

面向新世纪的红外物理与技术

庆贺汤定元院士八十华诞

学术论文集

中国科学院上海技术物理研究所

二〇〇一年十一月

面向新世纪的红外物理与技术

庆贺汤定元院士八十华诞

学术论文集

中国科学院上海技术物理研究所

二〇〇一年十一月

贡献毕生智慧

创新红外科技

贺锡定元院士
八十周年寿辰

路甬祥
千禧之春

序 言

中国科学院院士、中国科学院上海技术物理研究所前所长汤定元研究员是我国著名物理学家、红外物理学科的奠基者。半个世纪以来，汤定元先生将自己的才华和精力无私地奉献给我国的科技事业。他长期从事固体物理、半导体光电子及红外物理和技术的研究。在红外物理、光电器件和窄禁带半导体等方面，做出了杰出的贡献。为发展我国现代红外物理和技术，开辟了学科方向，建立了研究基地，培养了优秀人才，为中国科学院上海技术物理研究所的发展奠定了基础。今年5月12日是汤定元先生的八十华诞。为了学习和弘扬汤定元先生的爱国主义和献身科学的精神，上海技术物理研究所于2000年5月12日隆重举行了“面向新世纪的红外物理与技术学术报告会—暨庆贺汤定元院士八十华诞”的庆贺活动。

参加庆贺会的有上级领导、兄弟院校的领导和专家学者、上海技术物理研究所的研究人员和职工以及汤定元先生的学生。

会上，所长乐秀海研究员致贺词，中共上海市委统战部副部长陶人观、中国九三学社上海市委员会副主任何克诚、张叔英以及中共上海市委组织部吴正扬、中国科学院上海分院副院长计国桢、中共上海市科学技术委员会秘书长胡镇寰等领导同志发表了热情洋溢的讲话；会上宣读了中国科学技术部部长朱丽兰和中国科学院院长、中国科学院学部主席团执行主席路甬祥发来的贺信，宣读了路甬祥的亲笔题词和其它贺信。汤定元先生在海外的学生在寄来贺信的同时还向导师汇报了他们在国外的工作情况和取得的成绩。会议还收到了兄弟院所及汤定元先生的学生寄来或送来的礼品、鲜花、贺信、贺电和贺卡。在学术报告会上围绕红外遥感、红外技术和红外物理的发展和展望，进行了深入的阐述和学术交流。

值此世纪之交，欣逢汤定元先生八十华诞，为了表彰他在科学事业上作出的卓越成就，同时学习他以国家富强、民族振兴为己任的爱国主义情怀；学习他高瞻远瞩、洞察学科前沿的超前意识；学习他艰苦奋斗、刻苦拼搏的敬业精神；学习他追求真理、持之以恒、一丝不苟的科学态度；学习他尊重人才、扶植后辈的高尚品格；学习他虚怀若谷、关心他人的崇高品质，我们特编印这本纪念论文集，著书永志。

我们衷心祝愿汤定元先生健康长寿。

中国科学院上海技术物理研究所

《庆贺汤定元院士八十华诞学术论文集》

目 次

我国气象卫星红外遥感技术的发展回顾及展望	龚惠兴(1)
红外探测器的发展	方家熊(10)
现代红外物理研究新进展	褚君浩(18)
现代国防中的红外技术	蔡毅(22)
InSb 红外焦平面列阵器件——制造、性能和应用	陈伯良(29)
扫积型 (SPRITE) 器件和漂移实验	李言谨(34)
HgCdTe 测辐射计的空间和角响应分布测试	龚海梅(38)
(111) 和 (211) CdZnTe 衬底材料的位错评价	杨建荣等(47)
粒子束对碲镉汞材料性质的影响	李向阳等(52)
HgCdTe 的 CdTe 钝化	周咏东(57)
固体材料红外椭圆偏振光谱研究	黄志明等(60)
砷注入 MBE 碲镉汞 P-on-N 结研究的进展	赵军(64)
HgCdTe 材料杂质态的研究	常勇等(68)

我国气象卫星红外遥感技术的发展回顾及展望

龚惠兴

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

一、前言

自 1970 年 4 月 24 日第一颗东方红卫星入轨以来的 30 年间, 我国已成功发射了 50 多颗卫星, 其中包括 5 颗气象卫星。目前正在天上运行的 6 颗中国卫星中有两颗是气象卫星。由于风云一号 1C 卫星自 1999 年 5 月 10 日发射后, 轨道运行稳定, 获取的遥感图像信息优良, 实时发送的观测资料已被美、英、法、意等各国广为接收应用。联合国世界气象组织最近正式决定将风云一号 1C 卫星列入世界业务应用卫星序列。这是我国航天史上第一颗被列入国际业务应用的卫星, 标志着我国气象卫星的技术水平跨入国际先进行列。联合国世界气象组织秘书长在上海明确表示, 感谢中国用卫星技术向世界各国人民提供气象信息。

我国气象卫星及其遥感技术成就的取得, 是 30 年来新老科技工作者长期共同奋斗的结果, 这里要特别提及的是汤定元先生为我国气象卫星遥感技术发展所作出的重要贡献。

二、汤定元先生的贡献

汤定元先生是我国红外学科的奠基人, 他治学严谨, 目光敏锐, 勇于开拓。在 20 世纪 60 年代末至 70 年代初的文革期间, 尽管身处逆境, 但仍密切注视国际上红外技术发展的动向。汤定元认为“天气是一个全球性的现象, 要想充分了解它, 精确地预报它, 就必须有全球性的观测数据。人造地球卫星的出现为进行全球环模的气象观测提供了可能。要想在卫星上观测地气系统, 只能用远距离探测技术。由于地气系统的热辐射, 大气组分的吸收带大都位于 $3\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ 的范围内。因此, 被动式红外技术在气象卫星中有着特别合适的用途”。基于上述科学理念, 汤先生收集了大量的国外资料, 于 1974 年编译出版了 52 万字的《红外技术在气象卫星中的应用》一书。书中详细介绍了卫星大气红外遥感原理技术方法、仪器结构及空间致冷等, 为我国航天红外遥感技术的发展起了重要的启蒙和推动作用。在 20 世纪 70 和 80 年代, 该书是我国从事卫星红外遥感仪器研制专业技术人员的重要参考资料, 直至今日仍常被参阅。

