

机载全极化微波辐射计系统设计及海面亮温的提取方法

王振占¹, 丁甲^{1,2}, 陆浩¹, 刘璟怡¹, 佟晓林¹, 李彬¹, 董帅¹, 王特¹,
霍长兴¹, 叶云华¹, 张祥坤^{1,2}, 董晓龙^{1,3}

(1. 中国科学院国家空间科学中心中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100149;

3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100149)

摘要: 机载全极化微波辐射计(Airborne full Polarization Microwave Radiometer, APMR)是国家重大科技基础设施航空遥感系统的主要载荷之一,用于获取来自地球表面和大气的微波辐射电场的极化信息,从而反演地球表面和大气的物理参数. APMR是一个5频点的被动微波传感器,中心频点分别为10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 37.0 GHz和90 GHz. 其中,23.8 GHz和90 GHz采用水平和垂直极化接收方式;10.7 GHz, 18.7 GHz和37.0 GHz采用全极化接收方式,同时接收观测场景辐射的4个Stokes参数亮温. 该文在介绍我国第一台机载全极化微波辐射计APMR系统主要技术特点和基本性能指标的基础上,提出了由辐射计输出参数进行全极化定标、再进行海面亮温提取的二级数据处理方法,从而得到海面亮温的4个Stokes参数信息,其可用于海面风向、风速等参数的反演. APMR于2020年6月在东营进行了海上的搭载飞行试验,从实验结果中提取到的海面亮温与预期情况一致,这使仪器的工作性能以及海面亮温的提取方法得到验证,为未来机载平台获得海洋表面参数提供了新的技术手段.

关键词: 机载微波辐射计;全极化;定标;天线方向图;海面亮温

基金项目: 国家自然科学基金(No.41771405)

中图分类号: TP732.1;TP721.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)02-0275-11

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220439

Design of Airborne Full Polarization Microwave Radiometer System and Extraction Method of Sea Surface Brightness Temperature

WANG Zhen-zhan¹, DING Jia^{1,2}, LU Hao¹, LIU Jing-yi¹, TONG Xiao-lin¹, LI Bin¹, DONG Shuai¹,
WANG Te¹, HUO Chang-xing¹, YE Yun-hua¹, ZHANG Xiang-kun^{1,2}, DONG Xiao-long^{1,3}

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Eommunication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China;

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China)

Abstract: APMR (Airborne full Polarization Microwave Radiometer) is one of the main loads of the national major scientific and technological infrastructure aviation remote sensing system, which is used to obtain the polarization microwave radiation electric field information from the earth's surface and atmosphere, so as to retrieve the physical parameters of the earth's surface and atmosphere. APMR is a passive microwave remote sensor with 5 frequency points, and the central frequency points are 10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 37.0 GHz and 90 GHz respectively. Among them, horizontal and vertical polarization reception is adopted at 23.8 GHz and 90 GHz; and full polarization reception is adopted at 10.7 GHz, 18.7 GHz and 37.0 GHz, and four Stokes parameter brightness temperatures of observed scene radiation are received at the same time. Based on the introduction of the main technical characteristics and basic performance indexes of the APMR system of China's first airborne full polarization microwave radiometer, this paper puts forward a two-step data processing method which consists of full polarization calibration and sea surface brightness temperature extraction, so as to obtain the

four Stokes parameter information of sea surface brightness temperature, which can be used for the inversion of sea surface wind direction, wind speed and other parameters. Sea surface test of APMR have been carried out in Dongying in June 2020. The sea surface brightness temperature extracted from the experimental results is consistent with the expected situation, which verifies the working performance of the instrument and the extraction method of sea surface brightness temperature, and provides a new technical means for the future airborne platform to obtain ocean surface parameters.

Key words: airborne microwave radiometer; full polarization; calibration; antenna pattern; brightness temperature of the sea surface

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.41771405)

1 引言

全极化微波辐射计的研究可以追溯到 20 世纪八九十年代,苏联和美国研究人员从机载飞行数据中发现海面辐射的信号中存在交叉极化相关分量,而且这个信号随着相对风向呈出现周期性变化^[1,2],随后 Irisov 等人及 Wentz 等人^[3,4]通过对传统星载垂直、水平极化数据分析,也发现了亮温中存在的风向信息.美国于 2003 年发射了第一台全极化微波辐射计试验卫星——WINDSAT^[5],用于验证利用星载全极化微波辐射计遥感海面风场的技术可行性,试验达到了预期,卫星成功运行了 10 年以上,获得了大量的全球极化辐射信息,为海洋、大气和陆地地球物理参数的获取和应用研究提供了宝贵的基础数据.

机载全极化辐射计可以快速获得特定场区的微波辐射特征,由于其快速的响应能力,可以为星载全极化微波辐射计提供同步的比对试验,对验证遥感机理及其应用算法模型起到重要作用.第一台极化辐射计是苏联空间研究所在 20 世纪 80 年代晚期到 90 年代早期研究成功的^[6].随后就是美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制的机载辐射计 WINDRAD^[7].所有这些仪器都是不成像的,只能测量一维数据.另外第一台成像极化辐射计是丹麦技术大学^[8]和美国佐治亚理工学院^[9]研制的极化扫描辐射计(Polarization Scanning Radiometer, PSR).

在国家重大科技基础设施航空遥感系统的支持下,中国科学院国家空间科学中心于 2010 年开始国内首台机载全极化微波辐射计(Airborne full Polarization Microwave Radiometer, APMR)的设计.由于飞机平台更换和接口关系变更,APMR 直到 2019 年才集成完毕. APMR 是一个 5 频段的微波辐射计,接收来自地球表面和大气的微波辐射,通过反演获取海面风速风向、海面温度,以及大气水汽含量和云中液水含量信息. APMR 可以在任意入射角下进行圆锥扫描(首飞未采用该方式),也可以在垂直飞行方向进行交轨扫描. APMR 于 2019 年 9 月在西安进行第一次陆地上空飞行试验,验证了仪器的工作性能.随后在 2020 年 6 月在陕西西安和山东东营分别进行了陆地和海上飞行试验.

2 APMR 系统组成

APMR 是一台 5 频段的被动微波辐射计,中心频点分别为 10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 37.0 GHz 和 90 GHz. 其中,23.8 GHz 和 90 GHz 采用水平和垂直极化接收方式;10.7 GHz, 18.7 GHz 和 37.0 GHz 采用全极化接收方式,同时接收观测场景辐射的 4 个 Stokes 亮温.图 1 是 APMR 系统构成示意图,包括扫描头部(辐射计)、控制器、俯仰支臂(分别用于驱动和编码)、方位组合扫描装置和支撑框架.框架安装在飞机非气密舱内,辐射计安装在新舟 60 飞机^[10]后部的非气密开口处.

