

信号引论

XINHAO YINLUN

马 宏 久 编 译
李 大 锡



11

四川人民出版社

责任编辑：崔泽海
封面设计：邱荣松

信号引论

马宏久 李大锡 编译

四川人民出版社出版

(成都盐道街三号)

四川省新华书店发行

渡口新华印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 5.625 字数 113 千

1982 年 7 月第 1 版

1982 年 7 月第 1 次印刷

印数：1—3,730 册

书号：15118·66

定价：0.60 元

序

随着现代科学技术的发展，无线电电子学与通讯技术已被广泛地应用到各个技术领域和国民经济各部门。例如，从对人造卫星、火箭、导弹的控制到雷达、电子计算机、电视及家庭电器设备，无一不是电子技术的应用，无一不是渗透着电子技术的成果。电子工业是四化的先行军。在某种意义上讲，四个现代化实际上就是电子化。在各种设备及系统中，实现电子化都是通过电子信号来完成的。

信号是运载信息的工具，它的基本形式是变化着的电压和电流。如果电系统和其它系统相连接时，往往是通过换能器，将其它的物理量转换成电压或电流形式，来完成某种功能和达到设计者或使用者所要求的目的。

本书以英国出版的《信号》为蓝本、参照了其它国内外有关资料，深入浅出、扼要系统地介绍了各种信号的特点、传输特性、处理方法和重要的应用，以及现代数字信号通信原理。前三章对各种类型的信号特点加以分析，并研究了它们所具有的网络响应特性；第四、五章对各种信号应用中的传输方法和处理方法作了论述；第六、七章讨论了信号的随机过程和信息论，如何在噪声背景中有效的提取有用信号以及获得最大准确有用信息量；第八章讲述现代数字信号通信原理，并讨论了最佳匹配滤波器、判决门限和最小错误

概率。

在编译中，我们力求做到以简要和连贯的方式，把提出的基本概念与主题内容紧密结合；同时，书中还引入了有关例题，以加深读者对基本理论的理解，便于掌握与应用，并为进一步阅读有关提高性的专著，打下一个良好的基础。

在本书编译过程中，得到成都107信箱、成都电讯工程学院和四川省电子学会、成都市电子学会的大力支持，提供了许多宝贵资料和经验。成都电讯工程学院陆祖森老师对本书作了全面审校。在此，一并表示衷心感谢。由于水平有限、书中缺点错误难免、恳请读者批评指正。

编译者

一九八一年四月

目 录

第一章 绪论	1
1.1. 信号的类型	2
1.2. 信号的例子	3
1.3. 信号的频谱	11
第二章 信号分析	12
2.1. 周期信号的特性	12
2.2. 福里叶级数	14
2.3. 离散频谱	15
2.4. 典型级数	16
2.5. 复数形式	17
2.6. 福里叶积分	27
2.7. 连续频谱	28
2.8. 典型函数	29
2.9. 功率谱和能量谱	44
第三章 网络响应	46
3.1. 非重复波形	46
3.2. 理想低通滤波器	47
3.3. 重复波形	54
3.4. 实际低通滤波器	54
3.5. 从福里叶变换到拉普拉斯变换	57
3.6. 拉普拉斯变换	59

3.7. 褶积积分.....	67
第四章 信号传输.....	71
4.1. 频分制.....	71
4.2. 时分制.....	73
4.3. 信号畸变.....	74
第五章 信号处理.....	81
5.1. 信号的取样.....	81
5.2. 取样定理.....	83
5.3. 取样响应.....	85
5.4. 编码.....	88
5.5. 其它码.....	96
5.6. 误差.....	99
第六章 随机过程和噪声分析.....	101
6.1. 概述.....	101
6.2. 随机过程及其统计特性.....	103
6.3. 自相关函数及其功率谱.....	105
6.4. 噪声分析.....	106
6.5. 信号加噪声.....	112
第七章 信息论.....	117
7.1. 平均信息 H	118
7.2. 信道容量 C	120
7.3. 剩余度.....	125
第八章 数学信号的通信原理.....	128
8.1. 数字信号的调制与解调.....	129
8.2. 数字信号的最佳检测——匹配滤波器.....	139

8.3. 最佳检测门限和误差概率.....	142
问题与答案.....	149
附录:	156
附录 I: 国际电传打字电报编码.....	156
附录 II: 幅度调制与频率调制.....	157
附录 III: 福里叶解法.....	160
附录 IV: 国际莫尔斯 (Morse) 编码.....	167
附录 V: 信息率.....	168
附录 VI: 多卜勒雷达.....	170

