

VSAT 卫星通信工程

VSAT WEIXING TONGXIN GONGCHENG

王秉钧 金万超 王少勇 编著

VSAT 卫星通信工程

94

中国铁道出版社

前 言

VSAT 是一种新兴的卫星通信新领域。由于它可以直接安装于用户处,并能提供高质量的数据、话音、图像和其他综合业务,较好地满足了现代通信发展的需要,使卫星通信直接面向用户、面向家庭、甚至面向个人,是对传统卫星通信方式的重大突破和发展,它已成为现代卫星通信的一个重要分支,是 20 世纪 90 年代和 21 世纪初卫星通信三大重要发展方向(VSAT、移动卫星通信、直播卫星)之一。

VSAT 组网和建站十分方便,可向用户提供高效能、低成本和业务量自适应的服务,独立性很强,用户享有对网络的控制权。因此,自 20 世纪 80 年代中期出现 VSAT 以来,利用 VSAT 组织专用通信网便引起金融、零售业、能源、铁路、公路、水文水利、气象、地震、新闻、航空、军事等各个部门的极大兴趣,将卫星通信的应用推向空前普及。

铁路是国民经济的大动脉,VSAT 网不仅适用于铁路枢纽之间的通信,特别适用于用户分散、业务量小、边远地区的铁路通信,尤其是 VSAT 具有很强的机动性,站的安装、撤收时间很短,适合铁路现场事故处理及抢险、救灾等临时应急场合使用,在铁路通信中将有广泛的应用前景。

本书总结了作者多年来从事卫星通信工程实践的经验,以实用性为主,兼顾系统性、先进性和科学性,着重从工程角度系统地介绍 VSAT 卫星通信网的原理、组成、组网技术、工程设计、安装、调试等实用知识。

本书共分七章:第一章介绍卫星通信的基本原理、组成、工作频段、通信卫星、通信卫星的轨道、卫星通信地球站、卫星通信的通信体制和链路计算等基本问题。第二章介绍 VSAT 数据通信网的组成、特点、业务类型、具体应用、网络结构和组网方式、多址协议以及 VSAT 计算机网络体系结构等内容。第三章介绍 VSAT 电话网组成、特点、话务量分析、语音编码、调制解调、纠错和扰码、话音激活、回波抵消、DAMA 应用等技术。第四章介绍目前国际上流行的几种典型 VSAT 网的具体知识。第五章介绍 VSAT 系统工程设计的具体程序和方法,包括用户需求分析、卫星通信线路标准、确定使用的卫星、通信体制的选择、地球站及参数、卫星线路计算、网络设计等一系列问题。第六章介绍 VSAT 天线场地选择、设备安装和调试等。第七章介绍卫星通信的技术水平、发展概况、发展趋势和未来展望。

本书由王秉钧主编并编写第一章 § 1.9、§ 1.10,第三、四章;金万超编写第一章 § 1.1~§ 1.8,第五、六、七章;王少勇编写第二章,韩敏也参加了本书的编写工作。全书由王秉钧统编、修改和定稿。此外,田宝玉、杨磊、杨晋生等同志也参加了部分工作。

本书在编写过程中得到蒋同泽、吴慕龙、刘耀东、武恺等专家、教授的热情支持和帮助。在此,一并深表感谢。

由于作者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

作者

1998 年

目 录

第一章 卫星通信概论	1
§ 1.1 卫星通信的基本概念	1
§ 1.2 卫星通信的发展与应用	1
§ 1.3 卫星通信的线路组成	3
§ 1.4 卫星通信的主要特点	5
§ 1.5 卫星通信使用的频段	7
§ 1.6 通信卫星	8
§ 1.7 通信卫星的轨道.....	12
§ 1.8 通信地球站.....	14
§ 1.9 卫星通信的通信体制.....	16
§ 1.10 卫星通信链路的基本计算	32
第二章 VSAT 数据通信网	40
§ 2.1 数据通信的基本概念及特点.....	40
§ 2.2 数据通信的业务类型及应用.....	41
§ 2.3 VSAT 数据通信网的组成及工作原理	43
§ 2.4 VSAT 数据网的网络结构及组网形式	47
§ 2.5 VSAT 数据网多址协议	49
§ 2.6 VSAT 计算机网络体系结构	63
第三章 VSAT 电话通信网	67
§ 3.1 VSAT 电话通信网的特点	67
§ 3.2 VSAT 话务量分析	67
§ 3.3 VSAT 电话网	78
§ 3.4 语音编码技术.....	81
§ 3.5 调制解调技术.....	90
§ 3.6 差错控制与扰码.....	91
§ 3.7 话音激活技术.....	92
§ 3.8 回波抵消技术.....	95
§ 3.9 VSAT 电话网的技术体制选择	96
§ 3.10 DAMA 应用	96
第四章 VSAT 网的典型实例介绍	100
§ 4.1 国际卫星组织 INTELNET 网	100
§ 4.2 休斯公司 PES 网	105

§ 4.3 休斯公司 TES 网	114
§ 4.4 NEC NEXTAR 网	116
§ 4.5 AT&T TRIDOM 公司 Clearlink 网	122
§ 4.6 LINKOM 公司 LCS-3000 网	126
§ 4.7 SPAR 公司 VSATPlus 网	127
§ 4.8 GTE 公司 SKYSTAR ADVANTAGE 网	130
第五章 VSAT 网的总体方案设计	134
§ 5.1 概 述	134
§ 5.2 用户需求分析	134
§ 5.3 卫星通信线路标准	136
§ 5.4 确定使用的卫星	139
§ 5.5 通信体制的选择	156
§ 5.6 地球站及参数	156
§ 5.7 卫星线路计算	161
§ 5.8 网络设计	169
第六章 VSAT 系统安装与调试	174
§ 6.1 天线场地的选择	174
§ 6.2 设备安装	175
§ 6.3 测试与开通	180
§ 6.4 附录:我国“331 工程”卫星转发器的在轨测试	192
第七章 卫星通信的应用与发展	198
§ 7.1 目前卫星通信的技术水平和应用概况	198
§ 7.2 卫星通信技术的发展趋势	199
§ 7.3 移动卫星通信的发展	201
§ 7.4 卫星广播电视的未来	203

第一章 卫星通信概论

§ 1.1 卫星通信的基本概念

自从 1957 年世界上第一颗人造地球卫星上天以来,空间技术飞速发展,数以千计的各种用途的宇宙飞行器遨游太空,通信的范围也随之扩展,出现了以宇宙飞行器为对象的无线电通信,即宇宙通信。

