

# 基于线性正则变换的时频信号分离方法

向 强<sup>1,2</sup>, 秦开宇<sup>1</sup>, 张传武<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 610054; 2. 西南民族大学电信学院 成都 610041)

**【摘要】**时频信号分析是当今信号处理领域研究的一个热点问题, 各种时频分布函数得到了广泛的研究和应用。线性正则变换是一种重要的时频分析工具。文中研究了线性正则变换与传统时频分布函数的关系; 并基于这些关系, 提出了一种新的时频信号分离方法, 能够在时频面上互不重叠、但在时域和频域均存在较强耦合的多分量合成信号有效地分离。仿真实例表明了该方法的正确性和实用性。

**关键词** 带通滤波器; 傅里叶变换; 线性正则变换; 信号分离; 时频分析

**中图分类号** TN911.7

**文献标识码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.020

## Novel Method for Time-Frequency Signal Separation Based on the Linear Canonical Transform

XIANG Qiang<sup>1,2</sup>, QIN Kai-yu<sup>1</sup>, and ZHANG Chuan-wu<sup>2</sup>

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. College of Electrical & Information, Southwest University for Nationalities Chengdu 610041)

**Abstract** Time-frequency signal analysis is a hot research topic in signal processing domain at present. A number of time-frequency distributions have been developed and used to analyze time-frequency signal. The linear canonical transform with multi-parameter is a powerful time-frequency analysis tool. It is the generalization of the Fourier transform and the fractional Fourier transform. In this paper, the relations between the linear canonical transform and time-frequency distributions are obtained. Based on these relations, a novel method for time-frequency signal separation is proposed. This method is very effective to separate components from a time-frequency signal, whose components interact in the time and the frequency domains and does not overlapped with each other in the time-frequency plane. The simulation results illustrate the validity and practicability of the proposed method.

**Key words** bandpass filter; Fourier transform; linear canonical transform; signal separation; time-frequency analysis

线性正则变换<sup>[1]</sup>(linear canonical transform, LCT) 又称ABCD变换<sup>[1]</sup>, 是傅里叶变换(FT)、分数阶傅里叶变换<sup>[2]</sup>(fractional fourier transform, FRFT)的广义形式, 主要用于微分方程求解和光学系统分析。随着FRFT理论的发展, LCT逐渐在信号处理领域受到重视, 已经发展成为一种重要的时频分析工具。由于LCT具有3个自由参数(参变量间存在的一个约束条件, 使得具有4个参变量的线性正则变换, 其实只有3个自由参数), 相较于FRFT的1个自由参数和FT的0个自由参数, LCT具有更强的灵活性和处理能力。

信号滤波与分离是信号处理领域常见的问题。传统的信号分离方法通常采用时域分析或频域(Fourier域)分析方法。而对于在时频面上互不重叠, 但在时域和频域均存在较强耦合的多分量时频信

号, 由于各信号分量在时频平面里呈斜线分布, 使得这些分布在时间轴或频率轴上的投影均有重叠, 则很难在时域或频域得到好的分离结果。因此, 必须在时域或频域外的其他信号变换域寻找更为合适的信号分离方案。信号的线性正则变换是把信号变换到一个新的域(LCT域)表示。传统的时域、频域甚至分数阶变换域都是LCT域的特例。因此, LCT可以在统一的时频域上处理信号, 特别适合对时频信号的分析与处理。目前已有文献开始研究LCT在时频信号处理中的应用。文献[3]利用LCT的性质实现了对雷达、声纳及无线通信中多径回波信号的分离; 文献[4]介绍了基于LCT的最优滤波器设计等。本文从讨论LCT与传统时频分布函数关系的角度出发, 提出一种新的时频信号分离方法。该方法能有效地

收稿日期: 2009-02-13; 修回日期: 2009-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(60603009)

