



中国极轨气象卫星遥感技术的发展*

龚惠兴

(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

摘要 中国极轨气象卫星遥感技术的研究始于20世纪70年代。为获取昼夜云图,1974年开始研制48转/分可见红外扫描辐射计,可见和红外图像地面分辨率分别为4和5.8毫弧度。1977年“FY-1”气象卫星进入工程研制,开始使用辐射致冷器冷却的HgCdTe红外探测器研制120转/分扫描辐射计,图像地面分辨率均提高到3.6毫弧度。随着HgCdTe探测器性能的提高和数字化技术的进步,1982年开始研制360转/分5通道扫描辐射计,其中2个可见光通道用于海洋水色观测,图像地面分辨率1.2毫弧度。1988年9月“FY-1A”卫星首次发射,在1990年9月发射的“FY-1B”卫星上,扫描辐射计稳定工作了2年,图像清晰,红外辐射定标精度优于1K。为同时满足气象和海洋水色观测的需要,1989年提出研制十通道扫描辐射计,它不仅设有NOAA卫星AVHRR/3的6个探测通道,还有4个通道分别用于海洋水色观测和大气校正。该仪器装载在1999年5月和2002年5月入轨的“FY-1C”和“FY-1D”卫星上,运行寿命分别超过4年和9年。为发展新的遥感仪器和提高观测能力,在2002年发射的“SZ-3”和“SZ-4”飞船上进行了中分辨率成像光谱仪、多模态微波遥感器、太阳紫外光谱探测仪、地球辐射收支仪的遥感试验,并开展了大气红外分光计的研制,为中国极轨气象卫星从二维图像向三维立体观测建立了技术基础。第二代业务气象卫星“FY-3A”和“FY-3B”分别于2008年5月和2010年11月发射,各装载了10台遥感仪器,获取的数据用于天气预报和气候变化研究。中分辨率成像光谱仪有20个探测通道,可对全球表面状况做较精细的快速重复观测。

关键词 气象卫星,星载遥感器,遥感技术

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.Z01.005



龚惠兴院士

1 前言

1960年4月1日美国成功发射了世界上第一颗实验气象卫星“泰罗斯-1”,采用电视摄像技术成功地拍摄了可见光云图。虽然只工作了

78天,但显示了传统地基方式无法比拟的大尺度全球快速观测能力。我国从20世纪60年代末开始接收美国第一代业务气象卫星“艾萨”播发的实时过境云图资料,在天气预报、尤其是台风和寒潮等灾害性天气预报方面收到很好的效果。1969年1月,周恩来总理指示:“我们也要搞自己的气象卫星”,中国气象卫星系统研究从此起步。

1970年4月24日,我国第一颗卫星“东方红-1”发射成功,表明我国已具有研制和发射卫星的能

* 收稿日期:2013年4月1日

力,但要实现卫星气象观测必须解决遥感仪器和适合于观测的卫星平台。经多年研究和准备,1977年11月召开了气象卫星第一次大总体会议,决定进入工程研制,定名第一颗气象卫星为“风云一号”,近极太阳同步轨道,三轴稳定对地定向,固定翼太阳能电池阵供电。经会议讨论,遥感仪器由48转/分可见红外双通道扫描辐射计改为120转/分三通道扫描辐射计,以提高对全球昼夜云图的观测能力,图像观测资料用137MHz频率实时发送,我国已建立的地面接收站可兼容接收“风云一号”和美国气象卫星的云图资料。

2 “风云一号”卫星扫描辐射计的技术发展

48转/分可见红外双通道扫描辐射计是为气象卫星研制的第一台成像遥感仪器,1974年开始研制。它采用成像望远镜前的45°反射镜旋转扫描和卫星的绕地运动获取二维景象,有可见和热红外两个探测通道,实现昼夜观测。可见和热红外探测通道均为我国自行研制,限于当时水平,热红外通道采用室温热敏电阻探测器,探测率 $D^* \approx 1 \times 10^8$ 厘米 $\text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$,响应时间常数 ≈ 2 毫秒。可见和热红外通道瞬时视场分别为4和5.8毫弧度,卫星高度900公里时,相应的图像地面分辨率为3.6和5.2公里。该仪器的性能指标(表1)与美国1970年12月开始运行的“诺阿一号”卫星扫描辐射计(SR)相当。

