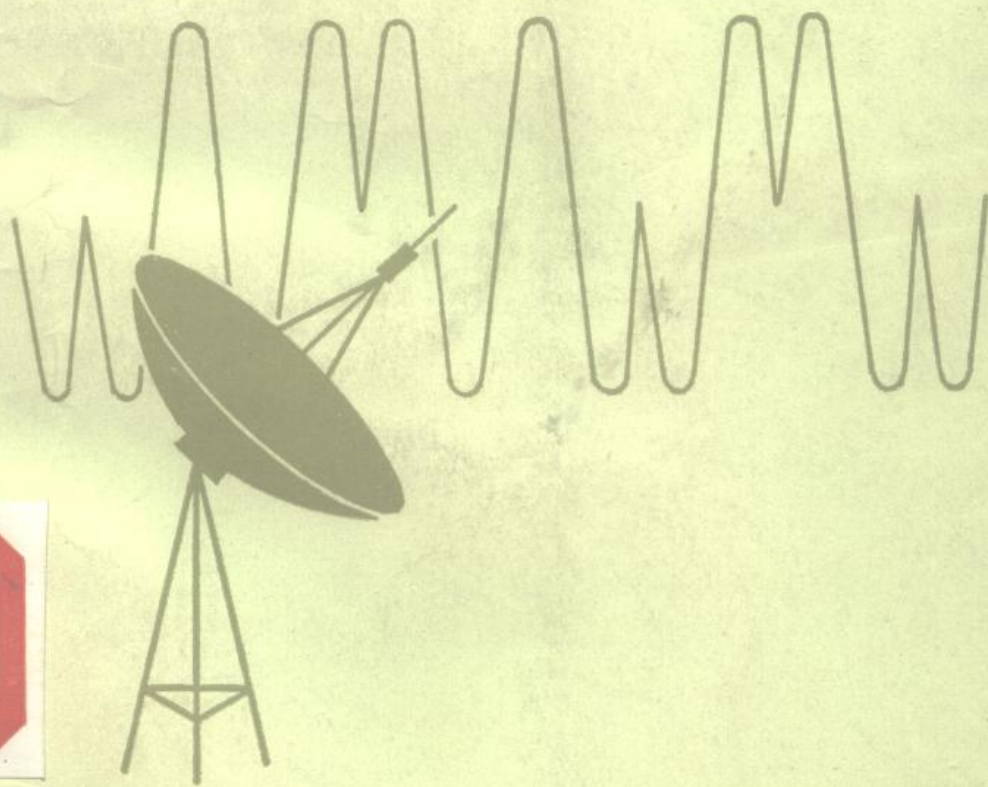


数字微波 接力通信系统 原理与设计

牛继烈 编著



北京邮电学院出版社

数字微波接力通信系统 原理与设计

牛继烈 编著

北京邮电学院出版社

内 容 提 要

本书着重介绍微波通信中的数字微波接力通信系统。内容有数字信号及其基带传输、数字信号的最佳接收原理、数字调制方式及其性能、实际信道对信号传输的影响、载波同步及位同步；最后为视距数字微波传输系统的设计及其设备构成。

本书可供大专院校微波通信师生作教学参考，也可供微波通信的工程技术人员使用。

数字微波接力通信系统原理与设计

编 著 牛继烈

责任编辑 王履镛

北京邮电学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印装

850×1168毫米 1/32 印张13 字数337千字

1989年7月第一版 1989年7月第一次印刷

印数：1—5000册

ISBN 7-5635-0040-5/TN·8 定价：2.60元

前 言

当前世界上正在兴起一场波及全球、影响深远的新技术革命。这场革命的核心就是迎接信息化社会，而通信现代化是一个首要解决的问题。随着集成电路技术及微计算机技术的迅速发展，数字通信技术得到了飞速的进步，而数字微波通信技术近年来发展得很快。预计到本世纪末将会广泛应用到工农业生产、科技、军事和日常生活等领域中去。

我国目前虽然自行设计和生产了一些数字微波设备，建设了几千公里的数字微波通信线路，但是总的说来，比国际水平还相差较远，而且远远不能适应四个现代化建设的需要。因此，我国已将通信装备列为电子和信息产业发展战略重点之一，在第七个五年计划期间要求以数字程控交换和微波通信（包括卫星通信）为重点，并为今后信息产业的发展打下好的基础。为此，从事通信技术研究单位和通信设备工厂企业，都在大力开发数字微波技术。

