



余兆明 编著

数字电视和 高清晰度电视

人民邮电出版社

数字电视和高清晰度电视

余兆明 编著

人民邮电出版社

9810005

内 容 提 要

本书系统阐述了数字电视和高清晰度电视的基本原理与技术。全书共分8章,第一章概述了电视技术的发展趋势;第二章对电视信号的频谱进行了分析;第三章介绍了视频A/D、D/A变换器;第四章说明了PAL信号的亮、色数字分离技术;第五章阐述了最新图像压缩编码原理;第六章介绍了数字电视的国际标准;第七章介绍电视信号的数字处理电路;第八章阐述了高清晰度电视的基本原理与应用。

本书内容丰富,系统性强,可供图像处理、电视工程技术人员以及高等院校相关专业师生阅读。

2014/02

数字电视和高清晰度电视

- ◆编 著:余兆明
- 责任编辑:陈万寿 王亚明
- ◆人民邮电出版社出版发行 北京崇文区夕照寺街14号
北京鸿佳印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆开本:787×1092 1/16
印张:23.5
字数:595千字 1997年5月第1版
印数:1—3,000册 1997年5月北京第1次印刷

ISBN7-115-06457-1/TN·1184

定价:31.00元

5000180

前 言

自从 1948 年视频数字化概念出现至今,电视编码压缩技术已经历了 40 多年。在这 40 多年内,视频数据压缩编码方法层出不穷,数字电视设备日新月异。VCD、VOD、数字摄像机、数字录像机、数字电视接收机、数字加密电视、全数字高清晰度电视均成为电子产业界和消费者心目中的“新星”,并逐渐形成整个电子行业的主流。

作者从事视频数字化技术的教学和科研工作已 20 多年,为帮助从事数字视频技术的工程技术人员更深入了解视频数字化的基本知识、电视信号数据压缩的基本原理、数字电视的实现方法以及已公布的各种视频编码的国际标准,结合自己的教学和科研的亲身体会编写了此书。书中除了引用作者的科研成果外,还引用了国内外公开发表的成果,所引用的部分均附了参考文献。希望本书能为从事数字电视原理教学、数字电视设备研制及数字电视技术推广应用的工程技术人员稍尽绵薄之力。

全书共分 8 章。第一章概述。第二章电视信号的频谱,分析了电视信号的一维、二维、三维频谱,并分析了不同的电视信号波形的频谱分布情况。第三章视频 A/D、D/A 变换器,叙述了电视信号的量化过程,分量信号量化比特数确定和码电平分配原则。第四章 PAL 信号亮、色数字分离,介绍了多种数字亮、色分离方法,并说明了它们的优缺点。第五章图像压缩编码,介绍了各种压缩编码原理及其实现方法,最后介绍了运动估值在序列图像编码中的应用情况。第六章数字电视国际标准,介绍了已公布的各种数字编码国际标准,分析了它们的不同点。第七章电视信号的数字处理电路,介绍了各种电视信号的数字处理电路,分析了它们的基本原理。第八章高清晰度电视,介绍了高清晰度电视的基本参数、扫描规范和图像质量,高清晰度摄像管和显像管及高清晰度电视信号传输、纠错编码、自适应均衡等技术。

书中所有插图都是研究生陈瑶、吕晓峰、徐鹏,青年教师孙海安及中信公司的谈建峰、张兵等帮助绘制的,附录中的中英文对照是由余智整理录入的,在此深表谢意。由于时间仓促,加之作者水平有限,数字技术发展一日千里,文献浩如烟海,作者常感力不从心,本书疏漏之处还望读者不吝赐教。

作者

1996 年 12 月

目 录

第一章 概述	1
第二章 电视信号的频谱	6
2.1 电视信号频谱的数学分析	6
2.2 几种典型电视信号的频谱分析	14
2.3 电视信号频谱的几种图示方法	28
第三章 视频 A/D、D/A 变换器	48
3.1 量化	48
3.2 分量信号量化比特数确定和码电平分配	51
3.3 PCM 编码	54
3.4 视频 A/D、D/A 变换器	55
第四章 PAL 信号的亮、色数字分离	67
4.1 抽样结构	67
4.2 PAL 信号亮、色数字分离	68
第五章 图像压缩编码	87
5.1 图像数据压缩机理及图像编码过程	87
5.2 亚奈奎斯特编码及内插方法	91
5.3 预测编码	100
5.4 变换编码	118
5.5 统计编码	128
5.6 子带编码	132
5.7 分形图像编码	138
5.8 模型基图像编码	146
5.9 运动估值在序列图像编码中的应用	153
第六章 数字电视的国际标准	175
6.1 CCIR 601 号建议	175
6.2 H. 261 标准	180
6.3 JPEG 标准	193
6.4 MPEG-1 标准	210
6.5 MPEG-2 标准	219
6.6 H. 263 建议	233
6.7 HDSL 技术	238
6.8 ADSL 技术	241
第七章 电视信号的数字处理电路	245
7.1 数字箝位电路	245
7.2 数字黑白切割	246

7.3	数字伽玛校正	247
7.4	数字增益调整	247
7.5	数字式图像轮廓增强	248
7.6	数字降噪	253
7.7	无闪烁处理	258
7.8	数字重影消除	261
7.9	画中画电视接收技术	263
7.10	大屏幕电视	268
7.11	大屏幕电视的画面分割技术	275
7.12	数字音频广播中的时间交织和频率交织技术	281
第八章	高清晰度电视	287
8.1	高清晰度电视的研究状况	287
8.2	高清晰度电视扫描规范和图像质量	288
8.3	高清晰度电视摄像和显像	290
8.4	美国的 HDTV 标准	295
8.5	高清晰度电视传输	305
8.6	HDTV 传输中的纠错编码	334
8.7	HDTV 的自适应均衡技术	340
8.8	格状编码调制的维特比译码算法	348
附录	常用术语的中英文对照	354
参考文献		369

