arXiv:2601.07130v1 [astro-ph.IM] 12 Jan 2026

神经形态计算对射电望远镜台址的潜在影响

Nicholas J. Pritchard[1], [2*]Richard Dodson[1†] 和 Andreas Wicenec[1†]

[1*]国际射电天文学研究中心，西澳大利亚大学，7 Fairway，珀斯，6009，西澳大利亚，澳大利亚。[2]物理、数学与计算学院，西澳大利亚大学，35 Stirling Highway，珀斯，6009，西澳大利亚，澳大利亚。

通讯作者。电子邮箱：nicholas.pritchard@research.uwa.edu.au；其他作者：richard.dodson@icrar.org；andreas.wicenec@uwa.edu.au；

[†]这些作者对本项工作贡献相同。

摘要

射电天文学依赖定制、实验性且富有创新性的计算解决方案。随着平方公里阵列（SKA）和下一代甚大阵列（ngVLA）等新一代望远镜逐步成形，这种情况将持续下去。在功耗要求日益严苛、射电环境愈发复杂的情况下，受相关功耗需求限制，采用传统冯·诺依曼计算可能难以实现科学目标。神经形态计算提供了一种颇具吸引力的替代方案；结合对数据驱动方法的需求，脉冲神经网络（SNN）是一种很有前景的实时高能效替代方案。射频干扰检测是脉冲神经网络颇具吸引力的应用场景，近期探索已显露出良好前景。本文全面分析了在若干现有及近期投入使用的仪器中，于射电天文处理流水线的关键阶段部署不同神经形态方法可能产生的影响。我们的分析描绘了一条切实可行的路径：近期可在现有仪器中部署基于现场可编程门阵列的脉冲神经网络，无需资本支出即可实现先进的数据驱动射频干扰检测；未来仪器则可采用神经形态 ASIC。分析发现，商用解决方案可将关键处理单元的功耗预算降低多达三个数量级，从而改变天文台的运行预算。高数据率频谱处理可能是一个非常适合

神经形态计算产业的应用方向，因为我们将射电望远镜视为全球规模最大的传感器内计算挑战。

关键词： 射电天文学、脉冲神经网络、神经形态计算、非冯·诺依曼计算

1 引言

天文学是科学领域中历史最悠久、最富传奇色彩的学科之一，其发展始终由仪器所定义。射电天文学自然也不例外，其发展始终受限于天文台相关设施的计算能力。从根本上说，射电望远镜面临着复杂的多维数据缩减问题。射电辐射（来自人为源和宇宙源）会在接收机中产生微弱的电场，这些电场经数字化后，原始电压会被相关处理，形成频谱数据（可见度）。第一步处理是检测并消除人为射电辐射，即射频干扰（RFI），否则这些干扰会淹没后续处理步骤。随后，通过迭代去除明亮的前景伪影，同时考虑地球曲率、电离层干扰、仪器噪声以及无数其他物理现象，对这些可见度进行平均并谨慎累积 [1]。更复杂的是，同时检测脉冲星等快速变化的“瞬变”事件，也是现代仪器的一项核心科学目标，因为这些令人费解的天体代表了迄今观测到的最极端物理现象之一 [2]。我们概述这一过程，是为了阐明射电天文学的核心挑战在于传感器内计算，而为方便起见，人们一直采用批处理方法应对这一挑战。从许多方面来看，与其将射电望远镜视为相机，不如将其视为麦克风；透过这一视角，我们看到射电天文学领域已为神经形态计算做好准备。

1.1 射电天文学的数据洪流

近期仪器面临着灵敏度和巡天速度至少提升一个数量级的飞跃，相应的数据处理挑战也随之而来 [3]。例如，SKA-Low、SKA-Mid 和 ngVLA 的初始数据速率，使这些仪器明确进入了高性能计算（HPC）的范畴；而已知的处理目标则促使人们开发高度优化的方法来实现这些目标[4]。面对即将到来的规模，相关领域正转向高吞吐量计算（HTC）或多任务计算（MTC），处理任务变得愈发细粒度、愈发并行化，并在日益异构的资源上执行[5, 6]。没有任何仪器能够以实时方式处理接近其最大观测能力的数据 [3]。与许多其他领域一样，瓶颈在于微观和宏观层面上的数据移动。仪器的计算平台越高效，在既定运行预算内就能开展越多科学研究。科学观测需求各不相同，更使这一挑战复杂化。快速射电暴（FRBs）和脉冲星等瞬变事件，是最

值得观测的科学目标之一，但需要实时检测。专门为快速粗成像和检测这些动态现象而设计的独立处理管线（有时频率分辨率可达毫秒级），是高性能计算所赋能的一项科学能力。相比之下，巡天科学涉及在特定时间和条件下，按计划观测天空的特定区域；这种观测通常更灵活，但灵活性也有一定限度。再电离时期（EoR）观测是大型射电干涉望远镜（如 SKA）的标志性科学应用场景，它揭示了一段此前从未观测到的历史时期[7]。这类观测以尽可能高的灵敏度运行，并需要处理数量最大的数据，才能生成精度足够高的图像。甚长基线干涉测量（VLBI）通过协同使用全球多台望远镜，对类星体和黑洞等极远天体成像；若采用传统技术，这些天体将无法成像 [8]。VLBI 也被“反向应用”，用于地球的天体测量和大地测量学 [9]。这类观测需要准确建模电离层效应，并在多个时间段内按准确确定的间隔进行测量。不同观测类型的处理需求和节奏各异，因此调度十分复杂；速度和效率越高，科学产出也就越大。

1.2 神经形态计算是一场范式转变

设计脑启发计算架构，在降低功耗和数据传输方面具有显著优势，这一点长期以来备受期待 [10]。神经形态计算也有着悠久的历史，长期以来一直在努力寻找神经科学以外的合适应用场景。不过，随着商用数字或混合信号加速器的出现，这一局面开始改变 [11]。信息稀疏且在能量受限条件下进行实时运行有益的应用领域，尤其适合脉冲神经网络 [12]。我们认为，神经形态计算可以采用多种形式，包括脑启发算法、基于赫布式 [13] 和反向传播式学习规则 [14, 15], 的现场可编程门阵列硬件实现，以及定制数字ASIC [16]；这些方法都可以在处理流水线的不同阶段，借助不同的神经形态硬件方案，应用于射电天文学。

作为一门观测科学，射电天文学围绕随时间变化的数据处理而展开，理想情况下还要实现实时处理，因此它天然适合神经形态系统。此外，尽管相关的数据处理规模极其庞大，数据本身却相对稀疏；直观地说，太空中有很多空无一物的地方。能够根据信息密度调整功耗的系统至关重要，而这正是神经形态计算可能带来独特优势之处。庞大的光谱数据、实时接收机电压处理、全天候观测的潜力，以及在技术极限下不断进行方法探索的历史，这些因素独特地结合在一起，使射电天文学成为应对神经形态系统诸多工程挑战的理想领域。

初始接收、相关性分析、射频干扰标记、瞬变检测和脉冲星检测，原则上都可以作为实时处理步骤来实现。此外，数据量的增加以及接收仪器灵敏度的提升，促使人们采用数据驱动的机器学习方法来处理这些任务。实施当代深度学习方法的运营成本，往往使其难以实际部署

[17]因此，探索脉冲神经网络（SNN）为实现数据驱动的实时信号处理任务带来了独特的希望。然而，成像是另一项挑战，当代方法需要沿着正交的数据维度（频率和时间）进行迭代处理 [1]；对于受冯·诺依曼瓶颈严格限制的数据放置而言，这无疑是一场噩梦 [18]。

1.3 相关工作

将神经形态计算应用于射频干扰检测的初步研究已显示出很大潜力。传统算法虽可行，但需要专家调优；而基于人工神经网络（ANN）的数据驱动方法在实际运行中的成本往往高得难以承受 [17]。长期以来，射电天文学一直被认为是脉冲神经网络的潜在应用领域 [19] ，学位论文附录中曾有一项非常初步的工作，使用纯合成数据测试脉冲星检测 [20]。此外，脉冲神经网络已用于其他高数据速率过滤任务，例如高能物理领域中的任务 [21], ，在这些应用中，采用现场可编程门阵列逻辑进行高效实现尤其值得期待；它们也用于卫星通信中的干扰过滤 [22]。近期一系列研究旨在评估将神经形态计算（尤其是脉冲神经网络）应用于射频干扰检测的可行性，实际上也就是检验“时变数据到时变计算平台”这一前提。射频干扰检测有若干理想的应用理由。首先，除非望远镜位于地球之外，否则都必须标记射频干扰。其次，近年来，缓解射频干扰这一挑战显著加剧，主要原因是近地轨道卫星的出现。第三，虽然已有基于机器学习的人工神经网络技术，但其部署成本被认为过高，而且通常仍沿用传统算法以图像为中心的方法。最后，多种标记方法可以结合使用，因此相较于射电天文学处理的其他方面（例如成像），具有一定的灵活性和试验空间。早期工作采用人工神经网络到脉冲神经网络的转换，保留了传统方法以图像为中心的处理方式，同时将随推理时间线性增长的内存需求降低为常量 [23]。随后，同一团队针对相同任务采用时间反向传播（BPTT）训练脉冲神经网络，发现其性能相当，并探索了理想的脉冲编码技术 [24], ；之后又将该研究扩展至包含基于真实 LOFAR 数据的结果 [25]。研究人员还尝试了更为新颖的方案，包括液态状态机 [26]。纳入偏振信息可提升检测性能 [27], ；将这些方法部署在 SynSense Xylo 硬件上，则可实现实时射频干扰检测，且每条基线的功耗低于 50 mW [28]。这项工作评估了脉冲神经网络和神经形态计算在这一处理环节中的适用性，降低了相关风险，并进行了探索；本文将在此基础上讨论部署此类解决方案的实际可行性及其可能产生的影响。

目前缺少一项系统层面的前瞻性分析，来评估神经形态技术对下一代天文台整个处理流水线的影响。本文勾勒出将神经形态技术应用于射电天文学的路径：从最直接的应用和神经形态程度最低的方法入手，再逐步拓展到日益复杂、神经形态程度更高的应用；同时说明沿途可能实现的节能效果，并在适用情况下，针对现有及即将投入运行的望远镜进行具体建模。

2 结果

现在，我们将介绍在射频干扰检测、瞬变搜索和成像等方面，将神经形态计算部署到多台射电望远镜中的假设情景建模。第4.1 节介绍了所考察望远镜的详细信息，第4.1.7节则概述了它们现有的数据处理资源。以下简要介绍这些望远镜：**默奇森宽视场阵列（MWA）**是一台位于西澳大利亚偏远地区的低频射电干涉仪望远镜，也是SKA-Low仪器的先导项目，由256个相控“瓦片”组成，每个瓦片含有16根偶极天线 [29]。**澳大利亚平方公里阵列探路者（ASKAP）**是一台碟式射电望远镜，也位于西澳大利亚偏远地区，由36面直径12米的抛物面天线组成 [30]。**低频阵列（LOFAR）**是另一项SKA-Low先导项目，位于荷兰，其仪器组件分布于欧洲各地 [31]。**SKA**是一项全球合作计划，旨在建造世界上最大的射电望远镜。该天文台总部位于英国曼彻斯特，在澳大利亚和南非运行两套仪器，分别覆盖“低频”和“中频”两个不同的频率范围 [32]。**SKA-Low** 仪器是SKA的低频部分，位于西澳大利亚偏远地区。**SKA-Mid** 仪器是SKA的中频部分，位于南非卡鲁地区。最后，**下一代甚大阵列（ngVLA）**是甚大阵列仪器的一项正在设计中的替代方案，将由282面天线组成 [33]。

2.1 射频干扰标记

射频干扰标记是采用神经形态方法处理的一项颇具吸引力的首要任务，因为在望远镜信号链的多个阶段都可能进行标记，甚至可能多次进行。在射电天空的噪声日益增多的背景下，有充分理由在处理流水线的多个阶段使用数据驱动方法来完成这项任务。神经形态计算或许能以极低的能耗实现这一目标。表1 展示了在多种仪器中，于短期、中期和长期部署神经形态方法的预期收益。对于多种仪器，神经形态计算有望以低一至三个数量级的能耗实现射频干扰检测，从而使数据驱动的实时射频干扰检测成为可行方案。方法部分更详细地阐述了我们选择各项指标以及为每种仪器选择神经形态硬件的理由。选择合适神经形态平台的主要依据，是平台的数据传输能力是否足以处理特定仪器为相应处理任务提供的频率通道数量。对于相关器和相关后处理活动，我们考察了 SpiNNaker 2 板卡，因为它们除了具备脉冲神经网络加速功能，还搭载标准的 ARM 处理器核心，因此更适合用于数值计算较多的处理阶段 [34]。

相关后射频干扰检测是当代射频干扰检测方法通常采用的阶段，目前已被证明是现有基于 ASIC 的神经形态芯片组的一项首要应用。补充表 1 展示了针对这一问题、应用于具有代表性的合成数据集的若干基于脉冲神经网络的方法，补充表 2 则包含了脉冲神经网络基线在

表 1 当代射电望远镜中用于射频干扰检测的假设性神经形态部署场景。

仪器	位置	当前硬件	拟议硬件	数量	电流功率（W）	拟议功率（W）（相对百分比）	时间线
MWA	接收	FPGA	-	-		-	Near
			SynSense Xylo 2	2048	1024	1.23 (0.12)	中等
	相关性	GPU	英特尔 Loihi 2 Oheo Gulch	24	18720	24 (0.13)	Far
	后相关器	CPU/GPU	SpiNNaker 2	304	152000	7296 (4.80)	Far
ASKAP	接收	FPGA	-	-		-	Near
			SynSense Xylo 2	1728	3456	1.04 (0.03)	中等
	相关性	FPGA	-	-		-	Near
			英特尔 Loihi 2 Oheo Gulch	252	49896	252 (0.51)	中等
	瞬变检测	FPGA	-	-	4500	-	Near
	后相关器	CPU/GPU	SpiNNaker 2	304	152000	7296 (4.80)	Far
LOFAR	接收	FPGA	-	-		-	Near
			英特尔 Loihi 2 Oheo Gulch	1664	49920	1664 (3.33)	中等
	相关性	GPU	SpiNNaker 2	26	10140	624 (6.15)	Far
	后相关器	GPU	SpiNNaker 2	54	7280	1296 (17.80)	Far
SKA-Low	接收	FPGA	-	-		-	Near
			SynSense Xylo 2	32768	49152	19.7 (0.04)	中等
SKA-MID	接收	FPGA	-	-		-	Near
			英特尔 Loihi 2 卡波霍点	197	14775	1576 (10.67)	中等
	相关性	FPGA	-	-		-	Near
			英特尔 Loihi 2 卡波霍点	180	13500	1440 (10.67)	中等
ngVLA	接收	FPGA	-	-		-	Near
			英特尔 Loihi 2 卡波霍点	263	19725	2104 (10.67)	中等
	相关性	FPGA	-	-		-	Near
			英特尔 Loihi 2 卡波霍点	240	18000	1920 (10.67)	中等

部署场景本质上具有推测性，但足以促使我们进一步研究射电天文学中的神经形态技术。有关各望远镜的信息，请参阅第 4.1 节；有关各望远镜计算设施的信息，请参阅表 4 ；有关神经形态硬件选项的信息，请参阅第4.2 节。采用脉冲神经网络进行射频干扰检测的现有工作已显示出良好前景，涉及一阶和二阶漏积分发放（LiF）神经元 [25]，使这一特定问题能够采用范围广泛的硬件实现方案。

