0254-6124/2026/46(5)-1088-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

DING Zonghua, WU Jian, YANG Song, DAI Liandong, XU Bin, MIAO Jiansu. Construction Process and Measurement Progress of Qujing Incoherent Scatter Radar (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1088–1098. CSTR:32142.14.cjss.2026–0003. DOI:10.11728/cjss2026.05.2026–0003

曲靖非相干散射雷达建设历程与观测研究进展*

丁宗华[1,2] 吴 健[1,3] 杨 嵩[1,2]
代连东[1,2] 徐 彬[1,3] 苗建苏[1,2]

1(中国电波传播研究所 青岛 266107)

2(云南昆明电磁波环境国家野外科学观测研究站 曲靖 655000)

3(电波传播全国重点实验室 青岛 266107)

摘 要 非相干散射雷达是目前地基电离层探测的重要设备. 本文概述了中国曲靖非相干散射雷达早期论证与建设过程, 给出该雷达在电离层、空间碎片、月球探测方面的代表性结果, 分析了目前存在的主要问题, 介绍了下一步观测计划. 结果表明, 曲靖非相干散射雷达可用于电离层电子密度与等离子体温度日变化、电子密度二维分布、电离层异常结构的探测以及双站接收实验, 支撑曲靖地区电离层变化与空间天气扰动研究; 可用于 3 cm 以上的低轨道空间碎片凝视探测, 给出距离、方位、仰角、散射截面、径向速度等参数, 进一步估算几何特征、运动姿态等, 支撑低轨道空间碎片监测预警; 可用于月球散射回波二维成像探测, 给出月球反照率等参数的空间分布, 支撑月球次表层资源探测.

关键词 非相干散射雷达, 电离层, 空间碎片, 月球

中图分类号 P352

Construction Process and Measurement Progress of Qujing Incoherent Scatter Radar

DING Zonghua[1,2] WU Jian[1,3] YANG Song[1,2]
DAI Liandong[1,2] XU Bin[1,3] MIAO Jiansu[1,2]

1(*China Research Institute of Radiowave Propagation*, *Qingdao* 266107)

2(*Yunnan Kunming Electromagnetic Environment National Observation and Research Station*, *Qujing* 655000)

3(*National Key Laboratory of Radio Wave Propagation*, *Qingdao* 266107)

Abstract The Incoherent Scatter Radar (ISR) is the most powerful equipment for the ionosphere

* 国家重点研发计划项目 (2025YFF0510702) 资助

2026-01-03 收到原稿, 2026-03-27 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

sounding on the ground. Some important events during the design and construction process of the Qujing ISR were described. Representative measurement results were introduced including the ionosphere, space debris and Moon measurement. The results show that this ISR can be used for the routine measurement of ionospheric electron density and plasma temperature in the fixed direction, the two-dimensional distribution in the scan mode, the abnormal structure of electron density, the bi-static receiving of the ionosphere. And it owns the ability of the space debris measurement with the size of more than 3 cm in the low Earth orbit in the beam parking mode, and the two-dimensional imaging and the scatter model correction of Moon. So Qujing ISR is of important value for the ionosphere and space environment measurement in China.

Key words Incoherent Scatter Radar (ISR), Ionosphere, Space debris, Moon

0 引言

电离层中等离子体密度随机热起伏对入射电磁波产生的散射称为非相干散射, 其散射截面与带电粒子荷质比成正比, 因此散射主要由电离层自由电子产生. 尽管电离层自由电子散射截面小, 散射信号弱, 但是仍可被大功率、高灵敏雷达探测. 非相干散射雷达探测具有探测参数多、空间覆盖范围广等突出优点, 是电离层探测的关键核心设备. 此外, 在流星、空间碎片、月球等探测以及射电信号被动接收方面也具有重要应用潜力.

Gordon[1] 于 1958 年首先提出用大功率雷达探测电离层后向非相干散射回波信号的设想. 随着雷达发射、接收和天线等技术发展, 国际上以美国及欧洲非相干散射科学联合会 (EISCAT) 为代表的国家和机构, 先后建设了约 10 套非相干散射雷达[2,3], 为全球电离层时空变化特性、大气层–电离层–磁层耦合、电离层物理机制与模式开发等提供了关键数据支撑.

建设中国自主的非相干散射雷达是肖佐教授等老一辈空间科学工作者的梦想. 1982 年, 中国电波传播研究所 (以下简称电波所) 利用曲靖原 110 雷达, 采用同步滤波器实现信号积累, 自主研制信号接收与数据处理系统及电离层参数反演软件, 在中国首次实现了电离层非相干散射探测[4], 为建设中国自主的非相干散射雷达打下了坚实技术基础. 图 1 为利用原 110 雷达于 1982 年 8 月 11 日 20:42 LT 探测的电离

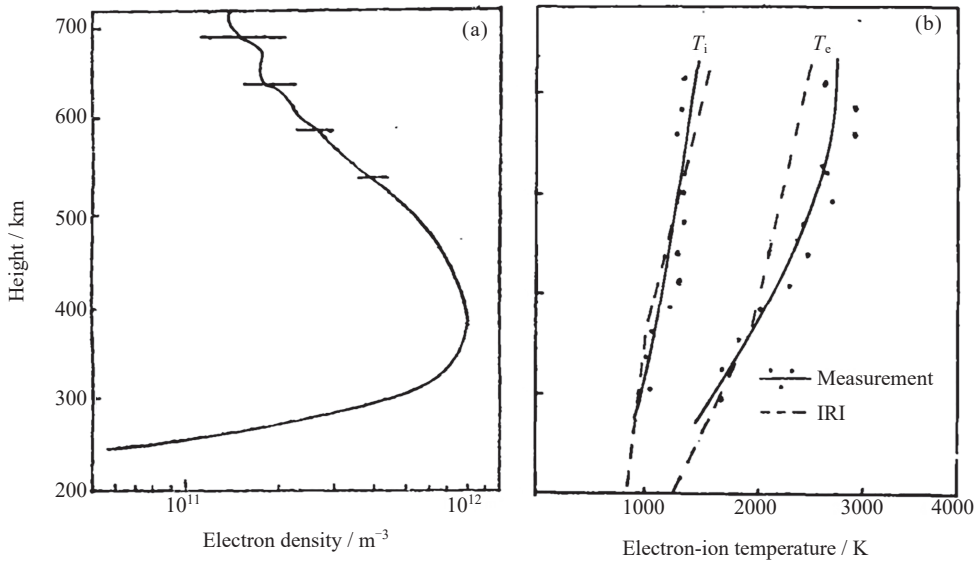


图 1 1982 年 8 月 11 日原 110 雷达探测得到的电离层电子密度 (a) 与电子–离子温度 (b) 剖面[4]

