

图像中的设备指纹提取技术研究综述

张明旺¹, 肖延辉², 田华伟^{2*}, 郝昕泽², 李丽华²

¹四川警察学院科研所, 四川 泸州 646000;

²中国人民公安大学国家安全与反恐学院, 北京 100038

摘要 随着图像获取与传输便利性的不断提高以及图像编辑工具的快速普及,使得恶意用户能够容易拍摄、传播、编辑和修改数字图像,进而达到实施恶意行为或犯罪的目的,则数字图像或视频将成为侦查取证与司法诉讼的关键证据。由图像传感器制造工艺的缺陷和硅晶片的不均匀性引起的光照响应不一致性(PRNU)对于每个相机来说,具有唯一性和稳定性,因此可以将其作为图像来源取证的有效设备指纹。首先对包括设备指纹技术在内的数字图像取证技术进行整体性的回顾,并介绍设备指纹的主要应用情景;然后介绍图像中设备指纹提取的基本技术原理,对设备指纹的提取技术发展情况进行综述;最后对设备指纹提取技术亟待解决的问题与技术发展趋势进行探讨。

关键词 图像处理; 图像识别; 图像取证; 设备指纹; 图像来源鉴定; 传感器模式噪声

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.220003

Review of Device Fingerprint Extraction Techniques in Image

Zhang Mingwang¹, Xiao Yanhui², Tian Huawei^{2*}, Hao Xinze², Li Lihua²

¹*Institute of Research, Sichuan Police College, Luzhou, Sichuan 646000, China;*

²*School of National Security and Counter Terrorism, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China*

Abstract With the continuous improvement of the convenience of image acquisition and transmission and the rapid popularization of image editing tools, a malicious users can easily shoot, spread, edit and modify digital images to achieve the purpose of malicious behavior or crime. It becomes the key evidence for investigation and collection of evidence and judicial proceedings. The illumination response inconsistency (PRNU) causes by the defects of the image sensor manufacturing process and the unevenness of the silicon wafer is unique and stable for each camera, so it can be used as an effective device fingerprint for image source forensics. First, a comprehensive review of digital image forensics technologies including device fingerprint technology is conducted, and the main application scenarios of device fingerprints are introduced. Then, the basic technical principles of device fingerprint extraction in images is introduced, and the development of device fingerprint extraction technology is summarized. Finally, the problems to be solved and the technology development trend of the device fingerprint extraction technology are discussed.

Key words image processing; image recognition; image forensics; device fingerprint; image source identification; sensor pattern noise

OCIS codes 100.3008; 230.6080; 130.6010; 110.4280

1 引言

先进的数字成像技术可以使数字成像设备向质量更高和成本更低的方向发展,便携式摄像机、

数码相机、扫描仪以及智能手机中的内置相机等几乎成为所有人每天都在使用的成像设备,因此每天都有大量的数字图像产生、传输、存储和处理。随着图像获取与传输的便利性不断提高以及图像

收稿日期: 2020-02-17; **修回日期:** 2020-04-03; **录用日期:** 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61772539, 61972405)、四川省科技计划项目(2018JY0521)、公安部技术研究计划(2017JSYJC01)、泸州市科技局项目(2018-GYF-8)

* **E-mail:** hwtian@live.cn

编辑工具的快速普及,一方面促进了数字图像的共享,另一方面也为偷拍、恶意散布和虚假编辑等违法行为提供了便利。目前,关于数字图像以及软件的违法工具正以一种远远超过其防御手段的速度发展。显然,数字图像或者视频已成为侦查取证与司法诉讼的关键证据之一。

数字图像取证技术是当前信息安全领域的研究热点之一,是网络空间安全和公安技术等学科的重要研究分支之一,是社会和信息安全的重要技术保障之一。例如,当犯罪嫌疑人拍摄并在互联网上发布含有非法信息的图像或视频时,如涉及恐怖主义、色情、暴力和虐待未成年人等,可以根据这些图像或视频文件来搜索同源图像和视频以及鉴别成像设备,进而帮助侦查人员锁定犯罪嫌疑人;当犯罪嫌疑人恶意伪造并公开传播虚假图像或视频时,可以鉴定这些图像或视频的真伪和识别篡改的位置与内容,进而揭露虚假信息与谣言。针对上述问题,将数字内容或设备来源作为取证的线索,并对图像中设备指纹的原理与技术展开科学研究。

本文第2节回顾数字图像取证技术并对图像中设备指纹的应用情景进行介绍;第3节介绍相机成像的数学模型,并对此数学模型提取设备指纹的基本技术原理进行介绍;图像中设备指纹的提取可分为滤波阶段、联合阶段和增强阶段三个阶段,因此在第4节对这三个阶段的关键技术发展进行详细论述;第5节对设备指纹提取技术亟待解决的问题与技术发展趋势进行探讨。

2 数字图像取证技术的简介

在已有的相关技术中,虽然基于图像头文件和数字水印的方法可用于图像来源的鉴别和图像伪造的检测,但有明显的局限性。在数字图像的头文件中,通常包含相机的品牌型号、拍摄时间、相机设

置甚至地理位置等信息,但这些信息很容易被擦除或者更改^[1],因此这些信息不可以作为法庭诉讼和刑事案件等敏感任务的可信证据之一。另外,获取的图像中可能不会含有数字水印,这是因为数字水印需预先且主动嵌入图像中^[2-5],因此如果图像中没有预先嵌入水印,也就无法进行图像来源的鉴别和图像伪装的检测。考虑到上述的局限性,研究者们将注意力转向设备指纹,即成像时遗留在图像中与生俱来且固有的特性。

