

地球同步轨道二维扫描红外成像技术

王淦泉, 陈桂林

(中国科学院红外系统探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 相对第一代地球同步轨道遥感卫星基于自旋稳定卫星平台的二维成像技术, 基于三轴稳定平台成像技术的最大优势在于大幅度提高成像效率、缩短成像周期和多载荷并举。我国基于三轴稳定平台的第二代地球同步轨道气象卫星扫描成像辐射计, 采用双扫描镜结合三反射光学系统、辐射制冷器及线列阵探测器, 实现了从可见光至甚长波红外波段的成像。面对扫描成像辐射计的恶劣温度环境、极端指向精度、超长运动寿命等任务要求组合, 研制过程中采用了空间光学、精密机械、长寿命运动、电机控制、空间热控、信息处理等综合技术, 使仪器实现了恶劣温度环境下的高精度成像。卫星计划于 2016 年发射, 届时将进一步提高我国预报短时天气及突发性灾害的能力。

关键词: 地球同步轨道; 二维扫描红外成像; 风云二号; 风云四号

中图分类号: V447+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0429-05

Two-dimensional scanning infrared imaging technology on geosynchronous orbit

Wang Ganquan, Chen Guilin

(Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract: Compared with the two-dimensional imaging technique based on spin-stabilized satellite platform of the first generation geosynchronous remote sensing satellite, the biggest advantage of the imaging technique based on three-axis stabilized platform lies in its significant improvement of imaging efficiency, shorter imaging period and simultaneous multi-payloads. In China, the second generation geostationary three-axis-stabilized platform weather satellite, FY-4, is in development. FY-4 scanning imagery radiometer adopts the imaging scheme of double-scan-mirror mechanism combined with three-mirror-anastigmat (TMA), linear array detectors and radiant cooler, achieving an imaging band from visible to very long wavelength IR. The radiometer development is faced with a combination of various task requirements, including the radiometer's harsh on-orbit temperature environment, pointing accuracy, long movement life, etc. So during the developing process, comprehensive technologies of optics, precision mechanics, long lifetime movement, motor control, space thermal control, information processing, etc. were employed to realize high precision imaging under poor temperature environment. The FY-4 satellite will be launched in 2016, which will then further enhance Chinese capacity of unexpected disaster and short-time weather forecasting.

Key words: geosynchronous orbit; two-dimensional scanning infrared imaging; FY-2;
FY-4

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-03

作者简介: 王淦泉(1962-), 男, 研究员, 副总设计师, 主要从事红外成像系统技术方面的研究。Email: wganquan@mail.sitp.ac.cn

0 引言

1974年5月,美国发射了第一颗开创气象卫星新纪元的 SMS-A^[1]地球同步气象卫星。并于1975年正式启用世界上第一颗地球同步轨道业务运行气象卫星 GOSE-1^[1]。近40年内,美国、欧洲、日本、印度、前苏联、中国、韩国等均相继发射了若干地球同步轨道气象卫星。地球同步轨道卫星依据卫星姿态控制技术分为自旋稳定平台和三轴稳定平台二种。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容易,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。其中,美国于1994年发射了世界上第一颗地球同步轨道三轴稳定平台气象卫星 GOES-8^[2],实现了 Imager 和 Sounder 双载荷的同时探测。

地球同步轨道气象卫星平台技术发展的同时,载荷技术也得到了发展。自旋卫星载荷从最初美国 SMS-A^[1]的3波段可见/红外扫描成像辐射计,到中国 FY-2 的5波段可见/水汽/红外红外扫描成像辐射计^[5],再到欧洲 MSG 的12波段自旋成像仪^[3],探测波段数量、帧时(时间分辨率)、空间分辨率、信噪比(温度分辨率)、定标精度等关键应用指标和性能都大幅提高。由于技术的复杂性,三轴稳定平台载荷技术的发展相对来说比较缓慢。

