

doi: 10.3788/gzxb20174606.0610003

# 数字照片图像来源检测中的传感器模式 噪声预处理方法

郭浩龙, 张荣, 郭立君, 江宝钊

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘 要:**针对传感器模式噪声易受 CFA 插值噪声和 JPEG 压缩噪声污染,提出一种基于空域平滑滤波的传感器模式噪声预处理方法,去除干扰噪声,从而提高数字照片图像来源检测准确率.假设传感器模式噪声是一种类似高斯白噪声的随机信号,其在频域具有与高斯白噪声相似的平坦频谱;基于此,在空域采用高斯白噪声对传感器模式噪声进行引导滤波,其空域平滑效果使传感器模式噪声在保持自身性质的同时,拥有与高斯白噪声相似的特性.手机相机照片图像库的评估实验结果表明,与现有预处理方法相比,所提算法在图像来源检测准确度上 Kappa 统计系数提高了 0.026 以上,同时算法对 JPEG 压缩的鲁棒性也明显优于其他算法.

**关键词:**数字图像取证;来源检测;平滑滤波;传感器模式噪声;高斯白噪声

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0610003-10

## Preprocessing Method of Sensor Pattern Noise in Camera Source Detection of Photo Images

GUO Hao-long, ZHANG Rong, GUO Li-jun, JIANG Bao-chuan

(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** The Sensor Pattern Noise (SPN) is easily contaminated by CFA interpolation noise and JPEG compression noise. These unwanted artifacts may result in false identifications in SPN-based source camera detection. A preprocessing method of SPN based on spatial smoothing was proposed in order to improve the accuracy of source camera detection. It is assumed that the SPN is a random signal similar to white Gaussian noise (WGN), and has a flat frequency spectrum similar to that of WGN in the frequency domain. Based on this assumption, WGN-guided filtering was used in the spatial domain in the proposed method. The spatial smoothing effect can suppress the unwanted artifacts of the SPN. At the same time, the SPN can maintain its own properties and possess similar characteristics with WGN. The proposed method was evaluated on our own database of camera images from cellphones. The experimental results show that the proposed method outperforms the existing preprocessing methods, the accuracy of the source camera detection being increased by more than 0.026 in terms of the Kappa statistical coefficients. The robustness to JPEG compression of the proposed method is also better than others.

**Key words:** Digital image forensics; Source detection; Smoothing filter; Sensor pattern noise; White Gaussian noise

**OCIS Codes:** 100.3008; 100.4994; 070.4790; 070.6110; 230.6080

## 0 引言

数字照片图像作为一种重要的信息载体,在新闻报道、保险申诉调查、犯罪调查等领域发挥着重要的作

基金项目:浙江省自然科学基金(No. LY17F030002)和浙江省“信息与通信工程”重中之重学科开放基金(Nos. xkx11521, xkx11516)资助

第一作者:郭浩龙(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为数字图像取证、模式识别. Email:guohaolong1106@163.com

导师(通讯作者):张荣(1970-),女,副教授,博士,主要研究方向为数字图像取证、模式识别. Email:zhangrong@nbu.edu.cn

收稿日期:2016-11-17;录用日期:2017-03-07

<http://www.photon.ac.cn>

用.然而,在这些特殊场合,如何保证作为证据的照片图像来源的真实性,一直是一个具有挑战性的研究课题<sup>[1]</sup>.

传感器作为相机成像的关键部件之一,由于其材质和制作工艺的原因,在成像时会不可避免地残留一些痕迹于照片中,文献<sup>[1]</sup>称这些痕迹为传感器模式噪声.由于每部相机的传感器都有差异,故其模式噪声也是独一无二的,因此可将传感器模式噪声看作相机的“指纹”.根据这一原理,Fridrich 首先提出了一种基于传感器模式噪声的照片图像的来源检测算法<sup>[1-2]</sup>.随后,Fridrich 团队对传感器模式噪声提取<sup>[3-4]</sup>和估计方法<sup>[5-6]</sup>以及相关性匹配<sup>[7]</sup>进行了深入研究,使该算法不断成熟,受到了研究人员的广泛关注<sup>[8-10]</sup>,并将其推广到图像篡改取证中<sup>[11-13]</sup>.

基于模式噪声的照片图像来源识别算法的关键,在于如何获得高质量的模式噪声,提高相关性匹配准确率,从而提高图像来源检测的准确率.由于传感器模式噪声是弱信号,容易受到图像内容、相机 CFA(Color Filter Array)插值和 JPEG (Joint Photographic Experts Group)压缩等不利因素干扰,致使来源检测结果不理想.在获取传感器模式噪声时,可使用多幅(如 50 幅<sup>[3]</sup>)内容平滑(如蓝天)的照片图像作为样本<sup>[4]</sup>,并使用较好的降噪方法<sup>[4,12,14]</sup>消除图像内容的影响.实际中,CFA 插值和 JPEG 压缩块效应等非模式噪声分量<sup>[3,15]</sup>对所提取的传感器模式噪声质量影响更大,且较难去除.考虑到不同的相机可能会采用相同的 CFA 插值方法和 JPEG 压缩量化表,产生相同或类似的噪声,干扰取证结果.因此,需要对提取到的传感器模式噪声进行预处理,剔除干扰因素,获得高质量的传感器模式噪声,提高识别准确率.

为了消除 CFA 插值噪声,Chen 等<sup>[4]</sup>提出零均值化法(Zero-Mean, ZM):将传感器模式噪声的每个像素分别减去该像素所在行和列的均值.Li 等<sup>[15]</sup>认为 CFA 模式的相机,与红色通道和蓝色通道相比,绿色通道的像素有一半是原始未经插值的,故而提出只利用绿色通道的数据提取传感器模式噪声,减小 CFA 插值影响.在抑制 JPEG 压缩影响时,Chen 等<sup>[4]</sup>认为真实的传感器模式噪声受到污染,而维纳滤波(Wiener Filter, WF)是一种基于最小均方误差准则的最优滤波系统,能从污染中估计出真实传感器模式噪声,因此提出在频域对零均值化后的传感器模式噪声采用维纳滤波进行处理.Li 等<sup>[15]</sup>认为 JPEG 压缩会在频谱中引起周期性的局部峰值,提出了一种频谱均衡化(Spectrum Equalization Algorithm, SEA)的方法,对传感器模式噪声频谱中的局部峰值进行抑制,达到剔除 JPEG 压缩噪声的目的.

