

卫星航法

(日本)木村小一著

杨守仁 阎中立 李万权 译

人民交通出版社

0666.134

M94

130195

卫 星 航 法

(日本)木村小一著

杨守仁 闵中立 李万权 译

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书以“海军导航卫星系统(NNSS)”为主,对有关人造地球卫星的基础知识、卫星导航系统的组成、定位原理和计算、定位精度和误差分析、系统的改进和卫星导航的发展方向,均有比较深入浅出的阐述。此外,书中对海事卫星的实验和发展情况,也作了介绍。

本书可供航海院校师生以及船员参考之用。

本书第一、二、三章由杨守仁译,第四、五、六、七、八章由闵中立译,第九、十、十一章由李万权译。全书译完后由李春宝校阅。

DVII / 17

卫 星 航 法

本书根据日本海文堂 昭和52年1月初版

《卫星航法》译出

(日本)木村小一著

杨守仁 闵中立 李万权 译

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.875 字数: 175千

1980年10月 第1版

1980年10月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2,600册 定价: 0.82元

序 言

人造卫星的出现至今已快20年了，象在本书中提到的那样，利用人造卫星的导航系统也经历了同样的岁月。著者对这一课题开始感兴趣是在1963年。虽然 NNSS 系统在1970年才首获实验成功，但从日新月异发展着的科学领域来看，好像是已经过了很久似的。当初可能因为这种系统的船上装置价格贵一些，NNSS 普及进展缓慢。但是到了最近，连捕金枪鱼的小型渔船也在使用这种装置了。据说，甚至连有的厂家也在惊呼此种接收装置的供不应求。在这种情况下，对能予出版或许是世界上最早的专门阐述这一领域的本书感到喜悦。

著者曾亲自写过电子航法研究报告、运输省船舶局发行的船员通信教科书和 NNSS 的综合研究报告以及说明书，并有机会于1974~75两年间在海文堂刊行的《海技と受験》杂志上简明易懂地以讲座的形式连载了导航卫星和海事卫星方面的文章。本书就是将当时的内容重新加以编排修订而整理出来的。

由于内容性质的关系，书中不得不使用一些数学公式，但是已经作了视情况可以跳过去读的安排。请读者根据自己的知识面来研读和应用。

在整理本书时，援用了电子航法研究所卫星导航组各位组员的研究成果。特别是在第四章例题的计算上得到奈须英臣君的帮助，并承提供许多研究资料。特志于此，以表谢意。

著 者

1976年12月

目 录

序 言

第一章 航海与人造卫星	1
1.1 宇宙故事中的导航卫星	1
1.2 人造卫星的运动与开普勒定律	2
1.3 人造卫星的种类	4
1.4 导航卫星	8
第二章 人造卫星的轨道与地球的形状	10
2.1 轨道六要素 (之一)	10
2.2 轨道六要素 (之二)	14
2.3 轨道的摄动	17
2.4 地球的形状和大小与各种测地系	20
2.5 地球重力场的不均匀引起的卫星运动	26
2.6 能看见卫星的地上范围	26
第三章 NNSS 的定位原理及系统的组成	28
3.1 NNSS 的研制经过 (之一)	28
3.2 NNSS 的研制经过 (之二)	34
3.3 多普勒效应	35
3.4 利用人造卫星电波的多普勒效应 求船位的可能性	37
3.5 NNSS 定位原理	40
3.6 NNSS 系统的构成	44
3.7 卫星	46
3.8 接收装置的概况和接收电路	50

3.9	使用两个频率修正电离层折射误差.....	53
3.10	轨道信息的译码电路.....	54
3.11	电子计算机.....	57
3.12	卫星的现状与接收、定位的次数.....	58
第四章	NNSS 的卫星轨道情报与定位计算方法	65
4.1	定位计算方法概要	65
4.2	来自卫星数据的详细内容	69
4.3	卫星数据的处理	71
4.4	定位计算所需数据的综合	74
4.5	时间的修正	78
4.6	卫星位置的计算	78
4.7	接收点(船舶)推算位置的计算	82
4.8	推算位置和实测位置与卫星之间的 距离变化(差)之差	84
4.9	联立方程式的建立.....	86
4.10	用最小二乘法解联立方程式.....	88
4.11	双频接收.....	92
4.12	短多普勒.....	93
4.13	卫星观测仰角的计算.....	95
4.14	卫星信号接收时间的预报.....	97
4.15	联机计算的考虑事项.....	99
4.16	大地水准面高度的修正.....	100
第五章	NNSS 接收装置的实况及其操作	101
5.1	NNSS 接收装置的种类	101
5.2	TA-3455 型接收装置	106
5.3	TOSNAV703 装置及其操作	108
5.4	其它400MHz 频带单波道接收装置	113
5.5	北辰-MAGNAVOX HX702A/HP 双波道	

