

现代小卫星与卫星小型化

Modern Smallsat and Satellite Microminiaturization

黄志澄

(北京系统工程研究所, 研究员 北京 100101)

80年代中期以来,以高技术为基础的现代小卫星的发展十分迅速,并带动卫星向小型化方向发展。这个趋势的出现是航天技术发展的必然。信息时代新的社会需求和冷战后空间技术更加注重实效的世界形势推动了现代小卫星的发展和卫星小型化,而新材料、新工艺、微电子、微机电系统等高新技术的发展为现代小卫星的发展和卫星的小型化奠定了技术基础。现代小卫星和卫星小型化正在促使卫星技术发生深刻的变革,并已在通信、对地观测、科学探测、技术演示等领域取得了初步的成效。现代小卫星和卫星小型化也为我国卫星技术的发展提供了契机。因此,认真总结国外在发展现代小卫星和实现卫星小型化方面的经验,无疑对我国卫星技术的发展有十分重要的意义。

一、现代小卫星是现代高技术发展产物。它以重量轻、费用低、研制周期短和功能密度高为特征

国际上通常将卫星按重量大小划分为纳米型、微型、超小型、小型、大型卫星等。例如按照英国萨里(Surrey)大学的分法,将重量小于10kg的卫星叫作纳米型卫星(Nanosat),10~100kg的叫作微型卫星(Microsat),100~500kg的叫作超小型卫星(Minisat),500~1000kg的叫作小型卫星(Small-sat),1000kg以上的叫作大型卫星。但也有不少其他单位把重量小于500kg以下的卫星称为小卫星,把重量小于50kg的小卫星称为微卫星。显然,只以重量来划分既不太科学,也不太严格。在60年代,世界上卫星技术刚刚起步时,卫星也不重,但其功能也不大。为此,国际上又提出了功能密度(单位重量的功能)的概念,来区分简单小卫星和现代小卫星。功能密度有显著提高而重量小于500~1000kg的卫星叫做现代小卫星。另外,国外有人把采用现代小卫星的技术,在保持功能基本不变或略为降低的情况下,使其重量大大减轻但重量仍大于1000kg的卫星,也叫做小卫星;而在本文中则把这

种做法称为卫星小型化。

当前,有些卫星为了增加功率,满足安装大孔径观测仪器的特殊要求和向多功能的综合平台方向发展,其重量还有继续增长的趋势。但对于这些卫星,它们的功能密度也增加得很快。另一方面,目前应用卫星的重量和主要用于科学试验的小卫星的重量之间,将是未来小型应用卫星的重量范围,就降低重量、提高功能密度而言,卫星的能源系统、结构系统和姿控系统的潜力很大。以能源系统为例,它的重量占卫星总重的35%以上。近年来,由于技术的进步已使太阳能帆板的能量密度从20w/kg提高到100w/kg,估计采用可展开式的太阳能帆板后,还可提高到200w/kg。镍氢电池的能量密度也提高了5倍,估计今后还可以大幅度地提高。由于高强度轻型材料的发展,结构系统和姿控系统也可以大幅度地降低重量。又由于电路的高度集成化和微处理器执行指令速度的大大提高,电子系统的体积、重量和能耗都会大大下降。根据这些分系统技术的发展趋势,估计采用目前已成熟的先进技术,可使卫星的总重降低40%左右。假如进一步采用正在发展中的技术,估计到2010年,卫星的总重与目前相比可降低70%左右。为了实现这个目标,美国正在研制演示验证先进技术的现代小卫星,如美国空军在1996年提出了“强力卫星”(MightySat)计划,目的是验证先进技术,以及时提供有效的航天器。具体的指标为125kg和500万美元,相隔1~1.5年发射一颗。

二、现代小卫星的发展,促进了卫星小型化和大卫星的发展,形成了高、中、低轨道综合利用,大、中、小同时并举的局面

纵观卫星技术的发展,我们可以看到,卫星已从技术试验阶段,发展到实用阶段。为了进一步提高卫星应用的效费比,国际航天界提出了“更好、更快、更便宜”的口号。卫星越来越多地采用公用平

