

高等学校教材

卫星通信

刘国梁 荣昆璧

西安电子科技大学出版社

1992

807

内 容 简 介

本书是在第一轮教材实践的基础上,根据机电部无线电技术与信息系统教材编审委员会无线电通讯编审小组主持召开的《卫星通信》教材修编意见征询会通过的修编大纲进行修编而成的。

本书系统地讲述了卫星通信原理。全书共六章,内容包括调频通信方式、数字通信方式、信道编码与数字信号处理、卫星线路的计算和地面站设备。本书力求叙述简明、概念清楚、通俗易懂。书后附有一定数量的习题及参考文献,供初学者自学参考。

本书系高等学校工科电子类专业的统编教材,供通信专业学生作专业课教材用,也可供从事这方面工作的科技人员阅读和参考。

高等学校教材
卫 星 通 信
刘国梁 荣昆璧
责任编辑 殷咸安

西安电子科技大学出版社出版

陕西省军区长城印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 15 4/16 字数 361 千字

1990年6月第1版 1992年5月第2次印刷 印数 2 001—5 000

ISBN7-5606-0112-X/TN·0039 (课) 定价: 4.00 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材 1986—1990 编审出版规划, 由无线电技术与信息系统教材编审委员会无线电通讯编审小组征稿, 推荐出版, 责任编委黄载禄。

本教材由西安电子科技大学担任主编, 它是根据编审小组新制定的编写大纲重新编写的。华中理工大学黄载禄担任主审。

本课程的教学参考时数为 50 学时。其主要内容包括: 第一章阐述卫星通信的特点、卫星通信系统的组成、通信卫星以及多址方式等基本概念; 第二、三章是本书的重点, 论述了调频通信方式、数字通信方式及其主要技术问题; 第四、五章讨论了卫星通信线路的计算以及信道编码与数字信号处理技术; 第六章介绍卫星通信地面站设备并给出了实例。使用本教材时, 应着重于基本原理和主要技术问题的介绍, 以便使读者通过学习, 熟悉卫星通信的基本原理, 卫星通信系统和地面站的组成, 初步掌握 FDMA 和 TDMA 方式的主要技术问题, 卫星通信中的信道编码与数字信号处理技术以及卫星通信线路的计算, 从而建立通信系统的完整概念。本书中有“*”号的内容, 可根据教学情况决定取舍。

本教材由刘国梁编写第一、二、五章和第四章 § 4.2 节, 荣昆壁编写第三、六章和第四章 § 4.1 节, 刘国梁统编全书。在本书的第一、六章中, 引用了郭建屏、任华生同志在《通信系统》的第一、二章和原《卫星通信》的第一、二、六章中编写的部分内容。付耀明同志参加了该书的审阅工作, 他为本书提出了许多宝贵的意见。在此对付耀明、郭建屏、任华生同志表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限, 书中难免还存在一些缺点和错误, 殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论

1.1 卫星通信的基本概念与特点	1
1.1.1 卫星通信的基本概念	1
1.1.2 卫星通信的特点及发展概况	2
1.2 卫星通信系统的组成	3
1.2.1 卫星通信系统的组成方框图	3
1.2.2 卫星通信系统的工作过程	4
1.3 卫星通信用的频段与电波	
传播特点	4
1.3.1 工作频段的选择	4
1.3.2 电波传播的特点	6
1.4 通信卫星	7
1.4.1 卫星的运动轨道	7
1.4.2 静止卫星	9
1.4.3 通信卫星和转发器的组成	12
1.4.4 通信卫星举例	16
1.5 卫星通信的多址方式及信道	
分配技术	22
1.5.1 频分多址(FDMA)方式	22
1.5.2 时分多址(TDMA)方式	24
1.5.3 空分多址(SDMA)方式	26
1.5.4 码分多址(CDMA)方式	26
1.5.5 信道分配技术	27

第二章 调频卫星通信

2.1 FDM/FM 方式	29
2.1.1 频分多路复用	29
2.1.2 多路电话信号的主要特性	31
2.1.3 多路电话调频波的特性	37
2.2 FDM/FM 系统话路中的噪声	38
2.2.1 话路中噪声的分类	39
2.2.2 话路噪声标准与噪声分配	40
2.3 FDM/FM 方式的热噪声	
信噪比	41
2.3.1 热噪声信噪比 S/N_0	41
2.3.2 信噪比 S/N_0 的加权值	43

2.3.3 加重与加重系数	44
2.3.4 门限电平	46
2.3.5 门限扩展解调器	47
2.4 FDM/FM 方式的失真噪声	52
2.4.1 非线性失真噪声	52
2.4.2 线性失真串噪声	58
2.4.3 回波引起的失真	60
2.5 SCPC/FM 方式	60
2.5.1 SCPC/FM 方式的特点	61
2.5.2 SCPC/FM 方式的热噪声	
信噪比	64
2.6 FDMA 方式的交扰调制与	
能量扩散	65
2.6.1 输入、输出特性的非线性	
引起的交调分量	66
2.6.2 调幅/调相转换所引起的	
交调分量	68
2.6.3 强信号对弱信号的抑制	72
2.6.4 减少交调产物的方法	75
2.6.5 能量扩散	76
2.7 卫星频带的利用和通路容量	78
2.8 电视信号的传输	78
2.8.1 电视信号的主要特性	79
2.8.2 电视信号的传输	82

