

第 1 章 卫星通信系统概述

卫星通信是指利用卫星作为中继站转发或反射无线电波,以此来实现两个或多个地球站(或手持终端)之间或地球站与航天器之间通信的一种通信方式。换言之,卫星通信是在地球上,包括地面、水面和大气层中的无线电通信站之间,利用人造卫星作为中继站进行的通信。

本章简要介绍卫星轨道、系统的组成、频率分配、卫星通信的特点、卫星通信系统的应用及发展。

1.1 卫星轨道

在卫星通信系统中,卫星是通信的重要中继站。用于通信系统的卫星可以有不同的运行轨道,而不同轨道卫星的系统在网络结构、通信方式、服务范围和系统投资等方面均有较大的差异。因此,有必要首先简单介绍有关通信卫星的轨道问题(关于轨道的详细讨论参见第 2 章)。

卫星通常围绕地球做无动力飞行,它们可视为宇宙中通过重力相互作用的两个物体。卫星围绕地球运行规律服从开普勒(Kepler)定律,轨道具有如下的特性。

(1) 卫星具有椭圆形轨道,而地球的地心 O 是椭圆的一个焦点,如图 1-1 所示。

(2) 卫星在轨道上以速度 V 运动的过程中,单位时间内地心 O 与卫星 S 的连线所扫过的面积(以轨道弧线为界)相等。

显然,卫星靠近地球时运动速度较快,而离开地球较远时运动速度较慢。

(3) 图 1-1 中 OS 为地心到卫星的距离,称为轨道半径,可用地球半径 R_e 与卫星到星下点(卫星-地心连线与地面的交点)的距离 h 之和来表示。对于椭圆轨道, $h = (h_{\max} + h_{\min})/2$,称为平均高度。显然,轨道半径等于椭圆轨道的半长轴 $[R_e + (h_{\max} + h_{\min})/2]$ 。

(4) 卫星运行周期 T 的平方与轨道半径 $(R_e + h)$ 的立方成正比:

$$T = 1.65866 \times 10^{-4} (R_e + h)^{3/2} \quad (1-1)$$

而卫星在圆形轨道上的运行速度 V 与轨道半径的平方根成反比:

$$V = 631.348 / (R_e + h)^{1/2} \quad (1-2)$$

式中,卫星运行周期为 T ,单位 min;卫星在(圆形)轨运行速度为 V ,单位 km/s;卫星平均高度 h ,单位 km;地球半径 $R_e = 6378$ km。

在卫星通信系统中,最常用的是圆形轨道,分为低轨(LEO, Low Earth Orbit)、中轨(MEO, Medium Earth Orbit)和静止轨道(GEO, Geostationary Earth Orbit)三类。LEO 系统的卫星轨道高度范围为 500 ~ 1500 km, MEO 的轨道高度为 10000 ~ 20000 km, GEO 的轨道高度为 35786 km(通常也被粗略地称为 36000 km)。运行周期为一个恒星日(23 小时 56 分 4 秒)的卫星称为同步卫星,轨道高度为 35786 km。轨道面与赤道平面相重合且轨道高度为 35786 km 的卫星称为静止轨道卫星,它与地面观察者之间保持相对静止。在 2000 ~ 8000 km 的空间有一个由范·艾伦(Van Al-

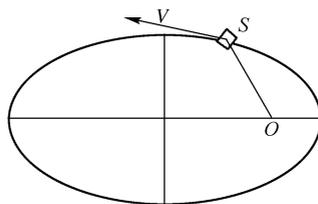


图 1-1 卫星运行轨道示意图

len)带形成的恶劣的电辐射环境,这一高度范围的空间不宜于卫星的运行。

卫星在轨道上运行时除受地球(假定为理想球形)引力影响外,还将受到诸多非理想因素的影响而产生摄动。这些因素主要有:地球形状不规则、大气阻力、太阳和月球引力等。对于LEO的近地卫星,前两种因素的影响是主要的。地球形状不规则产生的引力的变化将使轨道面发生旋转和轨道长轴在轨道面内转动(当轨道平面对赤道平面倾角为 63.4° 时,长轴在轨道面内不再转动);大气阻力将使轨道远地点不断降低,长轴缩短,运行周期减小,同时偏心率也不断变小,轨道高度越来越低,形状越来越圆,这一过程称为轨道衰减。对于GEO卫星,影响摄动的主要因素来自太阳和月球的引力,而不存在大气阻力的影响。

处于一定高度的卫星将对地面形成一定范围的覆盖区,而卫星可为覆盖区内用户之间的通信信号进行中继转发。覆盖区的范围是以某一允许的最低仰角来定义的,即覆盖区内用户对卫星的仰角都大于(或等于)某最低允许仰角。20世纪的卫星通信系统,大多采用GEO卫星。一颗GEO卫星能以零仰角覆盖全球表面的42%,三颗经度差约 120° 的卫星,能够覆盖除南、北极地区以外的全球范围。地面用户利用地球站与卫星连接的链路进行通信,从用户到卫星的距离至少有36000 km,微波链路设计应保证提供足够的接收信号功率,而用户间的单跳通信的信号传播延时可达 $1/4$ s。

由于摄动等非理想因素的影响,卫星运行的轨道是不稳定的,必须加以控制,称为轨道控制。轨道控制是对卫星的质心施加外力,以改变质心运动的轨迹。轨道控制可用于完成四种任务:变轨控制、轨道保持、返回控制和轨道交会。变轨控制是使卫星从一个自由飞行轨道转移到另一个自由飞行轨道的控制,比如,在GEO卫星发射过程中,要经过两次变轨才能使卫星进入静止轨道。图1-2所示为GEO卫星发射过程的轨道形状转换示意图。地面发射的卫星(发射点为 T)首先在 b 点进入 $150\sim 300$ km高度的圆形停泊轨道,之后末级火箭点火用于推动卫星从停泊轨道进入转移轨道GTO(Geostationary Transfer Orbit)。GTO为椭圆轨道,近地点为停泊轨道高度,远地点(图中的 a 点)为同步轨道高度(约36000 km),周期约为16 h。远地点发动机将卫星从转移轨道的远地点助推进入GEO的圆形轨道,使近地点也升高到36000 km左右。通常,这一过程除完成轨道形状的转换外,将同时实现轨道倾角的转换(将倾斜的轨道平面转换为与赤道平面的零倾角要求,即由同步轨道转换为静止轨道)。

