

星载Ku波段雷达星下点降雨识别流程构建

胡暉平¹, 谢航¹, 李秀仲^{1,3}, 徐莹^{2,3}, 何宜军^{1,3}

1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 南京 210044;
2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;
3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 10081

摘要: Ku波段雷达探测波束在经过降雨区域时, 由于雨滴对微波能量的吸收或散射, 其回波信号会发生衰减, 从而改变雷达的后向散射系数, 最终使观测结果产生偏差, 因此降雨识别对提高雷达观测结果的精度具有重要意义。根据本文研究, 2018年发射的中法海洋卫星CFOSAT (China - France Oceanography Satellite) 所搭载的海浪波谱仪SWIM (Surface Wave Investigation and Monitoring) 对降雨事件的发生频率存在低估。本文对一种基于MP (Matching Pursuit) 算法的降雨标识方法进行了改进, 以高度计回波估计的误指向角和雷达后向散射系数的沿轨波形作为改进后算法的输入, 并增加了滑动窗口对沿轨波形的处理。将改进后的降雨标识与相同时空范围内Jason-3的降雨识别结果以及GPM (Global Precipitation Measurement) 的后处理高精度全球降水产品进行了对比, 结果显示, 相比SWIM 0.3版本中的降雨标识, 本文的降雨标识对降雨具有更高的准确度。

关键词: 微波遥感, Ku波段高度计, 中法海洋卫星, 雷达回波, SWIM, MP算法, 降雨识别, 6S bloom

中图分类号: P2

引用格式: 胡暉平, 谢航, 李秀仲, 徐莹, 何宜军. XXXX. 星载Ku波段雷达星下点降雨识别流程构建. 遥感学报, XX(XX): 1-14

HU Weiping, XIE Hang, LI Xiuzhong, XU Ying, HE Yijun. XXXX. Construction of Flow for Nadir Rain Flag Identification of Spaceborne Ku-band Radar. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20243329]

1 引言

对于微波海洋卫星遥感, 降雨是影响卫星产品质量的重要因子之一。首先, 由于微波在水中的传播速度变慢, 使得微波脉冲往返的时间间隔变长, 这会导致根据其往返时间计算的海面高度会出现误差 (Tournadre 等, 1997)。其次, 由于雨滴对微波的吸收和散射作用使得高度计回波信号的功率发生变化, 从而导致在降雨区域根据高度计回波反演的雷达后向散射系数、有效波高以及根据雷达后向散射系数反演的海面风速可能出现较大误差 (姜祝辉等, 2011)。此外, 雨滴击打海面时还会改变海面的粗糙程度, 导致雷达后向散射系数发生变化。对于Ku波段高度计而言, 雨滴对微波能量的吸收在所有降雨对微波的影响中起

主导作用。在高度计经过降雨区域时, 其回波功率往往会发生衰减, 进而使回波波形失真。高度计回波波形是反演后向散射系数以及海面有效波高和风速等高度计产品的重要参数。由失真回波波形所估计的地球物理参数的精度必然会大大降低 (Quartly 等, 1998)。因此将高度计观测过程中受到降雨影响的数据标记出来, 对后续地球物理参数的计算以及校准工作等方面具有重要意义。

目前已有的高度计降雨识别方法主要分为两种, 一是根据校正辐射计所反演的大气液态水含量LWC (Liquid water content) 对高度计数据进行降雨标识, 二是将两个观测波段的后向散射系数进行对比后建立相关关系进而可以得到微波的衰减程度 (Guymer 等, 1995; Quartly, 2004; Quartly 等, 1996; Tournadre 等, 1997)。第一种

收稿日期: XXXX-XX-XX; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2022YFC3104902), 国家自然科学基金(编号:41706202和42176184), 海风海浪探测卫星波谱仪数据处理软件研制

第一作者简介: 胡暉平, 研究方向为小入射角微波遥感。E-mail: 1042790665@qq.com

通信作者简介: 李秀仲, 研究方向为卫星海洋遥感与应用。E-mail: lixiuzhong@nuist.edu.cn

方法利用校正辐射计的观测参数估计高度计足印上方空气柱的LWC,当LWC高于一定阈值则认为该处高度计数据受到了降雨影响。但是辐射计的足印半径大于高度计足印半径且即使在小范围内降水强度也会存在较大变化,因此仅依靠辐射计的降雨标识结果存在精度较低的问题(Quartly等,1996;Tournadre等,1997)。相比第一种方法,另一种基于两种不同观测波段的后向散射系数的降雨标识算法(后文简称为双波段算法)对高度计的降雨标识则更为精确。双波段算法的核心思想是利用微波在降雨中的衰减程度对于频率的依赖性。例如,当降水强度超过 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时Ku波段的后向散射系数 σ^0 会比无雨时衰减10dB左右,而C波段却几乎没有衰减(Tournadre,2004)。因此可根据两个波段观测的 σ^0 建立相关关系,从而确定Ku波段的衰减程度(Tran等,2004)。经验证,在南北纬 50° 内双波段算法可以较为精确的对降雨进行标识,且可以根据计算的Ku波段的后向散射系数衰减程度对降雨率进行估计(Tournadre,2004)。但对于单波段的高度计,双波段算法显然是不适用的。

2013年,法国和印度联合发射的SARAL(Satellite with ARGOS and ALtiKa)卫星所搭载的AltiKa高度计首次采用单一Ka波段进行探测。由于Ka波段受降雨影响后衰减明显,Tournadre等人将MP算法运用于Ka波段的降雨识别中(Tournadre等,2009)。该算法只需要一种微波频率的探测数据就可以进行降雨识别,它通过提取高度计误指向角 ζ^2 沿轨波形中的短尺度的强脉冲信号,从而找到高度计失真的回波波形的位臵,实现高度计的降雨识别。验证结果表明,MP算法的标识结果对Ka波段衰减超过1dB、观测高度误差超过5cm以及有效波高误差超过20cm的数据识别率超过了90%。但是,在后向散射系数 σ^0 长时间超过15dB时(文献中将其称为 σ^0 -bloom事件)误指向角 ζ^2 沿轨波形也会出现短尺度的强脉冲信号,而通过MP算法的标识结果中也包括了这种情况。为了避免 σ^0 -bloom事件对降雨标识的干扰,依然需要增加辐射计的观测结果(Tournadre等,2015)。

2018年发射的中法海洋卫星CFOSAT(China-France Oceanography Satellite)所搭载的海浪波

谱仪SWIM(Surface Wave Investigation and Monitoring)是一个工作在Ku波段的多波束真实孔径雷达,其 0° 波束与高度计的探测波束工作原理类似。与AltiKa高度计相同,SWIM也仅有一个探测波段,但与SARAL相比,CFOSAT上并未搭载校正辐射计,因此无法将MP算法直接应用于SWIM的降雨识别中。法国空间研究中心CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)所提供的SWIM的2级产品中的降雨标识算法也参考了Tournadre等人提出的MP算法以及一种基于小功率谱的方法,但并未给出具体的算法流程以及相关参数设置(Hauser等,2020)。

本文对2022年1-3月SWIM 6.0.3版本星下点产品的降雨标识与相同时间段内的Jason-3中的降雨标识进行了对比。其中Jason-3的降雨标识数量占总数据量的3.1%,而SWIM的L2星下点产品中的降雨标识率仅为1.03%,相比Jason-3,降雨标识少了约67%。基于Jason-3成熟的观测配置以及双波段算法的准确性,此结果表明SWIM目前的降雨识别结果对实际降雨存在严重低估现象。因此,为了解决目前SWIM产品星下点降雨标识不准确的问题,本文对基于MP算法的降雨识别方法进行了改进并应用于SWIM的L2星下点产品中。

