

北京市高等教育精品教材建设立项项目

数字广播电视技术书系

北京广播学院《数字广播电视技术书系》编辑委员会

数字电视 制播技术

张琦 林正豹 杨盈昀 编著
张永辉 主审

中国广播电视出版社

数 字 广 播 电 视 技 术 书 系

主 编 王明臣

副主编 李鉴增 张 琦 毛志伋

高福安 刘剑波

数字电视制播技术

张 琦 林正豹 杨盈昀 编著

张永辉 主审

中国广播电视出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字电视制播技术/张琦,林正豹,杨盈昀编著.

—北京: 中国广播电视出版社,2003.1

(数字广播电视技术书系/王明臣主编)

ISBN 7-5043-3987-3

I. 数… II. ①张… ②林… ③杨… III. ①数字电视—电视节目—制作②数字电视—电视节目—视频信号—数据传输 IV. TN948.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第088076号

数字电视制播技术

编 著:	张 琦 林正豹 杨盈昀
责任编辑:	王本玉
封面设计:	张一山
责任校对:	谭 霞
监 印:	戴存善
出版发行:	中国广播电视出版社
电 话:	86093580 86093583
社 址:	北京复外大街2号(邮政编码 100866)
经 销:	全国各地新华书店
印 刷:	北京市金星剑印刷有限责任公司
装 订:	涿州市西何各庄新华装订厂
开 本:	787×1092毫米 1/16
字 数:	440(千)字
印 张:	20.75
版 次:	2003年1月第1版 2003年1月第1次印刷
印 数:	5000册
书 号:	ISBN 7-5043-3987-3/TN·275
定 价:	39.00元

(版权所有 翻印必究·印装有误 负责调换)

谨以此书献给：

中国广播电视事业
的开拓者和继承者

北京广播学院《数字广播电视技术书系》

编辑委员会

主 任：周铜山

副主任：高福安 李鉴增 王明臣

委 员：（以姓氏笔划为序）

王本玉 毛志伋 车 晴 李 栋

刘剑波 宋培义 肖 歌 林正豹

林达恂 张永辉 张 琦 杨盈昀

书系总序

时间似流星，把一批批酷爱读书的学子带出学校大门，撒向广阔的社会舞台施展才华……

时间如巨浪，推动广播电视事业千帆竞发，百舸争流，新技术、新模式层出不穷……

时间若彩笔，不断地把人们满头乌发抹灰、添白，向张张稚嫩的脸庞描绘鱼尾纹……

时间造化万物，推陈出新！

1997年3月《现代广播电视技术全书》第一版面世，至今已5年多了。这5年时间，世界信息技术飞速发展；这5年时间，我国广播电视由局部采用数字技术，推向整个系统实现数字化。时间不断流淌出新理论、新器件、新技术、新模式。在数字化的推动下，广播电视节目制播系统、传输覆盖以及管理手段日趋网络化、智能化；虚拟环境的营造和利用，部分地取代硬件系统，取得了更优、更美的艺术效果。在前几年还供不应求的《现代广播电视技术全书》，其内容已不能满足当前和今后的发展要求。无论是广播电视技术高等教育，还是第一线工程技术实践工作，都渴望能有更适合技术发展要求的新书，以解急需。

与我国广播电视第一线联系密切、长期从事工程技术教育和科学研究的北京广播学院的教授们，在历史责任感的推动下，应“中国广播电视出版社”之约，参照北京市“高等教育精品教材建设规划”要求，在《现代广播电视技术全书》的基础上，重新制定编写大纲，力争涵盖当今广播电视从节目制作、播出、传输覆盖到接收重现等技术领域的最新成果。经过多次研讨审议、通力合作、历时年余，终成这部四百余万字的新编巨著《数字广播电视技术书系》，共分10册：

1. 广播影视声学
2. 数字音频技术及应用
3. 数字电视与高清晰度电视
4. 数字电视制播技术
5. 多媒体与电脑动画
6. 有线电视网络
7. 数字卫星广播与微波技术