表1 48转/分扫描辐射计与“诺阿一号”扫描辐射计性能比较

项 目	48转/分扫描辐射计	“诺阿1号”扫描辐射计
探测波段(μm)	0.55—0.83 10.5—12.5	0.52—0.73 10.5—12.5
光学口径(mm)	120	120
瞬时视场(mr)	可见 4 红外 5.8	可见 2.7 红外 5.4
探测器	可见 硅光二极管 红外 浸没热敏电阻	可见 硅光二极管 红外 浸没热敏电阻
扫描速率(rpm)	48	48
探测灵敏度	可见 $\text{NE}\Delta\text{I} \leq 5 \times 10^{-11} \text{W}/\text{cm}^2$ 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 1.0\text{K}$	可见 $\text{NE}\Delta\text{I} \leq 5 \times 10^{-11} \text{W}/\text{cm}^2$ 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 1.0\text{K}$

在气象卫星上,使用红外成像遥感技术不仅可以实现昼夜观测,而且能定量测量目标温度,地位十分重要。为提高红外遥感仪器的性能,我国在20世纪70年代初就部署了红外碲镉汞光子探测器研究,响应速度快,探测率 D^* 约比热敏电阻红外探测器高2—3个数量级,虽需约100K的低温工作,但比其他长波红外探测器的工作温度要高,可以用低功耗的被动式空间辐射致冷器冷却,实现空间长寿命工作。到70年代中期,我国的长波碲镉汞红外探测器及其辐射致冷器的研制均取得重要进展,考虑到美国在1978年开始发射的新一代“泰罗斯-N”卫星上将用成像观测能力更强的甚高分辨率扫描辐射计取代SR,其核心技术就是使用辐射致冷器冷却的碲镉汞红外探测器。这就是为什么在1977年11月气象卫星第一次大总体会议上要把第一颗气象卫星的遥感仪器由48转/分扫描辐射计改为采用以辐射致冷器冷却的碲镉汞探测器为核心技术的120转/分扫描辐射计的原因。

120转/分扫描辐射计设有1个可见、1个近红外和1个热红外共3个探测通道,10.5—12.5微米热红外通道用于观测昼夜云图,2个可见及近红外通道除观测云图外还可区分云雪和获取植被指数。由于“风云一号”卫星初期的云图传输采用模拟信号体制,为解决3个通道的图像传输问题,采用2台结构相同的扫描辐射计同轴背向安装,1台的探测

波段为0.55—0.75微米和10.5—12.5微米,另1台为0.52—1.1微米和10.5—12.5微米,但2台仪器的45°扫描反射镜转动位相差180°,在900公里轨道高度地球张角约122°,两边各取一路信号串联,实现2个通道图像信号的串行输出。辐射致冷器采用两级级联结构,碲镉汞红外探测器工作温度105K,并采用国内自制的低饱和蒸汽压硅基114#润滑油和



迷宫式密封的技术方案,实现敞开式扫描转动装置的空间长寿命润滑。

120转/分扫描辐射计样机于1979年夏完成,主要性能指标如表2。同年9月进行了航空校飞,获取的图像资料表明,扫描辐射计对云和各类地面目标均有良好的成像观测能力,尤其是夜间红外图像清晰,温度灵敏度达到0.09K。主要原因是碲镉汞红外探测器的性能有了显著的提高,探测率 D^* 从 5×10^8 厘米 $\text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 提高到 5×10^9 厘米 $\text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$,这为进一步发展和研制主要指标与1978年刚开始业务运行的美国“泰罗斯-N”业务气象卫星甚高分辨率扫描辐射计性能相近的遥感仪器奠定了技术基础。

制订的“风云一号”卫星甚高分辨率扫描辐射计技术方案为,探测通道仍为3个(可见、近红外,热红外各1个),空间分辨率提高3倍,为1.2毫弧度,与美国甚高分辨率扫描辐射计一致。为达到所需的探测灵敏度,光学口径扩大至200毫米,可见

近红外波段仍用硅探测器,热红外波段用辐射致冷器冷却的碲镉汞探测器。45°反射镜材料由铝改为国内自制的金属铍,以保证镜面光学质量的同时减轻重量,降低扫描镜在主动段力学振动时对轴承的冲击。扫描速率360转/分,周期稳定度优于 1×10^{-4} ,红外通道的探测灵敏度优于0.37K。采用图像信号数字化和星上数据实时缓冲处理技术,把占扫描周期1/3的地球图像信号用数字形式缓存在RAM中,再在下一个扫描周期中降低3倍速率读出,压缩传输带宽,输出高分辨率数字图像信号,并同时图像分辨率均匀化处理,输出平均地面分辨率约4公里的可见和红外模拟图像信号,供众多APT站接收。经2年深入研究,终于在1982年形成360转/分甚高分辨率扫描辐射计的技术方案(主要性能指标见表2),取代120转/分扫描辐射计作为第一颗“风云一号”气象卫星的遥感仪器,使卫星云图分辨率和图像信号传输体制与美国“泰罗斯-N”一致,进