第三章 数字卫星通信

3.1 时分多路复用	92
3.1.1 原理	92
3.1.2 复用制式	93
3.1.3 数字多路复接	94
3.2 调制	96
3.2.1 QPSK 调制	96
3.2.2 OK-PSK 调制	100
3.2.3 MSK 调制	103
3.2.4 数字信号的解调	108
3.3 SCPC 方式	113

3.3.1. 预分配的 SCPC 方式	113	性能指数	189
3.3.2. SPADE 方式	117	5.2 卫星通信线路传输信号时	
3.4 TDMA 方式	121	所需的 C/T 值	191
3.4.1 地面站的组成与工作原理	122	5.2.1 热噪声 $C/T(C/T_0$ 和	
3.4.2 系统定时与同步	127	$C/T_D)$ 值	191
3.4.3 帧结构与系统效率	134	5.2.2 对交调噪声的 C/T 值	195
3.4.4 SDMA/SS/TDMA 方式	137	5.2.3 卫星线路的 C/T 值	196
3.4.5 数据分组卫星通信	142	5.2.4 门限余量与降雨余量	197
3.5 CDMA 方式	144	5.3 卫星线路计算举例	198
3.5.1 概述	144	5.3.1 FDM/FM/FDMA 方式	198
3.5.2 基本原理	145	5.3.2 SCPC/FM/FDMA 方式	201
3.5.3 伪随机序列	147	5.3.3 TDMA 方式	203
3.5.4 同步	149	5.3.4 SCPC/PSK/FDMA	
3.5.5 系统性能	151	方式	206
第四章 信道编码与数字信号处理		第六章 地面站设备	
4.1 信道编码	154	6.1 地面站的类型与要求	209
4.1.1 差错控制方式	154	6.1.1 地面站的类型	209
4.1.2 编码	157	6.1.2 对地面站的要求	210
4.1.3 编码在卫星通信中的应用	175	6.1.3 地面站站址的选择	211
4.2 数字信号处理	178	6.2 地面站各分系统	213
4.2.1 数字语音内插(DSI)	178	6.2.1 天线和馈线分系统	214
4.2.2 差分脉码调制(DPCM)和白适应		6.2.2 大功率发射机分系统	216
差分脉码调制(ADPCM)	181	6.2.3 低噪声接收机分系统	219
4.2.3 回声抵消器	183	6.3 地面站设备举例	221
第五章 卫星通信线路的计算		6.3.1 DW-10 型同步卫星通信	
5.1 传播方程与接收机输入端的		地面站	221
载波噪声比	186	6.3.2 MARISAT 船载地面站	228
5.1.1 传播方程	186	习题	234
5.1.2 卫星通信线路的噪声	188	参考文献	237
5.1.3 载波噪声功率比与地面站			

第一章 绪 论

1.1 卫星通信的基本概念与特点

1.1.1 卫星通信的基本概念

卫星通信是宇宙无线电通信的形式之一，它是利用人造地球卫星作为中继站转发无线电波，在两个或多个地面站之间进行的通信。

以宇宙飞行体或通信转发体为对象的无线电通信通常称为宇宙通信。它可分为三种形式：(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的地球站之间的通信。人们常把第三种形式称为卫星通信。上面所说的宇宙站指的是设在地球大气层以外的宇宙飞行体(如人造卫星和宇宙飞船等)或其它天体(如月球、行星等)上的通信站；地球站是指设在地面、海洋或大气层中的通信站，习惯上常把它称为地面站。本书所讨论的是利用人造卫星转发的地面站之间的通信。

卫星通信是在地面微波中继通信和空间技术的基础上发展起来的。通信卫星的作用相当于离地面很高的中继站。这种通信的过程可用图 1-1 来说明。例如，图 A 和 B 分别表示地球上的两个地面站，只有当 A 和 B 两地面站都能够同时“看”到卫星时，才能经卫星转发进行通信。如果卫星的运行轨道属于低轨道，那么距离较远的 A、B 两站便不能同时“看”到卫星了。这时，从 A 站发出的信号是不能经卫星立即转发给 B 站的，必须采用贮存延迟转发方式。当卫星飞经 A 站上空时，卫星上的转发器接收 A 站发来的信号并贮存起来，等到卫星运行到 B 站上空时，由 B 站发出指令信号，启动卫星上的发射机，把贮存的信号再发给 B 站，这就是延迟转发式卫星通信系统。

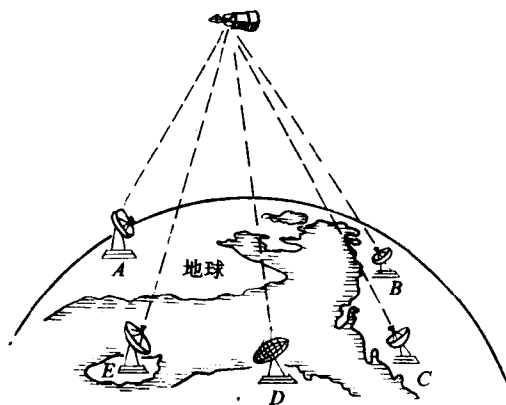


图 1-1 卫星通信的示意图

当卫星运行轨道较高时，A、B 两站便可同时“看”到卫星。这时，A 站发出的信号就可被卫星转发器接收，经变频、放大等处理后，立即转发给 B 站。因此，这种系统称为立即转发式卫星通信系统。

