DOI:10.11918/202006020

融合 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据监测飓风强度

石书祝[1],王市委[2],高柯夫[3]

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院,武汉 430079; 2. 武汉大学 电子信息学院,武汉 430072;
3. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心,武汉 430079)

摘 要: 为提高海洋飓风强度的观测频次和测量准确度,对综合利用热带气旋全球导航卫星系统(CYGNSS)和土壤湿度主动-被动探测(SMAP)卫星数据监测飓风强度进行了研究.首先,介绍了卫星数据特征;然后,以佛罗伦萨飓风为例,提出了融合这两种卫星数据监测海洋飓风强度的方法,其中包括卫星数据预处理、基于像素级影像融合方法的高风速区域提取和飓风强度测量;最后,将融合两种卫星数据测得的10场飓风的强度与美国国家飓风中心(NHC)提供的飓风最大风速值进行对比分析,并采用平均绝对误差、均方根偏差和相关系数3个指标评价这两种风速测量结果之间的差异.结果表明:与仅利用SMAP卫星数据相比,本文方法能以更高的频次监测飓风强度,可获得更加完整的飓风高风速区域;与美国国家飓风中心提供的飓风最大风速值相比,本文方法监测飓风强度结果的平均绝对误差变动范围为3.9~10.2 m/s,均方根偏差变动范围为4.6~12.5 m/s,相关系数变动范围为0.570 7~0.915 2,验证了提出的海洋飓风强度监测方法的有效性.

关键词: 飓风强度;遥感监测;热带气旋全球导航卫星系统(CYGNSS);土壤湿度主动-被动探测(SMAP)
中图分类号: X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)02-0071-06

Measurement of hurricane intensity by fusing CYGNSS and SMAP satellite data

SHI Shuzhu[1], WANG Shiwei[2], GAO Kefu[3]

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Global Navigation Satellite System Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To improve the frequency and accuracy for measuring ocean hurricane intensity, a joint use of cyclone global navigation satellite system (CYGNSS) and soil moisture active and passive (SMAP) satellites data to measure the hurricane intensity was investigated. First, the satellite data characteristics were introduced. Then, taking Hurricane Florence as an example, a method was proposed by fusing the satellite data to measure the ocean hurricane intensity, including the preprocessing of satellite data, the extraction of high wind speed area using a pixel-level data fusion method, and the measurement of hurricane intensity. Finally, the observation results of ten hurricanes were compared with the highest wind speed measured by the American National Hurricane Center (NHC). The root-mean-square difference, mean absolute error, and correlation coefficient were adopted to analyze the differences among the wind speed measurement results. Results demonstrate that compared with the case of the SMAP satellite data, the proposed method could measure the hurricane intensity at more frequent intervals, and more complete high wind speed area was obtained. The comparison between the hurricane intensity obtained using the proposed method and measured by NHC shows that the mean absolute error ranged between 3.9 and 10.2 m/s, the root-mean-square difference varied between 4.6 and 12.5 m/s, and the correlation coefficient ranged between 0.570 7 and 0.915 2, which confirms the effectiveness of the proposed method in measuring hurricane intensity.

Keywords: hurricane intensity; remote sensing; cyclone global navigation satellite system (CYGNSS); soil moisture active and passive (SMAP)

飓风具有突发性强、破坏力大的特点,会对沿海地区造成巨大的经济损失和不同程度的人员伤亡,是世界上最严重的自然灾害之一.准确监测飓风的中心位置、路径和强度,并对这些参数的演变情况进行高频次监测,对减轻和降低飓风灾害具有重要意义[1].

