

现代军事电子技术丛书

# 通 信

邹深昌 毛孝利 许宗泽 编  
沈祖伟 仰书耀

国防工业出版社

现代军事电子技术丛书

# 通 信

邹深昌 毛孝利

许宗泽 沈祖伟 仰书耀 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书是“现代军事电子技术丛书”的一个分册。共分三篇：第一篇，数字通信。主要内容是脉冲编码调制和增量调制；数字信号的载波调制和解调；数字通信同步。第二篇，卫星通信。主要内容是卫星通信的空间部分；卫星通信地面站。第三篇，扩频通信。主要内容是扩频原理及其主要性能指标；扩频用伪随机码序列；扩频信号的产生；相关与解调；扩频技术同步；扩频通信系统。

本书可供电子专业的工程技术人员、高等院校、中等专科学校师生等阅读。

现代军事电子技术丛书

通 信

邹深昌 毛孝利

许宗泽 沈祖伟 仰书耀 编

责任编辑 余发棣

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张9<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 255千字

1986年9月第一版 1986年9月第一次印刷 印数：0,001—2,370册

统一书号：15034·3023 定价：2.40元

## 前 言

本书比较通俗地介绍了航空通信技术以及有关的几种现代通信技术，适合于本专业工程技术人员和跨学科的科学工作者阅读。

通信的问题，实际上是消息的传输问题。要合理地用信号表示消息，并且将信号传输到对方，就要对信号进行一系列的变换。所以通信的过程也是一连串的信号处理的过程。模拟通信和数字通信中的信号处理则是两大类的信号处理方法。随着计算机技术的迅速发展，人与人之间的通信逐步扩大到计算机之间的通信，包括人与计算机之间的通信。数字通信越来越占重要地位。由于大规模集成电路的发展，数字通信设备的性能日益提高，功能日益增多。例如对数字信号的存储、交换、编码、加密都比较方便。数字通信能同时传输多种类型的信号。例如计算机的数据、数字化的电话信号以及遥控遥测的数字化信号，用时分多路的方式汇集在一起，通过数字卫星通信系统进行传输。

军事通信技术，需要在电子战环境下使用。也就是说，通信可能会受到敌方的干扰、拦截和窃听。要防止被窃听，加密是非常必要的。要防止干扰，可以采用能自动回避干扰方向的自适应天线。除了天线之外，对通信设备本身，采用扩频通信技术，则是主要的对抗电子干扰的手段了。为了增强在电子战中的生存能力，免受敌方窃听和破坏，目前的军事通信设备愈来愈复杂了，成本和价格也愈来愈昂贵了。

现代通信技术广泛应用于航空工程中，一项全新的先进的电子技术和通信设备往往最先应用于航空工程；此外，卫星通信是目前全球远距通信传输信息最多的通信技术，它的通信容量大，质量高，区域广。航空通信和卫星通信集中了航空工程、空间工

程和电子工程的先进技术，并对通信技术的发展有极大的影响。

基于上述理由，本书选择了下述几部分为内容。在绪论中论述了航空通信的概况，由邹深昌编写。第一至四章讲述数字通信，由毛孝利编写。第五、六、七章讲述卫星通信，由许宗泽（第五、六章）和沈祖伟（第七章）编写。第八至十四章讲述扩频通信，由仰书耀编写。

作者水平有限，不妥之处，敬请各位读者批评指正。

## 目 录

绪 论	1
<b>第一篇 数字通信</b>	
第一章 数字通信概论	6
§ 1-1 数字通信系统及其主要性能指标	6
§ 1-2 数字通信的优缺点及其发展	11
第二章 脉码调制与增量调制	14
§ 2-1 脉码调制的基本原理	14
§ 2-2 取样定理和取样器	15
§ 2-3 量化和量化噪声	18
§ 2-4 如何选择码组	20
§ 2-5 数/模变换器	23
§ 2-6 编码器	31
§ 2-7 对称二进制码的产生	37
§ 2-8 非均匀量化	38
§ 2-9 增量调制	46
§ 2-10 简单增量调制的特性	49
§ 2-11 自适应增量调制	53
§ 2-12 时分多路通信的概念和帧结构	57
第三章 数字信号的载波调制和解调	60
§ 3-1 概述	60
§ 3-2 振幅键控	61
§ 3-3 移频键控	68
§ 3-4 移相键控	71
§ 3-5 二进制数字调制系统性能比较	81
第四章 同步	83
§ 4-1 概述	83