上述算法由于未能充分利用传感器模式噪声特性,致使检测效果提高有限.为了更好地消除干扰噪声,改善传感器模式噪声质量,本文假设传感器模式噪声是一种类似高斯白噪声的随机信号,则其在频域应当具有平坦的频谱.基于此,提出一种空域平滑滤波的传感器模式噪声预处理方法,其原理是通过采用高斯白噪声对传感器模式噪声滤波处理,使传感器模式噪声在保持自身性质的同时,拥有与高斯白噪声相似的平坦频谱,剔除了干扰噪声,提高传感器模式噪声质量.大量手机相机照片的检测结果表明,与现有算法相比,所提算法有效地改善了传感器模式噪声质量,提高了照片图像来源检测的识别率,并且在抵抗 JPEG 压缩方面具有较强的鲁棒性.

## 1 传感器模式噪声及预处理

基于传感器模式噪声的照片来源检测算法的一般过程如图 1,具体步骤为:

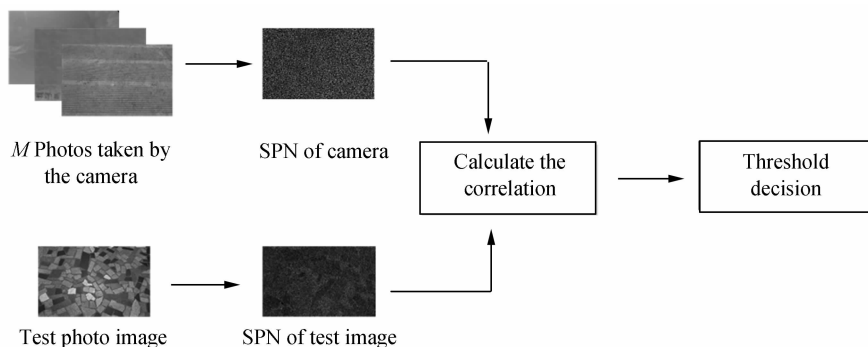


图 1 基于传感器模式噪声的照片图像来源检测算法过程  
Fig. 1 Process of photo image source detection based on SPN

步骤一:获取相机传感器模式噪声  $\mathbf{R}$ . 对相机拍摄的  $M$  幅照片图像进行降噪,获得  $M$  幅照片图像的噪声残差  $\mathbf{W}_i$ ; 然后对这  $M$  幅噪声残差采用最大似然估计获得相机传感器模式噪声  $\mathbf{R}$ , 即

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{I}_i - F(\mathbf{I}_i) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = \frac{\sum_{i=1}^M \mathbf{W}_i \mathbf{I}_i}{\sum_{i=1}^M \mathbf{I}_i^2} \quad (2)$$

式中,  $F$  是降噪操作, 目前常用的有小波变换<sup>[4]</sup>、三维块匹配(Block Matching Three-Dimension, BM3D)<sup>[12]</sup>和基于上下文自适应插值预测(Predictor based on Context Adaptive Interpolation, PCAI)<sup>[14,16]</sup>等方法,  $\mathbf{W}_i$  表示第  $i$  幅照片图像  $\mathbf{I}_i$  的噪声残差;

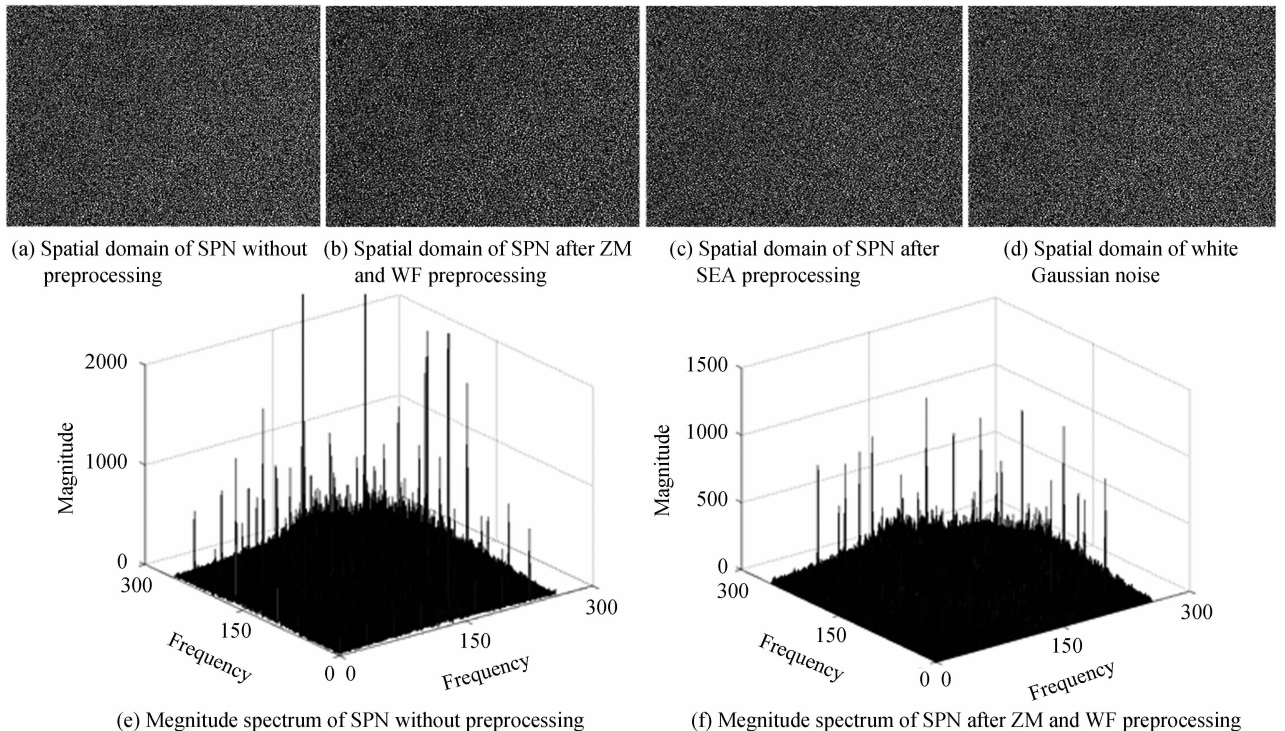
步骤二:采用式(1)的模型获得待测照片图像  $\mathbf{I}$  的噪声残差  $\mathbf{W}$ . 由于待测图像只有一幅, 因此常采用噪声残差  $\mathbf{W}$  近似表示其传感器模式噪声;