通常,相机成像过程会在所输出的图像上留下部分痕迹,为此研究者们已经开展了大量的工作以提取这些能够刻画成像设备痕迹的特征。图1为典型的相机成像过程。自然场景的光线经过镜头和颜色滤波阵列(CFA)后投射到成像传感器的表面,传感器将光信号转换为原始图像信号,然后经过白平衡、CFA插值、相机响应函数(CRF)变换和JPEG压缩的处理,最终转换为适合观看和显示的图像数据形式。一般而言,成像过程中所有的处理过程,如软件和硬件的处理过程都会在图像中留下特殊的模式和固有的痕迹,为此研究者们将其作为数字图像取证的重要参考依据之一。因此,传感器中的像素坏点^[6-7]、CFA插值痕迹^[8-9]、JPEG压缩痕迹^[10-11]、镜头的色散^[12-13]以及图像固有特征的组合^[14-15]等都可用于数字图像的取证。

此外,Fridrich教授等^[16]提出了基于传感器模式噪声(SPN)的来源检测算法,SPN的主要成分为光响应不一致性(PRNU)噪声,并且PRNU噪声主要是由传感器制造工艺的缺陷和硅晶片的不均匀引起的。SPN之所以可作为相机鉴别和相机链接的有效设备指纹,主要依赖于PRNU噪声具有对每个相机的唯一性和对环境变化的稳定性。

由此可见,开展基于PRNU噪声的图像设备指纹相关技术的研究具有重要的科学意义和应

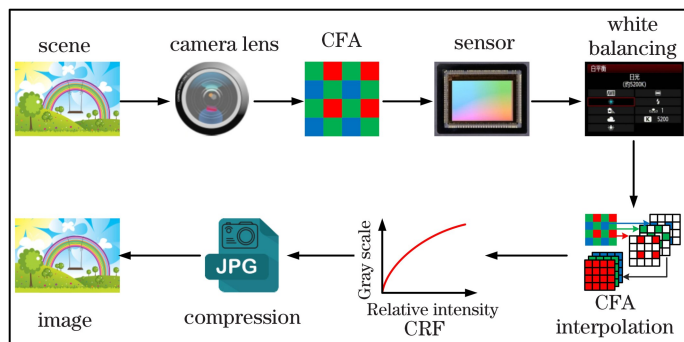


图1 典型相机彩色图像的处理过程

Fig.1 Typical camera color image processing

用价值。设备指纹提取的一般流程如图2所示。一般而言,基于PRNU噪声的图像设备指纹的数字取证技术主要有以下两类应用。

1) 图像来源鉴别。此类技术中最常见的应用是“源相机鉴别”和“源相机验证”。源相机鉴别的主要目标是从众多相机中鉴别出拍摄图像(query image)的源相机;源相机验证的主要目标是验证一幅图像是否是由某个特定相机所拍摄的。对这两种应用而言,源相机可供侦查取证人员使用。此外,还有一种被称为“指纹匹配”的应用,其可以实现大规模数据库中不同图像集合的链接或匹配。当侦查取证人员未能拿到源相机时,可以使用指纹匹配的技术从大规模图像库中搜索同源相机的图像。“视频片段链接”也是一个有意义的应用,其目的是从视频集中匹配和查询与图像同源的视频。

针对图像来源鉴别存在的问题,学术界已提出

了许多解决的方法^[7,9,12,14,17]。因传感器中的固有PRNU噪声具有唯一性,将其作为图像设备指纹具有先天的优势。因此,PRNU噪声作为图像设备指纹既可以用来鉴别不同品牌、不同型号的相机,又可以鉴别相同品牌、相同型号的相机。

2) 图像伪造检测。PRNU噪声可以作为一种用于检测伪造图像的数字水印,只是该水印是图像中固有的且具有唯一性,并伴随着图像的产生而存在,而且每个PRNU噪声与其源相机是一一对应的。图像中目标物体的拷贝与移动等伪造操作均会改变或者破坏伪造区域的PRNU噪声,比如从其他相机拍摄的图像中抠取目标物体并复制到待篡改图像中,或者直接移动待篡改图像中目标物体的空间位置。当然,恶意篡改者在篡改图像内容时也可能采取一些措施以避免PRNU噪声的破坏,为此研究者们已提出了多种图像伪造检测的方法^[18-22]。

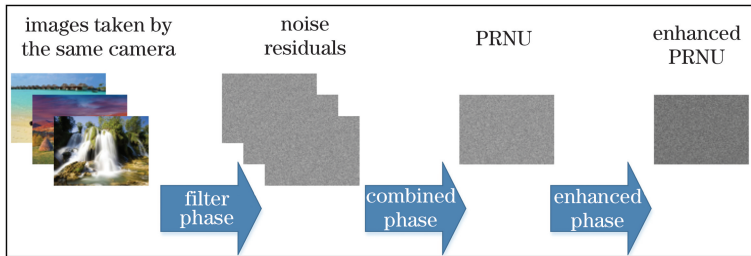


图2 设备指纹提取的一般流程

Fig. 2 General process of device fingerprint extraction

3 PRNU 设备指纹提取的技术原理

PRNU噪声是由传感器制造工艺的缺陷以及像素硅晶片的不均匀所引起的。因传感器的不完美而造成PRNU噪声 $K \in \mathbb{R}$ 是非常微弱的,其尺寸与传感器的尺寸一致。相机的输出图像可以表示为^[16]

$$I = I_0 + KI_0 + \Theta, \quad (1)$$

式中: I_0 表示原始的输入图像; I 表示输出图像; Θ 表示随机噪声。此处, K 以乘性规则作用于 I_0 ,并且与高斯白噪声的分布情况非常相似。 K 中频率内容的丰富性以及传感器的唯一性决定其是否可以作为图像来源相机鉴别和图像伪造检测的设备指纹。