§ 4-2	位同步的方法	83
§ 4-3	群同步	89
§ 4-4	网同步的概念	94

## 第二篇 卫星通信

第五章	卫星通信的发展	100
§ 5-1	卫星的发展史	100
§ 5-2	国际通信卫星	104
§ 5-3	国内通信卫星	108
§ 5-4	移动通信卫星	108
§ 5-5	卫星通信的优点	110
第六章	空间部分	117
§ 6-1	卫星轨道	117
§ 6-2	卫星线路	124
§ 6-3	卫星结构	134
§ 6-4	传输损耗	139
§ 6-5	噪声	145
§ 6-6	频率选择	151
第七章	卫星通信地面站	156
§ 7-1	地面站的组成	156
§ 7-2	多路复用	161
§ 7-3	多址联接和按需分配	170
§ 7-4	频分多址方式	174
§ 7-5	时分多址方式	178

## 第三篇 扩频通信

第八章	扩频原理及主要性能指标	190
§ 8-1	扩频原理	190
§ 8-2	扩频系统抗干扰性能分析	194
§ 8-3	跳频法扩频(F-H)	196
§ 8-4	跳时法扩频(T-H)	198
§ 8-5	混合方式扩频	199

§ 8-6 扩频系统的特点 .....	202
附录(一) 扩频信号的频谱分析 .....	205
附录(二) 扩频系统对各种干扰的抑制分析计算 .....	207
<b>第九章 扩频用伪随机码序列 .....</b>	<b>213</b>
§ 9-1 伪随机序列的产生和基本性质 .....	213
§ 9-2 最长线性移位寄存器序列( $m$ 序列) .....	214
§ 9-3 $m$ 序列的功率谱 .....	217
§ 9-4 码型的选择 .....	219
§ 9-5 比特速率和码长的选择 .....	223
§ 9-6 $m$ 序列的设计 .....	224
<b>第十章 扩频信号的产生 .....</b>	<b>226</b>
§ 10-1 直接序列扩频信号的产生——双平衡混频/调制器 .....	226
§ 10-2 跳频信号的产生 .....	228
§ 10-3 信息的传送 .....	232
§ 10-4 信息数字化方法 .....	233
<b>第十一章 相关与解调 .....</b>	<b>237</b>
§ 11-1 扩频的反变换——解扩 .....	237
§ 11-2 码定时误差对相关运算的影响 .....	240
§ 11-3 相关器对外来干扰的抑制作用 .....	241
§ 11-4 基带信号的恢复——信号解调 .....	246
<b>第十二章 同步 .....</b>	<b>255</b>
§ 12-1 扩频系统同步不确定性的来源 .....	255
§ 12-2 起始同步 .....	256
§ 12-3 同步的证实 .....	263
§ 12-4 跟踪 .....	268
§ 12-5 相干载波跟踪 .....	272
<b>第十三章 扩频通信系统(一)</b>	
<b>射频链的总体设计考虑 .....</b>	<b>274</b>
§ 13-1 噪声和同波道用户干扰 .....	274
§ 13-2 信号动态范围和自动增益控制 .....	275
§ 13-3 传播媒质的影响 .....	278
§ 13-4 收发信机总体设计的考虑 .....	280



