

空间目标天基光学成像观测现状研究

杨自兴 李 智

(中国人民解放军装备学院 北京 101416)

摘要: 地球静止轨道(GEO)因其轨道特殊性,常常运行着各国天基信息网的关键节点卫星,对地球静止轨道带内目标的跟踪观测便显得极为重要。针对近年来国外对地球静止轨道带的观测方式和技术,对美国 and 加拿大等国的空间目标天基观测现状进行了研究。首先从时空角度、覆盖范围等方面总结了天基光学成像观测的优势,其次结合美国和加拿大近来的研究情况分析了地球静止轨道目标天基光学成像观测的研究现状和不足之处,最后给出了地球静止轨道目标天基光学成像观测的发展趋势。

关键词: 地球静止轨道;天基光学成像观测;MiTeX;GSSAP

中图分类号: V11 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.6520

Research the status of space based optical imaging observation for resident space objects

Yang Zixing Li Zhi

(The Academy of Equipment of People's Liberation Army, Beijing 101416, China)

Abstract: Due to the orbital particularity of the Geostationary Orbit(GEO), there are many key node satellites of the space-based network of many countries on the GEO and it is of great significance to track and observe the GEO belt residents. This paper gives analyses on status of the space-based observations of the United States and the Canada based on the recent foreign approaches and technologies for the observations of the GEO belt. First, this paper argues the advantages of the space-based optical imaging observations from the perspectives of space angel and coverage. Then the research status and deficiencies of the space-based optical imaging observations for GEO objects based on the studies of the United States and the Canada are analysed. Finally, it gives the development trend of the space-based optical imaging of the GEO objects.

Keywords: geostationary orbit; the space-based optical imaging observations; MiTeX;Gssap

1 引言

地球同步轨道卫星根据任务要求一般在赤道上空地球静止轨道(GEO)的某一位置上定点运行,以满足对地球特定区域的稳定覆盖要求,通常也把 GEO 称为高轨^[1]。GEO 轨道因其轨道的特殊性,常常运行着各个国家重要的太空资源。图像跟踪相对于微波信号具有精度高、误差小、抗干扰能力以及抗遮挡能力强的优点^[2],对 GEO 目标进行抵近成像观测,获得 GEO 目标的轨道信息、特征信息以及对其信号进行侦听就显得十分重要。为了更好地发展 GEO 卫星技术,夺取空间资源的“制高点”——GEO 轨道资源,就必须要有对 GEO 目标进行精准细致成像观测能力。天基光学成像观测可以提供 GEO 目标的图像信

息,大大提升 GEO 目标的观测细致程度,为更好地利用 GEO 轨道提供支持,同时也为开展高轨试验和维护 GEO 轨道资源的安全提供了保障。

2 空间目标天基光学成像观测优势

天基光学成像观测,是指利用空间平台上的光学成像跟踪设备对空间目标进行跟踪观测,具有观测范围大、抗干扰能力强和智能化程度好的特点^[3]。传统的空间目标观测都是以尺度信息为主,即所谓的轨道测量与预测,而最新的 GEO 空间目标观测还要求掌握目标的外形、体积、质量、表面物理参数以及成像质量等具体信息,天基成像观测便凸显了其独特优势。

1)全天时、全天候

收稿日期:2015-05

对空间目标进行光学观测必须满足两个条件,即目标被太阳光照亮和观测站充分天黑^[4]。而天基观测由于观测站处于空间轨道,始终满足充分天黑的条件,因此只要目标被太阳光照亮便可观测,大大增长了可观测时长;空间没有阴天下雨,处于空间轨道的观测站每天都可以观测。这样天基观测便实现了全天时、全天候的观测,相较于地基观测而言优势明显。

2) 观测范围大,不受地球大气影响

天基光学观测不受地球大气的限制,具有观测精度高、观测目标多等特点,同时,由于不受地域和地理条件限制,天基观测的观测视角可以大于 180° ,单天基观测站便可实现大范围观测。

