

杨忠东, 刘健. 气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革. 应用气象学报, 2016, 27(5): 592-603.
doi:10.11898/1001-7313.20160508

气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革

杨忠东* 刘健

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要

该文回顾了环境气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器 50 多年的发展历程, 从不同时期在轨运行的近百台(套)仪器中选择了 12 种作为代表, 结合仪器功能性能技术指标和应用需求梳理分析了其历史发展脉络和主流业务发展趋势, 并初步探讨了创新发展方向。50 多年的发展可以分为 3 个阶段: 早期探索 20 年, 美国第 1 代探索性仪器, 开创了气象卫星对地观测的先河; 初步应用 20 年, 基本形成初步应用格局, 欧洲、中国等开始发展自己的环境气象卫星光学成像遥感仪器; 稳定应用和进步发展 10 多年。新一代极轨卫星可见光红外光学成像遥感仪器, 其典型特征是光谱波段 20 个以上, 谱段带宽窄, 光谱范围全面覆盖 $0.4 \sim 15 \mu\text{m}$, 辐射测量精度高, 空间分辨率为 $200 \sim 1000 \text{ m}$, 其改进型仪器代表了未来极轨气象卫星主流业务发展趋势。静止气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器未来主流业务发展方向的典型特点是光谱波段 15 个以上, 谱段带宽较窄, 光谱范围全面覆盖 $0.4 \sim 15 \mu\text{m}$, 辐射测量精度高, 空间分辨率为 $500 \sim 2000 \text{ m}$, 圆盘图成像速度可达到分钟级, 区域扫描速度更快。

关键词: 气象卫星; 可见光红外成像仪; 发展

引 言

可见光红外光学成像遥感仪器既是气象卫星发展最早的对地观测仪器, 也是最主要的仪器, 是大气水汽、云、地表、海表光学特征和热学特征空间对地成像观测不可或缺的技术手段。这些观测结果在天气分析、数值天气预报模式辅助应用、气候研究和预测、环境与灾害监测和预警等方面发挥着主要的、不可或缺的作用。

本文的可见光红外光学成像遥感仪器是指具有以固定时间周期连续扫描、空间无缝采样成像能力的仪器。空间分辨率达几百米到一公里, 幅宽为两三千公里。低轨具备单日完成白天和黑夜全球成像能力, 高轨具备几十分钟到几分钟圆盘图成像能力和区域更高空间分辨率、更快速成像能力。由可见光、近红外、短波红外、中波红外和热红外多波段的几个或几十个光谱通道组成, 光谱带宽一般为 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$, 由分色片或滤光片分光, 光谱范围覆盖 $0.4 \sim 15 \mu\text{m}$ 。

在低轨上一般是跨轨旋转扫描加卫星运动合成形成二维图像, 在高轨上, 早期自旋稳定平台是一维借助自旋扫描加另一维步进运动成像, 先进的三轴稳定卫星平台上仪器二维扫描成像。功能齐全、性能先进的可见光红外光学成像遥感仪器可以观测反演得到很多地球物理变量, 从地球大气方面的云分类和云微物理特征, 气溶胶光学和物理特征, 到陆地表面温度、光谱反射率及其衍生的陆地生态环境变量, 以及海面温度、海洋水色及其衍生海洋生态环境变等。

从 20 世纪 60 年代初期开始, 可见光红外光学成像遥感仪器已经有 50 多年的发展历程。大致可以分为 3 个阶段: ①早期探索 20 年(20 世纪 60—70 年代), 以美国泰罗斯 (Television and Infra-Red Observation Satellite-8, TIROS-8) 卫星^[1], 和雨云 (Nimbus) 1 号和 2 号卫星上安装的光导纤维摄像机等为代表的第 1 代可见光成像探索性仪器, 开创了气象卫星对地观测先河; ②初步应用 20 年(20 世纪 80—90 年代), 以美国 NOAA 卫星上的先进可见光红外旋转扫描辐射计 (Advanced Very High Resolution

2016-06-27 收到, 2016-07-15 收到再改稿。

* email: yangzd@cma.gov.cn

Radiometer, AVHRR)等为代表,经过 AVHRR/2/3 不断发展,积累了 30 多年长时间序列历史数据,奠定了广泛应用基础;③稳定应用和进步发展 10 多年(2000 年以来),以美国 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱辐射计(Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer, MODIS)为代表,相对于 AVHRR/3, MODIS 的功能、性能有了全面提高。之后出现了以美国苏密国家极轨合作计划(Suomi National Polar-orbiting Partnership, Suomi NPP)卫星上的可见光红外成像仪辐射计组件(Visible/Infrared Imager Radiometer Suite, VIIRS)、中国风云三号气象卫星上的新中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)等仪器为代表的新一代可见光红外光学成像遥感仪器,其典型特征是光谱波段 20 个以上,波段带宽窄,一般为 10~15 nm。光谱范围全面覆盖 0.4~15 μm ,辐射测量精度高。在指定条件下,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)可以达几百乃至上千,噪音等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NEdT)可达到 0.05 K,甚至更优。空间分辨率最高可达 200~300 m。

可见光红外光学成像遥感仪器在继承现代同类仪器先进性基础上持续发展和积累,延长历史数据时间序列;同时可以预见高精度可见光红外多角度、多通道、多极化光学成像仪等是新的发展方向。

1 可见光红外光学成像仪发展阶段

据世界气象组织数据统计,从 20 世纪 60 年代开始,迄今为止世界各国已在轨观测使用过的可见光红外光学成像遥感仪器有近百台(套)^[2]。这些仪器从其功能和性能指标共性方面分析都可以归为本文所研究的可见光红外光学成像遥感仪器这一类型,每台仪器还有其各自特点,彼此之间存在一些差异。本文根据这些仪器的空间、时间、辐射和光谱 4 个维度的主要功能性能、在轨工作时间长短、在业界的影响力大小等因素,选择其中一些具有典型代表意义的仪器从技术指标和应用需求两个方面,综合分析环境气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器半个多世纪的发展演化特点。