8. 宽带网络技术

9. 计算机网络技术及应用

10. 广播电视技术管理与教育

10 册书彼此协调分工, 构成相对全面、完整、配套齐全的书系; 而又各自独立成书, 可分册单独使用。这部书系的特色是力求突出其先进性、科学性、系统性和实用性。重点介绍当前国内外先进的数字技术、智能化制播技术、宽带网络技术、多媒体应用、光纤传输、卫星广播与数字微波等。该书系在兼顾技术理论、工程设计和实践应用的同时, 并对设备的管理和高质量的节目制作方法以及相关理论进行了较具体的论述, 力争作到理工结合、工艺兼容。

北京广播学院是全国著名的培养广播电视各类高级专门人才的高等学府, 拥有一大批在我国广播电视工程技术领域颇具声望的专家、教授和年轻的后起之秀。他们在数字电视、高清晰度电视、数字声音广播、数字记录、数字微波、卫星通信、宽带网络、多媒体制播技术以及现代化媒体管理等方面的研究成果, 为国内同行所关注。数十年来为我国广播电视事业培养了工程技术类大学本科生、研究生近万名, 为我国广播电视事业的发展作出了突出的贡献。学院汇集 30 多名学有所成, 业有所就的老、中、青优秀专家教授和科研骨干力量, 为了我国广播电视事业的发展, 为了满足广播电视技术领域第一线同行们的急需, 也为了学院教学和科研的需要, 将他们多年来从事教学和科研工作的积累, 以及技术实践经验, 认真地总结提炼, 编著成书, 献给新世纪我国广播电视事业的开拓者与继承者。本书系已纳入北京市“精品教材建设规划”, 可作为高等院校本科相关专业的教材; 又兼顾那些在广播电视技术领域第一线工作的工程设计、科研开发、设备维护人员的工作实践需求, 作为可靠、好用的“技术参谋”。

随着信息技术和数字技术、广播电视新技术的突飞猛进, 将会不断推出新的理论、新的技术、新的产品和新的制播手段。在当前和未来, 这种发展常常会超出人们的预料。我们衷心地希望广大读者和专家能对我们的工作提出改进意见和要求。我们也将按广大读者和专家们的意见和要求, 进一步补充和完善本书的内容, 使书系能与时俱进, 挺立潮头!

本书系的出版得到了北京广播学院领导和有关部门的大力支持, 尤其得到中国广播电视出版社有关领导, 及各位编辑的合作与支持。在此, 我谨代表北京广播学院《数字广播电视技术书系》编辑委员会, 向参加该书系编写的全体作者和有关领导以及一切为该书系出版作出贡献的同仁一并深表谢意。

北京广播学院



2002 年 5 月

前 言

20 世纪 90 年代数字电视开始迅速发展,1996 年 12 月美国 FCC 采用 ATSC (Advanced Television Systems Committee) 数字电视标准,并计划到 2006 年完全取代 NTSC 模拟电视广播。在过渡时期实行 HDTV 和 NTSC 同播。1993 年欧洲开始实现数字电视广播 (DVB—Digital Video Broadcasting) 计划,并从普通分辨率数字电视开始,在 1996 年 7 月进行了试播。现在 DVB 标准已在世界上许多国家推广。日本在 1999 年制订了 ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting) 地面广播标准,用于地面数字视频、数字音频与数据广播。

我国现在正在制定数字电视标准,大部分数字电视标准已经公布。现在已经开始数字电视卫星广播、数字有线电视和数字高清晰度电视试播,并计划到 2015 年数字电视广播全部取代 PAL 模拟电视广播。当前我国的广播电视正在全面地向数字化和网络化过渡,广播电视技术发生了日新月异的变化,广播电视系统和节目制作方法不断地更新,在演播室内数字电视设备正取代模拟设备,电视系统中的数字信号流代替了模拟信号。广播电视技术工作者很好地掌握数字电视信号格式、标准、传输接口、数字信号的产生、处理、记录、存储和播出设备的工作原理以及电视节目制作播出系统的构建和配置也是发展数字电视的当务之急。

