

基于 DST 的实值离散 Gabor 变换

武 杰,陶 亮,王华彬,姜 雪

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室,安徽 合肥 230039)

摘 要: Gabor 变换已被公认为是通信和信号处理中信号与图像表示的最好的方法之一,一直以来对 Gabor 变换的研究和应用实际上是基于 Fourier 变换的复值 Gabor 变换,因此这里对实值 Gabor 变换进行了研究。采用双正交分析方法,定义了一种基于离散正弦变换(DST)的实值离散 Gabor 变换(RDGT),该变换不仅适用于临界抽样条件而且适用于过抽样条件,并证明了变换的完备性条件(即该变换中综合窗与分析窗的双正交条件),该实验结果也验证了变换的完备性。针对实值信号,该变换由于仅涉及实值运算,并可利用快速 DST、IDST 算法来加速变换,因此比传统复值离散 Gabor 变换在计算、实现方面更为简单。在实际应用中,将更方便于软件和硬件的实现。

关键词: 离散余弦变换;离散 Gabor 变换;Gabor 变换系数

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)05-0118-05

DST - Based Real - Valued Discrete Gabor Transform

WU Jie, TAO Liang, WANG Hua-bin, JIANG Xue

(Ministry of Education Key Laboratory of Intelligence Computing and
Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: Gabor transform is recognized as one of the best methods for the expression of signal and image in the communication and signal processing. As all through the study and application to Gabor transform is complex-valued based on Fourier transform, now perform research to real-valued Gabor transform. A real-valued discrete Gabor transform (RDGT) based on the discrete sine transform (DST) for finite sequences is proposed in this paper, which can be applied to both the critical sampling condition and the over-sampling condition. The biorthogonal relationship between the analysis window and synthesis window for the transform is also proved in this paper and biorthogonality of the RDGT is validated by result of experiment. Because it only involves real operations and can utilize fast DST and IDST algorithms for fast computation, it is easier in computation and implementation by hardware or software compared to the traditional complex-valued discrete Gabor transform. It is much more convenient for the realization of hardware and software in practice.

Key words: discrete sine transform; discrete Gabor transform; coefficients of Gabor transform

0 引言

自 1946 年, Gabor 变换已被公认为是通信和信号处理中信号与图像表示的最好的方法之一^[1]。然而, Gabor 变换的计算复杂性很高, 实时应用受到很大限制。随着计算机技术的发展, 在实际应用中, 人们逐步认识到需要将 Gabor 变换离散化来解决这一问题。直到近二十年来离散 Gabor 变换提出后, 计算 Gabor 变换系数方法才有所突破。Gabor 变换的研究方法也就逐步丰富起来, 主要有以 Bastiaans^[2]、Wexler^[3] 等人为

代表的双正交分析法, Morris 等人为代表的框架理论^[4], Daugman 等人提出的神经网络方法^[5]等。

综观 Gabor 变换的研究历史, 注意到传统的 Gabor 变换是复值形式的, 是在复值 Fourier 变换基础上通过引入能够时移和频移的一系列基函数而产生的, 对实值 Gabor 展开与变换的研究几乎空白。尽管 Gabor 在 1946 年文献[1]中也提出了在连续余弦变换基础上引入实值 Gabor 展开, 1995 年文献[6]又将其离散化, 但对这种基于离散余弦变换的实值 Gabor 展开的研究很不充分, 例如, 其完备性条件如何等问题没有得到解决, 基于离散余弦变换的实值 Gabor 展开的研究文献也是寥寥无几。因此半个世纪对 Gabor 变换的研究和应用实际上是以基于 Fourier 变换的复值 Gabor 变换为主导地位的。

基于上述分析, 近年来在国家自然科学基金等资

收稿日期: 2007-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572128); 安徽省人才开发资金(2005Z029); 安徽大学人才队伍建设项目和创新团队基金

作者简介: 武 杰(1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字信号与图像处理、模式识别; 陶 亮, 教授, 博导, 研究方向为模式识别、多维信号处理等。

