

[德] H·舍恩费尔德 著  
张琦 译  
张永辉 校

高等学校教学用书

# 图像通讯原理

Impressum

Seite 10601a

Langzeitprognose

10/5 Temperatur  
— Regen  
☁ Wolken  
☀ Sonne  
→ Wind



## 内 容 提 要

本书用新的方法精辟系统地阐述了电视原理，较全面地介绍了模拟和数字的图像传输原理，并在二者之间架起了一座桥梁。其中包括文字图形电视、文字图形电话、有线（电缆和光缆）电视、卫星电视、数字电视、高清晰度电视（HDTV）、电视电话等现代通讯技术。

本书还详细地介绍了静止图像的各种传输方法，包括电报传真和图像传真。

本书包罗了现代的图像通讯新技术成果，适合于高等学校通讯和电视专业师生以及从事这方面工作的科学技术人员阅读参考。

### 图像通讯原理

[德] H·舍恩费尔德 著

张 琦 译

张永辉 校

责任编辑 王德声

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山东电子工业印刷厂印刷

\*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：13.25 字数：330千字

1987年7月第一版 1987年9月第一次印刷

印数：1—3300册 定价：2.25元

ISBN 7-5053-0042-3/TN 22

统一书号：15290·516

## 译 者 序

本书是联邦德国的电视技术权威舍恩费尔德教授的最新著作。近十年来，图像通讯技术在迅速开发，它广泛地涉及到电视和通讯两方面技术的发展。作者根据在不伦瑞克工业大学的多年教学经验，认为现在的无线电通讯教学应把经典的电视课程内容和现代的数字图像通讯技术结合起来，才能使学生掌握当今的通讯技术知识。作者力图通过本书在经典的电视技术和现代的图像通讯技术之间架起一座桥梁。因此，在书中结合教学经验和科研成果全面系统地阐述了电视原理和各种方式的图像通讯原理，并独特地用取样定理解释了经典的电视扫描等技术问题，指出了用数字信号处理方法提高现在的电视图像质量的途径。书末附有参考文献目录，可作为查阅和深入研究的指南。

本书的翻译和出版得到电子工业出版社的大力支持，相信书中内容会对读者的专业学习和科研、生产工作有一定帮助。由于水平所限，译文难免有谬误，请读者批评指正。

译者

## 序 言

通讯中增添图像传输显著地提高了通讯效果，因此近十年来图像通讯的作用日趋重要。宽频带传输技术（微波和光纤通讯技术）和微电子学的深入发展，有力地推动了图像通讯技术的发展。特别是微电子学的发展，促进了通讯技术中数字传输和数字处理技术的发展，对图像通讯的开拓十分有利。

令人注意的是，近年来图像通讯已深入到利用电话技术的通讯系统中。现代的办公室通讯是在一般的电话线路内增添了有效的电传打字机，而首要的是添加了静止图像传输的通讯设备。纸面上的文字和图形可以通过电传复印机传送，并能在电视接收机的荧光屏上显示。现在正在努力使所有这些通讯业务都能通过综合服务数字网（ISDN）传输。人们已经看出，由于上述通讯业务的发展，静止图像传输已开始成为一般通讯技术中不可分割的组成部分。通讯系统建设委员会（KtK）在1976年的总结报告中已经指出了这一点，并一再推荐静止图像传输方法。

从发展的观点来看，活动图像系统将来也可以经窄带电视电话接入通讯系统，或者以一般的宽带电视标准经光纤通讯网成为宽带 ISDN 技术的一部分。在这方面，1981年人们做了两项有利于活动图像系统发展的工作。第一项是联邦德国邮电部为地区通讯网作了一次大型光纤通讯试验（称为 BIGFON，“宽带综合光纤通讯地区网”）；第二项是国际广播委员会统一了数字电视标准。这两项工作为将来进行数字处理和以宽带系统给用户分配高质量图像创造了条件。

因此，现在正需要有一本教科书，综述当前应用极为广泛的图像通讯的基本原理。根据对图像通讯的展望可知，静止图像和活动图像的数字传输和数字处理技术涉及的知识范围很广。笔者在不伦瑞克工业大学十三年的教学经验证明，只涉及通讯方面的模拟和数字图像传输技术的讲授，不能使学生得到规划或鉴定这类传输设备的必要知识。现在，最好是把经典的电视课程内容——摄像、信号校正、彩色电视编码、模拟信号传输和彩色图像再现等，与现代的数字图像通讯原理结合起来。

近五年来兴起讨论这样一个重要问题，怎样应用先进的数字信号处理方法提高现有电视系统的图像质量。这方面，人们用现代的取样定理解释经典的图像分解方法，并从中得到了提高图像质量的重要知识。增加扫描行数（高清晰度电视，HDTV），当然能从根本上提高图像质量。本书要详细讨论上述各种问题，当然不是过深地研究工程上的解决方法，否则将超出本书的范围。事实证明，首先系统地阐述经典的图像传输基础理论，对于考虑如何提高图像质量标准是很有用的，所以，本书把电视理论与一般的图像通讯现代知识结合为一体。

