

# 子带图象编码系统中对称扩展方法的研究

陆系群 陈 纯

(浙江大学玉泉校区计算机科学系, 杭州 310027)

**摘 要** 在子带图象编码系统中, 有限长度信号序列(如图象信号), 存在由线性卷积引起的边界扩展效应. 传统方法一般用圆卷积和对称扩展方法来减弱边界扩展效应, 但实验结果表明边界还存在失真. 为此, 按序列中每个周期的长度和对称中心的位置不同, 将对称周期序列分为 4 种情况, 并分别研究它们在图象子带编码中的对称扩展方法. 实验结果表明, 按这种对称扩展方法能使重构信号在边界处不存在任何失真.

**关键词** 图象子带编码 线性相位完全重构分析/综合滤波器阵列 对称扩展

**中图分类号**: TN919.8 **文献标识码**: A **文章编号**: 1096-8961(2001)12:1170-05

## Research on Symmetric Extension in Subband Image Coding Systems

LU Xi-qun, CHEN Chun

(Department of Computer Science, Yu Quan Campus of Zhe Jiang University, Hang Zhou 310027)

**Abstract** In a subband image coding system, due to the non-ideal characteristics of the analysis/synthesis filters and the decimation/interpolation operations, the reconstructed signal, in general, suffers from magnitude/phase distortions and aliasing errors. For finite-length sequences (e. g. the image signals), besides the above errors, there is an additional error—the expansive effect around the borders due to linear convolution. Though the conventional symmetric extension and circular convolution are applied, the experiments show that the border distortion still exists in the reconstructed signal. The symmetric extension method is further studied in this paper and extended to the  $M$ -channel linear-phase perfect-reconstruction filter banks. In this paper, different symmetric sequences are formulated in a unified form based on the circular-symmetry framework. According to the period and the symmetric center of symmetric periodic sequences, four permissible types of symmetric extension are derived. The experiment shows that the reconstructed signal is free from distortion.

**Keywords** Subband image coding, Linear-phase perfect-reconstruction analysis/synthesis filter banks, Symmetric extension

## 0 引 言

图象子带编码系统中将输入图象信号  $x(n)$  通过分析滤波器阵列  $H_k(z)$  ( $0 \leq k \leq M-1$ ) 后, 分解成  $M$  个子带信号; 这  $M$  个子带信号经过采样后被编码和传输; 在接受端, 这  $M$  个子带信号经过解码、插值, 最后通过一组综合滤波器阵列  $F_k(z)$  ( $0 \leq k \leq M-1$ ) 重构后得到输出信号  $x'(n)$ . 由于进行采样及分析/综合滤波器特性的非理想性, 如果不

考虑信号被编码后的量化失真, 重构信号  $x'(n)$  就存在幅度/相位失真、混迭失真. 对于无限长信号序列来说, 如果重构信号消除以上 3 种失真, 则该分析/综合滤波器阵列称为完全重构滤波器阵列.

由于人眼的视觉系统对图象信号的相位失真很敏感, 所以要求分析滤波器和综合滤波器具有线性相位. 如果一个滤波器具有线性相位, 那么必须满足如下条件

$$h(n) = \pm h(N-1-n) \quad (1)$$

其中,  $N$  为滤波器的长度. 至于如何设计完全重构

线性相位滤波器阵列可参见文献[1]~[4].

一般图象子带编码系统如图 1 所示.

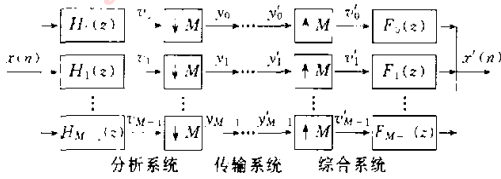


图 1 一般图象子带编码系统

由于图象是有限长度信号序列,所以除了上面所说的 3 种失真之外,还存在由线性卷积引起的信号边界扩展效应.假设输入信号  $x(n)$  的长度为  $N_x$ ,第  $i$  个分析滤波器  $H_i(z)$  的长度为  $N_H$ ,如果图 1 中的  $x(n)$  作线性卷积,则输出  $v_i(n)$  的长度为  $N_x + N_H - 1$ .表 1 给出了一张不同图象大小、不同通道数、不同滤波器长度时,图象信号经过滤波器线性卷积后象素增加的情况<sup>[1]</sup>.

