

HY-2A 卫星大气校正微波辐射计在轨数据定标和检验研究

王振占^{1,2}, 张德海^{1,2}, 赵 谨^{1,2}, 李 芸^{1,2}

(1. 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

[摘要] 海洋二号(HY-2A)卫星大气校正微波辐射计(ACMR)是为雷达高度计提供大气路径延迟校正的微波辐射计。本文针对ACMR热真空定标试验的原理、方法、实施过程及试验结果进行了阐述和分析,得到了ACMR 3个频率的辐射传输系数和非线性系数,并进行了天线订正的发射前算法分析,给出了天线温度系数。利用这些系数对在轨数据进行了处理,得到了在轨天线温度转换系数,并与Jason-1、Jason-2卫星上搭载的微波辐射仪(JMR)进行了匹配比较,结果表明一致性良好。

[关键词] HY-2A; ACMR; 定标和检验

[中图分类号] TP732.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0044-09

1 前言

海洋二号(HY-2A)卫星大气校正微波辐射计(ACMR)是为雷达高度计提供大气路径延迟校正的微波辐射计。图1为ACMR观测天线(左侧)和3个定标天线(右侧)的结构。

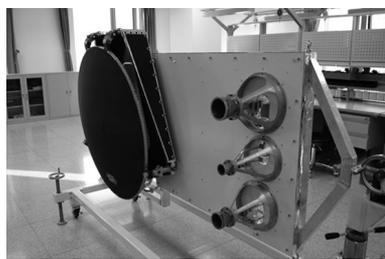


图1 ACMR的天线分布

Fig.1 Configuration of ACMR antenna

ACMR分系统主要性能指标见表1。其中,3路观测信号共用同一副抛物面天线。观测天线口径 920 ± 10 mm,天线净增益 ≥ 42 dBi,天线旁瓣电平抑制 ≥ 20 dB,天线交叉极化隔离度 ≥ 20 dB。

表1 HY-2A 卫星ACMR主要性能指标

Table 1 Main performance indicators of ACMR on HY-2A satellite

主要性能指标	通道1	通道2	通道3
中心频率/GHz	18.7	23.8	37.0
工作带宽(3 dB)/MHz	250	250	500
带宽误差/%	± 10	± 10	± 10
天线波束宽度(3 dB)/(°)	1.4 ± 0.2	1.1 ± 0.2	0.6 ± 0.1
极化方式	V/H	V/H	V/H
观测天线主波束效率/%	≥ 90	≥ 90	≥ 90
定标天线波束宽度(3 dB)/(°)	≤ 16	≤ 16	≤ 16
标称地面足迹(965 km 高度)/km	24	19	10
接收机噪声系数/dB	≤ 6.5	≤ 6.5	≤ 6.5
灵敏度/K	优于0.4	优于0.4	优于0.4
动态范围/K	3~350	3~350	3~350
线性度	优于0.999	优于0.999	优于0.999
定标精度(180~320 K)/K	≤ 1	≤ 1	≤ 1
积分时间/ms	200	200	200

观测天线 37.0 GHz 通道电轴指向平行于安装

[收稿日期] 2013-04-22

[作者简介] 王振占(1969—),男,河北青龙县人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为微波遥感新技术及应用技术;

E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn

面,对地指向星下点(+Z方向)工作,与+Z轴交角 $\leq 0.1^\circ$;观测天线18.7 GHz通道电轴指向平行于安装面,与+Z轴有固定夹角,角度偏向+X方向 $\leq 2.5^\circ$;观测天线23.8 GHz通道电轴指向平行于安装面,与+Z轴有固定夹角,角度偏向-X方向 $\leq 2.5^\circ$;定标天线电轴垂直于安装面,指向冷空工作。

HY-2A 卫星 ACMR 定标采用实时两点定标的方案。其中冷定标点采用冷空背景,通过独立的天线接收来自冷空的辐射2.7 K来实现。热定标点采用内部的匹配负载,其温度与微波开关的温度相同。两点定标的硬件实现方式是微波开关,在一个周期内分别观测冷空、热源各一次,然后观测地球目标。这样,通过冷定标点和热定标点的输出电压及温度就可以产生定标方程,进而为本观测周期内观测地球目标的输出结果进行定标,如图2所示。

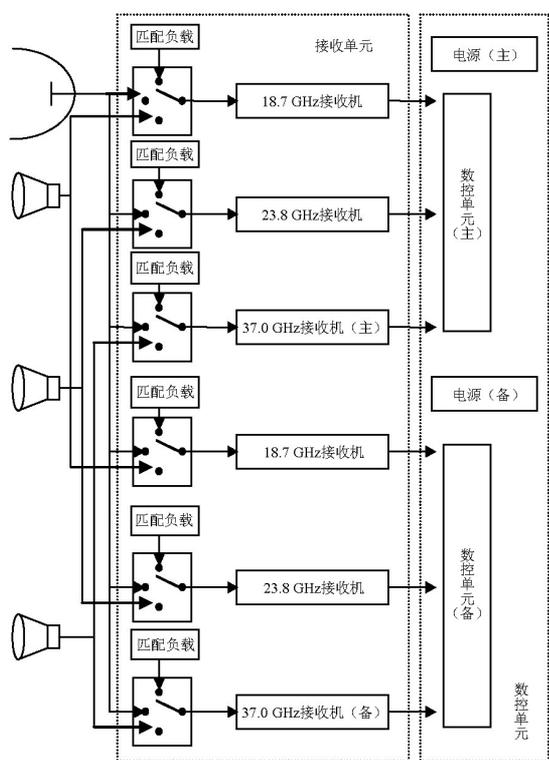


图2 ACMR原理图

Fig.2 The composition schematics of ACMR

2 ACMR 定标方程

ACMR 类型的微波辐射计是一种特殊形式的实时定标微波辐射计。定标采用微波开关分别观测冷空和内部常温负载来实现。这种体制的辐射计受到观测条件的限制,天线不能扫描,因此不能成

