

风云三号B星微波成像仪资料在陆地上的无线电频率干扰信号的识别

邹晓蕾^{1, 2} 赵娟³ 翁富忠⁴ 秦正坤^{1, 2}

(1 南京信息工程大学资料同化研究与应用中心, 南京 210044; 2 佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, 美国;

3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;

4 美国国家环境卫星、数据及信息服务中心, 美国国家海洋与大气管理局, 美国)

摘要: 风云三号B星 (FY-3B) 搭载的微波成像仪 (MWRI) 包括5个频率 (10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0GHz), 每个频率都有垂直极化和水平极化两个通道。研究发现, MWRI资料在陆地上的无线电频率干扰 (RFI) 现象, 这些干扰信号通常可以用谱差法和主分量分析法 (PCA) 进行识别。主分量分析法是利用自然辐射的观测具有全通道相关性的特征, 能够从自然辐射中识别出无线电频率干扰信号。在投影到第一主成分上的高值区, 通常存在无线电频率干扰。然而, 谱差法和主分量分析法都不能可靠地识别出在冰雪覆盖面和具有散射效应的地表上的干扰信号, 因为在这些区域10.65和18.7GHz通道之间的亮温差也有大的正值。因此, 利用标准化的主分量分析法来改进对无线电频率干扰的识别和探测。新的识别方法目前能够有效地应用于微波成像仪资料中干扰信号的识别。微波成像仪资料在10.65GHz频率上的无线电频率干扰信号广泛分布在欧洲和日本, 但在中国和美国较少出现。

关键词: 微波遥感, 微波成像仪, 无线电频率干扰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.015

Detection of Radio-Frequency Interference Signal over Land from FY-3B Microwave Radiation Imager (MWRI)

Zou Xiaolei^{1, 2}, Zhao Juan³, Weng Fuzhong⁴, Qin Zhengkun^{1, 2}

(1 Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Florida State University, USA

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 4 National Environmental Satellite, Data and Information Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA)

Abstract: The MicroWave Radiation Imager (MWRI) onboard the FengYun (FY)-3B satellite has five frequencies at 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, and 89.0 GHz, each having dual channels at vertical and horizontal polarization states, respectively. It is found that radiofrequency interference (RFI) is present in MWRI data over land. The RFI signals are, in general, detectable from a spectral difference method and a principal component analysis (PCA) method. In particular, the PCA method is applied to derive RFI signals from natural radiations by using the characteristics of natural radiation measurements having all-channel correlations. In the area where data have a higher projection onto the first principle component (PC) mode, RFI is, in general, present. However, both the spectral and PCA methods cannot detect RFI reliably over frozen grounds and scattering surfaces, where the brightness temperature difference between 10.65 and 18.7 GHz is large. Thus, detection is improved through the use of normalized PCA. The new RFI detection algorithm is now working reliably for MWRI applications. It is found that RFI at 10.65 GHz distributes widely over Europe and Japan, and is less popular over the United States and China.

Keywords: Microwave remote sensing, MicroWave Radiation Imager (MWRI), radio-frequency interference (RFI).

1 引言

搭载微波成像仪 (MWRI) 的中国第二代极轨卫

星风云三号B星, 于2010年11月5日 (世界时) 发射升空。MWRI和2002年5月4日 (世界时) 美国发射的Aqua卫星上携带的先进微波扫描辐射计 (AMSR-E) 的大部分频率一致。AMSR-E的C波段 (6.9GHz) 和X波段 (10.7GHz) 通道被设计用于提高地表遥感能力^[1]。2003年美国海军实验室发射了携带有全极化微波辐射计 (WindSat) 的美国国防部Coriolis卫星^[2]。

收稿日期: 2013年3月16日; 修回日期: 2013年6月20日

第一作者: 邹晓蕾 (1960—), Email: zou@fsu.edu

资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (2010CB951600); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906006)

WindSat还提供了6~37GHz频率范围内Stokes向量的第三、四分量^[3]。AMSR-E的继承者——AMSR-2被搭载于GCOM-W1卫星并于2012年5月发射。AMSR-2的任务与AMSR-E相似，但是它通过增加和6.9GHz相邻的7.3GHz通道，增强了对无线电频率干扰的识别能力。MWRI和AMSR-2的结合预期可以提高监测地球和大气中的水循环的能力。

如今，X波段已被用于主动和被动遥感。特别是雷达技术被民事生产、军事和政府机构广泛采用，用于气象监测、航空管制、遥控车库门、高速路上的全球卫星定位系统（GPS）、追踪防御、车速检测执法等。从而，AMSR-E的C波段和X波段，MWRI的X波段都运行在未受保护的频段上，来自地球自然的热辐射信号很容易被这些主动微波发射器的信号所掩盖^[3-6]。卫星微波辐射与主动传感器的信号混淆在一起，被称为无线电频率干扰。无线电频率干扰已成为微波遥感中越来越严重的问题。对AMSR-E和WindSat资料的早期研究表明，低频通道（如C波段和X波段）的亮温资料广泛存在无线电频率干扰信号^[4-8]。低频微波观测资料主要用于反演地表参数，如土壤湿度、植被含水量、地表温度以及雪盖^[9-13]。为了使反演误差达到最小，最好使用滤去了无线电频率干扰信号的资料进行反演。本文对中国风云三号B星搭载的MWRI X波段的无线电频率干扰信号的特征，包括强度、范围和位置进行了深入研究，重点研究不同季节陆地上无线电频率干扰信号的识别。

本文结构如下：第2节简要描述了风云三号B星MWRI的通道特征；第3节介绍了无线电频率干扰信号的两种识别方法；第4节为数值结果；第5节对全文进行总结。

2 MWRI通道特征

对MWRI及其定标的描述见文献[14]和[15]。中国气象局国家卫星气象中心和上海空间通信技术研究所合作，对亮温数据进行定标和定位。

MWRI以45°视角和1400km幅宽的圆锥扫描方式扫描地球，扫描周期为1.8s。在一个扫描周期内，卫星（飞行速度为7km/s）的星下点向前移动12km，这与89GHz通道的天线波束投射在地球表面的分辨率相当。MWRI的采样时间间隔为2.08ms，使得一个扫描循环内共有254个采样点。除了89GHz通道以外，余下所有通道的天线视场之间都有一些重叠。表1列出了MWRI 10个通道的频率、极化方式、带宽、视场分辨率和噪声等效温差。主波束效率在90%以上。MWRI亮温的动态范围在3~340K。

表1 微波成像仪（MWRI）通道特征

通道号	频率 (GHz)	极化方式	带宽 (MHz)	视场 (km) 跨轨×沿轨	噪声等效温差 (K)
1	10.65	V	180	51×85	0.5
2		H			
3	18.7	V	200	30×50	0.5
4		H			
5	23.8	V	400	27×45	0.5
6		H			
7	36.5	V	900	18×30	0.5
8		H			
9	89.0	V	2300	9×15	0.8
10		H			