1960 年 4 月 1 日美国成功发射了世界上第一颗气象卫星 TIROS-1, 开始用电视和红外辐射计进行全球云图的地气交流的辐射观测。TIROS 是电视与红外观测卫星的英文缩写。从中可以看出, 在气象卫星发展初期已对红外遥感技术十分重视。在经过几年的试运行后, 1966 年美国发射第一代业务气象卫星 ESSA。我国从 20 世纪 60 年代末开始接收 ESSA 卫星实时发送的 APT 图像资料, 用于台风、寒潮等灾害性天气预报, 收到很好的效果。1969 年 1 月周恩

来总理明确指示“中国也要搞自己的气象卫星”，中国的气象卫星研究工作从此起步。1971年国家决定将气象卫星的研制任务交给上海。鉴于我所是红外技术的专业研究所，又地处上海，协作配套方便，1972年上海市向我所下达了气象卫星红外遥感仪器的研究任务。

红外探测器是红外遥感仪器的核心。我国第一台气象卫星的旋转速度为48 r/min，可见红外双通道扫描辐射计样机的研制始于1974年。它有一个可见光和一个热红外成像探测通道。在方案设计时我们首先面临探测器的选择。经过分析比较，热红外通道选用热敏电阻探测器， $D^* \geq 2 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{HZ}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ，时间常数为2ms，它不需致冷，适合于空间工作。可见光通道则采用硅探测器。热敏电阻探测器是汤定元先生1964年从北京调来上海后主持开展研制的。我所原来没有可见和近红外波段的探测器，因此早在20世纪70年代初布置了硅探测器的研究。并且很快研制出可供试验用的样品。汤定元先生领导的红外热敏电阻探测器和硅探测器为我国早期气象卫星(48 r/min)可见红外双通道扫描辐射计的研制提供了重要的基础。该仪器于1977年完成航空校飞，证实了该仪器具有获取云图及地表图像信息的能力。热红外通道的探测灵敏度优于1K，达到了设计要求。其总体水平与当时仍在业务使用的美国ITOS气象卫星上的扫描辐射计相当。

遥感仪器是我国气象卫星发展的关键之一。48 r/min可见红外双通道扫描辐射计的研制成功，表明我国有能力独立发展气象卫星红外观测仪器。为此，国防科工委于1977年11月在上海召开了气象卫星大总体方案论证会，决定我国极轨气象卫星由预先研究转入工程研制。此次会议争论的焦点是我国第一颗气象卫星遥感仪器的指标。鉴于美国决定从1978年开始发射第三代业务气象卫星TIROS-N，使用先进的甚高分辨率进行气象观测，实时全球发送高分辨率的图像信息，并逐步取代第二代业务气象卫星ITOS发送的低分辨率图像信息，为了提高我国气象卫星的观测能力和考虑到今后的长远发展，匡定波先生提出了用先进的120 r/min + 碲镉汞红外探测器 + 辐射致冷器的技术路线，研制扫描速率为120 r/min，地面分辨率为3.2 km的可见红外扫描辐射计，作为我国第一颗极轨气象卫星的遥感仪器，得到会议的赞同。

我认为，匡定波先生建议的核心是采用了碲镉汞红外探测器。由于热敏电阻红外探测器是依靠辐射热敏效应原理工作的，辐射响应速度慢，探测率低，要发展高性能的红外成像遥感仪器，必须使用红外光电探测器。

碲镉汞探测器是一种三元系的新型红外光电探测器。与其他的红外光学探测器相比，碲镉汞探测器响应速度快(小于 $1\mu\text{s}$)，调整材料组份可以覆盖 $1\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 的红外响应波段，探测率 D^* 高，理论上可以达到背景限性能，特别是它的工作温度较高(77K ~ 110K)，可以用辐射致冷器冷却，适合空间长寿命工作。此种探测器，国际上于20世纪50年代末才开始研究，汤定元先生预见到它的应用前景，在20世纪70年代初部署研究，并迅速取得进展，于20世纪70年代中研制出具有较好性能的碲镉汞热红外探测器，不仅为我国第一颗气象卫星可见红外扫描辐射计技术方案的确定提供了重要依据，亦为我国气象卫星红外遥感技术的发展，乃至我国红外探测技术的发展奠定了重要的技术基础。

三、我国气象卫星可见红外遥感仪器

1988年9月3日中国发射第一颗极轨气象卫星FY-1A，以后又发射了两颗极轨气象卫星

FY-1B 和 FY-1C 及两颗静止气象卫星 FY-2A 和 FY-2B (见表 1)。

表 1 中国已发射的气象卫星

类别	卫星	发射日期	遥感仪器	轨道
极轨	FY-1A	1988.9.7	5 通道扫描辐射计	900km
	FY-1B	1990.9.3	5 通道扫描辐射计	900km
	FY-1C	1999.5.10	10 通道扫描辐射计	870km
静止	FY-2A	1997.6.10	多通道扫描辐射计	105°E
	FY-2B	2000.6.25	多通道扫描辐射计	105°E

