

FY-3D星微波湿温探测仪通道响应函数的影响分析

王振占¹, 许皓文^{1,2}, 段永强^{1,2}, 王文煜^{1,2}, 丁甲^{1,2},
何文明^{1,2}, 张升伟¹

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, 北京 100049

摘要: 微波湿温探测仪 (MWHTS) 的通道响应函数 (SRF) 一般被认为近似于矩形函数, 然而从实际 SRF 的测试数据来看, MWHTS 各个频段不同通道的 SRF 存在一定的带内波动。本文利用大气辐射传输模拟器 (ARTS) 模拟了 MWHTS 中 118 GHz 各通道不同场景的亮温谱, 并输入至前期建立的 MWHTS 系统仿真模型中, 通过定标得到了仪器的输出亮温, 进而评估实测 SRF 对亮温测量及其反演的大气温度廓线的影响, 并利用卫星实测数据进行了对比验证。结果表明, 亮温偏差与实际 SRF 的带内波动呈现线性正相关的关系, 当带内波动大于 3 dB 时, 亮温偏差可以达到 0.2—0.5 K。SRF 的带内波动会造成大气温度廓线反演误差, 特别是在高度为 1.8 km 时, 误差最大可以达到 0.8—0.9 K, 该仿真结果与卫星实测数据结果一致。因此在使用数据同化方法对数值天气预报 (NWP) 进行模拟时, 需要特别注意具有较大 SRF 带内波动的通道所引起的亮温偏差, 这对于未来卫星数据的应用具有重要的研究价值。

关键词: 遥感, 风云三号气象卫星 D 星, 微波湿温探测仪, 通道响应函数, 亮温偏差, 温度廓线反演

中图分类号: TP73

引用格式: 王振占, 许皓文, 段永强, 王文煜, 丁甲, 何文明, 张升伟. 2023. FY-3D 星微波湿温探测仪通道响应函数的影响分析. 遥感学报, 27(2): 394-405

Wang Z Z, Xu H W, Duan Y Q, Wang W Y, Ding J, He W M and Zhang S W. 2023. Effect analysis of spectral response function of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3D satellite. National Remote Sensing Bulletin, 27(2): 394-405 [DOI: 10.11834/jrs.20220450]

1 引言

风云三号气象卫星 D 星 (FY-3D 星) 于 2017 年 11 月 15 日成功发射。微波湿温探测仪 MWHTS (Microwave Humidity and Temperature Sounder) 是 FY-3D 星搭载的主要有效载荷之一, MWHTS 采用全功率辐射计来接收地球表面和大气的微波辐射, 能够提供高精度的大气湿温度廓线信息 (Wang 等, 2019)。由于射频器件在辐射计带宽内的传输特性是不同的, 因此通常采用通道响应函数 SRF (Spectral Response Function) 来描述某个通道的频率响应特性。对于辐射计来说, SRF 的带内波动是影响系统工作的重要因素。因此, 在 MWHTS 的设计过程中, 需要考虑控制 SRF 的带内波动在一定

的范围, 特别是在高频宽带或者低频窄带的情况下, 实现良好的带内波动 (± 2 dB) 是较为困难的, 例如对于 MWHTS 中 118 GHz 的 Ch2 和 Ch8, 其带内波动都超过了 4 dB, 所以量化的评估 SRF 带内波动带来的影响是非常重要的研究课题, 对于 MWHTS 后续的数据模拟具有极大地研究价值。

当前已有的研究对于辐射计 SRF 的影响分析分别采取了不同的方法。Saunders 等 (1995) 采用的方法是将实际的 SRF 形状等效为矩形的带宽修正法。在修正过程中, 将每个通道对应的 SRF 累加求和, 之后计算平均值得到修正系数, 这种方法广泛用于 AMSU, ATMS 等仪器的定标过程中 (Mo, 1996; Weng 等, 2013; Bormann 等, 2013; He 等, 2015; Wang 等, 2019)。Kim 等 (2014) 通

收稿日期: 2020-10-13; 预印本: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41771405)

第一作者简介: 王振占, 研究方向为微波遥感定标、定量反演与应用技术。E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn

通信作者简介: 许皓文, 研究方向为微波遥感定标、高速数字谱仪的理论与应用。E-mail: xuhaowen1223@163.com

过模拟的方法产生了一组SRF的结果,控制其带内波动均在3 dB之内,随后采用了MonoRTM辐射传输模型仿真了不同通道对应的亮温谱,将模拟的SRF和理想的矩形SRF作为输入,经过仿真后得到的亮温结果差值可以认为是亮温偏差(Liang等,2009;Moradi等,2020)。Matti等(2016)考虑到SRF是通过卷积从而对亮温产生影响的,因此将仪器实际的SRF和理想的矩形SRF分别和模拟产生的亮温谱进行加权,之后将二者得到的亮温结果差值认为是亮温偏差。Saunders等采用的方法是最为常用的评估方式,但是由于该方法只考虑了SRF的单一影响因素,因此对于评估真实的亮温偏差并不准确。Kim等(2014)和Matti等(2016)采用的方法虽然都是通过SRF和亮温谱加权的方式评估亮温偏差,但是由于仪器本身的影响因素并未考虑在内,因此还可以通过方法改进,从而更精确地评估由SRF引起的亮温偏差的结果。

本文采用前期建立的MWHTS系统仿真模型(段永强等,2020),以118 GHz为例,将实测的基带SRF与模拟的双边带SRF进行了量化的误差评估,实测的基带SRF包含了系统传输路径上各级微波器件的响应函数,是MWHTS特性的真实描述,更加接近实际辐射计系统的辐射测量过程。根据整个仿真过程,得到了理论亮温和测量亮温的结果,通过对比二者的差值,可以确定SRF对亮温测量的影响,进而分析亮温偏差对大气温度廓线反演的影响,最后还利用卫星实测数据进行了对比验证。

2 MWHTS的SRF和辐射亮温谱

MWHTS是一种交轨扫描的全功率型微波辐射计,为了提高辐射灵敏度采用了双边带设计,共包含15个探测通道(贺秋瑞等,2017),探测的中心频率为89—183 GHz(张升伟等,2013)。其中,89 GHz和150 GHz频段是大气窗区通道,118 GHz和183 GHz频段分别为氧气和水汽的吸收通道,可分别用于大气温度和湿度廓线的探测(张升伟等,2008)。

本文以118 GHz为中心频率,利用大气辐射传输模拟器ARTS(Atmospheric Radiative Transfer Simulator)模拟产生了113—123 GHz的亮温谱,如图1所示,其中不同的颜色代表了不同的带宽分

布,每种带宽组成了一个探测通道(He等,2016)。MWHTS中118GHz的技术参数如表1所示。

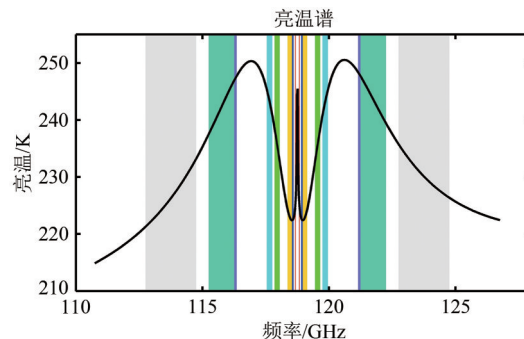


图1 113—123 GHz频段的亮温谱线

Fig. 1 Brightness temperature spectrum in the 113—123 GHz band

表1 MWHTS中118 GHz各通道的技术参数

Table 1 Technical parameters of each channel in 118 GHz of MWHTS

通道	中心频率/GHz	带宽/MHz	在轨灵敏度/K	WF峰值高度/hPa
Ch2	118.75±0.08	20	1.62	30
Ch3	118.75±0.2	100	0.75	50
Ch4	118.75±0.3	135	0.59	100
Ch5	118.75±0.8	200	0.65	250
Ch6	118.75±1.1	200	0.52	350
Ch7	118.75±2.5	200	0.49	地表
Ch8	118.75±3.0	1000	0.27	地表
Ch9	118.75±5.0	2000	0.27	地表

图2(a)和图2(b)分别展示了MWHTS的实测基带SRF和模拟的双边带SRF。从实测基带SRF来看,Ch6的带内波动为2 dB以内,Ch3、Ch4和Ch7的带内波动为3 dB以内,而其余通道达到了4 dB以上。由于实际的MWHTS为双边带的设计,但是目前我们无法直接测量双边带SRF的不平坦度,因此为了和基带SRF保持仿真的同步性,本文模拟产生了8个通道的双边带SRF,它们的带内平坦度设置为4 dB以内。

