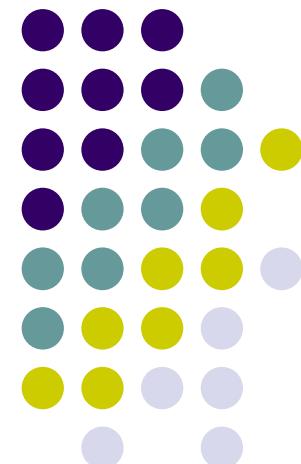


数字图像处理

第五讲
图像复原





提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波

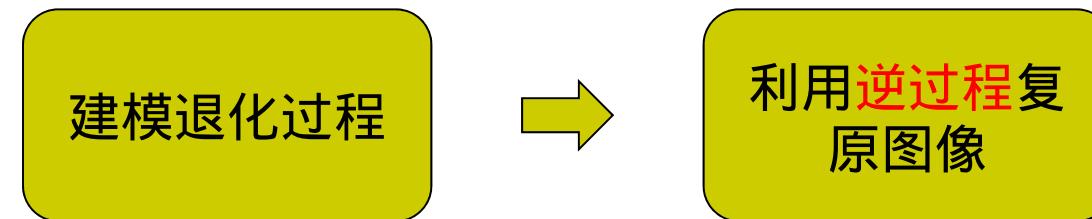




引言

● 图像复原

- 以预先制定的目标改善图像，客观
- 对模糊图像去模糊
- 利用退化现象的先验知识来恢复图像



● 图像增强

- 由人的主观感受来评判，主观
- 对比度拉伸

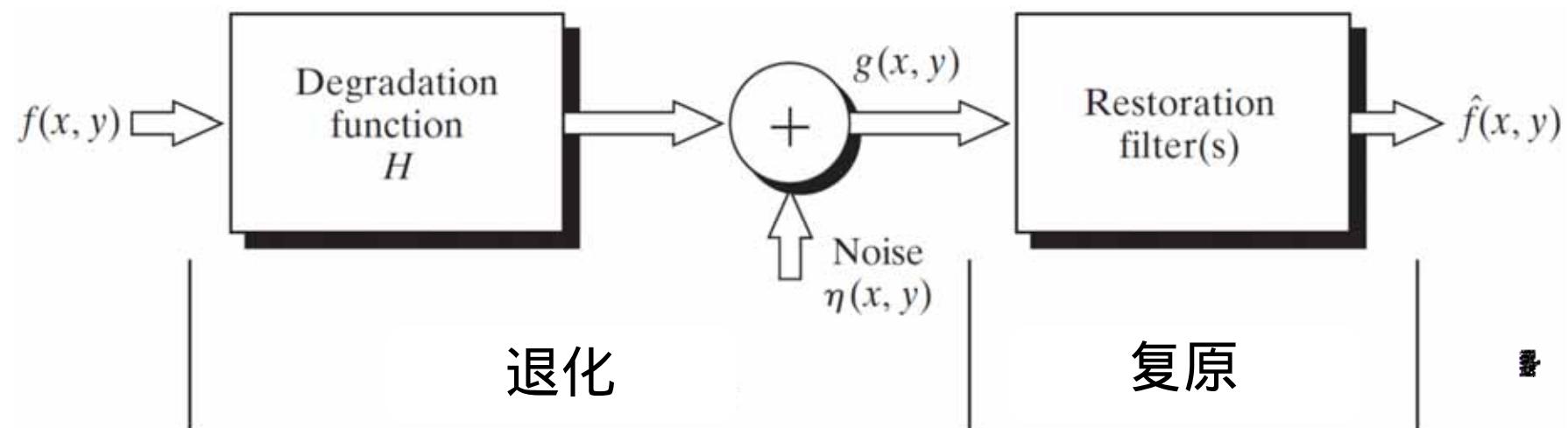




图像退化/复原建模

- 输入 $f(x, y)$
- 退化函数 H
- 加性噪声 $\eta(x, y)$
- 复原滤波器
- 输出 $\hat{f}(x, y)$

目标
 $f(x, y) \approx \hat{f}(x, y)$





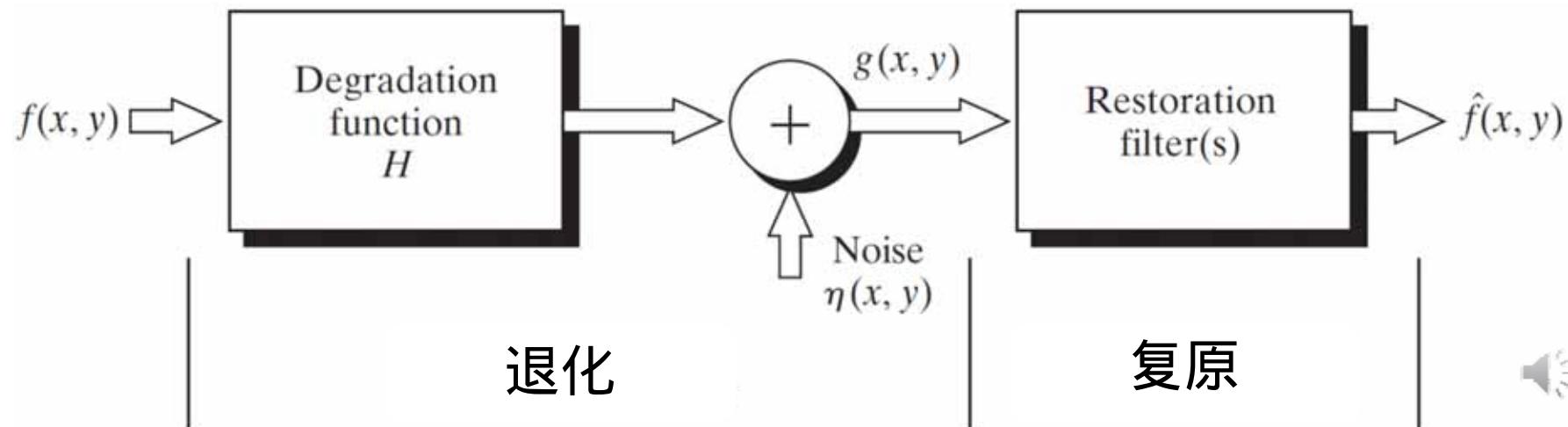
图像退化/复原建模

- H 为线性、位置不变

$$g(x, y) = h(x, y) \star f(x, y) + \eta(x, y)$$

- $h(x, y)$ 是退化函数的空间表示
- 频率域表示

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v)$$





提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波





噪声

- 当 $H = I$ 时

$$G(u, v) = F(u, v) + N(u, v)$$

- 噪声来源

- 图像获取：环境条件、传感器质量
- 图像传输：无线信号被干扰

- 刻画噪声

- 空间域和频率域特点
 - 白噪声：傅里叶变换后为常数
- 噪声是否和图像相关





噪声类型

- 噪声的空间表示
 - 概率密度函数（ PDF ）
- 高斯噪声
- 瑞利噪声
- 爱尔兰（伽马）噪声
- 指数噪声
- 均匀噪声
- 脉冲（椒盐）噪声



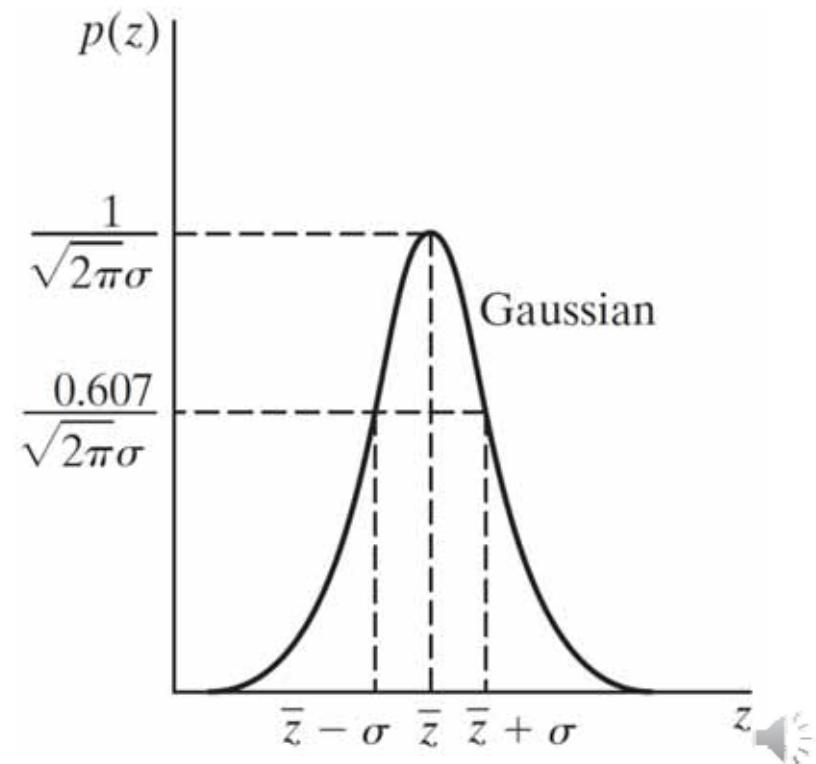


高斯噪声

● 概率密度函数

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(z-\bar{z})^2/2\sigma^2}$$

- \bar{z} 为均值、 σ 为标准差
- σ^2 为方差
- $[\bar{z} - \sigma, \bar{z} + \sigma]$ 占70%
- $[\bar{z} - 2\sigma, \bar{z} + 2\sigma]$ 占90%





瑞利噪声

- 概率密度函数

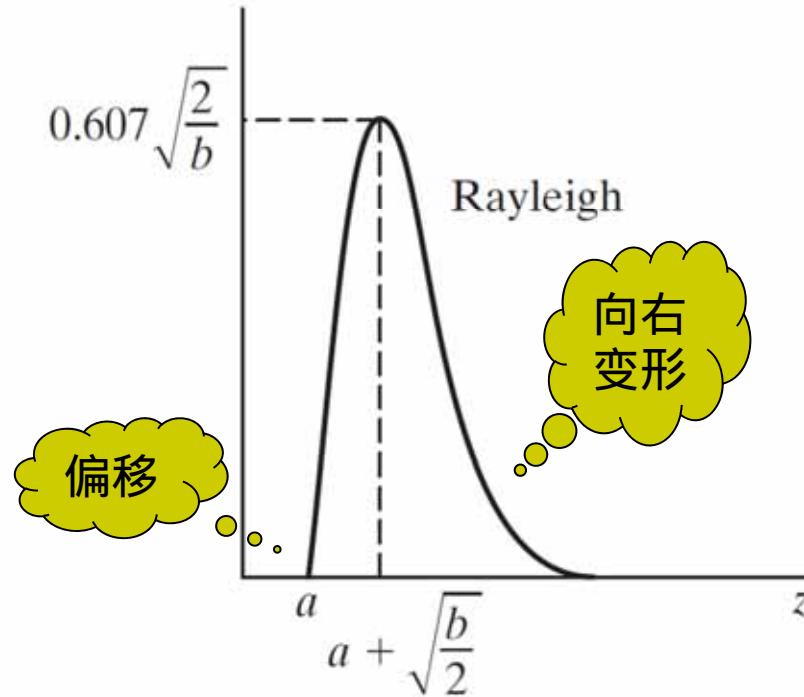
$$p(z) = \begin{cases} \frac{2}{b}(z - a)e^{-(z-a)^2/b} & \text{for } z \geq a \\ 0 & \text{for } z < a \end{cases}$$

- 均值

$$\bar{z} = a + \sqrt{\pi b / 4}$$

- 方差

$$\sigma^2 = \frac{b(4 - \pi)}{4}$$





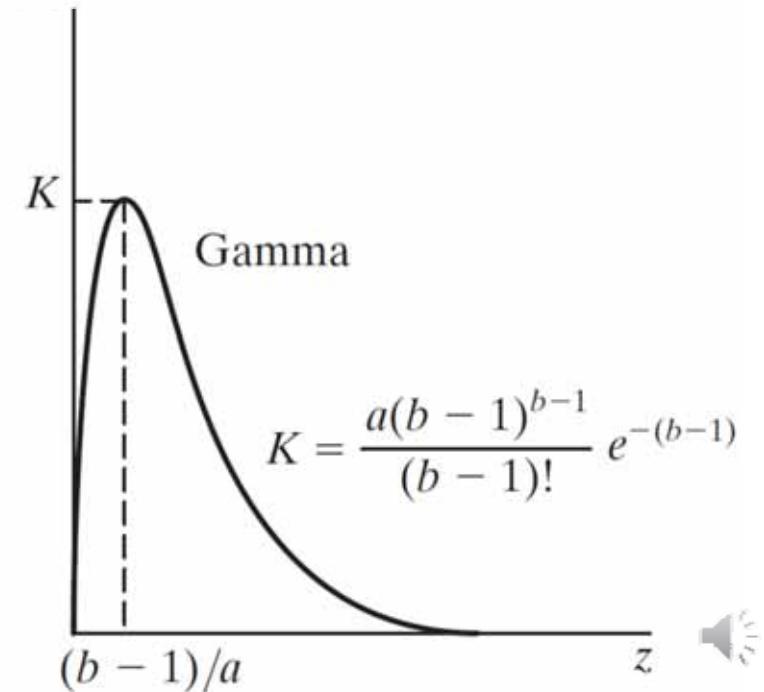
爱尔兰（伽马）噪声

● 概率密度函数

$$p(z) = \begin{cases} \frac{a^b z^{b-1}}{(b-1)!} e^{-az} & \text{for } z \geq 0 \\ 0 & \text{for } z < 0 \end{cases}$$

- $a > 0$, b 正整数
- 均值和方差

$$\bar{z} = \frac{b}{a} \quad \sigma^2 = \frac{b}{a^2}$$





指数噪声

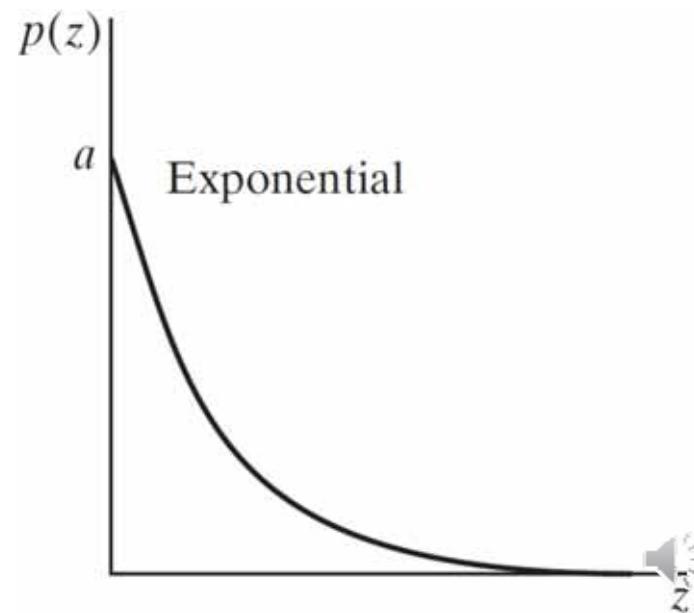
- 概率密度函数

$$p(z) = \begin{cases} ae^{-az} & \text{for } z \geq 0 \\ 0 & \text{for } z < 0 \end{cases}$$

- $b = 1$ 时的爱尔兰噪声

- 均值和方差

$$\bar{z} = \frac{1}{a} \quad \sigma^2 = \frac{1}{a^2}$$





均匀噪声

- 概率密度函数

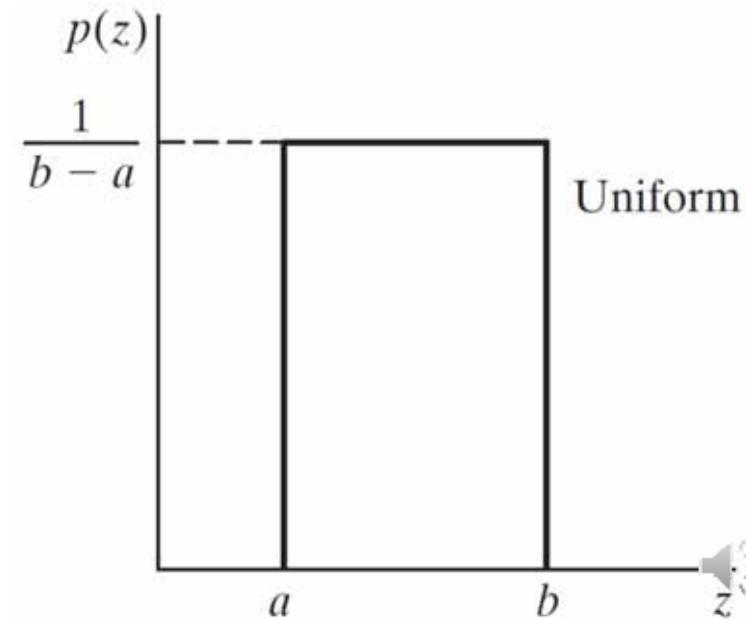
$$p(z) = \begin{cases} \frac{1}{b - a} & \text{if } a \leq z \leq b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 均值

$$\bar{z} = \frac{a + b}{2}$$

- 方差

$$\sigma^2 = \frac{(b - a)^2}{12}$$



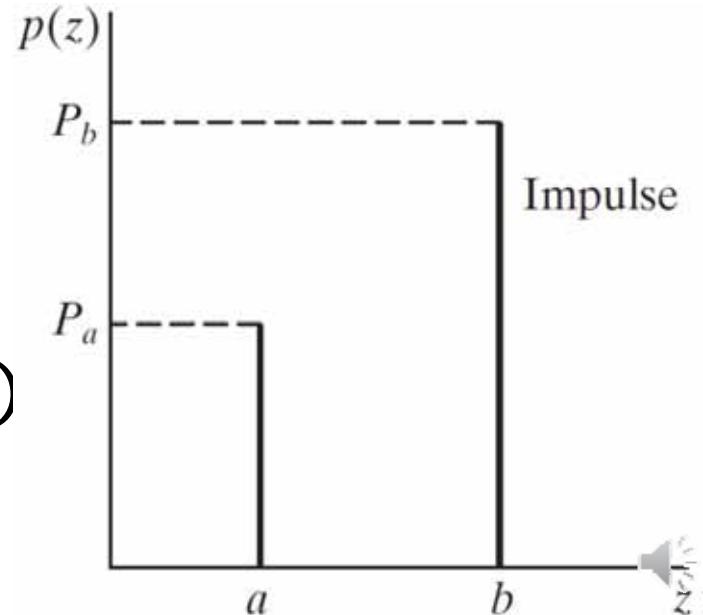


脉冲（椒盐）噪声

● 概率密度函数

$$p(z) = \begin{cases} P_a & \text{for } z = a \\ P_b & \text{for } z = b \\ 1 - P_a - P_b & \text{for } z = 0 \end{cases}$$

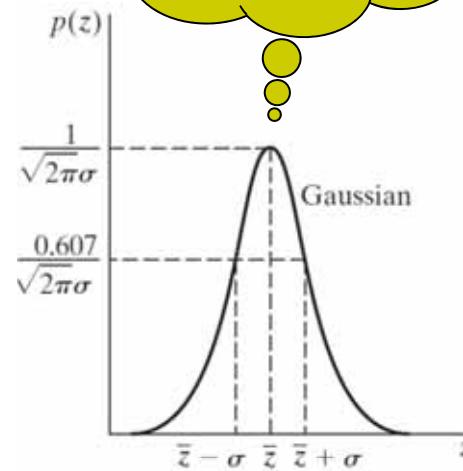
- P_a 或 P_b 为0，单极脉冲
- 都不为0，双极脉冲
- 可正可负
 - 盐（白色）、胡椒（黑色）



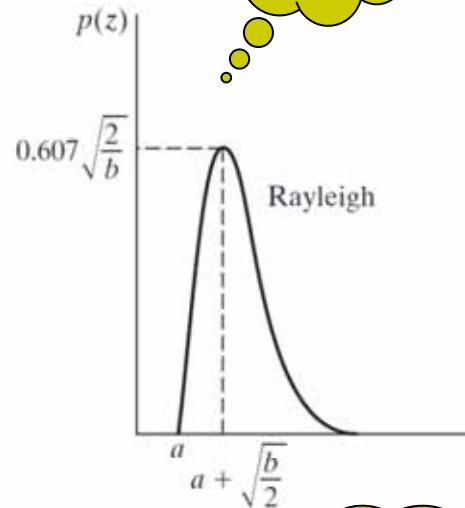


比较

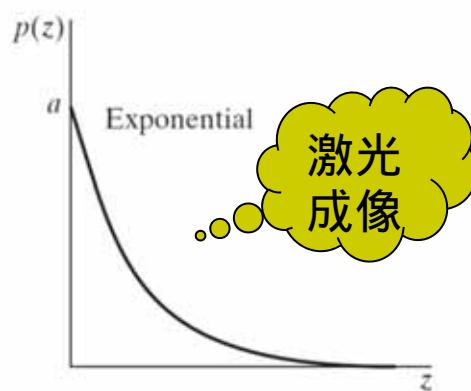
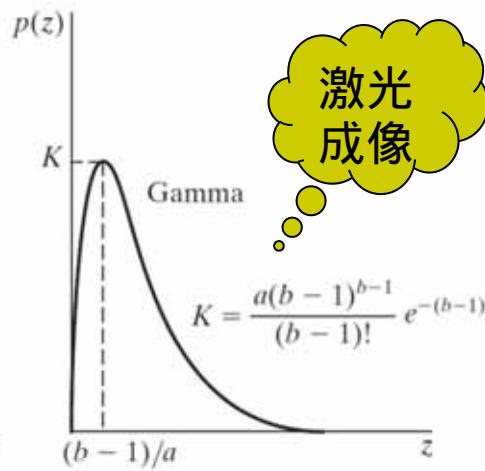
电路噪声
传感器噪声



