

# 风云三号B星红外分光计的定标和验证

漆成莉<sup>1</sup> 陈勇<sup>2</sup> 刘辉<sup>1</sup> 吴春强<sup>1</sup> 殷德奎<sup>3</sup>

(1 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 马里兰大学帕克分校地球系统科学综合研究中心, 美国;  
3 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 搭载于风云三号A星和B星上的红外分光计 (IRAS) 分别于2008年5月27日和2010年11月5日成功发射。该仪器主要提供从可见光到红外波长范围内多通道的辐射观测, 并可应用于资料同化、全球大气温度和水汽廓线反演等领域。搭载于风云三号A星上的IRAS由于滤光轮转速不稳定, 导致仪器观测不连续。风云三号B星上的IRAS运行正常, 处于稳定的业务模式。利用仪器在轨3个月期间的资料, 进行了一系列的在轨定标和验证试验, 对IRAS仪器的性能进行了一系列的验证, 包括冷空和暖黑体定标计数值的长期趋势、噪音等效辐射率等。利用IRAS和红外大气探测干涉仪 (IASI) 同时观察到的地球场景进行比较, 证明了两种观测非常相似。另外, 将FY3B/IRAS红外通道的观测与NOAA-19/HIRS对应的通道的辐射传输模式模拟进行了对比。对比结果显示相对于HIRS, 部分IRAS红外通道, 尤其是通道1到10, 15, 19和20偏差很小。但是少数通道, 如通道13, 16和18有较大的偏差。造成这些偏差的原因仍需要进一步的研究。

**关键词:** 定标验证, 风云3号, 红外分光计 (IRAS), 在轨定标

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.007

## Calibration and Validation of the InfraRed Atmospheric Sounder Onboard the FY3B Satellite

Qi Chengli<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>2</sup>, Liu Hui<sup>1</sup>, Wu Chunqiang<sup>1</sup>, Yin Dekui<sup>3</sup>

(1 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Earth System Science Interdisciplinary Center at University of Maryland, College Park, Maryland, USA

3 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

**Abstract:** InfraRed Atmospheric Sounder (IRAS) instruments were successfully launched onboard the FengYun-3A (FY3A) and FengYun-3B (FY3B) satellites on May 27, 2008, and November 5, 2010, respectively. They aim at providing multichannel radiances within the spectral range of visible to infrared (IR) wavelengths for many environmental applications, including data assimilation and retrievals of global atmospheric temperature and humidity profiles. However, the velocity of the filter wheel of the first IRAS onboard FY3A is unstable and, therefore, induced a discontinuity in the measurement. The IRAS onboard FY3B works well in normal and stable operational mode since its launch without any anomaly. A variety of postlaunch calibration/validation tasks are conducted using on-orbit data during a period of three months. This paper presents on-orbit verification of IRAS instrument performance, including long-term trends of the space and warm calibration counts and noise equivalent delta radiance. The Earth scenes observed simultaneously by IRAS and Meteorological Operational Satellite Programme (METOP)/Infrared Atmospheric Sounding Interferometer were obtained and compared to demonstrate a close similarity between the two measurements. Furthermore, the IR channel observations from FY3B/IRAS are compared with those from National Oceanic and Atmospheric Administration-19/ High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS) equivalent channels and simulations from a radiative transfer model. The results show that some of IRAS IR channels perform very well, particularly for channels 1-10, 15, 19, and 20, compared to those of HIRS. Several channels, such as 13, 16, and 18, however, display some large biases. The causes of these increased biases are still under investigation.

**Keywords:** Calibration validation, FengYun 3, InfraRed Atmospheric Sounder (IRAS), on-orbit calibration

### 1 引言

风云三号系列气象卫星是中国第二代的极轨气象

卫星。该系列卫星上搭载了11种仪器, 其中10种是第一次进入太空。红外分光计 (IRAS) 是其中观测地球天气和环境的主要仪器, 它提供了从可见光到红外波长范围多通道辐射观测, 可以用于辐射同化, 全球大气温度廓线、湿度廓线、臭氧含量和云参数的反演等。

IRAS的通道和仪器构造与搭载于NOAA和METOP系列卫星上的高分辨率红外辐射探测器

收稿日期: 2013年5月24日; 修回日期: 2013年6月20日  
第一作者: 漆成莉 (1979—), Email: qicl@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (2010CB951600); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201206002)

(HIRS)相似。IRAS具有26个通道,包括20个红外通道(3.7~15 $\mu\text{m}$ ),6个可见光和近红外通道(0.69~1.64 $\mu\text{m}$ )。HIRS具有20个通道(19个红外通道和1个可见光通道)。图1给出了IRAS 20个通道的光谱响应函数(SRF)。IRAS内置有一个黑体,用四个铂电阻温度计(PRT)进行温度测量。每个数据包有一次温度测量数据,在IRAS原始资料中每一条扫描线包括4个数据包。IRAS为步进式扫描的仪器,设计用于观测26个通道的辐射来计算从地球表面到40km的垂直温度和水汽廓线。表1列出了IRAS仪器的特征。多通道的观测是通过单个望远镜和26个独立滤光片得到的。椭圆扫描镜垂直于卫星飞行方向进行扫描,扫描步进角为1.8°,每条扫描线包含56个像元。相邻观测之间扫描镜移动很快(<35ms),观测时扫描镜驻留每个扫描位置上等待26个滤光片取样完成。每个观测大约需要100ms。每个通道的瞬时视场(FOV)在可见光波段和红外波段分别为1.4°和1.3°,在卫星高度836km处对应的星下点地面分辨率分别为20.3km和18.9km。

表2给出了IRAS通道特征,同时也列出了NOAA-19/HIRS对应通道的特征。通道1~7和14~18位于CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O吸收带,用于探测从地面到40km高度的温度廓线。通道11~14位于水汽吸收带,用于水汽廓线的反演。通道8~9和19~20,其权重函数的峰值位于近地面,主要用于温度廓线反演时地表发射率和云影响的订正。通道21~26主要用于提供云和水汽的信息。

表1 FY-3B/IRAS仪器特征

仪器性能	值
光学视场	1.4°(可见光至中波红外通道) 1.3°(长波红外通道)
通道间配准精度	5%
对地扫描张角	49.5°
对地观测	56
步进和测量时间	100ms
行扫描和回扫时间	6.4s
刈幅宽度	1127km
地面分辨率	20.3km(可见光至中波红外通道) 18.9km(长波红外通道)
辐射定标	290K 黑体和冷空
定标精度	1K(红外通道) 7% Albedo(通道21~24) 8% Albedo(通道25~26)
红外探测器制冷温度	100K
信号量化等级	13bit

IRAS红外通道的定标是通过观测位于仪器上的暖黑体和冷空两个目标来实现的,每40条扫描线(256s),通过对上述两个目标的观测对每个通道进行一次辐射定标。每个通道的性能特征包括噪音等效辐射率(NEAN)和可能用于大气温度反演及相关误差计算的定标数据。

## 2 发射后仪器性能测试及监测

在轨测试是一个重要的系统测试卫星和仪器性能的方法。在成功发射风云三号B星以后,IRAS可见光通道(通道21~26)最先启用,发射30d以后红外通道打开,整个仪器进入正常和稳定的状态。本文通过对风云三号B星进行的发射后的在轨测试,将测试结果与预先估计值或IRAS指标进行了对比。