理论亮温 T_{TB} 和测量亮温 T_{MB} 分别表示亮温的平均值和加权值,它们可以被分别定义为如式(1)和式(2)所示(Jarnot等,1996):

$$T_{TB} = \frac{\int T_{BU}(f) + T_{BD}(f)df}{\int df} \quad (1)$$

$$T_{MB} = \frac{\int T_{BU}(f)S_U(f) + T_{BD}(f)S_D(f)df}{\int S_U(f) + S_D(f)df} \quad (2)$$

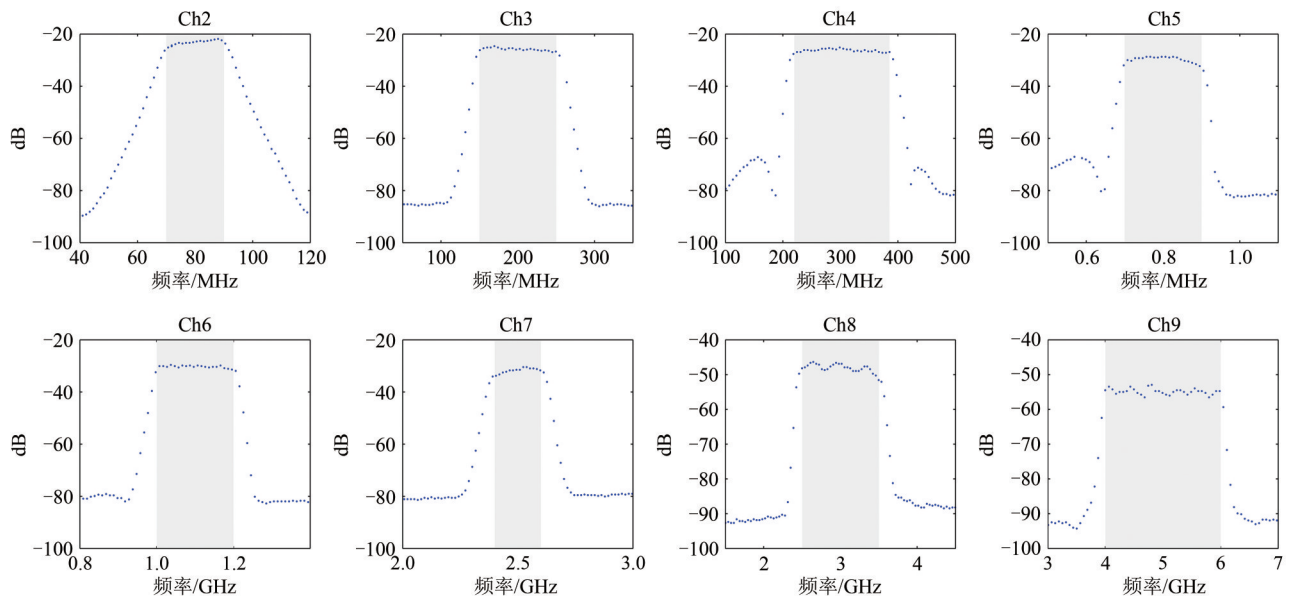
式中, $T_{BU}(f)$ 和 $S_U(f)$ 分别表示上边带的亮温谱和SRF, 而 $T_{BD}(f)$ 和 $S_D(f)$ 分别表示下边带的亮温谱和SRF。

本文在仿真过程中, 对于基带来说, $S_U(f)$ 和

$S_D(f)$ 均为实测的基带SRF数据, 对于双边带来说, $S_U(f)$ 和 $S_D(f)$ 分别为模拟的上下边带SRF数据。

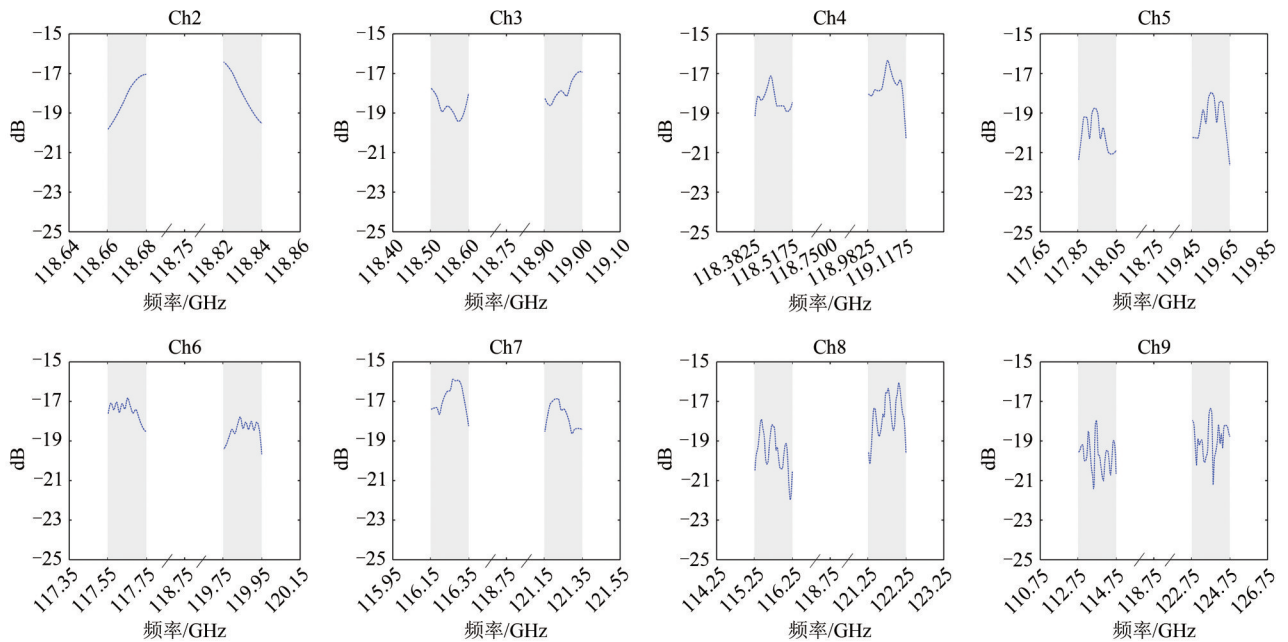
亮温偏差可以被定义为测量亮温 T_{MB} 和理论亮温 T_{TB} 的差值, 如式(3)所示:

$$\Delta T_B = T_{MB} - T_{TB} \quad (3)$$



(a) 实测的基带SRF

(a) Measured baseband SRFs



(b) 模拟的双边带SRF

(b) Simulated double sideband SRFs

图2 MWHTS中118 GHz各通道的实测基带SRF和模拟的双边带SRF

Fig. 2 Measured baseband SRFs and simulated double-band SRFs for each channel in 118 GHz of MWHTS

3 MWHTS系统仿真模型及方法概述

3.1 仿真模型

MWHTS系统仿真模型主要针对全功率型辐射计进行系统级仿真,可以用来模拟不同亮温谱线输入时MWHTS各个通道的输出电压。根据两点定标来计算目标的测量亮温。MWHTS系统仿真模型中同时考虑了宽带、高频、真实积分时间以及仪器实际参数等因素。在各模块的器件建模中,考

虑到仪器本身的影响,特别将MWHTS的实测参数,包括SRF,检波曲线等数据代入模型,从而可以表征仪器的真实性能,这样就使MWHTS系统仿真模型具有较高的准确度和可信度。

图3是系统仿真的流程图, MWHTS系统仿真模型主要包含了辐射源模型,前端模型和后端模型3部分。之前的研究中已经对MWHTS系统仿真模型进行了详细介绍,这里不再展开(段永强等, 2020)。

