

L波段微波辐射计周期脉冲式干扰时域检测方法研究

姜涛^{①②③} 赵凯^{*①③} 万祥坤^{①②}

^①(中国科学院东北地理与农业生态研究所 长春 130102)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

^③(中国科学院长春净月潭遥感实验站 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有效遥感器。但是,全球定位系统(GPS)信号、雷达信号以及一些商用电子产品的电磁辐射造成的频谱污染都可以对微波辐射计的探测造成干扰,使得被动微波遥感对地观测结果具有一定的偏差,降低了地表参数的反演精度。该文通过实验模拟脉冲式噪声干扰,观测其在L波段(全功率接收型)微波辐射计系统中的传输特性,分析输出信号特性与辐射计参数(积分时间、灵敏度)的相关性,获取其数字特征参数,结合脉冲检测法(APB),提出一种新的自相关检测(ACD)算法,能够有效用于周期性的脉冲式辐射干扰的检测,在微波辐射计系统积分时间1 ms的情况下,能够检测1.5 K的噪声干扰,满足卫星遥感探测反演地表参数精度的需求。

关键词: 微波辐射计; 射频干扰; 自相关检测; 时域脉冲检测; 脉冲辐射干扰

中图分类号: TP732.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1539-07

DOI: 10.11999/JEIT170954

Research on Detection Methods to Periodic Pulsed Interference for L Band Microwave Radiometer in Time Domain

JIANG Tao^{①②③} ZHAO Kai^{*①③} WAN Xiangkun^{①②}

^①(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(Changchun Jingyuetan Remote Sensing Test Station, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: L-band passive microwave remote sensing is an effective method for detection of soil moisture and ocean salinity. However, spectrum pollution from Global Positioning System (GPS), radar and electromagnetic radiation from some commercial electronic products can interfere with the detection of microwave radiometers, it results in a certain deviation to the ground observation, and reduces the retrieval accuracy of the surface parameters. Pulsed noise interference is simulated by experiment, its transmission characteristics in L-band (total power receiver) microwave radiometer system is observed, the correlation between the characteristics of the output signal and the radiometer parameters (integrating time and sensitivity) is analyzed, its digital characteristic parameters are obtained. Combining the method of Asynchronous Pulse Blanking (APB), a new AutoCorrelation Detection (ACD) algorithm is proposed, which can detect periodic pulsed radiation interference effectively. In the case that microwave radiometer system integrating time is 1 ms, it can detect the noise interference of 1.5 K, which meets the requirement of precision of surface parameters retrieved by satellite remote sensing.

Key words: Microwave radiometer; Radio-frequency interference; AutoCorrelation Detection (ACD); Asynchronous Pulse Blanking (APB); Interference of pulsed radiation

1 引言

微波辐射计是宽频带、高灵敏度被动接收机,

能够在较强的背景噪声中提取被测目标微弱的微波辐射信号^[1]。正因如此,微波辐射计的观测比较容易受到人造信号源的扰动^[2]。由于这种扰动本身发生在微波辐射计的工作频段或该频段附近,将直接经由天线进入测量系统,对系统观测精度造成了影响,这一过程我们称为射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)。较强的干扰一般导致对该地区的观测数据无法使用,较弱的干扰会影响反演精度^[3]。

收稿日期: 2017-10-18; 改回日期: 2018-03-27; 网络出版: 2018-04-24

*通信作者: 赵凯 zhaokai@iga.ac.cn

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2014FY201800-4)

Foundation Item: The Special Program for Science and Technology Basic Work of the Ministry of Science and Technology, China (2014FY201800-4)

L波段(1~2 GHz)的频率使用划分比较细致,由欧空局负责的土壤湿度和海表盐度空间遥感观测系统 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)与美国宇航局 NASA 负责的 SMAP(Soil Moisture Active Passive mission)土壤湿度遥感观测系统,虽然工作在受保护的频带内,也都在全球的不同区域受到不同程度的 RFI 的影响^[4-7]。国际上针对被动微波遥感对地观测中的 RFI 问题,先后提出了时域脉冲检测^[8]、频域检测^[9]、峰度检测^[10]、极化检测^[11]和空域检测^[12]等算法。近年,国内一些学者也对 RFI 检测算法开始了详细研究^[13,14]。在 SMOS, SMAP 系统中,当干扰所引起的亮度温度变化幅度与目标亮度温度变化可比时(通常为 2 K),难以被识别并误判,而且在地物目标边界亮度温度变化较大区域,如水陆边界,容易产生误判。