当卫星的运行轨道在赤道平面内，其高度约为 36 000 km 时，它的运行周期恰好与地球自转周期相同，它的位置相对地面站来说是静止不动的，因此这种卫星称为对地静止卫星，简称静止卫星，有时也叫同步卫星。利用这种卫星进行通信的系统称为同步卫星中继通信系统。目前国际和国内的卫星通信大都采用这种通信系统。

为了保证通信卫星的正常运行和工作，必须通过遥测和遥控系统对卫星的轨道、姿态

和有关部门的工作进行监视和校正,这就要求设置通信卫星监控站。另外,为了对通信业务进行协调和技术管理,还要设置卫星通信管理站。这两部分统称为卫星通信控制中心。因此,通信卫星、地面站群和控制中心这三部分便构成了一个完整的卫星通信系统。由于第三部分已超出本书的范围故未加叙述。

1.1.2 卫星通信的特点及发展概况

卫星通信与微波中继通信等其它方式相比有如下一些特点:

(1) 卫星通信覆盖区域大,通信距离远。因为卫星离地面距离很远,一颗卫星便可以覆盖地球表面积的三分之一,因而利用三颗同步卫星即可实现全球通信,所以目前它是远距离越洋通信和电视转播的主要手段。

(2) 卫星通信具有多址联接能力。在地面微波中继通信中,它的服务区域基本上是一条线路。而在卫星通信中,卫星所覆盖的区域内,所有地面站都能利用这一卫星进行相互间的通信,即可多址联接(见图 1-1)。

(3) 卫星通信的频带宽、容量大。卫星通信采用微波频段,而且一颗卫星上可设置多个转发器,故通信容量很大。如 IS-V 通信卫星,它可同时传输 12 000 路电话和两路电视;一种利用频率再用技术的卫星通信系统可传输 14 400 路电话或 24 路电视。

(4) 卫星通信机动灵活。卫星通信的建立不受地理条件的限制,地面站可以建立在边远山区、岛屿、汽车、飞机和舰艇上。只要建立起地面站,就可以与同一系统内的其它站进行通信。

(5) 卫星通信的质量好、可靠性高。卫星通信的电波主要在自由空间传播,而且通常只经过卫星一次转接,噪声影响小,故通信质量好。就可靠性而言,据统计,正常运转率达 99.8% 以上。

(6) 卫星通信的成本与距离无关。微波中继或电缆载波通信系统,其建设投资和维持使用费用都随距离而增加,而卫星通信的地面站至空间转发器这一区间并不需要线路投资,因而对国际通信或远程通信而言,按每路话、每公里的费用比较,卫星通信系统是最便宜的。

现在卫星通信大都采用同步卫星通信。国际通信卫星组织(INTELSAT)建立于 1964 年,先后发射了第一代至第六代国际通信卫星(IS-I、IS-II、IS-III、IS-IV、IS-IVA、IS-V、IS-VI),到目前为止,该组织的成员已增加到 140 多个国家和地区,参加工作的地面站已有 1 000 多个。在国际通信中,卫星通信承担了三分之一以上的远洋通信业务。此外,它向 20 多个国家出租了转发器作国内卫星业务使用,还提供了几乎世界上所有的远洋电视。

除 Intelsat 国际卫星通信系统外,尚有由苏联、东欧等国组成的 ИНТЕРСПУТНИК 国际卫星通信组织。此外,世界上有许多国家和地区还建立了国内或地区内卫星通信系统。不仅技术发达国家建立了自己的国内卫星通信系统,而且第三世界国家也已开始或正在建立国内卫星通信系统,如巴西的 Brasilsat 系统,阿拉伯国家的 Arabsat 系统,印度的 Insat 系统等。

卫星通信系统除用于商用电话外,卫星直播电视也在大力发展,如日本的 BS-2 系统现已投入使用。此外,它在军事方面的应用也极为广泛。美、苏等国都已建立了自己的军

事卫星通信系统，如美国的 Milstar 系统就是为空、海军服务的。同时，卫星通信技术已扩大到气象、导航、资源探测、计算机通信以及载人宇宙飞船的话音、图像和数据传输等方面。

我国从 70 年代初开始建立和发展卫星通信，1972 年初，在上海虹桥建立了第一个卫星通信地面站，天线直径为 10 m。1973 年后，在北京、上海等地相继建成了三个天线口径 30 m 的标准地面站，并开展了国际卫星通信业务。1975 年试制成功 DW-10 型同步卫星通信地面站，天线直径为 10 m，工作频率为 6/4 GHz，并分别在上海、南京和石家庄等地建立了卫星通信试验站，利用 IS-IV 通信卫星和“交响乐”通信试验卫星成功地进行了电话和电视等传输试验。

1984 年 4 月，我国成功地发射了第一颗国内实验同步通信卫星 STW-1，它可传送彩色电视和 15 路电话，设计寿命为 3 年。经北京、乌鲁木齐和拉萨等地的联试，证明该系统性能良好，达到了设计要求，为我国卫星通信开辟了新的前景。预计不久还将发射电视广播卫星和其它同步卫星，以满足日益增长的通信要求。