1.1 早期探索

1.1.1 AVCS

美国第 1 代试验气象卫星 TIROS 系列经过 7 颗卫星摸索,于 1963 年 12 月 21 日发射了第 8 颗卫星,命名为 TIROS-8,星上安装 1 台光导电视摄像系统(Vidicon Camera System, VCS),是第 1 代探索性卫星云图成像仪器的典型代表,它开创了气象卫星对地观测实用的先河,尽管它只是 1 台仅有 1 个可见光通道、视场角 108°的云图成像电视摄像机。紧随其后的是 Nimbus 系列,其中的 Nimbus 1 号和 2 号卫星上安装了 VCS。美国第 2 代气象卫星、第 1 代业务气象卫星环境科学和服务(Environmental Science and Services Administration, ESSA)系列的 ESSA-1~ESSA-9,以及改进型 TIROS 业务卫星 TIROS-M 和 NOAA-1 安装了先进的光导电视摄像系统(Advanced Vidicon Camera System, AVCS)^[3]。AVCS 也是 1 台单通道摄像机,光谱约为 0.45~0.6 μm ,以快照和 800 行×800 像素扫描两种方式观测。在雨云卫星上,平行安装了 3 台 AVCS,总幅宽为 3500 km,空间分辨率为 0.9 km。在 ESSA 卫星上只有 1 台 AVCS,幅宽为 3000 km,空间分辨率为 3.7 km,仅日间工作,每天接近覆盖全球 1 次。

AVCS 基本用途是获取云图,还未提出非常明确的辐射和光谱方面的定量探测概念,仅探索了卫星对地观测成像空间维和时间维关键技术和基本云图应用。

1.1.2 VHRR

甚高分辨率辐射计(Very High Resolution Radiometer, VHRR)是改进型 TIROS、美国第 3 代气象卫星系列 NOAA-2, NOAA-3, NOAA-4, NOAA-5 卫星上的主要对地观测仪器。这台典型的可见光红外光学成像遥感仪,从 1972 年的 NOAA-2 持续到 1979 年的 NOAA-5。VHRR 的主要用途是云图成像,包含可见光(0.52~0.72 μm)和红外(10.5~12.5 μm)两个光谱通道,跨轨扫描,扫描速度为每分钟 400 转,空间分辨率为 0.9 km,幅宽为 2580 km。日夜各获取全球图像 1 次。

从第 1 颗 TIROS 卫星算起,到 1979 年 NOAA-5 结束,美国极轨气象卫星的发展跨越了 3 代,走过了 20 年的历程,发展到 VHRR 可获取全球云图、海冰覆盖图像、云顶温度及高度、海面温度等数据,开启了气象卫星热红外成像观测之门,开始有了光谱

定量的概念。

1.1.3 VISSR

可见光红外旋转扫描辐射计(Visible-Infrared Spin Scan Radiometer, VISSR)是世界上第1台安装在静止轨道气象卫星上的光学成像仪器,它是美国静止轨道试验气象卫星同步气象卫星(Synchronous Meteorological Satellite, SMS)系列的两颗卫星 SMS-1, SMS-2 和第1代静止轨道业务环境气象卫星静止业务环境卫星(Geostationary Operational Environmental Satellite, GOES)系列的前3颗卫星 GOES-1, GOES-2, GOES-3 上安装的唯一对地观测仪器,两个系列前后持续时间从1974年到1993年。该仪器主要目的是云图圆盘图成像,包含可见光($0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$)和红外($10.5 \sim 12.6 \mu\text{m}$)两个光谱通道。卫星自身旋转形成东西方向连续扫描,南北方向机械步进,每30 min产生1幅全圆盘图像。可见光通道空间分辨率为0.9 km,红外通道为6.9 km。从GEOS-4到GOES-7 VISSR演变成可见光红外旋转扫描辐射大气探测仪(VISSR Atmospheric Sounder, VAS),它是通过滤光片辐射计技术在两通道可见光红外光学成像遥感仪 VISSR 和12通道的大气垂直探测仪 VAS 间进行功能切换,实现静止气象卫星上光学成像和大气探测功能,这也是世界上气象卫星首次实现光学成像仪器和大气探测仪器一体化,虽然不能同时使用。

从20世纪70年代中期 SMS-1 发射起,到90年代中期的 GOES-7 结束,美国的第1代静止轨道气象卫星的发展经历了20年的历程。

VISSR 的科学应用需求和工程技术指标基本上继承了前期极轨卫星系列 VHRR 的探索成果。后来世界上其他国家和地区高、低轨道气象卫星的发展也走了基本相同的路线。美国早期气象卫星也是当时世界上最先进的气象卫星,他们的探索成果为后继国家的气象卫星发展提供了许多学习和借鉴的经验。

1.2 初步应用

1.2.1 AVHRR

20世纪70年代末期到80年代初期,可见光红外光学成像遥感仪器由探索走到了初步应用阶段,其典型代表就是在 TIROS-N, NOAA-6, NOAA-8, NOAA-10 等卫星上安装的先进的甚高分辨率辐射计 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)。AVHRR 是4通道辐射计,光谱通道涵

盖可见光、近红外、中波红外和热红外,是在 VHRR 两通道基础上的革新发展。可见光通道细分为可见光和近红外两个通道,增加了中波红外通道,热红外通道光谱区间宽度缩减到短波方向的一半,初现热红外分裂窗通道的雏形。跨轨扫描 2048 个连续像素,幅宽为 2900 km,星下点空间分辨率为 1.1 km,红外通道每天覆盖全球两次。AVHRR 还进一步确定了具体的光谱和辐射测量技术指标,给出了各通道的中心波长,谱段区间范围,并第1次明确给出了规定能量输入条件下可见光通道信噪比(SNR)、红外通道噪声等效温差(NEdT)两个具体的辐射测量精度指标,标志着可见光红外光学成像遥感仪器建立了时间、空间、光谱和辐射4个维度的综合定量指标体系,为观测数据实际应用奠定了基础。

AVHRR/2 增加了另一个热红外长波分裂窗通道,其余指标未变化,进入了可见光、近红外、中红外、热红外两个分裂窗的5通道时代。安装在 NOAA-7, NOAA-9, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13, NOAA-14 共6颗极轨气象卫星上,一直持续到2007年。

AVHRR/3 又增加了 $1.61 \mu\text{m}$ 短波红外通道,原来的近红外通道光谱区间范围向短波方向缩减了 $0.1 \mu\text{m}$,其余指标未变化(详见表1),安装在 NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18 和 Metop-A, Metop-B, Metop-C 7颗美欧的极轨气象卫星上,观测数据一直延续到了2016年。

辐射定标精度及其稳定性是评价遥感数据能否定量应用,特别是能否形成气候数据集的一项重要指标。对于 AVHRR 这样到目前为止独一无二的长时间序列观测数据,在辐射定标的精度评价和改进方面有许多研究成果,一般地,AVHRR 可见光近红外通道数据辐射定标精度最好可以达到 5%^[4-5],红外通道数据可达到 0.5 K ^[6-7]。