像。这样一来,由于观测目标的辐射计电路与定标的电路不同,所以需要分别进行路径传输参数的定标以及辐射计系统响应特性(非线性)的定标。这就需要有一个复杂的测试过程来确定这些参数。

通常情况下,观测路径和冷空定标路径上分别包括天线、连接波导和微波开关等一系列微波元件,这些元件都会对经过的信号产生衰减。同时由于这些元件不是理想的器件,自身的辐射信号也会加入最终接收信号中,所以需要确定每个传输元件的衰减和传输系数。而对于常温热负载,由于其通常与微波开关处于相同的温度环境,所以从热负载进入接收机的温度就是本身的噪声温度。

接收机入口的天线温度 T'_A 通过实时点定标来得到^[1]

$$T'_A = \frac{T_C V_H - T_H V_C}{V_H - V_C} + \frac{T_H - T_C}{V_H - V_C} \cdot V_A + Q \quad (1)$$

式(1)中, V_A 、 V_H 、 V_C 分别为接收机测量到的来自观测天线、热负载(热源)和冷空天线的电压输出; T_H 、 T_C 分别为内部热负载和冷空的亮温; Q 为非线性参数,其定义为

$$Q = u \left[\frac{T_H - T_C}{V_H - V_C} \right]^2 (V_A - V_H)(V_A - V_C) \quad (2)$$

式(2)中, u 为非线性系数,在发射前确定。把式(2)带入式(1)可以得到二次定标方程

$$T'_A = a_2 V_A^2 + a_1 V_A + a_0 \quad (3)$$

式(3)中, a_0 、 a_1 、 a_2 为定标方程的系数

$$a_0 = T_H - V_H G + u V_H V_C G^2 \quad (4)$$

$$a_1 = G - u(V_H + V_C)G^2 \quad (5)$$

$$a_2 = uG^2 \quad (6)$$

式(4)~式(6)中, G 为系统增益的倒数,通过热源和冷源的输入和输出确定

$$G = (T_H - T_C) / (V_H - V_C) \quad (7)$$

定标支路接收机入口的亮度温度(简称亮温) T_C 为

$$T_C = m_C T_{BC} + n_{1C} T_{WC} + n_{2C} T_{SC} \quad (8)$$

式(8)中, T_{BC} 在轨时为冷空背景温度2.7 K,在热真空定标中为冷源亮温; T_{WC} 为定标波导的温度; T_{SC} 为定标支路开关的温度; m_C 、 n_{1C} 、 n_{2C} 为与冷空定标路径有关的传输系数。

接收机入口的天线温度 T'_A 表示为

$$T'_A = m_A T_A + n_{1A} T_{WA} + n_{2A} T_{SA} \quad (9)$$

式(9)中, m_A 、 n_{1A} 、 n_{2A} 为与观测路径有关的传输系数; T_A 为观测天线口面接收的天线温度; T_{WA} 为观测波导的温度; T_{SA} 为观测支路开关的温度(假设定标支路

T_{SC} 、观测支路 T_{SA} 和热负载支路 T_{SH} 开关温度相同,都等于 T_H 。

$$T_H = T_{SH} \quad (10)$$

上述系数 m_A 、 n_{1A} 、 n_{2A} 、 m_C 、 n_{1C} 、 n_{2C} 全部需要事先通过地面定标试验确定。这样,发射前每个通道总共需要确定7个参数。这些参数与工作温度有关,要在不同温度下测量。

3 发射前热真空定标及结果分析

3.1 定标原理及过程

ACMR 在热真空定标中的测试方法见图3。HY-2A 卫星 ACMR 热真空定标试验环境模拟其在轨运行环境,其中真空罐热沉充液氮,用来模拟设备在轨运行所处的冷空环境;利用真空变温源模拟地球表面亮温,使其温度在 90 ~ 330 K 变化;真空冷定标源的温度稳定在 90 K 附近,使用液氮系统冷却,用来模拟冷空。观测天线反射面打开,变温源对准观测天线的3个馈源;冷源对准定标天线。

