



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

研究生学位论文开题报告

报告题目 星载 GNSS 反射信号海面风速反演关键

技术研究

学生姓名 学号 2019E8017261017

指导教师 职称

学位类别 工程硕士

学科专业 电子与通信工程

研究方向 卫星导航技术

研究所（院系） 中国科学院空天信息创新研究院

填表日期 2020/11/26

中国科学院大学制

目录

1. 选题的背景及意义	1
2. 国内外本学科领域的发展现状与趋势	3
3. 课题主要研究内容、预期目标	6
3.1 研究内容	6
3.2 预期目标	8
4. 拟采用的研究方法、技术路线、实验方案及其可行性分析	8
4.1 研究方法	8
4.1.1 GNSS-R 理论模型分析	9
4.1.2 STK 仿真研究	15
4.1.3 经验模型法反演海面风速	16
4.2 技术路线	17
4.3 实验方案	17
4.4 可行性分析	18
5. 已有研究基础与所需的研究条件	18
5.1 已有研究基础	18
5.2 所需研究条件	19
6 研究工作计划与进度安排	19
参考文献	20

1. 选题的背景及意义

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)反射信号在传统的定位与授时服务中被认为是一种多径干扰信号,一般要予以抑制或者滤除。随着对 GNSS 反射信号认识的不断加深,20 世纪 90 年代前后,GNSS 反射信号被当作一种新的遥感机会信号源,并由此发展了 GNSS-R (Reflectometry) 技术。GNSS-R 技术是应用导航卫星信号开展地球遥感的一种新型微波遥感探测技术。GNSS-R 技术的基本原理是利用反射信号中的伪码与载波信号,通过码延迟和相关函数波形及其后延迟性进行分析,并结合海面、海浪对电波的散射理论,提取反射信号中携带的目标反射面的特性信息。

经过 30 年的长足发展,GNSS-R 技术已经成为国内外遥感与导航领域的研究热点。与陆地表面相比,海洋表面反射率与表面尺度特征变化较小,可建立统一的海洋表面反射模型,因此 GNSS-R 技术在海洋遥感领域得到了广泛应用。海面风速可直接影响海面对 GNSS 信号的散射特性,因而可利用 GNSS-R 技术提取反射信号中包含的反射面信息,进而实现风速的反演。

海面风速是影响海况的直接因素,根据不同的风浪指标,海况分为灾害性海况、危害性海况、恶劣海况、一般海况。在过去的 20 年里,全球飓风、旋风和风暴潮等风暴的发生次数从 1457 次增加到 2043 次,在 2000 年至 2019 年期间导致近 20 万人死亡,成为继洪涝灾害之后第二大致命的灾害^[1]。掌握实时的海况信息,可以对海啸、台风等恶劣进行提前预警,对降低海啸、台风等海洋灾害的影响具有重要意义。

海况与海洋渔业生产、海上运输、海洋开发和国防建设关系密切,为舰船安全航行、飞机巡逻侦察和舰载武器的使用提供环境支撑信息。海面风速是海洋环境与气候的关键参数,掌握海面风速信息,有利于人类从事安全、高效的海洋活动。

海面风速与全球气候变化和环境变化等有十分密切的关系,是海洋学和气候学中的基础支撑数据。掌握实时、全球范围的海面风速可为海洋学研究部门提供基础数据,有助于深入研究海洋现象,建立更精确的海洋模型。

海面风速是人类活动的基础支撑信息，海面风速探测具有重大意义。传统接触式浮标和风速计探测覆盖范围小，一般为近海海域，难以满足现代人类活动对宽覆盖范围探测的需求。将接收机搭载于低轨卫星上构建的星载 GNSS-R 平台可实现非接触式的全球风速探测。

传统的遥感探测方式，如雷达高度计与微波辐射计受限于搭载的卫星数量，重返时间与实时覆盖范围无法满足人类活动对低重访时间、宽覆盖范围的海洋环境信息的需求；此外，微波辐射计无法在夜晚进行探测，雷达高度计易受斑点噪声的影响，探测能力受限。与传统的遥感探测技术手段相比，GNSS-R 技术具有如下优势：

1. 以导航信号作为信号源，无需用户发射机，因此探测装置的重量、体积、功耗大大降低，可大大降低探测系统的复杂度与成本；
2. 全球近 150 颗导航卫星可为 GNSS-R 接收机提供免费的信号源，有利于实现全球范围的高覆盖范围、低重访时间的海洋参数反演；
3. L 波段信号对降雨、大雾等极端天气的抗干扰能力强，有利于实现全天候的观测；
4. GNSS 卫星轨道数量众多、错综分布，使得 GNSS-R 探测覆盖范围广。

基于星载 GNSS-R 探测的独特优点，利用星载 GNSS-R 技术进行海况反演已经成为遥感与导航领域的研究热点。

目前比较成熟的星载 GNSS-R 平台主要有英国的 TDS-1(TechDemoSat-1)卫星平台与美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）部署的 CYGNSS(Cyclone Global Navigation Satellite System)卫星平台,这两个卫星平台搭载的 GNSS-R 接收机只能接收 GPS 单系统反射数据，且仅有 4 个独立的反射通道，因此其覆盖面积非常有限，重访时间不够低。增加反射通道数量与卫星导航系统兼容数量能增加覆盖面积，降低重访时间，但同时也会增加 GNSS-R 接收机的重量与消耗功率，增加星载平台的设计复杂度与制造成本。此外，随着反射通道数量与卫星导航系统兼容数量的增多，覆盖面积与重访时间将趋于饱和。为了综合考虑覆盖面积、重访时间等反演指标以及星载平台设计复杂

度、制作成本，本研究将利用 STK 仿真工具，模拟 CYGNSS 任务的 8 颗小卫星平台，对星载 GNSS-R 的覆盖范围与重访时间进行仿真研究，设计合理的反射通道数量与卫星导航系统兼容数量方案，为 GNSS-R 接收机的设计提供参考依据。

GNSS-R 接收机的通道数量与卫星导航系统兼容数量决定了反演的覆盖范围与重访时间，而风速反演算法则决定了反演的精度。目前常采用经验模型法实现海面风速反演，经验模型亦称"黑箱模型"，是指不分析实际过程的机理，而是根据从实际得到的与过程有关的数据进行数理统计分析，按误差最小原则归纳出该过程各参数和变量之间的数学关系式。基于经验模型法，主要有两种方式实现海面风速反演：其一是从星载 GNSS-R 接收机输出的延迟多普勒图(Delay Doppler Map ,DDM)数据中提取反射信号功率值，通过建立反射信号功率与海面风速的关系，进而反演海面风速；采用此方法计算简单，可快速反演海面风速，但反演风速精度低。其二是结合反射信号功率、接收天线增益、发射信号功率、GNSS-R 传播路径与散射区域面积等配置信息，并基于双基雷达积分方程计算双基雷达截面，通过建立双基雷达截面与海面风速的关系，进而实现海面风速的反演；采用此方法反演精度高，但是计算复杂度高，需要较多的辅助信息，不利于实时风速反演。基于上述问题，本研究拟提出一种兼顾反演实时性与反演精度的海面风速反演算法，利用 TDS-1 的 DDM 数据进行实时风速反演，并利用雷达散射计的风速数据对反演结果进行同比分析。