Fig. 1 Profiles of ionospheric electron density (a) and electron-ion temperature (b) observed by the original 110 radar on 11 August 1982

层电子密度与电子离子温度剖面[4], 图 1(b) 给出了国际参考电离层模型计算得到的电子 (T_e) 与离子温度 (T_i), 用于对比验证, 表明中国 20 世纪 80 年代就已掌握非相干散射雷达数据处理方法. 在子午工程 (国家重大科技基础设施) 支持下, 电波所通过改造原 110 雷达, 2012 年建成了中国首套非相干散射雷达[5–7]. 该雷达采用大功率真空电子管集中发射、大口径抛物面天线机械扫描等传统技术体制, 为中国电离层空间科学与电波传播基础研究提供了重要实验条件.

肖佐教授对曲靖非相干散射雷达项目给予了很大关注与支持. 本文介绍了该雷达的论证与建设过程, 给出主要观测实验结果, 并对下一步工作计划进行了展望.

1 论证与建设过程

20 世纪 90 年代, 中国空间物理学家魏奉思院士牵头提出了东半球空间环境地基综合监测子午链工程 (简称子午工程) 设想, 肖佐教授作为总体组成员参加论证. 借助子午工程的建设契机, 为了最大程度提升中国空间物理监测能力与国际影响力, 电波所吴健研究员提出了利用曲靖原 110 雷达建设中国自主非相干散射雷达的方案建议. 原 110 雷达具有发射功率高、天线口径较大、站址电磁环境优良的特点, 适合电离层微弱的非相干散射信号探测. 肖佐教授对该方案的科学目标、技术指标以及关键技术方案的设计提供了重要指导.

在子午工程深入论证阶段, 肖佐教授对曲靖非相干散射雷达技术方案给予了重要指导. 2005 年该方案通过立项建议评审, 2006 年通过了可行性研究评审, 2007 年通过了初步设计评审, 2008 年正式启动建设, 2011 年底首次得到有效回波数据. 图 2 为 2011 年 11 月 11 日该雷达调试期间首次探测的电离层 F 层非相干散射回波功率谱与功率剖面, 其中功率谱具有双峰结构, 回波功率剖面随高度呈现先上升后下降的变化趋势, 显示了最基本的非相干散射特征, 验证了该雷达获取回波数据的准确性. 图中横坐标对应高度,起始高度为 150 km, 每个点对应 4.5 km; 纵坐标对应回波强度.

随后经过半年的改进、完善与试运行, 曲靖非相干散射雷达于 2012 年 6 月基本建成. 2012 年 6 月 21 日, 时年 76 岁的肖佐教授赴现场参加测试验收 (见图 3), 对该雷达获取有效回波的成果给予高度肯定, 也对雷达后续高质量稳定运行提出了建议. 曲靖非相干散射雷达的功能、技术指标以及初步探测结果等详细介绍见参考文献 [5–7]. 曲靖非相干散射雷达的建成, 填补了中国自主建设非相干散射雷达的空白, 实现了老一辈电离层空间物理科学家的梦想, 为中国电离层探测大型实验仪器设计与建设积累了宝贵经验, 研究团队在建设过程中也吸取了诸多教训,

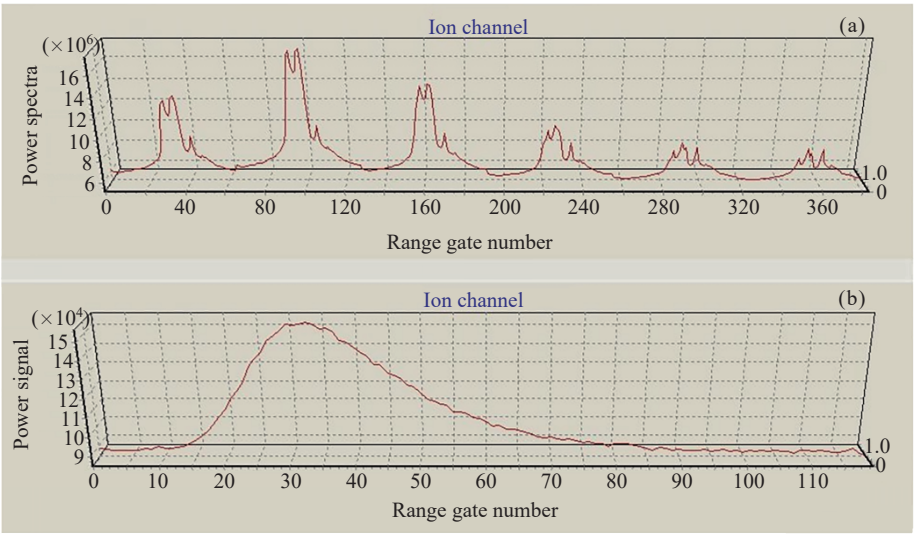


图 2 2011 年 11 月 11 日调试期间获得的有效电离层非相干散射回波功率谱 (a) 与功率信号 (b)

Fig. 2 Valid ionospheric echo power spectra (a) and power signal (b) recorded by the Qujing Incoherent Scatter Radar during the debugging period on 11 November 2011



图 3 2012 年 6 月 21 日肖佐教授参加曲靖非相干散射雷达现场测试 (a) 与验收会议 (b)

Fig. 3 Prof. Zuo Xiao attended the site test (a) and acceptance meeting (b) of Qujing Incoherent Scatter Radar on 21 June 2012

为中国子午工程三亚非相干散射雷达的设计、建设与运行提供了非常重要的技术支撑.