本文第二部分介绍了研究过程中所使用的数据,第三部分讲解了具体方法,总结了技术流程,并对其结果进行了具体讨论,第四部分给出了本文的研究结论。

2 数据

2.1 SWIM星下点产品

中法海洋卫星CFOSAT是一个由中国和法国空间研究中心CNES为了同步海浪谱和海面风场观测而设计的卫星,飞行高度为520km。其数据产品可以完善对海况的分析和预测,为天气预报和气候监测提供重要参考。CFOSAT所搭载的海浪波谱仪SWIM是一个工作在Ku波段(13.575GHz)的多波束真实孔径雷达,能向海面发射6个不同入射角的波束: 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 和 10° ,每个波束天线孔径都是 2° 。其中入射角为 0° 的波束为脉冲有限波束,原理和卫星高度计相同,用于进行有效波高和风速测量,另外的波束为中心视轴偏离天底方向 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 的5个笔形波束,通

过每分钟 5.6 转的速度旋转，用于获得海洋波浪的二维方向谱。本文主要采用的是 SWIM 的 6.0.3 版本 L2 星下点产品，它包括了根据回波波形所计算的沿轨后向散射系数以及误指向角数据。其星下点降雨标识产品还包括了 σ^0 -bloom 标识 (Hauser 等, 2020)。

2.2 Jason-3 GDR 产品

Jason-3 卫星是美法联合海洋测绘任务所于 2016 年 1 月 17 日发射的第四颗卫星高度计，是 TOPEX/Poseidon, Jason-1 和 Jason-2 的后继卫星，至今仍在运行，产品稳定性好。该星上搭载的高度计为 Poseidon-3B，工作波段为 Ku 波段 (13.575GHz) 和 C 波段 (5.3GHz)，是一个低功耗、低质量高度计，在数据校正后，可以非常精确地估计信号往返时间以计算距离，并给出了比较准确可靠的适用于 Ku 波段的星下点降雨识别标识。本文中的 MP 算法采用的是 Jason-3 卫星 f 版本的 SDR 和 GDR 数据集，其中 GDR 包括了 1Hz 和 20Hz 两种不同时间分辨率的数据。其沿轨后向散射系数以及 Ku 波段的天底指向角数据均是根据 MLE4 算法得出的结果。Jason-3 卫星数据提供了两种降雨标识产品，即双波段算法降雨标识和微波辐射计降雨标识，时间分辨率均为 1Hz (Bignalet-Cazalet 等, 2021)。

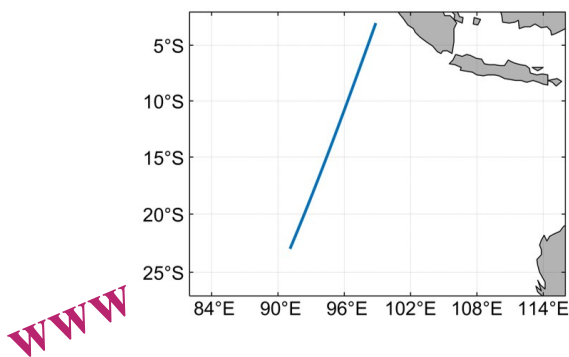
2.3 全球降水气候数据集 GPCP

全球降水气候数据 GPCP (Global Precipitation

Climatology Project) 是一个结合了数十颗静止卫星和极轨卫星的红外和微波观测资料并经过全球多个台站数据校正后的全球再分析降水产品，它提供了 1979 年至今的每 5 年降水数据、月平均降水数据以及 1996 年至今的日降水数据。本文使用了其 2.3 版本的日降水数据和月平均降水数据作为 MP 算法降雨识别结果的验证数据，其中 GPCP 日降水数据的空间分辨率为 1° 而月平均降水数据的空间分辨率为 2.5° (Adler 等, 2018; Huffman 等, 2001)。

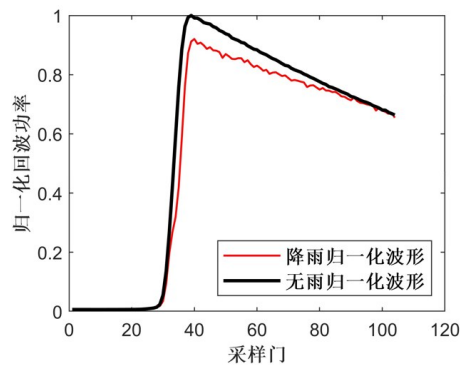
2.4 全球卫星降水计划多卫星融合产品 IMERG

全球卫星降水计划 GPM (Global Precipitation Measurement) 是一项国际卫星任务，由 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 和 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 合作开展，利用多传感器多卫星多算法结合卫星网络对全球降水进行观测。其中 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals) 产品是结合来自 GPM 中所有微波辐射计的数据生成的 3 级产品。其产品包括：早期多卫星产品 (Early)，用于起初的降水估计，发布时间为观测后 4 小时；后期多卫星产品 (Later)，发布时间为观测后 12 小时；终期多卫星产品 (Final)，发布时间为观测后约 2.5 个月。本研究使用的 IMERG 产品为后期多卫星产品，时间分辨率为 0.5 小时，空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。



(a) Jason-3 卫星运行轨迹。

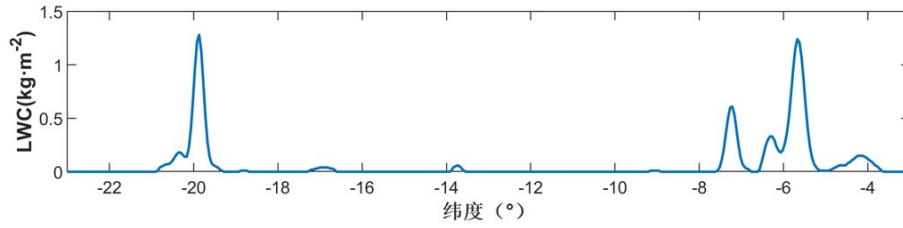
(a) The nadir track of Jason-3.



(b) Jason-3 降雨与无雨归一化回波功率。

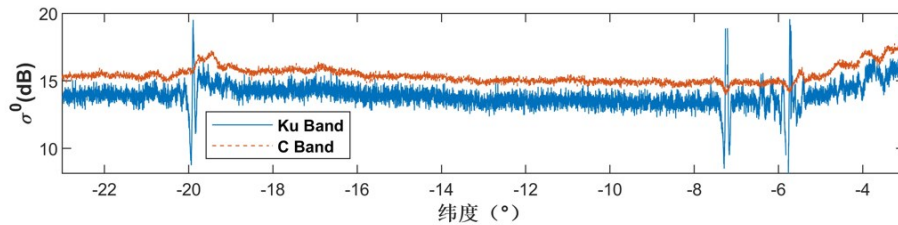
(b) The normalized radar echo power in rain and no rain

influenced data of Jason-3.



