全球定位系统
GNSS World of China
• 中国科学引文数据库（CSCD）
• 中国学术期刊（网络版）（CNKI）
• 中文科技期刊数据库
• 中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）
• 中国核心期刊（遴选）数据库
• 中国超星期刊域出版平台
• 日本科学技术振兴机构数据库（JST）

GNSS大气海洋遥感技术研究进展

安　豪，严　卫，杜晓勇，卞双双

Research progress of GNSS atmosphere-ocean remote sensing technology

AN Hao, YAN Wei, DU Xiaoyong, and BIAN Shuangshuang

引用本文:
安豪, 严卫, 杜晓勇, 等. GNSS大气海洋遥感技术研究进展[J]. 全球定位系统, 2021, 46(6): 1–10. DOI: 10.12265/j.gnss.2021101303
AN Hao, YAN Wei, DU Xiaoyong, et al. Research progress of GNSS atmosphere–ocean remote sensing technology[J]. Gnss World of China, 2021, 46(6): 1–10. DOI: 10.12265/j.gnss.2021101303

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021101303

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GNSS–R海面测高现状及其常用方法研究进展

Research on GNSS–R sea surface altimetry status and common methods

全球定位系统. 2020, 45(3): 96–103

GNSS–R信噪比信号在海面测高技术的研究综述

A summary of research on GNSS–R signal–to–noise ratio signal height measurement technology on the sea

全球定位系统. 2021, 46(4): 1–7

利用GNSS掩星数据分析ENSO期间

Analysis of Atmospheric Pressure Changes During ENSO Using GNSS Occultation Data

全球定位系统. 2018, 43(5): 58–60

伽利略卫星导航系统信号质量及定位性能分析

Analysis of Galileo Signal Quality and Positioning Performance

全球定位系统. 2018, 43(1): 19–24

INS/GNSS/ODO嵌入式系统的容错技术研究

Fault tolerance technology on INS/GNSS/ODO embedded system

全球定位系统. 2021, 46(2): 18–24

GNSS反射信号海面溢油回波DDM仿真研究

Sea Surface Slicked Oil Detection Using GNSS–R Simulation

全球定位系统. 2017, 42(3): 15–19

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2021101303

GNSS 大气海洋遥感技术研究进展

安豪[1], 严卫[2], 杜晓勇[1], 卞双双[1]
(1. 西安测绘研究所, 西安 710054;
2. 国防科技大学 气象海洋学院, 长沙 410073)

摘　要: 全球卫星导航系统 (GNSS) 信号资源的大气海洋遥感技术一直是一个研究热点. 伴随着 GNSS 系统的建设和发展, 相继出现了利用 GNSS 延迟信号、反射信号、掩星信号、极化信号获取大气和海洋环境参数的一系列新技术新方法. 在回顾 GNSS 大气海洋遥感技术概况的基础上, 先后概述了 GNSS 延迟信号 (GNSS-D) 技术、GNSS 反射测量 (GNSS-R) 技术、GNSS 无线电掩星 (GNSS-RO) 技术、GNSS 极化掩星 (GNSS-PRO) 技术的基本原理, 比较全面系统地分析了其国内外研究和应用方面的现状及最新进展, 特别是新兴 GNSS-PRO 技术的机理、优势及发展现状. 最后对该研究领域的发展前景进行了一些探讨, 相关技术的突破和发展必将在气象、水文、海洋、陆地、空间环境等地球科学领域发挥越来越重要的作用.

关键词: 全球卫星导航系统 (GNSS); 遥感; 北斗信号; GNSS 极化掩星 (GNSS-PRO); 极化相移
中图分类号: P228; P407　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1008-9268(2021)06-0001-10

0　引　言

近年来, 随着卫星导航精密定位技术的发展, 主要包括美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 Galileo 和中国北斗卫星导航系统 (BDS) 在内的全球卫星导航系统 (GNSS)迅猛建设和日臻成熟. GNSS 能提供全天候、全时段精准的定位导航和授时 (PNT) 服务, 率先在军事领域得到了广泛应用, 还在工业、农业、交通运输业、科学研究等人类社会和生活的方方面面发挥着不可估量的作用[1-2].

在 GNSS 高精度导航定位中, 大气层和地表环境的干扰会导致定位产生误差. 至今, 这些干扰仍然是高精度定位中不易解决的问题. 然而, 科学家在进行消除干扰研究时, 从逆问题的角度出发, 创造性地将大气延迟、地表反射等误差源作为有价值的信号源, 开展了遥感探测大气和地表环境要素的研究, 极大地拓展了 GNSS 的应用领域. 由于 GNSS 信号丰富、全球覆盖、成本低廉等独特优势, 迅速掀起了一波又一波研究热潮, 取得了大量的创新性研究成果, 部分研究成果已在相关业务上发挥重要作用[2-3].

经过二十多年的发展, 利用 GNSS 信号可探测多项大气海洋要素, 比如大气温湿廓线、大气可降水量 (PWV)、电离层电子密度、海面高度、海面风场等, 逐渐形成了 GNSS 大气海洋遥感技术[2]. 概括起来, 该技术主要有四个分支: GNSS 延迟信号 (GNSS-D) 技术、GNSS 反射测量 (GNSS-R) 技术、GNSS 无线电掩星 (GNSS-RO) 技术、GNSS 极化掩星 (GNSS-PRO) 技术[4].

1　GNSS-D 技术

1.1　基本原理

GNSS-D 技术是指利用大气层对 GNSS 导航定位的干扰信息, 即延迟项, 获得 GNSS 信号路径与大气相关信息的技术. 图 1 中由于不同高度不同大气折射率的存在, GNSS 信号在大气层传播过程中不会沿直线传播而发生了弯曲, 从而使信号产生了时间延迟. 这种延迟可分为中性层延迟和电离层延迟, 由于中性层延迟一般发生在对流层, 故也称对流层延迟[5]. 对流层延迟主要与大气中可降水量相关, 电离层延迟主要与电离层电子密度含量 (TEC) 相关, 故可利用 GNSS 信号对 PWV 和 TEC 进行探测.