在没有 RFI 的情况下,微波辐射计系统中传输的信号包括源于目标的热辐射和仪器内部的器件噪声,是符合高斯分布的白噪声随机过程,时频特性和统计特征不同于 RFI,这也是前述各个检测方法得以适用的理论依据。而当 RFI 的量级很小或频带较宽时,其所引起的微波辐射计测量结果不会在很大程度上偏离正态分布,如日本地区的电视信号造成的干扰就已经严重影响了 SMAP 卫星的探测,并导致其检测算法全部失灵^[7,15]。

脉冲信号是分析电子系统特性(时域、频域)的基础,本文针对真实天线孔径周期定标全功率接收体制微波辐射计,利用脉冲调制固态噪声源输出的方法,制造可控的干扰(以下称之为脉冲式辐射干扰),模拟实际测量中的低量级、宽频带复杂干扰,开展 L 波段微波辐射计射频频干扰识别与检测方法研究。由于微波辐射计测量的是噪声功率,只要其输入端的信号引起了功率变化,且在系统探测范围内,都会引起输出的变化,因此无论输入的信号是点频、窄频或宽频,都可以等效成一个同量级功率的宽带输入信号。

2 周期脉冲式辐射干扰

周期脉冲式信号可表述成不同频率的正弦波组合,因此本文先讨论具有随机相位正弦波与窄带平稳高斯过程之和的信号 $x(t)$ 通过微波辐射计的特性。设

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta) + \xi(t) \quad (1)$$

式中, A 为正弦波信号的幅值, ω_0 为干扰信号的角频率,包含于窄带平稳高斯过程 $\xi(t)$ 的频带之内, θ 为(0~2 π)上均匀分布的随机变量。根据随机过程

理论^[16],微波辐射计系统的输出 $\eta(t)$ 的概率密度为

$$f_x(x) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\xi^2)^{1/2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{x^2}{2\sigma_\xi^2}\right)^k}{k!} \cdot {}_1F_1\left(k + \frac{1}{2}; 1; -\frac{A^2}{2\sigma_\xi^2}\right) \quad (2)$$

式中, σ_ξ 为 $\xi(t)$ 的标准差, ${}_1F_1(a; b; z)$ 称为合流型超几何级数,其定义为

$${}_1F_1(a; b; z) = 1 + \frac{a}{b} \cdot \frac{z}{1!} + \frac{a(a+1)}{b(b+1)} \cdot \frac{z^2}{2!} + \frac{a(a+1)(a+2)}{b(b+1)(b+2)} \cdot \frac{z^3}{3!} + \dots \quad (3)$$

式中, $A^2/(2\sigma_\xi^2)$ 代表干扰信号的功率与噪声功率之比,当干扰信号很强时,其概率密度接近于随机相位正弦波的分布,当干扰很弱时,其概率密度接近于正态分布。

日益复杂的电磁环境使得微波辐射计探测到的射频频干扰具备类高斯分布的特性,假设这些信号叠加后的表述为 $r(t)$,它近似服从正态分布 $N(0, \sigma_1^2)$,被测地物目标辐射的热噪声 $\xi(t)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma_2^2)$,则微波辐射计天线接收的信号也服从正态分布,其分布参数为 $N(0, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$,方差的增大,在微波辐射计输出上的表现为亮度温度升高。若 $r(t)$ 具有周期性,则这种干扰可表示为

$$x(t) = r(t) \cdot \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(u\left(t - n \cdot T_p + \frac{T_L}{2}\right) - u\left(t - n \cdot T_p - \frac{T_L}{2}\right) \right) \right] + \xi(t) \quad (4)$$

式中, T_p 为脉冲干扰出现的周期, T_L 是它的持续时间, $u(t)$ 为阶跃函数。这里我们假设积分时间明显小于脉冲持续时间,则当脉冲辐射干扰不发生时,

$$E\{\eta_2(t)\} = G\sigma_2^2 \quad (5)$$

$$D\{\eta_2(t)\} = G^2\sigma_2^4 \quad (6)$$

G 表示微波辐射计系统的增益,当存在脉冲辐射干扰时

$$E\{\eta_1(t)\} = G(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (7)$$

$$D\{\eta_1(t)\} = G^2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2 \quad (8)$$

