

引用格式: Jiang Tao, Zheng Xingming, Li Xiaojie, *et al.* Detection of RFI in Ground-based L-band Radiometer and Analysis on Electromagnetic Environment in the Shandian River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1022-1032. [姜涛, 郑兴明, 李晓洁, 等. 闪电河流域L波段地基微波辐射计RFI检测与电磁环境分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1022-1032.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1022

闪电河流域L波段地基微波辐射计RFI检测 与电磁环境分析

姜涛¹, 郑兴明^{1,2}, 李晓洁¹, 李晓峰¹, 赵凯^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 遥感与地理信息研究中心, 吉林 长春 130102;
2. 中国科学院长春净月潭遥感实验站, 吉林 长春 130102)

摘要: L波段微波辐射计是探测土壤湿度和海水盐度的重要手段, 但日益严重的射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)使得L波段被动微波遥感无法达到地表参数的反演精度要求。将具有快速采样能力的L波段积分式微波辐射计搭载于车载移动平台, 在华北闪电河流域进行地基测量, 应用时域脉冲检测算法(Asynchronous Pulse Blanking algorithm, APB)及基于变异系数的中值比较算法对测量结果进行射频干扰检测与抑制, 两种算法对射频干扰检测都取得了一定的效果。根据检测结果, 闪电河综合遥感试验区的L波段地基微波辐射计观测到的射频干扰以小量级的脉冲式干扰为主, 野外干扰平均量级一般集中在3~4 K, 持续时间多在1~2 ms, 干扰率在2%~14%之间。对比分析发现, 城镇中的射频干扰较野外严重, 野外实验中H极化测量结果受射频干扰影响略轻于V极化, APB算法相对具有较多的误检现象, 而中值比较法则更能容许测量目标本身的辐射亮温波动, 该算法的最小检测干扰量级小于3 K, 有助于提高试验区内土壤湿度的反演精度。

关键词: L波段微波辐射计; 土壤水分; 射频干扰; 时域检测算法; 中值比较算法; 变异系数; 电磁环境分析

中图分类号: TP701 文献标志码: A 文章编号: 1004-0323(2021)05-1022-11

1 引言

空间遥感通过卫星平台的在轨运动, 实现高重复率观测, 为大尺度的地表参数反演提供了有效的信息获取手段。为研究全球水循环、能量循环机理与过程, 我国计划近几年内发射搭载L波段微波辐射计的遥感卫星, 为此, 2018年9月在华北地区的闪电河流域进行了航空遥感综合试验^[1], 旨在验证已

有仪器性能及算法的可靠性, 并在地面进行同步测量试验, 用以对比验证航空测量数据。期间, 中国科学院东北地理与农业生态研究所开展了地基L波段微波辐射计移动测量试验, 检测试验区的射频干扰环境。

根据国际电信联盟频率划分规定与《中华人民共和国无线电频率划分规定》, L波段(1~2 GHz)被广泛用于无线电导航、无线电定位以及移动电话等

收稿日期: 2020-09-17; 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目“基于多频段电磁波传播特性的森林枯枝落叶层参量反演方法研究”(41771400), “土壤水分与表面粗糙度的光学与雷达遥感协同反演算法研究”(41971323); 遥感科学国家重点实验室开放基金项目“地基亮温观测与机载亮温不确定性评估”(OFSLRSS201815), “东北积雪多角度微波辐射特性观测、模拟与参数反演”(OFSLRSS202018); 中国科学院科技服务网络计划“天—空—地一体化的农业灾害信息监测研究”(KFJ—STS—ZDTP—048—04—03)。

作者简介: 姜涛(1982—), 男, 吉林洮南人, 工程师, 主要从事微波辐射计研制、射频干扰检测研究。E-mail: jiangtao@iga.ac.cn

通讯作者: 郑兴明(1984—), 男, 四川中江人, 副研究员, 主要从事电磁波散射和被动微波遥感土壤水分反演研究。
E-mail: zhengxingming@iga.ac.cn

业务,被动微波测量被限制在1 400~1 427 MHz之间^[2-3],主要用于土壤湿度和海水盐度探测,但这27 MHz的频带也时常会被一些主动设备所干扰,包括非法侵占以及谐波的影响都会产生射频干扰,对微波辐射计的观测造成了严重的影响^[4]。国际上已经发射了3颗土壤湿度和海水盐度空间探测计划:SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), Aquarius 和 SMAP (Soil Moisture Active and Passive),其L波段微波辐射计都受到了不同程度的射频干扰影响^[5-8],导致数据不可用或地表参数反演精度下降^[9-10]。根据被动微波土壤水分反演模型,在某些特定条件下,1 K量级的干扰可能会引起约 $1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的反演误差^[11]。虽然SMOS与SMAP的仪器测量不确定度要求分别为3.5 K和1.3 K,但对土壤水分反演精度要求都为 $4\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ^[12-13]; Aquarius的科学目标为测量海水盐度以支持环境和气候变化研究,在开阔海域要求0.2实际盐度标度(Practical Salinity Scale, PSU)的精度,为此接收机的探测灵敏度要达到0.06 K(5.76秒积分时间)。由于射频干扰的原因,以上设计指标在很多地区都无法实现,必须进行射频干扰的检测与抑制工作^[4,7,14-15]。

射频干扰使得微波辐射计的输出结果在时域、频域及统计域内出现异常现象,Niamsuwan等^[16]提出了一种时域脉冲检测算法,在时域范围内检测微波辐射计的异常值,并通过模拟数据对该算法的性能及参数选取进行了分析,表明该算法很适合消除幅值较大、宽度窄的脉冲干扰信号;Guner等^[17-18]将测量数据进行傅立叶变换,对频域内的奇异值进行检测并滤除,研究表明该方法对占空比较大或连续的正弦干扰具有一定的可行性。Ruf等^[19]研制了一种敏捷式的数字辐射计接收机,能够将24 MHz的中频带宽划分为16个1.5 MHz的子带,并分别计算各个子带的峰度,依此判断接收信号是否满足高斯分布,进而进行射频干扰检测。除了以上的理论研究与模拟数据验证,各种算法还在空基实验中得到了实际的应用^[20],2005~2008年欧空局在欧洲和澳大利亚组织了多次航空遥感实验,Skou等^[21]应用峰度检测与极化检测法对多次实验结果进行分析,得出了不同地区的射频干扰特性;NASA也在北美进行了多次航空遥感飞行实验,Aksoy等^[22]在对SMAPVEX12航空实验数据进行分析时指出:该地区(加拿大温尼伯市)的射频干扰以窄频带脉冲型为主,多种类型并存,干扰幅度并无明显特征,并探

