

相控阵馈源MVDR波束合成器缓解RFI仿真*

李健^{1,2,3} 仵鹏^{1,2,3,4†} 段雪峰^{1,2,3} 裴鑫^{1,2,3} 张青松^{1,2,3,4} 陈卯蒸^{1,2,3}

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(2 新疆微波技术重点实验室 乌鲁木齐 830011)

(3 新疆射电天体物理实验室 乌鲁木齐 830011)

(4 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 相控阵馈源(Phased array feeds, PAFs)接收机作为下一代微波接收机,为大口径射电天文望远镜的射电干扰(Radio Frequency Interference, RFI)缓解工作带来了新的解决方法. PAFs接收机对射电望远镜焦平面的电磁波进行空域采样,返回时域阵列信号,使用最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)波束合成器可以自适应地识别RFI的方向,同时抑制RFI在输出信号中的功率,从而达到提升射电望远镜灵敏度的效果. 仿真结果表明MVDR波束合成器对有源高能量的射电干扰有很强的识别能力和一定程度的缓解能力,同时,该波束合成器对各阵元信道中加性噪声累积引起的无源干扰有很强的抑制能力,因此,PAFs接收机的MVDR波束合成器可以增强日益复杂电磁波环境下射电望远镜的抗干扰能力.

关键词 波束合成器, 射频干扰, 信号识别

中图分类号: P164; **文献标识码:** A

1 引言

上世纪末射电工程师开始使用相控阵馈源替代传统喇叭式馈源以获得更大的观测视场,提升了射电望远镜的工作效率,缩短了观测时间^[1]. 国际上美国国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)研制出19个阵元双偶极子PAFs (Phased array feeds)接收机,其数字波束合成器可以实时对波束进行合成^[2]; 荷兰射电天文研究所(Netherlands Institute for Radio Astronomy, ASTRON)研制出由144个Vivaldi天线作为阵元的PAFs接收机,结合MaxSNR (Maximum Signal-to-Noise Ratio)和LCMV (Linear Constraint Minimal Variance)波束合成器对连续的大视场进

行平滑性优化,提升了波束的旋转对称性,增强了望远镜观测时的稳定性^[3]; 澳大利亚国家射电望远镜中心(Australia Telescope National Facility, ATNF)研制出由94×2个贴片偶极子单元组成188阵元PAFs接收机Mk.II,该接收机安装在埃费尔斯伯格的100 m射电望远镜上,经过望远镜校准和波束合成优化基本可以满足实际观测的需求^[4]. 国内由上海天文台率先探索了在大口径射电望远镜使用PAFs接收机系统,该系统实现了对波束的控制功能^[5]; 国家天文台和中电五十四所联合成立的射电天文技术联合实验室正在开展平方公里阵列(Square kilometre Array, SKA)先导天线及相控阵馈源等关键技术研究,已经设计出中国SKA项目中

2021-12-21收到原稿, 2022-06-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12073067、12073066),新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2020D04014),西部之光项目(2019-XBQNXZ-B-018)资助

†wupeng@xao.ac.cn

的PAFs接收设备样机^[6]. 新疆天文台联合中国科学院和新疆维吾尔自治区, 拟在新疆奇台县建设“110 m口径全向可动射电天文望远镜”(QiTaiTelescope, QTT), 初步计划采用20 cm波段(0.7–1.8 GHz)相控阵馈源接收机装配在QTT主焦位置以实现连续的大视场覆盖^[7–8]. 目前国内还没有大口径射电望远镜应用PAFs接收机实现波束合成及RFI (Radio Frequency Interference)缓解的公开研究成果.

PAFs接收机作为一种新型的电磁波接收装置, 在全世界范围内都展开了广泛的研究. 相对于单波束接收机, 虽然拥有良好的主瓣增益和更低的旁瓣响应, 但是观测视场小、反射镜利用率低是其主要的缺点. 相对于多波束接收机, 在继承了单波束接收机高增益的基础上, 虽然增大了观测视场、提升了反射镜的利用率, 但是受限于馈源物理尺寸的影响, 无法形成连续的观测视场是其无法避免的缺点. PAFs接收机使用众多的小型天线对反射镜焦面场的电磁波进行空域采样, 返回时域阵列信号, 采用灵活的数字波束合成器对望远镜的波束形状、指向和数量等进行控制, 从而实现优化照明区域、选择性增强目标方向信号响应, 同时抑制干扰方向信号响应, 即在空域内实现RFI的缓解为单口径射电望远镜RFI缓解带来新的解决办法. 相较于单波束接收机和多波束接收机而言, 优化望远镜波束仅仅是天线设计的问题, 但是对PAFs接收机而言, 它也是一个波束合成器设计的问题, 波束合成器通过设计可以实现高灵敏度、给定空域响应或其他设计目标.