图2为PRNU指纹的提取流程,该过程一般分为滤波阶段、联合阶段和增强阶段三个阶段。在滤波阶段,模式残差即噪声残差可以通过滤波前后的图像差值得,表达式为

$$\hat{r} = I - F(I), \quad (2)$$

式中: $F(\cdot)$ 表示滤波处理。此处, \hat{r} 含有PRNU噪声以及其他不能用于取证的随机噪声。在联合阶段,将同一相机拍摄的 L 张图像中的噪声残差联合起来得到PRNU噪声。最常见的方式就是对噪声残差进行平均运算以进一步去除 \hat{r} 中的其他随机噪声,进而获得PRNU噪声,表达式为

$$\hat{K} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{r}_l. \quad (3)$$

在增强阶段,将进一步去除CFA插值和JPEG压缩等相同操作造成图像中共有的且不可用于取证的噪声,从而进一步增强PRNU噪声,以使其更好地应用于图像来源的鉴别和图像伪造的检测。

4 PRNU 设备指纹提取技术的综述

4.1 滤波阶段

在滤波阶段,(2)式中的模式残差即噪声残差,其可以通过滤波前后的图像差值得。关于图像中噪声的提取^[23-30],学术界已有大量的工作可以参

考。获得图像中含有 PRNU 噪声成分的 \hat{r} 是图像中 PRNU 设备指纹提取技术的关键阶段,为此研究者们进行了很多的尝试与创新,得到的典型方法如下。

4.1.1 基于小波的滤波

基于小波的滤波方法是由 Lukas 等^[16] 在 Kivanc Mihcak 等^[23] 提出的图像去噪算法的基础上提出的。首先使用 Daubechies 正交镜像滤波器对图像进行 4 级小波分解,得到垂直系数 $h(i,j)$ 、水平系数 $v(i,j)$ 和对角系数 $d(i,j)$, 其中 (i,j) 表示系数坐标。然后使用维纳滤波器对 $h(i,j)$ 进行去噪,则去噪后的小波系数为 $h_w(i,j) = h(i,j) \frac{\hat{\sigma}^2(i,j)}{\hat{\sigma}^2(i,j) + \sigma_0^2}$, 对 $v(i,j)$ 和 $d(i,j)$ 也采用

相同的操作,其中 σ_0 值为 3, $\hat{\sigma}^2(i,j)$ 表示“原始”无噪声图像的小波系数局部方差的估计值,这里使用最大后验估计来计算方差,表达式为

$$\hat{\sigma}_q^2(i,j) = \max \left[0, \frac{1}{q \times q} \sum_{(x,z) \in \beta_q} h^2(x,z) - \sigma_0^2 \right], \quad (4)$$

式中: $q \times q$ 表示以 (i,j) 为中心的窗口 β_q 的尺寸, 此处 $q \in \{3,5,7,9\}$; (x,z) 表示窗口 β_q 内的像素点; $h(x,z)$ 表示 (x,z) 处的小波系数。 $\hat{\sigma}^2(i,j)$ 的表达式为

$$\hat{\sigma}^2(i,j) = \min [\hat{\sigma}_3^2(i,j), \hat{\sigma}_5^2(i,j), \hat{\sigma}_7^2(i,j), \hat{\sigma}_9^2(i,j)], \quad (5)$$

式中: $\hat{\sigma}_3^2(i,j)$ 、 $\hat{\sigma}_5^2(i,j)$ 、 $\hat{\sigma}_7^2(i,j)$ 、 $\hat{\sigma}_9^2(i,j)$ 表示不同尺寸下的小波系数局部方差的估计值。最后,对去噪后的小波系数进行小波逆变换以得到去噪图像 $F(I)$ 。

4.1.2 基于上下文自适应插值的滤波

文献[24]提出了一种基于八邻域的上下文内容自适应插值(PCAI)算法,使用该算法对图像中的场景进行抑制。该算法可以将局部区域分成 6 种类型,即平滑区域、水平边缘、垂直边缘、正对角边缘、

反对角边缘以及其他区域。在平滑区域,利用均值滤波器来估计该平滑区域的中心像素值。在边缘区域,沿着边缘的方向来寻找中心像素值。在其他区域,采用中值滤波来估计中心像素值。对于上述 6 种类型,采用文献[24]中的方法对所有像素进行插值计算。

最后与文献[16]使用的方法相同,使用维纳滤波器对 \hat{r} 进行滤波,最终得到去噪后的图像 $F(I)$ 。

4.1.3 自适应空间滤波

文献[25]提出了一种两阶段的自适应滤波方法。在第一阶段,采用标准的自适应维纳滤波器直接在空域中对图像进行滤波,表达式为

$$\hat{r}(m,n) = I(m,n) - U(m,n) + [I(m,n) - U(m,n)] [\hat{\sigma}^2(m,n) - \sigma_0^2] / \hat{\sigma}^2(m,n), \quad (6)$$

式中: $U(m,n)$ 表示局部窗口的均值; (m,n) 表示图像中的像素点; $I(m,n)$ 表示像素点 (m,n) 的像素值; $\hat{\sigma}(m,n)$ 表示像素点 (m,n) 的标准差。在 (m,n) 的周围取大小为 $q \times q$ 的窗口 β_q , 此处 β_q 的大小取 9 pixel \times 9 pixel, 设置 σ_0^2 值为 5。第二阶段由两个级联的 2×2 中值滤波器组成,用于抑制 \hat{r} 中的异常像素值。

