

# 近场光学扫描显微镜中的信号处理

党 群<sup>1,2</sup>, 吕善伟<sup>1</sup>, 侯 洵<sup>2</sup>, 毛 峡<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083; 2. 西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西西安 710069)

**摘 要:** 在近场光学扫描显微镜中, 由于扫描方式的原因, 使得输出的数字图像中存在着随机性的行噪音, 采用传统的滤波方法无法有效的去除这种行噪音, 本文提出了空间域的自适应迭代处理和小波分析相结合的方法来处理这种行噪音; 为了使图像增强, 提出了分段线性伪彩色变换处理的方法, 它可以使图像内微妙的变化变得更为可见; 并采取曲面拟合来消除叠加在信号中的缓变的噪音。

**关键词:** 行噪音; 自适应; 小波分析; 伪彩色; 曲面拟合

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1886-04

## Signal Process In Scanning Near-field Optical Microscopy

DANG qun<sup>1,2</sup>, L ü Shan-wei<sup>1</sup>, HOU Xun<sup>2</sup>, MAO Xia<sup>1</sup>

(1. Dept. of eletroc engineer, Beijing University of areonautics and astronautics, Beijing 100083, China;

2. Photonics and Photot-technology Institute of Northwest University, Xi an, Shanxi 710068, China)

**Abstract:** There are random row-noises in output digital image of near-field optical scanning microscopy because of the scanning way. To adhibit traditional method of filtering the waves cannot effectively wipe off such row-noises. This paper presents a method which combines adaptive iteration and wavelet analysis to filter row-noises. The method of subsectional linearity pseudo-color transformation is presented for emboldening image. The fitting of curve surface is adopted for filtering slowly change row-noises added in signal.

**Key words:** row-noise; self-adapt; wavelet-analysis; pseudo-color; fit of curve surface

### 1 引言

近场光学扫描显微镜 (Scanning Near-field Optical Microscopy, 简称为 NSOM) 是扫描探针显微技术与光学显微技术相结合的产物。其原理是基于对非辐射场的探测与成象原理, 从而获得物体细微的精细结构。

发展近场光学扫描显微镜需要解决四个关键技术: (1) 尺度小于亚波长的光学探针; (2) 纳米量级精度的三维扫描机构; (3) 近场距离自动精确控制; (4) 计算机控制的图像数据采集和图像处理系统。近场光学扫描显微镜装置图如图一所示。在 70 年代以前, 上述技术均难以实现, 直到 80 年代初发明扫描隧道显微镜, 微计算机和图像处理技术也大有进步, 才为近场光学扫描显微镜创造了良好的条件。本文着重从信号处理的角度论述近场光学关键技术之一: 图像处理。

### 2 近场光学扫描显微镜基本原理:

在近场光学中, 所谓近场是指距离物体表面一个  $\lambda$  以内的区域。远场则指离开近场区域到无穷远处的区域。从付里叶光学方法或是从海森伯不确定性原理可以得出结论: 物体的细微结构信息被限制在接近物体表面的近场区域, 不能传播到远场去。可见, 在远场用常规的光学观察方法, 无法探测物

体的高频信息。因此, 为了获得物体的细微结构信息, 就必须探测束缚在物体表面的非辐射场的信息, 近场光学的核心即在于此。

近场光学扫描显微镜的基本结构包括:

(1) 探针: 用于发射或接受光子, 探针的尖端在 1—100 纳米之间。

(2) 信号采集及处理: 利用计算机对信号进行采集并进行初步的处理。

(3) 探针-样品间距的反馈控制: 其主要功能是根据反馈信号的变化来控制光线尖的位置, 使其保持在设定的高度上, 并提供扫描时  $z$  方向的微调信息。

(4) 三维扫描系统: 由压电陶瓷管和  $X, Y, Z$  三维驱动器电路组成。光纤尖固定在压电陶瓷管上实现光纤尖的三维扫描。

(5) 图像处理: 利用微机实现图像的实时显示和图像的恢复及图像的增强。

### 3 信号处理

#### 3.1 预处理

信号采集由微机完成, 由于信号强度一般都很低, 需要经

过光电倍增管等器件将光信号转换为电信号并放大,同时利用调制—锁相放大技术抑制噪声,提高信噪比.由于利用锁相放大器提取经前置放大后的反馈信号时,虽然锁相放大器的时间常数可调,最小时间为 1ms,这个时间常数虽小,但对于近场光学扫描显微镜来说,延滞较大,使得系统的稳定性控制难度增大,并且使扫描时间延长.为了克服这一问题,我们采用了绝对值峰值检波电路,该电路的输出电压与输入电压绝对值的平均值成正比,与锁相放大器相比较,绝对值峰值检波电路的输出噪声较大,但提高了扫描速度.

### 3.2 编程处理

近场光学扫描显微镜在工作时,由于系统的稳定性不是很高,再加上各种干扰以及系统传递函数的影响,使得系统的输出信号不能真实的反映样品的表面形貌.因此,必须对微机采集到的信号进行处理.这些处理包括:(1)邻域平均处理去除噪声;(2)反对比度增强;(3)曲面拟合消除噪声;(4)灰度比例尺变换;(5)利用直方图运算增强图像.

由于近场光学扫描显微镜是以扫描方式进行工作,因此使得系统的扫描图像带有较大的行噪声,在这种情况下,采用传统的求平均法以及付里叶滤波法去除行噪声效果不佳,本文采用了空间域的自适应迭代处理和小波分析结合处理行噪声的方法.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声,并实现噪声的定位.另外,为了从软件的角度进一步提高分辨率,我们还采取了一种分段线性变换的信号处理方法.现分述如下:

**3.2.1 自适应迭代法及小波分析结合处理行噪声** 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,这些因素造成了图像的早声信号具有较强的依赖于方向的特性,既在沿图像的扫描行,噪声变化缓慢,几乎是一致的,而在图像的列方向上,噪声的随机起伏性较大.令  $f(i, j)$  表示原图像的灰度,  $g(i, j)$  表示系统输出图像的灰度,  $a_i$  表示在列方向的乘性噪声,  $n(i, j)$  表示加性随机起伏噪声.由于列方向上产生的噪声远远超过了加性随机起伏噪声的影响,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声的影响,因此在下面的讨论中,为了方便,  $g(i, j)$  在的表达式中,略去  $n(i, j)$ .

原图像和输出图像均由两部分组成,一部分是背景图像,另一部分为目标图像,并且原图像的背景具有均匀性,即整幅图像的背景值基本上保持一致.由于的随机性,使得输出的背景和目标都具有行方向起伏的特点,为了消除这种行噪声,提出了一种自适应迭代处理方法来寻找一个补偿因子  $b_i^{[1,2]}$ ,该补偿因子的作用是使得输出图像的每一行的背景同整幅图像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  $g(i, j) = a_i \times c + a_i \times o(i, j)$ .  $b_i$  满足:  $a_i \times c \times b_i = p$ ,  $p$  表示整幅图像背景平均值,数学表达式为:  $p = (1/L) \times \left( \sum_i a_i \times c \right)$ ,  $L$  为行数,则  $b_i = p / (c \times a_i)$ ,此时  $g(i, j) = b_i \times g(i, j) = (p/c) \times (o(i, j) + c)$ ,由此恢复原图像.因为  $b_i = p / (c \times a_i)$ ,可见,当某行的噪

声较大时,补偿因子则越小,它对噪声有较大的抑制作用;当某行的噪声较小时,补偿因子则越大,它对噪声的抑制作用则较小.可见,补偿因子对行噪声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.目标值不同于背景值,  $s_i$  中应该去除目标值的影响.在一幅图像中,如果背景图像多,而目标图像少,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  $g(i, j) = s_i$ ;如果背景图像少,而目标图像多,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像值,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相加再除以行数,即得到整幅图像的背景平均值  $p$ ,令  $b_i = p / s_i = p / (c \times a_i)$ ,  $g(i, j) = g(i, j) \times b_i$ .经过这样处理后,大部分行噪声都可以去除掉.但在某些情况下,一些行噪声  $a_i$  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,这一行上的噪声去除效果不太好.这时我们可利用小波分析的方法设法去除噪声.

