

文章编号:1001-9081(2007)08-1922-04

基于 H. 264/AVC 低比特率视频流的双水印算法

单承赣, 孙德辉

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

(sunflying2008@sohu.com)

摘要:针对 H. 264/AVC 编码标准的新特性,通过对低比特率视频流 I 帧 DCT 域量化编码和 P 帧运动估计过程的研究,提出了一种可同时进行版权保护和完整性认证的双水印算法。实验表明,该算法在水印嵌入时通过 Lagrangian 最优编码控制技术,比特流达到了较好的率失真平衡;所嵌入的鲁棒水印对重量化编码、帧编辑等攻击具有抵抗性,所嵌入的脆弱水印对各种普通攻击具有较强的敏感性。该算法提取水印时不需对压缩码流完全解码,并且为盲提取,能够满足实时随机检测的需要。

关键词:H. 264/AVC; 比特流; 鲁棒水印; 脆弱水印; 量化; 运动矢量

中图分类号: TP309.2; TP391.4 **文献标志码:** A

Bi-watermarking algorithm for H. 264/AVC low bit-rate video stream

SHAN Cheng-gan, SUN De-hui

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: Noticing the new features of the H. 264/AVC video coding standard, through the research into the coding of the DCT coefficients of I-frames and the processing of the motion estimate of P-frames, a new bi-watermarking algorithm that can realize the copyright protection and the integrality authentication jointly was proposed. Simulation results show that the video stream has a good rate-distortion balance by using the coding control technique of Lagrangian optimization; the robust watermark embedded has good immunity to some attacks such as requantization, frames-editing and so on, and the fragile watermark embedded is very sensitive to various common attacks. This algorithm need not decode to the video bit stream entirely, and it realizes the blind detection of bi-watermarking, which can achieve the requirement of the random detection in real-time.

Key words: H. 264/AVC; bit stream; robust watermark; fragile watermark; quatzatization; motion vector

0 引言

在现有的实时视频水印算法中,离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)域水印^[1-3]和运动矢量水印^[4,5]因具有较低的复杂性与编码标准良好的兼容性,得到了深入的研究。然而以前大多数方法都着眼于 MPEG 视频高比特率率的应用,而不是低比特率(≤ 1 Mbit/s)。H. 264/AVC 标准尤其适用于低比特率的应用,加上运动精度的提高,其 4×4 块的预测残差经 DCT 变换和量化后,大部分 AC 系数都为零,传统的通过调制 DCT 系数幅度的水印嵌入方法已很难实现^[6]。

文献[7]通过自适应相位调制,提出了一种将灰度图像嵌入到 H. 264/AVC 视频流 DCT 域中的鲁棒水印,但其调制参数不易控制,计算量较大。文献[8]通过在编码器中加入漂移补偿机制,直接将水印序列嵌入到 H. 264/AVC 比特流中,但过程复杂。文献[9]中提出了一种混合水印机制,但其控制参数固定且修改幅度较大,视觉质量不是很理想。

基于文献[9]中混合水印机制的思想,结合 H. 264/AVC 新编码特性,通过在视频流编码的不同阶段分别嵌入鲁棒水印和脆弱水印,提出了一种能同时进行版权保护和完整性认证的双重水印嵌入方案。实验结果表明了该算法的有效性和实用性。

1 编码分析及双水印嵌入策略

H. 264/AVC 作为最新一代的数字视频编码标准,其仍然是基于块的混合编码方法。但它采用了大量先进的编码技术,大大地提高了编码效率和视频质量^[10]。

依据 H. 264/AVC 的编码新特性,本文提出的双水印算法通过修改帧内预测残差的量化系数,在视频序列 I 帧中嵌入鲁棒水印;通过适当地限制帧间运动估计的搜索精度,在 P 帧中嵌入脆弱水印。双水印嵌入算法基本框图如图 1 所示。

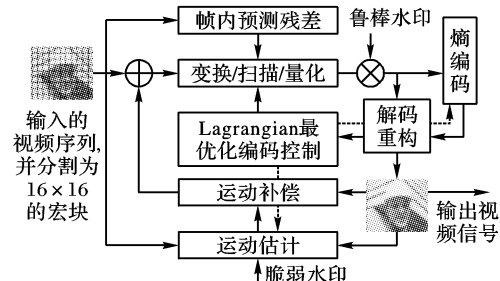


图1 双水印嵌入算法基本结构

1.1 I 帧帧内预测嵌入鲁棒水印

在 H. 264/AVC 标准中,亮度信号的帧内预测可分为 4×4 和 16×16 两种预测方式。其中 4×4 方式以 4×4 块为基础,有 9 种可选的预测模式,用于对图像的细节信息进行预测;

收稿日期:2007-02-02;修回日期:2007-04-17。

作者简介:单承赣(1942-),男,安徽合肥人,教授,主要研究方向:多媒体传输、视频编码与数字水印;孙德辉(1982-),男,河南固始人,硕士研究生,主要研究方向:视频编码与数字水印。

16×16方式以整个宏块为基础,有4种可选的预测模式,用于对图像的平坦区域进行预测。所有模式预测所得的残差矩阵都以4×4子块为基础进行4×4整数DCT变换,经量化编码,并做出最佳预测模式选择后,再生成比特流传输给解码器^[11]。

本算法第一步是在帧内预测4×4残差块DCT量化系数中嵌入鲁棒水印。由于量化后执行CABAC或CAVLC编码都是无损操作^[12],嵌入的水印信息在后续处理中不会丢失,并且只要嵌入的位置适当,水印在获得较好隐蔽性的同时将具有一定的鲁棒性。

具体嵌入步骤如下:

步骤1 在I帧的每个宏块中任选一个固定的4×4亮度子块作为水印嵌入块。其经帧内预测,将可能产生9个(4×4方式)或4个(16×16方式)不同的预测残差块。每一个残差块经4×4整数DCT变换后共有16个量化系数,按Zig-zag扫描顺序从低频到高频排列并量化。假定量化后的直流系数为 DC_0 ,交流系数为 $AC_1 \sim AC_{15}$ 。

步骤2 4×4残差块的变换系数较少,但其绝大部分能量都集中在直流分量和中低频分量中,改变其某个高频分量不会引起严重的视觉质量下降。故在高频区的量化系数 $AC_{10} \sim AC_{15}$ 中任选一个固定的位置,按式(1)进行修改。

$$AC_i^* = \begin{cases} AC_i + 1, & \text{if } AC_i \bmod 2 \neq W_i \bmod 2 \\ AC_i, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中 w_i 为鲁棒水印序列,取值为{0,1}。

步骤3 水印嵌入后,对不同预测模式产生的水印残差块进行编码时,残差数据小的块反而有可能耗费更多的比特率。为此引入Lagrangian最优化技术^[13]来确定最佳预测模式和水印残差块,以达到最佳的率失真平衡。Lagrangian代价函数如式(2):

$$J_{\text{mode}} = D_{\text{REC}}(MB, o) + \lambda_{\text{mode}} R_{\text{REC}}(MB, o) \quad (2)$$

其中 MB 为嵌入水印的宏块, o 为当前所选择的预测模式, $D_{\text{REC}}(MB, o)$ 为所选预测模式下宏块重建像素与原始像素之间的失真度, $R_{\text{REC}}(MB, o)$ 为熵编码后码流的比特率, λ_{mode} 为Lagrangian控制参数。其中 λ_{mode} 由H. 264/AVC量化参数 QP 确定,根据式(3)^[14]来计算:

$$\lambda_{\text{mode}} = 0.85 \times \text{pow}(2, (QP - 12)/3) \quad (3)$$

在相同参数情形下,不同预测模式将产生不同的Lagrangian代价函数值,其中使值最小的模式就是具有最佳率失真平衡性能的水印块预测模式。

由上面嵌入过程可知,I帧每个宏块都嵌入了1比特水印信息。残差块的量化AC系数最大改变幅值为1,但对量化前的DCT系数而言,也即相应改变了一个量化步长。显然I帧水印的嵌入强度与量化步长成正比,对重量化攻击有一定的鲁棒性。

另外,为了弥补鲁棒水印嵌入位置较为固定的不足,也可在嵌入前对鲁棒水印序列进行混沌置乱,以增强其安全性。

1.2 P帧帧间预测嵌入脆弱水印

对于帧间预测编码,H. 264/AVC采用树状结构运动补偿机制来划分宏块^[10]。一个宏块可以划分为从16×16到4×4不同尺寸的子块,每个子块都有单独的运动矢量。更小的子块划分和更多的运动矢量在提高了运动估计精确程度的同时,也为在运动估计过程中嵌入用于完整性认证的脆弱水印信息提供了可能。

与以前的视频编码标准相同,为了减少传输比特数,

H. 264/AVC也采用了运动矢量预测和差分矢量编码技术。对运动矢量进行编码时,不是直接对矢量水平分量和垂直分量值进行编码,而是对当前宏块的差分运动矢量(Motion Vector Difference, MVD)即当前宏块的运动矢量与预测运动矢量的差值进行编码。同时还采用了复杂的内插运算,亮度分量的运动估计搜索精度达到1/4像素^[11]。

根据文献[4]提出的修改MPEG运动矢量来嵌入水印的思想,考虑到H. 264/AVC特有的运动补偿机制及运动矢量划分模式,且达到很高的像素精度。本算法第二步通过修改预测矢量残差MVD的搜索预测精度,在P帧运动矢量中嵌入脆弱水印。

水印嵌入步骤如下:

步骤1 在P帧中,每个宏块被分割为不同尺寸的子块,对每个子块进行运动预测,得到运动矢量预测残差 $MVD = [dx, dy]^T$,其中 dx 和 dy 分别为MVD的水平分量和垂直分量。

步骤2 由于搜索范围精度为1/4像素,则 dx 的最小精确长度为1/4像素。在H. 264/AVC参考软件JM的解码实现中,其首先把运动矢量除以4,分为整数抽样点上运动矢量和分数抽样点上运动矢量,分别找到预测帧块中的相应位置。假定单位长度“1”代表1个像素,则按式(4)对MVD的水平分量 dx 进行修改:

$$dx^* = \begin{cases} dx - 1/4, & \text{if } (4 \times dx + T) \bmod 2 \neq W_i \bmod 2 \\ dx, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

其中 W_i 为脆弱水印序列,取值为{0,1}; T 为运动估计搜索窗口长度的2倍。

其实通过对满足条件的运动矢量的修改,其运动估计过程受到了限制,即预测搜索范围缩小了1/4个像素精度。

步骤3 嵌入后的残差矢量以宏块为基础进行变换量化编码,但不同分割尺寸导致失真度与传输比特率各不相同,这就要求编码器需为每个宏块选择传输比特量最少、失真度最小的最佳尺寸分割模式。在此也引入Lagrangian代价函数来确定最佳分割模式和运动矢量,如式(5):

$$mv_i = \arg \min_{mv \in M} \{ D_{ME}(MB, mv) + \lambda_{ME} R_{ME}(mv - pmv) \} \quad (5)$$

其中 M 为可能分割模式的集合, mv 为当前候选的运动矢量, pmv 为从邻块预测的运动矢量, $D_{ME}(MB, mv)$ 为宏块的失真度, $R_{ME}(mv - pmv)$ 为熵编码后传输运动矢量码流所需比特数, λ_{ME} 也为Lagrangian控制参数,并且与 λ_{mode} 有关,如式(6)^[14](对SAD准则)所示:

$$\lambda_{ME} = \text{sqrt}(\lambda_{\text{mode}}) \quad (6)$$

通过式(5)可最终确定使得Lagrangian代价函数值最小的最佳含水印运动矢量,但其优化判断过程显然要比帧内预测模式的情况复杂得多。

从上面嵌入过程可知,P帧每个运动矢量中都嵌入了1bit水印。每帧所嵌入的水印比特数即为运动矢量的个数,并且最少等同于宏块的数目,最多为宏块数目的16倍。运动矢量的数量由视频图像的动态信息而定,动态信息丰富的图像划分的子块较小较多,自然嵌入的水印信息也就较多。运动矢量的预测编码严重依赖于I帧及相邻块的解码,任何微小的攻击都有可能运动矢量发生改变,进而水印提取也将严重失真,即表现出水印的脆弱性。

2 双水印的提取方法

具体提取步骤如下:

步骤 1 对 H.264/AVC 压缩码流进行非完全解码,得到 I 帧的量化 DCT 系数和 P 帧的运动矢量预测残差 MVD。

步骤 2 在 I 帧每个宏块的水印嵌入子块中找到水印嵌入位置,设其对应系数为 AC_i^* ,则按式 $W_i' = AC_i^* \bmod 2$ 提取鲁棒水印序列。

步骤 3 设 P 帧运动矢量预测残差 MVD 的水平分量为 dx^* ,按 $W_i'' = (4 \times dx^* + T) \bmod 2$ 式进行脆弱水印序列提取。

由以上步骤可知,提取双水印时不需要对压缩码流完全解码,并且为盲提取。提取方法比较简单,计算效率较高。

3 实验及结果分析

本实验基于 H.264/AVC 参考软件模型 JM8.6 来实现水印的嵌入和提取,实验所用的视频序列为 QCIF 格式 (176×144) 的 foreman 和 container,帧频为 30 Hz,帧数都为 100 帧。由于 QCIF 每帧共有 99 (176/16×144/16=99) 个 16×16 的宏块,根据本文算法思想,帧内预测每个宏块嵌入 1 bit, P 帧帧间预测每个运动矢量嵌入 1 bit,则设定两个二进制水印序列。其中鲁棒水印序列长度为 99 bit,脆弱水印序列最大长度为 1584 bit (99×16=1584),分别重复嵌入到 I 帧和 P 帧的亮度分量中,每个 P 帧中嵌入水印的具体比特数与此帧图像的动态信息有关,但最多为 1584 bit,最少为 99 bit。对于脆弱水印序列,每个 P 帧所提取的水印长度即为所嵌入的水印比特数。

3.1 帧序设定为 GOP1 (IBPBP) 结构

图 2(a、b) 分别为测试序列 foreman 和 container 在量化参数 $QP = 28$ 时嵌入水印后所截得的视频帧,显然从视觉上看几乎没有明显的质量下降。图 3 为低比特率下两序列嵌入水印后的率失真曲线,图中四个节点分别为 $QP = 24, 28, 32, 36$ 时的相应值。从图中可以看出,嵌入后的水印视频与未嵌入的视频相比,视觉质量都有所下降,且编码比特率也都有所增加,并且嵌入水印后的 foreman 失真幅度比 container 较大,这是因为 foreman 较 container 具有更多的动态信息,在运动估计时具有更多的运动矢量,相应地嵌入水印比特较多,从而导致视频质量下降幅度和比特率增幅都较大。就 $QP = 28$ 时的 foreman 序列而言,视频质量平均下降约为 0.71 dB,比特率平均增加约为 3.12%,但视频仍具有较好的率失真性能。

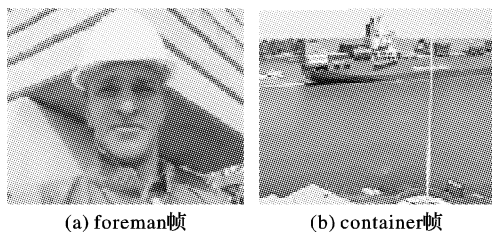


图 2 水印视频帧截图

为了客观评价所提取的水印序列,这里引入 BER (Bit Error Ratio) 做定量定性分析。BER 即为未正确提取的水印比特数与所嵌入总比特数的比率。 $BER = 0$ 表示嵌入的水印信息全部被正确检测出来。对于鲁棒水印,要求视频受到攻击后,仍能比较完整的提取出水印信息,即 BER 值越小越好;脆弱水印用来对视频图像进行内容认证,任何恶意的攻击都

可能导致水印不能被正确提取, BER 值很大时,即说明视频遭到了破坏。

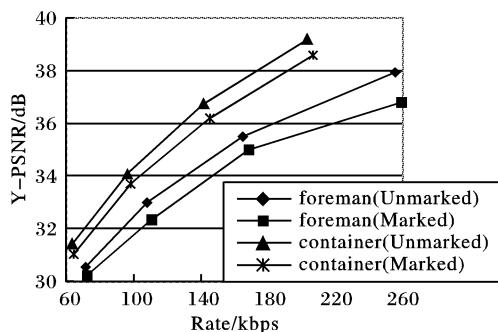


图 3 嵌入水印后率失真曲线

表 1 第 1 组 GOP 帧序所提取水印的 BER 值

	QP	BER		
		I/O	P/2	P/4
foreman	24	0.0101	0.9013	0.8702
	28	0	0.0130	0
	32	0.0707	0.8948	0.9210
container	24	0	0.9201	0.9134
	28	0	0	0
	32	0.1010	0.8989	0.8807

表 1 为量化参数 $QP = 28$ 的原始水印视频经重量化编码,其第 1 组 GOP (共 5 帧,依次为 IBPBP) 所提取水印的 BER 值。由表 1 可见,在视频未遭量化攻击时,所提取的鲁棒水印和脆弱水印的 BER 值几乎都为零,也即实现了双水印比较完整的提取。但在 QP 分别设为 24 和 32,经重量化编码后,从 I 帧提取的鲁棒水印 BER 值很小,可以说得到了较完整的水印提取,即说明水印对重量化攻击具有一定的鲁棒性。但从 P 帧提取的脆弱水印 BER 值都非常大,显然可说明视频受到了攻击。

表 2 同类型帧提取水印 BER 的平均值

	foreman		container	
	I 帧	P 帧	I 帧	P 帧
未受攻击	0	0.0033	0	0.0041
高斯滤波	0.2327	0.9807	0.3328	0.9674
椒盐噪声	0.1939	0.9412	0.2270	0.9201

表 2 为 $QP = 28$ 时两个含水印视频遭受攻击后,所有同类型帧所提取水印 BER 的平均值。从表 2 可以看出,滤波及噪声对所嵌入的双水印影响都较大。但相对而言,从 I 帧所提取水印 BER 值都小于 0.3500,其仍可做出版权所有者的判断,也说明 I 帧中水印对滤波和噪声攻击具有一定的鲁棒性,而 P 帧中水印几乎不能被检测到,即说明视频遭到了攻击。

3.2 帧序设定为 GOP2 (IBBPBPBPBPBB) 结构

客观上讲, GOP1 结构的码流将高于 GOP2,因为前者的 I 帧数目比后者多。图 4 为不同 GOP 结构下 foreman 水印视频序列比特流的率失真曲线。从图 4 可看出,设定相同 QP 时,采用 GOP2 帧序结构的含水印视频比特流,其率失真性能与 GOP1 结构的相比较差。这是因为本算法在 I 帧和 P 帧中都嵌入水印,当采用 GOP2 结构帧序时,由于跳帧增多,多帧预测导致水印误差累积增大,最终导致视频质量下降较多,且其比特率也相应增加。

另外,本文算法向每个 I 帧中都嵌入了相同的水印序列,在视频遭到帧删除或帧重组时,只要有 I 帧存在,就仍可提取

出鲁棒水印,说明本算法对帧编辑处理也具有鲁棒性且可随机检测。但对 P 帧水印而言,由于需要前后多帧的帧间预测进行编码,在遭到帧编辑攻击后,则可能导致预测残差和预测模式都发生很大变化,因而不可能进行正确的水印提取,水印表现很脆弱。