3 无线电频率干扰的识别方法

3.1 谱差法

在大部分陆地上，18.7GHz（通道3，4）的亮温比10.65GHz的亮温高，即谱差满足 $TB_{10V} - TB_{18V} < 0$ 和 $TB_{10H} - TB_{18H} < 0$ 。这是由于土壤和植被中水的介电常数依赖于频率，地表发射率随频率增加而增大。洪水和湿润表面等自然现象会使亮温降低，尤其是在低频波段上。而10.65GHz频率上的无线电频率干扰信号会使该频率的亮温值增加，从而导致相反符号的谱差： $TB_{10V} - TB_{18V} > 0$ 和 $TB_{10H} - TB_{18H} > 0$ ^[4]。无线电频率干扰信号来自于各种各样连贯持续的目标源，即辐射装置和天线，且常表现出定向、窄频带、空间上孤立分布、时间上持续存在的特征。

根据文献[6]的研究结果，当亮温观测满足下面两个谱差指数（给定极化方向下两个不同频率之间的亮温差）关系时，就可以识别出夏季陆地上MWRI资料在10.65GHz水平和垂直极化通道中的无线电频率干扰信号：

$$TB_{10H} - TB_{18H} > 5K \quad (1)$$

$$TB_{10V} - TB_{18V} > 5K \quad (2)$$

其中，阈值5K是依据文献[14]中的研究结果设定的，它们基于不同地表类型上的平均发射率特征，用一个微波陆面发射率模式来模拟AMSR-E的亮温值。

研究发现，当高纬地区有雪覆盖时， $TB_{10} - TB_{18}$ 的平均值会明显增加。这种纬度依赖特征在冬季比夏季更显著，因而固定的阈值5K被修正为随纬度变化的阈值函数：

$$RFI_{HI-threshold}^{winter} = f(\varphi) + c \quad (3)$$

其中， $f(\varphi) = a\varphi + b$ 是由区域内所有亮温观测资料导出的线性拟合方程，参数 c 的值依赖于通道敏感性和所考虑的自然场景。

自然目标物（如雪和冰）的散射效应能够大幅度地降低高频通道的亮温值，因而反符号的谱差也可能与陆面积雪和冰有关。为了避免误将雪和冰的散射效

应当作无线电频率干扰信号，引入下面两个有散射敏感性的谱差指数：

$$TB_{89H} - TB_{18H} \geq -10K \quad (4)$$

$$TB_{89V} - TB_{18V} \geq -10K \quad (5)$$

3.2 主分量分析法

与无线电频率干扰信号不同，地球表面通常产生平滑和超宽频带的微波辐射。对于来源于自然辐射的微波资料，不同通道之间的相关性往往很高（图9a~b）。而前述的谱差法并没有利用这种自然辐射的通道相关信息。此外，对于无线电频率干扰信号，10GHz通道和MWRI其他通道之间的相关性比较低，因为频率干扰只会增加某个低频通道的亮温值。文献[3]用频率干扰指数的主分量分析对谱差法进行了扩展，将一组相关的干扰指数线性变换为维数较小的一组不相关的变量，从而有效地将无线电频率干扰信号与自然辐射信号区分开。

定义一个无线电频率干扰指数向量，包括5个成分：

$$\vec{R}_{indices} = \begin{pmatrix} TB_{10H} - TB_{18H} \\ TB_{18V} - TB_{23V} \\ TB_{18H} - TB_{23H} \\ TB_{23V} - TB_{37V} \\ TB_{23H} - TB_{37H} \end{pmatrix} \quad (6)$$

运用主分量分析法识别10.65GHz水平极化方向上的无线电频率干扰信号，数据矩阵定义如下：

$$A_{5 \times N} = \begin{pmatrix} (TB_{10H} - TB_{18H})_1 & (TB_{10H} - TB_{18H})_2 & \cdots & (TB_{10H} - TB_{18H})_N \\ (TB_{18V} - TB_{23V})_1 & (TB_{18V} - TB_{23V})_2 & \cdots & (TB_{18V} - TB_{23V})_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (TB_{23H} - TB_{37H})_1 & (TB_{23H} - TB_{37H})_2 & \cdots & (TB_{23H} - TB_{37H})_N \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中， N 是指定区域内观测点的总数

然后，构造出协方差矩阵 $S_{5 \times 5} = AA^T$ ，其特征值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 和特征向量 $\vec{e}_i = [e_{1,i}, e_{2,i}, \dots, e_{5,i}]^T$ 满足方程：

$$S\vec{e}_i = \lambda_i \vec{e}_i \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (8)$$

其中， i 指示第 i 个主分量模态 ($i=1, 2, \dots, 5$)， \vec{e}_i 是第 i 个主分量模态； λ_i 表示第 i 个主分量模态对总方差的贡献。

用矩阵形式来表示特征值和特征向量：

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_5 \end{pmatrix}, E = [\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_5]$$

公式 (8) 可以改写成（注意 $E^{-1} = E^T$ ，因为 E 是正交矩阵）：

$$SE = EA \quad \text{或} \quad S = EAE^T \quad (9)$$

将数据矩阵 A 投影到由一组基向量 $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_5$

构建的标准正交空间中，得到所谓的主分量系数：

$$U_{5 \times N} = E^T A = \begin{pmatrix} \vec{u}_1 \\ \vec{u}_2 \\ \vdots \\ \vec{u}_5 \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中， $\vec{u}_i = [u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,N}]$ 是第 i 个主分量模态的系数。在这个新空间中，第一个基向量（称为第一主分量）是沿着方差最大值的方向展开的，第二个基向量（第二主分量）则是沿着方差次大值的方向展开。

数据矩阵 A 可以由以下5个主分量来构造：

$$A = EU = \sum_{i=1}^5 \vec{e}_i \vec{u}_i \quad (11)$$

第一主分量系数 \vec{u}_1 中的大值说明存在无线电频率干扰信号。

文献[3]运用上述的主分量分析法来识别夏季陆地上WindSat资料中的无线电频率干扰信号。本文则将主分量分析法同时应用于夏季和冬季的资料中。为了有效识别出冬季MWRI资料中的干扰信号，必须对频率干扰指数向量进行标准化：

$$\vec{R}_{indices} = \begin{pmatrix} \frac{TB_{10H} - TB_{18H} - \mu}{\sigma} \\ \frac{TB_{18V} - TB_{23V} - \mu}{\sigma} \\ \frac{TB_{18H} - TB_{23H} - \mu}{\sigma} \\ \frac{TB_{23V} - TB_{37V} - \mu}{\sigma} \\ \frac{TB_{23H} - TB_{37H} - \mu}{\sigma} \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中， μ 和 σ 分别是这5个指数的平均值和标准差。

4 数值结果

4.1 MWRI 10.65 和 18.7 GHz 通道亮温

图1给出了2011年2月24日（世界时）中国东部和日本区域风云三号卫星的MWRI在10.65和18.7GHz双极化通道的亮温分布，以及这两个通道在相同极化方式下的亮温差。可以看到，10.65GHz（图1a~b）通道的亮温基本比18.7GHz（图1c~d）的亮温低，在大部分陆地上差值都较大（~3K）（图1e~f）。10.65GHz亮温比18.7GHz亮温高很多的地方主要分布在日本和中国的一些大城市（如北京和上海）。图2是2011年2月7日（世界时）欧洲区域的10.65和18.7GHz双极化通道亮温。可以发现MWRI资料在欧洲的无线电频率干扰最显著，而在美国很少出现（图略）。