在本书的出版过程中，我的两位同事，莎拉女士和柳特伽女士给予了大力帮助，精心绘制了书中的插图，谨在这里致以衷心的感谢。还要感谢不伦瑞克工业大学通讯技术研究

所的电视技术和图像传输研究室的同事们，特别是工程师布赫瓦尔特、雅谷布森、约翰森和文德勒。还有赖默斯博士和勃兰德博士，他们在多年的科研工作中进行了很有价值的探讨，本书的一些章节里引用了他们的研究成果。最后，还要感谢罗伯特·博施公司在达姆斯塔特市的电视设备营业部和在基尔市的陆道尔夫·海尔博士工程师，以及慕尼黑市的西门子股份公司，他们提供了图39、45、103、109、116的图片。还要感谢出版社和编辑者对书稿长期写作过程的耐心等待。

多年来，经典电视技术在某些工科高等学校作为选修课程内容。本书打算在经典电视技术和现代图像通讯技术之间架起一座桥梁，其中写进了我在这两方面的教学经验和科研成果。因此，在高等学校和高等专科学校学习通讯技术的高年级学生，以及从事电视或通讯工作的工程师们，都会对这本书感兴趣的。

H·舍恩费尔德 1982年11月 写于不伦瑞克

# 目 录

<b>第一章 光-电变换</b> .....	(1)
1.1 图像信息的量化.....	(2)
1.2 取样定理.....	(2)
1.3 图像分解.....	(6)
1.3.1 与视觉分辨力的适配.....	(6)
1.3.2 用频分复用方式减少参量(同时制).....	(9)
1.3.3 用时分复用方式减少参量(顺序制).....	(10)
1.3.4 频带宽度.....	(11)
1.3.5 光栅的形成.....	(13)
1.3.6 电视信号的频谱.....	(17)
1.3.7 孔阑失真和孔阑校正.....	(22)
1.3.8 图像清晰度的定义.....	(29)
1.4 摄像器件.....	(34)
1.4.1 光电导摄像管.....	(35)
1.4.2 存储器管.....	(37)
1.4.3 线阵半导体图像传感器.....	(39)
1.4.4 面阵CCD和CID图像传感器.....	(41)
<b>第二章 彩色电视的摄像和显像</b> .....	(47)
2.1 混色曲线.....	(48)
2.2 彩色校正矩阵.....	(53)
2.3 三管式彩色摄像机.....	(54)
2.4 单管式和两管式彩色摄像机.....	(56)
2.4.1 缩小摄像机的途径.....	(56)
2.4.2 用时分复用技术得到 $R, G, B$ 信号.....	(56)
2.4.3 用频分复用技术得到 $R, G, B$ 信号.....	(60)
2.4.4 两管式彩色摄像机.....	(62)
2.5 电影扫描器.....	(66)
2.6 三枪三束彩色显像管.....	(69)
<b>第三章 活动图像模拟传输技术</b> .....	(73)
3.1 广播电视传输技术.....	(73)
3.2 残留边带传输方式.....	(74)
3.3 彩色编码器.....	(79)

3.3.1	兼容性	(79)
3.3.2	与彩色视觉分辨力的适配(非相关压缩)	(82)
3.3.3	编码矩阵	84)
3.3.4	色度信号传输方式	(86)
3.3.5	时分复用编码(时分法)	(93)
3.4	电视通道中的附加信息传输	(97)
3.4.1	用频分复用技术传送伴音	(98)
3.4.2	场消隐期间传送伴音(COM方式)	(100)
3.4.3	同步脉冲期间传送伴音(SIS方式)	(102)
3.4.4	测试行	(104)
3.4.5	场消隐期间传送数据信息	(105)
3.4.6	场消隐期间传送静止图像	(107)
3.4.7	文字图形电视和文字图形电话	(109)
3.5	有线电视	(113)
3.6	卫星电视	(118)
<b>第四章 活动图像数字传输技术</b>		(122)
4.1	活动图像信号的脉码调制	(122)
4.1.1	数字黑白图像信号	(122)
4.1.2	数字彩色电视信号	(124)
4.2	数字电视演播室	(126)
4.3	数字电视接收机	(130)
4.4	图像信号的码率压缩	(136)
4.4.1	降低取样频率和内插	(136)
4.4.2	通过分解力参数的变换进行非相关压缩	(136)
4.4.3	减少冗余度	(138)
4.4.4	差值脉码调制(DPCM)	(140)
4.4.5	帧间编码	(143)
<b>第五章 高清晰度电视和窄带电视电话</b>		(147)
5.1	高清晰度电视系统(HDTV)	(147)
5.1.1	高质量电视(HQ)和高清晰度电视(HDTV)的比较	(147)
5.1.2	行数的选择	(147)
5.1.3	传输带宽的选择	(150)
5.1.4	数字HDTV技术	(150)
5.2	窄带电视电话	(151)
5.2.1	对话系统中的图像传输	(151)
5.2.2	适合于窄带通路的参数的确定	(152)
5.2.3	行结构融合和图像分解力	(154)

5.2.4	宽带 / 窄带电视电话的标准变换	(156)
5.2.5	会议电视	(158)
<b>第六章</b>	<b>静止图像传输</b>	<b>(162)</b>
6.1	静止图像的扫描和记录	(163)
6.1.1	机械式图像扫描器和图像记录器	(163)
6.1.2	电子慢扫描技术	(166)
6.1.3	有标准变换的电视扫描	(168)
6.2	电报传真的传输方法	(171)
6.2.1	第1类传真机的模拟调制	(172)
6.2.2	第2类传真机的模拟调制	(174)
6.2.3	第3类传真机的数字调制	(175)
6.2.4	办公室通讯	(178)
6.3	图像传真的传输方法	(180)
6.3.1	通过电话线路的模拟传输法	(108)
6.3.2	彩色图像传真的传输方法	(181)
6.4	静止图像电话传输	(182)
6.5	来自气象卫星和空间探测器的图像	(184)
<b>参考文献</b>		<b>(188)</b>