卫星遥感因其覆盖范围广、成像面积大、时间分辨率高等优点,已成为监测飓风的常用手段之一[2].目前监测飓风的卫星主要有地球同步轨道气象卫星、极轨气象卫星和合成孔径雷达卫星.与地球同步轨道气象卫星相比,搭载微波散射计或辐射计的极轨气象卫星可获取全球海表面风场信息,而且不受云雾等复杂天气状况的影响,是监测飓风强度的最主要手段[3].但这些传感器的重复观测周期比

收稿日期: 2020-06-04
作者简介: 石书祝(1982—),男,副教授
通信作者: 高柯夫,gao@whu.edu.cn

较长,在飓风的生命周期内只能获得有限的观测数据[4].而且如本文后面所述,这些传感器的刈幅不连续,有时没有覆盖飓风的最大风速区,导致较大的飓风强度测量误差.

基于全球导航卫星系统反射信号测量技术的热带气旋全球导航卫星系统(CYGNSS)由美国国家航空航天局(NASA)于2016年12月15日发射.它由8颗低轨小卫星组成,主要任务是在35°N~35°S的区域内以25 km×25 km的空间分辨率和大约7.2 h的平均重访时间监测3~70 m/s范围内的海面风速[5].而且它能在每秒内同时生成32条宽度为25 km、长度为几十万米的刈幅[6].与搭载微波传感器的极轨气象卫星相比,CYGNSS卫星可明显缩短监测飓风的时间间隔,进而在飓风的生命周期内可获取更多的观测数据,同时还能提升空间覆盖率.美国密西根大学的研究人员提出了利用CYGNSS数据监测飓风中心、强度和集成动能的方法[7-9],并分别利用仿真数据和实测数据初步分析了CYGNSS卫星监测飓风的性能[10-11].南京信息工程大学的胡运等[12]也比较分析了CYGNSS卫星测得的风速值与实测数据之间的差异.然而,由于CYGNSS卫星的刈幅比较窄,而且在某些时刻上获得的刈幅数量比较稀少,因此仅利用CYGNSS卫星数据难以获得完整的高风速区域以进行准确的飓风强度测量[13].尽管如此,如果将CYGNSS卫星数据和极轨气象卫星数据进行融合,那么不但可对飓风强度进行更高频次的监测,而且还可获得比较完整的高风速区域从而进行更准确的飓风强度测量,但目前尚未见到相关研究报道.

以监测飓风常用的土壤湿度主动-被动探测(SMAP)卫星为例,本文首先介绍了该卫星和CYGNSS卫星数据的特征,在此基础上提出了融合这两种卫星数据监测飓风强度的方法,并将测量结果与美国国家飓风中心(NHC)提供的飓风最大风速值进行了对比分析,为以较高的频次准确监测海洋飓风强度提供一种新的解决方案.

1　卫星遥感数据

1.1　CYGNSS卫星数据

CYGNSS卫星数据共包含5级数据,其中对外公开第1~4级数据[14].第0级数据为由每颗CYGNSS卫星搭载的延迟-多普勒映射(DDM)设备直接输出的原始数据.将第0级数据DDM中的二进制位转换成接收功率可得到第1A级数据.在第1A级数据的基础之上,通过解前向散射模型可得到反映双基地雷达横截面积DDM的第1B级数据.从第1B级数据中的双基地雷达横截面积DDM和有效散射区域DDM中推导出DDM平均值和前缘斜率两个观测量,可进一步反演得到第2级数据中的风速产品.值得注意的是,由于海面粗糙度与风速之间的对应关系在不同海况条件下是变化的,因此这里的风速反演采用了两种地球物理模型函数获取第2级风速数据[15].其中一种是适用于一般海况的完全发育海洋模型;另外一种是适用于靠近飓风或处于飓风内部的海域的有限风区未完全发育海洋(YSLF)模型.第3级数据为第2级风速数据的网格化产品,即分别在空间上以0.2°×0.2°(纬度×经度)网格为单元取平均值,在时间上以1 h为单元取平均值.

本文采用基于YSLF模型反演得到的CYGNSS卫星第3级数据的2.1版本(数据下载地址https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/CYGNSS_L3_V2.1)监测海面10 m高度处的风速(U10),因为该版本的数据为经过地理编码之后的网格化风速产品,便于与极轨气象卫星数据进行融合以提取高风速区域.此外,该版本的数据格式为netCDF-4,包含了每个像素对应的地理位置、测量时间和风速值.

