

张玉璇,吴莹.GMI亮温资料RFI信号影响因子分析[J].海洋气象学报,2022,42(3):99-108.

ZHANG Yuxuan, WU Ying. Analysis of factors affecting RFI signal in GMI brightness temperature data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(3): 99-108. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.010. (in Chinese)

GMI亮温资料RFI信号影响因子分析

张玉璇^{1,2}, 吴莹^{1,3}

(1.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/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,江苏 南京 210044;2.广东海洋大学海洋与气象学院,广东 湛江 524088;3.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044)

摘要: 利用全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星上搭载的微波成像仪(GPM Microwave Imager, GMI)的一级亮温数据,通过谱差法识别被无线电频率干扰(radio frequency interference, RFI)污染的典型陆地地区,确定欧洲、东亚和南美作为主要研究区域,进一步分析RFI与卫星方位角、太阳方位角和太阳天顶角之间的关系,讨论RFI的影响因子。结果表明:水平极化方式下受RFI影响的区域范围比垂直极化方式下的范围更广;相对于强RFI信号分布对应的较宽的卫星方位角区间,存在RFI的像素点对应的太阳方位角和太阳天顶角角度区间范围较为集中;当RFI强度较弱时,垂直极化方式下的RFI的像素点远多于水平极化方式下的RFI像素点,但随着RFI强度的增强,水平极化方式下的RFI像素点多于垂直极化方式下的RFI像素点,且强度越大则两种极化方式下的RFI像素点数量差距越大。

关键词: 微波成像仪(GMI); 亮温; 无线电频率干扰; 影响因子

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)03-0099-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.010

Analysis of factors affecting RFI signal in GMI brightness temperature data

ZHANG Yuxuan^{1,2}, WU Ying^{1,3}

(1. 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 & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Using the level-1 brightness temperature data from the Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI), the typical continental areas contaminated by radio frequency interference (RFI) are identified by spectral difference method, and Europe, East Asia, and South America are selected as the main research areas. Furthermore, the relationship between RFI and satellite azimuth, solar azimuth, and solar zenith angle is analyzed to discuss the impact factors of RFI. The results are shown as follows. The area affected by RFI is wider in horizontal polarization mode than in vertical polarization mode. Compared with the wide range of satellite azimuth corresponding to the strong RFI signal distribution, the angular range of solar azimuth and solar zenith angle corresponding to RFI pixels is more concentrated. When the intensity of RFI is weak, the number of RFI pixels in vertical polarization mode is far more than that in horizontal polarization mode. However, as the intensity of RFI

收稿日期:2021-12-09; 修订日期:2022-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41975046,41305033)

第一作者:张玉璇,女,硕士研究生,主要从事大气、海洋探测与卫星遥感研究,734452271@qq.com。

通信作者:吴莹,女,博士,副研究员,主要从事大气探测与卫星遥感研究,wuying_nuist@163.com。

increases, the number of RFI pixels in horizontal polarization mode is more than that in vertical polarization mode, and the greater the intensity, the greater the difference between the number of RFI pixels in the two polarization modes.

Key words GPM Microwave Imager (GMI); brightness temperature; radio frequency interference (RFI); impact factor

引言

随着工业和科技的飞速发展以及相关技术的进步,微波波段不仅越来越多地被运用于民用和军用雷达,还在全球卫星定位系统、航空管制以及其他低功率的民用系统中得到了充分应用^[1-3]。星载微波资料是地面观测信息的主要来源之一,因此在陆面资料的反演同化方面起着重要作用。但由于对相关通道频率的保护缺乏全面性,星载微波辐射计在接收地气系统发出的自然热辐射的同时,也会接收到部分地面主动微波传感器发射的辐射和地面反射的辐射^[4-5],接收到这种混合信号的情况称之为无线电频率干扰(radio frequency interference, RFI)^[6-8]。RFI信号导致所得的相关探测信息出现严重失真的现象,大幅度降低了星载微波辐射计资料的使用率^[9-11],且RFI对低频观测通道的影响程度远大于对高频观测通道的影响。

为准确地识别出受到RFI影响的区域,国内外学者在这方面做了大量研究。LI et al.^[6]提出谱差法,并用该方法识别美国大陆在6.9 GHz频率通道的RFI。研究发现,谱差法对于正处于夏季的陆地地区可以最简单、高效地识别出RFI,但由于海洋本身具有较大的谱差波动性,导致谱差法在海洋地区无法有效识别RFI。NJOKU et al.^[12]利用平均值标准差法识别了全球陆面在6.9 GHz和10.7 GHz通道的RFI。LI et al.^[13]使用主成分分析法(principal component analysis, PCA),在此方法的基础上,ZOU et al.^[14]运用标准化的主成分分析法(normalized principal component analysis, NPCA),并证明该方法对识别积雪覆盖区域的RFI有更高的准确性。ZHAO et al.^[15]提出双主成分分析法(double principal component analysis, DPCA)能够有效地识别积雪和海冰等表面的RFI。官莉和张思勃^[16]提出改进的主成分分析法来识别欧洲地区在AMSR-E X波段的RFI信号,结果表明,在满足一定的条件时,观测视场受反射的静止电视卫星信号的干扰影响。WU et al.^[17]利用简化的广义频率干扰检测方法对陆地上AMSR2一级亮温数据中的C波段RFI

进行检测,同时分析了RFI的来源。结果表明,使用广义频率干扰检测方法识别的RFI污染区域的范围在某些区域大于其他方法识别的RFI污染区域的范围。位置不随观测地球方位角变化的RFI信号通常来自稳定、连续的地面微波辐射源,而RFI信号仅在某种扫描轨道(上升/下降)的某些方向上出现主要由地球静止卫星信号反射引起。此外,研究表明,作为全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星上所搭载的最核心且最重要的设备之一,微波成像仪(GPM Microwave Imager, GMI)的中低频率探测资料中存在RFI^[18-19],会导致中低频频段出现亮温值显著增加的现象。

GPM微波成像仪资料可以对大气中水汽的含量及种类、近地表降水率、云降水等云层内降水信息有较好的代表作用,其相关资料已经在卫星资料同化系统以及地表参数反演工作中扮演着重要的角色^[20-21]。本研究针对GMI的一级亮温数据,使用谱差法对2020年7月1—31日的全球GMI观测的亮温资料进行无线电频率干扰的识别,并针对存在明显RFI信号的典型区域的干扰信号影响因子进行分析,这将为GMI亮温资料的质量控制、反演精度以及对相关资料的使用效率的评估提供参考。

1 GMI 仪器

本研究选用的数据是GPM上搭载的微波成像仪(GMI)的一级亮温资料。GMI是一种全功率微波辐射计,运行的高度是407 km,较TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星上的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)有更高的空间分辨率^[20,22]。仪器绕垂直轴旋转的锥形扫描,偏置抛物面天线指向的离天底角为48.5°,GMI对地进行圆锥式扫描的角度为52.8°,扫描宽度保持在885 km,以椭圆形视场进行观测。GMI的频段范围为10~183 GHz,具有9个频段对应着13个不同的微波通道,如表1所示。