表 1 由线性卷积引起的象素数增加情况

图象大小	通道数	滤波器长度	需编码的总象素数	增加的比例 (%)
256 × 256	4	8	69 169	5.5
256 × 256	4	16	73 441	12.1
512 × 512	4	8	269 361	2.7
512 × 512	4	16	277 729	5.9
512 × 512	16	32	366 025	59.6

从表 1 可以看出,如果采用线性卷积,那么输出图象的总象素数要比原始输入图象的总象素数有所增加,这种现象在图象压缩应用中是不允许存在的.文献[5]~[7]中采用了对称扩展方法和圆卷积方法来消除子带图象信号处理中图象信号边界溢出.传统的对称扩展方法一般采用下式

$$\begin{aligned}
 &x(n), & 0 \leq n \leq N_x - 1 \\
 \hat{x}(n) = &\begin{cases} x(2N_x - n - 1), & N_x \leq n \leq 2N_x - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

但在实验中发现,采用这种对称扩展方法虽然能有效地控制子带图象处理中图象信号边界的溢

出,但重构图象的边界却存在失真,也就是说,不能达到完全重构的目的.如图 2 中,标准 256 × 256 灰度图象“Lena”经过 2 通道子波分析/综合滤波器阵列,采用式(2)的对称扩展方法得到的重构图象在边界上就存在失真.



(a) 原始图象 (b) 重构图象

图 2 图象经过 2 通道子波分析/综合滤波器阵列采用一般对称扩展方法得到的 Lena 重构图象

从图 2 中可以看出,重构图象的底部边界和左边边界有失真.

基于以上对称扩展方法虽然能控制图象信号边界的溢出,但重构图象信号的边界仍存在失真的现象,对子带图象编码系统中对称扩展方法作了进一步研究,针对各种不同的对称序列,将图象子带编码中的对称扩展方法统一在一个理论框架中.

### 1 图象子带编码的对称扩展方法

由于线性卷积的缘故,图象子带编码系统中会出现边界扩展现象.为了解决图象边界溢出的问题,最简单的方法是采用截尾或加窗口处理,但是这样会引起图象边界出现误差.文献[7]采用了圆卷积方法,但圆卷积方法有一个缺点是会在图象边界引起不连续现象,在低比特率编码时对量化失真会较敏感.文献[5]中提出了对称扩展方法,但是一般对称扩展方法虽然能有效地控制图象边界的溢出,但是重构图象的边界还存在失真.基于线性相位完全重构滤波器阵列的图象子带编码的对称扩展方法<sup>[4]</sup>如图 3 所示.

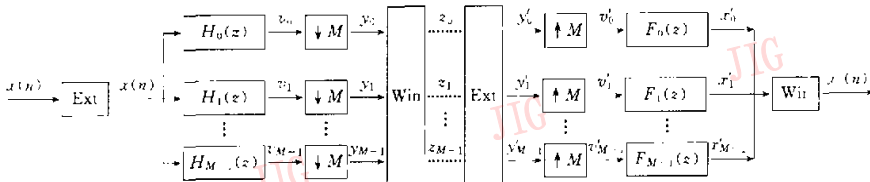


图 3 具有对称扩展方法的多通道分析/综合滤波器阵列

为了保证图象边界的连续性,输入信号  $x(n)$  首先扩展成对称信号  $\hat{x}(n)$ ,然后  $\hat{x}(n)$  作为输入和分析滤波器作圆卷积,因为分析滤波器阵列具有线性相位,所以分析滤波器  $H_c(z)$  为对称序列,输出信号  $v_c(n)$  也是对称序列;由于采样过程并不改变序列的对称性,所以采样器输出信号  $y_c(n)$  是对称序列,因此只需将  $y_c(n)$  中近一半的样值(依赖于序列的长度、对称和反对称性质)传输到接受端,在接受端假设事先知道  $y_c(n)$  的对称结构,就可以通过近一半的样值恢复  $y_c(n)$ 。在图3中,如果  $z_c(n)(0 \leq k \leq M-1)$  的总样本数和原始输入信号的像素点数保持一致,就能消除