从1979年发射的 NOAA-6 开始到2016年结束服役的 NOAA-19, AVHRR1/2/3 总共积累了30多年的对地观测数据,在天气分析、气候预测和环境灾害业务等方面发挥了重大作用。使用 AVHRR1/2/3 数据反演获取了一批具有较高精度和稳定性、时间序列比较长的地球物理参量,如云量、云顶温度及高度、云光学厚度、水汽总量、归一化植被指数、叶面积指数、地表温度、火点和火灾分布、雪量和雪盖、海面温度及海冰覆盖等。

表 1 AVHRR/3 光谱和辐射特性
Table 1 The spectral and radiometric
characterization of AVHRR/3

中心波长/ μm	光谱区间/ μm	SNR/NE Δ T
0.630	0.580~0.68	9 @ 0.5% 反照率
0.862	0.725~1.00	9 @ 0.5% 反照率
1.610	1.58~1.64	20 @ 0.5% 反照率
3.740	3.55~3.93	0.12 K @ 300 K
10.80	10.3~11.3	0.12 K @ 300 K
12.00	11.5~12.5	0.12 K @ 300 K

云是天气、气候研究中关注的热点,云对地球-大气系统能量平衡具有强烈的调节作用。云性质及其在不同空间和时间尺度上的变化对全球气候变化和各种尺度天气系统的影响不可忽视。了解云的物理性质有助于对天气变化的监测和预报、气候变化监测。

从早期探索阶段的云图解译,到后来的云参数定量化反演,云始终是气象卫星观测重点。云检测是大气、陆地、海洋参数反演的基础。基于 NOAA/AVHRR 数据, Rossow 等^[8-12] 研发了 ISCCP 的云检测算法。Saunders 等^[13] 研发了 APOLLO 算法 (the AVHRR Processing scheme OverCloud Land and Ocean)。Stowe 等^[14-18] 研发了 CLAVR (the NOAA Cloud Advanced Very High Resolution Radiometer) 算法。这些云检测算法使用 AVHRR 资料,实现了对大多数云盖情况下的准确检测,但对于高云检测还存在缺陷,1.38 μm 和二氧化碳吸收通道 (13.3, 13.6, 13.9 μm) 有助于高云,尤其是卷云的检测^[19-20], AVHRR 还没有这些通道。

在云检测的基础上,利用 AVHRR 数据在云量、云顶温度/高度、云光学厚度、云顶粒子有效半径、云相态等云的宏观和微观参数反演方面均取得了较好的研究成果^[21-34]。

自 20 世纪 60 年代开始利用卫星红外辐射计观测数据反演海表温度 (SST), McClain 等^[35-36] 利用 NOAA 资料首先开发了利用分裂窗区通道资料估算 SST 的线性算法,简称 MCSST,算法的假设条件是水汽总量与分裂窗亮温差成线性变化关系。考虑了水汽总量与分裂窗亮温差间非线性关系后, Walton 等^[37-38] 提出了交叉产品 SST (CPSST) 和非线性 SST (NLSST) 反演方法。Kilpatrick 等^[39] 对利用 NOAA 数据反演 SST 的算法进行了总结,发展了长时间序列 NOAA SST 气候数据处理算法。

大气气溶胶遥感反演是 AVHRR 数据一个重

要的应用方向, Geogdzhayev 等^[40] 提出一种利用 AVHRR 通道 1, 2 数据反演海洋气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数的改进算法,使用这一新算法处理了 1983—1994 年的全球 AVHRR 观测数据,卫星包括 NOAA-7, NOAA-9, NOAA-11, 得到了一组较长时间序列的海洋气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数产品全球气候数据集。该数据集能够反映全球气溶胶年季和南北半球时空变化特征,并清楚地展现出 1991 年 6 月菲律宾 Pinatubo 火山爆发造成大气气溶胶含量倍增事件。同时也发现了一些影响反演的 AVHRR 辐射定标精度问题,尤其是低端深空定标是限制反演精度的主要因素,低端深空一个计数值的差异可导致光学厚度 50% 的变化、Angstrom 指数 0.4 的变化。Mishchenko 等^[41] 又将这一数据集扩展到 1999 年, 2012 年 Mishchenko 等^[42] 再次将这一数据集扩展到 2005 年。

1.2.2 VIRR

可见光红外辐射计 (Visible and Infra-Red Radiometer, VIRR) 是中国风云极轨气象卫星的第 1 代 FY-1C, FY-1D, 第 2 代 FY-3A, FY-3B, FY-3C 5 颗卫星上安装的光学成像遥感仪器,共有 10 个光谱通道,包含 4 个可见光、1 个近红外、2 个短波红外、1 个中波红外和 2 个热红外分裂窗通道。跨轨扫描 2048 个像素,覆盖宽度达 2800 km,星下点空间分辨率为 1.1 km,红外通道每天全球覆盖两次,可见光通道覆盖 1 次^[43]。验证分析和研究表明, VIRR 可见光通道辐射定标不确定性为 5.5%~6.0%^[44],热红外通道 4 辐射定标精度为 0.84 ± 0.16 K,热红外通道 5 为 -0.66 ± 0.18 K^[45]。从 1999 年 FY-1C 发射到 2018 年 FY-3C 结束业务运行, VIRR 将积累整整 20 年 10 通道对地观测数据,这些数据将为天气分析、气候预测和环境灾害业务应用发挥积极作用。

1.2.3 IMAGER

IMAGER 是 GOES 卫星上的 5 通道光学成像仪器,继承 GOES-4~GOES-7 上的 VAS 成像部分功能,光谱通道包括 1 个可见光、2 个中波红外和 2 个热红外分裂窗通道。IMAGER 没有近红外和短波红外通道,有中波 6.75 μm 的水汽通道,突出了高轨气象卫星着重观测云和水汽的特点。IMAGER 红外通道空间分辨率为 4 km,可见光为 1 km,每 30 min 完成 1 幅全圆盘图像,卫星平台三轴稳定。IMAGER 东西向连续扫描,南北向步进完成全

圆盘扫描。这种功能配置从 GOES-8 一直保持到 GOES-11, 时间从 1994 年到 2011 年。

从 2001 年发射的 GOES-12 开始, IMAGER 的光谱通道进行了一些调整, 进一步突出了云和水汽目标的观测重点, 将通道 3 光谱区间从 $6.5 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 调整为 $5.8 \sim 7.3 \mu\text{m}$, 将通道 5 的光谱区间从 $11.5 \sim 12.4 \mu\text{m}$ 调整为 $13.0 \sim 13.7 \mu\text{m}$, 其余指标未做调整(详见表 2), 这一新观测模式将延续至 GOES-15 寿命末期的 2020 年。

