文章编号 1674-2915(2013)02-0156-07

# 大气痕量气体遥感探测仪发展现状和趋势

赵其昌*,杨 勇,李叶飞,董长哲
(上海卫星工程研究所,上海200240)

**摘要**:阐述了大气痕量气体探测技术的发展历程;详细介绍了几种国外先进的大气痕量气体遥感探测仪器的设计理念、工作原理和功能、工作模式、谱段设置和主要技术指标。讨论了我国遥感用星载大气痕量气体探测仪器的发展现状,给出了两种典型探测仪器的工作模式、谱段设置和主要性能指标。指出了未来星载大气痕量气体探测仪器的发展方向是提高遥感仪器的光谱分辨率、空间分辨率、灵敏度和定标精度以及发展主动遥感技术等,意在为我国今后这一领域的发展提供借鉴。

**关 键 词**:大气痕量气体;污染气体;光谱分辨率;遥感探测仪
**中图分类号**:TP722.3; X851 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20130602.0156

# Development status and trends of atmospheric trace gas remote sensing instruments

ZHAO Qi-chang*, YANG Yong, LI Ye-fei, DONG Chang-zhe
(*Shanghai Institute of Satellite Engineering*, *Shanghai* 200240, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zhao*031111@163. *com*

**Abstract**: The development of atmospheric trace gas detection technology is elaborated. The design concepts, working principles and apparatus functions, working modes, spectrum setting and the main technical indicators of several kinds of advanced atmospheric trace gas remote sensing instruments are introduced in detail. Then, the present situation of the atmospheric trace gas detection apparatus on remote sensing satellite in China is discussed, and the working models, spectral set and other technical indicators for two typical remote sensing instruments are given. Finally, the future development direction of spaceborne atmosphere trace gas detection instrument is pointed out, which involves the improvements of the spectral resolution, spatial resolution sensetivity and calibration accuracy of the instrument and the development of active remote sensing technology. These provide a reference for the development of our country's satellite atmospheric trace gas detection apparatus.

**Key words**: atmospheric trace gase; polluting gase; spectral resolution; remote sensing instrument

收稿日期:2012-11-21;修订日期:2013-01-23

# 1　引　言

大气痕量气体是指大气中浓度低于 $10^{-6}$ 的微量气体,如 $CH_4$、CO、$O_3$、$NO_2$、HCHO、BrO、OCLO 、$SO_2$、卤化物、有机化合物等。它们中有些是天然排放的,但近年来受人类活动的影响,这些痕量颗粒受到各种物理、化学、生物过程的作用并参与生物地球化学的循环,对全球大气环境、生态及气候产生了重大的影响,如化学烟雾、酸雨、温室效应、臭氧层破坏等均与痕量气体有关。

气候变化已成为当今国际社会普遍关心的全球性问题,对全球气候变化的监测与分析不仅是一个涉及国民健康、经济社会可持续发展的科学和技术问题,而且已经成为一个涉及到国家安全和国际环境外交的政治问题、经济问题。因此,大气痕量气体的在轨遥感探测已成为当前大气遥感中的一个重要领域和发展方向。

利用遥感仪器对大气痕量气体($CH_4$、CO、$O_3$、$NO_2$、HCHO、BrO、OCLO 和 $SO_2$)的分布和变化进行探测,可以定量获得区域及全球空气质量变化以及污染气体和气溶胶的分布输运过程,监测工业排放和生物燃烧对大气组成成分、全球气候变化的影响,并最终服务于建立区域和全球范围的大气成分监测与预警技术体系[1-2]。

# 2　国外的痕量气体遥感探测仪器

遥感是实现全球和区域大气痕量气体监测最有效的方法和技术,世界上主要遥感大国都对 CO、$CH_4$、$O_3$ 等痕量气体进行了天基监测并提出了监测发展规划,其中,欧洲、日本、美国的研发项目具有较大的影响力。

## 2.1　SCIAMACHY

大气制图扫描成像吸收光谱仪(The Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Chartography,SCIAMACHY)[3-5] 搭载于欧州航空局 2002 年 3 月成功发射的一颗欧洲环境卫星 ENVISAT 上,是 8 通道光栅式光谱仪,用于研究同温层臭氧损失和对流层空气质量。

