

# 风云三号气象卫星红外分光计 在轨交叉定标精度监测系统

漆成莉<sup>1</sup>, 徐寒列<sup>1</sup>, 胡秀清<sup>1</sup>, 殷德奎<sup>2</sup>

(1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心,北京 100081;

2. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

**摘要:**为了满足定量遥感对红外探测仪器定标精度监测的需求,采用风云三号气象卫星红外分光计(IRAS)与国际基准红外高光谱探测仪器进行交叉比对的方法,建立了FY-3C气象卫星红外分光计与高光谱仪器IASI的在轨交叉定标精度监测系统.通过对2014年一年的IRAS观测数据的定标精度监测和分析,结果显示,IRAS与IASI的相关系数均在0.98以上,通道1和18的定标偏差最大,分别为-3.7 K和2.1 K,通道9和16也有超过1K的偏差,其他通道的平均偏差均在1 K以内.地表观测通道8、9、18、19、20由于受卫星观测时空变化频繁的影响偏差标准差较大,在1.5~3 K左右,其他通道观测误差稳定性较好,均在1.5 K以内.通道2、3、4、10~13的定标偏差随目标亮温变化趋势不明显,通道14~20定标偏差随目标亮温变化趋势最强,最低和最高目标亮温对应的定标偏差之间的差别最大可达到5 K.定标偏差的时间序列分析表明大部分通道的定标偏差在一年的时间内保持稳定,变化幅度不超过0.3 K;通道15、19、20的定标偏差变化幅度约为1 K,通道1、14、16、17、18定标偏差一年的变化范围达到2~4 K.总之,在轨交叉定标精度监测系统为实时监测定标精度的变化提供了有效工具,为诊断仪器性能和改进定标方案提供了参考依据.

**关键词:**风云三号气象卫星;红外分光计;定标精度监测;交叉定标

**中图分类号:**P412, V443.5 **文献标识码:**A

## Platform for monitoring accuracy of on orbit cross calibration: Infrared Atmospheric Sounder onboard FY-3 satellite

QI Cheng-Li<sup>1</sup>, XU Han-Lie<sup>1</sup>, HU Xiu-Qing<sup>1</sup>, YIN De-Kui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,

China Meteorological Administration (LRCVES/CMA), National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Shanghai Institute of Technological Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** For quantitative remote sensing, instrument calibration precision should be monitored from time to time. To monitor the accuracy of cross calibration of FY-3C satellite Infrared Atmospheric Sounder (IRAS), a platform was set up based on a cross comparison of IRAS with standard infrared high spectral resolution instruments- Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI). Calibration precision monitoring analysis using IRAS data in the year of 2014 shows results as the following. For all the 20 infrared channels the correlation coefficients of IRAS with IASI were above 0.98. The mean bias for most channels are less than 1K except that channels 9 and 16 are nearly 1.4 K and channels 1 and 18 are larger than 2 K. The standard deviation for most channels is less than 1.5 K, while for surface sounding bands of 8, 9, 18, 19, and 20, it ranges from 1.5 to 3 K. The latter is probably due to that the channels which detect atmosphere of near boundary layer were more susceptible to the time and location differences. The calibration bias variation trend with target brightness temperature was flat for channel 2, 3, 4, 10 to 13, while an obvious trend can be seen for channels of 14 to 20 and the differ-

收稿日期:2015-03-27,修回日期:2015-09-10

Received date: 2015-03-27, revised date: 2015-09-10

基金项目:基金项目(41471304),公益性行业专项(GYHY201206002),863计划(2015AA123701)

**Foundation items:** Supported by National Natural Science Foundation of China (41471304), China's Research and Development Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology GYHY201206002), and 863 Plan (2015AA123701)

**作者简介 (Biography):** 漆成莉(1979-),女,湖南株洲人,副研究员,硕士,主要从事红外探测仪器预处理系统开发,光谱和辐射定标,以及红外仪器观测精度验证方面的研究. E-mail: qicl@cma.gov.cn

ence between maximum bias and minimum bias can reach 5 K. Time series analysis of calibration bias indicates that for most channels the calibration bias were stable in one year and the variation magnitude was less than 0.3 K. It is about 1 K for channel 15, 19, and 20. The calibration bias variation reached 2 to 4 K in one year for channel 1, 14, 16, 17, 18. In a word, IRAS cross calibration accuracy monitoring system provide a tool for real time monitoring of calibration precision change.

**Key words:** FY-3 satellite, IRAS, calibration accuracy monitoring, cross calibration

**PACS:** 07.57.Ty

## 引言

风云三号系列气象卫星是中国的第二代极轨气象卫星,红外分光计是 FY-3 气象卫星上的红外探测仪器,它提供了从可见光到红外波长范围多通道辐射观测,主要应用目的是数值天气预报的卫星资料同化,以及全球范围大气温度廓线,湿度廓线,臭氧含量和云参数的反演等.定量遥感应用对仪器的辐射性能非常敏感,因此成功进行卫星资料定量遥感应用的前提之一就是精确的辐射定标<sup>[1-5]</sup>.虽然卫星发射后半年内均进行了在轨测试,对卫星和仪器的所有性能指标(尤其是在轨定标精度)均进行了全面,详细的测试以保障后端产品反演和应用,但测试数据时间相对较短,一般只有几个月,而卫星的辐射信号和定标系数、灵敏度等参数随着时间以及卫星环境、轨道、季节等的变化均有不同程度的变化和衰减,为了全面了解仪器在整个运行寿命期内的性能表现和观测精度,国家卫星气象中心定标和资料同化团队近两年重点开展了对 FY-3 气象卫星仪器参数、辐射精度的监测系统建立,目标是全面、及时、深入的了解各个载荷在轨的状态和性能,监测在轨定标精度的时间变化规律,保障卫星资料的定量遥感应用.红外分光计于 2013 年开始建立仪器性能参数跟踪监测系统,辐射定标监测系统和在轨交叉定标精度监测系统.