欧洲非相干散射科学联合会 (EISCAT) 在北欧建有三套先进的非相干散射雷达 (采用传统技术体制), 开展了数十年的实验研究, 积累了丰富研究经验. 为了掌握最先进的非相干散射探测技术, 更好指导曲靖非相干散射雷达的方案设计与建设运行, 电波所吴健研究员提出加入 EISCAT 的设想, 得到肖佐教授等科学家的大力支持. 2005 年 10 月 19 日, 在娄勤俭副部长、EISCAT 理事长、肖佐教授等见证下 (见图 4), 电波所与 EISCAT 签署协议, 代表中国正式加入 EISCAT. 为了与 EISCAT 合作培养中国非相干散射探测青年人才队伍, 电波所于 2006 年 10 月 30 日至 11 月 3 日在青岛主办了 EISCAT 非相干散射雷达培训班, 主要内容为电离层非相干散射基础理论、曲靖非相干散射雷达关键技术解决方案、空间物理非相干散射探测研究前沿等, 肖佐教授等科学家参会授课 (见图 5), 并与青年科技工作者共同交流.



图 4 2005 年 10 月 19 日肖佐教授见证中国加入 EISCAT

Fig. 4 CRIRP formally joined EISCAT in the witness of Prof. Zuo Xiao on 19 October 2005



图 5 2006 年 10 月底肖佐教授与 EISCAT 非相干散射雷达培训班学员合影

Fig. 5 Prof. Zuo Xiao attended the EISCAT ISR school in the end of October 2006

2 电离层探测

曲靖非相干散射雷达采用全可动抛物面天线, 通过控制天线指向, 探测不同方向与区域的电离层分布与变化[5,7,8].

2.1 固定指向探测

自 2012 年建成运行以来, 研究者利用该雷达主要开展了固定指向 (天顶方向) 的电离层探测, 积累电离层电子密度、等离子体温度等参数数据, 为电离层气候学特征认识、扰动特征及机理研究提供基础数据. 图 6 为曲靖非相干散射雷达观测的电离层回波功率 (a) 与功率谱 (b) 数据实例[7], 图 6(b) 中不同颜色代表归一化功率谱密度, 该密度与回波信号强度成正比. 从图中可见电离层 Es 层、谷区、F_1 层、F_2 层以及

顶部各层的分布高度与信号相对强弱, 显示了曲靖地区电离层非相干散射回波的基本特征. 图 6 与图 2 基本一致, 但是图 6 给出了更丰富的分层结构信息. Liu 等[9] 利用曲靖非相干散射雷达、垂直探测仪以及张衡一号卫星的探测数据, 开展了固定高度 (张衡一号卫星轨道) 处电离层电子密度与电子温度的数据对比分析, 验证了曲靖非相干散射雷达探测数据的准确性.

利用曲靖非相干散射雷达固定指向探测数据, 可分析曲靖地区电离层电子密度、等离子体温度变化、扰动特征及其可能机制. 图 7 为电离层电子密度日变化分布 (仅白天), 可见电子密度最大值、峰值高度、厚度的日变化过程, 图 7(a) (b) 分别为 2023 年 10 月 16 日与 11 月 7 日观测结果, 电子密度日变化差异显著, 表明曲靖地区秋季电离层电子密度存在显著的逐日变化. Ding 等[10] 分析了曲靖地区电子–离子温度变化特征及其与电子密度的相关性, 给出了曲靖地区电子温度剖面的基本特征, 发现低电离层电子温度与电子密度成正相关, F 层存在明显的反相关性, 认为与不同高度电离层具有不同物理机制有关; Liu 等[11] 分析了日落期间电子密度的增强特征, 发现峰值高度以下电子密度增强更显著, 峰值高度以上不明显, 同时伴随峰值高度下降; 峰值高度相对最大电子密度存在 1.5～2.5 h 的时间延迟, 可能由向下的等离子体通量变化引起. Liu 等[12] 分析了 2015 年 5 月 29 日至 6 月 2 日磁静日期间最大电子密度与峰值高度的逐日扰动特性, 认为可能是赤道电场增强导致了此次扰动事件.

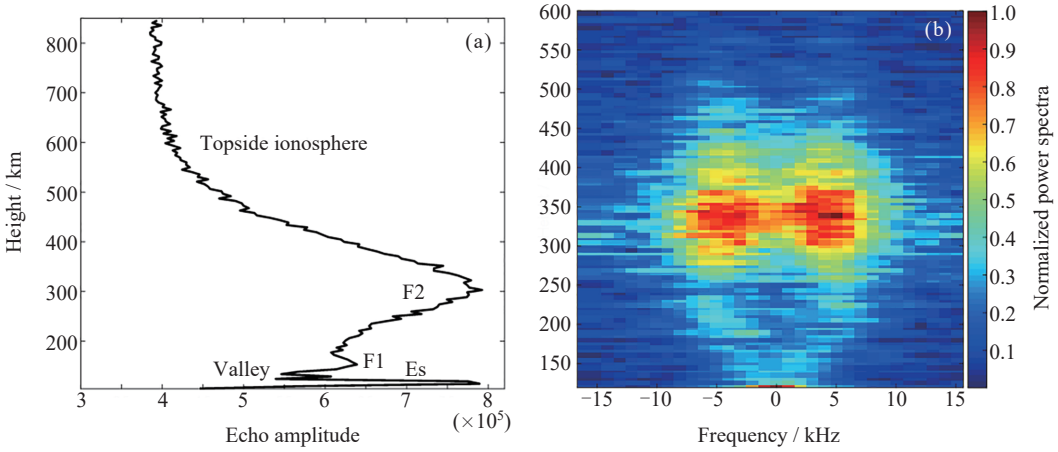


图 6 电离层散射回波剖面 (a), 归一化功率谱 (b)[7]

Fig. 6 Ionospheric scatted echo profile (a), and the normalized power spectra (b)[7]