据 Yu 等^[46]用深对流和沙漠等目标的几种替代定标方法对 GOES-12 上 IMAGER 可见光通道 7 年观测数据的综合研究结果表明, IMAGER 可见光通道的相对定标稳定可达到 1%。水汽通道的辐射定标一直比较困难, Wang 等^[47]利用红外大气探测高光谱干涉仪 IASI 星下点同步观测数据给 GOES-11, GOES-12 卫星的 IMAGER 水汽通道定标, 结果表明定标偏差为 $0.3 \pm 0.2 \text{ K}$ 。

从 20 世纪 90 年代中期, 高轨气象卫星光学成像仪器开始进入实际应用阶段。GOES-8~GOES-15 将能够积累 25 年的具有较高精度、持续稳定观测。从这些观测数据可以衍生获得水汽总量、云量、云顶温度/高度、云导风(水平方向), 土壤湿度、地表温度、海面温度和海冰覆盖等地球物理参量。

表 2 IMAGER 光谱和辐射特性
Table 2 The spectral and radiometric characterization of IMAGER

中心波长/ μm	光谱区间/ μm	SNR/NE ΔT
0.65	0.55~0.75	250 @ 100% 反照率
3.90	3.80~4.00	0.11 K @ 300 K
6.55	5.80~7.30	0.14 K @ 300 K
10.70	10.2~11.2	0.09 K @ 300 K
13.35	13.0~13.7	0.70 K @ 300 K

随着静止气象卫星时间分辨率的提高, 静止气象卫星数据在天气分析, 尤其是短时临近预报中发挥了越来越重要的作用。在对流云识别和云顶特性监测分析中, 多数研究利用 1 h 时间分辨率的数据, 得到了较为满意的对流云顶性质的分析监测方法, 发展了较好的对流云识别算法^[48]。随着社会进步, 对天气预报准确性的要求越来越高, 对对流初生预报的需求也越来越迫切。Mecikalski 等^[49-50]利用连续时间分辨率为 5~15 min 的 GOES 1 km 分辨率可见光通道、48 km 分辨率红外通道数据进行初生对流监测方法研究, 结果表明: 通过多通道组合形成

的指标不仅可以很好地监测到对流云的发生, 且可提前 30~45 min 预报对流的发生, 这一研究成果为对流预报提供了良好的基础, 方法命中率较高, 超过 90%, 但同时虚警率较高, 达到 65%。

1.2.4 S-VISSR

展宽的可见光红外旋转扫描辐射计(Stretched Visible and Infrared Spin Scan Radiometer, S-VISSR)是中国风云静止气象卫星序列 FY-2C, 2D, 2E, 2F, 2G, 2H 光通道 6 颗卫星上的光学成像仪器, 包含可见光、中红外、中红外水汽和两个热红外分裂窗 5 个通道, 自旋稳定卫星平台, 东西向连续扫描、南北步进, 空间分辨率红外通道为 5 km, 可见光通道 1.25 km, 每 30 min 成 1 幅圆盘图。业务运行时间从 2004 年到 2020 年, 持续 15 年以上。

刘健等^[51]利用 FY-2C 平均 10 min 观测时间分辨率的快速区域扫描数据, 对 2011 年 6 月 28—29 日的一次强对流天气过程进行分析, 充分利用静止气象卫星高时间分辨率观测数据在对流云发展演变过程中的作用, 揭示出强对流云发展过程中的云系特征。Yang 等^[52]利用 S-VISSR 数据研究了 2005—2012 年中国及其邻区北方暖季节中尺度对流系统特征, 取得了较好成果。

1.2.5 MVIRI

气象卫星可见光红外成像仪(Meteosat Visible Infra-Red Imager, MVIRI)是欧洲静止气象卫星序列 Meteosat-1~Meteosat-7 共 7 颗卫星上的 3 通道光学成像仪器, 可见光、中红外水汽和热红外通道, 自旋体制工作方式, 其主要功能、性能和其他同期同类卫星基本相同。MetSat-1~MetSat-7 在轨时间从 1978 年开始, 预计至 2017 年, 将持续运行接近 40 年, 算得上同一类型仪器持续时间最长。

1.3 稳定应用和进步发展

1.3.1 MODIS

经过 30 多年的发展和积累, 随着应用需求的日益旺盛和现代光、机、电、热技术的进步, 到 20 世纪末至 21 世纪初, 可见光红外光学成像遥感仪器在功能、性能及其稳定性和探测精度, 以及应用的广度和深度等方面都发生了飞跃性进步。中分辨率光谱成像仪 MODIS 是典型代表。该仪器在光谱、辐射、空间、时间分辨率 4 个方面都有跨越性发展, 满足了更高定标精度要求, 是划时代的大发展, 由此可见光红外光学成像遥感仪器进入了高精度稳定应用和进步发展阶段。

MODIS 仪器由 36 个光谱波段组成(详见表 3),20 个太阳反射波段,16 个热红外波段,光谱范围为 0.41~14.4 μm ,波段 1、波段 2 空间分辨率为 250 m,波段 3~7 空间分辨率为 500 m,波段 8~36 空间分辨率为 1000 m,仪器设计寿命 6 年。为了保障在轨定标精度和稳定性,确保数据产品质量,包含一套完整的在轨定标系统:光谱-辐射定标组件,对于太阳发射波段有太阳漫反射器,太阳漫反射器稳定性监测器,对于红外波段有内黑体,宇宙冷空观测。所有定标器件的在轨实际性能指标都满足或优于设计目标,Aqua 卫星 MODIS 中心波长大于 0.5 μm 太

阳反射波段辐射响应年变化小于 0.5%,0.412 μm 的 8 波段年变化为 3.6%,0.443 μm 的 9 波段年变化为 2.3%,0.469 μm 的 3 波段年变化为 1.6%,0.488 μm 的 10 波段年变化为 1.2%^[53];辐射热红外波段辐射响应非常稳定,几乎没有发现明显起伏,年变化小于 0.5%^[54],其中的热红外分裂窗波段 31、波段 32 所有探测器在轨噪声等效温差一直优于设计指标 0.05 K,定标系数非常稳定,扫描之间的变化小于 0.1%。Terra 和 Aqua 两颗卫星上的 MODIS 热红外分裂窗波段之间定标差异小于 0.1 K^[55]。

表 3 MODIS 光谱和辐射特性^[56]

Table 3 The spectral and radiometric characterization of MODIS(from reference [56])