4.1.4 内容自适应引导滤波

文献[26]提出了一种基于图像引导滤波的内容自适应滤波方法。采用空域中相邻像素加权平均的方式得到噪声残差,表达式为

$$\hat{r}(m,n) = I(m,n) - \sum_{(x,z) \in \beta_q} I(x,z) a(m,n) + b(m,n), \quad (7)$$

其中,

$$a(m,n) = \frac{1}{q^2} \sum_{(x,z) \in \beta_q} I^2(x,z) - U^2(m,n) \frac{\hat{\sigma}^2(m,n) + \Gamma(m,n)}{\hat{\sigma}^2(m,n) + \Gamma(m,n)}, \quad (8)$$

$$b(m,n) = U(m,n) - a(m,n)U(m,n), \quad (9)$$

式中: $I(x,z)$ 表示像素点 (x,z) 的像素值。 $\Gamma(m,n)$ 表示自适应平滑参数,可以表示为

$$\Gamma(m,n) = \frac{1}{MN} \sum_{(x,z)} \frac{[(\hat{\sigma}^2(m,n) + v) / (U^2(m,n) + 10^{-9})]^{0.75}}{[(\hat{\sigma}^2(x,z) + v) / (U^2(x,z) + 10^{-9})]^{0.75}}, \quad (10)$$

式中: $v = (0.001D)^2$, 其中 D 表示 I 的动态取值; M, N 表示图像的高和宽; $U(x,z)$ 表示图像的均值; $\hat{\sigma}(x,z)$ 表示图像的标准差。窗口 β_q 的尺寸根据图像纹理强度自动调整,可以表示为

$$q = \begin{cases} 13 - 2 \text{round}[v(I)/8], & v(I) < 36 \\ 5, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $v(I)$ 表示 I 的归一化总变分项; $\text{round}(\cdot)$ 表

示对数值进行四舍五入的操作。为了进一步抑制 $\hat{r}(m, n)$ 中的图像噪声,对 $\hat{r}(m, n)$ 进行截断,则取值范围为 $[-6, 6]$ 。

4.1.5 基于 BM3D 的滤波方法

基于 BM3D(Block-Matching and 3D filtering) 的滤波方法是由文献[27]提出的,被文献[31-32]改进后用于 PRNU 指纹的提取。该滤波方法联合了滑动窗口块匹配和 3D 变换技术,在变换域中对噪声进行滤波处理。首先滑动搜索与当前图像块相似的块,将所有匹配块以 3D 数组的形式进行存放。然后对该 3D 数组进行 3D 变换以得到变换域的稀疏表示,并在变换域的变换系数上进行有效的去噪操作(如维纳滤波等)。最后对滤波后的 3D 变换系数进行逆变换,进而得到去噪后的图像块。

4.1.6 基于 TWSC 的滤波方法

相较于加性高斯白噪声(AWGN)的估计,PRNU 噪声的提取所采用的噪声估计算法在图像真实噪声的提取方面性能劣势明显。因此,文献[33]提出了一种基于三方加权稀疏编码(TWSC)模型的 PRNU 噪声提取方法。TWSC 模型^[28]在图像真实噪声的估计上具有较好的性能,该方法估计的 PRNU 噪声成分可以得到更多的保留。实验结果表明,TWSC 模型对图像中的 PRNU 噪声的提取是有益的,进而提高了设备指纹提取算法的性能。

4.1.7 滤波阶段典型算法性能分析

文献[33]在 Dresden 图像库中进行了基于小波滤波的 PRNU 提取法、基于 BM3D 滤波的 PRNU 提取方法、基于 TWSC 滤波的 PRNU 提取方法的比较。该测试库使用 25 种型号、73 台相机拍摄了 14000 余幅多种场景的图像。将图像统一裁剪为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 、 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 和 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 三种尺寸并分别用于实验。针对每台相机,随机选择 50 幅图像用于相机 PRNU 指纹的提取。然后,在从剩余图像中随机选取 100 幅图像,并计算其噪声残差。最后计算每个相机的 PRNU 指纹与所有图像噪声残差之间的峰值相关能量比(PCE)。针对 PCE 值,根据不同的阈值来计算真阳率(TPR)和假阳率(FPR)。实验结果表明,在图像分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的情况下,当 FPR 值为 0.1 时,基于小波滤波、基于 BM3D 滤波和基于 TWSC 滤波三种方法的 TPR 值分别为 0.75、0.75 和 0.77;在分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的情况下,当 FPR 值为 0.1 时,三种算法的 TPR 值分别为 0.88、0.89 和 0.92;在分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times$

1024 pixel 的情况下,当 FPR 值为 0.1 时,三种算法的 TPR 分别为 0.95、0.96 和 0.98。Kang 等^[24]对基于 PCAI 滤波的 PRNU 提取算法和基于 BM3D 滤波的 PRNU 提取算法进行了比较,对 Dresden 图像库中 3320 幅图像进行算法性能的比较。当 FPR 值为 0.001 时,在图像分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的测试子集上,基于 PCAI 滤波和基于 BM3D 滤波的两种 PRNU 提取方法的 TPR 值分别为 0.462 和 0.377;在分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的测试子集上,两种算法的 TPR 值分别为 0.794 和 0.713;在分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的测试子集上,两种方法的 TPR 值分别为 0.890 和 0.859。综上所述,基于 PCAI 滤波和基于 TWSC 滤波的 PRNU 提取算法优于基于小波和基于 BM3D 的设备指纹提取算法。