小波变换的一个重要特征是它能表征信号的奇异性<sup>[3,4]</sup>,具有良好的时—频域局部化特点,因此可以局部检测奇异点.而付里叶变换只能对频率进行分析,无法知道空间上的信息.

近场光学扫描显微镜图像经过空间域的自适应迭代处理后,大部分行噪声都可以去除掉,但如前所述,在某些行仍有较大的噪声,这些行噪声的存在,使得图像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<sup>[5]</sup>,例如具有紧支集的二次样条小波  $\psi(x)$ .

对于二维图像信号,二维基本小波函数为:

$$\begin{aligned} \psi^1(x, y) &= \psi(x) \psi(y), \quad \psi^2(x, y) = \psi(x) \phi(y), \\ \psi^3(x, y) &= \psi(x) \psi(y), \end{aligned}$$

对应的滤波器系数为:

$$\begin{aligned} h_{LL}(k, l) &= h(k) \times h(l), \quad h_{LH}(k, l) = h(k) \times g(l), \\ h_{HL}(k, l) &= g(k) \times h(l), \quad h_{HH}(k, l) = g(k) \times g(l), \end{aligned}$$

因此,图像的小波变换,在每次分解过程中,图像的  $Y_2^{i-1}(x, y)$  被分解成如图 1 所示的四个部分.低通子图像  $Y_2^L$

$Y_2^L(x, y)$	$D_2^H(x, y)$
$D_2^L(x, y)$	$D_2^{HH}(x, y)$

图 1

$(x, y)$  为原图的垂直方向和水平方向上的低频部分;  $D_2^H(x, y)$  为垂直方向的高频分量,  $D_2^L(x, y)$  为水平方向的高频分量,  $D_2^{HH}(x, y)$  为垂直方向和水平方向两个方向上的高频分量,其中  $D_2^H$  子图像即显示了行噪声的分布情况.具体处理时,对  $D_2^H$  各行进行统计处理,求出各行上灰度值与整幅子图像  $D_2^H$  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,既有行噪声.这样,我们通

过对  $D_2^H$  子图像的分析,既可知行噪声的分布情况. 在我们的实验中,第一次分解时,  $D_2^H, D_2^V, D_2^D$ , 三幅子图像的频率较高,在  $D_2^H$  中行方向上较低频率的行噪声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  $D_2^H$  中较低频的行噪声就比较明显. 如果不考虑列方向的噪声,在分解时,只需要得到  $D_2^H(x, y), D_2^H(x, y)$ , 两幅子图即可.

为了去掉高频行噪声,在图像的合成时,略去  $D_2^H$  的成分. 这样处理后,只剩下频率较低的行噪声. 通过  $D_2^H$  的统计分析,可以实现行噪声的定位,因此可以通过加权平均的办法将其消除. 利用传统的付里叶分析,虽可以滤掉一些高频行噪声,但如要进一步滤掉频率较低的行噪声,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一频域局部化,而且时窗和频窗的宽度可以调节,故可实现噪声信号的定位. 最后给出实验结果:图 2 为系统的扫描图像,图 3 为利用上述方法处理后的图像.



图 2

图 3

**3.2.2 分段线性变换处理** 众所周知,伪彩色<sup>[6]</sup>是通过将每个灰度级匹配到彩色空间中的一点,将单色图像映射为一幅彩色图像. 伪彩色的诱人之处在于人眼能够分辨比灰度影调更多的不同的彩色. 这样,在一个单色显示器上,人或许只能在个灰度级中分辨出个左右级灰度而当映射到不同彩色后,就能看到更多的影调. 将不同的灰度映射到不同的彩色时,可以采取一一映射的函数关系,也就是说,不同的灰度不可能映射到同一个彩色影调. 一组典型的灰度—彩色变换的传递函数如图 4 所示. 图 4(a) 表示红色变换的传递函数,它表示,凡小于  $L/2$  灰度级,将转变为尽可能暗的红色,而在  $L/2$  到  $3L/4$  之间的灰度将使红色从暗到亮成线性关系变换,凡大于  $3L/4$  直到最大灰度级  $L$  的灰度,均转变为最亮的红色. 类似地,图 4(b) 和图 4(c) 分别表示绿色和蓝色变换的传递函数. 最后,图 4(d) 表示了三种彩色传递函数组合在一起的情况. 由图可知,只有两端点和中心点的灰度,才是纯三元色. 显然,用这种组合方案,将使整个灰度范围内的任何两种灰度,都不具有相同的彩色.

用上述的增强方法,虽然可以保证整个灰度范围内的任何两种灰度,都不具有相同的彩色. 但对于某些图像中的细节信息,还是不能够充分显示. 因此,我们采取了一种非一一映射的变换函数关系. 其方法是在将整个灰度范围分为好几个区间,在这些区间内,红,绿,蓝三色交替由最小灰度线性变换为最大灰度. 函数变换关系示意图如图 5 所示.

这种方法可以反映图像内部灰度的细微变化. 上述方法也可以用来实现灰度的非线性变换,同样可以使图像内微妙变化变得更为可见. 对这种变换后的图像再实行梯度运算,

就得到了图像的轮廓线或者说是灰度等高线. 这种轮廓线(或者说是灰度等高线)要比直接对图像进行梯度运算得到的轮廓线(或者说是灰度等高线)要更能反映图像内部的细节.

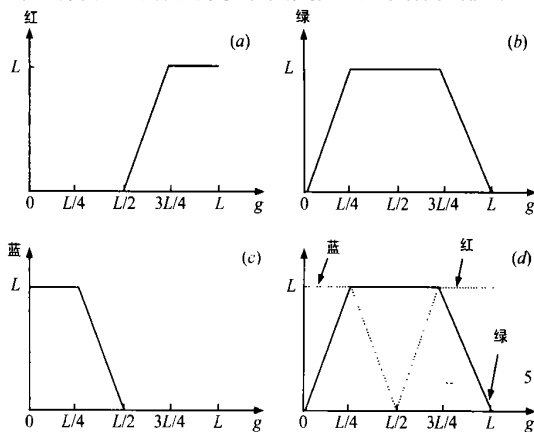


图 4

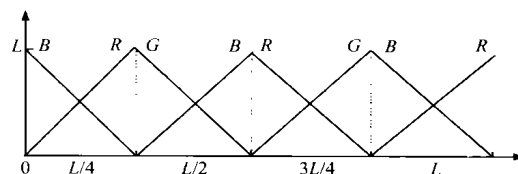


图 5

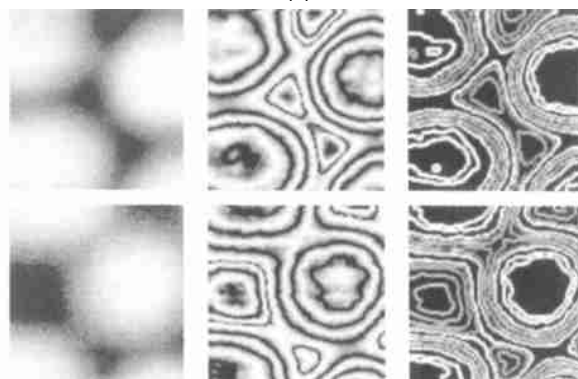


图 6

图 6 中,左边第一列为原始图像,第二列为去除噪声后的图像,第三列为采用非线性变换处理后的图像,最后一列为梯度图像.