步骤三:计算  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{W}$  的相关性  $\rho(\mathbf{R}, \mathbf{W})$ ;

步骤四:对  $\rho(\mathbf{R}, \mathbf{W})$  进行阈值判决, 若大于等于阈值, 认为来自该相机; 否则, 反之.

基于传感器模式噪声的图像来源检测算法的关键在于传感器模式噪声的获取, 然而通过式(1)和(2)获得的  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{R}$  中仍存在 CFA 插值噪声和 JPEG 压缩噪声等非传感器模式噪声分量<sup>[3,15]</sup>, 干扰检测结果. 因此在应用传感器模式噪声之前, 有必要对其进行预处理<sup>[4,15]</sup>, 消除干扰噪声.

图 2 给出文献[4]的 ZM+WF 和文献[15]的 SEA 两种算法处理过的传感器模式噪声在空域和频域的结果. 其中传感器模式噪声是利用 iPhone 5s 手机相机拍摄的 60 幅蓝天照片图像作为样本, 在绿色通道使用小波降噪方法并采用最大似然估计获取. 作为对比, 图 2 同时给出高斯白噪声在空域和频域的表现. 第一行从左至右分别是未处理的传感器模式噪声、经 ZM+WF 处理的传感器模式噪声、经 SEA 处理的传感器模式噪声和高斯白噪声的空域(截取中心  $256 \times 256$  区域)形式, 第二行是对应的频谱图. 直观而言, 两种方法处理过的传感器模式噪声和高斯白噪声在空域的结果表现基本一致, 然而频谱却与相差甚远. 图 2(e)是未处理传感器模式噪声的频谱, 其各个频率的幅值差异较大, 存在局部多峰现象. 图 2(f)是经过 ZM+WF 处理过的传感器模式噪声频谱, 与未处理的相比, 虽然稍微缩减各频率幅值之间的差异, 但是仍存在局部多峰情况. 分析图 2(g)SEA 方法的结果, 有效地抑制了局部峰值, 然而就频谱的形状而言, 与图 2(h)高斯白噪声的频



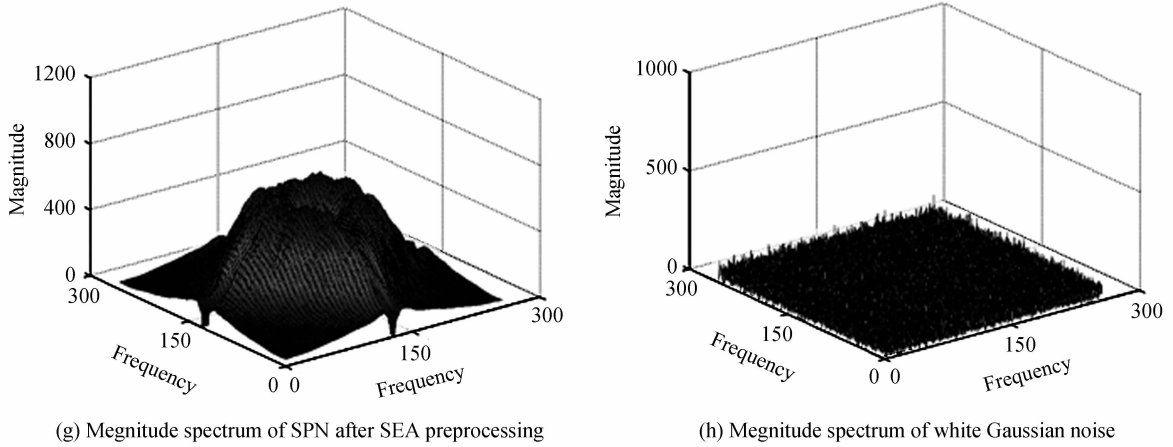


图2 iPhone 5s 手机相机的传感器模式噪声经不同预处理方法之后的空域和频谱结果与高斯白噪声对比  
Fig. 2 The spatial and magnitude spectrum results of iPhone 5s camera's SPN after different preprocessing methods are compared with the White Gaussian noise

谱相比,主要存在两个差异:第一,高斯白噪声的频谱是整体平坦,而 SEA 处理后的只是局部平坦;第二,SEA 处理后的频谱过于光滑。

上述分析可知,ZM+WF 和 SEA 预处理方法虽在一定程度上起到抑制频谱局部峰值的作用,却未能完全剔除干扰噪声,也没有考虑到传感器模式噪声自身的统计特性,因此有必要提出一种新的传感器模式噪声的预处理方法。

## 2 本文算法

传感器模式噪声主要是由生产过程中传感器制作工艺不完美和材质不一致性造成的,而这两种因素是随机发生的,并非刻意为之。因此,本文假设传感器模式噪声是一种类似高斯白噪声的随机信号,在频域拥有平坦频谱,当存在 CFA 插值和 JPEG 压缩等干扰噪声时会使频谱出现局部多峰现象。为了恢复传感器模式噪声原貌,消除干扰噪声影响,提出一种使传感器模式噪声频谱平坦化的空域平滑滤波方法,下面将对所提方法进行详细介绍。