真实 LOFAR 衍生数据集上的结果。对于 ASKAP、SKA-Low、SKA-Mid 和 ng VLA 等高度依赖现场可编程门阵列处理的仪器，采用脉冲神经网络方法进行实时射频干扰检测，主要优势在于模型规模较小，同时仍能保持有竞争力的性能。采用一阶和二阶 LiF 神经元的 ANN2SNN [23]，时间反向传播 [25, 27, 28]，以及液态状态机 [26]训练方法取得了有竞争力的结果，展现出在这一特定领域的应用前景。

射频干扰检测无疑是脉冲神经网络和神经形态计算在射电天文学中最有前景的首个潜在应用场景，近年来已展现出良好前景。

当然，这些结果只是推测；我们的意图是表明，当代神经形态硬件已具备先例和所需的规模，足以支持这一小众但数据密集型的应用场景。我们认为，部署神经形态方法最直接的途径，是利用多种仪器现有 FPGA资源中的剩余处理能力。这主要有两个原因：资本

成本为零，而且现有硬件已经能够处理所需的数据速率。我们希望，初步研究能够推动在资本更新节点部署现有的神经形态硬件；对于大型仪器而言，这种节点每隔数年便会出现一次。更为大胆的应用则着眼于更长远的未来，通常位于处理链的后续阶段。

2.2 瞬变检测

暂现源是最不为人所了解、因而也最引人关注的可观测现象之一，因此对于大多数正在运行和建造中的仪器而言，它们都是优先级很高的科学应用场景。可以在存档观测数据中搜索暂现源 [35, 36]，不过，对于若干现代仪器而言，实时瞬变检测尤其受到关注。表 2 汇总了一个假设的神经形态系统在多种仪器上进行实时瞬变检测所需满足的延迟要求。

在这一特定应用场景中，重点在于延迟；长期以来，人们一直认为，采用随时间变化的脉冲神经网络或神经形态方法进行数据处理具有优势 [20]。此外，即将投入使用的仪器预计将达到超过以往所有观测的灵敏度，因此，能够检测此前未曾观测到的暂现源的自适应系统也具有优势；这也是神经形态技术大有用武之地的另一个领域。尽管迄今尚未对此进行具体探索，但人们普遍预期，脉冲神经网络或神经形态技术可能会对这一高优先级科学应用场景产生重大影响。

表2 瞬变检测的神经形态部署场景 测。

仪器	通道	延迟	拟议硬件	电流功率（W）	拟议功率（W）	功率比例（%）
ASKAP	256	1.728毫秒	Loihi 2 Alia Point	4500	128	2.84
SKA-Low	500	100μs	Loihi 2 Hala Point	60000	1152	1.92

ASKAP 中的“CRACO”系统及其在 SKA-Low 中的后续系统尤其值得关注。ASKAP 流水线使用 20 个 Xilinx Alveo U280 FPGA，需要以 1.728ms 的延迟处理每秒 23 太像素的数据，实际上是在处理大小为 256×256 的图像。大型异步神经形态系统或许能够处理此类任务，因此我们考虑采用英特尔 Loihi 2 Alia Point 系统，其功耗为 128W，可能能够处理所需的 100Gbps 输入链路，而最低 200ns 的端到端响应时间或许足以支持实时运行。

SKA-Low 使用由 400 个 Xilinx Alveo U55C 组成的组合相关器、波束形成器和瞬变检测设备，总能耗为 60kW [38]。功耗为 1.1kW 的英特尔 Loihi 2 Hala Point 可能能够满足严格的延迟和数据量要求。当前的相关器-波束形成器可生成 500 个带宽为 118MHz 的脉冲星搜索波束，以及 16 个带宽最高达 300MHz 的脉冲星定时搜索波束 [38]。预期所需的延迟

用于瞬变检测的时间为 $100\mu s$ [39]，远高于 Loihi 2 系统所需的最低端到端响应时间 [40]。不过，在这两种情况下，在现有 FPGA 资源中实现脉冲神经网络逻辑都是明智的第一步。

2.3 成像

成像是一项数据密集型高性能计算工作负载。将可见度转换为图像的主要方法，本质上是对一段时间内的可见度进行平均，然后迭代地减去图像中最亮的元素；这些元素在傅里叶空间中确定。这个过程会持续进行，直到已知（或检测到）的明亮前景源被移除，并达到系统的热极限 [1, 41]。卷积和反卷积的迭代是主要瓶颈。虽然神经形态系统并非基于机器学习，但大规模通用神经形态系统有朝一日或许能提供高性能的解决方案。不断增长的射电天文学需求会消耗大量计算资源，因此哪怕效率略有提升，也能带来巨大的运营效益。

表3 列出了计算资源的估算值，以及假设中经过适当扩展、可取代这些资源的神经形态资源估算值；若能研究出合适的技术，这些神经形态资源便可用于替代现有资源。我们特别指出 SpiNNaker 2 系统，因为它既包含神经形态加速功能，也配备了用于通用计算的传统 ARM 核心，因此更适用于通用计算任务。

表 3 射电天文成像的拟议神经形态部署。

仪器	通道	基线	拟议硬件	数量	当前值功率（W）	拟议功率（W）	比例（%）
MWA	6400	8128	SpiNNaker 2	214	152000	5136	3.38
ASKAP	16416	630		17	152000	408	0.27
LOFAR	124928	1326		35	7280	840	11.54
SKA-Low	65536	130816		3443	597760	82632	13.82

由于目前不存在用于成像的高性能计算资源，因此省略了 SKA-Mid 和 ngVLA。对于 SKA-Low，我们以 Pawsey Supercomputing Centre 的整个 Setonix 系统作为参考。对于 MWA 和 ASKAP，我们以单独使用 GPU 分区作为参考。

我们计算了同时处理所有通道和所有基线所需的计算板数量，这一估算较为保守，因为通常会为缓冲预留一定的容差。MWA 和 ASKAP 的改进最为显著，其最低可行的神经形态资源所需能量分别仅为当前资源的 3.4% 和 0.3%。LOFAR 和 SKA-Low 的功耗均降低了一个数量级。

尽管这项建模仍属推测性且处于初步阶段，但它展现了神经形态计算为射电天文学带来显著实际效益的潜力。

3 讨论

射电天文学可能成为神经形态计算的“杀手级应用”。从传感器内计算的角度来看，射电望远镜是已建成的规模最大、数据密集度最高的传感器之一。射电天文台将由众多天线组成的庞大复杂网络与强大的计算资源连接起来。SKA 和 ngVLA 等新一代望远镜规模庞大，需要对原始数据和相关频谱数据进行实时处理。这种需求，加上实验性计算方法的发展历程，为探索非冯·诺依曼方法，尤其是神经形态方法在多个数据处理环节中的应用，提供了充分的动力。我们考察了神经形态计算在现有和新一代射电望远镜中跨不同模态的若干潜在应用和部署位置，涵盖灵活且近期可行的基于 FPGA 的方法、中期的商用 ASIC 集成，以及长期的大规模神经形态系统。

基于近期使用脉冲神经网络进行射频干扰检测的研究，我们认为，将实时射频干扰检测集成到相关处理前数据中，是最务实且近期最可行的方法。具体而言，将基于脉冲神经网络的方法集成到 ASKAP、SKA-Low 和 SKA-Mid 望远镜现有的 FPGA资源中，能够在近期带来最切实可行的影响。在这一方法下，数据驱动的射频干扰检测方法可以集成到信号处理链中的多个节点，而无需额外的资本投入。现有的学习方法已显示出良好前景；然而，受生物学启发的去噪方法、进化算法方法以及经过 BPTT 训练的异常检测方法，可能产生更稳健的基于脉冲神经网络的射频干扰检测方法。此外，如果将神经形态 ASIC 纳入射频干扰检测，这类方法所消耗的能量至少可比当前使用的资源低一个数量级，最高可低三个数量级。

瞬变源搜索一直被认为是神经形态计算的一个潜在应用场景，并且很可能是除射频干扰检测之外最具科学影响力的尝试任务。尽管计算要求，尤其是在延迟方面的要求，更为严格，但有理由相信，当代神经形态硬件能够切实可行地执行端到端瞬变检测，不过这仍有待未来开展工作。

成像相比更适合采用脉冲神经网络的射频干扰检测和瞬变检测任务，需要更多通用资源。然而，假设神经形态硬件能够执行成像操作，我们有理由相信，功耗同样有可能降低 1 至 3 个数量级。不过，在射电天文处理流水线的这一阶段集成神经形态计算，需要进一步研究通用神经形态计算处理器，以及基于机器学习和脉冲神经网络的技术。

图 1 总结了这些潜在收益，展示了多种仪器和多项计算任务的预计相对功耗与绝对功耗，并按近期至远期的可行性排列。

尽管仍处于发展成熟阶段，脉冲神经网络与神经形态计算社区仍在不断壮大；要推动各方支持采用神经形态计算应对大规模数据处理挑战，就必须持续致力于打造稳定的工具，并提供有说服力的基准测试。能够利用 FPGA资源评估基于脉冲神经网络的方法，且这些资源可顺利映射为高效 ASIC 实现的工具，在

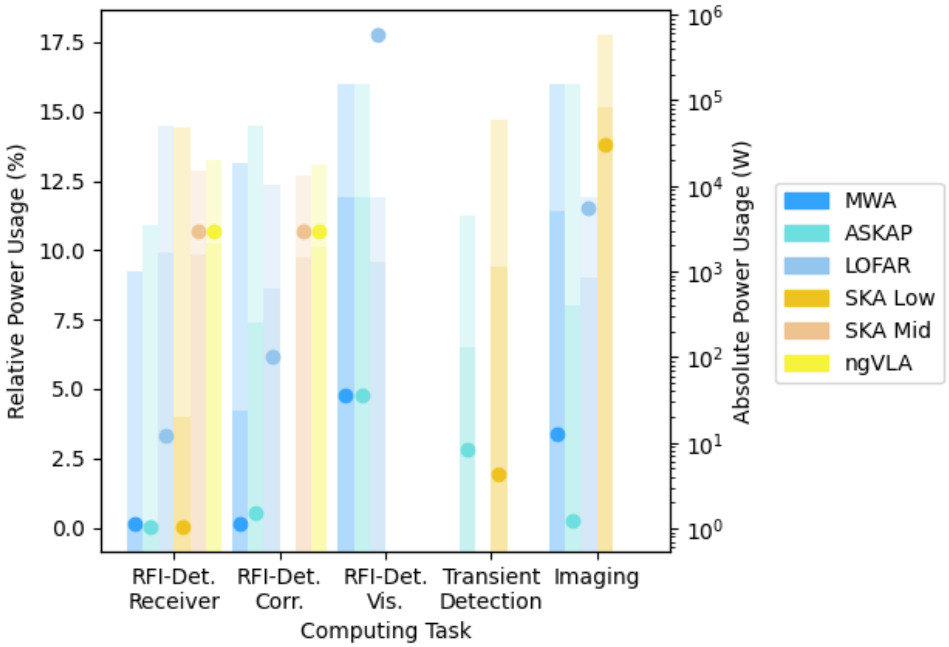

图 1 若干射电天文处理任务及射电望远镜的预测相对功耗（圆圈，左轴）和绝对功耗（柱形，右轴，对数刻度）。对于 MWA、ASKAP 和 SKA-Mid 仪器，在接收阶段仅使用神经形态计算任务进行射频干扰检测，能耗最多可降低三个数量级。相关器级射频干扰检测带来的相对改善幅度几乎相同。相关器后射频干扰检测可带来约一个数量级的改善，瞬变检测和成像也同样如此。

这种情况下尤其有用，因为 FPGA 实现是射电天文学界最有可能率先采用的途径。除了初期 FPGA 实现（其主要优势在于能够支持数据驱动处理任务）之外，长期引入神经形态硬件将彻底改变望远镜运行。此外，通过展示神经形态计算处理大规模光谱数据的能力，我们希望能在其他相关领域发现类似的应用场景，例如实时医学成像、射频信号情报、海洋学和地震分析。

最后，望远镜的能力历来受其配套计算设施的限制，而神经形态计算则带来了更遥远却令人振奋的可能性：支持规模至少比目前设想大一个数量级的望远镜。神经形态天文学的探索已经迈出第一步；神经形态技术正蓄势前行！

4 方法

4.1 处理模型

我们概述了每台待研究望远镜的处理模型，以及为不同计算任务选择各种神经形态芯片组的理由。对于每台望远镜，我们都会介绍其基本情况、科学目标，以及从天线到科学档案库的处理链。所举示例大致按建造时间顺序排列，其次按数据强度排列。为求简洁，我们将信号链简化为几个关键步骤：接收，即对原始电压信号进行数字化；相关性处理，即合并所有天线的信号；波束形成，即选择性地合并天线信号以增强信号强度；瞬变检测，即检测快速变化的现象，通常专门用于脉冲星；以及成像，即对相关的“可见度”数据进行平均并反复优化，将其转化为用于存档或后续科学研究的“数据立方体”。

4.1.1 MWA

默奇森宽视场阵列（MWA）是一台低频射电干涉仪望远镜，位于西澳大利亚的Murchison Radio-astronomy Observatory，由256块相控阵“瓦片”组成，每块瓦片包含一个由双极化偶极子构成的4x4网格，可接收70-300MHz范围内的信号 [42]。MWA最初主要作为平方公里阵列（SKA）的先导项目建造，旨在通过21厘米中性氢信号探测再电离时代 [43], 、监测太阳和电离层活动[44],、探测射电瞬变 [2], 并巡测河外天空 [45]。

图 2 展示了 MWA 数据处理流水线的高层示意图。处理工作分布在三个位置：在现场，将原始天线信号相关处理为可见度，然后通过光纤传输 $\approx$ 650千米（403 英里）至位于珀斯的科廷大学，在那里数据会先经过缓冲，再由 Pawsey Supercomputing Centre 的 Setonix 系统进行相关后处理、成像和脉冲星搜索。MWA 数字接收机主要由现场可编程门阵列驱动；16 台数字接收机处理来自 128 个天线单元的信号（两种观测模式各使用 256 个天线单元中的一半），每台数字接收机由八个 Xilinx Virtex-4 SX35 现场可编程门阵列组成，每个功耗为 5W；另配有一个功耗为 3W 的 Xilinx Virtex-5 SX50T [46]。每台接收机接收两路 8 位宽的数据流，采样率为每秒 655.36 兆次[46, 47]。该仪器由总计 256 个现场可编程门阵列元件驱动，合计功耗约为 1024W。现场的相关器 MWAX 由图形处理器驱动 [48]，支持实时运行，可处理所有活跃的 128 个站点天线单元。MWA 相关器由 24 台图形处理器服务器驱动，每台配备两颗 AMD Epyc 7F72 中央处理器和一块 Nvidia A40 图形处理器，平均每台接收 1.32GB/s 的数据 [48]。Nvidia A40 的功耗为 300W [49] ，AMD 中央处理器的额定热设计功耗为 240W [50],，总功耗因此达到 18.72kW。相关处理的一项关键挑战在于，根据定义，必须将每根天线的信号与所有其他信号进行相关处理 [1]。每台服务器接收来自单个粗通道的数据。每个通道由 5 位复数组成，并分割为数据包，每个数据包代表 8 秒的观测。相关器引擎的输入接收 6,400 个信号通道；相关后数据速率则包含 6,400 个细通道（每个为 200MHz），可进行平均