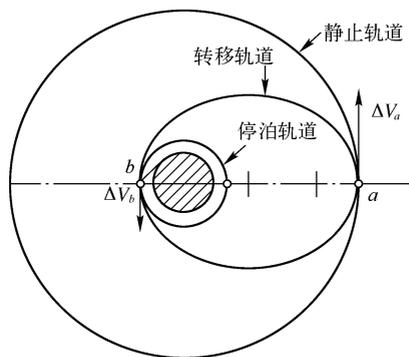


图1-2 GEO卫星的轨道转换

轨道保持用以克服各种摄动的影响,保持卫星轨道的某些参数不变。比如,为保持GEO卫星定点位置的精度(对于商业应用的静止卫星,其轨道倾斜不能大于 0.1° ,以控制卫星在轨道法线方向上的漂移范围,因为天线指向尖锐的大中型地球站的跟踪能力是有限的),需定期进行轨道修正。又比如,太阳同步轨道为保持其倾角和周期的变化在允许的范围内所实施的控制;而低轨道卫星为克服大气阻力,延长轨道寿命所进行的控制也是一种轨道保持。

使返回式卫星脱离其原有轨道而再入大气层,需要进行轨道控制。而使一颗卫星与另一颗卫星在同一时间以相同的速度到达空间同一位置,即实现两颗卫星(航天器)的交会(对接)时,也需要进行轨道控制。

除轨道控制之外,还必须对卫星的姿态进行控制。姿态控制是对卫星绕其质心施加外力

矩,以保持或按要求改变卫星在空间定向的技术。保持卫星在空间所需的定向是为了:①使卫星天线对准地面或空间的目标;②卫星进行轨道控制时,发动机应对准所要求的推力方向;③卫星再入大气层时,要求制动防热面对准迎面气流等。

姿态稳定是保持已有姿态的控制。卫星姿态稳定有自旋稳定和三轴稳定两类,前者依靠转动量矩保持自旋轴在惯性空间的指向,后者利用主动或环境力矩,保持星体三条正交轴线在某一参考空间的方向。目前,采用三轴稳定的居多。

在卫星通信系统中,也可采用低轨(LEO)或中轨(MEO)等非静止轨道(NGEO, Non-GEO)卫星。由于NGEO卫星与地球上的观察点有相对运动,为了保证对全球或特定地区的连续覆盖,以支持服务区内用户的实时通信,需要用较多数目的卫星组成特定的星座。比如,低轨卫星移动通信系统铱(Iridium)的星座由66颗高度785 km、倾角 86.4° 的卫星组成。全球星(Globalstar)的星座由48颗高度1414 km、倾角 52° 的卫星组成。低轨卫星的主要优点是,信号传播距离短,链路损耗和传播延时小,对用户终端的天线增益和发射功率要求不高。

1.2 系统的组成

1.2.1 空间段

卫星通信系统由空间段和地面段两部分组成。空间段以卫星为主体,并包括地面卫星控制中心(SCC, Satellite Control Center)和跟踪、遥测及指令站(TT&C, Tracking, Telemetry and Command station)。在TT&C站与卫星之间,有一条控制和监视的链路,通常对卫星进行下述几方面的监控。

- 在卫星发射阶段,一旦最后一级火箭释放,TT&C就必须对卫星进行跟踪和定位,并对天线和太阳能帆板的展开实施控制。
- 在系统运行过程中,对卫星的位置和轨道进行监测和校正,以便将轨道的漂移和卫星扰动控制在允许的范围内。在卫星寿命的最后阶段,轨道校正的星载燃料已基本耗尽,卫星应撤离服务岗位。GEO卫星通常的退役方法是利用剩下的少量燃料(比如2 kg),以增加速度使其轨道升高几千米,退伍的卫星将永远停泊在该轨道上。当然,卫星上的转发器应予关闭,以免干扰正常工作的GEO卫星。对于LEO卫星,如果不进行轨道校正,将由于大气阻力使轨道衰减,卫星最终会再进入大气层而被烧毁。
- 星载转发器是卫星的有效载荷,也是卫星通信系统空间段的主要组成部分。SCC可对星载转发器的输出及整个空间通信分系统进行测试、监控,并对出现的故障进行检修。
- 对由于“双重照射”形成的地区性通信干扰问题进行监测。由于地球站或卫星在某频率上错误地(可能是无意的,也可能是海盗行为,或是未经认可的卫星容量的使用)激活其发射机,对正常工作的卫星系统的覆盖区形成“双重照射”而引起严重干扰。TT&C必须迅速进行检测,探明干扰源所在,使正常业务受到的损害降到最小。

卫星星载的通信分系统主要是转发器,现代的星载转发器不仅仅能提供足够的增益(并包含从上行频率到下行频率的频率变换),而且具有(再生)处理和交换功能。

1.2.2 地面段

地面段包括了支持用户访问卫星转发器,并实现用户间通信的所有地面设施。用户可以

是电话用户、电视观众和网络信息供应商等。卫星地球站是地面段的主体,它提供与卫星的连接链路,其硬件设备与相关协议均适合卫星信道的传输。除地球站外,地面段还应包括用户终端,以及用户终端与地球站连接的“陆地链路”。当然,地球站应配备与“陆地链路”相匹配的接口(或网关)。但是,由于用户终端、“陆地链路”(通常为地面微波中继链路或光纤链路)及其接口都是地面通信网的通用设备,所以地面段常常被狭义地理解为地球站。地球站可以是设置在地面的卫星通信站,也可以是设置在飞机或海洋船舶上的卫星通信站。图 1-3 所示为地球站通过“陆地链路”与地面网节点相连接的情况。