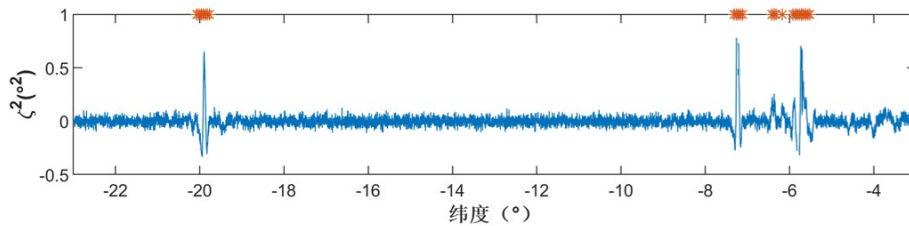
(c) Jason-3 辐射计估计的 1Hz 的大气液态水含量。

(c) Liquid water content estimated by radiometer in Jason-3。



(d) Jason-3 20Hz 的 Ku 波段后向散射系数沿轨波形。

(d) The Ku band along track waveform (20 Hz) of backscatter coefficients in Jason-3。



(e) Jason-3 20Hz 的误指向角沿轨波形（上方红色星号为 Jason-3 GDR 数据集中的根据双波段算法给出的降雨标识）。

(e) The along track waveform (20 Hz) of mispointing angles in Jason-3 (the red asterisks above indicate the rain flag given by dual-frequency algorithm in Jason-3 GDR dataset)。

图 1 Jason-3 卫星 Cycle 121 Pass 1 中的沿轨参数波形与降雨标识

Fig.1 The along track waveforms and rain flag in Jason-3 Cycle 121 Pass 1

3 方法和结果

高度计足中由液态水含量增高时，其回波波形相比于无雨时的回波波形会出现失真。图 1 显示了降雨与无雨处高度计回波、后向散射系数和误指向角的变化。与无雨时的平均回波的归一化波形相比，受降雨影响的回波波形的后沿会有所抬升，如图 1 (b) 所示。回波后沿斜率通常可以被用来估计高度计的误指向角，因此高度计在经过存在降水的区域时误指向角的波形会出现异常波动。研究表明，当 $\sigma^0 > 20dB$ 以及 $|\zeta^2| > 0.2^{\circ 2}$ 时回

波的峰值和后沿相比于理论回波波形会发生明显变化 (Tournadre 等, 2006)。根据图 1 (c) - (e)，Jason-3 的 σ^0 和 ζ^2 沿轨波形在 $20^{\circ}S$ 、 $7^{\circ}S$ 以及 $6^{\circ}S$ 附近振幅显著增加，且辐射计所观测的 LWC 也显示这三处附近的大气中的液态水含量显著高于其他地区，说明这三处有极大概率发生了降雨。

与误指向角 ζ^2 不同，后向散射系数 σ^0 依赖于回波峰值的大小，根本上反映了海面中小尺度的波动变化。 σ^0 的大小除了会受到降水的影响，还与海面风速大小有关，因此 σ^0 还包含了海面的风速信息。相比于 σ^0 沿轨波形， ζ^2 沿轨波形更依赖

于海面降水变化。因此, ζ^2 沿轨波形可以更好的表征回波波形受降雨的影响, 可以作为单一工作波段高度计降雨识别的主要参数 (Tournadre 等, 2009)。

然而从雷达参数的沿轨波形上看, 除了降雨外, 当海面风速小于 3m/s 或发生海面溢油时, 海表面会异常平滑, 这种海面状态在文献中被称为 slick 表面 (Ermakov 等, 1991)。需要注意的是这里所谓的海面平滑是指海面厘米级尺度的小波的缺失, 从更大的尺度上来说, 海面并非是平坦的 (Mitchum 等, 2004)。高度计的探测波束经过 slick 表面时, 后向散射系数 σ^0 的值会显著增大, ζ^2 沿轨波形的振幅也会显著增大。这种情况下, 非相干散射模型将不再适用, 因此得到的反演参数也可能存在异常。这种 σ^0 值的急剧增大现象在文献中被称为 “ σ^0 -bloom”。该现象会导致高度计回波达到峰值后快速衰减, 同样会造成回波波形失真, 从而导致误指南角沿轨波形的异常波动。由 σ^0 -bloom 导致的异常波动与降雨所导致的异常波动仅从振幅上难以区分, 但是由于 slick 表面的尺度一般情况下都会大于雨胞的尺度, σ^0 -bloom 导致的异常波动的持续时间往往大于高度计经过降雨区域的时间。而仅根据持续时间设置阈值并不能完全排除 σ^0 -bloom 的干扰。Tournadre 等人在利用 MP 算法对 AltiKa 的 ζ^2 沿轨波形重构的基础上, 增加了辐射计观测的 LWC 对重构 ζ^2 沿轨波形进行了过滤, 得到了准确的降雨识别结果 (Tournadre 等, 2015)。由于 AltiKa 是一个 Ka 波段高度计, 而 Ka 波段在降雨中的衰减约是 Ku 波段的 10 倍 (Tournadre 等, 2009), 且 CFOSAT 上并未搭载辐射计, 无法获取 LWC。因此, 必须重新调整 MP 算法中的阈值设置并找到一种能排除 σ^0 -bloom 干扰且不依赖于 LWC 方法, 才能对 SWIM 星下点产品进行准确的降雨识别。

3.1 基于 MP 算法的降雨标识方法

MP 算法是一种压缩感知算法, 其目的在于实现信号的压缩并从最大程度上保留其特征信息。其基本思想是基于小波分析的方法不断将小波函数在时域和频域上进行变换, 找到信号中与变换后的小波函数内积最大的部分, 最终将原信号通过一系列的变换后的小波函数线性表示出来, 这种方法也被称为信号的稀疏表示。理论上, 通过

小波函数重构的信号可以无限逼近原信号 (Davis 等, 1997; Mallat 等, 1993)。MP 算法是一个不断迭代的过程, 每次迭代会得到与当前信号残差最为匹配的小波函数 (在信号稀疏中称为 “原子”)。若小波函数为 $\psi(t)$, 经变换后的小波函数可写为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \#(1)$$

该函数中 a 为尺度参数, b 为时移参数。设原始信号为 s , R_i^i 为第 i 次迭代后的信号残差, MP 算法的过程可表示为

$$\begin{cases} R_s^0 = s \\ R_s^{i+1} = R_s^i - \langle R_s^i, \psi_i \rangle \psi_i \quad \#(2) \\ \psi_i = \arg \max_{\psi_i \in D} (\langle R_s^i, \psi_i \rangle) \end{cases}$$

其中 ψ_i 为第 i 次迭代中产生的 “原子”, $\langle \cdot \rangle$ 表示做内积, 集合 D 中包括了所有尺度和时移变换下的小波函数, 其对于原始信号 s 是过完备的。

若将 ζ^2 波形作为 MP 算法的输入信号, 其中因受到降雨或 σ^0 -bloom 等影响而振幅显著增大的异常部分在处理中可以视作需要保留的信号特征信息, 而无雨且没有 σ^0 -bloom、振幅很小的部分可以视作信号的白噪声, 则无需保留。经 MP 算法分解后的 ζ^2 波形 $\hat{\zeta}^2(t)$ 可表示为:

$$\hat{\zeta}^2(t) \approx \sum_{i=1}^n c_i \psi_i(t) = \sum_{i=1}^n c_i \psi_{a_i, b_i}(t) \quad \#(3)$$

本文 MP 算法选取的小波函数为消失矩为 8 的 Daubechies 小波 (简称为 db8 或 D8)。由于在计算机处理中, 需要对时间和尺度参数离散化, 采用了二进小波变换的方法即尺度参数 $a_i = 2^k$, $k = \log_2(N)$, N 为输入信号的长度。其中 k 必须为整数, 因此信号长度 N 需要填充为二进长度。