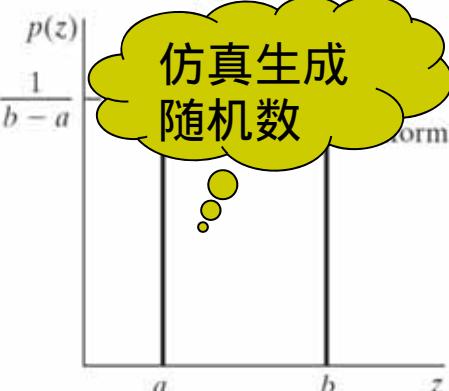
范围
成像



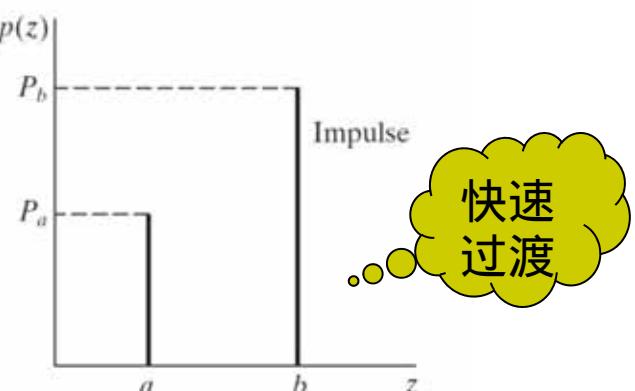
激光
成像



仿真生成
随机数



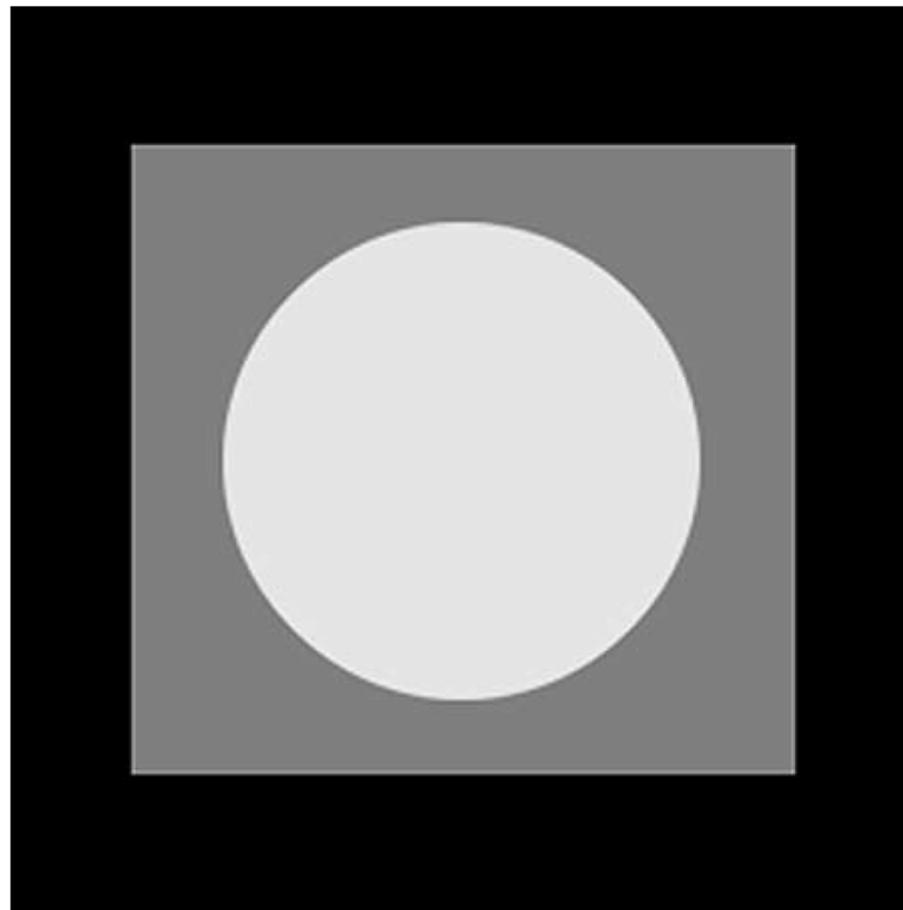
快速
过渡





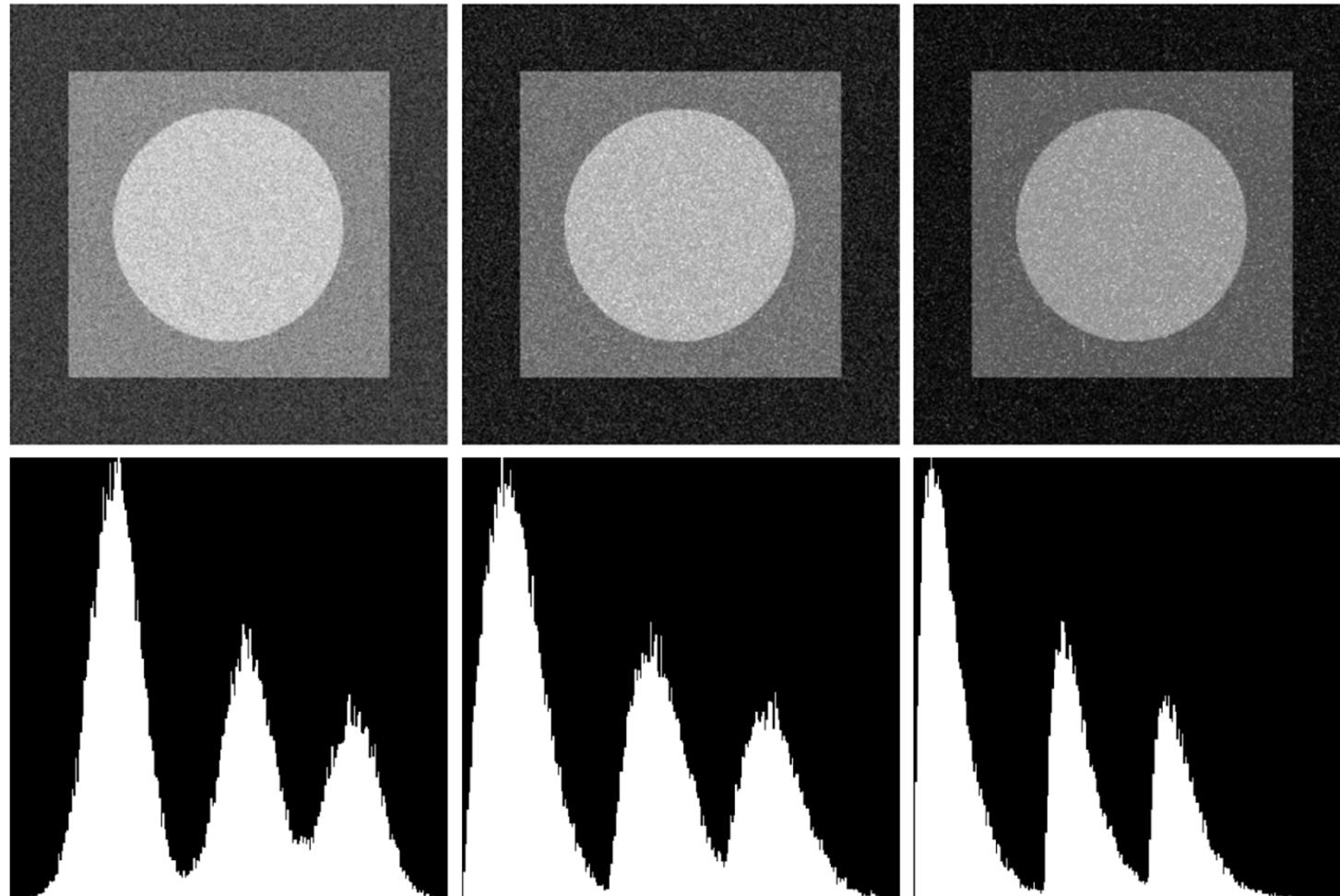
举例

- 原图





举例——加噪声



高斯

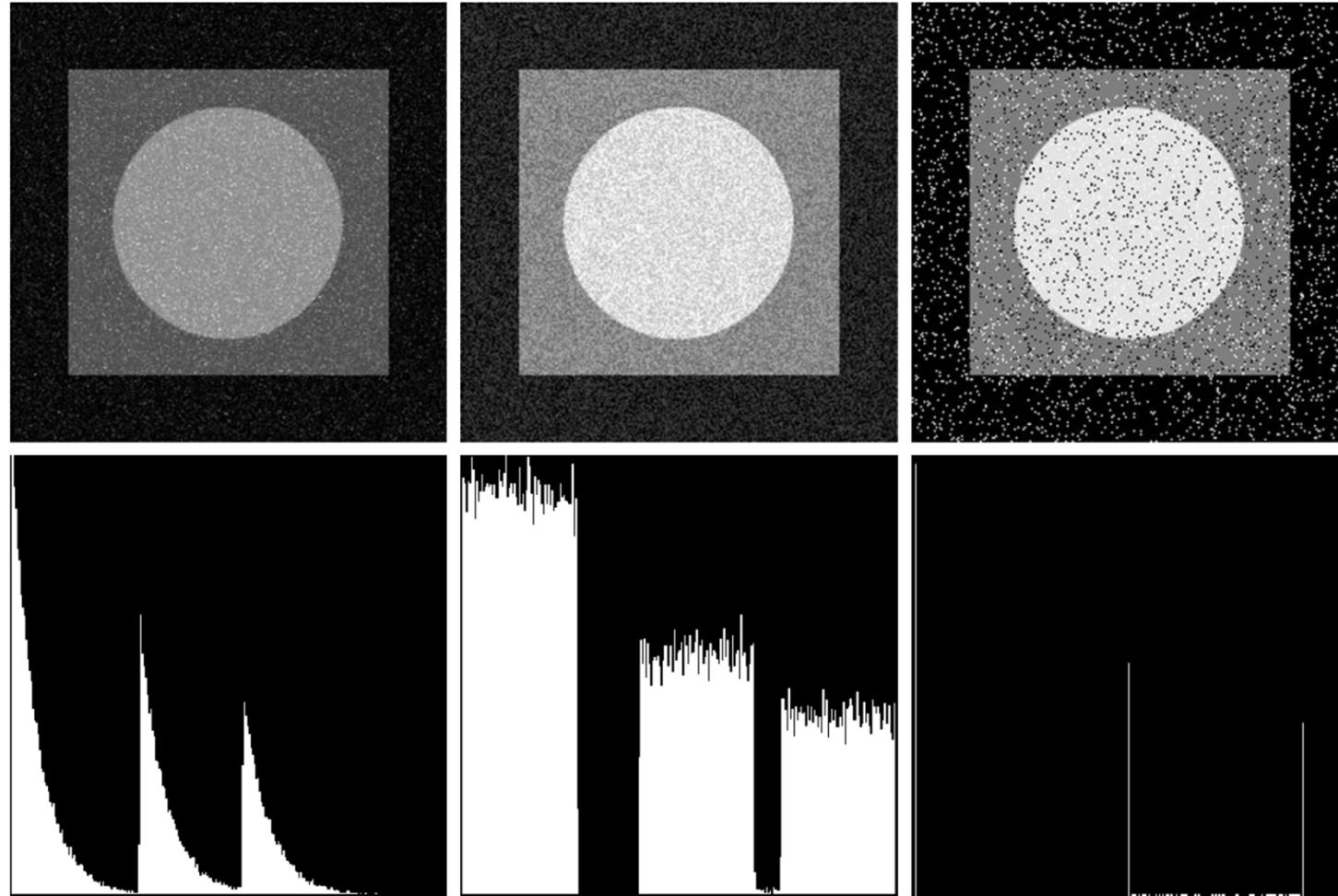
瑞利

爱尔兰





举例——加噪声



指数

均匀

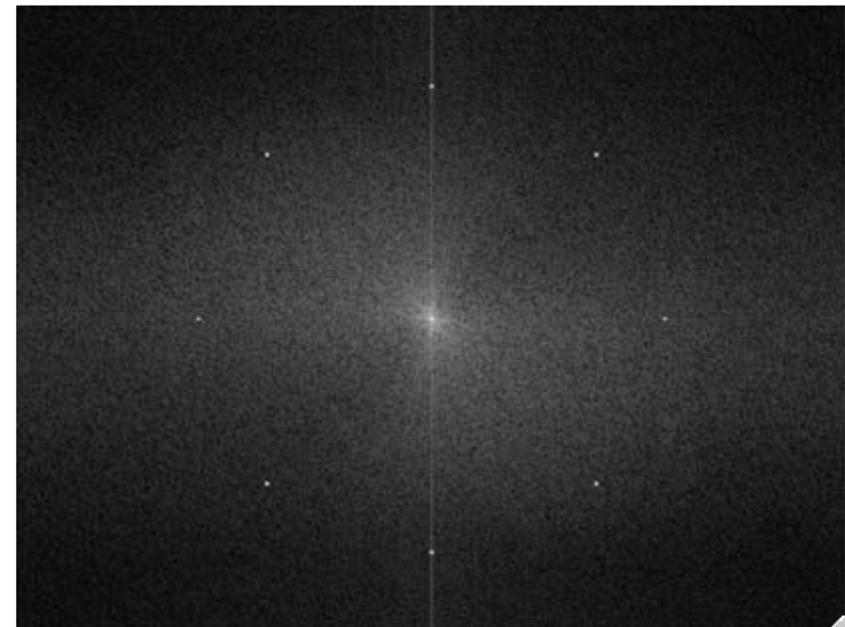
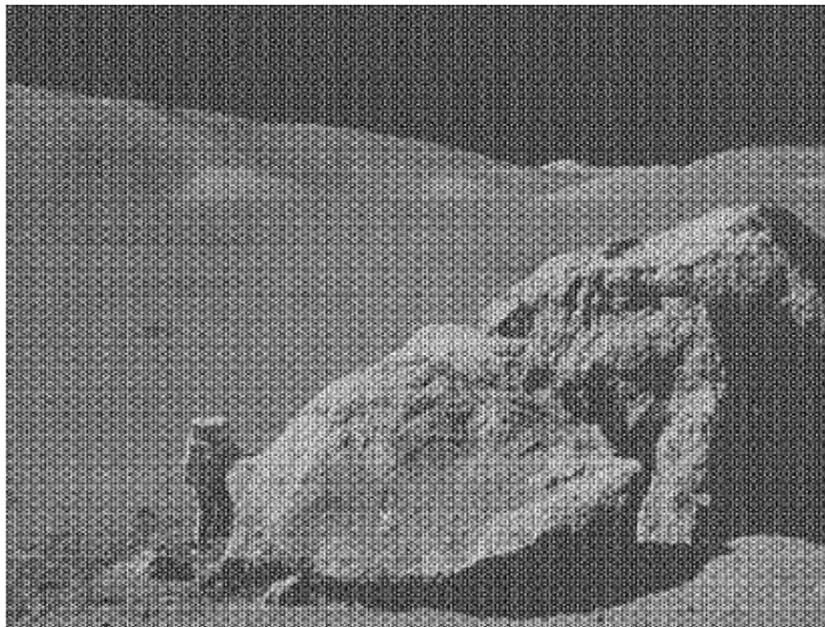
脉冲





周期噪声

- 通常由电力或机电干扰产生
- 噪声与空间位置有关
- 可以通过频域率滤波复原





噪声参数估计

- 周期噪声
 - 通过检查傅里叶谱、图像本身（简单情况）
- 一般噪声的PDF
 - 查看传感器说明书
 - 主动成像去估计参数，如拍摄纯色的物体
 - 从图像的局部稳定区域来估计噪声

$$\bar{z} = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p_S(z_i) \quad \sigma^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - \bar{z})^2 p_S(z_i)$$

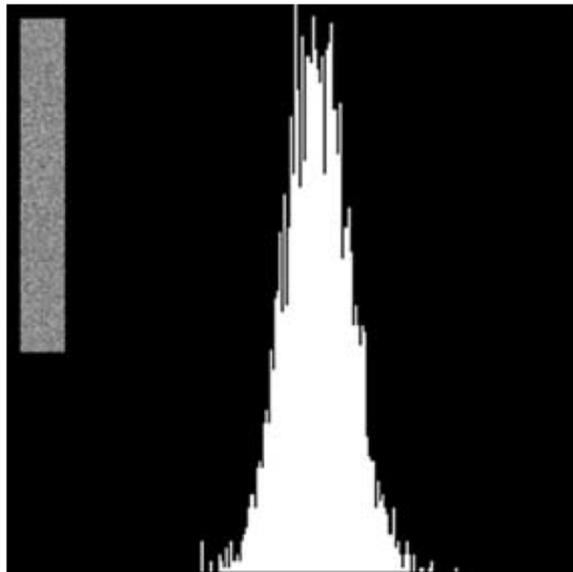
- $p_S(\cdot)$ 表示区域S内的概率估计



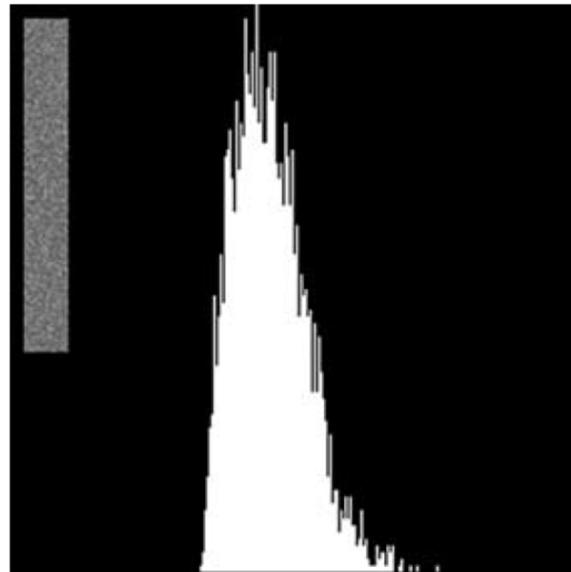


噪声参数估计

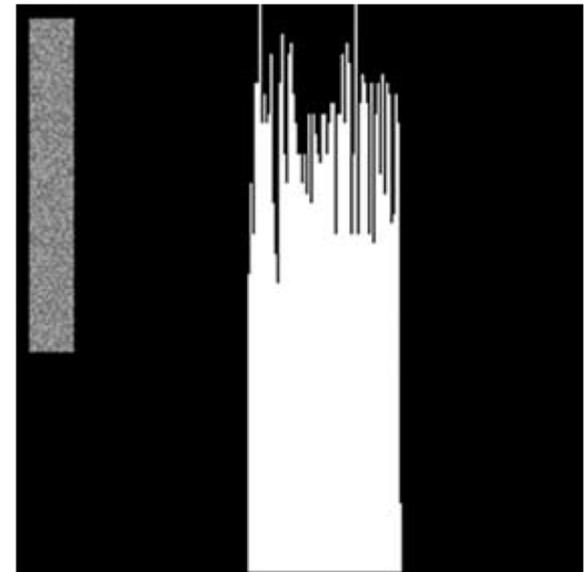
- 1 根据形状识别PDF的类型
- 2(a) 根据均值和方差来计算具体参数
- 2(b) 脉冲噪声则直接估计概率



高斯



瑞利



均匀





提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波





仅有噪声的图像复原

- 仅有噪声的图像退化
 - 空间域 $g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y)$
 - 频率域 $G(u, v) = F(u, v) + N(u, v)$
- 周期噪声
 - 从 $G(u, v)$ 估计 $N(u, v)$ ，直接减去噪声
- 一般加性噪声
 - 空间滤波





均值滤波器

- 算数均值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t)$$

- S_{xy} 表示以 (x, y) 为中心的区域
- 区域大小为 $m \times n$
- 空间滤波器，系数为 $1/mn$
- 平滑图像中的局部变化





均值滤波器

- 几何均值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \left[\prod_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t) \right]^{\frac{1}{mn}}$$

- S_{xy} 表示以 (x, y) 为中心的区域
- 区域大小为 $m \times n$
- 丢失的细节少



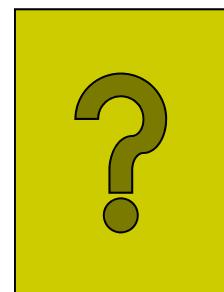


均值滤波器

- 谐波均值滤波器 (Harmonic mean)

$$\hat{f}(x, y) = \frac{mn}{\sum_{(s, t) \in S_{xy}} \frac{1}{g(s, t)}}$$

- S_{xy} 表示以 (x, y) 为中心的区域
- 区域大小为 $m \times n$
- 适用于盐粒噪声，不适用于胡椒噪声





均值滤波器

- 逆谐波均值滤波器 (Contraharmonic mean)

$$\hat{f}(x, y) = \frac{\sum_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t)^{Q+1}}{\sum_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t)^Q}$$

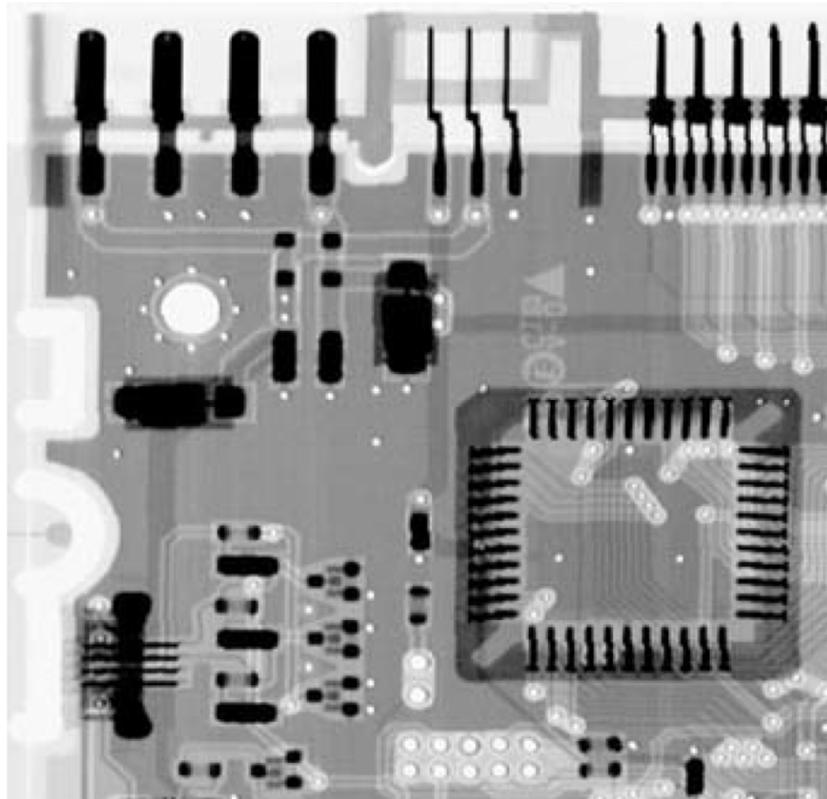
- Q 表示阶数
- $Q > 0$, 消除胡椒噪声
- $Q = 0$, 算数均值滤波器
- $Q < 0$, 消除盐粒噪声
- $Q = -1$, 谐波均值滤波器