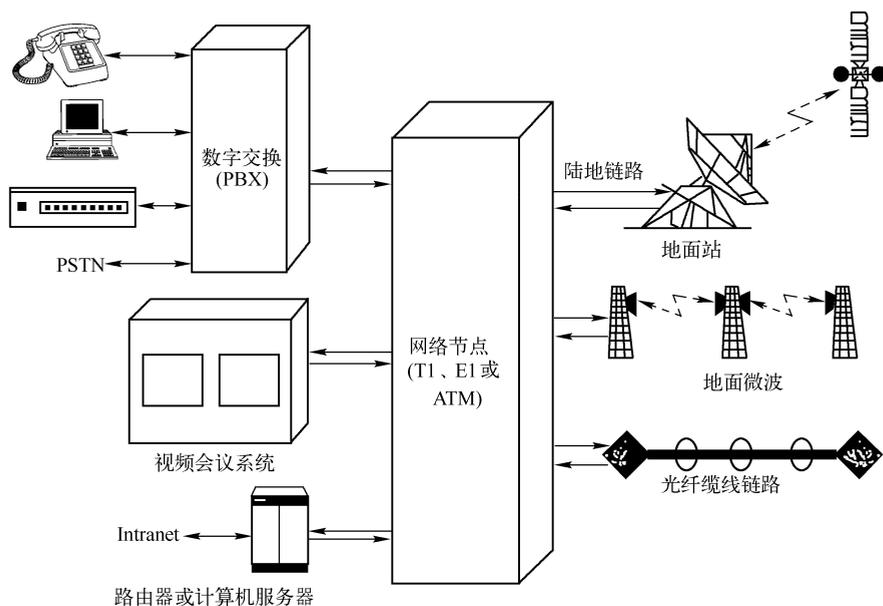


图 1-3 卫星地球站与地面网的一个节点连接的情况

1.3 频率分配

在卫星转发器与地面地球站之间,信息是利用电磁波来承载的。通常使用较高的频率天线才能有效地进行电磁波的辐射,同时有利于承载更高的信息速率。卫星通信系统常用的频率范围为 150 MHz ~ 300 GHz。然而,在不同的频段,大气(在晴天或雨天)对电波传播的影响是不同的,系统设计时需要特别考虑。

3 GHz 以下的频率区域定义了甚高频 VHF (Very High Frequency) 和超高频 UHF (Ultra High Frequency) 两个频段。VHF 的范围为 30 ~ 300 MHz,而 100 MHz 以下的频段不能用于空间通信。UHF 的范围为 300 ~ 3000 MHz。在卫星通信领域,通常认为 UHF 的范围为 300 ~ 1000 MHz。实际上这一频率范围的大部分已经为地面无线通信所占用。对于卫星系统而言,由于 UHF 频段只能传输较低的数据速率,因此通常只用于低轨小卫星 (Little LEO) 数据通信系统和静止卫星的遥测与指令系统,以及某些军用卫星通信系统。

在更高的超高频段 (SHF, Super High Frequency) 又进一步被划分为更常用的 L、S、C、X、Ku 和 Ka 等频段。各频段的频率大致范围如下:L, 1 ~ 2 GHz; S, 2 ~ 4 GHz; C, 4 ~ 7 GHz; X, 7 ~ 12 GHz; Ku, 12 ~ 18 GHz; Ka, 20 ~ 40 GHz。在卫星通信系统中,在某一频段内的上行链路

频率往往比下行频率高很多。这是因为 RF(Radio Frequency)功率放大器的效率随着频率的升高而下降,而地球站较卫星能容忍这种功放的低效率。同时,通常地球站发射功率比卫星发射功率大几十倍。几个常用的频段的上/下链路频率的习惯性表示为:L 频段 1.6/1.5 GHz,C 频段 6/4 GHz,X 频段 7/8 GHz,Ku 频段 14/12 GHz,Ka 频段 30/20 GHz。

由于卫星通信系统覆盖范围广,频率的分配和协调工作十分重要。为此,国际电信联盟(ITU, International Telecommunication Union)在有关规定中将全球划分为三个频率区域:Ⅰ区包括欧洲、非洲和俄罗斯亚洲部分、西亚地区及蒙古等,Ⅱ区包括南美洲、北美洲和格陵兰等,Ⅲ区为其他亚洲部分(包括中国)和澳洲。图 1-4 所示为频率划分的区域图。频率区域的划分有利于区域性业务的频率再用和全球业务频率的统一规划。

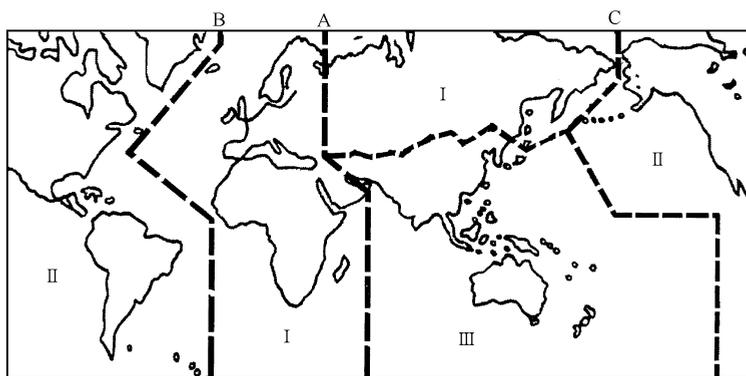


图 1-4 ITU 的频率划分区域图

按不同的业务类型对不同频段有一个大致的划分。低于 2.5 GHz 的 S 和 L 频段大部分用于移动通信业务和静止卫星测控链路的指令传输,以及特殊的卫星通信业务。多数商用卫星固定业务使用 C 频段(6/4 GHz),该频段目前已十分拥挤,且存在与地面微波中继网的同频干扰问题。Ku 频段(14/12 GHz)正在被大量利用,同时 Ka 频段(30/20 GHz)的应用已逐渐增多。

由于低频段频率资源日益紧张,使用 Ku 和 Ka 频段的系统不断增加,不久 Ku 和 Ka 频段也将趋于饱和,需要开发更高的频段资源。目前开始开发 Q 频段和 V 频段,其中 Q 频段范围为 36.0 ~ 46.0 GHz,V 频段范围为 46.0 ~ 56.0 GHz。为了支持更高的传输速率,太赫兹频段也在加紧开发中。太赫兹频率范围为 0.1 ~ 10 THz,资源丰富,容量大,可提供 10 Gbps 以上的高速传输速率,较光通信容易实现对接。但是太赫兹频段大气吸收损耗大,适合局域网或星间高速传输。此外,星间通信采用激光,可以进一步提高星间传输速率。