2. 国内外本学科领域的发展现状与趋势

国外对 GNSS-R 的研究较早，GNSS-R 的概念首次是由 Hall 在国际地理与遥感学会上提出^[2]，对 GNSS-R 的实际研究始于 1993 年 Martin-Neira 等^[3]提出 PARIS (Passive Reflectometry and Interferometry System)的概念，并推断 GNSS-R 进行海面测高的可能性。1994 年 Auber 等^[4]首次报告了 GNSS-R 信号可以被常规的导航定位接收机检测到。1996 年，美国国家航空航天局首次提出了利用 GNSS-R 遥感海态的潜在应用，并研制了一种特殊的延迟映射接收机 DMR^[5]，1997 年，美国针对 GPS 散射信号进行了理论研究和海上机载接收试验^[6]。同年，Martin-Neira 等又在荷兰鹿特丹进行了 GNSS-R 海面测高试验，即 PARIS 高度计 Zeeland 桥 I 试验。1998 年，Garrison 等^[7]采用了同样的理论模型检测海面

粗糙度。2000 年,美国在 Michael 和 Keith 飓风中进行了 GNSS-R 机载海面风场反演实验,并与浮标、Topex/Poseidon 卫星、ERS 和 QuikSCAT 卫星数据进行了比较^[8]。2001 年,德国 GFZ 提供了在 CHAMP 卫星上探测到 GNSS-R 的有力证据^[9]。许多科研机构开展了一系列利用 GNSS 的反射信号的理论研究和试验,美国的 JPL、科罗拉多大学,西班牙的 IEEC 与 Starlab 等先后进行了软/硬件 GNSS-R 接收机开发^[10, 11];实施了基于海岸、桥梁、高塔、飞机、气球等不同平台的高度计与散射计试验,检验了 GNSS-R 探测海面平均高度、有效波高、粗糙度等的可行性^[12, 13]。GNSS-R 海洋粗糙度数据还可以通过提供更好的海况校正帮助更好地恢复海洋盐度^[14]。

近年来,由于星载平台具有覆盖面积广、重访时间低的优点,国外对 GNSS-R 的研究重点主要在星载 GNSS-R 上;2002 年,Low 等人^[15]首次在星载平台上接收到了来自太平洋海面反射的 GPS 信号,对星载 GNSS-R 进行了可行性论证。2003 年,英国国家空间中心在发射的低轨卫星 UK-DMC 上搭载了 GPS-R 接收机,并验证了获得的信号功率与风速具有相关性^[16]。由于首次星载 GPS-R 接收机收集的信号质量不佳,星载 GNSS-R 技术的研究出现了停滞,直到 2014 年 7 月,英国发射了技术演示卫星 TDS-1,该卫星服役 4.5 年,期间获得了大量有效的 DDM 数据,开启了星载反射测量的新时代。Foti G 等^[17]于 2015 年首次报到了英国 TechDemoSat-1 卫星用于反演海洋风速的结果,提出了一种基于双基雷达方程和信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)的地球物理模型函数(Geophysical Model Function, GMF),采用经验模型法建立了雷达截面积(Radar Cross-Section, RCS)与海面风速的函数关系;在信噪比超过 3dB,风速在 3-18m/s 区间内,风速反演结果无偏,均方根误差为 2.2m/s。Martin Unwin^[18]等详细介绍了 TDS-1 搭载的 GNSS-R 载荷 SGR-ReSI(Space GNSS Receiver Remote Sensing Instrument)的工作方式,介绍了一种基于经验模型法建立信噪比与海面风速的 GMF,反演风速的均方根误差低于 4m/s。除了双基雷达的几何配置会影响 GNSS-R 观测量(信噪比、信号功率等)之外,由于未校正的接收机天线增益与未知的发射功率也会给 GNSS-R 观测量带来不确定性的影响;LIN W 等^[19]通过以方位角、入射角作为修正项,建立新的信噪比观测量,以降低观测量的不确定性。除了采用经验模型法建立 GMF 反演风速的方法之外, Milad 等^[20]提出了机器学习的方法建立新

型 GMF, 其采用前向反馈神经网络的算法, 以雷达截面积, 入射角、方位角、天线增益为输入变量, 风速为输出变量, 用大量数据对模型进行训练; 与经验模型法相比, 导出的模型在均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)方面有 20% 的显著改善。2016 年 12 月, 美国 NASA 成功部署了 8 颗小卫星组成的热带风暴探测星座 CYGNSS, 每颗小卫星上搭载了 GNSS-R 载荷 SGR-ReSI, 开启了星载 GNSS-R 探测海面高风速的篇章。文献[21]提出一种基于 DDM 样本值线性组合的广义线性观测量, 与 DDMA(Delay Doppler Map Average), DDM 前沿斜率反演海面风速的方法相比, 经过 PCA 方法优化的广义线性观测量反演风速的性能最佳。Feixiong Huang 等^[22]提出一种序贯处理 GNSS-R 延迟多普勒图的方法, 在风速小于 20m/s 时, 获得了均方根误差为 2m/s 的反演结果。当前关于星载 GNSS-R 的研究主要围绕英国 TDS-1 卫星与美国 CYGNSS 卫星的数据开展, 基于星载 GNSS-R 反演的风速、海冰分布等数据产品已用于极端天气预警、海上安全航行、科学研究等领域。

我国对于星载 GNSS-R 的研究起步较晚, 但许多研究机构 and 高等院校已经对 GNSS-R 海洋遥感领域进行了不同程度的理论与实验验证, 包括海面风场^[23, 24] (海面风向、海面风速等)、海面高度^[25-27]、有效波高^[28-30]、海冰分布^[31-33]等物理参数的反演方法和关键技术的研究, 已逐步完成地基、岸基、机载飞行的相关理论与实验验证^[34-38]。

近年来, 国内对于星载 GNSS-R 的研究主要以英国 TDS-1 与美国 CYGNSS 的开源数据作为支撑, 对海面风速、海冰探测等领域开展了相关研究。杨东凯等^[39]采用校正因子对 TDS-1 数据中提取的散射功率进行了校正处理, 并采用经验模型法建立了散射功率与海面风速的地球物理模型函数, 在 20m/s 以下获得了均方根误差为 2.11m/s 的反演结果。此外, 国内也开展了使用神经网络建立新型 GMF 的研究。高涵^[40]等提出了基于反向传播 (Back Propagation, BP) 神经网络反演海面风速的方法; 选取归一化双基雷达散射截面、DDM 前沿斜率、DDM 后延斜率作为输入, 以风速作为神经网络的输出, 用大量数据对模型进行训练; 风速小于 20m/s 时, 反演结果均方根误差为 1.21m/s; 风速大于 20m/s 时, 均方根误差为 2.54m/s。吴崇^[41]等比较了采用卷积神经网络和 BP 神经网络反演海洋表面风速的方法。采用神经网络的方法比经验模型法反演海面风速的精度更高, 但是

