

DIGITAALISET SUODATTIMET 521337A (DIGITAL FILTERS)**Tentti- ja paikontatehtävät /Exam and patching problems 18.3.2021 08.15-11.45****Tenttitehtävät sivuilla 2 ja 3.****Viikkokokeiden paikontatehtävät ovat edempänä tässä tiedostossa alkaen sivulta 4, jolta löytyvät paikannon ohjeet.****Exam problems on pages 2 and 3.****Week exam patching problems are further in this file starting on page 4 that contains the patching instructions.****Viikkokokeiden uusinnat vs. lopputentti? Miten valitsisin?****Week exam retakes or the final exam? How should I choose?**

Arvioit itse, kumpi menettely on oppimisesi ja loppuarvosanasi kannalta parempi.

It is up to you to decide which approach is better from the point of view of your learning outcomes and final grade.

Impulssivasteiden laskennasta**About calculating the impulse responses**

Kolmen ensimmäisen termin laskenta riittää. Useampiakin saa laskea.

Calculating three first terms suffices. You are welcomed to calculate additional ones.

DIGITAALISET SUODATTIMET 521337A (DIGITAL FILTERS)

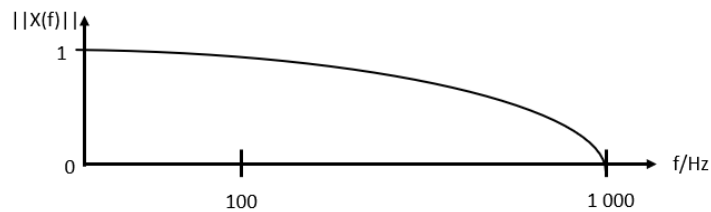
Tentti/Exam 18.3.2021 08.15-11.45

1. EKG-signaalin kiinnostava kaista ulottuu 100Hz:iin, mutta mittalaitteessa siihen summautuu muita biosignaaleja aina 1kHz asti. Tästä johtuen signaalin spektri on alla olevan kuvan karkeasti esittämän kaltainen.

Saat tehtäväksesi suunnitella ratkaisun, joka tuottaa 8 bitin näytteitä EKG-signaalista. Laskostumisten on jätävä alle signaalikvantisointikohinan. Sinulle annetaan ohjeeksi tähdätä mahdollisimman alhaiseen näytteistystaajuuteen ja käyttää 4. kertaluvun Butterworth-tyyppistä laskostumisenestosuodatinta. 100Hz kohdalla signaali saa vaimentua korkeintaan 1dB:n verran.

The interesting band of EKG signal extends to around 100 Hz, but in a measurement device other bio-signals are added up to 1kHz. For this reason the spectrum of the signal is roughly as shown in the figure below.

Your task is to create a solution that produces 8 bit samples from the EKG signal. Aliasing must be below the signal quantization noise level. You are instructed to aim at as low sampling frequency as feasible, and to employ a 4th order Butterworth anti-aliasing filter. At 100Hz the signal is allowed to attenuate at most by 1dB.



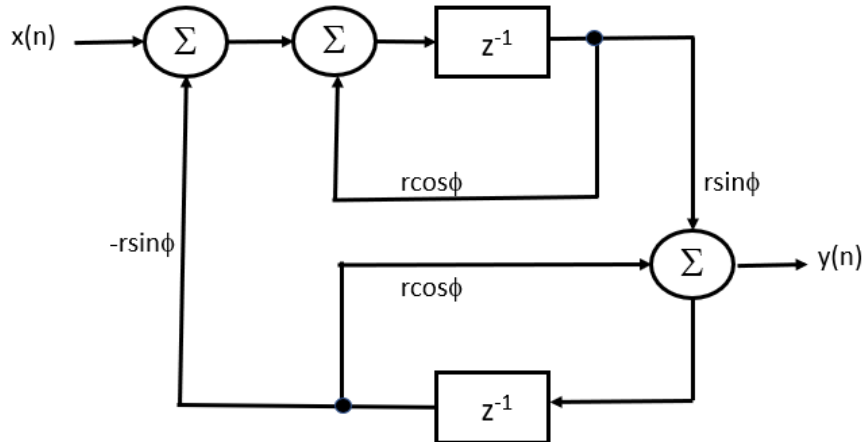
- a. Mikä on laskostumisenestosuodattimen ns. cut-off -taajuus (3dB vaimennuksen taajuus)?
What is the cut-off frequency (frequency of 3dB attenuation) of the anti-aliasing filter?
 - b. Mikä on toteutuksen näytteistystaajuus?
What is the sampling frequency of the design?
2. Erään biosignaalin mittauksessa käytetyn aikadiskreetin suodattimen siirtofunktio on alla. Selvitä sen impulssivaste.

