

文章编号:1001-9014(2005)05-0357-04

风云二号 B 星星载扫描辐射计水汽通道定标方法

戎志国^{1,3}, 张玉香¹, 王玉花², 邱康睦¹, 张如意²

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 3. 北京大学物理学院, 北京 100871)

摘要: FY-2B 静止气象卫星扫描辐射计水汽通道发射前定标在实验室真空罐内进行. 发射在轨后, 可以利用星上黑体监视探测器性能变化, 但由于星上黑体光路与目标光路不同, 无法进行水汽通道的在轨全光路定标. 介绍了 FY-2B 水汽通道的发射前定标、利用在轨电定标确定量化关系进行的定标处理以及与 NOAA-17 卫星 HIRS/3 通道 12 的相对定标方法.

关键词: 定标; 水汽通道; 性能变化; 相对定标; HIRS/3

中图分类号: P414.4 **文献标识码:** A

CALIBRATION METHOD FOR WATER VAPOR CHANNEL OF SCANNING-RADIOMETER CARRIED BY FY-2B SATELLITE

RONG Zhi-Guo^{1,3}, ZHANG Yu-Xiang¹, WANG Yu-Hua², QIU Kang-Mu¹, ZHANG Ru-Yi²

(1. National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China;

2. Institute of Shanghai satellite project, Shanghai 200240, China;

3. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The pre-launch calibration of the water vapor channel onboard FY-2B geostationary meteorological satellite was made in the Lab's vacuum container. The change of sensor's characteristics post-launch is normally monitored by the on-board blackbody. However, since the blackbody calibration path adopts different objective optic path, it is hard to make the in-orbit absolute calibration for the WV channel of the satellite. The pre-launch calibration of FY-2B's WV channel was introduced, and the calibration processing method with the quantized relation derived from in-orbit electronic calibration, as well as the inter-calibration for the channel 12 of HIRS/3 aboard NOAA-17 was also described.

Key words: calibration; WV channel; change of characteristics; inter-calibration; HIRS/3

引言

FY-2B 卫星于 2000 年 6 月 25 日升空, 并顺利定位于 104.5°E 的赤道上空. 上海技术物理研究所为 FY-2(03) 星研制了两套扫描辐射计, 编号为 9901、9902. 2000 年 1 月 24 日至 2000 年 2 月 16 日在上海航天局 509 所扩建后的 KM-2 真空系统中进行了两套红外、水汽通道的定标^[1], 定标实验方案参考了 FY-2A 在轨期间星上环境温度的变化规律. FY-2B 采用了编号 9902 的扫描辐射计.

为修正已发射上天的 9902 扫描辐射计红外、水汽通道的定标结果, 在对定标设备进行了无油化改造后, 2000 年 12 月对 9901 进行了复定标, 以验证

定标结果受污染的程度, 并得到对在轨的 9902 辐射计定标结果进行修正的依据.

2001 年 2 月 13 日 23 时(UT) FY-2B 水汽通道输出发生了非指令性突变, 探测器性能发生大幅衰减. 之后, 探测器输出一直保持稳定. 在发射前定标失效的情况下, 用 NOAA-17 卫星 HIRS/3 仪器的通道 12 进行了相对定标试验, 取得了 FY-2B 水汽通道在轨的实际定标结果.

1 FY-2B 水汽通道发射前定标和在轨定标

FY-2 卫星水汽通道与红外通道(10.5 μ m - 12.5 μ m)的实验室定标方法一样. FY-2(03) 星的实验室定标参照了 FY-2A 星在轨时的实际环境温度分

收稿日期: 2004-12-25, 修回日期: 2005-06-21

基金项目: 本研究得到 FY-2 卫星工程地面应用系统预研项目支持.

作者简介: 戎志国(1964-), 男, 江苏丹阳县人, 国家卫星气象中心高级工程师, 学士, 主要从事遥感卫星辐射定标工作.

Received date: 2004-12-25, revised date: 2005-06-21

布的变化,以主镜为主线,设定和控制次镜的几种温度状况,每种状况进行一组标定. 9902 正样产品辐射定标试验在辐冷器二级冷块温度 95K 时,共测定了 6 种不同主镜和次镜温度状态. 其中第 2、第 3 种状态时,主镜的温度设定相同而只变化次镜的温度,其它部件的温度随主镜温度而变化. 辐冷温度 100K 时测定了两组. 星上黑体在每种状态中,切入后光路定标一次.