本文假设传感器模式噪声是一种类似高斯白噪声的信号,并将传感器模式噪声用高斯白噪声线性表示,利用高斯白噪声对传感器模式噪声进行平滑处理,使处理后的传感器模式噪声在保持自身特性的同时,也拥有与高斯白噪声类似的平坦频谱。实现过程中,受引导滤波<sup>[17]</sup>的启发,采用一幅和传感器模式噪声相同尺寸的高斯白噪声  $\mathbf{G}$  对传感器模式噪声进行平滑处理。以相机传感器模式噪声  $\mathbf{R}$  为例,假设  $\mathbf{R}$  经过  $\mathbf{G}$  处理之后的输出为  $\mathbf{Q}$ ,即

$$\mathbf{Q} = T[\mathbf{G}, \mathbf{R}] \quad (3)$$

式中,  $T$  表示平滑处理过程。

在具体的平滑过程中,从局部出发,令  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{G}$  第  $k$  个对应的局部矩形窗区域  $w_k$  内所有像素点  $i$  都满足线性变换,即

$$\mathbf{Q}_i = a_k \mathbf{G}_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (4)$$

式中  $a_k, b_k$  为  $w_k$  内的线性系数。考虑到处理后的传感器模式噪声需要保持其固有特性,因此可通过最小化处理前后的传感器模式噪声误差求解这两个系数,即

$$E(a_k, b_k) = \frac{1}{2} \sum_{i \in w_k} (\|\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}_i\|_2^2 + \xi \|a_k\|_2^2) = \frac{1}{2} \sum_{i \in w_k} (\|a_k \mathbf{G}_i + b_k - \mathbf{R}_i\|_2^2 + \xi \|a_k\|_2^2) \quad (5)$$

为防止  $\|\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}_i\|_2^2$  过小,引入一个惩罚项  $\xi \|a_k\|_2^2$ ,其中  $\xi$  是惩罚因子。观察可知式(5)是一个线性回归方程,可通过最小二乘法求解,分别对  $a_k, b_k$  求偏导,即

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = \sum_{i \in w_k} [(a_k \mathbf{G}_i + b_k - \mathbf{R}_i) \mathbf{G}_i + \xi a_k] \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_k} = \sum_{i \in w_k} (a_k \mathbf{G}_i + b_k - \mathbf{R}_i) \quad (7)$$

对于凸函数  $E(a_k, b_k)$ , 其偏导为零时存在最小值, 令式(6)和式(7)为零可求得

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} \frac{\mathbf{G}_i - \mu_k}{\sigma_k^2 + \xi} \mathbf{R} \quad (8)$$

$$b_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} \left(1 - \mu_k \frac{\mathbf{G}_i - \mu_k}{\sigma_k^2 + \xi}\right) \mathbf{R} \quad (9)$$

式中,  $|\omega|$  表示局部区域  $\omega_k$  内的像素总个数,  $\mu_k$ 、 $\sigma_k^2$  分别为  $\mathbf{G}$  在  $\omega_k$  内像素的均值和方差. 观察式(8)和式(9)可知, 在不同的局部矩形区域内, 会得到不同的  $a_k$  和  $b_k$ . 将式(4)的线性关系应用到  $\mathbf{R}$  中所有的局部矩形区域时,  $\mathbf{R}$  中的每一个像素  $\mathbf{R}$  都经历  $|\omega|$  个窗口(对边界进行扩充之后, 原来的边界像素也经历  $|\omega|$  个窗口)的滤波处理, 故而  $\mathbf{R}$  会存在  $|\omega|$  个  $a$  和  $b$  系数. 当求解位置  $j$  的输出值  $\mathbf{Q}_j$  时, 可将对应位置  $\mathbf{R}_j$  的所有系数平均, 即

$$\mathbf{Q}_j = \bar{a}_j \mathbf{G}_j + \bar{b}_j \quad (10)$$

$$\bar{a}_j = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_j} a_k \quad (11)$$

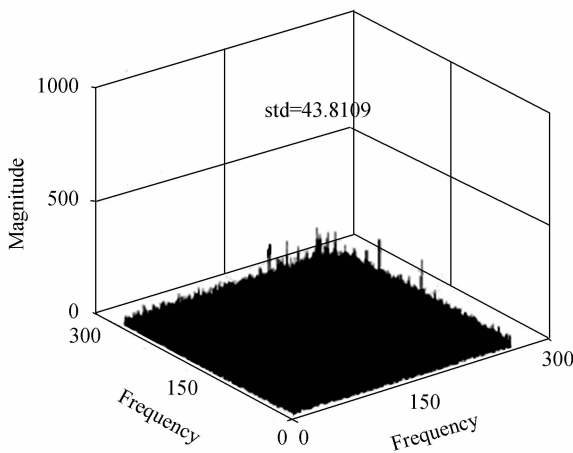
$$\bar{b}_j = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_j} b_k \quad (12)$$

式中,  $|\omega|$  表示像素点  $\mathbf{R}_j$  经历的窗口数目. 由式(8)、(9)可以看出, 上述过程实际上是利用高斯白噪声对传感器模式噪声的加权均值滤波.

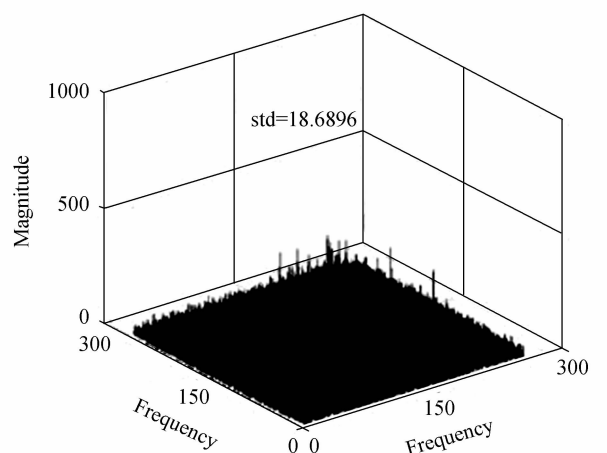
上面推导过程中仍存在两个未知的参量: 窗口  $\omega_k$  大小  $|\omega|$  和惩罚因子  $\xi$ , 为了获得最优的结果, 需要对  $|\omega|$  和  $\xi$  的取值进行分析.