The transfer function of a discrete time filter used in the measurements of a biosignal is below. Determine its impulse response.

$$H(z) = \frac{1 - z^{-2}}{1 - z^{-1} + 0.5z^{-2}} + \frac{1 + z^{-2}}{1 + z^{-1} + 0.5z^{-2}}$$

3. Sinulle osoitetaan eräs aikadiskreetin suodattimen numeerisesti kiinnostavaksi todettu realisaatorakenne, joka on seuraavalla sivulla. Mikä on sen siirtofunktio? Onko kyseessä ylipäästö vai alipäästösuodatin?

You are pointed to a numerically interesting realization structure of a discrete time filter on the next page. What is its transfer function? Is it a high pass or low pass filter?



4. Alla oleva EMG-mittarin eräs 2000Hz:n näytteistystaajuudella toimiva FIR-alipäästösuodatin on alunperin kvantisoitu 6 bitin tarkkuudella. Sinua pyydetään tarkistamaan, kuinka paljon estokaistan vaste taajuudella 875 Hz heikkenee, jos kertoimet kvantisoidaan 5 bittiseksi. Tasatilanteessa pyöristä parilliseen kvantisointitasoon.

The EMG measurement instrument includes a FIR low pass filter below that operates at 2000 Hz sampling frequency. It was originally quantized to 6 bit precision. You are asked how much the stop band attenuation at the frequency 875 Hz would be impacted if the coefficients were quantized to 5 bits. In case of a tie, round to even quantization level.

$$H(z) = -0.125 + 0.28125z^{-1} + 0.71875z^{-2} + 0.28125z^{-3} - 0.125z^{-4}$$

5. Saat lopuksi tehtäväksesi suunnitella ratkaisun, joka nostaa erään signaalin näytteistystaajuuden 5 kHz:tä 45 kHz:iin kahdessa vaiheessa. Sen varsinainen kiinnostava kaista on [0, 2] kHz.

Näytteistystaajuuden nostaminen saa lisätä kiinnostavan kaistan rippeliä korkeintaan 0.05 dB ja kuvastumisten on vaimennuttava vähintään 47 dB.

Kuinka suuren laskentatehon tarvitset? Tarvittavat suodattimet suunnitellaan sopivia ikkunafunktioita käyttäen.

Finally, you are given the task to design a solution that increases the sampling rate of a signal from 5 kHz to 45 kHz in two stages. The actual interesting band of the signal is [0, 2] kHz.

The increase of the sampling rate is allowed to increase the ripple in the interesting band by at most 0.05 dB while the imaging frequencies must be attenuated by at least 47 dB.

How much computing power do you need? The necessary filters are designed using suitable window functions.

DIGITAALISET SUODATTIMET 521337A (DIGITAL FILTERS)
Week exam patching/Viikkokokeiden paikonta 18.3.2021 08.15-11.45

Paikannon periaatteet/the patching scheme:

Uusinnoista saadut pisteet korvaavat aiemmat *tehtävä tehtävältä* (max 3p/tehtävä) pistetililläsi. Kunkin paikontakokeen ensimmäinen tehtävä vastaa aiemman viikkokokeen tehtävää 1 ja toinen tehtävää 2. Voit tarkistaa tilanteesi viikkokokeiden tuloslistalta.

