《天体物理学与天文学杂志》
(0000)**000**：#### DOI

arXiv:2611.32700v1 [astro-ph.IM] 24 Nov 2026

TWIN-1：用于在高里比达努尔进行太阳观测的新型 185 至 350 MHz 双单元射电干涉仪

Abhishek R[1]，G N Paneendra[1,2]，Raghavendra Rao K B[1]，Keerthipriya S[1] Katta Naveen[1,3]，Anumanchi Agastya Sai Ram Likhit[1,3]，Arul Pandian B[1]，Vinod K R[1]，Roshan Kumar Dora[1,3]，ArutkeerthiN[1,4]，Deep Bhowmik[1,5]，KrishnaBalajiS[1,6]，SahanaBhattramakki[1]，Prabu Thiagaraj[1]

[1] 拉曼研究所电子工程组，560080，印度[2] 基督大学（视同大学）物理与电子学系，班加罗尔 560029，印度[3] 印度科学教育与研究学院博帕尔分校物理系，462066，印度[4] 印度理工学院鲁尔基分校物理系，鲁尔基 247667，印度[5] 印度科学学院物理系，班加罗尔 560012，印度[6] 印度理工学院马德拉斯分校物理系，金奈 600036，印度

*通讯作者。电子邮件：abhishek@rri.res.in

摘要。
我们介绍一种新型双单元射电干涉仪 TWIN 的详细情况。该设备专为在高里比达努尔天文台（77.428°E，13.603°N）对 185 至 350 兆赫兹范围内的太阳事件进行常规监测而研发。这台干涉仪采用定制天线、国产射频前端（由低噪声放大器、功率合成器和高增益放大器组成），以及射频光纤信号传输模块构建。我们使用商用数字存储示波器开发了数据采集系统，并通过定制的基于 Python 的工具进行控制。示波器以 0.8 纳秒的时间分辨率对射频信号进行数字化处理，每次采集 9952 个时间采样点，标称占空比为 3 秒，所得数据则收集到远程计算机上。我们还开发了专用工具，用于分析数据并检测太阳事件。该干涉仪自 2023年7月 起投入运行。在分析中，我们检测到了当前太阳活动第25周期间发生的多个太阳事件。本文概述了该设备的设计理念、信号流、调试与验证、一次太阳事件的观测结果，以及数据采集、数据分析和归档方面的未来计划。

关键词。 天线设计；对数周期偶极天线；射电天文观测；射频干扰(RFI)；射电干涉测量；太阳事件。

1. 引言

低频射电天文学日益受到关注，并在天体物理学研究中发挥着关键作用。
天体源。全球有几台大型射电望远镜（LOFAR、MWA 和 LWA）在 350 兆赫兹以下的低频段运行。过去曾有一台简单的 20 兆赫兹双天线干涉仪 SIMPLETON 投入运行 (sim，2005)。本文介绍了在高里比达努尔射电天文台开发并调试一台简单的低频双天线对数周期偶极子阵列（LPDA）干涉仪 TWIN 的工作。该天文台位于班加罗尔以北约 85 公里处，坐标为东经 77.428°、北纬 13.603°，海拔 694 米。GeeTee、GRAPH 和 DART（Pandian等人，2026年）是该天文台的射电望远镜。GRAPH 是一台常用于观测太阳的成像望远镜。GeeTee 最初是一台成像仪器，后来改造为时域仪器，并在新冠肺炎疫情后停止运行；DART 则仍在运行，用于脉冲星研究。TWIN 是一台新建的双天线干涉仪，工作频率为 185 至 350 兆赫兹，在学生参与下于高里比达努尔天文台完成调试。它集成了定制的对数周期偶极天线、内部开发的射频前端接收系统，以及基于示波器的数据采集系统。基于 Python 的数据处理流水线可实现自动化观测排程、实时监测和初步数据分析（Likhit等人，2025年）。在过去两年的运行中，这台干涉仪表现稳定，观测了太阳凌日并探测到众多太阳事件。

太阳的活动以 11 年为周期波动。最近，在当前的太阳活动第25周期间，太阳活动有所增强。因此，

© 印度科学院

我们观测到更多事件，例如太阳耀斑、太阳风暴和日冕物质抛射，这些事件会影响近地空间天气（Jasinski&Velli，2025年）。鉴于这些变化，在此类时期进行观测对于理解其影响并分析背后的物理过程至关重要。TWIN干涉仪会在太阳经过天顶时对其进行常规监测。

