

一种L波段相控阵微波辐射计射频干扰检测算法

李浩^{①②} 卢海梁^{*②} 余锐^② 吕容川^② 李一楠^② 王佳坤^② 苗俊刚^①

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

^②(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

摘要: 目前,微波辐射计均面临严重的射频干扰(RFI)问题,尤其在低频段。针对一种用于获取海洋盐度和土壤湿度的L波段相控阵微波辐射计,该文提出一种射频干扰检测算法。首先,简单介绍了该L波段相控阵微波辐射计系统;随后,详细介绍该射频干扰算法,其主要包括RFI初标识、RFI滑动窗口1次标识、RFI滑动窗口2次标识和RFI扩展标识等4个步骤;最后,采用该算法对L波段相控阵微波辐射计的实验数据进行处理。实验结果均表明:该算法能够较好地检测出射频干扰异常数据,检测性能较好。

关键词: 相控阵辐射计; L波段; 射频干扰; 检测算法

中图分类号: TN972+.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0172-08

DOI: 10.11999/JEIT180203

Radio-frequency Interference Detection Algorithm for L-band Phased Array Microwave Radiometer

LI Hao^{①②} LU Hailiang^② YU Rui^② LÜ Rongchuan^② LI Yinan^②

WANG Jiakun^② MIAO Jungang^①

^①(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

^②(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: At present, microwave radiometers suffer from serious Radio Frequency Interference (RFI), especially in low frequency. In this paper, a radio frequency detection algorithm is proposed for L-band phased array radiometer, which is used to measure the sea surface salinity and soil moisture. First, the L-band phased array radiometer is introduced in briefly. Secondly, the radio frequency detection algorithm is introduced in details, which consists of the raw RFI flag, the RFI first moving-averaged window flag, the RFI second moving-averaged window flag and the expanded RFI flag. Finally, the experimental data obtained by the L-band phased array radiometer is processed with the proposed RFI detection algorithm. The results indicate that the proposed detection RFI algorithm can effectively detect the RFI contaminated abnormal data, and exhibits good detected ability.

Key words: Phased array radiometer; L-band; Radio Frequency Interference (RFI); Detection algorithm

1 引言

微波辐射计是获取全球尺度气象、水文、海洋等地球物理参量的重要工具之一,这些重要的地球物理参量包括海表盐度、海表温度、土壤湿度、大

气水含量等,其可满足全球气候研究、气象预测和灾害预警等需求^[1]。目前,用于观测全球海洋表面盐度的在轨卫星主要有欧洲空间局的SMOS卫星和美国国家航空航天局的Aquarius/SAC-D卫星,用于观测全球土壤湿度的在轨卫星主要有美国国家航空航天局的SMAP^[2-6]。这些卫星其主要载荷均是工作在受保护的、用于被动微波遥感的1400~1427 MHz频段(L波段)范围内微波辐射计^[2-6]。在国际电信联盟的《无线电规则》以及《中华人民共和国无线电频率划分规定》中,该频段分配给卫星地球探测(无源)、射电天文、空间研究(无源),禁止任何形式的电磁波发射^[7,8]。

然而,通过对SMOS^[2,3], Aquarius^[4], SMAP^[5,6],

收稿日期: 2018-02-28; 改回日期: 2018-10-10; 网络出版: 2018-10-22

*通信作者: 卢海梁 396689lhl@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41706204), 钱学森青年创新基金(QXSCXJJ2017-504), 中国空间技术研究院西安分院自主研发课题(Y17-KJCX-04)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41706204), QIAN Xuesen Young Innovation Foundation (QXSCXJJ2017-504), The Independent Investigate Project of China Academy of Space Technology (Xi'an) (Y17-KJCX-04)

WindSat^[9]和AMSE^[10,11]等卫星获取的大量被动微波遥感数据分析后均发现,这些星基微波辐射计的遥感数据均面临严重的射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI),尤其是低频段—L波段^[12]。研究表明,空基或地基微波辐射计同样会遭遇严重的射频干扰问题^[13,14]。这些射频干扰主要是由于人为因素造成,严重地影响了微波辐射计正常工作及其性能^[15]。针对这一射频干扰问题,文献^[16–18]提出了多种射频干扰检测算法以检测遥感数据中受射频干扰污染的遥感数据。根据射频干扰检测算法检测污染数据的角度及其特点,这些射频干扰检测算法可分为时域、频域、空域、时频域等。在后续数据处理中,将剔除这些受污染的遥感数据,以提高后续应用反演数据产品的质量。

针对无人机机动、灵活、快速响应等特点,文献^[19]研究了一种适用于无人机平台的L波段相控阵微波辐射计系统,用于快速获取特定海域的盐度信息以及农业资源土壤湿度信息等。而该L波段相控阵微波辐射计同样会遭遇严重的射频干扰问题。针对这一问题,本文提出了一种基于时域的射频干扰检测算法,并从亮温直方分布图和Kurtosis峰值两个角度评估了该射频干扰检测算法的检测能力。

