

# Introduktion til Digital Signalanalyse

## Eksamensforberedelse

Jonas Lind

15-08-2017

### Indhold

1	Analyse af digitale signaler med Diskret Fourier Transformation og Spektrogram	2
2	Spektral forbredning, zero-padding og window functions i relation til DFT	4
3	FIR/IIR filter analyse og design vha. placering af poler/nuller i pol-nulpunkts-diagrammet	6
4	Window method til FIR filter design	10
5	Interpolation og decimation	12
6	Differentiation og integration	16
7	Stokastiske signaler, herunder middelværdi, varians, sandsynligheds-tæthedsfunktion og histogram	19
8	Beregning af Signal-Noise Ratio i tids- og frekvens-domænet	21
9	Midlingsfiltre	23
10	Auto- og kryds-korrelation	26
11	CASE projekt 1 – FSK transmission	28
12	CASE projekt 2 – Audio filter	30
13	CASE projekt 3 – Vejecelle	33
14	CASE projekt 4 - Sonar	36

# 1 Analyse af digitale signaler med Diskret Fourier Transformation og Spektrogram

## 1.1 DFT

- Tidsinvariant (amplitude, frekvens og fase ændrer sig ikke med tiden indenfor vinduet der analyseres).
- Bruges til at transformere tidsdomæne data til frekvensdomæne data.
  - Et tidsdiskret signal i tidsdomænet transformeres til et signal angivet som et komplekst frekvensspektrum i frekvensdomænet.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi mn}{N}} \quad (1)$$

$n$  = tidsindex,  $m$  = frekvensindex,  $f_s$  = samplingsfrekvens,  $N$  = antal samples

- Eulers formel bruges for at beregne den reelle del og den imaginære del.

$$e^{-j\theta} = \cos(\theta) - j\sin(\theta) \quad (2)$$

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left( \cos\left(\frac{-j2\pi mn}{N}\right) \sin\left(\frac{-j2\pi mn}{N}\right) \right) \quad (3)$$

**Amplitudespektrum** Amplituden af  $X(m)$  kan beregnes ved længden af den reelle og imaginære del.

$$|X(m)| = \sqrt{\text{Re}(X(m))^2 + \text{Im}(X(m))^2} \quad (4)$$

**Effektspektrum** Effekten af  $X(m)$  kan beregnes ved at opløfte amplituden i 2. potens.

$$|X(m)|^2 \quad (5)$$

**Analyse frekvens** Samplefrekvensen kan findes ved en sample periode.

$$f_s = \frac{1}{t_s} \quad (6)$$

$$f_{\text{analyse}}(m) = \frac{mf_s}{N} \quad (7)$$

## 1.2 Frekvensopløsning

- Længden af vinduet bestemmer frekvensopløsningen.
  - Et bredt vindue øger frekvens opløsningen, men der ting der forhindrer det praktisk.
  - Hvis ikke  $\Delta R$  går op i sinus signalet kommer der spektral forbredning.
- Inputsignalet har en frekvens der ligger under  $\Delta R$ , vil der opstå spektral forbredning og inputsignalet vil vise sig i alle output "bins".

$$\Delta R = \frac{f_s}{N} \quad (8)$$

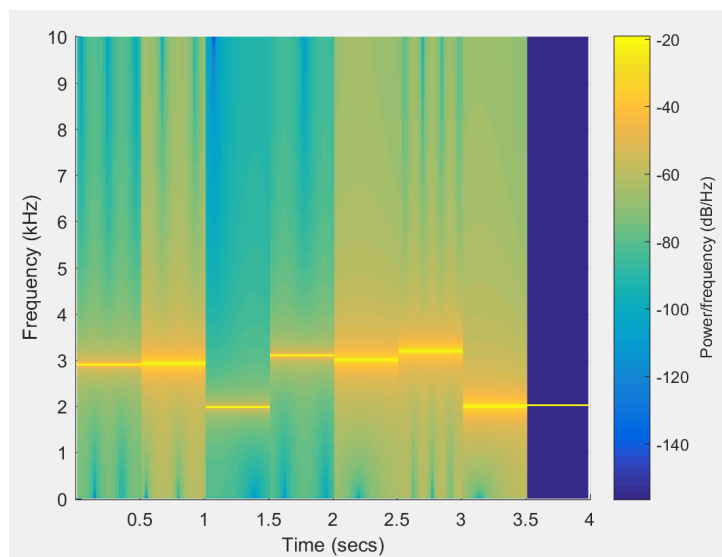
- Et bredt vindue medfører
  - Sampletiden forlænges og det betyder lange delays og en større DFT udregning.
  - Et langt vindue vil resultere i et signal der varierer med tiden.
  - Det medfører en ukorrekt frekvensanalyse hvis DFT udføres på et signal der ændrer sig over tid.

### 1.3 Short-Time DFT

- Løsningen på at udføre DFT på et bredt vindue.
  - Bryder et langt signal ned til mindre segmenter og analyserer hvert enkelt segment med DFT.
  - Segmenterne er i et fast interval fra  $k = 0$  til  $k = N - 1$ .
  - Når  $n$  ændres glider vinduet over på et andet segment af signalet.

### 1.4 Spektrogram

- Der er et trade-off imellem en god frekvensopløsning eller en god tidsopløsning.
  - Et smalt vindue giver en god opløsning i tid, men giver en dårlig opløsning i frekvens.
  - Et bredt vindue giver en god opløsning i frekvens, men en dårlig opløsning i tid.



Figur 1: Spektrogram af frekvenserne sendt gennem kommunikationssystemet Frequency-Shift Keying.

### 1.5 Invers-DFT

- Bruges til at transformere frekvensdomæne data til tidsdomæne data.

$$X(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j \frac{2\pi m n}{N}} \quad (9)$$

## 2 Spektral forbredning, zero-padding og window functions i relation til DFT

### 2.1 DFT

- Tidsinvariant (amplitude, frekvens og fase ændrer sig ikke med tiden indenfor vinduet der analyseres).
- Bruges til at transformere tidsdomæne data til frekvensdomæne data.
  - Et tidsdiskret signal i tidsdomænet transformeres til et signal angivet som et komplekst frekvensspektrum i frekvensdomænet.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi mn/N} \quad (10)$$

### 2.2 Spektral forbredning

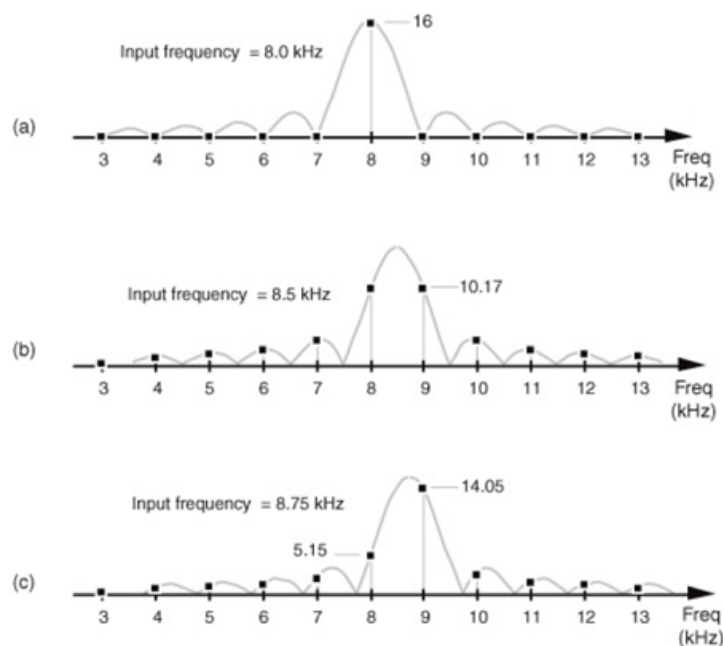
- Længden  $N$  af vinduet bestemmer frekvensopløsningen.
- Et bredt vindue øger frekvens opløsningen, men der er ting der forhindrer det praktisk.

$$\Delta R = \frac{f_s}{N} \quad (11)$$

- Hvis ikke  $\Delta R$  går op i sinus signalet kommer der spektral forbredning.
  - Inputsignalet har en frekvens der ligger mellem vores analyse frekvenser hvorved der opstår spektral forbredning og inputsignalet vil vise sig i alle output "bins-  $m$ ."

$$f_{analyse}(m) = \frac{mf_s}{N} \quad (12)$$

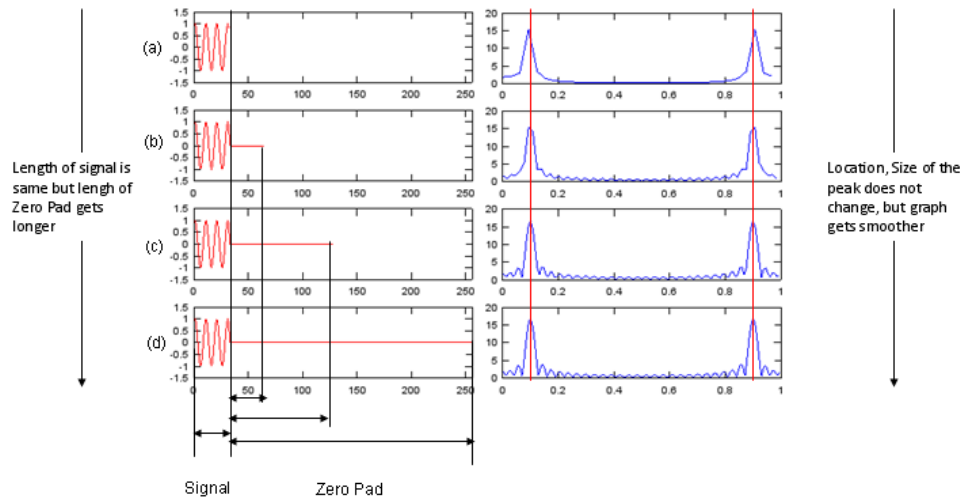
- Antal samples  $N$  er invers proportional med hovedsløjfens (main lobe) bredde.
- Spektral forbredning kan nemmere ses på en decibel skala.



Figur 2: Spektral forbredning.

## 2.3 Zero-padding

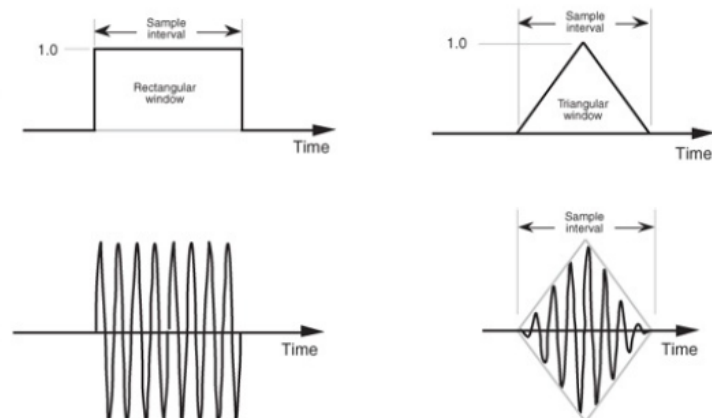
- Ved zero-padding forlænges et signal ved at tilføje et n antal 0'er til det oprindelige signal.
- Dette er med til at øge antallet af samples  $N$  også kaldet bins i frekvensdomænet, hvilket forbedrer frekvensopløsningen på signalet.
- Når der anvendes zero-padding skal det gøres før der foretages frekvensanalyse med DFT.



Figur 3: Zeropadding (a)  $N = 16$ , (b)  $N = 32$ , (c)  $N = 64$ , (d)  $N = 128$ .

