

## 星载 GNSS-R 海面风速反演方法研究

杨东凯\* 刘 毅 王 峰

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

**摘 要:** 星载 GNSS-R 因其时延-多普勒相关功率(DDM)波形对风速的敏感性较低,采用理论与实测波形匹配的方法所得风速精度较差。针对这一问题,该文采用一种直接建立相关功率值与风速之间联系的方法获取风速信息。基于相关功率模型对散射功率进行了归一化修正及其简化处理,利用 UK TDS-1 卫星试验数据和散射计(ASCAT)同比观测风速分别建立归一化散射功率及其简化式与海面风速之间的经验模型。与 ASCAT 观测风速对比结果表明:在 0~20 m/s 的风速范围内,采用归一化散射功率反演风速的均方根误差为 2.11 m/s;两种方法的反演精度相近,简化修正方式避免了复杂的积分运算更适用于实时处理。

**关键词:** 星载 GNSS-R; 海面风速; TDS-1; 经验模型

**中图分类号:** P237; TN967

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)02-0462-08

**DOI:** 10.11999/JEIT170490

## Ocean Surface Wind Speed Retrieval Using Spaceborne GNSS-R

YANG Dongkai LIU Yi WANG Feng

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For spaceborne GNSS-R, Delay-Doppler Map (DDM) shape is less sensitive to wind speed, resulting in poor retrieval accuracy measured by fitting theoretical DDM to the measured one. To solve this problem, a method directly linking the individual DDM power measurement to wind speed is developed to obtain wind speed. Scattered power is normalized by correction factor and its simplified form based on Zavorotny-Voronovich (Z-V) model, respectively. Empirical geophysical model functions linking both normalized scattered power and its simplified form to ocean surface wind speed are derived using spaceborne data on UK TechDemoSat-1 (TDS-1) together with in-situ Advanced Scatterometer (ASCAT) wind measurements. The Root-Mean-Square Error (RMSE) of wind speeds retrieved utilizing normalized scattered power is 2.11 m/s at 0~20 m/s. Simplified normalized scattered power by which wind speed accuracy retrieved is the same level with normalized scattered power is more suitable for real-time processing on-board.

**Key words:** Spaceborne GNSS-R; Ocean surface wind speed; TDS-1; Empirical model

### 1 引言

全球导航卫星反射信号(GNSS-R)技术作为一种新型地球遥感探测技术,近年来已成为国内外学者的研究热点之一。该技术通过接收、处理经地表反射的导航卫星信号,探测海面风速<sup>[1,2]</sup>、海冰<sup>[3,4]</sup>以及土壤湿度<sup>[5,6]</sup>等地表参数。1998年, Garrison 等人<sup>[7]</sup>分析了海面粗糙度对 GPS 反射信号的影响,提出了利用反射信号进行海风探测的设想,并通过一系列机载试验验证了利用 GPS 反射信号反演海面风速的可行性。2000年, Zavorotny 等人<sup>[8]</sup>以双基雷达方程为基础,采用 Kirchhoff 近似几何光学方法建立了 GNSS 海面散射信号时延-多普勒 2 维相关功率

模型(Z-V 模型),为理论和实测波形匹配反演风速的方法提供了基础。2002年, Lowe 等人<sup>[9]</sup>首次在星载平台上探测到 GNSS 反射信号,为星载探测提供了可行性论证。2003年,英国国家空间中心发射了首个搭载 GPS-R 接收机的 UK-DMC 卫星,并利用其接收、处理得到了 GPS L1 C/A 码反射信号<sup>[10]</sup>,验证了星载平台探测海风、海冰等参数的可行性<sup>[11]</sup>。2014年, Clarizia 等人<sup>[12]</sup>提出了以最小方差估计器反演风速的方法,通过 UK-DMC 和美国国家浮标中心(NDBC)数据对比得到均方根误差为 1.65 m/s 的反演结果。同年, TDS-1 卫星成功发射,其上搭载了可协同处理 GPS L1 C/A 码直反信号的空间 GNSS 遥感接收机(SGR-ReSI),并获得了大量 2 维时延-多普勒相关功率(DDM)数据<sup>[13]</sup>。 Foti 等人<sup>[14]</sup>首次利用 TDS-1 数据进行了海面风速反演的研究,

收稿日期: 2017-05-22; 改回日期: 2017-10-06; 网络出版: 2017-11-08

\*通信作者: 杨东凯 yangdongkai@sina.com

在 3~18 m/s 风速范围内, 反演精度可达 2.2 m/s。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(CYGNSS), 开启了星载 GNSS-R 海面高风速反演的篇章<sup>[15]</sup>。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<sup>[16-18]</sup>和机载<sup>[19-21]</sup>实验研究。对于星载 GNSS-R 技术, 国内更多的是理论和仿真研究, 实测数据处理和地表参数反演的文献较少。

