

静止轨道微波卫星大气探测能力分析和观测仿真¹

毕研盟^{1,2,4}, 杨军^{1,2}, 窦芳丽^{1,2}, 韩阳³, 王嘉琛^{1,2}, 李小青^{1,2}, 徐榕焱^{1,2,4}, 胡菊昞^{1,2}, 廖蜜^{1,2}, 张德军⁴

1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室/国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京, 100081;

2 许健民气象卫星创新中心, 北京, 100081;

3 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京, 100081;

4 卫星遥感数字化应用创新重点实验室, 重庆, 401147;

摘要 静止轨道微波探测卫星搭载微波探测仪, 利用平台相对地球静止特点, 以及微波对云雨的穿透能力, 可以对大气实现高频次、全天时和全天候观测, 为数值天气预报、灾害性天气研究提供高价值数据。本文对正在研制中的中国风云四号静止轨道微波卫星探测能力进行了较全面的介绍和分析, 其搭载的毫米波亚毫米波探测仪新增加了现有低轨卫星上所没有的55 GHz微波高光谱频段和380-425 GHz太赫兹通道, 极大拓展了探测仪对大气状态、云参数的观测能力。通过仿真技术给出了卫星特有的观测几何特点, 结合ARMS (Advanced Radiative Transfer Modeling System) 快速模式和背景场, 以1小时分辨率模拟了典型台风云雨场景下探测仪所有通道的亮温观测值。

关键词 静止轨道微波卫星; 大气探测; 微波高光谱; 太赫兹; 观测仿真

文章编号 中图分类号 文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2506.25071

1 引言

台风、暴雨等强致灾性天气是气象学界重点关注的大气现象。光学遥感受云雨影响, 无法提供云雨内部结构信息, 部分低轨道卫星搭载微波仪器, 可穿透云层观测台风核心和雨带垂直结构 (Zhu et al., 2013; Tian and Zou, 2016; Lin and Weng, 2018; 王业桂等, 2018), 但由于单颗卫星重访周期长, 难以连续监测台风快速演变。因此, 监测和预报领域仍然面临着以下关键问题: 在研究台风强度预报、突变机制, 暴雨和强对流内部动力机制、水汽输送等重要科学问题时, 仍然缺少高时空分辨率的大气温度、湿度和云廓线资料, 极大限制了对强致灾性天气的监测和预报能力。因此, 亟需进一步创新发展微波遥感探测技术, 提供所要求的探测

收稿日期 网络预出版日期

作者简介 毕研盟, 男, 1979年出生, 博士, 正研级高工, 主要从事卫星大气遥感研究, E-mail:biym@cma.cn.

资助项目 国家重点研发计划项目 2022YFF0801302 和国家自然科学基金项目 (42175167) 资助.

Funded by The National Key Research and Development Program of China (Grant 2022YFF0801302) and the National Natural Science Foundation of China (Grant 42175167).

28 资料，成为未来气象卫星发展的重要方向。

29 从探测频率上来看，微波探测向多频点的综合性探测发展。欧洲气象卫星组织(European Organization for
30 the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT) 预计2025年10月发射新一代极轨业务卫星
31 MetOp-SG-A (MetOp Second Generation-A) 星，搭载的微波探测仪(Microwave Sounder, MWS) 是一款全
32 功率辐射计，主要通道继承了AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A)、MHS (Microwave Humidity
33 Sounder) 和ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder)，性能进一步提升，频率范围从23.8~229 GHz
34 共24个通道，全新增加229 GHz通道([https://www.eumetsat.int/metop-sg\[2025-6-16\]](https://www.eumetsat.int/metop-sg[2025-6-16]))。MWS的目标是获取晴
35 空、云雨条件下的大气温度与水汽垂直廓线数据，为区域及全球尺度的数值天气预报(Numerical Weather
36 Prediction, NWP) 提供支撑(毕研盟等, 2024)，229 GHz通道还可用于区分云相态信息，获取云水路径。2026
37 年，EUMETSAT还将发射MetOp-SG-B极轨卫星，搭载冰云成像仪(Ice Cloud Imager, ICI)，频率范围从
38 183~664 GHz，这些毫米亚毫米波段覆盖了微波和远红外之间的中间谱段，将提供全新的冰水凝物观测信息，
39 使得能够更全面地了解冰云关键特性，改进气候和数值天气预报模型中的冰云模型(May et al., 2024)。2024
40 年8月，欧洲发射了AWS (Arctic Weather Satellite) 卫星，微波载荷设计有55 GHz、183 GHz和325 GHz，它
41 是计划中的气象微型卫星星座“EPS Sterna (EUMETSAT Polar System Sterna)” (北极燕鸥) 的原型卫星，
42 目标是探测全球大气温度、湿度廓线和云信息。这个星座将由3个极地轨道平面组成，高度595km，降交点
43 地方时(LTDN: Local Time of Descending Node) 分别为3: 30、7: 30和11: 30，补充FY-3晨昏轨道(5:30 LTDN)、
44 欧洲EPS轨道(9:30 LTDN)和美国JPSS轨道(13:30 LTDN)之间的空缺，每个轨道平面有2颗卫星，整个系统的
45 任务将持续13年([https://www.eumetsat.int/eps-sterne\[2025-6-16\]](https://www.eumetsat.int/eps-sterne[2025-6-16]))。