SCIAMACHY 由光机探测头部、辐射制冷器和电控箱 3 部分组成。为了实现 240 ~ 2 380 nm 宽波段的测量,SCIAMACHY 采用双单色仪方案。经扫描镜和望远镜聚焦于谱仪入射狭缝处的光辐射首先被色散棱镜分成 8 个波段,每个通道中的光栅进一步将光辐射色散形成高分辨率光谱(0.2 ~ 0.5 nm)并聚焦于 1 024 pixel 的线阵探测器上,见图 1。在紫外到可见区(240 ~ 1 050 nm)使用 Si 线阵列探测器,近红外区使用 InGaAs 线阵列探测器。这些探测器通过热总线装置(TBU)

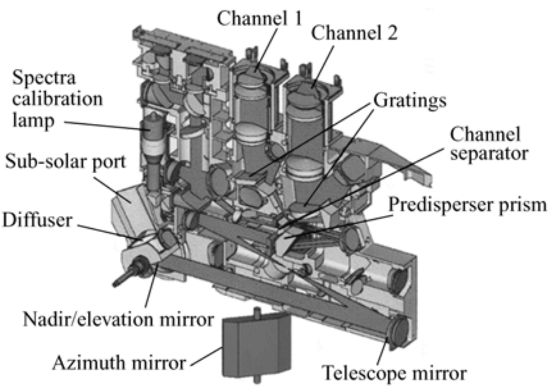



图 1　SCIAMACHY 结构示意图[6]

Fig. 1　Structure diagram of SCIAMACHY

与辐射制冷器连接被冷却至 150 ~ 235 K。前置色散棱镜同时也作为 Brewster 窗分离一部分偏振光送入偏振测量装置(PMD),其输出用于矫正偏振误差。狭缝反射光辐射直接进入太阳跟随器,它在掩日、掩月测量时控制扫描镜,用于跟踪日、月。每个光谱通道都配有一个探测器电子学模块(DME),DME 控制相关探测器读出信号、放大模拟信号并执行AD变换,每个通道的数字信号被

**表 1　SCIAMACHY 主要技术指标**

**Tab. 1　Main technical indexes of SCIAMACHY**

| Project | SCIAMACHY |
|---|---|
| Spectral range/nm | 240 – 2 380 |
| Wavelength accuracy/nm | ±0.01 |
| Observation mode | Nadir, Limb, Occulting |
| Spectral resolution/nm | 0.22 – 1.4 |
| Spatial resolution/km | 3 × 120(Limb, Occulting), 30 × 60(Nadir) |

送入科学数据处理单元(SDPU)。SDPU控制DME,获得、处理数据并将其送入S/C测量数据界面,系统控制单元从S/C获得命令自动控制整个系统操作并反馈遥感数据。表1给出了SCIAMACHY的主要技术参数。

## 2.2 GOME

全球臭氧监测试验装置(Global Ozone Monitoring Experiment,GOME)搭载于ERS2太阳同步轨道卫星,用于探测同温层和对流层大气中各种组分,如痕量气体、气溶胶和云的分布情况[7]。GOME的谱段为240~790 nm,光谱分辨率在240~400 nm为0.2 nm,在400~790 nm为0.4 nm,空间分辨率为40 km×40 km,光路图如图2

