微小型 GNSS-R 测高仪测高精度评估及地面验证

秦 瑾,孟婉婷,杜璞玉,冯剑锋,周 勃 (上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘 要:GNSS-R 是基于双基雷达散射机理的无源微波遥感技术,可同时接收多个镜面反射点的反射信号,实现海面高度、有效波高、海面风场、海冰等海态参数的宽刈幅探测。针对微纳卫星观测计划,研制国内首个星载微小型 GNSS-R 测高仪,开展外场实验,处理实验数据,采用基于本地码相关的 Clean replica 算法、干涉式互相关的 Interferometric 算法,根据曲线平滑算法对相延多普勒测图(DDM)曲线进行拟合,进而通过最大倒数点法(DER)、峰值半功率法(HALF)等镜点跟踪算法得到测高误差,对实验结果的预期和实测值进行分析,并提出改进方法。

关键词:GNSS-R;相延多普勒测图;自相关;测高仪;海面高度反演;最大倒数点法;峰值半功率法;平滑算法
 中图分类号:P715 文献标志码:A DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.013

Precision Evaluation and Ground Validation of GNSS-R Micro-Altimeter

QIN Jin, MENG Wanting, DU Puyu, FENG Jianfeng, ZHOU Bo

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: GNSS-R is the passive microwave remote sensing technology based on bistatic radar scattering mechanism. It can receive several reflective signals simultaneously, and the remote sensing data can be used for the wide swath detection of the sea surface height, the significant wave height, the sea surface wind field, the sea ice, et al. According to the demand of nano-sat observation plan, the first domestic satellite-borne GNSS-R micro-altimeter is developed, and an experiment in Dishui Lake is conducted. For processing the raw data, we use two algorithms, one is Clean replica self-correlation, and the other is interferometric cross correlation. The reflective delay Doppler mapping (DDM) is smoothed, and then leading edge derivative (DER) and half of the peak power (HALF) are used to trace the single point. Finally, the expected value and the measured value are analyzed, and the method for improvement is proposed.

Keywords: global navigation satellite system-reflection (GNSS-R); delay Doppler mapping (DDM); selfcorrelation; altimeter; sea height retrieval; leading edge derivative (DER); half of the peak power (HALF); smoothing spline algorithm

0 引言

利用 GNSS-R(Global Navigation Satellite System-Reflection)数据进行海态参数遥感的技术已经 出现 20 余年,相对于传统的微波遥感技术,GNSS-R 微波遥感技术是一项崭新的、有效的、低成本的微 波遥感技术,可应用于中尺度海面平均高度^[1]、海面 风场、有效波高、海冰、海表溢油、海面舰船目标、土 壤湿度、植被覆盖、空中飞行目标、掩星等参数的探 测,具有刈幅宽、功耗低、质量轻、成本低的优点。 虽然近年来 GNSS-R 实验多集中在岸基、机载 等平台,但星载 GNSS-R 载荷由于其刈幅宽、时间 及空间分辨率多样等优点,仍具有较大的业务应用 潜力。2003 年 10 月,英国空间中心发射了 UK-DMC 灾难探测卫星,其搭载的 GNSS-R 载荷^[2] 收 集了大量 GPS L1 波段的海洋表面散射信号的原始 数据,验证了利用星载 GNSS-R 设备遥感海态、冰 雪和陆地参数的可行性。2008 年,欧洲航空局 (ESA) 启动了 PARIS-IoD 项目^[3],2011 年宣布

收稿日期:2017-12-05;修回日期:2018-01-20

基金项目:上海市科委国际合作项目(17220730600);国家电网公司总部科技项目

作者简介:秦 瑾(1988一),女,硕士,主要研究方向为 GNSS-R 载荷设计技术。

GEROS-ISS 计划^[4],开展海面高度测量及大气探测、 降雨、海冰探测等研究。2016年,美国宇航局 (NASA)发射一箭八星 CYGNSS(微小型 GNSS-R卫 星)^[5],对台风进行高时空分辨率观测,旨在对台风内 核建模。2014年7月,英国 Surrey 研究中心研制的 SGR-Resi 搭载在 TechDemoSat-1 技术演示验证卫星 上发射成功,收集了大量的星载观测数据^[6-7]。

由于国外已经具有明确的星载 GNSS-R 微纳 卫星观测计划,而国内并没有,针对星载 GNSS-R 载荷的微小型设计,研制了微小型 GNSS-R 测高 仪,本文对 GNSS-R 测高原理、测高仪的硬件设计 方案、相关软件算法、地基实验验证方案、反演算法、 测高精度进行了介绍。