金项目的支持下,对实值 Gabor 变换进行了研究,研究了在离散 Hartley 变换(DHT)、离散余弦变换(DCT)和离散正弦变换(DST)基础上通过引入能够时移和频移的一系列基函数而产生的三种实值离散 Gabor 变换,并已在在前两种变换方面取得了一系列理论与应用成果^[7-9]。

文中介绍了基于 DST 的实值离散 Gabor 变换及快速算法,证明了该变换的完备(存在)性。针对实值信号,该变换由于仅涉及实值运算,并可利用快速 DST, IDST 算法来加速变换,因此比传统复值离散 Gabor 变换在计算、实现方面更为简单。

1 基于 DST 的有限长序列实值离散 Gabor 变换

设 $x(k)$ 表示由一个有限长实序列拓展成周期为 L 的实序列,实值离散 Gabor 展开定义为:

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \tilde{h}_{m,n}(k) \quad (1)$$

展开系数 $a(m, n)$ 可从下式获得:

$$a(m, n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k) \tilde{\gamma}_{m,n}(k) \quad (2)$$

此式定义为实值离散 Gabor 变换(RDGT)^[7,8],因此,实值离散 Gabor 展开为实值离散 Gabor 变换的逆变换,展开式(1)即为信号的重建式。上式中

$$\tilde{h}_{m,n}(k) = \tilde{h}(k - m\bar{N}) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \quad (3)$$

$$\tilde{\gamma}_{m,n}(k) = \tilde{\gamma}(k - m\bar{N}) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \quad (4)$$

$$g_n = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & n = 0, N \\ 1 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\text{mod}(n, N)$ 、 $\text{mod}(k, N)$ 分别代表 n 、 k 对 N 的求余运算; $L = \bar{N}M = N\bar{M}$, M 和 N 分别为时频域中的抽样点数, \bar{M} 和 \bar{N} 分别为频率和时间的抽样间隔。稳定的重建条件是 $\bar{N}\bar{M} \leq L$ (或 $MN \geq L$)。临界抽样出现在 $\bar{N}\bar{M} = NM = L$ ($a(m, n)$ 的个数等于 $x(k)$ 的样点数) 时刻,在欠抽样条件 ($MN < L$) 下会丢失信息。注意 $\tilde{h}(k)$ 和 $\tilde{\gamma}(k)$ 分别是综合窗 $h(k)$ 、分析窗 $\gamma(k)$ 的周期延伸,即

$$\tilde{h}(k) = \sum_i h(k + iL) = \tilde{h}(k + L) \quad (6)$$

$$\tilde{\gamma}(k) = \sum_i \tilde{\gamma}(k + iL) = \tilde{\gamma}(k + L) \quad (7)$$

另外,设 $\tilde{h}(k)$ 具有单位能量,即

$$\sum_{k=0}^{L-1} |\tilde{h}(k)|^2 = 1 \quad (8)$$

RDGT 系数 $a(m, n)$ 此刻也是实的,并且是以 m 和 n 为变量的周期函数。

$$a(m + iM, n + jN) = a(m, n) \quad i, j = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

$\tilde{h}(k)$ 与 $\tilde{\gamma}(k)$ 的双正交关系等价于下式(证明参见附录 A):

$$\sum_{k=0}^{L-1} \tilde{h}(k + mN) \cdot \tilde{\gamma}(k) \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot g_{n+1} \cdot (-1)^{\text{mod}(k, \bar{N})} \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + \text{mod}(n, \bar{N}) + 1]\pi}{2\bar{N}}\right) = \sqrt{\frac{L}{M}} \delta(m) \delta(n - (\bar{N} - 1)) \quad (10)$$

$$0 \leq m \leq \bar{M} - 1, 0 \leq n \leq \bar{N} - 1$$

这里 $\delta(k)$ 表示 Kronecker delta。式(10)也可以写成下列矩阵的形式:

$$\bar{H} \cdot \boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{v} \quad (11)$$

