

GNSS-R 海面风速反演算法

高 涵 白照广 范东栋 陈趁新 边福强

(航天东方红卫星有限公司,北京,100094)

摘要: 针对目前 GNSS-R 海面风速反演方法观测量单一,精度较低的问题,提出一种基于时延多普勒相关功率图 (Delay Doppler map, DDM) 的分割多普勒波形匹配反演算法。该方法利用新的 DDM 观测量,经过训练后,可以反演海面风速。使用该算法根据给定条件建立风场反演模型,以 CYGNSS 数据作为仿真输入量。仿真结果表明,利用该方法在海面风速 20 m/s 以下,反演风速的均方根误差为 2.01 m/s,结果优于传统 GNSS-R 风速反演使用的峰值功率法和前缘坡度匹配法 (Leading edge slope matching method, LES)。

关键词: GNSS-R; 风场反演; 风速

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)S-0102-05

Retrieval Algorithm for GNSS-R Sea Surface Wind Velocity

GAO Han, BAI Zhaoguang, FAN Dongdong, CHEN Chenxin, BIAN Fuqiang

(Dongfanghong Satellite Co. Ltd., Beijing, 100094, China)

Abstract: To tackle the problem of single measurement and low precision of GNSS-R sea surface wind speed inversion method, a segmentation Doppler waveform integral matching inversion algorithm based on Delay Doppler Map (DDM) is proposed. The method utilizes a new DDM observation parameter and, after training it can invert the sea surface wind speed. The algorithm is used to establish a wind field inversion model based on the given conditions, using CYGNSS data as the simulation input. The simulation results show that the root mean square error of the inversion wind speed is 2.01 m/s at the wind speed of sea surface of 20 m/s, which is better than the peak power method and leading edge slope (LES) matching method used in the traditional GNSS-R wind speed inversion.

Key words: GNSS-R; wind velocity retrieval; wind speed

利用全球导航卫星反射信号技术 (Global navigation satellite system reflections, GNSS-R) 进行遥感探测,是近年来新兴起的遥感技术手段。该技术应用导航卫星的 L 波段信号作为遥感探测量,利用安装于地基、空基或天基平台接收 L 波段反射信号,可以用于海面风速、海冰厚度、土壤湿度等地表参数遥感。具有信号源充足,可遥感参量丰富,接收设备相对简单等特点,已成为国际研究热点。

利用 GNSS-R 信号对反射面物理特征参数进

行反演的思想最早源于 1993 年。Martin-Neira^[1]提出了利用海面反射的 GPS 信号进行测高的概念,称为“Passive Reflectometry and Interferometry System”(PARIS),指出利用多颗卫星的反射信号同时对多个散射点进行测量,可以实现高时间和高空间分辨率的观测。1998 年, Garrison 等^[2]在不同的海况条件下进行了机载试验,验证了海面散射信号携带有海面粗糙度的相关信息。文献[3]提出了一种基于时延-多普勒映射观测量与风速进行线性

收稿日期: 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

通信作者: 白照广,男,研究员,博士生导师, E-mail: baizhaoguangdfh@spacechina.com。

引用格式: 高涵,白照广,范东栋,等. GNSS-R 海面风速反演算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 102-106. GAO Han, BAI Zhaoguang, FAN Dongdong, et al. Retrieval Algorithm for GNSS-R Sea Surface Wind Velocity[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 102-106.

回归的风速反演方法。2016年,Foti等^[4]利用UK-TechDemosat-1数据进行了星载风速反演的研究,其通过DDM峰值反解双基散射系数,并与ASCAT数据对比建立了反演风速的经验模型,结果表明该模型在3~18 m/s的范围内可以获得2.2 m/s的反演精度。2016年12月,美国NASA成功部署了由8颗小卫星组成的热带风暴探测星座(Cyclone Global Navigation Satellite System, CYGNSS),开启了星载GNSS-R海面风场遥感业务化运行新时代。

国内针对GNSS-R技术的研究起步于20世纪90年代末,并在海风探测方面进行了一系列岸基^[5-6]和机载^[7-8]实验研究。对于星载GNSS-R技术,国内大多还停留在利用国外的试验数据做理论研究和试验论证的阶段,实测数据处理和实时参数反演结果较少。