1 二维扫描红外成像的实现过程和方法

1.1 二维扫描红外成像技术

地球同步轨道卫星平均距离地面约 35 860 km。卫星对地球的视场约为 $17.4^\circ \times 17.4^\circ$ 。可以设想,地球同步轨道最理想的探测模式应该是这样的:利用一块能够完全覆盖地球视场的焦平面器件,就可以获得最高的探测效率。只要适当延长积分时间,还能获得波段探测灵敏度很高的、清晰的图像。假设仪器空间分辨率为 1 km,一块完全覆盖地球视场的焦平面器件规模就得达到 $10\ 845 \times 10\ 845$ 。就目前技术手段而言,满足各种性能要求的如此大规模的红外波段焦平面器件还无法生产。加上光学匹配、数据传输、探测器尺寸等综合限制因素,目前针对这种理想成像模式的系统方案还不能实现。因此,机械扫描结合线列阵探测器(含 TDI 或小面阵)的二维扫描红外

成像技术仍然是地球同步轨道实现二维成像的主要技术手段。对自旋稳定卫星而言,一维扫描通过卫星的自旋实现,另一维扫描则通过机械扫描结合电子扫描的方案实现。对三轴稳定平台而言,由于卫星指向相对地球基本不变,一维扫描利用机械扫描结合电子扫描,另一维扫描利用机械扫描方案实现。对基于二种姿控平台的探测载荷来说,有一点是共同的,探测器规模是地球全圆盘成像帧时的决定性因素。在其他条件不变的条件下,探测器规模越大,地球全圆盘成像帧时就越短。由于地球同步轨道卫星研制成本高昂,长寿命要求也是它们共同的特点之一。下面分别以“风云二号”和“风云四号”二维成像技术为例,阐述地球同步轨道二维扫描红外成像技术。

1.2 “风云二号”扫描辐射计^[4]

“风云二号”气象卫星的自旋轴与地球自旋轴平行,并以 100 r/min 速率旋转。扫描辐射计是一种光机线扫描成像系统,其望远镜系统主光轴垂直于卫星自旋轴,利用卫星自旋实现辐射计对地球自西向东扫描成像。卫星每自旋一周,辐射计望远镜指向自北向南步进一步,以此实现辐射计对地球的南北成像。当辐射计自北向南步进 17.4° ,就可完成对地球的全圆盘二维成像。考虑卫星姿态控制精度和图像配准等方面的因素,辐射计需自北向南步进 20° 左右,以保证获得完整的地球圆盘。辐射计获得地球全圆盘图像所需的时间与步进角度相关,而步进角度的大小与辐射计成像波段的探测器规模、空间分辨率和南北扫描重叠程度有关。辐射计扫描成像原理如图1所示。

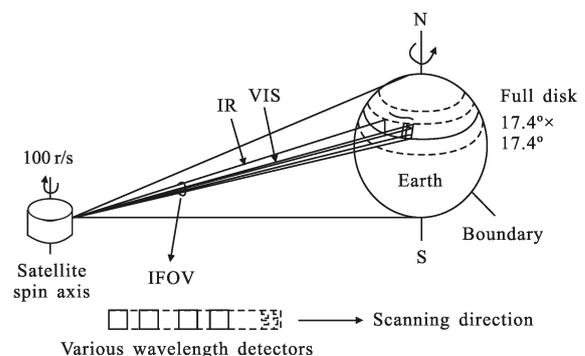


图1 “风云二号”扫描辐射计扫地球示意图

Fig.1 Schematic of “FengYun-2” radiometer’s scanning of earth

地球目标辐射和太阳反照由主光学望远镜接

收,会聚后通过视场分离,把可见光、红外和水汽5个探测波段能量分开。可见光由主光轴上的分离镜反射到主焦面的硅阵列探测器。红外和水汽辐射通过轴外中继光学系统耦合到位于辐射致冷器中的红外、水汽波段的碲镉汞(HgCdTe)探测器。卫星每旋转一周同时探测4个可见光、3个红外和1个水汽通道的信息。

辐射计设置了多种星上定标装置。在主焦面前装有太阳定标器,供可见光通道在轨定标用;在红外和水汽滤光片之前设有定标黑体,以便实现红外和水汽波段的星上辐射定标;在信息处理电路内还设有可见光、红外、水汽5个波段的电子学定标功能,用于校正波段放大电路的非线性。为提高光学系统的成像质量,可见、红外和水汽波段分别设有调焦装置,以保证探测器处在最佳像面上。光学焦面位置的调节是通过对图像信息高频分量的判读,指令控制调焦机构在轨进行的。图2是“风云二号”多通道扫描辐射计光路图。