对 FY-3 IRAS 的技术指标和观测方式进行了简介;同时介绍了基于 CMA-GSICS 平台建立 FY-3 IRAS 在轨交叉定标精度监测系统的流程、步骤和数据匹配方法;进而对 2014 年的 FY-3C IRAS 与高光谱仪器 IASI 的交叉比对结果和定标偏差原因及其趋势进行了分析.

## 1 FY-3 IRAS 简介

IRAS 由中国科学院上海技术物理研究所研制,表 1 给出了 FY3/IRAS 仪器性能参数. IRAS 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  $\mu\text{m}$ ). IRAS 采取步

进扫描方式,椭圆扫描镜垂直于卫星飞行方向进行扫描,扫描步进角 1.8 度,扫描镜在 100 毫秒(步周期)内完成一次对地测量,每条扫描线包含 56 个像元. IRAS 内置有一个黑体,用四个铂金电阻温度计(PRT)进行温度测量,在 IRAS 原始资料中每一条扫描线包括四个遥感数据包和一个遥测数据包,每个遥测数据包有一次黑体温度测量数据.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.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 836 公里其对应的星下点地面分辨率分别为 20.3 km 和 18.9 km.

表 1 FY3/IRAS 仪器性能参数

Table 1 Specifications for FY3/IRAS instrument

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

表 2 给出了 IRAS 光谱通道特征,同时也列出了国际类似仪器 NOAA-19/HIRS 对应通道的特征.通道 1 ~ 7 和 14 ~ 18 位于  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  吸收带,用于探测从地面到 40 Km 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.

IRAS 红外通道的在轨定标是通过观测位于仪

器上的黑体和冷空两个目标来实现的,星上黑体进行温控措施,有 17℃ 和 25℃ 两个温控点,正常模式设置在 17℃. 每对地扫描观测 38 条扫描线后,进行一次冷空扫描观测(6.4 秒,一条扫描线)和一次星上黑体扫描观测(6.4 秒,一条扫描线),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,即探测和定标周期为 40 条扫描线(256 秒,一个幅周期).

## 2 IRAS 交叉定标精度监测系统

### 2.1 系统描述

FY-3 红外分光计在轨交叉定标精度监测系统的主要组成如下图 1 所示,主要包括轨道预报、数据下载、交叉定标、结果分析、绘图与长期监测. 系统主要功能是以观测精度较高的高光谱红外仪器观测为参考基准,采取交叉比对的方式分析红外分光计相对参考基准观测的误差特征,并根据卫星交叉的时间频次,实现定标精度长时间的连续监测. 基于该系统的比对结果可分析定标误差的原因,并在定标算法进行改进,改进后的效果依然可在监测系统中进

行评估和验证.

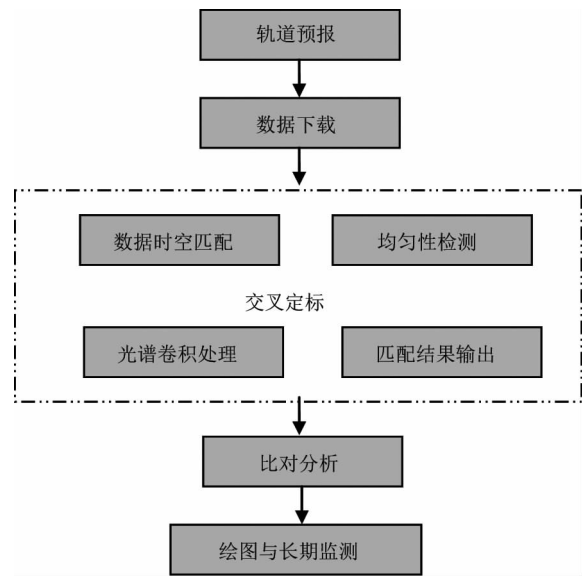


图 1 IRAS 交叉定标精度监测系统组成

Fig. 1 Cross calibration accuracy monitoring system of IRAS

### 2.2 交叉定标流程

表 2 FY3/IRAS 光谱通道特征

Table 2 FY3/IRAS channel characteristics

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)	1 030	9.71	25	O <sub>3</sub>	0.20	25
11	1 345	7.43	50	H <sub>2</sub> O	0.23	800
12 (11)	1 365	7.33	40	H <sub>2</sub> O	0.30	700
13 (12)	1 533	6.52	55	H <sub>2</sub> O	0.30	500
14 (13)	2 188	4.57	23	N <sub>2</sub> O	0.009	1000
15 (14)	2 210	4.52	23	N <sub>2</sub> O	0.007	950
16 (15)	2 235	4.47	23	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O	0.007	700
17 (16)	2 245	4.45	23	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O	0.007	400
18 (17)	2 388	4.19	25	CO <sub>2</sub>	0.007	Atmosphere
19 (18)	2 515	3.98	35	Window	0.007	Surface
20 (19)	2 660	3.76	100	Window	0.003	Surface
21	14 500	0.69	1000	Window	0.10% A	Cloud
22	11 299	0.885	385	Window	0.10% A	Surface
23	10 638	0.94	550	H <sub>2</sub> O	0.10% A	Surface
24	10 638	0.94	200	H <sub>2</sub> O	0.10% A	Surface
25	8 065	1.24	650	H <sub>2</sub> O	0.10% A	Surface
26	6 098	1.64	450	H <sub>2</sub> O	0.10% A	Surface

