



引文格式:李福,孙越强,夏俊明,等.中国近海岸基GNSS-R探测蒸发波导的空间范围研究[J].武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(12):2428-2439.DOI:10.13203/j.whugis20240330

Citation:LI Fu, SUN Yueqiang, XIA Junming, et al.Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct in the Coastal Waters of China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(12): 2428-2439. DOI: 10.13203/j. whugis20240330

中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究

李福^{1,2,3} 孙越强^{1,2,3} 夏俊明^{1,3} 王先毅^{1,3} 杜起飞^{1,3}
白伟华^{1,3} 梁宏⁴ 罗晋⁵

1 中国科学院国家空间科学中心,北京,100190

2 中国科学院大学,北京,100049

3 天基空间环境探测北京市重点实验室,北京,100190

4 中国气象局气象探测中心,北京,100081

5 云南省大气探测技术保障中心,云南 昆明,650034

摘要:蒸发波导由于其折射效应对雷达、通信具有显著影响。全球导航卫星系统反射信号遥感技术(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)全天候、被动接收的特点使其具有探测蒸发波导的应用潜力,然而岸基GNSS-R探测的空间范围与蒸发波导高度密切相关,在中国近海复杂的蒸发波导环境下是否具备实用价值仍有待研究。因此,基于沿海气象观测站实测数据以及欧洲中期天气预报中心发布的海水面温度数据,采用蒸发波导预测模型与GNSS-R蒸发波导探测范围模型,系统分析了GNSS-R探测蒸发波导的空间范围的时空分布特征。结果表明,基于中国沿海气象数据得到的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围在UTC时间5时至7时达到峰值,至夜间逐渐降低并趋于稳定;季节变化方面,夏秋季平均探测范围最大,冬季最小,在蒸发波导的高发期和平静期,GNSS-R探测蒸发波导的空间范围的平均值分别为145 km和103 km;此外,地域地形差异对探测范围也有影响,辽东半岛以及海南岛西侧探测范围平均值均大于东侧,而台湾海峡作为蒸发波导的高发区域,其GNSS-R探测蒸发波导的空间范围明显大于周边海域。研究结果将扩展气象数据的应用领域,提高相关区域雷达探测效能,并且为通信提供干扰预警信息。

关键词:蒸发波导;GNSS反射;有效散射半径;气象观测

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-11-29

DOI:10.13203/j.whugis20240330

文章编号:1671-8860(2025)12-2428-12

Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct in the Coastal Waters of China

LI Fu^{1,2,3} SUN Yueqiang^{1,2,3} XIA Junming^{1,3} WANG Xianyi^{1,3} DU Qifei^{1,3}
BAI Weihua^{1,3} LIANG Hong⁴ LUO Jin⁵

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

4 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

5 Yunnan Atmospheric Observation Technology Support Center, Kunming 650034, China

Abstract: Objectives: The evaporation duct has a significant impact on shore based radar, shipborne radar, and 5G communication due to its refractive effect. Global navigation satellite system reflectometry

基金项目:中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”青年创新课题(E3PD40017S);国家自然科学基金(42104032, 42074042);风云应用先导项目(FY-APP-2022.0108);中国科学院青年创新促进委员会项目(2020152);中国科学院青年交叉团队科研项目(JCTD-2021-10)。

第一作者:李福, 博士生, 工程师, 研究方向为GNSS遥感探测与应用。lif@nssc.ac.cn

通信作者:夏俊明, 博士, 副研究员。xiajunming@nssc.ac.cn

(GNSS-R) has the application potential of detecting evaporation duct due to the characteristics of all weather, passive reception and high spatial and temporal resolution. However, spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct is closely related to the evaporation duct height, and whether it has practical value in complex evaporation duct environment near the coast of China still needs to be studied. **Methods:** Thus, meteorological data measured from coastal meteorological observation stations and sea surface temperature released by European Centre for Medium-Range Weather Forecasts are used to obtain the spatio-temporal distribution pattern of the spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct, with the evaporation duct model and GNSS-R evaporation duct detection range model. **Results:** The spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct based on Chinese coastal meteorological data first increases and then decreases during the day. It reaches the maximum value from 5:00 to 7:00 UTC, and then gradually decreases and stabilizes at night. In terms of seasonal changes, the highest value is in summer and autumn, and the lowest value is in winter. The detection range of the Bohai Sea and the Yellow Sea are greatly affected by seasons, while the detection range of the East China Sea and the South China Sea is large and remains relatively stable throughout the year. Especially in the South China Sea, it can maintain a detection range of about 130 km throughout the year. Further analysis shows that during the high incidence period and the quiet period of the evaporation duct, the average spatial range of GNSS-R detection of the evaporation duct is 145 km and 103 km, respectively. In addition, regional differences have an influence on the detection range. For example, the average spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct on the western side of Liaodong Peninsula and Hainan Island is greater than that on the eastern side. As a high incidence area for evaporation duct, the Taiwan Strait has a larger spatial range of GNSS-R detection of evaporation ducts than the surrounding waters. **Conclusions:** The analysis results can expand the application areas of meteorological data, improve radar detection efficiency in relevant areas, and provide the warning information for communication.

Key words: evaporation duct; global navigation satellite system reflectometry (GNSS-R); effective scattering region; meteorological observation

大气波导是对流层大气中形成的一种特殊折射率剖面结构,可使电磁波传播轨迹弯曲程度超过地球曲率,并将其陷获在一定厚度的大气层内形成波导传播。蒸发波导是在海面几十米的高度范围内的一类特殊表面大气波导类型,出现概率达 85% 以上^[1]。蒸发波导可以使主动雷达探测区范围增加,从而实现超视距探测、实施超视距作战;另一方面蒸发波导容易使雷达出现探测盲区^[2-5],因此蒸发波导对于岸基雷达以及舰船雷达影响显著。此外,中国 5G 基站采用的时分双工制式使蒸发波导在近海岸,尤其是渤海湾沿岸、海南岛沿岸、台湾海峡附近,对 5G 通信的干扰尤为明显^[6-11]。然而如果能合理利用蒸发波导效应,亦可以显著提高海上通信系统的有效通信距离与覆盖范围,增强海上通信可靠性^[12]。

蒸发波导的探测方式主要有微波折射率仪、低空系留气球、气象梯度仪、机载大气折射率探测等原位探测方式^[1,13]以及利用雷达海杂波反演大气波导的 RFC (refractivity from clutter) 技术^[7, 14-15],原位探测方式成本高,在海洋等大面积

区域内无法大量设置观测点,而 RFC 方法属于主动探测方式,在应用中容易暴露己方目标。目前蒸发波导的诊断和预测主要采用海面以及特定高度的气象水文观测要素,通过计算得到蒸发波导高度和大气折射率剖面,目前应用比较广泛的有 PJ (Paulus-Jeske) 模型^[16-17]、MGB (Musson-Gauthier-Bruth) 模型^[18]、BYC (Babin-Young-Carton) 模型^[19]、NPS (Naval Postgraduate School) 模型^[20-21]和伪折射率模型^[22]。蒸发波导预测模型无法对蒸发波导的水平方向进行预测,因此许多学者采用再分析数据进行全球或区域蒸发波导统计研究^[23-27],但是基于全球再分析数据计算的蒸发波导在时间和空间分辨率以及实时性等方面仍需要提升。探索更高效的蒸发波导探测技术是未来提升海上雷达、跨海通信等领域性能的关键。