1.2　SMAP卫星数据

SMAP卫星由NASA设计成无源(工作频率为1.41 GHz的辐射计)和有源(工作频率为1.26 GHz的散射计)两种模式相结合的L波段探测器.它的平均飞行高度为685 km,轨道重复周期为8 d,刈幅宽度大约为1 000 km,空间分辨率为40 km[16].虽然该卫星被设计用于监测全球土壤湿度和冻融状态,但由于它还能获取海面后向散射系数,因此在风暴风速监测中也取得了很好的应用效果[17].

SMAP卫星数据共包含4级数据[18],本文采用SMAP卫星辐射计的第2B级近实时数据的4.3版本(数据下载地址http://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/smap/L2/JPL/V4.3)监测飓风强度.因为对于20~40 m/s范围内的海面风速,该版本数据与实测结果之间的偏差比较小[17],而且为在空间上以0.25°×0.25°网格为单元取平均值之后的网格化风速产品.此外,该版本的数据格式为HDF5,同样包含了每个像素对应的地理位置、测量时间和风速大小.

2　飓风强度监测方法

接下来以佛罗伦萨飓风为例阐述如何融合处理上述卫星遥感数据以监测飓风强度.

佛罗伦萨飓风起源于2018年8月30日在非洲西海岸形成的一个强热带波,并于9月1日达到热

带风暴状态. 该飓风的风速在 9 月 10 日达到了 225 km/h，直到 9 月 14 日才减小至 144 km/h[19]. 依据佛罗伦萨飓风的演化阶段，本文选取 2018 年 9 月 10 日至 13 日的 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据用于监测该飓风的强度. 此外，依据美国 NHC 提供的如图 1所示的佛罗伦萨飓风最优轨迹[19]，本文选择观测区域位于西经 53° ~80°，北纬 18° ~36°.

飓风强度监测方法的第 1 步是数据预处理. 考虑到每个卫星数据在像元大小、获取时间和观测结构中的差异，首先在空间上以 0.25° ×0.25°网格重新划分 CYGNSS 卫星数据，使其网格尺寸与 SMAP 卫星数据保持一致，然后再进行影像配准. 在此之后，采用相同比例依次画出基于 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据反演得到的风速结果. 最后按以下 3 种情况对数据进行分类处理.

1）如果 SMAP 卫星数据包含了完整的飓风高风速区域，或者完全不覆盖飓风所在区域，那么不对这些数据做进一步处理，如图 2 所示为 SMAP 卫星分别在 2018 年 9 月 12 日 21:12 协调世界时（UTC）和 9:43 UTC 获得的观测结果. 这是因为与 CYGNSS 卫星数据相比，SMAP 卫星数据能提供更好的高风速区域视觉效果.

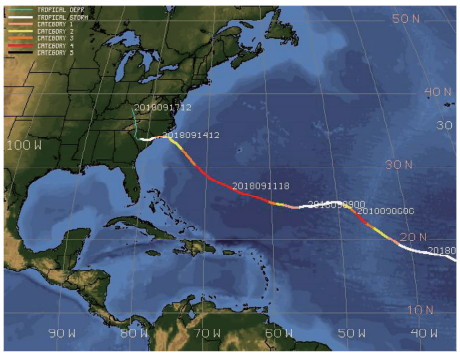


图 1　美国 NHC 提供的佛罗伦萨飓风最优轨迹[19]

Fig. 1　Optimal trajectory of Hurricane Florence provided by NHC[19]

