

# 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 (II): 校正试验\*

陆文<sup>1)†</sup> 严卫<sup>1)</sup> 艾未华<sup>1)2)</sup> 施健康<sup>3)</sup>

1) (解放军理工大学, 气象海洋学院, 南京 211101)

2) (中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044)

3) (解放军 63655 部队, 乌鲁木齐 841700)

(2012 年 6 月 7 日收到; 2012 年 11 月 22 日收到修改稿)

创建了地球场景数据集, 结合全极化微波辐射传输模型, 仿真了地球场景亮温. 基于自主推导的全极化天线温度方程, 通过 GRASP9 软件生成天线方向图, 模拟了辐射计的天线温度. 进而利用多元线性回归方法, 求取了天线交叉极化校正  $M$  矩阵, 实现了对星载极化相关型全极化微波辐射计天线交叉极化的校正. 试验结果表明: 天线温度与地球场景亮温之间具有良好的线性关系; 天线交叉极化对全极化微波辐射计正交通道亮温影响明显, 尤其以对垂直极化亮温误差的影响最为显著; 校正后各通道的天线交叉极化得到了有效的减小, 交叉极化优于  $-23$  dB, 极化纯度大于 99.5%, 采用  $M$  矩阵校正及消除天线温度中交叉极化亮温影响的方案是切实可行的. 该校正技术可以实现星载极化相关型全极化微波辐射计在轨运行后对于天线交叉极化的最终校正.

**关键词:** 全极化微波辐射计, 天线交叉极化, 天线温度方程,  $M$  矩阵

**PACS:** 84.40.Ba, 42.25.Ja, 92.60.Gn, 93.85.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.62.078403

## 1 引言

星载全极化微波辐射计作为空间被动微波遥感的新颖载荷, 能够探测目标电磁辐射的所有四个 Stokes 参数, 为海面风场等海洋大气环境参数的遥感探测提供了重要途径<sup>[1,2]</sup>. 2003 年美国发射了世界上第一个, 也是迄今唯一一个以海面风场为探测使命的星载全极化微波辐射计 WindSat, 对海面风矢量的全极化微波遥感进行了成功试验验证<sup>[3]</sup>. 基于对获取全球海洋动力环境要素信息的迫切需求, 国内首个星载全极化微波辐射计目前正处于研制阶段. 与 WindSat 采用分立馈源型的非相干极化信号接收体制不同, 国内在研的全极化微波辐射计采用相干极化信号检测方式, 称为极化相关型全极化微波辐射计.

全极化微波辐射计由于天线自身辐射特性以

及天线方向图旁瓣的贡献会使接收到的天线温度包含交叉极化分量, 产生天线交叉极化<sup>[4]</sup>. 天线交叉极化的来源主要有三方面<sup>[5-7]</sup>, 一是由于反射面的曲率特性, 当地球场景辐射进入到辐射计抛物面天线的时候, 每个极化辐射引起的表面电流导致反射的辐射中产生了正交极化的辐射, 与此同时反射面在反射辐射中增加了相位因子, 改变了入射辐射原来的极化状态, 引入交叉极化; 二是由于天线旁瓣的极化基准与主波束覆盖的地表目标的极化基准不一致, 天线温度中由旁瓣贡献的部分存在交叉极化分量; 三是由于馈源隔离度不完美, 每个连接到两个正交极化隔离端口的馈源本身会产生交叉极化.

天线交叉极化使得辐射计接收的辐射偏离了地球场景辐射原来的极化状态, 导致辐射计极化测量能力降级, 如不校正将严重影响到海面风场等海洋大气环境参数反演结果的正确性<sup>[8]</sup>. 微波辐射计

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41076118, 41005018) 和中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室基金 (批准号: KDW1105) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: luwenft@hotmail.com

天线交叉极化校正又称天线方向图校正,是指通过天线温度方程由天线温度反演出地球场景的辐射亮温,其实质是对天线温度方程的求解过程<sup>[9]</sup>.

天线温度方程是一个病态的第一类 Fredholm 积分方程,求解难度大,得到一个稳定的最优解较为困难,这是天线交叉极化校正的难点<sup>[10]</sup>.早期的传统双极化微波辐射计天线主波束效率较低,旁瓣贡献的天线温度较大,天线交叉极化校正大多采用对天线温度方程的积分表达式直接求解的方法,典型的如辐射计 SMMR 采用的就是矩阵法求解<sup>[11]</sup>.该方法的缺点是精度不高,执行效率低,随着天线主波束效率的提高不再适用.之后随着辐射计天线主波束效率的提高,天线温度与地球场景亮温之间大多具有较好的线性关系,天线交叉极化校正往往采用多元线性回归的方法,获得交叉极化校正  $M$  矩阵系数,从而展开校正.该方法提高了校正的效率和精度,如 SSML, AMSR-E, WindSat 等辐射计采用的就是这种方法<sup>[12-14]</sup>.

本文针对星载极化相关型全极化微波辐射计,基于自主推导的四个 Stokes 参数全极化天线温度方程,结合全极化辐射传输正演模型仿真天线温度,运用上述的多元线性回归方法求取交叉极化校正  $M$  矩阵,展开天线交叉极化校正,并对校正试验结果进行讨论分析.

## 2 校正试验方案

在原理上,天线交叉极化校正的实质是对天线温度方程求解,需要从辐射计天线温度反演出地球场景观测亮温.天线温度方程建立起天线温度与地球场景观测亮温之间的纽带.通过天线温度方程,可以计算仿真得到天线温度.由于直接求解天线温度方程的复杂性,本文采用多元线性回归方法,得到交叉极化校正  $M$  矩阵,建立起天线温度与地球场景观测亮温之间的关系,从而方便地通过天线温度反推出地球场景观测亮温.

由于缺少辐射计在轨运行天线温度的实测数据,天线交叉极化校正采用仿真数据进行试验,主要包括天线温度仿真、地球场景亮温数据集的创建、交叉极化校正  $M$  矩阵的获取等内容,校正步骤如下:

**步骤1** 结合极化相关检测理论,建立包含四个 Stokes 参数亮温的全极化天线温度方程,得到天线温度  $T_A$  (即  $T_{Av}, T_{Ah}, T_{A3}, T_{A4}$ ) 与地球场景亮温

$T_B$  (即  $T_{Bv}, T_{Bh}, T_{B3}, T_{B4}$ ) 的关系,其中下标 v, h, 3, 4 表示对应的四个 Stokes 参数亮温.

**步骤2** 创建地球场景数据集  $S_i, i = 1, 2, \dots, N$ , 该数据集包含海面风场、海表温度、大气柱状水汽含量、云水含量等全极化辐射传输正演模型需要作为输入的大气海洋环境参数.

**步骤3** 根据全极化微波辐射计的观测频点,以中心频率  $\nu_0$  为基准对辐射计带宽进行划分,划分得到的频率表示为  $\nu_j, j = 1, 2, \dots, F$ .

**步骤4** 在天线坐标系下,格点化天线方向图,并将天线波束投影到地球表面,得到视场内不同倾角  $\theta_k$  和方位角  $\varphi_k$  下地球表面对应的网格点,这些网格点表示为  $(\theta_k, \varphi_k), k = 0, 1, \dots, L$ .