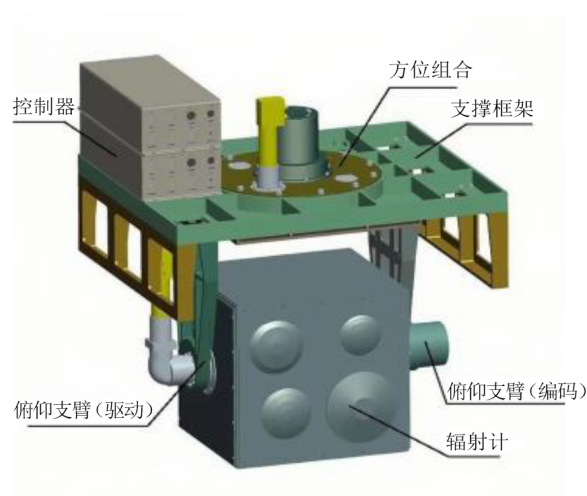


图1 APMR 系统总体构成示意图

APMR 采用直接计算垂直极化电场 E_v 和水平极化水平极化电场 E_h 的复相关技术体制,通过数字相关器的自相关和互相关计算,实现全部 4 个 Stokes 参数的测量,具体计算方式如下:

$$\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} T_v \\ T_h \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{k \cdot \eta} \begin{bmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle \\ \langle |E_h|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_v E_h^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_v E_h^* \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, λ 为对应通道波长; k 为玻尔兹曼常数; η 为波阻抗.

图 2 是 APMR 的系统组成框图, APMR 包括 5 个频

率通道: 10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 37 GHz 和 90 GHz. 其中 10.7 GHz, 18.7 GHz 和 37 GHz 为全极化通道, 23.8 GHz 和 90 GHz 为双极化通道.

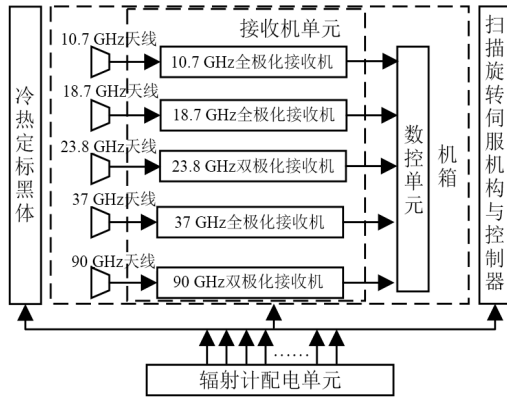


图2 APMR系统组成框图

每个通道都包括以下单元: 天线单元、接收单元和数控单元. 另外, 整个被动模块还将共用电源单元、旋转扫描伺服和控制机构单元以及用于整体定标的标准黑体. 其中, 23.8 GHz 和 90 GHz 采用单边带(SSB)接收机, 负责对接收信号进行下变频、放大、滤波、检波并放大到可供数字电路采集的电平幅度; 其他几个频率均采用双边带(DSB)接收机, 除了实现与 23.8 GHz 和 90 GHz 接收机相同的功能外, 还要对接收信号进行 IQ 解调、数字相关处理, 提取观测目标的极化信息. 全极化频段采用相干接收 IQ 检波的方式, 所得到的 IQ 视信号进行复相关处理, 得到 T_v, T_h, T_3, T_4 这 4 个 Stokes 参量. 辐射计接收机的系统分单元如图 3 所示.

两类收机的前端部分相同, 前端电路与功率检波积分电路构成双极化接收机, 与正交检波电路及数字相关器构成全极化数字接收机.

接收前端对天线接收到的水平极化和垂直极化两路信号进行放大、滤波、再放大, 两个信道接收机通过共用本振实现混频, 变成中频信号. 电路设计时, 使用参数一致的器件以及相同长度的信号接线, 以确保每个频率的两个极化通道都具有幅度和相位的一致性, 并根据全极化定标来校正可能存在幅相误差.

23.8 GHz 和 90 GHz 采用双极化接收机, 前端单元输出的中频信号首先被放大, 然后送入平方率检波器, 最终被积分放大至可供 AD 采集量化的电平幅度. 10.7 GHz, 18.7 GHz 和 37 GHz 这 3 个频段采用全极化接收机, 前端单元输出的中频信号经功分后输入到正交检波器, 被调制成一一对完全正交的 IQ 信号, 2 路极化接收信道对应 4 路信号, 再经过组合相关, 就可以得到所要测量的 4 个极亮温. 数字相关器是全极化微波辐射计的核心模

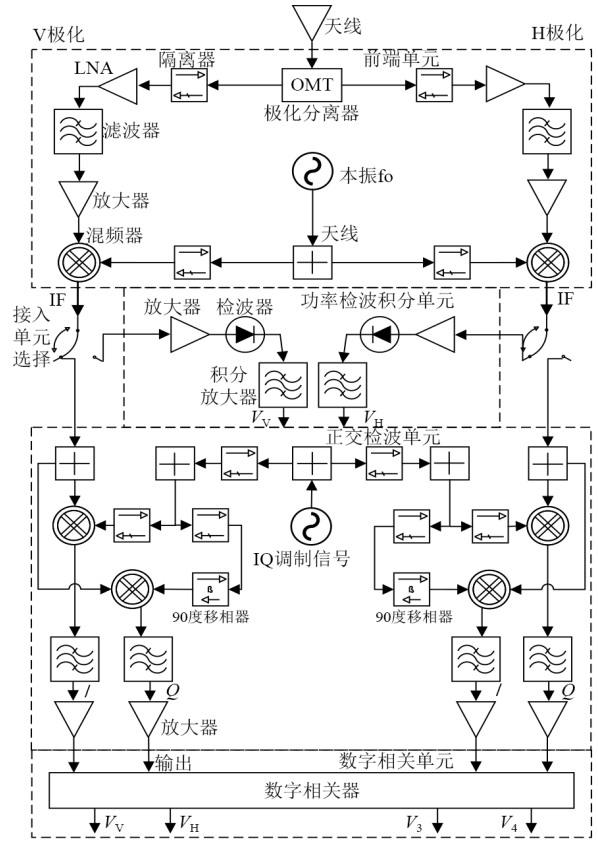


图3 接收机分单元原理框图

块之一, 用来提取观测目标的极化信息, 将接收到水平和垂直极化通道的 4 路 IQ 信号进行高速数字采集, 并进行自相关和互相关数字运算.

表 1 给出相关器输出的参数, 最终输出 14 个相关参数, 用于最终 4 个 Stokes 亮温计算. 相比于传统方案^[11], 各参数都有冗余设计.

表 1 数字相关器最终输出参数

通道序号	计算说明	输出结果
1	$I_v \cdot I_v^*$	V_v
2	$Q_v \cdot Q_v^*$	V_v
3	I_v 直流偏置	—
4	Q_v 直流偏置	—
5	$I_v \cdot Q_v^*$	—
6	$I_h \cdot I_h^*$	V_h
7	$Q_h \cdot Q_h^*$	V_h
8	I_h 直流偏置	—
9	Q_h 直流偏置	—
10	$I_h \cdot Q_h^*$	—
11	$I_v \cdot I_h^*$	$V_3/2$
12	$Q_v \cdot Q_h^*$	$V_3/2$
13	$I_h \cdot Q_v^*$	$-V_4/2$
14	$Q_h \cdot I_v^*$	$V_4/2$

由 14 个通道的输出结果,可以得出:第 1、第 2 通道输出结果对应系统 v 通道的电压(平方电压,与系统亮温成正比);第 6、第 7 通道输出结果对应系统 h 通道的电压,第 11、第 12 通道输出结果对应系统第 3 个 Stokes 参数通道的电压;第 13、第 14 通道输出结果对应系统第 4 个 Stokes 参数通道的电压. 另外,第 3、第 4、第 8、第 9 通道输出结果所表示的直流分量为单路信号自累加而来,该直流分量由系统通道内部产生,数值低于自相关通道 4 个数量级,可以忽略. 第 5、第 10 通道输出结果和 4 个 Stokes 参数无关,但是可用于通道相对相位差的计算. 根据输出电压可以通过定标得到相应的通道亮温.

