

doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2018.01.001

风云四号辐射成像仪及其数据在卫星气象中的应用

王淦泉[†], 沈霞

中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 人类社会的发展与气象观测密不可分,通过气象卫星观测气象是气象预报的重要手段。气象卫星主要分为极轨气象卫星和静止气象卫星两类。辐射成像仪一般是各类气象卫星的核心载荷,用于获取目标不同光谱波段的辐射数据。卫星气象是指对气象卫星获取的辐射数据进行分析处理,利用分析结果进行气象和气候预报。本文重点介绍了中国最新研制发射的第二代地球静止气象卫星——风云四号辐射成像仪的性能和技术特点,并介绍了辐射成像仪数据产品在卫星气象中的应用。

关键词 气象卫星;卫星气象;辐射成像仪;探测波段;气象产品

1 气象卫星和卫星气象^[1]

1.1 气象卫星

气象卫星是专门用于气象观测的应用卫星。气象卫星由卫星平台和有效载荷分系统组成,其中遥感仪器是气象卫星的核心有效载荷。气象卫星上的遥感仪器可以获取云和大气状态的数据。卫星气象是利用卫星遥感仪器获取的遥感数据,生成云和地球表面物理状态参数、大气物理状态参数、大气组成成分及垂直分布参数等产品,并将这些产品应用于气象和环境科学工程。

通过气象卫星获取的遥感数据要想得到有效的实际应用,必须解决遥感数据的定量化问题。遥感数据的定量化至少包含三方面的概念:一是遥感数据对应的地球上的准确位置;二是遥感数据的准确度;三是通过遥感数据所反演产品的准确度。遥感仪器一般会配置从可见光至甚长波的不同探测波段,而遥感数据主要是指依据不同探测波段获取的辐射量数据,这些辐射量数据反映了目标(云和地表)反射太阳能量的大小和目

标(云和地表)自身辐射亮温的高低。

1.2 卫星气象

在气象卫星工程发展的过程中,同时诞生了卫星气象学科和卫星气象工程。卫星气象是研究如何利用气象卫星获取的辐射数据,推导大气和地物表面状态的参数,以及如何解释卫星遥感图像。与卫星气象密切相关的学科有:

(1)几何学

高品质气象卫星观测产品(图像)的形成,需要掌握卫星、太阳、地球等天体的运动规律,预报多颗恒星的位置,利用几何学对获取的图像进行定位校正,使气象卫星观测数据与被测目标位置准确对应,并形成各种业务应用的投影图。

(2)大气物理学

在遥感观测过程中,将气象卫星遥感仪器一个探元对应的观测目标作为一个气象站,将遥感仪器观测得到的数据予以标定,再用大气物理学辐射传输方程反演,获得地球表面或大气的物理状态参数。

[†]通信作者,研究方向:地球同步轨道气象卫星可见红外遥感仪器的系统设计。E-mail: wganquan@mail.sitp.ac.cn

(3)大气动力学

根据气象卫星遥感仪器获取的云图像的宏观特征及其演变,利用大气动力学可以反推大气中发生了什么样的热力过程和动力过程,并且诊断大气中存在的天气系统在其生命史中处于什么阶段,发展前景如何。

(4)数据同化

全世界的气象站被安排在统一时间,用统一标准观测统一的气象要素。气象卫星观测数据是在不同时间获取的,并且观测要素也不是传统的压、温、湿、风等基本气象参数。数据同化的目的就是建立大气动力学和热力学的一系列方程组,使所有不同时间、不同地点、不同观测手段获取的不同性质和种类的数据,在描写大气行为的方程组及其初始条件和边界条件下达到最佳匹配。数据同化是数值天气预报和卫星气象的边缘学科。

2 地球静止轨道气象卫星的有效载荷

2.1 极轨气象卫星和地球静止气象卫星

在太阳同步轨道运行的气象卫星称作极轨气象卫星,其轨道高度一般在650~1 500 km,通过围绕地球飞行的方式实现全球观测,重复观测周期较长;在地球同步轨道运行的气象卫星称作地球静止气象卫星,其轨道高度为35 768 km,在相对地球静止的赤道上空实现对局部地球区域的快速和连续的观测,赤道上空3颗分布均匀的卫星可实现对全球连续观测。

极轨气象卫星每天以相同方向经过同一纬度的当地时间是相同的,对地球上同一区域的重复观测时间一般需要12 h。地球静止气象卫星相对地球几乎不动,比极轨气象卫星具有观测时间分辨率高的优势,对地球上同一区域重复观测的时间可以小于1 min。地球静止卫星对于短时天气预报、中小尺度天气系统、灾害天气的观测追踪和防灾减灾有特别重要的意义。

2.2 地球静止自旋气象卫星和三轴稳定气象卫星

根据卫星姿态稳定方式,地球静止气象卫

星可以分为自旋稳定静止气象卫星和三轴稳定静止气象卫星。自旋稳定静止气象卫星利用卫星自旋实现姿态稳定,姿态稳定度高,图像相对地球的定位精度也高。卫星旋转时,载荷也跟着旋转。载荷观测视线对地球的张角仅为约 17.4° ,导致载荷可观测时间的利用率很低,约为5.6%,无法实现凝视观测,区域观测的灵活性也较差。由于自旋速度的影响,探测器目标驻留时间短,并且空间分辨率越高驻留时间越短。自旋稳定静止气象卫星比较适合配置探测器不需要长驻留观测的辐射成像仪,不利于配置探测器需要长时间驻留观测的大气垂直探测仪、微波辐射计、闪电成像仪等载荷。地球静止自旋稳定卫星外形一般是圆柱体,地球静止三轴稳定卫星一般是长方体。

三轴稳定气象卫星利用飞轮的高速旋转实现姿态稳定和对地定向,姿态稳定度相对较低。由于可以始终对着地球,载荷可观测时间的利用率很高,可达80%以上。地球静止三轴稳定气象卫星区域观测灵活性好,时间分辨率很高。其上配置的辐射成像仪可以针对地球圆盘(圆直径 17.4°)任何位置实现区域快速成像,1 000 km \times 1 000 km区域的观测时间小于1 min。这种小区域的短时间连续观测,十分有利于揭示中小尺度灾害性天气系统的发展过程,帮助预报员作出准确预报。地球静止三轴稳定气象卫星可以凝视观测地球,探测器的观测驻留时间可以很长,使得配置需要长驻留时间的大气垂直探测仪、闪电成像仪、微波辐射计等有效载荷成为可能,并使对太阳成像也成为可能。