2 L波段相控阵微波辐射计系统简介

首先,简单介绍该L波段相控阵微波辐射计系统,其主要包括天线阵列链路和接收机通道链路^[19]。天线阵列链路包括1个 4×4 微带贴片相控阵天线、1个定标子系统、4个LNA、4个数控移相器和1个合路器;相控阵天线主要由4个 1×4 天线子阵组成;定标子系统由4个定标旋转开关、4个匹配负载、1个1分4的功分器和1个噪声源组成^[20]。接收机通道链路主要包括1个功率放大器、本振、混频器、滤波器、中频放大器、A/D转换器、平方检波器和积分器,其系统方框图如图1所示,相控阵天线和L波段接收机通道如图2所示。

在该L波段相控阵微波辐射计中,通过控制数控移相器,可实现在水平方向(交轨方向) $-30^\circ \sim 30^\circ$ 范围内、间隔为 5° 的13次扫描,其扫描波束编号如表1所示,相控阵在每个扫描角的3 dB波束宽度约为 25° 。

该相控阵微波辐射计的波束扫描时序和定标时序如图3所示,1次扫描周期包括13个角度扫描和1次周期定标,每个角度扫描为2.00 s,总共26.00 s,一次角度扫描包括:1.60 s的场景观测,0.20 s的高温定标,0.20 s的匹配负载;周期定标为4.00 s,连接高温源和匹配负载各2.00 s;1次全扫描共计

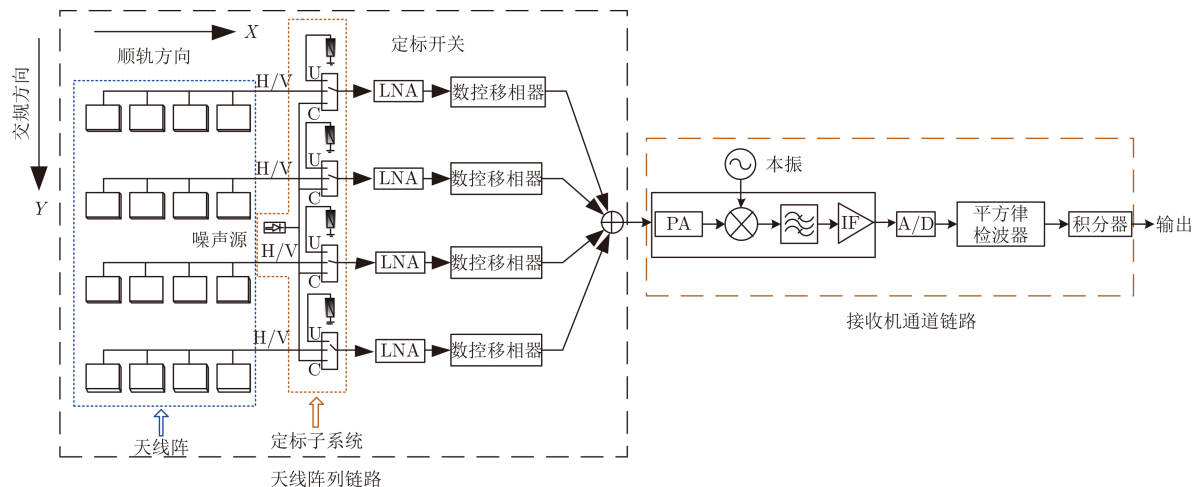


图1 L波段相控阵微波辐射计系统方框示意图

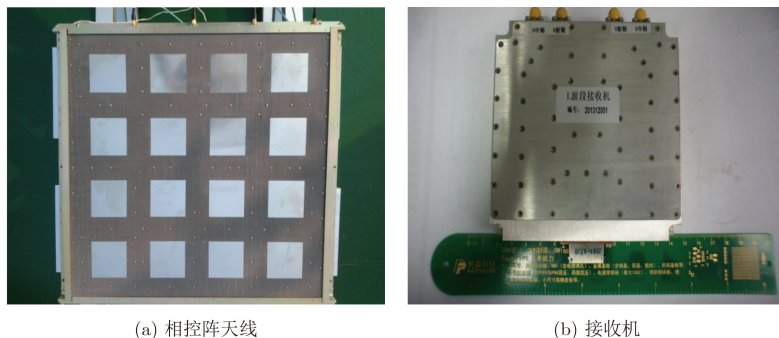


图2 L波段相控阵微波辐射计实物图

表1 L波段相控阵辐射计波束编号对应扫描角(°)

波束编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
扫描角度	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30

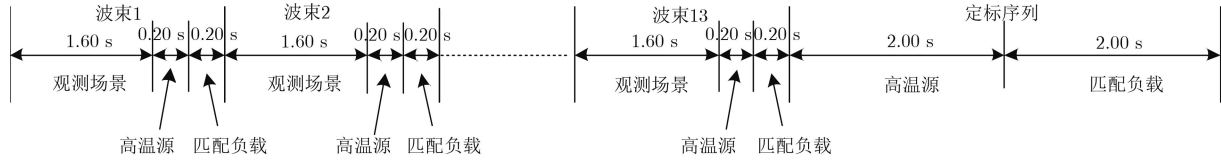


图3 L波段相控阵微波辐射计的波束扫描时序和定标时序分配示意图

30.00 s。辐射计单次积分时间为20 ms。在后续数据处理中，采集的数据根据波束编号分为13个数据子集，每个数据子集又分为场景数据子集和定标数据子集。需要指出的是，扫描时序和定标时序可根据实际情况重新设定。

