

通信工程丛书

卫星通信系统

(修订本)

蔡剑铭

吕海寰 甘仲民 编著

陈九治

中国通信学会主编·人民邮电出版社出版

目 录

第一章 概述	1
1.1 卫星通信的一般概念	1
1.1.1 卫星通信的含义及卫星通信系统的分类	1
1.1.2 卫星通信发展概况	7
1.1.3 卫星通信的特点及其在技术上带来的一些问题	9
1.2 卫星通信系统的组成、网络形式和运行	12
1.2.1 系统的组成	12
1.2.2 卫星通信网络的结构	16
1.2.3 系统的工作过程	17
1.3 卫星通信线路计算的基本公式	19
1.3.1 接收信号的功率	19
1.3.2 传输损耗	23
1.3.3 噪声与干扰	45
1.3.4 卫星通信线路中的载波功率与噪声功率比	74
1.3.5 卫星通信线路计算的一般任务	94
1.4 卫星通信使用的频率	98
1.4.1 频率分配	98
1.4.2 卫星通信频率范围选用的依据	108
1.4.3 当前卫星通信使用的频段	111
附录 I 微波波段的划分	113
附录 II 模拟制信号传输的假设参考电路和国际卫星通信组织 IS—N 系统的噪声分配	114

参考文献	116
第二章 通信卫星	119
2.1 卫星的轨道	119
2.1.1 卫星运动的轨道及主要参数	119
2.1.2 卫星的摄动	126
2.1.3 星蚀及日凌中断	127
2.1.4 轨道平面的倾斜效应	129
2.1.5 通信卫星的姿态稳定技术	131
2.1.6 静止卫星的发射过程	134
2.2 静止卫星轨道的有效利用	137
2.2.1 静止卫星轨道的分配与管理	137
2.2.2 静止卫星轨道的有效利用	139
2.3 通信卫星的覆盖区及传输迟延时间	145
2.3.1 全球波束覆盖区的几何关系	145
2.3.2 对准静止卫星时地球站天线主波束的方位角和仰角	147
2.3.3 卫星信道的传输时延及回波的抑制或抵消	150
2.4 静止卫星的组成	154
2.4.1 天线分系统	156
2.4.2 通信分系统(转发器)	160
2.4.3 电源分系统	163
2.4.4 跟踪、遥测、指令分系统	164
2.4.5 控制分系统	164
2.5 通信卫星简介	165
2.5.1 对地静止通信卫星实例—国际通信卫星 IS—V	165
2.5.2 一些主要的在轨对地静止通信卫星简介	171
2.5.3 对地非静止通信卫星的实例	186

附录 几个公式的推导	188
参考文献	194
第三章 卫星信道中信号的传输	196
3.1 模拟信号的传输	196
3.1.1 频率调制的几个基本问题	196
3.1.2 电话线路的调频传输带宽	209
3.1.3 电话线路的加权信噪比	214
3.2 数字基带信号的传输—语音	231
3.2.1 连续可变斜率增量调制(CVSD)方式	231
3.2.2 差分脉码调制(DPCM)和自适应差分脉码调制(AD-PCM)方式	237
3.2.3 声码器(Vocoder)	241
3.2.4 几种新型话音编码器的比较与评述	245
3.2.5 TDM-PCM 电话的传输标准	248
3.2.6 数字话音插空(DSI)技术	253
3.2.7 数字话路倍增设备(DCME)	263
3.3 数字基带信号的传输—数据	271
3.3.1 数据的代码及传输方式	274
3.3.2 传输控制电路	286
3.3.3 DTE 与 DCE 的物理接口标准	293
3.3.4 数据链路通信协议—HDLC 协议	307
3.3.5 广域网的 X.25 建议	320
3.4 数字信号的调制与解调	333
3.4.1 几种数字信号的调制方式	335
3.4.2 目前设备中常用的调制方式(数字化)	343
3.4.3 用电话线路传输数据所需的 Modem	364
3.5 数字卫星通信中的差错控制	371
3.5.1 自动要求重发(ARQ)方式	372