第一章 绪 论

信号就是随时间变化的电压或电流。常用它从一个地点到另一个地点传送消息或信息。一个消息，通常是用文字或编码符号的形式来表达。在通讯系统中，信息的含量是一个很重要的量。

信息的处理，是将它变换成字码或编码信号，当信号被发射后，通过一通讯系统到接收端，再将它变换为原来的信息或消息。典型的通讯系统的简要方块图，如1—1图所示。

图1—1中信号源产生的信息信号，通过发射机加工处理后，沿某一通讯线路发送出去。在接收端，信号信息被提取出来，再送到终端处理机中。在发射和接收过程中，还会从各种噪声源引入噪声。图1—1中表示的是一个单一的噪声源代表。

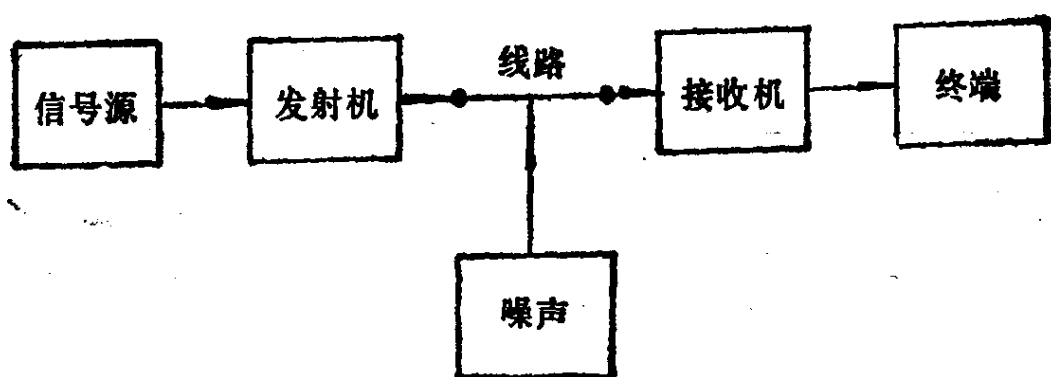


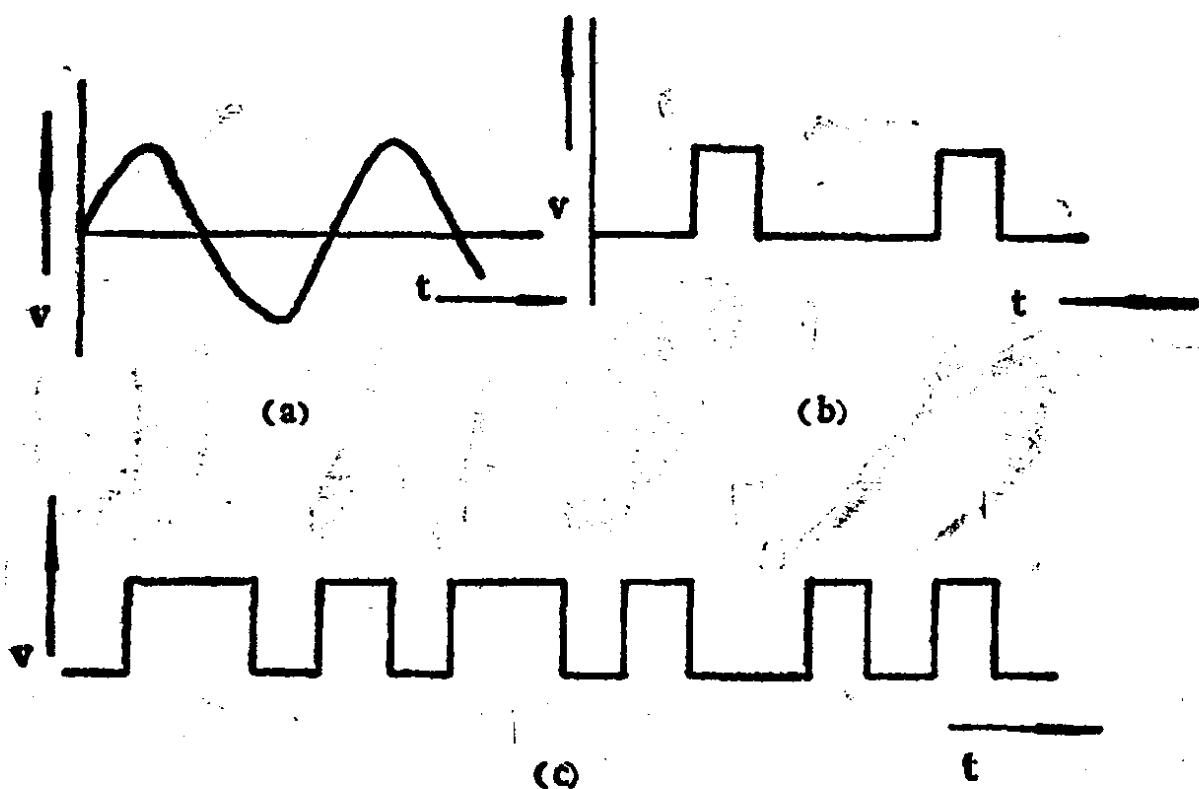
图1—1 典型通讯系统方块图

1.1 信号的类型

信号主要分为两种类型——随时间连续变化的模拟信号和离散时间的数字信号。

模拟信号，一般是像声波一个物理量的变化，或是单一的正弦波，或是其组合波。

数字信号，基本上是由发生在离散时间间隔上的“脉冲”组成。这些脉冲可以按确定的周期单个地产生，或按数码的形式编组产生，如电报。



(a) 简单的模拟信号

(b) 简单的数字信号

(c) 编码信号

图1—2 信号的类型

1.2 信号的例子

典型的信号是那些用于电报、电话、无线电通讯、电视和雷达中的信号。

一、电报信号

