

陈庆亮^{1,2} 郭业才¹ 王强³ 张晓丽⁴ 刘彬²

北斗反射信号海风探测数据分析与检定

摘要

利用导航卫星反射信号(GNSS-R)进行海风海浪探测为海洋气象提供了一种新的观测手段,数据分析及有效性检定是确定系统探测能力的重要过程.在描述北斗 GEO 卫星进行海风探测机理的基础上,利用北斗反射信号的相关时间进行了海风的反演.同时针对国家北斗应用项目“基于北斗导航卫星的大气海洋和空间监测预警应用示范工程”在山东进行试验和试运行期间产生的风速观测数据进行分析,并通过与标准数据的对比,确定了该方法的有效性.

关键词

导航卫星反射信号(GNSS-R);北斗 GEO;风速;岸基试验

中图分类号 P412.27

文献标志码 A

收稿日期 2014-12-24

资助项目 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA122402);国家自然科学基金(61171070)

作者简介

陈庆亮,男,硕士生,助理工程师,主要从事气象装备维护保障工作.sdqxql@163.com

郭业才(通信作者),男,博士,教授,主要从事智能信息处理与通信系统、大气声学与海洋学、图像技术的研究.guo-yecai@163.com

0 引言

随着全球卫星导航系统的日趋完善,导航卫星反射信号(GNSS-R)技术逐渐成为国内外的研究热点.从 1993 年 Martion-Neria 首次提出利用 GPS 散射信号进行海洋测高的定义^[1],GNSS-R 技术逐渐推广到了遥感领域,主要包括海面风场、波高、土壤湿度以及海冰探测等.

国外利用 GPS 反射信号对海风进行探测的研究较早,其中欧洲及美国在 20 世纪 90 年代中期对 GPS 散射模型、反射信号特征以及试验分析等方面做了一系列的研究.1996 年,Katzberg 等^[2]提出了一种从低轨卫星采集 GPS 散射信号用于推算电离层延迟的方法;1996—1997 年期间,NASA 开展了多次机载实验,对 GPS 反射信号的相关性进行了分析,论证了通过解析 GPS 反射信号来反演海洋信息^[3],并通过 1997 年的机载实验,得出海面 GPS 反射信号的时延相关功率波形与风速具有一定的几何关系^[4];1999 年西班牙加泰罗尼亚研究所同 NASA 在地中海联合开展了海风探测试验,并结合经验模型,取得了良好的探测结果.20 世纪 90 年代末,中国开始对 GNSS-R 技术进行研究,并在海面风场、海冰及土壤湿度领域开展了一系列的岸基及机载试验^[5-7].

2011 年 12 月 27 日,我国北斗导航系统正式开始运行,它创新性采用 GEO/IGSO/MEO 的混合星座设计,在亚太地区具有很好的覆盖能力;同时,北斗的 GEO 卫星位于地球静止轨道,其经度分别为 58.75°、80°、110.5°、140°、160°,其相对静止的特点,为 GEO 卫星、接收机与镜面反射点三者之间提供了一种稳定的几何关系,很大程度上提高了北斗反射信号探测海风的精度.

基于北斗导航卫星的海风海浪探测技术,提供了新的近海海风海浪观测手段,可在一定程度上改变长期以来我国综合气象观测系统在海上缺乏有效观测手段的状况,填补近海气象观测资料的空白.

2014 年 4 月以来,山东省气象局选取威海成山头进行北斗海风海浪探测应用示范,利用北斗反射信号进行岸基海风探测.本文首先对海风探测机理进行了介绍,着重对北斗海风探测数据进行了分析,并将其与国家海洋局成山头海洋监测站(以下简称海洋站)同比风速数据进行了对比,证明了利用北斗反射信号探测风速的有效性.

1 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

2 山东省气象局 大气探测技术保障中心,济南,250031

3 北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京,100191

4 山东省气象局,济南,250031

1 北斗反射信号海风探测方法

1.1 海风探测原理

GNSS-R 多源反射如图 1 所示,接收机通过接收天线覆盖区内多颗导航卫星的反射信号,克服了传统雷达单点测量的局限性,实现了大区域探测.由电磁波的传播基本理论可知,卫星信号经反射后,其极化特性、幅值、频率和相位均发生变化,探测系统通过分析反射信号特性变化,提取反射面的物理特性,完成遥感.