由于降雨标识的处理不需要重构后的 ζ^2 波形无限逼近原始波形, 因此处理中不对迭代残差进行约束, 而是通过直接设定迭代次数 n 停止迭代, 最终得到 n 个 “原子”。如果 n 设定的过小, 则可能信息遗漏, 而 n 设定过大则会导致信息冗余且效率低下。经过反复测试, 本文认为在对每一轨的卫星数据进行处理时将 n 设置为 200 较为合适, 但依然会存在一些冗余, 导致重构后的波形在非降雨处存在振幅很小的波动, 从而产生虚警现象。因此需要对 MP 算法输出的 “原子” 做进一步的筛选。首先对 “原子” 的尺度即 a_i 进行筛选, 可将

沿轨长度超过 160km 的大尺度波形变化被认为是与云雨衰减无关的。其次对“原子”的能量即 c_i 进行筛选，“原子”的能量必须显著的大于波形中的

高斯白噪声。本文设置尺度参数阈值为 9，原子能量阈值为无雨时白噪声功率的 3 倍 (Tournadre 等, 2009)。

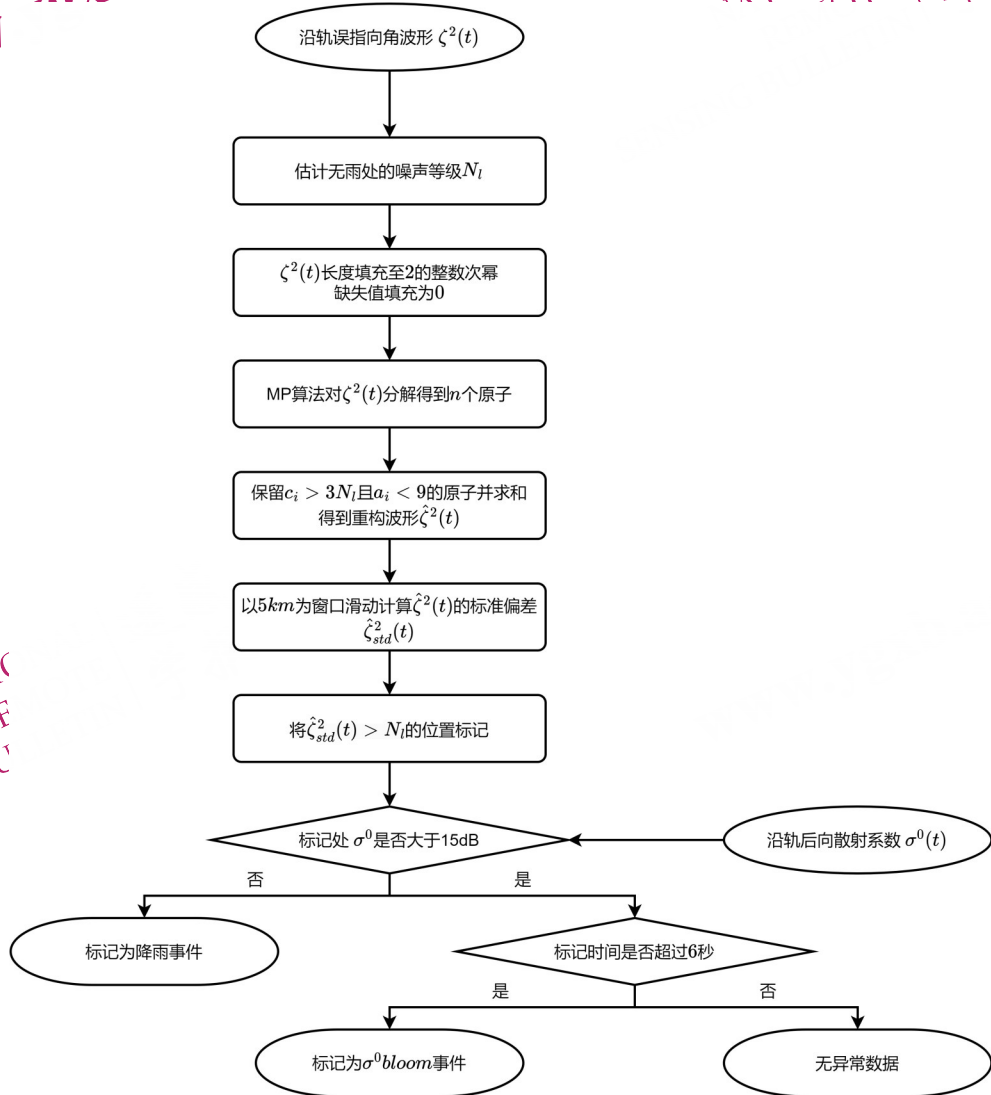


图 2 算法流程图

Fig.2 The flow chart of the algorithm

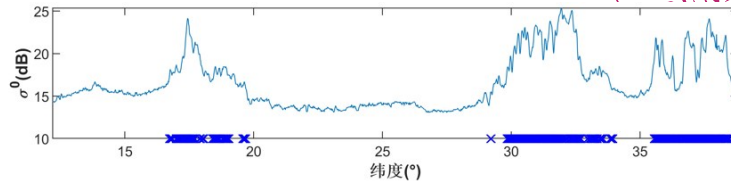
得到 MP 算法重构的 ζ^2 沿轨波形后，需要根据其绝对值的大小以及其标准偏差 STD (Standard Deviation)，对受降雨影响的区域进行标记。经本文测试，对于 SWIM 而言，将 Ku 波段重构的 ζ^2 波形的绝对值超过 0.55 倍的无雨时白噪声功率或者波形在 5km 窗口内的 STD 超过无雨时白噪声功率的部分作为降雨标识，可以有效降低由短脉冲边缘微小波动所造成的错误识别并尽可能地保留波形中的降雨信息。

而以上过程只是初步的筛选，并不能有效排除 σ^0 -bloom 干扰所导致的错误识别。如图 3 (a)

所示，在 16°N - 20°N 、 27°N - 34°N 和 35°N - 38°N 之间 σ^0 显著增高，其最大值超过 20dB，同时误指向角波形在这三处的振幅也显著增加。而经验表明，降雨的沿轨长度很少超过 100km，一般在一轨的卫星数据中不可能出现多次这种大尺度的降雨，而通过以上步骤的处理这三处的观测数据会不可避免地被标识出来。为了排除 σ^0 -bloom 的干扰，本文通过 σ^0 的沿轨波形对 σ^0 -bloom 进行识别，再将其从 MP 算法输出的结果中剔除。通过总结前人对 σ^0 -bloom 现象的研究 (Garcia, 1999; Mitchum 等, 2004; Thibaut 等, 2007; Tournadre 等,

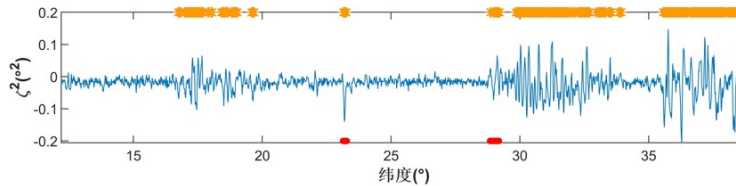
2006) 以及与 Jason-3 数据的对比结果, 本文将 σ^0 值超过 15dB 且持续时间超过 6 秒的 σ^0 -bloom 事件进行了识别并将其从 MP 算法的标识结果中剔除,