46 从微波探测的频谱分辨能力上看，与红外高光谱类似，微波频率也开始朝高分辨率发展，即微波高光谱
47 (microwave hyperspectral)，或者称之为微波精细谱(microwave fine spectra)、高波谱。传统微波传感器的
48 通道数量有限，限制了从观测中反演出地球物理参数的数量和精度。通常，具有高光谱分辨率的传感器具
49 备比传统通道更多的信息量，可以对所关注的物理参数进行充分探测，这早已被红外高光谱仪器所证实(如
50 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、CrIS (Cross-Track Infrared Sensor) 和FY-3/HIRAS
51 (Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder))。近年来技术进步已使微波精细谱探测成为可能，已有研
52 究表明，当使用微波高光谱探测时，温度和湿度廓线的反演可以显著改善。Boukabara et al. (2011) 研究了
53 微波精细谱传感器相对于传统宽通道仪器的优势，总结了精细谱传感器发展的科学历程和研究结论。
54 Blackwell et al. (2011) 介绍了一种用于大气探测的微波高光谱遥感模式，并证明了高光谱传感器极大提高
55 了温度和湿度廓线反演的准确性。Aires et al. (2015) 研究了卫星微波高光谱传感器在大气温度和湿度廓线
56 探测中的益处，并确认了微波高光谱传感器对反演结果的积极影响，温度反演不确定性降低了2至10%。对
57 于湿度探测，在先验信息的辅助下，反演精度改进可以达到30%。在这项研究之后，他们考虑了更复杂的云

58 /降水场景。Kummerow et al. (2022) 证明, 当使用60-80个微波通道仿真数据时, 温度和湿度探测的反演
59 精度可以提高50%。国内学者也开展了广泛研究, Bi et al. (2024) 对55 GHz附近微波高光谱探测能力进行
60 了评估, 对晴空下的信息量和自由度进行了估计。王丹蕾 (2022) 研究了微波高光谱信息提取方法, 有利于
61 高效利用高光谱数据以提高温度廓线探测精度。

62 综上所述, 发展静止轨道微波探测卫星, 由静止平台提供高时间分辨率, 由微波频段提供云雨内部资料,
63 成为解决上述关键问题的重要手段之一。这一卫星概念上提出很早, 并实现地面原理样机, 美国和欧洲提出
64 过的静止轨道卫星有实孔径方案(Geostationary Microwave Observatory, GEM)和综合孔径方案(Geostationary
65 Synthetic Thinned Aperture Radiometer, GeoSTAR) (Bizzarri B et al., 2002; Lambriksen B et al., 2004), 但
66 受限于工业技术研制难度, 一直未在高轨静止平台上真正实现。近年来, 随着科技水平的不断提高, 在静止
67 轨道实现低轨卫星上的微波探测能力, 并大幅增加新型微波探测技术成为了可能。中国在相关部门的支持下,
68 经过了10多年的发展, 相关关键技术均已突破, 有希望成为世界上首先实现静止轨道微波观测的国家(卢乃
69 锰和谷松岩, 2016; 张颖, 2017; 陈柯等, 2021)。本论文主要介绍和论述未来中国静止轨道微波卫星的任务
70 要求及其大气探测目标, 并通过观测仿真试验, 对其大气探测能力进行论证分析, 为未来微波星的可能应用
71 提供技术支撑。

72

73 2 静止轨道微波星大气探测目标

74 世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)在天气监测、气候研究和预警系统方面对地
75 球静止轨道大气观测有明确要求和期望。地球静止卫星由于其在一个地区的固定位置, 对于跟踪热带气旋和
76 强风暴等快速变化的天气系统至关重要, 另外, 静止卫星观测也需要与模型相结合, 以提高数值天气预报的
77 准确性。考虑到国情, 中国是一个气象灾害频发的国家, 结合各行业的实际应用需求, 需要进行高频次、全
78 天时和全天候观测, 以应对极端天气事件的发生。因此, 上述WMO的要求对中国静止轨道微波卫星也是适
79 用的。