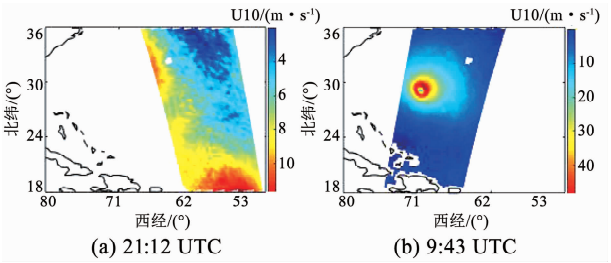


图 2　SMAP 卫星于 2018 年 9 月 12 日（a）21:12 UTC 和（b）9:43 UTC 监测佛罗伦萨飓风的结果

Fig. 2　Two observation results of Hurricane Florence acquired by SMAP satellite at (a) 21:12 UTC and (b) 9:43 UTC on September 12, 2018

2）如果 SMAP 卫星数据只包含了一部分飓风高风速区域，那么依据飓风的移动速度选取部分 CYGNSS 卫星数据与 SMAP 卫星数据进行融合以获得更加完整的高风速区域.

3）由于 CYGNSS 的刈幅比较稀疏，因此同样依据飓风的移动速度对剩余的 CYGNSS 数据进行融合以获得更加完整的飓风高风速区域.

飓风强度监测方法的第 2 步是采用像素级影像融合方法对 SMAP 卫星数据和 CYGNSS 数据进行融合. 像素级影像融合方法的本质可写成

$$P_{\text{fusion}}(x,y)=m(P_1(x,y),P_2(x,y),\cdots,P_N(x,y)). \tag{1}$$

式中：$P_1(x,y),P_2(x,y),\cdots,P_N(x,y)$ 为照射相同区域的 N 幅影像；$m(\cdot)$ 为融合运算符，通常为求平均值或最大值的运算符；x 和 y 分别为影像的横坐标变量和纵坐标变量.

像素级影像融合方法具体包括以下 3 个步骤：

1）首先选择 117 km/h 风速值（一级飓风的最小风速值）作为门限阈值将单个卫星数据分割为感兴趣的区域（ROI）和不感兴趣的区域（UROI），其中 ROI 为包含高风速值的区域，因为它可能属于飓风所在区域. 剩余的所有像素被划分为 UROI.

2）然后在像素上采用求最大值的运算符融合所有卫星数据的 ROI 和 UROI，即

$$P_{\text{fusion}}(u,v)=\max(P_1(u,v),P_2(u,v),\cdots,P_N(u,v)). \tag{2}$$

式中：P_{fusion} 为融合之后得到的影像，$\max(\cdot)$ 为求最大值运算符，(u,v) 为像素在影像中的位置变量.

3）最后，当 N 幅影像中的所有像素都完成融合之后，输出最终的融合影像 P_{fusion}.

由此可见，与单个 SMAP 或 CYGNSS 卫星数据相比，采用像素级影像融合方法可以较好地融合 SMAP 卫星数据和 CYGNSS 数据中各自包含的飓风高风速区域，因此处理之后的结果在理论上可以获得更加完整的飓风高风速区域. 实际应用中，经融合之后的一幅影像如图 3（c）所示. 在图 3 中，SMAP 卫星在 2018 年 9 月 10 日 21:37 UTC 只获得了佛罗伦萨飓风的一部分高风速区域，通过与 CYGNSS 卫星在 21:30 ~23:30 UTC 获得的数据进行融合之后，获得了一个更加完整的高风速区域，验证了像素级影像融合方法的有效性.

飓风强度监测方法的第 3 步是提取飓风高风速区域及飓风强度. 在融合之后的影像上通过分析 ROI 区域的尺度大小和移动轨迹，利用一个半径为 150 km 的黑色圆圈标记飓风最大风速区所在位置. 这里同样考虑了以下 3 种情况：1）如果 SMAP 卫星数据包含了完整的飓风高风速区域，则直接从该卫