2 RFI 识别算法

本研究采用谱差法对RFI进行分析。一般而

表1 GMI 各通道主要技术性能指标^[23]

Table 1 Main technical parameters of GMI channels^[23]

通道号	中心频率/GHz	极化方式	分辨率/(km×km)
1—2	10.65	V/H	19.4×32.2
3—4	18.70	V/H	11.2×18.3
5	23.80	V	9.2×15.0
6—7	36.50	V/H	8.6×15.0
8—9	89.00	V/H	4.4×7.3
10—11	165.50	V/H	4.4×7.3
12	183.31±3	V	4.4×7.3
13	183.31±7	V	4.4×7.3

注:“H”表示水平极化,“V”表示垂直极化,下同。

言,微波低频通道的亮温值与频率呈现正相关的关系,其主要原因是土壤和植被中水的介电常数同样与频率正相关,即其介电常数随频率的升高而逐渐增大,从而使得地表辐射率也随频率的增大而增大,但当某通道受到 RFI 污染时则会产生负谱差梯度现象^[12],即低频率通道的 RFI 最可能导致负频谱梯度的产生。据此,本研究选用对陆面 RFI 信号检测最为迅速且有效的方法,即谱差法^[6,24],用 RFI 指数来判断 RFI 的存在和强度。对于 10.65 GHz 通道的 RFI 指数:

$$I_{10.65p} = T_{B10.65p} - T_{B18.70p}, \quad (1)$$

式(1)中, I 表示 RFI 指数,下标 10.65 和 18.70 分别表示 10.65 GHz 和 18.70 GHz,下标 p 表示水平(H)或垂直(V)极化方式, T_b 表示观测的亮温值。中等强度的 RFI 值范围是 $5\text{ K} < I < 10\text{ K}$; $I > 10\text{ K}$ 则意味着强 RFI;当 $-5\text{ K} < I < 5\text{ K}$ 时为弱 RFI,与强 RFI 相比,观测资料中弱 RFI 会容易与陆地自然辐射混淆在一起,且难以将两者进行区分,这对提高探测精

度的工作来说是一个不小的难题。

3 结果与讨论

利用式(1)提出的 RFI 识别算法对 2020 年 7 月 1—31 日 GMI 的全球陆地亮温资料进行 RFI 识别,结果发现无论是垂直极化亮温还是水平极化亮温的全球分布均在欧洲、东亚以及南美地区出现一定范围的 RFI 信号,如图 1 所示 2020 年 7 月 3 日和 9 日 GMI 全球水平极化 RFI 分布(7 月其余日期的 RFI 分布图略),故将这 3 个地区作为主要的研究区域,并对 GMI 亮温资料中 RFI 信号的影响因子做进一步的讨论与分析。

3.1 欧洲 RFI 分布

图 2、3 分别给出的是 2020 年 7 月 1、3、8 和 10 日典型的欧洲 GMI 中 10.65 GHz 在水平极化方式和垂直极化方式下的 RFI 分布,RFI 的存在使得同一极化方式下的低频通道与相邻高频通道的 RFI 指数为正值,即在图中表现为棕黄色至红色的点。可以看出,在英国的东南部、伦敦附近有明显异常高亮温差值区,其 RFI 指数值范围为 25~30 K,并且在 10 d 的图中,该地区的 RFI 一直存在且强度较大。在法国东部地区偶尔有孤立的棕黄色点出现,其 RFI 指数范围为 20~30 K。同时可以看出,在意大利与土耳其有很多孤立的棕色和红色点分布,RFI 指数范围在 10~25 K 之间,且这两个区域的孤立棕、红色点的分布范围在 10 d 的图中是变化的。这些亮温异常点的存在说明这些地区的一级亮温资料受到 RFI 的污染,导致亮温资料失真。对比两种不同极化方式下的 RFI 分布(图 2、3)可以发现,水平极化方式下的 RFI 分布范围明显比垂直极化方式

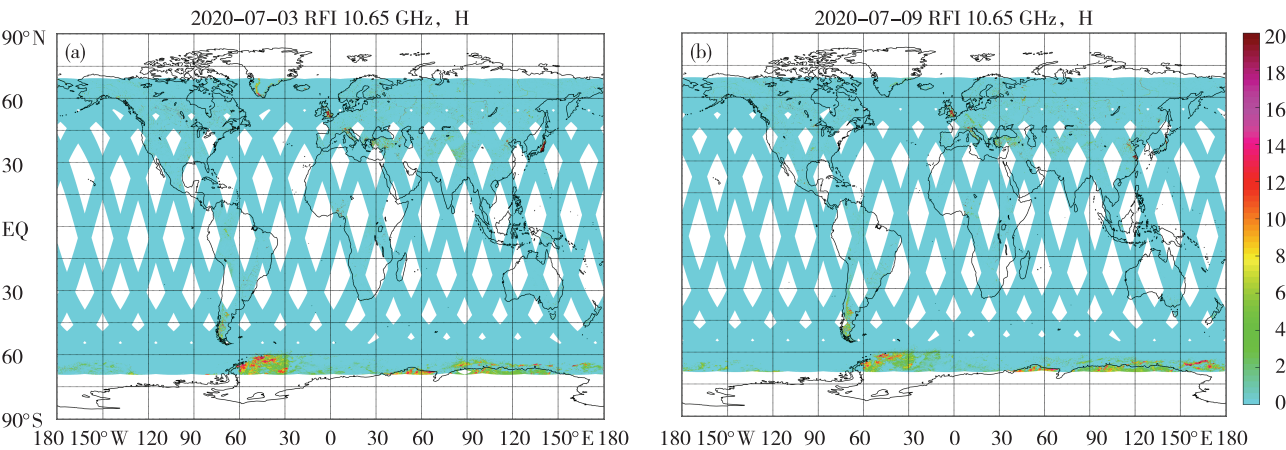


图1 全球 GMI 水平极化 RFI(色阶,单位:K)分布(a. 2020 年 7 月 3 日, b. 2020 年 7 月 9 日)
Fig.1 Global distribution of RFI (color scale, units: K) in horizontal polarization mode of GMI (a. 3 July 2020, b. 9 July 2020)