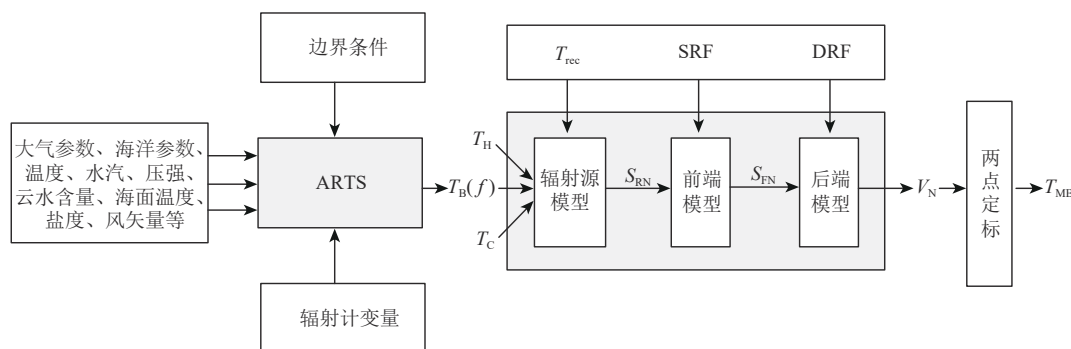


图3 系统仿真流程图

Fig. 3 Block diagram of system simulation

3.2 仿真方法

根据系统仿真流程,我们将仿真过程分为如下3步。首先,以大气参数,海洋参数,边界条件和辐射计变量等作为ARTS的输入,可以模拟得到MWHTS中118 GHz的亮温谱线。在仿真过程中,使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据进行模拟分析(贺秋瑞等, 2017),选取的时间和经纬度分别为2016年6月5日25°N—50°N和150°E—200°E。其次,对于ARTS模拟得到的亮温谱 $T_B(f)$,再结合295 K的高温源 T_H 和95 K的低温源 T_C ,将它们输入至所建立的MWHTS系统仿真模型中,经过辐射源模型得到输出频谱 S_{RN} ,进过前端模型得到输出频谱 S_{FN} ,经过后端模型得到最终的输出电压 V_N 。最后,根据两点定标过程,对MWHTS进行定标分析,通过对高温源和低温源建立线性定标方程,可以得到输出电压和亮温之间的关系,从而得到测量亮温 T_{MB} 。图4显示了MWHTS系统仿真模型中Ch9的一个定标周期后的输出电压。

3.3 反演方法

根据输出亮温的仿真结果,可以进一步进行

大气温度廓线的反演,从而评估由SRF引起的反演误差。本文中反演采用标准的一维变分法,利用辐射传输的正演过程,通过构建代价函数并使其最小化来获取大气参数的最优估计。一维变分的代价函数如式(4)所示:

$$J = \frac{1}{2} [\mathbf{x} - \mathbf{x}_b]^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} [\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{I}_0]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{I}_0] \quad (4)$$

式中, \mathbf{x}_b 代表背景廓线, \mathbf{B} 为与背景廓线变化相关的背景误差协方差矩阵, \mathbf{R} 表示模型误差和测量噪声的协方差矩阵。 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 表示对大气状态矢量 \mathbf{x} 的模拟亮温, \mathbf{I}_0 为观测亮温。误差协方差矩阵通常可以用对角矩阵来处理。因此,通过迭代计算大气状态矢量 \mathbf{x} 的下降方向就可以找到最小的代价函数。每次迭代中代价函数的梯度如式(5)所示:

$$\nabla_x J = \mathbf{B}^{-1} [\mathbf{x} - \mathbf{x}_b] + \mathbf{K}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{I}_0] \quad (5)$$

式中, \mathbf{K}^T 表示雅可比矩阵的转置矩阵。为了使代价函数的梯度为0,利用牛顿迭代法可以求得大气状态参数最优估计值,如式(6)所示:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_b + \mathbf{BK}^T(\mathbf{x}_n) [\mathbf{K}(\mathbf{x}_n) \mathbf{BK}^T(\mathbf{x}_n) + \mathbf{R}]^{-1} * [\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}(\mathbf{x}_n) - \mathbf{K}(\mathbf{x}_n)(\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_n)] \quad (6)$$

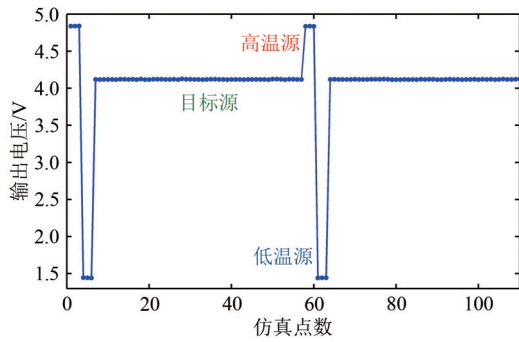


图4 MWHTS系统仿真模型中Ch9的输出电压
Fig. 4 Channel 9 output voltage of the MWHTS system simulation model

背景协方差矩阵表示大气状态矢量的统计变化特征（包括相关性），用于在不稳定的反演迭代中约束解的稳定性（正则化）。由于本文关注SRF的影响而非反演方法本身，这里使用上述ECMWF的再分析数据计算背景协方差矩阵，背景廓线使用相应的平均值。

4 结果分析及对比验证

4.1 仿真结果及分析

根据3.2节的仿真方法，可以得到理论亮温和不同SRF下的亮温偏差结果。因为有些通道的结果具有共性，所以文中仅列出了Ch3、Ch4、Ch5和Ch9的结果作为代表进行说明，其结果分别如图5（a）、5（b）、5（c）和5（d）所示。在图5中，不同的颜色代表了不同的亮温大小，在地理

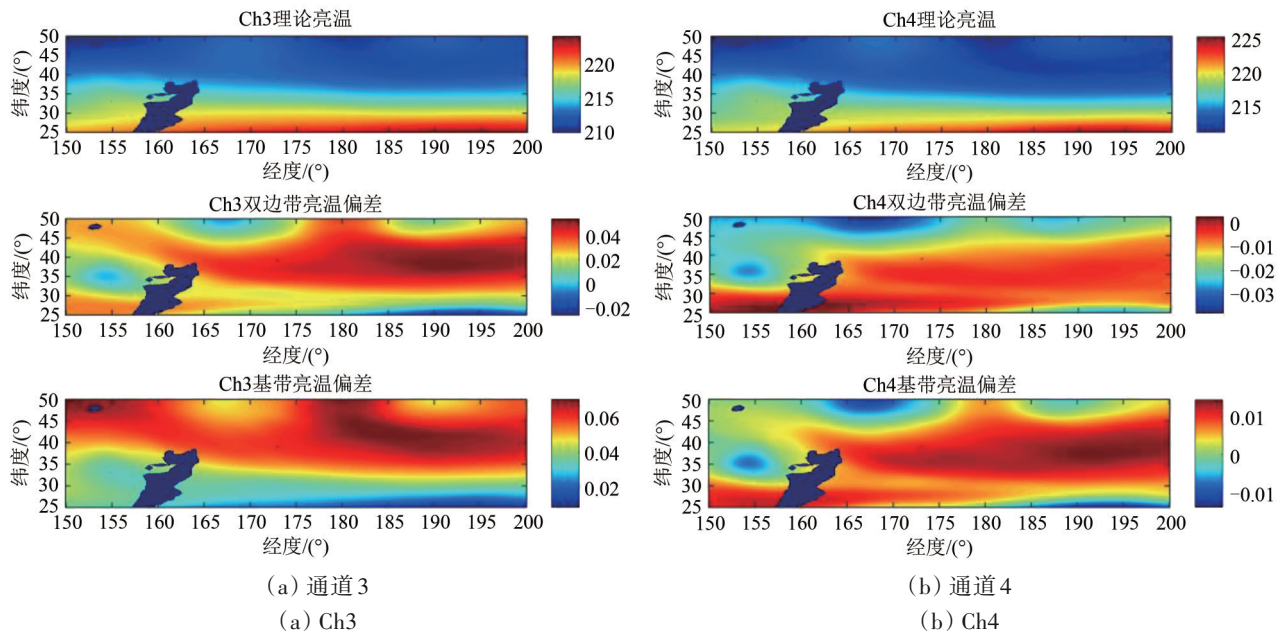
范围为158°E—165°E和25°N—40°N的亮温分布由于受到降雨的影响，所以此区域内的亮温分布并不考虑在内（贺秋瑞，2017）。

结合图5整体来看，不同通道之间的理论亮温分布和亮温偏差分布都是不同的，Ch5、Ch6、Ch7和Ch9的理论亮温分布趋势与双边带亮温偏差趋势保持一致，而Ch2、Ch3、Ch4和Ch8的理论亮温分布趋势与双边带亮温偏差趋势刚好相反。单个通道来看，每个通道的双边带亮温偏差和基带亮温偏差的分布具有一定的相似性。

