



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106154284 B

(45)授权公告日 2017. 11. 14

(21)申请号 201610439078.2

审查员 余莹洁

(22)申请日 2016.06.17

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106154284 A

(43)申请公布日 2016.11.23

(73)专利权人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

专利权人 北京航天自动控制研究所

(72)发明人 杨照华 刘保磊 曲少凡 肖雅蓉

闫瑞涛 余远金 祁振强

(74)专利代理机构 北京君恒知识产权代理事务

所(普通合伙) 11466

代理人 张璐 黄启行

(51)Int.Cl.

G01S 17/89(2006.01)

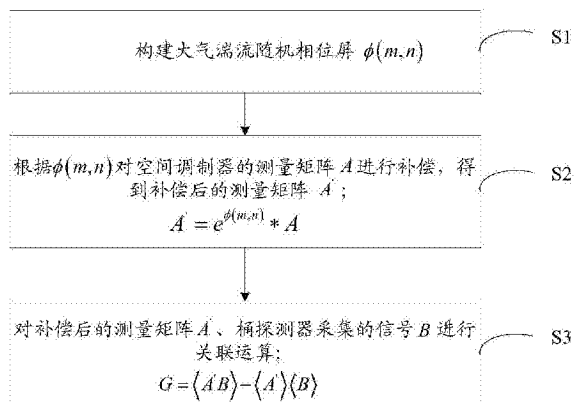
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法

(57)摘要

公开了一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法,包括:构建大气湍流随机相位屏  $\phi(m,n)$ ;根据  $\phi(m,n)$ 对空间调制器的测量矩阵  $A$ 进行补偿,得到补偿后的测量矩阵  $A'$ ;对补偿后的测量矩阵  $A'$ 、桶探测器采集的信号  $B$ 进行关联运算。本发明通过对单光臂关联成像中的大气湍流进行补偿,提高了参考光路与信号光路的相干性,进而使单光臂关联成像的成像质量显著提高。



1. 一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法,其特征在于,所述方法包括:  
S1、构建大气湍流随机相位屏  $\Phi(m, n)$ ;

S2、根据  $\Phi(m, n)$  对空间调制器的测量矩阵A进行补偿,得到补偿后的测量矩阵A';

$$A' = e^{\Phi(m, n)} * A$$

式中,\*为卷积运算;

S3、对补偿后的测量矩阵A'、桶探测器采集的信号B进行关联运算;

$$G = \langle A'B \rangle - \langle A' \rangle \langle B \rangle;$$

式中, $\langle \rangle$ 为相关运算,G为二阶关联函数。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述随机相位屏  $\Phi(m, n)$  具体为:

$$\Phi(m, n) = \sum_{m' = -(N_x/2)}^{(N_x/2)-1} \sum_{n' = -(N_y/2)}^{(N_y/2)-1} h(m', n') f(m', n') \exp[j2\pi(\frac{m'm}{N_x} + \frac{n'n}{N_y})]$$

$$\text{式中, } f(m', n') = \frac{2\pi}{\sqrt{G_x G_y}} \sqrt{0.00058} r_0^{-5/6} (f_x^2 + f_y^2)^{-11/12}, \text{ } h(m', n') \text{ 是均值为0、单位方}$$

差的复高斯随机变量, $G_x$ 、 $G_y$ 分别为所述随机相位屏在x、y方向的大小, $r_0$ 为大气湍流的相干长度, $f_x$ 、 $f_y$ 为空间频率。

3. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,所述 $r_0$ 满足:

$$r_0 = 0.185 \left[ \frac{\lambda^2}{\int_z^{z+\Delta z} C_n^2(\xi) d\xi} \right]^{3/5}$$

式中,z为光束传播方向, $\Delta z$ 为大气湍流薄层的厚度, $C_n^2$ 为折射率结构常数。

4. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,步骤S1包括:

S11、基于功率谱反演法构建随机相位屏  $\Phi(x, y)$ ;

$$\Phi(x, y) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \sqrt{F_\Phi(k_x, k_y)} \exp[j(k_x x + k_y y)] \Delta k_x \Delta k_y$$

式中, $\Phi(x, y)$ 为大气扰动相位, $h(k_x, k_y)$ 为频率域内均值为0、单位方差的复高斯随机变量, $F_\Phi(k_x, k_y)$ 是符合Kolmogorov模型的功率谱函数, $k_x$ 、 $k_y$ 分别为x、y方向的波数分量;

