

广播卫星电视接收机对SMAP卫星L波段微波辐射计的射频干扰特征分析

王新新^{①②③④} 王祥^② 范剑超^② 王林^② 孟庆辉^② 魏恩泊^{*①③}

^①(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

^②(国家海洋环境监测中心 大连 116023)

^③(中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071)

^④(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文通过融合SMAP卫星L波段交叉极化亮温,建立基于密度和强度空间分布特征的多重迭代聚类射频干扰(RFI)检测识别算法。分析并提取日本典型RFI源(广播卫星电视接收机)密度和累积强度的时空分布和变化特征。电视接收机作为典型的RFI源,主要分布在日本城市化水平和范围均相对较大的区域(条状或面状),局部区域内分布点圆状RFI(可能为微波辐射基站),导致局地化RFI累积强度具有很高的水平。同时,在日本其他区域也检测到独立分布的点圆状RFI,干扰强度和范围相对局限。2018年开始,日本RFI整体分布范围和强度能级呈下降趋势。典型RFI源特征分析对于我国建立RFI检测、识别及抑制模型具有重要意义。

关键词: SMAP卫星; L波段射频干扰; 广播卫星电视接收机; 时空特征分析

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2292-08

DOI: 10.11999/JEIT200593

Analysis of RF Interference Characteristics of Broadcasting Satellite TV Receivers to SMAP Satellite L-Band Microwave Radiometer

WANG Xinxin^{①②③④} WANG Xiang^② FAN Jianchao^② WANG Lin^②

MENG Qinghui^② WEI Enbo^{①③}

^①(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

^②(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

^③(Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

^④(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the fusion of SMAP satellite L-band cross-polarized brightness temperature, a multi-iteration clustering Radio Frequency Interference (RFI) detection and recognition algorithm based on its spatial distribution of density and intensity is established, and the spatial and temporal distribution and variation characteristics of the density and cumulative intensity of typical Japanese RFI sources (broadcast satellite TV receivers) are analyzed and extracted. As a typical RFI source, TV receivers are mainly distributed in areas with relatively large urbanization level and range (stripes or planes), with dotted RFI sources (possibly microwave radiation base stations) distributed in local areas, resulting in local areas with high RFI levels. In other areas where the urbanization level and scope are relatively small, the dot-round RFI sources are also detected, but the interference intensity and range are relatively limited. Beginning in 2018, the overall RFI distribution range and intensity level showed a downward trend. This work is of great significance to the establishment of RFI detection, identification and suppression models in China.

Key words: SMAP satellite; L-band RFI; Broadcast satellite TV receivers; Analysis of space-time characteristics

收稿日期: 2020-07-20; 改回日期: 2021-03-23; 网络出版: 2021-04-08

*通信作者: 魏恩泊 ebwei@qdio.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41806212), 国家重点研发计划(2016YFC1401000)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41806212), The National Key R&D Program of China (2016YFC1401000)

1 引言

SMAP(Soil Moisture Active and Passive)卫星总体目标任务是以相对较高的空间分辨率、敏感度、覆盖能力及重访周期等方面实现监测全球土壤湿度。SMAP卫星搭载了工作频率为1.41 GHz的L波段的微波辐射计, 因其工作频段和仪器设计特点, 目前也广泛应用于海表盐度卫星遥感观测, 是继SMOS和Aquarius卫星之后, 第3颗用于观测土壤湿度和海表盐度的微波遥感卫星^[1,2]。

L波段微波辐射计的工作频段处于国际电信联盟无线电通信组(International Telecommunications Union - Radiocommunications sector, ITU-R)的保护频段内, 根据《无线电规则》第5.340条的规定, 1400-1427 MHz主要分配给地球探测卫星服务(无源)、空间研究服务(无源)及射电天文服务, 该频段内禁止所有主动发射。但是大量观测事实和相关研究成果表明, L波段微波辐射计正在遭受大量的射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)污染^[3-6]。RFI源分布在世界各地, 主要分布在欧洲、亚洲和中东大部分地区^[3]。常见的RFI源包括L波段雷达、地面无线服务(监控摄像机、WiFi网络)、广播卫星服务及气象卫星服务等^[7,8]。

由于广播卫星服务(Broadcasting-Satellite Service, BSS)地面接收设备分布极其广泛, 是一种典型的RFI源, 对L波段微波辐射计的影响极其复杂。2008年, 在斯普林菲尔德开展的SMAP卫星空基验证试验结果证实了数字电视发射机的2次谐波发射到了L波段^[9]; 一项根据欧洲各国当局反馈的RFI源调查统计结果可知, 电视广播系统是欧洲观测的主要RFI源类型^[3]; 日本当局也通过试验证实了日本2011年至今新增的RFI污染主要是由于地面广播系统导致的^[10-12]。