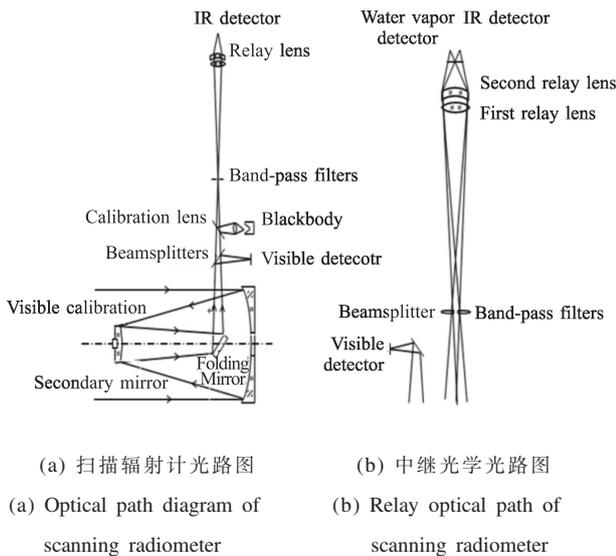


图2 “风云二号”多通道扫描辐射计光路图

Fig.2 Optical path diagram of "FengYun-2" multi-channel radiometer

1.3 “风云四号”扫描成像辐射计^[6]

(1) 原理和指标

“风云四号”是三轴稳定平台卫星,只有利用机械扫描的方式才能实现辐射计的二维成像。辐射计采用双扫描镜结合三反射光学系统、线列阵探测器和辐射制冷器的扫描成像技术方案。成像时东西扫描镜和南北扫描镜分别进行线性扫描和步进扫描,东西方向是

从东到西、从西到东往复式扫描,南北方向是从北到南步进。图3是理想的地球成像轨迹原理图。

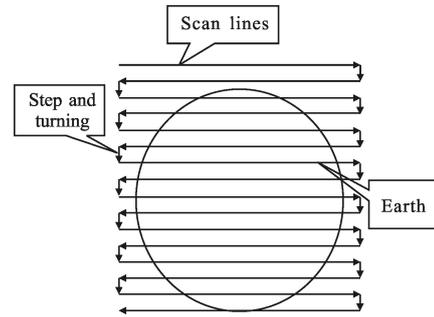


图3 “风云四号”扫描辐射计地球成像轨迹示意图

Fig.3 “FengYun-4” scanning radiometer ideal earth imaging track

来自地球景物的辐射被扫描镜反射到主光学系统,并通过中继光学系统将入射辐射分解为3个可见波段、2个近红外波段和8个红外波段。为提高2.1 μm和3.5 μm火探测波段的空间分辨率,采用了特殊的探测器排列和亚像元处理技术,可以使空间分辨率成倍提高,指标如表1所示。

表1 “风云四号”多通道扫描成像辐射计主要性能指标要求

Tab.1 Major property indexes of "FY-4" scanning imaging radiometer

Band No.	Bandwidth/μm	Resolution/km	NEDT or S/N
1	0.45-0.49	1	S/N ≥ 90(ρ=100%)
2	0.55-0.75	0.5-1	S/N ≥ 150 (ρ=100%)@0.5 km
3	0.75-0.90	1	S/N ≥ 200(ρ=100%)
4	1.36-1.39	2	S/N ≥ 150(ρ=100%)
5	1.58-1.64	2	S/N ≥ 200(ρ=100%)
6	2.1-2.35	2-4	S/N ≥ 200(ρ=100%)
7	3.5-4.0(High)	2	≤ 0.7 K(300 K)
8	3.5-4.0(Low)*	4	≤ 0.2 K(300 K)
9	5.8-6.7	4	≤ 0.2 K(300 K)
10	6.9-7.3	4	≤ 0.25 K(300 K)
11	8.0-9.0*	4	≤ 0.2 K(300 K)
12	10.3-11.3*	4	≤ 0.2 K(300 K)
13	11.5-12.5*	4	≤ 0.2 K(300 K)
14	13.2-13.8	4	≤ 0.5 K(300 K)