1.4 卫星通信的特点

由于卫星能提供较宽范围的覆盖,因此,卫星通信系统能为用户的无线连接提供很大的自由度,并能支持用户的移动性,使系统具有以下一系列优点。

(1) 卫星通信系统能以较低的成本提供较宽范围的无缝覆盖,服务范围宽且不受地理条件的限制。卫星能覆盖的范围由卫星的高度和允许的最小仰角确定,在卫星覆盖范围以内,通信成本与通信距离无关。一颗 GEO 卫星能有效地覆盖地球表面的 1/3(零仰角时能覆盖地球表面的 42%)左右,因此,三颗 GEO 卫星即可组成全球系统(南、北两极地区除外)。一颗低轨

卫星的覆盖范围虽然十分有限,但是一个完整的星座可以实现全球覆盖。卫星通信是唯一能对偏远地区、海岛、大山、沙漠、丛林等地形地貌复杂区域,以及空中和海上,提供可靠移动通信的手段,从而真正实现任何时间、任何地点的信息交流。

(2) 可利用频带宽。卫星通信系统可利用的频带很宽,从 VHF 频段(150 MHz)到目前已实用化的 Ka 频段(20/30 GHz),并在向更高的 Q(36 ~ 46 GHz)和 V(46 ~ 56 GHz)频段拓展。对于 C 频段(4/6 GHz)和 Ku 频段(12/14 GHz),可利用的频带宽度达 1 GHz。因此,卫星通信系统的容量是较大的。如果采用多波束星载天线等频率再利用技术,可进一步扩大系统的容量。此外,空间光链路正逐步成为星际通信的主流,同时,相应技术的改进和发展,将使星-地之间的激光通信成为可能。

(3) 卫星通信系统与地面通信基础设施相对独立,网络路由简捷。由于卫星提供了空间转发器,用户之间的通信不依赖于地面通信网,这对于那些地面通信基础设施不足的地区和国家(如发展中国家)具有重要意义。同时,对于建立或使用地面网需要付出高昂代价的稀业务密度地区,卫星通信系统能发挥重大作用。此外,对于跨国或全国性的公司、行业和政府部门,利用卫星通信系统构成专用数据网,就旁路了网络结构复杂的地面公用网,路由简捷、延时小,对专用网内部数据的传输和处理十分有利。

(4) 网络建设速度快、成本低。卫星通信系统与地面光纤或微波中继系统相比,不需要大量地面工程的基础设施,建设速度快。同时,系统的运行和维护费用低。在系统容量范围内,增加一个地球站的成本较低,特别是对小容量或个人终端而言所需投资更低。

(5) 卫星通信具有灵活性和普遍性。卫星通信可以不受自然条件和自然灾害的影响,如地震、雪灾、洪水等,实现全球范围的普遍服务。在快速、灵活地组成响应世界重大事件的全球视频网络业务方面,具有无可争辩的优势。

(6) 统一的业务提供商有助于系统的均匀服务,并有利于新业务的引入。通常,一个卫星通信系统由统一的业务提供商提供服务,有利于对系统内各地区提供一致(均匀)的服务,有助于建立跨国公司或行业的远程专用网,同时对个人用户(Direct PC)也较为有利。卫星通信系统对新业务的引入和对原有业务的拓展也较地面网有利。例如,为 Direct PC 用户可提供 Internet 业务、直接到户(DTH, Direct-to-home)业务,以及接入功能的数字用户线(DSL, Digital Subscriber line)等;同时,还可用 VSAT 小站(特别是工作于 Ku 和 Ka 频段的小站)支持多种类型的业务。

必须指出,卫星通信系统只是地面公用网的补充、扩展和备份。由国家、地区骨干网覆盖的高业务密度地区,利用卫星系统进行通信是不经济的,它只能作为因灾害等事故造成地面网故障时的备份。而对于广大低业务密度地区来说,使用卫星系统比建设地面网经济。同时,对于某些类型的业务和应用场合,卫星系统具有一定的优势,如视频广播(含直播系统和视频分配系统)、因特网接入、国际(越洋)通信等。

1.5 卫星通信系统的业务类型

卫星通信业务有固定卫星业务(FSS, Fixed Satellite Service)和移动卫星业务(MSS, Mobile Satellite Service)两类,与 FSS 有关的还有卫星广播业务(BSS, Broadcasting Satellite Service)。FSS 能在几兆赫甚至几十兆赫带宽内支持不同的应用,而利用甚小天线口径终端(VSAT, Very Small Aperture Terminal)工作于低业务密度地区的窄带业务,也属于 FSS。

卫星通信系统通常用于支持视频广播业务、电话等交互式业务、数据通信和因特网业务及

移动通信业务。

从应用角度来看,卫星通信可分为4个阶段:第一阶段主要用于国际通信;第二阶段开始提供电视传送;第三阶段提供国内公众通信和各种专网通信;第四阶段提供卫星移动通信。

1.5.1 卫星视频广播业务

目前,世界上运行的 GEO 卫星转发器中,有 2/3 是用于电视和视频广播的。早期的卫星电视广播是以调频方式传送模拟电视信号的,由地区电视台、有线电视网的卫星电视接收站或集体接收站进行接收,再送入家庭电视接收机。采用 C 频段(由于卫星与地面微波中继系统公用该频段,对卫星发射信号在地面的功率密度有严格限制)或中、小功率 Ku 频段卫星时,接收机天线较大。若采用大功率 Ku 频段直播卫星,也可由家庭卫星电视接收机直接接收。这种模拟传输方式占有的频带宽(每个转发器仅能传送 1~2 路电视节目),保证图像质量所需的信噪比也较高。

目前的卫星视频广播信号在演播室就已数字化了。信号数字化的最大好处是在几乎不损害视频信号质量的条件下有效地压缩数据传输速率,从而减小传输所需的带宽。目前,带宽压缩因子可达 10~20。