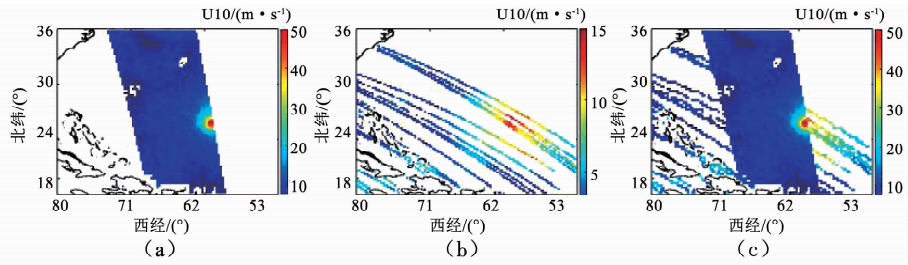


图 3　针对佛罗伦萨飓风,(a)SMAP 卫星在 2018 年 9 月 10 日 21:37 UTC 的监测结果,(b)CYGNSS 卫星在 21:30 ~ 23:30 UTC 的监测结果,(c)融合 SMAP 和 CYGNSS 卫星数据的监测结果

Fig. 3　Observation results for Hurricane Florence obtained by (a) SMAP at 21:37 UTC on September 10, 2018, (b) CYGNSS from 21:30 to 23:30 UTC, and (c) CYGNSS and SMAP satellite fusion data

星数据中获取黑色圆圈标记区域内的最大风速值;2)如果通过融合 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据获得飓风高风速区,那么首先从 CYGNSS 卫星数据中获取黑色圆圈标记区域内的最大风速值,然后将该值与通过 SMAP 卫星数据获得的最大风速值进行对比,获得二者之间的最大值;3)如果仅通过融合 CYGNSS 卫星数据获得高风速区域,则直接从该卫星数据中获得黑色圆圈标记区域内的最大风速值.

采用所提出的飓风强度监测方法融合 2018 年 9 月 10 日至 13 日期间的 CYGNSS 数据和 SMAP 卫星数据提取佛罗伦萨飓风高风速区域的结果见图 4. 从图 4 中可以清楚地看出,与仅利用 SMAP 卫星数据相比,融合 CYGNSS 数据和 SMAP 卫星数据不但能以更高的频次监测海洋飓风强度,而且还能获得更加完整的飓风高风速区域,验证了所提出的飓风强度监测方法的有效性.

