

北斗反射信号海风海浪反演系统与试验

杨东凯^① 王翔宇^① 刘建华^② 王峰^{*①}

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

^②(胜利油田安全环保督查中心 东营 257000)

摘要: 该文设计并实现了一种小型低功耗的北斗反射信号海风海浪反演系统, 针对反演精度受卫星高度角影响较大的问题, 提出高度角正弦值幂指数修正方法, 且为降低风速突变对风速反演的影响, 对风速反演模型进行了延时修正, 有效提高了有效波高和风速的反演精度。为了进一步提高反演精度, 提出多星联合观测和单边滤波的方法。北斗反射信号海风海浪探测试验结果表明: 设计和实现的反演系统具备长期稳定运行和观测的性能; 提出的反演模型和精度提升方法可以有效提高反演精度, 有效波高和风速反演精度分别可达0.14 m和1.28 m/s, 相比于Soulat等人提出的反演模型, 分别提高了0.13 m和0.78 m/s。

关键词: 北斗反射信号; 海风海浪反演; 高度角修正; 多星观测; 单边滤波

中图分类号: TN967.1; P237

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0317-07

DOI: 10.11999/JEIT180397

BeiDou-reflectometry Sea Wind and Wave Retrieval System and Experiment

YANG Dongkai^① WANG Xiangyu^① LIU Jianhua^② WANG Feng^①

^①(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

^②(Safety and Environmental Supervision Center, Shengli Oil Field, Dongying 257000, China)

Abstract: A low power and cost BeiDou-reflectometry used to retrieve Significant Wave Height (SWH) and wind is designed and implemented. To improve the retrieval accuracy, a correction method based on the power function of the elevation angle sinusoidal and a delay correlation for the rapid change of wind speed is proposed. Moreover, combined observation of multi-satellite signals and single-side filtering for the observable are performed to improve further the retrieval accuracy. The experiment results of observing SWH and wind speed using reflected BeiDou signals show that designed and developed system could implement long-term and stable observation; the retrieval accuracies of SWH and wind speed retrieved by proposed retrieval models and improvement methods of the retrieval accuracy are 0.13 m and 1.28 m/s which are 0.13 m and 0.78 m/s higher than the methods proposed by Soulat et al.

Key words: Reflected BeiDou signals; Wind speed and Significant Wave Height (SWH) retrieval; Correction of elevation angle; Multi-satellites observation; Single-side filtering

1 引言

海洋面积约占地球的3/4, 是地球环境的重要组成部分之一。实时有效地获得海洋环境数据, 对海洋环境管理、资源保护、灾害监测、海上生产作业和海洋军事等活动非常必要。近年来, 随着全球卫

星导航系统(Global Navigation Satellite System; GNSS)的发展, 利用海面散射的导航卫星信号进行遥感成为新的研究热点。1993年, 欧空局Martin-Neria首次提出PARIS概念, 对GPS海面测高进行了系统描述^[1]。随后多国研究机构陆续开展相关研究, 并在海面风浪^[2,3]、海冰^[4]、海盐^[5]、土壤湿度^[6]等探测领域取得了诸多成果。相比于雷达、散射计等传统遥感手段, GNSS-R技术可通过无源方式实现地表参数的低功耗、低成本探测, 尤其适合搭载于功耗与载荷能力受限的微纳卫星和无人机等平台。

海面状态作为导航卫星反射信号在遥感领域的重要研究方向之一, 其理论与实践探索在不断

收稿日期: 2018-04-27; 改回日期: 2018-09-10; 网络出版: 2018-09-21

*通信作者: 王峰 wangf.19@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41774028), 国家重点研发计划(2017YFB050802)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41774028), The National Key Research and Development Plan (2017YFB050802)