收稿日期: 2021-10-13
资助项目: 国家自然科学基金 (41805026); 地理信息工程国家重点实验室自主研究课题 (SKLGIE2019-ZZ-2)
通信作者: 安豪 E-mail: 13770997977@163.com

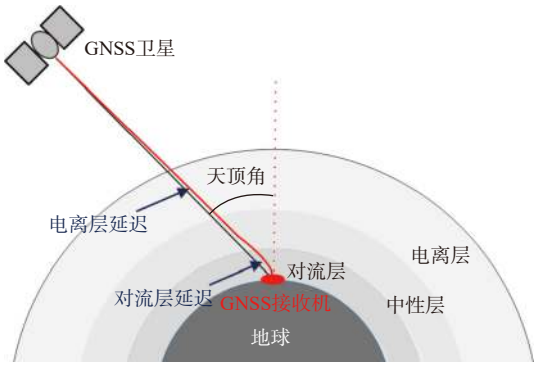

图 1 GNSS-D 信号传播示意图

1.2 研究进展

1.2.1 GNSS PWV 探测

地基 GNSS 探测 PWV 的概念最早由美国 BEVIS 等[6] 在 1992 年提出. 随后, 许多试验如 GPS/STORM、GPS-WIS94、WWAVE、CLAM [7-9] 等陆续开展, 证实了该技术的可行性, 与传统探空、水汽辐射计手段相比, 其精度差别不大. GPS 地基观测网的布设为水汽的分布研究提供了条件, 不少专家开展了水汽层析反演试验、层析模型、三维和四维层析方法等研究, 取得了较好的成果[10-11].

毛节泰[12]、李成才等[13] 开展了一系列理论研究和可行性试验. 此后, 多次外场试验在不同的区域开展, 比如国家卫星气象中心和北京大学等单位先后在北京地区、安徽地区, 中国科学院上海天文台在上海地区, 充分验证了技术的可行性, 评估了所获 PWV 的精度[1,14]. 不少专家基于地基 GPS 监测网进行层析水汽的试验, 研究不同的层析算法, 重构出水汽区域信息[15-16]. 近年来, 也有关于 BDS 信号提取 PWV 的研究[17-18]. 经过二十多年发展, 相关研究取得了十分显著的成果, 形成了一门新兴交叉学科—地基 GNSS 气象学.

GNSS 是一种获取大气水汽产品的有效方法, 可以提供高时空分辨率的大气水汽数据, 且该数据已广泛应用于区域数值天气预报中. 目前, 上海、武汉、香港等地区的地基 GNSS 水汽监测网已正式运行, 所获实时 PWV 精度可达 1～2 mm. 从应用情况看, 依然无法达到让人十分满意的效果, 仍有一些科学问题亟待研究, 比如水汽分布的实时获取、对流层延迟计算模型的适用性、水汽产品的区域同化、四维水汽层析算法的精度提高、多源数据 (BDS/GPS) 的组合观测, 移动平台 (船载) 水汽反演算法等.

1.2.2 地基 GNSS 电离层探测

伴随着 GPS 系统的建设, 利用地基 GPS 信号对电离层信息进行探测和建模成为热点研究方向之一. LANYI 等[19] 在 1988 年最早提出, 并开展了相关探测与建模, 初步论证了其可行性. 1993 年, MANNUCCI 等[20] 在利用 GPS 数据获取全球 TEC 的基础上, 开展了建模研究. 此后, 许多专家也从事该领域研究, 重点解决建模精度问题[21-22]. 为解决区域特征获取问题, 相关领域专家利用电离层层析技术, 重构出区域电子密度分布信息[23-24], 并得到广泛应用. 国际 GNSS 服务 (IGS) 于 1998 年成立, 旨在基于 GPS 数据监测全球 TEC 变化的工作, 并提供专门的电离层服务和产品. 目前, 全球有 7 个 IGS 电离层联合分析中心 (中国两个), 主要向 IGS 提交各自的电离层产品文件, 用于全球电离层监测及建模[25].

国内对这一研究的起步稍晚, 主要集中于不同大小区域电离层模型的构建、层析算法的研究等. 1999 年, 刘经南院士[26] 采用多项式构建了区域性电离层模型; 2001 年张小红等[27] 利用多项式拟合方法, 研究了小区域电离层模型的构建问题; 柳景斌等[28] 研究了时空分布均匀且精度较高的中国区域电离层球冠谐分析模型; 任晓东[29] 分析了多 GNSS 系统数据融合及建模问题. 与电离层分布大范围、高精度观测紧密相关的二维、三维和四维层析算法研究问题也得到了许多学者的关注[30-32], 突破的关键技术具有较强的应用价值. 目前, 随着我国 BDS 的全面建成, BDS 信号的电离层监测与产品应用、不同产品数据融合也是值得深入研究的方向.

2 GNSS-R 技术

2.1 基本原理

GNSS-R 技术是基于 GNSS 反射信号提取反射体信息的技术, 是 GNSS 信号的又一创新应用, 其研究机理是采用同一 GNSS 接收机同时接收直射信号和经反射体的反射信号, 并通过分析反射信号在波形、强度、频率、相位、极化等方面的变化特征, 反演出反射体相关信息, 如图 2 所示. 该概念由欧空局专家 MARTIN-NEIRA[33] 于 1993 年首先提出, 得到了国内外研究人员的广泛关注, 先后开展了不同参数反演的理论研究. 从试验研究到应用研究, 经历了地基、海基、空基、天基研究, 发展了海面参数遥感到陆面参数遥感. 因此, 这里从海面参数遥感和陆面参数遥感两个方面进行分析.