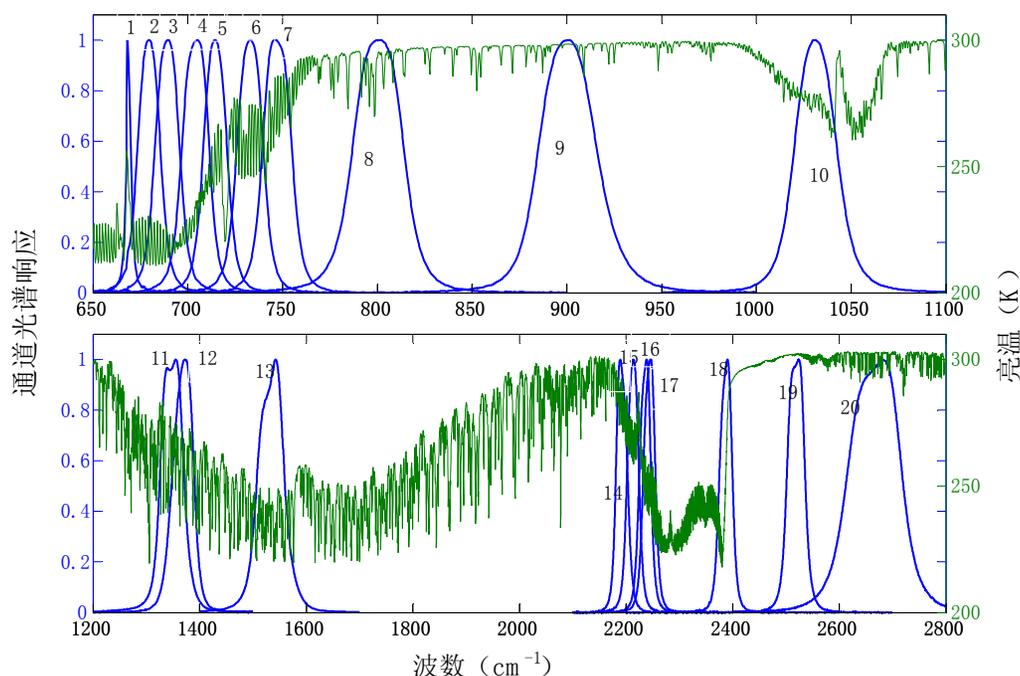


图1 FY-3B/IRAS 20个红外通道的光谱响应函数

表2 FY-3B/IRAS通道特征

通道 (HIRS通道)	中心波数 ( $\text{cm}^{-1}$ )	中心波长 ( $\mu\text{m}$ )	半功率带宽 ( $\text{cm}^{-1}$ )	吸收气体	NE $\Delta$ N ( $\text{mW}/\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	峰值能量高度 (hPa)
1 (1)	669	14.95	3	CO <sub>2</sub>	4.00	30
2 (2)	680	14.71	10	CO <sub>2</sub>	0.80	60
3 (3)	690	14.49	12	CO <sub>2</sub>	0.60	100
4 (4)	703	14.22	16	CO <sub>2</sub>	0.35	400
5 (5)	716	13.97	16	CO <sub>2</sub>	0.32	600
6 (6)	733	13.84	16	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	0.36	800
7 (7)	749	13.35	16	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	0.30	900
8 (10)	802	12.47	30	Window	0.20	Surface
9 (8)	900	11.11	35	Window	0.15	Surface
10 (9)	1030	9.71	25	O <sub>3</sub>	0.20	25
11	1345	7.43	50	H <sub>2</sub> O	0.23	800
12 (11)	1365	7.33	40	H <sub>2</sub> O	0.30	700
13 (12)	1533	6.52	55	H <sub>2</sub> O	0.30	500
14 (13)	2188	4.57	23	N <sub>2</sub> O	0.009	1000
15 (14)	2210	4.52	23	N <sub>2</sub> O	0.007	950
16 (15)	2235	4.47	23	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O	0.007	700
17 (16)	2245	4.45	23	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O	0.007	400
18 (17)	2388	4.19	25	CO <sub>2</sub>	0.007	700
19 (18)	2515	3.98	35	Window	0.007	Surface
20 (19)	2660	3.76	100	Window	0.003	Surface
21	14500	0.69	1000	Window	0.10%A	Cloud
22	11299	0.885	385	Window	0.10%A	Surface
23	10638	0.94	550	H <sub>2</sub> O	0.10%A	Surface
24	10638	0.94	200	H <sub>2</sub> O	0.10%A	Surface
25	8065	1.24	650	H <sub>2</sub> O	0.10%A	Surface
26	6098	1.64	450	H <sub>2</sub> O	0.10%A	Surface

仪器性能参数中最重要的一个参数是NE $\Delta$ N。发射前仪器的NE $\Delta$ N由地面真空定标试验数据确定。在真空定标试验中，观测目标是一个标准黑体，可以精确控制其物理温度，最终的NE $\Delta$ N值由标准黑体在290K时的观测信号值确定。在轨NE $\Delta$ N被定义成视场辐射率方差，通过黑体（290K）标准偏差（STDV）噪声计数值乘上在轨定标斜率得到。噪声计数值是45个黑体观测的标准差，最终的NE $\Delta$ N由在轨黑体扫描线上所有NE $\Delta$ N的平均值确定。图2给出了发射前和在轨测试得到的NE $\Delta$ N，可以看出对于大多数的通道（除了通道7和16外），发射后的NE $\Delta$ N值比发射前小并且达到设计指标。但是，通道7的噪声比指标略高，通道16的噪声要远高于发射前测试值和指标。图3给出了通道16从原始资料转换得到的亮温。图3a显

示发射后无论是地球观测还是定标观测都存在斑点噪声。利用3×3像素平均滤波的方法，对亮温比3×3像素窗区平均亮温高于5K的观测进行滤波，滤波的结果于图3b给出。滤波后，通道16的NE $\Delta$ N减半并达标。

自从风云三号A星发射成功后，对IRAS仪器状态和性能的监测系统平台就已建立。监测参数包括定标系数，黑体与空间视场计数值，以及仪器噪声（NE $\Delta$ N）。系统同时监测仪器状态参数，包括组件温度以及电压信息。FY3B/IRAS暖黑体计数值，冷空计数值，通道斜率以及NE $\Delta$ N随时间的变化由图4~7分别给出。从图中可以明显地看出，在早期的几个月中，冷暖定标计数值表现出快速变化的状态，然后变化的趋势逐渐变得平缓。前10个通道冷空计数值比黑体计数值衰减更多，因此定标系数的斜率表现出轻微