得到最终的降雨标识结果。需要注意的是该方法并不能精确识别 σ^0 -bloom 事件, 但能有效防止 σ^0 -bloom 对降雨识别的干扰。



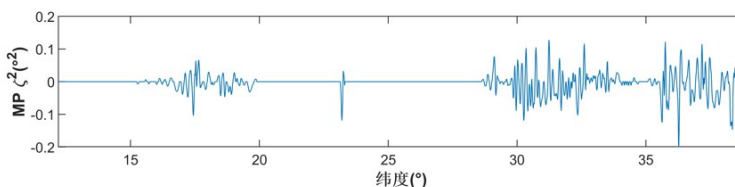
(a) SWIM 后向散射系数沿轨波形 (下方蓝色叉号表示该处附近后向散射系数超过 15dB 且持续时间超过 6 秒)

(a) The along track waveform of backscatter coefficients in SWIM (the blue crosses below indicate that the backscatter coefficients is over 15 dB and last over 6 seconds)



(b) SWIM 误指向角沿轨波形 (上方黄色星号为 MP 算法结果, 下方红色圆点为 MP 算法结果剔除 σ^0 -bloom 后的降雨标识结果)

(b) The along track waveform of mispointing angles in SWIM (the yellow asterisks indicate the flags given by MP algorithm and the red dots indicate the flags removed the σ^0 -blooms)



(c) 经过 MP 算法重构后的 SWIM 误指向角沿轨波形

(c) The along track waveform of mispointing angles in SWIM processed by MP algorithm

图 3 SWIM Cycle105 Pass18 (12.2°N-38.6°) 的沿轨参数波形与降雨标识

Fig.3 The along track waveforms and rain flags in SWIM Cycle105 Pass18 (12.2°N-38.6°)

3.2 降雨识别结果验证

图 4 是 SWIM 一段轨迹中几个雷达参数的沿轨波形, 该段波形中降雨对雷达参数的影响较为明显, 易于分辨。从图中可以看出 SWIM L2 星下点产品中的降雨标识位于 30.5°S、24°S 以及 18°S 附

近, 而本文重新计算的降雨标识在 29°S、和 18°S 左侧与 SWIM 产品存在明显不同。在两者均给出降雨标识的位置, 可以看到 ζ^2 波形发生了剧烈波动, 且从 σ^0 波形也可以看出 σ^0 值在降雨标识处发生了骤降。在 18°S 左侧明显存在两处 ζ^2 波形异常以及

σ^0 的骤降, 而 SWIM 产品只标记了一处。而在 29°S 附近, 虽然 ζ^2 与 σ^0 的波形变化并不明显, 但从有效波高 SWH (Significant Wave Height) 可以看出 29°S 附近 SWIM 观测的 SWH 存在异常变化, 这表明该处附近所观测的 SWH 数据质量可能受到降雨污染, 同时也表明了地球物理参数的反演误差与回波能量衰减程度之间存在很多不确定性。可见通过地球物理参数来评估降雨识别方法的表现并不准确。因此本文主要以对比 SWIM 与相同工作频率的高度计降雨标识结果以及全球降水产品提供的降雨率来验证降雨标识结果的准确性。

用于降雨识别验证的所有卫星产品以及全球降水产品的时间范围为 2022 年 1 月 1 日至 4 月 2 日。为了讨论对基于 MP 算法的降雨识别方法在 SWIM 产品中的表现, 本文首先选取了 Jason-3 的 GDR 产品中的双波段算法降雨标识结果作为参考。Jason-3 是以 Ku 波段为主生成各种高度计产品的, Ku 波段波形进行重跟踪, 得到了有效波高、海面高度等产品, 因此 Ku 波段回波波形是否受到降雨影响, 决定了高度计产品质量是否会受到降雨影响; 且 Jason-3 配备了校正辐射计, 观测手段成熟, Jason-3 中的降雨标识使用的双波段算法是目前 Jason 以及 Envisat 产品中降雨标识的业务化生成算法。同样, SWIM 也是以 Ku 波段海面回波波形为基础生成各种产品, 因此以 Jason-3 产品中降雨标识为参考, 能有效判断 SWIM 波形是否会受到降雨影响, 从而使降雨标识更有意义。

Jason-3 高度计中的双波段降雨标识利用了微波在降雨中的衰减程度对于频率的依赖性, 采用了 Ku 波段的 σ^0 观测值与 C 波段的 σ^0 观测值以及校正辐射计估计的大气液态水含量作为输入:

$$\begin{cases} \Delta\sigma^0 = f(\sigma_c^0) - \sigma_{ku}^0 \\ L_e > 200 \mu\text{m} \end{cases} \quad \#(4)$$

$\Delta\sigma^0$ 即 Ku 波段的降雨衰减, σ_{ku}^0 为 Ku 波段后向散射系数, σ_c^0 为 C 波段后向散射系数。f 则表示无雨时 Ku 波段 σ^0 与 C 波段 σ^0 具有一定的相关关系, 因此可根据其中一个波段的 σ^0 值估计另外一个波段的 σ^0 值。A 为 $\Delta\sigma^0$ 的阈值, 一般根据 C 波段 σ^0 的 RMS 确定。L_e 为单位面积上空的大气中液态水含量。简而言之, 就是由于在 C 波段 σ^0 几乎不受降雨影响, 而在 Ku 波段 σ^0 相比在 C 波段更易受到降雨影响, 因此当两个波段下观测的 σ^0 差值超

过一定程度则表明有极大可能发生了降雨。目前, 双波段算法已经成功地运用于 TOPEX 与 Jason 系列高度计的降雨识别中, 且根据 $\Delta\sigma^0$ 可以估计降水强度。其验证结果也表明, 根据双波段算法所估计的降水强度与 GPCP 月平均降水数据中的降水强度有着很好的一致性, 因此 Jason-3 中的降雨标识结果具有较高的可信度, 可以作为降雨标识结果的衡量标准之一。但由于两个卫星的运行轨迹不同, 且雨胞的空间尺度很少超过高度计足印尺度且降雨的持续时间一般以小时为单位, 两颗卫星很难观测到同一降雨事件, 因此本文主要从统计分析结果对 Jason-3 降雨标识与 MP 算法结果在相同时空下的降雨频率进行对比。

图 5 中的降雨数据占比 P_r 的计算方法为

$$P_r = \frac{f_r}{A} \quad \#(5)$$

其中 f_r 表示相同纬度数据中的降雨标识的数量, A 为相同纬度下观测数据总量。由于 Jason-3 GDR 产品在空间上只包含了 50°S – 50°N 内的降雨标识结果, 因此图 5 只统计了该纬度范围内的 SWIM 降雨标识进行对比。总体上, 可以看出 SWIM 6.0.3 版本星下点产品中的降雨标识量明显少于 Jason-3 的降雨标识量和 GPCP 的统计结果。且经本文统计, Jason-3 的降雨标识数量占总数据量的 3.1%, SWIM 6.0.3 版本星下点产品中的降雨标识率仅为 1.03%, 而 MP 算法的结果与 Jason-3 的降雨标识量仅相差 0.2%。在南北纬度 30° 内, 本文改进后的降雨标识对降雨的敏感性与双波段降雨标识基本一致。而 SWIM 6.0.3 版本星下点产品中的降雨标识则明显低估了实际的降雨事件的发生数量。