一个由一串字组成的消息，可以把其中每个字规定为确定的编码信号，然后发送出去。这就是电报的基础，通常用机电方法来完成，有点像打字机或所谓电传打字电报机。

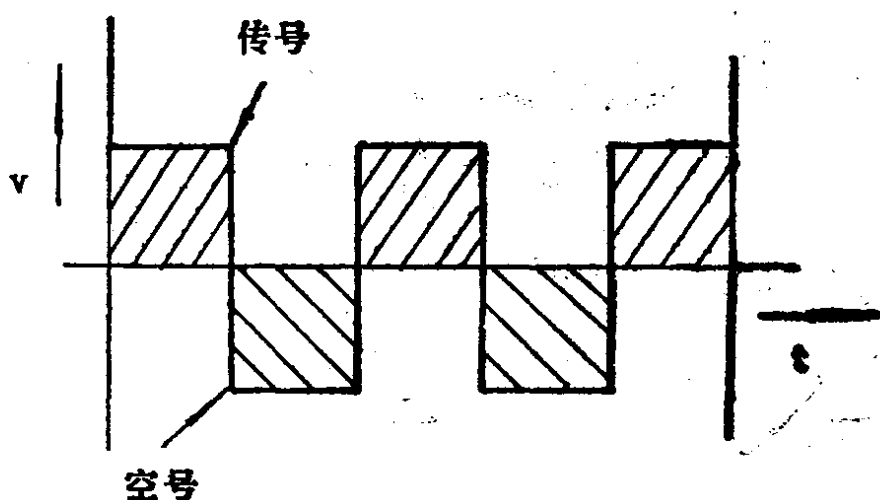


图1—3 字母 R的波形图

在电传打字电报机码中，所使用的字母 R 的波形如图 1—3 所示。

这个具有正负极性的脉冲波形的信号，分别被称为“传号”和“空号”。拍发这种脉冲信号的速度称为发送速率，以“波特”度量。“波特”的定义为每秒钟传送脉冲的数目。在电传打字电报机中，常用速度为50“波特”。

对于一个50“波特”的速度，按实际情况，每一路信号

应取带宽为 120Hz，这就是所谓一路“电报信道”。

例1·1 试说明在电报系统中，信号带宽和信号发送的速度之间的关系。

解：

研究一个简单的系统，其中基本信号是由正、负脉冲序列组成（图 1—3），发送信号速度为每秒脉冲传送的个数，因而信号的发送速度与脉冲宽度成反比。因此，脉冲宽度愈窄，单位时间能传送的脉冲数目就愈多。即：

$$\text{发信速度} = \frac{1}{\text{单个脉冲宽度}}$$

例如，对于50“波特”的信号传输速度来说，则有：

$$\text{单个脉冲宽度} = \frac{1}{50} = 2\text{ms}.$$

由于脉冲宽度或持续时间与它的频率成反比，发送信号速度与频率成正比。因此，发送信号的速度越高，所占据的频率就越宽。换句话说，信号所用的频率带宽是与信号发送速度成比例的。

