0254-6124/2026/46(5)-0001-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

DAI Guofeng, LI Guozhu, ZHANG Donghe, HAO Yongqiang, HU Lianhuan, SUN Wenjie, XIE Haiyong, NING Baiqi, ZHAO Xiukuan, LI Yi, LIU Jianfei. Observational on Ionospheric Disturbances Based on the Low-latitude Long-range Ionospheric Radar (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–14. CSTR:32142.14.cjss.2025–0207. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0207

基于低纬超视距电离层雷达的电离层扰动观测*

代国峰[1,2] 李国主[1,2,3] 张东和[4] 郝永强[5]
胡连欢[1,2] 孙文杰[1,2] 解海永[1,2] 宁百齐[1,2]
赵秀宽[1,2,6] 李 怡[1,2] 刘建飞[1,2]

1(中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京 100029)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室 北京 100029)

3(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 101408)

4(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

5(中山大学大气科学学院 珠海 519082)

6(中国科学院地质与地球物理研究所 黑龙江漠河地球物理国家野外科学观测研究站 北京 100029)

摘 要 在低纬电离层, 等离子体泡和行进式扰动是两种重要的电离层扰动现象. 这两种现象均能影响无线电波传播, 干扰卫星通讯和导航定位系统的正常工作. 由于陆基探测手段的局限, 目前对低纬海洋上空的电离层行进式扰动和等离子体泡观测仍存在大量空白. 基于子午工程二期海南低纬超视距电离层雷达, 介绍了一种超视距探测低纬电离层扰动的方法, 实现了对电离层等离子体泡的追踪和行进式扰动的二维结构成像. 雷达对等离子体泡的定位结果与全球导航卫星系统接收机的电离层闪烁指数观测结果一致, 对电离层行进式扰动的观测结果与电离层总电子含量的观测结果存在显著差异. 这种差异可能部分来源于两种观测手段高度上的区别. 鉴于雷达目前仅能观测准东/西方向传播的电离层行进式扰动和雷达东西方向大范围的电离层不均匀体, 给出一种将其观测方位拓展至全向 (360°) 的方法, 有效增大了雷达对背景电离层扰动和不均匀体的探测范围.

关键词 低纬超视距电离层雷达, 赤道等离子体泡不均匀体, 电离层行进式扰动, 全向超视距电离层雷达

中图分类号 P352

Observational on Ionospheric Disturbances Based on the Low-latitude Long-range Ionospheric Radar

DAI Guofeng[1,2] LI Guozhu[1,2,3] ZHANG Donghe[4] HAO Yongqiang[5]

* 国家自然科学基金项目 (42020104002, 42574220), 中国科学院国际伙伴计划项目 (183311KYSB20200003), 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队项目 (YSBR-018) 和国家重大科技基础设施子午工程项目共同资助

2025-12-04 收到原稿, 2026-03-05 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/)

HU Lianhuan[1,2] SUN Wenjie[1,2] XIE Haiyong[1,2] NING Baiqi[1,2]
ZHAO Xiukuan[1,2,6] LI Yi[1,2] LIU Jianfei[1,2]

1(*Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

2(*Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

3(*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 101408)

4(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871)

5(*School of Atmospheric Sciences, Sun Yat - Sen University, Zhuhai* 519082)

6(*Heilongjiang Mohe National Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract In the low-latitude ionosphere, the Equatorial Plasma Bubble (EPB) irregularities and Traveling Ionospheric Disturbances (TIDs) are two important space weather phenomena. These disturbances can affect radio wave propagation, disrupting satellite communications and navigation positioning systems. Due to the limitations of ground-based detection techniques, substantial observational gaps remain regarding ionospheric TIDs and irregularities over low-latitude oceanic regions. This study introduces an over-the-horizon detection method for low-latitude ionospheric disturbances using the Low-lAtitude long Range Ionospheric Radar (LARID) located in Hainan, China. By resolving the elevation angle of arrival based on the phase difference between the radar's main array and interferometer array, LARID can determine the spatial location of ionospheric disturbances. Leveraging its multi-beam observation capability, we have achieved two-dimensional imaging of TID structures and retrieved their wavelengths and propagation directions. The localization results for EPBs show good agreement with S_4 index data from GNSS receivers. Significant differences exist between the observed TIDs and GNSS TEC measurements, which may be partly attributed to the filtering effect of daytime westward wind fields on atmospheric gravity waves. While LARID is currently only capable of observing quasi-east/west propagating TIDs and ionospheric irregularities along the east-west direction, this study finally proposes a method to extend its observational azimuth to full 360° coverage. Ray-tracing experiments demonstrate that this expansion can effectively enhance LARID's detection coverage for background ionospheric disturbances and irregularities.

Key words Low-lAtitude long-Range Ionospheric Radar (LARID), Equatorial plasma bubble irregularity, Travelling ionospheric disturbance, Full azimuth long range ionospheric radar

0 引言

在地球的电离层中始终存在着各种类型和尺度的扰动现象, 这些扰动现象可能来源于地球磁层和行星际空间, 也可能来源于低层大气或地质活动. 其中电离层不均匀体和行进式扰动 (TID) 是两种广受关注的电离层扰动现象. 电离层不均匀体是空间尺度横跨 cm 到数百至上千 km 的等离子体密度不均匀结构, 可影响无线电信号在电离层中的传播, 导致信号幅度和相位快速起伏, 甚至卫星–接收机链路失锁, 对无线电通信、导航与定位产生显著影响[1,2]. 电离层行进式扰动是指在电离层中传播的周期为几分钟到几小时的波动. 对于中尺度行进式扰动 (MSTID), 其周期约为 10～60 min, 水平波长为数百 km[3–5].

已有研究表明, MSTID 和电离层不均匀体之间存在密切联系. 在中纬地区, Xiao 等[6] 研究了 24 个台风事件期间的位于中国大陆的电离层高频多普勒数据, 发现在台风期间几乎总能观测到 MSTID, 并且

日落后的 MSTID 事件中经常伴随着中纬扩展 F 现象. 后续 Xiao 等[7] 和 Li 等[8] 的研究表明, 中纬扩展 F 与 MSTID 具有紧密的相关性, MSTID 可作为激发中纬扩展 F 的种子扰动. 在低纬电离层, F 层不均匀体发生于赤道等离子体泡 (EPB) 内部/边缘. EPB 是一种由瑞利–泰勒不稳定性产生的大尺度电子密度耗空结构[9], 大多起源于日落附近的磁赤道上空. 在日落附近, 电离层被反转前增强的东向电场抬升时, F 层底部的初始微小扰动在不稳定性的作用下快速增长, 形成大尺度的密度耗空结构并上升至顶部电离层[10]. 在次级不稳定性的作用下, 耗空结构通过串级过程形成各种尺度的不均匀结构. 前人研究发现, 由东向电场引起的电离层抬升能够较好地解释 EPB 不均匀体发生率的季节变化和太阳活动高低年变化[11,12], 但始终无法较好地解释 EPB 发生率的逐日变化[13]. 近年来, 许多研究指出, F 层底部的初始种子扰动是解释 EPB 发生率逐日变化的关键因素, 而 MSTID 是初始种子扰动的一个重要来源[14].

由于地球低纬大量区域为海洋, 目前对低纬电离层 MSTID 和 EPB 不均匀体的观测仍存在大片空白, 这使得对于 MSTID 和 EPB 发生逐日变化之间的关系尚未完全清楚. 高频相干散射雷达是一种工作在高频波段 (3～30 MHz) 的电离层探测设备, 同时具备对 TID 和电离层不均匀体的探测能力. 从 20 世纪 90 年代以来, 超级双子极光雷达网络 (SuperDARN) 中的高频雷达被广泛应用于高纬度与中纬度地区 TID 和电离层不均匀体的观测研究[15,16]. 相较于全球导航卫星系统 (GNSS) 接收机、气辉和电离层测高仪等地基探测仪器, 高频雷达具有大范围、超视距观测的优势, 特别适用于沙漠、山地和海洋等偏远地区. 在子午工程二期支持下, 中国科学院地质与地球物理研究所于 2023 年在海南省东方市建成了一台低纬超视距电离层雷达 (LARID)[17]. LARID 由东西两部高频雷达组成, 视场覆盖了东经约 70°～150°的低纬电离层, 这为研究东亚与东南亚扇区的低纬 TID 和 EPB 不均匀体提供了新的观测机遇.