本文利用Z-V模型和Elfouhaily海浪谱建立GNSS-R海面散射模型验证了DDM观测量与风速变化之间的关系,提出分割多普勒波形匹配方法,并使用该方法反演海面风速。利用飓风全球导航卫星系统(CYGNSS)数据与同化后的欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)风速数据建立风速反演经验模型,实验结果表明,在0~20 m/s的范围内风速反演均方误差为2.01 m/s,在风速小于10 m/s是均方误差为1.8 m/s,优于使用LES与峰值功率特征量反演得到的2.12 m/s和2.41 m/s的均方根误差。

1 GNSS-R海面风速反演原理

GNSS-R散射信号的相关功率是导航信号时间延迟和多普勒频移的二维函数。Zavorotny等^[9]采用Kirchhoff近似几何光学建立了GNSS海面散射模型,又称为Z-V模型,将散射信号在散射面空间域上的分布与信号时-频域分布联系起来,其表达式为

$$\langle |Y(\tau, f)|^2 \rangle = T_i^2 \iint_s \frac{D^2(\rho)}{4\pi R_t^2(\rho) R_r^2(\rho)} \times \quad (1)$$

$$\Lambda^2[\delta\tau(\rho)] \times |S[\delta f(\rho)]|^2 \sigma_0(\rho) d^2\rho$$

式中: $\langle |Y(\tau, f)|^2 \rangle$ 是相关功率, T_i 是相干积分时间(1 ms), ρ 是散射面上的散射积分单元, $D(\rho)$ 是天线增益分布, $R_t(\rho)$ 和 $R_r(\rho)$ 分别是散射点与发射机和接收机之间的距离, $\sigma_0(\rho)$ 是散射系数(直接与

风场相关)式(1)中的 Λ 和 S 分别为伪码自相关函数、多普勒频差滤波SINC函数,表达式为

$$\Lambda = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} a(t_0 + t') a(t_0 + t' + \delta\tau) dt' = \begin{cases} 1 - |\delta\tau|/\tau_c & |\delta\tau| \leq \tau_c(1 + \tau_c/T_i) \\ 0 & |\delta\tau| > \tau_c(1 + \tau_c/T_i) \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{T_i} \exp(-2\pi j \delta f t) dt \quad (3)$$

式中: τ_c 是伪码码片宽度, $\delta\tau(\rho)$ 和 $\delta f(\rho)$ 代表相关功率 $|Y(\tau, f)|^2$ 中自变量 τ, f 与积分单元 ρ 处的相对延迟和相对多普勒频移的差。

由图1,2可以看出,不同海面风速下,DDM图呈现不同分布情况,因此,可以根据不同的DDM分布来反演海面风速。

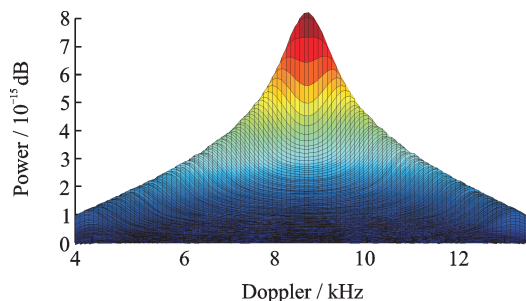


图1 2 m/s时的DDM图

Fig. 1 Schematic diagram of DDM at 2 m/s

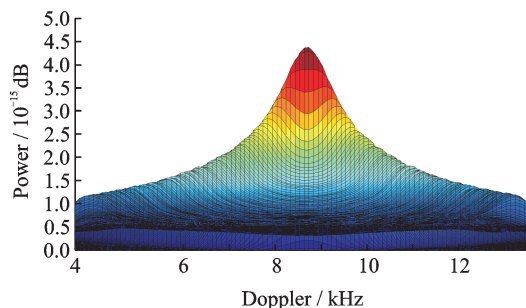


图2 3 m/s时的DDM图

Fig. 2 Schematic diagram of DDM at 3 m/s

2 分割多普勒波形匹配法反演海面风速

传统的反演方法直接波形匹配法,是将获取的DDM波形与风速对应的理论波形匹配,建立查找表进行风速反演。具体方法是将实测的波形与各种风速下的理论波形匹配比较,选取与实测波形最接近的理论波形对应的风速作为反演的风速结果。为了提高运算速度,Garrison和Katzberg等^[10]将理论模型式(1)改写为风速和时间延迟的级数形式

$$\left\langle |Y(\tau, f)|^2 \right\rangle \approx S \exp \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M a_{ij} u^i \tau^j \right) \quad (4)$$