Warnick等人在Green Bank Telescope 20 m射电望远镜上初步验证了使用波束合成器可以实现RFI缓解^[9]. MVDR (Minimum Variance Distortionless Response)波束合成原理可自主识别RFI的方向并予以缓解, 在阵列信号处理中有着广泛的应用. Jeffs等^[10]和Leshem等^[11]在对PAFs接收机信号处理建模时就提到MVDR自适应波束合成器具有很好的应用和拓展前景, 并做了一些深入的理论探索和仿真. 总体看MVDR波束合成器在PAFs接收机中具有很好的应用前景, 特别是在PAFs射电望远镜的大视场波束形成以及大视场下有源RFI缓解

等问题带来了新的解决方法.

2 阵列信号处理模型

PAFs接收机可以理解为采用众多小型天线按照一定规则排布的阵列电磁波接收系统. 因此PAFs接收机生成信号的处理方法满足阵列信号处理的基本模型.

2.1 平面阵列时域响应模型

在理想情况下, 假设射电望远镜位于自由空间内, 接收到的电磁波信号未受到遮挡与散射等影响, 并且假设PAFs各阵元在工作频带内具有相同、平坦且各向同性的接收灵敏度. 通常射电望远镜的主焦方向会对准目标源, 而干扰源的电磁辐射往往从射电望远镜的旁瓣进入, 射电望远镜观测示意图如图1所示.

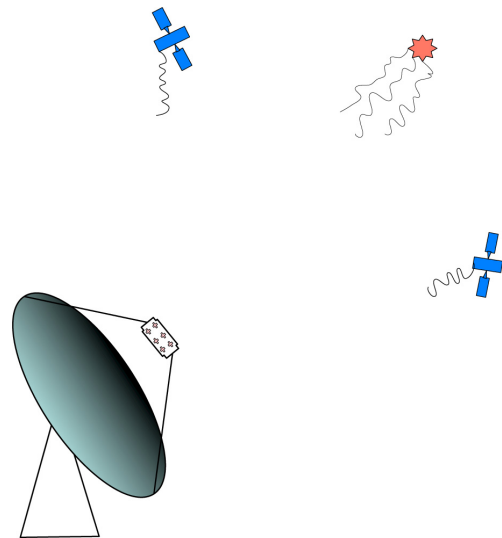


图 1 射电望远镜观测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radio telescope observations

假设有 $D + 1$ 个平面电磁波分别从球面角 Ω_d ($d = 0, 1, \dots, D$)入射到馈源, 且存在加性背景噪声, 则相对于参考阵元的第 m 个阵元观测到的信号波形可以描述为^[12]:

$$x_m(t) = s_0[t - \tau_m(\Omega_0)] + \sum_{d=1}^D s_d[t - \tau_m(\Omega_d)] + n_m(t), \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

式中, t 为时间信息, M 表示阵元数量, $\tau_m(\Omega_d)$ 是信号沿 Ω_d 方向到达第 m 个阵元相对于参考阵元的传播时间延迟, $s_d(t)$ ($d = 0, 1, \dots, D$)为在空间参考阵元测量的第 $D + 1$ 个信号波形, 其中 $d = 0$ 对应于期望信号, $d = 1, 2, \dots, D$ 对应于 D 个干扰, $n_m(t)$ 表示第 m 个阵元接收到的满足广义平稳特性的综合背景噪声.

2.2 MVDR波束合成器

Capon^[13]于1969年提出了MVDR波束合成器, 它可以使目标方向信号无失真通过的同时, 最大限度地抑制波束输出中的干扰和噪声功率. 1972年, Frost^[14]提出了LCMV波束合成器, 将期望信号不受影响的这一约束扩展为一组约束, 由于RFI的方向无法提前预知, 不能很好地实现提前约束. Max-SNR波束合成器可以实现输出信噪比最大化, 但对干扰的方位和缓解没有识别和处理能力, 更适合在没有RFI的环境下使用.