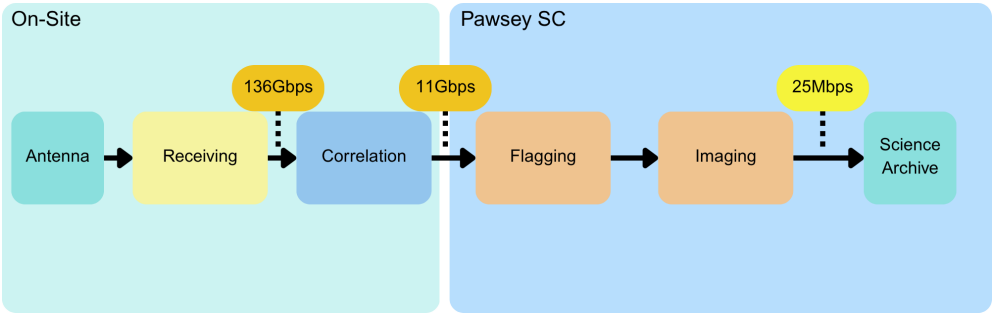

图2 MWA望远镜的高层级数据流图。青色方块表示数据源或数据接收端，黄色方块表示现场可编程门阵列处理，蓝色方块表示图形处理器处理，橙色方块表示中央处理器处理。

根据观测需求，可将通道数从 6,400 平均降至 1 个通道。相关后的信号传输至珀斯，由 Setonix 处理。该系统由 1,592 颗 AMD EPYC 7763 CPU（热设计功耗为 280W）和 304 块 AMD Instinct MI250X GPU（每块热设计功耗为 500W）组成 [51]。这台机器由全国多个科学项目共享；不过，天文学处理占用了可用计算资源的很大比例。MWA 的可见度数据总速率需乘以可能的基线对数量，也就是天线单元对的数量。由此需要并行处理 8,128 条基线，但无需实时处理。

目前，后相关标记和成像预处理由同一条 Birli处理流水线负责 [52] ，其中 AOFlagger 执行标记操作 [53] 会消耗≈10%观测的处理时间。瞬变检测主要基于图形处理器，而成像步骤则混合使用中央处理器和图形处理器资源。

考虑在 MWA 中使用神经形态资源进行射频干扰检测时，我们设想为每个接收机单元嵌入 16 个类似 Xylo 2 的处理器（每个处理器处理 8 个输入通道），需要 2048 个芯片，总能耗为 1.23W，约为现有资源的 0.1%。相关器处的射频干扰检测需要处理全部 6,400 个输入通道。鉴于现有使用脉冲神经网络进行射频干扰检测的技术需要 <5000 个神经元，因此为每个现有图形处理器资源配备一块相匹配的 Intel Loihi 2 Oheo Gulch 芯片应该足够，总能耗为 24W，约为现有资源的 0.1%。对于后相关器射频干扰检测，我们计划用 SpiNNaker2板卡替换 Setonix超级计算机的图形处理器分区，该分区运行着许多 MWA 成像进程。即使采用这一过于保守的估算，也需要 7.3kW，相当于运行现有机器所需资源的 5%。MWA 是一个很好的首个案例，它融合了信号处理和天线附近数据传输方面的一些主要挑战，同时与我们稍后介绍的一些数据量更大的仪器相比，其下游处理流水线（稍微）宽松一些。

4.1.2 ASKAP

澳大利亚平方公里阵列探路者（ASKAP）是一台碟式射电干涉仪，也位于澳大利亚联邦科学与工业研究组织默奇森射电天文台

西澳大利亚。ASKAP由36面直径12米的抛物面天线组成，每面天线都配备相控阵馈源（PAF），每个馈源包含188个接收单元。该仪器的工作频率范围为700–1800 MHz，2009年开始建设，2012年完工，随后开展试运行巡天并进行数次升级，直至全面投入运行 2022 [30]。ASKAP是平方公里阵列（SKA）的技术验证设备，因此专注于快速开展宽视场巡天 [54], 河外中性氢和连续谱观测 [55], ，并对射电瞬变和脉冲星进行表征 [56]。

图 3 展示了 ASKAP 数据处理工作流的图示。现场可编程门阵列负责接收机处理。每个天线上有 12 个“Dragonfly”模块，负责即时模数转换，每个模块配有 4 个赛灵思 Kintex 7 325T FPGA，分辨率为 12 位 [57]。

这套硬件处理频率为 1280 和 1536MHz 的采样时钟，产生 640 或 768 个宽度为 1MHz 的信号通道，以 16 位复数值流表示。每个天线总共输出 192 路光信号，其中包括 188 路光信号、2 路校准信号，以及 2 路预留信号，可用于射频干扰缓解等用途 [30]。我们会在此处加入用于射频干扰检测的神经形态资源：每个天线需要 48 个 Xylo-2 芯片，总计 1728 个，功耗为 1W。由于没有实测功耗数据，我们估计这些 FPGA 的功耗为每个 2W；36 个天线合计对应 1728 个设备，总功耗为 3.64kW。每个天线的数字接收机输出由七个“Redback”模块进行相关和波束形成，每个模块由 6 个赛灵思 Kintex 7 XC7K480T FPGA 组成；每个 FPGA 从所有 192 个数字端口接收来自各天线的 48MHz 带宽 [30]。每个 FPGA 始终输出 423 个频率通道，采样频率为 1.185 MHz。每个“Redback”模块的最大功耗为 373W，标称功耗为 200W [58]。ASKAP 有 252 个“Redback”模块（36 个天线各配 7 个），共计 1,512 个 FPGA。为估算功耗，我们将 200W 分摊到 6 个 FPGA 上，即每个 33W，总功耗估计为 49.90kW。若要在相关器阶段配备足够的神经形态资源，就需要处理输入到每个“Redback”模块的 423 个频率通道。考虑到现有基于脉冲神经网络的射频干扰检测方法的规模，我们仍可为 252 个“Redback”模块各配备一块 Loihi 2 Oheo Gulch 芯片，功耗共计 252W，占现有功耗预算的 0.5%。

相关器输出两路信号流：长期累积的可见度会下传至 Pawsey Supercomputing Centre 用于成像；波束形成信号则由协同实时 ASKAP 快速瞬变相干（CRACO）系统用于瞬变源（脉冲星）检测 [37]。“CRACO”由 20 个高性能 Xilinx Alveo U280 现场可编程门阵列组成，用于执行射频干扰检测和瞬变搜索。“CRACO”旨在生成 256×256 图像，目标时间分辨率为 1.7 毫秒，每秒产生 23 太像素的数据 [37]。我们估算每个芯片的功耗为 225 瓦 [59] ，由此估算系统功耗为 4.5 千瓦。在瞬变检测阶段进行神经形态处理时，FPGA 处理至关重要，因此若不替换整个瞬变搜索流程，几乎不可能集成其他类别的处理器。

下游可见度处理从射频干扰标记开始，随后进行成像，最多包含 16,416 个频率通道和 630 条基线 [30] ，也在

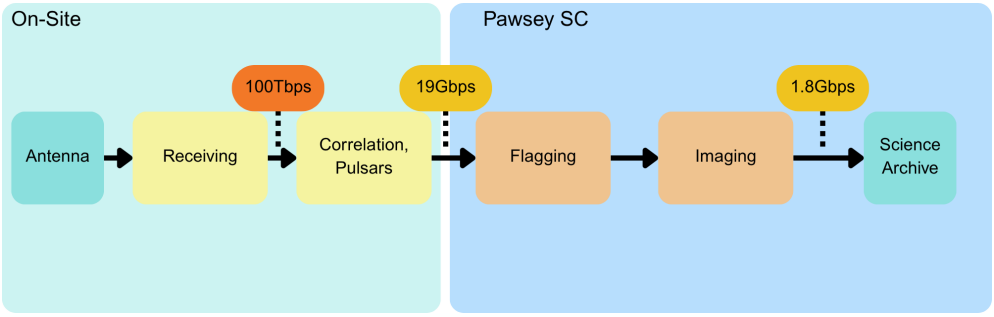

图3 ASKAP望远镜的高层级数据流图。图 2 中的图示约定同样适用。

Pawsey中心使用专用处理套件 ASKAPsoft [60], 进行，并与 MWA 及其他科学项目共享。处理以伪实时方式进行，每秒处理 2.4GB 的输入数据，并在每次观测结束后进行处理[61]。一次 8 小时的观测将产生 ≈70TB 数据 [62] ，随后将生成的数据产品归档至长期存储。对于神经形态资源，MWA 和 ASKAP 共用相同的超级计算设施，因此适用相同的相关器后估算。

4.1.3 LOFAR

低频阵列（LOFAR）是一台总部位于荷兰的大型射电干涉仪望远镜，在欧洲各地还设有其他台站，由约 100,000 根偶极天线组成，这些天线分布在 52 个台站中 [31]。该仪器分为荷兰的 24 个核心台站、分布在荷兰各地的 14 个远程台站，以及分布在欧洲各地的 14 个国际台站。LOFAR 被构想为完整 SKA 的先导仪器，同时也在自身领域作出了重要贡献。该项目于 2006 年开始建设，并于 2012 年全面投入运行。LOFAR 2.0 的升级工作于 2021年启动，并将持续至 2025年。LOFAR 主要用于探索早期宇宙、开展大规模巡天以及探测瞬变事件。

图4 展示了 LOFAR望远镜的数据处理工作流程。数据处理包括在每个台站对信号进行数字化，然后传输至格罗宁根的中央相关器进行实时相关，之后进一步成像，或进行波束成形以搜索脉冲星和瞬变源。拍字节级档案由阿姆斯特丹管理，并通过LOFAR长期档案向全球分发。

每个台站的计算能力由 8 台 Uniboard^2 设备 [63, 64] 提供，每台设备搭载 4 个 Intel Arria A10GX115 现场可编程门阵列，共计 1664 台设备。据我们估算，这些设备的功耗为≈30W，因此整个仪器的功耗为 49.9kW。每个台站的处理系统负责该台站的波束成形和相关性处理，之后通过 10Gbps 以太网将 3-9Gbps 数据流 [64] 传输至格罗宁根的中央处理系统。因此，由于每个台站的数据速率比之前讨论的仪器更高

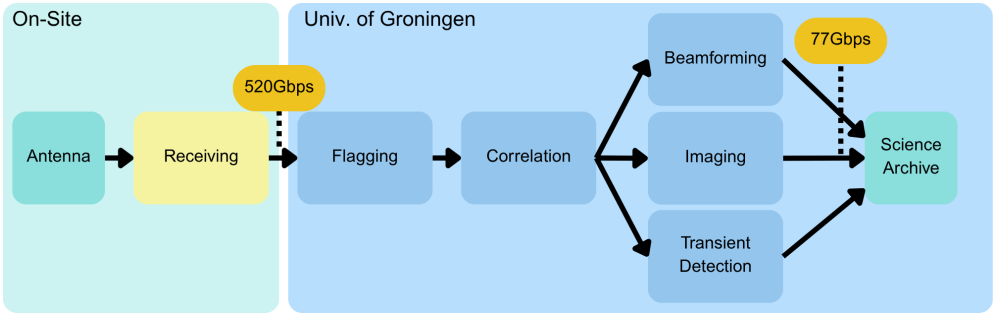

图4 LOFAR望远镜的高层数据流图。图 2 中的图示约定适用。

我们建议每个台站的 Uniboard 配备一枚 Loihi 2 Oheo Gulch 芯片即可满足需求。总共需要 1664 枚芯片，功耗为 1664W，仅为现有功耗需求的 3%。

在格罗宁根，由 GPU 驱动的 COBOLT相关器 [65], 最近完成了升级 [64] ，负责最终相关处理及下游处理，包括由定制集群执行的相关后标记和成像。COBOLT 由 13 个计算节点组成，每个节点包含两个 Nvidia Tesla V100 GPU，每个 GPU 的热设计功耗（TDP）为 250W [66] ，以及两个 Intel Xeon Gold SP6140 CPU，每个 CPU 的 TDP 为 140W[67]。该集群的总功耗约为 10kW。由于现有工作已经尝试在 LOFAR数据集上进行射频干扰检测 [25]，因此人们对将基于脉冲神经网络的射频干扰检测应用于 LOFAR 特别感兴趣。不过，该望远镜最近才完成以 GPU 为核心的升级，因此这被视为一项长期规划。尽管如此，在相关器处，更高带宽且更灵活的平台即可满足需求，因此我们考虑为每个现有 GPU 配置一块 SpiNNaker2板卡，共 26 块，总功耗为 624W，即现有功耗的 6%。科学数据处理器是一个独立集群，由 50 个配备 Intel Xeon E5-2680v3（TDP 为 120W [68] ）的 CPU 节点，以及 4 个 GPU 节点组成；每个 GPU 节点配备一颗 Intel Xeon E5-2630v3（TDP 为 85W [69]）和一块 Nvidia K20X（TDP 为 235W [70]），合计 TDP 为 7.3kW。该机器需要处理最多 124,928 个频率通道和 1,326 条基线 [31]。射频干扰标记和成像由 AOFlagger [53] 、WSClean [41], 等定制软件包完成，净数据输出为 77Gbps，并会被归档以供长期存储和下游科学使用。在相关器后阶段，通用性更强的神经形态机器适合成像阶段按批处理的计算方式。该系统有 2048 个输入通道，远低于多种神经形态芯片组的处理能力；不过，我们考虑采用 54 块 SpiNNaker2板卡，其总功耗为 1.3kW，即原功耗预算的 18%。

LOFAR 是 SKA-Low 仪器的近似对应体，不过需要处理的数据速率低一个数量级。人们有兴趣将神经形态计算方法整合到该仪器的处理流水线中 [71], ，尽管这项工作仍处于初步阶段。

4.1.4 SKA-Low

平方公里阵列（SKA）是一项全球大型科学项目，旨在建造世界上规模最大、灵敏度最高的射电望远镜。该项目分为位于澳大利亚的 SKA-Low 和位于南非的 SKA-Mid，致力于探索宇宙早期历史、星系演化、宇宙磁性和基础物理学。目前项目正在建设中，目标是在 2030 年代初全面运行 [7]。SKA 是 35 个成员国历经数十年规划、设计和建设协作的成果，如今已成为一个声名卓著的项目 [7]

低频仪器也位于澳大利亚西部的澳大利亚联邦科学与工业研究组织默奇森射电天文台。全部建成后，SKA-Low将由131,072个双极化偶极天线组成，这些天线分布在512个台站中，每个台站有256个天线，工作频段为50至350 MHz频段 [72]。工程于2021年正式开工，预计2025年首次亮相，并于2030 [7]左右完工。SKA-Low专注于探索宇宙最初十亿年以及瞬变事件。与LOFAR等前代仪器相比，SKA-Low的设计分辨率提高25%、灵敏度提升8倍、巡天速度提高135倍 [72]。

