

空间光学系统技术发展探讨

张新 付强

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要 文章总览国际典型大科学工程和计划,对空间光学系统技术在过去 20 年的发展做出了简要的归纳和总结。同时通过跟踪一些领域前沿和技术生长点,指出了一些可能对未来空间光学系统带来重大改变的方向。

关键词 空间光学 卡塞格林等晕系统 同轴三反消像散系统 施密特系统 自由曲面光学 位相复原技术 计算成像

中图分类号:V476 文献标识码:A 文章编号:1009-8518(2011)05-0029-06

The Technological Investigation on Space Optical Systems Development

Zhang Xin Fu Qiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract In this paper, through several typical large international scientific projects and programs, it makes a brief summary to the development of space optical systems technologies during the past two decades in this paper. At the same time, by tracking a number of technology frontiers and the growing point, it presents several directions which may take significant changes to space optical systems in the future in the paper.

Key words Space optics Ritchey-chretien system Three-mirror anastigmatic Schmidt system Free-form optics Phase retrieval Computational imaging

1 引言

空间光学是大气外层空间利用光学设备对空间和地球进行观测和研究的一个应用学科分支,对空间观测和研究,主要是利用不同波段和不同类型的光学设备。进入 21 世纪,国际上一些发达国家和有关部门都已制定了空间发展战略规划,如美国航空航天局(NASA)、欧洲空间局(ESA)和俄罗斯政府相关部门等都提出空间发展战略规划,这些规划提出了今后一段时间内空间科学要解决的问题和发展的方向,而解决这些问题并推进空间技术的发展很大程度上依赖于先进的光学望远镜及仪器设备^[1]。本文总览了国际上典型的空间望远镜,包括“哈勃”望远镜、“詹姆斯·韦伯”望远镜、先进技术大口径太空望远镜、“开普勒”太空望远镜和暗能量专用太空望远镜,对空间望远镜光学系统设计形式的发展进行了归纳和总结,同时通过认真调研,从光学系统设计方法和新的成像方法上指出了几个方向可能对未来空间光学系统带来重大改变。最后给出本文的结论。

2 从几代空间望远镜看空间光学系统的发展趋势

“哈勃”空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)是目前天文史上成就最大的观测仪器,于 1990 年发

射,由于它的轨道位置在地球的大气层之上,因此获得了地基望远镜所没有的好处——影像不会受到大气湍流的扰动,没有大气散射造成的背景光,特别是可以观测会被臭氧层吸收的紫外线。HST 的主要参数见表 1。

表 1 “哈勃”望远镜的主要参数

波段	紫外和可见光
轨道高度	570km
轨道周期	100min
质量	11 600kg
视场	28'
光学系统形式	同轴 R-C 系统
主镜	口径为 2.4m 单镜

HST 光学系统采用卡塞格林型的等晕系统,即 Ritchey-Chretien(R-C)光学系统,这种系统含有两面反射镜,主镜和次镜均为双曲面,能够使球差和彗差同时得到校正,这种系统具有尺寸小、焦距长、无色差的优点,但由于像散未消除,使得系统的视场不能很大,同时系统存在中心遮拦,限制了系统的成像品质^[2]。这就是 HST 视场仅为 28' 的原因。

“詹姆斯·韦伯”太空望远镜(The James Webb Space Telescope,JWST)是计划中的红外线观测用太空望远镜,作为 HST 的继任者,计划于 2013 年发射升空,它将被放置在距地球 15×10^5 km 的拉格朗日点 L_2 点上,在 30~55K 的温度下工作。主镜口径为 6.5m,聚光面积 25m^2 ,主镜总质量 705kg,系统面密度 28.2kg/m^2 。

HST 采用两镜系统,两镜系统的自由变量有 4 个,像差校正能力有限,如果再增加 1 个反射镜,则自由变量便是 7 个,从而大大增加了消像差的可能性^[3]。JWST 的光学系统形式采用同轴三反消像散(The Three-Mirror Anastigmat,TMA)结构,在所有的全反射式光学系统中,由 3 块反射镜组成的三镜消像散系统结构最简单,可以在不需要使用折射元件的条件下同时消除 4 种初级像差(球差、彗差、像散和场曲),同时采用全反射式结构,系统也不存在色差,且像质比较理想,但同轴反射系统视场小,中心遮拦的存在严重影响了成像的像质。

