Duffing 振子与分数傅里叶变换的 Chirp 水印检测性能对比研究^{*}

李东明^a, 王广君^a, 宋麦玲^b

(中国地质大学 a. 信息中心; b. 计算机学院, 武汉 430074)

摘 要:研究 Duffing 振子和分数傅里叶变换在 Chirp 类水印检测中的性能比较。首先分析目前分数傅里叶变 换检测 Chirp 类水印的不足,然后将嵌入在载体低频小波域的非周期 Chirp 信号通过分块平滑转换为单频周期 信号,利用 Duffing 振子阵列检测器检测微弱的周期信号。实验表明,当信嗓比为-41 dB 时,Duffing 振子仍然能 有效检测到水印的存在,此时分数傅里叶变换失效;而当信嗓比较高时,分数傅里叶变换计算较 Duffing 振子检测简单。

关键词: 微弱信号检测; 数字水印; 小波变换; Duffing 振子; Chirp 信号 中图分类号: TP309 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)05-1520-03 doi;10.3969/j.issn.1001-3695.2013.05.061

Comparison between Duffing oscillators and FRFT detector in Chirp typed watermarking detection

LI Dong-ming^a, WANG Guang-jun^a, SONG Mai-ling^b

(a. Information & Technology Center, b. College of Computer, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper analyzed the shortcomings of the FRFT detection method, and then changed the Chirp typed watermark which was embedded into the low frequency band of the host image in the wavelet domain into weak single frequency periodic signal which was then detected by the Duffing oscillators. It utilized the model of deterministic signal detection with unknown parameters to formulate the watermark detection. Experiments show that the detector performs effectively when the signal-to-noise ratio is greater than -41 dB, and the FRFT method is simple than Duffing oscillator.

Key words: weak signal detection; digital watermarking; discrete wavelet transform (DWT); Duffing oscillator; Chirp signal

近年来,用于版权保护的鲁棒水印技术的研究与应用取得 了很大进展,但是对于常见的几何攻击和非线性局部扭曲攻击 则抗攻击能力很弱。如何抵抗几何攻击仍然是水印领域面临 的最大困难,成为当前数字水印产品商业化最大的障碍,也是 研究的热点之一。近些年出现了一些利用 Chirp 类信号作为 水印的数字水印理论和方法。文献[1,2]分析了一种基于分 数阶傅里叶变换(FRFT)的加性水印算法,通过平衡水印容量 和鲁棒性之间的关系,实现了在具有较高嵌入容量的水印保证 系统的鲁棒性。文献[3]提出了一种利用分数阶傅里叶变换 的时频域联合的多分量数字水印方法,该算法直接在空域嵌 入,在分数阶傅里叶变换域内盲检测,在图像空域嵌入二维 Chirp 信号,而在水印检测时,对嵌入水印后的图像进行 Radon-Wigner 变换,变换域的峰值大于某一阈值时,意味着水印的存 在。该方案对一些常见的图像处理过程具有鲁棒性。

文献[3,4]首先分析图像在分数阶傅里叶域能量分布,然 后通过扫描不同分数阶域的 FRFT 幅度模峰值来完成 Chirp 水 印信号的盲提取。但是此类算法在超低信噪比(-20 dB)以 下就无法正常工作^[5,6]。 本文根据微弱信号混沌检测理论^[7,8],将水印检测问题转 换为超低信噪比条件下,载体背景中确定性周期信号的检测。

1 FRFT 方法的不足

根据文献[3~6],利用 FRFT 进行 Chirp 类信号水印检测, 由于直接计算 FRFT 的计算误差,Chirp 类信号在 FRFT 域聚焦 峰值有限。推导如下:

$$\begin{split} X_p(u) &= T_s \cdot H_N D^p H_N^{\mathsf{T}} \cdot X_N = F_p(X_N) \\ \nexists \oplus T_s &= \sqrt{\frac{2\pi}{N}}, D^p = \mathrm{Diag}(\,\mathrm{e}^{-j0}\,,\mathrm{e}^{-j\alpha}\,,\mathrm{e}^{-j2\alpha}\,,\cdots,\mathrm{e}^{-j(N-1)\alpha}\,)\,, \beta = 0 \end{split}$$

$$\frac{\partial \pi}{2}H_N$$
是取样长度为 N 时 Hermite 函数的离散化矩阵,展开得

$$\begin{split} & X_p(u) = \\ \left(\begin{array}{cccc} F_p, -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} & F_p, -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} + 1 & \cdots & F_p, -\frac{N-1}{2}, \frac{N-1}{2} \\ F_p, -\frac{N-1}{2} + 1, -\frac{N-1}{2} & F_p, -\frac{N-1}{2} + 1, -\frac{N-1}{2} + 1 & \cdots & F_p, -\frac{N-1}{2} + 1, \frac{N-1}{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_p, -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} & F_p, -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} + 1 & \cdots & F\frac{N-1}{2}, \frac{N-1}{2} \\ \end{split} \right)$$