作者简介: 向 强(1973-), 男, 博士生, 主要从事时频信号分析与测试方面的研究。

解决传统的时域、频率分析方法不能很好处理的多分量时频信号分离问题。仿真实验验证了该方法的有效性和可行性。

## 1 LCT的定义和简化形式

### 1.1 LCT的定义及性质

信号  $f(t)$  以实数  $(a, b, c, d)$  为参数, 并且满足  $ad - bc = 1$  的线性正则变换定义如下<sup>[1,3]</sup>:

$$F_{(a,b,c,d)}(u) = L_F^{(a,b,c,d)}[f(t)] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) K_{(a,b,c,d)}(t, u) dt & b \neq 0 \\ \sqrt{d} e^{j \frac{cd}{2} u^2} f(du) & b = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $K_{(a,b,c,d)}(t, u) = \sqrt{\frac{1}{j2\pi b}} e^{j \left( \frac{d}{2b} u^2 - \frac{1}{b} ut + \frac{a}{2b} t^2 \right)}$ ;  $L_F^{(a,b,c,d)}[\cdot]$  表示参数为  $(a, b, c, d)$  的LCT算子; 带有下标  $(a, b, c, d)$  的大写函数表示对应小写函数的LCT结果, 如式(1)中的  $F_{(a,b,c,d)}(u)$  表示  $f(t)$  的LCT。LCT定义中的参数  $(a, b, c, d)$  也可用参数矩阵  $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$  表示, LCT的性质<sup>[3,5-6]</sup>很多, 其中一个重要的性质是叠加性<sup>[5]</sup>, 即:

$$L_F^{(a,b,c,d)}[f(t)] = L_F^{(a_2, b_2, c_2, d_2)}[L_F^{(a_1, b_1, c_1, d_1)}[f(t)]] \quad (2)$$

式中 参数满足  $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix}$ 。

LCT的逆变换<sup>[7]</sup>(ILCT)可以表示为  $F_{(a,b,c,d)}(u)$  以实数  $(d, -b, -c, a)$  为参数的LCT, 即:

$$f(t) = L_F^{(d,-b,-c,a)}[F_{(a,b,c,d)}(u)] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{(a,b,c,d)}(u) K_{(d,-b,-c,a)}(u, t) du & b \neq 0 \\ \sqrt{a} e^{-j \frac{ca}{2} t^2} f(at) & b = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $K_{(d,-b,-c,a)}(u, t) = \sqrt{\frac{1}{-j2\pi b}} e^{j \left( \frac{-d}{2b} u^2 + \frac{1}{b} ut - \frac{a}{2b} t^2 \right)}$ 。

从式(3)可知,  $f(t)$  可由一组权系数为  $F_{(a,b,c,d)}(u)$  的正交基函数  $K_{(d,-b,-c,a)}(u, t)$  所表征, 该组基函数是调频率为  $-\frac{a}{b}$  的线性调频复指数函数。并且不同  $u$  值的基函数间存在不同的时移和相位因子, 即:

$$K_{(d,-b,-c,a)}(u, t) = e^{-j \frac{c}{2a} u^2} K_{(d,-b,-c,a)}\left(0, t - \frac{u}{a}\right) \quad (4)$$

### 1.2 LCT的简化形式

由于LCT有4个参数(其中仅3个自由参数), 通过

改变参数的取值, LCT可以简化为FT和FRFT等其他多种特殊形式<sup>[7]</sup>:

1) 当  $(a, b, c, d) = (\cos \theta, \sin \theta, -\sin \theta, \cos \theta)$  时, LCT变为以  $\theta$  为参数的FRFT。

2) 当  $(a, b, c, d) = (0, 1, -1, 0)$  时, LCT变为FT。可见FT和FRFT都是LCT的特例。

3) 当  $(a, b, c, d) = (1, 0, q, 1)$  时, 线性正则变换简化为信号与chirp信号的积(简称chirp乘积), 即:

$$L_F^{(1,0,q,1)}[f(t)] = f(u) e^{j \frac{q}{2} u^2} \quad (5)$$

4) 当  $(a, b, c, d) = (1, m, 0, 1)$  时, 线性正则变换简化为信号与chirp信号的卷积(chirp卷积), 即:

$$L_F^{(1,m,0,1)}[f(t)] = \sqrt{\frac{1}{j2\pi m}} f(u) e^{j \frac{1}{2m} u^2} \quad (6)$$

5) 当  $(a, b, c, d) = \left(k, 0, 0, \frac{1}{k}\right)$  时, 线性正则变换简化为尺度变换, 即:

$$L_F^{(k,0,0,\frac{1}{k})}[f(t)] = \sqrt{\frac{1}{k}} f\left(\frac{1}{k}u\right) \quad (7)$$