举例

- 高斯噪声



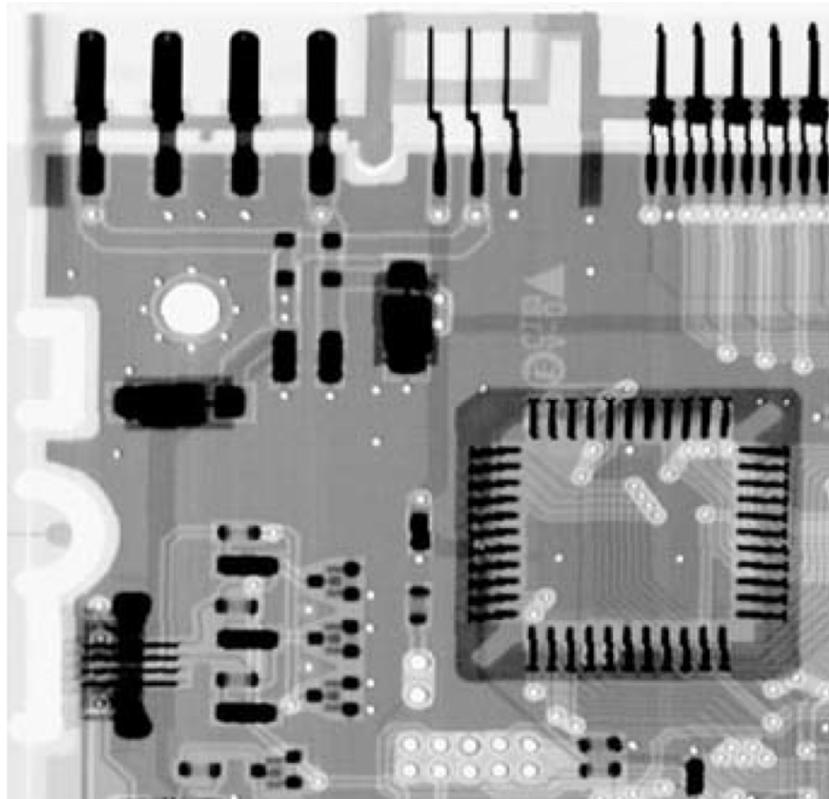
原图



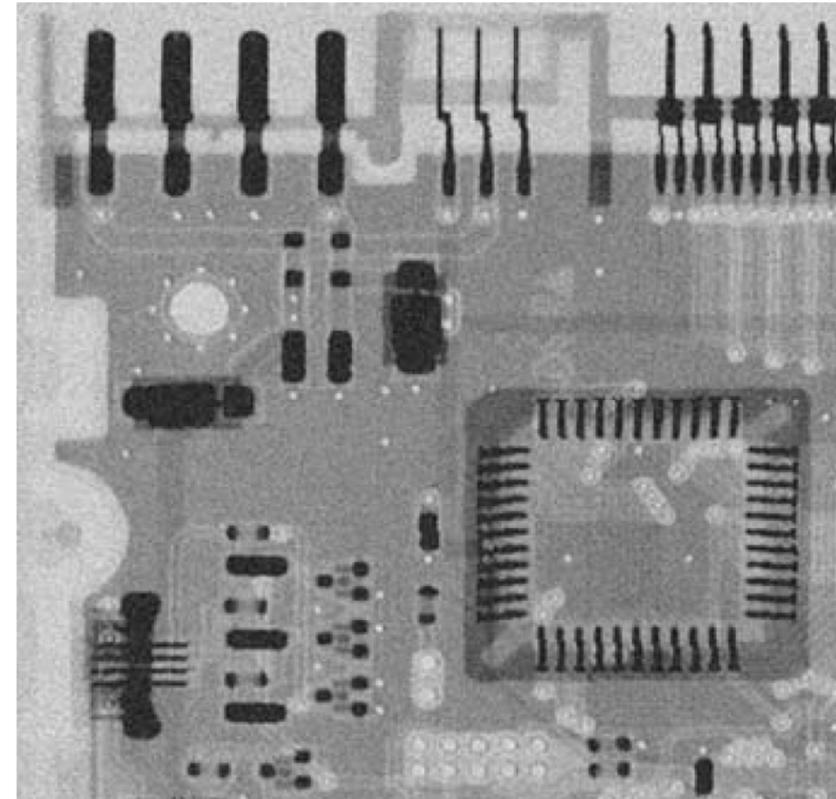


举例

- 高斯噪声



原图

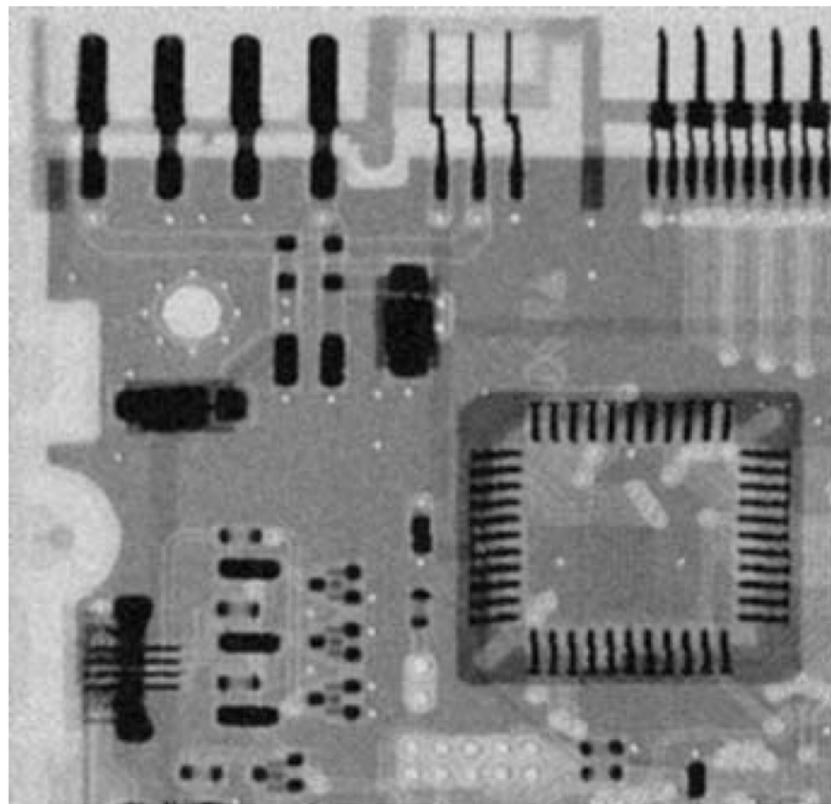


高斯噪声污染

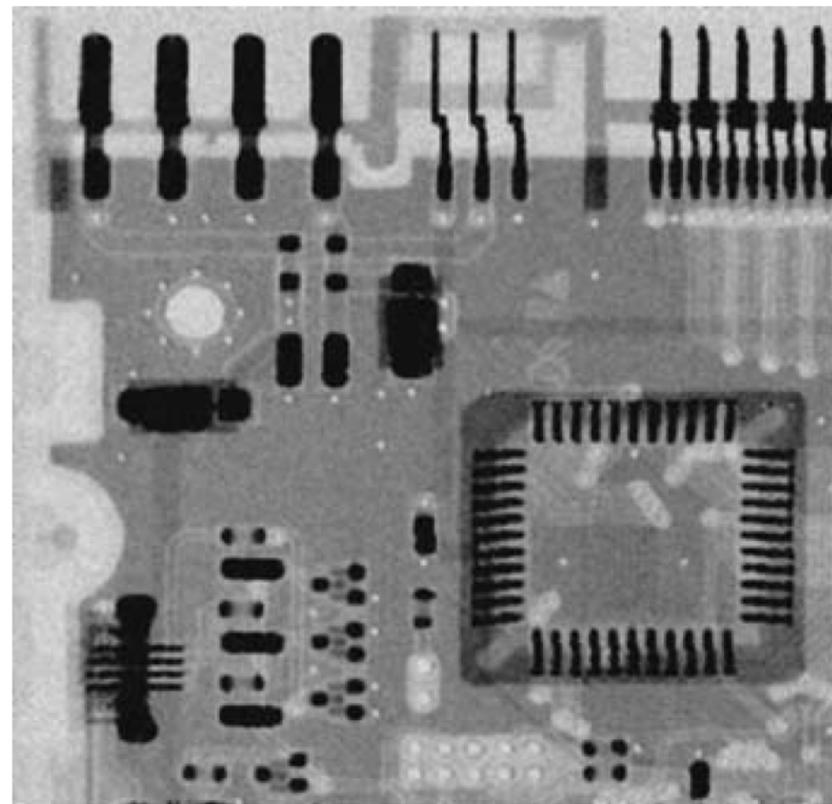


举例

- 高斯噪声



3×3 算数均值滤波器



3×3 几何均值滤波器

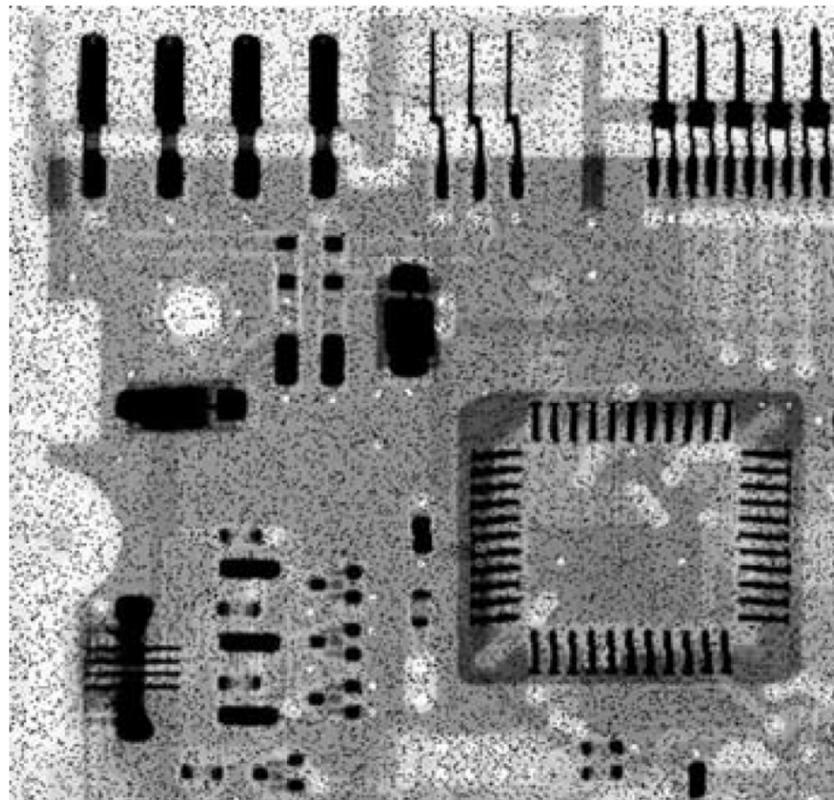
更清晰



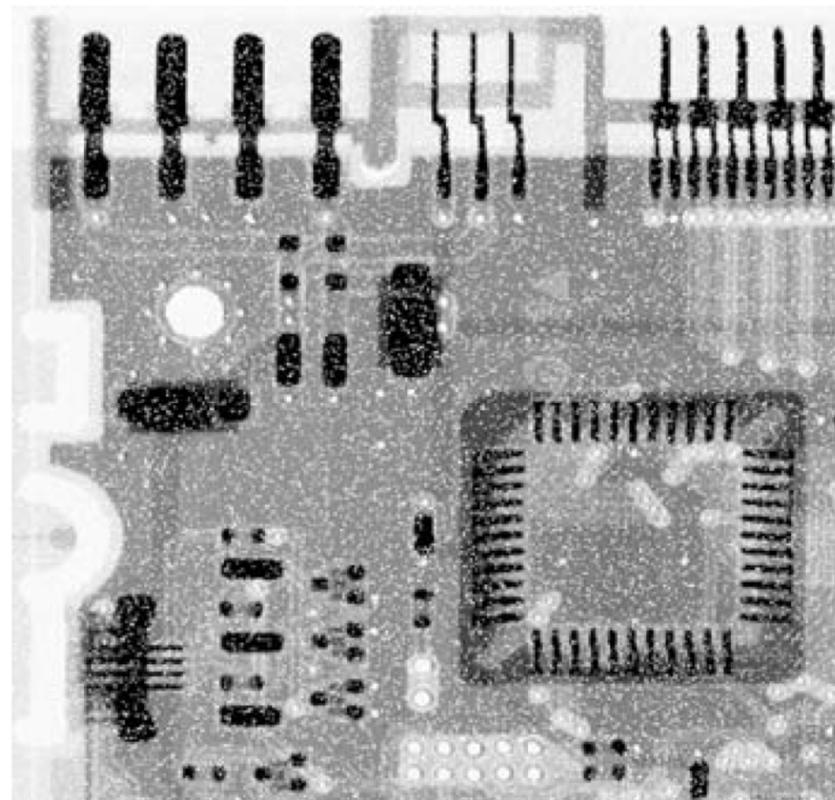


举例

● 椒盐噪声



概率为0.1的胡椒噪声

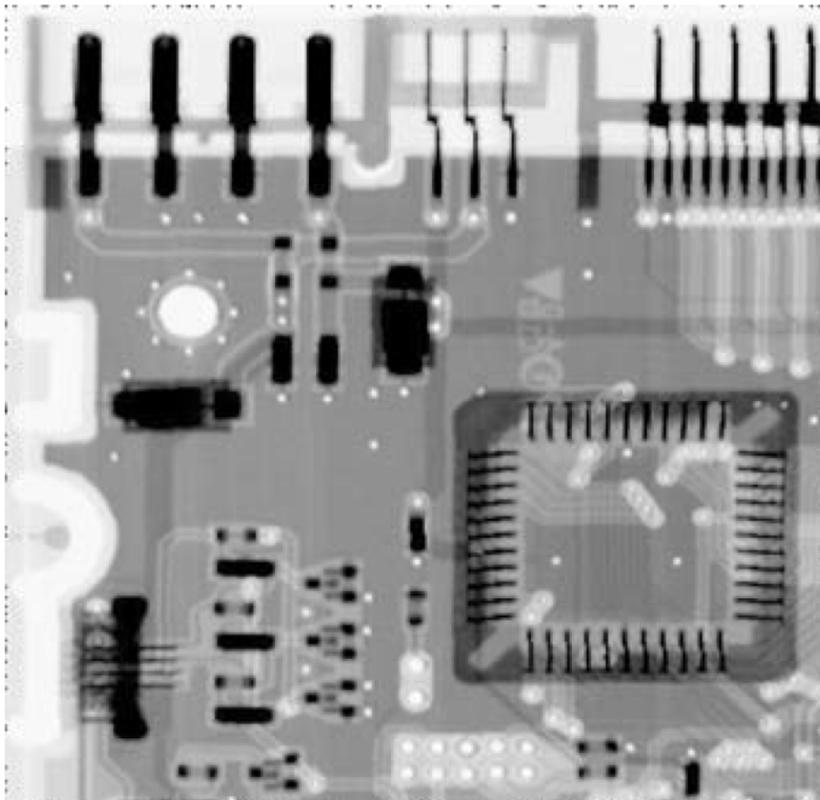


概率为0.1的盐粒噪声

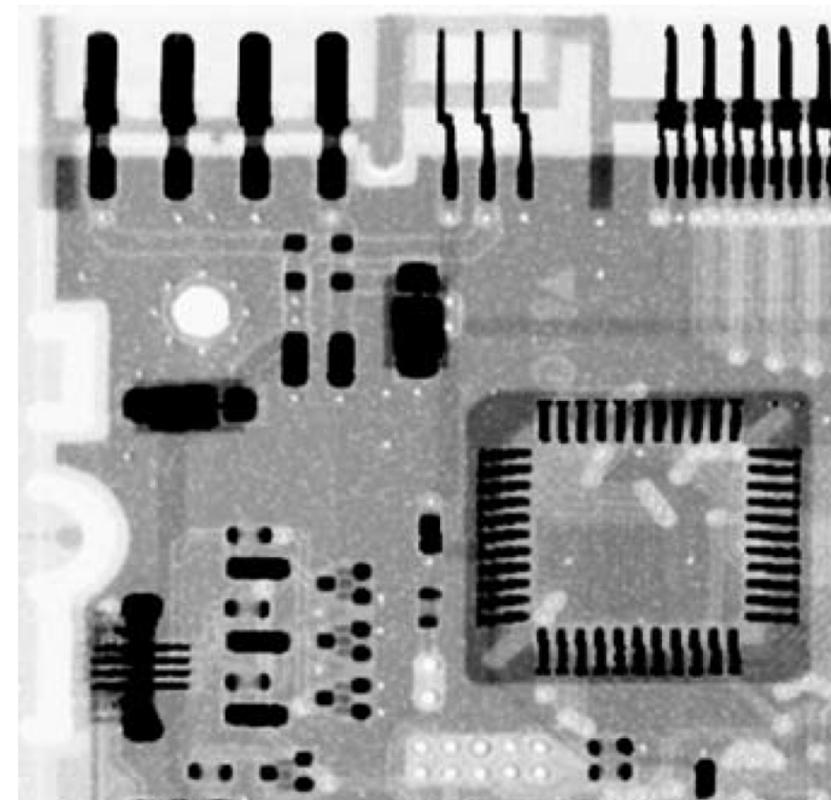


举例

● 椒盐噪声



$Q = 1.5$ 的逆谐波均值滤波器

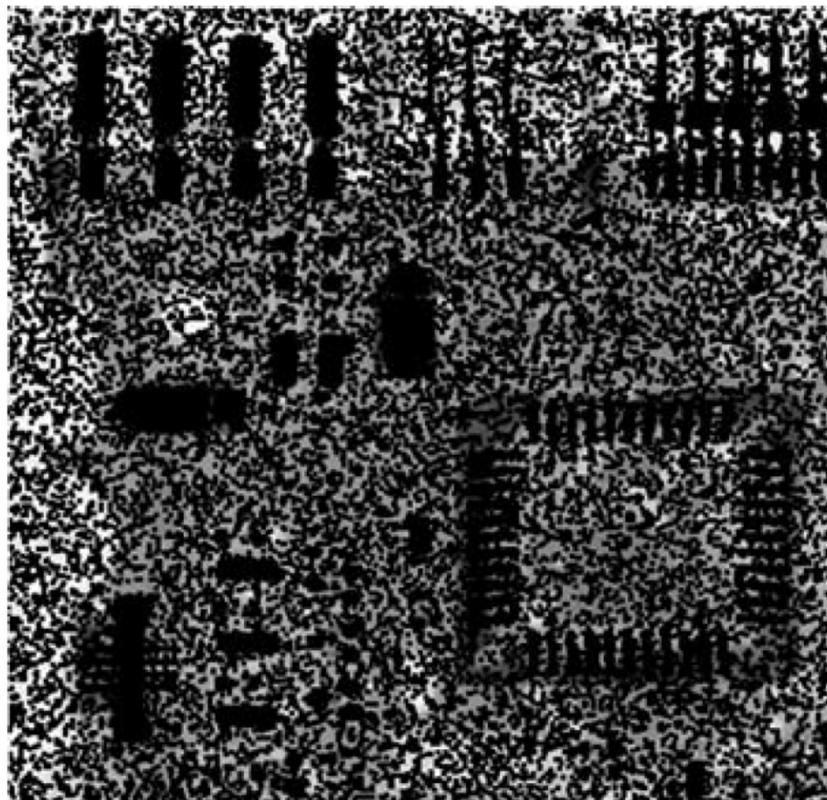


$Q = -1.5$ 的逆谐波均值滤波器

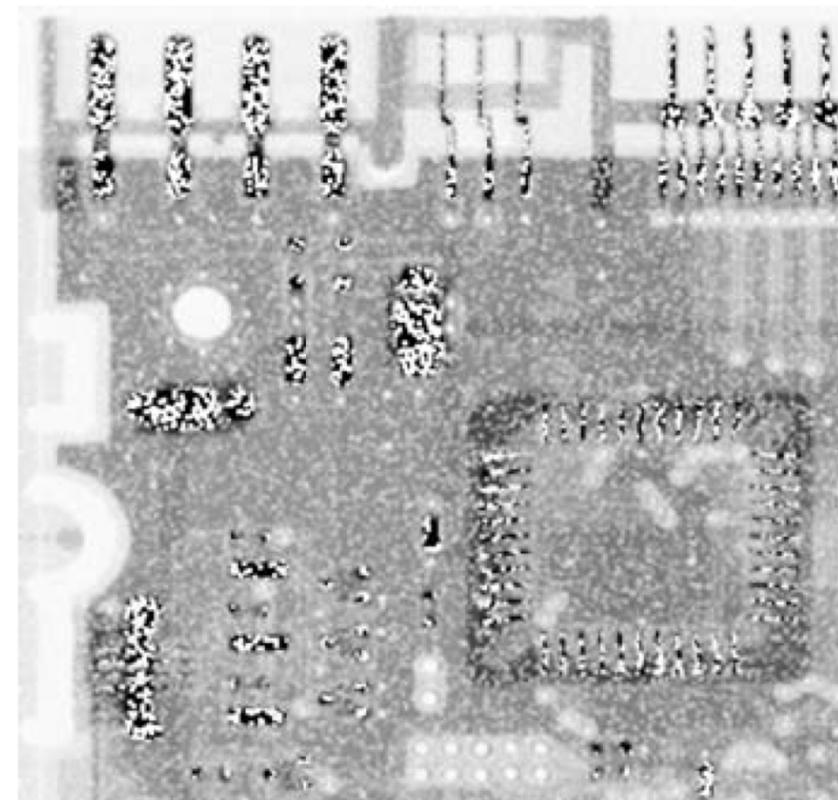


举例

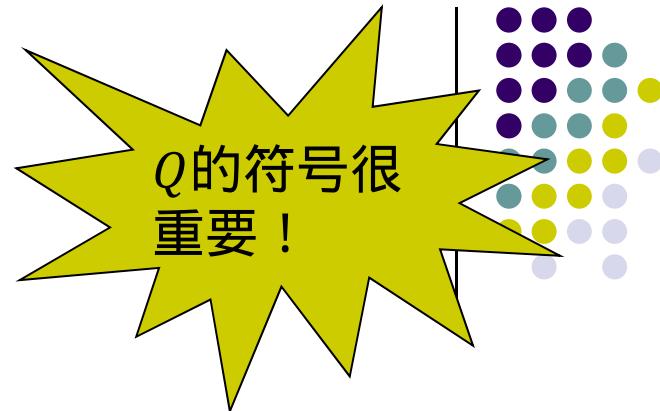
- 椒盐噪声



$Q = -1.5$ 的逆谐波均值滤波器



$Q = 1.5$ 的逆谐波均值滤波器





统计排序滤波器

- 非线性滤波器
 - 对滤波器覆盖的像素排序
 - 用排序决定的值替代中心像素
- 中值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \underset{(s, t) \in S_{xy}}{\text{median}} \{g(s, t)\}$$

- (x, y) 处的像素值也参与计算
- 良好的去噪能力，并且模糊少
- 尤其适用于单极或双极的脉冲信号





统计排序滤波器

- 最大值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \max_{(s, t) \in S_{xy}} \{g(s, t)\}$$

- 寻找图像中的亮点
- 降低胡椒噪声
- 最小值滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \min_{(s, t) \in S_{xy}} \{g(s, t)\}$$

- 寻找图像中的暗点
- 降低盐粒噪声





统计排序滤波器

- 中点滤波器

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{2} \left[\max_{(s, t) \in S_{xy}} \{g(s, t)\} + \min_{(s, t) \in S_{xy}} \{g(s, t)\} \right]$$

- 最大值和最小值的中点
- 结合了统计排序和求平均
- 适用于随机噪声
 - 高斯噪声、均匀噪声





统计排序滤波器

- α 截断的均值滤波
 - 去掉 S_{xy} 中灰度最低的 $d/2$ 个像素
 - 去掉 S_{xy} 中灰度最高的 $d/2$ 个像素

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{mn - d} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} g_r(s, t)$$

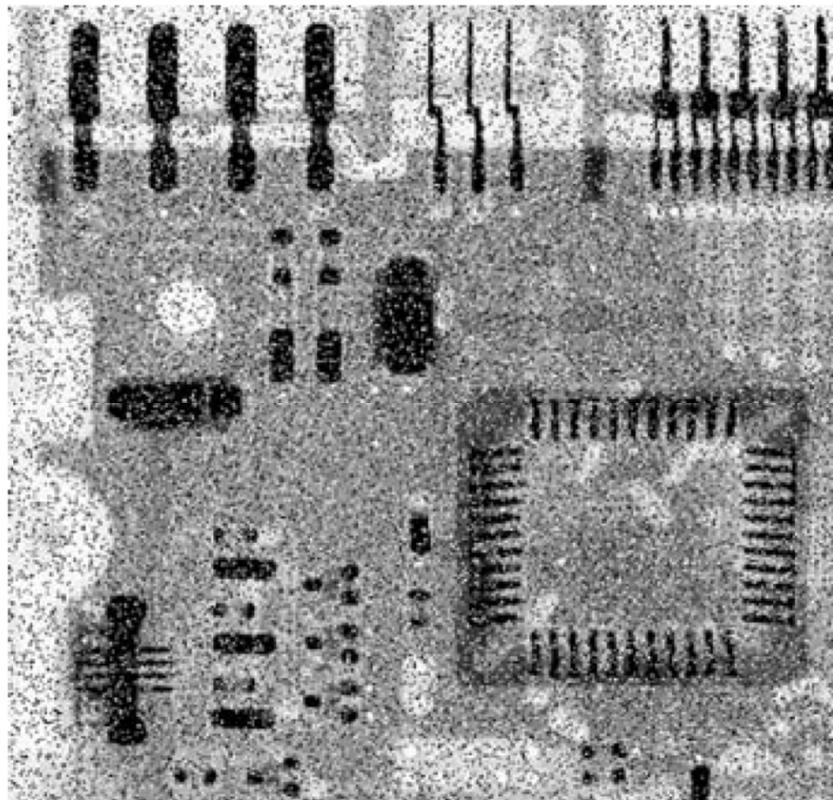
- 适用于存在多种噪声的情况
 - 高斯噪声、椒盐噪声混合
- $d = 0$ ，算数均值滤波器
- $d = mn - 1$ ，中值滤波器





