

差错信道下基于框架扩展的高效多描述图像编码

赵小青 倪林

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘要: 由量化框架扩展系数所产生的多描述图像编码, 在差错信道下具有良好的图像恢复性能。该文提出一种基于框架扩展的高效多描述图像编码。首先构造一种在量化噪声下具有均方误差意义上最优框架重建的均匀紧支框架。然后以小波零树作为框架扩展的基本运算单元, 在小波域对不同子带信息采用不同维度的框架进行扩展。通过不同维度的框架扩展实现对不同子带信息不同保护。框架扩展后的数据经量化编码形成多描述码流。实验结果证明, 相较于其他几种基于框架扩展的方法, 该文方法在同样的信道条件下具有更好的图像差错恢复性能。

关键词: 图像传输; 多描述编码; 框架扩展; 小波零树

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1836-05

Efficient Multiple Description Image Coding over Error-Prone Channels Based on Frame Expansion

Zhao Xiao-qing Ni Lin

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Multiple description image coding based on quantized frame expansion performs very well over error-prone channels. In this paper, an efficient multiple description image coding based on frame expansion is proposed. Firstly, an optimal uniform tight frame is designed, which can minimize the mean squared error with quantization. Then, basic unit of frame expansion is constructed from wavelet zero-trees and different frames are applied to coefficients in different sub-bands. In that way, different sub-bands gain different protections during the transmission. After quantization and entropy coding, multiple description bit streams are generated from frame expansion. The experiment results prove that compared with other methods based on frame expansion, the scheme can obtain better recovery images under the same channel condition.

Key words: Image transportation; Multiple description coding; Frame expansion; Wavelet zero-trees

1 引言

随着多媒体技术的飞速发展, 图像信息正越来越广泛地应用在网络信道传输中。但是, 由于图像信息对实时性要求极高, 信道误码、拥塞或延迟都会造成解码的不连续, 从而严重影响图像的解码恢复质量。为了在差错信道下有效传输图像, 人们提出一种能有效提高图像信息传输鲁棒性的信源信道联合编码——多描述编码^[1]。多描述编码将信息编码为多个独立的描述, 任何一个描述码流都能单独解码获得一个可接受的恢复质量。第一个实际的多描述编码是由 Vaishampayan 在文献[2]中所提出的多描述标量量化: 对信号分配几个粗索引来形成多个描述。第一个基于变换的多描述编码方法由 Wang, Orchard 等^[3]设计, 信号变换被用来在编码中引入冗余。文献[4]中则讨论了使用过完备框架扩展来产生具有一定冗余的一组描述。

框架扩展通过 R^N 到 $R^M (M > N)$ 的线性变换非常方便地

得到多个描述。由于其框架分量自身之间的线性相关性, 编码具有很好的差错恢复鲁棒性。文献[5-7]中, Goyal 等详细分析了 R^N 空间中的量化过完备框架扩展, 并证明紧支框架具有量化噪声下的最优重建性能。在此基础上, 文献[8, 9]用过采样滤波器组构造任意维度的框架。考虑到图像低频信息对重建具有重要意义, Motwani 等采用树状结构的过采样滤波器组框架实现框架扩展, 对图像低频信息提供优先保护^[10]。以上这些框架扩展的方法都是对整个图像信息采用同样的框架进行扩展, 且没有提出将数据进行多描述分包的具体策略。

目前, 小波变换在图像压缩与分析中已得到广泛的应用, 诸如 JPEG2000 标准, EZW, SPIHT 编码等都是在小波域进行。由于其自身优秀的时频分析能力, 小波变换在图像处理领域必将发挥更加重要的作用。因此, 本文提出一种小波域的基于框架扩展的多描述图像编码方法, 将小波零树作为框架扩展的基本运算单元。首先构造一种均匀紧支框架, 该框架可以实现量化噪声下, 均方误差意义上的最优重

建, 且具有良好的差错恢复性能。然后以小波零树为基本运算单位, 对不同频率子带采用不同维度的框架进行扩展。通过对不同子带的不同维度框架扩展, 实现对各个子带信息不同程度的保护。