## 2 LCT与时频分布的关系

### 2.1 LCT的分解

LCT有多种分解形式, 下面介绍一种重要的分解方法。根据LCT具有的叠加性, 将LCT的参数  $(a, b, c, d)$  表示为如下矩阵相乘的形式<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ q & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & \frac{1}{k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据LCT的简化定义, 由式(8)可知, LCT可分解为FRFT、尺度变换、chirp乘积3个过程。其中,  $\theta$  为FRFT的参数;  $k$  为尺度变换系数;  $q$  为chirp乘积的参数。对式(8)右边化简后得到:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \cos \theta & k \sin \theta \\ qk \cos \theta - \frac{\sin \theta}{k} & qk \sin \theta + \frac{\cos \theta}{k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过式(9)并利用条件  $ad - bc = 1$ , 可解得:

$$\theta = \arctan \frac{b}{a} \quad q = \frac{ac + bd}{a^2 + b^2} \quad k = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (10)$$

### 2.2 LCT与时频分布的关系

Wigner-Ville分布<sup>[9-10]</sup>(以下简称  $wv$  分布)是最早问世的时频分布函数, 具有局部时频聚集性好的特点, 而其他所有时频分布函数都可以看作是  $wv$  分布的加窗形式, 所以本文主要讨论LCT与  $wv$  分布的关系。假设信号  $f(t)$  的  $wv$  分布为  $w_f(t, \omega)$ , 由文献[9]知  $wv$  分布有以下性质:

(1) 尺度特性, 即:

$$\tilde{f}(t) = \sqrt{|a|} f(at) \Rightarrow W_{\tilde{f}}(t, \omega) = W_f\left(at, \frac{\omega}{a}\right) \quad (11)$$

(2) chirp乘积特性, 即:

$$\hat{f}(t) = x(t)e^{j\frac{m}{2}t^2} \Rightarrow W_{\hat{f}}(t, \omega) = W_f(t, \omega - mt) \quad (12)$$

如果用符号  $F_{\theta}(u)$  表示  $f(t)$  的以  $\theta$  为参数的 FRFT, 用  $w_{F_{\theta}}(u, v)$  表示  $F_{\theta}(u)$  的  $wv$  分布, 根据文献[2]有如下表达式:

$$w_{F_{\theta}}(u, v) = w_f(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta) \quad (13)$$

式(13)表明, FRFT使得信号的  $wv$  分布在时频面上产生了角度为  $\theta$  的顺时针旋转。如果用符号  $w_{F_{(a,b,c,d)}}(u, v)$  表示  $F_{(a,b,c,d)}(u)$  的  $wv$  分布, 由式(8)可知, 信号  $f(t)$  以实数  $(a, b, c, d)$  为参数的LCT计算可分解为FRFT、尺度变换、chirp乘积3个过程, 因此  $F_{(a,b,c,d)}(u)$  可表示为:

$$F_{(a,b,c,d)}(u) = e^{j\frac{q}{2}u^2} \sqrt{\frac{1}{k}} F_{\theta}\left(\frac{1}{k}u\right) \quad (14)$$

对式(14)两边取  $wv$  分布, 并利用式(11)~(13)得到:

$$w_{F_{(a,b,c,d)}}(u, v) = w_f\left(\frac{1}{k}u \cos \theta - k(v - qu) \sin \theta, \frac{1}{k}u \sin \theta + k(v - qu) \cos \theta\right) \quad (15)$$

利用式(9), 可将式(15)化简得到:

$$w_{F_{(a,b,c,d)}}(u, v) = w_f(du - bv, -cu + av) \quad (16)$$

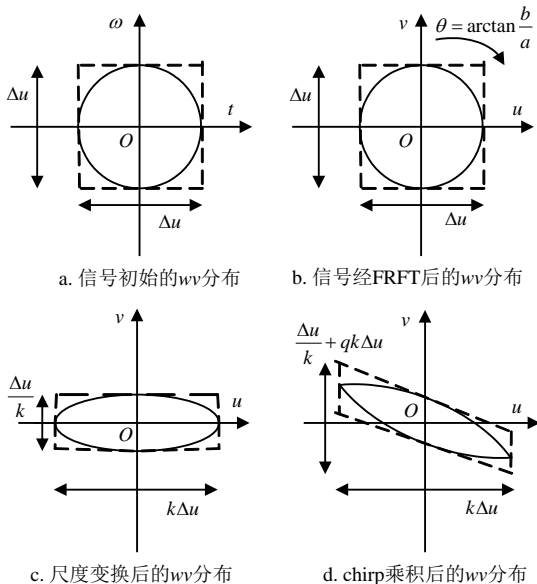


图1 信号经LCT后的  $wv$  分布变化过程

根据式(3)可得:

$$f(t) = L_F^{(d,-b,-c,a)}[F_{(a,b,c,d)}(u)] \quad (17)$$

对式(17)两边取  $wv$  分布, 并利用式(16)可得:

$$w_f(t, \omega) = w_{F_{(a,b,c,d)}}(at + b\omega, ct + d\omega) \quad (18)$$

式(16)和式(18)给出了信号  $f(t)$  经LCT前后的  $wv$  分布的关系表达式。按照式(8)的LCT的分解方法, 图1用几何图形描述了一个初始  $wv$  分布为圆的信号经LCT后的  $wv$  分布变化过程。