3.5.2 前向纠错(FEC)方式	376
3.6 格状编码调制—TCM	394
3.6.1 概述	394
3.6.2 TCM 的基本原理	396
3.7 扰码	402
3.7.1 扰码的作用	402
3.7.2 实施方法	403
3.8 线路要求的 $[C/n_0]$ 与 $[E_b/n_0]_{dB}$ 的关系	405
3.8.1 未采用纠错编码情况	406
3.8.2 采用纠错编码情况	407
附录 信道带宽与滚降系数的关系	411
参考文献	413
第四章 卫星通信体制导论	420
4.1 卫星通信体制的基本内容	420
4.2 多址联接方式的概述	422
4.2.1 实现多址联接的依据	422
4.2.2 几种常用的多址联接方式	429
4.3 多址分配制度	436
4.3.1 多址分配制度的含义	436
4.3.2 几种常用的多址分配制度	437
4.3.3 采用不同分配制度时转发器通道数及各地球站载波数的计算	447
4.3.4 与提高通道利用率有关的若干措施	453
4.3.5 按申请全可变分配的控制方式	455
4.4 几种常用的体制类型	461
附录 欧兰—B 公式及欧兰表	462
参考文献	478

第五章 频分多址(FDMA)方式	479
5.1 FDMA 的基本原理与特点	479
5.1.1 基本原理	479
5.1.2 FDMA 的特点	481
5.2 频分多址卫星通信系统中的互调	482
5.2.1 行波管放大器非线性特性的影响	482
5.2.2 互调的基本分析	485
5.2.3 减小互调干扰的主要措施	495
5.3 多路复用的 FDMA 系统——模拟制	510
5.3.1 概述	510
5.3.2 模拟制多路复用的 FDMA 系统	512
5.4 多路复用的 FDMA 系统——数字制 IDR	519
5.4.1 IS 系统的 IDR	519
5.4.2 IDR 的工作方式及有关规范	521
5.4.3 单址地球站 IDR 业务的工作过程	524
5.4.4 多址地球站 IDR 业务的工作过程	528
5.4.5 IDR 数字 MODEM 终端设备与末端设备	530
5.4.6 IDR 系统的同步问题——多普勒/准同步缓冲器	537
5.4.7 IDR 业务射频带宽求法	544
5.4.8 线路计算	545
5.5 SCPC 系统	549
5.5.1 概述	549
5.5.2 预分配的 DM(PCM)—PSK—SCPC 系统	551
5.5.3 预分配的 FM—SCPC 系统	566
5.5.4 SCPC—DA 系统	567
5.5.5 传输线路参数的计算	577
附录 I 利用等幅双波测得的 $[C/I]_2 \sim [BO_i]$ 预测等幅多波 ($n >$	

2) 工作时的 $[C/I]_n \sim [BO_i]$	584
附录 II 微波相位噪声	587
参考文献	595
第六章 时分多址(TDMA)方式	598
6.1 TDMA 方式的基本概念	599
6.1.1 帧结构	599
6.1.2 实现突发式发射与接收的方法	602
6.1.3 系统定时	603
6.2 帧长的选择	605
6.2.1 系统传输的比特速率 R_b	606
6.2.2 帧长与取样周期的关系	606
6.2.3 分帧长度 T_f	607
6.2.4 帧效率 η_f	607
6.2.5 选择帧长需考虑的因素	608
6.3 初始捕获与分帧同步	609
6.3.1 初始捕获的方法	609
6.3.2 同步方法与同步精度	613
6.4 报头检测	614
6.4.1 独特码(UW)的检测	615
6.4.2 载波与比特定时恢复	621
6.5 数字语音插空和纠错编码技术的应用	628
6.5.1 数字语音插空技术(DSI)的应用	628
6.5.2 纠错编码技术在 TDMA 中应用举例	629
6.6 与地面线路的接口	632
6.6.1 与模拟 FDM 线路的接口	632
6.6.2 与数字 TDM 线路的直接数字接口(DDI)	634
6.7 卫星交换一时分多址(SS-TDMA)	636
6.7.1 SS-TDMA 的基本特点	636

6.7.2 SS-TDMA 的帧同步	637
6.7.3 交换矩阵以及转换序列的排列	639
6.8 TDMA 线路计算	641
6.8.1 转发器工作点的选择	641
6.8.2 线路计算的基本公式	645
6.8.3 TDMA 系统容量的估算	645
6.8.4 举例	647
附录 相位模糊问题	649
参考文献	652
第七章 随机联接时分多址(RA/TDMA)方式	656
7.1 引言	656
7.2 ALOHA 方式	658
7.2.1 工作过程	658
7.2.2 ALOHA 方式的信道利用率	661
7.2.3 SREJ-ALOHA(选择重发 ALOHA)	664
7.3 S-ALOHA 方式	665
7.3.1 基本工作过程及信道利用率	665
7.3.2 优先等级问题	666
7.3.3 容纳站址数的估算	667
7.4 R-ALOHA 方式	667
7.5 小结	673
参考文献	677
第八章 码分多址(CDMA)方式	680
8.1 概述	680
8.1.1 码分多址的基本原理	680
8.1.2 码分多址方式的主要优缺点	683
8.2 直接序列调相码分多址方式(CDMA/DS)	687

