

基于数字滤波的计算机视频信息防泄漏研究

邱 扬,魏丽丽,田 锦,陈光达,钱柳宇

(西安电子科技大学机电工程学院,陕西西安 710071)

摘 要: 本文针对计算机视频信息泄漏,提出了一种基于数字滤波的防护方法.论文确定了字符带宽、图像可读性等对于数字滤波的约束条件,采用 FIR 设计了相应的数字滤波器,应用数字滤波器和模拟滤波器的组合滤波,消除了数字滤波器所固有的插入损耗周期性波动的缺点,最后通过试验验证了分析结果,获得了一些具有重要应用价值的结论.

关键词: 视频信息;防泄漏;信息安全;数字滤波

中图分类号: TP309.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2008) 06-1188-05

Research on Anti-leakage of Computer Video Signal Based on Digital Filtering

QIU Yang, WEI Li-li, TIAN Jin, CHEN Guang-da, QIAN Liu-yu

(Mechanical-electronic Engineering Institute of Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A method to prevent leakage from computer's video information by digital filtering is presented. The constraint conditions for digital filter by bandwidth and readability of character are obtained, and the corresponding digital filter is designed with FIR (Finite Impulse Response). The insertion loss of digital filter fluctuates periodically, composite application of analog and digital filter eliminate that disadvantage. And the measured and simulated results are in good agreement, and some important conclusions are achieved.

Key words: video information; anti-leakage; information security; digital filtering

1 引言

计算机视频信息是准周期的数字信号,其幅频特征为 Sa 函数包络的宽带离散信号,包含着大量的有用信息.再加上其串行特征和较长的线缆,而成为计算机系统中辐射最强,最容易被截获而复现的信息^[1,2].对于视频信息的研究主要涉及泄漏机理^[3,4]、屏蔽及模拟滤波^[5]等信息泄漏防护以及信息截获^[6]方面的研究.由于传统的屏蔽以及模拟滤波所要求的成本很高,再加上显示器分辨率也在不断变化,限制了这些技术的应用.为此,本文提出了基于数字滤波的计算机视频信息泄漏防护方法,确定了字符带宽、图像可读性等对于数字滤波的约束条件,采用 FIR 设计了满足需求的数字滤波器,并针对数字滤波器周期性的特点,应用模拟滤波器进行了抑制.最后通过试验验证了分析结果,获得了一些具有重要应用价值的结论.

2 视频信息截获原理

图 1 给出了视频信号的功率谱,从图中可以看出,

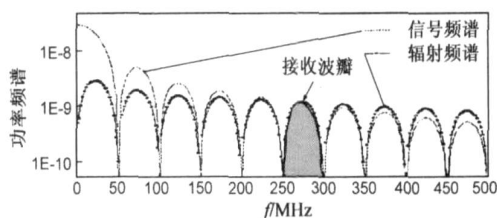


图 1 视频信号功率谱

只要将接收机的中心频率调谐到视频信号 $V(t)$ 谐波频谱的一个波瓣上,则 $V(\omega)$ 通过带通滤波器的输出为

$$Y(\omega) = \xi D_{\omega}(\omega - \omega_c) A \tau \frac{\sin(\omega \tau / 2)}{\omega \tau / 2} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} k_n \exp(-j\omega_c \tau) \quad (1)$$

其中: ξ 为修正系数, D_{ω} 为带通滤波器的传输函数, ω_c 为波瓣宽度, ω_c 为带通滤波器的中心频点, k_n 为 0 或 1 的随机数, A 为信号的时域幅值, τ 为屏幕上一个像素点的扫描时间.

将接收到的信号 $Y(\omega)$ 经过检波、限幅、整形放大,便可提取或恢复计算机视频泄漏的信息.

3 计算机视频信息数字滤波实现

从上述分析看出,对帧缓存器中的数字信号进行数字滤波,可以有效抑制其高频分量的辐射发射,减少信息泄漏的危险,扩大防护安全半径。但滤波必然以牺牲图像质量为代价,为了既能抑制视频信息泄漏,又能确保使用者的观察效果,则在数字滤波时必须设置字符带宽和图像可读性等两个约束条件。

3.1 字符带宽的确定

计算机显示器在工作时,不同的分辨率和场频决定了视频信号点频的不同。设显示器的分辨率为 $m \times n$ 、场频为 r ,引入考虑行、场消隐期影响的校正参数 1.388,则信号点频为:

$$f = 1/\tau = m \times n \times r \times 1.388 \quad (2)$$

通过对字符图像的频谱特性的分析^[4]可知,根据字符竖笔划对应的点脉冲宽度,即可确定视频信号带宽和安全带宽。在 $1024 \times 768 @75$ 显示模式下,点频约为 80MHz,而 5 号字符竖笔划占 2 个像素点,因而其辐射带宽为 $80/2 = 40\text{MHz}$ 。