根据实验室的定标数据即可进行定标计算.

1.1 定标方法:

由测定的目标黑体温度 T 通过积分计算可得出相应的辐亮度 $L_b(\nu, T)$ (用波数关系表示)

$$L_b(\nu, T) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{2hc^2\nu^3 d\nu}{[\exp(hc\nu/kT) - 1]} \quad (1)$$

其中 h 是普朗克常数, c 是光速,而 k 是玻尔兹曼常数. FY-2B 水汽通道的波段为 $6.3\mu\text{m} \sim 7.6\mu\text{m}$, 探测的有效动态范围为 190K ~ 290K. 光谱响应范围为 $6\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$, 对应的波数为 $\nu_1 = 1250\text{cm}^{-1}$, $\nu_n = 1666.7\text{cm}^{-1}$.

目标黑体的发射率 $\varepsilon(\nu)$ 和辐射计的光谱响应函数 $\Phi(\nu)$ 由研制单位提供, 辐亮度 $L_d(\nu, \varepsilon, T)$ 可以写为:

$$L_d(\nu, \varepsilon, T) = \int_{\nu_1}^{\nu_n} \Phi(\nu)\varepsilon(\nu) \frac{2h\nu^3\nu^3 d\nu}{[\exp(hc\nu/kT) - 1]} \quad (2)$$

发射率 $\varepsilon(\nu)$ 为常数, 等于 0.999.

对于 FY-2B 水汽通道的通道波谱范围, ν_i 是连续的. 式(2)的积分可以简化为 $L_d(T)$ 对 ν 的求和:

$$L_d(T) = \sum_{i=1}^{n-1} \Phi(\nu_i)\varepsilon \frac{2hc^2\nu^3(\nu_{i+1} - \nu_i)}{[\exp(hc\nu_i/kT) - 1]} \quad (3)$$

对式(3)进行归一化处理, 将得到等效辐亮度 $L_e(T)$:

$$L_e(T) = \frac{L_d(T)}{\int_{\nu_1}^{\nu_n} \Phi(\nu) d\nu} = \frac{L_d(T)}{\sum_{i=1}^{n-1} \Phi(\nu_i)(\nu_{i+1} - \nu_i)} \quad (4)$$

这里 $L_e(T)$ 的单位是 $\text{mw}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$.

处理扫描辐射计 9902 实验室定标数据即可得到目标辐亮度与输出电压的关系. 辐亮度 L 与电压 U 为线性关系, 见式(5):

$$L = A \times U + B \quad (5)$$

其中 A 、 B 为拟合系数.

根据卫星研制部门提供的 FY-2(03) 扫描辐射

计红外和水汽通道 A/D 量化关系, 可以得到计数值 C 与输出电压 V 的关系, 见式(6) 和图 1. 它是发射前设定的电路输出量化关系.

$$U = AA \times DC + BB \quad (6)$$

其中斜率 $AA = 19.644$, 截距 $BB = 119.89$, U 为电压, DC 为计数值.

从式(5)、(6)可以看出, 计数值与辐亮度也是线性关系, 在轨定标确定的就是两者之间的关系.

$$L = \alpha \times DC + \beta \quad (7)$$

在轨运行时, 卫星每次扫描观测的第一、第四帧为电定标阶梯数据. 用它与设定的电压值, 可以得到卫星电路输出的实际量化关系. 水汽(A机)增益第 08 级时, 其各阶梯电压输出值为: 0, 0.603, 1.132, 1.641, 2.132, 2.633. 阶梯电压与计数值之间的关系是图 1 中的短线, 可以看出阶梯的量化关系与地面给定的 A/D 量化关系的斜率一致, 而截距约相差约 110mv (约 6 个计数值). 在轨电定标量化是卫星输出(计数值)的真实反映.

FY-2B 电定标阶梯的输出非常稳定. 用 2000 年 7 月水汽通道开通不久的一组阶梯确定的量化关系, 系数为: 20.073, 截距: -12.623. 我们以此作为定标的量化依据.

