

Algorithms and Systems for Distributed Video Coding

分布式视频编码 算法与系统

邸金红 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

分布式视频编码 算法与系统

邴金红 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

军工企业是一个国家战略性生产能力、创新能力并通过分析各军工企业在不同时期业务侧重的变化,进而了解其所在国家的国防建设及国防需求的变化,冀望为我国军工企业及国防科技的创新发展提供启示和参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式视频编码算法与系统/邸金红著. —北京:国防工业出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-118-10817-0

I. ①分… II. ①邸… III. ①视频编码—研究
IV. ①TN762

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 143343 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6½ 字数 182 千字

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

分布式视频编码 (distributed video coding, DVC) 是一种全新的视频编码模式, 它基于 Slepian - Wolf 和 Wyner - Ziv 编码理论, 采用帧内编码加帧间解码, 将计算复杂度从编码端转移到了解码端, 具有编码器复杂度低、编码端耗电量低、容错性好等特点, 使得其特别适合于一些计算能力、内存容量、耗电量都受限的无线视频终端 (如无线视频传感器监控系统、移动摄像手机和便携式摄像机等), 并随着这些新视频应用的成长在近几年快速发展起来。

从技术角度讲, DVC 技术涉及信源编码、信道编码、视频编码等诸多领域, 横跨多个学科分支。从信息论的角度分析, DVC 系统可以达到和传统视频编码 H. 264/AVC 相同的率失真 (Rate Distortion, RD) 性能, 但是实际上 DVC 的性能和 H. 264/AVC 之间存在着较大的差距。要改进 DVC 性能上的不足, 需要多方面的理论支持。变换、量化、纠错编码、运动估计/补偿、重建、码率控制等技术均需要在新的框架下重新设计和优化。DVC 中还有一些特有的环节, 需要做进一步深入的研究, 如编码复杂度和压缩效率的权衡、边信息的生成、虚拟信道相关性的估算、分布式编码的抗误码性能等。DVC 的架构随着理论的不断深入将进一步改进, 从而建立一个真正符合分布式应用环境的高效编码架构。因此需要从理论到实践对 DVC 技术进行深入地研究。

全书共分为 8 章, 各章的主要内容如下:

第 1 章为绪论, 首先分析了分布式视频编码技术研究的背景和意义; 其次简单介绍了视频编码技术的发展; 接着阐述了分布式视频编

码的 Slepian - Wolf 理论和 Wyner - Ziv 理论两大基本理论；然后概述了分布式视频编码的实现架构和研究现状；最后介绍了本书的主要研究成果与内容安排。

第 2 章为边信息生成算法研究，首先总结了现有的边信息生成技术，并介绍了几种典型的边信息生成方法；接着提出了一种基于卡尔曼滤波的边信息生成方法，用卡尔曼滤波对运动估计过程中产生的运动矢量进行精化，提高运动矢量的准确度，将卡尔曼滤波和前向运动估计、双向运动估计以及空间平滑相结合生成边信息，仿真表明边信息质量得到了提升；最后针对剧烈运动的视频区域，提出了一种边信息改进方法，使用时空相关性提高了边信息的质量。

第 3 章为虚拟相关信道建模，对虚拟相关信道建模进行了研究，首先介绍两种 DVC 中常用的信道模型；然后详细介绍应用最广的拉普拉斯信道中参数的估计方法，包括像素域和变换域的相关噪声参数估计；最后提出一种基于残差能量分类的变换域理想相关噪声模型和基于像素域相关噪声辅助的直流系数修正算法，并进行了实验验证。

第 4 章为基于小波域的分布式视频编码，首先概述了小波域的 DVC 系统的研究现状；接着介绍了几种典型的小波域 DVC 架构；然后提出了一种小波域 DVC 系统的改进方案，对小波变换系数进行格雷码编码，能够减小 Wyner - Ziv (WZ) 帧和边信息之间的相关噪声误差。同时采用了更有效的虚拟信道模型和边信息生成技术。已解码的 WZ 帧含有当前帧的信息，利用已解码 WZ 帧信息对初始边信息进行精化，采用融合技术生成新的边信息辅助 LDPC 解码器重新解码重建 WZ 帧；最后仿真论证了改进的边信息能明显提高重建视频的质量，进而改善了系统的率失真性能。