表2 “风云一号”卫星扫描辐射计主要研制阶段及与国外同类仪器比较

项 目	120转/分三通道扫描辐射计	360转/分三通道扫描辐射计	360转/分甚高分辨率扫描辐射计	美“泰罗斯-N”甚高分辨率扫描辐射计
完成时间	1982年(初样)	1986年(初样)	1988年发射	1981年发射
轨道高度(km)	900	900	900	833
探测波段(μm)	0.55—0.75 0.52—1.05 10.5—12.5	0.55—0.75 0.52—1.05 10.5—12.5	0.48—0.53, 0.53—0.58 0.58—0.68, 0.725—1.05 10.5—12.5	0.58—0.68, 0.725—1.1, 3.55—3.93, 10.3—11.3, 11.5—12.5
光学口径(mm)	120	200	200	200
瞬时视场(mr)	均为3.6	均为1.2	均为1.2	均为1.3
图像星下点分辨率(km)	3.3	1.08	1.08	1.08
幅宽(km)	3 200	3 200	3 200	约2 900
扫描速率(rpm)	120	360	360	360
探测器	可见 硅光二极管 红外碲镉汞探测器	可见 硅光二极管 红外碲镉汞探测器	可见 硅光二极管 红外碲镉汞探测器	可见硅光二极管 红外碲镉汞探测器
红外探测器	105	105	105	约100
温度(k)	辐射致冷器冷却	辐射致冷器冷却	辐射致冷器冷却	辐射致冷器冷却
探测灵敏度	可见 $\text{NEDr} \leq 0.07\%$ (一个太阳常数) 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.2\text{K}$ (300K黑体)	可见 $\text{NEDr} \leq 0.07\%$ (一个太阳常数) 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.25\text{K}$ (300K黑体)	可见 $\text{NEDr} \leq 0.10\%$ (一个太阳常数) 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.25\text{K}$ (300K黑体)	可见 $\text{NEDr} \leq 0.05\%$ (一个太阳常数) 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.18\text{K}$ (300K黑体)
输出信息	模拟云图	数字云图+模拟云图	数字云图+模拟云图	数字云图+模拟云图

入国际先进行列。

但上述360转/分甚高分辨率扫描辐射计按研制要求只有3个探测通道,而高分辨率的图像信号传输格式已按与“泰罗斯-N”相一致的5通道图像信息格式编排,因此还有增加2个探测通道的潜力。鉴于当时卫星工程研制已进入后期,进度紧张,于1985年提出增加2个可见光探测通道用于海洋水色观测的技术方案,仪器改动量相对较小,得到海洋用户、工程总体支持和领导部门批准,形成我国气象卫星兼有海洋观测功能的特色,并使我国卫星海洋观测提前10年起步。

由于使用辐射致冷器冷却的碲镉汞红外探测器在室温环境下不能工作,为检验红外波段的探测性能并对目标辐射强度定量标定,利用带有气氦冷却系统的大型真空容器建立了检验设备,自行研制了大口径低温面源标准黑体,确立了红外通道地面性能检验和辐射定标方法,设定的目标探测动态范围为220—330K,红外辐射绝对定标精度优于1.0K。可见及近红外探测通道的地面辐射定标,则利用太阳作定标光源,通过比对不同太阳高度角下辐射计可见及近红外通道观测标准白板时的输出信号值,消去大气透过率的影响,绝对辐射定标精度优于10%。

1988年9月7日北京时间04:30,我国首颗气象卫星“FY-1A”在太原基地用“CZ-4A”运载火箭发射,太阳同步轨道,高度901公里,倾角99°,周期102.8分。扫描辐射计初始工作正常,4个可见和近红外通道的图像质量优良,但红外探测通道开通后,图像信号出现衰减,速率为-2.3倍/天,3天后失去使用价值。分析表明,这是由于辐射致冷器携带的地面水汽在轨道释放,并随着致冷器的冷却在低温光学部件表面“凝聚”所致。为此对1990年发射的第二颗气象卫星“FY-1B”扫描辐射计采取了严格的环境保护措施,包括对辐射致冷器用高纯氮气全程保护,直至临射前撤除。

1990年9月3日北京时间08:53,第二颗气象卫星“FY-1B”在太原基地成功发射。同年10月,国

家气象局卫星气象中心组织了该卫星的在轨性能测试,结果表明:扫描辐射计的各项性能指标均达到设计任务书要求,可见和红外图像质量优良,工作稳定,连续运行超过2年。“风云一号”甚高分辨率扫描辐射计是我国第一台卫星可见和红外成像遥感仪器,也是我国第一台具有图像实时传输、图像信息星上实时处理和数据定量化的遥感仪器,它的成功研制为我国卫星遥感开创了一类新的载荷,建立的技术为后续发展提供了基础。