**步骤5** 对于每个地球场景数据集  $S_i$ ,将数据集数据代入全极化微波辐射传输模型,计算各个网格点位置地球发射的全极化辐射亮温  $T_B^{ijk} (S_i, \nu_j, \theta_k, \varphi_k), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, F, k = 0, \dots, L$ .

**步骤6** 利用步骤 1 建立的全极化天线温度方程计算出天线温度  $T_A$ ,对于数据量为  $N$  的地球场景数据集,需要仿真计算出包含  $N$  个天线温度的天线温度集  $T_A^i, i = 1, 2, \dots, N$ .

**步骤7** 根据步骤 6 中的天线温度集  $T_A^i$  和步骤 5 得到的对应中心频率视轴方向上的地球场景亮温集  $T_B^i$ ,利用下述公式,采用多元线性回归方法得到天线交叉极化校正  $M$  矩阵

$$T_A = \begin{pmatrix} T_{Av} \\ T_{Ah} \\ T_{A3} \\ T_{A4} \end{pmatrix} = M T_B = \begin{pmatrix} M_{vv} & M_{vh} & M_{v3} & M_{v4} \\ M_{hv} & M_{hh} & M_{h3} & M_{h4} \\ M_{3v} & M_{3h} & M_{33} & M_{34} \\ M_{4v} & M_{4h} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{Bv} \\ T_{Bh} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $M$  表示天线交叉极化校正矩阵,下标 v, h, 3, 4 对应四个 Stokes 参数,  $T_B^i$  (即  $T_{Bv}^i, T_{Bh}^i, T_{B3}^i, T_{B4}^i$ ) 等于步骤 5 中地球在频率为  $\nu_0$ 、地面格点为  $\theta_k, \varphi_k$

处所辐射的亮温,即为  $T_B^{i00}(S_i, \nu_0, \theta_0, \varphi_0)$ . 那么采用的多元线性回归方程形式为

$$T_{Ap}^i = M_{pv}T_{Bv}^i + M_{ph}T_{Bh}^i + M_{p3}T_{B3}^i + M_{p4}T_{B4}^i + \varepsilon_i, \quad (2)$$

其中  $p = v, h, 3, 4, \varepsilon_i$ , 是回归方程的误差项.

**步骤8** 完成对天线交叉极化的校正, 输入天线温度  $T_A$ , 就可以得到校正后的地球场景亮温  $T'_B$ , 表示为

$$T'_B = M^{-1}T_A. \quad (3)$$

步骤 1 已由论文专题第一部分完成 [15], 实现了全极化天线温度方程的自主推导. 步骤 2 地球场景数据集的建立可以来源于实测的大气海洋环境

数据或是仿真数据, 本文采用了 WindSat 发布的环境数据产品 (environmental data record, EDR) 用于搭建地球场景数据集. 步骤 3 是对天线温度方程考虑带宽影响, 为了减小计算量提高计算效率, 在后面的仿真计算中对此因素暂不考虑. 步骤 4 表示根据天线方向图进行天线波束在地面投影区域的格点化, 计算时在主波束区域对于倾角和方位角的积分步长设置为  $0.1^\circ$ , 在旁瓣区域对倾角和方位角的积分步长设置为  $0.5^\circ$ . 步骤 5 表示通过全极化辐射传输模型建立地面亮温数据集. 步骤 6 实现了天线温度的计算与天线温度数据集的建立. 步骤 7、步骤 8 描述了利用多元线性回归方法获得天线交叉极化校正  $M$  矩阵并展开校正的过程. 校正的具体流程如图 1 所示.

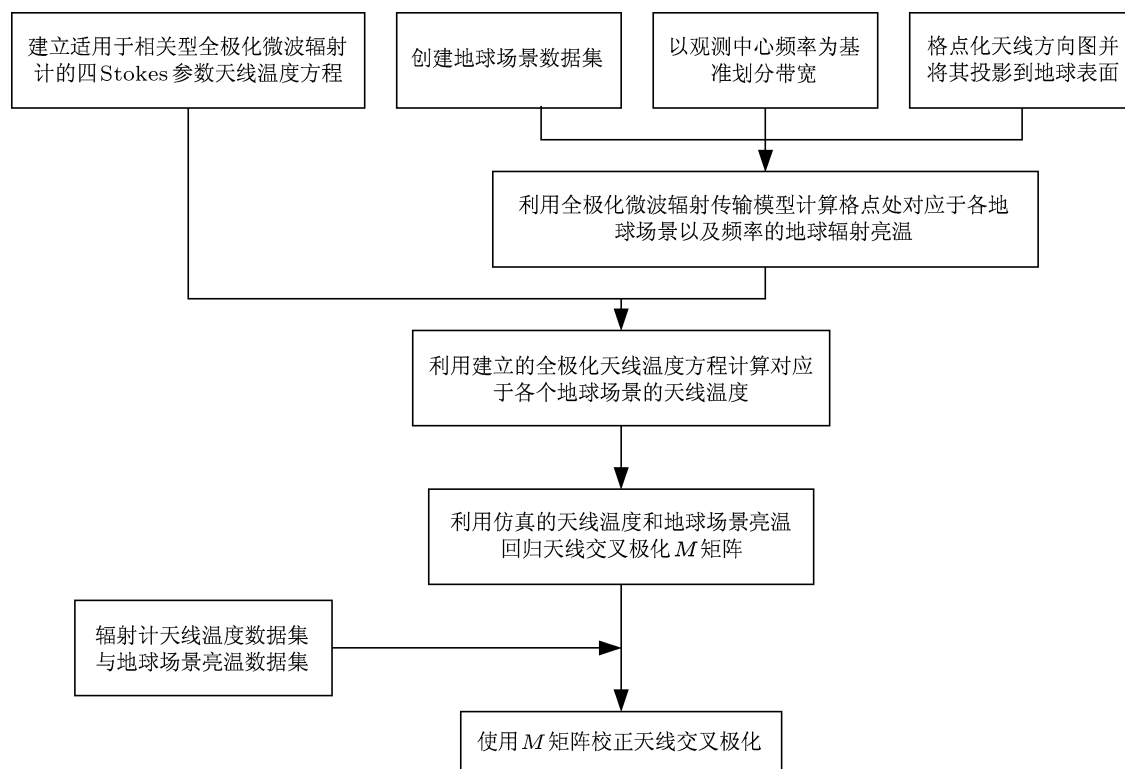


图 1 天线交叉极化校正过程

### 3 天线温度仿真

天线温度需要根据全极化天线温度方程采用仿真的方法获取. 天线温度方程的输入量包含了天线的增益和相对相位因子、极化旋转角以及地球场景亮温, 其中, 相对相位因子的计算方法已由论文专题第一部分给出 [15]. 因此, 天线温度仿真主要讨论产生天线方向图计算天线增益及相对相位因

子, 创建地球场景数据集, 运用全极化微波辐射传输正演模型仿真地球场景亮温等内容.

#### 3.1 天线方向图计算

由于缺少极化相关型全极化微波辐射计的天线实测方向图数据, 这里采用天线方向图仿真的方法获取方向图数据. 天线方向图仿真采用

通用反射面天线及天线辐射场分析软件 GRASP9 (General reflector and antenna farm analysis program package, GRASP) 来计算<sup>[16]</sup>. 由于国内的全极化微波辐射计处于在研阶段, 与 WindSat 具有相似的频

点并且部分设计参数未公开, 天线交叉极化校正辐射计参数的选取参考了 WindSat 的天线设计参数<sup>[14]</sup>. 利用 GRASP9 软件设置的天线配置参数如表 1 所示.

表 1 天线方向图计算参考的辐射计基本参数

GRASP9 输入参数	取值	GRASP9 输入参数	取值
Reflector diameter	72 in.	Feed Pattern	Gaussian Beam
Focal length	61.6 in	Feed Taper	-26 dB
Axis offset	14 in	Polarization	Linear

GRASP9 软件根据辐射计配置参数仿真出的辐射计反射面及馈源如图 2 所示, 反射面直径 (Reflector diameter)、焦距 (Focal length) 以及偏移量 (Axis offset) 在图中得到了很好的体现. WindSat 共有 5 个频率, 图 2 表示的是 10.7 GHz 的情形.

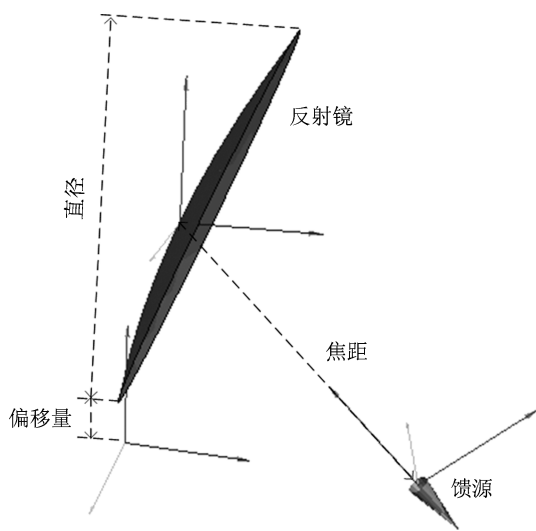


图 2 GRASP9 仿真的辐射计天线及馈源

那么仿真得到的同极化和交叉极化方向图如图 3 所示. 可以看出对于辐射计天线方向图而言, 在倾角较小的时候天线的增益很大, 即主波束的增益远大于旁瓣的增益, 并且交叉极化的增益远小于同极化天线方向图的增益.

GRASP9 软件得到的天线方向图是电场的辐射场复数据, 辐射场复数据模的平方表示了天线的增益, 天线温度仿真计算中需要的天线相对相位因子项亦可以由天线温度方程的相位因子公式由复辐射场数据计算得到.

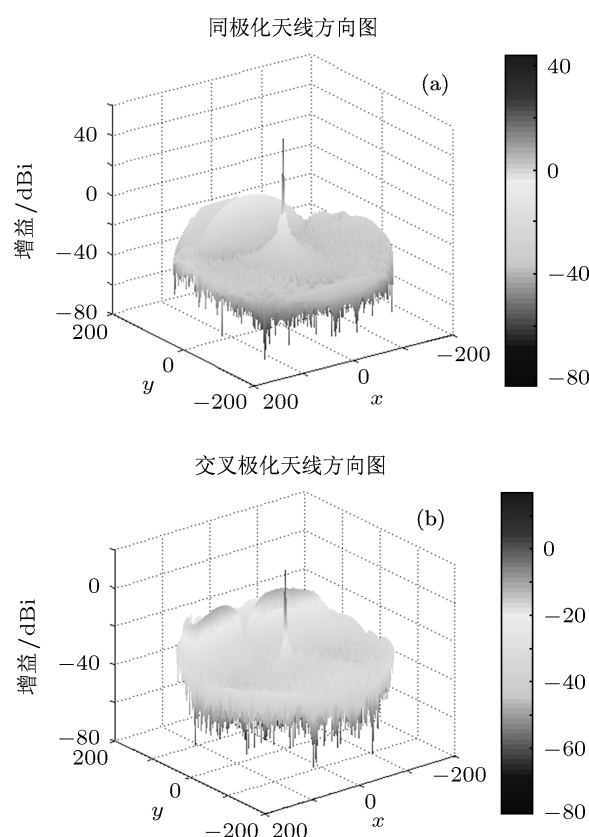


图 3 同极化及交叉极化天线方向图 (a) 同极化; (b) 交叉极化

### 3.2 地球场景数据集的创建

地球场景数据集是一个海洋大气环境参数集合, 用于作为全极化微波辐射传输模型的输入, 仿真得到地球场景亮温, 进而代入天线温度方程进行天线温度计算. 天线交叉极化校正采用的地球场景数据集来源于 WindSat EDR 产品数据, 每一条数据包包含海面风速、海面风向、海面温度、大气水汽含量、云水含量五个参数. 为了体现数据集所含数据的代表性, 选择 2004 年每月前三天每天前 1000

条 WindSat EDR 数据共 36000 条作为地球场景数据集. 地球场景数据集符合辐射传输模型输入参数动态范围的要求, 如图 4 所示. 图 4 反映了用于试验的地球场景数据集五个参数在各自物理值区间内出现的频数. 每五个参数的组合构成一条地球场景数据集中的数据单元, 这体现了自然界实际的海洋大气环境状况, 从而为利用仿真手段更加真实的进行天线交叉极化校正奠定了基础.

### 3.3 全极化微波辐射传输模型

全极化微波辐射传输模型用来模拟地球场景的亮温. 地球场景亮温是作为天线温度方程积分计算的输入, 也是用于回归天线交叉极化校正  $M$  矩阵的准备数据. 计算采用的是改进的全极化微波辐射传输模型, 将王蕊等<sup>[17,18]</sup>模型的固定入射角调整为可变输入角参量, 以满足对整个天线波束范围内

对应不同入射角的地面场景进行辐射计算. 计算采用的全极化辐射传输正演模型如下:

$$T_{Bv,h}(f, \theta, T_s, w, \varphi_w, V, L) = T_{BU} + t[E_{v,h}T_s + R_{v,h}(T_{BD} + tT_{BC})], \quad (4)$$

$$T_{B3,4}(f, \theta, T_s, w, \varphi_w, V, L) = t[E_{3,4}T_s + R_{3,4}(T_{BD} + tT_{BC})], \quad (5)$$

式中,  $T_{Bp}$ , ( $p = v, h, 3, 4$ ) 表示地球发射的辐射亮温, 它是观测频率  $f$ 、观测入射角  $\theta$ 、海面温度  $T_s$ 、海面风速风向  $w$  和  $\varphi_w$ 、大气水汽含量  $V$  以及大气液态水含量  $L$  的函数.  $T_{BU}$  为大气上行辐射亮温,  $T_{BD}$  为大气下行辐射亮温,  $t$  为大气透过率, 它们由  $f, \theta, V, L$  共同决定.  $T_{BC}$  为宇宙背景温度, 取 2.73 K.  $E_p, R_p$  表示海面发射率和反射率, 它们是  $f, \theta, T_s, w, \varphi_w$  的函数.

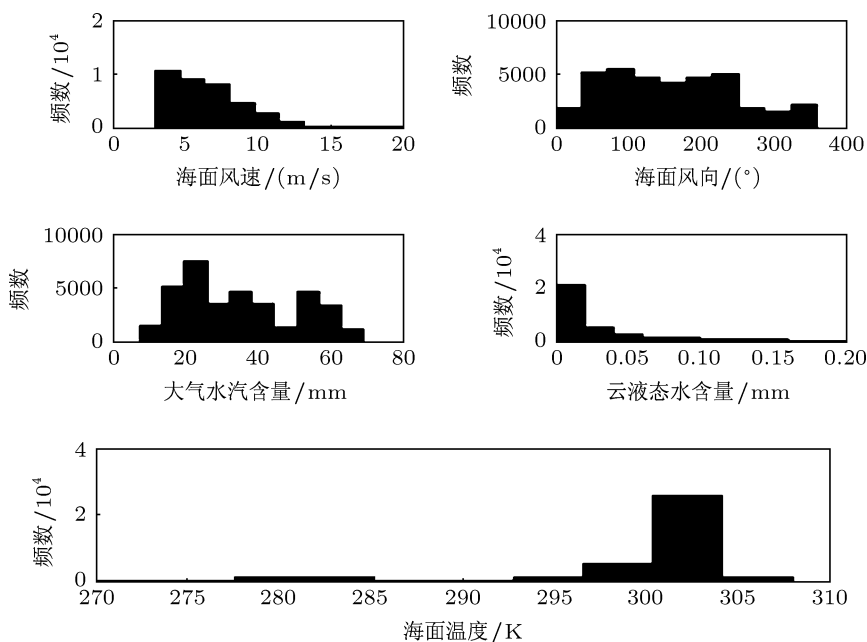


图 4 地球场景数据集数据分布图

该全极化微波辐射传输模型的输入量包含观测频率  $f$ 、观测入射角  $\theta$ 、海面温度  $T_s$ 、海面风速风向  $w$  和  $\varphi_w$ 、大气水汽含量以及大气液态水含量  $L$  七个参数, 输出的是全极化微波辐射计各频率各通道地球场景观测亮温. 全极化微波辐射传输模型的框架如图 5 所示.

目前的全极化微波辐射传输模型是基于天空

无雨、海面风速 3—25 m/s, 海面温度 273—310 K, 大气水汽含量 0—70 mm, 云液态水含量 0—0.2 mm 的自然环境建立的. WindSat 在环境数据 EDR 反演时, 对辐射传输模型也采用了上述的海洋大气环境参数范围限制. 因此, 3.2 节地球场景数据集中的海洋大气环境参数均符合全极化微波辐射传输模型的参数输入要求.

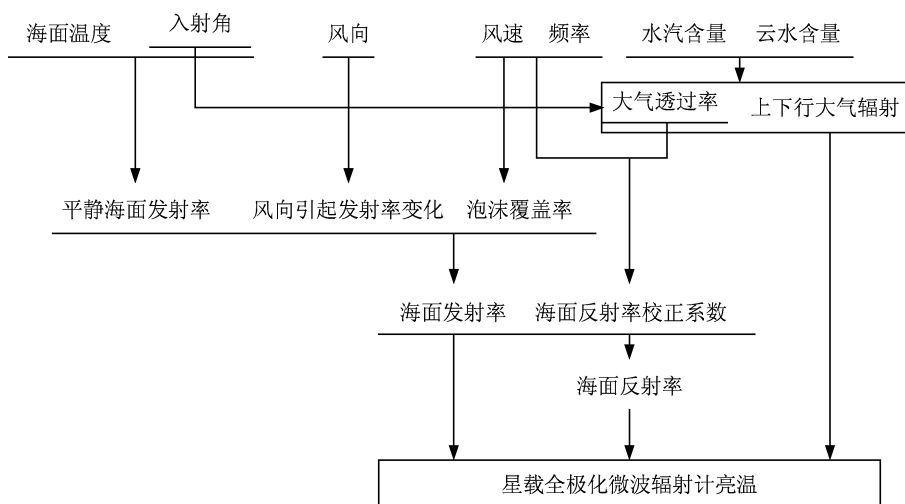


图5 全极化微波辐射传输模型框架

根据 3.2 节创建的地球场景数据集, 利用全极化微波辐射传输模型仿真得到 36000 条地球场景亮温数据, 进而根据天线温度方程得到 36000 条对应的天线温度, 从而实现地球场景亮温数据集与天线温度数据集的创建.

## 4 校正试验

### 4.1 全极化通道校正

全极化微波辐射计包含全极化通道与双极化通道, 以 WindSat 为例, 在 10.7 GHz, 18.7 GHz, 37 GHz 频率上进行全极化观测. 首先对全极化频率 10.7 GHz 进行天线交叉极化校正试验. 根据辐

射计频率进行参数设置, 10.7 GHz 对应的入射角为 49.9°, 天底角为 42.6°. 根据地球场景数据集仿真得到了 36000 条天线温度数据以及相应的地球场景亮温数据. 进而根据 (1) 式和 (2) 式回归得到天线交叉极化校正  $M$  矩阵, 如表 2 所示.  $M$  矩阵主对角线的元素表示同极化通道间天线温度和地球场景温度的关系, 而非主对角线的元素则表示了通道间交叉极化的影响. 可以看出主对角线元素小于 1 又非常接近于 1, 这说明天线温度中同极化亮温占了主导, 交叉极化占较小比例, 交叉极化导致天线温度小于对应的地球场景亮温, 并且交叉极化产生的亮温误差降低了天线对地球场景目标亮温观测的准确性.

表 2 10.7 GHz 天线交叉极化校正  $M$  矩阵

10.7 GHz	$T_{Bv}$	$T_{Bh}$	$T_{B3}$	$T_{B4}$
$T_{Av}$	0.9933	0.0037	-0.0027	-0.0073
$T_{Ah}$	0.0036	0.9932	-0.0088	-0.0244
$T_{A3}$	$-1.3871 \times 10^{-6}$	$2.4953 \times 10^{-4}$	0.9919	0.0051
$T_{A4}$	$-4.5833 \times 10^{-7}$	$-4.5833 \times 10^{-7}$	$4.4741 \times 10^{-4}$	0.9968

利用天线交叉极化校正  $M$  矩阵, 根据 (3) 式对 10.7 GHz 天线温度展开校正, 得到如图 6 所示的校正结果, 其中图 6(a), (c), (e), (g) 红色散点图表示校正前天线温度与地球场景亮温之间的关系, 图 6(b), (d), (f), (h) 绿色散点图表示校正后的天线温度与地球场景亮温之间的关系. 在理想不存在天线交叉极化影响的情况下, 天线温度应该等于地球场景亮温, 散点图的散点应完全分布于对角线上. 由

于天线交叉极化的影响, 图 6(a), (c), (e), (g) 校正前的温度散点图分布于对角线以下, 以垂直极化亮温和水平极化亮温最为显著. 这表示对于相同数值的地球场景亮温来说, 天线温度受交叉极化的影响而数值变小. 并且, 由于地球场景数据集的选择具有代表性, 仿真出来的地表亮温覆盖数值范围大, 模拟的亮温能较为真实的反应辐射计的实际观测状况.

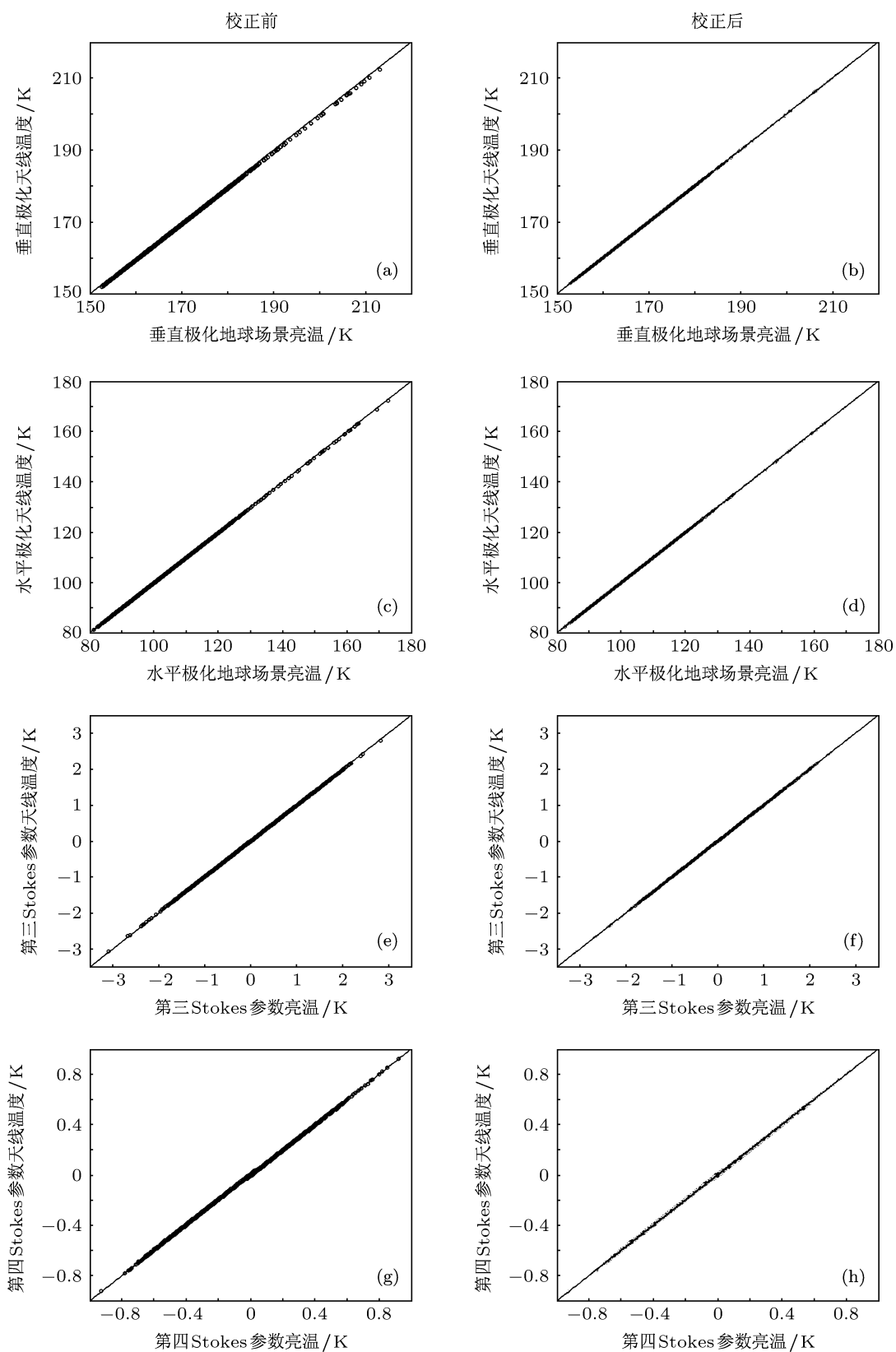


图 6 10.7 GHz 校正前后天线温度与地球场景亮温的关系 (a), (c), (e), (g) 红色散点图表示校正前的情况; (b), (d), (f), (h) 绿色散点图表示校正后的情况

为了检验天线交叉极化校正的效果,表 3 给出了校正前后四个通道 Stokes 亮温的误差. 误差计算以仿真的地球场景亮温为真值,利用校正前后的天线温度和其比较得出均方根误差. 可以看出校正后天线温度相对于地球场景亮温的误差得到了较为明显的减少,以正交通道天线温度的变化最为明显,垂直极化亮温和水平极化亮温误差分别减少了 99.37%和 95.22%,第三和第四 Stokes 参数的误差也得到了一定的削减. 对于全极化微波辐射计 WindSat 来说,其天线交叉极化的校正精度要求为  $-23$  dB 以内<sup>[3]</sup>,即极化纯度达到 99.5%以上,允许存在 0.5%的交叉极化分量. 通常在  $50^\circ$  左右的入射角下正交通道亮温中的垂直极化亮温大于水平极化亮温,以正交通道典型亮温取 100 K 为例,0.5%的交叉极化允许的交叉极化亮温误差为 0.5 K. 可以看出,校正前垂直和水平极化的亮温误差均与控制误差指标处于同一数量级,并且垂直极化亮温误差超过了指标要求,而校正后正交极化通道的交叉极化得到大幅减少. 对于极化通道来说,其比正交通道小两个数量级,取典型亮温为 1K,0.5%的指标允许交叉极化亮温误差为 0.005 K. 极化通道校正前的交叉极化亮温达到误差限额或与其相当,校正仍然是需要的. 特别指出的是,仿真由于没有考虑仪器噪声的影响,仿真的校正前通道间天线交叉极化误差偏小,对于辐射计的实际观测来说,实际交叉极化值会放大. 仿真结果说明采用多元线性回归的方法得出  $M$  矩阵,进而校正天线温度的方法是切实可行的.

表 3 10.7 GHz 天线交叉极化校正结果

10.7 GHz	$T_{Bv}$ 误差/K	$T_{Bh}$ 误差/K	$T_{B3}$ 误差/K	$T_{B4}$ 误差/K
校正前	0.7566	0.1004	0.0050	0.0021
校正后	0.0048	0.0048	0.0036	0.0020

现在考虑不同全极化频率下的天线交叉极化校正情况,针对 37 GHz 全极化频率展开校正. 37 GHz 对应的入射角为  $53^\circ$ ,天底角为  $45^\circ$ . 采用与 10.7 GHz 相同的校正步骤,得到的天线交叉极化校正  $M$  矩阵如表 4 所示. 校正前后天线温度与地球场景亮温的关系如图 7 所示. 天线温度的校正结果如表 5 所示. 可以看出,正交通道天线交叉极化的误差仍然较大,这是由于正交通道的亮温本身数量级较大,对于相同大小的  $M$  矩阵非对角线元素而言,其与正交通道亮温的乘积会产生更大的误差. 此

外天线交叉极化对垂直极化的绝对影响最大,这与偏置天线抛物面在垂直方向上不对称有关. WindSat 对于各通道亮温总的定标精度要求是正交通道 0.75 K 和极化通道 0.25 K,校正前垂直极化通道天线交叉极化的误差超过了定标精度要求,校正必不可少. 校正后,各通道误差均减小,满足 WindSat 对于交叉极化的亮温要求,正交通道天线交叉极化的亮温误差达到与极化通道相当的数量级. 关注极化通道第四 Stokes 参数亮温,与 10.7 GHz 类似,其校正前后的误差减小并不明显. 这是因为在四个 Stokes 参数亮温中,第四 Stokes 参数亮温的数值最小,相应的校正前亮温误差也最小. 第四 Stokes 参数亮温误差主要来自于极化通道亮温之间的交叉极化,垂直和水平极化亮温对应的  $M$  矩阵校正系数很小,正交通道亮温对于第四 Stokes 参数亮温校正的贡献很弱. 对于  $M$  矩阵校正算法而言,亮温数量级越大、 $M$  矩阵校正系数越大,说明待校正亮温与交叉极化的相关性就越大. 因此第四 Stokes 参数亮温的数值在校正后变化不显著,但其误差亦满足全极化微波辐射计对于天线的工作要求.

表 4 37 GHz 天线交叉极化校正  $M$  矩阵

37 GHz	$T_{Bv}$	$T_{Bh}$	$T_{B3}$	$T_{B4}$
$T_{Av}$	0.9932	0.0040	0.0014	0.0147
$T_{Ah}$	0.0027	0.9948	0.0015	0.0233
$T_{A3}$	$6.9687 \times 10^{-6}$	$-9.2550 \times 10^{-4}$	0.9900	0.0085
$T_{A4}$	$-4.2881 \times 10^{-6}$	$5.8485 \times 10^{-6}$	0.0010	0.9910

对于另一个全极化频率 18.7 GHz,其对应的入射角为  $55.3^\circ$ ,相应的天底角为  $46.68^\circ$ ,得到的天线交叉极化校正  $M$  矩阵以及校正结果如表 6 和表 7 所示. 18.7 GHz 与 10.7 GHz 以及 37 GHz 的校正结果类似,说明天线交叉极化校正算法对于三个全极化频率都是有效的.

## 4.2 双极化通道校正

WindSat 在 6.8 GHz, 23.8 GHz 频率上配备了传统的双极化通道,现在考查 6.8 GHz 双极化频率的天线交叉极化校正. 6.8 GHz 对应的入射角为  $53.5^\circ$ ,天底角为  $45.34^\circ$ . 在 6.8 GHz,微波辐射计只有垂直极化和水平极化两个通道,其天线交叉极化校正  $M$  矩阵应该是  $2 \times 2$  的矩阵,而非全极化频率的  $4 \times 4$  矩阵. 虽然 6.8 GHz 只接收正交极化通道亮温,但



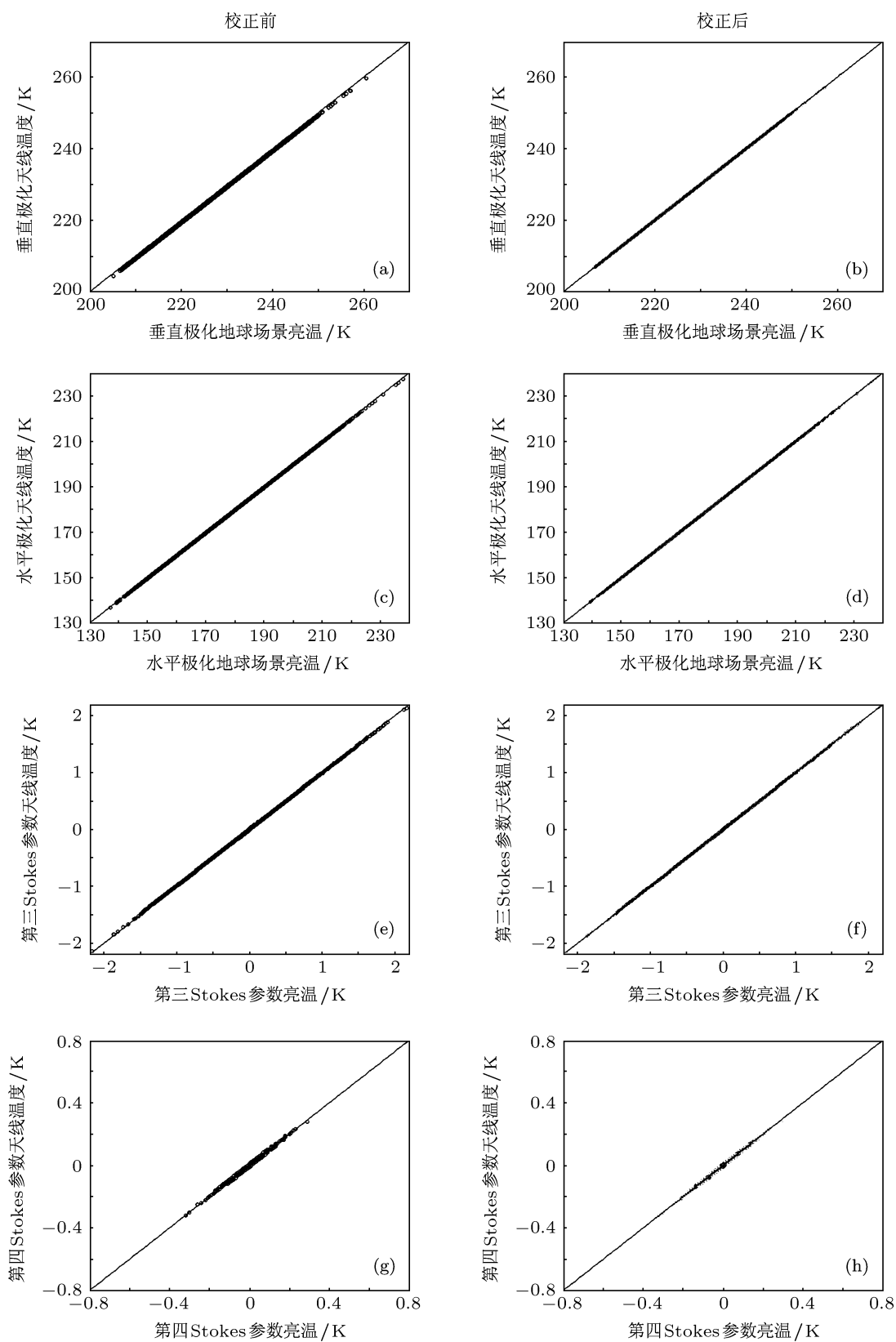


图7 37 GHz 校正前后天线温度与地球场景亮温的关系 (a), (c), (e), (g) 红色散点图表示校正前的情况; (b), (d), (f), (h) 绿色散点图表示校正后的情况

表 5 37 GHz 天线交叉极化校正结果

37 GHz	$T_{Bv}$ 误差/K	$T_{Bh}$ 误差/K	$T_{B3}$ 误差/K	$T_{B4}$ 误差/K
校正前	0.8525	0.3173	0.0046	0.0021
校正后	0.0058	0.0079	0.0034	0.0020

表 6 18.7 GHz 天线交叉极化校正  $M$  矩阵

18.7 GHz	$T_{Bv}$	$T_{Bh}$	$T_{B3}$	$T_{B4}$
$T_{Av}$	0.9933	0.0037	0.0011	0.0024
$T_{Ah}$	0.0029	0.9943	0.0021	0.0040
$T_{A3}$	$9.0559 \times 10^{-7}$	$-1.9478 \times 10^{-6}$	0.9903	0.0004
$T_{A4}$	$-4.4736 \times 10^{-7}$	$8.1439 \times 10^{-7}$	0.0004	0.9966

是由于地表发射的是四个 Stokes 参数的辐射, 天线温度仍然受到四个通道亮温间交叉极化的影响, 只是校正仅能采用正交通道亮温开展. 表 8 给出了 6.8 GHz 理论上得到的天线交叉极化校正  $M$  矩阵. 实际上, 仅包含双极化通道的辐射计天线交叉极化只能采用表 8 中阴影部分的系数展开校正, 如表 9

表 8 6.8 GHz 理论上天线交叉极化校正  $M$  矩阵

6.8 GHz	$T_{Bv}$	$T_{Bh}$	$T_{B3}$	$T_{B4}$
$T_{Av}$	0.9935	0.0032	-0.0039	-0.0023
$T_{Ah}$	0.0035	0.9933	-0.0080	-0.0043
$T_{A3}$	$6.9687 \times 10^{-6}$	$-9.2550 \times 10^{-4}$	0.9916	$5.8482 \times 10^{-6}$
$T_{A4}$	$-1.4644 \times 10^{-6}$	$2.7888 \times 10^{-6}$	$7.1623 \times 10^{-5}$	0.9983

表 9 6.8 GHz 实际天线交叉极化校正  $M$  矩阵

6.8 GHz	$T_{Bv}$	$T_{Bh}$
$T_{Av}$	0.9935	0.0032
$T_{Ah}$	0.0035	0.9933

表 10 6.8 GHz 天线交叉极化校正结果

6.8 GHz	$T_{Bv}$ 误差/K	$T_{Bh}$ 误差/K
校正前	0.8033	0.0357
校正后	0.0047	0.0051

对于 WindSat 另外一个双极化频率 23.8 GHz, 采用与 6.8 GHz 相同的校正方法, 得到天线交叉极化校正  $M$  矩阵以及校正结果如表 11 和表 12 所示. 正交通道校正结果与其他频率的校正结果一致.

所示.

表 7 18.7 GHz 天线交叉极化校正结果

18.7 GHz	$T_{Bv}$ 误差/K	$T_{Bh}$ 误差/K	$T_{B3}$ 误差/K	$T_{B4}$ 误差/K
校正前	0.8642	0.2443	0.0044	0.0024
校正后	0.0049	0.0054	0.0034	0.0023

采用  $2 \times 2$  的天线交叉极化校正  $M$  矩阵, 得到 6.8 GHz 天线交叉极化的校正结果, 如表 10 所示. 校正后, 正交极化的天线温度误差得到了显著的减小, 和其他频率正交通道相比较, 温度误差减小到了与它们一致的数量级. 可见在双极化频率, 极化通道亮温不参与天线温度校正对于正交通道亮温误差的校正影响是很小的. 这是因为极化通道的亮温数值上小于正交通道亮温两个数量级, 正交通道的天线交叉极化温度误差主要是由于垂直极化和水平极化之间的互相影响造成的. 6.8 GHz 天线温度的校正情况如图 8 所示.

表 11 23.8 GHz 天线交叉极化校正  $M$  矩阵

23.8 GHz	$T_{Bv}$	$T_{Bh}$
$T_{Av}$	0.9936	0.0034
$T_{Ah}$	0.0036	0.9936

表 12 23.8 GHz 天线交叉极化校正结果

23.8 GHz	$T_{Bv}$ 误差/K	$T_{Bh}$ 误差/K
校正前	0.8359	0.4361
校正后	0.0064	0.0081

## 5 结论

本文基于自主推导的全极化天线温度方程, 结合辐射传输正演模型仿真了地球场景亮温以及辐射计天线温度, 利用多元线性回归的方法求取了天线交叉极化校正  $M$  矩阵, 实现了极化相关型全极化