由文献[3]可知,如果能够对字符辐射带宽内 30% 频谱分量进行抑制(剩下的频谱范围即为安全带宽),就无法对该字符所对应的视频信息进行复现。不同字符对应的信息安全带宽(B_s)如表 1 所示:

表 1 不同大小字符对应的信号安全带宽($1024 \times 768 @75$)

指标 字号	占像素点数	信号波瓣带宽 (MHz)	安全带宽(B_s) (MHz)
1 号	4	20	14
3 号	3	27	19
5 号	2	40	28

3.2 图像可读性分析

对于计算机的文字信息,脉冲信号上升沿的陡峭程度决定了信号高频谐波的丰富程度。显然,经过数字滤波的字符信息,其时域特征为视频信号上升沿变缓(变缓程度取决于滤波方式及参数选择),而从字符图像看,滤波后字符的边缘会变得比较模糊(尤其是字符的竖笔划),产生重影。

滤波前后的图像和时域对应的波形对比如图 2、图 3 所示。

对比图 2 和图 3 可以看出,确定滤波器的截止频率必须确保滤波后图像的可读性。对此可用图像亮度表现度和相似度加以确定。



图 2 滤波前后图像对比

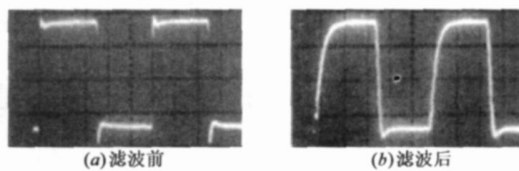


图 3 滤波前后的时域波形

亮度表现度是指人眼对图像平均亮度所表现出的整体效果。眼睛对于亮度的强度变化响应表现为对数非线性关系。图 4 给出了一束由背景强度环绕的具有强度 $I + \Delta I$ 的光线(ΔI 代表差别阈值,也即最小可觉差)。

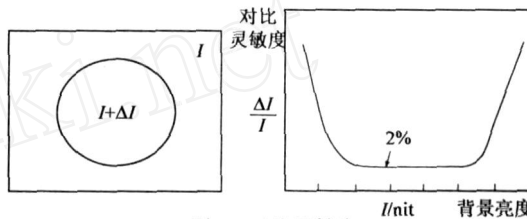


图 4 对比灵敏度

由韦伯-费希纳法则^[7]可知,人对外界刺激的响应正比于刺激量的对数。

(1) 滤波后图像的亮度表现度

$$R = K \frac{\left\{ \lg \left[\frac{1}{m} \sum_{i=0}^m I_b(i) \right] - \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{j=0}^n I_w(j) \right] \right\}}{\left\{ K \lg \left[\frac{1}{m} \sum_{i=0}^m I_b(i) \right] + K_0 \right\}} \quad (3)$$

其中: $I_b(i)$ 为滤波后图像 $f_r(x_1, x_2)$ 背景的单个像素亮度; $I_w(j)$ 为滤波后图像 $f_r(x_1, x_2)$ 文字信息的单个像素亮度; $K = \Delta I / I$ 为韦伯比(在很大的强度范围内, K 几乎为 0.02); K_0 为不同显示器的修正系数; m 、 n 的取值由原始图像的像素点数所确定。

(2) 图像相似度

对于原始图像 $f_o(x_1, x_2)$ 和滤波后图像 $f_r(x_1, x_2)$, 其相似度为:

$$S = \frac{1}{E} \sum_{j,k} \frac{\mu_{ojk}^2}{\mu_{ojk} \mu_{rjk}} E_{jk}^i, 1 \leq j \leq i, 1 \leq k \leq i \quad (4)$$

式中:令 $w_o^i = WT_o^i(a; b_1, b_2)$, $w_r^i = WT_r^i(a; b_1, b_2)$, 则

$$\mu_{ojk} = \sqrt{\frac{1}{N \times M - 1} \sum_{i_1}^N \sum_{i_2}^M w_o^i - \bar{w}_o^i}^2}$$

$$\mu_{rjk} = \sqrt{\frac{1}{N \times M - 1} \sum_{i_1}^N \sum_{i_2}^M w_r^i - \bar{w}_r^i}^2}$$

$$\mu_{orjk} = \sqrt{\frac{1}{N \times M - 1} \sum_{i_1}^N \sum_{i_2}^M \left[(w_o^i - \bar{w}_o^i) \times (w_r^i - \bar{w}_r^i) \right]^2}$$

$WT^i(a; b_1, b_2) =$

$$\frac{1}{a} \iint f(x_1, x_2) \psi \left(\frac{x_1 - b_1}{a}, \frac{x_2 - b_2}{a} \right) dx_1 dx_2$$

为在尺度 a , 二维位移 b_1, b_2 下,对图像进行第 i 级小波

变换所得到的的小波系数; $E_{jk}^i = \sum_{i_1}^N \sum_{i_2}^M [WT_o^i(a; b_1, b_2)]^2$

为原始图像在第 i 级小波分解中各个方向的能量; $E =$

$\sum E_{jk}^i$ 为原始图像的总能量.

由于滤波后图像质量的评价基于亮度表现度和相似度,因而将两者综合,形成综合评价指标:

$$D = \sqrt{aR^2 + bS^2} \quad (5)$$

式中: $a + b = 1$, $a, b \geq 0$, $0 \leq R, S \leq 1$.

采用上述公式,对满屏 1、3、5 号字符的滤波图像进

表 2 不同字符滤波后图像可读性仿真结果

字符	1 号			3 号			5 号		
频率	R	S	D	R	S	D	R	S	D
5MHz	0.1023	0.7071	0.3292	0.0813	0.6339	0.2927	0.0627	0.5772	0.2642
10MHz	0.1849	0.9229	0.4446	0.1273	0.9117	0.4233	0.1024	0.8822	0.4050
15MHz	0.2564	0.9701	0.4907	0.1603	0.9558	0.4509	0.1303	0.9391	0.4358
20MHz	0.2995	0.9737	0.5113	0.2141	0.9618	0.4708	0.1570	0.9466	0.4460

对比各种字号滤波后的效果,可确定不影响计算机使用者观察滤波后的图像,其综合指标 D 应大于 0.445. 此时 1 号字的滤波阻带截止频率可选择 10~15MHz, 3 号字可选择 15~20MHz, 5 号字可选择 20MHz 及以上频率.

3.3 FIR 滤波器设计

数字滤波器分为两类,即无限冲击响应滤波器(IIR)和有限冲击响应滤波器(FIR). 鉴于滤波对象是数字图像信号,要求滤波后的图像不产生严重的相位失真,而 FIR 滤波器具备的严格线性相位的特点满足这个要求,为此采用 FIR 滤波器实现数字滤波. 考虑字符带宽和图像可读性的约束,所设计的 FIR 滤波器需满足下式:

$$\begin{cases} H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} \\ \text{s. t. } f_s \leq \max(B_s), D \geq 0.445 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $H(e^{j\omega})$ 为 FIR 滤波器的传输函数.

数字滤波设计时,还必须消除滤波器插损的周期性和混叠性.

(1) 周期性:理想低通数字滤波器的单位脉冲响应对应的是一组离散量,相当于在时域采样. 令 $x_a(t)$ 是 $x_a(t)$ 采样后的信号,则

$$\text{时域: } x_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT) \delta(t - nT) \quad (7)$$

$$\text{频域: } X_a(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega - jk\Omega_s) \quad (8)$$

式中: $X_a(j\Omega)$ 为 $x_a(t)$ 的傅立叶变换;

$X_a(j\Omega)$ 为 $x_a(t)$ 的傅立叶变换.

从式(8)可以看出:时域采样对应于频域是周期性延拓,导致在周期性的

行仿真:

- K, K_0 分别取为 0.02 和 0.01;
- 考虑到亮度的贡献比相似度要大,取 a 为 0.8, b 为 0.2;
- 选取 db1 小波基进行 3 级小波变换计算相似度;
- 针对不同字号的汉字图像,采用不同的阻带截止频率(f_s).

分别进行仿真计算,所得数据如表 2 所示:

波器混合使用的方法(图 5),以消除数字滤波器插损周期性的缺点.

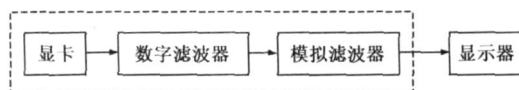


图 5 混合滤波

(2) 混叠问题:假定 $X_a(j\Omega)$ 的上限频率为 f_c ,则采样频率 f_0 应满足 $f_0 \geq 2f_c$,否则将会出现混叠现象.

算例:在计算机 1024 × 768 @75 显示模式下,点频为 80MHz. 根据 3.1 的分析结果可知,5 号字符的安全带宽为 28MHz. 基于安全考虑,在满足防混叠条件下,结合 3.2 中图像的可读性分析结果,将所设计的低通滤波器阻带截止频率定为 20MHz. 则滤波器设计指标如下:

- 采样频率:80MHz;
- 阻带截止频率:20MHz;
- 通带截止频率:16MHz;
- 通带最大衰减:3dB;
- 阻带最小衰减:60dB;
- 窗函数:Kaiser;

表 3 列出滤波器前 15 个系数. 所对应的滤波器幅频、相频特性如图 6 所示.

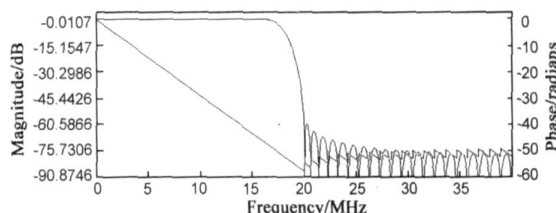


图 6 滤波器幅频及相频特性

表 3 滤波器系数

$h(0) = 0.000173$	$h(1) = -2.12 \times 10^{-5}$	$h(2) = -0.000385$	$h(3) = -0.000123$	$h(4) = 0.000642$
$h(5) = 0.000468$	$h(6) = -0.000860$	$h(7) = -0.001069$	$h(8) = 0.000902$	$h(9) = 0.001933$
$h(10) = -0.000586$	$h(11) = -0.002981$	$h(12) = -0.000277$	$h(13) = 0.004028$	$h(14) = 0.001849$

4 仿真分析及验证测试

采用上述滤波器参数所设计的滤波器,并加上截止频率为 80MHz 的模拟滤波器,建立了试验系统.图 7、8 分别给出了 5 号汉字字符滤波前后的效果.

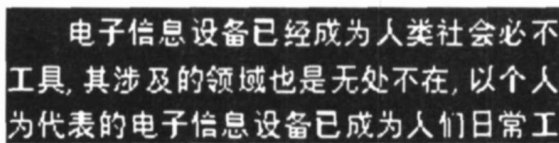


图 7 原始图

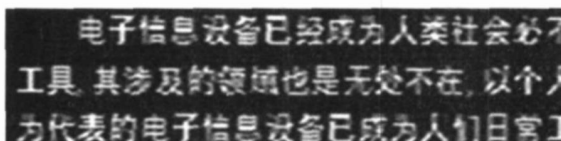


图 8 滤波后的效果图

由图 8 可以看出,由于 FIR 滤波器具有严格的线性相位,滤波后的图像失真较小,只是整幅图像产生了一定时延,其图像的可读性还是很好的.

图 9 和图 10 分别是滤波前后的图像在 10MHz~30MHz 频率范围内测得的辐射谱.

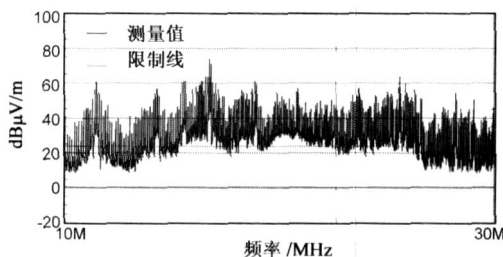


图 9 滤波前所接收的频谱

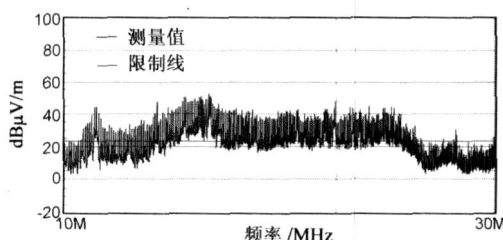


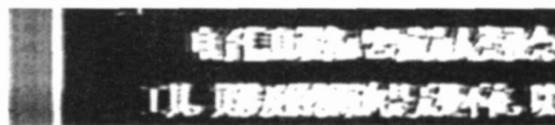
图 10 滤波后所接收的频谱

由图中可以看出:由于高频空间耦合较大,降低了滤波效果,相应的辐射抑制效果只有 15~20dB.

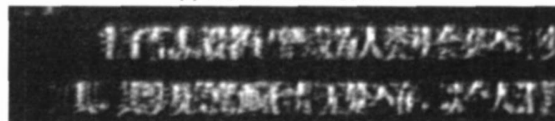
图像接收复现测试的频率范围为 20~500MHz,部分截获图像如图 11 所示:

通过测试比较可知:滤波前接收机可以在 20MHz、160MHz、220MHz、250MHz、270MHz、290MHz、340MHz 等多个频点接收到视频图像,而滤波后接收机只能在 20MHz 和 250MHz 两个频点接收到视频图像,但无法辨识图中的文字,其效果是非常明显的.其原因是:20MHz 频点低于滤波器截止频率,滤波器未起作用;250MHz 频点的接收主要是由于数字滤波插损周期性所造成的,虽然试

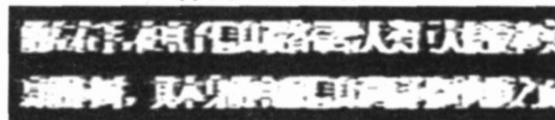
验中加了模拟滤波器,但随着频率的增加,其滤波性能有所降低.



(a) 滤波前 250MHz 接收图



(b) 滤波后 250MHz 接收图



(c) 滤波前 160MHz 接收图



(d) 滤波后 160MHz 接收图

图 11 不同频率点滤波前后接收图像

5 小结

本文从理论上对计算机视频信息防泄漏的数字滤波方法进行了深入的研究,确定了字符带宽、图像可读性等对于数字滤波的约束条件及约束准则,应用数字滤波器和模拟滤波器的组合滤波,消除了数字滤波器所固有的插入损耗周期性波动的缺点,最后通过试验验证了分析结果,获得了一些具有重要应用价值的结论.

参考文献:

- [1] Wim van Eck. Electromagnetic Radiation from Video Display Units: An Eavesdropping Risk? [J]. Computers & Security, 1985, 4: 269 - 286.
- [2] Markus G Kuhn. Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays [R/OL], <http://www.cl.cam.ac.uk/~mgk25/publications.html>, 2003.
- [3] Han Fang. Radiated emission from CRT of computer VDU [J]. IEEE Int. Symp. on EMC, Rec. 1990: 58 - 61.
- [4] 邱扬,任华胜,田锦. 计算机视频系统的信息电磁泄漏分析 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2002, 29(5): 693 - 708.
- Qiu Yang. Information electronic-magnetic emanation analysis of the video display unit for computers [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2002, 29(5): 693 - 708. (in Chinese)
- [5] 邱扬. 计算机 TEMPEST 中的关键技术-屏蔽定量设计方法的研究 [J]. 电子计算机外部设备, 1995(6): 69 - 74.

- [6] 董士伟, 许家栋. CRT 显示器信息电磁泄漏保熵性研究 [J]. 电子与信息学报, Mar. 2004, 26(3): 405 - 409.

Dong Shiwei, Xu Jiadong. On the Entropy Preservation of Information Electromagnetic Leakage from CRT Visual Display Unit [J]. Journal of Electronics & Information Technology, Mar: 2004, 26(3): 405 - 409. (in Chinese)

- [7] 林仲贤, 孙秀如. 视觉及测色应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

作者简介:



邱 扬 男, 1957 年出生, 现任西安电子科技大学机电工程学院教授, 电磁兼容性国防科技重点实验室客座教授, 陕西省电磁兼容专业委员会副主任. 发表 40 余篇学术论文, 出版 2 本专著, 获得过 3 项省部级科技进步奖. 主要研究方向为移动通信系统电磁兼容设计、信息技术设备的信息安全技术.

电子邮箱: qiuyang @vip. sina. com



魏丽丽 女, 1983 年出生, 2005 年毕业于西安电子科技大学测控技术与仪器专业, 现为该校机电工程学院测试计量技术及仪器专业硕士生, 主要从事信号完整性及图像处理研究.

电子邮箱: xuanjiwei @yahoo. com. cn



田 锦 女, 1972 年出生, 硕士学位, 现为西安电子科技大学机电工程学院副教授, 为该校电磁场与微波专业博士研究生. 主要研究方向为信息安全、通信系统电磁兼容设计及综合评估技术.

电子邮箱: tj402 @126. com



陈光达 男, 1966 年出生, 1990 年毕业于西安电子科技大学, 现为该校机电工程学院教授. 曾获国家科技成果进步奖二等奖 1 项, 部级科技成果进步奖 3 项. 主要研究方向为嵌入式机电控制、计算机信息防泄漏.

电子邮箱: fred. chen @126. com



钱柳宇 男, 1984 年出生, 2006 年毕业于西安电子科技大学测控技术与仪器专业, 现为该校机电工程学院测试计量技术及仪器专业硕士生, 主要研究方向为电磁兼容及防信息泄漏.

电子邮箱: auguste. qian @gmail. com