随着我国经济发展和遥感技术的进步,用户对气象卫星的要求不断增长。国家气象局从气象观测的需求,提出后续的“风云一号”极轨气象卫星应设有与“诺阿-K”基本相同的6个探测通道,国家海洋局要求在原有2个海洋水色通道的基础上再增加1个蓝光探测和1个近红外大气校正通道,以提高海洋水色观测能力和数据量化精度。显然,原5个探测通道的设置已不能同时满足两个用户的要求,为此,我们提出了十通道扫描辐射计的技术方案。探测波段10个,瞬时视场仍为1.2毫弧度,扫描速率360转/分,量化为10bit,因通道数增加1倍,串行输出数字信号速率从0.6654Mbps提高到1.3308Mbps,但仍使用1700MHz载波频率发送,所以国内外已建立的极轨气象卫星地面站只需局部改动即可兼容接收“风云一号”十通道扫描辐射计过境发送的实时云图观测资料。十通道扫描辐射计主要性能指标见表3,观测对象和应用范围多于当时正在业务运行的“诺阿-K”卫星上的同类遥感仪器。

1999年5月10日北京时间09:30十通道扫描辐射计装载在“FY-1C”卫星上发射,入轨不久即进入业务运行。因卫星工作稳定,扫描辐射计性能优良,各国地面站都可免费接收该卫星发送的实时过境观测资料,2000年8月“FY-1C”被联合国世界气象组织列为国际极轨气象卫星序列,这在我国是首次。“FY-1C”卫星十通道扫描辐射计设计寿命2年,实际运行4年9个月,于2004年2月12日失效。第二颗装载十通道扫描辐射计的“FY-1D”卫星于



表3 FY-1 C星十通道扫描辐射计性能及与美国同类仪器比较

项 目	十通道扫描辐射计	美“诺阿-K”甚高分辨率扫描辐射计	主要探测对象
时间	1999年发射	1998年发射	
轨道高度(km)	863	833	
探测波段(μm)	0.43—0.48	无	海洋水色
	0.48—0.53	无	海洋水色
	0.53—0.58	无	地表、海洋水色
	0.58—0.68	0.58—0.68	云图、植被、冰雪
	0.84—0.89	0.725—1.1	云图、植被、冰雪、水陆分界、大气校正
	0.90—0.965	无	水汽探测
	1.58—1.64	1.58—1.64	土壤湿度、区分云雪
	3.55—3.93	3.55—3.93	火情探测、温度探测
	10.3—11.3	10.3—11.3	昼夜云图、温度探测
	10.5—12.5	11.5—12.5	昼夜云图、温度探测
图像星下点分辨率(km)	1.08	1.08	
幅宽(km)	3 000	约2 900	
探测灵敏度	可见 $\text{NEDr} \leq 0.05\%$ (一个太阳常数) 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.25\text{K}$ (300K 黑体)	可见 $\text{NEDr} \leq 0.05\%$ (一个太阳常数) 红外 $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.12\text{K}$ (300K 黑体)	
输出云图信息	10通道高分辨率数字云图+ 2通道低分辨率模拟云图	5通道高分辨率数字云图+2 通道低分辨率模拟云图	

2002年5月15日发射,至2011年10月扫描辐射计轨道运行正常,连续工作时间超过9年5个月,成为我国轨道运行寿命最长的遥感仪器。

3 神舟飞船上的遥感技术试验和红外分光计研制

基于数值天气预报需要全球温度和水汽场探测数据,我国于1979年10月开始部署大气探测红外分光计的研制。其基本原理是测量一组不同吸收强度 CO_2 波段的出射红外辐射,反演大气温度的垂直分布,同时测量一组不同吸收强度的水汽吸收波段的出射红外辐射,根据已求得的大气垂直温度数据,获取水汽含量的垂直分布。红外分光计采用

滤光片式分光,它的研制经历了9探测波段I型样机、20波段II型样机、27波段III型样机和26波段飞行样机共4个阶段,至2008年5月首次装载“FY-3A”卫星入轨工作,历时29年。

“FY-3A”卫星红外分光计有26个探测波段,光学口径150mm,瞬时视场约 1.2° ,借助望远镜前的 45° 扫描反射镜步进运动,使观测视场作穿越飞行轨迹的扫描,轨道高度836公里,扫描范围 $\pm 49.5^\circ$,幅宽2 200公里,星下点足迹17.4公里。26个探测通道分4组:可见光和近红外通道4个,用带固定滤光片的4元硅探测器接收;短波红外通道2个,由固定带滤光片的双元碲镉汞探测器接收;中波和长波红外波段辐射分别透过装在同一滤光轮上的两

