

近场光学扫描显微镜图象的行噪音处理

党 群¹ 白永林² 张工力² 侯 洵^{1,2}
(1 西北大学光子学与光子技术研究所, 西安 710069)
(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 在近场光学扫描显微镜以及其他一些以扫描方式工作的系统中, 由于各种原因, 致使系统的扫描图象带有较大的行噪音. 在这种情况下, 采用传统的求平均法以及傅里叶滤波法去除行噪音效果不佳. 本文提出了在空间域的自适应迭代处理和小波分析结合处理行噪音的方法. 由于小波分析可以在时-频域局部化, 而且时窗和频窗的宽度可以调节, 故而可以检测到行噪音信号, 并实现噪音的定位, 实验证明效果较好.

关键词 行噪音; 自适应; 小波分析

0 引言

当近场光学扫描显微镜工作时, 由于工作条件及环境的不稳定性, 包括激光管输出激光束功率的不稳定性, 扫描不同行时, 切变力的起伏等等, 这些因素造成了图象的噪音信号具有较强的依赖于方向的特性, 即在沿图象的扫描行, 噪音变化缓慢, 几乎是一致的; 而在图象的列方向上, 噪音的随机起伏性较大. 为了消除这种噪音, 我们提出了空间域的自适应迭代处理方法, 该方法基于对图象的统计分析, 能够判别行噪音的存在, 并自适应的进行消除. 大多数行噪音经过这样处理后都可以去除掉, 但在某些情况下, 一些行噪音的消除情况不是很好, 因此我们再利用小波分析的方法设法去除这种情况下的噪音.

1 自适应迭代处理方法

令 $f(i, j)$ 表示图象的灰度, $g(i, j)$ 表示系统输出图象的灰度, a_i 表示在列方向的乘性噪音, $n(i, j)$ 表示加性随机起伏噪音. 由于列方向上产生的噪音远远超过了加性随机起伏噪音, 并且可以通过八点平均法等等一些较简单措施去除加性随机起伏噪音的影响, 因此在下面的讨论中, 为了方便, 在 $g(i, j)$ 的表达式中, 我们略去 $n(i, j)$. 原图象和输出图象均由两部分组成, 一部分是背景

图象, 另一部分为目标图象, 并且原图象的背景具有均匀性, 即整幅图象的背景值基本上保持一致. 由于 a_i 的随机性, 使得输出的背景和目标都具有行方向起伏的特点, 为了消除这种行噪音, 我们提出了一种自适应迭代处理方法来寻找一个补偿因子^{1,2} b_i , 该补偿因子的作用是使得输出图象的每一行的背景同整幅图象的背景平均值保持一致.

令 $c(i, j)$ 表示背景灰度, 由于背景具有均匀性, 所以 $c(i, j) = c$ (常数), $o(i, j)$ 表示目标灰度, 因此 $g(i, j) = a_i \times c + a_i \times o(i, j) \cdot b_i$ 满足 $a_i \times c \times b_i = p$, 在这里 p 表示整幅图象背景平均值, 数学表达式为 $p = (1/L) \times (\sum_i a_i \times c)$, L 为行数, 则 $b_i = p / (c \times a_i)$, 此时 $g(i, j) = b_i \times g(i, j) = (p / c) \times (o(i, j) + c)$, 由此恢复原图象. 因为 $b_i = p / (c \times a_i)$, 可见, 当某行的噪音较大时, 补偿因子则越小, 它对噪音有较大的抑制作用; 当某行的噪音较小时, 补偿因子则越大, 它对噪音的抑制作用则较小. 可见, 补偿因子对行噪音的处理具有自适应的能力.

为了得到每一行的背景值, 我们采取了迭代的方法进行处理. 首先, 计算出每一行的平均值: $s_i = (1/L) \times \sum_j g(i, j)$, L 为列数. 当然, s_i 是对

背景值和目标值的平均. 因为目标值不同于背景值, 因此, 在 s_i 中应该去除目标值的影响. 在一幅图象中, 如果背景图象多, 而目标图象少, 那么将 $g(i, j)$ 与 s_i 相比较, 当 $g(i, j)$ 与 s_i 相差较大时, 令 $g(i, j) = s_i$; 如果背景图象少, 而目标图象多, 那么将 $g(i, j)$ 与 s_i 相比较, 当 $g(i, j)$ 与 s_i 相差较大时, 计算该行中满足这一条件的 $g(i, j)$ 的平均值, 并将此值赋给与 s_i 相差较小的 $g(i, j)$ (当然, 在程序中为了不改变原图象值, 须将 $g(i, j)$ 事先保存在另一个矩阵中) 因为 s_i 不是背景平均值, 因此为了进一步消除 s_i 中目标值的影响, 我们将处理过后得到的 $g(i, j)$ 作为下一次处理的初始值, 一般迭代几次后, s_i 就非常接近于背景值, 即有 $s_i \approx c \times a_i$. 最后将每一行的背景值 s_i 相加再除以行数, 即得到整幅图象的背景平均值 p , 令 $b_i = p/s_i \approx p/(c \times a_i)$, $g(i, j) = g(i, j) \times b_i$. 经过这样处理后, 大部分行噪音都可以去除掉. 但在某些情况下, 一些行噪音 a_i 在一行的分布不一致, 即 a_i 与 j 的关系较大, 在这种情况下, 这一行上的噪音去除效果不太好. 这时我们可利用小波分析的方法设法去除这种情况下的噪音.

2 小波变换与信号奇异性的关系³

当函数 $\Psi(x)$ 满足 $c = \int_{-\infty}^{+\infty} (|\Psi(\omega)|^2 / \omega) d\omega < +\infty$ 时, 该函数称为基本小波, 基本小波 $\Psi(x)$ 通过伸缩和平移运算可产生一簇小波函数

$\Psi_{i,j}(x) = 2^{j/2} \Psi(2^j x - i)$
基本小波由尺度函数 $\phi(x)$ 构造, $\phi(x)$ 满足双尺度方程

$$\phi(x) = 2^{1/2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k) \phi(2x - k),$$
$$\Psi(x) = 2^{1/2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g(k) \phi(2x - k)$$

这里 $g(k) = (-1)^k h(1-k)$. 函数 $\Psi(x)$ 的小波变换定义为

$wf(s, x) = f \otimes \Psi_s(x)$, 其中 $\Psi_s(x) = (1/s) \times \Psi(x/s)$.

小波变换的一个重要特征是它能表征信号的奇异性⁴. 如果表示信号的函数无限次可导, 则称该信号没有信号奇异性. 如果表示信号的函数在某处有间断点或某阶导数不连续, 则称该信号有信号奇异性. 确定信号奇异性的经典方法是利用傅里叶变换, 当 $f(x)$ 是一个有界函数时, 考察

$F(\omega)$, 当

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(\omega)| (1 + |\omega|^\alpha) d\omega < +\infty \tag{1}$$

则称函数 $f(x)$ 在实数域上是一致 Lipschitz α 的, 由于傅里叶变换只能对频率进行分析, 无法知道空间上的信息, 因此由式 (1) 无法判断信号在哪一点上更加正则. 小波变换则不同, 它具有良好的时-频域局部化特点, 因此可以局部检测奇异点, 还能估计相应的 Lipschitz α 指数的大小.

定义设 $0 \leq \alpha \leq 1$, 当且仅当存在常数 A , 使得对于任意 $t_0, t_1 \in [a, b]$, 有

$$|f(t_0) - f(t_1)| \leq A |t_0 - t_1|^\alpha \tag{2}$$

则称函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上是一致 Lipschitz α 的, 并把式 (2) 成立的 α 的上界 α 称为函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上的 Lipschitz 指数. 设 $\Psi(x)$ 是连续可微的, 则有

定理 1 设 $f(x) \in L^2(R)$ 且 $[a, b]$ 是 R 的一个区间, 设 $0 < \alpha < 1$, 对任意的 $\delta > 0$, 在区间 $[a + \delta, b - \delta]$ 上是一致 Lipschitz δ 当且仅当对任意的 $\delta > 0$ 存在一常数 A_δ , 对 $x \in [a + \delta, b - \delta]$ 和 $s > 0$ 有

$$|wf(x, y)| \leq A_\delta s^\alpha$$

如果小波 $\Psi(x)$ 具有 n 次消失矩, 即当且仅当对所有的正整数 $k < n$, 有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \Psi(x) dx = 0$$

进一步假定小波函数 n 次可微并具有紧支集, 则有以下定理.

定理 2 设 $f(x) \in L^2(R)$, n 是一个正整数且 $\alpha \leq n$. 如果 $f(x)$ 在点 x_0 是 Lipschitz α 则存在一个常数 A , 满足对在 x_0 点的一个邻域的所有 x 和任意尺度 s , 有

$$|wf(s, x)| \leq A (s^\alpha + |x - x_0|^\alpha)$$

反之, 设 α 是一个非整数值, 函数 $f(x)$ 在 x_0 点是 Lipschitz α 如果下面两个条件成立:

1) 存在一些 $\delta > 0$ 和一个常数 A , 使得对在 x_0 点的一个邻域的所有 x 和任意尺度 s 有

$$|wf(x, y)| \leq A s^\alpha$$

2) 存在一个常数 B 满足, 对在 x_0 点的一个邻域的所有 x 和任意尺度 s

$$|wf(x, y)| \leq B (s^\alpha + |x - x_0|^\alpha / \log |x - x_0|)$$

以上两个定理说明小波变换特别适合估计函数的局部奇异性.

近场光学扫描显微镜图象经过空间域的自适

应迭代处理后,大部分行噪音都可以去除掉,但如前所述,在某些仍有较大的噪音,这些行噪音的存在,使得图象信号函数在相应的位置处表现出局部奇异性. 为了便于更好地检测信号的突变,可选用光滑函数的一阶导数作为小波函数⁵,例如具有紧支集的二次样条小波 $\Psi(x)$.

对于二维图象信号,二维基本小波函数为 $\Psi^1(x,y) = \Psi(x) \Psi(y)$, $\Psi^2(x,y) = \Psi(x) \Psi(y)$, $\Psi^3(x,y) = \Psi(x) \Psi(y)$, 对应的滤波器系数为 $h_{LL}(k,l) = h(k) \times h(l)$, $h_{LH}(k,l) = h(k) \times g(l)$, $h_{HL}(k,l) = g(k) \times h(l)$, $h_{HH}(k,l) = g(k) \times g(l)$

因此,图象的小波变换,在每次分解过程中,图象的 $Y_{2^j}^{-1}(x,y)$ 被分解成如图 1 所示的四个部分. 低通子图象 $Y_{2^j}^{LL}(x,y)$ 为原图的垂直方向和水平方向上的低频部分; $D_{2^j}^{LH}(x,y)$ 为垂直方向的高频分量, $D_{2^j}^{HL}(x,y)$ 为水平方向的高频分量, $D_{2^j}^{HH}(x,y)$ 为垂直方向和水平方向两个方向上的高频分量.

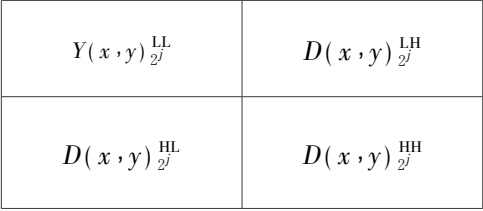


图 1 图象小波分解示意图

Fig. 1 Wavaet-decomposed subimage

对于近场光学扫描显微镜的图象,用前述自适应迭代处理行噪音后,在某些行上仍然存在着行噪音. 用小波变换进行处理后产生四个图象,其中 $D_{2^j}^{LH}$ 子图象即显示了行噪音的分布情况. 具体处理时,对 $D_{2^j}^{LH}$ 各行进行统计处理,求出各行上灰度值与整幅子图象 $D_{2^j}^{LH}$ 的灰度平均值之间的均方根值,均方根值较大处,在该行对应的位置,即有行噪音. 这样,我们通过对 $D_{2^j}^{LH}$ 子图象的分析,即可知道行噪音的分布情况. 在我们的实验中,第一次分解时, $D_{2^0}^{LH}$, $D_{2^0}^{HL}$, $D_{2^0}^{HH}$, 三幅子图象的频率

较高,在 $D_{2^0}^{LH}$ 中行方向上较低频率的行噪音显露得还不是很明显. 因此,还需要作第二次分解,此时得到的 $D_{2^1}^{LH}$ 中较低频的行噪音就比较明显. 需要说明的是,如果不考虑列方向的噪音,在分解时,只需要得到 $Y_{2^j}^{LL}(x,y)$, $D_{2^j}^{LH}(x,y)$ 两幅子图即可.

为了去掉高频行噪音,在图象的合成时,我们略去 $D_{2^j}^{LH}$ 的成分. 这样处理后,只剩下频率较低的行噪音. 通过 $D_{2^j}^{LH}$ 的统计分析,可以实现行噪音的定位,因此可以通过加权平均的办法将其消除. 利用传统的傅里叶分析,虽可以滤掉一些高频行噪音,但如要进一步滤掉频率较低的行噪音,一方面较难奏效,另一方面会损失大量的有用信息,而小波分析由于可在时-频域局部化,而且时窗和频窗的宽度可以调节,故可实现噪音信号的定位,因而较傅里叶分析具有优越性.

3 处理结果

图 2 为系统的扫描图象,图 3 为利用上述方法处理后的图象.



图 2 原始图象
Fig. 2 The original picture

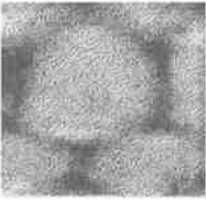


图 3 处理后的图象
Fig. 3 The result picture

参考文献

1 自动补偿不均匀积分灵敏度光电接收装置热像仪系统. 光学工程 1997, 64(2): 25~30

2 伊康斯基. 关于解决校正不均匀灵敏度多光谱热像仪扫描问题. 光学工程 1997, 64(2): 31~33

3 秦前清, 杨永凯. 实用小波分析. 西安电子科技大学出版社, 1998: 80~92

- 4 Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Trans on IT, 1992, 38(2) : 617~643
- 5 李建平. 小波分析在故障诊断中的应用-小波分析与信号处理. 重庆大学出版社, 1997, 193~199

A METHOD TO PROCESS THE ROW-NOISE IN IMAGE OF NEAR-FIELD OPTICAL SCANNING MICROSCOPY

Dang Qun, Bai Yonglin, Zhang Gongli, Hou Xun

¹ Photonics and Photon-technology Institute of Northwest University, Xi'an 710069

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2000-01-17

Abstract In the system with a mode of scanning, such as the near-field optical scanning microscopy, the image produced has big row-noise due to many kinds of reasons. In this case, the traditional methods, like average and Fourier filter, are not good at eliminating the row-noise. Two new methods, adaptive iterative and wavelet analysis, are proposed in this article. Wavelet-analysis is able to be localized in the time-frequency domain, and its window of time and frequency can be adjusted, therefore, the row-noise is able to be detected and Location of the noise can be realized. These processes prove to be effective in experiments.

Keywords Row-nose; Wavelet-analysis; Self-adapt



Dang Qun was born in 1975, received his B.S. degree in 1998. He is currently studying for his M.S. degree in Northwest University. His research interests are near-field optical microscope.