Lopullisessa arvostelussa otetaan huomioon seitsemän parasta viikkokoetta kahdeksasta [tämä menettely on tarkoitettu poissaolon kompensoimiseen]. Kuitenkin sekä viikkokokeiden 1-4 että 5-8 pistekertymien on ennen tätä valintaa erikseen oltava vähintään 12 pistettä.

The points from this re-take replace the earlier points *problem by problem* on your points account (max 3p/problem). The first problem of each patching exam corresponds to the problem 1 of the earlier week exam and the second to problem 2. You can check your situation from the week exam results sheet.

The final grading takes into account the seven best week exam results out of the total eight [this principle is to compensate for an absence]. However, you need to have accumulated at least 12 points from both week exam sets 1-4 and 5-8 before that step.

Tehtävien taustaksi/for the background of the problems:

Pääset kehittämään ultratiheisiin langattomiin antureihin ja toimilaitteisiin perustuvaa teknologiaa, jolla pystytään seuraamaan ihmiskuntaa uhkaavien virussairauksien leviämistä jo heikkojen oireiden perusteella.

You get an opportunity participate in the development of technology for tracking the spread of virus diseases that threaten the mankind. The foundation is ultra-dense wireless networks of sensors and actuators.

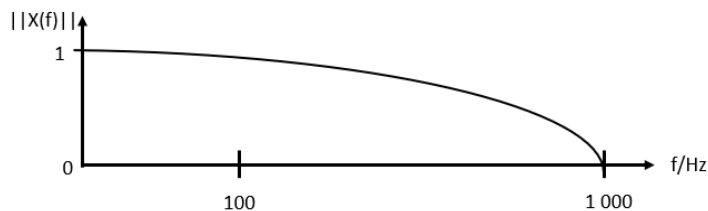
Viikkokoe 1/Week exam 1

1. EKG-signaalin kiinnostava kaista ulottuu 100Hz:iin, mutta mittalaitteessa siihen summautuu muita biosignaaleja aina 1kHz asti. Tästä johtuen signaalin spektri on alla olevan kuvan karkeasti esittämän kaltainen.

Saat tehtäväksesi suunnitella ratkaisun, joka tuottaa 8 bitin näytteitä EKG-signaalista. Laskostumisten on jätävä alle signaalikvantisointikohinan. Sinulle annetaan ohjeeksi tähdätä mahdollisimman alhaiseen näytteistystaajuuteen ja käyttää 4. kertaluvun Butterworth-tyyppistä laskostumisenestosuodatinta. 100Hz kohdalla signaali saa vaimentua korkeintaan 1dB:n verran.

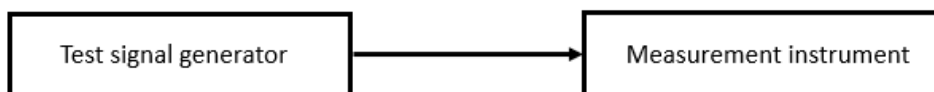
The interesting band of EKG signal extends to around 100 Hz, but in a measurement device other bio-signals are added up to 1kHz. For this reason the spectrum of the signal is roughly as shown in the figure below.

Your task is to create a solution that produces 8 bit samples from the EKG signal. Aliasing must be below the signal quantization noise level. You are instructed to aim at as low sampling frequency as feasible, and to employ a 4th order Butterworth anti-aliasing filter. At 100Hz the signal is allowed to attenuate at most by 1dB.



