



Technical University of Cluj - Napoca
Computer Science Department

Procesarea Imaginilor

Curs 9:

Zgomotul în imagini. Modelarea și eliminarea zgomotului



Definiția zgomotului

Zgomot := Orice proces (n) care afectează imaginea (f) și nu face parte din scenă (semnalul inițial - s):

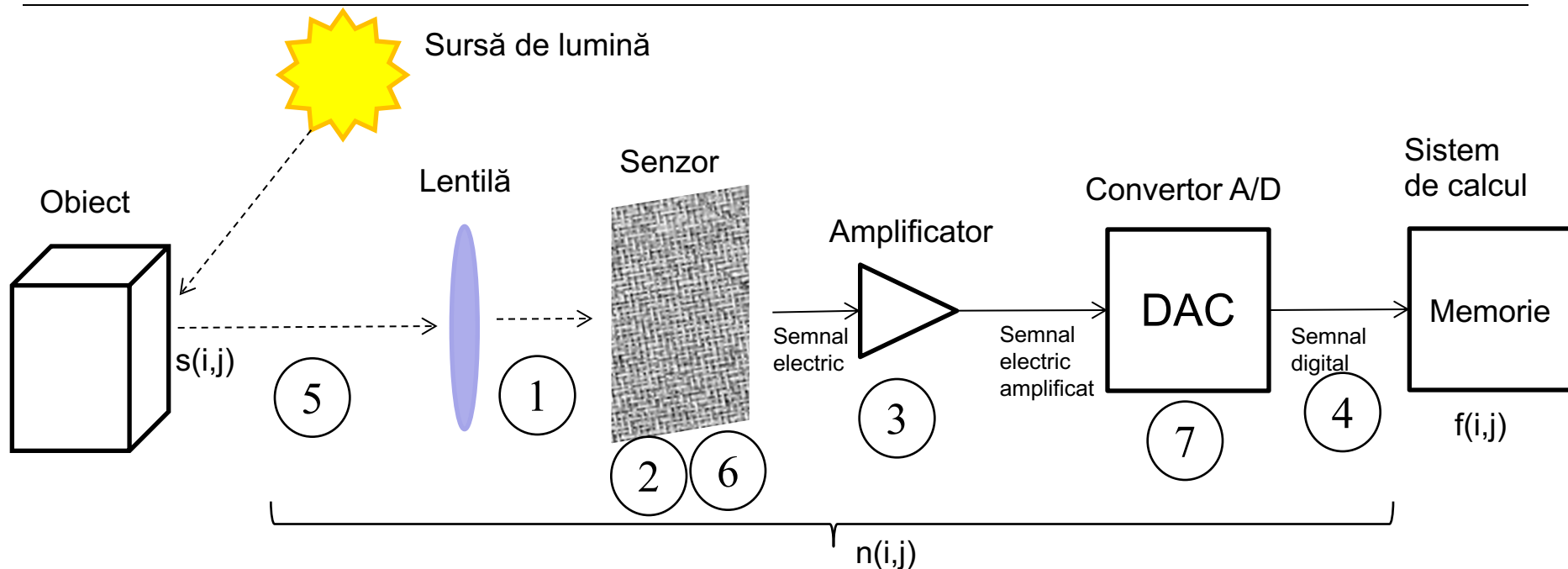
$$f(i,j) = s(i,j) + n(i,j) \text{ (modelul zgomotului aditiv)}$$

Cauze:

1. Natura discretă a radiației
2. Sensibilitatea detectorului (sensibilitate variabilă a elementelor din senzorul CCD/CMOS \Rightarrow fixed pattern noise (dark current noise (DCN) & photon response nonuniformity (PhRNU))
3. *Zgomot electric*
4. *Erori de transmisie a datelor*
5. *Turbulențe atmosferice*
6. *Rezoluția senzorului (cuantizarea spațială)*
7. *Digitizarea semnalului video (cuantizarea nivelelor de culoare / intensitate)*



Surse de zgomot



$s(i,j)$ – semnalul inițial, lumina reflectată de pe obiect

$f(i,j)$ – semnalul (imaginea digitală) memorat în sistemul de calcul

$n(i,j)$ – zgomot, procese care se interpun între s și f (1...7)

1 – Natura discretă a radiației

2 – Sensibilitatea variabilă a elementelor (pixelilor) senzorului

3 – Zgomotul electric

4 – Erori de transmisie a datelor

5 – Turbulențe atmosferice

6 – Rezoluția senzorului (erori de cuantizare spațială)

7 – Rezoluția convertorului A/D (erori de cuantizare a semnalului analogic)



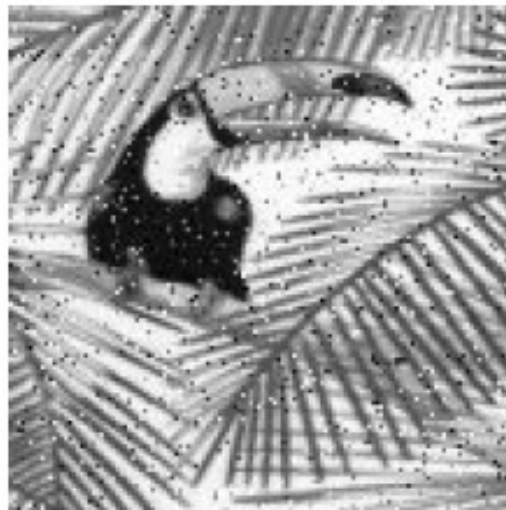
Zgomotul cauzat de pierderea datelor

“Data dropout noise”