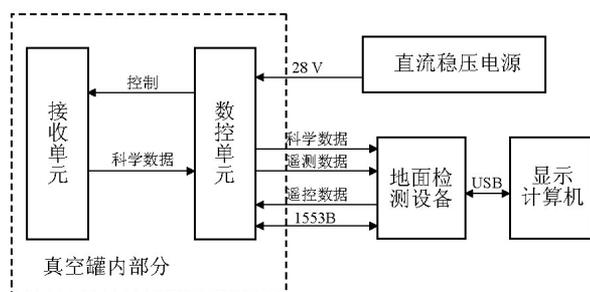


图3 热真空定标中的测试方法

Fig.3 Measuring method of thermal vacuum test of ACMR

由于冷源口面较小,不能同时覆盖3个定标天线,所以在定标过程中,通过控制冷源的升降,使其对准某一通道的定标天线,实现对该通道的定标。

整个定标试验需要 ACMR 在不同工作环境温度下进行。仪器温度分别设定为 10 °C、18 °C 和 25 °C,共3个测点。这些温度覆盖在轨工作温度 10 ~ 25 °C 的动态变化范围。这里的仪器温度采用整体的温控箱来控制:真空罐内的温度不变,通过温控系统控制黄色小舱的温度来模拟在轨运行的仪器温度,以接收机单元安装底板上测温点的温度为控温基准。本次试验只考察 HY-2A 卫星 ACMR 在上述3个温度点的灵敏度、线性度和定标准确度等主要技术指标,确定定标模型参数。

3.2 数据处理方法

3.2.1 定标目标黑体温度

黑体的平均温度 T_x 是所有铂电阻温度计 (PRT) 温度的加权和^[2]

$$T_x = \frac{\sum_{k=1}^m w_k T_k}{\sum_{k=1}^m w_k} + \Delta T_x \quad (11)$$

式(11)中, x 为试验中的热源、冷源和变温源; m 为每个目标(即热真空测试(T/V测试)中的地物目标黑体、冷空间黑体和内部热负载黑体,或在轨运行中的内部热负载黑体)的PRT数目; w_k 为每个PRT的权重,在发射前如果PRT良好,则权重为1,否则为0; ΔT_x 为校正因子,在发射前为0,但是在在轨运行中如果出现热偏差,则需要为这个校正因子赋值。

在T/V测试中,由于使用冷源目标(约90 K)作为低端定标源 T_{c0} ,所以对低温黑体的处理过程与上面高温黑体的过程相同。当在轨运行时,冷空定标约2.7 K。但是为了补偿由于卫星平台和地球临边的辐射贡献,冷空亮温2.7 K需要增加一个修正量 ΔT_c ,即

$$T_c = T_{c0} + \Delta T_c \quad (12)$$

ΔT_c 可以在发射前进行初步估计,但是最优数值要通过对发射后的数据进行分析来确定。

3.2.2 热敏电阻的定标系数

HY-2A 卫星 ACMR 主份测温电路和备份测温电路各提供32路测温电阻,分别用来测量观测天线、观测支路连接波导、定标天线、定标支路连接波导以及接收机内部开关、热负载和检波的温度。其中,主份测温电路和备份测温电路的定标方程为当温度 ≥ 1.77 °C 时,

$$T = aV^4 + bV^3 + cV^2 + dV + e \quad (13)$$

当温度 < 1.77 °C 时,

$$T = aV^2 + bV + c \quad (14)$$

式(13)和式(14)中, V 为测温电路的输出电压, V ;系数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 需要通过定标确定,这里省略。

3.2.3 定标电压计数值的处理

在辐射计一个定标周期中,辐射计天线观测目标黑体(地球)、热定标负载和冷目标黑体(冷空),产生数个采样点(取决于定标周期和数据采样时间),辐射计有对应电压数值输出。假设在此期间辐射环境没有发生改变,那么测量值之间的任何差异都是由噪声引起的。这个噪声可以通过平均来减小。

对于每次定标,黑体电压 V_w 要根据黑体内部采

样点的数目进行平均,如果样本之间的差值符合预定的限制(初始设置为标准偏差的3倍),那么这些样本的电压值就可以用来计算每个通道的电压值。冷空目标黑体电压数值的处理方法相同。

为了减小定标中的噪声,每个观测电压都要和其相邻观测电压值进行卷积,不同的观测值赋给其不同的权重。这样,平均电压数值 \bar{V}_x ($x=H,C$) 就可以表示为

$$\bar{V}_x = \frac{1}{n+1} \left[\sum_{i=-n}^n \left(1 - \frac{|i|}{n+1} \right) V_x(t_i) \right] \quad (15)$$

式(15)中, t_i 为目前定标周期之前或者之后的时间; n 为定标周期之前或者之后观测样本数。如果辐射计的定标周期为 τ , 目前定标周期时间为 t_0 , 那么 $t_i = t_0 + i \cdot \tau$ 。

3.3 ACMR 模型参数的获取

当不考虑系统非线性时,非线性系数 $u=0$ 。根据式(3)和式(9),可以得到定标方程

$$T_A = \frac{V_H - V_A}{V_H - V_C} \left(\frac{c_1}{a_1} T_{BC} + \frac{c_2}{a_1} T_{WC} + \frac{c_3}{a_1} T_H \right) + \frac{V_A - V_C}{V_H - V_C} \frac{1}{a_1} T_H - \frac{a_2}{a_1} T_{WA} - \frac{a_3}{a_1} T_H \quad (16)$$