辐射计设置了多种星上绝对定标装置。在扫描镜前端装有太阳反射定标装置,利用漫反射板和比

辐射计直接引入太阳实现在轨 $2.1\ \mu\text{m}$ 及以下波段部分孔径全光路绝对定标; 在扫描镜后端装有定标黑体, 供在轨实现 $3.5\ \mu\text{m}$ 及以上波段全口径全光路绝对辐射定标; 在信息处理电路内还设有电子学定标功能, 用于校正通道放大电路的非线性; 辐射计每隔一段时间(全帧扫描时为 $2\ \text{s}$ 左右, 区域扫描时为 $9\ \text{s}$ 左右) 还进行一次冷空间定标, 用于校正背景漂移等低频因素对成像质量的影响。

(2) 系统组成

“风云四号”扫描辐射计主要由光学、主体结构、扫描机构、探测器、电子、辐射制冷器、定标机构、热控等组成。

2 二维扫描红外成像综合技术

2.1 “风云二号”二维成像关键技术^[4]

2.1.1 扫描机构

望远镜系统和折镜系统的扫描机构具有关键部件多、动作反复次数多、周期变化大、精度高、寿命长的特点。方案采用了步进电机加齿轮或丝杠(滚珠丝杆和滑动丝杆)减速的高精度控制驱动技术。对扫描机构的各主要传动零部件作了合理的精度指标分配, 并尽可能提高关键传动部件的精度, 极力消除齿轮和螺母、滚珠丝杆副和螺母等传动间隙, 同时解决了密封、润滑等关键问题。使步进运动精度达到了 $\pm 3\ \text{rad}$ 的同时, 实现了 5 年以上的长寿命运动。

2.1.2 图像同步技术

“风云二号”气象卫星相对地球静止, 卫星随地球每天旋转一周。太阳与卫星自旋轴及地球与卫星自旋轴组成的两个平面形成的夹角 β 定义如图 4 所示。 β 角按特定规律变化时, 卫星自旋一周获得的精太阳脉冲信号在时间上不断后移(卫星自西向东旋转)或前移(卫星自东向西旋转)。“风云二号”配置了狭缝式太阳敏感器, 当卫星以 $100\ \text{rpm}$ 速率自旋时, 每周扫过太阳产生一个太阳脉冲信号。此信号用于卫星的同步控制和图像对准。它是扫描辐射计获取云图和地面接收云图的基准。辐射计完成一幅完整的地球圆盘云图有 2500 个自旋周期, 红外和水汽均有 2500 条扫描线, 可见光有 10000 条扫描线。扫描线的行间对准精度要求在 $7\sim 10\ \text{rad}$ 之间。作为产生高精度基准信号的精太阳敏感器必须具有微秒级的检测精度和大的平面扇形视场。当以精太阳脉冲作

为扫描成像基准时, 若不对 β 角造成的这种变化进行补偿, 则扫描线将会逐条后移或前移, 最终使扫描线离开地球。因此扫描同步器应实时修正这种常日 β 角变化, 这种修正称为 β 角补偿。通过扫描同步器可自动完成 β 角补偿。经过一个完整的计数周期, β 角自动补偿修正 360° 。

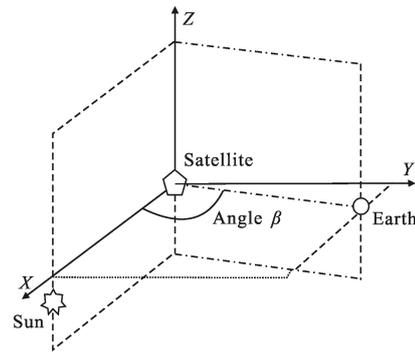


图 4 太阳、卫星和地球几何关系- β 角定义示意图

Fig.4 Definition of geometric relationship among sun, satellite and earth-angle β

2.2 “风云四号”二维成像关键技术^[6]

