

基于 GNSS-R 的海面风速探测技术研究

周旋^{*①②} 叶小敏^③ 于 暘^① 邵连军^② 刘书明^④ 李紫薇^①

^①(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

^②(北京 5111 信箱 北京 100094)

^③(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

^④(国家海洋信息中心 天津 300171)

摘 要: 该文利用数值仿真手段分析了全球导航卫星系统海面反射(GNSS-R)信号的时延相关功率曲线特征, 讨论了风速、风向、GNSS 卫星高度角、接收机平台高度和速度等因素对海面散射信号相关功率的影响, 给出了 GNSS-R 海面风速的反演方法和技术流程, 并进行了试验验证。结果表明, 在中低风速条件(<20 m/s)下, GNSS-R 测量的海面风速与实测风速的基本一致, 说明 GNSS-R 探测海面风速的可行性以及该文给出的海面风速反演方法的正确性。当风速超过 20 m/s 时, 由于受海浪谱模型的限制, 其反演的结果明显低于实测风速。最后, 根据试验结果, 初步给出了 GNSS-R 测量海面风速的修正模型。

关键词: 全球导航卫星系统海面反射信号(GNSS-R); 海面风速; 反演

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1575-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01396

Sea Surface Wind Speed Measurement Using GNSS Reflection Signal

Zhou Xuan^{①②} Ye Xiao-min^③ Yu Yang^① Shao Lian-jun^② Liu Shu-ming^④ Li Zi-wei^①

^①(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

^②(Mailbox 5111, Beijing 100094, China)

^③(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

^④(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: This paper introduces the mechanism of sea surface wind measurement using Global Navigation Satellite System Reflection (GNSS-R) signal and sea surface scattered signal theoretical model. Then the delay waveform of sea surface scattered signal is analyzed through numerical integration, and the influence of wind speed, wind direction, GNSS satellite elevation angle, receiver height and receiver speed on this delay waveform is discussed in detail. Based on the above analysis, the algorithm of GNSS-R sea surface wind retrieval is proposed. In order to validate the mechanism of GNSS-R measuring sea surface wind and the accuracy of this algorithm, Hurricane Dennis is used to test. The result shows that GNSS-R wind speed is generally consistent with the observational data for the low-moderate wind speed (<20 m/s) and is less than the observational data for high wind speed (>20 m/s). Finally, the correction model of GNSS-R wind speed is initially proposed on the basis of the experimental results.

Key words: Global Navigation Satellite System Reflection (GNSS-R) signal; Sea surface wind speed; Retrieval

1 引言

全球导航卫星系统(GNSS)不仅能够为用户提供导航定位信息, 还提供了源源不断的 L 波段微波信号。利用 GNSS-R 探测海面风速是近年来逐渐发展起来的 GNSS 新兴应用领域。该技术以

L 波段的导航卫星为信号源, 通过航空或卫星平台上搭载的延迟映射接收机和指向天顶的右旋天线、指向天底的左旋天线, 实现 GNSS 直射信号和海面反射信号的同步接收, 然后采用双基雷达前向散射模式进行海面风速的探测。

关于利用 GNSS-R 探测海面风速的研究, 美国、欧洲起步较早, 在探测机理、反射信号接收处理、海面风速反演以及试验验证等方面开展了一系列研究工作。1996 年, NASA 兰利研究中心的 Katzberg

2012-10-30 收到, 2013-03-18 改回

中国科学院重大科研装备研制项目(YZ200946)和国家 863 计划项目(2006AA09Z137)资助课题

*通信作者: 周旋 zhouxuan@irsa.ac.cn

和 Garrison 提出了利用低轨接收平台接收海面反射的 GPS 信号的概念, 此后, 开展了多种海态下的机载飞行试验, 验证了时延相关功率波形与海面粗糙度之间的扩散关系^[1-3]。1999 年, 西班牙 IEEC/CSIC 与美国 NASA 在地中海联合开展了 MEBEX 气球实验, 在 37 km 的高空成功获得了 GPS 海面反射信号^[4]。为进一步验证 GNSS-R 反演海面风速的技术体制, NASA、美国科罗拉多大学、ESA 和 Starlab 研究所进行了大量的试验, 并将理论模型与试验结果进行了对比分析^[5,6], 为 GNSS-R 海面风速探测提供了理论和试验基础。

