

当今小卫星技术水平和我国小卫星应用的对策

Contemporary Smallsat Technology and Developmental Strategies of China's Smallsat

林来兴

(北京控制工程研究所, 研究员 北京 100086)

80年代末期,国际上兴起小卫星热,而且在持续不断地发展。小卫星是以一种全新的概念出现的,采用了崭新的设计思想和大量的高新技术,急剧提高了自身的功能密集度。人们既能以单颗小卫星廉价快速地完成各项航天任务,又能以多颗小卫星组成星座,完成大卫星难以胜任的空间任务,例如全球卫星个人通信(全球信息化),以及实现时间和空间高分辨的全球环境监测。

当今国际上小卫星发展速度之快和技术水平之高超出一般人的估计。小卫星所具有的成本低、性能高、周期短、重量轻、体积小、安全可靠、快速灵活、可用多种方式发射等一系列优点,在近年来的实践中已逐步被人们所证实。可以预测:小卫星的出现和发展可与计算机工业中由大型机进入个人计算机,电子工业中由真空管进入固态器件相提并论。小卫星将引起航天技术和空间应用的一场重大革命。许多国家已经注意到小卫星具有重要的战略意义、巨大的潜在市场及广泛的应用前景,纷纷把小卫星列为跨世纪航天发展计划的重要内容。

我国是发展中国家,财力有限。按照“有限目标,突出重点,讲求实效,有所为,有所不为”的原则,小卫星应是我国航天技术的一个重要发展方向,特别是高新技术含量很高的现代小卫星(高功能密集度的小卫星)更应作为航天技术“发展研究”的重要选择。

一、当今小卫星技术发展水平

现代小卫星应用已经向全方位发展,而且不断开拓新的应用领域。主要应用方面(通信和遥感)的技术水平如下:

1. 通信方面

卫星通信将进入个人通信时代。这个时代的最大特点就是通信终端手持化、个人通信全球化。发展小卫星和组成小卫星星座正是要满足这个时代迫切的需要。具体来说,小卫星星座通信可以达到

下列5个任何(5W),即任何人(Whoever)可在任何地点(Wherever)和任何时间(Whenever)与任何人(Whomever)采用任何方式(Whatever)进行通信。

目前在全球移动通信方面,已采用的小卫星星座方案达10多种,最现实的有:48颗“全球星”,1997年开始发射,1999年全部建成投入使用;66颗铱星,1997年开始发射,1998年部分通话,2000年全部建成投入使用;36颗小卫星组成的Orbcomm数传小卫星星座,1995年发射2颗,1997年拟完成全部发射任务,并组网正式投入工作。这些小卫星采用先进生产装配工艺后每颗铱星生产周期为5天;“全球星”和Orbcomm小卫星为7天。目前小卫星每颗生产周期一般为36个月,最快也要18个月。

通过“全球星”和铱星系统的工程实现,低轨道小卫星星座技术将得到迅速发展。在此基础上840颗(可能改为288颗)的Teledesic系统将在1998年开始发射,2001年建成组网。该星座将实现全球宽带(20/30/60G)、无缝、高数传(2Mb/s)、小延迟(80ms)、大容量(154Gb/s)、低成本(0.06美元/bit/s)的通信,并将与信息高速公路联网,从而组成卫星—光缆混合的全球信息高速公路。

在地球同步轨道采用5颗小卫星,可代替一颗大型通信卫星。相同的通信容量和功能,小卫星成本低、可靠性高、风险小。当小卫星倾角 $i=0.07^\circ$ 、椭圆率 $e=6\times 10^{-4}$ 时,则5颗小卫星将自动围绕定点中心转动,永不相碰。这个特点还可使它除了通信,还兼有区域性导航作用。地球同步轨道通信是小卫星在应用方面又一个新开发的用途,有利于解决地球同步轨道位置拥挤和资源缺乏的问题。除此以外,在美国“军事星”计划的替代方案中,计划发射重120kg的Ka波段通信小卫星,代替目前地球同步轨道重达4540kg的大型军用通信卫星。

