

1.1 通信系统的基本概念

通信的目的在于传递信息,将完成信息传递所需全部设备和传输媒质的总和称为通信系统。典型通信系统的模型如图 1-1 所示。



图 1-1 通信系统的一般模型

系统中的信源是指发出信息的信息源,其作用是把各种可能消息转换成原始电信号。发送设备是将信源发出的信息转换成适合在信道中传输的信号形式。对应不同的信源和不同的通信系统,发送设备有不同的组成和功能。对于数字通信系统而言,发送设备常常包含基带处理和频带处理两部分,基带处理包括信源编码、信道编码以及为达到某些特殊要求所进行的各种处理,如多路复用、保密处理等;频带处理包含频率变换、滤波、功率放大等频带部分。传输媒介又称为通信信道,分为无线信道和有线信道。在有线信道中电磁信号(或光信号)被约束在某种传输线(架空明线、电缆、光缆等)上传输;在无线信道中电磁信号沿空间(大气层、对流层、电离层等)传输。无线媒介可以利用的频段从中、长波到激光,有较宽的频段,用不同性能的设备 and 配置方法,可以组成不同的通信系统。信道如果按传输信号的形式又可以分为模拟信道和数字信道。接收设备的基本功能是完成发送设备各项处理的“反变换”,即进行解调、译码、解密等。它的任务是从带有干扰的信号中正确恢复出原始消息,对于多路复用信号,还包括解复用设备用以实现正确分路。信宿是信息传送的目的地,也就是信息接收者。它是将复原的原始电信号转换成相应的消息。噪声源是系统内各种干扰影响的等效结果。系统的噪声来自各个部分,从发出和接收信息的周围环境、各种设备的电子器件到信道所受到的外部干扰,这些都会对信号形成噪声影响。通信系统设计的主要任务就是克服噪声的影响。

以上所述是单向通信系统,但在大多数场合下,通信双方是收发兼备的,以便随时交流信息,实现双向通信,电话就是一个最好的例子。如果两个方向有各自的传输媒介,则双方

都可以独立进行发送与接收,但若共享一个传输媒介,则必须用频率、时间或空间分配等办法来共享。

现代通信中常用的是数字通信系统,其组成如图 1-2 所示。

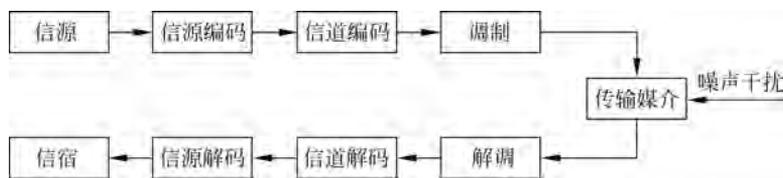


图 1-2 数字通信系统的组成

除图 1-2 中基本功能模块以外,根据不同的通信体制和要求还会有其他的处理过程,比如数据加密、扩频调制等。

在实际通信系统中,为了衡量系统的传输质量,通常用有效性和可靠性作为衡量通信系统最重要的性能指标。前者表示通信系统传输信息的数量,后者反映通信系统传输信息的质量。对于数字通信系统而言,系统的有效性和可靠性具体可用传输速率和传输差错率来衡量。

1.1.1 传输速率

传输速率是衡量通信系统传输能力的质量指标,它反映了系统的有效性,常用的有以下 3 种指标:

(1) 码元速率(R_s)。携带消息的信号单元称为码元,单位时间内传输的码元数称为码元速率,又称码元传输速率,单位为波特(Baud)。

(2) 信息速率(R_b)。在单位时间内传输的平均信息量称为信息速率,也称为比特率。单位是比特/秒(b/s)。

码元速率和信息速率有以下关系:

$$R_b = R_s \log_2 N \quad (\text{b/s}) \quad (1-1)$$

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad (\text{Baud}) \quad (1-2)$$

(3) 频带利用率(η)。频带受限制的信道简称为频带受限信道,常用“频带利用率”来衡量传输系统的有效性。它是指单位频带内所能实现的码元速率或者信息速率。

$$\eta = \frac{\text{码元速率}}{\text{带宽}} \quad (\text{Baud/Hz}) \quad (1-3)$$

或者

$$\eta = \frac{\text{信息速率}}{\text{带宽}} \quad (\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}) \quad (1-4)$$

1.1.2 传输差错率

传输差错率是衡量数字通信系统可靠性的性能指标。错误率又分为误比特率和误码率。

(1) 误比特率:

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输比特数}} \quad (1-5)$$

(2) 误码率:

$$P_s = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-6)$$

用二进制传输时, $P_b = P_s$; 而用 M 元码传输时, 两者不等。

1.2 卫星通信系统概述

卫星通信是地球上(包括水面、地面和低层空间)的无线电通信站利用人造卫星作为中继站转发无线电波建立通信联系的一种手段。与其他通信方式相比,卫星通信具有通信距离远,覆盖面积大;便于实现多址联接;通信频带宽,传输容量大;机动灵活;通信线路稳定可靠,传输质量高;成本与通信距离无关等优点。但是,卫星通信在技术上还存在一些缺点,比如,对通信卫星可靠性要求高,通信卫星寿命有限;通信卫星的发射与控制技术比较复杂;卫星通信具有较大的信号传输延迟和回声干扰等。

1.2.1 卫星通信系统的组成及网络形式

卫星通信系统是一个非常复杂的系统,它由地面部分和空间部分组成。主要包括通信地球站分系统、跟踪遥测指令分系统、监控管理分系统及空间分系统 4 部分,如图 1-3 所示。跟踪遥测指令分系统对卫星进行跟踪测量,控制其进入静止轨道上的指定位置,并对在轨卫星的轨道、位置及姿态进行监视和校正。监控管理分系统对在轨卫星的通信性能及参数进行业务开通前的监测和业务开通后的例行监测和控制,以保证通信卫星的正常运行和工作。空间分系统即通信卫星,其主体是通信装置(包括天线和转发器),保障部分则有星上的遥测指令、控制装置和能源装置等。地面的跟踪遥测指令分系统和监控管理分系统,及它们在空间相应的系统并不直接参与通信,所以很多场合所述的卫星通信系统仅由卫星转发器和通信地球站组成。

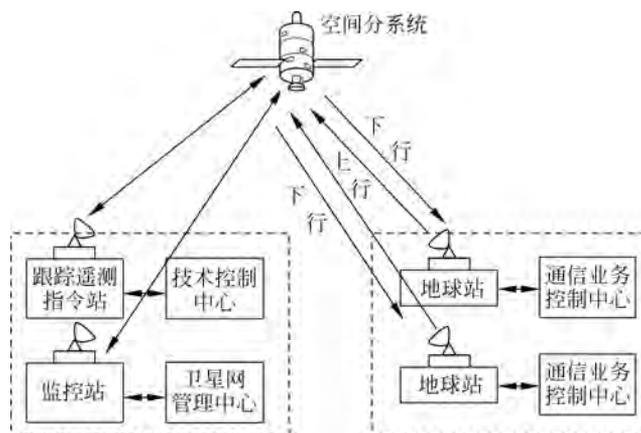


图 1-3 卫星通信系统的基本组成^[1]

与地面通信系统类似,每个卫星通信系统都有一定的网络结构,使网络中各地球站能够通过卫星按照一定形式进行通信。卫星通信网络有星型、网格型和混合型三种形式,星型和网格型的网络拓扑结构如图 1-4 所示。在星型网络中,外围各边远站仅与中心站直接通过卫星进行通信,边远站之间不能直接通过卫星通信,只能经中心站转接才能建立联系。在星型 VSAT 网中,中心站的天线尺寸较大,发射功率较大,而边远站的天线尺寸较小,发射功率较小。网格型网络中,各站彼此可经卫星直接通信。混合型有两种形式,一种是星型和网格型混合形式;另一种通常采用星型网络结构,各边远站之间的话音信号直接通过卫星进行通信,信令等控制信号则通过中心站进行转接。