- Cauza: biți pierduți sau alterați pe canalele de transmisie
- De obicei apare ca “zăpadă” pe imagine
- Zgomot ce afectează de obicei imaginile preluate din satelit
- Acest zgomot nu este corelat cu datele din imagine
- Acest zgomot poate fi eliminat fără degradarea imaginii dacă el afectează sub 1.5% din pixeli



1 in 100 bits



1 in 20 bits



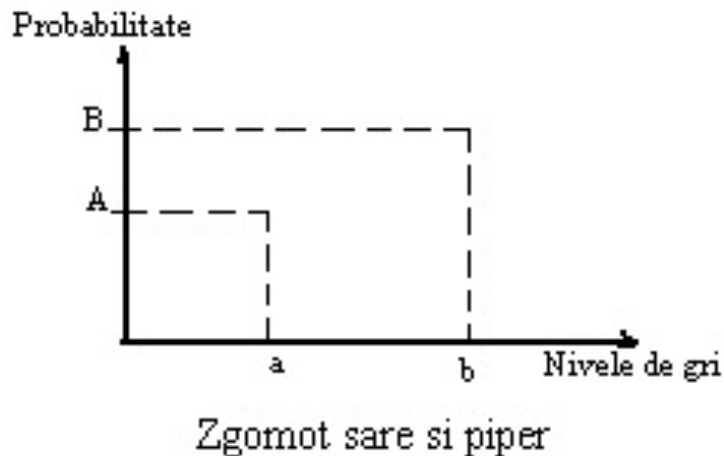
Zgomot Salt & Pepper (sare și piper)

Caz particular al zgomotului cauzat de pierderea datelor, cauzat de:

- funcționarea proastă a celulelor din senzorii camerelor
- greșeli ale locațiilor de memorie
- erori de sincronizare în procesul de digitizare
- erori (pierderi de biți) pe canalul de comunicație în cazul transmisiilor imaginilor (ex: transmisii prin satelit în condiții atmosferice proaste).

Model

$$FDP_{Sare\&\;piper} = \begin{cases} A & \text{pentru } g = a \text{ ("piper")} \\ B & \text{pentru } g = b \text{ ("sare")} \end{cases}$$



În modelul de zgomot de tip **salt & pepper** există doar două valori posibile, a și b. Din aceasta cauză se mai numește și zgomot de tip impuls (speckle). Probabilitatea de apariție a fiecăruia este mai mică de 0.1; La valori mai mari decât acestea, zgomotul va domina imaginea. Pentru o imagine de 8 biți, valoare de intensitate tipică pentru *zgomotul pepper* este ≈ 0 , și pentru *zgomotul salt* este ≈ 255 .



Zgomot Salt &Pepper (sare și piper)



Imaginea originală



Imagine cu zgomot
 $A = 0.005$, $B = 0.005$



Eliminarea zgomotului Sare și Piper

Se utilizează filtrul Median

- Gradul de filtrare este controlat prin dimensiunea filtrului



Filtru median 3x3



Filtru median 15x15



Zgomotul cu model fix (“fixed pattern noise”)

Cauze

- Celulele individuale ale senzorilor de imagine (CCD sau CMOS) au sensibilitate diferită, rezultând tensiune de ieșire diferită pentru aceeași cantitate de lumină captată.
- Sensibilitatea diferită este cauzată de imperfecțiuni ale procesului de fabricație.
- Acest zgomot se poate corecta prin calibrarea fiecărui pixel al senzorului.



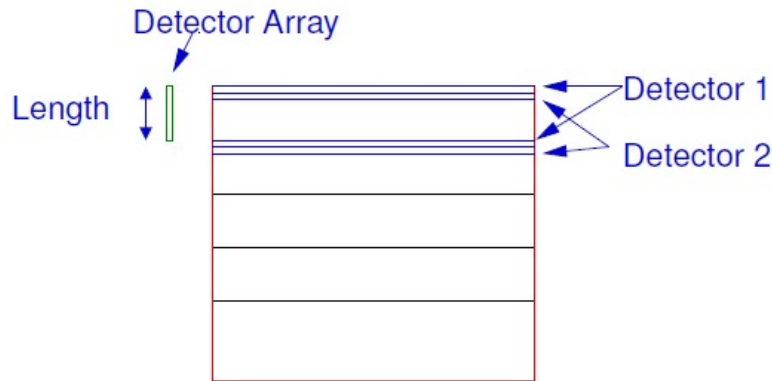
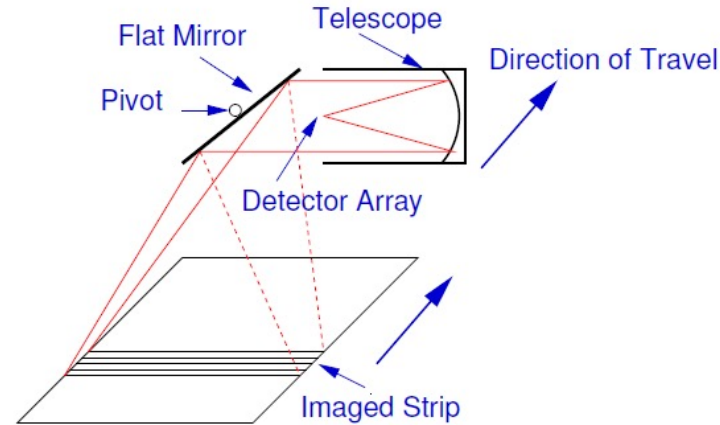
Zgomot FPN tipic, amplificat pentru vizibilitate (în realitate, diferența între minim și maxim este de 5 nivele de gri)

- Se fac măsurători în mai multe condiții de iluminare, și se calculează un profil de sensibilitate pentru fiecare pixel.
- Corecția FPN este necesară pentru aplicații unde răspunsul trebuie să fie foarte precis, cum ar fi aplicațiile astronomice.