宇宙通信有三种基本形式:

- (1) 地球站与宇宙站之间的通信;
- (2) 宇宙站之间的通信;
- (3) 通过宇宙站的转发或反射进行地球站之间的通信。

卫星通信就是上述第三种形式,它是利用人造地球卫星作空间中继站,来转发无线电信号,在两个或多个地球站之间进行直接通信。这种通信方式实际是微波中继通信的发展,是微波中继通信技术和航天技术结合的产物。众所周知,微波中继通信有通信质量好,容量大等优点,但由于是“视距”通信,中继站之间的距离受地球曲率限制,一般只能在 50km 左右,要实现远距离通信,就要在整个线路上设很多中继站,使微波信号一站一站地传下去。这样不仅投资

大,而且受地形条件限制,站址选择、建设、运行管理、维护都十分困难,通信可靠性也受到影响,远隔重洋的洲际通信更不可能。卫星通信由于空间卫星中继站居高临下,大大延长了一次中继的通信距离,从而克服了微波中继通信的缺点,如图 1.1.1 所示。

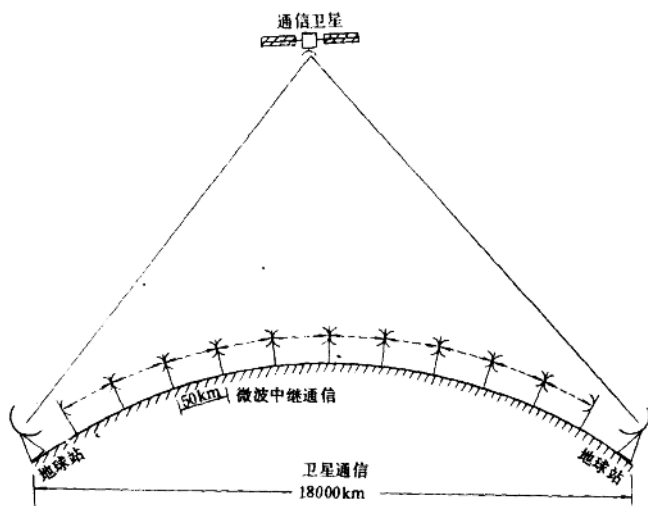


图 1.1.1 微波中继通信与卫星通信比较示意

§ 1.2 卫星通信的发展与应用

自从 20 世纪 40 年代中期提出利用人造地球卫星进行通信设想以来,历经 20 年探索、试验,终于在 20 世纪 60 年代中期投入实用,并在应用与发展上取得了举世瞩目的伟大成就。今

天,卫星通信已成为人们普遍使用的重要通信手段,并且以它信道稳定可靠、通信覆盖面积大、有多址通信能力、建设方便、组网灵活、见效快等优势,深受广大用户青睐。

回顾与展望:

(1) 20 世纪 40 年代提出构想及探索。

1945 年 10 月,英国科学家阿瑟·克拉克发表文章,提出利用同步卫星进行全球无线电通信的科学设想。最初利用月球反射进行探索试验,证明可以进行通信。但由于回波信号太弱、时延长、提供通信时间短、带宽窄、失真大等缺点,因此没有发展前途。

(2) 20 世纪 50 年代进入试验阶段。

1957 年 10 月,第一颗人造地球卫星上天后,卫星通信的试验很快就转入利用人造地球卫星试验阶段。主要试验项目是有源无源卫星试验和各种不同轨道卫星试验。

试验证明:

① 无源卫星不可取。主要缺点是要求地面大功率发射和高灵敏接收,通信质量差,不宜宽带通信,卫星反射体面积要大,且受流星撞击干扰,卫星只能是低轨道等。1964 年后,无源卫星试验宣告终止。

② 通过对各种轨道高度的有源通信卫星的试验,证明了高空轨道特别是同步定点轨道对于远距离、大容量、高质量的通信最有利。所以,试验及试用逐步集中到同步定点卫星方面。

(3) 20 世纪 60 年代中期,卫星通信进入实用。

1965 年成立了国际通信卫星组织 INTELSAT。相继发射了 IS—Ⅰ、IS—Ⅱ、IS—Ⅲ 通信卫星。一些国家建成了一批地球站,初步构成了国际卫星通信网络,开拓了国际卫星通信业务。限于当时技术条件,地球站设备十分庞大,采用 30m 口径的大型天线、几千瓦速调管发射机、致冷参量放大器接收机,建设一座地球站耗资巨大。

(4) 20 世纪 70 年代初期,卫星通信进入国内通信。

1972 年加拿大首次发射了国内通信卫星“ANIK”,率先开展了国内卫星通信业务,取得了明显的规模经济效益。地球站开始采用 21m、18m、10m 等较小口径天线,用几百瓦级行波管发射机、常温参量放大器接收机,使地球站向小型化迈进一大步,成本也大为下降。此间还出现了海事卫星通信系统,通过大型岸上地球站转接,为海运船只提供了通信服务。

(5) 20 世纪 80 年代,VSAT (Very Small Aperture Terminal) 卫星通信系统问世,卫星通信进入了一个突破性的发展阶段。

VSAT 是集通信、电子、计算机技术于一体的、固态化、智能化的小型无人值守地球站。一般 C 频段 VSAT 站的天线口径约 3m, Ku 频段为 1.8m、1.2m 或更小。可以把这种小站建在用户的楼顶上或就近地方直接为用户服务。VSAT 技术的发展,为大量专业卫星通信网的发展创造了条件,开创了卫星通信应用发展的新局面。

展望未来,卫星通信的发展方兴未艾,20 世纪 90 年代,VSAT 卫星通信更加普及;移动卫星通信的研制会有长足进展,可望 20 世纪 90 年代后期投入使用,人们将随身携带手持式卫星通信机,与全国乃至世界各地构成通信。