利用卫星广播系统传送视频信号的方式有 3 种。

- 点对多点的 TV 节目分配:数字视频信号从演播室通过卫星系统传送到地区广播站或地区电缆 TV 系统接收站,从而完成节目的分配。通常所传送的信号是宽带的多路数据流。
- 点到点的传输:用于数字视频信号从实况直播现场到演播室,或从一个演播室到另一个演播室的卫星传输。
- 点对多点的直接到户(DTH)广播方式:在卫星直播系统中,家庭用户接收机利用 0.5 m 左右的天线,可接收 5~8 路视频信号。

此外,远程教育系统是交互式视频广播系统的重要分支。

1.5.2 电话等交互式业务

电话业务是卫星通信系统支持的重要业务之一,但与地面光缆支持的 PSTN 电话网相比较,其经济性是考虑问题的焦点。卫星信道容量小、成本高,只有在地面网无法覆盖(或建立相应的地面投资极高而效益甚低)的乡村地区的用户才使用卫星电话。

GEO 卫星离地面高,信号传输延时长(约 250 ms)。如果系统用来支持电话业务,会晤双方会有脱离接触的感觉。但是,大量统计结果表明,对于经过 GEO 卫星通信系统的“单跳”电话会晤的语音质量,有 90%的用户表示可以接受。但应避免电话信号的“双跳”传输。

通信系统长的传播延时还会带来回波干扰的问题。卫星话路由发送和接收两个通道(四线)组成,它与二线本地环路用户话机之间,必须经过二-四线的转换(也称“混合”)才能进行连接。这种“混合”需要二线端的用户侧提供良好的阻抗匹配,以保证用户所接收的信号不致漏到发送支路。但是,由于众多可能被呼叫的用户是被随机接入的,严格的匹配要求是不现实的。而且,在整个通信链路中可能存在若干次的这种“混合”。于是,收听用户侧的接收信号漏至发送支路在所难免,该泄漏信号又会通过系统的发送支路回传给讲话的用户,回传信号的往返传输延时可达 0.5 s,因而,讲话的用户在 0.5 s 之后又听到自己的回声,严重影响了语音质量。为此,在卫星通信系统中通常都要采用回波抑制器,以消除回声的影响。回波抑制方法

是从接收语音数据流中提取其特征信息,并对其做出估计,用以抵消漏至发端的回波信号,这种方法也称为回波抵消法。目前,卫星系统的回波抵消器已是成熟的商业产品。

随着用户对多种业务需要的增长,要求卫星通信系统具有支持宽带多媒体业务的能力,包括:

- 具有支持高数据传输速率的能力(155 Mb/s,甚至更高)。
- 具有多路电话信道。
- 支持电视会议和可视电话业务。
- 能传输高分辨率彩色图像。
- 在因特网环境下,提供语音/数据/视频综合业务。

1.5.3 数据通信和因特网业务

数据通信网普遍采用分组交换的模式,其技术是基于某种数据协议概念的。20世纪80年代,公用和专用数据网大多是以X.25为基础的。20世纪90年代TCP/IP得到迅速的推广应用,成为分组数据网的主流技术。

在分组数据网中,传送的数据流被分成一个个分组。为了便于信息的可靠传输和处理,信息流在信源端被封装成分组时,每一分组加有报头(Header)。分组到达目的端之后,报头被去掉,并恢复为原来的信息流。同时协议还规定,目的端需要回传是否正确接收分组的确认信号给信源端。如果数据传输性能恶化而发生分组的错误和丢失,将要求信源端重传该分组。

分组交换有两种基本形式:虚电路方式(VC, Virtual Circuit)和数据报方式(DG, Data Gram)。虚电路方式是一种面向连接的技术,有连接的建立和清除过程。但是,连接不是物理链路的连接,而是由虚电路号所标识的逻辑信道的连接。数据报的传输无须预先建立连接,信源端的各数据分组沿彼此独立的路由进行传输。最典型的数据报协议是TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)的网络层协议IP。TCP利用IP数据报业务实现信息的传输功能。

国外早期兴起的VSAT系统,主要用于在主站与各远端小站之间的数据通信。具体应用有两个方面:①跨国公司或行业的专用数据网,用于总部与各连锁店(分支机构)之间的数据通信;②分级管理的计算机网,用于主机与各分机(或个人计算机)之间的数据通信。

与地面网链路相比较,卫星链路的比特差错率高且传输延时大,需要采用相应的措施。为改善卫星链路的比特差错性能,应采用前向纠错(FEC, Forward Error Correction),以减小重传概率。在接收电平出现衰落时,传输信号会产生成串的突发错误,还需要数据的交织。

为减少卫星链路长延时对数据传输效率带来的不利影响,应避免往返传输的握手信号通过卫星链路,以消除因终端长时间等待应答而不能正常发送数据的影响,同时也减轻了卫星链路传送握手信号的负担。

长延时的卫星链路用于TCP(Transmission Control Protocol)传输数据流时,其传输速率受到严格的限制,这是因为TCP协议要求链路往返延时与传输带宽的乘积(称为连接容量)小于“最大接收窗口”。若GEO卫星链路的往返延时为600 ms,而经典的TCP最大接收窗口为64(65.535)KB,于是允许的最大数据传输速率(带宽)应小于0.85 Mb/s。这种延时与带宽乘积超过64KB的数据连接,也称为“长粗管道”。为了适应长延时链路上的高速率TCP数据传输,互联网工程工作组IETF对窗口尺寸进行了修改,从65.535 KB扩展到1073.7 MB(窗口为30位的域段)。对往返延时为600 ms的GEO卫星链路,连接的最大数据传输速率可达14.3 Gb/s。

路由简捷的卫星通信网用于支持交互式业务时,交互性好的优点是突出的。如果这种交互式业务要通过地面网,由用户 PC 终端接到服务器的交互性将受到复杂网络结构的制约,交互质量将急剧下降。图 1-5 所示为用户利用 PC 将信息通过网络连接至服务器时不同路段的交互性示意图。用户与 PC 之间有很好的交互性(假定 PC 的速度足够快,功能足够强),但当信息传送经过复杂的网络云(网络结构复杂、节点多,并可能存在若干阻塞节点)时,交互性将恶化。若交互式业务通过网络结构简捷的卫星链路,可大大改善其交互性。