为了适应我国数字微波通信技术发展的需要，我们编写了这本书以供从事有关微波通信方面的工程技术人员参阅，并可用作院校无线通信专业学生的教学参考书。

数字微波通信系统的关键技术是载波调制、解调以及克服信道传输中的失真与干扰等技术。因此，本书主要介绍数字信号的性质、数字信号最佳接收基本理论、微波通信系统中的数字调制与解调技术、解调中的载波同步与位同步、实际微波信道中对数字信号传输的影响、数字微波传输系统设计以及通信线路的辅助系统。由于我的理论水平和实践知识所限，书中难免有不少错误和缺点，请广大读者多加批评指正。

在编写该书过程中，朱庆璋高级工程师和田永正教授都给予了很大帮助，在此表示衷心的感谢。

作者

于北京邮电学院

1988.11

目 录

第一章 绪论

第一节	数字微波通信技术的发展与趋向	(1)
1.1.1	数字微波通信发展现状	(1)
1.1.2	发展趋向	(2)
第二节	数字微波传输系统的特点	(3)
第三节	数字微波传输系统主要性能指标和性能极限	(4)
1.3.1	传输速率与信道容量	(4)
1.3.2	差错率及有效通信时间	(6)
第四节	传输中常见码型的频谱特性	(7)
第五节	随机脉冲序列的频谱特性	(10)
第六节	部分响应系统	(21)
1.6.1	双二进制系统	(21)
1.6.2	改进的双二进制系统	(26)
1.6.3	部分响应的一般形式	(29)

第二章 数字信号的最佳接收原理

第一节	引言	(32)
第二节	数字信号接收的统计表述	(33)
第三节	关于最佳接收准则	(37)
第四节	最佳相干接收	(40)
2.4.1	二进制信号的最佳相干接收机	(41)
2.4.2	二进制信号最佳相干接收机的性能	(45)
2.4.3	二进制信号的最佳形式	(48)
2.4.4	多进制信号的最佳相干接收机及其性能	(51)
第五节	随相信号的最佳接收—非相干接收	(56)
2.5.1	二进制随相信号的最佳接收机结构	(56)

2.5.2 二进制最佳非相干接收机的性能	(62)
----------------------	------

第三章 数字微波传输系统中的调制方式及其性能

第一节 引言	(66)
第二节 数字幅度调制与解调	(67)
3.2.1 二进制幅度键控(2ASK)	(67)
3.2.2 多进制数字幅度调制与解调	(73)
第三节 数字相位调制与解调	(93)
3.3.1 数字相位调制信号	(93)
3.3.2 二进制移相键控(2PSK)	(96)
3.3.3 四进制移相键控(4PSK)与解调	(113)
3.3.4 八相移相键控与解调	(129)
3.3.5 M 进制移相键控(MPSK)	(142)
第四节 数字频率调制与解调	(145)
3.4.1 离散相位二进制数字调频	(145)
3.4.2 连续相位移频键控(CPSK)	(155)
3.4.3 双二进制移频键控频相变换相干解调系统	(171)
第五节 复合调制方式	(175)
3.5.1 调幅—移相键控(AM—PSK)	(175)
3.5.2 调频—移相键控(FM—PSK)重叠调制方式	(178)
第六节 各种主要调制与解调方式的简要比较	(180)
3.6.1 抗噪声性能比较	(180)
3.6.2 传输效率比较	(182)
3.6.3 设备的复杂性	(184)
3.6.4 对抗各种信道缺陷的能力	(184)

第四章 实际信道对数字信号传输的影响

第一节 滤波系统对数字信号传输的影响	(189)
4.1.1 滤波特性畸变的影响	(189)
4.1.2 限带的影响	(194)
4.1.3 码间干扰对系统性能影响的估算	(203)
第二节 信道中非线性失真的影响	(208)
4.2.1 信道一般非线性失真及影响	(208)