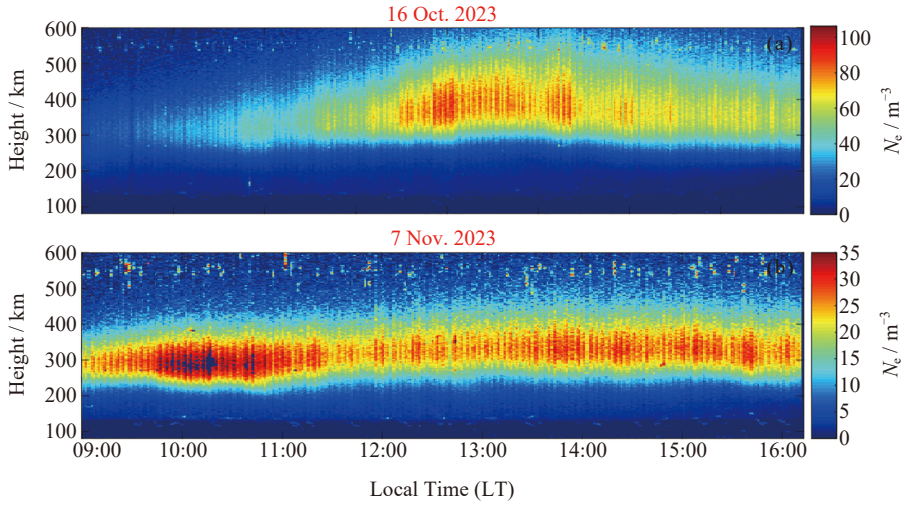


图 7 电离层电子密度日变化对比

Fig. 7 Comparison of the daily variations of ionospheric electron density

此外, Ding 等[13] 利用固定指向观测的低电离层探测数据, 分析了低电离层电子密度随地方时的变化特征, 发现不同时刻的电子密度剖面形态不一样, 且相对正午时刻具有一定的对称性. E-F 谷区在日出时较深较宽, 在 09:00－13:00 LT 期间随着电子密度增加, 谷区较窄并缓慢变化, 15:00 LT 开始谷区再一次加深.

2.2 二维扫描探测

曲靖非相干散射雷达可通过设置固定方位角连续改变仰角或固定仰角连续改变方位角的方式进行二维探测. 图 8 为 2014 年 7 月 23 日 15:00 LT 曲靖非相干散射雷达固定方位角 (180°) 时改变仰角扫描探测的电离层回波强度二维分布 (已做归一化处理, 无量纲)[7], 仰角变化范围为 30°～84°, 仰角步长为 5°. 由图可见, 在北纬 23°N－25°N 地区的电离层 F_2 层回波较强, 在 21°N－23°N 之间的 F_2 层回波随纬度的降低逐渐减弱. 由于电离层非相干散射回波与电子密度成正比, 电子密度越大, 散射回波越强, 表明电离层北驼峰可能移动至曲靖附近地区[5,7].

2.3 异常结构探测

受磁暴、低纬电动力学过程等影响, 曲靖地区电离层会出现特殊结构与扰动. 图 9 为 2025 年 9 月 23 日、9 月 25 日与 11 月 12 日探测的电离层回波功率随时间变化, 不同颜色代表回波信号强度 (无量纲).

由图 9 (a) 可见, 从 12:00－24:00 LT, 电离层散射回波出现了周期性振荡特征 (周期约 3 h), 同时伴随峰值高度的周期性上升与下降过程, 可能与大气周期性波动调制有关. 从图 9 (b) 可以看出, 在 21:30－22:30 LT 时间段, 电离层散射回波出现突然增强, 且高度突然增加 (从约 250 km 突增至约 350 km), 这与三亚非相干散射雷达观测结果基本类似, 但是三亚的非相干散射雷达观测的突然增强结构持续时间更长, 回波增强对应的散射高度更高, 可能与瑞利泰勒不稳定性产生的次生等离子体结构有关. 三亚地区纬度更低, 地磁场构型更有利于瑞利泰勒不稳定性的产生与发展, 曲靖地区位于中纬过渡区, 导致两地观测现象存在差异. 由图 9 (c) 可见, 在 11:00－12:00 LT 出现异常增强回波, 在 13:00－14:30 LT 散射回波近乎消失 (电子密度极小), 在 15:00－20:00 LT 回波恢复正常且显示周期性振荡特征 (周期约为 2.5 h). 图 9 与图 7 的逐日变化现象明显不同, 表明曲靖地区电离层出现异常结构或扰动, 值得深入研究.

2.4 基于双站体制的顶部电离层探测

曲靖非相干散射雷达天线仅 29 m, 增益有限, 难以有效探测顶部电离层. Ding 等[14] 介绍了利用该雷达发射, 采用某 12 m 太阳射电天线开展电离层散射实验, 初步结果验证了双站实验的可行性. 图 10 为 2023 年 4 月 17 日利用该雷达发射, 500 m 球面射电望远镜 (FAST) 接收的电离层非相干散射回波功率

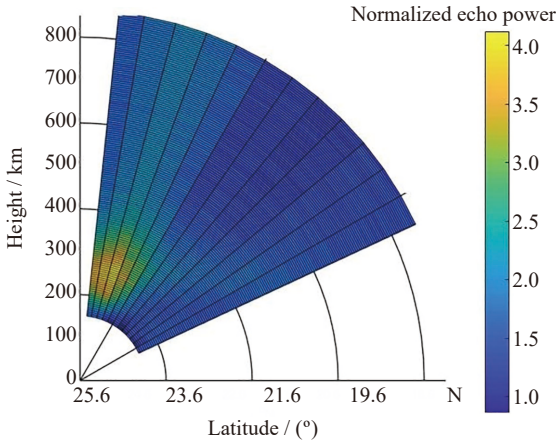


图 8 曲靖非相干散射雷达方位固定、仰角扫描探测的回波功率分布[7]

Fig. 8 Ionospheric echo profile in the elevation scan mode with the fixed azimuth by Qujing ISR[7]

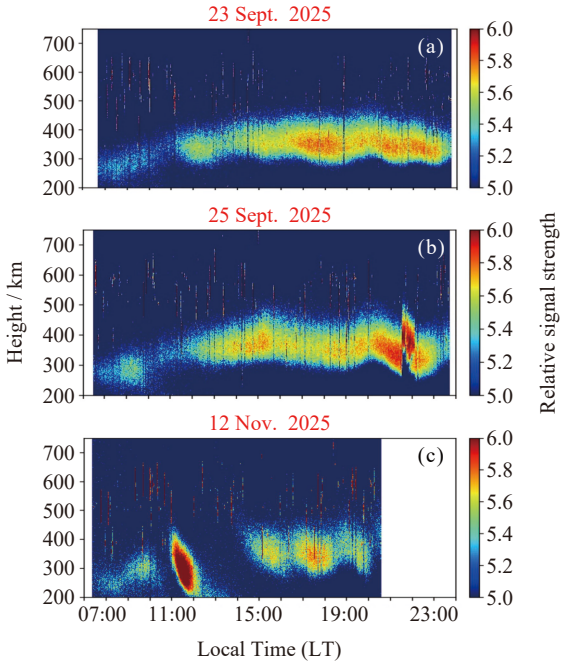


图 9 不同日期探测的电离层非相干散射回波实例

Fig. 9 Examples of the ionospheric echoes recorded by Qujing ISR in different dates