80 中国这颗携带微波大气探测仪的微波卫星计划于2026年底发射。主载荷是一台实孔径毫米波和亚毫米波
81 探测仪, 采用5 m大口径主反射面加第一、第二副反射面的离轴三反级联体制, 探测频段一方面继承了低轨
82 卫星微波探测仪ATMS、FY-3 MWTS (Microwave Temperature Sounder) 和MWHS (Microwave Humidity
83 Sounder) 所具有的所有频段, 即覆盖23.8 GHz、31.4 GHz、50~57 GHz、89 GHz、118 GHz、166 GHz和183
84 GHz等; 另外为了进一步提高对台风、暴雨等天气的三维观测能力, 新增加了229 GHz、380 GHz和425 GHz
85 太赫兹探测频段, 一方面可提高对大气水凝物的探测能力(刘磊等, 2020), 另一方面提高对中高层大气成
86 分和参数的探测能力(王振占等, 2023)。因此, 上述这些频段可探测信息包括大气温度、湿度、云、降水
87 和地表参数等, 可补充现有光学传感器的不足, 未来通过与光学传感器的协同观测, 可以进一步提高全天候

88 大气、地表的观测能力。

89 同时，与传统微波探测频段设置方式不同，微波探测仪在52~57 GHz全新增加了微波高光谱（精细谱）
90 通道，对频段的连续采样非常类似红外高光谱的探测方式。作为一种实验技术，该高光谱探测的科学目标是
91 提高所有天气条件下大气温度廓线的垂直探测和反演精度，探测数据有望支持微波高光谱数据同化系统和
92 NWP模型的发展，从而改善中短期天气预报。表1综合给出了微波探测仪新增的探测频段特征。

93
94

表 1 微波探测仪新增频率的主要特征和用途

Table 1 Characteristics and applications of the added channels in the microwave sounder

序号	频率(GHz)	带宽(MHz)	空间分辨率(km)	主要用途
1	52.6-55.0	200	60	大气垂直温度
	55.0-57.3	30	60	大气垂直温度
2	229	2000	25	地表特征、云
3	380.197±18.0	2×2000	25	大气水汽分布、云
4	380.197±9.0	2×2000	25	大气水汽分布、云
5	380.197±1.5	2×500	25	大气水汽分布、云
6	380.197±0.4	2×200	25	大气水汽分布、云
7	424.763±4.0	2×1000	17	大气垂直温度、云
8	424.763±1.5	2×600	17	大气垂直温度、云
9	424.763±1.0	2×400	17	大气垂直温度、云
10	424.763±0.6	2×200	17	大气垂直温度、云
11	424.763±0.3	2×100	17	大气垂直温度、云

95

96 3 微波星大气探测能力分析

97 3.1 传统通道探测能力

98 微波在大气中传输时，大气会产生一定程度的吸收作用，一般频率越高，吸收或散射特征会越显著，在
99 55 GHz、118 GHz、424 GHz附近，氧气吸收作用很强烈，而在183 GHz、380 GHz附近，水汽吸收作用强烈。
100 静止轨道微波探测仪各通道接收到的大气微波辐射为各层大气辐射之和，但主要来自其中有一定厚度的有效
101 辐射层，各层贡献的大小可由权重函数表征，在这儿定义为：

$$102 \quad w = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1)$$

103 其中 τ 指透过率， Z 指高度，单位 km。图 1 给出了美国标准大气状态下，探测仪主要通道的权重函数分布。
104 由图可见，23.8~52.8 GHz 权重函数峰值接近地表，53.2~55.5 GHz 权重函数峰值处于 15 km 之下的中等高度，

105 而 57 GHz 附近权重函数峰值则处于较高的高度，57 GHz 这些通道与 ATMS 现有通道类似，充分利用了氧
106 气吸收线关于中心频点的对称性，采用了双边带或四边带设计，其中 f_0 频率为 57.290 GHz， f_1 为 $f_1 \pm 0.217$
107 GHz， f_2 为 $f_0 \pm 0.322 \pm 0.048$ GHz， f_3 为 $f_0 \pm 0.322 \pm 0.022$ GHz， f_4 为 $f_0 \pm 0.322 \pm 0.010$ GHz， f_5 为 $f_0 \pm 0.322$
108 ± 0.0045 GHz。在 118 GHz 附近做了专门的通道选择，所以可使 118 GHz 附近的通道从地表至高层都有分
109 布，便于实现整个大气层的温度反演。183 GHz 通道设计用于反演大气水汽，因此，其通道权重函数峰值高
110 度皆处于 8 km 以下，380 GHz 通道有与其相似的分布特征，424 GHz 通道则有较高的权重函数高度分布，
111 与 118 GHz 的上层通道类似。受大气影响较小的窗区或近似窗区通道则有 89 GHz（目前在轨微波仪器上皆
112 有的通道，图中未画）、165 GHz 和 229 GHz，这些通道对地表信号、大气中的云会有明显的响应。从所有
113 这些通道权重函数分布可以看出，微波探测仪组合了现有气象卫星传统通道和新型的太赫兹探测通道，将拥
114 有目前较强的被动微波对大气和云的探测能力。