2.3 地球静止气象卫星载荷

1974年5月,美国发射了世界上第一颗地球静止气象卫星SMA-A,开创了气象卫星新纪元,并于1975年正式启用世界第一颗地球静止气象卫星GOES-1。40多年来,美国、欧洲、日本、印度、前苏联、中国、韩国相继发射了若干颗地球静止气象卫星。由于基于自旋稳定平台的探测技术对卫星平台和载荷的技术要求相对较低,各国基本上按照先发展自旋平台探测,后发展

三轴稳定平台探测的技术思路。美国于1994年发射了世界上第一颗基于三轴稳定平台的地球静止气象卫星GOES-8, 实现Imager和Sounder双载荷的同时探测^[2]。中国于1997年12月发射了自主研发的第一颗自旋稳定地球静止气象卫星FY-2(风云二号, 图1), 实现了从可见光至长波红外的5波段探测, 并于2016年12月发射了自主研发的第一颗三轴稳定地球静止气象卫星FY-4(风云四号, 图2)。卫星上同时装载了辐射成像仪、干涉式大气垂直仪、闪电成像仪等多台载荷, 是同类卫星中载荷最多的卫星。辐射成像仪探测波段从0.45~13.8 μm , 共有14个探测波段, 覆盖了从可见光至甚长波红外; 干涉式大气垂直探测仪探测波段有两个宽谱段组成, 分别从4.44~6.06 μm ($1\ 650\sim 2\ 250\ \text{cm}^{-1}$)和8.85~14.3 μm ($700\sim 1\ 130\ \text{cm}^{-1}$), 光谱灵敏度分别达到了0.8 cm^{-1} 和1.6 cm^{-1} , 共有1 500多个探测波段; 闪电成像仪探测中心波长为777.7 nm, 光谱带宽仅1 nm。闪电成像仪专门用于云顶闪电的探测; 辐射成像仪用于地球表面、大气和云的平面探测; 干涉式大气垂直探测仪用于大气的垂直探测。将辐射成像仪和干涉式大气垂直探测仪的数据融合, 可以实现地球大气的三维探测。干涉式大气垂直探测仪在风云四号上的搭载, 也是世界上首次在地球静止气象卫星上的搭载, 辐射成像仪性能也达到了世界先进水平。

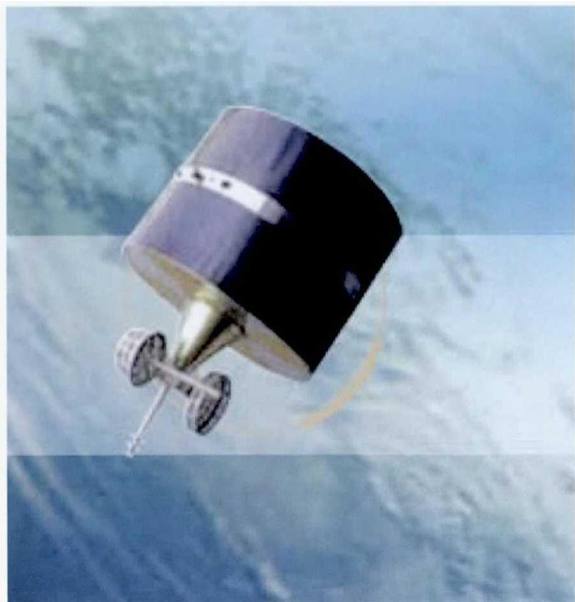


图1 风云二号气象卫星外形图

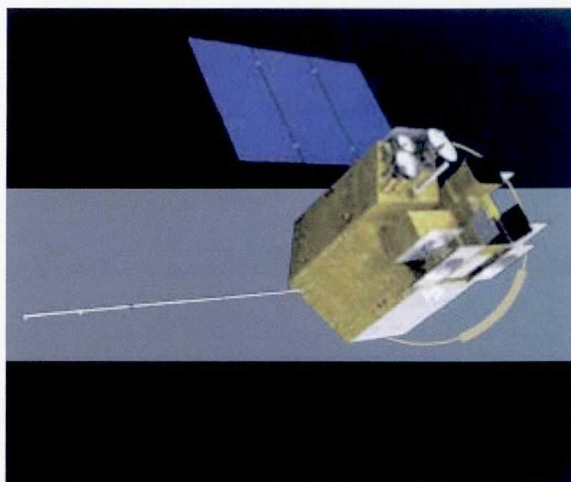


图2 风云四号气象卫星外形图

3 风云四号气象卫星辐射成像仪

3.1 辐射成像仪主要任务

风云四号卫星是中国第二代地球静止气象卫星, 而辐射成像仪是风云四号卫星上最重要的有效载荷之一。FY-4在轨主要任务是获取地球表面和云的多光谱、高精度定量观测数据和图像, 包括昼夜的地球全圆盘图像、高频次的区域图像, 以全面提高对地球表面和大气物理参数的多光谱、高频次、定量探测能力。

3.2 辐射成像仪性能特点

卫星平台从自旋稳定到三轴稳定的转变, 不仅使大气垂直探测仪和闪电成像仪等载荷的搭载成为可能, 同样也使辐射成像仪性能的大步跨越成为可能。地球静止自旋稳定平台辐射成像仪探测波段、每波段探测元数、辐射测量分辨率都会受到探测器驻留时间和成像效率的较大约束, 并且无法实现局部区域的快速重复观测。三轴稳定卫星平台为辐射成像仪提高扫描效率和实现局部区域的快速重复观测提供了可能。风云四号气象卫星辐射成像仪相对风云二号卫星辐射成像仪在性能上有了很大的提高, 主要体现在下面几点:

(1)采用自主二维扫描技术(图3), 即需要通过东西和南北两个方向的配合扫描实现对地球全圆盘的成像, 而自旋卫星的东西扫描是通过卫星

自旋实现的。

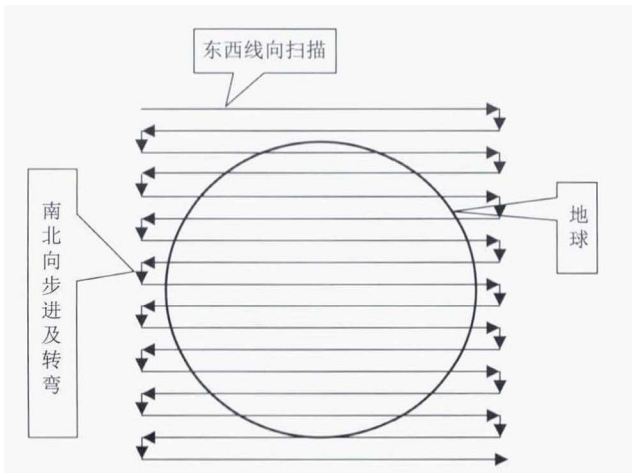


图3 风云四号辐射成像仪三维扫描成像原理图

(2)探测波段数从5波段增加到14波段，并且向可见光短波(低端)和红外长波方向(高端)均有拓展，光谱低端和高端分别达到了 $0.45\ \mu\text{m}$ 和 $13.8\ \mu\text{m}$ ，而风云二号辐射成像仪的光谱低端和高端分别为 $0.55\ \mu\text{m}$ 和 $12.5\ \mu\text{m}$ ，因此有效地拓展了目标特征的探测和应用范围。

(3)地球圆盘图成像时间从25 min缩短为15 min，全帧扫描效率从约5%提高到80%以上，有效地加大了波段探元数目，延长了目标成像驻留时间，是实现分辨率提高的技术基础，并显著提高了目标辐射灵敏度和图像对比度，主力探测波段 $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ 辐射灵敏度达到了0.06 K。

(4)可见光 $0.55\sim 0.75\ \mu\text{m}$ 波段空间分辨率达到

了500 m，仅为风云二号辐射成像仪的1/6，明显地改善了小目标图像的清晰度，配合连续小区域扫描非常有利于观测小尺度云的生成和发展过程。

(5)实现了地球观测视场范围(17.4° 圆)内任何位置的小区域连续观测功能， $1\ 000\ \text{km}\times 1\ 000\ \text{km}$ 区域成像时间可缩短至30 s内，中国区成像时间仅为5 min，这种性能在地球静止自旋稳定卫星上是无法实现的。连续性的区域观测对短时强灾害性天气现象的实时监测及过程研究具有重要作用。

(6)实现了全波段在轨定标，其中 $3.5\ \mu\text{m}$ 及以上红外波段实现了全口径全光路绝对定标，定标精度优于1 K，主力探测波段 $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ 辐射绝对定标精度达到了0.3 K。为辐射探测数据定量化应用提供了重要的保证。

(7)实现了成像与恒星敏感合一功能，具备了对在轨6等及以下恒星的观测能力，对于因热变形引起的光轴变化校正提供了重要的基础数据，以此基础数据为依据，推导的图像定位和配准算法有效地弥补了三轴稳定平台相对自旋稳定平台的重要缺陷，改善了图像相对地球的位置精度。图4是补偿前后印度陆地与印度洋交汇处廓线与标称地球网格对比效果图。可以看出，为了使辐射成像仪图像达到好的定位精度，地球静止三轴稳定气象卫星位置补偿是星地需要研究的关键内容。

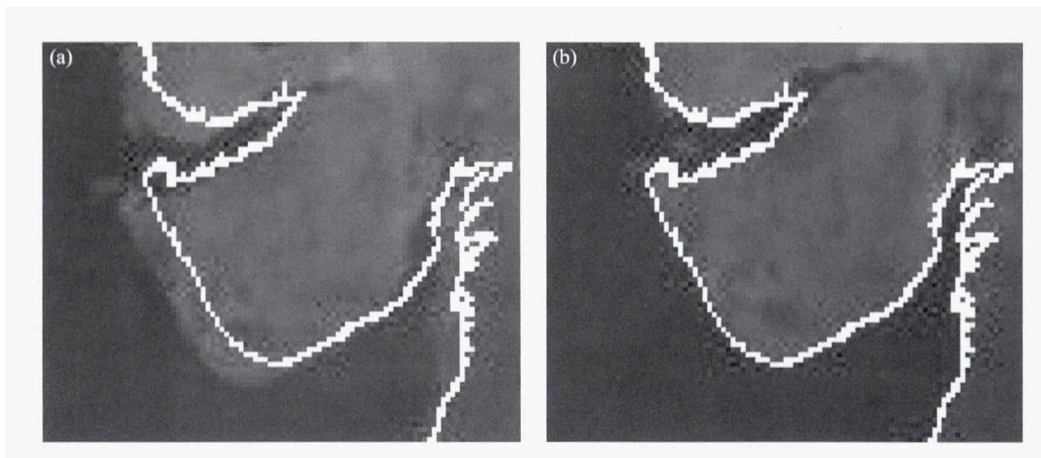


图4 补偿前(a)和补偿后(b)印度陆地边界与标称廓线

3.3 辐射成像仪技术特点

风云四号气象卫星经历了15年之久的漫长研制过程,由于需要解决卫星平台由自旋向三轴稳定姿态稳定方式转变带来的一些列问题,辐射成像仪经历了原理样机、模样、初样和正样等4个研制阶段。为了适应在轨环境,辐射成像仪发射前进行了真空模拟太阳辐照热平衡试验、太阳反射波段室内积分球定标和外场定标试验、红外波段真空定标试验、系统光谱响应测试等重要试验。