先进技术大孔径太空望远镜(The Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope,ATLAST)是在研的下一代空间天文望远镜,主镜口径计划在 8m 到 16m,将由“大力神 5 号”火箭携带发射升空,预计 2020 年~2025 年发射。ATLAST 将把 HST 和 JWST 的优点相结合,光谱覆盖范围与 HST 类似,轨道与 JWST 相同,均围绕“第二拉格朗日”的引力平衡点 L_2 盘旋。由于 ATLAST 口径巨大,望远镜敏感度将得到极大的提升,ATLAST 望远镜的敏感度是 HST 的近 2 000 倍,成像分辨率是 HST 或 JWST 的 7 倍左右。目前有 3 种设计方案,一种是 8m 主镜的方案,见图 1。这个方案外形上看是一个扩大版的 HST,采用的是整体结构的主镜,主镜采用 ULE 材料,主镜均方根误差 $<8\text{nm}$ 。望远镜前端放置开普勒式 60° 倾角切口随动遮光罩。望远镜后端留有 $\Phi 4\text{m} \times 4.5\text{m}$ 空间放置仪器设备。一种是 9.2m 主镜的方案,见图 2,这个方案从外形上看是扩大版的 JWST,主镜将由 36 块 ULE 玻璃材料制作的六边形镜片拼接而成,每块镜片宽约为 1.315m;一种是 16.8m 主镜方案,见图 3,主镜将由 36 块 SiC 材料的六边形镜片拼接而成,每块镜片宽约为 2.4m。

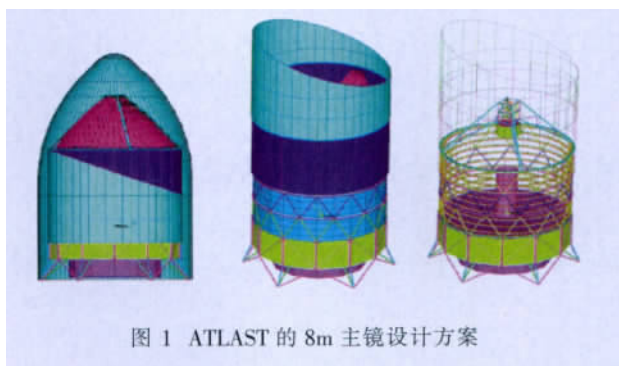


图 1 ATLAST 的 8m 主镜设计方案

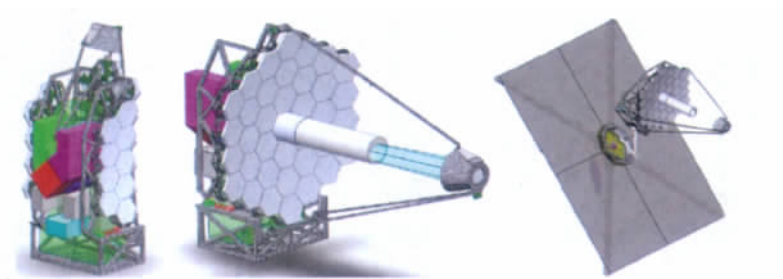


图 2 ATLAST 的 9.2m 主镜设计方案



图 3 ATLAST 的 16.8m 主镜设计方案

为了探测太阳系外类地行星,美国于 2009 年 3 月发射了“开普勒”太空望远镜 (Kepler Space Telescope),在为期至少三年半的任务内,“开普勒”望远镜将对天鹅座和天琴座中大约十万个恒星系统展开观测,以寻找类地行星和生命存在的迹象。

“开普勒”太空望远镜探测的波段为 430~890nm,光学系统形式采用施密特结构,主镜直径达到 1.4m, CCD 探测器像素数为 9 500 万,由 42 个 2 200×1 024 像素的 CCD 拼接而成;视场对角线达到 12°;动态探测范围为 9~16 个星等;飞行组件和装配仪器的质量为 1 017kg;飞行组件和装配仪器的功率为 771W,轨道周期为 372.5 天^[4-6]。图 4 为“开普勒”空间望远镜的结构布局图。