式中 $\boldsymbol{v} = \{\sqrt{L/M} 0 0 \dots 0\}^T$ 是一长度为 $\bar{M}\bar{N}$ 的矢量,

$\boldsymbol{\gamma} = \{\tilde{\gamma}(0)\tilde{\gamma}(1)\dots\tilde{\gamma}(L-1)\}^T = \{\gamma(0)\gamma(1)\dots\gamma(L-1)\}^T$, \bar{H} 是 $(\bar{M}\bar{N}) \times L$ 的实矩阵,结构为:

$$\bar{H}(m\bar{N} + n, k) = \tilde{h}(k + mN) \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n, \bar{N}) + 1]\pi}{2\bar{N}}\right) g_{n+1} \quad (12)$$

此时 $\boldsymbol{\gamma}$ 变成了由式(11)描述的线性方程组的解。在临界抽样条件下,即 $M = \bar{M}$ 和 $N = \bar{N}$ (或 $L = \bar{M}\bar{N}$),若 \bar{H} 是非奇异的, $\boldsymbol{\gamma}$ 具有唯一解。在过抽样条件下,即 $\bar{M}\bar{N} < L$,式(11)中 $\boldsymbol{\gamma}$ 的解为多解。

类似于复值离散 Gabor 变换^[10],这里选最小范数条件下,

$$\min_{\boldsymbol{\gamma} \in \bar{H}^{-1}\boldsymbol{v}} \sum_{k=0}^{L-1} |\tilde{\gamma}(k)|^2 \quad (13)$$

的解 $\boldsymbol{\gamma}_0$ 作为式(11)的解,即

$$\boldsymbol{\gamma}_0 = \bar{H}^T(\bar{H}\bar{H}^T)^{-1}\boldsymbol{v} \quad (14)$$

一旦求出了 $\boldsymbol{\gamma}$,就可利用快速的 DST^[11,12] 计算式(2)中的 $a(m, n)$:

$$a(m, n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k) \tilde{\gamma}(k - m\bar{N}) \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{\bar{M}-1} R_m(iN + j) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} R_m(iN + j) \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2j + 1][n + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \quad (15)$$

式中 $R_m(k) = x(k) \tilde{\gamma}(k - m\bar{N})$, $k = iN + j$ 。很显然上式可利用 N 点 DST 的快速算法进行计算。

同理,对于信号的重建,可将式(1)重写为:

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(k - m\bar{N}) \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \quad (16)$$

令 $k = qN + k_0$, $q = 0, 1, \dots, \bar{M} - 1$; $k_0 = 0, 1, \dots, N - 1$, 则上式变为

$$x(qN + k_0) = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(qN + k_0 - m\bar{N}) \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \right\} =$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(qN + k_0 - m\bar{N}) \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} a(m, n) \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2k + 1][n + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \right\} \quad (17)$$

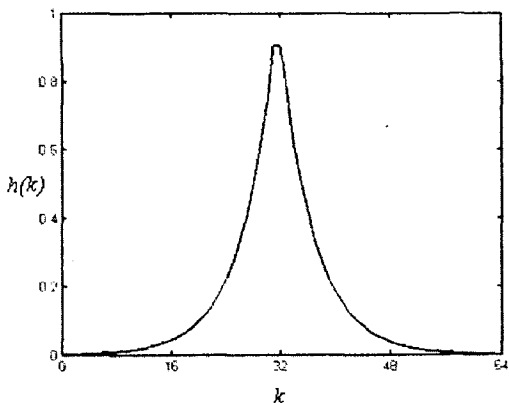
这里,第二个求和项也是一 N 点的 IDST, 同样可以用 IDST 的快速算法进行计算, 信号重建的复杂性比复值离散 Gabor 变换的信号重建简单得多。