4.2.2	硬限幅对系统性能的影响.....	(212)
4.2.3	功放非线性对正交调制系统的影响及对抗措施.....	(215)
第三节	传播衰落与失真.....	(218)
4.3.1	大气吸收及降雨衰减.....	(219)
4.3.2	多径传播与失真.....	(221)
4.3.3	抗多径衰落技术措施.....	(231)
第五章	数字微波传输系统中的载波同步与位同步	
第一节	载波同步的方法.....	(255)
5.1.1	插入导频法.....	(255)
5.1.2	直接提取载波法.....	(258)
第二节	数字微波相干解调系统的载波同步.....	(262)
5.2.1	二进制移相键控系统的载波同步.....	(262)
5.2.2	多进制移相键控系统的载波同步.....	(269)
5.2.3	16QAM解调系统的载波恢复.....	(279)
5.2.4	同步载波相位误差对系统误码性能的影响.....	(286)
5.2.5	载波恢复电路的带宽考虑.....	(291)
第三节	位同步信号的产生.....	(293)
5.3.1	直接提取法.....	(294)
5.3.2	插入导频法.....	(297)
5.3.3	位同步对系统性能的影响.....	(299)
第六章	视距数字微波传输系统设计	
第一节	概述.....	(306)
第二节	数字微波传输系统总体设计中应做出规定的基 本技术条件.....	(308)
6.2.1	标准容量系列.....	(309)
6.2.2	假设参考电路.....	(309)
6.2.3	频率配置.....	(313)
6.2.4	调制与解调方式的选择.....	(322)
6.2.5	接口特性.....	(323)
6.2.6	误码性能.....	(326)
6.2.7	中断与瞬时中断.....	(334)

6.2.8	净损耗与系统增益	(349)
第三节	数字微波传输系统的设计考虑	(351)
6.3.1	产生误码的主要因素及其影响	(351)
6.3.2	电路性能指标及分配	(361)
6.3.3	微波信道设备所需电气特性	(365)
6.3.4	站址设计考虑	(368)
6.3.5	电路质量指标估算	(370)
6.3.6	核算各段 C/N 指标	(372)
6.3.7	电路设计步骤与举例	(377)
第七章	视距数字微波接力线路构成的主要设备	
第一节	数字微波接力设备	(390)
7.1.1	数字微波接力设备的构成	(390)
7.1.2	数字微波收发信机的主要技术指标	(393)
第二节	辅助电路系统与设备	(394)
7.2.1	监视与控制系统	(395)
7.2.2	备份方式与电路切换设备	(397)
7.2.3	远地监控与联络方式	(403)

第一章 绪 论

第一节 数字微波通信技术的发展与趋向

1.1.1 数字微波通信发展现状

早在本世纪60年代就开始了数字微波通信方式的研究，特别是70年代以来，日本、美国、加拿大、意大利和法国等都进行了大量的研究和开发工作。在系统设计方面逐渐发生了变化；利用新的射频技术产生了更复杂的调制解调方式以克服频谱利用低的问题；并利用新的元件技术保证了在更大容量情况下可靠工作；微波设备已从频段和容量上实现了系列化生产，且日益广泛用于干线网、地区网及本地网中。日本的数字微波系统已占全部微波系统的30%左右，并计划在本世纪末基本上实现全部微波系统数字化。1983年加拿大建成了横贯北美大陆的全长为6400公里数字微波干线。美国现已使用了一万多部数字微波收发信设备，*ATT*公司计划再建设一万四千多公里的数字微波线路。在我国，目前新建的微波通信线路大多数将是数字微波系统。

数字微波的关键技术之一是高效率的调制解调技术。目前，多电平正交调幅方式中，16QAM和64QAM系统已商用化。日本已研制出256QAM方式的调制解调器，频谱利用效率达到 $10b/s \cdot Hz$ 。调制解调器的精度提高很大，它采用了单块集成电路的乘法器及新的自动控制多值识别装置。

近几年来，人们对数字微波信号的传播情况做了大量研究与实验，特别是对多径衰落有了一定的了解，并采用了一系列的对抗措施：如分集合并技术与自适应均衡技术等，都获得了良好的

效果。此外，低噪声高频放大器已较成熟，它使机内热噪声大大降低，接收机的噪声系数可做到3dB左右。所有这一切均说明，数字微波通信系统正处在飞速发展的时期。

1.1.2 发展趋向

今后通信网将朝着数字化、综合化和智能化的方向发展，数字微波传输系统必将会使用更加广泛，同时，它将越来越多地用于市内通信网。因此，今后向更大容量、更高效率、更高的频段、以及更可靠更经济等方面发展，仍然是主要方向。为此