本文介绍一种基于 LARID 雷达的超视距探测低纬电离层扰动的方法, 通过解析雷达回波的到达角, 确定 TID 和 EPB 不均匀体的空间位置; 结合雷达的多波束观测, 发展捕捉 TID 二维结构和反演 TID 传播参数的方法. 针对目前 LARID 观测的方位角局限性, 提出了一种拓展 LARID 为全向高频雷达的设想, 并利用射线追踪模拟实验评估了全向高频雷达的探测能力.

1 数据与方法

LARID 雷达位于海南省东方市 (北纬 19.2°, 东经 108.4°, 磁纬度 13.9°), 由两部分别朝向正东和正西方向的高频相干散射雷达组成. 图 1(a) 给出了 LARID 的位置 (红色六角星) 和方位角扫描波束的方向 (灰线). 每个波束之间的方位间隔为 3°, 方位角扫描范围为–24°～24°. 图中蓝色三角形和圆点分别代表 GNSS TEC 接收机及其与北斗同步卫星连线的电离层穿刺点位置. 红色三角形和圆点分别代表 GNSS 闪烁接收机及其与北斗同步卫星连线的穿刺点位置. 图 1(b) 给出了 LARID 的天线阵列布局, 东西雷达天线采用“背靠背”的排列方式. 每个雷达的天线阵列由 24 个对数周期天线构成, 其中 20 个天线收发一体 (主阵), 4 个天线仅用于接收 (干涉阵). 干涉阵位于主阵的西北侧. 两部雷达采用交替工作模式. 在常用的方位角扫描工作模式中, 每部雷达运行时长 2 min, 对应观测数据 4 min 的时间分辨率.

LARID 的基本参数及其对应的探测能力参数如表 1 所示. LARID 采用超级双子极光雷达网络常用的八脉冲 Katscan 编码. 这是一种不等间距编码, 依此在 8 个时刻 0, 14τ, 22τ, 24τ, 27τ, 31τ, 42τ 和 43τ 发射脉冲 (τ = 2.4 ms). 在数据处理方面 LARID 采用拟合自相关函数算法[18], 利用 8 脉冲之间的两两组合计算拟合自相关函数, 基于拟合自相关函数的相位和强度分别估计回波的多普勒速度和谱宽. 拟合自相关函数的时间分辨率为 τ, 对应多普勒频移测量范围为 –208.3～ 208.3 Hz. LARID 最大探测群距离为 4500 km, 常用距离分辨率为 45, 30, 15 km, 分别对应 100, 150 和 300 个距离门. 关于 LARID 的系统设计、科学目标及初步观测成果, 相关内容可参见 Hu 等[17,19]、Dai 等[20,21] 和 Sun 等[22] 的研究成果. 基于主阵波束合成的 I/Q 数据, 利用拟合自相关函数算法计算回波信号强度 (信噪比)、多普勒速度和多普勒谱宽. 雷达常用工作频率为 20.4 MHz, 主阵合成波束的主瓣在水平和垂直方向上的 3 dB 宽度分别约为 2.7°和 18°. 本研究在方位角方向上进行间隔 3°的扫

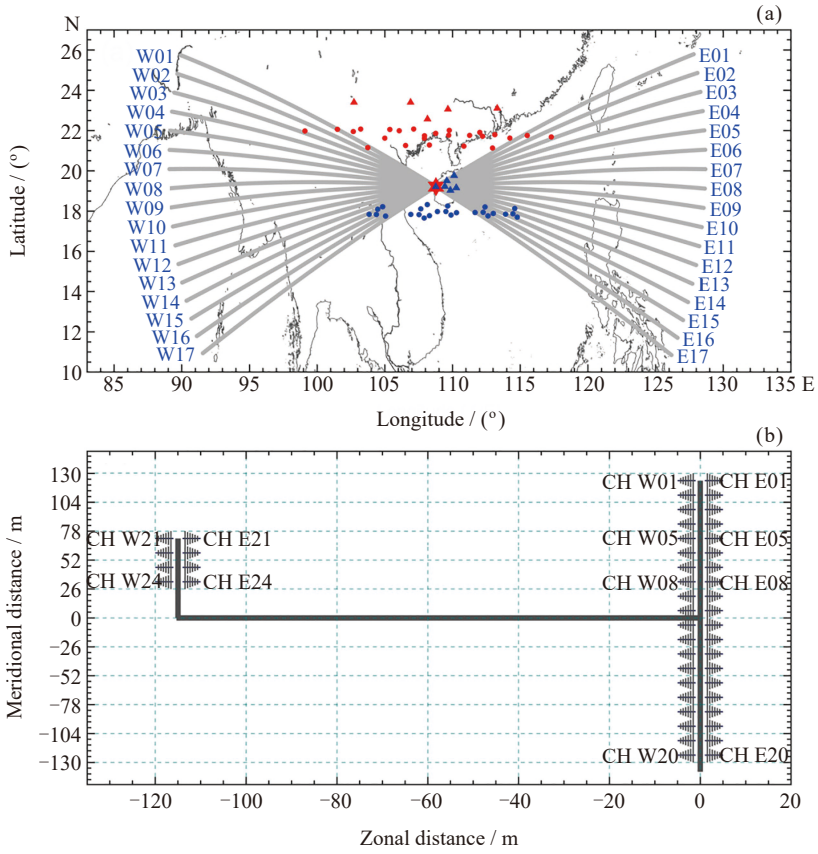


图 1 (a) LARID(红色六角星) 和东西向雷达的 17 个方位角扫描波束 (灰线) 位置, (b) LARID 天线阵列布局

Fig. 1 (a) Geographic locations of LARID (red hexagram) and the 17 azimuthal beam directions (gray lines) of the LARID west and east radars, and (b) antenna array layout of the LARID

表 1 雷达参数

Table 1 Radar parameters

参数名称	数值
工作频率/MHz	20.4
波形	不等间距脉冲
脉冲宽度/ms	100, 200, 300
编码	八脉冲Katscan
距离分辨率/km	15, 30, 45
最大探测时延/距离	0.03 s/4500 km
多普勒频移测量范围/Hz	-208.3～208.3

描探测; 由于波束在垂直方向上较宽, 该系统在垂直方向上并未进行扫描, 而是基于主阵合成信号和干涉阵合成信号之间的相位差, 利用空间干涉算法解算回波的到达角 (仰角)[23].

如果忽略电离层电子密度的水平梯度并假设电波沿直线传播, 对于 S 跳传播模式,在球坐标系下利用几何关系可得到电离层反射点的虚高 [24], 其表达式为

$$h' = \left[R_e{}^2 + \left(\frac{r}{2S}\right)^2 + \frac{R_e r}{S}\sin\alpha\right]^{\frac{1}{2}} - R_e. \quad (1)$$

其中, $S = 1, 2, 3, \cdots$对应地面/海面回波, $S = 0.5, 1.5, 2.5, \cdots$对应电离层回波; r为群距离; R_e为地球半径; α为回波仰角.

对于地面回波, 通常认为电离层扰动位于电离层反射点附近, 其中最远的电离层反射点距雷达的地面距离为

$$D_g = (2S-1)\,R_e \arcsin\left[\frac{r\cos\alpha}{2S\,(r+h')}\right]. \quad (2)$$

对于电离层回波, 一般近似认为不均匀体位于最远的电离层反射点附近, 其距雷达的地面距离可表示为

$$D_i = 2SR_e \arcsin\left[\frac{r\cos\alpha}{2S\,(r+h')}\right]. \quad (3)$$

首先根据回波时延计算群距离r, 利用主阵信号

和干涉阵信号之间的相位差解算回波仰角α, 根据仰角随群距离的变化判断回波的传播模式 (跳数S). 在忽略电离层电子密度的水平梯度和假设电波沿直线传播的情况下, 基于球坐标系下的几何关系, 利用式 (1) 估计电离层反射点的虚高h', 然后利用式 (2) 和式 (3) 估计地面距离, 最后结合波束的方位角和雷达的位置计算地面回波电离层反射点和电离层不均匀体的经纬度. 需要指出的是, 式 (1)～(3) 基于两个假设: 一是忽略了电离层的水平梯度, 即在多跳模式下假设不同反射区域的反射高度相同; 二是直线传播假设, 该假设下所估计的电波反射高度h'是虚高, 而非真实的高度. 这两个假设对电波在电离层的传播过程进行简化, 会引起计算的地面距离偏离真实的地面距离, 导致不均匀体与电离层扰动的定位结果也存在偏差.

