

# 基于态函数的离散分数余弦倒谱变换在取证语音信息隐藏中的应用

钟 巍,孔祥维,尤新刚,王 波

(大连理工大学电子信息与电气工程学部,辽宁大连 116024)

**摘 要:** 随着军事、安全等方面要求的日益增长,语音取证技术成为了语音信号处理和信息安全领域的热点和难点.本文提出了一种基于态函数的分数余弦倒谱变换,并将其应用到取证语音信息隐藏中,通过分析得到分数余弦倒谱变换的第3参数呈现一种独特的高频特性,从而提出了一种基于分数余弦倒谱变换的嵌入方法和过零率检测方法.实验仿真结果表明该方法具有一定的抗干扰能力,为分数余弦倒谱变换应用于取证语音信息隐藏提供了一种新的思路.

**关键词:** 分数余弦倒谱变换; 取证语音信息隐藏; 过零率检测

**中图分类号:** TP302.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0595-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.031

## Forensic Speech Information Hiding Using Fractional Cosine-Cepstrum Transform

ZHONG Wei, KONG Xiang-wei, YOU Xin-gang, WANG Bo

(Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** A new idea for forensic speech information hiding using three-cycle fractional cosine-cepstrum transform (3DFCCT) is proposed. We find in our analysis that the 3rd parameter of FRCT presents property of high frequency, then we put forward the low bit embedding and the over zero rate detection method for embedding secret information into speech signal in 3DFCCT domain. Results of simulation indicate that it has certain ability for anti-jamming. The discoveries in our study provide a new thought for application of 3DFCCT in forensic speech information hiding.

**Key words:** fractional cosine-cepstrum transform; forensic speech information hiding; zero-crossing rate detector

## 1 引言

语音取证是法律取证领域内一个崭新的研究方向,主要目的是指对录音信号进行获取、分析和评价以作为法庭或其他行政部门认可的证据,2009年 R. C. Maher<sup>[1]</sup>对语音取证技术的研究进展进行了详细讨论,同年, J. P. Campbell<sup>[2]</sup>等人介绍了取证说话人识别的研究进展.这两篇文章是对过去四十多年来语音取证技术进行了概括和总结,它们的发表标志着语音取证技术的发展到达了一个新的研究高度.目前语音取证研究的内容包括取证语音增强,语音信息隐藏,篡改识别与定位和取证说话人识别.

在语音取证中,特别是在取证语音信息隐藏技术中,如何确保语音证据在存储和传输过程中不受到非法篡改和破坏,是语音取证研究的热点和难点,常用的方法是提取语音信号的特征参数然后嵌入到语音中,嵌入

算法必须满足以下要求:

- (1)非法篡改者无法或很难发现隐秘信息的位置;
- (2)隐秘信息量必须满足一定要求,即必须大于或等于语音特征信息量;
- (3)根据隐秘信息能够判断存储语音是否已被篡改过,或篡改位置;

2007年 Kirbiz 等人在 AAC 压缩语音中嵌入以带限语音包络为参数的数字水印,取得了一定的效果<sup>[3,4]</sup>, Gulbis 等人着眼于时域和频域篡改,在 MP3 压缩语音中嵌入以语音特征参数为参数的易碎水印<sup>[5]</sup>.王国栋等人研究了脆弱和半脆弱水印算法<sup>[6~8]</sup>,孙建国<sup>[9]</sup>研究了无损数字水印技术.这些方法都只解决了或部分解决了要求的(2)(3)两点,但都回避了第(1)点的要求,如果非法篡改者发现水印位置,就可以再设置一个伪水印以骗过篡改检测算法,造成较大的影响.

上个世纪八十年代, V. Namias 提出了分数傅里叶

变换<sup>[10]</sup>理论,从此,分数阶傅里叶变换理论在差分方程、量子力学、光学信号处理中得到了广泛的应用<sup>[10,12]</sup>. Ozaktas 等人<sup>[7]</sup>认为信号的  $a$  阶分数傅里叶变换相当于信号在时频面内角度  $a\pi/2$  的旋转. 如果以一个随机数控制分数阶因子  $a$ , 在  $a$  阶分数傅里叶变换域上进行信息嵌入, 由于  $a$  随机变化无法预测和跟踪, 非法篡改者就很难发现、捕获、篡改隐秘信息.