我国在 GNSS-R 海面风速探测领域起步较晚, 基础较弱^[7]。符养等人^[8]在归纳国外研究成果的基础上, 系统地整理和阐述了利用 GNSS-R 反演海洋要素的理论模型、方法。刘经南等人^[9]从软件接收机和反演模型两个方面分析了 GNSS-R 的关键技术, 并指出了存在的问题和发展方向。杨东凯等人^[10]在青岛开展了 GNSS-R 接收机海面静态和海上动态飞行试验, 成功获得了 GPS 导航卫星海面反射信号。周晓中等人^[11]、李伟强等人^[12,13]在三亚开展了 GNSS-R 机载飞行试验, 成功反演了海面风速。上述研究集中在理论研究方面, 而进入试验测试阶段的研究成果, 由于飞行试验条件的限制, 获取的有效数据点有限^[11-13](约为 20 个), 且海况条件单一(风速集中在 2~6 m/s), GNSS-R 探测海面风速的可行性、精度和适用范围有待进一步的试验验证。

本文采用 NASA 提供的飓风“Dennis”机载 GNSS-R 观测数据进行海面风速的探测技术研究, 有效数据点达到数千个, 海况条件复杂, 最大海面风速达到 60 m/s, 且同机搭载的步进式微波辐射计 SFMR 测量的高精度海面风速可作为比对数据, 为验证 GNSS-R 海面风速探测机理以及本文给出的海面风速反演方法的精度和适用范围提供了数据基础。基于这一背景, 本文开展了 GNSS-R 海面风速探测的技术研究, 通过数值仿真手段分析了海面散射信号相关功率与风速、风向、卫星高度角、接收机平台高度和速度等参数的依赖关系, 给出了 GNSS-R 海面风速的反演方法和技术流程, 并进行了复杂海况下试验验证, 推动了 GNSS-R 海面风速探测技术的业务化应用。

2 GNSS-R 海面风速探测机理

风速通过风应力对海面作用, 产生风生海表面波, 这些表面波改变了海面粗糙度, 而 GNSS 海面散射信号相关功率后沿斜率与海面粗糙度相关, 如图 1 所示^[14]。

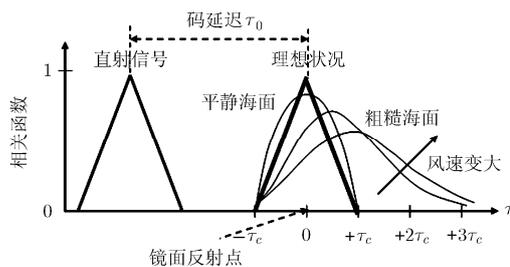


图1 不同海况下GNSS海面散射信号功率曲线

图 1 为不同海况下 GNSS 海面散射信号功率曲线, 其后沿斜率与风速具有直接关系, 海面风速越大, 波形的后沿变化越趋于平缓, 反之陡峭。由图 1 可知, 通过精确测量 GNSS 海面散射信号相关功率可以反演海面风速。

Zavorotny 等人^[15]利用 Kirchhoff 近似的几何光学方法推导了 GPS 海面散射信号相关功率理论形式表达式。该模型为时间延迟 τ , 多普勒 f_c 的函数:

$$\begin{aligned} & \langle |Y(\tau, f_c)|^2 \rangle \\ &= A^2 T_i^2 \iint \frac{D^2(r) \times A^2 [\delta\tau(r)] \times |S[\delta f(r)]|^2}{4\pi R_s^2(r) R_r^2(r)} \sigma_0(r) d^2r \quad (1) \end{aligned}$$

式(1)中, $R_s(r)$ 和 $R_r(r)$ 分别为 GPS 卫星和接收机到散射点的距离; $D(r)$ 为对应散射点 r 处的天线增益; A 和 S 分别为 GPS C/A 码自相关函数和多普勒频移函数, 与卫星高度角、接收机平台高度和速度有关; T_i 为相干积分时间; $\delta\tau(r)$ 和 $\delta f(r)$ 分别为时延和多普勒描述函数; $\sigma_0(r)$ 为双基散射截面, 与海面风速、风向和海浪谱模型有关, 这里采用 Elfouhaily 海浪谱^[16]。散射信号相关功率主要来自于 4 个区域的空间交叉区的贡献: $D^2(r)$ 决定的天线覆盖区; A^2 函数特性决定的等延迟区; $|S|^2$ 决定的多普勒区; $\sigma_0(r)$ 决定的照射区; 这些交叉区域的大小决定了海面分辨单元的大小, 其最小值决定了空间分辨率。图 2 为 GNSS-R 散射区域示意图^[14]。