在确定了 TID 的空间位置后, 利用 MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) 方法反演 TID 的传播方向和波长. MUSIC 方法由 Schmidt[25] 于 1986 年提出, 是一种广泛应用于雷达、声纳及无线通信领域的波达方向 (DoA) 估计算法. 该方法核心思路为基于传感器阵列采集的信号计算扰动波数谱, 从波束谱的局部极大值中反演扰动信号的传播方向. 本文结合高频雷达的观测数据介绍 MUSIC 算法的原理.

假设空间中存在 M个不同传播方向的信号 (TID), 被高频雷达的 L个距离门观测到. 其中, 第 m个 TID 的扰动可表示为$\alpha_m(t), m=1,2,3,\cdots,M$, 波矢为$k_m$. 在远场条件下, 第 l个距离门测得的回波信噪比为

$$x_l(t)=\sum_{m=1}^{M}\alpha_m(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_m\cdot r_l}+n_l(t)=\sum_{m=1}^{M}\alpha_m(t)s_l(k_m)+n_l(t), l=1,2,3,\cdots,L; \tag{4}$$

$$s_l(k_m)=e^{\mathrm{i}k_m\cdot r_l}. \tag{5}$$

其中, i为虚数单位, $n_l(t)$为阵列噪声信号, r_l为电离层反射点的位置. 整理式 (4) 可得

$$\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{S}\boldsymbol{\alpha}(t)+\boldsymbol{n}(t). \tag{6}$$

其中, $\boldsymbol{S}=[\boldsymbol{s}(k_1),\boldsymbol{s}(k_2),\cdots,\boldsymbol{s}(k_M)]$, $\boldsymbol{s}(k_m)$为第 m个信号的导向矢量. 假设不同 TID 信号之间, 以及 TID 信号与噪声信号之间是相互独立 (正交) 的, 则$\boldsymbol{x}(t)$的协方差矩阵可表示为[24]

$$\boldsymbol{R}=[\boldsymbol{x}(t)\boldsymbol{x}(t)^{\mathrm{H}}]\mathrm{E}=\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}+\sigma^2\boldsymbol{I}=\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}+\sigma^2\boldsymbol{I}. \tag{7}$$

其中, 上标 H 代表共轭转置; σ^2为噪声功率; $\boldsymbol{I}$为单位矩阵; $\boldsymbol{A}$为$\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{t})$的协方差矩阵, 其表达式为

$$\boldsymbol{A}=[\boldsymbol{\alpha}(t)\boldsymbol{\alpha}(t)^{\mathrm{H}}]\mathrm{E}. \tag{8}$$

矩阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}$的表达式为

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}=\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}. \tag{9}$$

在矩阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}$的 L个特征值中, 有 M个特征值不为零, 对应 M个扰动信号 (TID). 剩下的 $L-M$个特征值为零, 对应的特征向量$\boldsymbol{\lambda}_l$满足

$$\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\lambda}_l=0. \tag{10}$$

即该 $L-M$个噪声特征向量与 M个信号导向向量均正交. 在有噪声存在的实际观测数据中 ($\sigma\neq0$), 该 $L-M$个特征值不为零, 对应矩阵$\boldsymbol{R}$的前 $L-M$小的特征值. 将矩阵$\boldsymbol{R}$的 L个特征向量按照特征值的大小从大到小排序, 定义噪声矩阵为

$$\boldsymbol{Q}=[\boldsymbol{\lambda}_{M+1},\boldsymbol{\lambda}_{M+2},\cdots,\boldsymbol{\lambda}_L]. \tag{11}$$

基于信号向量与噪声矩阵之间的正交性定义波数谱[26],

$$P(k)=\frac{1}{||\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{s}(k)||^2}=\frac{1}{\boldsymbol{s}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{s}(k)}. \tag{12}$$

式中, 当$\boldsymbol{s}(k)$与噪声矩阵$\boldsymbol{Q}$的每一列正交时, $P(k)$取无穷大. 根据上文假设, TID 信号与噪声信号正交, 则使波数谱取无穷大的k即为所求的 TID 的波矢. 实际中由于噪声的存在, $P(k)$此时趋近于有限的局部最大值. 由此可通过寻找波数谱中的峰值估计 TID 的波矢,得到 TID 的传播方向和波长.

在实际的信噪比时间序列中可能存在各种周期尺度的扰动信号. 为了避免长周期的扰动信号对反演 TID 参数产生影响, 这里采取将时域信号转化为频域信号并限制频率范围的方法[27]. 具体方法是将式 (8) 中$\boldsymbol{\alpha}(t)$替换为其傅里叶变换谱$\boldsymbol{\alpha}(\omega)$, 并截取周期 10～60 min 的部分. 对 LARID 雷达观测到的每个 TID 事件, 首先选择扰动的传播特征最明显的三个相邻波束 2200～2800 km 距离门上长度为 3 h 的信噪比数据, 计算其 10～60 min 的快速傅里叶变换谱; 然后根据式 (7) 计算协方差矩阵, 并对其进行特征值分解, 取出其中特征值最小的 L—1 个特征向量组成噪声矩阵 (即取 M=1, 假设同一时间仅存在一个 TID); 最后利用式 (12) 计算波数谱, 在波数谱中寻找极大值, 根据其对应的南北方向和东西方向的波数估计传

播方向和波长.

为了验证和比较 LARID 雷达对 EPB 不均匀体和 TID 的观测结果, 使用东亚和东南亚电离层不均匀体和闪烁观测网络 (IONISE) 的 GNSS 电离层总电子含量 (TEC) 和 S_4 指数[28,29], 相应的接收机位置分布如图 1(a) 中的蓝色和红色三角形所示. 这些接收机能够接收来自北斗同步卫星的信号. 由于地面接收机到北斗静止同步轨道卫星连线的电离层穿刺点可认为固定不动, 根据北斗卫星信号计算的 TEC 和 S_4 指数较好地排除了由于穿刺点运动带来的空间变化, 能够准确表征电离层扰动的时间变化. 图 1(a) 中的蓝色和红色圆点标出了本文使用的 TEC 和 S_4 指数的固定电离层穿刺点位置. 这些穿刺点分别位于北纬 18°和 22°附近, 穿刺点的高度设为 400 km.

2 赤道等离子体泡不均匀体追踪

图 2 给出了 2024 年 4 月 25 日 LARID 西向雷达第 9 号波束 (方位角 270°) 回波的信噪比、视线多普勒速度、仰角和多普勒谱宽的群距离–时间分布图. 图中多普勒速度为正值 (负值) 表示目标远离 (朝向) 雷达的运动. 在 13:00-19:00 UT, 500～2200 km 距离处, 观测到多条具有较大多普勒速度和强信噪比的倾斜条纹. 这些条纹源自 EPB 不均匀体, 其负多普勒速度表明, 这些出现在雷达西侧的不均匀体向雷达运动 (东向漂移). 如图 2(c) 所示, 在 800 km 以外, EPB 不均匀体回波的仰角随群距离的减小而增大. 仰角的增大与 EPB 的东向漂移运动一致. 即在 EPB 的高度总体不变时, 当 EPB 接近雷达时, 观测 EPB 的仰角也随之增大. 而在 800 km 以内, 仰角的分布无规律. 这是计算仰角过程中, 主阵和干涉阵之间相位差存在 2π 模糊度造成的, 因此 800 km 以内仰角测量结果不准确[21]. 后续将聚焦于 800 km 以外的 EPB 不均匀体回波.