第一章 概 述

电视技术经历了从黑白电视到彩色电视的发展过程,有的国家已开始试播高清晰度电视和立体电视。电视的使用范围早已超越了广播、娱乐界,并深深地扩展到文化教育、科研管理、工矿企业、医疗卫生、公安交通、宇航和军事等各个部门。现在的彩色电视虽已发展到色彩鲜艳,形象逼真的水平,但是,它们仍然是“模拟电视”。在图像信号的制作处理、控制调节、记录重放、调制解调、传输转播、接收显示等过程中,图像信号和伴音信号都是在时间轴上和振幅轴上连续变化的模拟信号。模拟电视最明显的缺点是:接力传输方式产生噪声,长距离传输的信噪比恶化,使图像清晰度越来越受到损伤;发送传输设备中,放大器的非线性积累使图像对比度产生越来越大的畸变;相位失真的积累产生色彩失真,使“鬼影”现象愈来愈严重。同时,模拟电视还具有稳定度差、可靠性低、调整繁杂、不便集成、自动控制困难以及成本高等缺点。近10多年来,由于微电子技术、超大规模集成电路技术、数字信号处理技术、计算机技术的突飞猛进,使数字电视的发展取得了令人鼓舞的成果,特别是数字图像获取、数字存储、位图打印和图形显示的数字设备的出现带来了许多数字图像方面的应用。技术先进国家的电视演播室设备数字化已趋完成,数字电视接收机已上市出售,各种数字图像编码压缩设备随多媒体技术的发展已投入使用。国际上也相应制定了统一的数字电视信号的编码标准,为数字电视的发展奠定了坚实的基础。

所谓数字电视,是将传统的模拟电视信号经过抽样、量化和编码转换成用二进制数代表的数字式信号,然后进行各种功能的处理、传输、存储和记录,也可以用电子计算机进行处理、监测和控制。采用数字技术不仅使各种电视设备获得比原有模拟式设备更高的技术性能,而且还具有模拟技术不能达到的新功能,使电视技术进入崭新的时代。

数字电视技术与原有的模拟电视技术相比,有如下优点:

(1)信号杂波比和连续处理的次数无关。电视信号经过数字化后是用若干位二进制的两个电平来表示的,因而在连续处理过程中或在传输过程中引入杂波后,其杂波幅度只要不超过某一额定电平,通过数字信号再生,都可以把它清除掉,即使某一杂波电平超过额定值,造成误码,也可以利用纠错编、解码技术把它们纠正过来。所以,在数字信号传输过程中,不会降低信杂比。而模拟信号在处理和传输中,每次都可能引入新的杂波,为了保证最终输出有足够的信杂比,就必须对各种处理设备提出较高信杂比的要求。模拟信号要求 $S/N \geq 40\text{dB}$,而数字信号只要求 $S/N \geq 20\text{dB}$ 。模拟信号在传输过程中噪声逐步积累,而数字信号在传输过程中,基本上不产生新的噪声,即信杂比基本不变。

(2)可避免系统的非线性失真的影响。而在模拟系统中,非线性失真会造成图像的明显损伤。

(3)数字设备输出信号稳定可靠。因数字信号只有“0”、“1”两个电平,“1”电平的幅度大小

只要满足处理电路中可能识别出是“1”电平就可,大一点、小一点无关紧要。

(4)易于实现信号的存储,而且存储时间与信号的特性无关。近年来,大规模集成电路(半导体存储器)的发展,可以存储多帧的电视信号,从而完成用模拟技术不可能达到的处理功能。例如,帧存储器可用来实现帧同步和制式转换等处理、获得各种新的电视图像特技效果。

(5)由于采用数字技术,可以实现设备的自动化操作和调整。与计算机配合可实现各种自动控制和操作。

(6)数字技术可实现时分多路,充分利用信道容量,利用数字电视信号中行、场消隐时间、可实现文字多工广播(Teletext)。

(7)与模拟电视一样,压缩后的数字电视信号经数字调制后,可进行开路广播,在设计的服务区内(地面广播),观众将以极大的概率实现“无差错接收”(发“0”收“0”,发“1”收“1”),看到的电视图像及声音质量非常接近演播室质量。

(8)可以合理地利用各种类型的频谱资源。以地面广播而言,数字电视可以启用模拟电视的“禁用频道”(taboo channel),而且在今后能够采用“单频率网络”(single frequency network)技术,例如1套电视节目仅占用同1个数字电视频道而覆盖全国。此外,现有的6MHz模拟电视频道,可用于传输1套数字高清晰度电视节目或者4~6套质量较高的数字常规电视节目,或者16~24套与家用VHS录像机质量相当的数字电视节目。

(9)在同步转移模式(STM)的通信网络中,可实现多种业务的“动态组合”(dynamic combination)。例如,在一套普通的数字高清晰度电视节目中,经常会出现图像细节较少的时刻。这时由于压缩后的图像数据量较少,便可插入其它业务(如电子节目指南、传真、电子游戏软件等),而不必插入大量没有意义的“填充比特”。

