

通信系统

第 一 册

(内部试用)

中国人民
解放军 工程技术学院三系

一九八二年四月

前 言

本讲义系根据我院对数字通信专业本科学员的教学要求以及有关业务指挥干部的短训计划应急编写的，暂时供内部试用。

为了适应不同类型学员的基础和要求，为了保持知识的系统性和完整性，本讲义涉及的面较宽，深浅度起伏也较大，并对先修课有必要的重复，拟在讲授时，针对不同对象进行适当的调整 and 选择。

《通信系统》是通信基础理论的综合应用课程。其主要任务是明确通信系统的组成方式、一般原理、接口关系、性能特点、指标要求、国际标准、技术关键、设计考虑和改进思路等。从而使学员初步掌握不同通信系统的分析方法和计算方法。因此，它的特点是着重于总体概念的讨论和共性问题的研究，而很少涉及具体电路的详细分析和具体设备的全面解剖。

本讲义分为两篇，连同绪论共十一章。第一篇（二～六章，分装两册）是短波单边带通信系统，介绍了短波电道的特点和参量计算；单边带通信的基本原理和系统结构；单边带收、发信机的设计考虑以及短波数字通信中的某些问题。第二篇是卫星通信系统（七～十一章，分装三册），系本课程的重点。这部分介绍了卫星通信的一般概念、多种体制、线路计算、地面站构成以及今后的发展。

考虑到未来工作的需要，本讲义对模拟通信和数字通信、发信系统和受信系统都进行了介绍，但是较多地讨论了数字通信，重点地讨论了接收系统。

本讲义在编写过程中得到二局有关部门和许多同志的热情支持与帮助，特此表示感谢。

由于水平有限，加上时间仓促，不妥甚至谬误之处可能不少，望使用的同志提出批评指正，以便在编写正式教材时加以改进。

目 录

第一章 绪 论

§ 1—1 无线电通信及其发展概况	1
§ 1—2 通信系统概述	6

第一篇 短波单边带通信系统

第二章 短波信道

§ 2—1 短波通信的基本概念	16
§ 2—2 短波传播的特点	17
2.2.1 电离层的结构及其特性	17
2.2.2 衰落现象	20
2.2.3 环球回波	23
2.2.4 寂静区(越跨区)	24
2.2.5 电离层爆变	26
§ 2—3 短波电道的计算	26
2.3.1 工作频率的确定	27
2.3.2 接收点场强的计算	33
2.3.3 求最小辐射功率	38

第三章 单边带通信的基本原理

§ 3—1 单边带通信的一般概念	39
3.1.1 单边带通信方式的形成和发展	39
3.1.2 SSB 信号的特点	40
3.1.3 SSB 通信的优缺点	49

§ 3—2	SSB信号的产生	52
3.2.1	滤波法	53
3.2.2	移相法	57
3.2.3	第三法	58
3.2.4	合成法简介	62
§ 3—3	SSB信号的解调	67
3.3.1	滤波法解调	67
3.3.2	移相法解调	68
3.3.3	第三法解调	70
§ 3—4	SSB通信的频率稳定问题	71
3.4.1	对频率稳定性的要求	71
3.4.2	稳频措施	76
§ 3—5	SSB通信系统的组成	81
3.5.1	SSB系统的总体结构	81
3.5.2	SSB通信机的分类	83
3.5.3	SSB收、发信机的组成	85
第四章 SSB通信系统的质量指标		
§ 4—1	SSB通信设备中的非线性失真问题	90
4.1.1	非线性失真的一般分析	91
4.1.2	放大器的非线性失真	96
4.1.3	混频器的非线性失真	109
4.1.4	克服非线性失真的一般方法	113
§ 4—2	SSB发射机技术指标	114