台,平台将进一步增加功率、减轻重量、扩大功能。有效载荷的减轻将降低功耗、减轻重量、提高性能,提高星上处理能力。地面站将向小型化、标准化、机动化的方向发展。近年来,由于轻型材料、微电子、微机械技术的发展,正在促使卫星技术发生深刻的变革,不仅出现了一批实用的现代小卫星,而且由于现代小卫星技术的推动,促进了卫星小型化。以侦察卫星为例,现有低地球轨道(LEO)成像侦察卫星一般为15吨,现有地球静止轨道(GEO)的信号侦察和电子干扰卫星一般为5吨。采用卫星小型化技术后,估计可使卫星的重量降低到原有重量的20~25%,功耗降低40~50%。美国国家侦察局(NRO)在1996年组织了专家组对卫星小型化进行了评论。其结论为采用较小的卫星具有很多优点:

(1)增加了适应性。由于原来由一颗卫星完成的多种功能现在分成由几个卫星来完成而增加了系统的适应性。在危急时,可发射成本低的较小的卫星来强化其特殊功能。

(2)增加了坚固性。采用由较小卫星组成的星座,当有一颗卫星损坏时,影响较小。

(3)可以较快地引进新技术。由于可以更经常地制造和发射较小的卫星,从而可以较快地引进新技术。

(4)只要求较小的工业基础。若采购较小和较便宜的多个系统,则允许流水生产;并由于不购买大型航天器,而只要求较小的工业基础。

(5)促进商用系统的发展。

卫星小型化促进了整个卫星技术的进一步发展,使应用卫星形成了高、中、低轨道综合利用,大、中、小同时并举的局面,假如我们从卫星和运载火箭的大系统出发,以运送每公斤有效载荷入轨的费用和任务容量为指标,来评述卫星的发展趋势,不难看出地球静止轨道(GEO)的卫星,由于轨道位置十分宝贵,卫星的重量还有增加的趋势;而低地球轨道(LEO)的卫星重量则取决于发射费用,可能在几公斤到1200公斤甚至更重之间。

发展现代小卫星和卫星小型化还必须与发展相应的运载器结合起来,同时还要通过发展卫星的自主技术,减少对地面测控系统的依赖,从而减少整个工程系统的全寿命费用。只有这样,才能使现代小卫星获得更广泛的应用。为了满足日益增长的发射小卫星的需求,各国正在研制小卫星运载器,如发展在飞机上发射的小型火箭等。这不仅可以降低发射费用,而且由于它的机动性好而具有很高的军事价值。

三、现代小卫星和卫星小型化与低地球轨道的卫星星座的发展结合起来,将在经济和国防建设中发挥突出的作用

低地球轨道(LEO)的卫星星座(Satellite Constellation)的兴起促进了现代小卫星和卫星小型化的发展。卫星星座是为完成给定的空间任务,按一定规律布置的一群卫星。近年来,为了建设全球信息高速公路,通信卫星量的发展十分迅速,除了进一步发展地球静止轨道(GEO)的通信卫星外,为了实现全球个人通信和减少通信的时间延迟,国际上正在发展低地球轨道、中地球轨道(MEO)的通信卫星星座,目前已提出了多种方案。对于低地球轨道通信卫星星座,目前已提出的方案可分成三种类型。第一类叫做大LEO系统,其中典型的有由美国摩托罗拉公司为首研制的“铱”(Iridium)系统。这个系统为低轨道星座,轨道高度为780km。它有6个倾角为86.4°的轨道平面,每个轨道平面内有11颗卫星,共有66颗重800kg的卫星。卫星之间有星际的通信链路。另外还有轨道高度为1390km、8个轨道平面、48个重440kg的卫星组成的全球星(Globastar)系统等。第二类叫做小LEO系统,其中典型的有由美国轨道科学公司研制的“轨道通信”(Orbcomm)系统。这个系统共有28颗重40kg的卫星。主要进行数据的存储转发,用于管路监测和物资跟踪等。第三类是宽带LEO系统,其中典型的是美国Teledesic公司提出的轨道高度为1300~1400km、288个重1300kg卫星组成的全球电信系统。它是第二代通信星座系统的代表,具有宽带、双向、高速传输数据和图像的能力,具有通信、数据中继和定位等多种功能。它与地面信息高速公路可以实现无缝兼容,将成为美国争夺信息优势的主要技术基础。小LEO系统和大部分大LEO系统的卫星,应属于现代小卫星。中轨道移动通信卫星星座有轨道高度为10370km、3个轨道平面、12个重1950kg的卫星组成的奥德赛(Odssey)系统等。这种星座的卫星,显然已不属于现代小卫星之列,但在技术上也将受到现代小卫星发展的影响。