星载 GNSS-R 因其 DDM 波形对于风速的敏感性较低, 采用理论与实测波形匹配的方法所得风速精度较差, 因此建立相关功率与风速直接映射获取风速是一种常用方法<sup>[22]</sup>。本文以 Z-V 模型为理论基础, 通过校正因子对散射功率归一化修正得到归一化散射功率及其简化式, 并利用 Surrey 公司公开的 TDS-1 卫星的 DDM 数据和同比的 ASCAT 散射计测量风速, 建立了二者与海面风速之间的经验模型。测试结果表明, 在 0~20 m/s 风速范围内, 归一化散射功率及其简化形式两种方法反演风速的均方根误差分别为 2.11 m/s 和 2.15 m/s; 在风速小于 11 m/s 时, 均方根误差小于 2 m/s; 简化校正形式因其较低的时间复杂度而更适用于星上实时处理。由于 TDS-1 缺少定标校准措施, 无法得到准确的相关功率, 现有文献使用热噪声功率定标并以信噪比计算散射系数<sup>[14]</sup>, 或直接建立信噪比与风速的经验模型<sup>[23]</sup>, 但热噪声是一个高斯随机过程, 且除热噪声外, DDM 还受斑点噪声干扰。本文通过校正因子对相关功率计数值做归一化处理, 并建立与风速之间的经验模型, 避免了因噪声功率不稳定引入的误差, 且相关功率计数值相较于信噪比受量化误差的影响更小<sup>[24]</sup>。此外, 简化校正方式在保证反演精度的同时有效提升了运算效率。

## 2 反演原理与方法

GNSS-R 散射信号相关功率是时延和多普勒的 2 维函数, 在特定的时延  $\tau$  和多普勒频移  $f$  下, GNSS 双基散射信号相关功率  $P_R$  为散射面  $S$  上功率分布的积分<sup>[8]</sup>:

$$P_R(\tau, f) = \frac{\lambda^2 T_{\text{coh}}^2 P_T G_T}{(4\pi)^3} \cdot \iint \frac{G_R \sigma_0}{R_T^2 R_R^2} \chi^2(\tau - \tau', f - f') dS \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为载波波长;  $T_{\text{coh}}$  为相干积分时间;  $P_T$  和  $G_T$  分别表示 GPS 发射功率和天线增益;  $G_R$  表示接收天线增益;  $R_T$  和  $R_R$  分别表示发射机和接收机到散射单元的距离;  $\chi^2$  为伍德沃德模糊函数(WAF);  $\tau$  和

$\tau'$  分别为本地信号和散射单元散射信号的时延;  $f$  和  $f'$  分别为本地信号和散射单元散射信号的多普勒频率;  $\sigma_0$  为归一化双基散射系数, 与散射面的粗糙度有关, 常基于此反演海面风速。WAF 可近似表示为

$$\chi^2(\tau - \tau', f - f') = A^2(\tau - \tau') \text{sinc}^2(\pi(f - f')T_{\text{coh}}) \quad (2)$$

$$A(\tau - \tau') = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau - \tau'|}{T_{\text{chip}}}, & |\tau - \tau'| < T_{\text{chip}} \\ 0, & |\tau - \tau'| \geq T_{\text{chip}} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $T_{\text{chip}}$  为一个码片的时长。

定义校正因子  $F$  修正发射机和接收机的几何结构、接收天线增益及散射区域面积等参数对于  $P_R$  的影响, 得到归一化散射功率  $P_R^{\text{Norm}}$ 。假定散射区域内  $\sigma_0$  恒定不变,  $P_R^{\text{Norm}}$  可近似替代  $\sigma_0$ , 与风速建立经验函数关系。

$$F = \left[ \iint \frac{G_R \chi^2(\tau - \tau', f - f')}{R_T^2 R_R^2} dS \right]^{-1} \quad (4)$$

$$P_R^{\text{Norm}} = P_R \cdot F \quad (5)$$

使用修正因子对相关功率做归一化校正时, 忽略了 GPS 发射功率的波动及不同 GPS 卫星的发射功率差异, 将  $P_T$  和  $G_T$  视为常量。GPS 发射功率的波动性会影响风速反演精度, 这一误差因素可通过增加直射信号接收天线获取直射信号进行校正, 但碍于 SGR-ReSI 条件所限, 目前还无法对这一误差影响有效修正<sup>[11,14,23]</sup>。以接收平台高度 635 km、入射角 15°、发射功率存在不同幅度高斯白噪声扰动的环境仿真得到各风速段内 GPS 发射功率波动引起的风速反演误差如图 1 所示。由此可见相同波动情况下, 风速越大, 反演精度受 GPS 发射功率波动的影响越明显; 发射功率波动过大对风速反演结果具有很大影响, 未来的星载接收机有必要对该误差源定标校准。当发射功率波动小于 2 W 即波动小于 0.5% 时, 发射功率波动引起的风速反演误差不足 2 m/s 风速误差标准的 10%, 可忽略发射功率波动对风速测量的影响。