定标分为外定标和内定标，外定标主要是利用冷空作为定标源，内定标主要是利用匹配负载和噪声源作为定标源^[19]。

3 射频干扰检测算法

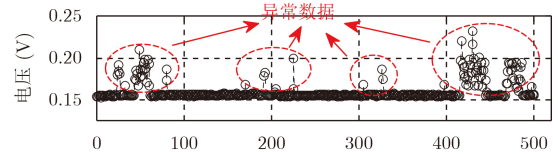
尽管该相控阵微波辐射计工作在被动保护频段L波段，但在实际中会遭受严重的射频干扰。如图4(a)所示，给出了波束7观测自然场景的原始电压值。由图4(a)可知：在观测的电压数据中，存在较多跳变、明显偏离正常自然场景数据范围的异常数据，这些异常数据主要是由外部射频干扰造成的，会严重地影响后续反演产品的质量。因此，需要检测并标识出这些受射频干扰影响的异常数据。

对于地球自然场景而言，其表面微波辐射亮温均是缓变的。因此，在无射频干扰时该L波段相控阵微波辐射计观测自然场景时获取的电压信号应该也是缓变的；若出现较强射频干扰时，由于其功率远高于自然场景的热辐射功率，其干扰信号通过天线接收后造成L波段辐射计的电压信号显著增强，偏离正常自然场景的电压值；同时，射频干扰多是随机或脉冲干扰，在电压信号上呈现跳变特性^[21]，如图4(a)所示。基于上述特征，本文研究了一种基于时域的射频干扰检测算法^[22]。

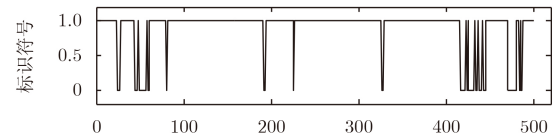
假设 x_i 是某扫描角度的该相控阵辐射计的观测数据(测量的电压数据)，如图4(a)所示，其射频干扰检测算法分为如下4个步骤：

第1步 RFI初标识：取数据序列 X_i 的均值 M ，当观测数据高于一定门限值时，则被标识为受RFI干扰的数据；否则，被标识为纯净的数据

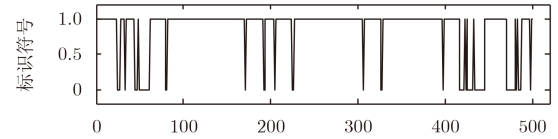
$$f_i^0 = \begin{cases} 0, & x_i \geq M + m \\ 1, & x_i < M + m \end{cases} \quad (1)$$



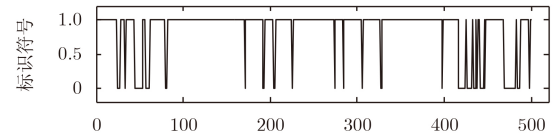
(a) 观测原始数据序列



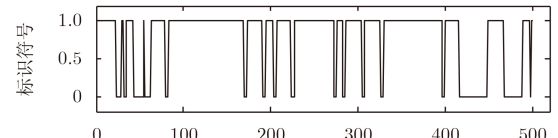
(b) RFI初标识



(c) RFI滑动平均1次标识



(d) RFI滑动平均2次标识



(e) RFI扩展标识

图4 射频干扰检测算法流程图样例

其中， f_i^0 表示数据 x_i 的RFI标识，若为“0”则表示该数据受到RFI污染，“1”则表示该数据未受RFI污染； M 是数据序列的均值； m 是RFI判断的门限值。图4(b)给出了图4(a)中的数据序列 x_i 的 $m = 0.005$ 时所对应的RFI初标识。

第2步 RFI滑动窗口1次标识：定义滑动窗口数据 Y_i 如式(2)

$$Y_i = [x_{i-W_S/2}, x_{i-W_S/2+1}, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, x_{i+W_S/2}] \quad (2)$$

其中， $i \in [(W_S/2+1), (W_S/2+2), \dots, (N-W_S/2)]$ ， W_S 表示滑动窗口长度， N 表示数据序列 x_i 的长

度。为保证数据集 Y_i 在 x_i 两边对称, W_S 取偶数。由于RFI数据是不可信的数据, 在后续处理中应该丢弃, 定义滑动窗口数据一次均值 $\tilde{y}_i$

$$\tilde{y}_i = \frac{\sum_{j=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm W_S/2} x_{i+j} f_{i+j}^0}{\sum_{j=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm W_S/2} f_{i+j}^0} \quad (3)$$

为得到一个“干净”的滑动窗口数据均值, 采用门限滤波, 门限值由滑动均值和辐射计的测量不确定度(等效噪声温度-- $NE\Delta T$ 或 σ)决定。如果数据超过设定的门限, 则认为 x_i 是受到RFI污染, 并标识出来。

$$f_{i+j}^1 = \begin{cases} 0, & x_{i+j} \geq \tilde{y}_i + T_m \cdot \sigma \\ 1, & x_{i+j} < \tilde{y}_i + T_m \cdot \sigma \end{cases} \quad (4)$$