讨了不同算法对各种类型干扰的适用性。SMAP卫星采用真实孔径观测方案,在研发阶段充分考虑了射频干扰的检测与抑制,将以上算法相融合,RFI的检测与抑制效果较好^[7];SMOS卫星搭载的综合孔径微波辐射计(MIRAS)包含72个微波辐射接收单元,地面某一像元的微波亮温由来自这些接收单元的信号两两相关后经过量化得到,但亮温的时间分辨率已经为 1.2 s ^[23],信号的时域与频域特性已经丢失,统计特征也发生了变化,前面所述方法均不能直接应用,地面所进行射频干扰检测方法只能采用有限的阈值法、空域法、极化法等,效果有限。

在电磁环境方面,Le Vine^[24]首先给出了Aquarius主被动微波遥感的全球RFI情况,Soldo等^[25]通过定义RFI指数,量化了SMOS数据在全球的污染程度,并且Soldo等^[26]还应用SMAP数据在全球范围开展了干扰源定位研究。以上研究均表明我国为射频干扰比较严重的地区之一。

Soldo也强调,射频干扰的检测细节与微波辐射计的体制有关^[5],文献[16]~[19]所述方法都是基于全数字微波辐射计开发的,而我国目前大多数微波辐射计接收机由于含有检波器和积分电路,射频干扰在时域和频域内的细节已经无法完全体现,且微波辐射计的输出在统计域内已经不再满足高斯分布,所以以上射频干扰检测算法无法直接应用。笔者利用自主研发的数字增益自动补偿型L波段微波辐射计,应用在此基础上提出的中值比较算法以及改进的时域脉冲检测算法,在闪电河流域进行射频干扰检测与抑制研究并对试验区的电磁环境进行了评述。

2 数据与方法

2.1 地基被动微波观测系统

被动微波遥感所测量的信号源于目标的热辐射噪声,其本质是物质内部微观粒子的无规律运动^[27],该噪声所产生的功率极低,根据理想黑体辐射公式:

$$P = kBT \quad (1)$$

其中: P 为黑体辐射功率;在中频带宽(B)60 MHz、黑体温度(T)290 K的条件下,其辐射功率仅为 $2.4012 \times 10^{-13}\text{ W}$, (式中 k 为波尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23}\text{ JK}^{-1}$),远远低于任何人造干扰源的功率。即使干扰源来自于天线的背瓣或副瓣,对于测量微弱电磁信号的微波辐射计的影响也可能是致命的。热

辐射噪声的电压在幅度上满足高斯分布,假设其电压为 $\xi(t)$,该时段只存在一种射频干扰 $A\sin(\omega t + \varphi)$,则微波辐射计所接受到的混合信号 $x(t)$ 可以表示为:

$$x(t) = \xi(t) + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

由于干扰信号 $A\sin(\omega t + \varphi)$ 的存在,将导致微波辐射计接收到的功率增加,表现为输出的实时亮温升高,干扰还使得接收信号的功率谱密度在 ω 处升高,另外,在统计域内的一些参数如变异系数或峰度出现异常变化。这些都要求微波辐射计具备较快速采集与处理的能力,方可分辨出射频干扰的影响。

闪电河流域水循环与能量平衡遥感综合试验中的地基L波段微波辐射计由中国科学院东北地理与农业生态研究所自主研制,采用数字增益自动补偿技术消除接收机增益波动引起的测量误差^[28-29]。该辐射计带宽(B)60 MHz,为配合射频干扰检测,将硬件积分时间(τ)缩小至1 ms,采样频率5 Ksps,前端开关切换周期为0.2 s,分别测量参考源与天线(各0.1 s)^[30],仪器探测灵敏度优于2 K。该辐射计在脉冲辐射干扰模拟实验中已经被证明具有一定的射频干扰检测能力^[31]。



图1 车载L波段被动微波观测系统

Fig.1 Ground-based remote sensing mobile observation platform

将L波段微波辐射计架设在长春净月潭遥感实验站地基遥感移动观测平台的旋转云台上,该平台可升高至5 m,旋转云台的方位角扫描范围为0~359°,高度角扫描范围为0~180°,为避免车体影响,被动微波测量方向最好与车身方向垂直,且高度角大于40°。采用大口径喇叭天线,主波束宽度15°,可通过自动转极化装置进行双极化观测,图1为该观



图2 被动微波观测系统工作流程

Fig.2 Workflow of passive microwave observation system

测系统在闪电河流域进行农作物观测实验(F5点)。在选择好实验地点后,车载被动微波观测系统按照图2所示流程进行实验观测。

2.2 观测数据

在闪电河流域共选择了8个地点进行了地基L波段微波辐射计测量,分别标记为F1、F2、F3、F4、F5、F6、F7、F8,观测目标依次为水体、草地、水体、裸土、胡萝卜、裸土、马铃薯和草地。F1点位于多伦县城的龙泽湖,代表城镇内的干扰情况;F3点位于沽源县北的天鹅湖,为综合试验中机载微波辐射计的飞行定标场,如图3所示,图中的红色线段代表机载微波辐射计的测量轨迹,飞行区域为70 km×10 km,共11个航段,相邻航段间隔1 km,每个航段长70 km。

在理论上,射频干扰对微波辐射计的探测影响可以应用Friis传输方程来描述^[32]:

$$P_{\text{RFI}} = \frac{1}{L_{\text{PDF}}} P_i G_t(\theta_r, \varphi_r) G_r(\theta_i, \varphi_i) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3)$$