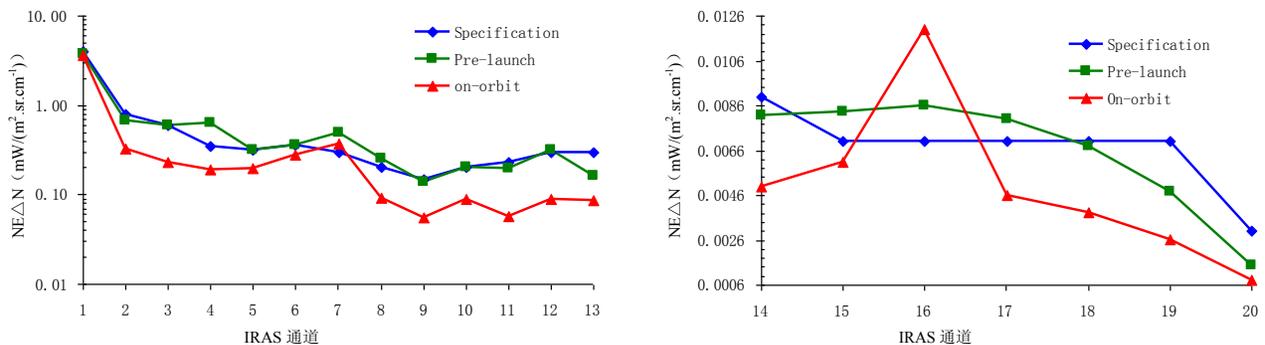


图2 FY-3B/IRAS发射前以及在轨资料得出的NE $\Delta$ N值

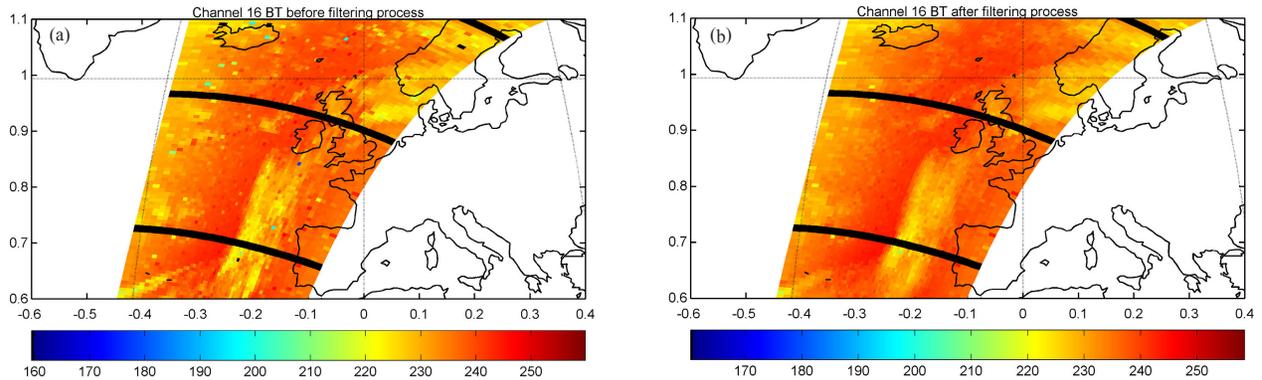


图3 滤波前 (a) 后 (b) 通道16的辐射亮温 (BT)

增大的趋势。对于冷空计数值，通道8和10信号衰减最大，通道8和10的冷空信号衰减量分别为400和300计数值，这与风云三号A星相似，而黑体信号的衰减为20，因此这两个通道表现出较陡的衰减斜率。除了8月末通道4，7和17噪声水平有大幅抖动以外，其他