交叉定标是系统的核心模块,其基本原理是对于同样的对地观测目标,以国际基准高精度仪器的观测和被定标仪器的观测二者进行比对,分析被定标仪器相对于基准仪器的观测偏差,根据误差特性对被定标仪器进行再定标处理,以定标精度较高的仪器为辐射基准,再结合被定标仪器的电压输出数值重新计算定标系数,从而达到对被定标仪器观测误差进行修正的目的.交叉定标过程主要包括轨道预报、像元地理位置匹配、时间及观测角度匹配、光谱匹配和定标系数推导等部分.全球天基互定标计划(GSICS)的各成员国均已组织建立了以高光谱仪器 AIRS 和 IASI 为基准<sup>[6-7]</sup>的静止气象卫星红外通道 GEO-LEO 交叉定标的业务系统,开展了 FY-2<sup>[8-10]</sup>, GOES<sup>[11-12]</sup>, Meteosat<sup>[13-14]</sup>, MTSAT<sup>[15]</sup> 等静止卫星红外通道的评估和精度监测.除了 FY-2,国家卫星气象中心也建立了针对 FY-3/MERSI<sup>[16-17]</sup>, FY-3/VIRR<sup>[17]</sup> 以及 FY-3/IRAS 的 GSICS 交叉定标科研业务系统,以逐步实现对 FY-3 红外遥感器的在轨辐射定标精度的监测.

交叉定标的方法和步骤在很多论文中均有阐述<sup>[18-19]</sup>,其核心是通过卫星观测数据的时间匹配、几何匹配、视角匹配来寻找匹配样本.寻找到时空匹配的样本后还需要进行不同仪器相近通道之间的光谱匹配,即使找到同瞳观测的样本,也仅仅是辐射的空间来源一致,而只有光谱范围也一致才具有可比性. FY3C/IRAS 除通道 20 外其他 19 个红外光谱通道都被 IASI 光谱完全覆盖,通过与 IASI 观测与 IRAS 光谱响应函数(SRF)卷积处理可以得到 IRAS 的近似真值,用于比对分析 IRAS 的观测误差特征.

### 2.3 观测样本时间、空间匹配

**像元空间匹配:**基于轨道预报后选择的 IRAS 数据和高光谱数据块(高光谱约 10 分钟数据块, IRAS 为一轨数据),首先根据轨道特征、观测时间和定位结果计算出交叉区域,再在交叉区域内进行像元投影和地理位置匹配,对于在地球上的地理位置投影重合的像元选择为初步匹配像元,再计算匹配像元的地面球面距离,选择小于 3 公里的像元为最终空间匹配像元.

**观测时间匹配:**虽然经过轨道预报后只选择了包含两颗卫星轨道交叉点的数据块,仍然需要首先对观测样本进行时间匹配,以直接剔除样本观测时间差较大的数据,提高数据处理效率. FY-3/IRAS 与 Metop/IASI 匹配的时间差阈值选择为 5 分钟.

**观测几何匹配:**经过空间和时间匹配后挑选的

像元,还要进一步进行观测几何的匹配,确保观测目标的辐射来自相似地面入射角和相似大气路径条件,观测几何匹配的条件如下式(1)所示:

$$|\cos(SZA_{IASI})/\cos(SZA_{IRAS}) - 1| < 0.05 \quad (1)$$

**环境均匀性检验:**为了消除由于两颗卫星之间观测时间、光学厚度、定位等观测条件的差别带进的误差,只选择均匀区域内的观测样本参与比对<sup>[7]</sup>. IASI 星下点分辨率为 12 km, IRAS 星下点分辨率为 17 km,以 IRAS 3×3 的像元(ENV-BOX)为均匀性检验范围,对仪器的每个红外通道观测辐射均要做检验,检验条件如下式:

$$\frac{STDV_{IRAS}}{MEAN_{IRAS}} < 0.5 \quad (2)$$

### 2.4 观测样本光谱匹配

IRAS 红外通道的光谱响应较宽,IASI 是红外高光谱干涉仪,观测从 3.6 到 15.5 μm 的红外谱区域,谱分辨率为 0.5 cm<sup>-1</sup>,谱取样间距为 0.25 cm<sup>-1</sup>,完全覆盖了 IRAS 前 19 个红外通道,通道 20 有小段光谱未被覆盖(其分析结果仅供参考),通过把 IASI 高光谱红外辐射光谱与 IRAS 光谱响应函数进行卷积计算可以得到 IRAS 的近似真值.对 IASI 通道辐射率进行积分如下式(3):

$$R_{COV} = \frac{\int_{v_1}^{v_2} R_{IASI}(v) SRF(v) dv}{\int_{v_1}^{v_2} SRF(v) dv} \quad (3)$$

其中,  $R_{COV}$  是 IRAS 通道辐射的卷积,  $R_{IASI}$  是 IASI 通道辐射,  $SRF(v)$  为 IRAS 的光谱响应函数.对积分后的 5×5 IASI 像素的平均值与 3×3 IRAS 像素的平均值进行比较分析其误差特征.

## 3 IRAS 交叉定标结果分析

### 3.1 FY-3/IRAS 与高光谱观测的定标比对

根据前面描述的交叉定标监测系统组成和流程建立了 FY3C/IRAS 与 METOP/IASI 的在轨交叉定标精度监测系统,依据轨道预报每天从国外网址下载交叉区域的高光谱数据,进行交叉定标处理,根据比对结果进行误差分析,进行定标精度的业务监测.图 2 为基于轨道预报软件和结合时间和距离阈值设置对 Metop-A 和 FY3C 卫星同时星下点(SNO)进行预报的卫星交叉点空间分布图,交叉点一般位于南北纬 75°~85°范围,每隔一个多月周期性出现(卫星经过时间小于 10 min),每次持续约六七天左右.图 3 为 2014 年 8 月 14 日 FY3C/IRAS 与 METOP/

IASI 匹配样本的散点图,匹配样本有 1 256 个, 20 个红外通道的 IRAS 与 IASI 观测的相关性非常好, 相关系数除通道 20 为 0.98 外,其他 19 个通道均在 0.99 以上. 表 3 为 2014 年所有交叉样本平均统计的 FY3C/IRAS 与 METOP/IASI 交叉比对误差,通道 1 偏差最大,比 IASI 观测要低 3.7 K 左右,通道 18 比 IASI 高 2.1 K,此外通道 9 和 16 也有超过 1 K 的偏差,其他通道的平均偏差均在 1 K 以内;对于偏差标准差,反映了仪器观测误差的稳定性,由于交叉定标方法本身的局限性,越靠近地表观测通道,其观测的时空变化性越强,样本的偏差标准差也越大,因此

地表观测通道 8、9、18、19、20 的标准差较大,在 1.5 ~ 3 K 左右;其他通道观测误差稳定性较好,均在 1.5 K 以内.