1. 研究能大幅度提高微波频段频率利用率的调制方式，如256QAM或1024QAM等更多电平的调制方式。为此，需要研制高性能高精度的调制与解调器。

2. 由于传输速率升高，传播失真的影响将加剧。所以，需要研究更优越的抗多径衰落技术，研制高性能的波形失真校正装置以及全数字化的横向均衡器作为多载方式。

3. 由于调制电平数增多，信号状态间的差距明显缩小，要求具有严格的线性信道。因此，需要进一步研究高性能的非线性放大器自适应补偿技术。

4. 为了扩大容量，需要开发更高频段的设备。

5. 研制高性能宽波段天线和减少极化间干扰的技术措施。

6. 进一步研究低功耗、小型化的微波通信设备等。

以上几个方面将是今后一段时期内数字微波通信技术发展急待解决的主要课题。除此之外，在系统方面，有关标准容量系列化更高群划分、数字微波系统各种频段的频率配置，长、中、短距离的标准假设参考电路及传输质量指标，以及系统设计方法将会日趋成熟与完善。随着集成电路和数字信号处理技术的发展，数字微波传输将变得更加经济、有效。作为灵活方便的一种传输手段，它将与光纤、卫星通信系统，并存于信息时代。

第二节 数字微波传输系统的特点

通常根据所传信号的波形，把微波传输系统分为两类：一类是所传基带信号的取值（或状态）是连续的、不可数的模拟信号，称模拟微波传输系统；如现有的调频方式微波系统，所传的话音信号与电视图象信号均是模拟的。另一类是数字微波传输系统，它所传的基带数字信号取值（或状态）是离散的、可数的脉冲形式的信号。因此，数字微波与模拟微波通信系统比较，有以下特点：

一、系统性能要求，质量评价标准不同。对于模拟微波传输系统，是按被传送基带信号波形的保真度高低来评价其优劣的。而数字微波系统，则按对被传基带信号的取值（或状态）判断的正确与否来评价优劣。所以模拟微波传输质量是以噪声功率大小（或信噪比）做为衡量指标，而数字微波电路则以误码率做为传输质量指标。

二、模拟微波系统主要考虑的是波形保真度，因此接收机的功能只是将基带信号检波出来。数字微波系统的接收机功能，不仅是要对基带信号进行检波，更重要的是对其取值（或状态）进行判别（如对二进制信号判别是“0”还是“1”）。所以解调器的构成也就不同，后者将增加判决再生以及基带信号处理部分。

三、数字微波传输信息可进行再生接力方式，这样便可避免像模拟微波接力系统中的那种噪声积累。

四、模拟微波多路通信系统通常采用频分多路复用方式，而数字微波多路通信系统则采用时分多路复用，所以信号同步系统将是数字微波设备中的重要组成部分。并且便于中间站上下话路和采用加密措施。

五、由于数字信号通常取离散的脉冲波形，因此信号频谱较模拟信号宽。随着传输容量的增大，信号所占频带更宽，多径衰落影响将加剧，对模拟系统的影响则较小。

六、数字微波系统除抗干扰性能较模拟系统强外，对基带信号便于根据需要进行处理，有利于实现集成化和数字化电路以及综合业务数字网的建立。

根据上述数字微波系统的特点，本书将重点阐述这些方面的基本原理与有关技术方面的考虑。

第三节 数字微波传输系统

主要性能指标和性能极限

通信系统的指标是一个比较复杂的问题，例如，要涉及到通信的有效性、可靠性、标准性、经济性和维护使用等多方面。但是对研究消息的传输来讲，通信的有效性与可靠性将是最主要的技术性能指标。这里所说的有效性主要是指信息传输的“速度”，而可靠性则主要指的是传输质量。两者是一对相互矛盾的问题。这对矛盾通常只能依据实际要求取得相对的统一，即在满足一定可靠性指标下尽量提高传输效率，或者在保持一定有效性的情况下尽量提高传输质量。

1.3.1 传输速率与信道容量

一、传输速率

在数字通信系统中，传输速率是主要性能指标之一。通常所说的传输速率包括信息传输速率和码元传输速率两种表示。

码元传输速率——每秒钟传送的码元脉冲数，单位是“波特”。一般简称码速率或符号率。码元有不同的进制数。

信息传输速率——每秒钟传送的信息量，单位是比特/秒(b/s)。按照信息论的观点，传送消息就是为了传送信息，消息中含有多少有意义的信息，是用“信息量”的多少来衡量。定义一位二

进码元所含的信息为信息量单位，称比特(*bit*，记作*b*)。信息传输速率简称传信率，用 R_b 表示。如果码元速率用 R_B 表示，则传送*M*进制的码元，其传信率为