低地球轨道的遥感卫星星座,缩短了对观测区域的重访周期,便于对观测对象进行动态跟踪,在环境和灾害监测以及军用方面,将有广泛的应用。下面重点介绍军用的现代小卫星。由于新的军事革命的推动,美国国防部以2025年为瞄准点,进行远期规划。美国空军大学在1996年8月完成的《空军2025》研究报告,就是这个远期规划的一份重要的支撑报告。在这份报告中,把由小卫星星座组成的全球信息管理系统(GIMS),列在美国空军在2025年前要发展的武器系统的首位。它是信息收集、处理、分析和咨询的扩大的智能网络。它用地面、空中和空间的所有传感器(包括声学的、光学的、无线电频率的和嗅觉的传感器)和全部侦察手段收集、贮存、融合和管理信息。这个系统能够根据用户的要求,应用神经式的处理以提供形势和战场的正确的

信息。它将通过个人数字助手和虚拟交互中心提供人的接口。作为这个系统的第一个阶段,先建立全球监视、侦察和目标系统(GSRTS)。它是一个天基的、全谱段的收集、处理和传播系统,以提供实时的信息数据库,建立感兴趣区域的虚拟现实图像,以提供形势认知、技术和情报信息、双向的指挥和控制。它包括较小的分布式的可扩展的卫星和天基传感器,可为战斗机按需求提供实时信息。最近,美国国防先期研究计划局(DARPA)提出了一项监视、目标和侦察系统(Starlite)卫星星座的建议。它由分布在高度为800km的轨道上的24个卫星组成,可在15分钟内观测全球大部分地方。卫星上装有合成孔径雷达(SAR)和运动目标指示器(MTI)。每个卫星可用下列三种模态之一工作:

(1)点观测,可以0.3m的分辨率调查4.5×4.5km的区域。

(2)扫描,每小时可以0.9m的分辨率用11km宽的条带调查360×360km的区域的20%。

(3)条带观测,每小时可以0.9m的分辨率扫描整个与朝鲜相似的地域。

假如美国实现这个计划,无疑将大大加强其空间监视和侦察能力,也为美国军方今后发展分布式的星座系统打下了基础。由以上的分析得知,小卫星和卫星小型化,与卫星星座的发展结合起来,将把卫星应用提高到一个新的水平。

四、现代小卫星技术的发展,促进了空间探测器的小型化,为人类探索和开发空间开辟了一条崭新的途径

现代小卫星技术的发展,促进了空间探测器的小型化,美国NASA在1994年1月,成功地发射了“克莱门汀”小型月球探测器。这个探测器总重463kg,研制费仅为5600万美元,研制周期为22个月。“克莱门汀”的成功拉开了空间探测器小型化的序幕。同年NASA又提出了“小型航天器技术倡议”(SSTI),研制成功了两个小型卫星。1995年NASA又提出了“新千载计划”(New Millennium Program)。该计划的目标更加先进,要在2000年前后实现航天器总重量减小到目前的1/10;航天器的有效载荷占总重之比,从目前的30%提高到70%;航天器功耗降低到目前的一半;可重复使用的软件通用模块达到80~90%;研制费降低50%;运行管理费降低30%;研制周期由目前的4~8年,缩短为1.5~2年;大幅度增加年发射数量。这个计划提出的关键技术是:自主技术、微电子技术、微电子机械系统(MEMS)、光通信技术、分系统模块化和多功能技术。“新千载计划”第一个航天器“深空”1号重约350kg,将于1998年发射。其主要任务是绕飞近地