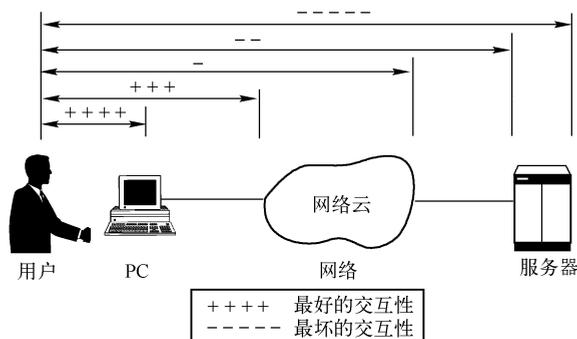


图 1-5 用户与 PC、服务器的交互性

同时,卫星网对于没有高速数据用户线的用户接入,也具有重要意义。国外开发的直接个人系统(Direct PC)能通过卫星链路提供 400 kb/s 的下载速率。

卫星系统还非常适合为不同地域的大计算机系统或计算机局域网(LAN, Local Area Networks)之间提供互连链路,其数据传输速率一般为 $N \times 64$ kb/s (N 为整数)。卫星系统也可用于连接多个 LAN 而构成广域网(WAN, Wide Area Network),由路由器将数据分组从一个 LAN 传送到另一个 LAN 的用户。

1.5.4 移动通信业务

就提供移动通信业务而言,卫星系统无论在服务质量或用户付费方面都无法与地面蜂窝网相竞争。然而,卫星具有大范围的无缝覆盖能力,使基于卫星的移动通信系统可为地面蜂窝网覆盖范围外的用户提供移动通信业务。对于这些用户,由于不在地面蜂窝网覆盖范围内,其移动通信业务只能由卫星系统来提供,称为“唯星用户”。它们是卫星移动通信系统的一类重要用户群。然而,卫星移动通信系统除了为“唯星用户”提供移动业务外,它在解决发展中国家的基本通信方面也可发挥重要作用。不少发展中国家幅员辽阔而经济发展又很不平衡,在一些边远地区和农村(包括一些矿山、海岛)还没有基本的通信手段。对于其中的某些地区来说,利用地面通信网的延伸和扩展来覆盖或者技术上是不可能的,或者经济上是不可行的。尽管利用 VSAT 固定业务卫星链路可以解决一些边远地区重要城镇的通信问题,但无法从根本上解决国家通信网的全国覆盖问题。建立卫星移动通信系统可以使覆盖区内的小型、低成本终端(可以是固定的公用电话亭,它比 VSAT 小站更经济、更方便)能通过卫星链路接入地面公用电话网。

用于移动通信系统的卫星,可以是静止轨道卫星,也可以是非静止轨道卫星。静止轨道卫星由于轨道高,信号传播损耗大,需要大的星载天线(比如,12~13 m 的 L 频段天线)。非静止轨道卫星常见的有低轨(LEO)和中轨(MEO)两种卫星,这是因为 LEO、MEO 卫星高度低,传播损耗小,有利于支持手持机进行通信。但是,为保持通信的连续性,应采用由若干颗卫星组

成的星座。

在 LEO 星座的卫星之间若有星际通信链路,则每颗卫星将成为空间网的一个节点,信号能按照所需的最佳路径进行传输,对于组织全球通信网将是十分方便和灵活的。在 LEO 星座的卫星之间也可以不用星际链路,当不同卫星覆盖范围内的用户之间需要进行通信时,必须通过各卫星覆盖区内相应的信关站,以及连接它们的地面公用网(PSTN 和地面专用线路)才能实现通信。

1.5.5 不同业务类型所需带宽

在上述的各种应用中,涉及不同业务信号的传输,它们所需的传输带宽不尽相同。图 1-6 所示为各类业务所需传输带宽的大致范围。值得注意的是,文件传输、交互式业务和电话业务等在收、发两个方向上需要传送的业务量大致相当,因此两个方向上所需带宽也大致相等。但是,文件传输、交互式多媒体业务所需带宽比电话业务所需带宽要宽。而对于广播电视,正向链路(即由广播中心至用户接收站)方向所需带宽较宽,而反向链路很窄(用于视频点播等)。同样,对于 VSAT 数据网来说,从小站至主站的反向链路所需的带宽通常大于正向链路所需带宽。数字用户链路(DSL)通常用于因特网用户浏览网页和下载文件,正向链路带宽(从服务器到用户)比反向链路(从用户到服务器)带宽要宽。

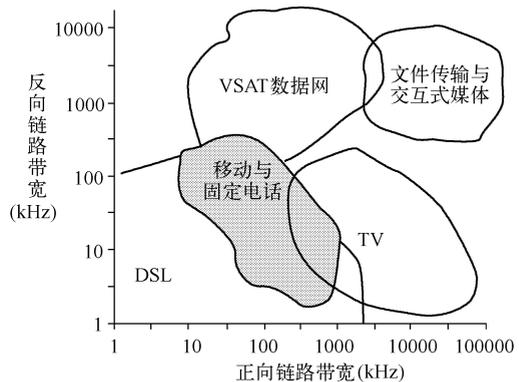


图 1-6 各类业务传输带宽

1.6 卫星通信的发展

1.6.1 卫星通信的发展历程

1945 年 10 月,英国雷达专家阿瑟·克拉克(Arthur C. Clarke)提出静止轨道卫星通信的设想,利用三颗同步轨道卫星覆盖全球。1957 年前苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星 sputnik。1958 年 12 月,美国发射了低轨道卫星“斯柯尔”,利用磁带录音,将甲站发送的信息延迟转发到乙站。1961 年,J. F. Kennedy 提出了利用卫星开展商用通信业务的概念。1962 年在最初的通信卫星条例基础上,建立了美国通信卫星公司(COMSAT, Communications Satellite Corporation)。1963 年美国开始进行同步卫星通信试验,1963 年 7 月和 1964 年 8 月,美国航空宇航局先后发射了三颗 SYNCOM 卫星,最后一颗进入了近似圆形的静止同步轨道,成为世界上第一颗试验性静止通信卫星,成功地进行了电话、电视和传真的传输试验,并于 1964 年秋用它向美国转播了在日本东京举行的奥林匹克运动会实况。1964 年 8 月成立国际通信卫星组织(INTER-SAT, International Telecommunications Satellite Consortium),是政府间全球性商业通信卫星机构,总部设在美国华盛顿,为目前世界上最大的卫星组织,其宗旨是建立和发展全球商业卫星通信系统。1965 年春,第一颗商用卫星“晨鸟”进入静止轨道,成为第一代“国际通信卫星”,标志着商用通信卫星进入实用阶段。1975 年第一次通过卫星成功实现直接广播试验,

