

## 基于矢量量化的模糊参数辨识及分辨率增强方法

乔建苹<sup>①②</sup> 刘 琚<sup>①</sup> 闫 华<sup>①</sup> 孙建德<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

<sup>②</sup>(北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室 北京 100871)

**摘 要:** 在实际的图像复原中通常需要预先估计模糊函数。该文将 Nakagaki 等人提出的基于矢量量化的模糊参数辨识算法进行改进, 利用 Sobel 算子形成特征矢量, 避免了 LOG 滤波器参数的选择, 增强了算法对辨识不同类型图像的模糊函数的鲁棒性, 并利用 DCT 对特征矢量降维, 减小了计算量。同时将其应用于超分辨率图像复原中, 辨识出多幅低分辨率图像的模糊函数, 然后融合具有不同模糊函数和信噪比的低分辨率图像, 实现了盲超分辨率图像复原。仿真结果表明了改进算法的有效性和可行性。

**关键词:** 图像复原, 盲超分辨率, 参数辨识, 矢量量化, Sobel 算子

中图分类号: TN391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)04-0592-05

## A VQ-Based Parameter Identification Approach to Blind Image Restoration and Resolution Enhancement

Qiao Jian-ping<sup>①②</sup> Liu Ju<sup>①</sup> Yan Hua<sup>①</sup> Sun Jian-de<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

<sup>②</sup>(National Laboratory on Machine Perception, Beijing University, Beijing 100871, China)

**Abstract** Blur identification is usually necessary in image recovery. In this paper, an improved approach is proposed on the basis of VQ-based blur identification algorithm developed by Nakagaki. In this method, Sobel operator is used for extracting feature vectors, so that the selection of the parameter of the LOG filter is avoided and this method is robust to different types of images. The dimensionality of the vector is reduced by utilizing DCT. Meantime, extension of this method to blind super-resolution image restoration is achieved. After blur identification, a super-resolution image is reconstructed from several low-resolution images obtained by different foci. Simulation results demonstrate the feasibility and validity of the method.

**Key words** Image recovery, Blind super-resolution, Parameter identification, Vector quantization (VQ), Sobel operator

### 1 引言

在图像记录过程中, 大气扰动、运动、错误聚焦及系统噪声等都会导致图像的模糊, 图像复原就是尽可能使退化图像恢复本来面貌。按照傅里叶光学的观点, 光学成像系统是一个低通滤波器, 因此传递函数在截止频率以外为零。为了恢复截止频率以外的信息, 使图像获得更多的细节就需要超分辨率图像复原技术。它在遥感图像、医学图像、高清晰度电视标准和合成视频变焦等领域都具有广泛的应用。

目前, 大多数图像复原技术都是假设点扩展函数(Point Spread Function, PSF)已知, 但在很多实际应用中, PSF 未知或仅知道其函数类型, 因此需要先从降质图像中辨识出

PSF再实施复原或者同时进行模糊辨识和复原。目前已有的 PSF辨识方法有同态滤波器法<sup>[1]</sup>, 功率谱法<sup>[2]</sup>以及GCV<sup>[3]</sup>等。2001年Panchapakesan<sup>[4]</sup>等提出了一种基于矢量量化的模糊参数辨识算法, 该算法假设PSF的类型已知, 且可由某一参数来表征, 利用矢量量化技术, 依照最小距离准则从一组候选参数中估计真实的PSF的参数。Nakagaki<sup>[5]</sup>等人在此基础上进行改进, 利用LOG滤波器和局部方差检测出原型图像的中间频率成分形成图像矢量。但该方法中 LOG 滤波器的参数是采用试探法选择, 且该参数随着图像类型的不同需要重新确定。

本文对 Nakagaki 的方法进行了改进, 首先用 Sobel 算子提取有用的频率成分, 避免了 LOG 滤波器参数的选择, 从而对辨识不同类型图像的模糊函数具有一定的鲁棒性; 其次, 在 DCT 域形成图像特征矢量, 降低了矢量空间的维数, 并对高频噪声有一定的抑制作用。同时将其应用于超分辨率

2004-07-14 收到, 2005-03-28 改回

山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(01BS04)和视觉与听觉信息处理国家重点实验室开放基金资助课题