第十四章 扩频通信系统(二) .....285

    扩频新器件、扩频通信系统举例 .....285

    § 14-1 扩频通信系统发展概况回顾.....285

    § 14-2 表面声波器件工作的物理基础.....285

    § 14-3 面声波器件功能简介.....289

    § 14-4 SAW 器件在扩频通信中的应用 .....297

参考文献 .....303

# 绪 论

## 一、航空通信技术概论

飞机在飞行中要不断地与地面指挥塔台取得联系，无线电信设备对飞机来说是必不可少的，靠它来保证飞机的安全飞行和完成飞行任务。

航空通信包括飞机通信（空—地，空—空）和航空设施间的地勤通信。目前多数飞机只用模拟的语音通信，特殊用途的飞机才使用数据通信和电传打字机。少数飞机还使用数字传真。地勤通信除了使用模拟的语音通信外，还使用数据通信。

现代飞机通信主要用甚高频（VHF）100~150兆赫波段和特高频（UHF）225~400兆赫波段。这是最普通的模拟通信，用语音进行调幅的通信方式。在这些波段中，每隔25千赫作为一个频道。通话时是半双工方式：即参加通话的各飞机和地面塔台同时使用一个频道，只是讲话时才发射电波，讲话完毕就停止发射，转入接收状态。这种方式每次只有一个电台发射，主要是指挥员讲，其他成员只能作简短的答话。表1所列是当前服役的几种美国军用电台。

表1 当前服役的美军航空电台

型 号	波 段	调 制	功 率
AN/ARC-164	UHF225-400兆赫	调幅	10瓦
AN/ARC-171	UHF225-400兆赫	调幅/调频	30~100瓦
AN/ARC-186	VHF30-88兆赫	调幅/调频	10~15瓦
AN/ARC-165	HF2-30兆赫	单边带/独立边带	250~1000瓦
AN/TRC-97A	SHF4.5-5千兆赫	调频/调分多路	1000瓦

这种通信的范围限于“视距”之内，称为“视距通信”。由于地球表面的弯曲，视距的范围与飞行高度有关。飞得越高，看得

越远，视距的范围也越大，见图0-1。如果飞行高度低，在阴影区内电波受地球表面的阻挡，电波不能直达，就不能通信了。在一定的飞行高度下，最大视距可由下式估算

$$R = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

其中 $R$ 为最大视距，以公里为单位。

$h_1, h_2$ 为两飞机的高度，以米为单位。

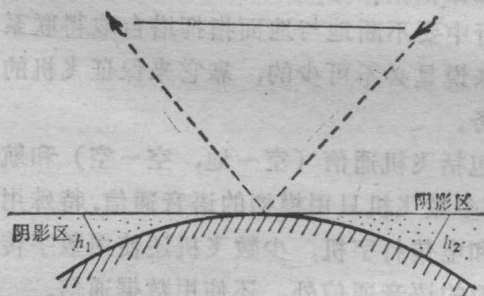


图0-1 视距通信范围

例如飞机的飞行高度为一万米，最大可通信距离约为824公里。

有些对地面作空中支援的飞机还加装了甚高频(VHF)30~88兆赫的调频语音通信电台。因为地面部队的坦克电台就是这种调频电台，这时飞机可以与它们连通。

另外，大型飞机的战略通信，还有短波(HF)2~30兆赫的短波电台，采用单边带调制。短波波段中，无线电波可以由数百公里高空上的电离层反射回来，通信距离几乎可以到达地球上任一点。而以这种电台能和远距离的指挥控制中心通信，也可以用于空中交通管制。因为电波经由高空的电离层反射下来，还能适用于超低空的通信。不过，电离层经常变化，日夜的强度和高度也不同，通信不稳定。此外，短波波段还常常遭受天电干扰，可用的频带也很窄。能够传输的信息很有限(即通信容量是很小的)。目前正在试验采用卫星通信来作远距离大容量的通信。另外为了解决中距离的视距外通信，也可以采用高空飞机作中继通信