为分析广播卫星系统地面终端对L波段微波辐射计的干扰特征, 本文选择日本为典型研究区域, 主要采用SMAP卫星L1B交叉极化亮温数据开展RFI检测识别, 统计分析日本RFI源的时空分布和变化特征, 结合日本BBS系统和地面电视接收机的传输参数, 分析BBS电视接收机对SMAP卫星的影响特征, 掌握卫星广播业务类型RFI源对L波段微波辐射计的影响规律, 对于RFI源类型的分类和下一步定量建立RFI局地化抑制模型提供理论依据。同时电视广播系统在我国也是一种普遍存在的RFI源, 该研究对我国相关机构开展疑似RFI源核查、排除和维护提供技术支撑具有重要意义。

2 理论基础

2.1 SMAP卫星和日本广播通信卫星系统

SMAP卫星在硬件上设计并使用了先进的数字微波辐射计, 能够提供丰富的时间和频率采样数据。在L波段微波辐射计工作频段内, 亮温对海表盐度的敏感度较低, 要求L波段微波辐射计需要具有很高的海表亮温观测精度, 即使较弱的RFI信号也有可能对微波辐射计造成不可忽视的影响^[13]。SMAP卫星数据处理系统中, 结合脉冲检测(时域检测)、交叉频率检测、峰度检测和极化检测等算法设计了更为复杂的RFI检测和抑制算法, 能够有效地检测并减缓RFI的影响, 因此在RFI检测与抑制方面较SMOS和Aquarius卫星表现更加突出^[12,14-16]。

2011年7月3日, 日本完成了BS广播的数字化转换, 2011年9月, BSAT 3C/JCSAT 110R静止轨道广播和通信卫星投入商业运行。该卫星搭载了两个独立Ku波段有效载荷, B-SAT有效载荷包括12个转发器, 对应12个直接广播信道, JCSAT有效载荷包含12个36 MHz的转发器, 对应12个固定直接通信信道, 上行链路和下行链路覆盖日本。

2.2 电视接收机干扰L波段微波辐射计机理

根据《无线电规则》第1.166条对干扰的定义, 可以将RFI理解为频率相近或相同的目标电磁波与干扰电磁波同时被卫星传感器接收时, 干扰电磁波对传感器造成的干扰^[17]。

SMOS卫星和SMAP卫星相关RFI研究团队和日本内政和通信部的研究与测试实验结果证实, BSAT-3c/JCSAT-110R卫星电视广播系统电视接收机新增的两个频道(19和21频道)是日本大量RFI的主要来源, 许多小的独立信号可能随机累加, 导致总的RFI贡献具有很高的水平能级, 具有显著的热噪声的特征^[18-20]。BSAT-3c/JCSAT-110R卫星在Ku频段运行, 根据ITU对世界的区域划分和频率分配, 日本所处的第3区BBS信道1-24覆盖频率范围为11.7-12.2 GHz, 日本分配了其中12个广播卫星信道。2011年日本完成了广播数字化转换后, 逐步开始启用频道17, 19, 21和23^[20]。

根据ITU-RR可知, 频道号和Ku波段BBS指派的频率(RF信号)之间的关系式及RF转中频(Intermediate Frequency, IF)的关系式为

$$f_{RF_n} = 11708.30 + 19.18n \quad (1)$$

$$f_{IF_n} = f_{RF_n} - f_{LO} \quad (2)$$

其中, n 为频道号; f_{RF_n} 为频道 n 的指派频率; f_{IF_n} 为IF的中心频率; f_{LO} 为本振频率。表1为新增频道号、Ku频段指派频率及IF频率范围对应关系。

表1 日本Ku波段BBS新增频道号与指派频率的对应关系及RF转换IF后对应的IF中心频率及频率范围^[20]

BBS 频道号	指派频率 (MHz)	转换IF中心频率 (MHz)	转换IF频率范围 (MHz)
17	12034.36	1356.36	1339.11~1373.61
19	12072.72	1394.72	1377.47~1411.97
21	12111.08	1433.08	1415.83~1450.33
23	12149.44	1471.44	1454.19~1488.69

注: 本振LO频率: 10678 MHz; 带宽BW: 34.5 MHz

图1为家用电视室外接收设备基本内部结构图和RF信号转换为IF信号后对L波段微波辐射计造成RFI污染的机制示意图。从图中可以看出, BBS电视接收设备通常包括低噪声模块(Low-Noise Block, LNB)转换器、混频器及室内设备等, RF信号由室外接收设备天线接收, 进入LNB模块后, 与本振混频, 将射频(RF)信号变频为中频(IF)信号, 再通过电缆与室内接收单元连接。结合表1可以看出, 日本新增的19和21频道的IF频率范围是1377.47~1450.33 MHz, 与L波段微波辐射计的工作频段1400~1427 MHz重叠, 由于故障或隔离不良等原因, 接收设备的低质量电缆、连接不良和不当的安装方法导致的射频屏蔽不足, 从而导致L波段微波辐射计观测到大量新增RFI信号^[20]。