图像复原中，辨识出多幅低分辨率图像的模糊函数，然后融合具有不同模糊函数和信噪比的低分辨率图像，实现了盲超分辨率图像复原。仿真结果表明改进算法对不同类型的图像均具有良好的辨识结果。

## 2 模糊参数辨识

传统的图像复原中，图像退化的数学模型可以描述为

$$y = x * b + e \quad (1)$$

式中  $y$ ， $x$ ， $b$  和  $e$  分别表示观测图像、原始图像、PSF 和加性噪声。由于大多数情况下 PSF 未知或仅知道其函数类型，所以图像复原首要的一步是辨识模糊函数，从而恢复原始图像。

### 2.1 基于矢量量化的模糊参数辨识方法<sup>[5]</sup>

矢量量化是在图像压缩领域中提出的一种方法，是指将图像分解成  $n$  维的图像矢量，然后按照一定的准则将矢量空间划分为若干区域，用每个区域中的一个代表性矢量代替该区域中的所有其它矢量。文献[5]将矢量量化应用于图像复原，用来辨识观测图像模糊函数的参数。算法分为码书设计和模糊函数的参数辨识两步。流程如图 1 所示：

算法中假设 PSF 的类型已知，且可用参数  $i$  来表征。首先根据经验设置模糊函数参数  $i$  的几个可能的取值，并选择与观测图像具有相同特征的同类图像为原型图像。用被不同参数的 PSF 模糊的原型图像设计相应的码书，组成码书集，设计流程如图 1(a)。辨识时将观测图像经同样的处理后形成图像特征矢量，计算所有矢量与码书集中各个码书的平均距离。距离最小的码书对应的参数即为观测图像 PSF 的参数，辨识过程如图 1(b)。

可以看出，能够有效辨识的关键在于形成的矢量能否反映该图像的特征。如果这些矢量不能代表图像的特征则不能有效辨识。

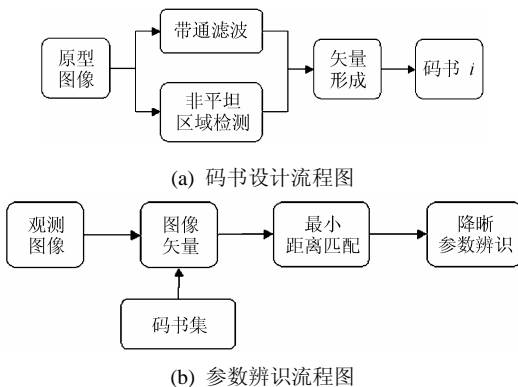


图 1 基于矢量量化的模糊参数辨识算法流程

### 2.2 算法改进

Nakagaki<sup>[5]</sup>等在设计码书时，使用 LOG 算子作为带通滤波器，然后根据局部方差检测出非平坦区域，用带通滤波后的图像中对应非平坦区域的那部分形成特征矢量。但是当 LOG 算子的参数选择不正确时，形成的矢量不能全部代表观

测图像的特征，因而不能进行有效的 PSF 参数辨识，并且辨识不同种类的图像时，需要再重新调整参数的取值。本文提出用 Sobel 算子对模糊后的原型图像(模糊参数为  $i$ )进行边缘检测，然后用 DCT 变换系数形成特征矢量，进行矢量量化。流程如图 2 所示。



图 2 改进算法流程

由于造成图像退化的 PSF 可以等效成低通滤波器，这样原始图像经过模糊后并未改变其低频(平坦)区域的内容，所以模糊图像的低频区域几乎不含有模糊函数的信息。因而 Sobel 算子作用后不会丢失有用信息。与 Nakagaki 方法中使用的 LOG 算子相比，Sobel 算子在检测边缘时可能会漏去一些细节，但它仍可以较精确地对边缘定位，且检测的边缘较宽，而在本文的方法中只需要通过滤波器得到含有体现各个  $h_i$  的不同的信息即可，这样使用 Sobel 算子可以最大程度地保留有用信息，且无需进行参数的选择。图 3 示出了模糊程度不同的图像经 Sobel 算子作用后的结果，其中图 3(a)和图 3(c)为模糊图像，模糊参数分别为  $i_1$ ， $i_2$ 。图 3(b)，3(d)分别为图 3(a)，3(c)经 Sobel 边缘检测的结果。可以看出模糊程度不同时，检测结果不同。这说明 Sobel 算子作用后产生的图像包含了模糊函数  $h_i$  的信息，它是本文方法能有效进行模糊辨识的基础。