对PAFs各阵元接收到的信号进行相位补偿和线性加权后, 可以实现射电望远镜的空域滤波能力, 即形成一定方向性的接收, 让目标方向入射的信号通过, 同时抑制其他方向入射的干扰与噪声, 这种信号处理技术称为波束合成. 在射电天文中, 通常希望最大限度地提高目标方向的电磁波响应, 同时尽可能地减小其他方向的电磁波响应. MVDR波束合成器可以使目标方向信号在无失真输出的状态下, 使望远镜输出的噪声与干扰功率达到统计意义下的最小化, 从而实现对于干扰和噪声的抑制, 减小系统输出中噪声与干扰的响应. PAFs接收机中MVDR波束合成器原理框架如图2所示, 其中LNA_1, LNA_2, \dots , LNA_M表示各阵元对应的低噪声放大器, $x_1(\omega)$, $x_2(\omega)$, \dots , $x_M(\omega)$ 为各阵元窄带频域信号, ω 为频域信息. 阵元信号经过一定量的样本统计后传入MVDR运算器, 再经过运算器处理后返回相应的匹配系数矩阵 $\mathbf{w}^H = [w_1, w_2, \dots, w_M]^H$, 其中 w_M 表示第 M 个阵元的权重, \mathbf{H} 表示共轭转置, $\mathbf{X}(\omega) = [x_1(\omega), x_2(\omega), \dots, x_M(\omega)]$ 为PAFs阵元输出矩阵, 最后这些系数与对应的统计样本加权后实现波束合成, 即 $y(\omega)$, 波束合成器完整表达式为^[10]:

$$y(\omega) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(\omega) = \left[\frac{\hat{\mathbf{R}} \mathbf{a}(\Omega_0)}{\mathbf{a}^H(\Omega_0) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\Omega_0)} \right]^H \mathbf{X}(\omega), \quad (2)$$

式中, $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本互谱系数矩阵, $\mathbf{a}(\Omega_0) = [a_1(\Omega_0), a_2(\Omega_0), \dots, a_M(\Omega_0)]^T$ 为望远镜波束导向向量, $a_M(\Omega_0)$ 表示主瓣波束指向 Ω_0 方向时第 M 个阵元的补偿系数. 在其他条件不变的情况下, 导向向量决定着PAFs的照明面积, 因此对反射面望远镜的分辨率有一定的影响, 其照明面积与分辨率呈正相关性. 利用该式遍历空间中所有像素点即可得到基于MVDR波束成器的射电天文像图.

3 仿真

新疆天文台拟在新疆奇台县建设“110 m口径全向可动射电天文望远镜”, 依据其科学目标, 计划在QTT主焦点配备一台20 cm波段(0.7–1.8 GHz)PAFs接收机, 以实现连续的高灵敏度大视场观测. 根据项目进展规划, 该台PAFs接收机采用96个阵元组成四边形平面阵列, 阵元排布方式如图3所示^[15].

3.1 仿真环境

使用Python仿真阵元输出信号和波束合成过程, 并对结果进行可视化处理, 仿真过程主要分为3个部分.

(1)信号发生器: 生成含有信号、干扰和综合噪声的PAFs阵列复指数信号流. 对PAFs建立坐标系如图4所示, 将阵元平面置于 yoz 平面, θ 与 ϕ 分别为信号相对于PAFs的水平方位角与垂直俯仰角, d_m^y 为第 m 个阵元相对于参考阵元沿着 y 轴的距离, d_m^z 为第 m 个阵元相对于参考阵元沿 z 轴方向上的距离. 设目标所在的方向余弦表示为 $(\cos \theta \cos \phi, \cos \theta \sin \phi, \sin \theta)$, 则平面电磁波到达各阵元之间的波程差决定了信号接收过程中的时间延迟, 因此, 第 m 个阵元相对于参考阵元沿 y 轴和 z 轴的时间延迟可分别表示为:

$$\begin{cases} \tau_m^y = \frac{d_m^y \cos \theta \sin \phi}{c}, \\ \tau_m^z = \frac{d_m^z \sin \phi}{c}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, c 为电磁波传递速度, 则方向 $\Omega(\theta, \phi)$ 的平面电磁波到达第 m 个阵元的时间与到达参考阵元的时间延迟可表示为:

$$\tau_m(\Omega) = \tau_m^y + \tau_m^z = \frac{d_m^y \cos \theta \sin \phi + d_m^z \sin \theta}{c}, \quad (4)$$

代入(1)式可得平面电磁波在各个阵元相对于参考

阵元的时域响应信号.