(10)很容易实现加密/解密和加扰/解扰技术,便于专业应用(包括军用)以及广播应用(特别是开展各类收费业务)。

(11)具有可扩展性、可分级性和互操作性,便于在各类通信信道特别是异步转移模式(ATM)的网络中传输,也便于与计算机网络联通。

(12)可以与计算机“融合”而构成一类多媒体计算机系统,成为未来“国家信息基础设施”(NII)的重要组成部分。

数字电视不进行数据压缩时,数码率太高。例如,亮度信号抽样频率一般选为13.5MHz(3倍彩色副载波频率),每样点值经8比特量化后,码率为 $13.5 \times 8 = 108 \text{ Mbit/s}$ 。两个色差信号R-Y、B-Y的抽样频率,分别为6.75MHz(3/2倍彩色副载波频率),每样点值经8比特量化后,为54Mbit/s。所以在不采用任何压缩措施时,总的数码率为 $108 + 54 + 54 = 216 \text{ (Mbit/s)}$ 。这相当于3000多路数字电话话路。从理论上讲,PCM二进制传输信道每1Hz带宽能传输的最高码率是2bit/s。因此,这相当于要求信道提供108MHz的带宽,是现有视频信号带宽的10倍以上。所以说,不压缩时的数字电视信号的数码率太高,频带太宽,从通信系统的观点来看,PCM传输方式是以带宽为代价换取高的传输质量。为了提高图像通信的有效性,一般不采用直接PCM方式传输,而是对数字化后的信源信号先进行数据压缩,然后再传输。现正在探索各种数据压缩措施,可望数码率大大降低。例如:美国所提出的全数字高清晰度电视方案,数据压缩后的信号带宽,可做到与普通NTSC彩色电视信号的带宽相同(6MHz),但图像质量实现了飞跃。按目前的国际水平,已实现的把一路普通彩色数字电视216Mbit/s的数码率压缩到8.448Mbit/s,它是未压缩前数据量的3.7%,相当于模拟信号带宽为4MHz,但与模拟彩色电视相比,其主观图像质量没有任何降低。另外,彩色数字会议电视系统,其数码率的国际标准为

2.048Mbit/s,数据量仅为未压缩前的1%,图像质量也可以达到满意的程度。可见,数据压缩的前景可观。数字调制技术更是方兴未艾。而且,8.448Mbit/s的数字电视信号,经数字调制以后的模拟带宽可降到1.2MHz,则在6MHz带宽中,可传5路8.448Mbit/s经调制以后的数字电视信号。

目前已被采用的数字电视设备有:数字特技、数字时基校正器、数字帧同步机、数字录像机、数字电视接收机等。数字化设备可大大扩展特技功能,加强艺术效果。

从整个电视系统来说,发展数字电视可以分两步走:(1)局部设备数字化。即摄像机输出为模拟信号,经模拟、数字转换(A/D)变成数字信号,在演播室中的数字设备中进行处理,如数字特技处理等,处理完后,又转换成模拟信号(D/A),再用电视发射机发射。接收机收到信号以后,检波成视频信号,再经A/D变换成数字信号,在接收机中进行数字处理(如数字降噪、数字轮廓校正、数字去重影、画中画等),再由D/A变换在显像管上显示出高度清晰、噪声很小的鲜艳图像。(2)全系统实现数字化,即把要发送图像直接变换成数字信号,经编码压缩再变换成适合于传输的码型,在数字微波、数字光纤信道上传输,在接收端再将所收到的数据恢复成电视图像,在通道的所有环节上电视信号都是以数字形式传送的。

图1-1为演播室数字处理框图。信号源为彩色摄像机送出R、G、B信号后,均经A/D变换成数字视频信号送至节目制作单元,同时还有数字录像机、数字特技以及数字制式转换器送来的信号均送入节目制作单元中,经节目制作以后的信号,再送至D/A变换器中,变成模拟信号,然后送往电视发射机。

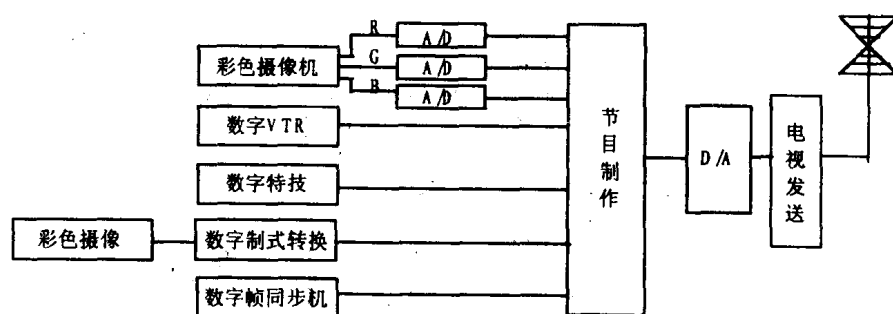


图 1-1 演播室数字处理框图

图1-2为数字电视传输系统框图。发端由摄像机产生彩色电视图像,经A/D变换后,变为数字视频信号送入信源编码中。信源编码承担着图像数据压缩功能,它去掉信号中的冗余度,使传输码率降低。经信源编码后的图像信号送入多路复用中与数字音频信号进行多路复用,然后送入信道编码器,信道编码即为纠错编码,提高信号在传输中的抗干扰能力。这是因为数据码流经长距离传输后不可避免地会引入噪声而发生误码。因此,加入纠错码以提高其抗干扰能力。经纠错编码后的信号送入输出接口电路。输出接口电路起码型变换作用,即把单极性码变成有利于传输的双极性码。远距离传输时,可以采用数字微波线路,也可以采用数字光纤线路,以接力传输方式,站与站的距离可达50km。收端的过程与发端相反,接收端收下信号后,输入接口电路把双极性信号变为单极性信号,再送入信道解码中,在信道解码中可纠正由传输所造成的误码,然后信号送入解多路复用,再分别送入视频、音频处理电路中,还原成模拟的视频、音频信号。

数字电视接收机框图如图1-3所示,电视接收天线接收下来的信号经高频通道、中频放大,然后,送至视频检波得到模拟信号。再经A/D变换,变为数字信号,送入数字处理器中,进