表2 用 $p_1 \sim p_6$ 表示的ACMR两个支路的传输参数

Table 2 ACMR transfer parameters of $p_1 \sim p_6$ at each path

频率/GHz	检波温度/K	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
18.7	296.817 3	0.797 6	0	0.226 9	1.034 3	0.031 9	0
	290.949 7	0.795 1	0.058 3	0.143 3	1.001 8	0	0
	283.310 7	0.794 6	0.155 3	0.052 4	1.000 5	0	0
23.8	296.165 5	0.783 8	0	0.456 5	1.253 2	0.258 8	0
	290.342 8	0.781 7	0	0.394 7	1.188 6	0.192 3	0
	282.762	0.775 8	0	0.239 3	1.026 7	0.026	0
37.0	300.825	0.736 5	0.187	0.075 4	1.002 4	0	0
	294.695 8	0.733	0.143 4	0.118 1	1.002 8	0	0
	286.960 1	0.733 2	0.172 6	0.089 5	1.001 5	0	0

3.4 灵敏度测量结果

灵敏度也称为温度分辨率(ΔT_B),是指辐射计对目标辐射变化的最小分辨能力。通常用辐射计测量给定稳定目标输出电压的标准差(STD)与接收机增益的商表示。利用内部热源在温度不变情况下的输出变化来估算,方法如下

$$\Delta T_B = \text{STD}(V_{Hi}/G_i)_{i=1:N} \quad (19)$$

式(19)中, N 为总测量次数,这里采用50包测量的电压数据进行平均; G 定义见式(7)。ACMR各通道的灵敏度见表3。

如果冷源升温,变温源温度不变,那么根据式(3)和式(8)同样可以得到 T_{BC} 的公式

$$T_{BC} = \frac{V_H - V_C}{V_H - V_A} \left(\frac{a_1}{c_1} T_A + \frac{a_2}{c_1} T_{WA} + \frac{a_3}{c_1} T_H \right) - \frac{1}{c_1} \frac{V_A - V_C}{V_H - V_A} T_H - \frac{c_2}{c_1} T_{WC} - \frac{c_3}{c_1} T_H \quad (17)$$

根据式(16),传输参数也可以用系数的比 $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ 表示,即

$$T_A = \frac{V_H - V_A}{V_H - V_C} (p_1 T_{BC} + p_2 T_{WC} + p_3 T_H) + \frac{V_A - V_C}{V_H - V_C} p_4 T_H - p_5 T_{WA} - p_6 T_H \quad (18)$$

采用最小二乘法得到传输参数 $p_1 \sim p_6$, 然后根据这些参数计算系数 a_1, a_2, a_3, c_1, c_2 和 c_3 。当这6个系数得出以后可根据测量值与真实值之间的差计算非线性系数 u 。试验中主份共计获得不同仪器温度下140个温度点的3个通道的测量数据,每个通道的温度曲线9条,共计27条;备份获得了89个温度点数据,温度曲线共计18条。表2给出根据主份所有测量数据,采用最小二乘法得到的传输参数 $p_1 \sim p_6$ 。

表3 ACMR灵敏度统计表

Table 3 Sensitivity statistics of each channel of ACMR

频率/GHz	检波温度/K	变源最大	冷源灵敏度/热源灵敏度/	
		灵敏度/K	K	K
18.7	296.82	0.14	0.06	0.1
	291.03	0.15	0.07	0.1
	283.38	0.15	0.07	0.1
	296.17	0.13	0.06	0.08
23.8	290.45	0.14	0.07	0.09
	282.86	0.15	0.08	0.1
	300.82	0.18	0.1	0.12
37.0	294.75	0.18	0.1	0.12
	287.01	0.19	0.1	0.13

3.5 定标误差

ACMR 定标误差是指经过非线性修正以后总的剩余残差。在修正冷、热偏差和非线性误差以后,主份3个通道在3个底板温度下的剩余残差见表4,所用的方法是利用辐射计测量的天线温度减去变温源的亮温。测量的天线温度就是辐射计经过两点定标并考虑传输路径的贡献以后得到的天线温度;变温源亮温是指其内部热敏电阻测量的温度乘以发射率得到的亮温。这里定标源的实测发射率约为0.999 2。从表4中可见修正后的残差在±0.2 K以内。

4 在轨天线旁瓣和交叉极化修正的发射前算法

4.1 冷空定标天线温度的计算

假设定标天线看到地球的主极化效率为 η_{EM} ,地球交叉极化效率为 η_{EX} ,舱板主极化效率为 η_{PM} ,舱板交叉极化效率为 η_{PX} ,冷空效率为 η_C ,则冷空定标天线观测到的亮温就不完全是 T_{BC} ,而是加权的天线温度 T_{AC} ,可以表示为

$$T_{AC} = \eta_{EM}T_{EM} + \eta_{EX}T_{EX} + \eta_{PM}T_{PM} + \eta_{PX}T_{PX} + \eta_C T_{BC} \quad (20)$$

表4 ACMR定标残差统计表

Table 4 The calibration residuals of each channel of ACMR at different temperatures

频率/GHz	检波温度/K	平均定标残差/K
18.7	296.82	0.11
	291.03	0.12
	283.38	0.18
23.8	296.17	0.07
	290.45	0.08
	282.86	0.15
37.0	300.82	0.06
	294.75	0.1
	287.01	0.14

式(20)中, T_{EM} 、 T_{EX} 、 T_{PM} 、 T_{PX} 分别为地球主极化和交叉极化亮温、舱板的主极化和交叉极化亮温。对于ACMR,假设地球、舱板的影响不分极化差异,则式(20)可以简化为

$$T_{AC} = (\eta_{EM} + \eta_{EX})T_E + (\eta_{PM} + \eta_{PX})T_P + \eta_C T_{BC} \quad (21)$$

这里,假设 $T_{EM} = T_{EX} = T_E$, $T_{PM} = T_{PX} = T_P$ 。因此当已知地球表面亮温和舱板温度时,就可以计算实际接收到的天线温度。表5~表7给出参数的系数。

表5 18.7 GHz冷空天线参数

Table 5 Cold space antenna parameters of 18.7 GHz

参数	主波束效率	主波束交叉极化效率	地球效率	地球交叉极化效率	舱板效率	舱板交叉极化效率	冷空效率	冷空交叉极化效率
平均值	0.912 4	0.000 7	0.004 8	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.994 2	0.000 8
方差	0.003 1	0.000 2	0.000 2	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.000 2	0.000 2

表6 23.8 GHz冷空天线参数

Table 6 Cold space antenna parameters of 23.8 GHz

参数	主波束效率	主波束交叉极化效率	地球效率	地球交叉极化效率	舱板效率	舱板交叉极化效率	冷空效率	冷空交叉极化效率
平均值	0.883 8	0.000 6	0.005 8	0.000 6	0.001 5	0.000 6	0.989 5	0.002 0
方差	0.005 9	0.000 1	0.000 8	0.000 1	0.000 3	0.000 1	0.000 7	0.000 4

表7 37.0 GHz冷空天线参数

Table 7 Cold space antenna parameters of 37.0 GHz

参数	主波束效率	主波束交叉极化效率	地球效率	地球交叉极化效率	舱板效率	舱板交叉极化效率	冷空效率	冷空交叉极化效率
平均值	0.889 1	0.002 8	0.005 4	0.000 9	0.001 0	0.000 6	0.986 3	0.005 7
方差	0.012 7	0.000 1	0.000 7	0.000 0	0.000 3	0.000 0	0.001 0	0.000 3

若忽略极化特性差异,则可以得到

$$T_{AC} = \eta_E T_E + \eta_P T_P + \eta_C T_{BC} \quad (22)$$

这里假设 $\eta_{EM} = \eta_{EX} = \eta_E, \eta_{PM} = \eta_{PX} = \eta_P$ 这样18.7 GHz、23.8 GHz和37.0 GHz的上述系数见表8。

表8 最终冷空天线参数系数

频率/GHz	η_E	η_P	η_C
18.7	0.004 8	0.000 2	0.995
23.8	0.006 4	0.002 1	0.991 5
37.0	0.006 3	0.001 6	0.992

假设 T_{BC} 为2.7 K,则通过两点定标得到的 T_A 即为地球表面的辐射估计值 T_E ; T_P 的获取以ACMR观测天线馈源波导入口的温度作为参考,可从数据包中获得。通过上式计算的 T_{AC} 就是对定标天线观测到的天线温度的修正结果,作为最后的天线温度的低端参与定标。

表9 18.7 GHz 馈源接收的各部分能量参数

Table 9 Energy parameters of each part received by 18.7 GHz feed source

参数	主波束效率	主波束交叉极化效率	地球效率	地球交叉极化效率	舱板效率	舱板交叉极化效率	冷空效率
平均值	0.974 9	0.007 5	0.952 4	0.007 2	0.003 7	0.000 1	0.036 5
方差	0.000 4	0.000 8	0.006 1	0.000 8	0.000 7	0.000 0	0.005 4

表10 23.8 GHz 馈源接收的各部分能量参数

Table 10 Energy parameters of each part received by 23.8 GHz feed source

参数	主波束效率	主波束交叉极化效率	地球效率	地球交叉极化效率	舱板效率	舱板交叉极化效率	冷空效率
平均值	0.981 7	0.000 9	0.968 5	0.000 9	0.002 4	0.000 0	0.028 2
方差	0.001 8	0.000 5	0.001 7	0.000 5	0.000 5	0.000 0	0.002 4

表11 37.0 GHz 馈源接收的各部分能量参数

Table 11 Energy parameters of each part received by 37.0 GHz feed source

参数	主波束效率	主波束交叉极化效率	地球效率	地球交叉极化效率	舱板效率	舱板交叉极化效率	冷空效率
平均值	0.979 0	0.000 6	0.960 4	0.000 6	0.004 4	0.000 0	0.034 6
方差	0.001 0	0.000 2	0.002 4	0.000 2	0.000 9	0.000 0	0.001 6

表9~表11中反射面效率是指馈源截获的反射面接收的贡献比例。可见主波束效率与反射面效率有差异,主波束效率大于反射面效率,说明主波束的能量没有完全被反射面截获。这里的计算是基于有限范围天线方向图的测试结果的,但是由于方向图测试只是在 E 面和 H 面进行,没有完整全空

4.2 主反射面天线旁瓣和交叉极化的修正——亮温算法

假设馈源接收到来自地球的主极化效率为 η_{RM} ,地球交叉极化效率为 η_{RX} ,舱板主极化效率为 η_{PM} ,舱板交叉极化效率为 η_{PX} ,冷空效率为 η_C ,则馈源接收到的天线温度可以表示为^[3]

$$T_{AF} = \eta_{RM} T_{RM} + \eta_{RX} T_{RX} + \eta_{PM} T_{PM} + \eta_{PX} T_{PX} + \eta_C T_{BC} \quad (23)$$

对于ACMR,假设地球、舱板和冷空的辐射不分极化差异,则式(23)可以简化为

$$T_{AF} = (\eta_{RM} + \eta_{RX}) T_{RE} + (\eta_{PM} + \eta_{PX}) T_P + \eta_C T_{BC} \quad (24)$$

当已知地球亮温 T_{RE} 和舱板温度,就可以计算实际接收的天线温度。反之,当通过星上实时定标获得了天线温度,就可以根据式(24)计算来自地球的辐射 T_{RE} 。表9~表11给出了不同通道各部分的能量参数。

间的方向图测试结果,所以这个计算结果需要结合在轨测试和交叉定标来确定各部分的比例系数。

5 发射后亮温的在轨定标方法

5.1 方法概述

目前在轨的与ACMR类似的辐射计只有Jason-1/2

上的微波辐射计(JMR)。因此ACMR的在轨定标首先采用交叉定标的方法来确定第4章的亮温算法系数。通过匹配的JMR和ACMR数据,在消除入射角差异的情况下,以JMR通道亮温为基准,获得ACMR亮温算法的系数。另外通过长期的数据分析,可以获得定标准确度和稳定性的定标结果。但是由于目前数据有限,只能先进行在轨亮温算法系数的确定,进而对ACMR定标进行初步评价。

5.2 HY-2A 卫星ACMR与JMR入射角引起的差异模拟分析

ACMR 23.8 GHz、37.0 GHz 和 18.7 GHz 的入射角依次按 2.24°、-2.26°、0°天底角计算,卫星高度 963 km,那么入射角分别为 2.58°、-2.60°和 0°。可见入射角和天顶角之间的差异很小。下面比较这个小入射角下的亮温与 Jason 天底观测的亮温之间的差异,如图 4 所示。其中 Jason 的频率分别为 18.7 GHz、23.8 GHz 和 34.0 GHz,与 ACMR 的最大区别是 37.0 GHz。

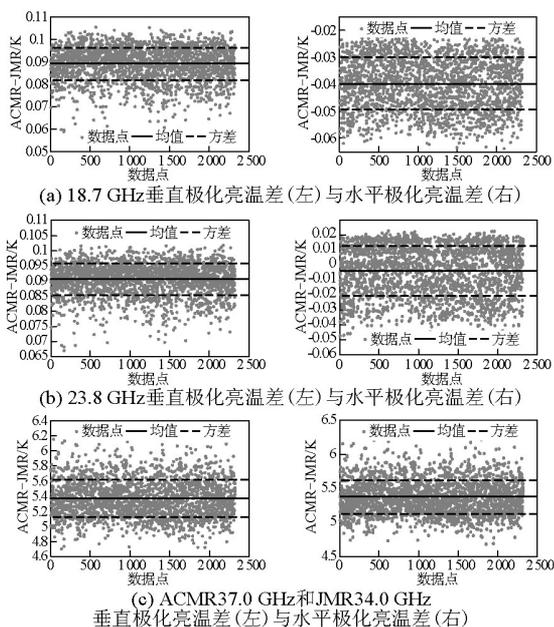


图4 ACMR和JMR亮温差异比较

Fig.4 Comparisons of brightness temperatures (T_B) between ACMR and JMR

由图4可见,除37.0 GHz由于频率差异引起的亮温差异大于5 K以外,其他两个相同频率由于入射角不同而引起的差异最大在0.1 K量级,基本可以忽略。

5.3 ACMR自身数据的匹配

ACMR自身由于天线波束指向不同,在卫星前

进过程中需要不断进行匹配,以保证数据地理位置的一致性。这样匹配的数据在时间上存在固定差异。23.8 GHz在前,37.0 GHz居中,18.7 GHz在后。23.8 GHz和18.7 GHz偏离天底的角度分别为2.24°和-2.26°,因此在地面的3个频率的定位点纬度出现约0.33°的间隔。而在数据处理过程中首先需要把这个间隔消除,进行数据的匹配。由于ACMR的采样策略,每个通道在连续采样10.4 s后进行一次定标,用时0.8 s,冷空和热负载各0.4 s,所以一个定标周期共计11.2 s。

在每个10 ms采样结束后每个通道得到3个数据,分别定义为数据A、数据B和数据C,那么在200 ms内对每个通道采样能够得到20个数据A、20个数据B和20个数据C,分别进行平均,每个通道最终得到3个平均数据。但是,根据要求,在软件将对地观测/定标选择开关送出后,需要等待4倍的积分时间即40 ms后才开始采集通道数据,因此在0~200 ms、400~600 ms和800~1 000 ms这3个200 ms内,每段开始的连续4个10 ms不进行通道采样,那么在这种情况下每个通道将得到16个数据A、16个数据B和16个数据C,分别进行平均,每个通道最终得到3个平均数据。

最后得到的数据为:a.冷空定标时采样数据,数据量为3(采集3次)×3(3个通道)×2(定标时间为2个200 ms)=18个字,即36字节;b.匹配负载定标时采样数据,数据量为3(采集3次)×3(3个通道)×2(定标时间为2个200 ms)=18个字,即36字节;c.对地观测时采样数据,数据量为3(采集3次)×3(3个通道)×52(观测时间为52个200 ms)=468个字,即936字节。其中,要求37.0 GHz通道与其他通道匹配的空间小于0.001°,约100 m。

5.4 ACMR与JMR的数据匹配及分析

使用的数据是ACMR的2011年10月27日到2012年2月9日的的数据,共计227个文件,而Jason-1的JMR数据时间为2011年9月29日到2012年2月4日共计3 005个文件。匹配的依据是JMR和ACMR时间上的差小于30 min,空间上ACMR的37.0 GHz通道的经纬度与JMR的3个通道的经纬度差均小于0.5°,而ACMR的37.0 GHz与18.7 GHz和23.8 GHz的经纬度差都小于0.001°。

利用5 400×2 700分辨率的海陆标志数据对每个经纬度点上的数据进行陆地判读,条件是该点及其周围200 km范围内都没有陆地则认为没有陆地

干扰,同时根据 JMR 提供的液态水反演结果(液态水含量为0)减小云出现导致空间辐射的不均匀性的影响。匹配的结果如图5所示。

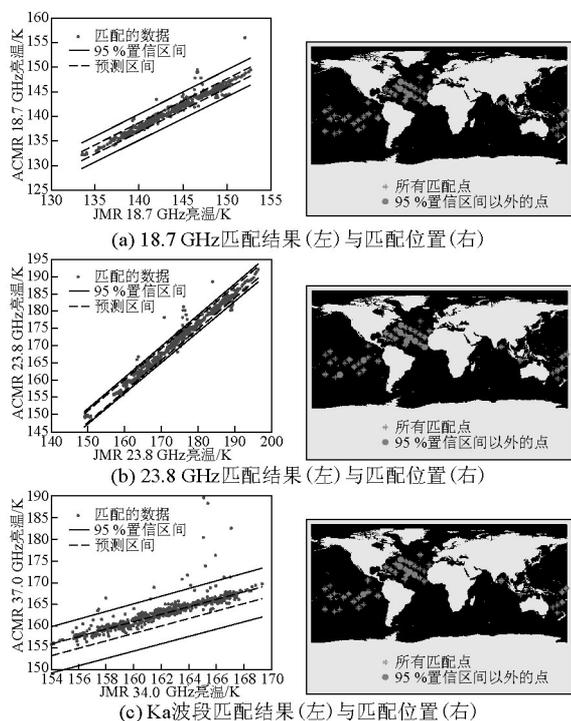


图5 ACMR和JMR匹配结果和对应位置

Fig.5 Matched data of ACMR and JMR and their corresponding locations

需要说明的是,这里ACMR数据是经过简单的路径辐射传输参数和非线性修正的结果,没有根据中频的温度对参数进行插值,也就是传输参数和非线性参数 u 的值是固定的。目的是先进行匹配,然后再进行精调,最终给出处理结果。

上述数据可以表示为

$$TB_{ACMR,f} = aTB_{JMR,f} + b \quad (25)$$

式(25)中, $TB_{ACMR,f}$ 、 $TB_{JMR,f}$ 分别表示ACMR和JMR在给定频率 f 的亮温; a 、 b 为系数。JMR数据与ACMR数据在晴空条件下的关系系数 a 和 b 见表12(95%置信区间)。

由表12可以看出,数据的一致性很好。从匹配数据的离散点分析可以看出,位于95%置信区间以外的点主要分布在特定的位置,如图5所示。可见,图中离散点很少,主要位于大西洋的一个小海域,其中一个位置很特殊,导致出现一个连续的亮温突出,这可能是由于在测量期间ACMR看到(经过)了一个辐射源。

表12 ACMR与JMR的关系系数

通道/GHz	系数 a	系数 b	相关系数 R^2
18.7→18.7	0.894 8 [0.885 4, 0.904 3]	12.51 [11.15, 13.86]	0.984 4
23.8→23.8	0.899 8 [0.893 2, 0.906 5]	14.44 [13.27, 15.60]	0.991 9
34.0→37.0	0.857 8 [0.840 9, 0.874 7]	23.96 [21.23, 26.70]	0.964 0

5.5 HY-2A 卫星ACMR在轨定标分析

利用匹配数据中位于预测区间以内的点对ACMR的定标过程进行分析。用于分析ACMR的18.7 GHz、23.8 GHz和37.0 GHz 3个通道在轨定标的匹配数据分别为530个、535个和518个。

从4.2节可以看出,天线温度和目标亮温之间是线性关系,其中的影响因子冷空是一个常数,而卫星舱板的系数很小,舱板在轨温度的变化也不大。在馈源入口处分别贴有热敏电阻,用来测量入口处舱板的温度。由于馈源位置不同,温度略有差异。图6给出所有匹配数据6434个点的不同位置舱板温度随纬度的变化,可见这些匹配数据集的温度变化在0.5 K以内。

