

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术



北京市高等教育精品教材立项项目

视频图像编码 VLSI设计

曹喜信 彭春干 编著

清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 计算机

视频图像编码VLSI设计

曹喜信 彭春干 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍高效的视频图像编解码 VLSI 设计技术,内容包括视频图像编码标准、编码硬件发展现状,视频压缩编码基本技术及其 VLSI 设计,视频图像编码标准关键技术分析,基于宏块流水的 H.264 及 AVS 系统架构设计,视频编码器的关键功能模块 VLSI 结构设计,视频编解码 VLSI 设计流程以及系统的综合与验证。

本书适合作为各大院校和研究所单位的博士生、硕士生或者高年级本科生集成电路设计课程的教科书,也可供涉及视频编解码标准 DSP 应用算法、结构或电路设计的专业人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

视频图像编码 VLSI 设计/曹喜信,彭春干编著.--北京:清华大学出版社,2014

21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术

ISBN 978-7-302-32209-2

I. ①视… II. ①曹… ②彭… III. ①视频信号—图像编码—高等学校—教材 IV. ①TN919.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 084592 号

责任编辑:郑寅堃 顾 冰

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.75 字 数:445 千字

版 次:2014 年 2 月第 1 版 印 次:2014 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:32.00 元

产品编号:028009-01

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程(简称‘质量工程’)”,通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail:weijj@tup.tsinghua.edu.cn

视频编码的关键技术包括帧间运动估计、变换、量化、熵编码、帧内预测编码、码率控制等,是所有主流的视频图像编码的国际标准和国家标准的核心。ISO 和 ITU 是国际视频图像压缩标准的两大官方组织。ISO 制订的静止图像的国际压缩标准包括 JPEG 和 JPEG2000,动态图像压缩标准包括 MPEG1、MPEG2、MPEG4、MPEG7、MPEG21 等。ITU 制定的视频压缩标准有 H. 261、H. 263 等。H. 264/AVC 则是 ISO 和 ITU 共同推出的高效视频压缩标准。AVS 作为一种新的视频图像压缩标准,是中国拥有自主知识产权的国家标准,已经为业界所接受。随着数字媒体技术和应用的不断演进,视频应用不断向高清晰度方向发展:数字视频的应用格式从 720P 向 1080P 全面升级,在一些视频应用领域甚至出现了 $4K \times 2K$ 、 $8K \times 4K$ ($K=1024$) 的数字视频格式;视频帧率从 30fps 向 60fps、120fps 甚至 240fps 的应用场景升级。当前主流的视频压缩标准 H. 264/AVC 的压缩效率的局限性在不断凸显。在 ISO MPEG 和 ITU-T VCEG 专家组的共同努力下,面向更高清晰度、更高帧率、更高压缩率视频应用的新一代国际视频压缩标准 HEVC/H. 265 标准已经发布,压缩效率比 H. 264/AVC 提高了一倍。但是,上述标准的算法复杂度极高,而且编码的算法复杂度是解码复杂度的数倍以上,这对满足实际应用是个极大的挑战。

超大规模集成电路设计 VLSI 技术和 SOC 设计技术的发展带给我们新的机遇,如今我们可以在 130nm、90nm、65nm、45nm 甚至 22nm 的工艺下,去设计符合应用要求的芯片,甚至可以想象应用 16nm 工艺的芯片来满足需求。芯片的电路门数已经从过去的几十万门发展到今天的数千万门,目的只有一个,就是要设计出计算速度很快、功耗低、面积小的实用型芯片。尽管今天已经有 TI、ADI、C2、MSTAR、Fujitsu、Broadcom 等公司的芯片问世,被广泛应用于 SMART TV、智能监控、智能手机、智能机顶盒、智能摄像机、网络摄像机、数码相机、汽车电子、医疗器械、航天器等领域,芯片的发展还是有很大的空间。未来媒体的发展需要设计更高效、性能更加卓越的芯片,这就使得我们必须研究和掌握新的设计技术。