改进后的算法对不同类型的图像形成特征矢量时无需参数的选择，因而具有一定的鲁棒性。算法中码书的设计需要较长时间，实际中可先设计好码书，存入数据库，那么给定一幅观测图像就可以很快地辨识出 PSF。理论上，只要码书中包含有足够全面的可代表各种边缘变化的特征矢量，就可对任意一幅图像进行辨识。但实际中，这样的码书太大，给设计和辨识带来很大的计算量，因而此方法更适用于同类图像模糊函数的辨识。

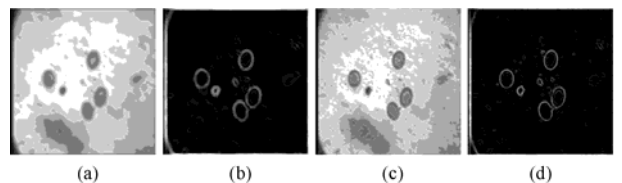


图 3 边缘检测结果比较

## 3 盲超分辨率图像复原

超分辨率图像复原是指由一系列低分辨率变形图像来估计一幅较高分辨率的非变形图像，同时还能够消除加性噪声以及由有限检测器尺寸和光学元件产生的模糊。其数学模型一般采用如下形式描述：

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 & H_1 & F_1 \\ \vdots \\ D_N & H_N & F_N \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix} X + E \Leftrightarrow Y = BX + E \quad (2)$$

其中  $B_k = D_k H_k F_k$ ,  $Y_k$  表示第  $k$  幅的低分辨率(Low Resolution, LR)图像;  $D_k$ ,  $H_k$ ,  $F_k$  分别表示第  $k$  幅 LR 图像对应的欠采样因子、模糊函数和几何变换;  $X$  表示未知的超分辨率(Super Resolution, SR)图像。  $E$  表示高斯白噪声。要重建出超分辨率图像,低分辨率图像间需含有类似但不完全相同的信息,这种不同可来源于许多方面,如相机的移动、变焦等。因此当生成 LR 图像的过程中成像系统的特性不同时,即使图像间没有相对移动也可以进行超分辨率图像复原,此时  $F_k$  为单位矩阵,各个  $H_k$  互不相同。本文采用了这种没有相对移动模型。

### 3.1 混合 ML/MAP/POCS 方法

文献[6]给出了一种混合 ML/MAP/POCS 的超分辨率图像复原方法。该算法中假设 PSF 已知。

定义式(2)中高斯随机向量  $E$  的自相关函数为

$$E\{EE^T\} = \begin{bmatrix} R_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & R_N \end{bmatrix}^{-1} = R^{-1} \quad (3)$$

利用 ML/MAP 和 POCS 中的非椭圆约束将超分辨率图像复原转化为一个凸优化问题:

$$\min \varepsilon^2 = \left\{ [Y - BX]^T R [Y - BX] + \alpha [SX]^T V [SX] \right\}, \quad (4)$$

服从  $\{X \in C_k, 1 \leq k \leq M\}$

其中  $S$  是 Laplace 算子,  $V$  是加权矩阵,用于控制图像的平滑度,  $\alpha$  是规整化参数,  $C_k$  表示附加约束,  $M$  为约束凸集的个数。

### 3.2 盲超分辨率图像复原方法

由式(2)可看出,传统的图像复原是超分辨率图像复原的特例,其最大区别是超分辨率复原中存在欠采样问题。因此传统的图像复原问题的解决方案可运用到超分辨率图像复原中。

我们先采用矢量量化进行模糊辨识,然后用于超分辨图像复原。整个的模糊参数辨识及超分辨图像复原算法描述如下(假设 PSF 的类型已知,且可用参数  $i$  来表征):