8.2.1 系统的组成与工作过程	687
8.2.2 CDMA/DS 系统的性能分析	691
8.2.3 CDMA/DS 方式的地址码设计	701
8.2.4 CDMA/DS 卫星通信线路的同步	707
8.3 跳频码分多址方式(CDMA/FH)	718
8.3.1 CDMA/FH 方式同 CDMA/DS 方式的对比	718
8.3.2 跳频图案的设计	719
8.3.3 跳频扩频用的频率合成器	723
附录 寻找 m 序列优选对的一种方法	728
参考文献	730

第九章 VSAT 与 VSAT 网络 732

9.1 概述	732
9.1.1 VSAT 的概念、特点与发展	732
9.1.2 VSAT 发展迅速的原因	734
9.1.3 VSAT 发展的状况	737
9.2 VSAT 系统分析	739
9.2.1 引言	739
9.2.2 VSAT 网	739
9.3 多址方式	744
9.3.1 多址方式与性能比较	744
9.3.2 响应时间的估算	754
9.3.3 VSAT 网的容量	756
9.4 VSAT 数据网的数据通信协议	757
9.4.1 VSAT 网中分层通信结构	758
9.4.2 VSAT 数据网特点	762
9.5 第二代 VSAT 系统	766
9.5.1 网络结构	766
9.5.2 多址入网协议—通报式随机多址方式	776

9.5.3 网络的监控管理	782
9.5.4 VSAT 系统中噪声与干扰的分析计算	786
9.6 VSAT 网的新应用与新网络概念	789
9.6.1 VSAT 站的分类与 VSAT 技术	789
9.6.2 利用 VSAT 实现卫星广域网(SWAN)	795
9.6.3 VSAT 网与移动通信系统相结合	798
9.7 利用 VSAT 卫星通信系统的综合业务数字网络(ISDN)	799
9.7.1 引言	799
9.7.2 卫星 ISDN 的性能要求	800
9.7.3 卫星 ISDN 的实现	803
9.8 发展趋势	810
参考文献	814
第十章 几种卫星通信系统	817
10.1 国际卫星通信系统(INTELSAT)	817
10.1.1 概述	817
10.1.2 空间段	822
10.1.3 地面段	836
10.1.4 具体应用举例	837
10.2 国内卫星通信系统	842
10.2.1 概述	842
10.2.2 中国国内卫星通信系统	850
10.3 移动业务卫星通信系统(MSS)	853
10.3.1 概述	853
10.3.2 国际海事卫星通信系统(INMARSAT)	859
10.3.3 陆地移动业务卫星通信系统	866
10.3.4 航空移动业务卫星通信系统	872
参考文献	880

第十一章 卫星通信系统总体的若干问题	884
11.1 静止通信卫星定点位置的优选	884
11.1.1 与同频段卫星网络间的协调	884
11.1.2 轨道位置对地球站天线仰角的影响	884
11.1.3 轨道位置对星蚀的影响	886
11.1.4 轨道位置对服务区视在大小的影响	887
11.1.5 基本结论	890
11.2 卫星通信系统的经济成本分析	891
11.2.1 经济成本分析比较的必要性及基本方法	891
11.2.2 卫星通信系统的成本估算	892
11.2.3 地球站经济成本优化选择举例	898
11.3 FDMA 系统中卫星转发器容量和链路性能的优化设计	903
11.3.1 优化设计的必要性	903
11.3.2 每载波多路(MCPC)的载波排列及链路性能的优化	904
11.3.3 每载波单路(SCPC)的载波排列及链路性能优化	907
11.4 同频段系统间的干扰与协调	923
11.4.1 系统间的干扰类型	923
11.4.2 无线电规则的有关规定	924
11.4.3 地球站的协调区域	929
11.5 卫星通信系统的可靠性	934
11.5.1 常用的几种通信可靠性尺度	934
11.5.2 复杂系统的可靠度计算	937
11.5.3 通信卫星的可靠性	938
11.5.4 地球站的可靠性	940
11.6 卫星通信用的保密技术	941

11.6.1	用固态器件实现的单次密码器.....	942
11.6.2	公钥密码系统.....	942
11.6.3	数字签名.....	945
11.6.4	多路复用和密码术的结合.....	945
11.6.5	前向纠错和密码术的结合.....	948
11.6.6	小结.....	950
11.7	结束语—发展趋势.....	951
	参考文献.....	953