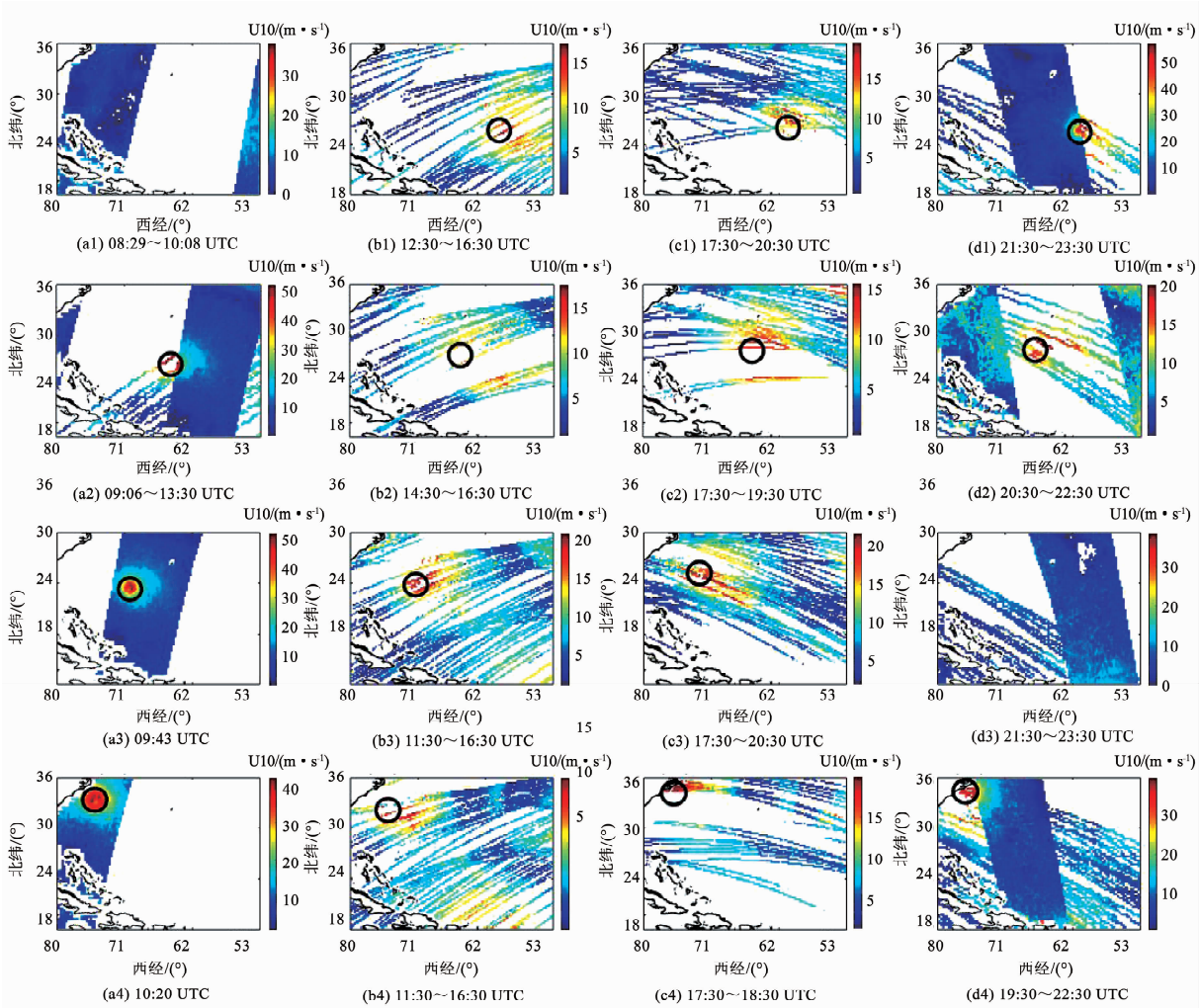


图 4　2018 年 9 月 10 日 ~ 13 日融合 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据提取佛罗伦萨飓风高风速区域的结果

Fig. 4　Final fusion images of Hurricane Florence observed from September 10 to 13, 2018 using CYGNSS and SMAP satellite data

3　飓风强度监测结果分析

依据本文的数据处理方法，融合 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据对包括佛罗伦萨飓风在内的 10 场飓风的强度进行了监测，并将测量结果与美国 NHC 提供的飓风最大风速值进行了对比分析. 分析结果见表 1，采用了平均绝对误差、均方根偏差和相关系数 3 个指标评价这两种风速测量结果之间的差异. 值得注意的是，NHC 提供的所有飓风最大风速值都是通过将综合利用气象卫星、飞机、天气多普勒雷达、海面浮标等多种手段获取的观测结果输入到飓风天气研究和预报系统(HWRF)等模型之后给出的最优最大风速值[20]，数据可从网址 https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/下载. 此外，本文还对 NHC 提供的风速结果进行了插值，以确保在相同的时间刻度上对上述两种风速测量结果进行对比.

从表 1 中可以看出，针对 10 场不同时间段的海洋飓风，与 NHC 提供的飓风最大风速值相比，本文提出的方法测得的飓风最大风速结果的平均绝对误差变动范围为 3.9 ~ 10.2 m/s，均方根偏差变动范围为 4.6 ~ 12.5 m/s，相关系数变动范围为 0.570 7 ~ 0.915 2. 造成上述两种风速测量结果之间差异的原因主要有以下几点：

1)由于 CYGNSS 卫星的刈幅比较窄而且稀疏，空间覆盖范围也有限，导致有时候 CYGNSS 卫星数据的融合结果没有完全覆盖飓风最大风速区，例如图 4(b2)展示的 CYGNSS 卫星在 2018 年 9 月 11 日 14:30 ~ 16:30 UTC 监测佛罗伦萨飓风的数据融合结果.