- a. Mikä on laskostumisenestosuodattimen ns. cut-off -taajuus (3dB vaimennuksen taajuus)?
What is the cut-off frequency (frequency of 3dB attenuation) of the anti-aliasing filter?
 - b. Mikä on toteutuksen näytteistystaajuus?
What is the sampling frequency of the design?
2. Tallennettua 1000Hz taajuudella näytteistettyä kaistaltaan [0, 200] Hz biosignaalia käytetään mittalaitteen testauksessa. Tällöin signaali syötetään nollannen kertaluokan pitoa käyttävään D/A-muuntimeen ja 200Hz:n kohdalla signaali saa vaimentua nimellistasostaan korkeintaan 34%:ia. Mittalaite toimii 8 bitin tarkkuudella ja kuvastukset eivät saa erottua sille signaalikvantisointikohinasta. Mikä on tarvitun Butterworth-tyyppisen kuvastumisenestosuodattimen cut-off-taajuus ja kertaluku? Desibelit voi pyöristää ensimmäiseen desimaaliinsa.

A stored biosignal with band [0,200] Hz that has been sampled at 1000Hz is used in the testing a measurement instrument. The signal is fed into a D/A converter that employs zero-order-hold, and the signal is allowed to be attenuated by at most 34% from its nominal level. At 200Hz The measurement device uses 8 bit precision and the imaging components may not be detectable from the signal quantization noise. What are the cutoff frequency and the order of the anti-aliasing filter? You may round the decibels to their first decimals.



Viikkokoe 2/Week exam 2

3. Biosignaaliasiantuntija ilmoittaa erääksi erittäin kiintoisaksi aikatazon näytesekvenssiksi $x(n)=[1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]$. Jatkosuunnittelua varten määritä sen taajuustason esityksen amplitudi- ja vaihekuvaajat.

The biosignal expert tells that a particularly interesting time domain sequence is $x(n)=[1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]$. For further analysis determine its frequency domain amplitude and phase diagrams.

4. Erään biosignaalin mittauksessa käytetyn suodattimen siirtofunktio on alla. Selvitä sen impulssivaste.

The transfer function using in the measurements of a biosignal is below. Determine its impulse response.

$$H(z) = \frac{1 - z^{-2}}{1 - z^{-1} + 0.5z^{-2}} + \frac{1 + z^{-2}}{1 + z^{-1} + 0.5z^{-2}}$$

Viikkokoe 3/Week exam 3

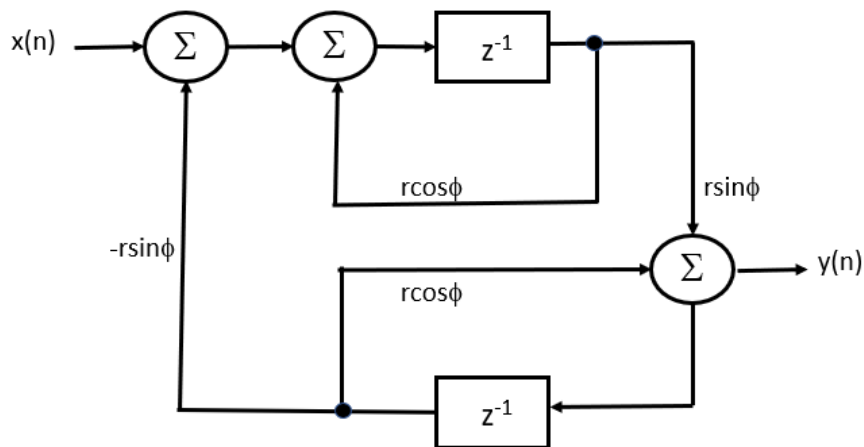
5. Erään biosignaalin mittauksessa käytetyn suodattimen siirtofunktio on alla. Selvitä sen amplitudi- ja vaihevasteet 0.25 Hz:n välein näytteistystaajuuteen 2 Hz. asti. Esitä amplitudivaste desibeleinä. Onko suodatin niinku stabiilikin? Perustele.

The transfer function using in the measurements of a biosignal is below. Determine its amplitude and phase responses at 0.25 Hz intervals until the 2 Hz sampling frequency. Present the amplitude response in decibels. Is the filter stable? Justify.

$$H(z) = \frac{1 - \sqrt{2}z^{-1} + z^{-2}}{1 - 1.4z^{-1} + 0.9801z^{-2}}$$

6. Sinulle osoitetaan eräs aikadiskreetin suodattimen numeerisesti kiinnostavaksi todettu realisaatorakenne. Mikä on sen siirtofunktio? Onko kyseessä ylipäästö vai alipäästösuodatin?