1 GNSS-R 测高原理

GNSS-R 探测仪可以同时接收多个 GNSS 卫星 的信号,其观测范围广,不受天气(云、雾)等影响,能 够对海面实现全天候、全天时观测,图 1 为 GNSS-R 几何关系。GNSS-R 探测仪一方面接收导航卫星直 射信号,对导航卫星进行捕获、跟踪、同步、授时,并 根据几何关系计算出反射信号的码相位、多普勒频 偏;另一方面对反射信号进行接收、下变频,并进行 多普勒延迟映射,得到相延多普勒测图(Delay Doppler Mapping,DDM)曲线,再经过反演算法得 到海面高度、有效波高、海面风场等信息。



图 1 GNSS-R 几何关系 Fig.1 Geometrical relationship of GNSS-R

海洋反射面的定义有两种:一种是假设地球表 面为水平,不考虑地球曲率,该方式用于以地基或低 空飞行器方式进行高度测量;另一种是采用球形模 型,考虑地球曲率对反射的影响,该方式用于以高空 飞行器或星载方式进行高度测量。假设地球表面为 水平的前提下,将接收机摆放于湖面或海面上方某 高度,可建立接收机与卫星和湖面或海面之间的几 何关系,如图2所示。



图 2 测高几何路径延迟模型 Fig.2 Delay model of the altimetric geometrical path

根据空间几何学原理,不考虑大气层等空间传播的不理想因素,可建立 BDS-R 测高型几何路径延迟模型。图 2 中,S 表示镜面反射点的位置,R 表示接收机。

已知 GNSS 卫星,镜面反射点和接收机的几何位 置^[8],则反射信号相对于直射信号总的延迟路径为

$$\rho_{\rm E} = P_{\rm 1} + P \tag{1}$$

根据几何光学原理,可得

$$P_1 + P = 2h\cos(\pi/2 - \alpha) \tag{2}$$

式中:h 为反射信号接收天线到反射面的高度;α 为 反射点到某颗卫星的俯仰角;P 为直射信号在卫星 与接收天线之间的几何距离。精确测量出直射和反 射信号的传播几何路径差,即可获得观测到的 h 为

$$h = \rho_{\rm E} / (2\sin\alpha) \tag{3}$$

2 硬件设计

微小型 GNSS-R 探测仪采用新一代的集成芯 片技术和软件无线电技术,硬件技术指标如下。

- 1) 上视天线:3 dB;
- 2) 上视天线波束宽度:120°;
- 3) 下视天线:12 dB;
- 4) 下视天线波束宽度:40°;
- 5)质量:<2 kg;
- 6)功耗:<13 W。

天线的辐射方向如图 3 所示,实验设备如图 4 所示。



图 3 天线辐射方向图 Fig.3 Radiation pattern of the antenna



图 4 GNSS-R 探测设备 Fig.4 GNSS-R remote sensor

3 软件算法

GNSS-R测高仪的探测原理是,利用反射信号 滞后于直射信号的延迟时间来进行反射面高度探 测。星载 GNSS-R测高仪的理想探测指标是:测高 精度为 5 cm,空间分辨率为 100 km,时间分辨率为 2 d。岸基、机载的 GNSS-R 测高仪通常可以达到 cm级的探测精度,而星载 GNSS-R 测高仪的探测 精度却受多种因素限制,得到的 DDM 曲线信噪比 会降低、曲线会非常平滑,不利于寻找精确的镜面反 射点。

通常获取反射信号 DDM 曲线有 Clean replica 和干涉式(Interferometric)两种相关处理算法。其 中,干涉式相关算法利用的是全码互相关,即将导航 卫星上面调制的 CA 码、P 码、M 码全部进行混合相 关,具体操作是直接在反射信号与直射信号进行互 相关操作,由于直射信号和反射信号是同源信号,所 以可得到全码互相关曲线。值得注意的是,全码互 相关时,噪声也进行了互相关,所以得到的 DDM 曲 线的噪底会比较大,信噪比稍微比 Clean replica 算 法略低,这也正是采用干涉式互相关算法时通常会 使用高增益天线(>20 dB)的原因。但由于其互相 关曲线包含了 P、M 码等高速码的自相关信息,其互 相关曲线具有更尖锐的尖峰,曲线斜率也较大,峰值 部分宽度也较窄,更利于寻找精确的镜面反射点位 置,所以反演可得到更高的精度。因此,在星载环境 下,使用干涉式相关算法要比传统的 Clean replica 算法能获得更高的精度。