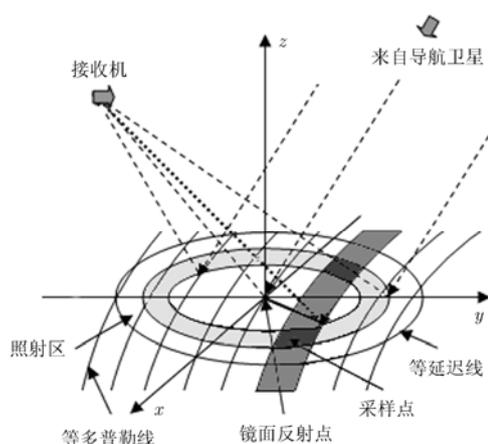


图2 GNSS-R散射区域示意图

3 散射信号相关功率模型仿真分析

由 GNSS 海面散射信号相关功率模型可知, 散射信号相关功率与风速、风向、卫星高度角、接收机平台高度和速度等参数有关, 由于试验采用 1 维时延的相关功率数据, 下面利用数值积分手段重点分析对这些参数对散射信号 1 维时延相关功率的影响。

3.1 风速的影响分析

图 3 为接收机高度 3 km, 速度 120 m/s, GNSS 卫星速度 3.87 km/s, 高度角 30°, 方位角 0°, 相干积分时间 1 ms, 多普勒频移 0 Hz, 海面温度 25°C, 海水盐度 35 psu, 海面风向 0°, 不同风速时 Elfouhaily 海浪谱模型的条件, 散射信号时延相关功率曲线随时间延迟的变化关系。

图 3 中横坐标为时间延迟, 纵坐标为归一化相关功率。当风速增大时, 散射信号相关功率曲线下降沿斜率减小, 峰值功率降低, 并向更大时延方向偏移, 这表明了随着风速增加海面粗糙度增加, 天线覆盖区变大, 远离镜面点的散射信号以更大的时延到达接收机, 散射信号相关功率拖尾随着时延扩散增大, 同时, 在准镜面方向的信号功率减小; 另外, 当风速较低时, 散射信号功率曲线间隔变化明显, 而风速较高时变化较小, 这说明 GNSS-R 反演海面风速时风速越高其探测精度会越低, 这主要是由于海表面均方斜率与风速之间的近似指数关系所致。

3.2 风向的影响分析

图 4 为散射信号时延相关功率曲线随海面风向的变化关系, 海面风速 7 m/s, 其它条件同图 3。

由图 4 可知, 散射信号相关功率峰值的部分受风向影响较小, 因此, 利用峰值附近的曲线反演海面风速时可以忽略风向的影响。当时间延迟较大时, 不同风向的海面散射信号相关功率相差较大, 逆风向比测风向相关功率拖尾扩展大。