二、电话信号

电话信号是通话时由讲话声音中包含的元音字母和辅音字母所组成的。讲话的声音在送话筒中共振，从而产生电话信号。讲话声音在波形上的起伏相当大，因此，电话信号实际上是不同的音频正弦波的复杂组合。一个表达元音字母 E 的信号波形，如图 1—4 所示。

对于话音信号，大多数能量是集中在较低的频率中。为了清楚表达话音，考虑大约从 300Hz 到 3400Hz 这样的频率

范围就够了。因而每路电话信息占用约 4KHz 的总带宽，即称为一路电话信道。

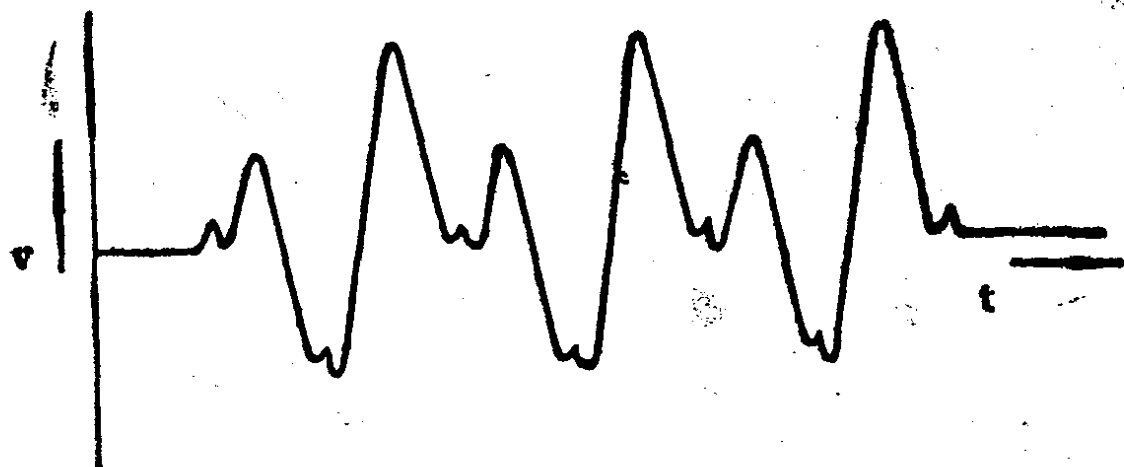
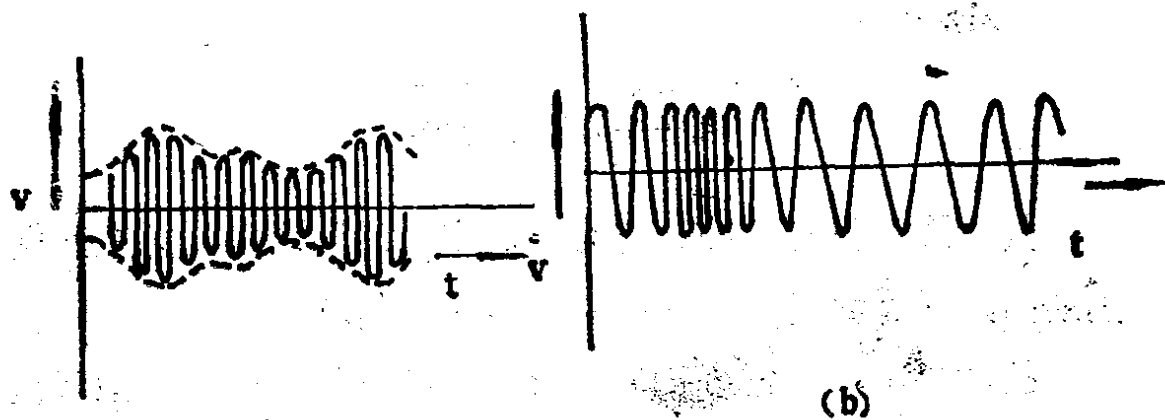