根据图5右侧亮温的数值，由定量化的结果表明，不同通道之间的亮温偏差大小不同，亮温偏差最小的例如Ch4，其最大亮温偏差小于0.04 K，Ch3、Ch6和Ch7的最大亮温偏差均小于0.11 K，而Ch2、Ch5、Ch8和Ch9的最大亮温偏差较大，保持在0.2 K—0.5 K（段永强，2020）。

为了更直观地展示SRF造成的亮温偏差和带内波动的关系，对所有结果进行了统计处理，列出了最大亮温偏差和平均亮温偏差，如表2、3所示。

SRF受到仪器元器件等技术水平的限制，大幅度降低带内波动是很难的，尤其是在高频率大带宽（如Ch8和Ch9）或者带宽非常窄（如Ch2）的情况下，所以SRF的误差校正需要在应用中进行。根据表2、3的统计结果，可以对最大亮温偏差和平均亮温偏差进行拟合，基带SRF的偏差分布和拟合结果如图6（a）所示，双边带SRF的偏差分布和拟合结果如图6（b）所示。



(a) 通道3
(a) Ch3

(b) 通道4
(b) Ch4

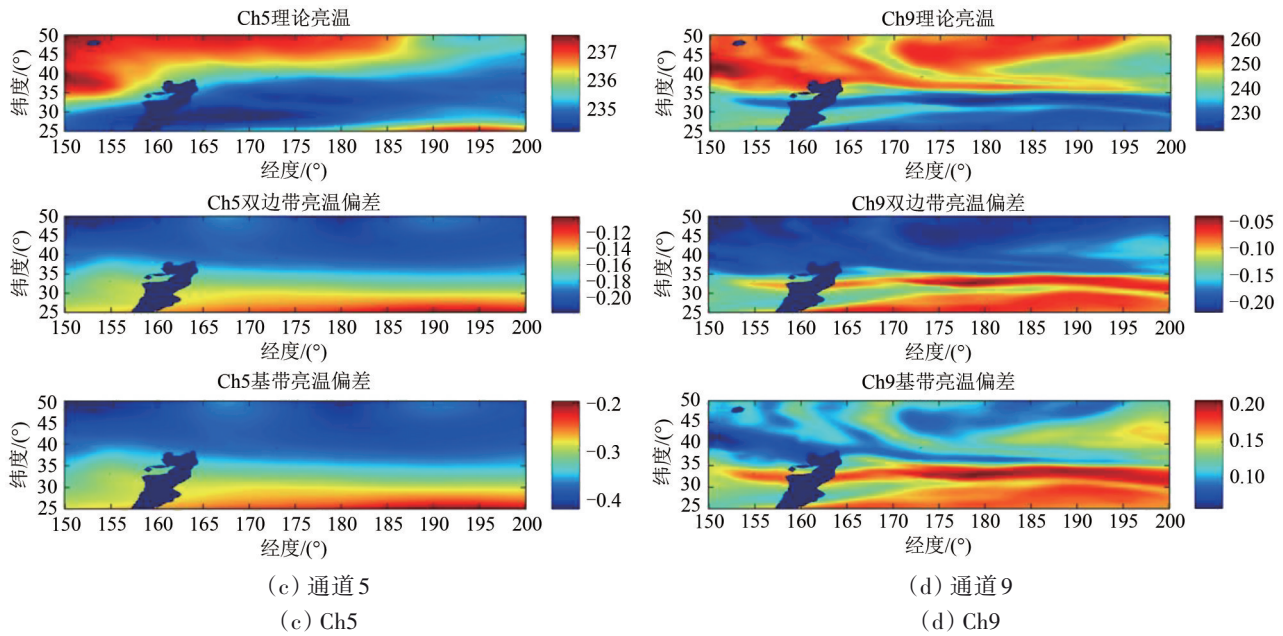


图5 MWHTS中118 GHz其中4个通道的理论亮温,双边带亮温偏差及基带亮温偏差

Fig. 5 Theoretical brightness temperature, double sideband brightness temperature biases and baseband brightness temperature biases of four channels in 118 GHz of MWHTS

表2 MWHTS中118 GHz不同通道亮温偏差统计结果 (基带SRF)

Table 2 Statistical results of brightness temperature biases of different channels in 118 GHz of MWHTS (Baseband SRF)

通道	带内波动/dB	最大亮温偏差/K	平均亮温偏差/K
2	4.47	0.5020	0.2668
3	2.94	0.0709	0.0510
4	2.68	0.0144	0.0057
5	5.42	0.4261	0.3483
6	1.78	0.0466	0.0398
7	2.82	0.1142	0.0515
8	5.54	0.4230	0.2186
9	3.26	0.2076	0.1310

从图6中最大亮温偏差和平均亮温偏差的散点分布情况来看,随着带内波动的增大,亮温偏差整体呈现增大的趋势。当带内波动大于3 dB时,基带SRF和双边带SRF的平均亮温偏差已经大于0.1 K。通过对散点进行拟合,基带SRF和双边带SRF的带内波动和最大亮温偏差之间,带内波动和平均亮温偏差之间都是呈现线性正相关,且相关系数均可以达到0.93以上。

从图5得到的结论可知,亮温偏差与目标亮温大小之间存在正相关性或负相关性,从表2的结果

可以计算出,对于基带SRF来说,Ch4和Ch7的带内波动仅相差5%左右,而通过对比亮温偏差可以得出,最大亮温偏差的结果相差87%,平均亮温偏差的结果相差88%,综合来看这说明了亮温偏差还会受到SRF的带内波动形状的影响。因为SRF的带内波动形状和该通道对应亮温谱的形状呈现不同的变化趋势,所以在计算测量亮温时会产生叠加或抵消效应,从而出现相关性不一致的结果,这需要针对具体仪器SRF的带内波动形状进行具体分析。

表3 MWHTS中118 GHz不同通道亮温偏差统计结果 (双边带SRF)

Table3 Statistical results of brightness temperature biases of different channels in 118 GHz of MWHTS (Double sideband SRF)

通道	带内波动/dB	最大亮温偏差/K	平均亮温偏差/K
2	3.39	0.3089	0.2370
3	2.48	0.0547	0.0293
4	2.77	0.0385	0.0121
5	3.45	0.2188	0.1787
6	2.73	0.1148	0.0985
7	2.61	0.0615	0.0342
8	3.82	0.2874	0.2226
9	3.47	0.2216	0.1592

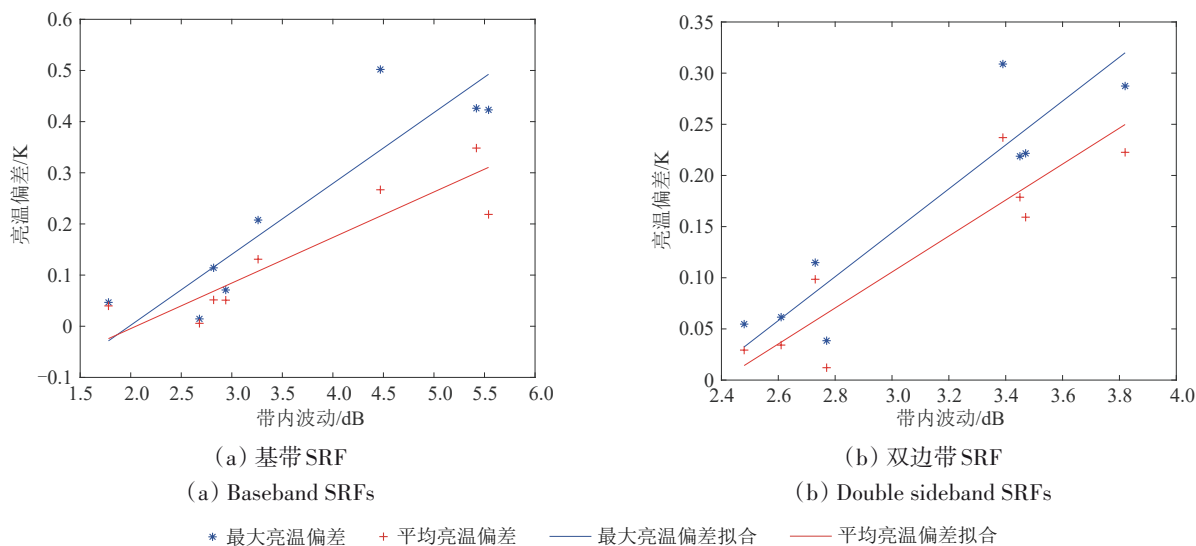


图6 MWHTS中118 GHz不同通道亮温偏差的分布和拟合结果

Fig. 6 Distribution and fitting results of brightness temperature biases of different channels in 118 GHz of MWHTS