地向前发展。美国兰利研究中心于1996年研制了实时输出GPS(Global Positioning System)反射信号相干值的专用接收机,并通过机载平台首次论证了GPS信号探测海风海浪的可能性^[7],但其采用的相关功率法在低高度接收平台中效果不明显。Soulat等人^[8]针对岸基平台接收的GNSS反射信号的相关时间对波高敏感的特性,提出了干涉复数场(Interferometric Complex Field, ICF)自相关法,并于巴塞罗那港口实现了岸基有效波高的测量。近年来,利用干涉^[9]及相关功率波形^[10]的特征参数进行海洋遥感的理论相继被提出,进一步丰富了海面风浪的反演方法。但由于GPS卫星相对于接收机处在时刻运动的状态,其不断变化的仰角、方位角等几何参数会对反射信号产生较大的影响,降低信号与海洋参数间的相关性^[11]。随着我国北斗导航系统的发展,基于北斗卫星反射信号的研究同样取得了大量成果。与其他GNSS卫星相比,北斗系统的GEO卫星在岸基条件下能够提供卫星-镜面反射点-接收机三者的稳定几何关系,从而消除了因卫星位置变化而带来的反演误差,因此通常采用GEO单独观测的方式进行海面风浪反演^[12,13]。但该方法未能从根本上解决卫星的高度角变化问题,且限定了天线的朝向,在GEO信号效果不好或覆盖不到的地区无法应用。

本文提出了一种高度角修正方法,并在此基础上论证了多星联合观测的可行性。该方法减小了卫星高度角变化对反演结果的影响,使系统既可通过北斗系统特有的GEO卫星实现无间断的连续观测,又可利用反射可见区内的MEO, IGSO卫星进行联合反演以减小噪声误差,充分利用了北斗多轨道体制的优势。在海风反演方面,风速大小并不会直接影响到反射信号特征,以往反演中通常采用与海浪类似的处理手段建立风速反演模型^[13],但该方法

受风浪间的相关性影响较大。本文依据海面风浪的变化特点,提出海风延迟拟合模型,通过牺牲一定的时效性提高风速反演精度,并在风浪反演前加入了数据平滑预处理,以进一步减小噪声的影响。在导航卫星反射信号实时接收处理方面,虽然各研究机构均有各自的硬件处理平台,但存在实地装配不便、供电困难以及无法实时传输反演数据等问题。本文设计并研制了一种小型低功耗海风海浪反演系统,实现了信号的采集、处理、反演一体化,并依据实际需求在交流供电和有线传输的基础上,增加了直流供电模块和无线通信模块,使该系统不仅能够支持太阳能供电方式,满足野外环境中长期无人探测的要求,也为气球、无人机等电瓶供电为主的多种平台搭载提供了可能。试验结果表明设计和研制的北斗反射信号处理平台可长期稳定运行,且提出的反演算法的有效波高和风速反演精度可达0.14 m和1.28 m/s,相比于Soulat等人提出的反比例模型分别提高了0.13 m和0.78 m/s。

2 反演系统构成

北斗反射信号海风海浪反演系统整体框架如图1所示,主要包括接收天线、射频前端、基带处理模块、反演模块、数据分析平台等部分。

系统通过右、左旋天线分别接收卫星的直射信号与海面反射信号,并由射频前端对信号进行采样量化,得到16.368 MHz采样和2 bit量化的数字中频信号。基带信号处理模块采用DSP+FPGA混合架构对数字中频信号进行处理,实现北斗直射信号的捕获、跟踪及定位,同时将反射信号与本地多路复制信号进行相关运算得到不同时延下的复数相关值。基带信号处理流程如图2, FPGA完成本地载波及伪码生成、直射和反射信号相关运算、数据传输等功能; DSP实现直射信号捕获、跟踪控制、定