图1—4 元音字母E 的电压波形

另外，这样的电话信道，可用于传送每路为 120Hz 带宽的若干路电报信息。在一路电话信道中，可容纳多达 24 路电报信道。

三、无线电信号

这种信号是用振荡器产生，由射频的正弦波组成。正弦波又称为“载波”。为了携带信息，它被讲话或音乐所调制。在调幅情况下，载波信号的幅度是随调制信号而变化，如图 1—5 所示。



(a)

图1—5 调制载波信号波形

(a) 调幅信号

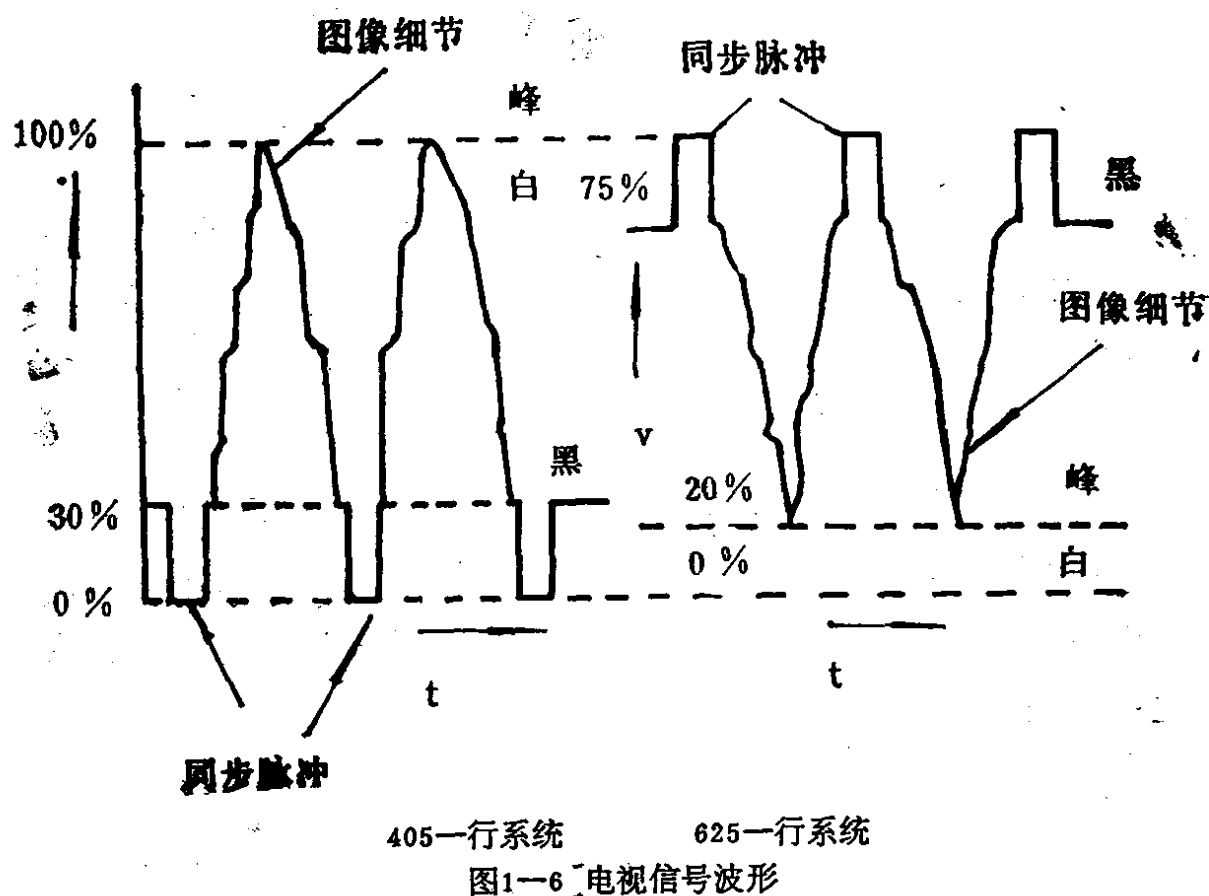
(b)