收稿日期: 2012-09-08; 修回日期: 2012-10-18 基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2011335070);中央高校基金资助项目(CUGL120278)

作者简介:李东明(1982-),男,江苏大丰人,讲师,博士,主要研究方向为计算机图像处理(universeli@163.com);王广君(1964-),男,河南禹州 人,教授,主要研究方向为计算机图像处理、智能仪器;宋麦玲(1971-),女,山西运城人,讲师,主要研究方向为信息安全.

$$\begin{pmatrix} x - \frac{N-1}{2} \\ x - \frac{N-1}{2} + 1 \\ \vdots \\ x \frac{N-1}{2} \end{pmatrix}$$
(1)

当取得合适的 $p = 2\beta/\pi$ 使得 Chirp 信号 $x = e^{\frac{c}{2}t^2}$ 在 u = 0 处 聚焦,即 $X_n(u)$ 在 u = 0 处得到最大值 $X_n(0)$:

$$|X_{p}(0)| = \left| \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} F_{0,i} \cdot x_{i} \right| \leq \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} |F_{0,i}| \cdot |x_{i}| = \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} |F_{0,i}| = 8.033|_{N=65}$$
(2)

因此,当可分离二维分数傅里叶变换在适当的阶数下出现 二维 Chirp 信号聚焦时,聚焦幅度为 $S_{p_1,p_2}(0,0) = F_{p_1} \{F_{p_2}(I(x,y)\} = F(I(x,y)) = |X_p(0)|^2 = 64.53 。根据文献[1,6],$ 载体经过小波变换后的低频系数在阶数远离1时(如 <math>p = 1.6) 的分数傅里叶变换幅度 $S_{p_1,p_2}(0,0) < 3$,所以理论上二维 Chirp 信号聚焦的幅度超过载体低频小波系数的 FRFT 值 20 倍。

一般情形下水印数据嵌入的模型为 $I = C + \alpha \times W$, C 是载 体数据, W 是水印数据, α 是嵌入强度, I 是含有水印的图像。 通常为了提高鲁棒性能, 需要提高嵌入强度。当 $\alpha \ge 0.05$ 时, Chirp 信号的幅度值(0.05)为 Wbarb 载体低频小波系数的平 均值(1.29)的1/20 左右, 实验表明此时并不能很好地满足水 印透明性的要求; 为了满足透明性的要求, 取 $\alpha < 0.05$, 但是此 时 Chirp 信号在合适阶数下 FRFT 的聚焦峰值仅仅为载体 FR-FT 的1 倍左右, 此时水印的透明性还没有得到完全满足, 水印 检测器已经无法工作。此类基于 FRFT 的算法在超低信噪比 (-20 dB)以下检测器无法正常工作^[3]。不同嵌入强度下含 水印图像的视觉质量如图1 所示。



2 基于 Duffing 振子的微弱周期信号的检测

2.1 Duffing 振子检测原理

为了能在超低信噪比条件下检测到微弱的 Chirp 类水印 信号,本文选用对周期信号敏感的混沌振子在小波域进行微弱 Chirp 信号的检测。考虑一个 Duffing 振子的检测模型:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -ky + (x^3 - x^5) + \gamma \cos(\omega t) + n(t) \end{aligned}$$

其中:k为阻尼比, $(-x^3 + x^5)$ 是非线性恢复力, $\gamma \cos(\omega t)$ 是内 置信号, n(t)是噪声且E[n(t)] = 0。影响状态的唯一因素就 是内部驱动信号 $\gamma \cos(\omega t)$, 可以通过调节 γ 来控制系统的状态: 当 γ 比较小时, 系统围绕焦点运动; 当 γ 超过某个阈值 γ_e 时,系统经历同宿轨线周期分叉直至进入混沌;当γ超过另一 个阈值γ_d时,系统脱离混沌状态进入大尺度周期运动状态。 所以可以根据系统的相图来判断状态的跃迁,也可用文献[3] 的方法通过 Lyapunov 指数符号来判断系统状态的变化。根据 式(3),得到系统的偏差方程:

$$\delta \dot{x} + k \delta \dot{x} - c(t) \delta x = 0 \tag{4}$$

其中: $x + \delta x$ 和 x 表示初始位置不同的两点, δx 为两点之间的 偏差, $c(t) = 3x^2 - 5x^4$ 。由文献[3]得

$$D(T) = e^{\sum_{n=0}^{T/\Delta t} H(n\Delta t) \cdot \Delta t}$$
(5)