若积分时间远大于脉冲辐射干扰的周期,有

$$E\{\eta(t)\} = G\left(\frac{T_L\sigma_1^2}{T_p} + \sigma_2^2\right) \quad (9)$$

$$D\{\eta(t)\} = \frac{T_L}{T_p} \left(2 - \frac{T_L}{T_p}\right) G^2\sigma_1^4 + G^2\sigma_2^4 - 2\frac{T_L}{T_p} G^2\sigma_1^2\sigma_2^2 \quad (10)$$

当积分时间远大于脉冲干扰周期时,微波辐射计的输出无法在时域内体现出干扰的特性,进而无法检测。若辐射计的硬件积分时间小于脉冲干扰的持续

时间,理论上可以将其检测出来。在这里一般应用比较经典的时域脉冲检测算法。

3 时域脉冲检测算法与自相关检测算法

3.1 时域脉冲检测算法

时域脉冲检测算法对异步脉冲带来的干扰问题有显著作用,又称为异步脉冲检测法(APB)。APB算法对数据流中的每个采样点 $x(i)$,与阈值 δ 比较,如果 x 超过了阈值就提示检测。阈值定义为

$$\delta = \beta\sigma + m \quad (11)$$

对应的 σ 和 m 是 x 的标准差和均值,分别通过之前有限个无干扰的数据点计算, β 参数的设置要权衡探测灵敏度与准确度^[8]。

由于系统中存在硬件积分电路及脉冲辐射干扰在短时间内的功率不恒定,本文对APB算法进行了适当的改进。功率较低的脉冲辐射干扰,即使在干扰发生期间,其某些采样点的幅值也可能小于正常期间的噪声峰值或时域检测算法的阈值,并用于计算平均值和标准差,使得结果出现很大偏差,所以要将标准差限定在上限 σ_{\max} 与下限 σ_{\min} 之间,由仪器测试可知,在不存在射频干扰的情况下,L波段微波辐射计的输出数据的标准差在1.0~1.1之间,因此界限值应满足 $\sigma_{\max} > 1.1$,而 $\sigma_{\min} < 1.0$ 。

如果 $x(i)$ 超出了检测阈值,需要对其进行标记,设置检测序列 z ,其定义如式(12):

$$z(i) = \begin{cases} 0, & x(i) \leq \delta \\ 1, & x(i) > \delta \end{cases} \quad (12)$$

此外,当检测到某一数据点超过阈值时,干扰可能已经发生或将继续发生,所以 $z(i)$ 附近的数据点也要一并进行标记,为此设置警告序列 f ,其定义值如式(13):

$$f(i) = \begin{cases} 1, & z(i-1) = 1 \text{ 或 } z(i) = 1 \text{ 或 } z(i+1) = 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (13)$$

对于检测序列 z 中出现相邻较近的两个或多个1时,有可能是一次干扰中检测不足造成的,警告序列 f 的赋值如式(14):

$$f(i) = \begin{cases} 1, & z(j) = 1, z(k) = 1, j - h \leq i \leq k + h, \\ & k - j \leq L \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

本次实验所使用的微波辐射计测量数据中, L 与 h 的取值要满足式(15)条件。

$$L + 2h < N_p - N_L \quad (15)$$

其中, N_p 为脉冲辐射干扰的周期, N_L 为干扰持续时间。 L 与 h 的取值将影响警告结果,本次模拟实验中 $L = 3$, $h = 1$ 。

3.2 自相关检测算法

由于噪声信号具有一定的不确定性,仅仅依靠阈值比较,往往不能准确判断干扰,为此,本文介绍了一种自相关检测(AutoCorrelation Detection, ACD)的方法,适用于具有一定周期性的脉冲辐射干扰的检测,在实际的微波辐射计观测中,来自航空管制雷达的干扰就是周期性的脉冲干扰。

自相关函数是描述随机信号 $x(t)$ 在任意两个不同时刻 t_1, t_2 的取值之间的相关程度。其定义为

$$R\{x(t_1), x(t_2)\} = E\{x(t_1) \cdot x(t_2)\} \quad (16)$$

根据信号理论,周期信号的自相关函数仍然是周期函数,且二者周期相同。而如前文所述的周期性脉冲调制的噪声辐射干扰,在经过微波辐射计系统后,若积分时间远远小于其调制周期,则辐射计的输出可视为叠加了随机噪声的周期信号。本文提出的脉冲辐射干扰自相关检测算法流程如图1。