2 框架扩展

2.1 框架的基本性质

框架扩展是将低维空间向量用高维空间向量进行完全描述。假设希尔伯特空间 $\mathbf{H}=\mathbf{R}^N$, 令向量集 $\Phi=\{\varphi_k\}_{k \in M} \subset \mathbf{H}$, M 是 Φ 的向量数。如果存在 $A>0, B< \infty$ 对任意 $x \in \mathbf{H}$ 满足式(1), Φ 叫做一个框架^[11]:

$$A\|x\|^2 \leq \sum_{k \in M} |\langle x, \varphi_k \rangle|^2 \leq B\|x\|^2 \quad (1)$$

A 和 B 称为框架界, $r=M/N$ 称为框架冗余。若框架界相等, 则框架紧支; 若对于任意 $k \in M$, 有 $\|\varphi_k\|=1$, 则框架均匀。对于均匀紧支框架, 有 $A=B=r=M/N$ 。

对于框架 $\Phi=\{\varphi_k\}_{k \in M}$, 其相应的框架操作符 \mathbf{F} 即为 \mathbf{R}^N 到 \mathbf{R}^M 的线性变换算子, 表示为 $y_k=(Fx)_k$, 则式(1)可写为

$$A\mathbf{I}_N \leq \mathbf{F}^T \mathbf{F} \leq B\mathbf{I}_N \quad (2)$$

\mathbf{F}^T 表示 \mathbf{F} 的转置。只有对于紧支框架, 才有 $\mathbf{F}^T \mathbf{F} = A\mathbf{I}_N$ 。由文献[5]中的分析, 框架扩展信号经过量化后相当于引入了均值为 0, 方差为 σ^2 白噪声, 均匀紧支框架重建后的信号均方误差最小。

2.2 一种均匀紧支框架

已知均匀紧支框架满足 $A=B$ 和 $\|\varphi_k\|=1, \forall k \in M$ 。由 $\|\varphi_k\|=1$, 易联想到单元圆上的向量。考虑单位圆上的 M 维框架, 有 $\varphi_k = \left(\cos\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right), \sin\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right) \right)$, $k=1, 2, 3, \dots, M$

得到

$$F(M \times 2) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{M}\right) & \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{M}\right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(\alpha + \frac{M-1}{M}2\pi\right) & \sin\left(\alpha + \frac{M-1}{M}2\pi\right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

因为 $\sum_{k=1}^M |\langle x, \phi_k \rangle|^2 = \sum_{k=1}^M \left(\cos^2\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right)x_1^2 + \sin^2\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right)x_2^2 \right) = \sum_{k=1}^M \left(\frac{\cos^2\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right) + 1}{2} x_1^2 + \frac{1 - \cos^2\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right)}{2} x_2^2 \right)$

且有 $\sum_{k=1}^M \frac{\cos^2\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right) + 1}{2} x_1^2 = \frac{M}{2} x_1^2 + \cos 2\alpha x_1^2$
 $\cdot \sum_{k=1}^M \cos \frac{4\pi(k-1)}{M} - \sin 2\alpha x_1^2 \sum_{k=1}^M \sin \frac{4\pi(k-1)}{M}$,

显然, $\sum_{k=1}^M \cos \frac{4\pi(k-1)}{M} = 0, \sum_{k=1}^M \sin \frac{4\pi(k-1)}{M} = 0$,

那么有 $\sum_{k=1}^M |\langle x, \varphi_k \rangle|^2 = \frac{M}{2} \mathbf{I}_2$, 得到 $A=B=M/2$, 证明式(3)是一个二维空间扩展到任意维度空间的均匀紧支框架。

2.3 框架的差错恢复

对于 2.2 节所构造的均匀紧支框架, 接收端对框架扩展信号应用式(4)进行框架重建。

$$\tilde{x} = \frac{2}{M} \sum_{k=1}^M \langle x, \varphi_k \rangle \varphi_k^T, \quad \varphi_k^T \text{ 是 } \varphi_k \text{ 的转置} \quad (4)$$

当丢失发生时, 若 $y_k = \langle x, \varphi_k \rangle$ 丢失, 意味着框架操作符的第 k 行 φ_k 与信号 x 的内积丢失。在框架重建之前, 首先利用框架分量的线性相关性对丢失分量进行恢复。若 φ_k 可以写为框架操作符其他行的有限线性组合 $\varphi_k = \sum_i \varphi_i$ 。那么相应的有 $\langle x, \varphi_k \rangle = \sum_i \langle x, \varphi_i \rangle$ 。则丢失的 y_k 可以从接收到的信息的线性组合中恢复。