1.2 卫星通信系统的组成

1.2.1 卫星通信系统的组成方框图

根据卫星通信系统的任务，一条通信线路总要有发端地面站、上行线路、卫星转发器、下行线路和收端地面站组成，如图 1-2 所示。其中上行线路和下行线路就是无线

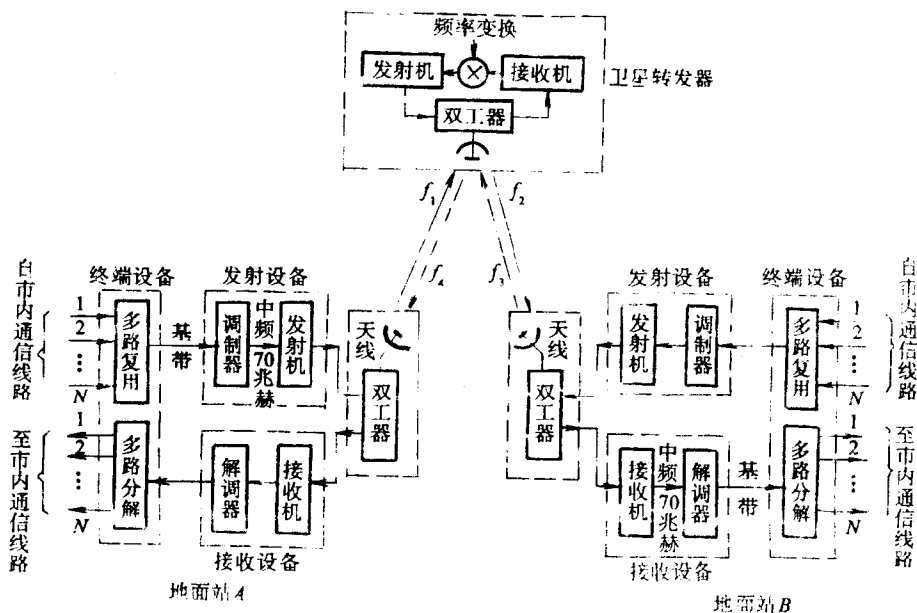


图 1-2 卫星通信系统的组成方框图

电波的传播路径。为进行双向通信，每一地面站均应包括发射和接收系统。由于收、发系统一般是共用一副天线，故需要使用双工器以便将收、发信号分开。地面站收、发系统的终端，通常都是与长途电话局或微波线路连接的。地面站规模的大小则视通信系统的用途而定。转发器的作用是接收地面站发来的信号，并经变频、放大后再转发给其它地面站，它由天线、接收设备、变频器、发射设备和双工器组成。

1.2.2 卫星通信系统的工作过程

卫星通信系统的工作过程可用频分多路电话信号的传输来说明。由市内通信线路送来的电话信号，在地面站 A (见图 1-2) 的终端设备内经多路复用后，输出的是多路电话的基带信号，带宽的大小依话路数目而定。基带信号被送至调制器对 70 MHz 或频率更高的副载波进行调制成为中频信号。目前，在模拟式卫星通信系统中多采用调频制，故中频信号是一调频波，此信号经上变频成为微波信号，再经功率放大和天线向卫星发射出去。

由地面站 A 发到转发器去的信号，经大气层和自由空间的传播，要受到很大的衰减并引入一定的噪声，最后到达卫星转发器。在转发器中，经接收机将载波频率为 f_1 的上行信号变换成频率较低的中频信号，并经放大，再变换成载波频率为 f_2 的下行信号。最后经输出级放大，并由天线发向各地面站。

由转发器发射的频率为 f_2 的信号，经自由空间和大气层传播，最后到达 B 站。因为转发器的功率小，天线增益低，故到达 B 站的信号是很微弱的，必须用高增益天线和低噪声接收机进行接收。被接收的信号经双工器、低噪声放大器和下变频器变成中频信号，再送到解调器经解调后输出基带信号。最后，利用多路分解设备进行分路，并通过市内通信线路送到各用户。

由 B 站向 A 站传送信号时与上述过程相同，只是上、下行的频率分别为 f_3 、 f_4 。在上行与下行线路中将频率分开是为了避免通信过程中的相互干扰。

多个地面站间的相互通信，工作过程与上述情况类似，只要选择不同的上、下行频率即可。

1.3 卫星通信用的频段与电波传播特点

1.3.1 工作频段的选择

卫星通信选用什么频段是一个很重要的问题，它将影响到系统的传输容量，地面站及转发器的发射功率，天线尺寸及设备的复杂程度等。选用频段时，主要从以下几方面来考虑：① 电波传播过程中的衰减要小；② 天线系统接收的外部噪声要小；③ 有较宽的频带以满足信息传输的要求；④ 能充分利用现有的通信技术；⑤ 与其它通信、雷达等电子系统间的干扰要小。根据以上要求，选在特高频或微波频段较好。目前大多数卫星通信系统选择在下列频段工作：

- | | |
|-----------|----------------|
| (1) UHF波段 | 400 / 200 MHz; |
| (2) L波段 | 1.6 / 1.5 GHz; |
| (3) C波段 | 6.0 / 4.0 GHz; |

