

星载微波辐射计欧洲大陆无线电频率干扰分析

官 莉 张思勃

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水
重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

摘要 基于 2011 年 6 月 1 日至 16 日先进微波扫描辐射计(AMSR-E)的观测资料,采用改进的主成分分析算法,对欧洲陆地区域的无线电频率干扰(RFI)进行识别和分析。研究发现影响英国和意大利的 X 波段 RFI 源主要是稳定的、持续的地面主动源,而影响欧洲其他国家的 RFI 则主要是反射的静止电视卫星信号对星载微波被动传感器观测的干扰。源于静止电视卫星的 RFI 出现位置和强度随时间周期性变化,在欧洲陆地多出现在星载微波辐射计升轨观测上,降轨观测则几乎不受其干扰。RFI 出现位置和强度与星载微波辐射计扫描方位角和观测视场相对静止电视卫星的方位有关,只有当星载微波辐射计视场扫描方位角大小与该视场相当于静止卫星发射方位角大小接近时该视场易受 RFI 影响。

关键词 探测器;先进微波扫描辐射计;无线电频率干扰;静止电视卫星

中图分类号 P413.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0728004

Source Analysis of Radio-Frequency Interference over Europe Land from Advanced Microwave Scanning Radiometer-E

Guan Li Zhang Sibao

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of
Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract The radio-frequency interference (RFI) over Europe land is identified and analyzed based on advanced microwave scanning radiometer-E (AMSR-E) observations from June 1 to 16, 2011 using modified principal component analysis algorithm. The X band AMSR-E measurements of England and Italy are mostly interfered by the stable, persistent active surface microwave transmitters. While the RFI source of other European countries is the interference of the reflected geostationary TV satellite downlink signals to the measurements of spaceborne microwave radiometer. The RFI location and intensity derived from the geostationary TV or communication satellite changes with time within observation period. The observations of spaceborne microwave radiometer of descending portions of orbits are usually interfered over Europe land, while ascending portions of orbits are hardly interfered. The RFI location and intensity from the reflection of downlink radiation are highly dependent upon the relative geometry between the geostationary satellite and the measuring passive sensor. Only these field of views which the scanning azimuth of spaceborne instrument is close to the relative azimuth to the geostationary satellite are easily effected by RFI.

Key words detectors; advanced microwave scanning radiometer-E; radio-frequency interference; geostationary TV satellite

OCIS codes 280.4991; 010.5620; 120.0280

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41175034)、江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA170003)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_489)

作者简介: 官莉(1973—),女,博士生导师,教授,主要从事大气遥感科学与技术方面的研究。

E-mail: liguan, nuist@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

卫星微波接收的来自地气系统的被动热辐射与主动传感器发射的混合信号,称之为无线电频率干扰(RFI),在主动及被动微波遥感探测领域已成为越来越严重的问题。人为的 RFI 源主要来自建于地表的主动微波发射器,如手机、雷达^[1]、空中交通管制、车辆测速仪器等,这些 RFI 源会污染地球大气的散射和发射辐射,会在卫星遥感探测量中增加不可预测的噪声。特别对于被动遥感,这一问题尤为严重,这是因为地表相对较弱的热发射辐射很容易被强的 RFI 信号淹没。近 10 年来随着地面移动通信等主动微波技术的发展和商业服务中对微波波段的使用日益增多,被动接收来自地球大气系统辐射的星载微波仪器观测越来越受到主动遥感的影响,解决星载微波仪器的无线电干涉问题的重要性越来越突显^[2-3]。目前全世界广泛使用的星载微波成像仪[载在地球观测系统(EOS)Aqua 卫星上的先进微波扫描辐射计(AMSR-E)、载在我国 FY-3 卫星上的微波成像仪(MWRI)和美国国防卫星上的 WindSat 全极化辐射计等]的 C 波段(6.9 GHz)或 X 波段(10.7 GHz)观测受来自地面主动的微波发射即无线电频率干扰 RFI 影响,造成观测亮度温度相比视场内自然大气和地表发射/散射辐射而言异常偏大,进而使反演的地表参数(如地表温度、土壤湿度等)^[4]和资料同化的分析场具有较大误差。

Li 等^[5]于 2004 年最先发现 AMSR-E 在 C 波段通道的探测数据中存在大范围的无线电频率干涉现象,并提出可以利用谱差法来量化 RFI 的强度和范围。2005 年, Njoku 等^[6]继续分析了 AMSR-E 数据中的 RFI 污染问题,指出 6.9 GHz 通道观测中 RFI 区主要集中在美国、日本和中东地区;而 10.7 GHz 通道观测中 RFI 区主要集中在英国、意大利和日本。Ellingson 等^[7]2006 年利用载在美国国防卫星上的 WindSat 全极化辐射计六个月的观测资料分析了美国大陆地区 C 波段和 X 波段探测所受的无线电频率干扰,识别出的 RFI 位置和强度与文献^[5-6]利用 AMSR-E 观测数据的研究结果基本一致。2006 年, Li 等^[8]进一步的研究指出谱差法没有利用辐射计观测各通道间的相关性,提出将主成分分析(PCA)方法首次应用于陆地地区的 RFI 分析。Adams 等^[9]在 2010 年研究发现海洋表面反射的静止通讯/电视卫星信号是干扰海洋上星载被动微波辐射计观测的主要来源。

国内开展主动无线电频率对星载微波仪器被动

观测的干扰研究和产生对无线电频率进行保护意识较晚,多数研究集中在地面主动无线电频率之间的相互影响^[10-11]。文献^[12-14]分别提出了适用于不同下垫面和天气条件的 RFI 信号订正算法、标准化的 PCA 方法和双主成分分析 PCA 方法。

本文用 AMSR-E 观测资料重点分析了欧洲陆地上无线电频率干扰的主要形成原因。为提高反演精度和资料同化分析场的质量提供了理论指导。

2 RFI 识别算法介绍

2.1 研究使用的资料

AMSR-E 搭载在 2004 年 5 月美国国家航空和宇宙航行局(NASA)发射的地球观测系统 Aqua 卫星上(轨道倾角为 98.3°)。该仪器主要用于观测云和地表,分别测量波段为 6.925、10.65、18.7、23.8、36.5、89.0 GHz 时水平极化和垂直极化的亮度温度,共有 12 个通道,空间分辨率从 89 GHz 的 5.4 km 下降为 6.9 GHz 的 56 km。AMSR-E 是圆锥型扫描仪器,天线圆锥扫描角为 47.4°,扫描帧幅宽度为 1445 km。降交点和升交点赤道过境时间分别为 01:30 和 13:30。

本文使用的是 2011 年 6 月 AMSR-E Level 2A 观测的亮度温度,Level 2A 资料中所有通道的空间分辨率都重新取样,取得了与 56 km 相同的空间分辨率,选取欧洲陆地区域作为研究对象。

2.2 改进的主成分分析算法介绍

综合考虑 RFI 影响区微波观测通道之间的不相关性和积雪/冰下垫面的散射作用,在主成分分析算法基础上,提出了改进的主成分分析算法。该算法仅对受 RFI 影响的(6/10~18 GHz)谱差和对自然冰雪影响敏感的(36.5~18.7 GHz)谱差进行主成分分析,利用 RFI 指数(RI)和两个积雪散射指数(SI)来构建进行主成分分析的向量 $\mathbf{R}_{\text{indices}}$ 。其中对于 6.9 GHz 通道用于进行 PCA 的向量为

$$\mathbf{R}_{\text{indices}} = \begin{bmatrix} R_{\text{RI},6\text{H}(V)} \\ R_{\text{SI},V} \\ R_{\text{SI},H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{6\text{H}(V)} - T_{10\text{H}(V)} \\ T_{18V} - T_{36V} \\ T_{18H} - T_{36H} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

若识别 10.7 GHz 干扰,则

$$\mathbf{R}_{\text{indices}} = \begin{bmatrix} R_{\text{RI},10\text{H}(V)} \\ R_{\text{SI},V} \\ R_{\text{SI},H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{10\text{H}(V)} - T_{18\text{H}(V)} \\ T_{18V} - T_{36V} \\ T_{18H} - T_{36H} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 T 表示观测的亮度温度,下标 H 和 V 表示水平极化和垂直极化方式,下标数字表示通道的频率:

6 表示 6.9 GHz 通道,10 表示 10.7 GHz 通道,以此类推。用 PCA 方法识别 6.9 GHz 水平极化 RFI 的

三维数据矩阵如下:

$$\mathbf{A}_{3 \times N} = \begin{bmatrix} (T_{6H} - T_{10H})_1 & (T_{6H} - T_{10H})_2 & \cdots & (T_{6H} - T_{10H})_N \\ (T_{18V} - T_{36V})_1 & (T_{18V} - T_{36V})_2 & \cdots & (T_{18V} - T_{36V})_N \\ (T_{18H} - T_{36H})_1 & (T_{18H} - T_{36H})_2 & \cdots & (T_{18H} - T_{36H})_N \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 N 表示指定区域内的观测点总数。

计算矩阵 \mathbf{A} 的协方差矩阵 \mathbf{S} : $\mathbf{S}_{5 \times 5} = \mathbf{A}\mathbf{A}^T$, 使其特征值($\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$)以及特征向量($\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]$)满足

$$\mathbf{S}\mathbf{u} = \lambda\mathbf{u}. \quad (4)$$

利用特征向量把数据矩阵 \mathbf{A} 投影到一个新的正交的数据空间,得到主成分矩阵 \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z}_{3 \times N} = \mathbf{u}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

每一个主成分彼此正交,互不相关,且第一主成分具有最大的方差,第二主成分次之^[15]。利用与 RFI 指数最相关的那个主成分来识别 RFI 区,通常夏季第一主成分可用于识别 RFI 分布和强度,而冬季,由于大范围冰雪散射区的存在,第二主成分则是与 RFI 信息最相关的主成分。该算法不仅适用于冬季积雪和 RFI 混合的复杂陆地区域,同样适用于夏季非散射地表的 RFI 识别。

3 欧洲大陆 RFI 来源分析

由于极轨卫星 Aqua 有效载荷 AMSR-E 每 16 天覆盖完全相同的区域,16 天的周期内卫星每天轨道覆盖观测范围不太相同^[16]。图 1 显示了 2011 年 6 月 1 日至 16 日基于 AMSR-E 升轨观测识别的 10.7 GHz 水平极化欧洲地区陆地上 RFI 分布,RFI 值大于 5 的地方被认为是 RFI 干扰的区域,图中白色区域为卫星轨道观测间隙区和海洋区域,降轨图略。下一个 16 天内卫星每天观测区域和 RFI 出现位置重复图 1 的分布(图略)。从图中可看出,英

国和意大利 RFI 出现的位置不随时间而变,每天都有,而且强度变化也很小,这说明英国和意大利 X 波段 RFI 源主要是稳定而持续的地面主动源,是不随时间和观测角度而变化的。而其余地方识别的 RFI(图中黄红色区域)是随时间而变的,每天出现的位置和强度不一样。如法国在 9 月 2、4、11、13 日出现了大范围强的 RFI 区,而在其余日期就没有出现,出现 RFI 的这 4 天卫星观测区域几乎相同只差了几个经度,且随着卫星轨道覆盖区域的这一点不同 RFI 出现位置和强度也随着不同。为研究这些地方 RFI 的形成来源,选取了这几天中的几个观测区域进行研究,研究区域分布如图 2 所示。

根据 Adams 研究结果,海洋表明反射的静止通讯/电视卫星信号是干扰海洋上星载被动微波辐射计观测的主要来源,洋面上风速较小时多发生的是镜面反射,对气象极轨卫星而言降轨时受静止卫星 RFI 影响的主要是北半球,升轨时受干扰的主要是南半球^[5]。表 1 列出了目前影响欧洲地区的主要静止电视卫星,主要是中心频率在 10.7 GHz 附近的 Hot bird、Atlantic bird 和 Astra 卫星。图 3 给出了 AMSR-E 接收地表反射的静止通讯/电视卫星信号示意图,图中蓝色等值线示意静止卫星下行波束覆盖范围和功率。由于海表反射引起的 RFI 非常依赖于静止卫星和星载被动仪器的相对几何位置,非严格的镜面反射使干扰信号具有角展度,因此当闪烁角小于 25° 时被认为是受静止卫星 RFI 干扰,其中闪烁角定义为每个观测视场镜面反射的静止电视卫星信号方向与视场到星载仪器方向之间的夹角。

表 1 影响欧洲地区的主要静止电视卫星

Table 1 Major geostationary TV satellite in Europe

Operator	Longitude degree	Region	Relevant band /GHz
Atlantic bird	W7°	Europe	10.7~11.7
Hot bird	E13°	Europe	10.7~12.75
Astra	E19.2°	Europe	10.7~10.95

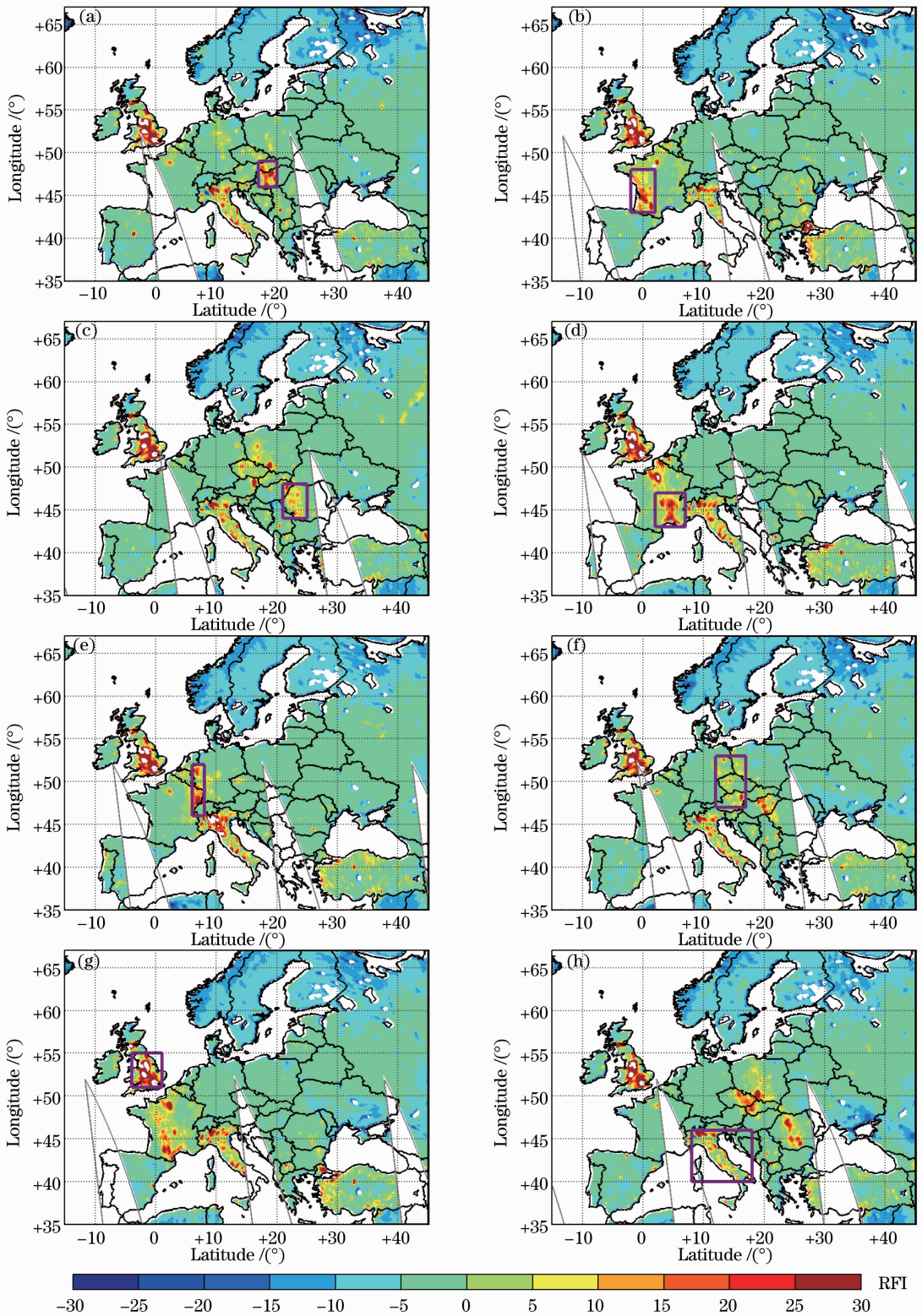


图 1 2011 年 6 月 1~16 日(选择的 8 天)基于 AMSR-E 升轨识别的欧洲地区 10.7 GHz 水平极化 RFI 分布。

(a) 06.01; (b) 06.02; (c) 06.03; (d) 06.04; (e) 06.06; (f) 06.10; (g) 06.11; (h) 06.12

Fig. 1 RFI distributions at 10.7 GHz with horizontal polarization over Europe land from 1 to 16 June, 2011 (selected 8 days) based on AMSR-E ascending observations. (a) 06.01; (b) 06.02; (c) 06.03; (d) 06.04; (e) 06.06; (f) 06.10; (g) 06.11; (h) 06.12

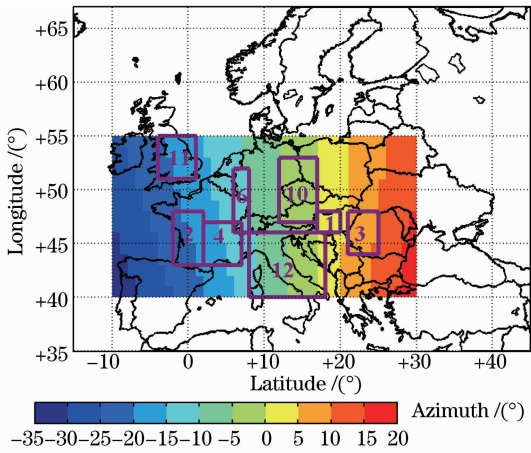


图 2 方框为图 1 中研究区域分布位置(框中数字为观测日期)。颜色代表静止卫星 Astra 和 Hot bird 发射的平均方位角

Fig. 2 Distributions of research areas of figure 1 (number in box is the observed date). Color contours denote the averaged downlink azimuth of geostationary satellite Astra and Hot bird

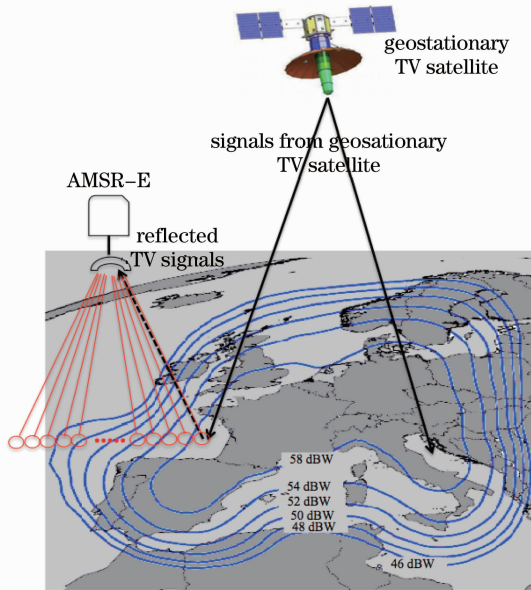


图 3 AMSR-E 接收地表反射的静止通讯/电视卫星信号示意图

Fig. 3 Sketch map of AMSR-E observations interfered by the reflected geostationary TV satellite downlink signals

通过对图 1 中 AMSR-E 辐射计 16 天观测周期内欧洲陆地上 RFI 的分析,初步估计图中星载微波成像仪接收辐射在某些地方出现的随时间和观测轨道位置而变的 RFI 是受地表反射的静止/通讯电视卫星信号的干扰,由于陆地表面的非均匀性,发生的多是漫反射。图 1 中展示的欧洲大陆区域由静止卫

星引起的 RFI 多出现在 AMSR-E 上升轨道,而在降轨中几乎没有(图略),这与海洋面上的研究结果是相反的。

图 2 中颜色等值线给出的是相对静止电视卫星的方位角,由于静止卫星在赤道上空向北半球欧洲斜向发射,角度表示的是卫星下行波束覆盖位置与静止卫星连线在地表的投影与正北方向的夹角,顺时针为正值,逆时针方位为负值。Atlantic bird 的主要投射能量在海洋上,而影响陆地的主要是 Astra 和 Hot bird,因此将两者的相对方位角进行了平均,即图中彩色阴影区。

AMSR-E 是圆锥型扫描仪器,在其 L2A 数据中提供了观测值地球方位角,定义为卫星扫描方向相对于观测视场正北面的方位,即观测视场和卫星的连线在地球上的投影与正北方向的夹角,取值范围为 $[-180^{\circ}, 180^{\circ}]$,顺时针为正值,逆时针方位为负值。由于 AMSR-E 是前半锥扫描,所以地球方位角取值为 $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 。为研究 RFI 出现位置与 AMSR-E 观测扫描方位的关系定义了扫描方位角,观测视场相对卫星飞行方向的方位,即观测视场和卫星的连线在地球上的投影与卫星飞行方向之间的夹角,向左扫描为负,向右扫描为正。由于 Aqua 卫星的轨道倾角为 98.3° ,所以扫描方位角与地球方位角相差 8.3° 。图 4 给出了 8 个研究区域中根据改进的主成分分析算法识别的 RFI 强度与扫描方位角之间的关系。Box11 和 Box12 分别代表的是英国和意大利的 RFI 区,可以看出这两个区域 RFI 出现位置和强度与仪器的扫描方位角无关,即仪器扫描到哪个方位都有很强的 RFI 干扰,进一步验证了英国和意大利的 RFI 源主要是稳定的、持续的地面主动源,而不是反射的静止卫星信号。其余研究区域并不是 AMSR-E 每个观测视场都受反射的静止电视卫星信号干扰,只有当星载微波辐射计扫描到某一方位角度范围内时这些视场才受 RFI 影响。分析图 4 中的研究区域 2、4 和 6,图 2 中这 3 个区域静止电视卫星发射的方位角为负值,说明该区域处在静止卫星的西侧,图 4 中 Box2、Box4 和 Box6 观测到 RFI 的辐射计扫描方位角分别为 $[-25^{\circ}, -10^{\circ}]$ 、 $[-20^{\circ}, -5^{\circ}]$ 和 $[-15^{\circ}, -5^{\circ}]$,观测方位角都是负的,说明出现 RFI 的观测视场都在卫星飞行方向的左侧;图 2 中随着 Box6、Box4 和 Box2 越来越偏向静止卫星的西侧方位,图 4 中受 RFI 影响辐射计视场的扫描方位越来越偏向飞行方向的左侧,说明 RFI 出现位置与星载微波辐射计观测扫描方

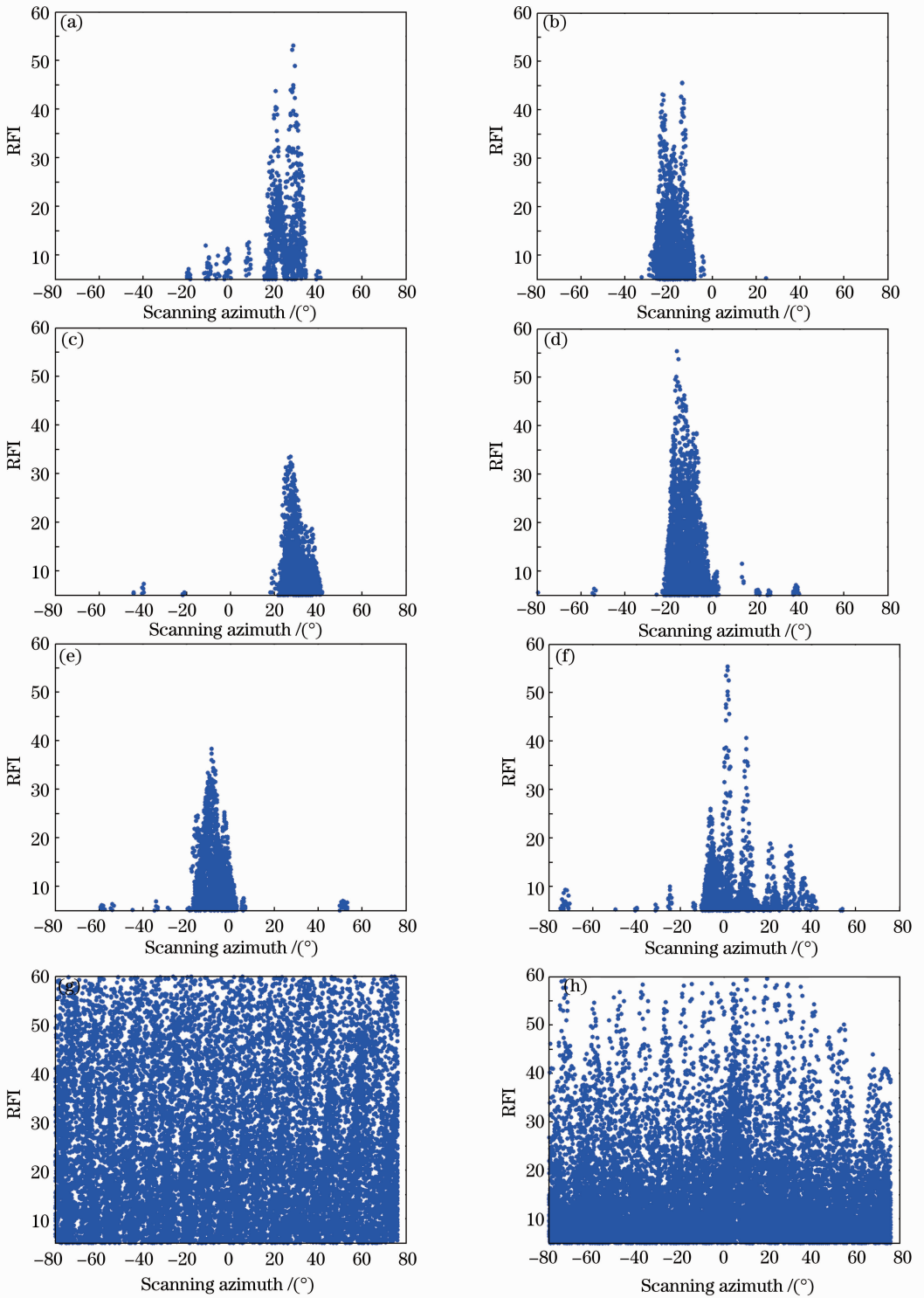


图 4 研究区域 RFI 强度与 AMSR-E 扫描方位角的关系。(a) Box1; (b) box2; (c) box3; (d) box4; (e) box6; (f) box10; (g) box11; (h) box12

Fig. 4 Relationship between RFI intensity and AMSR-E scanning azimuth in research areas. (a) Box1; (b) box2; (c) box3; (d) box4; (e) box6; (f) box10; (g) box11; (h) box12

位角和观测视场相对静止电视卫星的方位有关。研究区域 1 和 3 位于静止卫星的东侧,图 4 中出现 RFI 的视场观测角度则是正值(即仪器向右扫描),

同样区域 3 的位置相对于静止卫星更偏东一些, RFI 出现视场的扫描方向则更向右。Box10 基本上位于静止卫星发射零方位的位置,最强 RFI 基本都

集中出现在星下点位置。RFI 出现位置与星载微波辐射计观测扫描方位角和观测视场相对静止电视卫星的方位有关,当观测视场在静止卫星西侧方位时,辐射计扫描到卫星飞行方向左侧时会有 RFI 干扰,相反,当观测视场在静止卫星东侧方位时,辐射计扫描到卫星飞行方向右侧时易受 RFI 干扰。对比图 2 中研究区域相对静止电视卫星发射平均方位角和图 4 中出现 RFI 区域的星载微波成像仪的观测扫描方位角可发现两者数值是相当的,即只有当星载微波辐射计视场扫描角大小与该视场相当于静止卫星发射方位角大小接近时该视场易受 RFI 影响。

4 结 论

基于 2011 年 6 月 1 日至 16 日 AMSR-E 观测资料用改进的主成分分析算法对欧洲陆地区域的 X 波段无线电频率干扰进行识别和分析,得出如下结论:

- 1) 以欧洲陆地为例用改进的主成分分析算法可识别 X 波段 RFI 的位置和强度;
- 2) 欧洲大陆除英国和意大利以外 RFI 出现位置和强度随时间周期性变化,这些 RFI 主要来自于反射的静止电视卫星信号的影响,RFI 多出现在星载微波辐射计升轨观测上,而降轨观测几乎不受静止电视卫星信号干扰;
- 3) RFI 出现位置与星载微波辐射计观测扫描方位角和观测视场相对静止电视卫星的方位有关,当观测视场在静止卫星西侧方位时,辐射计扫描到卫星飞行方向左侧时会有 RFI 干扰,相反,当观测视场在静止卫星东侧方位时,辐射计扫描到卫星飞行方向右侧时易受 RFI 干扰;
- 4) 并非 AMSR-E 每个观测视场都受反射的静止电视卫星信号干扰,只有当星载微波辐射计视场扫描角大小与该视场相当于静止卫星发射方位角大小接近时该视场观测易受 RFI 影响。

参 考 文 献

- 1 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. *Chines J Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.
伯广宇, 刘 东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- 2 Chen Fuchang, Hu Jiacheng, Zhang Chengtao, *et al.*. Distributed Brillouin optical fiber temperature sensor based on high frequency microwave technology [J]. *Chinese J Lasers*,

- 2012, 39(6): 0605009.
陈福昌, 胡佳成, 张承涛, 等. 基于高频微波技术的分布式布里渊光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0605009.
- 3 Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan, *et al.*. Influence of motion status on multispectral optical characteristics of satellites [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1004002.
王付刚, 张 伟, 汪洪源, 等. 运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1004002.
- 4 Tao Dongxing, Zhao Huijie, Jia Guorui. A MODTRAN-based double-lookup-tables retrieval algorithm for water vapor amount of hyperspectral data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1001001.
陶东兴, 赵慧洁, 贾国瑞. 基于 MODTRAN 的双查找表法反演高光谱数据的水汽含量[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1001001.
- 5 L Li, E G Njoku, E Im, *et al.*. A preliminary survey of radio-frequency interference over the U. S. in Aqua AMSR-E data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42(2): 380-390.
- 6 E G Njoku, P Ashcroft, T K Chan, *et al.*. Global survey and statistics of radio-frequency interference in AMSR-E land observations [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43(5): 938-947.
- 7 S W Ellingson, J T Johnson. A polarimetric survey of radio-frequency interference in C- and X-bands in the continental united states using WindSat radiometry [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44(3): 540-548.
- 8 L Li, P W Gaiser, M H Bettenhausen, *et al.*. WindSat radio-frequency interference signature and its identification over land and ocean [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44(3): 530-539.
- 9 I S Adams, M H Bettenhausen, P W Gaiser, *et al.*. Identification of ocean-reflected radio-frequency interference using WindSat retrieval Chi-Square probability [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 406-410.
- 10 Jiang Lan. How to effectively prevent and eliminate VHF radio frequency interference [J]. *Air Traffic Management*, 2009, 20(5): 32-39.
蒋 兰. 如何有效预报和排查民航 VHF 无线电频率干扰[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2009, 20(5): 32-39.
- 11 Zhang Xiaoyan. Introduction to radio-frequency interference [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2012, 24: 100.
张晓燕. 浅谈无线电频率干扰 [J]. *科技创新导报*, 2012, 24: 100.
- 12 Wu Ying, Weng Fuzhong. Detection and correction of AMSR-E radio-frequency interference [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 25(5): 669-681.
- 13 X Zou, J Zhao, F Weng, *et al.*. Detection of radio-frequency interference signal over land from FY-3B microwave radiation imager (MWRI) [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50(12): 4994-5003.
- 14 J Zhao, X Zou, F Weng. WindSat radio-frequency interference signature and its identification over Greenland and Antarctic [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51(9): 4830-4839.
- 15 Yang Xiukun, Zhong Mingliang, Jing Xiaojun, *et al.*. FTIR microscopic image analysis based on principal component analysis-2th derivative spectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0711001.
杨秀坤, 钟明亮, 景晓军, 等. 基于主成分分析-二阶导数光谱成像的红外显微图像分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0711001.
- 16 AMSR-E Data Users Handbook (5th Edition) [R]. Japan Aerospace Exploration Agency, 2009.