2)有些飓风在观测周期内已经临近登陆或者已经登陆，即此时飓风的最大风速区位于陆地上，如图 4(c4)展示的佛罗伦萨飓风，但 CYGNSS 卫星和 SMAP 卫星都只能监测海面风速.

3)本文采用的 SMAP 卫星数据和 CYGNSS 卫星数据在监测海面风速时，与浮标等提供的风速实测结果相比存在一定偏差[17,21]，导致融合上述两种卫星数据监测飓风强度的结果相对于 NHC 提供的监测结果也会存在偏差.

4)本文采用的 SMAP 卫星数据和 CYGNSS 卫星数据在空间和时间上都做了平均处理，导致测得的最大风速值会偏小.

表 1　融合 CYGNSS 和 SMAP 卫星数据测得的飓风最大风速值与 NHC 提供的监测结果对比

Tab. 1　Comparison between the highest wind speed obtained by fusing CYGNSS and SMAP satellite data and that provided by NHC

飓风名称	观测周期	平均绝对误差/(m·s^{-1})	均方根偏差/(m·s^{-1})	相关系数
多里安	2019 年 9 月 1 日 ~4 日	7.3	8.6	0.843 7
佛罗伦萨	2018 年 9 月 10 日 ~13 日	5.9	6.8	0.737 9
迈克尔	2018 年 10 月 8 日 ~10 日	6.4	7.3	0.892 2
哈维	2017 年 8 月 23 日 ~26 日	5.5	6.7	0.915 2
诺曼	2018 年 9 月 1 日 ~4 日	6.6	7.3	0.892 2
艾莱塔	2018 年 6 月 7 日 ~9 日	10.1	12.5	0.750 7
罗莎	2018 年 9 月 27 日 ~30 日	10.2	11.9	0.570 7
温贝托	2019 年 9 月 16 日 ~19 日	3.9	4.6	0.823 7
埃里克	2019 年 7 月 29 日 ~8 月 1 日	7.6	10.9	0.617 8
洛伦佐	2019 年 9 月 27 日 ~29 日	5.7	6.4	0.588 6

4　结　论

本文介绍了 CYGNSS 和 SMAP 两种卫星数据的特征，在此基础上提出了融合这两种卫星数据监测飓风强度的方法，并将测量结果与美国 NHC 提供的飓风最大风速值进行了对比分析. 结果表明：1)与仅利用 SMAP 卫星数据相比，所提出的方法能以更高的频次监测飓风强度；2)与 NHC 提供的飓风最大风速值相比，所提出的方法监测飓风强度结果的平均绝对误差变动范围为 3.9 ~ 10.2 m/s，均方根偏差变动范围为 4.6 ~ 12.5 m/s，相关系数变动范围为 0.570 7 ~ 0.915 2，验证了本文提出的海洋飓风强度监测方法的有效性. 接下来，一方面将考虑融入更多的极轨气象卫星数据，进一步提高飓风强度的监测频率和测量准确度. 另一方面，还将该方法应用于融合处理海洋二号卫星数据[3]和同样基于全球导航卫星系统反射信号测量技术的国产捕风一号卫星数据[22]，以提高对中国周边海域台风强度的实时监测性能.

参考文献

[1] KHALIL G M. Cyclones and storm surges in Bangladesh: some mitigative measures[J]. Natural Hazards, 1992, 6: 11. DOI: 10.1007/BF00162096

[2] 胡潭高, 张登荣, 王洁, 等. 基于遥感卫星资料的台风监测技术研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 994
HU Tangao, ZHANG Dengrong, WANG Jie, et al. Review of typhoon monitoring technology based on remote sensing satellite data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(6): 994