- (4) X波段 8.0 / 7.0 GHz;
 (5) K波段 14.0 / 11.0 GHz;
 (6) 准毫米波段 30 / 20 GHz(准备使用)。

当电波在地面站与卫星间传播时,要穿过大气层,它对电波是有吸收作用的。测量表明,大气吸收损耗与频率的关系如图 1-3 所示。图中 θ 为地面站天线的仰角。当 θ 减小时,电波穿过大气层的路径增加,因而吸收损耗增大。由图还可以看出,工作频率在 1~5 GHz 时,大气吸收损耗小,而在 5~10 GHz 时开始增大,在 30~50 GHz 时,吸收损耗变得很大。从大气吸收损耗方面考虑,工作频率选在 10 GHz 以下为宜。

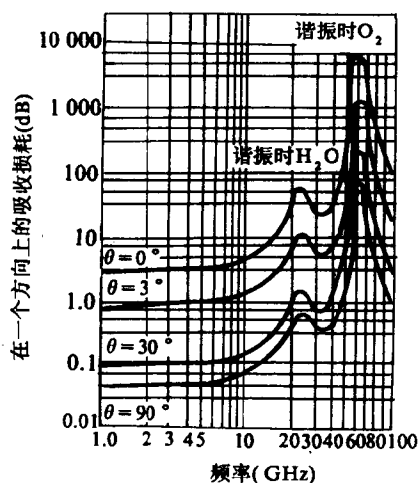


图 1-3 大气吸收损耗与频率的关系

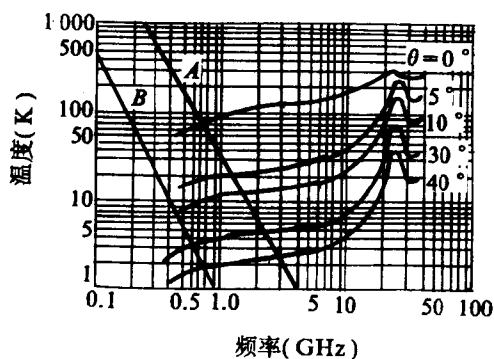


图 1-4 宇宙及大气噪声与频率的关系

从外部噪声看,当工作频率高于 100 MHz 时,宇宙(银河系)噪声将随频率的升高而迅速减小^①,如图 1-4 所示。所以,卫星通信的最低工作频率应高于 100 MHz。

从减小大气吸收损耗和外部噪声考虑,频率选在 1~10 GHz 以内为好,这一频段通常称为卫星通信的工作频率“窗口”。窗口中最理想的工作频率在 6/4 GHz 附近,该频段的带宽较宽;便于利用成熟的微波中继通信技术;而且由于工作频率高,天线的尺寸也可以小些。

当然,上面指出的卫星工作频段不是绝对的,随着通信业务量的增加,这一频段已经不够用了,人们已开始探索应用更高的直至光波段的可能性了。在 1971 年的国际有关会议上,已确定把宇宙通信的频段扩大到 275 GHz。

关于卫星通信使用的频段,国际电信联盟(ITU)在 1979 年的“世界无线电行政大会最后法案”文件中作了详细规定。这里摘录一部分(见表 1-1),仅供参考。

^① 宇宙噪声的大小与天线的指向有密切关系。当在银河系中心的指向上时,达到最大值(通常称为热空);而在其它指向上则是很低的(通常称为冷空)。图中直线 A 和 B 分别代表指向热空和冷空时的宇宙噪声与频率的关系。

表 1-1 卫星通信业务用频段分配表(部分)

类 型	频 带 (GHz)	使用 区 域	使用 业 务	备 注
从宇宙站	1.530~ 1.544	1, 2, 3	卫星水上移动	按 ITU1979 年有关 文件, 规定我国位 于第 3 区域 (卫星固定)
到地面站	1.544~ 1.545	1, 2, 3	卫星移动	
	1.545~ 1.559	1, 2, 3	卫星航空移动	
	2.500~ 2.690	1, 2, 3	卫星广播	
	3.400~ 4.200	1, 2, 3	卫星固定	
	4.500~ 4.800	1, 2, 3	卫星固定	
	7.250~ 7.750	1, 2, 3	卫星固定	
	10.700~11.700	1, 2, 3	卫星固定	
	11.700~12.000	3	卫星广播	
	12.500~12.750	3	卫星广播	
	17.700~21.200	1, 2, 3	卫星固定	
	22.500~23.000	2, 3	卫星广播	
	37.500~40.500	1, 2, 3	卫星固定	
	40.500~42.500	1, 2, 3	卫星广播	
从地面站	0.406 ~ 0.4061	1, 2, 3	卫星移动	
到宇宙站	1.6265~ 1.6455	1, 2, 3	卫星水上移动	
	1.6455~ 1.6465	1, 2, 3	卫星移动	
	1.6465~ 1.6605	1, 2, 3	卫星航空移动	
	5.650 ~ 7.075	1, 2, 3	卫星固定	
	7.900 ~ 8.400	1, 2, 3	卫星固定	
	12.750 ~13.250	1, 2, 3	卫星固定	
	14.000 ~14.800	1, 2, 3	卫星固定	
	17.300 ~17.700	1, 2, 3	卫星固定	
	27.000 ~31.000	2, 3	卫星固定	