第 5 章为基于棋盘分类的分布式视频编码，首先简述了信源分类的分布式视频编码方案的研究现状；接着从理论上分析了 WZ 帧分类编码的可行性；提出了一种基于棋盘分类的 DVC 方案，在编码端，按照棋盘格式将 WZ 帧分成两部分进行独立编码。在解码端，采用三

维递归搜索运动估计算法产生初始边信息,进而重建 WZ 帧的第一部分,接着用时空边界匹配算法对 WZ 帧的第二部分对应的边信息进行运动补偿精化,辅助解码 WZ 帧。仿真结果表明,与传统的分布式视频编码系统相比,提出的方案虽然增加了一些解码延迟,但是有效地提高了系统的率失真性能。

第 6 章为面向视频监控的分布式视频编码,首先简述了研究视频监控技术的重要意义;接着介绍了几种基于视频监控的 DVC 系统框图;然后提出了一种新的适用于视频监控的低延迟 DVC 方案,在编码端,采用一种基于时空相关性的 WZ 帧编码模式判决方法,利用 SKIP 模式减小码率;在解码端采用基于 Lucas-Kanade 算法的边信息外推方法,实现了系统的顺序解码。这种边信息外推方法运算复杂度较高,但是运动矢量估计非常精确。仿真结果表明,与传统的基于外推的分布式视频编码系统相比,提出的方案系统率失真性能明显提升。

第 7 章为基于压缩感知的分布式视频编码,首先介绍了基于压缩感知的分布式视频编码的一般结构;接着阐述了压缩感知的基本理论;最后提出了一种基于残差重构的分布式压缩感知视频编码方案,该方案利用相邻关键帧迭代进行 1/4 精度的运动估计/运动补偿操作以保证边信息的准确性;对边信息进行测量,并对测量残差值进行总变分最小化 (Total Variation Minimization, TVmin) 重构。实验证明,在相同的采样率下,提出的算法与传统分布式压缩感知视频编码方案相比,提出的算法可以获得明显的峰值信噪比增益。

第 8 章为分布式多视点视频编码,主要研究了分布式多视点视频编码技术。首先介绍了分布式多视点的一般框架,接着简述了视点间空间边信息的生成方法,最后对基于虚拟视点合成的方法生成 DMVC 的空间边信息进行了实验仿真。

本书的编写和出版得到了航空经济发展河南省协同创新中心、郑州航空工业管理学院信息与通信工程重点学科和复杂背景下目标探测

与识别技术创新团队的支持和资助。同时也得到了河南省科技攻关项目（项目编号：142102210506）、河南省教育厅重点项目（项目编号：14B510029）、郑州市科技计划—普通科技攻关项目（项目编号：20140704）以及福建省自然科学基金面上项目（项目编号：2012J01251）的支持。另外，还得到了北京邮电大学的大力支持。本书主要由邸金红博士组织撰写并统稿，叶锋博士参与了第3章的撰写，常侃副教授参与了第7章的撰写，范曼曼工程师参与了第8章的撰写工作。他们都为本书的顺利出版，给予很大帮助，并做了大量的工作，在此表示感谢！