# 第一章 光 - 电 变 换

通讯传输的费用是随着所要求的带宽加宽和所传送的参量数增多而增加的。在各种通讯方式中传输图像所要求的带宽最宽，需要传输的参量数也最多，特别是传输彩色活动图像。

为了便于理解，首先讨论黑白图像传输技术。为此，先对彩色图像进行亮度分离，如图1所示。通常，在被摄图像与摄像器件之间放置一片光学滤波器，其光谱特性要与入眼的视见度曲线  $\bar{v}(\lambda)$  尽可能一致（见参考文献 [ 1 ] 3.4节）。光学滤波后的图像可用以  $x$ 、 $y$ 、 $t$  为变量的亮度函数表示

$$Y(x, y, t) = \int \bar{v}(\lambda, x, y, t) d\lambda \quad (1)$$

实际上，上式中的积分是在光 - 电变换器（如摄像管的光敏层）中完成的，由摄像管直接得到亮度信号  $U_y(x, y, t)$ 。式中，时间作为第四个参量，它之所以包含在图像的亮度分布中，是因为我们所处理的一般是活动图像。所谓活动图像，就是图像上每一个象点的亮度都是随时间变化的。

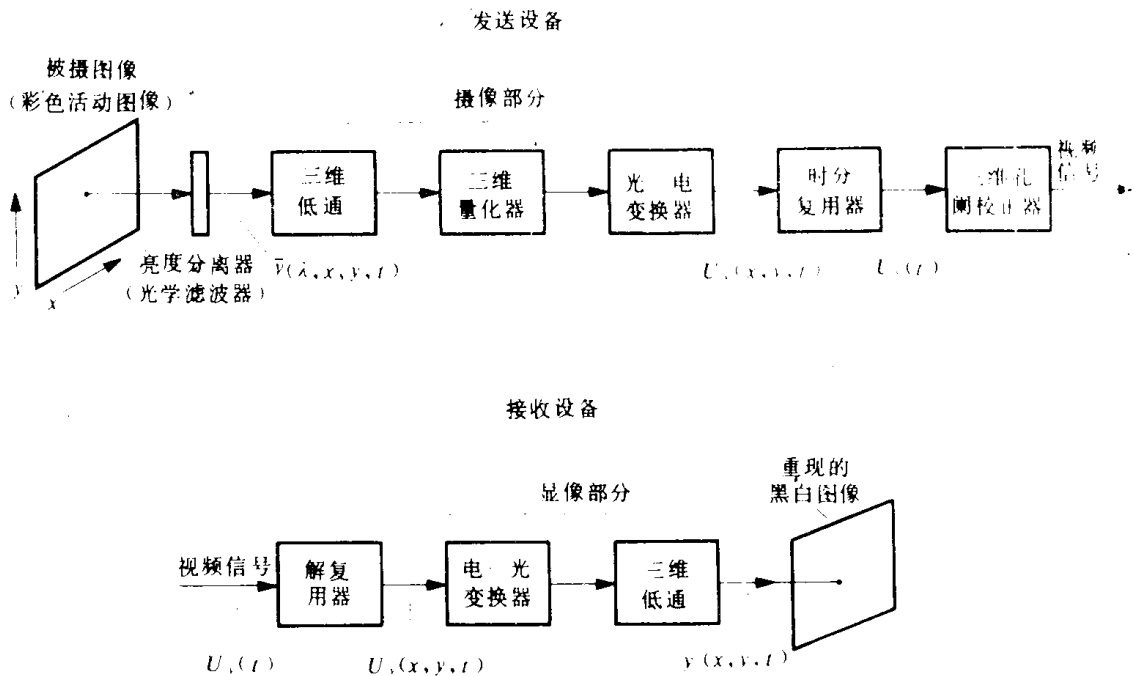


图1 四维黑白图像传输系统（用时分复用技术压缩参量）

## 1.1 图像信息的量化

为了降低传输费用,要求对三个参量  $x, y, t$  进行空域或时域的量化。例如用取样的方法传输离散的亮度值,以代替连续变化的亮度值。图 2(a) 描述了上述过程,图中画出一个按正弦规律变化的亮度信号,它经过取样变成了阶梯形。这个曲线图既可用于表示被摄图像上某点亮度随时间的变化,其周期为  $T_p$ ;也可用来表示被摄图像上的亮度沿  $x$  和  $y$  两个方向上的空间变化规律,其周期分别为  $X_p$  和  $Y_p$ ,即“空间频率”为:

$$u = \frac{1}{X_p} \text{ 和 } v = \frac{1}{Y_p}$$

每个阶梯值为取样周期  $X_T, Y_T, T$  内空间和时间上的算术平均值。这平均值由摄像器件(如摄像管)的积分或存储特性自然给出。这个过程类似于用一个狭缝对正弦曲线进行取样。由本章后面的 1.3.7 节可知,狭缝输出端的抽样值仍按正弦规律变化,但这个正弦波的幅度要乘以下面的系数,即按下面的数值减小:

$$a(u) = \left| \frac{\sin \pi X_T u}{\pi X_T u} \right| \quad (2a)$$

$$a(v) = \left| \frac{\sin \pi Y_T v}{\pi Y_T v} \right| \quad (2b)$$

$$a(f) = \left| \frac{\sin \pi T f}{\pi T f} \right| \quad (2c)$$

这就涉及到  $\text{sinc}$  函数<sup>①</sup>,其频率特性如图 2(b) 中的虚线所示。这个频率特性是能够校正的(见第 1.3.7 节),因此,这种量化产生的失真也是能够校正的。