其中, f_k^1 表示 x_k 的RFI标识, $T_m \cdot \sigma$ 表示判定RFI存在的门限值, T_m 表示尺度因子, 且是一个变量; σ 可用观测冷空场景时辐射计数据序列的标准差来替代。图4 (c) 给出了图4 (a) 中的数据序列 x_i 的 $W_S = 10$ 和 $T_m = 5$ 时所对应的RFI滑动窗口1次标识。

第3步 RFI滑动窗口2次标识: 计算滑动窗口RFI1次标识(步骤2)后“纯净”数据的滑动窗口数据均值 $\tilde{y}_{ci}$,

$$\tilde{y}_{ci} = \frac{\sum_{j=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm W_S/2} x_{i+j} f_{i+j}^0 f_{i+j}^1}{\sum_{j=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm W_S/2} f_{i+j}^0 f_{i+j}^1} \quad (5)$$

如果 x_i 偏离“纯净”数据的滑动窗口数据均值 $\tilde{y}_{ci}$ 超过 $NE\Delta T$ 的 σ 倍数时, 则认为该数据受到RFI污染, 并标识出来。

$$f_i^2 = \begin{cases} 0, & x_i \geq \tilde{y}_{ci} + T_{\text{det}} \cdot \sigma \\ 1, & x_i < \tilde{y}_{ci} + T_{\text{det}} \cdot \sigma \end{cases} \quad (6)$$

其中, $T_{\text{det}} \cdot \sigma$ 表示判定RFI存在的门限值, T_{det} 是一个可变的尺度因子。图4 (d) 给出了图4 (a) 中数据序列 x_i 的 $T_{\text{det}} = 2$ 时所对应的RFI滑动窗口2次

标识。

第4步 RFI扩展标识: 步骤3后, 如果数据 x_i 被标识为受RFI污染异常数据, 则认为数据 x_i 前后一定范围内的数据也受到RFI污染。RFI扩展标识如式(7)所示。

$$f_i^3 = 0, \quad i = [-W_r, -W_r+1 \dots, -1, 1, 2, \dots, W_r] \quad (7)$$

其中, W_r 是被标识的数据范围, 且 W_r 是变化的。图4 (e) 给出了图4 (a) 中数据序列 x_i 的 $W_r = 2$ 时所对应的RFI扩展标识(最终的RFI标识)。由图4 (a) 和图4 (e) 比较可知: 采用提出的射频干扰算法能标识出大多数跳变、偏离正常值的射频干扰造成的异常数据。

在后续数据处理中, 会丢弃标识为“0”的观测数据, 保留标识为“1”的纯净的观测数据, 以确保后续数据反演产品的质量。

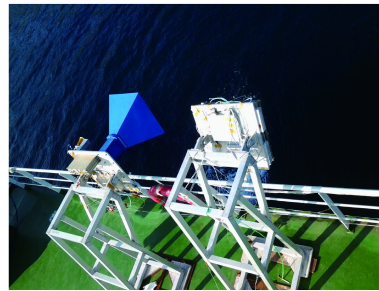
4 实验数据结果分析

为了评估该射频干扰检测算法的性能, 在珠海外海海域开展了外场实验, L波段相控阵微波辐射计安装在实验船上, 距离海面约5 m, 如图5所示。实验时实验海域盐度海洋表面盐度为28.2 psu, 海表温度为302 K, 风速低于2 m/s。实验获得了该L波段相控阵微波辐射计在两个观测角33°和51°下观测海面时波束5~波束9电压数据。图6 (a) 给出了两个观测角下波束5~波束9连接内部匹配负载时输出电压值, 图6 (b) 给出了两个观测角下波束5~波束9连接天线端口时输出电压值, 即观测海洋场景的电压值, 图6 (c) 给出了图6 (b) 中局部放大图。比较图6 (a)、图6 (b) 和图6 (c) 可知: 连接内部匹配时, 在同一观测角下的各波束输出的电压值比较平坦, 说明接收机内部是稳定的; 而连接天线端口观测海洋自然场景时, 在两个观测角下, 每个波束中都会出现一些跳变、偏离均值的异常数据。综合表明这些异常数据是由外部因素造成的, 即射频干扰造成的。

