

全极化微波辐射计姿态对观测亮温的影响及消除*

陆文[†] 严卫 王蕊 王迎强

(解放军理工大学气象学院, 江苏南京 211101)

(2011年7月3日收到; 2011年9月15日收到修改稿)

针对全极化微波辐射计精确探测的需求, 研究了辐射计姿态对于观测亮温的影响以及亮温误差校正. 建立了姿态偏移与观测入射角以及极化旋转角的关系, 模拟了观测亮温随观测入射角以及极化旋转角波动的变化; 仿真了姿态偏移情况下的辐射计原始观测亮温; 运用一种基于辐射传输模型的姿态补偿方法, 以垂直极化亮温和第三 Stokes 参数亮温为例, 对原始观测亮温展开误差校正. 研究显示, 该方法能够有效去除辐射计姿态偏移对观测亮温造成的影响, 校正结果满足辐射计数据预处理的误差精度要求.

关键词: 全极化微波辐射计, Stokes 参数, 观测入射角, 极化旋转角

PACS: 84.40.Xb, 93.85.Pq, 92.60.Gn, 41.20.Jb

1 引言

空间被动微波遥感是对地球观测重要的途径之一, 全极化微波辐射计作为一种新型的空间被动微波遥感仪器, 为海面风场、海面温度、大气水汽含量、降雨强度等大气海洋环境参数的观测提供了重要手段^[1,2]. 全极化微波辐射计在传统双极化微波辐射计探测垂直极化和水平极化辐射的基础上, 进一步提取观测目标第三和第四个 Stokes 参数分量的极化信息, 实现了对目标极化全部 4 个 Stokes 参量的探测. 2003 年美国发射了世界上第一台星载全极化微波辐射计 WindSat, 其在 10.7, 18.7 和 37 GHz 频率上配置了全极化通道, 首次实现了星载微波辐射计对目标的全极化观测^[3,4].

全极化微波辐射计采用圆锥扫描方式, 在理想条件下, 辐射计姿态平稳, 其观测入射角恒定, 极化旋转角为零. 然而在辐射计因翻滚和俯仰发生姿态偏移的情况下, 由于姿态失配造成了观测入射角不恒定, 随着观测方位的不同发生变化; 同时姿态偏移造成了辐射计的极化基准和地球表面极化基准不匹配, 产生极化旋转角. 观测入射角的波动主要对垂直极化亮温和水平极化亮温的观测产生影响, 而极化旋转角则主要对第三 Stokes 参数亮温的观

测产生影响.

辐射计姿态可以通过星载姿态敏感器(如磁强计等)测量得到, 仪器测量会产生残留误差, 并且当星载仪器发生故障时, 辐射计的姿态将很难直接获取^[5-7]. 在星载仪器测量的基础上, 辐射计姿态还需要地面数据预处理环节对其进行进一步的估计与修正. 结合地理定位算法将亮温图与地形图进行匹配估计姿态偏移是常用的方法. 这时需要选择有典型地理特征的地面控制点进行图像匹配, 该方法能够在一定程度上消除姿态校正的残留误差, 但控制点的选择存在主观人为因素, 从而影响到姿态判别的准确性^[8-10]. 本文研究一种结合辐射传输正演模型估计辐射计姿态偏移并消除其对观测亮温影响的方法: 通过建立全极化微波辐射计姿态偏移与观测亮温变化的关系, 模拟亮温误差随姿态偏移的变化规律, 运用结合辐射传输模型的姿态补偿方法, 展开辐射计姿态校正, 从而减轻和消除姿态误差对观测亮温的影响.

2 Stokes 参数与全极化亮温

通常自然介质发射的电磁波是部分极化的, 为了全面描述辐射的极化状态, Stokes 引入了 4 个参

* 国家自然科学基金(批准号: 41076118)资助的课题.

[†] E-mail: luwenft@hotmail.com

数 I, Q, U 和 V ^[11]. 分别定义为

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \frac{1}{\eta} \begin{pmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle + \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle |E_v|^2 \rangle - \langle |E_h|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_v E_h^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_v E_h^* \rangle \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 η 表示电磁波阻抗, I 表示辐射总能量, Q 表示垂直极化和水平极化能量之差, U 和 V 描述垂直极化和水平极化分量的相干关系, 其值分别为两者复相关结果的实部和虚部. 全极化微波辐射计的测量值一般用亮温表示, 在实际应用中, 通常将 Stokes 参数转换成亮温表达的形式^[12], 有

$$T_B = \begin{pmatrix} T_{Bv} \\ T_{Bh} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \end{pmatrix} = \frac{\lambda^2}{k \cdot \eta} \begin{pmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle \\ \langle |E_h|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_v E_h^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_v E_h^* \rangle \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 λ 表示电磁波波长, k 为玻兹曼常数. 习惯上, 通常忽略辐射强度与亮温之间的比例系数. 那么, 全极化微波辐射计观测亮温可以表示为

$$T_B = \begin{pmatrix} T_{Bv} \\ T_{Bh} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{I+Q}{2} \\ \frac{I-Q}{2} \\ U \\ V \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Stokes 参数的主要特点是各个参数都是可测量, 且均为辐射强度量纲. 全极化微波辐射计的测量值就是 Stokes 参数的所有 4 个分量, 得到目标辐射的全部极化信息. 其中, 正交通道亮温 T_{Bv} 和 T_{Bh} 主要用于提取海面风速信息, 极化通道亮温 U 和 V 主要用于确定海面风向.

3 辐射计姿态对亮温的影响

全极化微波辐射计在轨运行中, 由于平台受扰动等因素的影响, 不可避免地造成实际姿态与设计姿态失去配准, 会发生俯仰 (pitch)、翻滚 (roll) 和偏航 (yaw)^[13]. 这造成在姿态配准情况下本应重合的辐射计坐标系与轨道坐标系相互之间发生了偏

移, 如图 1 所示. 其中, X_O, Y_O, Z_O 表示轨道坐标系, X_R, Y_R, Z_R 表示辐射计坐标系. 在辐射计姿态配准时, W 表示辐射计扫描视线, η_0 表示辐射计此时的天底角, θ_0 表示观测入射角, n 表示地表入射点处的法线. 当辐射计姿态发生偏移时, 辐射计扫描视线表示为 W' , 天底角表示为 η' , 观测入射角为 θ' , 地表法线表示为 n' . 俯仰 (pitch)、翻滚 (roll) 和偏航 (yaw) 表示辐射计姿态的偏移, 即辐射计坐标系相对于轨道坐标系在俯仰、翻滚、偏航方向上的旋转, 分别用角度 $\xi_{pitch}, \xi_{roll}, \xi_{yaw}$ 表示, 该旋转满足右手螺旋关系. 辐射计姿态偏移会使观测入射角发生变化, 同时产生了极化旋转角, 这导致全极化微波辐射计观测亮温产生误差. 下面讨论辐射计姿态偏移对观测亮温的影响, 附录推导了姿态偏移与入射角以及极化旋转角的关系并对各坐标系参数定义进行了详细说明.

