

基于小波分析与帧间交错图像融合算法的 电磁泄漏信息还原方法

孙宇良, 李凯, 田平怡, 石琴, 于三强,
杨善勇, 刘鑫强, 杨光

(智能探测技术与装备山西省重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对显示器电磁泄漏信号还原出的图像存在模糊的问题, 提出了一种基于小波分析与帧间交错图像融合算法融合的电磁泄漏信息还原方法, 基于多帧平均去噪法的原理, 利用显示器显示图像信息时依赖于不同视频帧周期性重复的特性, 通过将连续帧进行像素点的交错叠加来实现图像增强, 进而有效减弱环境噪声的影响, 同时融合一维小波变换技术, 进一步提高了图像重建的质量; 实验结果表明, 相较于直接进行图像重构, 利用小波分析与帧间交错图像融合算法在图像信噪比、对比度、锐度上分别提高了 79.7%、15.9%、47.8%, 该算法在电磁泄漏信号还原与信号处理领域具有显著的应用价值。

关键词: 电磁泄漏; TEMPEST; 液晶显示器 (LCD); 信息恢复; Video Graphics Array (VGA)

EM Information Leakage Reconstruction Method Based on Wavelet Analysis and Interframe Interleaved Image Fusion Algorithm

SUN Yuliang, LI Kai, TIAN Pingyi, SHI Qin, YU Sanqiang, YANG Shanyong,
LIU Xinqiang, YANG Guang

(Shanxi Key Laboratory of Intelligent Detection Technology & Equipment, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the issue of blurry images reconstructed from electromagnetic leakage signals on displays, this paper proposes a restoration method for electromagnetic leakage information based on the fusion of wavelet analysis and interframe interleaved image fusion algorithm. Based on the principle of multi-frame average denoising method, utilizing the characteristic of periodic repetition of different video frames when displaying image information on a monitor, image enhancement is achieved by interleaving and superimposing consecutive frames with pixel points, which effectively reduces the influence of environmental noise. Meanwhile, by integrating one-dimensional wavelet transform technology, the quality of image reconstruction is further improved. Experimental results show that, compared with the direct image reconstruction, the wavelet analysis and frequency domain hierarchical image reconstruction improves the image signal-to-noise ratio, contrast ratio and acuteness by 79.7%, 15.9% and 47.8%, respectively. The algorithm has significant application value in the fields of electromagnetic leakage signal recovery and signal processing.

Keywords: EM leakage; TEMPEST; LCD; information recovery; VGA

0 引言

电磁设备在工作时或多或少都会产生电磁辐射, 耗

电量越高的部位产生的电磁辐射越大, 同时其造成的信息泄漏的可能性也越大。其实, 不仅计算机有电磁泄漏的风险, 智能手机^[1]、打印机^[2]、键盘^[3]、电力线^[4-5]、

收稿日期:2025-01-15; 修回日期:2025-02-13。

基金项目:中央引导地方科技发展资金(YDZJSX20231A025, YDZISX2024D032);山西重点研发计划项目(202202010101007);山西省科技成果转化引导专项(202204021301044, 202304021301028)。

作者简介:孙宇良(2001-),男,硕士研究生。

李凯(1979-),男,教授,博士研究生导师。

引用格式:孙宇良,李凯,田平怡,等.基于小波分析与帧间交错图像融合算法的电磁泄漏信息还原方法[J].计算机测量与控制, 2025, 33(3):259-266.

VGA 线缆^[6-7]、DVI 线缆^[8-9]都会产生电磁辐射,从而泄漏设备的工作状态,攻击者通过专用的接收设备和一定的手段就能获取其工作信息(此项技术被称为 TEMPEST 技术^[10]),其中的机密信息被攻击者窃取会产生很大的风险。而随着科技的发展,电磁设备产生的泄漏信号越来越来微弱,这对电磁泄漏信号的还原技术提出了更高的要求。目前对计算机显示系统电磁泄漏的研究主要集中在对泄漏信号的截获、图像信息的重建、泄漏源的识别分类、电磁泄漏信号去噪等方面。