本文概述了高里比达努尔射电天文台干涉仪的设计、实施以及调试初期结果。第 2 节介绍干涉仪。第 3 节概述干涉仪信号链，包括一个对数周期偶极子天线、一个低噪声放大器、一个前端射频接收机、一个射频光纤（RFoF）收发模块以及数据采集系统。第 4 节概述相关硬件的性能与特性，并展示高里比达努尔射电天文台的射频干扰情况。第 5 节介绍干涉观测并突出主要发现；第 6 节概述未来方向，随后在第 7 节给出结论。

2. 干涉仪简介

干涉仪由天线阵列组成，用于生成具有更高分辨率的图像。在干涉仪中，远场信号以平面波波前的形式到达天线，并根据源的方向和天线的朝向，在不同时间到达不同的天线。结果，来自不同天线的信号会产生相位差，在将其合并形成相控阵输出或进行相关处理以获得干涉仪输出之前，必须对这些相位差进行补偿。因此，在干涉仪天线配置中，会在信号路径中引入适当的延迟，即跟踪延迟，从而调整天线的相位中心，使其跟踪目标源的方向。进行这种信号路径跟踪对于实现天线合并输出和相关输出的最大响应至关重要。TWIN干涉仪分别记录两个单元的电压，因此如有需要，可以在后处理中在线应用此类延迟跟踪。我们开发了一个基于 MATLAB 的模型，用于计算干涉仪中的跟踪延迟（Sahana B，2019年）。

3. 干涉仪信号流

TWIN干涉仪由两个单元组成，每个单元均由四个对数周期偶极天线组合而成，如图1a、b所示。该干涉仪沿东西向基线安装，用于监测过境天体源。

如图 2 所示，LPDA 具有 11 个偶极子，设计用于 185–350 兆赫兹频段。这些偶极子由直径 9 mm 的铝管制成；支撑杆为边长 11 mm、长度 840 mm 的方形铝管。LPDA 支撑杆在低频端的间距为 21 mm，在高频端的间距为 6 mm，并在馈电端保持 50 欧姆的特性阻抗。同一组中的每个 LPDA 间距为 1.08 m，而干涉仪的两个单元（每个单元由四个 LPDA 组成）沿东西方向相距 8 m。

LPDA 接收到的天体信号本质上较弱，因此需要进行放大和滤波，以抑制干扰，并实现向实验室传输，以便记录和后续数据处理。LPDA 输出的射频信号首先由低噪声放大器（低噪声放大器）进行放大。来自四个 LPDA（分别对应每个单元）的低噪声放大器输出信号通过四路射频合路器进行合成。由此获得的单元输出信号随后在高增益前端射频接收机中分别进一步放大；该接收机安装在管状模块内，并通过定制开发的射频光纤收发器传输至实验室。在实验室中，使用数字存储示波器进行数字化，并使用计算机记录数据。干涉仪信号流的概要如图 1 所示。干涉仪的前端射频信号链由低噪声放大器、信号合路器、高增益前端射频接收机和射频光纤发射机构成，均由内部研发。低噪声放大器的增益为 11 dB，噪声系数为 0.6 dB，并配有滤波器，用于抑制低于 45 MHz 以及 88 至 108 MHz 之间的信号（调频波段），从而防止强射频干扰影响信号链。高增益放大器用于干涉仪信号链，增益为 53 dB，并集成了额外的带通滤波器，将观测频段限制在 185–350 MHz，同时避免该范围之外的通信射频干扰。

射频光纤发射机模块采用尾纤激光二极管（1310 nm，输出功率为 4 mW），将射频电信号转换为光信号。光信号通过一根从观测场地延伸至实验室、长 50 m 的单模光纤电缆传输后，由射频光纤接收机模块将其转换回电信号，再由多通道数字示波器数据采集系统进行数字化。射频光纤收发器的总增益约为 13 dB。