风云四号卫星2016年12月10日在西昌卫星发射中心发射后,在地面站的配合下,辐射成像仪进行了仪器温控符合性试验、14个波段图

像数据获取和校正试验、 $2.1\sim 2.35\ \mu\text{m}$ 和 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ (H)图像超分效果比对试验、在轨太阳反射波段定标试验、在轨红外波段定标试验等重要试验。经过近一年的在轨测试,风云四号卫星顺利地交付给了最终用户——国家气象局,辐射成像仪取得了圆满成功。图5和图6分别是 $2.1\sim 2.35\ \mu\text{m}$ 波段的超分前后图像压缩和放大状态时的效果对比图。其中图5(a)和5(b)是该波段图像压缩时的对比图,几乎看不出清晰度的差别;图6(a)和6(b)是该波段图像放大时的对比图,可以明显看出清晰度的差别。说明超分达到了良好效果,这是超分技术在中国遥感卫星上的首次应用,尤其是在定量卫星的应用上取得了首次突破。

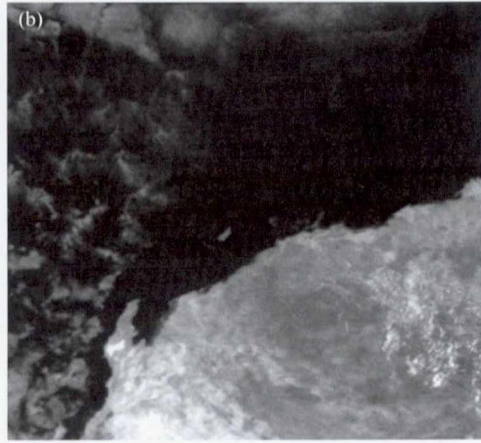
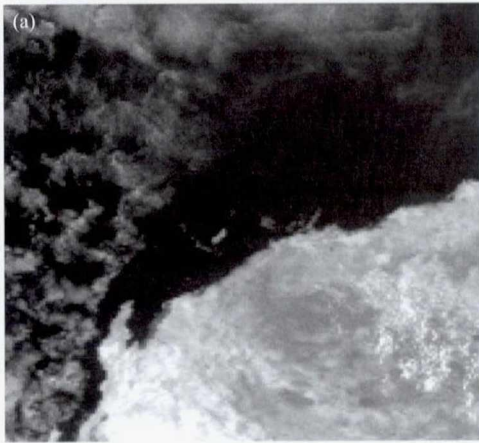


图5 波段 $2.1\sim 2.35\ \mu\text{m}$ 的超分前(a)和超分后(b)图像压缩状态时的效果对比图

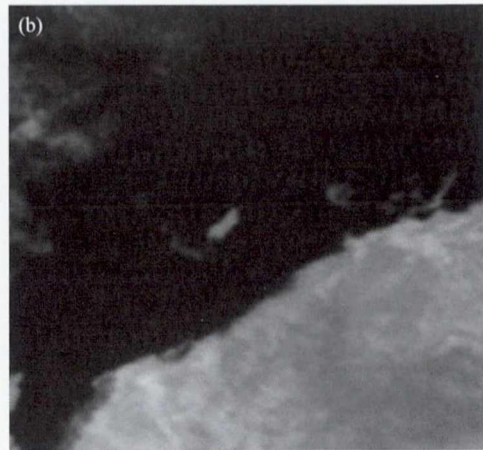
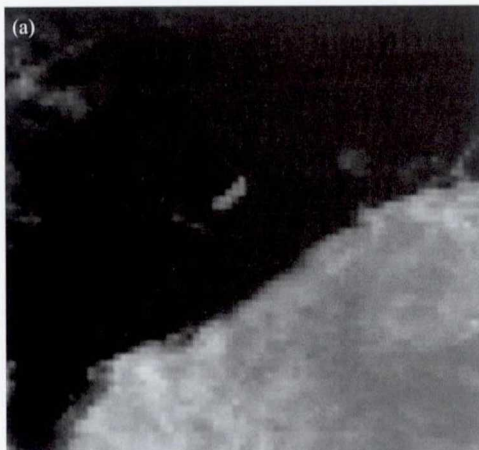


图6 波段 $2.1\sim 2.35\ \mu\text{m}$ 的超分前(a)和超分后(b)图像放大状态时的效果对比图

风云四号辐射成像仪对扫描系统、光机系统、热控系统、辐射制冷器、探测器、电子线路、星上定标系统等进行综合优化设计,以适应地球静止三轴稳定平台卫星特有的动力学环境、热学环境,强烈的太阳杂散辐射环境,满足空间分辨率、探测灵敏度(信噪比)、图像配准精度及超长的寿命等用户和卫星总体设计要求,并尽可能减少对卫星姿态的扰动,是辐射成像仪系统研制技术及各级分系统研制技术的重要研究内容和目标。特别是扫描系统如何保证稳定指向精度和面型质量及解决长寿命运动问题;光学及其结构如何适应剧烈的环境温度变化并保证良好的像质问题;定标方案、信息处理方案及探测器均匀性校正方案等如何保证系统探测精度的稳定性问题。辐射成像仪技术要求体现了3个特点:

(1)高精度:扫描镜运动精度高,要求达到 $1''(1\sigma)$,光分辨率高(仅 $14\ \mu\text{rad}$),各波段及波段内图像配准精度高(优于 $1/4$ 像素);

(2)长寿命:设计在轨寿命7年,主要体现在探测器长寿命和大惯量扫描镜连续低速摆动2亿次,这在国内还没有先例;

(3)环境恶劣:辐射成像仪每天外热流波动剧烈,引起内部温度场每天 $30\ \text{K}$ 以上的剧烈波动。

尽管三轴稳定卫星平台对于自旋稳定卫星平台有较多突出的优点,但辐射成像仪研制也存在其特有的难题:安装在相对较低姿态稳定度卫星平台上,不利于图像配准和定位,大惯量扫描镜的连续摆动会加剧这种不稳定;辐射成像仪如何适应恶劣的温度环境,并获得高质量的图像。设计师需要采用特殊的技术手段对这些问题加以有效解决,不然三轴稳定平台的优势就难以发挥,甚至辐射成像仪性能可能被这些问题所抑制。具体来说,辐射成像仪取得了以下重要的技术突破:

(1)辐射成像仪采用东西、南北双扫描镜实现二维扫描成像。卫星对扫描镜运动控制精度和实时补偿精度也提出了很高的要求,扫描镜扫描运动时的角位置定位精度达到 $1''(1\sigma)$ 。辐射成像仪扫描镜运动控制采用基于感应同步器角度反

馈、交流永磁伺服电机驱动的数字化控制技术,并利用激光陀螺对感应同步器的反馈角度进行了动态角度校正。陀螺校正成为实现高精度扫描镜绝对角度运动控制重要的环节,陀螺测角精度可以达到 $0.1''(1\sigma)$ 。在轨测试数据表明,辐射成像仪扫描镜运动指向精度分别在 $10^\circ/\text{s}$ 时达到了 $0.4''(1\sigma)$ 和 $2.5^\circ/\text{s}$ 时达到了 $0.24''(1\sigma)$ 。

(2)辐射成像仪凝视地球,且随地球同步自转,每天太阳直射到仪器内部的时间超过 $10\ \text{h}$,照到扫描镜的时间约 $6\ \text{h}$ 。辐射成像仪每天将经历被太阳高温直射和接收地球辐射或太空冷背景低温辐射的循环过程。由于外热流的变化,辐射成像仪也将随着外热流变化经历很大的温度变化。这种变化不仅表现出日周期,还表现出随太阳高度角变化的季节性周期。外热流的这种日变化,对仪器环境来说,好比每天都得经历一次春夏秋冬的四季温度循环。在这种日周期的“四季”温度循环过程中,仪器必须时刻保持良好的状态。受这种热循环影响最大的部件是扫描机构、三反射望远镜和辐射制冷器。仪器内的温度大幅变化非常不利于辐射成像仪获得稳定的高质量图像,尤其对图像配准精度和辐射探测精度会带来不利影响。为了将上述太阳不利影响降低到最低程度,设计师采取了以下技术措施:①良好的温控设计,不仅使得关键部件的温度极值小,而且要使温度波动范围小、梯度小;②优异的光机热变形抵御能力,望远镜能够适应 $0\sim 40\ \text{K}$ 的温度波动,扫描机构能够适应 $0\sim 50\ \text{K}$ 的温度波动及轴二端 $10\ \text{K}$ 的温度梯度;③良好的太阳杂散和背景辐射抑制措施,有效的光栏设计阻挡了一级杂散的入侵,同时星地配合的在轨背景辐射测试和校正过程,进一步降低了背景辐射的影响,有效地提高了探测数据的可信度。

(3)实现扫描镜东西向2亿次的低速往复扫描运动是辐射成像仪长寿命的主要标志。这种长寿命要以保证足够的扫描镜运动精度为前提,而且实现环境是扫描机构框架每天温度波动 $10\sim 40\ \text{K}$,显得难度更大。辐射成像仪在研制合适的润滑脂基础上,对扫描机构进行了精确的抵消温

度梯度引起的变形适应性设计。特别是扫描镜指向精度保证的核心元件——感应同步器的固定工艺方案，确保了扫描镜的运动指向精度不受环境温度波动的影响。发射前还进行多次真空和常压的温度验证试验，实现了恶劣温度环境下高精度与长寿命的统一。

4 辐射成像仪探测数据在卫星气象中的应用

4.1 辐射成像仪探测数据及处理

风云四号辐射成像仪具有从可见光至甚长波红外的14个探测波段，这14个波段具有不同的探测用途，可以识别不同地表、云或大气的不同光谱特征，详见表1。辐射成像仪原始数据经卫

星平台下传，被地面站接收后，需要经过多级处理才能形成有用的气象产品。气象卫星的数据处理一般分为4个级别：

(1)0级数据：辐射成像仪的原始数据通过卫星平台下传，经地面译码后形成的数据。

(2)1级数据：0级数据经格式变换、定位和定标等处理后生成的数据，包含波段辐射亮温和反射率。

(3)2级数据：对1级数据进行处理生成的各种产品，如地球物理参数(包括各种陆表、海表、云、大气状态等)、基本图像产品、环境监测产品和灾情监测产品等。

(4)3级数据：在2级数据基础上生成的气候产品和其他分析产品。

表1 风云四号气象卫星辐射成像仪主要性能

波段/ μm	星下点空间分辨率/km	S/N 或 NE ΔT	主要用途
0.45 ~ 0.49	1	$\geq 150(\rho=100\%)$	植被
0.55 ~ 0.75	0.5	$\geq 150(\rho=100\%), \geq 3(\rho=1\%)$	植被、雾、云、恒星观测
0.75 ~ 0.90	1	$\geq 200(\rho=100\%), \geq 3(\rho=1\%)$	植被，水面上空气溶胶
1.36 ~ 1.39	2	$\geq 50(\rho=100\%), \geq 3(\rho=1\%),$	卷云
1.58 ~ 1.64	2	$\geq 150(\rho=100\%), \geq 3(\rho=1\%),$	低云和雪识别、水云和冰云识别
2.10 ~ 2.35	2~4	$\geq 200(\rho=100\%), \geq 3(\rho=1\%),$	卷云、气溶胶，恒星观测
3.5 ~ 4.0(H)	2~4	$\leq 0.2 \text{ K}(315 \text{ K})$	火情
3.5 ~ 4.0(L)	4	$\leq 0.2 \text{ K}(300 \text{ K})$	水汽、雾
5.8 ~ 6.7	4	$\leq 0.3 \text{ K}(260 \text{ K})$	高层水汽
6.9 ~ 7.3	4	$\leq 0.3 \text{ K}(260 \text{ K})$	中层水汽
8.0 ~ 9.0	4	$\leq 0.1 \text{ K}(300 \text{ K})$	云、总水汽
10.3 ~ 11.3	4	$\leq 0.1 \text{ K}(300 \text{ K})$	地表温度
11.5 ~ 12.5	4	$\leq 0.1 \text{ K}(300 \text{ K})$	地表温度
13.2 ~ 13.8	4	$\leq 0.5 \text{ K}(300 \text{ K})$	水汽、云

