

# 卫星高光谱红外大气探测的正演模拟研究

张鹏<sup>1</sup>, Pascal Brunel<sup>2</sup>, 董超华<sup>1</sup>, 张文建<sup>1</sup>

(1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. Centre de Meteorologie Spatiale/Meteo-France, Lannion/France, 22302)

**摘要:**利用精确的红外大气辐射传输计算模型 KCARTA, 模拟计算了光谱分辨率、通道光谱响应函数、光谱定标精度、大气倾斜路径和表面发射率对高光谱观测亮温的影响。正演计算的结果表明:1) 提高光谱分辨率明显增加了可探测的大气亮温;2) 各种内、外部因素的变化对高光谱仪器将产生远较较低光谱仪器更大的观测亮温差。本研究可为我国高光谱大气探测仪器的设计以及高光谱大气探测反演算法研究的开展提供科学的参考依据。

**关键词:**卫星; 红外; 高光谱; 大气探测; 正演模拟

**中图分类号:**TP79 **文献标识码:**A

## STUDY OF HYPERSPECTRAL IR ATMOSPHERIC SOUNDING WITH AN ACCURATE FORWARD SIMULATION

ZHANG Peng<sup>1</sup>, BRUNEL Pascal<sup>2</sup>, DONG Chao-Hua<sup>1</sup>, ZHANG Wen-Jian<sup>1</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Centre de Meteorologie Spatiale, Meteo-France, Lannion 22302, France)

**Abstract:** With a well-developed infrared radiation transfer model KCARTA, the effects of spectral resolution, spectral response function shape, spectral calibration accuracy, propagation path and surface emissivity on the detected brightness temperature for hyperspectral sounding were simulated. The results from forward simulation show: 1) improvement of spectral resolution will increase detectable brightness temperature 2) any uncertainties from internal and external factors will lead up to much larger brightness temperature difference for hyperspectral sensor than for low spectral sensor. Results can be taken as the reference in designing future hyperspectral IR sensors and in developing hyperspectral retrieval algorithm.

**Key words:** satellite; infrared; hyperspectral; atmospheric sounding; forward simulation

### 引言

根据美国科学家 King<sup>[1]</sup> 和 Kaplan<sup>[2]</sup> 提出的卫星红外大气探测原理, 美国上世纪七十年代设计了红外大气探测仪 HIRS。作为 NOAA 泰罗斯业务垂直探测系统 TOVS 和 ATOVS 的核心仪器, 二十多年来, HIRS 为天气预报模式提供了大量不可或缺的信息, 填补了海洋、沙漠、山脉等大片区域常规探测资料的空白。

对红外探测仪器来说, 当前主要的问题是仪器光谱分辨能力  $R$  (定义为通道中心波长  $\lambda$  和通道光谱响应函数半峰值宽度  $\Delta\lambda$  之比) 太低, 例如, HIRS 的  $R$  值在 50~200 之间。  $R$  值低, 会造成权重函数垂直分布太宽且互相重叠, 导致所获得的大气垂直结

构的分辨率不高; 另外还导致可用于定量反演的通道数目太少, 限制了反演精度的提高, 不能满足提高 NWP 预报准确率的需要<sup>[3]</sup>。目前, 美国和欧洲都在大力发展各自的星载高光谱仪器以提升大气探测的能力。例如已经上天的美国 Aqua 卫星上的 AIRS, 探测通道达到 2 378 个,  $R$  提高到 1 000 左右, 辐射测量的等效噪声温度优于 0.2K。从上世纪九十年代开始, 我国开始发展自己的星载高光谱红外大气探测仪器并计划装载于新一代的极轨风云三号 FY3 和静止风云四号 FY4 气象卫星系列之上, 大约于 2010 年前后投入使用, 实现我国气象卫星事业的跨越式发展。

高光谱大气探测, 光谱分辨率高, 观测信息量大, 对影响仪器观测精度的因素变化敏感, 因此高光

收稿日期: 2004-10-11, 修回日期: 2005-03-30

Received date: 2004-10-11, revised date: 2004-03-30

基金项目: 国防科工委 2002 民用航天预先研究项目 (GFY3-高光谱-2002) 资助项目

作者简介: 张鹏 (1970-), 男, 山西忻州人, 博士, 副研究员, 主要从事大气辐射传输和卫星大气遥感研究。

谱大气探测在仪器设计和反演方法上均会碰到新的问题. 本文利用精确的红外大气辐射传输计算模型 KCARTA, 从正演的角度讨论和分析了光谱分辨率、通道光谱响应函数、光谱定标精度、大气倾斜路径和表面发射率对高光谱大气探测的影响.