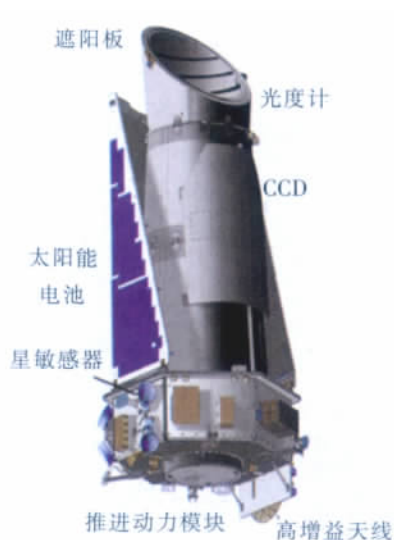


图 4 “开普勒”空间望远镜结构布局图

“开普勒”空间望远镜光学系统采用施密特结构,施密特结构是在球面反射镜的球心处垂直光轴放置施密特校正板。校正板的第一个面是平面,第二个面为非球面,这个非球面在理论上可以使球面反射镜的球差完全校正,因而相对孔径很大,可达 1:0.75。由于光阑处于球面反射镜的球心,轴外光束对于主光线完全对称,因此没有彗差和像散。校正板同时也是没有轴向色差和垂轴色差,只有少量色球差。但是像面是弯曲的,与反射镜的球面是同心圆。假如接受面是弯曲的,并与像面的弯曲相吻合,视场角可以很大,但如果接受面

是平面,则视场角很小。开普勒空间望远镜的像面就是采用由 42 个 $2\,200\times 1\,024$ 像素的 CCD 拼接而成的弯曲的焦平面,这样才使得系统的对角线视场达到 12° 。这种光学系统结构形式的缺点是长度比较大,约等于主反射镜焦距的两倍。

过去的十年中,天文学最重要的一项科学发现即是确知宇宙的膨胀速度正在加快。根据引力场方程,这正是宇宙中存在负压强能量的证明。该发现与宇宙物质总密度约 $2/3$ 的短缺都被认为是暗能量的作用。2004 年,威尔金森微波背景各向异性探测器给出的数据表明,宇宙中只有约 4.6% 是原子的世界,暗物质占了 23%,而暗能量占宇宙总质能的 72%。美国宇航局和能源部把希望寄予合作项目“联合暗能量任务”(Joint Dark Energy Mission),意图利用暗能量专用太空望远镜查明相关性质。

暗能量专用太空望远镜现有两种设计备选方案,其中优势明显的是采用离轴三反消像散系统形式,主镜口径在 1.1m 以上^[7]。拟采用视场离轴类似于经典的 Cooke 三片型结构形式,见图 5。库克三片式采用正负正光焦度分配方式,可以同时消除 4 种初级像差(球差、彗差、像散和场曲),同时采用全反射式机构,系统也不存在色差,且像质比较理想,与同轴三反消像散系统相比,离轴三反消像散系统可同时实现长焦距与大视场,且没有中心遮拦,调制传递函数高^[8]。

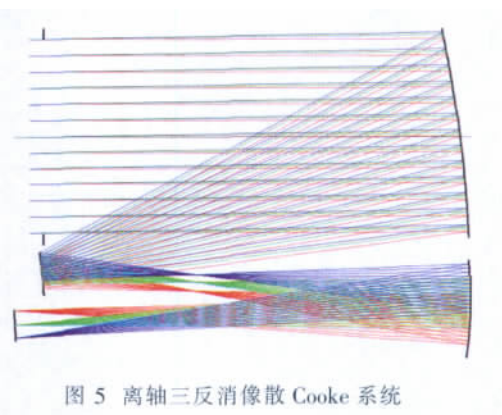


图 5 离轴三反消像散 Cooke 系统

从以上空间天文望远镜的光学系统形式发展过程中可以看出,空间天文望远镜结构形式主流上采用全反射式光学系统,为了追求高像质和大视场,光学系统结构形式由传统的同轴两镜系统发展到同轴 TMA 系统,再发展到离轴 TMA 系统,为了满足更高的需求,光学系统主镜的孔径一直在增大,但单镜主镜的成像品质始终优于拼接式主镜,即使当主镜口径达到 8m 情况下,研究者们也没有放弃单镜主镜的方案。

3 前沿新技术生长点

进入 21 世纪,技术的发展日新月异,很多新奇新颖的设计理念和技术方法的出现,给空间光学技术的发展注入了新的活力。下面分别从光学系统设计方法、波前传感技术和新的成像方法上指出了几个方向可能对未来空间光学系统带来重大改变。