接收装置	115
5.6 其它接收装置	116
5.7 NNSS 与其它导航装置的结合	117
第六章 NNSS 的实际定位精度	119
6.1 固定地点的定位精度	119
6.2 短多普勒方式的效果及其它	122
6.3 航行中的船舶定位精度	125
第七章 NNSS 定位误差的分析	130
7.1 影响定位精度的因素	130
7.2 与卫星及接收设备有关的误差	130
7.3 电波传播产生的误差	132
7.4 卫星轨道预报值的误差	139
7.5 输入船舶航向和航速误差的影响	140
7.6 包括大地水准面高度在内的天线高度误差的影响	145
7.7 总定位误差的分配	146
第八章 NNSS 的未来及下一代的卫导系统	147
8.1 NNSS 的优缺点	147
8.2 NNSS 的改进方向	147
8.3 下一代导航卫星系统——NAVSTAR/GPS	151
8.4 苏联的导航卫星系统	159
8.5 其它导航卫星系统	162
第九章 海事卫星的出现及其实验	163
9.1 海事卫星	163
9.2 各种系统方案提议时期	164
9.3 以政府间海事协商组织 (IMCO) 为中心的 国际动态	170
9.4 应用技术卫星 (ATS)	173

9.5	以美国宇宙航空局 (NASA) 为中心的 初期实验	177
9.6	MARSCAN 计划	182
9.7	ATS-6 卫星的实验情况	185
9.8	日本关于海事卫星的研究状况	187
第十章	海事卫星系统及其主要问题	191
10.1	利用海事卫星进行的船舶通信	191
10.2	使用卫星的遇难通信系统	193
10.3	船位的测定及其应用	196
10.4	海事卫星系统的参数	200
10.5	船舶站的天线	203
10.6	海事卫星与日本的情况	206
第十一章	海事卫星的系统研究和海事卫星计划	210
11.1	AMI的系统研究	210
11.2	国际商业通信卫星组织对于海事卫星的 研究	214
11.3	海事卫星专家小组委员会报告书	219
11.4	国际海事卫星组织 (MARISAT) 系统	232
11.5	MAROTS 系统	238
附录:	关于测地系变换图	243

第一章 航海与人造卫星

1.1 宇宙故事中的导航卫星

通过美国的阿波罗计划，把数名宇宙飞行员送上月球各地并取回月球岩石的事实证明，人类要飞往广阔宇宙的幻想，已经实现。从远古时代就有了这类幻想的神话，在日本从竹取寓言中女主人公的传说，以及希腊神话中用蝉翼升天的宇宙飞行者伊洛卡斯等均可找到这类例子。在其后的月球旅行小说中的开普勒小说，或者西朗诺·德·贝尔热拉的小说，以及有名的贝尔纳小说“月世界旅行”。或者H·G·威尔斯的“宇宙战争”也都有这样的内容。

大体在同一时代，1873年美国一个叫 Edward Everett Hale 的人发表了一本叫做“砖月”（The Brick Moon）的小说。可以说，这是今天的导航卫星的最初构想。笔者没能直接阅读过这部小说，但据说其构想大致是如下的内容。即将直径2000英尺（约600米）的砖制人造卫星，用弹力车弹到地球上空4000海里的圆形极轨道上，总共是4颗卫星，其中两颗在英国的格林威治上空通过，其余两颗在新奥尔良上空通过（这表示经度 0° 和 180° ，西经 90° 和东经 90° ）。因而使用六分仪对该砖月达到最高仰角时的角度进行测定，据此可以容易地求出经度（纬度测定可使用北极星）。根据今天的知识，使轨道高度为4000海里的卫星在地球同一地点上空旋转，很明显是不可能的，但如代之以今天的静止卫星，并且卫星直径从地球看上去是足够大的，那么他的设想就有可