## 1 红外辐射传输及正演计算模型

红外辐射传输计算的核心是对垂直分层大气透过率  $t$  的计算, 如式(1) 所示

$$I_{\bar{\nu}}(0) = B_{\bar{\nu}}(T_s) t_{\bar{\nu}}(p_s) + \int_{p_s}^0 B_{\bar{\nu}}[T(p)] \frac{\partial t_{\bar{\nu}}(p)}{\partial p} dp. \quad (1)$$

式中变量均对仪器通道光谱响应函数取平均,  $I$  为大气顶向上出射光强,  $B$  为温度  $T$  对应的普朗克黑体发射光强,  $t$  为各气压高度  $p$  处的光谱平均大气透过率, 下标  $s$  代表地表.

根据透过率计算的方法, 国际上存在两类大气红外辐射传输的计算模型, 即精确模型和快速模型. 精确模型一般采用逐线积分 (LBL) 的方法, 即按红外光谱顺序, 依次、逐条地计算大气气体吸收谱线的贡献, 它是开展高光谱大气探测研究的基础. 本文采用的计算模型 KCARTA<sup>[4]</sup> 是一种准逐线积分的精确模型, 主要特点是利用了一套由 GELEN2<sup>[5]</sup> 预先逐线计算好的实际大气压力和温度格点的吸收系数库, 既保留了逐线积分的精度, 又很大程度地降低了计算需要的时间. KCARTA 将大气从 1 100 ~ 0.005 hPa 分成 100 层来计算, 模型中考虑了 CO<sub>2</sub> 线性混合、水汽连续吸收 (CKD) 等方面最新的研究成果, 根据 HITRAN 2 000<sup>[6]</sup> 的谱线汇编资料 (包括大气主要分子和原子的谱线位置、强度、标准大气状态下的谱线半宽、以及线强和半宽的温度和压力依赖关系等参数), 能精确地计算 605 ~ 2 805 cm<sup>-1</sup> 的大气红外辐射传输, 模型的光谱计算分辨率最大为 0.002 5 cm<sup>-1</sup>.

## 2 正演模拟计算及分析

正演计算中, 大气廓线数据选用了一种改进的 1976 年美国标准大气. 另外, 作为补充还选用了目前欧洲在反演中使用的具有全球代表性的 52 条温度、湿度和臭氧廓线<sup>[7]</sup>.

利用 KCARTA, 选择大气廓线类型, 计算出大气顶红外亮温光谱, 输出的光谱分辨率为模型分辨率 (0.002 5 cm<sup>-1</sup>) 在此基础上, 选取不同的通道光谱响应函数 SRF (对干涉式光谱仪等同于仪器线型参数 ILS) 作为扫描函数 (Scan Function) 对原始的亮温

光谱进行卷积, 卷积如式(2) 所示, 最终模拟不同参数下的仪器观测光谱并进行分析.

$$t_{\bar{\nu}}(p) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\bar{\nu}, \nu) t_{\nu}(p) d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\bar{\nu}, \nu) d\nu. \quad (2)$$

### 2.1 光谱分辨率影响

为了减小通道光谱响应函数形状对观测光谱的影响, 此处的模拟选用了矩形扫描函数(3)

$$\phi(\bar{\nu}, \nu) = \begin{cases} 1, & \bar{\nu} - \Delta\nu/2 \leq \nu \leq \bar{\nu} + \Delta\nu/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

上式  $\Delta\nu$  为通道的光谱宽度, 可视为卷积后获得的仪器光谱分辨率. 图 1 是用这种方法得到的 10 cm<sup>-1</sup> (曲线 A) 和 0.5 cm<sup>-1</sup> (曲线 B) 分辨率的大气顶亮温光谱 (1976 年美国标准大气), 为了方便区分, 图中的曲线 A 亮温人为增大了 50K. 图例中的两种分辨率大致分别相当于目前滤光片式大气探测仪器的最高水平 (10 cm<sup>-1</sup>) 和高光谱大气探测仪器所达到的水平 (0.5 cm<sup>-1</sup>).

