

文章编号: 2095-4980(2016)02-0180-06

亚毫米波冰云成像仪通道选择

何杰颖^{a,b}, 张升伟^{a,b}

(中国科学院 a.空间科学与应用研究中心; b.微波遥感技术重点实验室, 北京 100190)

摘要:依据冰云参数的多极化多散射大气亚毫米波辐射传输模型,分析了 100 GHz~1 000 GHz 频段内大气卷云吸收的特性,通过通道频率和带宽的不同设置,确定亚毫米波冰云成像探测仪包含 15 个通道,频率覆盖范围为 118 GHz~900 GHz,建立其与遥感器通道灵敏度、定标精确度、不同地理位置和海拔高度上对流层卷云中冰水总量、冰晶粒子尺寸、形状、方向性等反演参数的约束模型,为设计和研制用于测量冰云参数的星载亚毫米波成像仪提供理论分析和仿真验证。

关键词:冰云; 亚毫米波; 辐射传输; 风云三号卫星微波湿温探测仪; 粒子尺寸

中图分类号: TN62

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0180

Channel selection of sub-millimeter ice-cloud sounder

HE Jieying^{a,b}, ZHANG Shengwei^{a,b}

(a.Center for Space Science and Applied Research; b.Key Laboratory of Microwave Remote Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the characteristics of multi-polar and multi-scattering for ice-cloud, the appropriate sub-millimeter atmospheric radiative transfer model is used to analyze the absorption and scattering of atmosphere from 100 GHz–1 000 GHz. The relationship between the sensitivity/calibration accuracy and channel specifications of sub-millimeter ice-cloud imager is analyzed, such as frequency, bandwidth, dual-band and polarization type settings, and then a 15-channel ice cloud imager which covers the frequencies from 118 GHz–900 GHz is proposed. The limitations of the parameter retrievals' accuracy of ice-clouds distributed in different regions and at different heights in the troposphere are considered, because different geographic locations and altitudes can result in a significantly difference for total ice, ice particle size, shape and direction of ice-clouds. Finally, the specific indicators which will play a vital part in designing the sub-millimeter ice-imager onboard Chinese satellite are proposed.

Key words: ice-cloud; sub-millimeter; radiative transfer; FengYun-3C Microwave Humidity and Temperature Sounder(FY-3C MWHTS); particle size

大气中的卷云在地球-大气系统中发挥了重要作用,且随时间和地点剧烈变化,主要依赖于云的水平范围、垂直位置、冰粒子尺寸和形状分布影响大气^[1-2]。星载可见光和红外探测仪可用来检测卷云存在与否及确定云顶高度、光学厚度、粒子尺寸,但仅适用于半透明的卷云;星载激光雷达可穿透卷云,但覆盖范围具有局限性^[3]。

亚毫米波冰云成像仪具有宽刈幅,专注于研究区域尺度内上对流层的冰云,能实现每日全球覆盖。目前国际上静止和极轨气象卫星还未搭载过用于冰云探测的太赫兹被动遥感仪器。设计和研制亚毫米波冰云遥感器^[4]的关键技术是选择能最大限度观测和分辨冰云参数信息的亚毫米波通道中心频率、通道数目、带宽、极化方式等,且同时兼顾大气辐射背景测量以及避免臭氧谐振的影响,从而保证系统指标性能和冰云参数反演精确度。

1 卷云大气辐射传输模型

本文采用开放的大气辐射传输仿真软件(ARTS)用于 1 GHz~1 000 GHz 范围内的大气辐射传输模拟^[5],把不同大气卷云粒子的散射特性加入 ARTS 模型中,重点分析不同波段粒子形状、分布方向等引起的大气辐射的极化差