谱, 双站探测散射点位于曲靖雷达与 FAST 中点, 该散射点高度为 600 km, 处于顶部电离层区域, 探测时间持续约 41.5 h. 曲靖非相干散射雷达发射信号为矩形脉冲, 脉冲宽度为 480 μs (对应距离分辨率约 75 km), FAST 在 500 MHz 时的增益约为 63 dB, 相对曲靖非相干散射雷达天线增益提高 110 倍. 可见 600 km 的非相干散射回波功率谱仍具有双峰结构, 在 14:00−16:00 LT 散射信号最强, 夜间 22:00−03:00 LT 散射信号最弱, 散射谱宽约十几 kHz, 比图 6 的底部电离层散射谱略宽, 上述特征符合电离层非相干散射基本特征[1,2], 验证了利用双站体制探测顶部电离层的可行性. 2023 年 4 月 18 日的最强功率谱出现在 08:00−10:00 LT, 而不是 14:00−16:00 LT, 表明顶部电离层也存在较强逐日变化, 与图 7 具有一定相似性.

3 空间碎片与月球探测

非相干散射雷达探测电离层与空间硬目标的主要区别体现在信号处理方法[7]. 因此, 可对回波采用与电离层散射回波不同的处理方法, 可将非相干散射雷达用于空间碎片、月球等硬目标探测.

3.1 空间碎片探测

空间碎片是指空间轨道上运行的无功能的空间物体. 随着人类空间活动的日益频繁, 空间碎片数目不断增加, 对空间活动安全的威胁愈发严重, 因此需要持续加强空间碎片探测. 自 20 世纪 90 年代, 国际上开展了基于非相干散射雷达的空间碎片探测研究[15], 为欧洲空间局 (ESA) 空间碎片建模与预警服务提供了数据支撑.

Ding 等[16]、Yang 等[17] 利用曲靖非相干散射雷达开展了空间碎片信号处理与数据分析工作, 建立了基于曲靖非相干散射雷达的空间碎片凝视探测方法, 提取了空间碎片距离、方位、仰角、速度、雷达散射截面 (RCS) 等信息, 积累了曲靖地区多年的空间碎片探测数据, 初步给出了曲靖地区空间碎片分布统计特征. 图 11[17] 为曲靖非相干散射雷达探测的空间碎片穿越雷达波束期间的回波信噪比强度与距离变化, 横坐标对应空间碎片穿越雷达波束的时间 (横坐标为脉冲序列号, 对应于空间碎片穿越波束的持续时间, 每个基本单位表示一次检测, 对应 10 个脉冲重复周期即 0.12 s), 可见空间碎片从雷达旁瓣逐渐进入波束中心最后离开波束的完整过程 (持续时间约 20 个基本单位, 即 2.4 s), 回波信号强度先逐渐增加, 随后减小, 并且伴随一些随机起伏变化 (可能与空间碎片的姿态变化等有关). 在此期间空间碎片的距离缓慢变化, 在穿过雷达波束 2.4 s 内距离变化约为 3 km, 对应的径向速度约为 1.2 km·s^{-1}, 远低于低轨目标绕地球运动速度, 表明空间碎片运动轨迹近似垂直于雷达波束, 因此径向速度较小. Ding 等[16] 与 Yang 等[17] 分析了曲靖地区空间碎片的分布特征, 发现空间碎片主要分布在 600～1100 km, 1400～1500 km 两个高度区间; 探测尺寸约 3～1000 cm, 具体尺寸分布与高度有关,

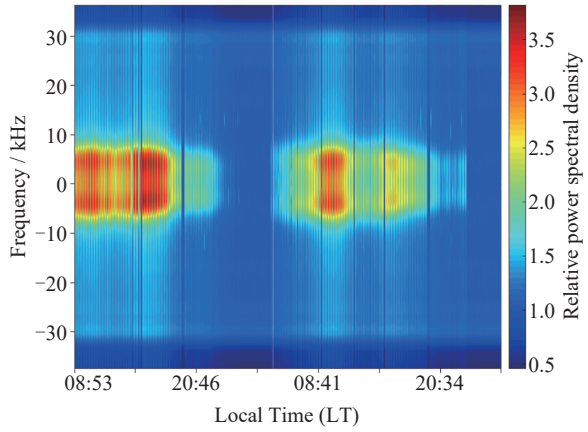


图 10 2023 年 4 月 17 日探测的 600 km 电离层散射回波谱的地方时变化

Fig. 10 Variations of the echo spectra at 600 km with local time on 17 April 2023

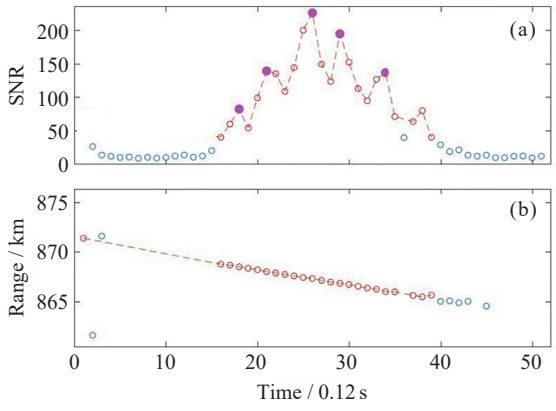


图 11 空间碎片穿越雷达波束期间的回波 (a) 与距离 (b) 的变化

Fig. 11 Variations of echo amplitude (a) and range (b) of space debris when passing through the beam

高度越低, 可探测的空间碎片尺寸越小, 在 300 km 探测尺寸约为 3 cm, 与 EISCAT 在北欧高纬地区观测结果基本一致[15].