其中: L_{PDF} 是与频率相关的抑制因子, P_i 表示干扰源的传输功率, $G_t(\theta_r, \varphi_r)$ 表示干扰源天线在辐射计方向上的增益, $G_r(\theta_i, \varphi_i)$ 表示辐射计天线在干扰源方向上的增益, λ 表示干扰源波长, R 表示干扰源与辐射计之间的距离。根据公式(3),当某一干扰源发生时,其对微波辐射计的探测影响不仅由干扰源的量级及两天线之间距离决定,而且与二者的工作频率、所在方位以及观测角度有关。

依据微波辐射计的测量结果,该地区的主要干扰形式可以认为是脉冲辐射干扰,即无论电子设备发出的信号为何种形式,都可以等效为一个少量级

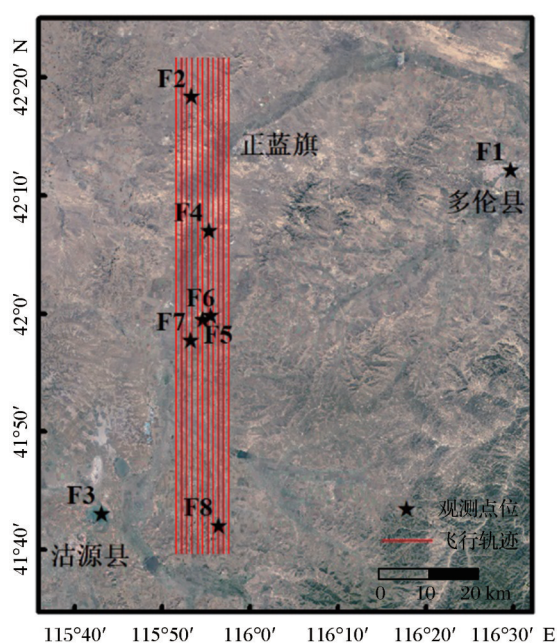


图3 闪电河流域被动微波遥感试验的地基观测点与机载测量轨迹

Fig.3 Ground observation points and flight route of airborne campaign of passive microwave remote sensing text in Shandian River Basin

的宽频带干扰,试验区此类干扰一般持续时间为1 ms至几十ms。试验区内测得的典型脉冲型干扰信号如图4所示(该典型干扰信号于9月25日15:36在F8点测量)。

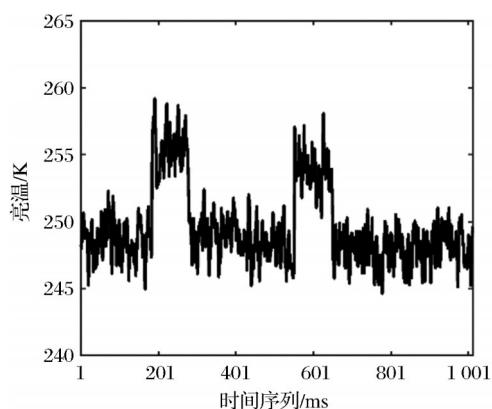


图4 脉冲式干扰(积分时间1 ms)

Fig.4 Pulsed Interference(integration time 1 ms)

图4中数据亮温为1 ms积分时间结果,干扰发生期间虽然亮温值有所升高,但其方差并未有明显变化。同时,试验区内也存在调制式干扰,可能来自低频的数字通讯系统,在F1点龙泽湖水体测量过程中检测到如图5所示干扰信号(9月12日16:25测量),此类干扰在发生期间信号幅度变化较大,有明

显的受调制表现。图4中干扰虽然严重,但由于持续时间较短,依然可以进行有效识别,但如果持续时间较长,则比较难于检测。由于人口和工业集中的因素,城镇的干扰要比野外严重,在多伦县城的龙泽湖畔(F1点)对水体进行测量(目标相对稳定),发现城镇内的干扰量级较大,对H极化测量的各帧数据取平均值,如图6所示(9月12日16:19~16:27测量),图中记录了L波段微波辐射计观测高度角从40°至70°变化过程中H极化的测量亮温值(92 ms积分时间)。而野外测量数据则相对较为“纯净”,图7与图8为9月25日F8点草地测量中观测高度角从40度~70度变化过程中H极化与V极化的亮温值(15:34~15:42测量),尽管已经进行了92 ms的积分,但有一些干扰现象依然很明显,特别是V极化测量数据。

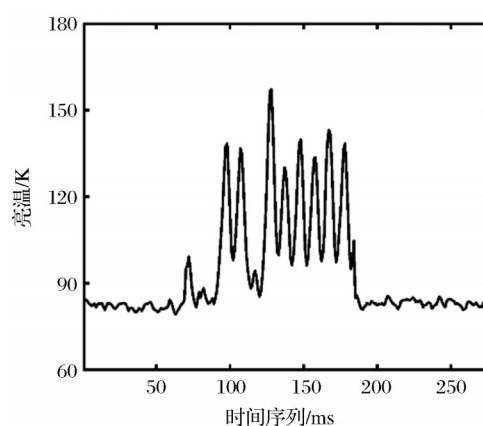


图5 调制式干扰(积分时间1 ms)

Fig.5 Modulated Interference(integration time 1 ms)

2.3 射频干扰检测算法

2.3.1 时域脉冲检测算法(APB)

微波辐射计所测量的热辐射信号能量极低,而人造干扰源所发射的功率使得微波辐射计的输出亮温升高,于是在时域进行能量检测也就成为了常规方法,一般将超过阈值的测量数据 $x(i)$ 标记为射频干扰,将检测标志为置1,阈值 δ 定义如式(4):

$$\delta = \beta\sigma + m \quad (4)$$

对应的 σ 和 m 分别是测量亮温的标准差和均值, β 参数决定着算法的灵敏度。Niamsuwan对算法中的各参数给出了详细的说明及计算方法^[16]。由于辐射计接收机中存在硬件积分电路,所以文献[31]对该算法进行了一些改进,主要体现在以下方面。