本书主要研究高效的视频编解码 VLSI 设计,重点研究设计和设计 H. 264/AVC 及 AVS 的 SOC 结构。其中,第 1 章为绪论,主要介绍视频图像压缩编码的必要性和可行性,视频图像压缩编码要求和图像质量评价体系,视频图像压缩标准的现状发展以及视频编码硬件发展现状。第 2 章是视频压缩编码基本技术及其 VLSI 设计,主要介绍彩色视频子采样技术 DCT 变换编码及其 VLSI 结构设计以及基于块的预测编码技术及其结构设计。第 3 章是视频图像编码标准关键技术分析,即 H. 264/AVC 视频编码标准关键技术和 AVS 视频编码标准关键技术分析。第 4 章是基于宏块的视频编码 VLSI 系统设计,即基于宏块流水的 H. 264/AVC 及 AVS 系统架构设计。第 5 章是视频编码器的关键功能模块 VLSI 结构设计,主要介绍高并行度整数像素运动估计模块 VLSI 结构设计,支持多参考帧的分数像素运动估计模块 VLSI 结构设计、多功能帧内预测和重构模块 VLSI 结构设计,基于 CAVLC/CABAC 的 EC 模块 VLSI 结构设计以及基于宏块流水的 DB 模块的 VLSI 结构设计。

第6章为系统的综合与验证。

2005年9月,我在北京大学软件与微电子学院组建了“数字媒体芯片与系统实验室”,许多关于“视频编码的算法研究和硬件设计”的研究工作就此展开。这期间实验室培养了一百多名集成电路设计个工程专业的博士、硕士研究生,取得了多项国家发明专利和软件著作权,还发表了数十篇学术论文。另外,我和学生刘京等合作编著出版了《深入理解视频编解码技术——基于H.264标准及参考模型》一书。由于北大无锡基地又成立了新的实验室,研究队伍也在不断扩充。需要编写一本专门的教材供研究生上课使用,而国内又没有一本这样的专门教材。作者在多年研究和讲课的基础上,在学习和吸收众多的研究成果后,结合自己的教学实践,撰写完成本书,这是国内首部关于此方面的研究专著。

在本书撰写过程中,我们参考了多年积累的研究成果,包括多项发明专利和数篇学术论文。本书还引用了我们实验室部分博士生和硕士生的研究成果,他们为本书的算法优化和VLSI设计付出了艰辛细致而富有成效的劳动。本书还参考了国际上诸多组织、大学和研究机构,如动态图像专家组(MPEG)、视频编码专家组(VCEG)、先进音视频编码专家组(AVS)、台湾大学DSP/IC设计实验室的资料和研究成果。在编写过程中得到了北京大学张兴教授、于敦山教授、盛世敏教授、吴中海教授的有力支持,以及北京EDA/SOPC技术研究会的大力支持。张奇惠博士为本书的出版做了大量细致的工作。另外,本书还借鉴了互联网上的部分资料。在此一并表示感谢!

本书适合作为各大院校和研究单位的博士生、硕士生或者高年级本科生集成电路设计课程的教科书,以讲授视频编码VLSI SOC设计、VLSI DSP结构设计或高性能VLSI系统设计等。本书对于那些涉及视频编解码标准DSP应用算法、结构或电路设计的专业人员也是一本很好的参考书。

“工欲善其事,必先利其器”,借助本书,希望广大读者尤其是学术界的学者和工业界工程师都可以从中受益。作者也希望能得到您的宝贵意见,以便我们在下次出版时改进。

曹喜信

2014年元旦于北京大学中关村新园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 视频压缩编码的必要性和可行性	1
1.3 视频压缩编码要求与图像质量评定体系	2
1.3.1 视频压缩编码的要求	2
1.3.2 图像质量评价体系	2
1.3.3 视频压缩系统评价指标	5
1.4 视频压缩编码标准的发展	5
1.5 视频编码技术的发展	10
1.5.1 视频编解码技术发展	10
1.5.2 视频编解码预处理技术进展	13
1.5.3 码率控制技术进展	14
1.5.4 视频编解码技术产业化进展	16
1.6 视频编码硬件发展现状	17
1.6.1 视频编解码硬件设计进展	17
1.6.2 视频图像编解码芯片的设计特点	18
1.6.3 视频图像编解码器系统架构设计	18
1.6.4 视频图像编解码硬件 ASIC 设计	21
1.6.5 视频编解码芯片解决方案	24
1.7 本书的结构	27
第 2 章 视频压缩编码基本技术及其 VLSI 设计	29
2.1 彩色视频子采样技术	29
2.1.1 RGB 彩色视频格式	29
2.1.2 YUV 彩色视频格式	29
2.1.3 基于 YUV 彩色视频子采样格式	30
2.1.4 YUV 子采样技术对视频编码 VLSI 设计的影响	32
2.2 DCT 变换编码及其 VLSI 结构设计	33
2.2.1 二维 DCT 的基本算法	34
2.2.2 二维 DCT 行列分离算法与行列转换结构	35
2.2.3 DCT 分布式算法	36
2.2.4 基于系数分布式算法优化的 8×8 DCT 结构设计	38