分数傅里叶变换的成功应用推动了其他分数变换的发展, 分数 Hartley 变换、分数 Hadamard 变换、分数余弦变换和分数正弦变换先后被提出, 2001 年 Pei Soo-Chang 在分数傅里叶变换的基础上重新定义了分数余弦变换和分数正弦变换<sup>[11,13]</sup>.

分数阶理论的引入使得离散余弦变换成为分数阶离散余弦变换的特例, 通过改变分数阶值, 可使离散余弦变换的内涵得以扩展. 由于离散余弦变换在信号处理领域内有着极其广泛的应用, 可以预见, 离散分数余弦变换具有非常广阔的应用前景<sup>[12~15]</sup>.

而对分数余弦变换的研究才刚刚开始, 目前只停留在分数余弦变换的定义的推导上, 尽管 Pei Soo-Chang 提出的分数余弦变换是基于 V. Namias 提出的分数傅里叶变换, 但由于其缺乏快速算法、计算量比较大, 并不利于实际应用. 如果基于普通 DCT 形式推导出离散分数余弦变换, 则可以得到其快速算法.

## 2 基于态函数的离散分数余弦倒谱变换

分数变换的目的实际上是寻找一种同时携带时域和频域的信息. 1995 年 Shih C. C. 提出了一种基于态函数的分数傅里叶变换, 如式(1)所示, 信号  $x(t)$  的  $a$  阶基于态函数的分数傅里叶变换可为:

$$F^a(x) = A_0 f_0(x) + A_1 f_1(x) + A_2 f_2(x) + A_3 f_3(x) \quad (1)$$

式中  $f_0(x)$ 、 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$  分别为信号  $x(t)$  的 0 次傅里叶变换(信号本身)、1 次傅里叶变换、2 次傅里叶变换、3 次傅里叶变换. 系数  $A_0 \sim A_3$  满足:

$$A_l = \cos \frac{(a-l)\pi}{4} \cos \frac{2(a-l)\pi}{4} \exp\left(-\frac{3i(a-l)\pi}{4}\right) \quad (2)$$

$l = 0, 1, 2, 3$

从上面定义可看出, 信号  $x$  的  $a$  次离散分数傅里叶变换为其本身和三次傅里叶变换的线性组合, 同时它也是一个线性算子. 基于 Shih C. C. 的态函数结构, 我们可以构造一个周期为 3 的离散分数余弦倒谱变换(3DFCCT: three cycles Discrete Fractional Cosine-Cepstrum Transform). 3DFCCT 满足以下特性:

$$\begin{cases} F^0(x) = x \\ F^1(x) = \text{IDCT}(\log[\text{DCT}(x)]) \\ F^2(x) = \text{IDCT}(\exp[\text{DCT}(x)]) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)为离散余弦倒谱变换和其逆变换. 从式(3)可知构

造的 DFCCT 变换满足周期性, 如下式定义:

$$F^a(x) = \lambda_0(a) F^0(x) + \lambda_1(a) F^1(x) + \lambda_2(a) F^2(x) \quad (4)$$

设该式满足可加性, 即:

$$\begin{aligned} F^{a+b}(x) &= \lambda_0(a+b) F^0(x) + \lambda_1(a+b) F^1(x) \\ &\quad + \lambda_2(a+b) F^2(x) \\ &= \lambda_0(a) F^b(x) + \lambda_1(a) F^{1+b}(x) \\ &\quad + \lambda_2(a) F^{2+b}(x) \end{aligned} \quad (5)$$

则由式(5)可知下式(6)、(7)成立:

$$F^{1+b}(x) = \lambda_0(b) F^1(x) + \lambda_1(b) F^2(x) + \lambda_2(b) F^0(x) \quad (6)$$

$$F^{2+b}(x) = \lambda_0(b) F^2(x) + \lambda_1(b) F^0(x) + \lambda_2(b) F^1(x) \quad (7)$$