[3] 林明森, 张毅, 宋清涛, 等. HY-2 卫星微波散射计在西北太平洋台风监测中的应用研究[J]. 中国工程技术, 2014, 16(6): 46
LIN Mingsen, ZHANG Yi, SONG Qingtao, et al. Application study of the HY-2 scatterometer on monitoring typhoon events in the northwest Pacific Ocean[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2014, 16(6): 46. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2014.06.007

[4] ZHANG X, LI T, WENG F, et al. Reanalysis of western Pacific typhoons in 2004 with multi-satellite observations[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 97(1): 3. DOI: 10.1007/s00703-006-0240-5

[5] RUF C, LYONS A, UNWIN M, et al. CYGNSS: enabling the future of hurricane prediction[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(2): 52. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2260911

[6] RUF C, GLEASON S, RIDLEY A, et al. The NASA CYGNSS mission: overview and status update[C]// 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth: IEEE, 2013: 2641. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127537

[7] MAYERS D, RUF C. Tropical cyclone center fix using CYGNSS winds[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58(9): 1993. DOI: 10.1175/JAMC-D-19-0054.1

[8] MORRIS M, RUF C F. Determining tropical cyclone surface wind speed structure and intensity with the CYGNSS satellite constellation [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56(7): 1847. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0375.1

[9] MORRIS M, RUF C F. Estimating tropical cyclone integrated kinetic energy with the CYGNSS satellite constellation [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56(1): 235. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0176.1

[10] SAID F, SOISUVARN S, JELENAK Z, et al. Performance assessment of simulated CYGNSS measurements in the tropical cyclone environment [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(10): 4709. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2559782

[11] RUF C, ASHARAF S, BALASUBRAMANIAM R, et al. In-orbit performance of the constellation of CYGNSS hurricane satellites [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(10): 2009. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0337.1

[12] HU Yun, WANG Xiaohun, WANG Dongxiao. Validation of CYGNSS observation and its potential applications[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(3): 370. DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2018.03.013

[13] LEROUX M D, WOOD K, ELSBERRY R L, et al. Recent advances in research and forecasting of tropical cyclone track, intensity, and structure at landfall[J]. Tropical Cyclone Research and Review, 2018, 7(2): 85. DOI: 10.6057/2018TCRR02.02

[14] RUF C, CHANG P S, CLARIZIA M, et al. CYGNSS handbook [M]. Ann Arbor: Michigan Publishing, 2016

[15] RUF C S, BALASUBRAMANIAM R. Development of the CYGNSS geophysical model function for wind speed[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(1): 66. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2833075

[16] MEISSNER T, RICCIARDULLI L, WENTZ F J. Capability of the SMAP mission to measure ocean surface winds in storms [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(8): 1660. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0052.1

[17] YUEH S H, FORE A G, TANG Wenqing, et al. SMAP L-band passive microwave observations of ocean surface wind during severe storms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(12): 7339. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2600239

[18] Jet Propulsion Laboratory. SMAP (Soil Moisture Active Passive)—Data Products[EB/OL]. (2015-10-08)[2020-01-06]. https://smap.jpl.nasa.gov/data/

[19] National Hurricane Center. Tropical cyclone report: Hurricane Florence[EB/OL]. (2019-05-03)[2020-03-22]. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2018&basin=atl

[20] CANGIALOSI J P, BLAKE E, DEMARIA M, et al. Recent progress in tropical cyclone intensity forecasting at the National Hurricane Center[J]. Weather and Forecasting, 2020, 35(5): 1913. DOI: 10.1175/WAF-D-20-0059.1

[21] RUF C S, GLEASON S, MCKAGUE D S. Assessment of CYGNSS wind speed retrieval uncertainty[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(1): 87. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2825948

[22] 杨东凯, 李晓辉, 王峰. GNSS 反射信号海洋遥感应用现状分析[J]. 无线电工程, 2019, 49(10): 843
YANG Dongkai, LI Xiaohui, WANG Feng. Analysis of application status of GNSS reflected signal in ocean remote sensing[J]. Radio Engineering, 2019, 49(10): 843. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3106.2019.10.001

(编辑 苗秀芝)