3) 对空间目标可近距离成像

由于天基观测的平台位于空间轨道,其可根据任务需求,进行抵近观测,对空间重要目标进行近距离长时间的跟踪成像观测,不仅可以得到目标的轨道信息,还可以得到目标本身的结构及表面材质信息。

3 空间目标天基光学成像观测研究现状

3.1 美国空间目标天基观测研究现状

在空间目标的天基观测领域,美国一直处于世界领先地位。20世纪90年代,美国启动天基可视计划(space-based visible program, SBV),该计划发射的“中段空间试验”卫星(midcourse space experiment, MSX)搭载了林肯实验室设计的天基可见光传感器,用来对空间目标测量技术和相关功能进行验证。2002年,美国发射天基红外预警系统低轨星座部分(Space Based Infrared System, SBIRS-Low),天基红外预警卫星有效载荷包含多个红外和可见光探测器,这些探测器具有不同的视场和焦段,同时其有效载荷还包含数据处理子系统,这能够大大提高美国对空间目标编目的能力。2004年,美国启动了轨道深空成像系统(orbit deep space imager, ODSI),该项目卫星成像系统采用望远镜并具有空间机动能力,能够探测、识别和跟踪目标,提供目标的高分辨率图像,在获得目标轨道信息的同时可以提供目标自身的结构信息。但是该项目并未完成,在2007年后便下马。2010年9月25日,美国在加州范登堡军事基地发射了一颗侦察卫星,该卫星载有天基空间监视系统(space-based space surveillance, SBSS),主要负责监视地球周围的物体和太空陨石,主要监视对象为所有轨道上的人造卫星和太空碎片。

近年来,美国在继续加强天基空间监视能力的同时,开始大力发展 GEO 目标天基光学成像跟踪观测能力,先后发射了“微型卫星技术试验”(MiTEx; Micro-Satellite Technology Experiment)卫星和“地球同步空间态势感知项目”(GSSAP)卫星,构建其 GEO 目标成像观测的能力。

MiTEx 计划包括 MiTEx-A、B 两颗卫星和推动这两颗卫星进入地球同步轨道的上面级。由美国国防高级研

究计划局(DARPA)、空军和海军研究实验室联合研制。2006年6月21日,搭载两颗 MiTEx 卫星的“德尔它-2”火箭从卡纳维拉尔角发射基地升空,每颗卫星重约 226.8 kg (500 磅),由轨道科学公司(OSC; Orbital Sciences)与洛克希德·马丁公司共同建造^[5],如图 1 所示。

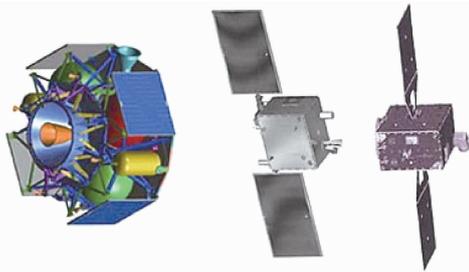


图 1 MiTEx 小卫星示意
(左为 NRL 上面级,右为两颗小卫星)

MiTEx-A、B 卫星属于抵近观测飞行器,能够机动到地球静止轨道上的目标卫星附近,进行抵近观测并获取详细的图像信息。这两颗卫星用“德尔它-2”火箭发射升空,0.5 h 后进入椭圆转移轨道;然后依靠海军研究实验室(NRL)研制的上面级火箭发动机将它们推到赤道上空的圆形静止轨道。

MiTEx-A 与 MiTEx-B 卫星入轨后进行了轨道机动和相互观测试验,并对国防支援计 23 (Defense Support Program 23, DSP-23) 卫星进行抵近观测。美国官方对外宣称 MiTEx 卫星为一颗技术验证星,目的是为了在轨验证轻质量能源与动力系统、自主管理、自主导航、自主轨道机动等技术。然而事实上, MiTEx 卫星具备对 GEO 带内卫星进行近距离观测的能力,并可能通过轨道交会逼近 GEO 带内卫星至足够近的距离,为高轨空间对抗创造条件。到目前为止, MiTEx-A 卫星一直保持在比 GEO 低约 50 km 的轨道上正常飞行,按照其观测能力分析,可能已经完成了对全 GEO 带内卫星的成像观测与信号侦听。