3.1 Clean replica 算法

Clean replica 算法是传统的 GNSS-R 相关处理 算法,其将接收到的反射信号和本地生成的 CA 码 或者民用 P 码进行相干积分、非相干累加,即利用 了伪随机码的自相关和互相关原理。相关原理如图 5 所示,CA 码的自相关函数如图 6 所示。



图 5 Clean replica 算法的自相关软件结构 Fig.5 Software structure of self-correlation with Clean replica

3.2 干涉式算法

干涉式相关算法是将反射信号与直射信号直接进 行互相关运算,相关曲线结果包含了 CA 码、P 码、M 码 的相关特性信息。相关原理如图 7 所示,从图 7 可以 看出,全码互相关得到的曲线具有更尖锐的尖峰。全 码互相关函数及全码反射信号功率谱如图 8 所示。

4 实验开展及数据处理

岸基 GNSS-R 实验地点为上海市滴水湖景区, 两副天线搭载在高为5m的支撑杆上,上视天线对 天放置,下视天线照射水面,实验设备放置方式如图 9所示。



图 6 CA 码的自相关函数





图 7 全码互相关软件结构

Fig.7 Software structure of cross correlation with direct signal





图 10 是北斗 GEO 01 号星的直射信号相关值。 横轴为 CA 码的码相位,纵轴为相关值,可以看到出 现了相关峰,并大于监测阈值,可以对该卫星信号进 行跟踪。

GNSS-R 接收机均采用直射信号开环控制反射 信号的形式对反射信号进行 DDM 映射,即捕获跟 踪到直射信号的观测量时,根据几何关系,计算反射 信号的码延迟和多普勒频偏。图 11 是北斗 GEO 01 号星的反射信号与本地 CA 码进行 1 ms 相干积 分得到的波形。图 12 是直射信号、反射信号分别与 本地 CA 码进行 1 ms 相干积分、0.5 s 非相干积分 得到的波形。可以看出:1)反射信号的功率明显比



图 9 实验地点及设备放置 Fig.9 Experiment location and the placement of instrument at Dishui Lake



图 10 直射信号相关值

Fig.10 Direct signal correlation value



CA 码进行 1 ms 相干积分图

Fig.11 DDM of reflected signal of BD GEO 01 with located CA code @1 ms coherent

直射信号低;2)非相干积分能够提高功率谱的信噪 比;3)由于风速较低,湖面较平静,反射信号的功率 谱散射并不剧烈。图 13 是直射信号与反射信号进 行干涉式互相关的波形,可以看出由于接收机的 BD通道带宽只有4 MHz,并没有完全接收到 BD 的 P码,所以该波形的形状并不准确,但同样可看出反 射信号滞后于直射信号的时间。



- 图 12 北斗 GEO 01 号星的反射信号与本地 CA 码进行 1 ms 相干积分、0.5 s 非相干积分图
- Fig.12 DDM of reflected signal of BD GEO 01 with located CA code @1 ms coherent, 0.5 s incoherent



- 图 13 北斗 GEO 01 号星的直射信号与反射信号 进行干涉式互相关的波形
- Fig.13 Full code DDM of direct signal with reflected signal of BD GEO 01

图 14 是 GPS 05 号星的直射信号、反射信号分 别与本地 CA 码进行 1 ms 的相干积分、0.5 s 的非 相干积分得到的波形,图 15 是直射信号与反射信号 进行干涉式互相关的波形,由于接收机的 GPS 通道 带宽只有 2 MHz,并没有完全接收到 GPS 的 P 码、 M码,所以该波形的形状并不准确,但同样可以看 出反射信号滞后于直射信号的时间。



- 图 14 GPS 05 号星的直射信号、反射信号与本地 CA 码 进行 1 ms 的相干积分、0.5 s 的非相干积分图
- Fig. 14 DDM of direct signal and reflected signal of GPS 05 with located CA code @1 ms coherent, 0.5 s incoherent

根据测风仪测量,此时风速为1.008 m/s,根据 超声波雷达的测量数据,超声波雷达与湖面之间的 垂直平均距离为0.925 m,所以天线距离水面的 真实高度应为5.925 m,根据曲线平滑算法,对多普勒频偏为0 Hz时的一维时延反射功率谱进行曲线 拟合,再根据最大倒数点法(DER)、峰值半功率法 (HALF)^[9]得到镜点的位置,如图 16 所示。