(1)在阈值计算过程中对标准差进行了限制,

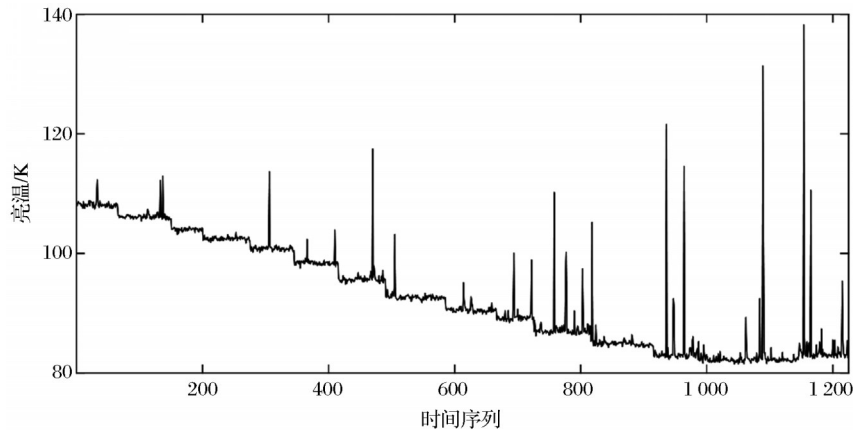


图 6 F1点水体测量时水平极化受到的射频干扰情况(积分时间 92 ms)

Fig.6 RFI on horizontal polarization of water in F1 point(integration time 92 ms)

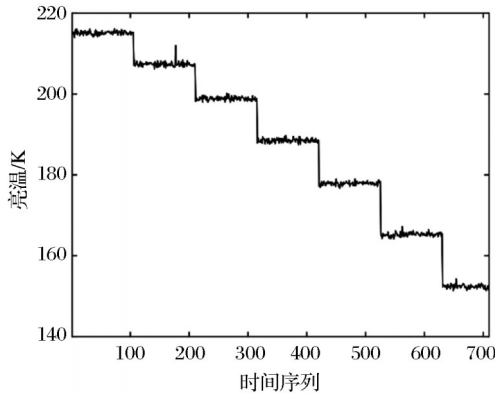


图 7 F8点H极化测量数据(积分时间 92 ms)

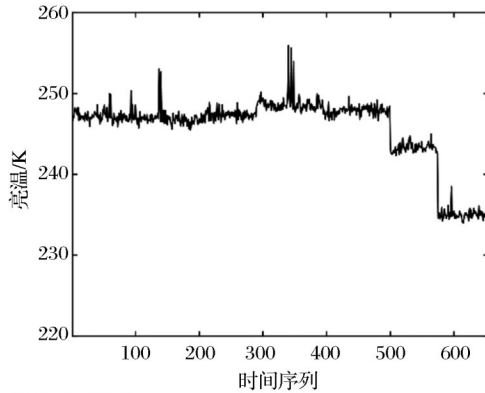
Fig.7 Data of H polarization in F8 point
(integration time 92 ms)

图 8 F8点V极化测量数据(积分时间 92 ms)

Fig.8 Data of V polarization in F8 point
(integration time 92 ms)

当标准差大于 1.3 或小于 0.8 时,分别以 1.3 和 0.8 为标准差计算阈值;

(2)以检测标志位为元素形成检测序列 $z(i)$,如式(5),在此基础上生成警告序列 $f(i)$,即将干扰数据的相邻数据同样标志为射频干扰,如式(6);

$$z(i) = \begin{cases} 0 & x(i) \leq \delta \\ 1 & x(i) > \delta \end{cases} \quad (5)$$

$$f(i) = \begin{cases} 1 & z(i-1)=1 \text{ or } z(1)=1 \\ & \text{or } z(i+1)=1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

若进行干扰检测的数据点总数为 N ,则根据检测序列和警告序列可以定义检测率 r_d 与警告率 r_w :

$$r_d = \frac{\sum_{i=1}^N z(i)}{N} \times 100\% \quad (7)$$

$$r_w = \frac{\sum_{i=1}^N f(i)}{N} \times 100\% \quad (8)$$

检测率可以体现算法的检测能力,但为了避免干扰被检出时,其影响已经开始或仍将继续,本研究使用警告序列进行干扰抑制。

(3)将统计分析方法引入平均值与标准差的初值选取过程中,在一定程度上避免了由于初值选取不当造成的开始阶段漏检或误检,本次试验过程中规定标准差范围 0.8~1.3,水体测量时平均值范围设置为 40~260 K,其他地物测量时平均值范围设置为 120~280 K。

2.3.2 基于变异系数的中值比较算法

微波辐射计测量的是目标物体的热辐射,其信号表现为具有高斯分布特性的随机噪声。在经过微波辐射计系统后其输出电压的标准差(σ_v)与均值(m_v)之比与微波辐射计的中频带宽(B)与硬件积分时间(τ)有关^[27],如式(9):

$$\sigma_v/m_v = 1/\sqrt{B\tau} \quad (9)$$

实验中用标识 kc 来表示这个比值的 1 000 倍,

则本实验所用辐射计的 kc 值应为4.082 5,但实际测量时该值受硬件电路的影响会有所偏离,而且测量目标不同也会引起该值的变化。在地基微波辐射计观测实验中, kc 一般分布在2~9之间。文献[30]提出了一种基于变异系数CV中值的滤波方法—中值比较法。实验采用该方法进行射频干扰检测,帧容量设置为92,分别计算各帧的电压平均值、标准差以及变异系数,组容量设置为25,统计出一组内变异系数的最小值 M_i 和中值 M_e ,检测阈值定义为 $\delta_m = 2 * M_e - M_i$,对变异系数超过 δ_m 的数据帧标记为射频干扰。

3 结果与分析

3.1 射频干扰检测

应用中值比较算法和时域脉冲检测算法对8个观测点的数据进行处理,图9是F1点龙泽湖水体观测中H极化64度一组数据的检测结果(1 ms积分时间),该组数据的后边部分正是图5所示干扰的发生时段,两种检测算法对这种持续时间较短的干扰都能够有效检测。