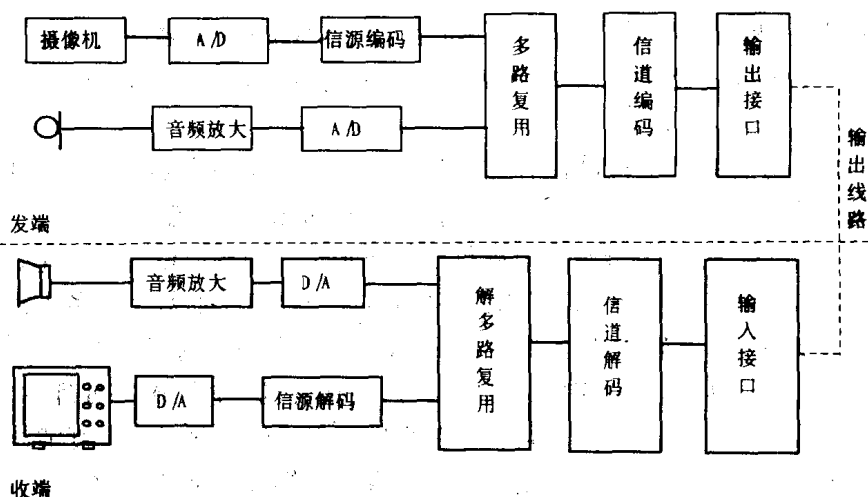


图 1-2 数字电视传输系统

行数字降噪、数字轮廓校正、数字去重影、行频加倍、去闪烁处理、画中画处理等，最后送入 D/A 变换器中，变成模拟信号供显像管显示。电视发射高频部分和电视接收高频通道部分均为模拟系统，这是因为在接近 1000MHz 频率要实现数字化就目前的水平不可能完成。

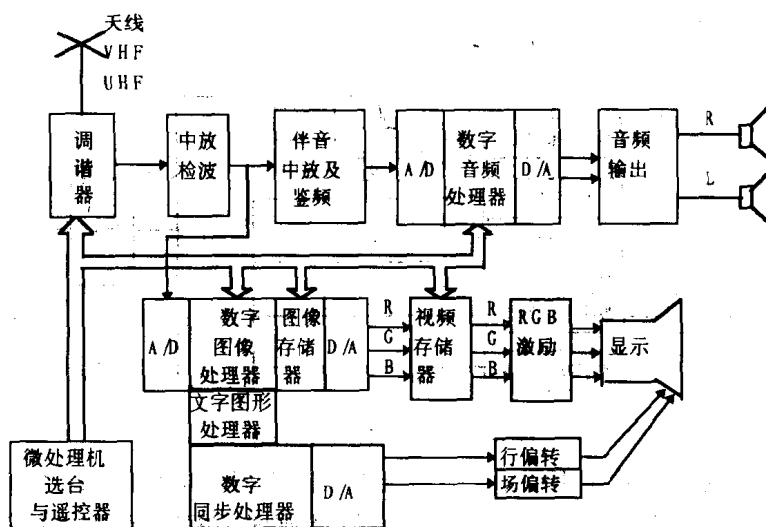
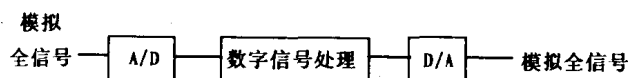


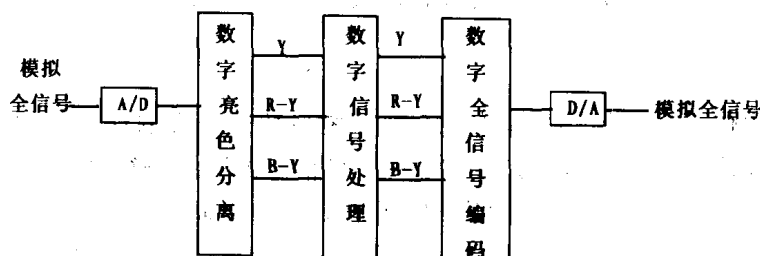
图 1-3 数字电视接收机方框图

对数字电视信号进行编码可分为全信号编码和分量编码，如图 1-4 所示。从图 1-4(a)可以看出，模拟全电视信号经 A/D 变换，变为数字信号，经数字处理后，再送入 D/A 变换，还原成模拟全信号。全信号编码，从框图上看似乎很简单，但这种方法易造成亮、色干扰。尤其对 SE-CAM 制来说，由于色差信号对副载频的调制方式是调频的，难于采用全信号编码，只能采用分量编码，图 1-4(b)是分量信号编码框图，模拟全信号经 A/D 变换后，再经数字亮、色分离，分成数字亮度信号和数字色差信号，送入数字信号处理器中，经处理后的信号再经数字式全信号编码，然后经 D/A 变成模拟全信号。该图虽增加数字亮、色分离和数字式全信号编码，但数字处理是对分量信号进行的，消除了亮、色干扰现象。这种处理方式可使图像质量提高，因此应用较为广泛，国际标准也建议采用分量信号编码方式。

从数字电视发展的趋势来看,可有如下进程。第一步实现普通电视的数字化,利用 MPEG-1 的国际标准,将数据率压缩到 2.048Mbit/s 速率,其图像质量可优于家用录像机 VHS 的质量。第二步按 MPEG-2 标准中的主级标准,将数据率压缩到 8.448Mbit/s,其图像质量可达现有电视演播室的质量。第三步按 MPEG-2 的高级标准,将数据率压缩到 20Mbit/s 左右,其图像质量可达 HDTV 的质量。将来,人们不会只满足于 HDTV,还会有更高级的电视。例如,可能出现垂直和水平清晰度分别为现有电视的 4 倍和 8 倍的特高清晰度电视(UDTV)和超高清晰度电视(SDTV),扫描行数可达 2248 行,其图像质量可达 70mm 电影的水平。