将式(4)、(6)、(7)代入式(5)并进一步化简整理可得:

$$\begin{pmatrix} \lambda_0(a+b) \\ \lambda_1(a+b) \\ \lambda_2(a+b) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0(b) & \lambda_2(b) & \lambda_1(b) \\ \lambda_1(b) & \lambda_0(b) & \lambda_2(b) \\ \lambda_2(b) & \lambda_1(b) & \lambda_0(b) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_0(a) \\ \lambda_1(a) \\ \lambda_2(a) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式(8)可写为:

$$\Lambda(a+b) = \Lambda'(b) \Lambda(a) \quad (9)$$

对式(8)进行对角变换, 即:

$$\Phi(a) = \mathbf{H} \Lambda(a) \quad (10)$$

$\Phi$  为对角线矩阵,  $\mathbf{H}$  定义如下:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h_1 & h_2 \\ 1 & h_2 & h_1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(9)可得:

$$\Phi(a+b) = \mathbf{H} \Lambda'(b) \cdot \mathbf{H}^{-1} \Lambda(a) \quad (12)$$

由矩阵知识可得:  $\mathbf{H}^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{H}|} \mathbf{H}^*$ , 代入式(12)化简整理可得:

$$\begin{pmatrix} \phi_0(a+b) \\ \phi_1(a+b) \\ \phi_2(a+b) \end{pmatrix} = \frac{1}{|\mathbf{H}|} \begin{pmatrix} (\lambda_0(b) + \lambda_1(b) + \lambda_2(b)) |\mathbf{H}| & 0 & 0 \\ B_{10} & B_{11} & B_{12} \\ B_{20} & B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_0(a) \\ \phi_1(a) \\ \phi_2(a) \end{pmatrix} \quad (13)$$

上式中:

$$B_{10} = \lambda_1(b) (h_1^3 - h_1 h_2^2 + h_2^2 - h_2 h_1 + h_2 - h_1) + \lambda_2(b) (h_2 h_1^2 - h_2^3 + h_2 - h_1 + h_1 h_2 - h_1^2) \quad (14)$$

$$B_{11} = \lambda_0(b) |\mathbf{H}| + \lambda_1(b) (2h_1 h_2 - h_1^2 - 2h_2 + 1) + \lambda_2(b) (h_2^2 - 2h_1 h_2 + 2h_1 - 1) \quad (15)$$

$$B_{12} = \lambda_1(b) (h_1 h_2 - h_1^2 + h_2 - h_2^2 + h_1 - 1)$$

$$+ \lambda_2(b)(h_2^2 - h_1 h_2 + 1 - h_2 + h_1^2 - h_1) \quad (16)$$

$$B_{20} = \lambda_1(b)(h_1^2 h_2 - h_2^3 + h_1 h_2 - h_1^2 + h_2 - h_1) \\ + \lambda_2(b)(h_1^3 - h_1 h_2^2 + h_2 - h_1 + h_2^2 - h_1 h_2) \quad (17)$$

$$B_{21} = \lambda_1(b)(h_2^2 - h_2 h_1 + h_1^2 - h_1 + 1 - h_2) \\ + \lambda_2(b)(h_1 h_2 - h_1^2 + h_1 - 1 + h_2 - h_2^2) \quad (18)$$

$$B_{22} = \lambda_0(b)|\mathbf{H}| + \lambda_1(b)(h_2^2 - 2h_1 h_2 + 2h_1 - 1) \\ + \lambda_2(b)(-h_1^2 + 2h_1 h_2 - 2h_2 + 1) \quad (19)$$

而式(13)为对角线矩阵,则式(14)、(16)、(17)、(18)必须等于0,式(15)、(19)必须不等于0.因此可得:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h_1 & h_2 \\ 1 & h_2 & h_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \frac{-1-\sqrt{3}i}{2} & \frac{-1+\sqrt{3}i}{2} \\ 1 & \frac{-1+\sqrt{3}i}{2} & \frac{-1-\sqrt{3}i}{2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