根据广播电视发展的需要,在我们从事多年教学和科研的基础上编写了这本书。配合《数字广播电视技术书系》,我们在本书中以图文并茂的形式,将基础理论与实际应用的电视设备和电视系统最新技术结合起来,系统地分析和阐述了上述有关内容,阐明了主要的数字电视节目制作和播出设备原理。希望对从事多媒体和视音频技术的研究人员、数字视频设备的研制人员、电视工程技术人员和大专院校有关专业的师生有所帮助。

本书的第 1、2、7、8 章由张琦编写,第 3、4、5 章由林正豹编写,第 6 章由杨盈昀编写。由于我们的水平有限,加之时间仓促,错误和疏漏之处在所难免,还诚望读者不吝赐教。

编 者

2002 年 10 月于北京广播学院

内 容 提 要

本书系统地分析了数字电视演播室主要设备的工作原理及其应用,还分析了数字电视节目制作和播出系统的基本技术和系统构成。

本书共分8章,第1章系统地介绍了数字电视演播室视音频信号的规格、传输标准和应用接口;第2章分析了数字电视摄像机的工作原理;第3、4、5章分析了各种数字录像机的工作原理和技术特点;第6章分析了数字特技和数字切换台的基本原理及应用;第7章介绍了数字矩阵各部分电路的构成及工作原理;第8章分析了数字演播室和虚拟演播室的组成及技术原理和发展方向、数字节目制播网的构成及所应用的基本技术,例如,传输流和文件的接口协议、SCASI、FC SAN、NAS、双网结构、声像资料的存储和提取、2类硬盘播出系统的技术特点等。

目 录

第 1 章 演播室的串行数字信号传输及标准接口	1
1.1 数字视频分量信号标准	1
1.2 辅助数据的插入	18
1.3 比特并行4:2:2 数字信号传输方式	19
1.4 串行数字视频信号传输系统——SDI 接口	20
1.5 4:2:2 标准的 16/9 与 4/3 宽高比的关系	37
1.6 串行数字传输接口——SDTI	39
1.7 IEEE 1394 串行接口	45
1.8 数字音频传输接口	49
第 2 章 数字彩色电视摄像机	60
2.1 彩色电视摄像机的组成	60
2.2 摄像机的光学系统	66
2.3 CCD 摄像器件	71
2.4 视频信号处理放大器的组成	82
2.5 摄像机数字信号处理的特点	90
2.6 数字信号处理电路和数字电路系统	95
2.7 同步信号发生器	107
第 3 章 磁带录像机原理	112
3.1 磁带录像机的构成	114
3.2 磁带录像机的机械系统与系统控制	118
3.3 磁带录像机的伺服系统	127
3.4 Betacam-SP 格式	140
第 4 章 数字录像机	146
4.1 数字录像机概述	146
4.2 数字录像机的关键技术	156
4.3 D-Betacam 格式	165
4.4 DVCPRO 格式	172

第5章 电子编辑	190
5.1 电子编辑的工作方式	190
5.2 实现电子编辑的措施	191
5.3 电子编辑的控制方式	194
5.4 时间码	197
5.5 RS-422A 串行遥控信号	204
第6章 视频切换与数字特技	210
6.1 视频切换台概述	210
6.2 视频切换原理	212
6.3 视频切换台的功能特性	230
6.4 数字视频特技概述	233
6.5 图像变换原理	235
6.6 三维数字特技的工作原理	243
6.7 多通道特技	252
6.8 视频切换台与数字特技的实际应用	253
第7章 数字视频矩阵	256
7.1 矩阵系统	256
7.2 矩阵电路结构	258
7.3 多功能矩阵控制系统	264
第8章 数字电视节目制播系统	269
8.1 概述	269
8.2 数字演播室系统	275
8.3 声像资料的存储	286
8.4 数字电视自动播出系统	295
8.5 多媒体声像资料系统	304
8.6 虚拟演播室技术	309
参考文献	317