时间噪声相对稳定。

### 3 风云三号星红外分光计的定标算法

在正常业务工作状态下，红外分光计有两种工作模式：定标模式和扫描模式，它们在一个包含40条扫描线的观测循环中交替工作。在定标模式中，扫描镜

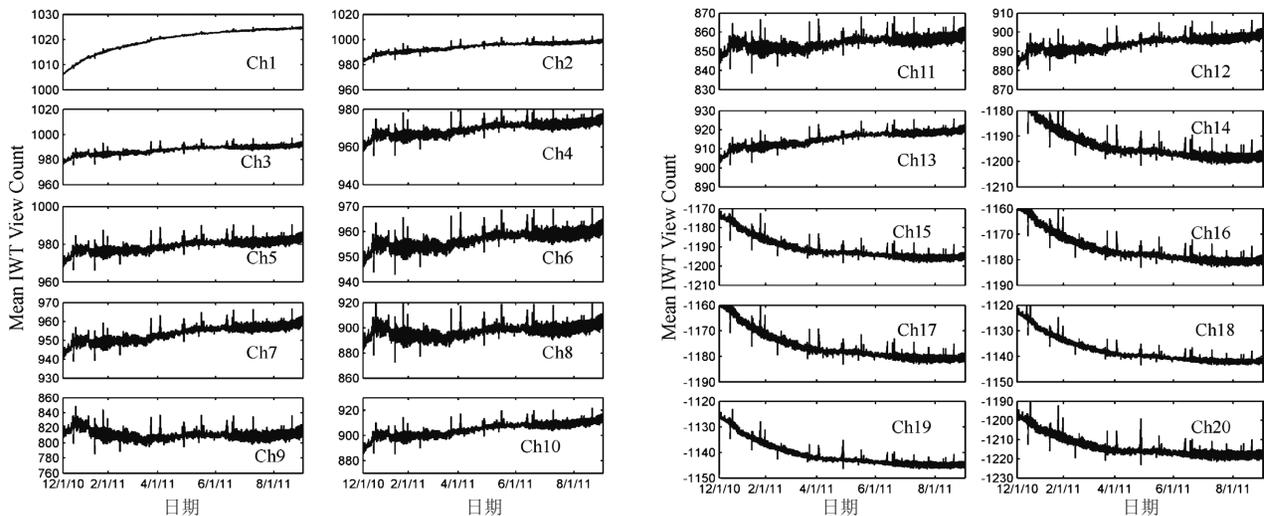


图4 暖黑体定标计数从FY-3B/IRAS发射日期起随时间变化的长期趋势

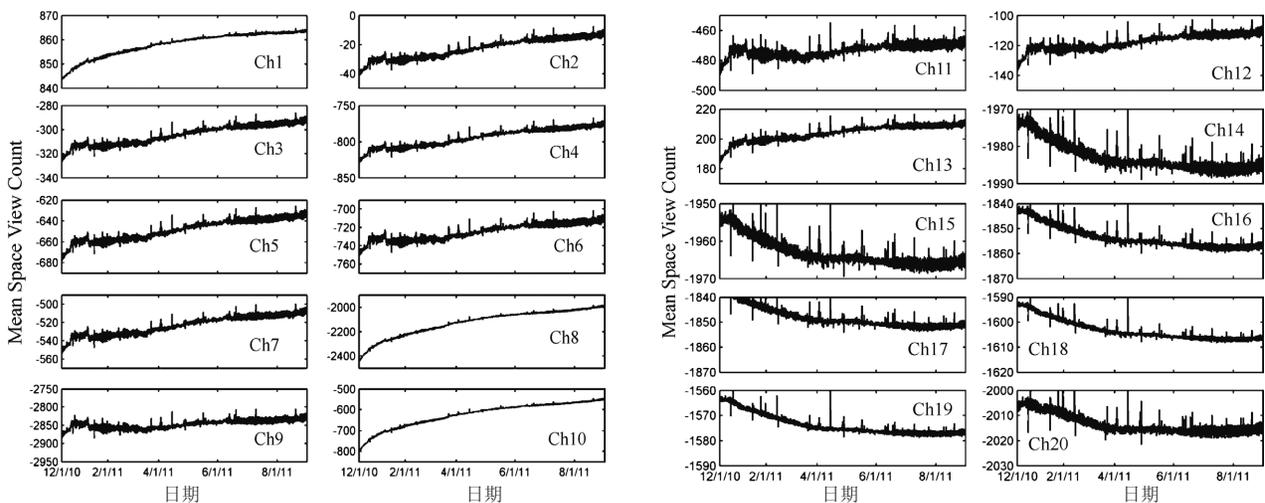


图5 冷空间计数从FY-3B/IRAS发射日期起随时间变化的长期趋势

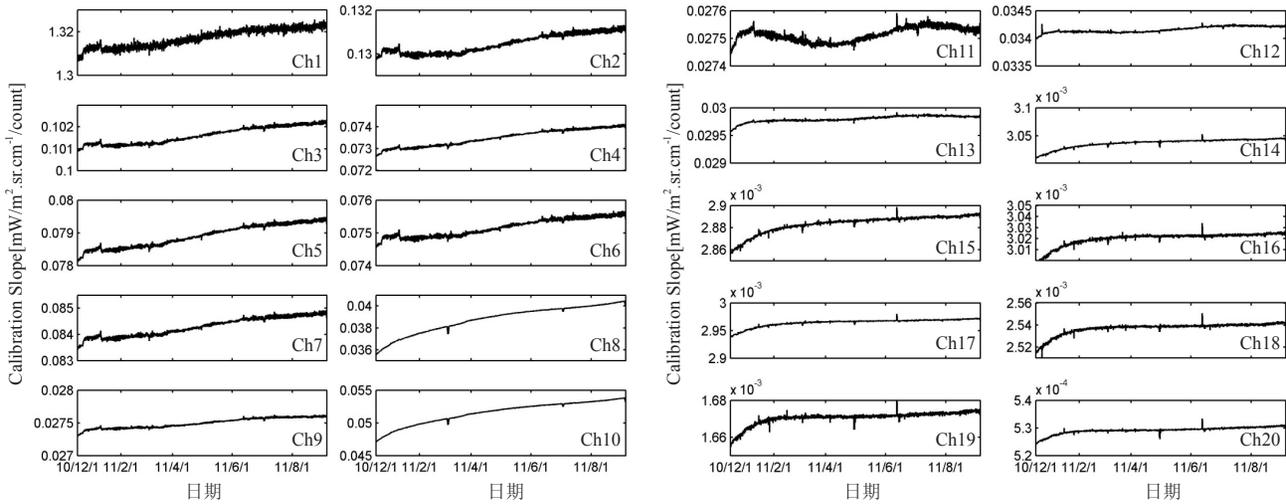


图6 通道定标系数 (斜率) 从FY-3B/IRAS发射日期起随时间变化的长期趋势

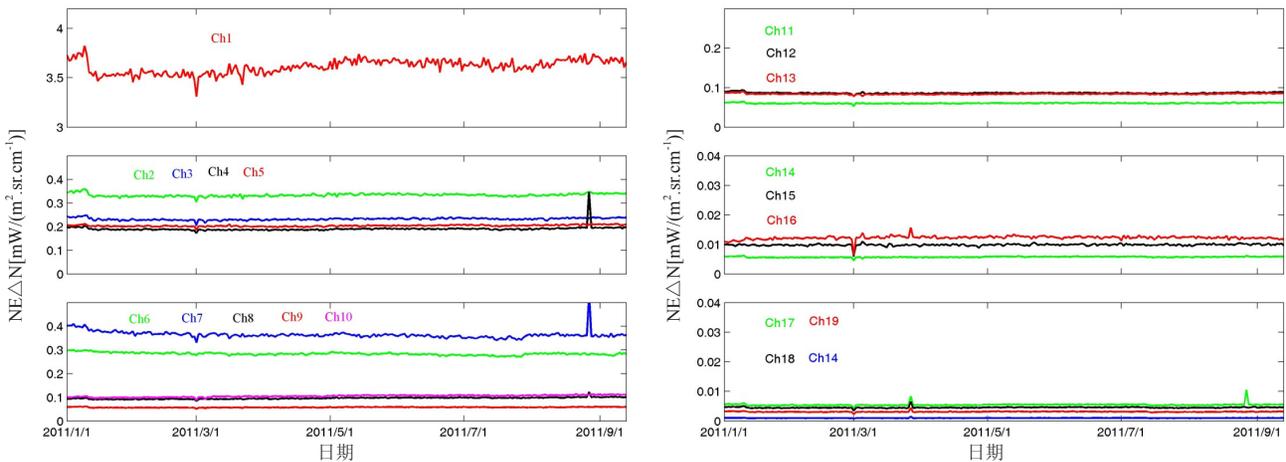


图7 NEΔN从FY-3B/IRAS发射日期起随时间变化的长期趋势

对外太空和仪器上搭载的黑体两个定标目标观测, 包含两条扫描线; 在扫描模式中, 扫描镜指向地球共包含38条扫描线。对于扫描模式, 所有56个观测都是有效的; 对于定标模式, 前45个观测是有效的, 剩余11个观测是电校正信息。

仪器观测输出的描述辐射大小的变量是用数字计数值表示, 但是卫星数据应用中常用的变量为辐射率。辐射定标是一个推导仪器计数值和通道辐射率之间关系的过程。一个仪器在其生命周期内包含两个独立的定标过程: 发射前定标和在轨定标。发射前定标通过卫星发射前地面的真空定标试验完成。从数字计数值到辐射率的转换由以下的二次方程完成:

$$r = a_0 + a_1 C_v + a_2 C_v^2 \quad (1)$$

其中,  $C_v$ 是观测得到的计数值,  $r$ 为与之相对应的辐射率,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ 是定标系数;  $a_1$ 直接反映了计数值和输入辐射率信号之间的斜率, 可作为反映仪器响应率的一个重要参数。

在真空红外定标试验中, 仪器对准一个外部的标准黑体源, 其温度被精确控制: 200~280K每隔10K和285~340K每隔5K (共21组温度点)。通过计算21组黑体的辐射率与计数值之间的方程, 可以确定仪器观测到辐射率的定标系数。

当卫星发射后, 仪器处于与地面真空试验所不同的环境中 (近似真空环境)。因此, 在发射前得到的定标系数不再适用, 需要通过在轨试验资料建立新的定标关系。卫星在轨时, 只有冷空视场和内置黑体视场可用于定标的的数据, 因此只能得到系数 $a_0$ 和 $a_1$ , 而 $a_2$ 则保持地面定标的数值 (见表3)。定标细节和HIRS相似 (参见NOAA KLM用户手册: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c7/sec7-2.htm>)。在轨系数 $a_0$ 和 $a_1$ 可通过将式 (1) 应用于冷空和黑体两个目标观测得到:

$$0 = a_0 + a_1 C_s + a_2 C_s^2 \quad (2)$$

$$r_b = a_0 + a_1 C_b + a_2 C_b^2 \quad (3)$$

表3 FY-3B/IRAS二次定标系数

通道	$a_2$ (mW/(m <sup>2</sup> ·sr·cm <sup>-1</sup> ·count <sup>2</sup> ))	通道	$a_2$ (mW/(m <sup>2</sup> ·sr·cm <sup>-1</sup> ·count <sup>2</sup> ))
1	-2.63E-04	11	2.79E-08
2	-5.27E-07	12	5.42E-08
3	-1.00E-07	13	3.19E-07
4	7.88E-08	14	-3.72E-09
5	9.10E-08	15	-2.68E-09
6	-2.43E-07	16	-4.30E-09
7	-9.68E-08	17	-3.20E-09
8	3.59E-08	18	-2.64E-09
9	1.39E-08	19	-2.13E-09
10	4.10E-08	20	6.23E-11

其中,  $C_5$ 和 $C_6$ 分别为定标模式观测的45个冷空和黑体计数的平均值。冷空的辐射率认为是0,  $r_b$ 是黑体目标的辐射率。冷空和黑体的计数在45个观测上取平均值, 且不符合标准的数据通过 $3\sigma$  (STDV) 标准去掉。内置铂金热敏电阻温度计 (PRT) 的计数值通过二次关系转化成黑体温度。对于每个红外通道, 黑体辐射 $r$ 可通过普朗克关系得出:

$$r = \frac{c_1 v^3}{[\exp(\frac{c_2 v}{T^*}) - 1]} \quad (4)$$

其中,  $c_1$ ,  $c_2$ 为普朗克常数,  $v$ 为中心波数, 在卫星发射前基于通道谱响应函数 (SRF)  $\phi(v)$ 计算得到:

$$v = \frac{\int \phi(v) v dv}{\int \phi(v) dv} \quad (5)$$

$T^*$ 为中心波数 $v$ 处的通道有效亮温 (BT), 定义为:

$$T^* = b + cT \quad (6)$$

其中,  $b$ 和 $c$ 为依赖通道的带宽订正系数, 基于卫星发射前一组模拟温度和有效亮温计算得到<sup>[1]</sup>,  $T$ 是内置黑体PRT温度。