S22、对  $\Phi(x, y)$  进行离散化、谐波补偿,以构建大气湍流随机相位屏  $\Phi(m, n)$ 。

5. 如权利要求4所述的方法,其特征在于, $F_\Phi(k_x, k_y)$  具体为:

$$F_\Phi(k_x, k_y) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi(k_x, k_y) \Delta k_x \Delta k_y$$

式中, $\Phi(k_x, k_y)$ 为符合Kolmogorov模型的折射率功率密度函数,并且  $\Phi(k_x, k_y)$  满足:

$$\Phi(k, z) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3};$$

式中,z为光束传播方向,k为三维空间中的波数。

## 一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及量子关联成像领域,尤其涉及一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法。

### 背景技术

[0002] 量子关联成像,又称鬼成像,是一种新型的成像技术。与传统成像中直接记录光强和相位的方式不同,量子关联成像是将信号光路与参考光路的信息进行关联运算得到的。具体的,在双光臂关联成像中,可通过桶探测器收集被探测物体透射或反射的光强信息,即信号光路的信息;可通过阵列探测器收集用于照射探测物体的光场信息,即参考光路的信息;然后,将信号光路与参考光路的信息进行关联计算。在单光臂关联成像中,可通过桶探测器收集信号光路的信息,并以储存在计算机中的测量矩阵作为参考光路的信息,然后将信号光路与参考光路的信息进行关联运算。关联成像的奇特之处在于,单独的桶探测器测量或单独的阵列探测器测量都不能恢复物体的信息,但是将桶探测器与阵列探测器的测量信息进行关联,却能够恢复物体的信息,并且物体图像的分辨率可以突破衍射极限。

[0003] 当在大气环境中应用单光臂关联成像技术时,由于在传输路径上存在大气湍流,会对信号光路造成干扰,进而使信号光路与参考光路的关联程度下降,导致成像质量显著降低。

[0004] 针对大气湍流对单光臂关联成像的影响,亟需一种能对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法,以提高参考光路与信号光路的关联性,进而提高成像质量。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提出一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法,以极大减小大气湍流对量子关联成像的影响,提高关联成像质量。

[0006] 本发明提供的对大气湍流进行补偿的单光臂成像方法,包括:

[0007] S1、构建大气湍流随机相位屏  $\Phi(m,n)$ ;

[0008] S2、根据  $\Phi(m,n)$  对空间调制器的测量矩阵A进行补偿,得到补偿后的测量矩阵A';

[0009]  $A' = e^{\Phi_{m,n}} * A$

[0010] 式中,\*为卷积运算;

[0011] S3、对补偿后的测量矩阵A'、桶探测器采集的信号B进行关联运算;

[0012]  $G = \langle A'B \rangle - \langle A' \rangle \langle B \rangle$ ;

[0013] 式中, $\langle \rangle$ 为相关运算,G为二阶关联函数。

[0014] 其中,所述随机相位屏  $\Phi(m,n)$  具体为:

[0015] 
$$\phi(m,n) = \sum_{m'=-N_x/2}^{(N_x/2)-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{(N_y/2)-1} h(m',n') f(m',n') \exp[j2\pi(\frac{m m'}{N_x} + \frac{n n'}{N_y})]$$

[0016] 式中,  $f(m', n') = \frac{2\pi}{\sqrt{G_x G_y}} \sqrt{0.00058 r_0^{-5/6} (f_x^2 + f_y^2)^{-11/12}}$ ,  $h(m', n')$  是均值为

0、单位方差的复高斯随机变量,  $G(x)$ 、 $G(y)$  分别为所述随机相位屏在  $x$ 、 $y$  方向的大小,  $r_0$  为大气湍流的相干长度,  $f_x$ 、 $f_y$  为空间频率。

[0017] 其中, 所述  $r_0$  满足:

$$[0018] \quad r_0 = 0.185 \left[ \frac{\lambda^2}{\int_z^{z+\Delta z} C_n^2(\xi) d\xi} \right]^{3/5}$$

[0019] 式中,  $z$  为光束传播方向,  $\Delta z$  为大气湍流薄层的厚度,  $C_n^2$  为传播路径上大气湍流强度的结构常数。

[0020] 其中, 步骤 S1 包括:

[0021] S11、基于功率谱反演法构建随机相位屏  $\phi(x, y)$ ;

$$[0022] \quad \phi(x, y) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \sqrt{F_\phi(k_x, k_y)} \exp[j(k_x x + k_y y)] \Delta k_x \Delta k_y$$

[0023] 式中,  $\phi(x, y)$  为大气扰动相位,  $h(k_x, k_y)$  为频率域内均值为 0、单位方差的复高斯随机变量,  $F_\phi(k_x, k_y)$  是符合 Kolmogorov 模型的功率谱函数,  $k_x$ 、 $k_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的波数分量;

[0024] S22、对  $\phi(x, y)$  进行离散化、谐波补偿, 以构建随机相位屏  $\phi(m, n)$ 。

[0025] 其中,  $F_\phi(k_x, k_y)$  具体为:

$$[0026] \quad F_\phi(k_x, k_y) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi(k_x, k_y) \Delta k_x \Delta k_y$$

[0027] 式中,  $\Phi(k_x, k_y)$  为符合 Kolmogorov 模型的折射率功率密度函数。

[0028] 在本发明的技术方案中, 对大气湍流进行补偿的单光臂成像方法主要包括: 构建大气湍流随机相位屏  $\phi(m, n)$ ; 根据  $\phi(m, n)$  对空间调制器的测量矩阵  $A$  进行补偿, 得到补偿后的测量矩阵  $A'$ ; 对补偿后的测量矩阵  $A'$ 、桶探测器采集的信号  $B$  进行关联运算。本发明通过对单光臂关联成像中传输路径上存在的大气湍流进行补偿, 提高了参考光路与信号光路的相干性, 进而显著提高了关联成像的成像质量。

## 附图说明

[0029] 通过以下参照附图而提供的具体实施方式部分, 本发明的特征和优点将变得更加容易理解, 在附图中:

[0030] 图1是本发明的对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法的示意图;

[0031] 图2是点目标在湍流补偿前后的关联成像结果对比图;

[0032] 图3是双缝目标在湍流补偿前后的关联成像结果对比图。

## 具体实施方式

[0033] 下面参照附图对本发明的示例性实施方式进行详细描述。对示例性实施方式的描述仅仅是出于示范目的, 而绝不是对本发明及其应用或用法的限制。

[0034] 大气湍流是一种重要的大气运动形式。大气湍流的存在会使大气中的热量、动量、

物质的传递、交换显著增强。因此,大气湍流的存在会对声波、光波以及其他电磁波在大气中的传播造成一定的干扰和损耗。

[0035] 当在大气环境中进行单光臂关联成像时,由于大气湍流的存在,会使信号光的波前发生一些起伏性的变化,从而影响到信号光强度的变化;然而,计算机存储的测量矩阵,即参考光路的信息不会受到大气湍流的影响。因此,大气湍流的存在会降低信号光路与参考光路的关联性,导致成像质量下降。

[0036] 鉴于此,本申请的发明人首先对大气湍流如何作用于单光臂关联成像进行了研究。研究发现,在单光臂关联成像系统中,物臂探测面上的光场分布可以表示成:

$$[0037] \quad E_t(x_t) = \int dx_s E_s(x) h_1(\xi, x) T(\xi) h_2(x_t, \xi) \quad \text{公式1}$$

[0038] 式中,  $E_s(x)$  表示照射物体所用的光源的场分布,  $h_1(\xi, x)$  为光源到物体的脉冲响应函数,  $h_2(x_t, \xi)$  为物体到桶探测器的脉冲响应函数,  $T(\xi)$  为物体的透过率函数,  $\xi$  为物面上任一点的坐标,  $x_t$  为桶探测器探测面上任一点的坐标。其中,  $h_1(\xi, x)$ 、 $h_2(x_t, \xi)$  分别为:

$$[0039] \quad h_1(\xi, x) = \frac{1}{\sqrt{j\lambda d_1}} \exp \left[ \frac{jk}{2d_1} (x - \xi)^2 + \psi_1(x, \xi) \right] \quad \text{公式2}$$

$$[0040] \quad h_2(x_t, \xi) = \frac{1}{j\lambda \sqrt{d_2}} \exp \left[ -\frac{jk}{d_2} (\xi - x_t)^2 + \psi_2(x_t, \xi) \right] \quad \text{公式3}$$