图象信号边界溢出现象。

上面已经提到,为了消除图象信号边界溢出现象,除了采用对称扩展以外,还需以圆卷积代替线性卷积,为了更好地表示序列的对称性和周期性,将对称序列放在一个圆上表示,一般对称序列可以分为如图4所示的4种形式,A、B表示对称序列的长度为偶数的情况,C、D表示对称序列的长度为奇数的情况,图中箭头所指的地方是对称中心,所有的对称序列可以分为反对称序列(-1)和正对称序列(+1),可以看出当B、C、D序列为反对称序列时,对称中心的值应为0(即B中  $a=d=0$ ,C中  $c=0$ ,D中  $a=0$ )。

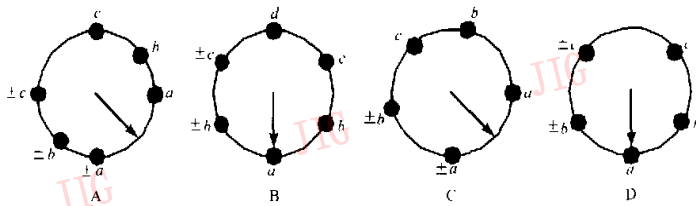


图4 4种圆对称序列

在图象子带编码系统中,一般来说,图象信号的长度远远长于滤波器序列的长度,所以在图3中  $\hat{x}(n)$  和分析滤波器  $H_c(z)$  作圆卷积时,以  $\hat{x}(n)$  的长度为基准,文献[8]中已证明了两个长度相等的序列作圆卷积后,输出序列的长度不变,对称特性由滤波器序列的对称特性决定,因为一般图象信号的对称特性是正对称,也就是说,图3中  $v_c(n)$  的长度与  $x(n)$  一样,对称特性由分析滤波器  $H_c(z)$  决定。

为了一般起见,假设输入原始信号  $x(n)$  的长度为  $N_1$ ,对称扩展信号  $\hat{x}(n)$  的长度为  $N_2$ ,它们之间满足下列关系

$$N_2 = 2N_1 + N_0 \quad (3)$$

其中,  $N_0$  为正整数,  $v_c(n)$  的长度  $N_3$  与  $\hat{x}(n)$  的长度一样,文献[1]已证明经过采样器,输出信号  $y_c(n)$  的长度  $N_4$  为  $N_3/M$ ,对称特性保持不变,表2列出了当  $y_c(n)$  为不同长度、不同对称特性序列时,输出序列  $z_c(n)$  的长度  $N_5$ 。

在表2中,当B、C、D序列为反对称序列时,由于对称中心的值为0,并假设接受端事先已知输出序列的对称特性,所以0值的样本不用传输。

为保证图象边界不溢出,  $z_c(n)(0 \leq k \leq M-1)$  的总样本数和原始输入信号的像素点数应保持一致,即  $\sum_{i=1}^M N_{5i} N_2 = 0$ 。针对前面4种对称序列和

表2 输出序列  $z_c(n)$  的长度  $N_5$

对称类型	对称特性	$N_5$
A	正对称	$N_4/2$
	反对称	$N_4/2$
B	正对称	$(N_4/2 + 1)$
	反对称	$(N_4/2 - 1)$
C	正对称	$(N_4/2 + 1)/2$
	反对称	$(N_4/2 - 1)/2$
D	正对称	$(N_4/2 - 1)/2$
	反对称	$(N_4/2 + 1)/2$

对称特性,分别讨论式(3)的形式。

(1) 对称序列类型A 正对称和反对称所需输出序列的长度是一样的。

$$\sum_{i=0}^{M-1} \frac{1}{2} N_{5i} = \sum_{i=0}^{M-1} \frac{2N_{5i} + N_2}{2M} = N_1, \text{ 即 } N_5 = 0 \quad (4)$$

(2) 对称序列类型B

正对称

$$\sum_{i=0}^{M-1} \left\{ \frac{1}{2} N_{5i} + 1 \right\} = \sum_{i=0}^{M-1} \left\{ \frac{2N_{5i} + N_2}{2M} + 1 \right\} = N_1$$

即  $N_5 = 2M$  (5)

反对称

$$\sum_{i=0}^{M-1} \left\{ \frac{1}{2} N_{5i} - 1 \right\} = \sum_{i=0}^{M-1} \left\{ \frac{2N_{5i} + N_2}{2M} - 1 \right\} = N_1$$

即  $N_5 = 2M$  (6)