(2)波束合成器: 使用MVDR波束合成器计算统计样本下最优匹配系数组 \mathbf{w}_{MVDR} , 实现波束合成. 在信号发生器的参数基础上输入主瓣方向参数: $\Omega_0(\theta_0, \phi_0)$, 生成波束导向矢量 $\mathbf{a}(\Omega_0)$, 波束导向矢量应当为(4)式所对应时间上的补偿, 具体频域表达式为:

$$\mathbf{a}(\Omega_0) = - \begin{bmatrix} \exp(-i\omega\tau_1\Omega_0) \\ \exp(-i\omega\tau_2\Omega_0) \\ \vdots \\ \exp(-i\omega\tau_M\Omega_0) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \exp[-i\omega(d_1^y \cos \theta_0 \sin \phi_0 + d_1^z \sin \theta_0)] \\ \exp[-i\omega(d_2^y \cos \theta_0 \sin \phi_0 + d_2^z \sin \theta_0)] \\ \vdots \\ \exp[-i\omega(d_M^y \cos \theta_0 \sin \phi_0 + d_M^z \sin \theta_0)] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $\exp(\cdot) = e^{(\cdot)}$ 表示指数函数, $i = \sqrt{-1}$ 是虚数单位.

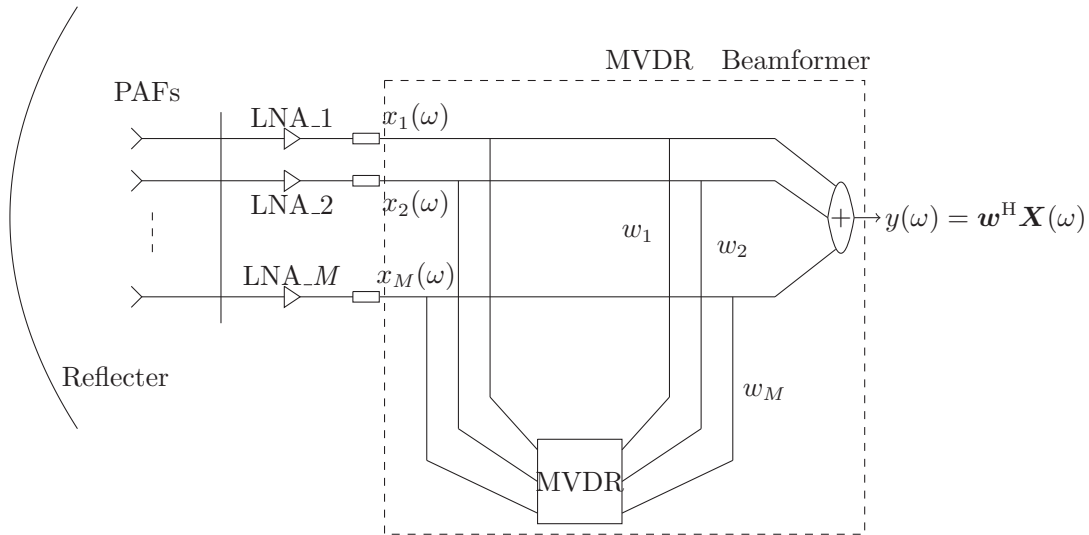


图2 MVDR波束合成器框架图

Fig. 2 MVDR beamformer frame diagram

使用不依赖于样本统计的匹配系数作为固定波束合成器, 该波束合成器用作与MVDR波束合成器性能对比, 其恒定匹配系数 $\mathbf{w}_{\text{CONST}}$ 为: $[1, 1, \dots, 1]$ (此时波束指向为 $\Omega(0^\circ, 0^\circ)$, 即是指向望远镜焦点的方向).

(3)结果可视化: 对波束合成器的输出信号遍历成像区域, 生成望远镜二维响应图像. 可视化主要参数为: 成像范围, 图像分辨率.