§ 4—3 SSB接收机技术指标	118
第五章 SSB通信系统设计的考虑	
§ 5—1 SSB发射机的设计考虑	129
5.1.1 SSB信号产生的方案选择	129
5.1.2 混频次数的确定	129
5.1.3 两次混频方案中“中频”的选择	129
5.1.4 实现大功率高频宽带发射的措施	133
5.1.5 减小非线性失真的措施	134
§ 5—2 SSB接收机的设计考虑	136
5.2.1 混频次数的确定	136
5.2.2 中频频率的选择	136
5.2.3 前端电路(高频头)的考虑	141
5.2.4 选择性分配	154
5.2.5 增益分配	155
§ 5—3 SSB收、发信机的方案举例	156
5.3.1 SSB发射机方案举例	156
5.3.2 SSB接收机方案举例	158
第六章 短波数字通信中的一些问题	
§ 6—1 短波信道特性对传输数字信号的影响	162
6.1.1 多普勒频移的影响	162
6.1.2 多径效应的影响	163
§ 6—2 实时选频技术	169
6.2.1 卡斯自动选频和预报系统	170

6.2.2 短波测试设备选频系统	174
§ 6—3 分集接收技术	178
6.3.1 基本概念	178
6.3.2 分集方式	179
6.3.3 合并方式	181
6.3.4 分集接收的效果	186
§ 6—4 调制和解调技术	187
6.4.1 概 述	187
6.4.2 频率差分移相键控(FDPSK)方式	191
6.4.3 多电平脉冲调幅方式(MPAM)	198
6.4.4 多频移频键控(MFSK)	204
§ 6—5 自适应通信技术概述	206
6.5.1 反馈自适应通信	207
6.5.2 前向自适应通信	208
§ 6—6 短波数据的入网问题	214
§ 6—7 短波数字通信的发展动向	216

第一章 绪 论

§ 1-1 无线电通信及其发展概况

广义上讲,使用任何方法,通过任何媒质,由一地向另一地(即在不同位置上)传递信息,进行联系,均可称为“通信”,如狼烟、金鼓、号角、哨音、旗语、灯语、信函、电话、电报、电视、传真等等。随着社会的进步,人们逐渐发现,借助于电(电压、电流、电磁波等)几乎能使各种信息(如语言、文字、数据、图象等)在极远的距离上实现迅速、有效、准确、可靠的传递。这种利用电能所进行的通信称为“电气通信”或“电通信”,简称“电信”。今天,电信已成为人类社会的主要通信手段,以至“电信”与“通信”近于同义词而不加区分。我们以后提到“通信”,若不作特别声明,也均指“电信”。

根据传递信息的媒质的不同,通信可分为两大类:一类称为有线通信,它是利用导线来完成信息传递的一种通信方式;另一类称为无线通信,它是利用电磁波在空间传播来完成信息传递的一种通信方式。无线通信又按电磁波的波长分为“无线电通信”(频率在 $10\text{KHz} \sim 400\text{GHz}$)和“光波通信”(目前主要是波长小于 $300\mu\text{m}$ 的激光通信)。

在空间传播的电磁场称为电磁波。在真空中其传播速度为 3×10^8 米/秒。其波长范围极广,从 10^4km (公里)到 0.1pm (皮米),即 $0.001\text{\AA}$ (埃) [$1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ (微米) $=10^{-10}\text{m}=10^{-1}\text{nm}$ (纳米) $=10^2\text{pm}$]。其波段的划分如表1-1所示。当前主要采用无线电射频波段和红外线波段。

无线电波一般指 10^3m 到 1mm (一说 $3 \times 10^3\text{m} \sim 0.1\text{mm}$)的电磁波。其传播途径可分为地波、空间波和地表波三种。其波段划分及应用