115 图 1 美国标准大气状态下主要传统微波通道、太赫兹通道权重函数

116 Fig.1 Weighting functions of the existing microwave and Terahertz channels under the U.S. standard atmosphere conditions

117 与现有的 ATMS 等仪器相比，新增的 380 GHz 和 424 GHz 两组太赫兹波段作为微波和红外的中间波段，
118 兼具有微波穿透性和红外高分辨率的特点。与可见光、红外相比，太赫兹遥感大气探测受到的大气衰减较小，
119 既可以在低能见度的黑夜正常工作，同时对云雾、雨雪等物质的穿透能力较强。这些频率用于探测大气，对
120 云粒子散射敏感，可从探测信号中提取云的相关信息，使在高频观测模拟和物理反演中定量考虑吸收气体、
121 水物质的影响，一定程度上解决云的精确探测问题，目前针对这些通道的相关反演技术仍然是比较新兴的领
122 域。应该指出的是，这些权重函数是晴空大气产生的，未考虑云和降水的影响。

123 3.2 微波高光谱通道探测能力

124 静止轨道微波探测仪在 52.6~57.3 GHz 内全新增加了微波高光谱探测通道，52.6~55 GHz 范围分辨率 200
125 MHz，55~57.3 GHz 为 30 MHz，总数 89 个通道（Bi et al., 2024）。这些通道与红外高光谱仪器的通道设置相
126 似，与传统上挑选孤立的通道不同，这些通道在整段频谱上连续分布，进而形成对整层大气的垂直方向的密
127 集采样，图 2 给出了美国标准大气下这些微波精细谱通道权重函数分布，可以看到，峰值从大气低层到高层
128 都有分布，在 30 km 的高度范围内，权重函数峰值尤其密集，这可以显著增加垂直探测大气的信息量，有可
129 能精确探测到对流层顶处的温度廓线的复杂拐点形态。

130 图 2 美国标准大气状态下 89 个微波高光谱通道（52.6-57.3 GHz）权重函数

131 Fig.2 Weighting functions of 89 microwave hyperspectral channels (52.6–57.3 GHz) under the U.S. standard atmosphere
132 conditions

133 基于有代表性的 43 层大气廓线数据集，共 42 条，利用 ARTS（Atmospheric Radiative Transfer Simulator）
134 辐射传输模式计算了这些高光谱通道对大气温度的雅可比，基于 Rodgers 的信息量理论，估计了这些高光谱
135 通道的信息谱，如图 3 所示，可以看到 57 GHz 附近是高信息量富集区。通过与 ATMS 相似频段（通道 3~15，

136 对应频率为50.3 GHz到57.29 GHz) 现有通道的比较, 可以发现, 这些高光谱通道信息量增加约46%, 这对
137 提高大气温度反演精度是非常有利的。

138 图3 89个微波高光谱通道平均信息谱分布

139 Fig.3 The average information spectral distribution of 89 microwave hyperspectral channels

140 基于最优估计反演理论 (Rodgers, 2000), 结合雅可比和高光谱通道的噪音水平 (这里设定为1.5K),
141 计算了反演平均核函数 (图4), 这是在真实反演中比权重函数更有实际应用价值的函数, 如果被反演量是
142 温度廓线, 则核函数对反演量起平滑作用, 噪音会使得核函数出现负值, 并且有一定宽度, 代表了这些通道
143 对温度廓线的垂直分辨率。可以看到, 这些核函数比权重函数更窄, 说明对真实大气有较好的垂直分辨能力。
144 核函数还有一个“Area”值, 其值为接近1的区域代表反演可靠的区域, 即反演结果主要来自于观测信息,
145 而非先验信息。图4同时给出这个值的一半, 从Area值为1的区域, 可以看到反演高可信度区域, 即约800 hPa
146 至1 hPa范围内。