到目前为止,在中国已发射的极轨气象卫星上只使用过两种遥感仪器,即 5 通道扫描辐射计和 10 通道扫描辐射计。前者用于 FY-1A 和 FY-1B 卫星,后者用于 FY-1C 和明年将发射的 FY-1D 卫星,每颗卫星上装两台相同的扫描辐射计,互为备份,以提高遥感系统的可靠性。

由于 10 波段扫描辐射计是从 5 波段扫描辐射计发展而来,所以二者外形及工作原理相似。二者都采用 45° 镀基金属反射镜,扫描速率 360 r/min,非成像的共轴共焦光学系统,光学口径为 200mm,分色片分束,探测波段由位于探测器前的滤光片限定,瞬时视场均为 1.2mr~1.26mr。5 通道扫描辐射计使用两次分色,形成三路光束有三个通道的瞬时视场配准,其余两个通道沿扫描方向分别超前和滞后中心视场两个取样样本。10 通道扫描辐射计有四个探测通道的瞬时视场配准,其余六个通道瞬时视场位于主光轴两侧。此种光路的优点是光学系统结构简单,光学效率较高,不足之处是由于 45° 镜扫描时会产生像的转动,各探测通道的瞬时视场不能全部配准。

表 2 FY-1 卫星扫描辐射计及 NOAA-AVHRR 的波段

AVHRR/2	5 波段辐射计	10 波段辐射计	AVHRR/3
0.58 μ m ~ 0.68 μ m	0.58 μ m ~ 0.68 μ m	0.58 μ m ~ 0.68 μ m	0.58 μ m ~ 0.68 μ m
0.725 μ m ~ 1.1 μ m	0.725 μ m ~ 1.1 μ m	0.84 μ m ~ 0.89 μ m	0.725 μ m ~ 1.1 μ m
3.55 μ m ~ 3.93 μ m		1.58 μ m ~ 1.64 μ m	3.55 μ m ~ 3.93 μ m
		3.55 μ m ~ 3.93 μ m	
10.3 μ m ~ 11.3 μ m		10.3 μ m ~ 11.3 μ m	10.3 μ m ~ 11.3 μ m
11.5 μ m ~ 12.5 μ m	10.5 μ m ~ 12.5 μ m	11.5 μ m ~ 12.5 μ m	11.5 μ m ~ 12.5 μ m
	0.48 μ m ~ 0.53 μ m	0.43 μ m ~ 0.48 μ m	
	0.53 μ m ~ 0.58 μ m	0.48 μ m ~ 0.53 μ m	
		0.53 μ m ~ 0.58 μ m	
		0.900 μ m ~ 0.965 μ m	

FY-1 卫星扫描辐射计和 NOAA-AVHRR 的探测波段列于表 2,可以看到 5 通道扫描辐射计中只有三个探测通道与当时正在运行的 AVHRR/2 基本一致。限于当时中国红外探测器的发展水平,其余两个选用 0.48 μ m ~ 0.53 μ m 及 0.53 μ m ~ 0.58 μ m 可见光波段,它们与 0.58 μ m ~ 0.68 μ m 波段一起进行海洋叶绿素及泥沙含量的观测,取得较好的观测效果。由于这三个波段分别位于光谱的蓝、绿、红,因此具有获取地面真实色彩影像的能力。四个可见和近红外探

测通道使用 Si 探测器, 热红外通道使用光电导型 (PC)-HgCdTe 探测器, 工作温度 105K, $D^* = 1 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 用辐射致冷器冷却。尽管 FY-1B 卫星在入轨半年后姿态时有故障, 但扫描辐射计在 1992 年 11 月卫星放弃之前轨道工作一直正常, 其性能指标列于表 3。

20 世纪 90 年代初中国开始研制 FY-1 卫星的改进型 FY-1C, 要求在保证轨道可靠工作的前提下进一步提高扫描辐射计的探测能力。因此决定在 5 波段扫描辐射计的基础上发展 10 波段扫描辐射计。其中 6 个波段与 NOAA-AVHRR/3 一致, 保留两个海洋水色观测波段, 再增加一个 $0.43\mu\text{m} \sim 0.48\mu\text{m}$ 波段用于低浓度海洋叶绿素的观测, 最后一个波段选择在 $0.900\mu\text{m} \sim 0.965\mu\text{m}$ 水气吸收带, 它与 $(0.84 \sim 0.89)\mu\text{m}$ 波段一起用于大气中水气含量的估计。10 通道扫描辐射计的光学及机械结构与 5 通道扫描辐射计基本相同, 由于探测通道数增加, 仅对后光学系统作了修改。

表 3 5 通道及 10 通道扫描辐射计的性能指标

项目	5 通道扫描辐射计	10 通道扫描辐射计
卫星	FY-1A, 1B	FY-1C, 1D
轨道高度	900km	870km
探测波段	5 个	10 个
瞬时视场	1.2mr	1.26mr
地面分辨率	1.08km	1.1km
光学口径	200mm	200mm
扫描速率	360rpm	360rpm
有效观测角	$\pm 55.4^\circ$	$\pm 55.4^\circ$
有效扫描长度	3100km	3000km
探测器	Vis 及 NIR : Si TIR : PC-HgCdTe	Vis 及 NIR : Si SWIR : PV-HgCdTe TIR : PC-HgCdTe
制冷方式	辐射制冷 105K	辐射制冷 105K
探测灵敏度	Vis 及 NIR : $NE\Delta\rho \leq 1 \times 10^{-3}$ TIR: $NE\Delta T \leq 0.25\text{K}$	Vis 及 NIR : $NE\Delta\rho \leq 5 \times 10^{-4}$ SWIR: $NE\Delta\rho \leq 1 \times 10^{-3}$ TIR: $NE\Delta T \leq 0.3\text{K}$
辐射定标精度	Vis 及 NIR: $\leq 8\%$ TIR : $\leq 1\text{K}$	Vis 及 NIR: $\leq 7\%$ SWIR : $\leq 8\%$ TIR: ≤ 1
量化	8bit	10bit
数据率	HRPT : 0.6654Mbps DPT : 2.4KC	HRPT : 1.3308Mbps GDPT : 88.72Kbps
重量	43kg	48kg
功耗	28W	44W

