文章编号:1671-4598(2018)08-0247-05 DOI:10.16526/j.cnki.11—4762/tp.2018.08.055 中图分类号:TP391 文献标识码:A

基于 DWT 和形态学滤波的图像伪造检测方法

如先姑力·阿布都热西提，亚森·艾则孜
（新疆警察学院 信息安全工程系，乌鲁木齐 830013）

摘要：针对图像中复制－移动和拼接形式的图像伪造检测，提出一种基于离散小波变换（DWT）和形态学滤波的图像伪造检测方法；首先，将图像转换为灰度图，通过应用 DWT 获得 LH、HL 和 HH 子带；然后，通过阈值判断来获得伪造图像区域的边缘，并通过形态学滤波来连接边缘使其清晰化；最后，提取伪造区域的 SIFT 特征，并通过相似性检测来寻找图像中与伪造区域相似的区域，以此来确定伪造类型；实验结果表明，该方法能够准确检测出伪造区域和伪造类型。

关键词：图像伪造检测；离散小波变换；形态学滤波；尺度不变特征变换

Image Forgery Detection Based on DWT and Morphological Filtering

Ruxianguli·Abudurexiti, Yasen Aizezi
(Department of Information Security Engineering, Xinjiang Police College, Urumqi 830013, China)

Abstract: For the issues that the image forgery detection in the form of copy－move and splicing, an image forgery detection method based on discrete wavelet transform (DWT) and morphological filtering is proposed. Firstly, the image is converted to grayscale and the LH, HL, and HH subbands are obtained by applying a DWT. Then, the edge of the forgery image area is obtained by the threshold judgment, and the edges are sharpened through morphological filtering. Finally, the SIFT feature of the forged region is extracted and the similar region in the image is searched through the similarity detection. Experimental results show that this method can accurately detect forgery regions and forgery types.

Keywords: image forgery detection; discrete wavelet transform; morphological filtering; scale invariant feature transform

0 引言

随着数字技术的发展，出现了很多对数字图像进行处理的软件，以此可以形成各种类型的伪造图像。图像伪造检测在取证等领域具有重要意义。由于数字图像中功能强大的软件工具，通过肉眼很难确定图像是否为原始图像[1]。其中，复制－移动和拼接是两种常见的图像伪造手段[2]。复制－移动是通过剪切图像中的一个区域并将其粘贴到其他位置，而剪切是通过剪切其他图像区域并将其粘贴到该图像。基于这种分类，在复制－移动图像中搜索具有相似特征的区域，或者在拼接图像中搜索完全不同特征的区域是伪造检测的基本原理[3]。

对于复制－移动类图像伪造的检测，基本都是以搜索相似区域为主要手段，而特征不一致性的情况被认为是拼接图像[4]。文献［5］利用离散小波变换（DWT）和离散余弦变换（DCT）来变换图像，然后提取特征，并基于特征比较来确认复制区域。文献［6］提出了一种基于二进小波变换（UDWT）和 Zernike 矩的新方法来进行复制－移动图像的伪造检测。其首先采用 UDWT 方法来获得图像低频（LL）组件，然后计算 Zernike 矩以产生 LL 上重叠块的特征向量，并根据这些向量找到复制区域。文献［7］使用 DWT 将图像分解成 4 个子带，对从 LL 子带划分出的每个小重叠块使用尺度不变特征变换（SIFT）来提取特征向量。

对于拼接的检测，其比复制－移动的检测复杂。许多拼接检测方法的关键思想是寻找与图像特征不一致的区域。重采样的区域，双重压缩的区域，以及具有模糊差异或锐度差异的区域都可以被认为是拼接的痕迹。例如，文献［8］表明图像中 JPEG 压缩的差异可能由拼接引起，其基于 8×8 块的离散余弦变换（DCT）变换来检测 DCT 块的移位。文献［9］表明照明不一致性和固有重采样性质也是检测拼接的参数，其在提取对比度和平均灰度值特征之前，将图像块转换成 HSV 颜色空间。

然而，大部分现有方法都是单独检测复制－移动或拼接的问题，只有很少的文献能够同时对同一图像中的复制－移动和拼接问题进行检测。例如，文献［10］提出了一种结合 DCT 和加速稳健特征（SURF）的综合技术，以检测复制－移动或拼接图像的伪造。这意味着被检测的图像是可选的，而不需事先将其分类为复制－移动或拼接。文献［11］提出了一种二进小波变换和 Zernike 矩的检测方法，通过 Zernike 矩来表示块区域的特征。文献［12］使用多分辨率韦伯局部描述符（WLD）来检测图像中的复制－移动和拼接，其首先将 RGB 图像转换为 YCbCr 色彩图像，使得 WLD 可以从比亮度更不敏感的色度分量中提取特征。

本文开发了一种检测算法，可以对多个复制－移动和拼接形式的图像伪造进行检测。通过应用一级 DWT 获得

收稿日期:2017-08-28； **修回日期**:2017-09-26。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61762086);新疆警察学院校级科研基金科技应用创新一般项目(2017JYYYCXYB13)。
作者简介:如先姑力·阿布都热西提(1976-),女,新疆喀什人,硕士,副教授,主要从事信息安全、自然语言处理等方向的研究。
通讯作者:亚森·艾则孜(1975-),男,新疆库车人,硕士,教授,主要从事数字取证、自然语言处理等方向的研究。

LH、HL 和 HH 子带，通过阈值判断来获得伪造图像区域边缘，通过形态学滤波来连接边缘使其清晰化，以此实现伪造行为的检测。为了确定伪造类型，提取伪造区域的尺度不变特征变换（SIFT）特征，并通过相似性检测来确定。实验结果表明，本文方法能够准确检测出伪造区域和伪造类型。

1 提出的伪造检测方法

1.1 提出方法的基本框架

本文提出了一种在没有任何原始图像先验信息情况下，不仅可以对伪造进行检测，同时能够给出伪造类型。伪造类型包括单独的复制－移动、拼接或同时有复制－移动和拼接。另外，该方法可以检测图像中的多个伪造区域。

提出方法分为两个部分：1）边缘检测和伪造确认；2）相似区域检测来确定伪造类型。其中，基于一级 DWT 的 3 个子带 LH，HL 和 HH，通过高清晰边缘对可疑区域进行定位来检测伪造。通过搜索类与可疑区域相似的区域来确定图像伪造的类型。两部分的流程分别如图 1 和图 2 所示。

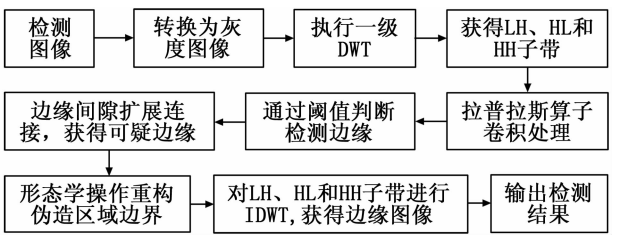


图 1 边缘检测和伪造确认的流程图

在图 1 所示的第一阶段中，在应用一级 DWT 分解之前，首先使用 $I=0.299R+0.587G+0.114B$ 将彩色图像转换成灰度图像。由于边缘由高频表示，所以考虑 3 个子带 LH，HL 和 HH 来检测边缘。实际上，真实图像中有许多边缘，因此需要对粘贴引起的边缘进行采集。为每个图像的纹理和布局进行阈值设置，范围从最大清晰度的 50%～80%。

在所有 3 个高频子带中通过阈值进行锐化和滤波之后，通过形态学滤波操作来连接边缘间隙。为了检测粘贴部分，通过设置 LL 子带中的低频部分为零来忽略他们。因此，对这 4 个子带进行逆离散小波变换（IDWT）后，只显示包含边缘的图像。如果存在粘贴图像的边缘，即可以确认伪造行为。否则，图像是原始的。

图 2 所示的伪造类型确定过程中，对于每个伪造部分，通过特征相似性检测来确认复制－移动或拼接操作。应用斑点检测来定义伪造区域的大小 $m\times n$。通过将测试的 $M*N$ 图像分割为多个重叠的 $m*n$ 块。使用 SIFT 特征提取技术创建 $(M-m+1)(N-n+1)$ 个特征向量，并搜索具有相似特征的区域。可存在如下几种伪造类型：1）复制－移动，如果图像中至少有一个其他区域有类似特征；2）拼接，如果图像中没有类似的区域；3）复制－移动和拼接，如果存在至少两个伪造区域，且复制－移动为类型 1，拼接为类型 2。

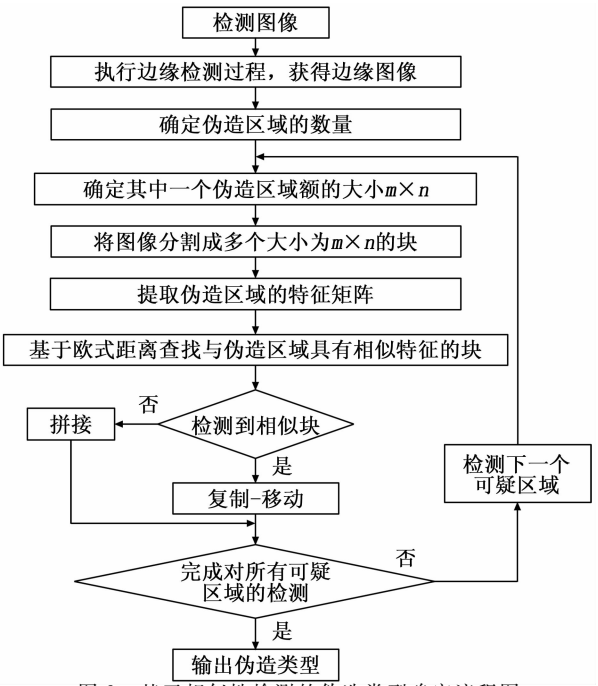


图 2 基于相似性检测的伪造类型确定流程图

1.2 边缘检测和伪造确认

1.2.1 基于 DWT 的图像多尺度表示

DWT 是对选定的图像进行多分辨率分解，将图像在不同方向和频带上分解为不同的子图。通过一级小波分解后，图像变为逼近子图（LL）、水平方向子图（HL）、垂直方向子图（LH）和对角方向子图（HH），如图 3 所示。其中，LL 为低频分量，继承了图像的大部分能量；其他 3 个子图为高频细节分量，所包含的图像能量较少，主要用来表示图像的边缘信息。在进行下一级分解时，LL 将以相同的方式再次分解为更小的 4 个子图。

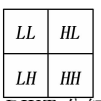


图 3 DWT 分解子图

对于二维图像 $f(x,y)$，二维 DWT 将产生一个可分离的尺度函数 $\varphi(x,y)$ 和 3 个可分离的方向敏感小波 $\psi^H(x,y)$，$\psi^V(x,y)$，$\psi^D(x,y)$，分别对应于沿水平边缘，垂直边缘和对角线的变化。表达式如下：

$$\varphi(x,y)=\varphi(x)\varphi(y) \tag{1}$$

$$\psi^H(x,y)=\psi(x)\varphi(y) \tag{2}$$

$$\psi^V(x,y)=\varphi(x)\psi(y) \tag{3}$$

$$\psi^D(x,y)=\psi(x)\psi(y) \tag{4}$$

式中，$\varphi(x)$，$\varphi(y)$ 是一维的尺度函数。$\psi(x)$，$\psi(y)$ 是一维的小波函数。

在 DWT 中，尺度函数用于创建一系列图像的近似值。尺度和变换的基本功能定义如下：

$$\varphi_{j,m,n}(x,y)=2^{j/2}\varphi(2^jx-m,2^jy-m) \tag{5}$$

$$\psi^i_{j,m,n}(x,y)=2^{j/2}\psi(2^jx-m,2^jy-m) \tag{6}$$

对于所有的 j，$k\in Z$，$m=n=0,1,2,\cdots,2^{j-1}$。$i=\{H,V,D\}$ 表示方向小波。然后，通过定义近似系数

和方向系数来完成尺寸为 MxN 的图像 $f(x, y)$ 的离散小波变换。

$$W_{\varphi}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \tag{7}$$

$$W_{\psi}^{i}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j_0, m, n}{}^{i}(x, y) \tag{8}$$

式中，j_0 为任意尺度，$W_{\varphi}(j_0, m, n)$ 为尺度 j_0 处图像 $f(x, y)$ 的近似系数，$W_{\psi}{}^{i}$ (j_0, m, n) 为用于在尺度 $j \geqslant j_0$ 中增添水平、垂直和对角细节的系数。

应用 DWT 后，图像被分解成近似水平，垂直和对角线部分。即图像 $W_{\varphi}(1, m, n)$ 将会被分解为 $W_{\varphi}(0, m, n)$、$W_{\psi}^{H}(0, m, n)$、$W_{\psi}^{V}(0, m, n)$ 和 $W_{\psi}^{D}(0, m, n)$。对二维图像的一级 DWT 分解过程如图 4 所示。

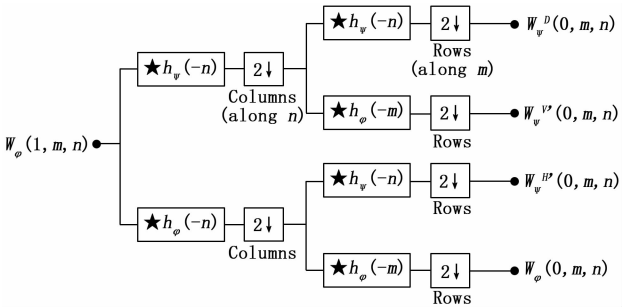


图 4　对二维图像的一级 DWT 分解

1.2.2　边缘检测

边缘的清晰度可以作为复制粘贴区域的痕迹。因此，边缘检测是搜索可疑区域的第一步，对有高清晰度边缘的可疑区域进行采集，然后进行检测伪造。本文将拉普拉斯算子应用于 DWT 的 LH，HL 和 HH3 个子带，通过每个子带与一个 3×3 拉普拉斯核之间的卷积来选择用于进一步处理步骤的边缘部分。

1.2.3　基于形态学操作连接边缘间隙

一般来说，在粘贴的位置，会通过一些软件工具或 Photoshop 使边界变平滑，因此并不是所有的边缘在 LH，HL 和 HH 中都能被连续检测到。存在一些零散分布的像素值，因此采用了形态学操作来连接一些间隙，使边界平滑，有助于更好地检测伪造区域。

通过将每个 LH，HL 和 HH 应用于 A，以及将连接间隙的结构元素应用于 B，通过形态学操作来修复边界上的间隙。形态学操作定义为：

$$A \circ B = (A \Theta B) \oplus B \tag{9}$$

式中，A 和 B 是二维空间 Z^2 中的两个集合；Θ 表示形态学操作中的腐蚀操作，$\oplus$表示膨胀操作。另外，Z^2 中的两个集合 A 和 B 的连接定义如下：

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq 0\} \tag{10}$$

其中：$\hat{B}$ 是 B 的映射，$(\hat{B})_z$ 是由 $\hat{B}$ 经过 z 偏移得到的。

1.3　基于相似性检测确定伪造类型

1.3.1　提取块区域的 SIFT 特征

用 SIFT 特征点检测算子提取可疑块区域图像的特征。

首先，需要找出在不同方向观察物体时都不会受影响的位置和尺度。通过一个连续尺度函数来寻找稳定的特征点，即将一个尺度可变的高斯函数与二维图像 $I(x, y)$ 进行卷积，表达式[13]如下：

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \tag{11}$$

式中，x，y 表示空间坐标，σ 为高斯标准差，用来表示尺度大小，$G(x, y, \sigma)$ 为高斯函数：

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-((x-m/2)^2+(y-n/2)^2)/2\sigma^2} \tag{12}$$

为了寻找 $L(x, y, \sigma)$ 尺度空间的极大值点和极小值点，将每一个采样点与同尺度的相邻点进行比较，将极值点对应的采样点作为特征点[8]。

然后，依据极值点邻域像素的梯度方向分布特性，给每个极值点分配一个方向。每个取样点的梯度模值和方向的表达式如下：

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y)-L(x-1, y))^2+(L(x, y+1)-L(x, y-1))^2} \tag{13}$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{(L(x, y+1)-L(x, y-1))}{(L(x+1, y)-L(x-1, y))}\right) \tag{14}$$

为了正确感知在尺度空间中检测稳定关键点的位置，借助于高斯函数微分中的尺度空间峰值 $D(x, y, \sigma)$，两个邻近尺度中的不相似性通过稳定性 k 来表示。在任何情况下，都需要对尺度空间特征描述进行计算，因此 D 可以通过简单的图像相减来计算，表示如下：

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \tag{15}$$

1.3.2　基于特征矩阵的相似块检测

相似区域块检测是通过计算各块区域的特征向量之间的相似性，其中相似性以欧式距离来度量。设定 S_i 和 S_j 表示两个 SIFT 特征向量，每个特征向量包含 L 个特征，那么两者的相似性计算如下[14]：

$$D(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^{L} [S_i(k) - S_j(k)]^2} \tag{16}$$

设定一个阈值 T_s，如果 $D(i, j)$ 小于 T_s，那么判断第 i 个块区域的特征 S_i 与第 j 块区域的特征 S_i 相似，即两个块区域相似。

2　实验及分析

2.1　实验设置

所提出的算法在 Matlab2013 中由处理器 Intel（R）Core i5－2400 CPU@3.10 GHz，内存 8 GB 的 PC 机上运行。用于测试复制－移动、拼接的伪造测试图像是从文献[15]提供的基准数据中采集。这些图像都是自然图片，并由 Photoshop 进行伪造。

所提出的方法基于 3 个不同的数据进行评估，3 个不同数据集分别包含复制－移动图像，拼接图像以及在相同图像同时包含复制－移动和拼接。每个数据集中包含 50 张

图像。

2.2 性能验证

首先，利用本文方法对 3 种数据集中的一张伪造图像进行检测，检测结果如图 5 所示。可以看出，图 5（a）中右边的小树为复制－移动区域，图 5（c）中的修正胶带为拼接区域，图 5（e）中右边大花苞为复制－移动区域，小花苞为拼接区域。通过本文方法都成功地检测出伪造区域和伪造类型，证明本文方法的有效性。

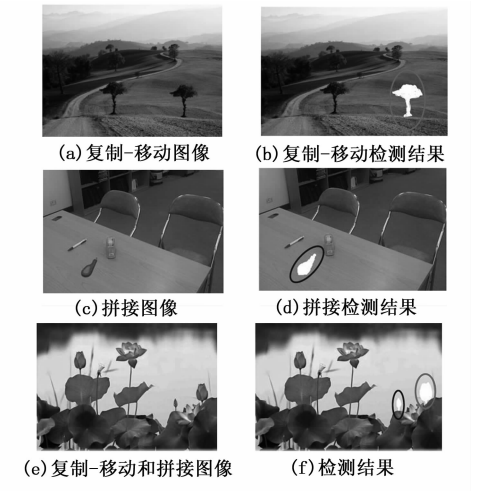


图 5 本文方法的检测结果

2.3 性能比较

将本文方法与文献［10］提出的 DCT＋ SURF 特征的检测方法，文献［11］提出的基于二进小波变换（UDWT）＋Zernike 矩的方法进行比较。

定义的 3 个性能参数，称为准确率（Precision），召回率（Recall）和 F_1 度量。精确度用来度量精确检测伪造图像的可能性，召回率用来度量伪造图像被成功检测的可能性。F_1 度量综合考虑了准确率和召回率。

$$Precision = \frac{T_P}{T_P + F_P} \tag{17}$$

$$Recall = \frac{T_P}{T_P + F_N} \tag{18}$$

$$F_1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{19}$$

式中，T_P、F_P 和 F_N 分别表示正确检测伪造像素、错误检测伪造像素和遗漏伪造像素的数量。

在 3 个数据集上进行 3 次实验，并计算性能度量的平均值，实验结果如表 1 所示，另外，表 2 统计了所有数据集上的平均值。可以看出，本文方法获得了最佳的性能。这是因为，本文通过 DWT 和形态学滤波获得了连续清晰的边缘信息，这为定位伪造区域提供了良好的基础。另外，本文通过提取伪造区域的 SIFT 特征，并通过相似性计算来确定伪造类型，大大提高了准确性。

而文献［10］提出的 DCT＋ SURF 特征的检测方法中，SURF 特征是一种基于不同尺度空间的，采用小波变换来提取的特征。为了保证 SURF 特征的有效性，需要事先对特征确定方向。另外，其是通过特征匹配来检测伪造，所产生的特征维数较大，这在一定程度上影响了检测性能。文献［11］提出的基于二进小波变换（UDWT）＋Zernike 矩的方法中，Zernike 矩特征是一种鲁棒特征，并能够缩小块匹配的搜索范围。但是，Zernike 矩特征匹配中的阈值选取需要人工调试，很难得到一个最佳阈值，为此也影响了检测精度。

表 1 3 个数据集上的性能比较 %

方法		DCT＋SURF	UDWT＋ZM	本文方法
数据集 1	准确度	91.76	93.52	94.97
	召回率	89.28	88.67	91.23
	F1	90.50	91.03	93.06
数据集 2	准确度	90.29	91.68	93.36
	召回率	87.83	88.17	90.41
	F1	89.04	89.89	91.86
数据集 3	准确度	88.25	89.54	91.74
	召回率	86.59	87.81	90.03
	F1	87.41	88.67	90.88

表 2 3 个数据集上的性能平均值 %

	DCT＋SURF	UDWT＋ZM	本文方法
平均准确度	90.10	91.58	93.36
平均召回率	87.90	88.22	90.56
平均 F1	88.98	89.86	91.93

3 结束语

本文提出了一种检测图像伪造检测方法，包括单独复制－移动、拼接伪造或同时具有两者的伪造。首先通过 DWT 分解得到图像的 3 个子带 LH，HL 和 HH，获得粘贴的边缘痕迹。当伪造被确认后，提取可疑区域的 SIFT 特征。通过与图像中其他区域块的比较来确定伪造类型。实验结果证明了本文方法的有效性和可行性。

参考文献：

[1] 刘 欢，刘朝涛，黄 丽. 离散小波变换耦合静电场理论的图像快速伪造检测算法［J］. 计算机测量与控制，2016，24（3）：44－47.

[2] 邵 虹，朱 虹，崔文成. 抗翻转、旋转和缩放攻击的图像区域复制篡改检测［J］. 计算机辅助设计与图形学学报，2015，27（1）：157－165.

[3] Jaberi M，Bebis G，Hussain M，et al. Accurate and robust localization of duplicated region in copy－move image forgery［J］. Machine Vision & Applications，2014，25（2）：451－475.

[4] 欧阳军林，伍家松，Gouenou，等. 鲁棒的复制－缩放－粘贴篡改检测方法［J］. 东南大学学报：自然科学版，2014，44（6）：1116－1120.

[5] Tu K H，Huynh K V，Le－Tien T，et al. A survey on Image Forgery Detection techniques［A］. IEEE Rivf International Conference on Computing & Communication Technologies－Research，Innovation，and Vision for the Future［C］. IEEE，

2015：71－76.
[6] Yang J，Ran P，Xiao D，et al. Digital image forgery forensics by using undecimated dyadic wavelet transform and Zernike moments [J]. Journal of Computational Information Systems，2013，9 (16)：6399－6408.
[7] 李晓飞，李鹏飞. 基于 SIFT 的伪造图像盲检测算法 [J]. 长春大学学报：自然科学版，2014，24 (10)：1354－1357.
[8] Mire A V，et al. Digital Forensic of JPEG Images [A]. Fifth International Conference on Signal and Image Processing [C]. IEEE Computer Society，2014：131－136.
[9] Neenu H U，Cheriyan J. Image forgery detection based on illumination inconsistencies & intrinsic resampling properties [A]. International Conference on Emerging Research Areas：Magnetics，Machines and Drives [C]. IEEE，2014：1－6.
[10] Lin S D，Wu T. An integrated technique for splicing and copy－move forgery image detection [A]. International Congress on Image and Signal Processing [C]. IEEE，2011：1086－1090.
[11] 秦　娟，李　峰，向凌云，等. 采用圆谐－傅里叶矩的图像区域复制粘贴篡改检测 [J]. 中国图象图形学报，2013，18 (8)：919－923.
[12] Saleh S Q，Hussain M，Muhammad G，et al. Evaluation of Image Forgery Detection Using Multi－scale Weber Local Descriptors [J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools，2015，24 (4)：142－148.
[13] 谢建平，陈长水，王佩琳，等. 具有旋转不变性的图像矩的快速算法 [J]. 光学学报，2010，30 (2)：394－398.
[14] 杜振龙，杨　凡，李晓丽，等. 利用 SIFT 特征的非对称匹配图像拼接盲检测 [J]. 中国图象图形学报，2013，18 (4)：442－449.
[15] Christlein V，Riess C，et al. An Evaluation of Popular Copy－Move Forgery Detection Approaches [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security，2012，7 (6)：1841－1854.

(上接第 246 页)

选择协议点到点平均时延比原网格 Leader 选择协议明显偏高，这是因为加入信誉系统增加了点到点的身份认证，节点的报文处理变复杂，对恶意节点的识别等都增加了路由开销。

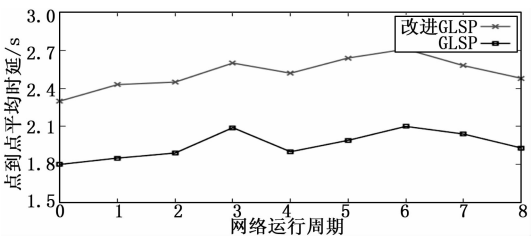


图 7　不同周期下的点到点平均时延

4　结束语

本文首先运用形式化分析方法对 GRID 路由协议中的网格 Leader 选择协议协议进行安全性分析，得出该协议在面临选择新节点时只考虑到离网格中心的位置，易被内部节点恶意攻陷，篡夺网格控制权。接着运用基于信誉系统的方法从信誉度计算、信誉管理、信誉决策 3 个方面对网格 Leader 选择协议进行改进，增加了以信誉度为首位的网格 Leader 优先级选择方案，在网络通信前期识别出恶意节点并剔除，从而预防了内部恶意节点的篡夺攻击。本文对网格 Leader 选择协议的形式化分析不够深入，接下来应采用更深入、更自动的方法分析它的安全性，同时增加信誉系统后网络通信性能影响很大，后续应研究采用效率更高的算法改进系统。

参考文献：

[1] 史美林，英　春. 自组网路由协议综述 [J]. 通信学报，2001，22 (11)：93－101.
[2] 张立涛. 无线自组织网络信任模型的研究 [D]. 南京：南京邮电大学，2010.
[3] 施荣华，罗棋峰. 一种 MANET 中基于位置信息的 ZRP 路由协议 [J]. 湖南大学学报：自然科学版，2009 (8)：38－42.
[4] Liao W H，Sheu J P，Tseng Y C. GRID：A Fully Location－Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks [J]. Telecommunication Systems，2001，18 (1)：37－60.
[5] 于宏毅. 无线移动自组织网 [M]. 北京：人民邮电出版社，2005.
[6] 李仓元. 移动 Ad Hoc 网络安全协议的形式化分析研究与应用 [D]. 合肥：合肥工业大学，2010.
[7] Fang W，Zhang C，Shi Z，et al. BTRES：Beta－Based Trust and Reputation Evaluation System for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Network and Computer Applications，2016 (59)：88－94.
[8] 邵　梅，王玉斌，马争先，等. Ad hoc 网络 AODV 协议的形式化分析与仿真 [J]. 广西科学院学报，2010，26 (4)：461－464.
[9] 古天龙，蔡国永. 网络协议的形式化分析与设计 [M]. 北京：电子工业出版社，2003.
[10] 李鲲鹏. 深度报文检测中高速正则表达式匹配算法研究 [D]. 郑州：解放军信息工程大学，2012.
[11] 李　健，李　玮，兰来喜，等. GRID 路由协议的可扩展性分析 [J]. 电力系统通信，2008，29 (187)：55－58.
[12] 陈　晶，崔国华，杨木祥，等. 一种 Ad Hoc 网络中安全的网格路由协议 [J]. 计算机学报，2006，29 (9)：1648－1656.
[13] Perrig A，Canetti R，Tygar J D，et al. The TESLA broadcast authentication protocol [J]. RSA Laboratories：Crypto－Bytes Technical Newsletter，2002，5 (2)：2－13.
[14] Buchegger S，Boudec J Y L. Performance analysis of the CONFIDANT protocol [A]. Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking& Computing [C]. Lausanne，Switzerland，2002：226－236.
[15] 姚　雷，王东豪，梁　璇，等. 无线传感器网络多层次模糊信任模型研究 [J]. 仪器仪表学报，2014 (7)：1606－1613.
[16] 吴继春. Ad Hoc 网络路由协议的研究与 NS2 仿真 [D]. 武汉：武汉理工大学，2005.