卫星通信的应用如图 1.2.1 所示。

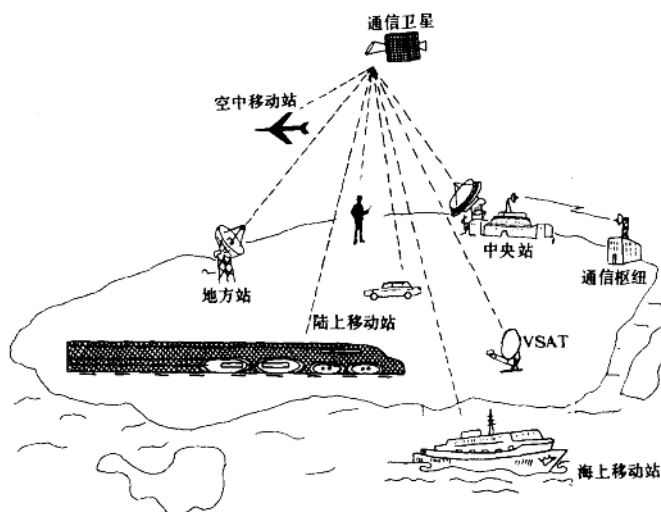
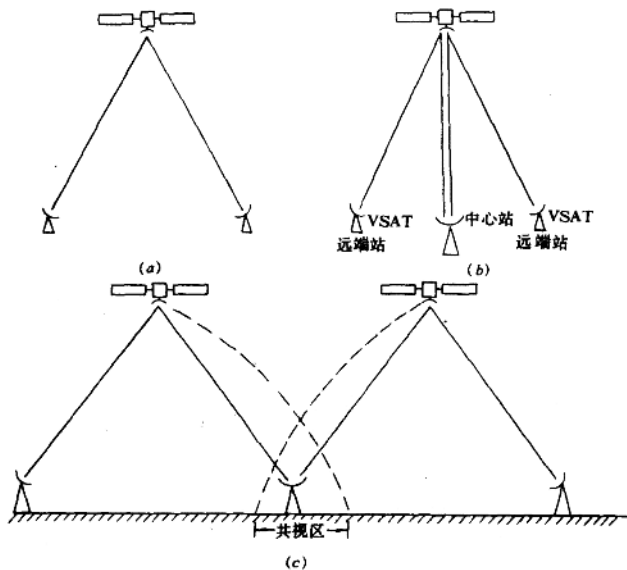


图 1.2.1 卫星通信的应用

§ 1.3 卫星通信的线路组成

卫星通信线路是由地球站—通信卫星—地球站组成。在一个静止通信卫星的覆盖区内,有多个地球站,其中任意两个地球站之间,通过卫星转发器,就构成一条卫星通信线路。一般静止卫星都采用单跳通信线路,如图 1.3.1(a)所示。在星状网 VSAT 系统中,VSAT 远端站之间通信采用双跳通信线路,如图 1.3.1(b)所示。超远距离的国际间通信,两端地球站分别在两颗卫星覆盖区内,则必须由两颗卫星覆盖的共视区地球站转接,构成双跳通信线路,如图 1.3.1(c)所示。

卫星通信线路的工作原理和信息传递过程如图 1.3.2 所示。A 站用户的信息信号(电话、数据或图像信号)由地面线路送到 A 地球站终端设备(模拟或数字终端设备),加工处理后输出是一个多路复用信号,即基带信号。基带信



(a) 单跳线路; (b) 星状网远端站之间双跳线路; (c) 超远距双跳线路。

图 1.3.1 卫星通信线路示意图

号频率一般在几千赫到几兆赫之间。然后将基带信号送往调制器,用调频(模拟信号)或相移键控(数字信号)将它调制在 70MHz 中频载波上。调制器输出的已调中频载波信号在发射机的上变频器中变成射频载波 f_1 (例如在 6GHz 左右),最后经过发射机的功率放大器放大到必须的电平,通过收发隔离的双工器由天线向卫星发射出去。

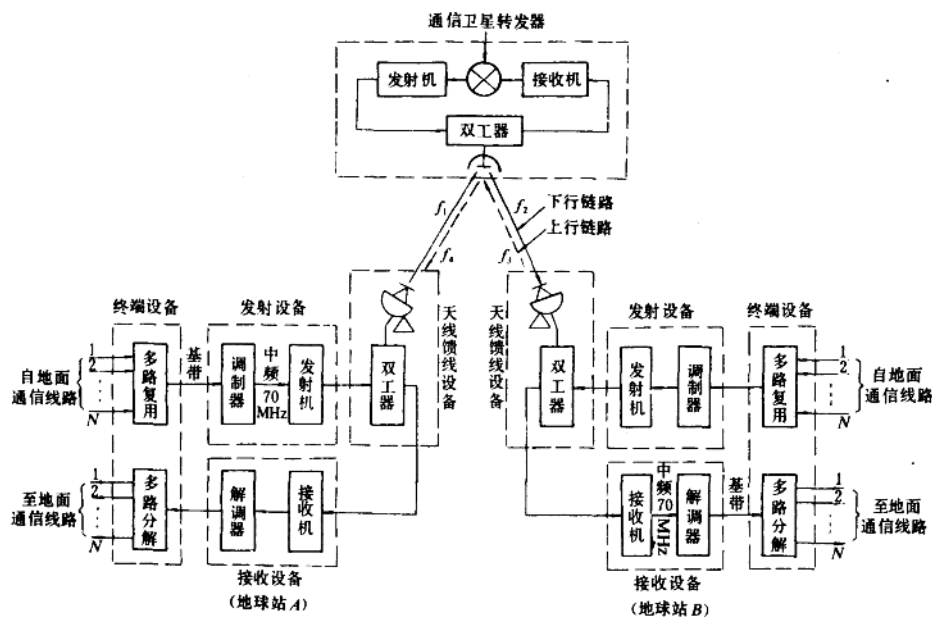


图 1.3.2 卫星通信线路组成方框图

从地球站 A 发出的射频信号,要经过大气层和自由空间的一段相当远的传输路径,然后到达卫星转发器。射频信号在这段行程中要受到很大衰减,并且要混进各种噪声。卫星转发器的接收机收到射频载波 f_1 信号,先将它变换成中频信号进行适当放大(也可以直接进行放大),然后再进行频率变换,变成射频载波 f_2 (例如在 4GHz 左右),经发射机进行功率放大,再经双工器送往天线转发到地面上来。为了使转发器在转发上行(f_1)、下行(f_2)载波时不造成相互干扰,上行和下行载波频率之间必须有足够的频差。

由卫星转发器转发下来的下行射频载波信号和上行一样要经过一段很长的传输路径才能到达地球站 B。在这段下行线路中,射频信号也要受到很大衰减,也要混进各种噪声。由于转发器的功率比较小,因此,地球站 B 接收到的信号非常微弱,一般只有几个皮瓦($1\text{pW} = 10^{-12}\text{W}$)。