示波器以 1.25 GHz 的采样率同步将两个单元的信号数字化，并以突发模式每隔一次传输来自每个单元的 8 位宽、9,952 个采样电压样本的数据块

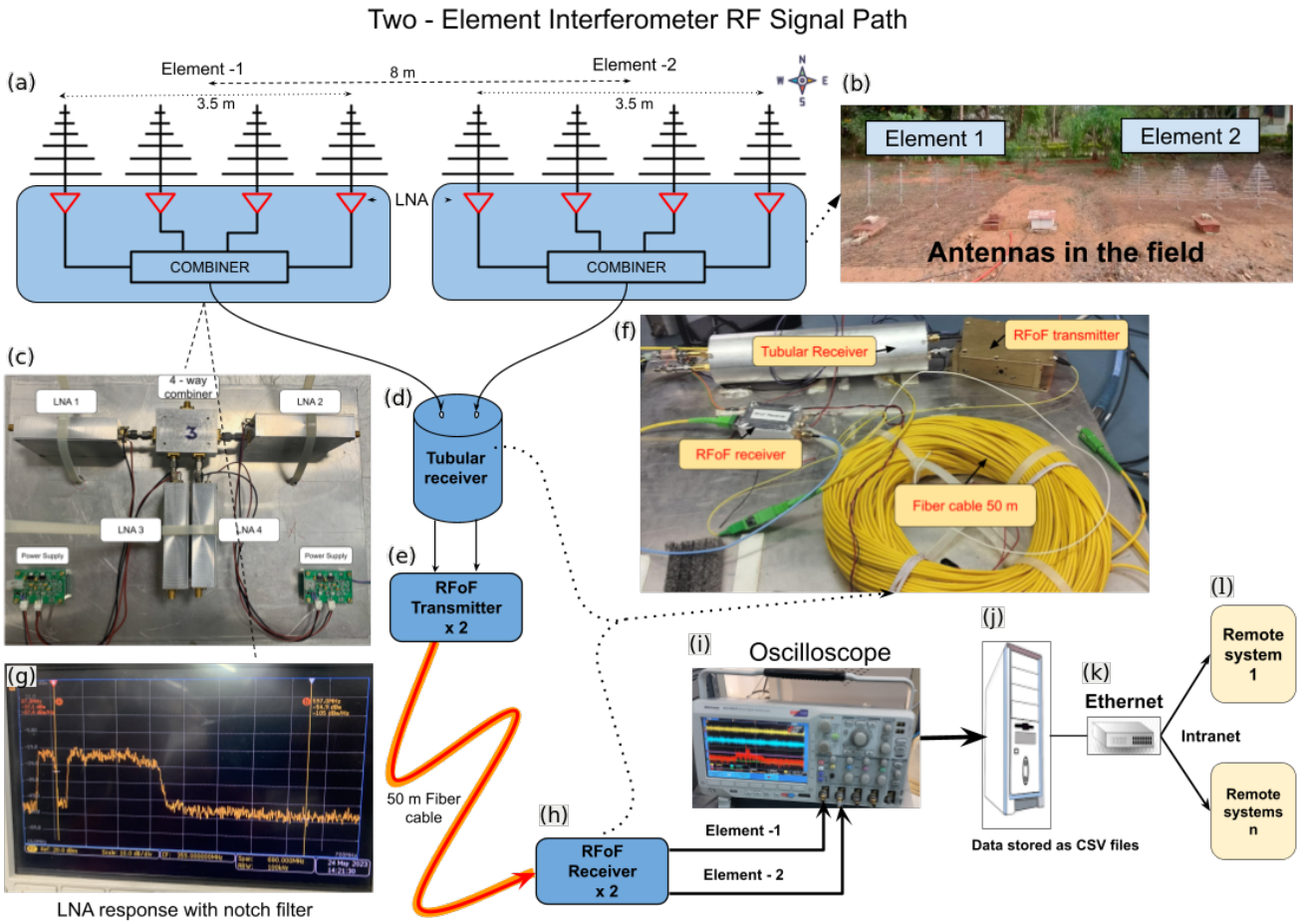

图 1：TWIN干涉仪从天线到数字化的射频信号路径框图。(a) 由 8 个对数周期偶极天线（LPDA）组成的示意图，排列为两个单元，每个单元包含 4 个 LPDA。(b) 8 个 LPDA 的实际部署。(c) 四路合路器。(d) 管状接收机。(e) 两台射频光纤发射机将模拟射频信号转换为数字光信号。(f) 管状接收机、射频光纤发射机、接收机和光纤的实际部署情况。(g) 低噪声放大器的响应，展示其包含的陷波滤波器。(h) 射频光纤接收机级。(i) 示波器，用于数字化和数据写入。(j) 数据存储在计算机中，可通过 (k) 以太网访问。(l) 内联网中的其他计算机也可以访问这些数据。

3 秒传输至远程计算机。数字化信号会实时监测，并以数据包形式存储，以供进一步分析。

干涉仪数据采集基于 Python 的数据采集套件，可实现自动化观测调度、实时监测和初步数据处理。该系统通过使用 Python 库 Streamlit 和 PyVISA 的 SCPI命令序列，实现对数据采集的控制。该界面还支持通过安全的无线局域网进行远程访问，支持用户发起的观测，并提供手动射频干扰屏蔽、凌日绘图和条纹图分析等功能（Likhit等。，2025年）。

4. 性能与表征

单个对数周期偶极子天线和单元天线的波束方向图在 CST-Studio 中进行了仿真 ®，并使用 MATLAB 模型研究了干涉仪响应（Ab-hishek，2023）。前端电子设备和光纤收发器模块均为自主研发。