式(4)由于积分运算耗时较长, 影响风速反演算法的效率, 不适于星上实时风速反演。假定在镜面反射点附近的较小积分区域内, 多普勒频移函数保持一致, 忽略积分区域内散射单元与 GPS 发射机和 TDS-1 接收机的微小距离变化, 校正因子可简化为如式(6)所示。

$$F_{\text{simp}} = \frac{R_{T,SP}^2 R_{R,SP}^2}{G_{R,SP} S} \quad (6)$$

式中,  $R_{T,SP}$  和  $R_{R,SP}$  分别为发射机和接收机与镜面

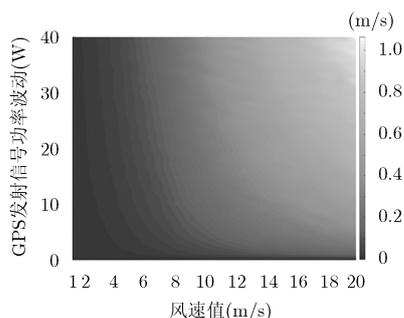


图1 不同风速下 GPS 发射功率波动引入的反演误差

反射点的距离;  $G_{R,SP}$  为接收天线在镜面反射点处的增益;  $S$  为有效散射区域的面积, 在入射角  $\theta_i$  不超过  $35^\circ$  时与  $1/\cos^2 \theta_i$  近似成正比例<sup>[25]</sup>。本文以  $1/\cos^2 \theta_i$  替代  $S$  计算简化校正因子  $F_{\text{simp}}$ , 并选取镜面反射点附近区域作为有效散射区域计算归一化相关功率  $P_R^{\text{Norm}}$  及其简化形式  $P_{R,\text{simp}}^{\text{Norm}}$ , 为进一步降低噪声影响, 以该区域内散射信号的平均功率计数值表示相关功率, TDS-1 功率计数值与实际相关功率存在大约 210~220 dB 的差异。

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_R(\tau_i, f_j) \\ = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (S_{\text{DDM}}(\tau_i, f_j) - N_{\text{DDM}}) \quad (7)$$

式中,  $S_{\text{DDM}}(\tau_i, f_j)$  为 DDM 中  $(\tau_i, f_j)$  对应的相关功率计数值;  $N_{\text{DDM}}$  为 DDM 图像的噪底, 通过 DDM 中无信号区域计算得到。由于海面的不同散射单元具有不同的时延和多普勒, DDM 实际反映了功率在散射面上的分布, 因此, 式(7)中时延和多普勒范围的选择受空间分辨率限制。如图 2 所示为两种不同入射角下的等时延线和等多普勒线的空间分布情况, 等时延线和等多普勒线的分布受入射角影响, 随入射角增大, 等时延椭圆间距变宽并向发射机方向伸展, 等多普勒线间距变宽。

假设时延-多普勒域内的时延和多普勒范围对应的散射区域为瞬时视场, 则其平方根为反演参数

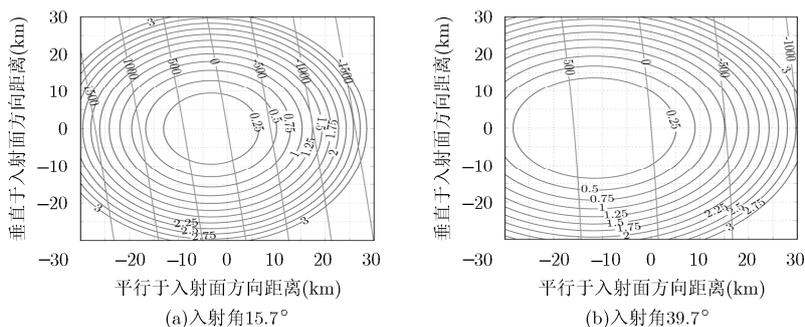


图2 等时延线及等多普勒线的空间分布

的空间分辨率<sup>[26]</sup>。由于选定的最大等多普勒线通常位于最大等时延椭圆外, 空间分辨率可由空间内选定的最大等时延椭圆的面积确定:

$$R_{\text{geo}} = \sqrt{\pi r_a r_b} \quad (8)$$

式中,  $r_a$  和  $r_b$  分别为等时延椭圆的长半轴和短半轴长度。图 3 给出了不同时延范围对应的空间分辨率与入射角之间的关系。从图中可以看出, 空间分辨率随入射角增大而增大; 时延范围为  $-0.25 \sim 0.25$  码片时, 在较宽的入射角范围内, 满足 25 km 空间分辨率的要求。根据上述所论, 在求解式(7)所示的平均功率时, 本文选定  $-0.25 \sim 0.25$  码片的时延范围, 与之对应的多普勒范围选定为  $-1 \sim 1$  kHz。