主要用途	波段	波段范围*	光谱辐射/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	SNR/NE Δ T/K
陆地/云/边界层气溶胶	1	620~670	21.8	128
	2	841~876	24.7	201
陆地/云/气溶胶特性	3	459~479	35.3	243
	4	545~565	29.0	228
	5	1230~1250	5.4	74
	6	1628~1652	7.3	275
	7	2105~2155	1.0	110
	8	405~420	44.9	880
	9	438~448	41.9	838
海洋水色/浮游生物/ 生物地球化学	10	483~493	32.1	802
	11	526~536	27.9	754
	12	546~556	21.0	750
	13	662~672	9.5	910
	14	673~683	8.7	1087
	15	743~753	10.2	586
	16	862~877	6.2	516
	17	890~920	10.0	167
大气水汽	18	931~941	3.6	57
	19	915~965	15.0	250
	20	3.660~3.840	0.45(300 K)	0.05
地表/云温度	21	3.929~3.989	2.38(335 K)	2.00
	22	3.929~3.989	0.67(300 K)	0.07
	23	4.020~4.080	0.79(300 K)	0.07
	24	4.433~4.498	0.17(250 K)	0.25
大气温度	25	4.482~4.549	0.59(275 K)	0.25
	26	1.360~1.390	6.00	150(SNR)
卷云水汽	27	6.535~6.895	1.16(240 K)	0.25
	28	7.175~7.475	2.18(250 K)	0.25
	29	8.400~8.700	9.58(300 K)	0.05
臭氧	30	9.580~9.880	3.69(250 K)	0.25
地表/云温度	31	10.780~11.280	9.55(300 K)	0.05
	32	11.770~12.270	8.94(300 K)	0.05
云顶高度	33	13.185~13.485	4.52(260 K)	0.25
	34	13.485~13.785	3.76(250 K)	0.25
	35	13.785~14.085	3.11(240 K)	0.25
	36	14.085~14.385	2.08(220 K)	0.35

注: * 波段 1~19 光谱单位: nm; 波段 20~36 光谱单位: μm 。

自从 Terra 和 Aqua 卫星 1999 年、2002 年发射以来,MODIS 仪器已经观测获取了十几年的对地观测数据,连续产生 40 多种大气、陆地、海洋高质量科学数据产品。MODIS 序列数据产品极大地增强了科学界对地球环境和气候变化的研究能力。

MODIS 数据研究和应用程度之深、领域之广是目前任何同类卫星遥感仪器都无法匹敌的。

1.3.2 MERSI

中分辨率光谱成像仪(MERSI)是中国第 2 代风云极轨气象卫星系列 FY-3A(2008 年发射)、FY-3B(2010 年发射)、FY-3C(2013 年发射)3 颗卫星上的主要可见光红外光学成像遥感仪器,共有 20 个波段,其中在可见光、近红外和短波红外谱段有 19 个 20 nm 或 50 nm 带宽的窄带波段,1 个 2.5 μm 带宽的热红外宽带波段,中心波长为 11.5 μm ,空间分辨率为 250 m,另有 470 nm,550 nm,650 nm,865 nm 4 个中心波长的波段可见光空间分辨率也是 250 m,其余波段空间分辨率为 1000 m。仪器扫描幅宽达 2900 km,周期为 1.5 s,跨轨 10 元(空间分辨率 1000 m 波段)或 40 元(空间分辨率 250 m 波段)多元并扫^[57]。

MERSI 在辐射、光谱和时间分辨率方面接近同期世界水平,最具特色的是 5 个 250 m 空间分辨率波段的优势,这在同期同类卫星尚属于首次。①1 个 250 m 空间分辨率热红外波段,更高的空间分辨率图像可揭示出地表、海表和云更多的热红外细节特征,信息更加丰富;②红光谱段和近红外谱段 2 个波段 250 m 空间分辨率可产生更高分辨率的植被指数,对于发现更多陆地生态系统特征提供了基础数据产品;③蓝、绿、红谱段 3 个 250 m 可见光波段可合成出真彩色图像,更加利于用户识别、判断、分析和理解地表、海表和云的丰富细节特征信息。

利用红外高光谱大气探测仪 CrIS 同步观测数据对 FY-3C/MERSI 的热红外波段辐射响应性能研究结果^[58]表明:MERSI 和 CrIS 亮度温度具有很好的一致性,偏差呈现正态分布,平均偏差为 -0.18 ± 0.83 K。

2016 年底即将发射的 FY-3D 卫星,其光学成像仪器 MERSI-II 是 MERSI 的升级版,在原有基础上增加了 4 个中红外波段,将原来热红外宽波段分为两个 250 m 空间分辨率的两个分裂窗波段,共 25 波段,各波段提高了辐射测量精度。MERSI-II 将在 FY-3 系列未来每颗卫星上安装,至少可以持

续到 2025 年以后。

1.3.3 VIIRS

可见光红外成像仪(VIIRS)是美国 2011 年发射的新一代极轨环境气象卫星系列 Suomi NPP 卫星上主要光学仪器,共有 22 光谱波段,谱段范围为 412 nm~12.4 μm 。仪器跨轨扫描幅宽达 3000 km,周期为 1.786 s,16 元或 32 元并扫。VIIRS 有 16 个星下点 750 m 中分辨率波段,每个波段 16 个探测单元,其中 11 个太阳反射波段、5 个热辐射波段;5 个星下点 375 m 高分辨率波段,每个波段 32 个探测单元,其中 3 个太阳反射波段、2 个热辐射波段;1 个全色谱段(0.5~0.9 μm)750 m 空间分辨率昼夜波段。

该仪器在光谱、辐射方面继承了许多 MODIS 先进科学技术成果,在空间采样方面使用独特的非均匀采样技术,使得星下点到扫描边缘的像元空间一致性得到很大改善。相关定标研究结果表明^[59],VIIRS 类似 MODIS 太阳反射波段和 MODIS 的辐射定标偏差大部分在 2% 之内,热辐射波段可达到 0.1 K 的一致性^[60]。VIIRS 将在美国联合极轨卫星系统(Joint Polar Satellite System,JPSS)系列的 JPSS-1,JPSS-2,JPSS-3,JPSS-4 的 4 颗卫星上安装,至少延续到 2038 年。

MERSI-II,VIIRS,以及 Metop-SG 系列(2021—2042 年)A1,A2,A3 3 颗卫星上的 MetImage 属于相同水平,代表了未来世界各国极轨气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器的主要发展方向。

1.3.4 AHI

先进的葵花成像仪(Advanced Himawari Imager,AHI)是日本 2015 年发射的葵花 8 号三轴静止气象卫星上的主要光学成像遥感仪器,设计寿命为 15 年。其圆盘图 10 min 成像,局部区域扫描图像可以更快,可达到 2.5 min。主要用途是亚太区域云图分析和短时临近天气预报、数值天气预报应用、云导风、水汽图像分析和环境监测。该仪器包含 16 个光谱通道,光谱范围为 430 nm~13.40 μm ,包括可见光、近红外、短波红外、中红外和热红外。空间分辨率 645 nm 的通道为 500 m,分辨率为 455 nm,510 nm,860 nm 的通道为 1000 m,其余 12 个短波红外、中红外和热红外通道为 2000 m。

初步验证研究结果^[61]表明,AHI 图像导航定位精度可达到 1 km;红外通道的辐射定标精度为 0.2 K,且未发现明显昼夜变化。利用数值天气预

报模式和辐射传输模式在晴空条件下 AHI 红外通道 7~16 的数据初步同化试验结果发现^[62],总体上 AHI 观测和模式模拟结果具有较好的一致性,通道 7~14 发现有 1 K 左右的冷偏差,而长波通道 15 和 16 冷偏差大约为 2~3 K,3 个水汽通道 8,9,10 偏差为 1.5 K,其余通道为 1 K 左右。

美国未来(2016—2035 年)第 3 代环境气象业务卫星系列 GOES-R,GOES-S,GOES-T,GOES-U 4 颗卫星上的主要光学成像仪器 ABI(Advanced Baseline Imager)、中国未来(2016—2040 年)静止气象卫星系列风云四号的 FY-4A,FY-4B,FY-4C,FY-4D,FY-4E,FY-4F,FY-4G 7 颗卫星上的光学成像仪 AGRI(Advanced Geostationary Radiation Imager)、欧洲未来(2019—2039 年)第 3 代 Meteosat 卫星系列的 MTG-I1,MTG-I2,MTG-I3,MTG-I4 4 颗卫星上的 FCI(Flexible Combined Imager)的科学技术指标体系都和 AHI 基本类似,各自略有特点,这一技术体系将是未来世界各国静止气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器的主要方向。

2 可见光红外光学成像遥感仪器创新发展

经过 21 世纪 10 年代新一轮的探索和发展,环境气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器现在以及未来十几年主流业务技术体制发展方向已经基本明确,极轨卫星上以 MERSI-II,VIIRS,以及 Metop-SG 系列的 MetImage 为代表;静止轨道卫星上以

ABI,AGRI,FCI 为代表。

作为环境气象卫星光学成像遥感仪器一个新的发展方向,多角度多通道多极化成像仪(Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager, 3MI)是创新发展,将安装在 Metop-SG 的 A1,A2,A3 3 颗卫星上,持续时间为 2021—2042 年。3MI 多角度、多通道、多极化成像仪,在原有光学成像仪器时间、空间、光谱和辐射 4 个维度基础上增加了极化维度测量,必然可以得到前所未有的新信息。3MI 在 POLDER-3/PARASOL 的基础上,在整个光谱覆盖范围、空间分辨率和刈幅三方面均有提高。3MI 的刈幅宽度 2200 km,空间分辨率为 4 km,包含 12 个带宽 10 nm,20 nm,40 nm 的光谱波段(410~2130 nm),详见表 4,其中 9 个含 $-60^\circ,0^\circ,+60^\circ$ 3 个角度极化通道,14 个不同观测角度,由近红外和短波红外两个模块构成。

3MI 主要任务是为气候监测、数值天气预报模式、大气化学研究和空气质量监测提供大气气溶胶粒子观测信息^[63]。大气气溶胶关乎人类生活质量和健康,目前,这也是现代气候模拟中最大的不确定性因素。利用 3MI 观测数据可反演得到地表反照率、短波双向反射率、云短波反射率,云滴谱、冰云粒子有效半径、植被指数、水汽总量以及气溶胶关键参数,如气溶胶光学厚度、粒子类型和尺度、折射率指数、球度和高度指数等,这些数据有助于深入研究气溶胶、云的辐射和微物理特性,帮助改进气溶胶、空气质量预报模型的性能。

表 4 3MI 主要特性和用途^[64]

Table 4 The main characterizations and usages of 3MI(from reference [64])

3MI	中心波长/ μm	光谱带宽/nm	SNR@xx, x/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	极化	主要用途
可见光近红外谱段	0.410	20	100 @ 35.4	Y	吸收气溶胶,火山灰云
	0.443	20	100 @ 48.9	Y	吸收气溶胶
	0.490	20	100 @ 55.6	Y	气溶胶,地表反照率,云反射率,光学厚度
	0.555	20	100 @ 55.2	Y	地表反照率
	0.670	20	100 @ 44.1	Y	气溶胶光学特性
	0.754	20	200 @ 36.6	N	云,气溶胶高度
	0.763	10	200 @ 36.1	N	云,气溶胶高度
	0.865	40	100 @ 28.2	Y	植被,气溶胶,云,地表特征
	0.910	20	200 @ 25.2	N	水汽,大气校正
短波红外谱段	0.910	20	200 @ 25.2	N	水汽,大气校正
	1.370	40	100 @ 10.7	Y	卷云,水汽图像
	1.650	40	100 @ 6.8	Y	气溶胶反演中的地表特性
	2.130	40	100 @ 2.9	Y	气溶胶反演中的地表特性,云微物理

3 结 论

回顾环境气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器 50 多年的发展历程,涉及的内容非常广泛,世界各国已发射的卫星上安装的此类仪器就有近百台(套)之多,其中大多仪器观测数据的应用领域涵盖大气科学、气候学、陆地生态环境和海洋科学等诸多学科门类。从这近百台(套)仪器中,选择不同时期在轨的 12 种作为典型代表,结合仪器功能、性能技术指标和应用需求进行了解剖分析,梳理了其历史发展脉络,并探讨未来的主流业务发展方向和创新发展趋势。

环境气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器的 50 多年的发展历程可以分为 3 个阶段:①早期探索 20 年(20 世纪 60—70 年代),以 AVCS 等为代表,这是第 1 代探索性仪器,开创了气象卫星对地观测的先河;②初步应用 20 年(20 世纪 80—90 年代),以 AVHRR 等为代表,基本形成了初步应用局面,同时欧洲、中国等也开始发展自己的环境气象卫星光学成像遥感仪器;③稳定应用和进步发展 10 多年(2000 年以来),以 MODIS 为基础,先后出现了 VIRS, MERSI 等仪器为代表的新一代极轨卫星可见光红外光学成像遥感仪器,其典型特征是光谱波段 20 个以上;波段带宽窄,一般为 10~15 nm;光谱范围全面覆盖 0.4~15 μm ;辐射测量精度高,在指定条件下,SNR 可以达几百乃至上千,NEdT 可达到 0.05 K,甚至更优;空间分辨率为 200~1000 m。MERSI-II, VIIRS, MetImage 类型仪器代表了未来世界各国极轨气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器主流业务发展趋势。

静止气象卫星以在轨的 AHI 以及即将在轨的 ABI, AGRI 等为代表,其典型特点是光谱通道 15 个以上,谱段带宽较窄,光谱范围全面覆盖 0.4~15 μm ,辐射测量(SNR 或 NEdT 以及辐射定标精度)精度高,空间分辨率为 500~2000 m,圆盘图成像速度可以达到分钟级,区域扫描速度更快。AHI, ABI, AGRI, FCI 的科学技术指标体系将是未来世界各国静止气象卫星可见光红外光学成像遥感仪器主流业务发展趋势。

可见光红外光学成像遥感仪器在继承现代同类仪器先进性基础上持续发展,不断积累,稳定延长历史数据时间序列;同时,可以预见,高精度可见光、红

外多角度、多通道、多极化光学成像仪是一个新的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Wikipedia. Television Infrared Observation Satellite. Wikipedia, 2016.
- [2] WMO. WMO OSCAR. List of all Instruments. 2015.
- [3] Rao P K, Holmes S J, Anderson R K, 等编. 许健民, 方宗义, 徐建平, 等译. 气象卫星——系统、资料及其在环境中的应用. 北京:气象出版社, 1994.
- [4] Schmidt M, King E A, McVicar T R. A method for operational calibration of AVHRR reflective time series data. *Remote Sens Environ*, 2008, 112(3): 1117-1129.
- [5] Trishchenko A P, Li Z. A method for the correction of AVHRR onboard IR calibration in the event of short-term radiative contamination. *Int J Remote Sens*, 2001, 22(17): 3619-3624.
- [6] Mittaz J, Harris A. A physical method for the calibration of the AVHRR/3 thermal IR channels. Part II: An in-orbit comparison of the AVHRR longwave thermal IR channels on board metop-A with IASI. *J Atmos Ocean Technol*, 2011, 28(9): 1072-1087.
- [7] Raja M, Wu X Q, Yu F F. Extended Inter-comparison of collocated MetOp-A AVHRR-IASI brightness temperature data and its implication for AVHRR calibration. *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization VI: Readiness for GEOSS IV*, 2010, 781107, doi: 10.1117/12.861265.
- [8] Rossow W B, Garder L C. Validation of ISCCP cloud detections. *J Climate*, 1993, 6(12): 2370-2393.
- [9] Rossow W B, Schiffer R A. ISCCP cloud data products. *Bull Am Meteor Soc*, 1991, 72(1): 2-20.
- [10] Seze G, Rossow W B. Time-cumulated visible and infrared radiance histograms used as descriptors of surface and cloud variations. *Int J Remote Sens*, 1991, 12(5): 877-920.
- [11] Rossow W B. Measuring cloud properties from space: A review. *J Climate*, 1989, 2(3): 201-213.
- [12] Rossow W, Moshier F. ISCCP cloud algorithm intercomparison. *J Climate Appl Meteor*, 1985, 24(9): 877-903.
- [13] Saunders R W, Kriebel K T. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int J Remote Sens*, 1988, 9(1): 123-150.
- [14] Stowe L L, Davis P, McClain E P. Evaluating the CLAVR (clouds from AVHRR) phase I-cloud cover experimental product. *Adv Space Res*, 1995, 16(10): 21-24.
- [15] Stowe L L, Vemury S K, Rao A V. AVHRR clear sky radiation data sets at NOAA/NESDIS. *Adv Space Res*, 1994, 14(1): 113-116.
- [16] Stowe L L, Davis P A, McClain E P. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the advanced very high resolution radiometer. *J Atmos Ocean Technol*, 1999, 16(6): 656-681.

- [17] Heidinger A K. CLAVR-x Cloud Mask Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), NOAA/NESDIS/Office of Research and Applications, Washington, DC, USA, 2004.
- [18] Vemury S, Stowe L L, Anne V R. AVHRR pixel level clear-sky classification using dynamic threshold (CLAVR-3). *J Atmos Ocean Technol*, 2001, 18(2): 169-186.
- [19] Gao B C, Goetz A F H, Wiscombe W J. Cirrus cloud detection from airborne imaging spectrometer data using the 1.38 micron water vapor band. *Geophys Res Lett*, 1993, 20(4): 301-304.
- [20] Baum B A, Wielicki B A. Cirrus cloud retrieval using infrared sounding data: Multilevel cloud errors. *J Appl Meteorol*, 1994, 33(1): 107-117.
- [21] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(15): 1878-1893.
- [22] Ou S C, Liou K N, Takano Y, et al. Remote sounding of cirrus cloud optical depths and ice crystal sizes from AVHRR data: Verification using FIRE II IFO measurements. *J Atmos Sci*, 1995, 52(23): 4143-4158.
- [23] Nakajima T Y, Nakajima T. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX Regions. *J Atmos Sci*, 1995, 52(23): 4043-4059.
- [24] Ackerman S A, Moeller C C, Strabala K I, et al. Retrieval of effective microphysical properties of clouds: A wave cloud case study. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(8): 1121.
- [25] Baum B A, Yang P, Nasiri S, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part III: High-resolution spectral models from 100 to 3250 cm⁻¹. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46(4): 423-434.
- [26] Baum B A, Yang P, Heymsfield A J, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part II: Narrowband models. *J Appl Meteorol*, 2005, 44(12): 1896-1911.
- [27] Baum B A, Heymsfield A J, Yang P, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part I: Microphysical data and models. *J Appl Meteorol*, 2005, 44(12): 1885-1895.
- [28] Ou S C, Liou K N, Caudill T R. Remote sounding of multilayer cirrus cloud systems using AVHRR data collected during FIRE-II-IFO. *J Appl Meteorol*, 1998, 37(3): 241-254.
- [29] Kawamoto K, Nakajima T. A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing. *J Climate*, 2001, 14(9): 2054-2068.
- [30] 赵凤生, 丁强, 孙同明, 等. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. *气象学报*, 2002, 60(5): 594-601.
- [31] Liu Jian, Dong Chaohua. Using satellite data to analyze properties of cloud particles size on the top of cloud. *J Infrared Millim Waves*, 2002, 21(2): 4-8.
- [32] Liu Jian, Zhu Yuanjing, Zhao Bolin, et al. Application study on detecting multilayer cloud's properties by satellite data. *J Infrared Millim Waves*, 2004, 23(6): 408-412.
- [33] 刘健. FY-2 云检测中动态阈值提取技术改进方法研究. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(4): 288-292.
- [34] 傅云飞. 利用卫星双光谱反射率算法反演的云参数及其应用. *气象学报*, 2014, 72(5): 1039-1053.
- [35] McClain E P, Pichel W G, Walton C C, et al. Multi-channel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures. *Adv Space Res*, 1982, 2(6): 43-47.
- [36] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *J Geophys Res Ocean*, 1985, 90(C6): 11587-11601.
- [37] Walton C C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *J Appl Meteorol*, 1988, 27(2): 115-124.
- [38] Walton C C, Pichel W G, Sapper J F, et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *J Geophys Res*, 1998, 103(C12): 27999.
- [39] Kilpatrick K A, Podestá G P, Evans R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *J Geophys Res*, 2001, 106(C5): 9179.
- [40] Geogdzhayev I V, Mishchenko M I, Rossow W B, et al. Global two-channel AVHRR retrievals of aerosol properties over the ocean for the period of NOAA-9 observations and preliminary retrievals using NOAA-7 and NOAA-11 data. *J Atmos Sci*, 2002, 59(3): 262-278.
- [41] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Liu L, et al. Aerosol retrievals from AVHRR radiances: Effects of particle nonsphericity and absorption and an updated long-term global climatology of aerosol properties. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2003, 79-80: 953-972.
- [42] Mishchenko M I, Liu L, Geogdzhayev I V, et al. Aerosol retrievals from channel-1 and -2 AVHRR radiances: Long-term trends updated and revisited. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2012, 113(15): 1974-1980.
- [43] Dong C, Yang J, Zhang W, et al. An overview of new Chinese weather satellite FY-3A. *Bull Am Meteorol Soc*, 2009, 90(10): 1531-1544.
- [44] Gao C, Zhao Y, Li C, et al. An investigation of a novel cross-calibration method of FY-3C/VIRR against NPP/VIIRS in the Dunhuang test site. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 77-98.
- [45] Xu N, Chen L, Hu X, et al. Assessment and correction of on-orbit radiometric calibration for FY-3 VIRR thermal infrared channels. *Remote Sens*, 2014, 6(4): 2884-2897.
- [46] Yu F, Wu X. An integrated method to improve the GOES Imager visible radiometric calibration accuracy. *Remote Sens Environ*, 2015, 164: 103-113.