2 模拟实验

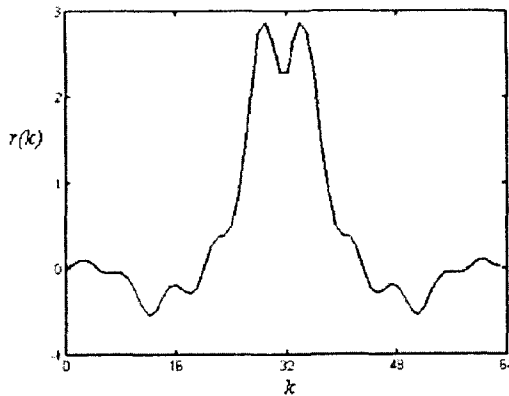
在实验中,首先利用式(15)计算出对应于一维双边指数综合窗

$$h(k) = \exp(-0.2 |k - 31.5|)$$

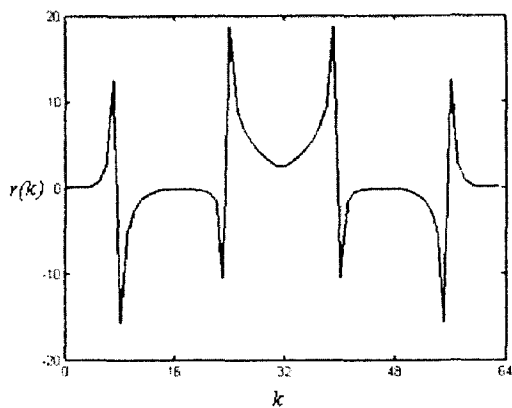
的三个双正交分析窗(如图 1 所示), 定义过抽样率为 $\beta = L/\bar{M}\bar{N}$, 由图 1 可看出, β 越大, 双正交分析窗的形状越接近于双边指数综合窗。然后分别将这三个双正交分析窗用于几种信号的实值离散 Gabor 变换计算, 如一段语音信号、幅度为 1 的矩形脉冲信号等。实验表明重建的信号与原信号的均方误差在临界抽样(图 1(b))和过抽样(图 1(c), (d))均为 10^{-15} 数量级。因此, 模拟计算实验也验证了所提出的变换是完备的。



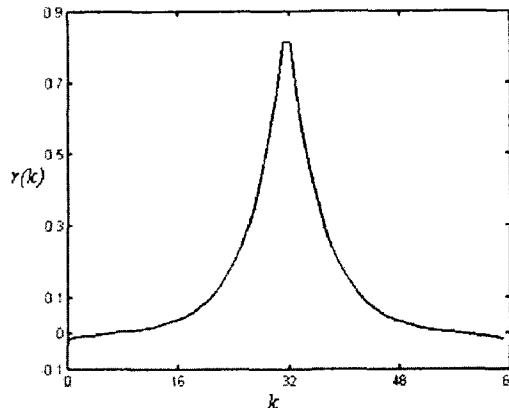
(a) 双边指数综合窗 $h(k)$, $L=64$



(c) 过抽样条件下的分析窗 $\gamma(k)$, $L=64$, $N=16$, $\bar{N}=8$, $\beta=2$



(b) 临界抽样条件下的分析窗 $\gamma(k)$, $L=64$, $N=16$, $\bar{N}=16$, $\beta=1$



(d) 过抽样条件下的分析窗 $\gamma(k)$, $L=64$, $N=32$, $\bar{N}=2$, $\beta=16$

图 1 实验结果

3 结束语

文中采用双正交分析方法,定义了一种基于 DST 的实值离散 Gabor 变换,证明了该变换中综合窗与分析窗的双正交条件(即证明了变换的完备性),该实验结果也验证了变换的完备性。对于实值序列,由于该变换仅涉及实值计算,并且可利用快速 DST, IDST 算

法来加速运算,因此在计算方面比传统复值离散 Gabor 变换更为简单。在实际应用中,将更方便于软件和硬件的实现。另外,对该变换的应用也正在进行研究,如利用该变换对核磁共振 FID 信号进行消噪,实验表明已取得了与文献[11](利用了基于 DHT 的实值离散 Gabor 变换)同样的好效果。

附录 A 双正交关系的证明

将(2)代入(1)得到下式(变换完备性条件):

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{h}_{m,n}(k) \cdot \tilde{\gamma}_{m,n}(k') = \delta(k - k') \tag{A.1}$$