举例

● 椒盐噪声



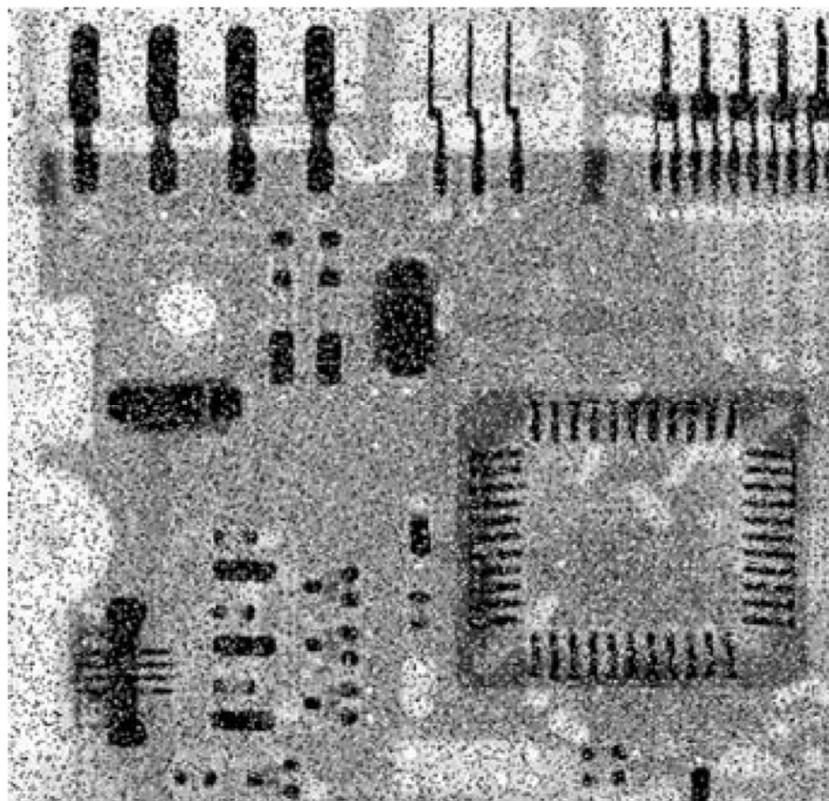
$P_a = P_b = 0.1$ 的椒盐噪声污染



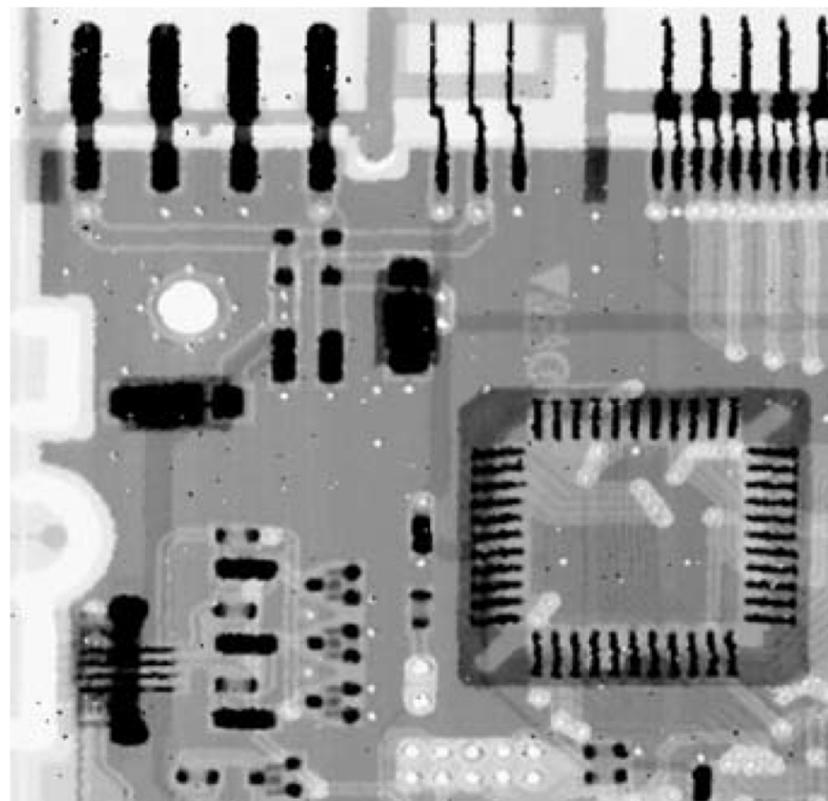


举例

● 椒盐噪声



$P_a = P_b = 0.1$ 的椒盐噪声污染

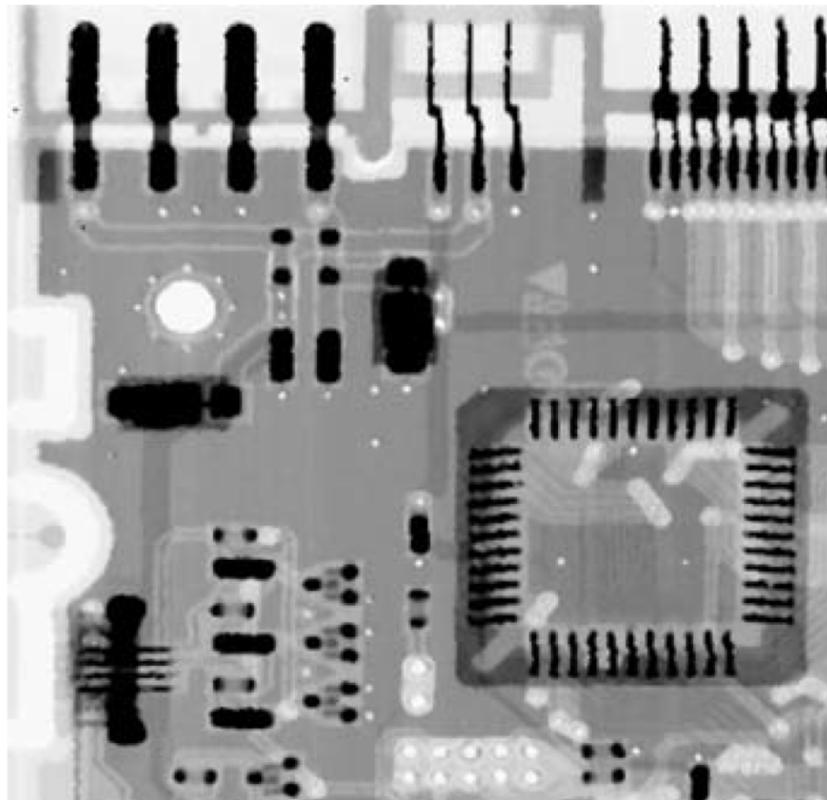


3×3 的中值滤波器（第一次）

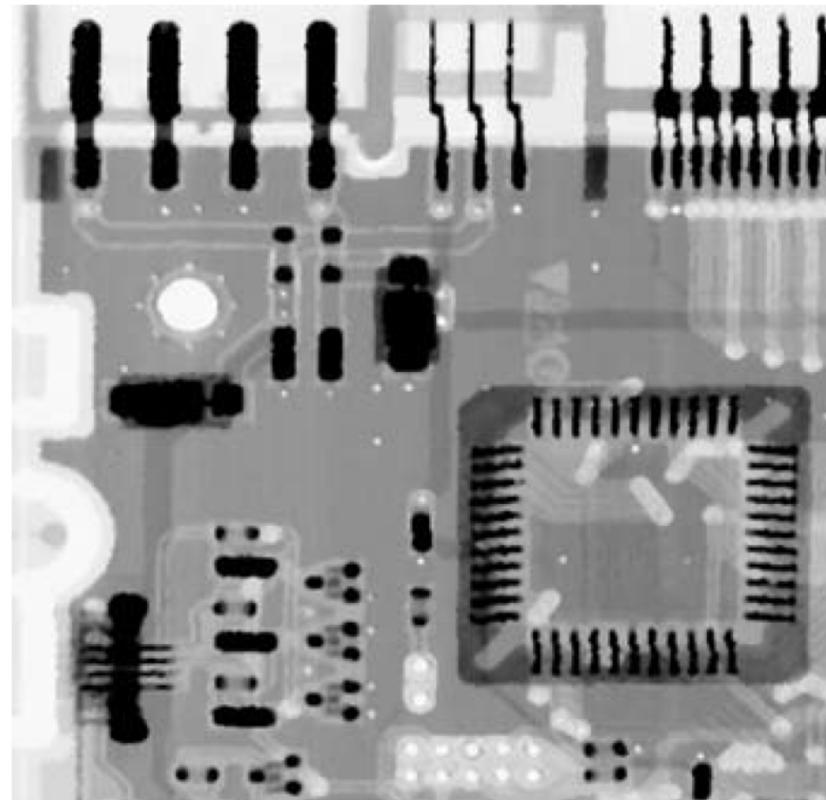


举例

- 椒盐噪声



3×3 的中值滤波器（第二次）



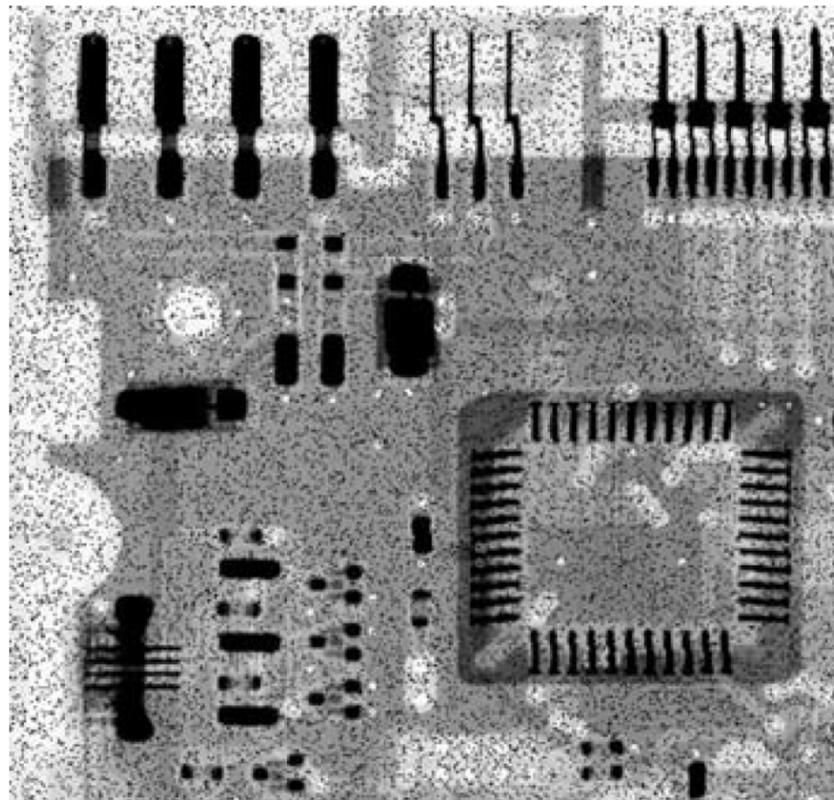
3×3 的中值滤波器（第三次）



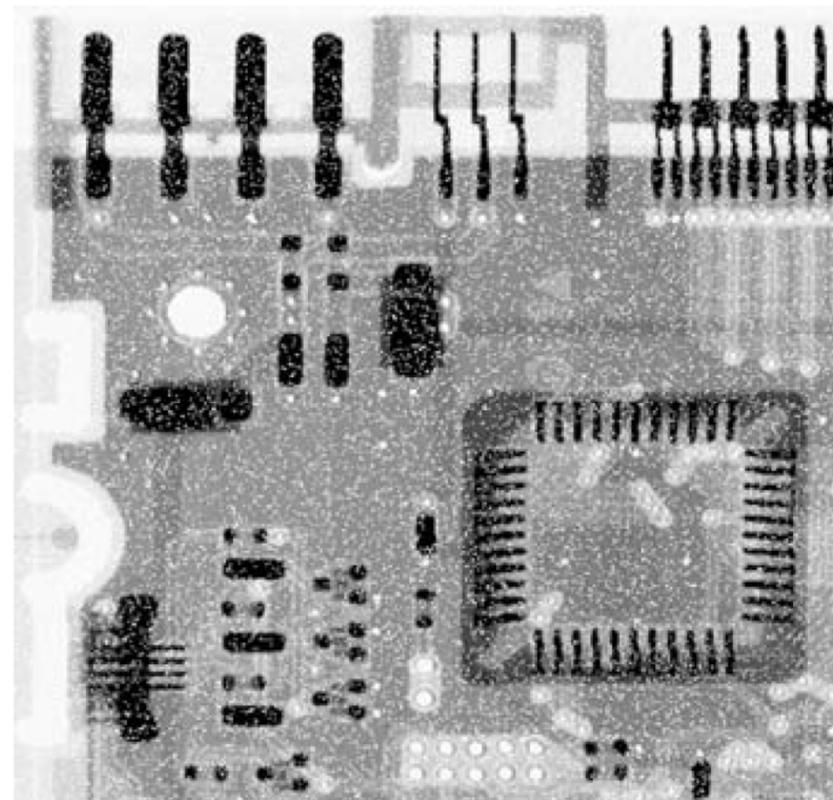


举例

● 椒盐噪声



概率为0.1的胡椒噪声



概率为0.1的盐粒噪声

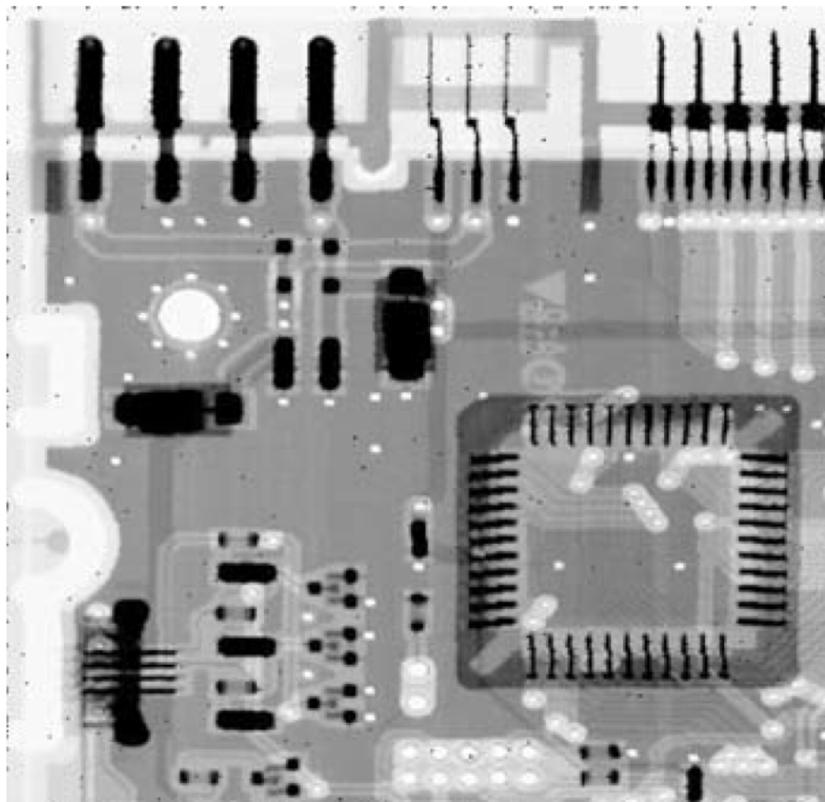


举例

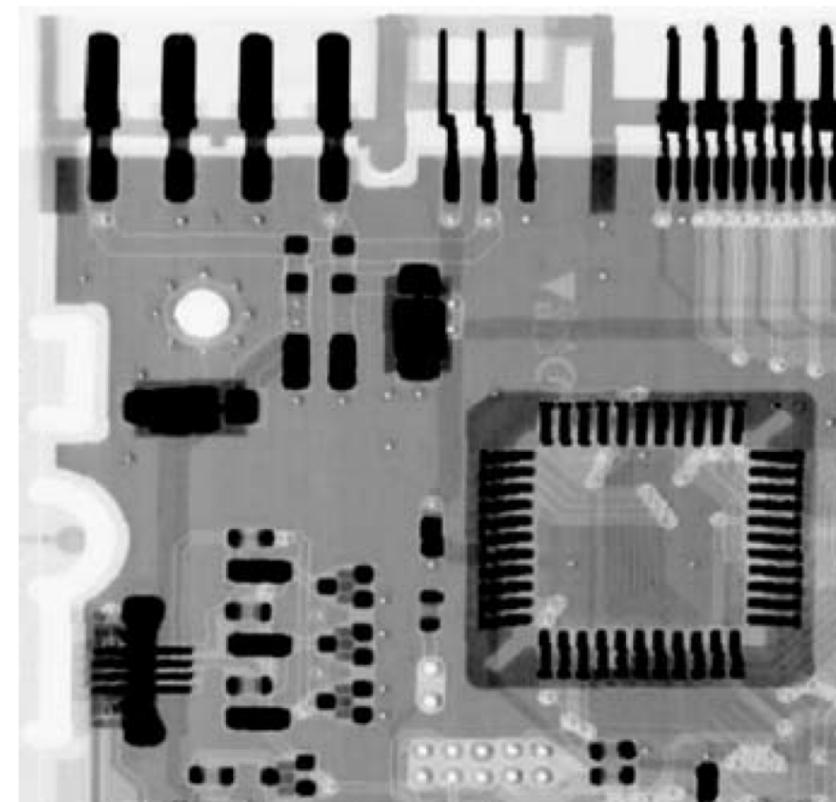
● 椒盐噪声

黑暗区域变窄

黑暗区域变宽



3×3 最大值滤波器



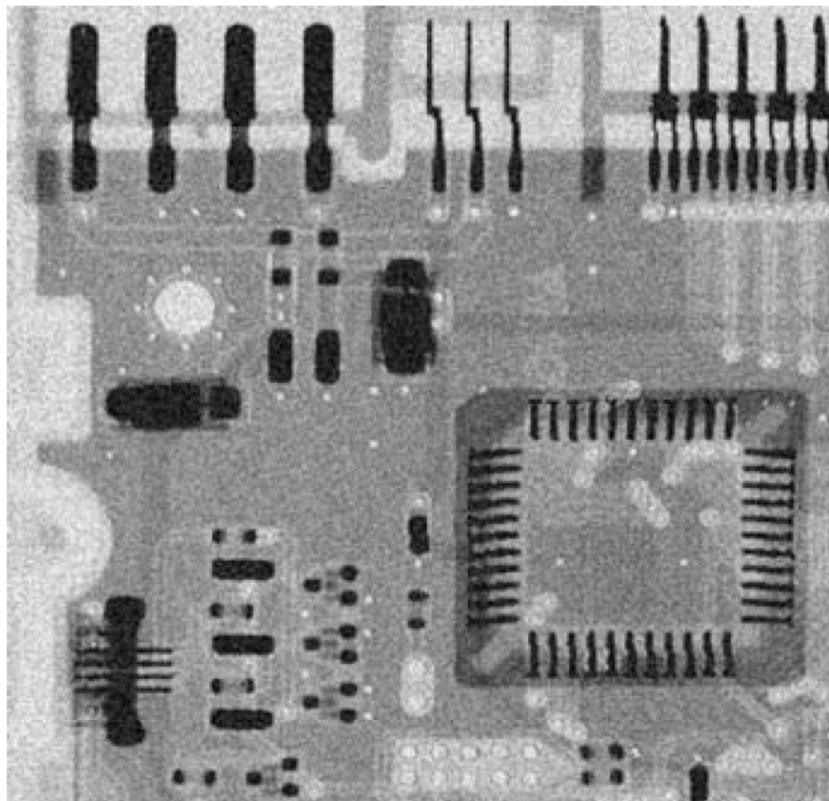
3×3 最小值滤波器



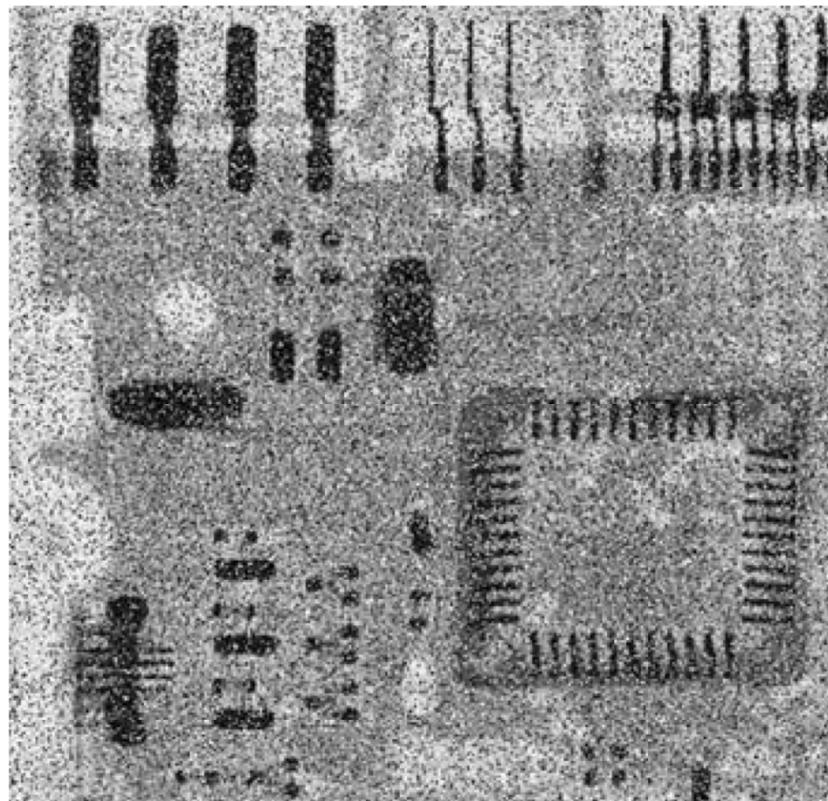


举例

- 均匀噪声&椒盐噪声



均匀噪声



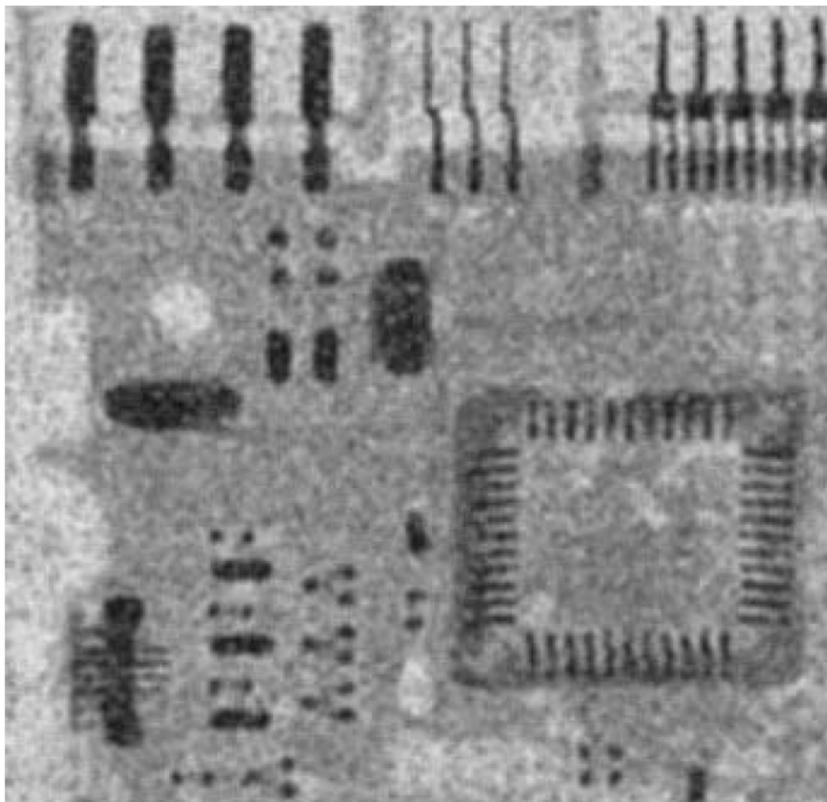
均匀噪声&椒盐噪声



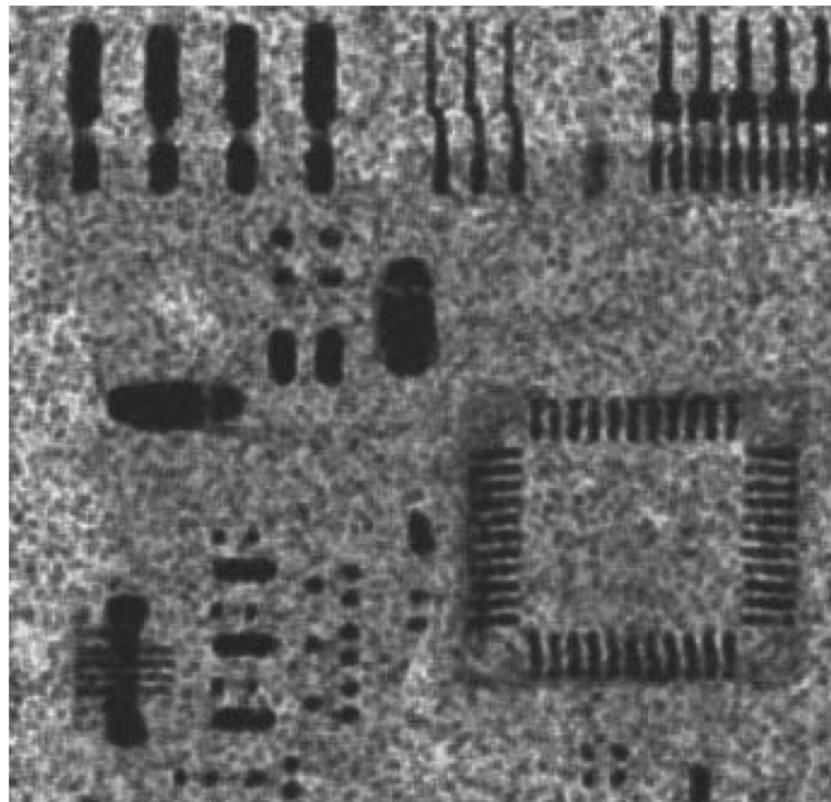


举例

- 均匀噪声&椒盐噪声



算数均值滤波



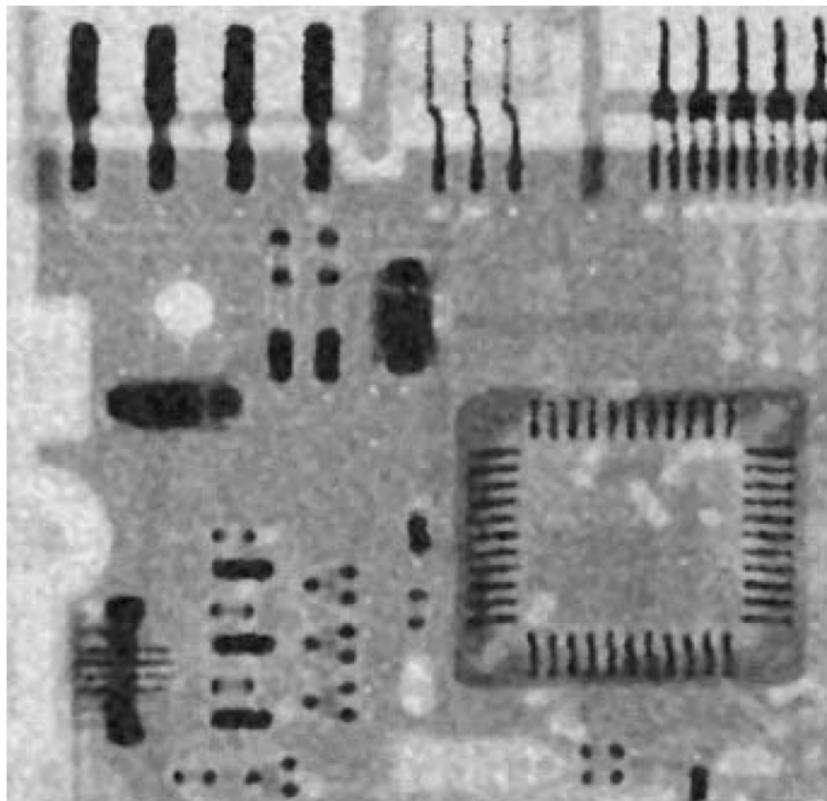
几何均值滤波



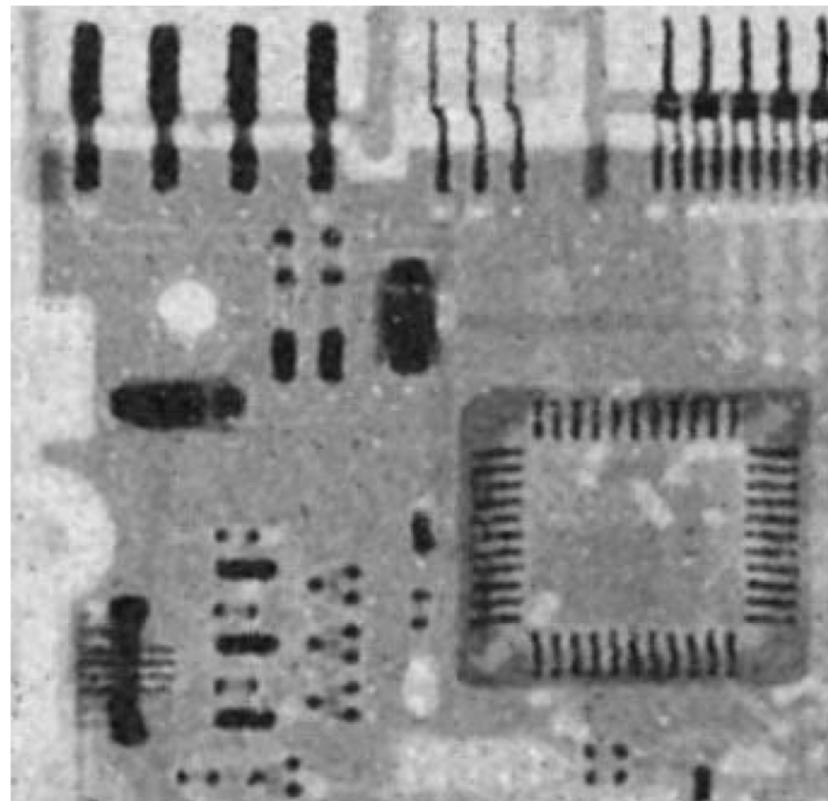


举例

- 均匀噪声&椒盐噪声



中值滤波



α 截断的均值滤波 ($d = 6$)





自适应滤波器

- 之前假定所有像素点采用相同的滤波器
 - 忽略了每个像素的特性
- 自适应滤波器
 1. 自适应局部降噪滤波器
 2. 自适应中值滤波器
 - 复杂度更高





自适应局部降噪滤波器

- 均值——体现平均灰度
- 方差——反映了对比度
- 利用如下四个度量
 - 含噪声的灰度值 $g(x, y)$
 - 噪声的方差 σ_η^2
 - S_{xy} 内的局部均值 m_L
 - S_{xy} 内的局部方差 σ_L^2





自适应局部降噪滤波器

● 整体思路

1. 如果 σ_η^2 为零，则滤波器应该直接返回 $g(x, y)$ 的值。在零噪声情况下 $g(x, y)$ 等于 $f(x, y)$ 。
2. 如果局部方差比 σ_η^2 大，则滤波器返回 $g(x, y)$ 的一个近似值。高局部方差与边缘相关，因此需要保持这些信息。
3. 如果两个方差相等，我们则希望滤波器返回 S_{xy} 中像素的算术均值。这种情况发生在局部区域与整个图像有相同特性的条件下，并且局部噪声将通过简单地求平均来降低。





自适应局部降噪滤波器

- 具体公式