- [47] Wang L, Cao C, Goldberg M. Intercalibration of GOES-11 and GOES-12 water vapor channels with MetOp IASI hyperspectral measurements. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26(9): 1843-1855.
- [48] Meng Z, Zhang Y. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China. *Mon Wea Rev*, 2012, 140: 445-470.
- [49] Mecikalski J R, Bedka K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 49-78.
- [50] Mecikalski J R, Bedka K M, Paech S J, et al. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 4899-4914.
- [51] 刘健, 蒋建莹. FY-2C 高时间分辨率扫描数据在强对流云团监测中的应用研究. *大气科学*, 2013, 37(4): 873-880.
- [52] Yang X, Fei J, Huang X, et al. Characteristics of mesoscale convective systems over China and its vicinity using geostationary satellite FY2. *J Clim*, 2015, 28(12): 4890-4907.
- [53] Xiong X, Sun J, Xie X, et al. On-orbit calibration and performance of Aqua MODIS reflective solar bands. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48(1): 535-546.
- [54] Xiong X, Chiang K, Sun J, et al. NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance. *Adv Space Res*, 2009, 43(3): 413-422.
- [55] Xiong X, Wu A, Cao C. On-orbit calibration and inter-comparison of Terra and Aqua MODIS surface temperature spectral bands. *Int J Remote Sens*, 2008, 29(17-18): 5347-5359.
- [56] Maccherone B. MODIS Web. <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct>, 2014.
- [57] Yang Z, Lu N, Shi J, et al. Overview of FY-3 payload and ground application system. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50(12): 4846-4853.
- [58] Xu H, Xu N, Hu X. Inter-Calibration of Infrared Bands of FY-3C MERSI and VIRR Using Hyperspectral Sensor CrIS and IASI. Proc. SPIE 9264, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III, 92640B, 2014.
- [59] Upreti S, Cao C. Suomi NPP VIIRS reflective solar band on-orbit radiometric stability and accuracy assessment using desert and Antarctica Dome C sites. *Remote Sens Environ*, 2015, 166: 106-115.
- [60] Cao C, Xiong J, Blonski S, et al. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(20): 11664-11678.
- [61] Okuyama A, Andou A, Date K, et al. Preliminary validation of Himawari-8/AHI navigation and calibration. *SPIE*, 2015, 9607: 96072E.
- [62] Da C. Preliminary assessment of the advanced Himawari imager (AHI) measurement onboard Himawari-8 geostationary satellite. *Remote Sens Lett*, 2015, 6(8): 637-646.
- [63] Manolis I, Grabarnik S, Caron J, et al. The MetOp Second generation 3MI Instrument. Proc SPIE, 2013, 5: 88890J.
- [64] Nazionale C, Aeronautica C, Pratica V, et al. METOP-SG 3MI (Multi-viewing Multi-channel Multi-polarization Imaging), a Powerful Observing Mission for Future Operational Applications. Daniele BIRON. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Vienna, 2013.

A Review of Visible Infrared Imaging Radiometer on Meteorological Satellite

Yang Zhongdong Liu Jian

(*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

The development of visible infrared imaging radiometer that payload on environmental and meteorological satellites for 50 years are reviewed. 12 kinds of instruments are selected as typical representatives from nearly 100 sets of instruments run in orbit at different period. An analysis is done combined instrument functional performance specifications with application requirement. The analysis can be done from the basic strands of historical development, trend of main operational in the future and the direction of innovation and development. The development process can be divided into three stages. The first stage is the early exploration period. It is the first generation of remote sensing instrument on meteorological satellite that created a precedent for earth observation. The second stage is the initial application period, it basically forms a stable preliminary application situation for three decades. At the same time, Europe and China begin to develop their own environmental meteorological optical remote sensing instruments. The third one is development and stable application stage. It appears a new generation visible infrared optical imaging radiometer. These instruments have some common characteristics, such as more than 20 spectrum channels with narrow bandwidth spectrum. The spectral range covers 0.4–15 μm and radiometric accuracy. Their spatial resolution is between 200 and 1000 meters in general. Advanced instruments represent trends of visible infrared imaging radiometer on polar orbit meteorological satellite in the future. The visible infrared optical imaging radiometers on geostationary orbit meteorological satellite are characterized by about 15 typical spectral channels with narrow spectral bandwidth and the coverage of spectral range from 0.4 μm to 15 μm . The radiometric is also very high. The spatial resolution is between 500 and 2000 meters. The disk image forming speed can reach minute level and the regional area scanning can be faster.

Key words: meteorological satellite; visible infrared imaging radiometer; development