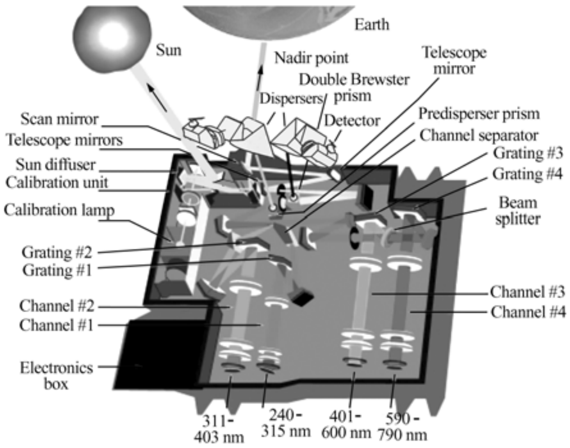



图2 GOME光路示意图

Fig.2 Optical path diagram of GOME

所示。GOME是扫描成像光谱仪,由扫描镜及其控制系统、光学系统、焦平面组件、偏振测量系统、定标组件和电子学处理电路组成。240~790 nm波段分成4个通道,其中240~405 nm的光被通道分离器(有反射和透射涂层的棱镜)分成240~295 nm和290~405 nm两个紫外通道;405~790 nm的光被一个双色反射镜分成405~605 nm和590~790 nm两个通道。每个通道都采用一个1 024 pixel的硅线阵探测器[8-9]。为了定量化科学应用,GOME设置了专门的定标系统,提供仪器在轨定标。定标系统从电子学处理电路接到命令后,打开定标光源和快门,进行定标。通过遥测数据可连续监测电流值、温度及快门的状态等。表2给出了GOME的主要技术参数。

**表2 GOME主要技术指标**

**Tab.2 Main technical indexes of GOME**

| Project | GOME |
|---|---|
| Spectral range/nm | 240~790 |
| Wavelength accuracy/nm | ±0.02 |
| Observation mode | Nadir |
| Spectral resolution/nm | 0.22~0.4 |
| Spatial resolution/nm | 32×32(Nadir) |

## 2.3 OMI

美国和欧洲共同组织研制的新一代痕量气体监测仪—臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument,OMI)(见图3),主要用来精确测量地球大气中$O_3$总量及分布,研究大气中$O_3$的变化趋势,同时可以获得云和气溶胶参量以及其他痕量气体含量及其分布[10-11]。

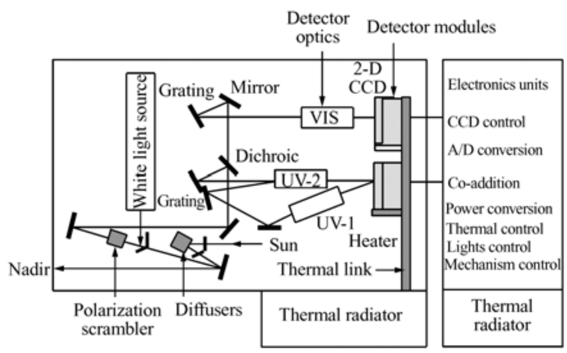



图3 OMI光路示意图

Fig.3 Optical path diagram of OMI

OMI是一种气体成分探测仪,其通过测量地球大气和地球表面的后向散射辐射,利用331.2和317.5 nm处臭氧的强吸收峰进行臭氧总量的探测和反演。OMI的波长为270~500 nm,光谱分辨率达0.42 nm,空间分辨率为13 km×24 km,视场为114°,幅宽为2 600 km。所以,OMI比GOME和SCIAMACHY具有更高的空间分辨率,并且具有一天覆盖全球的优势,首次提供了每天的全球臭氧及其它污染物的测量结果。

OMI是一台高光谱成像仪,扫描方式为推扫,用于探测可见光和紫外波段太阳后向散射辐射。采用高光谱探测改进了臭氧测量精度,并且可以进行在轨的辐射和光谱定标。地球后向散射经扫

描镜进入视场后,由宽视场望远镜将光信号分别引入两个光栅光谱仪,每个光谱仪使用各自的 CCD 探测器。星上定标系统包括白光源、发光二极管和漫射器。表 3 为 OMI 的主要技术指标。

**表 3　OMI 主要技术指标**

**Tab. 3　Main technical indexes of OMI**

| Project | OMI |
|---|---|
| Observation mode | Nadir |
| Target detection | Total ozone, profile; $NO_2$、HCHO、BrO、OClO、$SO_2$(Total) |
| Field of view | 114°(level 2 600 km); 13 km × 24 km, 13 km × 48 km |
| Channels × spectral resolution | Vertical distribution: 270 − 310 nm × 0.63 nm; Total ozone: 310 − 365 nm × 0.42 nm; Other ingredients: 365 − 500 nm × 0.63 nm |
| Global coverage time | One day |

## 3　国内的痕量气体遥感探测仪器

国内大气痕量气体遥感探测仪器的研制起步较晚,比较有代表性的是 2009 年入轨的紫外臭氧总量探测仪(TOU)和正在研制的大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI),其中 TOU 成功应用在 $O_3$ 监测方面并发挥了重要作用。

### 3.1　TOU

TOU 用于大气臭氧总量全球分布定量测量,其通过测量地球大气对太阳紫外波段的后向散射来反演全球臭氧总量全球分布,为全球气候变化研究、气候预报和环境监测提供重要参数。

TOU 为一个 6 通道分光光度计,光机头部由扫描镜及其控制系统、前光学部分、分色片、波长选择调制器、后光学部分、探测器组件、辐射定标装置、波长监测装置和电子学控制、处理系统组成,具有 3 种工作模式,即对地扫描模式、波长监测模式和辐射定标模式[12-13]。其光谱特性和技术指标见表 4、表 5。图 4 给出了其光路示意图。大气紫外后向散射辐射经扫描镜、前光学部分后

**表 4　TOU 通道中心波长和带宽**

**Tab. 4　Center wavelength and bandwidth of TOU channels**

| Channel | Center wavelength/nm | Bandwidth/nm |
|---|---|---|
| 1 | 308.68 ± 0.15 | 1.0 + 0.3, − 0.0 |
| 2 | 312.59 ± 0.15 | |
| 3 | 317.61 ± 0.15 | |
| 4 | 322.40 ± 0.15 | |
| 5 | 331.31 ± 0.15 | |
| 6 | 360.11 ± 0.25 | |

**表 5　TOU 主要性能指标**

**Tab. 5　Main technical indexes of TOU**

| Parameter | Performance indicator |
|---|---|
| Sensitivity | ≤0.0014 $\mu W/cm^2 \cdot sr \cdot nm$($S/N = 1$) |
| Scan range | 31 sampling points |
| Line scan time/s | 8.16 |
| Calibration accuracy | Brightness, irradiance 2%; Spectrum 0.03 nm |
| Quantization levels/bit | 12 |
| Stray light | $< 10^{-3}$ |
| Nadir ground resolution/km | ~50 |

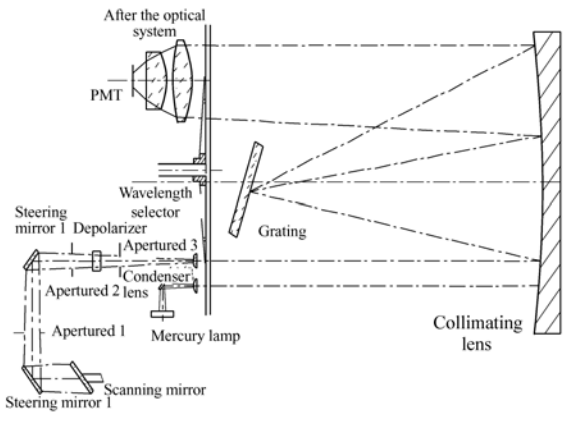



图 4　TOU 光路示意图

Fig. 4　Optical path diagram of TOU

进入分色片,经光栅分光后由波长选择调制系统将6个测量波段送给光电倍增管,光电倍增管的输出由前置放大器放大后,经过A/D转换,将模拟信号变为数字信号,最后由远置单元经发送给卫星并下传。

### 3.2 EMI

EMI用于监测气候和生态环境有重要影响的痕量气体($O_3$、$NO_2$、HCHO、BrO、OCLO和$SO_2$)的分布和变化,仪器光谱为240~710 nm,采用4个光谱通道(240~315 nm、311~403 nm、401~550 nm、545~710 nm),仪器在太阳同步轨道进行天底观测,刈幅宽度为2 600 km。仪器的主要指标见表6。

**表6 EMI主要指标**

**Tab.6 Main technical indexes of EMI**

| Parameter | Performance indicator |
|---|---|
| Scan range/nm | 240-315 nm, 311-403; 401-550, 545-710 |
| Spectral resolution/nm | 0.3-0.5 |
| Radiation calibration precision/% | Absolute accuracy 5, Relative accuracy 3 |
| Spectral calibration accuracy/nm | Be better than 0.05 |
| Work mode | Nadir sweeping, calibration model |
| Total field of view/(°) | 114(Cross track) |
| Spatial resolution/km | 48×13 |
| Quantization levels/bits | 14 |