1979年国际海事卫星组织(INMARSAT, International Maritime Satellite Organization)成立,为一个国际合营股份公司,总部设在伦敦,在全球范围内特别是海洋、高山等常规公用通信网络难以覆盖的地方提供通信和定位服务。20世纪70年代到80年代中期,是卫星通信发展的成熟时期,其应用仍然以面向干线通信为主,随着卫星功率的提高,集成电路、射频器件以及编码和调制等数字信号处理技术日趋成熟,VSAT应运而生,其应用开始面向小型用户。

1984年第一个直接到户系统(DTH, Direct-to-home)在日本开始运行。1987年INMARSAT成功进行地面移动卫星通信试验,1989—1990年INMARSAT将全球移动卫星通信业务扩展到地面和空间移动通信领域。

1995年世界无线电行政委员会(WRC, World Radio Committee)对非静止轨道卫星系统分配新频谱,商用低地球轨道(LEO, Low Earth Orbit)卫星系统ORBCOM第一次传送低速数据试验成功,1998年通过低轨星座引入手机通信业务,以“铱”系统为代表的低轨星座移动卫星通信系统,代表了当时民用卫星通信技术的最高水平。但由于受到光纤通信和地面蜂窝移动通信发展的影响和冲击,整个卫星通信市场进入了低速增长期。1999—2000年引入卫星直接广播语音业务。

除了卫星固定通信和卫星移动通信以外,卫星宽带通信是近年来卫星通信业务发展的热点和主要发展方向之一。市场调查机构北方天空研究所(NSR)预测,全球宽带卫星互网络接入的收入预计将从2007年的8.23亿美元增长到2017年的39亿美元。随着宽带卫星通信技术的快速发展,传统的C和Ku频段已不能满足日益增长的业务需求。Ka频段频率高、可用带宽宽,是宽带卫星通信的可选频段之一。

近年来,美国宇航局推出了一项“手机卫星(Phone Sat)”计划,即智能手机微卫星。智能手机微卫星是航天技术和互联网技术的结合,以智能手机为主要组件,从而制造出一种廉价和易于建造的微卫星。将其发射进入太空,可以使用手机相机拍摄地球表面图像。2013年4月21日,美国轨道科学公司在美国国家航空航天局位于弗吉尼亚州瓦勒普斯岛的发射场发射了三颗被称为“手机卫星”的低成本手机卫星。

进入21世纪以后,卫星通信从系统到技术都进行了革命性的升级换代。这个时期Ka频段得到广泛应用,支持手持机的窄带移动卫星通信系统以及支持个人用户的宽带多媒体卫星通信系统得到快速发展。

从卫星通信系统技术体制看,经历了从初期的模拟通信到数字通信的过程;支持的业务也从初期的窄带话音、电视转播,到目前的“直接到户”DTH视频广播,直接个人系统Direc PC(提供Internet业务),移动通信业务和宽带综合业务;频段方面从最初的UHF, L, S, C频段,发展到Ku, Ka, EHF频段。

1.6.2 卫星通信的发展趋势

除国际通信卫星组织(INTELSAT)和国际海事卫星通信组织(1994年12月更名为国际移动卫星组织)(INMARSAT, International Maritime Satellite Organization)以及美国的PanAmSat等全球通信系统外,还有许多地区性或国家拥有的区域性卫星通信系统,如欧洲、北美、南美(巴西)、中国、印度尼西亚、澳洲、中东和日本等。

从卫星通信应用范围的发展过程来看,一些新的应用领域和系统已先后形成。

(1) 卫星移动通信系统:除较早期的Inmarsat外,支持手持机的低轨卫星铱系统(66颗卫星)和全球星系统(48颗卫星)最具代表性。

(2) 新的卫星广播系统:包括电视节目分配系统、电视直接到户(DTH)系统;数字视频广

播(DVB)、数字音广播(DAB)系统和数据广播系统等。

(3) VSAT 系统:该系统终端成本低,天线小(1 m 左右),安装方便,可支持语音、数据和传真等业务,适合构成行业或跨国公司的专用网。同时,系统对解决边远山区、农村等稀路由地区的通信也十分有效,对促进发展中国家通信事业的进步具有重要意义。

卫星通信有以下发展趋势:

(1) 传统的 C、Ku 频段静止轨道卫星将保持稳定发展,并将以大容量(转发器数量在 50 个左右)、高功率(功率为 8000 ~ 15000 W)和长寿命(15 年左右)的新系统逐步更换现有系统。同步卫星向大容量、多波束、智能化方向发展。

(2) 微小卫星、纳卫星和皮卫星的快速发展,小卫星通信地面站广泛应用。小型低轨卫星系统陆续投入运行,用于低速数据传输,如 E-Sat、GE American 和 GEMnet 等系统。

(3) 对地静止轨道资源非常有限,因此国际电联(ITU)鼓励采用中低轨道、高倾斜椭圆轨道以及 IGSO 轨道。

(4) 由于频率资源日益紧张,C 和 Ku 频段已逐渐趋于饱和,因此要采用更高的频段,如 Ka、EHF、Q、V 等频段。

(5) 不断发展新业务,如无线 Internet、组播和交互式 TV、移动语音、数据通信、数字视频广播、数字音频广播、多媒体通信和 Internet 接入等。

(6) 地面终端的发展呈现小型化、综合化及智能化。终端可工作在多个频段,支持综合业务,适应多种多址接入方式、调制方式、编码方式,传输速率可改变。

(7) 宽带卫星通信系统在加紧开发之中,如 Teledesic 系统由 288 颗卫星组成,工作于 Ka 频段,寿命设计为 10 年左右,用于高速数据和可视电话的传输。