可见及近红外通道都用 Si 探测器。 $(1.58 \sim 1.64)\mu\text{m}$ 的短波红外通道采用室温工作的 PV-HgCdTe 探测器, $D^* \geq 2 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。三个热红外通道 ($3.55\mu\text{m} \sim 3.93\mu\text{m}$, $10.3\mu\text{m} \sim 11.3\mu\text{m}$ 及 $11.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$) 使用带微型滤光片的三元 PC-HgCdTe 探测器组件, 工作温

度 105K，用辐射制冷器冷却。辐射制冷器的制冷量、热红外通道的探测灵敏度、MTF 测量及辐射定标都在带有温度低于 15K 的冷背景及标准黑体的真空容器中进行。辐射定标准确度优于 1K。

FY-1C 卫星自去年 5 月入轨以来工作一直正常。由于 10 通道扫描辐射计获取的图像信息采取全球实时发送的方式，图像资料不仅包含可见和红外云图信息，而且还包含海洋水色和海面温度信息，受到国内外用户的欢迎，为此联合国世界气象组织今年已正式将 FY-1C 卫星列入世界业务应用卫星系列。

静止气象卫星多通道扫描辐射计，依靠卫星 100rpm 的自旋及辐射计望远镜指向的自北向南的步进运动获取地球圆盘的景象。

光学系统为 Ritchey-Chretien 型，口径为 400mm，焦距为 3000mm。它有三个探测通道：可见光通道为 $0.5\mu\text{m} \sim 1.05\mu\text{m}$ ，瞬时视场为 $40\mu\text{r}$ ；水气通道为 $6.3\mu\text{m} \sim 7.6\mu\text{m}$ ，瞬时视场为 $160\mu\text{r}$ ；热红外通道为 $10.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$ ，瞬时视场为 $160\mu\text{r}$ 。为了简化光路结构和提高光学效率，探测波段的形成不用分色片，而采用可见和红外通道视场分离的方式。望远镜指向的步进采用主镜和次镜同步步进运动。为使探测器与主光轴相对位置保持恒定，主镜步进角为次镜步进角的 2 倍，每步长 $140\mu\text{r}$ ，共 2500 步，步进范围 $\pm 10^\circ$ ，需 25 min。再用 2.5 min 自南向北快速返回，2.5 min 用于卫星姿态稳定，地球圆盘的观测周期为 30 min。

可见光通道使用 4 元 Si 探测器并行扫描，图像地面分辨率 1.44 km，水气及热红外通道用 PC-HgCdTe 探测器，工作温度为 100K， D^* 为 $2 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \text{HZ}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ，用口径为 464mm 的辐射制冷器冷却。水气及热红外探测通道的灵敏度 $\text{NE}\Delta\text{T}$ 分别为 0.8K 及 0.4K。为了提高可靠性，各探测波段均有备份探测器。

表 4 多通道扫描辐射计指标

探测波段	$0.5\mu\text{m} \sim 1.05\mu\text{m}$ $6.3\mu\text{m} \sim 7.6\mu\text{m}$ $10.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$		步进范围	$\pm 10^\circ$ (2500 步)	
瞬时视场	可见光 水气及热红外	$40\mu\text{r}$ $160\mu\text{r}$	观测周期	30 分钟	
地面分辨率	可见光 水气及热红外	1.44km 5.76km	探测灵敏度	可见光 水气 热红外	$\text{NE}\Delta\rho \leq 5 \times 10^{-3}$ $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.8\text{K}$ (260K) $\text{NE}\Delta\text{T} \leq 0.4\text{K}$ (300K)
光学系统	R-C 型		量化	可见光 水气及热红外	6bit 8bit
口径	400mm		数据率	14Mbps	
步进角	$140\mu\text{r}$		重量 设计寿命	75kg 3 年	

尽管 FY-2A 卫星在入轨 10 个月后出现不能连续工作的故障，但多通道扫描辐射计自 1997 年 6 月至今一直工作正常，轨道运行寿命超过三年。

四、我国气象卫星遥感仪器的未来发展

目前,中国正在开始第二代极轨气象卫星 FY-3 的研制,其主要任务是获取中期数值天气预报所需的全球温度、湿度、云及辐射参数;监测气象,水文自然灾害及生态环境,监测海面风场及水色水温等。为此, FY-3 卫星除继续使用 10 波段扫描辐射计外,还将装载四种光学遥感仪器和两种微波遥感仪器(见表 5)。