全球导航卫星系统反射信号遥感技术(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R) 是一种新兴遥感探测技术^[28],通过接收机接收和处理海洋、陆地等不同目标反射的 GNSS 信号,实

现地球物理参数的提取,已应用于海面风场^[29]、土壤湿度^[30-32]、冻土冻融^[33-34]、海冰探测^[35-36]、积雪反演^[37]、水面高度^[38-39]等领域。由于GNSS-R技术具有全天候、被动接收等优势,近年来许多学者采用GNSS-R相关技术进行大气波导探测。文献[40]提出了采用地基单站GPS精密单点定位反演大气折射率剖面的方法;文献[41]从理论上证明了利用GPS海面散射信号反演大气波导的可行性,并在中国东南沿海进行了相关实验验证;文献[42]论证了利用GPS散射信号的功率开展大气波导探测的可行性。北京航空航天大学研究团队提出将GNSS反射信号近似为多条反射信号叠加的结果,研究了在复杂环境下的GNSS反射信号模型,增加了降雨、泡沫等因素的影响^[43-44]。中国科学院国家空间科学中心研究团队提出了GNSS卫星海面反射信号的有效散射区域的概念,并仿真分析了大气波导高度对有效散射区域的影响以及将GNSS标准反射信号与GNSS波导反射信号分开的方法^[45]。文献[46]根据低仰角的GNSS海面散射信号可以被表面波导有效捕获的特点,提出了一种基于GNSS反射信号接收功率反演表面波导的方法。

蒸发波导的折射效应会导致GNSS-R信号传播路径发生变化,因此造成接收机接收到的GNSS-R信号范围不同,从而可以根据GNSS-R信号范围反演蒸发波导参数信息。与传统原位探测和主动雷达探测相比,GNSS-R具有全天候、被动探测的优势。现有研究表明,岸基GNSS-R探测蒸发波导的最远探测距离与蒸发波导高度密切相关^[45]。不同地理环境下蒸发波导参数不同,导致利用GNSS-R技术探测蒸发波导的空间范围不同。中国东部和南部大陆海岸线超过1.8万km,内海和边海的水域面积约470万km²,岸基GNSS-R技术能否对相关海域内蒸发波导进行有效覆盖与有效探测,是岸基GNSS-R探测蒸发波导技术能否实用化的前提。

本文基于中国气象局提供的中国沿海99个气象观测站时长为1a的逐小时气象观测数据,在假定蒸发波导水平分布均匀的前提下,结合欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的全球海水表面温度数据,采用蒸发波导预测PJ模型和GNSS-R蒸发波导探测范围模型,计算出相应的GNSS-R信号的最大有效散射半径,作为该时刻对应地点周边海域的GNSS-R探测蒸发波导的

空间范围估计值。本文基于实测气象数据,揭示了中国近海岸基GNSS-R探测蒸发波导的空间范围的时空分布规律以及热点区域分布和地域地形相关影响。本文成果一方面为GNSS-R探测蒸发波导技术研究以及实用化提供了参考,尤其是为GNSS-R探测蒸发波导设备的研制以及安装选址提供了有效依据;另一方面探索了沿海以及岛屿上已有的气象观测数据的新应用。

1 原理

1.1 蒸发波导预测模型

PJ模型计算简便,是目前舰船上蒸发波导预测应用最为广泛的蒸发波导预测模型之一。采用位折射率、位温、位水汽压分别代替折射率、空气温度、水汽压,海面大气压取常数1000 hPa,采用参考高度 $z_r=6$ m的空气温度 T_a (单位为K)、相对湿度 R_h 、风速 u (单位为m/s)和海水表面温度 T_s (单位为K)作为输入,计算整体Richardson数 R 和Monin-Obukhov长度 L ,计算式为:

$$R = 98z_r \frac{T_a - T_s}{u^2 T_a} \quad (1)$$

$$L = \frac{10z_r \Gamma_e}{R} \quad (2)$$

式中,函数 Γ_e 用分段函数近似计算:

$$\Gamma_e = \begin{cases} 0.05, & R \leq -3.75 \\ 0.065 + 0.004R, & -3.75 < R \leq -0.12 \\ 0.109 + 0.367R, & -0.12 < R \leq 0.14 \\ 0.155 + 0.021R, & R > 0.14 \end{cases} \quad (3)$$

PJ模型根据输入的空气温度与海水表面温度差将大气状态分为3种,即大气中性条件($\delta=0$)、稳定的大气层结($\delta>0$)和不稳定的大气层结($\delta<0$),根据上述不同状态给出高度 z 处的普适函数取值公式为:

$$\begin{cases} \varphi = 1 + 5.2 \frac{z}{L}, & \delta > 0 \\ \varphi = 1, & \delta = 0 \\ \varphi^4 - 18 \frac{z}{L} \varphi^3 = 1, & \delta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

采用位折射率公式分别计算空气的位折射率 N_a 和海面的位折射率 N_s :

$$\begin{cases} N_a = \frac{77.6}{T_a} \left(1000 + \frac{4810}{T_a} e \right) \\ N_s = \frac{77.6}{T_s} \left(1000 + \frac{4810}{T_s} e_0 \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, e 表示参考高度处的水汽压; e_0 表示海水表面饱和水汽压,计算式为:

$$\begin{cases} e = \frac{R_e}{100} \times 6.105 \exp\left(25.22 \times \frac{T_a - 273.15}{T_a} - 5.31 \times \ln \frac{T_a}{273.15}\right) \\ e_0 = 6.105 \exp\left(25.22 \times \frac{T_s - 273.15}{T_s} - 5.31 \times \ln \frac{T_s}{273.15}\right) \end{cases} \quad (6)$$

对于稳定或中性条件,蒸发波导高度的计算式为:

$$z_e \approx \frac{N_a - N_s}{-0.125 \left(\ln \frac{z}{z_0} + \frac{5.2}{L} z \right) - \frac{5.2(N_a - N_s)}{L}} \quad (7)$$

式中, z_e 为蒸发波导高度,单位为 m; z_0 为动力粗糙度, PJ 模型中取值为 $0.000\ 15\ \text{m}^{[1]}$ 。根据上述结果判断波导高度 z_e 是否满足 $0 \leq z_e \leq L$, 如果不满足,则重新计算波导高度:

$$z_e = \frac{49.6(N_a - N_s) + 5.2z}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (8)$$

对于不稳定条件,蒸发波导高度为:

$$\begin{cases} z_e = \left(\alpha^4 - \frac{18\alpha^3}{L} \right)^{-\frac{1}{4}} \\ \alpha = \frac{-0.125 \left(\ln \frac{z_r}{z_0} - \psi \right)}{N_a - N_s} \end{cases} \quad (9)$$