1985 年, Van Eck 通过在伦敦街上用装在小型货车上的 10 m 高的天线窃听电磁泄漏信号,并成功在电视屏幕上显示^[11],自此 TEMPEST 技术成为学者研究的热点。文献 [12] 提出了利用频率解调技术重建电磁泄漏信号的新方法,提供了电磁泄漏信号还原的一种新思路;同时他们提出了一种利用 SDR 从多个视频泄漏源中重建视频信号的方法^[13]。文献 [14] 提出采用卷积神经网络(CNN)从电磁泄漏信号频谱中提取图像特征的方法,其方法可以同时检测不同分辨率和不同采样率的图像泄漏信息。一些学者考虑到目前高分辨率显示器能在屏幕上划分多个区域进行显示,每个区域传输不同的像素信息。针对此他们进行了相关研究,成功利用传递函数的差异^[15]和独立分量分析(ICA)^[16]这两种方法分离了泄漏信号中包含的多个屏幕信息,并利用 CNN 评估重建率,证明改变接收频率会改变屏幕信息的分离精度^[17];此外,该作者还提出用非负线性优化的方法从低采样率泄漏信号中重建清晰的图像信息^[18]。以上研究中还原图像的质量与去噪算法密切相关,常见的电磁泄漏信号的去噪方法有多帧平均去噪法^[19]和小波变换去噪法^[20]。多帧平均去噪法在减小噪声的同时会因时序误差及截获设备的精度出现帧间偏移的现象,为此文献 [21] 提出了一种针对电磁泄漏信号恢复序列的图像迁移特征检索算法,但由于不可能准确地选择合适的参考图像,该方法会在图像匹配中存在一些误差。小波变换去噪法因其需要确定合适的基函数、阈值、变换层数,在实现上较为复杂,并且单独用小波变换去噪法的效果不太理想。此外,学者们也提出了其他去噪方法,如随机共振去噪法^[22]、自适应滤波去噪法^[23]、基于模糊度的还原图像去噪技术^[24],但他们的还原效果均有待提高。

为了提高还原图像的清晰度,通过对电磁泄漏信号进行自相关分析,确定显示器的行同步信号和场同步信号,并基于 MIN-MAX 归一化原理,计算各个像素点的像素值。利用显示器展示图像信息时依赖于视频帧周期性重复的特点,首次提出了一种基于小波分析与帧间交错图像融合算法相结合的电磁泄漏信息还原方法,该方法通过对连续视频帧进行像素点的交错叠加来减轻环

境噪声的干扰,同时结合一维小波变换进行降噪处理,进一步提升了恢复后图像的信噪比。

1 电磁泄漏源的分析

对于一个计算机显示系统,主机、显示器、传输线缆都会导致电磁信息泄漏。为了从 VGA 线缆的电磁泄漏信息中还原出显示器的显示内容,首先应知道显示器显示图像信息的原理。显示器包含两个区域,一个是实际可见的空间,称为显示区;另一个是给行、场回扫留出时间的不可见空间,称为消隐区。显示器的分辨率受水平可见像素数 x_d 、垂直可见像素数 y_d 、水平总像素数 x_t 、垂直总像素数 y_t 等 4 个参数的影响。每个像素点都会被转化为一个电子信号,从左到右,从上到下依次重复,并传递到下一帧,这些重复的变化产生 3 个周期特性,如行同步信号 f_h 、场同步信号 f_v 、像素频率 f_p 。基本所有的显示器都符合 VESA 标准,其规定了每个分辨率的水平和垂直像素数,并定义了合适的行同步信号、场同步信号、像素频率。

VGA 线缆上传输的信号为模拟信号,是由 RGB 信号、行同步信号和场同步信号组成的复合信号。设视频信息在 VGA 线缆上传输的信号为 $\rho(t)$,其由视频信号 $\rho_p(t)$ 、行同步信号 $\rho_h(t)$ 、场同步信号 $\rho_v(t)$ 三部分构成,其关系如式(1):

$$\rho(t) = \rho_p(t) \times \rho_h(t) \times \rho_v(t) \quad (1)$$

视频信息传输至显示器时,视频信号按照行同步信号 $\rho_h(t)$ 、场同步信号 $\rho_v(t)$ 排列,组成 $x_t \times y_t$ 的视频信息。因此,将采集的电磁泄漏信号还原重构为显示器显示的视频信息时,可以通过 VESA 标准确定像素点的排列。

2 电磁泄漏信号的截获及处理

2.1 电磁泄漏信号的截获

电磁信号泄漏的途径分为辐射泄漏和传导泄漏,图 1 说明了电磁设备泄漏的途径及截获方法。电磁设备在工作时会产生电磁波,该电磁波在空气中自由传播,产生了辐射泄漏,通过连接线缆泄漏出信号称为传导泄漏。辐射泄漏出的信号可以被天线^[25]、磁场探头^[26]采集,传导泄漏出的信号可以被电流钳^[27]采集,通过矢量信号分析仪^[28]、示波器^[29]、频谱分析仪^[22]、软件无线电^[30]、宽带接收机等接收设备可处理采集到的信号。从信号传输的角度可分为串行数据泄漏和并行数据泄漏,并行数据泄漏信号因信号间频率相同,会产生同频信号干扰,故很难被攻击者还原,而串行数据泄漏信号会直接暴露在攻击者面前,容易被时分接收、频分接收和方位接收,显示器、RS232、键盘等都是串行传输的数据。

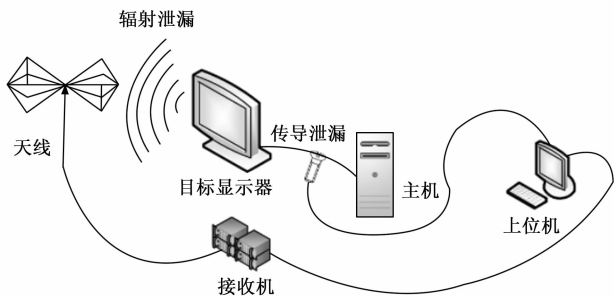


图 1 电磁泄漏信号截获方式

2.2 显示器同步信号的确定

精准获取显示器行频、场频信息是还原电磁泄漏信号的关键步骤。对信号进行自相关处理, 无相关性的信号会被大幅度衰减, 相关性强的信号会增强, 从而凸显出信号中的有用信息, 进而提取出显示器的行频、场频信息。采集的显示器电磁泄漏信号 $g(t)$ 如式 (2) 所示, 其中 $p(t)$ 为泄漏发射的信号, $n(t)$ 为噪声信号。

$$g(t) = p(t) + n(t) \quad (2)$$

则它们的自相关函数为:

$$R_{gg}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T g(t)g(t+\tau)dt \approx R_{pp}(\tau) + R_{nn}(\tau) \quad (3)$$

其中: $R_{pp}(\tau)$ 是信号的自相关函数, $R_{nn}(\tau)$ 是环境噪声的自相关函数。噪声是随机的信号, 经过多次自相关运算后 $R_{nn}(\tau)$ 会趋近于零, 从而提取出被噪声淹没的电磁泄漏信号。

2.3 一维小波变换去噪

小波变换是一种多尺度信号分析方法, 它能够将信号分解到不同的尺度上进行分析。在去噪过程中, 小波变换能够区分信号和噪声在不同尺度上的表现特性, 从而实现噪声的有效去除。设采集的离散电磁泄漏信号是 $s(t)$, 则 $s(t)$ 的离散小波变换为:

$$WT_s(j,k) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt \quad (4)$$

其中: $\Psi_{j,k}(t) = \alpha^{-j/2} \Psi(\alpha^j t - k\tau)$, α 为尺度因子, τ 为位移因子, $\Psi(t)$ 为母小波。

设小波去噪的阈值模型为:

$$P = \begin{cases} \sigma \sqrt{2\log_2 M} \mu < v \\ \min(\sigma \sqrt{2\log_2 M}, \sigma \sqrt{q_s}) \mu > v \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\mu = \frac{\gamma - M}{M}$, $v = \sqrt{M \log_2 M}^{3/2}$, M 为采集的

电磁泄漏信号在所有尺度上的小波包分解得到小波系数的个数总和, σ 为噪声信号的偏差。为求式 (5) 中的 s , 设 $Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ 为由小到大的顺序进行排列的小波系数的平方, 定义向量 $\vec{\varphi}$:

$$\begin{cases} \vec{\varphi}_i = \frac{M - 2i - (M - i) q_i + \sum_{k=1}^i q_k}{M} \\ \vec{\varphi}_i = \min(\vec{\varphi}_i) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $i=1, 2, \dots, M$, 利用式 (6) 求出 i 的值即为 s 的值。根据阈值选择收缩每层小波系数, 将小于阈值的小波系数置为零或进行缩小处理, 保留大于阈值的小波系数, 从而去除截获电磁泄漏信号中的噪声。

2.4 帧间交错图像融合算法

多帧平均去噪的基本原理是利用多幅图像 (或视频帧) 的平均值来减少噪声的影响。当多幅图像中的噪声是随机分布时, 进行平均操作可以将噪声相互抵消, 从而得到更清晰的图像。显示器显示的图像信息是周期性不断显现的, 故其辐射出的有用信息也是周期性重复的, 而每帧的噪声是随机分布的, 对每帧图像进行多帧平均可以大大提高图像的信噪比。

假设接收到的第 k 幅图像的有用信息为 v_s , 噪声信息为 v_n , 则对于连续的 N 帧信息图像, 其多帧平均计算公式如下:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [v_s + v_n] = V_s + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_n \quad (7)$$

其中: V_s 为图像有用信息。由于信号是连续采集的, 可以认为信号还原出的图像在叠加后平均功率不变, 同时由于噪声的非相关性, 噪声的功率在叠加平均后会降为原来的 $\frac{1}{N}$ 倍。但是由于受接收机硬件电路同步信号漂移和精度不够的影响, 所还原出的图像存在着不同程度的帧间偏移^[31], 通常直接对多帧图像进行平均反而会隐没图像信息, 往往在进行多帧平均前会采用帧间匹配算法^[32], 但这极大地增加了电磁泄漏信号还原的复杂度。