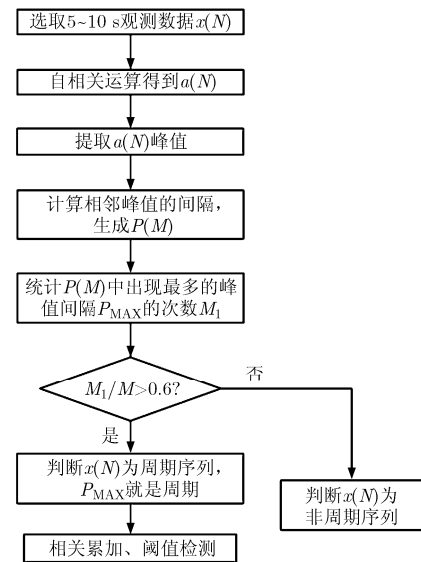


图1 ACD算法流程

步骤3中的峰值提取方法如下:(1)对 $a(N)$ 求导得到序列 $a'(N-1)$;(2)提取 $a'(N-1)$ 的符号得到序列 $s(N-1)$;(3)对 $s(N-1)$ 求导得到 $s'(N-1)$;(4)提取 $s'(N-1)$ 中值为-2的元素 $s'(m)$,并标记出其在 $a(N)$ 中的坐标位置 k , $a(k)$ 就是所提取的原始峰值。

以Neyman-Pearson(NP)准则为基础^[17],结合观测实验确定脉冲辐射干扰被微波辐射计采集的概率,对于脉冲宽度为 T_L 、周期为 T_p 、幅值为 A_L 的信号,在所观测时间窗口(通常观测时间 $\geq 10T_p$)内,可以近似等效数值为 $A_L T_L / T_p$ 的直流电压。则检测出有相应干扰量的检测概率随 $N(A_L T_L)^2 / (T_p \sigma_2)^2$ 单调递增(N 为数据采集量)。阈值的选取依据误检概

率而定,若阈值过高,可能导致判断出的峰值数量减少;而阈值过小,使得一些本非峰值的自相关结果被误判。引入相关函数的幅值系数 μ_{\max} , 定义为检测阈值与自相关结果次大值 a_{s_m} 的比值(由于脉冲辐射干扰中的噪声分量使得自相关结果中存在冲击函数,所以最大值对其它峰值无参考意义),即满足 $a(k) > \mu_{\max} a_{s_m}$ 条件的原始峰值判断为最终峰值。令 $\mu_{\max} = 0.75$, 可以使得干扰量级较低时误检概率小于 0.4, 即 $M_1 / M > 0.6$ 。

4 脉冲辐射干扰实验

本文利用幅值较高的噪声电平模拟实际测量中的复杂干扰,设计了脉冲辐射干扰实验。所采用的 L 波段辐射计在基于全功率微波辐射计设计基础上采用了数字增益自动补偿算法,具有较高的灵敏度^[18]。系统的硬件积分时间(τ)为 1 ms,中频带宽(B)为 60 MHz,在 $T_A=280$ K 时计算的噪声不确定度为 1.176 K,前端开关切换周期为 0.2 s。AD 采样率为 5 ksps。将 L 波段微波辐射计连接 L 波段电调衰减器(L-band Electronic Attenuator, LEA),测量放在液氮中的匹配负载,如图 2 所示。

通过调节 LEA 的控制电压 V_{LEA} ,实现对 L 波段微波辐射计提供不同量级的输入亮度温度(Temperature Brightness, TB)。LEA 的性能指标如表 1 所示。

如图 2 连接实验装置,设置函数信号发生器输

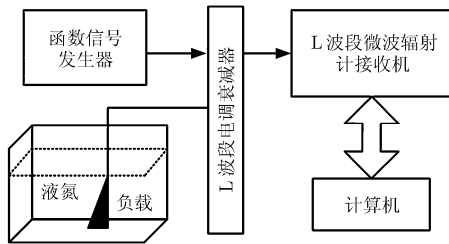


图 2 脉冲辐射干扰实验设计框图

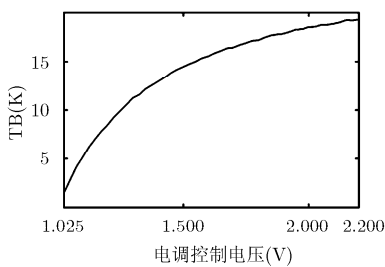
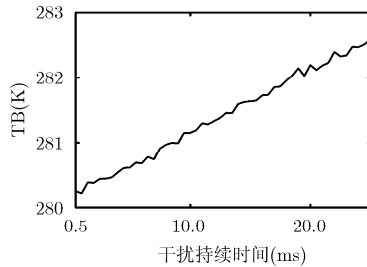
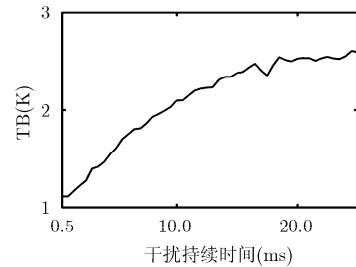