4.1 使用 *CST* 模拟的对数周期偶极子天线响应

在150、200、250、300和350兆赫兹下获得的H面和E面的主瓣增益、半功率波束宽度及第一级旁瓣电平，分别对应表1 和2中的单个对数周期偶极子天线，以及表3和4中的阵元（由四个对数周期偶极子天线组成的组）。图2 b显示了单个对数周期偶极子天线的S_{11} 响应，

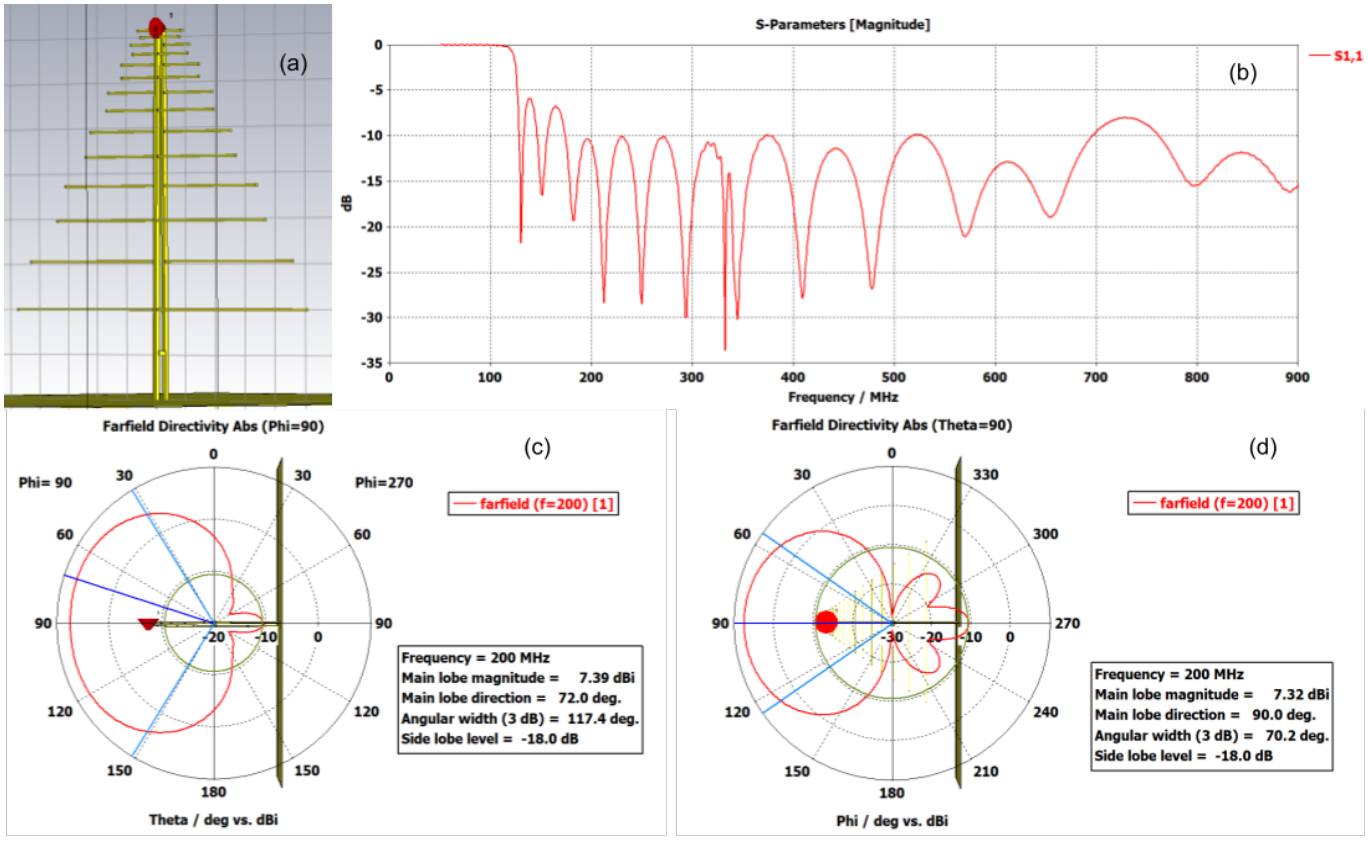

图2：(a) 对数周期　偶极天线。(b) 天线的 S_{11} 响应。(c) 200 兆赫兹下的 H平面波束响应。(d) E面波束响应，频率为 200兆赫兹。

图2 c和d显示了对数周期偶极子天线在200兆赫兹下的H面和E面响应。

单个对数周期偶极子天线H面响应

参数（单位）	频率（兆赫兹）				
	150	**200**	**250**	**300**	**350**
主瓣（dBi）	8.7	7.4	6.4	7.9	7.0
旁瓣（dB）	-19.2	-18	-18.1	-2.2	-2
半功率波束宽度	84.5	117.4	147.4	57.6	88.5