SKA-Low的数据处理量相应增加了一个数量级。图5 展示了SKA-Low仪器的数据流。原始信号在台站进行数字化处理，并以每秒7.2太比特（Tb/s）的速率汇总传输至现场的中央信号处理器（CSP），进行清理和平均处理。每个台站由八个“瓦片处理器模块”（TPM）负责处理 [73], ，每个模块由2个Xilinx XCKU040 FPGA组成 [74], ，据我们估计，每个模块的功耗为 ≈6W，512个台站总计需要49 kW。每个台站产生512个波束，随后由下游进行相关处理。在每个台站现有的FPGA资源旁部署神经形态芯片组是很自然的选择，每个芯片组可产生512个通道。我们建议每个台站使用64个SynSense Xylo 2芯片，总计32,768个芯片，合计功耗为19.7 W，占总功耗的0.1%。SKA-Low的相关器还负责脉冲星搜索，由400个配备高带宽存储器的Xilinx Alveo U55C FPGA组成，称为“原子级商用现货产品”（atomic COTS） [38]。该集群处理6 Tbps的数据，产生9 Tbps的输出，总功耗为60 kW。该设备还负责射频干扰标记，这一功能通过FPGA逻辑实现，使用了<50%的可用FPGA逻辑；所选FPGA还预留了余量，以支持进一步开发 [38]。Atomic COTS可产生16个脉冲星定时波束、500个脉冲星搜索波束，以及2.7 Tbps的可见度数据，并将其传输至珀斯的科学数据处理器（SDP）。该处理器通常包含55,296个通道，每个通道带宽为5.4 k Hz，积分时间为0.85秒。考虑到相关处理由大量FPGA资源承担，在不替换整个流程的情况下引入神经形态ASIC并不可行，因此本文不予讨论。

随后，数据以最高 5.76 Tb/s 的速率传输至珀斯，由专用的 HPC 系统处理相关工作流，以生成可用于科学研究的数据产品。SKA-Low 可生成多达 65,536 个频率通道，以及对应 130,816 条基线的可见度 [38]。SDP 尚不存在，因此，为开展建设前调试，已使用包括 Pawsey 超级计算机中心在内的各种高性能计算资源。SDP 的要求极为严苛 [75] ，而成像的输入/输出处理长期以来一直被认为是所有数据处理挑战中最严峻的挑战，

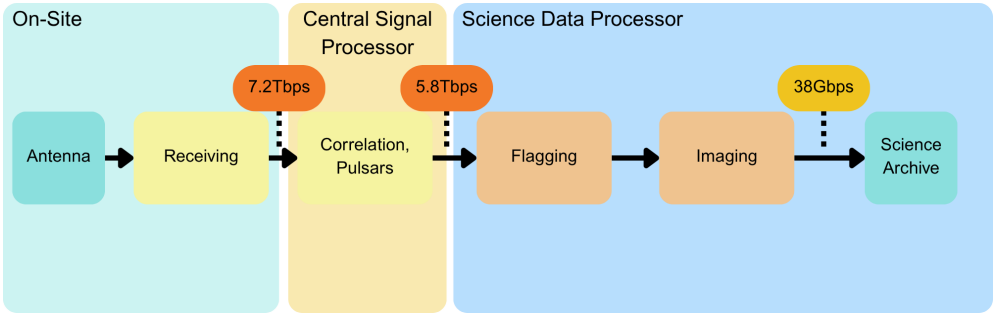

图 5 SKA低频望远镜的高级数据流图。图示约定参见图 2。

尽管创新技术可能会缩小这一差距 [76]。最终产品会导出至国际 SKA区域中心网络，供天文学家远程访问。

4.1.5 SKA中频

SKA中频望远镜（SKA-Mid）由197个碟形天线组成，位于南非北开普省的卡鲁沙漠 [77]。这些天线的工作频率范围为350MHz至15.4GHz。建设于2021年开始，预计于2025年首次接收到光，并于2030年完工。SKA-Mid旨在研究星系演化、中性氢和瞬变现象；这些研究已由MeerKAT仪器 [78], 进行原型验证，该仪器将并入SKA-Mid仪器[72]。这两台SKA仪器将协同开展观测，也可单独开展观测，并由位于英国曼彻斯特的总部共同运营。

高层次的数据处理与 SKA-Low 类似，不过数据整形方式有所不同。图 6展示了 SKA-Mid 仪器的数据流。现场可编程门阵列资源会在每个天线处对信号进行数字化，然后将其传输至现场的中央信号处理器（CSP），用于相关性计算、波束成形和脉冲星搜索；随后，数据会在开普敦的 SKA区域中心借助高性能计算资源进行处理，之后导出可用于科学研究的数据产品，并发送至更广泛的 SRC网络。数字化在天线底座上进行 [79, 80]，初始处理由 Altera Stratix 10 DX现场可编程门阵列负责，我们估计其功耗为 75 W；随后，集中式 TALON DX 相关器负责相关性计算 [81] ，同样由 Altera Stratix 10 DX现场可编程门阵列供电，我们估计其功耗为 75 W。SKA-Mid 全面部署需要 180 块此类计算板。为在接收机级进行射频干扰检测而引入神经形态硬件时，我们考虑在每个天线上同时部署一台 Intel Loihi 2 Kapoho Point，每台功耗为 8 W；在 197 个天线上总功耗为 1576 W，占现有预算的 11%。在相关器阶段，我们同样考虑使用 Intel Loihi 2 Kapoho Point，功耗为 1440 W，占所需 180 台设备功耗的 11%。与 SKA-Low 一样，SKA-Mid 最多可生成 65,536 个用于成像的频率通道和 19,306 条基线 [77]。两台设备的总功耗约为 28.2 kW。与 SKA-Low 一样，下游图像处理资源尚未配置，因此我们不提供参考硬件或神经形态硬件建议。

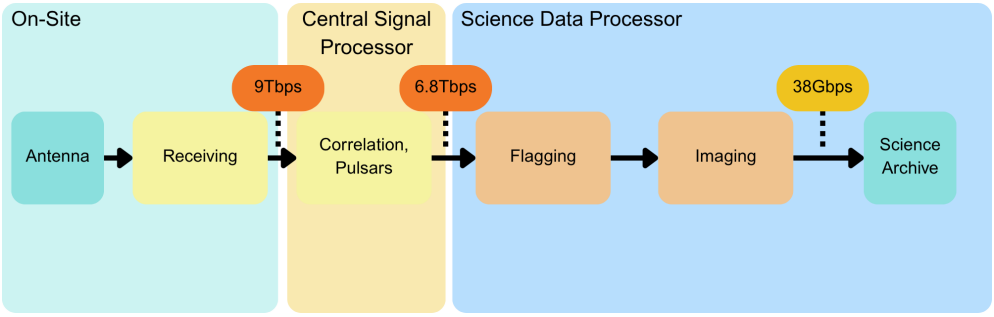

图 6 SKA-Mid望远镜的高级数据流图。图 2中的图示约定适用。

虽然 SKA-Low 和 SKA-Mid 共享许多设计思路，但天线类型和数据处理结构的不同，对可用计算资源造成了不同的压力。

4.1.6 ngVLA

下一代甚大天线阵（ngVLA）是一座规划中的射电干涉仪望远镜，主要位于美国新墨西哥州，其他台站分布于北美洲，由263面固定式18米天线和19面可移动式6米天线组成，工作频率范围为1.2–116 GHz [82]。该项目由美国国家射电天文台（NRAO）发起，设计和原型开发于2015年开始，2024年获准建设，主要场址工程于2025年启动；目标是于2031年开始科学观测，并于2037年全面建成。ngVLA旨在研究行星与恒星形成、天体化学、星系演化以及黑洞等相对论现象，其灵敏度和分辨率将达到现有甚大阵列（VLA）和阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵列的10倍 [82]。

图 7 展示了 ngVLA 仪器拟议的数据流。数据处理包括对每根天线的信号进行数字化，通常以 720Gbps 的速率传输至新墨西哥州索科罗的中央相关器，以进行实时校准和成像 [83],处理管线每年生成数拍字节的可用于科学研究的数据集，并通过美国国家射电天文台的数据中心进行归档和分发，以供全球访问。虽然建设工作尚未开始，但我们仍可对一些初步计算需求进行推测。Pedestal 处理似乎将采用与为 SKA-Mid 开发的 TALON 相关器类似的设计 [81] 因此，我们假设使用 Altera Stratix 10 DX FPGA 进行接收、相关处理和脉冲星搜索，其比例与 SKA-Mid 类似。因此，天线需要 263 个 FPGA，相关器另需 240 个，功耗分别为 19.7kW 和 18k W。若采用大致等效的神经形态资源，则每个天线在接收机和相关器阶段各使用一枚英特尔 Loihi 2 Kapoho Point 芯片；对于 263 个天线和 240 块相关器板卡，这将分别需要 2.1kW 和 1.9kW，也就是两种情况下均为原始功耗的 11%。ngVLA 将生成最多包含 300,000 个频率通道的可见度，这是所有拟议或现有仪器中最多的，并具有 34,453 条基线 [82]。同样，成像资源尚未纳入考虑，因此我们不再进一步评论。ngVLA 的设计仍在进行中，因此代表了当前关于基于天线的射电望远镜设计的最新思路，其显著特点是几乎普遍使用 FPGA资源，这是由射电天文学对灵活性和延迟要求所决定的。

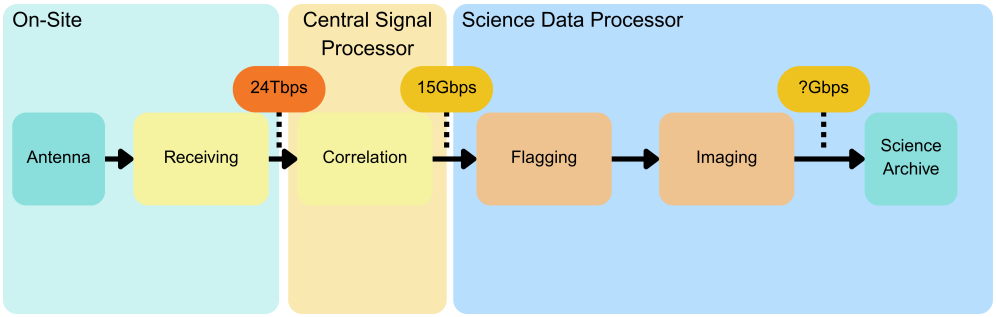

图 7 ngVLA望远镜的高层数据流图。图示惯例参见图 2 。

4.1.7 现有计算机硬件

我们首先讨论各望远镜设施中的现有资源，这些资源汇总于表 4中。我们已尽力，尤其是针对 FPGA资源，在可能的情况下提供具有代表性的功耗估算和总体资源特征描述。

表4 传统硬件参数。

设备	Type	功率 (W)	仪器	处理阶段	数量	总功率 (W)
赛灵思 Virtex 4 SX35	FPGA	5	MWA	接收	128	640
赛灵思 Virtex 5 SX50T	FPGA	3	MWA	接收	128	384
Nvidia A40	GPU	300	MWA	相关性	24	7200
AMD Epyc 7F72	CPU	240	MWA	相关性	48	11520
AMD EPYC 7763	CPU	280	MWA, ASKAP	成像	1592	445760
AMD Instinct MI250X	GPU	500	MWA, ASKAP	成像, 暂现源	304	152000
赛灵思 Kintex 7 325T	FPGA	2*	ASKAP	接收	1728	3456
赛灵思 Kintex 7 XC7K480T	FPGA	33	ASKAP	相关性	1512	49896
Xilinx Alveo U280	FPGA	225	ASKAP	暂现源	20	4500
Intel Arria A10GX115	FPGA	30	LOFAR	接收	1664	49920
Intel Xeon Gold SP6140	CPU	140	LOFAR	相关性	26	3640
Nvidia Tesla V100	GPU	250	LOFAR	相关性	26	6500
Intel Xeon E5-2680v3	CPU	120	LOFAR	成像	50	6000
Nvidia K20X	GPU	235	LOFAR	成像	4	940
Intel Xeon E5-2630v3	CPU	85	LOFAR	成像	4	340
Xilinx XCKU040	FPGA	6*	SKA-Low	接收	8192	49152
Xilinx Alveo U55C	FPGA	150	SKA-Low	相关性，暂现源	400	60000
Altera Stratix 10 DX	FPGA	75*	SKA-Mid	接收	197	14775
Altera Stratix 10 DX	FPGA	75*	SKA-Mid	相关性，暂现源	180	13500
Altera Stratix 10 DX	FPGA	75*	ngVLA	接收	263	19725
Altera Stratix 10 DX	FPGA	75*	ngVLA	相关性，暂现源	240	18000

总计算资源汇总自多个来源，涵盖多种望远镜。尽可能提供现场可编程门阵列资源的输入输出带宽和功率。Pawsey Supercomputing Centre 的 Setonix超级计算机总资源由多个科学项目共享。SKA-Low/Mid 的成像资源尚未提供，因为目前还未确定。*功耗为估算值。

4.2 神经形态硬件规格

我们现在讨论正在考量的神经形态芯片组。我们选择重点关注几个特定选项：SynSense Xylo 2、英特尔 Loihi 2 和 SpiNNaker 2；选择依据是能否找到具体规格以及硬件能否切实交付。我们的务实

选择侧重于开发生态系统相对成熟的芯片。表 5 列出了用于模拟射电天文学场景下假设部署的相关规格，以及粗略的功耗测量数据。部分数值为估算值，以替代具体且经验证的指标；但这些数值经过计算，可用于估计性能或规模，尤其是输入/输出和功耗规格。

4.2.1 SynSense Xylo 2

SynSense Xylo 2 平台主要面向边缘感知问题，其特点是功耗极低，但网络规模有限。每颗芯片支持 16 个输入、8 个输出和最多 1000 个内部神经元 [84]，在专门用于 512 个频率通道的射频干扰检测任务时，功耗约为 600 mW [28]。

4.2.2 SpiNNaker2

SpiNNaker 2 是第二代 SpiNNaker 芯片 [85]，将通用 ARM 核心与数值加速器相结合，每颗芯片包含 152 个核心，分为 38 个四核处理单元（PE）。每个 PE 根据连接密度，可模拟 250 至 1000 个神经元；一块板由 48 颗芯片[86] 组成，并通过二维环面网格 [87]连接。SpiNNaker2 系统的功耗采用保守估算，依据的是语言建模系统基准测试，结果为 390 mW [88]。输入/输出限制基于每个处理单元每个时间步最多接收 500 个输入脉冲，以及每块板 10 Gbps 的限制。

4.2.3 英特尔 Loihi 2

英特尔第二代神经形态系统 Loihi 2 可通过可编程动态特性实现脉冲神经网络 [89]。每颗芯片集成 128 个神经形态核心，在异步设计下支持 100 万个神经元。Loihi 2 的模块化互连允许各芯片组之间进行平面连接 [87]，可组合成多种形态，涵盖从单芯片板卡（Oheo Gulch）到 HPC 规模的 Hala-point 系统 [90]。每颗芯片都配备一条 10 Gbps 以太网链路，为输入信息量设定了上限。功耗根据各系统可用芯片数量，按最坏情况指标进行缩放估算 [91, 92]。

表 5 神经形态硬件参数

设备	神经元数量	时钟速度（MHz）	功耗（mW）
SynSense Xylo 2	1000	6.25 - 100	0.6
SpiNNaker 2 芯片	32,250 - 152,000	100 - 400	500
SpiNNaker 2 板卡	1,500,000 - 7,296,000	100 - 400	24000
Intel Loihi 2 Oheo Gulch	1,000,000	>5*	1000
Intel Loihi 2 Kapoho Point	8,000,000	>5*	8000
英特尔 Loihi 2 VPX	16,000,000	>5*	16000
英特尔 Loihi 2 Alia Point	128,000,000	>5*	128000
英特尔 Loihi 2 Hala Point	1,152,000,000	>5*	1152000