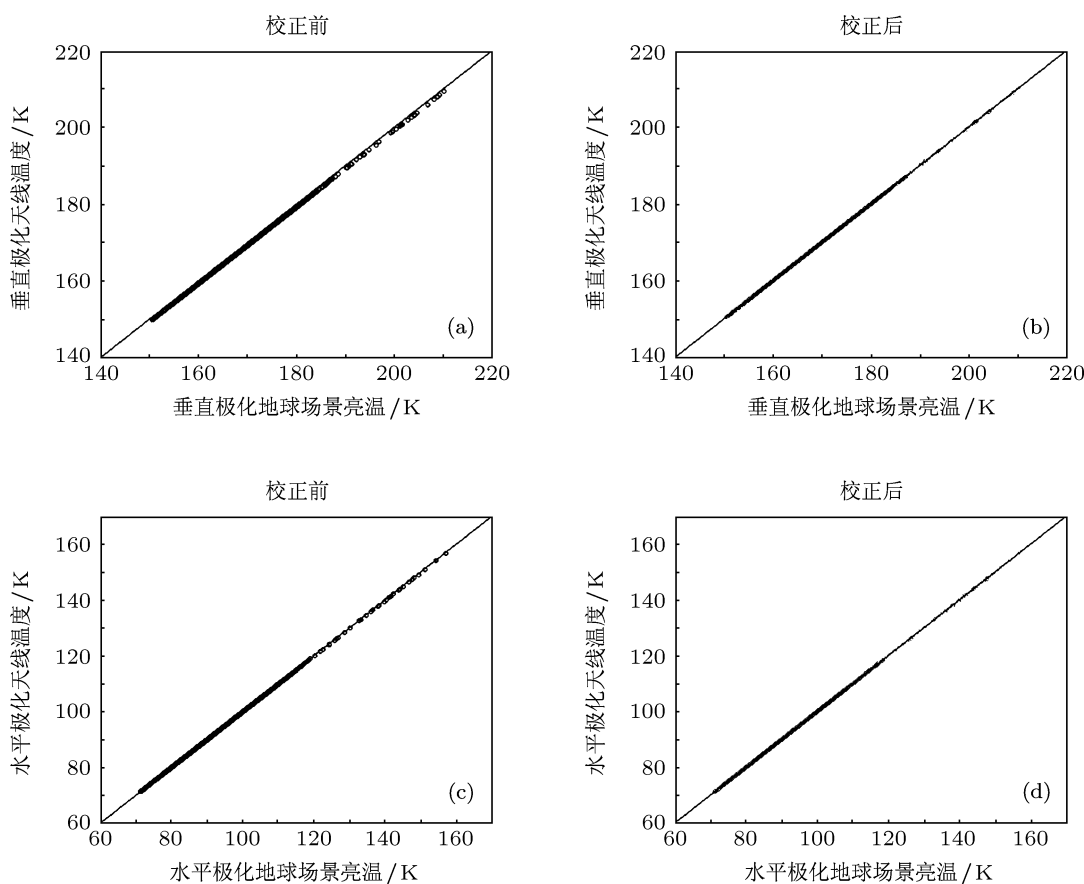


图 8 6.8 GHz 校正前后天线温度与地球场景亮温的关系 (a), (c) 红色散点图表示校正前的情况; (b), (d) 绿色散点图表示校正后的情况

微波辐射计的天线交叉极化校正. 试验结果表明, 天线交叉极化对全极化微波辐射计正交通道亮温影响明显, 尤其以对垂直极化亮温造成的误差最为显著, 校正后各通道的天线交叉极化得到了有效的减小, 交叉极化优于  $-23$  dB, 极化纯度大于 99.5%, 达到了与 WindSat 对于天线交叉极化指标一致的水平. 由于同极化的天线温度和地球场景亮温存在相当好的线性关系, 通过校正试验证明, 采用  $M$  矩阵校正天线温度的方案是切实可行的. 该方法不同于天线设计和优化阶段进行的交叉极化校正, 而是适用于辐射计在轨运行后的最终校正. 辐射计发射升空后, 将天线温度乘以  $M$  矩阵的逆  $M^{-1}$ , 可以有效减小天线交叉极化对观测的影响.

计算中, 天线方向图采用仿真软件获取, 模拟

的校正前天线交叉极化亮温误差相对较小, 产生此现象的原因有: 1) 馈源辐射是采用 GRASP9 自带的高斯馈源波束仿真, 没有考虑极化隔离不完全造成的交叉极化; 2) 没有在计算中考虑随机噪声的影响; 3) 仿真计算时没有考虑辐射计带宽; 4) 计算时根据不同频率考虑了中心波束入射角与天底角的变化, 但没有考虑馈源不同方位排列对于交叉极化的影响. 因此实际辐射计的天线交叉极化作用预期将大于仿真计算结果. 在今后的工作中, 需要结合国内星载极化相关型全极化微波辐射计的实际设计参数与测试数据, 将现有仿真模型与校正算法更好地进行整合与优化, 更为深入地开展天线交叉极化校正的研究.

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K 1981 *Microwave remote sensing: active and passive* (Vol. 1) (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company) pp229–85
- [2] Martine S 2004 *An introduction to ocean remote sensing* (Cambridge: Cambridge University Press) pp201–27
- [3] Gaiser P W, Twarog E M, Karen L L 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 2347
- [4] Plonski M, Smith C 2001 *Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the conical-scanning microwave imager/sounder (CMIS) environmental data records (EDRs)* (Vol.1 17) (Lexington: AER) pp1–132
- [5] Hewison T J, Saunder R 1996 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **34** 405
- [6] Janssen M A, Ruf C S, Keihm S 1995 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **33** 138
- [7] Smith C K, Thompson D 2008 *IGARSS Boston, MA, July 6–11, 2008* p10
- [8] Lu W, Yan W, Wang R, Wang Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 018401 (in Chinese) [陆文, 严卫, 王蕊, 王迎强 2012 物理学报 **61** 018401]
- [9] Kim S B, Wentz F J 2008 *IGARSS Boston, MA, July 6–11, 2008* pp1184–1187
- [10] Zhang Z Y, Lin S J 1995 *Microwave radiation measurement technology and Application* (Beijing: Electronic Industry Press) (in Chinese) [张祖荫, 林士杰 1995 微波辐射测量技术与应用 (北京: 电子工业出版社)]
- [11] Njoku Eni G, Christensen E J, Cofield R E 1980 *IEEE J. Oceanic Eng.* **5** 125
- [12] Wentz F J 1993 *User's Manual SSM/I Antenna Temperature Tapes Revision 2* (Santa Rosa: Remote Sensing System) pp7–15
- [13] Tachi K, Arai K, Sato Y 1989 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **27** 177
- [14] Gaiser P, Purdy B 2002 *Antenna design, modeling, and testing on the WindSat satellite wind direction measurement system* (Washington: Naval Research Laboratory) pp39–43
- [15] Shi J K, Lu W, Yan W, Ai W H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 078403 (in Chinese) [施健康, 陆文, 严卫, 艾未华 2012 物理学报 **61** 078403]
- [16] Pontoppidan K 2005 *GRASP9 technical description* (Denmark: TICRA Engineering Consultants) pp1–11
- [17] Wang R 2007 *MS Thesis* (Nanjing: Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology) (in Chinese) [王蕊 2007 硕士学位论文 (南京: 解放军理工大学气象学院)]
- [18] Wang Z Z 2005 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王振占 2005 博士学位论文 (北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心)]

# Antenna cross-polarization correction for spaceborne polarimetric microwave correlation radiometer (II): Correction experiment\*

Lu Wen<sup>1)†</sup> Yan Wei<sup>1)</sup> Ai Wei-Hua<sup>1)2)</sup> Shi Jian-Kang<sup>3)</sup>

1) ( College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China )

2) ( CMA Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China )

3) ( Unit 63655 of PLA, Urumchi 841700, China )

( Received 7 June 2012; revised manuscript received 22 November 2012 )

## Abstract

In this paper, we simulated the earth scene brightness temperature by creating the earth scene data sets and using polarimetric microwave radiative transfer model. On the basis of the fully polarized antenna temperature equation we have derived, the radiometer antenna temperature was also simulated by generating antenna pattern through GRASP9 software. Then by using multiple linear regression method, the  $M$  matrix was calculated and the antenna cross-polarization correction for spaceborne polarimetric microwave correlation radiometer was realized. The correction results show that the antenna temperature and earth scene brightness temperature have a linear relationship. Antenna cross-polarization influences the orthogonal channels brightness temperature seriously, especially the vertical polarization brightness temperature. The antenna cross-polarization for each channel has been effectively reduced. Residual cross-polarization is better than  $-23$  dB and the polarization purity is greater than 99.5%. Correction of using  $M$  matrix to eliminate the antenna cross-polarization is feasible. It has been proved that this technique is most appropriate for the final correction of antenna cross-polarization for the spaceborne polarimetric microwave correlation radiometer on orbit.

**Keywords:** polarimetric microwave radiometer, antenna cross-polarization, antenna temperature equation,  $M$ -matrix

**PACS:** 84.40.Ba, 42.25.Ja, 92.60.Gn, 93.85.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.62.078403

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41076118, 41005018), and the foundation of CMA key laboratory for atmospheric physics and environment (Grant No. KDW1105).

† Corresponding author. E-mail: luwenft@hotmail.com