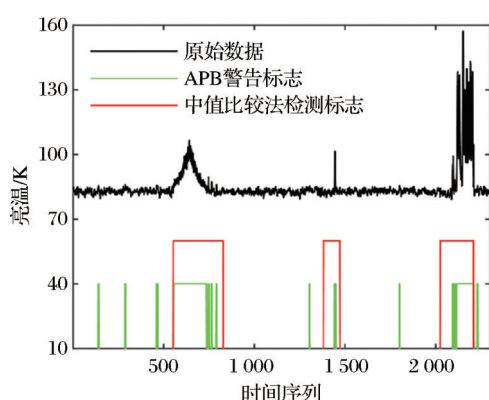


图9 F1点H极化64°数据检测结果(积分时间1 ms)

Fig.9 Detection result of H polarization at 64 degree in F1 point(integration time 1 ms)

对于研究区内较常见的脉冲式干扰,图10给出了F8点草地观测V极化55度一组数据的检测结果(1 ms积分时间),该组数据的尾部发生了一次小量级的脉冲辐射干扰,两种算法对此也都成功检测。值得注意的是中值比较算法在发现某一帧的变异系数超出检测阈值后并不定位干扰发生的具体时刻,而是整帧标记为干扰,如图9中1500 ms附近的一次干扰,可能只是持续了几个毫秒,但该帧的

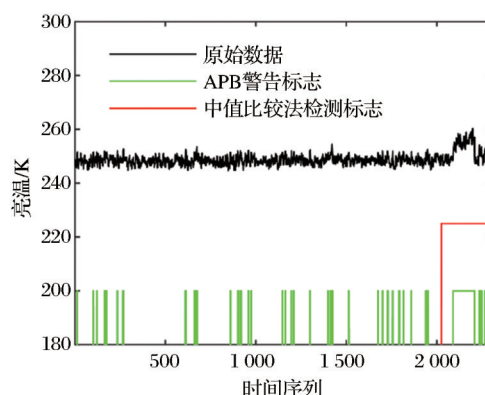


图10 F8点V极化55度数据检测结果(积分时间1 ms)

Fig.10 Detection result of V polarization at 55 degree in F8 point(integration time 1 ms)

92 ms数据被中值比较算法全部标记;而APB算法的检测是逐个数据点进行的,只是将高于检测阈值的数据点标记,警告序列也只是多了相邻的数据点而已,所以中值比较算法的检测率一般会高于APB算法的检测率,甚至高于其警告率。

为了能够有效检测小量级干扰,APB算法的检测阈值与检测均值相差不会太大,一般为2~3 K左右^[30],这会在一定程度上造成误检,即APB算法可能会将测量目标短时间内的正常波动检测为射频干扰,并有可能使得警告率高于中值比较算法的检测率,因为中值比较算法对这种波动具有较强的容许性。图11为F4点裸土观测V极化40 K测量数据,在该角度的检测中,中值比较算法的检测率为5%,而APB算法的检测率为6.87%(警告率为12%),图中可见,APB算法存在一定的误检现象,当然该算法对检测到干扰的相邻数据直接标记也

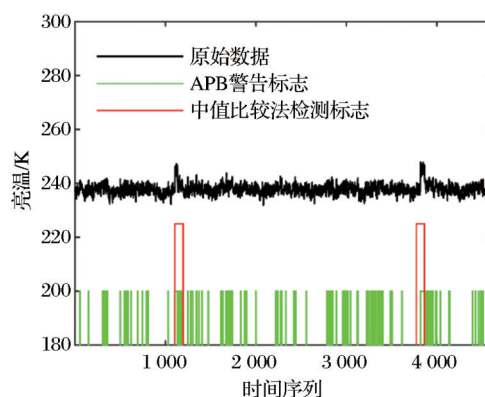


图11 F4点V极化40 K数据检测结果(积分时间1 ms)

Fig.11 Detection result of V polarization at 40 degree in F4 point(integration time 1 ms)

是警告率偏高的一个原因。

3.2 电磁环境分析

根据微波辐射计的测量结果与检测(警告)标志,可以按照式(10)提取未受到干扰数据 $y(i)$ 。

$$y(i)=x(i)\cdot[1-f(i)]$$
 (10)

其中: $x(i)$ 为辐射计测量的原始数据; $f(i)$ 表示 APB 算法的警告序列(在中值比较算法中使用检测序列)对所有未受到干扰的数据求平均值,可以近似地认为目标的微波辐射亮温真值。而实际上,如果脉冲辐射干扰持续时间较长,其影响超过了一帧数

据,有可能不被中值比较算法所检测,虽然本试验区此类干扰极少,但计算亮温真值时该算法也考虑了这种漏检,具体方案为对未受到干扰的亮温数据进行排序,取中间 10 帧的平均值作为亮温真值(920 ms 积分)。将干扰数据(92 ms 积分时间)与计算的亮温真值作差值,可以近似认为是观测到的干扰量级,表 1 给出了各试验点不同极化观测中的最大干扰量级和检测率(警告率),检测率(警告率)可以认为是观测到的干扰率,计算过程中 N 为该极化中所有角度测量数据容量的总和。

表 1 中值比较算法与 APB 算法的检测结果对比
Table 1 Comparison of detection results between median comparison algorithm and APB algorithm