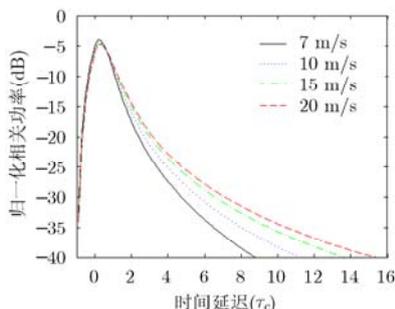


图 3 归一化相关功率与风速的关系

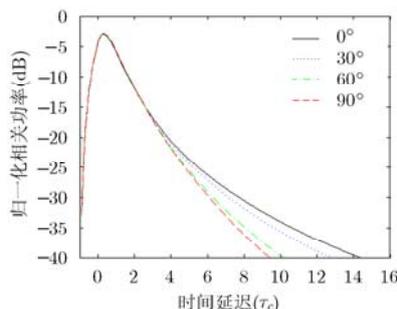


图 4 归一化相关功率与风向的关系

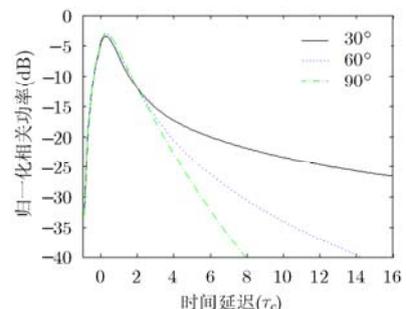


图 5 归一化相关功率与卫星高度角的关系

3.3 卫星高度角的影响分析

图 5 为散射信号时延相关功率曲线随 GNSS 卫星高度角的变化关系, 海面风速 7 m/s, 其它条件同图 3。

由图 5 可知, 散射信号相关功率峰值受卫星高度角的影响不大。随着时延增大, 卫星高度角对散射信号相关功率的影响增大, 具体表现在随着卫星高度角的降低, 散射信号相关功率曲线的下降沿斜率更低, 这是因为卫星高度角降低, 等延迟带将覆盖更宽的海面散射范围。

3.4 接收机高度的影响分析

图 6 为散射信号时延相关功率曲线随接收机高度的变化关系, 海面风速 7 m/s, 其它条件同图 3。

由图 6 可知, 散射信号相关功率受接收机高度的影响较大。随着接收机高度的增加, 天线覆盖区变大, 散射信号相关功率峰值功率降低, 并向更大时延方向偏移, 同时下降沿斜率减小。

3.5 接收机速度的影响分析

图 7 为散射信号时延相关功率曲线随接收机速度的变化关系, 海面风速 7 m/s, 其它条件同图 3。

由图 7 可知, 散射信号相关功率受接收机速度的影响较大, 随着接收机速度的增加, 相关功率曲线下降沿斜率增大, 这是因为不同的接收机速度确定的等多普勒区大小不同。

由散射信号相关功率模型仿真分析结果可知, 海面风速、海面风向、GNSS 卫星高度角、接收机平台高度和速度等参数对散射信号相关功率有直接的影响, 在已知 GNSS 卫星高度角、接收机高度和速度等参数的情况下, 利用式(1)计算不同风速条件下的散射信号相关功率理论波形, 通过理论和实测波形匹配可以实现海面风速反演。

4 试验验证

为了验证 GNSS-R 海面风速反演方法的可行性和精度, 本文采用 NASA 提供的大西洋飓风“Dennis”的机载 GNSS-R 观测数据进行试验, 飞机平台为 P-3, GNSS-R 接收机的信号源为 GPS, 工

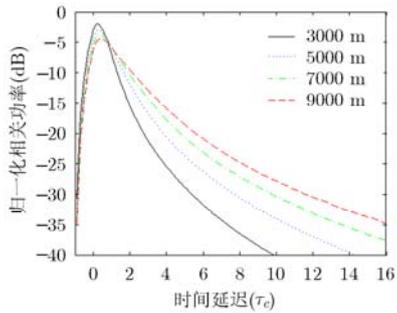


图 6 归一化相关功率与接收机高度的关系

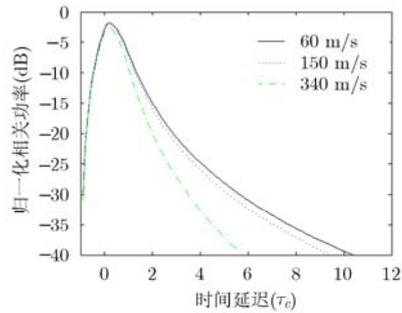


图 7 归一化相关功率与接收机速度的关系

作频率为 1575.42 ± 5 MHz, 观测时间为 2005 年 7 月 8 日 04:35~08:30; 比对数据为同机搭载的步进式微波辐射计 SFMR 测量的风速数据^[17]。SFMR 由美国麻省大学微波遥感实验室提供, 工作在 C 波段, 能同时以 4.55 GHz, 5.06 GHz, 5.64 GHz, 6.34 GHz, 6.96 GHz, 7.22 GHz 等 6 个频率测量海表面发射率, 进而反演海面风速和降雨强度, 其测风精度可达到 1 m/s。P-3 飞行轨迹及 SFMR 测量的海面风速如图 8 所示。

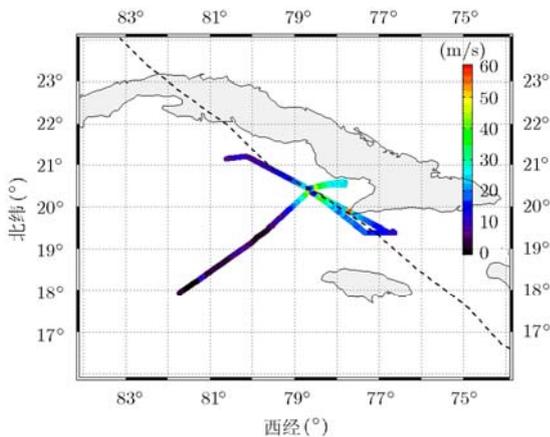


图 8 P-3 飞行轨迹及 SFMR 测量的海面风速

图 8 中黑色细虚线为大西洋飓风“Dennis”的轨迹, 灰色粗实线代表 P-3 飞行轨迹及 SFMR 测量的海面风速, 风速最大值为 60 m/s, 作为 GNSS-R 反演海面风速的比对数据。

4.1 GNSS-R 海面风速反演方法

GNSS-R 海面风速反演流程如图 9 所示。

(1)理论波形库构建 将系统工作状态参数, 包括接收机高度、接收机速度、相干积分时间、GNSS 卫星高度角等参数, 输入到海面散射信号相关功率模型即式(1), 计算不同风速条件下的海面散射信号归一化相关功率, 生成理论波形库。系统接收到的 GPS 卫星依次为 PRN08, PRN24, PRN28, PRN07, PRN02 和 PRN10, 接收机高度为 5100 m, 速度为 130 m/s, 相干积分时间为 1 ms, GPS 卫星高度角

的范围为 $45^\circ \sim 80^\circ$ 。

(2)码片延迟对齐处理 从原始数据中提取 GNSS-R 相关功率测量值, 然后利用左旋天线位置、GNSS 卫星位置和大地球水准面高程模型计算镜面反射点延迟, 以镜面反射点为基准进行码片对齐处理, 提高数据处理精度。图 10 为 GNSS-R 反射信号数据进行码片延迟对齐后的示意图。

(3)非相干累加 海面散射信号非常微弱, 为了保证海面风速的反演精度, 通过增加相干积分时间和非相干累加时间提高信号信噪比。但粗糙的海面有可能使反射信号相干时间变短, 此时过长的相干累加时间反而会造成信号信噪比的下降。因此, 系统结合非相干累加提高信号信噪比。图 10 中红线代表累加结果的拟合曲线, 累加次数 50。

(4)减噪底 由于左、右旋天线增益不同及环境因素的影响, 相关功率实测数据含有噪声。由于镜面点信号最先到达接收机, 故可以将早于镜面点 2 个码片的输出数据功率均值作为噪底。

(5)归一化 为了降低天线增益的影响、保证相关功率理论波形与实测波形具有可比性, 将理论数据和实测数据分别除以总的反射信号功率, 实现数据归一化。

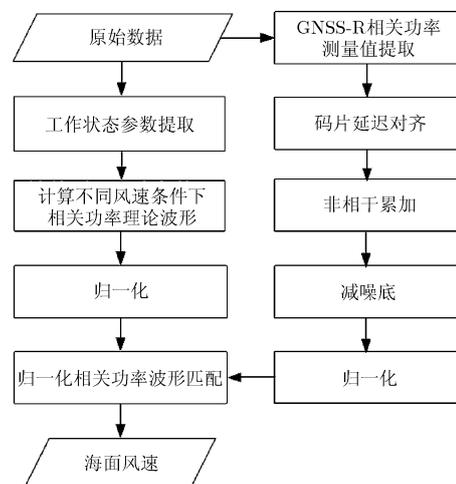


图 9 GNSS-R 海面风速反演流程图

(6)波形匹配 将相关功率理论波形与实测波形进行匹配, 采用最小二乘匹配方法寻找合适的海面风速, 当实测与理论功率后沿波形之间的均方偏差达到最小时, 理论相关功率波形对应的风速即为所求的海面风速。

图 11 为风速 10 m/s 的实测波形与理论波形匹配的示意图。由图 11 可知, 当码延迟小于 2 个码片时, 波形下降沿部分的实测波形与 10 m/s 理论波形较为吻合。但当码延迟大于 2 个码片后, 实测波形后沿与理论波形相差较大, 这是因为 GNSS 海面散射信号相关功率即海面回波能量主要来自镜面反射点附近的海域, 随着码延迟范围逐渐扩大并远离镜面反射点, 接收机接收到的能量也随之减少, 而且在该区域的能量受噪声影响较大, 对反演风速不是很有利。为了保证海面风速的反演精度, 选择 0~2 码片的波形后沿进行匹配, 确定海面风速。

4.2 结果与讨论

图 12 为 GNSS-R 与 SFMR 反演的海面风速对比。横坐标为 SFMR 海面风速, 经过下投式探空仪的校准, 其精度达到 1 m/s; 纵坐标为 GNSS-R 海面风速, 与 SFMR 的均方差为 10.3 m/s, 偏差为 3.9 m/s。由图 12 可知, 当风速小于 20 m/s 时, GNSS-R 与 SFMR 海面风速的均方差为 3.2 m/s, 偏差为 0.1 m/s, 达到较高的精度, 说明 GNSS-R 探测海面风速的可行性以及本文给出的海面风速反演方法的正确性。但随着风速的增加, GNSS-R 海面风速明显小于 SFMR 风速, 这是由于散射信号相关功率采用的 Elfouhaily 海浪谱模型是基于中低风速的观测资料建立的, 在高速风速下误差较大。

利用图 12 对 SFMR 和 GNSS-R 海面风速关系进行拟合, 具体形式如式(4):

$$U_{\text{GNSS-R}} = 8.5 \cdot \ln(U_{\text{SFMR}}) - 7 \quad (4)$$

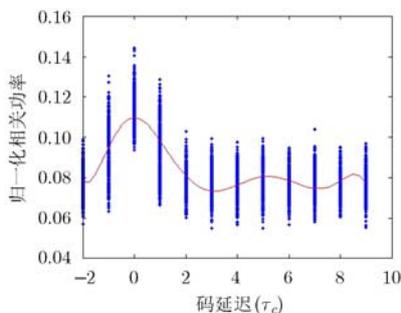


图 10 码片延迟对齐后的结果

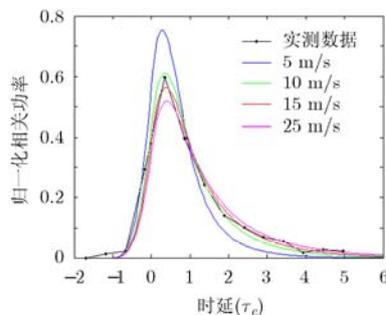


图 11 波形匹配示意图

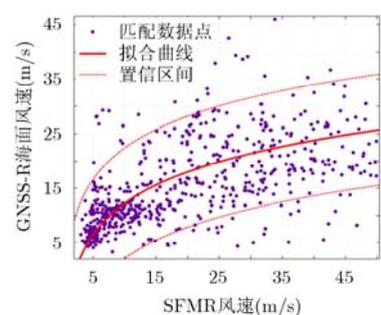


图 12 GNSS-R 与 SFMR 反演的海面风速对比

式中 $U_{\text{GNSS-R}}$ 代表 GNSS-R 反演的海面风速, U_{SFMR} 代表 SFMR 反演的海面风速, 式(4)对应图 12 中的红色实线, 90%的置信区间对应于图 12 中的红色虚线。

式(4)给出了 GNSS-R 海面风速与实测风速的初步关系。由于飞行试验条件的限制, 获取 GNSS-R 飓风观测数据非常困难, 式(4)的适用性还需要进一步验证。

5 结束语

GNSS-R 海面风速探测技术具有全天时、全天候、低功耗、宽覆盖、多信号源、低成本等特点, 已成为全球卫星导航定位系统发展潜力最大的前沿技术之一。美国 NASA 把该项研究计划列入最有发展前途的新技术项目之一, 我国海洋、气象、航空、航天等部门也十分重视该项技术的进展, 并已列入相关的应用计划。

本文介绍了 GNSS-R 海面风速的探测机理及海面散射信号的相关功率模型, 并结合数值仿真手段分析了不同海态条件、不同卫星参数和不同接收机状态对海面散射信号相关功率的影响, 给出了 GNSS-R 海面风速的反演方法和技术流程, 然后利用飓风“Dennis”的机载 GNSS-R 探测数据进行了试验。结果表明, 在中低风速条件下 (<20 m/s), GNSS-R 海面风速与实测风速基本一致, 说明 GNSS-R 探测海面风速的可行性以及本文给出的海面风速反演方法的正确性。随着风速的增大, GNSS-R 反演的海面风速明显小于实际风速, 这主要是因为受到海浪谱模型精度的限制。最后, 根据试验比对结果, 初步给出了 GNSS-R 反演海面风速的订正模型。

致谢 感谢 NASA 兰利研究中心提供的 GNSS-R 探测数据。

参考文献

[1] Katzberg S J and Dunion J. Comparison of reflected GPS

wind speed retrievals with dropsondes in tropical cyclones [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17), L17602, doi:10.1029/2009GL039512.

- [2] Katzberg S J and Garrison J L. Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean [R]. NASA Technical Memorandum 4750, 1996.
- [3] Katzberg S J, Torres O, and Ganoe G. Calibration of reflected GPS for tropical storm wind speed retrievals [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(18), L18602, doi:10.1029/2006GL026825.
- [4] Cardellach E, Ruffini G, Pino D, *et al.* Mediterranean balloon experiment: ocean wind speed sensing from the stratosphere, using GPS reflections[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3): 351-362.
- [5] Park H, Valencia E, Rodriguez-Alvarez N, *et al.* New approach to sea surface wind retrieval from GNSS-R measurements[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2011: 1469-1472.
- [6] Thompson D R, Elfouhaily T M, and Garrison J L. An improved geometrical optics model for bisatic GPS scattering from the ocean surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2810-2821.
- [7] 万玮, 陈秀万, 李国平, 等. GNSS-R 遥感国内外研究进展[J]. 遥感信息, 2012, 13(3): 112-119.
Wan Wei, Chen Xiu-wan, Li Guo-ping, *et al.* GNSS reflectometry: a review of theories and empirical applications in ocean and land surfaces[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 13(3): 112-119.
- [8] 符养, 周兆明. GNSS-R 海洋遥感方法研究[J]. 武汉大学学报 • 信息科学版, 2006, 31(2): 128-131.
Fu Yang and Zhou Zhao-ming. Investigation of ocean remote sensing by using GNSS-R signal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(2): 128-131.
- [9] 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 Jing-nan, Shao Lian-jun, and Zhang Xun-xie. Advances in GNSS-R studies and key technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 955-960.
- [10] Yang Dong-kai, Wang Yan, Lu Yong, *et al.* GNSS-R data acquisition system design and experiment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3842-3846.
- [11] 周晓中, 李紫薇. 机载 GPS-R 遥感海面风场实验[J]. 解放军理工大学学报 • 自然科学版, 2011, 12(1): 84-89.
Zhou Xiao-zhong and Li Zi-wei. Experiment on wind remote sensing using GPS-R from aircraft platform[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(1): 84-89.
- [12] 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 Wei-qiang, Yang Dong-kai, Li Ming-li, *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.
- [13] Li Wei-qiang, Yang Dong-kai, Zhang Bo, *et al.* Real-time processing of reflected GNSS signals for remote sensing: system and experiments[J]. *Journal of Navigation*, 2011, 64(Suppl. S1): 127-140.
- [14] 路勇. 基于 GNSS 反射信号的海面风速探测技术研究[D]. [博士论文], 北京航空航天大学, 2009.
Lu Yong. The study of sea wind field detecting technology using GNSS reflection signal[D]. [Ph. D. dissertation], Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [15] Zavorotny V U and Voronovich A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-964.
- [16] Elfouhaily T, Chapron B, and Kostasros K, *et al.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(15): 781-796.
- [17] Zavorotny V U, Akos D M, and Walsh E J. Comparing wind speed retrievals from GPS reflectometry with SFMR surface wind speeds in hurricane Ike[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009: 429-432.
- 周旋: 男, 1981年生, 博士, 工程师, 研究方向为 GNSS-R 海洋环境要素探测.
- 叶小敏: 男, 1981年生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为微波信号海面散射模型.
- 于暘: 女, 1982年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为 GNSS-R 海面散射信号仿真分析.
- 李紫薇: 女, 研究员, 长期从事基础测绘、资源调查、海洋环境监测、灾害应急监测等遥感应用技术研究以及无人机遥感系统、GNSS-R 遥感系统研制工作.