图3的散点图显示了图1和图2区域内资料的10.65和18.7GHz亮温之间的线性相关关系。当满

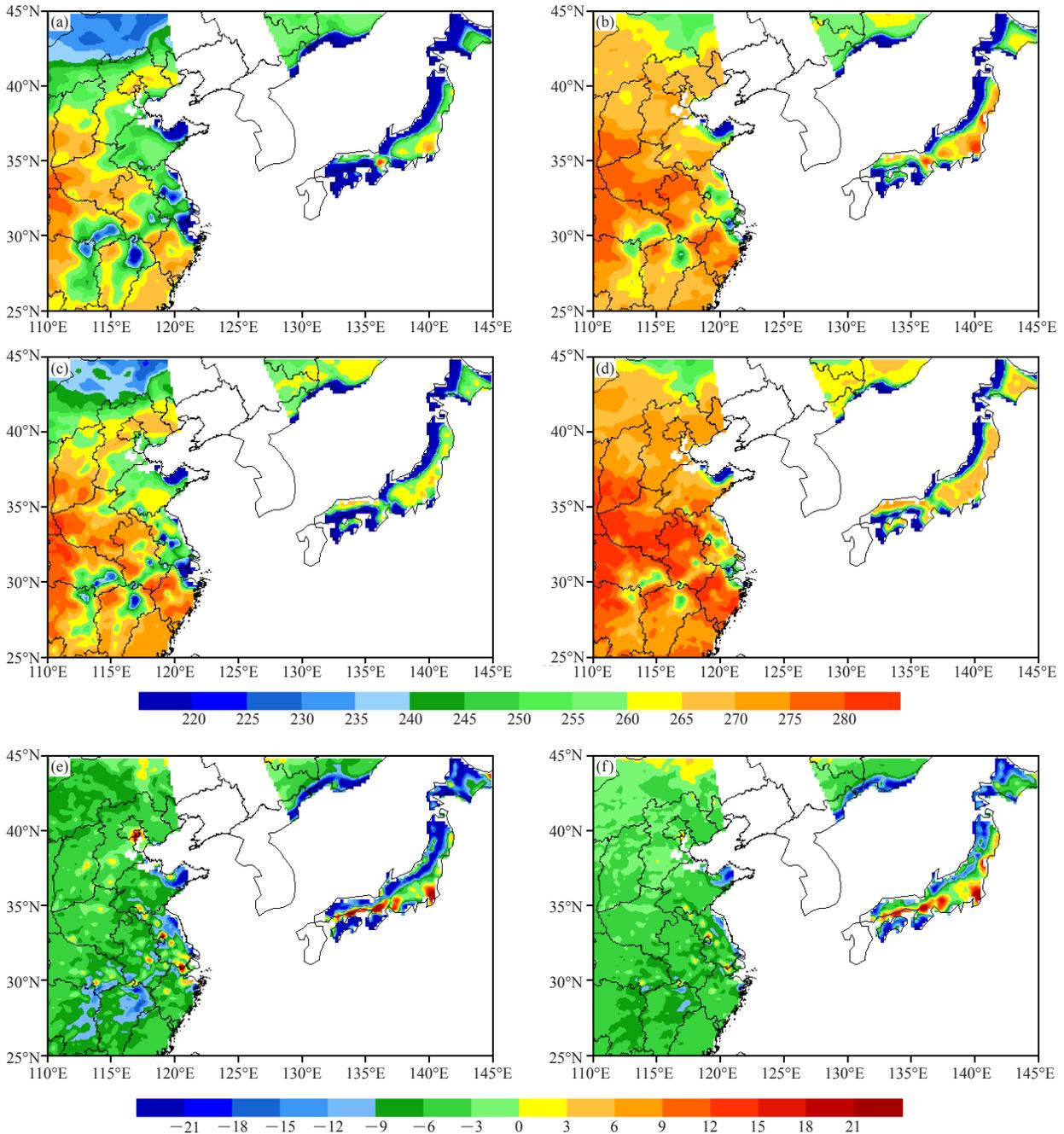


图1 2011年2月24日亚洲东部10.65GHz (a, b) 和18.7GHz (c, d) 在水平 (左侧) 和垂直 (右侧) 极化方向的亮温。(e, f) 为10.65GHz和18.7GHz通道之间的亮温差 (即 (e)=(a) - (c), (f)=(b) - (d))

是 $TB_{10H} - TB_{18H} < 0$ 或 $TB_{10V} - TB_{18V} < 0$ 时, $TB_{10H} - TB_{18H}$ 和 $TB_{10V} - TB_{18V}$ 有负的线性相关关系。在欧洲地区, MWRI资料在10.65GHz的亮温值比18.7GHz的亮温可以高出100K以上, 有些亮温值甚至超过了MWRI资料限定的动态范围的上限 (340K)。

检验MWRI 1~4通道异同的另一个方法是, 以经度为横坐标, 画出 TB_{10H} , TB_{18H} , TB_{10V} 和 TB_{18V} 的散点图, 并将满足 $TB_{10H} - TB_{18H} > 5K$ 或 $TB_{10V} - TB_{18V} > 5K$ 的观测点的纬度标记为彩色, 满足 $TB_{10H} - TB_{18H} \leq 5K$ 或

$TB_{10V} - TB_{18V} \leq 5K$ 的观测点标记为黑色 (图4和图5)。可以看到, 除了最低频率的通道1和2, 4个通道的亮温值都有一个几乎固定的上界。

水平极化的亮温比垂直极化的亮温范围宽很多, 这也证实了垂直极化对地表变化的敏感性比水平极化的低。对于10.65GHz通道, 满足 $TB_{10H} - TB_{18H} > 5K$ 或 $TB_{10V} - TB_{18V} > 5K$ 的资料出现了几个山峰形状的分佈 (图4a~b, 图5a~b)。这些来自于各种各样连贯持续的目标源, 且具有定向、窄频带、空间上孤立分佈、