图 2A 至 D 分别是 10、2、1 和 0.5 cm<sup>-1</sup> 4 种光谱分辨率红外光谱的亮温分布统计结果, 直方图的标准偏差分别为 1.19、0.67、0.55 和 0.47K. 从图中可以看到, 随着光谱分辨率的提高, 直方图的形态发生了明显变化. 一些低光谱中很少出现、甚至从未出现的亮温, 在高光谱中出现几率显著增加. 不同的亮温对应了不同高度的大气信息, 可探测的亮温越多, 可探测的大气高度也就越多. 因此, 光谱分辨率的提高是改进大气探测垂直分辨率的根本原因.

另外, 垂直探测分辨率提高的程度并不正比于光谱分辨率提高的程度, 它们之间的关系可以用亮温直方图的标准偏差近似表示. 例如, 光谱分辨率从 10 cm<sup>-1</sup> 波数提高到 1 cm<sup>-1</sup> 波数时, 标准偏差从 1.19 K 减小到 0.55K, 降低了约 1 倍, 而大气探测的垂直分辨率也大约提高了 1 倍左右. 国外有关的大气温、

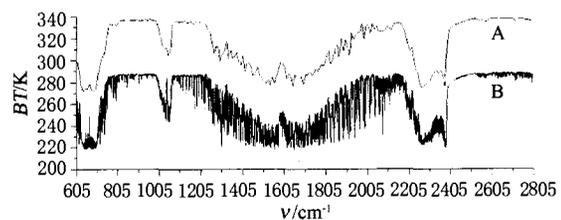


图 1 10 cm<sup>-1</sup> (曲线 A) 和 0.5 cm<sup>-1</sup> (曲线 B) 分辨率的大气顶亮温光谱

Fig. 1 Brightness temperature spectrum at top of atmosphere in spectral resolution 10 cm<sup>-1</sup> (curve A) and 0.5 cm<sup>-1</sup> (curve B)

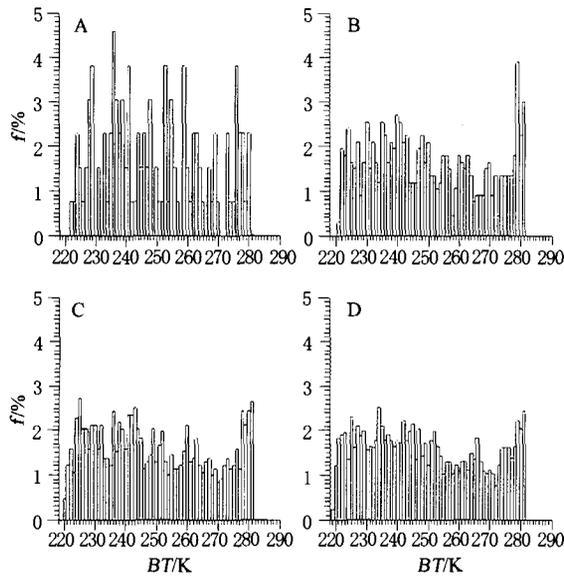


图2 大气顶光谱亮温分布的频次图,图A至D依次为光谱分辨率10、2、1、0.5  $\text{cm}^{-1}$   
Fig. 2 Probability of present brightness temperature at top of atmosphere, from A to D corresponds spectral resolution 10, 2, 1, 0.5  $\text{cm}^{-1}$

湿度廓线的反演数值试验,可以进一步证实这一结论<sup>[3]</sup>.