神经形态硬件参数。神经形态系统的神经元数量与基于脉冲神经网络的计算任务密切相关。时钟速度与瞬变检测等延迟敏感任务有关；功耗则用于生成仪器尺度的功耗估算。SynSense Xylo 的数值来自官方规格表 [84] 英特尔 Loihi 2 的功耗数值，是根据单颗 Oheo Gulch 芯片在最坏情况下的功耗，按比例放大估算得出的。SpiNNaker 2 的输入/输出数值也采用类似方法，根据一个高负载语言建模示例中的数值进行取整并按比例缩放估算 [88]。

*异步设计使时钟速度难以确定，但芯片级最小时间步长低于 200 ns，这为有效时钟速度提供了下限 [40]。

经费声明。本研究获得了西太平洋未来领袖奖学金、澳大利亚政府研究培训计划学费抵免以及澳大利亚政府研究培训计划津贴的支持。

利益冲突。作者声明不存在需要披露的利益冲突。

作者贡献。N.J.P构思了本文、制作了图表并撰写了论文正文。R.D和A.W协助准备分析。所有作者均审阅了论文。

补充信息

补充说明 1：基于脉冲神经网络的射频干扰检测在合成 HERA 数据集上的结果

补充表 1 各种算法、人工神经网络和基于脉冲神经网络的方法在合成 HERA 数据集上进行射频干扰检测的结果。

Work	模型	受试者工作特征曲线下面积	精确率-召回率曲线下面积	F1	参数数量
Algorithmic Baselines					
Mesarcik 等人 [93]	AOFlagger [53]	0.974	0.88	0.873	N/A
ANN Baselines					
Mesarcik 等人 [93]	R-Net [94]	0.975	0.846	0.846	32.9k
Mesarcik 等人 [93]	U-Net [95]	0.975	0.896	0.902	292k
Mesarcik 等人 [93]	自动编码器	0.981	0.927	0.91	365k
van Zyl 和 Grobler [96]	RFDL	0.994	0.965	0.944	234k
Du Toit 等人 [17]	ASPP	-	-	0.985	292k
Du Toit 等人 [17]	RNet-7 [94]	-	-	0.989	32.9k
Du Toit 等人 [17]	RFI-Net [97]	-	-	0.993	809k
SNN Baselines					
Pritchard 等人 [23]	ANN2SNN	0.944	0.92	0.953	339k
Pritchard 等人 [24]	BPTT	0.929	0.785	0.761	73.7
Pritchard 等人 [25]	BPTT + DN	0.996	0.914	0.907	213k
Pritchard 等人 [26]	液态状态机	0.842	0.781	0.743	8.2k
Pritchard 等人 [27]	全极化	0.997	0.96	0.955	51.7k
Pritchard 等人 [28]	BPTT-64	0.988	0.983	0.983	368k

基于脉冲神经网络的检测方法属于最小的模型之列，同时性能非常接近最先进水平的基于人工神经网络的模型。HERA 数据集可在网上免费获取 [93]。

补充说明 2：真实 LOFAR数据集上的基于脉冲神经网络的射频干扰检测结果

补充表 2 在真实 LOFAR数据集上，采用各种算法、人工神经网络和基于脉冲神经网络的方法进行射频干扰检测的结果。

Work	模型	受试者工作特征曲线下面积	精确率-召回率曲线下面积	F1	参数数量
Algorithmic Baselines					
Mesarcik 等人 [93]	AOFlagger [53]	0.788	0.572	0.57	N/A
ANN Baselines					
Du Toit 等人 [17]	R-Net-5 [94]			0.65	19.9k
Du Toit 等人 [17]	R-Net-7 [94]			0.649	32.9k
Du Toit 等人 [17]	RFI-Net [97]			0.632	809k
Mesarcik 等人 [93]	U-Net [95]	0.802	0.592	0.588	292k
Mesarcik 等人 [93]	自动编码器	0.862	0.622	0.511	365k
van Zyl 和 Grobler [96]	RFDL	0.989	0.748	0.675	234k
Du Toit 等人 [17]	ASPP			0.630	292k
Ouyang 等人 [98]	Swin-UNetR-6M	0.971	0.678	0.630	6.5M
Ouyang 等人 [98]	Swin-UNetR-100M	0.974	0.683	0.628	102.1M
Ouyang 等人 [98]	Swin-UNetR-400M	0.977	0.694	0.640	409.1M
SNN Baselines					
Pritchard 等人 [23]	ANN2SNN	0.609	0.321	0.408	692k
Pritchard 等人 [25]	BPTT +DN	0.346	0.604	0.474	16.4k

该 LOFAR数据集 notoriously 难以处理；在这里，尽管脉冲神经网络方法会降低检测准确率，但与复杂度高出几个数量级的人工神经网络模型相比，其表现仍然相当出色。LOFAR数据集也可在线获取 [93]。

参考文献

[1] Thompson, A.R., Moran,J.M., Swenson Jr., G.W.: 《射电天文学中的干涉测量与综合》，第3版，2017年版。天文学与天体物理学丛书。施普林格，Cham（2017年）。出版物标题：射电天文学中的干涉测量与综合

[2]Hurley-Walker, N., Zhang, X., Bahramian, A., McSweeney, S.J., O'Doherty, T.N., Hancock, P.J., Morgan, J.S., Anderson, G.E., Heald, G.H., Galvin, T.J.: 具有异常缓慢周期性辐射的射电暂现源。《自然》**601**（7894），526–530（2022年）https://doi.org/10.1038/s41586-021-04272-x 。出版商：Nature PublishingGroup。访问日期：2025年10月3日

[3] Vermij, E., Fiorin, L., Jongerius, R., Hagleitner, C., Bertels, K.: 百亿亿次级射电天文学的挑战：SKA能否乘上技术浪潮？《国际高性能计算应用期刊》**29**（1），37–50（2015年）https://doi.org/10.1177/1094342014549059。出版商：SAGE Publications Ltd STM。访问日期：2024年10月28日

[4] Fiorin, L., Vermij, E., Lunteren, J., Jongerius, R., Hagleitner, C.: 探索 SKA1-Low 中央信号处理器高能效加速器的设计空间。《国际并行编程杂志》**44**(5), 1003–1027（2016年）https://doi.org/10.1007/s10766-016-0420-y 。访问日期：2025年10月6日

[5] Raicu, I., Foster, I.T., Zhao, Y.: 面向网格和超级计算机的多任务计算。载于：2008年网格和超级计算机多任务计算研讨会，第 1–11 页（2008年）。https://doi.org/10.1109/MTAGS.2008.4777912 。ISSN：2151-1691。https://ieeexplore.ieee.org/document/4777912 访问日期：2025年10月6日

[6]Wu, C., Tobar, R., Vinsen, K., Wicenec, A., Pallot, D., Lao, B., Wang, R., An, T.,Boulton, M., Cooper, I., Dodson, R., Dolensky, M., Mei, Y., Wang, F.: DALiuGE: 用于驾驭天文数据洪流的图执行框架。《天文学与计算》**20**，1–15（2017年）https://doi.org/10.1016/j.ascom.2017.03.007。访问日期：2019年7月17日

[7] Schilizzi, R.T., Ekers, R.D., Dewdney, P.E., Crosby, P.: 《SKA 科学案例的演变》。载于：Schilizzi, R.T., Ekers, R.D., Dewdney, P.E., Crosby, P.（编）：《平方公里阵列：正在形成中的科学巨型项目，1990—2012》，第 199—278 页。施普林格，Cham（2024）。https://doi.org/10.1007/978-3-031-51374-9 5 。https://doi.org/10.1007/978-3-031-51374-9 5访问日期：2025年10月3日[8] 事件视界望远镜合作组，Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., Baczko, A.-K., Ball, D., Baloković, M., Barrett, J., Bintley, D., Blackburn, L., Boland, W., Bouman, K.L., Bower, G.C., Bremer, M., Brinkerink, C.D., Bris- senden, R., Britzen, S., Broderick, A.E., Broguiere, D., Bronzwaer, T., Byun, D.-Y., Carlstrom, J.E., Chael, A., Chan, C.-k., Chatterjee, S., Chatterjee, K., Chen, M.-T., Chen, Y., Cho, I., Christian, P., Conway, J.E., Cordes, J.M., Crew,

G.B., Cui, Y., Davelaar, J., Laurentis, M.D., Deane, R., Dempsey, J., Desvignes, G., Dexter, J., Doeleman, S.S., Eatough, R.P., Falcke, H., Fish, V.L., Fomalont, E., Fraga-Encinas, R., Freeman, W.T., Friberg, P., Fromm, C.M., G´omez, J.L., Galison, P., Gammie, C.F., Garc´ıa, R., Gentaz, O., Georgiev, B., Goddi, C., Gold, R., Gu, M., Gurwell, M., Hada, K., Hecht, M.H., Hesper, R., Ho, L.C., Ho, P., Honma, M., Huang, C.-W.L., Huang, L., Hughes, D.H., Ikeda, S., Inoue, M., Issaoun, S., James, D.J., J annuzi, B.T., Janssen, M., Jeter, B., Jiang, W., John- son, M.D., Jorstad, S., Jung, T., Karami, M., Karuppusamy, R., Kawashima, T., Keating, G.K., Kettenis, M., Kim, J.-Y., Kim, J., Kim, J., Kino, M., Koay, J.Y., Koch, P.M., Koyama, S., Kramer, M., Kramer, C., Krichbaum, T.P., Kuo, C.-Y., Lauer, T.R., Lee, S.-S., Li, Y.-R., Li, Z., Lindqvist, M., Liu, K., Liuzzo, E., Lo, W.-P., Lobanov, A.P., Loinard, L., Lonsdale, C., Lu, R.-S., MacDonald, N.R., Mao, J., Markoff, S., Marrone, D.P., Marscher, A.P., Mart´ı-Vidal, I., Mat- sushita, S., Matthews, L.D., Medeiros, L., Menten, K.M., Mizuno, Y., Mizuno, I., Moran, J.M., Moriyama, K., Moscibrodzka, M., M¨uller, C., Nagai, H., Nagar, N.M., Nakamura, M., Narayan, R., Narayanan, G., Natarajan, I., Neri, R., Ni, ¨C., Noutsos, A., Okino, H., Olivares, H., Ortiz-Le´on, G.N., Oyama, T., Ozel, F., Palumbo, D.C.M., Patel, N., Pen, U.-L., Pesce, D.W., Pi´etu, V., Plambeck, R., PopStefanija, A., Porth, O., Prather, B., Preciado-L´opez, J.A., Psaltis, D., Pu, H.-Y., Ramakrishnan, V., Rao, R., Rawlings, M.G., Raymond, A.W., Rezzolla, L., Ripperda, B., Roelofs, F., Rogers, A., Ros, E., Rose, M., Roshanineshat, A., Rottmann, H., Roy, A.L., Ruszczyk, C., Ryan, B.R., Rygl, K.L.J., S´anchez, S., S´anchez-Arguelles, D., Sasada, M., Savolainen, T., Schloerb, F.P., Schuster, K.- F., Shao, L., Shen, Z., Small, D., Sohn, B.W., SooHoo, J., Tazaki, F., Tiede, P., Tilanus, R.P.J., Titus, M., Toma, K., Torne, P., Trent, T., Trippe, S., Tsuda, S., Bemmel,I.v., Langevelde,H.J., Rossum,D.R., Wagner,J., Wardle,J., Weintroub, J., Wex, N., Wharton, R., Wielgus, M., Wong, G.N., Wu, Q., Young, K., Young, A., Younsi, Z., Yuan, F., Yuan, Y.-F., Zensus, J.A., Zhao, G., Zhao, S.-S., Zhu, Z., Algaba, J.-C., Allardi, A., Amestica, R., Anczarski, J., Bach, U., Baganoff, F.K., Beaudoin, C., Benson, B.A., Berthold, R., Blanchard, J.M., Blundell, R., Bustamente, S., Cappallo, R., Castillo-Dom´ ınguez, E., Chang, C.-C., Chang, S.- H., Chang, S.-C., Chen, C.-C., Chilson, R., Chuter, T.C., Rosado, R.C., Coulson, I.M., Crawford, T.M., Crowley, J., David, J., Derome, M., Dexter, M., Dorn- busch, S., Dudevoir, K.A., Dzib, S.A., Eckart, A., Eckert, C., Erickson, N.R., Everett, W.B., Faber, A., Farah, J.R., Fath, V., Folkers, T.W., Forbes, D.C., Freund, R., G´omez-Ruiz, A.I., Gale, D.M., Gao, F., Geertsema, G., Graham, D.A., Greer, C.H., Grosslein, R., Gueth, F., Haggard, D., Halverson, N.W., Han, C.-C., Han, K.-C., Hao, J., Hasegawa, Y., Henning, J.W., Hern´andez-G´omez, A., Herrero-Illana, R., Heyminck, S., Hirota, A., Hoge, J., Huang, Y.-D., Impel- lizzeri, C.M.V., Jiang, H., Kamble, A., Keisler, R., Kimura, K., Kono, Y., Kubo, D., Kuroda, J., Lacasse, R., Laing, R.A., Leitch, E.M., Li, C.-T., Lin, L.C.-C., Liu, C.-T., Liu, K.-Y., Lu, L.-M., Marson, R.G., Martin-Cocher, P.L., Massingill, K.D., Matulonis, C., McColl, M.P., McWhirter, S.R., Messias, H., Meyer-Zhao, Z., Michalik, D., Monta˜na, A., Montgomerie, W., Mora-Klein, M., Muders, D., Nadolski, A., Navarro, S., Neilsen, J., Nguyen, C.H., Nishioka, H., Norton, T.,

Nowak, M.A., Nystrom, G., Ogawa, H., Oshiro, P., Oyama, T., Parsons, H., Paine, S.N., Pe˜nalver, J., Phillips, N.M., Poirier, M., Pradel, N., Primiani, R.A., Raffin, P.A.,Rahlin,A.S.,Reiland, G., Risacher, C., Ruiz,I., S´aez-Mada´ ın,A.F.,Sassella, R., Schellart, P., Shaw, P., Silva, K.M., Shiokawa, H., Smith, D.R., Snow, W., Souccar, K., Sousa, D., Sridharan, T.K., Srinivasan, R., Stahm, W., Stark, A.A., Story, K., Timmer, S.T., Vertatschitsch, L., Walther, C., Wei, T.-S., Whitehorn, N., Whitney, A.R., Woody, D.P., Wouterloot, J.G.A., Wright, M., Yamaguchi, P., Yu, C.-Y., Zeballos, M., Zhang, S., Ziurys, L.: M87事件视界望远镜结果I：超大质量黑洞的阴影。《天体物理学杂志快报》875(1), 1 (2019年) https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7 。出版方：美国天文学会。访问日期：2025年10月3日[9] Sovers, O.J., Fanselow, J.L., Jacobs, C.S.: 射电干涉测量中的天体测量学与大地测量学：实验、模型和结果。《现代物理评论》70(4), 1393–1454 (1998) https://doi.org/10.1103/RevModPhys.70.1393 。出版方：美国物理学会。访问日期：2025年10月3日[10]Schuman, C.D., Kulkarni, S.R., Parsa, M., Mitchell, J.P., Date, P., Kay, B.: 神经形态计算算法与应用的机遇。《自然·计算科学》2(1), 10–19 (2022年) https://doi.org/10.1038/ s43588-021-00184-y 。数量：1 出版方：自然出版集团。访问日期：2023-11-24[11] Muir, D.R., Sheik, S.: 神经形态技术走向商业成功之路。《自然通讯》16(1), 3586 (2025年) https://doi.org/10.1038/ s41467-025-57352-1 。出版方：自然出版集团。访问日期：2025-06-09[12] Eshraghian, J.K., Ward, M., Neftci, E., Wang, X., Lenz, G., Dwivedi, G., Bennamoun, M., Jeong, D.S., Lu, W.D.: 运用深度学习经验训练脉冲神经网络。arXiv. arXiv:2109.12894 [cs] (2022年)。https:// doi.org/10.48550/arXiv.2109.12894 。http://arxiv.org/abs/2109.12894 访问日期：2023-01-18[13] Heidarpur, M., Ahmadi, A., Ahmadi, M., Rahimi Azghadi, M.: CORDIC-SNN：在现场可编程门阵列上使用Izhikevich神经元进行STDP学习。IEEE《电路与系统汇刊I：常规论文》66(7), 2651–2661 (2019年) https://doi.org/10. 1109/TCSI.2019.2899356 。访问日期：2026年1月7日[14] Pham, Q.T., Nguyen, T.Q., Hoang, P.C., Dang, Q.H., Nguyen, D.M., Nguyen, H.H.: FPGA上的SNN实现综述。载于：2021年多媒体分析与模式识别国际会议（MAPR），第1–6页。IEEE，越南河内（2021年）。https://doi.org/10.1109/MAPR53640.2021.9585245 。https://ieeexplore.ieee.org/document/9585245/ 访问日期：2026年1月7日[15] Karamimanesh, M., Abiri, E., Shahsavari, M., Hassanli, K., Schaik, A., Eshraghian, J.: FPGA上的脉冲神经网络：方法综述与最新进展。《神经网络》186, 107256 (2025年) https://doi.org/

10.1016/j.neunet.2025.107256 。访问日期：2025年2月19日

[16] Frenkel, C., Bol, D., Indiveri, G.: 神经形态处理系统设计的自下而上与自上而下方法：自然智能与人工智能之间的权衡与协同效应。IEEE会议录**111**(6), 623– 652 (2023年)https://doi.org/10.1109/JPROC.2023.3273520 。会议名称：IEEE会议录。访问日期：2024-03-13

[17] Du Toit, C.D., Grobler,T.L., Ludick, D.J.：深度学习射频干扰检测算法的比较框架。《皇家天文学会月刊》**530**(1), 613–629（2024年）
https://doi.org/10.1093/mnras/stae892 。访问日期：2024年4月29日

[18] Corda, S., Veenboer, B., Awan, A.J., Kumar, A., Jordans, R., Corporaal, H.：射电天文成像的近存储器加速。arXiv. arXiv:2005.04098 [cs] (2020年)。
https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.04098 。http://arxiv.org/abs/2005.04098 访问日期：2025年10月3日

[19] Kasabov, N., Scott, N.M., Tu, E., Marks, S., Sengupta, N., Capecci, E., Othman, M., Doborjeh, M.G., Murli, N., Hartono, R., Espinosa-Ramos, J.I., Zhou, L., Alvi, F.B., Wang, G., Taylor, D., Feigin, V., Gulyaev, S., Mahmoud, M., Hou, Z.-G.,Yang, J.：基于 Neu- Cube 神经形态框架的时空数据机器演进：设计方法与精选应用。《神经网络》**78**，1–14（2016年）https://doi.org/10.1016/j.neunet.2015.09.011 。访问日期：2024-03-15

[20] Scott,N.M.：用于时空和频谱时序数据分析的脉冲神经网络演进：模型、实现与应用。博士学位论文，奥克兰理工大学（2015年）。
https://hdl.handle.net/10292/10601 访问日期：2024-04-05

[21]Miniskar, N.R., Young, A.R., Asifuzzaman, K., Kulkarni, S., Date, P., Bean, A., Vetter, J.S.：Neuro-Spark：一种用于传感器内过滤的亚微秒级脉冲神经网络架构。载于：2024年国际神经形态系统会议（ICONS），第63–70页。IEEE，美国弗吉尼亚州阿灵顿（2024年）。https://doi.org/10.1109/ICONS62911.2024.00017 。
https://ieeexplore.ieee.org/document/10766567/ 访问日期：2026年1月7日

[22] Eappen, G., Daoud, S., Skatchkovsky, N., Ortiz, F., Lagunas, E., Martins, W.A., Chatzinotas, S.：用于卫星系统高能效星载干扰检测的神经形态模型。《IEEE航空与电子系统汇刊》**61**(6), 17682–17702（2025年）
https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3608092。访问日期：2026年1月7日[23] Pritchard, N.J., Wicenec, A., Bennamoun, M., Dodson, R.：基于脉冲神经网络的射频干扰检测。《澳大利亚天文学会刊》**41**，028（2024年）
https://doi.org/10.1017/pasa.2024.27

[24]Pritchard, N.J., Wicenec, A., Bennamoun, M., Dodson, R.：使用脉冲神经网络进行有监督的射频干扰检测。载于：2024年国际神经形态系统会议（ICONS），第102–109页（2024年）。https://doi.org/10.1109/ICONS62911.2024.00023 . https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10766534 访问日期：2025-09-16

[25]Pritchard, N.J., Wicenec, A., Bennamoun, M., Dodson, R.：用于射电天文学中射频干扰检测的脉冲神经网络。《Communications Physics》8(1), 517（2025年）https://doi.org/10.1038/s42005-025-02420-7。访问日期：2026-01-09[26]Pritchard, N.J., Wicenec, A., Bennamoun, M., Dodson, R.：利用液态状态机推进射电天文学中的射频干扰检测。载于：2025年国际联合神经网络会议（IJCNN），第1–7页（2025年）。https://doi.org/10.1109/IJCNN64981.2025.11229299 。ISSN：2161-4407。https://ieeexplore.ieee.org/document/11229299 访问日期：2025-11-17[27] Pritchard, N.J.,Wicenec,A., Dodson,R., Bennamoun, M.：面向现代射电望远镜实时射频干扰检测的包含极化信息的脉冲神经网络。《国际无线电科学联盟〈无线电科学快报〉》**7**（2025年）https://doi.org/10.46620/25-0006 。访问日期：2025-09-22[28] Pritchard, N.J., Wicenec, A., Dodson, R., Bennamoun, M., Muir, D.R.：神经形态天文学：用于射频干扰检测硬件的端到端脉冲神经网络流程。arXiv。arXiv:2511.16060 [cs]（2025年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.16060。http://arxiv.org/abs/2511.16060 访问日期：2025-11-21[29] Lonsdale, C.J., Cappallo, R.J., Morales, M.F., Briggs, F.H., Benkevitch, L., Bow-man, J.D., Bunton, J.D., Burns, S., Corey, B.E., deSouza, L., Doeleman, S.S., Derome, M., Deshpande, A., Gopala, M.R., Greenhill, L.J., Herne, D.E., Hewitt, J.N., Kamini, P.A., Kasper, J.C., Kincaid, B.B., Kocz, J., Kowald, E., Kratzen-berg, E., Kumar, D., Lynch, M.J., Madhavi, S., Matejek, M., Mitchell, D.A., Morgan, E., Oberoi, D., Ord, S., Pathikulangara, J., Prabu, T., Rogers, A., Roshi, A., Salah, J.E., Sault, R.J., Shankar, N.U., Srivani, K.S., Stevens, J., Tingay, S., Vaccarella, A., Waterson, M., Wayth, R.B., Webster, R.L., Whit-ney, A.R., Williams, A., Williams, C.：默奇森宽视场阵列：设计概述。《IEEE会议录》**97**(8), 1497–1506（2009年）https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2017564 。访问日期：2025年9月24日[30] Hotan, A.W., Bunton, J.D., Chippendale, A.P., Whiting,M., Tuthill, J., Moss,V.A.,McConnell, D., Amy, S.W., Huynh, M.T., Allison, J.R., Anderson, C.S.,Bannister,K.W., Bastholm,E.,Beresford, R.,Bock, D.C.-J.,Bolton,R., Chap-man,J.M., Chow, K., Collier, J.D., Cooray, F.R., Cornwell, T.J., Diamond, P.J.,Edwards, P.G.,Feain,I.J., Franzen, T.M.O., George, D., Gupta, N., Hampson,G.A.,Harvey-Smith,L., Hayman,D.B., Heywood, I., Jacka, C.,Jackson,C.A.,

Jackson, S., Jeganathan, K., Johnston, S., Kesteven, M., Kleiner, D., Koribal-ski, B.S., Lee-Waddell, K., Lenc, E., Lensson, E.S., Mackay, S., Mahony, E.K., McClure-Griffiths, N.M., McConigley, R., Mirtschin, P., Ng, A.K., Norris, R.P., Pearce, S.E., Phillips, C., Pilawa, M.A., Raja, W., Reynolds, J.E., Roberts, P., Roxby, D.N., Sadler, E.M.,Shields, M.,Schinckel, A.E.T., Serra,P.,Shaw,R.D., Sweetnam, T., Troup, E.R., Tzioumis, A., Voronkov, M.A., Westmeier, T.：澳大利亚平方公里阵列探路者：I. 系统描述。《澳大利亚天文学会刊》**38**，009（2021年）https://doi.org/10.1017/pasa.2021.1。访问日期：2025-09-26

[31] Van Haarlem, M.P., Wise, M.W., Gunst, A.W., Heald, G., McKean, J.P., Hes- sels, J.W.T., De Bruyn, A.G., Nijboer, R., Swinbank, J., Fallows, R., Brentjens, M., Nelles, A., Beck, R., Falcke, H., Fender, R., H¨orandel, J., Koopmans, L.V.E., Mann, G., Miley, G., R¨ottgering, H., Stappers, B.W., Wijers, R.A.M.J., Zaroubi, S., Van Den Akker, M., Alexov, A., Anderson, J., Anderson, K., Van Ardenne, A., Arts, M., Asgekar, A., Avruch, I.M., Batejat, F., B¨ahren, L., Bell, M.E., Bell, M.R., Van Bemmel, I., Bennema, P., Bentum, M.J., Bernardi, G., Best, P., Bˆ ırzan, L., Bonafede, A., Boonstra, A.-J., Braun, R., Bregman, J., Breitling, F., Van De Brink, R.H., Broderick, J., Broekema, P.C., Brouw, W.N., Br¨uggen, M., Butcher, H.R., Van Cappellen,W.,Ciardi, B., Coenen, T., Conway,J., Coolen, A., Corstanje, A., Damstra, S., Davies, O., Deller, A.T., Dettmar, R.-J., Van Diepen, G., Dijkstra, K., Donker, P., Doorduin, A., Dromer, J., Drost, M., Van Duin, A., Eisl¨offel, J., Van Enst, J., Ferrari, C., Frieswijk, W., Gankema, H., Garrett, M.A., De Gasperin, F., Gerbers, M., De Geus, E., Grießmeier, J.-M., Grit, T., Gruppen, P., Hamaker, J.P., Hassall, T., Hoeft, M., Holties, H.A., Horneffer, A., Van Der Horst, A., Van Houwelingen, A., Huijgen, A., Iacobelli, M., Intema, H., Jackson, N., Jelic, V., De Jong, A., Juette, E., Kant, D., Karastergiou, A., Koers, A., Kollen, H., Kondratiev, V.I., Kooistra, E., Koopman, Y., Koster, A., Kuniyoshi, M., Kramer, M., Kuper, G., Lambropoulos, P., Law, C., Van Leeuwen, J., Lemaitre, J., Loose, M., Maat, P., Macario, G., Markoff, S., Masters, J., McFadden, R.A., McKay-Bukowski, D., Meijering, H., Meulman, H., Mevius, M., Middelberg, E., Millenaar, R., Miller-Jones, J.C.A., Mohan, R.N., Mol, J.D., Morawietz, J., Morganti, R., Mulcahy, D.D., Mulder, E., Munk, H., Nieuwen- huis, L., Van Nieuwpoort, R., Noordam, J.E., Norden, M., Noutsos, A., Offringa, A.R., Olofsson, H., Omar, A., Orr´u, E., Overeem, R., Paas, H., Pandey-Pommier, M., Pandey, V.N., Pizzo, R., Polatidis, A., Rafferty, D., Rawlings, S., Reich, W., De Reijer, J.-P., Reitsma, J., Renting, G.A., Riemers, P., Rol, E., Romein, J.W., Roosjen, J., Ruiter, M., Scaife, A., Van Der Schaaf, K., Scheers, B., Schellart, P., Schoenmakers, A., Schoonderbeek, G., Serylak, M., Shulevski, A., Sluman, J., Smirnov, O., Sobey, C., Spreeuw, H., Steinmetz, M., Sterks, C.G.M., Stiepel, H.-J., Stuurwold, K., Tagger, M., Tang, Y., Tasse, C., Thomas, I., Thoudam, S., Toribio, M.C., Van Der Tol, B., Usov, O., Van Veelen, M., Van Der Veen, A.-J., Ter Veen, S., Verbiest, J.P.W., Vermeulen, R., Vermaas, N., Vocks, C., Vogt, C., De Vos, M., Van Der Wal, E., Van Weeren, R., Weggemans, H., Weltevrede, P., White, S., Wijnholds, S.J., Wilhelmsson, T., Wucknitz, O., Yatawatta, S., Zarka,

P., Zensus, A., Van Zwieten, J.：LOFAR：低频阵列。天文学与天体物理学**556**，2（2013年）https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220873。访问日期：2025-09-17

[32] Schilizzi, R.T., Ekers, R.D., Dewdney, P.E., Crosby, P.：《平方公里阵列：正在形成中的科学超级项目，1990—2012》。历史与文化天文学。施普林格，Cham（2024年）。https://doi.org/10.1007/978-3-031-51374-9 。https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-51374-9 访问于2025年10月3日

[33] Selina, R.J., Murphy, E.J., McKinnon, M., Beasley, A., Butler, B., Carilli, C., Clark, B., Durand, S., Erickson, A., Grammer, W., Hiriart, R., Jackson, J., Kent, B., Mason, B., Morgan, M., Ojeda, O.Y., Rosero, V., Shillue, W., Sturgis, S., Urbain, D.：ngVLA参考设计[34] Theilman, B.H., Aimone, J.B.：在神经形态硬件上求解稀疏有限元问题。《自然·机器智能》**7**(11), 1845–1857（2025年）https://doi.org/10.1038/s42256-025-01143-2 。访问于2026-01-09[35] Swinbank, J.D.,Staley,T.D., Molenaar, G.J., Rol, E., Rowlinson, A., Scheers,B.,Spreeuw, H., Bell, M.E., Broderick, J.W., Carbone, D., Garsden, H., Horst,A.J., Law, C.J., Wise, M.,Breton, R.P., Cendes, Y., Corbel, S., Eisl¨offel, J., Fal- cke, H., Fender, R., Grießmeier, J.-M., Hessels, J.W.T., Stappers, B.W., Stewart, A.J., Wijers, R.A.M.J., Wijnands, R., Zarka, P.：《LOFAR瞬变源处理流水线》。《天文学与计算》**11**, 25–48（2015年）https://doi.org/10.1016/j.ascom.2015.03.002。访问于2025年10月3日[36] Sokolowski, M., Wayth, R.B., Bhat, N.D.R., Price, D., Broderick, J.W., Bernardi, G., Bolli, P., Chiello, R., Comoretto, G., Crosse, B., Davidson, D.B., Macario, G., Magro, A., Mattana, A., Minchin, D., McPhail, A., Monari, J., Perini, F., Pupillo, G., Sleap, G., Tingay, S., Ung, D., Williams, A.：面向SKA-Low原型台站的南半球全天射电瞬变监测器。《澳大利亚天文学会刊》**38**, 023（2021年）https://doi.org/10.1017/pasa.2021.16。访问于2025年10月3日[37] Wang, Z., Bannister, K.W., Gupta, V., Deng, X., Pilawa, M., Tuthill, J., Bunton, J.D., Flynn, C., Glowacki, M., Jaini, A., Lee, Y.W.J., Lenc, E., Lucero, J., Paek, A., Radhakrishnan, R., Thyagarajan, N., Uttarkar, P., Wang, Y., Bhat, N.D.R., James, C.W., Moss, V.A., Murphy, T., Reynolds, J.E., Shannon, R.M., Spitler, L.G., Tzioumis, A., Caleb, M., Deller, A.T., Gordon, A.C., Marnoch, L., Ryder, S.D., Simha, S., Anderson, C.S., Ball, L., Brodrick, D., Cooray, F.R., Gupta, N., Hayman, D.B., Ng, A., Pearce, S.E., Phillips, C., Voronkov, M.A., West- meier, T.：《CRAFT相干阵列（CRACO）升级 I：系统描述及110毫秒射电暂现源试验巡天结果》。《澳大利亚天文学会刊》**42**, 005（2025年）https://doi.org/10.1017/pasa.2024.107。arXiv:2409.10316 [天体物理学]。访问于2025年10月2日

