宁静区. 这项工作需要和政府部门协调, 根据国际电联的建议在观测站附近划定射频保护区, 提供相关政策支持并实施管理条例来限制特定频段和频谱的使用, 包括禁止和限制在无线电宁静区附近使用射频信号发射机. 这种管理安排的设置和机制已经有一些先例, 例如, 欧洲射电天文频率委员会⁴对射电天文频率保护的政策法规做了总结概述, 详见Cohen等人2005年的报告^[10]. 图4中展示的是一个实例, 建于中国贵州省的、世界上最大的单体射电望远镜—500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)⁵周围的无线电宁静区的设置: 在站址5 km范围内(即图4中的内圆)的核心区域禁止设置、使用任何无线电台(站), 严禁建设辐射电磁波的设施; 中间区5–10 km内严禁设置、使用工作频率在68–3000 MHz且发射有效功率100 W以上的无线电台(站), 设置、使用其他无线电台(站)及建设产生辐射电磁波的设施时, 须由省无线电管理机构组织电磁兼容论证, 经论证对射电望远镜正常运行构成干扰的不得建设.

除了选址规避临近的地面射频干扰设备, 针对观测设施的必要预防方案也能够最大限度地减少被RFI污染数据的接收. 必须确保在观测设施附近的计算机系统和其他通过无线连接的设备(例如无线局域网、2.4 GHz的WLAN、园区监视系统)被有效地屏蔽, 以防止它们对接收信号产生污染. 另外, 供电设施(传输电缆和发电/变电站)中电子设备产生的RFI, 以及接收机和数据记录仪器、控制电机系统产生的电磁辐射都会对接收信号造成干扰^[11–13]. 特别是对于预期信号弱的观测(例如宇宙再电离时期中性氢的研究), 必须以适当方式消除RFI. 广义上, 对于识别、信号衰减的估值以及消除方法的研究被称为电磁兼容性(electromagnetic compatibility, EMC)研究. 欧洲射电天文频率委员会曾对荷兰WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope)^[14]干涉阵列进行了专门研究, 其中一部分RFI污染被认定为来自于观测站自身设备, 如网络设备(交换机)、计算机(CPU、监视器)等设备、存盘的读写操作以及接收机的影响, 还有一些强干扰信号来自电子监控设备, 这些观测站自身设备是天文学家经常忽视的地方, 恰恰是主要的临近RFI来源之一.

⁴<http://www.craf.eu/radio-quiet-zones-around-observatories/>

⁵<http://fast.bao.ac.cn/en>

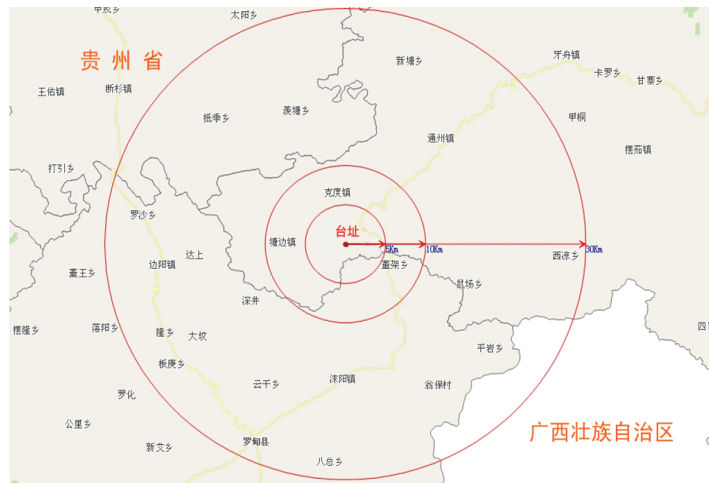


图 4 FAST的无线电宁静区. 图片来自于FAST项目办公室

Fig. 4 Illustration of the radio quiet zone of the FAST. Image courtesy of FAST project office

预防工作需要在站址建立长期的监测设备, 对已知的RFI强源的频率、出现时间、方位等信息进行有效掌握, 以对其识别和消除, 而且也可以对一天当中选择合适的观测时间提供指导. 对RFI敏感的一些脉冲星和谱线观测, 可以选择RFI干扰最少的时段来运行观测设备. 来自卫星的干扰信号是不可避免的, 但其频率和运行轨道是一定的, 对诸如GPS信号可直接对所有接收的数据进行精确的时间标记, 在后续操作中可直接删除. 此外, 还必须监测望远镜周围的环境, 考虑接收数据中的电离层变化, 并跟踪记录仪器的影响(例如在接收到来自地面源的强信号时接收机增益的偏差会增加).

3.2 预检测方案

预检测方案包括在接收机中安装带通或高/低通滤波器, 以实现已知强RFI信号在频域的抑制, 显然这个方案适用于天文观测频段以外的已知强干扰信号. 这个方案的原理和操作比较简单, 不足之处是, 在接收机中安装带通或高/低通滤波器会导致插入损耗, 在接近频段边缘的频率处系统温度也会显著升高, 影响带通性能. 而且滤波还可能导致连续观测的数据丢失, 而通常这些丢失的数据对于谱线观测是非常重要的, 因为RFI一般发生在接收机通带内的临界频率. 若带外的RFI持续时间不长, 在数据获取过程中采用间歇性的停止观测也可以用于在时域中的RFI消除, 且对于脉冲和周期信号也是有用的. 从以上讨论可以看出, 该方法中会造成一部分数据丢失, 相当于减少了有效观测时间.

数据接收阶段的RFI预检测和抑制消减方法需要实时操作, 对于单体望远镜问题不大, 对于大型望远镜阵列会是一个不小的负担. Baan等^[15]测试了在WSRT工作的FPGA(Field-Programmable Gate Array)的设置, 对包括实时RFI抑制系统在内的RFI环境进行了系统性的研究. FPGA执行初始频域滤波, 然后利用累积求和对接收到的数据进行阈值处理, 其结果如图5所示. 类似的实验研究将有助于对早期阶段的RFI进行识别和消除, 可以在单体望远镜和阵列望远镜中设置实现, 还可能推广应用到未来的大型干涉阵列如平方公里阵列望远镜(Square Kilometre Array, SKA)中.

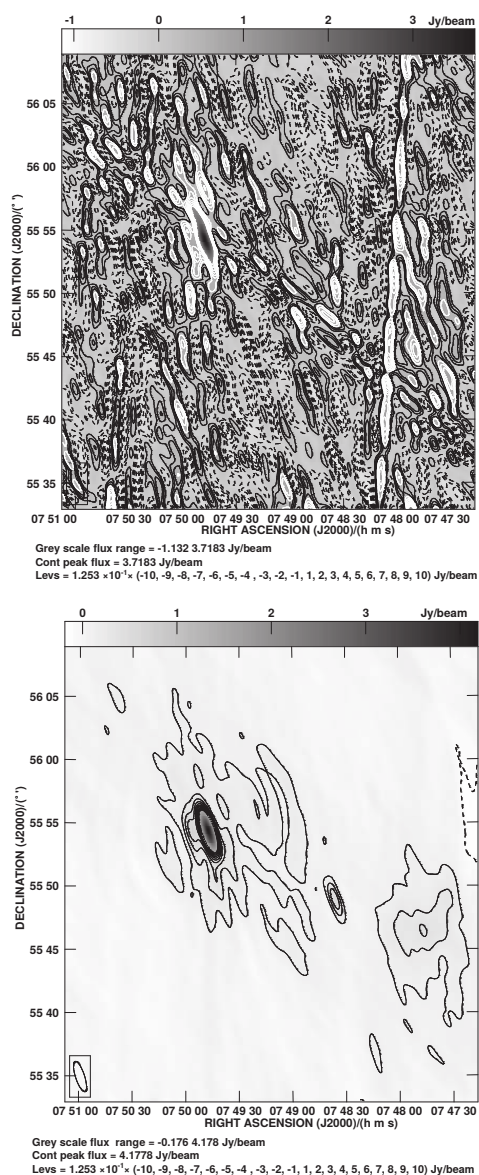


图 5 双瓣射电星系DA 240在357 MHz的连续谱观测. 上图和下图分别为RFI消除前后的图像对比, 可以看出在RFI影响的上图中几乎无法判断天体, 而下图的图像质量已经相当好^[15].

Fig. 5 Continuum emission from the giant double radio galaxy DA 240 at 357 MHz before (top) and after (bottom) removing RFI. The contrast between these two images is obvious. After RFI excision, the image quality has been significantly improved^[15].

3.3 预相关方案

预相关方案应用于接收的原始数据, 或是在相关和进一步处理之前、经过预检测滤波后输出的数据, 是一种接近实时地识别和减少RFI污染的手段. 作为时域中的自适应噪声消除(adaptive noise cancellation, ANC)方案, 以及暂时消隐数据接收的相关方法, 这些方案可以通过空域消除法来实现, 具体涉及在天线阵列一级消除RFI信号. 我们将

在后面讨论这些技术细节.

(1)在天线和仪器一级的空域消除法是应用于初始成像/波束形成阶段的RFI抑制技术, 特别是针对位置和方向已知的RFI源. 在单口径望远镜中, 天文和RFI信号被相干叠加; 而在干涉测量阵列中, 只有部分RFI不经过相干地进入接收系统, 即实现了内置方案, 其延展的干涉阵列单元就相当于RFI的空间滤波器. 值得注意的是, 阵列中每个站的数据校准仍然会受到当地RFI的影响.

(2)空域消除可以在多波束天线系统中通过调整波束模式来实现, 即使得强RFI源的位置对应于空值(例如Ellingson等^[16]、Hansen等^[17]和Landon等^[18]). 类似的子空间投影技术被用于消除RFI, 其中协方差矩阵的本征值分解(奇异值分解)由干涉阵列的每个分量在不同时间接收的信号组成(详见Leshem等^[19]、Briggs等^[20]、Boonstra等^[21]、Pen等^[22]、Kocz等^[23]和Paciga等^[24]的论述); 而相控阵可用于识别和消除由于通讯或其他信号传输而导致的RFI, 评判标准是已知所得信号的某些统计特性(例如平均值、中值和相关性等)是周期性的(周期平稳的、非稳定过程, 见Weber等^[25]和Hellbourg^[26]).

(3)波形滤波或ANC是通过在频域中使用卷积核来进行阈值处理, 从而对时域RFI进行滤波, 并在将数据反馈到相关器之前返回到时域. 常用的方法是对已知的RFI源采用维纳滤波器(如Barnbaum等^[27]), 并且假设RFI源是静止的. 由于滤波的过程本质上是作用于有序时间数据集的, 因此它们适用于连续观测以及脉冲星的搜索和监测实验(相关研究参见Kesteven等^[28]).

(4)时间消隐技术, 是在对存在强RFI的接收信号时间段停止相关器输入, 并且对所接收样本的变化属性进行相关研究(例如Weber等^[29]和Fridman^[30])的技术. 剪切技术则是对时间消隐技术作出的补充: 若先前信号的累积和超过预定阈值, 则对信号采取阈值化处理(例如Baan等^[31]和Fridman^[32]). RFI的识别基于随机高斯噪声信号的期望 χ^2 分布产生的系统偏差、累积动态功率谱中高阶统计产生的系统偏差(如Fridman^[33])以及时域中的随机高斯噪声的期望统计所产生的偏差^[34]. 利用累积功率谱及其平方得到的频谱峰度的测量结果被用于量化由高斯随机噪声的期望产生的接收信号的偏离^[35-37].

3.4 后相关方案

这些方案被应用于相关后的数据, 并涉及对观测频率数据的时间片段、二维时频数据或积分后数据立方体的处理, 使其能够在成像之前或期间执行RFI的消减. Offringa等^[7]对其中一些方案进行了概述, 其重点放在通过统计分析数据来准确地标记和阈值化. 传统的后相关处理RFI方案包括标记和消除两个步骤, 由于数据量大, 非常耗时, 而且通常需要手动进行, 对于将来处理平方公里阵列望远镜这样的大规模观测数据十分不利. 因为该方案面向积分后数据和相关后的数据进行处理, 在这个环节经常会导致大量数据丢失, 影响到数据的整体质量, 有时候丢失的数据会影响到有用天文信号的挖掘.

后相关RFI抑制和消减可以通过平滑和表面拟合、基于边缘停止的识别系统、阈值处理等一些类似于预相关方案中的方法来实现, 下面将讨论这些技术.

(1)对接收机给定目标频率范围之外的信号进行数字滤波(如Ellingson等^[38]和李浩然等^[39]), 需要在傅里叶频域中采用窗口函数, 以确保信号中的信息得以完整保存. 空间零陷和RFI自适应消除(指向已知强RFI源的天线或参考信道, 参见

苗可可等^[40])可以用于主相控阵列的天文信号中RFI信号的消除(如Ellingson等^[16]、Barnbaum等^[27]和Briggs等^[41]), 经过仿真, 其对于前相关和后相关方案都适用^[42].

(2)表面拟合是对时频数据进行平面拟合, 拟合方法包括使用像素片段、平滑函数(如Offringa等^[7]中的讨论)、在傅里叶域^[43]中对基于图像差的RFI标记以及图像重构(例如Winkel和Kerp^[44]).

(3)由稳定的、不动的RFI源(相对于波束相位中心)随不同基线变化而产生的条纹停止的影响能应用于分析和消除RFI^[45]. 该方法与傅立叶域中的阈值转换法被一起集成到天文图像处理系统(Astronomical Image Processing System, AIPS)的流水线中^[46].

(4)用于顺序采样的阈值处理也能够被用于离线RFI抑制. 这种阈值处理是基于累积和的, 利用了时间标记的精确性, 类似于早先描述的预相关方案中的时间消隐.

(5)时间连续或形态相关的数据的组合阈值能够被用于RFI的抑制. 该方法通过有效测量联通程度判断数据是否是RFI以及哪些数据是RFI, 然后向被RFI污染的数据分配特定权重, 并且利用预定义的阈值来标记出这些数据(如Offringa等^[7, 47]). 自动标记和阈值法被较多地应用到干涉阵列的流水线处理系统, 实例包括Pieflag (应用于澳大利亚望远望远镜致密阵列^[48])、AOflogger (应用于低频阵列、LOFAR和MWA, Offringa等^[2, 47, 49])、为艾伦望远镜阵研发的流水线(如Keating等^[50])、FLAGCAL (应用于巨米波射电望远镜, 详见Prasad等^[51])和用于校准英国e-MERLIN (electronic Multi-Element Radio Linked Interferometer Network)阵列数据的RFI阈值法SERPENT (Scripted E-merlin Rfi-mitigation PipelinE for iNterferometry, 详见Peck等^[52]).

(6)在使用自动阈值技术时, 须特别小心误删除时变天体信号, 因为这些标记可能把不大于2 min的真实信号识别为来自RFI的污染. 一个例子是, 在对LOFAR的恒星撕裂时间天体Swift J1644+57 (例如Cendes等^[53])进行研究时, 并未检测到预期的源, 分析原因可能是其微弱瞬时信号被认定为RFI并在数据处理过程中被删除了.

因此, 与先前描述的方法类似, 阈值处理技术必须结合数据的期望统计分布和随机高斯噪声, 以准确推断由RFI污染引起的偏差. 后相关分析的优点在于能离线处理大量的数据(包括基于初始似然估计的标记和处理)以及在最小的人为干预情况下训练自动标记(将来采用人工智能的机器学习)和消除RFI的算法, 使得利用累积数据来获得尽可能准确的统计特征信息的可能性增加. 最近, 已经有学者尝试使用神经网络(深度学习的一种方法)以及阈值算法^[54]对模拟的后相关数据进行训练, 该实验在RFI识别精度方面得到了令人信服的结果, 然而其缺点是速度还不够快, 且对运算强度的需求太大, 距离大规模应用还有一定距离.

4 射电天文中的应用RFI抑制和消减方案的科学案例

射电天文中有价值的信号包括干涉仪的可见度数据和单天线的流量密度测量, 它们都分布于时域和频域中, 观测结果依赖于设施的观测能力和天体源的情况. 可见度数据是由多个望远镜组成的干涉阵列通过干涉合成的, 与单天线相比大大提高了成像灵敏度和分辨率, 可用于研究: 银河系中恒星形成和恒星的晚期演化; 通过脉泽辐射精确测量天体的位置和距离; 脉冲星的物理性质及精确测距; 研究河外星系的活跃星系核(active galactic nuclei, AGNs); 星系合并和相互作用时发生的星暴活动; 星系团; 对整个银河系

的中性氢进行普查; 利用宇宙尺度上的中性氢辐射研究宇宙再电离时期和通过重子声波振荡探测暗物质; 建立毫角秒精度的天体参考架; 监测地球板块运动等. 单天线的脉冲星计时数据用于重新构造已知脉冲星的独特脉冲形状, 从监测数据中寻找新的脉冲星和其他重复性瞬变信号(可能是旋转射电瞬变源和快速射电暴), 以及在脉冲星计时阵列中设置精确的计时信息, 以便从中搜寻出超大质量黑洞并合产生的引力波. Padovani^[55]综述了河外射电天文的最新发展. Carilli等^[56]总结了即将开建的国际大科学项目—SKA的早期科学目标, SKA最新的科学白皮书更新了主要科学目标和研究课题. 2015年在瑞典和2016年在印度召开的SKA科学大会对第1阶段(SKA-1)的科学方案进行了详细论证. 我国科学家也正在撰写中国SKA科学白皮书和科学方案.

有一点需要指出的是: 所有上述天文前沿研究的推进都离不开技术的进步, 包括发展新的硬件设备(新型天线和宽带馈源、接收机的低温放大器、高速电子记录终端、软件和硬件相关处理机)、开发适应大规模观测数据的自动流水线处理软件系统以及大数据量的分析能力(数据处理、分类、存储和检索以及用户交互等). 观测数据的好坏关系到科学成果的质量甚至结论的真伪, 射电频率干扰抑制和消减技术也在科学需求的指引下得以不断进步和发展. 下面, 我们展示了一些国内外有代表性的观测设备(主要集中在低频射电干涉阵列)的主要科学目标以及采用的RFI防护、抑制和消减方法, 从其实施过程和结果中找出有益的经验, 从而使RFI消减方案得到改进与调整.

4.1 寻找宇宙第一缕曙光的探路者项目—21 cm阵列(21CMA)

21CMA位于中国西部新疆天山深处的乌鲁斯台, 是由我国科学家独立建造的、国际上最早用于探测宇宙第一缕曙光的专用射电干涉阵列. 该阵列由在50–300 MHz频率(其中性能最佳的波段是70–200 MHz)范围内运行的81个波束组成, 总共有10287个对数周期天线, 能够探测红移 z 在6–27范围内的中性氢21 cm发射线. 天线固定指向北天极, 长期积累数据用于统计测量宇宙学红移后的中性氢发射线信号, 以此研究宇宙再电离时期的第1代发光天体的形成和演化^[57].

21CMA数据中RFI的特性、识别和消减在Huang等^[58]的论文中有详细描述. RFI的主要来源是119 MHz和130 MHz频率的民用航空通信、137–138 MHz频率范围的ORBCOMM通信卫星的信号(见表1)、附近经过列车中151 MHz的对讲机通信信号、调频FM无线电传输信号及从观测仪器和计算机系统产生的射频干扰信号. 针对RFI的消减分为几个步骤来解决: 首先, 通过干涉相关和长时间积分来识别RFI, 具体是根据RFI信号偏离高斯概率分布函数的偏差来判定, 强RFI信号很容易在频谱中被认证识别; 然后通过对可见度数据做加权处理达到消除时变RFI的目的, 将其影响减少到最小程度.

4.2 FAST

FAST是我国独立建造的世界最大的单口径望远镜, 位于中国贵州省, 球面直径500 m, 在70–3000 MHz的低中频范围内工作. 其早期科学目标包括银河系以及近邻星系内中性氢的深度巡天、脉冲星普查和搜索、分子谱线和河外羟基超脉泽研究等(例如Nan等^[59]、Li等^[60–61]和潘之辰等^[62]).

FAST由于其高灵敏度的特性, 也因此极易受到RFI的影响, 如何在高灵敏度下对干

扰进行防范和消除是FAST干扰研究的核心. FAST选址在贵州偏远的喀斯特地形中, 其得天独厚的自然条件不仅为建造超级望远镜提供了便利, 而且使得当地的RFI污染能够达到最小化(如Nan等^[59]). 在贵州省人民政府的支持下, FAST制订了详细的RFI防护条例, 在望远镜站点周围30 km半径设置无线电宁静区, 建立监管设施, 最大程度地保护现在以及将来的无线电环境(图4). 对台站仪器(主要是控制系统)和计算机系统在使用过程产生的EMC进行了详细的研究、识别和管理, 并采取措施以使台站自身产生的RFI达到最低水平^[63]. 除了以上预防措施, FAST的干扰消减相关工作正在研究进行. FAST数据处理中可以考虑采用预相关技术的RFI削减策略, 包括利用阈值处理和中值滤波以优化定时和频谱数据, 类似的方案在美国的Arecibo和Green Bank望远镜中被采用, 例如Bhat等人分别对Arecibo和Green Bank望远镜的测试数据进行了模拟和研究^[64]. 除此之外, 还可以根据RFI引起的高斯噪声的统计性质而设计的RFI识别流水线程序(类似方案可参考Andreut等^[65]), 由于FAST灵敏度非常高, RFI信号容易识别, 因此可以考虑采用时间消隐方法消减识别出的RFI信号.

4.3 天马望远镜

天马望远镜即上海65 m射电望远镜, 位于上海松江佘山地区, 是除FAST外目前亚洲口径最大的射电天文望远镜, 也是国际VLBI (very long baseline interferometry)网的一个重要组成单元, 由中国科学院上海天文台负责运行. 该望远镜采用了卡塞格伦反射面天线, 其工作波段范围较广, 在L、S、C、X、Ku、K、Ka和Q共8个波段均配有接收设备^[66], 是我国第一个能够在7 mm波长工作的射电望远镜. 其科学研究领域包括分子谱线观测(包括大质量恒星形成区的谱线、K波段银道面的谱线、高红移一氧化碳等其他重要分子谱线, 详见吴亚军等^[67])和脉冲星、暗弱射电源(包括X射线双星、微类星体、射电耀变体等)的观测研究等^[68].

天马望远镜的RFI污染主要来自C波段以下, 其消减措施包括: 设立了3 km范围的无线电宁静区; 在1–12 GHz的频率范围内对RFI进行监测; 利用1200个触感器组成的主动面对设备进行评估; 在S和L波段, 利用超导滤波器去除强干扰; 对于通道内的RFI污染, 在终端直接去除, 然后把消除强干扰后的数据用于科学研究.

4.4 e-MERLIN

位于英国的MERLIN阵经过改造后, 用高速光纤取代了过去借助微波的数据传输, 原有MERLIN阵列的接收机、模拟和数字电子设备等都有升级^[69], 因此重新命名为e-MERLIN, 它的工作频率为151 MHz–24 GHz^[70]. MERLIN和e-MERLIN已被用于大量的科学研究, 包括恒星形成和演化晚期的质量损失(如Richards等^[71]、Ainsworth等^[72]和Morford等^[73]); 对AGN的光年到千光年尺度喷流特性的观测研究(如An等^[74–75]、Gabanyi等^[76]、Araudo等^[77]和Straal等^[78]); 星暴星系(例如Argo等^[79])、通过基于原子和分子发射线的诊断, 包括预期的光学深度和向内/向外的喷流特性^[80]来区分AGN与星暴活动; 从气体云和恒星形成区域以及演化晚期的恒星包络中识别和调查脉泽发射线(羟基、水和甲醇等, 参见Green等^[81]、Etoka等^[82]、Richards等^[83]和Wolak等^[84]). 另一个重点研究的有趣课题是搜索快速射电暴的前身星及物理本质, 包括最近观察到的FRB 150418等(如Bassa等^[85]和Giroletti等^[86]).

监测发现e-MERLIN站址附近的RFI典型污染水平为5%–25%^[52]. e-MERLIN的RFI消减方案是基于干涉测量的, 将来的设施(技术和科学目标)会越来越复杂, Peck和Fenech在LOFAR使用的后相关方案基础上进行扩展, 发展了一套供e-MERLIN使用的RFI消减方法和流水线(SERPENT), 主要组合了阈值和累积求和技术. e-MERLIN中使用的RFI消减流水线如图6所示.

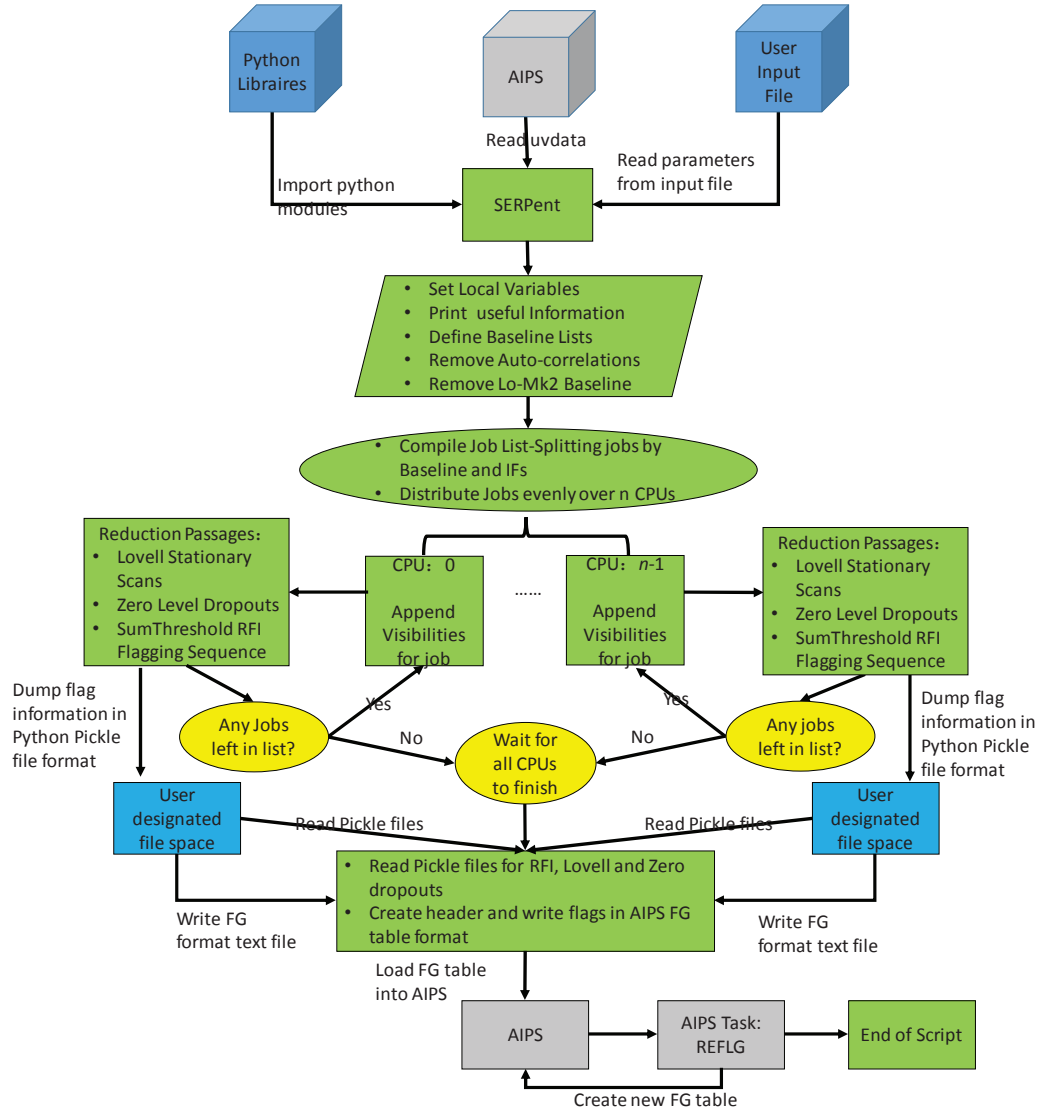


图6 在e-MERLIN中使用的RFI消减流水线, 采用了组合阈值和中值绝对偏差滤波^[52]

Fig. 6 Suggested parallelized RFI mitigation pipeline for the e-MERLIN by using the combinatorial thresholding and the median absolute deviation based filtering^[52]

4.5 GMRT

位于印度浦那附近的GMRT, 在50–1420 MHz的频率范围内运行. 研究覆盖了广

泛的领域, 包括脉冲星搜索(流量密度测量、谱指数)和计时(如Gupta等^[87]和Dembska等^[88]); 通过定向观测和全天区搜寻来获得河外星系的光谱和连续谱(如Roy等^[89]); 分子云和恒星形成区的研究(如Ainsworth等^[90]); 射电星系和活动星系核的研究, 包含喷流形态、识别以及分析双核源(如Kharb等^[91]和Singh等^[92]); 星系团的运动学和活动信号(如Lindner等^[93]); 研究再电离时期等(如Pen等^[22]和Paciga等^[24]).

GMRT射电环境的干扰主要来自FM传播、无屏蔽的电缆和电视信号, 其中许多已被正确识别并采取了校正措施, 包括: 成功引入政府监管措施将GSM网络的运行从已有的850/900 MHz改为1800 MHz^[94]; 使用奇异值分解方法以及跟踪和干涉测量消除作为RFI抑制的预相关方案, 例如再电离时期的研究^[24]; 使用后相关方案中简要讨论过的边缘停止校正来消除不产生边缘模型的RFI^[45]; 重新开发的信号处理流水线^[95], 如图7所示, 通过中值绝对偏差估计器在预相关阶段将接收的电压流消隐在预先定义的阈值之上来标记并消除RFI.

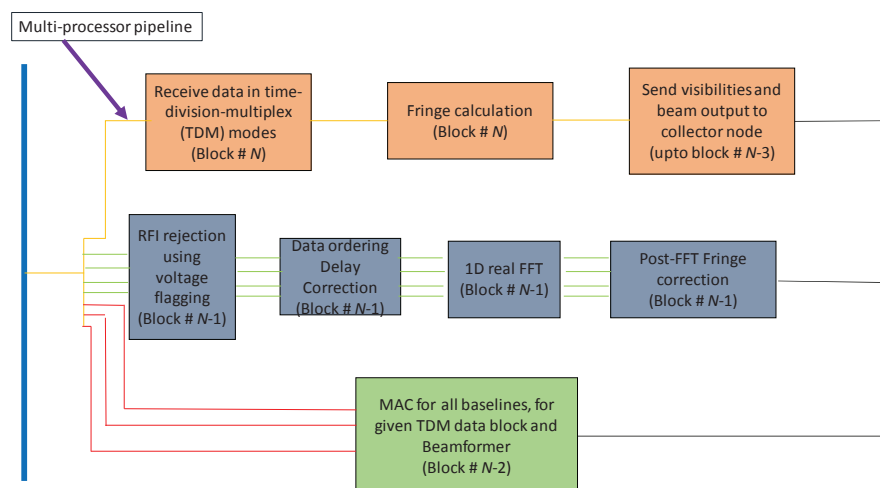


图 7 针对单节点的数据处理流水线, 对GMRT中的脉冲星计时数据处理过程进行RFI消除^[95]

Fig. 7 Data processing pipeline for a single node and the stage illustrating the RFI excision for the pulsar timing data processing at the GMRT^[95]

4.6 LOFAR

LOFAR主要位于荷兰, 其他欧洲国家(德国、法国、瑞典和英国)也分布了一些长基线站点. LOFAR在30–80 MHz和110–240 MHz频率范围内运行, 空缺的中间频率是规避典型的FM广播频道, 研究领域包括研究再电离时期^[96]、瞬变现象的搜索和监测^[97–98]、宇宙磁场^[99]、通过气体云的坍缩和演化来研究星系结构的形成、星系^[100–101]、星系团^[102]、宇宙射线^[103]、太阳系物理以及其他目标和探索模式(如van Haarlem等^[104]及其参考文献).

对LOFAR站点附近的RFI环境研究表明, 持续产生噪声的源包括FM收音机和电视信号传播^[105], 占据1.8%–3.2%的窄带污染^[8]. 对所有可能产生弱和强RFI污染的来源都通过经验进行估计, 特别是对于敏感的再电离时期的研究^[106]. RFI的抑制主要通过使用

组合阈值^[7]和AOFlogger软件包^[47]等后相关方案来实现. 该软件包可以以无标度方式处理不同分辨率的数据, 后相关器数据中的RFI由此被自动标记和消除. 在LOFAR中使用的几种标记流水线如图8和9所示.

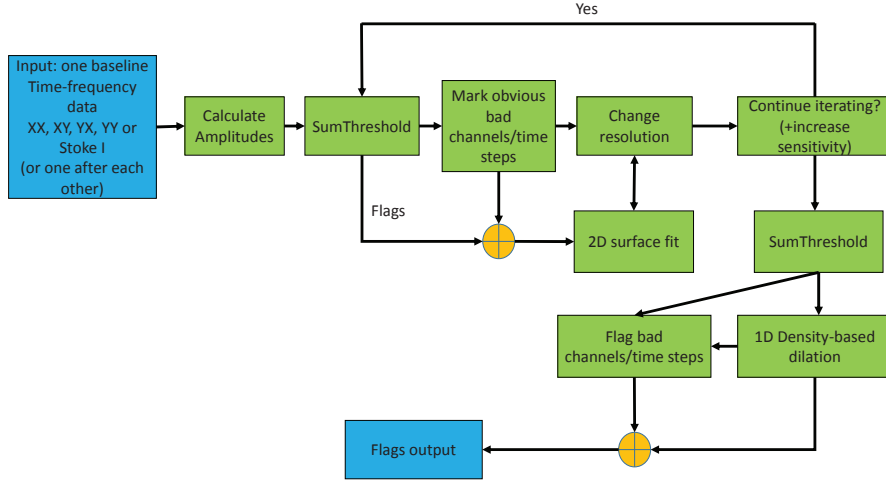


图 8 使用组合阈值的方法在LOFAR中测试并采用的RFI标记流水线^[107]

Fig. 8 RFI flagging pipeline tested and adopted at LOFAR using the combinatorial thresholding method^[107]

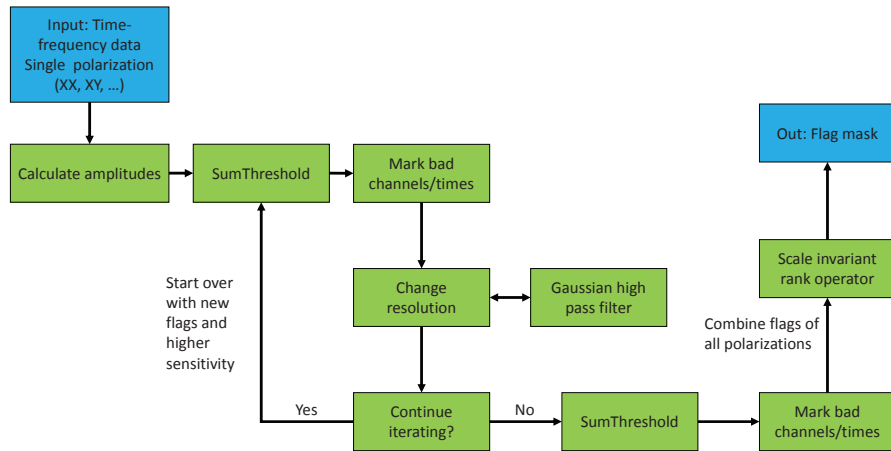


图 9 使用组合阈值法和尺度不变的排列算符在LOFAR数据处理中采用改进后的RFI标记流水线^[49]

Fig. 9 Updated RFI flagging pipeline at LOFAR using the combinatorial thresholding method and the scale invariant rank operator^[49]

4.7 WSRT和焦平面阵(APERTIF)

荷兰射电天文学研究所(Netherlands Institute for Radio Astronomy, ASTRON)运行的WSRT阵列由14个沿着东西方向排布的望远镜组成, 在120 MHz–8.3 GHz频率范围内工作. 研究领域包括利用HI勘测来对星系成像(如Braun等^[108]、Oosterloo等^[109]和

Heald等^[110])以及其他诸如ALFALFA (Arecibo Legacy Fast Arecibo L-band Feed Array, 见Leisman等^[111])、OH吸收线系统的定向光谱观测(例如Vermeulen等^[112])、用极化和法拉第旋转测量限制星系中的磁场强度和拓扑(如Heald等^[113]和Braun等^[114])、定位及调查星系和河外星系脉泽发射线(水、甲醛和甲醇等)、恒星形成区的原子和分子线、尘埃和气体云(例如Dickel等^[115]、Klockner等^[116]和Yim等^[117])等。

焦平面阵是在1000–1700 MHz频率范围中工作的焦面阵列原型^[118], 是WSRT的升级, 使其拥有更大视场和带宽, 以助于更好地研究HI和OH, 以及搜寻脉冲星^[119]。

WSRT采用的预相关方案对实时RFI抑制非常有效, 包括消隐、累积求和以及通过对偏差的推导从接收数据和噪声的预测统计特性进行推断和消除(如Fridman^[33]和Baan等^[15, 31])。

4.8 SKA先导设施/探路者

SKA的站址有两个, 分别位于澳大利亚(低频阵列)和南非(中频阵列), 在此之前, 共建有4个SKA先导望远镜, 包括西澳的MWA和ASKAP (Australian SKA Pathfinder)以及南非的MeerKAT和HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array)。针对MWA和ASKAP实施的预防性措施包括选择适当的站点及其相关准备工作。Norris等^[69]对已有的和建设中的SKA设施情况进行了详细的评述。

对于在700–1800 MHz频率范围内工作的ASKAP, 其预相关方案中使用的是空间滤波技术。Hellbourg等^[120]使用参考天线的方法对此技术进行了测试, 并建议使用。最近, 由于奇异值分解法在BETA (Boolardy Engineering Test Array, 由6个天线组成, 参见McConnell等^[121])中的成功使用, 此方法也被建议用于处理卫星通信产生的RFI^[122]。

MWA是在80–300 MHz频率范围内工作的SKA先导望远镜。它位于澳大利亚的默奇森内, 是政府监管保留的一个无线电宁静区, 主要科学目标是研究再电离时期、巡天(银河系和系外)、瞬变研究和太阳系物理^[123–125]。经过验证, 消隐技术能够帮助其降低RFI, 特别是针对来自FM无线电波段的噪声^[126]。基于AOFlagger的RFI标记和阈值算法被成功改进以应用于MWA数据(如Offringa等^[2]和Beardsley^[127])。由于观测站的位置远离城市, 其数据的污染不超过3% (主要是由于卫星、FM收音机和数字电视信号)。以上研究还主张开发前相关硬件接口(在接收器处)以及用于近实时RFI消除的高时频分辨率进一步消除干扰。因此, 预相关和后相关技术相结合的方法在RFI的标记和消减中将会是一个很重要的方向。

MeerKAT目前正处于开发和测试阶段, 也是SKA的先导设施, 将在扩展后集成到SKA-1中频阵列中。仪器阵列的核心将位于南非的卡鲁沙漠, 此无线电宁静区是经过广泛的现场调研之后才确定的。KAT-7是在1200–1950 MHz运行的紧凑型天线阵列, 是专门验证MeerKAT的科学和技术实现可能性的前期试验阵列^[128]。KAT-7进行的科学研究成果包括: 对附近低亮度星系和星团的HI观测; 结合VLBI的观测数据对新星、X射线双星、AGN和脉冲星等瞬变源的研究; 对OH脉泽的研究(Foley等^[129]及其参考文献)。在针对附近包含丰富气体的星系NGC 3109的HI研究中, RFI的消除方式是使用低带通滤波, 其污染主要来自包括天线在内的内部仪器^[128]。研究还指出, 屏蔽与天线相关的数字转换器可以进一步减少仪器RFI的影响^[129]。

HERA最近也被划为SKA先导设施, 主要对红移 z 在6–12范围内的源进行了深

度HI探测, 以研究再电离时期, 同时也通过红移 $z \sim 30$ 的源研究宇宙黎明时期^[130], 其涵盖与21CMA和其他实验相似的目标源, 例如位于南非的PAPER (Precision Array for Probing the Epoch of Reionization, 详见Parsons等^[131]). 虽然这些设施需要根据其不同的射电干扰环境而采用不同的去噪方法, 但由于其科学目标的相似性, 因此在诸如21CMA和MWA中使用的RFI抑制方案对HERA也是绝对有用的.

5 讨论和总结

本文旨在介绍常用的RFI抑制和消减方案, 确定其当前使用情况和状态, 并介绍相关技术的最新进展. 了解这些方案的动机及使用场景对于它们的实施、改进以及新方法的研发都是非常有用的. 不同的观测设备(单口径或干涉阵列)需要单独制定适合的RFI抑制技术, 这需要在对RFI环境、观测模式(计时和连续谱线成像)、兼容的硬件和软件以及可用的计算资源等条件进行评估之后决定. 技术上可能会面临的挑战包括两点: 一是由于观测设备的带宽不断增加, 时频分辨率越来越高, 因此经常要处理TB量级以上的数据, 对大数据量数据的处理要求会更高; 二是需要确保制定的消减步骤是非线性的.

计算能力(处理、存储、检索和用户交互)的快速发展, 包括离线群集的使用、超级计算机、在线云计算等, 使得预相关和后相关阶段的RFI消减方案能够统一执行. 因此, 新的技术可以直接嵌入现有的工作流程中, 设备的修改、测试和升级不需要花费额外的时间和费用, 现有观测设施的预相关设置中的软件流水线也不用增加.

为了适当地部署计算资源和设计组合方案, 不同观测站所需的抑制水平需要分别进行定量评估. 此外, 还需要一种客观的频谱管理(定义、实施和维护)协调手段, 从而对相关问题进行协调处理. 因此, 需要对现有设备进行精确分析以及良好的自我管理手段, 以使日益广泛的商业和通信干扰最小化, 从而能够改善并获得更好的天文观测能力. 本文对其主要方案进行了综述, 重点放在地面传输污染对天文信号接收的影响. 本文还展示了一些观测设施(主要是低频)的实施方案, 用于分析这些方案的适用性以及将来使用的可能性.

必须强调, 对RFI信号的预防比消除更好, 因为预防性方案减少了数据污染, 且不使用额外的计算资源来处理数据, 从而避免了数据丢失, 也节省了成本. 实时预相关消隐和滤波也对抑制RFI信号具有非常好的效果, 该技术的实现依赖于快速数据处理, 因此以前这些技术的发展得到了限制. 然而, 由于现代数字信号处理设备(如FPGA)的快速发展, 这些技术现在能够相对容易地实现. 实时后相关在干涉相关过程中且在对数据进行平均之前执行, 它利用了数据的统计特性, 对于干涉仪尤其有效, 但是对于将来大型干涉阵列设备产生的超大数据量, 其处理过程可能会受限于计算硬件的条件. 所有实时RFI消减技术的计算中大量运行时间消耗在了数据的读取和写入, 因此, 数据处理器(例如计算集群)的输入/输出(I/O)性能极大地影响了实施的效率. SKA数据管理研发团队(如Wang等^[132])研究了底层并行I/O的方法, 可为改进大规模RFI消减方案的执行提供有价值的参考. 虽然离线后相关方法可能不如实时方案有效, 但它们的实施更灵活, 因此实际上更加具有吸引力. 它们不需要改变现有的前端和后端设备, 并且与广泛使用的软件相关处理机完美兼容. 此外, 自动离线标记对于处理弱RFI是必不可少的方法, 因

为数据集成后增加的干扰噪声对于检测弱RFI是非常有用的,而在实时标记中它却可能被忽略了.

在识别和消除RFI之后必须要对有用数据进行恢复,这使得对RFI信号进行分类的自动处理方法也非常重要,该方法用统计的方式来减少检测的失误.另外,现有和将来的观测设施所产生的数据量越来越大,例如FAST、SKA的先导望远镜(MWA、ASKAP、MeerKAT和HERA)和探路者(如21CMA、GMRT和LOFAR),这也从另一方面刺激了自动分类处理方法的发展.因此,有必要引进、测试和部署更复杂的算法,而不是使用简单的标记和阈值法. RFI消减的具体方式是,在相关阶段中使用各种技术的组合,从而显著抑制RFI,其中一些技术还能够实现数据的部分恢复,使得历史档案数据可以得到充分利用,从而训练改进算法、进行测试以及随后的部署.

从SKA先导项目(MWA和MeerKAT)的RFI监控经验可知,即使在采取监管预防措施之后,SKA (将在其先导望远镜相同的场所建造)仍不可避免地面临主要来自飞机和卫星传输信号的RFI污染.由于SKA的高灵敏度和EoR研究对动态范围极高的需求,如何消除低强度的RFI将是一个巨大的挑战,需要以最高优先级对待.图10是包含了RFI抑制部分的SKA数据检测和预处理流程图. SKA高时频分辨率的优点使其能够准确识别和消除RFI污染,从而减少数据丢失;然而,处理SKA产生的大量数据需要依靠强大的计算能力.除了来自计算方面的挑战之外,SKA科学数据缓冲器的容量对RFI的检测造成了另一个限制,因为在RFI识别的过程中,中间数据将被保存在存储器中,其存储容量大小需要与输入的快照数据集大小相同^[2].当前的RFI抑制软件包是在高性能计算(high performance computing, HPC)平台的多个节点上并行化的,从而减轻了计算和存储的压力,但是目前天文软件和算法在HPC上的效率非常低(10%–25%),提高软件并行化的执行效率是这方面的紧迫任务.

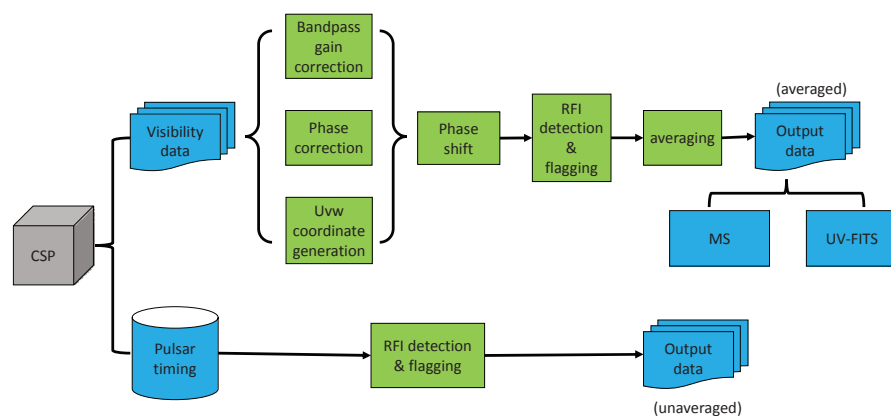


图 10 SKA 数据检测和预处理示意图(含RFI抑制步骤)

Fig. 10 Sketch of the SKA data inspection and pre-processing including RFI mitigation step

致谢 首先感谢武向平院士对文章总体方向的指导和建议. 感谢Willem Baan教授对论文草稿的有益讨论, 感谢南仁东研究员、张海燕研究员提供FAST的RFI消减方案信息, 感谢李斌研究员提供天马望远镜RFI消减方案信息.

参 考 文 献

- [1] Fridman P A, Baan W A. A&A, 2001, 378: 327
- [2] Offringa A R, Wayth R B, Hurley-Walker N, et al. PASA, 2015, 32: e008
- [3] 王思秀, 贾良权. 无线互联科技, 2011, 05: 21
- [4] Rybicki G B, Lightman A P. Radiative Processes in Astrophysics. New York: Wiley-Interscience, 1979
- [5] Kulkarni S R, Ofek E O, Neill J D, et al. ApJ, 2014, 797: 70
- [6] Petroff E, Keane E F, Barr E D, et al. MNRAS, 2015, 451: 3933
- [7] Offringa A R, de Bruyn A G, Biehl M, et al. MNRAS, 2010, 405: 155
- [8] Offringa A R, de Bruyn A G, Zaroubi S, et al. A&A, 2013, 549: A11
- [9] Baan W A. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)001
- [10] Cohen J, Spoelstra T, Ambrosini R, et al. CRAF Handbook for Radio Astronomy. Third Edition. Dwingeloo: CRAF Secretariat, 2005
- [11] 李颖, 刘奇, 刘艳玲, 等. 天文研究与技术, 2016, 13: 133
- [12] 刘奇, 陈卯蒸, 李颖, 等. 天文研究与技术, 2015, 12: 292
- [13] 刘奇, 王凯, 王洋, 等. 天文研究与技术, 2014, 11: 218
- [14] Millenaar R P, Stiepel H J. On Self-generated RFI at Radio Astronomy Sites. Second Edition. Dwingeloo: CRAF Secretariat, 2004
- [15] Baan W, Fridman P A, Roy S, et al. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)024
- [16] Ellingson S W, Hampson G A. ITAP, 2002, 50: 25
- [17] Hansen C K, Warnick K F, Jeffs B D, et al. RaSc, 2005, 40: RS5S16
- [18] Landon J, Elmer M, Waldron J, et al. AJ, 2010, 139: 1154
- [19] Leshem A, van der Veen A, Boonstra A. ApJS, 2000, 131: 355
- [20] Briggs F H, Kocz J. RaSc, 2005, 40: RS5S02
- [21] Boonstra A J, van der Tol S. RaSc, 2005, 40: RS5S09
- [22] Pen U, Chang T, Hirata C M, et al. MNRAS, 2009, 399: 181
- [23] Kocz J, Briggs F H, Reynolds J. AJ, 2010, 140: 2086
- [24] Paciga G, Chang T, Gupta Y, et al. MNRAS, 2011, 413: 1174
- [25] Weber R, Feliachi R, Boonstra A J. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)033
- [26] Hellbourg G, Weber R, Capdessus C, et al. CRPhy, 2012, 13: 71
- [27] Barnbaum C, Bradley R F. AJ, 1998, 116: 2598
- [28] Kesteven M, Hobbs G, Clement R, et al. RaSc, 2005, 40: RS5S06
- [29] Weber R, Faye C, Biraud F, et al. A&AS, 1997, 126: 161
- [30] Fridman P A. AJ, 2008, 135: 1810
- [31] Baan W A, Fridman P A, Millenaar R P. AJ, 2004, 128: 933
- [32] Fridman P A. MNRAS, 2010, 409: 808
- [33] Fridman P A. A&A, 2001, 368: 369
- [34] Baddi R. AJ, 2011, 141: 190
- [35] Nita G M, Gary D E, Liu Z, et al. PASP, 2007, 119: 805
- [36] Gary D E, Liu Z, Nita G M. PASP, 2010, 122: 560
- [37] Nita G M, Gary D E. MNRAS, 2010, 406: L60
- [38] Ellingson S W, Bunton J D, Bell J F. Proceedings of SPIE, 2000, 4015: 400
- [39] 李浩然, 陈卯蒸, 裴鑫. 新疆大学学报: 自然科学版, 2016, 33: 317
- [40] 苗可可, 王壮, 程翥, 等. 天文研究与技术, 2015, 12: 433
- [41] Briggs F H, Bell J F, Kesteven M J. AJ, 2000, 120: 3351
- [42] Mitchell D A, Robertson J G, Sault R J. AJ, 2005, 130: 2424
- [43] Winkel B, Kerp J, Stanko S. AN, 2007, 328: 68
- [44] Winkel B, Kerp J. ApJS, 2007, 173: 166
- [45] Athreya R. ApJ, 2009, 696: 885
- [46] Kogan L, Owen F. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)037

- [47] Offringa A R, van de Gronde J J, Roerdink J B T M. *A&A*, 2012, 539: A95
- [48] Middelberg E. *PASA*, 2006, 23: 64
- [49] Offringa A R. *Algorithms for Radio Interference Detection and Removal*. Groningen: University of Groningen, 2012
- [50] Keating G K, Barott W C, Wright M. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7740: 774016
- [51] Prasad J, Chengalur J. *ExA*, 2012, 33: 157
- [52] Peck L W, Fenech D M. *A&C*, 2013, 2: 54
- [53] Cendes Y, Wijers R A M J, Swinbank J D, et al. *arXiv:1412.3986*
- [54] Akeret J, Chang C, Lucchi A, et al. *arXiv:1609.09077*
- [55] Padovani P. *arXiv:1609.00499*
- [56] Carilli C L, Rawlings S. *NewA*, 2004, 48: 979
- [57] Wu X. *BAAS*, 2009, 41: 474
- [58] Huang Y, Wu X, Zheng Q, et al. *RAA*, 2016, 16: 016
- [59] Nan R, Li D, Jin C, et al. *IJMPD*, 2011, 20: 989
- [60] Li D, Nan R, Pan Z. *IAU Symposium*, 2013, 291: 325
- [61] Li D, Pan Z. *RaSc*, 2016, 51: 1060
- [62] 潘之辰, 钱磊, 岳友岭. *天文研究与技术*, 2017, 14: 8
- [63] Zhang H, Nan R, Gan H, et al. *IAUGA*, 2015, 22: 2221546
- [64] Bhat N D R, Cordes J M, Chatterjee S, et al. *RaSc*, 2005, 40: RS5S14
- [65] Andreut M, Guram S S, George S J, et al. *Proceedings of Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2011, 442: 115
- [66] 梁占刚, 李斌, 孙昕, 等. *天文研究与技术*, 2016, 13: 498
- [67] 吴亚军, 刘庆会, 李娟, 等. *天文研究与技术*, 2017, 14: 1
- [68] 沈志强. *科学*, 2013, 03: 15
- [69] Norris R P, Afonso J, Bacon D, et al. *PASA*, 2013, 30: e020
- [70] Garrington S T, Anderson B, Baines C, et al. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 332
- [71] Richards A M S, Davis R J, Decin L, et al. *MNRAS*, 2013, 432: 61
- [72] Ainsworth R E, Ray T P, Scaife A M M, et al. *MNRAS*, 2013, 436: L64
- [73] Morford J C, Fenech D M, Prinja R K, et al. *MNRAS*, 2016, 463: 763
- [74] An T, Hong X Y, Hardcastle M J, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 87
- [75] An T, Paragi Z, Frey S, et al. *MNRAS*, 2013, 433: 1161
- [76] Gabanyi K E, Dubner G, Giacani E, et al. *arXiv:1504.03800*
- [77] Araudo A T, Bell A R, Blundell K M. *ApJ*, 2015, 806: 243
- [78] Straal S M, Gabanyi K E, van Leeuwen J, et al. *ApJ*, 2016, 822: 117
- [79] Argo M K, van Bemmell I M, Connolly S D, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 1081
- [80] Costagliola F, Aalto S, Sakamoto K, et al. *A&A*, 2013, 556: A66
- [81] Green J A, Caswell J L, Fuller G A, et al. *MNRAS*, 2012, 420: 3108
- [82] Etoke S, Gray M D, Fuller G A. *MNRAS*, 2012, 423: 647
- [83] Richards A M S, Etoke S, Gray M D, et al. *A&A*, 2012, 546: A16
- [84] Wolak P, Szymczak M, Gerard E. *MNRAS*, 2013, 430: 2499
- [85] Bassa C G, Beswick R, Tingay S J, et al. *MNRAS*, 2016, 463: L36
- [86] Giroletti M, Marcote B, Garrett M, et al. *arXiv:1609.01419*
- [87] Gupta Y, Gothoskar P, Joshi B C, et al. *Proceedings of Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2000, 202: 277
- [88] Dembska M, Kijak J, Jessner A, et al. *MNRAS*, 2014, 445: 3105
- [89] Roy N, Kanekar N, Braun R, et al. *MNRAS*, 2013, 436: 2352
- [90] Ainsworth R E, Coughlan C P, Green D A, et al. *MNRAS*, 2016, 462: 2904
- [91] Kharb P, Srivastava S, Singh V, et al. *MNRAS*, 2016, 459: 1310
- [92] Singh V, Ishwara-Chandra C H, Kharb P, et al. *ApJ*, 2016, 826: 132
- [93] Lindner R R, Baker A J, Hughes J P, et al. *ApJ*, 2014, 786: 49

- [94] Raybole P. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)003
- [95] Roy J, Gupta Y, Pen U, et al. ExA, 2010, 28: 25
- [96] Jensen H, Datta K K, Mellema G, et al. MNRAS, 2013, 435: 460
- [97] Kondratiev V I, Verbiest J P W, Hessels J W T, et al. A&A, 2016, 585: A128
- [98] Pilia M, Hessels J W T, Stappers B W, et al. A&A, 2016, 586: A92
- [99] Beck R, Anderson J, Heald G, et al. AN, 2013, 334: 548
- [100] de Gasperin F, Orru E, Murgia M, et al. A&A, 2012, 547: A56
- [101] Mulcahy D D, Horneffer A, Beck R, et al. A&A, 2014, 568: A74
- [102] van Weeren R J, Rottgering H J A, Rafferty D A, et al. A&A, 2012, 543: A43
- [103] Schellart P, Nelles A, Buitink S, et al. A&A, 2013, 560: A98
- [104] van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. A&A, 2013, 556: A2
- [105] Bentum M, Boonstra A J, Millenaar R. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)006
- [106] Offringa A R, de Bruyn A G, Zaroubi S, et al. MNRAS, 2013, 435: 584
- [107] Offringa A R, de Bruyn A G, Zaroubi S, et al. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)036
- [108] Braun R, Oosterloo T A, Morganti R, et al. A&A, 2007, 461: 455
- [109] Oosterloo T, Morganti R, Crocker A, et al. MNRAS, 2010, 409: 500
- [110] Heald G, Jozsa G, Serra P, et al. A&A, 2011, 526: A118
- [111] Leisman L, Haynes M P, Giovanelli R, et al. MNRAS, 2016, 463: 1692
- [112] Vermeulen R C, Ros E, Kellermann K I, et al. PASA, 2003, 20: 65
- [113] Heald G, Braun R, Edmonds R. A&A, 2009, 503: 409
- [114] Braun R, Heald G, Beck R. A&A, 2010, 514: A42
- [115] Dickel H R, Goss W M, De Pree C G. AJ, 2001, 121: 391
- [116] Klockner H, Baan W A. A&A, 2004, 419: 887
- [117] Yim K, van der Hulst J M. MNRAS, 2016, 463: 2092
- [118] Verheijen M A W, Oosterloo T A, van Cappellen W A, et al. Proceedings of American Institute of Physics Conference Series, 2008, 1035: 265
- [119] Rottgering H, Afonso J, Barthel P, et al. JApA, 2011, 32: 557
- [120] Hellbourg G, Chippendale A P, Kesteven M J, et al. 2014 IEEE Global Conference, 2014: 1286
- [121] McConnell D, Allison J R, Bannister K, et al. PASA, 2016, 33: e042
- [122] Bannister K, Hellbourg G, Hotan A. RFI Mitigation with BETA. ASKAP Commissioning & Early Science Memo, 2016
- [123] Lonsdale C J, Cappallo R J, Morales M F, et al. IEEE, 2009, 97: 1497
- [124] Tingay S J, Goeke R, Bowman J D, et al. PASA, 2013, 30: e007
- [125] Bowman J D, Cairns I, Kaplan D L, et al. PASA, 2013, 30: e031
- [126] Mitchell D, Greenhill L J, Clark M, et al. Proceedings of RFI Mitigation Workshop, 2010, PoS(RFI2010)016
- [127] Beardsley A. The Murchison Widefield Array 21cm Epoch of Reionization Experiment: Design, Construction, and First Season Results. Seattle: University of Washington, 2015
- [128] Carignan C, Frank B S, Hess K M, et al. AJ, 2013, 146: 48
- [129] Foley A R, Alberts T, Armstrong R P, et al. MNRAS, 2016, 460: 1664
- [130] DeBoer D R, Parsons A R, Aguirre J E, et al. arXiv:1606.07473
- [131] Parsons A R, Backer D C, Foster G S, et al. AJ, 2010, 139: 1468
- [132] Wang R, Harris C, Wicenec A. A&C, 2016, 16: 146

Radio Frequency Interference Mitigation

AN Tao^{1,2} CHEN Xiao¹ MOHAN Prashanth¹ LAO Bao-qiang¹

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2 *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

ABSTRACT The observational facilities of radio astronomy keep constant upgrades and developments to achieve better capabilities including increasing the time of the data recording and frequency resolutions, and increasing the receiving and recording bandwidth. However in contrast, only a limited spectrum resource has been allocated to radio astronomy by the International Telecommunication Union, resulting in that the radio observational instrumentations are inevitably exposed to undesirable radio frequency interference (RFI) signals which originate mainly from the terrestrial human activity and are becoming stronger with time. RFIs degrade the quality of data and even lead to invalid data. The impact of RFIs on scientific outcome becomes more and more serious. In this article, the requirement for RFI mitigation is motivated, and the RFI characteristics, mitigation techniques, and strategies are reviewed. The mitigation strategies adopted at some representative observatories, telescopes, and arrays are also introduced. The advantages and shortcomings of the four classes of RFI mitigation strategies are discussed and presented, applicable at the connected causal stages: preventive, pre-detection, pre-correlation, and post-correlation. The proper identification and flagging of RFI is the key to the reduction of data loss and improvement in data quality, and is also the ultimate goal of developing RFI mitigation technique. This can be achieved through a strategy involving a combination of the discussed techniques in stages. The recent advances in the high speed digital signal processing and high performance computing allow for performing RFI excision of the large data volumes generated from large telescopes or arrays in both real time and offline modes, aiding the proposed strategy.

Key words telescopes, radio frequency interference, instrumentation: detectors, methods: statistical