## 1.2 取样定理

如果一个重现图像不因图像信息的量化而有失真和干扰,其重要条件是要遵守取样定理(见参考文献 [2] 第 3 章)。首先要把被取样信号的带宽限制在空间频率或时间频率  $W$  以下,使之满足下列条件:

$$W_x \leq \frac{1}{2X_T}, \quad W_y \leq \frac{1}{2Y_T}, \quad W_t \leq \frac{1}{2T} \quad (3a)$$

$$\text{或 } X_T \leq \frac{X_p}{2}, \quad Y_T \leq \frac{Y_p}{2}, \quad T \leq \frac{T_p}{2} \quad (3b)$$

即是说,一个按正弦规律变化的亮度信号,其半个周期内至少要包含一个取样周期。若由于量化以及其它原因(例如第 1.3.7 节讨论的孔阑失真)引起的频率特性下降近似于直线变化,如图 2(b) 中的曲线②所示,而视频信号的最高频率又超过式(3a)规定的界限  $W$ ,那么图 2(c) 表明,在这种情况下,取样信号的频谱在视频范围内会有重叠(如图

①  $\text{sinc}$  函数类似于取样函数,称为  $\text{sinc}$  函数。——译者注

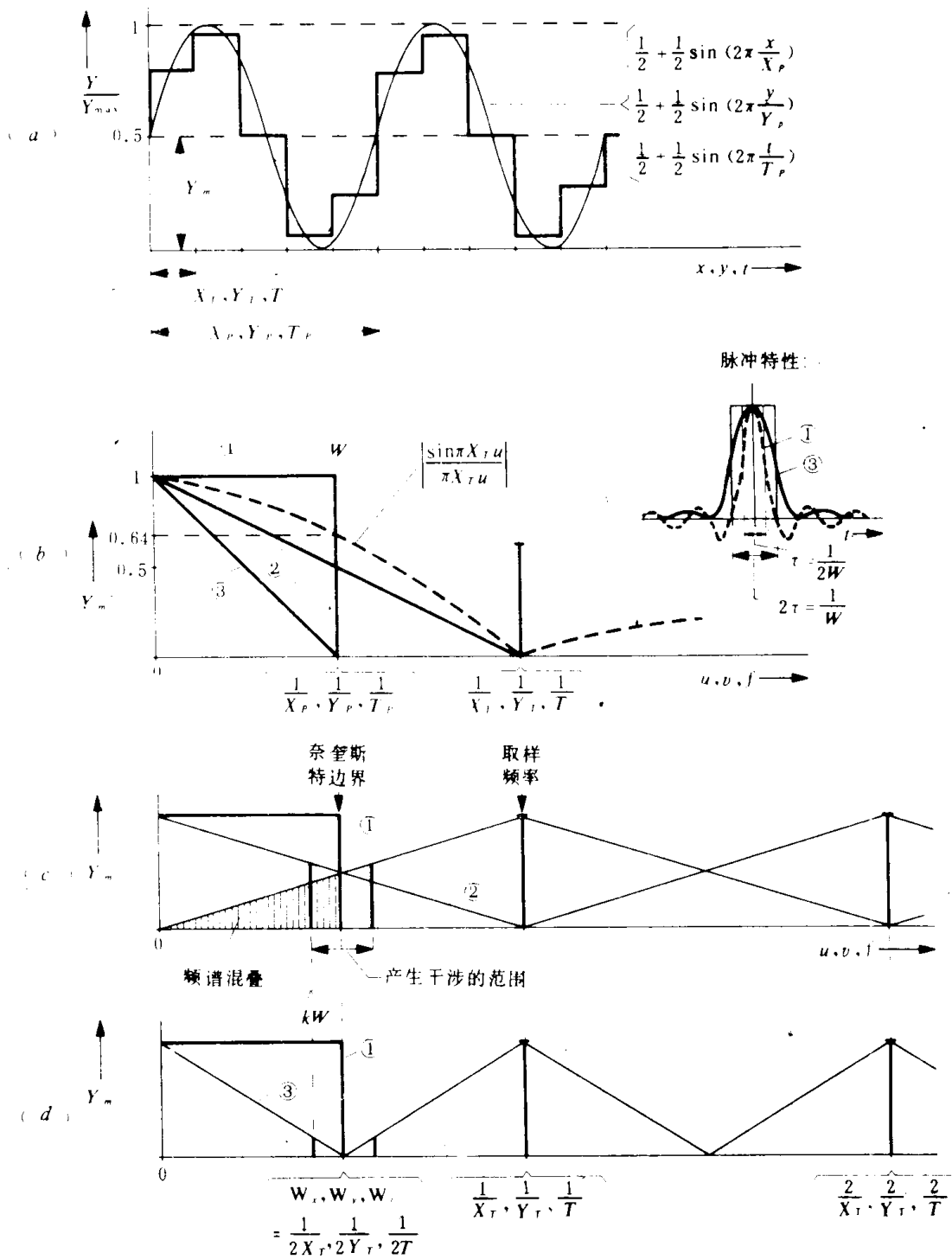


图2 图像时域量化和空域量化的取样定理

- (a) 由于时域量化或空域量化，正弦波成了阶梯波
- (b) 前置光学滤波器的频率特性及其脉冲特性；
- (c) 有混叠失真的取样信号频谱；
- (d) 用理想的前置光学滤波器消除了频谱混叠（混叠失真的一部分）的取样信号频谱