### 3 时频信号的分离

图2所示的时频信号由多个信号分量组成, 各个信号分量的  $wv$  分布虽然相互分离, 但彼此之间在时域或频域却存在较强的耦合, 因此, 无法用传统的滤波方法实现其分离。从图1可知, 信号经LCT后的  $wv$  分布在时频面发生了旋转、缩放、扭曲的变化。其中, LCT使信号的  $wv$  分布在时频面上发生旋转的特性, 可用于多分量时频信号的分离。如果利用LCT与  $wv$  分布的关系, 选择合适的LCT参数, 将待分离信号经LCT后, 便可实现信号在特定LCT域的解耦合, 最后通过在该LCT域设计带通滤波器实现时频信号的分离。

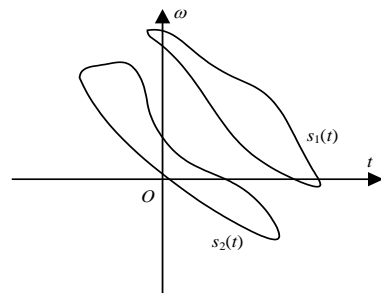


图2 存在较强时频耦合的多分量合成信号

本文假设图2中时频信号  $z(t)$  由两个分量组成, 即  $z(t) = s_1(t) + s_2(t)$ 。在图2中设计3条平行的分离线, 如图3所示。将信号  $z(t)$  的两个分量的  $wv$  分布分开。假设分离线的斜率为  $\lambda = \tan \alpha$ , 分离线与时间轴的交点坐标为  $(t_i, 0)$ , 其中  $i = 1, 2, 3$ 。则将图3中的  $wv$  分布顺时针旋转  $\theta$  ( $\theta$  满足  $\tan \theta = 1/\lambda$ ) 角度后, 可实现信号  $z(t)$  在特定LCT域的解耦合。根据前面LCT与  $wv$  分布的关系, 设计LCT参数为:

$$a = -\lambda \quad b = 1 \quad c = -1 \quad d = 0 \quad (19)$$

利用式(3)可得到各个信号分量, 即:

$$s_i(t) = L_F^{(d,-b,-c,a)}[Z_{(a,b,c,d)}(u)P_{B_i}(u)] \quad (20)$$

其中  $i = 1, 2$ , 并且  $P_{B_i}(u)$  是按式(19)中参数所对应LCT域的带通滤波器, 即:

$$P_{B_i}(u) = \begin{cases} 1 & u \in (u_{l_i}, u_{h_i}) \\ 0 & u \notin (u_{l_i}, u_{h_i}) \end{cases} \quad B_i = u_{h_i} - u_{l_i} \quad (21)$$

式中  $B_i$  为LCT域带宽。根据式(18)可得到滤波器参

数分别为:

$$\begin{cases} u_{h_i} = at_i \\ u_{l_i} = at_{i+1} \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (22)$$

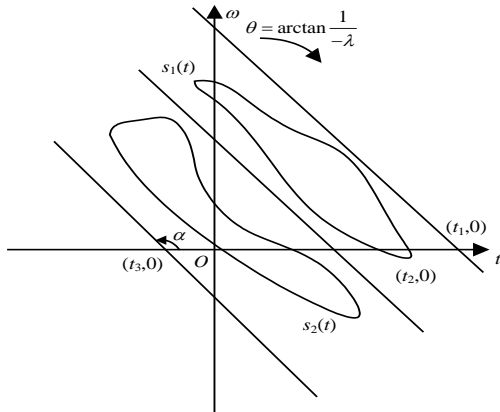


图3 时频平面上各分量信号间的平行分离线

### 4 仿真实验

下面用仿真实例验证本文方法的可行性。设一非平稳信号  $z(t)$  由余弦调频(cos of cos)信号  $s_1(t)$  和 chirp 信号  $s_2(t)$  两个分量叠加而成, 设观察时间为  $[-5\text{ s}, 5\text{ s}]$ 。  $z(t)$  的实部波形如图4a所示,  $z(t)$  的  $wv$  分布如图4b所示, 其中最上面的波形代表余弦调频信号的  $wv$  分布, 最下面的斜线代表chirp信号的  $wv$  分布, 其余为交叉项。