(a) 全信号编码



(b) 分量信号编码

图 1-4 图像信号编码

习 题

1. 什么叫数字电视,它与模拟电视相比有哪些优点?
2. 普通彩色电视数字化后未经压缩的数码率为多少? 相当于模拟信号带宽为多少?
3. 试画出数字电视接收机框图,解释各部分的作用,并说明为什么高频通道未数字化?
4. 由于模拟输入信号方式的不同,图像信号编码可分哪两种? 它们各有什么优、缺点?
5. 利用电视原理中所学知识分别求出 625 行、1125 行、2248 行电视的带宽为多少?
6. 你知道哪些数字电视国际标准? 它们有何特点? 它们的速率为多少?
7. 你知道什么叫 HDTV 吗? 它的扫描行数和带宽是多少呢?
8. 什么叫 VCD 和 DVD?

第二章 电视信号的频谱

2.1 电视信号频谱的数学分析

电视图象信号频谱的性质是电视系统中图像信号处理的理论基础,也是彩色数字电视中数据压缩的理论依据,所以,有必要对电视图象信号的频谱进行分析。

设有电视信号 $f(x, y)$, 它是两个自变量 x, y 的周期函数, 该周期函数对 x 来讲以 T_H 为周期, 对 y 来讲, 以 T_V 为周期。即 $f(x+T_H, y+T_V)=f(x, y)$ 。众所周知, 周期函数可以用傅立叶级数进行展开。在复杂的运算中, 采用傅里叶级数的复数形式是方便的。

先把周期函数 $f(x, y)$ 考虑作为 x 的函数(即为对某一确定的 y 而言), 根据傅立叶级数的复数形式, 有

$$f(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} F_m(y) e^{jm\frac{2\pi}{T_H}x} \quad (2-1)$$

式中

$$F_m(y) = \frac{1}{T_H} \int_{-\frac{T_H}{2}}^{\frac{T_H}{2}} f(u, y) e^{-jm\frac{2\pi}{T_H}u} du \quad (2-2)$$

式(2-2)中, $F_m(y)$ 代表 m 次谐波的幅度和相角, 根据电视信号的性质, 能量主要集中在低频分量上, 其幅度 $|F_m(y)|$ 将随 m 的增大而递减(当 m 足够大时), 且最终趋于零。当然, $F_m(y)$ 之值取决于函数 $f(x, y)$, 当函数 $f(x, y)$ 随 x 的变化缓慢时, 则幅度 $|F_m(y)|$ 将随 m 的增大而很快减小, 即其高频成分较少, 反之, 若函数 $f(x, y)$ 随 x 的变化较快, 则幅度 $|F_m(y)|$ 将随 m 的增大而衰减较慢, 这表示其高频成分较为丰富。若函数 $f(x, y)$ 有跃变, 则幅度 $|F_m(y)|$ 将按 $\frac{1}{m}$ 的规律递减(当 m 足够大时)。

由于函数 $f(x, y)$ 又是自变量 y 的周期函数(其周期为 T_V), 故由(2-1)式可知, $F_m(y)$ 必是自变量 y 的周期函数。因此, $F_m(y)$ 又可以展开成下面的傅立叶级数的复数形式:

$$F_m(y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_{mn} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} \quad (2-3)$$

式中

$$F_{mn} = \frac{1}{T_V} \int_{-\frac{T_V}{2}}^{\frac{T_V}{2}} F_m(v) e^{-jn\frac{2\pi}{T_V}v} dv$$

将(2-2)式中的变量 y 代以积分变量 v 后,再代入到上式的 $\dot{F}_m(y)$ 中得到:

$$\dot{F}_{mn} = \frac{1}{T_H T_V} \int_{-\frac{T_H}{2}}^{\frac{T_H}{2}} \int_{-\frac{T_V}{2}}^{\frac{T_V}{2}} f(u, v) e^{-j\left(\frac{m2\pi}{T_H}u + \frac{n2\pi}{T_V}v\right)} du dv \quad (2-4)$$

将(2-3)式代入(2-1)式中,就得到:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} \right] e^{jm\frac{2\pi}{T_H}x} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn} e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} \end{aligned} \quad (2-5)$$

(2-5)式和(2-4)式即为两个自变量的周期函数 $f(x, y)$ 的二维傅立叶级数的复指数形式,类似地,可以说 $\dot{F}_{mn}$ 代表谐波 $e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)}$ 的幅度和相角。同样, $\dot{F}_{mn}$ 之值取决于函数 $f(x, y)$ 。其幅度 $|\dot{F}_{mn}|$ 将随 m 和 n 的增大而逐渐减小(严格地说,应当在 m 和 n 足够大之后)以至最终趋于零。若函数 $f(x, y)$ 随 x 的变化缓慢,则幅度 $|\dot{F}_{mn}|$ 将随 m 的增加而很快减小趋于零;反之,若函数 $f(x, y)$ 随 x 的变化较快,则幅度 $|\dot{F}_{mn}|$ 将随 m 的增大而缓慢衰减地趋于零。同理,若函数 $f(x, y)$ 随 y 的变化缓慢,则幅度 $|\dot{F}_{mn}|$ 将随 n 的增大而很快衰减;反之,若函数 $f(x, y)$ 随 y 的变化较快,则幅度 $|\dot{F}_{mn}|$ 将随 n 的增大而缓慢衰减。