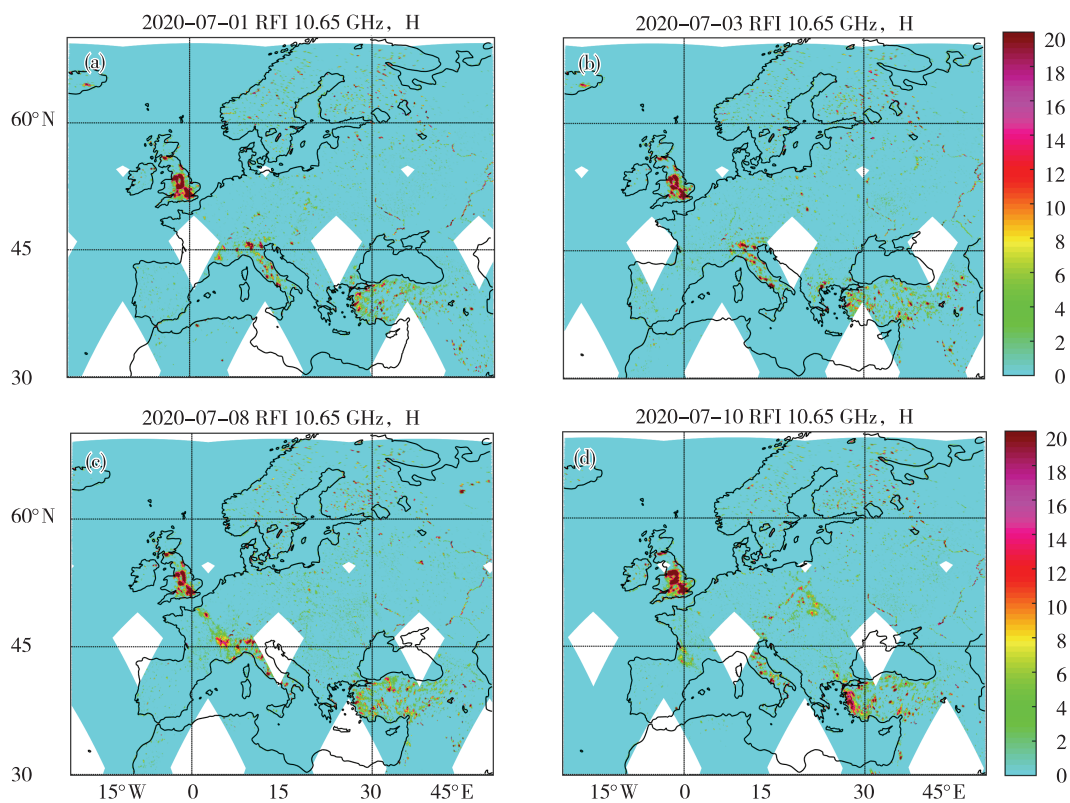


图 2 2020 年 7 月欧洲 GMI 水平极化 RFI(色阶,单位:K)分布(a. 1 日, b. 3 日, c. 8 日, d. 10 日)
Fig.2 Distribution of RFI (color scale, units: K) in horizontal polarization mode of GMI over Europe in July 2020 (a. 1 July, b. 3 July, c. 8 July, d. 10 July)

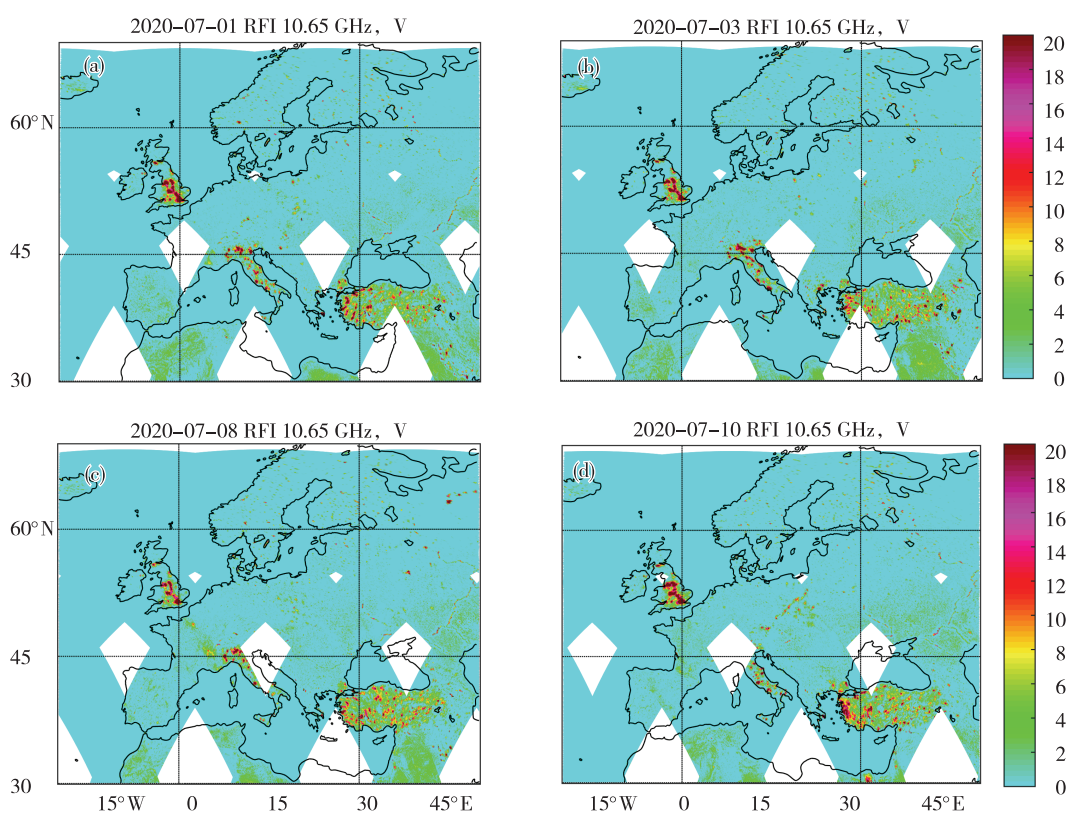


图 3 2020 年 7 月欧洲 GMI 垂直极化 RFI(色阶,单位:K)分布(a. 1 日, b. 3 日, c. 8 日, d. 10 日)
Fig.3 Distribution of RFI (color scale, units: K) in vertical polarization mode of GMI over Europe in July 2020 (a. 1 July, b. 3 July, c. 8 July, d. 10 July)

下的分布范围更大,且对于同一地区,水平极化方式下的 RFI 指数大于垂直极化方式下的 RFI 指数,同时水平极化方式下的 RFI 相比于垂直极化方式下的 RFI 更容易从其他没有被无线电信号干扰的像素点中区分出来。

3.1.1 RFI 与卫星方位角

由欧洲 2020 年 7 月 1—31 日 GMI 在两种极化方式下 10.65 GHz 的 RFI 与卫星方位角的散点关系(图 4)可以发现, $[-180^\circ, 180^\circ]$ 卫星方位角范围内,在有些方位角区间范围内 RFI 强度显著较大,如