图 3 不同控制电平下产生的干扰量级



(a)平均值



(b)标准差

图 4 不同持续时间脉冲辐射干扰条件下辐射计输出数据的平均值与标准差

表 1 L 波段电调衰减器性能指标

工作频率范围(GHz)	1~3
插入损耗(dB)	≤ 1.2
驻波比	≤ 1.6
承受功率(dBm)	30
衰减量(dB)	30
工作电压(V)	0~+12
工作温度(°C)	-40~+60

出固定电平, $V_{LEA} = 1.0$ V 时为无干扰条件下微波辐射计的输出(280.14 K), 将 V_{LEA} 设定在固定电平 1.025~2.200 V 之间, 设置间隔为 0.025 V, 测量的微波辐射计输出数据减去 $V_{LEA} = 1.000$ V 时的均值, 近似认为其产生的干扰量级, 见图 3。当 V_{LEA} 为 1.025 V, 1.050 V, 1.100 V, 1.500 V, 2.000 V 时, 模拟差生的噪声辐射干扰量级分别为 1.5 K, 2.8 K, 5.0 K, 14.5 K, 18.5 K。

4.1 不同持续时间脉冲辐射干扰模拟实验

如图 2 连接实验装置, 调节信号发生器, 使其工作在脉冲模式, 设置信号周期为 50 ms, 低电平 1.0 V, 高电平 1.1 V(模拟干扰量级 5 K), 改变占空比从 1%变化至 50%, 模拟脉冲辐射干扰的持续时间从 0.5 ms 至 25.0 ms, 分别记录数据。实验测量结果的均值和标准差如图 4。

4.2 不同量级脉冲辐射干扰模拟实验

如图 2 连接实验装置, 设置函数信号发生器工作在脉冲模式, 周期为 50 ms, 占空比为 50%, 低电平为 1.000 V, 高电平由 1.025 V 递增至 2.200 V, 间隔为 0.025 V, 模拟不同量级的脉冲辐射干扰。记录微波辐射计的输出数据, 不同幅度脉冲干扰下的平均值和标准差如图 5。

5 实验结果与分析

5.1 APB 算法的处理结果

在应用时域脉冲检测算法进行脉冲辐射干扰识

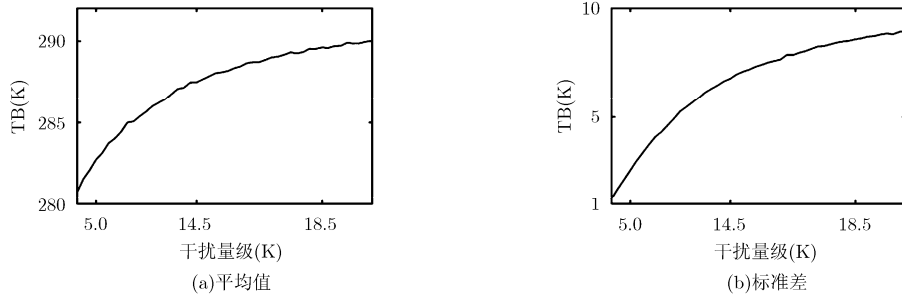


图5 不同量级脉冲辐射干扰条件下辐射计输出数据的平均值与方差

别时, β 的取值较小时, 过检测的情况严重; 而 β 取值较大时, 检测不足的现象明显。而在脉冲持续时间较短或干扰量级较小时, 两种现象同时存在。对 T_L 为 2.5 ms 及 25.0 ms 的干扰数据进行检测处理, $\beta = 2.5$ 时检测结果如图 6, 图 7。

在图 6, 图 7 中, 带点的实线为测量的原始数据, 虚线为时域检测算法计算的阈值, 矩形实线窗口表示检测算法得到的警告区, 即 $f(i) = 1$ 的区间。持续时间为 2.5 ms 的数据在 $t = 20.0$ ms 附近出现一次过检测。