(b) 调频信号

当调制信号是由音乐的声音组成的时候,对于商业广播,音乐的频带宽度可扩展到10KHz;并在高保真度的情况下,还可提高到15KHz。

四、黑白电视信号

电视广播的图像信号,由不同辉度的影像轮廓组成,从黑到白,随时变化,如图1-6所示。



其波形是很复杂的。它有一固定的时间间隔,并在此间隔期内,通过改变亮度的明暗来传送图像的细节。

接收机中,为使行扫描和场扫描与发射端的电视摄影机的行扫描线和场扫描线同步,应插入一系列脉冲,如图1-6所示。

对于 BBC——625 行体制，典型的信道带宽，一般从直流扩展到 8MHz。

例1·2 试说明，在传输下列各种信号时传输线路中所要求的带宽：(1)高质量音乐；(2)12路电话信道；(3)24路音频电报信道，每路信号发信速度为 50“波特”；(4)625行电视图像，其行扫描时间是 $60\mu\text{s}$ ，图像画面的宽高比为 $4/3$ 。

解：

1. 高质量的音乐能覆盖的频率宽度超过一般人的平均听觉范围，其低端可延展到 20Hz，高端至 16~18KHz。因而，所要求的带宽约 16KHz，或等效于（用于）传输线上的 4路电话信道。

2. 对于清晰的讲话而言，3.4KHz 的带宽就够了，但考虑到滤波器的特性，以每路信道分配 4KHz 带宽平均值，因此 12路信道应有 $12 \times 4\text{KHz} = 48\text{KHz}$ 带宽。

3. 由于用“波特”表示的信号，发信速度等于电报脉冲宽度的倒数，则脉冲宽度 $= \frac{1}{50}\text{S}$

对于一个完整的一周期，应将一个双向脉冲（+Ve 到 -Ve）变为基波周期。即：

$$\text{周期宽度} = 2 \times \frac{1}{50} = \frac{1}{25}\text{S}$$

或，基波频率 = 25Hz

这些脉冲是用来对一个 500Hz 的单音载波进行调幅的。在单音载波频率周围产生的“和频”与“差频”称为边带（见附录 I）。于是给出总的带宽为 $2 \times 25 = 50\text{Hz}$ 。然而，考虑到滤波器的特性，实际中使用的是 120Hz 带宽，若允许某

些三次谐波即 75Hz 也被传输，则可保持脉冲的矩形，也就保证了继电器（电报继电器）可靠的工作。

对 24 路信道而言，带宽要求为：

$$24 \times 120\text{Hz} = 2880\text{Hz}$$

4. 如图 1—7 所示，设图像宽为 W ，高为 h ，则：

$$W/h = 4/3 \text{ 或 } h = \frac{3}{4}W$$

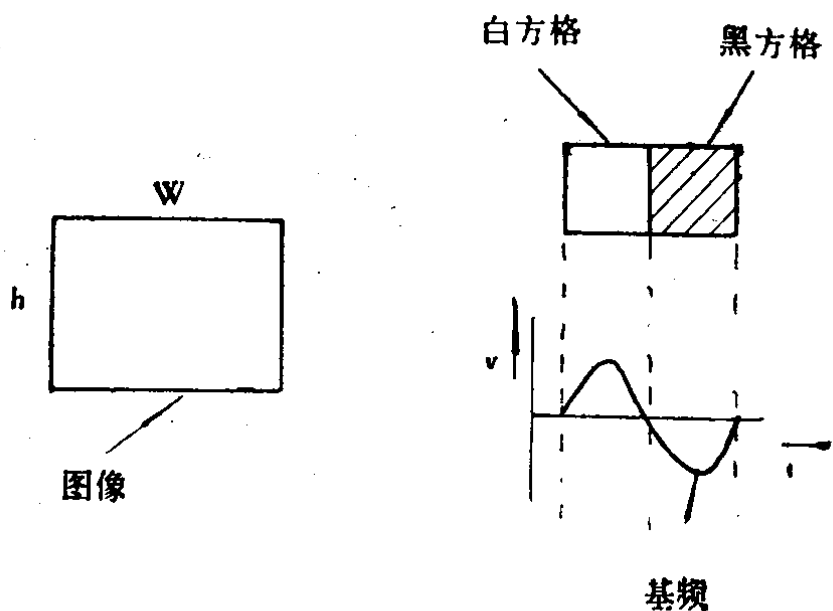


图1—7 图像及像素

因为图像为 625 行，其行间距可由下式给出：

$$h/625 = \frac{3}{4}W \times 625$$

在行扫和帧扫的清晰度相同情况下，像素的宽和高也相等，都等于 $3W/4 \times 625$ 。因此，

$$\text{每行素数} = \frac{W}{\text{像素宽度}} = \frac{4}{3} \times 625$$

现在，

$$\text{一个像素扫描时间} = \frac{60 \times 10^{-6}}{4/3 \times 625} = \frac{9 \times 10^{-6}}{125} \text{S}$$