简单分析可令:

$$\phi_k(a) = \exp(ik\pi a) \quad k=0,1,2 \quad (21)$$

将式(21)、 $\mathbf{H}$ 代入式(10)可得:

$$\mathbf{A}(a) = \begin{pmatrix} \lambda_0(a) \\ \lambda_1(a) \\ \lambda_2(a) \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 + \exp(-\frac{2\pi ai}{3}) + \exp(-\frac{4\pi ai}{3}) \\ 1 + \exp(-\frac{2\pi(a-1)i}{3}) + \exp(-\frac{4\pi(a-1)i}{3}) \\ 1 + \exp(-\frac{2\pi(a-2)i}{3}) + \exp(-\frac{4\pi(a-2)i}{3}) \end{pmatrix} \quad (22)$$

则离散分数余弦倒谱变换 3DFCCT 为:

$$F^a(x) = \frac{1}{3} \sum_{k=0}^2 \left[ 1 + \exp(-\frac{2\pi(a-k)i}{3}) \right. \\ \left. + \exp(-\frac{4\pi(a-k)i}{3}) \right] F^k(x) \quad (23)$$

式(23)中,  $F^0(x) = x$ ,  $F^1(x)$ ,  $F^2(x)$  分别为  $x(t)$  离散余弦倒谱变换和其逆变换. 上式也显示, 当  $a = 0$  时,  $F^a(x)$  为时间序列  $x$  本身; 当  $a = 1$  时,  $F^a(x)$  为时间序列  $x$  的离散余弦倒谱变换; 当  $a = 2$  时,  $F^a(x)$  为时间序列  $x$  的离散逆余弦倒谱变换, 满足边界性.

### 3 基于 3DFCCT 变换的取证语音信息隐藏算法

通常的水印或信息隐藏算法只具有隐蔽性, 如果非法篡改者怀疑语音嵌入了隐秘信息, 则可在时域、频域、倒谱域或其它域进行扫描即易发现或更换隐秘信息. 对于取证语音来说, 隐藏算法不仅需要具有隐秘性而且还必须具备抗扫描能力. 对于 3DFCCT 变换而言, 如果采用伪随机序列控制分数阶因子  $a$ , 在  $a$  阶 3DFCCT 变换域上进行取证语音信息嵌入, 由于伪随机

序列的类噪声和随机跳变等特点, 篡改着无法跟踪捕获隐秘信息, 也就是说基于 3DFCCT 的算法具有抗扫描能力.

对于取证电话语音信息隐藏而言, 隐秘信息比特率通常不高, 一般在  $10 \sim 30\text{bit/s}$ . 本系统中设定每 256 点嵌入 1bit. 而嵌入算法考虑在  $a$  阶 3DFCCT 变换域上采用低 bit 嵌入. 本系统中在语音段中每 256 点嵌入 1bit. 即首先检测当前帧(256 点)是否为语音帧, 如是则嵌入隐秘信息. 为了提高系统的稳健性, 在第 6 位嵌入信息位时, 接收端能够比较准确地提取信息, 实验结果显示, 在第 7 或第 8 位嵌入时, 误比特率超过 20%.

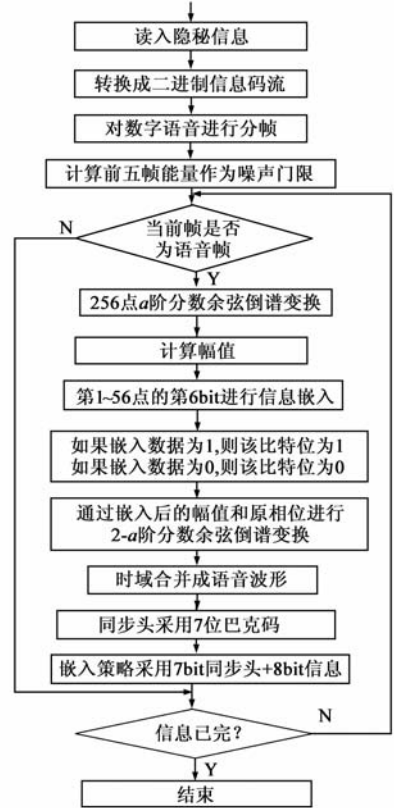


图1 离散分数余弦倒谱变换域上的低比特嵌入方法

需要说明的是基于巴克码具有尖锐的自相关特性, 本方案将其作为同步头.

### 4 低比特位嵌入的实验结果

为了更好地分析分数余弦变换域上低比特位嵌入的性能, 本文将其与离散余弦变换域上的低比特嵌入进行比较.

从图中可看出, 无论是 DCT 方法还是分数余弦倒谱变换方法, 嵌入信息后的语音与纯净语音相比基本无差别, 从听觉效果上看, 两者差别不大.

### 5 分数余弦变换域上的过零率法

在变换域上改变某些参数可以隐藏信息, 但由于

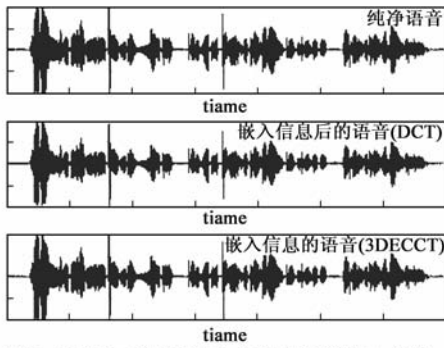


图2 离散余弦变换域上的低比特位嵌入方法

人耳对语音信息比较敏感,导致寻找一种既不被人耳所感知,又能够抗多种干扰和噪声比较困难.通过大量实验分析发现(实验室环境下对 60 青年男女进行录音,语音长度平均 10s,每人共 10 句话),当  $0.2 < a < 0.9$  时,在 256 点分数余弦倒谱变换参数中,细微改变第 1,2 位的参数,人耳易察觉,而且波形不易区分;如果改变第 3 位以后的参数,其对应的分数谱幅值变化曲线受噪声(由荷兰 RSRE 语音研究中心提供的高斯白噪声和非平稳噪声)的影响比较大;实验室还发现,细微改变第 3 位参数幅值,具有不被人耳感知的特点,而且在波形上具有较大的区别,加载噪声后,其对应的分数谱幅值变化幅度要明显小于其他位的参数,这一点与 DCT 变换的特性相当,人耳对 DCT 低频参数也不敏感.

图 3 和图 4 给出了纯净语音和加入 01 相间的字符串后的语音在分数余弦倒谱变换域的第 1 点、第 3 点的对比情况,需要说明的是加入信息后的语音在听觉上与原始纯净语音一致.在分数余弦变换域上第 3 点上呈现出比较高的频率.针对这种特性,本文提出了如下方法:

(1)如果数据信息位为 1,传 01 相间的字符串,这时分数域波形第 3 点呈现较高的频率;

(2)如果数据信息位为 0,不改变任何值,这时分数域波形第 3 点与原始纯净波形保持一致;

(3)在接收端针对一帧语音采用过零率的大小来判断接收到信息位是 0 还是 1.

表 1 是实验室环境下针对 60 名青年男女进行录音,每人 10 句话,语音长度平均 10s,对这些语音采用 DCT 方法和 3DFCCT 方法进行语音信息隐藏所得到的误码率,实验结果表明 3DFCCT 在 10dB 白噪声环境下性能要优于 DCT 方法 6.5 个百分点,在 10dB Pink 噪声环境下性能要优于 DCT 方法 5.7 个百分点,在 10dB Volvo 噪声环境下性能要优于 DCT 方法 4.3 个百分点.表 1 结果表明,3DFCCT 方法具有比普通 DCT 方法更强的抗噪声能力.图 5 给出了 10dB 白噪声环境下的 3DFCCT 方法的误码率曲线,从图 5 中可发现,当  $a$  为

0.5 左右,误码率达最小.