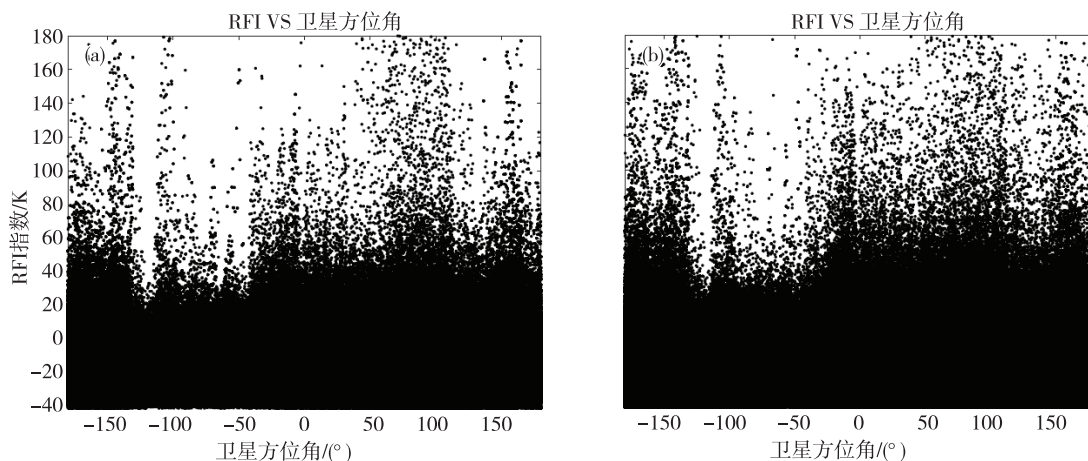


图 4 2020 年 7 月 1—31 日欧洲 10.65 GHz RFI 与卫星方位角的散点图(a.水平极化方式,b.垂直极化方式;图中的 1 个点代表 1 个 RFI 像素,下同)

Fig.4 Scatter plot of 10.65 GHz RFI and satellite azimuth over Europe from 1 to 31 July 2020 (a. horizontal polarization mode, b. vertical polarization mode; a scatter in the figure represents an RFI pixel, similarly hereinafter)

3.1.2 RFI 与太阳方位角

图 5 给出的是欧洲 2020 年 7 月 1—31 日 GMI 在两种极化方式下 10.65 GHz 的 RFI 与太阳方位角的散点关系图。由图可知,两种极化方式下太阳方位角的范围为 $[-180^\circ, -20^\circ] \cup [65^\circ, 180^\circ]$,且 RFI 信号强度随着方位角大小的变化呈现连续多个峰值。根据 2020 年 7 月 1—31 日太阳方位角在欧洲的分布(图略),发现该 31 d 内欧洲的太阳方位角是没有在 $(-20^\circ, 65^\circ)$ 内取值的,故图 5 中才会表现为空白区域。相比上文讨论的 RFI 与卫星方位角的关系,可以发现,强度大的 RFI 集中分布在较小的太阳方位角范围内。

3.1.3 RFI 与太阳天顶角

图 6 给出的是欧洲 2020 年 7 月 1—31 日 GMI 在两种极化方式下 10.65 GHz 的 RFI 与太阳天顶角的散点关系图。分析可知,当 $0 \text{ K} \leq I < 30 \text{ K}$ 时,两种极化方式下,出现 RFI 信号对应的太阳天顶角的范围为 $[7^\circ, 126^\circ]$;当 $I \geq 30 \text{ K}$ 时,两种极化方式下

$-180^\circ, -150^\circ, -100^\circ, -20^\circ, 20^\circ, 50^\circ, 100^\circ$ 和 150° 附近。由此可见,总体上,RFI 分布的卫星方位角范围比较均匀,但强度大的 RFI 分布在少量方位角区间范围内,表明卫星方位角对 RFI 的影响较大。这说明陆地表面上主动微波发射器发出的信号导致 RFI 信号的强弱和卫星的相对位置有关,即卫星只有在某些特定方位观测时才会接收到 RFI 信号,且强度大小也和方位角有关,这与参考文献[16—17]的结论一致。此外,比较图 4a、b 可以发现,水平极化方式下存在 RFI 的像素点更多,且强度更大的现象。

现 RFI 信号对应的太阳天顶角范围集中在 $[10^\circ, 115^\circ]$ 之间。对比图 6a、b 可以看出,水平极化方式下产生的 RFI 像素点多于垂直极化方式下产生的像素点。总体看来,相比于卫星方位角,RFI 指数高值出现的像素点更易出现在特定的太阳天顶角范围内,如在 $30^\circ, 50^\circ$ 和 90° 等附近。

3.2 东亚 RFI 分布

东亚地区 RFI 主要出现在我国河北、江浙一带,以及日本部分地区。图 7 给出了 2020 年 7 月 3、4、6 和 9 日典型的东亚地区 GMI 中 10.65 GHz 与 18.7 GHz 在水平极化方式下的亮温差(在垂直极化方式下的图略)。可以看出,7 月 3 日在日本境内发现强度很大且覆盖范围较广的 RFI,而我国只有少数零星的 RFI 信号分布,且水平极化方式下的 RFI 分布范围略大于垂直极化方式下的分布情况。7 月 4 日和 9 日的水平极化 RFI 分布中,我国河北、江浙一带有显著的较强 RFI 信号,而日本境内 RFI 范围较小且 RFI 指数值相对较低。总体而言,在 7 月 1—31 日

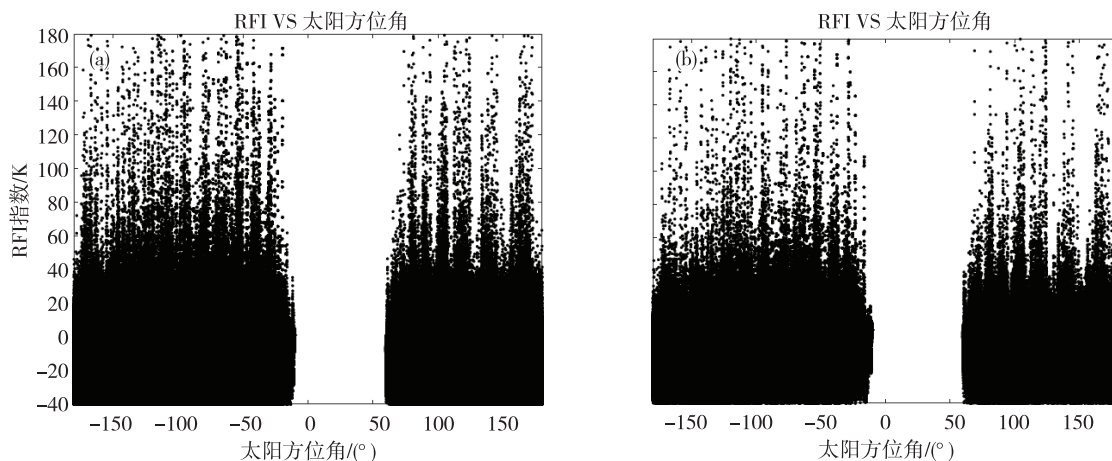


图5 2020年7月1—31日欧洲10.65 GHz RFI与太阳方位角的散点图(a.水平极化方式,b.垂直极化方式)