### 3 TDS-1 卫星

TDS-1 卫星于 2014 年 7 月 8 日成功发射, 轨道高度 635 km、倾角  $98.4^\circ$ , 搭载包括 SGR-ReSI 在内的 8 个试验载荷, 通过地面站控制各载荷以 8 天为一个工作周期轮流工作。SGR-ReSI 在每个工作周期内工作一至两天, 可同时跟踪、记录和处理 4 路 GPS L1, L2C 及其他导航卫星的地表反射信号并产生 1 s 非相干累加的 DDM 数据<sup>[13]</sup>。SGR-ReSI 的射频前端增益模式分无监控自动增益控制(uAGC)和固定增益两种模式, 早期运行阶段为 uAGC 模式, 2015 年 4 月 24 日后为 36 dB 固定增益模式<sup>[24]</sup>。

本文采用 2015 年 11 月 26 日至 2016 年 4 月 19 日期间 L1 B 数据作为观测数据, 并以 ASCAT MetOp-A 散射计测量的 L2 风场数据作为同比数据。同比数据匹配标准设定为与 GNSS-R 镜面反射点的经纬度之差在  $0.25^\circ$  以内, 观测时间之差在 60 min 以内。如表 1<sup>[13,27,28]</sup>所示, MetOp-A 与 TDS-1 的轨道参数相近, 其中 TDS-1 是准太阳同步轨道卫星, 其降交点地方时偏移为 1.42 h/yr, 本文所采用的观测数据中, 天线足印轨迹相近且两轨迹前后相差约 50 min, 故而对于海面风速的长时间大尺度观测, 现阶段 ASCAT MetOp-A 的风场数据是 TDS-1 风速反演研究中的良好同比数据源。目前关于 TDS-1 风速反演研究中常采用该数据源及 1 h 和  $1^\circ$  的匹配

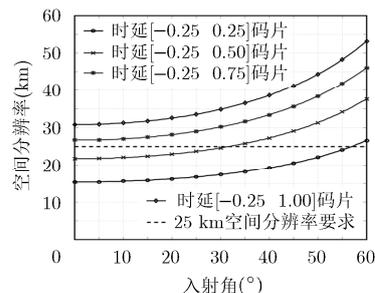


图3 空间分辨率与入射角的关系

表1 卫星轨道参数

卫星	轨道高度 (km)	轨道倾角 (°)	轨道周期 (min)	降交点地 方时
MetOp-A	817	98.7	101.0	9:30am
TDS-1	635	98.4	97.3	9:00am

标准<sup>[14,23]</sup>，本文对此限定更加严格。本文所选用的 TDS-1 试验数据的射频前端为固定增益模式，因而信噪比(SNR)和信号减噪声(SMN)两种形式均可表示相关功率，受制于量化误差的影响，SMN 更适于表示相关功率进行风速反演分析<sup>[24]</sup>。

#### 4 数据质量控制

任何对地观测的遥感卫星均需进行严格的数据质量控制。由于 TDS-1 卫星任务旨在测试和提高其上搭载硬件设备的技术成熟度，利用遥感数据研究地球环境仅是次要目标，因此其遥感数据质量不及传统遥感卫星的级别<sup>[25]</sup>，在进行反演算法研究之前，需对数据质量进行控制。为了消除海冰和陆地反射信号的影响，本文选用纬度低于 $50^\circ$ ，且距海岸线的经纬度之差大于 $0.5^\circ$ 海域的反射信号数据进行风速反演研究。

TDS-1 星载观测数据的最大误差源为卫星姿态的不确定性，在其处于日食阶段时姿态误差最大可达 $10^\circ$ <sup>[14,25]</sup>。由于接收天线在镜面反射点处的天线增益通过查表获得，未知的 $10^\circ$ 姿态角误差对天线增益的计算造成较大影响，天线波束附近区域的增益受姿态不确定性的影响较小，天线主瓣之外区域的增益随姿态角迅速变化，受姿态误差影响较大。根据 Surrey 公开的天线增益查找表绘制如图 4 所示的天线方向图，入射角在 $40^\circ$ 左右时天线增益开始呈现快速下降趋势，为尽量减弱最大可达 $10^\circ$ 的姿态角误差所引起的天线增益计算误差，本文将入射角范围限制在 $30^\circ$ 以内。

DDM 同时存在系统热噪声和斑点噪声，利用非相干累加可以减弱噪声影响。非相干累加的理论增益可表示为<sup>[29]</sup>

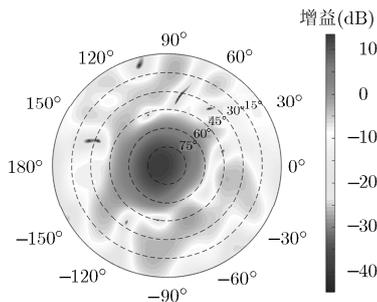


图4 天线方向图

$$G(m) = 10 \lg(m) - \frac{10 \lg \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{9.2m}{D_c(1)}} \right]}{1 + \sqrt{1 + \frac{9.2}{D_c(1)}}} \quad (9)$$