$$\hat{f}(x, y) = g(x, y) - \frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_L^2} [g(x, y) - m_L]$$

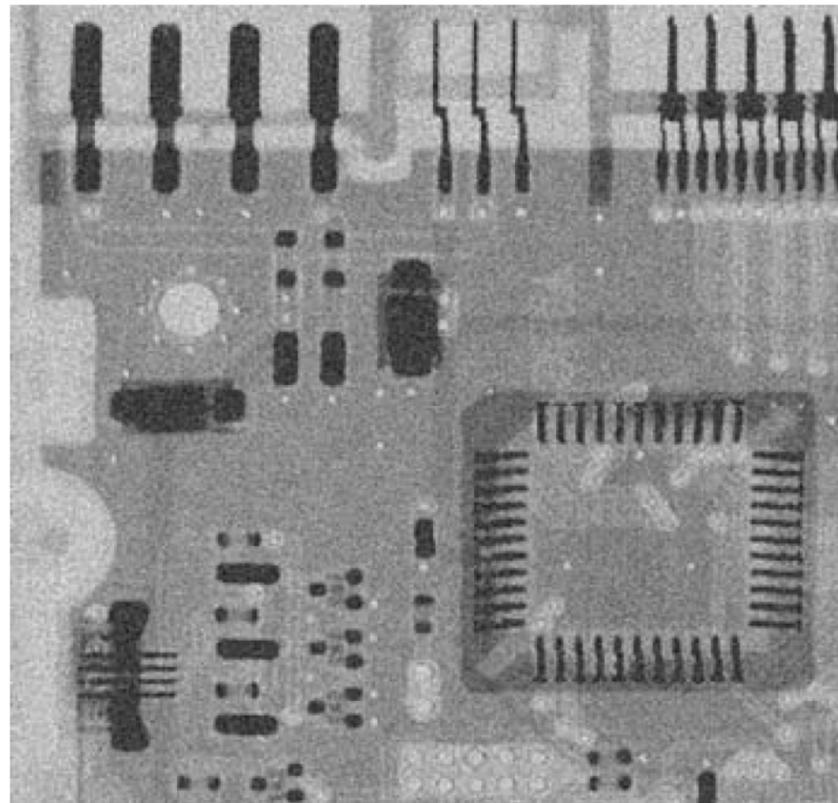
- σ_η^2 需要估计，因此通常不准确
- 其他值可以直接计算
- 假设 $\sigma_\eta^2 \leq \sigma_L^2$
- 如果遇到 $\sigma_\eta^2 > \sigma_L^2$ ，将系数强制设为1



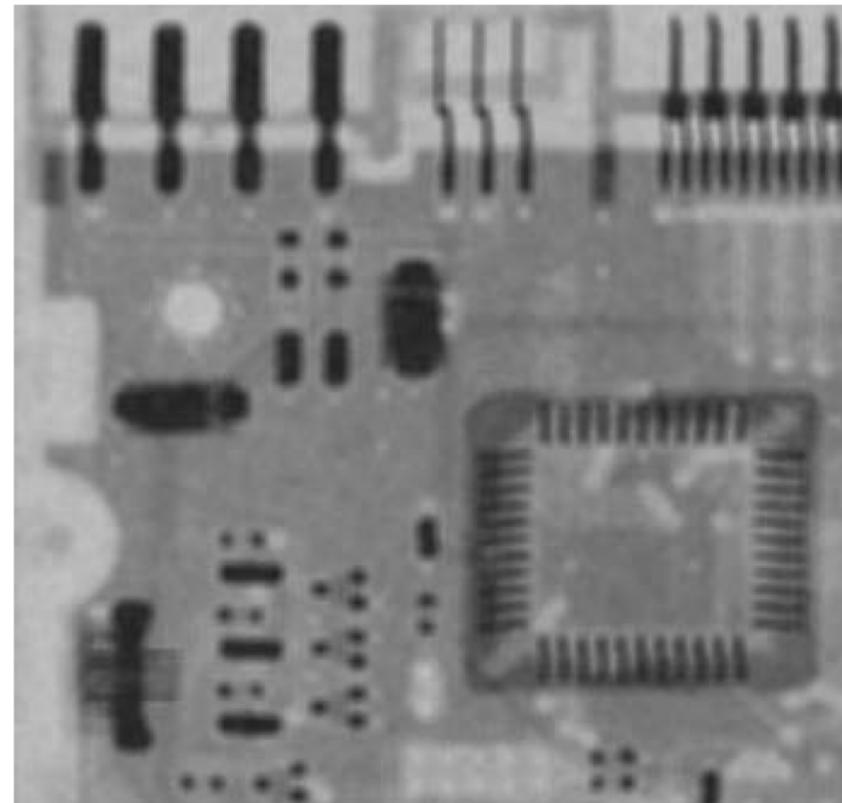


举例

- 滤波器对比



高斯噪声



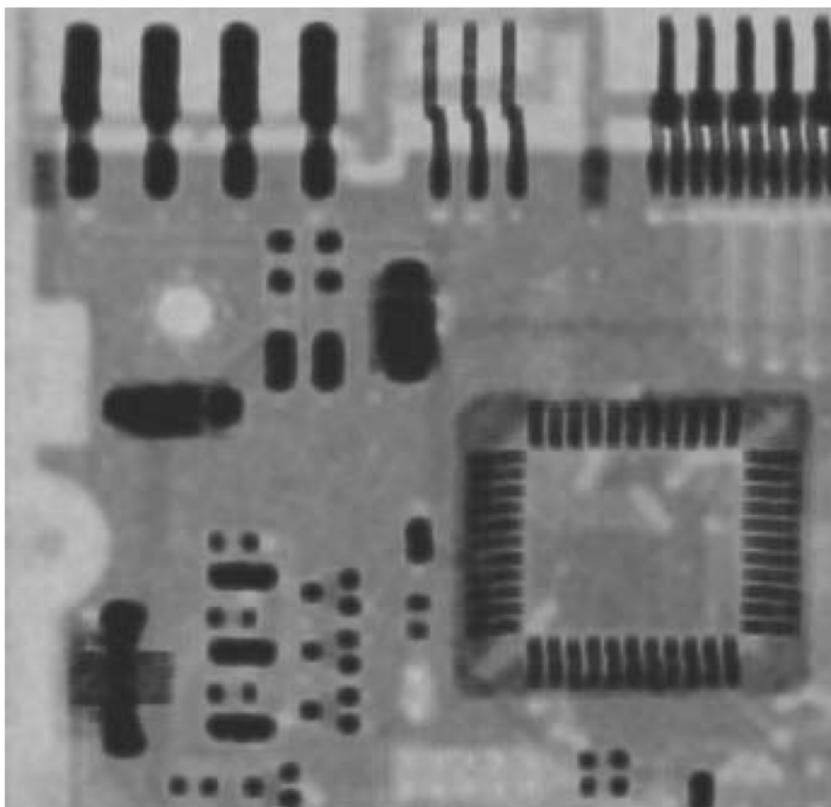
7×7 算术均值滤波器



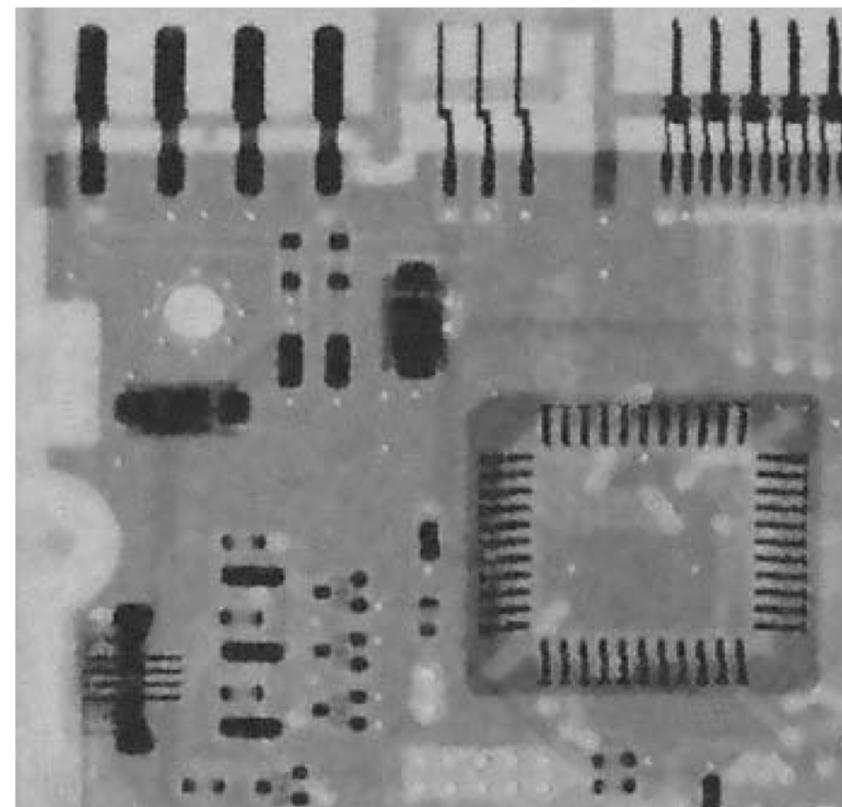


举例

- 滤波器对比



7×7 几何均值滤波器



自适应局部降噪滤波器





自适应中值滤波器

- 传统中值滤波器
 - 针对脉冲噪声概率较小的情况，低于0.2
- 自适应中值滤波器
 - 处理更大的噪声概率
 - 平滑非脉冲噪声时，保持细节
 - 矩形 S_{xy} 的大小动态变化





自适应中值滤波器

- 考虑如下符号

- $z_{\min} = S_{xy}$ 中的最小灰度值
- $z_{\max} = S_{xy}$ 中的最大灰度值
- $z_{\text{med}} = S_{xy}$ 中灰度值的中值
- $z_{xy} =$ 坐标 (x, y) 处的灰度值
- $S_{\max} = S_{xy}$ 允许的最大尺寸





自适应中值滤波器

● 阶段A

$$A1 = z_{\text{med}} - z_{\min}$$

$$A2 = z_{\text{med}} - z_{\max}$$

如果 $A1 > 0$ 并且 $A2 < 0$, 进入阶段B , 否则增大滤波器的尺寸

如果滤波器尺寸小于 S_{\max} , 重复阶段A , 否则输出 z_{med}

● 阶段B

$$B1 = z_{xy} - z_{\min}$$

$$B2 = z_{xy} - z_{\max}$$

如果 $B1 > 0$ 并且 $B2 < 0$, 输出 z_{xy} , 否则输出 z_{med}





自适应中值滤波器

- 阶段A

$$A1 = z_{\text{med}} - z_{\min}$$

$$A2 = z_{\text{med}} - z_{\max}$$

如果 $A1 > 0$ 并且 $A2 < 0$, 进入阶段B , 否则增大滤波器的尺寸

如果滤波器尺寸小于 S_{\max} , 重复阶段A , 否则输出 z_{med}

- 判断 z_{med} 是否为脉冲噪声
- 如果否 , 转向阶段B
- 如果是 , 增加窗口





自适应中值滤波器

● 阶段B

$$B1 = z_{xy} - z_{\min}$$

$$B2 = z_{xy} - z_{\max}$$

如果 $B1 > 0$ 并且 $B2 < 0$, 输出 z_{xy} , 否则输出 z_{med}

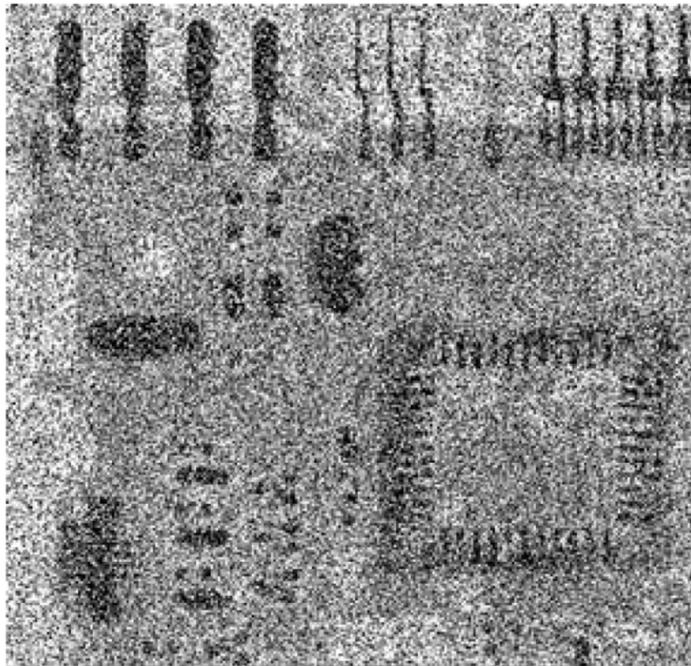
- 判断 z_{xy} 是否为脉冲噪声
- 如果否 , 输出 z_{xy} (减少失真)
- 如果是 , 输出 z_{med} (中值滤波)





举例

- 大概率椒盐噪声



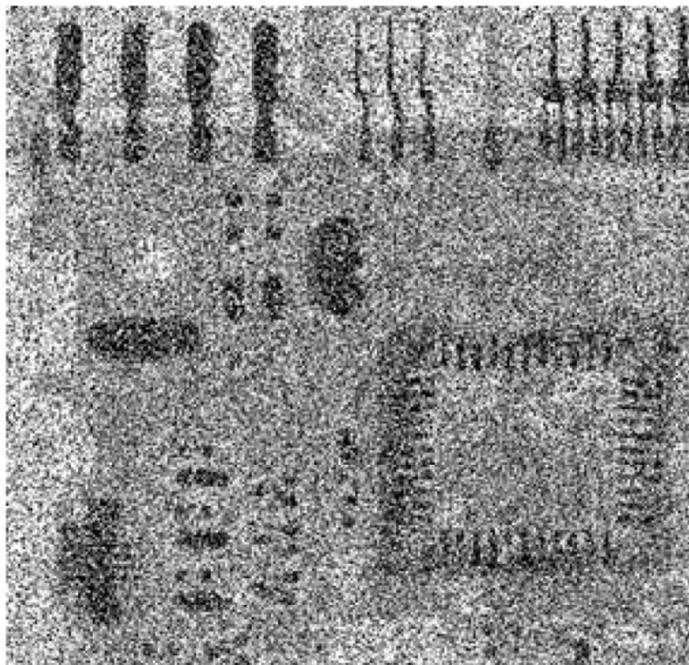
$P_a = P_b = 0.25$ 的椒盐噪声



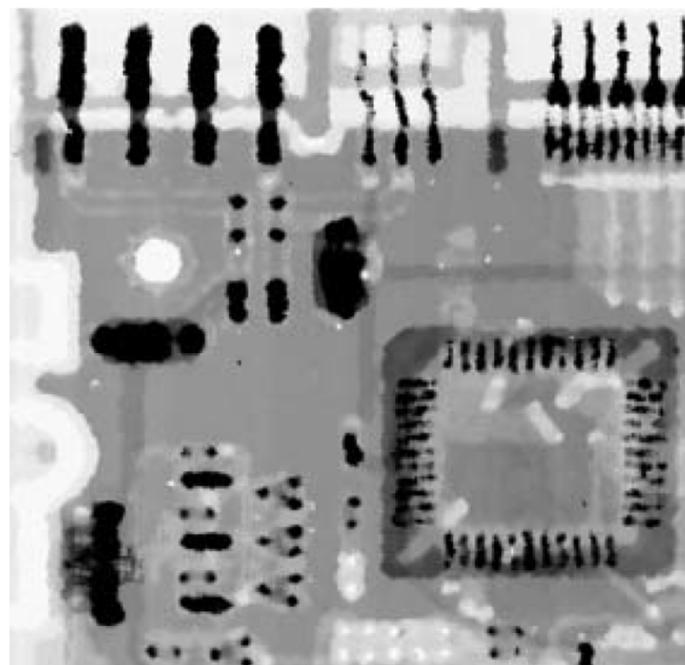


举例

- 大概率椒盐噪声



$P_a = P_b = 0.25$ 的椒盐噪声



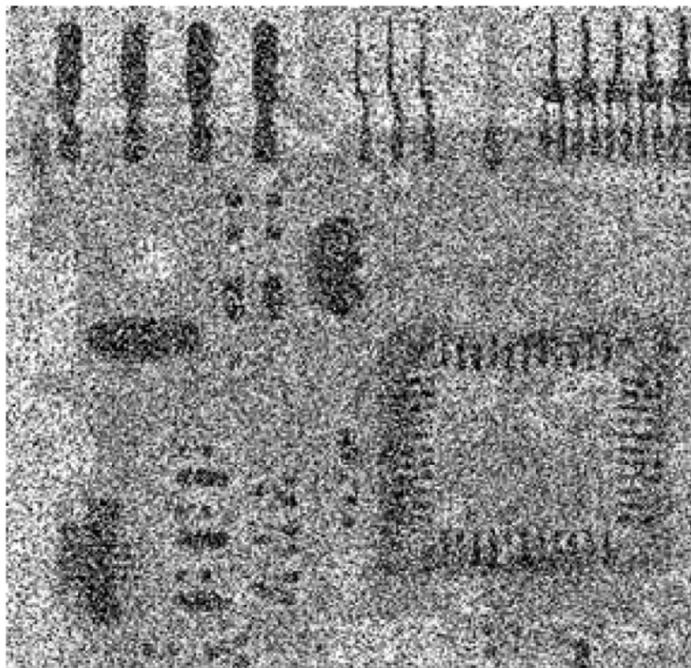
7 × 7中值滤波器



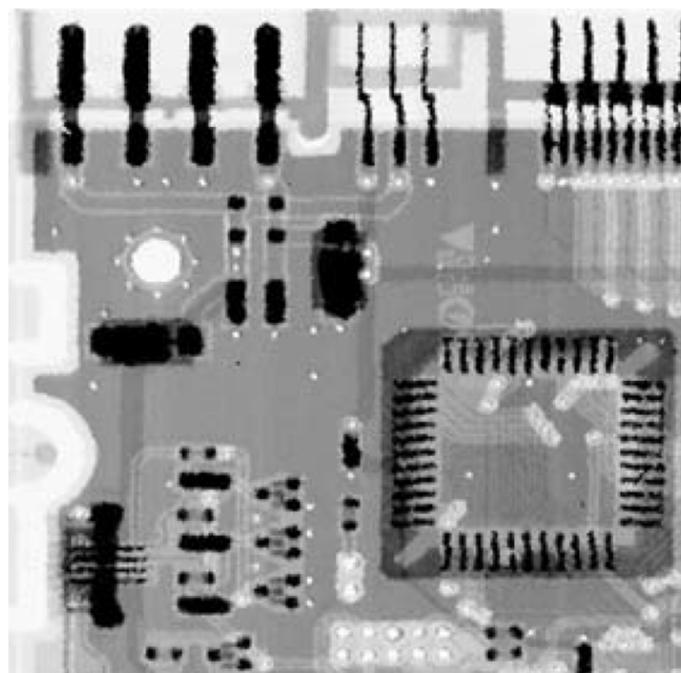


举例

- 大概率椒盐噪声



$P_a = P_b = 0.25$ 的椒盐噪声



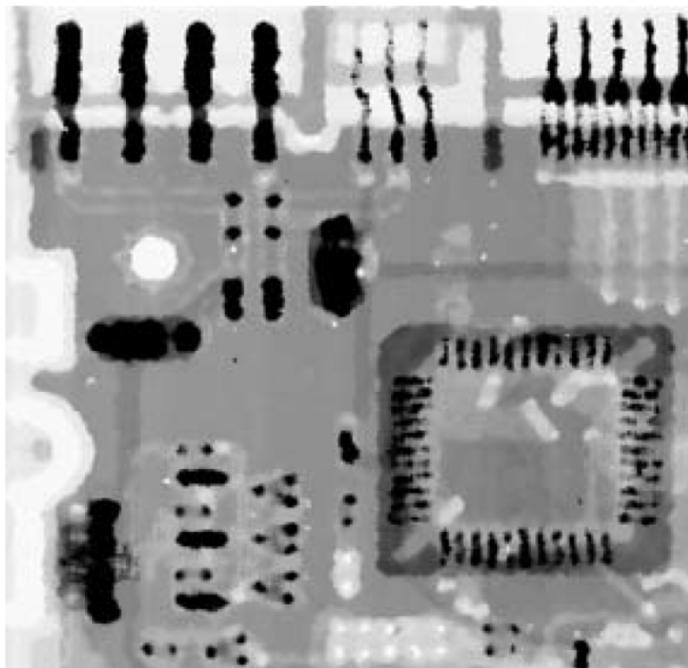
$s_{\max} = 7$ 的自适应中值滤波器



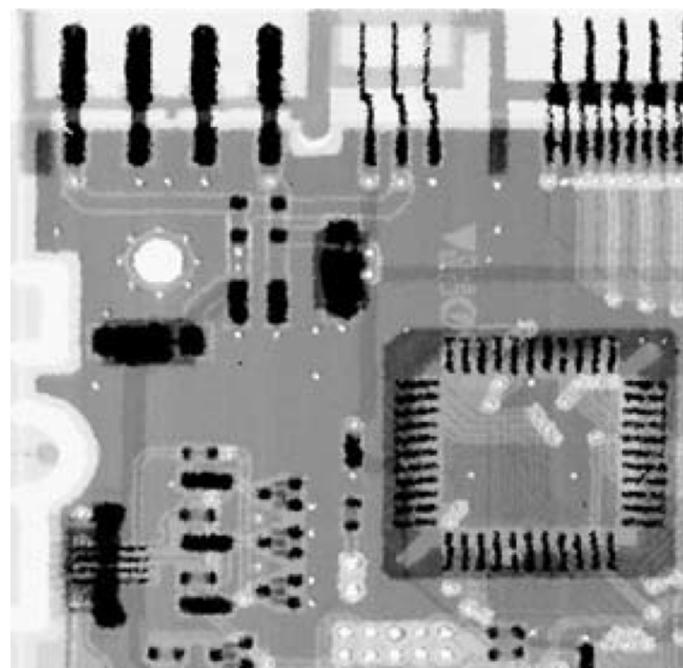


举例

- 大概率椒盐噪声



7×7 中值濾波器



$s_{\max} = 7$ 的自适应中值濾波器





提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波



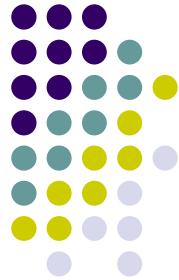


频域滤波消除周期噪声

- 傅里叶变换之后可以识别周期噪声
 - 周期性噪声以能量脉冲出现
 - 利用选择性滤波器去掉噪声

 1. 带阻滤波器
 2. 带通滤波器
 3. 陷波滤波器
 4. 最佳陷波滤波器





带阻滤波器

- 理想带阻滤波器

$$H(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{if } D_0 - \frac{W}{2} \leq D \leq D_0 + \frac{W}{2} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 巴特沃斯带阻滤波器

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{DW}{D^2 - D_0^2} \right]^{2n}}$$

- 高斯带阻滤波器

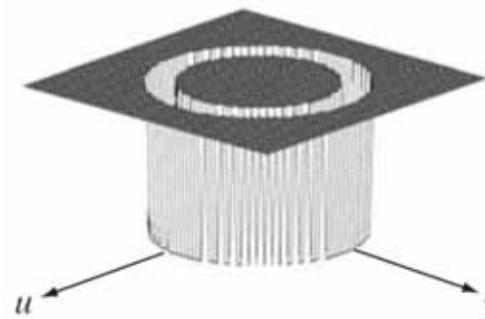
$$H(u, v) = 1 - e^{-\left[\frac{D^2 - D_0^2}{DW}\right]^2}$$



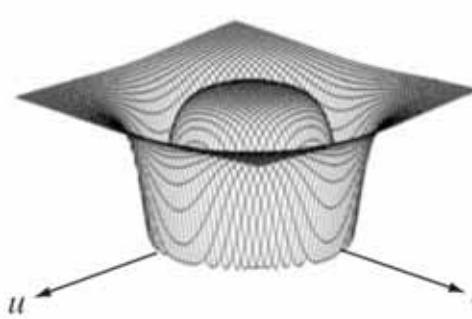


带阻滤波器

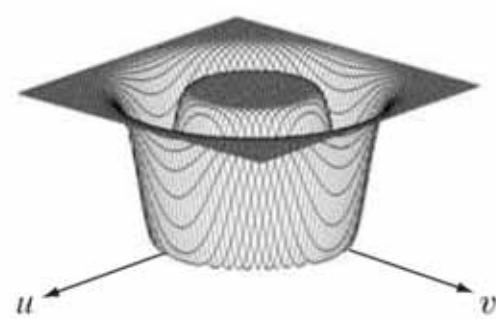
● 透视图



理想带阻滤波器



巴特沃斯带阻滤波器



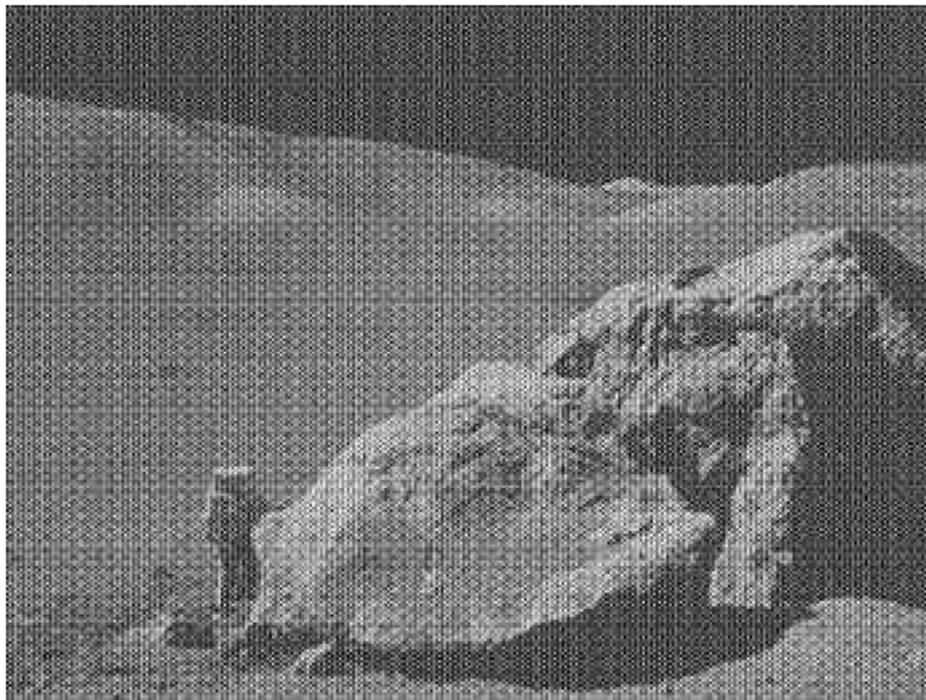
高斯带阻滤波器



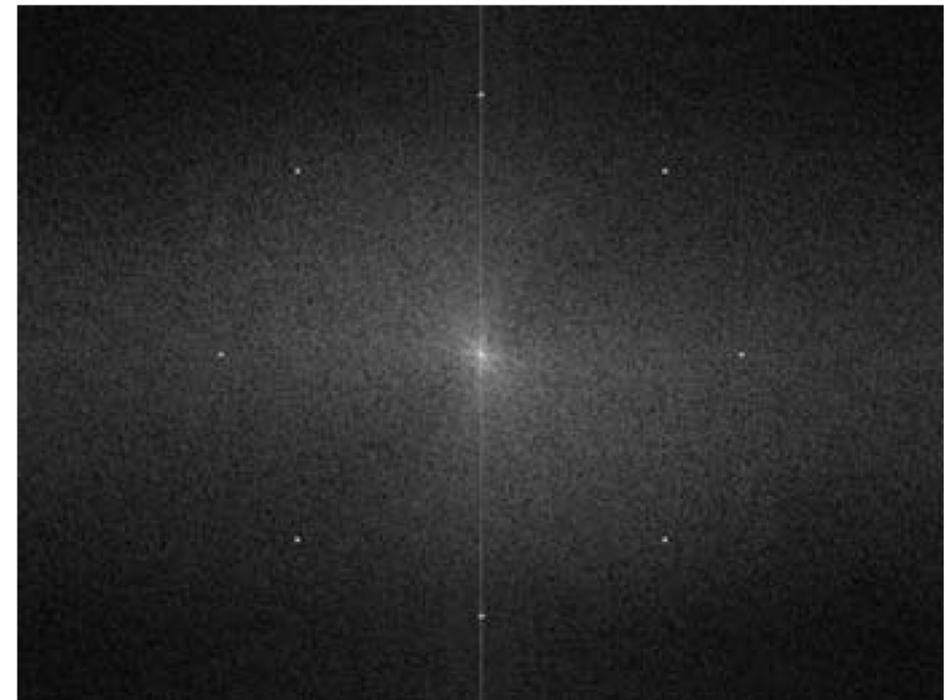


举例

- 周期性噪声的傅里叶变换



被正弦信号污染的图像



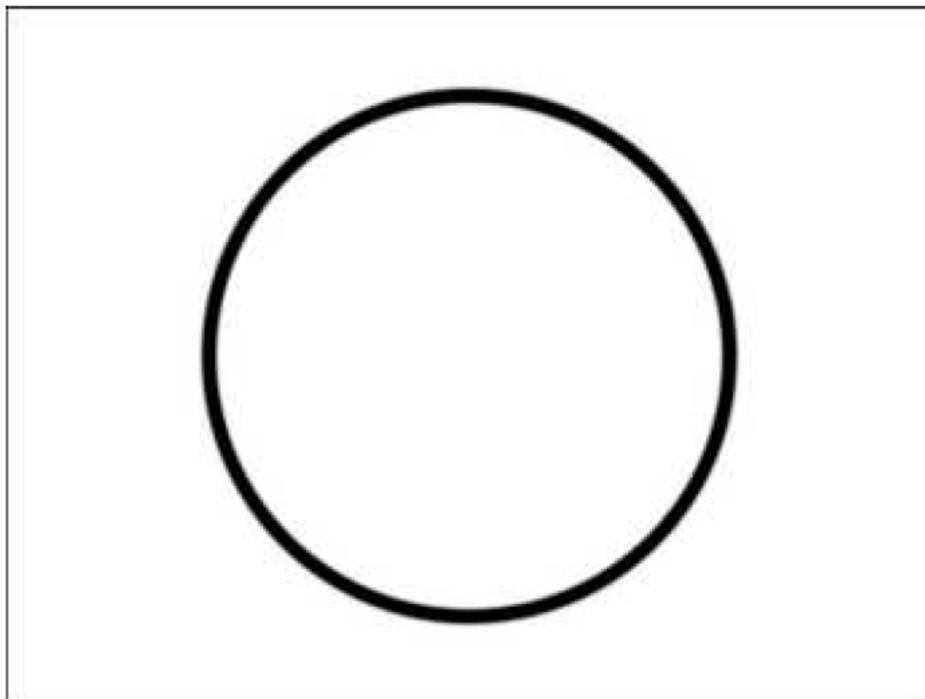
傅里叶变换





举例

- 周期性噪声的傅里叶变换



巴特沃斯带阻滤波器



滤波的结果

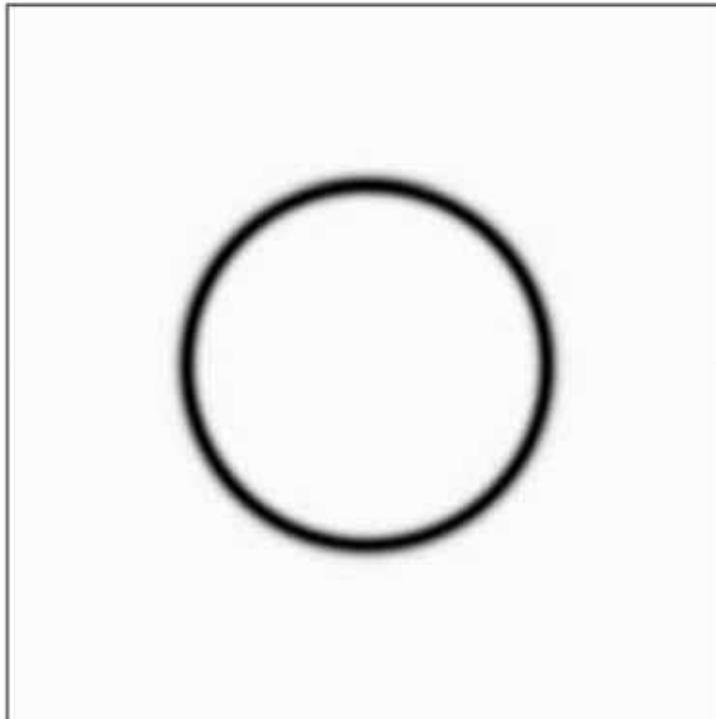




带通滤波器

- 从带阻滤波器构造带通滤波器

$$H_{\text{BP}}(u, v) = 1 - H_{\text{BR}}(u, v)$$



高斯带阻滤波器



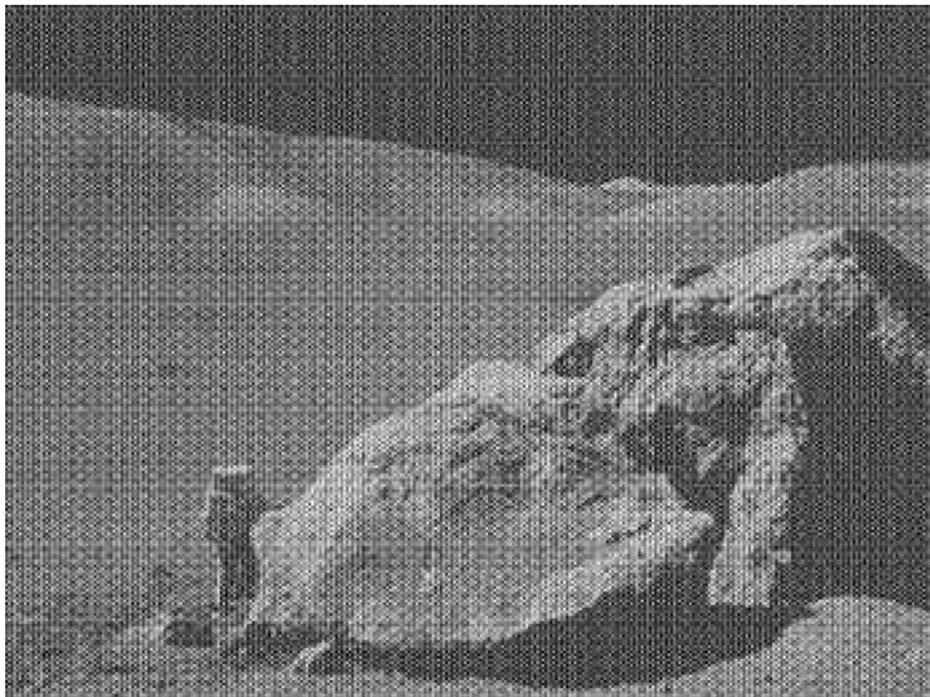
高斯带通滤波器



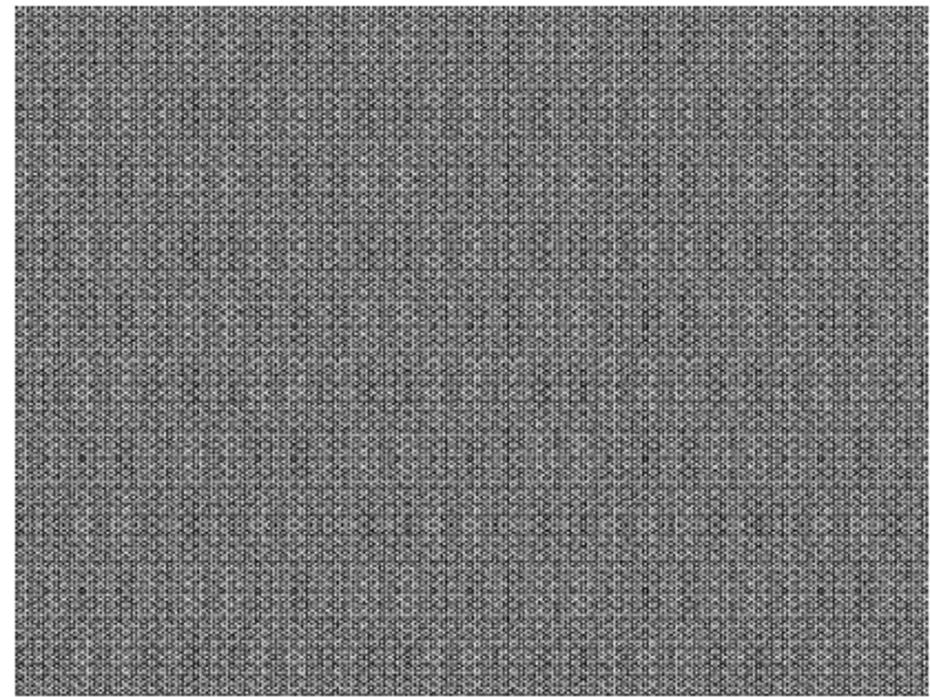


举例

- 提取噪声



被正弦信号污染的图像



提取的噪声





陷波滤波器

1. 处理特定区域
2. 保持对称性
 - 在 (u_0, v_0) 存在陷波， $(-u_0, -v_0)$ 也存在一个
 - 陷波带阻滤波器

$$H_{\text{NR}}(u, v) = \prod_{k=1}^Q H_k(u, v) H_{-k}(u, v)$$

- $H_k(u, v)$ 是中心在 (u_k, v_k) 的高通滤波器
- $H_{-k}(u, v)$ 是中心在 $(-u_k, -v_k)$ 的高通滤波器
- 中心是相对于 $(M/2, N/2)$ 而言





陷波滤波器

- n 阶巴特沃斯陷波带阻滤波器

$$H_{\text{NR}}(u, v) = \prod_{k=1}^3 \left[\frac{1}{1 + [D_{0k}/D_k(u, v)]^{2n}} \right] \left[\frac{1}{1 + [D_{0k}/D_{-k}(u, v)]^{2n}} \right]$$

- 其中 $D_k(u, v) = [(u - M/2 - u_k)^2 + (v - N/2 - v_k)^2]^{1/2}$

$$D_{-k}(u, v) = [(u - M/2 + u_k)^2 + (v - N/2 + v_k)^2]^{1/2}$$

- 陷波带通滤波器

$$H_{\text{NP}}(u, v) = 1 - H_{\text{NR}}(u, v)$$

- 交互式地改变DFT的局部区域

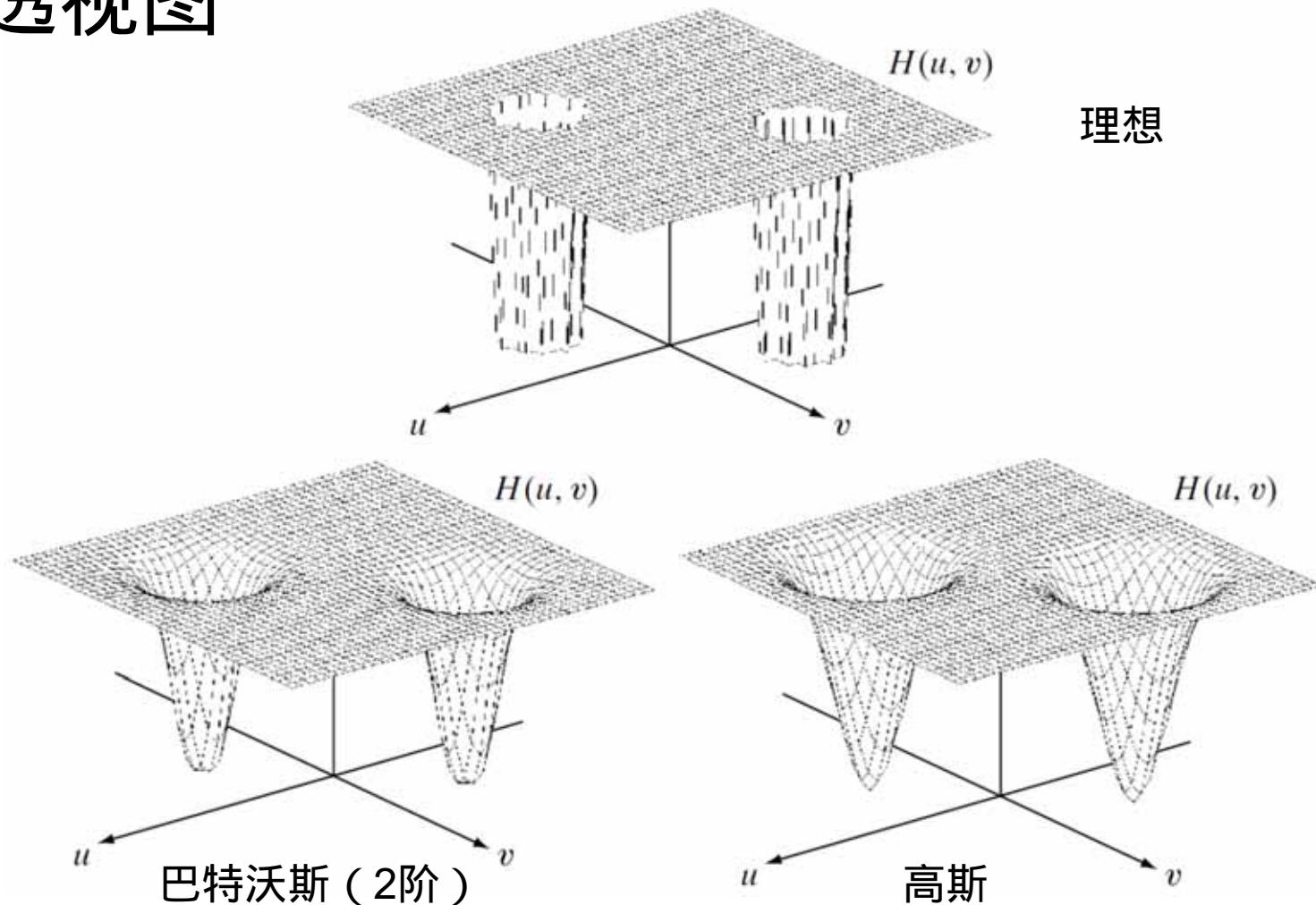
- 不进行补0填充





陷波带阻滤波器

● 透视图

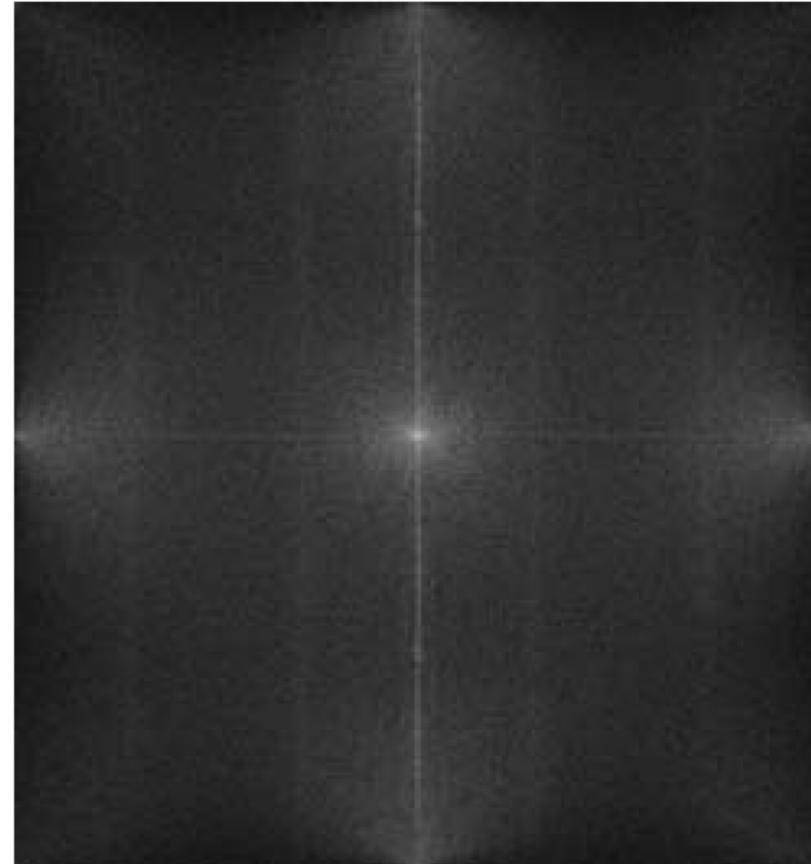


举例

- 含噪声的卫星图片



原图



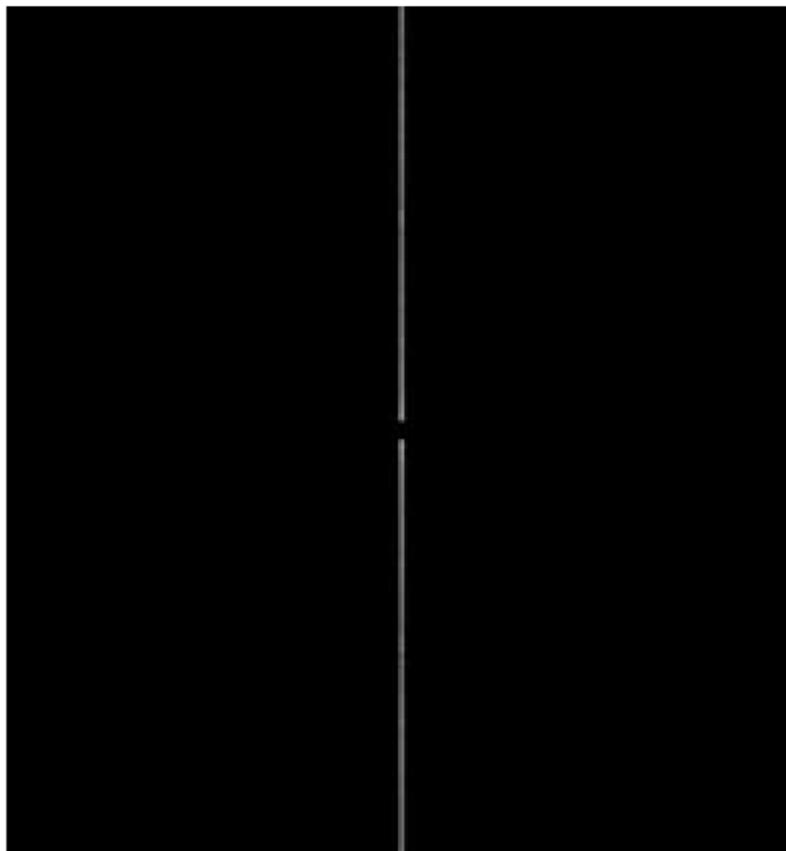
傅里叶谱





举例

- 含噪声的卫星图片



陷波带通滤波器



提取的噪声



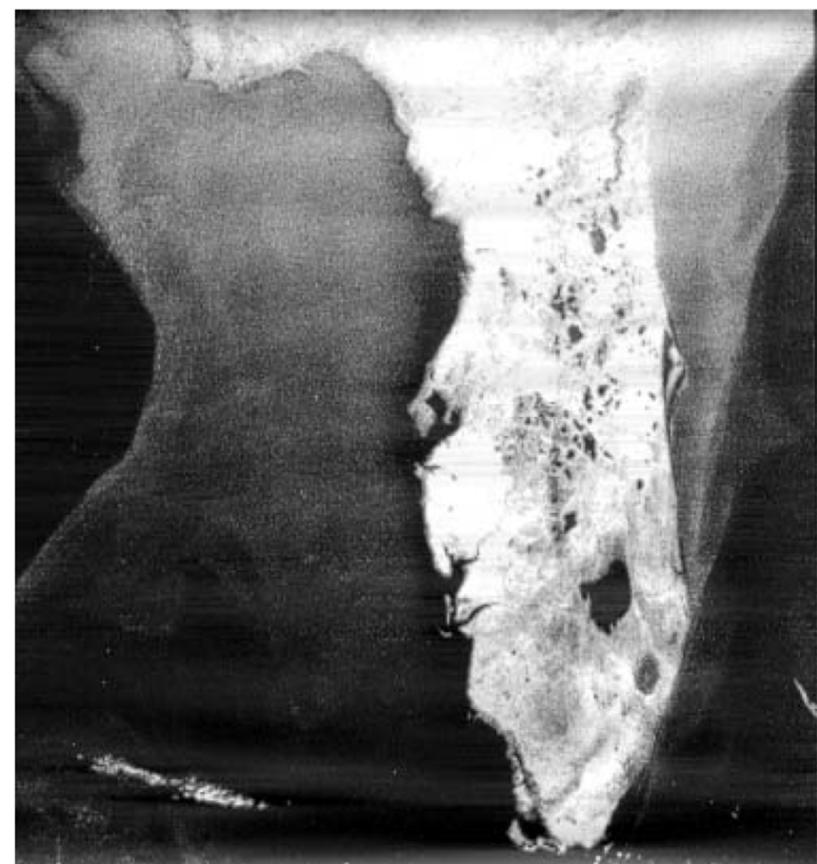


举例

- 含噪声的卫星图片



原图



滤波后的图像



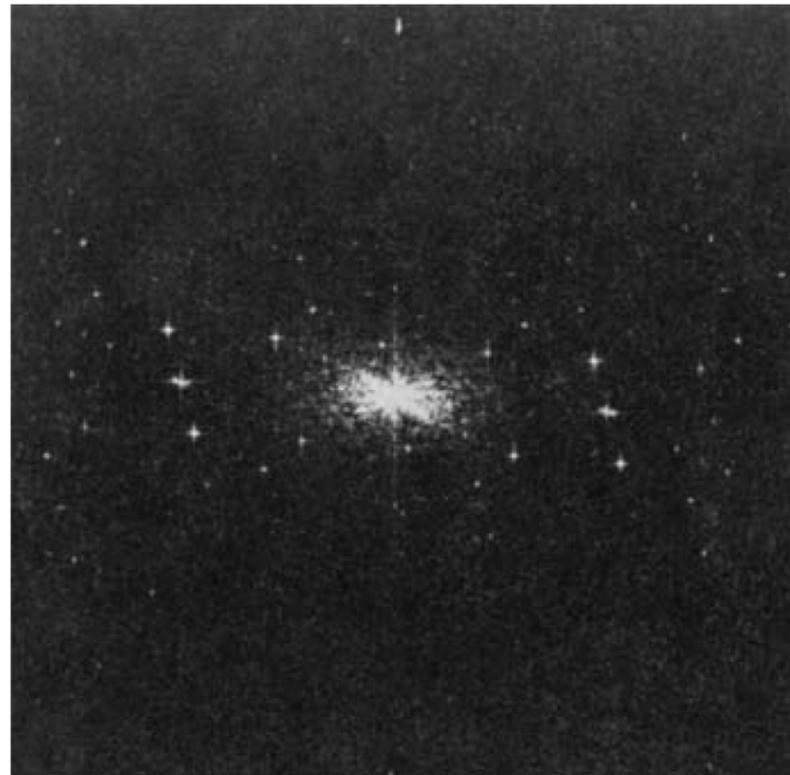


最佳陷波滤波器

- 频率域的噪声模式有时候难以准确去除
 - 多种噪声、噪声并非单一频率



火星地形图



傅里叶谱图





最佳陷波滤波器

- 提取干扰模式的主频

$$N(u, v) = H_{NP}(u, v)G(u, v)$$

- 观察干扰模式

$$\eta(x, y) = \mathfrak{I}^{-1}\{H_{NP}(u, v)G(u, v)\}$$

- 去掉干扰模式

$$\hat{f}(x, y) = g(x, y) - w(x, y)\eta(x, y)$$

- 优化权重
 - 最小化局部方差





优化权重

- 局部方差

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{(2a + 1)(2b + 1)} \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \left[\hat{f}(x + s, y + t) - \bar{\hat{f}}(x, y) \right]^2$$

- 其中

$$\bar{\hat{f}}(x, y) = \frac{1}{(2a + 1)(2b + 1)} \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \hat{f}(x + s, y + t)$$

- 化简

$$\begin{aligned} \sigma^2(x, y) &= \frac{1}{(2a + 1)(2b + 1)} \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \left\{ [g(x + s, y + t) \right. \\ &\quad \left. - w(x + s, y + t)\eta(x + s, y + t)] \right. \\ &\quad \left. - [\bar{g}(x, y) - \bar{w}(x, y)\eta(x, y)] \right\}^2 \end{aligned}$$



优化权重



- 假设权重在局部为常数

$$w(x + s, y + t) = w(x, y) \quad -a \leq s \leq a \text{ and } -b \leq t \leq b.$$

- 简化 $\overline{w(x, y)\eta(x, y)} = w(x, y)\bar{\eta}(x, y)$
- 方差

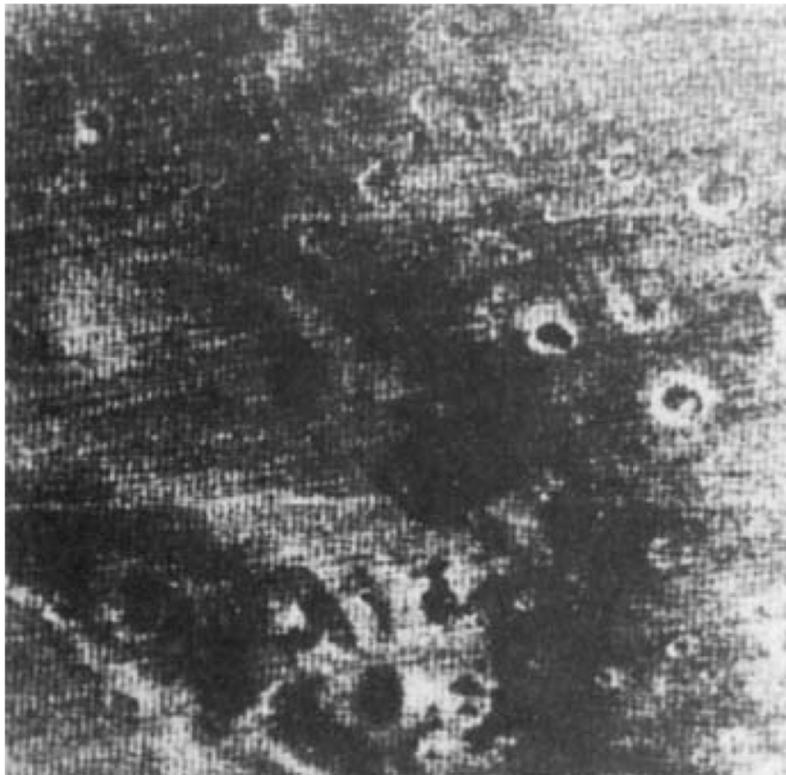
$$\begin{aligned} \sigma^2(x, y) &= \frac{1}{(2a+1)(2b+1)} \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \{ [g(x+s, y+t) \\ &\quad - w(x, y)\eta(x+s, y+t)] \\ &\quad - [\bar{g}(x, y) - w(x, y)\bar{\eta}(x, y)] \}^2 \end{aligned}$$

- 求导 $\frac{\partial \sigma^2(x, y)}{\partial w(x, y)} = 0 \Rightarrow w(x, y) = \frac{\overline{g(x, y)\eta(x, y)} - \bar{g}(x, y)\bar{\eta}(x, y)}{\bar{\eta}^2(x, y) - \bar{\eta}^2(x, y)}$

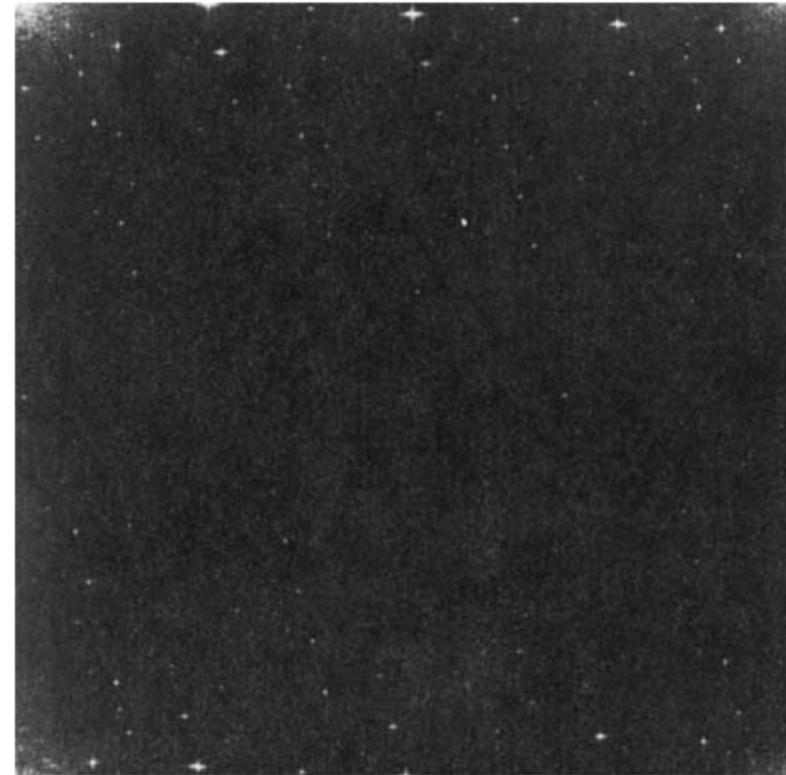


举例

- 最佳陷波滤波器



火星地形图



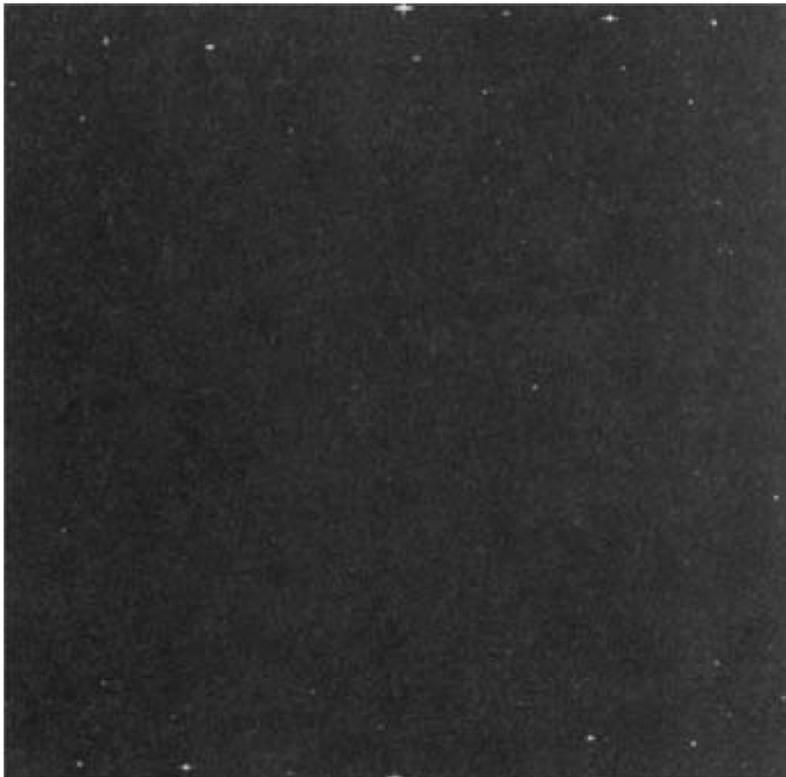
傅里叶谱图（没有中心化）



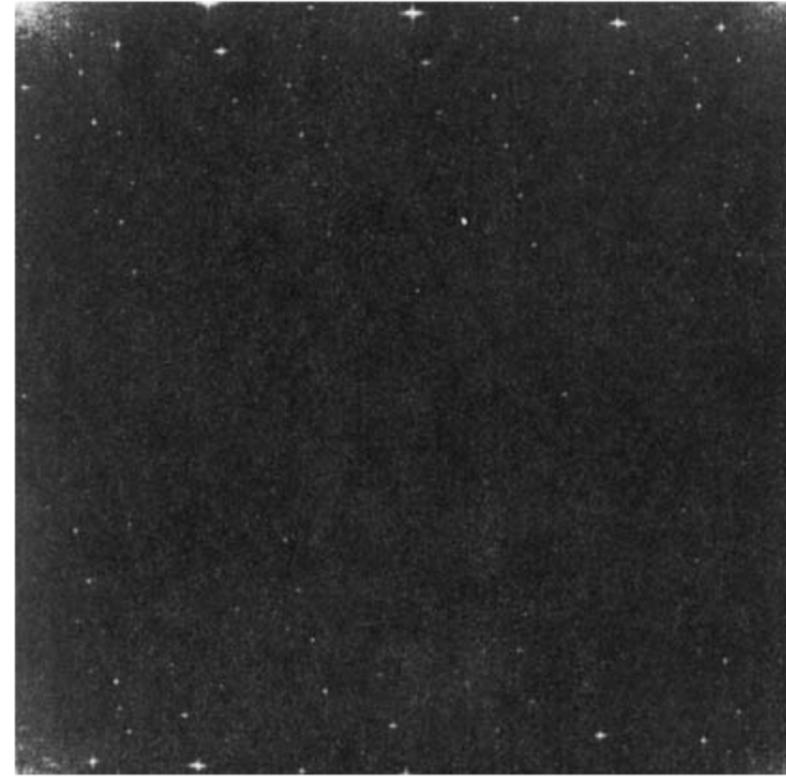


举例

- 最佳陷波滤波器



频率域内提取的噪声



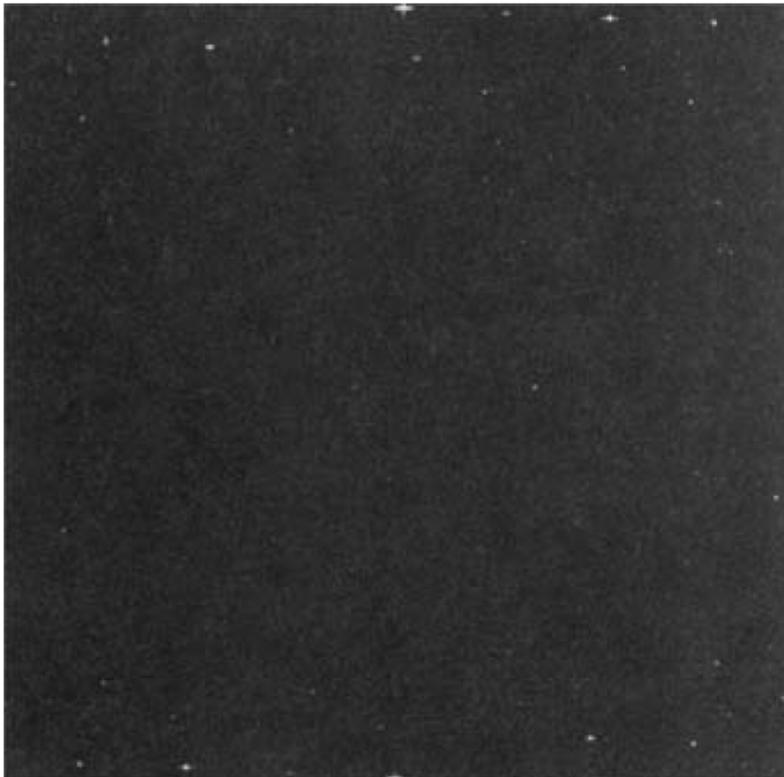
傅里叶谱图（没有中心化）



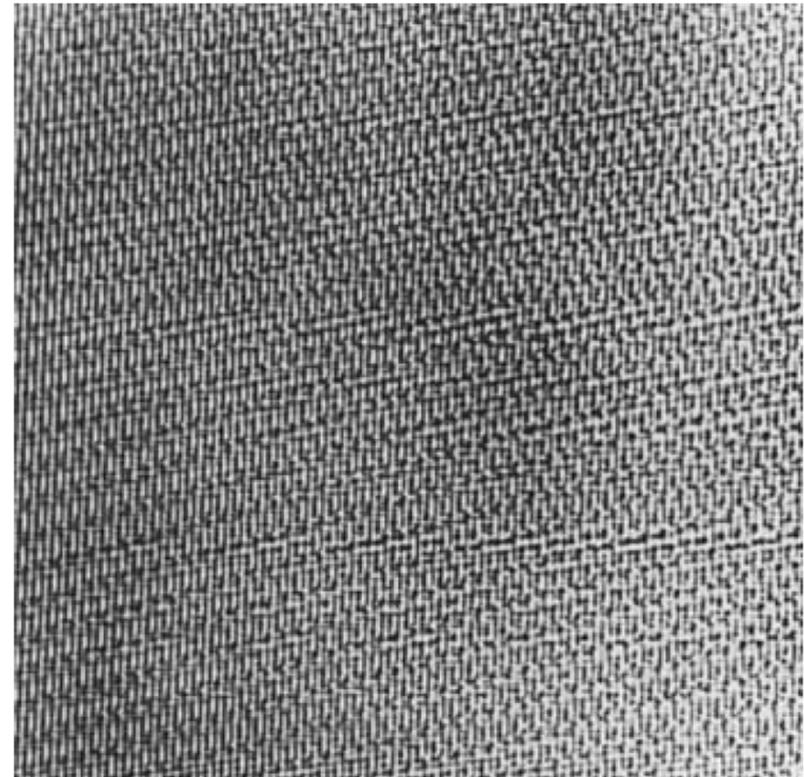


举例

- 最佳陷波滤波器



频率域内提取的噪声



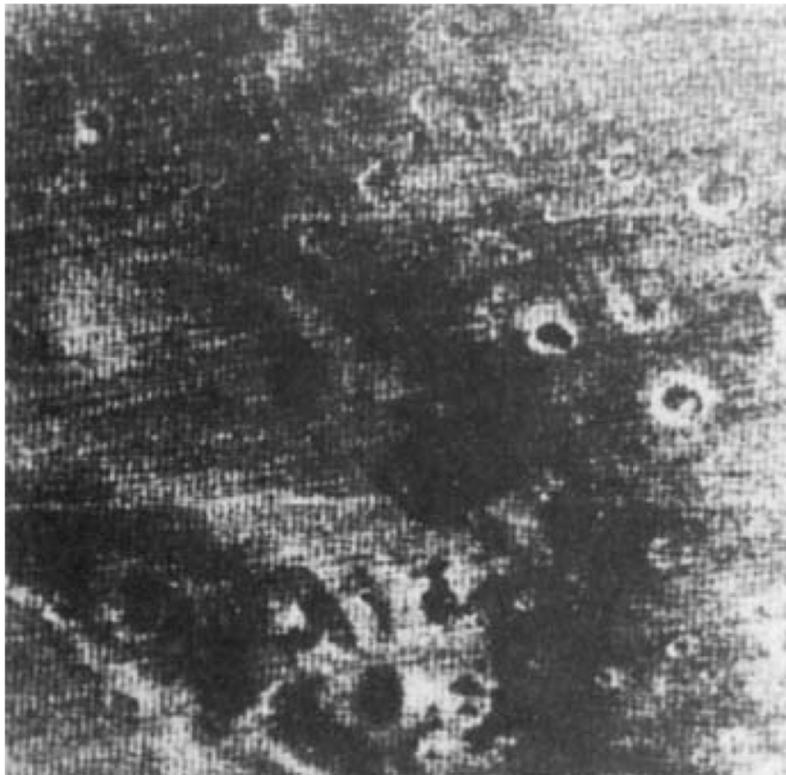
噪声的空间表示



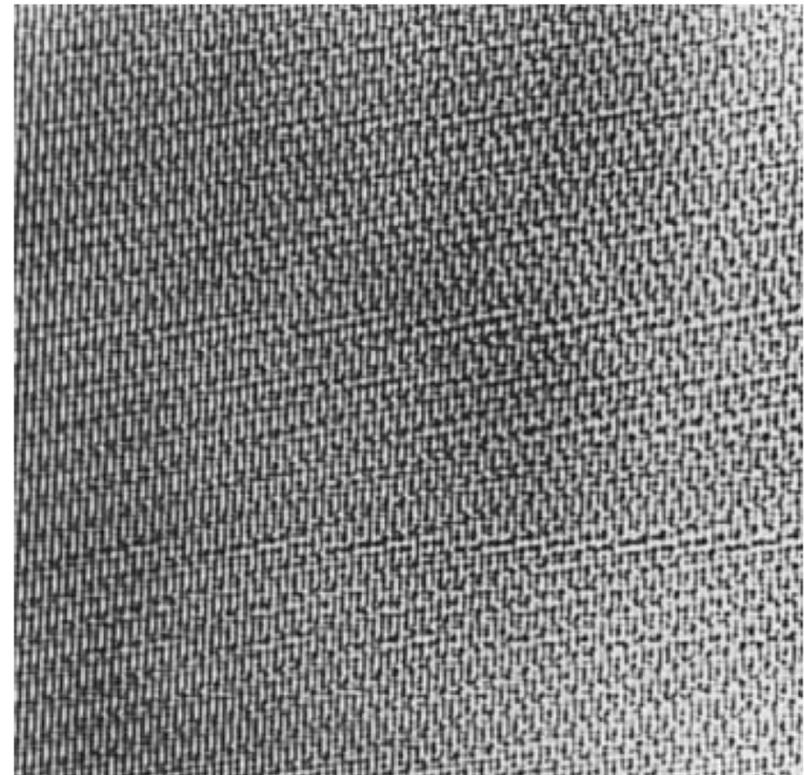


举例

- 最佳陷波滤波器



火星地形图



噪声的空间表示





举例

- 最佳陷波滤波器



火星地形图



处理后的图像

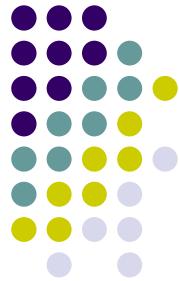




提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波





线性、位置不变的退化

- 图像退化建模

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + \eta(x, y)$$

- 假设 $\eta(x, y) = 0$

$$g(x, y) = H[f(x, y)]$$

- H 是线性的

$$H[af_1(x, y) + bf_2(x, y)] = aH[f_1(x, y)] + bH[f_2(x, y)]$$

- 加性 (additivity)

$$H[f_1(x, y) + f_2(x, y)] = H[f_1(x, y)] + H[f_2(x, y)]$$

- 同质性 (homogeneity)

$$H[af_1(x, y)] = aH[f_1(x, y)]$$





线性、位置不变的退化

- H 是位置不变的

$$H[f(x - \alpha, y - \beta)] = g(x - \alpha, y - \beta)$$

- 对所有的 $f(x, y), \alpha, \beta$ 都成立
- 输出仅和输入值有关，与位置无关
- 引入冲激函数

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) \delta(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta$$

- 图像退化建模

$$g(x, y) = H[f(x, y)] = H \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) \delta(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \right]$$





线性、位置不变的退化

- 图像退化建模

$$g(x, y) = H[f(x, y)] = H \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) \delta(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \right]$$

- 加性

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H[f(\alpha, \beta) \delta(x - \alpha, y - \beta)] d\alpha d\beta$$

- 同质性

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) H[\delta(x - \alpha, y - \beta)] d\alpha d\beta$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) h(x, \alpha, y, \beta) d\alpha d\beta$$

- H 的冲激响应



第一类叠加积分

$$h(x, \alpha, y, \beta) = H[\delta(x - \alpha, y - \beta)]$$





线性、位置不变的退化

- **H 的冲激响应**

$$h(x, \alpha, y, \beta) = H[\delta(x - \alpha, y - \beta)]$$

- H 是位置不变的

$$H[\delta(x - \alpha, y - \beta)] = h(x - \alpha, y - \beta)$$

- 图像退化建模

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) h(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta$$

- 有噪声

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) h(x, \alpha, y, \beta) d\alpha d\beta + \eta(x, y)$$





线性、位置不变的退化

- H 的冲激响应

$$h(x, \alpha, y, \beta) = H[\delta(x - \alpha, y - \beta)]$$

- H 是位置不变的

$$H[\delta(x - \alpha, y - \beta)] = h(x - \alpha, y - \beta)$$

- 图像退化建模

- 空间域

$$g(x, y) = h(x, y) \star f(x, y) + \eta(x, y)$$

- 频率域

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v)$$





提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波





图像观察估计

- 选择图像内的一个区域
 - 进行处理：去掉噪声，还原图像
 - 可以手动去除
- 利用公式估计退化函数

$$H_s(u, v) = \frac{G_s(u, v)}{\hat{F}_s(u, v)}$$

- 依据

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v)$$

- 从 $H_s(u, v)$ 扩展到 $H(u, v)$
 - H 是位置不变的





图像配准

- 问题定义

- 输入图像、输出图像（参考图像）
- 估计变换函数

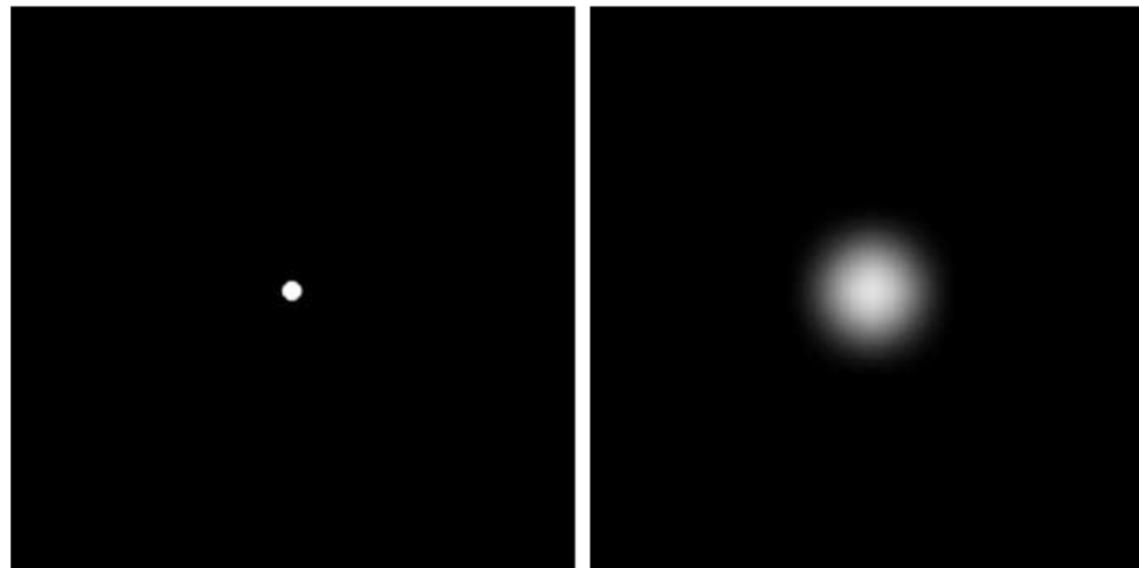




试验估计

- 对冲激成像
 - 冲激数值大，因此噪声的影响可以忽略
- 计算公式

$$H(u, v) = \frac{G(u, v)}{A}$$





建模估计

● 大气湍流

- k 是和湍流性质相关的常数
- 与高斯低通滤波器很相似

$$H(u, v) = e^{-k(u^2 + v^2)^{5/6}}$$



可忽略的湍流



剧烈湍流 ($k = 0.0025$)





建模估计

● 大气湍流

- k 是和湍流性质相关的常数
- 与高斯低通滤波器很相似

$$H(u, v) = e^{-k(u^2 + v^2)^{5/6}}$$



中等湍流 ($k = 0.001$)



轻微湍流 ($k = 0.00025$)





建模估计

- 运动模型（平面运动）

$$g(x, y) = \int_0^T f[x - x_0(t), y - y_0(t)] dt$$

- T 是曝光时间
- $x_0(t), y_0(t)$ 分别是 x 和 y 方向上的速率
- 傅里叶变换

$$G(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^T f[x - x_0(t), y - y_0(t)] dt \right] e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$





建模估计

● 傅里叶变换

$$\begin{aligned} G(u, v) &= \int_0^T \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[x - x_0(t), y - y_0(t)] e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \right] dt \\ &= \int_0^T F(u, v) e^{-j2\pi[ux_0(t)+vy_0(t)]} dt \\ &= F(u, v) \int_0^T e^{-j2\pi[ux_0(t)+vy_0(t)]} dt \end{aligned}$$



- 定义 $H(u, v) = \int_0^T e^{-j2\pi[ux_0(t)+vy_0(t)]} dt$
- 频率域滤波

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v)$$





建模估计

- 频率域滤波器

$$\begin{aligned} H(u, v) &= \int_0^T e^{-j2\pi[ux_0(t)+vy_0(t)]} dt \\ &= \frac{T}{\pi(ua + vb)} \sin[\pi(ua + vb)] e^{-j\pi(ua+vb)} \end{aligned}$$

- 令 $x_0(t) = at/T$, $y_0(t) = bt/T$
- 模拟运动效果

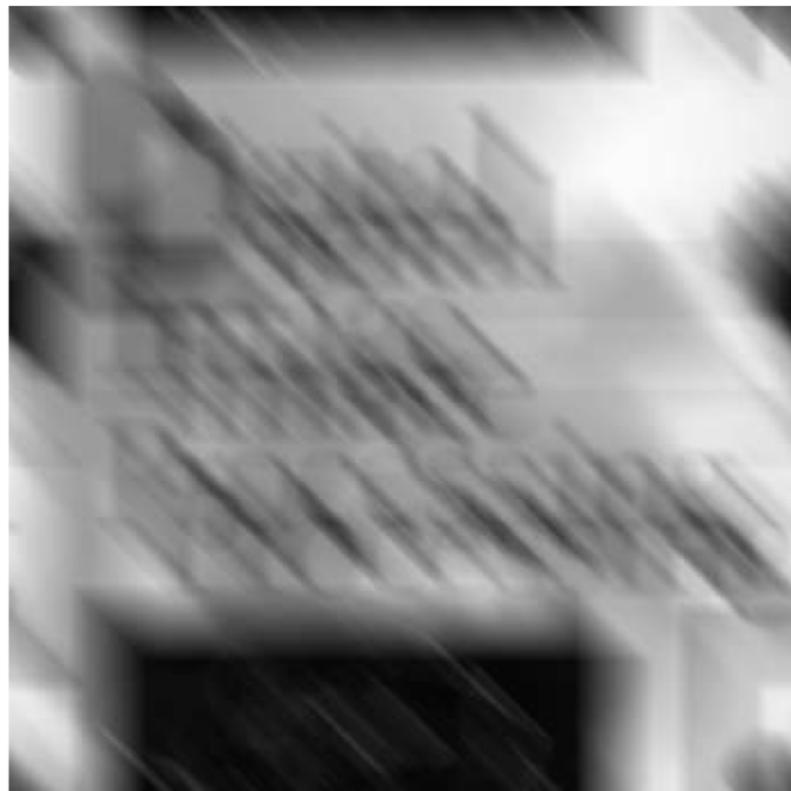
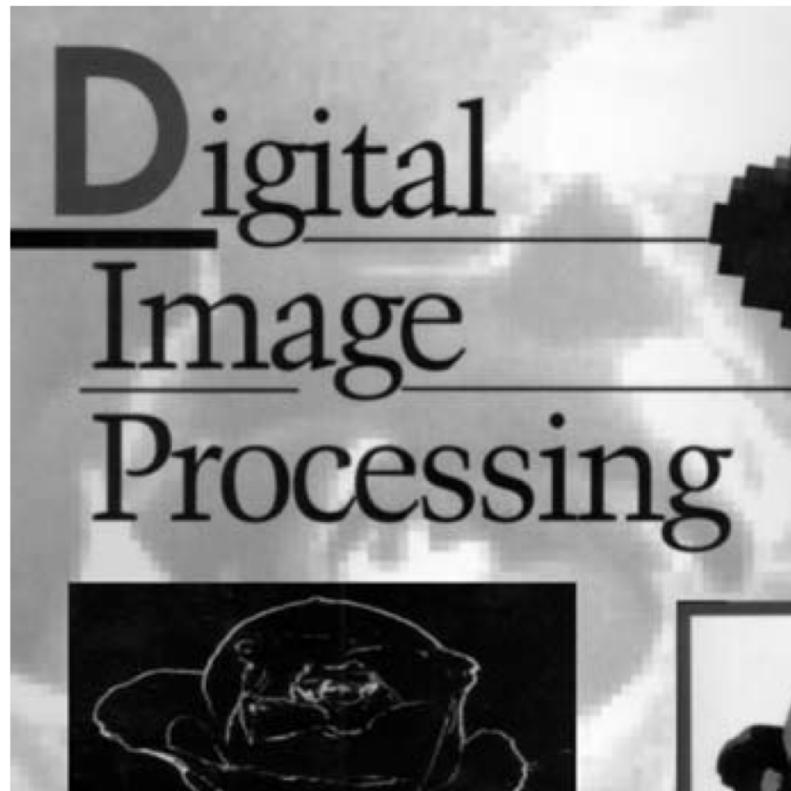
$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v)$$





举例

- 模拟运动效果
 - $a = b = 0.1$, $T = 1$





提纲

- 图像退化/复原建模
- 噪声模型
- 仅有噪声的图像复原
- 频域滤波消除周期噪声
- 线性、位置不变的退化
- 估计退化函数
- 逆滤波





逆滤波

- 退化函数 H 已知

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v)$$

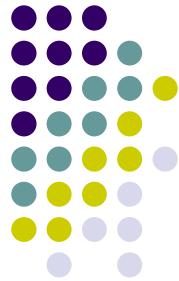
- 计算公式

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)}$$

$$\hat{F}(u, v) = F(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)}$$

- 防止除0
 - 截断频率高的分量





举例

- 退化模型已知



$$H(u, v) = e^{-k[(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2]^{5/6}}$$

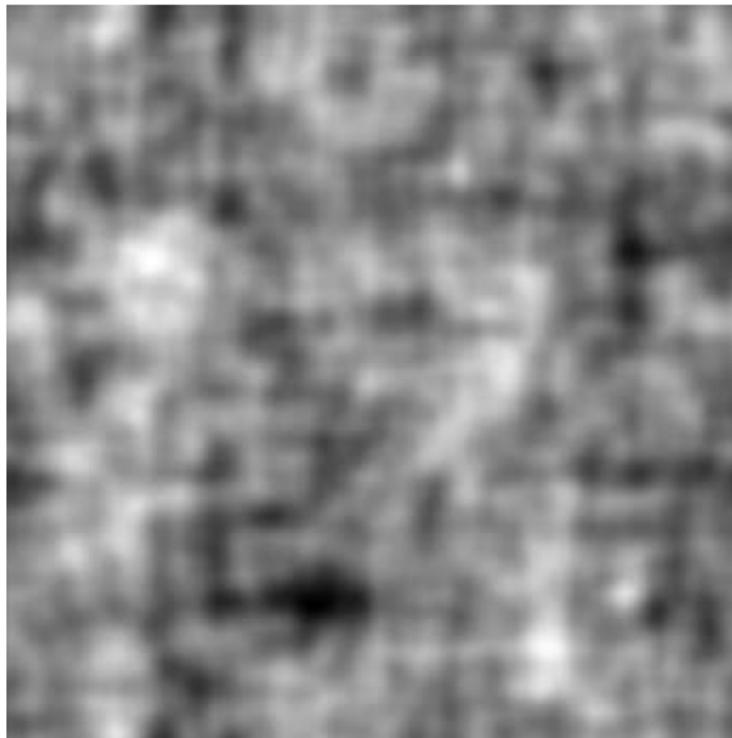




举例

- 逆变换

利用巴特沃斯低通滤波器截断



全滤波



40处截断





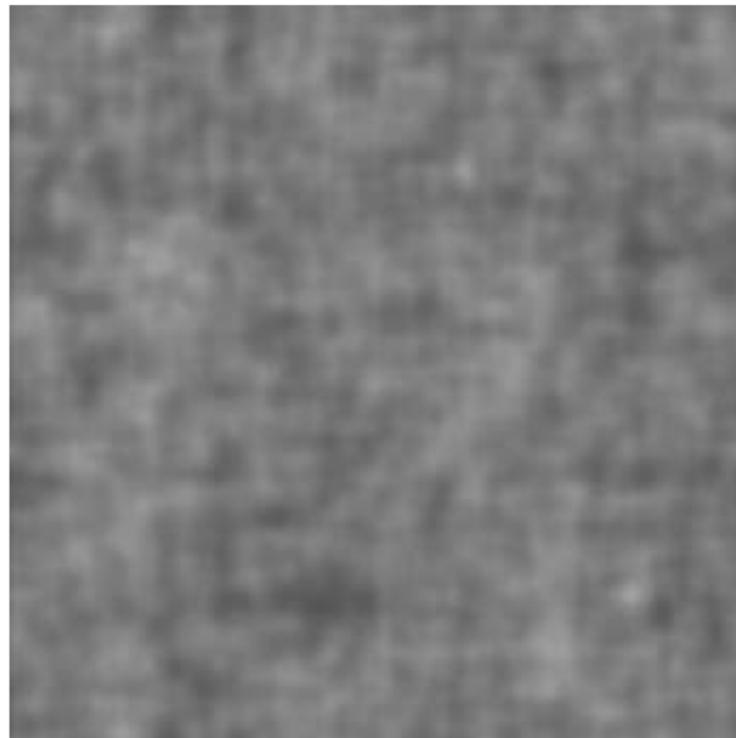
举例

- 逆变换

利用巴特沃斯低通滤波器截断



70处截断



85处截断