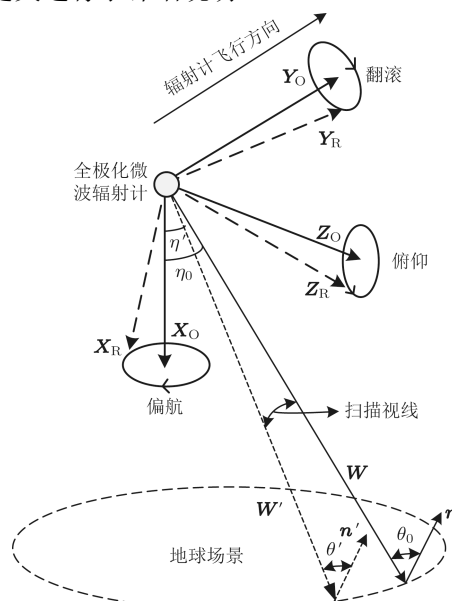


图 1 辐射计姿态与观测几何关系示意图

3.1 入射角变化对亮温的影响

辐射计姿态发生偏移时, 定义辐射计入射角变化量为 $\Delta\theta = \theta' - \theta_0$. 全极化微波辐射计观测入射角变化量与辐射计姿态偏移有着密切的联系, 在附录中详细推导了它们之间的关系. 参考 WindSat 的轨道参数, 设置轨道高度为 820 km, 地球平均半径为 6378.137 km, 姿态配准时标准入射角 θ_0 为 49.9° , 通过模拟仿真, 得到入射角变化与辐射计姿态偏移的关系, 如图 2 所示. 可见入射角的变化量 $\Delta\theta$ 随着辐射计的俯仰和翻滚具有明显的沿方位的波动变化. 俯仰与翻滚造成的 $\Delta\theta$ 振幅相当, 相

位相差约 90°。图 2 模拟时, 将辐射计俯仰和翻滚对入射角变化量的影响分别进行了考虑, 其中一个量变化时, 另一个变量赋值为零不做变化。由于全极

化微波辐射计采用圆锥扫描方式, 故辐射计的偏航对入射角变化没有影响, 此处不做考虑。

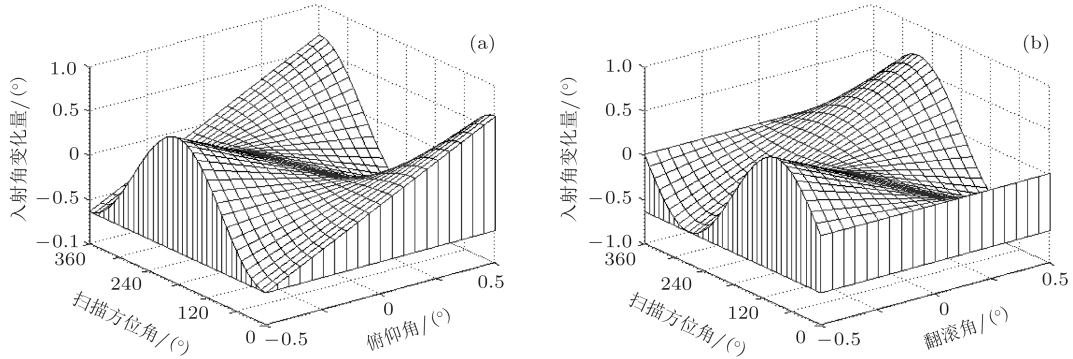


图 2 入射角变化与辐射计姿态偏移的关系 (a) 表示入射角变化量随扫描方位角和俯仰角的变化; (b) 表示入射角变化量随扫描方位角和翻滚角的变化

通常, 全极化微波辐射计的姿态偏移量较小 (小于 1°), 从而造成入射角发生的波动较小, 那么观测亮温 T_B 的变化可以用亮温在原始入射角 θ_0 附近的一阶近似表示 [14]

$$T_B(\theta') \approx T_B(\theta_0) + (\theta' - \theta_0) \left. \frac{\partial F}{\partial \theta} \right|_{\theta'=\theta_0}, \quad (4)$$

其中 F 表示全极化辐射传输正演模型, 它能模拟能量从地球目标向辐射计传输的物理过程 [15-18], 用它模拟辐射计接收到的 4 个 Stokes 参数亮温, 表示为

$$T_{Bp} = F(f, \theta, T_s, w, \phi, V, L), \quad (5)$$

其中, T_{Bp} ($p = v, h, 3, 4$) 表示辐射计观测亮温, 它是观测频率 f , 观测入射角 θ , 海面温度 T_s , 海面风速 w , 相对风向 ϕ , 大气水汽含量 V 以及大气液态水含量 L 的函数。

定义亮温误差 $\Delta T_B = T_B(\theta') - T_B(\theta_0)$, 那么由于入射角波动造成的亮温误差 ΔT_B 表示为

$$\Delta T_B = \Delta \theta \cdot \left. \frac{\partial F}{\partial \theta} \right|_{\theta'=\theta_0}. \quad (6)$$

(6) 式建立了入射角变化量与亮温误差的关系, 这也是进行亮温误差校正的基础。

根据 (4)–(6) 式, 可以模拟得到全极化微波辐射计在入射角波动情况下亮温的变化情况。研究表明, 入射角波动造成的亮温误差主要来自正交通道亮温 (垂直和水平极化亮温), 第三、第四 Stokes 参数亮温受入射角影响很小 [19], 因此本文主要研究入射角波动对正交通道亮温的影响。

垂直和水平极化亮温受入射角波动的影响体现在亮温关于入射角的变化率 $\Delta T_B / \Delta \theta$, 如 (6) 式

所示。由于垂直和水平极化亮温受相对风向的方位角调制影响很小, 因此根据 (5) 式, 采用了精简的不受相对风向影响的辐射传输正演模型 F_1 来模拟正交通道亮温, 表示为

$$T_{Bv,h} = F_1(\theta, w, T_s, V, L). \quad (7)$$

正演模型 F_1 的输入包括观测入射角 θ 、海面风速 w 、海面温度 T_s 、大气水汽含量 V 、云液态水含量 L 共 5 个参数, 输出为正交通道亮温 T_{Bv} 和 T_{Bh} [19]。参照 WindSat 的参数设置, 以 10.7 GHz 垂直极化为例, 得到了在 41°–59° 区间范围内亮温随入射角的变化率, 如表 1 所示。计算时正演模型取海面风速 10 m/s, 海面温度 298 K, 大气水汽含量 30 mm, 云液态水含量 0.05 mm。这里入射角每隔 3° 进行采样。对于全极化微波辐射计观测来说, 入射角一般在 (40°, 60°) 之间, 例如全极化微波辐射计 WindSat 的 5 个频率的入射角范围是 49.9°–55.3°, 其中 49.9° 对应于 10.7 GHz。