GSSAP 卫星是美国最新的 GEO 空间态势感知项目内的卫星,其总共包含 4 颗卫星,2014 年 7 月 28 日发射入轨了两颗,另外两颗预计 2016 年发射入轨。

GSSAP 是美空军的机密项目,用于为美国战略司令部监视地球同步轨道的碰撞威胁和潜在对手的不法活动。2014 年 2 月,美空军航天司令部(AFSPC)官员谢尔顿首次披露该项目。GSSAP 卫星体积小,配备有光电传感器,在执行监视任务时可根据不同监视方向,在地球同步带上下机动。

GSSAP 两颗卫星均是由轨道科学公司研制,其中轨道科学公司在 2014 年 AMOS 高级光学与空间监视会议上提出在 GEO 轨道两颗商业卫星上搭载光学相机从东西两侧对 GEO 目标进行观测,两颗卫星配合观测模式如图 2 所示^[6]。

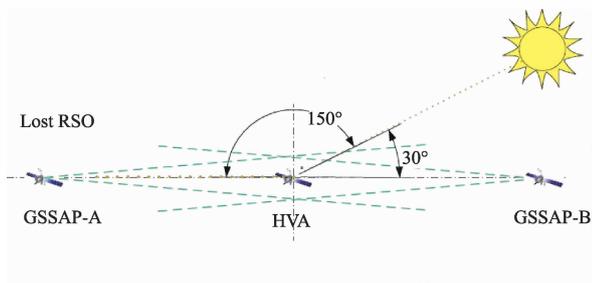


图2 两颗 GSSAP 卫星可能的工作模式

从图2中分析得出,在这种工作模式下,即使在最恶劣的情况下也可以实现对 GEO 的观测,这种工作模式可能和 GSSAP 的工作模式类似。同时,通过对洛克希德·马丁公司发表的文献[7],分析得出 GSSAP 卫星上可能在±X方向上都安装了可见光的宽视场观测相机和窄视场成像相机,同时可能搭载了红外相机,4颗 GSSAP 卫星组成的卫星星座示意如图3所示。这也和 GSSAP 计划在2016年再发射两颗 GSSAP 卫星的情况吻合。

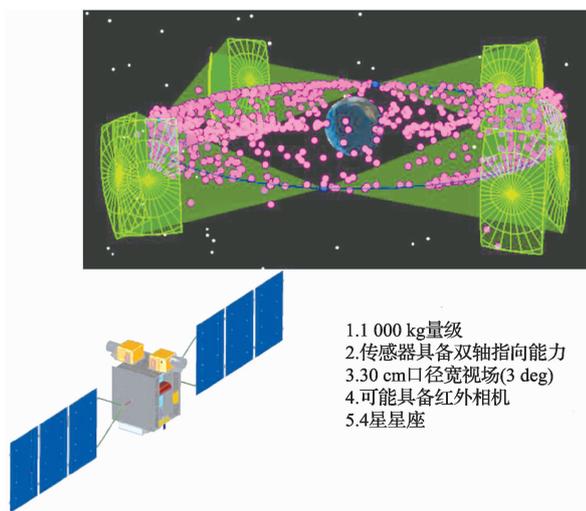


图3 GSSAP 观测系统

美国空军航天司令部航空航天与网络作战主任谢尔顿称,GSSAP不会取代第一空间作战中队当前具备的能力,“天基空间监视系统”(SBSS)和“先进技术风险降低”(ATTR)卫星在低地球轨道上运行并提供不同的能力。GSSAP将部署到地球同步轨道附近,对于观测地球同步轨道物体具有非常独特的优势,从而使空军能清晰地表征空间物体,而不仅仅是跟踪空间物体。因此,GSSAP将填补对地球同步轨道的监视能力缺口。美国空军在地球同步轨道部署有宝贵的空间资产,如提供核指挥与控制通信的先进极高频卫星(AEHF)以及监视敌方导弹发射并提供预警的“天基红外系统”(SBIRS)。谢尔顿称,GSSAP标志着空间监视能力的重大进步,可更好地避免空间碰撞并探测威胁,促进美国识别对手试图躲避探测的行动,并