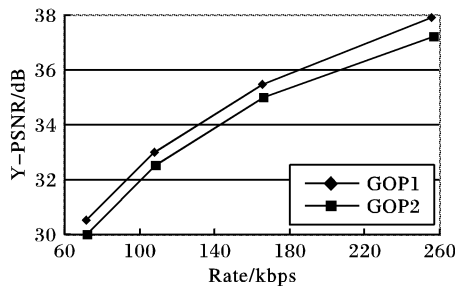


图4 不同 GOP 结构率失真曲线

4 结语

分别通过在 I 帧 DCT 域量化系数中嵌入鲁棒水印和在 P 帧运动矢量中嵌入脆弱水印,提出了一种针对 H. 264/AVC 低比特率视频流的双水印算法。本算法充分结合 H. 264/AVC 编码标准及新特性,在嵌入过程中利用 Lagrangian 最优编码控制技术,达到了较好的率失真平衡。所嵌入的 I 帧水印对重量化编码、帧编辑、滤波及加噪等具有一定的鲁棒性,所嵌入 P 帧水印对各种基本攻击都有较强的脆弱性,可同时实现对数字视频进行版权保护和完整性认证。本算法复杂度低,计算简单,可满足实时随机盲检测的需求,具有较好的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] HARTUNG F, GIROD B. Watermarking of uncompressed and compressed video[J]. *Signal Processing*, 1998, 66(3): 283–301.
- [2] SIMITOPOULOS D, TSAFTARIS S A, BOULGOURIS N V, *et al.* Compressed-domain video watermarking of MPEG streams [C]// *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME 2002)*. Lausanne, Switzerland: IEEE Communications Society, 2002, 1: 569–572.
- [3] BISWAS S, DAS S R, PETRIU E M. An adaptive compressed MPEG-2 video watermarking scheme[J]. *IEEE Transactions Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(5): 1853–1861.
- [4] JORDAN F, KUTTER M, EBRAHIMI T. Proposal of a watermarking technique for hiding/retrieving data in compressed and decompressed video, ISO/IEC/JTC1/SC29/WG11/MPEG97/M2281[R]. 1997.
- [5] SONG J, LIU K J R. A data embedding scheme for H. 263 compatible video coding[C]// *Proceedings of IEEE International Symposium Circuits and Systems*. Spain: IEEE Computer Society, 1999, 4: 390–293.
- [6] ALATTAR A M, LIN E T, CELIK M U. Digital watermarking of low bit-rate advanced simple profile MPEG-4 compressed video[J]. *IEEE Transactions Circuits Systems Video Technology*, 2003, 13(8): 787–800.
- [7] ZHANG J, HO A T S. Robust digital image-in-video watermarking for the emerging H. 264/AVC standard[C]// *IEEE 2005 Workshop on Signal Processing Systems (SIPS 2005)*. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 657–662.
- [8] SAKAZAWA S, TAKISHIMA Y, NAKAJIMA Y. H. 264 native video watermarking method[C]// *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2006)*. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 4.
- [9] QIU G, MARZILIANO P, HO A T S, *et al.* A hybrid watermarking scheme for H. 264/AVC video[C]// *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*. Washington: IEEE Computer Society, 2004, 4: 865–869.
- [10] WIEGAND T, SULLIVAN G J, BJNTEGAARD G, *et al.* Overview of the H. 264/AVC video coding standard[J]. *IEEE Transactions Circuits Systems Video Technology*, 2003, 13(7): 560–576.
- [11] SULLIVAN G, WIEGAND T. Video compression from concepts to the H. 264/AVC standard[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(1): 18–31.
- [12] MARPE D, SCHWARZ H, WIEGAND T. Context-based adaptive binary arithmetic coding in the H. 264/AVC video compression standard[J]. *IEEE Transactions Circuits Systems Video Technology*, 2003, 13(7): 620–636.
- [13] JOCH A, KOSENTINI F, SCHWARZ H, *et al.* Performance comparison of video coding standards using Lagrangian coder control [C]// *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'02)*. [S. l.]: IEEE Press, 2002, 2: II-501–II-504.
- [14] WIEGAND T, SCHWARZ H, JOCH A, *et al.* Rate-constrained coder control and comparison of video coding standards[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2003, 13(7): 688–703.

(上接第 1921 页)

任。本信任度模型仍有待完善,将时间的因素考虑到信任度模型中是今后研究的重点和难点。

参考文献:

- [1] JØSANG A, GRAY E, KINATEDER M. Analysing topologies of transitive trust[C]// *Proceedings of the Workshop of Formal Aspects of Security and Trust (FAST)*, 2003 [2007–01–01]. http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/32947/http://zSzzzw-w. informatik. uni-stuttgart. de/SzipvzSzvszSdezSzpeoplezSzkinatemlzSzpaperszSzJosangGrayKinateder_FAST2003. pdf/jsang03analysing. pdf.
- [2] LEVIEN R, AIKEN A. Attack-resistant trust metrics for public key certification[C]// *7th USENIX Security, Symposium*, January 26–29, 1998, San Antonio, Texas. (2002–04–12) [2007–01–05]. http://www.usenix.org/publications/library/proceedings/sec98/full_papers/levien/levien_html/levien.html.
- [3] BETH T, BORCHERDING M, KLEIN B. Valuation of trust in open network[C]// *Proceedings of the European Symposium on Research in Security (ESORICS)*. Brighton: Springer-Verlag, 1994: 3–18.
- [4] MAURER U. Modeling a public-key infrastructure[C]// BERTINO E. *Proceedings of 1996 European Symposium on Research in Computer Security (ESORICS'96)*, LNCS 1146. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 325–350.
- [5] REITER M K, STUBBLEBINE S G. Toward acceptable metrics of authentication[C]// *Proceedings of 1997 IEEE Symposium Security and Privacy*. Washington: IEEE Computer Society, 1997: 10–20.
- [6] ZIMMERMANN P. Pretty good privacy user's guide: volume I and II [Z]. Distributed with PGP software, 1993.
- [7] 周建峰, 马玉祥, 欧阳雄. PKI 信任模型研究[J]. *电子科技*, 2006(4): 75–78.
- [8] 白保存, 李中学, 陈旺. 一种新的 PKI 信任度模型算法设计[J]. *计算机测量与控制*, 2005, 13(8): 843–845.
- [9] JØSANG A. An algebra for assessing trust in certification chains[C]// *Proceedings of the Network and Distributed Systems Security Symposium (NDSS'99)*, 1999 [2007–01–15]. <http://sky.fit.qut.edu.au/~josang/papers/Jos1999-NDSS.pdf>.
- [10] PERLMAN R. An overview of PKI trust model[J]. *IEEE Network* November, 1991, 3(6): 38–43.