4.2 联合阶段

经过第一阶段的滤波后,除了含有 PRNU 噪声以外, \hat{r} 中依然含有相当多的随机噪声,则无法用于图像的取证,因此需将从同一相机拍摄的 L 张图像中提取的噪声残差联合起来,可以得到更可靠的 PRNU 指纹。一些科研人员采用了 $\hat{r} = KI_0 + \theta$ 的数学模型,这里 $\theta \in \mathbb{R}$ 表示随机噪声污染物,其具有固定的均值和方差,并且与 KI_0 是互相独立的。因为 $I_0(m, n)$ 与 $K(m, n)$ 是互相独立的,则 L 个噪声残差的平均值 $R = \sum_{i=1}^L \hat{r}_i / L$ 。其他两种经典方法的介绍如下。

4.2.1 最大似然估计法

Chen 等^[34]采用了 $\hat{r} = KI_0 + \theta$ 的数学模型,并认为所有 L 个图像在固定的相应位置上的随机噪声(如 $\theta_l(m, n), l = 1, \dots, L$)是服从零均值且固定方差的高斯白噪声。因此,采用最大似然估计(MLE)法来估计 K ,表达式为

$$R_{\text{MLE}} = \frac{\sum_{i=1}^L \hat{r}_i I_i}{\sum_{i=1}^L I_i^2} \quad (12)$$

所有 L 个图像在固定的相应位置上的随机噪声,可以通过对拍照环境的控制来设定方差。

4.2.2 加权平均法

如果不能对拍摄环境进行控制,即使相机感光度(ISO)设置为固定值,上述随机噪声的方差也不会是恒定不变的,这是因为快门和焦距等相机设置都会对其产生影响。基于这些事实,文献[35]采用了加权平均操作来降低估计误差,表达式为

$$R_w = \sum_{l=1}^L \omega_l \hat{r}_l, \quad (13)$$

式中： ω_l 波段第 l 个图像的权重，可以表示为

$$\omega_l = \frac{1}{\sigma_l^2} \left(\sum_{s=1}^L \frac{1}{\sigma_s^2} \right)^{-1}, \quad (14)$$

式中： σ_l^2 表示 \hat{r}_l 的方差； σ_s^2 表示 r_s 的方差； s 表示区别于第 l 个图像。设 R 为 \hat{r}_l 的均值且 $\hat{n}_l = \hat{r}_l - R$ ，则有

$$\sigma_l^2 = \frac{\sum_{(m,n)} [\hat{n}_l(m,n) - \bar{n}_l]^2}{MN}, \quad (15)$$

$$\bar{n} = \frac{\sum_{(m,n)} \hat{n}_l(m,n)}{MN}.$$

4.2.3 联合阶段典型方法的性能分析

Kang 等^[24]对基于 MLE 的 PRNU 提取方法、基于 PCAI 滤波的 PRNU 提取方法和基于 BM3D 滤波的 PRNU 提取方法进行比较。比较结果表明，当 FPR 值为 0.001 时，在图像分辨率为 128 pixel×128 pixel、256 pixel×256 pixel、512 pixel×512 pixel 三个测试子集上，基于 MLE 的 PRNU 提取方法的 TPR 值分别为 0.391、0.772 和 0.881，显然该方法的性能优于基于 BM3D 滤波的方法，而低于基于 PCAI 滤波的方法。Lawgaly 等^[35]在实验中使用了 Canon IXUS115HS、Panasonic DMC TZ20、Samsung L301、Canon G10、Sony DSC HX200、Fujifilm S2950 等 6 台相机，每部相机均使用 200 张图像。实验结果表明，在相同条件下，使用加权平均操作可以为基于 MLE 的 PRNU 提取方法的性能带来一定的提升。具体情况下，当 FPR 为 0.01 时，在分辨率分别为 128 pixel×128 pixel、256 pixel×256 pixel 和 512 pixel×512 pixel 的情形下，TPR 值分别提升 0.16、0.11 和 0.04。

4.3 增强阶段

在增强阶段，将进一步去除使用 CFA 插值和 JPEG 压缩等相同操作而造成图像中共有的且不可用于取证的噪声，从而进一步增强 PRNU 指纹的性能。因此，研究者们又进行了许多尝试以进一步增强 PRNU 指纹的性能。

4.3.1 去除共有成分法

经过滤波和联合两个阶段的操作后，估计的 PRNU 噪声中除了含有代表相机唯一性的 PRNU 指纹外，还有一些并不具有相机唯一性的人工痕迹噪声。这些人工痕迹噪声是在相机成像的过程中采用了相同的处理算法（如 CFA 内插、伽马校正和

JPEG 压缩等）而造成的，所以其是图像中共有的成分，因此人工痕迹噪声不仅不可以用于图像来源的鉴别，而且还应该从估计到的 PRNU 噪声中去除掉，从而进一步提高 PRNU 指纹的性能。估计到的 PRNU 噪声中有多种类型的人工痕迹噪声，因此对其完全去除是非常困难的。文献[34]采用了基于两步操作的方法对噪声进行去除，虽不能完全应对多种人工痕迹噪声，但起到了有效的抑制作用，操作步骤如下。

第一步操作称为零均值操作，用 $Z(\cdot)$ 来表示。该操作的主要目的是去除由 CFA 内插所带来的噪声。具体是将图像中的每个像素都减去其所在列的像素均值，每个像素都减去其所在行的像素均值。

第二步操作是在傅里叶变换域中对估计到的 PRNU 噪声进行维纳滤波，而滤波操作仅在傅里叶变换的幅度上进行。

4.3.2 相位操作法

与 4.3.1 节介绍的去除共有成分法类似，文献[36-37]介绍了一种从噪声残差的频率域中进一步去除由 JPEG 压缩、CFA 内插和传感器设计等操作所带来的非唯一性人工痕迹噪声和图像内容噪声的方法。该方法基于的传感器噪声是高斯白噪声，因而具有平滑频谱这一确定假设。首先对噪声残差进行处理，表达式为

$$P_{bl} = \frac{F(\hat{r}_l)}{|F(\hat{r}_l)|}, \quad l=1, \dots, L, \quad (16)$$

式中： $F(\cdot)$ 表示傅里叶变换； P_{bl} 表示第 l 幅图像噪声残差 \hat{r}_l 的相位成分。然后将所有的相位成分联合起来进行傅里叶逆变换，从而得到 PRNU 指纹 R_p ，表达式为

$$R_p = \text{Re} \left[F^{-1} \left(\frac{\sum_{l=1}^L P_{bl}}{L} \right) \right], \quad (17)$$

式中： $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部。

4.3.3 谱均衡化法

基于 PRNU 与高斯白噪声的分布相同这一基本假设，文献[38]提出了傅里叶域谱均衡化的 PRNU 增强方法。这一方法的理论基础：高斯白噪声的傅里叶变换谱是平滑的，因此傅里叶谱中的峰不可能表达真正的 PRNU 噪声。该方法由两个主要步骤组成，首先利用迭代的方式计算傅里叶系数的局部均值，进而检测异常的峰值。然后，通过局部均值的方式来平滑傅里叶谱抑制所检测到的异常峰值。

4.3.4 增强阶段典型算法性能分析

Lin 等^[38]的实验结果表明去除共有成分法^[34]和谱均衡化法对 PRNU 指纹的增强是非常有效的。Lin 等^[38]采用了包含 10 个品牌、15 个型号的 49 台相机所采集的图像进行对比分析,每台相机采集的图像数量为 200 幅,其中用于 PRNU 指纹提取和性能验证的图像数量分别为 50 和 150。在分辨率为 256 pixel×256 pixel 图像上,当 FPR 为 0.001 时,去除共有成分的指纹增强方法^[34]对基于小波滤波的算法、基于 MLE 的算法、基于相位操作算法、基于 PCAI 滤波的算法、基于 BM3D 滤波的算法等 5 种 PRNU 提取算法的 TPR 分别提升了 0.616、0.600、0.188、0.703 和 0.634。在同样的实验条件下,均衡化法对以上 5 种 PRNU 提取算法的 TPR 分别提升了 0.740、0.740、0.249、0.767 和 0.797。

5 存在的问题与发展趋势

5.1 对人工经验的依赖性太强,智能化程度有待提高

当前,几乎所有成像设备指纹的提取方法都是使用模型来驱动的,即基于已简化的相机成像数学模型,这种简化后的数学模型无法精确刻画复杂的成像过程,因此会造成提取的设备指纹具有先天性的固有缺陷。另外,无论是在滤波阶段和联合阶段,还是在增强阶段,现有的几乎所有操作都是依靠经验进行人工指纹特征的提取,而对于更智能化且数据驱动的指纹提取方法的研究较少。近年来,鉴于深度学习技术在图像特征提取、基于内容的图像检索和图像内容识别等研究方向的成功经验,认为利用深度学习技术可以使深度神经网络自主地学习样本的指纹特征,这将是设备指纹技术未来发展的方向。这在一方面避免了以往依赖经验甚至运气而进行人工指纹特征的提取,另一方面与基于人工规则构造特征的方法相比,利用大规模样本库自动化且智能化地学习特征,更能准确表达图像中的设备指纹信息。

5.2 提取的设备指纹适用性不足,通用性需进一步增强

一方面现有方法提取的指纹尺寸过大,均是在 512 pixel×512 pixel 以上,这严重影响了其在内容篡改的检测与定位等应用的准确性;另一方面,现有方法提取的设备指纹尺寸不统一,不适用于指纹的比对计算。例如,在便携式录像机的鉴别中,视频帧的分辨率一般远远低于静止图像,在这种情景

下指纹尺寸有差异,将难以对其进行比对计算^[39]。因此,小尺寸、固定长度、鲁棒且通用性强的指纹提取技术将是下一步研究的重要方向^[40-48]。

5.3 图像测试库规模太小,成像设备源类型需进一步完善

近年来,智能手机具有经济性、携带便捷性和通信便利性等优势,使得其可以迅速且大量的普及。根据日本影视器材工业协会(CIPA)公布的销售数据统计报告表明^[49],自 2014 年起日本相机厂商的销售额就开始出现下降的趋势,2015 年的跌幅达到 20%。2016 年,国际著名网络相册公司 Flickr 公开了从 2015 年到 2016 年人们喜欢使用的拍摄设备统计数据^[50],对比 2015 年同期,Flickr 上使用手机拍摄图像的占比从 39%上升到 48%,而单反相机则从 2015 年同期的 31%下降到 25%,紧凑型相机则从 25%下跌到 21%。由此可见,智能手机已成为最重要的图像拍摄设备。但令人遗憾的是,在图像设备指纹的相关研究领域,标准图像测试库的成像设备库中智能手机的品牌种类、型号数量以及设备数量都太少,如在 Dresden 图像库^[51]中采集图像的设备全部为数码相机,没有智能手机;最近公布的 VISION 图像库^[52]中仅仅使用了 35 台智能手机作为采集设备。为此,因大规模的智能手机的加入以及成像设备源的完善是相关研究领域中亟需解决的问题。最近,本课题组的相关工作^[53]就是针对这一问题的。