地点编号	经纬度	观测日期	观测目标	极化	中值比较算法		APB 算法		
					最大干扰 量级/K	检测率 /%	最大干扰 量级/K	警告率 /%	检测率 /%
F1	116.494 088° E 42.203 106° N	2018/09/12	水体	H	55.42	22.51	55.45	5.82	3.86
				V	24.31	22.10	24.43	8.38	4.73
F2	115.888 652° E 42.306 303° N	2018/09/26	草地	H	4.87	13.29	5.01	7.68	4.19
				V	4.02	11	4.42	12.99	7.23
F3	115.718 307° E 41.717 390° N	2018/09/26	水体	H	3.77	9.55	3.95	5.83	2.85
				V	4.47	12.75	4.80	11.32	6.35
F4	115.922 069° E 42.117 544° N	2018/09/27	裸土	H	1.56	5.43	1.73	6.19	2.88
				V	4.43	9.71	4.66	10.56	5.64
F5	115.909 589° E 41.992 272° N	2018/09/16	胡萝卜	H	1.69	5.87	1.95	5.99	2.81
				V	3.00	6.34	3.11	7.31	3.68
F6	115.924 444° E 41.997 222° N	2018/09/19	裸土	H	3.14	7.08	3.27	6.68	3.29
				V	3.12	10.18	3.28	7.06	3.75
F7	115.887 500° E 41.963 056° N	2018/09/20	马铃薯	H	2.78	8.38	2.96	7.65	3.78
				V	3.39	11.25	3.51	8.28	4.42
F8	115.940 000° E 41.700 277° N	2018/09/25	草地	H	4.73	4.00	4.87	5.77	2.74
				V	7.49	7.84	7.69	8.84	4.99

表 1 中可以看出,由于 APB 算法误检的影响,部分观测数据的警告率高于中值比较算法的检测率。由于中值比较算法在发现干扰后整帧标记并滤除,对亮温真值的计算影响较小,而 APB 算法只是滤除了大于阈值的数据及少量的邻近点,加之误检导致部分亮温值较高的正常数据也同样被滤除,导致计算的亮温真值一般偏低,表现为其干扰量级略高于中值比较算法。

由检测结果可知,试验区内城镇内干扰量级较大(F1 点),而野外测量点干扰量级较小,V 极化受

到的射频干扰较 H 极化严重,表现为表 1 中的该极化最大干扰量级偏高,检测率(警告率)偏大。试验区北部以草原为主,居民较少,但存在一定数量的风力发电设备,F2 点附近建有联通信号塔,受干扰概率偏大;试验区中部及南部为农牧交错地带,分布一定数量的现代化农田,F8 点附近建有一太阳能发电站,这些都可能干扰到 L 波段微波辐射计的观测;试验区内有县道 502 及 402 等几条交通要道,汽车电子设备也是重要的 L 波段干扰源,F4 点和 F7 点受到的干扰可能与邻近县道 502 有关;F3 点天鹅

湖水体测量过程中同样存在一定数量的射频干扰,可能会影响机载微波辐射计的定标。两种算法虽然能够检测出一些低于3 K的射频干扰,但由于干扰量级与微波辐射计的探测灵敏度接近,所以当表格内最大干扰量级小于3 K时,有可能出现误检现

象,表中显示9月16日V极化测量的最大干扰量级为3 K,定位在40度观测过程中,本次干扰附近数据的检测结果如图12所示,在50帧数据中,中值比较算法检测出5帧干扰,而只有r3干扰现象较为明显。r3的干扰量级为3.00 K。

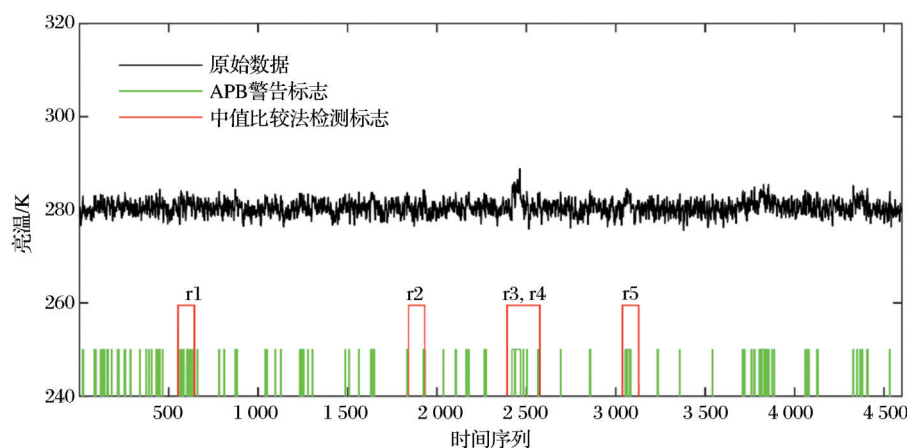


图12 F5点V极化40度数据检测结果(积分时间1ms)

Fig.12 Detection result of V polarization at 40 degree in F5 point(integration time 1 ms)

相对于卫星遥感与航空遥感,地基实验可以进行长时间序列观测,在干扰率不高的条件下,这种量级的射频干扰对观测结果的影响几乎可以忽略不计。

APB算法虽然具有一定的误检率,但可以根据检测标志得出每次干扰的持续时间,进而通过滤波后的数据计算出一次干扰的平均量级,即干扰持续时间内的平均亮温与滤波后的平均亮温作差。图13给出野外观测点F2~F8点的干扰持续时间与平均干扰量级(大于2K)的密度(相对该点的最大密度归一化),图中显示,L波段微波辐射计检测到的闪电河流域野外射频干扰持续时间多数为1~2 ms,干扰的平均量级多数集中在3~4 K(图13中的平均干扰量级与表1中的最大干扰量级计算方法并不一样);考虑到硬件积分时间为1ms,大部分干扰的实际的持续时间可能小于1 ms。为了对比清晰,个别观测点存在持续时间大于40 ms,或量级大于15K的干扰并未在图中显示。

4 结 论

将自主研发的L波段微波辐射计搭载于地基移动遥感平台,在闪电河流域进行移动观测,将试验区内的干扰类型进行分类,确定主要为脉冲型干

扰,且持续时间一般较短,应用中值比较算法和时域脉冲检测算法对试验中的小量级射频干扰进行检测与抑制,取得了较好的检测效果,在此基础上统计了8个地基测量点各个极化的最大干扰量级和平均检测率(警告率),中值比较算法的最小干扰检测量级低于3 K。分析了试验区电磁环境的影响以及可能来源,野外测量中干扰量级不高,平均量级主要集中在3~4 K之间,干扰持续时间多为1~2 ms,各点干扰率有较大差异,从2%~14%不等,V极化观测受到的干扰较H极化略微严重。但城镇内射频干扰较严重,会影响到周边的电磁环境,无论是地基遥感还是星基空基遥感都会受到影响。地基试验由于观测时间相对较长,在抑制干扰后可以靠增加观测样本来保证灵敏度,而卫星遥感或空基遥感因为对同一区域观测时间有限,滤除受干扰数据后将不可避免地降低探测灵敏度。