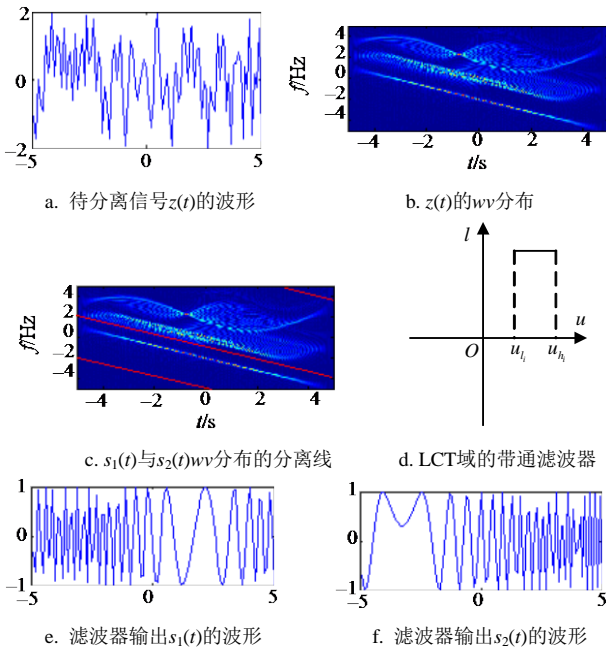


图4 基于LCT的时频信号分离仿真波形

由图4b可知, 仅在时域或频域很难将两个信号分离。在图4b中设计3条平行的分离线, 斜率为  $-0.6$ , 将两个信号的  $wv$  分布分开, 如图4c所示。从图4c可

知, 3条分离线与时间轴的交点分别为  $(-\frac{25}{3}, 0)$ 、 $(-\frac{5}{3}, 0)$ 、 $(\frac{35}{3}, 0)$ 。根据式(19)可设计LCT参数为  $(0.6, 1, -1, 0)$ 。根据式(22)得到带通滤波器  $P_{B_1}(u)$  的参数  $u_{h_1} = 7, u_{l_1} = -1$ ;  $P_{B_2}(u)$  的参数  $u_{h_2} = -1, u_{l_2} = -5$ 。LCT域带通滤波器  $P_{B_i}(u)$  如图4d所示。根据式(20)分别得到  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$ , 图4e和4f所示为计算机仿真输出的结果。

### 5 结束语

本文介绍了线性正则变换的定义和基本性质; 研究了线性正则变换与传统时频分布函数的关系。对于存在较强时频耦合的多分量信号, 通过线性正则变换后, 能够在该线性正则域上实现完全解耦合。利用该理论, 本文提出了基于线性正则变换的时频信号分离方法, 并且以包含两个分量的合成信号为例, 讨论了用于时频信号分离的线性正则变换以及带通滤波器的参数设计。仿真实验表明, 该方法是时频域信号分离的有效手段。

本文的研究工作得到了西南民族大学校级基金的资助, 在此表示感谢。

### 参考文献

- [1] MOSHINSKY M, QUESNE C. Linear canonical transformations and their unitary representations[J]. J Math Phys, 1971, 12(8): 1772-1783.
- [2] ALMEIDA L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3084-3091.
- [3] SHARMA K K, JOSHI S D. Signal separation using linear canonical and fractional Fourier transforms[J]. Opt Communications, 2006, 265: 454-460.
- [4] BARSHAN B, KUTAY M A, OZAKTAS H M. Optimal filters with linear canonical transformations[J]. Opt Commun, 1997, 135: 32-36.
- [5] DENG Bing, TAO Ran, WANG Yue. Convolution theorems for the linear canonical transforms and their applications[J]. Science in China Series F: Informadon Sciences, 2006, 49(5): 592-603.
- [6] SHARMA K K, JOSHI S D. Signal reconstruction from the undersampled signal samples[J]. Opt Commun, 2006, 268: 245-252.
- [7] STERN A. Sampling of linear canonical transformed signals[J]. Signal Processing, 2006, 86(7): 1421-1425.