**表 3 FY3C/IRAS 与 METOP/IASI 交叉比对误差**  
**Table 3 Mean bias and standard deviation of IRAS observation compared with IASI**

通道	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平均偏差/K	-3.71	-0.82	-0.68	-0.68	-0.86	-0.70	-0.89	-0.75	-1.48	-0.78
偏差标准差/K	0.93	0.16	0.15	0.26	0.51	0.83	1.32	1.87	1.91	1.03
通道	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
平均偏差/K	-0.52	-0.42	0.04	-0.88	-0.37	-1.25	-1.09	2.10	0.13	0.08
偏差标准差/K	1.08	1.03	0.54	1.49	1.03	1.08	0.97	1.81	2.23	3.06

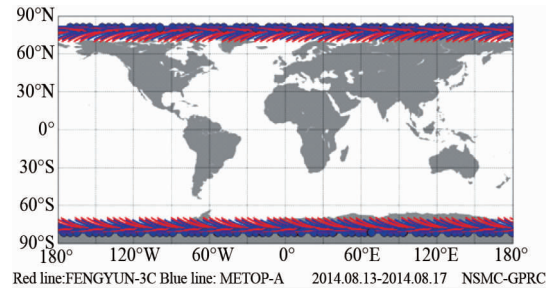


图 2 2014 年 8 月 13 ~ 17 日 FY3C 与 METOP-A 交叉点区域  
Fig. 2 Satellite crossing locations of FY3C with METOP-A during 13 to 17 August 2014

**3.2 定标精度与目标的关系**

IRAS 红外通道的在轨定标方案是采用二次项定标方法,如下式(4),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. $a_0, a_1$  是通过观测位于仪器上的黑体和冷空两

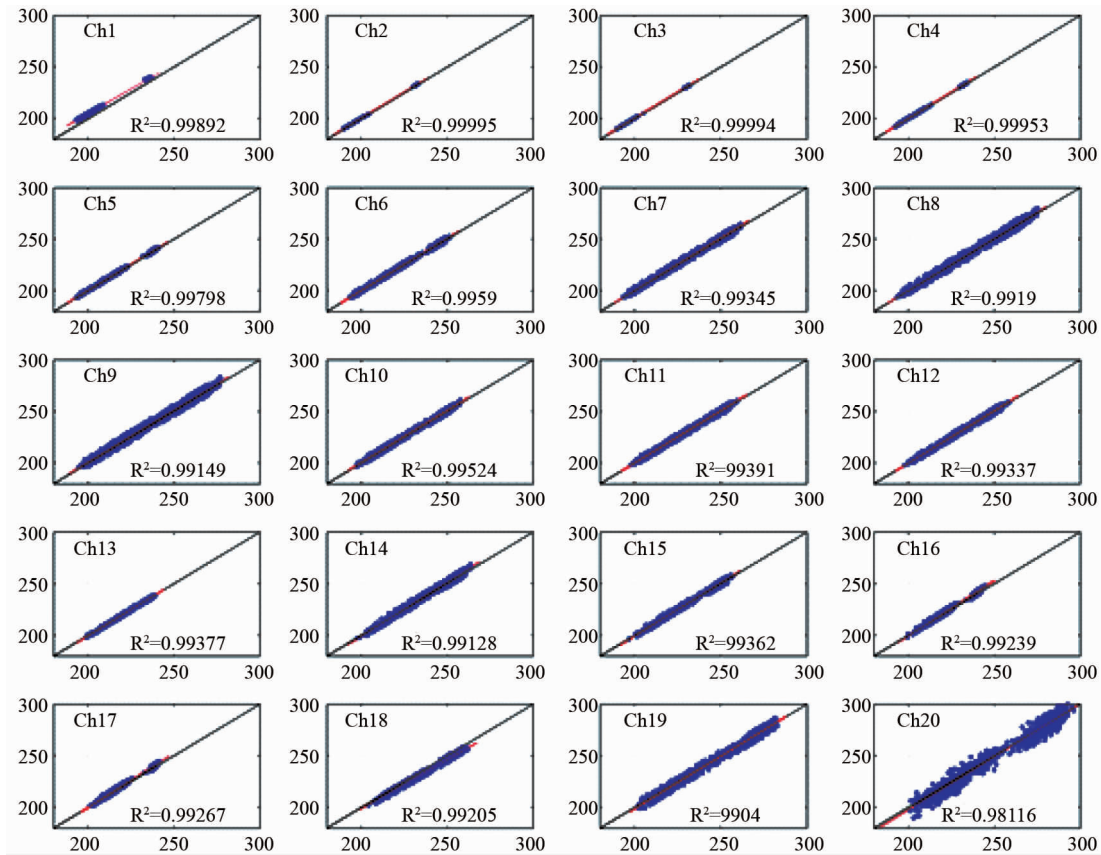


图 3 FY3C/IRAS 与 METOP/IASI 匹配样本的散点图  
Fig. 3 Scatter diagrams of FY-3C IRAS observations versus IASI measurements onboard METOP-A

个目标进行两点定标计算得到,  $a_2$  是二次项系数, 不能在轨计算得到, 是在地面真空定标试验中基于多组外定标源黑体的辐射率与计数值进行二次项拟合得到, 在轨保持不变.