2.3 SMAP卫星RFI检测算法

SMAP卫星综合检测与抑制算法主要包括脉冲检测(时域检测)、交叉频率检测、峰度检测和极化检测, 最后设计最大概率检测算法(Maximum Probability of Detection, MPD)通过逻辑“或”将每个单独检测算法的RFI检测标志整合, 以达到最大检测率的目的。但是每种检测算法都具有“双面性”, 通常通过统计方法得到检测阈值, 来确定算法的敏感度和误报率^[16,21-24]。但当RFI所引起的亮温变化幅度与自然水平相当时, 将难以通过算法检测识别, 而且在水陆(冰)边界等地物目标边界亮温

变化较大区域, 也容易产生误判, 其检测结果无法直接应用到RFI源时空分布特征分析研究中^[6,12,25]。

交叉极化亮温对地面RFI的信号很敏感, 其异常能够反映RFI源丰富的特性, 并且能够反映不同强度级别的RFI信号, 尤其在弱RFI信号的检测方面具有一定的优势。但是受法拉第旋转和沿海边界的影响, 极化检测算法在SMAP实际应用中利用率偏低^[6,17,26]。因此, 本文利用卫星接收的交叉极化亮温数据对RFI源敏感的特性, 构建表征陆地RFI发射功率的交叉极化合成参数。相关研究结果表明, 构建交叉极化合成参数的方法能够有效地表征RFI强度分布情况, 通过RFI强度的空间分布特征能够实现RFI检测和识别^[17,26]。交叉极化合成参数 W 通过式(3)计算得到。

$$W = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3)$$

其中, U 和 V 分别代表第3、第4 Stokes参数。

3 研究方法

3.1 研究数据

本文采用美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSDIC)提供的SMAP卫星L1B极化亮温数据。该产品提供了按时间排序地理定位的SMAP卫星观测亮温校准估计值, 数据提供起始时间为2015年3月31日, 该数据包含由SMAP卫星天线温度计算得到的4个Stokes参数。

3.2 RFI检测识别算法建立

RFI检测识别算法主要根据作者前期建立的交叉极化合成参数 W 表征RFI发射强度的关系式和基于SMAP卫星交叉极化数据构建的SMAP卫星自动检测和识别算法^[17,27]。

RFI自动检测和识别算法主要包括RFI检测和识别两个部分。检测算法用于提取疑似RFI样本, 并在此基础上构建RFI识别算法, 具体步骤为:

第1步为RFI疑似样本检测初筛。主要通过统计方法计算SMAP卫星每半轨所有观测数据 W 的概

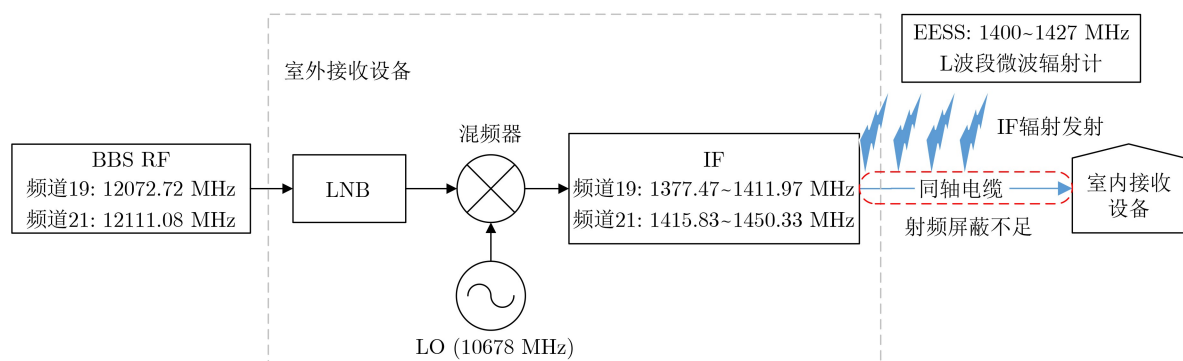


图1 家用电视室外接收设备基本内部结构及IF辐射发射导致的RFI机制示意图

率密度函数(Probability Density Function, PDF)和累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)确定动态检测阈值,并标记RFI疑似检测样板。同时结合SMAP卫星原始RFI标记信息,为后续RFI识别算法提供研究区域内尽可能多的疑似RFI样本。

第2步为基于RFI检测样本密度和强度空间分布特征的RFI识别。Soldo等人^[24]于2018年采用基于密度的空间聚类(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)和阈值递减多重迭代的算法对SMAP卫星开展RFI源定位研究,但该方法因DBSCAN聚类方法的局限性,当两个RFI源之间的距离小于卫星观测的空间分辨率时,算法区分识别两个RFI源的能力降低。因此,需要引入RFI强度空间分布特征的聚类条件和迭代运算方法,对质量控制后的RFI疑似样本数据集建立基于发射强度和密度的多重迭代聚类算法。