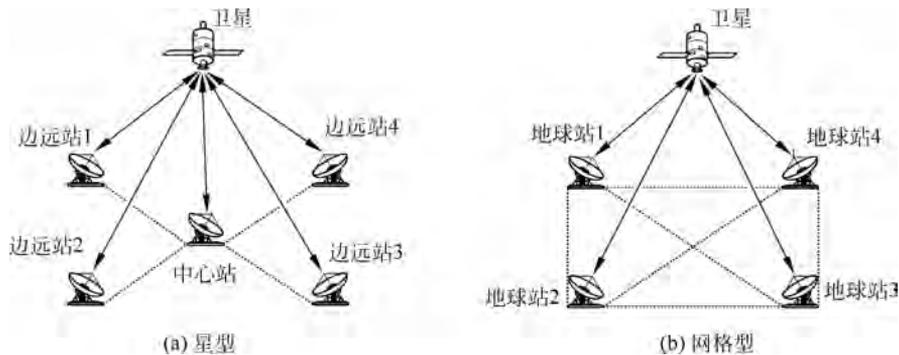


图 1-4 卫星通信网络结构

1.2.2 卫星通信系统工作频段

卫星通信工作频段的选择直接影响整个系统的传输容量、质量、可靠性、设备的复杂性和成本的高低,还将影响与其他通信系统的协调能力。通常,将卫星通信使用的频率范围选在微波波段,且必须高于 100MHz,以便不受电离层的影响。世界无线电行政会议规定,卫星通信的使用频段为 136MHz~275GHz,但是,中间有许多频段被航天、移动、广播、海上等领域使用。目前,大多数卫星选择频段如表 1-1 所示。

表 1-1 卫星选择频段

频 段	频 率	频 段	频 率
UHF	400/200MHz	Ku	14/12GHz
L	1.6/1.5GHz		14/11GHz
C	6/4GHz	Ka	30/20GHz
X	8/7GHz		

卫星通信的频段还在向更高频段扩展,如 30/20GHz 的频段已开始使用,其上行频率为 27.5~31GHz,下行频率为 17.7~21.2GHz,该频段所用带宽可达 3.5GHz,但降雨影响严重。此外,低于 2.5GHz(处于 UHF 频段)的频率大部分用于非同步卫星或移动业务的卫星通信。

1.2.3 卫星通信体制概述

通信体制是指通信系统所采用的信号传输方式和信号交换方式。卫星通信系统的通信

体制除了有一般无线通信均要涉及的基本信号形式和调制方式外,还包含多址联接方式、卫星信道的分配方式等内容。通常,按照所采用的基带信号处理方式、调制方式、多址联接方式、信道分配及交换制度的不同来描述不同的卫星通信系统体制。

1. 基带处理部分

在数字卫星通信系统中,基带信号处理包括信源编码与解码、信道编码与解码、加扰与解扰、复用/复接与解复用/分接等环节。

1) 信源编码

卫星通信中主要有话音和图像两种业务,不同的业务采用不同的信源编码方式。

对于话音业务,常用的话音信号压缩编码方式有波形编码、参数编码和混合编码方式。波形编码是一种直接将时域信号转换成数字代码的编码方式,其编码信号与原输入信号基本保持一致。这种方式的特点是信号的信噪比高。脉冲编码调制(Pulse Code Modulation, PCM)和自适应增量调制(Adaptive Delta Modulation, ADM)都属于这一类。其中,通用的PCM系统的数码率为64kb/s,话音质量达到长途电话通信网的标准要求,在大、中容量民用数字卫星通信系统中应用广泛。自适应差分脉码调制(Adaptive Differential Pulse Code Modulation, ADPCM)在数码率为32kb/s的情况下,可达到64kb/s的PCM系统的质量,且信道利用率提高一倍,并在许多实际系统中得到了应用。增量调制(ΔM)或增量脉冲码调制方式(DM)系统虽然也压缩了数码率,可以工作在32kb/s或16kb/s,但其话音质量不如PCM和ADPCM。参数编码是一种以发声机制模型为基础的编码方式,是将其转换成为数字代码的一种编码方式。参数编码的压缩比很高,但是通常话音质量只能达到中等水平。如数字移动通信系统和卫星移动通信系统中使用的线性预测编码(Linear Predictive Coding, LPC)及其改进型,传输速率可压缩到2~4.8kb/s,甚至更低,但是此时收端的话音仍能保证相当程度的可懂度。混合编码综合了波形编码和参数编码的优点,使编码后的数字话音既包含话音特征参量,又包含部分波形编码信息。如多脉冲激励线性预测编码系统、正规脉冲激励编码系统和码激励线性预测编码系统等。混合编码可以将速率压缩至4~16kb/s,在此范围内能够获得良好的话音效果。

对于图像信号而言,可以分成两种情况:一是广播电视信号;另一种是会议电视信号。对于广播电视信号,不进行频带压缩的传输速率高达160Mb/s,一般采用帧内差值脉冲编码方式(Differential Pulse Code Modulation, DPCM),把传输速率压缩至34Mb/s以下。对差值的量化仍采用非线性压扩特征。目前国际上已有的高效图像编码技术和标准有MPEG-2、MPEG-4、H.264等。对于变化较小的视频会议电视信号,一般编码传输速率倾向于采用1.5~2.0Mb/s,对于这种信号的编码,多采用帧间和帧内预测相结合的方法。

2) 信道编码

在数字卫星通信中,广泛应用差错控制技术,以提高系统通信可靠性。常用的有循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)和前向纠错(Forward Error Correction, FEC)技术。

CRC是在发端产生具有某种特殊数学结构的CRC码,与数据一起发射出去。在收端采用与发端相同的CRC码,并与发射的码进行比较,若一致,则认为接收的数据与发射的数据是完全相同的,否则认为接收数据中存在错误。

FEC的方法是通过增加冗余比特,以发现或者纠正错误。与未编码时相比,误码性能

明显改善,这种改善可以用编码增益来描述。在给定误比特率条件下,未编码与编码传输的归一化信噪比 E_b/N_0 之差称为编码增益。在数字卫星通信中主要采用分组码和卷积码,近年来,高效新型编码(如 Turbo 码、LDPC 码)的应用也日趋广泛。在给定误比特率为 10^{-5} 时,采用分组码的编码增益为 3~5dB,采用卷积码并进行维特比解码可以获得 4~5.5dB 的编码增益,采用 RS 分组码和卷积码、维特比解码的级联码可以获得编码增益为 6.5~7.5dB。

3) 扰码

在数字卫星通信中为了便于提取比特定信息并进行能量扩散,通常需要对原信号进行加扰以改变原信号的统计特性再进行传输,通常是用伪随机码(PN)序列与数字基带信号序列进行模 2 加来实现加扰。接收时,则用与发端相同的 PN 序列和解调出的数字基带信号序列进行模 2 加进行解扰,从而恢复原数字基带信号。

2. 卫星通信中的调制部分

在卫星数字通信系统中多采用相移键控(Phase Shift Keying, PSK)、频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)和以此为基础的其他调制方式。从功率有效角度,常用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、偏移四相相移键控(Offset-QPSK, OQPSK)、最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)和高斯最小频移键控(Gaussian Filtered Minimum Shift Keying, GMSK)等调制方式;从频谱有效角度来看,常用多进制数字相位调制(Multiple Phase Shift Keying, MPSK)、多进制正交幅度调制(Multiple Quadrature Amplitude Modulation, MQAM)等调制方式;此外,还有格型编码调制(Trellis Coded Modulation, TCM)和多载波调制(Multicarrier Modulation, MM)等新技术也在卫星通信中得到应用。