第1章 演播室的串行数字信号传输及标准接口

1.1 数字视频分量信号标准

1.1.1 抽样

(1) 抽样原理

把模拟信号变成数字信号时，首先用一个周期为 T 的窄脉冲流对模拟信号幅度进行抽取，把时间上连续变化的模拟信号变成时间上离散的信号，如图1-1所示。图

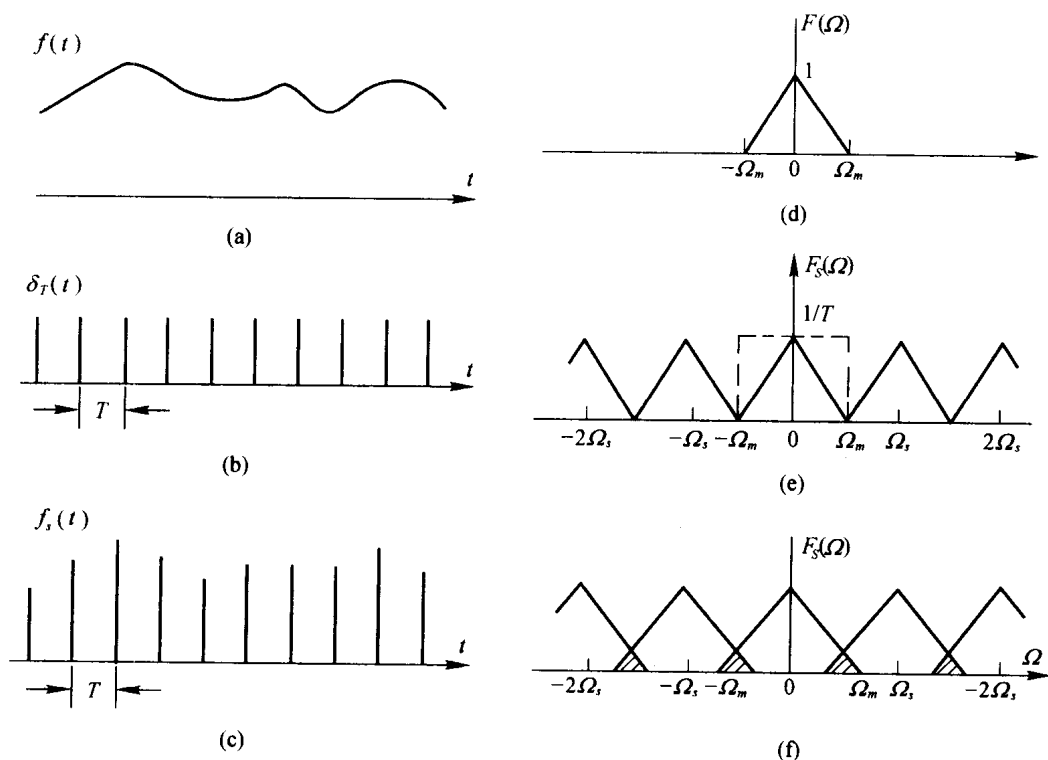


图1-1 抽样原理

中, (a)是时间上连续变化的模拟信号 $f(t)$; (b)是抽样脉冲序列; (c)是抽样后的信号 $f_s(t)$ 。

若抽样脉冲序列是周期为 T 的冲激函数序列 $\delta_T(t)$, 其定义为:

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (1-1)$$

抽样频率即是抽样脉冲的频率 $f_s = 1/T$ 。抽样后的信号为:

$$f_s(t) = f(t) \cdot \delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) \delta(t - nT) \quad (1-2)$$

显然, 抽样后的信号相当于 $f(t)$ 对抽样脉冲序列幅度的调制。

$f_s(t)$ 的频谱 $F_s(\Omega)$ 为 $f(t)$ 的频谱 $F(\Omega)$ 与 $\delta_T(t)$ 的频谱 $\Delta_T(\Omega)$ 的卷积, 可以写成:

$$\begin{aligned} F_s(\Omega) &= \frac{1}{2\pi} [F(\Omega) * \Delta_T(\Omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \Delta_T(\Omega - \tau) d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Omega_s \delta(\Omega - \tau - n\Omega_s) d\tau \\ &= \frac{\Omega_s}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \delta(\Omega - \tau - n\Omega_s) d\tau \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\Omega - n\Omega_s) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中, $\Omega = 2\pi f$; $\Omega_s = 2\pi f_s$ 。