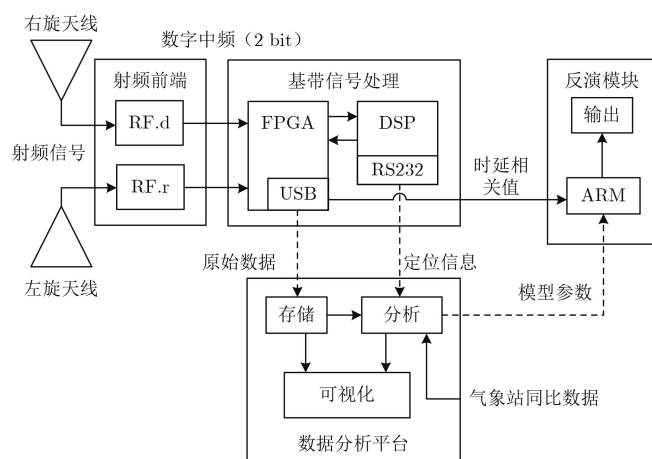


图1 系统整体框架

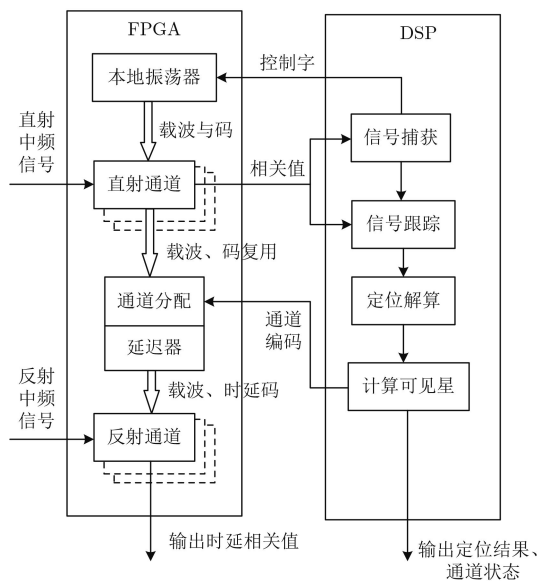


图2 基带信号处理流程

位解算以及反射通道可见星选择等。相关运算模块包含直、反两个通道，其中直射通道32路，能够同时对32颗卫星的直射信号进行超前-即时-滞后6路

相关运算；反射通道共6路，通过接收DSP发送的卫星信息动态分配观测区域内的反射信号进行多路相关处理得到不同时延的复数相关值。此外，FPGA中的数字控制振荡器和移位寄存器通过接收DSP发送的卫星信息和控制字产生不同频率的载波和码。

反演模块依据数据分析平台提供的风浪反演模型，利用复数相关值反演海风海浪，并通过RJ45端口或无线传输模块将反演结果实时传输给用户端。为了降低系统功耗和便于系统集成，系统增加了低功耗ARM板卡的反演模块，并将其与射频前端、基带处理模块一起集成在防水机箱中。同时，系统支持两种供电模式，即220 V交流和36 V直流供电模式，便于使用野外太阳能或电瓶供电方式，有效解决了野外装配中220 V交流供电困难的问题，提高了系统应用的便捷性。如表1所示，相比于国内外典型GNSS反射信号接收机，本文设计和研制的系统在输出相同观测量的同时，体积、功耗均大幅降低，并且在供电方式和反演模块的选择上具备便捷性和灵活性，便于应用在野外场景。

表1 接收机参数表

设备名称	尺寸(cm)	功耗(W)	工作电压(V)	反演模块	输出结果
GOLD-RTR ^[14]	48×48×36	50	220	-	相关波形
GRrSv.2 ^[15]	48×48×18	50	220	-	相关波形
Oceanpal ^[16]	48×48×18	100	100~240	PC机	相关波形、风浪值
本文反演系统	24×24×18	10	36, 220	ARM, PC机	相关波形、风浪值

3 试验论证与算法分析

3.1 试验场景

为了验证系统实时处理北斗导航直射和反射信号的功能以及建立更精确的反演模型，2017年12月，课题组在山东省东营市开展了北斗反射信号海风海浪反演的岸基试验。试验地点选在东营市胜利油田5万吨油轮码头(119.0657°E, 38.15410°N)，距海岸线约7 km，陆地风场对海风影响较小。图3为试验过程中天线架设情况和基于PC机的监测平台，其中天线朝向的方位角和视场角分别约为225°和45°，距海面高度约30 m。本次试验持续5天，累计获得2091组测量间隔为1 min的复数相关值数据以及附近气象站的海面有效波高和风速同比数据。此次试验一方面通过间隔重启和连续运行两种模式初步验证了系统的可靠性和连续性；另一方面，为建立更精确的反演模型提供了数据。