在辐射成像仪的4级数据处理过程中，1级数据的生成需涉及定位处理和定标处理。定位处理是在每一个探测像素位置和相应的地面探测点的地理经纬度之间建立确定的映射关系。位置标定信息有卫星轨道、姿态参数，地标导航，太

阳、地球、卫星、恒星相对关系等。定量处理是在每一个(组)探测数据与反射率和辐射亮温之间对应关系。形成数据定标信息有辐射成像仪发射前、后的各波段辐射定标系数，在轨辐射背景数据等。

4.2 基于辐射成像仪探测数据的气象产品及应用

辐射成像仪的探测数据形成的气象产品分为定性产品和定量产品两种。定性产品主要以图像的形式给出,通过分析图像中目标的纹理、形状、分布、走向趋势和相对大小关系等特征,从而得到一些图像的定性分析结果。定量产品除涵盖了定性产品的功能以外,还可以进行进一步的数值分析、验证。实际应用中,需要同时考虑用户的需求和数据本身的特点来进行产品反演。

在卫星气象的4级数据产品中,2级数据产品最为丰富。按投影分类有兰勃特投影、麦卡托投影、等经纬度投影、极射赤道投影等;按通道分类有单通道(波段)云图、多通道(波段)合成云图等。除了云图外,2级数据产品有地表温度、海表温度、植被指数、干旱指数、积雪范围、海水、云总量、云高、云顶温度、射出长波辐射、海上气溶胶、大气可降水、海面指数、城市热岛;还有洪灾、森林火灾、沙尘暴、大雾等

灾害监测产品;还有海洋水色、海面油污、河口泥沙、海岸侵蚀等海洋环境产品。3级数据产品主要指气候产品和分析产品。气候产品有按候(5天)、旬、月统计的海温、积雪、云总量、大气湿度、植被指数;分析产品有热带气旋位置、热带气旋强度、极涡位置、中尺度天气结构场、农作物长势等^[1]。

下面通过云检测、云相态、沙尘暴、积雪指数、强对流等产品来介绍辐射成像仪多波段数据在卫星气象中的作用^[3]。

云检测算法采用辐射成像仪的 $0.65\ \mu\text{m}$ 、 $1.61\ \mu\text{m}$ 、 $3.75\ \mu\text{m}$ 、 $7.1\ \mu\text{m}$ 、 $10.8\ \mu\text{m}$ 、 $12.0\ \mu\text{m}$ 等6个通道数据,结合多种辅助数据源,利用云和晴空在光谱及空间方面的不同特征来进行区分。检测结果共分为4类,包含:晴空、可能晴空、可能云、云。人们日常生活中见到的各种云,当用计算机来识别时,却要用到如此之多的光谱数据才能确定(图7)。

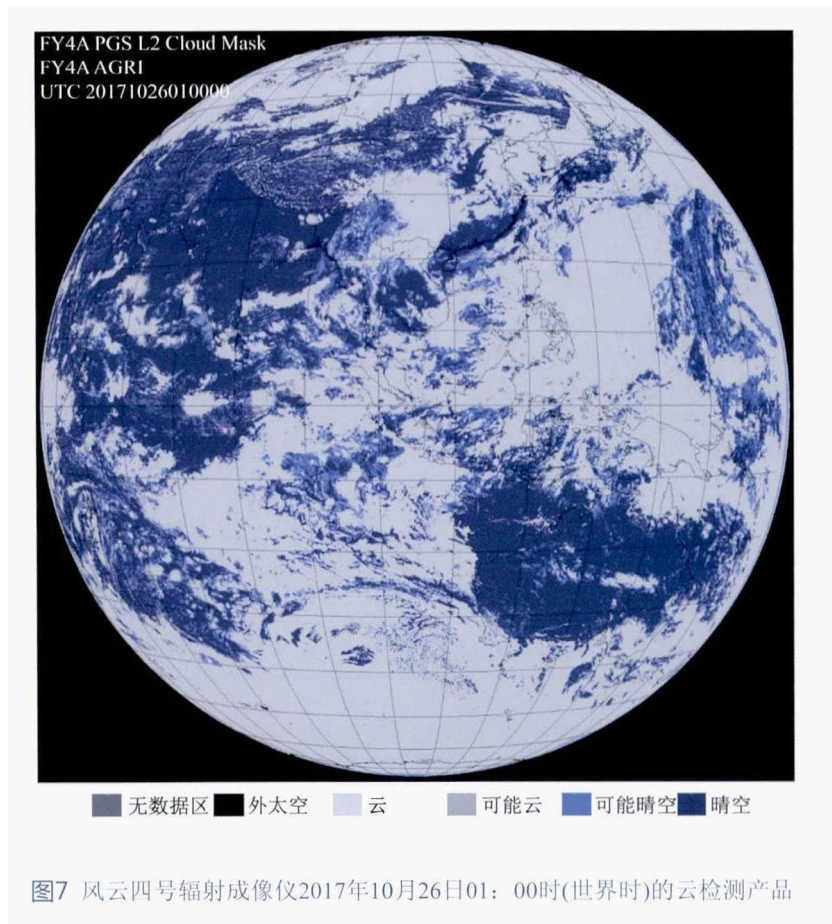


图7 风云四号辐射成像仪2017年10月26日01:00时(世界时)的云检测产品

仅靠单一通道或波长的云有效发射率无法得到云的微物理信息，需要利用云的有效发射率的波谱变化。为了有效利用这个特征，可利用有效云发射率来计算有效吸收光学厚度比。云的有效

吸收光学厚度比不依赖于观测的辐射、云高或云光学厚度。云相态算法需要使用成像仪7.3 μm 、8.5 μm 、11 μm 和12 μm 通道的辐射数据以及成像仪的云检测产品来进行计算(图8)。