范围如表 1-2 所示。无线电通信是本课程的主要研究对象。

表 1-1 电磁波波段划分

波段名称	波 长	频 率	附 注
工业波段	10^3m 以上	3KHz 以下	一般在交流发电机中产生。
音频波段	$3\times 10^3\text{m}$ 以上	10KHz 以下	人耳的听觉范围是 16-20000Hz
视频波段	30m 以上	10MHz 以下	
射频波段	$10\text{m}\sim 0.1\text{mm}$	$3\text{KHz}\sim 3000\text{GHz}$	即无线电波段, 一说 $10\text{KHz}\sim 400\text{GHz}$ 。
光 波	红外线	$0.1\text{mm}\sim 0.76\mu\text{m}$	$3000\text{GHz}\sim 3.9\times 10^5\text{GHz}$ 一说 $0.75\text{mm}\sim 0.76\mu\text{m}$ 有远、中、近之分
	可见光	$0.76\mu\text{m}\sim 0.4\mu\text{m}$	分红橙黄绿青兰紫等七种。
	紫外线	$0.4\mu\text{m}\sim 50\text{\AA}$	一说 $0.4\mu\text{m}\sim 5000\text{\AA}$ 。
	伦琴射线	$50\text{\AA}\sim 0.04\text{\AA}$	即 X 射线。一说 $5000\text{\AA}\sim 4\text{\AA}$ 。
	丙种射线	$0.04\text{\AA}$ 以下	即 γ 射线。一说 $4\text{\AA}$ 以下。

通信还有其它一些分类方法。例如按传输特征分, 有线通信又可分为架空明线、电缆、波导、光纤通信等; 无线通信可分为长波、中波、短波、超短波、对流层散射、流星余迹、微波中继、卫星中继、激光通信等。按通信业务可分为电报、电话、电视、数据、传真、广播等。按传输容量可分为单路通信和多路通信。按信号形式可分为模拟通信和数字通信。按线路结构可分为点对点通信和网通信等等。

在人类的各种社会事业中, 通信事业的发展是最快的。这充分体现了它的重要性, 体现了它和人类生活极为密切的关系。从第一台有线电

表 1-2 无线电波段的划分

波(频段)名称		波 长	频 率	应 用 范 围
超长波(甚低频 VLF)		$10^3 \sim 10^4 \text{ m}$	$3 \sim 30 \text{ KHz}$	1. 海岸~潜艇通信; 2. 海上导航。
长波(低频 LF)		$10^4 \sim 10^5 \text{ m}$	$30 \sim 300 \text{ KHz}$	1. 大气层内中距通信; 2. 地下岩层通信; 3. 海上导航。
中波(中频 MF)		$10^3 \sim 10^2 \text{ m}$	$300 \text{ KHz} \sim 3 \text{ MHz}$	1. 广播; 2. 海上导航。
短波(高频 HF)		$10^3 \sim 10 \text{ m}$	$3 \sim 30 \text{ MHz}$	1. 远距离通信; 2. 广播(占低端一部分)
超短波(甚高频 VHF)(米波)		$10 \sim 1 \text{ m}$	$30 \sim 300 \text{ MHz}$	1. 电离层散射通信($30 \sim 60 \text{ MHz}$); 2. 流星余迹($30 \sim 100 \text{ MHz}$, $40 \sim 80 \text{ M}$ 最佳); 3. 人造电离层通信($30 \sim 144 \text{ MHz}$); 4. 对飞机、导弹、卫星等空间飞行体的通信。
微波	分米波(特高频 UHF)	$1 \sim 0.1 \text{ m}$	$300 \sim 3000 \text{ MHz}$	1. 小容量微波中继($8 \sim 12$ 路, $352 \sim 420 \text{ MHz}$); 2. 对流层散射通信($700 \sim 10000 \text{ MHz}$); 3. 中容量微波中继(120 路, $1.7 \sim 2.4 \text{ GHz}$)
	厘米波(超高频 SHF)	$10 \sim 1 \text{ cm}$	$3 \sim 30 \text{ GHz}$	1. 大容量中继通信(6000 路, $3.6 \sim 4.2 \text{ GHz}$); 2. 大容量中继通信(2500 路, $5.85 \sim 8.6 \text{ GHz}$); 3. 卫星通信(常用 $3 \sim 10 \text{ GHz}$)
	毫米波(极高频 EHF)	$10 \sim 1 \text{ mm}$	$30 \sim 300 \text{ GHz}$	1. 再入大气层时的通信; 2. 波导通信
	亚毫米波(超极高频 SEHF)(远红外线低端)	$1 \sim 0.1 \text{ mm}$	$300 \sim 3000 \text{ GHz}$	1. 波导通信; 2. 光纤通信; 3. 激光通信。