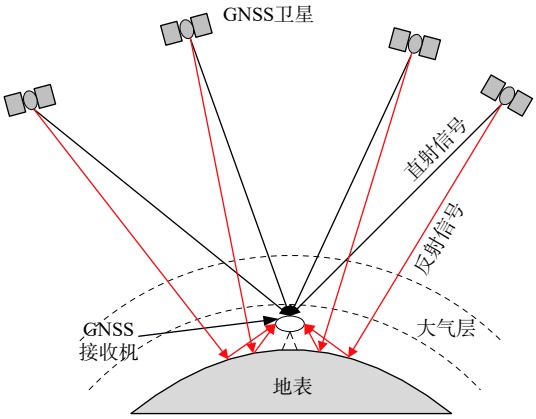

图 2　GNSS-R 信号传播示意图

2.2　研究进展

2.2.1　海面参数遥感

国内外研究人员重点开展了海面高度、海面风场、有效波高、海冰和海洋盐度等海表信息的理论、算法和试验研究. 为验证 GNSS-R 信号提取海面风场的可能性, 从 20 世纪 90 年代中期开始, 美国国家航空航天局 (NASA) 先后开展了地基、空基试验, 不断优化专门的接收机和算法, 达到了试验目的 [34-35]. 欧空局专家 MARTIN-NEIRA 等也多次开展 Zeeland 桥试验, 用于验证海面测高的可行性. 随后, 为研究监测海面风场、有效波高、海面高度的可行性, 美国 NASA 与科罗拉多大学、欧空局、德国 GFZ、西班牙 IEEC 与 Starlab 等机构在诸多接收机研制和数据处理算法研究的基础上, 利用海岸、热气球、高塔、飞机、飞船、桥梁等进行了多次试验 [36-39]. 在海冰监测、海洋盐度反演也进行了理论和试验研究 [40-41]. 目前, 该技术的研究主要聚焦在星载试验, 比较著名的有英国发射的全球首个用于海面波高和风场反演试验的 Tech-Demonsat-1 卫星 [39]、NASA 于 2016 年发射的用于热带气旋探测及其海面风场业务化运行的 CYGNSS 星座 [42]、欧空局用于验证海面测高和风场反演试验的 GEROS-ISS 项目 [43].

国内机构和专家也跟紧国外相关研究, 主要进行了海面测高、海面风场的仿真分析、硬件研制、算法研究和验证试验. 2003 年杨东凯等 [44] 利用自制接收机, 开展了机载试验, 用于验证 GPS-R 测风和测高的可能性. 随后, 符养 [45] 和王迎强 [46] 等研究了一种新的风场反演方法, 并通过机载试验验证了其有效性. 2006 年, 国内首次岸基 GNSS-R 海洋遥感试验—CORE 试验在厦门海岸开展, 并获得了有效波高 [47]. 为充分验证 GPS-R 测风的算法, 中国科学院国家空间科学中心也在渤海地区开展机载试验 [48]. 近年来, 该技术研究的重点在如何改进数据处理算法提高海面测高、海面风速的精度上 [49-50]. 国内对于在 GNSS-R 监测海冰尚处于起步阶段, 主要借助于国内外试验数据验证可行性 [51-52]. 随着我国 BDS 的建设, 出现了利用 BDS 反射信号提取相关参数的研究, 主要在利用 BDS 信号获取潮位、海面波浪高度和海平面变化等方面取得了不少研究成果 [53-55]. 对于星载试验, 2019 年我国发射了首颗载有 GNSS-R 载荷的“捕风一号 A/B”两颗试验小卫星, 主要用于海面风场的反演研究, 也可监测冰川、积雪厚度、土壤湿度等 [56]; 2021 年 7 月 5 日发射的风云系列卫星 FY-3E 上, 也增加了 GNSS-R 海面风场探测功能 [57].

2.2.2　陆面参数遥感

对于 GNSS-R 陆面参数的遥感, 目前主要在反演土壤湿度和积雪深度. 反射表面的介电常数是影响 GNSS-R 信号的特性, 而介电常数和土壤湿度、积雪深度有关联, 可用 GNSS-R 信号反演土壤湿度、积雪深度. MASTERS 等 [58] 开展了塔基试验对 GNSS-R 反演土壤含水量进行研究. 为验证反演土壤湿度可行性, 美国 NASA 和科罗拉多大学于 2002 年开展首次机载试验 [59], 并持续开展多次试验. 许多国家和地区相继开展试验进行研究, 2007—2008 年法国先后进行两次机载试验, 2005—2008 年澳大利亚开展四次机载试验 [60], 2009、2011 年欧空局先后开展两次地基和机载试验 [61], 英国 TechDemonsat-1 卫星 GNSS-R 数据反演土壤湿度研究 [62]. 也有一些算法的研究, 比如西班牙 RODRIGUEZ-ALVAREZ N 等 [63] 研究的干涉模式信息测量技术、美国 LARSON 等 [64] 研究的多路径信号提取土壤湿度技术. 对于积雪深度研究起步相对较晚, 2009 年开始, 美国专家结合实际暴风雪进行了探索研究 [65], 并推导出利用 GNSS 信噪比提取积雪深度的机理和数据处理方法 [66-67]; 西班牙专家利用长期地基试验, 进一步研究了干涉模式信息测量技术和相关反演算法 [68].

国内相关机构和专家利用国外试验数据开展了土壤湿度反演的机理研究 [69], 开展了地基试验: 武汉大学与中国科学院武汉植物研究所联合开展了多次地基试验 [70]; 随后, 中国气象局、中国科学院国家空间科学中心、中国科学院遥感与数字地球研究所、清华大学、北京大学、北京航空航天大学等单位也先后多次开展了地基试验 [71-72], 初步得出在平坦地表时, 反演结果与土壤湿度计实测结果一致性较好, 但对于粗糙地表还需深入的研究. 其中, 2014 年在河南郑州开展的 GNSS-R 机载试验, 得出了土壤湿度的估算方法, 具有重要的参考价值 [73]. 武汉大学进行了基于

BDS 反射信号的反演算法和试验研究，验证了 BDS 信号反演土壤湿度的可行性[74].

对于积雪深度，邵礼明等[75]利用欧空局在南极洲的 GNSS-R 干雪试验数据，探索了可行性；李彬彬等[76]在美国科罗拉多大学试验数据的基础上，进行了积雪深度的反演研究；中国科学院上海天文台的金双根等[77]证明了 L2P 的信噪比数据能够有效反演雪深；刘智康等[78]在北极黄河站开展了地基试验，所得雪深变化特征与实测值较一致；王力福等[79]利用新疆阿勒泰地区 GPS 监测站数据，对积雪深度进行了反演，表明地基 GNSS 气象监测站的又一潜在应用价值. 目前，积雪深度的反演精度需进一步的提高，一方面可从反演算法入手；另一方面可考虑在不同导航系统、不同卫星、不同频段反演结果的融合上下功夫.