对于式(3)框架, 有

$$\sum_{i=1}^M \varphi_i = \sum_{k=1}^M \cos\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right) + \sum_{k=1}^M \sin\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right)$$

且 $\sum_{k=1}^M \cos\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right) = 0, \sum_{k=1}^M \sin\left(\alpha + \frac{k-1}{M}2\pi\right) = 0$ 。所以 $\sum_{i=1}^M \varphi_i = 0$, 那么自然有 $\varphi_k = -\sum_{i, i \neq k} \varphi_i, 1 \leq i \leq M, i \neq k$, 得到

$$\langle x, \varphi_k \rangle = -\sum_{i, i \neq k} \langle x, \varphi_i \rangle, 1 \leq i \leq M, i \neq k \quad (5)$$

对于 M 为偶数的框架, 因为 $\cos \alpha + \cos(\pi + \alpha) = 0$,

$\sin \alpha + \sin(\alpha + \pi) = 0$ 。所以 当 $\left| \left(\alpha + \frac{k_1-1}{M}2\pi \right) - \left(\alpha + \frac{k_2-1}{M}2\pi \right) \right| = \pi$ 时, 有 $\varphi_{k_1} + \varphi_{k_2} = 0$, 此时 $|k_1 - k_2| = M/2$, 得到

$$\langle x, \varphi_k \rangle = -\langle x, \varphi_i \rangle, \quad i = k \pm M/2 \quad (6)$$

本文所构造的均匀紧支框架具有良好的差错恢复性能。当 M 为奇数和偶数时, 接收端分别采用式(5)和式(6)所示的线性关系, 从接收到的信息中恢复出丢失的系数。

3 基于框架扩展的多描述图像编码

3.1 小波零树结构

小波零树结构是一个自然的数据分割单位, 两层小波变换的零树结构如图 1 所示。低频子带 LL2 在 LH2, HL2, HH2 高频子带中各有一个孩子系数, LH2, HL2, HH2 高频子带分别在相对应的高频子带中各有 4 个孩子系数。本文按照小波零树的结构对系数进行扫描, 形成框架扩展的基本运

算单元：首先由一棵或几棵小波零树构成一个基本的数据单元。在这个数据单元中，按照其系数所属子带的不同选择不同维度的框架进行扩展。然后将这个数据单元中所有数据的框架扩展分量仍然按照零树的顺序组织起来，得到框架扩展后的数据单元。

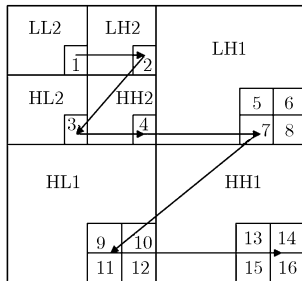


图1 两层小波变换的零树结构

3.2 多描述编码

对于图像信息而言，其低频信息和高频信息的重要程度显然是不一样的。低频信息从很大程度上决定了图像的视觉恢复效果。本文所提出的基于框架扩展的多描述图像编码方法通过在由小波零树构成的基本运算单元内，对不同子带信息进行不同维度的框架扩展来实现对低频信息的优先保护。该方法的编解码结构框架如图2所示，编码和解码的具体策略分析如下：

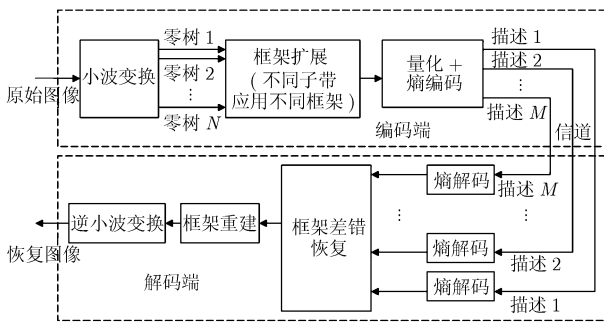


图2 本文方法的编解码结构框架

编码端：采用式(3)所示的均匀紧支框架，按照第二章所述方法分别构造由2维空间扩展到不同维度的框架。框架扩展的基本运算单位由零树信息组成，低频子带进行较高维度的扩展，以获得更多冗余；高频子带则进行较低维度扩展，不引入过多冗余以提高编码效率。框架扩展之后，具体的多描述分包方法为：假设编码为M个描述，那么在所有框架扩展后的基本数据单元中，每隔M个系数抽取一个系数形成一个描述。由此将所有的框架扩展数据单元分为M个描述。然后对每个描述进行量化和熵编码，得到M个多描述码流在差错信道上传输。