1.3.2 电波传播的特点

卫星通信用的无线电波, 主要在大气层以外的自由空间内传播。在目前使用的频段内, 大气层的衰减损耗与自由空间的传播衰耗相比是很小的, 故可认为电波是在自由空间内传播。这和地面微波中继通信以及对流层散射等通信系统不同, 即卫星通信的信道特性

是比较稳定的,通常可以看作恒参信道。当然,根据具体情况,有时还必须考虑对流层和电离层的影响。

1.4 通信卫星

1.4.1 卫星的运动轨道

一、运动轨道

通信用的卫星视使用目的和发射条件的不同,可以有不同高度和不同形状的轨道。但是它们有一个共同点,就是它们的轨道平面都通过地球重心。卫星运动所在的轨道面称为轨道平面。如果卫星的轨道平面在赤道平面内,卫星轨道称为赤道轨道;如果轨道平面与赤道平面有一定的夹角,称为倾斜轨道;如果轨道平面通过地球的两极附近,则称为极轨道。

卫星轨道平面与赤道平面的夹角,称为轨道倾角。卫星环绕地球一周所需的时间称为运行周期。因为地球总是在自转,所以一般地说,虽然一个卫星的轨道倾角和运行周期是一定的,但从地球上某一点来观察,间隔一周期后的位置并不相同。

卫星的轨道可以是圆形或椭圆形。但是,不论轨道形状如何,卫星的运动总是服从万有引力定律的,可以把它看成是受中心力作用的质点运动,根据万有引力定律,该中心力为

$$F = G \frac{Mm}{R^2} = \mu \frac{m}{R^2} \quad (1-1)$$

式中, G 为万有引力常数($6.67 \times 10^{-20} \text{ km}^3 / \text{kg} \cdot \text{s}^2$); M 为中心质点(地球)的质量($5.977 \times 10^{24} \text{ kg}$); m 为运动质点(卫星)的质量; R 为质点间(地球到卫星)的距离; $\mu = GM$ 为开卜勒常数($3.986 \times 10^5 \text{ km}^3 / \text{s}^2$)。

因为卫星与地球相比,它的质量是很小的,对地球的影响可以忽略。所以,在以地球中心为原点的直角坐标系中,由万有引力的三个分量,可以得出著名的开卜勒定律:

第一定律:卫星以地球中心为一焦点,作二次曲线运动。

第二定律:连接卫星与地球质量中心的矢径,在单位时间内所扫过的面积相等。

第三定律:卫星绕地球公转周期的平方,与椭圆半长轴的立方成正比。

由第一定律知道,卫星的轨道一般是椭圆形,但在特殊情况下,可以是圆形,此时地球中心就是圆轨道的圆心。

由第二定律知道,卫星在椭圆形轨道上运行时,它在远地点的速度最小,而在近地点的速度最大。当在圆形轨道上运行时,卫星作匀速圆周运动。

由第三定律知道,当卫星在半长轴为 a 的椭圆形轨道上运行时,它的周期 T 为

$$T = 2\pi \left[\frac{a^3}{\mu} \right]^{1/2} = 2\pi \left[\frac{a^3}{GM} \right]^{1/2} \quad (1-2)$$

当卫星按圆形轨道运行时,设它在轨道上的切线速度为 v ,则其所受的向心力必然是

地球对它的引力，因而有下式存在

$$\frac{mv^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2} = \frac{\mu m}{R^2} \quad (1-3)$$

由上式可以得到卫星在轨道上的切线速度 v 为

$$v = \left(\frac{GM}{R} \right)^{1/2} = \left(\frac{\mu}{R} \right)^{1/2} \quad (1-4)$$

若卫星在圆形轨道上运行，并设卫星离地面的垂直高度为 h ，地球的半径为 R_e (6 370 km)，则(1-2)式和(1-4)式可分别表示为

$$T = 2\pi \left[\frac{(R_e + h)^3}{GM} \right]^{1/2} \quad (1-5)$$

$$v = \left[\frac{GM}{R_e + h} \right]^{1/2} \quad (1-6)$$

由(1-5)式和(1-6)式可见，当卫星围绕地心作匀速圆周运动时，运行周期 T 和切线速度 v 与卫星的质量 m 无关，只随离地面的垂直高度 h 而变化。如果卫星在赤道平面内自西向东(与地球自转方向相同)作圆周运动，而且其周期恰好为一个恒星日(23 小时 56 分 4.09 秒)，则卫星与地球呈相对静止状态，这时由地面上的某点观察卫星它是静止不动的，因此称为静止卫星。这种轨道称为静止轨道，习惯上常称之为同步轨道。由(1-5)式和(1-6)式可以分别算出静止卫星的高度 $h = 35\,860\text{ km}$ ，匀速圆周运动的速度 $v = 3.07\text{ km/s}$ 。

对地静止轨道只有一条，即使卫星的间隔按 2° 配置，在同步轨道上最多只能配置 180 颗卫星。因而如何共享同步轨道资源是世界各国十分关注的一个重要问题。国际上曾多次开会协商解决同步轨道位置的分配问题，以便充分利用这一空间资源。我国的实验通信卫星 STW-1 现在分配的位置为 $E125^\circ$ ，另外还申请了 $E103^\circ$ 、 $E65^\circ$ 、 $E80^\circ$ 和 $E95^\circ$ 等位置，作为广播电视和国内卫星通信使用。