2.2.1 主要研究内容

成像辐射计是风云四号气象卫星最重要的仪器之一。对扫描系统、光机系统、热控、辐射制冷器、探测器、电子学、星上定标系统等进行综合优化设计, 以适应地球同步轨道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, 是成像辐射计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, 更是系统设计的重要研究内容。

2.2.2 二维扫描控制技术

为消除像旋、漏扫、降低惯量和减少对卫星的姿态扰动、利于提高控制带宽及未来业务卫星的扩展需要, 二维扫描红外成像通过双扫描镜机构来实现, 即东西、南北扫描镜独立运动, 且轴系正交。二维扫

描系统扫描镜采用 SiC 材料,控制技术采用以直流无刷电机为驱动电机,以绝对式感应同步器为反馈元件,以高速处理器为运算器的数字式闭环控制、直接驱动方案。针对东西镜低速摆动扫描长寿命要求,研制了特别的润滑剂。动态精度要求高 $1''(1\sigma)$ 、摆动速度低(1.67 RPM)、(摆动 2 亿次)、在轨温度环境超恶劣(支架每天温度变化 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)是辐射计扫描机构研制需要面对的巨大挑战。

2.2.3 热控技术

辐射计在轨热环境面临舱内吸收的总外热流变化幅度大(0~724 W),扫描镜支架外热流随时间和季节变化分布极不均匀,扫描镜上吸收的外热流变化幅度大(0~20 W)。方案设计采取了散热面设计、等温化设计和电加热设计等技术措施,以使仪器入轨后在剧烈变化外热流的影响下保持尽可能低的温度变化范围和变化速率。

2.2.4 杂散光抑制技术

为提高仪器抗杂散辐射的能力及午夜时分仪器的利用率,主光学系统设计为具有二次实像面、有较强的抗杂散辐射能力的离轴三反射系统。并在中间像面处设置视场光阑,在望远镜出瞳处设置里奥光阑,视场光阑和里奥光阑结对,实现了“遮挡良好”的光学系统。来自望远镜孔径光阑的散射和衍射在望远镜里奥光阑处被阻挡。在红外波段望远镜的焦面处设置了方形视场光阑,阻挡了视场光阑外的杂散光,同时,望远镜出瞳处设置了欠尺寸的里奥光阑,使红外探测器看不到里奥光阑前的非光学面。里奥光阑处在辐射制冷器内部,温度在 120 K 左右,是一个冷光阑。除了使用冷屏蔽来降低背景,还使用低温滤光片来限制光谱范围,进一步降低背景。这样,红

外后光路和望远镜形成了多级级联视场光阑和里奥光阑,可明显减少红外光路的衍射杂散光。

2.2.5 图像导航与配准技术

卫星轨道的变化和姿态的漂移、星上运动部件的扰动、仪器温度场的剧烈变化引起的光轴缓慢的周期性变化,各种长短周期的姿态变化和扰动对图像导航和配准精度产生了不利影响。图像导航与配准设计了基于精确的卫星姿态测量和控制技术,扫描机构高精度、高带宽控制技术,辐射计星敏感与成像合一技术,通过实时计算辐射计扫描镜运动补偿量并由扫描机构执行微量补偿的方案,用来提高图像导航和配准精度。

3 结束语

地球同步轨道遥感卫星正在实现从自旋稳定平台到三轴稳定平台的跨越。二维扫描红外成像技术也将实现扫描控制、图像导航配准、热控、杂散辐射抑制、焦平面技术等方面的跨越。预计于 2015 年前后发射的风云四号气象卫星将集中展现这些综合技术成果。

参考文献:

- [1] GOES-NO/P/Q. The Next Generation [EB/OL]http://www.ngdc.noaa.gov, 2001.
- [2] Space Systems/Loral GOES I-M Data Book[Z]. 1996.
- [3] Aminou D M A, Jacquet B, Pasternak F. Characteristics of the meteosat second generation (MSG) radiometer/imager: SEVIRI[C]//SPIE, 1997, 3221: 19-31.
- [4] Xu Boming. Payload Technologies of Weather Satellite[M]. Beijing: Aerospace Press, 2005. (in Chinese)
徐博明. 气象卫星有效载荷技术 [M]. 北京: 宇航出版社, 2005.