3.1 光学系统设计方法——自由曲面

自由曲面是一类非旋转对称、形状不规则的曲面结构,它不仅能简化系统结构、降低成本、实现功能集成化,还能提高和改善系统性能。光学自由曲面是一类特殊的自由曲面,由于其全新的设计理念,能最大限度地改善光学系统的性能,如校正像差、改善像质、扩大视场等,是新一代光学系统的核心关键元件。

“哈勃”空间望远镜最初传回来的图片有严重的问题,获得的最佳图像品质远低于期望:点源的影像被扩散成超过一弧秒半径的圆。问题来源于主镜的形状被磨错了 $1/20$,镜面与需要的位置只差了 $2\mu\text{m}$,但这个差别造成了灾难性的球面像差。1993 年进行对“哈勃”空间望远镜的第一次维修,研究人员设计一个有符号相反等值的球面像差光学系统,相当于配上一副能改正球面像差的眼镜。用来改正球面像差的仪器称为空间望远镜光轴补偿校正光学(The Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement, COSTAR),其光路布

局见图6。2005年,Joseph M. Howard在OSA年会的特邀报告中提到在COSTAR中使用了两片自由曲面。

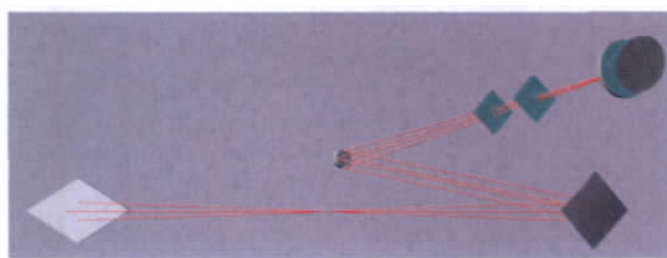


图6 COSTAR光路布局图

自由曲面是在轴对称非球面的基础上全面放开面形自由度,使其完全非对称化,像差平衡能力大大提升,尤其对轴外像差平衡能力明显,从而提升光学系统的视场适应能力。其特点与我国新一代航天遥感光学系统的发展需求相契合,为解决现有技术的瓶颈带来了曙光,具有非常高的应用价值。

3.2 波前传感技术

大口径天文望远镜的加工、装调以及在轨调整过程中都要用波前传感技术。在光学系统中波前传感实际上是要测定光学系统的波面像差。目前,波前传感技术主要有干涉测量技术、夏克—哈特曼(Shack-Hartmann)技术、五棱镜扫描技术等。近年来,由于计算机的发展和软件优化能力的提高,基于位相参差的位相恢复技术有了很大的进展。

位相恢复技术是从相机获得的图像(光强分布)信息中推算出光学系统的波面像差的一种波前传感技术。这种方法直接用相机获得的图像信息作为评价像质的依据,是一种最直接和真实的评价。这里没有任何其他传感器,所以系统简单,也没有传感器和图像之间的任何换算误差^[8]。

光学系统的波像差是代表光学系统成像品质的最根本的物理量。有了波像差的数据,就可以计算出点扩散函数和光学传递函数,知道图像变模糊的原因,从模糊图像中恢复原来的图像。

位相恢复问题归结为已知点扩散函数和光瞳函数的振幅分布,求出光瞳函数的位相部分,即波像差。从数学关系上说,这时的解不是唯一的解,但可以利用迭代法和参数选择方法求得满意的结果。

计算机的发展和软件优化水平的不断提高,这种位相参差的位相恢复技术有了很大的进展,在实验室位相恢复精度已经达到了衍射极限水平,自适应控制的闭环周期达到了100Hz。目前,该技术已经开始实际应用,且应用前景颇好,前述的“詹姆斯·韦伯”天文望远镜在轨调整方案就是采用了该项技术。

3.3 成像方法——计算成像

由于卫星发射时冲击、振动及空间环境的影响,使得光学系统组成元件之间的间隔、镜片面形发生变化,系统的成像像质难免不受到影响。如何提高光学系统的容限同时提高空间光学望远镜的环境适应性,很多研究者对此进行了深入的研究,很多实用的新的理论和方法被提出。其中就包括利用目前图像处理技术上的优势来弥补光学系统的某些缺点,即光数混合成像技术的研究,也就是下面提到的计算成像技术。