采用提出的射频干扰检测算法对图(b)中在两



(a) 试验海域



(b) 相控阵辐射计试验状态

图5 相控阵辐射计开展外场试验

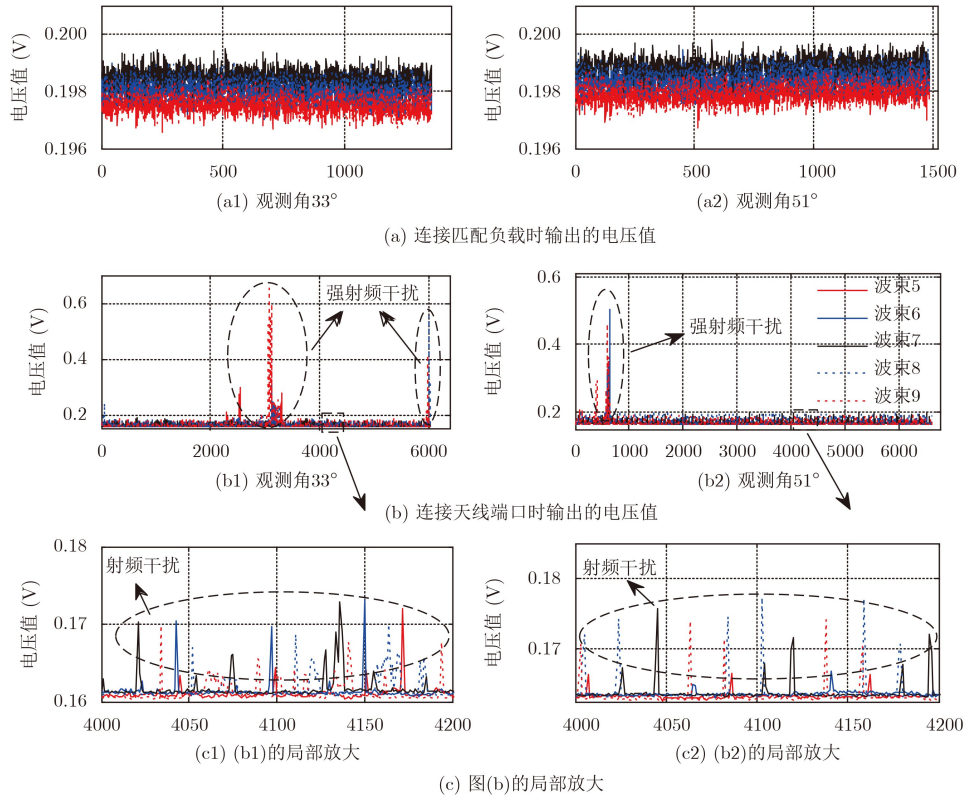


图6 相控阵辐射计在两个观测角下的输出值

个观测角下波束5~波束9观测数据进行射频干扰检测, 其中射频干扰检测算法中的各参量设置如表2所示。

表2 射频干扰检测算法中各参量值

波束编号	T_m	T_{det}	W_S	W_r
5~9	5	2	10	1

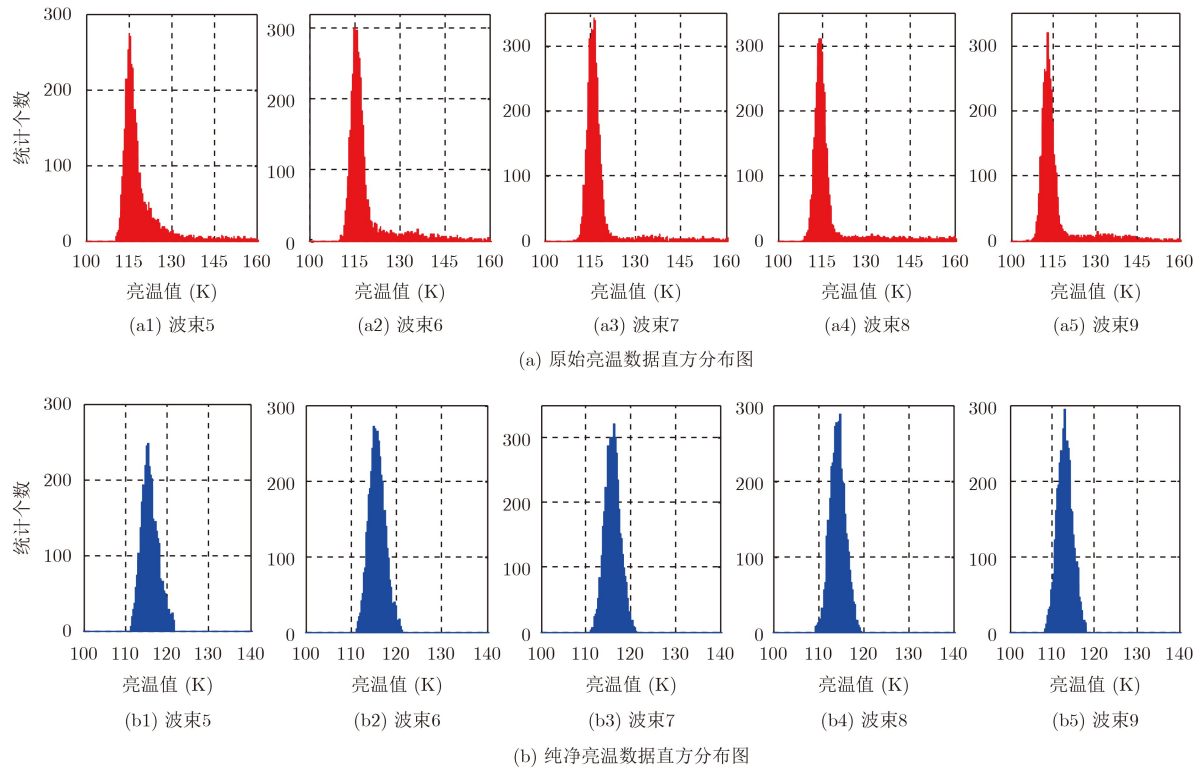
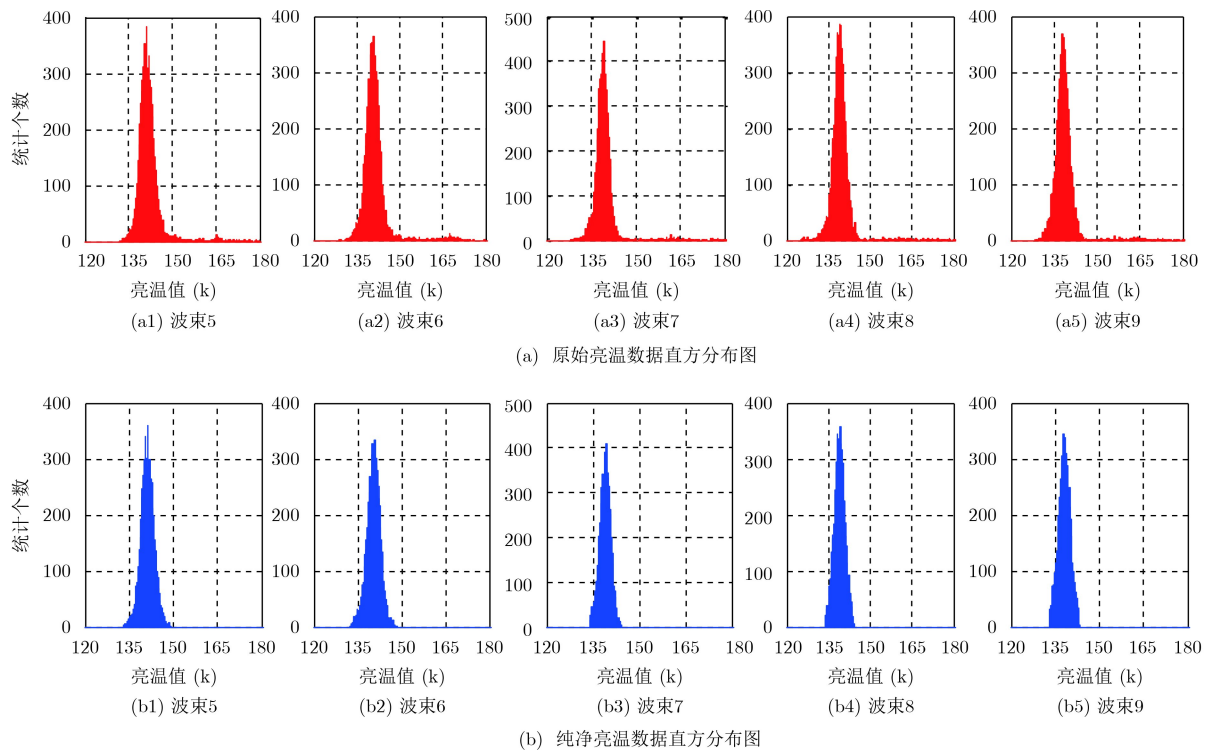
首先, 利用冷空对原始海洋场景数据进行定标, 获得海洋场景的亮温值^[19]。一般来讲, 由于无法精确获得观测海洋时RFI的时空信息, 很难定量地评估RFI检测算法的检测能力和性能。然而, 比较所有原始亮温数据和被标识为“1”的纯净亮温数据的亮温直方分布图可为RFI检测算法的性能评估提供重要参考^[16,17]。图7和图8分别给出了波束5—波束9在两种观测角33°和51°时定标后原始的亮温数据和被标识为“1”的纯净亮温数据的亮温直方分布图。由图7和图8可知: 在原始亮温数据中, 存在较多偏离正常值的异常亮温数据, 原始亮温数据的直方分布图具有较为明显的右边拖尾; 而被标识为“1”的纯净亮温数据的直方分布图的右边拖尾较短, 更服从自然场景亮温数据的高斯分布特征。上述结果表明本文提出的射频干扰检测算法能够检测和标识出偏离正常值的、受RFI干扰的异常亮温数据。

当观测无射频干扰的海洋场景时, 相控阵辐射计获得的同一观测角、同一波束的亮温数据 X 应服从高斯分布。因此, 可用Kurtosis峰值 κ 来描述亮温数据呈高斯分布的程度, 其定义为

$$\kappa = \frac{E(X - u)^4}{(E(X - u)^2)^2} = \frac{u_4}{\sigma^4} \quad (8)$$

其中, κ 表示亮温数据序列 X 的第4分量, u 表示亮温数据序列 X 的均值, σ 表示的亮温数据序列 X 的标准差。对于理想的高斯分布数据序列 X 而言, 其Kurtosis峰值为3。当Kurtosis峰值大于3时, 则表明数据序列分布拖尾较长; 当峰值小于3时, 表明数据序列分布拖尾较短^[22]。