组滤光片,由单元中波和单元长波红外碲镉汞探测器接收,滤光轮内外圈分别安放7个中波和13个长波窄带滤光片,依次探测20个波段的红外辐射,探测器工作温度97K,由辐射致冷器冷却。表4和表5是“FY-3A”卫星红外分光计的主要性能指标和探测波段设置,红外辐射定标精度约1.0K。

表4 “FY-3A”卫星红外分光计主要性能

项 目	性能指标
发射时间	2010年11月
轨道高度(km)	836
探测波段	见表5
瞬时视场(mr)	1.2
星下点足迹(km)	17.4
步进扫描角	$\pm 49.5^\circ$
扫描幅宽(km)	2 200
扫描周期(s)	6.4
长波红外探测灵敏度 $NE\Delta N$	$0.15\text{—}4.0\text{mW}/\text{m}^2\cdot\text{Sr}\cdot\text{cm}^{-1}$
中波红外探测灵敏度 $NE\Delta N$	$0.003\text{—}0.007\text{mW}/\text{m}^2\cdot\text{Sr}\cdot\text{cm}^{-1}$
红外辐射定标精度(k)	1K(270K黑体)
辐射校正周期(s)	256
数据量化	13 bit

为改变我国气象卫星只能获取单一的光学图像状况,需要发展新的遥感手段提高气象观测能力。为此,在1992年11月起步的我国载人飞船工程应用系统中安排了中分辨率成像光谱仪、太阳紫外光谱探测器、地球辐射收支仪、太阳常数监测仪、卷云探测仪和多模态微波遥感器的研制。中分辨率成像光谱仪是我国首次研制的“图谱合一”的空间光学遥感仪器,能在对地成像的同时获取每个目标像元的光谱信息。它有34个探测通道(可见光20个、近红外10个、短波红外1个、长波红外3个),采用双面反射镜旋转扫描方式,扫描范围 $\pm 44^\circ$ 。为提高探测灵敏度,采用22元并扫,瞬时视场1.5毫弧度,344公里轨道高度的地面分辨率约500米。可见和近红外辐射经光栅分光后分别用 22×20 元

和 22×10 元面阵Si探测器接收,共形成30个探测通道。短波红外和长波红外辐射分别由带滤光片和读出电路的4个 22×1 元线列碲镉汞探测器接收,其中3个长波红外探测器的工作温度85K,由适合空间工作的自制分置式斯特林机械致冷机冷却,致冷温度85K。太阳紫外光谱探测器是一台高精度的

紫外光谱辐射计,主要任务是监测太阳紫外光谱辐照度及变化,并测量255—340纳米中12个特征波长的大气紫外后向散射辐射,反演臭氧总量及垂直分布。它采用光栅色散的双单色仪串接结构,提高了光谱分辨率并抑制了杂散光,依靠光栅转动完成光谱测量,光谱分辨率0.15纳米,带宽约1.0纳米,探测器为光电倍增管。太阳常数监测仪用于测量地球接收的太阳辐射,地球辐射收支仪测量地球反射的太阳辐射和出射的红外辐射,结合2台仪器测量数据可推算地球的储能变化,供全球气候变化研究。太阳常数检测仪是一种腔形结构的绝对辐射计,依靠快门的开闭和腔体温度的电加热控制,使腔体闭锁时加热到与开启接收太阳辐射时相同的温度,所需的加热功率即为腔体接收面积与太阳常数的乘积,视场 15° ,光谱范围0.2—50微米,绝对

辐射测量精度 $\pm 0.2\%$ 。地球辐射收支仪也为腔形电功率补偿式绝对辐射计,它有2个探测通道,全波探测通道接收0.2—50微米的地球全波段出射辐射,短波探测通道接收0.2—4.5微米地球反射太阳辐射,两者辐射之差即为地球自身出射的红外辐射。全波和短波腔形探测器独立,视场均为 90° ,可进行飞行中辐射标定(全波段用黑体、短波段用卤钨灯),辐射探测精度优于 $\pm 1.5\%$ 。多模态传感器有3种工作模式:被动式微波辐射计、主动式微波散射计和微波高度计。微波辐射计在6.6—37GHz频段内设置大气窗区和水汽吸收的5个频点,探测沿飞行方向的海面温度、海洋降水和土壤湿度等,地面分辨率约50公里,辐射测量精度1K。微波散射计