其中: $H(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ c(t) & -k \end{bmatrix}$, *n* 表示在一个周期 $T = 2\pi/\omega$ 中对 时间 *t* 以 Δt 为间隔的离散抽样,采用四阶龙格—库塔方法求 解得到 D(T) 的数值表示。设 λ_1 和 λ_2 为 D(T) 的两个特征 值,则可以得到 Duffing 振子的 Lyapunov 指数: $l_1 = \frac{1}{T} \ln |\lambda_1|$,

 $l_2 = \frac{1}{T} \ln |\lambda_2|$ 。Lyapunov 指数只要有一个正值时,系统处于混 沌状态; Lyapunov 指数其中之一为零时,系统处于临界混沌 状态。

2.2 Chirp 信号的周期化

G(x)

单分量二维 Chirp 类信号表示如下:

$$S_1(x,y) = A e^{j(\frac{m}{2}x^2 + \frac{m}{2}y^2)}$$
(6)

Duffing 振子只对周期信号具有敏感性,所以为了得到周期信号,将 $S_1(x,y)$ 和它的时间迟滞信号 $S(x - \tau, y - \tau)$ 共轭相乘并取实部,如式(7)所示:

$$(y) = \operatorname{Re}(S_1(x,y) \cdot S_1(x-\tau,y-\tau)) = A^2 \cos(mx\tau + my\tau - m\tau^2)$$

$$(7)$$

可见 G(x,y) 为一个初相为 – $m\tau^2$, 频率为 $mx\tau$ + $my\tau$ 的余 弦周期信号, 取 y = 0 则得到一维单频周期信号, 可以送入 Duffing 振子水印检测器中进行检测。对于多分量二维 Chirp 类信 号 $S_2(x,y)$ 有 $S_2(x,y) = \sum_{i=1}^{2} A_i e^{i(\frac{m_i}{2}x^2 + \frac{m_i}{2})^2)}$, 则 $S_2(x,y)$ 与其迟滞 信号相乘并且取实部得到乘积信号得

 $G(x,y) = A_1^2 \cos(m_1 \tau x + m_1 \tau y - m_1 \tau^2) + A_2^2 \cos(m_2 \tau x + m_2 \tau y - m_2 \tau^2) +$

$$\begin{split} &A_1 A_2 \cos\left(\frac{m_1 - m_2}{2} x^2 + \frac{m_1 - m_2}{2} y^2 + m_2 \tau x + m_2 \tau y - m_2 \tau^2\right) + \\ &A_1 A_2 \cos\left(\frac{m_2 - m_1}{2} x^2 + \frac{m_2 - m_1}{2} y^2 + m_1 \tau x + m_1 \tau y - m_1 \tau^2\right) \end{split} \tag{8}$$

信号和其迟滞信号相乘会产生交叉项,但是交叉项仍然为 非周期 Chirp 信号,对 Duffing 振子不构成影响。本文为分析简 便,将零均值高斯白噪声 n(x,y)引入模型:

$$S(x,y) = Ae^{j(\frac{m}{2}x^2 + \frac{m}{2}y^2)} + n(x,y)$$
(9)

此时不能利用上面的方法直接时间迟滞相乘,否则噪声也 被乘进去,信噪比降低。本文采用分块相乘的方法获得周期信 号。对于单分量 Chirp 信号,首先将 *S*(*x*,*y*)分成 *N* 块,每块大 小 *M* × *M*,则相邻的第 *k* 块和第 *k* + 1 块的乘积为

$$G_k(x,y) = S(x - kM, y - kM) \cdot \overline{S(x - (k+1)M, y - (k+1)M)} = A^2 e^{j(Mmx + Mmy - (2k+1)M^2m)} + N_k(x,y)$$
(10)