第一章 概 述

1.1 卫星通信的一般概念

1.1.1 卫星通信的含义及卫星通信系统的分类

(1) 什么是卫星通信

卫星通信,简单地说,就是地球上(包括地面、水面和低层大气中)的无线电通信站之间利用人造卫星作中继站而进行的通信。

图 1.1 中画出一一种比较简单的卫星通信系统。它只用一颗通信卫星,卫星天线的波束,覆盖了全部通信站所在的地域,各通信站天线均指向卫星。这样各站都可通过卫星转发来进行通信。由此可见,卫星通信是地面微波接力通信的继承和发展,是微波接力通信的一种特殊形式。

大家知道,微波是直线传播的,微波接力通信是一种“视距”通信,即只在“看得见”的范围内才能通信。由图 1.2 可见,离地球表面高度为 h_E 的卫星中继站,“看到”地面的两个极端是 A 和 B 点,换句话说, $\widehat{AB}$ 长度将是卫星为中继站所能达到的最大通信距离。利用几何学不难得知

$$\widehat{AB} = R_E \phi_2 = R_E (2 \cos^{-1} \frac{R_E}{R_E + h_E}) (\text{km}) \quad (1.1)$$

式中: R_E 为地球半径, $R_E = 6378 \text{ km}$; ϕ_2 为 $\widehat{AB}$ 所对的圆心角(弧度); h_E 为通信卫星到地面的高度(km)。让我们用两个例子说明卫星高度对地面上最大通信距离的影响:

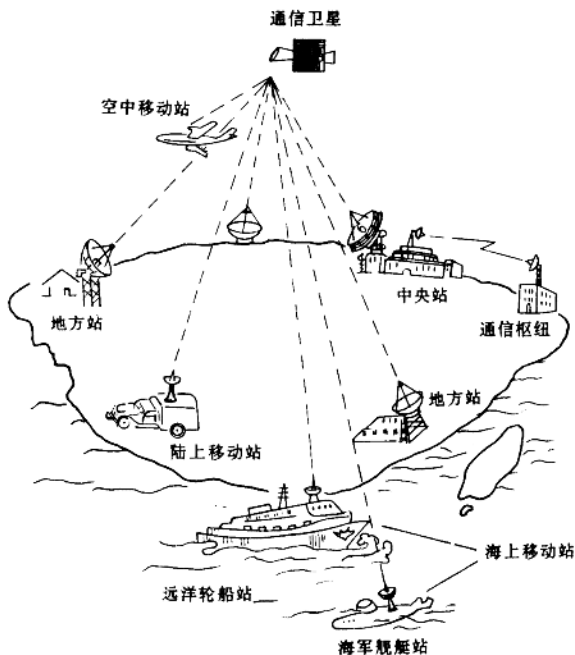


图 1.1 卫星通信示意图

【例】 $h_E = 500\text{km}$, $\phi_2 = 0.767\text{rad}$, 按(1.1)式求得

$$\widehat{AB} = 6378 \times 0.767 = 4892(\text{km})$$

【例】 $h_E = 35800(\text{km})$, $\phi_2 = 2.838(\text{rad})$

$$\widehat{AB} = 6378 \times 2.838 = 18100(\text{km})$$

在第二章我们将看到,地球卫星的轨道形状有椭圆形和圆形两种,地球的中心(简称地心)就处在椭圆的一个焦点或圆心上。按照轨

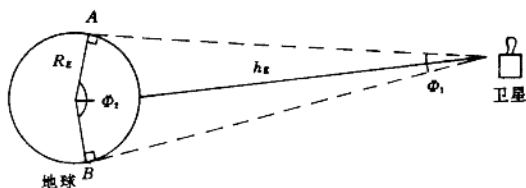


图 1.2 卫星作为中继站时通信最大距离的计算

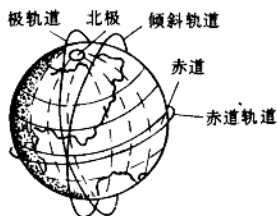


图 1.3 通信卫星的轨道

道平面与赤道平面的夹角 i (称为轨道倾角) 大小不同, 如图 1.3 所示, 地球卫星的轨道有赤道轨道 ($i=0^\circ$)、极轨道 ($i=90^\circ$)、倾斜轨道 ($0^\circ < i < 90^\circ$) 之分。若卫星的轨道是圆形且在赤道平面上、卫星离地面 35786.6 公里, 其飞行方向与地球自转方向相同, 则从地面上任一点看去, 卫星是“静止”不动的, 这种对地静止的同步