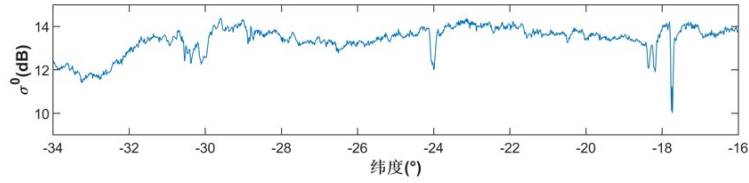
然而, 当南北纬度超过 40° 时, SWIM 与 Jason-3 的降雨标识在走势上存在明显差异。SWIM 改进前后的降雨标识数量在南北纬度超过 40° 时呈下降趋势, 而 Jason-3 的降雨标识则在南北纬 40° – 50° 间存在一处局部极大值。这可能是由于两种降雨标识算法不同所导致的。双波段算法依赖于两种探测波段频率间观测的 σ^0 的差异, 而 MP 算法则依赖于高度计回波受降雨影响的衰减程度。因此单从识别降雨的能力上, 双波段算法性能优于 MP 算法, 且双波段算法不仅可以识别是否存在降雨, 还可以根据式 (4) 中计算的 $\Delta\sigma^0$ 反演降雨率。

为了进一步验证改进后降雨标识的有效性, 本文还对 SWIM 和由 GPM 提供的后处理高分辨率

的全球降水产品 IMERG 进行了匹配 (匹配的时间窗口为 1800s, 空间窗口为 25km), 并且统计了不同降雨率下由本文改进前后 SWIM 降雨标识性能的差异。图 6 (b) 中识别率的定义为

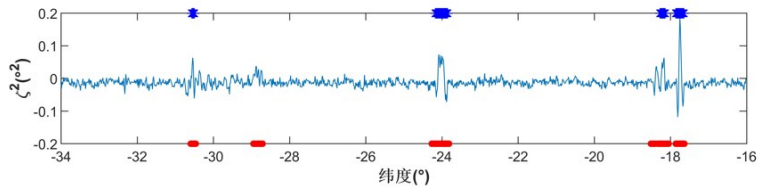
www.ygxb.ac.cn

遥感学报



(a) SWIM 后向散射系数沿轨波形

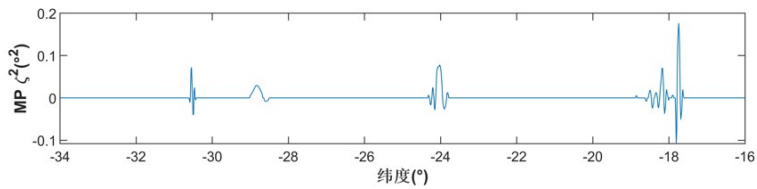
(a) The along track waveform of backscatter coefficients in SWIM



(b) SWIM 误指向角沿轨波形 (上方蓝色星号标记为 SWIM 目前产品中的降雨标识, 下方红色点状标记为本文算法给出的降雨标识)

(b) The along track waveform of mispointing angles in SWIM (the blue crosses above indicate the rain flag in SWIM L2 nadir

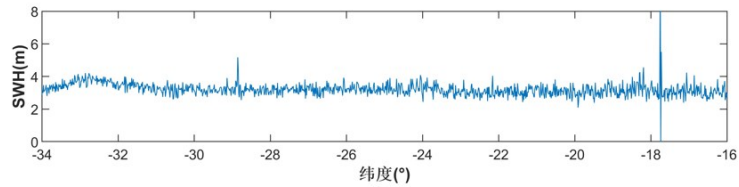
product version 6.0.3, the red dots below indicate the rain flag defined by this article)



(c) MP 算法重构的 SWIM 误指向角沿轨波形

(c) The along track waveform of mispointing angles in SWIM processed by MP algorithm

www.ygy



(d) SWIM 沿轨有效波高

(d) The along track waveform of significant wave height in SWIM

图 4 SWIM Cycle105 Pass14 (16°S-32°S) 的沿轨参数波形与降雨标识

Fig.4 The along track waveforms and rain flags in SWIM Cycle105 Pass14 (16°S-32°S)

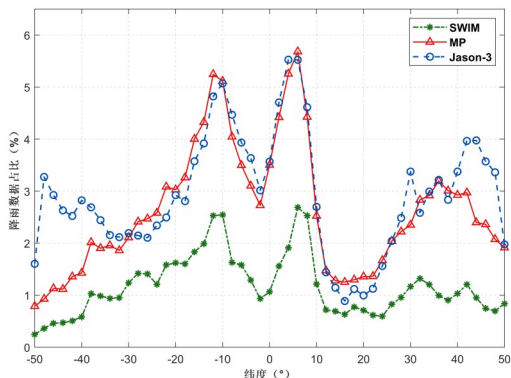
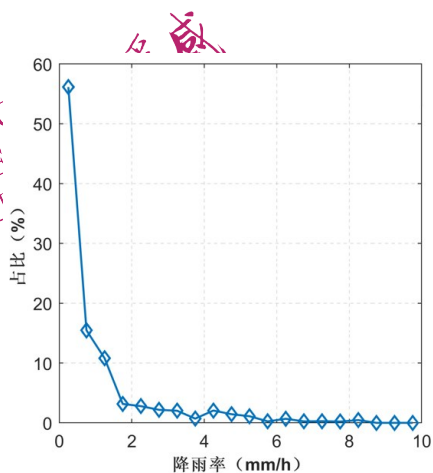


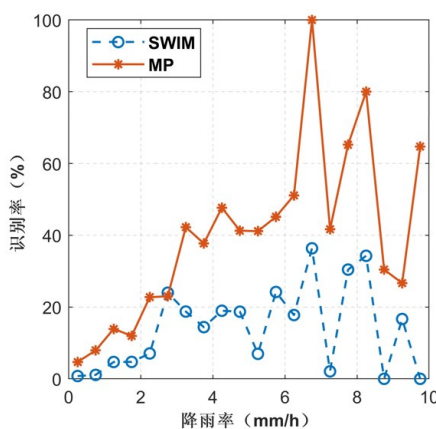
图5 降水数据占比在不同纬度下的分布(图例中SWIM表示目前产品中的降雨标识,MP表示经本文改进后的降雨标识)

Fig.5 Percentage of rain influenced data in different latitudes (the “SWIM” in legend indicates rain flag in SWIM L2 nadir product version 6.0.3, the “MP” in legend indicates rain flag defined by this article)



(a) IMERG 产品中不同的降雨率数据在所有数据中的占比。

(a) Percentage of different rain rate data.



(b) 不同降雨率下, SWIM 产品中以及经本文改进后重新计算的两种降雨标识的降雨识别率。

(b) Percentage of rain events flagged by SWIM L2 nadir product version 6.0.3 and rain flag defined by

this article.

图6 SWIM降雨识别率随降雨率大小的变化

Fig.6 Percentage of flagged samples in SWIM as a function of rain rate

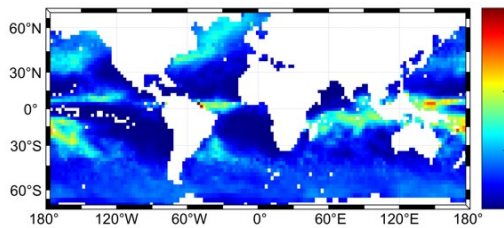
图7为2022年1-3月的全球降水产品GCP、IMERG以及Jason-3降雨标识和改进后SWIM的降雨标识在全球范围内的分布,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,图中空白处表示该处数据无效。图7(a)的色标单位为日降水率(mm/day),图7(b)(c)(d)的色标均为日降水次数。其中图7(b)中根

$$P_d = \frac{r}{S} \#(6)$$

其中 r 表示匹配数据中相同降雨率下被算法识别出的降雨事件数量, S 为匹配数据中某一降雨率的所有数据量。如图6(b)所示,在降雨率小于 3mm/h 的情况下,SWIM产品中的降雨标识与本文改进的降雨标识对降雨的识别能力都未超过30%,可见小于 3mm/h 的降雨对于高度计回波的影响较小。而对于降雨超过 3mm/h 的情况,本文改进后的降雨标识相比SWIM最新产品对于降雨的识别率更高。需要注意的是,降雨超过 7mm/h 的情况占有所有GPM观测到的降雨数据中占比不到1%,因此统计结果可能不具有代表性。从总体上看,SWIM最新产品的降雨标识算法对所有强度的降雨识别率均未超过40%,而经过本文改进后的基于MP算法的降雨标识方法对降雨的准确度更高,可以更好地识别强降雨事件。