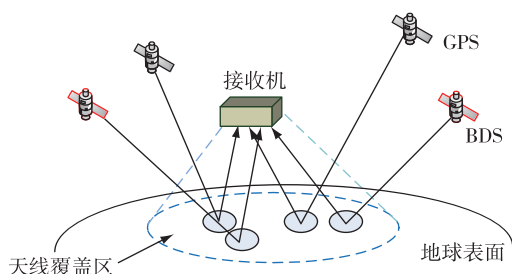


图 1 GNSS 多源反射示意

Fig. 1 Illustration of GNSS multi-source reflection

卫星信号经海面反射后,其功率、频率、相位会发生变化,根据 Z-V 模型对散射功率的描述,接收机处的反射信号功率表达式^[8]为

$$\langle |Y_R(\tau)|^2 \rangle = T_i^2 \int \frac{|R|^2 D^2(r) \Lambda^2(\tau - R_r/c) \times |S[f_d(r) - f_c]^2|}{4R_1^2(r)R_2^2(r)} \times P_{pdf} \left[-\frac{r_{\perp}}{r_z} \right] d^2r, \quad (1)$$

式中 T_i 为积分时间, R 菲涅尔反射系数, $D(r)$ 为天线覆盖区, Λ^2 决定等延迟区, R_r 为反射路径长度, c 为信号传播速度, $|S|^2$ 为多普勒区, $R_1(r)$, $R_2(r)$ 分别表示发射机、接收机到散射点 r 处的向量, $f_d(r)$ 为散射点 r 处的多普勒频率, f_c 多普勒频率补偿, P_{pdf} 为散射区表面坡度高斯密度函数, r_{\perp} 表示散射点的水平分量, r_z 表示散射点处的垂直分量.

海面风场引起海面粗糙度的变化,进而导致了海面散射信号功率的变化^[9],如图 2 所示.从图 2 中可看出在粗糙海面,随着风速的增大,海面散射信号相关功率后沿的斜率发生变化^[10],可通过 Kirchhoff 近似的几何光学得到的理论模型与实测波形相匹配,来反演海面风速.在岸基条件下,天线的覆盖区域远不足第一等延迟区(接收平台高度低导致),因此无法利用相关功率波形来计算风速,但由于较小

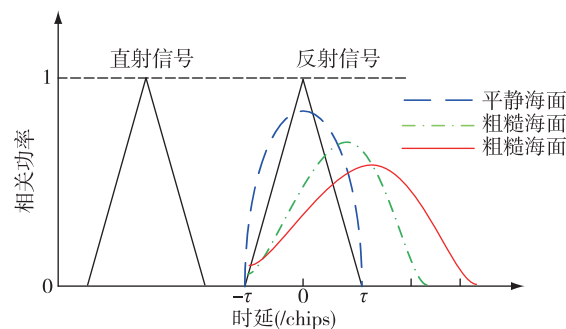


图 2 反射信号功率与海面风速的关系

Fig. 2 Relationship between reflected signals power and sea wind speed

的多普勒频移,使得反射信号的相关时间大大增长,因此通过提取反射信号的相关时间来反演海面风速^[11]成为可能.

镜面反射点处的反射信号的相关时间:

$$\tau_s = \int_0^{\infty} \frac{\langle Y_R(t_0, 0) Y_R(t_0 + \Delta t, 0) \rangle_t}{\langle Y_R(t_0, 0) Y_R(t_0, 0) \rangle_t} d\Delta t. \quad (2)$$

根据 Frasier 等提出的反射信号相关时间与风速的理论模型^[12],可得:

$$\tau_s = 3 \frac{\lambda}{U_{10}} f_{er}^{-\frac{1}{2}} \left(2.7 \frac{\rho}{U_{10}^2} \right), \quad (3)$$

其中 U_{10} 是海面 10 m 高度的风速, $f_{er}(\cdot)$ 为误差函数, ρ 为等效闪耀区.根据相关时间与风速的关系可反演出海面的风速.

1.2 北斗反射信号海风探测区分析

在岸基条件下,利用卫星探测海面风速,需要考虑卫星的移动造成海面闪耀区的变化.根据式(3)中闪耀区与相关时间的关系,相关时间会发生变化,最终导致风速反演过程中产生较大的误差.而北斗卫星导航系统中的 GEO 卫星位于地球静止轨道,其相对地球近似静止的特点,有效克服了闪耀区的移动,接收机、GEO 卫星、海面镜面反射点组成了近似稳定的几何关系.图 3 为岸基条件下,接收机、GEO 卫星与海面反射区的示意.