当 $DC = 0, 1, 2, \dots, 254, 255$ (水汽通道计数值需要反向), 将得到一组电压值 U_i , 代入式(5) 可得到一组辐亮度值 L_i . 由光谱响应函数可以求得通道的中心波数 ν_0 . 由辐亮度 L_i 及中心波数 ν_0 , 可以反演出通道的目标亮温 T_i :

$$T_i = hc\nu_0/k/\ln(1 + 2\varepsilon hc^2\nu_0^3/L_i) \quad (8)$$

用中心波数反演出的目标亮温有一定的误差, 将此温度 T_i 代入式(3), (4), 可得一幅亮度 L_i' , 比较 L_i' 与 L_i , 如二者相差超出误差范围, 则给 T_i 一个修正量 ΔT , 使 $T_i' = T_i + \Delta T$, 再重复以上过程, 直至

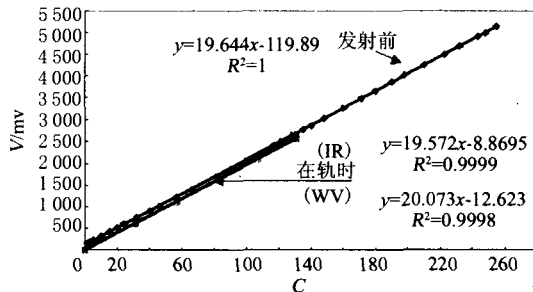


图 1 FY2(03) 红外与水汽通道 A/D 量化及在轨电定标的关系图
Fig. 1 Chart of A/D quantitative relation and electrical calibration in-orbit

得到的目标辐亮度 L_i' 达到精度要求. 由此可计算得到定标查找表.

1.2 系统误差修正

由于 FY-2(03) 星的两套扫描辐射计在实验室定标时, 发生了真空泵油泄漏汽化, 使得真空容器中的定标器主镜受到了污染. 两套辐射计受污染的过程是一样的, 所以, 为了修正已发射上天的 9902 扫描辐射计红外、水汽通道的定标结果, 在对定标设备进行了无油化改造后, 2000 年 12 月对 9901 进行了重新定标, 以验证定标结果受污染的程度, 并得到对在轨的 9902 辐射计的定标值进行修正的依据. 上海技物所提供了 9901 两次红外、水汽通道实验室定标得到的定标曲线斜率变化及建议使用的水汽通道修正量为 1.82%. 不同温度点的辐亮度变化将引起不同的温度差, 对于水汽通道, 1.82% 的系统差最大能引起 2K 的误差.

利用系统差可以修正水汽通道的定标结果, 得到定标系数、截距(反向后), 以及定标查找表. 95K 的六组、100K 两组的定标系数、截距见表 1:

1.3 星上黑体定标介绍

FY-2B 星上定标系统设计成每 3 张云图进行一次星上黑体定标. 但由于定标光路是后光路, 星上黑体不象目标一样通过主镜、次镜等前端光学系统, 故星上定标不是全光路整机定标而只是仪器的部分定标^[2], FY-2B 扫描辐射计红外、水汽通道光电示意图 2. 电子学定标阶梯和黑体定标结果可以作为红外、水汽通道探测器性能变化的依据.

星上黑体定标输出在云图的第 3 帧, 红外、水汽通道图像的位置将显示定标的输出变化过程. 输出稳定时即可得到对应当时黑体温度的计数值. 黑体温度是可控的, 但也随星上环境的变化而变化, 需以遥测数据为准. 在 FY-2B 上将黑体温度降为 8℃. 辐

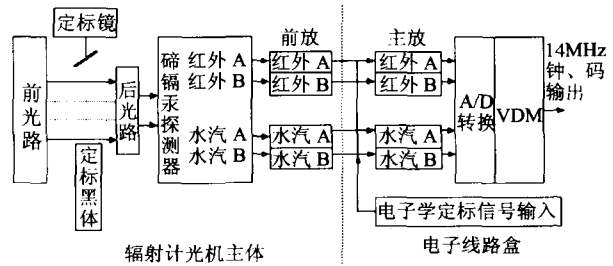


图 2 辐射计光电部分原理框图

Fig. 2 Frame chart of electric principle for the radiometer

冷温度 95K 时, 在轨黑体定标输出: 红外为 130、水汽为 120 左右(A 机).

FY-2B 卫星红外、水汽通道自 2000 年 7 月 19 日开通以来, 扫描辐射计经受了恶劣空间环境的影响, 至今仍在正常工作. 特别是红外通道保持了较好的稳定性, 图像质量和定标精度都达到了令人满意的结果. 水汽通道由于动态范围的限制, 图像的对比度较小, 但也好于 GMS-5 的水汽图像.