其中: $k = 1, 2, ..., N - 1; N_k(x, y)$ 为噪声的自迟滞相乘、信号与 噪声迟滞相乘以及信号延迟与噪声的乘积之和; $G_k(x, y)$ 是一 个频率为Mm的单频信号,可以通过相位补偿使得每段的初始 相位相同,然后再进行平均处理。对于每段中的 $N_k(x, y)$,因 为信号与白噪声不相关,所以平均后的 $N_k(x, y)$ 幅度将趋于 零。因此分块相乘再经过相位补偿以及叠加平均处理后,信噪 比提高并且得到一个周期信号:

$$\overline{G(x,y)} = \frac{1}{N-1} \sum_{k} \operatorname{Re} \left[G_k(x,y) e^{j(2k+1)M\omega} \right]$$
(11)

其中, ω 为 Duffing 振子內置信号频率。将 $\overline{G(x,0)}$ 送入 Duffing 振子检测器,估计出频率 Mm,从而得到估计值 m,最终得到水 印的估计序列 $S(x,0) = e^{i(\frac{m}{2}x^2)}$ 。多分量 Chirp 信号同样处理。

2.3 Chirp 类水印的嵌入

首先将载体图像 I 进行小波变换,提取低频小波系数 C(x,y)。然后将给定的离散 Chirp 信号 S(x,y)嵌入到 C(x,y)中,嵌入公式 $W(x,y) = C(x,y) + \alpha S(x,y)$,其中 α 为微弱的嵌 入强度。多分量 Chirp 水印嵌入公式如下:

$$S(x,y) = \sum_{i=1}^{N} A_i \cos(m_i x^2 + m_i y^2)$$
(12)

式(2)中各个水印信号的幅度 A_i 取得非常小,且可以随机 选择;水印的参数 m_i 可作为密钥使用。

一个含有两个混沌振子的阵列检测器如图2所示。



2.4 Chirp 类水印的检测步骤

水印检测时应该使用含有两个 Duffing 振子的阵列进行水印信号的检测。水印检测步骤如下:

a)首先将含有水印的载体图像 I'进行小波变换,提取低频 小波系数 C'(x,y)。

b)将 C'(x,y)分成 N 块,每块大小 M × M,则相邻的第 k 块和第 k + 1 块进行乘积得到

$$\begin{aligned} G_k(x,y) &= S(x-kM,y-kM) \cdot \overline{S(x-(k+1)M,y-(k+1)M)} = \\ & A_1^2 e^{j(Mm_1x+Mm_1y-(2k+1)M^2m_1)} + \\ & A_2^2 e^{j(Mm_2x+Mm_2y-(2k+1)M^2m_2)} + N_k(x,y) \end{aligned} \tag{13}$$

c)根据式(11),首先对步骤b)的结果进行相位补偿,然后 进行叠加平均得式(14),其中ω为Duffing振子检测器的内置 信号频率。

$$\overline{G(x,y)} = \frac{1}{N-1} \sum_{k} \operatorname{Re} \left[G_{k}(x,y) e^{j(2k+1)M\omega_{1}} + G_{k}(x,y) e^{j(2k+1)M\omega_{2}} \right]$$
(14)

d)将 $\overline{G(x,0)}$ 送入 Duffing 振子阵列检测器,估计出频率 Mm_1 、 Mm_2 ,从而得到估计值 m_1 、 m_2 ,最终得到水印的估计序列 为

 $S(x,0) = e^{j(\frac{m_1}{2}x^2)} + e^{j(\frac{m_2}{2}x^2)}$

3 仿真实验与抗攻击性能的对比测试

仿真实验采用原始图像为 256×256 的灰度级 Wbarb 图像, db8 小波分解。取 $m_1 = \omega_1/8$, $m_2 = \omega_2/8$, $A_1 = A_2 = 1 \times 10^{-2.5}$ 。将 Duffing 振子阵列均调整到临界混沌状态。嵌入载体中的水印 为 $S_2(x,y) = \sum_{i=1}^{2} A_i e^{i(\frac{m_i}{2}x^2 + \frac{m_i}{2}y^2)}$ 。使用四阶龙格—库塔法, 取 k =0.5, 检测器Duffing 振子阵列检测频率分别为: $\omega_1 = 1$ rad/s, $\omega_2 =$ 2 rad/s; Duffing 振子均使用同一个阈值 $\lambda_d = 0.60086475$; 系统灵 敏度为 10⁻⁸。由于低频小波系数实际上并非高斯分布,实验测 得当嵌入的 Chirp 信号幅度超过 $A_1 = A_2 = 1 \times 10^{-2.5}$ 时, 系统可 以检测到嵌入在载体中的 Chirp 水印,因此系统能检测到的信 噪比门限为 10 $\log_{10} \frac{(10^{-5})^2}{0.1273} = -91.0483$ dB,即如果在载体中直 接嵌入周期的单频信号,则系统能检测到的单频周期信号幅度 为 10⁻⁵。图 3 中,(a) 和(b)分别是原始图像和低嵌入强度的水 印图像;(c)是振子处于混沌状态;(d)(e)分别是振子阵列在 $\omega_1 = 1 \text{ rad/s}, \omega_2 = 2 \text{ rad/s}$ 时系统因为受到周期水印的驱动,由 混沌转向大尺度周期运动状态。