针对微波辐射遥感亮温数据而言, 在理想情况下, 当剔除亮温数据中所有受RFI的异常数据后, 余下纯净亮温数据序列的Kurtosis峰值应该为3。但在实际中, 射频干扰算法无法完全检测出受RFI影响、非常接近于正常亮温数据的异常数据, 从而造成射频干扰检测后的Kurtosis峰值偏离3。当Kurtosis峰值小于3时, 拖尾较短, 表明有较多的纯净数据标识被错误地标识为受RFI干扰的异常数据, 此时检测算法虚警率较高; 当Kurtosis峰值大于3时, 拖尾较长, 表明有较多的受RFI干扰的异常数据未被检测出, 此时检测算法检测概率较低^[22]。由此可知: 当Kurtosis峰值越接近于3时,

图 7 在观测角 33° 下波束5—波束9的射频干扰检测算法前后的亮温数据的直方分布图图 8 在观测角 51° 下波束5—波束9的射频干扰检测算法前后的亮温数据的直方分布图

检测算法虚警率越低，检测概率越高，检测算法性能越好。

采用上述方法评估本文提出的射频干扰检测算法，如表3和表4分别给出了对应图7和图8中采用射频干扰检测算法前后亮温数据分布的Kurtosis峰

值。由表3和表4可知：波束5—波束9标识的纯净亮温数据的Kurtosis峰值均在3附近，差值不大。上述实验结果均表明本文提出的射频干扰检测算法能够标识大多数的RFI的异常亮温数据，具有较好的检测性能。

表 3 观测角33°时的Kurtosis值

	波束5	波束6	波束7	波束8	波束9
原始数据的 κ 值	284.47	254.83	19.50	214.60	129.08
RFI后的 κ 值	2.84	2.91	2.83	2.85	2.73

表 4 观测角51°时的Kurtosis值

	波束5	波束6	波束7	波束8	波束9
原始数据的 κ 值	587.64	362.80	163.46	158.29	123.89
RFI后的 κ 值	2.57	2.58	2.91	2.73	2.70

需要特别指出的是, 射频干扰检测算法中的各参量值可根据实际情况进行调整, 以获得最佳的检测性能。具体而言, 各参量值设置合理时, 纯净亮温数据直方分布图更近似于高斯分布, Kurtosis峰值 κ 更接近于3。当 T_m 和 T_{det} 设置过大时, 只有较强的RFI污染数据才能被检测到, 同时较少的纯净亮温数据被错误地标识为受RFI污染的数据, 此时具有较低的检测概率和虚警率; 相反, 当 T_m 和 T_{det} 设置过小时, 此时同时具有较高的检测概率和虚警率。当 W_s 和 W_r 设置过大时, 能够检测更多弱的RFI污染数据, 但同时更多纯净的亮温数据会被错误检测为受RFI污染的数据, 此时具有较高的检测概率和虚警率; 相反, 当 W_s 和 W_r 设置过小时, 此时具有较低的检测概率和虚警率。

5 结束语

针对一种L波段相控阵微波辐射计面临严重的射频干扰问题, 本文提出了一种基于时域的射频干扰检测算法。该射频干扰检测算法主要通过RFI标识、RFI滑动窗口1次标识、RFI滑动窗口2次标识和RFI扩展标识4个步骤实现对异常亮温数据的检测和标识, 且认为这些被标识的异常亮温数据是由射频干扰造成的。同时, 通过观测海洋场景获得的实验数据验证了提出的射频干扰算法, 重点从观测场景亮温数据的直方分布图和Kurtosis峰值两个方面详细分析了该射频干扰检测算法的性能, 实验结果均表明: 该射频干扰检测算法具有较好的检测性能, 能较好地检测出受RFI干扰的异常亮温数据。由于该方法是基于滑动窗口的时域检测方法, 因此, 其对于脉冲式干扰源的检测效果更佳, 且具有检测流程简单、运算量小等优点。此外, 该射频干扰检测算法不局限于L波段相控阵微波辐射计, 亦可应用于其他类似的微波辐射计系统。

尽管被动微波遥感工作在受保护的频段, 但当前面临着严重的射频干扰, 其严重地影响了被动微波遥感的数据质量。针对这一问题, 一方面需要研究合适的射频干扰检测算法检测出受RFI影响的遥