地球站 B 收到转发器转发下来的微弱信号,先经低噪声放大器放大,再由下变频器变换成中频信号,进一步放大后,经解调器把基带信号解调出来,最后通过终端设备处理、分路、送往地面线路至 B 站用户。

反过来,B 站向 A 站发信过程同样经过上述过程,只是使用的载波频率不同。

§ 1.4 卫星通信的主要特点

1. 通信距离远,通信距离与建设成本无关

由于卫星中继站在高空,地球静止卫星在赤道平面上空约 36 000km,居高临下,一次中继通信距离可达 18 000km,而且不论是远隔重洋的万里通信,还是近到几公里的通信,信号传输路径都同样由一端地球站经卫星再传送到另一端地球站构成通信,可见两端地球站间的通信距离与建设成本无关。

2. 通信覆盖面积大,具有多址通信能力

地球静止卫星,根据配置天线不同,可对地球形成局部区域性覆盖或者大面积的球覆盖。一颗卫星可覆盖地球面积的 42.46%,三颗卫星可基本覆盖全球(除南北极形成的盲区),如图 1.4.1 所示。

地面微波中继通信只能沿中继线路构成通信。而卫星通信类似一个多发射台的广播系统,每个地球站都是一座广播发射台,它把信号送到卫星上,由卫星向地面转发广播,只要在卫星天线波束的覆盖区域内,各地球站都可收到所有的广播,再通过接收机选出所需要的某一个或某几个发射台的信号。这样就构成在卫星天线波束覆盖区内任意两地球站之间的通信,即“多址通信”。这个特点是卫星通信的突出优点,它为通信组网应用,提供了高效率 and 灵活性。

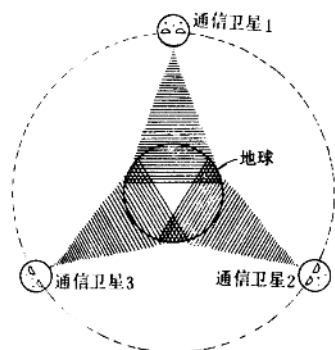


图 1.4.1 三颗静止卫星全球覆盖图

3. 通信容量大,能传送多种通信业务

卫星通信主要采用微波频段,可供使用的频带很宽;

卫星技术不断发展,提供的能源越来越充分;通信的新技术不断应用,使得卫星通信容量越来越大。目前国际通信卫星 IS-VI 号的容量已达到 40 000 路电话和两路彩色电视,除传送电视、电话业务外,还可传送数据、传真、图像等多种业务。

4. 传播稳定可靠,通信质量好

静止卫星通信系统的电波传播路径绝大部分是在穿透大气层以外的宇宙空间传播,差不多处于理想的真空状态,因此电波传播稳定,有“恒参信道”之称。地面微波中继通信的电波传播全部处于对流层中传播,远不及卫星通信稳定,通信质量也不及卫星通信好。

虽然卫星通信的信道稳定,并非一点不受自然条件影响,这与采用的通信频段有关。C 频段(4~6GHz)处于“无线电窗”频段内,大体可以看作是自由空间传播。1979 年 2 月,我国利用德、法“交响乐”卫星进行 C 频段传播试验,电平变化均小于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。所以在 C 频段卫星通信系统设计中的余量只取 3~6dB 已足够。这与地面微波中继设计余量取 20~40dB 相比要好得多。

5. 建设周期短,见效快

只要有卫星资源可利用,地球站建到哪里,通信网可立即扩展到哪里。特别是近年来 VSAT 小型地球站问世,组网建设更为方便,基本无需土建施工,可以将 VSAT 小站安放在用户的楼顶上或就近地方,直接为用户服务。

卫星通信也有一些不利因素:

1. 保密

卫星通信具有广播特性,一般来讲较易被窃听。因此,对于不公开的信息应注意采取保密措施。

通信系统保密主要从窃听和信息加密两方面考虑。

防窃听,虽然卫星通信比有线通信较易被窃听,但采用先进的技术体制也能起到防止窃听作用。例如,利用卫星信道时延长的特点,采用跳频技术;利用卫星信道频带宽的特点,采用扩频技术;利用卫星天线有多种覆盖的特点,采用点波束天线,使卫星转信能量集中在某一特定工作地区。

信息加密,对于现代侦听技术来说,防窃听已不足以解决通信保密问题,即便是地下电缆、海缆通信,也不能有效地防止窃听。所以,通信保密的重点应是信息加密。现代数字通信及计算机技术为信息加密提供了技术条件。卫星通信信道稳定,不问距离远近均可直达通信,便于传输同步数字加密信息。所以,为保密起见,卫星通信可选用数字通信体制及数字加密技术。

2. 时延

利用静止卫星进行通信,信号传播距离远,如果地球站天线仰角 $5\sim 10^\circ$,信号经卫星一次转接行程约 $8\times 10^4\text{km}$ 。信号以 $3\times 10^5\text{km/s}$ 的光速传播, $8\times 10^4\text{km}$ 行程需 270ms 。这样长的时延将带来回波干扰和话音重叠问题,如图1.4.2所示。卫星线路为4线传输,进入电话用户需经2/4线变换器,当A站向B站送话时,送话信号到达B站,由于2/4线变换器的网络得不到完全平衡,大部分话音信号送给B站用户,而有少部分话音信号漏入B站发信线路返回A站。如果传输时延短(如地面长市话线路一般小于 50ms),发送用户收到的返回信号几乎与发送信号同时间,发话者觉察不到回音。卫星通信时延较长,所以发话者会感觉有明显回音,这就是回波干扰。另一方面,由于传输时延较长、收信方应答时延也长,还会造成收方应答刚发出,发方尚未收到,认为没有应答又发出第二句话,与收方应答信号发生碰撞,这叫做通话重叠。所以,卫星电话采用了回波抑制或回波抵消设备,较好地解决了这个问题。但是,卫星线路的传输时延并不能克服,往往打卫星电话使人感到对方应答慢,反映迟钝。这就要求打卫星电话时,讲话稍慢些,使用次数多了会习惯的;另外,通话尽量避免两次经过卫星转发的双跳通信。