4.2 反演结果及分析

与理想的矩形 SRF 相比，基带 SRF 和双边带 SRF 的反演结果分别如图 7 (a) 和 7 (b) 所示。对于两种 SRF 引起的反演误差，整体趋势基本保持一致，最大值均出现在高度为 1.8 km 处，此时

基带 SRF 和双边带 SRF 的误差分别达到了 0.9 K 和 0.8 K。

从反演应用角度来说，0.8—0.9 K 是一个较大的误差，尤其是在近地表的 1.8 km 处，对于天气预报的贡献率很大，因此这是必须要校正的误差项。

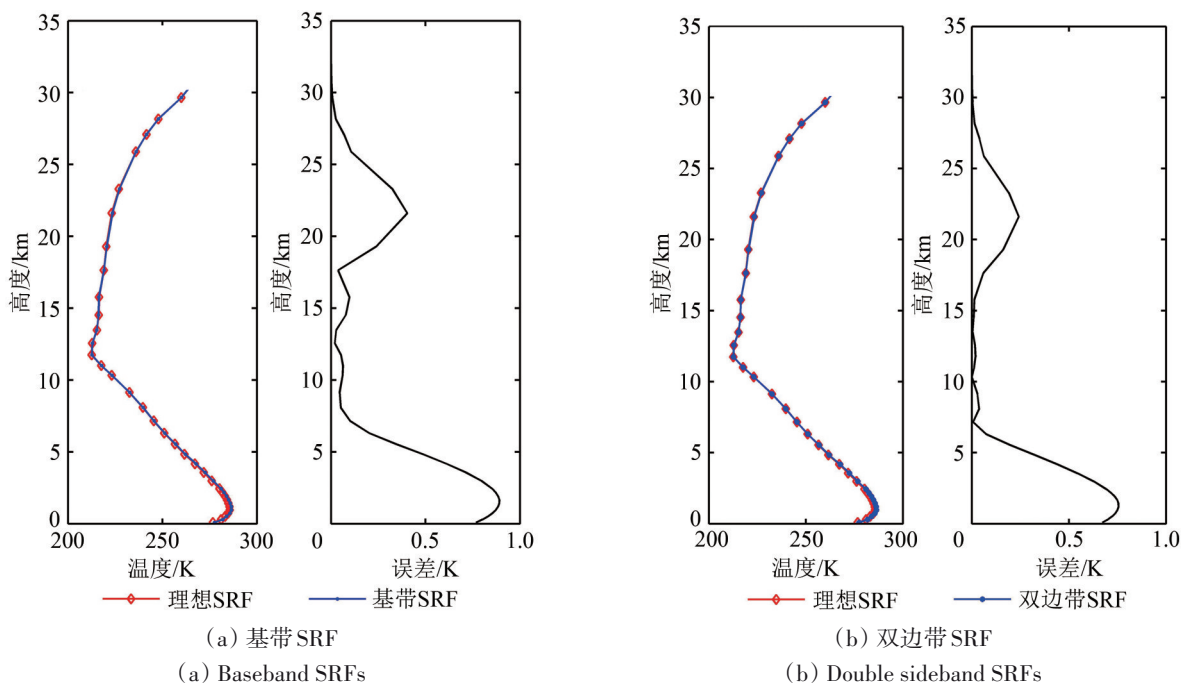


图7 基带 SRF 和双边带 SRF 对应的大气温度廓线反演结果和误差分布

Fig. 7 Retrieval results and error distribution of atmospheric temperature profiles corresponding to baseband SRF and double sideband SRF

此外，针对不同通道在整个区域最大亮温偏差的不同，还进行了不同亮温偏差下大气温度廓线的反演，使用的数据为 2014 年 6 月 14 日坐标点

(40° N, 116.25° E) 的 ECMWF 再分析数据。将 118.75 GHz 频点上初始亮温及反演结果作为参考，之后在初始亮温的基础上，选取亮温偏差分别为

0.04 K, 0.1 K 和 0.3 K 进行大气温度廓线的反演, 并和 118.75 GHz 频点上初始亮温反演结果进行差值对比, 3 种亮温偏差引起的大气温度廓线反演误差结果如图 8 所示。

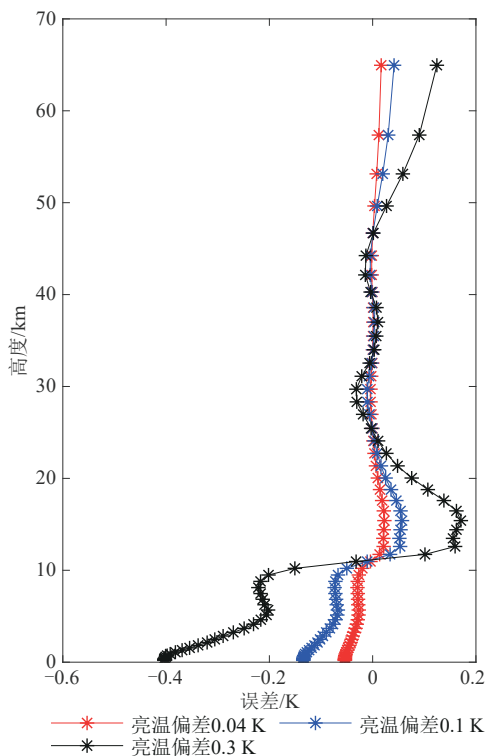


图 8 不同亮温偏差引起的大气温度廓线反演误差
Fig. 8 Retrieval errors of atmospheric temperature profile caused by different brightness temperature biases

从图 8 可以看出, 不同亮温偏差对大气温度廓线的反演误差也不一样, 整体来看, 亮温偏差越大, 反演误差的最大值也就越大, 但反演误差整体分布趋势保持一致; 单独来看, 对于 0.04 K, 0.1 K 和 0.3 K 的亮温偏差, 反演误差最大值分别为 0.05 K, 0.13 K 和 0.41 K。

4.3 与观测亮温的对比验证

为了进一步分析在不同入射角下 SRF 对于观测亮温的影响, 本文选取了 MWHTS 在轨运行期间的实测数据进行了 SRF 对观测亮温的影响分析。MWHTS 实际观测的扫描角范围是 $\pm 53.35^\circ$, 共计产生 98 个观测点, 每个点之间的扫描角间隔 1.1° 。这里对比使用的数据为 2018 年 7 月 5 日 $0\text{--}35^\circ\text{N}$ 和 $140\text{--}180^\circ\text{E}$ 的两轨 MWHTS 观测数据, 图 9 为实际的观测亮温结果。

根据观测亮温的结果, 对 8 个通道的模拟亮温与观测亮温进行了对比分析, 因为有些通道的结

果具有共性, 所以文中仅列出了 Ch2、Ch4、Ch5 和 Ch8 的结果作为代表进行说明, 其结果分别如图 10 (a)、10 (b)、10 (c) 和 10 (d) 所示。其中, SRF 权重是指实测的 SRF 频点的归一化权重 (总和为 1), 均匀权重是指在 SRF 测试的频点全部采用相同的归一化权重, DSB 权重是指上边带和下边带各在中心频点采用 0.5 的权重, 这是亮温模拟中通常使用的方法。图 10 中上排左右两图分别给出了 3 种模拟亮温偏差的均值和标准差, 分别是均匀权重和 DSB 权重的亮温偏差 (红色)、SRF 权重和 DSB 权重的亮温偏差 (绿色), 以及 SRF 权重和均匀权重的亮温偏差 (蓝色); 下排左右两图分别给出了 3 种模拟亮温与观测亮温偏差的均值和标准差, 其中 L1 是指卫星实测的 L1 级亮温数据。