式中， $m$  为非相干累加次数， $D_c(1)$  为关于检测概率和虚警概率的函数。图 5 为在检测概率 $P_d = 0.9$ 和虚警概率 $P_{fa} = 10^{-7}$ 情况下，非相干累加的理论增益曲线。从图中可知，随着累加次数的增多，非相干累加的增益变化趋于平缓。式(8)中忽略了接收机运动对空间分辨率的影响，实际上，卫星运动导致了卫星轨迹向的空间分辨率变化，变化量为 $v_{SP}T_{inc}$  (其中， $v_{SP}$  为镜面反射点运动速度， $T_{inc}$  为非相干累加时间)。因此，在满足反演精度的前提下，尽量减小非相干累加时间显得至关重要。SGR-ReSI 设备在星上完成了 1 s 非相干累加处理，是否可在 1 s 累加的基础上，对连续的 DDM 数据进行多秒累加以提升信噪比，并进一步提高反演精度需要进行详细分析。如图 6 所示为对 DDM 连续多秒累加后的信噪比增益，从图中可以看出，除少量数据外，大部分数据经过多秒累加后信噪比并没有明显增加。因此，本文采用星上 1 s 非相干累加后的 DDM 数据进行风速反演研究。

尽管经过非相干累加可以减弱噪声的影响，但部分 DDM 仍然被埋在噪声中，若这些 DDM 不被剔除，将会影响风速反演精度。为了剔除信噪比较低的 DDM 数据，设定信噪比阈值进行数据筛选，定义：

$$\text{SNR}_{\text{peak}} = \frac{S_{\text{peak}}}{N_{\text{avg}}} - 1 \quad (10)$$

式中， $S_{\text{peak}}$  为 DDM 峰值功率， $N_{\text{avg}}$  为噪底功率。需指出的是，SNR 阈值在剔除强噪声干扰的 DDM 数据的同时，也剔除了部分高风速数据，且如图 7 所示 SNR 阈值越高，用于反演风速的样本越少，即空间覆盖率越低。

#### 5 风速反演及结果分析

将数据质量控制筛选后的 DDM 数据和经校正

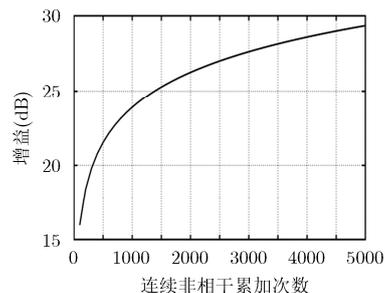


图5 非相干累加的理论增益曲线

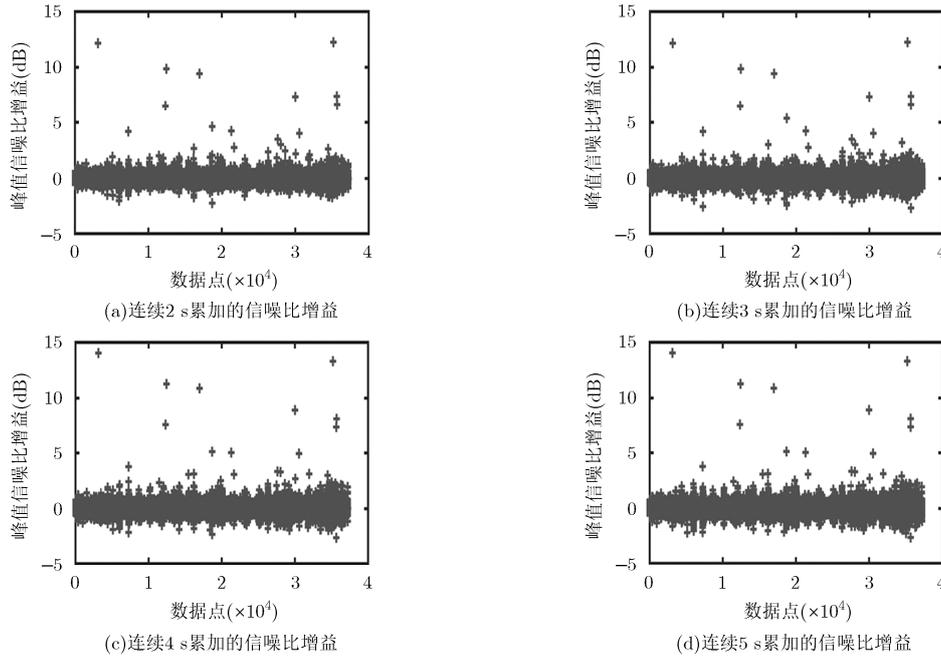


图6 连续  $N$  秒累加的峰值信噪比增益

因子  $F$  修正的  $P_R^{Norm}$  按照 75% 和 25% 的比例随机分成训练集和测试集, 由训练集得到  $P_R^{Norm}$  和  $U_{10}$  之间的经验模型函数, 并使用测试集分析所建立的模型的效果。