## 2.2 通道光谱响应函数影响

选取3种宽度的三角形函数(图3A线1、2、3)和1种矩形函数(图3A线4),以这些理想的通道光谱响应函数分别作为扫描函数,获得波数为  $1\text{cm}^{-1}$  量级分辨率的红外光谱,模拟通道光谱响应函数形状变化对观测亮温的影响. 矩形响应函数定义同式(3),三角形响应函数的定义如下:

$$\phi(\bar{v}, v) = \begin{cases} 1 + \frac{v - \bar{v}}{\Delta v}, & \bar{v} - \Delta v/2 \leq v \leq \bar{v} \\ 1 - \frac{v - \bar{v}}{\Delta v}, & \bar{v} \leq v \leq \bar{v} + \Delta v/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

以三角形响应函数为基准,进行比较. 表1列出了SRF形状改变造成的亮温差异,随着形状改变的增大,观测亮温误差越来越大. 即使在形状改变最小的试验1中(FWHM形变20%),整个光谱的观测亮温均方根误差仍然达到0.76K. 高光谱仪器设计中红外亮温测量的误差需要保证在  $\pm 0.5\text{K}$  以内,因此设计要求SRF的形变误差小于5%<sup>[8]</sup>. 图3B是试验1引起的热红外光谱亮温差的分布,整个光谱中观测亮温受SRF形变误差影响的差异很大,一些波长受到的影响非常严重,而另外一些波长则受到的影响很小. 需要指出,受影响的程度在光谱上是不固定

表1 SRF影响试验

Table 1 SRF influence experiments

SRF 试验	FWHM 比	最大正亮温差(K)	最大负亮温差(K)	亮温均方差(K)
试验1	0.8	2.76	-4.85	0.76
试验2	0.6	5.49	-11.84	1.68
试验3	2.0	8.66	-7.31	1.66

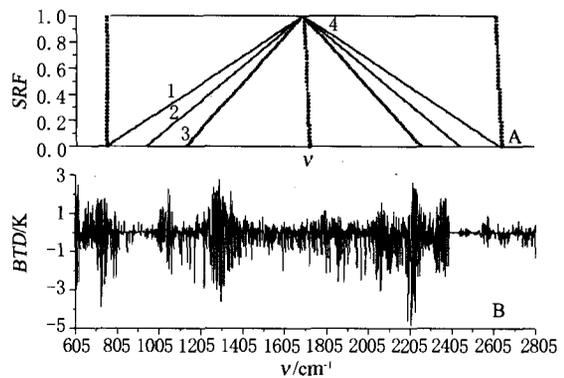


图3 通道光谱响应函数影响试验,A为四种通道光谱响应函数,B为试验1造成的亮温差  
Fig. 3 SRF influence experiments, A shows 4 shapes of SRF, B shows BTD spectrum caused by experiment 1

的,随大气廓线的不同而改变.

## 2.3 光谱定标精度影响

仪器标定的测量光谱同真实的物理光谱之间总是存在误差,测定的通道光谱中心会或左或右有一个微小的光谱偏移  $\delta$ . 特别对干涉式光谱仪而言,这个光谱偏移  $\delta$  是在整个观测光谱中都存在的系统定标误差<sup>[9]</sup>. 这里定义光谱定标误差为  $\delta/\Delta v$ , 其中  $\Delta v$  为仪器的光谱分辨率. 取  $\Delta v = 1\text{cm}^{-1}$ , 将1) 光谱曲线整体向右平移  $0.05\text{cm}^{-1}$  (试验1); 2) 光谱曲线整体向左平移  $0.05\text{cm}^{-1}$  (试验2); 3) 光谱曲线整体向右平移  $0.1\text{cm}^{-1}$  (试验3). 同平移前的光谱亮温进行比较,试验结果如表2所列. 结果表明,试验1、2引起的观测亮温差相当,随着光谱定标误差的增大,观测误差成比例增大.

图4为试验1的光谱定标误差引起的热红外光谱的亮温差分布. 由于在光谱平移过程中,曲线的形状不发生改变,平移在前一个位置造成的正亮温差,必然在随后的位置上造成一个负的亮温差,反之亦然,所以图4的亮温差曲线沿横坐标呈轴对称分布. 这个结果提供了一种从观测误差中分离和提取光谱定标误差的依据.