从 3 种模拟亮温偏差的均值可以看出, Ch2、Ch6 和 Ch7 采用实际的 SRF 权重和 DSB 权重计算的亮温偏差小于 0.2 K, Ch3、Ch4、Ch5 和 Ch9 计算的亮温偏差约为 0.2—0.3 K, 而 Ch8 的亮温偏差可以达到 0.8 K, 而且随着扫描角不同亮温偏差也不同, 因此采用 DSB 的方法模拟亮温需要考虑扫描角的影响。此外通过比较 SRF 权重与均匀权重亮温偏差的均值可以发现, 相对 Ch2、Ch4 和 Ch6, 其他所有通道的 SRF 变化对亮温都有较为明显的影响, 其中影响最大的是 Ch8, 最大值约为 0.3 K。一些研究中提到了微波辐射计亮温偏差的扫描角依赖性并把它们归因于天线扫描的射频匹配, 但是从本文的模拟中可以发现 SRF 同样会引起一些通道亮温偏差的扫描角依赖性, 而且不同通道亮温偏差的扫描角依赖性是不同的。

从 3 种模拟亮温与观测亮温偏差的均值可以看出, 模拟亮温和观测亮温之间存在一定的偏差, 这是微波辐射计定标和检验需要解决的问题, 这里不再赘述。从量化的结果来看, 不同权重函数计算的模拟亮温与观测亮温之间的偏差是不同的, Ch3、Ch4、Ch5 和 Ch8 的平均亮温偏差可以达到 0.2—0.5 K, Ch8 的最大亮温偏差为 0.8 K, 这与基于 MWHTS 响应特性的仿真结果是一致的。

从标准差的结果可以看出, 所有通道 3 种模拟亮温之间的标准差都小于 0.2 K, 一些通道甚至远小于 0.1 K, 所有通道 3 种模拟亮温与 L1 亮温之间的标准差是基本保持一致的, 说明 SRF 会产生一定的亮温偏差, 这个偏差与角度有关系, 但是对系统灵敏度的影响很小。

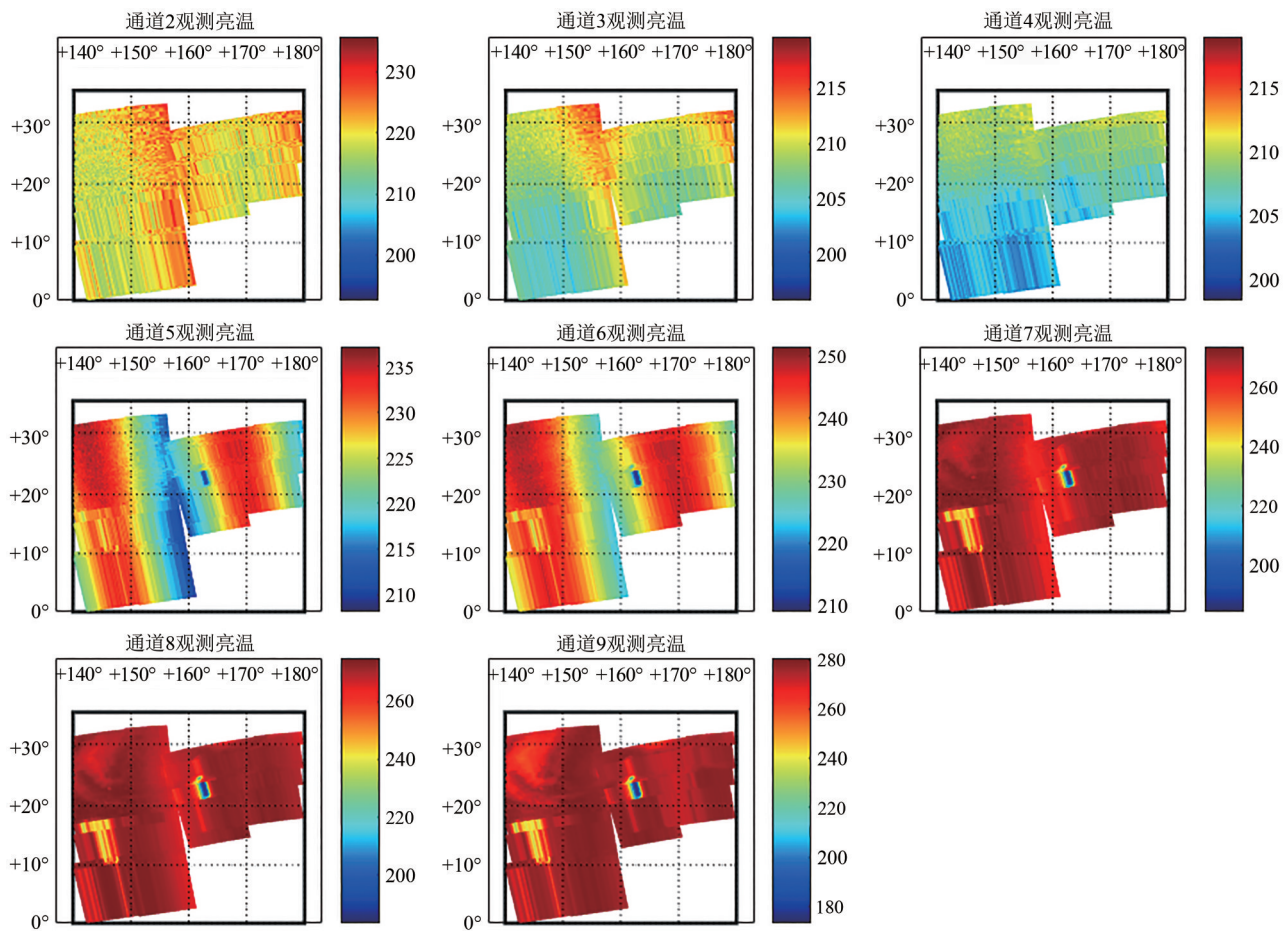
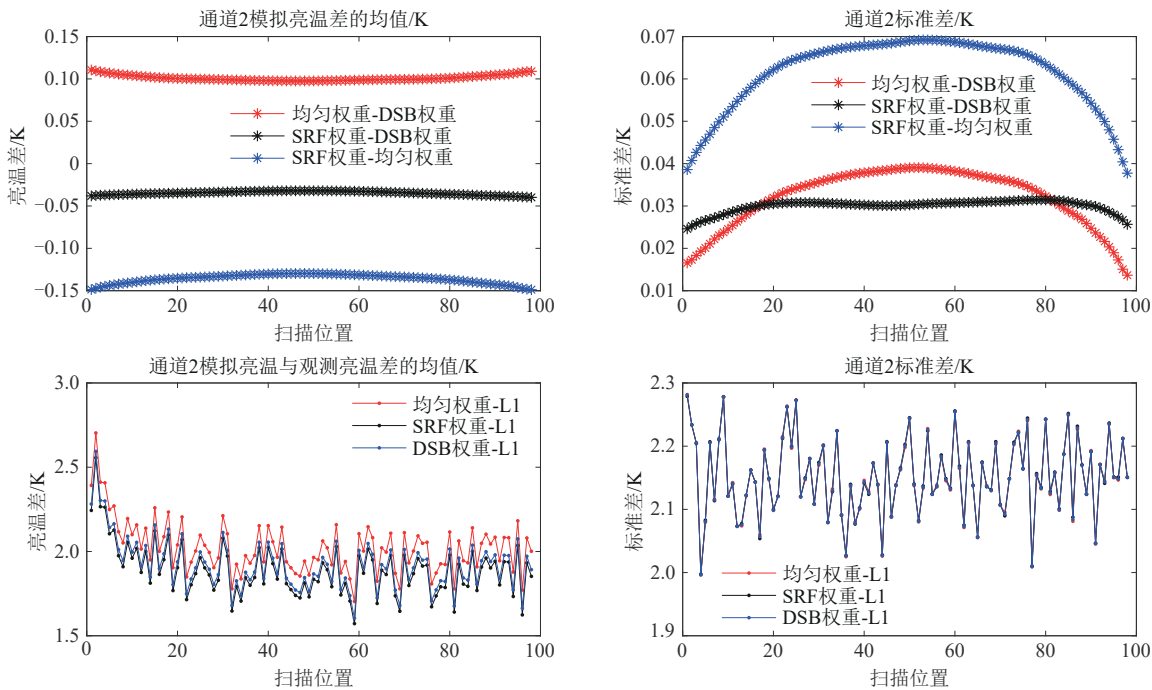
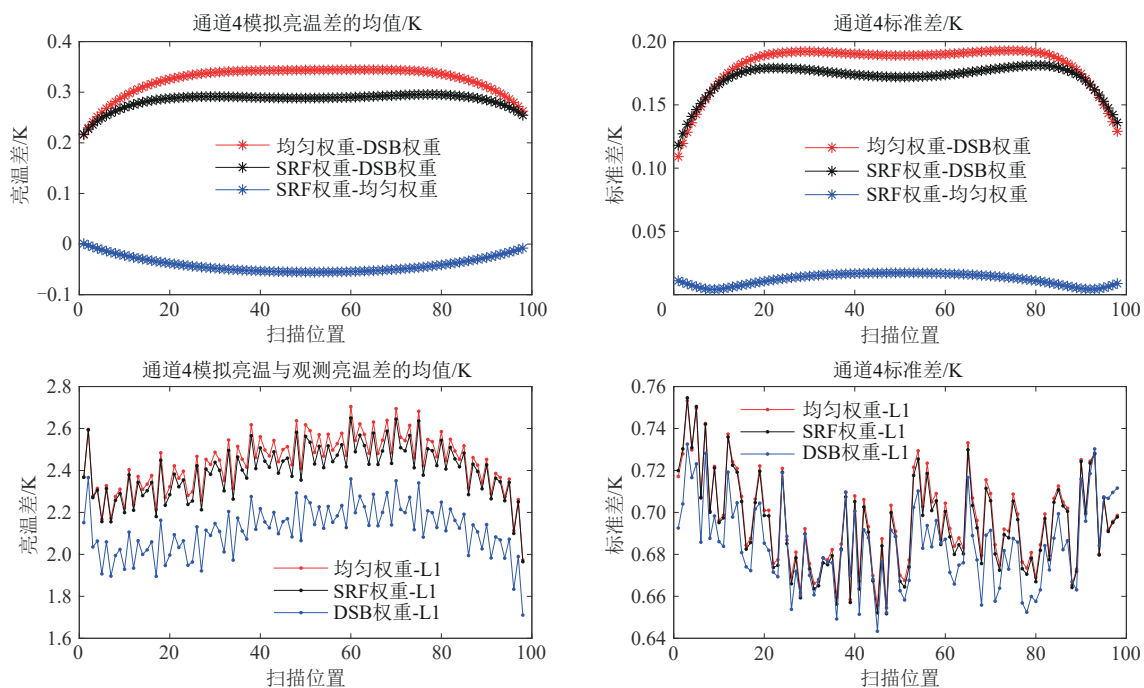