异, 及其与卷云参数之间的关系, 以及遥感测量的仿真和遥感反演中雅克比的计算, 同时精确仿真宽带辐射通量。

图1是1 GHz~1 000 GHz微波和亚毫米波大气波谱, 亚毫米波成像仪通道选择下列能够提供冰晶廓线的吸收线中心位置: 118 GHz, 氧气吸收通道不仅能反映各层温度的分布, 还对云中冰态粒子的存在有探测能力; 183 GHz, 对薄卷云相对不敏感; 325 GHz可替代 183 GHz, 但受卷云影响更大, 冰粒子是弱的吸收体, 发射非常小的亚毫米波辐射, 使卷云的物理温度对辐射测量影响很小。在该波段, 波长与卷云中冰粒子的尺寸相当, 散射过程满足 Rayleigh 和 Mie 散射, 因此卷云的消光和辐射信号正比于冰粒子的体积(质量), 同样对冰粒子的尺寸和形状非常敏感。380 GHz, 对卷云很敏感, 可用于上对流层的湿度探测。448 GHz 与 380 GHz 探测能力相当, 但对低对流层的覆盖相对较差; 683 GHz 和 874 GHz, 对于稀薄的卷云非常敏感, 空间分辨力更高。

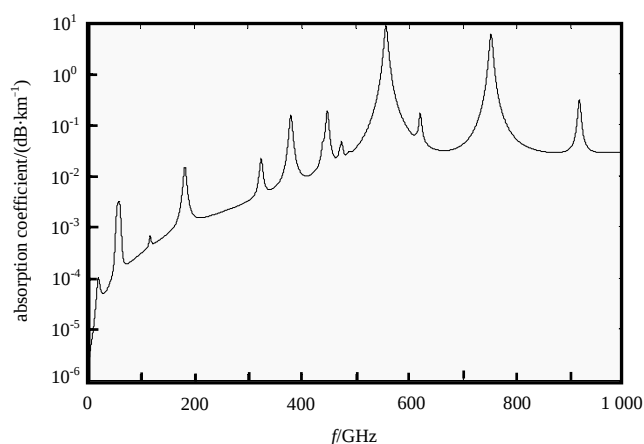


Fig.1 Atmospheric absorption spectrum of microwave and sub-millimeter wave

图1 微波和亚毫米波大气波谱

2 亚毫米波冰云成像仪通道选择

通道选择是大气特征高度、系统灵敏度、硬件技术可行性和通带物理特性等的折衷。为了更好地反演卷云的3个参数(冰水路径、冰晶粒子尺寸和直径), 亚毫米波成像仪需选择适合的通道。选择适当通道有一些基本原则: a) 选择的通道应有相似的辐射, 权重函数覆盖很宽范围的频率; b) 利用双频带外差接收机, 本振频率在水汽谱线附近, 对指定接收机, 为了获得多通道, 中间频率的权重函数峰值分布在不同高度; c) 尽可能避免臭氧的干扰; d) 选择最优的带宽以在保证权重函数足够窄时具有低噪声。亚毫米波冰云成像仪通道选择将针对不同大气样本数据源对通道频率、带宽、极化方式等作进一步分析。

2.1 大气样本数据源

模拟大气辐射传输过程需要大气廓线样本。为了便于探讨在毫米/亚毫米波段微波探测的最佳频率或最佳频点组合, 反演大气卷云参数, 有必要建立全球的大气廓线样本库以及典型区域个例, 包括大气的温度、湿度廓线, 臭氧和其他痕量气体含量, 以及确定大气的分层和大气层顶高度和冰云参数(如水汽含量、中等粒子尺寸和表面发射率)等。

样本1采用了欧洲中尺度数值预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)样本库^[6], 包括13 495条探空廓线, 变量有气压、温度、水汽、臭氧以及地面参数, 覆盖全球陆地和海洋, 其中海洋3 962条, 包括60层高度的压强、温度、水汽、臭氧、云覆盖、云中液态水和积分水汽。样本2采用ECMWF提供的全球网格数据, 分辨力为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 包括全球分布的经纬度、气压分布层(37层)、时间和变量, 其中变量包括温湿度廓线、臭氧含量、云覆盖情况、积分水汽和云中液态水、风向等参数。

样本3为台风个例数据库, 天气研究预报(Weather Research Forecast, WRF)模式系统是由美国研究部门及大学的科学家共同参与开发研究的新一代中尺度预报模式和同化系统^[7-8]。WRF模式不仅可以用于真实天气的个案模拟, 也可以用其包含的模块组作为基本物理过程探讨的理论根据。