表 1 垂直极化亮温关于入射角的变化率

入射角/(°)	亮温变化率/K/(°)
41	2.0851
44	2.0945
47	2.1053
50	2.1181
53	2.1336
56	2.1526
59	2.1768

可以看出在入射角处于 (40°, 60°) 之间的时候, 垂直极化亮温随入射角的变化有着 2 K/° 以上的

变化率, 1° 的入射角变化就会导致亮温的误差达到 2 K, 如此大的亮温误差是不可忽视的, 超过了辐射计定标精度的要求. WindSat 对于正交通道定标精度是 0.75 K^[3], 因此亮温误差如不校正会对参数反演产生很大影响.

3.2 极化旋转角对亮温的影响

全极化微波辐射计姿态偏移还导致辐射计天线的极化基准和地表目标的极化基准发生失配, 极化基准存在以电波传播方向为轴的旋转, 产生极化旋转角, 如图 3 所示.

图 3 中电磁波垂直于表面入射, 定义向左的旋转为正, φ 即为极化旋转角, \mathbf{v}, \mathbf{h} 表示地表目标的垂直和水平极化, $\mathbf{v}_A, \mathbf{h}_A$ 表示辐射计天线的垂直和水平极化. 辐射计姿态偏移与极化旋转角关系的详细

推导参见附录. 采用与 3.1 节相同的辐射计参数, 模拟得到极化旋转角与辐射计姿态的关系, 如图 4 所示. 可见极化旋转角随着辐射计的俯仰和翻滚也具有明显的沿方位向的波动变化, 并且变化规律与入射角变化量的变化规律类似. 这种变化规律可以用正(余)弦三角函数的形式拟合得到. 由于圆锥扫描全极化微波辐射计的偏航对极化旋转角没有影响, 这里在姿态模拟中不做考虑.

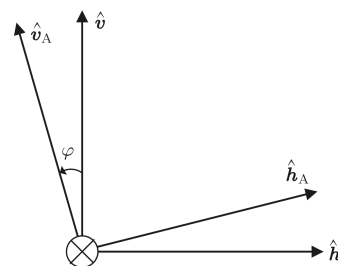


图 3 极化旋转定义

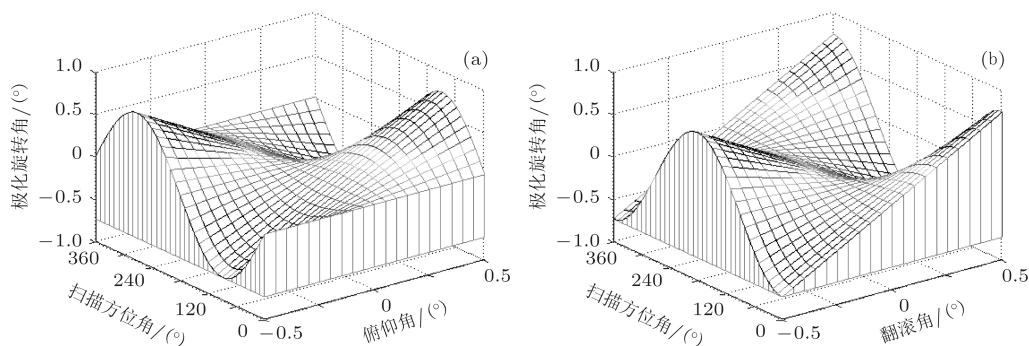


图 4 极化旋转角与辐射计姿态偏移的关系 (a) 表示极化旋转角随扫描方位角和俯仰角的变化; (b) 表示极化旋转角随扫描方位角和翻滚角的变化.

根据图 3, 极化旋转角 φ 对亮温的影响, 可以解释为电场矢量 \mathbf{E} 在天线极化基准下相对于地面目标极化基准发生了偏转^[20], 表示为

$$\begin{pmatrix} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}_A) \\ (\mathbf{E} \cdot \mathbf{h}_A) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}) \\ (\mathbf{E} \cdot \mathbf{h}) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

因此, 由于极化旋转角的存在导致了 4 个 Stokes 参数中 Q 和 U 产生相应的旋转, 而 I 和 V 不受极化旋转的影响, 表示为

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\varphi) & -\sin(2\varphi) & 0 \\ 0 & \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}. \quad (9)$$

那么, 经过旋转后的第三 Stokes 参数亮温 U' 表示为

$$U' = Q \sin(2\varphi) + U \cos(2\varphi). \quad (10)$$

第三 Stokes 参数亮温变化量 ΔU 表示为

$$\Delta U = U' - U = Q \sin(2\varphi) - 2U \sin^2 \varphi. \quad (11)$$

通常, 辐射计姿态失配造成的极化旋转角数值较小, (11) 式可以简化为

$$\Delta U \approx Q \sin(2\varphi) \approx 2Q\varphi. \quad (12)$$

(11), (12) 式建立了极化旋转角与亮温误差的

关系,这是进行第三 Stokes 参数亮温误差校正的基础. 根据 (11) 式,模拟得到第三 Stokes 参数亮温误差 ΔU 随极化旋转角变化的关系,如图 5 所示.

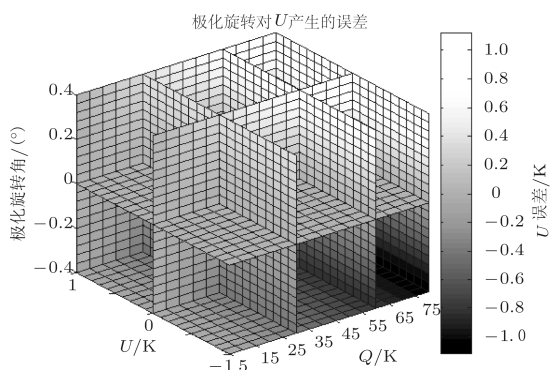


图 5 极化旋转角对第三 Stokes 参数亮温的影响

对于全极化微波辐射计来说,以 10.7 GHz 为例,通常 Q 的典型值取值范围在 65—75 K 之间,第三 Stokes 参数亮温 U 的取值在 -1—1 K 范围内,由图 5 可知极化旋转角对 U 观测精度的影响可以达到接近 1 K. 根据 (9) 式,容易得出垂直和水平通道亮温受到极化旋转的影响微小. 例如,在 Q 和 U 分别为 75 和 0.3 K 的情况下,取极化旋转角为 0.3° ,那么经过极化旋转以后 Q' 和 U' 的取值分别为 74.9961 和 0.8236 K,极化旋转对 Q 和 U 的影响分别为 -0.0039 和 0.5236 K,显然第二 Stokes 参数亮温 Q 对极化旋转不敏感,第三 Stokes 参数亮温 U 对极化旋转敏感. 第三 Stokes 参数亮温 U 比正交通道亮温在数值上要小两个数量级,并且定标精度提高, WindSat 对极化通道亮温的定标精度要求为 0.25 K^[3],所以极化旋转角产生的亮温误差对 U 有显著影响,校正必不可少. 相对于 U ,垂直和水平通道亮温的数量级较大,定标精度要求降低 (WindSat 为 0.75 K),极化旋转对其产生的亮温误差可以忽略不计. 因此本文主要研究辐射计姿态偏移产生的极化旋转角对第三 Stokes 参数亮温 U 的影响及其校正.