式中, ψ 为 z_r/L 的普适函数。

对计算结果进行修正,当 $T_a - T_s > -1$ 时,分别计算 $T_a = T_s$ 和 $T_a = T_s - 1$ 状态下的波导高度,取两个波导高度的较小值作为波导高度的最终值^[17,23]。

1.2 GNSS-R 探测蒸发波导原理

GNSS-R 探测蒸发波导原理如图 1 所示。GNSS-R 技术采用两个天线分别接收 GNSS 定位信号和反射信号,将反射信号与本地码进行相关运算,得到基于码延时和多普勒延时的 DDM (Delay-Doppler maps) 数据,从 DDM 中反演反射信号路径中的相关参数信息。

在标准大气环境下,当海面平静,即反射面光滑时,反射信号经过海面反射进入接收机反射天线,反射区域即通常称为镜面反射点(图 1 中 S_p 点)的位置可以按照几何光学方式进行计算。当海面粗糙时,海面反射信号既包括符合几何光学的镜面反射,也包括由于海面粗糙而产生的散射信号。根据视线传播公式^[47]可以计算接收机反射天线接收到的所有信号的最远距离 D :

$$D = \sqrt{2R'} \times \sqrt{H} \quad (10)$$

式中, R' 为考虑标准大气折射后的等效地球半径,

约为 $4R_e/3$, R_e 为地球半径,本文取 $6\ 378\ 137\ \text{m}$ 。假设接收机高度 H 为 $10\ \text{m}$,则 D 约为 $13\ \text{km}$ 。

如图 1 所示,定义接收机反射天线与所能接收到的距离反射天线最远的反射信号的距离为 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围,标准大气环境下 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围记为 R_n 。本文假设蒸发波导水平分布均匀且具有水平无限扩展特性,当海面存在蒸发波导时,蒸发波导区域不同高度的大气折射率记为 n_0, n_1, \dots ,由于蒸发波导对电磁波的超折射效应超过了地球曲率,一部分在标准大气环境下计算的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围 R_n 之外的散射信号也能够进入接收机反射天线,此时 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围记为 R_d 。反射天线接收到的信号包含镜面反射点信号、经过蒸发波导区域的反射信号以及一部分直射信号,由于经过蒸发波导区域的反射信号相比于镜面反射点信号较弱,如何对上述信号进行有效区分是 GNSS-R 探测蒸发波导的难点。

2 数据与方法

2.1 气象观测数据

本文采用中国气象局提供的中国沿海 99 个气象观测站时长为 1 a 的逐小时观测数据,作为蒸发波导预测模型的实测参数,评估 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。筛选的每个气象观测站点均提供了站点纬度、站点经度、空气温度、空气相对湿度、大气压强、风速、风向等参数的逐小时数据,以及相关参数的测量时刻,数据时间范围为 UTC 时间 2023 年 5 月 1 日 0 时至 2024 年 4 月 30 日 23 时。其中部分站点存在个别时刻数据缺失或者无效的情形,采用缺失或无效数据的前后时刻计算蒸发波导高度数据,通过线性插值的方法将蒸发波导高度数据补充完整,以便于分析。

需要注意的是,所采用的岸基气象观测站的位置一般位于陆海交界区,一些观测站点位于距离海岸线几十千米的位置,导致观测受到海陆大气影响,并不能完全反映对应海域的蒸发波导气象条件,从而对蒸发波导高度预测造成一定的误差。

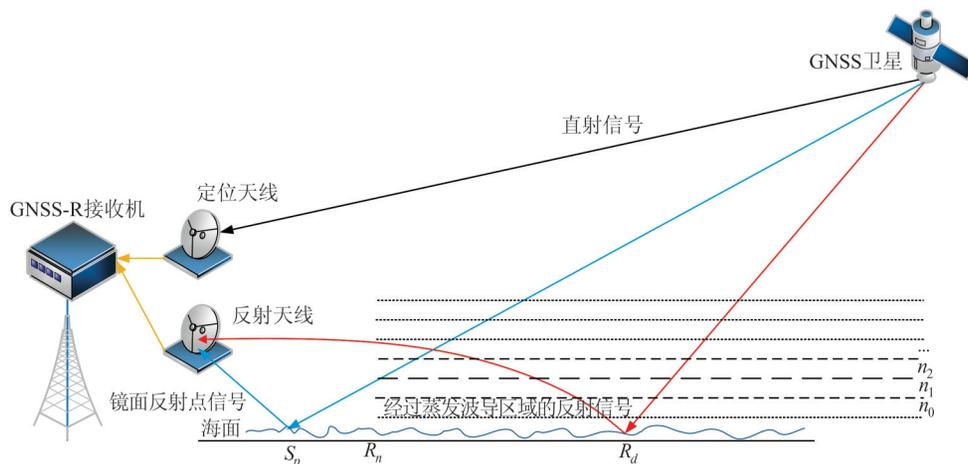


图1 GNSS-R探测蒸发波导原理

Fig. 1 Principle of GNSS-R Detection of Evaporation Duct

2.2 海水表面温度数据

沿海气象观测站的气象数据主要是大气相关参数,采用PJ模型进行蒸发波导高度计算还缺少海水表面温度数据,因此采用ECMWF发布的全球再分析数据中的逐小时海水表面温度数据(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/re-analysis-era5-single-levels?tab=download>)。相关研究表明,ECMWF海水表面温度数据比实际测量的海水表面温度低,因此会造成蒸发波导预测高度偏低^[48],尽管如此,通过筛选气象观测站点相关位置的海水表面温度作为PJ模型的输入参数,计算蒸发波导高度,得到的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围时空分布特征仍具有重要的研究意义。

由于ECMWF的海水表面温度数据空间分辨率为 0.25° ,而气象站采样点大部分与海岸有一定的距离,因此采用最邻近的选择方法,如果距离气象观测站最近的再分析数据格网点为陆地,则继续选择邻近格网点的海水表面温度数据。

2.3 GNSS-R探测蒸发波导的空间范围计算方法

为了得到不同蒸发波导条件下GNSS-R探测蒸发波导的空间范围,本文采用中国科学院国家空间科学中心开发的GREEPS软件进行蒸发波导条件下GNSS信号仿真,该软件基于电磁射线追踪法以及Snell定律,可以得到不同大气条件下反射信号的传播路径信息^[49]。根据不同蒸发波导高度得到的大气折射率曲线,可以得到对应的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围。采用Zavorotny-Voronovich(Z-V)模型^[32]仿真得到不同蒸发波导条件下的有效散射半径分布,当接收机高度范围为2~25 m且蒸发波导高度变化范围为