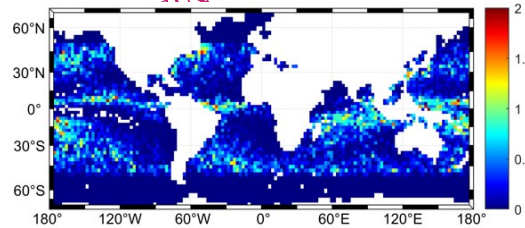
品在低纬度地区呈现较好的一致性。在 ITCZ (Intertropical Convergence Zone) 以及 SPCZ (South Pacific Convergence Zone) 区域图 7 均呈现高值且大洋西侧降水明显高于东侧, 降雨标识结果与气候平均态的降水分布的特征基本符合 (Frank 等,

1996)。而当南北纬超过 40° 时, Jason-3 产品中标识的降雨明显增多, 这与图 5 和图 6 的结果基本一致, 说明双波段算法在降雨低于 3mm/h 的识别能力更强, 基于 MP 算法的降雨标识对于低于 3mm/h 的降雨的识别能力还需要进一步的改进。



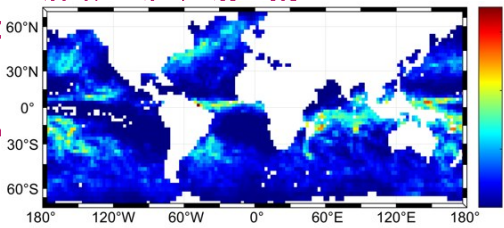
(a) GPCP 提供的全球降雨率分布图 (单位: mm/day)

(a) Global rain rate distribution provided by GPCP (unit: mm/day)



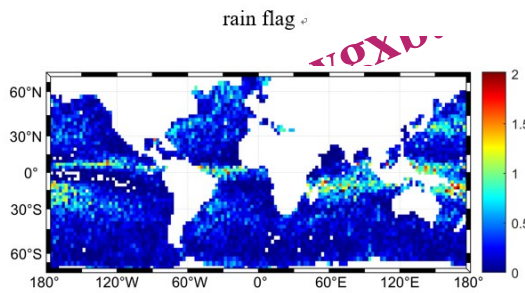
(b) 根据 Jason-3 的降雨识别结果统计的平均日降雨次数分布图

(b) Global rain events distribution per day calculated by Jason-3



(c) 根据 IMERG 产品中降雨超过 3mm/h 计算的平均日降雨次数分布图

(c) Global rain events (rain rate over 3mm/h) distribution per day calculated by IMERG product



(d) 根据本文算法的降雨识别结果所统计的平均日降雨次数分布图

(d) Global rain events distribution per day calculated by rain flag defined by this article

图 7 不同产品提供的 1-3 月全球降水分布 (图中空白点为无效数据)

Fig7 Global precipitation distribution from January to March given by different products (The blanks in the figures indicates that the data in that areas is invalid)

4 结论

中法海洋卫星 CFOSAT 所搭载的海浪波谱仪 SWIM 是一个工作在 Ku 波段的多波束真实孔径雷达, 其星下点波束工作原理和卫星高度计类似, 都可用于进行有效波高和风速测量。根据以往高度计的研究表明, 由高度计探测的地球物理参数会受到降雨的影响。因此需要将受降雨影响的高

度计数据识别出来。对于像 TOPEX 和 Jason 等双波段高度计, 已经有了较高精度的降雨识别方法。但由于 SWIM 只有一个工作波段, 导致双波段降雨标识方法不能直接运用于 SWIM 的产品当中。而基于 MP 算法的单波段降雨识别方法仍依赖于辐射计的观测结果。且目前 SWIM 产品中的降雨识别结果相比 Jason-3 的降雨标识, 存在标识量不足的问题。这可能导致一些受降雨影响的数据被用于地

球物理参数的计算当中,影响地球物理参数的反演精度。为了解决这一问题,本文对基于MP算法的降雨标识方法进行了改进。本文的改进主要包括了结合误指向角的标准偏差以及后向散射系数对SWIM中的星下点产品进行了降雨识别,并给出了具体的降雨识别方法流程和阈值。

本文以SWIM 6.0.3版本2022年1-3月的L2星下点产品作为研究对象,将误指向角 ζ^2 的沿轨波形作为输入,经过MP算法处理实现 ζ^2 沿轨波形的稀疏,提取其中的降雨信息。对稀疏后的波形进行进一步处理即可得到初步的识别结果。但因为高度计中普遍存在的 σ^0 -bloom现象也会导致 ζ^2 波形的功率显著增大,所以仅凭借MP算法提取的降雨标识还不够准确。因此,本文还结合了对 σ^0 沿轨波形的处理,对 σ^0 -bloom进行了识别,再将其从MP算法的结果中剔除,得到最终的降雨标识结果

为了验证本文改进后SWIM星下点降雨标识的准确性,本文选择了Jason-3中的降雨标识结果、GPCP全球降水数据集以及GPM后处理的高精度降水产品作为参考,从统计角度进行了对SWIM改进后的降雨识别结果进行了验证。结果显示,经本文改进后的SWIM降雨标识在全球分布上与Jason-3以及IMERG产品中降雨率大于3mm/h的在全球范围的分布具有强相关性。从不同纬度上看,本文改进后的SWIM的降雨识别结果相比目前SWIM 6.0.3版本的星下点产品更接近Jason-3的降雨标识结果。此外,验证结果也表明,当纬度大于一定值时,MP算法的结果与Jason-3的降雨标识相比赤道附近会出现一定偏差。这是由于两种降雨标识在算法上的根本不同所导致的。因此对于基于MP算法的降雨识别方法,在中高纬度地区还有进一步改进的空间。此外,目前MP算法只能标识出是否存在降雨,无法像双波段降雨识别算法一样反演降雨率进行定量分析。因此对于单波段高度计的降雨探测还有待更进一步的研究和改进。

志 谢 本论文受国家重点研发计划、国家自然科学基金和海风海浪探测卫星波谱仪数据处理软件研制项目的支持,同时感谢法国CNES提供的卫星数据以及ESSIC和CICS提供的全球降水数据。

参考文献(References)