表5 “FY-3A”卫星红外分光计探测波段设置

波段号	中心波长 (μm)	带宽 (cm ⁻¹)	主要吸收气体	探测对象
1	14.95	3	CO ₂	
2	14.71	10	CO ₂	
3	14.49	12	CO ₂	
4	14.22	16	CO ₂	高层大气温度和低
5	13.97	16	CO ₂	层水汽含量分布,地
6	13.64	16	CO ₂ /H ₂ O	表温度,云检测
7	13.35	16	CO ₂ /H ₂ O	
8	12.47	30	大气窗区	
9	11.11	35	大气窗区	
10	9.71	25	O ₃	臭氧含量
11	7.43	50	H ₂ O	低层水汽含量
12	7.33	40	H ₂ O	水汽含量剖面及对
13	6.52	55	H ₂ O	温度探测水汽订正
14	4.57	23	N ₂ O	
15	4.52	23	N ₂ O	
16	4.47	23	CO ₂ /N ₂ O	低层温度剖面探测
17	4.45	23	CO ₂ /N ₂ O	
18	4.19	25	CO ₂	
19	3.98	35	大气窗区	地表温度和云检测
20	3.76	100	大气窗区	
21	0.69	1 000	大气窗区	云和晴空区检测
22	0.885	385	大气窗区	
23	0.94	550	H ₂ O	陆表复盖,区分云和
24	0.94	200	H ₂ O	雪,气溶胶探测,估
25	1.24	650	H ₂ O	算水汽总量
26	1.64	450	H ₂ O	

采用两个相互垂直和不同极化的天线笔型圆锥扫描,发射 13.9GHz 的调制脉冲,回波信号由同一天线接收,借助飞船的前进运动,获取海面风场观测资料,风速测量范围 4—24 米/秒,精度 -2 米/秒,风向测量 0°—360°,精度 ±20°,刈幅 350 公里,分辨率 50 公里(表 6)。上述仪器装载在“神舟三号”

(SZ-3)和“神舟四号”(SZ-4)飞船的留轨舱中,分别于 2002 年 3 月和 12 月入轨试验,每部遥感仪器均显现良好的对地观测性能,其建立的技术基础和积累的工程研制经验为我国极轨气象卫星向全天候三维立体观测发展提供技术了基础。

4 “风云三号”卫星遥感仪器

上述遥感仪器的空间技术试验虽然获得了成功,但要满足“FY-3A”气象卫星的业务使用要求还需改进和提高性能。如中分辨率成像光谱仪的探测通道由 34 个减少到 20 个,但空间分辨率提高到 1 公里以上,其中 1 个热红外和 4 个可见近红外通道的地面分辨率为 250 米,以实现全球陆地面和海洋目标 1—2 次/天更精细的观测。红外探测器的致冷由机械致冷改为辐射致冷,以实现长寿命可靠工作。选用 10—40 元线列探测器并行扫描以补偿因空间分辨率提高引起的灵敏度下降,插入“K 镜”以消除 45°反射镜扫描产生的像旋,保证各探测通道图像的配正。被动式微波辐射探测由微波温度计和微波湿度计联合完成,微波温度计选择 50.3—57.31GHz 内的 1 个窗区和 3 个氧吸收带频点,用于探测大气温度的垂直分布。微波湿度计则选取 3 个 183.3GHz 水汽吸收带和 1 个 150GHz 双极化窗区频点,探

测水汽的垂直分布。微波温度计和微波湿度计的天线波束均作穿越轨道的扫描,观测幅宽分别为 2 100 公里和 2 700 公里,地面分辨率分别约 50 公里和 15 公里。由于微波辐射可以透过云层,弥补了红外分光计探测受云影响的不足,它们与红外分光

表6 神舟三号和神舟四号飞船上试验的环境遥感仪器

遥感仪器	飞行平台和入轨时间	探测波(频)段	空间分辨率	探测精度	目的
中分辨率成像光谱仪		0.403—0.803 μm 20个 0.823—1.028 μm 10个 2.15—2.25 μm 1个 8.4—12.5 μm 3个	1.5mr	优于10% 优于10% 优于10% 优于1K	大气、陆地和海洋的成像光谱观测
太阳紫外光谱探测仪	神舟3号留轨舱 高度334公里 2002年3月入轨	0.25—0.34 μm 12个	约25°	优于15%	臭氧总量和垂直分布探测
太阳常数监测仪		0.2—50 μm 1个	15°	$\pm 0.5\%$	地球太阳照度测量
探地球辐射收支仪		0.2—50 1个 0.2—4.5 1个	$\pm 45^\circ$ $\pm 45^\circ$	$\pm 1.0\%$ $\pm 1.5\%$	地球反射和红外出射辐射测量
卷云探测仪		略	略	略	略
多模态微波遥感器	神舟4号留轨舱 高度334公里 2002年12月入轨	辐射计模态	1.5°—8.5°	优于1K	表面温度和降水
		6.6—37GHZ 5个 散射计模态	8.5°	2m/s 20°	海面风场
		13.9GHZ 1个 高度计模态		$\leq 50\text{cm}$ (有效波高)	海平面高度和波高