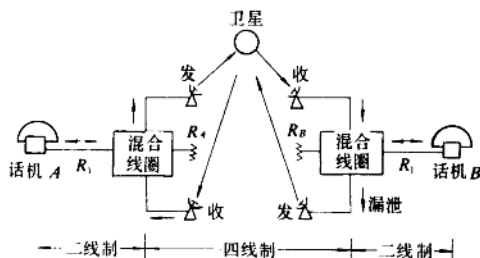


图 1.4.2 卫星线路基本构成

卫星通信时延较长,所以发话者会感觉有明显回音,这就是回波干扰。另一方面,由于传输时延较长、收信方应答时延也长,还会造成收方应答刚发出,发方尚未收到,认为没有应答又发出第二句话,与收方应答信号发生碰撞,这叫做通话重叠。所以,卫星电话采用了回波抑制或回波抵消设备,较好地解决了这个问题。但是,卫星线路的传输时延并不能克服,往往打卫星电话使人感到对方应答慢,反映迟钝。这就要求打卫星电话时,讲话稍慢些,使用次数多了会习惯的;另外,通话尽量避免两次经过卫星转发的双跳通信。

3. 星蚀

静止卫星围绕地球赤道面旋转,当卫星、地球和太阳共处在一条直线上时,地球挡住了阳光对卫星的照射,卫星进入地球的阴影区,造成了卫星的日蚀——星蚀,如图1.4.3所示。

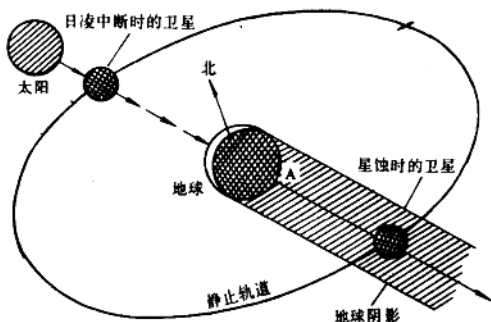


图 1.4.3 静止卫星的星蚀和日凌中断示意图

星蚀发生在每年春分和秋分前后各 23 天的午夜,每天发生星蚀持续时间不等,最长时间为 72min,如图 1.4.4 所示。

幸好星蚀时间是卫星下面的地面时间接近午夜,是通信业务较少的时间。调整卫星位置使星下点位置东移或西移,可改变星蚀出现的时间,卫星位置西移 1° ,星蚀开始时间可推迟 4min;东移 1° 则可提前 4min。例如,某国内静止卫星在秋分那天的星蚀开始时间是平均太阳时间 23:17,现将卫星位置西移 26° ,则星蚀开始时间将推迟到 01:01。当然这种偏移将使地球站观看卫星的仰角发生变化,可能会带来一些不利影响,例如,传输损耗增加,但这种影响并不严重。

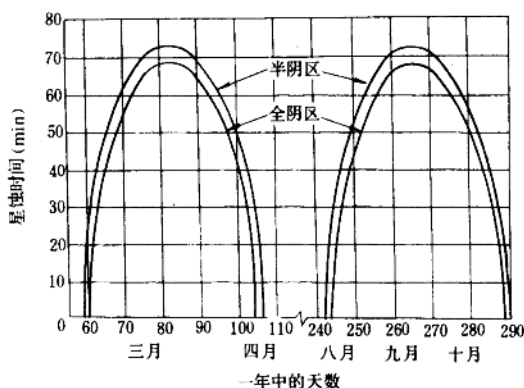


图 1.4.4 星蚀发生时间

现在静止通信卫星一般都备有蓄电池供电系统,星蚀期间,卫星所需的能源将由星载蓄电池供电,保证通信不间断。有可能由于卫星重量所限,不能携带足够的蓄电池,这种情况就不能保证星蚀期间全部转发器工作。所以在设计卫星时,要综合用户需求、卫星重量、卫星位置等因素,统筹安排卫星上的能源。

4. 日凌中断

静止卫星围绕地球赤道面旋转,当地球、卫星和太阳共处在一条直线上,如图 1.4.3 所示。这时地球站天线对准卫星的同时也就对准太阳,强大的太阳噪声进入地球站将造成通信中断——日凌中断。

日凌中断每年春分秋分前后发生共两回,每回约 6 天,每天中午持续最长时间为 10min,这与地球站的天线口径、工作频率有关。例如,10m 天线的地球站,在 4GHz 工作,最长日凌中断时间约为 6min。

对于静止卫星通信系统来说,日凌中断是难以避免的。幸好中断时间较短,累积时间为全年的 0.02%,并且可以预报,必要时可采用主、备卫星转换办法来保证不间断通信。

§ 1.5 卫星通信使用的频段

卫星通信的工作频率选择主要由以下两个因素决定:

① 避免有害干扰

无线电频谱是一种公用资源,如果不加以谨慎控制,彼此会有干扰,所以选用频率必须合理分配,避免有害干扰。

② 传输效率高

频率不同,传输损耗和噪声也不同。

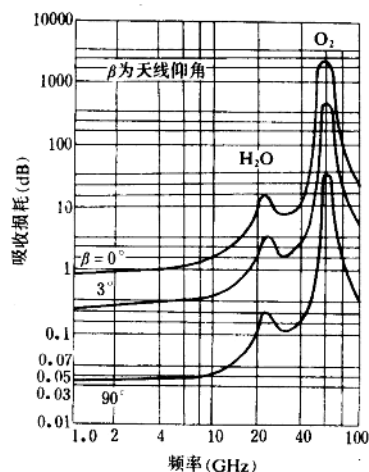


图 1.5.1 大气吸收损耗与频率的关系

图 1.5.1 所示为大气吸收损耗与频率的关系。从图中可以看出频率在 1~5GHz 时大气吸收损耗较小。频率在 5~10GHz 时大气吸收损耗开始增加,到 25~60GHz 时变得非常大。从大气吸收损耗的角度考虑,卫星通信应选用 12GHz 以下频率为好。

当频率在 1GHz 以下宇宙噪声会迅速增加;10GHz 以上大气噪声也迅速增加。因此,从降低系统噪声来说,卫星通信工作频率最好选用 1~10GHz 之间。

从传输损耗和噪声性能来看,卫星通信的工作频率在 1~10GHz 最为适宜,称无线电窗。

当然,除上述两方面还应考虑整个卫星通信系统的容量、质量、可靠性、设备的复杂程度和成本的高低等。

综合上述各方面考虑,目前大多数卫星通信系统使用的工作频段如表 1.5.1 所示。

表 1.5.1 卫星通信的频段

频 段	范围(GHz)	频 段	范围(GHz)
UHF	0.3~1.12		
L	1.12~2.6	Ku	12.4~18
S	2.6~3.95	K	18~26.5
C	3.95~8.2	Ka	26.5~40
X	8.2~12.4	毫米波	40~300

