

Multi-band RMS limiter

For Loudspeaker Protection

16. juni 2016

Kasper Kiis Jensen
Poul Hoang
Mikkel Krogh Simonsen
16gr640@es.aau.dk

Department of Electronic Systems
Aalborg University
Denmark



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem
Problemstilling
Problemformulering

Løsning
System
Resultater

Opbygning
Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Problem

Problemstilling
Problemformulering

Løsning

System
Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings muligheder

Perspektivering

Diskussion og afsluttende ord

Demonstration

Problemet

Højtaleren

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

2

Højtaleren

- ▶ Størrelse
- ▶ Lydstyrke
- ▶ Lydkvalitet

Musik

- ▶ Genre
- ▶ Frekvensrespons

Brugsforvirring



Problem

Problemstilling
Problemformulering

Løsning

System
Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration



Problemet

3 spørgsmål

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

3

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Hvad er problemstillingen?

Hvordan analyseres problemet?

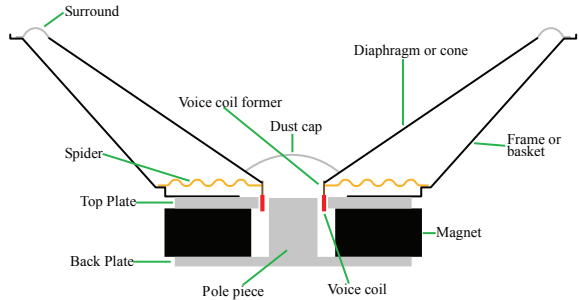
Hvad er løsningen?

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

4

Højtalersens fysiske begrænsning

Spolen (coil) rammer
bagplade (backplate)



Problem
Problemstilling
Problemformulering
Løsning
System
Resultater
Opbygning
Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder
Perspektivering
Diskussion og
afsluttende ord
Demonstration

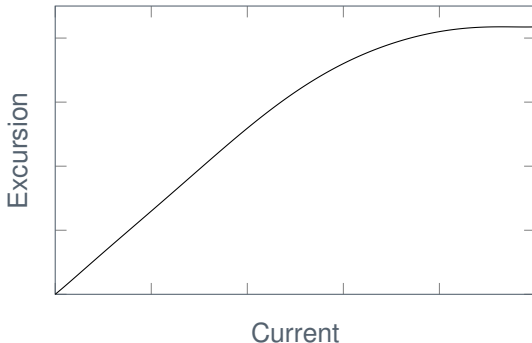
Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

5

Er der tegn på at de
fysiske begrænsninger?

Forvrængning opstår
inden spolen rammer
bagpladen

Forvrængning i musik



Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

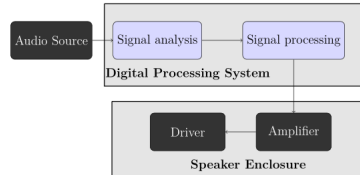
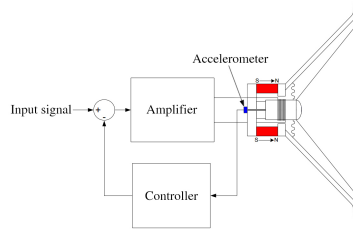
Designmetode

Feedback

- Forsøg for udledning af mønstre
- Svær løsning pga. sensorer
- Generel løsning
- Tidskrævende løsning

Feedforward

- Modeller
- Ikke generel løsning





Problemet

Problemformulering

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

7

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

How can a real-time signal processing system in an active loudspeaker prevent the coil from hitting the backplate of the woofer and reduce distortion compared to peak limitation?

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem
Problemstilling
Problemformulering

Løsning

8

System
Resultater

Opbygning
Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Multibånds RMS limiter (0 - 530 Hz)

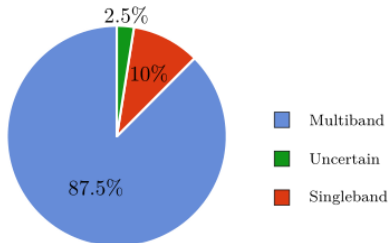
- Fire limiter bånd
- Et overordnet bånd