图 8 所示为 SNR 阈值为 1.3 时训练集的  $P_R^{Norm}$  与  $U_{10}$  的关系, 对其建立指数函数形式的经验模型:

$$U_{10} = Ae^{BP_R^{Norm}} + C \quad (11)$$

式中,  $A, B, C$  为待定参数。通过训练集数据样本拟合, 得到该经验模型待定参数分别为  $A = 3.506 \times 10^{22}, B = -0.237, C = -0.0115$ 。由此可见, 由于高风段相对于低风段数据量过少, 单段地球物理模型函数(GMF)对高风速数据的拟合效果不佳, 将  $P_R^{Norm}$  以 209.1 dB 为界分成两段分别拟合, 得到的分段 GMF 对于高风速的适应效果有所改善。

基于该经验模型及模型参数, 利用测试集的

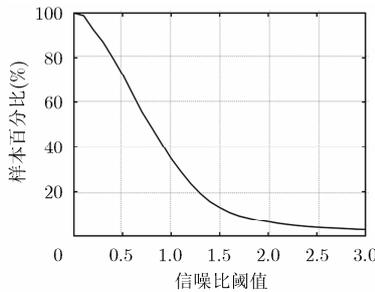


图7 样本占比与信噪比阈值的关系

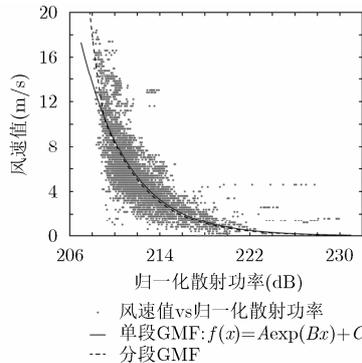


图8 风速值与归一化散射功率的关系

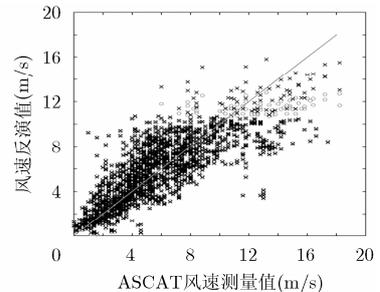


图9 归一化散射功率风速反演值与 ASCAT 同比观测值比较

$P_R^{Norm}$  对  $U_{10}$  进行反演, 并与 ASCAT 测量的同比风速作对比, 单段及分段 GMF 反演风速与同比风速的比较结果如图 9 所示。单段及分段反演风速值与 ASCAT 同比风速测量值之间平均偏差分别为 0.024 m/s 和 0.022 m/s, 均方根误差分别为 2.11 m/s 和 2.09 m/s。分段反演中, 高风速段风速反演值偏低的情况有所改善。

进一步分析模型的反演性能, 将风速按 1 m/s 的间隔分段, 统计各风速段的风速反演精度, 结果如图 10 所示。由图 10 可见, 模型对低于 11 m/s 的风速具有较好的反演效果, 反演精度小于 2 m/s, 对于高于 11 m/s 的风速, 随着风速的增大, 反演精度急速下降。主要原因是: (1)  $P_R^{Norm}$  对高风速的敏感度下降; (2) 如图 8 所示, 高于 11 m/s 风速的样本较少导致经验函数对于该风速段的拟合效果不佳。(3) 图 10 中采用相同形式不同参数的分段 GMF

风速反演误差在高风段有所降低，说明高风速时单段 GMF 反演效果不佳主要因为该风速段的数据占比太少，导致参数拟合时向低风速倾斜严重，提升模型训练时高风速数据占比可改善高风速拟合不佳的状况。

如前所述，通过设定 SNR 阈值剔除强噪声干扰数据的方式，可保证风速反演的精度。图 11 为 SNR 阈值与风速反演精度之间的关系。从图中可看出，随着 SNR 阈值的增大，反演误差下降，当阈值大于 1.3 时，均方根误差小于 2 m/s。但是，从图 7 可知，此时所用的数据样本仅为 20%，即空间覆盖率大幅下降。因此，如何提高数据信噪比以及通过定标和校正技术提高数据质量是星载 GNSS-R 技术的关键技术之一。

由于校正因子  $F$  的积分运算时耗大，使得风速反演处理效率低，无法满足星上实时处理需求。式 (6) 对积分运算进行了简化处理，大幅度提高了计算效率。经简化校正因子  $F_{\text{simp}}$  修正的散射功率  $P_{R,\text{simp}}^{\text{Norm}}$  与海面风速  $U_{10}$  的关系如图 12 所示，具有类似于式 (11) 的指数函数关系，其待定系数分别为  $A = 4.299 \times 10^{27}$ ,  $B = -0.2117$ ,  $C = -0.0665$ 。利用测试集单段及分段反演风速与 ASCAT 同比风速的对比结果如图 13 所示，平均偏差分别为 0.021 m/s 和 -0.050 m/s，均方根误差分别为 2.15 m/s 和 2.18 m/s。分