图 8, 图 9 给出干扰量级为 2.8 K 和 18.5 K 时 $\beta = 2.5$ 的警告结果。

可以看出干扰量级为 2.8 K 时, 存在检测不足的现象。当干扰量级小于 5 K 时, 由于时域检测算法存在严重的检测不足, 大量受到干扰影响的数据用于计算阈值, 导致其不断升高。对标准差进行限制后, 阈值上升幅度并不大, 使算法得以继续执行, 只是检测准确性有所降低。

5.2 ACD 算法的处理结果

ACD 算法的检测结果与 μ_{max} 的取值有关, 应用图 1 所示 ACD 方法对不同实验条件下的自相关结果选取 10 个周期观测窗口, 进行了峰值检测分析, 结果如下: (1) 在 $\mu_{max} < 0.7$ 时所检测出来的峰值偏多, $\mu_{max} > 0.85$ 时所检测出的峰值偏少, 其间隔不能反映出脉冲辐射干扰的周期; (2) 当干扰量级较低或持续时间较短时, 检测出干扰周期的准确率偏低, 但

1.5 K 干扰量级数据在 $0.7 \leq \mu_{max} \leq 0.85$ 条件下的准确率也都高于 60%; 当脉冲持续时间 $T_L \leq 1$ ms 时, 无法检测到自相关函数的周期性, 即无效检测。

分别对持续时间为 2.5 ms 及干扰量级为 2.8 K 的实验数据给出检测结果示意图如图 10, 图 11。

图 10 与图 11 中的黑色带点曲线表示的是近 5 s 的观测数据相关累加后在一个脉冲辐射干扰周期内的结果。通过与图 6、图 8 对比表明, 在干扰持续时间较短或干扰量级较小时, 相比 APB 算法, ACD 算法检测出周期性脉冲干扰的可靠性更高。

5.3 APB 算法与 ACD 算法的对比

5.3.1 脉冲辐射干扰的检测对比 由 5.2 节可知, ACD 算法相比于 APB 算法的差别主要体现在持续时间较短或量级较小的脉冲辐射干扰条件下, 故选取 2.5 ms 持续时间及 1.5 K 干扰量级的实验数据进行对比, 为便于分析, 只在实验数据中截取有限数据点进行处理, 对比结果如表 2。

表 2 中, APB 算法如果在一次干扰发生期间没有警告标识, 则认为本次干扰未检测。对 1.5 K 干扰量级的实验数据处理过程中, 在 18 次干扰周期内检测次数高达 38, 这是由于在 25 ms 的干扰发生期间因干扰量小而存在检测不足, 使得一次干扰被检测成多个脉冲。ACD 算法在检测前需要对 1050 数据点进行自相关运算、峰值提取及相关累加, 在此过程中计算出的峰值间隔与干扰周期相等的次数即为表 2 中的 ACD 检测次数。