2.2.5	实数 DCT 与 IDCT 失配问题	42
2.2.6	H.264 4×4 整数 DCT 及其结构设计	42
2.3	基于块的预测编码技术及其 VLSI 结构设计	46
2.3.1	预测编码的基本概念	46
2.3.2	基于块平移的运动估计和补偿方法	47
2.3.3	运动矢量估计算法及其 VLSI 结构设计	48
2.3.4	分数插值算法及 VLSI 结构设计	55
2.3.5	块匹配搜索算法及其对块匹配 ASIC 结构的影响	59
第 3 章	视频编码标准关键技术分析	62
3.1	H.264 视频编码关键技术	62
3.1.1	H.264 视频编解码器的基本结构	62
3.1.2	H.264 的档次和级	63
3.1.3	H.264 的块尺寸可变技术	64
3.1.4	H.264 的多参考帧技术	64
3.1.5	H.264 的高精度的分数像素运动估计技术	65
3.1.6	H.264 的率失真拉格朗日模式判定技术	67
3.1.7	H.264 的多模式帧内预测技术	68
3.1.8	H.264 的自适用去块效应滤波技术	70
3.1.9	H.264 的混合熵编码技术	73
3.2	AVS 视频编码标准关键技术分析	79
3.2.1	变换,量化技术	79
3.2.2	帧内预测	80
3.2.3	分数像素插值与帧间预测	81
3.2.4	RD 率失真优化	82
3.2.5	环路滤波	82
3.2.6	AVS 2D-GOLOMB 熵编码	83
第 4 章	基于宏块的视频编码 VLSI 系统设计	85
4.1	基于宏块的 H.264 编码 VLSI 系统设计	85
4.1.1	视频编码系统实现方案与 ASIC 设计空间	85
4.1.2	复杂软件模型到硬件系统架构的映射方法和策略	86
4.1.3	传统的基于 CPU 平台硬件加速编码系统	90
4.1.4	基于宏块的四级流水 H.264/AVC 编码调度方案	91
4.1.5	H.264 编码 ASIC 系统方案	97
4.1.6	片外存储器的组织	98
4.2	基于宏块的 AVS 编码 VLSI 系统设计	99
4.2.1	AVS 视频编码 SoC 芯片整体方案	99
4.2.2	总体结构的关键模块设计	100

第 5 章 视频编码器关键功能模块 VLSI 结构设计	104
5.1 H.264 编码器关键功能模块 VLSI 结构设计	104
5.1.1 H.264 中涉及的基本功能器件的硬件性能分析	104
5.1.2 整数运动估计模块 ASIC 结构设计	107
5.1.3 分数运动估计模块 ASIC 结构设计	126
5.1.4 帧内预测和重构模块 ASIC 结构设计	139
5.1.5 基于上下文可变长熵编码模块 ASIC 结构设计	149
5.1.6 去块效应滤波模块 ASIC 结构设计	152
5.2 AVS 编码器关键功能模块 VLSI 结构设计	156
5.2.1 帧内预测和重构模块 VLSI 结构设计	156
5.2.2 AVS 熵编码的硬件实现	189
5.2.3 环路滤波器的硬件设计	202
5.2.4 RD 率失真优化 VLSI 结构设计	220
第 6 章 H.264/AVS 宏块层编码器的综合与验证	232
6.1 视频编码芯片设计	232
6.1.1 视频编解码芯片设计流程	232
6.1.2 RTL 级设计与 FPGA 验证	233
6.2 视频编解码 SoC 芯片的验证系统设计	235
6.2.1 硬件架构设计	235
6.2.2 C 模型的设计	242
6.2.3 独立验证系统的设计	252
6.2.4 全芯片验证	266
参考文献	272