参考图3的阵元排布方式确定对应的PAFs阵元坐标, PAFs的窄带工作频率为1.5 GHz, 通常设定阵元间距与信号波长比例系数 $r = 0.5$, 确定样本采样精度 $\text{SP}=4$, 样本总量 $N = 1024$. 假定在理想反射条件下PAFs完整覆盖电磁波在抛物面反射形成的平面电磁场, 因此使用所有阵元进行波束合成. 定义信噪比 $\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_n}$, 其中 P_s 为样本信号功率, P_n 为样本噪声功率. 向信号发生器输

入 $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 的信号参数, 并对生成的所有阵元信号使用固定波束合成器进行波束合成, 归一化后可得望远镜的波束方向图, 可视化结果如图5所示。

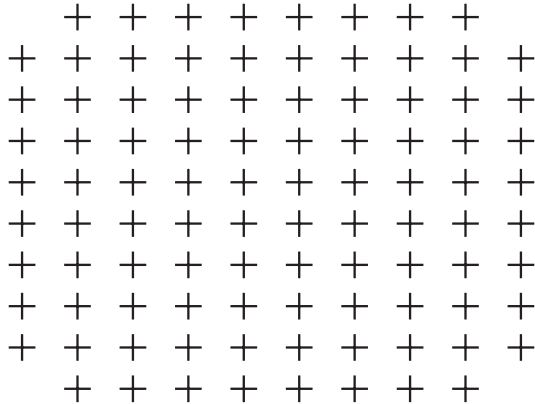


图3 QTT PAFs 96阵元布局图(0.7-1.8 GHz)

Fig. 3 The layout of 96 elements of PAFs in QTT (0.7-1.8 GHz)

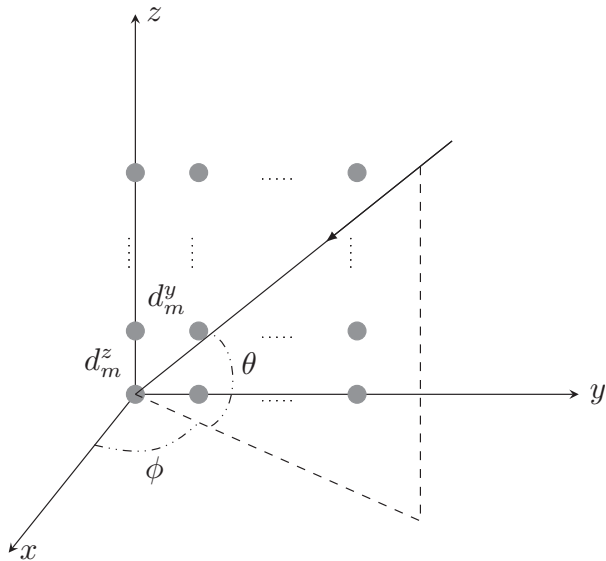


图4 阵列建模示意图

Fig. 4 Schematic diagram of element modeling

3.2 有源RFI缓解仿真结果

向波束生成器同时输入两种不同参数的信号, 分别作为一个目标源和一个干扰源, 两个源的具

体参数如表1所示. 固定波束合成器的响应结果如图6 (a)所示. 将生成的 N 个样本量作为MVDR波束合成器的统计输入^[10], MVDR波束合成器的输出即为该样本下满足RFI缓解的合成信号, 在该合成信号下的望远镜响应如图6 (b)所示。

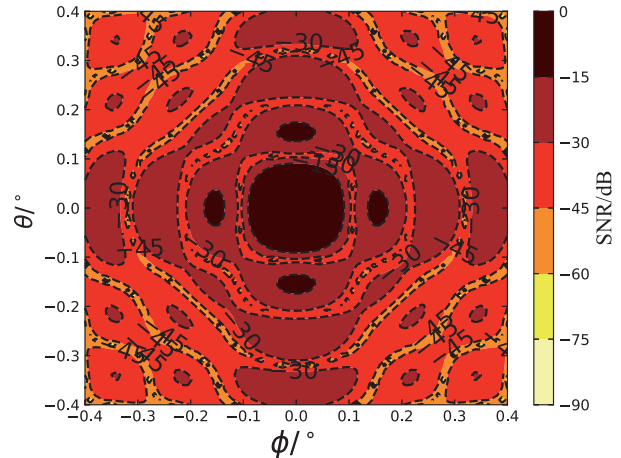


图5 QTT PAFs 96阵元在1.5 GHz下的方向图

Fig. 5 The patterning of PAFs with 96 elements of QTT at 1.5 GHz

表1 信号源与干扰源参数表

Table 1 Signal source and interference source parameters list

Parameters	SNR/dB	$\phi/^\circ$	$\theta/^\circ$	f/GHz
Signal	-30	0	0	1.5
Interference	10	-0.25	-0.25	1.5