#### 第一阶段 码书的设计

步骤 1 根据经验设置模糊函数参数的几个可能的取值,并选择与低分辨率图像具有相同特征的同类图像为原型图像。

步骤 2 按照低分辨率图像的成像过程,用设置的几个模糊函数分别对原型图像进行模糊和欠采样,欠采样因子由分辨率提高的要求和原型图像决定。

步骤 3 对这些图像进行 4 邻点(bilinear)或 8 邻点(bicubic)双线性插值。

步骤 4 经 Sobel 算子进行边缘检测后,对图像分块进行 DCT 变换,在变换域形成图像特征矢量。

步骤 5 用 LBG 算法进行矢量量化<sup>[7]</sup>,得出对应的码书,

组成码书集(每个码书与步骤 1 中设置的参数取值一一对应)。

#### 第二阶段 参数辨识

将低分辨率图像与上述步骤 3 同样的插值方式插值、边缘检测及 DCT 后形成特征矢量,计算所有矢量与码书集中各个码书的平均距离。距离最小的码书对应的参数即为低分辨率图像的模糊参数。

辨识出每一帧 LR 图像的模糊函数后,利用 3.1 节所述混合 ML/MAP/POCS 方法重建出超分辨率图像。为了提高运算速度,对式(4)的求解采用子序列子集共轭梯度最优化迭代算法<sup>[8]</sup>求取最优解。

## 4 计算机仿真

为了说明上述算法的有效性,我们分别对 3 类图像进行仿真实验:天文图像、医学图像和自然图像。实验中考虑了模糊函数为高斯和散焦两种情况。

### 4.1 传统图像复原中的改进算法仿真

设模糊函数类型为散焦函数,由散焦半径  $r_i$  唯一确定。针对不同的图像噪声来源,分别在模糊图像中加入了不同类型的噪声,例如,遥感图像中普遍存在的椒盐噪声,医学成像、CCD 成像中可能出现的高斯白噪声和泊松噪声<sup>[9]</sup>等。下面给出了部分仿真结果。图 4 为天文图像的例子,图 4(a)为用于码书设计的原型图像,图 4(b)–4(e)分别为加入了不同类型的噪声的待辨识的观测图像,实验中设置模糊函数参数候选集为  $r = \{2.4 \ 2.6 \ 2.8 \ 3.0 \ 3.2 \ 3.4 \ 3.6 \ 3.8 \ 4.0\}$ 。图 5 为医学图像的例子,参数候选集设置为  $r = \{2.0 \ 2.5 \ 3.0 \ 3.5 \ 4.0 \ 4.5 \ 5.0\}$ 。辨识结果分别如图 4(f)和图 5(f),图中横轴为设置的模糊函数参数(即散焦半径)的可能的取值,纵轴为观测图像形成的特征矢量与码书集中每个码书之间的平均距离。曲线最低点对应的横坐标即为辨识出来的观测图像的散焦半径。图 4(g)和图 5(g)均为辨识出模糊函数的参数后,用约束最小二乘方法复原的结果,可以明显看出复原图像的灰度边缘。