表 5 FY-3 卫星遥感仪器的性能参数及探测对象

序号	仪器名称	性能参数				主要探测对象
		光谱(频率)范围	通道数	扫描范围	地面分辨率	
1	10 波段扫描辐射计	0.58 μm ~ 12.5 μm	10	$\pm 55.4^\circ$	1.1km	昼夜云图,海面温度,火情、作物及植被
2	红外分光计	0.69 μm ~ 15.0 μm	26	$\pm 49.5^\circ$	17km	大气温度及水气垂直分布,卷云探测
3	中分辨率成像光谱仪	0.40 μm ~ 12.5 μm	20	$\pm 45^\circ$	0.25km ~ 1km	陆地生态环境,海洋水色水温
4	微波辐射计	23.9GHz ~ 89GHz	9	$\pm 48.6^\circ$	50km ~ 75km	全天候大气垂直温度探测
5	微波成像仪	10.65GHz ~ 89GHz	10	$\pm 44.8^\circ$	10km ~ 50km	降水,海面风场
6	紫外臭氧探测仪	0.25 μm ~ 0.34 μm	12		200km	臭氧垂直分布
7	地球辐射收支仪	0.31 μm ~ 0.38 μm	6	$\pm 51^\circ$	50km	臭氧总量
		0.2 μm ~ 50 μm	2	$\pm 50^\circ$	30km	地球辐射收支
		0.2 μm ~ 50 μm	2		3000km	地球辐射收支

红外分光计有 26 个探测波段,用于大气温度、水气及卷云探测。中分辨率成像光谱仪有 20 个波段,地面分辨率在 250m 和 1km 之间,高分辨率的波段用于陆地生态环境的监测,1km 的波段用于海洋水色及水温的监测。微波辐射计将提供全天候的大气垂直温度的探测数据。微波成像仪用于观测降水及海面风场。紫外臭氧探测仪包括两台仪器:一台是宽视场非扫描的紫外后向散射仪,用于探测臭氧含量的垂直分布;另一台是窄视场、扫描型的臭氧总量探测仪,用于探测全球臭氧的分布。地球辐射收支仪亦包括两台仪器,其中窄视场,扫描辐射收支仪用于提供地球辐射的区域分布信息。

2003 年中国将发射 FY-2 改进型静止气象卫星,多通道扫描辐射计的探测通道将增加到 5 个,地面分辨率亦将提高到 1.25 km (可见光)及 5 km (红外)。

表 6 改进型多通道扫描辐射计的探测波段及地面分辨率

探测波段 (μm)	星下点分辨率 (km)	用途
0.55 ~ 0.75	1.25	可见光云图
3.55 ~ 3.93	5	洋面温度,火情探测
6.3 ~ 7.6	5	水气图像
10.5 ~ 11.5	5	红外云图,洋面温度
11.5 ~ 12.5	5	红外云图,洋面温度

五、国际气象卫星及其遥感仪器的发展趋势

自 1960 年 4 月 1 日美国成功发射第一颗实验气象卫星 TIROS-1 以来的 40 年间, 世界各国发射的民用和军事气象卫星的总数超过 150 颗, 由于气象卫星在天气预报、自然灾害监测、作物估产、冰雪及水文监测预报、全球变化研究、气象导航和航运保障、军事气象保障等方面取得的巨大社会和经济效益, 气象卫星已被公认为最富成效的空间技术应用领域。因此, 凡具有独立空间开发能力的国家和地区都把气象卫星列为优先发展对象。目前, 世界上拥有气象卫星的国家有美国、俄罗斯、欧洲、日本、印度和中国。面对新的世纪, 世界气象卫星及其遥感技术有下列发展趋势。

1 静止气象卫星的姿态

极轨气象的姿态从 1970 年起由自旋改为三轴稳定, 使可见红外扫描辐射计及大气垂直温度探测红外分光计等红外行扫描仪得以使用, 摒弃了电视场摄像, 使气象卫星的观测水平上了一个台阶。但在静止气象卫星中, 仍长期采用自旋稳定的姿态, 究其原因, 一是由于静止气象卫星发展初期沿用了相对成熟的自旋通讯卫星的姿态控制技术, 二是由于静止气象卫星的光学遥感仪器空间分辨率高 (约 $30\mu\text{r} \sim 40\mu\text{r}$), 如要求两张连续拍摄的地球圆盘图像达到像素级的配准, 卫星的姿态变化速率要求达到 $2 \times 10^{-6} (^{\circ})/\text{s}$, 技术实现有很大的难度。因此除由美国福特公司制造的印度 INSAT-1 卫星以外, 其余的美国、欧洲、日本及中国的静止气象卫星都采用自旋稳定的姿态, 扫描辐射则依靠光学望远镜指向的南北方向的步进和卫星的自旋扫描获取地球二维景象。随着卫星技术的进步, 1994 年美国开始发射三轴稳定的静止气象卫星 GOES-8, 它装载两台遥感仪器——成像仪和垂直探测仪, 均采取自身二维扫描的方式。成像仪有一个可见光探测通道和四个热红外探测通道, 地面分辨率分别为 1km、4km 和 8km ($6.5\mu\text{m} \sim 7.0\mu\text{m}$ 水气探测波段)。垂直探测仪有 19 个探测通道, 地面分辨率为 8km, 波段设置与 NOAA 极轨气象卫星垂直探测仪 (HIRS/3) 一致, 以实现大气温度分布的联合探测。静止气象卫星改成三轴稳定姿态后的最大优点是观测方式灵活和快速。既可进行全圆盘的观测亦可进行区域观测, 最小的观测区域为 $1000 \times 1000 \text{km}^2$, 仅需 40s。因此, 此种卫星能连续进行大气现象变化过程的观测和连续跟踪, 如龙卷风等破坏性很大的灾害性天气现象, 对气象研究和灾害预报具有重要意义。据此, 日本不久将发射的静止气象卫星 MT-Sat 采用三轴稳定的姿态。欧洲尽管在其下一代静止气象卫星 MSG 仍然采用自旋稳定的姿态, 但表示这仅是 2000 年~2010 年的过渡, 2010 年后将改用三轴稳定的姿态, 以提高欧洲静止气象卫星的观测能力。俄罗斯 1994 年 10 月发射的第一颗静止气象卫星 GOMS 采用了三轴稳定的姿态。