图6 (a)分析可得: 在固定波束合成器的成像范围内, 干扰源的响应位于以 $\phi = -0.25^\circ$ 和 $\theta = -0.25^\circ$ 为中心的区域, 在分辨率内完全被 $\text{SNR} \geq 45 \text{ dB}$ 的响应区间覆盖, 外围主要被 $\text{SNR} \geq 30 \text{ dB}$ 的响应区间覆盖; 信号源的响应被设定于 $\phi = 0^\circ$ 和 $\theta = 0^\circ$ 为中心的区域, 由于该区域的响应与图中大部分 $\text{SNR} \geq 30 \text{ dB}$ 的响应区域处于同一动态范围, 无法辨别是信号响应还是噪声和干扰引起的综合响应. 干扰位置处有着明亮且最大范围的响应, 目标位置处的信号响应类型无法识别。

图6 (b)分析可得: 在MVDR波束合成器的成像范围内, 干扰源的响应位于 $\phi = -0.25^\circ$ 与 $\theta =$

-0.25° 的中心区域内,在分辨率内以 $\text{SNR} \geq 15 \text{ dB}$ 的成像范围占据主要区域,外围更大的响应区域处于 $\text{SNR} \geq 0 \text{ dB}$ 的响应范围;反观位于 $\phi = 0^\circ$ 与 $\theta = 0^\circ$ 为中心的信号区域,在有效的分辨范围内主要以 $\text{SNR} \geq 15 \text{ dB}$ 为主要响应区域,甚至于在最中心可看到 $\text{SNR} \geq 30 \text{ dB}$ 的小范围响应区域。

从SNR响应分布变化可得,干扰位置处的SNR得到了明显的抑制与缓解,SNR的抑制最大可达 45 dB ,最低也有 30 dB ;目标位置处的SNR整体得到了相对较小的抑制,最大抑制仅为 15 dB ,中心点处实现了 0 dB 抑制,即无畸变响应.两个源相比较,虽然SNR均得到了抑制,但是等价于信号处的源得到了约 25 dB 的增强.从成像效果变化可得,图像整体能量分布下降,干扰与噪声的功率得到明显的缓解,目标信号得到明显增强,从原来的淹没状态中凸显而出,且全图能量最强点位于目标方向处,成像噪声整体得到改善.

在该仿真中RFI的方向是除焦点方向以外随机设定的,具备方向上的随机性,从仿真结果可得MVDR波束合成器拥有时变RFI缓解能力,这是因为MVDR波束合成器是建立在一定时间样本统计的基础上,所以缓解RFI在时间上的分辨率与样本统计的时间分辨率具有一致性.

3.3 噪声累积引起的RFI缓解仿真结果

当目标源非常微弱,且无有源干扰时,PAFs接收机系统的每个阵元接收到的信号通常被淹没在噪声里,MVDR波束合成器可以在一定程度内提取出每个阵元中的目标信号进行合成,从而增强目标信号响应,同时抑制波束合成时阵元之间加性噪声累积引起的干扰响应.

向波束生成器输入 $\text{SNR} = -30 \text{ dB}$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$ 的信号作为阵元输出信号^[10],固定波束合成器的响应结果如图7(a)所示,将生成的 N 个样本量作为MVDR波束合成器的统计输入,MVDR波束合成器的输出即为该样本下满足RFI缓解的合成信号,在该合成信号下的望远镜响应如图7(b)所示.

图7(a)分析可得:在固定波束合成器的成像中,有许多大小不一,呈现出随机分布的响应区域,这些响应处于 $\text{SNR} \geq 20 \text{ dB}$ 的范围内,并且位于以 $\phi = 0^\circ$ 和 $\theta = 0^\circ$ 为中心的信号区域也处于该范围内,因此该响应是随机分布所引起的还是目标源的响应无法区分.主要原因是由于各阵元之间加性噪声在波束合成时累积引起的响应,这种响应在微弱的天文信号观测中会表现为一种无规律,相对强的干扰分布.