在公式(2-4)中,应该注意到:

$$\dot{F}_{(-m)(-n)} = \frac{1}{T_H T_V} \int_{-\frac{T_H}{2}}^{\frac{T_H}{2}} \int_{-\frac{T_V}{2}}^{\frac{T_V}{2}} f(u, v) e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}u + \frac{n2\pi}{T_V}v\right)} du dv$$

将上式与(2-4)式进行比较,可以看出 $\dot{F}_{(-m)(-n)}$ 与 $\dot{F}_{mn}$ 互为共轭复数,记为

$$\dot{F}_{(-m)(-n)} = \dot{F}_{mn}^* \quad (2-6)$$

二维傅立叶级数的复数形式也可以变化成二维傅立叶级数的三角函数的形式。公式(2-5)可以改写为

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{0n} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn} e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} \\ &\quad + \sum_{m=-\infty}^{-1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn} e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} \end{aligned} \quad (2-7)$$

(2-7)式右边的第一项可化成

$$\begin{aligned} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{0n} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} &= \dot{F}_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} \dot{F}_{0n} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} + \sum_{n=-\infty}^{-1} \dot{F}_{0n} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} \\ &= \dot{F}_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} \dot{F}_{0n} e^{jn\frac{2\pi}{T_V}y} + \sum_{n=1}^{+\infty} \dot{F}_{0(-n)} e^{-jn\frac{2\pi}{T_V}y} \\ &= \dot{F}_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|\dot{F}_{0n}| \cos\left(n\frac{2\pi}{T_V}y + \phi_{0n}\right) \end{aligned}$$

式中 $|\dot{F}_{0n}|$ 为 $\dot{F}_{0n}$ 的幅度; ϕ_{0n} 为 $\dot{F}_{0n}$ 的相角。(2-7)式右边的第三项可以化成

$$\begin{aligned} \sum_{m=-\infty}^{-1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn} e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} &= \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{(-m)(-n)} e^{-j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} \\ &= \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn}^* e^{-j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} \end{aligned}$$

再将(2-7)式右边的第三项与第二项合并:

$$\sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\dot{F}_{mn} e^{j\left(m\frac{2\pi}{T_H}x + n\frac{2\pi}{T_V}y\right)} + \dot{F}_{mn} e^{-j\left(m\frac{2\pi}{T_H}x + n\frac{2\pi}{T_V}y\right)} \right]$$

$$= \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} 2|\dot{F}_{mn}| \cos \left[\left(m\frac{2\pi}{T_H}x + n\frac{2\pi}{T_V}y \right) + \psi_{mn} \right]$$

式中 $|\dot{F}_{mn}|$ 为 F_{mn} 的幅度; ψ_{mn} 为 F_{mn} 的相角。

因此可得:

$$f(x, y) = F_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|\dot{F}_{0n}| \cos \left(n\frac{2\pi}{T_V}y + \psi_{0n} \right)$$

$$+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} 2|\dot{F}_{mn}| \cos \left[\left(m\frac{2\pi}{T_H}x + n\frac{2\pi}{T_V}y \right) + \psi_{mn} \right] \quad (2-8)$$

上式(2-8)就是周期函数 $f(x, y)$ 的二维傅立叶级数的三角函数的形式。

讨论:

1. 由于 PAL_D 信号的带宽规定为 6MHz, 在此带宽内的行频最高次谐波只能为 $m = \frac{6\text{MHz}}{f_H} = 384$ 。

2. 在两根行频主谱线之间的间隔为 f_H 宽度, 在这频带宽度范围内, 只能安排场频的最高次谐波为 $n = \frac{f_H}{f_V} = 312.5$ 。

所以, 式(2-8)应该为:

$$f(x, y) = F_{00} + \sum_{n=1}^{312.5} 2|\dot{F}_{0n}| \cos \left(n\frac{2\pi}{T_V}y + \psi_{0n} \right)$$

$$+ \sum_{m=1}^{384} \sum_{n=-312.5}^{312.5} 2|\dot{F}_{mn}| \cos \left[\left(m\frac{2\pi}{T_H}x + n\frac{2\pi}{T_V}y \right) + \psi_{mn} \right]$$

下面我们借助于二维傅立叶级数的公式进行电视图像信号的频谱分析。

2.1.1 静止图像信号的频谱

一幅图像的宽为 H , 高为 V , 如图 2-1 所示, 图像上各点的亮度 B 决定于图像的内容, 显然, 亮度 B 是点 (x, y) 的函数, 将图像上各点的亮度 $B(x, y)$ 转变为电信号是借助于电子束的扫描。电子束是从左到右, 从上到下, 逐行地进行扫描, 即电子束的扫描分为水平扫描(行扫描)和垂直扫描(场扫描)两种情况。电子束扫描到的地方, 就将该点的亮度 $B(x, y)$ 转变为与其成正比的电流信号 i , 因此电流信号也是点 (x, y) 的函数 $i(x, y)$, 很显然, 它是一个周期函数。根据公式(2-8), 有

$$i(x, y) = F_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|\dot{F}_{0n}| \cos \left(n\frac{2\pi}{T_V}y + \psi_{0n} \right)$$

$$+ \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} 2|\dot{F}_{mn}| \cos \left[\left(m\frac{2\pi}{T_H}x + n\frac{2\pi}{T_V}y \right) + \psi_{mn} \right] \quad (2-9)$$

在图 2-1 中, 电子束水平扫描一行的时间称为行周期 T_H ; 垂直扫描一场的时间称为场周期 T_V 。它们对应的行频为 f_H , 场频为 f_V , 并且 $f_H = \frac{1}{T_H}$, $f_V = \frac{1}{T_V}$ 。若一帧图像分为两场, 并且每帧图像水平扫描有 N 次, 则 $T_H = \frac{T_V}{N}$, 或者 $f_H = \frac{N}{2}f_V$, 式中 N 为每帧行数, $i(x, y)$ 为电视图像信