式中: S 为比例因子; u 为海表风速; τ 为相对于镜面的时间延迟。式(4)最终近似到8阶级数, 其中系数 a_{ij} 在风速 1.75~21.75 m/s 的范围内完全拟合了模型。假定风速为固定值, 已知接收机高度与卫星, 可以使用理论模型经过最小二乘法拟合得到式(4)中比例因子 S 。

通过对式(4)观察和使用发现, 该近似并没有考虑多普勒频率影响, 因为早期的延时接收机(Delay mapping receiver, DMR)仅能将多普勒频率设为单一值。而现在的延时-多普勒接收机(Delay Doppler mapping receiver, DDMR)可以得到任意多普勒频率下的时延相关曲线。因此在多普勒域进行分段积分, 设定权重 S_D , 采用最小二乘法对风速曲线与DDM波形曲线拟合。根据式(1—3)将式(4)改写为

$$\left\langle |Y(\tau, f)|^2 \right\rangle \approx S_D \exp \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^P a_{ijk} u^i \tau^j f^k \right) \quad (5)$$

与式(4)相比, 该模型考虑了多普勒项影响, 同时采用多普勒维分段积分方法, 减少了积分运算时间, 兼顾了运算效率。

根据式(5)设定的特征量, 多普勒维分段积分的DDM数值, 设定风速反演拟合经验公式

$$v = a e^{b\chi^2} + c e^{d\chi^2} + e \quad (6)$$

式中: v 为反演风速, a, b, c, d 分别为待定拟合参数, χ^2 表示反演特征量 $\left\langle |Y(\tau, f)|^2 \right\rangle$ 的多普勒维分段积分值。

特征量表达式为

$$\chi^2(\tau, f) = \sum_1^N \int_{f_0}^{f_0 + \zeta f} \left\langle |Y(\tau, f)|^2 \right\rangle df \quad (7)$$

设定多普勒间隔为 $\zeta f = 500$ Hz, 多普勒窗 $[-8 \text{ kHz}, 8 \text{ kHz}]$, 取 $N=5$, 如图3所示, 在DDM多普勒维取 N 段功率值积分后求和, 得到特征量 χ^2 。

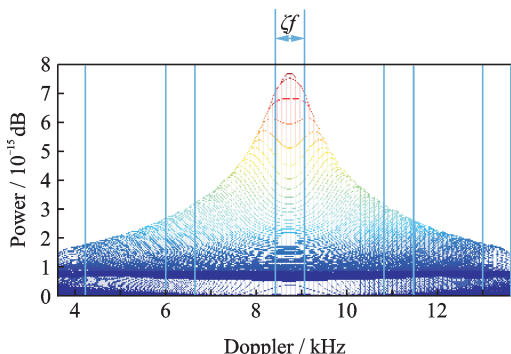


图3 分割多普勒波形匹配法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of segmentation Doppler waveform integral matching method

本文采用CYGNSS星座中第一颗卫星2017年4月22日至2017年6月1日期间L1的数据作为观测量, 并以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)融合风场数据作为真值同比验证, 以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 为风场范围标准, 匹配CYGNSS镜面反射点与EC数据经纬度, 观测时差在3 600 s之内。设定反演流程如图4所示。

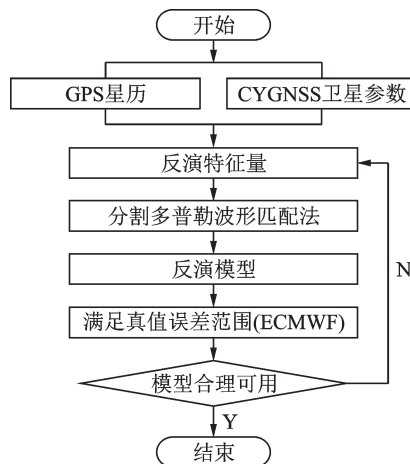


图4 风速反演流程图

Fig. 4 Flow chart of wind speed inversion

(1) 选定GPS卫星与相应CYGNSS卫星, 输入GPS星历与CYGNSS卫星参数;