You are pointed to a numerically interesting realization structure of a discrete time filter. What is its transfer function? Is it a high pass or low pass filter?



Viikkokoe 4/Week exam 4

7. Lihaksista saadun EMG-signaalin kaista on välillä [0, 500] Hz ja se on alipäästösuodatettava ennen jatkokäsittelyä korkeataajuuksien häiriöiden poistamiseksi. Suodatuksessa edellyttään kaikkien taajuuksien viivästyvän saman verran. Saat valita tuohon kohtaan alla ehdolla olevista FIR-suodattimista tarkoitukseen soveltuvan.

The band of the EMG signal that originates from the muscles is [0, 500] Hz and it must be low pass filtered before further processing to eliminate high frequency interference. In filtering all frequencies must be delayed by the same time. You get an opportunity to choose a suitable one from the FIR filters below.

- (a) $H_1(z) = 1 - 2z^{-1} + z^{-2} - z^{-3} + 2z^{-4} - z^{-5}$
 (b) $H_2(z) = 1 + 2z^{-1} + 2z^{-2} + z^{-3}$
 (c) $H_3(z) = 1 + 2z^{-1} - z^{-2} - z^{-3} - 2z^{-4} - z^{-5}$
 (d) $H_4(z) = 1 + 2z^{-1} + 4z^{-2} + 2z^{-3} + z^{-4}$
 (e) $H_5(z) = -2 - z^{-1} + z^{-3} + 2z^{-4}$

Perustele valintasi ja poisvalintasi. Esitä ja piirrä valitsemasi siirtofunktion vaihe- ja amplitudivasteet ($\pi/2$ välein riittää)

Justify your choice and exclusions. Present and plot the phase and magnitude responses of your selected transfer function ($\pi/2$ interval suffices)

8. EMG-mittalaitteen digitaaliseen esikäsittelyosaan vaaditaan ikkunamenetelmällä suunniteltu digitaalinen FIR-alipäästösuodatin, jonka spesifikaatiot ovat seuraavat:

The digital preprocessing stage of the EMG measurement instrument demands a digital FIR filter designed using the window method. The filter has the following specifications:

- Näytteistystaajuus/sampling frequency $F_s = 5000$ Hz
 Päästökaistan rajataajuus/passband edge frequency $f_p = 500$ Hz
 Estokaistan rajataajuus/stopband edge frequency $f_s = 2500$ Hz
 Estokaistan vaimennus/Stopband attenuation $A_s > 45$ dB
 Päästökaistan rippeli/ripple in passband $\delta_p < 0.03$

- a. Mitkä ikkunafunktiot täyttävät vaatimukset?
Which window functions meet the specifications?
- b. Suunnittele suodattimen toteutus ikkunamenetelmällä ja laske suodattimelle kolme kerrointa. Käytä ikkunaa, jonka ominaisuudet ovat lähimpänä vaatimuksia ja täyttävät ne.
Design the filter using window method and determine three coefficients for the filter. Use the window that is the closest to the specifications and meets them.

Viikkokoe 5/Week exam 5

9. Lihaksista saatavien EMG-signaalien mittauksiin todetaan kytkeytyneen sähköverkosta 150 Hz häiriön, joka on jatkotoimenpiteitä varten erotettava hyvin kapealla kaistanpäästösuodattimella, jonka kaistanleveydeksi sallitaan korkeintaan 5Hz.

Suunnitellet tarkoitukseen rekursiivisen FIR-suodattimen. Näytteistystaajuuden sekä taajuusnäytteiden määrä ovat valittavissasi. Esitä siirtofunktio.

The measurements of EMG signals from the muscles is harmed by 150Hz interference that needs to be separated for further processing using a very narrow-bandpass filter. The filter to be realized for the experiments is allowed to possess max. 5Hz bandwidth.