发现对手可能拥有的对高轨道空间资产存在威胁的能力。

通过对 MiTEx 和 GSSAP 计划的比较基本可以得出,GSSAP 计划是 MiTEx 计划的升级版。GSSAP 将使美国在地球同步轨道太空态势感知能力方面实现重大跨越。

3.2 加拿大空间目标天基观测研究现状

2013年2月25日发射的“蓝宝石”(Sapphire)卫星是加拿大首颗军事卫星,专门用于空间目标监视。与 Sapphire 一同发射的“近地物体监视卫星”(NEOSSat)是加拿大航天局的首个“多任务微卫星平台”演示验证卫星,两颗卫星的安装位置如图4所示^[7]。

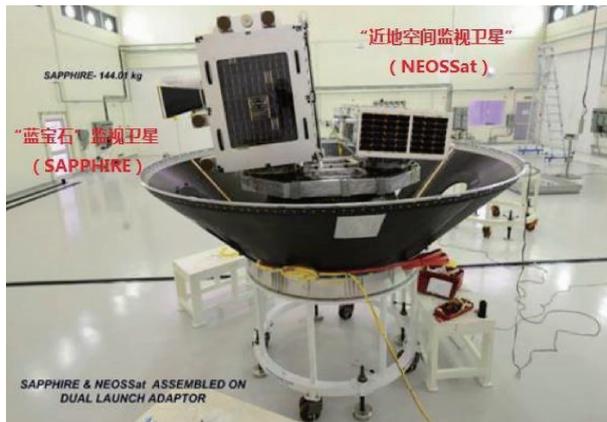


图4 Sapphire 与 NEOSSat 安装位置

Sapphire 卫星是加拿大首颗专用军事卫星,主要任务是探测和跟踪位于 6 000~40 000 km 内的空间目标。2014年1月,该卫星投入运行后成为美国空间监视网的又一天基节点,为其提供每天大约 300 个目标的更新数据。Sapphire 卫星轨道高度 750 km 的太阳同步轨道,光学载荷重 28.5 kg,口径 13.7 cm,采用三反射式设计,与美国 SBV 载荷类似,其光学载荷如图5所示^[8]。

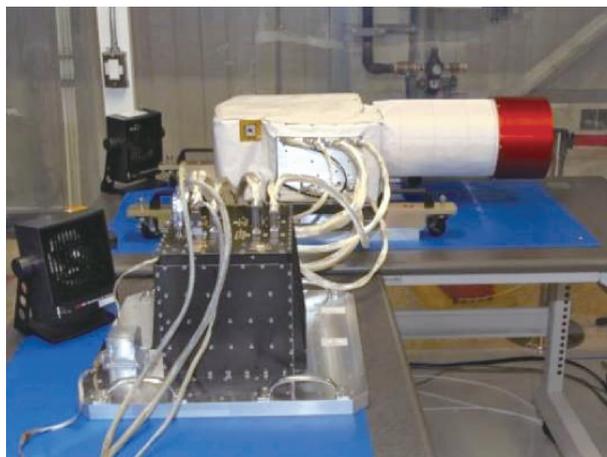


图5 Sapphire 卫星光学载荷

NEOSSat 微小卫星运行在 786 km 高度的太阳同步晨昏轨道上,安装有 15 cm 口径的光学系统、GPS 接收机

和高精度姿态控制系统^[9]。该卫星有两项任务:一是近地空间监视(NESS),用于探测和跟踪小行星;二是高轨道监视(HEOSS),用于监视高轨空间目标。其高轨观测如图6所示。