于是,  $a_1$ 和 $a_0$ 可以写成:

$$a_1 = \frac{r_b - a_2(C_b^2 - C_s^2)}{C_b - C_s} \quad (7)$$

$$a_0 = -a_2 C_s^2 - a_1 C_s \quad (8)$$

IRAS仪器的探测设备能接收到所有投射到探测器上面的辐射。仪器温度被精细控制从而最小化其他部分导致的误差扰动, 因此, 大多数光学部件在整个定标过程中 (40条扫描线, 256s) 温度变化缓慢。通过上述的步骤, 可得到定标观测扫描线上的定标系数 (内部黑体和冷空的扫描线), 再插值到两个定标周期之间38个地球视场扫描线上。将得到的系数应用于地球视场, 即可得出对应的辐射率和亮温从而完成定标过程。

## 4 IRAS观测的验证

### 4.1 不同卫星之间观测的验证

本文通过两种方法对IRAS观测进行了验证。一是利用近地轨道卫星上的高光谱仪器, 如大气红外探测仪 (AIRS) 和红外大气探测干涉仪 (IASI)。将AIRS和IASI作为标准是因为它们便于在空间上匹配, 同时通过光谱匹配可以和任意一个宽谱段的红外扫描仪进行对比。验证表明AIRS和IASI仪器非常准确<sup>[2,3]</sup>, 而且相互一致<sup>[4-8]</sup>。

IASI被选为IRAS验证的参照标准。搭载于风云三号B星上的IRAS与搭载于METOP上的IASI两颗卫星之间的辐射偏差通过两个卫星轨道相交时观测到的辐射率确定 (交叉定标, SNO)。SNO一般发生在极地地区, 时间间隔为数天。因为SNO观测是在近乎相同时间相同地点, 且都是星下点的观测, 这样便消除了时间和观测角所造成的差别。卫星交叉定标方法被用于发射后定标, 来客观和准确地测量卫星间观测误差<sup>[9]</sup>。

选择从2011年1—6月共6个月的IRAS和IASI数据做卫星间交叉定标。将地面距离小于10km, 观测时间差小于10min的两个观测认为是SNO。选取空间的子数据集,  $5 \times 5$  IASI像素和 $3 \times 3$  IRAS像素, 子数据集中心的像素满足上面SNO标准。IASI是一个迈克尔逊干涉仪, 观测 $3.6 \sim 15.5 \mu\text{m}$ 的红外谱区域, 谱分辨率为 $0.5 \text{cm}^{-1}$ , 谱取样间距为 $0.25 \text{cm}^{-1}$ 。但由于IRAS红外通道的光谱响应较宽, 不能直接对比IASI和IRAS上观测的辐射率。因此, 对IASI通道辐射率进行积分:

$$R_{COV} = \frac{\int R_{IASI}(v) \phi(v) v dv}{\int \phi(v) dv} \quad (9)$$

其中,  $R_{COV}$ 是IRAS通道辐射的卷积,  $R_{IASI}$ 是IASI通道辐射。

利用式 (10) 对积分后的 $5 \times 5$  IASI像素进行质量控制, 从而去掉不均匀的观测:

$$\frac{STDV_{IASI}}{MEAN_{IASI}} < 0.1 \quad (10)$$

如果 $5 \times 5$  IASI像素的统计参数符合式 (10) 的要求, 将它们的平均值与 $3 \times 3$  IRAS像素的平均值进行比较。通过计算IRAS和IASI亮温差的平均值和方差进行统计比较。图8给出了IRAS和IASI的对比结果。大部分通道的偏差小于1K。通道13和18表现出较大的正偏差 (3~4K)。亮温差和目标温度的对比于图9给出, 可以看出在高目标温度范围内存在较大的正偏差, 表明非线性仍然显著存在。还可以看出权重函数

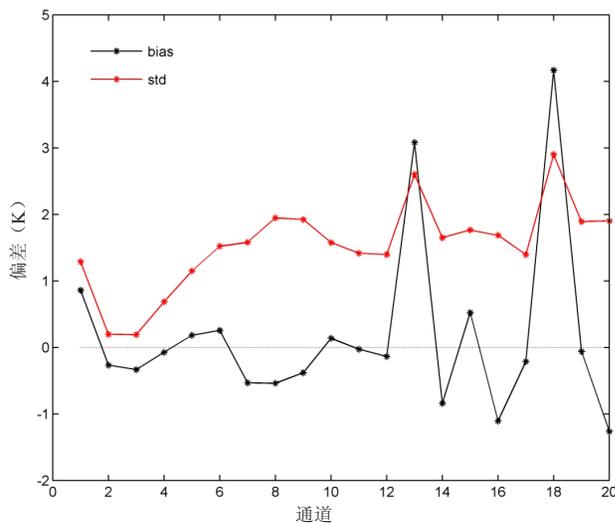


图8 IRAS和IASI间的SNO偏差特征

峰值较低的通道标准差偏大(表2), 这可能是由于探测近大气边界层的通道对于时间和地点的差别更加敏感, 虽然SNO方法已经较好地控制了这些差别。

#### 4.2 理论模拟和观测亮温

第二种估计卫星观测的方法是对比观测和模拟的结果。本文利用快速辐射传输模式CRTM来模拟IRAS通道亮温。CRTM是由美国卫星资料同化联合中心(JCSDA)开发的基于探测器的快速辐射传输模式<sup>[10-13]</sup>。该模式既可以用于模拟大气顶层的辐射, 也可以模拟各种大气和地表条件下的辐射梯度, 是数值天气预报模式中资料同化系统的重要组成部分。

由于陆地表面的地表发射率很难确定, 云区和

降水区域的模拟准确率比较低, 本文只模拟了海洋上空晴空区域的亮温。为了更好地对比相似的探测器, NOAA-19/HIRS观测也通过相同的方法进行了模拟和对比。

美国国家环境预报中心(NCEP)全球预报系统(GFS)6h预报场得到的大气廓线和地面场被用作CRTM的输入变量。但是, 在海洋上GFS海表面温度由海表面温度和海冰分析业务系统OSTIA的全球海温替代。OSTIA资料为英国气象局每天全球范围1/20° (~6km) 高分辨率的资料集<sup>[14]</sup>。GFS大气廓线(气压, 温度, 水汽和臭氧)垂直65层在全球格点上有0.3125°的空间分辨率。对于给定的卫星观测点, 预报场的空间和时间插值通过以下方法实现: 空间上, 卫星星下点的数据利用周围4个分析格点通过双线性插值的方法得到; 时间上, 通过对与IRAS以及HIRS相邻两个时次的分析场线性插值得到。

本研究选取了2011年4月9—15日的一周观测资料, 将CRTM模式模拟和FY3B/IRAS, 以及NOAA-19/HIRS进行了对比。FY3B和NOAA-19卫星均为下午星, 其升轨的当地时分别为13:30pm和13:31pm。因此IRAS和HIRS具有非常相似的时间和空间覆盖。图10给出了IRAS观测亮温以及对应的HIRS通道亮温。对于每个通道(IRAS通道3, 9和12, 与之对应的HIRA通道3, 8和11), 结果给出了2011年4月9日降轨全球分布直方图。通过观察直方图可以发现, IRAS三个通道的亮温在直方图上的峰值相对于HIRS对应通道观测有轻微的位移(小于1 K)。