Zgomotul cu model fix (“fixed pattern noise”)

Zgomot cu model fix datorat unor procese de scanare



(a) Image Geometry



(b) Typical image

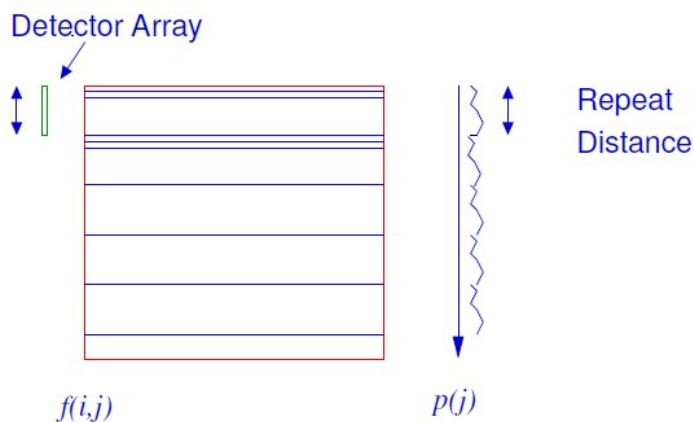


Zgomotul cu model fix (“fixed pattern noise”)

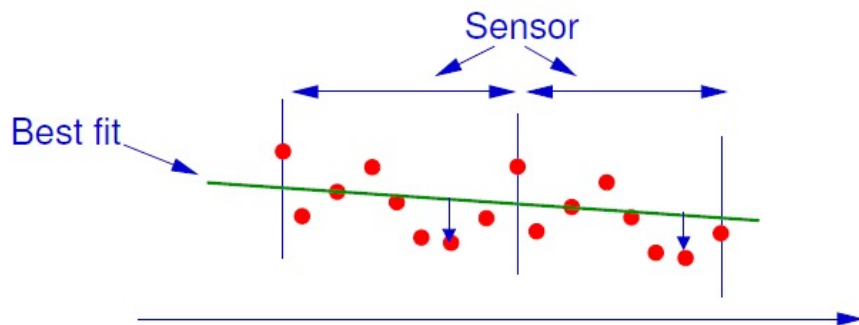
Zgomot cu model fix datorat unor procese de scanare

- Zgomotul este repetitiv, cu perioada dată de lăţimea senzorului
- Prin analiza proiecţiei imaginii, se poate determina perioada

$$p(j) = \sum_{i=0}^{N-1} f(i, j)$$



- Se poate analiza zgomotul ca o deviere faţă de o liniaritate locală:





Zgomot uniform

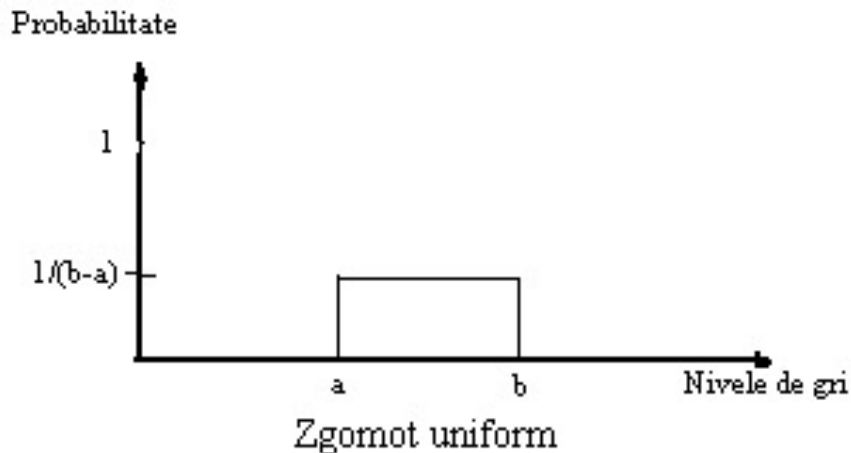
- Model teoretic, simplu de generat
- Folosit la degradarea imaginilor pentru evaluarea algoritmilor de restaurare (deoarece oferă un model de zgomot neutru)

Model

$$FDP_{Uniform} = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , a \leq g \leq b \\ 0 & , \text{altfel} \end{cases}$$

Media: $\mu = (a+b)/2$

Varianța: $\sigma^2 = (b-a)^2/12$



Cu distribuția uniformă, valorile nivelelor de gri ale zgomotelor sunt distribuite într-un domeniu specific, care poate fi întreg domeniul (0 - 255 pentru 8 biți), sau o porțiune mai mică din acest domeniu [a ... b].



Zgomot uniform

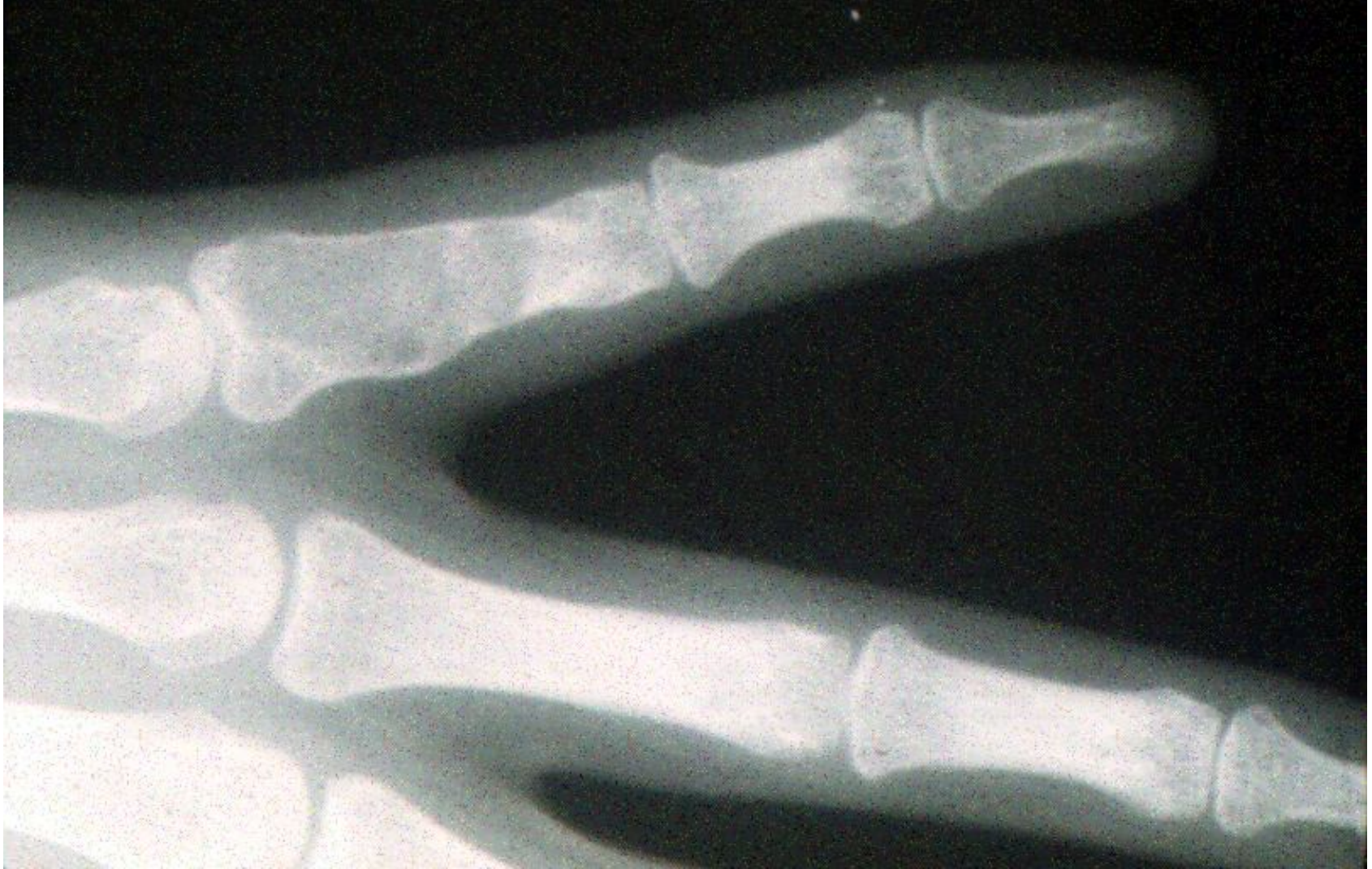


IMAGE PROCESSING



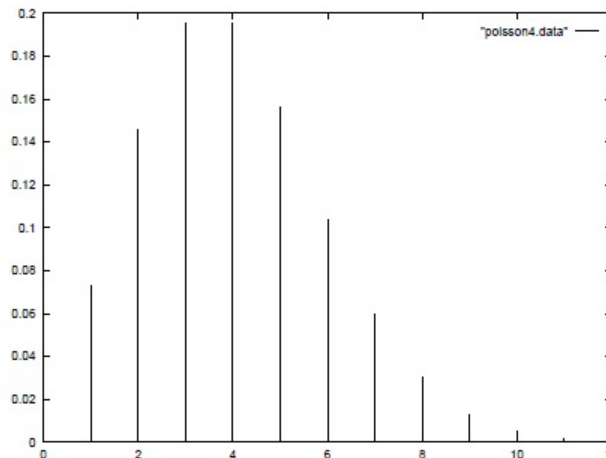
Zgomotul din procesul de detecție

- “Detector noise”, “Shot noise”
- Zgomot intrinsec procesului de măsură, ce nu are legătură cu sistemul de captare a imaginii.
- Toate sistemele de captare a imaginii numără de fapt particule, electroni sau fotoni, care sunt supuse legilor fizice și statistice
- Pentru o sursă cu strălucirea medie $\langle \mu \rangle$ valoarea așteptată este:

$$\langle f \rangle = \Delta t \langle \mu \rangle$$

- O singură observație va fi o variabilă aleatoare din distribuția de probabilitate:

$$p(f) = \frac{\langle f \rangle^f \exp(-\langle f \rangle)}{f!}$$

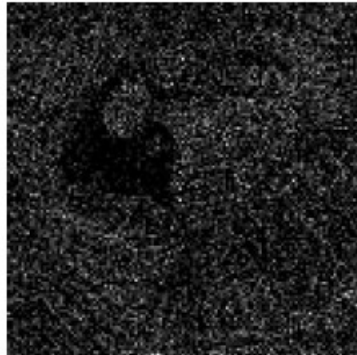


PDF a unei
distribuții Poisson
cu $\langle f \rangle = 4$

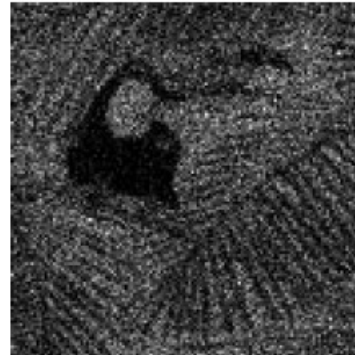


Zgomotul din procesul de detecție

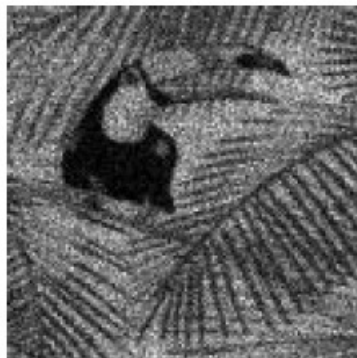
- Atunci când sunt puțini fotoni per pixel, zgomotul domină.



1 Photons/Pixel



4 Photons/Pixel



16 Photons/Pixel



64 Photons/Pixel

- În imaginile astronomice se pot întâlni și cazuri cu 0.1 fotoni/pixel.



Aproximarea Gaussiană

- Distribuția Poisson este dificil de utilizat. Pentru valori așteptate mari, această distribuție se poate aproxima printr-un Gaussian de medie u și varianță $\sigma^2 = 2u$

$$p(n) = \frac{u^n \exp(-u)}{n!} \rightarrow \frac{1}{(2\pi u)^{1/2}} \exp\left(\frac{-(n-u)^2}{2u}\right)$$

- Pentru $u > 20$, această aproximare are o eroare mai mică de 1%
- Astfel, pentru o medie $\langle f \rangle$ se aproximează $p(f)$ prin:

$$p(f) = \frac{1}{(2\pi \langle f \rangle)^{1/2}} \exp\left(\frac{-(f - \langle f \rangle)^2}{2\langle f \rangle}\right)$$

- Dacă privim valoarea măsurată f ca fiind supusă unui zgomot aditiv $f = \langle f \rangle + n$ unde n este zgomotul (de medie zero), avem PDF a zgomotului :

$$p(n) = \frac{1}{(2\pi \langle f \rangle)^{1/2}} \exp\left(\frac{-n^2}{2\langle f \rangle}\right)$$

- Acest zgomot este dependent de semnalul f , (Signal Dependent Additive Noise), și este dificil de procesat.



Zgomot Gaussian

- Folosit pentru modelarea proceselor naturale care introduc zgomote (ex: zgomotul electric din timpul procesului de achiziție, sau natura radiației)
- Zgomot aditiv independent de semnal (asumpție validă pentru imagini cu contrast mic)

Model

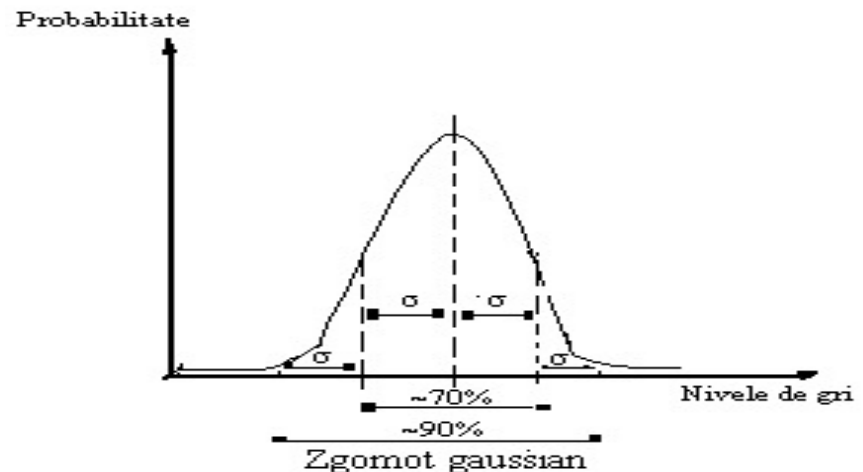
$$FDP_{Gaussian} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(g-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

unde:

g = nivel de gri;

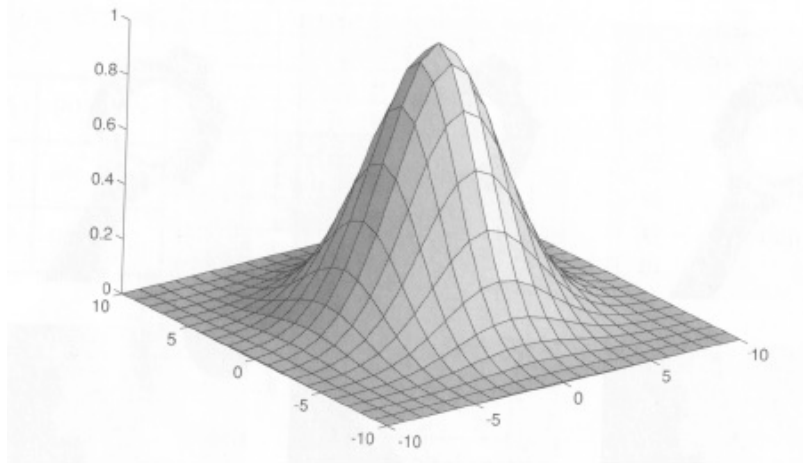
μ = media zgomotului;

σ = deviația standard a zgomotului;





Eliminarea zgomotului Gaussian

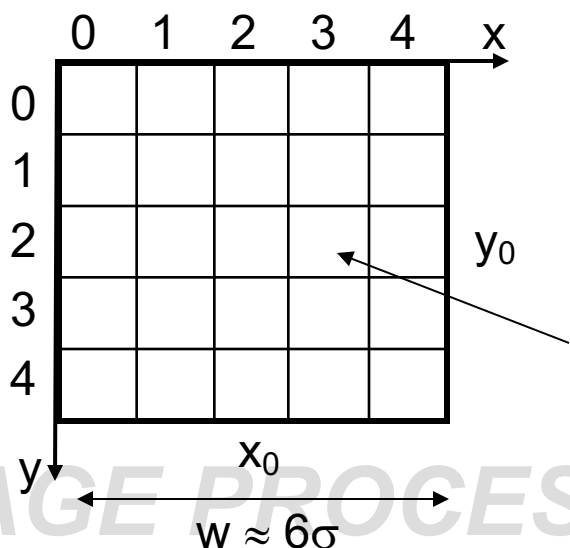


Nucleu de convoluție pentru eliminarea zgomotului Gaussian

$$G(x,y) = G(x)*G(y)$$

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Proiectarea unui nucleu de convoluție Gaussian pentru restaurarea imaginilor corupte de zgomot gaussian cu deviație standard σ și dimensiune w :



$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)}{2\sigma^2}}$$



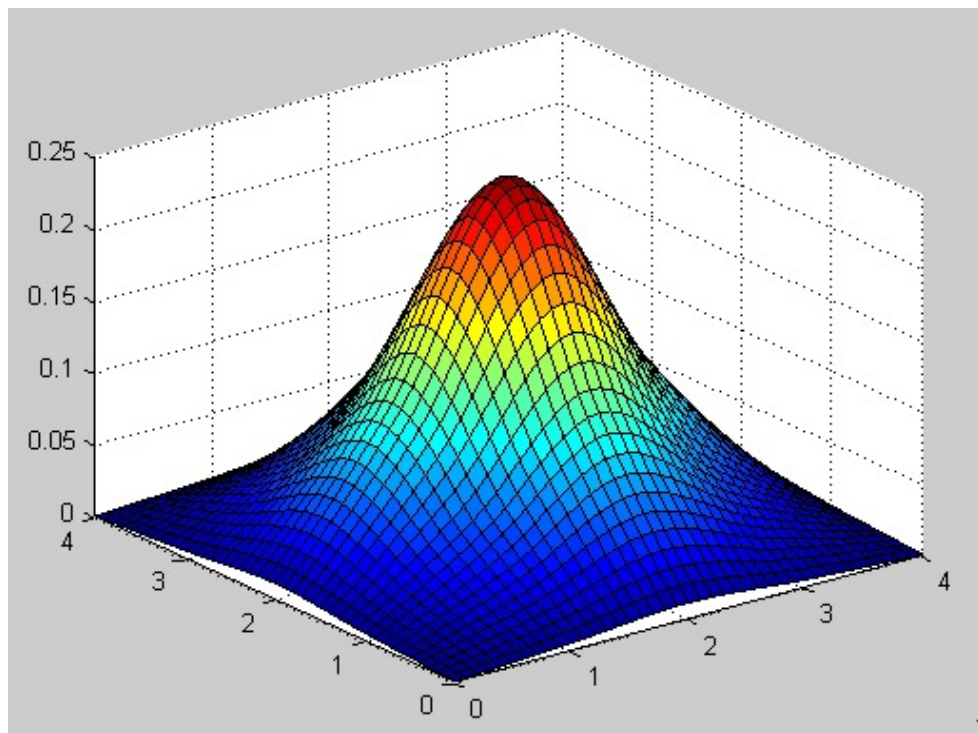
Eliminarea zgomotului Gaussian

Exemplu Matlab

```
function [G]=gaussian(sigma);  
w=round(6*sigma);  
x0=floor(w/2)+1;  
y0=x0;  
sigma2=2*sigma*sigma;  
for x=1:w  
    for y=1:w  
        G(x,y)=1/(pi*sigma2)*exp(-(x-x0)*(x-x0)+(y-y0)*(y-y0))/sigma2);  
    end  
end  
[X,Y] = meshgrid(1:1:w,1:1:w);  
Z = interp2(G,X,Y,'cubic');  
x=1:0.1:5  
y=1:0.1:5;  
surf(x,y,Z);
```

$$\sigma = 0.8 \Rightarrow w = 5$$

```
G =  
    0.0005    0.0050    0.0109    0.0050    0.0005  
    0.0050    0.0521    0.1139    0.0521    0.0050  
    0.0109    0.1139    0.2487    0.1139    0.0109  
    0.0050    0.0521    0.1139    0.0521    0.0050  
    0.0005    0.0050    0.0109    0.0050    0.0005  
  
>> sum(sum(G))  
ans =  
    0.9982
```