[38] Hampson, G.A.、Bunton, J.D.、Humphrey, D.、Bengston, K.J.、Jourjon, G.、Bolin、

A.B., Chen, Y., Troup, E.R., Babich, G.C., Van Aardt, J.C.：平方公里阵列低原子商用现成相关器和波束形成器。《天文望远镜、仪器与系统》**8**（01）（2022年）https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.011018 。访问日期：2025年10月2日

[39] Aafreen, R., Abhishek, R., Ajithkumar, B., Vaidyanathan, A.M., Barve, I.V., Bhattramakki, S., Bhat, S., Girish, B.S., Ghalame, A., Gupta, Y., Hayatna- garkar, H.G., Kamini, P.A., Karastergiou, A., Levin, L., Madhavi, S., Mekhala, M., Mickaliger, M., Mugundhan, V., Naidu, A., Oppermann, J., Pandian, B.A., Patra, N.,Raghunathan,A., Roy, J., Sethi, S., Shaw, B., Sherwin, K., Sinnen, O., Sinha, S.K., Srivani, K.S., Stappers, B., Subrahmanya, C.R., Prabu, T., Vinutha, C., Wadadekar, Y.G., Wang, H., Williams, C.: SKA瞬变源搜索的高性能计算：基于FPGA的加速器的应用。《天体物理学与天文学杂志》**44(1)**，11（2023年）https://doi.org/10.1007/s12036-022-09896-7。访问日期：2025年10月3日

[40] Davies, M.：英特尔实验室推出的新型 Loihi 2 研究芯片，性能最高可达前代产品的 10 倍，并配备开源、由社区驱动的神经形态计算框架

[41]Offringa, A.R., McKinley, B., Hurley-Walker, N., Briggs, F.H., Wayth, R.B., Kaplan, D.L., Bell, M.E., Feng, L., Neben, A.R., Hughes, J.D., Rhee, J., Mur- phy, T., Bhat, N.D.R., Bernardi, G., Bowman, J.D., Cappallo, R.J., Corey, B.E., Deshpande, A.A., Emrich, D., Ewall-Wice, A., Gaensler, B.M., Goeke, R., Green- hill,L.J., Hazelton, B.J., Hindson, L., Johnston-Hollitt,M., Jacobs,D.C., Kasper, J.C., Kratzenberg, E., Lenc, E., Lonsdale, C.J., Lynch, M.J., McWhirter, S.R., Mitchell, D.A., Morales, M.F., Morgan, E., Kudryavtseva, N., Oberoi, D., Ord, S.M., Pindor, B., Procopio, P., Prabu, T., Riding, J., Roshi, D.A., Shankar, N.U., Srivani, K.S., Subrahmanyan, R., Tingay, S.J., Waterson, M., Webster, R.L., Whitney, A.R., Williams, A., Williams, C.L.：wsclean：一种用于射电天文学的快速、通用宽视场成像器的实现。皇家天文学会月刊 **444(1)**, 606–619（2014年）https://doi.org/10.1093/mnras/stu1368。访问日期：2025年10月3日

[42] Wayth, R.B., Tingay, S.J., Trott, C.M., Emrich, D., Johnston-Hollitt, M., McKin- ley, B., Gaensler, B.M., Beardsley, A.P., Booler, T., Crosse, B., Franzen, T.M.O., Horsley,L., Kaplan, D.L.,Kenney, D., Morales, M.F., Pallot,D., Sleap, G.,Steele, K., Walker, M., Williams, A., Wu, C., Cairns, I.H., Filipovic, M.D., Johnston, S., Murphy, T., Quinn, P., Staveley-Smith, L., Webster, R., Wyithe, J.S.B.：《默奇森宽视场阵列第二阶段：设计概述》。澳大利亚天文学会刊**35**，033（2018年）https://doi.org/10.1017/pasa.2018.37。arXiv:1809.06466 [天体物理学]。访问日期：2025年9月24日

[43] Line, J.L.B., Trott, C.M., Cook, J.H., Greig, B., Barry, N., Jordan, C.H.：验证澳大利亚 MWA 再电离时期流水线 I：21厘米天空模型与相关测量密度。《澳大利亚天文学会刊》**41**,

067 (2024年) https://doi.org/10.1017/pasa.2024.31 。访问日期：2025年10月3日

[44] Tingay,S.J., Oberoi, D., Cairns, I.,Donea,A., Duffin, R., Arcus,W., Bernardi,G., Bowman, J.D., Briggs, F., Bunton, J.D., Cappallo, R.J., Corey, B.E., Deshpande, A., deSouza, L., Emrich, D., Gaensler, B.M., Goeke, R., Greenhill, L.J., Hazel- ton, B.J., Herne, D., Hewitt, J.N., Johnston-Hollitt, M., Kaplan, D.L., Kasper, J.C., Kennewell, J.A., Kincaid, B.B., Koenig, R., Kratzenberg, E., Lonsdale, C.J., Lynch, M.J., McWhirter, S.R., Mitchell, D.A., Morales, M.F., Morgan, E., Ord, S.M., Pathikulangara, J., Prabu, T., Remillard, R.A., Rogers, A.E.E., Roshi, A., Salah, J.E., Sault, R.J., Udaya-Shankar, N., Srivani, K.S., Stevens, J., Subrah- manyan, R., Waterson, M., Wayth, R.B., Webster, R.L., Whitney, A.R., Williams, A., Williams, C.L., Wyithe, J.S.B.：默奇森宽视场阵列：使用低频平方公里阵列先导设备开展太阳科学。《物理学杂志：会议系列》**440**, 012033 (2013年) https://doi.org/10.1088/1742-6596/440/1/012033 . Accessed 2025年10月3日

[45] Wayth, R.B., Lenc, E., Bell, M.E., Callingham, J.R., Dwarakanath,K.S.,Franzen,T.M.O., For, B.-Q., Gaensler, B., Hancock,P., Hindson,L., Hurley-Walker, N.,Jackson,C.A.,Johnston-Hollitt, M., Kapi´nska, A.D., McKinley, B., Morgan, J., Offringa, A.R., Procopio, P., Staveley-Smith, L., Wu, C., Zheng, Q., Trott, C.M., Bernardi, G., Bowman, J.D., Briggs, F., Cappallo, R.J., Corey, B.E., Desh- pande, A.A., Emrich, D., Goeke, R., Greenhill, L.J., Hazelton, B.J., Kaplan, D.L., Kasper, J.C., Kratzenberg, E., Lonsdale, C.J., Lynch, M.J., McWhirter, S.R., Mitchell, D.A., Morales, M.F., Morgan, E., Oberoi, D., Ord, S.M., Prabu, T., Rogers, A.E.E., Roshi, A., Shankar, N.U., Srivani, K.S., Subrahmanyan, R., Tingay, S.J., Waterson, M., Webster, R.L., Whitney, A.R., Williams, A., Williams, C.L.：GLEAM：银河系及河外全天 MWA 巡天。《澳大利亚天文学会刊》**32**，025（2015年）https://doi.org/10.1017/pasa.2015.26 。访问日期：2025年10月3日[46] Prabu, T., Srivani, K.S., Roshi, D.A., Kamini, P.A., Madhavi, S., Emrich, D., Crosse, B., Williams, A.J., Waterson, M., Deshpande, A.A., Shankar, N.U., Sub- rahmanyan, R., Briggs, F.H., Goeke, R.F., Tingay, S.J., Johnston-Hollitt, M., R, G.M., Morgan, E.H., Pathikulangara, J., Bunton, J.D., Hampson, G., Williams, C., Ord, S.M., Wayth, R.B., Kumar, D., Morales, M.F., deSouza, L., Kratzenberg, E., Pallot, D., McWhirter, R., Hazelton, B.J., Arcus, W., Barnes, D.G., Bernardi, G., Booler, T., Bowman, J.D., Cappallo, R.J., Corey, B.E., Greenhill, L.J., Herne, D., Hewitt, J.N., Kaplan, D.L., Kasper, J.C., Kincaid, B.B., Koenig, R., Lons- dale, C.J., Lynch, M.J., Mitchell, D.A., Oberoi, D., Remillard, R.A., Rogers, A.E., Salah,J.E., Sault, R.J., Stevens, J.B., Tremblay, S., Webster, R.L., Whitney, A.R., Wyithe, S.B.：默奇森宽视场阵列的数字接收机。实验天文学**39**（1），73–93（2015年）https://doi.org/10.1007/s10686-015-9444-3 。访问日期：2025年9月24日[47] Girish,B.S., Reddy, S.H.,Sethi, S., Srivani, K.S., Abhishek, R.,Ajithkumar,B.,Bhattramakki, S., Buch, K.,Chaudhuri, S., Gupta, Y., Kamini, P.A., Kudale, S.,

Madhavi, S., Muley, M., Prabu, T., Raghunathan, A., Shelton,G.J.：数字接收机架构的演进：从 MWA 到 SKA1-Low 及未来。《天体物理学与天文学杂志》**44**（1），28（2023年）https://doi.org/10.1007/s12036-023-09921-3 。访问日期：2025年9月24日[48]Morrison, I.S., Crosse, B., Sleap, G., Wayth, R.B., Williams, A., Johnston- Hollitt, M., Jones, J., Tingay, S.J., Walker, M., Williams, L.：MWAX：默奇森宽视场阵列的新型相关器。《澳大利亚天文学会刊》**40**，019（2023年）https://doi.org/10.1017/pasa.2023.15 。arXiv:2303.11557 [天体物理学]。访问日期：2025-09-17

[49] NVIDIA A40 数据手册

[50]Devices，A.M.：AMD Epyc 7002 系列处理器。技术报告（2020年4月）。https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/products/epyc/amd-epyc-7002-series-datasheet.pdf

[51] Setonix。https://pawsey.org.au/systems/setonix/ 访问日期：2025年10月3日

[52]MWATelescope/Birli。默奇森宽视场阵列（MWA）望远镜。原始日期：2021-01-20T05:53:56Z（2025年）。https://github.com/MWATelescope/Birli访问日期：2025年10月3日

[53] Offringa, A.：AOFlagger：射频干扰软件。天体物理学源代码库，1010（2010）[54] Duchesne, S.W., Ross, K., Thomson, A.J.M., Lenc, E., Murphy, T., Galvin, T.J., Hotan, A.W., Moss, V., Whiting, M.T.：《ASKAP 快速连续谱巡天（RACS）VI：RACS-high 1 655.5 MHz 图像与目录》。《澳大利亚天文学会刊》**42**，038（2025）https://doi.org/10.1017/pasa.2025.2。访问日期：2025年10月3日[55] Pingel, N.M.,Dempsey, J., McClure-Griffiths, N.M., Dickey, J.M., Jameson, K.E.,Arce, H.,Anglada,G.,Bland-Hawthorn, J., Breen, S.L., Buckland-Willis, F.,Clark, S.E., Dawson, J.R., D´enes, H., Teodoro, E.M.D., For,B.-Q.,Foster, T.J.,G´omez, J.F., Imai, H., Joncas, G., Kim, C.-G., Lee, M.-Y.,Lynn, C., Leahy, D.,Ma,Y.K., Marchal, A., McConnell, D., Miville-Desch`enes, M.-A., Moss, V.A.,Murray, C.E., Nidever,D., Peek, J., Stanimirovi´c, S., Staveley-Smith, L., Tepper-Garcia, T., Tremblay, C.D., Uscanga, L., Loon, J.T.v., V´azquez-Semadeni, E., Allison, J.R., Anderson, C.S.,Ball, L., Bell, M., Bock, D.C.-J., Bunton, J., Cooray, F.R., Cornwell, T., Koribalski, B.S., Gupta, N., Hayman, D.B., Harvey-Smith, L., Lee-Waddell, K., Ng, A., Phillips, C.J., Voronkov, M., Westmeier, T., Whit- ing, M.T.：GASKAP-HI 先导巡天科学 I：ASKAP 放大观测小麦哲伦星云的中性氢发射。《澳大利亚天文学会刊》**39**，005（2022）https://doi.org/10.1017/pasa.2021.59 。访问日期：2025年10月3日

[56]Hobbs, G., Heywood, I., Bell, M.E., Kerr, M., Rowlinson, A., Johnston, S., Shannon, R.M., Voronkov, M.A., Ward, C., Banyer, J., Hancock, P.J., Murphy, T., Allison, J.R., Amy, S.W., Ball, L., Bannister, K., Bock, D.C.-J., Brodrick, D., Brothers, M., Brown, A.J., Bunton, J.D., Chapman, J., Chippendale, A.P., Chung, Y., DeBoer, D., Diamond, P., Edwards, P.G., Ekers, R., Ferris, R.H., Forsyth, R., Gough, R., Grancea, A., Gupta, N., Harvey-Smith, L., Hay, S., Hay- man, D.B., Hotan, A.W., Hoyle, S., Humphreys, B., Indermuehle, B., Jacka, C.E., Jackson, C.A., Jackson, S., Jeganathan, K., Joseph, J., Kendall, R., Kiraly, D., Koribalski, B., Leach, M., Lenc, E., MacLeod, A., Mader, S., Marquarding, M., Marvil, J., McClure-Griffiths, N., McConnell, D., Mirtschin, P., Neuhold, S., Ng, A., Norris, R.P., O'Sullivan, J., Pearce, S., Phillips, C.J., Popping, A., Qiao, R.Y., Reynolds, J.E., Roberts, P., Sault, R.J., Schinckel, A.E.T., Serra, P., Shaw, R., Shimwell, T.W., Storey, M., Sweetnam, A.W., Tzioumis, A., Westmeier, T., Whiting, M., Wilson, C.D.：围绕间歇脉冲星 PSR J1107-5907 区域开展的射电暂现事件 ASKAP 先导巡天。《皇家天文学会月刊》**456**（4），3948–3960（2016）https://doi.org/10.1093/mnras/stv2893 。访问日期：2025年10月3日[57] Brown, A.J., Hampson, G.A., Roberts, P., Beresford, R., Bunton, J.D., Cheng, W., Chekkala, R., Kiraly, D., Neuhold, S., Jeganathan, K.：第二代ASKAP数字接收机系统的设计与实现。载于：2014年国际先进应用电磁学会议（ICEAA），第268–271页（2014）。https://doi.org/10.1109/ICEAA.2014.6903860 。https://ieeexplore.ieee.org/document/6903860 访问日期：2025年10月2日[58] Hampson, G.A., Brown, A., Bunton, J.D., Neuhold, S., Chekkala, R., Bateman, T., Tuthill, J.：ASKAP Redback-3——一种灵活的数字信号处理平台。载于：2014年第31届URSI大会暨科学研讨会（URSI GASS），第1–4页。IEEE，北京，中国（2014）。https://doi.org/10. 1109/URSIGASS.2014.6930062 。http://ieeexplore.ieee.org/document/6930062/访问日期：2025年10月2日[59] Devices, A.M.：Alveo U280数据中心加速卡数据手册（DS963）。技术报告（2023年6月）。https://docs.amd.com/r/en-US/ds963-u280[60] Guzman, J., Whiting, M., Voronkov, M., Mitchell, D., Ord, S., Collins, D., Mar- quarding, M., Lahur, P., Maher, T., Van Diepen, G., Bannister, K., Wu, X., Lenc, E., Khoo, J., Bastholm, E.：ASKAP科学数据处理软件——ASKAP-soft 0.23.3版。澳大利亚联邦科学与工业研究组织（2019）。https://doi.org/10.25919/5CCA3787A6353。https://data.csiro.au/collections/#collection/CIcsiro:39526v1/DItrue 访问日期：2025年10月3日[61] Guzman, J.C., Bastholm, E., Raja, W., Whiting, M., Mitchell, D., Voronkov, M., Ord, S.：我们准备好了吗？ASKAP望远镜高性能计算（HPC）系统的开发与调试经验