4 观测亮温误差校正

4.1 亮温误差仿真

辐射计姿态偏移带来了入射角以及极化旋转角的变化,入射角变化导致的正交通道亮温误差和极化旋转角导致的第三 Stokes 参数亮温误差是十分显著的,需要进行消除,现在讨论入射角波动和

极化旋转角造成的亮温误差的校正问题. 因为全极化微波辐射计未经过辐射校正和定标的原始观测亮温很难获取,所以通过亮温仿真的方法模拟得到全极化微波辐射计的原始观测数据. 亮温仿真使用 (5) 式描述的全极化微波辐射传输正演模型实现. 这里正演模型 F 的输入包括观测入射角 θ 、海面风速 w 、海面相对风向 ϕ 、海面温度 T_s 、大气水汽含量 V 、云液态水含量 L 共 6 个参数,输出为全极化微波亮温 T_{Bp} ($p = v, h, 3, 4$). 为了讨论辐射计姿态误差对亮温的影响及消除,在仿真时,人为地加入了包含俯仰和翻滚的辐射计姿态偏移,得到了包含姿态偏移的原始观测亮温,作为姿态校正算法的输入.

背景场的选择使用全极化微波辐射计 WindSat 发布的环境数据产品 (environmental data record, 简记为 EDR) 作为辐射传输正演模型的输入,选择 2004 年每月第一天第一轨前 1000 条海面数据,共计 12000 条用于正演模型仿真产生全极化亮温. 参照全极化微波辐射计 WindSat 的通道和频率设置,着重对 10.7 GHz 全极化通道的亮温校正进行模拟. 模拟设置的全极化微波辐射计的轨道高度为 820 km,原始入射角为 49.9° ,辐射计姿态俯仰角 ξ_{pitch} 为 0.18° ,翻滚角 ξ_{roll} 为 -0.16° .

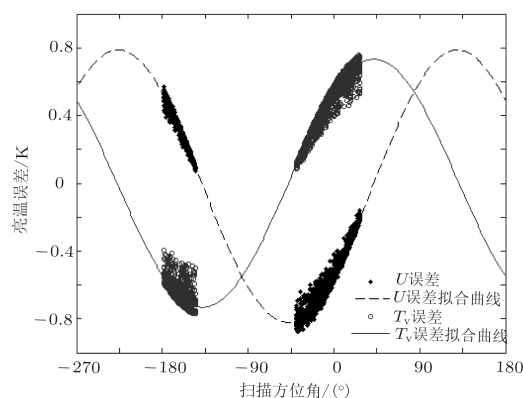


图 6 辐射计姿态偏移造成的亮温误差

在讨论中,以垂直极化通道亮温 T_{Bv} 和第三 Stokes 参数通道亮温 U 为例进行分析. 图 6 给出了仿真得到的在辐射计姿态偏移情况下亮温 T_{Bv} 和 U 的误差. 该误差定义为辐射计姿态偏移时的亮温减去姿态配准时的亮温. 需要说明的是 WindSat 圆锥扫描存在前视和后视两种情况,分别对应于扫描方位角 ω 在 -179° 到 -145° 和 -39° 到 28° 的范围^[21].

可以看出姿态偏移造成的亮温误差随着观测

方位角具有明显的方位向调制特性. 辐射计姿态偏移造成了 T_{Bv} 和 U 误差的幅值均在 0.8 K 左右. 如此大的误差对于垂直极化亮温和第三 Stokes 参数亮温来说均是不可忽视的. WindSat 数据预处理对于正交通道亮温的精度要求是 0.75 K, 对于第三 Stokes 参数亮温的精度要求是 0.25 K. 可见, 由于辐射计姿态偏移造成的亮温误差最大值均超过了辐射计数据预处理的精度要求. 用曲线拟合的方法, 发现亮温误差的分布满足正弦曲线的变化规律, 拟合的公式形式为 $A_0 + A_1 \sin(A_2\omega - \omega_0)$. 由此得到:

$$\begin{aligned} \Delta T_{Bv} &= 0.0004 + 0.7321 \\ &\quad \times \sin(1.0032\omega + 48.0903), \\ \Delta U &= -0.0163 + 0.8034 \\ &\quad \times \sin(1.0119\omega - 41.1209). \end{aligned} \quad (13)$$

ΔT_{Bv} 和 ΔU 的振幅相当, 相位差异约 90° . 用均方根误差 (root mean square error, 简记为 RMSE) 来衡量亮温误差的大小. 计算得到姿态校正前垂直极化亮温 T_{Bv} 的均方根误差为 0.5602 K, 第三 Stokes 参数亮温 U 的均方根误差为 0.4398 K.

4.2 亮温校正

对于亮温校正, 已知的是包含姿态偏移的原始观测亮温, 需要得到的是辐射计的姿态偏移量, 在此基础上进而消除姿态偏移对亮温观测造成的影响. 这里运用一种姿态补偿方法, 对辐射计姿态偏移展开校正并消除观测亮温的误差.

以仿真得到的包含辐射计姿态偏移的亮温作为待校正的原始观测亮温, 在假设辐射计姿态配准的情况下, 运行全极化辐射传输正演模型 F , 得到不含姿态误差的标准亮温, 从而计算出图 6 所示的 ΔT_{Bv} 和 ΔU . 根据 (6) 式, 取 $\partial F_1 / \partial \theta$ 的典型值为 2.1177 K° , 得到入射角的变化 $\Delta \theta = \Delta T_{Bv} / (\partial F_1 / \partial \theta)$. 根据 (12) 式, 取 Q 的典型值为 66.7120 K , 得到极化旋转角的变化 $\Delta \varphi = \Delta U / (2Q/180\pi)$. 这里 $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_0$, $\varphi_0 = 0^\circ$ 对应于姿态配准情况下的极化旋转角. 采用 $\partial F_1 / \partial \theta$ 和 Q 的典型值而不采用每次运行正演模型计算的原因是典型值代表了变量的平均变化情况, 在精度允许的情况下这样操作可以提高计算效率, 节约了针对每个观测点匹配背景场数据进而运行正演模型的时间损耗. 典型值的选取采用了精

简的与相对风向无关的正演模型 F_1 进行计算, 正演模型的输入为海面风速 10 m/s, 海面温度 298 K, 大气水汽含量 30 mm, 云液态水含量 0.05 mm. 由此得到估计的 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$ 的形式为

$$\begin{aligned} \Delta \theta(\omega) &= 1.8888 \times 10^{-4} + 0.3457 \\ &\quad \times \sin(1.0032\omega + 48.0903), \\ \Delta \varphi(\omega) &= -0.0070 + 0.3452 \\ &\quad \times \sin(1.0119\omega - 41.1209). \end{aligned} \quad (14)$$

$\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$ 的变化曲线如图 7 所示. 图 7 中实线表示实际的 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$ 随方位角的变化情况, 虚线表示采用典型值估算方法得到的 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$. 可见, 采用典型值方法估计得到的入射角与极化旋转角的变化与实际值变化没有明显差异, 在 WindSat 扫描区域内最大的差异不超过 0.05° . 依据附录, $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$ 与辐射计姿态偏移具有直接关系, 根据 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$ 曲线, 可采用曲线逼近的方法得到辐射计姿态偏移的俯仰角 ξ_{pitch} 和翻滚角 ξ_{roll} .

定义目标函数 J , 寻求辐射计的姿态偏移状态 ξ_{pitch} 和 ξ_{roll} , 使得该状态产生的 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$ 与先前估计得到的 $\Delta \theta_{\text{estimate}}$ 和 $\Delta \varphi_{\text{estimate}}$ 最为接近, 那么此时的辐射计俯仰角 ξ_{pitch} 和翻滚角 ξ_{roll} 即为所求. 该曲线逼近的方法满足最小二乘原理, 目标函数 J 的定义为

$$\begin{aligned} J &= \left(\sum_{-179^\circ}^{-145^\circ} \Delta A(\omega) + \sum_{-39^\circ}^{28^\circ} \Delta A(\omega) \right), \\ \Delta A(\omega) &= \left\{ [\Delta \theta(\xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}, \omega) \right. \\ &\quad - \Delta \theta_{\text{estimate}}(\xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}, \omega)]^2 \\ &\quad + [\Delta \varphi(\xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}, \omega) \\ &\quad \left. - \Delta \varphi_{\text{estimate}}(\xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}, \omega)]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\Delta \theta_{\text{estimate}}$ 和 $\Delta \varphi_{\text{estimate}}$ 表示采用典型值估算方法估计得到的入射角和极化旋转角的变化. 那么, 辐射计姿态俯仰和翻滚的确定如下所示.

$$(\xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}) = \arg \min J(\xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}). \quad (16)$$

最终当辐射计的俯仰角为 0.198° , 翻滚角为 -0.162° 时, 目标函数 J 取得极小值. 那么, 确定辐射计姿态偏移量的估计值为俯仰角 $\xi_{\text{pitch}} = 0.198^\circ$, 翻滚角 $\xi_{\text{roll}} = -162^\circ$. 图 7 中点划线描述了辐射计处于这样姿态偏移时对应的 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \varphi$, 曲线的变化规律与采用典型值方法估计得到的 $\Delta \theta_{\text{estimate}}$ 和 $\Delta \varphi_{\text{estimate}}$ 在 WindSat 扫描区域内符合得非常好. 经过比较, 辐射计俯仰与翻滚的

估计值相对于亮温仿真时设置的原始值存在的残留误差为 $\Delta\xi_{\text{pitch}} = 0.018^\circ$, $\Delta\xi_{\text{roll}} = -0.002^\circ$.

将估计得到的辐射计俯仰和翻滚角作为新的姿态偏移量, 进行辐射计姿态校正. 再次运行全极化辐射传输正演模型, 通过与先前模拟的包含姿态误差的原始亮温比较, 得到新的亮温误差 $\Delta T'_{\text{Bv}}$ 和 $\Delta U'$, 如图 8 所示.

可见由于对辐射计姿态偏移进行了较为精确的估计, 正演模型仿真的亮温与观测原始亮温之间的偏差得到了明显的减小. 通过曲线拟合, 得到 $\Delta T'$ 和 $\Delta U'$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta T'_{\text{Bv}} &= -3.5074 \times 10^{-4} \\ &\quad + 0.0545 \sin(1.0045\omega - 97.1380), \\ \Delta U' &= -1.0879 \times 10^{-3} \\ &\quad + 0.0629 \sin(0.9883\omega \\ &\quad - 172.5262). \end{aligned} \quad (17)$$

完成了辐射计姿态校正, 就可以去除姿态偏移对观测亮温造成的影响. 通常, 针对海面风场等环境参数的反演, 需要假设辐射计姿态恒定, 将辐射计观测的原始亮温订正到标准的姿态下, 即观测入射角为 θ_0 , 极化旋转角 φ 为零的状态. 那么首先, 根据得到的辐射计姿态偏移 ξ_{pitch} 和 ξ_{roll} 的估计值, 可以推知 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$. 接着, 利用 (4) 式得到亮温校正后的 $T_B(\theta_0)$, 利用 (12) 式得到校正后的 U . 校正前, 垂直极化通道亮温均方根误差为 0.5602 K, 通过计算得到校正后亮温误差为 0.0455 K, 减小了 91.88%. 极化通道亮温 U 在校正前的亮温误差为 0.4398 K, 校正后亮温误差为 0.0310 K, 减小了 92.95%. 可见, 相对于全极化微波辐射计 WindSat 正交通道 0.75 K 和极化通道 0.25 K 的定标精度, 校正后的亮温误差减小了一个数量级, 辐射计姿态对于亮温的影响得到了有效地消除.

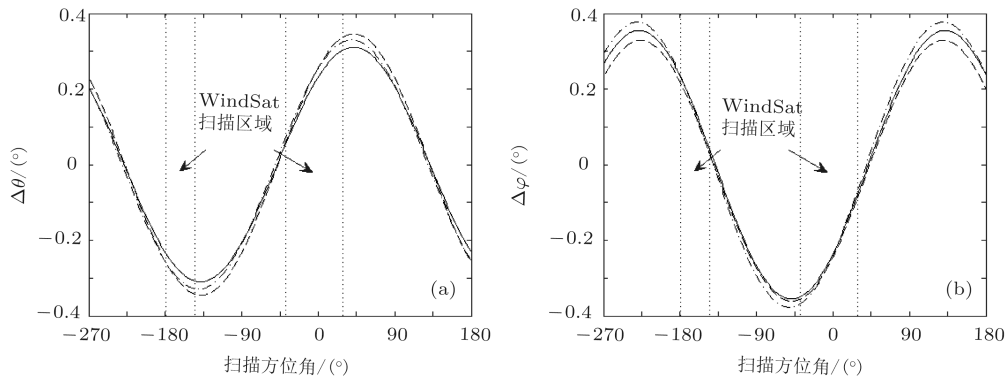


图 7 入射角和极化旋转角的变化情况 实线、虚线、点划线分别表示实际的、典型值方法估计的、通过曲线逼近得到的 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 的变化情况; (a) 入射角的情形; (b) 极化旋转角的情形

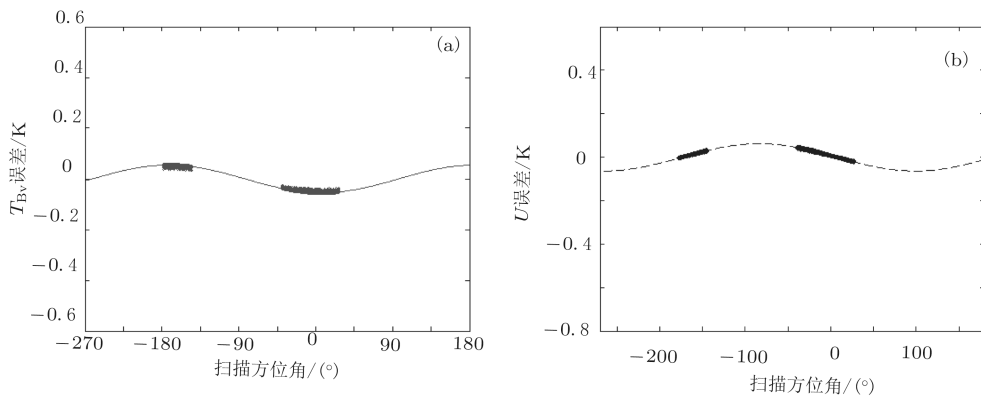


图 8 姿态校正后的亮温误差 (a) $\Delta T'_{\text{Bv}}$ 的变化情况; (b) $\Delta U'$ 的变化情况

5 结论

讨论了姿态对全极化微波辐射计观测的影响.

推导了观测入射角和极化旋转角随辐射计姿态的变化关系. 利用一种姿态补偿手段, 实现了辐射计姿态校正, 消减了辐射计姿态对垂直极化通道亮温

和第三 Stokes 参数亮温的影响. 由于水平极化亮温与垂直极化亮温的校正方法类似, 本文用垂直极化亮温作为正交通道亮温的代表进行研究. 基于仿真数据的研究结果表明, 辐射计姿态偏移造成的误差得到有效地消除.

辐射计姿态偏移通过改变观测入射角与极化旋转角, 从而对正交通道亮温和第三 Stokes 参数亮温产生影响. 观测入射角与极化旋转角受辐射计翻滚和俯仰调制, 在方位角做正弦规律的变化. 入射角与极化旋转角的变化幅值与辐射计姿态偏移的角度在同一数量级. 入射角与极化旋转角建立了辐射计亮温与姿态偏移之间的纽带, 是进行亮温误差校正的基础.

在基于仿真数据研究的基础上, 对于今后基于实测数据的全极化微波辐射计亮温校正, 获取精确的辐射传输正演模型是前提, 背景场参数典型值的选取是关键. 辐射传输模型精确才可以准确模拟辐射计的实际观测亮温. 背景场参数典型值的选择需要具有代表性, 才能反映参数变化的平均情况.

运用的姿态补偿方法既可以单独对辐射计姿态进行校正, 还可以和基于仪器测量的姿态确定方法以及地理定位算法相结合, 实现对辐射计姿态的综合校正. 首先由姿态敏感器数据得到基于仪器测量的辐射计姿态, 进而由地理定位算法进行亮温图

与地形图匹配, 完成对辐射计姿态的再校正, 最后采用本文的姿态补偿方法, 对残留的姿态误差进行校正.

针对目前国内星载全极化微波辐射计的预先研究需求, 本文的工作为数据预处理算法中的辐射计姿态校正环节做了尝试和铺垫. 今后需要将辐射计硬件参数仿真和环境参数反演进一步结合, 更加真实地模拟和分析在实际观测中辐射计姿态对微波辐射计观测的影响.

附录

A1. 推导辐射计姿态与入射角和极化旋转角的关系

首先定义在姿态发生偏移时与辐射计观测有关的基本坐标系, 如表 2 所示.

那么在姿态发生偏移时, 辐射计对地观测的情况如图 9 所示. 其中 $\mathbf{X}_O, \mathbf{Y}_O, \mathbf{Z}_O$ 表示轨道坐标系, $\mathbf{X}_R, \mathbf{Y}_R, \mathbf{Z}_R$ 表示辐射计坐标系, $\mathbf{X}_A, \mathbf{Y}_A, \mathbf{Z}_A$ 表示天线坐标系, 它们均是单位矢量; pitch, roll, yaw 表示辐射计姿态的俯仰、翻滚和偏航; ω 表示辐射计的扫描方位角, 即天线坐标系相对于辐射计坐标系的旋转; η_0 表示辐射计姿态配准时的天底角, η' 表示辐射计姿态偏移时的天底角. 在辐射计姿态偏移时, 扫描视线表示为 \mathbf{W}' , 天底角表示为 η' , 观测入射角为 θ' , 地表法线表示为 \mathbf{n}' .

表 2 辐射计观测坐标系定义

坐标系	代号	坐标轴	定义
轨道坐标系	Orb	\mathbf{X}_O	地心方向
		\mathbf{Y}_O	$\mathbf{Z}_O \times \mathbf{X}_O$
		\mathbf{Z}_O	轨道角动量矢量的反方向
辐射计坐标系	Inst	\mathbf{X}_R	辐射计的偏航轴 (yaw)
		\mathbf{Y}_R	辐射计的滚动轴 (roll)
		\mathbf{Z}_R	辐射计的俯仰轴 (pitch)
天线坐标系	Ant	\mathbf{X}_A	与 \mathbf{X}_R 相同
		\mathbf{Y}_A	$w = 0^\circ$ 时, 与 \mathbf{Y}_R 相同; $w \neq 0^\circ$ 时, 相当于 \mathbf{Y}_R 轴在扫描平面内旋转
		\mathbf{Z}_A	$w = 0^\circ$ 时, 与 \mathbf{Z}_R 相同; $w \neq 0^\circ$ 时, 相当于 \mathbf{Z}_R 轴在扫描平面内旋转