(8) 现有卫星通信系统为适应新技术发展和系统对容量的更大要求形成了新的演进方案,如新一代 Iridium 系统除目前的语音和数据服务外,还提供宽带互联网接入服务、专用网关以及广域广播服务等。Iridium 系统将升级卫星软件,提高 GPS 捕获速度及定位精度,此外还增加了遥感功能。Inmarsat 推出宽带化服务,单个终端同时提供语音和宽带数据,速率达 492Kbps,支持最新的 IP 业务及传统的电路交换语音和数据。提供移动和固定网络覆盖以外的语音、文本和电子邮件收发服务。此外,Inmarsat 还能对用户位置进行跟踪,提供免费的全球航班追踪服务,并提供增强的位置报告设备。

(9) 天地网络不断融合。卫星通信与有线电视、宽带互联网、移动互联网等融合。有线电视、宽带互联网、移动互联网具有互动性和社交功能,而卫星通信更适合广域覆盖,它们之间具有明显的互补性,为其相互融合提供了基础。卫星通信、有线电视、宽带互联网、移动互联网都属于信息服务业,相互融合是共同的发展趋势。

(10) 新技术广泛运用。卫星通信行业是典型的技术密集性行业,技术进步是卫星通信行业发展的主要推动力量,如星上交换与处理、多波束天线等。地面通信的成果不断被卫星通信所应用,如 SkyTerra 系统通过结合卫星和地面技术,采用辅助地面组件技术(ATC 技术),实现卫星网络与地面网络的无缝集成,用户在卫星网络与地面网络之间可以实现转换。卫星移动通信与地面移动通信相互补充,实现无缝覆盖,共享许多技术,如空中接口、多址接入等。

习题

- 1.1 简要叙述卫星通信的主要优缺点。与光纤通信相比,你认为卫星通信系统适合什么样的应用领域?
- 1.2 试计算下列圆形轨道卫星系统的卫星运行周期 T 和速度 V 。

- (1) 铱系统(Iridium);卫星轨道高度为 780 km。
- (2) 全球星系统(Globalstar);卫星轨道高度为 1414 km。
- (3) 中轨系统(MEO);卫星轨道高度为 10354 km。
- (4) 全球定位系统(GPS);卫星轨道高度为 20200 km。
- (5) 地球同步轨道;卫星轨道高度为 35786 km。

1.3 试解释静止卫星轨道应满足的条件。在上海的正上方可以配置一颗静止卫星吗?同步卫星轨道与静止卫星轨道有何差别?你认为人类可以发射任意多的静止卫星吗?这会受到什么样的制约?

1.4 某全球静止卫星通信系统是建立在星际链路基础上的,并用以建立不能同时看到同一卫星的两地球站之间的通信链路。不考虑大气对电波的折射,并假定地球为理想圆球,试计算:

(1) 两卫星之间不被地表阻挡的最大通信距离是多少?星际链路传输延时是多少?

(2) ITU 允许的最大(单向)传输延时为 400 ms。若两地球站到各自卫星的距离都是 36000 km,为满足 ITU 对延时的限制,此时两卫星之间的最大延时是多少?

(3) 若卫星采用星上处理,两卫星处理延时合计为 35 ms,此时两卫星的最大距离是多少?

1.5 卫星通信系统由哪几部分组成?它们各自的作用如何?

1.6 你认为 ITU 将全球划分为 3 个频率区域有何意义?

1.7 卫星广播系统与地面广播系统(含光缆 TV 系统)相比有何特点?你认为它在普及我国电视广播中能发挥哪些作用?

1.8 通信网址 <http://www.intelsat.com> 可以获得 INTELSAT 从 20 世纪 60 年代至今的发展过程的信息。请找出 INTELSAT 8 系列卫星的轨道位置和每颗卫星上转发器(含 C、Ku 频段转发器)的数目。

本章参考文献

- [1] B. R. Elbert. Introduction to Satellite Communication(Second Edition). Boston. London: Artech House Inc., 1999
- [2] B. R. Elbert. The Satellite Communication Applications Handbook(Second Edition). Boston_London: Artech House Inc., 2004
- [3] T. Pratt et al. . Satellite Communications(Second Edition). New York: John Wiley & Sons Inc., 2003(中译本:甘良才,等. 卫星通信. 北京:电子工业出版社,2005)
- [4] D. Roddy. Satellite Communications(Third Edition). McGraw - Hill Companies Inc., 2001(中译本:张更新,等. 卫星通信. 北京:人民邮电出版社,2002)
- [5] J. E. Kadish, T. W. R. East. Satellite Communications Fundamentals. Artech House; Boston, London, 2000
- [6] T. Iidaed, et al. . Satellite Communications; System and Its Design Technology, IOS Press Inc. [distributor], 2000
- [7] E. Lutz, M. Werner, A. Jahn. Satellite Systems for Personal and Broadband Communication. Berlin: Springer-Verlag, 2000
- [8] G. Maral. VSAT Networks(Second Edition). London: John Wiley & Sons, Ltd., 2003
- [9] 吕海寰,等. 卫星通信系统. 北京:人民邮电出版社,1999
- [10] 王秉钧,等. 现代卫星通信系统. 北京:电子工业出版社,2004
- [11] 陈振国,等. 卫星通信系统与技术. 北京:北京邮电大学出版社,2003
- [12] 杨千里. 中国卫星通信发展之路. 国际太空,2014 年第 2 期
- [13] 张俊祥. 卫星通信发展展望. 无线电通信技术,2012 年第 4 期
- [14] 张更新. 现代小卫星及其应用. 北京:人民邮电出版社,2009
- [15] 郭庆,王振永,顾学迈. 卫星通信系统,北京:电子工业出版社,2010