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

在比较不同的通信系统时，不能单看它们的传输速度，因为两个系统的传输速度相等，它们的传输效率并不一定相同，还要看它们占用的频带如何。所以，真正衡量数字通信系统的有效性指标，应该是单位频带的传信率，即每赫每秒所传送的比特数($\text{b/s} \cdot \text{Hz}$)。

二、信道容量及性能极限

信息流能否以 R_b 的速率通过信道正确地送往对方，这一问题仙农(*Shannon*)定理给出了答案。该定理指出，如果信息源的信息速率 R_b 小于或等于一个所谓的信道容量*C*，那么在理论上便存在一种方法可使信息源的输出，能够以任意小的差错概率通过信道进行传输。如果 $R_b > C$ ，则信道没有任何办法传送这样的信息，或者说，传送二进制信息的差错率 = 1/2。

由此可见，信道容量*C*是信道的极限传输能力，它常用最大的信息速率表示。

信道的极限传输能力受噪声和带宽的限制。可以证明，在被白色高斯噪声干扰的信道中，传送最大的信息速率由下式确定：

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad \text{b/s} \quad (1-2)$$

其中，*B*是信道带宽(Hz)；*S*是信号功率(*W*)；*N*是噪声功率(*W*)。这便是著名的仙农公式。若噪声用单边带噪声功率密度 N_0 表示，则 $N = BN_0$ ，此时

$$C = B \log_2(1 + S/BN_0) \quad \text{b/s} \quad (1-3)$$

由此式可知，信道容量受带宽(*B*)、信号功率(*S*)及噪声功率密度(N_0)“三要素”的限制，并可得出以下结论：

1. 减小噪声、增大信号功率可使信道容量提高。当 $N_0 = 0$ 或

$S = \infty$ 时, 可使 $C = \infty$ 。但是这种情况意味着无噪声和发射功率无穷大, 显然是无法实现的。

2. 增大带宽, 当 $B \rightarrow \infty$ 时, (1-3) 式可写成

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow \infty} C &= \lim_{B \rightarrow \infty} \left[\frac{S}{N_0} \cdot \frac{N_0 B}{S} \log_2(1 + S/BN_0) \right] \\ &= \frac{S}{N_0} \log_2 e \approx 1.44 S/N_0 \end{aligned} \quad (1-4)$$

其中 $\lim \left[\frac{1}{X} \log_2(1 + X) \right] = \log_2 e \approx 1.44$

由此得出如下结论: 当 S/N_0 一定时, 即信道带宽 $B \rightarrow \infty$, 信道容量也是一定值, 该值称为信道容量极限。

3. 当 $R_b = C$ 时, 频带利用率达到最高, 此时等于

$$R_b/B = \log_2(1 + S/N) \quad (\text{b/s} \cdot \text{Hz}) \quad (1-5)$$

在信噪功率比 S/N 给定时, 理想系统可能达到的最高频带利用率由(1-5)式确定。它便是系统频带利用率的极限值。

4. 当信道容量保持不变时, 带宽与信噪比 S/N 是可以互换的, 即增加带宽可使 S/N 提高。对于数字通信系统, 理想系统中输出信噪比随带宽 B 按指数律增加。究竟以谁换谁, 要根据实际情况决定。

1.3.2 差错率及有效通信时间

一、差错率

差错率是衡量通信系统可靠程度的重要性能指标。通常有两种表述方法: 误码率及误比特率(通称比特误码率 BER)。

所谓误码率, 是指在所传码序列很长时, 错误接收的码元数占传送总码数中的比例, 或精确地讲, 即是码元被传错的概率。

比特误码率(BER), 则是指在所传码序列很长时, 被传错

的二进制数在总传送的二进制数中占的比例，或者说，是在传输系统中比特被错传的概率，所以简称误比特率。

通常数字微波传输系统的性能指标均用比特误码率表示，因为这样便于对系统间的性能进行比较和测量。目前CCIR建议，对长距离数字微波电路规定了高比特误码率和低比特误码率标准。