$F(\Omega)$ 和 $F_s(\Omega)$ 见图1-1的 (d)、(e)、(f)。图中的 Ω_m 为 $f(t)$ 的最高信号频率。可以看出, $F_s(\Omega)$ 是 $F(\Omega)$ 以 Ω_s 为周期的周期性延拓, 只是幅度降低为 $1/T$ 。图(e)中的 $\Omega_s = 2\Omega_m$, 图(f)为 $\Omega_s < 2\Omega_m$ 的情况。

(2) 模拟信号的恢复

由图1-1(e)可以看出, 只要 $\Omega_s \geq 2\Omega_m$, 就可以用一个理想的低通滤波器 (如图中的虚线所示, 实践中不计其负频率) 把模拟信号的信息 $F(\Omega)$ 不失真地恢复出来。

理想低通的幅频特性表示为:

$$G(\Omega) = \begin{cases} T & |\Omega| < \Omega_m \\ 0 & |\Omega| \geq \Omega_m \end{cases} \quad (1-4)$$

对上式进行傅氏反变换可求得低通滤波器的冲激响应为:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega_m}^{\Omega_m} T e^{j\Omega t} d\Omega = \frac{T\Omega_m}{\pi} \cdot \frac{\sin\Omega_m t}{\Omega_m t} \quad (1-5)$$

低通的输出是 $g(t)$ 与 $f_s(t)$ 的卷积, 就是原模拟信号 $f(t)$, 因为据式 (1-2) 可得:

$$\begin{aligned} f(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_s(\tau) g(t - \tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} f(\tau) \delta(\tau - nT) \right] \cdot g(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t-\tau) \delta(\tau-nT) d\tau \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) g(t-nT)
 \end{aligned}$$

由 $g(t-nT)$, $\Omega_m = \frac{\Omega_s}{2} = \frac{\pi}{T}$, 及式(1-5)和式(1-6)可得:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) \frac{\sin \frac{\pi}{T}(t-nT)}{\frac{\pi}{T}(t-nT)} \quad (1-7)$$

低通滤波器的冲激响应 $g(t)$ 又称为内插函数。由式(1-7)可以看出, $f(t)$ 为各样点的样值与其对应的内插函数沿时间轴上之积的总和。内插函数如图1-2(a)所示。由图可知, 在取样点上的 $f(t)$ 值等于其样值 $f(nT)$, 而在样点之间的值由各内插函数在样点之间的延伸值与各自样点值的乘积之和组成。无限项乘积之和使离散信号恢复为连续信号, 完全恢复了原模拟信号, 如图1-2(b)所示。因为内插函数是理想低通滤波器的冲激响应, 所以低通滤波器又称为内插滤波器。

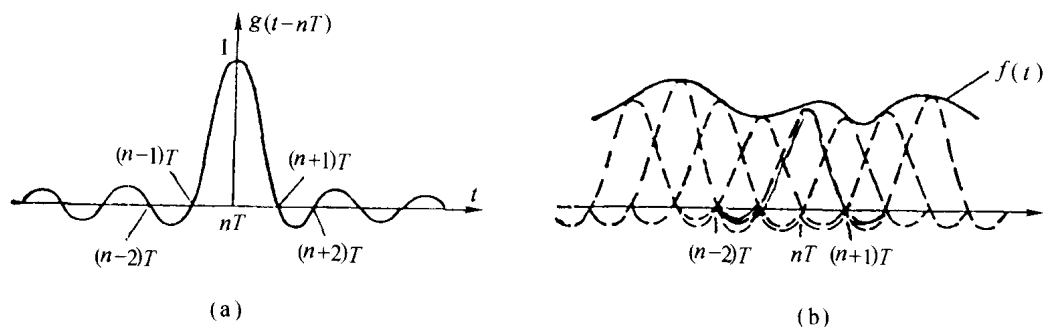


图1-2 内插函数 $g(t)$ 以及 $f(t)$ 的恢复

(3) 抽样频率的选择原则

若 $\Omega_s < 2\Omega_m$, 则抽样后信号的频谱如图1-1(f)所示, 基带频谱与抽样后频谱有部分混叠, 见图中阴影线部分。在这种情况下, 通过理想低通滤波器恢复的信号中包含混叠分量, 在恢复的图像上将产生混叠失真, 如条纹干扰。