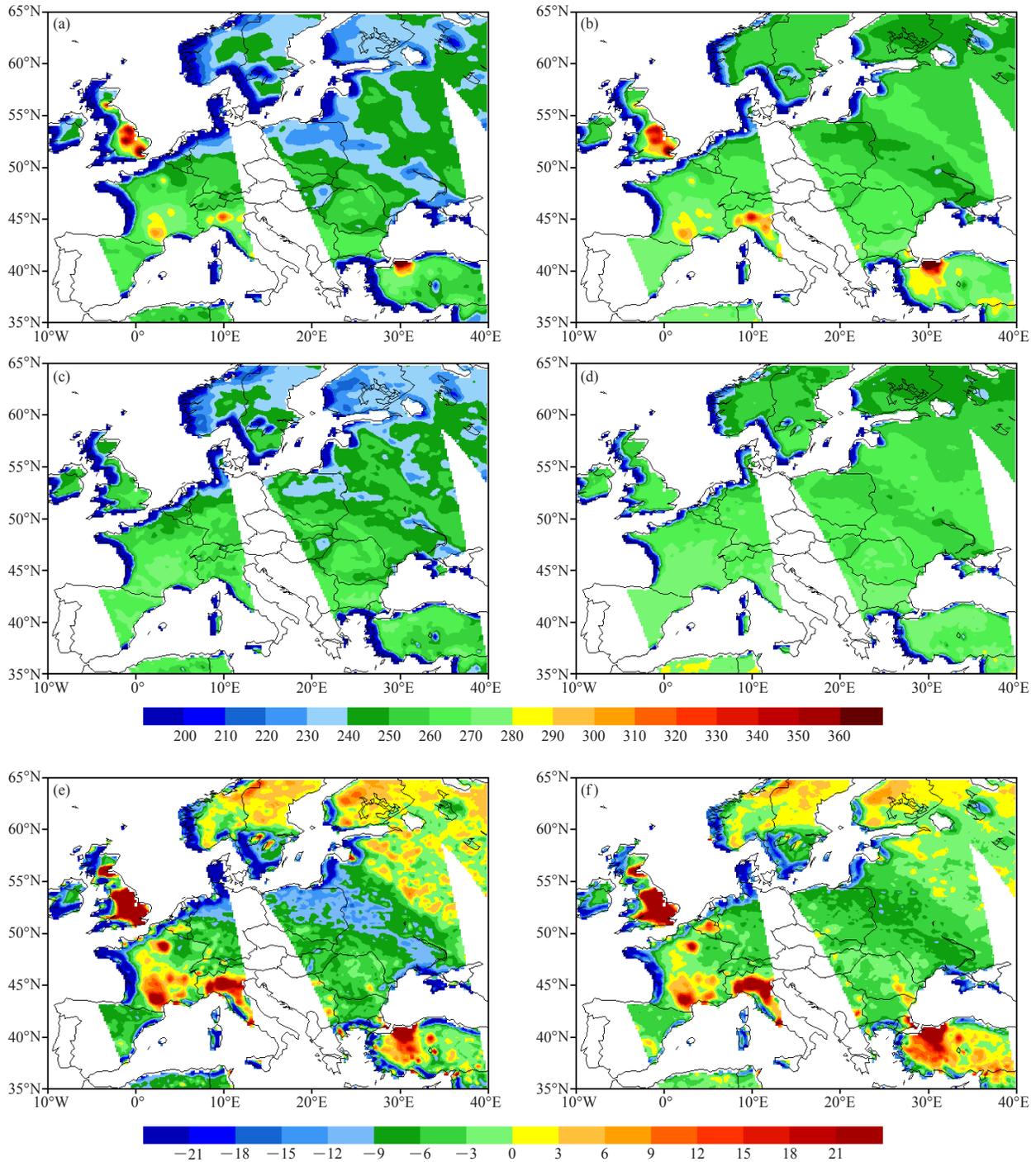


图2 2011年2月7日欧洲地区10.65 GHz (a, b) 和18.7 GHz (c, d) 在水平(左侧)和垂直(右侧)极化方向的亮温。(e, f) 为10.65 GHz和18.7 GHz通道之间的亮温差(即(e) = (a) - (c), (f) = (b) - (d))

时间上持续存在的特征的信号究竟是不是无线电频率干扰信号呢? 下面两部分将分别使用谱差法和主分量分析法, 来识别MWRI资料中的无线电频率干扰信号。

4.2 谱差法识别的无线电频率干扰信号分布

雪和冰的散射效应导致18.7GHz亮温比10.65GHz亮温降低的更多, 从而能够改变地表的谱差。此外, 雪的存在会使得 $T_{10} - T_{18}$ 的大小超过5K。所以简单

地将谱差法直接应用到夏季至冬季的资料会出现问题。例如, 图6给出了10GHz和18GHz之间、水平和垂直极化方式下, 谱差大于5K的空间分布状况, 使用资料所在的区域比图1和图2的区域大。在北边大部分区域谱差 $T_{10H} - T_{18H} > 5K$ (图6a~b) 是由于地表有雪覆盖导致的, 而非无线电频率干扰。由于冰雪的散射效应在高频通道9~10 (89GHz) 比在低频通道1~4

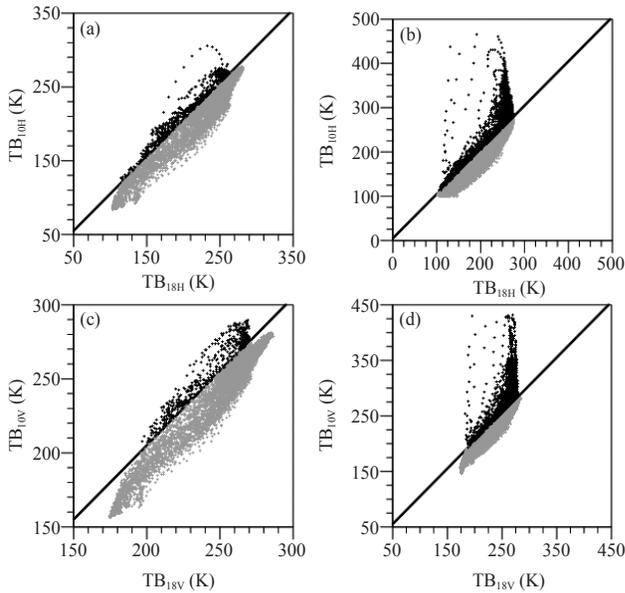


图3 (a) ~ (b) 为2011年2月24日亚洲 (25°—45°N, 110°E—145°E, 左侧) 和2011年2月7日欧洲 (35°—65°N, 10°W—40°E, 右侧) 通道2 (10.65GHz, 水平极化) 和通道4 (18.7GHz, 水平极化) 的亮温散点图。(c) ~ (d) 同(a) ~ (b), 但为垂直极化方向。满足 $TB_{10H}-TB_{18H} \geq 5K$ 或 $TB_{10V}-TB_{18V} \geq 5K$ 的资料用黑点表示

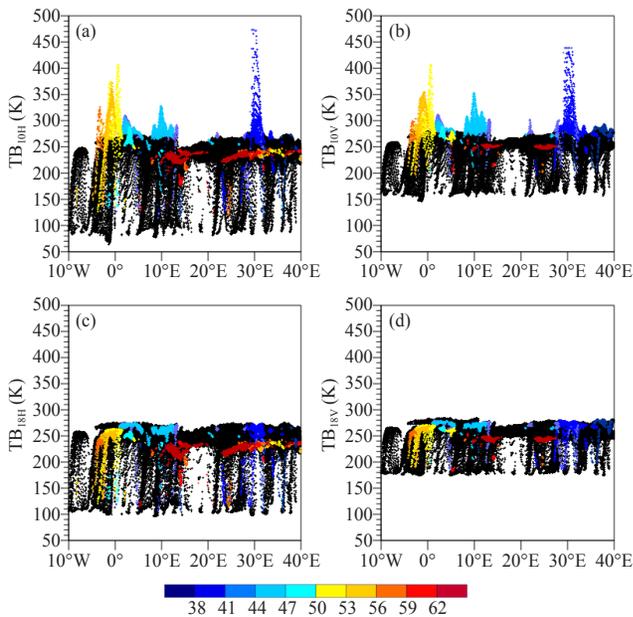


图5 2011年2月7日在图2区域内10.65GHz (a, b) 和18.7GHz (c, d) 水平 (左侧) 和垂直 (右侧) 极化亮温。观测点的纬度用彩色表示。满足 $TB_{10H}-TB_{18H} \leq 5K$ 或 $TB_{10V}-TB_{18V} \leq 5K$ 的资料用黑点表示, 其他的根据纬度用彩色点表示