图 3 中,接收机天线距离海面高度为 h ,为消除反射天线接收到陆地的反射信号,反射天线与水平面的倾斜角为 θ ,天线半功率波束宽度为 β , BDS 所示为北斗的 GEO 卫星,海面镜面反射点的仰角近似不变, d 为天线覆盖区与天线平台的水平距离,天线的探测区的长轴为 r .

$$d = h \cdot \tan\left(\theta - \frac{\beta}{2}\right), \quad (4)$$

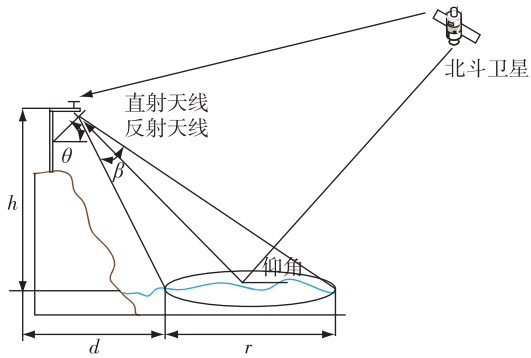


图3 岸基探测区域示意

Fig. 3 Illustration of GNSS-R coastal detection

$$r = h \cdot \tan\left(\theta + \frac{\beta}{2}\right) - d, \quad (5)$$

将(4)代入(5)得:

$$r = h \cdot \left[\tan\left(\theta + \frac{\beta}{2}\right) - \tan\left(\theta - \frac{\beta}{2}\right) \right]. \quad (6)$$

2 观测环境与设备

2014年6—10月,山东省气象局与北京航空航天大学在山东威海联合开展海风海浪探测试验,图4为探测海域及卫星分布情况。

通过对观测位置处的卫星分布情况分析,北斗GEO卫星的方位角与高度角的变化在1°左右,因此可忽略其变化所引起的反射区的变化.观测平台(122°41'49"E,37°23'23"N)距海面35 m左右,监控站与观测平台的距离为40 m。

直射天线选用右旋极化天线(RHCP),天线增益为5 dB,朝向天顶方向;反射天线采用左旋极化天线(LHCP),波束角为38°,天线增益为12 dB,其与水平面成40°夹角。

3 数据分析

2014年6月2日,北斗海风探测系统搭建完成后,开始进入运行阶段.对探测海域进行了1个月的持续试验,并将反射信号相关时间与6月海洋站观测的风速变化趋势进行比较,结果如图5所示。

根据图5中相关时间与观测风速的趋势关系,结合Frasier提出的风速反演理论模型,对反射信号相关时间和风速数据采用幂函数形式的经验模型^[11]:

$$U_{10} = a \cdot \tau_s^b, \quad (7)$$

式中a与b为经验模型的参数.对6月3日12时到6

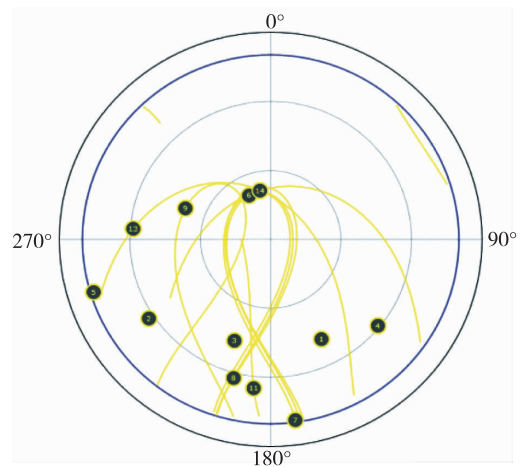
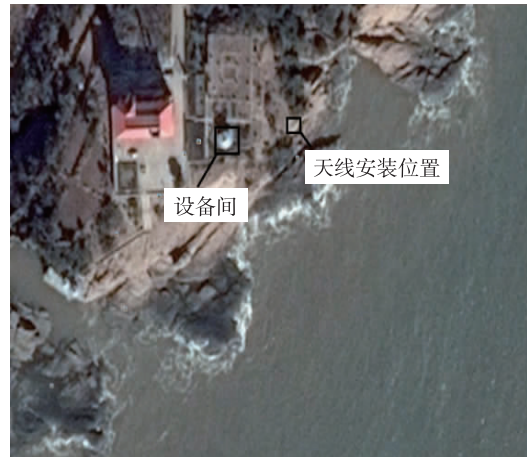