理想情况下, 轨道坐标系、辐射计坐标系是重合的, 天线坐标系相对于辐射计坐标系只有沿扫描方位角的旋转 ω . 需要指出的是为了简化说明过程这里将卫星和辐射计视为一体考虑, 用辐射计坐标系统一代指. 那么由于辐射计姿态偏移, 辐射计坐标系相对于轨道坐标系的 3 个坐标轴产生了偏航 (yaw)、俯仰 (pitch) 和翻滚 (roll) 方向上的旋转, 角度表示为 $\xi_{\text{yaw}}, \xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}$. 从轨道坐标系到天线坐标系的坐标转换可以表示为 [22]

$$T_{\text{orb/ant}} = T_{\text{orb/inst}} \cdot T_{\text{inst/ant}}, \quad (18)$$

这里的变换包含了从轨道坐标系到辐射计坐标系以及从辐射计坐标系到天线坐标系的两个转换, 其中从轨道坐标系到辐射计坐标系的转换表示为

$$T_{\text{orb/inst}} = R_{\text{pitch}} \cdot R_{\text{roll}} \cdot R_{\text{yaw}} = \begin{bmatrix} \cos \xi_{\text{pitch}} & \sin \xi_{\text{pitch}} & 0 \\ -\sin \xi_{\text{pitch}} & \cos \xi_{\text{pitch}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \xi_{\text{roll}} & 0 & -\sin \xi_{\text{roll}} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \xi_{\text{roll}} & 0 & \cos \xi_{\text{roll}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi_{\text{yaw}} & \sin \xi_{\text{yaw}} \\ 0 & -\sin \xi_{\text{yaw}} & \cos \xi_{\text{yaw}} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

$R_{\text{pitch}}, R_{\text{roll}}, R_{\text{yaw}}$ 表示辐射计姿态变换的俯仰、翻滚和偏航矩阵. 从辐射计坐标系到天线坐标系的转换表示为

$$T_{\text{inst/ant}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}, \quad (20)$$

这里 ω 是辐射计的扫描方位角.

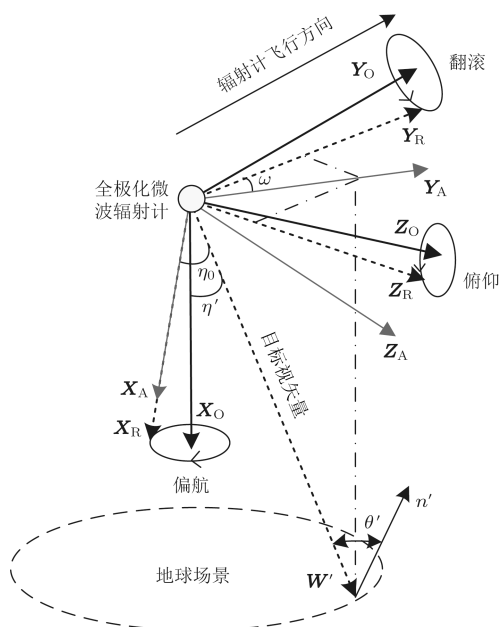


图9 辐射计观测状态示意图

现在考虑辐射计姿态偏移对观测入射角的影响. 入射角的变化由天底角的变化得到. 全极化微波辐射计观测时天底角是在轨道坐标系下定义的. 圆锥扫描全极化微波辐射计扫描视线的倾角在扫描周期内是固定的, 取值为 η_0 . 那么在辐射计姿态偏移时, 天线坐标系下的单位视矢量 \mathbf{W}'_A 可以表示为 $(\cos \eta_0, \sin \eta_0, 0)$, 将其变换到轨道坐标系下, 得到姿态偏移时轨道坐标系下的视矢量 \mathbf{W}'_O , 表示为

$$\mathbf{W}'_O = T_{\text{orb/ant}}^{-1} \cdot \mathbf{W}'_A. \quad (21)$$

那么变化以后得到的新的天底角为

$$\eta' = \arccos(\mathbf{W}'_O \cdot \mathbf{X}_O). \quad (22)$$

根据天底角与入射角的几何关系, 新的观测入射角表示为

$$\theta' = \arcsin \left[\frac{R+H}{R} \cdot \sin(\eta') \right], \quad (23)$$

其中 R 表示地球平均半径, H 表示辐射计的飞行高度. 因此得到辐射计入射角的变化量为

$$\Delta\theta = \theta' - \theta_0, \quad (24)$$

其中 θ_0 为辐射计姿态配准时的原始观测入射角. (21)—(24) 式就建立起辐射计姿态偏移与观测入射角变换的关系.

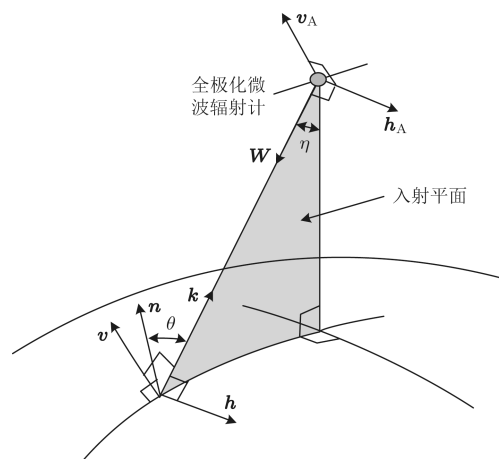


图10 地表目标极化基准和天线极化基准

下面讨论辐射计姿态偏移对极化旋转角的影响. 如图3, 极化旋转角 φ 定义为地表目标极化基准和辐射计天线极化基准之间的旋转. 地表目标极化基准和辐射计天线极化基准的描述如图10^[17]. 其中 \mathbf{k} 为电磁波传播方向单位矢量, \mathbf{W} 为观测视线方向单位矢量 ($\mathbf{W} = -\mathbf{k}$), \mathbf{n} 为地表目标点的单位法线. 在天线坐标系下, \mathbf{W} 表示为 \mathbf{W}'_A . 在轨道坐标系下, \mathbf{W} 表示为 \mathbf{W}'_O . 那么地表目标极化基准表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= \mathbf{k} \times \mathbf{n}, \\ \mathbf{v} &= \mathbf{h} \times \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (25)$$

利用表2定义的辐射计天线坐标系 \mathbf{X}_A 轴, 得到天线的极化基准, 表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_A &= \mathbf{W} \times \mathbf{X}_A, \\ \mathbf{v}_A &= \mathbf{W} \times \mathbf{h}_A. \end{aligned} \quad (26)$$

理想情况下, 天线的极化基准应和地球场景的极化基准完全匹配, 这样天线观测得到的亮温才能表示地球场景亮温, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_A &= \mathbf{v}, \\ \mathbf{h}_A &= \mathbf{h}. \end{aligned} \quad (27)$$

实际情况下, 由于辐射计姿态偏移, 天线的极化基准并不和地球场景的极化基准完全匹配, 存在以电波传播方向为轴的旋转, 这就产生了极化旋转角 φ .