图 3(a) 给出了 800 km 以外, 多普勒速度大于 50 m·s^{-1} 的 EPB 不均匀体回波的仰角随距离和时间的分布. 利用式 (1) 和式 (3), 结合波束方位角和雷达的位置, 可得到 EPB 不均匀体所在的经度. 图 3(b) 中的黑色三角形和彩色圆点分别展示了 LARID 观测的 EPB 不均匀体和 GNSS 接收机观测的 S_4 指数的经度–世界时散点图, 圆点颜色代表 S_4 指数的大小. 在东经 94°～103°两种观测手段的重叠区域, 可以看到 EPB 不均匀体回波出现的位置与 S_4 指数较大的位置 (黄/红色) 基本吻合. 这可以解释为 EPB 沿磁力线拓展至低纬电离层, LARID 观测到的 EPB 不规则体会引发电离层闪烁, 该闪烁被 GNSS 闪烁接收机捕获, 表现为 S_4 指数增大. 闪烁观测结果验证了 LARID 对 EPB 不规则体的定位结果. 相较于陆基

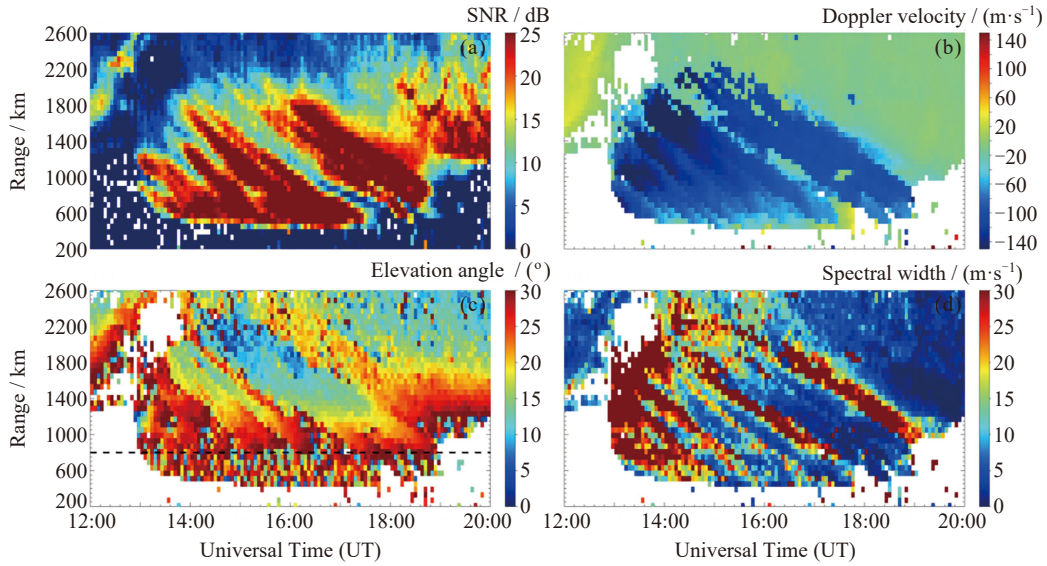


图 2 2024 年 4 月 25 日 12:00－20:00 UT 期间, LARID 西向雷达 9 号波束观测参数的距离–时间分布

Fig. 2 Range - time distributions of observed parameters measured along beam 9 of the LARID west radar at 12:00–20:00 UT on 25 April 2024

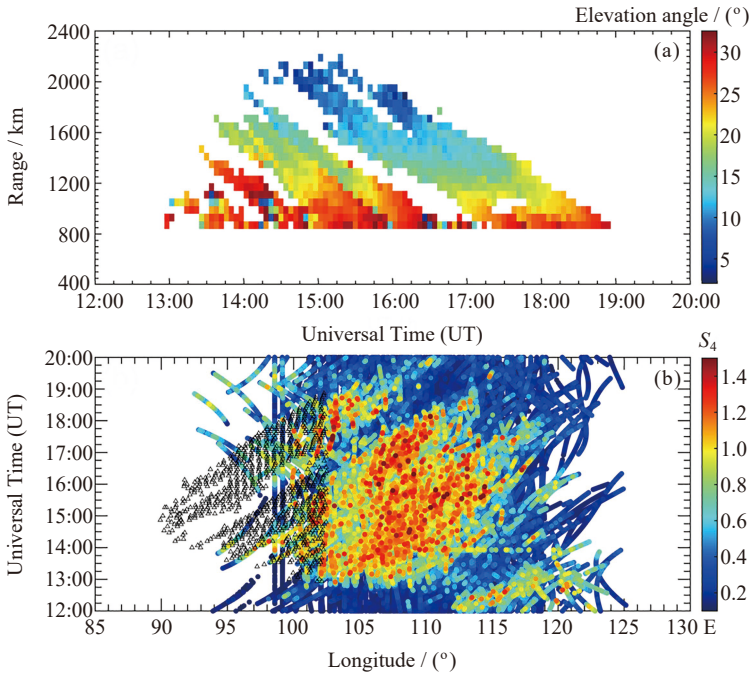


图 3 (a) 2024 年 4 月 25 日 12:00－20:00 UT 期间, LARID 西向雷达 9 号波束观测的回波仰角的距离–时间分布. (b) LARID 观测的 EPB 不均匀体回波 (黑色三角形) 与 GNSS 接收机观测的 S_4 指数 (彩色圆点) 的经度–世界时散点图

Fig. 3 (a) Range - time plots of echo elevation angle along beam 9 of the LARID west radar during 12:00–20:00 UT on 25 April, 2024. (b) Comparison of longitude-time variation of EPB irregularity echoes observed by the LARID (black triangles) and the S_4 index (colored dots) observed by GNSS receivers

的 GNSS 观测, LARID 的观测经度覆盖了东经 90°－99°, 有效填补了中南半岛和印度洋上空 GNSS 观测数据的不足.

需要指出的是, 在东西方向上电离层电子密度随经度 (地方时) 的变化会形成水平梯度, 从而导致对不均匀体的定位结果偏离其真实位置. 而在南北方向上, 由于 LARID 位于电离层北赤道异常峰附近, 电子密度的水平梯度更加显著, 导致定位误差更明显. 为了得到准确的射线传播路径, 需要知道实际电离层的电子密度分布. 由于雷达视场覆盖的西北太平洋和东南亚区域电子密度观测非常有限, 目前还无法定量评估忽略水平梯度这一假设带来的影响. 下一步的研究可综合日本和中国科学院地质与地球物理研究所在东南亚和海南岛建设的测高仪的观测数据, 改善雷达的定位误差. 这些测高仪位于北半球低纬东经 100°－110°, 覆盖了西向雷达在 0.5 跳传播模式下电离层反射点的部分经度范围. 这些沿经度方向排列的测高仪观测到的电子密度剖面可用来近似表征电离层电子密度在水平方向上的变化, 并将其作为射线追踪模式的输入, 有望改善雷达的定位误差.

3 电离层行进式扰动二维结构成像

图 4 给出了 2024 年 5 月 1 日 LARID 东向雷达 2 号波束 (方位角 81°) 回波的信噪比、视线多普勒速度、仰角和谱宽的群距离–时间分布. 图 2 中多普勒速度为正值 (负值) 表示目标远离 (朝向) 雷达的运动. 如图 4(a) 所示, 在 03:00－07:00 UT 期间, 在距离门 1600～3400 km 内, 可以看到多条倾斜的信噪比增强条纹. 这些条纹的群距离随时间逐渐增大, 表明信噪比扰动在远离雷达 (即准东向传播). 在图 4(b)(d) 中, 这些条纹的多普勒速度较小 (在±15 $m\cdot s^{-1}$ 范围内), 谱宽也接近于 0. 说明这些回波来源于准静止目标 (地面或者西北太平洋海面). 图 4(c) 中回波的仰角随距离的增大而减小, 符合 F 区一跳传播的地面/海面回波特征.