用于相关计算的从正交检波单元输出到数字相关器的 4 路信号 I_v, I_h, Q_v, Q_h 分别为

$$\begin{aligned} I_v &= G_{I_v} E_v \cdot A_{I_v} e^{j\omega t} + V_{N,I_v}, \\ Q_v &= G_{Q_v} E_v \cdot A_{Q_v} e^{j\omega t + j\frac{\pi}{2}} + V_{N,Q_v}, \\ I_h &= G_{I_h} E_h \cdot A_{I_h} e^{j\omega t} + V_{N,I_h}, \\ Q_h &= G_{Q_h} E_h \cdot A_{Q_h} e^{j\omega t + j\frac{\pi}{2}} + V_{N,Q_h} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, G 为通道电压对场强的增益; E 为电场; A 为调制信号幅度; V_N 为接收机噪声.

全极化微波辐射的天线采用介质透镜加载喇叭天线形式,以减小轴向尺寸,并兼顾保温、防霜的要求. 全极化微波辐射的天线单元包括 5 个分立的天线,每个频率的天线都分别由喇叭天线、介质透镜和极化分离器组成. 根据观测要求,考虑观测窗口的限制,最低频率 X 波段的天线的波束宽度约为 11° ,相比于星载天线^[12]明显更宽. 表 2 给出最终 APMR 的主要技术指标,并已更新为实际实验测试结果.

表 2 APMR 系统性能和主要技术指标(更新为实测)

参数	设计的性能指标
工作频率/GHz	10.7, 18.7, 23.8, 37 和 90
工作带宽/MHz	300, 750, 500, 2000, 1000
天线波束宽度(3 dB)	$5^\circ \sim 11.4^\circ$
极化方式	23.8 GHz, 90 GHz(V, H 极化); 10.7 GHz, 18.7 GHz, 37.0 GHz(全极化)
天线旁瓣电平抑制	≥ 25 dB
天线交叉极化隔离	≥ 38 dB
主波束效率	$\geq 95\%$
天线端口驻波比	≤ 1.3
接口形式	SMA, BJ-180/220/320 标准矩形波导, 标准方法兰接口
接收机噪声系数	≤ 4.0 dB
定标技术	冷源与热源定标
动态范围/K	3 ~ 350
灵敏度/K	0.3, 0.4; 0.3, 0.4; 0.3, 0.4; 0.3, 0.4; 0.5, 0.7
定标精度/K	0.75
线性度	优于 0.999
积分时间	1 000 ms

3 海面亮温提取原理

相关器 14 个通道的输出参数包含着海面的全极化亮温信息,在进行全极化定标后,得到对应接收机输入端(天线输出)的 4 个 Stokes 亮温. 受天线尺寸、扫描角度以及姿态控制的限制,天线接收亮温和真实的海面亮温存在较大差异. 想要进行海面风矢量参数的反演,需要进行天线方向图校正并求解天线亮温相对应的海面亮温.

3.1 机载全极化微波辐射计的定标原理

定标源内部的结构如图 4 所示,由于伺服转台的使用环境以及空间限制,定标源采用平板结构形式,冷、

热定标板与伺服转台之间通过支架进行加固连接.

常温源和加热源采用结构相同但口面不同的微波辐射黑体. 常温定标源不做主动温控,但需要做被动隔热,以减少外界环境温度变化的扰动. 为了实时监测冷热定标板的表面温度,设置了若干温度监测点,热敏电阻将温度数据实时传回,以检测定标板表面温度. 加热定标源采用电阻丝加热,温度控制在 $60^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$,温度均匀性不超过 0.2°C .

试验过程中,微波辐射计分别观测外部冷源和热源,利用这两个源的温度和输出电压就可以对常规通道进行两点定标. 假设观测热源的亮温 T_H 、输出电压

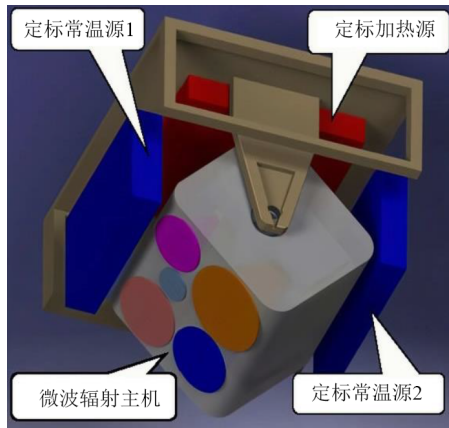


图4 辐射计定标常温冷源和定标热源布局

V_H , 观测冷源的亮温 T_C 、输出电压 V_C (角标 H 表示热源, C 表示冷源), 则对于观测目标输出电压 V_A 所对应的天线温度 T_A 可表示为^[13]

$$T_A = \frac{T_H - T_C}{V_H - V_C} \cdot V_A + \frac{V_H T_C - V_C T_H}{V_H - V_C} \quad (3)$$

辐射计观测外部热源时全极化通道输出的电压分别为 $V_{H,3}$ 和 $V_{H,4}$, 那么对应的相关系数和理想亮温分别为^[14]

$$\rho_{H,3} = \frac{V_{H,3}}{\sqrt{V_{H,v} V_{H,h}}} \quad (4)$$

$$\rho_{H,4} = \frac{V_{H,4}}{\sqrt{V_{H,v} V_{H,h}}}$$

$$T_{H,3} = 2\rho_{H,3} \sqrt{T_{\text{sys},v} V_{\text{sys},h}} \quad (5)$$

$$T_{H,4} = 2\rho_{H,4} \sqrt{T_{\text{sys},v} V_{\text{sys},h}}$$

观测外部冷源时全极化通道输出的电压分别为 $V_{C,3}$ 和 $V_{C,4}$, 那么对应的相关系数和理想亮温为

$$\rho_{C,3} = \frac{V_{C,3}}{\sqrt{V_{C,v} V_{C,h}}} \quad (6)$$

$$\rho_{C,4} = \frac{V_{C,4}}{\sqrt{V_{C,v} V_{C,h}}}$$

$$T_{C,3} = 2\rho_{C,3} \sqrt{T_{\text{sys},v} V_{\text{sys},h}} \quad (7)$$

$$T_{C,4} = 2\rho_{C,4} \sqrt{T_{\text{sys},v} V_{\text{sys},h}}$$

观测海洋目标时, 全极化通道输出的电压分别为 V_3 和 V_4 , 那么对应的相关系数和理想亮温为

$$\rho_3 = \frac{V_3}{\sqrt{V_v V_h}} \quad (8)$$

$$\rho_4 = \frac{V_4}{\sqrt{V_v V_h}}$$

$$T_3 = 2\rho_3 \sqrt{T_{\text{sys},v} V_{\text{sys},h}} \quad (9)$$

$$T_4 = 2\rho_4 \sqrt{T_{\text{sys},v} V_{\text{sys},h}}$$

上述方程是数字相关辐射计输出的理想定标方程. 由于系统亮温和系统电压面向海面时都包含海面亮温信息, 因此由原本定标时的固定值变成了变量. 理论上, 冷热源的第 3 和第 4 个 Stokes 参数亮温为 0, 即

$$\begin{aligned} T_{H,3} = T_{C,3} = 0 \\ T_{H,4} = T_{C,4} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