基于多帧平均去噪法的原理, 提出了帧间交错图像融合算法进行还原图像的去噪, 具体而言, 帧间交错图像融合算法在将一维的采集数据转换为二维图像信息时, 将原来算法的每个像素点扩展为其 n 倍 (n 为叠加帧数)。以两帧叠加为例, 如图 2 所示, 将第一幅图像的第一行像素点设置为叠加图像的第一行, 第二幅图像的第一行像素点设置为叠加图像的第二行, 以此类推。以此来增强图像信息。图 3 (a) 以英文字母“E”的两帧叠加为例, 给出了更为直观的展示。实际上, 图 3 (a) 中两个小“E”会因为环境噪声而有所不同。从像素方面来看, 环境噪声会使像素点产生明暗波动, 造成图像的模糊。假设左边小“E”的第一行像素点都受到污染, 观察到的会是一个倒着“F”; 同时假设右边小“E”的第一列像素点都受到污染, 观察到的会是一个数字“三”。这样会让人完全曲解图像的含义。经过帧间交错图像融合算法的叠加后, 形成的大“E”如图 3

(b) 所示。可以明显看出能够准确识别还原后图像是一个“E”。

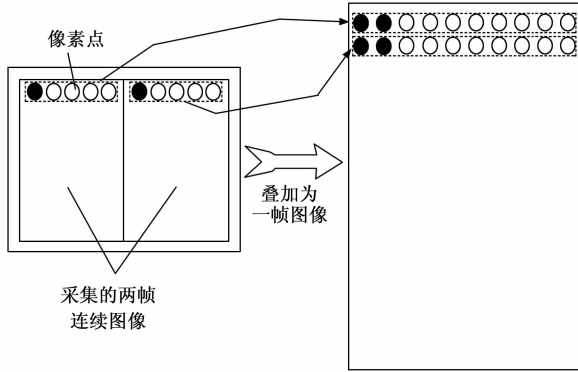


图 2 帧间交错图像融合算法原理

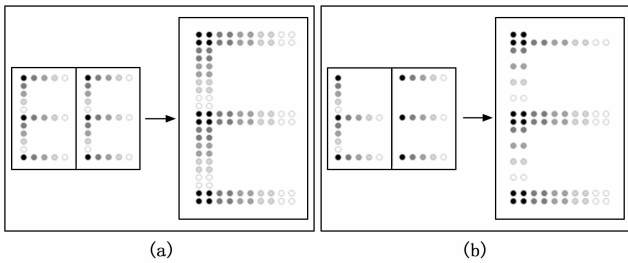


图 3 帧间交错图像融合算法示例

多帧平均去噪技术通常要求首先恢复各个视频帧，随后对这些视频帧进行平均处理以实现降噪，或者也可以直接对采集的数据进行平均，但无论哪种方式，都高度依赖于精准的帧间匹配算法来确保各数据点能够准确无误地相互对应。帧间交错图像融合算法采用了一种更为直接的方法，即直接对连续采集的数据进行重叠处理，这一过程中仅需确保所采集的数据至少涵盖了两帧完整的图像信息，相较于多帧平均去噪法，该算法在实现上更为简便高效。

2.5 小波分析与帧间交错图像融合算法

以往研究表明，单独运用小波变换对电磁泄漏信号进行去噪处理的效果并不理想，常需结合其他技术以提高图像信噪比，例如文献 [33] 中所采用的小波变换与独立分量分析 (ICA) 结合的去噪方法。同样的，尽管帧间交错图像融合算法相较于多帧平均去噪法简化了处理流程，但在整合多帧图像信息 (尤其是达到数十帧时) 时，仍面临明显的帧间偏移问题。鉴于此，提出了一种创新方法，即融合小波分析与帧间交错图像融合算法，旨在即便在仅叠加少量视频帧的情况下，也能实现高信噪比图像的还原。图 4 为该算法的流程图，其具体实施步骤如下：

1) 对截获的电磁泄漏信号进行自相关处理以获取行频、场频；

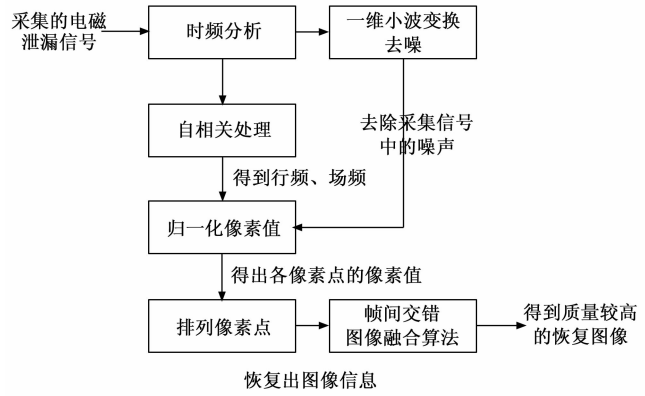


图 4 小波分析与帧间交错图像融合算法

- 2) 利用小波变换对电磁泄漏信号进行去噪处理；
- 3) 将像素点的像素值归一化在 0~255 的区间；
- 4) 根据行频、场频、分辨率排列像素点，得到完整的还原图像；
- 5) 采用帧间交错图像融合算法重叠图像，得到质量较高的还原图像。

3 实验验证

针对连接主机和显示器的 VGA 线缆的传导泄漏展开研究，实验装置由显示器、主机、电流钳组成，如图 5 所示。主机是 NI 的 PXIe 机箱，由 NIPXIe-8135、NI PXIe-6537、NI PXIe-5162、NI HDD-8261 等 4 个模块组成。其中，设置采集卡 (NI PXIe-5162) 的采样频率 f 为 250 MHz。显示器的点频、行频、场频分别为 135 MHz、79.976 kHz、75.025 Hz，显示器分辨率为 1 280×1 024。电流钳接收频率为 20 Hz~100 MHz，最大电流 30 A，灵敏度 0.1 V/A。实验是在无屏蔽的实验室进行的，电流钳一端夹住 VGA 线缆，另一端连接在采集卡上。显示器显示指定的内容后，用设计的上位机软件采集线缆泄漏的信号。

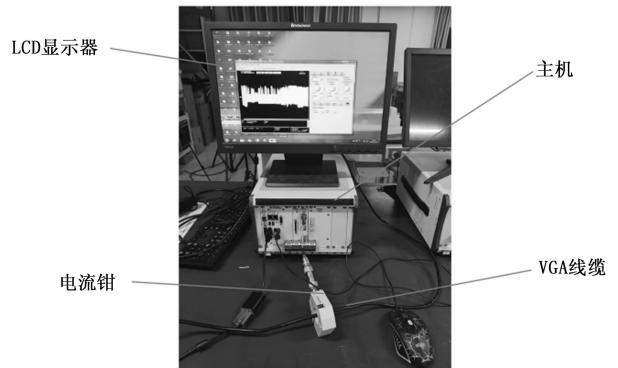


图 5 实验环境

将采集的电磁泄漏信号进行自相关处理后的结果如图 6 (a) 所示，由式 (8) 计算可得出显示器的场频为 75.09 Hz。截取自相关处理后的一段信号如图 6 (b)

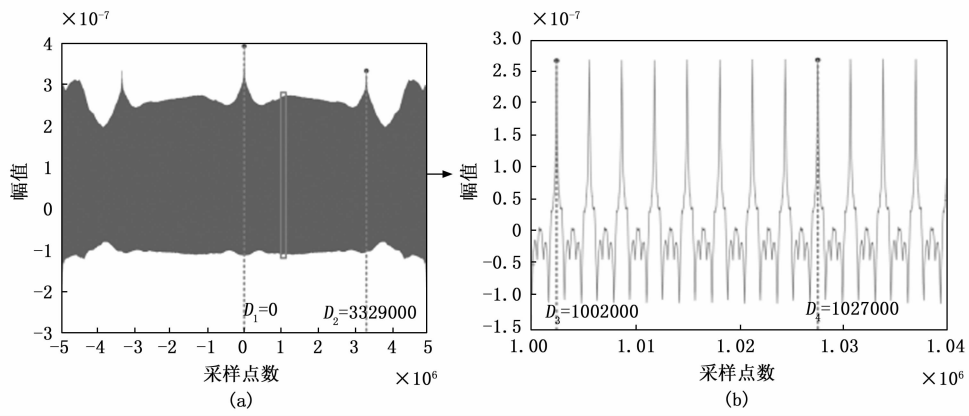


图 6 电磁泄漏信号自相关处理结果

所示, 由式 (9) 计算可得出显示器的行频为 80 kHz。

$$f_v = \frac{1}{\left(\frac{D_2 - D_1}{f}\right)} \quad (8)$$

$$f_h = \frac{1}{\left(\frac{(D_4 - D_3) / 8}{f}\right)} \quad (9)$$

重构图像时, 按一行 $x_i = \frac{f_b}{f_h}$, 行数 $y_i = \frac{f_h}{f_v}$ 将采集的一维电磁泄漏信息进行排列, 这就构成了 $x_i \times y_i$ 的图像信息^[34]。文献 [35] 提出对颜色构成简单的视频图像, 在还原时可直接将像素值设置为 0 或 255, 利用此种方法还原出的图像如图 7 所示, 该方法严重影响了还原图像的清晰度, 电磁泄漏信号恢复效果不佳。

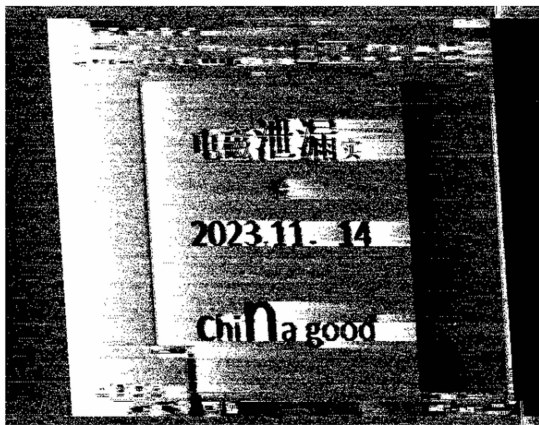


图 7 还原图像

为提升图像的对比度和清晰度, 基于 MIN-MAX 归一化原理, 将所采集电磁泄漏信号连续映射到 [0, 255] 的像素值区间内。设采集的第 i 个信号幅度为 $D(i)$, 采集数据中的最大值为 D_{\max} , 最小值为 D_{\min} , 则像素值 $\text{Pixel}(i)$ 可通过式 (10) 得出。基于该方法恢复的图像如图 8 所示。可以看出, 还原图像的清晰度得

到明显提升, 同时还原图像的颜色更有对比度。

$$\text{Pixel}(i) = \frac{D(i) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \times 255 \quad (10)$$



图 8 改进后还原图像

接着利用帧间交错图像融合算法和小波变换去噪法进行还原, 结果如图 9 所示。

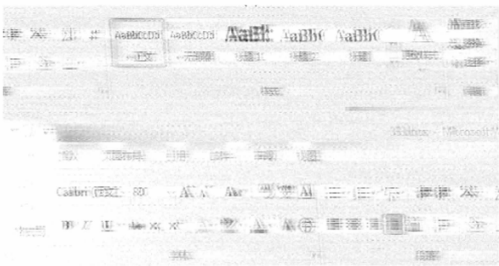
图 7、图 8 以及图 9 所展示的内容均源自于对同一组采集的电磁泄漏数据的还原重构。其中图 9 中 (a)、(b)、(c) 三幅子图展现的是对还原图片信息中文档工具栏部分。图 9 (a) 是经过小波变换处理后的图像结果。小波变换作为一种强大的信号处理工具, 能够有效地在频域内对图像进行分解与重构, 从而在一定程度上减少噪声干扰, 但此时的工具栏区域仍被噪声所掩盖。图 9 (b) 展示了采用帧间交错图像融合算法后的图像还原效果。这一算法通过利用噪声的无序性, 实现了帧与帧之间的信息互补与融合, 显著增强了图像的连贯性和清晰度。在这一处理下, 原本模糊不清的工具栏内容开始展现出更多的识别特征, 一些关键



(a) 小波去噪还原图像



(b) 帧间交错图像融合算法还原图像



(c) 小波去噪与帧间交错图像融合算法还原图像

图 9 还原图像

的工具图标和文字信息已经能够识别出来。图 9 (c) 则是将小波变换去噪与帧间交错图像融合算法结合的图像还原效果。可以看出，还原图像凸显出了更多的信息。

4 还原图像的评价与分析

利用信噪比、对比度、锐度等 3 种指标分别对还原图像进行客观评价。信噪比是描述信号中有价值信息和没有价值信息所占比例的衡量标准。信噪比越高，表示有用信息所占的比例越大，信号质量越好；反之，则失真严重。设图像中第 i 行第 j 列的像素值为 $D(i, j)$ ， m 、 n 分别表示图像像素点的行数和列数，定义图像的信噪比如式 (11) 所示：

$$SNR(dB) = 10 \times \log_{10}$$

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D(i, j)}{m \times n} \right)^2 \div \left(\frac{1}{m \times n} \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[D(i, j) - \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D(i, j)}{m \times n} \right) \right]^2 \right) \quad (11)$$

图像的对比度反映了图像中明暗区域的差异程度，

当图像中的明暗区域差异较大时，可以认为图像的对比度较高；反之，当明暗区域差异较小时，图像的对比度较低。定义图像对比度如式 (12) 所示：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[D(i, j) - \left(\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D(i, j) \right) \right]^2}{m \times n}} \quad (12)$$

图像的锐度与图像中的边缘和细节信息密切相关，锐度高的图像通常具有清晰、明显的边缘和细节，而锐度低的图像则可能显得模糊或缺乏细节。利用 Sobel 算子计算图像的锐度，Sobel 算子由两个 3×3 的卷积核组成，其 x 、 y 方向的卷积核为：

$$\Phi_x = \Phi_y^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

设矩阵 G 为：

$$G = \begin{bmatrix} G(i-1, j-1) & G(i, j-1) & G(i+1, j-1) \\ G(i-1, j) & G(i, j) & G(i+1, j) \\ G(i-1, j+1) & G(i, j+1) & G(i+1, j+1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

则图像的锐度为：

$$\Gamma = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[G(i, j) - \left(\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D(i, j) \right) \right]^2} \quad (15)$$

其中：

$$G(i, j) = \sqrt{\left[\sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 (G \cdot \Phi_x)_{mn} \right]^2 + \left[\sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 (G \cdot \Phi_y)_{mn} \right]^2} \quad (16)$$

利用上述 3 种图像效果评价指标得到的不进去噪、采用小波去噪、帧间交错图像融合算法、小波去噪与帧间交错图像融合算法还原图像的清晰度指标如表 1 所示。

表 1 图像客观评价

处理方法	不进去噪	小波去噪	帧间交错图像融合算法	小波去噪+帧间交错图像融合算法
信噪比	3.45	4.44	5.87	6.20
对比度	26.27	27.83	28.60	30.44
锐度	25.38	34.16	35.23	37.51

从表中数据可得，小波去噪与帧间交错图像融合算

法的信噪比、对比度、锐度值相比于不进行去噪分别提高了79.7%、15.9%、47.8%，相比于单独采用小波去噪分别提高了39.6%、9.4%、9.8%，相比于单独采用帧间交错图像融合算法分别提高了5.6%、6.4%、6.5%。同时，图7~9验证了小波去噪与帧间交错图像融合算法恢复的图像信息最多，帧间交错图像融合算法恢复的图像信息次之，这两种方法不仅能清晰的还原出文档中输入的字样，而且能清晰的还原出文档工具栏里的内容。

5 结束语

针对计算机视频信息电磁泄漏信号还原出的图像信息存在模糊的问题，提出了一种基于小波分析与帧间交错图像融合算法相结合的电磁泄漏信息还原方法。探索了一种全新的图像去噪途径，即利用像素点的交错排列策略，将不同帧的视频信息进行叠加处理，以此达到去除噪声、增强图像质量的目的。同时融合一维小波变换进行去噪，进一步提高了还原图像的信噪比。实验结果显示，这一方法不仅成功凸显了图像中的更多细节，还实现了对文档工具栏内容的还原，这在以往的研究中是难以达到的成就。相较于传统的多帧平均法，帧间交错图像融合算法在操作上更为简便，无需复杂的预处理步骤，即在将一维采集数据重构为二维图像信息的同时进行去噪。为了全面评估该方法的性能，实验采用了信噪比、对比度、锐度等客观评价指标对还原后的图像进行了综合评价。结果显示，相较于其他现有方法，小波分析与帧间交错图像融合算法相结合的方法在各项指标上均表现出色。这不仅证明了该方法在电磁泄漏信号还原领域的有效性，也为其在信号处理、图像增强等相关领域的应用提供了有力的支持。这一研究成果不仅为电磁泄漏信号的图像还原提供了新的思路，也为信号处理、图像增强等领域的进一步发展提供了有益的参考和借鉴。不过，该方法只能应用于静止图像的泄漏信号，并不适用于连续图像的泄漏信号。同时，未来将会对其他电磁泄漏源（如DVI、HDMI）展开研究。

参考文献:

- [1] TRIP BOGDAN, BUTNARIU VLAD, BOITAN ALEXANDRU, et al. Video Signal Recovery from the Smartphones Touchscreen LCD Display [J]. lecture notes of the institute for computer sciences, social-informatics and telecommunications engineering, 2019, 283: 89-95.
- [2] BOITAN A, BĂRTUȘICĂ R, HALUNGA S, et al. Video signal recovery from the laser printer LCD display [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2018, 10977.
- [3] SHUGO KAJI, DAISUKE FUJIMOTO, MASAHIRO KINUGAWA, et al. Echo TEMPEST: EM information leakage induced by IEMI for electronic devices [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65 (3): 655-666.
- [4] NGUYEN-VAN T, SENDA M. Reconstruction of PC display from common-mode noise emitting on electrical power line [J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9 (11).
- [5] TRIP BOGDAN, BUTNARIU VLAD, VIZITIU MADALIN, et al. Analysis of compromising video disturbances through power line [J]. Sensors, 2022, 22 (1).
- [6] LEE H S, YOON J G, SIM K H. Measurement and analysis of the electromagnetic emanations from video display interface [J]. 2015 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, 2015: 71-73.
- [7] ZHANG N, LU Y H, CUI Q, et al. Investigation of unintentional video emanations from a VGA connector in the desktop computers [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59 (6): 1826-1834.
- [8] LEE H S, YOON J G, SIM K H. Study for possibility of information leakage from digital video display interface [C] // Kunming: 2016 URSI ASIA-PACIFIC RADIO SCIENCE CONFERENCE, 2016: 1102-1103.
- [9] LEE H S, YOON J G, SIM K H. Analysis of information leakage from display devices with LCD [C] // Kunming: 2016 URSI ASIA-PACIFIC RADIO SCIENCE CONFERENCE, 2016: 1277-1280.
- [10] David Easter. The impact of 'Tempest' on Anglo-American communications security and intelligence, 1943-1970 [J]. Intelligence and National Security, 2021, 36 (1).
- [11] WIM V E. Electromagnetic radiation from video display units: An eavesdropping risk? [J]. Computers & Security, 1985, 4 (4): 269-286.
- [12] Pieterjan De Meulemeester, Bart Scheers, Guy Ae Vandebosch. Differential signaling compromises video information security through AM and FM leakage emissions [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62 (6): 2376-2385.
- [13] Pieterjan De Meulemeester, Bart Scheers, Guy Ae Vandebosch. A quantitative approach to eavesdrop video display systems exploiting multiple electromagnetic leakage channels [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62 (3): 663-672.
- [14] MAO J, LIU J M, ZHANG J M, et al. A method for detecting image information leakage risk from electromagnetic emission of computer monitors [J]. Journal of Intelli-

- gent and Fuzzy Systems, 2021, 40 (2): 2981 - 2991.
- [15] KITAZAWA T, KITAMURA Y, KIM Y W, et al. TEMPEST attack against high-resolution displays using differences in the transfer function of EM waves [J]. 2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC), 2022.
- [16] KITAZAWA T, KITAMURA Y, KIM Y W, et al. A novel remote visualization of screen images against high-resolution display with divided screens focusing on the difference of transfer function of multiple emanations [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64 (6): 1941 - 1948.
- [17] KITAZAWA T, HAYASHI Y. Evaluation of impact of differential transfer efficiency of EM leakage on screen reconstruction against high-resolution displays [C]. Krakow, Poland: 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC Europe, 2023: 1 - 6.
- [18] KITAZAWA T, KUBO H Y, HAYASHI Y C. A Method for extracting plausible images from EM leakage measured at low sampling rates [J]. IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, 2023: 87 - 91.
- [19] CHOI D H, LEE E B, YOON J G. Reconstruction of video information through leaked electromagnetic waves from two VDUs using a narrow band-pass filter [J]. IEEE Access, 2022, PP (99): 40307 - 40315.
- [20] TANG Y W, HUANG C. Application of weak signal extraction technology in computer video leaking measurement system [J]. 2012 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012: 1128 - 1131.
- [21] MIAO C W, HU J L. Research on the algorithm of electromagnetic leakage reduction and sequence of image migration feature retrieval [J]. Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2019, 2019 (1): 47.
- [22] LIU J, YONGMEI L, JIEMIN LINE Z, et al. A detecting method of electromagnetic emanations based on stochastic resonance [J]. , 2018: 580 - 583.
- [23] MIAO C W. Research and evaluation on adaptive filtering of computer video electromagnetic leakage emission reduction image [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 490 (7): 072054.
- [24] MIAO C W. Research on denoising processing of computer video electromagnetic leakage reduction image based on fuzzy degree [J]. Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2019 (1).
- [25] CHOI D H, LEE E, NAM T, et al. An analysis of video signal using Double-ended mode in perspective of EMI [C] // Nusa Dua-Bali, Indonesia: 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2021: 1 - 3.
- [26] LEE H S, YOON J G, SIM K H. An information recovery technique from radiated electromagnetic fields from display devices [J]. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2016: 473 - 475.
- [27] 钱志升, 王勤民, 周长林, 等. 基于空域相关滤波法的计算机视频线缆传导泄漏信号分析与重建 [J]. 电波科学学报, 2017, 32 (3): 331 - 337.
- [28] HUANG W, FENG Z, XU Y. Analysis on the modeling and image restoration of electromagnetic radiation leakage [C] // Nanjing: 2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2021: 516 - 520.
- [29] VALENTIN V, ALEXANDRU B, VLAD B, et al. Experimental study of radiated compromising emanations for computer monitors [J]. 2019 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING (ISEEE), 2019.
- [30] OGLI F K I. Study of the spectrum of side electromagnetic radiations of video interface DVI [C] // Tashkent, Uzbekistan: 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), 2021: 1 - 3.
- [31] LEE E B, CHOI D H, NAM T S, et al. A quantitative analysis of compromising emanation from TMDS interface and possibility of sensitive information leakage [J]. IEEE Access, 2022, PP (99): 73997 - 74011.
- [32] LEE H S, CHOI D H, SIM K H, et al. Information recovery using electromagnetic emanations from display devices under realistic environment [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61 (4): 1098 - 1106.
- [33] SHI J, YONGACOGU A, SUN D, et al. A novel wavelet based independent component analysis method for pre-processing computer video leakage signal [J]. Proceedings-International Symposium on Computers and Communications, 2016, 2016-AUGUST: 334 - 339.
- [34] 杨文翰, 吕英华. 计算机电磁辐射信息再现分析 [J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34 (1): 26 - 29.
- [35] 杨旺霖, 苏新彦, 姚金杰, 等. 一种低采样率下 VGA 线缆辐射信息恢复方法 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (10): 103 - 108.