3 GNSS-RO 技术

3.1 基本原理

该技术通常将接收机装在低轨道地球卫星 (LEO) 上，并在掩星条件下对 GNSS 信号进行接收，由于受到电离层电子和中性大气的折射效应影响，GNSS 信号在大气层中的传播路径发生了弯曲，使得信号产生了延迟，利用相关算法解算这些延迟可获取路径上的大气和电离层参数信息如图 3 所示.

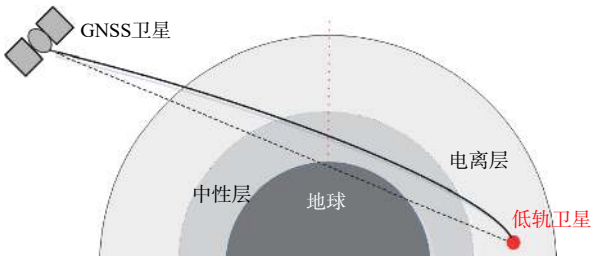

图 3 GNSS-RO 信号传播示意图

3.2 研究进展

上世纪 80 年代，伴随着 GPS 星座的发展，已有学者针对掩星技术探测大气相关理论进行预先研究，为后续利用 GPS 掩星探测积累了技术[80]. 为验证其可行性，KURSINSKI 等[81]利用美国 Microlab-1 卫星成功接收的掩星数据反演出大气信息. 随后，一系列 GPS 掩星项目研究先后在不同国家和地区展开，比如丹麦的 Orsted、德国的 CHAMP、阿根廷的 SAC-C、美国与德国合作的 GRACE、美国与中国台湾合作的 COSMIC、COSMIC-2、欧空局的 Metop-A、Metop-B、Metop-C 和我国的 FY-3C、FY-3D、FY-3E 以及欧洲气象卫星组织的第二代极轨卫星 (EPS-SG) 计划等，其中应用较为广泛的是 COSMIC 星座[82]. 近年来，微纳卫星上搭载 GNSS 掩星气象探测载荷成为研究的热点. 美国计划在低轨部署 “持续地球无线电掩星群计划” (CICERO) 星座，其首颗星已于 2017 年发射，目前正在组网建设中；一些商业气象公司也启动了掩星项目，比如 Spire Global、GeoOptics、PlanetiQ 都在推进自己的 LEO 卫星星座，用于获取 GNSS 掩星数据，以提供更精准的气象数据服务[83].

我国对该技术的研究从地基掩星开始. 2003 年，北京应用气象研究所联合多家单位在五台山开展了我国首次山基试验，填补了国内的空白[48]. 随后，多个机构分别在湖北药姑山和九宫山[84]、河北雾灵山[85]开展了山基试验，充分研究了相关设备和算法的可行性. 2013 年，我国 FY-3C 卫星上搭载了国际首台 BDS/GPS 兼容的掩星探测仪，成功得到大量掩星数据及反演产品，在数值天气预报和气候监测中发挥了重要作用[86]. 2017 年发射的 FY-3D 卫星和 2021 年发射的 FY-3E 卫星继续搭载了该载荷[87]. 2018 年发射的 “张衡一号”电磁监测试验卫星，也搭载了可接收 GPS 和 BDS 掩星信号的载荷[88]. 还有一些微纳卫星项目，比如 2020 年 1 月发射了天津大学研制的国内首个商业 GNSS 掩星探测载荷、南京信息工程大学计划的“南信大一号”GNSS 大气海洋遥感试验卫星项目等.

近年来，国内外对 GNSS 大气参数掩星探测的研究较多，且相对成熟. 目前的研究重点集中在误差分析[89]、气候应用[90]、数据同化[91]方面. 对于 GNSS 电离层掩星探测，大致集中在几个方面：消除局部球对称假设的影响、LEO 卫星高度以上的电子含量的影响等误差源剔除[92]，提高反演精度为主的反演算法研究[93]，联合地基天基探测结果对电离层层析成像的算法研究[94]和研究电离层模型、全球电离层同化模型、电离层运行机制、监测空间天气异常等[95]为主的应用研究.

4 GNSS-PRO 技术

4.1 基本原理

目前，国际上对 GNSS-PRO 的研究还很少. 最早由西班牙研究人员 CARDELLACH 等[4]于 2010 年提出利用 LEO 卫星接收 GNSS-PRO 信号探测强降雨的概念，其基本原理是右旋圆极化的 GNSS 信号在穿过雨区时，受到非球形雨滴的影响，水平极化分量和垂直极化分量的相位会发生偏移，在掩星条件下接收该偏移量进而获取降雨信息具体如图 4 所示. 在 Radio-Occultation and Heavy Precipitation with PAZ

项目支持下, 该团队研制出专门的 GNSS 双极化掩星接收机, 并搭载在 2018 年 2 月 22 日发射的西班牙地球观测极轨卫星 PAZ 上.

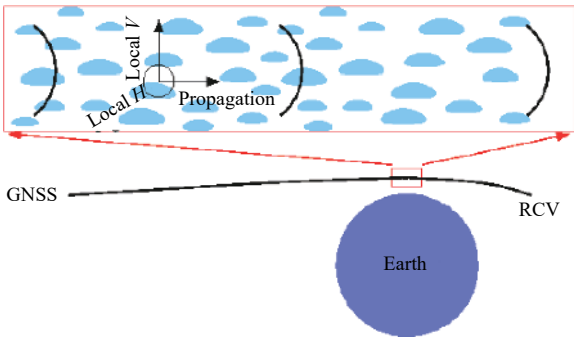

图 4　低轨卫星接收 GNSS-PRO 信号监测强降雨原理示意图[4]

图 5 中 PAZ 卫星上的 GNSS-PRO 载荷是国际上首台双极化掩星接收机, 可同时接收穿过降水云团的掩星信号和极化信号. 因此, 该项目不仅可获得常规掩星所得大气温压湿廓线, 还探究利用 GNSS-PRO 载荷监测强降雨的能力. 掩星信号得到的降水云中大气温压湿廓线信息, 对于降水云系的结构和发展过程研究具有十分重要的意义; 极化信号反演的降水信息将为天基降水探测提供新的手段, 对全球降水观测具有重要作用.