这里检查了东向雷达所有 13 个波束 (方位角为 78°～114°) 的信噪比群距离–时间分布图, 在 1600～3400 km 内均观测到类似的信噪比增强条纹. 这些增

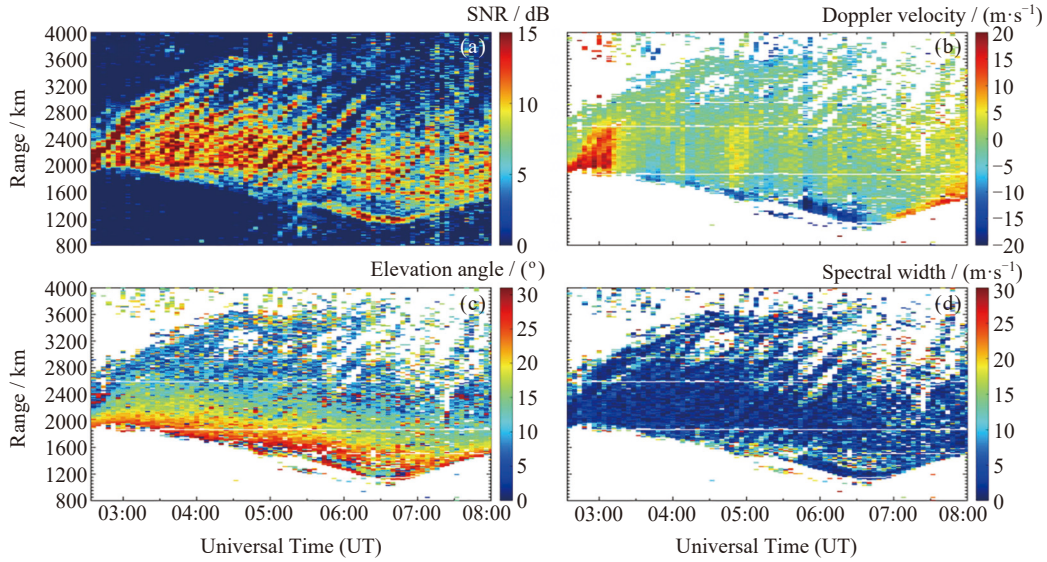


图 4 2024 年 5 月 1 日 02:30–08:00 UT 期间, LARID 东向雷达 2 号波束观测的回波的距离–时间分布

Fig. 4 Range - time plots of echoing observed by beam 2 of the LARID east radar during 02:30–08:00 UT on 1 May 2024

强条纹在时间上表现为准周期的振荡. 研究发现, 在东向雷达所有波束 1600～3400 km 内, 大部分距离门上的信噪比在 03:00-07:00 UT 期间存在周期为 20～50 min 的振荡. 图 5(a) 给出了其中一个典型的例子, 图中蓝线显示了 2 号波束在 2850 km 距离门处的去趋势信噪比随时间的变化. 该去趋势信噪比是通过从原始信噪比时间序列中减去 60 min 窗口的滑动平均值得到的. 图 5(b) 给出了其对应的 Lomb-Scargle 周期图, 可以看到在约 24 min 处出现显著峰值. Samson 等[30] 指出, 高频雷达回波信噪比的振荡是由在电离层反射点附近传播的大气重力波引起的. 大气重力波引起中性粒子的振荡, 通过离子–中性粒子碰撞将运动传递给电离层等离子体. 等离子体的运动导致等离子体等密度面发生变形, 根据大气重力波的相位形成凹、凸相间的波浪状结构. 无线电波在凹面处会聚、在凸面处发散, 从而引起回波信噪比的增强和减弱. 对于一跳地面回波, 利用式 (1) 和式 (2) 可以得到电离层反射点的位置. 图 5(c) 给出了 05:18 UT 回波信噪比的二维分布, 可以看到 3 条大致沿南北向排列的波阵面. 图中白色圆点标示 LARID 6～8 号波束在 2200～2800 km 内的 120 个距离门的地理位置分布. 利用 03:30－06:30 UT 期间, 6～8 号波束在 2200～2800 km 距离门上的 120 个 SNR 时间序列, 计算其波数谱, 如图 5(d) 所示. 波数谱在 (0.0371, 0.0006) km^{-1} 附近存在单一峰值, 对应传播方位角约为 89°, 波长约为 169 km, 属于 MSTID.

考虑到 MSTID 的传播范围, 该扰动有可能被海南岛附近的陆基观测手段观测到. 为了验证和比较 LARID 的观测结果, 这里分析了位于海南的 GNSS 接收机观测的北斗同步卫星 TEC 数据, 其固定电离层穿刺点位于北纬 18°附近, 与东向雷达 6～8 波束的纬度接近 (见图 5c 白色圆点). 与雷达信噪比数据的处理方法类似, 从原始 TEC 中减去 60 min 窗口的滑动平均值, 得到去趋势的扰动 TEC. 图 6 给出了 2024 年 5 月 1 日东向雷达 2 号波束的扰动信噪比和扰动 TEC 的经度–世界时变化, 其中东经 115°以西为 TEC 的观测结果, 东经 115°以东为 LARID 的观测结果. 对比发现 TEC 观测结果和 LARID 具有显著差异, 在东经 104°－115°未观测到类似的斜条纹. 分析了 10～90 min 的其他去趋势时间窗口的结果, 均未发现类似于高频雷达观测的扰动, 表明这种差异可能与 TEC 去趋势所用的时间窗口无关.

为进一步分析 LARID 雷达和 GNSS TEC 观测结果的差异, 对 2023 年 4 月 1 日至 2025 年 3 月 31 日共 2 年内 LARID 在 00:00－11:00 UT(对应 LARID 地方时 07:00－18:00 LT) 的地面回波数据进行了统计. 期间, LARID 一共观测到 84 个白天 MSTID 事件, 图 7(a) 展示了该 84 个事件中 MSTID

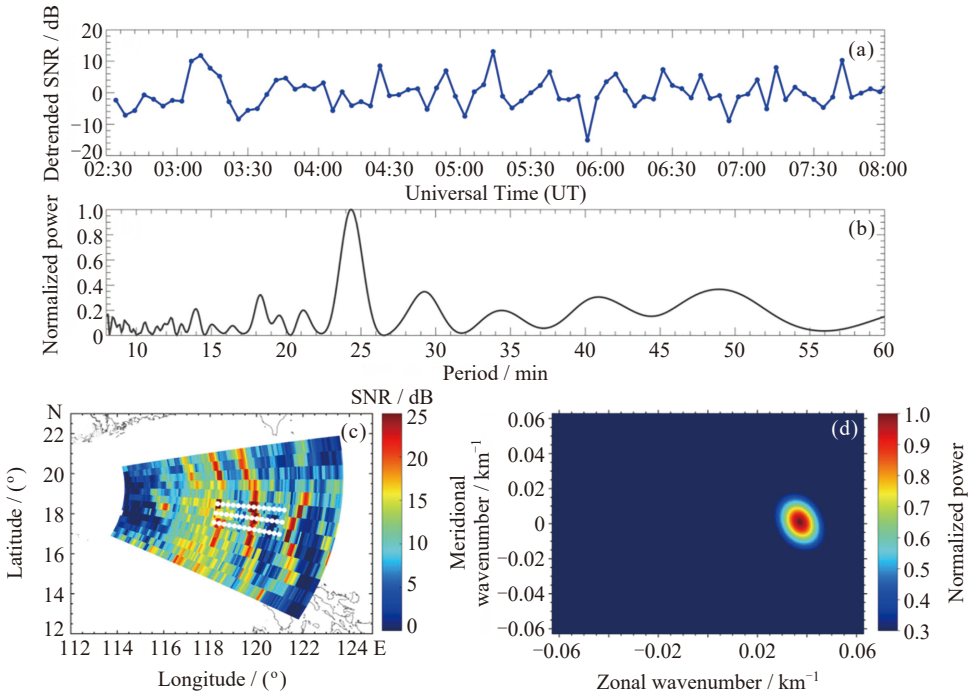


图 5　2024 年 5 月 1 日 LARID 东向雷达 2 号波束在 2850 km 距离门处的观测结果. (a) 去趋势信噪比时间序列, (b) 对应的 Lomb-Scargle 周期图, (c) 05:18 UT 信噪比二维分布, (d) 基于 120 个距离门上 03:30—06:30 UT 的信噪比时间序列计算得到的波数谱