在进一步的工作中,可以将地基试验数据与机载测量数据进行对比,分析同一地区射频干扰在空地观测模式中的表现形式及影响机理。

本次试验开展于闪电河流域,属于农牧交错地带,人口密度较小,工业比重也不高,但地基微波辐射计依然能够检测出一些明显的射频干扰。因此,在我国后续的L波段卫星探测计划中要充分考虑

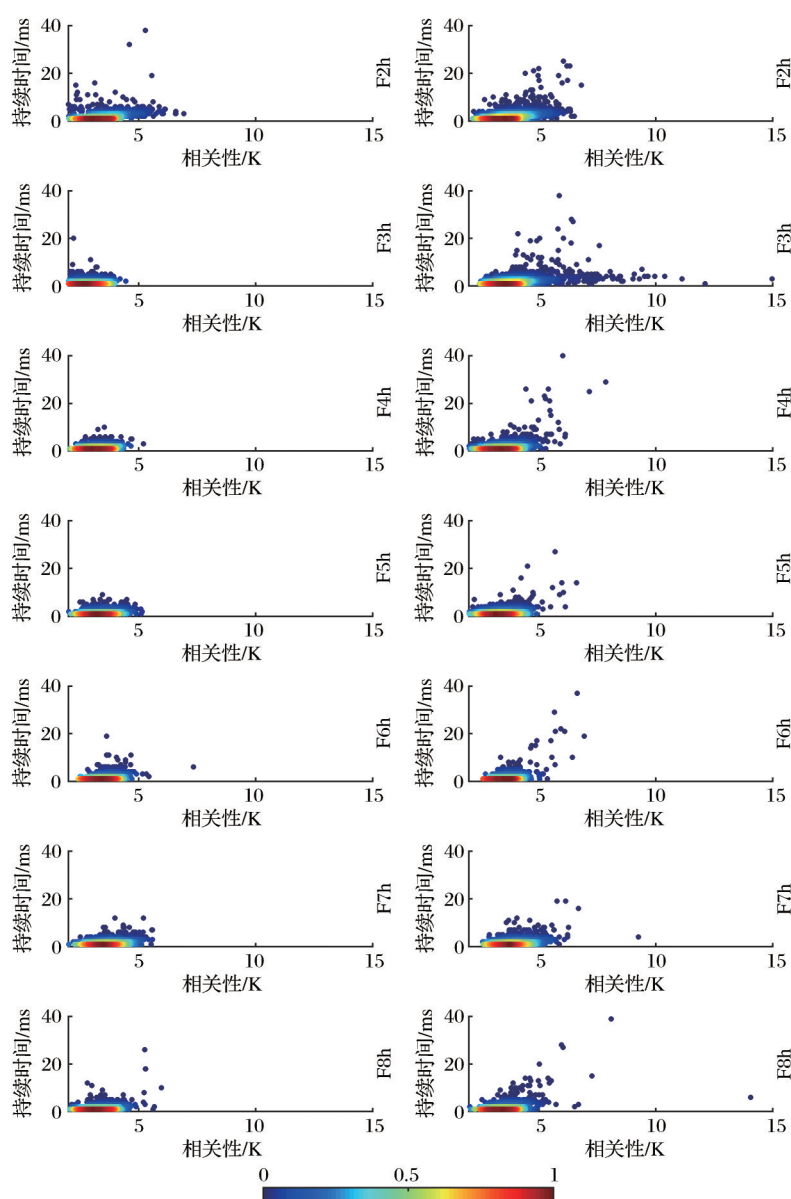


图13 野外实验点的平均干扰量级与持续时间密度分布(积分时间1ms)

Fig.13 Density distribution of average interference level and duration in field experimental sites (integration time 1 ms)

RFI影响,相对于微波辐射计的宽频带接收,射频干扰多是持续时间较短、频谱较窄的信号,因此,射频干扰的检测需要在接收机系统中进行子带划分或缩短硬件积分时间。另外,为了能够在频域和统计域内开发新的算法,短时间内能够进行大量数据样本的采集至关重要,当然这也会对数据存储与无线传输产生一定的压力。

参考文献 (References):