用 $f(k, k')$ 表示(A.1)的左边式,并重写成下式

$$f(k, k') = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(k - m\bar{N}) \cdot \tilde{\gamma}(k' - m\bar{N}) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k', N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \right\} \tag{A.2}$$

将下列 DST 函数正交性关系式

$$\sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k', N) + 1][\text{mod}(n, N) + 1]\pi}{2N}\right) g_{n+1} = \sum_i \delta(k - k' - iN) \tag{A.3}$$

代入(A.2)式后得:

$$f(k, k') = \sum_i \delta(k - k' - iN) \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{h}(k' + iN - m\bar{N}) \tilde{\gamma}(k' - m\bar{N}) \tag{A.4}$$

套用附录 B 中(B.5)式,(A.4)式变为

$$f(k, k') = \sum_i \delta(k - k' - iN) \cdot \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} \left[\sum_{k''=0}^{L-1} \tilde{h}(k'' + iN) \cdot \tilde{\gamma}(k'') \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k'', \bar{N}) + 1][\text{mod}(j + \bar{N})\pi]}{2N}\right) g_{j+1} \right] \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k', \bar{N}) + 1][\text{mod}(j + \bar{N})\pi]}{2N}\right) g_{j+1} \right\} \tag{A.5}$$

而 $k'' = k' - m\bar{N}$,所以:

$$(-1)^{\text{mod}(k'', \bar{N})} = (-1)^{\text{mod}(k' - m\bar{N}, \bar{N})} = (-1)^{\text{mod}(k', \bar{N})}$$

再将双正交关系式(10)代入(A.5)式方括号中得

$$f(k, k') = \sum_i \delta(k - k' - iN) \cdot \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{\frac{1}{M}} \delta(j - (\bar{N} - 1)) (-1)^{\text{mod}(k', \bar{N})} \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k', \bar{N}) + 1][\text{mod}(j + \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{j+1} \right\} = \delta(k - k') \tag{A.6}$$

式(A.6)说明了如果分析窗 $\gamma(k)$ 存在,式(10)就隐含了(A.1)式,于是证明了 $\tilde{h}(k)$ 与 $\tilde{\gamma}(k)$ 的双正交关系式(10)成立。

附录 B 离散泊松(Poisson)求和公式

设 $\{a(n)\}$ 是一周期为 $L = M\bar{N}$ 的序列,其 DST 变换为

$$A(k) = \text{DST}[a(n)] = \sum_{n=0}^{L-1} a(n) \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, L) + 1][\text{mod}(n, L) + 1]\pi}{2L}\right) g_{k+1} \tag{B.1}$$

由 $\{a(n)\}$ 构成另一周期为 \bar{N} 的序列 $\{\hat{a}(n)\}$:

$$\hat{a}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a(n - m\bar{N}), \hat{a}(n) = \hat{a}(n + \bar{N}) \tag{B.2}$$

对 $\hat{a}(n)$ 进行 DST 变换得

$$A(k) = \text{DST}[\hat{a}(n)] = \sum_{n'=0}^{\bar{N}-1} \left[\sum_{m=0}^{M-1} a(n' - m\bar{N}) \right] \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n', \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} = \sum_{n'=0}^{\bar{N}-1} \left[\sum_{m=0}^{M-1} a(n' + (M - m)\bar{N}) \right] \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n' + (M - m)\bar{N}, \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\bar{N}-1} \left[\sum_{m=0}^{M-1} a(n' + m\bar{N}) \right] \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n' + m\bar{N}, \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} = \\ & \sum_{n=0}^{L-1} a(n) \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n, \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

对式(B.3)进行离散 DST 逆变换(IDST)得

$$\hat{a}(n) = \text{IDST}[A(k)] = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{\bar{N}-1} A(k) \cdot \sin\left(\frac{[2\text{mod}(n, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n, \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} \quad (\text{B.4})$$