Fig. 5　Observations from LARID east radar along beam 2 at the range gate of 2850 km on 1 May 2024. (a) Detrended SNR time series, (b) corresponding Lomb - Scargle periodogram, (c) two - dimension SNR map at 05:18 UT, (d) wavenumber spectrum calculated from 120 SNR time series acquired at range gates during 03:30–06:30 UT

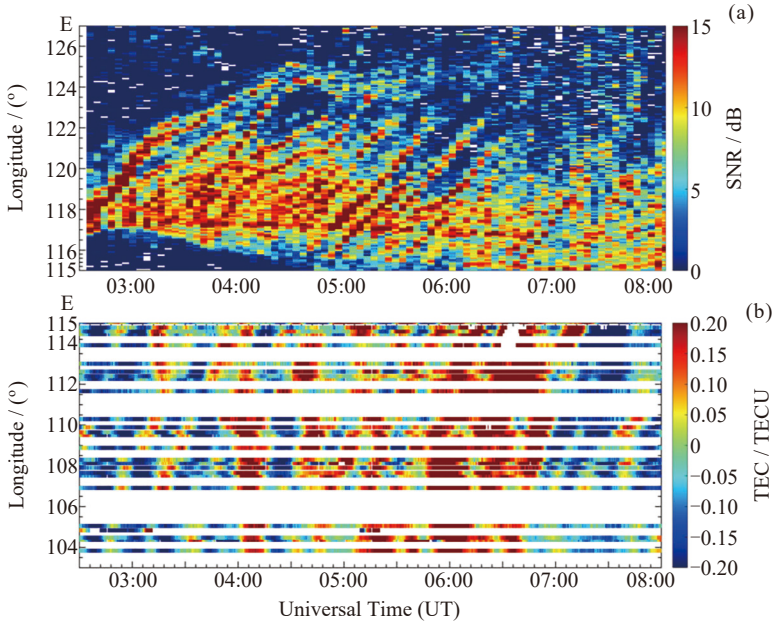


图 6　2024 年 5 月 1 日 LARID 东向雷达 2 号波束观测的回波信噪比的经度–世界时变化 (东经 115°以东) 和北纬 18°附近固定电离层穿刺点的扰动 TEC 的经度–世界时变化 (东经 115°以西)

Fig. 6　Longitudinal-UT variations of the detrended SNR along beam 2 of LARID east radar (to the east of 115°E) and the disturbed TEC measured at the fixed IPPs along the 18°N chain

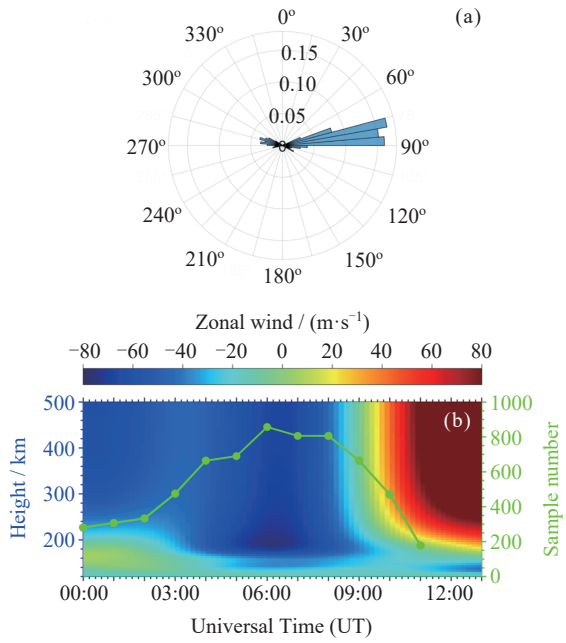


图 7 (a) 2023 年 4 月 1 日至 2025 年 3 月 31 日期间 LARID 观测到的 MSTID 的传播方位角分布, (b) HWM14 模式计算得到的 MSTID 观测日 LARID 上空纬向风场平均值随高度和世界时的变化

Fig. 7 (a) Statistical distribution of propagation azimuth of MSTIDs observed by LARID from 1 April 2023 to 31 March 2025. (b) Mean zonal wind profiles over LARID calculated by the HWM14 model averaged for the days when MSTIDs were observed by LARID

传播方向的分布. 可以看到, 白天 MSTID 的传播方向集中在准东 (60°−90°) 和准西 (270°−300°) 方向, 东向传播 MSTID 的发生率 (74%) 高于西向传播 MSTID 的发生率 (26%). 东、西向雷达观测到的 MSTID 的经度范围分别约为东经 95°−105°和东经 115°−125°. 对每一个 MSTID 事件分析对应的 TEC 观测结果发现, 绝大部分 (79 个)MSTID 事件发生期间, 位于东经 105°−115°穿刺点的 TEC 观测均未出现与高频雷达类似的扰动.

GNSS TEC 和 LARID 观测结果的差异一方面可能源于两者的经度差异, 也可能源于两种探测手段在探测高度上的区别. 由于高频电波在电离层底部反射, LARID 观测到的 MSTID 也局限于电离层底部, 而 TEC 信号主要来自电离层峰值附近的电子. 已有研究表明, 白天 MSTID 绝大部分源于大气重力波[5]. 根据重力波理论, 背景风场对向上传播的大气重力波具有过滤作用[4,31]. 在背景风场中传播的大气重力波的频率ω会产生多普勒偏移, 其表达式为

$$\hat{\omega} = \omega - ku. \tag{13}$$

其中, k为水平波数, u为沿波传播方向的水平风速, $\hat{\omega}$为固有频率. 式 (13) 表明, 当大气重力波顺着背景水平风场传播时, 其固有频率会减小. 当频率趋近于零, 垂直波长趋于零, 导致波的能量耗散至背景风场中. 该机制称为临界层过滤效应, 常用来解释白天经向传播的 MSTID 大多趋向赤道向传播这一现象[32]. 图 7(b) 给出了 LARID 观测到 MSTID 的全部日期中, HWM14 模式输出的纬向风场平均值随高度、世界时的变化, 图中绿色实线表示 MSTID 事件次数随世界时的分布, 正 (负) 的速度代表东向 (西向) 风场. 从图中可以看到, MSTID 主要发生在 03:00−10:00 UT, 在此期间 200 km 以上的纬向风场方向为西向. 白天的西向纬向风场会阻碍 LARID 在电离层底部观测到的西向传播的 MSTID 继续向上传播. 对于东向传播的 MSTID, 需要注意的是实际纬向风可能与 HWM14 风场存在差异. 此外, 垂直温度结构等其他因素也可能影响大气重力波的向上传播. 因此 LARID 和 TEC 探测高度的差异可能是 LARID 观测到的大部分 MSTID 无法被 GNSS TEC 观测到的部分原因.

4 全向高频雷达设想

LARID 雷达观测到的 MSTID 传播方向集中在准东、准西向, 未观测到赤道向传播的 MSTID. 以往基于 GNSS TEC 数据的统计研究表明, 低纬 MSTID 主要沿赤道向传播[32]. LARID 未观测到赤道向传播的 MSTID, 并不表明赤道向传播的 MSTID 不存在, 而是由其观测 TID 的方位局限导致的. Samson 等[27,30] 指出, 高频雷达回波信号强度的振荡源于重力波调制的凹凸起伏的等离子体等密度面产生的聚焦/散焦效应. 这种聚焦/散焦效应要求 MSTID 的波阵面方向与雷达波束方向接近垂直, 即 MSTID 的传播方向需与雷达波束保持准平行关系. 目前 LARID 雷达的波束扫描方位角在正东/正西向的±30°范围内. 因此, 即使南向/北向传播的 MSTID 出现在雷达探测视场内, LARID 也无法观测到相应的扰动. 这也限制了 LARID 观测其他方位角上的电离层不均匀体.