## 2.4 大气倾斜路径影响

当卫星在非星下点观测时,由于倾斜的视角,使

表2 光谱定标精度影响试验

Table 2 Spectral calibration influence experiments

光谱定标 试验	光谱定标 误差	最大 正亮温差 (K)	最大 负亮温差 (K)	亮温 均方差 (K)
试验1	5%	3.16	-3.29	0.69
试验2	5%	3.06	-2.80	0.66
试验3	10%	6.38	-6.21	1.36

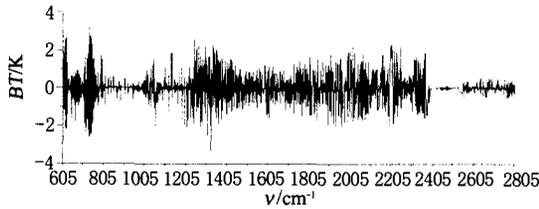


图4 光谱定标误差试验1所造成的亮温差

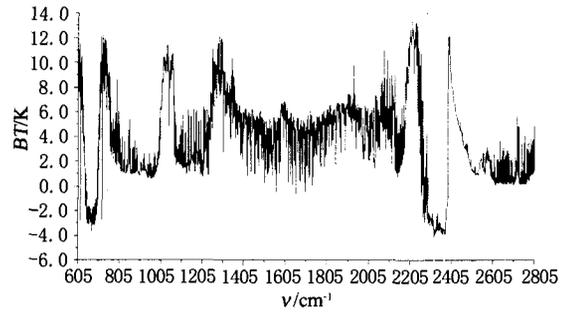
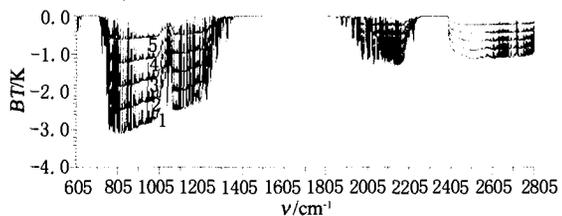
Fig. 4 BTD spectrum caused by experiment 1 of spectral calibration accuracy influence

观测路径要比垂直路径长  $\sec\theta$  倍 ( $\theta$  为卫星视角). 大气倾斜路径可以降低大气顶亮温,也可以增加大气顶亮温,是卫星观测中需要订正的因素之一. 图5是  $1\text{cm}^{-1}$  光谱分辨率垂直路径(星下点)减倾斜路径 ( $60^\circ$  观测视角)热红外光谱的亮温差结果,大气顶亮温的减小最大可达  $12\text{K}$  以上,而增加最大可达  $4\text{K}$  左右.

在大气吸收率尚未饱和为1的吸收带翼区及窗区,倾斜路径增加了吸收路径的长度,降低了大气透过率,因而穿透高层大气到达大气顶的地表及低层大气(温度较高)的能量减小,该效应导致大气顶亮温降低;在大气吸收率已经饱和的强吸收区,大气顶向上辐射主要来自高层大气的发射,倾斜路径增加了高层大气的发射,这种效应导致大气顶亮温升高,如  $\text{CO}_2$  的  $15\mu\text{m}$  和  $4.3\mu\text{m}$  强吸收带. 因此,在订正观测角度对卫星亮温的影响时,除了要考虑大多数光谱区域,倾斜路径对观测亮温的减小外,也不能忽略对  $15\mu\text{m}$  和  $4.3\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  吸收带亮温增加部分的订正. 如果订正不当,会对观测引入更大的误差.

### 2.5 地表发射率影响

在红外大气探测当中,常常将地球表面(包括陆表和海表)作为黑体近似处理. 实际的地球表面,其发射率一般在  $0.95 \sim 1$  之间,如果用黑体发射率1代替,将会低估表面的实际物理温度. 图6是地表发射率分别取  $0.95, 0.96, 0.97, 0.98$  和  $0.99$  时,同黑体发射比较所造成的亮温差. 表面发射偏离黑体的程度越大,引起的亮温误差越大. 另外,在靠近地球发射的能量峰值附近 ( $700 \sim 1000\text{cm}^{-1}$ ),引起的亮温误差最大;距热红外发射能量峰值越远,亮温误

图5 倾斜路径 ( $60^\circ$  观测视角) 造成的亮温差Fig. 5 BTD spectrum caused by slash path ( $60^\circ$  view angle)图6 表面发射率造成的亮温差,曲线1到5分别是  $0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.99$  时的结果Fig. 6 BTD spectrum caused by surface emissivity, curve 1 to 5 represents the results from  $0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.99$ 

差随之减小. 当表面发射率为  $0.95$  时,观测亮温的减小最大可达  $2 \sim 3\text{K}$  左右.