1.1 引言

随着微电子技术、计算机技术、通信技术的发展和网络技术的普及,与视频有关的各种应用变得越来越广泛,智能终端、HDTV、IPTV、移动多媒体等已经对现代人的日常生活、存储技术的迅速发展和互联网视频会议、可视电话、Internet 教育、娱乐产生了重大的影响;与此同时海量视频业务的传送和存储也对现有存储资源和信道带宽带来了巨大的挑战,增加信道带宽和压缩信号带宽是目前解决视频传输要求不断增长的两个主要技术方向;虽然网络技术的迅速发展增加了通信信道的带宽,但这仍难以满足各种视频应用对信道的要求;另一方面,对于便携系统而言,海量存储设备会极大增加产品的成本;因此,利用视频压缩技术降低视频信号存储容量和传输带宽,是目前一项紧迫而且现实的研究课题。

1.2 视频压缩编码的必要性和可行性

视频通常是指运动图像序列,在多媒体通信中,视频信息的庞大数据量给信息的存储和传输带来了极大的困难。以常见的视频信号 PAL 信号(分辨率 576×576 , 16 位/像素)为例,视频图像的数据量为 $720 \times 576 \times 16 = 6.64 \text{ Mb/帧}$;这样,一个 1GB 容量的硬盘也只能存放大约为 1300 帧这样的静止彩色图像。若仍以 25fps(帧/秒)的帧速率传输,则视频信号的传输速率大约为 132.7 Mb/s 。由此可见,视频数据量十分巨大,不便于存储和传输。单纯用扩大存储容量、增加通信信道的带宽的办法不现实。而数据压缩是一个行之有效的方法,通过数据压缩的手段把信息的数据量降下来,以压缩编码的形式存储和传输,即节约了存储空间,又提高了通信信道的传输效率。

视频压缩不仅是必要的,而且是可能的。因为在视频数据中存在着极强的相关性,也就是存在着很大的冗余度。因此可以通过去除冗余信息来实现压缩。静止图像压缩的一个主要目标,是在保持重建图像质量可以被接受的同时,尽量去除图像本身存在的空间冗余信息。而视频信号的压缩,是在去除空间冗余的同时,还可以通过去除时间冗余以达到较高的压缩比;除时间和空间冗余外,在一般的图像和视频数据中,还存在信息熵冗余、结构冗余、知识冗余、视觉冗余等。

(1) 信息熵冗余:信息熵冗余也称编码冗余,由信息论的有关原理可知,表示图像数据

的一个像素点,只要按照信息熵的大小分配相应比特数即可。然而对于实际图像数据的每个像素,很难得到它的信源熵,在数字化一幅图像时,对每个像素是用相同的比特数表示,这样必然存在冗余。

(2) 结构冗余:有些图像的部分区域内存在非常强的纹理结构,或是图像的各个部分之间存在某种关系,例如自相似性等,这些都是结构冗余的表现。

(3) 知识冗余:有些图像包含的信息与某些先验的基础知识有关,如作为证件照的头肩图像中,头、眼、鼻和嘴的相互位置等信息就是一些常识,这种冗余,称为知识冗余。

(4) 视觉冗余:在大多数情况下,重建图像的最终接受者是人的眼睛。人类的视觉系统是世界上最好的图像处理系统,但它不是完美的。人类的视觉系统对于图像的注意是非均匀和非线性的,并不是对图像中的任何变化都能感知。例如图像系数的量化误差引起的图像变化在一定范围内的变化是不能为人眼所觉察的。因此,如果能充分利用人类视觉系统的这些特点,是可以得到高的压缩比的编码系统。

上述几种冗余,是压缩图像与视频数据的出发点。图像与视频编码方法,就是尽可能消除这些冗余信息,以降低表示图像与视频所需要的数据量。

1.3 视频压缩编码要求与图像质量评定体系

1.3.1 视频压缩编码的要求

视频压缩编码系统包括编码器、传输通道和解码器三大部分,具体应用如图 1-1 所示。

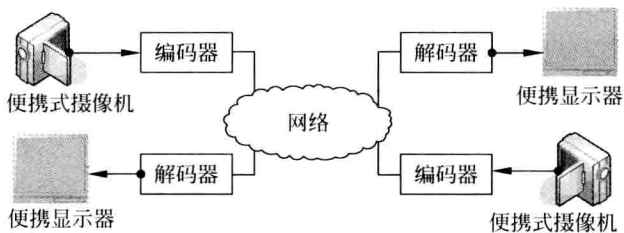


图 1-1 视频压缩编码应用示意图

如上所述,视频压缩编码的主要目标是为了节省传送的带宽和存储空间。视频压缩编码应该满足两个主要要求:

① 必须压缩在一定的带宽内,即视频编码器应该具有压缩的功能,通常用压缩率表示。

② 压缩后的视频信号经解压缩后应保持一定的视频质量。如果只强调高压缩率,但压缩后信息严重失真,显然不能满足要求;反之,只关心质量,压缩比太小,也不符合要求。

1.3.2 图像质量评价体系

在图像视频压缩中为增加压缩比有时会舍弃一些图像细节或其他不太重要的内容,比如前面指出的去除视觉冗余数据,能导致实在的信息损失,所以在图像编码中解码图像与原

始图像可能会不完全相同。在这种情况下常常需要有对信息损失的量度(或说对图像质量的评价体系)以描述重建图像质量相对于原始图像的偏离程度,这些评价原则一般称为保真度准则。常用的保真度准则可分为客观和主观两大类。

1. 客观保真度准则

当损失的信息量用编码图像与解码图像的函数表示时,称之为客观保真度准则,最常用的一个准则是输入图像与输出图像之间的均方根(rms)误差。令 $f(x, y)$ 表示输入图像, $f'(x, y)$ 表示 $f(x, y)$ 压缩后解压缩得到的图像,对任意的 x 和 y 、 $f(x, y)$ 和 $f'(x, y)$ 之间的误差 $e(x, y)$ 定义为

$$e(x, y) = f'(x, y) - f(x, y) \quad (1.1)$$

如果图像的尺寸为 $M \times N$,则它们的总误差为

$$e_{\text{sum}} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f'(x, y) - f(x, y)) \quad (1.2)$$

则 $f(x, y)$ 与 $f'(x, y)$ 之间的均方根误差 e_{rms} 为

$$e_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f'(x, y) - f(x, y))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

若将 $f'(x, y)$ 看成是 $f(x, y)$ 与 $e(x, y)$ 之和,那么解码图像的信噪比 SNR 为

$$\text{SNR} = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f'^2(x, y)}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f'(x, y) - f(x, y)]^2} \quad (1.4)$$

对式(1.4)求平方根,就可以得到均方根信噪比 SNR_{rms} ,进一步将 SNR_{rms} 归一化并用分贝(dB)表示,令

$$\bar{f} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \quad (1.5)$$

$$\text{SNR} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y) - \bar{f})^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f'(x, y) - f(x, y))^2} \right] \quad (1.6)$$

令 $f_{\text{max}} = \max\{f(x, y), x=0, 1, \dots, M-1; y=0, 1, \dots, N-1\}$,可以得到峰值信噪比 PSNR:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left[\frac{f_{\text{max}}^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f'(x, y) - f(x, y))^2} \right] = 10 \lg \left[\frac{(2^n - 1)^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f'(x, y) - f(x, y))^2} \right] \quad (1.7)$$

2. 主观保真度准则

尽管客观保真度准则提供了评估信息损失的方法,但实际应用中很多解压缩图像的最终接收系统是人眼,这样,采用主观方法来测度图像的质量更为直接也更合适。常用的方法是对 1 组(超过 10 人)精心挑选的观察者展示一幅典型的图像并将他们对该图像的评价综合起来以得到一个统计的质量评价结果。评价可对照某种相对应的尺度进行,表 1-1 给出

了一种对视频图像质量进行绝对评价的尺度,这里根据图像绝对质量进行判断打分。

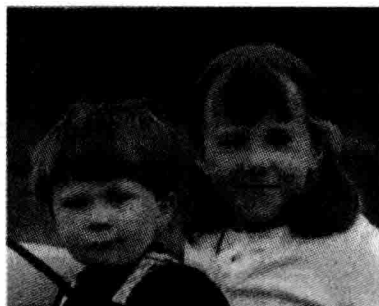
表 1-1 主观图像质量评价尺度表

评 分	评 价	说 明
6	优秀	图像质量非常好,如同人能想象的最好质量
5	良好	图像质量高,观看舒服,干扰极少而且不影响观看
4	可用	图像质量可接受,有干扰但不影响观看
3	勉强可用	图像质量差,干扰有些妨碍观看,观察者希望改进
2	差	图像质量很差,影响观看的干扰始终存在,几乎无法观看
1	不能用	图像质量极差,不能使用