图9 MWHTS实际的观测亮温结果

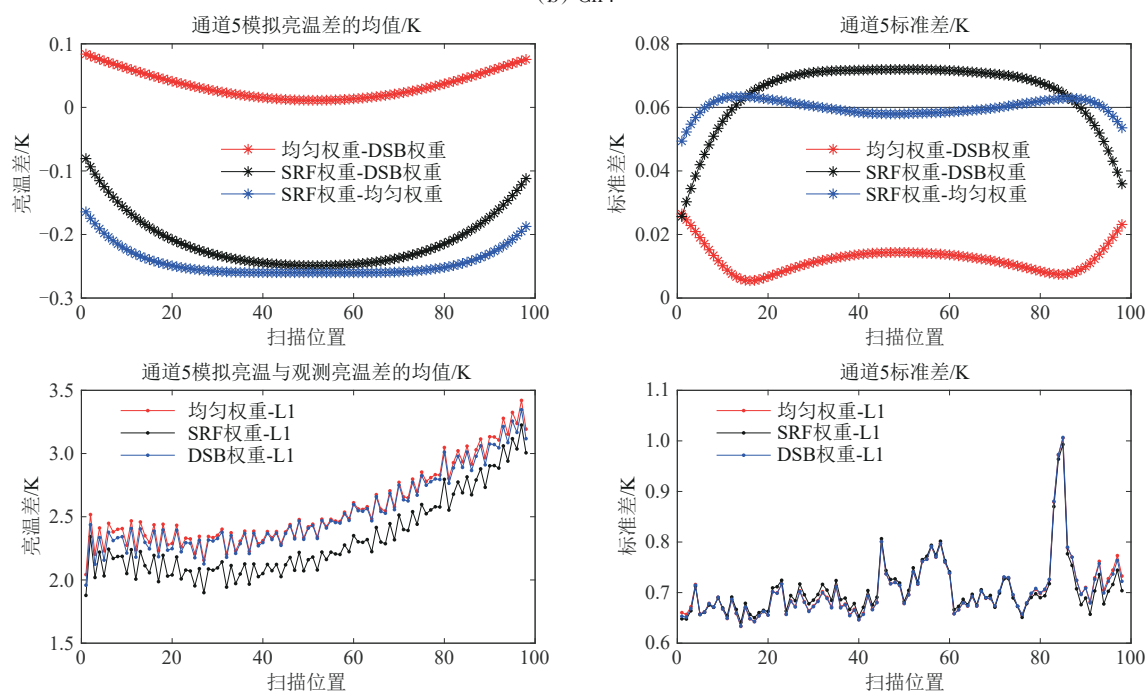
Fig. 9 The results of actual observational brightness temperature of MWHTS



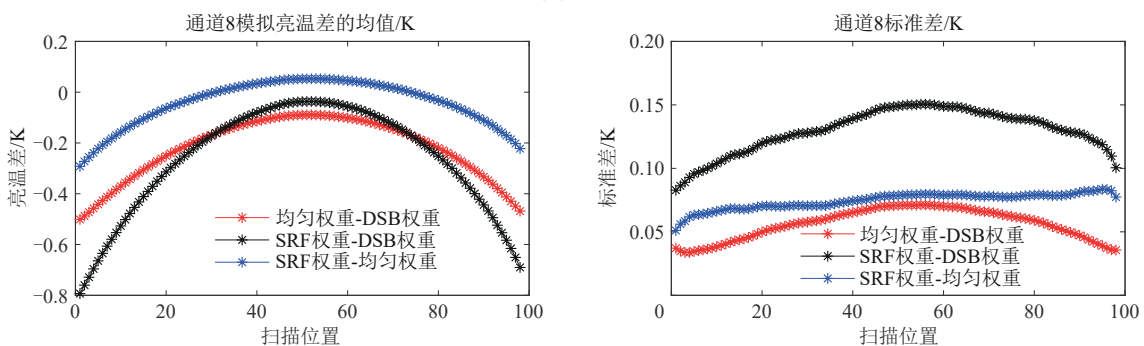
(a) 通道2
(a) Ch2



(b) 通道4
(b) Ch4



(c) 通道5
(c) Ch5



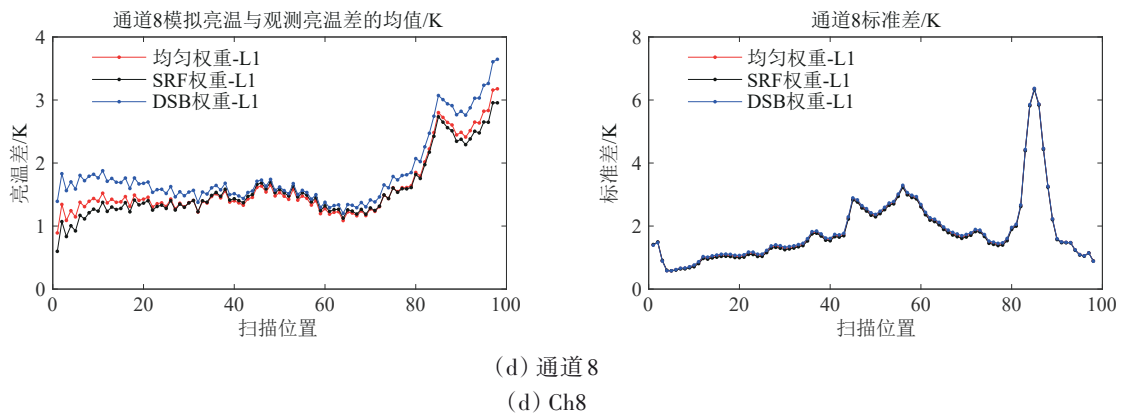


图 10 MWHTS 的模拟亮温与观测亮温结果对比

Fig. 10 Comparison of simulated brightness temperature and observational brightness temperature of MWHTS

5 结论

近年来随着遥感定量化的要求不断提高, SRF 问题的重要性才逐渐被认识到, 对于 SRF 的测量需求也日益迫切。本文针对 FY-3D 星 MWHTS 中 118 GHz 通道 SRF 引起的亮温偏差及反演误差进行了初步的仿真分析。结果表明, SRF 的带内波动与亮温偏差之间存在线性正相关的关系, 当 SRF 的带内波动小于 3 dB 时, 其造成的亮温偏差小于 0.1 K; 而当 SRF 的带内波动大于 3 dB 时, 亮温偏差可以达到 0.2—0.5 K (段永强, 2020)。