中画阴影线的部分所示)，这称为混叠失真，它在图像上产生引人注目的干涉现象和差拍现象（见参考文献〔2〕3.1节）。现对这类干扰列举几例。

(1) 当亮度随时间变化时

a) 图象闪烁并颤动；

b) 高速旋转的辐条轮会出现一个形似反向旋转的干扰图像（这是频闪效应，频闪频率等于图像变换频率和轮辐旋转频率之差）。

(2) 当亮度随空间变化时

a) 画面上对角线方向的边沿呈阶梯状（象锯齿一样）；

b) 图2(c)中与传输频带重叠的取样信号频谱（图中阴影线部分）在图像上产生低频干扰。参见图20(a)中600电视线附近的干扰图样

c) 图2(c)中还示出，在奈奎斯特边界频率附近，取样信号频谱与精细水平条纹图案产生的相应信号谱线之间，会产生干涉现象。这种情况可参见图20(a)中300电视线附近的干扰图样。

如果在量化前，从光学方面能做出如图2(b)中曲线①那样理想的频带限制，上述干扰是可以避免的。这对 $x, y, t$ 三个参量都适用。因此，图1中在三维量化器前放置了一个三维低通滤波器。根据图2(c)的频谱，在取样系统的输出端也必须放置一个低通滤波器，用来平滑输出波形上的阶梯，这就是图1中电-光变换器后面的三维低通滤波器。

此外，按照取样定理，要求发射和接收设备中的前置和后置滤波器也有理想的矩形特性，以便与带宽为 $W$ 的传输通道相匹配。

图2(b)所画脉冲特性①的响应曲线表明，截止频率为 $W$ 的理想矩形低通滤波器，能通过的最窄脉冲宽度为 $\tau = 1 / 2W$ 。与此相应，可分解的最小像素宽度为

$$s = \frac{1}{2W} \quad (4a)$$

根据取样定理式(3)中规定的界限值，对三维图像来说，上式意味着：

$$\text{水平方向 } s_x = X_T = \frac{X_P}{2}$$

$$\text{垂直方向 } s_y = Y_T = \frac{Y_P}{2} \quad (4b)$$

$$\text{时域范围 } s_t = T = \frac{T_P}{2}$$

从光学方面来说，要做出这样陡峭截止的低通滤波器是不可能的。

仔细观察图2(b)中理想低通滤波器的脉冲特性①，可以看到，该脉冲前后都出现了负的振荡（见参考文献〔2〕5.2.1节）。由于光变化不可能出现负值，因此，理想的光学低通滤波器是不能实现的。图2(b)中的频率特性线性下降曲线③，是一种可实现的频带限制特性，与之相应的脉冲特性③只出现正的振荡。这时，脉冲宽度 $\tau = 1 / W$ 。因为这个频率特性曲线下面的面积减少了一半，所以脉冲宽度增加了一倍。

图2(d)表明，采用曲线③那样的频率特性后，不再出现频谱混叠，因而混叠失真也

消除了。实际上，对于按空间变化的亮度分布来说，光-电变换器的孔阑失真就会造成这样的频率特性下降，如图2(b)中虚线所示。孔阑失真的原因在于：扫描电子束的直径不是无限小，光-电变换器信号板上像素之间的电荷扩散，以及光在镜头中的散射。通常，还需要加一个光学低通滤波器，使频带内的高频下降特性尽可能与图2(b)中的曲线③一致。这样做的效果见图20(b)。

按上述理论正确工作的图像传输系统，如图2(b)所表明，最窄的脉冲宽度增加了一倍（与理想矩形滤波器相比）。由式(4b)  $s_x = 1/2W_x = X_T$ ， $s_y = 1/2W_y = Y_T$ ， $s_z = 1/2W_z = T$ 可知，所能分解的最小像素的宽度也增加了一倍。也就是说，图像清晰度降低一半。

实际上，在图1所示的传输系统中，要理想地避免混叠失真几乎是不可能的。因为这需要在系统的输入端和输出端各设置一个三维光学低通滤波器，其滤波特性应当像图2(b)中曲线③所表示的那样，但这是做不到的。从理论上来说，可以象图1那样，在发送设备输出端设置一个三维孔阑校正器，用来补偿由二个低通滤波器造成的清晰度损失。孔阑校正器具有与两个低通特性互补的高频提升特性。因此，经孔阑校正后，整个系统又具有与图2(b)中的曲线①相应的、带宽为 $W$ 的理想低通特性。于是，所传输的图像又能有最佳清晰度，就象最小的像素宽度没有增加一样。

可是，在实际的图像传输系统中，既不可能做出象图2(b)中特性③那样的光学滤波器，也不可能用那么大的高频提升量来均衡高频特性下降。考虑到信杂比，也不能这样做。最多可以采用二维的孔阑校正（见第1.3.7节），以补偿光-电变换器引起的少量高频下降，即大约能补偿图2(b)中曲线②所表示的滤波特性。实际中，与这样的频率特性相关的混叠失真，人们是可以容忍的。