(10.65~18.7GHz) 强很多, 所以对于冬天资料中干扰信号的识别需要引入另一个判据 $TB_{89}-TB_{18} \geq -10K$ 。图6中满足 $TB_{10}-TB_{18} \geq 5K$ 的资料被分成了两部分: 一部分满足 $TB_{89}-TB_{18} \leq -10K$ (绿色阴影), 另一部分满足 $TB_{89}-TB_{18} > -10K$ (红色阴影)。

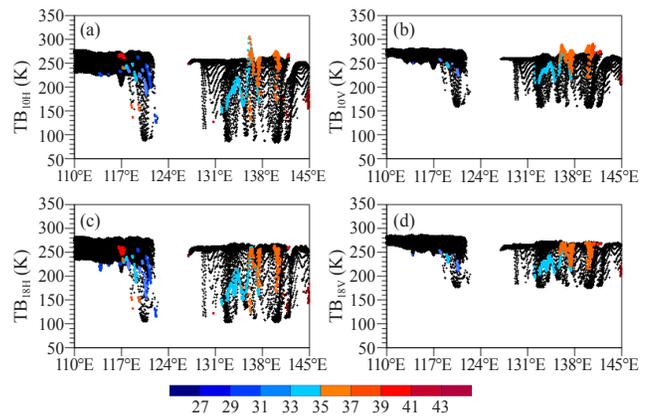


图4 2011年2月24日在图1区域内10.65GHz (a, b) 和18.7GHz (c, d) 水平 (左侧) 和垂直 (右侧) 极化亮温。观测点的纬度用彩色表示。满足 $TB_{10H}-TB_{18H} \leq 5K$ 或 $TB_{10V}-TB_{18V} \leq 5K$ 的资料用黑点表示, 其他的根据纬度用彩色点表示

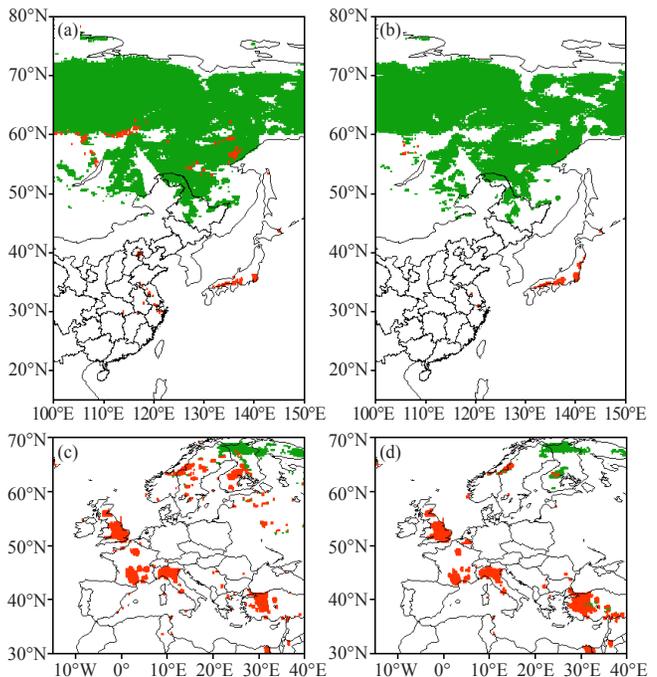


图6 2011年2月24日亚洲 (a, b) 和2011年2月7日欧洲 (c, d) 10GHz和18GHz的水平 (左侧) 和垂直 (右侧) 极化通道之间的亮温差大于5 K 的资料的空间分布。满足 $TB_{10}-TB_{18} \geq 5K$ 和 $TB_{89}-TB_{18} \leq -10K$ 的数据用绿色表示, 满足 $TB_{10}-TB_{18} \geq 5K$ 和 $TB_{89}-TB_{18} > -10K$ 的数据用红色表示

图7阐明了无线电频率干扰信号是如何被识别的。图7a是亚洲 (10°—80°N, 70°—150°E) 夏季 (2011年7月1—10日) $TB_{10H}-TB_{18H}$ 10d 平均资料的散点图, 图7b~c是冬季 (2011年2月1—10日) 资料的散点图。图7b中资料满足 $TB_{10}-TB_{18} < 5K$, 或者 $TB_{10}-TB_{18} \geq 5K$ 和 $TB_{89}-TB_{18} \geq -10K$; 图7c中资料同时满足 $TB_{10}-TB_{18} \geq 5K$ 和 $TB_{89}-TB_{18} \leq -10K$ 。识别频率干扰的谱差法中采用的判据在图中用实线表示, 即图7a中

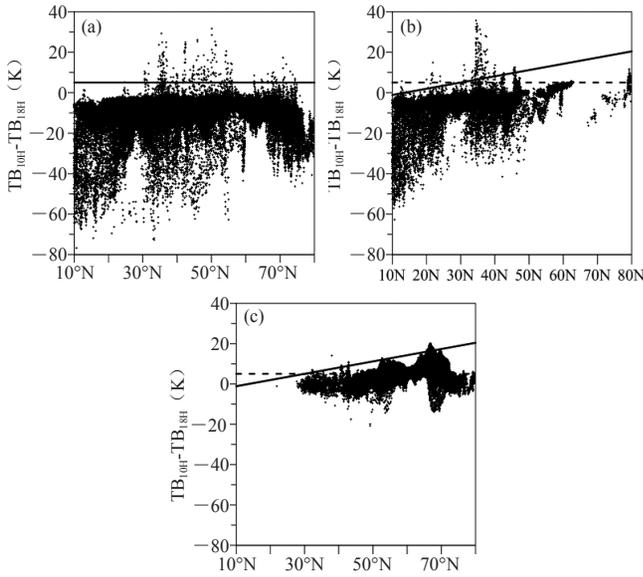


图7 (a) 亚洲 (10°—80°N, 70°—150°E) 2011年7月前10d平均 $TB_{10H}-TB_{18H}$ 的散点图; (b) 亚洲 (10°—80°N, 70°—150°E) 2011年2月前10d平均 $TB_{10H}-TB_{18H}$ 的散点图, 只包含满足 $TB_{10H}-TB_{18H}<5K$ 或 $TB_{10H}-TB_{18H}\geq 5K$ 和 $TB_{89H}-TB_{18H}>10K$ 的资料; (c) 同(b), 但是满足 $TB_{10H}-TB_{18H}\geq 5K$ 和 $TB_{89H}-TB_{18H}\leq -10K$ 。识别频率干扰信号的谱差法中使用的判据用黑色实线表示, 图(b)和(c)中的虚线表示 $TB_{10H}-TB_{18H}=5K$

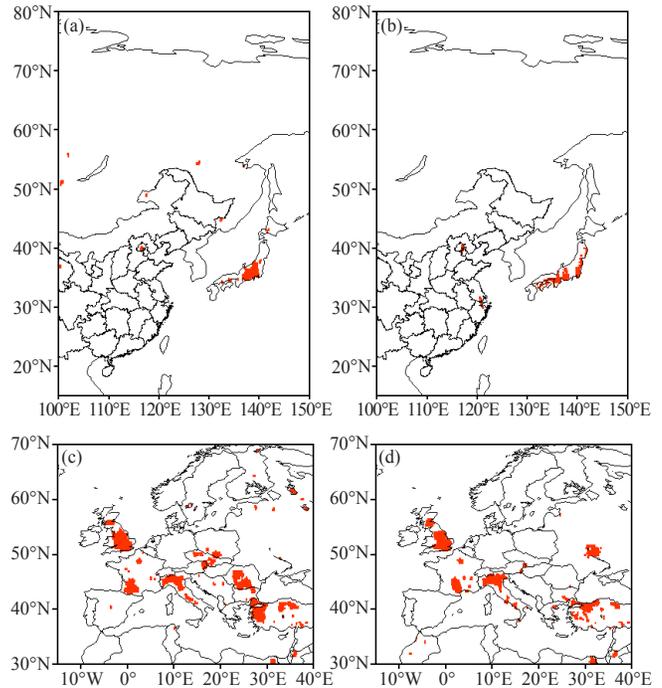


图8 用谱差法识别出的2011年7月1—10日(左侧)和2011年2月1—10日(右侧)在亚洲(a, b)和欧洲地区(c, d) 10.65GHz水平极化的无线电频率干扰信号分布

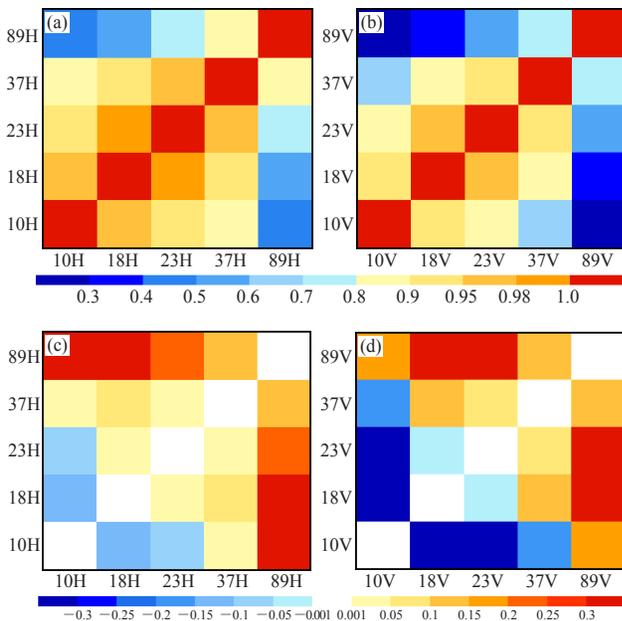


图9 (a) ~ (b) 为2011年2月1—10日(世界时)欧洲区域所有资料统计得到的水平(左侧)和垂直(右侧)极化通道的相关矩阵。(c) 为受到频率干扰污染的资料统计的相关矩阵与(a)中相关矩阵的差。(d) 同(c), 但为垂直极化通道

的 $TB_{10H}-TB_{18H}=5K$, 图7b~c中的 $f(\varphi)=a\varphi+b+c$, 其中 a, b, c 的值分别为0.308, -14.836, 10.602。显然, 判据(1)(图7b~c中的虚线)不适用于冬季情况。

而依赖于纬度的判据(3)(图7b~c中的实线)有效地剔除了虚假的无线电频率干扰信号。

图8分别给出了用谱差法识别出的2011年7月1—10日和2月1—10日亚洲(图8a~b)和欧洲(图8c~d)区域10.65GHz水平极化的无线电频率干扰信号的分布。从图中发现, 日本和欧洲区域都有很强的干扰信号; 而在中国, 除了北京和上海, 很少有干扰信号出现。

因为每个通道探测的是来自相同地球场景的微波辐射, 所以MWRI不同通道之间的相关性很高。另一方面, 无线电频率干扰信号是独立于自然辐射的信号, 且仅增加X波段通道的亮温。在有频率干扰的地方, X波段通道与其他通道之间的相关性会较低。为了证实这一点, 图9给出了欧洲2011年2月1—10日所有资料的水平和垂直极化通道之间的相关系数矩阵。对于MWRI, 除了89GHz通道外, 其他所有通道之间均为高度正相关, 且水平极化通道之间的相关性(图9a)比垂直极化的(图9b)更高。图9c~d是用所有资料和有频率干扰的资料统计得到的相关系数的差。可以看出, 对于水平极化的资料, X波段通道与18.7, 23.8GHz通道之间的相关性比较小; 对于垂直极化的资料, 除了89GHz通道外, X波段通道和其余通道之间的相关性都较小。

4.3 主分量分析法识别的无线电频率干扰信号分布

分别将2011年2月1—10日, 2月19—28日和7月

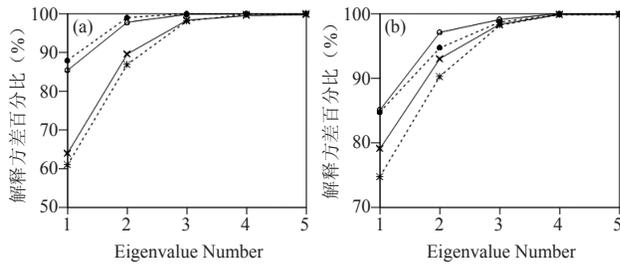


图10 2011年2月1—10日亚洲（圆圈和圆点）和欧洲（十字叉和星号）的10d平均资料在水平（实线）和垂直（虚线）极化方向，分别不做标准化（a）和做标准化（b）时的频率干扰指数的5个主分量的解释方差百分比

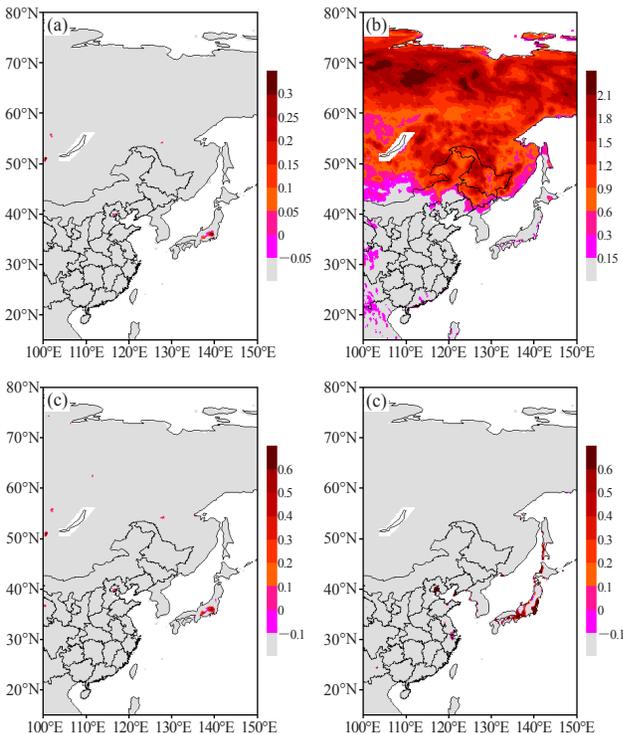


图12 2011年夏季（7月1—10日，左侧）和冬季（2月1—10日，右侧）用主分量分析法不做标准化（a, b）和做标准化（c, d）识别出的10.65 GHz水平极化的无线电频率干扰信号分布