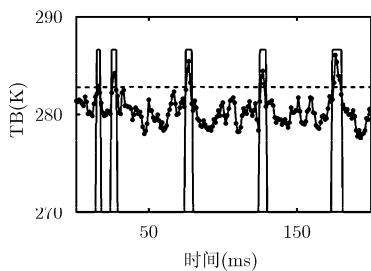


图6 持续时间为 2.5 ms 的脉冲辐射干扰检测结果

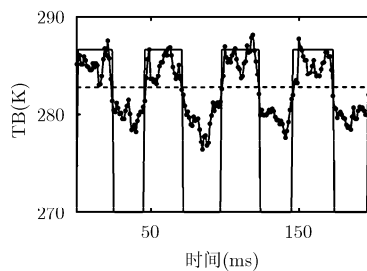


图7 持续时间为 25.0 ms 的脉冲辐射干扰检测结果

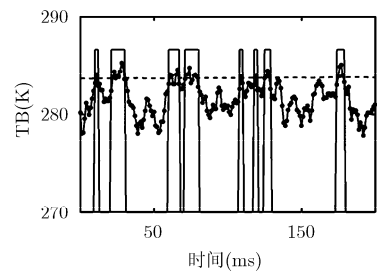


图8 干扰量级为 2.8 K 时脉冲辐射干扰检测结果

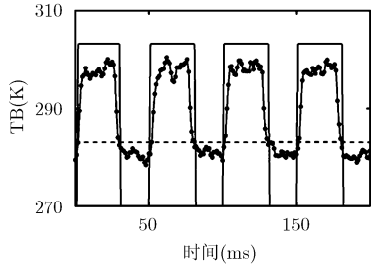


图 9 干扰量为 18.5 K 时脉冲辐射干扰检测结果

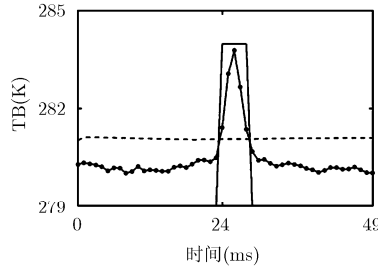


图 10 干扰持续时间为 2.5 ms 时 ACD 算法的检测结果

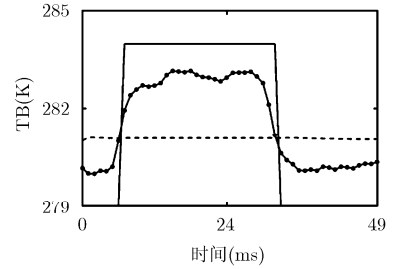


图 11 干扰量为 2.8 K 时 ACD 算法的检测结果

表 2 ACD 算法与 APB 算法在检测中的对比

算法	APB	ACD
数据点数(2.5 ms 持续时间)	1050	1050
理论干扰次数(2.5 ms 持续时间)	21	21
检测次数(2.5 ms 持续时间)	24	21
过检测次数(2.5 ms 持续时间)	5	0
未检测次数(2.5 ms 持续时间)	2	0
数据点数(1.5 K 干扰量级)	1050	1050
理论干扰次数(1.5 K 干扰量级)	21	21
检测次数(1.5 K 干扰量级)	38	14
过检测次数(1.5 K 干扰量级)	1	0
未检测次数(1.5 K 干扰量级)	3	7

5.3.2 脉冲辐射干扰的抑制对比 在 5.1 节与 5.2 节中对测量序列中存在脉冲辐射干扰的数据进行了相应的警告标识,但要想抑制其影响,还需要将被警告的数据剔除,最简单的剔除算法如式(17):

$$y(i) = x(i) \cdot [1 - f(i)] \quad (17)$$

式(17) y 序列中不为 0 的数据就是滤除脉冲辐射干扰后的结果,虽然干扰期间的数据缺失会对规定积分时间内的探测灵敏度造成影响,但在地基微波遥感中可以通过加长观测时间来补充数据。两个实验数据的处理结果如图 12, 图 13。

图 12 中, APB 算法与 ACD 算法的滤除效果都较为良好,在 T_L 较长时这主要得益于前文对 APB 算法的改进;而在 T_L 较短且大于 1.0 ms 时, ACD 算法的检测性能优于 APB 算法,两者在图 12 中表现的检测结果相近的原因为: (1) 脉冲干扰辐射本身

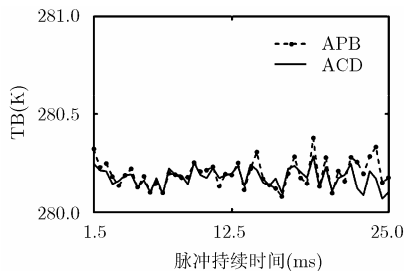


图 12 不同持续时间脉冲辐射干扰的滤除结果

在 T_L 短时的等效干扰量就很小; (2) 存在一定的过检测现象,使得功率较大的非干扰噪声信号被滤除。在图 13 不同量级的脉冲辐射干扰实验中,当干扰量级较小时(小于 5 K), ACD 算法检测并滤除后的结果更接近于无干扰时的测量值(280.14 K)。当干扰量级为 2.8 K 时, APB 算法的滤除效果最差,与真实值相差 1.17 K;而干扰量级为 16.5 K 时, ACD 算法滤除效果最差,与真实值相差 0.45 K。

6 结束语

对于日益严重的被动微波射频干扰问题,本文提出用脉冲辐射干扰模拟实际观测中的射频干扰情况。设计可控的模拟实验,研究射频干扰的时域检测算法,得出结论如下: (1) 根据全功率微波辐射计系统中存在硬件积分电路及脉冲辐射干扰短时间内功率不恒定的特点,通过改进 APB 算法及合理选取参数范围,在干扰量级较大或持续时间较长时取得了较好的检测效果; (2) 针对周期性射频干扰,提出 ACD 检测算法,当干扰量级较小时,检测效果较 APB 算法更为显著。