实际的低通滤波器的截止特性不可能是矩形的, 而是在截止频率 Ω_m 附近倾斜下降的。因此为了不出现混叠失真, 应使 $\Omega_s > 2\Omega_m$ 。一般根据低通滤波器的特性之优劣, 取 $\Omega_s = (2.2 \sim 2.7) \Omega_m$ 。抽样频率高有利于低通滤波器的设计。

实际上抽样频率 f_s 的选择要考虑以下两个条件:

- ① 满足奈奎斯特准则: $f_s > 2f_m$ 。
- ② 抽样点位置分布应成正交结构, 便于信号处理。

ITU-R 601 建议, 对模拟分量视频信号抽样时, 亮度信号 Y 的抽样频率为: $f_s = 13.5\text{MHz}$ 。

对于 625 行/50 场电视标准, 每行样点数为 864 个, 每场样点数为 $312.5 \times 864 = 270000$ 个, $f_m = 6\text{MHz}$; 对于 525 行/60 场电视标准, $f_m = 4.2\text{MHz}$, 每行样点数为 858 个, 每场样点数为 $262.5 \times 858 = 225225$ 个。

显然, f_s 对两种扫描标准都满足 $f_s > 2f_m$ MHz 的条件, 并保证每行、每场、每帧的样点数都是整数, 使行与行、场与场、帧与帧之间的样点位置都能对齐, 这种样点结构就称为正交结构。对于色度分量信号 C_r 和 C_b , $f_s = 6.75\text{MHz} > 2 \times 2.75\text{MHz}$, 每行样点数分别为 432 个 (对于 625 行/50 场) 和 429 个 (对于 525 行/60 场)。

1.1.2 分量信号的抽样比例及样点结构

(1) 分量信号抽样比例

分量信号抽样比例是指亮度信号 Y 与色度分量信号 C_r 和 C_b 的抽样频率之比例。由于各信号的抽样频率都基于一个基准频率 3.375MHz , 所以把 Y 、 C_r 和 C_b 的抽样频率对 3.375MHz 的倍数之比称为分量信号抽样比。现在得到应用的分量信号抽样比例有以下几种:

① 4:2:2 抽样: 4:2:2 抽样的亮度信号 Y 的抽样频率为 $4 \times 3.375 = 13.5\text{MHz}$, C_r 和 C_b 信号的抽样频率为 $2 \times 3.375 = 6.75\text{MHz}$, 数字电视演播室的制播设备采用了这种抽样比例。

② 4:4:4 抽样: 亮度信号和两个色度信号的抽样频率都是 13.5MHz 。这种抽样比应用于数字信号发生器、高级后期节目制作和非常复杂的信号处理设备中, 对带宽相同的 R 、 G 、 B 或 Y 、 C_r 和 C_b 信号进行抽样。

③ 4:2:0 抽样: 4:2:0 抽样的 Y 信号抽样频率仍为 13.5MHz , C_r 和 C_b 信号的水平抽样频率仍为 $2 \times 3.375 = 6.75\text{MHz}$, 但垂直方向是每两行产生一行色度样值。在 ITU-R BT601 中只推荐了前两种抽样比例。

(2) 数字分量信号的样点结构

以下讨论 3 种典型的样点结构:

① 4:2:2 结构: ITU-R BT601 推荐的 4:2:2 抽样的样点结构称为 4:2:2 结构, 在每一行中, 每两个亮度样点含一个色度样点, 如图 1-3 (a) 所示。