将式(B.3)代入式(B.4)后得

$$\begin{aligned} \hat{a}(n) &= \sum_{m=0}^{M-1} a(n - m\bar{N}) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{\bar{N}-1} \left[\sum_{n=0}^{L-1} \hat{a}(n') \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n', \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} \right] \cdot \\ & \sqrt{\frac{2}{N}} \sin\left(\frac{[2\text{mod}(k, \bar{N}) + 1][\text{mod}(n, \bar{N}) + 1]\pi}{2N}\right) g_{k+1} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

此式即为 DST 函数形式的离散泊松(Poisson)求和公式。

参考文献:

- [1] Gabor D. Theory of communication[J]. J. Inst. Electr. Eng., 1946, 93(III): 429 - 457.
- [2] Bastiaans M. Gabor's expansion of a signal into Gaussian elementary signals[J]. Opt. Eng., 1981, 20(4): 594 - 598.
- [3] Wexler J, Raz S. Discrete Gabor expansions[J]. Signal Processing, 1990, 21(3): 207 - 220.
- [4] Morris J M, Liu Y. Discrete Gabor expansion of discrete-time signals in $l^2(z)$ via frame theory[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1994, 40(2): 151 - 181.
- [5] Daugman J. Complete discrete 2 - D Gabor transform by neural networks for image analysis and compression[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1988, 36(7): 1169 - 1179.
- [6] Stewart D F, Potter L C, Ahalt S C. Computationally Attractive Real Gabor Transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(1): 77 - 84.
- [7] Tao Liang, Kwan H K. Real discrete gabor expansion for finite and infinite sequences[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Geneva, Switzerland: [s. n.], 2000: 637 - 640.
- [8] Tao Liang, Cheng G J. Real-valued discrete Gabor transforms for discrete signal and image representation[J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 10(4): 444 - 449.
- [9] 陶亮, 顾涓涓. 实值 Gabor 变换理论及应用[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
- [10] 陶亮, 张德龙, Kwan H K. 实值离散 Gabor 变换的最优双正交分析窗函数[J]. 电路与系统学报, 2000, 5(4): 48 - 52.
- [11] Tao Liang, Kwan H K. Noise Reduction for NMR FID Signals via Oversampled Real-valued Discrete Gabor Transform[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2005, 88(7): 1511 - 1518.
- [12] 蒋增荣. 快速算法[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993: 415 - 434.

(上接第 117 页)

2.4 其他技术

在 TRS 系统中, 采用了 JDBC 技术与数据库相连。JDBC 是一个标准数据库访问接口, 使用 Java 语言编写数据库应用程序。JDBC 主要用来连接数据库和直接调用 SQL 命令执行各种 SQL 语句。Java 中的 JDBC 相当于 Microsoft 平台中的 ODBC。对于页面当中用户输入的数据格式是否符合数据库中的要求, 采用了 JBuilder 2006 软件中自带的 validation 验证框架, 开发人员只需要在相关 JSP 页面中进行设置, 然后在 validation.xml 文件中添加验证规则即可。

3 结束语

介绍了基于 Struts 框架的学员培训注册系统的设计与实现。实践证明, Struts 框架使得开发人员可以方便地显示系统的页面、业务逻辑和数据操作, 以层次的形式加以分割, 从而缩短软件开发的周期, 提高系统

的可重用性和可维护性。然而由于社会的进步, 计算机技术的发展, 人们已经开发出了多种系统的开发框架, 各种框架都有其优缺点, Struts 框架也不例外, 今后可以尝试将不同的框架应用到系统当中。

参考文献:

- [1] 梅登华, 闵华清. 基于 STRUTS 框架的 SRM 系统设计[J]. 计算机工程, 2006, 32(17): 262 - 264.
- [2] 刘畅, 李振坤, 李和香. 基于 Struts 的高校教学管理平台的设计与实现[J]. 现代计算机, 2006, 25(4): 65 - 68.
- [3] 张升平. 基于 MVC 模式的研究生管理系统[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2006, 23(3): 277 - 280.
- [4] 张桂元, 贾燕枫. Struts 开发入门与项目实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [5] 胡飞跃, 彭楚武. 基于 MVC 模型及 Struts 框架的远程教学系统[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(13): 1947 - 1948.