(2) 提取反演特征量, 采用分割多普勒波形匹配法建立风速反演模型;

(3) 计算反演值与真值(这里采用ECMWF融合风场数据作为真值)均方误差, 选取最小均方值作为模型参数确定标准;

(4) 通过输入数据集不断迭代反演模型, 至所有数据输入结束, 选取误差最小模型参数作为该方法模型参数。

3 仿真校验

根据前文反演流程, 建立分割多普勒波形匹配反演模型, 模型经验公式为式(6), 如图5所示, 风速与特征值关系呈指数负相关。

风速反演经验公式中的待定参数用残差和最小的方法确定

$$\epsilon(a, b, c, d, e) =$$

$$\min \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left| v_{\text{res}_j}(\chi^2) - v_{\text{ECMWF}_j} \right| \right) \quad (8)$$

式中 M 表示每天反演数据总时间, 单位为s, 本文中 $M=86\,400$ s; N 表示反演训练天数, 本文中 $N=$

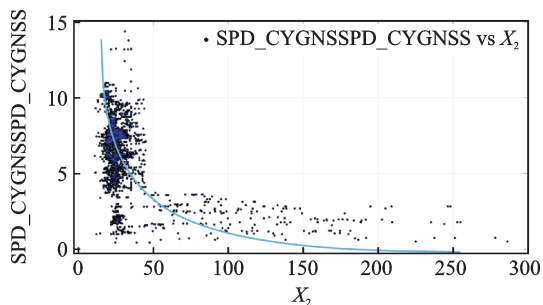


图5 风速值与特征量的关系图

Fig. 5 Relationship between wind speed and feature quantity

40; v_{res_j} 表示第 i 天 j 时刻数据反演得到风速; v_{ECMWF_j} 表示此时 ECMWF 融合风场数据, 选定所有反演结果中残差值最小时的参数作为经验公式参数。计算得到反演经验模型(6)中待定参数分别为 $a = 9.661$, $b = -0.016\ 28$, $c = 0.251\ 7$, $d = 0.007\ 028$, $e = -1.015\ 4$ 。反演结果如图6—8所示。在风速小于 10 m/s 时, 反演风速误差较小, 当风速大于 10 m/s 时, 反演风速误差增加呈发散趋势。这是因为随着风速增大, 海面粗糙度增大, 反射信号功率降低, 其对风速变化敏感性下降; 因此风速反演精度随着风速的增大而降低。

反演风速均方根误差计算公式为

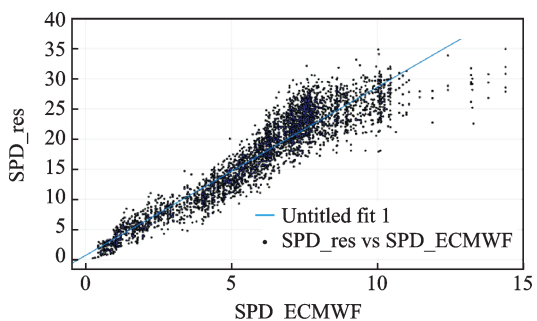


图6 分割多普勒反演值与ECMWF风速同比观测值比较结果

Fig. 6 Comparison of segmentation Doppler inversion values and ECMWF wind speed observations

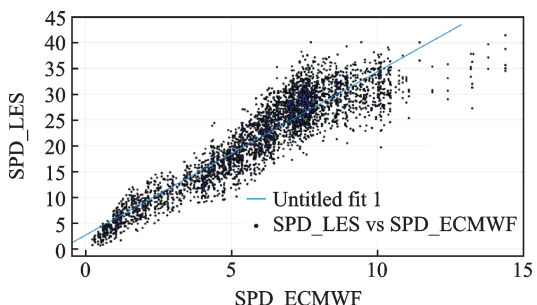


图7 LES反演值与ECMWF风速同比观测值比较结果

Fig. 7 Comparison of LES inversion values with ECMWF wind speed year-on-year observations