极化旋转角是在辐射计天线坐标系下描述的, 这里定义为天线水平极化与地表目标水平极化之间的夹角. 在姿态发生偏移时, 轨道坐标系下定义的地表目标水平极化矢

量 \mathbf{h} 表示为 $\mathbf{W}'_O \times \mathbf{X}_O$. 那么, 将在轨道坐标系下定义的地表目标水平极化矢量变换到天线坐标系下, 有:

$$\mathbf{h}'_A = T_{\text{orb}/\text{ant}} \cdot \mathbf{h} = T_{\text{orb}/\text{ant}} \cdot (\mathbf{W}'_O \times \mathbf{X}_O). \quad (28)$$

在天线坐标系下, 天线的水平极化矢量 \mathbf{h}_A 表示为 $-\mathbf{Z}_A$, 即 $(0, 0, -1)$, 天线的垂直极化矢量 \mathbf{v}_A 表示为 $\mathbf{W}'_A \times \mathbf{h}_A$. 那么, 地球目标水平极化矢量 \mathbf{h}'_A 和天线

水平极化矢量 \mathbf{h}_A 的夹角即为极化旋转角 φ , 表示为

$$\varphi = \begin{cases} \arccos(\mathbf{h}'_A \cdot \mathbf{h}_A) & (\mathbf{h}'_A \cdot \mathbf{v}_A \geq 0), \\ -\arccos(\mathbf{h}'_A \cdot \mathbf{h}_A) & (\mathbf{h}'_A \cdot \mathbf{v}_A < 0). \end{cases} \quad (29)$$

(28), (29) 式就建立起辐射计姿态偏移与极化旋转角变换的关系. 只要已知辐射计姿态偏离量 $\xi_{\text{yaw}}, \xi_{\text{pitch}}, \xi_{\text{roll}}$, 扫描方位角 ω , 天底角 η_0 , 就可以计算出极化旋转角 φ .

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K 1981 *Microwave Remote Sensing: Active and Passive* (Vol. 1) (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company) pp229–285
- [2] Martine S 2004 *An Introduction to Ocean Remote Sensing* (Cambridge: Cambridge University Press) pp201–227
- [3] Gaiser P W, Twarog E M, Karen L L 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 2347
- [4] Wang Z Z, Jiang J S, Liu J Y, Yin X B 2008 *Eng. Sin.* **6** 76 (in Chinese) [王振占, 姜景山, 刘憬怡, 殷晓斌 2008 中国工程科学 **6** 76]
- [5] Zhang R, Zhu Z C, Zhang J, Zhu G X 2006 *J. Astronaut.* **27** 578 (in Chinese) [张锐, 朱振才, 张静, 朱光沂 2006 基于磁强计的微小卫星姿态确定宇航学报 **27** 578]
- [6] Qian S, Li P K, Zhang S F, Cai H 2009 *J. Astronaut.* **30** 585 (in Chinese) [钱山, 李鹏奎, 张士峰, 蔡洪 2009 宇航学报 **30** 585]
- [7] Abdelrahman M, Peak S Y 2011 *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* **47** 1401
- [8] Teshima Y, Iwasaki A 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 222
- [9] Khlopenkov K V, Trishchenko A P, Luo Y 2010 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **48** 2150
- [10] Lu W, Yan W, Shi J K, Ren J Q 2010 *Remote Sens. Tech. Appl.* **25** 126 (in Chinese) [陆文, 严卫, 施健康, 任建奇 2010 遥感技术与应用 **25** 126]
- [11] Stokes G G 1852 *Trans. Cambridge Phil. Soc.* **9** 399
- [12] Shi J K, Yan W, Gong H Y 2009 *J. Microwave* **25** 79 (in Chinese) [施健康, 严卫, 龚洪运 2009 微波学报 **25** 79]
- [13] Zhang R W 1998 *Satellites Orbit and Attitude Dynamics and Control* (Beijing: Beihang University Press) pp11–27 [章仁为 1998 卫星轨道姿态动力学与控制 (北京: 北京航空航天大学出版社) 第 11–27 页]
- [14] Corbella I, Gasiewski A J, Klein M, Piepmeier J R 2001 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **39** 193
- [15] Guo G J, Su L, Bi S W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2448 (in Chinese) [郭冠军, 苏林, 毕思文 2005 风成海面的极化辐射 物理学报 **54** 2448]
- [16] Brown S T, Ruf C S, Lyzenga D R 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **44** 611
- [17] 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)]
- [18] Xie T, He C, Perrie W, Kuang H L, Zou G H, Chen W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024101
- [19] Purdy W E, Gaiser P W, Poe G A 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **44** 496
- [20] Yan W, Lu W, Shi J K, Ren J Q, Wang R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 09940 (in Chinese) [严卫, 陆文, 施健康, 任建奇, 王蕊 2011 物理学报 **60** 09940]
- [21] Meissner T, Wentz F J 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **44** 506
- [22] Plonski M, Smith C 2001 *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the Conical-Scanning Microwave Imager/Sounder (CMIS) Environmental Data Records (EDRs)* Vol. 17 (Lexington: AER) pp1–132

Eliminating the influence of attitude on brightness temperatures measurement for polarimetric microwave radiometer

Lu Wen[†] Yan Wei Wang Rui Wang Ying - Qiang

(*Institute of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*)

(Received 3 July 2011; revised manuscript received 15 September 2011)

Abstract

In order to meet the requirement of accurate detection for polarimetric microwave radiometer, in this paper, we study on the influence of attitude on brightness temperatures received by the radiometer. Correction for brightness temperatures errors is also analyzed. The relationship between the misspecification of the attitude and the incidence angle together with polarization rotation angle is established. The variation of brightness temperatures with the change of incidence angle and polarization rotation angle is simulated. We simulate the original observational brightness temperatures of the radiometer. A method based on the radiative transfer model for compensating attitude offset to correct brightness temperatures errors is presented. Taking vertical brightness temperature and the third Stokes parameter brightness temperature for example, our method can eliminate the influence of attitude offset on the observation of brightness temperatures effectively, the result can satisfy the accuracy requirement of data preprocessing for polarimetric microwave radiometer.

Keywords: polarimetric microwave radiometer, Stokes parameters, incidence angle, polarization rotation angle, attitude correction

PACS: 84.40.Xb, 93.85.Pq, 92.60.Gn, 41.20.Jb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41076118).

[†] E-mail: luwenft@hotmail.com