- Adler R.F., Sapiano M.R.P., Huffman G.J., Wang J., Gu G., Bolvin D., Chiu L., Schneider U., Becker A., Nelkin E. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(4): 138.[DOI 10.3390/atmos9040138]
- Bignalet-Cazalet F., Picot N., Desai S., Scharroo R., Egido A. Jason-3 products handbook [R]: CNES, 2021.
- Davis G., Mallat S., Avellaneda M. Adaptive greedy approximations [J]. *Constructive Approximation*, 1997, 13(1): 57-98. [DOI 10.1007/bf02678430]
- Ermakov S.A., Salashin S.G., Panchenko A.R. Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1991, 16(3-4): 279-304.[DOI 10.1016/0377-0265(92)90010-Q]
- Frank J.W., Roy W.S. SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 55(9): 1613-27. [DOI 10.1175/1520-0469(1998)055<1613: SIRRWA>2.0.CO;2]
- Garcia A. Study of the origins of the sigma0 bloom [D]. Blacksberg, Virginia; Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- Guymet T.H., Quartly G.D., Srokosz M.A. The effects of rain on ERS-1 radar altimeter data [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(6): 1229-47. [DOI 10.1175/1520-0426(1995)012<1229:TEOROR>2.0.CO;2]
- Hauser D., Tourain C., Lachiver J. M. SWIM products users guide — product description and algorithm theoretical baseline description [Z]//CNES. 2020
- Huffman G. J., Adler R. F., Morrissey M. M., Bolvin D. T., Curtis S., Joyce R., McGavock B., Susskind J. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2001, 2(1): 36-50.[DOI 10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2]
- Mallat G.S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 41(13): 3397-414.[DOI 10.1109/78.256982]
- Mitchum G.T., Hancock D.W., Hayne G.S., Vandemark D.S. Blooms of sigma0 in the TOPEX radar altimeter data [J]. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*, 2004, 21(8): 1232 - 45.[DOI 10.1175/1520-0426(2004)021<1232:BOITTR>2.0.CO;2]
- Quartly G.D. Sea state and rain: a second take on dual-frequency altimetry [J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27(1-2): 133-52. [DOI 10.1080/01490410490465472]
- Quartly G.D., Guymet T.H., Srokosz M.A. The effects of rain on TPO-EX radar altimeter data [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, 13(6): 1209 - 29. [DOI 10.1175/1520-0426(1996)013<1209:TEOROT>2.0.CO;2]
- Quartly G.D., Srokosz M.A., Guymet T.H. Understanding the effects of rain on radar altimeter waveforms [J]. *Advances in Space Re-*

- search, 1998, 22(11): 1567-70. [DOI 10.1016/S0273-1177(99)00072-1]
- Thibaut P., Ferreira F., Femenias P. Sigma0 blooms in the Envisat radar altimeter data; proceedings of the Envisat Symposium, F, 2007 [C].
- Tournadre J. Validation of Jason and Envisat altimeter dual-frequency rain flags [J]. Marine Geodesy, 2004, 27(1-2): 153-69. [DOI 10.1080/01490410490465616]
- Tournadre J., Chapron B., Reul N., Vandemark D.C. A satellite altimeter model for ocean slick detection [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(C4). [DOI 10.1029/2005jc003109]
- Tournadre J., Lambin-Artru J., Steunou N. Cloud and rain effects on AltiKa/SARAL Ka-Band radar altimeter—Part II: Definition of a rain/cloud flag [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(6): 1818-26. [DOI 10.1109/tgrs.2008.2010127]
- Tournadre J., Morland J.C. The effects of rain on TOPEX/Poseidon altimeter data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1117 - 35. [DOI 10.1109/36.628780]
- Tournadre J., Poisson J.C., Steunou N., Picard B. Validation of AltiKa matching pursuit rain flag [J]. Marine Geodesy, 2015, 38(sup1): 107-23. [DOI 10.1080/01490419.2014.1001048]
- Tran N., Obligis E., Ferreira F. Comparison of two Jason-1 altimeter precipitation detection algorithms with rain estimates from the TRMM microwave imager [J]. Journal of Atmosphere and Oceanic Technology, 2004, 23. [DOI 10.1175/JTECH1742.1]
- Jiang Z.H., Huang S.X., Liu B. Standard relationship adjustment of dual frequency altimeter backscatter coefficient [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) 2011, 12(05):555-8. (姜祝辉, 黄思训, 刘博. 对双频高度计后向散射系数标准关系的修正[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(05):555-8. [DOI 10.7666/j.issn.1009-3443.201105027.])
- Jiang Z.H., Huang S.X., Liu G., Liu X.P. Research on the development of surface wind speed retrieval from satellite radar altimeter [J]. Marine Science Bulletin. 2011, 30(05): 588-94. (姜祝辉, 黄思训, 刘刚, 刘向培. 星载雷达高度计反演海面风速进展 [J]. 海洋通报, 2011, 30(05): 588-94. [DOI 10.3969/j.issn.1001-6392.2011.05.019.])

Construction of Flow for Nadir Rain Flag Identification of Spaceborne Ku-band Radar

HU Weiping¹, XIE Hang¹, LI Xiuzhong^{1,3}, XU Ying^{2,3}, HE Yijun^{1,3}

1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Beijing 10081, China

Abstract: Objective Rain flag is necessary for Ku-band altimeters, because the presence of rain in the sub-satellite track will cause attenuation of the backscatter signal, which can lead to errors of the altimeter products. The SWIM (Surface Wave Investigation and Monitoring) instrument payload on the CFOSAT (China - France Oceanography Satellite) is a Ku-band (13.575 GHz) real aperture radar which illuminates the surface sequentially with six incidence angles. The nadir beam of the SWIM can be used as an altimeter except for measuring the SSH (Sea Surface Height). The rain events identified by rain flag in SWIM L2 nadir products offered by CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) has been underestimated compared to these in Jason-3. Thus, the rain flag in SWIM L2 nadir products need to be improved. Methods Apparently, the dual-frequency rain flag algorithm used in Jason-3 products cannot be applied in SWIM which only works on Ku-band. To address this issue, a rain flag based on MP (Matching Pursuit) algorithm is introduced and modified to make it applicable to SWIM in this article, which is extremely versatile and can be easily adapted to any altimeter data. The along-track waveform of mispointing angles can easily be decomposed by MP algorithm based on wavelet packet decomposition. Then the intervals where the mispointing angles presents short-scale coherent variations can be detected. Except for rain events, the σ^0 -blooms can also cause this kind of variations in the waveform of the mispointing angles. In this article, the along track waveform of σ^0 is also used to produce the rain flag. The flag given by MP algorithm where the σ^0 is over 15 dB and lasts for 6 seconds should be removed. Results The dual-frequency rain flag in Jason-3 products and the products of NASA's Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (Global Precipitation Measurement) has been used to test the performance of the SWIM rain flag offered by this article. The percent of rain events given by dual-frequency rain flag in Jason-3 is 3.1%, while that in SWIM L2 nadir products offered by CNES is 1.03%. By using the method in this article, the difference between the amounts of rain events in Jason-3 and SWIM is only 0.2%. When rain rate reaches over 3 mm/h, this method performs better than SWIM L2 nadir product. In addition, the consistence between Jason-3 and SWIM nadir rain flag in the method is well in low latitudes, but it will descend when latitudes is larger than 40 degrees. Conclusion The quantity of rain flags in SWIM L2 nadir products at present has been apparently underestimated. This article provides a new SWIM nadir rain flag based on MP algorithm. Compared to other kinds of rain flag, this new rain flag can be used in altimeters works on single Ku band without radiometers. The difference is that after the waveform comprised by radar mispointing angles is processed by MP algorithm, the backscatter coefficients is also taken into account and a sliding window is added to reduce the influence of the σ^0 -bloom. After the collocation with high resolution observation by GPM, the results show

that the rain flag defined by this new method performs well when rain rate is larger than 3 mm/h and it is consistent with the dual-frequency rain flag. But when latitudes is larger than 40 degrees, the consistency will decline, which needs further research to confirm the reason.

Key words: : microwave remote sensing, Ku-band altimeter, CFOSAT, SWIM, radar waveform, MP algorithm, rain flag, L-bloom

Supported by Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3104902); National Natural Science Foundation of China (No. 42176184 and 41706202); Development of Data Processing Software for Sea Wind and Wave Satellite Spectrometer

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报