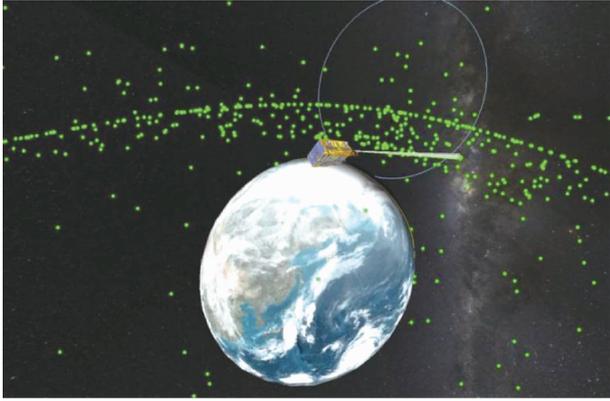


图6 NEOSat 高轨观测

4 空间目标天基光学成像观测技术发展趋势

总结近年来以美国为首的航天大国的空间目标天基光学观测技术发展,发现存在以下几点不足:

1)观测平台绝大多数不具备对 GEO 卫星成像观测能力。目前对 GEO 卫星的观测主要是以低轨卫星和地面测站为主,只有极少数的高轨观测平台对高轨卫星的观测,即使美国最新的 GSSAP 卫星,虽然覆盖了整个 GEO 带,但是也只能是对少数目标进行成像观测,对其他目标依然只能是进行光点跟踪观测,无法对大量 GEO 目标的进行成像观测。

2)高轨观测平台大多不具备抵近观测能力。如若要用天基观测系统保障在轨试验的顺利进行,就必须要实现数十公里级别的近距离伴飞、绕飞或者定点/区域保持观测,而观测平台的日常运行轨道不可能距离目标卫星如此之近,因此就要求成像观测系统具有相应的轨道机动能力,现有的天基观测系统,大多不具备这种能力。

3)高轨观测平台单一,未能实现高轨对高轨的组网观测,对 GEO 目标的遍历周期长。现有的 GEO 卫星观测系统,大多是依靠单星或者双星观测,因此对 GEO 目标的成像遍历周期长,不能满足应急任务需求。

针对上述的空间目标成像观测技术发展的不足,各国未来势必会加大投入,补足这样的缺陷。而空间目标成像观测呈现加速发展的态势,必将成为太空态势感知技术的关键一环^[10]。从其发展特点,特别是美国的天基光学成像目标观测系统发展可以看出以下几点发展趋势:

1)发展微小卫星,进行机动抵近观测。微小卫星因其体积较小,可以获得较强的机动能力。在特定时段,对重点区域重点目标进行观测时,可以利用微小卫星机动性强的优势,对重点区域重点目标进行抵近跟踪观测,获得

其近距离的高分辨率图像信息。

2)构建 GEO 目标天基光学成像观测系统,加强对 GEO 目标的跟踪观测。GEO 轨道分布着通信导航、数据中继、导弹预警、电子侦察等战略卫星资源,增强对地球同步轨道目标的观测能力是未来天基空间观测系统的发展方向之一,构建可成像的 GEO 目标天基观测系统势必是未来空间目标光学成像观测的一个发展方向。

3)组建空间目标天基光学成像观测卫星网,由单星观测向星座观测发展。从 GSSAP 的设计可以看出,其设计之初就是构建了四星共同实施 GEO 目标观测的任务模式,这种多星联合观测也将是未来空间目标天基观测的一个发展方向。

5 结论

通过对美国和加拿大的天基空间目标观测研究现状进行总结分析,总结发现国外空间目标天基观测主要依靠光学设备,辅以红外和雷达设备,而且从光点跟踪向成像跟踪方向发展。总结得出了天基空间目标光学成像观测的未来发展趋势,即观测平台小型化、观测设备系统化以及观测卫星星座化,这3个趋势都将有利于天基平台进行近距离抵近成像跟踪观测,这对我国未来发展空间目标天基观测具有一定的引导意义。