感数据; 另一方面, 应该加强无线电管理和监督, 杜绝射频干扰的出现, 从根本上解决射频干扰问题。

参 考 文 献

- [1] 张祖荫, 林士杰. 微波辐射测量技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995: 166–203.
ZHANG Zuyin and LIN Shijie. Microwave Radiation Measurement Technology and Application[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1995: 166–203.
- [2] 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).
- [3] DAGANZO E, OLIVA R, KERR Y H, *et al.* SMOS radiometer in the 1400–1427 MHz passive band: Impact of the RFI environment and approach to its mitigation and cancellation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(10): 4999–5007. doi: [10.1109/TGRS.2013.2259179](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2259179).
- [4] 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).
- [5] BRADLEY D, BRAMBORA C, WONG M E, *et al.* Radio-Frequency Interference (RFI) mitigation for the Soil Moisture Active/Passive (SMAP) radiometer[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2010: 2015–2018. doi: [10.1109/IGARSS.2010.5652482](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5652482).
- [6] AKSOY M, JOHNSON J T, MISRA S, *et al.* L-band radio-frequency interference observations during the SMAP validation experiment 2012[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(3): 1323–1335. doi: [10.1109/TGRS.2015.2477686](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2477686).
- [7] International Telecommunications Union, Radio Regulations, vol. I[S], Geneva, Switzerland, 2008.
- [8] 中华人民共和国无线电频率划分规定[S]. 2006.
Regulation of radio frequency division in People's Republic of China[S]. 2006
- [9] LI L, GAISER P W, BETTENHAUSEN M H, *et al.* WindSat radio-frequency interference signature and its identification over land and ocean[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(3): 530–539. doi: [10.1109/TGRS.2005.862503](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862503).
- [10] NJOKU E G, ASHCROFT P, CHAN T K, *et al.* Global survey and statistics of radio-frequency interference in AMSR-E land observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(5): 938–947. doi: [10.1109/TGRS.2005.862503](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862503).

- 10.1109/TGRS.2004.837507.
- [11] FENG Chengcheng, ZOU Xiaolei, ZHAO Juan. Detection of radio-frequency interference signals from AMSR-E data over the United States with snow cover[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(2): 195–204. doi: 10.1007/s11707-015-0509-4.
- [12] 官莉, 夏仕昌, 张思勃. 大面积水体上空星载微波辐射计的干扰识别[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 22–31. doi: 10.11898/1001-7313.20150103.
- GUAN Li, XIA Shichang, and ZHANG Sibao. Identifying the interference of space-borne microwave radiometer over large water area[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(1): 22–31. doi: 10.11898/1001-7313.20150103.
- [13] SKOU N, MISRA S, BALLING J E, *et al.* L-band RFI as experienced during airborne campaigns in preparation for SMOS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1398–1407. doi: 10.1109/TGRS.2009.2031637.
- [14] AKSOY M, PARK J, and JOHNSON J T. Joint analysis of radio frequency interference from SMOS measurements and from airborne observations[C]. Proceedings of General Assembly and Scientific Symposium Symposium, Istanbul, Turkey, 2011: 1–4. doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050795.
- [15] 卢海梁, 李青侠, 李炎, 等. 基于SMOS卫星数据的中国地区L波段射频干扰研究[J]. *微波学报*, 2016, 32(1): 86–91. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201601019.
- LU Hailiang, LI Qingxia, LI Yan, *et al.* A study of L-band radio frequency interference over China based on SMOS data[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(1): 86–91. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201601019.
- [16] LU Hailiang, LI Qingxia, LI Yan, *et al.* Low-level radio-frequency interference detection algorithm based on European centre for medium-range weather forecasting for the soil moisture and ocean salinity mission[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 095996. doi: 10.1117/1.JRS.9.095996.
- [17] 卢海梁. 星载综合孔径微波辐射计校正和定标及射频干扰检测[D]. [博士学位], 华中科技大学, 2016.
- LU Hailiang. Correction & calibration and radio frequency interference detection for on-board aperture synthesis radiometers[D]. [Ph. D. dissertation], Huazhong University of Science & Technology, 2016.
- [18] MISRA S and RUF C S. Analysis of radio frequency interference detection algorithms in the angular domain for SMOS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1448–1457. doi: 10.1109/TGRS.2011.2176949.
- [19] LU Hailiang, LI Yinan, YU Rui, *et al.* A L-band phased array radiometer for sea surface salinity[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Fort Worth, USA, 2017: 2935–2938. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127613.
- [20] 牛雪杰, 崔华阳, 余锐. 一种用于微波辐射计的双极化相控阵天线系统设计[J]. *空间电子技术*, 2015, 5: 14–17. doi: 10.3969/j.issn.1674-7135.2015.05.003.
- NIU Xuejie, CUI Huayang, and YU Rui. A dual-polarized phased array antenna system of microwave radiometer[J]. *Space Electronic Technology*, 2015, 5: 14–17. doi: 10.3969/j.issn.1674-7135.2015.05.003.
- [21] 姜涛, 赵凯, 万祥坤. L波段微波辐射计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.
- [22] KHAZAAL A, CABOT F, ANTERRIEU E, *et al.* A kurtosis-based approach to detect RFI in SMOS image reconstruction data processor[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 7038–7047. doi: 10.1109/TGRS.2014.2306713.
- 李 浩: 男, 1980年生, 研究员, 研究方向为全极化微波辐射计、综合孔径微波辐射计系统设计等.
- 卢海梁: 男, 1986年生, 博士, 研究方向为被动微波辐射无源探测、被动微波遥感、射频干扰检测等.
- 余 锐: 男, 1983年生, 高级工程师, 研究方向为被动微波遥感、微波辐射计系统设计等.
- 吕容川: 女, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为全极化微波辐射计、被动微波遥感、大气探测等.
- 李一楠: 男, 1985年生, 高级工程师, 研究方向为被动微波遥感、综合孔径微波辐射计系统设计等.
- 王佳坤: 女, 1992年生, 工程师, 研究方向为被动微波遥感、被动微波辐射无源探测等.
- 苗俊刚: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为微波遥感理论与技术、毫米波亚毫米波技术等.