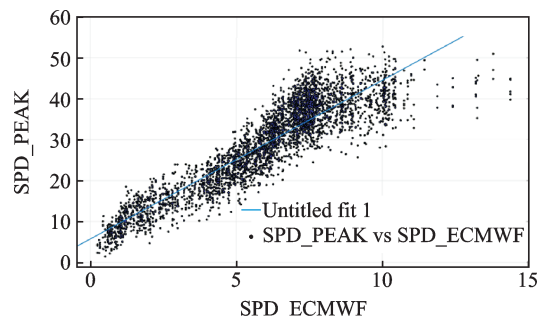


图8 功率峰值反演值与ECMWF风速同比观测值比较结果

Fig. 8 Comparison of power peak inversion values and ECMWF wind speed observations

$$\delta_{v_{res}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_{res} - v_{ECMWF})^2} \quad (9)$$

式中: n 为反演样本数量, v_{res} 和 v_{ECMWF} 分别表示 k 时刻反演值与真值, 计算得到采用分割多普勒波形匹配法反演风速的均方根误差为 2.01 m/s , 对比采用传统的峰值功率法求得的均方根误差 2.41 m/s 和 LES 方法^[10-13]求得的均方根误差 2.12 m/s , 均方误差更小, 反演结果理想。利用更多的观测数据可以进一步提高反演精度, 同时用以建立高风速段反演模型。

4 结 论

本文在仿真分析 GNSS-R 海面前向散射信号功率与风速相关的基础上, 提出了基于 GNSS-R 海面散射信号 DDM 的风速反演方法, 分割多普勒波形匹配法, 建立了风场反演模型, 采用实测数据对该方法进行了仿真实验。结果显示采用分割多普勒波形匹配法反演风速值的均方根误差为 2.01 m/s , 优于采用 LES 方法和功率峰值方法反演结果的均方误差。该反演方法相对传统方法反演精度更高, 同时方法中分段积分的方式兼顾了高计算效率和大数据量特点, 适用于星载数据处理, 为 GNSS-R 数据风场反演提供了新的方法和思路。

参考文献:

- [1] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS) application to ocean altimetry[J]. ESA Journal, 1993, 17(4): 331-355.
- [2] GARRISON J L, KATZBERG S J, 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.

- [3] RODRIGUEZ A N, AKOS D M, ZAVOROTNY V U, et al. Airborne GNSS-R wind retrievals using delay-Doppler maps[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 51(1): 626-641.
- [4] 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.
- [5] 杨东凯, 李伟强, 杨威. 北斗系统在海风海浪探测中的应用研究[J]. 导航定位学报, 2014, 2(2): 97-101.
YANG Dongkai, LI Weiqiang, YANG Wei. Research on BDS applications in sea wind and wave detection [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 2(2): 97-101.
- [6] LI W Q, YANG D K, FABRA F, et al. Typhoon wind speed observation utilizing reflected signals from Beidou Geo satellites[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC). Nanjing: [s. n.], 2014: 191-200.
- [7] JING Y, CHENG N, YANG X, et al. Retrieval of sea surface winds under hurricane conditions from GNSS-R observations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(9): 91-97.
- [8] YANG D K, ZHANG Y Q, LU Y, et al. GPS reflections for sea surface wind speed measurement [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 569-572.
- [9] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 38(2): 951-964.
- [10] GARRISON J L, KATZBERG S J, ZAVOROTNY V U, et al. Comparison of sea surface wind speed estimates from reflected GPS signals with buoy measurements[C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2000.
- [11] NØRGAARD M, POULSEN N, GLEASON R S. The CYGNSS level 1 calibration algorithm and error analysis based on on-orbit measurements [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(1): 37-49.
- [12] JIN Shuanggen, CARDELLACH E. GNSS remote sensing: Theory, method and applications [M]. [S.l.]: Springer, 2014.
- [13] KOMJATHY A, ARMATYS M, MASTERS D, et al. Retrieval of ocean surface wind speed and wind direction using reflected GPS signals [J]. Journal of Atmosphere & Oceanic Technology, 2004, 21(3): 515-526.

(编辑:张彤)