147 图4 基于典型大气廓线数据集计算的89个微波高光谱通道反演核函数分布 (为了便于展示, 图中黑色虚线代表的是
148 Area值的一半)。

149 Fig.4 Distribution of retrieval averaging kernels for 89 microwave hyperspectral channels computed from a typical atmospheric
150 profile dataset. (For visualization clarity, the dashed curve (black) denotes half of the Area value)

151 3.3 产品种类

152 从前述通道设置可以看到, 探测仪涵盖了窗区通道、温度探测通道、水汽吸收通道以及高频太赫兹通道,
153 可形成对地表、大气及云雨信息的有效观测。但探测仪原始的实际观测量是对接收信号的计数值, 数据接收
154 以下以来需要开展一系列的处理, 才能得到所需要的产品。具体而言, 微波星地面系统针对微波星搭载的毫
155 米波亚毫米波探测仪在轨观测数据, 经过地理定位和辐射定标处理可得到亮温数据, 称之为一级数据(Level-1
156 product), 在此基础上, 采用先进的卫星遥感数据反演技术, 将多种遥感信息实时处理, 生成能反映地球大
157 气变化特征的多种地球物理参数, 形成覆盖观测区域的产品, 即二级数据 (Level-2 product), 为天气分析、
158 数值预报、气候研究、自然灾害以及地球系统科学研究提供高频次的全天候观测数据。基于这些丰富的微波
159 观测数据, 微波星产品生成系统设计了多种类型的产品, 包括算法较为成熟的二级业务产品、科学研究的二
160 级试验产品、为资料数值同化系统服务的Level-1 C产品, 以及跨平台的三级参数融合产品 (Level-3 product),
161 如表2所示。整个产品的生成时效和提供时间须满足下游各级用户的时效要求。

162 表2 微波探测仪产品种类

163 Table 2 Product types for microwave sounder

164 产品类别	产品名称
二级业务	大气温度廓线、大气湿度廓线、地面降雨、大气可降水、云水路径、

	冰水路径
二级试验	地面降雪、水凝物廓线、潜热廓线、地表微波比辐射率、冰晶有效粒子直径、风矢量
三级融合	与静止轨道光学卫星和低轨卫星仪器融合的降水、大气温湿廓线；与地基雷达的融合产品；
数值同化服务	NWP L1C

165

166 4 观测仿真

167 4.1 典型区域的观测几何特征

168 灾害性天气观测对静止卫星的需求主要体现在快速扫描和机动性观测方面，风云四号光学星A、B星较
 169 好地实现了这一点，通过扫描系统在东西和南北两个方向作“步进—驻留”扫描，选取所需的探测区域（王
 170 嘉琛等, 2024），这种扫描方式一方面可为微波星所借鉴，另一方面，了解光学星扫描观测特点，有助于光
 171 学星和微波星开展协同观测，利于开发微波-光学融合的三级产品，克服微波空间分辨率较低的缺点，做到
 172 优势相互补充，充分发挥静止卫星多星联合观测优势。

173 由于微波星天线口径太大无法运动，因此卫星采用了平台从南向北、从西向东运动方式，叠加探测仪后
 174 端扫描镜360°圆周运动的方式对地扫描，单个瞬时视场在地面投影形成近似椭圆足迹，每个扫描周期内的
 175 一系列足迹在地面投影形成100°的圆弧段。当卫星平台南北向运动时，多个圆弧段叠加形成不同大小的扫
 176 描区域。假定卫星定位于东经123.5°上空，仿真了以东南海域台风高发地为中心的微波星最小扫描区域，
 177 对应理论大小为500 km×500 km，用时约2-3分钟，如图5(a)所示，这种扫描模式可快速跟随台风、强天气系
 178 统区域移动，形成对指定区域的高时效观测。图5(b)同时给出了卫星观测中国区域3000 km×3000 km的区域
 179 大小时，扫描轨迹覆盖情况，由于中国区西部相对于卫星定点位置的卫星天顶角较大，因此投影足迹呈现放
 180 大效应，当没有灾害性天气所需要的高频次观测时，卫星将以此种观测模式为主，整个区域覆盖一次约需
 181 60-80分钟。除上述两种区域大小外，微波卫星还可对1500 km×1500 km区域大小实现观测，用时约20-30分
 182 钟。

183 需要说明的是，观测区域大小是灵活可调的，未来会随着卫星任务不同而不断优化；另外，卫星星下点
 184 原始观测空间分辨率随频率升高而升高，以55 GHz为例，约为60 km，当卫星观测角度较大时，分辨率会进
 185 一步降低。但是55GHz频段连续两次观测区域之间有较大的重叠，可以利用冗余信息进一步提高空间分辨率
 186 至25 km。在183 GHz，原始空间分辨率就有25 km，到更高频380 GHz和424 GHz，原始分辨率达17 km。