但是实际测量中发现观测热源和冷源时 $T_{H,3}$, $T_{C,3}$ 和 $T_{H,4}$, $T_{C,4}$ 存在一个较小的偏移量, 因此在测量的 T_3 和 T_4 亮温中需要减去这个偏移量. 即

$$\begin{aligned} T'_3 &= T_3 - \sqrt{|T_{H,3} T_{C,3}|} \\ T'_4 &= T_4 - \sqrt{|T_{H,4} T_{C,4}|} \end{aligned} \quad (11)$$

通过观测外部的热源、冷源并结合微波辐射计的 outputs 值, 可以实现前 4 个 Stokes 参数的天线定标. 机载试验不具备利用全极化定标源实时定标的条件 (设备过于庞大), 因而其第 3、第 4 个 Stokes 参数受到的通道相对相位差的影响^[15,16] 无法通过定标来消除.

3.2 天线方向图积分原理

海面风场信息的反演工作是根据海面亮温等参数来进行的. 但是由于机载试验设备尺寸的限制, 天线的波束宽度较大且扫描角度较小, 天线波束覆盖范围内的海面亮温信息差异很大. 这样的天线亮温不能被当成海面亮温直接用于海面风矢量参数的反演. 为了提取海面亮温, 需要建立天线亮温 and 该扫描角度 (交轨扫描) 下海面亮温的对应关系, 这个过程称为天线方向图校正 (Antenna Pattern Calibration, APC) 或海面亮温的提取.

利用海面亮温模型生成每个扫描角度对应整个天线波束照射区域内各点的亮温信息, 然后将这些亮温进行天线方向图积分, 同时得到每个扫描位置积分后的天线亮温 (在该文后续的表述中简称天线亮温) 以及每个扫描位置波束中心的海面亮温 (在该文后续的表述中简称海面亮温).

每个扫描角度都存在对应的模拟天线亮温和模拟海面亮温, 多个海况就得到多组结果. 用线性拟合, 计算出二者的对应关系, 即

$$[k, b] = \text{polyfit}(T_A, T_B) \quad (12)$$

其中, $\text{polyfit}(\cdot)$ 是线性拟合求解函数; T_A 是模拟天线亮温; T_B 是模拟海面亮温; k 是线性拟合斜率; b 是截距. 应用这一拟合参数, 飞行试验的中心亮温应该为: $T_B = T_A k + b$. 为了使模型计中对应的拟合参数能够用于飞行试验的海面亮温提取, 模型中的天线方向图、飞行参数、接收机相对相位差必须与试验的相关参数保持一致.

模拟海面亮温可根据海面亮温模型直接读取, 根据全极化微波辐射计的天线温度表达式^[17] 得到模拟天

线亮温,即

$$\bar{T}_{A,e} = C_e \int_{4\pi} \bar{F}_n(\hat{k}) \bar{R}(\psi) \bar{T}_B(\hat{k}) d\Omega \quad (13)$$

其中, $\bar{T}_{A,e}$ 表示 4 个 Stokes 参数对应的天线温度向量; e 表示垂直/水平极化状态; C_e 是不同极化的归一化天线方向图系数; $\bar{F}_n(\hat{k})$ 是天线方向图矩阵; $\bar{R}(\psi)$ 为极化旋转矩阵; ψ 为极化旋转角; $\bar{T}_B(\hat{k})$ 为场景的 4 个 Stokes 亮

$$\bar{F}_n = \begin{bmatrix} |f_{n,vv}|^2 & |f_{n,vh}|^2 & \text{Re}(f_{n,vv}f_{n,vh}^*) & -\text{Im}(f_{n,vv}f_{n,vh}^*) \\ |f_{n,hv}|^2 & |f_{n,hh}|^2 & \text{Re}(f_{n,hv}f_{n,hh}^*) & \text{Im}(f_{n,hv}f_{n,hh}^*) \\ 2\text{Re}(f_{n,vv}f_{n,hv}^*) & 2\text{Re}(f_{n,hv}f_{n,vh}^*) & \text{Re}(f_{n,vv}f_{n,hh}^*) + \text{Re}(f_{n,vh}f_{n,hv}^*) & -\text{Im}(f_{n,vv}f_{n,hh}^*) + \text{Im}(f_{n,vh}f_{n,hv}^*) \\ 2\text{Im}(f_{n,vv}f_{n,hv}^*) & -2\text{Im}(f_{n,hv}f_{n,vh}^*) & \text{Im}(f_{n,vv}f_{n,hh}^*) + \text{Im}(f_{n,vh}f_{n,hv}^*) & \text{Re}(f_{n,vv}f_{n,hh}^*) - \text{Re}(f_{n,vh}f_{n,hv}^*) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $f_{n,ab}$ ($ab = vv, hh, vh, hv$) 是无单位的、归一化的天线电压方向图, 满足如下关系:

$$\max(|f_{n,vv}|^2 + |f_{n,vh}|^2) = \max(|f_{n,hh}|^2 + |f_{n,hv}|^2) \equiv 1 \quad (15)$$

图 5 给出 APMR 的 10.7 GHz 天线方向图的实测结果.