为了避免所有的混叠失真，从系统理论上讲，要额外设置一个后置滤波器（截止频率为 $W_y$ 的垂直滤波器）。对于按行量化（扫描线是水平的）的一般电视系统来说，不可能做出这样的滤波器。图2(d)表明，采用理想的光学前置滤波器虽然能消除频谱混叠，但在产生干涉现象的频率范围内，仍然存在着精细水平条纹图案产生的信号谱线与取样信号频谱中相应边频分量之间的干涉效应。

电视技术中的一个重要问题是，要求计算出一个恰当的水平条纹频率 $KW$ （见图2(d)所示），这一个频率与取样信号频谱中相应的边频分量之间的干涉现象，观察者刚好能容忍。这里， $W$ 是取样频率的一半， $K$ 是所谓的凯尔系数。凯尔系数是以参考文献[4]的三个作者中第一个作者的姓氏命名的。文章中描述了一种实验研究，根据图像观察人员的主观评价来确定这个系数。

$$K = \frac{KW_y}{W_x} = \frac{K \times \frac{1}{2Y_T}}{\frac{1}{2Y_T}} = 0.64 \quad (5)$$

按当时的文献记载，100行（相当于 $W_y$ 为100）扫描的电视只能传输64线的水平条纹图像（相当于 $KW_y$ 为64），其伴随的干涉现象尚可容忍。在后面传输带宽的计算中，要用到

这个系数—— $K = 0.64$ （见第1.3.4.2节）。

在新的研究中（见参考文献[5]），人们已把关于干涉现象的主观评价容限扩大到图像的水平方向（ $x$ 扫描方向）上。这对沿 $x$ 方向有量化电荷分布的半导体摄像器件来说，是有现实意义的（见第1.4.4节）。研究证明，水平方向凯尔系数的大小，与放大系统和传输通道中，后置滤波器频带截止边缘的形状有很大关系。也就是说，与 $y$ 方向按行量化的情况不同，在 $x$ 方向取样时相应的滤波特性容易影响凯尔系数。参考文献[5]还特别指出，如果光-电变换后的传输通道具有图2(d)所示的理想矩形频带，截止频率为 $W_1$ ，那么“水平方向的凯尔系数” $K' = 1$ ，它与取样前光-电变换部分中频带截止边缘的陡度无关。

### 1.3 图像分解

#### 1.3.1 与视觉分辨力的适配

现在，进一步研究1.1节中讨论的图像量化问题，重点研究量化精度和眼睛极限分辨力之间的关系。显然，人们不宜将量化精度选择得比人眼极限分辨力低。这种量化级数与人眼分辨力的精细适配，称为“非相关压缩”（见参考文献[6]），因为量化只抑制了眼睛几乎分辨不出的那些图像细节。利用“非相关压缩”可使量化级数减少到心理光学所要求的最小值，因而可以使电视传输费用降低到可能的限度。在传输静止图像时，只需进行空域量化，而在传输活动图像时，还存在时域量化问题。

##### 1.3.1.1 时域量化

电影技术中对活动影像进行的时域量化，是快速、成串地给人眼提供一格一格的影片影像。只要影片换格频率高于大约每秒16格，视觉上就感到影像是连续运动的。这里，利用了人眼的视觉惰性。但是，人眼的储存作用是不完善的，当影像重复频率不太高时，人眼还会感觉到周期性的亮度起伏，即影像出现明显的闪烁效应。换格频率16 Hz是人眼对影像运动具有自然感、连续感的临界频率，又叫做融合频率。也就是说，当1秒钟投映16个分立画面时，人眼刚好感觉到活动影像的动作是连续的、自然的。但这时对影像的亮度一起一伏却还有闪烁感觉。人眼刚刚感觉不到亮度闪烁的影像重复频率称为临界闪烁频率。根据实验，临界闪烁频率比融合频率要高得多，至少约50 Hz。

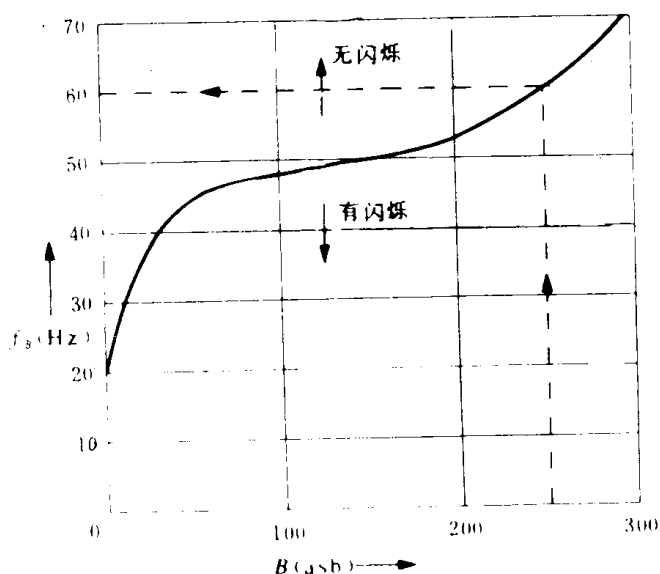


图3 临界闪烁频率 $f_s$ 和亮度 $B$ 的关系

图3是关于心理光学实验的结果（见参考文献[1]2.3节）。随着重现图像亮度 $B$  [ asb $\odot$ ，亚熙提]的增加，必须提高影像重

$\odot 1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} = \pi \text{ asb}$  ——译者注