## 2.4 Window functions

- Vindues metoder reducerer DFT-lækage ved at minimere størrelsen af sinc-funktionens sidelobes.
  - Samme amplitudeværdi af inputtet ved både start og slutningen af sample intervallet.
  - Hovedsløjfens peak værdi reduceres – kaldes for processing loss of a window.
- Tradeoff
  - Bredden af hovedsløjfen, dæmpningen af sidesløjferne og hastigheden hvorved de dæmpes.
- Anvendelse af både zero-padding og window functions
  - Vinduesfunktionen må kun anvendes på det originale signal inden der foretages zero-padding.

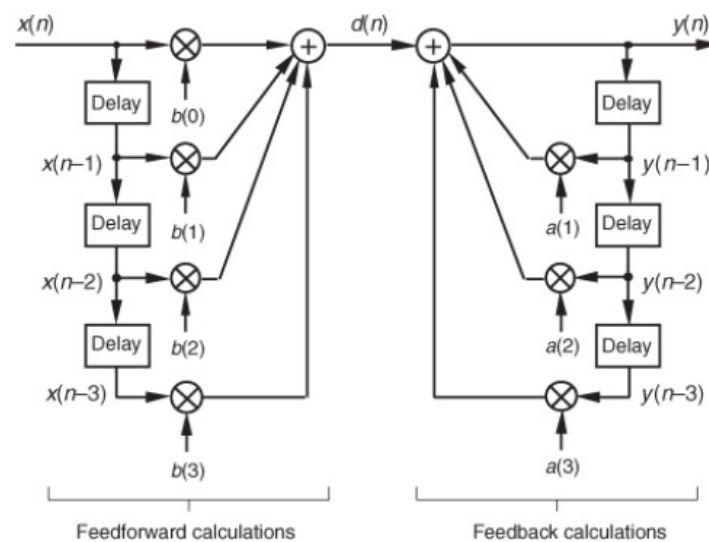


Figur 4: Rektangulær og Triangulær vinduesfunktion.

### 3 FIR/IIR filter analyse og design vha. placering af poler/nuller i pol-nulpunkts-diagrammet

#### 3.1 FIR- og IIR-filtre generelt

- FIR filter output samples afhænger kun af tidligere input samples.
- IIR filter output samples afhænger af tidligere input samples og af tidligere output samples.
- FIR filter har et endeligt impuls-respons og  $h(n) = \text{filter-koefficienter}$ .
- IIR filter har et uendeligt impuls-respons og  $h(n)$  skal med tiden falde mod 0 for at det er stabilt.



Figur 5: IIR digital filter struktur med feedforward og feedback udregninger.

Differensligning - Finite Impulse Response (FIR)

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M) \quad (13)$$

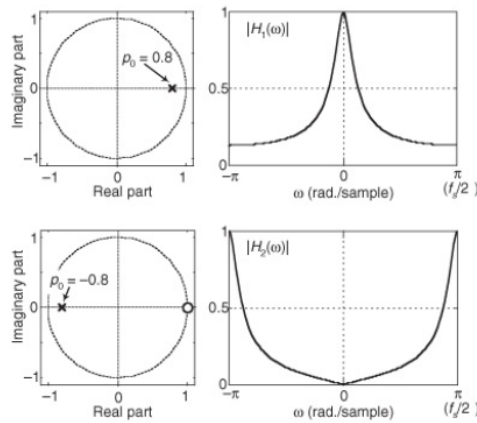
Differensligning - Infinite Impulse Respons (IIR)

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M) + a_1y(n-1) + a_2y(n-2) + \dots + a_Ny(n-N) \quad (14)$$

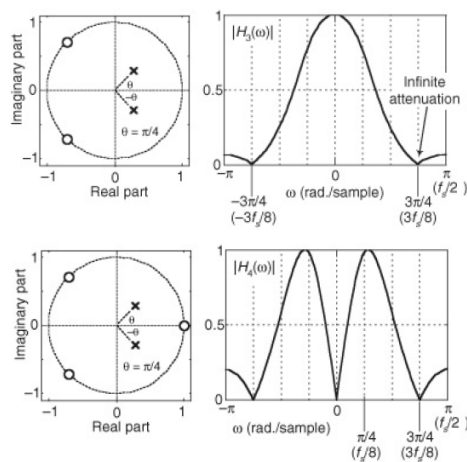
- Filtrets orden er største værdi af N og M.

#### 3.2 Pol-nulpunkts analyse

- FIR eller IIR-filter?
  - FIR har kun poler i origo.
  - IIR har flere poler.
- Poler danner peaks.
  - Har betydning for hvor meget frekvenserne bliver forstærket, hvis den placeres på enhedscirklen forstærkes frekvenserne uendeligt meget.
- Nulpunkter danner dyk.
  - Har betydning for hvor meget frekvenserne bliver dæmpet, hvis den placeres på enhedscirklen dæmpes frekvenserne uendeligt meget.

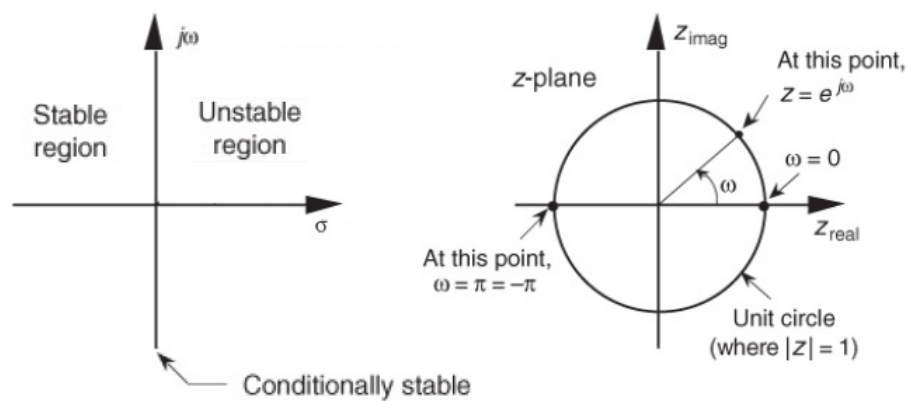


Figur 6: IIR filter poler/nulpunkter og normaliseret frekvens respons.



Figur 7: IIR filter poler/nulpunkter og normaliseret frekvens respons.

- Stabilitet.
  - Hvis alle poler er placeret inde i enhedscirklen vil filteret være stabilt.
  - Polen kan ophæves ved at have et nulpunkt med præcis samme afstand fra (0,0) og dermed samme længde.
  - Poler/nulpunkter placeret i (0,0) påvirker ikke filterets frekvens respons.



Figur 8: s-planet og z-planet.

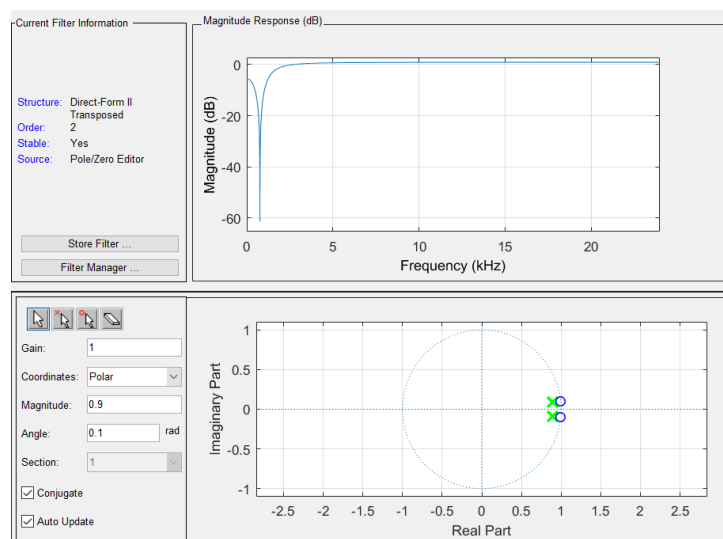
### 3.3 Design af 2. ordens IIR filter

- Et 2. ordens IIR notch filter designs ved at placere poler og nulpunkter i z-domænet.
- Nulpunkter/poler har en radius og vinkel da de er komplekse tal.
  - $r$  er nul-radius og  $\omega$  er nul-vinkel.
  - Nul-radius sættes til 1 og pol-radius sættes til 0,9 da det et skarpt filter ønskes.

$$z_0 = re^{j\omega} \mid p_0 = re^{j\omega} \quad (15)$$

- Vinklen af de to nulpunkter og to poler beregnes (kompleks konjugerede).

$$\omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \quad (16)$$

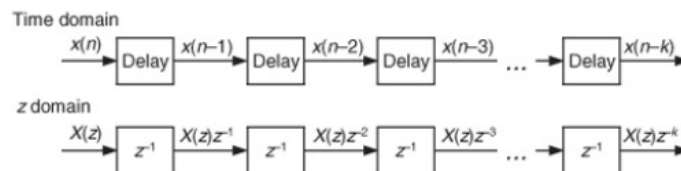


Figur 9: Filter Designer tool i Matlab.

- Overførelsesfunktionen  $H(z)$  i z-domænet opstilles ud fra poler/nulpunkter.

$$\begin{aligned} z_0 &= e^{j0,1028} \\ \bar{z}_0 &= e^{-j0,1028} \\ p_0 &= 0,9e^{j0,1028} \\ \bar{p}_0 &= 0,9e^{-j0,1028} \end{aligned}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = G \frac{(z - z_0)(z - \bar{z}_0)}{(z - p_0)(z - \bar{p}_0)} = G \frac{(z - e^{j0,1028})(z - e^{-j0,1028})}{(z - 0,9 \cdot e^{j0,1028})(z - 0,9 \cdot e^{-j0,1028})} \quad (17)$$



Figur 10: Tids- og z-domæne delay.

- Overførelsesfunktionen  $H(z)$  skrives om således at polynomierne er opløftet negativt.

$$H(z) = \frac{z^2 - 1,99z + 0,99}{z^2 - 1,79z + 0,81} \cdot \frac{z^{-2}}{z^{-2}} \longrightarrow \frac{1 - 1,99z^{-1} + 0,99z^{-2}}{1 - 1,79z^{-1} + 0,81z^{-2}} \quad (18)$$



- Brøkerne kan skrives ud.

$$Y(z)(1 - 1,79z^{-1} + 0,81z^{-2}) = X(z)(1 - 1,99z^{-1} + 0,99z^{-2}) \quad (19)$$

- Differensligningen kan opstilles ved at anvende invers z-transformation.

$$y(n) - 1,79y(n-1) + 0,81y(n-2) = x(n) - 1,99x(n-1) + 0,99x(n-2) \quad (20)$$

$$y(n) = 1x(n) - 1,99x(n-1) + 0,99x(n-2) + 1,79y(n-1) - 0,81y(n-2) \quad (21)$$

## 4 Window method til FIR filter design

- Metode til design af FIR filtre, hvor man i frekvensdomænet vælger frekvenser man ønsker at fjerne.
- Der bruges vinduer for at undgå Gibbs fænomen, som er 'ører' på et firkantsignal.

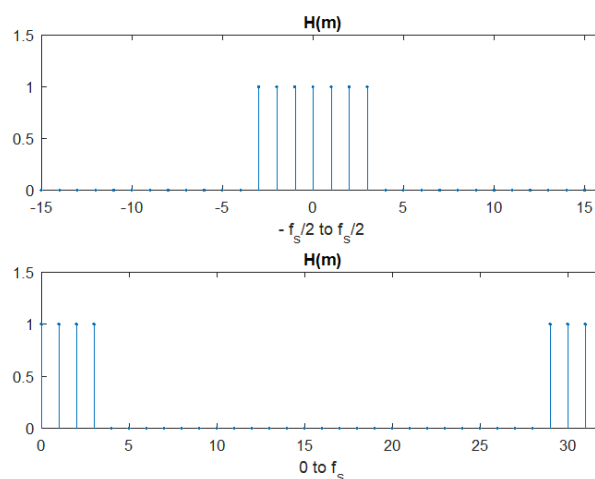
### 4.1 Filter design

- Fastlæg samplefrekvensen samt knækfrekvenser.
  - Antallet af filterkoefficienter/filterorden.
- Lav ideelt filter I frekvensdomænet.
  - Antal af bins bestemmer hvor præcist man kan ramme de valgte knækfrekvenser.
  - Giver et større group delay.
- Det ideelle filters overføringsfunktion konstrueres op til  $\frac{f_s}{2}$ , hvorefter det spejles omkring  $\frac{f_s}{2}$  for at danne den fulde overføringsfunktion.

$$N = 32$$

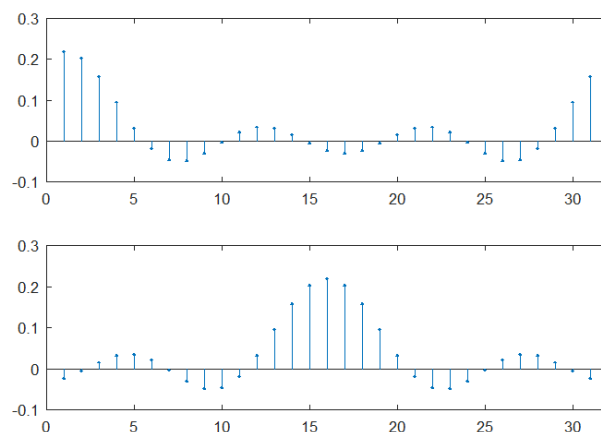
Normeret cut-off frekvens:  $f_{cut} = 0,2$

Hvilket bin-nummer rammer tættest på cut-off frekvensen:  $N_{cut} = \frac{f_{cut}}{2} \cdot N = 3,2 \approx 3$



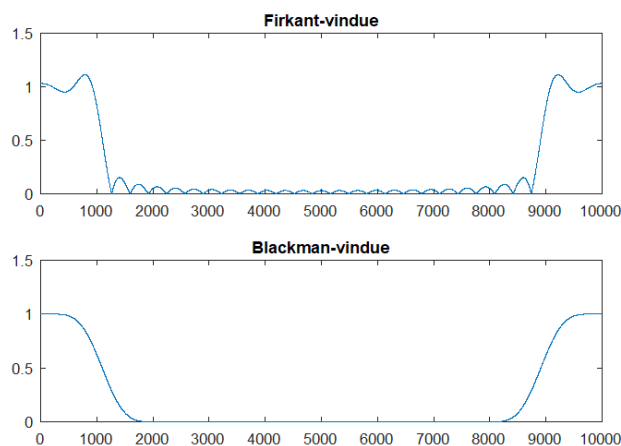
Figur 11: Ideelt lavpasfilter set med kontinuert frekvensrespons og diskret frekvensrespons.

- Der foretages en IDFT for at få filteret over i tidsdomænet.
  - I tidsdomænet bliver responset repræsenteret som en sinc-funktion.
- Sinc funktionen shiftes for at få peaket til at ligge midt i de valgte filterkoefficienter, da filterkoefficienterne skal være symmetriske for at få lineær fase.
  - Den sidste sample fjernes for at shifte impulsresponsen.



Figur 12: IDFT af det diskrete respons efterfulgt af et symmetrisk respons der er blevet shiftet.

- Et vindue ganges på for at udvælge betydende filterkoefficienter.
  - Et vindue giver en kraftigere dæmpning.
- Filteret kan trækkes over i frekvensdomænet med en DFT, for at validere at der gør som ønsket.



Figur 13: Der anvendes DFT for at trække filteret over i frekvensdomænet for at validere det.

## 4.2 Typer af vinduer

- Et firkant vindue giver den skarpeste cut-off frekvens, men resultere i ripple på flankerne.
  - Skyldes at firkanten repræsenteres som en sinc i frekvensdomænet, som foldes med den ideelle overføringsfunktion.
- Et Blackman vindue giver en større dæmpning og mindre ripple, men derimod mindre skarpe flanker.

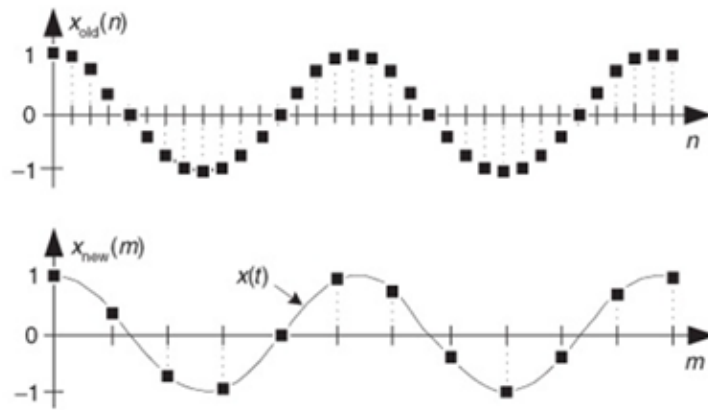
## 5 Interpolation og decimation

### 5.1 Decimation

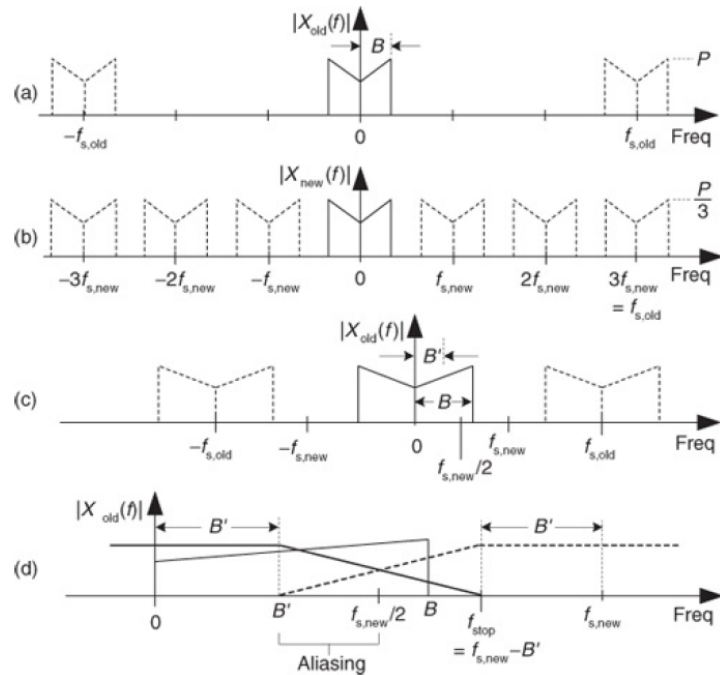
- To-trins proces med lavpasfiltrering efterfulgt af downsampling.
- Samplerate reduceres ved downsampling.
  - En sekvens af samplede signalværdier kan downsampled med en faktor  $M$  ved at beholde hver  $M$ -sample og kassere alle resterende samples.

$$f_{s\text{ new}} = \frac{f_{s\text{ old}}}{M} \quad (22)$$

$$x_{\text{new}}(m) = x_{\text{old}}(Mm) \quad (23)$$

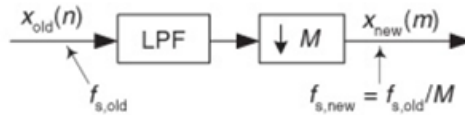


Figur 14: Sample rate konvertering med den originale sekvens øverst og den downsampled med  $M = 3$  sekvens nederst.



Figur 15: Spektrummet af et originalt båndbegrænset samplet  $x_{\text{old}}(n)$  signal er indikeret med solid lines. Spektralreplikationerne er angivet med dashed lines.

- $X_{new}(f)$  kan være opnået direkte ved at sample det originale kontinuerlige  $x(t)$  signal med en samplefrekvens på  $f_{s\ new}$ , i modsætning til nedsampling  $x_{old}(n)$  med en faktor på tre.
- Der er en grænse for hvor meget der kan downsamples i forhold til båndbredden  $B$  af det originale signal.
  - Den nye samplefrekvens  $f_{s\ new} > 2B$  for at forhindre aliasering.
  - Hvis en decimation kræver  $f_{s\ new} < 2B$ , skal  $x_{old}(n)$  være lavpasfiltreret før downsampling udføres.
    - \* Hvis det originale signal har en båndbredde  $B$  og det kun er båndbredden  $B_v$  der er interessant at beholde skal signal spektrummet over  $B'$  lavpas-filtreres med fuld dæmpning i stopbåndet fra  $f_{stop}$ .
    - \* Lavpas filteret's  $f_{stop}$  frekvens kan være så høj som  $f_{stop} = f_{s\ new} - B'$  og der vil ikke opstå aliasering i båndbredden  $B'$ .
- Downsampling medfører ikke amplitudetab i tidsdomænet.
- Downsampling medfører derimod et amplitudetab med en faktor  $M$  i frekvensdomænet,  $A_{new} = \frac{A}{M}$ .
  - DFT amplituden er proportional med antallet af samples i tidsdomænet.

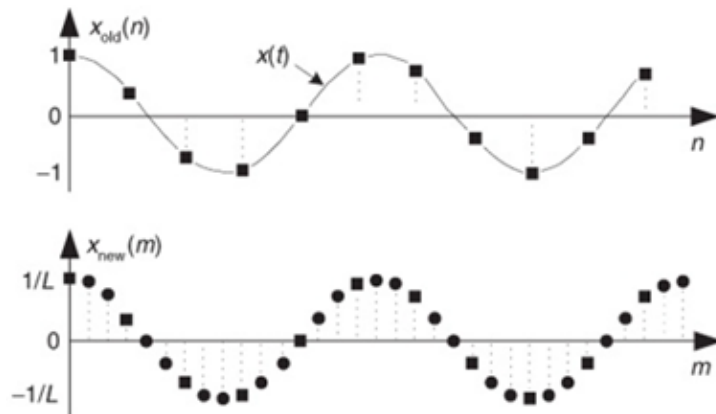


Figur 16: Decimation.

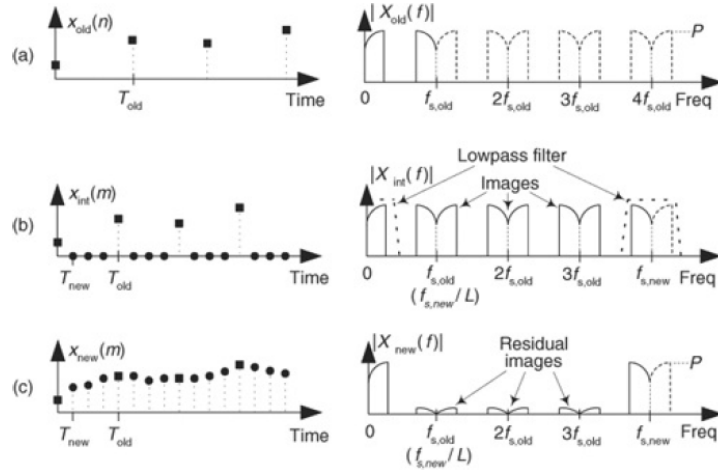
## 5.2 Interpolation

- Interpolation er en to-trins proces med upsampling efterfulgt af en lavpasfiltrering.
- Samplerate øges ved upsampling.
  - For at øge samplefrekvensen  $f_{s\ old}$  med en faktor  $L$  indsættes  $L-1$  zero-valued samples mellem hver sample i  $x_{old}(n)$ , hvilket skaber en længere sekvens.
  - I slutningen af den forlængede sekvens tilføjes også  $L-1$  zero-valued samples.

$$f_{s\ new} = L \cdot f_{s\ old} \quad (24)$$

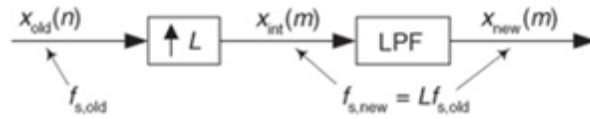


Figur 17: Interpolation med den originale sekvens øverst og den upsamlede med  $L = 3$  sekvens nederst.



Figur 18: Den originale sekvens øverst, den upsamplede med  $L = 4$  sekvens i midten og output sekvensen efter interpolation filter nederst.

- Lavpasfilteret sørger for at dæmpe de spektrale "images" i frekvensdomænet.
  - Dette filter kaldes for et interpolation filter.
- Interpolation medfører et amplitudetab med en faktor  $L$  i tidsdomænet, men det amplitudetab forsvinder i frekvensdomænet da sekvensen indeholder  $L$  gange flere samples.
  - DFT amplituden er proportional med antallet af samples i tidsdomænet.

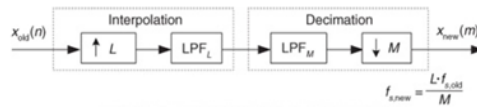


Figur 19: Interpolation.

### 5.3 Kombination af Interpolation og Decimation

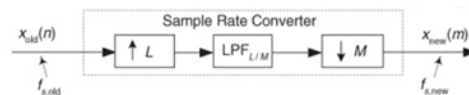
- Samplerate konvertering; Interpolation med en faktor  $L$  efterfulgt af Decimation med en faktor  $M$ .

$$\text{Sample rate conversion} = \frac{L}{M} \quad (25)$$



Figur 20: Kombination af interpolation/decimation.

- Interpolationsfiltret  $LPF_L$  og decimeringsfiltret  $LPF_M$  kan kombineres i et enkelt filter.
- Beregningsbyrden for at ændre sampreraten med  $L/M$  er mindre når filterne kombineres end ved en individuel interpolation efterfulgt af en individuel decimation.



Figur 21: Anvendelse af et multirate filter.

- Dette kaldes for en sample rate converter.
  - Hvis  $L > M$  har vi interpolation.
  - Hvis  $M > L$  har vi decimering.
- Filteret  $LPF_{L/M}$  kaldes ofte et multirate filter.
- For at undgå aliasering skal filteret,  $LPF_{L/M}$ , dæmpe alle frekvenser der ligger over:
  - $\frac{f_{s\ old}}{2}$
- Eller hvis  $LPF_{L/M}$  efter hvilken der er mindst:
  - $\frac{f_{s\ old}}{2} \left( \frac{L}{M} \right)$

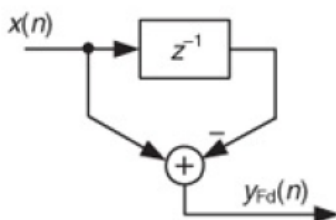
## 6 Differentiation og integration

Differentiation er godt beskrevet for kontinuerte signaler, men differation for diskrete signaler er ikke veldefineret. Derfor bruges der forskellige modeller for tilnærmelsesvis beregning af de afledte derativer i digital signal behandling.

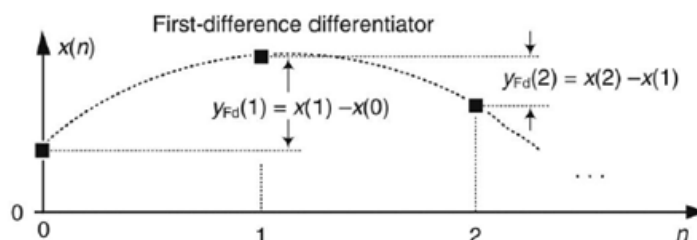
### 6.1 First-difference differentiator

- Beregner differenceen mellem hver sample.
- Forstærker højfrekvente spektrale komponenter, har samme karakteristik som et højpas filter.

$$y_{Fd}(n) = x(n) - x(n-1] \quad (26)$$



Figur 22: First-difference differentiator.

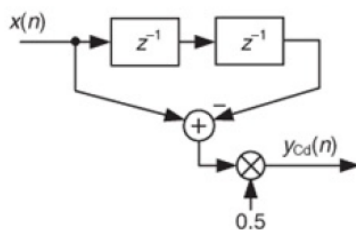


Figur 23: First-difference differentiator.

### 6.2 Central-difference differentiator

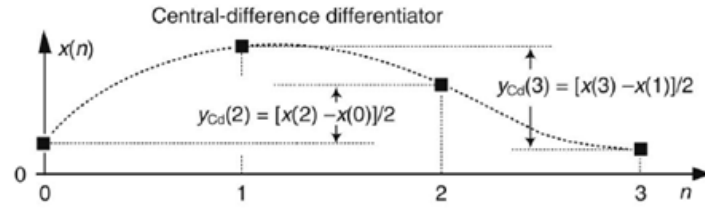
- Beregner den gennemsnitlige difference mellem hver 2. sample.
- Dæmper højfrekvente spektrale komponenter.

$$y_{Cd}(n) = \frac{x(n) - x(n-2]}{2} \quad (27)$$



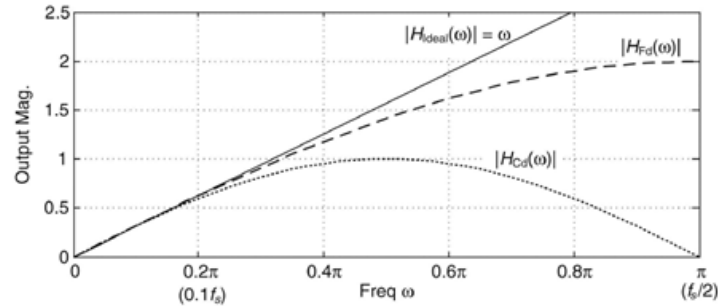
Figur 24: Central-difference differentiator.





Figur 25: Central-difference differentiator.

- First-difference og Central-difference differentiators er kun præcise når input signalets båndbredde er lille i forhold til input signalets sample rate  $f_s$ .
- Begge differentiators har lineære fase respons og dermed en konstant tidsforsinkelse kaldet *group delay*.
  - First-difference differentiator har en delayline på  $D = 1$  og dermed et group delay på  $G_{diff} = \frac{D}{2} = 1/2 = 0,5$  sample.
  - Central-difference differentiator har en delayline på  $D = 2$  og dermed et group delay på  $G_{diff} = \frac{D}{2} = 2/2 = 1$  sample.



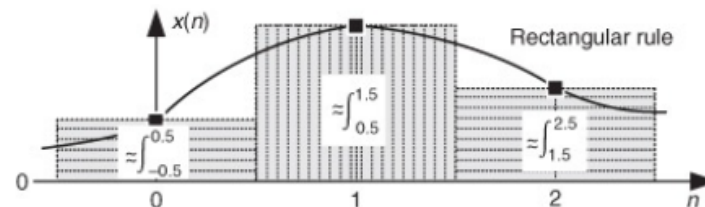
Figur 26: Frekvensrespons for simple differentiators.

### 6.3 Integration

Integration er godt beskrevet for kontinuerte signaler, men integration for diskrete signaler er ikke vel-defineret. Derfor bruges der forskellige modeller for tilnærmelsesvis kontinuert integration.

**Rectangular Rule Integrator** udregner summen af de skraverede rektangler. Den nuværende sum  $y_{Re}(n)$ , er den forhenværende sum  $y_{Re}(n-1)$  plus den nuværende input sample  $x(n)$ .

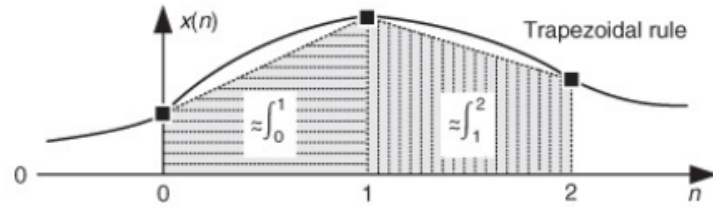
$$y_{Re}(n) = x(n) + y_{Re}(n-1) \quad (28)$$



Figur 27: Rectangular Rule Integrator.

**Trapezoidal Rule Integrator** udregner summen af  $y_{Tr}(n)$  ved at beregne arealet ved gennemsnittet af  $x(n) + x(n-1)$  i det skraverede areal til højre og addere det med værdien for den forhenstående sum  $y_{Tr}(n-1)$ .

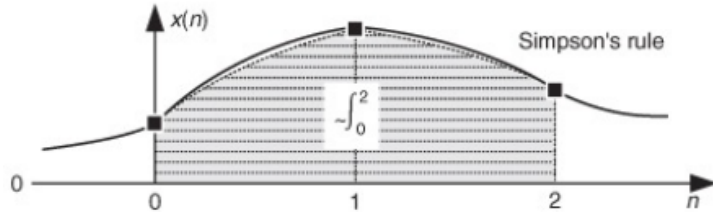
$$y_{Tr}(n) = 0.5x(n) + 0.5x(n-1) + y_{Tr}(n-1) \quad (29)$$



Figur 28: Trapezoidal Rule Integrator.

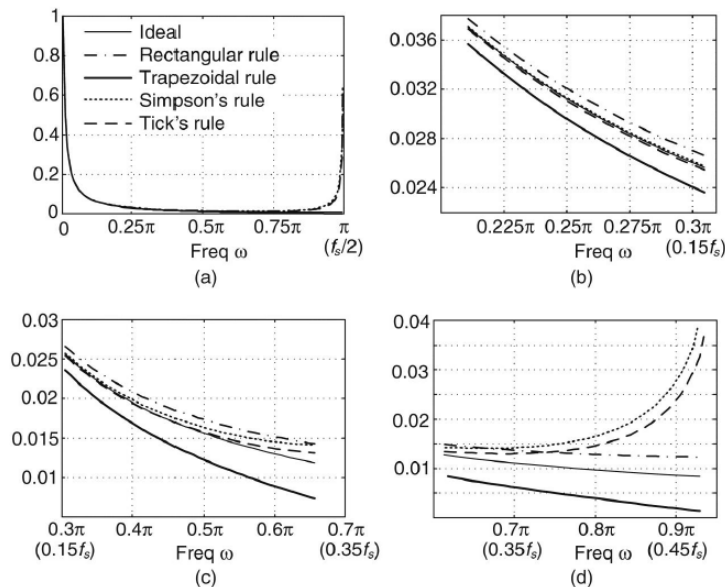
**Simpson's Rule Integrator** benytter tre samples til at beregne arealet under skraverede kurve.

$$y_{Si}(n) = \frac{x(n) + 4x(n-1)x(n-2)}{3} + y_{Si}(n-2) \quad (30)$$



Figur 29: Simpson's Rule Integrator.

- Simple integrators er præcise ved lave frekvenser (når input signallets båndbredde er lille i forhold til input signallets sample rate  $f_s$ ).
  - Det er her hvor det er mest nødvendigt med høj præcision.
- Ved højfrekvent støj scenarier skal Rectangular Rule eller Trapezoidal Rule integratorer anvendes, fordi de giver forbedret dæmpning af spektrale komponenter i nærheden af  $\frac{f_s}{2}$ .



Figur 30: Normaliseret frekvensrespons for fire integrators.

## 7 Stokastiske signaler, herunder middelværdi, varians, sandsynlighedstæthedsfunktion og histogram

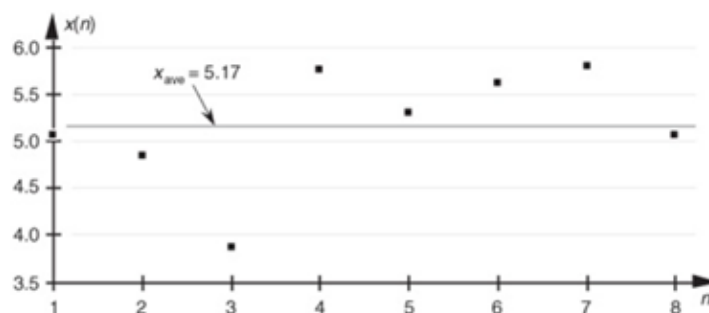
### 7.1 Stokastiske signaler

- Stokastisk ('tilfældig') signal.
  - Modsat deterministisk ('forudsigelig') som kunne være en sinus-tone eller et firkant-signal.
  - Kan ikke opskrive fast formel.
  - Kan beskrive signalet med middelværdi, varians, sandsynlighedsfunktion.

### 7.2 Middelværdi

- DC niveau.
  - Gennemsnittet af en sekvens af N samples er summen af disse samples divideret med N.
  - $x_{ave}$  er den værdi som summen af forskellene mellem  $x(n)$  og  $x_{ave} = 0$ .
  - Summen af sekvensen  $d_{iff}(n) = x(n) - x_{ave} = 0$ .
  - Lige meget værdi over som under gennemsnittet.

$$x_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (31)$$

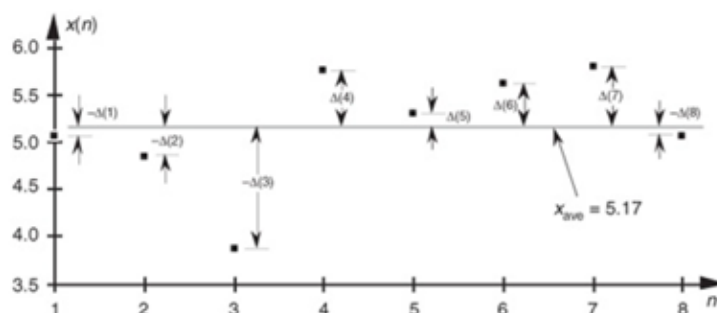


Figur 31: Gennemsnittet af en N lang sekvens.

### 7.3 Varians

- AC-middel-værdi.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - x_{ave})^2 \quad (32)$$



Figur 32: Variansen hvor  $\Delta(n) = x(n) - x_{ave}$ .

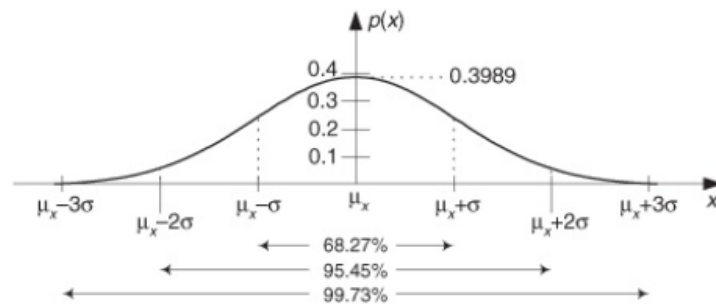
## 7.4 Standard afvigelse

- Standard afvigelsen svarer til RMS-værdien for en  $DC = 0$ .

$$\sigma = \sigma^2 \quad (33)$$

## 7.5 Sandsynligheds-tæthedsfunktion

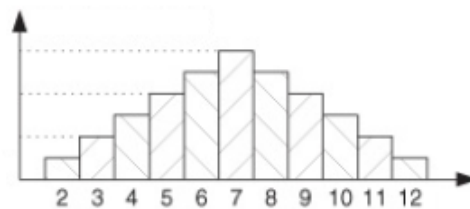
- Normal fordeling.
- Kurven topper ved gennemsnittet  $\mu_x$ .
- Standardafvigelsen afgør faconen  $\mu_x + \sigma$ .



Figur 33: Normalfordeling med gennemsnit  $= \mu_x$ .

## 7.6 Histogram

- Histogrammets vertikale akse er antallet af gange, som en bestemt værdi indtræffer i signalet.



Figur 34: Histogram.

## 8 Beregning af Signal-Noise Ratio i tids- og frekvens-domænet

Signal-to-noise ratio er forholdet mellem det ønskede signal og det uønskede signal (støj).

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (34)$$

### SNR i tidsdomænet

- Estimere SNR af et signal udfra signalets sampleværdier.
- Middel-effekt.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2 \quad (35)$$

- AC middel-effekt.

$$P = \sigma^2 + x_{ave}^2 \quad (36)$$

- SNR for AC udtrykkes ved variansen.

$$SNR = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad (37)$$

- I praksis kan et signal variere meget i effekt.
  - Meget anvendt at bruge dB til at måle SNR.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR) \quad (38)$$

- Hvis rms er oplyst i stedet for effekt.
  - Da der bruges en amplitude (volt eller ampere) i stedet for effekt benyttes  $20 \log_{10}$  istedet for  $10 \log_{10}$ .

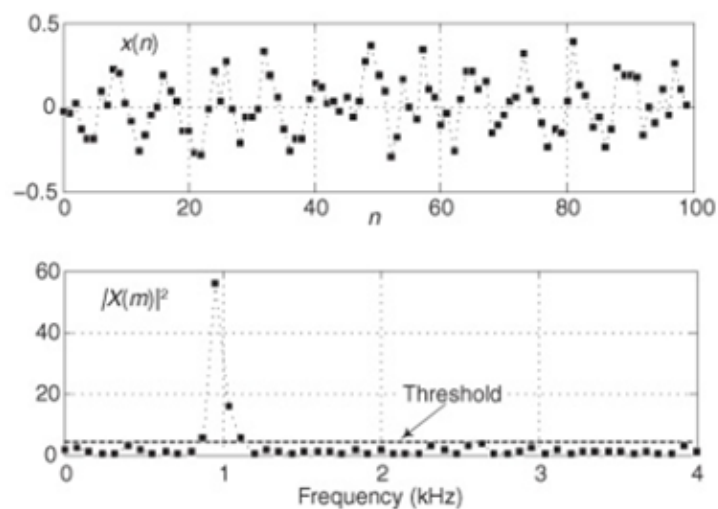
$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2} \quad (39)$$

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{x_{rms signal}}{x_{rms noise}} \right) \quad (40)$$

**SNR i frekvensdomænet** kan groft estimeres baseret på signalets egenskaber i frekvensdomænet.

- Der anvendes DFT på signalet i tidsdomænet og herefter fås de positive amplitudestørrelser  $|X(m)|^2$ .
- En threshold værdi fastsættes.
  - Over threshold værdien er det ønskede signals amplitudestørrelse.
  - Under threshold værdien er det uønskede støjsignals amplitudestørrelse.

$$SNR = \frac{\text{sum of samples above threshold}}{\text{sum of samples below threshold}} \quad (41)$$



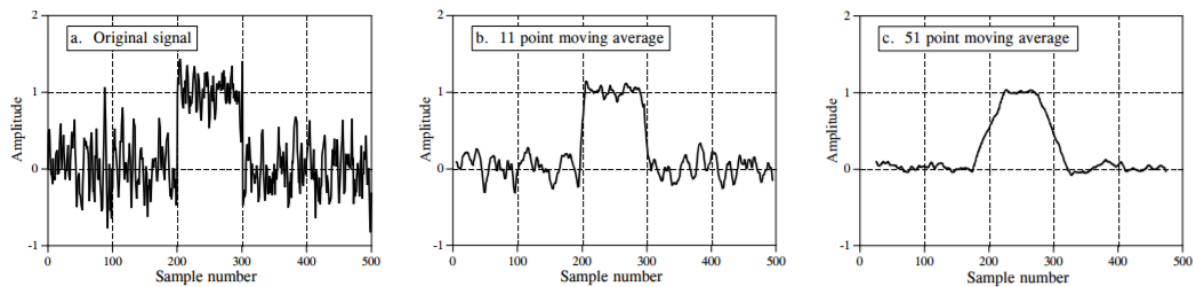
Figur 35: Øverst er støj afbildet i tidsdomænet. Nederst er støj afbildet i frekvensdomænet.

**Parseval's sætning** siger at energien bevares gennem Fourier's transformation således at summen af kvadrerede samples i tidsdomænet er lig med summen af kvadrerede samples i frekvensdomænet.

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} |X(m)|^2 \quad (42)$$

## 9 Midlingsfiltre

Midlingsfiltre benyttes til at beregne en løbende middelværdi for et signal.

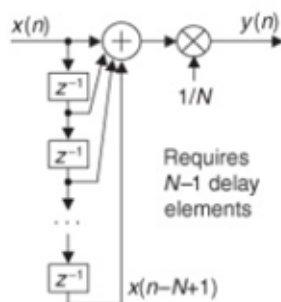


Figur 36: Signal før og efter det er filtreret med midlingsfilter.

### 9.1 Ikke-rekursiv

- FIR filter med  $N$  antal filterkoefficienter.
- Har  $N - 1$  delay elementer.

$$y(n) = \frac{1}{N}(x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-N+1)) \quad (43)$$

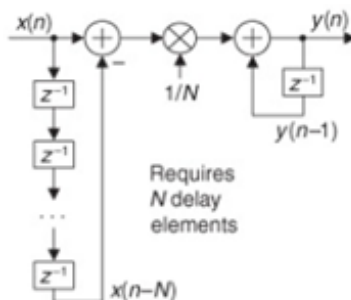


Figur 37: Ikke Rekursiv midlingsfilter.

### 9.2 Rekursiv

- Mindre beregningstung, da den kun kræver 2 adderinger pr. output sample uanset antallet af delays.
- Har  $N$  delay elementer, altså et ekstra delay i forhold til ikke-rekursiv midlingsfilter.

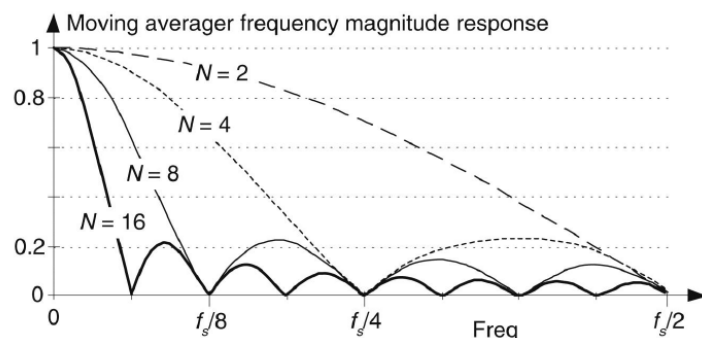
$$y(n) = \frac{1}{N}(x(n) - x(n-N)) + y(n-1) \quad (44)$$



Figur 38: Rekursiv midlingsfilter.

### 9.2.1 Frekvensrespons

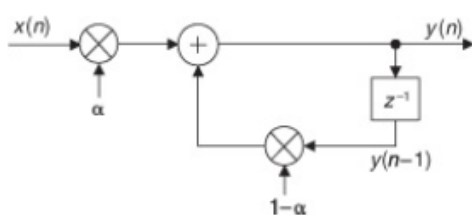
- Ikke-rekursiv og rekursiv midlingsfiltere har akkurat samme frekvensrespons.
- "The roll-off" er meget langsom og stopbåndets dæmpning er ringe.
- *Remember, good performance in the time domain results in poor performance in the frequency domain, and vice versa.*<sup>1</sup>
  - Midlingsfilteret er et fantastisk midlingsfilter i tidsdomænet, men en elendig lavpas filter i frekvensdomænet.



Figur 39: Frekvensrespons for et midlingsfilter med N antal filterkoefficienter.

### 9.3 Eksponentielt midlingsfilter

- Nyeste samples får størst vægt.
- Reagerer hurtigere på ændringer i input ifht. almindelig midlingsfilter.
- Faktoren  $0 < \alpha < 1$  bestemmer hvor meget vægt tidligere output værdier skal have for nye output værdier.
  - Hvis  $\alpha = 1$  ignoreres tidligere output værdier, da nye output værdier reagerer med det samme på nye input værdier samtidig giver det ingen dæmpning.



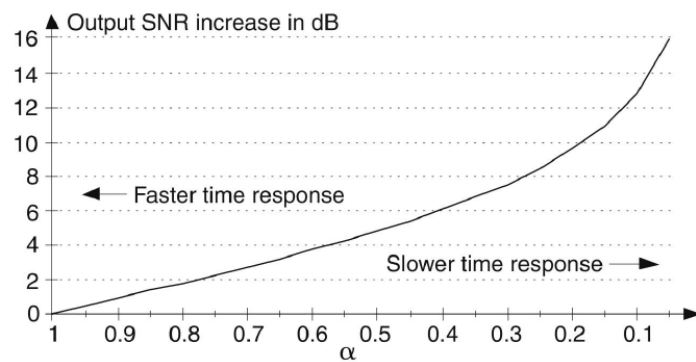
Figur 40: Eksponentielt midlingsfilter.

#### 9.3.1 Støjreduktion

- En mindre  $\alpha$  værdi giver en bedre støjreduktion men midlingsfilterets output tager samtidig længere tid om at reagere og stabilisere sig.

<sup>1</sup>The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing Moving Average Filters, Chapter 15, Page 180.





Figur 41: Eksponentielt midlingsfilterets SNR som en funktion af faktoren  $\alpha$ .

- Midlingsfilterets SNR kan regnes herved.

$$SNR_{exp(dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{\alpha}{2 - \alpha} \right) \quad (45)$$

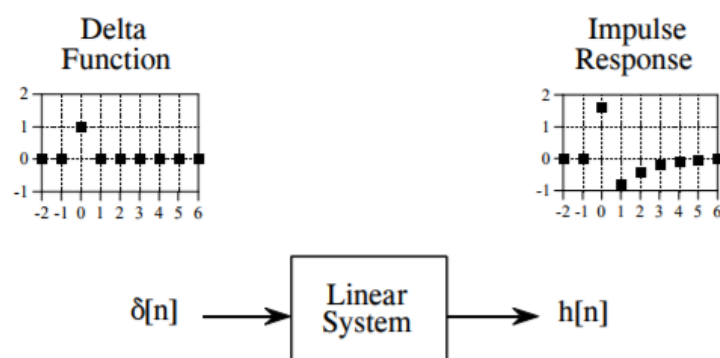
## 10 Auto- og kryds-korrelation

### 10.1 Foldning

Foldning er en matematisk måde at kombinere to signaler til at danne et tredje signal.

#### 10.1.1 Delta Funktion og Impuls Respons

- Delta-funktionen  $\delta[n]$  er en normaliseret impuls.
- Alle dens samples har en værdi på 0, bortset fra samplenummer 0, som har en værdi på 1.
- Impuls responset  $h[n]$  for et lineært system er outputtet fra systemet, når inputtet er en delta-funktion.

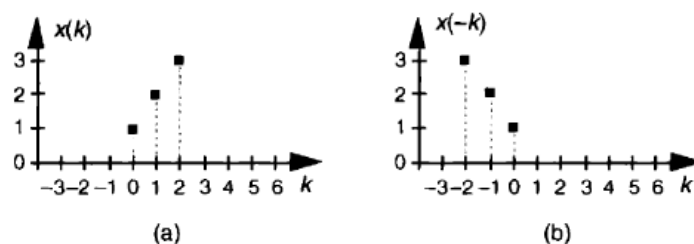


Figur 42: Definition af delta funktionen og impuls responset.

- Inputsignalet foldet med systemets impuls respons er svarende til outputsignalet.
- Hvis  $x[n]$  er et signal med  $N$  antal samples fra 0 til  $N-1$ , og  $h[n]$  er et signal med  $M$  antal samples fra 0 til  $M-1$ , bliver foldningen af de to signaler:  $y(n) = x(n) \otimes h(n)$ , et signal med  $N + M - 1$  antal samples fra 0 til  $N + M - 2$ .

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) \cdot x(n-k) = h(n) \otimes x(n) \quad (46)$$

- Inputsignalet  $x(k)$  flippes rundt så dette placerer sample 0 til højre og efterfølgende opadgående samples til venstre.
  - $x(k)$  bliver herved til  $x(-k)$ .
- Alle produkter af  $h(k)$  og  $x(0-k)$  for alle  $k$ -værdier summeres og herved fås  $y(0)$ .
- $x(-k)$  shiftes en sample til højre.
- Alle produkter af  $h(k)$  og  $x(1-k)$  for alle  $k$ -værdier summeres og herved fås  $y(1)$ .
- Der shiftes og summeres indtil der ikke er overlap mellem  $h(k)$  og  $x(n-k)$ .



Figur 43: (a) sekvensen  $x(k)$ ; (b) spejling af sekvensen  $x(k)$  omkring  $k = 0$ .

**Foldnings-teorem I** betyder at foldning af to signaler i tidsdomænet er det samme som multiplikation af to signaler i frekvensdomænet.

$$h(n) \otimes x(n) \Leftrightarrow H(e^{j\omega}) \cdot X(e^{j\omega}) \quad (47)$$

**Foldnings-teorem II** betyder at foldning af to signaler i frekvensdomænet er det samme som multiplikation af to signaler i tidsdomænet.

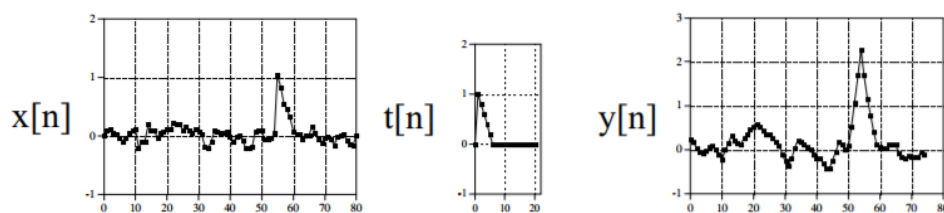
$$h(n) \cdot x(n) \Leftrightarrow H(e^{j\omega}) \otimes X(e^{j\omega}) \quad (48)$$

## 10.2 Krydskorrelation

Korrelation mellem 2 signaler. Kan bruges til at finde periodicitet i et signal, signaldetektion eller system identifikation

- Amplituden af hver sample i krydskorrelationssignalet er mål for hvor meget det signal der er optaget lignet det oprindelige target signal.
- $r(n)$  er derfor et mål for, hvor meget et signal ligner et andet signal - tidsforskudt med  $n$ .

$$r(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \cdot x(n+k) = h(n) \otimes x(-n) \quad (49)$$



Figur 44:  $y(n)$  er krydskorrelationen mellem  $x(n)$  og  $t(n)$ .

## 10.3 Autokorrelation

Korrelation af signal med sig selv tidsforskudt.

$$r(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \cdot x(n+k) = x(n) \otimes x(-n) \quad (50)$$

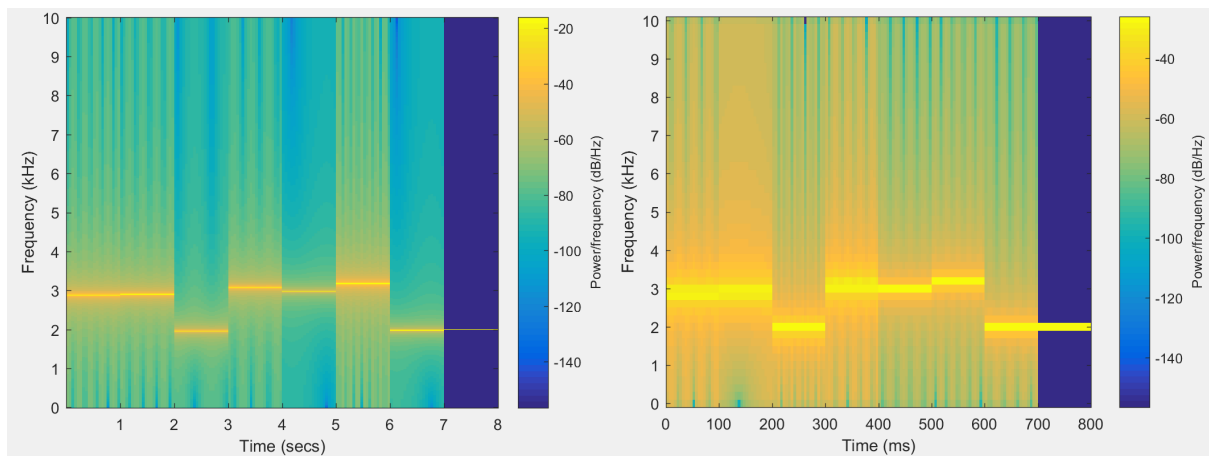
## 11 CASE projekt 1 – FSK transmission

### 11.1 Opgavebeskrivelse

- Lave et kommunikationssystem imellem to enheder, hvor hver enhed har en mikrofon og en højttaler.
- Der benyttes en hørbar lyd som genereres som et lydsignal-array.
- Bit rate, båndbredde og betydning af signal-støj-forhold.

### 11.2 Analyse af lydsignal

- Analyse af hvilke karakterer, som svarer til hvilke frekvenser.
- Signalet analyseres vha. Short-Time Fourier Transform – dvs. med spektrogram-plot.
  - Et smalt vindue giver en god opløsning i tid, men giver en dårlig opløsning i frekvens.
  - Et bredt vindue giver en god opløsning i frekvens, men en dårlig opløsning i tid.



Figur 45: V: God opløsning i frekvens og dårlig opløsning i tid. H: God opløsning i tid og dårlig opløsning i frekvens.

### 11.3 Dekodning

- Frekvensbåndet der arbejdes indenfor er kendt og dermed den laveste frekvens og højeste frekvens.
- Længden af hvert symbol er også kendt.
- Antallet af symboler der er blevet sendt findes ved hjælp af samplefrekvensen samt længden på det modtagne signal.

$$\Delta R = \frac{f_s}{N} \quad (51)$$

### 11.4 Signal-støj-forhold

- Jo større distance mellem enhederne, jo mindre bliver effekten af signalet fra højttalerne, og jo mere består det samlede signal af støj.
  - Signalet blev optaget ved 4 forskellige distancer (0 m, 0 m, 0 m og 0 m).

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (52)$$

### SNR i tidsdomænet

- Estimere SNR af et signal udfra signalets sampleværdier.
- Middel-effekt.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2 \quad (53)$$

**SNR i frekvensdomænet** kan groft estimeres baseret på signalets egenskaber i frekvensdomænet.

- Der anvendes DFT på signalet i tidsdomænet og herefter fås de positive amplitudestørrelser  $|X(m)|^2$ .
- En threshold værdi fastsættes.
  - Over threshold værdien er det ønskede signals amplitudestørrelse.
  - Under threshold værdien er det uønskede støjsignals amplitudestørrelse.

$$SNR = \frac{\text{sum of samples above threshold}}{\text{sum of samples below threshold}} \quad (54)$$

### 11.5 Bit rate

- Ved en enkelt tone kan der aflæses fint med en symbol længde på 0.1 s
- Hvis der er to frekvenser tæt på hinanden skal der bruges en symbol længde på 0.5 s.
- Der kan anvendes zero-padding til at få den korrekte amplitude.

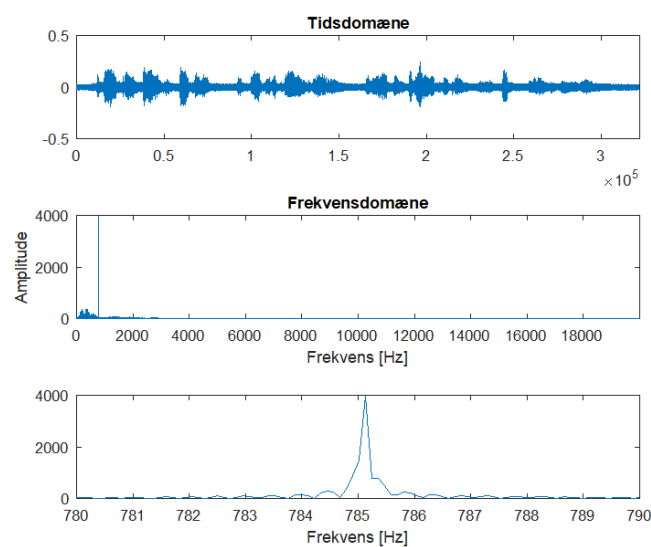
## 12 CASE projekt 2 – Audio filter

### 12.1 Opgavebeskrivelse

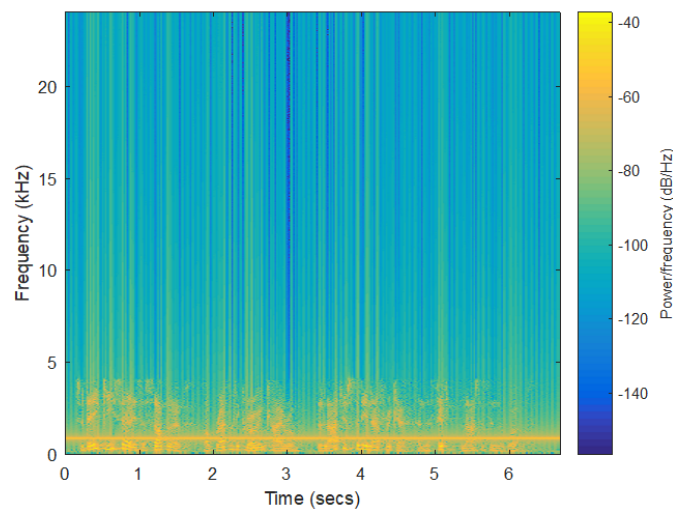
- Analysere støjfyldt lydsignal og undersøge hvilken frekvens som ønskes fjernet.
- Designe IIR filter ved placering af poler/nuller.
- Implementere IIR filter på Blackfin processor.

### 12.2 Analyse af lydsignal

- Frekvensanalyse med DFT af lydfil hvorved støjsignal findes.
- På et spektrogram kan den gennemgående støj ses som en gul streg ved frekvensen 785 Hz.



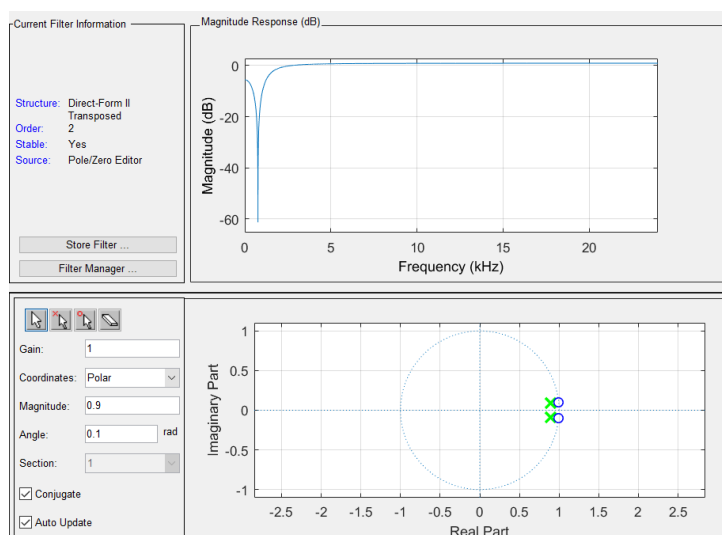
Figur 46: Signalet i tidsdomænet og efterfølgende DFT af signalet.



Figur 47: Spektrogramanalyse af signalet.

## 12.3 Design af IIR filter

- Poler danner peaks.
  - Har betydning for hvor meget frekvenserne bliver forstærket, hvis den placeres på enhedscirklen forstærkes frekvenserne uendeligt meget.
- Nulpunkter danner dyk.
  - Har betydning for hvor meget frekvenserne bliver dæmpet, hvis den placeres på enhedscirklen dæmpes frekvenserne uendeligt meget.
- Stabilitet.
  - Hvis alle poler er placeret inde i enhedscirklen vil filteret være stabilt.
  - Polen kan ophæves ved at have et nulpunkt med præcis samme afstand fra (0,0) og dermed samme længde.
  - Poler/nulpunkter placeret i (0,0) påvirker ikke filterets frekvens respons.



Figur 48: IIR filter poler/nulpunkter og frekvens respons.

- Et 2. ordens IIR notch filter designs ved at placere poler og nulpunkter i z-domænet.
- Nulpunkter/poler har en radius og vinkel da de er komplekse tal.
  - $r$  er nul-radius og  $\omega$  er nul-vinkel.
  - Nul-radius sættes til 1 og pol-radius sættes til 0,9 da det et skarpt filter ønskes.

$$z_0 = re^{j\omega} = e^{j\omega} \quad (55)$$

$$p_0 = re^{j\omega} = 0,9e^{j\omega} \quad (56)$$

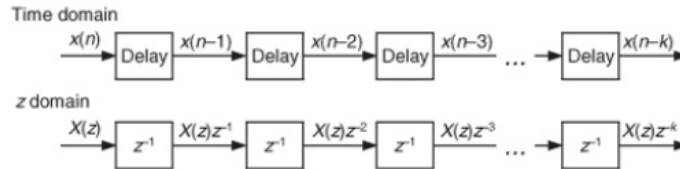
- Vinklen af de to nulpunkter og to poler beregnes (kompleks konjugerede).

$$\omega = 2\pi \frac{f}{f_s} = 2\pi \frac{785 \text{ Hz}}{48 \text{ kHz}} = 0,1028 \quad (57)$$

- Overførelsesfunktionen  $H(z)$  i  $z$ -domænet opstilles ud fra poler/nulpunkter.

$$\begin{aligned} z_0 &= e^{j0,1028} \\ \bar{z}_0 &= e^{-j0,1028} \\ p_0 &= 0,9e^{j0,1028} \\ \bar{p}_0 &= 0,9e^{-j0,1028} \end{aligned}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = G \frac{(z - z_0)(z - \bar{z}_0)}{(z - p_0)(z - \bar{p}_0)} = G \frac{(z - e^{j0,1028})(z - e^{-j0,1028})}{(z - 0,9 \cdot e^{j0,1028})(z - 0,9 \cdot e^{-j0,1028})} \quad (58)$$



Figur 49: Tids- og  $z$ -domæne delay.

- Overførelsesfunktionen  $H(z)$  skrives om således at polynomierne er opløftet negativt.

$$H(z) = \frac{z^2 - 1,99z + 0,99}{z^2 - 1,79z + 0,81} \cdot \frac{z^{-2}}{z^{-2}} \longrightarrow \frac{1 - 1,99z^{-1} + 0,99z^{-2}}{1 - 1,79z^{-1} + 0,81z^{-2}} \quad (59)$$

- Brøkerne kan skrives ud.

$$Y(z)(1 - 1,79z^{-1} + 0,81z^{-2}) = X(z)(1 - 1,99z^{-1} + 0,99z^{-2}) \quad (60)$$

- Differensligningen kan opstilles ved at anvende invers  $z$ -transformation.

$$y(n) - 1,79y(n-1) + 0,81y(n-2) = x(n) - 1,99x(n-1) + 0,99x(n-2) \quad (61)$$

$$y(n) = 1x(n) - 1,99x(n-1) + 0,99x(n-2) + 1,79y(n-1) - 0,81y(n-2) \quad (62)$$

- Filterkoefficienterne bliver dermed.

$$\begin{aligned} b_0 &= 1 \\ b_1 &= -1,99 \\ b_2 &= 0,99 \\ a_0 &= 1,79 \\ a_1 &= -0,81 \end{aligned}$$

## 12.4 Implementation på Blackfin processor

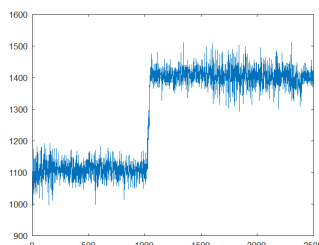
- Datatypen "short" anvendes til variablene, da der arbejdes på en fixed-point processor.
- Bitmanipulation ( $1 \ll 14$ )
  - Bit 1 er signbit som afgør om det er positiv eller negativ talværdi.
  - Bit 2 er fixed-point binary som placerer kommaet det samme sted.
- Der bitshiftes dermed 14 pladser til venstre for at placere filterkoefficienter som MSB lige efter signbit og fixed-point bit.



## 13 CASE projekt 3 – Vejecelle

### 13.1 Opgavebeskrivelse

- Analysere og forbedre dataene fra en støjfyldt måling på en vejecelle.
- Der designes og implementeres forskellige midlingsfiltre i Matlab for at fjerne støj.



Figur 50: Vejecelle måling med 1 kg belastning og uden belastning.

### 13.2 Data analyse

- Den første del af signalet er med 1 kg belastning og næste del er uden belastning.
- Signalet deles derfor op for at kunne udregne middelværdi, spredning og varians af de to forskellige målinger.

**Middelværdi** er gennemsnittet af sekvensen på  $N$  samples er summen af disse samples divideret med  $N$ . Der er lige meget værdi over som under gennemsnittet.

$$x_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \approx 1100 \dots 1400 \quad (63)$$

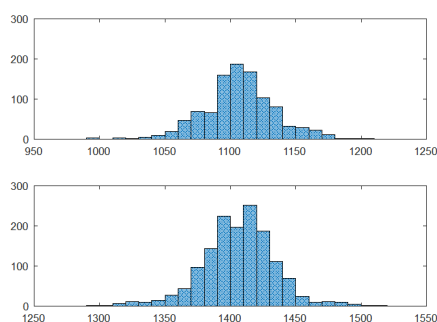
**Varians** er AC-middel-værdien.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - x_{ave})^2 \approx 772 \dots 794 \quad (64)$$

**Standard afvigelse** svarer til RMS-værdien for en  $DC = 0$ . Standard afvigelsen kaldes også for spredningen.

$$\sigma = \sigma^2 \approx 27 \dots 28 \quad (65)$$

- Variansen og spredningen for de to målinger er cirka den samme.
  - Forventeligt da det kun er DC værdien der burde ændres.



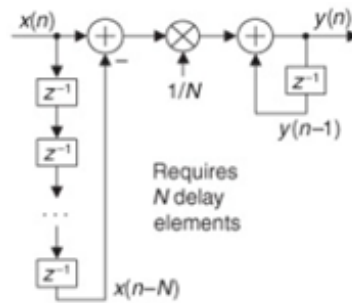
Figur 51: Histogram af de to signalniveauer normal fordelt rundt om deres middelværdi.

### 13.3 Midlingsfiltre

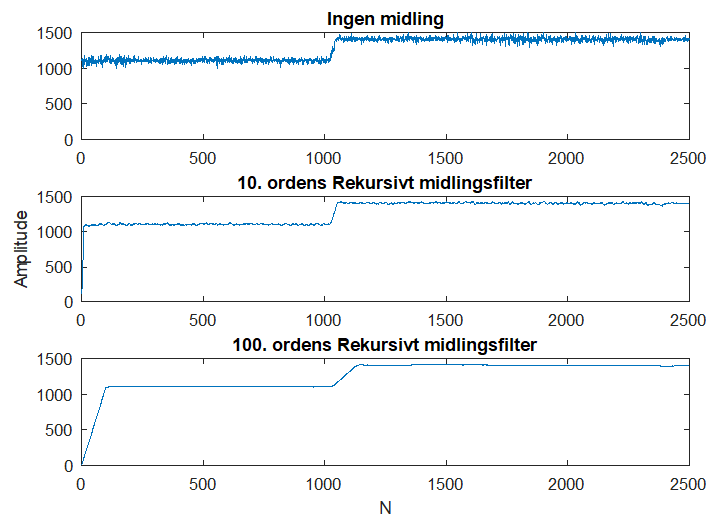
#### Ikke-rekursiv midlingsfilter

- Mindre beregningstung, da den kun kræver 2 adderinger pr. output sample uanset antallet af delays.
- Har  $N$  delay elementer, altså et ekstra delay iforhold til ikke-rekursiv midlingsfilter.

$$y(n) = \frac{1}{N}(x(n) - x(n - N)) + y(n - 1) \quad (66)$$

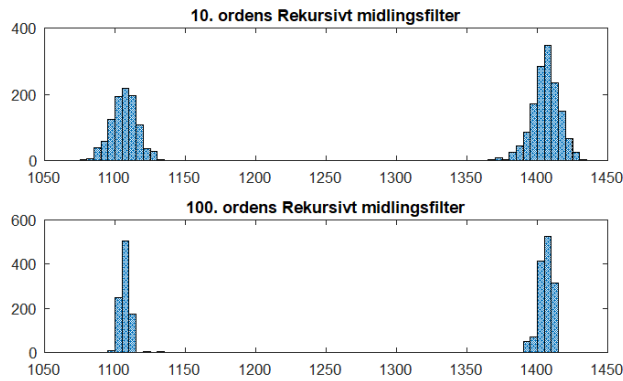


Figur 52: Rekursiv midlingsfilter.



Figur 53: Vejecelle måling med 1 kg belastning og uden belastning med et 10. og 100. ordens midlingsfilter.

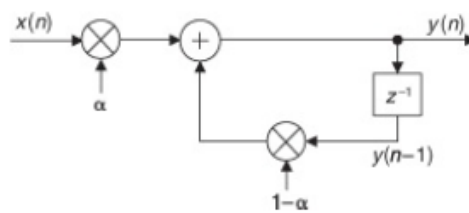
- Midlingsfilteret gør at der kommer en indsvingningstid.
  - Ved et 10. ordens filter nås DC værdien efter cirka 10 samples.
  - Ved et 100. ordens filter nås DC værdien efter cirka 100 samples.



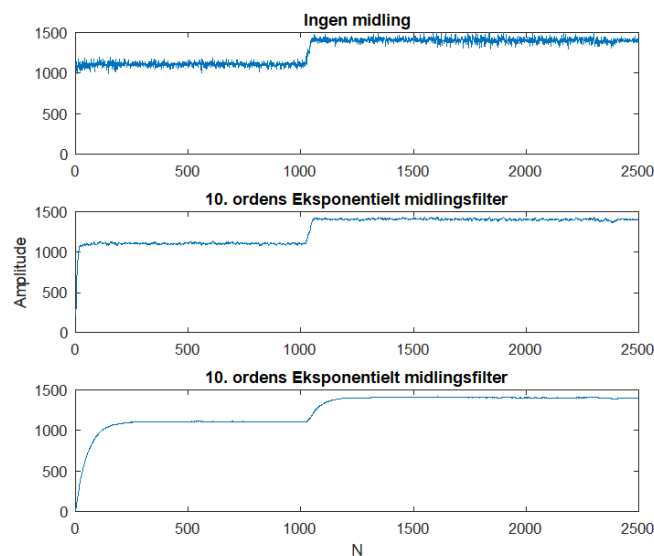
Figur 54: Histogram af de to signalniveauer normal fordelt efter midlingsfilteret. Dataen er mere samlet.

### EkspONENTIELT midlingsfilter

- Nyeste samples får størst vægt.
- Reagerer hurtigere på ændringer i input ifht. almindelig midlingsfilter.
- Faktoren  $0 < \alpha < 1$  bestemmer hvor meget vægt tidligere output værdier skal have for nye output værdier.
  - Hvis  $\alpha = 1$  giver det ingen dæmpning og samtidig ignoreres tidligere output værdier, da nye output værdier reagerer med det samme på nye input værdier.



Figur 55: EkspONENTIELT midlingsfilter.



Figur 56: Vejecelle måling med 1 kg belastning og uden belastning med et 10. og 100. ordens eksponentielt midlingsfilter.

## 14 CASE projekt 4 - Sonar

### 14.1 Opgavebeskrivelse

- Afstandsbestemmelse ved et udsende et akustisk signal.
- Systemet vil afspille og optage ekko-signalet på Blackfin kittet.
- Afstanden findes ved hjælp af krydskorrelation.

### 14.2 Signal generation

- Krav til signalet er at samplefrekvensen er 48 kHz, da det er denne som Blackfin kittet arbejder med. Vi vælger 50 ms og derfor får vi en arraystørrelse på 2400 samples.
- Et unikt signal ønskes, hvorfor et sweep eller hvid støj er bedre end et sinus signal.
  - Et sinus signal er kontinuert og da den gentager sig selv er det et problem da vi med korrelation leder efter gentagelser.
- Længden af signalet skal sørge for at være langt nok til at optage både når signalet sendes afsted og indtil det er kommet tilbage.
- Præcisionen af målingen er ca. 7 mm per sample.

$$\frac{340 \text{ m s}^{-1}}{48 \text{ kHz}} \approx 7 \text{ mm} \quad (67)$$

- Systemet skal kunne måle afstande op til 10 m. Dette giver en forventning om at ekkoet skal rejse 20 m. Det vil tage ekkoet 59 ms at rejse 20 meter.

$$\frac{20 \text{ m}}{340 \text{ m s}^{-1}} \approx 59 \text{ ms} \quad (68)$$

- Antal samples der er brug for til at optage afspilningen er  $F_s \cdot T + 2400 \cdot 2 \approx 7600$ .
- Array størrelsen bliver hermed  $2^{13} = 8192$ .
- Optagetiden er herved 160 ms.

$$\frac{N}{F_s} = \frac{7600}{48 \text{ kHz}} \approx 160 \text{ ms} \quad (69)$$

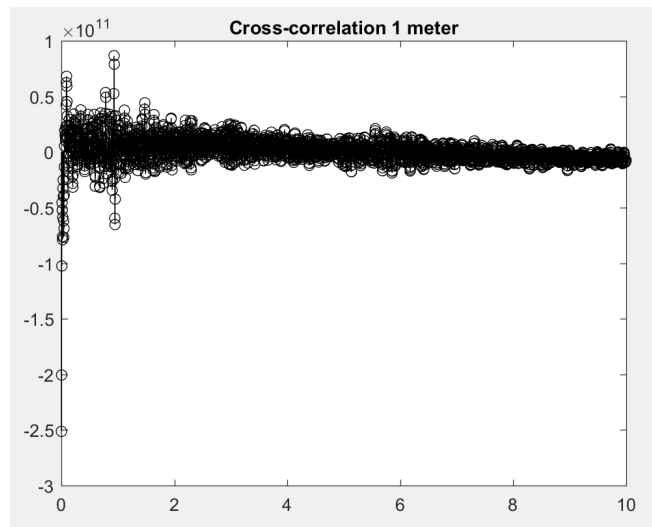
### 14.3 Signal analyse

- Krydskorrelation anvendes mellem det udsendte signal og de optagede signaler for at finde tidsforskydningen.
- Distancen kan beregnes ved den sample hvor der opstår peak i krydskorrelationen.

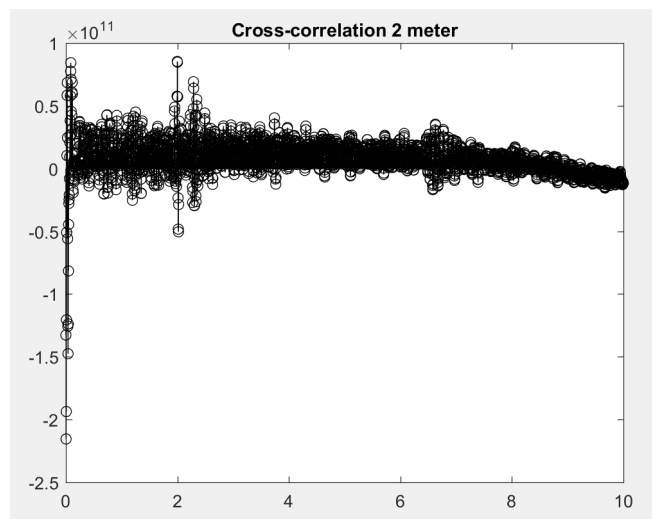
$$Distance = Sample \cdot 340 \text{ m s}^{-1} \cdot \frac{1}{48 \text{ kHz}} \cdot 0.5 \quad (70)$$

Afstand målt [m]	Afstand udregnet [m]	Difference [cm]
1	0,935	6,5
1,5	1,678	17,8
2	2,001	0,1
3	3,184	18,4
4,5	4,388	11,2

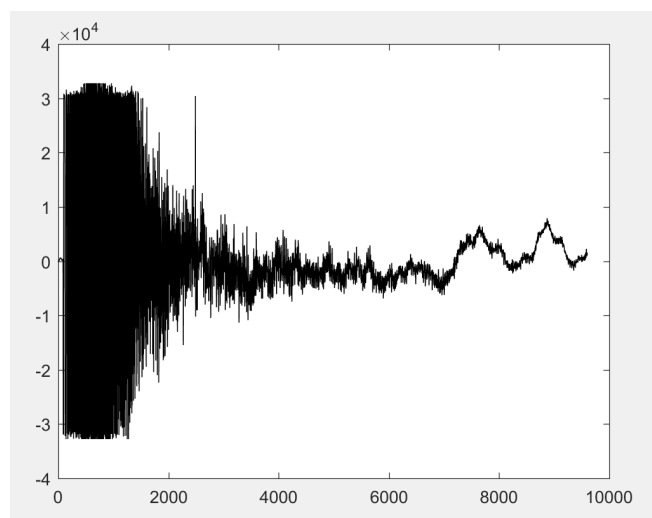
Tabel 1: Resultater af analyse.



Figur 57: Stem af krydskorrelation for 1 m.



Figur 58: Stem af krydskorrelation for 2 m.



Figur 59: Højttaleren er tæt på mikrofonen hvorfor signalet er meget kraftigere i starten af optagelsen.