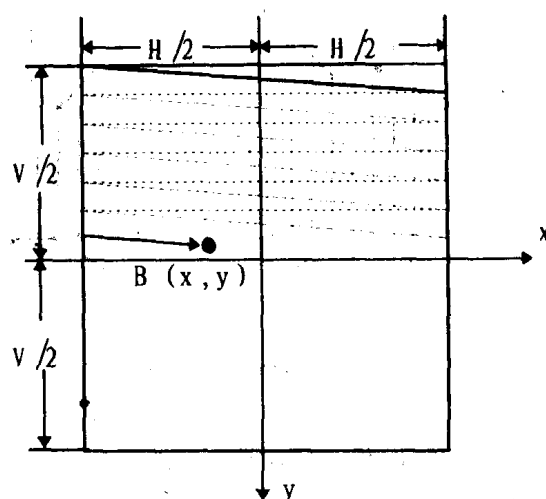


图 2-1 一幅图像扫描示意图

号。若以图像中心点“O”作为计算扫描的起点,则扫描电子束所在点离开中心点“O”的水平距离 $x = \frac{H}{T_H}t = Hf_H t$; 而扫描电子束所在点离开中心点“O”的垂直距离 $y = \frac{V}{T_V}t = Vf_V t$ 。将 x, y 的时间表示式代入 $i(x, y)$ 中,即得扫描电子束所取下的电视图像信号 $i(t)$ 。

$$\begin{aligned}
 i(t) &= i(Hf_H t, Vf_V t) \\
 &= F_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|F_{0n}| \cos(2\pi n f_V t + \phi_{0n}) \\
 &\quad + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} 2|F_{mn}| \cos[(2\pi m f_H + 2\pi n f_V t) + \phi_{mn}] \\
 &= F_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|F_{0n}| \cos(2\pi n f_V t + \phi_{0n}) \\
 &\quad + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} 2|F_{mn}| \cos[2\pi(m f_H + n f_V)t + \phi_{mn}] \quad (2-10)
 \end{aligned}$$

公式(2-10)把电视图像信号 $i(t)$ 分解为各次谐波分量之和。其谐波频率为 $f = (m f_H + n f_V)$ 。我们已经再三指出:各次谐波分量的幅度即傅立叶衰减系数的幅度 $|F_{mn}|$ 随着 m 或 n 的增加而减少,以至最后趋于零。 $|F_{mn}|$ 是分别随着 m 或 n 的增加而收敛的快慢取决于函数 $i(x, y)$ 随 x 或 y 变化的慢、快。可绘出电视图像信号的幅度频谱图 $|F_{mn}|$ 图 2-2 更加醒目了。

同样,由于 PAL_D 信号带宽限带在 6MHz 之内; f_V 副谱线只能安排在两根主谱线范围之内,所以, $m=384, n=\pm 312.5$, 或(2-10)式有

$$i(t) = F_{00} + \sum_{n=1}^{312.5} 2|F_{0n}| \cos(2\pi n f_V + \phi_{0n}) + \sum_{m=1}^{384} \sum_{n=312.5}^{312.5} 2|F_{mn}| \cos[2\pi(m f_H + n f_V)t + \phi_{mn}]$$

公式 2-2 和幅频特性图 2-2 都表明:电视图像信号可以认为是由直流分量、场频分量和它的倍频分量($m=0$ 的各项),行频分量和它的倍频分量($n=0$ 的各项),以及以场频为间隔,左右地分布在行频和行频的谐波周围的各个频率分量所组成。从幅频特性图 2-2 中可以更加醒目的看出,大部分信息能量都聚集在行频及其倍频附近相当狭的频带内,而在行频的倍频之间的频

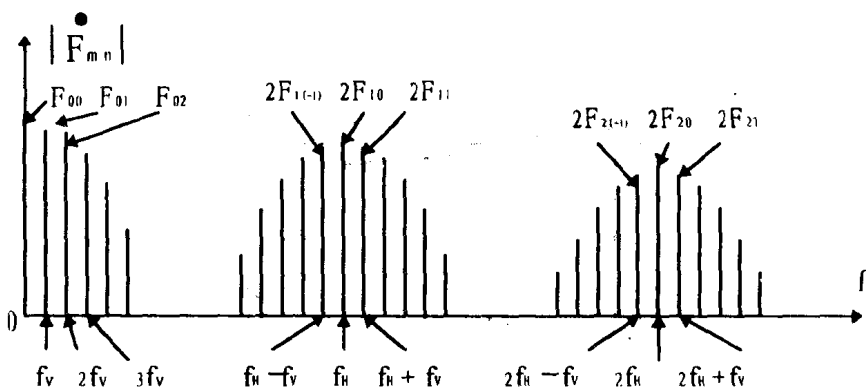


图 2-2 电视信号的幅频特性

带内信息能量很小。

下面结合物理概念对公式(2-10)作几项讨论：

(1)若所传送的图像为垂直条纹时，即图像亮度 $B(x, y)$ 仅随 x 而变化，而在垂直方向 y 上亮度无变化，这时各行的亮度变化都一样，所以每行的电视图像信号都是重复的，其重复周期为 T_H 。也就是说，这种图像的 $i(t)$ 仅是以 T_H 为周期的周期函数，因而，其谐波频率成分是行频及其倍频，这相当于在公式(2-10)中 $n=0$ 的情况。

$$i(t) = F_{00} + \sum_{m=1}^{+\infty} 2|F_{m0}| \cos(2\pi m f_H t + \psi_{m0}) \quad (2-11)$$