1—10日的MWRI资料处理为格距为20km的10d复合格点资料。使用10d的资料是为了去除MWRI的扫描轨道之间资料空白区域。基于这10d复合资料，首先计算出式（6）和式（12）定义的无线电频率干扰指数向量，然后采用主分量分析法，用于聚类识别和分级。换言之，多维辐射资料中与频率干扰相关的主分量被提取出来用于识别无线电频率干扰信号。文献[3]给出了主分量分析法在无散射地表上频率干扰识别中的应用前景。

利用2011年2月1—10日亚洲和欧洲的10d平均资料，包括水平和垂直极化，分别做标准化和不做标准化，计算出的频率干扰指数的5个主分量的解释方差

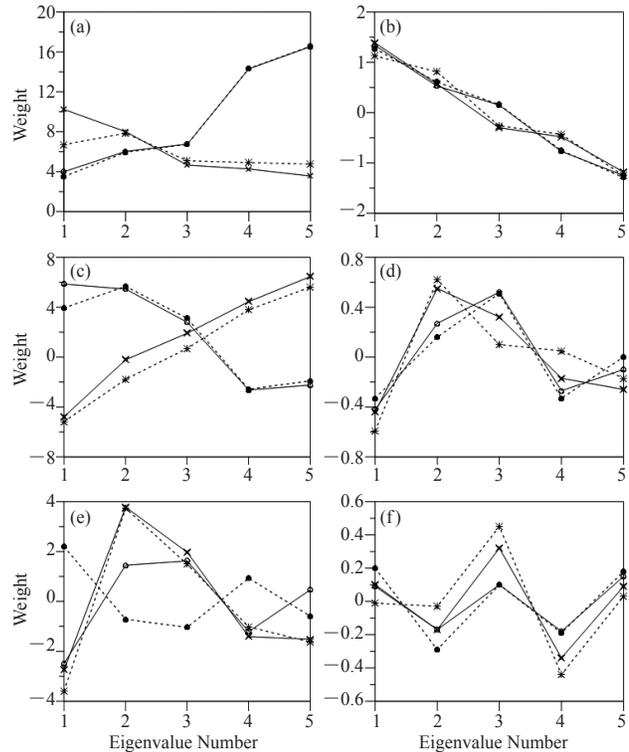


图11 2011年2月1—10日亚洲（圆圈和圆点）和欧洲（十字叉和星号）的10d平均资料在水平（实线）和垂直（虚线）极化方向，分别不做标准化（左侧）和做标准化（右侧）时计算得到的频率干扰指数的第一（a, b），第二（c, d），第三（e, f）主分量

百分比显示在图10中。在亚洲和欧洲区域，第一主分量分别占总方差的85%和60%，而且前3~4个主分量占了总方差的大部分。水平极化通道比垂直极化通道的方差比例更大。当使用标准化的频率干扰指数时，亚洲和欧洲之间的方差差异明显减小了。

图11提供了图10中频率干扰指数的特征值对应的前3个主分量（即特征向量）。当不对频率干扰指数做标准化时，第一主分量总是保持正值，反映出辐射通道的量级大小；水平和垂直极化通道的第二、三主分量系数在亚洲有着相反符号，表明不同极化方式间的差异。当使用标准化的频率干扰指数时，第一主分量出现了最明显的变化，4种情形（亚洲、欧洲、水平和垂直极化）下的第一主分量系数均随着频率升高而单调减小，反映出MWRI通道的谱梯度特征。采用不做标准化的频率干扰指数（图11a, c, e）得到的亚洲和欧洲之间、水平和垂直极化之间的第一主分量系数的差别明显减小了（图11b, d, f）。

图12给出了分别使用频率干扰指数向量式（6）和式（12）的主分量分析法识别出的2011年夏、冬季亚洲地区在10.65 GHz水平极化通道的无线电频率干扰信号的分布。不做标准化时（图12a~b），主分量分

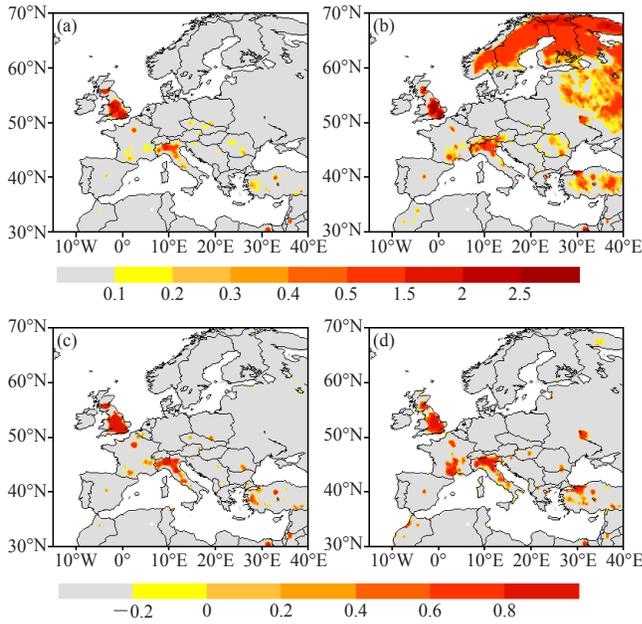


图13 2011年夏季(7月1—10日, 左侧)和冬季(2月1—10日, 右侧)用主分量分析法不做标准化(a, b)和做标准化(c, d)识别出的10.65GHz水平极化的无线电频率干扰信号分布(欧洲地区)

析法只能成功识别出MWRI夏季资料中的频率干扰信号(图12a),而在冬季不行(图12b)。高纬地区的积雪会与频率干扰信号混淆在一起(图12b)。经过标准化后,主分量分析法不仅有效识别出在日本和北京冬季的频率干扰信号,而且还找到了上海和东部沿海的一些城市的干扰信号(图12d)。对频率干扰指数进行标准化并没有影响夏季主分量分析识别出的频率干扰结果,且图12c~d中的频率干扰信号分布与谱差法识别出的信号分布很接近(图8a~b)。

在欧洲也有类似的结果(图13)。通过比较图13b和图13d,可以看出,标准化频率干扰指数消除了雪的散射效应。利用式(6)(图13a)或式(12)(图13c)都可以对频率干扰信号进行探测和识别。主分量分析法识别出的干扰信号分布(图13c~d)与谱差法识别出的(图8c~d)结果相似。

为了检验两种改进的无线电频率干扰信号识别方法的稳健性,图14给出了欧洲2011年2月19—28日的频率干扰信号分布。结果再次表明,谱差法和主分量分析法识别出的频率干扰结果非常相似(图14a~b)。与最初10d MWRI中的频率干扰信号分布相比(图13c~d),欧洲的无线电频率干扰在时间上一一直持续存在。