不同卫星的反演数据结果如表 1 所示,直射滞后 于反射信号的时间的估计值 Δρ=2h sin θ 以 50 s 的数 据为样本,对两种镜点跟踪方法进行反演精度计算。



- 图 15 GPS 05 号星的直射信号与反射信号 进行干涉式互相关的波形
- Fig.15 Full code DDM of direct signal with reflected signal of GPS 05



图 16 镜点位置 Fig.16 Specular point location

卫星号	高度角/(°)	跟踪方法	测高误差/cm
BD GEO 01	49	DER	1.5
		HALF	1.8
BD MEO 13	49	DER	2.5
		HALF	3.4
GPS 06	53	DER	4.6
		HALF	5.2
GPS 19	67	DER	4.3
		HALF	5.1

表1 不同卫星的反演数据结果

 Tab.1
 Retrieval data results of different satellites

从表1可以看出,有的卫星的反演结果测高误 差(方差)较小,但有的卫星反演结果方差较大,分析 原因有可能是因为接收机的定位精度不够准确,或 者风速太小导致散射效应不明显,也有可能受到电 离层等环境的误差因素影响,后续可利用宽带接收 机对数字中频信号进行采集,对干涉式算法进行性 能验证,提高反演结果的精度。

5 结束语

本文介绍了 GNSS-R 测高原理、自行研制的微 小型 GNSS-R 测高仪硬件设计方案、相关软件算 法(Clean replica 算法、Interferometric 算法)、地基 实验开展、反演算法(DER、HALF)、测高精度评 估、后续改进思路等,实现了测高仪的地基实验测 高精度的评估,测高误差小于 5.1 cm。从反演结 果来看,有的卫星测高误差较小,有的卫星测高误 差较大,原因可能是北斗卫星码速较高,导致测高 误差较小。由于风速较小,滴水湖的湖面较为平 静,预计测高误差应小于2 cm,而实验结果并没有 达到预期目标,原因可能是接收机采用的是单频 定位,精度不够准确,也可能是受电离层等环境的 误差因素影响,后续可研制宽带 GNSS-R 测高仪 (30 MHz频宽),对全码信号进行采样,利用干涉 式算法进行载荷的测高精度验证并在多平台(如 机载、热气球)进行数字采集,分析环境因素对测 高精度的影响,进而结合实测数据统计特征,建立 测高精度仿真模型^[10],对仿真和实测数据的测高 精度进行对比,进而对 GNSS-R 测高仪在星载环 境下的工作性能进行评估。

参考文献

- MARTÍN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry[J]. ESA Journal, 1993, 17(4): 331-355.
- [2] UNWIN M, GLEASON S, BRENNAN M. The space GPS reflectometry experiment on the UK disaster monitoring constellation satellite [C]//Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2003: 2656-2663.
- [3] MARTÍN-NEIRA M, D'ADDIO S, BUCK C, et al. The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 2209-2237.
- [4] WICKERT, J, CARDELLACH E, MARTÍN-NEI-RA 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.

- [5] ROSE R, WELLS W, REDFERN J, et al. NASA's cyclone global navigation satellite system (CYGNSS) mission: Temporal resolution of a constellation enabled by micro-satellite technology [C]//27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, August 10-15, 2013, Utah State University, Logan, UT, USA.
- [6] UNWIN M, JALES P, BLUNT P, et al. The SGR-ReSI and its application for GNSS reflectometry on the NASA EV-2 CYGNSS mission [C]//Aerospace Conference, IEEE, 2013, Big Sky, MT, USA. 13517422.
- [7] HU C, BENSON C, RIZOS C, et al. Single-pass sub-meter space-based GNSS-R ice altimetry: results from TDS-1[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(8): 3782-3788.
- [8] 李伟强,杨东凯,李明里,等.面向遥感的 GNSS 反 射信号接收处理系统及实验[J].武汉大学学报(信息 科学版),2011,36(10):1204-1208.
- [9] MASHBURN J, AXELRAD P, T. LOWE S, et al. An assessment of the precision and accuracy of altimetry retrievals for aMonterey bay GNSS-R experiment
 [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9 (10): 4660-4668.
- [10] SEMMLING A M, LEISTER V, SAYNISCH J, et al. A phase-altimetric simulator: studying the sensitivity of Earth-reflected GNSS signals to ocean topography[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(11): 6791-6802.