[0041] 式中,  $\psi_1(x_t, \xi)$  表示光源到物体之间的传输路径上大气湍流导致的随机相位扰动,  $\psi_2(x_t, \xi)$  表示物体到桶探测器之间的传输路径上大气湍流导致的随机相位扰动,  $d_1$  为光源到物体之间的传输路径的长度,  $d_2$  为物体到桶探测器之间的传输路径的长度。

[0042] 参考臂探测面的光场分布可以表示为:

$$[0043] \quad E_r(x_r) = \frac{1}{\sqrt{j\lambda d_1}} \int dx_s E_s(x) \exp \left[ \frac{jk}{2d_1} (x - x_r)^2 \right] \quad \text{公式4}$$

[0044] 物臂与参考臂的二阶关联函数为:

$$[0045] \quad \begin{aligned} G(x_t, x_r) &= \langle E_t(x_t) E_r(x_r) E_r^*(x_r) E_t^*(x_t) \rangle \\ &= \langle I_t(x_t) I_r(x_r) \rangle - \langle I_t(x_t) \rangle \langle I_r(x_r) \rangle \end{aligned} \quad \text{公式5}$$

[0046] 式中,  $\langle \rangle$  表示相关运算,  $I_t(x_t)$  表示物臂探测面上的光强分布,  $I_r(x_r)$  表示参考臂探测面上的光强分布。

[0047] 由大气湍流引起的相位扰动的统计平均可表示为:

[0048]

$$\exp \left[ \psi_i(\xi, \eta) + \psi_i(x', \xi') \right] = \exp \left\{ -\frac{1}{\rho_i} \left[ (x - x')^2 + (x - x')(\xi - \xi') + (\xi - \xi')^2 \right] \right\} \quad \text{公式6}$$

[0049] 式中,  $\rho_i = (0.54 C_n^{2(i)} k^2 d_i)^{-3/5}$ ,  $\rho_i$  表示在大气湍流介质中传输的球面波相干长度,  $i = 1, 2$ ,  $C_n^{2(i)}$  为折射率结构常数。

[0050] 基于公式1-6,经化简整理可得:

[0051]

$$G(x_r, x_r) = \frac{\sqrt{\pi c_0 I_0^2}}{\sqrt{\alpha \beta_2 (\alpha + 2\beta_1)}} \int d\xi |t(\xi)|^2 \exp\left[-\frac{2A^2}{\alpha + 2\beta_1} (\xi - x_r)^2\right] \exp\left[-\frac{B^2}{\beta_2} (\xi - x_r)^2\right] \quad \text{公式 7}$$

[0052] 式中,  $A = k/2d_1$ ,  $B = k/2d_2$ ,  $\alpha = r_e^{-2}/2$ ,  $\beta_i = \rho_i^2$ 。其中, 大气湍流对桶探测器探测面上的点扩散函数的影响可表示为  $h_g^b(x_1, \xi)$ ,  $h_g^b(x_1, \xi)$  为:

$$h_g^b(x_1, \xi) = \exp\left[-\frac{2A^2}{\alpha + 2\beta_1} (\xi - x_r)^2\right] \quad \text{公式 8}$$

[0054] 基于上述分析可知, 大气湍流对单光臂关联成像中物臂探测面上的光场分布存在影响, 进而降低了物臂与参考臂光场的相干性, 影响成像质量。为了削弱大气湍流对单光臂关联成像的影响, 本发明提供了一种对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法。

[0055] 下面结合附图以及具体实施例对本发明的技术方案进行详细说明。图1为本发明实施例中的对大气湍流进行补偿的单光臂关联成像方法的示意图。从图1可见, 该方法包括以下步骤:

[0056] 步骤S1、构建大气湍流随机相位屏  $\phi(m, n)$ 。

[0057] 其中, 步骤S1包括子步骤S11、S12。子步骤S11为: 基于功率谱反演法构建随机相位屏  $\phi(x, y)$ , 子步骤S12为: 对  $\phi(x, y)$  进行离散化、谐波补偿, 以构建随机相位屏  $\phi(m, n)$ 。

[0058] 具体地, 在子步骤S11中, 首先生成一复高斯随机数矩阵, 然后用符合Kolmogorov大气相位扰动的功率谱函数对其进行滤波, 再进行逆傅里叶变换。上述处理过程可表示为:

$$\phi(x, y) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \sqrt{F_\phi(k_x, k_y)} \exp[j(k_x x + k_y y)] \Delta k_x \Delta k_y \quad \text{公式 9}$$