一般来讲,PSNR 愈高视频质量愈高;反之亦然。但实际上有时并非如此。如图 1-2(b)、图 1-2(c)所示,图 1-2(c)中的 PSNR 比图 1-2(b)中的低近 2dB,但图 1-2(c)的主观评定却高于图 1-2(b),因为其中人的脸部更清晰,只是背景模糊,而人的视觉对脸部往往更敏感更重视。



(a) 原图像



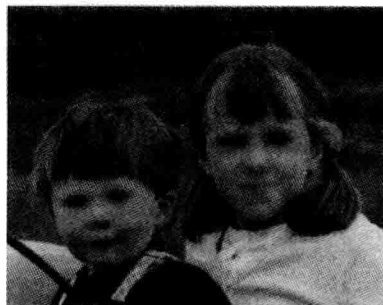
(b) 33.2dB



(c) 31.8dB



(d) 26.5dB



(e) 37.5dB

图 1-2 图像质量评价准则 PSNR 示例图

1.3.3 视频压缩系统评价指标

如 1.3.1 节所述,对于特定的视频压缩系统或某种算法而言,与 1.3.1 节的两个主要要求相对应,通常采用如下两个主要指标参数来衡量其优劣。

标准测试序列 RDO 曲线:是指对于选定的标准测试序列,经过特定的视频压缩系统或算法在不同的量化参数(QP)下编解码后得到的一组 PSNR 和码率(Rate)值,以 Rate 为横轴,PSNR 为纵轴拟合得到的二维曲线。这种曲线经常用于在同一幅图上比较不同编解码标准或算法的编解码性能,非常直观明了,但测试工作量比较大。

PSNR 对 Ratio:为了快速得到某种算法的性能,也可以在选定的量化参数值情况下,比较对于不同标准测试序列通过压缩算法编解码得到的平均 PSNR 和平均 Ratio 压缩率(压缩前码率/压缩后码率)来评价算法的优劣。

在满足上述性能指标要求的情况下,视频压缩编解码系统应该满足实时性强,易于 VLSI 实现、低成本和可靠性高等要求。本书主要讨论在保证系统的 RDO 曲线或者 PSNR 对 Ratio 指标的情况下,研究满足各种实时性要求、低成本和低功耗的视频编码关键技术的芯片设计方法及其结构。

1.4 视频压缩编码标准的发展

视频压缩标准规定了视频编码需要的语法和可选用的工具,主要包括比特率控制算法、单通道与多通道编码、I/B/P 帧比率、运动搜索范围、运动搜索算法以及选用的个别工具与模式。提供灵活配置以允许用户在计算负载和改进质量之间做出不同的取舍。显然,所有编码器都可以采用或高或低的码率实现不同的视频质量水平。为了保证不同厂家视频编解码产品之间的互操作性,视频编解码技术的标准化问题日益引起了人们的重视。各大国际组织在数字视频编解码标准化方面展开了许多相关的工作并制定了一系列的视频编解码标准。图 1-3 列出了 4 种最为主要的视频压缩标准的发展历程。目前在从事视频压缩标准制定方面贡献最突出、影响力最大的国际组织主要有国际标准化组织 ISO/IEC 的运动图像专家组(Motion Picture Expert Group, MPEG)和国际电信联盟 ITU-T 的视频编码专家组(Video Coding Expert Group, VCEG)。两个国际标准化组织根据不同的应用需要,采用相似的压缩编码技术分别制订了 MPEG-X^[1,2] 和 H. 26X^[3] 系列视频压缩标准。其中,ITU-T 针对视频通信领域的一些应用(如可视会议、视频电话等),分别制定了 H. 261、H. 262、H. 263/H. 263+/H. 263++、H. 26L/H. 264; ISO/IEC 主要针对视频存储领域(如 VCD/DVD 等),相继制订了 MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4(Part 2)。上述几个国际视频压缩标准尽管应用领域不同,但基本上都采用的是基于块的混合视频编码技术。两大国际组织在发展各自的视频压缩标准的同时也注重合作,1992 年联合推出的 MPEG-2/H. 262 是现在应用得最广泛的国际视频压缩标准。在 H. 264 的制订过程中,ISO/IEC MPEG 也积极加入并与 ITU-T VCEG 再次联手推出了 H. 264/AVC,并将其作为 MPEG-4 的第 10 部分^[4,5]。今年已推出具有历史意义的最新标准 H. 265,即 HEVC 编码技术。从 2000 年起,我国开始研发具备自主知识产权的第二代信源编码标准 AVS^[6]。在 2003 年 12 月举行第 7 次会议