段反演方式对于采用简化式  $P_{R,\text{simp}}^{\text{Norm}}$  反演方法的高风速段改善效果不明显，且低风速段有发散变差趋势。由于简化修正因子  $F_{\text{simp}}$  的近似处理，其相对于使用  $F$  归一化的情况存在个别坏点，使得反演结果略微变差，但两种方法的反演精度相差很小，且利用归一化散射功率反演海面风速具有更小的时间损耗，可节省 3000 余倍的处理时间。

### 6 结束语

本文对星载 GNSS-R 反演海面风速技术进行了研究。首先理论推导了归一化散射功率及其简化式与 DDM 之间的关系；然后利用 TDS-1 星上处理的 DDM 和 ASCAT 同比风速数据建立了二者与风速之间的经验模型。测试结果表明：

- (1) 在 0~20 m/s 的风速范围内，反演风速值与同比 ASCAT 风速测量值之间的偏差分别为 0.024 m/s 和 0.021 m/s，均方根误差分别为 2.11 m/s 和 2.15 m/s；
- (2) 风速范围在 11 m/s 以内时均方根误差小于 2 m/s，在高于 11 m/s 的风速范围，反演精度迅速变差；
- (3) 采用同模式 GMF 分段反演对于高风速反演精度有小幅改善，高风速反演效果较差主要原因是高风速数据占比过少影响 GMF 参数拟合；

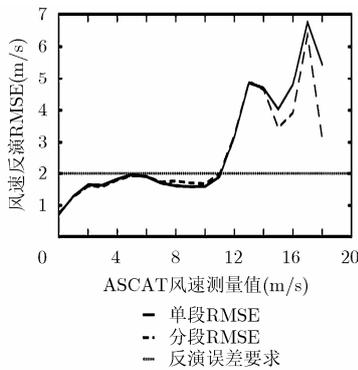


图 10 各风速段风速反演误差

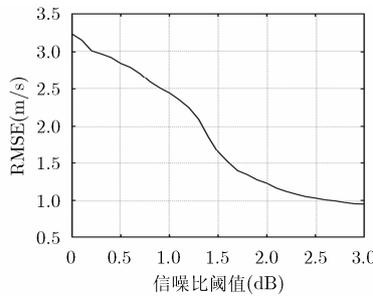


图 11 反演精度随信噪比阈值变化曲线

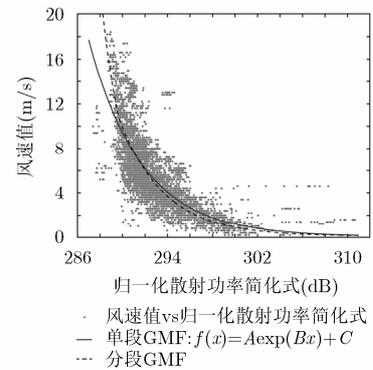


图 12 风速值与归一化散射功率简化式的关系

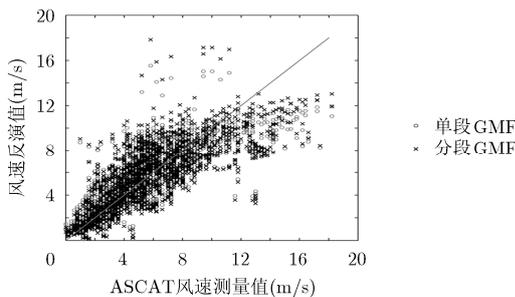


图 13 归一化散射功率简化式风速反演值与 ASCAT 同比观测值比较

(4) 归一化散射功率及其简化式的风速反演精度相近，但简化形式节省了复杂的积分运算过程的耗时，更易满足星上实时反演的需求。

最后，需要指出的是本文通过对 DDM 数据进行严格的数据质量控制得到了较好的结果，这无疑降低了空间覆盖率。但是，TDS-1 卫星主要目的是测试和提高硬件技术的成熟度，对 DDM 数据未进行功率定标和校正，这也是通过数据质量控制使得大量数据被剔除的原因之一。在未来的星载任务中，