3.2 基础反演模型

3.2.1 有效波高反演模型

海浪的变化反映了海面粗糙度的变化。随着海

面粗糙度的增加，GNSS反射信号的相关性下降。因此，可以通过GNSS反射信号的相关性观测海浪的变化。通常，GNSS反射信号的相关性用相关时间表征^[17]，即

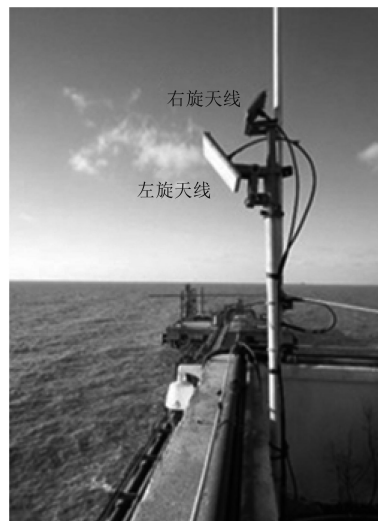


图3 试验期间天线架设情况

$$\tau_F = \frac{\int_0^{+\infty} R_r(\tau) d\tau}{R_r(0)} \quad (1)$$

其中, $R_r(\tau)$ 为GNSS反射信号复数相关值自相关函数。在计算自相关函数时,为了消除导航电文以及传播路径等与海面无关因素对反射信号的影响,反射信号的复数相关值通过直射信号复数相关值进行归一化处理。Soulat等人^[8]基于海面高度服从高斯分布的假设理论推导出了呈高斯分布的GNSS反射信号复数相关值自相关函数,且反射信号相关时间与海面有效波高、海表面相关时间、卫星高度角以及GNSS信号波长存在式(2)的关系:

$$\tau_F = \frac{\tau_z}{2k\delta_c \sin \theta} = \frac{\lambda}{\pi \sin \theta} \frac{\tau_z}{SWH} \quad (2)$$

其中, SWH为有效波高、 θ 为卫星高度角; τ_z 为海表面相关时间,可以经验的近似为有效波高的线性函数; λ 为GNSS信号载波波长, δ_c 为表面高度的标准差。由于近海海域环境较为复杂,海表面并非完全服从高斯分布,有效波高与相关时间、高度角正弦值并不满足标准的反比例关系,且未知的海表面相关时间为有效波高的线性近似,因此无法直接利用式(1)反演有效波高,一般通过建立经验模型进行海面参数的测量。文献^[18]利用Oceanpal的试验数据建立了有效波高和相关时间的2阶多项式模型,其中,为了减小卫星高度角对反演结果的影响,参考式(1)对相关时间进行了高度角正弦值的1阶线性修正。但是,如上所述,由于海表面通常为非高斯的,相关时间和高度角正弦值并不满足反比例关系,即不能通过高度角正弦值对相关时间进行线性修正。北斗GEO在岸基情况下提供了稳定的观测几何,在建立经验模型时,可以忽略卫星高度角的影响,有效地提高反演精度^[12]。但利用GEO信号进行反演对观测区域提出了要求,且无法充分利用观测区域内的所有卫星信号进行联合观测提高反演精度。因此,对卫星高度角进行更精确

的修正是建立高精度反演模型的关键。本文建立了相关时间和有效波高的幂函数模型,在此基础上,引入高度角正弦值的幂函数修正因子:

$$SWH(t) = a\tau_F^b(t) \sin^c \theta(t) \quad (3)$$

其中, a , b 和 c 为经验模型的待定系数。通过本次试验数据验证,对相关时间及高度角正弦值加入幂指数参数后能更好地描述岸基下海浪复杂的变化过程,且更好地修正了高度角对反演结果的影响。图4分别给出了训练集和测试集数据的拟合和反演结果,其中利用式(3)对训练集数据进行回归拟合得 a , b 和 c 分别为261, -1.577和-0.7988,利用测试集反演的有效波高均方误差为0.21 m。用相同的训练集和测试集对式(2)直接回归拟合和测试,得到反演均方根误差达0.27 m。相比于式(2)的模型,本文提出的经验模型在反演精度上提高了0.06 m,具有更好的高度角修正效果。