根据理论模型模拟,在土壤湿度的遥感反演中,土壤湿度变化 1%,其辐射亮度温度变化约为 0.7 K, SMOS 的土壤水分观测不确定度为 3.5 K, SMAP 的不确定度为 1.3 K,二者对土壤湿度反演的精度要求都为 4%。考虑到反演模型的不确定性,我国在十三五规划的陆地水卫星的观测精度要求优于 2 K,所以检测出 1.5 K 的 RFI,能够满足验证卫星遥感观测的需求。为深入解决各种不同类型射频干扰在地基

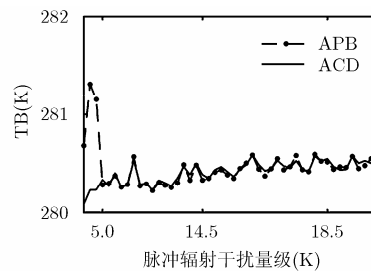


图 13 不同量级脉冲辐射干扰的滤除结果

遥感中的影响,作者将进一步改进接收机系统,并研究相应抑制算法,为卫星遥感完成L波段地物参数反演提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] ULABY F T, MOORE R K, and FUNG A K. 著. 侯世昌, 马锡冠, 译. 微波遥感——微波遥感基础和辐射测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 37-39.
ULABY F T, MOORE R K, and FUNG A K. Microwave Remote Sensing—Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry[M]. Beijing: Science Press, 1988: 37-39.
- [2] LE VINE D M, JOHNSON J T, and PIEPMEIER J. RFI and remote sensing of the earth from space[C]. Radio Frequency Interference, Socorro, USA, 2016: 49-54. doi: 10.1109/RFINT.2016.7833530.
- [3] ZHAO Tianjie, SHI Jiancheng, 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.
- [4] 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 Microwave*, 2016, 32(1): 86-91. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201601019.
- [5] SOLDI Y, LE VINE D M, MATTHAEIS P D, *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.
- [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, Espoo, Finland, 2016: 14-18. doi: 10.1109/MICRORAD.2016.7530495.
- [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] NIAMSUWAN N, JOHNSON J T, and ELLINGSON S W. Examination of a simple pulse blanking technique for RFI mitigation[J]. *Radio Science*, 2005, 40(5): RS5S03-1-RS5S03-5. doi: 10.1029/2004RS003155.
- [9] GÜNER B and JOHNSON J T. Performance study of a cross-frequency detection algorithms 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.
- [10] RUF C S, STEVEN M G, and 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.
- [11] BALLING J E, SOBJÆRG S S, KRISTENSEN S S, *et al.* RFI detected by kurtosis and polarimetry: Performance comparison based on airborne campaign data[C]. 12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Rome, Italy, 2012: 1-4. doi: 10.1109/MicroRad.2012.6185255.
- [12] PARK H, GONZÁLEZ-GAMBAU V, CAMPS A, *et al.* Improved MUSIC-based SMOS RFI source detection and geolocation algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 54(3): 1311-1322. doi: 10.1109/TGRS.2015.2477435.
- [13] WU Li, ZHU Jiaqi, LÜ Yan, *et al.* Detection of radiometer radio frequency interference with Power-Law detector[C]. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Suzhou, China, 2017: 1-2.
- [14] HU Fei, PENG Xiaohui, HE Feng, *et al.* RFI mitigation in aperture synthesis radiometers using a modified CLEAN algorithm[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(1): 13-17. doi: 10.1109/LGRS.2016.2622760.
- [15] SOLDI Y, MATTHAEIS P D, and LE VINE D M. L-Band RFI in Japan[C]. Radio Frequency Interference, Socorro, USA, 2016: 111-114. doi: 10.1109/RFINT.2016.7833542.
- [16] 陆大金. 随机过程及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 491-497.
LU Dajin. Random Process and Its Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 491-497.
- [17] STEVEN M K. 著. 罗鹏飞, 张文明, 刘忠, 等. 译. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 501-508.
STEVEN M K. Fundamentals of Statistical Signal Processing—Estimation and Detection Theory[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 501-508.
- [18] 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. doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2007.05.023.
SUN Hongyan and ZHAO Kai. Study of noise coupled digital auto-gain compensative microwave radiometer[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2007, 30(5): 100-104. doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2007.05.023.

姜涛: 男, 1982年生, 工程师, 博士生, 研究方向为微波辐射计研制、射频频干扰检测。

赵凯: 男, 1962年生, 研究员, 研究方向为微波遥感器研制、微波遥感理论研究。

万祥坤: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为微波辐射计研制。