如何通过定标和校正技术获得高质量数据是星载 GNSS-R 的关键技术之一。

### 参考文献

- [1] GARRISON J L, KOMJATHY A, ZAVOROTNY V U, *et al.* Wind speed measurement using forward scattered GPS signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(1): 50-65. doi: 10.1109/36.981349.
- [2] 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): 1575-1580. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01396.  
ZHOU Xuan, YE Xiaomin, YU Yang, *et al.* Sea surface wind speed measurement using GNSS reflection signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7): 1575-1580. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01396.
- [3] KOMJATHY A, MASLANIK J, ZAVOROTNY V U, *et al.* Sea ice remote sensing using surface reflected GPS signals[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Hawaii, 2000, 7: 2855-2857.
- [4] 高洪兴, 杨东凯, 张波, 等. 基于 GNSS 卫星反射信号的海冰厚度探测[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5): 1096-1100. doi: 10.11999/JEIT160765.  
GAO Hongxin, YANG Dongkai, ZHANG Bo, *et al.* Remote sensing of sea ice thickness with GNSS reflected signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1096-1100. doi: 10.11999/JEIT160765.
- [5] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, CAMPS A, *et al.* Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: Experimental results over a bare soil field[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(11): 3616-3624. doi: 10.1109/TGRS.2009.2030672.
- [6] Mironov V L and Muzalevskiy K V. The new algorithm for retrieval of soil moisture and surface roughness from GNSS reflectometry[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, 2012: 7530-7532.
- [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] ZAVOROTNY V U and VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-964. doi: 10.1109/36.841977.
- [9] LOWE S T, LABRECQUE J L, ZUFFADA C, *et al.* First spaceborne observation of an Earth-reflected GPS signal[J]. *Radio Science*, 2002, 37(1): 1-28. doi: 10.1029/2000RS002539.
- [10] GLEASON S, HODGART S, SUN Y, *et al.* Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2005, 43(6): 1229-1241. doi: 10.1109/TGRS.2005.845643.
- [11] GLEASON S. Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low earth orbit[D]. [Ph.D. dissertation], University of Surrey, 2006.
- [12] CLARIZIA M P, RUF C S, JALES P, *et al.* Spaceborne GNSS-R minimum variance wind speed estimator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(11): 6829-6843. doi: 10.1109/TGRS.2014.2303831.
- [13] SURREY SATELLITE TECHNOLOGY LTD. Mission description-GNSS reflectometry on TDS-1 with the SGR-RcSI[OL]. <http://www.merrbys.co.uk:8080/Catalogue/Data/Documents/TDS-1%20GNSS-R%20Mission%20Description.pdf>. 2017.2.
- [14] FOTI G, GOMMENDINGER 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. doi: 10.1002/2015GL064204.
- [15] CYGNSS mission[OL]. <http://clasp-research.engin.umich.edu/missions/cygnss/>. 2017.3.
- [16] WANG Xin, SUN Qiang, ZHANG Xunxie, *et al.* First China ocean reflection experiment using coastal GNSS-R[J]. *Science Bulletin*, 2008, 53(7): 1117-1120. doi: 10.1007/S11434-008-0110-2.
- [17] LI W Q, YANG D K, FABRA F, *et al.* Typhoon wind speed observation utilizing reflected signals from Beidou Geosatellites[C]. *China Satellite Navigation Conference (CSNC)*, Nanjing, 2014: 191-200.
- [18] WANG F, YANG D K, ZHANG B, *et al.* Wind speed retrieval using coastal ocean-scattered GNSS signals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(11): 5272-5283. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2611598.
- [19] 杨东凯, 张益强, 张其善, 等. 基于 GPS 散射信号的机载海面风场反演系统[J]. *航空学报*, 2006, 27(2): 310-313.  
YANG Dongkai, ZHANG Yiqiang, ZHANG Qishan, *et al.* Airborne ocean wind-field retrieval system based on GPS scattering signals[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2006, 27(2): 310-313.
- [20] 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. doi: 10.1109/LGRS.2008.2000620.
- [21] 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 & Information Science of Wuhan University*, 2011,

- 36(10): 1204–1208.
- [22] RODRIGUEZ-ALVAREZ N and GARRISON J L. Generalized linear observables for ocean wind retrieval from calibrated GNSS-R delay-doppler maps[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 54(2): 1142–1155. doi: 10.1109/TGRS.2015.2475317.
- [23] UNWIN M, JALES P, TYE J, *et al.* Spaceborne GNSS-reflectometry on TechDemoSat-1: Early mission operations and exploitation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4525–4539. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2603846.
- [24] TYE J, JALES P, UNWIN M, *et al.* The first application of stare processing to retrieve mean square slope using the SGR-ReSI GNSS-R experiment on TDS-1[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4669–4677. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2542348.
- [25] 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.
- [26] CLARIZIA M P and RUF C S. Wind speed retrieval algorithm for the cyclone global navigation satellite system (CYGNSS) mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4419–4432. doi: 10.1109/TGRS.2016.2541343.
- [27] ESA. MetOp's polar orbit[OL]. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/The\\_Living\\_Planet\\_Programme/Meteorological\\_missions/MetOp/Orbit](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Meteorological_missions/MetOp/Orbit). 2017.10.
- [28] SURREY SATELLITE TECHNOLOGY LTD. TechDemo Sat-1: The Mission[OL]. <http://www.sstl.co.uk/Missions/TechDemoSat-1—Launched-2014/TechDemoSat-1/TechDemoSat-1—The-Mission>. 2017.10.
- [29] 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: 90–91.
- YANG Dongkai and ZHANG Qishan. GNSS Reflected Signal Processing: Fundamentals and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 90–91.
- 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.
- 刘毅: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为卫星导航信号及其在风速遥感中的应用.
- 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.