(3) 对称序列类型 C

正对称

$$\sum_{n=0}^{M-1} \left( \frac{1}{2} N_x + \frac{1}{2} \right) = \sum_{n=0}^{M-1} \left( \frac{2N_x + N_0}{2M} + \frac{1}{2} \right) = N_x$$

即  $N = -M$  (7)

反对称

$$\sum_{n=0}^{M-1} \left( \frac{1}{2} N_x - \frac{1}{2} \right) = \sum_{n=0}^{M-1} \left( \frac{2N_x + N_0}{2M} - \frac{1}{2} \right) = N_x$$

即  $N = M$  (8)

(4) 对称序列类型 D 与类型 C 情况类似。

如果滤波器是类型 A 的对称特性,那么除了要求滤波器阵列具有线性相位完全重构的性质以外,没有其他对称性要求,但是如果滤波器具有其他 3 种对称类型,那么为了使整个对称扩展期间,  $N_0$  保持一致性,图象信号要作正对称扩展,  $v(n)$  的对称特性由分析滤波器的对称特性决定,由此可以得出所有的分析滤波器的对称特性必须保持一致,不论是哪种对称类型,都要求输入图象信号的大小必须是分析/综合滤波器阵列通道数的整数倍。

2 计算机模拟实验结果

实验中采用的分析滤波器的系数序列如表 3 所示,这组滤波器同样可用于传统小波对称扩展方法的实验中,由表 3 可以看出,这一组分析滤波器的两个滤波器的对称特性都是正对称,第 1 个滤波器的长度为 23,第 2 个滤波器的长度为 25,对称类型符合前面所描述的类型 D,所以  $N_0 = -2$ ,这里采用的对称扩展方式如下

$$\hat{x}(n) = \begin{cases} x(n), & 0 \leq n \leq N_x - 1 \\ x(2N_x - n - 2), & N_x \leq n \leq 2N_x - 3 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

重构图象如图 5 所示,从图中可以看出,重构图象没有任何失真。



(a) 原始图象 (b) 重构图象  
图 5 经过式(9)扩展后得到的 Lena 重构图象

表 3 分析滤波器序列

$h_0(n)$	$h_1(n)$
5.925 095 040 422 7e-03	1.041 695 743 668 7e-05
-1.568 316 798 689 4e-02	-2.765 211 145 369 3e-05
1.559 402 897 211 2e-03	8.256 264 894 771 2e-06
3.604 755 992 737 2e-02	-1.334 990 286 487 9e-05
-2.231 444 906 617 9e-02	-3.740 214 719 005 8e-05
-4.244 485 113 337 7e-02	9.942 616 312 845 9e-03
4.098 117 534 801 2e-02	5.282 253 195 079 3e-04
6.373 569 167 304 0e-02	-3.188 322 295 616 5e-02
-8.708 071 966 694 9e-02	-1.127 635 997 234 7e-03
-6.464 037 094 403 7e-02	9.510 012 297 700 5e-02
0.313 145 920 053 81	9.519 576 925 246 5e-04
0.313 145 920 053 81	0.310 421 744 323 19
-6.464 037 094 403 7e-02	0.310 421 744 323 19
-8.708 071 966 694 9e-02	-9.519 576 925 246 5e-04
6.373 569 167 304 0e-02	9.510 012 297 700 5e-02
1.098 117 534 801 2e-02	-1.127 635 997 234 7e-03
-4.244 485 113 337 7e-02	-3.188 322 295 616 5e-02
-2.231 444 906 617 9e-02	5.282 253 195 079 3e-04
3.604 755 992 737 2e-02	9.942 616 312 845 9e-03
4.559 402 897 211 2e-03	-3.740 214 719 005 8e-05
-1.568 316 798 689 4e-02	-1.334 990 286 487 9e-05
5.925 095 040 422 7e-03	8.256 264 894 771 2e-06
	-2.765 211 145 369 3e-05
	1.041 695 743 668 7e-05

3 结 论

在图象子带编码系统中,由于图象信号是有限长度信号,所以作线性卷积存在边界溢出现象,传统方法一般应用圆卷积和对称扩展方法,但实验结果表明,边界还存在失真,本文针对各种不同的对称周期序列进一步研究图象子带编码中的对称扩展方法,将图象子带编码中的对称扩展方法统一在一个理论框架中,在分析/综合滤波器阵列是线性相位完全重构的条件下,使得重构信号在边界处不存在任何失真。

参 考 文 献

- Vaidyanathan P P. Multirate systems and filter banks [M]. Englewood Cliffs, USA, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- Nguyen T Q, Vaidyanathan P P. Maximally decimated perfect-reconstruction FIR filter banks with pairwise mirror-image analysis (and synthesis) frequency responses [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing, 1998, ASSP-36(5): 693~706.