复频率  $f_b$  [Hz], 才能不产生闪烁现象。由于电视图像的峰值亮度多数情况下为  $250\text{asb}$ , 据图 3 可知, 图像重复频率 (即每秒重现的图像幅数) 必须选在  $50 \sim 60\text{Hz}$  范围内。

可见, 在  $16\text{Hz}$  的融合频率和  $50\text{Hz}$  的临界闪烁频率之间, 存在着很大的数量差别。然而, 人们不可能仅仅为了防止闪烁干扰而将每秒钟呈现的图像幅数提高到融合频率的三倍。电影技术较好地解决了这个问题, 它是在放映机里的遮光器上附加三个扇形遮光片, 在每一格影像的投映期间, 扇形遮光片三次遮断光线。于是, 尽管影片换格频率仍是  $16\text{Hz}$ , 但呈现给人眼的光脉冲频率却是  $16 \times 3 = 48\text{Hz}$ 。普通放映机每秒放映  $24$  格影片, 只要对每格影片遮断两次光线, 光脉冲频率就是  $24 \times 2 = 48\text{Hz}$  (见参考文献 [7] 第 V 章 B)。

如果人们在电视接收机里装一个存储器, 以使一幅完整的图像能多次显示, 那么在电视技术中也能用类似电影的方法来解决闪烁问题。不过, 现在的电视设备中并未采用存储器, 而是采用了所谓的隔行扫描方法, 它同样能使光脉冲频率提高一倍 (见第 1.3.5.2 节)。

### 1.3.1.2 空域量化

把图 4 所示的平面图像分成  $\rho$  个大小相等的正方形像素。如果像素数目太少, 对角线方向的图形将出现阶梯形轮廓 (即混叠失真, 见第 1.2 节)。图 1 中的显像部分, 放在电-光变换器后面的光学低通滤波, 实际上就利用人眼的有限分辨力, 也即是依靠视觉的空间平均作用来完成的。

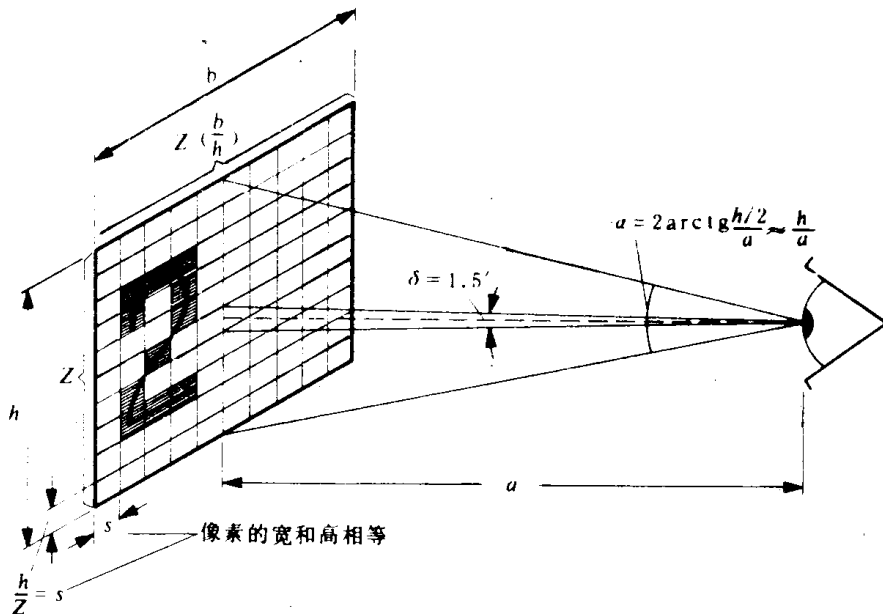


图 4 最少像素数的估算

按照图 4, 根据确定的观察距离  $a$  和相应的视角  $\alpha$ , 并根据近似公式

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{h/2}{a} \approx \frac{\alpha}{2} \quad (6a)$$

以及人眼极限分辨角的近似公式

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{s/2}{a} \approx \frac{\delta}{2} \quad (6b)$$

可以求得图像垂直方向上的像素数为

$$Z = \frac{h}{s} \approx \frac{a}{\delta} \quad (7)$$

然后可求出正方形（垂直方向和水平方向上分解力相同）像素的总数为

$$\rho = Z^2 \left( \frac{b}{h} \right) \quad (8)$$

式中， $\frac{b}{h}$  表示图像宽高比（帧型比）。

表1列出了根据式(7)和式(8)计算出的电视图像和传真照片上应有的最少像素数。计算时，所用的极限分辨角为 $\delta = 1.5'$ 。表中的计算数据，对于电视图像来说，选定的观看距离为4~5倍图像高度；而对于通过电话线路传输的规格为13cm × 18cm的传真照片来说，观看距离仅为25~30cm。因此，计算出的传真照片的像素数要高得多。

表1 电视和传真图像的最少行数和总像素数

	$a$	$a$	行数 $Z$ [按式(7)]	宽高比 $b : h$	总像素数 $\rho$ [按式(8)]
电 视	$(4 \sim 5) h$	$\approx 15$	600	4 : 3	$0.5 \cdot 10^6$
传 真	$(2 \sim 2.3) h$ $a = 25 \sim 30 \text{ cm}$ $h = 13 \text{ cm}$	$\approx 25$	1000	$\frac{18 \text{ cm}}{13 \text{ cm}}$	$1.4 \cdot 10^6$