5.4 评测方法的适用环境过于理想,评测方法的研究需更切合实际

合理的设备指纹评测方法能够对现有的设备指纹提取方法进行科学合理的比较,对设备指纹提取技术的进步与发展起到良好的促进作用。目前,评测方法多数都是采用基于标准相关系数的方法^[34,36,54-55],如归一化互相关系数,将中心化后的 PRNU 指纹 R 和查询图像的噪声残差 \hat{r}_q 之间的归一化互相关系数定义为

$$\rho = \frac{R \odot \hat{r}_q}{|R| |\hat{r}_q|}, \quad (18)$$

式中: \odot 表示点积。类内相关系数可以表示来自于同一台相机的设备指纹之间的相似性;类间相关系数可以表示来自于不同相机的设备指纹之间的相似性。理论上讲,类间相关系数的分布应该集中在 0 附近;而类内相关系数的分布应该集中在 1 附近。基于此,现有的方法多是基于相关系数比较的方法,但是实际情况却并非如此,由于受到多种噪

声的污染,特别是同型号相机的设备指纹含有相同且未被去除干净的噪声,类间相关系数和类内相关系数的分布是接近的甚至是重叠的。由此可见,相关系数难以用单一分布模型来精确描述,也不宜用拟合的分布模型参数作为可靠的性能评价测度^[34]。因此,应在考虑到设备指纹中噪声污染难以去除干净这一客观事实的情况下,设计更加科学合理且更切合实际应用的设备指纹评测方法。

6 结 论

回顾图像中的设备指纹提取技术的基本原理,并介绍其应用场景。分析设备指纹提取技术与其他数字图像取证技术的区别。将图像中的设备指纹提取技术分成滤波、联合和增强等三个处理阶段,并分别综述各个阶段的技术发展及特点。最后得到现有图像中的设备指纹提取技术的缺点与建议,该技术对人工经验的依赖性太强,智能化程度有待提高;提取的设备指纹适用性不足,通用性需进一步增强;图像测试库尤其是智能手机图像库规模太小,成像设备源类型需进一步完善;评测方法的适用环境过于理想,评测方法的研究需更切合实际。未来,将会在设备指纹的通用性和评测方法的可用性等方面开展研究工作。

参 考 文 献

- [1] Sandoval Orozco A L, Arenas González D M, García Villalba L J, et al. Analysis of errors in EXIF metadata on mobile devices [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2015, 74(13): 4735-4763.
- [2] Tian H W, Zhao Y, Ni R R, et al. LDFT-based watermarking resilient to local desynchronization attacks [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, 43(6): 2190-2201.
- [3] Tian H W, Xiao Y H, Cao G, et al. Robust watermarking of mobile video resistant against barrel distortion[J]. *China Communications*, 2016, 13(9): 131-138.
- [4] Tian H W, Zhao Y, Wang Z, et al. Robust multi-bit watermarking for free-view television using light field rendering [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2013, 96(12): 2820-2829.
- [5] Tian H W, Zhao Y, Ni R R, et al. Geometrically robust image watermarking by sector-shaped partitioning of geometric-invariant regions[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21819-21836.
- [6] Kurosawa K, Kuroki K, Saitoh N. CCD fingerprint

- method-identification of a video camera from videotaped images[J]. *Proceedings 1999 International Conference on Image Processing*, 1999, 3: 537-540.
- [7] Geradts Z J, Bijhold J, Kieft M, et al. Methods for identification of images acquired with digital cameras [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4232: 505-512.
- [8] Bayram S, Sencar H, Memon N, et al. Source camera identification based on CFA interpolation [C]//*IEEE International Conference on Image Processing 2005*, September 14, 2005, Genova, Italy. New York: IEEE, 2005: 8835799.
- [9] Swaminathan A, Wu M, Liu K J R. Nonintrusive component forensics of visual sensors using output images [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2007, 2(1): 91-106.
- [10] Sorell M J. Digital camera source identification through JPEG quantisation [M]//Sorell M J. *Multimedia forensics and security*. Pennsylvania: IGI Global, 2008: 291-313.
- [11] Alles E J, Geradts Z J M H, Veenman C J. Source camera identification for heavily JPEG compressed low resolution still images [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2009, 54(3): 628-638.
- [12] Choi K S, Lam E Y, Wong K K Y. Source camera identification using footprints from lens aberration [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6069: 60690J.
- [13] Van L T, Emmanuel S, Kankanhalli M S. Identifying source cell phone using chromatic aberration[C]//*2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, July 2-5, 2007, Beijing, China. New York: IEEE, 2007: 883-886.
- [14] Kharrazi M, Sencar H T, Memon N. Blind source camera identification [C]//*2004 International Conference on Image Processing*, 2004, October 24-27, 2004, Singapore, Singapore. New York: IEEE, 2004: 709-712.
- [15] Çeliktutan O, Sankur B, Avcibaş I. Blind identification of source cell-phone model [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(3): 553-566.
- [16] Lukas 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.
- [17] Thai T H, Coganne R, Retraint F. Camera model identification based on the heteroscedastic noise model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(1): 250-263.

- [18] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting traces of resampling[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(2): 758-767.
- [19] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(10): 3948-3959.
- [20] Johnson M K, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting[C]//*Proceedings of the 7th workshop on Multimedia and security-MM&Sec '05*, August 1-2, 2005, New York, NY, USA. New York: ACM, 2005: 1-10.
- [21] Lin Z, Wang R, Tang X, et al. Detecting doctored images using camera response normality and consistency [C]//2005 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2005: 1087-1092.
- [22] Chen W, Shi Y Q, Su W. Image splicing detection using 2D phase congruency and statistical moments of characteristic function [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6505: 65050R.
- [23] Kivanc Mihcak M, Kozintsev I, Ramchandran K. Spatially adaptive statistical modeling of wavelet image coefficients and its application to denoising [C]//1999 *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings*, March 15-19, 1999, Phoenix, AZ, USA. New York: IEEE, 1999: 3253-3256.
- [24] Kang X G, Chen J S, Lin K R, et al. A context-adaptive SPN predictor for trustworthy source camera identification[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, 2014(1): 19.
- [25] Cooper A J. Improved photo response non-uniformity (PRNU) based source camera identification [J]. *Forensic Science International*, 2013, 226(1/2/3): 132-141.
- [26] Zeng H, Kang X G. Fast source camera identification using content adaptive guided image filter[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2016, 61(2): 520-526.
- [27] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [28] Xu J, Zhang L, Zhang D. A trilateral weighted sparse coding scheme for real-world image denoising [M]//Ferrari V, Hebert M, Sminchisescu C, et al. *Computer vision-ECCV 2018. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2018, 11212: 21-38.
- [29] Lü J R, Luo X G, Qi S F, et al. Image denoising using weighted nuclear norm minimization with preserving local structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(16): 161006. 吕俊瑞, 罗学刚, 岐世峰, 等. 保持局部结构的加权核范数最小化图像去噪[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(16): 161006.
- [30] Liu Y C, Zhao C H, Xu Q. Neural network-based noise suppression algorithm for star images captured during daylight hours[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0610003. 刘宇宸, 赵春晖, 徐卿. 基于神经网络的全天时天文导航图像去噪方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0610003.
- [31] Cortiana A, Conotter V, Boato G, et al. Performance comparison of denoising filters for source camera identification [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7880: 788007.
- [32] Chierchia G, Parrilli S, Poggi G, et al. On the influence of denoising in PRNU based forgery detection [C]//*MiFor '10: Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Multimedia in Forensics, Security and Intelligence*, October 29, 2010, Firenze, Italy. New York: ACM, 2010: 117-122.
- [33] Zhang Y S, Tian H W, Xiao Y H, et al. PRNU extraction algorithm based on trilateral weighted sparse coding model[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2019, 37(5): 704-710. 张永胜, 田华伟, 肖延辉, 等. 基于三方加权稀疏编码模型的 PRNU 提取算法[J]. *应用科学学报*, 2019, 37(5): 704-710.
- [34] 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.
- [35] Lawgaly A, Khelifi F, Bouridane A. Weighted averaging-based sensor pattern noise estimation for source camera identification [C]//2014 *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, October 27-30, 2014, Paris, France. New York: IEEE, 2014: 5357-5361.
- [36] Kang X G, Li Y X, Qu Z H, 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.

- [37] Kang X G, Li Y X, Qu Z H, et al. Enhancing ROC performance of trustworthy camera source identification[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7880: 788009.
- [38] Lin X F, Li C T. Preprocessing reference sensor pattern noise via spectrum equalization [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016, 11(1): 126-140.
- [39] Hsu C C, Hung T Y, Lin C W, et al. Video forgery detection using correlation of noise residue[C]//2008 IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing, October 8-10, 2008, Cairns, Qld, Australia. New York: IEEE, 2008: 170-174.
- [40] Chierchia G, Parrilli S, Poggi G, et al. PRNU-based detection of small-size image forgeries[C]//2011 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP), July 6-8, 2011, Corfu, Greece. New York: IEEE, 2011: 12216957.
- [41] Cozzolino D, Gagnaniello D, Verdoliva L. A novel framework for image forgery localization [EB/OL]. (2013-11-27) [2020-02-16]. <https://arxiv.org/abs/1311.6932>.
- [42] Chierchia G, Poggi G, Sansone C, et al. A Bayesian-MRF approach for PRNU-based image forgery detection [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2014, 9(4): 554-567.
- [43] Li C T, Li Y. 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.
- [44] Hu Y J, Yu B H, Jian C. Source camera identification using large components of sensor pattern noise[C]//2009 2nd International Conference on Computer Science and its Applications, December 10-12, 2009, Jeju, Korea. New York: IEEE, 2009.
- [45] Tomioka Y, Ito Y, Kitazawa H. Robust digital camera identification based on pairwise magnitude relations of clustered sensor pattern noise[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 8(12): 1986-1995.
- [46] Li R Z, Guan Y, Li C T. PCA-based denoising of Sensor Pattern Noise for source camera identification [C]//2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), July 9-13, 2014, Xi'an, China. New York: IEEE, 2014: 436-440.
- [47] Bayram S, Sencar H T, Memon N. Efficient sensor fingerprint matching through fingerprint binarization [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(4): 1404-1413.
- [48] Valsesia D, Coluccia G, Bianchi T, et al. Compressed fingerprint matching and camera identification via random projections [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(7): 1472-1485.
- [49] Manabu O. Statistical results & outlook [EB/OL]. [2020-02-16]. <http://www.cipa.jp/stats/documents/common/cr1000.pdf>.
- [50] Flickr B. Smartphones dominate flickr uploads in 2016, apple leads device makers [EB/OL]. (2016-12-06) [2020-02-16]. <http://blog.flickr.net/en/2016/12/06/smartphones-dominate-flickr-in-2016-apple-leads/>.
- [51] Gloe T, Böhme R. The Dresden image database for benchmarking digital image forensics [J]. Journal of Digital Forensic Practice, 2010, 3(2/3/4): 150-159.
- [52] Shullani D, Fontani M, Iuliani M, et al. VISION: a video and image dataset for source identification [J]. EURASIP Journal on Information Security, 2017, 2017(1): 15.
- [53] Tian H W, Xiao Y H, Cao G, et al. Daxing smartphone identification dataset [J]. IEEE Access, 2019, 7: 101046-101053.
- [54] Goljan M. Digital camera identification from images-estimating false acceptance probability [M]//Kim H J, Katzenbeisser S, Ho A T S. Digital watermarking. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 2009, 5450: 454-468.
- [55] Al-Ani M, Khelifi F. On the SPN estimation in image forensics: a systematic empirical evaluation [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(5): 1067-1081.