解码端：在解码出框架扩展分量后，解码端首先利用式

(5)和式(6)所示的框架分量线性关系对丢失信息进行差错恢复。然后再进行框架重建，将数据恢复到小波域。逆小波变换后，得到恢复图像。本文构造的框架为均匀紧支框架，可实现量化噪声下均方误差意义上最优的重建。

4 实验结果与分析

采用256×256的标准灰度LENA图像进行差错信道下的仿真测试。首先采用‘Daubechies 9/7’小波对图像进行两层离散小波变换。然后在由两棵小波零树形成的基本运算单元中，对不同子带信息进行不同维度的框架扩展。对低频子带LL2采用F(8×2)框架进行扩展，对其他高频子带则根据编码要求选择较低维框架进行扩展。实验中考虑两种信道差错情况：(1)描述要么理想接收，要么完全丢失；(2)每个描述均遭受一定程度的误码影响。

图3显示了在第(1)种信道差错情况下，本文方法分别接收到8个描述，6个描述，5个描述和4个描述下的接收端最大概率恢复图像，此时总码率为1.00bpp，描述个数为8，总的冗余为30%。随着描述的丢失，图像恢复质量缓慢降级，主要是高频细节信息丢失，而低频信息基本得到了较好恢复。由图3可看出，即使在丢失了一半描述的情况下，恢复图像仍然保持了可接受的视觉恢复效果。



图3 编码为8个描述，总码率为1.00bpp，本文方法接收到不同个数描述接收端恢复图像

在第(2)种信道差错情况下，将本文多描述编码与单描述编码(SDC)进行图像差错恢复性能比较，如图4所示。设定总的编码码率为1.25bpp。多描述编码为8个描述，分别通过框架扩展添加10%和30%的冗余。单描述编码不添加任何冗余，编码后通过一个信道进行传输。由图4可知，在低误

码率时，单描述编码的图像恢复质量比多描述编码略高，这是因为没有冗余的单描述编码具有更高的编码效率。但随着信道误码率的增加，单描述编码的恢复图像质量迅速下降，而多描述编码则表现出了很好的抗误码性能。

将本文方法与文献[10]中的过采样滤波器组框架以及文献[12]所构造的框架进行差错信道下的多描述编码性能比较。过采样滤波器组框架采用文献[10]中所述的分包方法形成数据包，再将数据包分为多个描述。对于文献[12]的框架，我们同样以小波零树为基本单元进行扩展形成多描述。设定总的编码码率为 1.5bpp，总的冗余量为 30%，将数据分包为 8 个描述。当信道工作在第(1)种差错状态下，接收端接收到的不同个数描述的恢复图像 PSNR 如图 5 所示。由图 5 可知，相比于过采样滤波器组框架^[10]，本文方法的图像恢复质量更优，并且图像质量随描述丢失的降级比较平缓。这主要是因为以小波零树结构对数据进行分包，可以避免按照子带进行数据分包时，低频子带信息连续丢失对图像恢复所造成的严重影响。本文方法与文献[12]中的框架在描述丢失下的恢复图像降级趋势比较接近，但是本文方法的图像恢复质量在各个描述丢失率下，都优于文献[12]中的框架。这说明本文方法给图像低频信息提供了更好的抗差错性能。