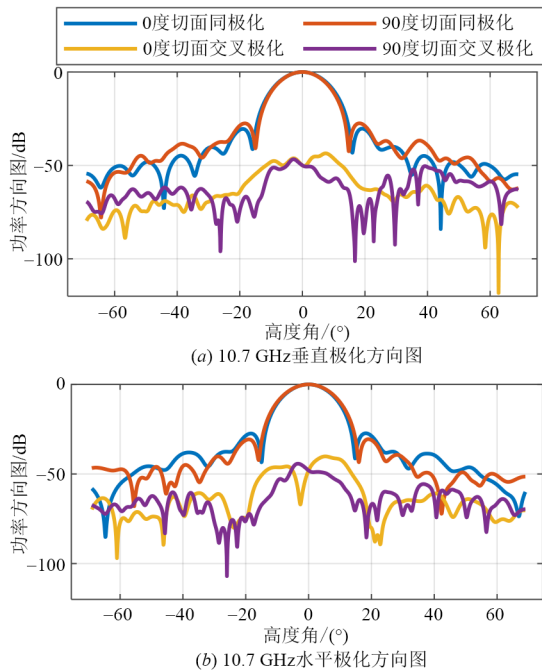


图 5 10.7 GHz 实测天线方向图

极化旋转角的计算是机载微波辐射计观测数据处理另外一个关键环节^[18]. 飞机飞行姿态的变化幅度较大, 飞行姿态尤其是滚动和俯仰对于观测入射角和极化旋转角影响较大^[19]. 极化旋转角 ψ 对应 4 个 Stokes 参数的极化旋转矩阵 $\bar{R}(\psi)$ 为

向量. 由于天线观测区域内亮温是变化的, 尤其是天线波束较宽的情况, 需要在所考虑天线方向图的有效范围内 (通常大于 5 倍 3 dB 波束宽度), 计算每个微小面元的方向图和亮温的积分, 最终得到总的天线温度. 全极化天线方向图 $\bar{F}_n(\hat{k})$ 是一个对于 4 个 Stokes 极化方向图互相关的综合校正, 其可表示为 4×4 的矩阵, 即

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \psi & \sin \psi \sin \psi & -\sin \psi \cos \psi & 0 \\ \sin \psi \sin \psi & \cos \psi \cos \psi & \sin \psi \cos \psi & 0 \\ 2\sin \psi \cos \psi & -2\sin \psi \cos \psi & \cos \psi - \sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式 (16) 的 4 行对应 $\bar{F}_n(\hat{k})$ 的 4 行极化状态. 姿态变化不但影响极化旋转, 同时使得入射角发生改变, 入射角偏差影响天线方向图与海面亮温匹配的准确性, 因此姿态影响必须考虑. 这需要根据姿态和扫描角度信息进行坐标系转换, 在标准航线坐标系下最终得到整个波束所有点的入射方向并分别计算入射角, 根据极化向量和实际天线接收基准方向来计算极化旋转角.

4 数据处理与结果分析

4.1 天线亮温定标结果

APMR 于 2020 年 6 月 25 日在海上进行首次飞行试验. 飞机从山东烟台胜利机场出发, 到达海区后进行从北往南然后从南往北的往返飞行, 共计 3 个往返观测. 各波段实测灵敏度以及定标精度已更新于表 2. 选取一组往南飞行时观测的海面的实验数据. 在其全部的 5 个波段中, X (10.7 GHz) 波段、K2 (23.8 GHz) 波段和 Ka 波段 (37 GHz) 数据较好. 这 3 个波段的电压参数经过定标以后对应亮温如图 6 所示.

从图中亮温数据可以看出, APMR 的有效观测角度范围超过 $\pm 20^\circ$. 就水平和垂直两个极化而言, 其每个扫描周期中, 亮温随扫描角度变化的趋势都符合预期, 并且不同扫描周期的数据具有很强的 consistency. 图 6(b) 和 (e) 给出 X 波段和 Ka 波段全极化辐射计测量的 T_3 和 T_4 极化亮温 (K2 波段为双极化), T_3 和 T_4 随着扫描角度呈现出明显的单调性, 这是机载全极化微波辐射计交轨扫描的极化特征.

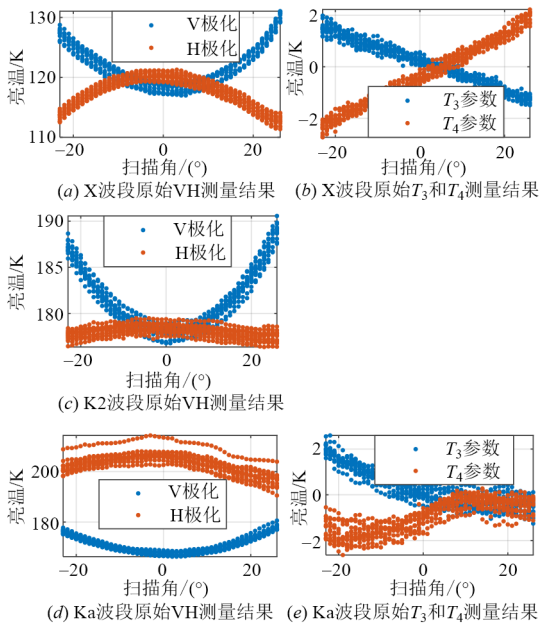


图 6 APMR 观测的原始亮温数据

4.2 海面亮温的提取

4.2.1 天线和海面亮温模型

以 X 波段为例,分析天线方向图的影响. 本文匹配了 2020 年 6 月 25 日观测期间的欧洲中期数值预报中心提供的 ERA5 再分析数据,利用 FASTEM5^[20]和 MPM93 大气吸收系数模型^[21]以及海面发射率的相关因素^[22],模拟了随机海况下在不同的扫描角度下的波束中心的海面亮温,其结果如图 7(c)和图 7(d)所示. 在每个扫描角度下,对 $\theta=0^\circ \sim 40^\circ$ 波束角度范围内的天线方向图进行积分,最后得到天线方向图积分后的天线亮温,其随扫描角度的变化如图 7(a)和图 7(b)所示. 在建模和积分计算的过程中考虑了飞行姿态的影响:翻滚角度 $2.8^\circ \pm 0.4^\circ$,俯仰角度 $2.7^\circ \pm 0.1^\circ$,偏航角度 $2.9^\circ \pm 0.2^\circ$;天线方向图积分时考虑交叉极化造成的影响;计算极化旋转角度时,天线极化接收的基准方向采用路德维希的第三种相关定义^[23].

从图 7(a)和图 7(c)来看, T_v 和 T_h 对应的模拟海面亮温与天线方向图积分后的模拟天线亮温差异很小,差值保持在 1 K 之内,这说明海面亮温的提取过程对前两个亮温参数的影响较小. 但是从图 7(b)和图 7(d)来看, T_3 和 T_4 这 2 个亮温参数对应的模拟海面亮温和模拟天线亮温之间存在的差异较为明显.

图 7(d)中模拟海面亮温的 T_3 和 T_4 参数随扫描角度变化保持稳定. 但图 7(b)积分后的模拟天线亮温中,虽然 T_4 整体仍相对平稳,但是随扫描角度的变小,亮温逐步趋于 0 K. 这是由于模拟的海面 T_4 亮温在天线波束区域内随方位角周期性变化^[24],在天线方向图积分时会相互抵消,而随着扫描角度的减小,波束区域内 T_4 的

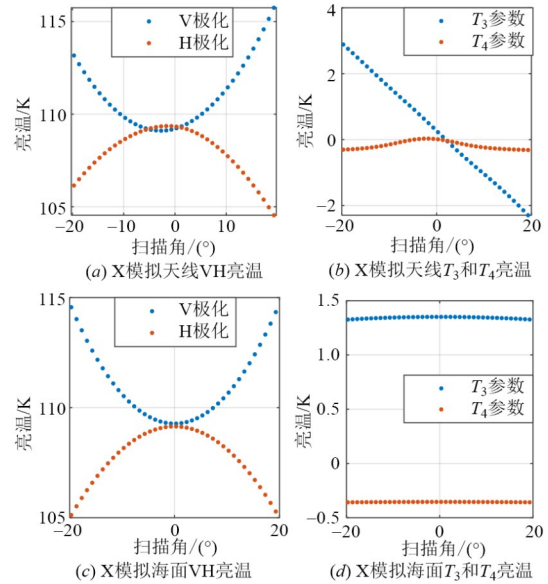


图 7 X 波段模拟得到的海面亮温以及天线亮温

中心对称性增强,在积分后抵消就更彻底. 同样的原因,随扫描角度的变小, T_3 也应逐步趋于 0 K,但由于交叉扫描时还存在姿态的偏差, T_3 参数又受到极化旋转的影响,因而其表现出明显的随扫描角度变化的趋势.