本书在分布式视频编码的算法与系统研究方面做了初步的探讨，希望能为该领域的研究人员提供参考。由于作者水平有限，书中的论述难免出现疏漏，恳请广大读者批评指正。

作者

2015年12月

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 视频编码技术的发展	2
1.2.1 H.264/AVC 标准	5
1.2.2 HEVC	6
1.3 分布式视频编码的基本理论	8
1.3.1 Slepian - Wolf 无损压缩理论	9
1.3.2 Slepian - Wolf 编码器	10
1.3.3 Wyner - Ziv 有损压缩理论	12
1.3.4 Wyner - Ziv 编码器	13
1.4 分布式视频编码的实现方案	14
1.4.1 基于像素域的 DVC 方案	16
1.4.2 基于变换域的 DVC 方案	18
1.4.3 PRISM 方案	21
1.4.4 DISCOVER 方案	23
1.5 分布式视频编码的应用与关键技术	24
1.5.1 典型应用	24
1.5.2 关键技术	26
参考文献	30
第 2 章 边信息生成算法研究	37
2.1 引言	37
2.2 边信息生成方法概述	38

2.2.1	运动补偿帧内插法	39
2.2.2	基于差分运动的边信息生成方法	41
2.2.3	基于哈希信息的边信息生成方法	44
2.2.4	基于EM算法的边信息生成方法	46
2.3	基于卡尔曼滤波的边信息生成技术	50
2.3.1	卡尔曼滤波	50
2.3.2	基于卡尔曼滤波的运动估计	52
2.3.3	空域平滑	53
2.3.4	双向运动补偿	54
2.3.5	实验结果与分析	54
2.4	基于空间相关性的边信息改进方法	59
2.4.1	提出的边信息改进方法	59
2.4.2	实验结果与分析	62
2.5	本章小结	65
	参考文献	65
第3章	虚拟相关信道建模	68
3.1	引言	68
3.2	常见的信道模型	69
3.2.1	高斯信道模型	69
3.2.2	拉普拉斯信道模型	70
3.3	拉普拉斯信道中参数的计算	71
3.3.1	像素域相关噪声参数估计	71
3.3.2	变换域相关噪声参数估计	76
3.4	实验设计与结果分析	85
3.5	本章小结	88
	参考文献	88
第4章	基于小波域的分布式视频编码	90
4.1	引言	90
4.2	小波域的分布式视频编码	91

4.2.1	小波域的 PRISM 编码	91
4.2.2	残差 LQR - DVC 编码	93
4.2.3	基于模归约的 LTW 编码	94
4.3	改进的小波域的分布式视频编码	95
4.3.1	基于块的分类	96
4.3.2	格雷码编码	97
4.3.3	虚拟信道模型	98
4.3.4	边信息生成	99
4.4	实验结果与分析	101
4.5	本章小结	105
	参考文献	105
第 5 章	基于棋盘分类的分布式视频编码	107
5.1	引言	107
5.2	传统 DCT 域分布式视频编码	110
5.3	棋盘分类的分布式视频编码	112
5.3.1	理论分析	112
5.3.2	编码框架设计	113
5.3.3	编解码过程	113
5.4	主要算法	115
5.4.1	三维递归运动搜索算法	115
5.4.2	基于时空的边界匹配算法	118
5.5	实验结果与分析	122
5.6	本章小结	124
	参考文献	125
第 6 章	面向视频监控的分布式视频编码	128
6.1	引言	128
6.2	面向视频监控的分布式视频编码	130
6.2.1	反向信道感知的分布式视频编码	131
6.2.2	背景帧辅助编码的分布式视频编码	132

6.2.3	基于自回归模型的低延迟分布式视频编码	134
6.3	低延迟分布式视频编码	135
6.3.1	模式判决	136
6.3.2	边信息外推	137
6.4	实验结果与分析	145
6.5	本章小结	154
	参考文献	154
第7章	基于压缩感知的分布式视频编码	157
7.1	引言	157
7.2	基于压缩感知的分布式视频编码结构	158
7.3	压缩感知理论	159
7.3.1	压缩感知基础理论	159
7.3.2	信号的稀疏变换	160
7.3.3	测量矩阵	161
7.3.4	重构算法	162
7.4	基于残差重构的 DCVS 方案	165
7.4.1	整体结构	166
7.4.2	残差重构	167
7.4.3	边信息生成	167
7.5	实验结果与分析	168
7.6	本章小结	170
	参考文献	170
第8章	分布式多视点视频编码	174
8.1	引言	174
8.2	分布式多视点视频编码框架	175
8.3	视点间空间边信息的生成方法	176
8.3.1	基于视点间位差补偿的空间边信息生成方法	176
8.3.2	基于视点间单应性的空间边信息生成方法	177