表 1：放置于地平面上的对数周期偶极子天线所获得的 H平面主瓣、旁瓣和半功率波束宽度。

4.2 干涉仪响应

首先，使用 MATLAB 开发的模型研究了干涉仪的预期响应。该 MATLAB 模型针对一个从东向西经过的源，在加入与东西向干涉仪基线相关的延迟后，对模拟的天空信号进行相关处理。如图3所示，当天线接收到的信号没有相位偏移时，所得相关图样会出现峰值响应，而相关

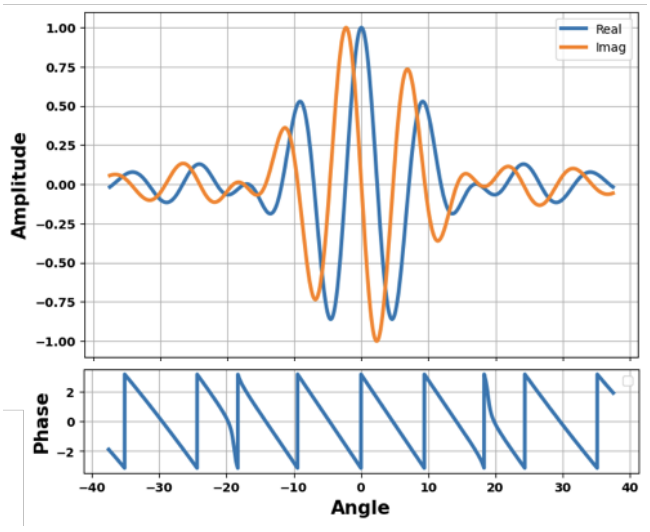

图3：使用 MATLAB 构建的模型进行干涉仪仿真。源从天顶经过 ± 2.5 小时期间的干涉条纹和相位图

单个LPDA E面响应

参数（单位）	频率（兆赫兹）				
	150	200	250	300	350
主瓣（dBi）	8.7	7.3	4.3	7.9	6.8
旁瓣（分贝）	-19.2	-18	-16	-19.1	-17.3
半功率波束宽度	58.8	70.2	104.4	42.8	72.7

表2：置于地平面上方的对数周期偶极子天线（LPDA）所获得的E面主瓣、旁瓣和半功率波束宽度。

LPDA单元H面响应

参数（单位）	频率（兆赫兹）				
	150	200	250	300	350
主瓣（dBi）	12.8	12.6	12.9	14.0	13.1
旁瓣（dB）	-19.2	-18.0	-18.1	-2.2	-2.0
半功率波束宽度	84.5	117.4	147.4	57.6	88.5

表 3：置于地平面上一个单元（由 4 个对数周期偶极天线组成）的 H平面主瓣、旁瓣和半功率波束宽度。

功率会随着信号路径中产生延迟而降低。下图显示了相应的相关相位随源的天顶角变化的关系。

4.3 前端接收机的特性

低噪声放大器（低噪声放大器）、4 路射频合路器、高增益管状接收机模块以及射频光纤收发器在天文台投入使用前，均在实验室环境中进行了特性测试。测试采用一组单音信号和宽带噪声源，在更宽的频率范围内进行，以研究设备在 185 和 350 兆赫兹下的工作情况，并验证低噪声放大器滤波器对 FM 频段（88–108 兆赫兹）的抑制效果。前端电子设备（包括低噪声放大器和管状接收机）对测试输入的频带响应如图 1 g 所示。信号链的总增益为 66 dB。

5. 观测结果

作为调试的一部分，在继续开展观测之前，我们使用双元干涉仪进行了观测，以评估射频干扰状况。图4显示了频谱图，其中可见185至350兆赫兹之间的射频干扰信号。240至270兆赫兹范围内的特征来自卫星。在

对数周期偶极子天线单元响应 E面

参数（单位）	频率（兆赫兹）				
	150	200	250	300	350
主瓣（dBi）	12.8	12.5	10.8	14.0	12.0
旁瓣（dB）	-17.0	-13.4	-11.4	-11.8	-7.4
半功率波束宽度	22.5	17.7	14.4	11.6	10.5