Baseret på lytteforsøg

Forskellige kombination

- Vægtning
- Lydforskel

Ikke muligt at finde systemer at teste
de forskellige konstellationer



Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

System

- ▶ Fem RMS limiters

GUI

- ▶ Volumekontroller
- ▶ Otte bånd equalizer
- ▶ Otte bånd spectrum analyzer

Platform

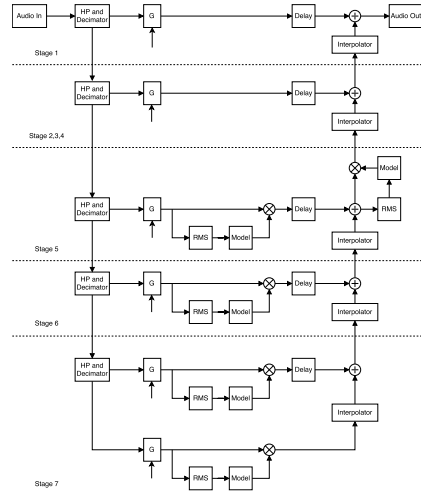
- ▶ Development Board TMDX5515EZDSP
- ▶ Dali Zensor 5

Multirate system

- Decimation
- Interpolation

Samplingsfrekvenser

- 48.000 Hz
- 24.000 Hz
- 12.000 Hz
- 6.000 Hz
- 3.000 Hz
- 1.500 Hz
- 750 Hz
- 375 Hz



Multi-band RMS Limiter Gruppe 640

Problem

Problemstilling
Problemformulering

Løsning

System
Resultater

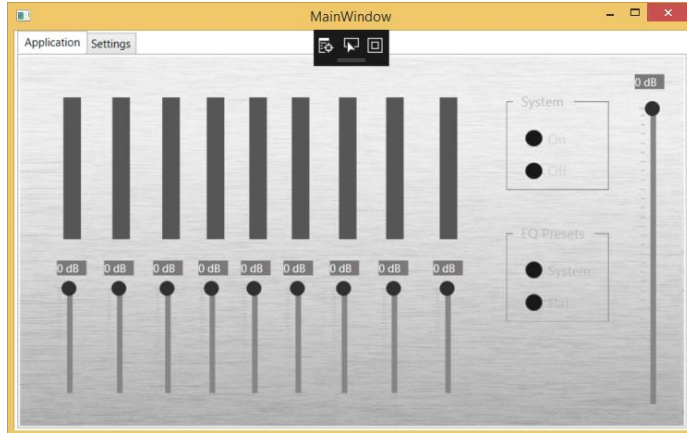
Opbygning

Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration





Resultater

Gennemgang

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

12

Frekvensrepons

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

RMS limiter

Støjguld

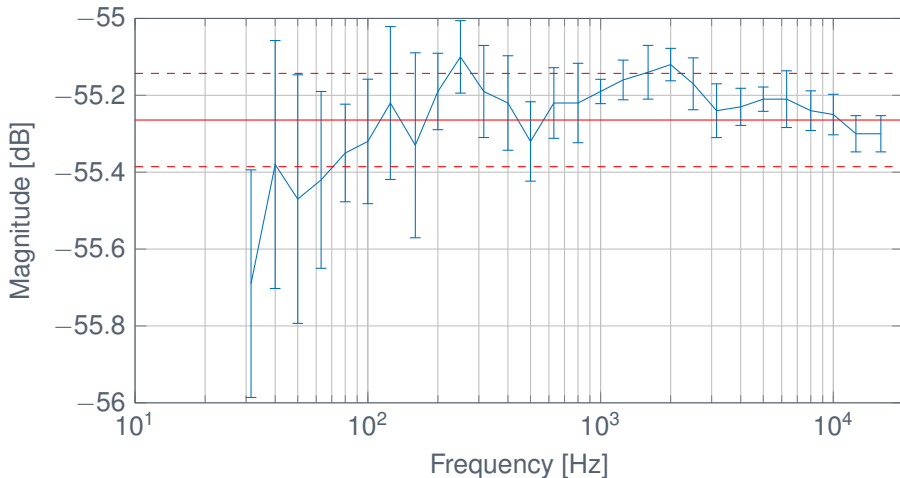
Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Bypassed frekvensrespons



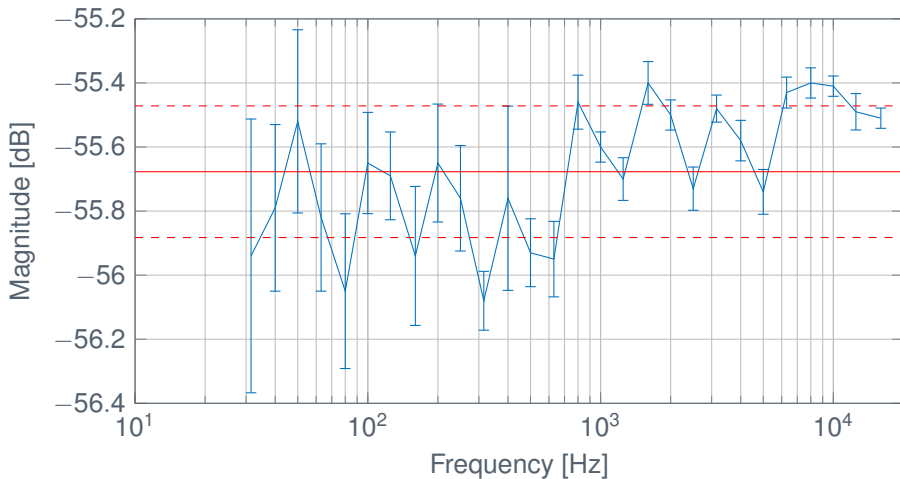
13

Problem
Problemstilling
Problemformulering
Løsning
System
Resultater
Opbygning
Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder
Perspektivering
Diskussion og
afsluttende ord
Demonstration

41

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

System Frekvensrespons



14

41

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

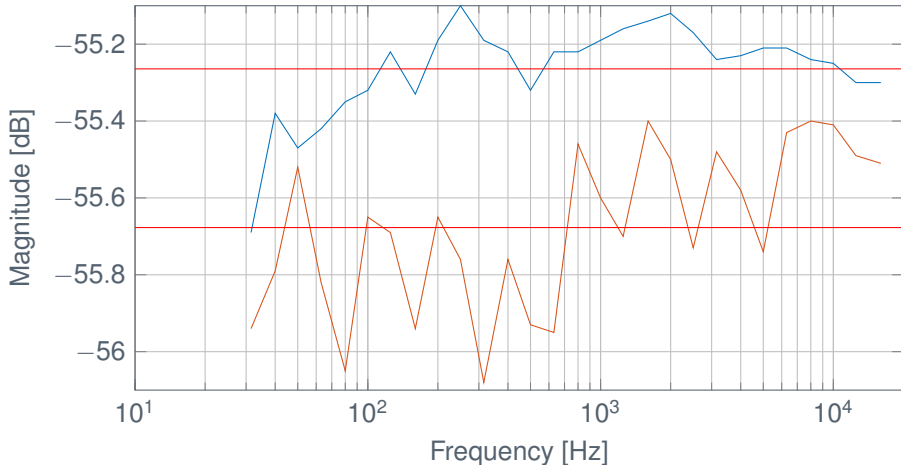
Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Sammenligning af frekvensrespons



Problem
Problemstilling
Problemformulering

Løsning

System
Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

16

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

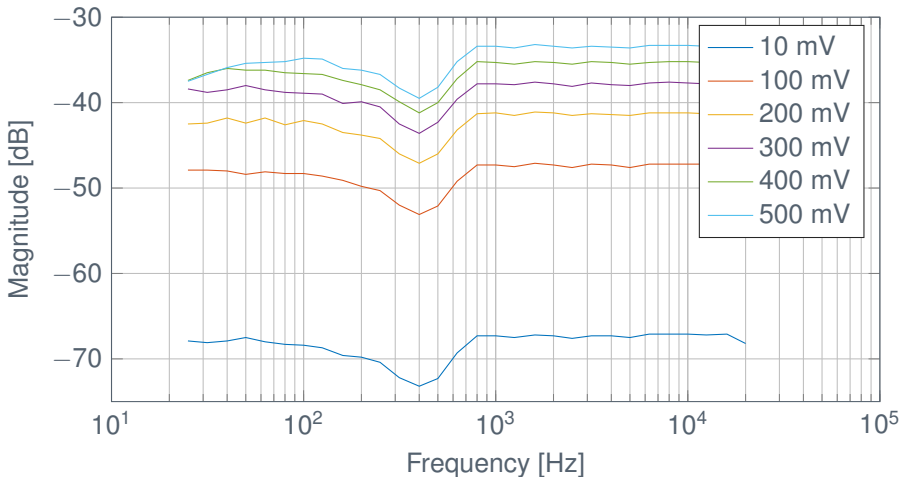
Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Frekvensrepons med limiter slået til ved forskellige amplituder





Resultater Limiter

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

17

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

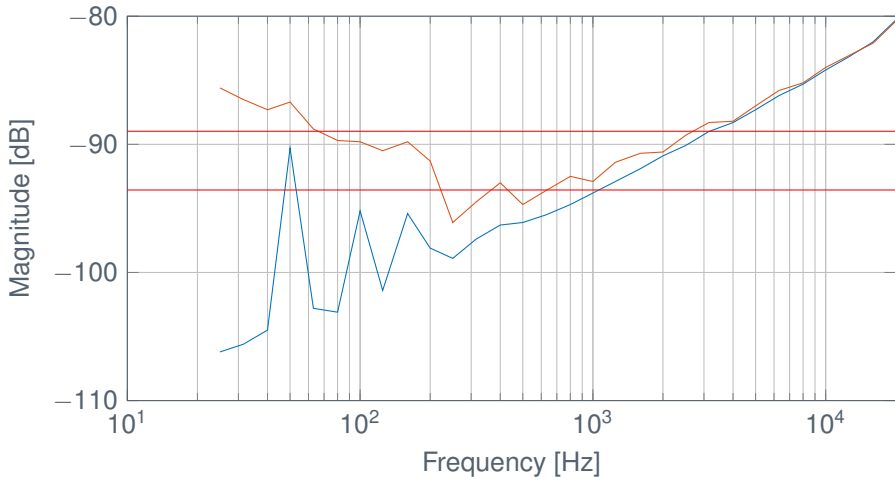
Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Støj med og uden system



18

Problem
Problemstilling
Problemformulering
Løsning
System
Resultater
Opbygning
Multi-Rate/stage
Decimation
RMS Limiter
Interpolation
Relevante optimerings
muligheder
Perspektivering
Diskussion og
afsluttende ord
Demonstration

41

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

► Downsampling
med faktor 2

► 7 gange

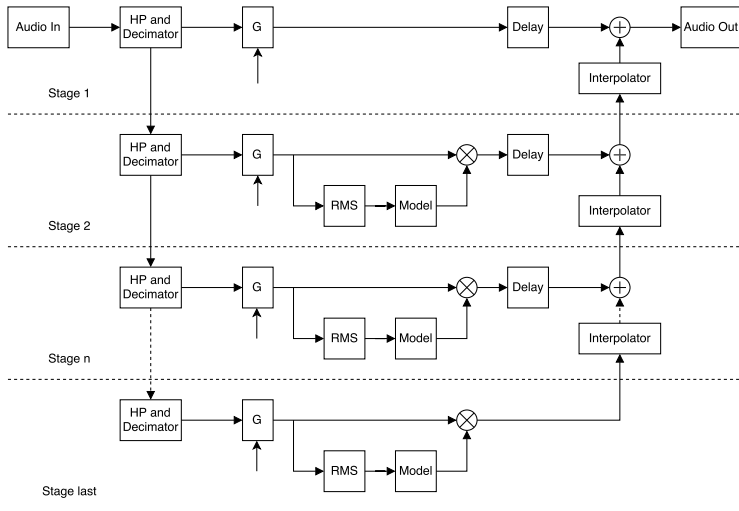
► 48 kHz

► 24 kHz

► 12 kHz

► ...

► 375 Hz



Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

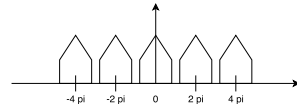
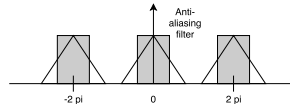
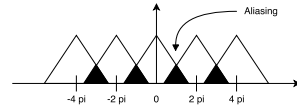
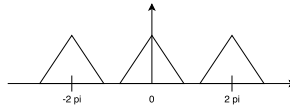
Demonstration

Funktionalitet:

- Lavpas filter til Anti-Aliasing
- Spektral inversion til højpas filtrering

Krav:

- Overholde IEC 6964 - Class 2
- Lineær fase
- 60 dB dæmpning ved $\frac{fs}{2L}$

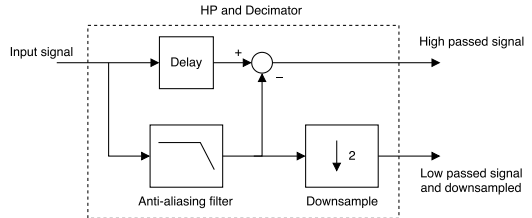


Funktionalitet:

- ▶ Lavpas filter til Anti-Aliasing
- ▶ Spektral inversion til højpas filtrering

Krav:

- ▶ Overholde IEC 6964 - Class 2
- ▶ Lineær fase
- ▶ 60 dB dæmpning ved $\frac{f_s}{2L}$

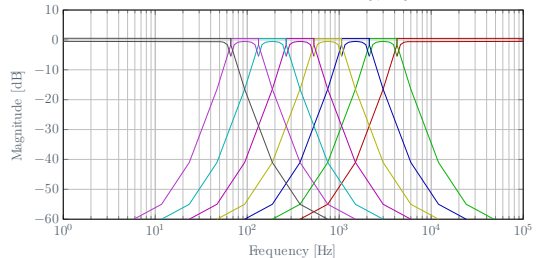
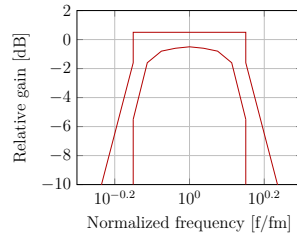


Krav:

- ✓ Overholde IEC 6964 - Class 2
- ▶ Lineær fase
- ▶ 60 dB dæmpning ved $\frac{f_s}{2L}$

Første Downsampling:

- ▶ Første downsampling til
 - ▶ $f_s = 24\text{kHz}$
 - ▶ $f_c = 3\text{kHz}$
- ▶ Octave sampling efterfølgende



Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Krav:

✓ Overholde IEC 6964 - Class 2

✓ Lineær fase

✓ 50. Orden FIR

✓ Type 1 (Type 2?)

✓ Symmetrisk

✓ Lige orden

✓ 60 dB dæmpning ved $\frac{fs}{2L}$

▶ $\omega_{\text{pass}} = 0.125 \frac{\pi \text{ rad}}{\text{sample}}$ (3.000Hz)

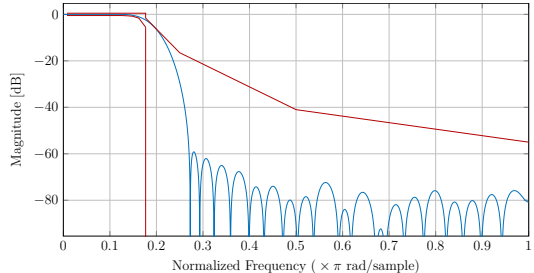
▶ $\omega_{\text{stop}} = 0.271 \frac{\pi \text{ rad}}{\text{sample}}$ (6.500Hz)

Metode brugt:

▶ Kaiser Window method

▶ Effektivt design

▶ Justerbar beta-værdi



To Veje:

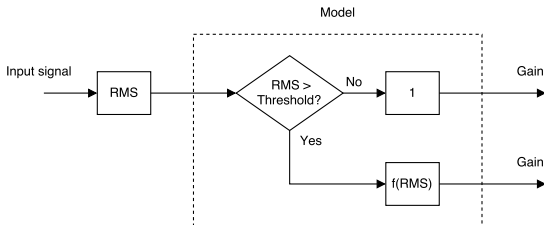
- ▶ THD modeller
- ▶ Målt grænseværdier

Funktionalitet:

- ▶ Beregn RMS værdi i bånd
- ▶ Bestem gain passende gain værdier
- ▶ Påfører gain

Krav:

- ▶ Løbende RMS^2
- ▶ Dæmpning af input til \geq grænseværdien
- ▶ ≥ 0 s attack time
- ▶ 5 s release time



Krav:

✓ Løbende RMS²

- Nødvendige samples: $n = \frac{fs}{f_{lowest}}$
 - Band 1-4: $n = \frac{375Hz}{30Hz} = 12.5 \approx 16$
 - Band 5: $n = \frac{3000Hz}{30Hz} = 100 \approx 128$



Grænseværdien bestemmes ved at:

Sammenhæng mellem output fra dsp og effekt afsat:

$$\frac{(\text{Threshold} \cdot U)^2}{R} = P$$

Grænseværdien findes ved

$$\text{Threshold} = \frac{\sqrt{P \cdot R}}{U}$$

Fejlkilder

- ▶ Konstant impedans
- ▶ Forkert effekt
- ▶ Ukendt spændings forstærkning

Look up tabellen laves:

Nødvendig dæmpning hvis input er over threshold bestemmes ved:

$$G = \frac{\text{Threshold}}{U}$$

Værdien tilpasses DSP algoritme:

$$G = \sqrt{\frac{\text{Threshold}^2}{U^2}}$$

Værdierne fordeles mellem 0.0V til 1.0V over n steps, hvor $n = 1, 2, 3, \dots, 1024$

$$G = \sqrt{\frac{\text{Threshold}^2}{\left(\frac{n}{1024}\right)^2}}$$

Look up tabellen laves:

$$G = \sqrt{\frac{\text{Threshold}^2}{(\frac{n}{1024})^2}}$$

Værdien tilpasses DSP / codec. Output er en faktor 5 lavere

$$G = \sqrt{\frac{\text{Threshold}^2}{5 \cdot (\frac{n}{1024})^2}}$$

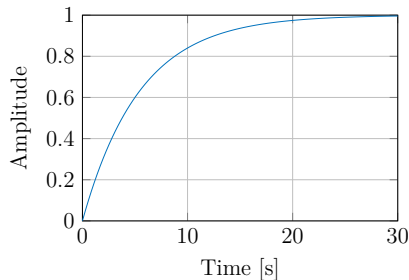
Værdierne konverteres til Q15 format ved $\cdot 2^{15}$

Fejlkilder

- ▶ Forkerte grænseflader
- ▶ Forkert threshold
- ▶ skalerings problemer. $0x1FFF$ = Max udstyring = 2 bit mindre end $0x7FFF$

Krav:

- ▶ ≥ 0 s attack time
 - ▶ Påfør gain med det samme
 - ▶ Sample size bestemmer attacktime
- ▶ 5 s release time
 - ▶ $H(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$
 - ▶ $\tau = 5$ s
 - ▶ $\omega_c = \frac{1}{\tau}$
 - ▶ $H(s) = \frac{0.2}{s + 0.2}$
- ▶ Impuls Invariant metode
 - ▶ $H(z) = T \frac{0.2}{1 - e^{-0.2T} z^{-1}}$

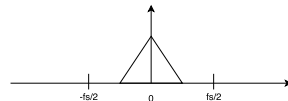
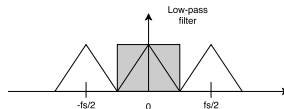
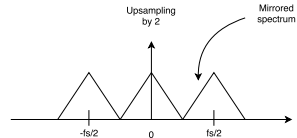
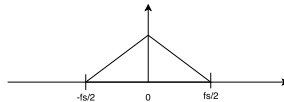


Upsampling/Interpolation:

- Konvertering fra f_s til $\frac{f_s}{2}$
- Zero-padding til upsampling
- Lavpasfiltrering

Krav:

- Må ikke interfere med signal bandwidth
- 60 dB dæmpning ved $\frac{f_s}{2L}$



Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

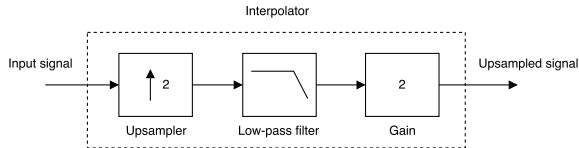
Demonstration

Funktionalitet:

- ▶ Lavpas filter til rekonstruktion
- ▶ Zero-padding til upsampling
- ▶ Forstærkning med faktor L

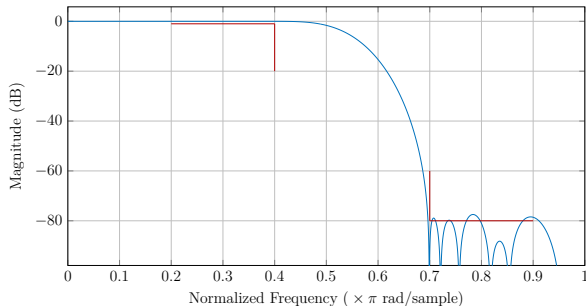
Krav:

- ▶ Må ikke interfere med signal bandwidth
- ▶ 60 dB dæmpning ved $\frac{f_s}{2L}$



Krav:

- ✓ Må ikke interferere med signal bandwidth
- ✓ 60 dB dæmpning ved $\frac{fs}{2L}$
 - ▶ 34. Orden FIR
 - ▶ Type 1



Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

33

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

- ▶ Reducering af anvendte instruktioner.
 - ▶ Gennemsnitligt 900 instruktioner pr. sample.
 1. Generel optimering såsom cirkulære buffer og DUAL-MAC
 2. Polyphase FIR filtre
- ▶ Mindre delay gennem systemet
 - ▶ 111 ms delay gennem systemet
 1. Færre trin/bånd (stages) i systemet
 2. IIR filter i interpolation
- ▶ Bedre RMS limiter

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

34

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

41

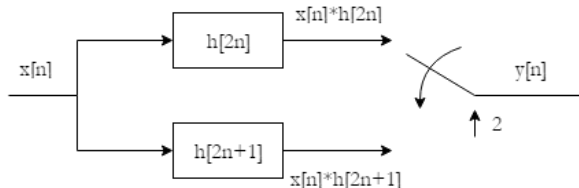
Generel reducering af anvendte instruktioner

- ▶ Dobbelt initialisering af buffere. (30 – 40 instruktioner)
- ▶ Reservering af cirkulære buffere
 - ▶ TMS320C5515 kan initialisere fem cirkulære buffere
 - ▶ Fire kan reserveres til udvalgte filtre
 - ▶ Færre instruktioner på initialisering (10 - 20 instruktioner)
- ▶ Færre funktionskald
- ▶ Multirate algoritme til scheduling frigør program memory

Zero-padding anvendes i interpolation

Halvdelen af udregningerne giver nul

Polyphase filter i interpolation halvere filter algoritmen





Optimering

Mindre delay gennem systemet

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

36

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

41

Færre trin/bånd (stages) i systemet

IIR filter i interpolation

- Mindre delay
- Lille ulinearitet ved signalbåndbredde

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

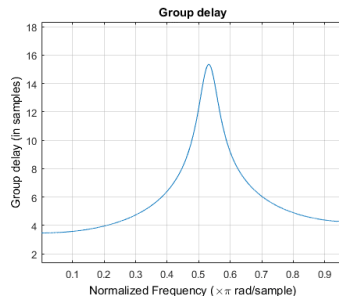
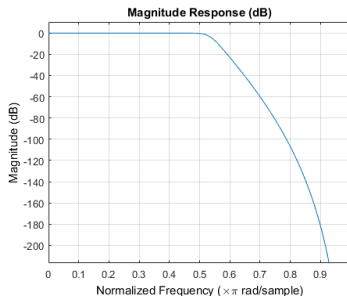
Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Butterworth IIR filter

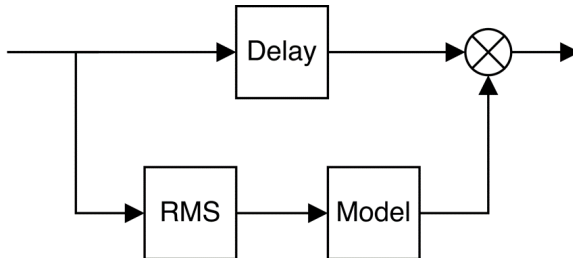
- $N = 8$
- $\text{Cutoff} = 0.5\pi$



37

41

Delay i RMS limiter design for at beskytte mod transiente signaler



Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Systemet er velegnet til mindre højttalere

- Mere effekt kan afsættes uden at ødelægge wooferen

Forstærkningen for en aktiv højttaler kan øges

- Systemet sørger for at bassen holdes under en threshold



Diskussion og afsluttende ord

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

Dept. of Electronic Systems
Aalborg University
Denmark

Projekt uden konkrete fortilfælde

Projektet har undersøgt både feedback og feedforward som løsning

Størstedelen af projektet har været konceptudvikling

Projektet omhandler en aktuel problemstilling

40

41



Demonstration

Multi-band RMS
Limiter
Gruppe 640

Problem

Problemstilling

Problemformulering

Løsning

System

Resultater

Opbygning

Multi-Rate/stage

Decimation

RMS Limiter

Interpolation

Relevante optimerings
muligheder

Perspektivering

Diskussion og
afsluttende ord

Demonstration

41

41

Lad os alle gå mod lab



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK