

ITU-R RA.2126号报告

射电天文学中的射频干扰减缓技术

(ITU-R 第237/7号课题)

(2007年)

1 引言

本报告简要介绍了射电天文学中最新的射频干扰 (RFI) 减缓技术, 并具体研究了来自仪表外部的、无法由仪表操作员控制的人为干扰的减缓技术。在本报告中, 判断信号是否为 RFI 的标准仅为看其在所需观测中是否为无用但可监测到的信号, 且是否会影响到观测的顺利进行。有些干扰虽不易检测, 但仍可能影响观测。减缓此类干扰要困难得多。

干扰减缓技术应保证在ITU-R RA.769号建议书中规定的灵敏度水平进行观测, 且数据丢失率应控制在ITU-R RA.1513号建议书规定的限值范围之内。上述建议书规定了高效射电天文观测的条件, 并给出了计算共享研究和兼容性研究中可容忍RFI条件的数值依据。除简单切除受RFI影响的数据外, 在射电天文学中并未广泛采用干扰减缓方法, 其主要原因是此类方法不易设计或执行, 且可能要求开发较多的特殊软件。

近期以来, 在射电天文观测过程中使用的标准观测模式和信号处理技术在某种程度上保证了干扰减缓的连贯性, 已被证明可在存在某些干扰时确保提供有用的天文数据。

例如, 合成孔径成像中的“条纹旋转 (fringe stopping)”即有可能去除间距较大的天线所接收的RFI的相干性, 并进而抑制所关联相干产物中的RFI[Thompson, 1982年]。对某些综合射电天文望远镜而言, 此类干扰可能导致在地图上的天极处出现一个杂光源, 这给近极观测带来了极大困难。由于脉冲星产生宽带噪声脉冲, 因此接收机需要大量带宽才能实现有用的信噪比。当构成脉冲的噪声通过星际介质中的稀薄等离子体时, 将受到依赖于频率的色散的影响。在用射电天文望远镜观测脉冲星时, 为准确恢复脉冲的自身信息 (无色散), 通常采用软硬件结合的方法来人为消除脉冲色散。此过程有助于降低RFI, 原因是脉冲星信号的消色散过程亦相应地消除RFI。但上述过程仅可有限地减缓干扰。

干扰总是会恶化数据的质量。天文学家逐渐发现这样一种事实: RFI的强度和时域/频谱密度会令观测结果深受RFI的影响以致失去使用价值。或许利用单碟天线射电望远镜进行的观测 (连续谱或光谱) 最易受到干扰的影响, 原因是积分时间增长提高了望远镜对天文信号的灵敏度, 但同时也同等程度地提高了其对RFI信号的灵敏度。尽管某些观测模式可使望远镜不受电平数较低的RFI的影响, 但如所接收到的宇宙射电辐射的信号强度过低, 则会使射电天文观测极易受到干扰的影响。

RFI不仅会影响某些观测或特定观测类型的质量，而且还会限制射电天文电台的总体效率，加大在所需观测时间、处理复杂性和操作开销方面的难度或支出。例如，为消除RFI，在观测结束后日益需要对观测数据进行手工编辑，在合成孔径成像中有时亦需如此[Lane等人，2005年]。尽管这样做十分有效，但很难实现自动化，因此随着观测长度和所观测带宽的增加，这一工作变得极其枯燥乏味。由于RFI的存在，有时需要大大延长人工时间和望远镜工作时间，对科研工作而言，其带来的恶果不啻于严重干扰所观测辐射的RFI。

以上问题推动了对可能被视为“自动化”或“实时性”RFI减缓技术的研究，此类技术的研究基于以下前提，即：任何特定技术在表面上均为仪表的不可分割的组成部分，且在工作时无需人工介入。下节介绍的技术即以此为前提。

2 RFI减缓技术

近年来，对于干扰射电望远镜接收机模拟输出的RFI的减缓技术的研究成为一个热门话题，这得益于以实时信号处理手段减缓RFI的技术的发展。在近期研究此问题的会议的摘要中，有很多关于此话题的有益介绍，如[Bell等人，2000年和Ellingson，2005年]。在本报告中，对于干扰减缓技术的分类方法如下：

1. 切除，意为“切掉”RFI。例如，由短脉冲构成的RFI可通过消隐相应脉冲来减缓，这称为时域切除。相应地，减缓持续RFI可采用阵列波束成形技术，以便在易产生RFI的方向上定位天线方向图的零点，这称为空域切除。由于在干扰切除过程中引入了赝像，因此各类干扰切除技术的一个共性是会丢失部分天文数据，并使其余数据出现一定失真。另外，由于数据消隐（blanking）相当于缩短了观测时间，因而亦需相应地延长所需的观测时间，以达到灵敏度或测量准确性方面的要求。
2. 取消，意为“扣除”望远镜输出中的RFI。在一定意义上，取消手段优于切除手段，原因是它在移除RFI时不会对天文数据产生影响，因而提供一种在表面上似不会产生与数据简单“切除”相关的赝像的“透视”能力。然而，如下所述，究竟采用“切除”还是“取消”手段，通常要看对干扰的抑制是否受到射电望远镜所收到的干扰的估值的限制。
3. 反符合法，从广义上意为对RFI加以区别对待，其依据为间距较大的天线应接收到同样的天文信号，但不会接收到同样的RFI。在这种情况下，RFI将增加各天线的背景噪声电平而非相干信号的电平。这将恶化所接收到的相干信号的质量，进而要求延长观测时间，以实现所需的信噪比。

在观测时频繁或经常使用的干扰减缓方法大多基于时域切除法，即：删除被认定受到RFI破坏的数据。有关内容见第2.1段。利用实际或仿真天文数据，已证明了空域切除法（第2.2段）和取消法（第2.3、2.4段）的有效性，但此类方法大多仍需进一步研发，或仅在特定情形下使用。各种形式的空域切除法通常要求大量特殊软件的支撑，并要求加大计算机的处

理能力。反符合技术（第2.5段）可较有效识别被RFI破坏的数据，但在严格意义上并不能被定位为干扰减缓技术，原因是其并未提供一种不同于时域切除法的干扰移除手段。

2.1 时域切除法（消隐法）

这或许是实时减缓RFI脉冲的最古老、也是最有名的方法。消隐法的出现或许要追溯到观测1 215-1 400 MHz频段时遇到的地面航空雷达问题。此类雷达一般发射固定频率或正弦啁啾波形的脉冲，其脉冲长度为2-400 ms，脉冲发射间隔为1-27 ms，带宽等级为1 MHz。这些脉冲通常可通过几百公里以外的射电望远镜的旁瓣检测到。虽然发射有荷因数相对较低（一般小于0.1%），但较短的脉冲发射周期增加了准确消隐的难度。影响消隐雷达脉冲的另一因素是地貌特征和航空器的发射，这导致在脉冲以“直达路径”到达之后另外产生脉冲的若干副本（见[Ellingson和Hampson，2003年]的附录）。这些多径脉冲可以强大到破坏天文观测数据，却也可以微弱到不被发现。因此，为确保消隐所检测到脉冲的所有多径副本，由所检测到脉冲触发的消隐间隔一般须比所检测到的脉冲长许多倍。一般而言，通常需要消隐间隔长度达到几百毫秒（即脉冲长度的10-100倍）[Ellingson和Hampson，2003年]。

迄今为止，已在不同程度上建议并开发了若干实时时域切除技术。Friedman[1996年]、Weber等人[1997年]和Leshem等人[2000年]均曾介绍过检测脉冲干扰和消隐输出的方法。美国国家天文台和电离层研究中心（NAIC）已在Arecibo天文台（波多黎各）研制出一种实时减缓本地强雷达脉冲的设备。此设备可跟踪特定雷达的已知脉冲间隔模式，并在所预期的脉冲到达时间附近的某一时间窗口消隐接收机的输出。在此领域的更多近期工作（包括实验结果）见[Ellingson和Hampson，2003年；Fisher等人，2005年和Zheng等人，2005年]，后两篇论文均讨论了航空测距设备（DME）产生的脉冲干扰问题。

消隐法的主要局限在于检测性能。尽管一旦发现RFI便可以消隐方式将其彻底移除，但不可避免的一点是，一些看似微弱却具有破坏力的局部脉冲将无法删除。然而，在单个脉冲的时间尺度内，天文信号的信噪比（SNR）一般远小于1；因此，为有效抑制合并输出中的RFI，必须可靠检测到在此电平值附近的RFI。这是相当困难的，近期在采用上述消隐法方面取得的成功需归功于对RFI波形的详尽了解，这可以在一定程度上解决SNR不足的问题。

改进检测性能的另一貌似可行的方法为充分利用无需做特定了解的RFI波形，例如，循环平稳研究[Britteil和Weber，2005年]将其应用于HIBLEO2（铱星）卫星信号，而卡尔曼跟踪将其应用于航空雷达。另一具有挑战性的问题是如何设置检测门限和消隐窗口长度，以在可靠RFI减缓（建议采用低门限和长窗口）、限制灵敏度的恶化和引入消隐影像（建议高门限和短窗口）之间达成一种可接受的折衷，[Niamsuwan、Johnson和Ellingson，2005年]曾研究过此问题。此外，“消隐”时间亦为损失的观测时间，故可能要求延长观测时间，以达到所需的灵敏度。

2.2 空域切除法（零点法）

当仪表由多部天线元件组成时，可以人为操控元件输出，以便在易发生RFI的方向上制造一个零点[Van Veen和Buckley, 1988年]，其基本技术的著名应用案例为“抗干扰”军事通信和商用蜂窝通信[Liberti和Rappaport, 1999年]。原则上，同样技术亦适用于射电天文研究。但是，在实际工作中，情形却相对复杂。首先，在射电天文研究中，与传统商业和军事应用不同，即使INR远小于1，RFI仍具有破坏性。因此，为保证有效性，零点形成算法须在此类电平附近成功检测到RFI，并对其加以定位。相反，商业和军事应用中的RFI通常不成其为问题，除非INR的量级达到1。基于此原因，在军事和商业应用中开发的大多数零点形成算法均基于维纳滤波器策略（其中包括所谓“功率最小化”和“最小差异”算法），但这在INR小于1时却表现欠佳[Ellingson和Hampson, 2002年]。目前已知的是，基于维纳滤波的技术仅限于按INR的比例降低INR，即它可轻易将RFI降至INR-1的水平，却很难进一步降低其水平。因此，为保证此类技术对射电天文的有效性，通常需要采取额外措施，以增大提交给干扰减缓算法的实际INR值。以下将讨论其中的几种措施。

射电天文观测取决于天线性能（如增益、波束信息、旁瓣分布）。为确保参数不随时间变化，过去依靠准确而仔细的测量可解决这一问题。旁瓣方向图的变化可能会令用于在合成孔径干涉中生成高动态范围图像的自标定算法变得复杂。为减缓干扰，需保持或起码应了解天线波束和旁瓣方向图在调制过程中上述参数的变化，这对目前广泛使用的信号处理和天线控制系统而言堪称一个挑战。

除基于维纳滤波的传统零点形成技术之外，还有一种基于“子空间投影”的技术。子空间投影的理论基础是借助阵列元素之间的相干性来识别干扰，此相干性可用于确定波束成形系数，进而形成丢弃干扰的方向图，且不对主瓣特性产生太大影响。从数学角度而言，子空间投影过程分为两步：

- 确定空域斜方差矩阵的特征矢量（阵列元素间的两两相干集）；
- 使波束成形向量系数与涉及干扰的特征矢量（干扰“子空间”）正交（“投影”操作）。

通常假设干扰控制着阵列所接收的功率，因此干扰子空间总是与空域斜方差的最大特征值相关。但当干扰相对较弱时，特别是当干噪比小于1时，这会带来一些问题[Ellingson和Hampson, 2002年]。尽管如此，但已证明的是：如正确使用子空间投影法，则其在射电天文研究中仍具有相当大的优势[Raza等人, 2002年]。此类技术并非解决欠理想检测和定位性能问题的万灵药，但其可减少天线方向图的失真，并在一定程度上令信号行为变得更易预测和修改。在合成孔径成像中，甚至可通过后处理操作来校正此类技术产生的失真[Leshem等人, 2000年]。

一般而言，零点形成最适于减缓卫星产生的RFI，在应对地面RFI时便显得不那么有效。这是因为地面RFI经常被其穿越的地形驱散，在到达射电望远镜时亦常常不再是平面波，而是在动态范围内有所变化的复杂波前，且其入射方向明显分布于较大的角度范围。传统零点形成技术一般会因角度扩散的存在而出现恶化，当INR减小时情形会变得更为糟糕。

整体而言，由于复杂性较高及相关开发和部署工程成本较大，空域切除技术仍未得到验证。不过，近期工作表明在此方面一直在取得稳步进展[Boonstra和Van der Tol，2005年；Hansen等人，2005年]。即使在最有利的条件下，所获得的数据仍达不到在没有干扰的情况下应有的质量。

2.3 时域消除法

最优的单碟天线时域消除算法包括如下步骤：

- 第一步： 检测并估算RFI波形。
- 第二步： 合成RFI波形的无噪声版本。
- 第三步： 从遭到破坏的数据中提取经合成的RFI波形。

如下所述，在频率域亦可部署一种对等的程序。和切除法一样，商业和军事应用在干扰消除算法的使用方面也有着大量经验[Haykin，2001年]。此方法始于[Barnbaum和Bradley，1998年]的射电天文研究，当时两人采用了较流行的“最小二乘法”（LMS）算法 – 这是一种基于维纳滤波器原则的技术。由于需要输入 $INR > 1$ 来保证较好效果，此技术仅限于射电天文应用。如希望使用此方法时输出 $INR \ll 1$ ，通常需要采用某些手段来使接收RFI时令 INR 大于一次仪表所显示的 INR 。实现此效果的一种方法（事实上亦为[Barnbaum和Bradley]所倡导）是采用一部单独的定向天线来接收RFI。由于多数大型天线的旁瓣增益在远旁瓣的各方向上大致相同，因此便可令 INR 能与用于接收RFI的辅助天线的增益保持大概成比例的改善。例如，利用干扰消除算法，增益为20 dB的yagi天线可实现约20 dB的 INR 改善，并以同等程度降低望远镜输出的 INR 。随后开展的工作[Jeffs等人，2005年]意图将其“基准信号”方法加以拓展，以期利用增益达到30 dB的天线的多个辅助信号达到更好的防范卫星RFI的性能。

[Ellingson，2002年]则从更具理论意义的角度就此问题提出了另一种观点。根据其观点，干扰消除算法可实现的干扰抑制效果大致受到输入 INR 和 L 的乘积的制约，其中 L 是用于估算波形参数的样本数量，假设某一噪声带宽等于Nyquist带宽或根据噪声带宽与Nyquist带宽的比值按比例进行调整。因此，如欲将 INR 等于-20 dB的信号再抑制20 dB，便需至少分析10 000份Nyquist率样本，若噪声带宽小于Nyquist率，则需分析的样本数量亦应按比例增加。当然，在此时间范围内信号特性亦须保持不变，而这很容易成为一种制约因素。

对利用辅助天线来获得较高 INR 基准信号的干扰消除技术而言，另一制约因素是此类技术很容易降级成切除技术。例如，一部配有高增益辅助天线的单碟天线射电望远镜在工作时可能会成为一部二元阵列，致使干扰消除算法可能在RFI方向上合成一个方向图零点，从而出现与上述涉及零点形成的情况相同的后果。需考虑的另一问题是：针对影响观测的每一RFI源均对基准天线进行定位是一项相当繁重的工作。

可避免上述问题的另一种时域干扰消除方法是对直接来自望远镜输出的特定基准信号进行合成，为此需要充分利用事先了解到的调制特性。例如，[Ellingson等人，2001年]曾介绍过一种用于减缓全球导航卫星系统（GLONASS）产生的RFI的技术，为此需对信号进行部分解调，然后对解调结果再度加以调制，以获得无噪声的RFI估算值。其结果表明，尽管随INR接收到的RFI达到-20 dB的量级，但却可将INR减少20 dB以上。在此情形中，通过有效增加与解调过程相关的INR，INR“不足”的问题得以克服。应指出，通过使用辅助天线，同样技术亦可用于进一步改善INR。遗憾的是，GLONASS使用的信号调制类型（即直接序列扩展频谱）仅代表借助部分解调获得较大INR改善的“初级阶段”。对大多数其它信号而言，经过类似处理并不呈现同等幅度的改善，且当调制为模拟方式或结构不可知时效果会更不尽人意。比如，[Roshi，2002年]曾针对模拟电视信号采用类似方法开展研究，尽管在初始阶段实现了较大的INR，但最终仅达成了约12 dB的干扰抑制。[Ellingson和Hampson，2002年]则采用了估算-合成-提取手段，结果证明可将雷达脉冲的噪声抑制16 dB的量级。

简言之，尽管时域消除法看似比切除法更为可取，但它蕴含的一个较大风险是不能对波形加以正确估算，因此当提取出合成波形时，可能无法彻底将波形完全移除。尽管切除法的性能主要受制于检测RFI的能力，但时域消除法的性能主要受制于估算RFI波形的能力。为实现干扰消除法所提供的“透视”能力需付出的代价是其性能在本质上较为有限，且不如切除技术来得稳健可靠。然而，在此领域仍在开展有用的创新研究，例如：[Kesteven，2005年]近期展示了自适应消除法在脉冲星射电天文研究中的高效利用，而[Poulsen，2003年]则展示了实行自适应干扰消除所需的实时硬件。

对此技术而言，消除干扰的能力决定于干扰消除波形的质量，为此需估算射电望远镜接收到的干扰波形。在估算过程中出现任何闪失都可能导致数据遭到某种程度的破坏。

2.4 后相干消除法

在时域中实现干扰消除的另一种不错的方法是“后相干”消除法。所谓“相干”指增加独立天线输出（如极化、或阵列中彼此分开的天线），并在随后对各产物的频谱进行平均。单碟天线射电望远镜常可通过相干获得Stokes参数，多碟天线阵列亦常可通过交叉相干来合成图像。同样，辅助基准天线亦可与主天线交叉相干。只要辅助天线以较低SNR接收所需的天文信号，那么利用混合（与辅助天线相干的望远镜输出）相干产物来校正遭到RFI破坏的相干产物便不成其为问题。率先提出此技术的人是[Briggs、Bell和Kesteven，2000年]，但在随后此技术被表明基本上等同于时域（“预相干”）消除，唯一区别是通过合并相干产物可轻松获得额外的INR。对新一代射电望远镜阵列而言，此技术可谓带来了曙光，原因是它允许合成来自同一天线的高增益辅助波束，而无需要求附加的“物理”天线元件。此外，现代射电望远镜的相干器多为极其复杂且昂贵的系统，而此方法则要求大大增加相干器的容量，以计算所需的额外相干产物，并使用此类产物来实现RFI的消除。同时，大多数RFI信号的动

态本质亦限制了为有效利用此技术而进行的合成的数量，并可能需要几十毫秒的“清空时间”（dump times）才能减缓卫星信号或多径衰落信号产生的干扰。相干器容量的增加及清空时间的减少可能会令成本和复杂性超出常规限度，而数据处理程度的提高却将使数据遭到某种程度的破坏。

此类技术亦包括合成孔径成像技术，这些技术均利用现成的相干产物来达到类似的效果。近期案例见[Cornwell等人，2004年]。

2.5 反符合技术

最后讨论一下用反符合技术来减缓RFI的可能性。如上所述，此方法并非直接减缓RFI，而重在解决上述“检测”问题。反符合技术对RFI进行区别对待，这基于以下事实：间距较大的天线应可以收到同样的天文信号，但其收到的RFI将有所不同。此技术主要用于搜索天文瞬态干扰，脉冲RFI对此类瞬态干扰有着极其严重的影响。根据干扰信号范围的不同，可能要求天线间距达到几百公里以上。诚然，这将导致此项技术在应用时变得捉襟见肘，除非类似的望远镜仅按必要间距隔开且使用同样的视场，但这种情形是极其罕见的。干扰消除法绝非完美手段，而残余干扰的随机波动亦将导致数据的恶化。尽管如此，在全天空瞬态干扰搜索[Katz，2003年]和对脉冲星产生的一次性“巨大”脉冲的搜索[Bhat等人，2005年]工作中，此技术还是得到了成功的应用。

3 结论

RFI干扰减缓技术似乎可为射电天文研究带来极大好处，但在开发可用于日常操作的实用且可行的技术方面，大量工作仍有待完成。比较明确的一点是，不能将RFI减缓技术视为解决目前和未来射电望远镜所遭遇的外部RFI问题的唯一良方。不过，不可避免的一点是，任何特定技术的有效性均取决于以下因素：

- 特定观测的仪表结构或配置情况；
- 观测模式（如光谱、连续合成孔径成像、脉冲星色散搜索）；
- RFI自身的特质（如连续或间歇性、空域连贯性或多径分散性等）。

减缓技术仅可降低数据遭破坏或被干扰影响的程度，同时亦会增加操作费用。最后应指出：对射电天文研究而言，没有任何一种技术可以解决所有问题。

参考文献

- BARNBAUM, C. 和 BRADLEY, R. F. [1998年], 实现射电天文干扰切除的一种新方法; 实时自适应消除法。《天文杂志》, 116页, 2598。
- BELL, J. F., EKKERS, R. D. 和 BUNTON, J. D. [2000年] Elizabeth 和 Frederick White关于射频干扰减缓技术的会议摘要。《澳大利亚天文协会出版物》, 17页, 3。
- BHAT, N. D. R., CORDES, J. M., CHATTERJEE, S. 和 LAZIO, T. J. W. [2005年] 采用同步双频观测确定并减缓射频干扰。《射电科学》, 40页, RS5S14。
- BOONSTRA, A. J. 和 VAN DER TOL, S. [2005年] 在初始低频阵列 (LOFAR) 相控阵列测试站对干扰信号进行空域滤波。《射电科学》, 40页, RS5S09。
- BRIGGS, F. H., BELL, J. F. 和 KESTEVEN, M. J. [2000年] 利用独立基准信号和闭包关系从被破坏的天文频谱中移除射频干扰。《天文杂志》, 120页, 3351。
- BRITTEIL, S. 和 WEBER, R. [2005年] 用于射电天文干扰减缓的两种循环平稳信号检测仪的比较。《射电科学》, 40页, RS5S15。
- CORNWELL, T. J., PERLEY, R. A., GOLAP, K. 和 BHATNAGAR, S. [2004年] 在无基准信号的合成成像中切除RFI。《EVLA备忘录》86页, NRAO (<http://www.nrao.edu/>)。
- DONG, W., JEFFS, B. D. 和 FISHER, J. R. [2005年] 利用卡尔曼跟踪仪实现射电天文雷达干扰的消隐。《射电科学》, 40页, RS5S04。
- ELLINGSON, S. W., BUNTON, J. D. 和 BELL, J. F. [2001] 利用参数建模技术移除OH谱线观测中的GLONASS C/A信号。《天文物理杂志》, 135页增补内容, 87。
- ELLINGSON, S. W. [2002年] 微波辐射测量的自适应消除法的优势和劣势。《IEEE国际地质科学学报(遥测报告会)》, 3页, 1685。
- ELLINGSON, S. W. 和 HAMPSON G. A. [2002年] 相控阵列射电望远镜干扰零点的子空间跟踪方法。《IEEE天线和传播译刊》, 第50卷, 1, 25-30页。
- ELLINGSON, S. W. 和 HAMPSON G. A. [2003年] L频段射电天文雷达干扰的减缓。《天文物理杂志》, 147页增补内容, 167。
- ELLINGSON, S. W. [2005年] 射电天文射频干扰减缓特节引言。《射电科学》, 40页, RS5S01。
- FISHER, J. R., ZHENG, Q., ZHENG, Y., WILSON, S. G. 和 BRADLEY, R. F. [2005年] 960和1215 MHz间红移HI和OH观测脉冲干扰的减缓。《天文杂志》, 129页, 2940。
- FRIEDMAN, P. [1996年] IEEE第八次报告会会刊。《统计信号和阵列处理》, 264页。
- HANSEN, C. K., WARNICK, K. F., JEFFS, B. D., FISHER, J. R. 和 BRADLEY, R. [2005年] 利用焦平面阵列减缓干扰。《射电科学》, 40页, RS5S15。
- HAYKIN, S. [2001年] 《自适应滤波理论》。第4版。Prentice Hall。
- JEFFS, B. D., LI, L. 和 WARNICK, K. F. [2005年] 利用辅助天线实现射电天文阵列的干扰减缓。《IEEE信号处理译刊》, 第53卷, 2, 439页。
- KATZ, C. A. [2003年] 对611 MHz瞬态射电天文辐射的研究。《澳大利亚天文协会出版物》, 115页, 675。
- KESTEVEN, M. [2005年] 再谈自适应滤波器脉冲星观测中的射频干扰的减缓。《射电科学》, 40页, RS5S06。

- LANE, W. M.等人[2005年] 低频后相干射频干扰切除。《射电科学》，40页，RS5S05。
- LESHEM, A., VAN DER VEEN, A.-J. 和 BOONSTRA, A.-J. [2000年] 射电天文中的多信道干扰减缓技术。《天体物理杂志》，131页增补内容，355页。
- LIBERTI, J. C. 和 RAPPAPORT, T. S. [1999年] 《无线通信中的智能天线：IS-95和第三代CDMA应用》。Prentice-Hall。
- NIAMSUWAN, N., JOHNSON, J. T. 和 ELLINGSON, S. W. [2005年] 谈一种实现射频干扰减缓的简单脉冲消隐技术。《射电科学》，40页，RS5S03。
- POULSEN, A. J. [2003年]射电天文卫星干扰的实时自适应消除。杨百翰大学硕士论文。
- RAZA, J., BOONSTRA, A.-J., 和 VAN DER VEEN, A. J. [2002年] 射电天文中的射频干扰的空域滤波。《IEEE信号处理通函》，第9卷，2，64-67页。
- ROSHI, D. A. [2002年] 电视干扰的消除。NRAO电子部技术注解，第193款。
- THOMPSON, A. R. [1982年] 射电天文合成阵列对干扰信号的响应。《IEEE天线和传播译刊》，第30卷，3，450-456页。
- VAN VEEN, B. D. 和 BUCKLEY, K. M. [1988年4月] 波束成形：实现空域滤波的一种通用手段。《IEEE声音、语音和信号处理杂志》。
- WEBER, R., FAYE, C., BIRAUD, F. 和 DANSOU, J. [1997年] 《天文学和天体物理学增补内容》，126、161页。
- ZHENG, Q., ZHENG, Y., WILSON, S. G., FISHER, J. R. 和 BRADLEY, R. F. [2005年] 射电天文信号产生的测距设备干扰的切除。《天文杂志》，129页，2933。

参考书目

- BEAUDET, C. M.等人[2003年] 在Chajnantor LMA观测站所进行的RFI研究。《ALMA备忘录》，470页，<http://www.alma.nrao.edu/memos/>。
- ROGERS, A. E. E., PRATAP, P., CARTER, J. C. 和 DIAZ, M. A. [2005年] 327 MHz氦线灵敏度搜索中使用的射频干扰屏蔽和减缓技术。《射电科学》，40页，RS5S17。
- WEINTROUB, J. [1998年] 在搜索高红移原始银河结构时使用的射频波谱技术。哈佛大学博士论文 (<http://seti.harvard.edu/grad/jpdf/thesis.pdf>)。
-