3.2.2 风速反演模型

作为海浪主要成因之一,通常情况下海面风速与浪高存在着较强的相关性。因此类似于有效波高的测量,可以通过建立GNSS反射信号的相关时间与风速的经验模型进行风速反演^[18]。但需要指出的是海岸线和海床等的反射作用以及陆面风场的影响使得近海岸海面风速和有效波高的相关性下降,即近海岸风速和有效波高的相关性具有区域性,因此在利用GNSS反射信号进行海面风速测量时,首先需要确定观测区域的风速与有效波高或GNSS反射信号相关时间具有强相关性。这是利用GNSS反射信号相关时间观测海面风速的一种局限。图5为试验地点附近气象站实测的最大值归一化的有效波高和风速的散点图和趋势图。从图中可看出海面风速与浪高变化趋势基本一致,在试验观测区域内,可以利用GNSS反射信号相关时间测量风速。

在海洋运动中,海浪对海风的响应通常存在滞后性,尤其在风速突变的情况下。如图5中的A和

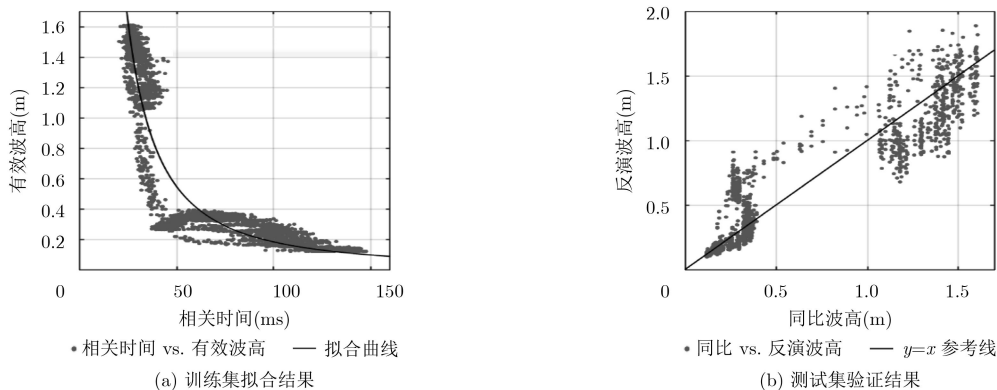


图4 幂指数模型海浪反演结果

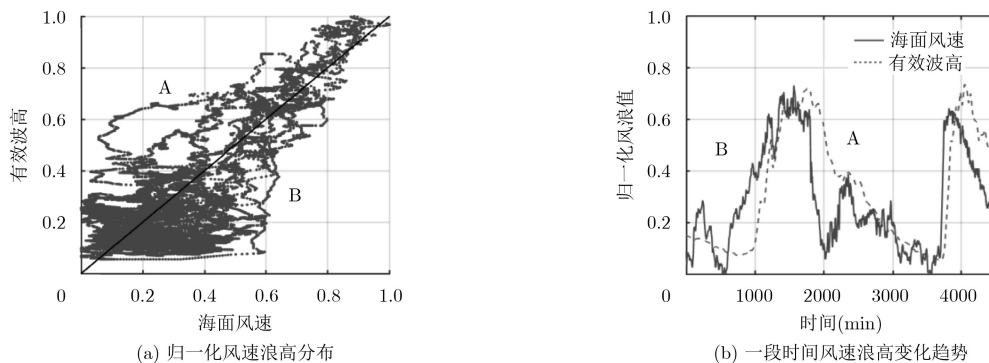


图5 12月份东营港风浪归一化数值及变化曲线

B处，海风下降和上升速度明显快于海浪下降和上升速度。为了能更好地利用GNSS反射信号相关时间反演风速，可以在有效波高反演模型的基础上加入延迟参数 δ 建立风速反演模型：

$$w_s(t) = a' \tau_F^{b'} (t + \delta) \sin^c \theta (t) \quad (4)$$

如图6所示为训练集和测试集的拟合和反演结果，利用训练集数据对式(4)进行最优化处理得 $\delta=50$ min时，具有最佳结果，相应的 a' 、 b' 和 c' 分别为849.2、-1.339、-0.9011。利用测试集反演的风