二、摄动

上面所讲的卫星运动轨道，是把地球和卫星都当作理想球体，而且是在不考虑地球以外引力的情况下得到的。也就是把地球和卫星都看成质点(理想球体)之间的问题来讨论的。但是，实际上地球并不是理想球体，而且卫星除了受地球引力外，还受到月球、太阳等引力，这些作用又随时间的推移而有所不同，其结果必定使卫星的轨道参数也随时间而变化，并偏离由开卜勒法则所确定的轨道，这种现象称为摄动。引起摄动的主要因素有如下几个方面：

(1) 地球扁平度引起的摄动。地球的形状近似于一个在赤道部分稍有膨胀的扁平的旋转椭球体。这种扁平形状改变了地球周围的引力场的理想分布，从而使卫星偏离预定的轨道。

(2) 地球以外的引力影响。除了地球以外，月球和太阳对卫星也是有引力的。特别是对轨道比较高的静止卫星，影响更为显著。对静止卫星来说，太阳的引力约为地球引力的 $1/37$ ，月球的引力约为地球引力的 $1/6\,800$ ，由于这些原因，静止卫星的轨道倾角变

化,最大可接近于每年 1° 。

(3) 地球大气的影响。高度较低的卫星运行时会受到大气阻力,阻力大小与大气密度、卫星形状及运行速度有关。结果使卫星的椭圆轨道的远地点逐渐降低,以致趋于圆形轨道。

以上因素是一直作用于卫星上的,它们使卫星渐渐地偏离预定位置。对静止卫星来说,地球结构不均匀将使卫星环绕速度发生变化,即产生漂移。而月球和太阳的影响,也会使卫星产生漂移。因此,在卫星上都装有横向和轴向的喷射推进装置,通过调整以保持卫星位置的稳定。

1.4.2 静止卫星

要利用卫星进行全球通信,要适当地配置若干个通信卫星,配置方法与卫星制式有关。到目前为止,提出过三种典型的卫星制式:

(1) 随机卫星制。它是由高度为几千到一万公里的不同随机轨道上的许多个卫星组成的,利用这种卫星进行通信时,每个地面站要架设两部能够旋转的天线,交替跟踪可以“看”到的卫星。由于卫星数目多,地面站庞大等缺点,很少采用它。

(2) 相位卫星制。它是在轨道上均匀地配置若干个卫星,进行通信的地面站则依次转换使用这些卫星。这种系统需要 10 个左右的卫星,比前一种实用价值高,在某些特定场合使用。

(3) 静止卫星制。这种卫星与地球呈相对静止状态,地面站可只用一部天线,而且不需要在大范围内转动,如图 1-5 所示。从一颗卫星向地球引两条切线,切线间的夹角约为 17.34° 。这样,在赤道上空配置 3~4 颗卫星,就可建立全球通信。这种卫星制式除两极盲区无法通信外,经济上和使用上都是最好的卫星制式。下面着重介绍一下静止卫星的有关问题。

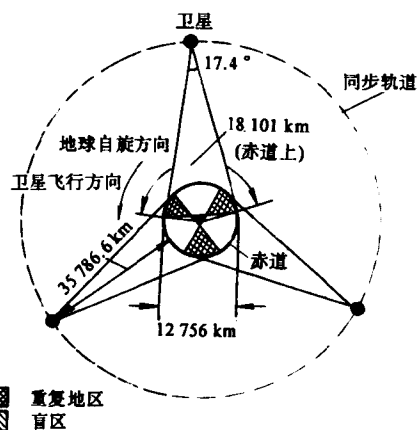


图 1-5 静止卫星制式

一、静止卫星的观察参数

卫星通信是利用直线传播的电磁波来传递信息的。这就要求地面站的天线要时刻指向卫星。通常把地面站天线的轴线指向静止卫星的方位角、仰角和距离总称为静止卫星的观察参数。

静止卫星的观察参数如图 1-6 所示。图中以 S 表示静止卫星; D 表示地面站; O 表示地球中心; M 表示卫星 S 与地球中心 O 的连线在地球上的交点,称之为星下点;地面站 D 与星下点 M 的连线(即地面站指向卫星的连线在地面上的投影)称为地面站天线指向卫星的方位线 K ;地面站与卫星的连线称视线 d ,也就是地面站与卫星间的距离,视线与方位线所在的平面称方位面。

静止卫星与地面站的几何关系如图 1-7 所示。图中 R_e 为地球半径； λ 为地面站经度与星下点经度差（注意正、负号）； ρ 为地面站与星下点之间的纬度差； β 为地面站与星下点之间的弧线所对的圆心角（小于 180° ），也叫地面站中心角； O 为地球中心； A 为地面站所在经线与赤道的交点。其它符号意义与图 1-6 相同。

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(180^\circ - \varphi) &= \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\sin \rho} \\ \varphi &= \arctg\left(\pm \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\sin \rho}\right) \end{aligned} \quad (1-7)$$
$$OB = (R_c + h) \cos \beta = R_c + d \sin \theta$$

$$\text{即 } \sin \theta = \frac{\left[\frac{(R_c + h)}{R_c} \cos \beta - 1 \right]}{\frac{d}{R_c}} \quad (1-8)$$