参考文献

- [1] 蒙波,黄剑斌,李志,等.美国高轨抵近操作卫星 Mi-TE_x 飞行任务及启示[J]. 航天器工程,2014,23(3): 112-118.
- [2] 张宇.一种图像确认目标的多目标跟踪方法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(6): 617-624.
- [3] 刘伟,胡以华,贺敏.天基成像跟踪关键技术研究[J]. 航天电子对抗,2008(1):30-32.
- [4] 石俊霞,李佩玥,郭永飞,等.航天遥感 TDI CCD 相机面阵成像模式的实现[J]. 国外电子测量技术,2014,33(5): 97-101.
- [5] 张宇,李颀,段建锋,等.基于星间测量的航天器精密定轨技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3): 233-239.
- [6] MORRIS K, RICE C, LITTLE E. Relative cost and performance comparison of GEO space situational awareness architectures[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014: 82.
- [7] MASKELL P, ORAM L. Sapphire: Canada's answer to space-based surveillance of orbital objects[J]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2008: 5.

(下转第78页)

Sub-Nyquist sampling of sparse wideband analog signals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010,4(2):375-391.

- [9] 孙英侠, 李亚利, 宁宇鹏. 频谱分析原理及频谱分析仪使用技巧[J]. 电子测量技术, 2014,37(7): 23.
- [10] 王树东, 何明. LabVIEW 在数据采集系统中的应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(6): 103-106.
- [11] 田园, 周勛. 窗函数在数字滤波器设计中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013,32(4): 25-27.

作者简介

付宁, 1979 年出生, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为自动测试技术、压缩感知技术等。

E-mail: funinghit@163.com

施睿, 1988 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为嵌入式系统、自动测试技术等研究。

(上接第 61 页)

- [8] SCOTT R L, WALLACE B, SALE M, et al. Toward microsatellite based space situational awareness[C]. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2013:17
- [9] 雷鹏, 王俊. 天基系统 CMOS 图像传感器成像距离研究[J]. 电光与控制, 2009(1): 10-14.
- [10] 徐俊, 侯云飞, 郭海良. 天基空间目标监视系统发展现状及思考[J]. 科技研究, 2013,29(2):93-95.

作者简介

杨自兴, 1990 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为空间目标观测、识别和定轨。

李智, 1973 年出生, 教授, 博士生导师, 博士学位。主要研究方向为武器系统应用和空间安全方向。

(上接第 66 页)

- [7] 周莹, 王虎, 吴伟, 等. 二次电子探测器选择对 FESEM 图像的影响[J]. 实验室研究与探索, 2012,31(7):246-248.
- [8] 柴智勇, 刘效磊, 冯计民. 几种车身油漆鉴定方法比较研究[J]. 电子测量技术, 2014,37(7):125-129.
- [9] 曹水良, 梁志红, 尹平河. 不同加速电压对不导电样品扫描电镜图像的影响[J]. 暨南大学学报: 自然科学与医学版, 2014,35(4):357-360.
- [10] MA Y H, ZHANG X H, CHEN X G. Observation on non-conductive powder samples by Scanning electron microscope[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(32):226-229.
- [11] 周广荣. 影响扫描电镜图像质量的因素分析[J]. 使

用与维修, 2010(6):57-59.

- [12] 夏江南, 高建辉, 姜宁, 等. 测试样品的扫描电镜图像缺陷原因及解决方法[J]. 信息记录材料, 2014, 15(2):29-34.

作者简介

黎爽, 1985 年出生, 硕士研究生, 助理研究员。主要研究方向为材料学。

E-mail: monster337@sina.com

邓平晔(通讯作者), 1974 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为材料物理学。

E-mail: dengpy99@tsinghua.org.cn