计算成像技术是通过联合光学和数字图像处理(或计算)的方法来产生传统光学系统极难获得或无法获得的图像。发展计算成像技术的动机在于两方面,一方面它可以提供更优越的成像特性,包括视场范围、光谱分辨率、动态范围、时间分辨率等,同时也可以实现光学系统的机动性(可以操纵成像光学系统的焦距、景深、分辨率、照度等)。另一方面,提高成像系统的性能与复杂程度的比率,高性能通常带来高的系统复杂程度,而计算成像技术可以通过引入数字图像处理换来系统复杂程度的简化。在计算成像技术中,研究人员对波前编码技术和编码孔径成像技术的研究投入了大量的精力。

波前编码技术是一种将光学成像技术和数字图像处理技术相结合的新型成像技术。该技术的主体思想是:在光学系统光瞳处加入一个特殊形式的位相掩模板,经过理论计算光学设计软件的模拟分析,构造出使光学系统对某种光学参数(主要是各种像差)不敏感的掩模板模型,然后采用数字图像处理技术对所获得的中间像进行处理,去除掩模板对光学系统的影响,得到一个全变动范围内都比较好的成像品质。由于掩模板采用位相形式,所以在光传输过程中,不损失光能量,比起现有的二元成像光学能够获得更高的成像效

率^[9-10]。

编码孔径成像是混合光数成像系统,采用多孔径编码掩模替代了具有聚焦能力的光学元件(透镜、反射镜),这一掩模对将传播到一个二位探测器阵列的来自场景的波前进行编码,随后采用基于编码的掩模透射的知识,通过相关或解卷积对探测的二维强度图像进行解码,恢复场景的图像。

与常规的采用透镜或反射镜将来自场景的光线聚焦在探测器阵列上的成像方法相比,自适应编码成像有以下优点^[11]:

- 1) 通过消除常规的光学元件降低了系统的质量;
- 2) 对给定的角分辨率,可减小系统的质量;
- 3) 具有降低成像系统成本的潜力;
- 4) 景深无限大,对于近距离和中距离场景具有被动三维成像的可能;
- 5) 具有柔性故障模式,允许探测器和掩模阵列上的多点或成线缺陷,这是由场景中的每一点的光的分布特性决定的;
- 6) 可以忽略图像失真和畸变;
- 7) 由于图像形成是分布式的,对给定的探测器阵列像素数目和系统视场,可以提高系统的分辨率。

现在美国 Northrop Grumman 公司和英国 QinetiQ 公司正在美国国防部先进技术预研局提出的 LACOSTE 项目的支持下,发展采用具有多个视看方向的交织的子孔径来实现高分辨率、灵活的变分辨率能力和大视场的概念,几千米的高度下视观察及在大范围内连续成像的传感器,保证了实现探测和跟踪感兴趣的物体所需的分辨率。

4 结束语

本文总览了国际上典型的空间望远镜,从空间天文望远镜的光学系统形式的发展过程中可以看出,空间天文望远镜结构形式主流上采用全反射式光学系统,为了追求高像质和大视场,光学系统结构形式由传统的同轴两镜系统发展到同轴 TMA 系统,在发展到离轴 TMA 系统,为了满足更高的需求,即更大的角分辨率,光学系统主镜的孔径一直在增大,但单镜主镜的成像品质始终优于拼接式主镜。从发展速度上看,光学系统的形式的采用趋于保守,从 R-C 到 TMA,步子迈得不大,但几代空间望远镜在获取信息量上有质的跨越。本文还提出了几个空间光学技术发展的新方向。在光学系统的设计方法上,光学自由曲面的应用,将能最大限度地改善光学系统的性能。在波前传感技术方面,基于位相参差的位相恢复技术将发挥重要作用。最后对新兴的计算成像技术中的波前编码技术和编码孔径成像技术进行了简要的介绍。新兴的技术和方法发展十分迅速,可能会酝酿空间望远镜光学系统形式的大的改变。