1)旋转10°攻击 图4中,(a)(b)分别是受旋转+剪切 攻击水印图像和振子因为水印的存在从混沌状态转向大尺度 周期状态的图样;(c)是 FRFT 检测图样。从(b)(c)中看出, 在水印嵌入强度比较低时,混沌振子可以感知水印信号的存 在,而此时 FRFT 已经失效。



(a)水印图旋转攻击 (b) 混沌振子检测结果 (c) FRFT方法检测结果 图4 混沌振子在w,=1 rad/s时由临界混沌状态转变为 大尺度周期运动状态,而FRFT方法检测失效

2)高斯噪声 噪声虽然可以将相轨迹拉伸,但因周期信号的影响,检测系统仍然可以很好地检测出水印。

图 5 中,(a)(b)分别是受噪声攻击水印图像和振子因为 水印的存在从混沌状态转向大尺度周期状态的图样;(c)是 FRFT 检测图样。从(b)(c)中看出,在受强噪声攻击时,混沌 振子可以感知水印信号的存在,而此时 FRFT 已经失效。



(a) 水印图噪声攻击 (b) 混沌振子检测结果 (c) FRFT方法检测结果 图5 受噪声攻击水印图像和振子因为水印的存在从 混沌状态转向大尺度周期状态,而FRFT方法检测失效

3)剪切攻击 实验显示如果裁减的图像不超过原始图像的30%时,混沌系统仍然能够检测出水印的存在。

图 6 中,(a)(b)分别是受剪切攻击水印图像和振子因为 水印的存在从混沌状态转向大尺度周期状态的图样;(c)是 FRFT 检测图样。从(b)(c)中看出,剪切攻击下,由于水印信 号的周期片段存在,混沌振子可以感知水印信号的存在,而此 时 FRFT 已经失效。

表1 是本文中两种检测 Chirp 水印信号方法的比较。*m*₁、 *m*₂ 是利用 FRFT 方法检测到的信号调频率; (下转第1526页) 测效果,这是由于文献[7]中将流量的各个部分进行了细化分析。相较前三种方法,本文提出的检测方法与文献[7]以及文献[8]的检测效果相当,但是具有最低的误检率,说明通过 FS-VDD 隐式地确定各个流量分量的关系较线性的相加更优。表 1中的检测率检测的仅为是否发生了 DoS 攻击,并不考虑攻击 的持续时间,它们所得的检测率是检测出攻击次数占总的攻击 次数比例。若考虑攻击持续时间,如图 3 中 4 000 s,通过其他 三种方法检测认为此时流量正常,而本文方法仍然可以检测出 此时发生攻击,也就是说本文方法可以统计出异常持续时间。 另外,从检测方法的反应速度来说,由于某种单一攻击初期引 起的变化较弱,往往被背景流量的噪声所覆盖,初期无法检测 出来,而本文方法和文献[8]由于分别考虑了各种协议的流 量,因此在对攻击的反应速度上优于其他两种方法。

4 结束语

本文从降噪的角度分析考虑了网络流量异常检测,采用局 部投影去噪的方式对网络流量进行了实时的降噪处理。在降 噪过程中通过 PCA 处理提高选择局部邻域的选择准确率,并 引入语音增强中的 SDC 噪声估计方法以提高效果。在构建模 型时综合考虑了异常流量、测得流量以及各个协议流量对于模 型建立的意义,通过 FSVDD 建立最终异常检测模型,能够更加 准确地描述各个因素在异常检测中的相互关系。通过在 OP-NET 上模拟攻击的实验说明,本文提出方法能够提供更加准 确的流量异常检测和更低的误报率,为流量异常检测和网络的 安全防护提供了新的思路。

参考文献:

[1] CASAS P, VATON S, FILLATRE L, et al. Optimal volume anomaly

(上接第1522页) m'₁、m'₂ 是利用 Duffing 振子检测到的信号调 频率。由于本文使用两分量的 Chirp 水印,所以检测到的调频 率有两个。"\"表示未能检测出水印。数据表明, Duffing 振子 检测性能较 FRFT 方法的检测性能高。