能全部实现。

顺便说一下，对于今天电视中继等使用的通信卫星，其最初设想是在1945年由英国科学记者A·C·克拉克在某一无线电杂志上发表的。导航卫星约比这一设想早70年。

1.2 人造卫星的运动与开普勒定律

把球类和石子向上投去，便会描绘出一条叫做抛物线的曲线而返回地面。这无疑是由于地球引力的吸引所致。然而，假定有一个大力士能够把石头投出于地球引力场之外（引力场大约与距离的平方成反比），那个石头就将在宇宙中徘徊。火箭就起到了这种投出的作用。

另外，把石头系在绳的一端上，使之旋转，则石头将以手为中心，呈圆形转动。做这样的圆周运动的物体有一个向外飞去的力，即所谓离心力。上面有细绳连系时，在细绳上的张力和离心力是平衡的，于是形成圆周运动。人造卫星的运动与此相似，用火箭发射卫星使之在达到某一速度（每秒7公里以上）之前作加速运动，到达地球大气层之外几乎没有空气的地方，在卫星向外飞出的离心力与地球引力相平衡处，卫星除因残留的稀薄空气而有极小的减速外，几乎保持原来的速度，因而将会在一个相当长的时期内绕地球旋转。

这样，根据对太阳系各行星运动的观测，地球和人造卫星两星体的运动，服从于由开普勒导出的所谓开普勒定律。这一定律后来由牛顿在理论上加以确定。

开普勒定律由下述三点组成。

第一定律：人造卫星在以地球为中心或焦点的二次曲线——圆、椭圆、抛物线、双曲线——上运动〔这里系阐述地球与人造卫星的关系。而该定律对太阳与行星，地球与月

球（月球是地球的卫星），以及其他天体也都是适用的〕。

第二定律：以地球中心做为焦点的卫星运动，在一定的时间内，卫星动径所扫过的面积相等。

第三定律：椭圆轨道长半轴的立方与卫星绕轨道一周的时间（即周期）的平方成一定的比例关系。

首先，轨道的形状是由卫星发射时的初速度所决定的。绕地球旋转的卫星的初速度在不能使卫星脱出地球重力圈的情况下，通常如图 1-1 所示，卫星沿椭圆轨道运行，椭圆的特殊情况（长半轴与短半轴相等）就是圆的轨道，而理想的圆轨道几乎是没有的。初速为每秒 11.04 公里以上时，卫星已经不能回到地球，而成为人造行星。火星火箭和金星火箭就是那种行星。这种情况将运行在抛物线的轨道上，而速度更大时，即成为双曲线轨道。

回到椭圆轨道的情况，这时重力是集中在地球的中心，地球中心即成为椭圆的一个焦点。而轨道长轴上的点 P 是卫星最接近地球的点，叫做近地点（perigee），长轴和轨道的另一个交点，即距离地球最远的点，该点叫做远地点（apogee）。

开普勒第二定律，也叫做面积速度定律。是指单位时间内卫星在轨道上前进的长度连结地球中心的面积，即图上画斜线部分的面积是一定的，这表示轨道上的卫星速度不是固定的，意味着在近地点最快，在远地点最慢。根据第三定律，卫星绕轨道一周的周期 T 与轨道椭圆的长半径 A 之间存在着 $A^3/T^2 = \text{定值}$ 的关系。

椭圆轨道的卫星速度 v 有如下的关系：

$$v^2 = GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{A} \right) \quad (1.1)$$

式中： G 为万有引力的常数， $G = 6.607 \times 10^{-8} \text{cm/g} \cdot \text{sec}^2$ ，

M 为地球的质量, $M = 5.975 \times 10^{27} \text{g}$, r 为轨道上的点距地球中心的距离。如果轨道是圆的, r 与 A 相等, (1.1) 式则成为

$$v^2 = \frac{GM}{r} \quad (1.2)$$

这就是离心力和重力相等的关系, 即 $\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$, 式中 m 为卫星质量, 由此不难导出 (1.2) 式。

此外由 (1.2) 式知, 上述卫星绕地球一周的时间, 即周期 T , 乃是绕该圆周 $2\pi r$ 一周的时间, 所以 $T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{GM}}$
 $= \frac{2\pi r^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{GM}}$, 从此可以得出上述 $\frac{A^3}{T^2}$ 等于定值的关系。这样,