空间碎片主要环绕地球进行高速运动 (受地球引力作用), 同时进行不规则运动 (例如翻滚、微动). Sun 等[18] 利用曲靖非相干散射雷达空间碎片回波信噪比数据, 提出了基于逆拉登变换 (Inverse Radon Transform, IRT) 的空间碎片微动特征提取方法, 提取了空间碎片自旋或翻滚半径、自旋周期以及姿 态角等参数, 初步判断了其几何形状, 为中国空间碎片特征识别提供了新方法. 图 12 为 2017 年 6 月 30 日 04:55:33 LT 曲靖非相干散射雷达探测的某空间碎片回波分析结果 (轨道高度 448 km)[18]. 从图中可见, 该目标存在两个散射中心, 形状具有不规则性, 大体为长条形.

3.2 月球探测

月球是距离地球最近的天体, 月球探测具有重要的科技、经济与战略意义, 中国实施了月球探测嫦娥工程, 实现了“绕、落、回”三步走目标, 在国际上产生了重大影响. 相比于嫦娥工程的绕月卫星探测与落月就位探测, 采用地基无线电雷达进行月球遥感探测具有一定特色, 例如不受太阳光照和地球气象条件限制、低频段电磁波可穿透月球浅表层等, 有望成为中国月球探测的重要补充. 美国 Arecibo 雷达是全球最著名的月球与行星探测雷达[19], 在月球二维成像、月球南极水冰探测等方面取得了重要成果. EISCAT 利用其 930 MHz 非相干散射雷达开展了月球回波二维成像实验, 距离分辨率为 600 m[20]; Sun 等[21] 综述了中国地基无线电雷达月球探测进展, Yang 等[22,23]、Li 等[24] 等介绍了基于曲靖与三亚非相干散射雷达的月球探测实验结果.

由于月球相对地球运动速度缓慢且已知, 将曲靖非相干散射雷达波束指向月球, 发射高功率脉冲信号 (目前主要采用 13 位巴克码编码, 脉冲重复周期为 12 ms, 码元宽度为 30 μs), 通过对月球回波进行常规的脉冲压缩与相干处理, 即可得到月球表面不同时延 (对应于月球表面不同位置) 的回波功率. 图 13 为曲靖与 Arecibo 非相干散射雷达 (68 cm 波长, 天线口

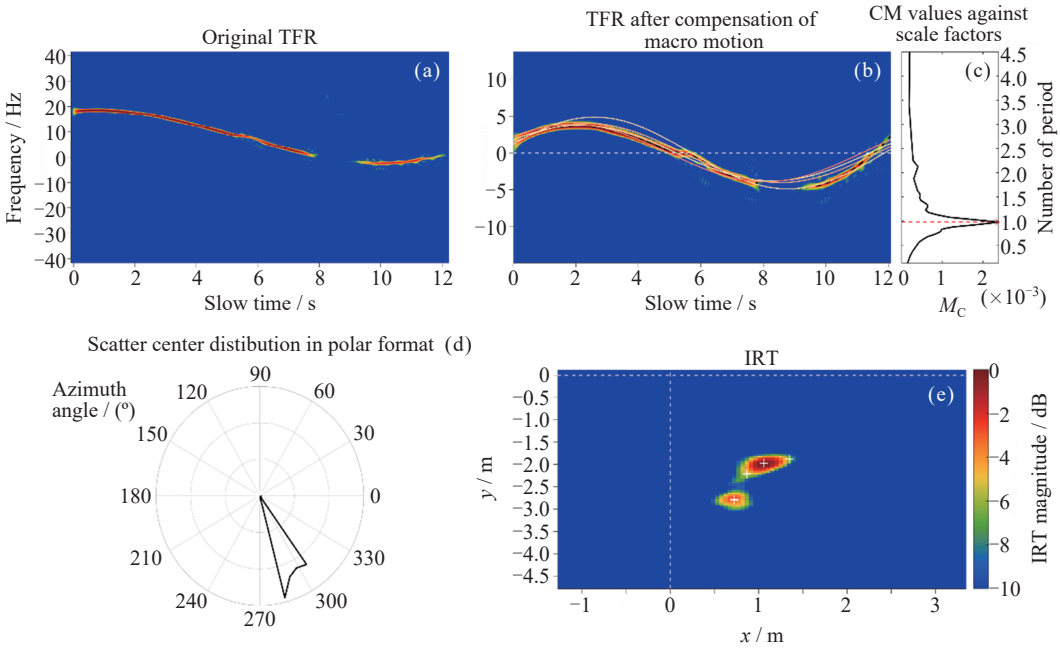


图 12 2017 年 6 月 30 日曲靖非相干散射雷达空间碎片回波分析结果[18]. (a) 原始回波时频分布, (b) Dechirp 修正后的时频分布, (c) 各时间尺度因子对应 IRT 的集中度值, (d) 散射中心在极坐标系下的排列, (e) IRT 成像结果

Fig. 12 Experimental result of space debris echo on 30 June 2017 by QJISR[18]. (a) Time-Frequency Representation (TFR) of the raw echo, (b) TFR after the De-chirp processed, (c) Concentration Measurement (CM) value in the different periods, (d) the scatter center distribution in the polar coordinate, (e) IRT image

径 305 m, 已停止工作) 探测月球的归一化回波反照率随入射角变化, 可见两台雷达的观测结果基本一致, 测量之差与入射角有关, 入射角越低, 两台雷达探测结果越一致; 入射角越高 (30°以上), 测量之差约为 2.5 dB, 相对差约 10%, 该结果验证了曲靖雷达探测月球回波的准确性[21]. 利用距离–多普勒成像技术, 并通过坐标系转换可得到月球近地球面不同位置的散射回波二维像, 如图 14 所示, 图中不同灰度表示不同的散射信号强度, 与月球该处的地形地貌、月壤月岩的成分等有关, 该特征与现有结果基本一致[19,23]. 图中的探测空缺是由于探测期间月球自转所致, 与观测几何位置有关. Yang 等[22] 针对月球散射回波双参量 (漫散射、准镜面反射) 模型严重依赖于入射角、准确度有限且不适用于不同波长的问题, 利用 Arecibo 与曲靖非相干散射雷达月球回波数据, 对该模型进行改进, 发现改进后模型计算的后向散射系数、极