图 5　PAZ 卫星[96]

4.2　研究进展

自该新概念提出以来, 为充分验证其可行性, CARDELLACH 研究团队在理论分析、算法研究、数据处理、试验验证等方面开展了大量的研究. 2014 年, 将 42 万多条 COSMIC 掩星廓线与 TRMM 卫星雨强信息对比得出, 掩星观测极化相移与强降雨的相关性较好[96]. 因此, 研制了专门的微带天线, 开展了长期的地基试验, 针对性地研究了各种误差源及影响因素的处理方案, 并利用实测数据, 验证了该思路的可行性[97]. 还提出了一种概率反演算法用于降雨强度的反演, 并利用 GPM 降水产品说明了其有效性[98]. 对于 PAZ 卫星试验数据, 通过处理和对比分析, 得出了降水云中的大气温湿压廓线, 成功获得强降水中的极化相移观测值以及降水云的垂直结构[99], 进一步说明了其潜在的应用价值. 但是, 目前还没有看到降雨强度的定量反演结果.

国防科技大学气象海洋学院团队对相关理论和试验进行了研究. 基于 GNSS 信号穿过雨区后极化特性 (交叉极化分辨率、极化相移) 发生变化的物理特性, 分别建立了交叉极化分辨率和极化相移随雨强变化的正演模型, 利用数值模拟了两种模型反演雨强的可行性[100-103]. 在此研究基础上, 该团队研制了专门的用于接收 GNSS 双极化信号的圆锥喇叭天线, 图 6 为 GNSS 双极化降雨监测系统, 并于 2015 年和 2016 年在南京溧水开展了长期地基试验, 逐一解决了质量控制、失锁、周跳、硬件效应、电离层、中性大气、初值不确定、多路径效应等问题, 获得雨致极化相移观测值, 充分验证了该新概念的可行性, 为后续天基试验研究奠定了基础[104].

图 6　外场试验中 GNSS 双极化降雨监测系统的户外天线部分[104]

5　结束语

GNSS 大气海洋遥感是 20 世纪末发展起来的新兴研究领域, 其非常精妙地将遥感探测、大气海洋空间科学与卫星导航定位技术相结合, 大大拓展了 GNSS 的应用范围, 极大地发挥了其应用价值. 由于 GNSS 信号有全球性、全天候、全天时、稳定性、免费、时空分辨率高、抗干扰性强等优势, 在大气海洋遥感领域的应用一直是许多国内外专家研究的焦点. 目前, 由我国自主发展、独立运行的 BDS 已完成全球组网, 为 GNSS 大气海洋遥感技术的发展带来了新的

机遇，将有力的促进该领域的研究及应用. 虽然该遥感技术经历了三十多年的发展，取得了一系列研究成果和成功的应用，但仍存在一些值得进一步研究的地方：

1) 高精度产品生成方面. 目前，GNSS-D 和 GNSS-RO 技术已基本成熟，在全球地基观测站网和众多卫星载荷的接收下，积累了海量的数据，反演出了较高精度的产品. 但是，三维、四维水汽和电离层参数分布等产品的精度还需进一步的提高，可在模型构建、资料同化、层析算法等方面进行深入研究；也可借助人工智能技术，充分挖掘大数据的特征，以得到更多更高精度的产品.

2) 更先进接收系统方面. 不同领域不同需求的 GNSS 接收机系统已基本实现，但从未来发展需求的角度看，随着 GNSS 星座的不断发展，多频、多模、更多通道的 GNSS 接收机需加快发展；多功能集成的接收机需重点研制，比如集定位、GNSS-RO 和 GNSS-R、GNSS-PRO 等功能于一体；小型化、智能化的接收机具有巨大的应用前景，比如可搭载于微纳卫星上，具备星上实时处理功能等.

3) 新方向深入研究方面. 目前，GNSS-R 技术的地表遥感理论体系和方法研究正在逐步完善，星载试验验证还处于初步研究阶段，故在海面要素监测、土壤湿度提取、冰雪参数遥感等方面有许多科学和技术问题值得进一步的研究. GNSS-PRO 技术处于探索研究阶段，但其显示出深远的科学意义和潜在的应用价值. 因此，其相关理论、算法、星载试验和应用方面都需要研究.

4) 深挖掘应用潜力方面. 在应用领域上，电离层产品可用于地震监测与短临预报，GNSS-R 技术可用于监测海面溢油、海洋涡流、海上目标以及提取大气波导、植被信息等. 在应用方式上，随着多个 GNSS 应用卫星星座的建设，多卫星多载荷协同观测、星地多手段综合监测已成为可能，这样可实现更大范围、更高精度甚至实时准实时的环境要素监测，进一步提高对大气海洋环境的认知.

参考文献

[1] 李国平. 地基GPS气象学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[2] JIN S G, CARDELLACH E, XIE F Q. GNSS remote sensing: theory, methods and applications [M]. Springer, Germany, 2014: 17-240.

[3] 张京江, 楚艳丽. 滑动时间窗技术在地基GPS数据实时解算中的应用[J]. 气象科技, 2014, 42(2): 204-207.

[4] CARDELLACH E, RIUS A, CEREZO F. Polarimetric GNSS radio-occultations for heavy rain detection[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010: 3841-3844. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5650907

[5] 郭志梅, 李黄, 缪启龙. GPS探测气象参数的技术进展[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 212-224.

[6] BEVIS M, BUSINGER S, CHISWELL S, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. Journal of applied meteorology, 1994, 33(3): 379-386. DOI: 10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2

[7] DUAN J P, BEVIS M, FANG P, et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water vapor[J]. Journal of application meteorology, 1996, 35(6): 830-838. DOI: 10.1175/1520-0450(1996)035<0830:GMDEOT>2.0.CO;2

[8] TREGONING P, BOERS R, O'BRIEN D, et al. Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 1998, 103(D22): 28701-28710. DOI: 10.1029/98jd02516

[9] BRAUN J J, ROCKEN C, LILJEGREN J C. Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the Global Positioning System and a pointing microwave radiometer[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2003, 20(5): 606-612. DOI: 10.1175/1520-0426(2003)202.0.CO

[10] CHAMPOLLIONA C, MASSONA F, BOUIN N N, et al. GPS water vapor tomography: preliminary results from the ESXOMPTE field experiment[J]. Atmospheric research, 2005, 74(1): 253-274. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.04.003

[11] PERLER D, GEIGER A, HURTER F. 4D GPS water vapor tomography: new parameterized approaches[J]. Journal of geodesy, 2011, 85(8): 539-550. DOI: 10.1007/s00190-011-0454-2

[12] 毛节泰. GPS的气象应用[J]. 气象科技, 1993(4): 45-49.