上,AVS工作组提交了标准的第一部分(系统)和第二部分(视频)的草案最终稿和报批稿配套的验证软件。2004年12月,全国信息技术标准化技术委员会组织评审并通过了AVS标准视频草案。2005年1月,AVS工作组将草案报送信息产业部(简称信产部,现为工业和信息化部)。3月30日,信产部初审认可,标准草案视频部分进入公示期。2005年初(第12次全体会议)完成了第三部分(音频)草案。目前,AVS标准已经得到广泛应用,前景非常看好。

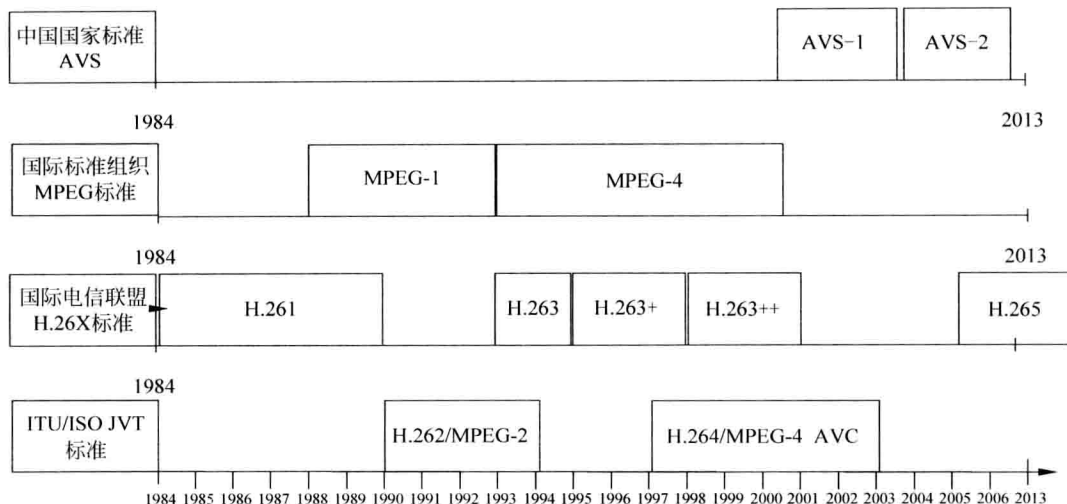


图 1-3 几种国际标准制订时间及发展历程

1. MPEG-x 系列编解码标准简介

MPEG-x 系列视频编解码标准是由 MPEG 负责制定的,该组织的任务是研究开发运动图像及其声音的数字编解码国际标准,自从 1988 年成立以来,制定了一系列有较大影响的标准,对推动视频编解码技术的发展做出了重要的贡献。

(1) MPEG-1 标准于 1992 年 11 月获得正式批准。该标准主要是为数据光盘存储、VCD、消费视频等应用而制定的,在影视和多媒体计算机领域中得到了广泛应用。其主要目标是在 1~1.5Mb/s 的情况下,提供 30 帧 CIF 格式 VHS(Video Home System)质量的图像。

(2) MPEG-2 标准于 1994 年 11 月正式发布,MPEG-2 标准作为 MPEG-1 的扩展,支持隔行扫描的视频编码,广泛应用于数字电视和高清数字电视信号的传输和高质量视频信号的存储(DVD)。而在此之前,ITU-T 也成立了一个图像编码的专家组,开始制定应用于 ATM 环境下的 H. 262 标准,由此开始了 ISO/IEC 和 ITU-T 两个标准组织的合作。MPEG-2 标准能够支持高分辨率图像和声音,其目标是在 3~15Mb/s 传输速率下提供广播级的图像。MPEG-1 和 MPEG-2 标准为 VCD、DVD、数字电视等产业的发展打下了坚实基础,使多媒体应用进入普通家庭。