相较于图 7(b)模拟天线的 T_3 和 T_4 亮温结果,在图 6(b)实际飞行试验的结果中,除 T_3 外, T_4 也出现了明显的随扫描角变化的趋势,并且 T_3 和 T_4 亮温的比例稳定在 $1:(-1.5)$,这是由于实际接收机 v 和 h 通道存在相对相位差,因此模型中也要考虑加入通道相位差. 模型修正后,多个海况下的模拟结果如图 8 所示.

在扫描角度和风向条件确定时,利用得到的模拟

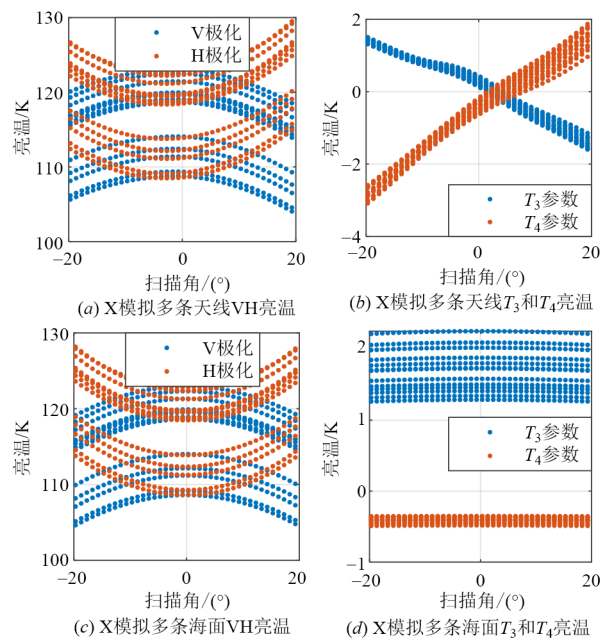


图 8 X 波段多个海况对应扫描周期的模拟海面、天线亮温

海面心亮温和模拟天线亮温求解线性拟合参数,并用于实际飞行试验海面亮温的求解.如图8所示,模拟多个不同海况在给定相对风向条件下的结果,由于一个扫描周期对应40个扫描角度,这样可以一次性求解40组拟合参数.

从图8的结果来看,在每个扫描角度下,不同海况条件模拟出来的海面和天线2组亮温参数呈现良好的线性对应关系,这是采用线性拟合的依据.为获取准确的拟合参数,需明确相对风向和扫描角度.准确的扫描角度可以通过姿态校准得到,而相对风向可采用风向匹配方法来获取.

图8(d)中每个扫描周期海面亮温的 T_3 和 T_4 参数几乎没有变化,基于这一特性,使用 $1^\circ\sim 360^\circ$ 的风向来进行逐次校正.当校正结果中整个扫描周期变对应的变异系数(均方差除以均值)最小时, T_3 和 T_4 亮温在整个扫描周期内最平稳,证明该试验结果被成功校正.由于此时相对风向也可直接得出,将该方法称为风向匹配方法.

4.2.2 风向匹配方法及验证

在风向匹配方法的辅助下,可以从试验获取的天线亮温中提取到海面亮温.海面亮温的准确性直接影响海面相关参数的反演结果,因此,风向匹配方法的正确性以及提取到海面亮温的准确性都需要验证.在风向为 40° 时,生成一个扫描周期的模拟天线亮温和海面亮温,称为参考天线亮温和参考海面亮温,在360个风向角度下逐次对参考天线亮温来校正,不同假设风向下得到的海面 T_3 和 T_4 亮温结果如图9所示.

由于360个校正结果无法全部在图中体现,因此从

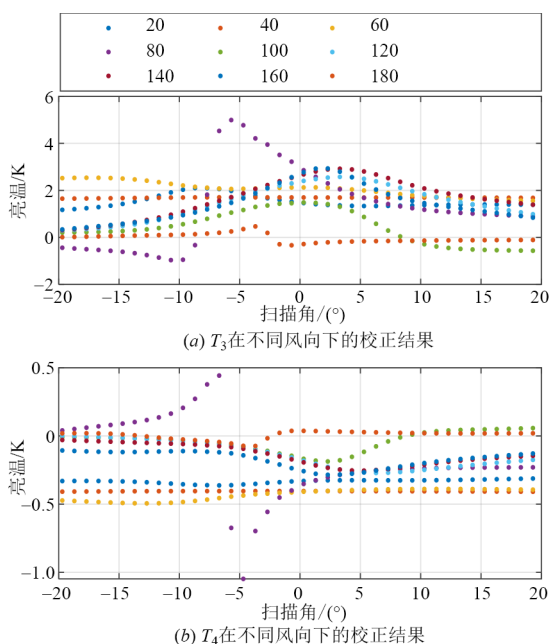


图9 X波段模拟天线亮温 T_3 和 T_4 的校正结果

图9节选了20度间隔的9个结果.校正结果随着相对风向角度改变而改变.如表3所示,在全部的校正结果中,风向在 40° 附近时对应的变异系数最小.

表3 验证试验X波段天线亮温校正结果

参数	39°	40°	41°
总变异系数	0.008 348	0.005 456	0.006 439
T_3 变异系数	0.008 305	0.005 375	0.006 343
T_4 变异系数	0.000 841	0.000 940	0.001 106
T_v 误差/K	0.014 700	0.015 000	0.015 300
T_h 误差/K	0.004 600	0.006 900	0.016 700
T_3 误差/K	0.069 600	0.068 500	0.067 300
T_4 误差/K	0.008 700	0.009 000	0.009 400

从表3的3个风向的校正结果的变异系数来看,该匹配方法可以得到正确的风向;此时,从通过线性拟合天线亮温提取到的4个Stokes参数与已知海面亮温的误差结果来看,使用线性拟合系数校正得到的结果是准确的.

为了使结果更具有普遍性,利用模型生成了 $10^\circ\sim 360^\circ$ 、间隔为 10° 的36组风向的参考模型,并用风向匹配方法从天线亮温中提取海面亮温,结果如图10所示.