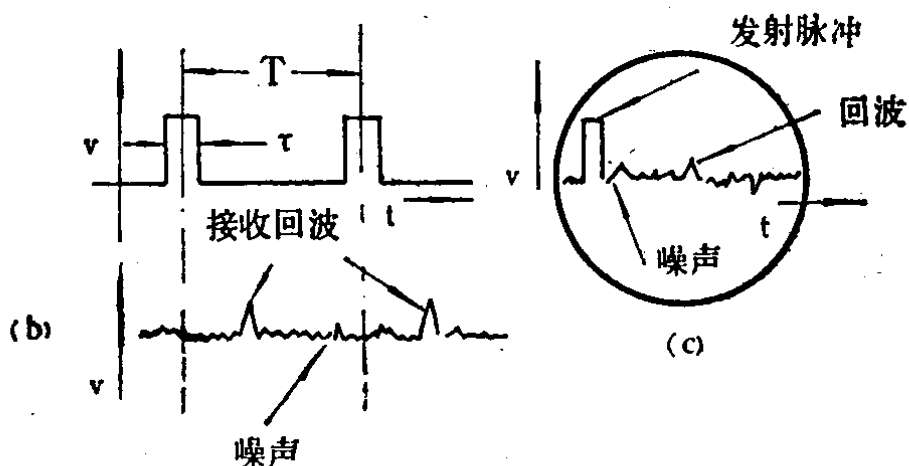
$$\text{二个像素扫描时间(整个周期)} = \frac{180 \times 10^{-6}}{125} \text{S}$$

$$\text{因而, 基波频率} = \frac{125 \times 10^{-6}}{18} = 7 \text{MHz}$$

由于均匀图像亮度是一直流信号, 这也是必须被发送出去的, 因此总的带宽需 0—7MHz, 即 7MHz。由于这样大的带宽, 所以双边带电视没有被采用, 而是采用一种更经济的体制, 即所谓“残留边带传送”体制。

五、雷达信号

用雷达对远距离目标的距离和方位的探测, 通常是用发射一个短的周期信号, 并接收从目标反射回来的一部分信号的能量来完成的。这个信号大体上是一串约为 1KHz 的低重复频率的矩形发射脉冲, 如图 1—8 所示。所用的脉冲宽度在 0.1~10μs 之间。



(a) 发射信号 (b) 接收信号 (c) 雷达显示信号

图1—8 雷达信号波形

此信号可以看作由无穷多的正弦波组成，且这些正弦波的频率之间是谐波关系。当发射信号从远距离目标反射回来后，为合理而准确地接收到该信号，必然要求有一个确定的带宽，这个带宽大约为 $2\sim 5\text{MHz}$ 。一部雷达也可以用于速度测量。例如，测量一架飞机速度，就是利用所谓的多卜勒雷达进行的，并在附录 VI 中作了论述。

例1·3 一部雷达发射机，是由重复频率为 500Hz 和持续期为 $2\mu\text{s}$ 的发射脉冲所调制，假定被发射的平均功率是 800W 。

- 求：1. 脉冲占空系数；
2. 峰值功率及平均功率；
3. 最小和最大作用距离。

解：

$$1. \text{占空系数} = \frac{\text{脉冲宽度}}{\text{重复周期}} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\frac{1}{500}} = 10^{-3}$$

$$2. \text{峰值功率} = 800\text{W} / \frac{1}{1000} = 800\text{KW}$$

$$\text{平均功率} = 800\text{W}$$

$$3. \text{电磁波的能量传播速度为 } 3 \times 10^8 \text{M/s}$$

$$\text{因此，} 1\mu\text{s} \text{ 内传播的距离为 } 3 \times 10^8 \times 10^{-6} = 300(\text{M})$$

最小距离是按信号传到目标再反射回来所用的最小时间来确定。这个最小时间必须不低于脉冲持续期，不然被反射信号将与发射信号混淆一起，因为发射脉冲仅在 $4\mu\text{s}$ 以后才关闭。因此，到达目标的最小时间 $= \frac{2}{2}\mu\text{s} = 1\mu\text{s}$ ，或到达目