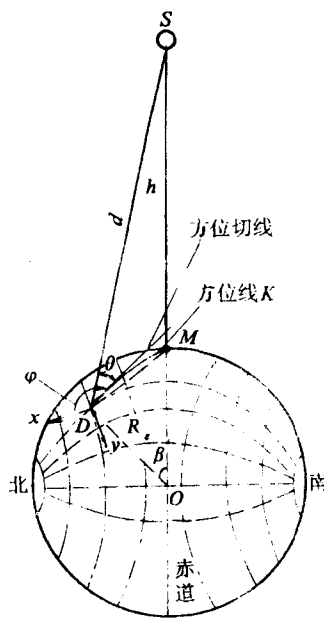
$$\cos \beta = \cos \rho \cdot \cos \lambda \quad (1-9)$$
$$d = \left[(R_e + h)^2 + R_e^2 - 2(R_e + h)R_e \cos \beta \right]^{1/2} \quad (1-10)$$
$$\theta = \arcsin \left[\frac{k \cos \lambda \cos \rho - 1}{(k^2 + 1) - 2k \cos \lambda \cos \rho} \right] \quad (1-11)$$


图 1-6 静止卫星的观察参数

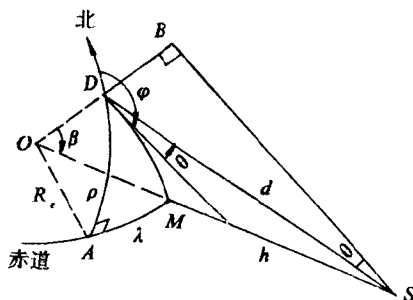


图 1-7 地面站与静止卫星的几何关系

式中, $k = (R_e + h) / R_e$. 同样, 在 $\triangle DOS$ 中可得

$$\frac{d}{\sin\beta} = \frac{R_e + h}{\sin(90^\circ + \theta)} \quad (1-12)$$

在球面直角三角形 $\triangle ADM$ 中, $\widehat{DM} = \beta$, 由三角公式

$$\sin\beta = \frac{\sin\lambda}{\sin(180^\circ - \varphi)} = \frac{\sin\lambda}{\sin\varphi} \quad (1-13)$$

将(1-13)式代入(1-12)式中经整理后得到地面站与静止卫星间的距离 d 为

$$d = (R_e + h) \frac{\sin\lambda}{\cos\theta \cdot \cos\lambda} \quad (1-14)$$

二、确定静止卫星通信范围的因素

1. 静止卫星的覆盖区及可通信区

从静止卫星引向地球的切线所包围的区域称为静止卫星的覆盖区, 即地面站天线仰角 $\theta = 0^\circ$ 时正好能观察到卫星的边缘线所包围的地面区域. 如图(1-8)中 $\widehat{TT'}$ 弧线所包围的区域.

由于地形、地物及地面噪声的影响, 天线仰角 $\theta = 0^\circ$ 时, 是不能进行有效通信的. 实践表明: 在 $\theta \geq 5^\circ$ 时, 才能有效地减小大气吸收和雨、雾产生的衰减及地面噪声的影响. 通常把该 θ 值称为天线最低角 $\theta_{\min}$. 也就是说, 只有 $\theta \geq 5^\circ$ 的区域, 才能在地面站与静止卫星间进行有效通信. 因此, 把天线最低仰角的边缘线所包围的地面区域称为静止卫星的可通信区. 如图 1-8 中 $\widehat{EE'}$ 弧线所包围的区域.

由图 1-8, 利用正弦定理可得出地面站的中心角 β 与天线仰角 θ 之间的关系如下

$$\frac{R_e}{R_e + h} = \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\theta} \quad (1-15)$$

由上式可见, 当 β 增加时, θ 减小, 故地面站离星下点愈远, 地面站天线仰角 θ 愈小.

2. 静止卫星通信中的最大传输时延

当卫星高度增加时, 可以增大卫星通信的范围, 但是信号的传输时延也会增加. 由图 1-8 可以求出信号的最大传输时延 τ_m 为

$$\tau_m = \frac{2d}{c} = \frac{2(R_e + h)}{c} \cdot \frac{\sin\beta}{\cos\theta_{\min}} \quad (1-16)$$

式中, c 为光速. 在静止卫星通信情况下, 可以求得 $\tau_m = 0.27$ s.

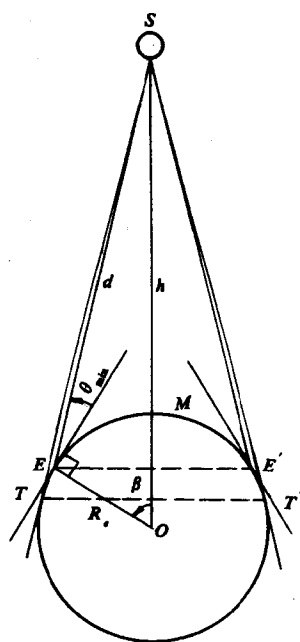


图 1-8 静止卫星的覆盖区及可通信区