4 结果与讨论

4.1 RFI检测识别统计结果

本文处理了2015年4月至2020年6月日本区域共计4661轨SMAP卫星L1B极化亮温数据,平均每月75轨数据,各月数据量分布稳定。各年累计检测为RFI疑似样本710085个,其中识别为符合和不符合RFI强度空间分布特征样本数分别为650634个和59451个,各年疑似RFI样本识别率*P*比较稳定,总体识别率为91.63%,可见该算法能够有效稳定地检测识别RFI。疑似RFI样本识别为符合RFI特征的识别率*P*通过式(4)计算得到。

$$P_i = \frac{N_{RFI_ide_i}}{N_{RFI_sus_i}} \quad (4)$$

其中,*i*代表年份; $N_{RFI_ide_i}$ 代表识别为符合RFI特征样本数; $N_{RFI_sus_i}$ 代表检测为RFI疑似样本数。

由于识别RFI样本数量巨大,本文将研究区域设计为9 km×9 km空间分辨率的矩阵,统计每个矩阵内RFI识别样本累计强度,并将研究区域划分

为若干小区分别讨论。2015年至2020年研究区域RFI累计强度空间分布图如图2所示。

4.2 RFI检测识别结果对比分析

在RFI检测阶段提取的疑似样本数据集如图3所示。从图中可以看出,疑似检测样本几乎覆盖了整个研究区域,尤其是日本南部水陆交界较多的区域。检测算法能基本实现对卫星观测数据的RFI标记,但由于RFI源天线通过旁瓣对L波段星载微波辐射计的影响不受地面RFI源位置的限制,而是只要微波辐射计与RFI源天线之间存在视线传播路径,就会影响卫星观测结果^[12,24]。同时受水陆边界亮温变化较大、瞬时RFI发射源和其他误差源等因素的综合影响,在缺少地面实测数据的条件下,很难判断RFI检测结果与实际RFI源位置之间的关系,因此不能直接用检测结果分析RFI的时空变化特征。

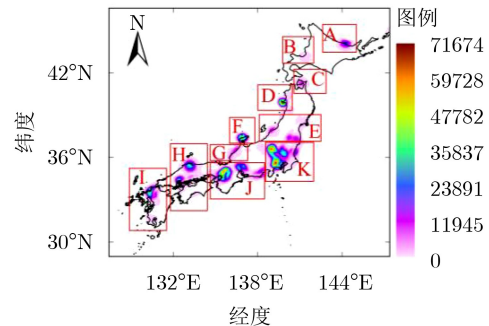


图2 2015年至2020年研究区域RFI累积强度空间分布图

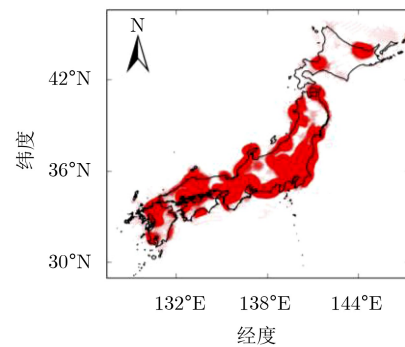


图3 2015年至2020年研究区域RFI疑似样本累积标记空间分布图

表2 2015年4月至2020年6月RFI检测识别结果统计表

年份	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	合计
有效数据天数(天)	274	366	365	365	332	181	1883
有效数据轨道数(个)	669	900	913	905	817	457	4661
平均每月数据个数(个)	74	75	76	75	74	76	75
检测为RFI疑似样本数(个)	111294	144865	147848	134979	114354	56745	710085
识别为符合RFI特征样本数(个)	102072	133798	135805	123103	104097	51759	650634
未识别为符合RFI特征样本数(个)	9222	11067	12043	11876	10257	4986	59451
疑似样本识别率 <i>P</i> (%)	91.71	92.36	91.85	91.20	91.03	91.21	91.63

RFI识别算法是在检测结果的基础上丰富了标记信息,通过对比图2和图3,RFI识别结果更能表征研究区域RFI源强度的空间分布特征,对于水陆边界分布较多的研究区域依然能够对检测结果进行细致的分类和分析,对于后续统计分析研究区域RFI的时空变化特征提供了具有代表性的RFI数据。

4.3 空间分布特征

为分析探讨日本RFI的时空分布特征与日本大量终端设备空间分布之间的关系,本文引入美国国家极轨合作伙伴卫星(NPP)搭载的可见光红外辐射仪(VIIRS)夜光遥感观测数据(图4)。夜光遥感数据是人类活动引起的夜光辐射信号的直接反映,在区域尺度上能够反映城市化水平,而人为的夜光辐射信号和城市化水平之间的关系在时空上通常是单调和稳健的,所以可以采用每年的地表平均夜光数值反映日本的城市化水平和人口密度情况^[28]。