2. 遥感方面

以往卫星遥感对地球环境进行观察和监测取得了很大成绩,但是尚都停留在或者空间分辨率

高、时间分辨率低的水平,例如军用侦察卫星;或者时间分辨率高、空间分辨率低的水平,例如静止轨道气象卫星。对军用或民用来说,都满足不了当前对地球环境监测的需求。

目前,地球环境观测急需时间分辨率和空间分辨率均很高的遥感。根据实际需要,对时空分辨率要求最高的是战争,其次是自然灾害,其中从高到低顺序为地震、森林火灾、油污染和洪水等。完成以上监测任务最适宜采用小卫星组成的星座。应用高新技术可获得高空间分辨率,采用卫星星座可实现高时间分辨率。由7颗小卫星星座组成的地中海区域观测系统就是一个很好的实例。该系统有4颗雷达和3颗光学(可见光和红外)遥感小卫星,卫星重500kg,位于高度为500km的太阳同步轨道上,组网后可实现全天时观测。其空间分辨率为米级,时间分辨率在不同地区可以从3小时到13小时,观测数据可随时传送到用户。该系统计划1999年首次发射,2000年完成星座组网。

战术侦察小卫星已经取得很大进展,空间分辨率可以达到优于米级,覆盖宽度几十公里。可以通过小卫星或者遥感器前后、左右转动扫描,把覆盖宽度加大到几百公里。这种小卫星重量均在200~300kg,低轨道工作寿命约5年。例如以色列1995年4月4日,用自己的运载火箭成功发射了自己研制的高分辨率遥感小卫星(地平线-3号),卫星重225kg,星上有一台高分辨率数字成像CCD相机。CCD相机重36kg,在焦面上装有6000像元的CCD线阵,三轴姿态稳定,指向精度 0.1° ,相机抖动量小于 0.04 角秒。CCD相机对地面进行推扫,面积为 $11\text{km}\times 11\text{km}$,地面分辨率为 1.8m 。相机可左右两侧摆动 $\pm 30^\circ$,采用X波段可实时向地面传输图像数据。卫星设计寿命4年。在地平线-3基础上改进的计划近期发射的地平线-4号(EROS-B)分辨率可达 1m ,太阳同步轨道高度为 600km ,卫星寿命为5年,地面扫描宽度为 15km ,也可能达 40km 。

美国最近准备发射的地球观测公司研制的“晨鸟”和“快鸟”两颗光学遥感小卫星,可以相互配合工作,提供多种分辨率(1m 、 3m 为全色, 4m 、 15m 为多谱)和多种谱段的遥感数据。“晨鸟”卫星重约 310kg ，“快鸟”卫星重约 450kg 。最短重访时间为 $1.5\sim 2.5$ 天。该公司还计划建立完整的地面数据处理、归档和发送系统,保证卫星获得的数据在48小时内送到用户手中,其中最快的仅需要15分钟。

目前世界上遥感小卫星性能已可与大型遥感卫星相比,如美国拟于近年内发射的“观测镜”小卫星,重量为 771kg ,地面分辨率达到 1m ,工作寿命为5年。

二、区域和地带小卫星移动通信系统

1. 小卫星通信系统

我们建议研制和发射一个以我国为核心的区域性和环球地带(经度不限)的移动通信系统。这个通信系统由小卫星星座组成,它的主要参数和性能如下:

(1)卫星轨道高度为 $10\ 880\text{km}$,圆轨道,轨道倾角为零,轨道周期约为6小时。

(2)当轨道高度 $H=10\ 880\text{km}$,选最低仰角 $\alpha=10^\circ$ 时,根据计算,卫星覆盖区的地心半张角 $\gamma=58.6^\circ$ 。

(3)星座由5颗小卫星组成,均匀分布在赤道平面,每颗相隔为 72° 。保证全天时通信,南北纬度宽度 $\pm 50^\circ$ 。若把卫星天线向北偏置 10.5° ,此时卫星天线不再指向赤道,而是指向北纬 18° ,从而提高星上天线增益。