EMI由离轴三反望远镜、光路切换装置、漫反体切换装置、卤素灯、4台光谱仪、4片背照帧转移面阵CCD探测器及热电制冷模块组成。光路示意图如图5所示。

EMI采用推扫方式获取来自地球的入射辐射,入射辐射通过仪器前置光学系统会聚后进入中继光学系统,经中继光学的分色片分光并会聚后分别进入4个独立光谱仪,由光谱仪内的Offner光学组件完成色散后,传输至各光谱仪相应的面阵探测器完成空间和光谱信息记录,再经A/D、编码后传至数传。仪器在轨采用太阳光与标准灯实现光谱与辐射定标。

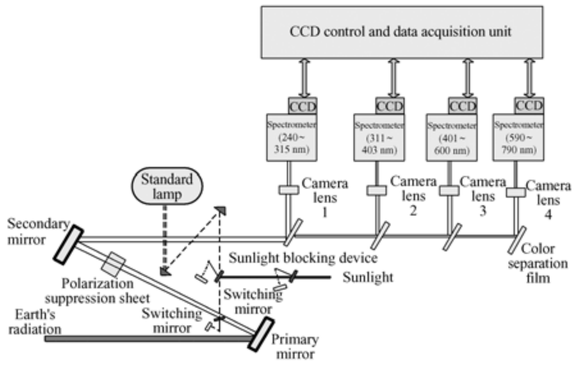



图5 EMI光路示意图

Fig.5 Optical path diagram of EMI

## 4 痕量气体遥感探测仪器的发展趋势

为应对全球气候的变化,各国已越来越重视对全球和区域大气痕量气体的监测,而大气痕量气体探测对精度要求越来越高。如国内正在研制的大气痕量气体差分吸收光谱仪和紫外高光谱臭氧廓线探测仪的光谱分辨率要求为0.3 nm,灵敏度要求为mW量级,杂散光量级为$10^{-4}$,其主要技术方案采用高效率的光栅光谱仪结合高性能的大规模探测器组件实现高精度的定量探测[14-15]。可见,为了满足大气痕量气体高精度、高灵敏度的探测需求,未来痕量气体遥感仪器应重点发展以下几个方面。

(1)提高光谱分辨率

为了细分痕量气体及其变化,必须增加探测通道,进而要求提高光谱分辨率。提高光谱分辨率的途径常采用光栅式或干涉式分光方式,但同时必须要保证信号能量。

(2)提高空间分辨率

为了满足地球化学探测的需求,要求遥感仪器的空间分辨率越来越高,例如:臭氧探测仪器由50 km提高到13 km。

(3)提高仪器的灵敏度和定标精度

为了准确反映所观测目标的真实情况,提高观测数据反演精度,痕量气体探测仪器需要提高仪器的灵敏度和定标精度。

(4)发展主动遥感

为了精确获取痕量气体的变化信息,遥感卫星需要配置一些主动遥感仪器,如激光雷达等。

## 5　结束语

大气痕量气体遥感观测技术可以经济、快速地获取宏观尺度上大气痕量气体的信息,相对于传统的监测站方式具有无可比拟的优势,欧美发达国家都相继开展了大气痕量气体遥感探测仪器的研究,以期掌握痕量气体循环的第一手资料。

为满足越来越高的应用需求,大气痕量气体遥感探测仪器经过了几十年的发展,其功能和性能指标不断提高。国内外已经在轨的痕量气体遥感探测仪器在气候变化研究中发挥了重要的作用,未来的遥感探测仪器的发展将在痕量气体监测方面产生更重要的影响。为具有更多的话语权,我国应该积极发展痕量气体遥感探测仪器,从而为区域和全球气候变化研究提供强有力的科技手段。

**参考文献:**


[1] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. 中国光学,2011,4(6):546-561.
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gased[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):546-561. (in Chinese)

[2] 刘倩倩,郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. 中国光学,2012,5(6):566-577.
LIUQ Q,ZHENG Y Q. Development of spectral balibration technologies with ultra-high resolutions[J]. *Chinese Optics*,2012,5(6):566-577. (in Chinese)

[3] MAGER R,FRICKER W,BURROWS J P,*et al*.. Sciamachy a new-generation of hyperspectral remote sensing instrument[J]. *SPIE*,1997,3106:84-94.

[4] BOVENSMANN H,BURROWS J P,BUCHWITZ M,*et al*.. Sciamachy:mission objectives and measurement modes[J]. *American Meteorological Society*,1999,56(2):127-150.