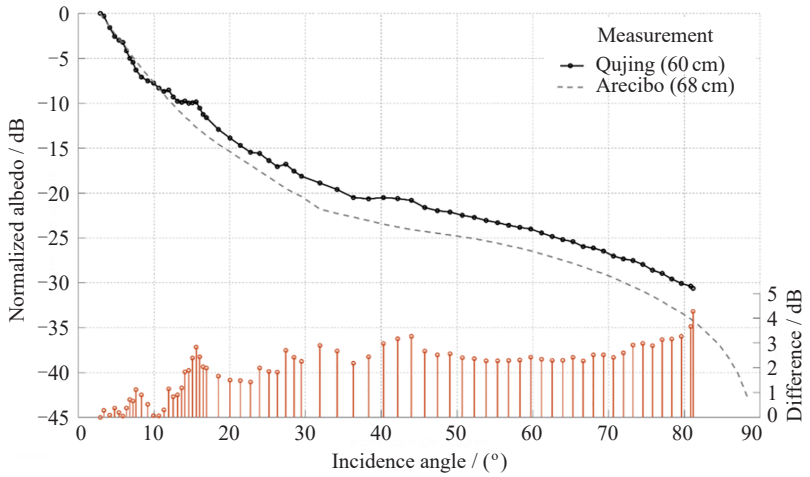


图 13 曲靖 (实线) 与 Arecibo 雷达 (虚线) 探测的月球回波随入射角变化 (下方为两雷达测量结果之差)

Fig. 13 Echo variation with the incident angle between the Qujing (solid line) and Arecibo (dot line) ISR (the difference between the two radar measurements is shown in the bottom panel)

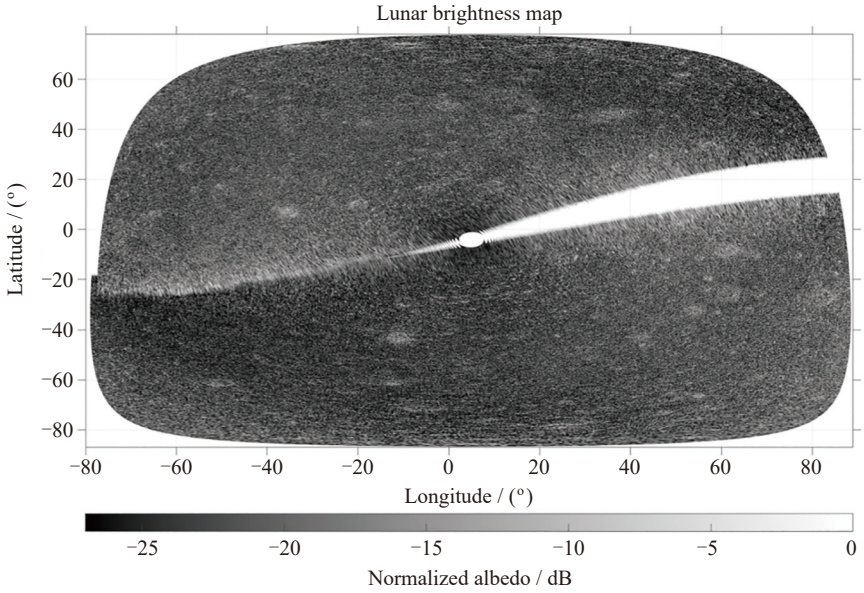


图 14 曲靖非相干散射雷达月球回波二维像

Fig. 14 Two-dimensional lunar image by the Qujing ISR

化比随入射角的变化特征与实测数据更接近, 这对地基雷达月球回波数据处理与解译具有重要意义.

4 结论与展望

本文概述了中国曲靖非相干散射雷达早期论证与建设情况, 给出了曲靖非相干散射雷达在电离层、空间碎片、月球探测方面的代表性结果, 并结合实测数据展示了该雷达在电离层电子密度与等离子体温度观测、空间碎片凝视探测与月球二维成像探测等方面的能力, 为下一步该雷达的观测运行与成果产出提供了重要指导.

曲靖非相干散射雷达虽然已运行近 14 年, 但仍存在许多不足[7], 需进一步改进完善, 具体包括: 由于发射机功率泄漏、流星余迹与中层顶大气湍流散射回波干扰等影响, 120 km 以下电离层探测回波较弱, 反演参数误差较大; 由于技术体制限制, 二维或三维大范围扫描探测实验开展与数据积累十分有限; 由于维护保养工作量大、运行经费高等原因, 连续探测与夜间探测的数据积累有限.

下一步将面向中国中低纬过渡区电离层精细结构与演化过程、大气层–电离层–热层跨圈层耦合等科学需求, 以及电离层预报、空间碎片预警、月球次表层探测等应用需求, 持续开展观测与深入研究, 近期将重点开展低电离层精细结构与北驼峰大尺度异常结构探测, 提升中国区域电离层探测与认知能力.

致谢 在肖佐教授等老一辈科学家的关心指导下, 中国的电离层非相干散射雷达技术达到了国际一流水平, 子午工程 (二期) 建成全有源相控阵非相干散射三站雷达系统, EISCAT 的新一代非相干散射雷达——EISCAT 3D 的天馈分系统也由中国的科技工作者研制. 谨以此文纪念肖佐教授诞辰 90 周年.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] GORDON W E. Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar[J]. *Proceedings of the IRE*, 1958, **46**(11): 1824-1829

[2] EVANS J V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, **57**(4): 496-530

[3] DING Zonghua, DAI Liandong, DONG Mingyu, *et al*. Progress of the incoherent scattering radar: from the traditional radar to the latest EISCAT 3D[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, **29**(5): 2376-2381 (丁宗华, 代连东, 董明玉, 等. 非相干散射雷达进展: 从传统体制到 EISCAT 3D[J]. 地球物理学进展, 2014, **29**(5): 2376-2381)

[4] ZHENG Chuanqing, ZHU Taiping, JING Yushan. Probing the ionospheric electron density, electron temperature and ion temperature profiles by the R_{10} radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1986, **1**(1): 11-19 (郑传青, 朱太平, 景玉山. 利用 R_{10} 雷达探测电离层电子浓度、电子和离子温度分布 [J]. 电波科学学报, 1986, **1**(1): 11-19)