从图2和图4可以看出,研究区域的RFI密度主要呈现出独立点圆状、大范围条形状和面状的分布特征。通过对比夜光遥感年均分布图和RFI密度空间分布图发现,SMAP卫星RFI空间分布基本覆盖了日本城市化水平相对较高、范围较大的地区(如区域H, I, J和K等)。但在部分城市化水平相对较低、范围较小的地区也检测到了大量RFI信号(如区域A, C, D和F等)。

图5为研究区域2015年至2020年RFI月平均累计强度统计直方图,从统计结果看出,研究区域内

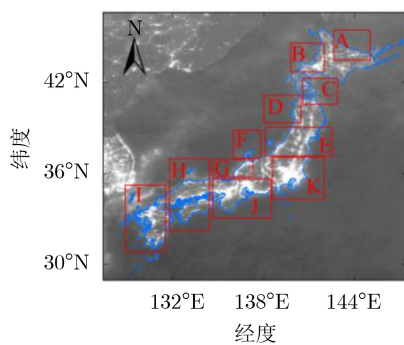


图4 NPP-VIIRS夜光遥感卫星观测数据年均分布图

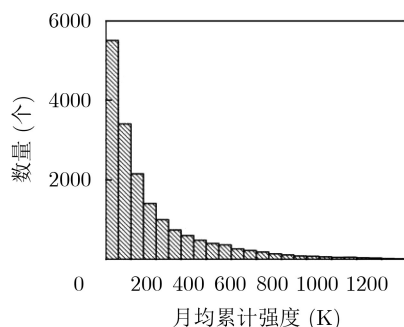


图5 2015年至2020年RFI月均尺度累计强度统计直方图

分布着大量的低水平能级的RFI,中高水平能级RFI相对较少,主要呈现3种形式的空间分布:

(1)在城市化水平较低的区域呈相对独立的点圆状分布,强度由中心向四周衰减,影响范围相对局限,主要分布在日本西部和北部沿海城市化水平较低、范围较小地区的区域。这部分RFI来源相对单一,有可能来自分布较少的电视接收设备累计干扰或固定的单一微波发射基站。

(2)沿岸条形状分布(如区域G)和大范围面状分布(区域J和K等),与城市化水平和范围的空间分布吻合度很高,主要分布在日本东部、南部等城市化水平相对较高、范围较大区域。大量的RFI随机累加,导致RFI局地化贡献具有较高的水平能级,符合BBS电视接收机对卫星的影响特征。

(3)在大范围面状的区域内分布着多个相互影响的点圆状RFI(区域K),导致局地化累计强度达到更高的水平能级,这可能是固定分布的单一微波发射基站和广泛分布的广播卫星系统电视接收设备共同作用的结果。

4.4 时空变化特征

由于2015年、2019年和2020年的数据无法形成全年覆盖,但平均每月数据量分布稳定。为更好地分析RFI强度时空变化特征,本文对各年RFI检测数据做强度累计计算,并根据各年有效数据覆盖的月数,计算并得到研究区域各年RFI月均尺度累计强度分布图(如图6所示)。从图6可以看出,RFI分布和强度的时空变化的特征总体上看,在2016年至2017年,RFI整体分布范围较广、强度较大,2018年以后,部分区域分布的RFI出现消失的情况,同时RFI强度有减弱变化的特征趋势,具体特征分析如下:

(1)在2016年,区域A和区域C处新增2个独立的点圆状RFI分布。2015年至2017年,区域F处分布点圆状RFI,且强度相对稳定,2018年之后,该区域的RFI消失,一直持续到2020年,未再检测到RFI。

(2)区域K为研究区域城市化水平范围最大和强度最高的区域,2015年,该区域内分布2个影响范围叠加的点圆状RFI。2016年至2017年,该区域左上角新增1处点圆状RFI分布,强度呈逐年增大的变化趋势,3个点圆状RFI的影响范围相互重叠。2018年,该区域内右上侧分布的RFI强度逐渐减弱,点圆状分布特征消失。2019年,左上分布的RFI强度和点圆状特征也逐渐减弱。