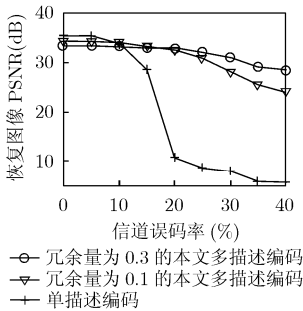


图 4 本文方法的多描述和单描述图像差错性能比较

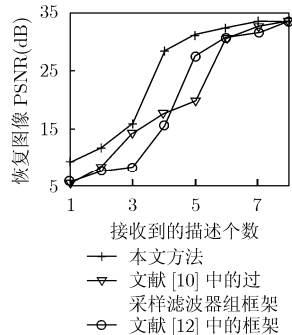


图 5 本文方法与文献[10]中的过采样滤波器组框架，文献[12]所构造框架在第(1)种信道差错状态下的多描述编码性能比较

当信道工作在第(2)种差错状态下，每个描述码流均遭受一定程度的误码影响。由图 6 可知，本文方法在各个信道误码率下均表现出了比文献[10]和文献[12]中框架更为优越的差错恢复性能。在低误码率情况下，本文方法的恢复图像 PSNR 几乎没有下降。直到误码率达到 15%以上，图像恢复质量才发生缓慢的下降。相比于文献[10]和文献[12]中的框架，本文方法的优越性表现在较大误码性下的差错鲁棒性。当信道误码率达到 40%时，文献[10]和文献[12]中框架的恢复图像 PSNR 仅为 13.3874dB 和 22.1176dB 时，本文方法的恢复图像 PSNR 仍能达到 30dB 以上。实验结果充分说明：差错信道下，本文基于框架扩展的多描述图像编码具有比之前

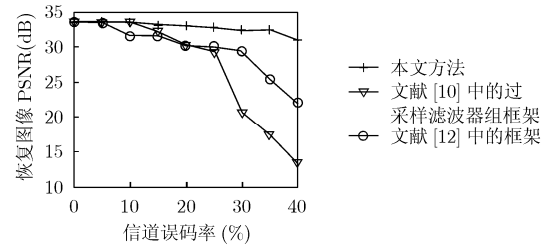


图 6 本文方法与文献[10]中的过采样滤波器组框架，文献[12]所构造框架在第(2)种信道差错状态下的多描述编码性能比较

几种基于框架扩展的方法更好的图像差错恢复性能。

5 结束语

本文采用框架扩展产生多描述编码码流，以实现差错信道下图像信息的鲁棒性传输。我们首先构造一种均匀紧支框架，该框架可以实现量化噪声下均方差意义上的最优框架重建，且具有很好的差错恢复性能。然后，以小波零树为基本单元进行框架扩展。按照系数所属子带的不同，采用不同维度的框架进行扩展，从而对不同的子带信息提供不同的保护。实验结果证明：较之于其他几种基于框架扩展的多描述编码方法，本文方法在差错信道下具有更好的鲁棒性。我们的进一步研究计划是将所构造框架应用到多描述视频编码中。

参考文献

- [1] Goyal V K. Multiple description coding: Compression meets the network. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001, 18(5): 74-93.
- [2] Vaishampayan V A. Design of multiple description scalar quantizers. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1993, 39(3): 821-834.
- [3] Wang Y, Orchard M T, and Reibman A. Multiple description image coding for noisy channels by pairing transform coefficients. *IEEE First Workshop on Multimedia Signal Processing*, Princeton, NJ, 1997: 419-424.
- [4] Goyal V K, Kovacevic J, Aream R, and Vetterli M. Multiple description transform coding of images. *Proc. of ICIP'98*, Chicago, IL, 1998, 1: 674-678.
- [5] Goyal V K, Vetterli M, and Thao N T. Quantized overcomplete expansions in IR^N : Analysis, synthesis and algorithms. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998, 44(1): 16-31.
- [6] Goyal V K, Kovacevic J, and Vetterli M. Multiple description transform coding; robustness to erasures using tight frame expansions. *Proc. of International Symposium on Information Theory' 98*, Cambridge, MA, 1998: 408.
- [7] Goyal V K, Kovacevic J, and Vetterli M. Quantized frame expansions as source-channel codes for erasure channels. *Proc.*

- of DCC'99, Snowbird, UT, 1999: 326-335.
- [8] Kovacevic J, Dragotti P L, and Goyal V K. Filter bank frame expansions with erasures. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(6): 1439-1450.
- [9] Dragotti P L, Kovacevic J, and Goyal V K. Quantized oversampled filter banks with erasures. Proc. of DCC'2001, Snowbird, UT, 2001: 173-182.
- [10] Motwani R and Guillemot C. Tree-structured oversampled filterbanks as joint source-channel codes: Application to image transmission over erasure channels. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(9): 2584-2599.
- [11] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992: 56-101.
- [12] Goyal V K, Kovacevic J, and Kelner J A. Quantized frame expansions with erasures. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2001, 10(3): 203-233.
- 赵小青: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为图像与视频编码传输.
- 倪 林: 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 目前研究方向为视觉信息处理、生物特征识别等, 发表论文 50 余篇.