(2)若所传送的图像为水平条纹时，即图像亮度 $B(x, y)$ 仅随 y 而变化，而在 x 上无变化。这种图像的 $i(t)$ 仅是以 T_V 为周期的周期函数，因此其谐波频率成分是场频及其倍频。这相当于在公式(2-10)中 $m=0$ 的情况。

$$i(t) = F_{00} + \sum_{n=1}^{+\infty} 2|F_{0n}| \cos(2\pi n f_V t + \psi_{0n}) \quad (2-12)$$

(3)对于实际的静止图像，其亮度 $B(x, y)$ 不仅随 x 变化，也随 y 变化，也就是说，每行的图像信号都不相同，但它是周期地变化着(周期为 T_V)。这可理解为公式(2-11)中的幅度 F_{00} ， $|F_{m0}|$ 和相角 ψ_{m0} 受到一个周期信号(周期为 T_V)的调制。已调波的频谱就不仅在行频及其倍频上，而扩展到行谐波 $m f_H$ 附近的频率上，形成上、下两个边带($m f_H \pm n f_V$)。这就是图 2-2 所表示的情况。这时的 $i(t)$ 表达式就是公式(2-10)。

(4)上面的所有论述都是在理想扫描的情况下进行的。即假定行、场逆程时间都极短，都予以忽略。然而，电子束扫描的实际情况是存在行、场逆程时间，并且在逆程时间传送消隐信号(黑色电平的信号)。其实，这种情况，相当于在图 2-1 的理想扫描情况下传送一幅有黑色边框的静止图像吧了。如图 2-3 所示。这样，上述的分析对考虑行、场扫描逆程后的实际情况也全部有效。

相对静止的图像谱线的特点为：①其频谱以主谱线 f_H 和副谱线 f_V 离散分布。②谱线幅度随谐波次数增加而逐渐下降，能量主要集中在低频分量。③主谱线两边安排副谱线，其幅度越靠近主谱线幅度越大，越远离，幅度越小。④在 PAL_D 制中行频谱线的最高谐波为： $m = \frac{6\text{MHz}}{f_H} = 384$ 。⑤在两相邻的主谱线中最多可安排副谱线数为： $\frac{f_H}{f_V} = \frac{15625\text{Hz}}{50\text{Hz}} = 312.5$ 根。

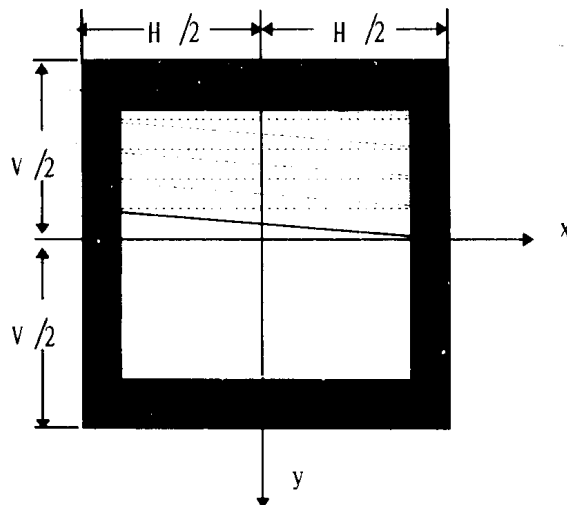


图 2-3 考虑行场逆程的图像扫描

2.1.2 活动图像信号的频谱

活动图像中每点的亮度 B 不仅是 x, y 的函数, 而且还是时间 t 的函数。因此, 亮度就是三个自变量 x, y, t 的函数了, 即 $B(x, y, t)$ 。

先来分析活动图像经过一段时间 T 后又重复的情况。这时 $B(x, y, t)$ 是三个自变量的周期函数, 其周期分别为 T_H, T_V, T 。可以仿照二维傅立叶级数的方法分析 $B(x, y, t)$ 。根据公式 (2-5) 可写出:

$$B(x, y, t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mn}(t) e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y\right)} \quad (2-13)$$

上式中, $\dot{F}_{mn}(t)$ 是自变量 t 的周期函数 (周期为 T)。因此, $\dot{F}_{mn}(t)$ 可以展开成下面的傅立叶级数的复数形式。

$$\dot{F}_{mn}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mnk} e^{jk\frac{2\pi}{T}t} \quad (2-14)$$

式中:

$$\dot{F}_{mnk} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{F}_{mn}(t) e^{-jk\frac{2\pi}{T}t} dt \quad (2-15)$$

根据公式 (2-14), 上式 (2-15) 可化为:

$$\dot{F}_{mnk} = \frac{1}{T_H T_V T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \int_{-\frac{T_H}{2}}^{\frac{T_H}{2}} \int_{-\frac{T_V}{2}}^{\frac{T_V}{2}} B(u, v, \tau) e^{-j\left(\frac{m2\pi}{T_H}u + \frac{n2\pi}{T_V}v + k\frac{2\pi}{T}\tau\right)} du dv d\tau \quad (2-16)$$

将公式 (2-14) 代入到公式 (2-13) 中就得到:

$$B(x, y, t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \dot{F}_{mnk} e^{j\left(\frac{m2\pi}{T_H}x + \frac{n2\pi}{T_V}y + k\frac{2\pi}{T}t\right)} \quad (2-17)$$

公式 (2-17) 和公式 (2-16) 即为三维傅立叶级数的复指数形式。其中, 幅度 $|\dot{F}_{mnk}|$ 也是分别随 m, n, k 的增大而衰减。仿第一节, 只要注意到 $\dot{F}_{(-m)(-n)(-k)} = \dot{F}_{mnk}$, 我们可将三维傅立叶级数的复数形式变化成三维傅立叶级数的三角函数的形式。有: