

静态图像多维水印的并行嵌入和检测

梁建勋 胡波 凌熨亭

(复旦大学电子工程系 CAT 实验室, 上海, 200433)

摘要 数字水印已经成为多媒体数据产权保护的一种有效的解决方案, 不可察觉性和鲁棒性是图像水印中基本要求, 但它们却是一对互相制约的因素, 在两者之间寻找一个平衡点, 已经成为水印中的一个关键问题. 本文提出了一种多维水印的方案, 在图像的 DCT 域中, 使用扩频技术并行地嵌入互相独立的多维水印信号, 可以在不增加水印信号幅度的情况下, 提高水印的鲁棒性.

关键词 产权保护, 数字水印, 扩频通信, 伪随机, 联合概率分布.

PARALLEL EMBEDDING AND DETECTION OF MULTIDIMENSIONAL WATERMARK FOR STILL IMAGE

LIANG Jian-Xun HU Bo LING Xie-Ting

(CAT Group, E. E. Department, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Digital watermarking has become one of the effective solutions to the protection of copyright of multimedia data. Imperceptibility and robustness, which are the basic requirements of digital watermark, conflict with each other. So, looking for a trade-off of the pair has become one of the keys in watermarking. A scenario of multidimensional watermark for resolving rightful ownership of digital images was proposed in this paper. The multidimensional watermark, whose vectors are mutually independent, was embedded into image in the DCT domain in parallel by using spread-spectrum technology. The robustness of multidimensional watermark was improved without enhancing the watermark energy.

Key words copyright protection, digital watermark, spread-spectrum communication, pseudorandom sequence, joint probability distribution.

引言

数字水印技术近来已成为多媒体数据产权保护的重要方法, 该方法通过对数据的少量修改, 把一些信息(署名)直接嵌入到多媒体中, 对水印后多媒体数据的署名检测提取, 可以确定这些数据的版权归属.

为了实现图像的产权保护, 图像水印应具备: 不可察觉性、鲁棒性、相对独立性, 并且允许多重水印同时存在. 对于不可视水印图像, 人眼无法主观判别原始图像, 检测过程中使用原始数据并不能完全解决版权纠纷, 因而不使用原始版本数据已成为水印的另一个重要要求.

水印按照嵌入的方法不同可分为时域(空间域)^[1,2]和变换域两种. 变换域的水印可分为 DCT^[3-5]、Wavelet^[6]、Fourier^[7] 等几种方法. 变换域水印可以充分考虑到信号处理在变换域上的影响; 而且它的视觉模型比较成熟, 利用这种模型可以嵌入不可视的水

印, 因此变换域水印方法要优于空间域水印方法. 本文主要讨论静态灰度图像的 DCT 域水印.

高频成分经过信号处理容易丢失, 水印应该加在感知比较重要的部分. 文献[1]把水印加在包括 DC 在内的低频 DCT 系数中, 文献[2]使用了只对 DC 系数水印的方案; 文献[3,4]提出了特征提取的方法, 只对某些大于指定阈值的系数水印, 其中包括高频部分. 文献[5]提出了多层次水印方法, 图像的 DCT 矩阵被分成高容量区(低频部分)和高鲁棒性区(中高频部分), 在不同区域分别加入不同的水印信号.

文献[1,2]对 DC 系数水印容易造成图像失真, 而且不能进行多重水印; 并且文献[1]使用原始图像的检测方案是不可取的, 文献[3,4]的特征提取法不可避免地对高频部分进行水印, 实验结果表明这种方案对低通滤波的鲁棒性较差. 文献[5]中高容量水印的目的在于图像验证并不是产权保护, 高容量水印鲁棒性较差.

我们提出的方法是在 DCT 域低频部分考虑视觉模型,使用扩频技术并行嵌入多维水印.在水印检测过程中不借助原始图像,利用联合概率分布的方法检测水印的存在.

1 多维水印

水印应该加到图像的中低频部分,因为一般的信号处理对图像的高频部分影响比较大.DCT 域中(参见图 1),低频成分包含了比高频成分更多的能量.水印的盲检测(不使用原始图像)过程中,图像部分相当于引入的噪声.选用最低频部分 1 和 2 嵌入水印等于增加了噪声信号能量,检测效果较差^[6].为了达到较好的盲检测效果,我们不采用掩蔽阈值较低的 4,5 系数而采用序号为 3,6,7,8 的中频系数作为水印区域,分别记为 $I_1 \sim I_4$.水印嵌入的详细框图见图 2,其中 W 是待嵌入的四维水印, R 是四维的伪随机码, W' 是经伪随机码调制的水印信息.它的嵌入过程可按以下步骤进行.

1.1 用户信息映射为 4 维的伪随机序列

$S = \{S_1 \dots S_L\}$ 是由用户提供的字符串,如果字符串长度小于 8,系统由默认字符补足为 8 个字符.这个字符串可以是注册码或有意义的署名信息.按照不可逆函数 F ,字符串 S 映射为一个四维的 10 阶 m 序列 $PN = \{PN(j) \mid j = 1, \dots, 4\}$,其中 $PN(j) = F(j, s) \ j = 1, \dots, 4$ 是按照函数 F 映射成的第 j 个 m 序列.

不可逆函数 F 的是一个多对一映射:首先, S 中的字符 $S_i(a-z$ 和系统提供的五个保留字符)映射为值 $C_i, 1 \leq C_i \leq 31$;其次, $(C_{2j-1} + C_{2j})/2$ 作为伪随机序列 PN_j 的索引; $(C_j \% 4) \times 256 + (C_{j-1} \% 4) \times 64 + (C_{j-2} \% 4) \times 16 + (C_{j+3} \% 4) \times 4 + C_{j+4} \% 4$ 是一个十位二进制数,最后把它映射为 PN_j 的初始

0	1	5	I_2	14	15	27	28
2	4	I_3	13	16	26	29	42
I_1	I_4	12	17	25	30	41	43
9	11	18	24	31	40	44	53
10	19	23	32	39	45	52	54
20	22	33	38	46	51	55	60
21	34	37	47	50	56	59	61
35	36	48	49	57	58	62	63

图 1 DCT 矩阵中的水印区域分布图
Fig. 1 Watermark location in DCT matrix

相位.其中 $i = 1 \dots 8, j = 1, \dots, 4$. PN_j 是周期为 $2^m - 1$ 长度为 $L_h \cdot L_v$ 的 m 阶伪随机序列, L_h, L_v 分别代表行与列中 DCT 的块数.根据 m 序列特性, PN 的各个成分之间相互独立.

1.2 图像 DCT 变换,提取掩蔽阈值

原始图像首先被分成 $L_h \cdot L_v$ 个互不重叠的块,每个块的大小是 8×8 .块之间按照逐行扫描的顺序排列.对每一个 8×8 的块进行 DCT 变换, DCT 矩阵中各系数按照 Zig-zag 排序(如图 1 所示).根据人眼对不同频率分量敏感度不同,可以得到独立于图像的 DCT 矩阵的频率分量阈值:如果再考虑到图像亮度的影响,可以得到更精确的掩蔽阈值: $T_f(u, v), u, v = 1 \dots 8$,如果再考虑到图像亮度的影响,可以得到更精确的掩蔽阈值

$$T_f(u, v, b) = T_f(u, v) (X_{0,0,b} / X_{0,0})^\alpha,$$

其中 $X_{0,0}$ 是 DC 系数的平均值, b 是块的编号, α 取 0.649.用于水印的 3,6,7,8 系数掩蔽值,按顺序记为

$$G_j(b), j = 1, \dots, 4, b = 1, \dots, L_h \cdot L_v.$$

由于我们对不同频率成分单独嵌入相互独立的水印,为了对各频率嵌入相同能量的水印信号,嵌入信号应满足条件 $G(b) = \min(G_j(b)), j = 1, \dots, 4$.

1.3 生成伪随机序列调制的水印信息

四维的水印信息是根据 DCT 序号 3,6,7,8 的掩蔽阈值生成的,最简单的方法是由 $W_j(i) = \alpha_j \cdot PN_j(i) \cdot G(i)$,得到

其中

$$\alpha_j = \begin{cases} 0.26, & \text{if } \text{mean}\{I_j(i)\} \geq 0 \\ -0.26, & \text{others} \end{cases}$$

经过扩频调制的四维水印信号并行嵌入到图像中,即, $I'_j(i) = I_j(i) + W_j(i), i = 1, \dots, L_v \times L_h, j = 1, \dots, 4$.得到多维水印后的图像 DCT 系数.

1.4 图像 IDCT 变换恢复

水印后的图像 DCT 系数,经过 IDCT 变换,按照同样的块排序方式,恢复为图像数据.由于我们在

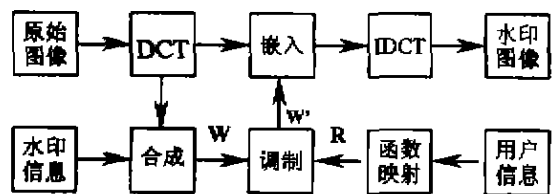


图 2 水印嵌入图
Fig. 2 Block diagram of watermark embedding

水印过程中考虑到了不同系数的阈值,因此得到水印图像是人眼不能分辨的.

2 多维水印联合检测

2.1 假设检验

图像水印检测时,首先提取待测系数向量 X ,然后计算 X 和检测序列 S^* 的相关值. S^* 不一定和 S 相同,但和 S 有高度相关性.相关值和阈值 T 比较,判定图像是否含有水印.图像水印的检测过程就是假设检验

$$H_0: X(i) = I(i) + N(i)$$

$$H_1: X(i) = I(i) + \alpha GS(i) + N(i)$$

H_0 表示待测图像不含对应水印, H_1 表示包含水印. $N(i)$ 是由于信号处理等原因引起的噪声.相关检测输出值 q

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n Y(i)}{V_y \sqrt{n}} = \frac{M_y \sqrt{n}}{V_y}$$

其中 $Y(i) = X(i)S^*(i)$, M_y 是 $Y(i)$ 的平均值, V_y 是 $Y(i)$ 的样本方差.

假设 $\{Y(i)\}$ 是稳态的,并且是 $1(1 \in N^+)$ 长度独立, $S^*(i)$ 是和图像 I 无关的均值为零的序列.当 n 比较大时,在 H_0 的假设下, q 近似服从 $N(0, 1)$ 的正态分布;在 H_1 的假设下, q 近似服从 $N(m, 1)$ 的正态分布,其中

$$m = \frac{(E(\alpha GS(i)S^*(i)) + E(N(i)S^*(i)))\sqrt{n}}{V_y} \approx \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha GS(i)S^*(i) + N(i)S^*(i))}{V_y \sqrt{n}}$$

检测相关值 q 和阈值 T 比较, $q > T$ 表示图像包含水印, $q < T$ 表示不包含.假设检验中会犯两类错误(见图 3):第一类错误是 H_0 为真时接受水印的存在(B区),错误概率是 P_{err1} ;第二类错误是 H_1 为真时拒绝水印的存在(A区),错误概率是 P_{err2} . T 的选择条件是使总误差 $P_{err} = P_{err1}P(0) + P_{err2}2P(1)$ 最小,一般认为两种假设的等概率出现,所以取 $T = m/2$.

信号处理基本不影响 H_0 的分布,但会使 H_1 的分布误差增大,均值变小(见图 3).如果只考虑犯第一类错误的概率,使 P_{err1} 近似为某一定值, T 的取值要比 $m/2$ 小的多^[9],从而可以减少被处理过图像的水印检测错误率.如果 T 的选择满足条件 $P_{err1} < \alpha$, 为保证犯第二类错误的概率也不超过 α , m 必须满足条件 $m > 2T$.如果取 $\alpha = 0.01\%$, 则 $m > 2T = 2 \cdot 3.72 = 7.44$.

当 H_0 和 H_1 的分布存在交叉时,无论 T 怎么选择,总存在不小于 P_{err} 的错误率.文献[9]中指出只有增加水印信息的能量,增大 m 的值,才能减少错误概率.其实如果我们使用联合概率分布理论,在不增加水印能量的情况下提高准确率.

2.2 联合概率分布

$$\begin{aligned} & n \text{ 维随机向量中如果对一切 } x_1, x_2, \dots, x_n \text{ 都有} \\ & \{\omega | X_1(\omega) \leq x_1, X_2(\omega) \leq x_2, \dots, X_n(\omega) \leq x_n\} \\ & = \bigcap_{i=1}^n \{X_i(\omega) \leq x_i\} \in F \end{aligned}$$

那么 $F_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 叫做 n 维随机变量 (X_1, X_2, \dots, X_n) 的联合分布函数.

n 维随机变量相互独立,是指这 n 个随机变量中任何一些随机变量的取值情况不影响其它随机变量取值的概率.对于任何实数 x_1, x_2, \dots, x_n , 均有

$$\begin{aligned} & P\{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n\} \\ & = P\{X_1 \leq x_1\} P\{X_2 \leq x_2\} \dots P\{X_n \leq x_n\}, \end{aligned}$$

即 $F(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1)F(x_2) \dots F(x_n)$

四维相互独立水印的检测过程中,犯第一类错误的概率是

$$\begin{aligned} P_{err1} &= P(x_1 < T_1, x_2 < T_2, \dots, x_4 < T_4) \\ &= P(x_1 < T_1)F(x_2 < T_2) \dots F(x_4 < T_4), \end{aligned}$$

如果以错误概率 0.01% 的显著水平衡量,在各维检测值是同一正态分布的条件下,只需满足条件 $P < 0.0001^{1/4} = 0.1$, 因此可取 $T = 1.28$. 为保证犯第二类错误的概率不超过 α , 各水印分量的检测正确率 P_{cor} 必须满足条件 $P_{cor} > (1 - 0.0001)^{1/4} = 0.999975$, 也就是 $m > T + 4.05 = 5.33$. 因此在同样检测水平限制下,多维水印对检测期望值 m 的要求降低了.或者说嵌入同样能量的水印时,多维水印的

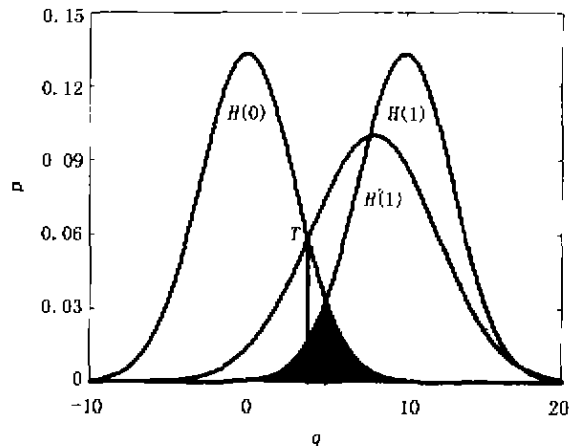


图 3 假设检验
Fig. 3 Hypothesis testing

检测错误率降低了。

2.3 多维水印检测

待测图像按照水印嵌入中的方法分块、DCT 变换后,提取序列号为 3,6,7,8 的 DCT 矩阵系数向量(如图 4 所示)。每个系数向量与对应的检测序列 S^* 相关, S^* 不一定和 S 是同一序列,可以是和 S 高度相关的序列。 S^* 的选择影响检测值的输出,我们选择最优化值 $S^* = \alpha GS^{[4]}$ 。每一个检测相关值 q_j , 和阈值 T_j 相比较,只有条件 $q_j > T_j, j = 1, \dots, 4$ 都成立时,才认为图像中包含认证的水印。

3 实验结果

我们以字符串“fudan”为署名信息,把它按照函数 F 映射为四个 10 阶 m 序列。对 512×512 的 Lena 图像和 Baboon 图像,在 DCT 域分别对 3,6,7,8 的四维系数并行嵌入对应的水印。水印后的图像与原图像相比,只是相当于分别引入了 42.0210dB 和 42.8504dB 的噪声,并没有视觉上的差别(如图 5 所示),因此这种多维并行水印是不可察觉的。

对 512×512 的 Lena 图像,我们分别嵌入 27621 种不同的四维水印信息,图 6 显示了两种假设的检验分布图。四维水印的检测分布是近似相同的,他们的阈值 T_j 可选择同一个值 T 。对于 T 的不同选择,联合检测的两类错误概率如表 1 所列。错误概率为“—”表示样本点未落入错误区域。 T 的选择对于检测的准确度非常重要,我们以第一类错误 0.005% 的检测标准,使用一维的水印, T 应该选择 3.9^[9]。我们使用四维的水印方案,选择 T 为 1.3 即可。

表 1 假设检验错误概率

Table 1 Error probability in hypotheses testing

T	第一类错误	第二类错误
1.0	6.0996e-4	—
1.4	4.0549e-5	—
.....
7.8	—	3.6204e-5

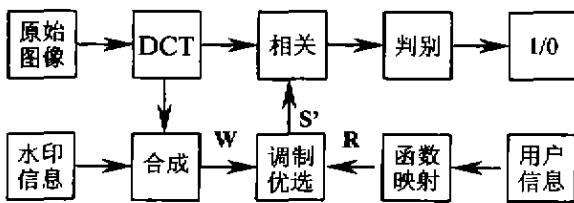


图 4 水印检测图

Fig. 4 Block diagram of watermark detection

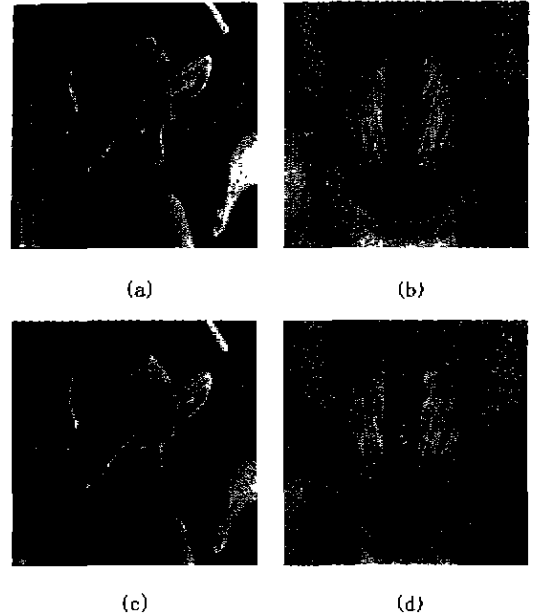


图 5 水印效果图

(a) 原始 Lena 图象 (b) 原始 Baboon 图象
(c) 水印后的 Lena 图象(SNR=41.0614)
(d) 水印后的 Baboon 图象(SNR=42.8504)

Fig. 5 Watermark performance

(a) original Lena (b) original Baboon
(c) watermarked Lena(SNR=41.0614)
(d) watermarked Baboon(SNR=42.8504)

水印联合嵌入检测方法有很高的鲁棒性,它能适用于 JPEG 压缩,低通滤波,图像比例缩放和多重水印等情况。

3.1 JPEG 压缩

假设检验中犯错的概率将随着量化因子 Q 的减小而增大,图 7 显示了不同量化因子 Q 的 JPEG 压缩后检验的正确率 P ,S-D、M-D 分别表示单维和多维方法,采用^[9]的单维水印方案并取 $T = 3.9$,

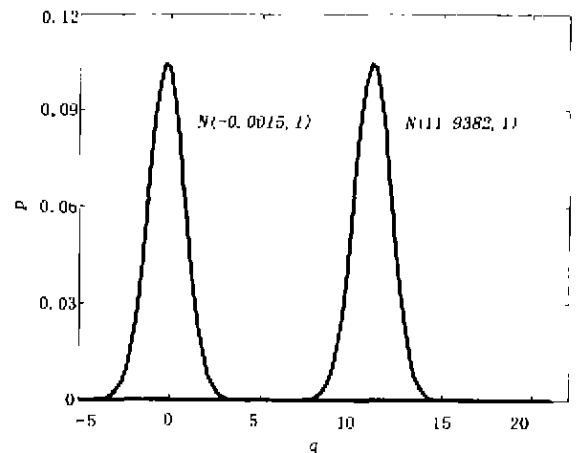


图 6 水印检测输出值 q 的分布图

Fig. 6 Distribution of watermark detection output q

它能够检测出 $Q > 25\%$ 时的压缩图像. 使用同样水印的方法, 多维水印法在量化因子为 15% 时, 检测正确率近似 100% .

3.2 低通滤波

中低频的多维水印方案对于图像的低通滤波有非常高的鲁棒性. 对水印后的图像, 使用 3×3 阶的二维 Gaussian 低通滤波器对其滤波, 图 8 显示了 $\sigma = 5.3$ 的高斯低通滤波器滤波后的图像, 它相当于引入了 16.6035dB 的噪声, 滤波后图像中的水印能够得到完全正确的检测.

3.3 比例缩放

为了检测缩放后图像中的水印, 首先通过降(升)采样率恢复图像的大小. 表 2 列出了过缩放处理后, 只相当于对图像引入了少量的噪声, 水印的检测均值没有太大的变化, 所有检测值均落入了置信区间.

3.4 多重水印

我们的水印方案类似于扩频通信^[1], 不同用户水印信息相互独立, 因此能够单独检测. 表 3 列出了三重水印的检测均值及多重水印对图像带来的噪声影响. 三重水印后的图像只相当于引入 37.1568dB 的噪声, 而且多重水印的检测值全部落入了置信区间.

4 结论

用于产权保护的图像水印是一种保密的私有水

表 2 图像缩放后水印的检测
Table 2 Watermark detection of scaled image

几何操作		均值 m	SNR(dB)
中值法升采样 (1024×1024)	抽取 恢复	11.9382	42.0210
抽取法降采样 (256×256)	重复 恢复	9.6853	40.9581

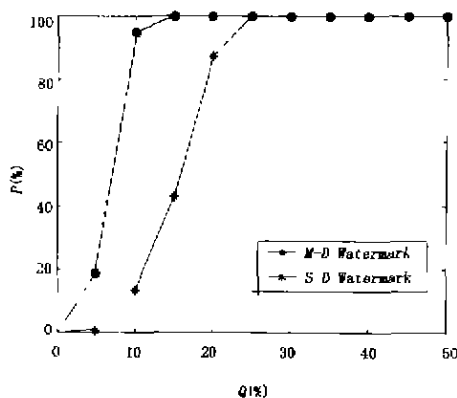


图 7 JPEG 压缩后水印检测正确率图

Fig. 7 Watermark veracity as a function of quality factor Q of JPEG

表 3 多重水印的检测

Table 3	Detection of multiple watermarks	
	均值 (m)	SNR(dB)
一重水印	11.9448	42.0210
两重水印	10.9527	38.9410
三重水印	10.3564	37.1568

印, 图像水印的目的不是嵌入尽量多的水印信息, 而是要求水印的鲁棒性要好. 在 DCT 域中低频部分的水印, 使用了多维信号的并行嵌入和联合检测的方法. 该方法能够适用于 $Q > 10\%$ 的 JPEG 压缩、低通滤波等, 实验证明这种水印方案有很高的鲁棒性.

REFERENCES

- [1] Ingermar J Cox, Joe Kilian, Tom Leighton, *et al.* Secure spread-spectrum watermarking for images, audio and video. *Proc. ICIP'96*, 3: 243—246
- [2] Huang Jiwu, Shi Yun Q, Shi Yi. Embedding image watermarks in DC components. *IEEE Trans. On Circuits and Systems for Video Tehnology*, 2000, 10: 974—979
- [3] Craver S, Memon N, Yeo B, *et al.* Can invisible watermarks resolve rightful ownerships? *Proc. IS&T/SPIE Electronic Imaging: Storage and Retrieval of Image and Video Databases*, 1997, 3022: 310—321
- [4] Zeng Wenjun, Liu Bede. A statistical watermark detection technique without using original images for resolving rightful ownerships of digital images. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, 8(11): 1534—1545
- [5] Wu Min, Yu Hong Heather, Alex Gelman. Multi-level data hiding for digital image and video. *Photonic East '99 - Multimedia Sys. and Application*, In: *Proc SPIE 1999*, 3845
- [6] Juan R Hernandez, Martin Amado, Fernando Pérez-Gonzalez. DCT-domain watermarking techniques for still images: detector performance analysis and a new structure. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(1): 55—68
- [7] Kundur D, Hatzinakos D. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion. In: *Proc. IEEE Internat. Conf. Image Processing*, 1997, 1: 544—547
- [8] Piva A, Barni M, Bartolini F. Copyright protection of digital images by means of frequency domain watermarking. In: *Proc SPIE, Mathematics of Data/Image Coding, Compression, and Encryption*, 1998, 3456: 25—35
- [9] Piva A, Barni M, Bartolini F, *et al.* Threshold selection for correlation-based watermark detection. In: *Proc COST 254 Workshop on Intelligent Communications*, 1998, 254: 67—72.
- [10] LIN Ke-Xiang, WANG Yi-Fei. *The Theory and Application of Pseudo-random Code*. Beijing: People's Post and Telecommunication Publishing House(林可祥, 汪一飞. 伪随机码的原理与应用. 北京: 人民邮电出版社), 1978