$$r = a_0 + a_1 C_v + a_2 C_v^2 \quad (4)$$

为了检查 IRAS 定标偏差与观测目标亮温的相关关系, 将定标偏差随目标亮温变化的关系绘于图 4. 由图 4 可见 20 个红外通道定标偏差随目标亮温变化均呈现不同程度的趋势变化. 通道 2、3、4、10 ~ 13 的定标偏差随目标亮温变化趋势不明显; 通道 14 ~ 20 定标偏差随目标亮温变化趋势最强, 最低和最高目标亮温对应的定标偏差之间的差别最大可达到 5 K; 此外, 不同通道的偏差随目标亮温变化的方向也有区别, 大部分通道目标亮温越高, 偏差越大, 通道 1 规律相反, 低温端的偏差最大. 这也说明实验室推导的二次项定标系数用到在轨定标并非完全精确, 地面试验是依据地面近似真空环境中的通道计数值与辐射建立的二次式关系, 到了星上环境发生改变, 辐射响应性能也发生变化, 地面建立的模拟关系式与真实情况可能存在偏差, 影响在轨定标结果.

综合分析图 3 和图 4 的样本均有亮温高的样本和亮温低的样本且明显有聚合在两块不是均匀分布, 实际即是对应南北两极的样本. 由于在 8 月份, 对应北极极昼时期, 北极区域样本的亮温比南极区域样本的亮温要高, 所以从两块聚合的样本各自看其与目标温度的关系是不一样的, 误差特征也不一样, 尤其通道 16、17、240 K 区域的样本在北极是正偏差, 而若位于南极则为负偏差, 这是不一致的, 同样亮温大小的目标对应的观测原始计数值不一样, 这点是值得深入分析研究的问题.

在轨辐射定标以星上黑体和冷空作为辐射基准源, 因为冷空的温度 (2.73 K) 在热红外光谱范围其辐射近似为零, 远小于仪器的灵敏度水平 (如 2.73 K 在 11 和 12 的对应的辐射约为 0.000 28 和 0.001 2, 而仪器在这两个通道的灵敏度分别为 0.07 和 0.08  $\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$ , 一般以零值代替且非常稳定. 星上黑体 (IWT) 可依据内置 PRT 读数进行精确计算得到其辐射值, IRAS 仪器的星上黑体是进行精密温控的, 在轨测试结果星上黑体温度稳定性在 0.05 K 以内<sup>[20]</sup>. 当仪器观测冷空或星上黑体时, 来自目标自身的辐射应当是稳定的, 但分析发现当观测冷空和黑体时 IRAS 探测器输出的信号并非稳定, 而是有明显的轨道变化特征, 如下图 5 所示. 探测器输出信号中包含的真正目标物 (定标源黑体、

冷空) 的辐射是稳定的, 则必然包含了其他辐射来源, 可能来自仪器内部或其他星体. 对于红外仪器产生在仪器内部的则很可能是仪器的背景辐射, 对于线性响应通道随轨道变化的背景辐射不影响定标系数, 而对于非线性通道这种影响则会引起 0.2 ~ 0.7 K 的误差<sup>[21]</sup>. 根据其他仪器经验若有来自其他星体的辐射则很可能为观测冷空时对应某个角度有射入的太阳污染, 且太阳污染影响最大的是中波红外通道. 以发射前定标系数推断出星上在轨观测冷空 (2014 年 8 月 14 日一轨数据, 扫描线 200 附近对应南极, 扫描线 720 附近对应北极) 的对应辐射值如下图 6 所示, 通道 1 ~ 13 为正常的随轨道变化的背景辐射, 而通道 14 ~ 20 明显在过北极时段有信号污染, 对应 8 月份为北极极昼, 很可能在观测冷空时某个角度太阳光进入冷空视场, 此外 IRAS 滤光片是分两圈安装在滤光片轮上, 外圈安装的是通道 1 ~ 13, 内圈安装通道 14 ~ 20, 当角度刚好照射在内圈滤光片时, 内圈滤光片在一个凝视时刻刚好旋转一圈完成所有通道的观测, 导致内圈的 7 个通道均受到太阳污染. 这些推测均需要在未来的研究工作中再进行仔细分析和确认.

### 3.3 定标精度的时间序列分析与监测

建立在轨交叉定标监测系统的目的是实时监测 IRAS 定标精度的变化和趋势, 并提供及时的变化信息供仪器研制部门和预处理地面系统参考, 以诊断仪器性能特征和分析数据质量. 图 7 为 2014 年 FY3C/IRAS 定标偏差的时间序列图, 大部分通道的定标偏差在一年的时间内保持稳定, 变化幅度不超过 0.3 K; 通道 15、19、20 的定标偏差变化幅度约为 1 K; 通道 1、14、16、17、18 定标偏差一年的变化范围达到 2 ~ 4 K, 且从偏差与目标温度的关系可以看出南、北两极的样本有不一样的误差特征, 意味着南北两极的辐射响应有不一致. 偏差的时间序列分析结果显示通道 14 ~ 18 在某些时间段的误差特征很一致, 图中一个数据点代表一天的样本统计结果, 通道 14 ~ 20 为中波红外通道, 可能受太阳污染影响且相对通道 1 ~ 13 较大, 这种污染不会同时在南北两极出现, 因此对应这几个通道的定标精度在时间上也不太稳定可能与此有关, 需要未来深入研究背景辐射和太阳污染进行订正以验证推断的误差原因, 为提高数据质量和改进定标算法提供有用信息.

## 4 结论

卫星发射后经过在轨测试, 当仪器和地面预处



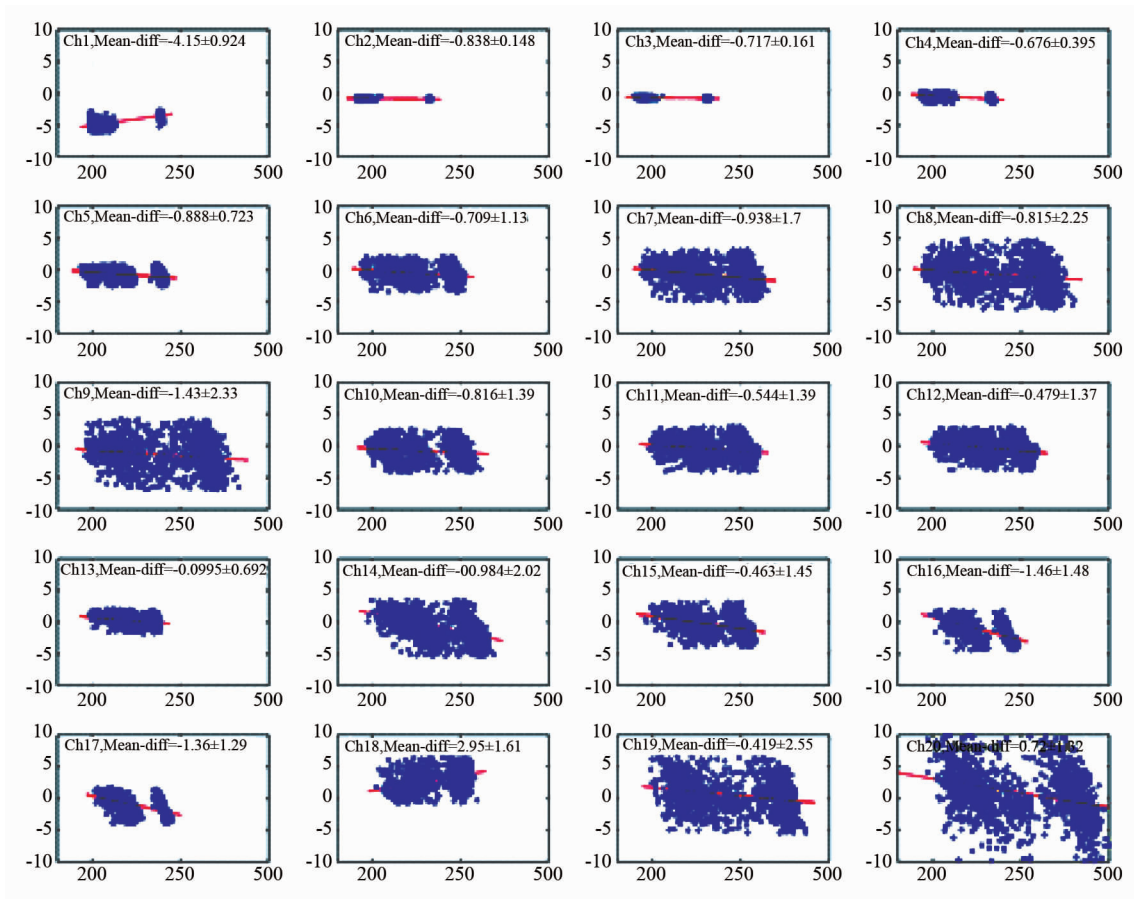


图4 以IASI为基准的IRAS亮温偏差 $Diff_{IRAS-IASI}$ 随目标亮温的变化  
 Fig. 4 IRAS brightness temperature bias variation with target brightness temperature

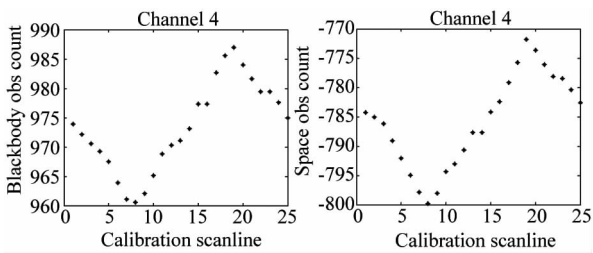


图5 FY-3气象卫星红外分光计一轨数据的黑体(左)和冷空(右)观测信号(通道4)  
 Fig. 5 One orbit of FY-3/IRAS measured counts when observing blackbody(left) and space(right)

理系统均处于稳定、业务运行状态,对卫星数据观测精度的评估和监测是仅次于卫星和仪器性能状态监测的一项支撑业务,有基于卫星交叉比对和基于辐射传输模拟两种实现途径.辐射传输模拟的方法需要每个仪器都单独计算透过率系数文件,且逐通道不同的云的影响及其检测是难点问题,而交叉比对不用考虑这两点,但其缺陷是目标集中在南北两极高纬地区,样本空间代表性不够,因此两种方法可相

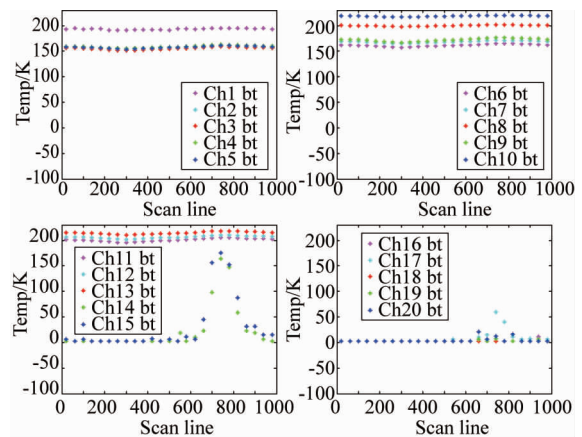


图6 基于发射前定标系数推断的IRAS冷空观测亮温  
 Fig. 6 IRAS space view brightness temperature using pre-launch calibration coefficients

互作为补充和验证.基于交叉比对方法建立极轨卫星在轨辐射定标精度监测系统的基本流程是进行轨道预报,根据预报结果进行数据下载,再进行时空匹配和光谱卷积计算处理得到待监测仪器的近似真值