187 图 5 卫星对典型台风发生区域和中国区域观测时，地面观测点几何分布特征。(a)为 500 km×500 km 区域扫描点覆盖情

况，原始观测点可分辨识别；(b)为 3000 km×3000 km 区域，由于扫描点密集，导致无法分辨识别。

Fig.5 Geometric distribution of field of view (FOV) at ground during satellite observations over typical typhoon and Chinese region. (a) Coverage pattern within a 500 km×500 km area with distinguishable FOVs at raw resolution. (b) Coverage within a 3000 km×3000 km area with dense scanning points making it difficult to distinguish.

4.2 典型频段台风观测模拟

卫星观测仿真在卫星发射前可提供研究使用的模拟数据，高频次地模拟观测可更直观地展示出观测区域天气现象的演变过程，帮助认识微波星的观测能力。本文采用ARMS快速辐射传输模式（Weng et al., 2020），对2024年7月超强台风“格美”进行了探测仪所有通道的观测亮温模拟。模拟时考虑了卫星观测的天顶角和方位角；地表发射率采用TELSEM地表发射率模型；输入大气背景场参数为ERA5再分析场数据，包括的水凝物变量包含云冰、云水、雨、雪含量；模拟的区域范围为3000 km×3000 km，空间分辨率0.25°，时间间隔1小时。

按照上述设定，进行了微波探测仪所有通道的观测模拟，为了观察台风的时间演变，模拟时段从2024年7月15日到31日。图6给出了典型通道在7月24日3:00一个时次的亮温模拟结果，这些通道亮温分布清楚地显示了台风区域，由于各通道的穿透深度不同，显示的细节并不相同，除了权重函数很高的通道外，大部分通道皆可看到台风中心区域，380.197±0.4 GHz通道主要用于水汽探测，由于权重函数峰值高度约在10 km，而且受云雨粒子散射影响，反映的是台风高层水汽和冰云的分布信息，424.763±1.5 GHz通道是氧气吸收通道，同样会受高层云散射的强烈影响。将ARMS的模拟结果与RTTOV模拟结果进行了简单比较，二者模拟的亮温空间分布一致性较好，亮温差异在1 K以内，表明ARMS模拟结果是可信的。从这些模拟结果可以看出，未来卫星发射后，对台风可实现高频次观测，有望得到台风内部高时间分辨率的温度场、湿度场和风场信息，为研究台风内部热力场和动力场的演变提供观测数据。

图 6 2024 年 7 月台风格美的静止轨道微波星不同通道观测亮温（单位：K）模拟结果

Fig.6 Simulated brightness temperatures (Unit: K) from channels of geostationary microwave sounder for Typhoon Gaemi in July 2024.

5 总结

经过50多年的发展，微波探测大气技术不断完善，资料在数值天气预报等领域应用效果显著。综合近几年国际和国内最新发展情况，可以看到，微波探测大气领域技术将向“三高”发展：高轨平台、高光谱分辨率和高频（太赫兹）频段。

- 高轨平台将拓展微波观测视角，提高观测时间分辨率。
- 高频太赫兹频段（0.1~10 THz，30 μm~3 mm）将以其特有的性质补充现有微波的探测大气能力。
- 高光谱分辨率将进一步深挖现有微波频段上探测大气的潜力。在已有的频段上，沿经典的55 GHz、118 GHz和183 GHz吸收线，以较高的谱线分辨率连续、同时采样，获得完整的吸收谱特征，可为

219 大气探测提供更多的信息量和自由度，一定程度上提高受云雨影响的大气参数反演精度问题。

220 中国静止轨道微波探测卫星的发展正体现了上述趋势。本文从通道设置、产品种类、观测几何和仿真模
221 拟等方面介绍了微波星探测能力。微波探测仪组合了现有微波通道、微波高光谱通道和太赫兹探测通道，将
222 极大提升并拓展对大气和云的探测能力；与探测能力相适应，产品生成系统采用先进的卫星遥感数据反演技
223 术，生成能反映地球大气变化特征的多种地球物理参数，形成覆盖观测区域的产品；卫星观测区域大小可调，
224 可根据天气情况进行灵活设置，典型台风仿真模拟表明，高频次观测有望得到台风内部高时间分辨率的温度
225 场、湿度场和风场信息，为研究台风内部热力场和动力场的演变提供观测数据。