报机出现(1830年)到现在只有150年,从第一台无线电报机出现(1895年)到现在则只有80多年,可是已经到了高度发达的阶段。据统计,廿世纪以来,通信的速度增加了1000万倍,信息的记录速度增加了100万倍。而与人类生活有密切关系的能源的生产不过增加了1000倍,工业产品生产只增加了几百倍。在军备竞赛的时代,武器的生产也不过增加了100万倍。

从通信距离来看,已从几公里发展到几万公里的全球通信和亿万公里的宇宙通信。

从通信容量看,已从单路电报或电话发展到每信道传输数百兆比特/秒的数据或数十万路电话。

从使用的频率范围看,已从初期的长波通信发展到波长为十几个微米的光波通信。

从业务范围看,已从初期的电报电话通信发展到高速的数据、传真以及各种静止和活动的图象等,并且从社会公用通信发展到了办公室和家庭通信。

从信号形式看,已从模拟通信发展到数字通信,并已开始建立纯数字化的通信线路和通信网。

纵观通信的发展过程,其总的趋势是不断地向高效率和高可靠性迈进。高效率主要体现在长距离和大容量。要实现大容量的通信就必须设法扩展使用的频率范围和压缩信号的频带。高可靠性主要体现在抗干扰能力的加强和检测技术的改进。这就要不断寻找新的传输方式和信息处理方式。当然,根据不同的业务需要,小型化、保密性、经济性等等也都受到高度重视,并且不断取得新的进展。

可以预计,通信事业的未来更是不可限量的。对于80年代的发展

前景，我们可以作如下展望：卫星通信将是发展最快的通信手段，国际电信卫星通信网可借助V代卫星进一步得到完善，从而使通信容量扩大一倍（达到12000路双向话），光纤通信将有长足的进展，估计80年代末太平洋电缆将换成光纤。国际计算机直通业务（ICAS）将逐步开放。国际直通电报将成为国际通信的主角，报量将超过5000万次。办公室通信（国际自动拨号长话、电视电文、用户电报、远距复制、文稿显示等）和家庭通信（家庭双向电视、壁挂式电视、超小型携带式电话、微处理器值班电话、电视电话、卫星电视接收、自动控制用电、报警、防灾等）将大大发展。短波通信将进一步向独立边带、数字化、国体化前进。散射通信也将向数字化发展，并利用新的分集接收方式。总之，今后十年中，各种通信手段都在竞争中有显著的新进展。不同的通信方式将有不同的发展速度，但任何一种方式还不大可能完全被其它方式所取代。在各种通信手段中，数字通信方式是极有发展前途的，短距离传输会大量使用，但远程传输仍将多用现有的模拟设备。

§ 1-2 通信系统概述

实现某种通信过程的全部设备和传输媒质总称为“通信系统”。利用无线电信道传递信息的通信系统称为“无线电通信系统”。所有的各种通信系统都可以用图1-1加以概括，该图反映了通信系统的共性，一般称为“通信系统模型”。通常，根据研究对象和讨论问题的不同，还可以给出不同形式的较为具体的通信系统模型。

图1-1中各方框的含义有不同的说法，这无关紧要，不影响我们对整个通信系统的理解。

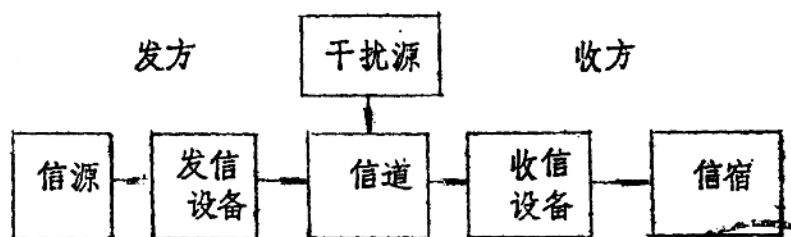


图 1-1 通信系统模型

“信源”即信息源，又称发信者，是所要传送的消息的发源地。其作用是把消息（如语音、符号、图形、影象等）转换成电信号，并进行适当的复用处理。若为数字通信，又包括模/数转换装置，即所谓“信源编码”设备。有人把原始电信号的产生装置（如电话单机、打字机、录相机等等）称为“发消息终端设备”，而把信号复用、信源编码设备称为“发信终端设备”。我们这里把发信终端以前的部分都看成是信源，其输出为基带信号（有的只把发消息终端看作信源）。