小卫星和彗星,通过微型成像光谱仪观测它们的化学成分,研究太阳系的形成和演变。这个探测器首次使用太阳能电推进系统,其氙离子推力器所需的电能由高效太阳电池供电。“深空”1号的研制费预计为6000万美元,研制周期为两年。“新千载计划”第二个航天器“深空”2号,是两个微型火星探测器/插入器,它将搭载在“火星-98”探测器上登上火星,并插入火星表面上层,用以测量表面的大气压力、温度和土壤中的水分。“新千载计划”第三个任务是由3个“深空”3号探测器组成的星座,进行日地空间探测。

与“新千载计划”的小型探测器相比,美国过去的空间探测计划,耗资巨大。1976年6~7月,美国发射的“海盗”1号和“海盗”2号火星探测器,虽然也取得了成功,但耗费了30亿美元(1997年价格)。1997年7月4日,美国“探路者”(Pathfinder)火星探测器在火星着落,在一系列探测活动中取得巨大的成功。这个探测器的总费用只有2.5亿美元。估计在“新千载计划”的基础上,还会进一步降低空间探测的费用。美国总统克林顿在“探路者”着落后说“我们重返火星,是美国空间探索计划开始新时期的标志”。无疑,这个新时期是与小型探测器技术与探测器小型化联系在一起的。我国在深空探测方面还是空白。我们在起步时完全可以抛开国外过去的老路,一开始就直接走小型探测器的新路。

五、现代小卫星和卫星小型化的发展促进了整个卫星管理体制的改革

发展小卫星和实现卫星小型化的目的是为了更快、更好和更省地发展航天事业。为此,不仅要组织好技术攻关,而且必须改革传统的卫星研制的管理方法。国外在小卫星管理方面取得的经验,正在推动整个卫星管理体制的改革。这方面,以下一些国外的经验值得我们借鉴:

1. 充分发挥大学、小型研究所和中、小公司的作用。由于小卫星需要的人力和物力较少,需要的技术含量较高,大学、小型研究所和中、小公司可在发展小卫星中起重要的作用。例如英国的萨里大学,美国的斯坦福大学、麻省理工学院等大学,都在发展小卫星方面,作出了显著的成绩。英国萨里大学在7年内已成功地研制和发射了7颗小卫星。美国海军空间技术中心(NCST),只有350人,它研制和发射成功的“克莱门汀”小型月球探测器被国际航天界誉为“军转民的有益尝试和更快、更好、更省的成功实践”。美国的轨道科学(Orbital Science)机构正在研制世界上第一个小LEO星座,已发射的两个小卫星目前已正式提供商业通信服务。美国Spectrum Astro公司,正在研制前述的“深空”1号

和“强力卫星”2号。实践证明这些大学和中、小公司比大公司在思想上要解放得多,在管理上要灵活得多,能较快地适应发展现代小卫星的要求。

2. 广泛采用臭鼬(SKunk)工作模式。臭鼬工作模式是美国洛克希德公司在50年代,为加速研制无人侦察机U-2而创造的一种高效的“突击小分队”工作模式。臭鼬就是这个突击队的名称。这种工作模式的特点是集中少数精干人员,以高度的责任感和积极性,在很短时间内突击完成任务。这种突击队有的叫做“一体化产品研制组”(TPDT),这个组的组长对整个任务负责,对研制工作每天的进展都了如指掌。研制组要自始至终,完成设计、生产、试验,并参加发射和运行管理。一般总装、测试和试验在同一地点进行。小卫星采用这种工作模式,既加快了进度,又保证了质量。实行这种工作模式,关键是选择好组长。

3. 将技术演示和应用尽可能结合起来。小卫星的技术含量很高,采用大量新技术必定会增加风险。为了减少风险,发展小卫星一般要从发展技术试验卫星做起。但发展技术试验小卫星,应将技术演示和应用尽可能结合起来。在美国这种做法叫做“先期概念技术演示”(ACTD)。上述的“克莱门汀”