§ 1.6 通信卫星

1.6.1 通信卫星的种类

一般从卫星本体的技术状态来分类,目前主要有两种:

(1) 双自旋稳定卫星

这种卫星从外型看,大都是圆柱形,如图 1.6.1 所示。依据陀螺旋转原理,如果使卫星围绕最大惯性轴以一定自旋速度旋转(通常 $60\sim 100\text{r/min}$),则卫星本身有很高的角动量,按着角动量守恒定律,自旋轴被固定在宇宙空间的固定方向上,于是卫星姿态得到稳定。卫星旋转时,为使天线指向地球,天线必须反方向旋转消旋,即天线消旋,或使卫星有效载荷连同天线装在一个消旋平台上反方向旋转消旋,称平台消旋。所以,这种卫星称为双自旋稳定卫星,或简称自旋卫星。

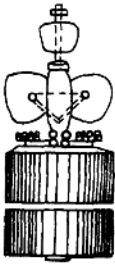


图 1.6.1 双自旋稳定卫星外形图

(2) 三轴稳定卫星

这种卫星的外形像一只大飞鸟,中间是方形卫星本体,两边展开的两翼是太阳能电池阵,如图 1.6.2 所示。卫星在空间的姿态可由通过卫星质心的三个轴来确定。这三根轴一般选在卫星轨道平面的垂线、法线和切线三个方向上,分别称为俯仰轴、偏航轴、滚动轴,如图 1.6.3 所示。这可用一架沿卫星轨道绕地球飞行的飞机来比拟,即从地面上看,绕俯仰轴偏转时,飞机是上升或下降;绕偏航轴偏转时,飞机是朝左或朝右偏离航线;绕滚动轴偏转时,飞机的两翼一高一低地翻滚。所以,凡不是用卫星本体自旋,而利用喷气、惯性飞轮、电机

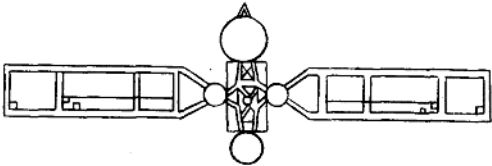


图 1.6.2 三轴稳定卫星外形图

直接控制上述三轴以使卫星保持正确姿态的方法均属广义的三轴稳定法。其中,最典型的三轴稳定法是在星体内分别装有上述三轴为旋转轴的三个小型惯性飞轮,当卫星姿态正确时,各飞轮按规定速度旋转,使卫星保持稳定。一旦发现姿态变化,根据情况改变某轴向飞轮的旋转速度产生反作用来使卫星姿态恢复正常。用三轴稳定方法使卫星在空间保持姿态稳定的卫星,叫三轴稳定卫星或称三轴卫星。

三轴卫星与自旋卫星比较,三轴卫星有许多优点:

① 姿态控制精度较高,可达到小于等于 0.1° 。自旋卫星则为 $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ 。

② 可节省燃料。控制飞轮的旋转一般只需消耗电能,仅当姿态偏差大于飞轮所能修正的界限时,才需使用一些燃料。

③ 采用太阳能电池帆板,可获得较大的发电功率。而自旋卫星的太阳能电池是贴在星体表面,受星体表面积大小限制,又受日光照射面积限制(仅约 $1/3$ 阳面受日光照射),因而发电能力受到限制。

④ 星体结构设计较方便,其形状受限小,不像自旋卫星要按照对称于最大惯性轴的要求来设计。

⑤ 信号传输不经过旋转部件,损耗小。

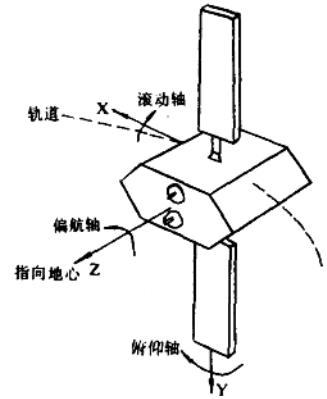


图 1.6.3 三轴稳定卫星的三个轴向图

1.6.2 通信卫星的组成和功能

通信卫星除星体外,主要由以下五个分系统组成,如图 1.6.4 所示。

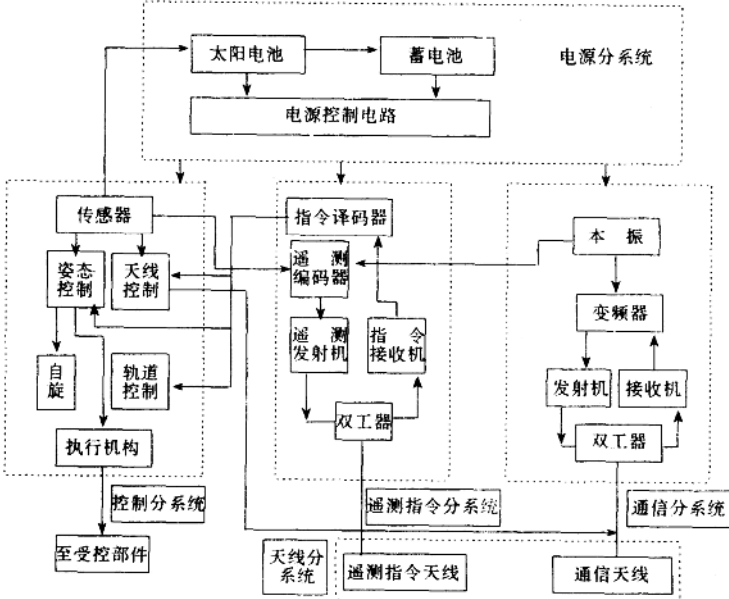


图 1.6.4 通信卫星组成

1. 天线分系统

卫星上装有两种天线,一种是遥测、指令和信标天线,一般是全向天线,以便可靠地接收指令并向地面发射遥测数据和信标。另一种是通信天线,根据需要可设计成全球波束天线、区域波束或点波束天线、赋形波束天线,如图 1.6.5 所示。

全球波束天线:对于静止卫星而言,其波束的半功率角宽度为 $\theta_{1/2} \approx 17.4^\circ$,恰好覆盖卫星对地球的整个视区。也就是说,在地球面积约 $\frac{1}{3}$ 的覆盖区内,任何地球站之间都可构成通信。