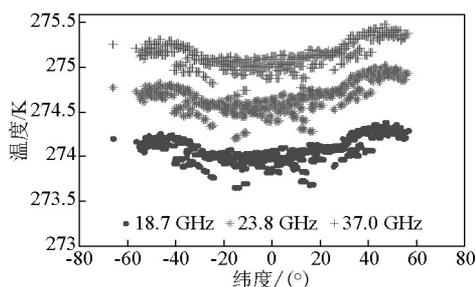


图6 舱板波导入口温度随纬度的变化

Fig.6 Satellite panel temperatures change during a full orbit

图7为2011年10月27日3个位置所有的温度变化数据,可见3个温度点的温度均匀性非常好,变化约为0.2 K。

这样,舱板对亮温的贡献也可以认为是一个常数。因此,为了评估天线旁瓣和交叉极化的贡献,笔者用一个总的常数表示二者贡献的和,即

$$T_A = \eta_E T_{BE} + \eta_O T_{BO} \quad (26)$$

式(26)中, T_A 为接收到的总天线温度; η_E 为来自地球主波束的亮温 T_{BE} 的比例; η_O 为其他贡献总和

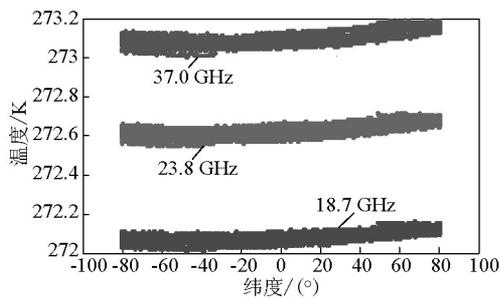


图7 一天内舱板波导入口位置所有温度变化

Fig.7 Physical temperatures change during a day

T_{bo} 的比例。考虑到天线测量的不确定性和交叉极化差异很小的特性,笔者把主波束内的主波束效率和交叉极化效率合并为 η_e ,把舱板的主极化和交叉极化效率以及冷空效率等其他系数合并为 η_0 ,得到系数见表13。

从表13可以看出不管是主波束总效率还是反射面截获总效率,都与天线观测到的目标有关,由于测量范围的限制存在误差,所以利用二者任何一个计算目标的亮温都会带来较大的不确定性。

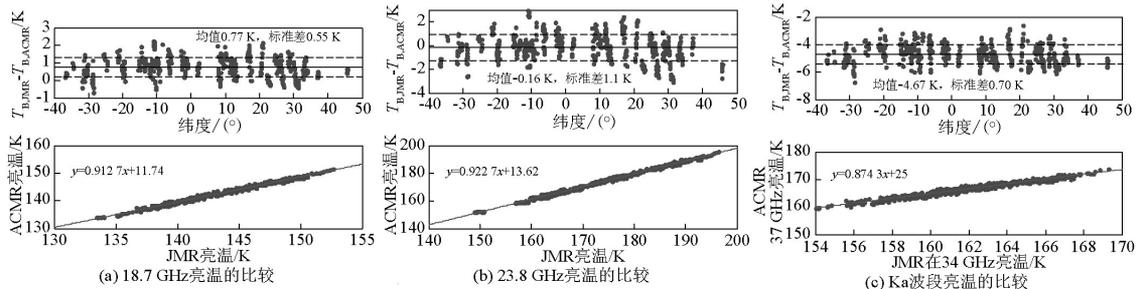


图8 经过天线温度修正的ACMR与JMR比较

Fig.8 Comparison between ACMR and JMR corrected by antenna temperature

6 结语

本文介绍了HY-2A卫星ACMR热真空定标、在轨定标和检验的原理方法和实施过程。热真空定标过程决定了ACMR辐射传递系数和非线性系数,通过天线温度算法修正给出了天线温度转换系数。将这些系数用于在轨数据处理,并将数据与JMR数据进行匹配比较,一致性良好。其中18.7 GHz的亮温偏差为0.77 K,标准差为0.55 K,23.8 GHz偏差为-0.16 K,标准差1.1 K。对于Ka波段,由于频率本身存在差异,最终偏差为-4.67 K,标准差为0.70 K。另外从图8中可见两个辐射计之间数据存在很好的线性关系。二者差异的原因可能是由两台辐射计

表13 ACMR天线温度系数
Table 13 Antenna temperature coefficients for ACMR

频率/GHz	主波束总效率	反射面总效率	主波束外效率	反射面外效率
18.7	0.982 4	0.959 6	0.017 6	0.040 4
23.8	0.982 6	0.969 4	0.017 4	0.030 6
37.0	0.979 6	0.961	0.020 4	0.039

最后经过主波束天线修正的ACMR测量的目标亮温与JMR亮温的比较如图8所示。可见修正各种天线影响后二者的亮温更加接近,18.7 GHz的亮温偏差为0.77 K,标准差为0.55 K;23.8 GHz偏差为-0.16 K,标准差为1.1 K。对于Ka波段,偏差为-4.67 K,标准差为0.70 K。Ka波段偏差大的原因首先是由于二者的频率不同,根据5.2节分析,理论偏差约-5.4 K,所以二者的实际偏差应该在0.7~0.8 K。图8中给出的对应线性方程是拟合的线性关系。可以看出这个系数与表13的系数略有差异。因为这里对获取的天线温度进行了卫星本身和冷空溢出的修正,导致ACMR的亮温略有不同。

观测路径差异和面元大小不同造成的。通常匹配数据轨道正好是交叉的,大气路径存在差异,同时ACMR空间分辨率远比JMR高。

参考文献

- [1] Wang Zhenzhan, Li Jing, Zhang Shengwei, et al. Prelaunch calibration of microwave humidity sounder on China FY-3 meteorological satellite[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2011, 8(1): 29-33.
- [2] Mo T. Prelaunch calibration of the advanced microwave sounding units-A for NOAA-K[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(8): 1460-1469.
- [3] Claassen J, Fung A. The recovery of polarized apparent temperature distributions of flat scenes from antenna temperature measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1974, 22(3): 433-442.

(下转61页)