计一起构成了“FY-3A”气象卫星的全球大气温度和湿度分布的垂直探测系统。臭氧吸收太阳紫外辐射并对上层大气加热,为了解臭氧层的变化对天气和气候的影响,需要在全球范围内对大气臭氧的总量和垂直分布进行监测,为此在“FY-3A”卫星上配置了紫外臭氧垂直探测仪和紫外臭氧总量探测仪。前者的结构与神舟3号太阳紫外光谱探测仪基本相同,依靠光栅的转动完成0.25—0.34微米内12个不同吸收强度波长的紫外后向散射辐射测量,视场25°,固定朝向地球。紫外臭氧总量探测仪测量0.308—0.361微米内6个紫外波段的后向散射辐射,星下点分辨率50公里,扫描观测幅宽2 800公里。“FY-3”卫星除安装非扫描的宽视场(120°)地球辐射探测仪外,还配置了视场2°、幅宽2 200公里的扫描型窄视场地球辐射探测仪,以获取小尺度区域出射辐射数据,它们与太阳辐射监测仪一起,完成天气和气候变化研究所需的地球辐射收支监测。此外还装载了微波成像仪,选用10.65—89GHz频段内的5个频点,均V和H极化,形成10个探测通道,依靠天线的转动使接收波束作圆锥扫

描,获取微波辐射图像,地面分辨率 $9 \times 15 \sim 51 \times 85$ 公里,幅宽1 400公里,用于观测降水、土壤湿度、陆表温度等。

“风云三号”卫星是我国第二代极轨业务气象卫星,首星“FY-3A”于2008年5月27日11:02发射入轨,高度831公里,共装载10台遥感仪器(见表7),除十通道扫描辐射计作为成熟的成像遥感仪器继续使用外,其余9台均为第一次入轨工作,这不仅反映了我国在气象卫星遥感技术所取得的进步,也使我国气象卫星的观测能力从获取图像提升到三维立体观测,并用微波遥感弥补了光学遥感受云影响的不足,这对于提高我国天气预报水平、气象灾害监测和开展气候变化研究均有重要作用。“FY-3B”卫星于2010年11月5日北京时间02:37发射,它与“FY-3A”一起构成上下午轨道的双星业务观测,全球覆盖为4次/天。

5 结束语

中国极轨气象卫星的遥感技术研究和遥感仪器研制主要由中科院所属的研究所完成,至今已持



表7 “FY-3A”和“FY-3B”极轨气象卫星遥感仪器

仪器名称	光(频)谱围 (μm)	探测通道 (个)	扫描范围	地面分辨 (km)	探测对象
十通道扫描辐射计	0.43—12.5	10	$\pm 55.4^\circ$	1.0	昼夜云图、植被、火情、冰雪、海洋水色、海面温度
红外分光计	0.69—15.0	26	$\pm 49.5^\circ$	17	大气温度和水汽垂直分布
中分辨率成像光谱仪	0.40—12.5	20	$\pm 55.4^\circ$	0.25—1.0	云特性、气溶胶、水汽总量、植被、火情、雪盖、海洋水色、海冰、海面温度
微波温度计	50.3—57.3GHz	4	$\pm 48.3^\circ$	50—75	探测20公里以下大气温度垂直分布
微波湿度计	150—183.3GHz	5	$\pm 53.35^\circ$	15	大气水汽含量垂直分布
微波成像仪	10.65—89GHz	10(5频段双极化)	1400km (圆锥扫描)	9x15—51x85	探测降水、云中水含量、土壤湿度、海冰及积雪
紫外臭氧垂直探测仪	0.16—0.4 0.25—0.34	12	25°固定 25°固定	200	监测太阳紫外光谱辐照度 探测臭氧含量垂直分布
紫外臭氧总量探测仪	0.308—0.36	6	$\pm 55^\circ$	50	探测臭氧总量全球分布
太阳辐射监测仪	0.2—50	1	三台辐射计组合	单台视场 18°	地球上空太阳辐照度测量
地球辐射收支仪	窄视场 0.2—3.8 0.2—50 宽视场 0.2—3.8 0.2—50	1 1 1 1	$\pm 50^\circ$ 扫描 固定对地 锥角120°	29 固定对地 锥角120°	地球局部出射辐射测量 地球大范围出射辐射测量

续40年,其特点是:遥感仪器种类多,涉及技术面广,定量化要求高。不仅促进了卫星气象观测业务的建立和天气预报水平的提高,也使观测对象逐步扩大、经济和社会效益不断提高。

参考文献

1 Gong H X. Visible-infrared scanning radiometer on FY-1 meteorological satellite and its technical advances. Chinese Journal of Infra-red and Millimeter Waves, 1990, 9(2).
2 危峻,龚惠兴. “神舟三号”飞船的空间科学实验. 科学杂志, 2002, 54.