区域波束或点波束天线:波束半功率角宽度较小,几度或更小;使波束只覆盖某一地区,功率比较集中,更好地满足某一地区通信要求。更小的波束,则为特定的小区特殊通信服务,称点波束。

赋形波束天线:波束覆盖轮廓不规则,视服务区的形状而定。为使波束成形,有的是通过修改反射器形状来实现;更多的是利用多个馈源从不同方向经反射器产生多波束的组合来实现。

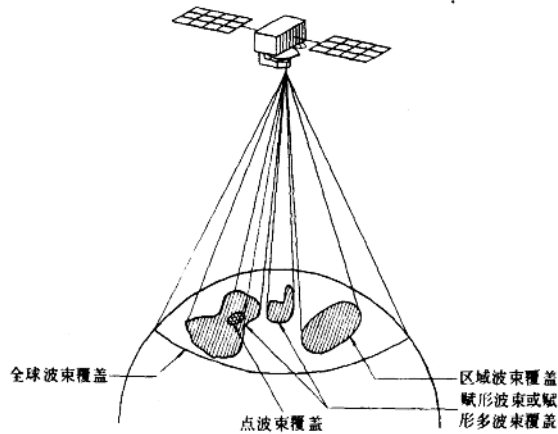


图 1.6.5 通信卫星的各种波束示意图

2. 通信分系统

卫星上的通信系统又叫转发器或中继器,实质上是一部宽频带的收、发信机。对转发器的基本要求是:以最小的附加噪声和失真,足够的工作频带和输出功率来为各地球站有效而可靠地转发无线电信号。

转发器通常分为透明转发器和处理转发器两类。

透明转发器:它收到地球站发来的信号后,除进行低噪声放大、变频、功率放大外,不作任何加工处理,只是单纯地完成转发任务。也就是说,它对工作频带内的任何信号都是“透明”的通路。透明转发器有一次变频和二次变频两种,如图 1.6.6 所示。

处理转发器:它除了进行转发信号外,还具有信号处理的功能,如图 1.6.7 所示。

卫星上对信号处理可有多种形式,主要包括对数字信号再生,使噪声不会积累;对不同的卫星天线波束之内进行信号交换;更高级的信号变换和处理如上行 FDMA 变为下行 TDMA 信号识别等。

处理转发器技术比较复杂,目前大都使用透明转发器。

3. 电源分系统

卫星上电源分系统是星上各种电子设备所需能量的源泉。它是由太阳能电池方阵、蓄电池组、稳压控制电路等组成,如图 1.6.8 所示。平时由太阳能电池供电,同时蓄电池被充电。星蚀时将由蓄电池组供电,保证卫星通信不间断工作。图中的二极管 D_1 用来阻止蓄电池放电电流流向太阳能电池; D_2 则为蓄电池提供放电通路。

4. 遥测、指令分系统

为了保证通信卫星的正常运转和工作,就要不断地了解卫星内部各种情况和工作是否正

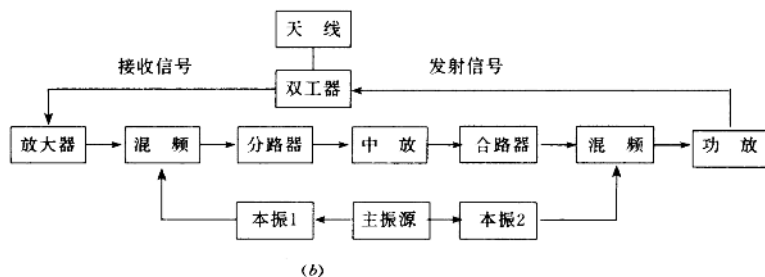
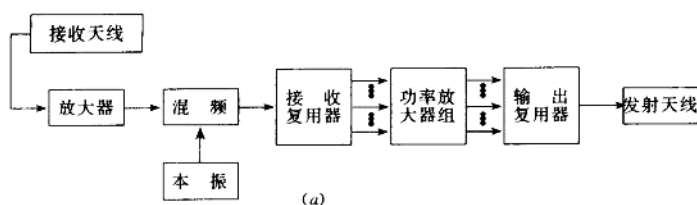


图1.6.6 透明转发器原理方框图

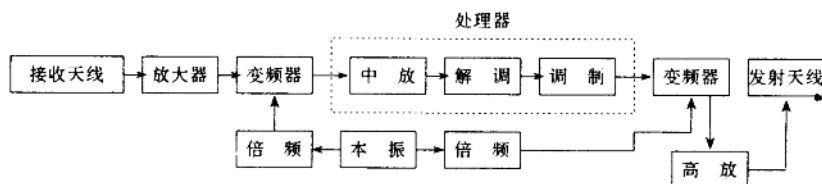


图1.6.7 处理转发器原理方框图

常。必要时应能通过指令信号去控制卫星上某些设备,例如,当某部件发生故障时,通过指令信号控制倒换备份等。所有这些,都是通过卫星上的遥测、指令分系统来完成的。

遥测设备是用各种传感器和敏感元件等器件,不断测得有关卫星姿态及星内各部分工作状态的数据,经放大,多路复用,编

码、调制等处理后,通过专用的发射机和天线发给地面的跟踪遥测指令站(TT&C站),也可称测控站。测控站接收并检测出卫星发来的遥测信号,转送给卫星监控中心进行分析处理;需要实施指令控制时,再将指令信号回送给测控站,由测控站向卫星发出有关姿态和位置校正、星体内温度调节、主备用部件切换、转发器增益调整等控制指令信号。

指令设备是专门用来接收地面测控站发给卫星的指令,并进行解调和译码,尔后将其暂时储存起来,同时又经遥测设备发回地面进行校对,地面测控站在核对无误后再发出“指令执行”信号。卫星指令设备收到“指令执行”信号后,将存贮的指令送到控制分系统,使有关执行机构正确地完成控制动作。

5. 控制分系统

控制分系统是由一系列机械的或者电子的可控调整装置组成,如各种喷气推进器、驱动装

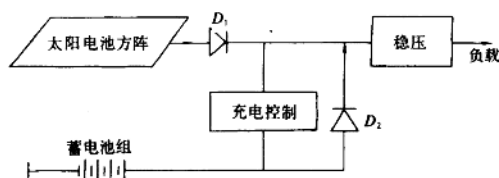


图1.6.8 通信卫星电源方框图

置、加热及散热装置、各种转换开关等。在地面测控站的指令控制下完成对卫星的姿态、轨道位置、工作状态、主备用切换等各项调整功能。

§ 1.7 通信卫星的轨道

1.7.1 通信卫星的轨道

卫星的轨道是指卫星相对地球中心运动的路径。根据不同应用和要求,卫星在天空有不同的运行轨道,可大致区分如下:

(1) 按轨道形状分

——圆形轨道

——椭圆形轨道

(2) 按卫星轨道倾角分

——赤道轨道:卫星轨道平面与地球赤道平面重合,即轨道倾角为 0° ;

——极地轨道:卫星轨道平面与地球南北极的轴线重合,即轨道倾角为 90° ;

——倾斜轨道:卫星轨道平面与地球赤道平面之间的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

(3) 按卫星轨道离地面的高度分

——低轨道:通常高度为 $500 \sim 2\,000\text{km}$ 或 $3\,000\text{km}$ (许多在 $1\,500\text{km}$ 以下),周期约 $1\text{h}45\text{min}$ (在 $1\,000\text{km}$ 高度);

——中轨道:通常高度为 $2\,000\text{km}$ 或 $3\,000 \sim 20\,000\text{km}$,周期约为 $5 \sim 6\text{h}$ (对约 $10\,000\text{km}$ 高度而言);

——高轨道:通常高度在 $20\,000\text{km}$ 以上,周期大于 12h 。

高轨道卫星的高度为 $35\,860\text{km}$,周期为 24h 的赤道轨道又称为同步轨道。若卫星在地球赤道平面上空 $35\,786.04\text{km}$ 处环绕地球公转,方向与地球自转方向相同,速度与地球自转速度相等(同步),倾角很小($<1^\circ$)的卫星轨道称静止轨道。所谓静止,不是卫星真的静止不动,而是从地面看卫星是相对静止的。理想的静止轨道特性是:

——周期 $t=86\,164.091\text{s}$,即 $23\text{h}56\text{min}4.091\text{s}$;

——地球赤道半径 $r=6\,378.16\text{km}$;

——卫星高度 $h=35\,786.04\text{km}$;

——轨道半径 $r+h=42\,164.20\text{km}$;

——卫星速度 $V=3.074\,662\text{km/s}$;

——轨道上 1° 的弧长 $l=735.904\text{km}$;

——轨道面对赤道面的倾角 $i=0^\circ$;

——偏心率 $e=0$ 。

通信卫星的轨道大都采用静止轨道。其主要优点是:

① 便于通信地球站跟踪指向卫星,简化地球站设备;

② 卫星覆盖面积大,三颗卫星基本上可覆盖全球,构成全球通信;

③ 几乎没有多普勒频移,使卫星通信的信号更加稳定;

④ 卫星约 99% 的时间内处于太阳照射之下,减轻了星载蓄电池负担,同时也减少卫星环

境温度变化；

⑤ 卫星处在强烈的地球辐射带之外，可简化卫星表面保护措施，同时地球磁场对卫星自旋影响不大。静止轨道卫星也有一些缺点，例如，信号传播时延长，信号弱，发射控制技术复杂。

静止卫星轨道的精度要求很高，稍有偏差卫星就会漂移。轨道周期比地球自转周期大时，卫星均匀地向西漂移；比地球自转周期小时向东漂移；周期差万分之一，每天漂移 0.036° 。轨道不圆时($e \neq 0$)，卫星每天沿东西方向来回摆动一次，离摆动中心最大幅度(地心张角的弧度数)是偏心率的两倍($2e$)。轨道倾角不为零时($i \neq 0$)，卫星将会在南北方向上偏离赤道，星下点轨迹呈“8”字形，离开赤道面最大地心张角等于轨道倾角。因此，真正的静止十分困难。即使卫星已经静止在某个地理经度的赤道上空，摄动也会引起它的轨道发生下列变化。

① 太阳和月球引力与地球扁率综合影响，使轨道倾角产生长期变化，最初几年的倾角可看成长周期变化，其变化率为 $0.7^\circ/\text{年} \sim 0.9^\circ/\text{年}$ ；

② 地球扁率使卫星均匀地向东漂移，这一影响靠提高轨道半长轴抵消，也就是使轨道的周期比地球自转周期长 6s ；

③ 地球赤道不圆引起卫星东西方向摆动，漂移量与时间平方成正比。漂移加速度与静止的地理经度有关，在 $0 \sim 0.0017^\circ/\text{天}^2$ 之间。若不作轨道控制任其漂移，经度位置会发生大幅度摆动。所以静止卫星都具有轨道修正能力。

1.7.2 轨道形状与卫星速度的关系

根据计算，如不考虑空气的阻力，在地面以 7.9km/s 的速度把卫星向水平方向抛出去，它将沿着以地球为中心的圆轨道运行，这是在地面发射人造地球卫星所需的最小速度，叫环绕速度，也叫圆轨道速度或第一宇宙速度。如果增加卫星速度，圆轨道运动就要受到破坏，使轨道从圆变成椭圆。速度越快，椭圆拉得越长。当速度增大到 11.2km/s 时，卫星将摆脱地球的引力，呈抛物线轨道飞出地球去，像地球围绕太阳运行一样，成了人造行星。这个脱离地球而去的速度叫脱离速度，也叫第二宇宙速度。如卫星速度再继续增加，除借助地球绕太阳的 30km/s 的速度外，再增加一个 16.7km/s 的速度，称第三宇宙速度，卫星将飞出太阳系。图 1.7.1 表示卫星以不同速度环绕地球运行的轨道。

环绕速度和脱离速度随卫星高度不同而不同，卫星轨道越高，地球对卫星的引力越小(即卫星重量越轻)，其环绕速度和脱离速度越小。但是发射卫星所需的能量并不减少，反而增加。因为卫星升高要消耗能量。表 1.7.1 中所列数据供参考。

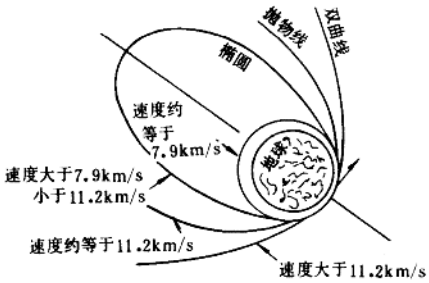


图 1.7.1 不同速度的卫星轨道示意图

表 1.7.1 卫星高度与速度的关系

高度(km/s)	环绕速度(km/s)	脱离速度(km/s)
0	7.912	11.189
500	7.619	10.776
1000	7.356	10.403
5000	5.924	8.378