本文采用高斯白噪声进行平滑处理的目的是: 输出的传感器模式噪声既保留原始传感器模式噪声的固有成分又拥有类似高斯白噪声的频谱. 为满足这两个要求, 考虑像素点受其八邻域像素的影响最大, 因此在平滑过程中通常设置  $|\omega| = 3 \times 3$ . 对于惩罚因子  $\xi$ , 它的作用是为了防止  $\|\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}_i\|_2^2$  过小. 因为  $\|\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}_i\|_2^2$  过小时, 处理前后的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{Q}$  会非常相似, 甚至出现完全相等的情况, 此时可能未剔除 JPEG 压缩噪声; 而  $\|\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}_i\|_2^2$  过大时,  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{Q}$  之间的差异变大, 造成  $\mathbf{Q}$  中原始传感器模式噪声的成分较少. 为了获得最优  $\xi$  的取值范围, 选取不同的  $\xi$  值进行实验, 结果如图 3.

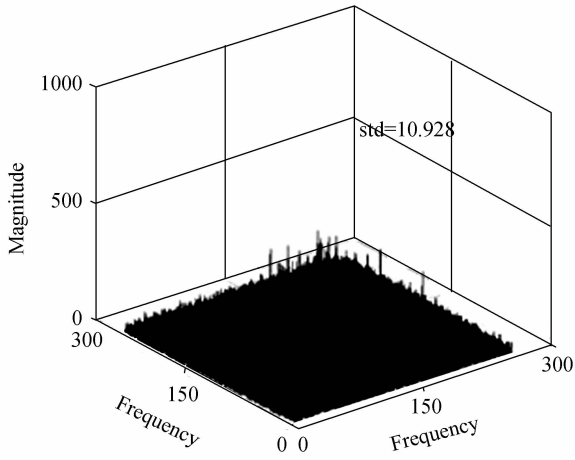
观察不同  $\xi$  值下的结果, 当  $\xi$  取 0.0001、0.01 和 0.1 时, 与图 2(b) 的原始传感器模式噪声频谱相比, 频谱变得平坦, 但仍存在小部分局部峰.  $\xi$  取 0.5 和 1 时的结果显示, 频谱在保持平坦的同时局部峰进一步减少, 而当  $\xi$  继续增大时, 频谱已基本不变. 观察图 3 中不同  $\xi$  值下频谱的标准方差, 当  $\xi$  值小于 0.5 时, 随着  $\xi$  值的增加, 频谱的标准方差急剧减小; 而当  $\xi$  值大于等于 0.5 时, 随着  $\xi$  的增加, 标准方差变化较小, 趋于平稳. 图 3 的结果显示, 随着  $\xi$  值的增加, 其对传感器模式噪声频谱的影响由大变小. 据此, 本文在 0.5~2 范围内对  $\xi$  进行取值, 本文实验中设置  $\xi$  为 0.75.



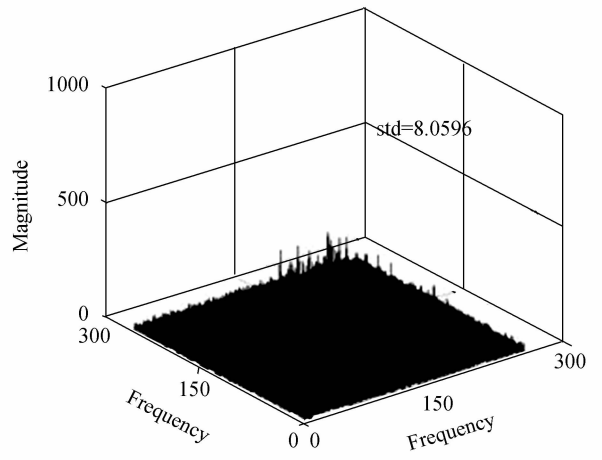
(a) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 0.0001



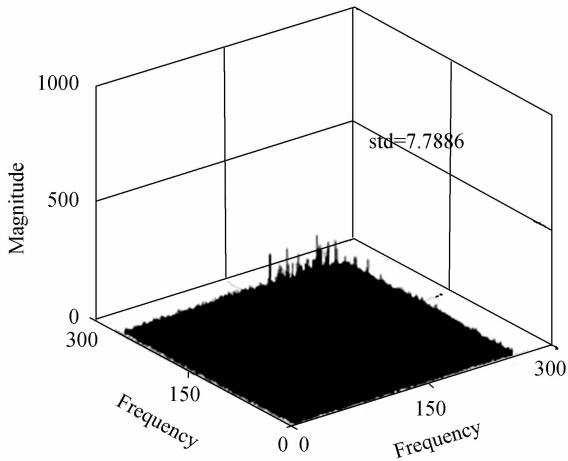
(b) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 0.001



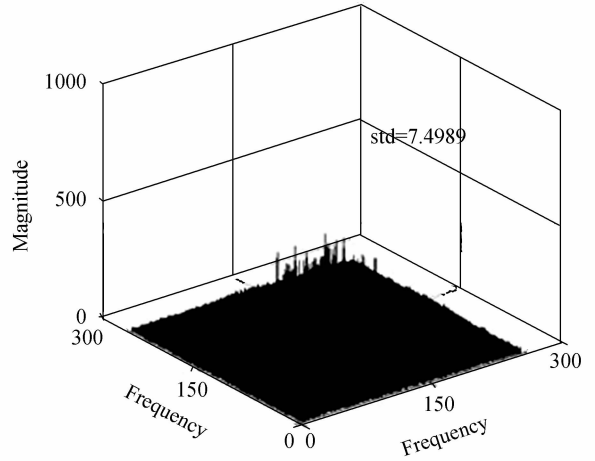
(c) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 0.01