图4 探测海域及卫星分布

Fig. 4 Sea wind and wave detection area and satellites distribution

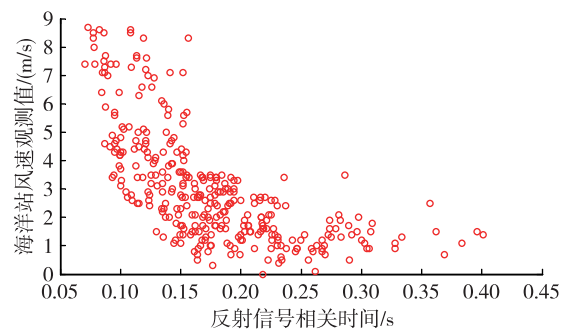


图5 6月海洋站风速观测值与反射信号相关时间对比

Fig. 5 Comparison between wind speed observed by ocean station and correlation time in June

月15日23时期间总计300 h的反射信号相关时间 τ_s 与海洋站风速观测数据进行拟合,计算得出 $a = 0.6385, b = -1.262$ 。

在试验中,将6月的数据用于建模,利用拟合出

的经验模型,本文对6月下旬至9月的数据进行了分析.6—8月的数据如图6所示.

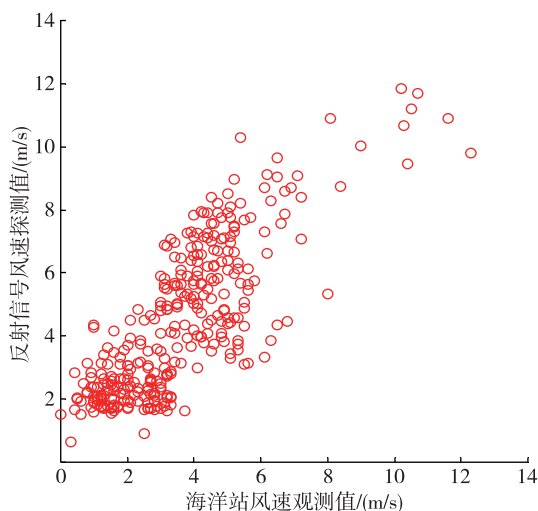


图6 6—8月反射信号风速探测值与海洋站风速观测值对比

Fig. 6 Comparison of wind speed between reflected signal inversion and ocean station observation during June to August

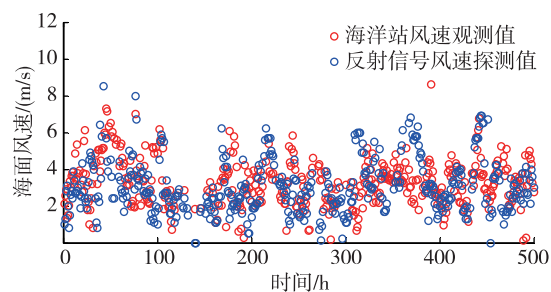
从图6中可明显看出,6—8月间利用反射信号探测的风速数据与海洋站所提供的风速数据具有很好的—致性.

9月的风速数据如图7所示.图7a为9月累计578h的风速数据观测值.从图7中可明显看出9月期间,由反射信号反演出的风速与海洋站提供的同比风速数据具有很好的—致性,对9月的数据的精度进行分析,得出风速的探测均方根误差为 ± 1.85 m/s,符合风速观测技术指标 ± 2.00 m/s.

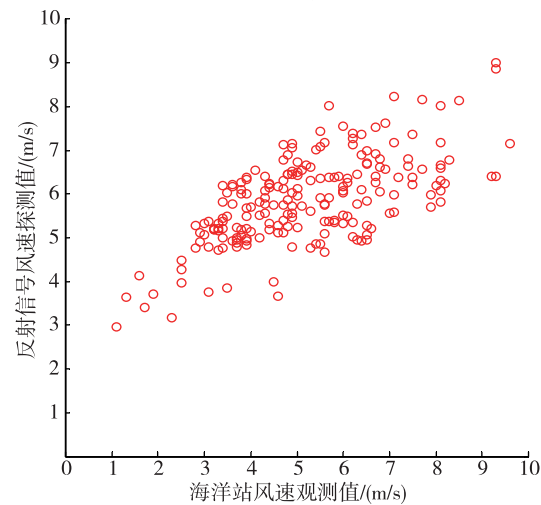
4 结论

岸基条件下探测海风的主要难点在于其复杂的海域地理环境、复杂的几何关系导致传统的理论模型无法适用于不同的海域,而北斗系统采用混合星座,其中低纬度的5颗GEO相对于地球基本处于静止状态.因此,北斗反射信号海风海浪探测系统将北斗卫星GEO卫星作为信号源,从而克服了卫星的高度角、方位角的变化,同时海面反射区域基本不变,最终接收机、镜面反射点以及卫星三者间具有稳定的几何关系,大大提高了海风探测精度.