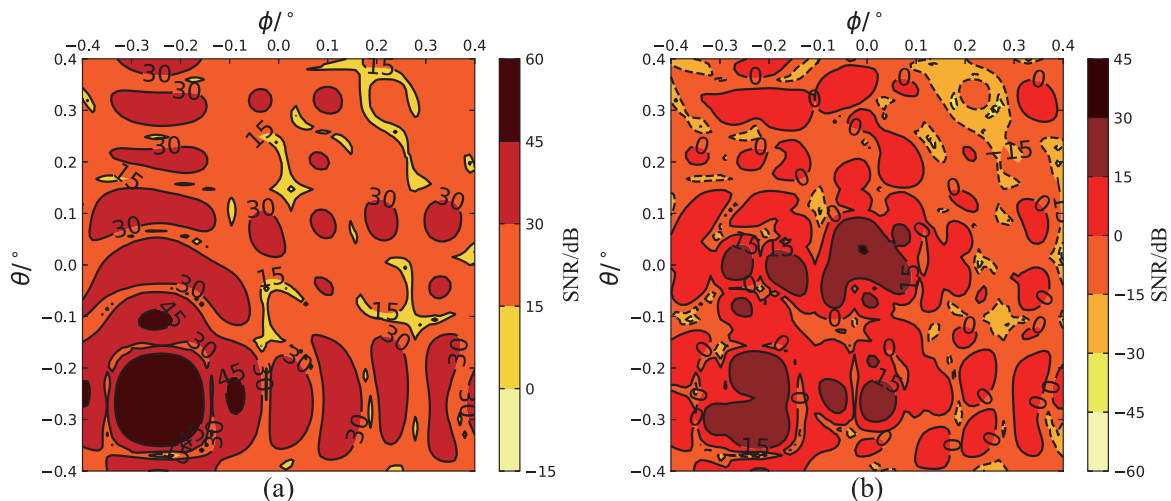


图 6 (a)有源干扰下固定波束合成器响应图,(b)有源干扰下MVDR波束合成器响应图.

Fig. 6 (a) Response diagram of conventional beamformer under active interference, (b) Response diagram of MVDR beamformer under active interference.

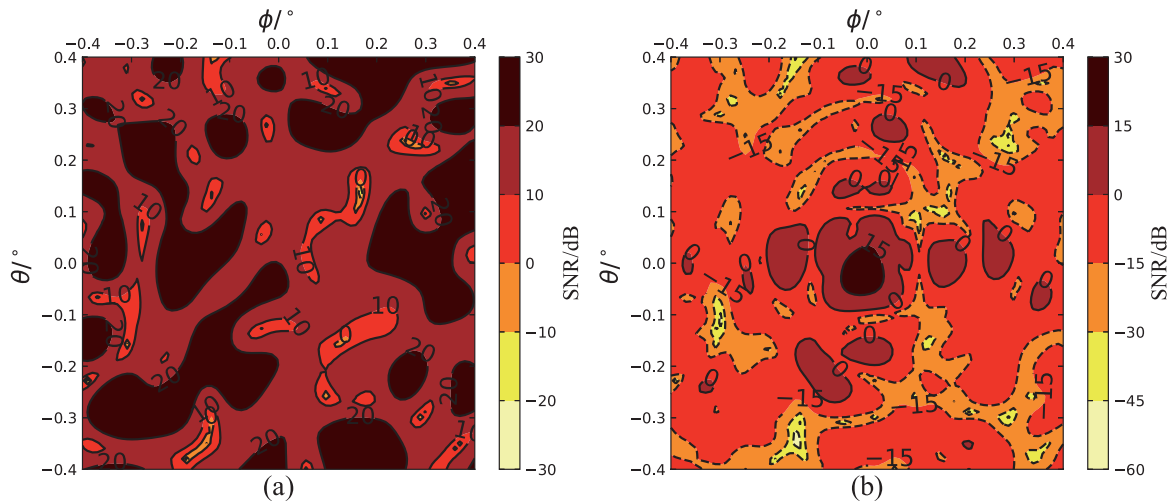


图7 (a)无源干扰下固定波束合成器响应图, (b)无源干扰下MVDR波束合成器响应图.

Fig. 7 (a) Response diagram of conventional beamformer under passive interference, (b) Response diagram of MVDR beamformer under passive interference.

图7 (b)分析可得: 在MVDR波束合成器的成像中, 目标源响应位于 $\phi = 0^\circ$ 和 $\theta = 0^\circ$ 为中心的区域, 在分辨率内以 $\text{SNR} \geq 0$ dB的动态范围为主要响应, 在最中心处更有一部分成像区域处于 $\text{SNR} \geq 15$ dB的动态范围内. 从全图来看, 除目标区域以外均无其余响应高于 $\text{SNR} \geq 15$ dB的动态范围, 加性噪声引起的干扰得到了明显的抑制.