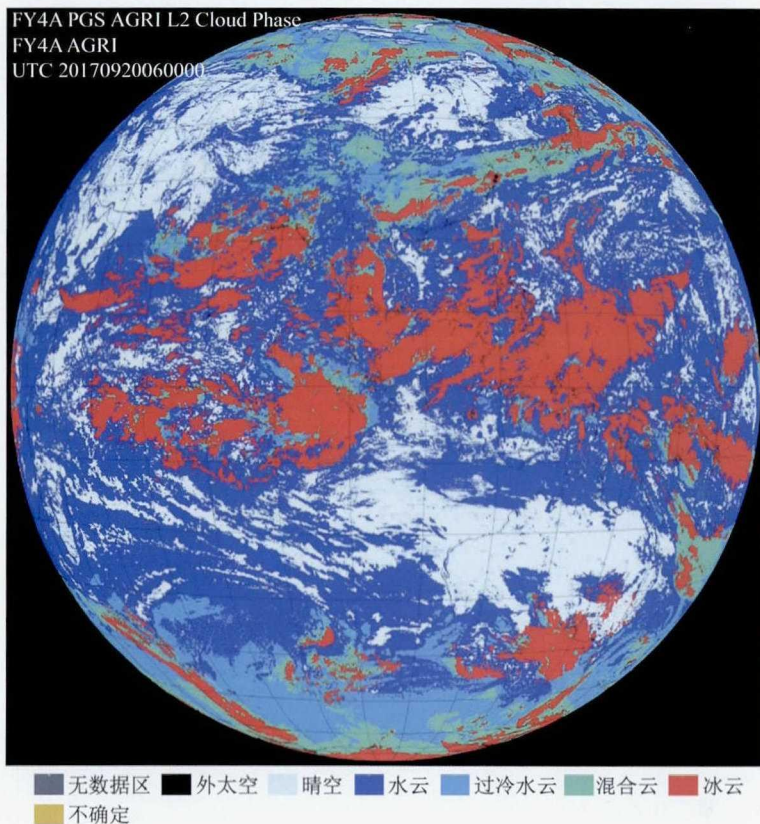


图8 风云四号辐射成像仪2017年9月20日06:00时(世界时)的地球全圆盘云相态图像

图9是风云四号辐射成像仪2017年5月4日03:15时(世界时)的沙层强度监测图。

沙尘检测算法以沙尘在各光谱展示的与云、地表和晴空大气的独特差异性为基础，并依据光谱阈值法和概率密度函数将沙尘从云和晴空水体陆地中区分开。须采用0.47 μm 、0.64 μm 、0.86 μm 、1.38 μm 、1.6 μm 、3.7 μm 、11 μm 、12 μm 等波段的产品数据，对沙尘产品采用单通道光谱聚类、亮温差、比值法、背景场法和均一性检验等12组判识标准。就像医生对复杂病理的判定过程，必须通过一系列不同类型检查指标的综合，才能确定病情。

图10是风云四号辐射成像仪2017年10月16日04:53时(世界时)中国区域积雪覆盖范围产品

示例。

图10中，从帕米尔高原沿青藏高原北侧到青海湖南部的沿线区域，有明显的积雪分布，这说明产品监测到了10月中旬中国西部青海、甘肃等地的一次显著降雪过程。此外，贝加尔湖的西部和南部，也有成片的积雪覆盖。产品算法需要辐射成像仪的0.65 μm 、0.825 μm 、1.375 μm 和1.61 μm 反射率通道数据，3.75 μm 、8.5 μm 、10.8 μm 和12.0 μm 亮温通道数据，卫星天顶角、太阳天顶角、卫星方位角和太阳方位角信息，时间、高程、土地利用类型等地理信息数据，以及积雪判识查找表和积雪判识阈值表，以及云检测结果。