本文首先介绍了利用北斗反射信号进行海风探测的基本原理,接着对威海海风探测试验进行了数据分析.通过对2014年6月上旬的数据进行拟合,结合Fraser提出的理论模型得出了风速探测的经验模



a. 趋势分布



b. 风速对比

图7 9月反射信号风速探测值与海洋站风速观测值

Fig. 7 Comparison of wind speed between reflected signal inversion and ocean station observation in September, with for tendency distribution, and for wind speed comparison

型.建模后,本文对6月下旬至9月的探测结果进行了分析,并将其与气象站提供的同比风速进行了比较,结果证明了利用北斗反射信号进行海风探测具有良好的可行性.

参考文献

References

- [1] Martin-Neira M.A passive reflectometry and interferometry system(PARIS)-Application to ocean altimetry [J].ESA Journal, 1993, 17(4): 331-355
- [2] Katzberg S J, Garrison J L. Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean [R]. NASA Technical Memorandum 4750, 1996
- [3] Lowe S T, Hajj G L. Detection of an ocean reflected GPS signal [C] // GPS Surface Reflections Workshop at Goddard Space Flight Center, Pasadena, CA, 1998
- [4] Verschell M A, Bourassa M A, Weissman D E, et al. Ocean model validation of the NASA scatterometer winds [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C5): 11359-11373
- [5] 张益强.基于GNSS反射信号的海面微波遥感技术

- [D]. 北京: 北京航空航天大学电子信息工程学院, 2007
- ZHANG Yiqiang. Ocean microwave remote technology based on GNSS-R[D]. Beijing: School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, 2007
- [6] 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
- LI Weiqiang, YANG Dongkai, LI Mingli, et al. Design and experiments of GNSS-R receiver system for remote sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(10): 1204-1208
- [7] 刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(11): 955-960
- LIU Jingnan, SHAO Lianjun, ZHANG Xunxie. Advances in GNSS-R studies and key technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(11): 955-960
- [8] Zavorotny V U, Voronovich A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[C] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 951-964
- [9] 杨东凯, 张其善. GNSS 反射信号处理基础与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012
- YANG Dongkai, ZHANG Qishan. GNSS reflected signal processing: Fundamentals and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2012
- [10] 周旋, 叶小敏, 于暘, 等. 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(7): 1576-1580
- ZHOU Xuan, YE Xiaomin, YU Yang, et al. Sea surface wind speed measurement using GNSS reflection signal[J]. Chinese Radio Science, 2013, 35(7): 1576-1580
- [11] 李伟强. 基于北斗 GEO 卫星反射信号的台风风速观测[C] // 第五届中国卫星导航学术年会, 2014
- LI Weiqiang. Typhoon wind speed observation based on Beidou satellite GEO reflected signals[C] // 5th Conference on China Satellite Navigation, 2014
- [12] Frasier S J, Camps A J. Dual-beam interferometry for ocean surface current vector mapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(2): 401-414

Analysis and verification of the ocean surface wind measurement detected with Beidou reflected signals

CHEN Qingliang^{1,2} GUO Yecai¹ WANG Qiang³ ZHANG Xiaoli⁴ LIU Bin²

1 School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Support Center for Atmospheric Sounding Technology, Shandong Meteorological Bureau, Ji'nan 250031

3 School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191

4 Shandong Meteorological Bureau, Ji'nan 250031

Abstract The ocean wind and wave sensing utilizing reflected signal from Global Navigation Satellite System (GNSS) provides a novel detection approach for marine meteorological observation, while the data analysis and validity verification are important to evaluate the performance of this technology. This paper introduces the sea wind detection mechanism using Beidou GEO satellites, and retrieves the sea wind based on the correlation time of the reflected signals of GEO satellite. The data collected by Beidou ocean remote sensing station of Shandong, which was set up for the demonstration of the Beidou application in oceanic, atmospheric and space monitoring and early warning program, are analyzed and compared with standard data, and the results prove the validity of the proposed method and the system.

Key words Global Navigation Satellite Signal Reflectometry (GNSS-R); BDS GEO; wind speed; coastal experiment