二、有效通信时间

对通信系统可靠性常用的重要性能指标之一就是有效通信时间，一般用平均无中断工作时间表示。对于数字无线电传输系统，由于电波传播衰落，设备故障以及噪声干扰等随机因素的影响，不可能长时间内一直满足给定误码率的指标要求而使系统正常工作。因此，衡量一个通信系统的可靠性如何，有效通信时间是非常重要的。为此CCIR建议，定义了系统的可用率（可用性），用系统无中断正常工作时间所占总通信时间的比例来衡量系统的可靠性，或用平均无中断工作时间衡量。该性能主要决定于设备的平均无故障工作时间及电波传播衰落分布（见第六章）。

第四节 传输中常见码型的 频谱特性

众所周知，一个通信系统主要功能就是有效和可靠地传输代表信息的所谓传输代码，这种代码通常可取各种形式的脉冲波形进行传输。图1-1示出了几种常见的基带传输代码波形。

图1-1(a)表示双极性不归零码。这种码的特点是用正电压和负电压分别代表二进制代码的符号“1”和“0”，在一个码元时间中不是负脉冲就是正脉冲，二者之间没有时间空隙，如果“0”和“1”符号为等概情况时，它将无直流分量，因此，这种基

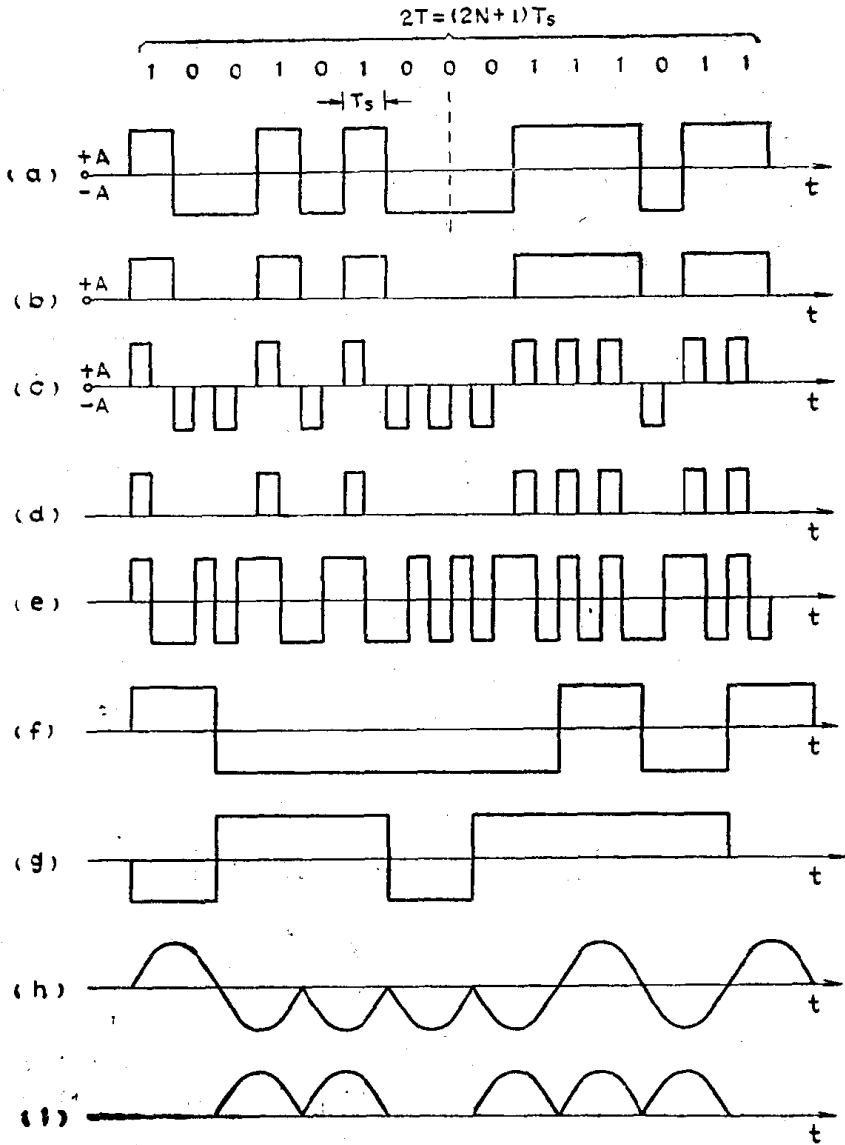


图1-1 常见的基带传输码

带信号适于传输用,同时,它也有较强的抗干扰能力。图1-1(b)是单极性不归零码,这种码与双极性码不同之处在于二进制代码符号“0”不是用负脉冲代表,而是用无脉冲代表。显然它有直流