8.3.3	基于视点变换的空间边信息生成方法·····	179
8.3.4	基于多视点运动估计的空间边信息生成 方法·····	181
8.4	空间边信息生成方法·····	184
8.4.1	视点合成的发展·····	184
8.4.2	深度信息获取方法·····	185
8.4.3	虚拟视点合成过程·····	187
8.5	实验结果与分析·····	188
8.6	本章小结·····	191
	参考文献·····	191
	缩略语·····	193

绪 论

1.1 引 言

随着因特网和移动通信的迅猛发展，以数字图像和数字视频为核心的多媒体技术在人们的日常生活中获得了日益广泛的应用，如数字电视、数字视频存储、视频会议、无线视频会话等。H. 264/AVC 是目前主流的视频编码标准。据统计，基于 H. 264/AVC 视频压缩格式的应用已占据网络多媒体通信领域 66% 的市场份额。鉴于 H. 264/AVC 的巨大成功，2010 年 4 月，国际数字视频压缩标准组织（Joint Collaborative Team on Video Coding，JCT-VC）启动了下一代数字视频压缩标准的规划，将其命名为高效视频编码（High Efficiency Video Coding，HEVC），主要研究进一步提高编码效率的新工具和新方法。H. 264 和 HEVC 均采用变换编码和预测编码技术相结合的混合编码框架。编码器端采用运动估计/补偿技术，其计算复杂度比解码端高出很多，通常为解码端的 5~10 倍。这种不对称的编码方式适用于视频信号一次编码、多次解码的场景，如视频广播、视频点播、视频光盘存储等。

随着网络技术、无线技术和计算机技术的飞速发展，近年来涌现出许多具有崭新特点的多媒体应用设备，如无线视频传感器监控网络、移动摄像手机和便携式摄像机等。它们在存储容量、计算能力和功率资源等方面都受到很大的限制，这些应用场景的视频编码具有不同于传统视频压缩编码的特点，编码设备简单并且能量受限，而解码

设备一般无能量限制并且具有较强的计算能力。因此编码复杂度较高的传统混合编码技术 H. 264 及 HEVC 不再适用新应用的需求。一种新的视频编码框架——分布式视频编码 (Distributed Video Coding, DVC) 开始引起人们的关注, 它为以上应用场合提供了很好的解决方案。DVC 突破了传统视频编码的束缚, 将耗时耗功率的运动估计/补偿从编码端移到解码端, 采用“帧内编码 + 帧间解码”技术, 有效降低了编码复杂度。此外 DVC 系统结构还具有抗传输误码的优点。

随着“三网融合”与“物联网”产业的不断推进, DVC 技术作为具有巨大应用价值和研究价值的新一代视频压缩编码技术, 正得到业内广泛的关注和研究。从应用角度讲, DVC 技术在基于移动设备的视频会议、分布式视频交互以及移动可视电话等诸多场合都有着广泛的应用。从技术角度讲, DVC 技术涉及信源编码、信道编码、视频编码等诸多领域, 横跨多个学科分支。因此, 致力于研究此项技术进而推动相关领域快速发展, 具有重要意义。

从信息论的角度分析, DVC 系统可以达到和传统视频编码 H. 264/AVC 相同的率失真 (Rate Distortion, RD) 性能, 但是实际上 DVC 的性能和 H. 264/AVC 之间存在着较大的差距。要改进 DVC 性能上的不足, 需要多方面的理论支持。变换、量化、纠错编码、运动估计/补偿、重建、码率控制等技术均需要新的框架下重新设计和优化。DVC 中还有一些特有的环节, 需要做进一步深入的研究, 如编码复杂度和压缩效率的权衡、边信息的生成、虚拟信道相关性的估算、分布式编码的抗误码性能等。DVC 的架构随着理论的不断深入将进一步改进, 从而建立一个真正符合分布式应用环境的高效编码架构。因此需要从理论到实践对 DVC 技术进行深入地研究。