速的均方根误差为1.43 m/s，相比未延迟修正的反演误差提高了0.49 m/s。值得注意的是尽管对海风反演进行延迟修正有效解决了风速突变情况下反演误差过大的问题，但丧失了一定的反演时效性。

3.3 算法优化

3.3.1 多星联合观测

如图7所示，试验期间任一时刻在同一反射天线视场内均至少有两颗可见星信号。在岸基条件下天线视场内的海面参数可以认为是统一的，因此可通过多颗卫星信号联合观测提高海面风速和有效波

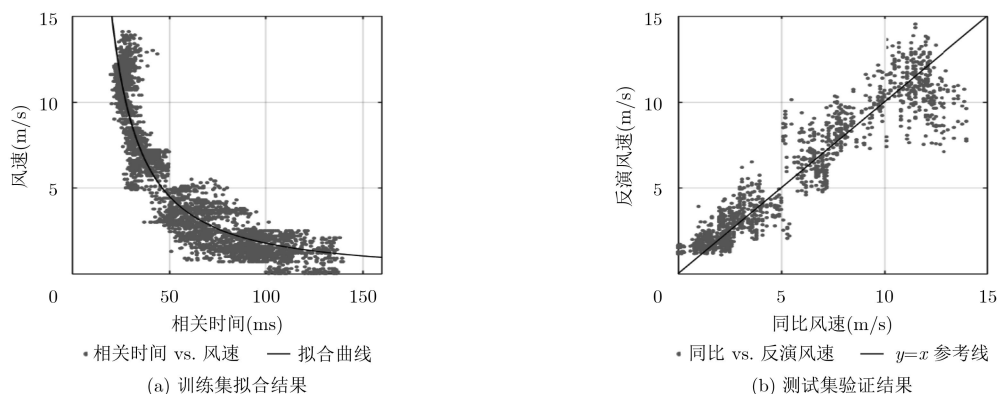


图6 延迟幂指数模型海风反演结果

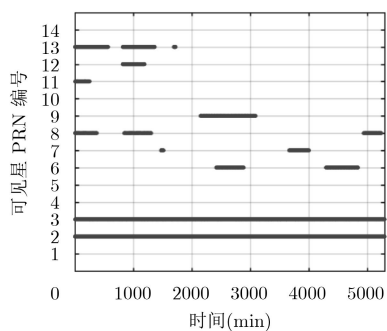


图7 试验期间北斗反射可见星分布

高的反演精度。

假设测量误差服从高斯分布，且多颗卫星的观

测相互独立，则可以通过对多颗卫星的观测结果进行平均来减小反演误差，即反演模型式(3)和式(4)变为

$$\left. \begin{aligned} SWH(t) &= \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^{n(t)} a \tau_{F,i}^b(t) \sin^c \theta_i(t) \\ w_s(t) &= \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^{n(t)} a' \tau_{F,i}^{b'}(t + \delta) \sin^c \theta_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， $n(t)$ 为 t 时刻下目标区域内所有反射可见星数目， $\tau_{F,i}$ 、 θ_i 分别为第 i 颗卫星所对应的反射信号相关时间及高度角。利用3.2节的训练集和测试集对式(5)所示的经验模型进行训练和测试得 $a=254.1$ ，

$b=-1.57$, $c=-0.7876$, 相应的有效波高均方根误差为0.19 m, $a'=880.3$, $b'=-1.352$, $c'=-0.9275$, 反演风速的均方根误差为1.36 m/s。与单星反演结果相比, 综合多颗卫星数据进行反演减少了噪声等因素带来的误差, 提高了系统精度与稳定度, 有效波高和风速反演精度分别提高了0.02 m和0.07 m/s。