3. Scman A K, Vaidyanathan P P, Nguyen T Q. Linear phase paraunitary filter banks: theory, factorizations and applications [J]. IEEE Trans. On Signal Processing, 1993, 41(12): 3180~3496.

4. 陆系群, 陈纯, 余英林. 比较线性相位完全重构滤波器阵列在图象编码中的应用[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(6): 463~466.

5. Smith M J T, Eddins S L. Analysis/synthesis techniques for subband image coding [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing, 1990, ASSP-38: 1446~1456.

6. Karlsson G, Vetterli M. Extension of finite length signals for subband coding [J]. Signal Processing, 1989, 17(6): 161~168.

7. Woods J, O'Neil S. Subband coding of images [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing, 1986, ASSP-34: 1278~1288.

8. Chen L. Designed of linear phase paraunitary filter banks and finite length signal processing [D]. Hong Kong University, 1997.



**陆系群** 1969年生, 1997年获华南理工大学通信与电子系统专业博士学位, 现为浙江大学计算机系副教授. 主要研究方向为图象处理、人工神经网络与时间序列分析与预测、多通道分析/综合滤波器阵列理论与设计等.



**陈纯** 博士, 教授, 博士生导师, 浙江大学计算机软件研究所所长, 计算机系主任. 长期从事计算机图形图像处理、CAD/CAM、人工智能、CSCW等领域的教学和科研工作. 发表论文30余篇.

## “虚拟现实及其在工业中的应用”(VRAI'2002)国际会议

### 征文通知

“虚拟现实及其在工业中的应用”国际会议定于2002年4月10~12日在杭州召开. 会议由中国图象图形学学会主办, 由中国图象图形学学会虚拟现实专业委员会、杭州电子工业学院和浙江大学CAD&CG国家重点实验室联合承办. 会议将特邀国内外16位著名专家就虚拟现实及应用的最新动态和热点问题作专题报告. 大会优秀论文将推荐到IEEE CG & A, Computers & Graphics, The Visual Computer, IJVR, International Journal of CAD/CAM, JCST杂志上发表. 大会同时举办“虚拟现实及其应用”高级研讨班和“图形图象及虚拟现实产品”展览会, 欢迎投稿、参展和参加会议.

**征文范围为:**

Virtual Reality Algorithms	Artificial Life/Artificial Reality	VR in Game/Entertainment
Real-time/Time-critical Rendering	Avatars and Intelligent Agents	VR in Scientific Visualization
Multi-resolution Modeling	Augmented Reality	VR Application in E-Commerce
Image Based Modeling and Rendering	VR in Architecture Industry	VR in Education
Virtual Reality Developing Tools	VR in Manufacture Industry	Large-scale Simulation
Distributed Virtual Reality	VR in Aerospace Industry	Tele-presence and Robotics Simulation
Collaborative Virtual Environment	VR in Process Industry	Integration of VR and Multimedia
Intelligent Virtual Environment	VR in Automotive Industry	Integration of VR with CAD/GIS
Human Computer Interface	Medical Application of VR	Other Virtual Reality Applications
3D Auditory Rendering in VR		

**重要日期:**

征文截止日期: 2001年12月31日    录取通知日期: 2002年1月31日    照相版论文截止日期: 2002年2月15日

来稿请寄: vrai2002@cad.zju.edu.cn (电子版, DOC/RTF/PDF/PS)

会议网址和电子邮件地址: <http://www.cad.zju.edu.cn/VRAI2002>    <http://www.hzjee.edu.cn/VRAI2002>

会议联系人: 潘志庚 研究员 (Prof. Zhigeng Pan) 浙江大学CAD&CG国家重点实验室, 杭州, 310027

联系电话: 0571-87951045; 13957182360    传真: 0571-87951780    电子邮件: pzg@cad.zju.edu.cn

万健 博士 (Dr. Jian Wan) 杭州电子工业学院计算机分院, 杭州, 310037

联系电话: 0571-88809321; 13958085627    传真: 0571-88077232    电子邮件: wanjian@mail.hz.zj.cn