[5] BURROWS J P,SCHNEIDER W,GEARY J G,*et al*.. Atomospheric remote sensing with Sciamachy[C]. Degest of 4th Topical Meeting on Optical Remote Sensing of the Atmosphere,Washington,USA,1990,4:71-74.

[6] DOBBER M R. Calibration of the sciamachy instrument on the esa-envisat satellite[J]. *SPIE*,1999, 3750:407-418.

[7] BURROWS J P,WEBER M,ROZANOV V,*et al*.. The global ozone monitoring experiment(GOME):mission concept and first scientific results[J]. *J. Atoms. Sci.*,1999,6:151-175.

[8] PEREZ A,MUNRO R,EISINGER E,*et al*.. The new generation of GOME instrument in infrared spaceborne romote sensing[J]. *SPIE*,1999,4486:334-343.

[9] 江文华,马建中,颜鹏,等. 利用 GOME 卫星资料分析北京大气 $NO_2$ 污染变化[J]. 应用气象学报,2006,17(1):67-72.
JIANG W H,MA J ZH,YAN P,*et al*.. Characterization of $NO_2$ pollution changes in Beijing using GOME satellite data[J]. *J. Appl. Meteorology*,2006,17(1):67-72. (in Chinese)

[10] LEVELT P F,VANDENOORD G H J,DOBBER M R,*et al*.. The ozone monitoring instrument[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*,2006,44(5):1093-1101.

[11] DOBBER M R,DIRKSEN R J,LEVELT P F,*et al*.. Ozone monitoring instrument calibration[J]. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*,2006,44(5):1209-1238.

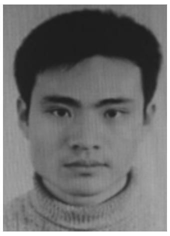
[12] 王咏梅,王英鉴,王维和,等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪[J]. 科学通报,2009,23:194-199.
WANG Y M,WANG Y J,WANG W H,*et al*.. FY-3 satellite the sonde of total ozone for UV[J]. *Chinese Sci. Bull.*,2009,23:23-27. (in Chinese)

[13] 王英鉴,王咏梅,张仲谋. 紫外臭氧总量探测仪的设计和定标[C]//中国空间科学学会第七次学术年会,大连,中国,2009-08-28:12-17.
WANG Y J,WANG Y M,ZHANG ZH M. Design and calibration for the sonde of total ozone for UV[C]//Chinese Space Science Institute of the Seventh Academic Annual Meeting,Dalian,China,Aug. 28-30,2009:12-17. (in Chinese)

[14] 郑玉权,高志良. $CO_2$ 探测仪光学系统设计[J]. 光学 精密工程,2012,20(12):2645-2653.
ZHENG Y Q,GAO ZH L. Optical system design of $CO_2$ sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(12):2645-2653. (in Chinese).

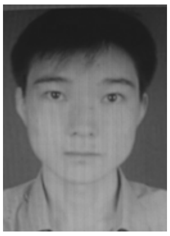
[15] 郑守国,李淼,张健,等. 痕量 $N_2O$ 气体检测系统的设计与实现[J]. 光学 精密工程,2012,20(10):2154-2160.
ZHENG SH G,LI M,ZHANG J,*et al.*. Design and implementation of trace $N_2O$ detection system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(10):2154-2160. (in Chinese)

**作者简介:**



赵其昌(1984—),男,河南周口人,硕士,工程师,2007年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航天器总体设计、遥感图像处理方面的研究。E-mail:zhao031111@163.com

李叶飞(1979—),女,江苏常州人,硕士,高级工程师,2002年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2007年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事光学遥感图像处理方面的研究。E-mail:liyefei@509.sast.casc



杨 勇(1983—),男,山东济宁人,硕士,工程师,2006年于山东师范大学获得学士学位,2008年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事微波遥感图像处理方面的研究。E-mail:yangyong3@509.sast.casc

董长哲(1986—),男,安徽蚌埠人,硕士,工程师,2008年于电子科技大学获得学士学位,2011年于航天科技集团公司五院获得硕士学位,主要从事大气产品反演、遥感图像处理方面的研究。E-mail:dongchangzhe@509.sast.casc