3.3.2 单边邻域滤波

在实际测量中, 以1 min的反射信号复数相关值计算的信号相关时间受到噪声等因素的影响而呈现较大的波动, 但是相比之下风浪数据的变化则较为平缓, 即风浪变化在时间上有较强的近邻相关性, 当前时刻的数值与前一时刻差别不大。因此首先可采用单边邻域滤波法对反射信号相关时间序列进行预处理。

$$\tau_F^s(t) = \frac{1}{\omega + 1} \sum_{i=0}^{\omega} \tau_F(t-i) \quad (6)$$

其中, ω 为邻域窗口长度。实际环境中海浪的变化比海风变化缓慢, 海浪滤波窗口要略宽于海风的滤波窗口。在本文中, 有效波高和风速反演模型中, 窗口长度 ω 分别选择5和3。如图8, 通过单边邻域滤波, 相关时间变化曲线变得更加平滑。利用滤波后的相关时间进行有效波高和风速反演, 单星观测时, 反演的有效波高和风速均方根误差分别为0.16 m和1.30 m/s, 多星联合观测时, 相应的均方根误差为0.14 m和1.28 m/s。相比于3.2节的反演结果, 通过对相关时间进行单边邻域滤波处理, 有效波高和风速反演精度分别提高了0.07 m和0.15 m/s。

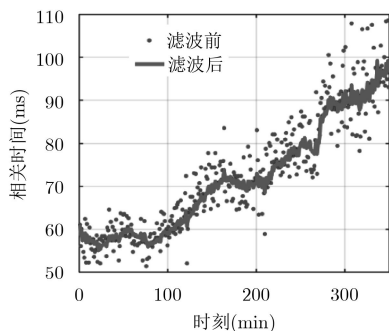


图8 邻域滤波效果

表2给出了不同反演方法的对比结果, 高度角对有效波高和风速反演均具有较大影响, 而风速通过延时修正有效提高了反演精度, 但是损失了反演的时效性。通过多星联合观测和单边邻域滤波的方法进一步提高了反演精度。相比于文献[12]提出的方法, 本文提出的经验模型的有效波高和风速反演精度提高了0.13 m, 0.78 m/s。

表2 不同反演方法对比

反演模型	优化算法	有效波高误差 (m)	风速误差 (m/s)
反比例模型	-	0.27	2.06
	-	0.21	1.43
指数模型(对风速 延时修正)	多星观测	0.19	1.36
	平滑滤波	0.16	1.30
	多星&平滑	0.14	1.28

4 结束语

本文在北斗反射信号实时处理方面, 介绍了一种小型低功耗的北斗反射信号海风海浪实时反演系统。该系统支持220 V交流和36 V直流供电模式, 增加了基于ARM的反演模块和无线传输模块, 便于野外无人值守场景的观测。在风浪反演模型方面, 提出了高度角修正的有效波高反演模型和高度角、延时修正的风速反演模型, 在此基础上提出多星联合观测和单边滤波的反演精度提升策略。为了验证反演系统的可靠性及所提算法的有效性, 在山东东营市开展了北斗反射信号海风海浪反演试验, 结果表明:

(1)北斗反射信号处理系统通过多次间隔重启和连续观测策略的测试, 具备了长期稳定观测和连续实时输出直射、反射信号复数相关值的性能。

(2)提出的高度角正弦值幂函数修正方法能够有效减小高度角对北斗反射信号相关时间的影响, 提高有效波高和风速反演精度。

(3)提出的延时修正能够解决风速突变引起的反演精度下降的问题, 提高风速反演精度。

(4)在高度角修正和延时修正的基础上, 提出的多星联合观测和单边滤波能够进一步提高有效波高和风速反演精度。

(5)通过本文提出的反演模型和精度提升方法, 有效波高和风速的反演精度可达0.14 m和1.28 m/s, 相比于Soulat等人提出的反演模型, 分别提高了0.13 m和0.78 m/s。

参考文献

- [1] MARTIN-NEIRA M. A pasive reflectometry and interferometry system (PARIS) application to ocean altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331-355.
- [2] SOISUVARN S, JELENAK Z, SAID F, et al. The GNSS reflectometry response to the ocean surface winds and waves[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4678-4699. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2602703.