226 应用方面，静止轨道微波星的高频次观测，有助于提高致灾天气的监测和预报准确度，提升防灾减灾能
227 力。但由于轨道高度原因，导致空间分辨率较低，会在一定程度上限制观测的应用，为解决这一问题的途径
228 主要有两个，一个是文中提到的与光学卫星协同观测，生成空间分辨率较高的融合产品，另外就是在未来发
229 展中，进一步增大微波接收天线的物理尺寸，提高观测的原始空间分辨率。

230 参考文献 (References)

- 231 Aires F, Prigent C, Buehler S A, et al. 2019. Towards more realistic hypotheses for the information content
232 analysis of cloudy/precipitating situations-Application to a hyperspectral instrument in the microwave[J].
233 Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,145,1-14. doi:10.1002/qj.3315.
- 234 Blackwell W J, Bickmeier L J, Leslie R V, et al. 2011. Hyperspectral microwave atmospheric sounding[J].
235 IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.,49,128-142. doi:10.1109/TGRS.2010.2052260.
- 236 Bi Y, Yang J, Wei C, et al. 2024. Atmospheric Temperature Measurements Using Microwave Hyper-Spectrum
237 from Geostationary Satellite: Band Design, Weighting Functions and Information Content[J]. Remote
238 Sens.,16. doi:10.3390/rs16020289.
- 239 毕研盟, 李娟, 吴春强, 等. 2024. 卫星微波高层探测通道定标精度评估[J]. 大气科学, 48(2): 602-618. Bi
240 Yanmeng, Li Juan, Wu Chunqiang, et al. 2024. Calibration Evaluation of Satellite Microwave Sounding
241 with Channels in the Upper Atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(2):
242 602-618. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.22214.
- 243 Bizzarri B, Gasiewski A, Staelin D. 2002. Initiatives for millimetre/submillimetre-wave sounding from
244 geostationary orbit[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, ON,
245 Canada, pp. 548-552 vol.1. doi:10.1109/IGARSS.2002.1025102.
- 246 Boukabara S-A, Garrett K, Chen W, et al. 2011. MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and
247 retrieval system[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49(9): 3249-72.
248 doi:10.1109/TGRS.2011.2158438.
- 249 陈柯, 郑照明, 蔡保国, 等. 2021. 基于全链路仿真的静止轨道毫米波大气探测性能[J]. 红外与毫米波学报,
250

251 40(02):230-242. Chen Ke, Zheng Zhaoming, Cai Baoguo et al. 2021. Performance of geostationary
252 orbit millimeter-wave atmospheric soundings based on end to end simulations[J]. Journal of Infrared and
253 Millimeter Waves (in Chinese), 40(02): 230-242. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2021.02.014.

254 Kummerow C D, Poczatek JC, Almond S, et al. 2022. Hyperspectral Microwave Sensors-Advantages and
255 Limitations[J]. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote. Sens.,15:764-775, doi:10.1109/JSTARS.
256 2021.3133382.

257 刘磊, 翁陈思, 李书磊, 等. 2020. 太赫兹波被动遥感冰云研究现状及进展[J]. 地球科学进展, 35(12):
258 1211-1221. Liu Lei, Weng Chensi, Li Shulei, et al. 2020. Review of Terahertz Passive Remote Sensing
259 of Ice Clouds[J]. Advances in Earth Science (in Chinese),35(12):1211-1221.
260 doi:10.11867/j.issn.1001-8166. 2020.103.

261 Lambrigtsen B, Wilson W, Tanner A, et al. 2004. GeoSTAR - a synthetic aperture approach for a geostationary
262 microwave sounder[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720), Big Sky,
263 MT, USA, pp. 1008-1014 Vol.2. doi: 10.1109/AERO.2004.1367702.

264 卢乃锰, 谷松岩. 2016. 静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望[J]. 气象科技进展, 6(1):120-123.
265 Lu Naimeng, Gu Songyan. 2016. The Status and Prospects of Atmospheric Microwave Sounding by
266 Geostationary Meteorological Satellite[J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in
267 Chinese), (1):4. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.019.

268 Lin L, Weng F. 2018. Estimation of Hurricane Maximum Wind Speed Using Temperature Anomaly Derived
269 from Advanced Technology Microwave Sounder[J]. IEEE Geosci. Remote. Sens. Lett.,15(5):639-43.
270 doi:10.1109/LGRS.2018.2807763.

271 May E, Rydberg B, Kaur I, et al.2024. The Ice Cloud Imager: retrieval of frozen water column properties[J].
272 Atmos. Meas. Tech.,17:5957-5987. doi:10.5194/amt-17-5957-2024.