参考文献

- [1] 韩昌元.空间光学的发展与波前传感技术[J].中国光学与应用光学,2008,1(1):13-24.
- [2] 潘君骅.光学非球面的设计、加工和检测[M].北京:科学出版社,1994.
- [3] Gardner I J P, Mather J C, Clampin M. Science with the James Webb Space Telescope[J]. Proc.SPIE, 2006, 6265(6265n):1-12.
- [4] Zinn J W, Jones G W. Kepler Primary Mirror Assembly: FEA Surface Figure Analyses and Comparison to Metrology [J]. Appl Optics Proc.SPIE, 2007, 6671(667105):1-11.
- [5] Koch D, Borucki W, Webster L. Kepler: a Space Mission to Detect Earth-class Exoplanets[J]. Proc. SPIE, 2006, 6265:599-607.
- [6] Borucki W J, Koch D G, Lissauer J J. The Kepler Mission: A Wide Field of View Photometer Designed to Determine the Frequency of Earth-Size Planets around Solar-Like Stars[J]. Proc.SPIE, 2003, 4854:129-140.
- [7] Lampton M L, Sholl M J, Levi M E. Off-Axis Telescopes for Dark Energy Investigations[J]. Proc.SPIE, 2010, 7731(77311G):1-11.
- [8] 常军,翁志成,姜会林,等.用于空间的三反射镜光学系统设计[J].光学学报,2003,23(2):216-219.

- [9] Dowski E R, Cathey W T. Extended Depth of Field through Wave-Front Coding[J]. Appl Optics, 1995, 34(11):1859-1866.
- [10] Cathey W T, Dowski E R, FitzGerrell A R. Optical/Digital Aberration Control in Incoherent Optical Systems [J]. Second Iberoamerican Meeting on Optics, 1996, 2730:120-126.
- [11] 范晋祥, 岳艳军. 军用红外成像系统新概念新体制的发展[J]. 红外与激光工程, 2010, 40(1):1-6.

作者简介

张新, 男, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为先进光学系统设计、光学与光电工程新技术与新方法。

欧洲智库预测未来十年还将建造并发射 1145 颗卫星

欧洲咨询公司(Euroconsult)最新发布的《世界市场调查——2020 年前建造并发射的卫星》报告预测, 未来 10 年(2011~2020 年)预计将建造并发射约 1 145 颗卫星, 比上一个 10 年(2001~2010 年)的卫星数量多 51%。

这份报告(第十四版)指出, 制造和发射这 1 145 颗卫星所获全球收益将达 1 960 亿美元, 其中 70% 的需求来自政府。政府继续主导航天市场, 卫星系统也仍是为民用和军用用户提供通信和地理情报。

来自 50 个国家的政府机构将在未来十年发射共 777 颗卫星, 其中超过 80% 的卫星来自 6 个主要航天大国和地区(如美国、俄罗斯、欧洲国家、日本、中国和印度)。这 80% 的卫星实际包括太空国家替换已运行的系统、发射新卫星, 新兴太空国家只建造和发射新系统, 还未到达替换现有卫星的阶段。

未来 10 年将建造并发射的政府卫星中, 有超过三分之二的卫星用于民用和军民两用; 专用军事卫星仍集中在美国、欧洲、俄罗斯、中国、日本和以色列几个有限国家范围内。

国防与安全机构大都热衷于拥有安全通信和成像情报系统, 但预算制约了国防开支, 导致更多公-私合作关系和政府采用商业卫星搭载有效载荷。

随着更多的国家和多边机构为多种目标而寻求成像服务, 欧洲咨询公司预期, 未来 10 年将建造并发射超过 200 颗政府地球观测卫星, 使得地球观测成为民用政府卫星应用中所占比例最大的部分。该报告还指出, 政府将开发更多太空科学和探索任务(占上个 10 年的 30%), 任务复杂程度和成本多种多样。

在商业太空领域中, 约有 50 家公司在地球同步轨道运行通信和广播卫星, 另有 10 家公司在低地球轨道运行可提供通信和地球观测服务的卫星。

欧洲咨询公司预测, 在未来 10 年, 有市场价值达 500 亿美元的 203 颗商业通信卫星将发射进入地球同步轨道(GEO)。

地球同步轨道之外的商业卫星服务在未来 10 年将得到飞速发展, 共有 165 颗卫星将被建造并发射到中高地球轨道(MEO)和低地球轨道(LEO)。大约 40 颗卫星将发射进入 LEO, 提供商业光学和雷达成像服务。

(改编自中国航天科技集团网 2011- 09- 07)