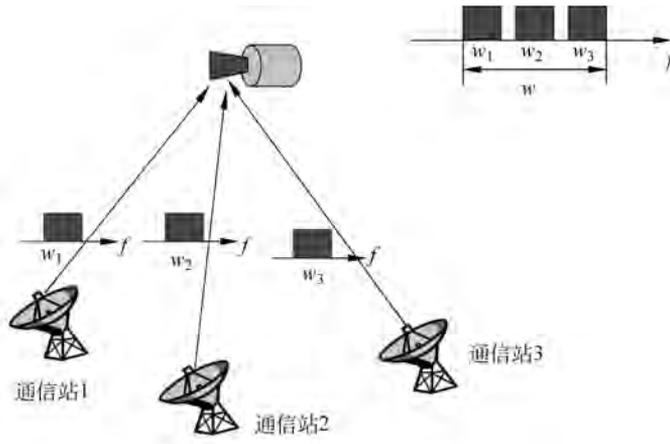
3. 卫星通信中的多址联接部分

多址联接是指多个地球站通过共同的卫星,同时建立各自的信道,从而实现各地球站相互之间通信的一种方式。多址方式的出现,大大提高了卫星通信链路的利用率和通信连接的灵活性。目前常用的多址方式有频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)和空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)以及它们的组合形式。此外,还有利用正交极化的极化分割多址联接方式等。

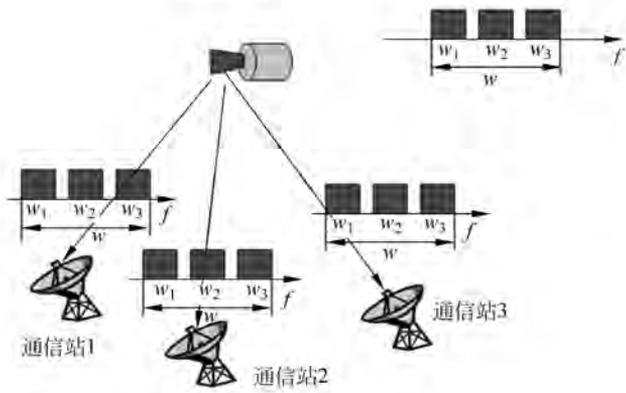
1) FDMA 方式

当多个地球站共用卫星转发器时,如果根据配置的载波频率的不同来区分地球站的站址,这种多址联接方式称为频分多址。其基本特征是把卫星转发器的可用射频带宽分割成若干互不重叠的部分,分配给各地球站作为所要发送信号的载波使用。由于各载波的射频频率不同,可以区分开不同的地球站。FDMA 上行和下行线路工作原理如图 1-5 所示。

频分多址有单址载波、多址单载波和单址单载波三种处理方式。其中,单址载波方式是指每个地球站在规定的频带内可发多个载波,每个载波代表一个通信方向,如图 1-6 所示。如果系统有 n 个地球站,则每个地球站需发 $n-1$ 个载波,而转发器则要转发 $n(n-1)$ 个载波。多址载波方式是指每个地球站只发一个载波,在基带中利用频分多路复用(Frequency Division Multiplexing, FDM)、时分多路复用(Time Division Multiplexing, TDM)方式将不



(a) FDMA上行线路原理图



(b) FDMA下行线路原理图

图 1-5 FDMA 工作原理图

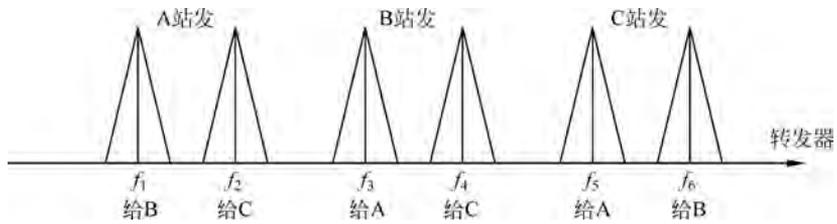


图 1-6 FDMA 单址载波排列示意图^[1]

同的频率或时隙划分给不同的目的地球站,如图 1-7 所示。单路单载波(Single Channel Per Carrier, SCPC)方式是指每个载波只传送一路语音或数据信号,如图 1-8 所示。

2) TDMA 方式

在 TDMA 方式中,分配给各地球站的不再是一个特定频率的载波,而是一特定的时隙。各地球站在定时同步系统的控制下,只能在指定的时隙内向卫星发射信号,而且时间上互不重叠。在 TDMA 系统中,地球站中有一个为基准站,为其他各站发射定时基准,基准站常由某一地球站兼任,各地球站按规定的时隙依次向卫星发射信号。图 1-9 以 3 个地球站为例,给出了 TDMA 系统的工作示意图。

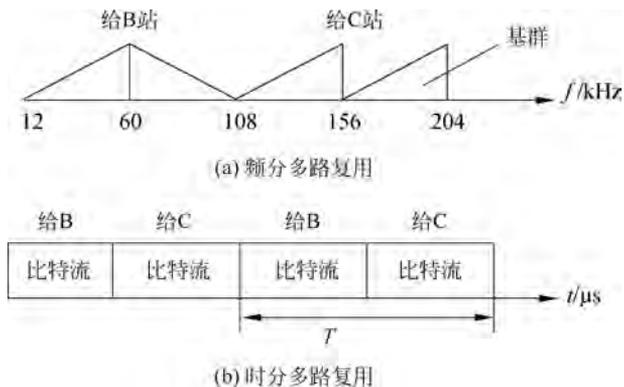


图 1-7 基带多路复用中的信道定向^[1]

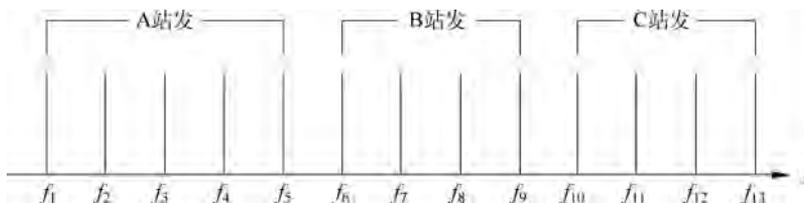


图 1-8 SCPC 信道定向^[1]

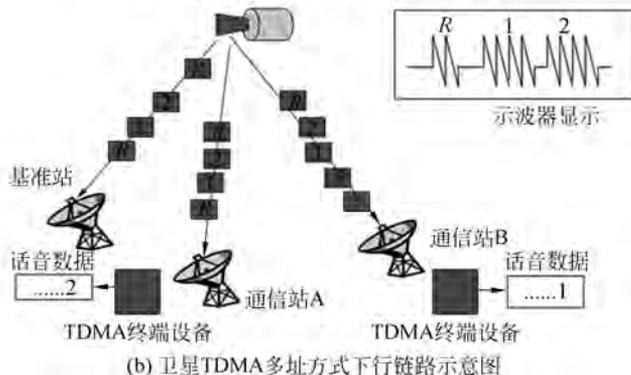
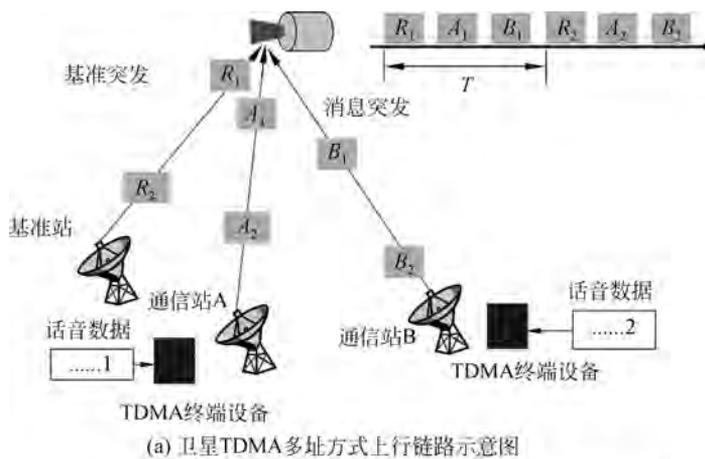