表 4：在地平面上方放置一个由 4 个对数周期偶极天线组成的天线单元所获得的 E面主瓣、旁瓣和半功率波束宽度。

除了这些强烈的射频干扰信号外，我们还观测到全天不同频率下偶发的杂散信号。

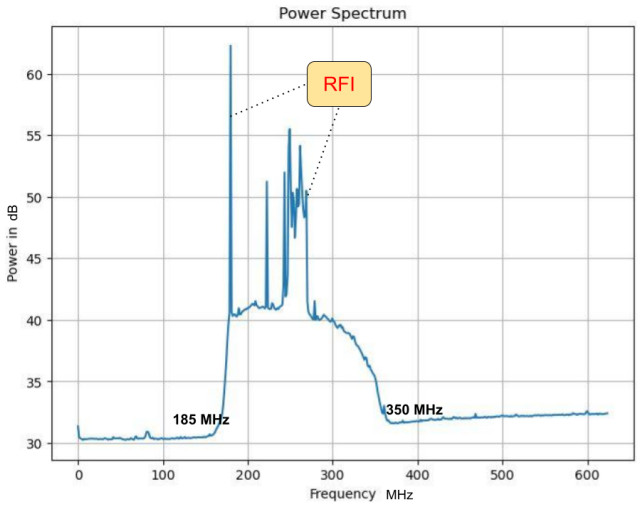

图 4：天线单元的频带响应，显示了在 185 兆赫兹以及 240 至 270 兆赫兹之间观测到的几个强干扰信号。

5.1 太阳凌日观测

观测安排在白天进行，共持续 7 小时。太阳大约用 3 小时穿过双单元干涉仪的波束。图5显示了在一次太阳凌日期间获得的动态频谱中的条纹图样。条纹的强度反映了不同频率下随时间变化的相位相干性。ff

在此类太阳观测中，可以探测到太阳耀斑和日冕物质抛射（CMEs）等事件。太阳耀斑是复杂且动态的事件，会以电磁辐射和加速的高能粒子形式释放大量能量（Benz，2016；Fletcher等。，2011）。电磁辐射是太阳爆发最早出现的特征（Salmane 等。，2018）。射电辐射的五种主要类型（也

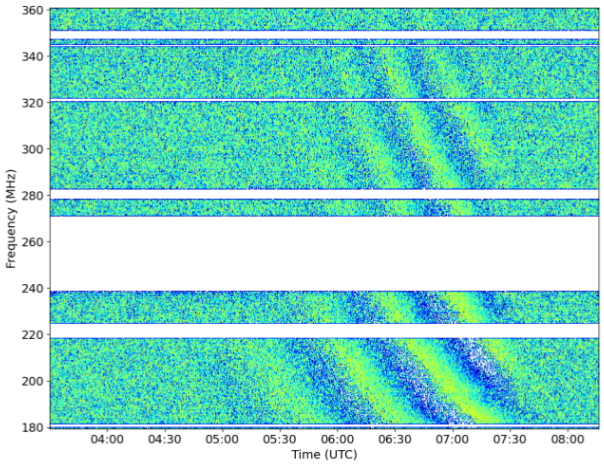

图5：条纹漂移是由太阳凌日造成的。图中可见的白色区域是经过屏蔽的射频干扰区域。

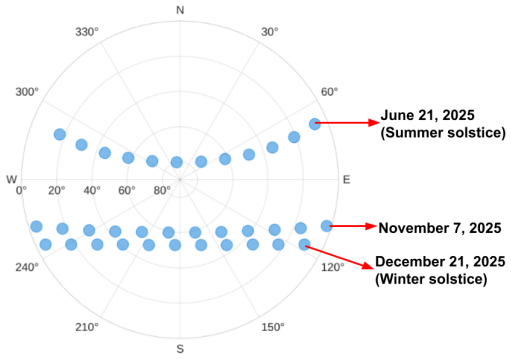

图6：这幅示意图展示了 2025年11月7日耀斑发生时太阳经过 TWIN 上空的路径。（Paneendra，2026）。

称为太阳射电暴）根据频率带宽、漂移率和持续时间等特性进行表征，并分为I型、II型、III型、IV型和V型（Smith，1966）。双元干涉仪可以探测与太阳耀斑和日冕物质抛射相关的II型、III型、IV型和V型暴，这些暴可能出现在180 MHz至350 MHz带宽内。

5.2 数据分析与结果

太阳射电暴在时间-频率图中呈现为漂移的特征。在这些信号中，本地生成的射频干扰（RFI）和卫星信号会干扰我们的频段。在分析过程中，必须抑制频谱中的射频干扰，以便识别太阳事件信号。对数据进行统计分析有助于识别并隔离受射频干扰影响的数据。手动检查数据可能十分繁琐，因此常会考虑采用基于 MAD-的算法。