(3)其他区域各年的RFI分布范围和强度特征相对稳定,整体有减弱变化的趋势。

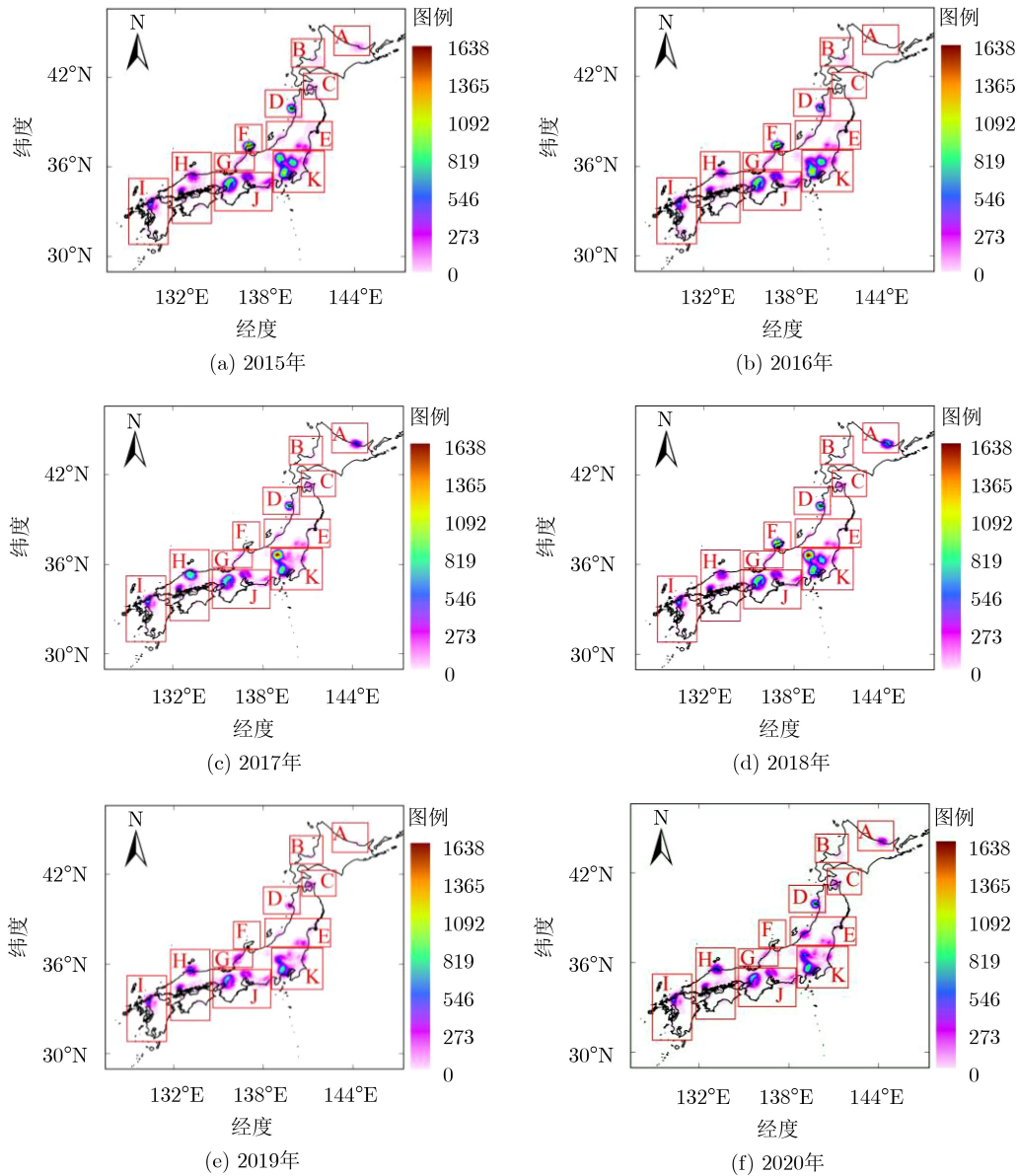


图6 2015年至2020年研究区域RFI月均尺度累计强度分布图

时间变化特征主要是与日本相关机构从2018年开始开展的相关举措有关，比如日本内政和通信部在2018年发布了安装卫星广播接收设施的新安装指南，并更换了大量电视接收设备；日本电子和信息产业协会也制定了针对高屏蔽卫星接收设施的新授权系统，这一系列举措在一定程度上大大降低了L波段的RFI^[20]。

5 结束语

BBS电视接收系统在全球分布范围十分广泛，且L波段微波辐射计敏感度相对较高，即使较弱的RFI也很有可能干扰L波段微波辐射计。本文为分析广播卫星系统电视接收系统对L波段微波辐射计的影响特征，选择广播卫星系统电视接收系统为典型RFI源的日本作为研究区域，分析了该类型RFI

源对卫星的干扰机理。并将RFI检测和识别方法应用于SMAP卫星的L1B交叉极化通道数据，得到了长时间范围内的RFI密度和累积强度分布图，系统地分析了研究区域内RFI的时空分布和变化特征，不仅验证了BBS电视接收系统为日本的主要RFI源类型，还探讨分析了日本分布的其他特征类型RFI源(微波发射基站)的可能类型。