3 龚惠兴,孙允珠等.极轨气象卫星的有效载荷. 气象卫星有效载荷技术. 北京:中国宇航出版社, 2005, 3: 74-177.
4 张生伟,李靖等. 风云三号卫星微波湿度计的系统设计与研制遥感学报, 2008, 12(2): 199-207.
5 杨军,董超华等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报 2009, 67(4): 501-509.
6 王咏梅,王英鉴等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪. 科学通报, 2009, 54(23): 3778-3783.
7 乔木,杨虎等. 风云三号微波成像仪在轨性能稳定性分析. 遥感学报, 2012, 16(6): 1254-1261.

龚惠兴 中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,中科院上海技术物理所研究员。1940年出生,1963年毕业于中国科学技术大学。20世纪70年代起从事红外光电技术和航天遥感技术研究,成功研制“风云一号”气象卫星甚高分辨率辐射计、十通道扫描辐射计,神舟飞船中分辨率成像光谱仪等。1992—1994年任国家载人飞船工程应用系统首任总设计师,2001—2006年任国家“863”计划航空航天领域专家委员会主任。致力于推进空间应用技术的发展。E-mail:hxgong_sitp@yahoo.com.cn

Development of Polar Orbit Meteorological Satellite Remote Sensing of China

Gong Huixing

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract China began to study the polar orbit meteorological satellite remote sensing technology in the 1970s. To acquire the global cloud images day and night, a visible and infrared scanning radiometer is developed in 1974. The radiometer used a scanner with 48 rpm, an Si detector, and an infrared thermistor detector. At the orbit altitude of 900 km, it could generate images with ground resolutions of 3.6 km and 5.2 km respectively. In 1977, the FY-1 meteorological satellite came into its engineering development phase, a cooled HgCdTe infrared detector is used for its scanning radiometer with 120 rpm. Its ground resolution had been improved to 3.2 km. With the improvement of the performance of HgCdTe detectors and the progress of digital technologies, China began to develop a 5-channel scanning radiometer with 360 rpm which had the same performance as that of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) onboard of TIROS-N satellite in 1981. Among the five channels, two channels were used for ocean color observation and had the ground resolution of 1.1 km. In September 1988, the FY-1A satellite was launched for the first time. Later, the scanning radiometer onboard of the FY-1B satellite was launched in September 1990 and was in stable operation for two years after. The visible and infrared images acquired were very clear and their infrared radiant calibration accuracy was better than 1 K. To meet the needs of meteorological and ocean color observations at the same time, China began to develop a Ten-channel Scanning Radiometer. The instrument not only has six channels similar to those channels of the AVHRR/3 onboard the NOAA satellite, but also has four channels used for ocean color observation and atmospheric correction, respectively. The instrument was installed onboard of the FY-1C and FY-1D meteorological satellites launched in May 1999 and in May 2002, respectively. They were in stable operation and acquired clear images for more than 4 years and more than 9 years, respectively.

To develop new remote sensors and improve the observation ability of polar orbit meteorological satellites, China carried out a series of remote sensing tests for a medium resolution imaging spectrometer, a multi-mode microwave remote sensor, a solar ultraviolet spectrum detecting instrument, and an earth radiation budget measurement instrument onboard of the SZ-3 and SZ-4 spacecrafts launched in 2002. It also developed an infrared atmospheric sounder which had laid the technical basis for its polar orbit meteorological satellites to transform from two-dimensional imaging observation to three-dimensional stereo observation.

The second generation of operational meteorological satellite FY-3A was launched in May 2008. It carried ten remote sensing instruments in total, including a Ten-channel Scanning Radiometer, a Medium Resolution Imaging Spectrometer, an Infrared Radiation Sounder, a Microwave Temperature Sounder, a Microwave Humidity Sounder, a Microwave Imager, a Total Ozone Unit, a Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer, a Solar Irradiance Monitor, and an Earth Radiation Monitor. The data acquired were used both for weather forecast and for climate change study. The medium resolution imaging spectrometer had 20 detecting channels. Among them, four visible channels and one thermal infrared channel had a ground resolution of 250 m which could be used for fast, repeatable, and finer observation of global surface.

Keywords meteorological satellite, spaceborne remote sensor, remote sensing technology

Gong Huixing born in 1940, graduated from University of Science and Technology of China (USTC) in 1963. He has worked at the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences since 1968 and began to be engaged in the research on infrared opto-electrical and space remote sensing technologies in 1970s. He and his research team have developed suc-

(转至32页)