Fig.5 Scatter plot of 10.65 GHz RFI and solar azimuth over Europe from 1 to 31 July 2020 (a. horizontal polarization mode, b. vertical polarization mode)

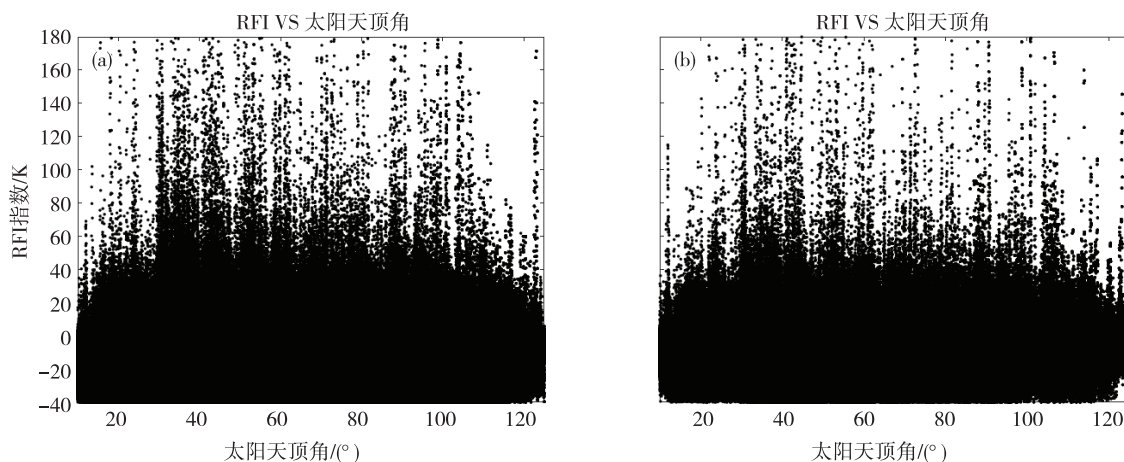


图6 2020年7月1—31日欧洲10.65 GHz RFI与太阳天顶角的散点图(a.水平极化方式,b.垂直极化方式)

Fig.6 Scatter plot of 10.65 GHz RFI and solar zenith angle over Europe from 1 to 31 July 2020 (a. horizontal polarization mode, b. vertical polarization mode)

这31 d内,该研究区域中RFI的分布范围和强度的日变化较大。

3.2.1 RFI与卫星方位角

图8给出的是东亚地区2020年7月1—31日GMI在两种极化方式下10.65 GHz的RFI与卫星方位角的散点关系图。分析可知,当 $0\text{ K} < I < 20\text{ K}$ 时,卫星方位角的范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$;当 $20\text{ K} \leq I < 30\text{ K}$ 和 $I \geq 30\text{ K}$ 时,在水平极化方式下的卫星方位角的范围仍然是 $[-180^\circ, 180^\circ]$,但在垂直极化方式下, $20\text{ K} \leq I < 30\text{ K}$ 的RFI大部分处于 $[-180^\circ, -130^\circ] \cup [-100^\circ, -75^\circ] \cup [-50^\circ, 180^\circ]$ 范围内, $I \geq 30\text{ K}$ 的RFI大部分处于 $[-180^\circ, -130^\circ] \cup [-90^\circ, -75^\circ] \cup [0^\circ, 130^\circ]$ 范围内。由总体分布来看,强度稍弱的RFI随卫星方位角分布是比较均匀

的,而强度大的RFI则出现在较为集中的卫星方位角区间范围内,特别是在垂直极化的条件下。

3.2.2 RFI与太阳方位角

图9给出的是东亚地区2020年7月1—31日GMI在两种极化方式下10.65 GHz的RFI与太阳方位角的散点关系图。由图可知,当 $0\text{ K} < I < 10\text{ K}$ 时,太阳方位角的范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$;当 $10\text{ K} \leq I < 20\text{ K}$ 时,太阳方位角的范围为 $[-180^\circ, 0^\circ] \cup [50^\circ, 180^\circ]$;当 $20\text{ K} \leq I < 30\text{ K}$ 时,水平极化方式下的太阳方位角范围是 $[-180^\circ, 0^\circ] \cup [50^\circ, 180^\circ]$,垂直极化方式下的太阳方位角范围是 $[-180^\circ, -25^\circ] \cup [60^\circ, 150^\circ]$;当 $I \geq 30\text{ K}$ 时,水平极化方式下的太阳方位角范围是 $[-150^\circ, -10^\circ] \cup [50^\circ, 150^\circ]$,垂直极化方式下的太阳方位角范围是 $[-150^\circ, -25^\circ] \cup [50^\circ,$

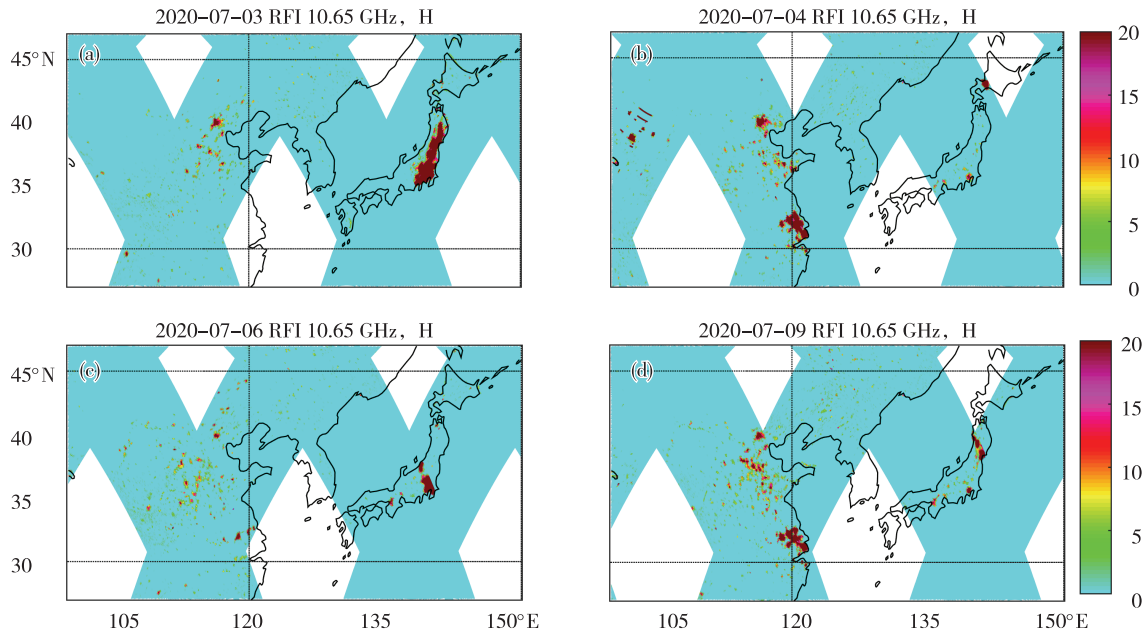


图7 2020年7月东亚GMI水平极化RFI(色阶,单位:K)分布(a. 3日, b. 4日, c. 6日, d. 9日)

Fig.7 Distribution of RFI (color scale, units: K) in horizontal polarization mode of GMI over East Asia in July 2020 (a. 3 July, b. 4 July, c. 6 July, d. 9 July)

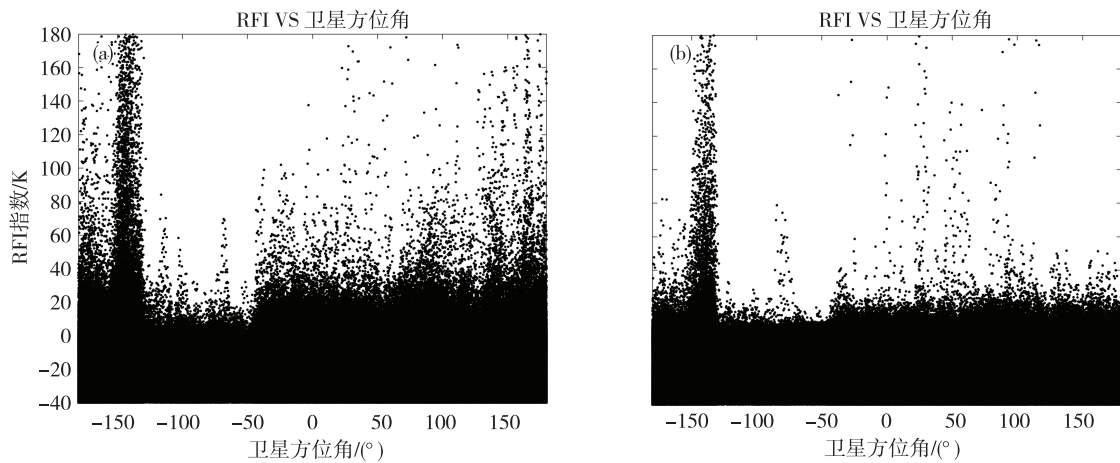


图8 2020年7月1—31日东亚地区10.65 GHz RFI与卫星方位角的散点图(a.水平极化方式,b.垂直极化方式)

Fig.8 Scatter plot of 10.65 GHz RFI and satellite azimuth over East Asia from 1 to 31 July 2020 (a. horizontal polarization mode, b. vertical polarization mode)

100°]。由此可以看出,当 RFI 强度较大时,水平极化方式下的太阳方位角范围大于垂直极化方式下的太阳方位角范围。相比于 RFI 与卫星方位角的关系,强 RFI 随太阳方位角的分布更为集中。

3.2.3 RFI 与太阳天顶角

图 10 给出的是东亚地区 2020 年 7 月 1—31 日 GMI 在两种极化方式下 10.65 GHz 的 RFI 与太阳天顶角的散点关系图。分析可知,两种不同的极化方式下:当 $0\text{ K} < I < 5\text{ K}$ 时,太阳天顶角的范围均为 $[0^\circ, 130^\circ]$;当 $5\text{ K} \leq I < 10\text{ K}$ 时,太阳天顶角的范围为

$[3^\circ, 126^\circ]$;当 $10\text{ K} \leq I < 20\text{ K}$ 时,太阳天顶角的范围为 $[3^\circ, 120^\circ]$;当 $I \geq 20\text{ K}$ 时,太阳天顶角的范围是 $[9^\circ, 120^\circ]$ 。与太阳方位角的关系相类似,RFI 信号强度随着太阳天顶角大小的变化也呈现连续多个峰值。此外,对比图 10a、b 可以发现,在水平极化方式下强 RFI 指数值的像素点明显多于垂直极化方式下的数量,且水平极化方式下强 RFI 的像素点太阳天顶角分布的范围也比垂直极化方式下的更广。

3.3 南美 RFI 分布

用类似的方法分析南美地区(图略),7月1—

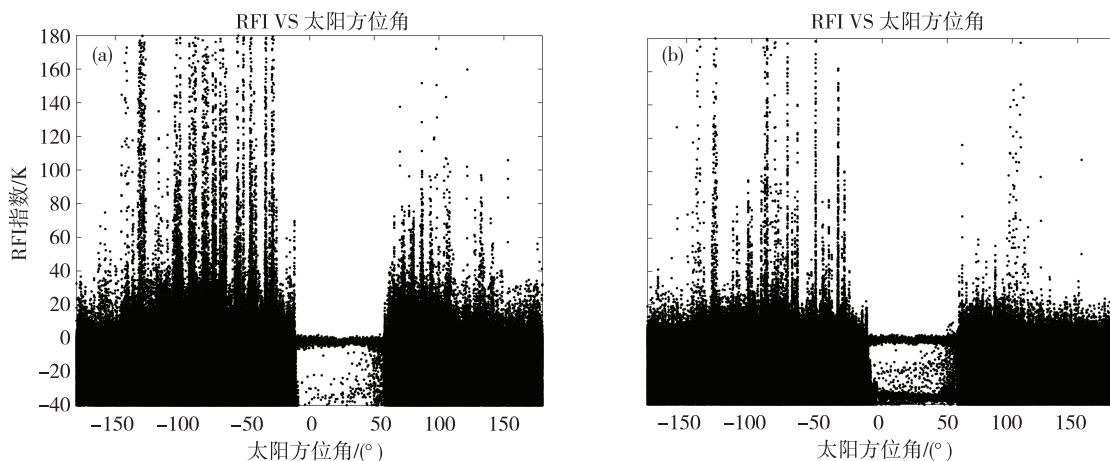


图 9 2020 年 7 月 1—31 日东亚地区 10.65 GHz RFI 与太阳方位角的散点图(a.水平极化方式,b.垂直极化方式)

Fig.9 Scatter plot of 10.65 GHz RFI and solar azimuth over East Asia from 1 to 31 July 2020 (a. horizontal polarization mode, b. vertical polarization mode)

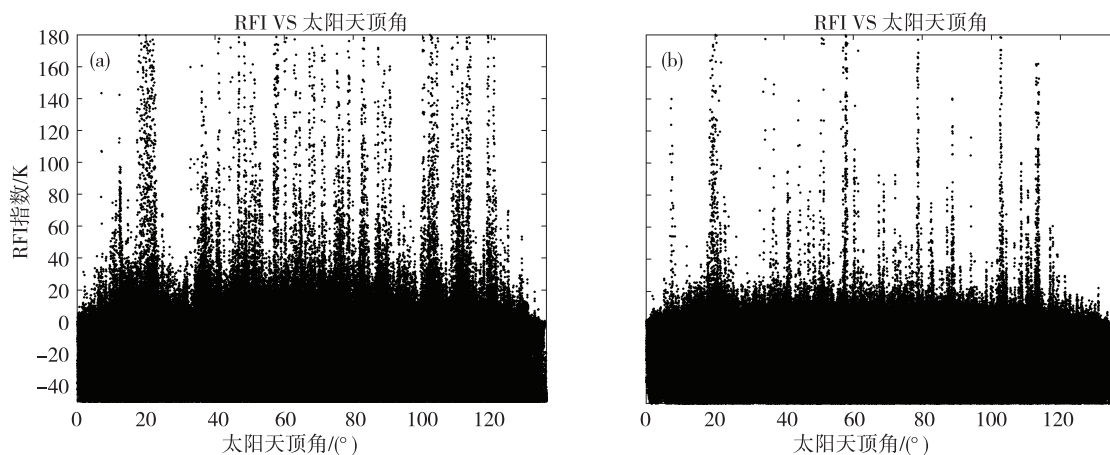


图 10 2020 年 7 月 1—31 日东亚地区 10.65 GHz RFI 与太阳天顶角的散点图(a.水平极化方式,b.垂直极化方式)

Fig.10 Scatter plot of 10.65 GHz RFI and solar zenith angle over East Asia from 1 to 31 July 2020 (a. horizontal polarization mode, b. vertical polarization mode)

31 日,南美洲阿根廷南部地区出现了一定范围的 RFI,但与欧洲和东亚地区出现的 RFI 比较,南美的 RFI 的强度相对较小,谱差值处于 9~15 K 范围内。此外,与欧洲和东亚地区具备相似分布特点,即水平极化方式下 RFI 的分布范围比垂直极化方式下更广一些,且强 RFI 信号的像素点更明显突出。如,根据 7 月 2 日两种极化方式下的 RFI 分布,发现在水平极化通道中,巴拉圭东部地区出现几个孤立的棕色点,但其在垂直极化方式通道中不是很明显。对比 7 月 10 日的 RFI 分布也可以得出相同的结论。

由 RFI 与卫星方位角的散点关系(图略)可知,当 $0\text{ K} < I < 20\text{ K}$ 时,两种极化方式下的卫星方位角范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$;当 $20\text{ K} \leq I < 30\text{ K}$ 和 $I \geq 30\text{ K}$ 时,在水平极化方式下的卫星方位角范围仍然是

$[-180^\circ, 180^\circ]$,但在垂直极化方式下, $20\text{ K} \leq I < 30\text{ K}$ 的 RFI 大部分处于 $[-180^\circ, -150^\circ] \cup [-100^\circ, 20^\circ] \cup [50^\circ, 180^\circ]$ 范围内。当 $20\text{ K} \leq I \leq 40\text{ K}$ 时,可以明显发现水平极化方式下该区域内 RFI 的像素点总数多于在垂直极化方式下的像素点总数,且水平极化方式下 RFI 随卫星方位角分布较为均匀,但垂直极化方式下 RFI 集中在较小卫星方位角范围内。

由 RFI 与太阳方位角的散点关系(图略)可知,当 $0\text{ K} < I < 10\text{ K}$ 时,两种极化方式下的太阳方位角范围均为 $[-180^\circ, 180^\circ]$;当 $10\text{ K} \leq I < 20\text{ K}$ 时,水平极化方式下的太阳方位角范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$,垂直极化方式下的太阳方位角范围为 $[-180^\circ, 70^\circ] \cup [100^\circ, 180^\circ]$;当 $20\text{ K} \leq I < 30\text{ K}$ 时,水平极化方式下

的太阳方位角范围是 $[-180^{\circ}, 60^{\circ}] \cup [100^{\circ}, 180^{\circ}]$, 垂直极化方式下的太阳方位角范围是 $[-20^{\circ}, 70^{\circ}] \cup [100^{\circ}, 120^{\circ}]$; 当 $I \geq 30$ K 时, 水平极化方式下的太阳方位角范围是 $[-180^{\circ}, 60^{\circ}] \cup [110^{\circ}, 180^{\circ}]$, 垂直极化方式下的太阳方位角范围是 $[0^{\circ}, 20^{\circ}]$ 。与 RFI 随卫星方位角分布相比, RFI 随太阳方位角的分布较为集中。

由 RFI 与太阳天顶角的散点关系(图略)可知, 当 $0 \text{ K} < I < 5 \text{ K}$ 时, 两种不同的极化方式下, 太阳天顶角的范围均为 $[0^{\circ}, 97^{\circ}] \cup [103^{\circ}, 106^{\circ}] \cup [120^{\circ}, 180^{\circ}]$; 当 $5 \text{ K} \leq I < 10 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下的太阳天顶角范围和 $0 \text{ K} < I < 5 \text{ K}$ 时的一致, 垂直极化方式下的太阳天顶角范围为 $[0^{\circ}, 97^{\circ}] \cup [103^{\circ}, 106^{\circ}] \cup [123^{\circ}, 180^{\circ}]$; 当 $10 \text{ K} \leq I < 20 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下的太阳天顶角范围和 $0 \text{ K} < I < 5 \text{ K}$ 时的一致, 垂直极化方式下的太阳天顶角范围为 $[20^{\circ}, 97^{\circ}] \cup [103^{\circ}, 105^{\circ}] \cup [123^{\circ}, 124^{\circ}] \cup [130^{\circ}, 180^{\circ}]$; 当 $20 \text{ K} \leq I < 30 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下的太阳天顶角范围是 $[20^{\circ}, 97^{\circ}] \cup [103^{\circ}, 106^{\circ}] \cup [120^{\circ}, 180^{\circ}]$, 垂直极化方式下的太阳天顶角范围为 $[20^{\circ}, 97^{\circ}] \cup [123^{\circ}, 124^{\circ}] \cup [130^{\circ}, 180^{\circ}]$; 当 $I \geq 30 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下的太阳天顶角范围是 $[20^{\circ}, 97^{\circ}] \cup [103^{\circ},$

$104^{\circ}] \cup [136^{\circ}, 180^{\circ}]$, 垂直极化方式下的太阳天顶角范围为 $[140^{\circ}, 142^{\circ}]$ 。这期间太阳天顶角在 $[105^{\circ}, 120^{\circ}]$ 之间不存在 RFI 指数大于零的像素, 即在该范围中的亮温资料没有被无线电信号所干扰。

在 3 个研究区域中, 按 RFI 强度进行分段统计, 得到表 2 的显示结果。可以看出, 对于欧洲来说, 当 $0 \text{ K} < I < 5 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下 RFI 像素点的占比达到 4.19%, 垂直极化方式下 RFI 像素点的占比达到 20.88%, 表明垂直极化方式下 RFI 像素点占比远远大于水平极化方式下的占比; 而当 $5 \text{ K} \leq I < 10 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下 RFI 像素点的占比为 0.89%, 垂直极化方式下 RFI 像素点的占比为 0.72%, 即水平极化方式下的 RFI 像素点占比大于垂直极化极化方式下的占比; 且 RFI 信号越强, 两种极化方式下 RFI 像素点占比的差距越大。南美地区也有类似的特征。对于东亚地区, 当 $0 \text{ K} < I < 10 \text{ K}$ 时, 垂直极化方式下的 RFI 像素点占比大于水平极化方式下 RFI 像素点的占比; 而当 $I \geq 10 \text{ K}$ 时, 水平极化方式下的 RFI 像素点占比大于垂直极化方式下的占比; 同样, RFI 信号越强, 两种极化方式下 RFI 像素点占比的差距越大。

表 2 不同地区、不同强度 RFI 的像素点百分比统计
Table 2 Percentage statistics of RFI pixels with different intensities in different regions

RFI 指数/K	RFI 像素点/总点数/%					
	欧洲		东亚		南美	
	H	V	H	V	H	V
$0 < I < 5$	4.19	20.880	6.360	21.350 00	1.590 0	4.150 000
$5 \leq I < 10$	0.89	0.720	4.800	8.320 00	0.120 0	0.077 000
$10 \leq I < 20$	0.56	0.280	0.200	0.190 00	0.071 0	0.020 000
$20 \leq I < 30$	0.19	0.066	0.061	0.014 00	0.013 0	0.000 940
$I \geq 30$	0.12	0.028	0.016	0.000 97	0.001 9	0.000 037

4 结论

使用 GMI 一级亮温数据, 运用谱差算法对欧洲、东亚和南美 3 个主要典型区域陆地的 RFI 信号进行识别, 根据所识别的结果进一步对 RFI 的影响因子进行分析与讨论, 得出以下结论:

(1) 不同极化方式下的亮温资料中, RFI 信号具有明显的差异, 水平极化方式下的 RFI 污染区域的范围比垂直极化方式下的范围更广, 且 RFI 强度更大。

(2) RFI 信号的数量和强度与卫星方位角、太阳

方位角和太阳天顶角有着不同程度的相关性。对于欧洲和南美地区, 相对于强 RFI 信号分布的较宽的卫星方位角区间, 存在 RFI 的像素点对应的太阳方位角和太阳天顶角角度区间范围较为集中, 且呈现出明显的峰型。对于东亚地区, RFI 与卫星方位角、太阳方位角以及太阳天顶角关系都较为密切, 存在 RFI 的像素点对应的角度均显著集中于小范围区间, 且也呈现出明显的峰型。因此, 这 3 个因子对 RFI 信号的强度都有一定程度的影响。

(3) 当 $0 \text{ K} < I < 5 \text{ K}$ 时, 3 个主要研究区域的垂直极化方式下产生的 RFI 像素点远多于水平极化方式

下的 RFI 像素点;但是随着 RFI 的强度增强,当 $I \geq 5$ K(欧洲和南美)或 $I \geq 10$ K(东亚)时,水平极化方式下产生的 RFI 像素点多于垂直极化方式下的 RFI 像素点;而且 RFI 信号越强,两种极化方式下 RFI 像素点占比的差距越大;对于同一研究区域同一极化方式来说,RFI 的强度越大,所占比例越小,即较大 RFI 指数的像素点数量随着 RFI 强度的增大而减少。

此外,需要注意的一点是,GMI 的 10.65 GHz 和 18.7 GHz 通道虽然对大雨和中雨比较敏感,但其观测值也受下垫面、是否有降水过程等的影响。本研究在用这两个波段计算 RFI 指数,分析卫星方位角、太阳方位角和太阳天顶角在不同地区对 RFI 的影响时,应该探讨该过程中是否有降水过程的影响,因而在之后的工作中会选取更长尺度的样本进行相关的研究,并探讨降水等对其的影响。

参考文献:

- [1] 王烁,张佃国,郭学良,等.利用机载探测设备研究云中零度层附近云雷达反射率与液态含水量的关系[J].海洋气象学报,2020,40(2):103-112.
- [2] 李晓东,盛立芳,邱静怡,等.西太平洋中南部冬季悬空波导统计分析及其成因初探[J].海洋气象学报,2017,37(2):51-56.
- [3] 宫庆龙,刁一娜.冷空气过程对黄海东海区域海洋大气边界层结构影响的个例分析[J].海洋气象学报,2018,38(1):51-61.
- [4] 张秋晨,龚佃利,冯俊杰.RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计反演产品评估[J].海洋气象学报,2017,37(1):104-110.
- [5] 王洪,雷恒池,杨超,等.济南地区大气可降水量三种观测反演资料的对比分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):83-89.
- [6] LI L, NJOKU E G, IM E, 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.
- [7] 吴莹,姜苏麟,钱博,等.星载微波资料频率干扰信号识别研究综述[J].地球物理学进展,2017,32(5):1944-1952.
- [8] 官莉,李晟祺.星载微波成像仪无线电频率干扰软件识别算法综述[J].电波科学学报,2020,35(2):280-291.
- [9] WU Y, WENG F Z. Applications of an AMSR-E RFI detection and correction algorithm in 1-DVAR over land[J]. J Meteor Res, 2014, 28(4):645-655.
- [10] 冯呈呈.微波辐射计数据中无线电频率干扰识别及其对地表土壤湿度反演影响[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [11] 吴莹,姜苏麟,王振会.无线电频率干扰对 MWRI 资料反演地表温度的影响[J].国土资源遥感,2018,30(4):90-96.
- [12] 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 Trans Geosci Remote Sens, 2005, 43(5):938-947.
- [13] LI L, GAISER P W, BETTENHAUSEN M H, 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.
- [14] ZOU X L, ZHAO J, WENG F Z, 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.
- [15] ZHAO J, ZOU X L, WENG F Z. WindSat radio-frequency interference signature and its identification over Greenland and Antarctic[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2013, 51(9):4830-4839.
- [16] 官莉,张思勃.星载微波辐射计欧洲大陆无线电频率干扰分析[J].光学学报,2014,34(7):277-283.
- [17] WU Y, QIAN B, BAO Y S, et al. Detection and analysis of C-band radio frequency interference in AMSR2 data over land[J]. Remote Sens, 2019, 11(10):1228.
- [18] DRAPER D W, NEWELL D A, WENTZ F J, et al. The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): instrument overview and early on-orbit performance[J]. IEEE J-STARS, 2015, 8(7):3452-3462.
- [19] XUE Q M, GUAN L. Identification of sun glint contamination in GMI measurements over the global ocean[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2019, 57(9):6473-6483.
- [20] 唐国强,万玮,曾子悦,等.全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J].遥感技术与应用,2015,30(4):607-615.
- [21] 李芳,李南,万瑜.台风“温比亚”影响山东期间 GPM 资料的降水分析[J].海洋气象学报,2020,40(4):69-76.
- [22] 卢美圻.GPM/DPR 星载双频雷达探测降水的敏感性与差异性分析[D].南京:南京信息工程大学,2017.
- [23] 余占猷.利用 DPR 和 GMI 探测结果对东亚降水云的个例分析研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
- [24] WU Y, WENG F Z. Detection and correction of AMSR-E radio-frequency interference[J]. Acta Meteor Sinica, 2011, 25(5):669-681.