“信宿”即信息的归宿，又称收（受）信者。其作用是把基带信号分割变换为原始电信号（由受信终端完成），再把电信号转换为人们可以感知的原始消息（由收消息终端完成）。我们这里把受信终端以后的部分都看成是信宿（有的则只把收消息终端看作信宿）。

发消息终端和收消息终端统称为“消息终端”。发信终端和受信终端统称为“通信终端”。

至此，我们需要复习明确几个已经遇到的名词概念。

信息：人们想要确知而尚未确知的事件、情态或知识称为信息。它载荷于消息之中，是人们传递和处理的对象。它和物质（有形的设备）、

能量（无形的动力）共同构成实现通信的三大要素。

消息：用以载荷信息的有次序、有规律、可以识别的状态或现象称为“消息”。有各种不同形式的消息，通常分为两类：一类是具有连续时间函数特征的消息，称为“连续消息”，如读声、音乐、动画等。另一类是具有离散时间函数特征的消息，称为“离散消息”，如文字、符号图表等。

信号：由消息转化过来，与消息一一对应，且适于在信道上传输的物理量称为“信号”。在电信中体现为电压、电流或电波（称为“电信号”）的幅度、频率或相位等的变化。有多种不同形式的信号，通常也分为两类：一类是具有连续时间函数特征的信号，称为“连续信号”或“模拟信号”。它对应于“连续消息”，如电话、电视等。另一类是具有离散时间函数特征的信号，称为“离散信号”。如果不仅在时间上离散，而且取值也是离散的则统称为“数字信号”。数字信号可以直接由离散消息转化而来，如电报信号，数据信号等；也可以由连续信号转化而来，如数字电话、数字电视等。

以上介绍了信源、信宿和几个名词的概念，下面继续说明其它几个方框的内容和作用。

“发信设备”是发信终端到传输媒质之间的设备。其作用是把信号进行各种变换和处理，使之适合在特定的信道中传输。不同的通信系统有不同的设备组成。例如在卫星数字通信中它包括信道编码（纠错编码）、信道调制、上行变频、微波放大、发射天线等。

“收信设备”是收信方从传输媒质到收信终端之间的全部设备。其作用与发信设备恰好相反，是把由信道中接收下来的信号进行反变换，使之适合受信者的要求，它所包括的设备也随着系统的不同而不同。如

在卫星数字通信中它包括接收天线、微波放大、下行变频、信道解调、纠错解码等。

有人把调制以前和解调以后，即“中频”以下的部分统归于通信终端，而只把上变频到发射天线的部分看作发信设备，称为“发信机”；把接收天线到下变频的部分看作收信设备，称为“收信机”。这也未为不可。

“信道”一般指传输信号的媒质和通道，称为“狭义信道”。有时为了便于研究信息传输中的某些问题，把传输媒质两端的一部分设备或全部设备都统称为信道。例如，从研究调制与解调的基本问题出发而构成的信道称为“调制信道”；着眼于研究编解码问题的信道称为“解调信道”等。这些信道都属于“广义信道”。图 1-1 中的信道是狭义信道。

有多种形式的信道，也有多种的分类方法。

按媒质的形式分为两类：一类是有线信道，由有形的导线构成，如架空明线、同轴电缆、传输波导、光导纤维等。另一类是无线信道，由电磁波作媒质。现代无线通信系统的典型信道有：(1)中长波地表波传播信道；(2)短波电离层反射信道；(3)超短波及微波视距传播信道；(4)超短波流星余迹散射信道；(5)超短波电离层散射信道；(6)超短波及微波对流层散射信道；(7)超视距绕射信道；(8)人造卫星中继信道；(9)光波视距传播信道等。这九种信道各有其不同的特点，我们在此只讨论有关的通信系统时作具体的介绍。