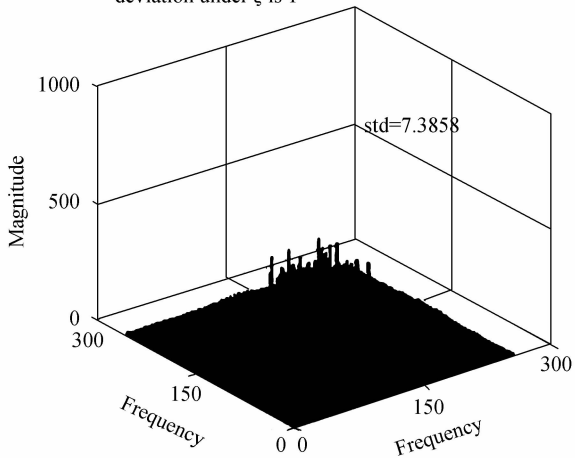
(d) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 0.5



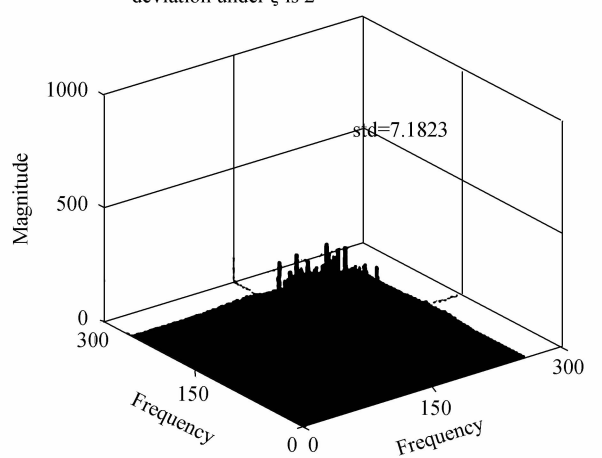
(e) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 1



(f) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 2



(g) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 4



(h) The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under  $\xi$  is 20

图3 不同  $\xi$  值下的传感器模式噪声频谱及频谱的标准方差

Fig. 3 The magnitude spectrum of SPN and its standard deviation under different  $\xi$  values

### 3 实验与分析

本文的目的是比较预处理方法对传感器模式噪声质量的影响,因此对小波降噪获得的传感器模式噪声分别采用 ZM+WF<sup>[4]</sup>、SEA<sup>[15]</sup> 及所提算法等 3 种方法进行处理.为了减少图像内容的影响,本文采用文献

[4]的方法,首先对每一部待测相机使用其拍摄的 60 幅蓝天照片图像作为样本,用于获取相机传感器模式噪声.考虑到绿色通道中有一半的像素是原始值,而另外两个通道只有四分之一的像素是原始值,为减小 CFA 插值影响,对所有预处理方法均在绿色通道进行实验.另外,本文在计算  $\rho(\mathbf{W}, \mathbf{R})$  时,采用文献[7]所提的峰值相关能量比法,即

$$\rho(\mathbf{W}, \mathbf{R}) = \frac{\text{sign}(\mathbf{P}_{\max}) \mathbf{P}_{\max}^2}{\frac{1}{mn - N^2} \sum_{s,s' \in N} \mathbf{P}(s)^2} \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{P}$  是  $\mathbf{W}, \mathbf{R}$  (二者维度同为  $m \times n$ ) 的相关函数,维度与  $\mathbf{W}, \mathbf{R}$  一样,  $\mathbf{P}_{\max}$  为  $\mathbf{P}$  的峰值,  $\text{sign}(\mathbf{P}_{\max})$  为峰值符号,分母表示以  $\mathbf{P}_{\max}$  为中心的  $N \times N$  (通常  $N=11$ ) 区域外各点平方和均值.

### 3.1 图像库与实验方法

具有高清拍照功能的智能手机在日常生活中得到了广泛普及,但由于存储问题,手机相机多采用较低的 JPEG 压缩质量,对传感器模式噪声破坏更加严重.考虑到本文算法主要是为了消除 CFA 插值和 JPEG 压缩对传感器模式噪声的影响,因此使用十部智能手机相机拍摄的照片建立一个相机照片图像库,照片内容包括天空、草坪、树木或建筑等自然场景,如图 4. 十部手机相机型号、分辨率、照片数量及格式见表 1. 由于相机的分辨率不尽相同,为便于实验,当遇到维度不一的情况,按照小尺寸照片的维度在大尺寸照片的中心截取相同维度参与实验.

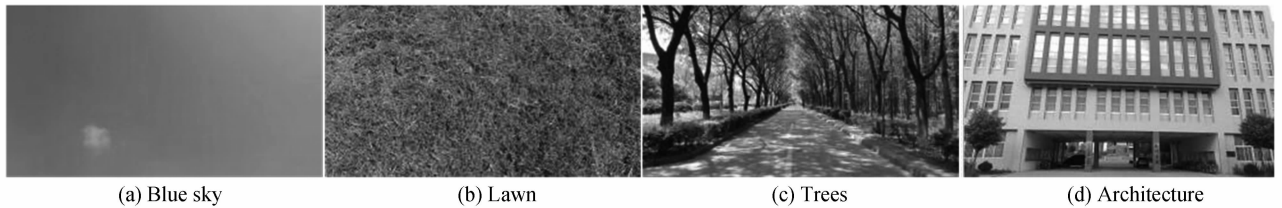


图 4 十部手机相机拍摄的照片样本

Fig. 4 Sample images from ten phone cameras

表 1 十部手机相机参量及图像数量和格式

Table 1 Ten phone cameras parameters and image number and format

Camera model	Resolution (ppi)	Number of images	Format
HTC One M7	1 520 × 2 688	450	JPEG
HUAWEI honor6	3 120 × 4 160	450	JPEG
HUAWEI mate 7	2 336 × 4 160	450	JPEG
iPhone 5s	2 448 × 3 264	450	JPEG
iPhone 6	2 448 × 3 264	450	JPEG
MEIZU MX4	3 936 × 5 248	450	JPEG
One Plus A0001	3 120 × 4 160	450	JPEG
Samsung S5	2 988 × 5 312	450	JPEG
SONY Z1	2 160 × 3 840	450	JPEG
SONY Z3	2 160 × 3 840	450	JPEG

为了能客观公正地评价各种算法的性能,本文采用 ROC 曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve) 和 Kappa 统计两种方法进行分析.