2 提高综合观测能力

为了更好发挥气象卫星的应用效益, 各国都在致力于提高气象卫星的观测能力。主要从三个方面入手:

a. 提高遥感仪器的空间分辨率

气象观测要求的地面分辨率是 1km, 这对轨道高度约 850km 的极轨气象卫星可见和红外观测通道来说早已实现。但是对于静止气象卫星, 由于轨道高, 目前仅有美国的 GOES 及日本

的 GMS-5 可见光通道的地面分辨率达到 1km, 热红外通道地面分辨率仅为 4km。中国 FY-2 静止气象卫星的可见光通道地面分辨率 1.44km, 水气及热红外通道地面分辨率 5.76km, 但比印度目前正在运行的 INSAT-2E 气象卫星上的同类仪器, 可见通道 2km 热红外 8km 的分辨率明显要好。为了提高地面分辨率, 印度在 INSAT-2E 卫星上装载了一台三波段 CCD 相机, 利用列阵探测器技术和合理的光学口径达到 1km 的地面分辨率。欧洲将在其计划 2000 年底发射的第二代静止气象卫星 MSG 上用多元探测器并行扫描及图像元技术, 使可见光和热红外通道地面分辨率分别达到 1km 和 3km, 如能实现将成为下世纪初空间分辨率最高的静止气象卫星。

b. 增加探测波段

增加探测波段是为了获取更多的目标光谱信息。在极轨气象卫星的光学成像遥感仪器中, 目前以中国 FY-1C 的 10 波段扫描辐射计的探测波段为最多。静止气象卫星中, 将以欧洲第二代静止卫星 MSG 的探测通道为最多, 共 12 个。不仅可拍摄可见及红外云图, 还能用于植被监测、区分云雪、森林火情监测、水气云图和对热红外通道的洋面温度测量更精确的大气订正。显著扩大了静止气象卫星观测资料的应用范围。

c. 增加新的遥感仪器

最典型的是欧洲将于 2003 年发射的 METOP 极轨气象卫星。该卫星除了装载用于气象观测的 AVHRR-3、HIRS-3、AMUS-A、MHS 和 IASI (红外大气干涉仪) 之外, 还将装载 MIMR (多频成像微波辐射计) 和 ASCAT (先进的风散射计) 用于冰雪、土壤温度、大气水气含量、降水、海面风速及风向的测量。计划于 2005 年发射的中国 FY-3 极轨气象卫星除了光学和微波气象遥感仪器外, 还将装载 20 探测波段、地面分辨率为 0.5km 及 1.0km 的中分辨率成像光谱仪用于陆地生态及海洋水色水温的观测, 使 FY-3 气象卫星成为多功能的环境遥感卫星。

3 提高大气垂直温度分布探测精度

大气垂直温度分布的业务探测始于 1972 年。30 年来尽管发展了二代大气红外分光辐射计, 探测波段从 8 个增加到 20 个, 用微波辐射计减少云的影响。但至今大气垂直温度探测误差仍在 2℃左右, 不能满足精值天气预报所需的优于 1℃的要求。为此欧洲正在研制 IASI (红外大气探测干涉仪)。用干涉法进行大气红外光谱的精细测量, 光谱范围为 3.62 μm ~ 15.5 μm , 光谱分辨率约为 0.45 cm^{-1} , 比目前正在业务使用的 HIRS/3 光谱分辨率至少提高 5 倍, 预计大气垂直温度的探测精度达到 1.5℃, 计划 2003 年装载在 METOP 气象卫星上进行首次轨道飞行试验。另一方面美国 JPL 已完成了 AIRS (大气红外探测仪), 用光栅分光的方法进行大气精细红外光谱的测量, 探测波段为 3.74 μm ~ 15.4 μm , 光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda > 1200$, (15.4 μm 时为 0.5 cm^{-1}), 光谱取样 2378 个。预计大气温度的垂直分布探测精度可达到 1℃。该仪器利用了多线列的碲镉汞红外焦平面探测器和长寿命机械制冷等先进技术, 价格昂贵, 约花去 1.7 亿美元的研制经费。

1998 年 5 月美国发射 NOAA-15 极轨气象卫星, 开始使用 20 个微波探测通道的 AMSU (先进的微波辐射计) 取代 4 通道的 MSU (微波辐射计) 进行大气温度及水气的垂直分布业务探测。以弥补大气红外分光辐射计在有云情况下探测精度下降的不足。AMSU 由 AMSU-A

和 AMSU-B 两台仪器组成,前者有 15 个微波通道利用 5.5mm O_2 吸收带探测大气温度垂直分布,后者有五个微波通道,利用 183GHz 的水气吸收带,估计低层大气中水气的含量,预计 AMSU 至少使用到 2010 年。

4 国际合作进一步加强

民用气象卫星是全球公益性卫星,易于开展国际合作,例如现时美国 NOAA-15 气象卫星的两个重要载荷 AMSU-B 和 ARGOS (遥感平台数据收集系统)就是分别由英国和法国提供的。下世纪初,欧美之间在气象卫星上的合作将从现时的载荷扩大到卫星系统。已决定从 2003 年起美国仅发射下午轨道的 NOAA 极轨卫星,而上午轨道的 NOAA 卫星将由欧洲的 METOP 卫星取代。两颗卫星上的遥感仪器配置基本相同。由欧洲和美国提供,卫星各自建造。共同组成极轨气象卫星业务观测系统。这种合作对美国来说,降低了卫星的制造和运行费用。对欧洲来说,提高了欧洲获取全球环境信息的能力,增强了欧洲在全球环境监测中的地位。