采用神经网络的方法需要更多的观测量，计算复杂度更高，占用计算资源多；采用经验模型法往往只需要单一观测量，计算复杂度低。此外，李中奎^[41]等将卡尔曼（Kalman）滤波技术引入风速反演算法中，以避免观测量突变值带来较大的反演误差。

随着国内对星载 GNSS-R 技术的逐步深入，2019 年 6 月 5 日，中国航天科技集团有限公司成功部署了我国首个 GNSS-R 卫星任务捕风 1 号（BuFeng-1 A/B）双卫星。针对捕风 1 号获得的反射信号，文献^[42]提出了将归一化双基地雷达横截面与海面风速相关联的海洋地球物理模型函数，初步结果显示，在 0.5–40.5 m/s 的范围内，反演结果的均方根误差 RMSE 为 2.63 m/s。反演风速值分别与 ASCAT(Advanced Scatterometer)测量值和浮标测量值相比，在中低风速下 RMSE 分别为 2.04 m/s 和 1.77 m/s。捕风 1 号获得的信号功率在不校准的情况下，RMSE 高达 7.0256m/s，刘原华等^[43]利用噪声温度对信号功率进行校准后 RMSE 降至了 2.5128m/s。捕风 1 号的成功部署大大扩充了星载 GNSS-R 的应用空间。

综上所述，GNSS-R 经过 30 余年的理论与实验验证，GNSS-R 技术取得了长足的发展，并逐步实现了从岸基平台到船载平台、机载平台、星载平台对 GNSS 海洋反射信号的接收与处理。

3. 课题主要研究内容、预期目标

3.1 研究内容

（1）GNSS 反射信号海面风速反演理论模型归纳

区别于 GNSS 直射信号，反射信号的传播路径更加复杂，经海面反射之后的 GNSS 信号在极化方式、信号功率等方面发生了较大的改变。结合海浪谱模型、双基雷达散射模型（Z-V 模型）、菲涅尔反射系数、GNSS-R 几何配置等信息，可构建海面风速与 GNSS 反射信号功率波形的理论关系，其关系示意图如图 1 所示。本课题将开展海浪谱模型、双基雷达散射模型归纳，建立海面风速与反射信号功率理论关系；采用控制变量法分析在特定风速下，接收平台高度、卫星仰角等几何因素对接收功率的影响。

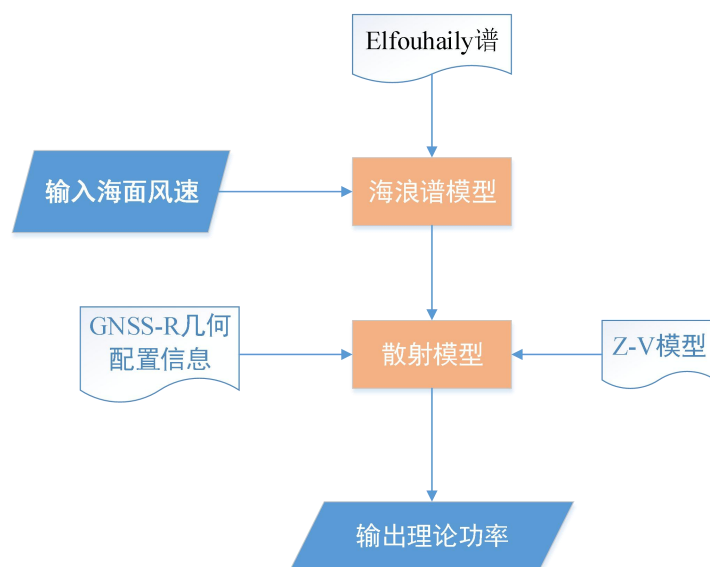


图 1 GNSS-R 理论模型示意图

(2) 基于 STK 的星载 GNSS-R 覆盖面积与重访时间的仿真研究

星载 GNSS-R 与传统浮标探测相比的最大优势在于覆盖面积广,与传统微波遥感探测的方式相比在于重访时间低。STK 是由美国 Analytical Graphics 公司开发的一款在航天领域处于领先地位的商业分析软件;STK 支持航天任务的全过程,包括设计、测试、发射、运行和任务应用;STK 的核心能力是产生位置和姿态数据、获取时间、遥感器覆盖分析。本课题将采用 STK 工具软件,模拟 CYGNSS 任务的 8 颗小卫星平台,采用控制变量法仿真分析反射通道数量、卫星导航系统兼容数量对覆盖面积与重访时间的影响,特别地对我国海域的覆盖情况与重访时间进行详细分析;兼顾系统复杂度与探测性能,设计更优的接收机通道数量与卫星导航系统兼容数量方案。

(3) 基于英国 TDS-1 卫星的开源 DDM 数据进行海面风速反演算法优化

英国于 2014 年 7 月发射 TDS-1 卫星,该卫星搭载了 GNSS-R 载荷 SGR-ReSI。SGR-ReSI 可以收集 GPS 反射信号并由其获得 DDM 数据,DDM 数据是解读海洋平面粗糙度与海面风速的重要信息源。本课题将对常用的风速反演算法进行对比分析,拟提出一种兼顾反演实时性与反演精度的海面风速反演算法。

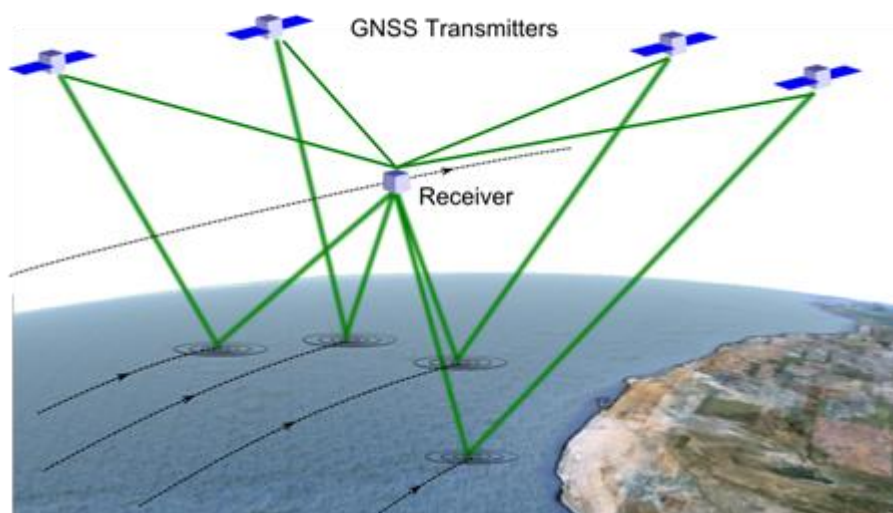


图 2 星载 GNSS-R 信号传播路径几何示意图

3.2 预期目标

针对以上研究内容，本课题的预期目标具体如下：

- (1) 运用 GNSS 反射信号海面风速反演相关理论，建立海面风速与接收信号功率波形的理论关系，得到接收机平台高度、卫星仰角等几何因素对风速的影响机制。
- (2) 优化反射通道数量与卫星导航系统兼容数量方案。模拟 CYGNSS 任务的 8 颗小卫星平台，得到该星载平台反射通道数量与卫星导航系统兼容数量对全球及我国海域覆盖面积、平均重访时间的影响机制。
- (3) 在对常用风速反演算法比对分析的基础之上，建立一种兼顾反演实时性与反演精度的海面风速反演算法，利用 TDS-1 的 DDM 数据获得实时海面风速反演结果，并采用雷达散射计的风速数据对反演结果进行同比分析。

4. 拟采用的研究方法、技术路线、实验方案及其可行性分析

4.1 研究方法

本课题通过运用理论模型分析法对 GNSS-R 的几何模型、信号模型进行数学

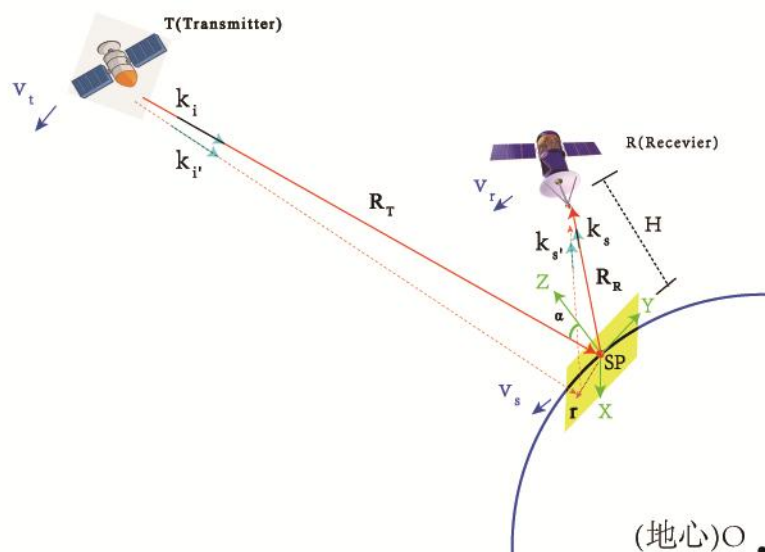
建模，为实现海面风速反演提供理论支撑。使用仿真分析法探讨星载 GNSS-R 平台接收通道数量、卫星导航系统兼容数量对覆盖面积、重访时间的影响关系。采用经验模型法建立提取的观测量与风速之间的函数关系，以有效观测量快速反演海面风速；采用修正法与统计模型法，剔除干扰因素对风速反演结果的影响，以得到较高的风速反演精度。

4.1.1 GNSS-R 理论模型分析

GNSS 反射信号理论，包括 GNSS-R 几何模型、反射信号模型、海浪谱模型，通过对模型的分析，可以为海面风速反演提供理论支撑。

(1) GNSS-R 几何模型

GNSS 反射信号测量中，GNSS 卫星、反射面和接收机构成一个收发分置结构，在遥感探测机理方面属于双基（多基）雷达观测模式。图 3 所示为星载 GNSS-R 几何模型，坐标系 XYZ 是在镜反射点 SP 处建立的本地坐标系， r 是位于切平面上的散射点。低轨卫星搭载了 GNSS-R 载荷，即 GNSS-R 接收机，GNSS-R 接收机可同时接收一定范围内多颗导航卫星的直射、反射信号，可以大大提升时空分辨率。导航卫星发射的 GNSS 信号为右旋圆极化信号，经过海面散射之后，信号转变为左旋圆极化信号，所以 GNSS-R 接收机一般需要采用两副天线，一副向上的低增益右旋圆极化天线，用于接收直射信号，另一副向下的高增益左旋圆极化天线，用于接收海面反射信号。GNSS-R 接收机既接收经过镜反射点 SP 反射的信号，又接收经过镜反射点周围 r 散射的信号。GNSS-R 接收机通过对直射信号的处理可以获得卫星与接收机的位置速度等信息，结合地球模型，可以计算出地球上镜反射点的位置；通过对反射信号的处理可以提取反射面的特征信息。



(2) GNSS-R 信号模型

$$\mathbf{E}^i(R_T, t) = A \frac{1}{R_T} a \left(t - \frac{R_T}{c} \right) \exp \left(j k_i R_T - 2 \pi j f t \right) \quad (1)$$

$$A = \sqrt{\frac{P_T G_T \lambda^2}{L_f (4\pi)^2}} \quad (2)$$

GNSS 信号传播至海面之后将发生散射作用，GNSS 信号是右旋圆极化电磁波，经过海面散射后的信号，既可能存在右旋圆极化波，又可能存在左旋圆极化波，与菲涅尔反射系数有关。经过海面散射后的信号，其电场强度会发生变化，散射电场与入射电场的关系为：

$$E_p^{scat} = \Re_{pq} E_q^{inc} \quad (3)$$

其中 E_q^{inc} 表示 p 极化方式的电场， E_p^{scat} 表示转变为 q 极化方式的电场， \Re_{pq} 表示由 p 极化方式转化为 q 极化方式时的菲涅尔反射系数。任何一种菲涅尔反射系数可由垂直方向与水平方向的菲涅尔反射系数表示。同极化与交叉极化下的菲涅尔反射系数的表达式如下：

$$\Re_{RL} = \frac{1}{2}(\Re_h - \Re_v) \quad (4)$$

$$\Re_{RR} = \frac{1}{2}(\Re_h + \Re_v) \quad (5)$$

\Re_{RL} 表示右旋圆极化信号转变为左旋圆极化信号的菲涅尔反射系数， \Re_{RR} 表示右旋圆极化信号保持极化方式不变时的菲涅尔反射系数。以 GPS L1 波段 (1575.42MHz) 为例，假设海水温度为 25°C ，盐度为 35，复介电常数 $\epsilon_r = 70.53 + 65.68i$ 。复介电常数的实部对应通常的介电常数，虚部对应损耗因素。在仅考虑复介电常数实部的情况下，考察菲涅尔反射系数与入射角度的关系，得到的仿真结果如图 4 所示。从图中可以看出，当入射角度大于 83 度左右时，GNSS 反射信号保持右旋圆极化的特性；当入射角度小于 83 度时，GNSS 反射信号由右旋圆极化信号转变为左旋圆极化信号；当入射角度小于 30 度时，GNSS 反射信号的极化分量中左旋圆极化信号占比非常大。一般情况下，星载 GNSS-R 接收机接收到的信号来自卫星正下方附近反射区域的信号，这也是星载 GNSS-R 接收机朝下天线采用左旋圆极化天线的原因。

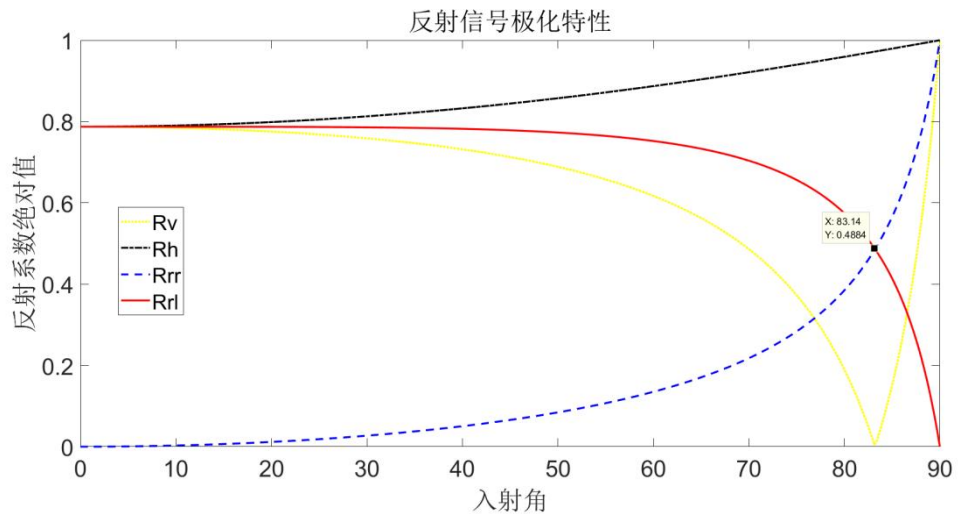


图 4 反射信号极化分量与入射角度的关系

对于 GNSS 信号经过海面散射之后，获得的左旋圆极化信号电场为：

$$\mathbf{E}_L^s(r') = \Re_{RL} \mathbf{E}_R^i(r') \quad (6)$$

因为星载 GNSS-R 几何配置中入射角度一般小于 30 度，即反射的主要成分为左旋圆极化信号，可用左旋圆极化分量 $\mathbf{E}_L^s(r')$ 认定为经过海平面散射后的 GNSS 信号电场。

Zavorotny and Voronovich^[44]采用几何光学极限法并应用到基尔霍夫近似条件下，到达接收机处的 GNSS 信号可表示为：

$$\mathbf{E}^s(R_T, R_R, t) = A \iint D(r) \exp\left(j\left(t - \frac{R_T + R_R}{c}\right)\right) \mathbf{g}(R_T, R_R) d^2r \quad (7)$$

$$g(R_T, R_R) = -\frac{\Re_{RL} \exp(-2\pi j f_1 t)}{4\pi j R_T R_R} \exp\left[j\hat{k}_i(R_T + R_R)\right] \frac{q^2}{q_z} \quad (8)$$

其中 $D(r)$ 是接收机天线方向性图函数， R_R 是接收机至散射点 r 的距离， q 是散射矢量。

上述得到的接收 GNSS 信号并没有考虑多普勒效应，因为导航卫星与低轨卫星的运动必然会产生多普勒效应，此外在星载条件下，因散射点处运动产生的多普勒效应也是不可忽略的，考虑在非常短的时间间隔 t' 下， R_R 与 R_T 会因运动发生改变，即：

$$R_T(t+t') \approx R_T(t) + t'(\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_t) \cdot \hat{\mathbf{k}}_i \quad (9)$$

$$R_R(t+t') \approx R_R(t) + t'(\mathbf{v}_r - \mathbf{v}_s) \cdot \hat{\mathbf{k}}_s \quad (10)$$

其中 \mathbf{v}_s 是散射点速度矢量， \mathbf{v}_s 是发射机速度矢量， \mathbf{v}_r 是接收机速度矢量。将式，代入式中，式变为：

$$g(R_T, R_R, t+t') = g(R_T, R_R, t) \exp\left\{-2\pi j \left[f_1 + f_D(r, t')\right](t+t')\right\} \quad (11)$$

其中 $f_D(r, t')$ 表示散射点为 r 时接收信号总的多普勒频移, $f_D(r, t') = f_{D,0} + f_s$, $f_{D,0}$ 表示因为发射机与接收机运动造成的多普勒频移, f_s 表示散射面运动造成的多普勒频移, 它们的表达式为:

$$f_{D,0} = \frac{[v_t \cdot \hat{k}_i - v_r \cdot \hat{k}_s]}{\lambda} \quad (12)$$

$$f_s = \frac{q \cdot v_s}{2\pi} \quad (13)$$

对于海洋平面上的散射矢量 q , $q_{\perp} \ll q_z$, 因此对 f_s 的贡献主要来自散射分量 q_z [44], 所以有:

$$f_s \approx \frac{q_z \cdot (v_s)_z}{2\pi} \quad (14)$$

通过对 GNSS 反射信号建模得到了 GNSS 反射信号的准确表达式, 但是该反射信号必须在接收机进行相关处理才可以有效提取反射信号信息。在 GNSS 接收机中, 接收机对当前时刻从天线获得的 GNSS 信号与 PRN 码的副本互相关, 则相关值为:

$$Y(t, \tau) = \int_0^{T_i} a(t+t') \mathbf{E}^s(t+t'+\tau) \exp(2\pi j f t') dt' \quad (15)$$

其中 T_i 是相干积分时间, 它要大于伪随机噪声码单个码片 τ_c 的长度, 小于整个伪随机码序列 $a(t)$ 的长度。GNSS 的输出是作为延迟函数 τ 的平均功率, 该输出量是通过对信号的同相分量和正交分量进行平方, 然后在累积时间内进行平均而获得的, 该输出量为[45]:

$$\langle |Y(\delta\tau, \delta f)|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y(t_i, \tau)|^2 = \frac{A^2 T_i^2}{4\pi} \iint_A \frac{G_R \Lambda^2(\delta\tau) S^2(\delta f)}{R_T(r) R_R(r)} \sigma^0(r) d^2r \quad (16)$$

$\langle |Y(\delta\tau, \delta f)|^2 \rangle$ 是关于时间延迟与多普勒频移的函数, 称为延迟-多普勒图

(DDM), 是 GNSS-R 海洋遥感应应用中常用的一个观测量; 其中 $\Lambda^2(\delta\tau)S^2(\delta f)$ 称为 Woodward 模糊度函数, 表示由于接收机在做互相关处理时, 本地伪随机噪声码与本载波频率与接收到的 GNSS 反射信号未完全同步造成的功率损耗, 在 GNSS 信号为 BPSK 调制方式下, 其表达式为:

$$\Lambda(\delta\tau) = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} a(t+t')a(t+t'+\delta\tau)dt' = \begin{cases} 1 - \delta\tau / \tau_c, & |\delta\tau| \leq \tau_c \left(1 + \frac{\tau_c}{T_i}\right) \\ -\frac{\tau_c}{T_i}, & |\delta\tau| > \tau_c \left(1 + \frac{\tau_c}{T_i}\right) \end{cases} \quad (17)$$

$$S(\delta f) = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} \exp(-j2\pi\delta f t') dt' = \frac{\sin(\pi\delta f T_i)}{\pi\delta f T_i} \exp(-j\pi\delta f T) \quad (18)$$

σ^0 是归一化双基地雷达截面, 与散射面的几何特征有关, σ^0 的表达式为:

$$\sigma^0 = |\Re_{RL}|^2 P \left(-\frac{q_{\perp}}{q_z} \right) \frac{q_{\perp}^4}{q_z^4} \quad (19)$$

P 为海面倾斜概率密度函数, 描述了风速与散射表面几何特征的关系, 因此在得知海浪谱函数的条件下, 可以得到理论的 DDM 值。

(3) 海浪谱模型

海面倾斜概率密度函数与风速存在着紧密联系的关系, 海面倾斜概率密度函数可由二维高斯函数描述:

$$P_S(s_x, s_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{sx}\sigma_{sy}\sqrt{1-b_{x,y}^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-b_{x,y}^2)} \left(\frac{s_x^2}{\sigma_{sx}^2} - 2b_{x,y} \frac{s_x s_y}{\sigma_{sx}\sigma_{sy}} + \frac{s_y^2}{\sigma_{sy}^2} \right) \right] \quad (20)$$

式中 $s_x = \frac{-q_x}{q_z}$, $s_y = \frac{-q_y}{q_z}$; σ_{sx}^2 , σ_{sy}^2 分别为沿 x 方向和 y 方向的海面均方倾斜; $b_{x,y}$

为随机变量 s_x , s_y 的相关系数。

海面均方倾斜和相关系数与海面风场之间可以通过海浪谱建立如下关系:

$$\sigma_{sx, sy}^2 = \langle s_{x,y}^2 \rangle = \int_{-\infty}^{k_0} \int_{-\infty}^{k_0} k_{x,y}^2 \psi(k_x, k_y) dk_x dk_y \quad (21)$$

$$b_{x,y} = \langle s_x s_y \rangle / \sigma_{sx} \sigma_{sy} \quad (22)$$

$$\langle s_x s_y \rangle = \int_{-\infty}^{k_0} \int_{-\infty}^{k_0} k_x k_y \psi(k_x, k_y) dk_x dk_y \quad (23)$$

式中， k_x 和 k_y 分别为沿 x 方向和 y 方向的波数，并且 $k_0 = 2\pi \sin \theta / (3\lambda)$ 为截止波数； $\psi(k_x, k_y)$ 为海浪谱函数，常用的海浪谱有 Apel 谱与 Elfouhaily 谱，一般使用 Elfouhaily 谱对公式，进行谱积分，可求出海面的均方倾斜和相关系数，进而可求得海面倾斜概率密度函数。Elfouhaily 谱^[46]的定义为：

$$S_E(k, \varphi) = M_E(k) f_E(k, \varphi) \quad (24)$$

其中， $M_E(k)$ 表示 Elfouhaily 谱中各项同性的部分， $f_E(k, \varphi)$ 表示对应的方位函数，关于该公式的具体表达式可参考文献^[46]。风速对海浪谱的影响体现在 $M_E(k)$ 中，特定的风速对应特定的海浪谱函数，通过海浪谱可求得海面倾斜概率函数，进而通过公式可得到双基雷达截面积，最后通过公式得到接收机相关功率值；至此本文从理论上建立了海面风速与延迟-多普勒功率（DDM）的数学关系，从理论的角度合理的解释了海面风速对延迟-多普勒功率的影响关系。

4.1.2 STK 仿真研究

利用仿真方法复现实际系统中发生的本质过程可以减少试验成本与降低试验出错率，本研究将借助于 STK 仿真工具，对星载 GNSS-R 的实时覆盖面积、日覆盖面积、全球平均重访时间等进行仿真分析，对中国海域地区的覆盖情况与重访时间进行单独分析；探讨反射通道数量、卫星导航系统兼容数量方案对覆盖面积与重访时间的影响，以为接收机设计提供指导意见。

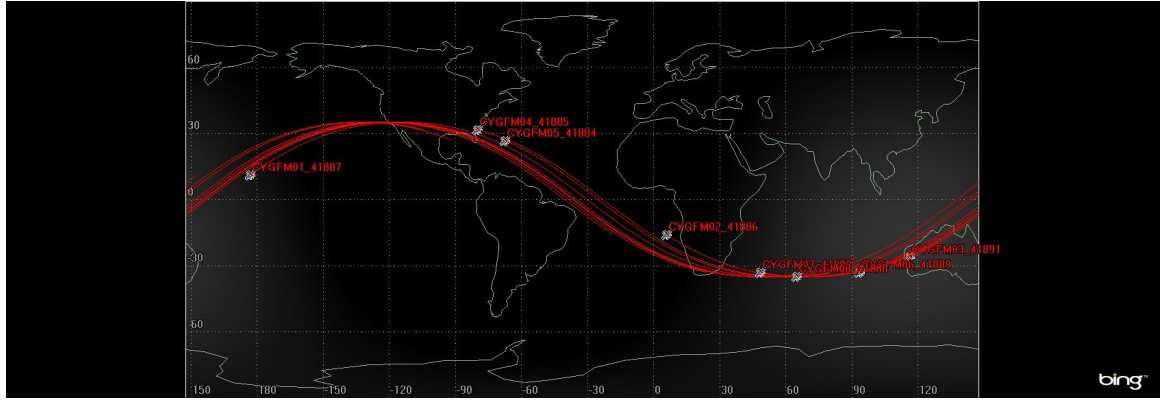


图 5 CYGNSS 分布示意图

4.1.3 经验模型法反演海面风速

经验模型法是 GNSS-R 反演海面风速常用的方法之一，此外有模型匹配法和神经网络法。模型匹配法是指通过把实测信号功率波形与理论信号功率波形相匹配，并把理论功率波形相对应的风速值作为输出值，采用该方法具有很好的理论解释性，但是往往反演精度很低；神经网络法通常以 GNSS-R 双基雷达截面积、几何配置信息等作为输入变量，以同比风速值作为输出变量，通过用大量的数据对神经网络进行训练后，输出的风速值具有精度高的特点，但是变量对风速的影响机制不明晰，计算复杂度高，需要较多的数据。采用经验模型法建立观测量与风速之间关系的方法具有变量关系明确、计算复杂度较低、精度较高的特点；常用的经验公式有^[17, 18]：

$$U_{10} = A(SNR - k_1 AGSP + k_2)^B \quad (25)$$

$$U_{10} = ae^{\sigma_0^b} + c \quad (26)$$

式中 U_{10} 为距海平面 10 米高处的风速，SNR 是 DDM 数据中提取的信噪比观测量，AGSP 是接收机朝向镜反射点处的增益，A、B、 k_1 、 k_2 是待拟合的参数；式中 U_{10} 为距海平面 10 米高处的风速， σ_0 是归一化雷达截面积，a、b、c 是待拟合的参数；上式中参数常采用最小二乘法拟合得到。

本研究拟提出一种兼顾反演实时性与反演精度的海面风速反演算法，该算法的实现包含四部分：其一，设计数据质量控制器，判别污染严重的信号源并予以

剔除；其二，基于接收功率与噪声温度、天线增益密切关联，仅利用噪声温度、天线增益对反射信号功率进行修正；其三，修正后的反射信号功率因其受到噪声的影响，在特定风速下反射信号功率呈现一定的随机特性，使用统计模型的方法分析反射信号功率的分布规律，计算反射信号功率的均值；其四，采用经验模型法建立反射信号功率均值与海面风速的数学关系，进而实现海面风速的反演。最后，将利用 TDS-1 的 DDM 数据获得实时海面风速反演结果，并利用雷达散射计的风速数据对反演结果进行同比分析。

4.2 技术路线

技术路线流程图如图 6 所示：共分为 GNSS 反射信号理论模型建立、STK 仿真设计、海面风速反演算法调研、海面风速反演算法实现与验证。

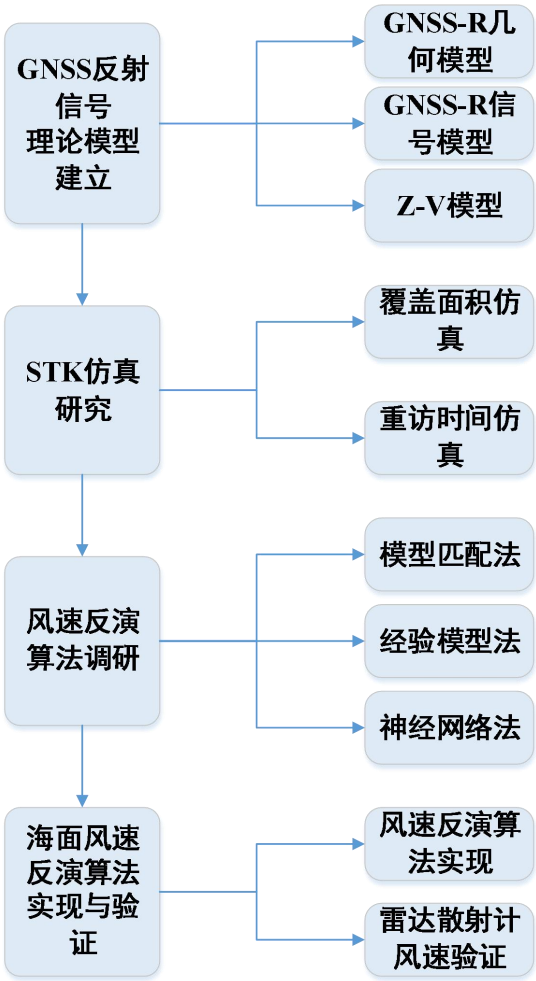


图 6 技术路线实现流程图

4.3 实验方案

(1) GNSS 反射信号理论模型验证方案

用理论模型获得的功率波形 (DDM) 与相同参数配置下的 TDS-1 实测 DDM 数据进行比对, 验证理论模型的合理性。

(2) STK 仿真研究验证方案

模拟 CYGNSS 的 8 颗小卫星, 分析星载 GNSS-R 平台的覆盖面积与重访时间, 以现有配置 (四通道、兼容 GPS 卫星导航系统) 获得的覆盖面积与重访时间为辅助验证信息。

(3) 海面风速反演验证方案

将 TDS-1 卫星数据反演的海面风速与 MetOp-A 星载雷达散射计的风速数据进行对比研究, 其对比的条件设定为两卫星探测区域经纬度差小于 0.5 度, 探测时间差小于 1 小时。

4.4 可行性分析

首先, 星载 GNSS-R 风速反演技术虽然诞生较晚, 但近年来发展迅速, 国内外已有相当一部分文献验证了星载 GNSS-R 技术用于风速反演的可行性; 此外, 已有国外团队将基于 TDS-1 DDM 数据反演的风速数据产品公布于网站 <http://merrbys.co.uk/>, 可供外界研究验证, 即星载 GNSS-R 技术用于海面风速反演是可行的。

其次, 本人所在的实验室研制过一款 GNSS-R 接收机, 并从岸基实验平台验证了其用于海面风速反演的可行性, 本实验室具有一定的技术积累。

最后, 作者本人在对星载 GNSS-R 的学习过程总具有了一定的知识积累, 对 GNSS 反射信号的理论知识与风速反演算法有了一定的认识, 将支持本研究的开展。

基于以上分析, 本文所提出的方案是可行的。

5. 已有研究基础与所需的研究条件

5.1 已有研究基础

- (1) 作者本人所属的研究团队研制过 GNSS-R 接收机,并顺利开展了海面风速与浪高反演实验。
- (2) 作者本人阅读了大量相关文献,掌握一定的理论基础;获得了 TDS-1 开源 DDM 数据集,并对数据集进行了初步的解析;获得了 MetOp-A 星载雷达散射计的同比验证风速数据;具有了支撑算法实现与验证的数据集。采用经验模型法获得的初步反演结果如图 7 所示,与同比散射计的风速相比,均方根误差为 4.2m/s 左右,后续将进一步改进风速反演算法,以获得更高的反演精度。

5.2 所需研究条件

- (1) 计算机及相关仿真软件,用于算法设计与仿真。
- (2) 开源数据集,支撑算法的实现与验证。

6 研究工作计划与进度安排

依据本课题的研究内容及技术路线,拟将课题分为五部分逐步完成。

第一部分:GNSS 反射信号理论模型建立。

第二部分:基于 STK 的星载 GNSS-R 平台覆盖面积与重访时间仿真。

第三部分:星载 GNSS-R 风速反演算法实现及验证。

第四部分:拟撰写一篇学术论文并投稿。

第五部分:撰写学位论文,准备毕业答辩。

根据课题的整个时间跨度,做出以下的时间安排:

2020 年 12 月—2020 年 1 月:完成第一部分的目标;

2021 年 1 月—2021 年 4 月:完成第二部分的目标;

2021 年 4 月—2021 年 11 月:完成第三、四部分的目标;

2021 年 11 月—2022 年 4 月:完成第五部分的目标。

参考文献

- [1] 中国气象报社.过去 20 年气候灾害数量增长“令人震惊”[EB/OL].
<http://data.cma.cn/site/article/id/40502.html>,2020-11-18.
- [2] HALL C, CORDEY R. Multistatic scatterometry; proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium,'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century', F, 1988 [C]. IEEE.
- [3] MARTIN-NEIRA M J E J. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry [J]. 1993, 17(4): 331-55.
- [4] AUBER J-C. Characterization of multipath on land and sea at GPS frequencies; proceedings of the Proc of ION GPS-94, F, 1994 [C].
- [5] GARRISON J L, KATZBERG S J. Detection of ocean reflected GPS signals: Theory and experiment; proceedings of the Proceedings IEEE SOUTHEASTCON'97'Engineering the New Century', F, 1997 [C]. IEEE.
- [6] THOMPSON D R, ELFOUHAILY T M, GASPAROVIC R F. Polarization dependence of GPS signals reflected from the ocean; proceedings of the IGARSS 2000 IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment Proceedings (Cat No 00CH37120), F, 2000 [C]. IEEE.
- [7] GARRISON J L, KATZBERG S J, HILL M I J G R L. Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the Global Positioning System [J]. 1998, 25(13): 2257-60.
- [8] KOMJATHY A, ARMATYS M, MASTERS D, et al. Retrieval of ocean surface wind speed and wind direction using reflected GPS signals [J]. 2004, 21(3): 515-26.
- [9] ARMATYS M J. Estimation of sea surface winds using reflected GPS signals [J]. 2002,
- [10] LOWE S T, KROGER P, FRANKLIN G, et al. A delay/Doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing [J]. 2002, 40(5): 1150-63.

[11] MARCHÁN-HERNÁNDEZ J F, RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ N, CAMPS A, et al. Correction of the sea state impact in the L-band brightness temperature by means of delay-Doppler maps of global navigation satellite signals reflected over the sea surface [J]. 2008, 46(10): 2914-23.

[12] LOWE S T, ZUFFADA C, LABRECQUE J L, et al. An ocean-altimetry measurement using reflected GPS signals observed from a low-altitude aircraft; proceedings of the IGARSS 2000 IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment Proceedings (Cat No 00CH37120), F, 2000 [C]. IEEE.

[13] GARRISON J L, KOMJATHY A, ZAVOROTNY V U, et al. Wind speed measurement using forward scattered GPS signals [J]. 2002, 40(1): 50-65.

[14] VALENCIA E, CAMPS A, RODRIGUEZ - ALVAREZ N, et al. Improving the accuracy of sea surface salinity retrieval using GNSS - R data to correct the sea state effect [J]. 2011, 46(6):

[15] LOWE S T, LABRECQUE J L, ZUFFADA C, et al. First spaceborne observation of an Earth - reflected GPS signal [J]. 2002, 37(1): 7-1-7-28.

[16] GLEASON S, HODGART S, SUN Y, et al. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low earth orbit for the purpose of ocean remote sensing [J]. 2005, 43(6): 1229-41.

[17] FOTI G, GOMMENGINGER C, JALES P, et al. Spaceborne GNSS reflectometry for ocean winds: First results from the UK TechDemoSat - 1 mission [J]. 2015, 42(13): 5435-41.

[18] UNWIN M, JALES P, TYE J, et al. Spaceborne GNSS-reflectometry on TechDemoSat-1: Early mission operations and exploitation [J]. 2016, 9(10): 4525-39.

[19] LIN W, PORTABELLA M, FOTI G, et al. Toward the generation of a wind geophysical model function for spaceborne GNSS-R [J]. 2018, 57(2): 655-66.

[20] ASGARIMEHR M, ZHELAVSKAYA I, FOTI G, et al. A GNSS-R geophysical model function: Machine learning for wind speed retrievals [J]. 2019,

- [21] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, GARRISON J L J I T O G, SENSING R. Generalized linear observables for ocean wind retrieval from calibrated GNSS-R delay-Doppler maps [J]. 2015, 54(2): 1142-55.
- [22] HUANG F, GARRISON J L, RODRIGUEZ-ALVAREZ N, et al. Sequential Processing of GNSS-R Delay-Doppler Maps to Estimate the Ocean Surface Wind Field [J]. 2019, 57(12): 10202-17.
- [23] 周旋, 叶小敏, 于暘, et al. 基于 GNSS-R 的海面风速探测技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(07): 1575-80.
- [24] 万贝, 段崇棣, 牛新亮. 机载 GNSS-R 海面风场反演信号处理方法研究 [J]. 电子设计工程, 2018, 26(07): 63-7.
- [25] 周勃, 秦瑾, 姚崇斌, et al. 星载相控阵 GNSS-R 测高系统设计与实验 [J]. 上海航天, 2018, 35(02): 110-20.
- [26] 樊梦文, 张波, 王峰. 基于半无码的 P(Y)码自相关 GNSS-R 海面测高方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(02): 398-404.
- [27] 张云, 张杨阳, 孟婉婷, et al. 机载 GNSS 反射信号海面测高模型的研究 [J]. 海洋学报, 2020, 42(03): 149-56.
- [28] 李颖, 朱雪瑗, 崔璨, et al. 船载 GNSS-R 有效波高测量的初步研究 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35(02): 180-3.
- [29] 徐飞, 孙协昌, 刘馨宁, et al. 利用机载 GNSS-R 的有效波高反演技术 [J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(03): 212-8.
- [30] 王波, 闫星魁, 徐宇柘, et al. 岸基 GNSS 反射信号的波浪多参数反演方法研究 [J]. 电波科学学报, 2019, 34(03): 315-21.
- [31] 张玄黎, 高洪兴, 杨东凯. GNSS-R 应用于海冰厚度的遥感模拟 [J]. 导航定位学报, 2017, 5(03): 19-23.
- [32] 谢向芳. 基于 GNSS-R 的海冰检测的研究 [D]; 上海海洋大学, 2018.
- [33] 张国栋, 郭健, 杨东凯, et al. 星载 GNSS-R 海冰边界探测方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(05): 668-74.
- [34] 王鑫, 孙强, 张训械, et al. 中国首次岸基 GNSS-R 海洋遥感实验 [J]. 科学通报, 2008, 05): 589-92.

- [35] 李明里, 杨东凯, 李伟强, et al. 中国南海 GNSS-R 海洋遥感机载实验及数据反演, 中国江西南昌, F, 2011 [C].
- [36] 张训械, 邵连军, 王鑫, et al. GNSS-R 地基实验 [J]. 全球定位系统, 2006, 05): 4-8+12.
- [37] 白伟华. GNSS-R 海洋遥感技术研究 [D]; 中国科学院研究生院 (空间科学与应用研究中心), 2008.
- [38] 林明森, 王其茂, 彭海龙. GPS 反射信号的海洋应用 [J]. 海洋湖沼通报, 2004, 04): 32-40.
- [39] 杨东凯, 刘毅, 王峰. 星载 GNSS-R 海面风速反演方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(02): 462-9.
- [40] 高涵, 白照广, 范东栋. 基于 BP 神经网络的 GNSS-R 海面风速反演 [J]. 航空学报, 2019, 40(12): 198-206.
- [41] 吴崇, 严颂华, 杨永立, et al. 基于时延-多普勒图像的海洋表面风速反演方法 [J]. 科技通报, 2019, 35(09): 22-30+47.
- [42] JING C, NIU X, DUAN C, et al. Sea Surface Wind Speed Retrieval from the First Chinese GNSS-R Mission: Technique and Preliminary Results [J]. 2019, 11(24): 3013.
- [43] 刘原华, 冯琳芳, 牛新亮. GNSS-R 海面风场数据处理技术探讨 [J]. 导航定位学报, 2020, 8(03): 76-80.
- [44] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G J I T O G, SENSING R. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application [J]. 2000, 38(2): 951-64.
- [45] GLEASON S. Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low earth orbit [D]; University of Surrey, 2006.
- [46] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind - driven waves [J]. 1997, 102(C7): 15781-96.