5 总结和讨论

本文利用两个月的风云三号B星MWRI资料,分别用谱差法和统计学的主分量分析两种方法,识别出

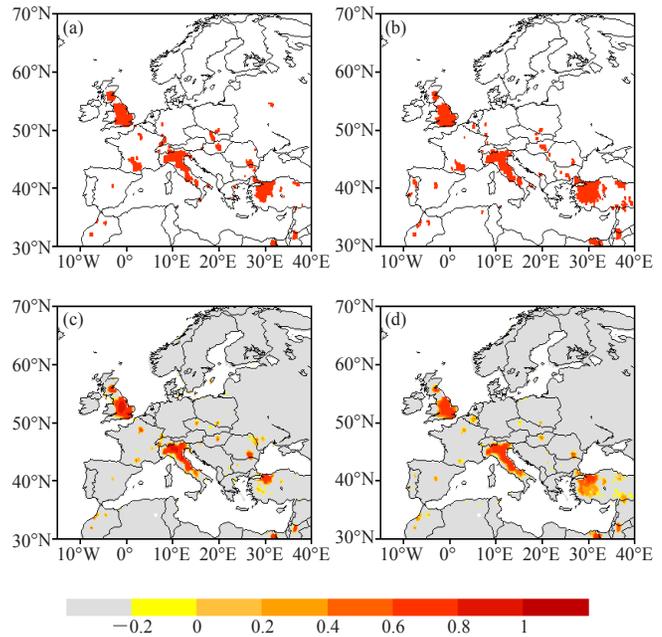


图14 用谱差法(a, b)和主分量分析法(c, d)识别出的2011年2月19—28日欧洲10.65GHz水平(左侧)和垂直(右侧)极化的无线电频率干扰信号分布

亚洲和欧洲大陆上X波段通道中的无线电频率干扰信号。频率干扰信号的准确识别不仅能提高在陆面上地球物理学的反演能力,还能在卫星遥感技术方面提供微波频段保护的证据。

对于频率干扰信号的识别,主分量分析法同时利用了多通道相关和谱差指数的特征。本文改进了文献[6]和[3]发展的对AMSR-E和WindSat资料C波段和X波段中的频率干扰信号的识别方法,应用于MWRI资料中干扰信号的识别。MWRI X波段水平和垂直极化通道都有较强的频率干扰信号存在。对比不同识别方法、不同时间段资料的试验结果,发现MWRI资料中有大量频率干扰信号,且其时间上具有持续性。欧洲大陆和日本的频率干扰信号比亚洲和美国的分布更广泛。就地理分布而言,频率干扰信号主要出现在欧洲和日本,而在美国很少。在没有“真实”的频率干扰信号的可信数据集用于评估不同分类方案价值的情况下,文中两种独立的干扰信号识别方法结果的一致性,使得对识别陆地上的频率干扰信号具备了信心。

参考文献

- [1] Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 184-194.
- [2] Gaiser P W, St Germain K M, Twarog E M, et al. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: Sensor description and early orbit performance. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 2347-2361.

“风云气象卫星”主题文献计量指标分析

■ 胡英 李婧华

针对国内外“风云气象卫星”主题文献进行计量分析,力图从这个层面揭示我国气象卫星研究与应用、国内外机构和科学家的科研产出与国际合作、高产出期刊等状况。

一、数据来源及统计方法

利用中国知网学术期刊网络出版总库(CNKI)和SCI-E数据库,分别对国内出版的“风云三号”系列卫星和国际出版的“风云”系列卫星相关主题文献进行检索分析。选取主题检索方式,CNKI学科类别限定为气象学、海洋气象学、农业气象学、森林气象

学、气象灾害及预防、遥感技术,检索式为“主题=风云三 or 风云3 or 风云-3 or FY3 or FY-3”,检索命中文献184篇(检索时间为2013年7月5日)。SCI-E数据库检索式为“主题=((FENGYUN-1* or FENGYUN-2* or FENGYUN-3* or "FENGYUN 1*" or "FENGYUN 2*" or "FENGYUN 3*" or FY-1* or FY-2* or FY-3* or FY1* or FY2* or



从总体趋势看,SCI-E国际论文与SCI-E中国论文产出几乎一致,表明中国作者是国际该主题论文产出的最主要贡献者。

FY3* or “FY 1*” or “FY 2*” or “FY 3*”) and satellite),获得初步检索结果后,再利用精炼检索进行学科筛选,文献类型选择研究论文,得到精确主题论文128篇(检索日期为2013年7月11日)。

二、统计结果与分析

1. 论文产出量与年代变化趋势分析

图1给出CNKI“风云三号”和SCI-E“风云”系列气象卫星主题文献年代分布。国内最早有关“风云三号”气象卫星主题文献发表在2001年的《上海航天》上。SCI-E最早收录的“风云”系列气象卫星主题文献,是中国作者在1993年发表在《中国科学(B辑)》上的文章。自2008年起,伴随着风云三号A星的发射,文献产出量陡增。2008年,CNKI收录“风云三号”

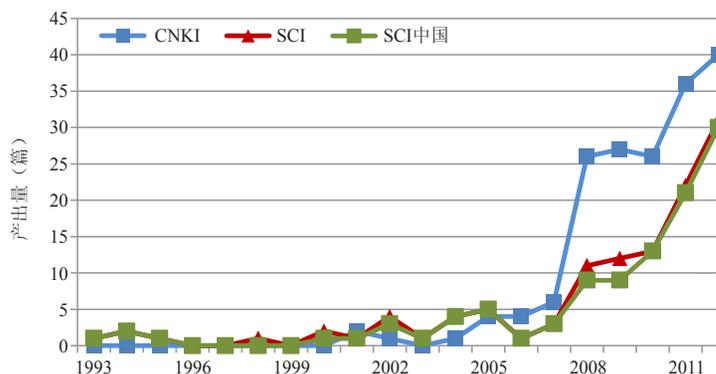


图1 CNKI“风云三号”和SCI-E“风云卫星”主题文献产出年代分布

(下转160页)

- [3] Li L, Gaiser P W, Bettenhausen M, et al. WindSat radio-frequency interference signature and its identification over land and ocean. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 530-539.
- [4] Li L, Njoku E, Im E, et al. A preliminary survey of radio-frequency interference over the U.S. in Aqua AMSR-E data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 380-390.
- [5] Njoku E, Ashcroft P, Chan T, et al. Global survey and statistics of radio-frequency interference in AMSR-E land observations. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 938-947.
- [6] Wu Y, Weng F. Detection and Correction of AMSR-E Radio-Frequency Interference. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 25: 669-681.
- [7] Ellingson S W, Johnson J T. A polarimetric survey of radio-frequency interference in C- and X-bands in the continental United States using WindSat radiometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 540-548.
- [8] McKague D, Puckett J J, Ruf C. Characterization of K-band radio frequency interference from AMSR-E, WindSat and SSM/I. *Proc IGARSS*, 2010, 2492-2494.
- [9] Njoku E, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 to 18 GHz. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 79-93.
- [10] Njoku E, Koike T, Jackson T, et al. Retrieval of soil moisture from AMSR data// Pampaloni P, Paloscia S. *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere*. Utrecht, the Netherlands: VSP Publ, 2000.
- [11] Li L, Gaiser P W, Gao B C, et al. WindSat global soil moisture algorithm and validation. *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, 2010, 48: 2224-2241.
- [12] Jackson T J, Bindlish R, Gasiewski A J, et al. Polarimetric Scanning Radiometer C- and X-band microwave observations during SMEX03. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 2418-2430.
- [13] Kelly R, Chang A, Tsang L, et al. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 230-242.
- [14] Yang H, Weng F, Lv L, et al. The FengYun-3 Microwave Radiation Imager On-orbit Verification. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49: 4552-4560.
- [15] Weng F Z, Yan B H, Grody N C. A microwave land emissivity model. *J Geophys Res*, 2001, 106, D17.