由于 T 是 $r^{\frac{3}{2}}$ 的函数, 所以在赤道上发射与地球自转同方向旋转的圆轨道卫星, 若其高度适当, 则卫星与地球自转速度相同, 即成为周期为 24 小时的卫星, 看上去静止在赤道上空的一点。这就是静止卫星, 这时卫星的高度约为 35,800 公里。

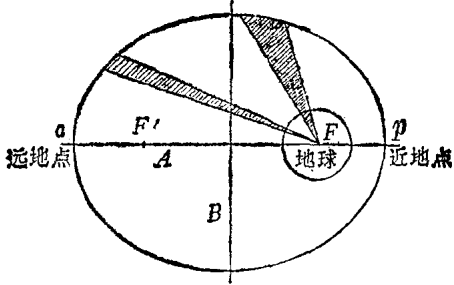


图1-1 椭圆轨道与面积速度定律

1.3 人造卫星的种类

自从 1957 年发射第一颗人造卫星, 至今 10 余年内已经

发射了1000颗以上的人造卫星，它们都属于哪些种类呢？其分类的方法有各种各样。这里将简要地就卫星的种类加以考察。

第一种分法是载人卫星和无人卫星。载人卫星亦即有人乘坐的卫星。只有美国和苏联两个国家发射过这种卫星。美国连续数次进行了马久里、捷米尼计划的载人卫星实验，直至依据阿波罗计划完成登月活动，最近又通过宇宙实验室进行了长时间的宇宙活动。苏联最先成功地发射了载人卫星东方号（ВОСТОК），此后，又发射了上升号（ВОСХОД）、联盟号等载人卫星。美国和苏联的两颗卫星也实现了宇宙靠接。

无人卫星中，有如前述的超出地球引力范围以外的金星火箭和火星火箭等，应该叫做人造行星。苏联和美国的某些人造行星进行了各个有关星体的观测，或者进而在相应星体上软着陆成功，或者成为那个天体的卫星。利用无人卫星进行着陆，也有做为月球卫星而绕月球周围旋转进行连续观测的人造卫星。此外还有对宇宙空间各种现象进行观测的大量观测卫星，包括到现在为止的主要载人卫星，其主要目的是对宇宙空间的各种现象进行观测。有时日本也将观测卫星称为科学卫星。

人造卫星的第二个应用领域是军用。多数军用卫星具有秘密色彩，其中，做为本书主题的导航卫星 NNSS 等是军事卫星，同时也作为民用，因此其区别并不明显。

最后一种范围，称为实用卫星，是与我们生活有密切关系的人造卫星。国际电话和电视中继通信卫星就是其中有代表性的。在美国通信卫星如“tellstar”（“电星”卫星）、“relay”（“中继”卫星）、“echo”（“回声”卫星）（echo 1号直径为30米，2号为41米的气球卫星，利用该卫星的表面反射电波）等各卫星，是1960~1964年间进行试验

的。因为这些均属移动卫星，所以，日美间的通信中继，就存在着只有两者都能看到同一卫星的极短时间，比如十几分钟内才能使用的问题。前已述及，克拉克通信卫星的建议包括使用静止卫星问题，这种静止卫星通过使用“同步”卫星进行1964年秋东京奥运会的电视转播而宣告成功，其2号于1963年7月、3号于1964年8月发射，慕尼黑奥运会转播是利用3号进行的。

在此以后，通过国际性的组织，国际商业通信卫星组织（INTELSAT）陆续发展了大型高性能的通信卫星，利用卫星的通信中继完全是商业性质的，日本同国外之间的电话，通过卫星和海底电缆几乎没有区别。此外，最近除国际商业通信卫星（INTELSAT）外，为了将通信卫星供国内或地区间使用的目的，加拿大已经发射了安尼克（Anik）国内通信卫星，其他还有美国的各种国内通信卫星，欧洲各国共同研制的交响乐卫星计划，轨道试验卫星（OTS）计划等，日本也在研制实验用国内通信卫星并准备在1977年发射。苏联在这方面的动态不同，陆续发射使用长椭圆轨道“闪电”通信卫星。苏联做为北方国家，由于赤道静止卫星使用价值较小，因而根据面积速度一定的法则，利用椭圆轨道远地点附近卫星速度慢的特点，使卫星轨道的远地点处于苏联国土上，从而使一颗卫星能够长时间使用。

以船舶和陆地之间通信中继为目的的卫星，是一种通信卫星，同时也是具有导航作用的一种导航卫星。这样的卫星，称为海事卫星，本书也将有所介绍。这种卫星出现以后有可能在数年或十数年内实现船上与陆地上任何地方之间的直接使用拨号电话。