[0060] 式中,  $\phi(x, y)$  为大气扰动相位,  $h(k_x, k_y)$  为频率域内均值为0、单位方差的复高斯随机变量,  $F_\phi(k_x, k_y)$  是符合Kolmogorov模型的功率谱函数,  $k_x$ 、 $k_y$  分别为x、y方向的波数分量。

[0061] 其中,  $F_\phi(k_x, k_y)$  具体为:

$$F_\phi(k_x, k_y) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi(k_x, k_y) \Delta k_x \Delta k_y \quad \text{公式 10}$$

[0063] 式中,  $\Phi(k_x, k_y)$  为符合Kolmogorov模型的折射率功率密度函数。 $\Phi(k_x, k_y)$  具体为:

$$\Phi(k, z) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3} \quad \text{公式 11}$$

[0065] 式中,  $z$  为光束传播方向,  $C_n^2$  为折射率结构常数,  $k$  为三维空间中的波数。基于公式10、11可得:

$$F_\phi(k_r) = 2\pi k^2 0.033 k_r^{-11/3} \int_z^{z+\Delta z} C_n^2(\xi) d\xi \quad \text{公式 12}$$

[0067] 式中,  $F_\phi(k_r)$  为与传播方向(即z轴方向)垂直的任意薄层切片上的大气湍流相位的功率谱函数,  $\Delta z$  为湍流层厚度,  $k_r = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ ,  $k_z = 0$ 。

[0068] 又有, 大气湍流的相干长度  $r_0$  可表示为:

$$[0069] \quad r_0 = 0.185 \left[ \frac{\lambda^2}{\int_x^{z+\Delta z} C_n^2(\xi) d\xi} \right]^{3/5} \quad \text{公式 13}$$

[0070] 基于公式12、13,对公式9进行化简、整理,即可得到化简后的 $\phi_{x,y}$ 的表达式。

[0071] 在子步骤S22中,对化简后的 $\phi(x,y)$ 进行离散化、谐波补偿,则可得到大气湍流的随机相位屏 $\phi(m,n)$ 。其中, $\phi(m,n)$ 具体为:

$$[0072] \quad \phi(m,n) = \sum_{m'=-N_x/2}^{(N_x/2)-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{(N_y/2)-1} h(m',n') f(m',n') \exp[j2\pi(\frac{m m'}{N_x} + \frac{n n'}{N_y})] \quad \text{公式 14}$$

[0073] 式中, $f(m',n') = \frac{2\pi}{\sqrt{G_x G_y}} \sqrt{0.00058} r_0^{-5/6} (f_x^2 + f_y^2)^{-11/12}$ , $h(m',n')$ 是均值为

0、单位方差的复高斯随机变量, $G(x)$ 、 $G(y)$ 分别为所述随机相位屏在x、y方向的大小, $r_0$ 为大气湍流的相干长度, $f_x$ 、 $f_y$ 为空间频率。

[0074] 步骤S2、根据 $\phi(m,n)$ 对空间调制器的测量矩阵A进行补偿,得到补偿后的测量矩阵A',具体计算公式为:

$$[0075] \quad A' = e^{\phi_{m,n}} * A \quad \text{公式 15}$$

[0076] 式中,\*为卷积运算。

[0077] 步骤S3、对补偿后的测量矩阵A'、桶探测器采集的信号B进行关联运算,具体计算公式为:

$$[0078] \quad G = \langle A'B \rangle - \langle A' \rangle \langle B \rangle \quad \text{公式 16}$$

[0079] 式中, $\langle \rangle$ 为相关运算,G为二阶关联函数。

[0080] 在本发明实施例中,通过对单光臂关联成像中的大气湍流进行补偿,提高了物臂与参考臂光场的相干性,从而显著提高了成像质量。为了详细说明本技术方案的技术效果,下面以点目标、双缝目标在湍流补偿前后的关联成像结果进行对比。图2是点目标在湍流补偿前后的关联成像结果对比图,图3是双缝目标在湍流补偿前后的关联成像结果对比图。从图2、图3可见,与传统的关联成像相比,本发明通过对大气湍流进行补偿,显著提高了成像质量。