表 1 实验室环境下对 60 人青年男女语音进行信息嵌入的误码率

		DCT 方法	3DFCCT
白噪声	30dB	12.2%	8.5%
	20dB	17.3%	13.4%
	10dB	24.8%	18.3%
Pink 噪声	30dB	12.9%	8.8%
	20dB	18.2%	14.0%
	10dB	23.3%	17.6%
Volvo 噪声	30dB	7.2%	7.3%
	20dB	14.7%	13.2%
	10dB	19.9%	15.6%

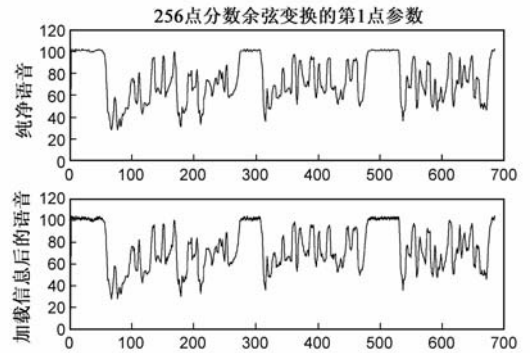


图3 分数余弦倒谱变换域上的第1参数变化情况

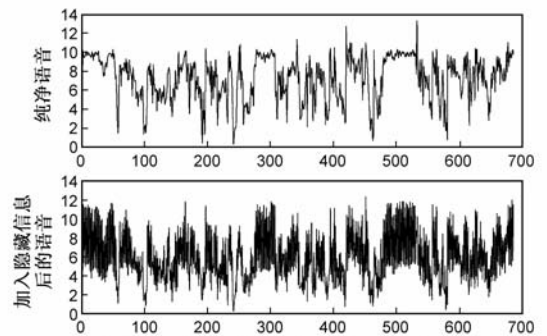
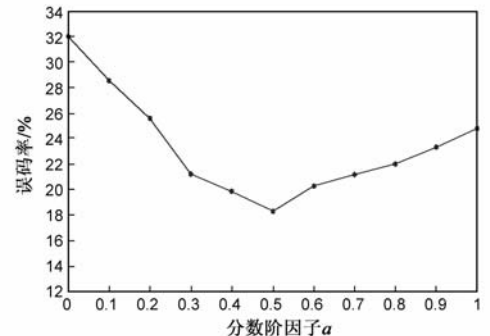


图4 分数余弦倒谱变换域上的第3参数变化情况

图5 白噪声环境下(10dB)不同分数阶因子 $a$ 时的 3DFCCT 方法误码率曲线

试听实验表明,嵌入隐秘信息前后,两者都基本听不出,听觉效果相当,但 DCT 的听觉效果更好一些.

由于 3DFCCT 方法的分数阶因子  $a$  可控,可采用一组伪随机序列来进行控制,在接收端同样可采用相同

的伪随机序列用于隐秘信息提取,因此,即使监听者怀疑语音中携带隐秘信息,但无伪随机序列也无法截取隐秘信息.而 DCT 方法则不然,一旦怀疑,则通过分析 DCT 域易发现隐秘信息.而且 3DFCCT 方法嵌入和提取隐秘信息的手段实现简单,在 30dB 噪声环境下正确率可达 90% 以上,而且具有一定的抗干扰能力.

## 6 小结

离散分数余弦倒谱变换是余弦变换的推广,在数字信号处理中具有广泛的应用价值,本文基于态函数提出了一种新的分数余弦倒谱变换算法,并将其应用到取证语音信息隐藏中,通过改变第 3 位参数和低比特位信息来嵌入隐秘信息,提出了离散分数余弦倒谱变换域上的过零率法和低比特嵌入法,与其他嵌入方法相比,DCT 方法是目前综合评价最佳的方法在抗噪声性能、听觉效果方面都较好,而且计算复杂度中等,是目前主流的信息隐藏方法,理论分析和初步实验结果表明,本文提出的 3DFCCT 方法,在误码率方面优于 DCT 方法,而且更加隐蔽,抗主动干扰能力更强,能够较好地嵌入隐秘信息,具有一定的抗干扰和抗监听能力,但尚需进一步从多个角度分析寻找最佳的分数阶因子和更稳健的隐秘信息提取方法以及继续寻找离散分数余弦倒谱变换域上新的特征参数来有效嵌入隐秘信息.