通过对亮温偏差进行的大气温度廓线反演, 结果表明, SRF 造成的亮温偏差会对反演结果造成一定的影响, 特别是在高度为 1.8 km 时大气温度反演误差最大, 可以达到 0.8—0.9 K, 这对于天气预报的数据应用具有重要的影响。对于不同的亮温偏差, 当亮温偏差越大时, 反演误差的最大值也就越大。

通过卫星实测数据分析不同 SRF 下的模拟亮温与观测亮温之间的差异, 结果表明, 不同权重函数计算的模拟亮温与观测亮温之间的偏差是不同的, Ch3、Ch4、Ch5 和 Ch8 的平均亮温偏差可以达到 0.2—0.5 K, 而 Ch8 的亮温偏差最大, 达到了 0.8 K, 这与基于 MWHTS 响应特性的仿真结果是一致的, 也验证了 MWHTS 系统仿真模型的正确性和准确度。

基于本文的分析, 在卫星数据的应用中, 需要特别注意具有较大 SRF 带内波动的通道所产生的亮温偏差, 这对于未来卫星数据的应用将产生重要的科学价值。

志 谢 感谢国家卫星气象中心提供的 FY-3D 星数据; 感谢中国科学院微波遥感技术重点实验室提供的 FY-3D 星 MWHTS 的实测基带 SRF 数据; 感谢 ECMWF 提供的 ERA5 再分析数据。

参考文献 (References)

- Bormann N, Fouilloux A and Bell W. 2013. Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23): 12970-12980 [DOI: 10.1002/2013JD020325]
- Duan Y Q. 2020. Research on Simulation of Signal Transmission Model and Indicators of Microwave Radiometer System. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences): 72-81 (段永强, 2020. 微波辐射计系统的信号传递模型及性能指标的仿真研究. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心): 72-81)
- Duan Y Q, Wang Z Z and Zhang S W. 2020. Modeling and simulating of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3(D) satellite. *Journal of Electronics and Information Technology*, 42(6): 1549-1556 (段永强, 王振占, 张升伟, 2020. 风云三号(D) 气象卫星微波湿温度计系统建模和仿真. *电子与信息学报*, 42(6): 1549-1556 [DOI: 10.11999/JEIT190507])
- He J Y, Zhang S W and Wang Z Z. 2015. Advanced Microwave Atmospheric Sounder (AMAS) channel specifications and T/V calibration results on FY-3C satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(1): 481-493 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2324173]
- He Q R. 2017. Study on retrieving the atmospheric temperature and humidity profiles from measurements of microwave humidity and temperature sounder on FY-3C Satellite. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences): 33-40 (贺秋瑞, 2017. FY-3C 卫星微波湿温探测仪反演大气湿温廓线研究. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心): 33-40)
- He Q R, Wang Z Z and He J Y. 2016. Bias correction for retrieval of atmospheric parameters from the microwave humidity and temperature sounder onboard the Fengyun-3C satellite. *Atmosphere*, 7(12): 156 [DOI: 10.3390/atmos7120156]
- He Q R, Wang Z Z and HE J Y. 2017. Retrieval of clear sky tempera-

- ture and humidity profiles over land using measurements of FY-3C/MWHTS. *Journal of Remote Sensing*, 21(1): 27-39 (贺秋瑞, 王振占, 何杰颖. 2017. FY-3C/MWHTS资料反演陆地晴空大气湿温廓线. *遥感学报*, 21(1): 27-39) [DOI: 10.11834/jrs.20176006]
- Jarnot R F, Cofield R E, Waters J W, Flower D A and Peckham G E. 1996. Calibration of the microwave limb sounder on the upper atmosphere research satellite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D6): 9957-9982 [DOI: 10.1029/95JD03792]
- Kaisti M, Altti M and Poutanen T. 2016. Radiometric resolution analysis and a simulation model. *Remote Sensing*, 8(2): 85 [DOI: 10.3390/rs8020085]
- Kim E, Lyu C H J, Anderson K, Leslie R V and Blackwell W J. 2014. S-NPP ATMS instrument prelaunch and on-orbit performance evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9): 5653-5670 [DOI: 10.1002/2013JD020483]
- Liang X M, Ignatov A and Kihai Y. 2009. Implementation of the community radiative transfer model in advanced clear-sky processor for oceans and validation against nighttime AVHRR radiances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D6): D06112 [DOI: 10.1029/2008JD010960]
- Mo T. 1996. Prelaunch calibration of the advanced microwave sounding unit-A for NOAA-K. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44(8): 1460-1469 [DOI: 10.1109/22.536029]
- Moradi I, Goldberg M, Brath M, Ferraro R, Buehler S A, Saunders R and Sun N H. 2020. Performance of radiative transfer models in the microwave region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(6): e2019JD031831 [DOI: 10.1029/2019JD031831]
- Saunders R W, Hewison T J, Stringer S J and Atkinson N C. 1995. The radiometric characterization of AMSU-B. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 43(4): 760-771 [DOI: 10.1109/22.375222]
- Wang Z Z, Li J Y, He J Y, Zhang S W, Gu S Y, Li Y, Guo Y and He B Y. 2019. Performance analysis of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3D satellite from prelaunch multi-angle calibration data in thermal/vacuum test. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(3): 1664-1683 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2868324]
- Weng F Z, Zou X L, Sun N H, Yang H, Tian M, Blackwell W J, Wang X, Lin L and Anderson K. 2013. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19): 11187-11200 [DOI: 10.1002/jgrd.50840]
- Zhang S W, Li J, Jiang J S, Sun M H and Wang Z Z. 2008. Design and development of Microwave Humidity Sounder for FY-3 meteorological satellite. *Journal of Remote Sensing*, 12(2): 199-207 (张升伟, 李靖, 姜景山, 孙茂华, 王振占. 2008. 风云3号卫星微波湿度计的系统设计与研制. *遥感学报*, 12(2): 199-207) [DOI: 10.11834/jrs.20080226]
- Zhang S W, Wang Z Z, Sun M H, He B Y and Jiang J S. 2013. The design and development of advanced microwave atmospheric sounder onboard FY-3 satellite. *Engineering Sciences*, 15(7): 81-87 (张升伟, 王振占, 孙茂华, 何宝宇, 姜景山. 2013. 风云三号卫星先进微波大气探测仪系统设计与研制. *中国工程科学*, 15(7): 81-87) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.07.012]

Effect analysis of spectral response function of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3D satellite

WANG Zhenzhan¹, XU Haowen^{1,2}, DUAN Yongqiang^{1,2}, WANG Wenyu^{1,2}, DING Jia^{1,2}, HE Wenming^{1,2}, ZHANG Shengwei¹

1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The shapes of the channel Spectral Response Function (SRF) of Microwave Humidity and Temperature Sounders (MWHTS) are generally considered to be approximately rectangular. However, the SRF of each band channel of MWHTS shows certain in-band fluctuations based on the actual SRF test data. In this paper, the brightness temperature spectra of different scenarios for each channel at 118 GHz of MWHTS are simulated using an Atmospheric Radiative Transfer Simulator (ARTS). After inputting them into the MWHTS system simulation model we established in the previous stage, the output brightness temperature of the instrument is obtained after calibration, the influences of actual SRF on brightness temperature measurements and the retrievals of atmospheric temperature profiles are evaluated, and comparisons are further made with the actual satellite data of MWHTS in FY-3D to verify the results. The results show that the brightness temperature bias is linearly and positively correlated with the in-band fluctuations of SRF. The bias can reach 0.2—0.5 K in the 118 GHz channel when the actual SRF in-band fluctuations are larger than 3 dB. The in-band fluctuations of SRF will cause retrieval errors in the atmospheric temperature profiles, especially at an altitude of 1.8 km, where the retrieval error can reach the maximum value of 0.8—0.9 K. The simulation results are consistent with the results of the actual satellite data, so special attention needs to be paid to the bias in the simulated brightness temperature of the channels with large SRF fluctuations in applying simulations for Numerical Weather Prediction (NWP) using data assimilation methods, which has important research value for the future application of satellite data.

Key words: remote sensing, FY-3D meteorological satellite, microwave humidity and temperature sounder, spectral response function, brightness temperature bias, retrieval of temperature profiles

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41771405)