273 Rodgers C D. 2000. Inverse Methods for Atmospheric Sounding[M]//World Scientific Publisher: Singapore.
274 doi: 10.1142/3171.

275 Tian X, Zou X. 2016. ATMS- and AMSU-A-derived hurricane warm core structures using a modified retrieval
276 algorithm[J]. J. Geophys. Res.: Atmos.,121:1-17. doi: 10.1002/2016JD025042.

277 Weng F, Yu X, Duan Y. et al. 2020. Advanced Radiative Transfer Modeling System (ARMS): A
278 New-Generation Satellite Observation Operator Developed for Numerical Weather Prediction and
279 Remote Sensing Applications[J]. Adv. Atmos. Sci.,37:131-136. doi: 10.1007/s00376-019-9170-2.

280 王丹蕾. 2022.微波高光谱辐射计通道的信息分析与配置研究[D].四川:电子科技大学. Wang Danlei, 2022.
281 A Study on Channel Information Analysis and Configuration of Microwave Hyperspectral Radiometer[D].
282 M. S. thesis (in Chinese), University of Electronic Science and Technology of China. doi:
283 10.3969/j.issn.1000-3177.2013.01.005.

284 王嘉琛, 王静, 刘成保, 等. 2024.风云四号卫星轨道运动补偿算法建模与仿真分析[J].武汉大学学报 (信

息科学版), 49(10): 1879-1890. Wang Jiachen, Wang Jing, Liu Chengbao, et al. 2024. Orbit Motion Compensation Modeling and Simulation Analysis for FY-4 Geostationary Meteorological Satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese), 49(10):1879-1890. doi: 10.13203/j.whugis20220314.

王业桂, 张斌, 蔡其发, 等. 2018.不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响[J].大气科学, 42 (2): 398-410. Wang Yegui, Zhang bin, Cai Qifa, et al. 2018. Effects of assimilating microwave remote sensing data of different satellite on the simulation of typhoon track [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 398-410. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17150.

王振占, 王文煜, 佟晓林, 等. 2023.星载被动微波遥感技术及其应用进展[J].空间科学学报, 43(06):986-1015. Wang Zhenzhan, Wang Wenyu, Tong Xiaolin, et al. 2023. Progress in Spaceborne Passive Microwave Remote Sensing Technology and Its Application[J]. Chinese Journal of Space Science (in Chinese), 43(06):986-1015. doi: 10.11728/cjss2023.06.yg15.

Zhu T, Weng F. 2013. Hurricane Sandy warm-core structure observed from Advanced Technology Microwave Sounder[J]. Geophys. Res. Lett., 40(12):3325-30. doi: 10.1002/grl.50626.

张颖. 2017.静止轨道干涉式毫米波大气探测器动态目标观测仿真分析[D].中国科学院大学. Zhang Ying.2017. Simulation and Analysis for Dynamic Target Observation of Geostationary Interferometric Microwave Sounder[D].Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences.

Analysis of Atmospheric Sounding Capability and Observation Simulation for Geostationary Microwave Satellite

BI YanMeng^{1,2,4}, Yang Jun^{1,2}, Dou FangLi^{1,2}, Han Yang³, Wang JiaChen^{1,2}, Li XiaoQing^{1,2}, Xu RongHan^{1,2,4}, Hu JuYang^{1,2}, Liao Mi^{1,2}, Zhang Dejun⁴

¹Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

²Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

³CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081, China;

⁴Key Laboratory of Remote Sensing Application and Innovation, Chongqing 401147, China;

Abstract The geostationary orbit microwave sounding satellite carrying a microwave sounder utilizes the relatively stationary characteristics of the platform, as well as the microwave's ability to penetrate clouds and rain, to achieve high-frequency, all-day, and all-weather observations of the atmosphere, providing high-value

318 data for numerical weather forecasting and disaster weather research. This paper analyzes the sounding
319 capability of the Chinese FengYun-4 geostationary orbit microwave satellite currently under development. The
320 observation method and product system are introduced. Its millimeter wave sub-millimeter wave sounder has
321 added the 55 GHz microwave hyperspectral frequency band and 380-425 GHz terahertz channel that are not
322 available on existing low orbit satellites, greatly expanding the sounder's ability to observe atmospheric status
323 and cloud parameters. The unique observation geometry characteristics of the satellite are shown through
324 simulation technology. Based on the ARMS fast mode and atmospheric backgrounds, the brightness
325 temperature of typical channels for detection of temperature and humidity, as well as the terahertz channels,
326 are simulated under typhoon background.

327

328 **Keywords** Geostationary microwave satellite; Atmosphere sounding; Microwave hyperspectral; Terahertz;
329 Observation simulation.