由于广播卫星电视接收系统在全球范围内应用极其广泛，而日本于2011年因广播卫星电视接收机设备安装问题导致的大范围RFI污染也有可能成为全球性的问题。对于我国来说，分布在我国沿海地区的大量RFI源也同样制约我国自主盐度卫星的发展，通过对此类型RFI源开展特征分析，对于我国的RFI源检测、识别及特征库的建立提供了重要参考、数据积累及研究支撑。

RFI源的精确定位和强度估算研究是减缓、抑制RFI的重要前提^[29]。本文基于交叉极化合成参数表征RFI源发射强度初步构建了地面RFI源识别方法,并初步分析了研究区域RFI的时空变化特征,但本文在建立RFI检测识别算法时,虽采用了复杂的聚类迭代算法,但未充分考虑弱RFI信号淹没在强RFI信号影响范围内的情况,这可能会降低RFI的检测率,导致误报率和漏报率升高。后续工作将继续优化以上RFI检测识别算法,同时将通过该算法利用电磁辐射检测仪和L波段微波辐射计等观测设备的陆地和海洋实测数据对我国开展系统性的RFI检测、识别、定位及减缓研究。

参 考 文 献

- [1] DINNAT E P, LE VINE D M, BOUTIN J, *et al.* Satellite sea surface salinity: Evaluation of products and impact of retrieval algorithms[C]. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 7936–7939. doi: [10.1109/IGARSS.2019.8899065](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8899065).
- [2] FORE A, YUEH S, TANG Wenqing, *et al.* The JPL SMAP sea surface salinity algorithm[C]. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 7920–7923. doi: [10.1109/IGARSS.2019.8898359](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898359).
- [3] OLIVA R, DAGANZO E, KERR Y H, *et al.* SMOS radio frequency interference scenario: Status and actions taken to improve the RFI environment in the 1400–1427-MHz passive band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1427–1439. doi: [10.1109/TGRS.2012.2182775](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2182775).
- [4] LE VINE D M, DE MATTHAEIS P, RUF C S, *et al.* Aquarius RFI detection and mitigation algorithm: Assessment and examples[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4574–4584. doi: [10.1109/TGRS.2013.2282595](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2282595).
- [5] MISRA S, JOHNSON J, AKSOY M, *et al.* SMAP RFI mitigation algorithm performance characterization using airborne high-rate direct-sampled SMAPVEX 2012 data[C]. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013: 41–44. doi: [10.1109/IGARSS.2013.6721087](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6721087).
- [6] MOHAMMED P N, AKSOY M, PIEPMEIER J R, *et al.* SMAP L-band microwave radiometer: RFI mitigation prelaunch analysis and first year on-orbit observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10): 6035–6047. doi: [10.1109/TGRS.2016.2580459](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2580459).
- [7] CAMPS A J, CORBELLA I, TORRES F, *et al.* RF interference analysis in aperture synthesis interferometric radiometers: Application to L-band MIRAS instrument[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 942–950. doi: [10.1109/36.841976](https://doi.org/10.1109/36.841976).
- [8] CAMPS A, GOURRION J, TARONGI J M, *et al.* Radio-frequency interference detection and mitigation algorithms for synthetic aperture radiometers[J]. *Algorithms*, 2011, 4(3): 155–182. doi: [10.3390/a4030155](https://doi.org/10.3390/a4030155).
- [9] PARK J, JOHNSON J T, MAJUREC N, *et al.* Airborne L-Band radio frequency interference observations from the SMAPVEX08 campaign and associated flights[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3359–3370. doi: [10.1109/TGRS.2011.2107560](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2107560).
- [10] SOLDO Y, DE MATTHAEIS P, and LE VINE D M. L-band RFI in Japan[C]. 2016 Radio Frequency Interference (RFI), Socorro, USA, 2016: 111–114. doi: [10.1109/RFINT.2016.7833542](https://doi.org/10.1109/RFINT.2016.7833542).
- [11] LE VINE D M, JOHNSON J T, and PIEPMEIER J. RFI and remote sensing of the earth from space[C]. 2016 Radio Frequency Interference (RFI), Socorro, USA, 2016: 49–54. doi: [10.1109/RFINT.2016.7833530](https://doi.org/10.1109/RFINT.2016.7833530).
- [12] SOLDO Y, LE VINE D M, DE MATTHAEIS P, *et al.* L-Band RFI detected by SMOS and Aquarius[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 4220–4235. doi: [10.1109/TGRS.2017.2690406](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2690406).
- [13] MIRANDA J J, VALL-LLOSSERA M, CAMPS A, *et al.* Sea state effect on the sea surface emissivity at L-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2307–2315. doi: [10.1109/TGRS.2003.817190](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.817190).
- [14] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, *et al.* Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729–1735. doi: [10.1109/36.942551](https://doi.org/10.1109/36.942551).
- [15] MISRA S and RUF C S. Detection of radio-frequency interference for the Aquarius radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3123–3128. doi: [10.1109/TGRS.2008.920371](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.920371).
- [16] PIEPMEIER J R, JOHNSON J T, MOHAMMED P N, *et al.* Radio-frequency interference mitigation for the soil moisture active passive microwave radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 761–775. doi: [10.1109/TGRS.2013.2281266](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2281266).
- [17] 王新新, 王祥, 韩震, 等. 基于L波段Stokes参数遥感数据射频频干扰检测及特性分析[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(10): 2342–2348. doi: [10.11999/JEIT141577](https://doi.org/10.11999/JEIT141577).
WANG Xinxin, WANG Xiang, HAN Zhen, *et al.* Radio frequency interference detection and characteristic analysis based on the L band Stokes parameters remote sensing data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(10): 2342–2348. doi: [10.11999/JEIT141577](https://doi.org/10.11999/JEIT141577).