将电视电波从卫星直接传播到家庭的广播卫星也在各国进行研制，日本对于这种实验卫星同样列入1978年的发射计

划。如果这种卫星达到实用化，即使远离陆地的船上也可以指望及时看到新的电视节目了。

通过气象卫星从高空拍摄云层照片并进行电传以用于天气预报，这是大家所熟悉的，在船上直接接受这种云层照片的装置，也可以在最近得到。为此目的卫星，有泰洛斯、埃萨等气象卫星。在今后，爱特斯卫星将是一个主要的气象卫星。这些都是美国卫星。苏联也发射数颗气象卫星，苏联船只利用这些卫星的报告也已见到。此外也在推进一个计划，这个计划以世界气象组织（WMO）等为中心，国际共同协作发射五颗静止气象卫星，用来对地球上的云层动态进行统一的观测。关于该卫星的发射，美国负责2颗，欧洲、苏联和日本各分担一颗。除云层照片外，气象卫星可观测红外线领域的辐射分布，这些观测结果的分析广泛用于气象、海象资料的收集方面。

能够细致确定地球形状，精确测定各大陆和岛屿位置的是测地卫星。虽说迄今为时的多数测地卫星属于军用，但也有日本参与进行共同观测的实例。根据前述的“回声”气球卫星进行的光学观测，海上保安厅水路部对日本本土和鸟岛的关系进行了测定，结果弄清了该岛位置必须比海图上的位置西移约1500米。这样，将来使用测地卫星进行世界海图的再审查，对航海安全是很必要的。这里述及的 NNSS 亦可用以测地。

此外日本也在发展电离层观测卫星，这一卫星可以观测电离层的状态，用于电波预报，使短波通信的频率选择更加可靠。这一卫星已经发射，但其后发生了故障，计划再行发射。这个领域的卫星先驱有加拿大的阿罗埃特、ISIS，日本也接收来自这个卫星的数据并进行分析。由气象卫星利用可见光（彩色）和红外线拍摄的高分辨率的地面照片资料，可

用来观测田野作物的种类和海水的污染情况，由资源探测卫星阿磁号所拍摄的照片，最近提供了多方面的资料。可见，在资源的发现与防止公害方面也开始利用卫星进行。此类卫星，有地球观测卫星、测地卫星 (landsat)、测海卫星 (seasat) 等名称。如上所述即使是导航卫星以外的各种卫星，对船舶也不一定没有关系，具有极大利用价值的不在少数。虽然如此，本书将以导航卫星和海事卫星做为叙述的主题。

1.4 导 航 卫 星

所谓导航卫星，是 Navigation Satellite 的译词，以前，因为对航海很有用，所以也叫航海卫星，一般不叫航法卫星。做为这种卫星的最早建议，是本章开头所提及的小说，而1957年10月苏联发射的世界第一颗人造卫星斯普特尼克 (Sputnik) 1号，成为研制这种导航卫星的诱因。于是，由美国海军投资，约翰·霍普金斯大学研究所参与研制子午仪 (Transit) 导航卫星系统，其后就做为本书主题的海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System)，通称 NNSS 投入实际使用，并且今天已由军用达到了广泛的民用。

美国宇航局 (NASA)，从1963年起，对哪种民用导航卫星较好，包括 NNSS 的利用在内，进行了研究，此后，联合国常设委员会之一的宇宙空间和平利用委员会为了讨论有关民用导航卫星系统，于1976年召开了航行服务卫星工作委员会的会议。虽然这里使用了航行服务卫星 (Navigation Service Satellite) 一词而其后并不再使用，但该工作委员会认为船舶和飞机的导航和它们之间的通信中继，以及利用

于遥测等综合用途的卫星系统，是有必要的，而且是可能实现的。其结果出现了前节已经提到的海事卫星（及航空卫星）。关于这种海事卫星，做为导航卫星的一个领域，本书将叙述其有关现状等内容。

这样一来，导航卫星存在两个领域，它们有发展形态的系统和改良形态的系统，也有还处于方案建议阶段的各种各样的系统，关于此类广泛意义上的导航卫星，也将进行某些展望。

在第二章的开头，做为 1·2 节的继续，对有关人造卫星的基本情况需要首先加以说明。