2 利用 NOAA-17 卫星 HIRS/3 仪器通道 12 进行 FY-2B 水汽通道的相对定标

2.1 相对定标

2001 年 2 月 13 日从世界时 23 点开始 FY-2B 水汽通道的输出发生了很大变化, 水汽通道探测器的响应发生了较大的跳变衰减(另文叙述与分析).

FY-2B 卫星水汽通道跳变后, 其输出又保持了稳定. 但发射前的定标结果已然无效. 虽然 GMS-5 的水汽通道与 FY-2B 的相近, 然而水汽对辐射的方向相当敏感, 两颗卫星分处不同经度的赤道上空, 故不能用当时的 GMS-5 进行相对定标. 考虑到 NOAA-17 卫星每隔一段时间即有轨道通过 FY-2B 星下点附近区域, 而其 HIRS/3 有水汽通道, 可以为 FY-2B 水汽通道进行相对定标.

相对定标是以较高定标精度的卫星通道标定较低精度卫星通道的工作^[3].

相对定标需要进行不同卫星相近通道间的光谱匹配、卫星资料的时间匹配、几何匹配, 从而建立两个卫星通道间对同一时间、同一卫星扫描角获得的同一目标的卫星入瞳辐亮度与对应卫星通道图象间的关系, 当获得较高精度卫星通道的定标系数后, 即可计算出所需标定卫星通道的定标系数^[4-6].

2.2 时间匹配、几何匹配

FY-2 静止气象卫星位于地理经度 104.5 度的赤道上空, 每 25 分钟可完成扫描地球一次. NOAA 卫星

表 1 利用星上电定标及系统修正过的 FY-2B 水汽通道在轨定标结果

Table 1 The calibration results corrected systematically and according to electric calibration in-orbit for FY-2B WV channel

辐冷温度	序号	系数	截距	主镜温度 K	次镜温度 K
95K	1	-0.08999	23.50367	275.2	289.3
	2	-0.09309	24.09057	278.9	282.2
	3	-0.09289	24.07082	278.08	288.15
	4	-0.09321	24.16532	280.08	289.15
	5	-0.09724	24.93395	282.12	292.15
	6	-0.09867	25.35806	285.2	293.4
100K	1	-0.10058	25.76533	278.13	288.1
	2	-0.10223	26.16442	281.15	290.92

太阳同步,每天有一条降轨、一条升轨通过同一地点.如果按卫星扫描角相近的原则选择目标,目标应位于FY-2星下点附近的±20度内,即在40X40度的星下点区域.NOAA卫星通过此区域的时间有10分钟左右.因此,在时间匹配上,应选择两颗卫星扫描此区域时间相差不超过15分钟的轨道图象资料.

FY-2B和NOAA卫星均有定位数据.FY-2B可将选中的区域进行正形投影,投影范围为:85°E—125°E,20°N—20°S,进行几何定位检验,保证定位精度在一个像元内.NOAA卫星通过FY-2B星下点附近的HIRS/3资料可从NOAA网站上下载.

由于HIRS/3水汽通道的分辨率为18.9KM,而FY-2B水汽通道的分辨率为5KM,故可用4X4个FY-2B的水汽通道的像元取平均与HIRS/3水汽通道对应位置的像元进行比较,获得两卫星水汽通道间计数值的拟合关系.

2.3 FY-2B水汽通道与NOAA-17 HIRS/3通道12光谱匹配计算

NOAA-17卫星HIRS/3仪器有两个水汽通道,通道11,12,中心波长分别为7.33μm,6.52μm,介于FY-2B水汽通道之间(FY-2B水汽通道归一化的中心波长为6.8266μm).通道12完全包含于FY-2B水汽通道,而通道11处于水汽通道较低响应的一边.由于归一处理后的辐亮度主要与中心波长有关,因此,通道12能更好代表水汽通道探测到的辐亮度,可以用HIRS/3通道12与FY-2B水汽通道进行相对定标.见图3.另外,两颗卫星水汽通道探测的水汽高度均在5-7km处.