You design a recursive FIR filter for the purpose. It is up to you to select the sampling frequency and the number of frequency samples. Present the transfer function of your solution.

10. Lihaksista saatavien EMG-signaalien mittauksiin tajutaan kytkeytyneen myös 50Hz häiriön. Se päätetään irrottaa ei-rekursiivisella taajuusnäytteistetyksi suunnitellulla FIR-suodattimella, jolta vaaditaan lineaarinen vaihevaste. Nyt tarvituksi kaistanleveydeksi ilmoitetaan 10 Hz.

Valitse näytteistystaajuus ja taajuusnäytteiden määrä ja laske suodattimelle vähintään kaksi kerrointa.

It is observed that the measured EMG-signal contains also 50Hz interference. Your bosses decide that they should be eliminated with a non-recursive frequency sampling based FIR filter that is required to have linear phase response. Now the bandwidth is specified to be 10Hz.

Select the sampling frequency and the number of frequency samples, and calculate at least two coefficients for the filter.

Viikkokoe 6/Week exam 6

11. Alla oleva EMG-mittarin eräs 2000Hz:n näytteistystaajuudella toimiva FIR alipäästösuodatin on alunperin kvantisoitu 6 bitin tarkkuudella. Sinua pyydetään tarkistamaan, kuinka paljon estokaistan vaste taajuudella 875 Hz heikkenee, jos kertoimet kvantisoidaan 5 bittiseksi. Tasatilanteessa pyöristä parilliseen kvantisointitasoon.

The EMG measurement instrument includes a FIR low pass filter below that operates at 2000 Hz sampling frequency. It was originally quantized to 6 bit precision. You are asked how much the stop band attenuation at the frequency 875 Hz would be impacted if the coefficients were quantized to 5 bits. In case of a tie, round to even quantization level.

$$H(z) = -0.125 + 0.28125z^{-1} + 0.71875z^{-2} + 0.28125z^{-3} - 0.125z^{-4}$$

12. EMG-mittalaitteessa on seuraava impulssi-invariantilla menetelmällä suunniteltu digitaalinen alipäästösuodatin. Se päätetään havaittujen ongelmien vuoksi korvata aikajatkuvalla analogisella suodattimella. Valitettavasti alkuperäiset suunnitteludokumentit ovat kadonneet, joten joudut käänteiseen insinööriyöhön. Esitä alkuperäinen aikajatkuvan suodattimen s-tason siirtofunktio.

Näytteenottoväliksi voit olettaa $T=1$.

The EMG measurement device includes the following digital low-pass filter that has been designed using impulse-invariance method. Due to observed problems it is replaced by a respective continuous time analog filter. Unfortunately, the original design documents have disappeared, so you need to reverse engineer the solution. Present the respective original s-plane transfer function.

You may assume sample interval $T=1$.

$$H(z) = \frac{1.0}{1 - e^{-2.0}z^{-1}} + \frac{2.0}{1 - e^{-1.0}z^{-1}}$$

Viikkokoe 7/Week exam 7

13. EMG-mittalaitteeseen tarvitaan vielä Butterworth -suodattimen kaltaisesti käyttäytyvä digitaalinen alipäästösuodatin (maksimaalisen tasainen ja monotoninen vaste). Suodattimen on täytettävä alla olevat vaatimukset. Mikä on suodattimen siirtofunktio? Käytät suunnitteluun bilineaarista z-muunnosta.

The measurement instrument needs a digital low-pass filter with Butterworth response characteristics (maximally flat and monotonous). The filter needs to satisfy the requirements below: What is the transfer function of the filter? You naturally use the bilinear z-transform method.

Päästökaista/Passband 0-500Hz

Estokaista/Stopband 2-2.5kHz

Estokaistan vaimennus vähintään/Stopband attenuation at least 20 dB

Näyteistystaajuus/Sampling frequency 5kHz

14. Mittalaitteeseen joudutaan viime hetken muutoksena toteuttamaan IIR-suodatin. Toteutus tehdään kiinteän pisteen laskennalla 16 bitin sananpituudella. Akkurekisterin pituus on 32 bittiä. Toteutettavalle siirtofunktiolle on haettu kaksi alla esitettyä muotoa toteutuksen pohjaksi.

Esitä suodattimella suora (yksi lohko) ja kaskadirealisaatio, jälkimmäinen perustuen ns. kahden kanonisen lohkon (tunnetaan myös käsitteellä Direct Form II) käyttöön. Vertaile realisaatioitasi pyöristyksistä aiheutuvan kvantisointikohinan perusteella. Osoita perustellen mielestäsi parempi toteutus.

When the measurement device is being tested, a last minute change of adding an IIR filter is found mandatory. It will be implemented using fixed point 16 bit arithmetic, while the accumulator register has 32 bits. Two alternative transfer function formulations shown below are given for the filter.

Present direct structure (single block) and cascade realizations for the filter, the latter based on two canonic blocks (also known as Direct Form II). Compare your realizations based on their round-off noise characteristics. Justify, which implementation is better.

$$H(z) = \frac{1 + 0.67z^{-1} - z^{-2}}{1 - z^{-1} + 0.5z^{-2}} \frac{1 - 0.67z^{-1}}{1 - 0.875z^{-1} + 0.09375z^{-2}}$$

$$= \frac{1 - 1.4489z^{-2} + 0.67z^{-3}}{1 - 1.875z^{-1} + 1.46875z^{-2} - 0.53125z^{-3} + 0.046875z^{-4}}$$

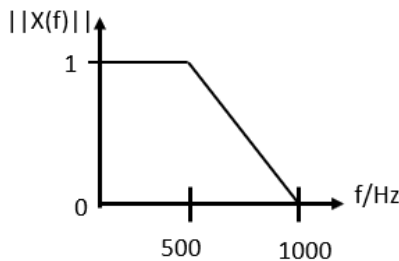
Viikkokoe 8/Week exam 8

15. Laitteen toimintojen testaukseen käytetään alla olevan kuvan spektrin omaavaa 2 kHz taajuudella näytteistettyä signaalia, jonka kiinnostava kaista ulottuu 500 Hz:iin saakka. Sen näytteistystaajuus on kuitenkin muutettava 1.5 kHz:ksi.

Esitä tarvittavan näytteistysnopeuden muuntimen lohkokaavio ja hahmottele signaalin spektri kussakin muunnosketjun vaiheessa (jokaisen lohkon jälkeen) kulloiseenkin Nyquistin taajuuteen asti.

The testing procedure of the device employs the signal with the spectrum below, sampled at 2 kHz rate. The interesting band extends to 500 Hz. For further processing its sampling rate is reduced to 1.5 kHz.

Present a block diagram for the needed sample rate converter and sketch the spectrum of the signal at each stage of the conversion chain (after each block) until each relevant Nyquist frequency.



16. Saat lopuksi tehtäväksi suunnitella ratkaisun, joka nostaa erään signaalin näytteistystaajuuden 5 kHz:tä 45 kHz:iin kahdessa vaiheessa. Sen varsinainen kiinnostava kaista on $[0, 2]$ kHz.

Näytteistystaajuuden nostaminen saa lisätä kiinnostavan kaistan rippeliä korkeintaan 0.05 dB ja kuvastumisten on vaimennuttava vähintään 47 dB.

Kuinka suuren laskentatehon tarvitset? Tarvittavat suodattimet suunnitellaan sopivia ikkunafunktioita käyttäen.

Finally, you are given the task to design a solution that increases the sampling rate of a signal from 5 kHz to 45 kHz in two stages. The actual interesting band of the signal is $[0, 2]$ kHz.

The increase of the sampling rate is allowed to increase the ripple in the interesting band by at most 0.05 dB while the imaging frequencies must be attenuated by at least 47 dB.

How much computing power do you need? The necessary filters are designed using suitable window functions.