为了实现对沿其他方向传播的 TID 和其他方位

角上 (例如南半球和北半球中纬度) 的电离层不均匀体的超视距探测, 一种方法是在 LAIRD 现有天线阵列的基础上增设两组相同配置的天线阵列, 形成观测方位角覆盖 360°的全向高频雷达. 图 8(a)～(c) 给出了设想的全向高频雷达的天线阵列布局, 增设的两组天线阵列的空间朝向如图 8(a) 和图 8(c) 所示, 三组天线阵列的主阵形成一个等边三角形 (相邻天线阵列主阵之间的夹角为 60°). 在每个天线阵扫描±30°的情况下, 6 部雷达可以实现 360°的全向扫描. 如图 8(d) 所示, 蓝色代表现有的 LARID 东、西雷达的视场, 红色代表增加的其他 4 部雷达的视场. 这 3 组天线阵列之间需要保持足够间距, 避免相互之间的遮挡.

图 9 给出了在高太阳活动水平 ($F_{10.7}$=150) 下 10:00 UT, 模拟的工作频率 20.4 MHz、仰角为 5°～40°的无线电波传播路径 (白色虚线所示). 电波的初始方位角覆盖了 0°～360°(6°间隔). 图中背景颜色代表电离层模式 IRI-2020 给出的 350 km 高度处电子密度的大小. 在 F 区峰值高度以下, 电子密度整体上随高度逐渐增加. 根据斯涅尔 (Snell) 定律, 电波在峰值高度以下传播时, 其仰角会逐渐减小. 当电离层电子密度足够大时, 仰角会减小为零, 此时电波到达反射点, 称为 0.5 跳. 随后仰角继续减小为负值, 直到反射回地面. 电波从地面发射到返回地面的过程称为一跳. 该过程可重复多次, 直到信号强度衰弱至可忽略或穿透电离层. 根据不均匀体对电磁波的相干散射理论, 不均匀体的后向散射回波产生于射线垂直于地磁场的位置, 即理论上能够探测到电离层不均匀体的地方. 考虑到赤道等离子体泡在高度上呈近似垂直的延伸结构, 从电离层底部一直伸展至顶部, 而雷达回波产生于电离层底部. 为简化分析, 本研究近似认为探测到的电离层不均匀体位于距其最近的电离层反射点附近, 并以该反射点的跳数 (S) 来表示不均匀体的传播模式. 如图 9(a) 所示, 图中白点 (S=0.5)、红点 (S=1.5)、黄点 (S=2.5) 和黑点 ($S\geqslant$3.5) 分别代表了不同传播模式下射线垂直磁力线 (可能探测到电离层不均匀体) 的位置. 可以看到, 在东西方向可以接收到 0.5 跳及以上的不均匀体回波, 在北半球可以接收到来自北纬 30°－60°的 0.5 跳, 1.5 跳和 2.5 跳不均匀

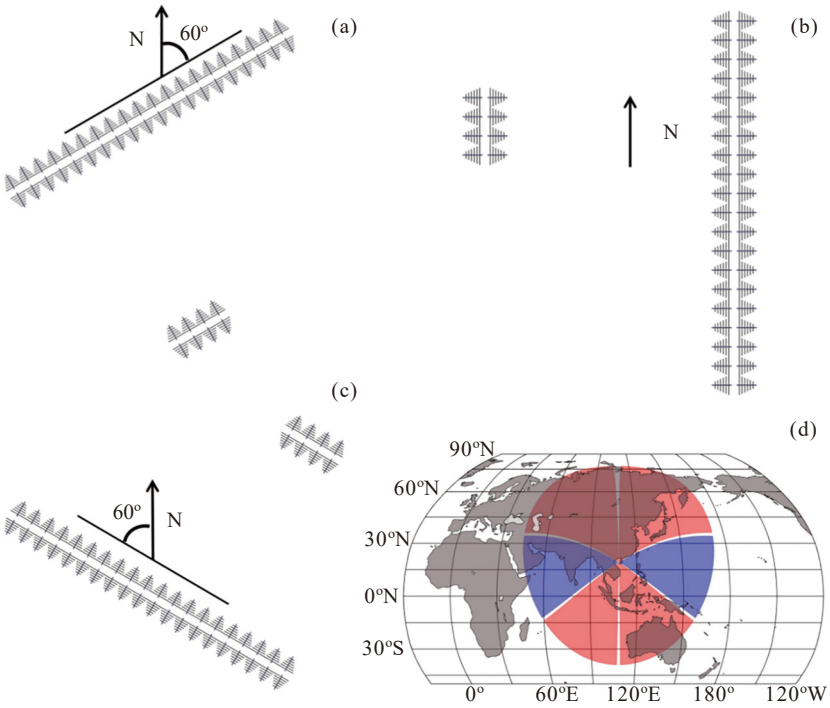


图 8　设想的全向高频雷达天线布局示意. (a)(c) 增加的两组天线阵列, (b) 现有的 LARID 天线阵列, (d) 全向高频雷达的视场

Fig. 8　Layout of the proposed full-azimuth high-frequency radar antenna configuration. (a) (c) Two added antenna arrays. (b)Existing LARID antenna array. (d) Field of view of the full-azimuth high-frequency long range ionospheric radar

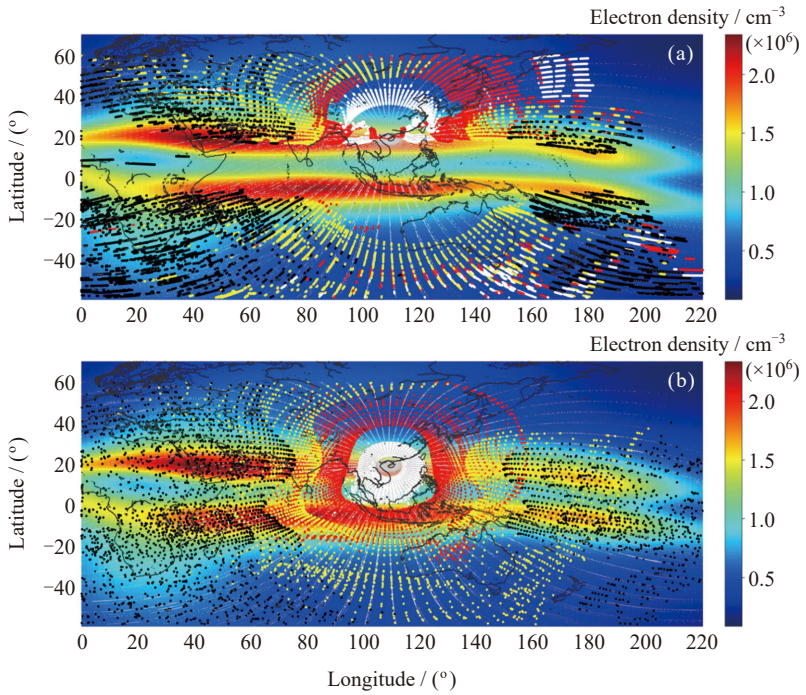


图 9 (a) 20.4 MHz 电波射线路径 (白色虚线) 以及不同传播模式下射线垂直于磁力线的位置 (散点), (b) 20.4 MHz 电波射线路径 (白色虚线) 以及不同传播模式下的电离层反射点位置 (散点)

Fig. 9 (a) Ray path of radio wave at frequency of 20.4 MHz (white dashed lines) and locations where the ray is perpendicular to the geomagnetic field line (colored dots) for different propagation modes. (b) Ray path of radio wave at frequency of 20.4 MHz radio wave (white dashed lines) and locations of ionospheric reflection points for different propagation modes (colored dots)

体回波, 在南半球可以接收到来自南纬 30°−60°的 1.5 跳和 2.5 跳电离层回波. 这意味着全向高频雷达具有探测北半球中纬度电离层不均匀体和南半球海洋上空不均匀体的能力. 对于地面回波, 由于在电波传播路径上, 电离层反射点处电子密度一般最大, 该处电离层扰动的绝对幅度通常也更大. 因此在电离层研究中通常近似认为, 雷达地面回波所观测到的背景电离层扰动发生于该反射点附近. 对于 S 跳电波传播路径, 存在 S 个由近及远的电离层反射点. 图 9(b) 展示了电波射线路径上不同传播模式的最远电离层反射点的位置, 白、红、黄、黑分别代表 1 跳、2 跳、3 跳、4 跳 (及以上) 传播模式, 背景颜色代表电离层模式 IRI-2020 给出的 350 km 高度处电子密度的大小. 从图中可以看到, 在东西方向赤道异常峰附近的高电子密度区域, 高频雷达可以接收到 1～4 跳回波, 经度范围覆盖了东经 60°至东经 180°. 在南半球海洋区域和北半球中纬区域可以接收到 2 跳和 3 跳地面回波. 考虑到北半球大陆区域 (例如青藏高原) 和南半球太平洋、印度洋上空是大气重力波的热点区域[33], 全向高频雷达的地面回波观测数据, 将为研究这些区域的大气波动和大气–电离层耦合提供重要支撑.