相对定标的光谱匹配过程是通过模式如MODTRAN,选用热带大气模式、多组探空样本数据和36种卷云模型进行模拟计算,分别与两卫星通道光谱响应函数卷积,得到不同卫星通道的入瞳辐亮度,见图4.建立两颗卫星通道间辐亮度的关系,一般是线性关系.线性方程为:

$$L_{FY2} = a \times L_{NOAA} + b \quad (9)$$

其中 L_{FY2} 为FY-2B水汽通道的辐亮度; L_{NOAA} 为NOAA-17HIRS/3通道12的辐亮度;经最小二乘法计算获得两卫星相应通道间的比例系数为 $a = 1.677448$, $b = 0.049254(mw/m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$.

2.4 相对定标计算

从NOAA-17卫星HIRS/3资料中获取通道12的定标系数,可以确定通道12不同计数值对应的辐亮度.从FY-2B水汽通道与HIRS/3通道12间计数值的拟合关系,可确定不同FY-2B水汽通道计数值

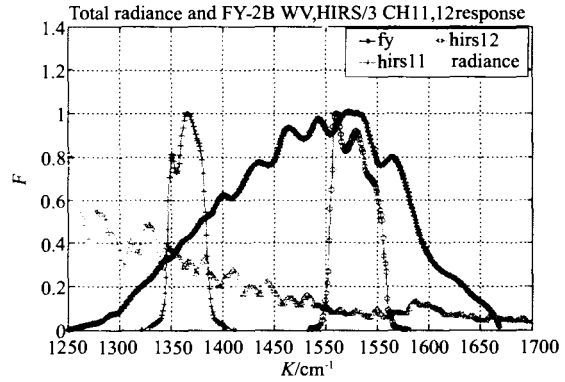


图3 总辐射与两卫星水汽通道光谱(波数)响应函数后示意图(NOAA-17)

Fig.3 Total radiance of IR band and FY-2B, NOAA-17 wv channel spectral response functions

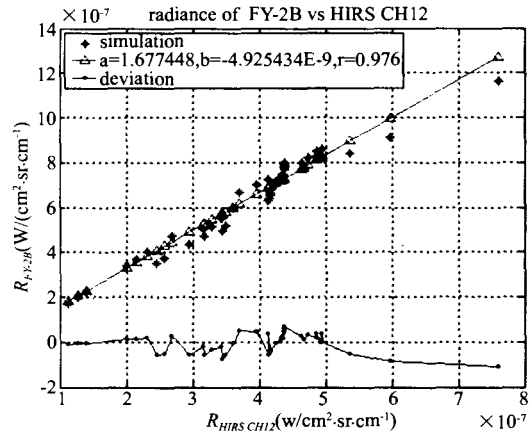


图4 FY-2B水汽通道与NOAA-17 HIRS/3的通道12光谱拟合结果

Fig.4 Spectral matching results of FY-2B wv channel and NOAA-17 HIRS/3 channel 12

对应的通道12计数值,从而由式(9)得到FY-2B水汽通道的辐亮度,用辐亮度与计数值的对应关系就能计算出定标系数.

表2为一段时间的相对定标结果.NOAA-17卫星HIRS/3通道12的定标系数基本不变,而FY-2B卫星水汽通道的系数和截距均有一定波动.

一般来说,定标斜率的绝对值变大才表示探测器响应衰减.但由于FY-2B水汽通道跳变后其通道的动态范围也出现大幅收窄的变化,使得定标斜率的绝对值变小(与发射前定标比较),这并不表示探测器灵敏度提高.

从2月到6月,由于太阳照射角度的变化,FY-2B星上环境温度变化较大,特别是二级辐冷温度将从95K升到100K.2003年卫星辐冷温度甚至升到了102.8K,超出了设计温度.辐冷温度直接决定了红外通道探测器的灵敏度, (下转第365页)

- acteristics of radiation reflection on rough metal surfaces with description of heat transfer parameters [J]. *JSME International Journal, Series B*, 1999, **42**(4): 745—751.
- [5] Rodriguez J, Gomez M, Ederth J, et al. Thickness dependence of the optical properties of sputter deposited Ti oxides films [J]. *Thin Solid Films*, 2000, **365**: 119—125.
- [6] Nijnatten P A. A pseudo-Fresnel approach for predicting directional optical properties of coated glazing [J]. *Thin Sol-*

id Films, 2001, **392**: 282—288.

- [7] HUANG Yong, LIANG Xin-Gang, Xia Xin-Lin, et al. Thermal emission characteristics of an anisotropic scattering medium layer with gradient index [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄勇,梁新刚,夏新林,等.各向异性散射梯度折射率介质层的热发射特性. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1): 49—52.