[0081] 虽然参照示例性实施方式对本发明进行了描述,但是应当理解,本发明并不局限于文中详细描述和示出的具体实施方式,在不偏离权利要求书所限定的范围的情况下,本领域技术人员可以对所述示例性实施方式做出各种改变。

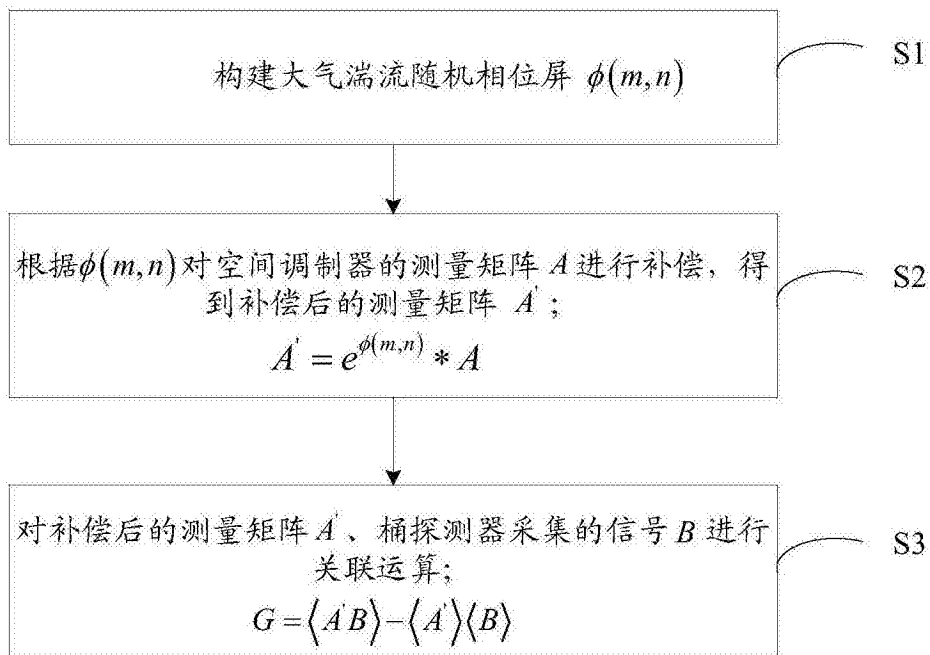


图1

关联 计算 次数	5000	10000	50000
计算 鬼成 像未 补偿			
计算 鬼成 像补 偿后			

图2



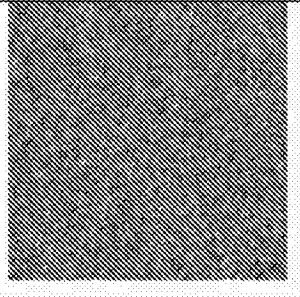
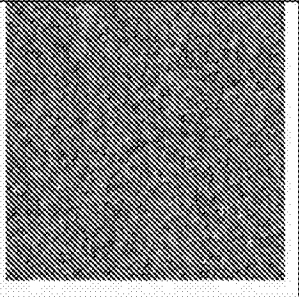
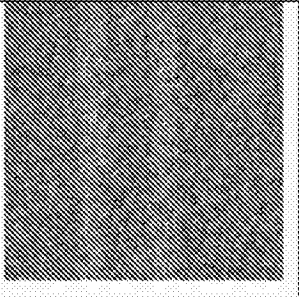
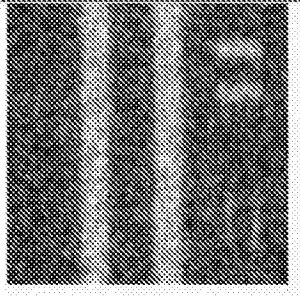
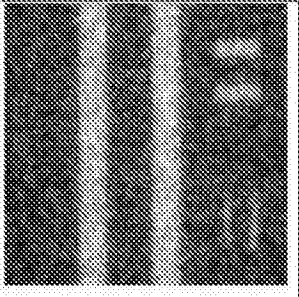
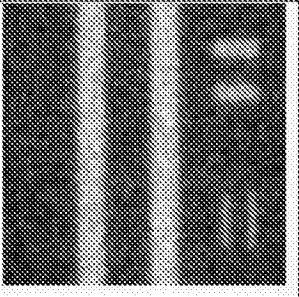
关联 计算 次数	5000	10000	20000
计算 鬼成 像未 补偿			
计算 鬼成 像补 偿后			

图3