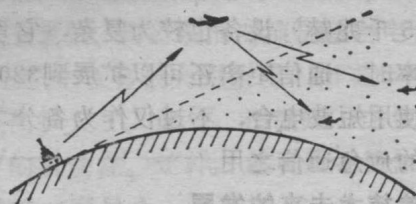


图0-2 高空中继通信的概念

(见图0-2)。这种中继通信采用特高频波段，频带宽，容量大，不受天电干扰，也能较好地解决中距离通信问题。超低空通信也属于这种情况，所以这些技术也能解决超低空通信的问题。

航空设施间的地勤通信。机场之间、地面指挥控制中心、空军基地、各种地面上的航空设施之间的通信是很频繁的。除了使用普通的通信方式外，军用通信主要是采用对流层散射电台。美军AN/TRC-97A电台（见表1）就是典型的一种。它采用直径为8英尺的抛物面天线，通信距离可达160公里，可传输24路数据，每路2.4千比特每秒。少数电台还加装有保密数字装置。这种电台可以移动，有一定的机动性。

对流层散射通信的原理见图0-3。在数十公里的高空上，空气的密度、温度与压力都存在微小的不均匀性，电波照射时将会有散射现象。收发两端使用方向性强的抛物面天线，可以达到通

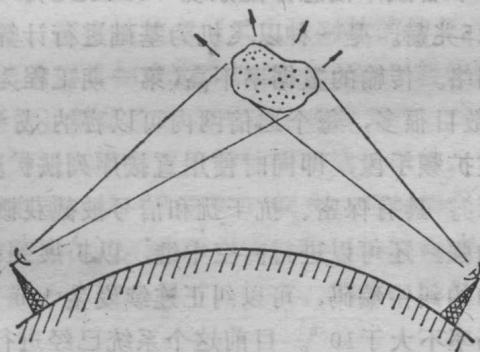


图0-3 对流层散射通信的概念

信的目的。当然，所使用的发射功率较大（1千瓦至数千瓦），频率也较高（4~5千兆赫），设备也较为复杂，它可以用汽车运载。加大发射功率时，通信距离还可以扩展到320公里。

地勤通信还使用短波电台，不过仅作为备分之用或前沿的指挥操作中心之间的应急通信之用。

### 二、航空通信技术未来的发展

由于计算机技术的发展，机载雷达、导航、驾驶、武器、预警、防撞等各个系统都可用计算机进行智能管理，必须具有数据通信能力。而目前却缺乏专门的数据通信系统，不能实现计算机对计算机的通信，不能对机内各系统进行智能管理。在军事应用方面，由于电子对抗（ECM）的急剧发展，通信随时可能被窃听和干扰，要求增加保密和抗干扰的措施。无论是飞机通信还是航空设施间的地勤通信都需要加强反电子对抗（ECCM）的手段，增加保密设备，增强生存能力。

下面以美空军目前的发展为例，说明航空通信技术的发展。

对于飞机语音通信，准备在八十年代增加语音通信的抗干扰能力，加装语言保密设备接口。八十年代末期，将使用直接序列法扩频技术（见第十章），采用自适应天线阵使天线的方向图零点自动对准干扰源。

对于飞机数据通信，八十年代正在研制新的数据通信系统，这就是所谓“联合战术信息分配系统”（JTIDS），它使用更高的频段965~1215兆赫。是一种以飞机为基础进行计算机对计算机的数据通信网络。传输的数据率不高（第一期工程为57.6千比特/秒），而用户数目很多，每个通信网内可以容纳成千上万个用户。使用双重扩频手段，即同时使用直接序列法扩频和跳频法扩频（见第八章）。具有保密、抗干扰和信号被截获概率低等性能。它的生存能力强。还可以进行高空中继，以扩展到视距范围外通信。采用强力的纠错编码，可以纠正连续发生120比特的突发错误，保证误码率不大于 $10^{-6}$ 。目前这个系统已经进行试验，准备在八十年代末期布署。