TWIN观测调度器（Likhit等。，2025年）提供了一组精简选项，用于评估观测数据的质量；而更强大的分析工具见（Paneendra等。，2025年）和（Paneen-dra 等。，2026c），该工具可在时域和频域中全面抑制射频干扰。

我们的天文台位于北半球，十二月和六月两个极端纬度处太阳在 TWIN 上的位置如图 6中的示意图所示。2025年11月7日，发生了一次强烈的太阳耀斑，TWIN 数据捕获了这一事件。图 7 是分析后的输出，生动地描绘了这一强烈的太阳事件（Paneendra 等。，2026a）。该事件的检测结果与乌代布尔太阳天文台的 e-CALLISTO 乌代布尔太阳射电频谱图相符（USO，2025年）。图 6 显示了2025年11月7日耀斑期间太阳在 TWIN 上空的运行路径。

6. 未来展望与讨论

人工检测太阳事件可能困难且耗时；因此，我们旨在使用机器学习技术实现自动化。该过程中的一些挑战包括射频干扰检测与抑制。射频干扰抑制也可以使用更现代的技术实现自动化，其中涉及人工智能和机器学习。实时射频干扰抑制和太阳射电暴检测管线正在开发中，以纳入该管线。过去两年收集的数据已完成全面分析，检测到的太阳耀斑将在我们即将发表的论文（Paneendra等。，2026b）中报告。在当前分析中，尚未考虑跟踪延迟，因此干涉观测时间缩短至约3小时；我们将纳入跟踪功能，以实现更长时间、更高灵敏度的观测。过去两年期间的完整太阳观测数据集已存档，并可在数据门户 [https://www.rri.res.in/obsastro]。

7. 结论

我们设计并实现了一台使用对数周期偶极子天线的双元干涉仪，位于 RRI 高里比达努尔射电天文台。我们已成功采集并处理数据，以观测太阳凌日。在180至350 MHz 频段进行观测，有助于探测日冕上层的太阳辐射（Benz，2016）。自 2023年7月 起，我们几乎持续开展太阳监测，并在观测数据中检测到多个太阳事件，相关报告见（Paneendra 等。，2026c）。一种易于构建的仪器——