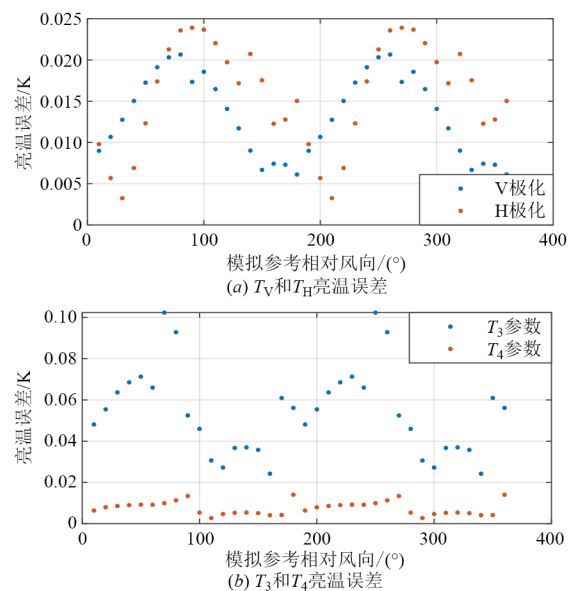


图10 多组参考从天线亮温提取结果的误差

36组参考模型匹配到的风向误差均在 1° 之内;提取到的亮温与参考亮温对比, T_v 和 T_h 误差均在0.03 K以内, T_3 和 T_4 的误差均保持在0.1 K以内.这表明利用风向匹配方法从天线亮温中提取到海面亮温的方法可行.

4.2.3 机载试验提取到的海面亮温结果

机载飞行试验当日,天气状况良好.查阅ERA5模

型数据,飞行时段海洋表面温度 296.219 7 K, 10 m 处风速 5.449 5 m/s, 相对风向 59.738 6°. 将天线风向匹配方法应用于飞行试验所得到的 X 波段的亮温, 提取出校正后的海面亮温. 其风向匹配结果如图 11 所示.

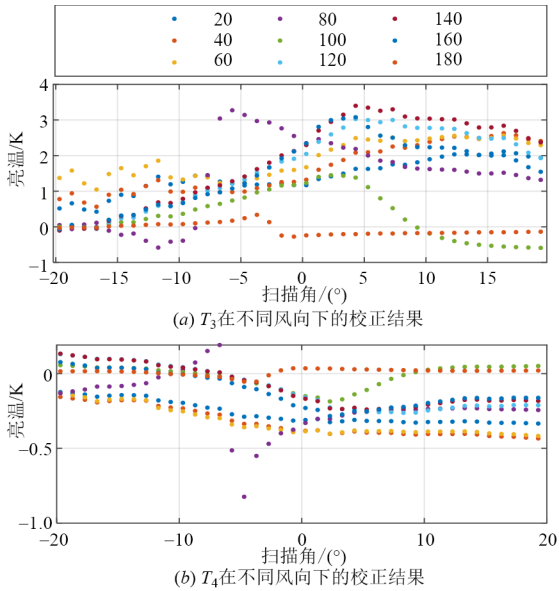


图 11 X 波段实际飞行数据 T_3 和 T_4 的校正结果

如表 4 所示, 在全部的 360 组校正结果中, 变异系数最小的风向出现在 68° 附近.

表 4 飞行试验 X 波段天线亮温校正结果

参数	67°	68°	69°
总变异系数	0.175 648	0.172 862 5	0.178 895
T_3 变异系数	0.172 108	0.169 715 6	0.176 231
T_4 变异系数	0.035 087	0.032 833 8	0.030 761

由风向匹配方法得出当时风向为 68°, 这与实际风向 59.738 6° 的误差为 8.261 4°. 此误差与 windSat10°~20° (随风速变化) 的设计风向精度相比, 在可接受范围. 利用该风向对应的拟合系数, 得到飞行试验对应的校正结果, 其天线亮温和校正后的海面亮温如图 12 所示.

图 12 将不同扫描周期的结果进行平均, 作为最终结果并用曲线标示. 此时, 在单个扫描周期下 T_3 和 T_4 参数的平均值占比为 2.017 K 和 -0.321 K, 均方差为分别为 0.347 K 和 0.067 7 K. 从提取到的海面亮温结果来看, 其符合实际亮温和扫描角度的对应关系.

与同时期匹配得到的卫星数据及 ERA5 模型得到的亮温结果相比, 从飞行数据提取得到的海面亮温拥有相同的变化趋势. 但是受大气参数及实际定标等因素的影响, 低空飞行数据与高空卫星数据存在差异. 二者的对照情况如图 13 所示.

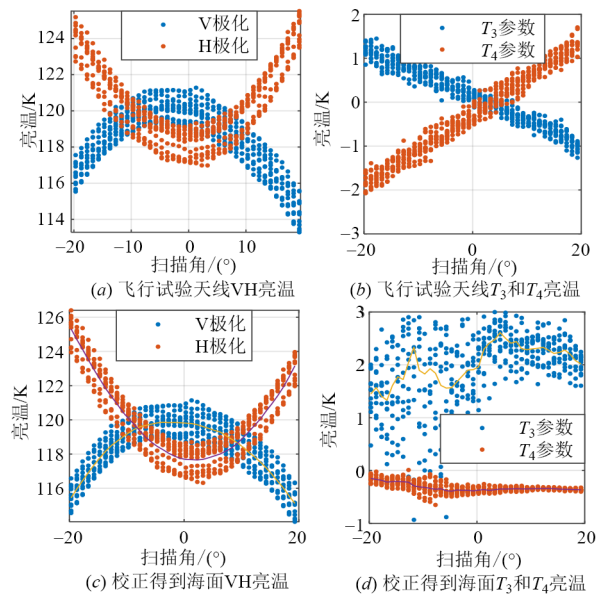


图 12 X 波段飞行数据天线亮温和对应海面亮温

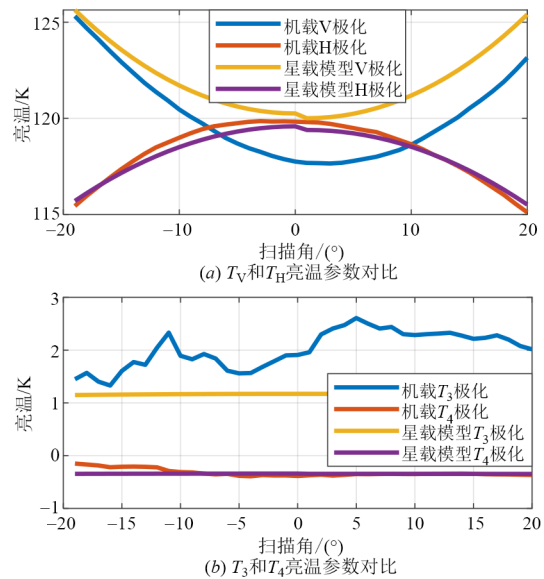


图 13 X 波段飞行数据海面亮温和星载模型数据

总体来看, 将海面亮温提取方法应用于真实机载试验, 得到的结果存在误差. 该误差对比理想模型提取到亮温地误差会大一些. 这是由于 ERA5 海面亮温模型和实际海面参数存在差异, 接收机通道相干噪声的影响未完全消除, 以及天线接收到的旁瓣亮温等因素影响.

5 结论

APMR 是国内首台机载多频段全极化微波辐射计, 用于海洋表面和大气参数, 以及陆表特征的遥感, 同时可以配合卫星同类载荷进行同步定标检验. 该文介绍了国家重大科技基础设施航空遥感系统的主要载荷之

一的 APMR 的系统组成以及性能参数.

所得数据采取全极化定标和海面亮温提取的二级数据处理方法. 海面亮温提取的过程中, 使用风向匹配方法, 在获取海面亮温参数的同时得到相对风向. 该方法应用于理想的天线亮温, 其提取到的亮温误差小于 0.1 K, 同步得出的风向误差也在 1° 之内, 这印证了风向匹配方法的正确性. 将此方法推至飞行试验数据的处理, 其匹配相对风向在 68° 附近, 校正结果与理想海面亮温的特点一致: T_3 和 T_4 亮温参数在小扫描角度时, 其对应亮温基本不随扫描角度变化, 其对应的变异系数分别为 0.169 715 6 和 0.032 833 8.

飞行试验数据结果证明仪器工作正常, 定标灵敏度以及系统稳定性的参数符合预期, 数据处理最终结果与理论结果一致, 这反映出 APMR 系统设计的正确性, 为机载辐射计海面亮温的准确获取提供了切实可行的方案.

致谢 感谢国家重大科技基础设施航空遥感系统的支持.

参考文献

- [1] TSANG L. Polarimetric passive microwave remote sensing of random discrete scatterers and rough surfaces[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1991, 5(1): 41-57.
- [2] VEYSOGLU M E, YUEH H A, SHIN R T, et al. Polarimetric passive remote sensing of periodic surfaces[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1991, 5(3): 267-280.
- [3] IRISOV V G, KUZMIN A V, POSPELOV M N, et al. The dependence of sea brightness temperature on surface wind direction and speed. theory and experiment[C]// *IGARSS' 91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management*. Espoo: IEEE, 1991: 1297-1300.
- [4] WENTZ F J. Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 960-972.
- [5] GAISER P W, GERMAIN K M ST, TWAROG E M, et al. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: Sensor description and early orbit performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2347-2361.
- [6] DZURA M S, ETKIN V S, KHRUPIN A S, et al. Radiometers-polarimeters: Principles of design and applications for sea surface microwave Emission Polarimetry[C]// *IGARSS' 92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Houston: IEEE, 1992: 1432-1434.
- [7] YUEH S H, WILSON W J, LI F K, et al. Polarimetric measurements of sea surface brightness temperatures using an aircraft K-band radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1): 85-92.
- [8] SKOU N, LAURSEN B, SOBJAERG S. Polarimetric radiometer configurations: Potential accuracy and sensitivity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2165-2171.
- [9] PIEPMEIER J R, GASIEWSKI A J. High-resolution passive polarimetric microwave mapping of ocean surface wind vector fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 606-622.
- [10] 李峰. 国产新舟 60 遥感飞机交付验收[J]. *新长征(党建版)*, 2020(4): 61.
LI F. Delivery and acceptance of domestic Xinzhou 60 remote sensing aircraft[J]. *New Long March: Party Building Edition*, 2020(4): 61. (in Chinese)
- [11] 党鹏举, 何征, 李鹏飞. 基于数字相关型全极化微波辐射计的灵敏度分析[J]. *电子学报*, 2020, 48(10): 1938-1942.
DANG P J, HE Z, LI P F. Sensitivity analysis based on digital correlation fully polarized microwave radiometer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(10): 1938-1942. (in Chinese)
- [12] WANG H J. Multi-frequency dual-polarization spaceborne microwave radiometer antennas[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen: IEEE, 2020: DOI:10.23919/EuCAP48036.2020.9135380.
- [13] 段永强. 微波辐射计系统的信号传递模型及性能指标的仿真研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
DUAN Y Q. Research on Simulation of Signal Transmission Model and Indicators of Microwave Radiometer System[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [14] 李彬. 一种新型全极化微波辐射计定标源研制及定标方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2017.
LI B. Research on a New Type of Fully Polarized Microwave Radiometer Calibration Source and Its Calibration Method[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [15] 段永强, 王振占, 张升伟. 风云三号(D)气象卫星微波湿度计系统建模和仿真[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(6): 1549-1556.
DUAN Y Q, WANG Z Z, ZHANG S W. Modeling and

simulating of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3(D) satellite[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020, 42(6): 1549-1556. (in Chinese)

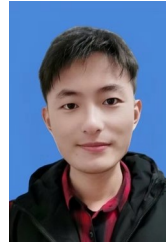
- [16] DING J, WANG Z Z, DUAN Y Q, et al. A digital-simulation model for a full-polarized microwave radiometer system and its calibration[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4888.
- [17] PIEPMEIER J R, LONG D G, NJOKU E G. Stokes antenna temperatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(2): 516-527.
- [18] 施健康, 陆文, 严卫, 等. 星载极化相关型全极化微波辐射计天线交叉极化校正技术(I): 天线温度方程推导[J]. 物理学报, 2013, 62(7): 078402.
SHI J K, LU W, YAN W, et al. Antenna cross-polarization correction for spaceborne polarimetric microwave correlation radiometer(I): Derivation of the antenna temperature equation[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(7): 078402. (in Chinese)
- [19] PENG J Z, MISRA S, PIEPMEIER J R, et al. Soil moisture active/passive(SMAP) L-band microwave radiometer post-launch calibration upgrade[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(6): 1647-1657.
- [20] KAZUMORI M, ENGLISH S J. Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(689): 1354-1375.
- [21] LIEBE H J, HUFFORD G A, COTTON M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz[J]. Apet, 1993, 3(1): 1-10.
- [22] LI Y Y, WANG Z Z, HU Y Q, et al. Influence of oceanic parameters on Aquarius L-band sea surface emissivity[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1961(1): 012065.
- [23] LUDWIG A. The definition of cross polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1973, 21(1): 116-119.
- [24] 马小峰, 林明森, 周武, 等. 新型海洋微波辐射计遥感原理与发展[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(4): 622-629.
MA X F, LIN M S, ZHOU W, et al. Principle and development of new microwave radiometer to observe ocean [J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(4): 622-629. (in Chinese)

作者简介



王振占 男, 1969 年出生, 河北秦皇岛人. 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”引进人才. 曾承担风云三号微波湿度计定标和数据处理算法研究, 嫦娥二号微波探测仪月壤辐射传输理论和应用方法研究, 海洋二号微波辐射计定标、数据处理及应用研究, 全极化微波辐射计定标、数字相关器及应用技术研究等科研任务. 现主要从事微波遥感新技术及应用技术等

E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn



丁 甲(通讯作者) 男, 1996 年出生, 山东枣庄人. 2019 年本科毕业于山东科技大学通信工程专业并获省优秀毕业生, 同年保研至中国科学院大学, 现在国家空间科学中心中国科学院微波遥感技术重点实验室攻读博士学位. 主要从事全极化辐射计的天线方向图校正、全极化辐射计的数字孪生系统仿真、全极化定标方法的探究等方面的研究工作. 中国电子学会会

员编号: E190021177A.

E-mail: 1075767279@qq.com; dingjia19@mailsucas.ac