按传输信号的形式可分为传输连续信号的“模拟信道”和传输数字信号的“数字信道”。

按信道能力可分为“无记忆信道”和“有记忆信道”。如果信道在一定的时刻输出的符号在统计上仅与相应的输入符号有关系，而与在

以前的输入符号没有关系时，称为“无记忆信道”。如果在一定时刻输出符号不仅与该时刻的输入有关，而且与它以前的输入符号有关，则称为“有记忆信道”。狭义信道是无记忆信道。有的广义信道，如编码信道是有记忆信道。

按信道参量的特性可分为“恒参信道”和“变参信道”。信道参量（如时延、衰耗、频率或时间扩散）不随时间变化的信道称为“恒参信道”，也叫“时不变信道”或“非时变信道”。信道参量随时间而随机变化的信道称为“变参信道”，也叫“随参信道”或“随机时变信道”。在前面列举的九种无线信道中，除(1)(3)(8)几种以外，其余大致上都属于变参信道。

对各种广义信道的研究表明，它们都具有以下的共同特点：

- (1) 具有一个（或多个）输入端，也一定有一个（或一对）输出端。各种形式的信号功率可以馈进其输入端，而收取自输出端。
- (2) 大多数信道可认为是线性的，满足叠加原理。
- (3) 即使信道没有输入，在输出端也存在一定的功率，即加性干扰。
- (4) 信号通过信道传输时需要一定的延迟时间，并以不同方式受到衰减（固定的或时变的损耗）。

这些特性说明，各种类型的信道都可以概括为二端或四端的线性网络，如图 1-2 所示，称为“信道模型”。

对于图 1-2(a)来说，其输入输出关系一般可由下式决定：

$$S_o(t) = K(t) S_i(t) + n_i(t) \quad (1-1)$$

对于图 1-2(b)来说，设有 K 个输入端， n 个输出端，则其输入输出关系可表示为

$$S_{oj}(t) = \sum_{m=1}^k K_{jm}(t) S_{im}(t) + n_{ij}(t) \quad (1-2)$$

式中 $S_i, S_{i,m}$ —— 输入信号,
 $S_o, S_{o,j}$ —— 输出信号,
 $n_i, n_{i,j}$ —— 加性噪声,
 $K, K_{j,m}$ —— 传输系数。

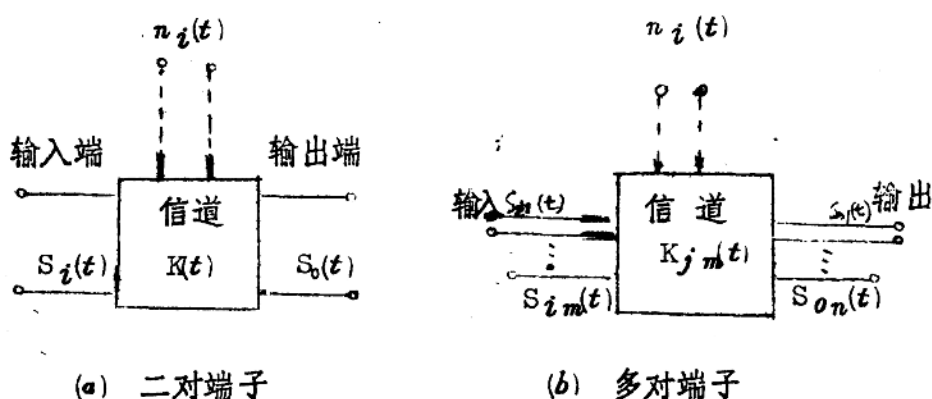


图 1-2 信道模型

当 K 基本不变时即为恒参信道；当 K 与 t 有密切关系作随机变化时，则为变参信道。对于变参信道目前尚未建立很完善的数学模型，我们暂在介绍具体信道时作定性的说明。

各种信道传输信息的容量是有限的，不同信道有不同的容量。信道每秒钟能够传送的最大信息量称为“信道容量”。高斯噪声信道传输数字信息的信道容量可用下式表示：

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ b/s} \quad (1-3)$$

式中 C —— 信道传送信息的最大可能速率，单位为“比特/秒” (b/s)。

B —— 信道带宽，单位赫兹 (Hz)。