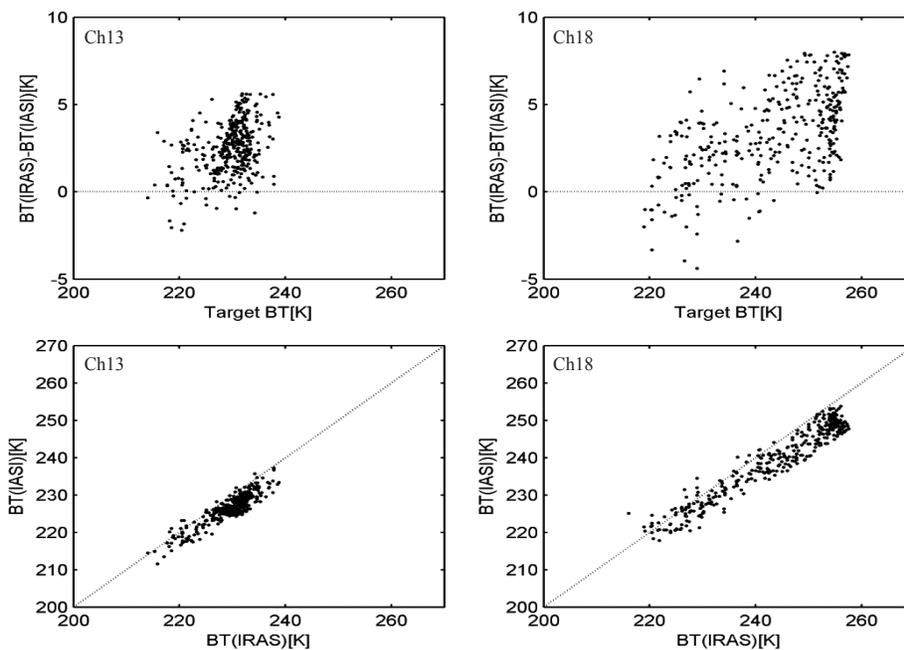


图9 目标亮温与IRAS和IASI亮温差之间的偏差特征

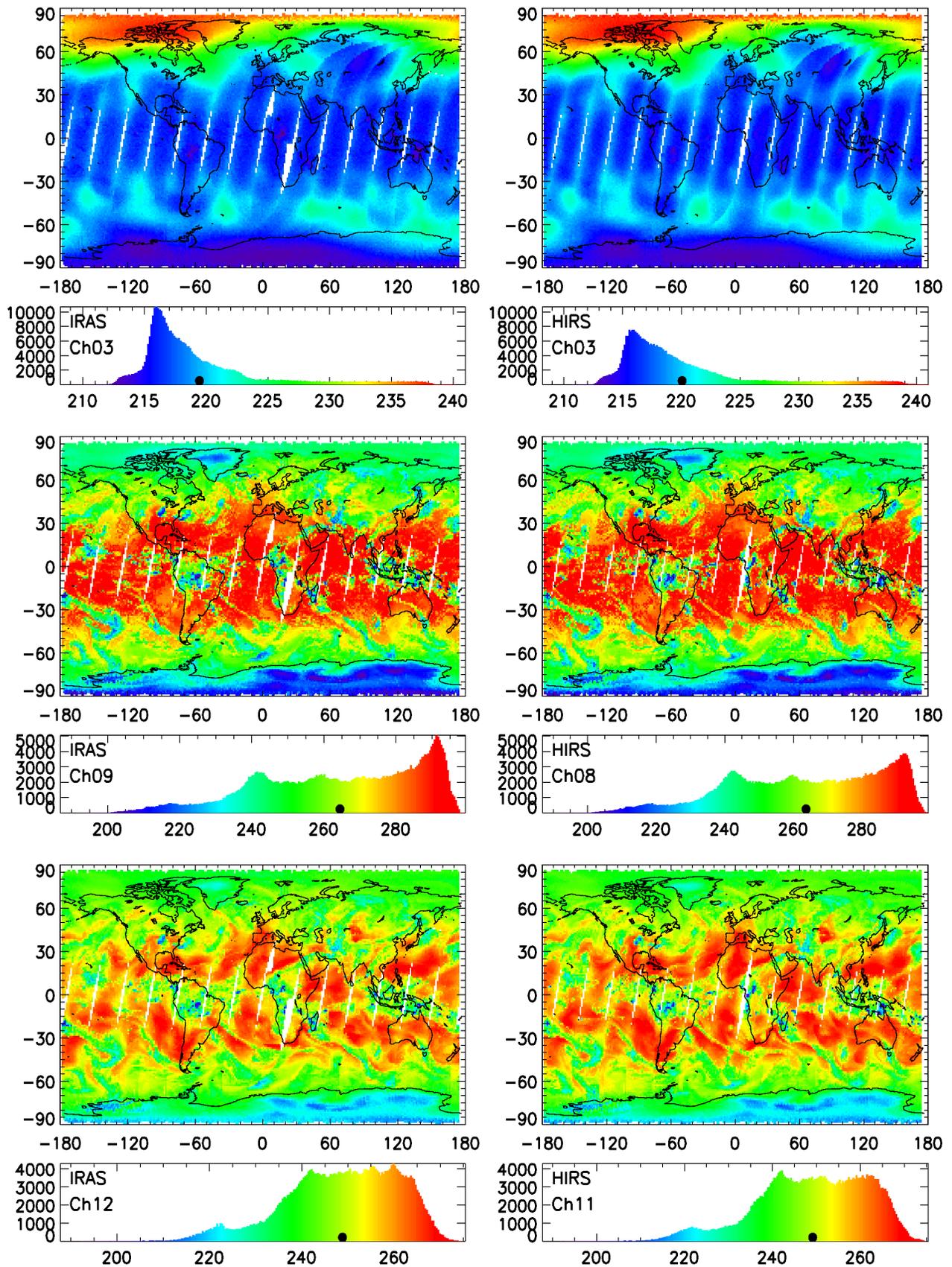


图10 FY-3B/IRAS (左列) 和对应的NOAA-19/HIRS (右列) 通道观测亮温 (对每个通道 (通道3, 9和12) 上半部分为全球分部, 下半部分为直方图 (2011年4月9日降轨资料), 直方图底部黑点表示每张图的平均亮温)

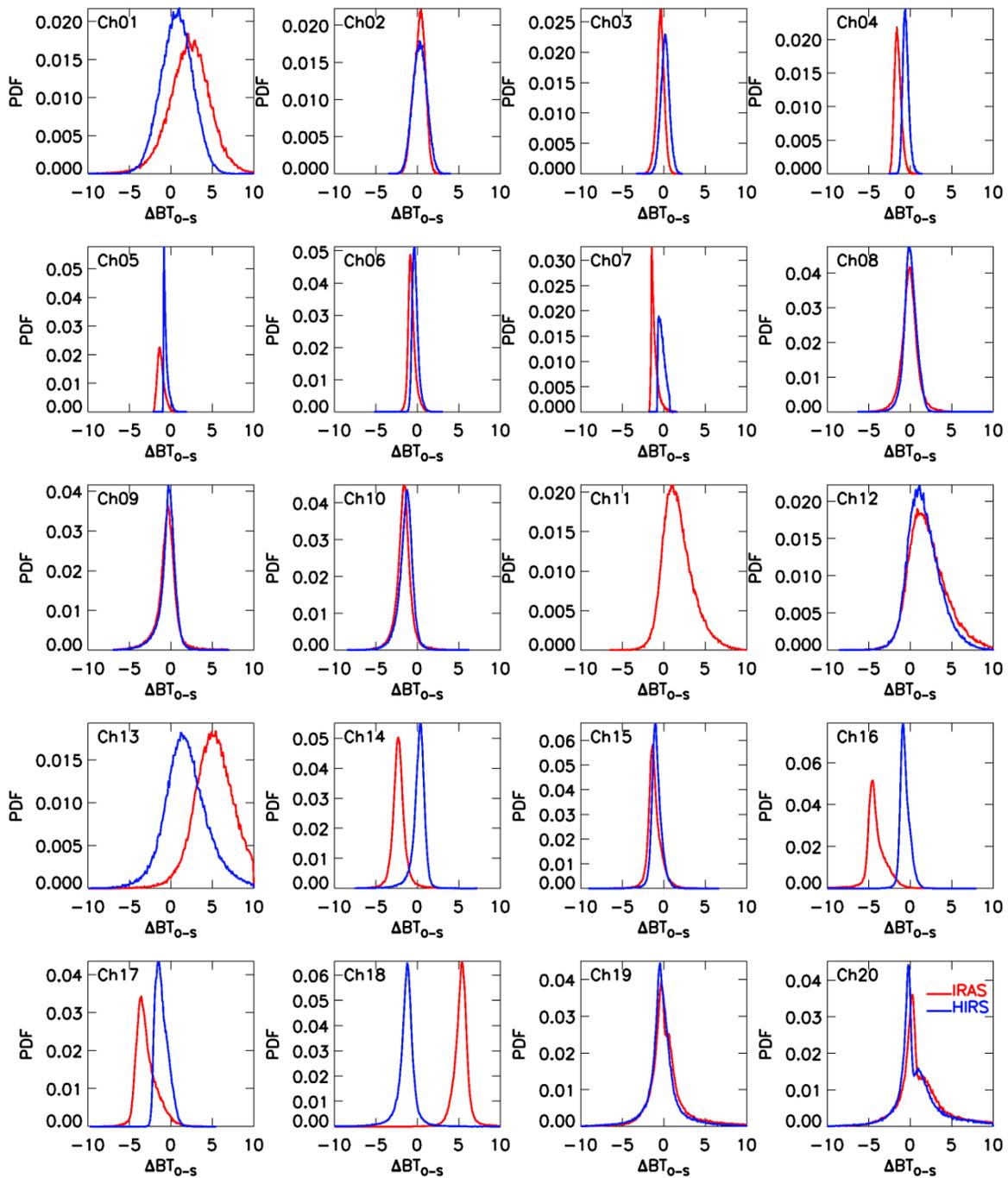


图11 晴空条件下海洋表面2011年4月9—15日IRAS (红色) 及HIRS (蓝色) 观测和CRTM模拟之间偏差的PDFs

观测和CRTM模拟的对比只在 $\pm 65^\circ$ 之间的海洋上晴空条件下进行。云检测基于一个简单方法进行<sup>[15]</sup>: 通道4, 5, 7 (14.22, 13.97, 13.35 $\mu\text{m}$ ) 3个二氧化碳吸收通道被用作高层云存在性的检测。如果CRTM模拟的晴空视场辐射与观测辐射之差大于噪音水平的5倍 ( $R_{clr} - R_m > 5NE\Delta N$ ), 认为有高云存在。同时, 11.11 $\mu\text{m}$ 窗区通道 (IRAS通道9, HIRS通道8) 被用作低云的检测, 其判定条件为水汽订正亮温比海面温度

高2.5K。

图11给出了2011年4月9—15日海洋表面晴空区域IRAS和HIRS观测与CRTM模拟偏差的概率密度分布函数。大部分IRAS和HIRS通道的偏差分布较一致, 尤其是二氧化碳探测通道。通道13, 14, 以及16~18存在较大偏差。图12给出了IRAS和HIRS观测与模拟的平均偏差和标准偏差 (由于HIRS没有与IRSA通道11相对应的通道, HIRS在该通道的均值和标准偏差被