#### 方法一:ROC 曲线

将表 1 中每部相机的  $\mathbf{R}$  分别与 450 幅同源照片的  $\mathbf{W}$  和 450 幅异源照片 (九部异源相机,每部挑选 50 幅) 的  $\mathbf{W}$  进行相关性计算.以第一部手机相机 HTC One M7 为例,将其传感器模式噪声  $\mathbf{R}$  分别与 450 幅来自该相机照片的  $\mathbf{W}$  计算相关性,得到 450 个同源样本的相关性值;再将  $\mathbf{R}$  与来自剩余九部相机的 450 幅照片的  $\mathbf{W}$  计算相关性,得到 450 个异源样本的相关性值;按照此计算方法,依次完成其余九部相机传感器模式噪声与图像库中 450 幅同源照片和 450 幅异源照片的相关性计算,最终可得到同源和异源样本的相关性值各 4500 个.对这 9000 个相关性值进行阈值决策,可得到检测结果的真正率 (True Positive Rate, TPR) 和假正率 (False Positive Rate, FPR),即

$$TPR = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \quad (14)$$

$$FPR = \frac{N_{FP}}{N_{FP} + N_{TN}} \quad (15)$$

式中,  $N_{TP}$ 、 $N_{FN}$ 、 $N_{FP}$  和  $N_{TN}$  分别表示将同源样本判决为同源、将同源样本判决为异源、将异源样本判决为同源和将异源样本判决为异源的数量. 当需要分析不同预处理算法对来源识别的影响时, 可根据每种算法在不同阈值下的 TPR 和 FPR 作出 ROC 曲线, 然后评估.

方法二: Kappa 统计

采用 Kappa 统计方法时, 将表 1 中每一幅照片图像的传感器模式噪声  $W$  分别与十部相机的传感器模式噪声  $R$  计算相关性, 比较得到的十个相关性值, 找出最大相关性值对应的相机, 就认为该照片来自此相机. 将表中 4500 幅图像全部计算完毕, 就可得到混淆矩阵, 以此获得 Kappa 系数, 即

$$Kappa = \frac{O - e}{K - e} \quad (16)$$

式中  $K$  为总样本数目,  $O$  表示实际正确预测的样本数目,  $e$  为理论正确预测的样本数目. Kappa 系数值越大, 表明算法性能越好.

### 3.2 实验结果与分析

分别用 ZM+WF、SEA 和所提算法等 3 种预处理方法对原始的传感器模式噪声进行处理, 再按照 ROC 曲线和 Kappa 统计方法分别进行实验, 得出 ROC 曲线和 Kappa 系数值, 分别如图 5 和表 2 所示.

观察图 5 的 ROC 曲线, 从定性角度分析, Original (未经预处理) 的检测结果最差, 其次是 SEA、ZM+WF, 这两种方法性能相近, 略好于 Original 算法的, 而所提算法的检测结果是所有预处理方法中最好的. 为进一步说明所提算法优势, 从定量角度出发, 通过实验获得四种算法的 Kappa 系数值, 见表 2 所示, 分别为 0.947 2、0.957 0、0.953 6 和 0.983 0. 对比可知, 所提算法的区分准确度最高, Kappa 统计系数提高了 0.026 以上, 进而证明了所提算法性能最好.

### 3.3 鲁棒性分析

前文指出 JPEG 压缩会降低传感器模式噪声质量, 为评估所提算法的对 JPEG 压缩的鲁棒性, 对表 1 所给图像库中的所有照片图像分别采用 90%、70% 和 50% 等 3 种 JPEG 压缩质量进行压缩, 然后采用不同预处理方法处理, 再进行检测. 检测结果的 ROC 曲线和 Kappa 系数分别在图 6 和表 3 中给出.

观察图 6 的 ROC 曲线和表 3 的 Kappa 系数可知, 在相同 JPEG 压缩质量下, 前三种算法的性能明显低于所提算法的; 而随着压缩质量降低, Original 算法的性能下降最明显, ZM+WF 和 SEA 等算法的也有所下降, 而所提算法的依旧表现良好. 统计表 3 中四种算法在 3 种压缩质量下最小的 Kappa 系数, 将其与表 2 中未压缩时的 Kappa 系数相比较, 分别下降了 0.065 5、0.021 2、0.018 和 0.004, 所提算法下降最少, 由此可说明所提算法对抵抗 JPEG 压缩具有较强的鲁棒性.

表 3 不同方法下对不同 JPEG 压缩质量图像检测结果的 Kappa 系数

Table 3 Kappa coefficients of different JPEG compression quality image detection results under different methods

Methods		Original	ZM+WF	SEA	Proposed
JPEG quality	90%	0.945 9	0.949 9	0.949 6	<b>0.980 0</b>
	70%	0.881 7	0.936 6	0.935 6	<b>0.980 2</b>
	50%	0.885 2	0.935 8	0.935 6	<b>0.979 0</b>