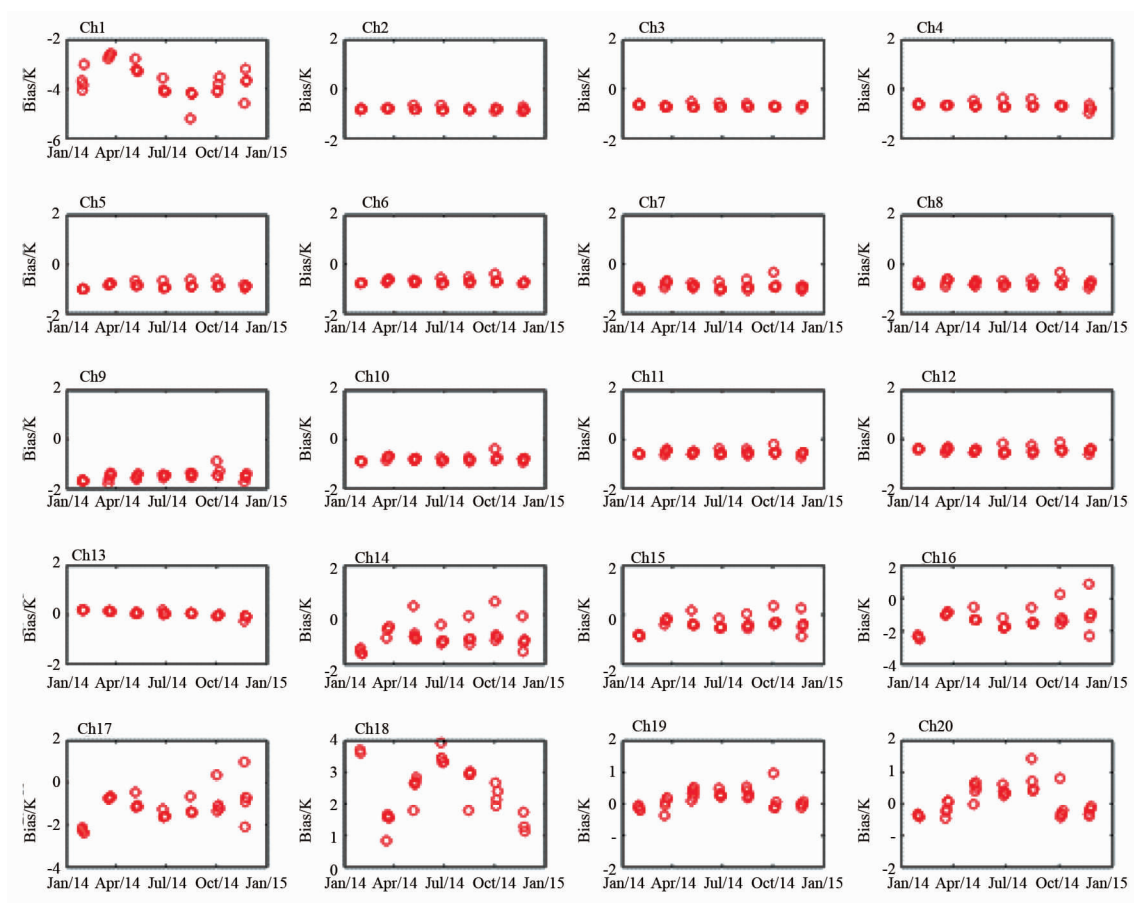


图7 2014年FY3C/IRAS定标偏差的时间序列图

Fig.7 Time series of FY3C/IRAS calibration bias in the year of 2014

观测,根据输出结果进行误差计算分析,最终进行偏差、标准差、与目标亮温相关关系等分析和长期监测。

利用2014年一年的观测资料进行了定标监测试验.20个红外通道的IRAS与IASI观测的相关性非常好,相关系数均在0.98以上.FY3C/IRAS与METOP/IASI交叉比对一年的交叉样本平均统计误差,通道1偏差最大,为-3.7 K左右,通道18为2.1 K,此外通道9和16也有超过1 K的偏差,其他通道的平均偏差均在1 K以内.对于偏差标准差,地表观测通道8、9、18、19、20的标准差较大,在1.5~3 K左右,其他通道观测误差稳定性较好,均在1.5 K以内.分析了IRAS定标偏差与观测目标亮温的相关关系,通道2、3、4、10~13的定标偏差随目标亮温变化趋势不明显,通道14~20定标偏差随目标亮温变化趋势最强,最低和最高目标亮温对应的定标偏差之间的差别最大可达到5 K.定标偏差的时间序列图表明大部分通道的定标偏差在一年的时间内保持稳定,变化幅度不超过0.3 K;通道15、19、20的定

标偏差变化幅度约为1 K;通道1、14、16、17、18定标偏差一年的变化范围达到2~4 K,定标精度误差较大和随时间序列不稳定的通道或许与背景辐射和太阳污染有关,需要进入深入分析。

基于CMA-GSICS平台建立的IRAS在轨交叉定标精度监测系统现已准业务运行,可实时监测定标精度变化趋势.未来的工作需要对线下的匹配样本进行更加详细深入的分析,包括与目标亮温的关系,在南北两极区域的特征,以及不同时间段的误差特征是否为仪器误差的真实表现均可作为诊断仪器性能和改进定标算法以及监测系统的质量控制提供重要的参考依据。

## References

- [1] XU Na, CHEN Lin, HU Xiu-qing, *et al*, Nonlinearity of FY-2D infrared detector in thermal window channels and its correction method[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐娜,陈林,胡秀清,等, FY-2D 红外探测窗区通道非线性特性及其定标订正方案, *红外与毫米波学报*), 2013, 32(4): 337-343.



- [2] Inter-calibration of geostationary ( GOES, METEOSAT, GMS) and polar-orbiting ( HIRS and AVHRR) infrared window radiances[R]. CGMS-XXVII-USA-WP-21, 13-19 October 1999 in Beijing, China.
- [3] König M, Tjemkes S, Hans-Joachim Lutz. The importance of using clear radiances and near-nadir views for satellite intercalibration[R]. CGMS-XXVIII EUM-WP-16, 16-20 October 2000 in Woods Hole, MA, USA.
- [4] Tobin DC, Revercomb H E, Moeller C C, et al, 2006: Use of atmospheric infrared sounder high-spectral resolution spectra to assess the calibration of moderate resolution imaging spectroradiometer on EOS aqua [J], *J. Geophys. Res.*, 111, D09S05, doi:10.1029/2005JD006095.
- [5] Gunshor M M, Schmit T J, Menzel, W P, et al, Intercalibration of broadband geostationary imagers using AIRS[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2009, **26**:746 - 758.
- [6] Cao C, Goldberg M, Wang L. Spectral bias estimation of historical HIRS using IASI observations for improved fundamental climate data records[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, **26**(7): 1378 - 1387.
- [7] Wang L, Goldberg M, Wu X, et al. Consistency assessment of atmospheric infrared sounder and infrared atmospheric sounding interferometer radiances: double differences versus simultaneous nadir overpasses [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**:D1111.
- [8] Xu Na, Hu Xiu-Qing, Chen L, et al. Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR using high-spectral resolution sensors IASI and AIRS[J]. *J. Remote Sensing* (徐娜, 胡秀清, 陈林等, FY-2 静止卫星红外通道的高光谱交叉定标, *遥感学报*), 2012, **16**(5): 939 - 952.
- [9] Zhang Y, Gunshor M M. Intercalibration of FY-2C/D/E infrared channels using AIRS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3): 1231 - 1244.
- [10] HU Xiu-qing, XU Na, WENG Fu-zhong, ZHANG Yong. Long-term monitoring and correction of FY-2 infrared channel calibration using AIRS and IASI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(10): 5008 - 5018.
- [11] Wang L, Cao C, Goldberg M. Intercalibration of GOES-11 and GOES-12 water vapor channels with MetOp IASI hyperspectral measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, **26**:1843 - 1855.
- [12] Yu F, Wu X, Radiometric calibration accuracy of GOES sounder infrared channels[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3):1187 - 1199.
- [13] Hewison T J. An evaluation of uncertainty of the GSICS SEVIRI-IASI intercalibration products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3):1171 - 1181.
- [14] Hewison T J. Ice contamination of meteosat/SEVIRI implied by intercalibration against metop/IASI [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3):1182 - 1186.
- [15] Yoshihiko T. New spectral compensation method for intercalibration using high spectral resolution sounder[R]. Meteorological Satellite Center Technical Note, 2008, **50**:1.
- [16] XU Na, HU Xiu-qing, CHEN Lin, et al. On-orbit radiometric calibration accuracy of FY-3A MERIS thermal infrared channel[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (徐娜, 胡秀清, 陈林等, FY-3A/MERIS 热红外通道在轨辐射定标精度评估, *光谱学与光谱分析*), 2014, **34**(12):3429 - 3434.
- [17] XU Han-lie, XU Na, HU Xiu-qing. Inter-calibration of infrared bands of FY-3C MERIS and VIRR using hyperspectral sensor CrIS and IASI[C]. 2014, ASIA-PACIFIC REMOTE SENSING Proc. SPIE, 9264 - 10.
- [18] QI Cheng-Li, HU Xiu-Qing, ZHANG Li-Yang, et al. 2012. Cross-calibration of FY1C/1D satellite based on hyper-spectral data[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (漆成莉, 胡秀清, 张里阳等, 基于高光谱资料对 FY-1 气象卫星进行交叉定标, *气象学报*), 2012, **70**(4):892 - 901.
- [19] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, LU Feng, et al. Inter calibration of FY-2B IR channel with NOAA satellites [J]. *Acta Meteorologica* (戎志国, 张玉香, 陆风, 等, FY-2B 与 NOAA 卫星红外通道的相对定标, *气象学报*), 2005, **63**(4):485 - 492.
- [20] QI Cheng-li, XU Han-lie, YIN De-kui. FY3C IRAS on-orbit performance and measurements validation, ASIA-PACIFIC REMOTE SENSING Proc[C]. 2014, SPIE, 9264 - 8.
- [21] Mittaz J P D, Harris, A R, Sullivan J T. , A physical method for the calibration of AVHRR/3 thermal IR channels 1: The prelaunch calibration data[J]. *Atmos. Ocean. Technol.*, 2009, **26**(9): 996 - 1019.

~~~~~

(上接 270 页)

- [5] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens[J]. *Science*, 2005, **308**: 534 - 537.
- [6] Schuring D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**: 977 - 981.
- [7] Garcia-Garcia J, Bonache J, Gil I, et al. Miniaturized microstrip and CPW filters using coupled metamaterial resonators [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, **54**(6): 2628 - 2635.
- [8] Paul O, Beigang R, Rahm M. Highly selective terahertz bandpass filters based on trapped mode excitation[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 18590 - 18595.
- [9] Chin J Y, Lu M, Cui T J. Metamaterial polarizers by electric-field-coupled resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 251903 - 251905.
- [10] Wei X, Shi H, Dong X, et al. A high refractive index metamaterial at visible frequencies formed by stacked cut-wire plasmonic structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(1): 011904 - 011907.
- [11] Smith D R, Schultz S, Markos P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**: 195104 - 195108.
- [12] Hua Y L, Li Z Y. Analytic modal solution to transmission and collimation of light by one-dimensional nanostructured subwavelength metallic slits[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**: 013104 - 013111.
- [13] Smith D R, Vier D C, Kohnshny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**: 036617 - 036627.
- [14] Fernández-Domínguez A I, Martín-Moreno L, García-Vidal J, et al. Spoof surface plasmon polariton modes propagating along periodically corrugated wires [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(6): 1515 - 1521.