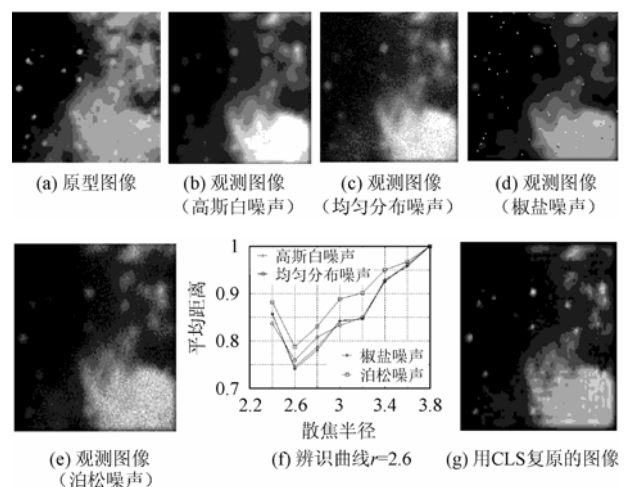


图 4 天文图像

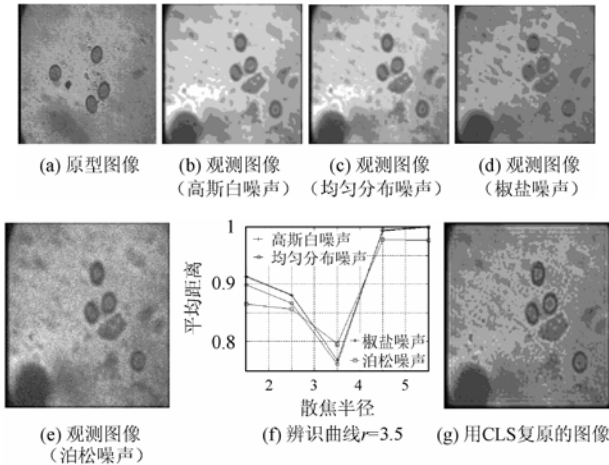


图 5 医学图像

实验中为了增强算法对不同类型的噪声的适应性，根据实际情况对观测图像进行了预处理。为了兼顾算法的有效性和实时性，针对随机脉冲噪声，我们采用了中值滤波预处理。中值滤波是一种去除噪声的非线性处理方法，在去除噪声的同时可以保护图像的边缘。因而不会对辨识结果产生负面影响。对于泊松分布的噪声，它和热噪声一样具有很宽的频谱，属于白噪声<sup>[9]</sup>，可以使用多帧叠加平均预处理。当然也可以采用其他更好的既可以去噪又同时保护边缘的去噪方法。而对于高斯噪声，即使不进行预处理，也能得到正确辨识。一方面由于Sobel算子可以抑制噪声的影响，另一方面，在形成码书时，只取了DCT变换后的低频或中低频系数，对噪声也有一定的抑制作用。由图 4(f)和图 5(f)可以看出，对于加入不同类型噪声的情况均能得到正确辨识。



图 6 自然图像

本算法能进行正确辨识的关键在于码书的设计，即用于码书设计的原型图像需含有与观测图像相似的特征矢量。作为观测图像是自然图像的码书设计的例子，图 6 示意出了用于码书设计的原型图像和待辨识的观测图像。在对待辨识图像 LENA 辨识时，原型图像 HOUSE 图像中包含了 LENA 图像背景中的直线特征，而 PEPPER 和 GIRL 则包含了 LENA 图像中曲线的特征。如果仅用 PEPPER 和 GIRL 作为原型图像则不能进行有效辨识。并且码书中包含的矢量越全面，辨识效果越好。从这里可以看出本文的方法比较适用于辨识同类图像。

为了减小运算量，增强算法对噪声的鲁棒性，在矢量形成过程中，利用离散余弦变换进行降维。值得一提的是，特征矢量维数的选择应适中，其大小与图像的类型有关，比如对于图 5 所示的高频成分较少的医学图像，由于大部分都是

平坦区域，所以此时矢量的维数可由  $8 \times 8 = 64$  减少到 6，降低了 90% 左右。而对于图 6 所示的自然图像，细节较丰富，所以矢量的维数要大一些。

另一方面，当实际的模糊函数的参数不恰好落在设置的候选参数集内时，得到的辨识结果为与实际参数最相近的候选参数，这时要使结果满足一定的精度，可将参数步长变小，重新在较小范围内进行辨识，以得到较精确的结果。

### 4.2 盲超分辨率图像复原

下面的仿真中设定散焦半径候选参数为  $r = \{2 \ 2.5 \ 3 \ 3.5 \ 4 \ 4.5 \ 5 \ 5.5\}$ 。图 7(a) - 7(d) 为 4 幅待辨识的低分辨率图像，是由一幅高分辨率图像经过变焦模糊(用具有不同散焦半径的散焦函数来模拟)和亚采样(sample=2)产生，每幅的大小是  $128 \times 128$ 。原型图像同图 6(a) 所示。

为了观察噪声的影响，分别对降晰图像加入了不同程度的高斯白噪声，其模糊信噪比分别为  $BSNR = 20\text{dB}$ 、 $30 \text{ dB}$  和  $\infty\text{dB}$ 。采用 3.2 所述方法分别对 4 幅低分辨率图像进行模糊参数辨识，辨识曲线如图 8 所示。