(4)用途:实现南北纬 50° 地带全天时通话,提供手持机的移动和个人通信。

(5)每颗小卫星重量 $600\sim 700\text{kg}$,功率 $900\sim 1100\text{W}$ 。第一期可先发射2颗,达到中国地区白天通话的目的。以最经济的投资和技术最有把握地满足我国移动通信的需求,同时满足广大农村通话的需要。

(6)全部费用预计 $2\sim 3$ 亿美元,第一批先发射 $2\sim 3$ 颗,估计费用 1.5 亿美元。

2. 系统特点

这个小卫星星座与其他类似星座相比具有下列优点:

(1)在相同条件(覆盖区和轨道高度)下卫星个数最少,仅为其它类似中轨道星座卫星数的 $1/2$ 。

(2)投资和经费最少。

(3)星座仅为一个轨道平面,为此要求备份星也仅需要一颗。一般来说,一个轨道面需要备份星一颗,不同轨道面的备份星不能公用,因为倾角改变,燃料消耗很大。

(4)由于以中国地区为核心,卫星天线向北固定偏移一个角度考虑(10.5°),卫星天线增益可以提高 $5\sim 6$ 分贝(见图1)。多波束天线设计应考虑覆盖地区集中在北纬 58° 至南纬 15° 之间,而不是均匀分布。我国国土最高纬度为北纬 $53^\circ 34'$,最南海域岛屿为北纬 $3^\circ 51'$,即南沙群岛。本通信系统保证全天时通信直到北纬 50° ,即中国最北方黑龙江省黑河和内蒙古满州里一带。

这个小卫星星座覆盖地带,是世界通信用户最集中的地方,开发这个地带的移动通信,不仅可以完全满足我国全国移动通信的需要,而且对亚太地区,乃至欧洲和美洲都有很大的通信使用价值,因此可以进行国际合作,推向国际市场。

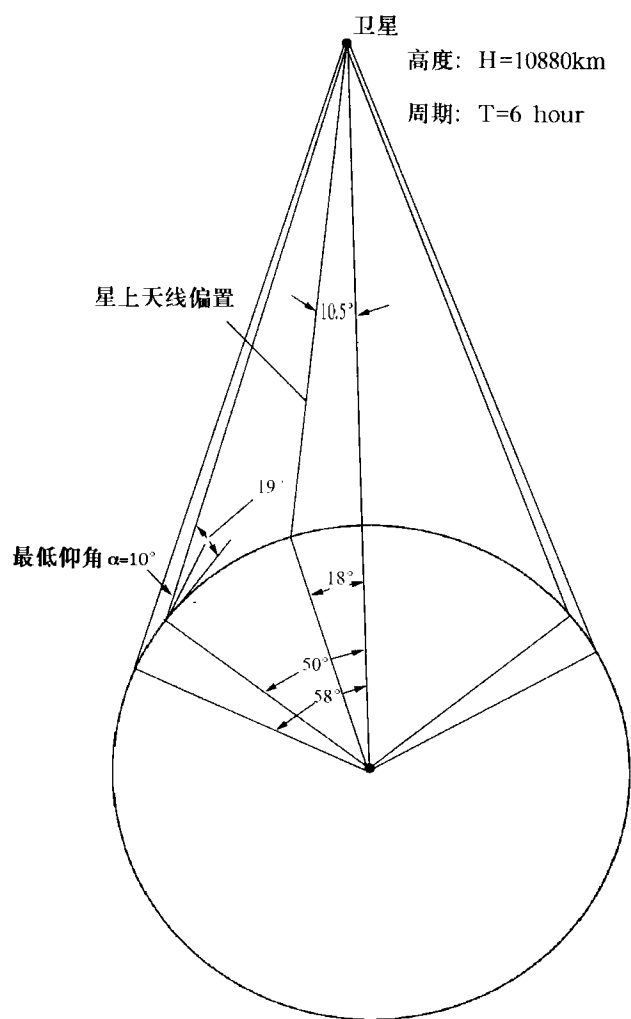


图1 覆盖地心角和最低仰角与轨道高度关系以及天线偏置

三、由重力梯度小卫星星座组成地球环境观测系统

为满足对世界任一区域一天两次的重复观测的要求,可以采用数颗小卫星分布在同一轨道上组成地球环境观测系统。设 P_c 为轨道交点周期,由于地球自转,两条相邻星下点轨迹与某一纬度的两个交叉点之间的距离为 $P_c \cdot 0.25L$ (km),其中 0.25 是地球每分钟自转的经度, L 为在该纬度上转过 1° 经度的距离(以千米计)。如果在一个轨道周期内等时间发射 N 颗卫星,且地面幅宽为:

$$B \geq \frac{P_c \cdot 0.25 \cdot L}{N} \text{ (km)}$$

那么,这些小卫星可以无间隙地依次观测两条轨迹之间的整个区域。依此类推,则可覆盖全球。如果卫星从我国东部向南发射,南行轨迹(下降弧段)主要覆盖东半球;北行轨迹(上升弧段)主要覆盖西半球。7~8 圈后,情况正相反,上升弧段覆盖东半球,下降弧段覆盖西半球。如果发射时(下降弧段)是白天,上升弧段就是夜晚,因而可以一天两次覆盖亚

洲大陆和美洲大陆。

该系统由 7 颗分布在同一轨道平面上的小卫星组成,轨道与太阳同步,参数如下:长半轴 $a = 1.121135R_e = 7150.6\text{km}$;高度 $h = 772.6\text{km}$;倾度 $i = 98^\circ$;近地点角距 $\omega = 90^\circ$;偏心率 $e = 0.001035$;平均周期 $P = 100.78\text{min}$;交点周期 $P_c = 100.225\text{min}$ 。

两条相继星下点轨迹间的经度距离是 25.06° ,在赤道上的距离是 2789km ,在 20° 纬度处距离是 2621km 。如果 7 颗卫星等间距分布在同一轨道上,地面幅宽为 $\pm 200\text{km}$ ($B = 400\text{km}$),这样即使在赤道上两条星下点轨迹间的地区也能完全被覆盖;在更高的纬度,相邻观测带之间有部分重叠,因而可以容忍一些姿态摆动,而又不遗漏观测区。通过适当安排,开始时可发射少量卫星,以较长重访周期观测,待 7 颗卫星都进入轨道后再实现一天两次观测。

1. 重力梯度三轴稳定小卫星平台

重力梯度卫星最大特点是结构简单、成本低、可靠性高、消耗能量小,能安全长寿命地工作。重力梯度小卫星平台主要组成部分是与重力梯度技术有关的,例如重力杆与伸杆机构、天平动阻尼、磁捕获与磁控、磁姿态测量等。其余的电源、结构、遥测遥控、热控等与普通卫星技术基本类似。

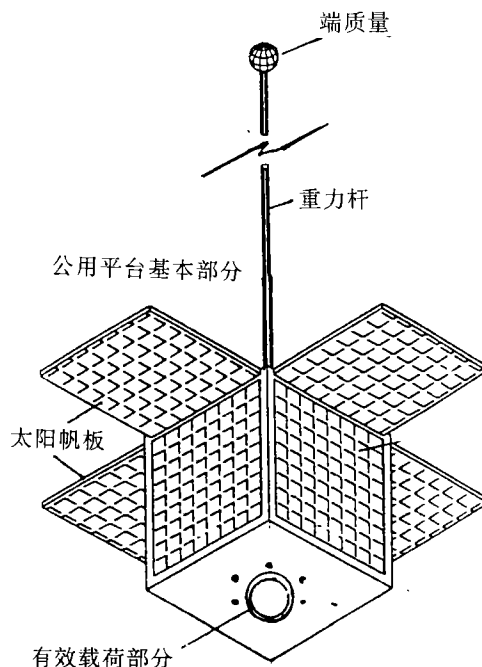


图2 重力梯度稳定平台构型

图2表示重力梯度小卫星外形结构。根据方案初步分析估算,重力杆长度 7~8m,端质量 3kg。卫星重量 60~70kg,平均功率 27~30W。卫星结构伸杆后成为哑铃形,可实现对地俯仰和滚动指向稳

(下转第 13 页)

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)