[13] 李成才, 夏青. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报, 1999, 44(3): 333-336.

[14] 郭志梅. 利用地基GPS资料反演大气可降水量的初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.

[15] 宋淑丽. 地基GPS网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2004.

[16] 毕研盟, 杨光林, 聂晶. 基于Kalman滤波的GPS水汽层析方法及其应用[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 109-114.

[17] 吴旭祥, 郭秋英, 侯建辉. 基于BDS精密星历产品的水汽探测性能分析[J]. 全球定位系统, 2019, 44(5): 91-99.

[18] 郭秋英, 侯建辉, 刘传友, 等. 基于北斗三号的大气水汽探测性能初步分析[J]. 全球定位系统, 2021, 46(1): 89-97,11.

[19] LANYI G E, ROTH T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations[J]. Radio science, 1988, 23(4): 483-492. DOI: 10.1029/RS023i004p00483

[20] MANNUCCI A J, WILSON B D, EDWARDS C D. A new method for monitoring the earth's ionospheric total electron content using the GPS global network[J]. Proceedings institute of navigation, 1993: 1323-1332. DOI: 10.2307/1324176

[21] HERNÁNDEZ-PAJARES M. IGS ionosphere WG status report: performance of IGS ionosphere TEC maps position paper[J/OL]. [2021-09-30]. Pajares, 2004. https://www.researchgate.net/publication/237789274_Performance_of_IGS_Ionosphere_TEC_Maps.

[22] YUAN Y B, HUO X L, OU J K, et al. Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2008, 44(4): 1498-1510. DOI: 10.1109/TAES.2008.4667725

[23] KUNITSYN V E, ANDIREEVA E S, RAZINKOV O G. Possibilities of the near-space environment radio tomography[J]. Radio science, 1997, 32(5): 1953-1963. DOI: 10.1029/97RS00837

[24] HOWE B M, RUNCIMAN K, SECAN J A. Tomography of the ionosphere: four-dimensional simulations[J]. Radio science, 1998, 33(1): 109-128. DOI: 10.1029/97RS02615

[25] 盛传贞, 张京奎, 张宝成. 不同全球电离层格网产品在中国区域的应用精度评估与分析[J]. 全球定位系统, 2021, 46(4): 8-15.

[26] 刘经南. 广域差分GPS原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999.

[27] 张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频GPS观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(2): 140-143,159.

[28] 柳景斌, 王泽民, 王海军, 等. 利用球冠谐分析方法和GPS数据建立中国区域电离层TEC模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(8): 792-795,814.

[29] 任晓东. 多系统GNSS电离层TEC高精度建模及差分码偏差精确估计[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[30] 徐继生, 邹玉华. 时变三维电离层层析成像重建公式[J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 438-445.

[31] 吴寒, 姚宜斌, 陈鹏, 等. GNSS电离层层析成像算法研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(12): 1405-1408.

[32] 霍星亮, 袁运斌, 欧吉坤, 等. 顾及电离层变化的层析反演新算法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2393-2401.

[33] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J/OL]. [2021-09-30]. ESA journal, 1993, 17(4): 331-355. https://www.researchgate.net/publication/279897829_A_Passive_Reflectometry_and_Interferometry_System_PARIS_Application_to_ocean_altimetry

[34] LIN B, KATZBERG S J, GARRISON J L, et al. Relationship between GPS signals reflected from sea surfaces and surface winds: modeling results and comparisons with aircraft measurements[J]. Journal of geophysical research, 1999, 104(C9): 20713-20727. DOI: 10.1029/1999JC900176

[35] 周晓中. GNSS-R海洋遥感原理与方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2010.

[36] ZAVOROTNY Z U, VORONOVICH A G, KATZBERG S J, et al. Extraction of sea state and wind speed from reflected GPS signals: modeling and aircraft measurements [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000: 1507-1509. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.857255

[37] GARRISON J L, KOMJATHY A, ZAVOROTNY V U, et al. Wind speed measurement using forward scattered GPS signals[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2002, 40(1): 50-65. DOI: 10.1109/36.981349

[38] CARDELLACH E, RUFFINI G, PINO D, et al. Mediterranean balloon experiment: ocean wind speed sensing from the stratosphere, using GPS reflections[J]. Remote sensing of environment, 2003, 3(88): 351-362. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00176-7

[39] FOTI G, GOMMENGINGER C, JALES P, et al. Spaceborne GNSS reflectometry for ocean winds: first results from the UK TechDemoSat-1 mission[J]. Geophysical research letters, 2015, 42(13): 5435-5441. DOI: 10.1002/2015GL064204

[40] ZAVOROTNY V U, ZUFFADA C. Assessing the possibility of measuring the thickness of undeformed first-year Arctic sea ice from bistatic reflections of GPS signals[C]//The 2003 Workshop on Oceanography with GNSS-R, 2003.

[41] KAINULAINEN J, RAUTIAINEN K, LEMMETYINEN J, et al. Detection of a sea surface salinity gradient using data sets of airborne synthetic aperture radiometer HUT-2-D and a GNSS-R instrument[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2011, 49(11): 4561-4571. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2151864

[42] CHEW C, REAGER J T, SMALL E. CYGNSS data map flood inundation during the 2017 Atlantic hurricane season[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 9336. DOI: 10.1038/s41598-018-27673-x

[43] WICKERT J, CARDELLACH E, MARTIN-NEIRA M, et al. GEROS-ISS: GNSS reflectometry, radio occultation, and scatterometry onboard the international space station[J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2016, 9(10): 4552-4581. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2614428

[44] 杨东凯, 张益强, 张其善, 等. 基于GPS卫星信号的海面风场遥感方法研究与实现[J]. 遥感信息, 2006(3): 10-12,18.

[45] 符养, 周兆明. GNSS-R海洋遥感方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(2): 128-131.