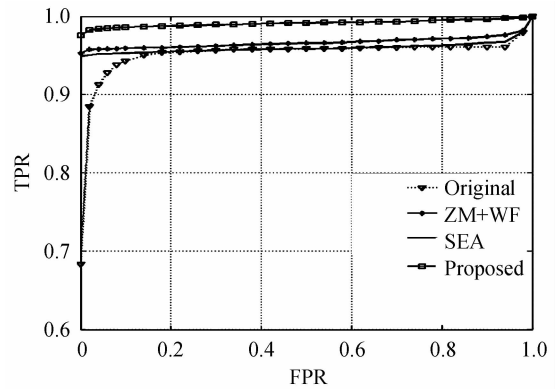


图 5 不同方法下检测结果的 ROC 曲线

Fig. 5 ROC of detection results under different methods

表 2 不同方法下检测结果的 Kappa 系数

Table 2 Kappa coefficients of detection results under different methods

Methods	Original	ZM+WF	SEA	Proposed
Kappa	0.947 2	0.957 0	0.953 6	0.983 0



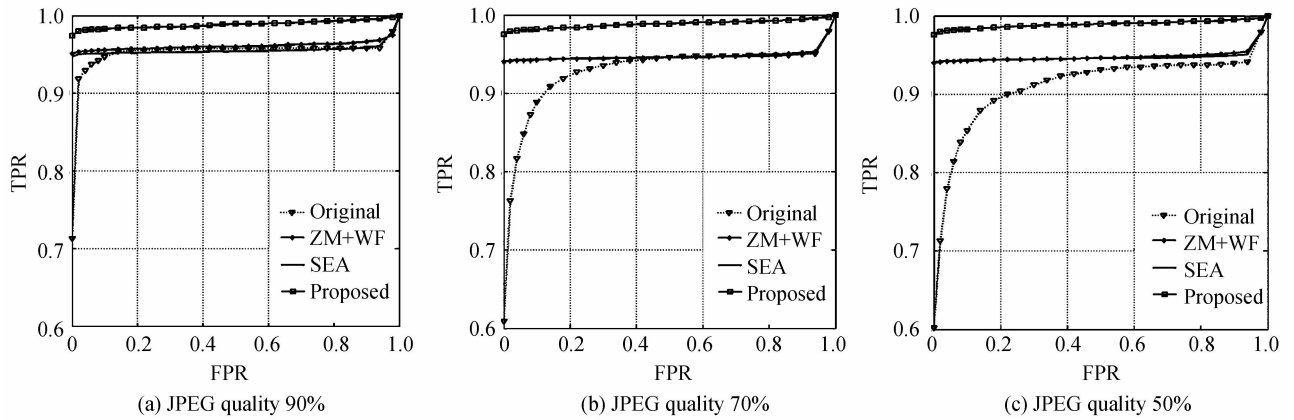


图6 不同方法对不同 JPEG 压缩质量图像检测结果的 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curves of different JPEG compression quality image detection results under different methods

## 4 结论

为了提高基于传感器模式噪声的照片图像来源检测算法的识别率和鲁棒性,提出一种基于空域平滑滤波的传感器模式噪声预处理方法.通过分析传感器模式噪声的形成过程,认为传感器模式噪声是一种类似高斯白噪声的随机信号,在频域拥有平坦的频谱,存在 CFA 插值噪声和 JPEG 压缩噪声等干扰噪声时会破坏该特性.因此,基于引导滤波思想,在局部区域中用高斯白噪声对传感器模式噪声进行线性逼近,基于误差最小化实现对传感器模式噪声的平滑滤波.经所提方法处理的传感器模式噪声在保持原有特性的同时,拥有类似高斯白噪声的性质,剔除了干扰噪声,使频谱趋于平坦,实现了提高传感器模式噪声质量的目的.大量实验结果表明,与现有算法相比,所提算法在有效改善传感器模式噪声质量的基础上,提高了照片图像来源检测的识别率,并对 JPEG 压缩具有较强的鲁棒性.

与图像来源检测不同,图像篡改取证是分块计算待测图像和相机传感器模式噪声之间的相关性,块的大小决定篡改检测的准确率和篡改区域定位精确性.未来的研究可在现有工作基础上,进一步提高对小图像块的检测率,进而提高图像篡改取证算法的性能.

## 参考文献

- [1] LUKÁŠ J, FRIDRICH J, GOLJAN M. Determining digital image origin using sensor imperfections[C]. SPIE, 2005, **5685**: 249-260.
- [2] LUKÁŠ J, FRIDRICH J, GOLJAN M. Digital camera identification from sensor pattern noise[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2006, **1**(2): 205 - 214.
- [3] GOLJAN M, FRIDRICH J. Camera identification from cropped and scaled images[C]. Electronic Imaging International Society for Optics and Photonics, 2008: 0-12.
- [4] CHEN M, FRIDRICH J, GOLJAN M, *et al.* Determining image origin and integrity using sensor noise[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, **3**(1): 74-90.
- [5] GOLJAN M, Fridrich J. Sensor-fingerprint based identification of images corrected for lens distortion[C]. IS&T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2012, **8303**: 265-298.
- [6] GOLJAN M, FRIDRICH J. Sensor fingerprint digests for fast camera identification from geometrically distorted images [C]. IS&T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013, **8665**(4): 25-34.
- [7] GOLJAN M, FRIDRICH J, FILLER T. Large scale test of sensor fingerprint camera identification[C]. SPIE, 2009, **7254**: 72540I-72540I-12
- [8] HU Yong-jian, YU Bing-hua, JIAN Chao. Source camera identification using large components of sensor pattern noise [C]. International Conference on Computer Science and ITS Applications IEEE Xplore, 2009: 1-5.
- [9] LI C T. Source camera identification using enhanced sensor pattern noise[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, **5**(2): 280-287.
- [10] KANG Xian-gui, LI Yin-xiang, HUANG Ji-wu, *et al.* Enhancing source camera identification performance with a camera reference phase sensor pattern noise[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, **7**(2): 393-402.
- [11] CUI Xia-rong, SU Guang-da. Detecting spurious area of digital image based on noise correlation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2108-2113.

- 崔夏荣, 苏光大. 基于噪音相关性的数字图像区域作伪检测[J]. 光子学报, 2008, **37**(10):2108-2113.
- [12] CHERCHIA G, PARRILLI S, POGGI G, *et al.* On the influence of denoising in PRNU based forgery detection[C]. In Processing 2nd ACM Workshop Multimedia Forensics, 2010; 117-122.
- [13] LI C T, LI Yue. Color-decoupled photo response non-uniformity for digital image forensics[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, **22**(2): 260-271.
- [14] WU Guang-dong, KANG Xiang-gui. A context adaptive predictor of sensor pattern noise for camera source identification[C]. In Processing 19th IEEE International Conference on Image Processing, 2012; 237-240.
- [15] LIN Xu-feng, LI C T. Preprocessing reference sensor pattern noise via spectrum equalization[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, **11**(1): 126-140.
- [16] KANG Xiang-gui, CHEN Jie, LIN K, *et al.* A context-adaptive SPN predictor for trustworthy source camera identification[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, **2014**(1):1-11.
- [17] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2013, **35**(6):1397-1409.