## 参考文献

- [1] Maher R C. Audio forensic examination[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(2): 84 – 94.
- [2] Campbell J P, Shen W, et al. Forensic speaker recognition[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(2): 95 – 103.
- [3] Kirbiz S, Lemma A N, et al. Decode-time forensic watermarking of AAC bitstreams[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(4): 683 – 696.
- [4] Kirbiz S, Celik M, et al. Forensic watermarking during AAC playback[A]. Proceeding of IEEE International Conference on Multimedia and Expo[C]. New York: IEEE Press, 2007. 1111 – 1114.
- [5] Gulbis M, Muller E, et al. Combining multilevel manipulation estimation with content-based authentication watermarking[A]. Proceeding of Third International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing[C]. New York: IEEE Press, 2007. 461 – 464.
- [6] 王国栋,刘粉林,等.一种能区分水印或内容篡改的脆弱水印算法[J].电子学报,2008,36(7):1349 – 1354.  
Wang Guodong, Liu Fenlin, et al. An image authentication scheme with discrimination of tampers on watermark or image[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1349 – 1354. (in Chinese)
- [7] 孙建国,张国印,等.一种矢量地图无损数字水印技术

[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2786 – 2790.

- Sun Jianguo, Zhang Guoyin, et al. Lossless digital watermarking technology for vector maps[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 38(12): 2786 – 2790. (in Chinese)
- [8] 金喜子,姜文哲.块级篡改定位的 JPEG 图像脆弱水印[J].电子学报,2010,38(7):1585 – 1589.  
Jin Xizi, Jiang Wenzhe. Fragile watermarking capable of locating tampered blocks in JPEG images[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1585 – 1589. (in Chinese)
  - [9] 段贵多,赵希,等.一种新颖的用于图像内容认证、定位和恢复的半脆弱数字水印算法研究[J].电子学报,2010,38(4):842 – 847.  
Duan Guiduo, Zhao Xi, et al. Novel semi-fragile digital watermarking algorithm for image content authentication, localization and recovery[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 842 – 847. (in Chinese)
  - [10] Namias V. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics[J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 1980, 25(3): 241 – 265.
  - [11] Shih C C. Fractionalization of fourier transform[J]. Optics Communications, 1995, 118(5 – 6): 495 – 498.
  - [12] Almeida L B. An introduction to the angular Fourier transforms[A]. Proceeding of IEEE International Conference on Acoust, Speech, and Signal Processing[C]. New York: IEEE Press, 1993: 257 – 260.
  - [13] Ozaktas H M, Zalevsky Z, et al. The Fractional Fourier Transform with Applications in Optics and Signal Processing[M]. USA: John Wiley&Sons Ltd, 2001. 104 – 132.
  - [14] Pei S C, Tseng C C, et al. Discrete fractional Hartley and Fourier transforms[J]. IEEE Transaction on Circuit Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1998, 45(6): 665 – 675.
  - [15] Pei S C, Yeh M H. Discrete fractional Hadamard transform [A]. Proceeding of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. New York: IEEE Press, 1999. 1485 – 1488.

## 作者简介



钟 巍 男,1973 年 5 月出生于安徽省铜陵市.现为大连理工大学博士研究生.从事数字音频取证方面的研究工作.

E-mail: zww110221@163.com

孔祥维 女,1963 年 4 月出生于湖北省,现为大连理工大学电信学院教授,博士生导师,IEEE 信号处理和通信分会会员,中国电子学会通信分会、多媒体信息安全专委会副主任,长期从事多媒体信息处理、多媒体信息安全以及模式识别的研究工作.

E-mail: kongxw@dlut.edu.cn