[46] 王迎强, 严卫, 符养, 等. 利用机载 GNSS反射信号反演海面风速的研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 51-59.

[47] 王鑫, 孙强, 张训械, 等. 中国首次岸基GNSS-R海洋遥感实验[J]. 科学通报, 2008, 53(5): 589-592.

[48] 万玮, 陈秀万, 彭学峰, 等. GNSS遥感研究与应用进展和展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 858-874.

[49] 刘原华, 何孟然, 牛新亮. GNSS-R海面风速反演技术研究[J]. 全球定位系统, 2020, 45(2): 55-59.

[50] 胡媛, 钟李程, 陈行杨, 等. GNSS-R信噪比信号在海面测高技术的研究综述[J]. 全球定位系统, 2021, 46(4): 1-7.

[51] 杨明华, 曹云昌. 基于GNSS-R的后续海冰观测实验[J]. 全球定位系统, 2014, 39(4): 51-54,68.

[52] 高洪兴, 杨东凯, 张波, 等. 基于 GNSS 卫星反射信号的海冰厚度探测[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1096-1100.

[53] 杨东凯, 王强, 曹云昌, 等. 基于北斗反射信号的海面有效波高探测[J]. 高科技与产业化, 2014(10): 81-83.

[54] JIN S G, QIAN X D, WU X R. Sea level change from BeiDou Navigation Satellite System-reflectometry (BDS-R): first results and evaluation[J]. Global and planetary change, 2017(149): 20-25. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.12.010

[55] 胡媛, 陈行杨, 顾旺旺, 等. GNSS-R海面测高现状及其常用方法研究进展[J]. 全球定位系统, 2020, 45(3): 96-103.

[56] 捕风一号双星发射, 利用导航信号监测台风[J]. 国际太空, 2019(6): 10-11.

[57] SUN Y Q, LIU C L, TIAN Y S, et al. The status and progress of Fengyun-3E GNOS II mission for GNSS remote sensing[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2019) 2019: 5181-5184. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899319

[58] MASTERS D, ZAVOROTNY V U, KATZBERG S, et al. GPS signal scattering from land for moisture content determination[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2000), 2000, 7: 3090-3092. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.860346

[59] MASTERS D, AXELRAD P, KATZBERG S. Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02[J]. Remote sensing of environment, 2004, 92(4): 507-520. DOI: 10.1016/j.rse.2004.05.016

[60] 刘成. GNSS-R应用于测量表层土壤湿度及软件设计[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.

[61] PIERDICCA N, GUERRIERO L, CAPARRINI M, et al. GNSS reflectometry as a tool to retrieve soil moisture and vegetation biomass: experimental and theoretical activities[C]//IEEE International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2013: 1-5. DOI: 10.1109/ICL-GNSS.2013.6577282

[62] CHEW C, SHAH R, ZUFFADA C, et al. Demonstrating soil moisture remote sensing with observations from the UK TechDemoSat-1 satellite mission[J]. Geophysical research letters, 2016, 43(7): 3317-3324. DOI: 10.1002/2016GL068189

[63] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, CAMPS A, et al. Soil moisture retrieval using GNSS- R techniques: experimental results over a bare soil field[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2009, 47(11): 3616-3624. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2030672

[64] LARSON K M, BRAUN J J, SMALL E E, et al. GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content[J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2010, 3(1): 91-99. DOI: 10.1109/JSTARS.2009.2033612

[65] LARSON K M, GUTMANN E D, ZAVOROTNY V U, et al. Can we measure snow depth with GPS receivers?[J]. Geophysical research letters, 2009, 36(17): L17502. DOI: 10.1029/2009GL039430

[66] GEREMIA-NIEVINSKI F G, LARSON K M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation—part I: formulation and simulations[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(10): 6555-6563. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2297681

[67] GEREMIA-NIEVINSKI F G, LARSON K M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation-Part II: Application and validation[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(10): 6564-6573. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2297688

[68] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, AGUASCA A, VALENCIA E, et al. Snow thickness monitoring using GNSS measurements[J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2012, 9(6): 1109-1113. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2190379

[69] 关止, 赵凯, 宋冬生. 利用反射GPS信号遥感土壤湿度[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 747-750.

[70] 严颂华, 龚健雅, 张训械, 等. GNSS-R测量地表土壤湿度的地基实验[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2735-2744.

[71] 李黄, 夏青, 尹聪, 等. 我国GNSS-R遥感技术的研究现状与未来发展趋势[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 389-399.

[72] 杨磊. GNSS-R农田土壤湿度反演方法研究[J]. 测绘学报, 2018, 47(1): 134

[73] WAN W, BAI W H, ZHAO L M, et al. Initial results of China 's GNSS-R airborne campaign: soil moisture retrievals[J]. Science bulletin, 2015, 60(10): 964-971,984. DOI: 10.1007/s11434-015-0789-9

[74] YAN S H, ZHANG N, CHEN N C, et al. Using reflected signal power from the BeiDou geostationary satellites to estimate soil moisture[J]. Remote sensing letters, 2019(10): 1-10. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1519272

[75] 邵礼明, 张云, 孟婉婷, 等. 基于GNSS-R干雪深度检测的研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(17): 9-12.

[76] 李彬彬, 张云, 杨树瑚, 等. 单天线GNSS反射信号的积雪厚度反演[J]. 全球定位系统, 2016, 41(6): 37-41,54.

[77] JIN S G, QIAN X D, KUTOGLU H. Snow depth variations estimated from GPS-Reflectometry: a case study in Alaska from L2P SNR data[J]. Remote sensing, 2016, 8(1): 63. DOI: 10.3390/rs8010063

[78] 刘智康, 安家春, 冯鱼, 等. 基于GNSS-R 技术的北极黄河站雪深反演研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(5): 81-86.

[79] 王力福, 张双成, 张成龙, 等. 地基GPS用于阿勒泰积雪深度反演研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 93-98.

[80] HARDY K R, HAJJ G A, KURSINSKI E R. Accuracies of atmospheric profiles obtained from GPS occultations[J]. International journal of satellite communications, 1994, 12: 463-473. DOI: 10.1002/sat.4600120508

[81] KURSINSKI E R. Monitoring the Earth's atmosphere with GPS[J]. GPS World, 1995, 5(3): 50-54.