5 军用和民用气象卫星合并

从 1965 年起美国开始发射 BLOCK-4 军事气象卫星,卫星系统属国防部,空间段由空军空间司令部的指令站控制。美国军事气象卫星至少发展了三代 (BLOCK-4, BLOCK-5D-1, BLOCK-5D-2), 卫星的主要观测功能与同期运行的民用气象卫星基本相同。为了节省经费,提高气象卫星的使用效益。1994 年 5 月克林顿总统决定把美国的 DMSP 国防气象卫星计划与民用的 NOAA 卫星合并。同年 10 月成立联合办公室,然后由 NOAA 提出下一代军民两用的 NOAA-O~Q 计划,2005 年起执行,每两年发射一颗,设计寿命 5.5 年,直至 2011 年。卫星的设计需兼顾军方的要求,卫星的运行由 NOAA 操作,但在战时,军方有权向敌方拒发卫星的观测资料。从 1998 年起军方位于马里兰州的地面接收运控中心由 NOAA 接管。上述合并措施,预计在 15 年内可节省 10 亿美元的经费开支。

谨以本文祝贺尊敬的汤定元先生 80 华诞。

红外探测器的发展

方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

一、红外探测器发展简史

从发现红外辐射以来, 红外探测器发展简史就是红外技术应用的历史。在红外遥感方面, 从点目标探测, 扫描成像, 多光谱扫描成像到红外成像光谱, 红外探测器由单波段单元器件, 多元器件, 多波段线列器件向单波段焦平面阵列 (FPA) 器件和多波段焦平面发展。

国际上 20 世纪 80 年代第一代通用组件广泛应用于军用热像仪, 第二代热像仪的红外焦平面器件的研究飞速发展。20 世纪 90 年代初以来, HgCdTe、InSb 和 PtSi 焦平面技术有了重大突破, 但是因成本的原因, 还是未能广泛应用于民用场合。例如 $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 高性能 HgCdTe 1024×1024 元 FPA, 全世界只在天文学观测和遥感方面用了几十个而已。

我国 20 世纪 60 年代初, 在汤定元先生倡导和亲自主持下, 开拓了红外探测器研究领域。20 世纪 70 年代初, 汤定元先生首先在国内介绍了红外技术在气象卫星中的应用, 推动我国红外技术向民用发展, 亲自主持研制成功我国第一个空间遥感用红外探测器。

国内空间红外探测器主要用于气象卫星和地球资源卫星, 正在由单波段单元扫描成像向小规模多元多波段发展。国际上目前大多数航天用红外探测器, 除了大尺度的气象监测应用以外, 已实现了多元多波段的红外集成组件和大规模线列和面阵红外焦平面。

在空间军事红外探测方面, 由于对全球信息管理系统、全球监视侦察和瞄准系统以及攻击性微机器人的远期需求, 以天基图像信息的获取为中心, 正推动着红外焦平面器件向大规模智能化、多波段和超光谱、小型化和微型化方向发展。

红外探测器本身的技术关键有: 红外敏感材料、半导体器件工艺、集成电路设计、封装技术、测试技术、真空技术和可靠性技术。这些技术的内涵极其丰富, 有其独立的发展历史。例如, 汤定元先生在 20 世纪 50 年代创立的测量半导体表面复合速度的汤定元-高国裕方法, 对于研究空间遥感用碲镉汞红外探测器起到了重要作用。红外探测器技术就是这些技术综合的一门综合技术科学。

红外探测器应用需求在先, 是探测器发展的指路明灯。目前红外技术的主要应用是遥感, 其他应用有环境检测、医疗设备、工业控制、安全报警、化学分析和科学测量等。探测器是红外技术应用的主要关键技术, 探测器与红外系统的其他关键技术如光学系统、电子学系统、信息处理与显示、机械结构系统和制冷系统等紧密相关。红外系统的这些其他关键技术是探测器技术原始创新的源泉。

二、我国航天用几类 HgCdTe 探测器

我国遥感卫星成功应用了下列红外探测器：

- 1) 长波单元 HgCdTe 光导探测器，工作温度为 105K
- 2) 长波四元双波段 HgCdTe 光导探测器，工作温度为 100K
- 3) 中、长波三波段光导 HgCdTe/ 微型滤光片探测组件，工作温度为 105K
- 4) 短波单元 HgCdTe 光伏探测器，室温工作
- 5) 长波八元 HgCdTe 光导探测器，工作温度为 105K
- 6) 短波两波段八元光伏 HgCdTe/ 滤光片组件，工作温度为 155K

其中 1)~4) 由我所研制，用于气象卫星系列。5)、6) 分别由昆明物理所和津航光电所研制，用于资源卫星。我国其他空间遥感器将继续采用这些成熟的技术，近期还将应用一些有特色的新器件，例如我所的下列探测器：

- 7) 短波、中、长波四波段 22 元 HgCdTe/ 微型滤光片焦平面组件，工作温度为 80K ~ 100K
- 8) 甚短波光伏探测器和甚长波大面积 HgCdTe 光导探测器

1 光导型气象遥感红外探测器

1978 年开始研究的工作温度为 105K 的 $10.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$ 长波单元 HgCdTe 光导探测器，是我国第一个得到成功应用的空间遥感红外器件，起到了率先发展我国空间遥感红外探测器的历史作用。工作温度为 100K 的 $6.3\mu\text{m} \sim 7.6\mu\text{m}$ 和 $10.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$ 长波四元双波段 HgCdTe 光导探测器，具有独特的 $6.3\mu\text{m} \sim 7.6\mu\text{m}$ 水气探测能力。这两种器件技术难关的解决，为我所目前同时发展多种空间遥感红外探测器打下了良好的基础。