至此，我们根据眼睛对分割的像素恰能产生平均作用的极限情况，选定了总像素数。当一幅图像具有如此之多的像素数时，人眼实际能分辨出怎样的图像细节，这个问题将在后面第1.3.8节讨论。

具有时间平均特性和空间平均特性的人眼视觉，其空间平均特性象一个空间低通滤波器，它的空间截止频率（按表1）是600像素/15°，也即40像素/1°；其时间截止频率（按图3）是60Hz。因此，1°视觉内人眼感知像素数的时间分辨力可以用下式表示：

$$40 \times 40 \times 60 = 96000 \text{ 像素} \cdot \text{s} \quad (9a)$$

这是在垂直和水平方向内各为1°视角，1秒钟内所能观察到的正方形平面上的最高像素数。1°视角也是人眼视觉最清楚的范围，它是由眼球视网膜上黄斑区的“中央凹”的大小决定的。在中央凹处锥状视觉细胞密度最大。

除了空间平均特性和时间平均特性外，还要考虑人眼的亮度分辨力，这种分辨力大约相当于127级亮度差，即等于每个像素可以有7 bit的亮度信息。于是，综合人眼的三个特性，从式(9a)可算出人眼视觉能处理的最大信息流（即所需通道容量）为

$$96000 \times 7 = 672 \text{ kbits} \quad (9b)$$

如果在电视传输过程中始终是传输最大分辨力的图像细节，它们全由黄斑区内的中央凹来感知，那么根据式(9b)，人眼视觉需要处理的信息流是0.67 Mbit/s。显然，如果整



个画面都以同样的最大分辨力来传输，那么，这个  $1^\circ \times 1^\circ$  观察面内的信息流再乘上与画面的高和宽相对应的视角范围  $15^\circ \times 15^\circ$ （见表1），就可得到整个画面的信息流，即

$$0.672 \times \left(\frac{15^\circ}{1}\right)^2 \approx 150 \text{ Mbit/s} \quad (10)$$

在第1.3.5.2节中将指出，用隔行扫描方法可以使图像重复频率减半，并能使图像上没有大面积的亮度闪烁。因此，电视系统传输的与人眼时空分辨力适配的最大信息流，可以减少到75Mbit/s。

### 1.3.2 用频分复用方式减少参量（同时制）

在图1中，光-电变换器的输出是一个亮度信号  $U_v(x, y, t)$ 。从原理上讲，这个亮度信号有三个参量。在实际实现光-电变换时，可以简单地想象，是从光电导层的每一个像素上分别引出一个信号通路，如图5(a)所示。然而，向接收端传输时却只有一条通道，它只能传输信号  $U_v(t)$ 。因此，必须设法减少信号的参量。

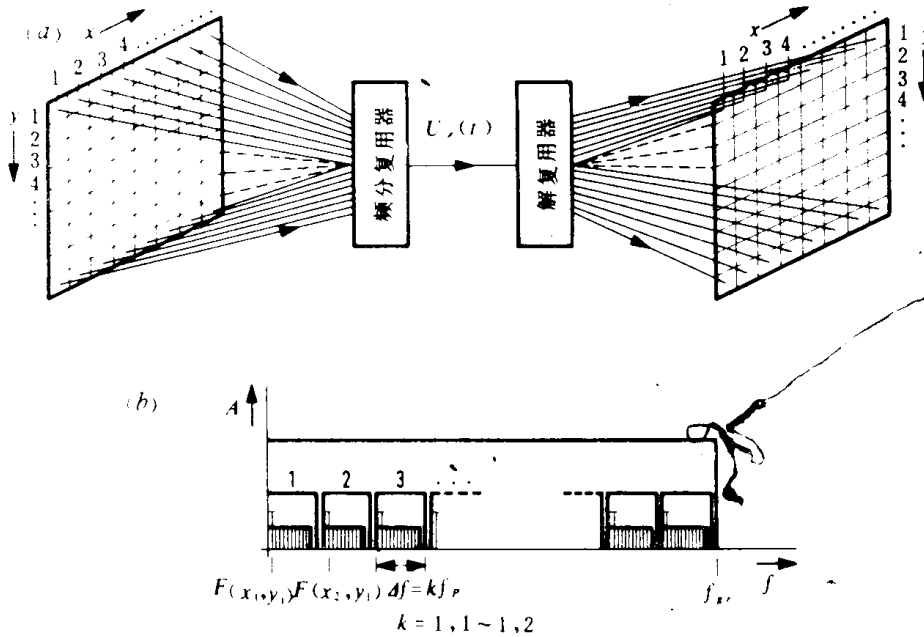


图5 频分复用传输系统

为此，在图5(a)中用频分复用器将  $x, y, t$  三个参量减少成一个参量  $t$ 。这是把每个像素随时间变化的亮度信息，调制到不同频率的载频上，然后混合起来经一条通道传输出去。混合的信号为

$$\begin{aligned} U_v(x, y, t) &= U_{v,1}(t) \sin [2\pi F(x_1, y_1)t] \\ &+ U_{v,2}(t) \sin [2\pi F(x_2, y_1)t] \\ &+ \dots = U_v(t) \end{aligned} \quad (11)$$

图5(b)中，每个已调波信号通路采用残留边带传输方式，因而每一通路所需带宽为  $kf_p$ 。 $f_p$ 是像素亮度变化的最高频率。在极端情况下， $f_p = f_B/2$ ，即  $f_p$ 等于帧频  $f_B$ 的一