经过MVDR波束合成器处理后, 从SNR动态变化范围可知, 目标源的SNR处于最高动态范围, 噪声累计引起的干扰全部得到了抑制; 从成像效果变化可知, 图像整体能量分布下降目标信号得以凸显, 满足基本处理预期.

4 总结与展望

综上仿真结果, MVDR波束合成器在基于一定量的样本统计后可以自适应地缓解RFI, 提升望远镜的灵敏度, 在强RFI干扰下, MVDR波束合成器可以缓解RFI的响应, 提亮目标源. 在进行弱源且无有源RFI的观测条件下, 加性噪声在固定波束合成时降低了望远镜的灵敏度, MVDR波束合成器对这些噪声引起的干扰有很好的抑制效果.

本文围绕PAFs接收机系统单波束合成优化展开研究, 根据波束合成原理以及阵列信号处理方法,

对有源干扰源进行了MVDR波束合成优化, 同时也对加性噪声在PAFs波束合成中的累积干扰进行了MVDR波束合成优化, 针对波束合成结果均做了2维成像分析. MVDR波束合成器对非主瓣内的干扰有很强的识别和抑制能力, 可以提升在RFI环境下射电望远镜的观测能力, 同时单波束的自适应优化也为PAFs连续大视场优化及相应的RFI缓解提供了基础.

参考文献

- [1] Warnick K F, Maaskant B, Ivashina M V, et al. Proceedings of the IEEE, 2016, 104: C3
- [2] Ruzindana M W. Real-time Beamforming Algorithms for the Focal L-band Array on the Green Bank Telescope. Provo City: Brigham Young University, 2017: 27-29
- [3] Ivashina M V, Iupikov O, Maaskant R, et al. ITAP, 2011, 59: 1864
- [4] Chippendale A P, Beresford R J, Deng X, et al. Proceedings of 2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Cairns: IEE, 2016, 19: 23
- [5] 何晨阳, 李斌. 中国科学院上海天文台年刊, 2013, 34: 53
- [6] 伍洋, 杜彪, 刘肖萌, 等. 电子与信息学报, 2013, 35: 1236
- [7] 王娜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 783
- [8] 马军, 裴鑫, 王娜, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49: 099502

- [9] Warnick K F, Jeffs B D, Landon J, et al. Proceedings of 2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting. Banff: IEEE, 2009: 1
- [10] Jeffs B D, Warnick K F, Landon J, et al. ISTSP, 2008, 2: 635
- [11] Leshem A, van der Veen A J. ITIT, 2000, 46: 1730
- [12] 鄢社峰. 优化阵列信号处理: 快速优化算法与应用. 北京: 科学出版社, 2021: 2-24
- [13] Capon J. Proceedings of the IEEE, 1969, 57: 1408
- [14] Frost O L. Proceedings of the IEEE, 1972, 60: 926
- [15] 王凯, 陈卯蒸, 马军, 等. 天文学进展, 2021, 39: 377

Simulation of Phased Array Feeds MVDR Beamformer to Mitigate RFI

LI Jian^{1,2,3} WU Peng^{1,2,3,4} DUAN Xue-feng^{1,2,3} PEI Xin^{1,2,3} ZHANG Qing-song^{1,2,3,4}
CHEN Mao-zheng^{1,2,3}

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(2 Xinjiang Key Laboratory of Microwave Technology, Urumqi 830011)

(3 Xinjiang Radio Astrophysics Laboratory, Urumqi 830011)

(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT The phased array feeds (PAFs) receiver is a next-generation microwave receiver that provides a new solution to reduce Radio Frequency Interference (RFI) for large-aperture radio astronomy telescopes. The PAFs receiver samples the electromagnetic wave in the focal plane of the radio telescope in spatial domain and returns the time-domain array signal. The use of Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) beamformer allows for adaptive identification of the orientation of RFI while suppressing the power of RFI in the output signal, thereby enhancing the sensitivity of the radio telescope. The simulation results show that the MVDR beamformer has a strong ability to identify and mitigate active high-energy radio interference. Meanwhile, the beamformer has a strong ability to mitigate passive interference caused by the accumulation of additive noise in each array element channel. Therefore, the MVDR beamformer for PAFs receiver enhances the anti-interference capability of the radio telescope in the increasingly complex electromagnetic wave environment.

Key words beamformer, radio frequency interference (RFI), signal identification