[62]Whiting, M., Ord, S.M., Mitchell, D., Voronkov, M., Guzman, J.C.：ASKAP 的高性能流水线处理。载于：2018年第二届URSI大西洋无线电科学会议（AT-RASC），第1–1页。IEEE，大加那利岛（2018年）。https://doi.org/10.23919/URSI-AT-RASC.2018.8471521 。https://ieeexplore.ieee.org/document/8471521/ 访问日期：2025年10月3日

[63]Schoonderbeek, G.W., Szomoru, A., Gunst, A.W., Hiemstra, L., Hargreaves, J.：《面向射电天文学的通用可扩展高性能计算平台 UniBoard2》。《天文仪器学报》**08**(02), 1950003（2019年）https://doi.org/10.1142/S225117171950003X。出版商：世界科学出版公司。访问日期：2025年10月2日[64] Juerges, T., Mol, J.D., Snijder, T.：《LOFAR2.0：台站控制升级》。第18届加速器与大型实验物理控制系统国际会议会议论文集**ICALEPCS2021**，6–0469（2022年）https://doi.org/10.18429/JACOW-ICALEPCS2021-MOAR03 。作品大小：6页，0.469 MB ISBN：9783954502219 媒介：PDF 出版商：JACoW出版社，瑞士日内瓦。访问日期：2025年10月3日[65]Broekema, P.C., Mol, J.J.D., Nijboer, R., A mesfoort, A.S., Brentjens, M.A., Loose, G.M., Klijn, W.F.A., Romein, J.W.：Cobalt：用于LOFAR的基于GPU的相关器和波束形成器。《天文学与计算》**23**，180–192（2018年）https://doi.org/10.1016/j.ascom.2018.04.006。访问日期：2025年10月2日[66] NVIDIA公司：NVIDIA V100张量核心GPU。技术报告（2020年1月）。https://images.nvidia.com/content/technologies/volta/pdf/volta-v100-datasheet-update-us-1165301-r5.pdf[67]英特尔：Intel Xeon Gold 6140处理器数据手册。技术报告（2017年7月）。
h
t
t
p
s://
w
w
w.i
ntel.com/content/www/us/en/products/sku/120485/intel-xeon-gold-6140-processor-24-75m-cache-2-30-ghz/specifications.html
[68] 英特尔：Intel Xeon E5-2680 v3处理器数据手册。技术报告（2014年9月）。
h
t
t
p
s://
w
ww.intel.com/content/www/us/en/products/sku/81908/intel-xeon-processor-e52680-v3-30m-cache-2-50-ghz/specifications.html
[69] 英特尔：Intel Xeon E5-2630 v3处理器数据手册。技术报告（2014年9月）。
h
t
t
p
s://
w
ww.intel.com/content/www/us/en/products/sku/83356/intel-xeon-processor-e52630-v3-20m-cache-2-40-ghz/specifications.html[70] NVIDIA公司：NVIDIA Tesla K20X GPU加速器。技术报告（2013年7月）。https://www.nvidia.com/content/PDF/kepler/Tesla-K20X-BD-06397-001-v07.pdf[71] Bos, H.：面向射电天文学的模拟神经形态接收机信号处理。硕士论文，拉德堡德大学，荷兰（2025年6月）

[72] Braun, R., Bourke, T.L., Green, J.A., Keane, E., Wagg, J.: 《利用平方公里阵列推进天体物理学》。载于：《利用平方公里阵列推进天体物理学》会议论文集——PoS(AASKA14)，第215卷，第174页。SISSA Medialab，???（2015年）。https://doi.org/10.22323/1.215.0174 。会议名称：利用平方公里阵列推进天体物理学。https://pos.sissa.it/215/174/访问日期：2025年10月3日

[73]Chaudhari, S.、Gupta, Y.、T, P.: SKA-Low台站信号处理系统：现状、计划及印度所扮演的角色。载于：第六届URSI无线电科学区域会议——RCRS 2024会议论文集。URSI——国际无线电科学联盟，印度比姆塔尔（2024年）。https://doi.org/10.46620/URSIRSRC24/0997NNP3287 。https://www.ursi.org/proceedings/RCRS/2024/RCRS2024 0997.pdf 访问日期：2025年10月2日[74] Benthem, P.、Wayth, R.、Acedo, E.d.L.、Adami, K.Z.、Alderighi, M.、Belli, C.、Bolli, P.、Booler, T.、Borg, J.、Broderick, J.W.、Chiarucci, S.、Chiello, R.、Ciani, L.、Comoretto, G.、Crosse, B.、Davidson, D.、DeMarco, A.、Emrich, D.、Es, A.v.、Fierro, D.、Faulkner, A.、Gerbers, M.、Razavi-Ghods, N.、Hall, P.、Horsley, L.、Juswardy, B.、Kenney, D.、Steele, K.、Magro, A.、Mattana, A.、McKinley, B.、Monari, J.、Naldi, G.、Nanni, J.、Ninni, P.D.、Paonessa, F.、Perini, F.、Poloni, M.、Pupillo, G.、Rusticelli, S.、Schiaffino, M.、Schillir`o, F.、Schnetler, H.、Singuaroli, R.、Sokolowski, M.、Sutinjo, A.、Tartarini, G.、Ung, D.、Vaate, J.G.B.d.、Virone, G.、Walker, M.、Waterson, M.、Wijnholds, S.J.、Williams, A.: 《孔径阵列验证系统1：系统概述与早期调试结果》。Astronomy & Astrophysics**655**，5（2021年）https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040086。出版商：EDP Sciences。访问日期：2025年10月2日[75] Wang, R.、Tobar, R.、Dolensky, M.、An, T.、Wicenec, A.、Wu, C.、Dulwich, F.、Podhorszki, N.、Anantharaj, V.、Suchyta, E.、Lao, B.、Klasky, S.: 《在Summit超级计算机上处理全规模平方公里阵列数据》。载于：SC20：高性能计算、网络、存储与分析国际会议，第1–12页（2020年）。https://doi.org/10.1109/SC41405.2020.00006 。https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9355269 访问日期：2025年10月3日[76] Williamson, A.、Elahi, P.J.、Dodson, R.、Rhee, J.、Gong, Q.: 《射电天文数据处理与存储的优化》。arXiv。arXiv:2410.02285 [天体物理学]版本：1（2024年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.02285 。http://arxiv.org/abs/2410.02285 访问日期：2025-09-17[77] Swart, G.P.、Dewdney, P.E.、Cremonini, A.: 《SKA1-Mid望远镜架构概述》。《天文望远镜、仪器与系统》**8**（1），011021（2022年）https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.011021 。出版商：SPIE。访问日期：2025年10月3日

[78] Jonas, J.，MeerKAT团队：《MeerKAT射电望远镜》。载于：会议论文集

《MeerKAT科学：迈向SKA之路》— PoS(MeerKAT2016)，第001页。SISSA Medialab，斯泰伦博斯，南非（2018年）。https://doi.org/10.22323/ 1.277.0001 。https://pos.sissa.it/277/001 访问日期：2025年10月6日[79]Roy, J., Pleasance, M., Harrison, S., Wolfgang, A., Caputa, K.：《平方公里阵列中频望远镜单像素馈源接收机系统概述》。载于：2022年第三届URSI大西洋与亚太无线电科学会议（AT-AP-RASC），第1–4页（2022年）。https://doi.org/10.23919/AT-AP-RASC54737. 2022.9814339 。https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9814339 访问日期：2025年10月3日

[80]Tan, G.H., Lehmensiek, R., Billade, B., Caputa, K., Gauffre, S., Theron, I.P., Pantaleev, M., Ljusic, Z., Quertier, B., Peens-Hough, A.：《平方公里阵列中频射电望远镜的一种创新型高灵敏度接收机系统》。载于：Hall, H.J., Gilmozzi, R., Marshall, H.K.（编），《地基与机载望远镜VI》，第9906卷，第990660页。SPIE，???（2016年）。https://doi.org/10.1117/12.2230897 。国际光学与光子学学会。https://doi.org/10.1117/12.2230897

[81]Pleasance, M., Carlson, B., Vrcic, S., Gunaratne, T.：《面向SKA早期阵列组装体的TALON演示相关器架构》。载于：2021年国际无线电科学联盟第34届大会暨科学研讨会（URSI GASS），第1–4页（2021年）。https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560125 。ISSN：2642-4339。https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9560125 访问日期：2025年10月2日

[82]Selina, R., McKinnon, M., Beasley, A.J., Murphy, E., Carilli, C., But- ler, B., Clark, B., Erickson, A., Grammer, W., Jackson, J., Kent, B., Mason, B., Morgan, M., Ojeda, O., Shillue, W., Sturgis, S., Urbain, D：《下一代甚大阵列：技术概述》。载于：Gilmozzi, R., Marshall, H.K., Spyromilio, J.（编）《地基与机载望远镜 VII》，第 55 页。SPIE，美国奥斯汀（2018年）。https: //doi.org/10.1117/12.2312089 。https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10700/2312089/The-Next-Generation-Very-Large-Array-a-technical-overview/10.1117/12.2312089.full 访问日期：2025年10月3日

[83] Selina，R.：ngVLA：项目技术概述（2024年）

[84]Xylo-Audio 开发套件数据手册。技术数据手册，SynSense AG（2022年6月）。https://www.synsense.ai/wp-content/uploads/2023/06/Xylo-Audio-datasheet.pdf

[85]Gonzalez, H.A., Huang, J., Kelber, F., Nazeer, K.K., Langer, T., Liu, C.,Lohrmann, M.,Rostami, A., Sch¨one, M., Vogginger, B., Wunderlich, T.C., Yan, Y., Akl, M., Mayr, C.: SpiNNaker2：用于基于事件的异步机器学习的大规模神经形态系统。arXiv。arXiv:2401。04491 [cs]（2024年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.04491 。http://arxiv.org/abs/2401。

[86]SpiNNcloud：SpiNNaker2芯片拓扑。技术报告（2025年）。https: // spinnaker2.gitlab.io/external/documentation/hardware/2-s2-chip-topology/ # chip-overview[87] Young, A.R., Dean, M.E., Plank, J.S., Rose, G.S.：脉冲神经形态硬件通信系统综述。IEEE Access 7，135606–135620（2019年）https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941772 。访问日期：2026年1月7日[88] Nazeer, K.K., Sch¨one, M., Mukherji, R., Vogginger, B., Mayr, C., Kappel, D., Sub-ramoney, A.：SpiNNaker2神经形态芯片上的语言建模。载于：2024年第六届IEEE人工智能电路与系统国际会议（AICAS），第492–496页（2024年）。https://doi.org/10.1109/AICAS59952.2024.10595870 。ISSN：2834-9857。https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10595870 访问日期：2025年6月13日[89]Orchard, G., Frady, E.P., Rubin, D.B.D., Sanborn, S., Shrestha, S.B., Som-mer, F.T., Davies, M.：利用Loihi 2进行高效神经形态信号处理。载于：2021年IEEE信号处理系统研讨会（SiPS），第254–259页（2021年）。https://doi.org/10.1109/SiPS52927.2021.00053 。ISSN：2374-7390。https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9605018 访问日期：2024年10月22日[90] Abreu, S., Shrestha, S.B., Zhu, R.-J., Eshraghian, J.：基于英特尔 Loihi 2的高效大语言模型神经形态原理。arXiv。arXiv:2503.18002 [cs]（2025年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.18002 。http://arxiv.org/abs/2503. 18002 访问日期：2025年6月13日[91] Shrestha, S.B., Timcheck, J., Frady, P., Campos-Macias, L., Davies, M.：利用Loihi 2进行高效视频和音频处理。载于：ICASSP 2024——2024年IEEE声学、语音与信号处理国际会议（ICASSP），第13481–13485页（2024年）。https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10448003 。ISSN：2379-190X。https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10448003 访问日期：2025年9月25日[92]Brehove, M., Tumpa, S.A., Kyubwa, E., Menon, N., Narayanan, V.：Loihi 2上的Sigma-Delta神经网络转换。arXiv。arXiv:2505.06417 [cs]（2025年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06417 。http://arxiv.org/abs/2505. 06417 访问日期：2025年10月2日[93] Mesarcik, M., Boonstra, A.-J., Nieuwpoort, R., Ranguelova：在射电天文学中无需观测射频干扰即可学习检测射频干扰。Zenodo（2022年）。https://doi.org/10. 5281/zenodo.6724065 。https://doi.org/10.5281/zenodo.6724065[94] Sadr, A.V., Bassett, B.A., Oozeer, N., Fantaye, Y., Finlay, C.：深度学习改进了射频干扰的识别。《皇家天文学会月刊》499(1)，379–390（2020年）https://

doi.org/10.1093/mnras/staa2724 。地点：大克拉伦登街，牛津 OX2 6DP，英格兰 出版商：牛津大学出版社 类型：文章[95] Akeret, J.、Chang, C.、Lucchi, A.、Refregier, A.：使用深度卷积神经网络抑制射频干扰。《天文学与计算》**18**，35–39（2017年）https://doi.org/10.1016/j.ascom.2017.01.002 。访问日期：2022年09月20日[96]van Zyl, D.J.、Grobler, T.L.：先消除后检测：一种用于在射电天空图像中检测射频干扰的反直觉方法。《皇家天文学会月刊》**530**（2），1907–1920（2024年）https://doi.org/10.1093/mnras/stae979。访问日期：2024年10月23日[97]Yang, Z.、Yu, C.、Xiao, J.、Zhang, B.：FAST的射频干扰深度残差检测。《皇家天文学会月刊》**492**（1），1421–1431（2020年）https://doi.org/10.1093/mnras/stz3521 。访问日期：2023年08月16日[98]Ouyang, X.、Dreuning, H.、Mesarcik, M.、Nieuwpoort, R.V.：用于射电天文学中射频干扰抑制的分层视觉变换器，阿根廷巴里洛切（2024年）