图11是风云四号辐射成像仪利用10.8 μm 通道增强显示后得到的2017年8月22日21时(世界

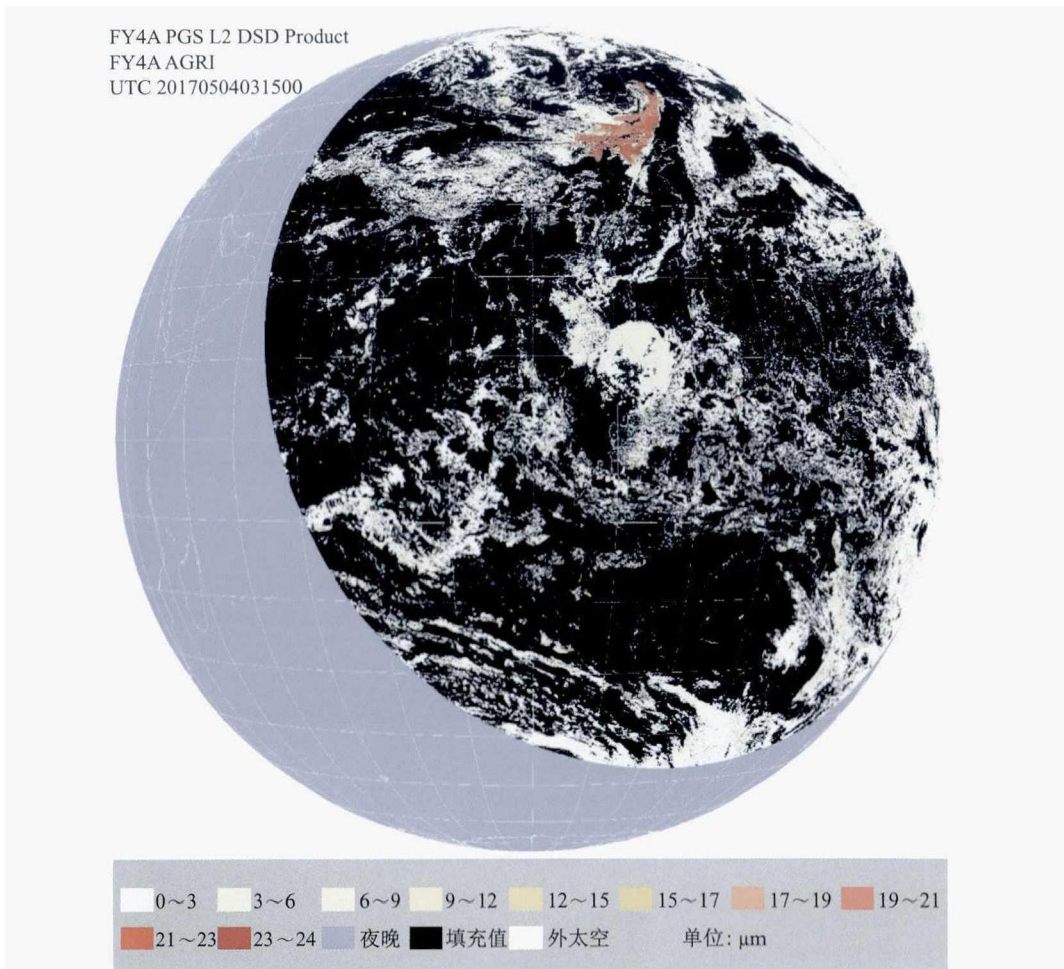


图9 辐射成像仪沙层暴强度分布监测图

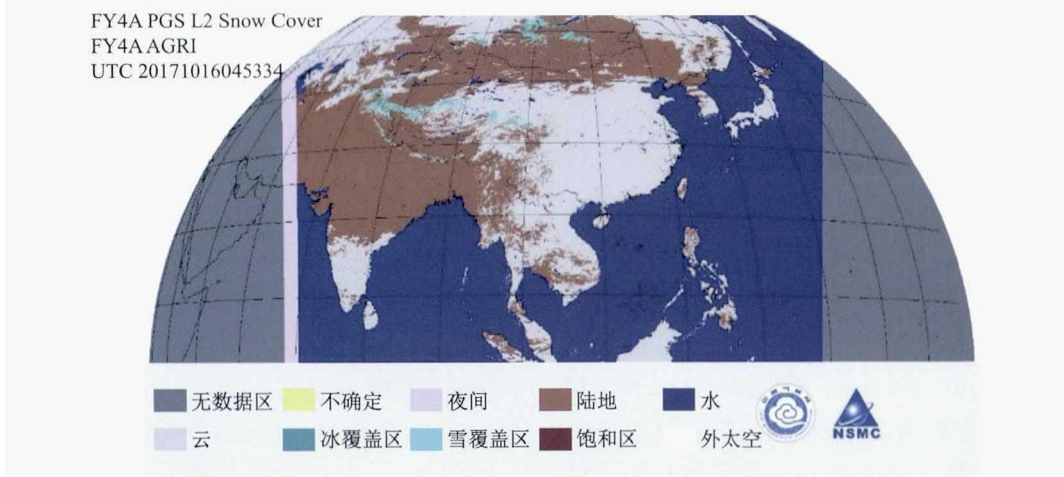


图10 风云四号辐射成像仪2017年10月16日04:53时(世界时)中国区域积雪覆盖范围产品

时)台风“天鸽”在登陆广东前的图像。从图上可以清晰地观察到台风的结构特征：整个台风南侧螺旋云带发展旺盛，强对流区主要集中在西南

象限，登陆前中心眼区清晰，围绕眼区为密实卷云。地球静止气象卫星辐射成像仪是监测台风生成和发展的监测利器。

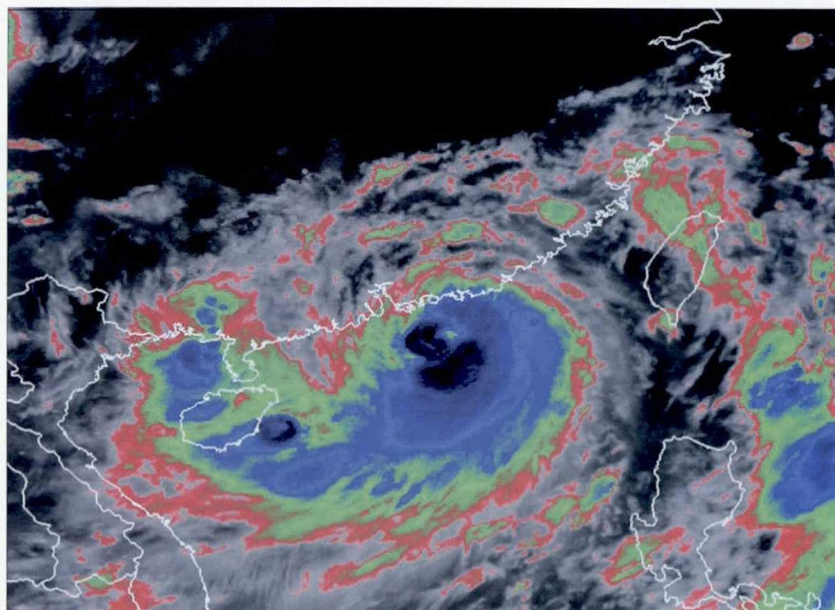


图11 风云四号辐射成像仪利用10.8 μm 通道监测台风的增强图像

气象卫星的产品已广泛应用、服务于气象、海洋、水文、环境、防灾减灾、航空、海运及交通运输等领域和部门。随着社会的进步、国民经济的发展、人民生活水平的不断提高，卫星产品在社会经济可持续发展、防灾减灾及服务人民大众日常生活等方面，正发挥着越来越重要的作用。

(2017年11月6日收稿)■



参考文献

- [1] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京: 北京宇航出版社, 2005.
- [2] GOES-N/O/P/Q. The next generation earth stationary meteorological satellite [EB/OL]. [2017-11-06]. https://sxi.ngdc.noaa.gov/sxi/docs/GOES-NOP_Brochure_40p.pdf.
- [3] 杨军. 卫星气象及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2014.

The FY-4 radiometer imager and the application of its data in the satellite meteorology

WANG Ganquan, SHEN Xia

Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The development of human society is inextricably linked with meteorology. Observation from meteorological satellite is an important means of meteorological forecasting. Meteorological satellite can be in polar orbits and geostationary orbit. Radiometer imager is typically the core payloads of meteorological satellite and makes use of the multi-spectra results to carry out meteorological and climate forecasts. This article focuses on the performance and technical characteristics of the China's newly developed and launched second-generation geostationary meteorological satellite FY-4 radiometer imager, and introduces the application of its data products in satellite meteorology.

Key words meteorological satellite, satellite meteorology, radiometer imager, spectral band, meteorological product

(编辑: 温文)