4 结束语

本文将 FRFT 和 Duffing 振子在 Chirp 类水印检测中的性 能进行比较,首先分析 FRFT 方法检测载体中水印的不足,然 后根据微弱信号混沌检测理论,将水印检测问题转换为超低信 噪比条件下,载体低频小波系数背景中利用 Duffing 振子滤波

0.01 0.125, \(\nu_0.125, 0.25 0.12, \(\nu_0.125, 0.25 0.120, \(\nu_0.125, 0.25 \)\)

detection and isolation in large-scale IP networks using coarse-grained measurements [J]. Computer Networks, 2010, 54(11): 1750-1766.

- [2] LAKHINA A, CROVELLA M, DIOT C. Mining anomalies using traffic feature distributions [C]//Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2005;217-228.
- [3] 朱应武,杨家海,张金祥.基于流量信息结构的异常检测[J].软件学报,2010,21(10):2573-2583.
- [4] LAKINA A, CROVELLA M, DIOT C. Diagnosing network-wide traffic anomalies[C]//Proc of Conference on Application, Technologries, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2004:219-230.
- [5] 侯重远,江汉红,芮万智,等.工业网络流量异常检测的概率主成 分分析法[J].西安交通大学学报,2012,46(2):70-75.
- [6] 曹敏,程东年,张建辉,等.基于自适应阈值的网络流量异常检测 算法[J]. 计算机工程,2009,35(19):164-166,177.
- [7] 邹柏贤.一种网络异常实时检测方法[J]. 计算机学报,2003,26 (8):940-947.
- [8] 颜若愚,郑庆华,牛国林.自适应滤波实时网络流量异常检测方法
 [J].西安交通大学学报,2009,43(2):1-5.
- [9] YU J, LEE H, KIM M S, et al. Traffic flooding attack detection with SNMP MIB using SVM[J]. Computer Communications, 2008, 31 (17):4212-4219.
- [10] EPHRAIM Y, Van TREES H L. A signal subspace approach for speech enhancement[J]. IEEE Trans on Speech and Audio Processing, 1995, 3(4):251-266.
- [11] 韩敏,项牧.局部投影去嗓的一种改进的邻域选取方法[J].系统 工程学报,2009,24(4):392-398.
- [12] TAX D M J, DUIN R P W. Support vector data description [J]. Machine Learning, 2004, 54(1):45-66.
- [13] LIN Chun-fu, WAN Sheng-de. Fuzzy support vector machines [J].
 IEEE Trans on Neural Networks, 2002, 13(2):464-471.

器检测周期信号。算法信噪比在低于 - 41 dB 时仍能有效地 检测到水印,此时 FRFT 方法失效,但 FRFT 方法在信噪比较高 时计算较简单。因此,在水印检测时可以综合考虑两种方法, 提高水印检测的可靠性。

参考文献:

\,\/0.125,0.250

- [1] 杨守义, 姬留杰, 穆晓敏, 等. 基于 FRFT 的数字水印算法分析 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(1): 20-23.
- [2] CANDAN C, KUTAY M A, HALDUN M O. The discrete fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000,48 (5):1329-1337.
- [3] 张峰,穆晓敏,杨守义,等.基于 FRFT 盲检测 Chirp 类数字水印算 法[J]. 计算机工程与应用,2006,42(27):57-61.
- [4] WANG Dian-hong, LI Dong-ming, YAN Jun, et al. An improved Chirp typed blind watermarking algorithm based on wavelet and fractional Fourier transform [C]//Proc of the 4th International Conference on Image and Graphics. 2007;291-296.
- [5] 李东明,王典洪,严军,等.基于小波与分数傅里叶变换的图像水 印算法[J].计算机工程,2008,34(8):15-18.
- [6] 平先军,陶然,周思永,等. 一种新的分数阶傅里叶变换快速算法
 [J]. 电子学报,2001,29(3):406-408.
- [7] 孙中伟,冯登国,武传坤.基于弱信号检测理论的离散小波变换域 数字水印盲检测算法[J]. 计算机研究与发展,2006,43(11): 1920-1926.
- [8] STANKOVIC S, DJUROVIC I, PITAS I. Watermarking in the space/ spatial-frequency domain using two-dimensional Radon-Wigner distribution[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(4):650-658.
- [9] 文忠,李立萍.基于 Duffing 振子的弱 Chirp 信号检测与参数估计
 [J].自动化学报,2007,33(5):536-539.