(下转第633页)

- & Astronautics, 2004, 21(1): 76-80.
- [7] DENSON W. The history of reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1998, 47(3): 321-328.
- [8] NACHTMANN H, CHIMKA J R. Fuzzy reliability in conceptual design[C]//2003 Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [9] BAZU M. A combined fuzzy-logic & physics-of-failure approach to reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(2): 237-242.
- [10] 赵建华, 段友丽, 楚文海. 改进层次分析法和模糊综合评判实现压铸镁合金选材[J]. 铸造技术, 2008, 29(6): 735-738.  
ZHAO Jian-hua, DUAN You-li, CHU Wen-hai. Improved analysis hierarchy process and fuzzy synthetic judgment on the selection of die casting magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2008, 29(6): 735-738.
- [11] 云绍辉. 基于AHP的组织学习能力模糊综合评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2007, 9(5): 26-28.  
YUN Shao-hui. Fuzzy synthetic evaluation for organizational learning ability based on AHP[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2007, 9(5): 26-28.
- [12] 何柱姿, 孙利琼, 杨华昆. 成都市非公有中小企业融资效率模糊综合评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2008, 10(3): 27-31.  
HE Zhu-zi, SUN Li-qiong, YANG Hua-kun. Vague and comprehensive evaluation about financing of non-public ownership small enterprises in Chengdu[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2008, 10(3): 27-31.

编辑 黄 莘

(上接第573页)

- [8] KOC A, OZAKTAS H M, CANDAN C, et al. Digital computation of linear canonical transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2383-2394.
- [9] HLAWATSCH F, BOUDREAUX-BARTELS G F. Linear and quadratic time-frequency signal representation[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(2): 21-67.
- [10] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
ZHANG Xian-da. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

编辑 黄 莘

(上接第580页)

## 参 考 文 献

- [1] YU Min. Look into the initial confinement fusion[J]. The China Academy of Engineering Physics, 1980, 1(1): 1-24.
- [2] 胡广月, 刘慎业, 张继彦. 长脉冲KeV X射线源的辐射特征[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 771-776.  
HU Guang-yue, LIU Shen-ye, ZHANG Ji-yan. Emission characteristic of long laser pulse keV X-ray source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 771-776.
- [3] KANIA D, IVERSON A, SMITH L, et al. Flat response detectors—the vacuum ultraviolet and soft X-ray region[J]. Appl Phys, 1986, 60: 2596-2599.
- [4] IDZOREK G, COULTER W, WALSH P. Soft X-ray diagnostics for pulsed power machines[C]//Proc 10th IEEE International Pulsed Power Conference. Los Alamos: National Laboratory, 1995: 981-986.
- [5] KANIA D, LANE S, JONES B, BENNETT C, et al. High speed detection of thermonuclear neutrons with solid state detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1988, 35(1): 387-388.
- [6] 朱健强. 神光II高功率激光实验装置[J]. 自然杂志, 2006, 28(5): 271-273.  
ZHU Jian-qiang. Shenguang-II: High power laser facility[J]. Nature Journal, 2006, 28(5): 271-273.
- [7] 江少恩, 郑志坚, 孙科煦. 软X光能谱仪的一种新的解谱方法[J]. 计算物理, 2001, 18(3): 276-280.  
JIANG Shao-en, ZHENG Zhi-jian, SUN Ke-xu. A new method unfolding spectral for the soft X-ray spectrometer[J]. Computational Physic, 2001, 18(3): 276-280.
- [8] MIURA E, HONDA H, KATSURA K. et al. Soft X-ray emission from noble gas clusters excited by an ultrashort[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2000, 70(60): 783-787.
- [9] 江少恩, 孙科煦, 彭能岭, 等. 小型X光二极管的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(6): 571-574.  
JIANG Shao-en, SUN Ke-xu, Peng Neng ling, et al.. Development on mini X-ray diode[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(6): 571-574.
- [10] 郭玉彬. 脉冲等离子体软X射线探测系统[J]. 微细加工技术, 1996, 1(1): 29-39.  
GUO Yu-bin. Detecting system of soft X-ray in pulse laser-produced plasma[J]. Microfabrication Technology, 1996, 1(1): 29-39.
- [11] WANG Wen-xiang, YUE Lin-gna, YU Guo-fen, et al. Dispersion equation of the coaxial-radial line[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2004, 2(1): 6-9.

编辑 张 俊