图 1-9 TDMA 系统

在 TDMA 系统中,所有地球站在卫星内占有的整个时间间隔称为帧周期(简称帧)。把每个地球站占有的时隙称为分帧。卫星的一帧由一个基准站分帧和所有地球站分帧组成。除基准站分帧以外,其他每个地球站分帧均由前置码和信息数据两部分组成。前置码包括载波恢复和比特定时信息、独特码、监控脉冲、勤务脉冲等内容。载波恢复和比特定时恢复脉冲主要用来在接收端提供相干解调的载波和定时同步信息。独特码提供本分帧的起始时间标志和本站站名标志,并为完成分帧同步提供必要信息。监控脉冲用来对信道特性进行测量并表明信道分配的规律和指令。勤务脉冲用来作各站之间的通信联络。信息数据部分包含发往各地球站的数字话音或其他数据信号,不同时隙承载发往不同地球站的信息数据。基准站分帧只有一个前置码,其中除了没有勤务联络信号外,其他均与别站前置码的结构一样,它的独特码是一帧开始的时间基准。图 1-10 所示为一种典型的帧结构。

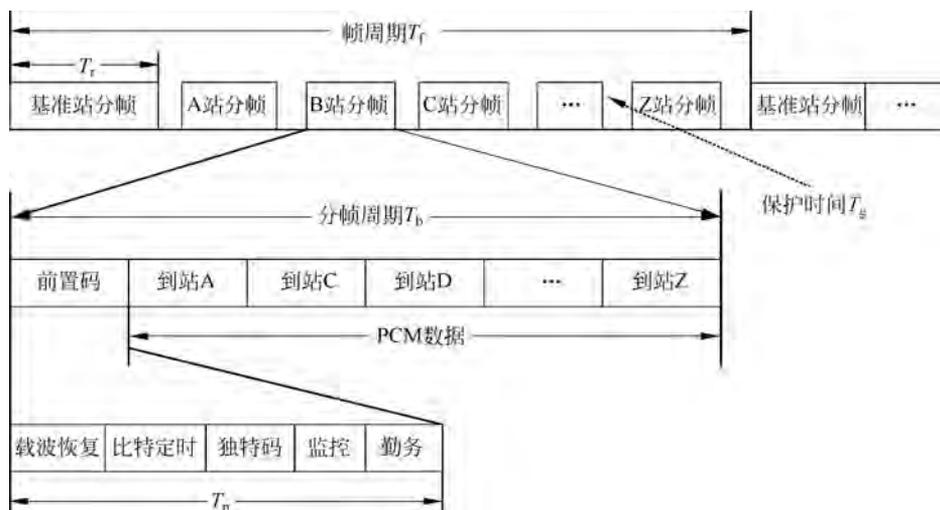


图 1-10 一种典型的帧结构

3) 空中交换—时分多址(SpaceSwitch-TDMA, SS-TDMA)方式

如果通信卫星采用多波束天线,各波束指向不同区域的地球站,这种依靠卫星波束指向的不同来区分地球站地址的方式称为 SDMA。通常,SDMA 方式和其他多址方式结合使用。在 SS-TDMA 方式中,为了在不同波束覆盖的区域之间进行通信,通常在星上必须设置一个交换矩阵,该交换矩阵根据预先设计好的交换次序进行高速切换。

4) CDMA 方式

CDMA 方式是利用自相关特性非常强而互相关性比较弱的伪随机序列作为地址信息(地址码),对被用户信息调制过的载波进行扩频调制,经卫星信道传输后,在接收端以本地产生的伪随机序列作为地址码进行解扩,当接收信号的地址码与本地地址码完全一致时,将该扩频信号还原为原来的窄带信号接收下来,其他与本地地址码不同的信号则仍保持或扩展为宽带信号被滤掉,从而实现多址联接。图 1-11 是典型的 CDMA/DS 直接序列扩频 CDMA 系统原理示意图。

4. 卫星通信中的信道分配

所谓信道分配是指:对于 FDMA 系统,分配各地球站占用的转发器频段;对于 TDMA 系统,分配各站占用的时隙;对于 CDMA 系统,分配各站使用的码型。常用的分配方式有



图 1-11 CDMA/DS 多址能力示意图

以下几种。

(1) 预分配方式(Pre-Allocation, PA)。预分配是指预先将通信信道固定分配给各个地球站。信道分配后,在一段时期内不改变,且其他站不能使用别的站信道。在 FDMA 系统中,系统所用频带和载波事先分配给各个地球站。业务量大的地球站,分的信道多些,反之少些。在 TDMA 系统中,事先把转发器的时隙分成若干分帧,并分配给各地球站,业务量大的站的分帧长度长,反之分帧长度短。

(2) 按需分配方式(Demand Assigned Multiple Access, DAMA)。这种方式是所有信道归各站共用,当某地球站需要与另一地球站通信时,首先提出申请,通过控制系统分配一对空闲信道供其使用。一旦通信结束,这对信道又归共用。由于各站之间可以互相调剂使用信道,因而可用较少的信道为较多的站服务,信道利用率高,但控制系统较复杂。

(3) 随机分配方式(Random Assignment, RA)。随机分配是指通信网中的各个用户可以随机地选取(占用)信道。这种分配方式常采用 ALOHA 技术,适用于随机、突发通信。

1.3 典型卫星通信系统概述

1.3.1 单路单载波语音数据传输系统

本节以 FDMA 体制中的预分配 PCM/PSK/SCPC 系统为例介绍单路单载波语音数据传输系统。按照 IESS-303 文件规定,一个 36MHz 带宽的转发器的频率配置如图 1-12 所示。图中,导频信号为 70MHz,每信道的分配带宽为 45kHz,可以容纳 800 条信道,靠近 70MHz 导频两侧的第 400 路和第 401 路信道空闲不用,信道间的保护间隔为 22.5kHz。

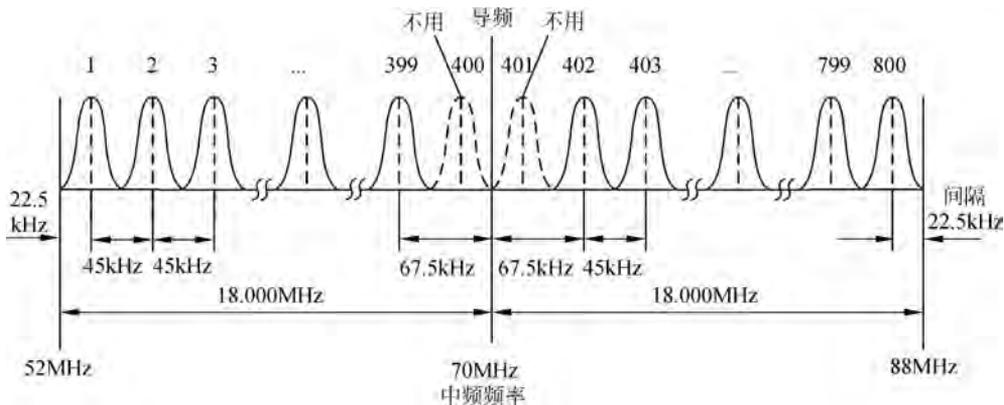


图 1-12 PCM/PSK/SCPC 系统的频率配置

SCPC 系统通信地球站主要由前端设备与地面终端设备两大部分组成,其中前端与其他数字卫星通信系统中前端设备基本相同,地面终端设备能独特地反映 SCPC 系统特点。SCPC 地面终端设备主要由中频公共设备和通道设备两部分组成,如图 1-13 所示^[1]。

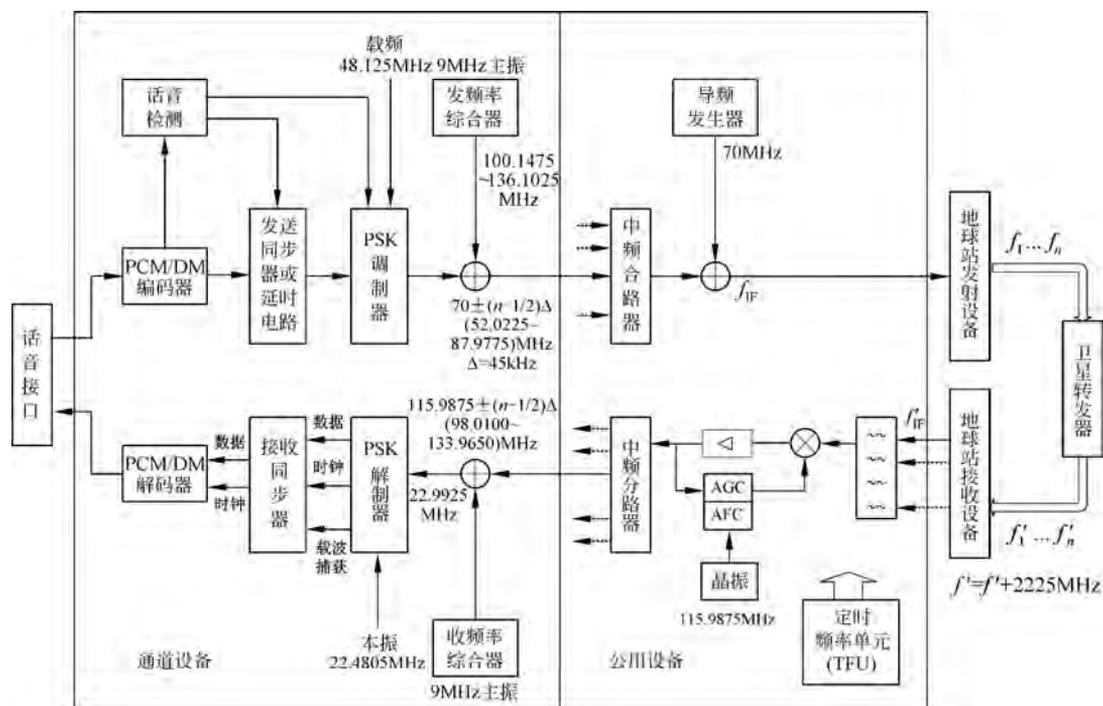


图 1-13 PCM/SCPC 系统组成框图^[1]

通道设备的数目与每个地球站发射的载波数目一致。每个通道设备包含 PCM 编/解码器、通道同步器、语音检测器、频率综合器、PSK 调制和解调器等。其中,语音检测器的输出控制载波实现语音激活,频率综合器用以选择卫星信道频率。该系统中的 PCM/ SCPC 语音数据传输参数如表 1-2 所示。

表 1-2 语音传输时 PCM/SCPC 的主要参数

参 数	数 值	参 数	数 值
基带处理	7b A 律 A=87.6、8kHz 抽样 PCM	IF 噪声带宽	38kHz
信道调制方式	QPSK	发射的 RF 频差	250kHz
载波控制	语音激活	接收的 IF 频差	相对于滤波器中心(1kHz)
速率	64kb/s	门限误比特率	10 ⁻⁴
RF 通道带宽	45kHz		

PCM/QPSK/SCPC 系统的语音通道数据格式如图 1-14 所示。

其中,报头由 40b 的载波恢复和 80b 的比特定恢复码字组成,随后是 32b 的 SOM 作为消息开始指示,用于码字(群)同步和解决 QPSK 相干解调时的相位模糊问题,PCM 语音信码是传输的语音信息载荷,长度为 224b。每组 SOM 和语音信码时长为 4ms,语音信号被

分为若干个 4ms 的分组。

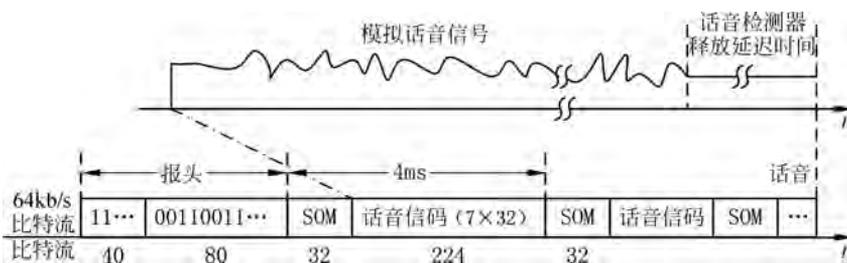


图 1-14 PCM/QPSK/SCPC 系统的语音通道数据格式^[1]

公用设备主要包含中频合/分路器以及相应的射频处理,其中包括自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)和利用导频信号进行自动频率校正的自动频率控制(Automatic Frequency Control, AFC)单元。

1.3.2 中等数据速率传输系统

1978年,INTELSAT提出了中等数据速率传输数字卫星通信系统,又称IDR(Intermediate Data Rate)系统。IDR系统的信息码率范围为 $64\text{kb/s} \sim 44.736\text{Mb/s}$,介于SCPC系统(最大速率 64kb/s)和TDMA系统(最大速率 120Mb/s)之间,所以称为中等数据速率系统。

IDR系统是一种ADPCM/TDM/QPSK/FDMA数字卫星通信系统。其多址联接方式为FDMA,载波定向方式为FDMA的MCPC方式,利用基带TDM复用方式完成载波定向。扰码采用由20级移位寄存器构成的自同步型扰码器。信道编码除 1024kb/s 业务采用 $1/2$ 卷积码以外,其他业务一般采用 $3/4$ 码率删除卷积码。中频调制采用QPSK调制。

通常,IDR系统采用数字电路倍增设备(Digital Circuit Multiplication Equipment, DCME)技术实现用户扩容,提高信道利用率。采用DCME技术的IDR扩容系统如图1-15所示。DCME包含低速编码(Low Rate Encoding, LRE)和数字语音内插(Digital Speech Interpolation, DSI)。其中,LRE采用ADPCM技术,可将每路信息速率由 64kb/s 压缩到 32kb/s ,DSI增益可达2.5倍。

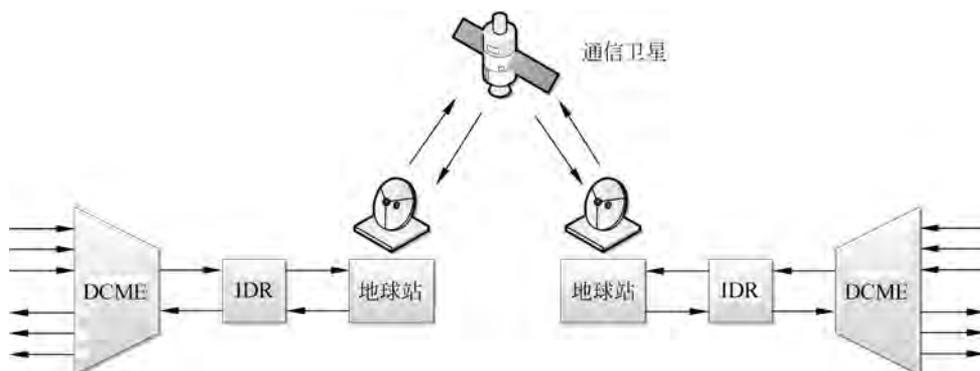


图 1-15 带 DCME 的 IDR 系统^[2]

IDR 系统地球站设备信道单元的处理框图如图 1-16 所示。

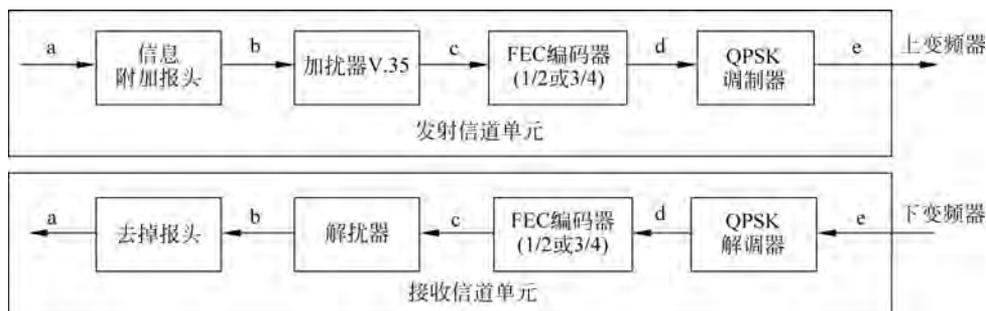


图 1-16 IDR 信道单元组成图

a—信息速率 IR ；b,c—合成速率 $CR=(IR+OH)$ ；
d—传输速率 $R=(IR+OH)\times 4/3$ ；e—符号速率 $SR=R/2$ 。

图中发射单元 a 点的信息数据通常是 PCM 一次群、二次群信号经过基带传输编码后的双极性信号。

INTELSAT 建议的各 IDR 载波的传输参数如表 1-3 所示。

表 1-3 INTELSAT 建议的 IDR 载波的相关参数(FEC 为 3/4 卷积码,C/N 均为 9.7dB)

信息速率 (IR) /kb·s ⁻¹	报头速率 (OH) /kb·s ⁻¹	数据速率 ($IR+OH$) /kb·s ⁻¹	传输速率 /kb·s ⁻¹	占用带宽 /kHz	分配带宽 /kHz	C/T /dBW·K ⁻¹	C/N_0 /dBHz
64	0	64	85.33	51.2	67.5	-171.8	56.8
192	0	192	256.00	153.6	202.5	-167.1	61.5
384	0	384	512.00	307.2	382.5	-164.1	64.5
1544	96	1.640	2.187	1.31	1552.5	-157.8	70.8
2048	96	2.144	2.859	1.72	2002.5	-156.6	72.0
6312	96	6.408	8.544	5.13	6007.5	-151.8	76.8
8448	96	8.544	11.392	6.84	7987.5	-150.6	78.0
32064	96	32.160	42.880	25.73	29125.0	-144.8	83.8
34368	96	34.464	45.952	27.57	32250.0	-144.1	84.1
44736	96	44.832	59.776	35.87	41875.0	-138.4	84.8

IDR 系统中,1.544~44.736Mb/s 的所有信息速率传输时都增设 96kb/s 的报头位,目的是为了工程勤务线路(Engineering Service Circuit, ESC)传输和提供维修报警。1.544Mb/s 和 2.048Mb/s IDR 载波的报头结构如图 1-17 所示。6.312Mb/s 和 8.448Mb/s 的 IDR 载波的报头结构如图 1-18 所示。

1.3.3 卫星 DVB-S 系统

DVB-S 由欧洲电信标准委员会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)制定,是目前世界上使用最广泛的数字卫星电视广播标准。

按 DVB-S 进行的卫星数字广播电视传输系统发送端信号处理流程框图见图 1-19。

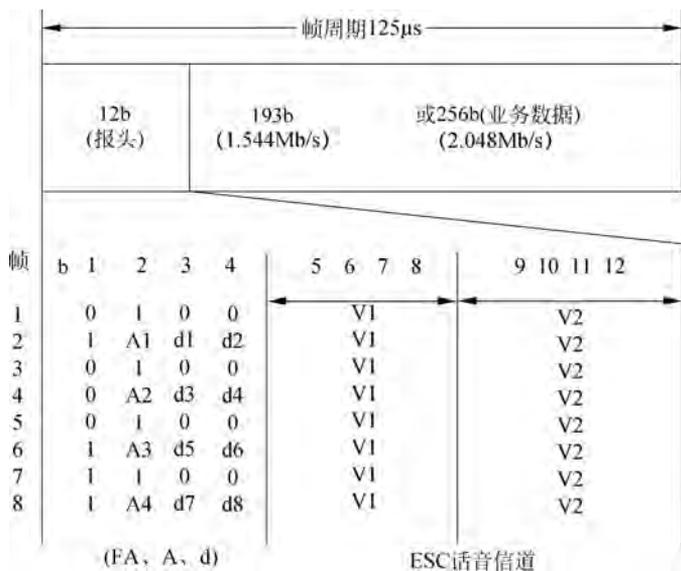


图 1-17 1.544Mb/s 和 2.048Mb/s 的 IDR 报头结构^[3]

V_i = ESC 语音信道 i 位 ($i=1,2$), 如果不使用则调到 1; A_i = 反向告警 ($i=1,2,3,4$), 无告警=0, 告警=1;

d_i = ESC 数字数据 ($i=1\sim8$), 如果不使用则调到 1; 8 帧=1 个复帧(周期=1ms);

报头速率(OH) = $12b/125\mu s = 96kb/s$



图 1-18 6.312Mb/s 和 8.448Mb/s 的 IDR 报头结构

3 子帧=1 帧(帧周期=125μs); 报头位的配置与 1.544Mb/s 和 2.048Mb/s 相同;

8 帧=1 个复帧(周期=1ms); 报头速率(OH) = $12b/125\mu s = 96kb/s$

由图 1-19 可知, 视频编码器、音频编码器和数据编码器输出的三路信号经节目复用器复用后, 输出复用传送包, 节目复用器输出数据的信息率是 6.11Mb/s。每一路节目由一到多个私有数据的基本流(Elementary Stream, ES)组成。多路节目经过传输流打包、复用后形成每分组长度为 188B 的 MPEG-2 传输流(Transport Stream, TS)分组。然后, MPEG-2 传输流分组数据进行信道适配, 分别完成复用适配、能量扩散、前向纠错编码以及 QPSK 调制等过程后, 将信号传送至卫星信道, 完成发送。

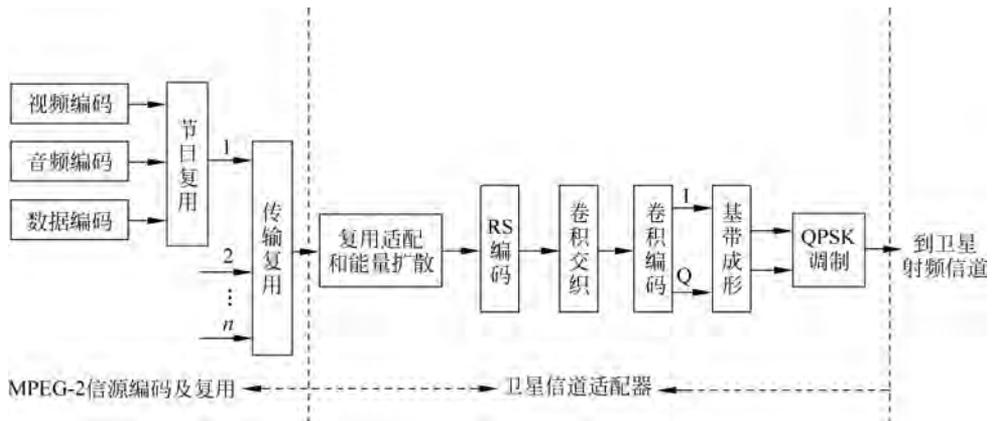


图 1-19 卫星数字广播电视传输系统发送端信号处理流程图

其中,MPEG-2 传输流分组结构图如图 1-20 所示。

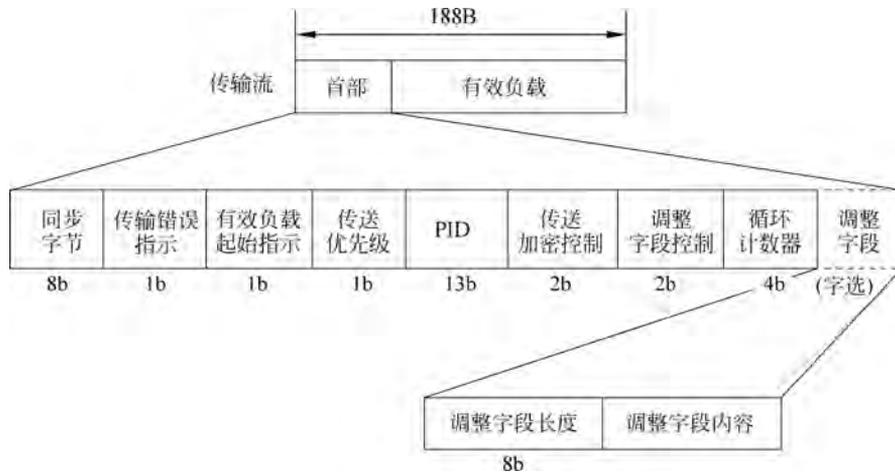


图 1-20 MPEG-2 传输流分组结构图^[4]

传输流分组首部如果不含调整字段,则由四个字节构成。调整字段作为可选部分一般只出现在嵌入参考时钟(Program Clock Reference Insertion,PCR Insertion)传输流等特殊分组中。首部中各字段定义具体如下:

同步字节: 1B,固定值为 0x47,传输流分组同步标志。

传输错误指示: 1b,置“1”表示分组中存在无法纠正的误码。

有效负载起始指示: 1b,当分组负载为 PSI 数据时,该位置“1”表示传输流分组中包含 PSI 数据首部,有效负载的第一个字节将作为首部偏移指示字段(pointer_ field),指示 PSI 首部在负载中的偏移位置;置“0”则表示分组中不含 PSI 首部,有效负载为紧接上一分组未传输完毕的数据。

传输优先级: 1b,置“1”表示该分组在相同 PID 的传输流分组中具有较高的优先级,应当优先处理。

PID: 13b,作为传输流分组的识别标志。

传输加密控制: 2b,指示负载的加密状况,0x00 表示负载不加密,其他三个值为用户定

义的加密方式预留。

调整字段控制：2b, 指示分组含有调整字段与有效负载的情况。

循环计数器：4b, 对传输流分组传送顺序的计数。计数采用循环方式, 当计数值达到 15 时, 下一个计数值回到 0。

传输流分组的有效负载由 PES、PSI 或用户私有数据等构成, 当数据长度超过一个分组所能承载的负载长度值时, 会被拆分在多个分组中分段传送。负载紧接分组首部, 不满 188B 的传输流分组通过填充字节补足。

传送复用包数据流首先进行复用适配, 将每 8 个传送复用包组成 1 个超帧, 并将每个超帧中的第一个包的同步字节反转, 即由 47H 变为 B8H。超帧结构图如图 1-21 所示。

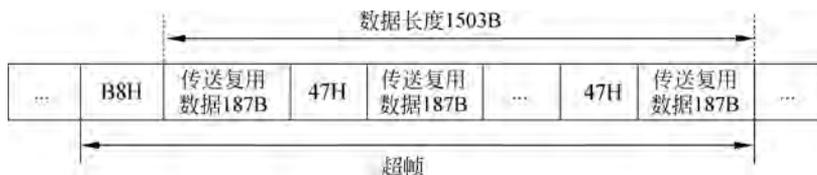


图 1-21 传输流超帧结构图^[5]

DVB-S 的能量扩散采用伪随机序列进行加扰使序列随机化, 接收端采用相同的伪随机序列进行去扰完成去随机化过程。所采用的伪随机序列的生成多项式为 $P(x) = 1 + x^{14} + x^{15}$, 图 1-22 是 DVB-S 随机化及去随机化的原理示意图。此外, 在 DVB-S 系统中, 超帧同步头(B8H)不被加扰, 超帧中每帧的同步头(47H)也不进行加扰操作。

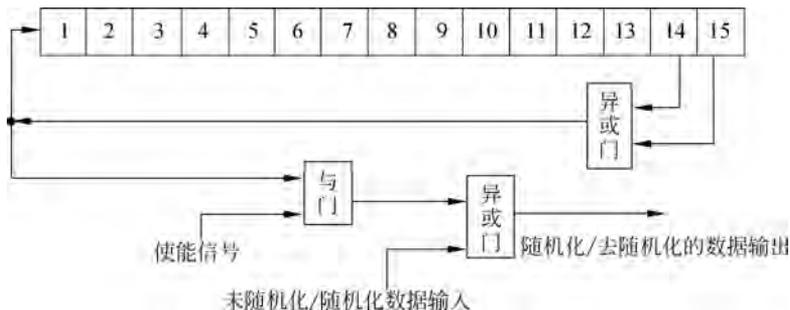


图 1-22 DVB-S 随机化/去随机化原理图^[5]

DVB-S 信道编码采用级联编码, 外码采用 RS 编码, RS 编码采用 (204, 188, T=8) 截短 RS 码, 其原码为 (255, 230, T=8) RS 码, 每个码元含 8b。该编码器对加扰后的每个数据包 (共 188B) 进行编码, 得到长为 204B 的码字; T=8 表示该截短 RS 码的纠正随机错误能力为 8。然后进行卷积交织, 卷积交织的交织深度 $I=12$ 。内码为卷积编码方式, 卷积编码主要用来纠正随机错误, 它允许在生成元为 (171, 133) 的 (2, 1, 6) 卷积码的基础上进行删除, 可供选择的码率有 1/2、2/3、3/4、5/6 和 7/8。1/2 码率的卷积编码输出经删除处理后分成同相分量 I 和正交分量 Q 两路信号, 经平方根升余弦滚降滤波后送到 QPSK 调制器进行调制。

接收端接收的卫星信号经低噪声放大后下变频成 0.9~1.4GHz 的 L 频段信号, 进入综合接收解码器 (Integrated Receiver Decoder, IRD), 如图 1-23, 经调谐器和 QPSK 解调器

解调为数字信号(数字流),此数字流经维特比解码、去交织及 RS 解码,对传输中引入的误码进行纠错,然后对此数字流进行去复用,解出多套节目的数码送到 MPEG-2 视、音频解码器,经解压缩、数模变换等处理后输出模拟信号,输出的模拟视频信号可以是分量信号也可以是复合信号。



图 1-23 DVB-S 数字卫星广播接收流程图

2.1 系统仿真概念与流程

2.1.1 通信系统仿真的概念

随着通信技术的迅猛发展,通信系统建设可采用的技术方法也多种多样,同时通信系统的功能要求也越来越高,系统建设趋于复杂,建设的经费不断增加。对于正在规划或设计的通信项目,可以建立相应的通信系统模型,通过计算机仿真对设想中的通信系统进行多种方案的设计和参数实验,预测系统未来性能和效果,通过对仿真结果的分析,得到最佳方案;对已有通信系统进行改变时,也可以通过系统仿真,模拟改进后系统的运行情况,以寻求满意的改进方案。因此,通信系统仿真的方法可以得到最佳系统参数,为实际工程的设计建造提供参考和依据,从而节省不必要的时间和资金投入。

随着计算机技术和网络技术的迅速发展,我们的生活已经进入信息时代,人们的生活、学习、工作方式都在发生巨大的变化。计算机仿真技术的发展使人们认识发现问题的方式发生了改变。通信系统仿真为理论教学 and 实际工程问题的解决提供了一种手段。在通信教学的课程中,通信系统仿真能够让老师把复杂的通信原理及过程展示给学生,也可以让学生通过通信系统的仿真,对通信的过程有一个更加深入的理解和研究;在实际工程中,通信系统仿真能够对实际工程中的问题进行抽象分析,得出理论参考值,节省投入成本。

实际的通信系统是一个功能结构较为复杂的系统,对这个系统做出的任何改变(如改变某个参数的设置、改变系统的架构等)都可能影响整个系统的性能和稳定性。因此,在对原有的通信系统做出改进或建立一个新系统之前,通过需求对这个系统进行建模和仿真。通过仿真结果衡量方案的可行性,从中选择最合理的系统配置和参数设置,然后再将结果应用到实际系统中。

2.1.2 通信系统仿真的流程

图 2-1 为通信系统仿真流程,下面我们对每个过程进行详细说明。

1. 问题需求分析

在做通信系统仿真之前,首先进行的是需求分析,它包括对问题的抽象分析建模,对主要通信体制、系统规模、预期效果和可能出现的问题等方面进行需求调研和分析。

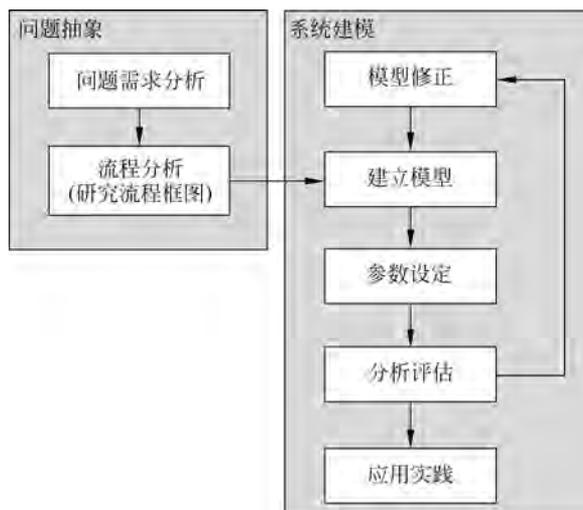


图 2-1 通信系统仿真流程

2. 流程分析

流程分析在系统建模中是十分重要的环节之一，它是实际问题和系统仿真间的纽带，流程分析结果得到具体的流程框图，流程框图指导仿真系统的建立。它决定了仿真的每个流程。

3. 建立模型

根据流程分析得到的流程框图，利用相关工具搭建系统模型进行仿真。

4. 参数设定

根据实际需求设定仿真和测试参数，这一工作需要实际的通信系统有全面了解，以保证置入仿真数据有充分的可信度。测试参数设置在仿真模型建好后，对所关心的仿真结果数据进行分析。仿真时结合系统模型针对取样数据做仿真运行，按预期目标输出仿真结果。

5. 分析评估

评估仿真结果是仿真最重要同时也是最有意义的一个环节，由仿真工作所得到的结果只是抽象数据，需要对这些数据进行后期的分析比较，以提取对系统性能的评估数据，这样才真正完成仿真工作。为得到可信结论，通常对同一系统模型进行多次仿真，每次置入不同系统参数，对多次结果进行比较。

6. 模型修正

根据分析评估的结果对仿真模型进行修正，经过修正后的模型需将其结果输出，再次经过分析评估，分析结果是否达到预期目标。若没能达到设计目标则需要再次修正。

7. 应用实践

从仿真结果的角度，对系统仿真进行分类可以分为验证型仿真和数值运算型仿真。验证型仿真主要是对算法和处理流程的验证分析，这样的仿真结果可以直接应用于实际问题的解决；而对于数值运算型仿真的结果，它是实际问题的理论参考，与实际工程指标存在一定的误差。通过仿真数值与实际指标的误差对比可以衡量该仿真系统性能的优劣。

2.2 Simulink 工具应用

2.2.1 Simulink 简介

Simulink 是 MATLAB 中的一种可视化仿真工具,是一个对动态系统进行建模、仿真和仿真结果可视化分析的软件包,在通信系统仿真中得到了广泛的应用。Simulink 采用基于时间流的链路级仿真方法,将仿真系统建模与工程中通用的方框图设计方法统一起来,使实际问题中抽象出的流程框图较为快速地转化为具体的仿真语言。Simulink 采用模块化建模方式,多种模块之间建立连接,从而完成对通信流程的仿真处理。软件本身提供了大量专业的模块资源供开发者使用,除此之外软件还提供了供开发者进行自定义模块的接口,同时,自身提供了专门用于显示输出信号的模块,可以在仿真过程中随时观察仿真结果。

使用 Simulink,开发者可体验到其图形化操作界面的简单,通过鼠标操作就可将一个相当复杂的动态系统模型建立起来。Simulink 可以避免或减少编写 MATLAB 仿真程序的工作量,从而简化仿真建模的过程,其特点更加适合于大型系统的建模和仿真。Simulink 中的帮助文档提供了十分详细的模块说明和开发流程,并给出部分系统仿真的实例以便开发者研究学习。

Simulink 仿真环境附带了许多专业仿真模块库,开发者利用这些模块可以快速建立相应的系统模型进行仿真。模块化的处理使得开发者不必花费大量的时间去了解模块内部的结构,大大方便了复杂系统的建模。Simulink 提供的这些专业模块均通过了各专业的权威专家评测,具有较高的可信度和稳定性,从而保证了仿真系统的精度和可靠性。

2.2.2 Simulink 编程语言——S 函数

为了将系统数学方程与系统可视化模型联系起来,在 Simulink 中规定了固定格式的接口函数形式,称为 S 函数。S 函数是用不同的编程语言,包括 MATLAB、C、C++ 和 FORTRAN 等写成的 Simulink 模块的一种语言描述。S 函数还可以进行编译,以提高执行速度。Simulink 自带的标准模块库就是用 S 函数编写并进行编译后形成的。使用 S 函数可以极大地扩充平台的仿真能力。

1. S 函数的工作原理

开发者在编写 S 函数之前,了解 S 函数的工作原理是有必要的。这对于了解 Simulink 的整个仿真原理也十分有益。

Simulink 模型的执行是按阶段进行的,Simulink 仿真包括两个阶段:初始化和模型执行。在初始化阶段,Simulink 引擎把模型采用的各个模块纳入系统模型:确定没有显示设定的信号属性(例如名称、数据类型、信号宽度和采样时间);模块估值;确定模块的执行顺序;分配和初始化存储模块状态和输出当前值的存储空间。

接下来,Simulink 模型的运行进入仿真循环阶段。在每一次循环中,Simulink 引擎根据初始化阶段确定的顺序执行模型中的每个模块。Simulink 模块在仿真的过程中可以抽象为输入变量、状态变量和输出变量,其中输出变量又是抽样时间、输入变量和状态变量的函数,如图 2-2 所示。