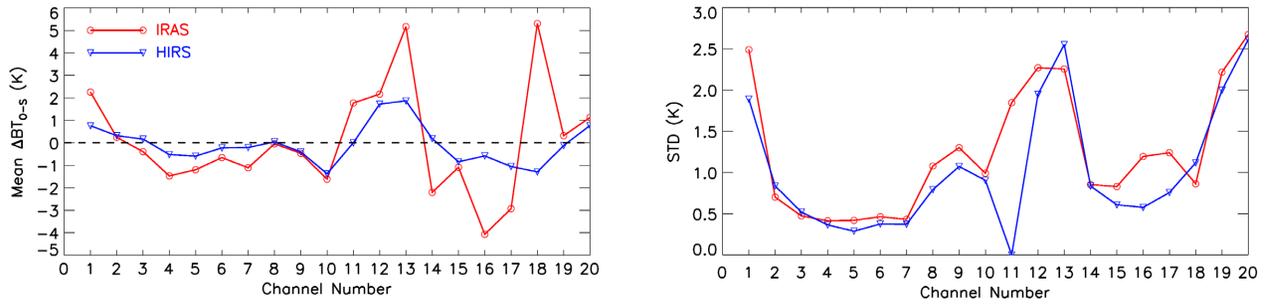


图12 晴空条件下海洋表面2011年4月9—15日IRAS (红色) 及HIRS (蓝色) 观测和CRTM模拟之间的平均偏差和标准差

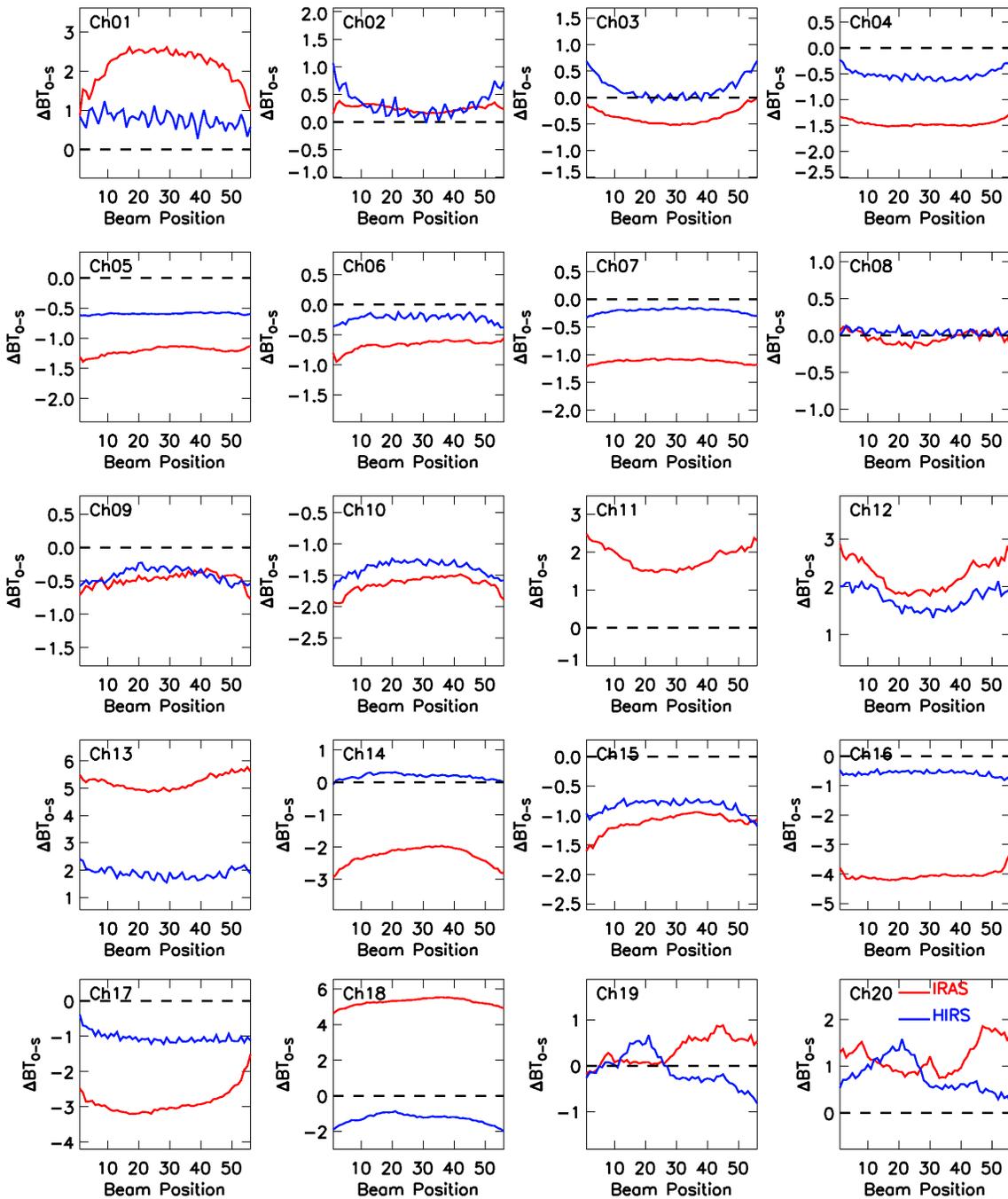


图13 晴空条件下海洋表面2011年4月9—15日IRAS (红色) 及HIRS (蓝色) 观测与CRTM模拟之间偏差作为扫描位置的函数

设为0)。IRAS观测与模拟之间的最大偏差位于通道13和通道18(5K),最小偏差在通道8(0.05K)。对于HIRS,其最大偏差(通道13,1.9K)比IRAS小,最小偏差(通道8,0.04K)与IRAS相近。总体来说,HIRS比IRAS的观测误差小,更稳定。IRAS部分通道表现出较大的偏差(通道13,16,18,这与SNO检验的结论相一致),可能是由仪器校准过程、仪器光谱响应函数发生变化(例如SRF)、仪器参数、背景场以及模式误差等因素造成,这需要进一步的研究。图12也显示,IRAS和HIRS所有通道标准偏差(STDV)的大小和趋势都较为一致。通道3~6表现出最小的标准偏差,而地表通道,如通道19和20表现出最大的标准偏差。该结果与卫星间对比的结果一致。造成这一分布的原因在于地表参数以及云对模拟的影响在地面通道(如通道19和20)较大,而在大气探测通道(如通道3和6)影响较小。本文研究发现IRAS和HIRS之间的偏差较小(对所有通道都小于0.7K),这说明IRAS观测可以被考虑应用于数值天气预报(NWP)模式中,但需要更多的试验。

图13比较了晴空条件下海洋表面2011年4月9—15日IRAS及HIRS观测与CRTM模拟之间偏差作为扫描位置的函数。IRAS和HIRS大部分通道都表现出误差对扫描角的依赖,但是HIRS表现出来的误差较小。这一误差应该小心地从卫星同化系统中移除,以满足观测误差无偏高斯分布的假定。

## 5 结论

在轨测试是卫星和仪器发射后的一个必经步骤。IRAS业务校准算法能够正常工作,使得在轨测试和仪器性能监测得以成功进行。在轨仪器性能监测包括进行长期的冷空和黑体信号监测,噪音等效辐射(NEAN)的测量。除了通道7和16外,在轨NEAN均达标。在刚发射的几个月中,冷空和暖黑体观测计数值变化较大,但最近几个月逐渐趋于平稳。通道8和10的定标曲线的斜率下降最大,是由于冷空计数值的减少导致。除8月以外,噪声具有较平稳的状态。在8月,通道4,7,17有一个剧烈的变化。

进行了IRAS和METOP/IASI卫星间对比,发现两个观测非常相似。同时,对FY-3B/IRAS和NOAA-19/HIRS的亮温分布与辐射传输模式的模拟进行了对比,某些通道表现出很大的差别。需要进一步的研究来理

解其中的原因。本研究的结果为未来验证以及应用该类红外仪器提供了有用的信息。

致谢:感谢翁富忠博士和邹晓蕾教授在本文撰写过程中提出的宝贵的建设性意见。

## 参考文献

- [1] Chen Y, Weng F, Han Y, et al. Planck weighted transmittance and correction on solar reflection for broadband infrared satellite channels. *J Atmos Oceanic Technol*, 2012, 29(3): 382-396.
- [2] Tobin D C, Revercomb H E, Knuteson R O, et al. Radiometric and spectral validation of Atmospheric Infrared Sounder observations with the aircraft-based Scanning High-Resolution Interferometer Sounder. *J Geophys Res*, 2006, 111, D09S12, doi: 10.1029/2005JD006094.
- [3] Blumstein D, Tournier B, Cayla F R, et al. In-flight performance of the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) on METOP-A. *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization III: Readiness for GEOSS*, San Diego, CA, USA, SPIE, 66840H-12. 2007.
- [4] Aumann H H, Pagano T S. Using AIRS and IASI data to evaluate absolute radiometric accuracy and stability for climate applications. *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization IV: Readiness for GEOSS II*, San Diego, CA, USA, SPIE, 708504-5. 2008.
- [5] Blumstein D, Pequignot E, Tournier B, et al. IASI FM2 on METOP A performances after 1.5 year in orbit. 16th International TOVS Study Conferences, Angra dos Reis, Brazil, 2008.
- [6] Strow L, Hannon S, Tobin D, et al. Inter-calibration of the AIRS and IASI operational infrared sensors. 17th annual CALCON Technical Conference, Logan, UT, USA, 2008.
- [7] Tobin D C, Revercomb H, Nagle F, et al. Evaluation of IASI and AIRS spectral radiances using simultaneous nadir overpasses. 16th International TOVS Study Conferences, Angra dos Reis, Brazil, 2008.
- [8] Wang L, Wu X, Li Y, et al. Comparison of AIRS and IASI radiances using GOES imagers as transfer radiometers towards climate data records. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(3): 478-492.
- [9] Cao C, Xu H, Sullivan J, et al. Intersatellite radiance biases for the High-Resolution Infrared Radiation Sounders (HIRS) on board NOAA-15, -16, and -17 from simultaneous nadir observations. *J Atmos Oceanic Technol*, 2005, 22(4): 381-395.
- [10] Weng F, Han Y, Delst P, et al. JCSDA community radiative transfer model (CRTM). *Tech Proc, 14th Int ATOVS Study Conf*, Beijing, China, 2005.
- [11] Han Y, Delst P, Liu Q, et al. Community Radiative Transfer Model (CRTM)-Version 1. NOAA Tech Rep, NESDIS 122, 2006.
- [12] Chen Y, Weng F, Han Y, et al. Validation of the Community Radiative Transfer Model (CRTM) by using CloudSat data. *J Geophys Res*, 2008, 113, D00A03, doi:10.1029/2007JD009561.
- [13] Chen Y, Han Y, Delst P, et al. On water vapor Jacobian in fast radiative transfer model. *J Geophys Res*, 2010, 115, D12303, doi:10.1029/2009JD013379.
- [14] Stark J D, Donlon C J, Martin M J, et al. OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. *Oceans '07 IEEE Aberdeen, conference proceedings. Marine challenges: coastline to deep sea*. Aberdeen, Scotland. IEEE, 2007.
- [15] Wylie D P, Menzel W P. Eight years of high cloud statistics using HIRS. *J Climate*, 1999, 12(1): 170-184.