1983 年开始研究风云二号卫星扫描辐射计用的 100K 红外 / 水气双光谱波段四元红外器件工艺技术，1987 年突破了红外 / 水气双光谱通道红外器件芯片技术，1988 年解决了红外 / 水气双光谱通道红外传感器的高可靠封装设计，研制出水气光谱通道红外传感器，填补了国内空白。至 1993 年，完成了器件与辐射制冷器、整机光学电学的匹配和各种连试，圆满完成了整星的器件工作，获得了成功，水气 / 红外双光谱通道红外图象的质量达到当时国际先进水平。

风云二号扫描辐射计对碲镉汞水气 / 红外双光谱通道红外器件，不仅提出了性能指标要求，而且有航天特殊要求的高可靠性指标。技术要求包括：敏感元尺寸、纵向和方位偏差、敏感元中心定位偏差、工作温度、响应波段、波段探测率、波段响应率、偏置电功耗、低频跳动、重量、室温下存贮、高能辐照以及其它环境试验条件等二十几项。研制交付的风云二号卫星用水气 / 红外双光谱通道红外探测器件达到了风云二号扫描辐射计分系统的技术要求，达到的波段探测率为：红外 $D_{(10.5\sim 12.5)\mu\text{m}}^* = 3.4 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ ，水气 $D_{(6.3\sim 7.6)\mu\text{m}}^* = 1.1 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 。其中波段探测率由下列公式定义：

$$D_{\Delta\lambda}^* = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_b(\lambda) \cdot D_{\lambda}^* d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_b(\lambda) d\lambda$$

式中波段探测率 $D_{\Delta\lambda}^*$ 的下标 $\Delta\lambda$ 表示 λ_1 到 λ_2 的波段范围。

2 中、长波三波段光导 HgCdTe/ 微型滤光片探测组件

中、长波三波段光导 HgCdTe/ 微型滤光片探测组件的三个波段是 $8.4\mu\text{m} \sim 8.9\mu\text{m}$ 、 $10.3\mu\text{m} \sim 11.3\mu\text{m}$ 和 $11.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$ 。我们分析了预研的进展情况和各种资源条件, 实现了两项创新措施:

1) 对中波 ($3.55 \sim 3.95\mu\text{m}$) 波段, 不沿用外国的铋化镉材料和器件技术路线; 2) 在中科院应用基础研究项目和我所第八研究室配合下, 突破中红外 ($3.55 \sim 3.93\mu\text{m}$)、长波红外 ($10.3 \sim 11.3$) 和 ($11.5 \sim 12.5\mu\text{m}$) 的中长波三通道碲镉汞红外探测器 / 低温微型滤光片组件技术; 解决了组件可靠性试验和工程应用问题。

在国内首次成功实现了中、长波三波段红外探测器 / 低温微型滤光片组件技术, 圆满提交了风云一号 (C) 星的十通道扫描辐射计用的 105K 中长波三通道碲镉汞红外探测器 / 微型滤光片组件。

交付的器件达到了风云一号 (C) 星扫描辐射计分系统的技术要求, 主要技术水平如下: 响应波段 $3.55\mu\text{m} \sim 3.93\mu\text{m}$ 、 $10.3\mu\text{m} \sim 11.3\mu\text{m}$ 和 $11.5\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$ 的波段探测率分别为 $4.8 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 、 $2.4 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 和 $2.4 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 二年可靠性大于 0.97。组件响应光谱曲线如图 1 所示。

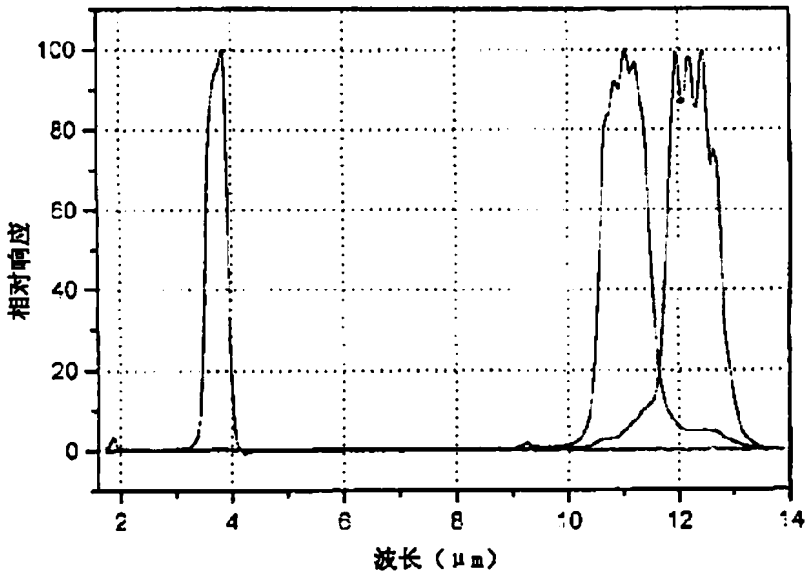


图 1

3 室温短波单元 HgCdTe 光伏探测器

目前, 国外已采用 III-V 族薄膜材料进行短波红外探测器的研制。国内的相应器件还不能达到风云一号 (C) 星的要求。我们采取了具有我国特色的创新技术路线, 采用 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 体材料研制用于风云一号 (C) 星上第六波长通道的 $1.58\mu\text{m} \sim 1.64\mu\text{m}$ 短波红外探测。这条技术路线的难点在于 $X \approx 0.6$ 高组分碲镉汞材料制备和多元系半导体平面器件工艺。

我们改进了固体区熔法生长晶体工艺技术, 成功地克服了高组分碲镉汞材料合成困难, 设计背景温度梯度消除了分凝。完善并发展了早期研制的平面器件工艺, 研制出器件达到扫描辐