5 结论

基于子午工程二期低纬超视距电离层雷达 LARID, 介绍了一种超视距探测 EPB, MSTID 等电离层扰动的方法. 基于电离层回波的到达角观测, LARID 能够定位赤道等离子体泡的空间位置. 结合多波束地面回波观测, LARID 能够对 MSTID 的二维结构进行成像. 赤道等离子体泡的定位结果与低纬电离层闪烁观测符合良好. LARID 观测到的 MSTID 传播方向集中在准东、准西方向, 且与 GNSS TEC 观测存在显著差异. 该差异可能源于两种观测手段探测高度上的区别. 为了实现对南半球海洋等难以布设地基设备的区域上空电离层不均匀体和扰动的探测, 提出了一种拓展 LARID 为全向高频雷达的方法, 模拟

结果表明, 全向高频雷达能够有效探测北半球中纬和南半球海洋上空的电离层变化.

致谢 低纬超视距雷达数据由国家重大科技基础设施子午工程 (https://www.meridianproject.ac.cn/) 提供, GNSS 总电子含量数据和电离层闪烁数据由国家地球系统科学数据中心–地球物理分中心 (http://wdc.geophys.ac.cn/dbList.asp) 提供. 在电离层不均匀体的机理分析及低纬超视距电离层高频雷达早期设计等关键工作中, 肖老师给予了悉心指导. 他始终心系中国南部空间环境探测能力的提升, 多次在学术会议等场合为高频雷达探测模式开发与背景电离层扰动观测提供宝贵建议. 肖老师的学术远见与热忱关怀, 将永远铭记. 谨以此文深切缅怀肖佐老师.

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] KINTNER P M, LEDVINA B M, DE PAULA E R. GPS and ionospheric scintillations[J]. *Space Weather*, 2007, **5**(9): S09003

[2] WERNIK A W, SECAN J A, FREMOUW E J. Ionospheric irregularities and scintillation[J]. *Advances in Space Research*, 2003, **31**(4): 971-981

[3] HUNSUCKER R D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, **20**(2): 293-315

[4] HINES C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights[M]//HINES C O. The Upper Atmosphere in Motion. Washington: American Geophysical Union, 1974: 248-328. DOI: 10.1029/GM018p0248

[5] OTSUKA Y. Medium-scale traveling ionospheric disturbances[M]//HUANG C S, LU G, ZHANG Y L, *et al*. Ionosphere Dynamics and Applications. Washington: American Geophysical Union, 2021: 421-437

[6] XIAO Z, XIAO S G, HAO Y Q, *et al*. Morphological features of ionospheric response to typhoon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A4): A04304

[7] XIAO S G, XIAO Z, SHI J K, *et al*. Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread *F*[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A1): A01303

[8] LI K, ZHANG D H, TIAN Y Y, *et al*. Statistical study on the connections between TEC periodic disturbances associated with MSTIDs and mid-latitude frequency spread f in summer nights over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(6): e2025JA033706

[9] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics[M]. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2009

[10] SULTAN P J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread *F*[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A12): 26875-26891

[11] HUANG C S. Effects of the postsunset vertical plasma drift on the generation of equatorial spread F[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, **5**(1): 3

[12] SU S Y, CHAO C K, LIU C H. On monthly/seasonal/longitudinal variations of equatorial irregularity occurrences and their relationship with the postsunset vertical drift velocities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A5): A05307

[13] ABDU M A. Day-to-day and short-term variabilities in the equatorial plasma bubble/spread F irregularity seeding and development[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, **6**(1): 11

[14] TAKAHASHI H, WRASSE C M, FIGUEIREDO C A O B, *et al*. Equatorial plasma bubble seeding by MSTIDs in the ionosphere[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, **5**(1): 32

[15] CHISHAM G, LESTER M, MILAN S E, *et al*. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions[J]. *Surveys in Geophysics*, 2007, **28**(1): 33-109

[16] NISHITANI N, RUOHONIEMI J M, LESTER M, *et al*. Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, **6**(1): 27

[17] HU L H, LI G Z, NING B Q, *et al*. Development of low latitude long range ionospheric radar for observing plasma bubble irregularities and preliminary results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(3): e2023JA032099

[18] RIBEIRO A J, RUOHONIEMI J M, PONOMARENKO P V, *et al*. A comparison of SuperDARN ACF fitting methods[J]. *Radio Science*, 2013, **48**(3): 274-282

[19] HU L H, LI G Z, NING B Q, *et al*. Extremely long-range observations of ionospheric irregularities in a large longitude zone from pacific to Africa using a low latitude over-the-horizon radar in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(16): e2024GL109579

[20] DAI G F, LI G Z, OTSUKA Y, *et al*. Was the unseasonal development of post-sunset equatorial plasma bubbles in southeast Asia driven by quasi-2-day planetary waves?[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(3): e2024JA033280

[21] DAI G F, LI G Z, HU L H, *et al*. Azimuthal asymmetry of quasi-zonally propagating medium-scale traveling iono-

spheric disturbances revealed by the low latitude long-range ionospheric radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(10): e2025JA034050

[22] SUN W J, LI G Z, NING B Q, *et al*. Monitoring of ionospheric variability using the low latitude long range ionospheric radar (LARID): capabilities, advantages and limitations[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(11): e2024SW004134

[23] SHEPHERD S G. Elevation angle determination for SuperDARN HF radar layouts[J]. *Radio Science*, 2017, **52**(8): 938-950

[24] THOMAS E G, SHEPHERD S G. Virtual height characteristics of ionospheric and ground scatter observed by mid-latitude SuperDARN HF radars[J]. *Radio Science*, 2022, **57**(6): e2022RS007429

[25] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, **34**(3): 276-280

[26] SAMSON J C. Pure states, polarized waves, and principal components in the spectra of multiple, geophysical time-series[J]. *Geophysical Journal International*, 1983, **72**(3): 647-664

[27] SAMSON J C, GREENWALD R A, RUOHONIEMI J M, *et al*. Goose Bay radar observations of Earth-reflected, atmospheric gravity waves in the high-latitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1990, **95**(A6): 7693-7709

[28] LI G Z, NING B Q, ZHAO X K, *et al*. Low latitude ionospheric TEC oscillations associated with periodic changes in IMF *Bz* polarity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(16): 9379-9387

[29] SUN W J, WU B Y, WU Z, *et al*. IONISE: an ionospheric observational network for irregularity and scintillation in East and Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): e2020JA028055

[30] SAMSON J C, GREENWALD R A, RUOHONIEMI J M, *et al*. High-frequency radar observations of atmospheric gravity waves in the high-latitude ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, **16**(8): 875-878

[31] COWLING D H, WEBB H D, YEH K C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, **76**(1): 213-220

[32] HU L H, LEI J H, SUN W J, *et al*. Latitudinal variations of daytime periodic ionospheric disturbances from Beidou GEO TEC observations over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(3): e2020JA028809

[33] HOFFMANN L, XUE X, ALEXANDER M J. A global view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(2): 416-434

作者简介



代国峰 男, 1997 年 7 月出生于重庆市, 现为中国科学院地质与地球物理研究所工程师, 主要研究方向为电离层高频无线电探测技术研发、电离层扰动与不均匀体观测研究等.
E-mail: guofengcas@mail.iggcas.ac.cn



李国主（通信作者） 男, 1980 年 9 月出生于湖南省, 现为中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 中国科学院大学教授, 主要研究方向为电离层探测技术研发、电离层不均匀体诊断与机理研究和电离层与流星天文学科交叉研究等.
E-mail: gzlee@mail.iggcas.ac.cn