本章首先概述视频编码技术的发展, 其次介绍分布式视频编码的理论基础, 然后给出了分布式视频编码几种典型的实现方案, 最后总结了分布式视频的主要应用和关键技术。

1.2 视频编码技术的发展

数字视频技术的广泛应用, 促使了许多视频编码标准的产生。致

力于视频压缩的两个国际组织，国际标准化组织（ISO/IEC）和国际电信联盟（ITU - T）陆续颁布了一系列视频压缩标准 MPEG - X 和 H. 26X，极大地推动了视频编码技术的发展。现行视频压缩标准的发展过程如图 1 - 1 所示。

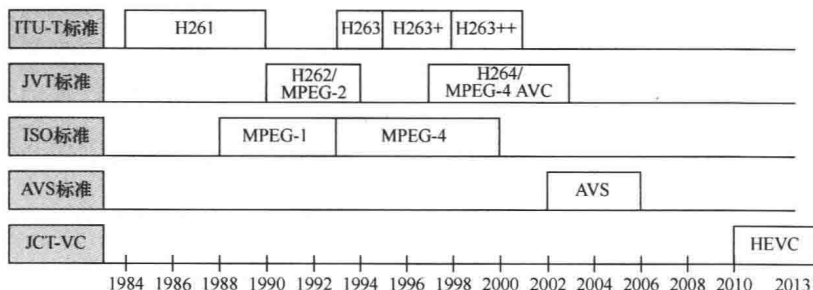


图 1 - 1 现行视频压缩标准发展过程示意图

1993 年，活动图像专家组（Moving Picture Expert Group, MPEG）公布了 MPEG - 1 视频编码标准，主要用于家用 VCD 的视频压缩。

1994 年，ITU - T 和 ISO/IEC 联合公布了 H. 262/MPEG - 2 标准，用于数字视频广播、家用 DVD 的视频压缩和高清晰度电视。

1995 年，ITU - T 推出 H. 263 标准，用于低于 64kb/s 的低码率视频传输。此后又在 1998 年和 2000 年分别公布了 H. 263 + 标准和 H. 263 + + 标准。

1999 年，ISO/IEC 通过了视听对象的编码标准——MPEG - 4，它除了定义视频压缩编码标准外，还强调了多媒体通信的交互性和灵活性。

2003 年 5 月，ITU - T/ISO 正式公布了 H. 264/AVC 视频压缩标准，由于其具有比以往标准更出色的性能，受到了广泛的重视和欢迎。2005 年 3 月推出了高保真扩展（Fidelity Range Extension, FRExt），用于高清晰度及演播室质量的视频压缩。此后在 2007 年 11 月推出了可分级视频编码（Scalable Video Coding, SVC）扩展，又在 2009 年 3 月推出了多视点视频编码（Multiview Video Coding, MVC）扩展。

随着网络技术和终端处理能力的不断提高，人们对目前广泛使用的 H. 264/AVC 压缩标准提出了新的要求。如图 1-2 所示，视频压缩无处不在。基于视频的 web 业务持续增长，业务量直逼 TV 应用。这几年来，YouTube 已经占据了视频业务 27% 的市场。同时，用户的期望决定了视频的灵活性和质量，随之而来的是视频传输方式从线性到非线性的转变。用户需要“个人时间”而不是“重要时间”来观看视频节目。由于新业务的增加，特别是智能手机的 4G/LTE 移动传输，一些移动网络运营商预测未来 10 年里每年对带宽的需求都将提高一倍。

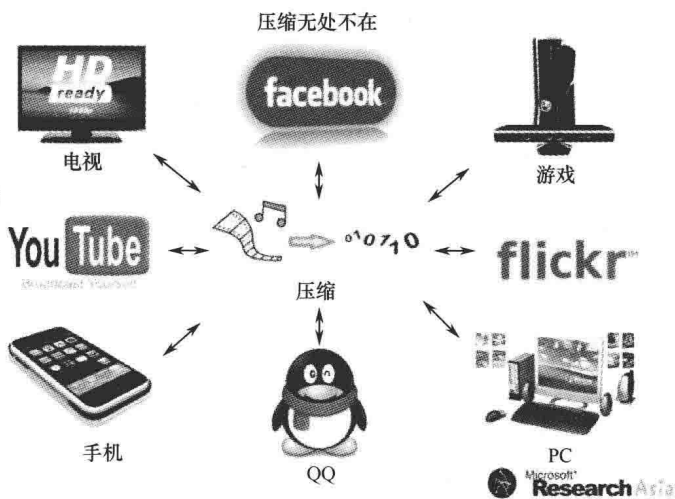


图 1-2 视频需求

虽然这些需求在一定程度上可通过网络效率提升和物理层的技术来实现，但是视频压缩也同样重要。H. 264/AVC 发布以后，经过几年的发展（例如，新型运动补偿、变换、插值和熵编码等技术的提出），具备了推出新一代视频编码标准的技术基础。

2010 年 4 月份，JCT-VC 第一次会议在德国德累斯顿召开，正式启动了下一代数字视频压缩标准的制定规划，目标是在 H. 264/AVC 高档次的基础上，压缩效率提高一倍以上。2010 年 7 月，确定了编码工具实验参考模型（Test Model under Consideration, TMuC），

成立了 AD HOC 小组，分领域搜集和审阅技术提案（Call for Proposals, CfP）。2010 年 10 月完成了测试模型的选择。通过各种标准草案版本，进一步完善测试模型设计，于 2013 年 1 月完成标准的最终稿。2013 年 11 月 25 日，ISO/IEC 正式公布了 H. 265/HEVC 标准。标准发布之后，相关标准的进一步工作仍然在继续。JCT-VC 现有的工作主要集中在就 H. 265/HEVC 的扩展内容进行完善，如更高的比特深度、可伸缩 HEVC 编码和多视角立体编码等。

下面首先介绍主流的 H. 264/AVC 标准的关键技术，然后介绍 HEVC 标准中的一些新方法和新技术。

1. 2. 1 H. 264/AVC 标准

H. 264/AVC 标准是目前主流的视频压缩标准。它既保留了以往压缩技术的优点，又具有其他压缩技术无法比拟的优点。

(1) 低码率：与 MPEG2 和 MPEG4 等压缩技术相比，在同等图像质量下，采用 H. 264 技术压缩后的数据量只有 MPEG2 的 1/8，MPEG4 的 1/3。

(2) 容错能力强：在不稳定网络环境下，H. 264 提供了解决“丢包”等错误的必要工具。

(3) 网络适应性强：H. 264 提供了网络抽象层（Network Abstraction Layer, NAL），使得 H. 264 码流能容易地在不同网络上传输（如互联网、CDMA、GPRS、WCDMA、CDMA2000 等）。

H. 264/AVC 标准沿用基于块的预测/变换混合编码框架。如图 1-3 所示。为了提高编码效率，H. 264/AVC 采用了一些新技术。亮度帧内预测有 Intra4×4 和 Intra16×16 两种编码模式。其中 4×4 亮度子块有 9 种可选预测模式，而 16×16 亮度子块有 4 种可选预测模式。可变块大小的帧间预测和亚像素的运动估计是去除帧间冗余的主要技术。帧间预测划分方式多达 7 种。H. 264 对图像或者预测残差采用了 4×4 整数离散余弦变换技术，避免了以往标准中使用的通用 8×8 离散余弦变换、逆变换经常出现的失配问题。此外，H. 264 的先进技术还包括多参考帧运动估计、自适应去块滤波器、基于码率控制的编码端控制策略和改进的熵编码技术等。将各种编码工具按照各自