对于地勤通信,目前使用典型的对流层散射电台 AN/TRC-97A 是六十年代布署的。新研制的对流层散射电台 AN/TRC-170 的性能比 AN/TRC-97A 有很大的改善。由表 2 可见,通信容量增加了,通信距离扩大了。此外,还缩短了电台架设和沟通的时间,加强了电台的机动性。这样,就可以不再依赖短波通信,因为短波通信质量差,容量小,不可靠。

表 2 美军车载数字对流层散射电台的比较

型 号	AN/TRC-97A	AN/TRC-170
频率	4.4~5兆赫	4.4~5兆赫
容量	保密数字 $24 \times 2.4$ 千比特/秒	保密数字 2 兆比特/秒
多路方式	FDM(频分多路)	TDM(时分多路)
天线直径	8 英尺	15英尺
功率	1 千瓦	$2 \times 6.6$ 千瓦
分集方式	二重空间分集	四重空间分集
通信距离	160公里	320公里

预计九十年代电子对抗斗争将激烈增加,通信设备没有足够的反电子对抗手段(ECCM)将不能生存。随着对航空通信和容量的需求的提高,各种通信系统间的联通性将日益突出。随着超大规模集成电路和微处理机的出现,保密技术,编码技术、调制技术、数字信号处理技术、语音和图象信号的处理技术、自适应天线阵和保形天线(与机身、机翼表面齐平的飞机天线,不产生额外的气动阻力)、毫米波技术(反电子对抗的结果,必然使频率向上扩展)、新的器件如声表面波器件(SAM器件)和电荷耦合器件(CCD器件)等都发展很快。这些新工艺、新技术、新器件的发展,都为提高航空通信的性能创造了条件。使航空通信将进一步增强反电子对抗(ECCM)能力,包括增强抗干扰能力和增强反窃听的能力;进一步降低发射信号的被截获概率;进一步提高机动性;进一步减小尺寸、重量、功率,降低价格等。

# 第一篇 数字通信

## 第一章 数字通信概论

### § 1-1 数字通信系统及其主要性能指标

通信是利用电子设备将消息从发信者传送到受信者的过程。一般说来，发信者所发出的原始消息都是非电参量，例如语言、音乐、图象、文字、数据等，必须将它们变换为用电压或电流来表示的电信号（简称信号）后，才能利用电子设备来传输。例如，电话和广播中，利用话筒将语音变换为音频信号。如果我们用电子示波器来观察音频信号，就会发现这类信号有一个显著的特征：它的幅值是连续变化的，即幅值是时间的连续函数。而且，幅值大小模拟了语音的强弱，有无限多种可能的取值状态，幅值大小变化的速度（频率的高低）则与原始消息的强弱变化速度一致。这类信号称为模拟信号。如图 1-1 所示。不仅音频信号具有

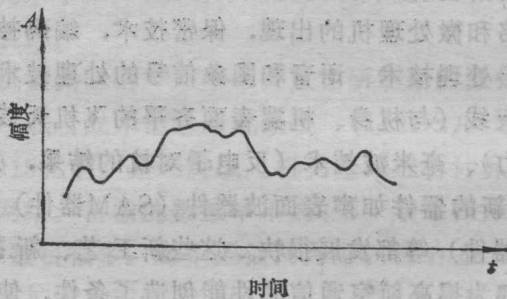


图 1-1 模拟信号示意图

这种特征，大多数消息所对应的信号都有这种特征。例如电视图象信号也是一种典型的模拟信号。直接传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统。模拟通信系统有两个基本的缺点：一是它的抗干扰性能较差，传输消息的可靠性较低；二是接收端收到的信

号是模拟信号，不能直接进入电子计算机，很难实现对消息的自动分析和处理。

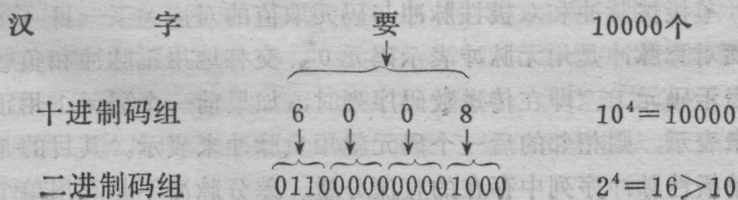
数字通信系统不直接传输模拟信号，而是将模拟信号变换为数字信号后再传输。数字信号的基本特征是它的参数取值只有有限个取值状态。例如，电子计算机中所处理的信号只有两种可能的取值状态，分别用数码 1 和 0 来表示。这种只有两种基本元素的信号称为二进制信号。这是最简单的一种数字信号。

二进制数字信号只有两种不同的取值状态，如何表示千差万别的不同消息呢？我们以电报信号为例来说明这个问题。

常用汉字有将近一万个，数量很大。如果直接用电压或电流来表示汉字的话，就需要有一万种不同大小或不同频率的电压或电流，这是相当复杂的。在普通的明码电报中，是先将汉字编码，利用四位基本阿拉伯数字（0、1、2、…9）的不同组合来表示不同的汉字。例如，数码 6008 就表示汉字“要”。十中取四的组合数共有  $10^4 = 10000$  个（从 0000 到 9999），完全可以表示一万个不同的汉字。用十种不同的电压来表示十个基本的阿拉伯数字，再用它们的不同组合来表示不同的汉字，就得到了十进制数字信号（十进制数码或码组）。

十进制数字信号只有十种基本取值状态，比直接对应于汉字的信号（一万种取值状态）简单得多。但是，要用电键来直接打出十种不同的状态仍然是相当困难的，故进一步简化为“传号”和“空号”（分别记为数码 1 和 0）这两种键控信号的不同组合， $n$  个二进制数码的不同组合有  $2^n$  种。为了表示十种基本阿拉伯数字，要求  $n \geq 4$ 。

上述过程归结如下：





上述码组都是由四个基本元素组成，基本元素称为码元。每个码元有  $P$  种取值状态，就是  $P$  进制码组。一个码组中码元的个数，称为码组长度  $n$ ，简称码长。上例中，码长  $n = 4$ 。码长为  $n$  的  $P$  进制码组共有  $L = P^n$  个，能表示  $L$  种不同的状态。

显然，二进制码组最简单，它的码元只有 1、0 两种不同的取值。可以用脉冲的有、无或脉冲极性的正、负来表示。一般说来，表示码元不同取值的脉冲具有从 0 到数兆赫的基本频带，故在电子技术中常称它们为基带信号。数字通信中常用的基带信号波形如图 1-2 所示。

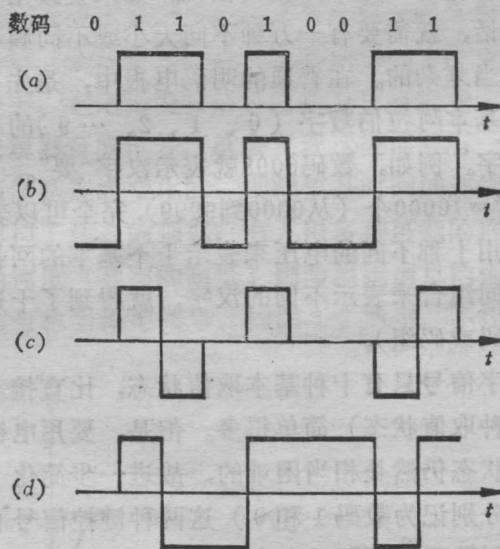


图1-2 基带信号波形

(a) 单极性脉冲；(b) 双极性脉冲；(c) 平衡对称脉冲；(d) 差分脉冲。

单极性脉冲和双极性脉冲与码元取值的对应关系一目了然。平衡对称脉冲是用无脉冲表示码元 0，交替地用正脉冲和负脉冲来表示码元 1。即在传送数码序列时，如果前一个码元 1 用正脉冲来表示，则相邻的后一个码元就用负脉冲来表示。其目的是消除单极性脉冲序列中存在的直流分量。差分脉冲不是利用单个脉