图 7 (a) - (d) 为 4 幅 LR 图像 (e) 为采用混合 ML/MAP/POCS 方法重建出的高分辨率图像

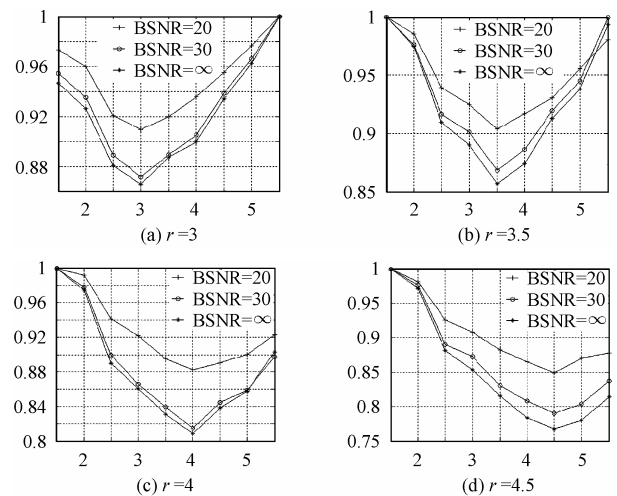


图 8 参数辨识曲线

图 8(a) - 8(d) 分别为对 4 幅低分辨率图像的辨识结果。

从图中可以看出,不同的信噪比下都能得到正确辨识。但信噪比越大,曲线越尖锐,越容易辨识。辨识出低分辨率图像的 PSF 后,经子序列子集共轭梯度最优化迭代算法重构出一幅高分辨率图像。采用上述 4 幅 LR 图像重建出的高分辨率图像如图 7 (e)所示,其大小是  $256 \times 256$ ,分辨率提高 2 倍。对于模糊函数为高斯函数的情况(其函数由方差唯一确定),同样可以得到有效辨识。

## 5 结束语

本文对 Nakagaki 等人提出的基于矢量量化的模糊参数辨识算法进行了改进,Sobel 算子的使用避免了 LOG 滤波器参数的选择,增强了算法对不同类型图像辨识的鲁棒性,并利用 DCT 对特征矢量降维,有效降低了矢量空间的维数。同时将其应用于超分辨率图像复原中,辨识出多幅低分辨率图像的模糊函数,然后融合具有不同模糊函数和信噪比的低分辨率图像,实现了盲超分辨率图像复原。仿真结果表明,改进后的算法在传统的图像复原及超分辨率图像复原的模糊参数辨识中均能得到很好的辨识效果。但该算法在分辨率增强倍数要求较高的情况下,不能得到有效结果,这是下一步要研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Stockham T G, Cannon T M, Ingebretsen R B. Blind deconvolution through digital signal processing. *Proc. of IEEE*, 1975, 63(4): 678 – 692.
  - [2] Cannon M. Blind deconvolution of specially invariant image blurs with phase. *IEEE Trans.on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1976, 24(1): 58 – 63.
  - [3] Reeves S, Mersereau R. Blur identification by the method of generalized cross-validation. *IEEE Trans.on Image Processing*, 1992, 1(3): 301 – 311.
  - [4] Panchapakesan K, Sheppard D G, Marcellin M W, et al.. Blur identification from vector quantizer encoder distortion. *IEEE Trans.on Image Processing*, 2001, 10(3): 465 – 470.
  - [5] Nakagaki R, Katsaggelos A K. A VQ-based blind image restoration algorithm. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(9): 1044 – 1053.
  - [6] Elad M, Feuer A. Restoration of a single super-resolution image from several blurred, noise, and undersampled measured images. *IEEE Trans.on Image Processing*, 1997, 6(12): 1646 – 1658.
  - [7] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design. *IEEE Trans. on Communications*, 1980, 28(1): 84 – 95.
  - [8] 刘良云,李英才,相里斌.超分辨率图像重构技术的仿真实验研究. *中国图像图形学报*, 2001, 7(6): 629 – 635.
  - [9] 邹异松.电真空成像器件及理论分析.北京:国防工业出版社, 1989: 230 – 250.
- 乔建萃: 女, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为多媒体信号处理。  
 刘 琚: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为盲信号处理、通信信号处理、多媒体信号处理等, 发表论文 80 余篇。  
 闫 华: 女, 1973 年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理技术。  
 孙建德: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为多媒体信号处理、数字水印技术, 发表论文 10 余篇。