1



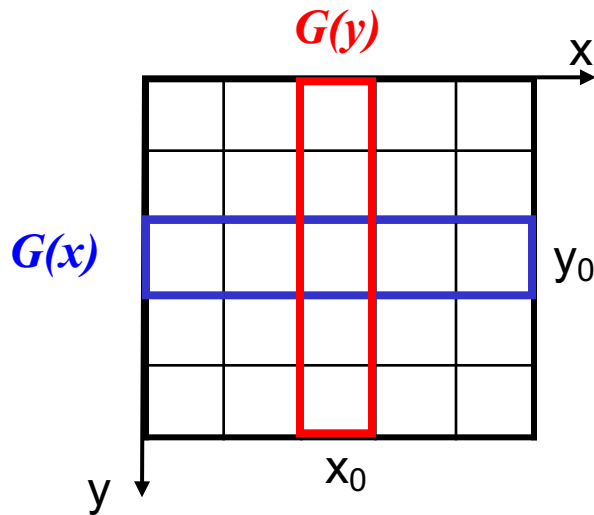
Eliminarea zgomotului Gaussian

Filtrare în domeniul spațial (cu nuclee de convoluție)

$$I_D(x, y) = G(x, y) * I_S(x, y)$$

sau

$$I_D(x, y) = (G(x) * G(y)) * I_S(x, y) = G(x) * (G(y) * I_S(x, y))$$



$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$$

$$G(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}}$$



Eliminarea zgomotului Gaussian - exemplu



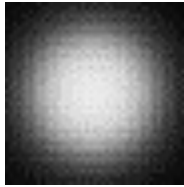
Imaginea originală, S



Imagine cu zgomot, $I = S + N(\text{Gaussian}, \text{Sigma}=10)$



Eliminarea zgomotului Gaussian - exemplu



Nucleu
Gaussian, G



Imagine filtrată, $F = I * G$



Zgomotul Gaussian în domeniul frecvențelor

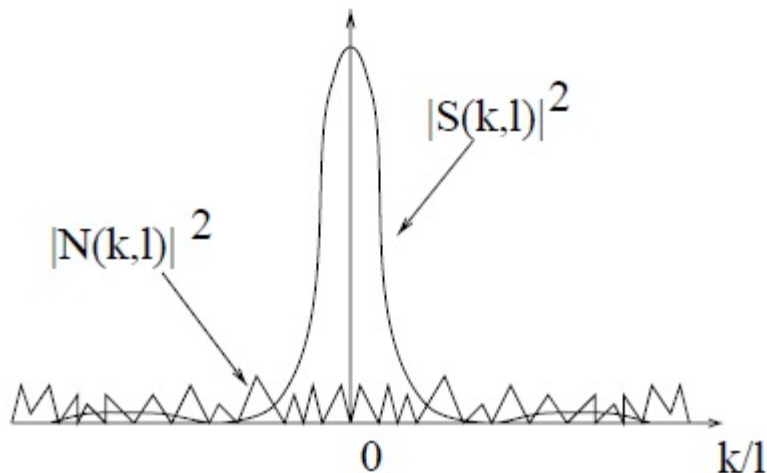
Zgomotul este aditiv, iar transformata Fourier este liniară, deci:

$$F(k, l) = S(k, l) + N(k, l)$$

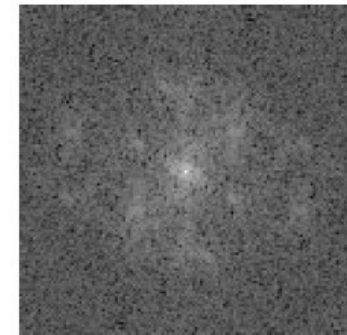
S – semnalul, concentrat în general în zonele de frecvență redusă

N – zgomotul, constant pentru toate frecvențele spațiale

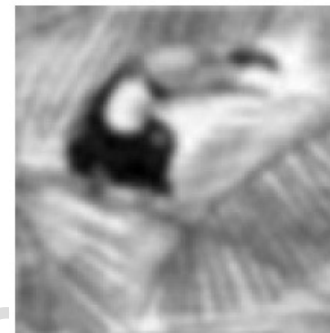
Zgomotul are efect mai puternic asupra frecvențelor spațiale mari:



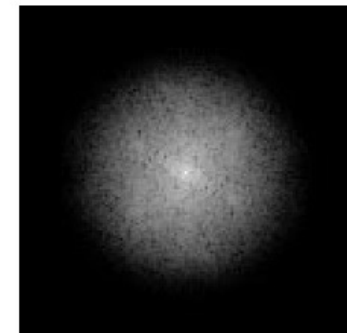
Noisy Image



Fourier Transform



Low-pass filtered



Fourier Transform



Determinarea prezentei zgomotului in imagine

Raportul semnal zgomot (Signal to Noise Ratio - SNR)

Modelul zgomotului aditiv:

$$f(i,j) = s(i,j) + n(i,j)$$

n – medie zero ($\langle n(i,j) \rangle = 0$) și independent de semnal ($\langle s(i,j)n(i,j) \rangle = 0$)
 \Rightarrow

$$\langle s(i,j) \rangle = \langle f(i,j) \rangle = \mu \quad \Rightarrow \text{Zgomotul afecteaza deviația standard (varianța) dar nu afectează media imaginii}$$
$$\sigma_f^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2$$

$$SNR = \frac{\sigma_s}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{\sigma_n^2} - 1}$$

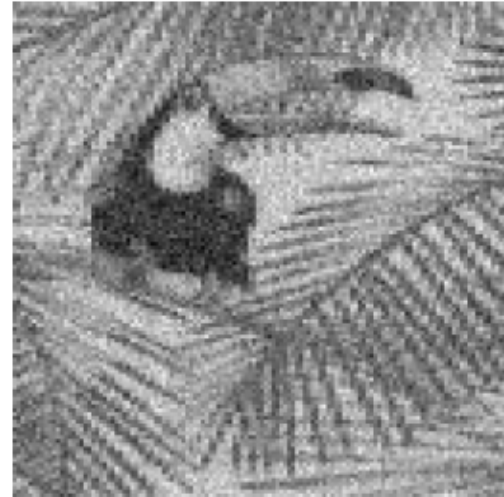
SNR	>	20	Little visible noise
SNR	\approx	10	Some noise visibile
SNR	\approx	4	Noise clearly visible
SNR	\approx	2	Image severely degraded
SNR	\approx	1	Is there an image?



SNR – Example:



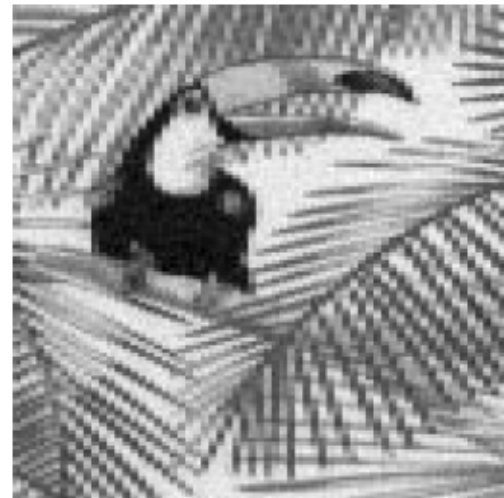
SNR = 1



SNR = 2



SNR = 4



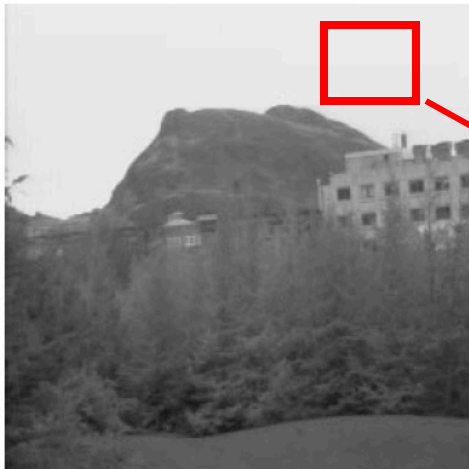
SNR = 8



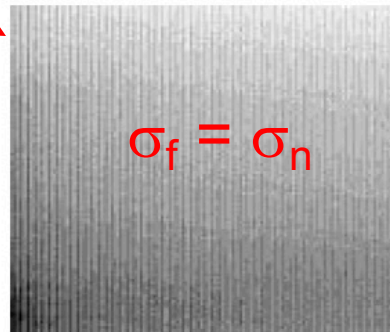
Calculul raportului semnal zgomot (SNR)

Dintr-o singură imagine

1. Se calculează σ_f pe toată imaginea
2. Se selectează o regiune cu intensitate uniformă $\sigma_s = 0$ (ex: zona de cer, apă, un perete uniform etc. și se calculează $\sigma_f = \sigma_n$



Imagine întreagă



Porțiune de cer

$$SNR = \frac{\sigma_s}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{\sigma_n^2} - 1}$$



Calculul raportului semnal zgomot (SNR)

Din două imagini succesive (în timp) ale aceleiași scene:

$$f(i,j) = s(i,j) + n(i,j)$$

$$g(i,j) = s(i,j) + m(i,j)$$

- n și m au aceeași FDP: au aceeași medie (0) și deviație standard
- n și m sunt necorelate (independente) de semnal: $\langle s(i,j)n(i,j) \rangle = 0$, $\langle s(i,j)m(i,j) \rangle = 0$

$$r = \frac{\langle (f - \langle f \rangle)(g - \langle g \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle \langle (g - \langle g \rangle)^2 \rangle}}$$

Corelația normalizată dintre f și g

$$r = \frac{\langle fg - \langle f \rangle \langle g \rangle \rangle}{\sqrt{\langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle \langle (g - \langle g \rangle)^2 \rangle}}$$

$$r = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \quad \text{SNR} = \sqrt{\frac{r}{1-r}}$$



[1] Noise in images, Lecture notes on Digital Image Analysis, Applied Optics Group, Department of Physics, University of Edinburgh.

<https://www2.ph.ed.ac.uk/~wjh/teaching/dia/noise.shtml>