- [3] XU Fei, SUN Xiechang, LIU Xinning, *et al.* The study on retrieval technique of significant wave height using airborne GNSS-R[C]. Conference of Spacecraft TT&C Technology in China, Singapore, 2016: 401–411.
- [4] ZHU Yongchao, YU Kegen, ZOU Jingui, *et al.* Sea ice detection based on differential delay-doppler maps from UK TechDemoSat-1[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1–18. doi: 10.3390/s17071614.
- [5] 王峰, 杨东凯. 星载GNSS-R辅助海洋盐度探测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(1): 108–116. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0018.
- WANG Feng and YANG Dongkai. Sea surface salinity determination method assisted by spaceborne GNSS-R[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(1): 108–116. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0018.
- [6] DU Wenying, CHEN Nengcheng, and YAN Songhua. Online soil moisture retrieval and sharing using geospatial web-enabled BDS-R service[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 354–367. doi: 10.1016/j.asr.2016.11.028.
- [7] GARRISON J L, KATZBERG S J, and HILL M I. Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the Global Positioning System[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(13): 2257–2260. doi: 10.1029/98GL51615.
- [8] SOULAT F, CAPARRINI M, GERMAIN O, *et al.* Sea state monitoring using coastal GNSS - R[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(21): 133–147. doi: 10.1029/2004GL020680.
- [9] ALONSO-ARROYO A, CAMPS A, PARK H, *et al.* Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R interference pattern technique: Results from a three-month field campaign[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(6): 3198–3209. doi: 10.1109/TGRS.2014.2371540.
- [10] WANG Feng, YANG Dongkai, LI Weiqiang, *et al.* A new retrieval method of significant wave height based on statistics of scattered BeiDou GEO signals[C]. Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+2015), Tampa, America, 2015: 3953–3957.
- [11] VALENCIA E, CAMPS A, MARCHAN-HERNANDEZ J F, *et al.* Experimental determination of the sea correlation time using GNSS-R coherent data[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 675–679. doi: 10.1109/LGRS.2010.2046135.
- [12] LI Weiqiang, FABRA F, YANG Dongkai, *et al.* Initial results of typhoon wind speed observation using coastal GNSS-R of BeiDou GEO satellite[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4720–4729. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2523126.
- [13] 公绪艳, 张凤元, 杨东凯, 等. 基于北斗卫星反射信号的海面风速探测[J]. 现代电子技术, 2017, 40(5): 5–9. doi: 10.16652/j.issn.1004-373x.2017.05.002.
- GONG Xuyan, ZHANG Fengyuan, YANG Dongkai, *et al.* Ocean surface wind speed detection based on reflected signal of Beidou satellite[J]. *Modern Electronics Technique*, 2017, 40(5): 5–9. doi: 10.16652/j.issn.1004-373x.2017.05.002.
- [14] NOGUES-CORREIG O, GALI E C, CAMPDERROS J S, *et al.* A GPS-reflections receiver that computes doppler/delay maps in real time[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 45(1): 156–174. doi: 10.1109/TGRS.2006.882257.
- [15] LI Weiqiang, YANG Dongkai, ZHANG Bo, *et al.* Real-time processing of reflected GNSS signals for remote sensing: System and experiments[J]. *The Journal of Navigation*, 2011, 64(S1): 127–140. doi: 10.1017/S0373463311000403.
- [16] Oceanpal Datasheet[OL]. <http://www.starlab.es/products/oceanpal>. 2003.
- [17] 周荫清. 随机过程理论[M]. 第3版, 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013: 64–65.
- [18] WANG Xin, SUN Qiang, ZHANG Xunxue, *et al.* First China ocean reflection experiment using coastal GNSS-R[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(7): 1117–1120.

杨东凯: 男, 1971年生, 教授, 研究方向为卫星导航信号处理及应用技术、无线传输等。

王翔宇: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为卫星导航信号及其在风浪遥感中的应用。

刘建华: 男, 1975年生, 高级工程师, 研究方向为油田安全生产管理。

王峰: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为卫星导航信号及其在海洋遥感中的应用。