[82] 王也英, 杜晓勇, 袁勇. 我国天基GPS掩星探测现状及发展趋势[J]. 气象科技, 2011, 39(2): 202-206.

[83] 原民辉, 刘韬. 空间对地观测系统与应用最新发展[J]. 国际太空, 2018(4): 8-15.

[84] 胡雄, 张训械, 吴小成, 等. 山基GPS掩星观测实验及其反演原理[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 22-27.

[85] 范磊, 符养, 杜晓勇, 等. 雾灵山山基掩星观测反演误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(1): 89-92.

[86] 王树志, 朱光武, 白伟华, 等. 风云三号C星全球导航卫星掩星探测仪首次实现北斗掩星探测[J]. 物理学报, 2015, 64(8): 408-415.

[87] YANG Z D, ZHANG P, GU S Y, et al. Capability of Fengyun-3D satellite in earth system observation[J]. Journal of meteorological research, 2019, 33(6): 1113-1130. DOI: 10.1007/s13351-019-9063-4

[88] CHENG Y, LIN J, SHEN X H, et al. Analysis of GNSS radio occultation data from satellite ZH-01[J]. Earth and planetary physics, 2018, 2(6): 499-504. DOI: 10.26464/epp2018048

[89] 张纪满, 林剑, 祝芙英. GPS-LEO无线电中性大气掩星反演误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(11): 1159-1164.

[90] GOBIET A, KIRCHENGAST G. Advancements of GNSS radio occultation retrieval in the upper stratosphere for optimal climate monitoring utility[J]. Journal of geophysical research:atmospheres, 2004(109): 137-148. DOI: 10.1007/978-3-662-09041-1_14

[91] 邹逸航, 马旭林, 姜胜, 等. COSMIC掩星资料同化对台风“天兔”预报影响的试验[J]. 海洋学研究, 2017, 35(3): 9-19.

[92] 吴小成, 胡雄, 宫晓艳, 等. 三维模式约束的电离层掩星反演方法[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 618-625.

[93] LEI J H, SYNDERGAARD S, BURNS A G, et al. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: preliminary results[J]. Journal of geophysical research, 2007, 112(A7): A07308. DOI: 10.1029/2006JA012240

[94] 欧明, 甄卫民, 徐继生, 等. 地基GPS与掩星联合的电离层层析成像方法研究[J]. 全球定位系统, 2014, 39(5): 1-7.

[95] 陈锐志, 王磊, 李德仁, 等. 导航与遥感技术融合综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1507-1522.

[96] CARDELLACH E, TOMÁS S, OLIVERAS S, et al. Sensitivity of PAZ LEO polarimetric GNSS radio-occultation experiment to precipitation events[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 53(1): 190-206. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2320309

[97] PADULLÉS R, CARDELLACH E, JUÁREZ M D L T, et al. Atmospheric polarimetric effects on GNSS radio occultations: the ROHP-PAZ field campaign[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2016, 16(2): 635-649. DOI: 10.5194/acpd-15-18747-2015

[98] CARDELLACH E, RULLÓP R, TOMÁS S, et al. Probability of intense precipitation from polarimetric GNSS radio occultation observations[J]. Quarterly journal of the royal meteorological society, 2017, 144(S1): 206-220. DOI: 10.1002/qj.3161

[99] CARDELLACH E, OLIVERAS S, RIUS A, et al. Sensing heavy precipitation with GNSS polarimetric radio occultations[J]. Geophysical research letters, 2019, 46(2): 1024-1031. DOI: 10.1029/2018GL080412

[100] 安豪. 全球导航卫星信号极化相移监测降雨强度技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.

[101] 安豪, 严卫, 赵现斌, 等. 基于1-10 GHz空地链路信号的雨强监测方法可行性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 555-563.

[102] YAN W, AN H, FU Y, et al. A method for estimating rain rate from polarimetric GNSS measurements: preliminary analysis[J]. Atmospheric research, 2014(149): 70-76. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.05.016

[103] AN H, YAN W, HUANG Y X, et al. GNSS measurement of rain rate by polarimetric phase shift: theoretical analysis[J]. Atmosphere, 2016, 7(8): 101. DOI: 10.3390/atmos7080101

[104] AN H, YAN W, BIAN S S, et al. Rain monitoring with polarimetric GNSS signals: ground-based experimental research[J]. Remote sensing, 2019, 11(19): 2293. DOI: 10.3390/rs11192293

作者简介

安豪 (1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为 GNSS 信号非导航应用.

严卫 (1961—), 男, 博士, 教授, 研究方向为大气海洋空间环境遥感.

杜晓勇 (1974—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为 GNSS 气象学.

Research progress of GNSS atmosphere-ocean remote sensing technology

AN Hao[1], YAN Wei[2], DU Xiaoyong[1], BIAN Shuangshuang[1]

(1. *Xi'an Institute of Surveying and Mapping*, *Xi'an* 710054, *China*;
2. *College of Meteorology and Oceanography*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073, *China*)

Abstract: The atmosphere-ocean remote sensing technology of fully mining Global Navigation Satellite Systems (GNSS) signal resources has always been a research hotspot. With the construction and development of GNSS, a series of novel technologies and methods to obtain the parameters of atmospheric and oceanic environment by GNSS delayed signals, reflected signals, occultation signals and polarimetric signals have appeared successively. In this paper, the principles of GNSS delay (GNSS-D), GNSS reflectometry (GNSS-R), GNSS radio-occultation (GNSS-RO) and GNSS Polarimetric radio-occultation (GNSS-PRO) technologies are respectively summarized on the basis of reviewing the general situation of GNSS atmosphere-ocean remote sensing technology. The progress of their research are also illustrated comprehensively and systematically, especially the mechanism, advantages and status of emerging GNSS-PRO technology. Finally, the development prospect of this field is discussed. The breakthrough and development of related technologies will play an increasingly important role in the earth science fields such as meteorology, hydrology, ocean, land and space environment.

Keywords: Global Navigation Satellite Systems (GNSS); remote sensing; BeiDou signal; GNSS polarimetric radio occultation (GNSS-PRO); polarimetric phase shift