(3) MPEG-4 标准于 1991 年 5 月提出,1993 年 7 月得到确认,其目标是极低码率的音频/视频编解码。MPEG-4 支持逐行扫描和隔行扫描,是基于视频对象的编码标准。MPEG-4 标准既能够支持码率低于 64kb/s 的视频应用,也能够支持广播级的视频传输。与其他压缩标准相比,MPEG-4 标准在 DCT 的基础上引入了图像模型的概念从而具有更高的压缩效率。MPEG-4 提供基于内容的编码能力,能够对物体的形状进行编码,代表了新一

代的视频编码技术。

2. H.26x 系列视频编解码标准简介

国际电信联盟的标准化组织是专业化的国际组织,它主要负责电信技术的开发和运营协调。同时,为了推进世界范围内的电信业务标准化,它会发布一些电信行业的推荐标准。

(1) H.261 是最早出现的实用视频编码标准,于1991年获得正式批准。它的输出码率是 $p \times 64\text{kb/s}$, p 取值较小时,只能传输清晰度不太高的图像,适用于可视电话;而 p 取值较大时,可以传输清晰度较好的视频会议图像。H.261 标准是图像压缩编码领域40年研究成果的结晶,是第一个在国际上产生广泛影响的视频编码标准,随后的视频编码标准在算法上都受到了 H.261 编码标准的深刻影响。

(2) H.263、H.263+、H.263++ 标准。1996年ITU-T推出了针对甚低比特率的视频压缩标准 H.263 建议。H.263 最初是针对低于 64kb/s 范围的甚低比特率应用设计的,但实验结果表明,在任意速率范围内,都取得了良好的压缩效果。H.263 标准的帧率为10帧/秒以上,图像分辨率为 176×144 (QCIF 格式)或者 128×96 (SQCIF 格式)。H.263 是为了支持低速率视频通信而制订的标准,但同时希望码流也能够适应较大的动态范围;而不仅仅限于低码率。

1998年,ITU-T推出的 H.263+ 是 H.263 视频编码标准的第二个版本,它提供了12个新的可选择模式,进一步提高了压缩编码性能。H.263+ 允许使用更多的源格式,拓宽了应用范围。另一重要的改进是可扩展性,它允许多显示率、多速率及多分辨率,增强了视频信息在易误码、易丢包异构网络环境下的传输。另外,H.263+ 对 H.263 中的不受限运动矢量模式也进行了改进。

2000年,ITU-T又推出 H.263++,对 H.263 又做了一些新的扩展,增加了一些新的可选技术,从而更加适应于各种网络环境,并增强了差错恢复的能力。新增的可选模式有增强参考帧选择模式、数据划分片模式、扩展的追加增强信息模式等。

(3) H.264/AVC 视频编解码标准。1998年ITU-T第16研究小组在对 H.263 不断改进的同时,还开始了另一个研究项目 H.26L,目标是制定一个新的数字视频编解码标准,使其编码效率能够两倍于当时已投入使用的标准。这个项目具体由视频编码专家组(ITU-T/SG 16/Q.6 的 VCEG)负责,后来,MPEG 专家组也加入进去,成立了联合视频组(Joint Video Team,JVT)来共同完成标准的最终制订工作。2003年3月,标准的最终草案公布,H.264/AVC 标准有两个不同的名称:在ITU-T中,它的名字叫 H.264;而在ISO/IEC中,它被称为 MPEG-4 的第10部分,即高级视频编码(Advanced Video Coding,AVC)。与以前的视频编码标准不同,H.264 不仅含有一个规定视频编码算法的视频编码层(Video Coding Layer,VCL),还包括一个规定网络传输规范的网络提取层(Network Abstraction layer,NAL),H.264/AVC 的视频编码层采取的编码框架仍然是传统的混合编码框架。与以前的标准相比较,H.264/AVC 的应用前景更为广泛,它允许在 Internet 中以 1Mb/s 的速率传送电视质量的视频信号,它可以使 8MHz 的模拟带宽中容纳两倍于 MPEG-2 编码的数字电视频道,它使无线视频通信成为可能,它对传统的数字媒体存储技术也将产生了巨大的影响。可以预见,H.264/AVC 标准的制定标志着数字视频编码技术开始走向成熟。

3. 中国的 AVS 标准简介

我国于2002年6月开始着手制定具有自主知识产权的音/视频编码技术的 AVS 标准,