2.2 通道频率的选择

对于对地观测的下视辐射计, 卷云与冰水路径紧密相关, 卷云包含不同形状和尺寸的冰晶粒子, 冰晶的平均尺寸可以根据2个频率处亮温凹陷的比率进行估计。对于2个正交极化通道, 水平方向非球冰粒子可用来确定冰粒子形状。

通过数值模拟可知, 用于测量卷云的亚毫米波辐射计应当包含183 GHz通道用来确定大气背景的辐射。同时, 考虑到权重函数分布, 且要避免臭氧振动谱线, 保证权重函数分布在不同高度, 亚毫米波成像仪频率推荐为: 118 GHz, 183 GHz, 325 GHz, 448 GHz, 683 GHz 和 874 GHz。图2给出了亚毫米波通道选择的位置, 接收机中心频率覆盖了很大的频谱范围。

根据不同频率时大气吸收和衰减的特点, 结合大气中冰云的辐射传输和散射特性, 下文着重对中心频率为

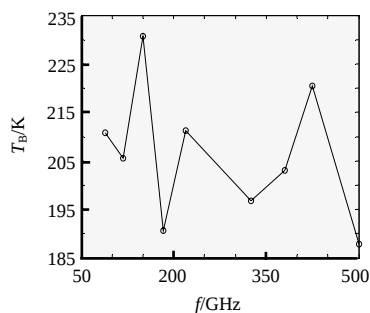
118.75 GHz, 183.31 GHz, 325.15 GHz, 448 GHz, 以及窗区 682.95 GHz, 874.38 GHz 频率进行了分析。在水汽吸收峰附近增加的额外通道可以延续高度的覆盖范围: 118.75 GHz 和 183.31 GHz 远翼通道的微波辐射亮温受云雨粒子影响显著, 通道用于提供水汽背景信息, 吸收峰值附近权重函数峰值高度分布在对流层, 穿透性较强, 具有对云中液态和冰态粒子的探测能力; 325.15 GHz 进一步拓展了测量高度范围; 接近 448 GHz 的通道用于测量高度高的范围。利用样本 3 中典型台风区域冰云存在情况下, 冰水总量为 50 mm, 考虑样本廓线中冰粒子尺寸、形状, 50 GHz~500 GHz 范围内上述中心频点的亮温值分布以及双极化亮温差如图 3 所示。

其中, 183.31 GHz, 325.15 GHz, 448 GHz, 682.95 GHz, 874.38 GHz 探测频点是目前国际上论证的焦点, 欧空局对此进行过相关论证, 本文采用的是 118.75 GHz 附近探测通道。

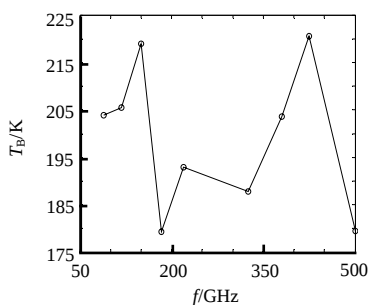
我国新一代极轨气象卫星 FY-3C 星上装载的新型 MWHTS 首次搭载 118 GHz 频点探测通道, 与 183.31 GHz 探测通道联合工作^[9-11]。118.75 GHz 通道的上行辐射亮温同样也受到冰态粒子的影响, 显示了 118.75 GHz 氧气吸收通道不仅能反映各层温度的分布, 还对云中冰态粒子的存在有探测能力。183 GHz 作为湿度探测通道, 其远翼通道也具有探测云中冰态水凝物的潜能。

同时, 液态粒子的存在对 118 GHz 的远翼通道亮温产生了明显影响, 对吸收峰附近亮温影响较小, 118.75 GHz ± 5 GHz 的亮温随中层雨水含量的增加下降了约 4.5 K, 即此通道能够反映出云雨大气中层云水和雨水含量的变化。冰态水凝物的散射作用会对 118 GHz 和 183 GHz 主探测通道的亮温产生影响, 尤其是中层雪粒子的增加使得 118.75 GHz ± 5 GHz 探测亮温下降约 10 K, 可用于探测大气中的雪晶粒子。

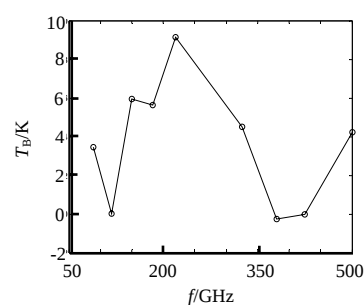
通过搭载于 FY-3C 卫星的探测仪 MWHTS 在轨测试数据证实, 118.75 GHz 具有冰云探测的能力, 技术成熟, 因此, 118.75 GHz 是冰云探测的重要备选通道。



(a) brightness temperature of vertical polarization(V)



(b) brightness temperature of horizontal polarization(H)



(c) difference of brightness temperatures(V-H)

Fig.3 Brightness temperatures of 50 GHz~500 GHz dual-polarization channels

图 3 50 GHz~500 GHz 双极化通道亮温分布及亮温差分布

2.3 通道极化方式的选择

对于窗区 682.95 GHz 和 874.38 GHz, 是否采用双极化通道与硬件实现、反演数据精确度有关。通过 FY-3C MWHTS 业务运行结果可知, 窗区通道采用双极化可增加近地表信息量的获取, 提高地表参数的反演精确度。

选取窗区通道的目的是利用其大气透过率高, 可探测到近地表大气参数的优势, 为冰云探测提供有效的背景信息。水平和垂直极化获取的辐射量信息具有明显差异, 见图 4。对于 682.95 GHz 和 874.38 GHz, 通过双通道极化差异的敏感性分析, 可提高冰云参数反演精确度, 选其一则选择 682.95 GHz。通过样本 2 和样本 3 形成训练样本库和性能评估样本库, 建立大气冰云反演算法, 验证 874.38 GHz 双极化通道的必要性, 如图 5 所示。结合欧洲相关科学家对于可见冰云成像仪反演精确度的验证^[2,12], 可以证明 874.38 GHz 采用双极化通道设置具有重要意义。

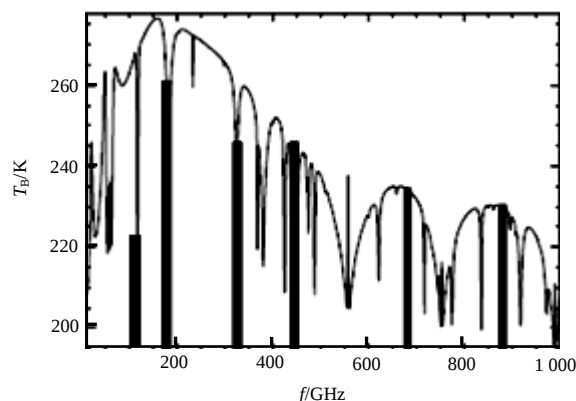


Fig.2 Distribution of radiative transfer for ground-based radiometer(the black columns note the recommended frequencies)

图 2 星载辐射计晴空辐射谱, 标注频率为亚毫米波推荐频率

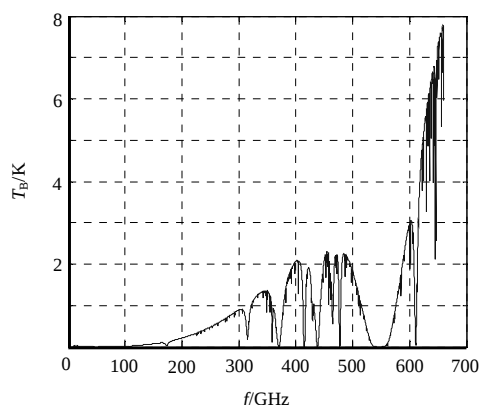


Fig.4 Difference of dual-polarization channels for 200 GHz–660 GHz

图 4 200 GHz~660 GHz 极化通道仿真亮温值差异

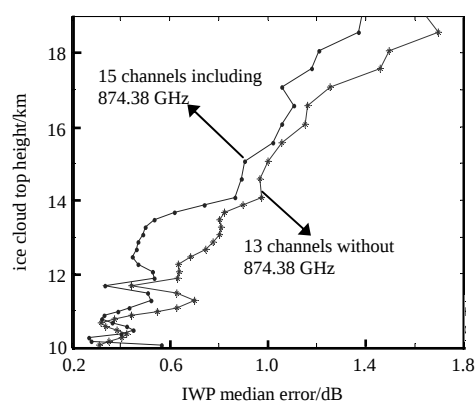


Fig.5 Comparison of IWP and median size retrievals of ice whether using 874.38 GHz

图 5 874 GHz 通道对反演冰云路径和冰粒子尺寸的影响

2.4 单双边带的选择

通道带宽选择主要受限于数据应用对系统灵敏度,即卷云参数反演精确度的要求。通道设置为双边带,表现为在吸收带基本对称的条件下,在气体吸收峰值左右对称位置选择一对探测频点共同构成一个探测通道。优势是可以提高仪器的灵敏度,抑制频率漂移对接收辐射量的影响。但无论是氧气吸收带还是水汽吸收带都不可能完全对称,因此探讨在吸收带内通道中心频率左右,带宽值既能满足硬件技术要求又能满足数据应用对灵敏度的要求。

对于所选中心频率 183 GHz, 325 GHz, 448 GHz, 亮温仿真值可知,一定带宽内吸收谱线基本对称,可根据实际情况设置为双边带。对于 183 GHz,双边带范围在 8.5 GHz 以内; 325 GHz 双边带范围在 6 GHz 以内; 448 GHz 双边带范围在 8 GHz 以内,吸收带基本对称。对于 118.75 GHz,针对干洁大气,利用 MPM93 模型仿真的大气吸收系数如图 6 所示^[13]。在 118.75 GHz $\pm$ 5 GHz 范围内,大气吸收系数是近似对称的,且随着频率远离谱线中心而逐渐减小。

针对冰云存在的大气真实廓线, 118.75 GHz $\pm$ 5 GHz 范围内,大气系数见图 6(b)。可见,在冰云存在的真实大气情况下, 118.75 GHz 仍具有较好的准对称性,不对称性对冰云探测影响较小。通过对其他可选通道做相似分析,可得出相同结论,在此不再赘述。

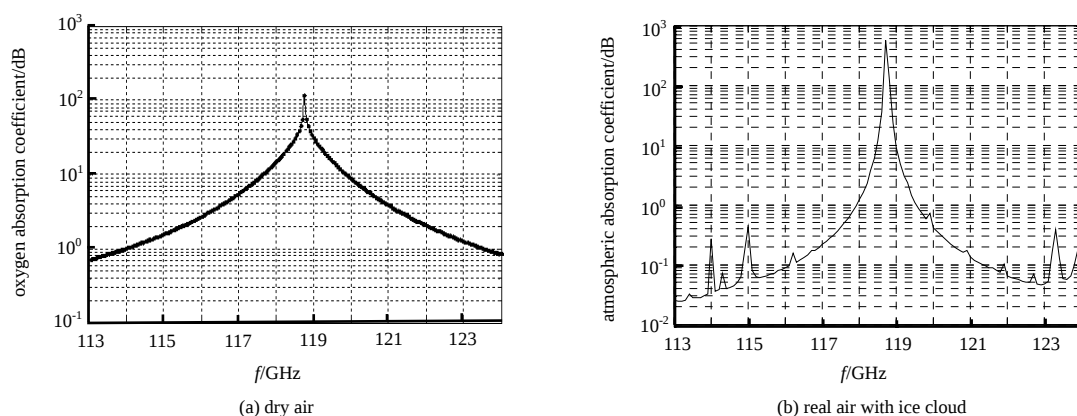


Fig.6 Atmospheric absorption coefficients near 118.75 GHz

图 6 118 GHz 附近大气吸收系数

辐射计灵敏度与接收机噪声温度、通道带宽、积分时间和天线接收到的目标亮度温度有关。在接收机噪声系数一定的情况下,带宽越宽,积分时间越长,灵敏度越好。同时,观测目标的亮温越低,灵敏度越好;观测目标的亮温越高,灵敏度越差。这取决于冰云粒子尺寸、形状等。由于大气对微波传输的衰减随频率变化,接收通道带宽的选取应结合冰云反演精确度进行合理折中。窗区 683 GHz 和 874 GHz, 6 GHz 带宽以内,满足卷云参数反演精确度的需求^[14-15],带宽范围的设置较宽松,可参考硬件实际技术水平选取带宽。

2.5 冰云成像仪通道设置

根据上述关于冰云探测仪探测频率、极化方式、通道单双边带设置及带宽等讨论,对于我国研制的亚毫米波冰云成像仪的通道设计指标建议如表 1 所示。

表 1 亚毫米波冰云成像仪的通道设计指标
Table1 Channel design and specifications of sub-millimeter ice cloud sounder

center frequency/GHz	bandwidth/MHz	stability/MHz	polarization	number of band	sensitivity/K	calibration accuracy/K
118.75±2.50	1 000	30	H	2	0.50	1.00
118.75±3.00	1 000	30	H	2	0.50	1.00
118.75±5.00	2 000	30	H	2	0.50	1.00
183.31±1.00	1 000	30	H	2	0.50	1.00
183.31±3.00	1 000	30	H	2	0.50	1.00
183.31±7.00	2 000	30	H	2	0.50	1.00
325.15±2.00	1 500	30	H	2	0.80	1.20
325.15±5.00	1 500	30	H	2	0.80	1.20
448.00±1.00	3 000	30	H	2	0.80	1.20
448.00±3.00	3 000	30	H	2	0.80	1.20
448.00±7.00	3 000	30	H	2	0.80	1.20
682.96	5 000	50	V	1	1.00	1.50
682.96	5 000	50	H	1	1.00	1.50
874.38	5 000	50	V	1	1.00	1.50
874.38	5 000	50	H	1	1.00	1.50

3 结论

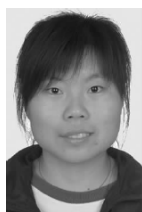
本文立足于国际前沿发展领域,在现有关于亚毫米波通道选择和大气参数反演研究的技术积累和型号任务验证下,根据 100 GHz~1 000 GHz 频段内大气卷云吸收的特性,通过对比和分析不同频率和带宽的亚毫米波成像仪通道,建立其与遥感器通道灵敏度,定标精确度,不同地理位置和海拔高度上对流层卷云中冰水总量、冰晶粒子尺寸、形状、方向性等反演参数的约束模型^[16],开展的工作对我国自主研制亚毫米波冰云成像仪具有重要意义,为遥感器的系统设计指标提供理论分析和仿真实验验证。

参考文献:

- [1] EMDE C,BUEHLER S A,ERIKSSON P,et al. The effect of cirrus clouds on microwave limb radiances[J]. Atmospheric Research, 2004,72(1\2\3\4):383-401.
- [2] BUEHLER S A,Jiménez C,EVANS K F,et al. A concept for a satellite mission to measure cloud ice water path,ice particle size,and cloud altitude[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2007,133(S2):109-128.
- [3] 韩丁,严卫,叶晶,等. 基于 CloudSat 卫星资料分析东太平洋台风的云、降水和热力结构特征[J]. 大气科学, 2013,37(3): 691-704. (HAN Ding,YAN Wei,YE Jing,et al. Analyzing cloud,precipitation,and thermal structure characteristics of typhoons in eastern Pacific based on CloudSat satellite data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013,37(3): 691-704.)
- [4] MIAO J,JOHNSEN K P,BUEHLER S,et al. The potential of polarization measurements from space at mm and sub-mm wavelengths for determining cirrus cloud parameters[J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2003,3(1):39-48.
- [5] ERIKSSON P,BUEHLER S. ARTS user guide[EB/OL]. (2012-06-14)[2015-04-20]. <http://www.sat.ltu.se/arts/docs/>.
- [6] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Browse reanalysis datasets[DB/OL]. [2015-05-20]. <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/browse-reanalysis-datasets>.
- [7] MICHALAKES J,DUDHIA J,GILL D,et al. The weather research and forecast model: software architecture and performance[C]// 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology. 2004:156-168.
- [8] KUMAR R,NAJA M,PFISTER G G,et al. Simulations over south Asia using the Weather Research and Forecasting model with Chemistry(WRF-Chem):set-up and meteorological evaluation[J]. Geoscientific Model Development, 2012,5(2): 321-343.
- [9] 郭杨,卢乃锰,谷松岩. FY-3C 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道辐射特性仿真分析[J]. 红外与毫米波学报, 2014,33(5):481-491. (GUO Yang,LU Naimeng,GU Songyan. Simulate the radiometric characteristics of 118 GHz and 183 GHz

- channels for FY-3C new microwave radiometer sounder[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2014,33(5):481-491.
- [10] ZHANG Shengwei, LI J, JIANG J, et al. Microwave Humidity Sounder(MWHS) of Chinese meteorological satellite FY-3[C]// Proceedings of the Microwave Technology and Techniques Workshop-Enabling Future Space Systems. Noordwijk, Netherlands:[s.n.], 2006:632.
- [11] GU S Y, GUO Yang, WANG Z, et al. Calibration analyses for sounding channels of MWHS onboard FY-3A[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012,50(12):4885-4891.
- [12] DAVIS C P, EVANS K F, BUEHLER S A, et al. 3-D polarised simulations of space-borne passive mm/sub-mm midlatitude cirrus observations: a case study[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2007,6(6):12701-12728.
- [13] LIEBE H J. MPM—an atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989,10(6):631-650.
- [14] HEYMSFIELD A J, MCFARQUHAR G M. Mid-latitude and Tropical Cirrus Microphysical Properties[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2002.
- [15] EVANS K F, EVANS A H, NOLT I G, et al. The prospect for remote sensing of cirrus clouds with a submillimeter-wave spectrometer[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999,38(5):514-525.
- [16] GAO B C, GOETZ A F H, WISCOMBE W J. Cirrus cloud detection from airborne imaging spectrometer data using the 1.38 μm water vapor band[J]. Geophysical Research Letters, 1993,20(4):301-304.

作者简介:



何杰颖(1984-),女,天津市人,在读博士研究生,主要研究方向为地基及星载微波辐射计设计与研制,星载和地基微波辐射计信息反演,大气探测与研究.email:hejieying@mirslab.cn.

张升伟(1963-),男,山东省巴邑市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为陆基、机载及星载微波遥感器系统设计与研制.

(上接第 174 页)

- [10] 雷文强,蒋艺,胡林林,等. 工艺参数影响的D波段行波管盒型窗分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6): 853-856. (LEI Wenqiang, JIANG Yi, HU Linlin, et al. Analysis of pill-box window for D band TWT considering process parameters influence[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):853-856.)

作者简介:



雷文强(1972-),男,重庆市人,博士,副研究员,主要从事真空电子学和太赫兹技术的相关研究.email:leton@163.com.

阎磊(1984-),男,西安市人,助理研究员,主要从事毫米波器件,大功率太赫兹真空器件的输能器件及磁聚焦系统的设计.

胡林林(1979-),男,湖北省荆州市人,硕士,副研究员,主要从事高功率微波器件、大功率太赫兹电真空器件及信号测量方面的研究.

蒋艺(1983-),男,成都市人,硕士,助理研究员,主要从事大功率太赫兹器件的设计.

周泉丰(1984-),男,四川省荣县人,博士,副研究员,主要从事太赫兹电真空电子器件工作.

马国武(1981-),男,四川省凉山州人,硕士,副研究员,主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件的研究.

胡鹏(1985-),男,四川省绵阳市人,博士,助理研究员,主要从事毫米波真空电子器件工作.

陈洪斌(1971-),男,重庆市人,博士,研究员,主要从事毫米波和太赫兹器件的研究.