(上接第 360 页)

但水汽通道探测器却对辐冷温度的这些变化不太敏感. 相对定标的结果也说明了此点.

表 2 FY-2B 水汽通道与 NOAA-17 卫星 HIRS/3 通道 12 相对定标结果

Table 2 The inter-calibration results of FY-2B WV channel with channel 12 in HIRS/3 on NOAA-17 satellite.

时间	FY-2B 水汽通道 定标系数	截距	HIRS/3 通道 12 定标系数	截距
2003/02/16	-0.073124	19.23975	-0.037049	20.70293
2003/02/18	-0.061597	18.85464	-0.037051	21.11906
2003/02/19	-0.070299	20.41230	-0.037054	21.07536
2003/02/22	-0.061124	18.77404	-0.037061	21.10984
2003/02/25	-0.061546	18.03404	-0.037057	20.67189
2003/04/25	-0.086691	22.52301	-0.037081	20.92611
2003/04/30	-0.083272	20.63571	-0.037084	20.81677
2003/05/11	-0.062091	17.27405	-0.037091	20.77659
2003/05/13	-0.076598	19.35696	-0.037093	20.80562
2003/05/16	-0.07282	19.18052	-0.037089	20.72629
2003/05/20	-0.087970	21.93407	-0.037091	20.80586
2003/05/22	-0.076128	18.74260	-0.037092	20.64531
2003/05/25	-0.075133	19.52489	-0.037094	20.83763
2003/05/26	-0.073693	18.31944	-0.037093	20.78403
2003/05/27	-0.085470	20.64857	-0.037095	20.96291
2003/05/30	-0.067308	17.77303	-0.037095	20.71378
2003/06/3	-0.074592	19.57626	-0.037096	20.82886
2003/06/4	-0.074961	18.73601	-0.037095	20.78534
平均值	-0.073120	19.23975	-0.03705	20.70293

REFERENCES

- [1] RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu, HU Xiu-qing, et al. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2B meteorological satellite's ir channel [J]. *J. of Infrared Millim. Waves*, (戎志国,邱康睦,胡秀清,等. FY2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与在轨辐射定标比较, *红外与毫米波学报*) 2002, **21**: 408—412.
- [2] RONG Zhi-Guo. Calibration method of scanning radiometer on FY-2 satellite in orbit [J]. *Chinese Space Science and Technology*, (戎志国. FY-2 卫星扫描辐射仪在轨定标方法, *中国空间科学技术*) 2000, **20**: 67—71.
- [3] Mathew M. Gunshor, Timothy J. et al. Intercalibration of geostationary and polar-orbiting infrared window and water vapor radiances [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, **21**(1): 61—68.
- [4] Sohn B J, SCHMETZ J, Chung E S. Inter-calibration of the Meteosat-7 water vapor channel with SSM/T-2 [J]. *Journal of geophysical research*, 2000, **105**(D12): 673—680.
- [5] Stephen A Tjemkes, König M, Lutz Hans-Joachim. Calibration of meteosat water vapor channel observations with independent satellite observations [J]. *Journal of geophysical research*, 2001, **106**(D6): 5199—5209.
- [6] Yang Zhongdong, Gu Songyan, Qiu Hong, et al. Research on the algorithm of cross calibration about IRMSS on board aboard on CBERS-1 [J]. *J. of Infrared Millim. Waves*, (杨忠东,谷松岩,邱红,等. 资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究, *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(4): 281—285.

《红外与毫米波学报》2006 年征订启事

《红外与毫米波学报》是国内红外与毫米波科学技术领域唯一的学报类刊物,着重反映红外与毫米波领域的最新研究成果和技术进展,是中国和国际红外与毫米波学界交流最新研究成果的平台。读者对象:国内外红外与毫米波领域的科研人员,工程技术人员及高等院校师生、研究生等。

本刊为“中国自然科学核心期刊”、“中国科技核心期刊”,多次荣获国家和中国科学院“优秀期刊奖”,为《SCI》(美国科学引文索引)、《EI》(美国工程索引)、《CA》(美国化学文摘)、《SA/INSPEC》(英国科学文摘)等国际著名检索体系收录。

本刊为中、英文混排双月刊,大 16 开本、80 页,定价:10 元/期。国内外公开发行,全国各地邮局均有订阅,邮发代号:4-335。