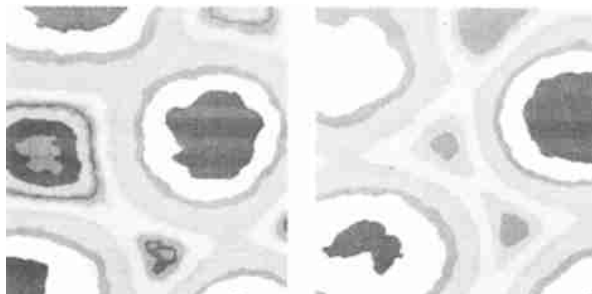


图 7 近场光学显微镜扫描图像的伪彩色显示

**3.2.3 曲面拟合消除噪声** 近场光学扫描显微镜在扫描图

像时,由于扫描方式的限制,或者如果样品没有放平,这就造成扫描图像的有用信息叠加在一个缓变的曲面(或直面)上,也就是说,图像叠加了缓变的噪声.我们应用曲面拟合<sup>[7]</sup>的方法来消除这种噪声.

事先根据扫描图像设定曲面的阶数,一般我们设定的一阶,二阶,三阶,四阶,甚至到五阶,六阶.然后利用最小二乘法可以得到曲面函数的具体参数.下面用一个三阶函数的例子来说明这个方法.设:

$$f(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4x^2 + c_5y^2 + c_6x^2y + c_7xy^2 + c_8x^3 + c_9y^3$$

令:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & x_1^3 & y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 & x_2^2y_2 & x_2y_2^2 & x_2^3 & y_2^3 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 & x_3^2 & y_3^2 & x_3^2y_3 & x_3y_3^2 & x_3^3 & y_3^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_N & y_N & x_Ny_N & x_N^2 & y_N^2 & x_N^2y_N & x_Ny_N^2 & x_N^3 & y_N^3 \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \dots \\ g_N \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_9 \end{bmatrix}$$

B 是 N × 10 矩阵, Y, C 是 N × 1 矩阵, g<sub>1</sub>, g<sub>2</sub>, ..., g<sub>N</sub> 等是图像的灰度值.表示每一个数据点的误差的列向量可以写为:

$$E = Y - BC$$

均方误差由下式给定:

$$MSE = \frac{1}{N} E^T E$$

将 E 表达式代入上式,对 C 中的元素进行微分并令导数为零可以得到:



图 8



图 9

$$C = [B^T B]^{-1} [B^T Y]$$

如果点的个数和系数个数相等, B 是一个方阵.倘若它是非奇异的,则可以直接求逆.在这种情况下,

$$C = B^{-1} Y$$

图 8 为原始图像,图 9 为经过曲面拟合后的图像.

参考文献:

[ 1 ] - [ J ]. , 64, 2, 1997: 25 - 30.

[ 2 ] - [ J ]. , 64, 2, 1997: 31 - 33.

[ 3 ] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [ J ]. IEEE Trans. on IT, 1992, 38(2) : 617 - 643.

[ 4 ] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析 [ M ]. 西安电子科技大学出版社, 1998: 80 - 92.

[ 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》 [ M ]. 重庆大学出版社, 1997: 193 - 199.

[ 6 ] 赵荣春. 数字图像处理导论 [ M ]. 西北工业大学出版社.

[ 7 ] Kenneth R Castleman. 数字图像处理 [ M ]. 朱志刚等译. 电子工业出版社, 435 - 437.

作者简介:



党 群 男. 1975 年生于陕西. 于 1997 年, 2000 年在西北大学分别获学士学位、硕士学位, 现为北京航空航天大学电子工程系博士生, 专业为电磁场与微波. 主要研究方向为: 电磁场与微波技术, 小波应用, 图像增强处理.

吕善伟 男. 1937 年生于辽宁省大连. 北京航空航天大学教授, 博士生导师. 1960 年毕业于北京航空学院. 现兼任天线学会委员、北京航空航天大学电子专业副主任等, 长期从事射频、微波工程与天线的教学与科研工作.