[5] DING Zonghua, YU Lang, DAI Liandong, *et al*. The preliminary measurement and analysis of the power profiles by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3564-3569 (丁宗华, 鱼浪, 代连东, 等. 曲靖非相干散射雷达功率剖面的初步观测与分析 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3564-3569)

[6] DING Z H, WU J, XU Z W, *et al*. The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 87

[7] MIAO Jiansu, DING Zonghua, DAI Liandong, *et al*. Progress and prospects based on Qujing incoherent scatter radar measurements[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(1): 66-76 (苗建苏, 丁宗华, 代连东, 等. 曲靖非相干散射雷达观测研究进展与展望 [J]. 地球与行星物理论评, 2024, **55**(1): 66-76)

[8] DING Zonghua, DAI Liandong, YANG Song, *et al*. Preliminary measurement and analysis of the power spectra by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, **33**(6): 2204-2210 (丁宗华, 代连东, 杨嵩, 等. 曲靖非相干散射雷达功率谱的初步观测与分析 [J]. 地球物理学进展, 2018, **33**(6): 2204-2210)

[9] LIU J, XU T, DING Z H, *et al*. The comparison of electron density between CSES in situ and ground-based observations in China[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(18): 4498

[10] DING Zonghua, DAI Liandong, YANG Song, *et al*. Preliminary analysis of the ionospheric electron temperature variations of F layer in daytime using the Qujing incoherent scatter radar measurements[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, **63**(4): 1282-1293 (丁宗华, 代连东, 杨嵩, 等. 曲靖非相干散射雷达电离层 F 区日间电子温度变化特征初步分析 [J]. 地球物理学报, 2020, **63**(4): 1282-1293)

[11] LIU L B, DING Z H, LE H J, *et al*. New features of the enhancements in electron density at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(2): e2019JA027539

[12] LIU L B, DING Z H, ZHANG R L, *et al*. A case study of the enhancements in ionospheric electron density and its longitudinal gradient at Chinese low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(5): e2019JA027751

[13] DING Zonghua, DAI Liandong, YANG Song, *et al*. Preli-

minary analysis of daytime electron density in the ionospheric E-F valley based on the Qujing incoherent scatter radar observations[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, **37**(3): 357-363 (丁宗华, 代连东, 杨嵩, 等. 曲靖非相干散射雷达电离层 E-F 谷区电子密度日间变化特征初步分析 [J]. 电波科学学报, 2022, **37**(3): 357-363)

[14] DING Z H, ZHANG R, DAI L D, *et al*. Application perspective of Qujing incoherent scatter radar acting as a high power source at 500 MHz[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Guilin: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ISAPE.2016.7833958

[15] MARKKANEN J, LEHTINEN M, LANDGRAF M. Real-time space debris monitoring with EISCAT[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **35**(7): 1197-1209

[16] DING Zonghua, YANG Song, JIANG Hai, *et al*. The data analysis of the space debris observation by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Space Debris Research*, 2018, **18**(1): 12-19 (丁宗华, 杨嵩, 江海, 等. 曲靖非相干散射雷达空间碎片实测数据分析 [J]. 空间碎片研究, 2018, **18**(1): 12-19)

[17] YANG Song, DING Zonghua, XU Zhengwen, *et al*. Statistical analysis on the space posture, distribution and scattering characteristic of debris by incoherent scattering radar in Qujing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, **33**(6): 648-654 (杨嵩, 丁宗华, 许正文, 等. 曲靖上空空间碎片姿态、分布和散射特性的统计分析 [J]. 电波科学学报, 2018, **33**(6): 648-654)

[18] SUN Dadi, ZHOU Ke, REN Tongcan. Microtremor characteristic extraction method of space debris based on the Qujing incoherent scatter radar observations[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2023, **38**(5): 887-894 (孙大地, 周珂, 任同灿. 曲靖非相干散射雷达空间碎片微动特征提取方法 [J]. 电波科学学报, 2023, **38**(5): 887-894)

[19] STACY N J S, CAMPBELL D B, FORD P G. Arecibo radar mapping of the lunar poles: a search for ice deposits[J]. *Science*, 1997, **276**(5318): 1527-1530

[20] VIERINEN J, LEHTINEN M S. 32-cm wavelength radar mapping of the Moon[C]//Proceedings of 2009 European Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2009: 1-4

[21] SUN Jing, YANG Song, ZHOU Feng, *et al*. The status of earth-based radar astronomical observations of the Moon in China[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2022, **19**(1): 29-40 (孙靖, 杨嵩, 周峰, 等. 我国地基雷达观测月球的现状和研究进展 [J]. 天文研究与技术, 2022, **19**(1): 29-40)

[22] YANG Song, DING Zonghua, MIAO Jiansu, *et al*. Preliminary lunar observation by Qujing incoherent scatter radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2022, **20**(1): 15-21,27 (杨嵩, 丁宗华, 苗建苏, 等. 曲靖非相干散射雷达月球探测初步结果 [J]. 雷达科学与技术, 2022, **20**(1): 15-21,27)

[23] YANG Song, GUO Qiang, LIU Guang, *et al*. Modification for two-component modeling of lunar echoes with earth-based radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2025, **40**(5): 978-986 (杨嵩, 国强, 刘广, 等. 地基雷达月球散射回波双参量模型修正研究 [J]. 电波科学学报, 2025, **40**(5): 978-986)

[24] LI Mingyuan, WANG Yonghui, YIN Hanlin, *et al*. A mosaic imaging study of the northern and southern hemispheres of the nearside of the Moon based on the Sanya incoherent scatter radar[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(4): 450-458 (李鸣远, 王永辉, 尹翰林, 等. 基于三亚非相干散射雷达的月球正面南北半球拼接成像研究 [J]. 地球与行星物理论评, 2021, **52**(4): 450-458)

作者简介



丁宗华 男, 1978 年 10 月生, 湖北人, 博士, 研究员, 研究方向为电离层中高层大气探测与建模、电波传播与应用等.
E-mail: zhdingmou@163.com



吴 健 男, 1962 年 8 月生, 河南人, 博士, 研究员, 研究方向为电波环境探测与建模、电波传播理论与应用等.
E-mail: wu.jian@139.com



杨 嵩 男, 1992 年 1 月生, 河南人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为空间环境探测技术研究.
E-mail: thunderlikeys@163.com