0~35 m时,将得到的不同接收机高度GNSS-R探测蒸发波导的空间范围均值^[45]进行拟合,得到GNSS-R蒸发波导探测范围模型,该模型中GNSS-R探测蒸发波导的空间范围与蒸发波导高度的拟合函数为:

$$\bar{R}_d = 152.6e^{(0.001836z_e)} - 132.8e^{(-0.1923z_e)} \quad (11)$$

式中, \bar{R}_d 表示对应蒸发波导高度 z_e 下GNSS-R探测蒸发波导的空间范围均值,单位为km。

采用气象站观测的温度、湿度、风速等气象数据以及ECMWF提供的海水表面温度数据,根据PJ模型计算对应时刻蒸发波导高度,然后以该时刻蒸发波导高度作为GNSS-R蒸发波导探测范围模型输入,计算GNSS-R探测蒸发波导的空间范围。由式(11)可知,当 $z_e > 28$ m时,GNSS-R探测蒸发波导的空间范围将稳定在160 km左右,因此对于 $z_e > 28$ m的蒸发波导,均可以按照GNSS-R探测蒸发波导的空间范围为160 km进行计算。需要注意的是,本文的仿真结果基于蒸发波导具有水平无限延伸特性的假设,实际情况中蒸发波导水平分布可能是不一致的,这将造成实际的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围与根据气象数据估计的探测范围不一致。

3 结果分析

3.1 GNSS-R探测蒸发波导的空间范围的时间演化特征

为了研究GNSS-R探测蒸发波导的空间范围时间演化特征,以月为时间区间,计算同一观测站点每天相同时刻的蒸发波导高度月平均值,根据式(11)计算得到对应的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围随时间的变化趋势曲线,如图2所示。

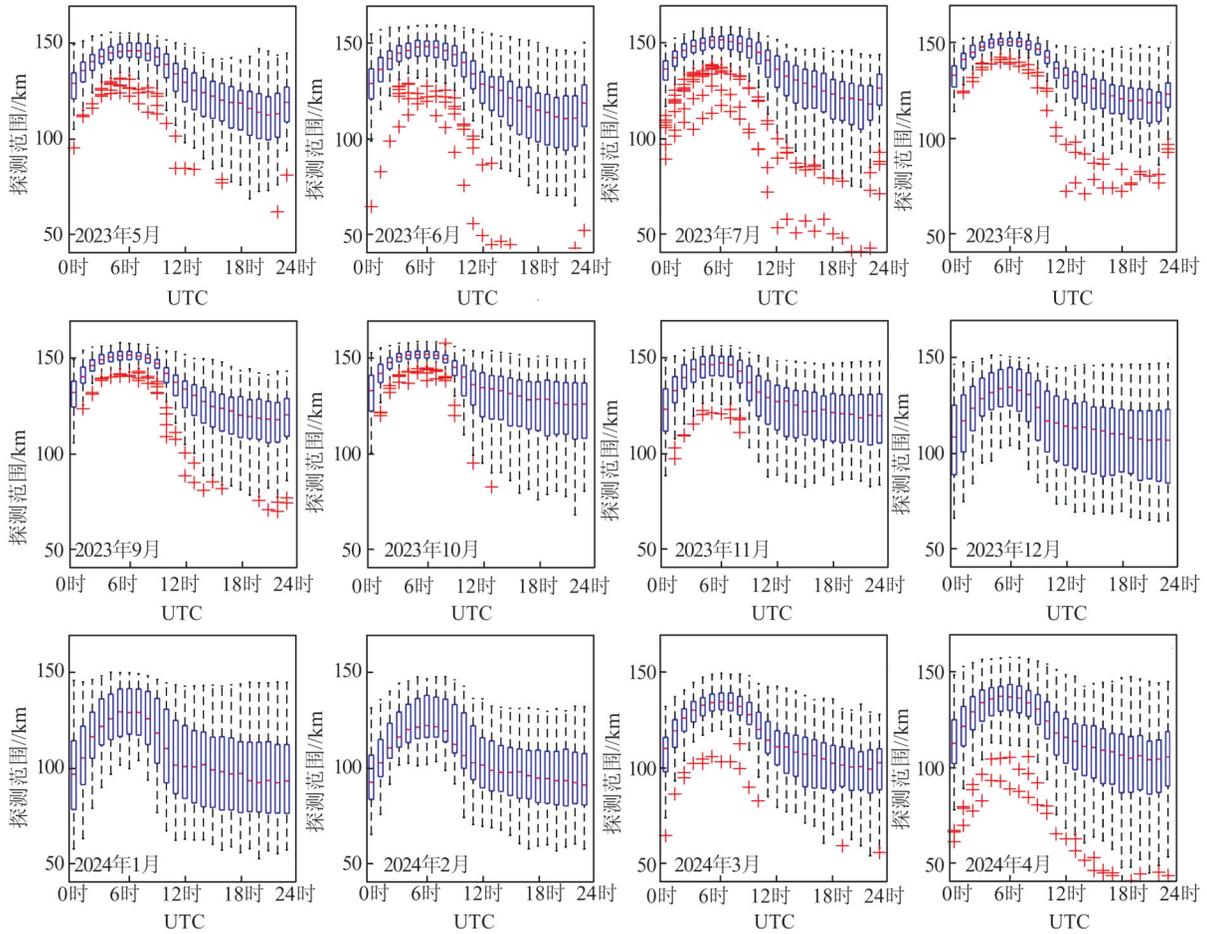


图 2 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围随时间的变化趋势

Fig. 2 Trend of Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct over Time

由图 2 可知,GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围具有明显的日周期特性,UTC 时间 0 时至 12 时对应北京时间 8 时至 20 时,即气象数据中的白天时间范围内,全年 12 月的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围均显现出先增加后降低的特征,并且全天 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围最大值集中出现在 UTC 时间 5 时至 7 时之间。UTC 时间 12 时至 24 时对应北京时间 20 时至次日 8 时,即气象数据中的夜间时间范围内,GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围在全年 12 月均趋于稳定,并且均低于全天的平均值。

计算每月所有站点各个时刻 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的均值,结果如图 3 所示。由图 3 可知,GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围存在明显的季节特征,具体表现为:在 1 月、2 月为全年最低,3 月、4 月相较于 1 月、2 月逐渐增加,在 7 月—10 月达到全年最高值,11 月、12 月相较于 7 月—10 月逐渐降低,上述变化规律与已有的采用再分析数据进行的蒸发波导高度统计研究^[23-24]结果一致。

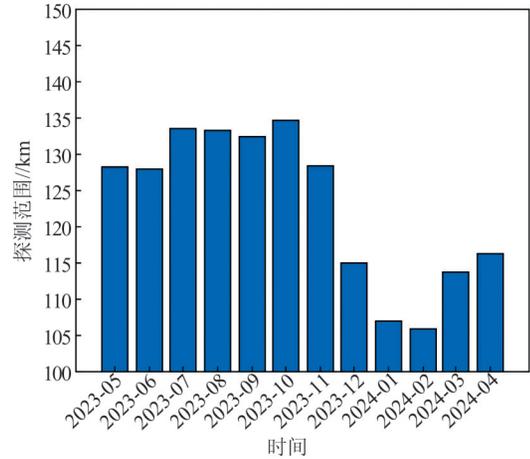


图 3 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围月变化

Fig. 3 Monthly Spatial Range Variations of GNSS-R Detection of Evaporation Duct

3.2 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的空间分布特征

基于§3.1 得出的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的时间演化特征,选取每一个观测站点每天 5 时、6 时、7 时的数据计算月平均值,作为该观测点该月白天的蒸发波导高度均值,由此得到全

年各观测站点白天的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围分布,如图4所示。同理,选取夜间20时、21时、22时的数据计算月平均值,作为该观测

点该月夜间的蒸发波导高度均值,由此得到全年各观测站点夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围分布,如图5所示。

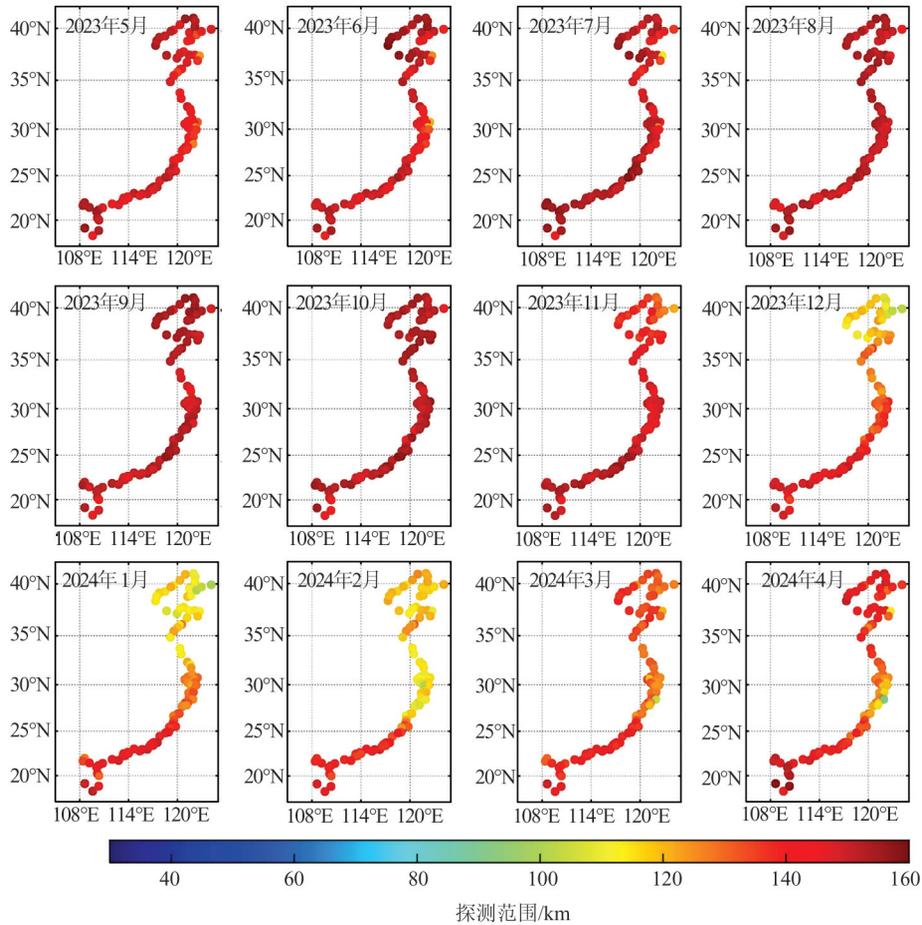


图4 各观测站点白天GNSS-R探测蒸发波导的空间范围

Fig. 4 Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct During Daytime at Each Observation Station

由图4和图5可知,选取的观测站点在白天和夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围变化趋势比较一致,具体表现为冬季(12月、1月、2月)白天/夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围显示出明显的南高北低趋势。渤海、黄海以及部分东海海域白天/夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围低于南海海域;春季(3月、4月、5月)渤海和黄海海域白天/夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围逐渐增加,并逐渐接近东海和南海海域;夏季(6月、7月、8月)和秋季(9月、10月、11月)渤海、黄海海域白天/夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围与东海、南海海域相近,均达到全年最大值;此外,在3月和11月,渤海海域白天/夜间的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围出现了明显的季节转换趋势;4月黄海部分海域以及东海部分海域白天/夜间的

GNSS-R探测蒸发波导的空间范围比其他海域低。

根据上述GNSS-R探测蒸发波导的空间范围的时空分布规律,定义夏季和秋季白天为蒸发波导高发期,定义冬季夜间为蒸发波导平静期。计算蒸发波导高发期所有观测站点的蒸发波导高度平均值约为13 m,然后根据GNSS-R蒸发波导探测范围模型得到GNSS-R探测蒸发波导的空间范围约为145 km,以此作为蒸发波导高发期的平均探测范围。同理,计算蒸发波导平静期所有观测站点的蒸发波导高度平均值约为5 m,GNSS-R探测蒸发波导的空间范围约为103 km,以此作为蒸发波导平静期的平均探测范围。因此只要发生蒸发波导,即使在蒸发波导的平静期,仍能采用岸基GNSS-R技术对距离观测点约103 km的海域的蒸发波导进行有效探测。

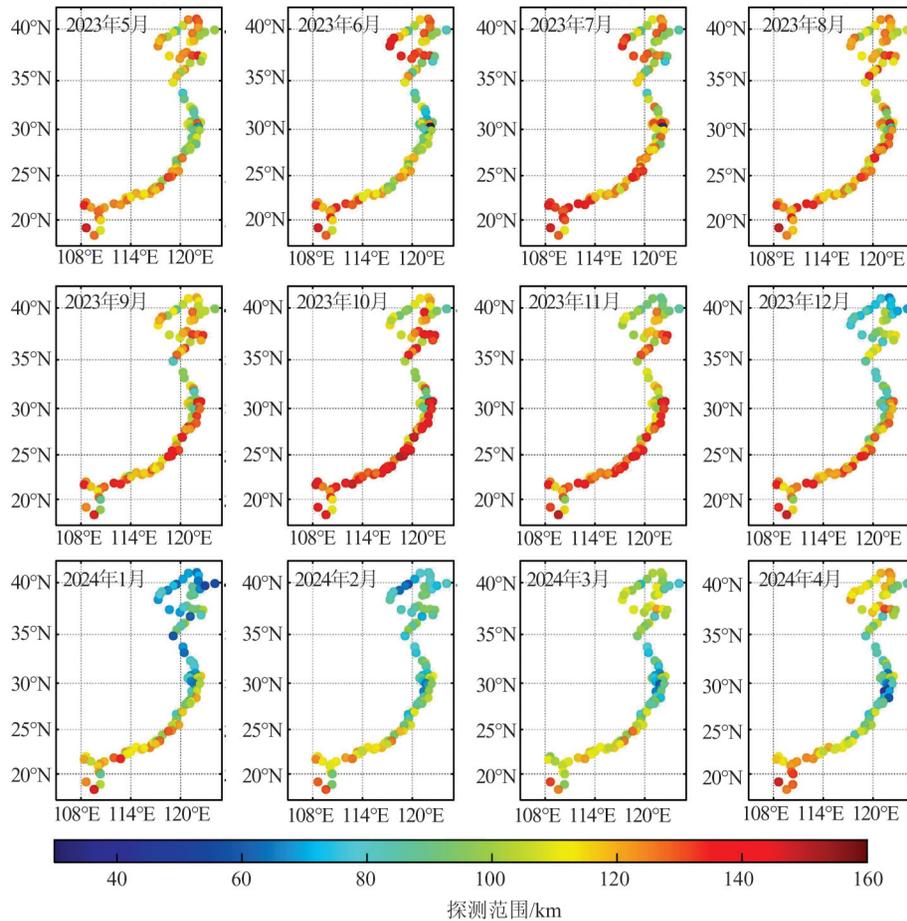


图 5 各观测站点夜间 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围

Fig. 5 Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct During Nighttime at Each Observation Station

3.3 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的热点区域分析

根据 §3.1 和 §3.2 分析结果可知, GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的时间和空间分布均具有较明显的特征。由于蒸发波导高度具有明显的日周期性, §3.1 和 §3.2 采用的月平均统计方式对于某些时刻出现的强波导可能会造成误差。此外, 不同海域气候变化规律存在差异, 需要考虑地域因素对蒸发波导的影响。因此按照观测站点位置邻近的海域对观测站点进行划分, 绘制了渤海、黄海、东海、南海海域每天的平均 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 渤海和黄海海域 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围日均值受季节影响较大, 在冬季达到全年最小值。东海和南海海域 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围日均值相较于渤海和黄海海域更加稳定, 尤其是南海海域, 能全年保持约 130 km 的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。此外, 黄海和东海同一时间各个站点的差异相较于渤海和南海要大。

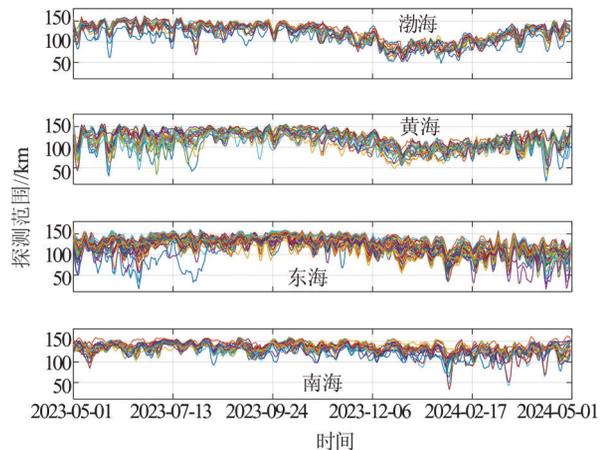


图 6 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围日均值

Fig. 6 Daily Average Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct

需要注意的是, 沿海陆地对蒸发波导也可能造成影响, 为了进一步分析陆地影响, 选取 4 组热点区域进行分析, 分别是: (1) 辽东半岛西侧的长兴岛观测站和东侧的皮口观测站; (2) 山东半岛北侧的烟台观测站和南侧的海阳观测站; (3) 舟山群岛的嵊泗观测站、台湾海峡的秀屿观测站和雷州

半岛周边的雷州观测站;(4)海南岛西侧的东方观测站和东侧的万宁观测站。将全年每天同一时刻

的数据取均值,得到24 h全年平均GNSS-R探测蒸发波导的空间范围,如图7所示。

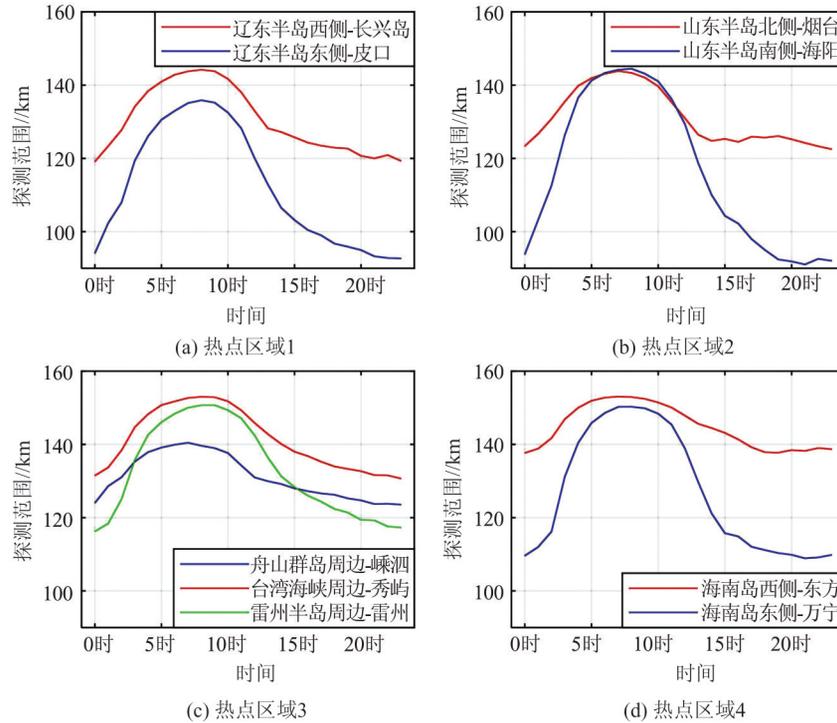


图7 热点地区24 h全年平均GNSS-R探测蒸发波导的空间范围对比

Fig. 7 Comparison of 24-hour Annual Average Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct in Hotspot Areas

由图7可知,辽东半岛和海南岛的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围均具有明显的东、西侧差异,西侧GNSS-R探测蒸发波导的空间范围均大于东侧,原因可能是由于陆地的阻隔作用,辽东半岛西侧和海南岛西侧被陆地与太平洋阻隔,形成了更稳定的气象环境,更容易形成蒸发波导。山东半岛南侧和北侧只在夜间时间表现出北侧GNSS-R探测蒸发波导的空间范围大于南侧,白天时间两者GNSS-R探测蒸发波导的空间范围相近,原因可能是山东半岛北侧和南侧的地理位置对应的白天海洋环境参数对蒸发波导的影响相近。此外,台湾海峡周边的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围大于同时的舟山群岛附近和雷州半岛周边。由于台湾海峡周边蒸发波导高发,所以采用GNSS-R进行蒸发波导探测,将会具有比其他区域更大的平均探测范围。

4 结 语

本文采用中国气象局提供的沿海气象观测数据结合ECMWF海水表面温度数据计算蒸发波导高度,根据蒸发波导条件下的GNSS-R散射理论,对GNSS-R探测蒸发波导的空间范围的时空分布进行了分析,并且对4组热点地区进行了

进一步研究,得到结论如下:

1) 基于沿海气象数据得到的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围具有明显的日变化规律和季节变化规律,即白天逐渐增加再降低,在UTC时间5时至7时达到最大,至夜间逐渐降低并趋于稳定;在夏季和秋季达到最大,冬季降低至全年最小值,3月、4月和11月、12月显示出季节转换的趋势。

2) 渤海和黄海海域GNSS-R探测蒸发波导的空间范围受季节影响较大,东海和南海海域则全年均保持在一个比较稳定的范围,其中南海海域全年GNSS-R探测蒸发波导的空间范围均值在130 km左右。

3) 蒸发波导高发期的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围平均值约为145 km,蒸发波导平静期的GNSS-R探测蒸发波导的空间范围平均值约为103 km。

4) 中国近海蒸发波导具有明显地理分布特征,如辽东半岛和海南岛均为西侧比东侧的GNSS-R探测蒸发波导的平均空间范围大,台湾海峡周边比其他区域GNSS-R探测蒸发波导的空间范围大。

本文的研究结果显示出岸基GNSS-R探测

蒸发波导的巨大潜力以及应用前景,如果能充分利用沿海站点、岛屿(如东沙群岛、南沙群岛)、近岸舰船以及海上浮标等安装 GNSS-R 探测设备,则可以实现对相关海域进行全范围蒸发波导全天候被动探测,探测结果可以实时应用于雷达修正、通信干扰预警等领域。此外,基于现有气象观测数据可以估计蒸发波导高度以及 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围,从而可以充分利用已经建成的沿海及岛屿气象观测站的数据,扩展数据应用至蒸发波导监测领域,其监测结果可以提升雷达探测、海上通信能力。

值得注意的是,因为沿海气象观测数据的测量误差以及蒸发波导预测模型误差等因素,所以根据沿海气象观测数据只能对 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围进行粗略估计,真实 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围需要考虑蒸发波导的水平分布以及电磁环境等因素的影响,未来将关注于采用 GNSS-R 实测数据进行蒸发波导的统计分析,构建蒸发波导实时探测、预警及修正系统。

参 考 文 献

- [1] 康士峰, 张玉生, 王红光. 对流层大气波导[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 2-82.
KANG Shifeng, ZHANG Yusheng, WANG Hongguang. Atmospheric Duct in Troposphere Environment[M]. Beijing: Science Press, 2014: 2-82.
- [2] 焦林, 张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(5): 815-820.
JIAO Lin, ZHANG Yonggang. Study of the Shadow Zone of the Radar in the Atmospheric Duct[J]. *Journal of Xidian University*, 2004, 31(5): 815-820.
- [3] 任朔. 蒸发波导环境下的舰船雷达性能评估系统设计与实现[D]. 新乡: 河南师范大学, 2022.
REN Shuo. Design and Implementation of the Shipborne Radar Performance Evaluation System in the Evaporation Duct [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2022.
- [4] 章晗, 王红光, 李建儒. 一次大气波导过程天气雷达超视距海面回波分析[J]. 电波科学学报, 2022, 37(3): 505-511.
ZHANG Han, WANG Hongguang, LI Jianru. Analysis on Trans-Horizon Sea Echoes of Weather Radar Within an Atmospheric Duct Process[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, 37(3): 505-511.
- [5] YU H X, LIAO C, FENG J, et al. Analysis of Radar Target Scattering Echo with Surface Ducting in Large-Scale Environments Based on the PE-MoM Hybrid Method [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(9): 2295-2299.
- [6] ZHOU T, SUN T Y, HU H L, et al. Analysis and Prediction of 100 km-Scale Atmospheric Duct Interference in TD-LTE Networks[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2017, 2(1): 66-80.
- [7] YANG C, GUO L X. Inferring the Atmospheric Duct from Radar Sea Clutter Using the Improved Artificial Bee Colony Algorithm[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, 10(4): 437-445.
- [8] WANG Y Z, CHEN Y, ZHOU T, et al. A Traceable Approach to Remote Interference Management for New Radio[C]//IEEE International Conference on Communications Workshops, Shanghai, China, 2019.
- [9] LIU F F, PAN J X, ZHOU X W, et al. Atmospheric Ducting Effect in Wireless Communications: Challenges and Opportunities [J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2021, 6(2): 101-109.
- [10] WEI M S, XIE W L, ZHANG G H. Research Based on Remote Interference Management[C]//International Wireless Communications and Mobile Computing, Harbin, China, 2021.
- [11] 赵飞龙. 5G 大气波导干扰形成条件及其规避方法研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(1): 109-115.
ZHAO Feilong. Forming Interference of Atmospheric Duct in 5G and Avoid Method [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(1): 109-115.
- [12] 董浩, 宋亮, 化存卿, 等. 海上通信技术发展与研究综述[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 1-17.
DONG Hao, SONG Liang, HUA Cunqing, et al. Survey of the Research and Development on the Maritime Communication Technology [J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(5): 1-17.
- [13] 张玉生, 郭相明, 赵强, 等. 大气波导的研究现状与思考[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 813-831.
ZHANG Yusheng, GUO Xiangming, ZHAO Qiang, et al. Research Status and Thinking of Atmospheric Duct [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(6): 813-831.
- [14] FOUNTOULAKIS V, EARLS C. Duct Heights Inferred from Radar Sea Clutter Using Proper Orthogonal Bases [J]. *Radio Science*, 2016, 51(10): 1614-1626.
- [15] JI H J, YIN B, ZHANG J P, et al. Joint Inversion

- of Evaporation Duct Based on Radar Sea Clutter and Target Echo Using Deep Learning[J]. *Electronics*, 2022, 11(14): 2157.
- [16] JESKE H. State and Limits of Prediction Methods of Radar Wave Propagation Conditions over Sea [C]//Modern Topics in Microwave Propagation and Air-Sea Interaction, Dordrecht, Netherlands, 1973.
- [17] PAULUS R A. Practical Application of an Evaporation Duct Model[J]. *Radio Science*, 1985, 20(4): 887-896.
- [18] MUSSON-GENON L, GAUTHIER S, BRUTH E. A Simple Method to Determine Evaporation Duct Height in the Sea Surface Boundary Layer[J]. *Radio Science*, 1992, 27(05): 635-644.
- [19] BABIN S M, YOUNG G S, CARTON J A. A New Model of the Oceanic Evaporation Duct [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(3): 193-204.
- [20] FREDERICKSON P, DAVIDSON K, GOROCH A. Operational Bulk Evaporation Duct Model for MORIAH Version 1.2[R]. Monterey, USA: Naval Postgraduate School, 2000.
- [21] FAIRALL C W, BRADLEY E F, HARE J E, et al. Bulk Parameterization of Air - Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(4): 571-591.
- [22] 刘成国, 黄际英, 江长荫, 等. 用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面[J]. *电子学报*, 2001, 29(7): 970-972.
LIU Chengguo, HUANG Jiyong, JIANG Changyin, et al. Modeling Evaporation Duct over Sea with Pseudo-Refractivity and Similarity Theory[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(7): 970-972.
- [23] 杨坤德, 史阳, 马远良, 等. 近海面蒸发波导理论模型与特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2022: 31-96.
YANG Kunde, SHI Yang, MA Yuanliang, et al. Theoretical Model and Characteristics of Evaporation Waveguide near the Sea Surface[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2022: 31-96.
- [24] 陈莉. 中国近海大气波导的统计特征分析及演变机理的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
CHEN Li. Statistical Characteristics Analysis of Atmospheric Ducts over China Seas and Numerical Modeling Study on Their Evolution Mechanism [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [25] YANG K D, ZHANG Q, SHI Y, et al. On Analyzing Space-Time Distribution of Evaporation Duct Height over the Global Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(7): 20-29.
- [26] YANG S B, LI X F, WU C, et al. Application of the PJ and NPS Evaporation Duct Models over the South China Sea (SCS) in Winter[J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0172284.
- [27] GUO X M, ZHAO D L, ZHANG L J, et al. A Comparison Study of Sensitivity on PJ and NPS Models in China Seas[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(5): 1022-1030.
- [28] 吴学睿, 宋少辉, 马文骁, 等. 典型水循环参数星载 GNSS-R/SoOP-R 遥感探测的研究现状[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(1): 1-14.
WU Xuerui, SONG Shaohui, MA Wenxiao, et al. A Review of GNSS-R/SoOP-R for Essential Hydrological Climate Variables Detection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 1-14.
- [29] 王峰, 李建强, 杨东凯, 等. “吉林一号”宽幅 01B 卫星 GNSS-R 数据风速反演研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(1): 56-67.
WANG Feng, LI Jianqiang, YANG Dongkai, et al. Wind Speed Retrieval Using GNSS-R Data from “Jilin-1” Kuanfu-01B Satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 56-67.
- [30] 贾燕, 金双根, 肖智宇, 等. 全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感: 现状与机遇[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(11): 1784-1799.
JIA Yan, JIN Shuanggen, XIAO Zhiyu, et al. Soil Moisture Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System-Reflectometry: Current Status and Opportunity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1784-1799.
- [31] 郑南山, 何佳星, 丁锐, 等. 基于轨迹聚类的 GNSS-IR 多系统组合土壤湿度估计方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(1): 37-46.
ZHENG Nanshan, HE Jiaying, DING Rui, et al. A GNSS-IR Multi-system Combination Soil Moisture Estimation Method Based on Track Clustering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 37-46.
- [32] 张双成, 郭沁雨, 马中民, 等. 星载 GNSS-R 反演土壤湿度研究进展与思考[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(1): 15-26.
ZHANG Shuangcheng, GUO Qinyu, MA Zhongmin, et al. Research Advances and some Thoughts on Soil Moisture Retrieval by Space-Borne GNSS-R [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 15-26.
- [33] 刘善伟, 梁承佳, 万玮, 等. 一种考虑地形影响的 GNSS-IR 冻土冻融形变监测方法[J]. *武汉大学学*

- 报(信息科学版), 2024, 49(1): 77-89.
- LIU Shanwei, LIANG Chengjia, WAN Wei, et al. A New GNSS-IR Method to Monitor Permafrost Freeze-Thaw Deformation Considering the Terrain Effect [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 77-89.
- [34] 魏涛, 韩磊. 星载 GNSS-R 技术在地表冻融判别中的应用[J]. 北京测绘, 2025, 39(11): 1688-1694.
- WEI Tao, HAN Lei. Application of Spaceborne GNSS-R Technology in Surface Freeze-Thaw Identification [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(11): 1688-1694.
- [35] 叶世榕, 罗歆琪, 南阳, 等. 一种改进的星载 GNSS-R 卷积神经网络海冰检测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 90-99.
- YE Shirong, LUO Xinqi, NAN Yang, et al. An Improved Sea Ice Detection Method Based on Spaceborne GNSS-R Using CNN[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 90-99.
- [36] 曾棋, 张胜凯, 龚力, 等. 基于 GNSS-IR 技术的南极海冰积雪深度反演研究[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(3): 14-18.
- ZENG Qi, ZHANG Shengkai, GONG Li, et al. Research on Inversion of Antarctic Sea Ice Snow Depth Based on GNSS-IR Technology[J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(3): 14-18.
- [37] 邓攀, 王泽民, 安家春, 等. 利用小波分解的 GNSS-R 雪厚反演改进算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 863-870.
- DENG Pan, WANG Zemin, AN Jiachun, et al. An Improved Algorithm Based on Wavelet Decomposition to Retrieve Snow Depth Using GNSS-R Signals [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 863-870.
- [38] 邓垦, 周佩元, 杜兰, 等. 多系统单频紧组合 GNSS-R 测高方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 146-155.
- DENG Ken, ZHOU Peiyuan, DU Lan, et al. GNSS-R Altimetry Method with Multi-System Single-Frequency Tight Integration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 146-155.
- [39] 刘文. 低成本 GNSS 浮标数据解算方法及海面高观测精度分析[J]. 北京测绘, 2025, 39(10): 1448-1454.
- LIU Wen. Low-Cost GNSS Buoy Data Calculation Method and Sea Surface Height Observation Accuracy Analysis [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(10): 1448-1454.
- [40] LOWRY A R, ROCKEN C, SOKOLOVSKIY S V, et al. Vertical Profiling of Atmospheric Refractivity from Ground-Based GPS [J]. *Radio Science*, 2002, 37(3): 13-1-13-19.
- [41] 王波. 基于雷达杂波和 GNSS 的大气波导反演方法与实验[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- WANG Bo. Method and Experiment of Atmospheric Ducts Estimation Using Radar Clutter and GNSS[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [42] ZHANG J P, WU Z S, WANG B, et al. Modeling Low Elevation GPS Signal Propagation in Maritime Atmospheric Ducts [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, 80: 12-20.
- [43] 祁永强, 张波, 杨东凯, 等. 机载 GNSS 海洋反射信号的建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(3): 567-572.
- QI Yongqiang, ZHANG Bo, YANG Dongkai, et al. Modeling and Simulation of Airborne GNSS Ocean Reflection Signal [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(3): 567-572.
- [44] LI B W, ZHANG B, YU Y Q, et al. A Random Model and Simulation for Generating GNSS Ocean Reflected Signals [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(7): 1036-1040.
- [45] 刘黎军, 夏俊明, 白伟华, 等. 蒸发波导对 GNSS 海面反射信号有效散射区域的影响[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 499-507.
- LIU Lijun, XIA Junming, BAI Weihua, et al. Influence of Evaporation Duct on the Effective Scattering Region of GNSS Reflected Signals on the Sea Surface [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(2): 499-507.
- [46] LIU X Z, CAO Y H, WU Z S, et al. Inversion for Inhomogeneous Surface Duct Without a Base Layer Based on Ocean-Scattered Low-Elevation BDS Signals [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3914.
- [47] 张瑜. 电磁波空间传播[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 104-106.
- ZHANG Yu. Electromagnetic Wave Propagation in Space [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007: 104-106.
- [48] YANG N, SONG D, SU D B, et al. The Influence of Sea Surface Temperature from ECMWF Reanalysis Data on the Nonuniformity of Evaporation Duct [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 1503805.
- [49] BAI W H, XIA J M, ZHAO D Y, et al. GREEPS: An GNSS-R End-to-End Performance Simulator [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016.