- [1] Zhao T J, Shi J C, Lv L Q, *et al.* Soil moisture experiment in the Luan river supporting new satellite mission opportunities [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111680. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111680.
- [2] Regulations of the People's Republic of China on Radio Frequency Division [Z]. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2014. [中华人民共和国无线电频率划分规定[Z]. 中华人民共和国工业和信息化部, 2014.]
- [3] NO.5.340 of Radio Regulations of International Telecommunications Union - Radiocommunications sector. Article 5, Radio Regulations, Volume 1, 2012. <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>.
- [4] Zhao Tianjie. Recent advances of L-band application in the passive microwave remote sensing of soil moisture and its prospects[J]. Progress in Geography, 2018, 37(2): 198-213. [赵天杰. 被动微波反演土壤水分的L波段新发展及未来展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 198-213.]
- [5] 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, 1-16. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2690406.
- [6] Kornberg M, Oliva R, Fauste J, *et al.* SMOS payload status after six years in orbit operational and thermal performance, calibration strategy & RFI management[C]//14th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad). IEEE, 2016.
- [7] 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.
- [8] 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 Microwave, 2016, 32(1): 86-91.[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.]
- [9] Zhao T J, Shi J C, Bindlish R, *et al.* Refinement of SMOS multiangular brightness temperature toward soil moisture retrieval and its analysis over reference targets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2015, 8(2): 589-603. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2336664.
- [10] Wang Shu, Jiang Lingmei, Wang Jian. Retrieval of soil moisture based on multi-frequency microwave remote sensing: study of HiWATER[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1414-1425.[王舒, 蒋玲梅, 王健. 基于多频被动微波遥感的土壤水分反演—以黑河上游为例[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1414-1425.]
- [11] SMAP Handbook[Z]. National Aeronautics and Space Administration, 2014.
- [12] Barre H M J, Duesmann B, Kerr Y H. SMOS: the mission and the system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(3): 587-593.
- [13] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, *et al.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 704-716.
- [14] Zhang Z J, Lan H M, Zhao T J. Detection and mitigation of radiometers radio-frequency interference by using the local outlier factor[J]. Remote Sensing Letters, 2017, 8(4): 311-319.
- [15] Oliva R, Daganzo-Eusebio E, Kerr Y K, *et al.* SMOS radio frequency interference scenario: status and actions taken to improve the RFI environment in the 1 400~1 427 MHz passive band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5): 1427-1439.
- [16] Niamsuwan N, Johnson J T, Ellingson S W. Examination of a simple pulse blanking technique for RFI mitigation[J]. Radio Science, 2005, 40(5): RS5 S03. DOI: 10.1029/2004RS003155.
- [17] Güner B, Niamsuwan N, Johnson J T. Performance study of a cross-frequency detection algorithm for pulsed sinusoidal RFI in microwave radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 2899-2908. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2043532.
- [18] Güner B, Johnson J T, Niamsuwan N. Time and frequency blanking for radio-frequency interference mitigation in microwave radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3672-3679. DOI: 10.1109/TGRS.2007.903680.
- [19] Ruf C S, Gross S M, Misra S. RFI detection and mitigation for microwave radiometry with an agile digital detector[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 694-706. DOI: 10.1109/TGRS.2005.861411.
- [20] Fanise P, Zribi M, Parde M, *et al.* Analysis of RFI identification and mitigation in CAROLS radiometer data using a hardware spectrum analyser[J]. Sensors, 2011, 11(3): 3037-3050.
- [21] 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 & Remote Sensing, 2010, 48(3): 1398-1407.
- [22] 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.
- [23] McMullan K D, Brown M A, Martin-Neira M, *et al.* SMOS: The payload[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(3): 594-605.
- [24] Le Vine D M, Matthaeis P de. Aquarius active/passive RFI environment at L-band[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10): 1747-1751.
- [25] Soldo Y, Khazaal A, Cabot F, *et al.* An RFI index to quantify the contamination of SMOS data by radio-frequency interference[J]. IEEE Journal of selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(4): 1577-1589. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2425542.
- [26] Soldo Y, Le Vine D M, Bringer A. 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.
- [27] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing-Vol.1 (Microwave remote sensing fundamentals and radiometry)[M]. Beijing: Science Press, 1988: 239-244.[乌拉比 F T, 穆尔 R K, 冯建超. 微波遥感-第一卷(微波遥感基础和辐射测量学)[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 239-244.]
- [28] Sun Hongyan, Zhao Kai. Study of noise coupled digital A-to-gain compensative microwave radiometer[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(5): 100-104.[孙鸿雁, 赵凯. 机载噪声耦合式增益自动补偿微波辐射计[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(5): 100-104.]
- [29] Zhao Kai, Shi Jiuxin, Zhang Hande. High sensitivity airborne

- L-band microwave radiometer measurements of sea surface salinity[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 277-283.
- [赵凯, 史久新, 张汉德. 高灵敏度机载L波段微波辐射计探测海表盐度. *遥感学报*, 2008, 12(2): 277-283.]
- [30] Jiang Tao. Research on suppression method of electromagnetic interference based on L-band microwave radiometer with digital gain automatic compensation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.[姜涛. 基于数字增益自动补偿型L波段微波辐射计电磁干扰抑制方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.]
- [31] Jiang Tao, Zhao Kai, Wan Xiangkun. Research in 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.[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.]
- [32] Piepmeier J R, Pellerano F A. Mitigation of terrestrial radar interference in L-band spaceborne microwave radiometers [C]//*IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 2006.

Detection of RFI in Ground-based L-band Radiometer and Analysis on Electromagnetic Environment in the Shandian River Basin

Jiang Tao¹, Zheng Xingming^{1,2}, Li Xiaojie¹, Li Xiaofeng¹, Zhao Kai^{1,2}

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;*

2. *Changchun Jingyuetan Remote Sensing Test Site, Changchun 130102, China)*

Abstract: The L-band microwave radiometer is an important experimental equipment for detecting soil moisture and Sea Surface Salinity (SSS). However, the increasingly Radio-Frequency Interference (RFI) makes the L-band passive microwave remote sensing unable to meet the inversion accuracy requirements of ground surface parameters. In this paper, an integral type L-band microwave radiometer with fast sampling capacity is mounted on the vehicle mobile platform. The ground measurement is carried out in the Shandian River Basin of North China. The Asynchronous Pulse Blanking algorithm (APB) and the median comparison algorithm based on the coefficient of variation are used to detect and mitigate the radio-frequency interference of the measured results. Both of two algorithms have achieved a certain effect on radio-frequency interference detection. According to the test results, the RFI observed by the L-band ground-based microwave radiometer in the remote sensing experimental area of the Shandian River is mainly small-scale pulsed interference, the field interference level is generally 3~4 K, most interference persist 1~2 ms, and the interference rate is between 2% and 14%. The analysis shows that the field interference magnitude in the experimental area is significantly smaller than that in the cities and towns, and the interference to V polarization is slightly more serious than that to H polarization. It is found that the APB algorithm has more false detection phenomena or False Alarm Rate (FAR), while the median comparison algorithm based on the coefficient of variation can more tolerate the radiation brightness temperature fluctuation of the target itself, and the minimum detection interference level or magnitude of the latter algorithm is less than 3 K. The measurement data of ground-based L-band passive microwave radiometer will contribute to the verification and calibration of remote sensing data of both aviation and satellite.

Key words: L-band microwave radiometer; Soil moisture; Radio frequency interference; Asynchronous pulse blanking algorithm; Median comparison algorithm; Coefficient of variation; Analysis on electromagnetic environment