卫星简称为静止卫星。利用静止卫星作为中继的通信系统, 称为静止卫星通信系统。

目前, 几乎所有的通信卫星都是有源卫星, 即卫星上装载电子设备, 能将接收到的来自地球站发射的信号进行放大、频率变换和其它处理, 再发回地球, 是一种有增益的可以部分地补偿传播损耗的中继。在五、六十年代进行卫星通信试验时, 曾利用过无源卫星。这种卫星是靠星体的金属表面对无线电波进行反射作为中继的。可以想到, 由于自由空间的传播损耗、卫星表面的吸收损耗和反射的无规则性, 通信质量是很差的。

卫星通信的频率使用微波频段 (300 兆赫 ~ 300 吉赫), 其原因, 除了可获得通信容量大的优点之外, 主要是考虑到卫星处于外层空

间(即在电离层之外),地面上发射的电磁波必须能穿透电离层才能到达卫星,同样,从卫星到地面上的电磁波也必须穿透电离层,而微波频段恰好具备这一条件。

由于作为中继站的卫星处于外层空间,这就使得卫星通信。不同于其它地面无线电通信方式,而属于宇宙通信的范畴。

随着航天技术的巨大进展,人类的活动领域已扩大到地球大气层以外的空间。为了满足宇宙航行中传递信息的需要,宇宙(空间)无线电通信*也随之而发展起来。国际电信联盟(ITU)的国际无线电咨询委员会(CCIR)从1959年开始把宇宙(空间)通信列为新的课题,不断提出许多重要的技术建议。1963年,召开了世界临时无线电行政会议(EARC),为宇宙通信制定了规则,分配给10吉赫以下的频带。1971年,又为宇宙通信召开了世界无线电行政会议(WARC),把分配的频带扩展到275吉赫;修订了有关的技术标准;并且对宇宙无线电的术语及其定义作了统一的规定。1979年WARC又作了新的规定:

宇宙(空间)无线电通信有三种形式:

- ① 宇宙站与地球站之间的通信;
- ② 宇宙站之间的通信;
- ③ 地球站相互间通过宇宙站的转发或反射而进行的通信。

这里,宇宙站是指设在地球大气层之外的宇宙飞行体或其它天体(如月球或别的行星等)上的通信站。地球站是指设在地球表面(包括陆地、水上和大气层中)的通信站。

共同进行一定的宇宙无线电通信业务的一组地球站和宇宙站,叫做宇宙通信系统,简称为宇宙系统。

宇宙无线电通信业务包括宇宙研究业务、电波天文业务,卫星间业务、标准频率卫星业务、报时卫星业务、气象卫星业务、地球探测卫

* 包括利用一个或多个空间电台或利用一个或多个反射卫星或空间中其它物体所进行的任何无线电通信,称为空间无线电通信。

星业务、无线电导航卫星业务、无线电测位卫星业务、广播卫星业务、固定卫星业务、移动卫星业务等等。其中需要说明的是：

① 固定卫星业务 它的基本特点是地球站固定不动。地球站架设时，必须防止与其它地面微波通信系统（如同频段的微波接力）以及其它卫星通信系统之间的相互干扰。

② 移动卫星业务 这是指舰船、飞机、车辆等利用卫星进行通信的业务，包括舰船之间、飞机之间、或它们与固定站之间的通信。总之，通信双方至少其中之一是移动的。移动站使用的无线电频率，要遵守国际的有关规定（参见 1.4 节）。

③ 广播卫星业务 其业务包括电视广播和语言广播。在这种业务中，卫星上的发射机输出功率较大，信号的频谱（功率谱密度）较宽，容易造成对其它卫星通信系统的干扰，因此更要严格遵守国际规定。

综上所述，可以看出：

① 卫星通信属于宇宙无线电通信的第三种形式；通信卫星就是离地球最近的一种宇宙站；固定、移动和广播等卫星业务是宇宙通信业务的重要组成部分。正在发展的宇宙接力通信中，卫星通信将起着重要的作用。

② 卫星通信必须遵守 EARC 和 WARC 为宇宙通信制定的有关规则，工作频率必须在分配的频段中选取，以便和其它宇宙系统保持协调。

(2) 卫星通信系统的分类

今天，世界上已建立了几十个卫星通信系统，将来还要更多。归纳起来，可从不同角度对它们进行分类：