在大气强吸收谱带 ( $15$  和  $4.3\mu\text{m}$   $\text{CO}_2, 6.3\mu\text{m}$  水汽), 整层大气的透过率为零,大气吸收了全部的地球表面发射. 这时大气顶的热红外辐射全部来自大气的发射,因而,表面发射率的变化对这些吸收带内的大气顶热红外辐射没有影响.

### 3 结语

高光谱红外大气探测是传统红外大气遥感同高光谱分辨率的观测技术相结合的一个新的发展和研究方向,本文通过精确的正演模拟计算,获得了以下几点主要结论:

1. 对大气顶亮温光谱的统计发现,光谱分辨率的提高明显增加了可探测的亮温,从而使大气垂直探测的能力提高. 利用亮温统计分布的标准偏差,还可以定量地估计垂直分辨率提高的程度.

2. 综合各种影响试验的结果可以发现,同等程度的干扰因素对高光谱仪器造成的观测误差远比低光谱仪器要大. 因此,除在仪器研制中必须提高辐射和光谱定标的精度外,在反演过程中还必须引入降低和消除误差影响的处理方法.

3. 在红外光谱中,一些通道受误差影响非常大,而另一些通道受到的影响则比较小.原则上,受影响小的通道是反演算法中首选的理想通道.但需要注意的是,这些受影响小的通道在光谱上的位置并不是固定的,而是随着大气的温度、组份等状态变化的.因此在反演算法发展中,如何从高光谱的上千个通道中随大气状态的改变动态地选择理想的反演通道,既改进反演精度,又提高反演效率,是一项全新的、挑战性的课题,应该是今后高光谱大气探测反演算法中迫切需要解决的难点.

**致谢** 感谢作者法国合作工作期间,法国气象局空间气象中心(CMS/Meteo-France)H. Roquet、G. Rochard、D. Patrick 给予的帮助.

### REFERENCES

- [1] King J I F. *The Radiative Heat Transfer of Planet Earth*. In "Scientific Uses of Earth Satellites" [M]. Ann Arbor: Univ. of Michigan Press, 1956. 133—136.
- [2] Kaplan L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurements [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49** (10): 1004—1007.
- [3] Smith W L, D K Zhou, F W Harrison, *et al.* Hyperspectral remote sensing of atmospheric profiles from satellites and aircraft [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4151**:94—102.
- [4] Strow L L, Motteler H E, Benson R G, *et al.* Fast computation of monochromatic infrared atmospheric transmittances using compressed lookup tables [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1998, **59**(3—5): 481—493.
- [5] Edwards D P. GENLN2-A general line-by-line atmospheric transmittance and radiance model, NCAR technical note [R]. NCAR/TN-367 + STR, Boulder, CO. 1992.
- [6] Rothman L S, A Barbe, D Chris Benner, *et al.* The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2003, **82**(1—4): 5—44.
- [7] Chevallier F. Sampled databases of 60-level atmospheric profiles from the ECMWF analysis [R]. EUMETSAT SAF Program Research Report No. 4, ECMWF, 2001.
- [8] Aumann, H H, Gregorich D, Gaiser S, *et al.* AIRS algorithm theoretical basis document level 1B [R]. Jet Propulsion Laboratory, 2000.
- [9] Persky M J. A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for remote sensing [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(10): 4763—4797.

## 2006 年《红外与毫米波学报》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,是中国与国际红外与毫米波学术界交流最新研究成果的平台。

主要报导:红外与毫米波领域的新概念、新成果、新进展。主要刊登在红外物理、凝聚态光学性质、低能激发过程、飞秒光谱学、非线性光学、红外光电子学、红外与毫米波技术(包括元器件、系统及应用)、智能信息技术和人工神经网络等方面有创新的论文,具有国际、国内先进水平的研究报告和阶段性研究简报及高水平的述评。

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。

本刊由中国科学院上海技术物理研究所和中国光学学会共同主办,中国科学出版社出版,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。

本刊为《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》(美国科学文摘)、AJ《俄罗斯文摘杂志》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。