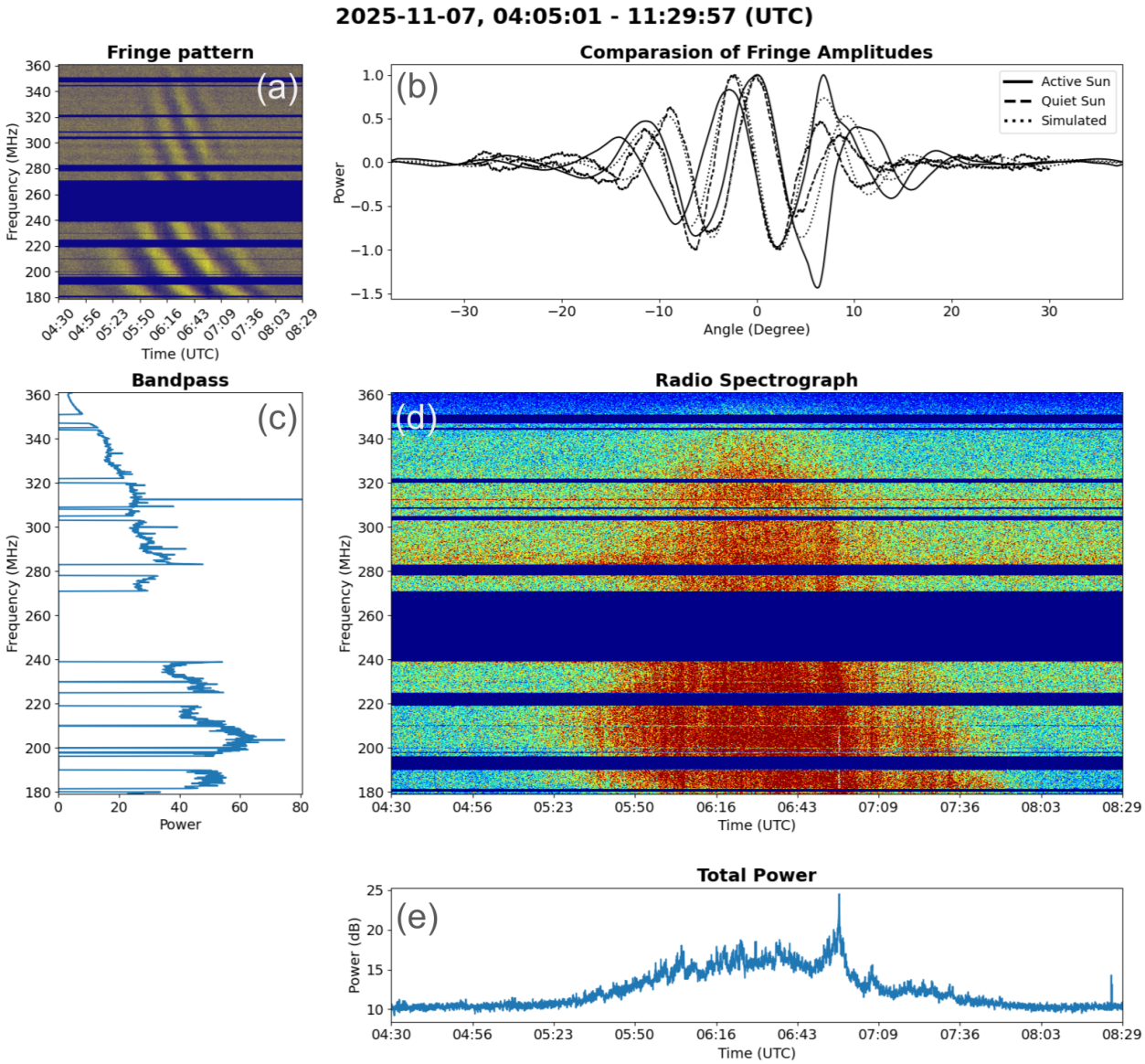

图7：2025年11月7日：TWIN探测到的一次重大太阳耀斑。(a) 条纹漂移。(b) 200兆赫兹处模拟信号、宁静太阳和活动太阳的条纹振幅比较。(c) 平均带通。(d) 2025年11月11日观测到的一次IV型太阳射电暴的频谱图（Paneendra 等。，2026a)（e）接收信号的功率

例如 TWIN 这样的仪器，有助于持续观测并监测事件，以研究空间天气，同时为学生提供仪器构建和天文数据分析方面的培训机会。

8. 致谢

我们感谢 EEG 成员、RRI 和天文台工作人员提供的帮助，以及他们为建造干涉仪并使其投入运行所作的贡献。我们衷心感谢 S Somashekar 在RFoF模块设计方面给予的指导。我们感谢工场团队，尤其是 Srinath、Janardhana 和全体天文台工作人员，感谢他们帮助我们调试并启用该系统，并参与系统的日常维护。

参考文献

2005年，双元件20兆赫兹射电干涉仪，澳大利亚

2025年，USO/PRL 乌代布尔站使用 CALLISTO 进行太阳射电观测

Abhishek, R. 2023，相关器 MATLAB 模型

Benz, A. 2016，《太阳物理学评论》，14，doi:10.1007/s41116-016-0004-3

Fletcher, L., Dennis, B., Hudson, H., 等. 2011，ssr，159，19

Jasinski, J. M., & Velli, M. 2025，《天体物理学杂志快报》，990，L55

Likhit, A. A. S. R., Naveen, K., Pandian, B. A., Ab- hishek, R., & Prabu, T. 2025，《面向高里比达努尔 Gauribidanur射电天文台 SKA 低频波束形成测试台对数周期偶极子天线阵列的远程数据采集与分析创新网络工具》，arXiv:2501.13090 Pandian, A., Bagchi, J., Thiagaraj, P., 等.2026，GBD- DART-I：高里比达努尔 130 兆赫兹至 350 兆赫兹范围内的脉冲星与瞬变源观测，arXiv:2602.00677 Paneendra, G. N. 2026，高里比达努尔射电天文台上空的太阳路径 Paneendra, G. N., Abhishek, R., Vinod, K. R., B, A. P., & Thiagaraj, P. 2026a，RRI TWIN 于2025年11月7日探测到的重大太阳事件 Paneendra, G. N., Valsan, V., & Thiagaraj, P. 2025，使用双元干涉仪研究太阳射电暴 Paneendra, G. N., Vinod, K. R., Pandian, B. A., 等. 2026b，太阳活动第25周与 180—350 兆赫兹空间天气监测 Paneendra, G. N., Vinod, K. R., , 等. 2026c，TWIN- 2：将 180—350 兆赫兹太阳射电暴定时与 GOES 和 Aditya-L1 X 射线探测结果进行比对，arXiv:2611.25642 Sahana B, P. T. 2019，虚拟干涉测量，Gi- Hub:Interferometry Salmane, H., Weber, R., Abed-Meraim, K., Klein, K.- L., & Bonnin, X. 2018，《空间天气与空间气候杂志》，8，A43

Smith, F. G. 1966，射电天文学