- [18] PENG Jinzheng, MISRA S, CHAN S, *et al.* SMAP radiometer brightness temperature calibration for the L1B_TB, L1C_TB (Version 4), and L1C_TB_E (Version 2) data products[EB/OL]. https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/technical-references/SMAP_L1_Assessment%20Report%2020180601_v9.pdf.2020.2.
- [19] QUEROL J, PEREZ A, and CAMPS A. A review of RFI mitigation techniques in microwave radiometry[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 3042. doi: 10.3390/rs11243042.
- [20] DAGANZO E, OLIVA R, RICHAUME P, *et al.* SMOS RFI experience in the 1400–1427 MHz passive band: Case of extended interference caused by broadcasting satellite home-TV receivers[C]. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 4455–4458. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8897873.
- [21] AKSOY M. Radio frequency interference characterization and detection in L-band microwave radiometry[D]. [Ph. D. dissertation], The Ohio State University, 2015.
- [22] PIEPMEIER J R, FOCARDI P, HORGAN K A, *et al.* SMAP L-band microwave radiometer: Instrument design and first year on orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1954–1966. doi: 10.1109/TGRS.2016.2631978.
- [23] SOLDI Y, LE VINE D M, BRINGER A, *et al.* Recent advances in Smap RFI processing[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 313–315. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8518891.
- [24] SOLDI Y, LE VINE D M, BRINGER A, *et al.* Location of radio-frequency interference sources using the SMAP L-band radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(11): 6854–6866. doi: 10.1109/TGRS.2018.2844127.
- [25] 姜涛, 赵凯, 万祥坤. L波段微波辐射计周期脉冲式干扰时域检测方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(7): 1539–1545. doi: 10.11999/JEIT170954.
- JIANG Tao, ZHAO Kai, and WAN Xiangkun. Research on detection methods to periodic pulsed interference for L band microwave radiometer in time domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(7): 1539–1545. doi: 10.11999/JEIT170954.
- [26] KRISTENSEN S S, BALLING J E, SKOU N, *et al.* RFI detection in SMOS data using 3rd and 4th Stokes parameters[C]. The 12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), Rome, Italy, 2012: 1–4. doi: 10.1109/MicroRad.2012.6185254.
- [27] WANG Xinxin, WANG Xiang, FAN Jianchao, *et al.* Automatic detection and identification of RFI sources for SMAP satellite polarized data based on IDL[C]. The 10th International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Marrakesh, Morocco, 2019: 76–80. doi: 10.1109/ICICIP47338.2019.9012190.
- [28] 马廷. 夜光遥感大数据视角下的中国城市化时空特征[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(1): 59–67. doi: 10.12082/dqxkx.2019.180361.
- MA Ting. Spatiotemporal characteristics of urbanization in china from the perspective of remotely sensed big data of nighttime light[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(1): 59–67. doi: 10.12082/dqxkx.2019.180361.
- [29] JIN Rong, LI Qingxia, and LIU Hang. A subspace algorithm to mitigate energy unknown RFI for synthetic aperture interferometric radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(1): 227–237. doi: 10.1109/TGRS.2019.2936005.
- 王新新: 男, 1989年生, 助理研究员, 主要研究方向为海表面盐度卫星微波遥感、RFI检测及抑制。
- 王 祥: 男, 1984年生, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生态环境遥感及应用研究等工作。
- 范剑超: 男, 1985年生, 副研究员, 主要研究方向为海洋遥感目标信息智能提取。
- 王 林: 男, 1981年生, 副研究员, 主要研究方向为海洋光学、水色及。
- 孟庆辉: 女, 1987年生, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生态环境遥夜光遥感等。
- 魏恩泊: 男, 1965年生, 研究员, 主要研究方向为海洋遥感机理(白冠微波辐射、盐度微波遥感理论)和复合介质物性理论等。

责任编辑: 陈 倩