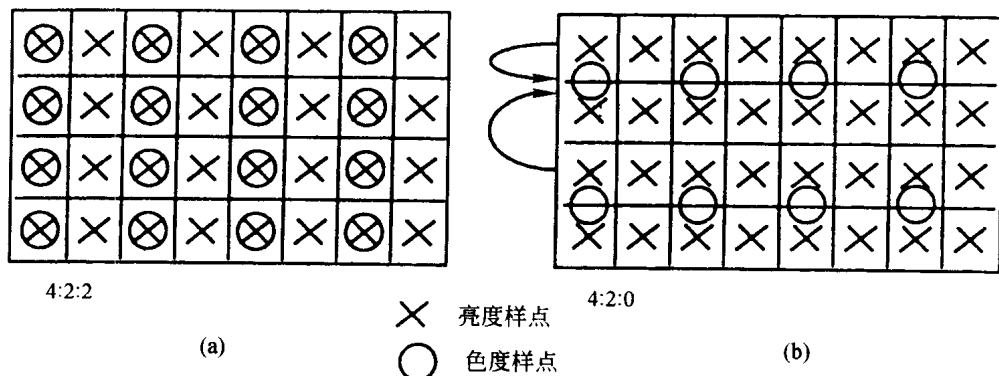


图 1-3 样点结构

② 4:2:0 结构:如图1-3(b)所示,在水平方向每两个亮度样点对应1个 C_r 和 C_b 样点,每一场在垂直方向上也是每两行 Y 样点含一行 C_r 和 C_b 样点,即垂直方向的样点数也是亮度信号的1/2。

这种样点结构应用于 MPEG 压缩数字信号处理系统。提出这种样点结构的理由是:对色差信号可通过减少垂直方向的样点数来匹配水平方向样点数的减少,以达到降低数据输率的要求。

4:2:0 结构的色度样值是通过4:2:2 结构中的色度样值计算得出的,因此也称为内插样值。计算方法之一如图中的箭头所示,每个内插样值分别由奇(偶)场中每相邻两行样点的样值算出,得到的样值为奇(偶)场相邻的两行共用,保证奇(偶)场都有自己的色度行,在垂直方向上与相应的 Y 样点排成一条直线。

计算方法之二是由帧内空间上每相邻的四行样值计算出内插样值,若内插样值用 E 表示,则可按下式算出

$$E = \frac{A + 3B + 3C + D}{8} \quad (1-8)$$

式中的 A 、 B 、 C 、 D 是一条垂直线上相邻的四个样点的样值,计算出的样点供4个样点的中间两个样点用,在垂直方向上与相应的 Y 样点排成一条直线。

③ 4:4:4 结构:在4:4:4 样点结构中, Y 、 C_b 、 C_r 或 R 、 G 、 B 三个分量信号带宽相同,抽样频率相同,每个有效行内样点数相同。

1.1.3 对抽样信号输入低通滤波特性的规定

在亮度信号的抽样频率定为13.5MHz时,为了防止出现频谱混叠,规定亮度信号低通滤波器的幅频特性和群延时特性如图1-4所示,亮度信号频率响应直到5.75MHz都是平坦的。前置滤波后亮度信号的抽样频谱在最高亮度信号频率5.75MHz与奈奎斯特频率6.75MHz之间有一个空隙,能满足防止频谱混叠的要求。

色度信号的抽样频率是亮度信号抽样频率的1/2,为防止频谱混叠,色度信号的频率响应和群延时特性规定如图1-5所示。其中,(a)表示恢复基带视频信号所需的低通滤波特性。色差信号的频率特性到2.75MHz都应应是平坦的。

前置滤波后色度信号的抽样频谱在最高信号频率(2.75MHz)与奈奎斯特频率(3.375MHz)之间的距离能防止频谱混叠。

1.1.4 量化

(1) 量化过程

将抽样的样值变为在幅度上离散的有限个二进制信号,这就是量化。抽样使时间上连续信号变为离散的信号,量化又使幅度上的连续变为离散的。

在图1-6中,曲线为被抽样的模拟信号;竖线表示量化后的样值电平; Q 代表量化间距; n ……代表量化电平的级序,它们所指的位置代表预定的量化电平,如 n 所指的位置表示此处的量化电平为 nQ 。在这里所有的量化间距都是相等的,因而称为均匀量化或线性量化。量化后的样值电平与原来的模拟信号电平之间是有误差的,这

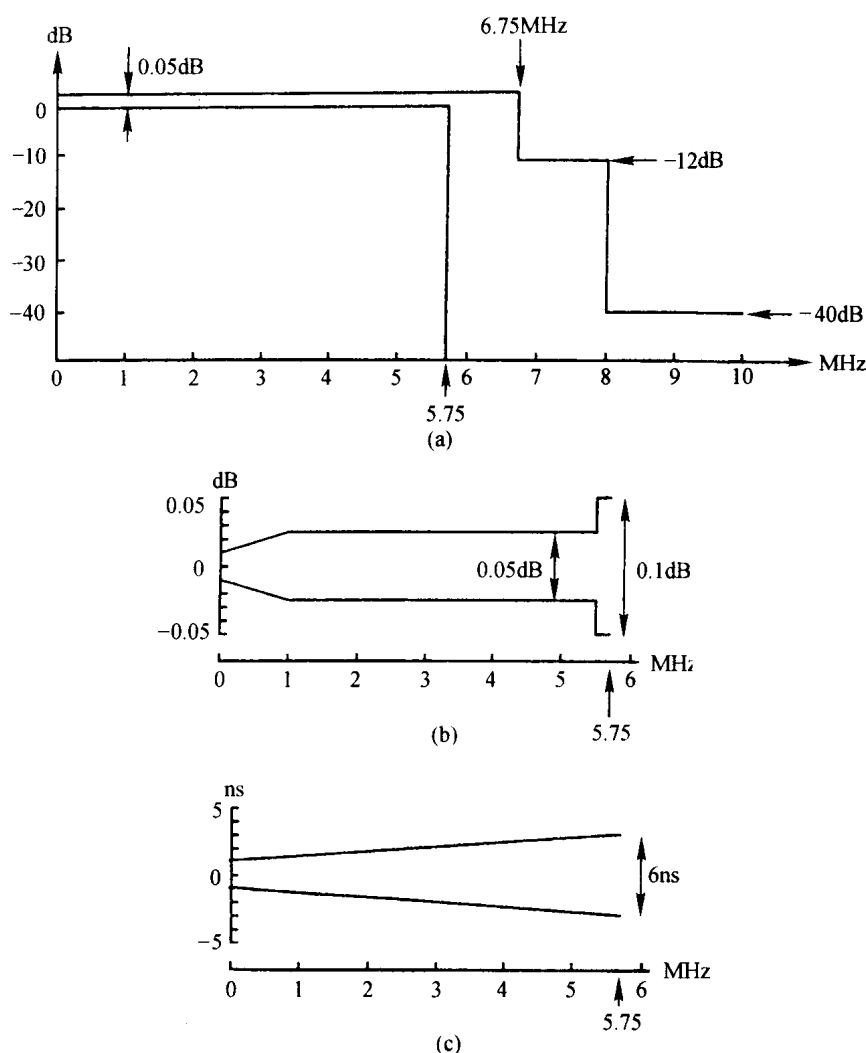


图1-4 对Y信号低通滤波器参数的规定

(a)频率响应模板 (b)通带内响应波动容限 (c)通带内群延时容限

个误差称为量化误差。现在大多数采用四舍五入的方法来处理被量化样值与预定的量化电平之间的差值, 比如, 电平在 $nQ \pm Q/2$ 范围内的模拟信号样值, 其量化电平都定为 nQ 。这种量化方式的最大量化误差为 $|Q/2|$ 。

若输入信号的动态范围为 S , 则总的量化电平级数 $M = S/Q$ 。以二进制编码时, 所需的比特数 n 与 M 的关系为

$$M = 2^n \quad (1-9)$$

(2) 量化噪声

量化误差是数字系统中特有的损伤源。可以把量化误差看作一种噪声, 这种噪声明显时, 引起信号波形失真和图像上的伪轮廓效应。量化噪声是随机的, 对于线性量化, 其量化噪声的一阶概率, 在 $-Q/2$ 至 $+Q/2$ 区间是均匀分布的。于是求得量化噪声的均方差为 $Q^2/12$, 噪声有效值为 $Q/\sqrt{12}$ 。 D/A 变换后的输出信号峰峰值为 $2^n Q$ 。