月球探测器,在这方面都做得比较好,不仅验证了先进技术,而且取得了很好的应用效果。

4. 提高卫星的生产效率。原有的卫星的总装是位置固定的,而“铱”系统和“全球星”系统改成卫星不断移动到不同的装配小组处,从而提高了卫星生产效率。摩托罗拉公司生产“铱”系统只有50人,每22天装配一颗卫星,最终目标达到每5天装配一颗卫星。阿莱尼亚公司生产“全球星”系统只有140人,将每10天装配一颗卫星。

由以上的分析可见,当今在卫星技术领域里正孕育着一场技术革命,即卫星向小型化的方向发展。现代小卫星和卫星小型化的发展是为了满足更好、更快、更省地发展卫星的要求,是为了满足未来高技术局部战争的需要和军用民用方面对卫星组网运行的需要。可以预见,小卫星在卫星技术领域里引起的变化,就如同微型计算机在计算机技术领域里引起的变化一样。应该说,这样的变革还刚刚开始,卫星功能密度的增势还远未结束。超轻型材料、新型空间能源系统和新型空间推进系统,纳米级的电子元器件、微米以至纳米级的机械装置等,将推动卫星技术进入一个崭新的时代。

(责任编辑 王宏章)

(上接第9页)

定。由磁控实现天平动阻尼和偏航轴稳定,三轴对地指向精度 $1\sim 2^\circ$ 。姿态角速率 $0.01^\circ/\text{s}$ 。

卫星姿态测量部件有三轴磁强计、太阳敏感器和红外地平仪,通过不同姿态敏感器组合起来。各种组合获得的测量精度是不一样的,一般姿态测量精度在 $0.5\sim 1^\circ$ 左右,并且具有很高冗余度,以确保测量数据的高可靠性。

2. 有效载荷——CCD相机

对地球环境一天两次的重复观测是很必要的,如森林火灾、农作物病虫害、干旱、洪水、各种污染(海洋、湖泊、放射性)等。上述这些环境变化,如果我们采用中分辨(几十米到上百米)可见光遥感器(CCD相机),一天观测地球环境两次,可以观察和监测地球上70%的资源、灾害和环境变化,具有很大的社会效益。如还有红外光谱遥感器,对火灾和夜间观测更有好处。但是由于红外相机要求致冷和较大的重量与功耗,以及红外相机的技术目前还存在一定难度,所以一颗几十公斤的小卫星中难以包含,因此,目前暂不考虑,等以后红外相机技术更加成熟后,再单独发射搭载它的小卫星。

可见光遥感器采用的CCD相机,其CCD器件目前有面阵和线阵两种。根据要求(见陈芳允等,小卫星地球环境观测系统与国际合作,IAF-92-0138,中译本“卫星应用简报”,1996年NO:22),分辨率为

50m,覆盖宽度400km。在轨道为772.6km高时,面阵和线阵两种CCD器件都可以满足,但是都需要拼接技术。面阵CCD价钱很贵,又不易拼接,而且航天应用的大面阵(例如像元 4096×4096)还不易采购和引进,目前国内亦没有单位能提供合格的面阵大视场CCD相机,所以可采用线阵CCD相机。

卫星有效载荷除了CCD相机外,还有数据存贮转发,这两种有效载荷对平台的要求基本上一致,重力梯度姿态完全可以满足它们对稳定的要求。

3. 运载火箭和费用与效益

发射上述小卫星星座,最好采用“一箭七星”,即利用1枚运载火箭1次把7颗小卫星发射入轨,因为这7颗小卫星都均匀分布在一个轨道平面内。

7颗小卫星星座的地球环境观测系统(含运载火箭)经费,经调查大约为1.5~2亿人民币。

我国每年由地球环境造成的自然灾害损失,据有关部门最近统计,约1000~2000亿人民币。通过这个星座观测、预报,若能减少10~20%的损失,则仅从经济效益来说即可获利100~400亿人民币。由此可见经济效益与经费投入之比为50~200倍,除此以外还有其它社会效益,例如环境和生态保护等,可见这是一个一本万利的投资方案。

(责任编辑 王宏章)