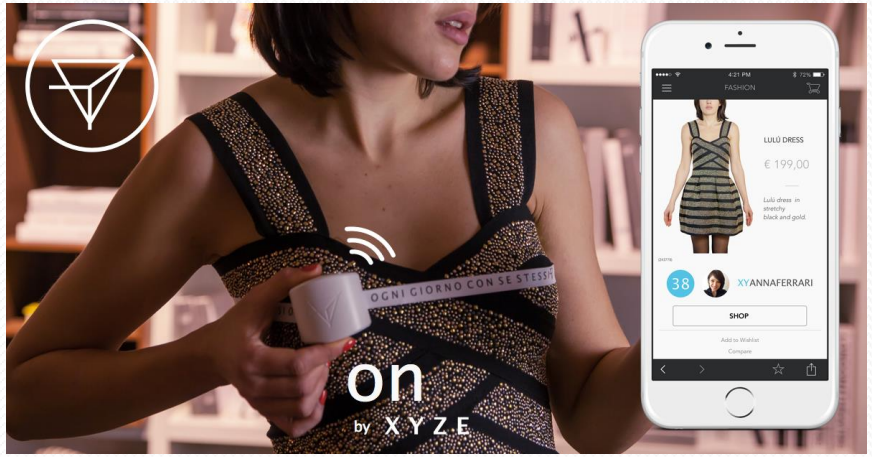
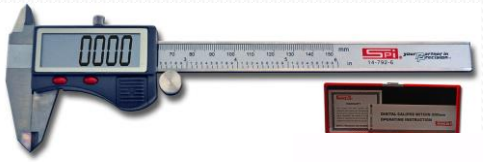
Stafræn merkjavinnsla fyrir amatöra

Sæmundur E. Þorsteinsson
TF3UA

Stafræn merkjavinnsla á mörgum sviðum



Stafræn merkjavinnsla á mörgum sviðum



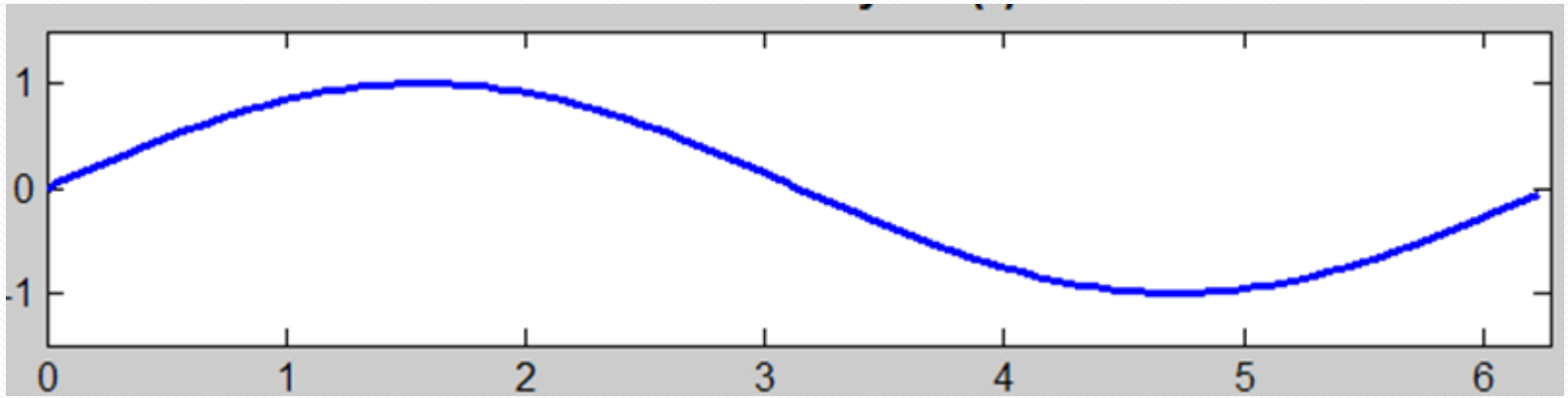
Mismunandi form merkis

- Samfellt merki (e. continuous signal)
  - Merkið er skilgreint fyrir öll gildi tímans og getur tekið hvaða endanlegt gildi sem er
  - Dæmi: Tal fyrirlesarans
- Tímastakrænt merki (e. time discrete signal)
  - Merkið er skilgreint fyrir aðeins ákveðna tímapunkta, milli þeirra er það óskilgreint
  - Dæmi: Lesið er af kvikasilfurs hitamæli kl 12:00 á hverjum degi
- Útslagsstakrænt merki (e. amplitude discrete signal)
  - Útslag merksins getur aðeins tekið ákveðin gildi
  - Dæmi: Verð á Einstakri í Ríkinu (getur ekki verið 448,97648 kr.)
- Útslags- og tímastakrænt merki
  - Merkið er bæði stakrænt í tíma og útslagi
  - Slíkt merki er kallað stafrænt merki (e. digital signal)
  - Dæmi: Tölur sem skrifaðar eru í skrá, eða tölur á CD-diski

Samfellt merki

- Dæmi um einfalt samfellt merki er sínussveiflan

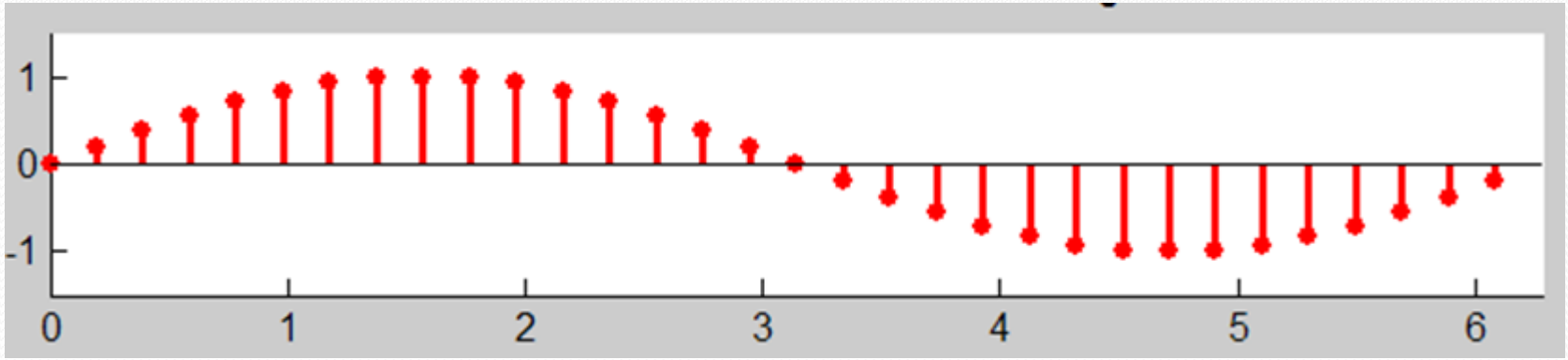
$$x(t) = A\sin(\omega t)$$



Teiknað í Matlab með plot(t,x,'b-')

Tímastakrænt merki

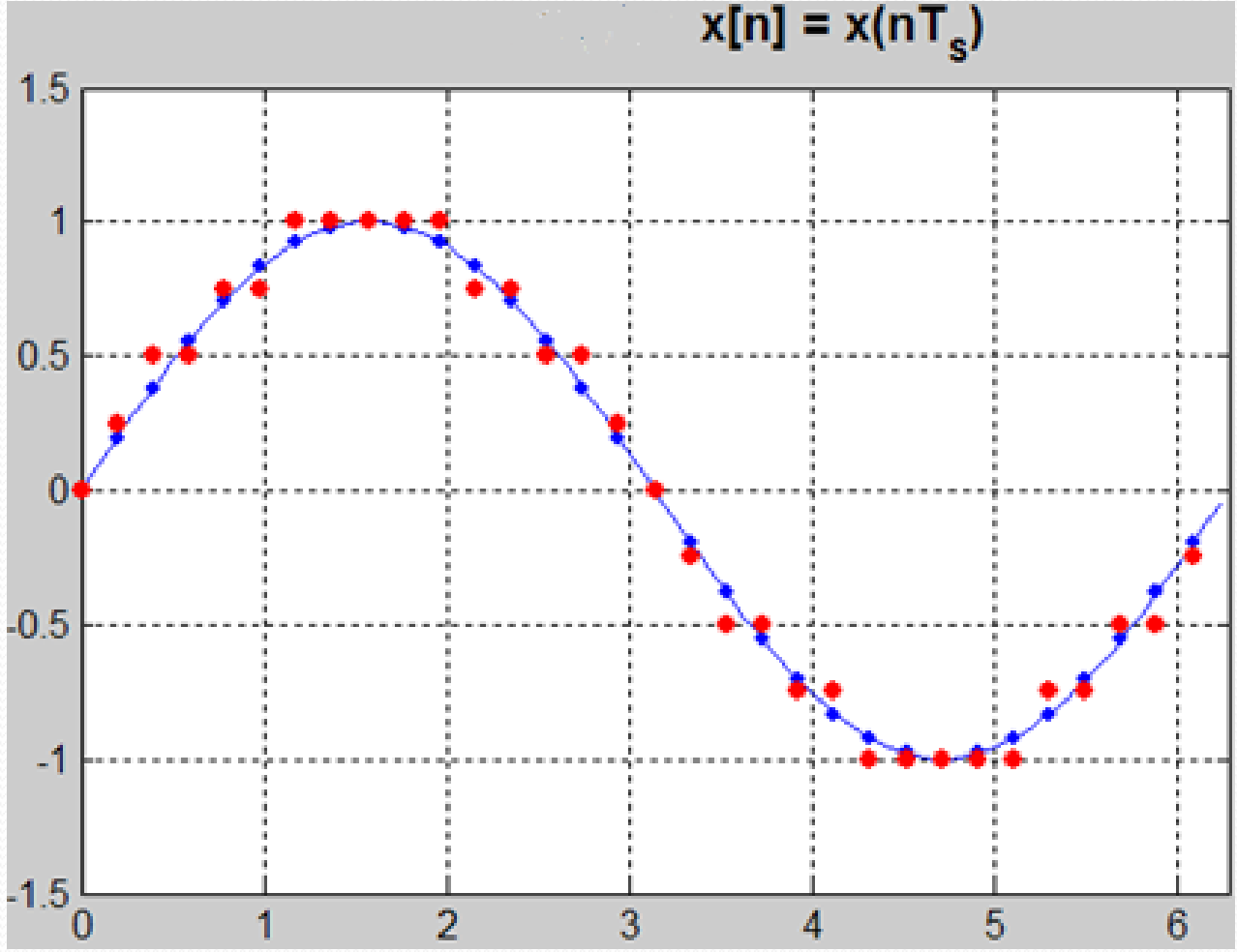
- Samfelldu merki breytt í tímastakrænt merki, aðeins skilgreint á ákveðnum augnablikum



Teiknað í Matlab með stem(n,x,'r')

Stafrænt merki

- Stafrænt merki er stakrænt merki bæði í tíma og í útslagi



- Samfellda merkið
- Mæld gildi (stakræn í tíma)
- Mæld gildi (stafræn, stakræn í tíma og útslagi)

Dæmi um stafrænt merki

- Hljóð (t.d. tónlist) er hægt að geyma á stafrænan hátt í skrám t.d.
  - wav, mp3, aac og flac skrár
  - Í raun er þetta röð af tölum sem spilarinn þarf að túlka á réttan hátt til þess að framkalla hljóðið

- Matlab sýning

Stafræn merkjavinnsla

- Suðs gætir minna í stafrænum en hliðrænum kerfum
  - Hægt að endurvinna stafræn merki fullkomlega, ekki hliðræn
  - Því er hægt að senda stafræn merki um langan veg án nokkurs merkistaps
- Í stafrænum kerfum er auðveldara að samþætta marga strauma, t.d. senda hljóð og mynd saman eða flétta saman margar sjónvarpssendingar
- Stafrænt kerfi er hannað til að meðhöndla gögn, þau geta verið af mörgu tagi, hljóð, mynd, tölvugögn

Stafræn merkjavinnsla

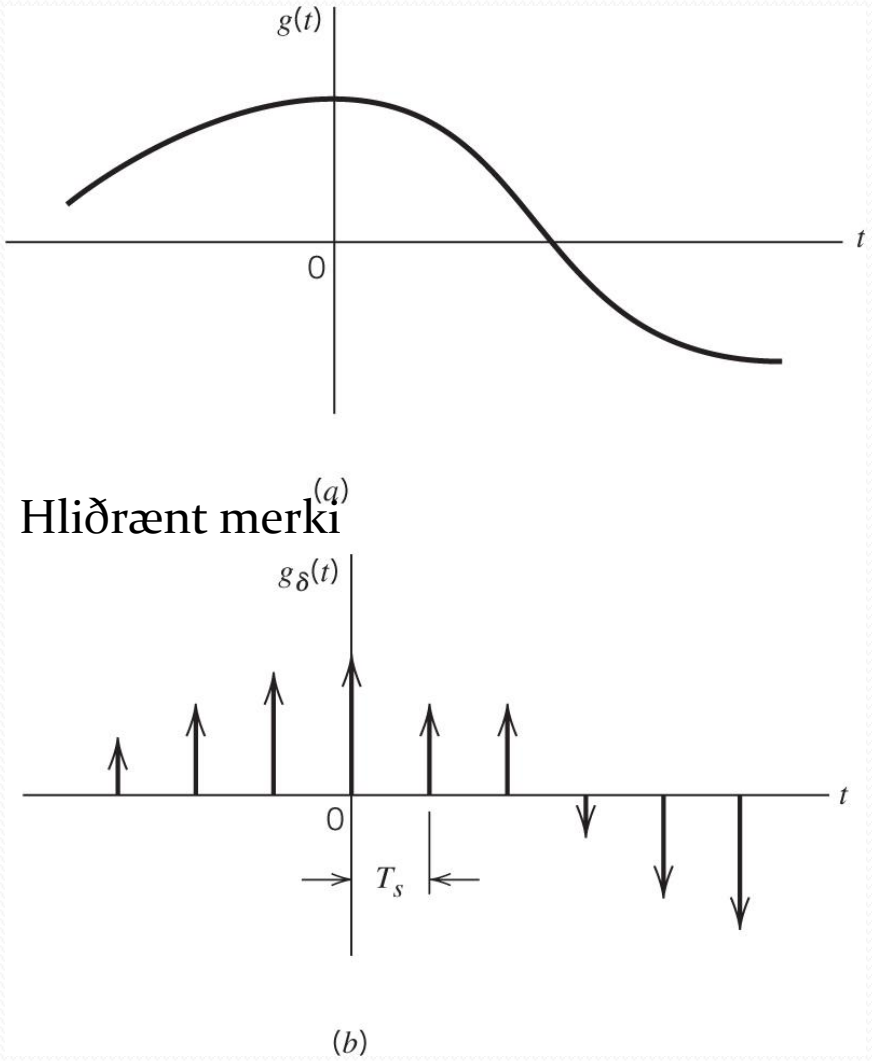
- Auðveldara að smíða stafrænar rásir, framleiða milljónir rása sem virka allar nákvæmlega eins, stafræn kerfi eru ónæmari fyrir ýmsum áhrifum umhverfisins
- Hægt að þjappa stafrænum merkjum mjög mikið saman svo að þau nýta bandbreidd margfalt betur
  - Hliðrænt sjónvarp tók um 6 MHz bandbreidd. Hægt er að senda fléttu með um 8 stöðvum í þeirri bandbreidd með stafrænni tækni, DVB-T
  - Venjulegt sjónvarpsmerki (staðalskerpa) sem hefur verið gert stafrænt þarfnast 270 Mb/s fjarskiptahraða
  - Hægt að þjappa því í 2 Mb/s og senda yfir IPTV án þess að sjá mikla gæðaminnkun

Stafræn merkjavinnsla

- Hægt er að bæta villuskynjandi og/eða villuleiðréttandi kóðun við stafræn merki þ.a. villulíkur geta orðið hverfandi
  - Sérstaklega mikilvægt í gagnafjarskiptum milli tölva, t.d. þegar gögn í gagnagrunnum eru flutt milli staða
- Margir stafrænir staðlar eru í gildi sem gilda um allan heim, t.d. IEEE 802.3, IP, GSM, UMTS, LTE, WSJT og fl.

Sýnataka (e. sampling)

- Til að vinna hliðrænt merki í stafrænu kerfi þarf að taka sýni af því og breyta sýnunum yfir á stafrænt form. Stafrænt merki er kallað stakrænt (e. discrete) í tíma og útslagi. Það er stakrænt í tíma af því að það getur aðeins haft gildi á vissum gefnum andartökum. Gildi þess á öðrum tímum skiptir ekki máli. Það er stakrænt í útslagi af því að það getur aðeins tekið ákveðin útslagsgildi

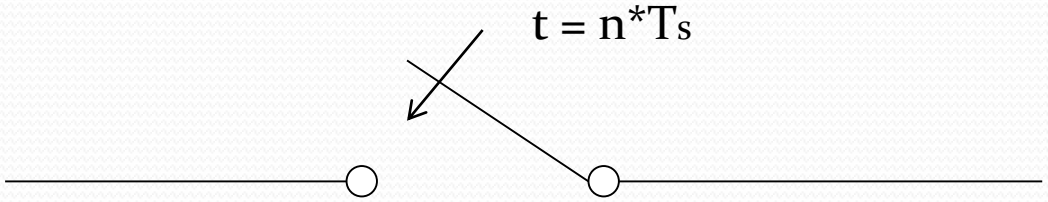


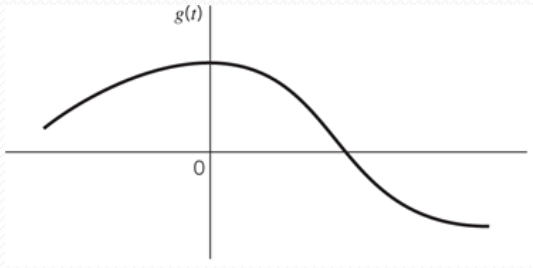
Hliðrænt merki

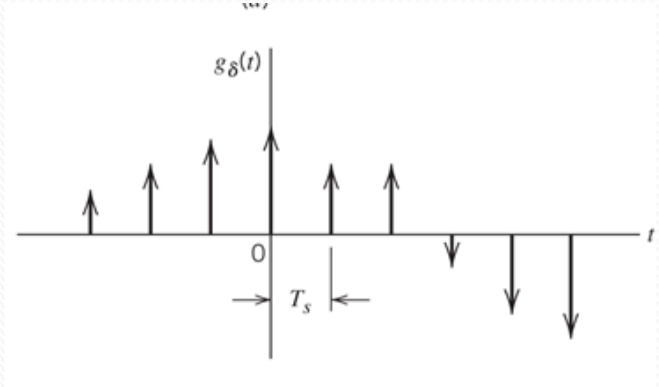
Tímastakrænt merki

Sýnataka (e. sampling)

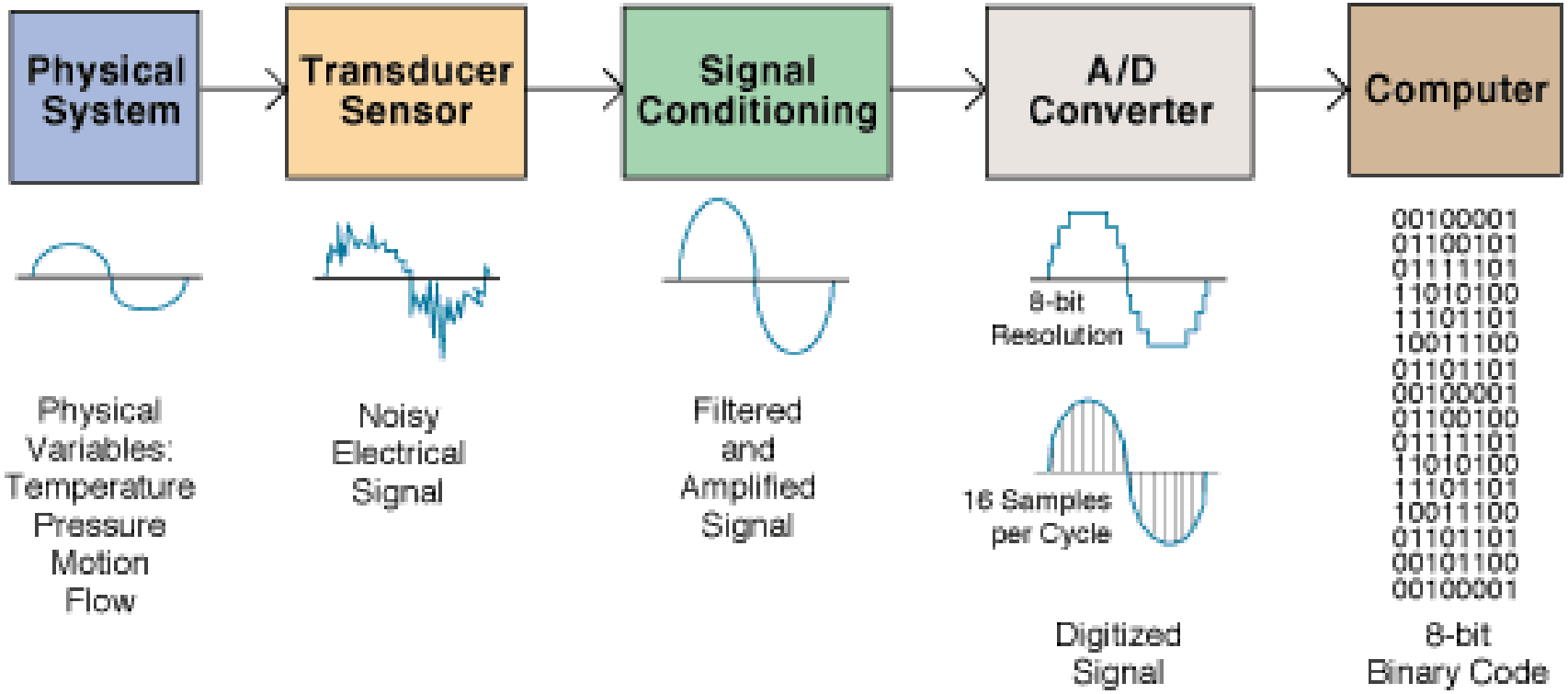
- Getum ímyndað okkur að sýnatakan eigi sér stað með rofa sem snýst með ákveðnum hraða, hittir alltaf snertuna á tímanum n*T_s



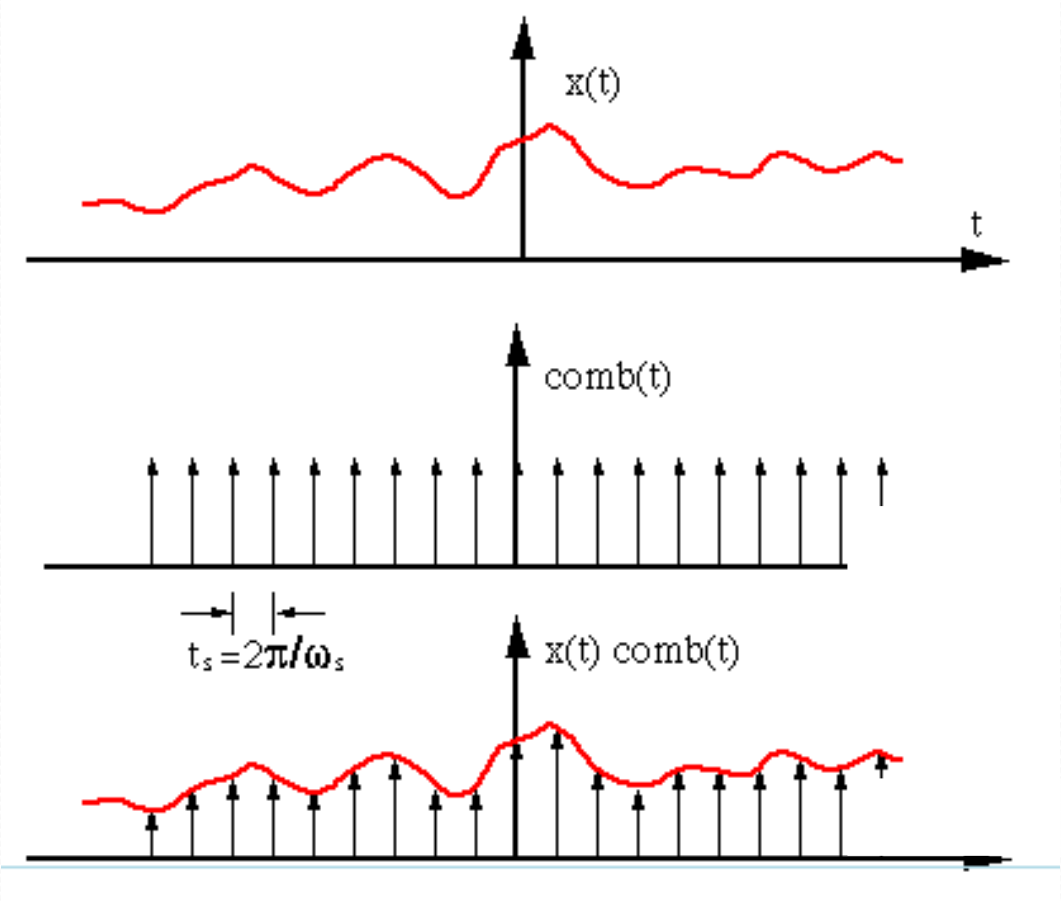




Skynjun samfelldra merkja með tölvu



Hversu oft þarf að taka sýni ?



$$t_s = \frac{1}{f_s}$$

f_s er sýnatökutíðni

Sýnatökuregla Nyquists, nefnd af Shannon

- Ef fall x(t) inniheldur enga tíðni hærri en B Hz er hægt að ákvarða það fullkomlega út frá sýnum sem eru tekin örar en á 1/(2B) sek. fresti
- Einnig má orða þetta þannig að taka verður sýni með hærri tíðni en 2B svo hægt verði að endurvinna upphaflega merkið út úr sýnunum

Reglan ýmist kennd við
Harry Nyquist, Claude Shannon, E.T. Whittaker eða Vladimir Kotelnikov – eða engan þeirra og þá kölluð einfaldlega sýnatökureglan "**The sampling theorem**".

Sýnatökuregla Nyquists

- Reglan segir að taka þurfi sýni með hærri en tvöfaldri tíðni hæsta tíðniþáttar merkisins.
  - Sé hæsti tíðniþátturinn t.d. 100 Hz þarf að taka sýni tíðar en með 200 Hz til þess að upplýsingar tapist ekki úr merkinu.

Þetta er lágmark!
Algengt er að taka sýni töluvert oftar t.d 5x eða 10x

Hvað gerist ef sýni eru tekin of hægt?

Sýni tekin of hægt

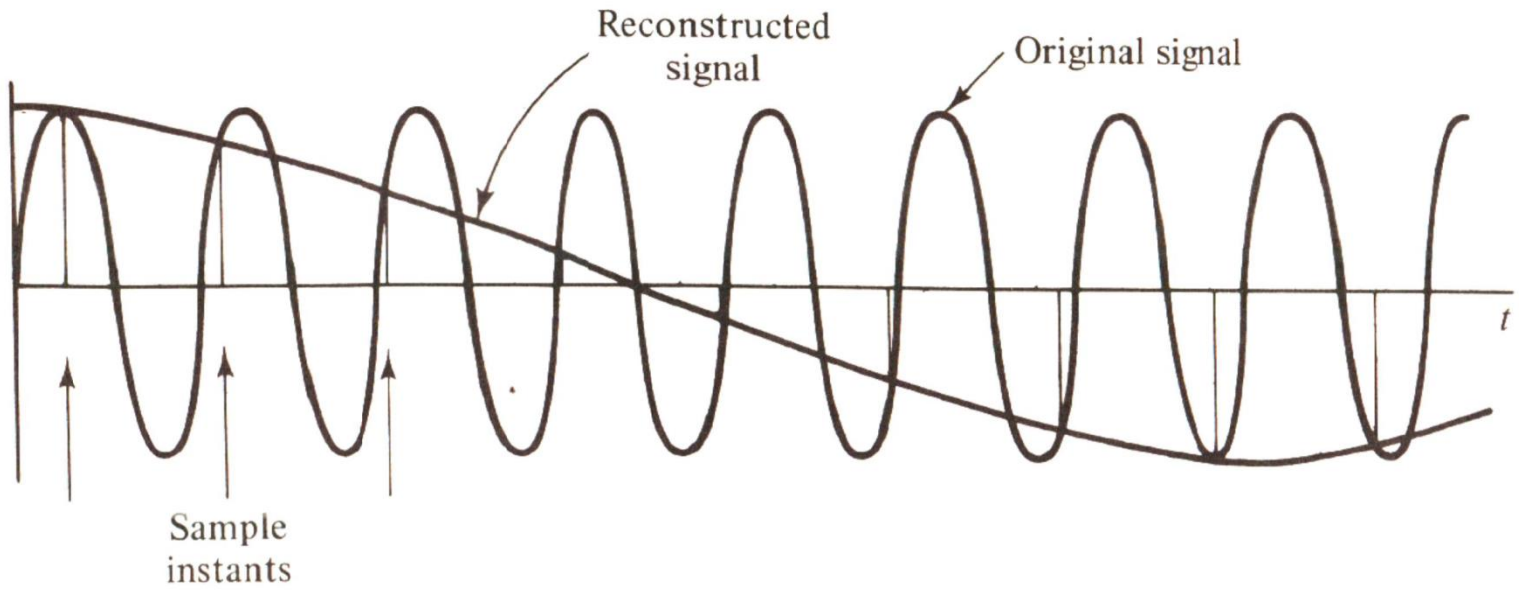


Figure 4.2-6. Showing the effect of sampling below the Nyquist rate.

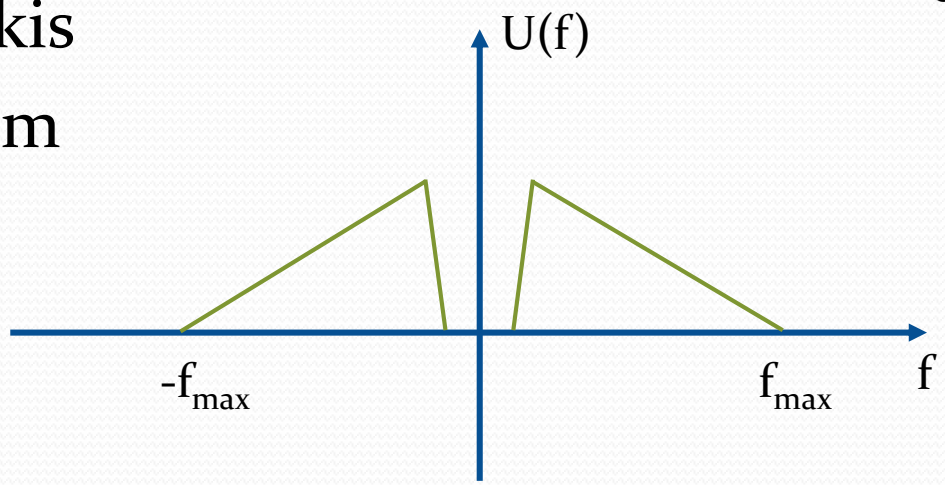
Það tapast ekki bara tíðniþættir heldur koma nýir sem ekki eru til staðar í upphaflega merkinu

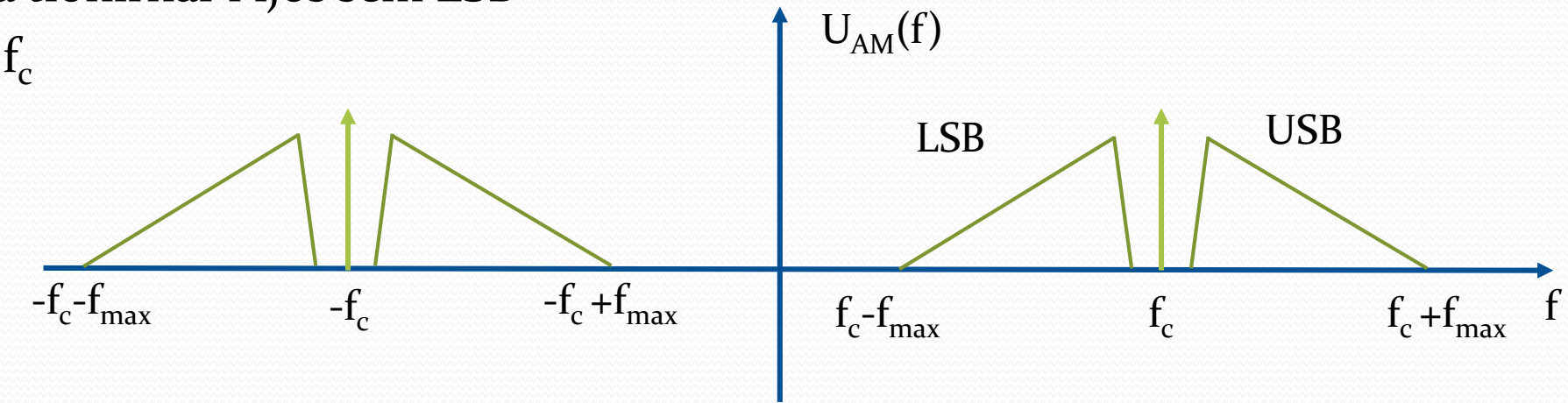
Hjólið sem snýst aftur á bak

- Allir kannast við að hafa séð hjól í kvikmynd þar sem hjólið virðist snúast aftur á bak eða jafnvel standa í stað, þó að vagninn á hjólinu fari áfram
- Þetta er dæmi um þegar sýnatakan er ekki nægilega hröð
- Sú truflun sem kemur fram þegar sýnatakan er of hæg er kölluð **spegilbjögun (e. aliasing)**

Merki og tíðniróf þess

- Þetta tíðniróf getur t.d. verið tíðniróf hljóðmerkis
- Við sjáum að merkið hefur tíðniróf á neikvæðum tíðnum
  - Skiljum ekki hvað neikvæð tíðni þýðir og getum ekki skynjað hana
  - Hins vegar sjáum við hana um leið og við t.d. styrkmótum merkið
    - Þá koma neikvæðu tíðnirnar í ljós sem LSB
    - Mótum á tíðninni f_c



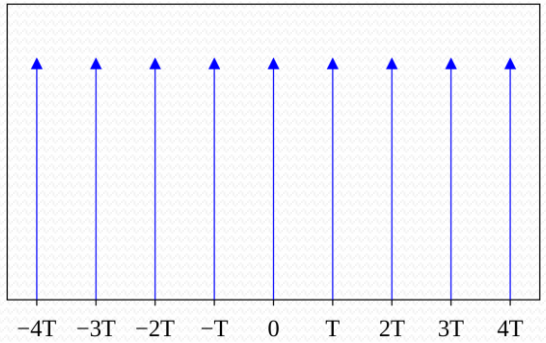


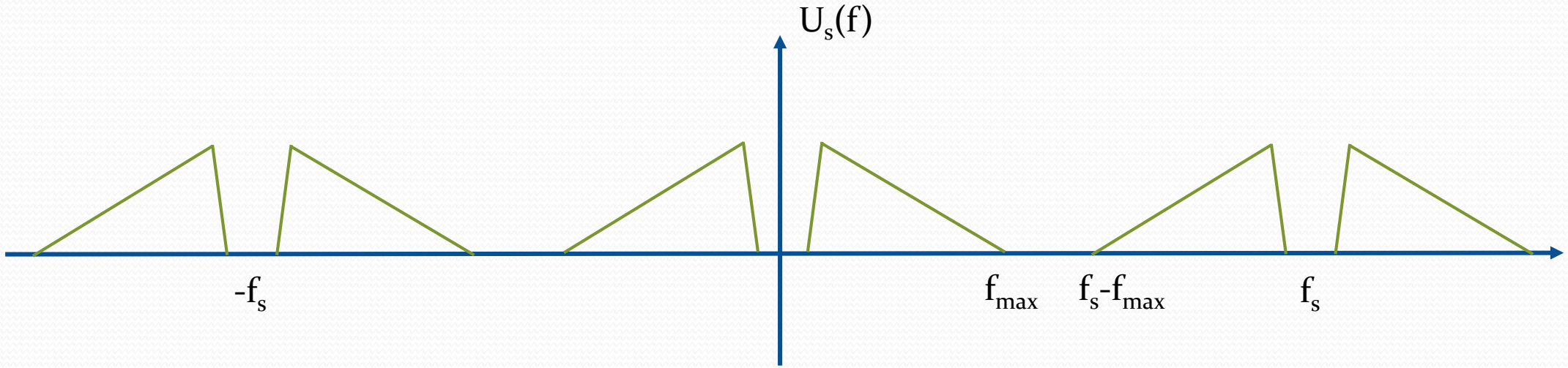
Sýnatakan

- Sýnatakan er eins og að móta (margfalda) með röð af mjóum púlsum
  - Þeir hafa tíðnina f_s
  - Þá verður til merki með tíðniróf sem endurtekur sig kringum f_s , $2 \cdot f_s$, $3 \cdot f_s$, $4 \cdot f_s$ og s. frv.
  - Til þess að engin bjögun verði þarf greinilega

$$f_s - f_{max} > f_{max}$$

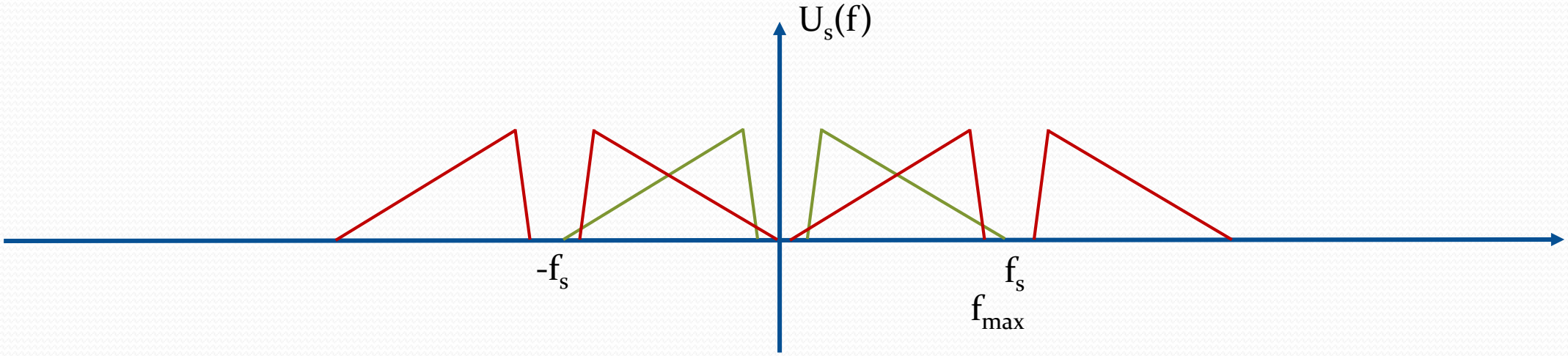
$$f_s > 2 \cdot f_{max}$$

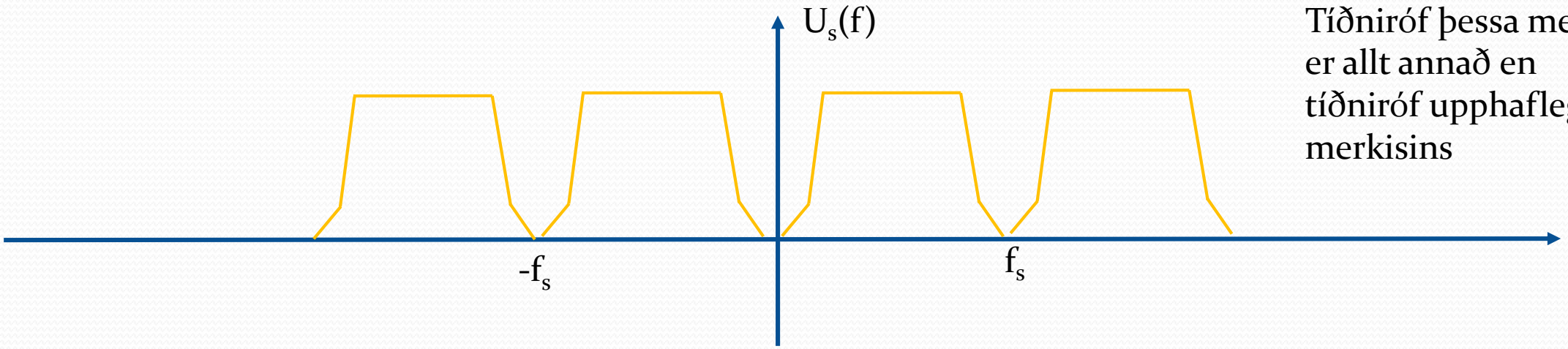




Hvað ef f_s er ekki meira en 2 f_{max} ?

- Hér er dæmi þar sem $f_s = f_{max}$

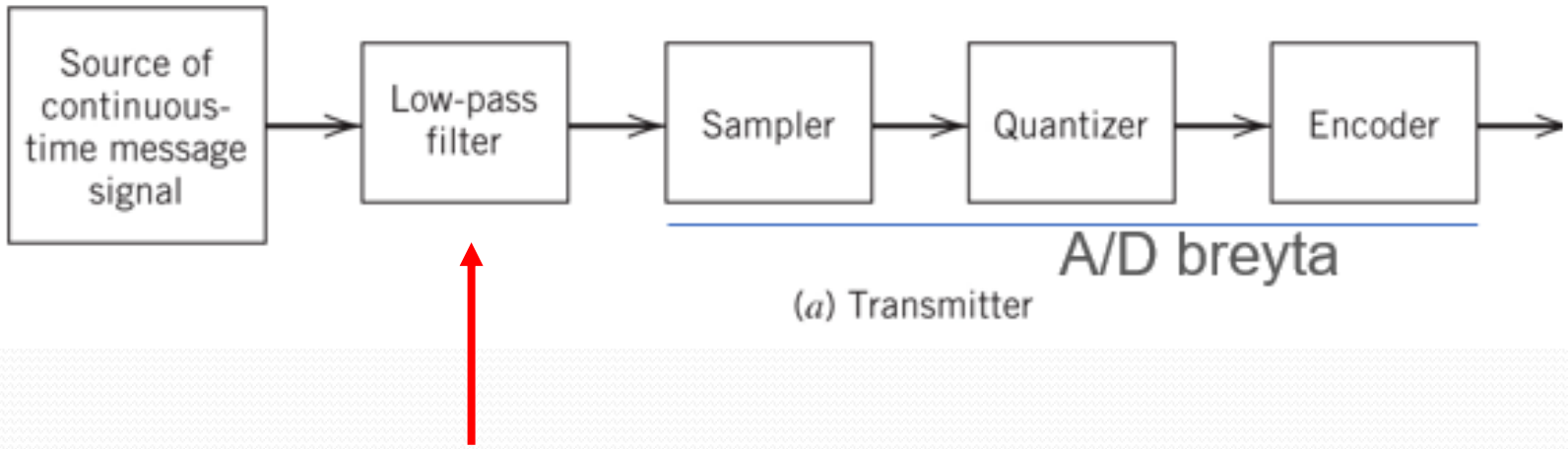




Tíðniróf þessa merkis er allt annað en tíðniróf upphaflega merkisins

Forsía í stafrænum kerfum

- Mjög mikilvægt er að setja lághleypisíu á hliðræna merkið áður en það er gert stafrænt
  - Ef það er ekki gert geta háir tíðniþættir fylgt með inn á A/D breytuna sem valda spegilbjögun



(a) Transmitter

Hugbúnaðarradió

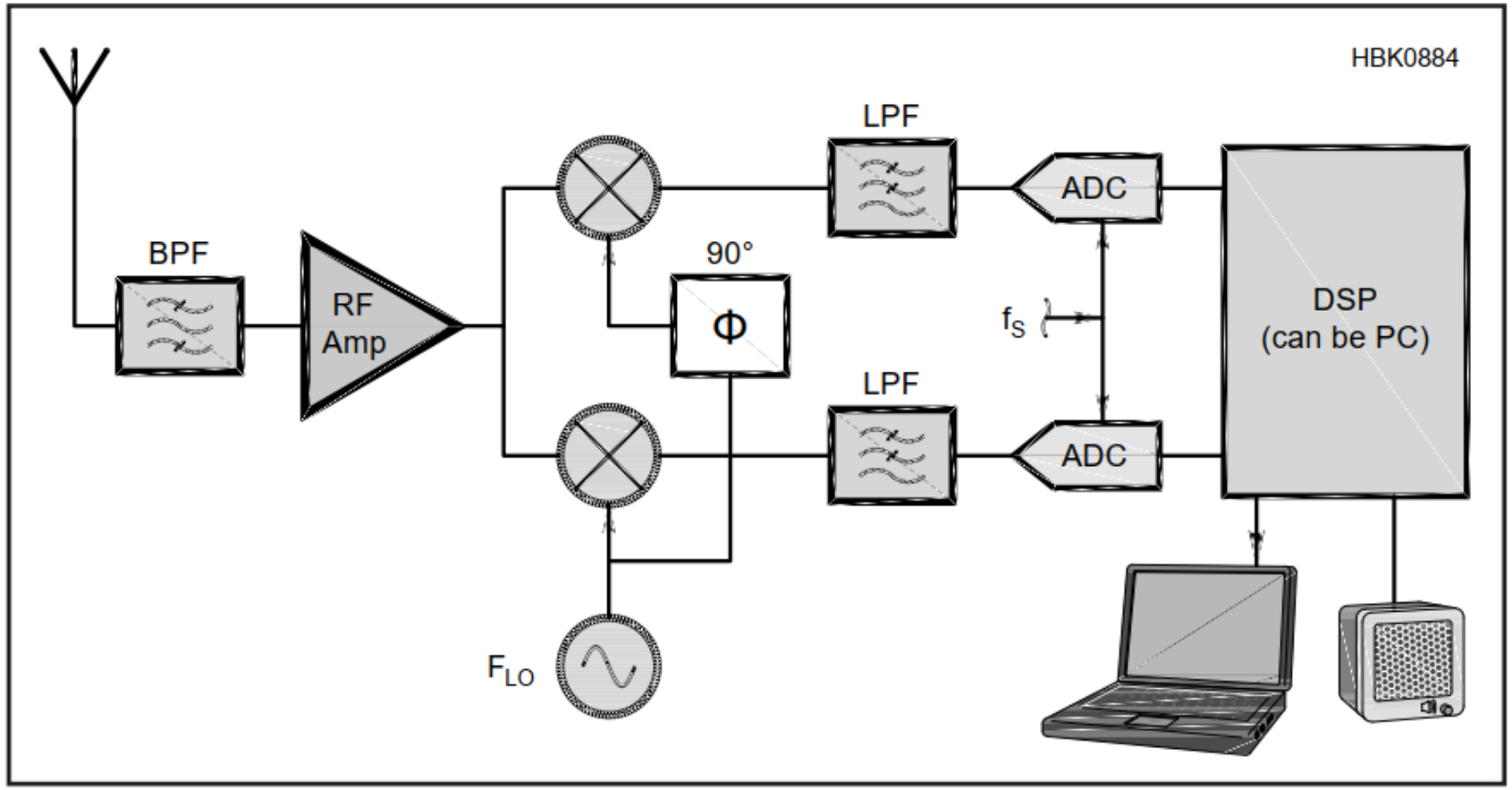


Figure 8.3 — Direct-to-baseband SDR receiver architecture.

- Þetta hefur verið kallað lágsláttar viðtæki (e. direct conversion)
  - Tvær rásir í tækinu, í-fasa (e. in-phase) og þverfasarás (e. quadrature)
  - Í stafrænum tækjum er auðvelt að eyða speglitíðninni sem kemur fram með lágsláttar viðtækjum
- Heimild: ARRL handbókin 2023

Hugbúnaðarradíó

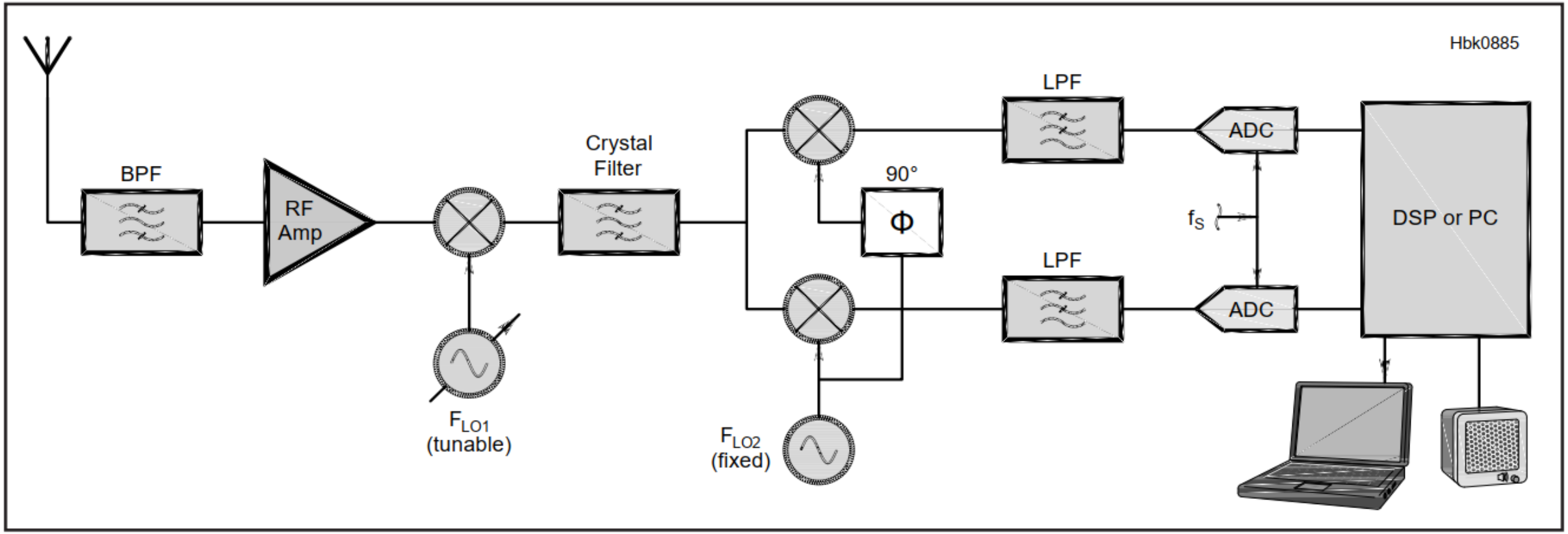


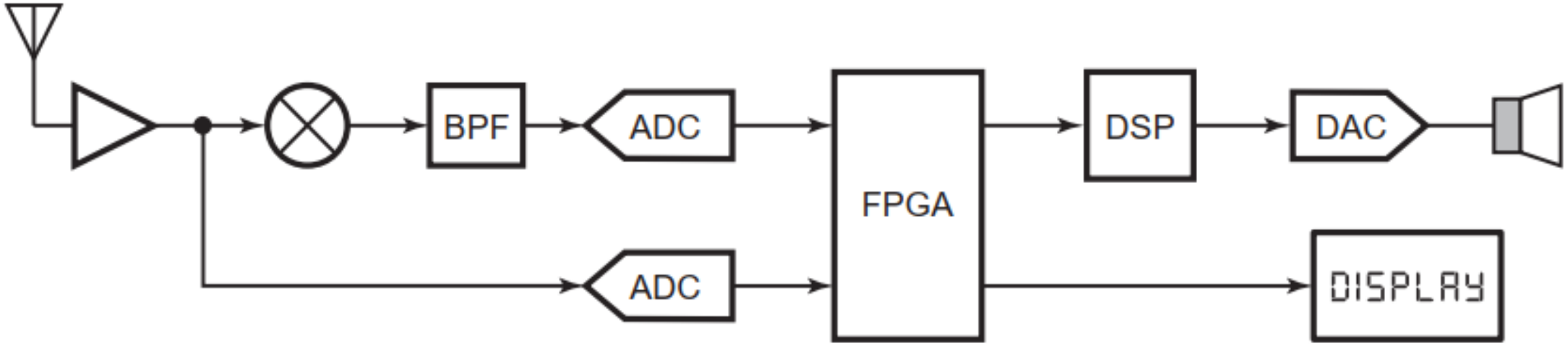
Figure 8.4 — Hybrid superhet/DSP SDR receiver architecture.

- Fyrst blandað á millitíðni og síðan SDR
  - t.d. Elecraft K3 og Icom IC-7851
  - Heimild: ARRL handbókin 2023

Kostir við að færa fyrst á millitíðni

- Þegar A/D breytan er sett aftan við krystalsíu á millitíðni er hægt að bæta svipult svið viðtækisins (kallað “Blocking Dynamic Range” BDR)
- Þetta þýðir að sterk merki sem eru utan við hleypisvið krystalsíunnar hafi síður áhrif á frammistöðu viðtækisins
  - BDR er hlutfallið í dB milli styrks merkis utan við hleypisviðið, sem er svo sterkt að það veldur 1 dB minnkun á styrk merkisins sem tekið er við og suðsins þegar ekkert merki er í viðtökusviðinu (oftast m.v. 500 Hz bandbreidd)
  - Hægt er að ná BDR = 140 dB eða hærra

Hugbúnaðarradíó

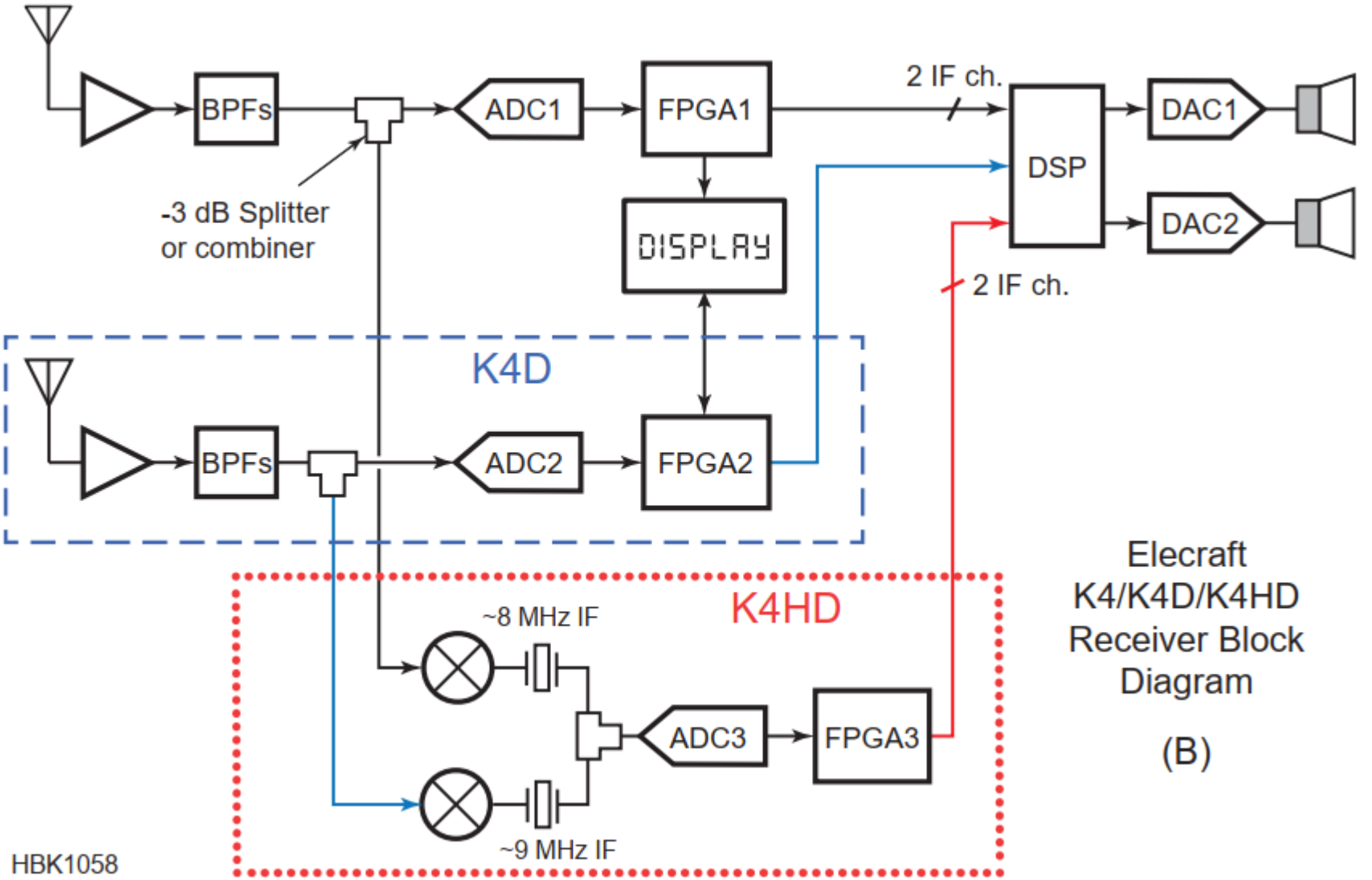


Yaesu Receive Path Block Diagram

- Tvær rásir, sýni tekin á RF tíðni, öll vinnsla stafræn til að búa til bandsjá
- Einnig fært niður á millitíðni (9 MHz) og sýni tekin þar
  - til dæmis Yeasu FTDX101
  - Þetta gefur af sér viðtæki með afbragðs getu

Heimild: ARRL handbókin 2023

Hugbúnaðar-radíó



- Elecraft K4 línan
- K4 hefur eitt viðtæki, K4D hefur tvö
- K4HD hefur til viðbótar rás með krystalsíum á tveimur IF, 8 MHz og 9 MHz

Hugbúnaðarradíó

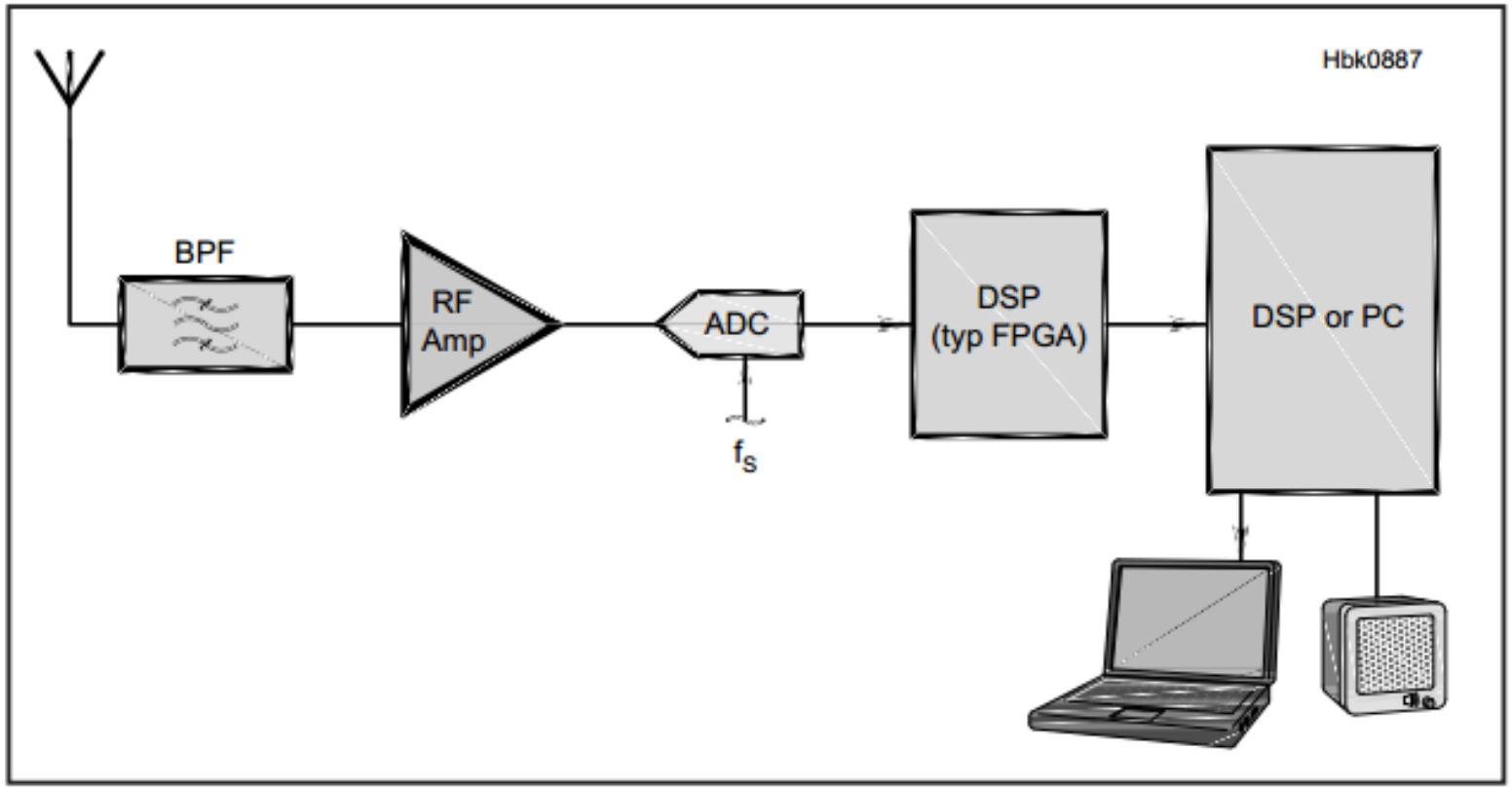


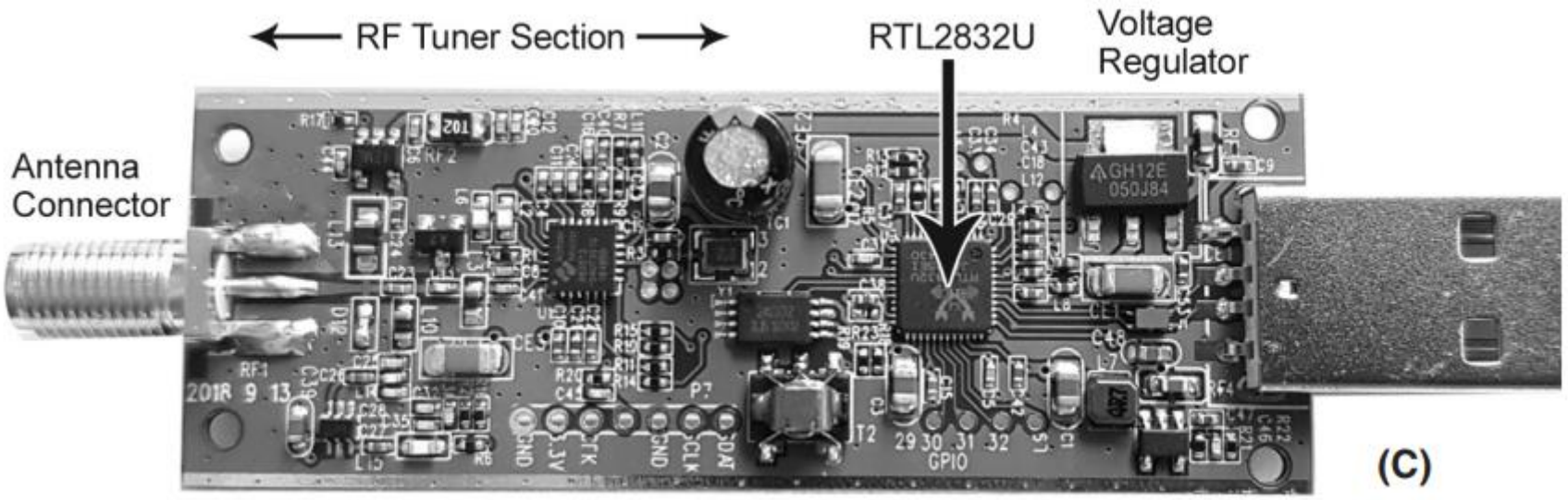
Figure 8.7 — Direct RF-sampling DSP SDR receiver architecture.

- Alstafrænt tæki, eingöngu bandhleypisían og RF magnarinn eru hliðræn
  - Flex-6700, Elecraft K4 og Icom 7610 eru dæmi um tæki sem byggja á þessari högun

Heimild: ARRL handbókin 2023

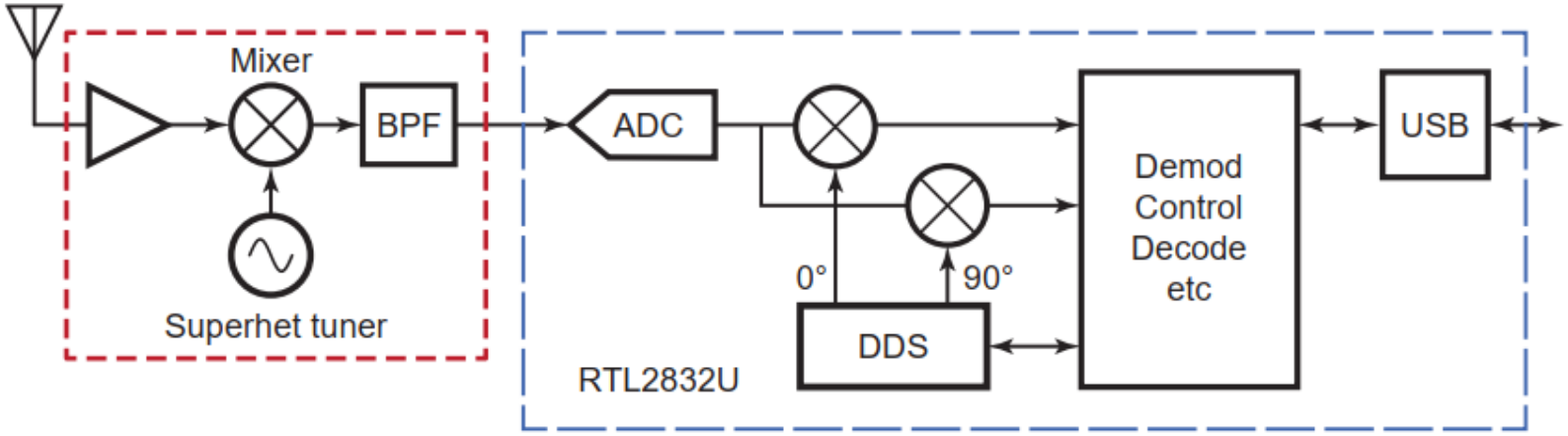
Hugbúnaðarradíó á 26€

- RTL SDR er ódýrasta SDR sem ég veit um
- 25 MHz – 1760 MHz
- Hægt að breyta sumum svo að lægri tíðnir náist
- www.pa3fwm.nl/technotes/tn20.html

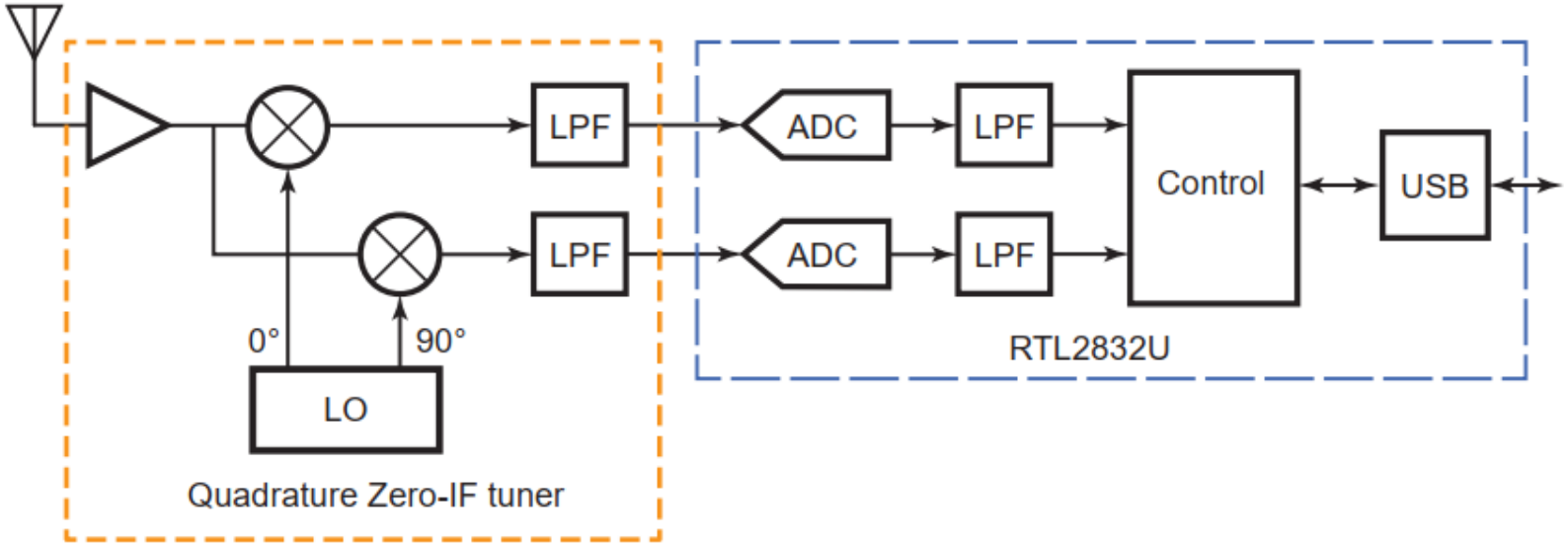


Tvær útfærslur

- Með háslláttar viðtæki
- Með tveggja rása(I/Q) lágsláttar viðtæki



(A) Using RTL2832U IC with Superhet Tuner



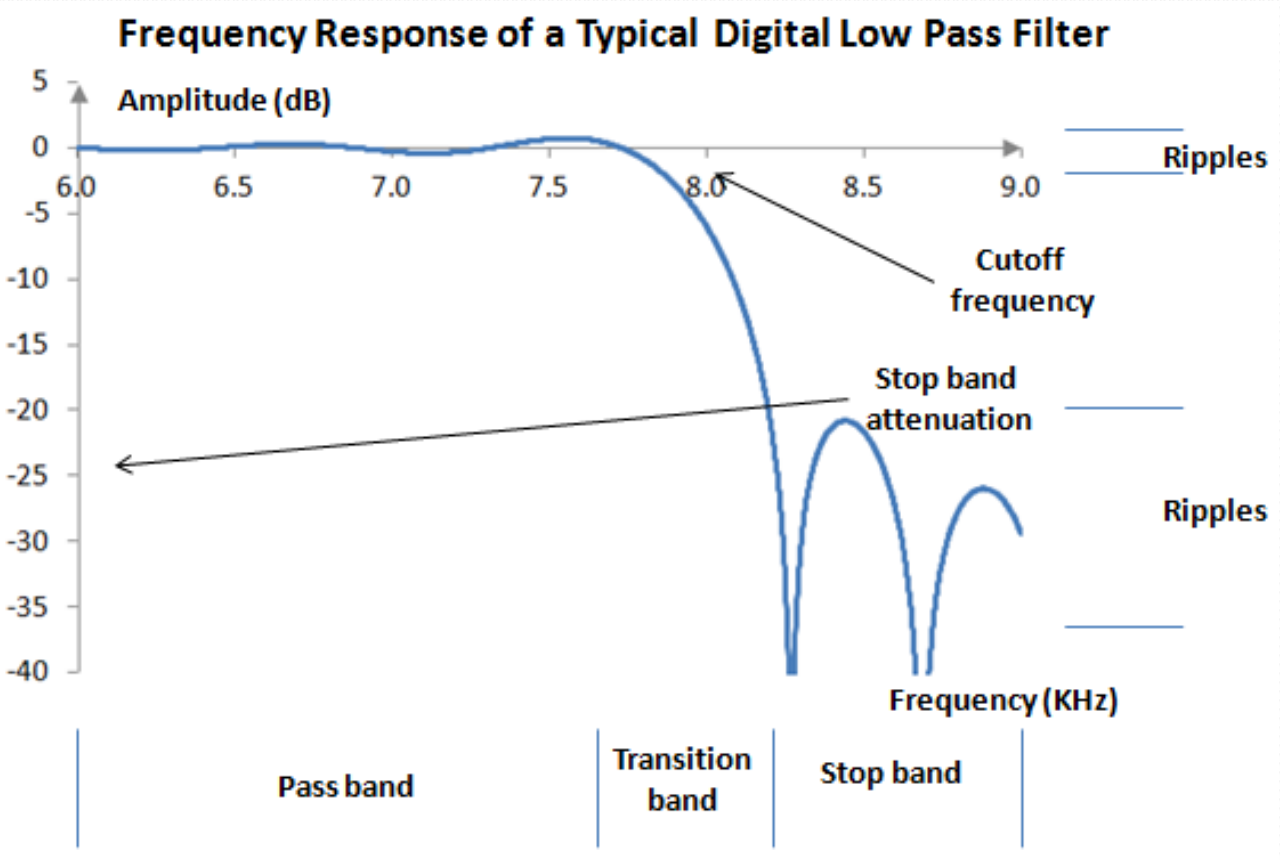
HBK1057

(B) Using RTL2832U IC with Quadrature Zero-IF tuner

Stafrænar síur

- Í stafræna heiminum er hægt að hanna margs konar síur
  - Til dæmis bandhleypisíu með mörgum hleypisviðum
  - Bandstop síu (e. notch) með mörgum deyfitíðnum
  - Síu sem seinkar stóru tíðnisviði um 90°
  - Sjálfstilltar síur (e. adaptive filters) sem geta sjálfar fundið truflanir til að sía burt
  - Margs konar hugbúnaður til að hanna stafrænar síur, t.d. Matlab, Python og fl.

Dæmi: Stafræn lághleypisía



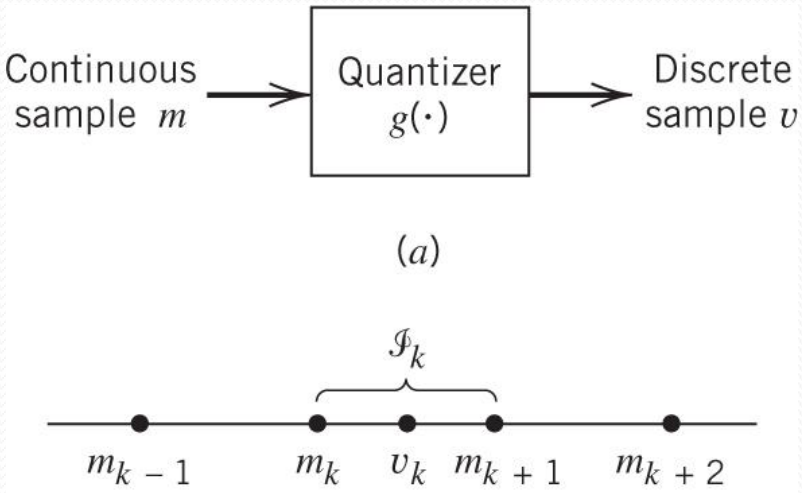
A/D breytur – lykil hugtök

- Sýnatökutíðni, „Sampling rate“
- Upplausn, „Resolution“
- Skömmtun -> Skömmtunarsuð (e. quantisation noise)
- Mælisvið,
  - – t.d. 0 V-5 V
- Bandvídd
- Mögnun
- Suð

A/D := Analog/Digital

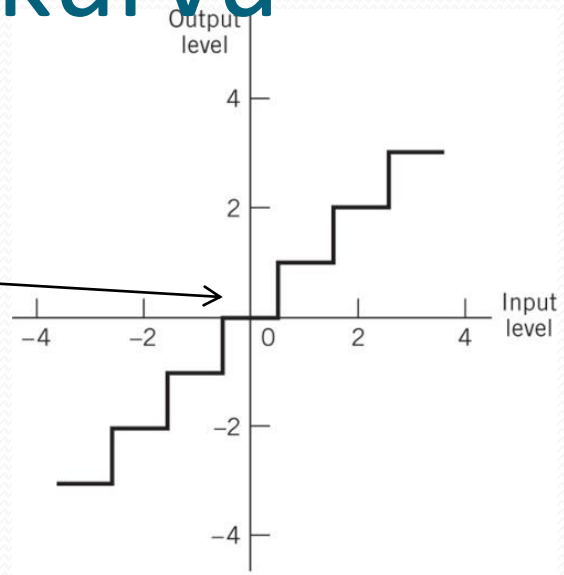
Skömmtun

- Óhjákvæmilegur fylgifiskur stafrænnar merkjavinnslu
- Skömmtunin stafar af því að varpa þarf gildum úr mengi rauntalna yfir í mengi heiltalna
- Ekki hægt að finna skekkjulausa samsvörun
- Lítum á skömmtunina sem ákveðinn hlekk í merkjavinnslukeðjunni

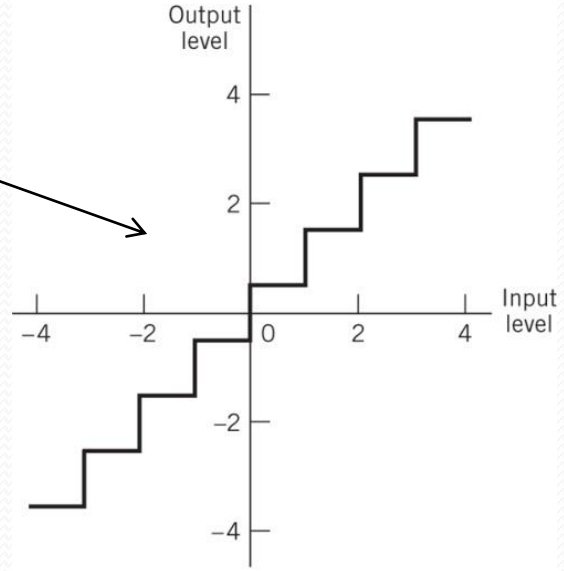


Staðsetning skömmtunarkúrvu

- Midtread
  - „Miðtraðkað“
- Midrise
  - „Miðrisið“



(a)



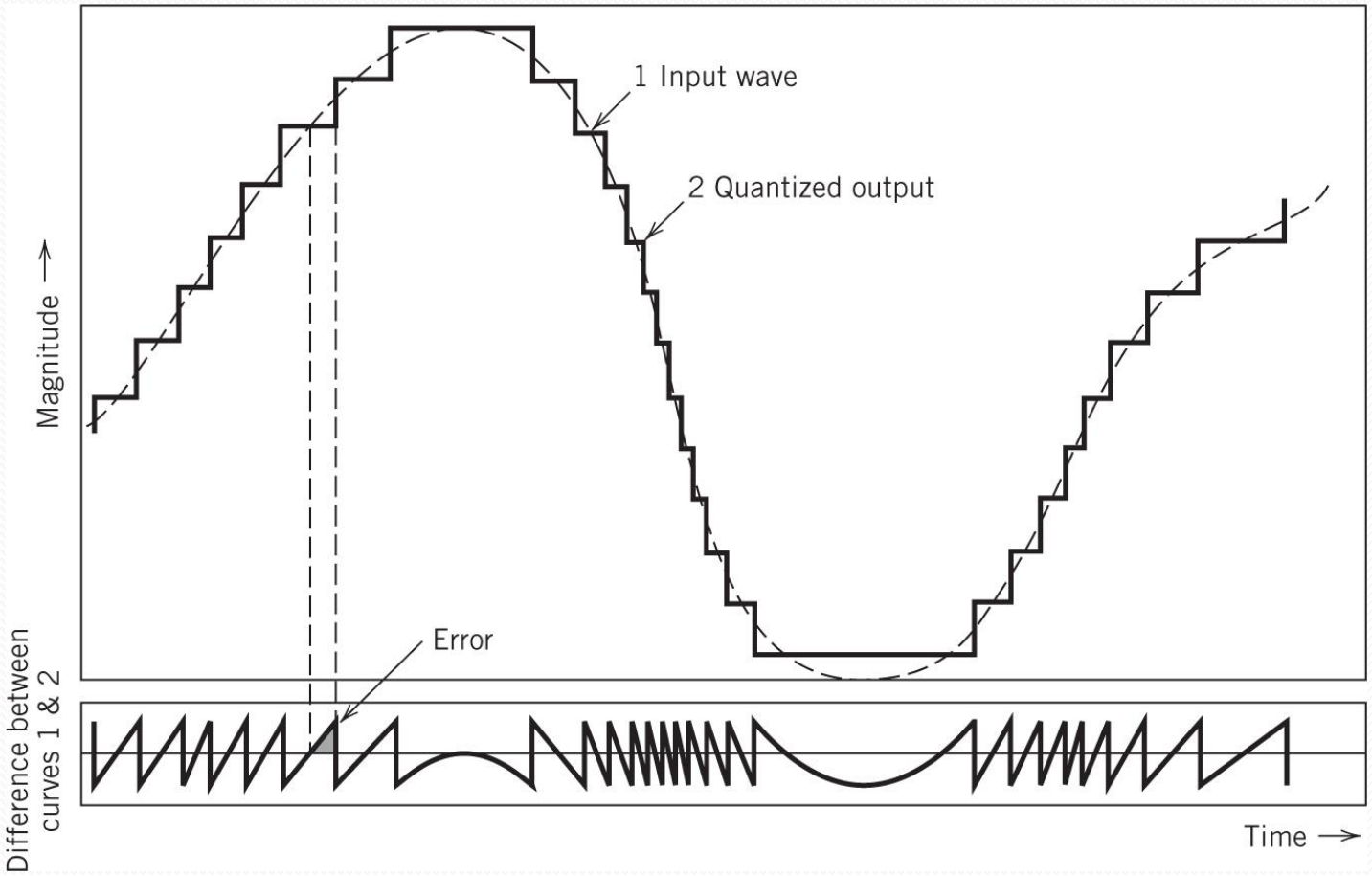
Skömmtunarsuð (e. Quantisation Noise)

- Stafræna merkið getur aðeins tekið ákveðið mörg gildi
  - 4 bita merki getur tekið 16 gildi
  - 8 bita merki getur tekið 256 gildi
  - 16 bita merki getur tekið 2^{16} gildi =65536 gildi
- Líta má á skekkjuna milli samfellda merkisins og stafræna merkisins sem suð
  - skömmtunarsuð
- Hægt er að sýna fram á að Merkis –skömmtunarsuðshlutfallið, SQNR fyrir sínuslaga fall er:
- $SQNR = 1{,}76 + 20log_{10}(2^b) = 1{,}76 + 6{,}02\text{b}$
  - Þar sem b= fjöldi bita

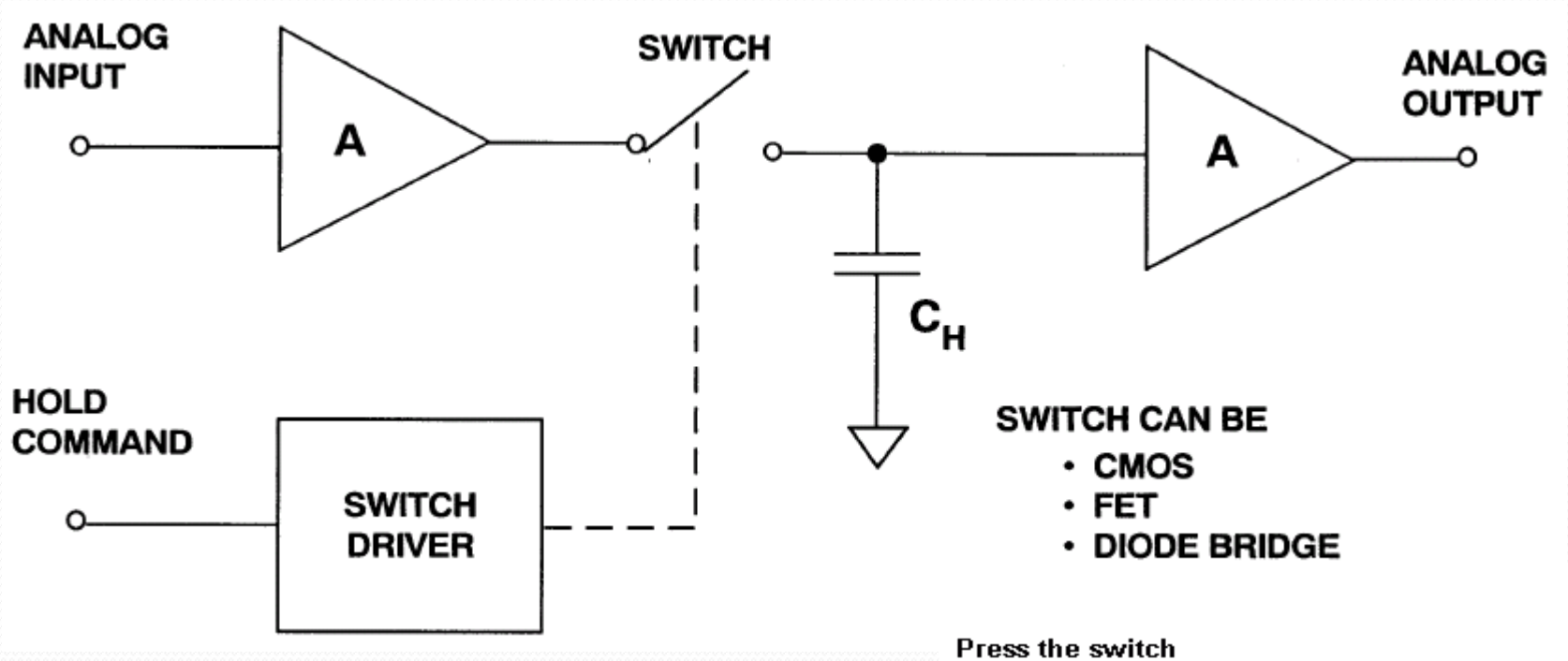
Skömmtunarsuð (e. Quantisation Noise)

- Fyrir símakerfið (PSTN) er b=8 og þá er
  - SQNR = 50 dB
- Fyrir kerfið þar sem b=4
  - SQNR = 26 dB
- Fyrir CD-diska þar sem b=16
  - SQNR = 98 dB
  - Þetta er stærsta suðframlagið á CD-diski
- Merkis-suðs hlutfall í góðum plötuspilara (vinyl) er
  - 55 – 60 dB

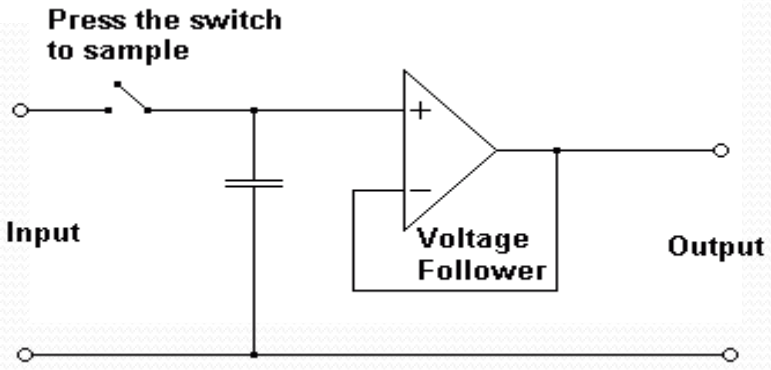
Upplausn - Skömmtunarsuð – Quantisation Noise



Aðgerðamagnari til að halda merki (Hold)

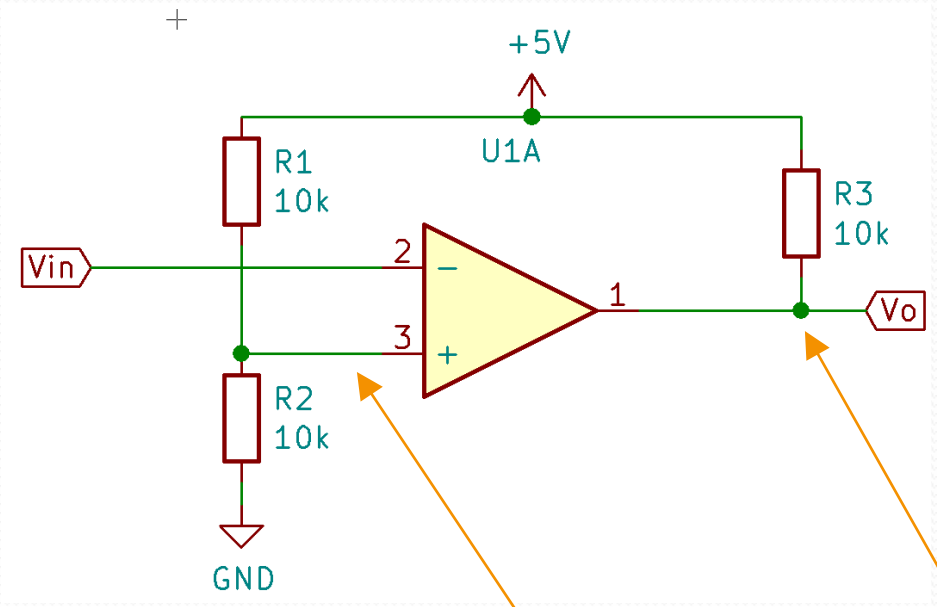


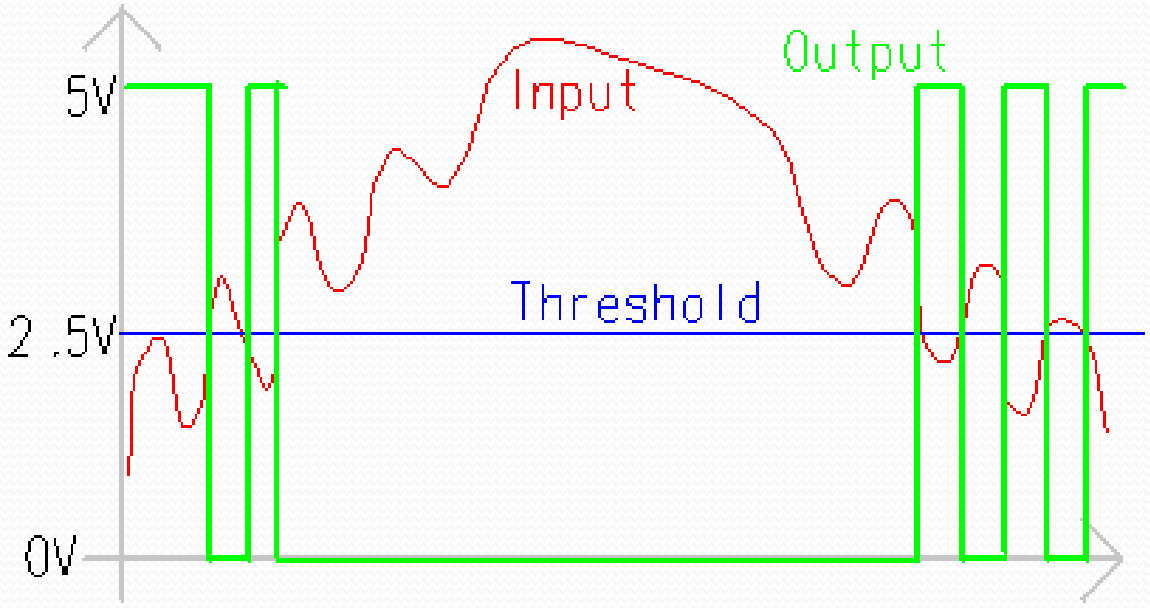
Rásin – Einföld útfærsla af haldrás. Þegar rofinn er tengdur hleðst þéttirinn C_H
Síðan aftengist rofinn. Eftir það er útspennan sú sem þéttirinn hefur (smá leki).



"Sample and Hold" rás

Aðgerðamagnari til að bera saman merki (comparator)





Opin rás, enginn straumur –> spennan 5V eða 0V

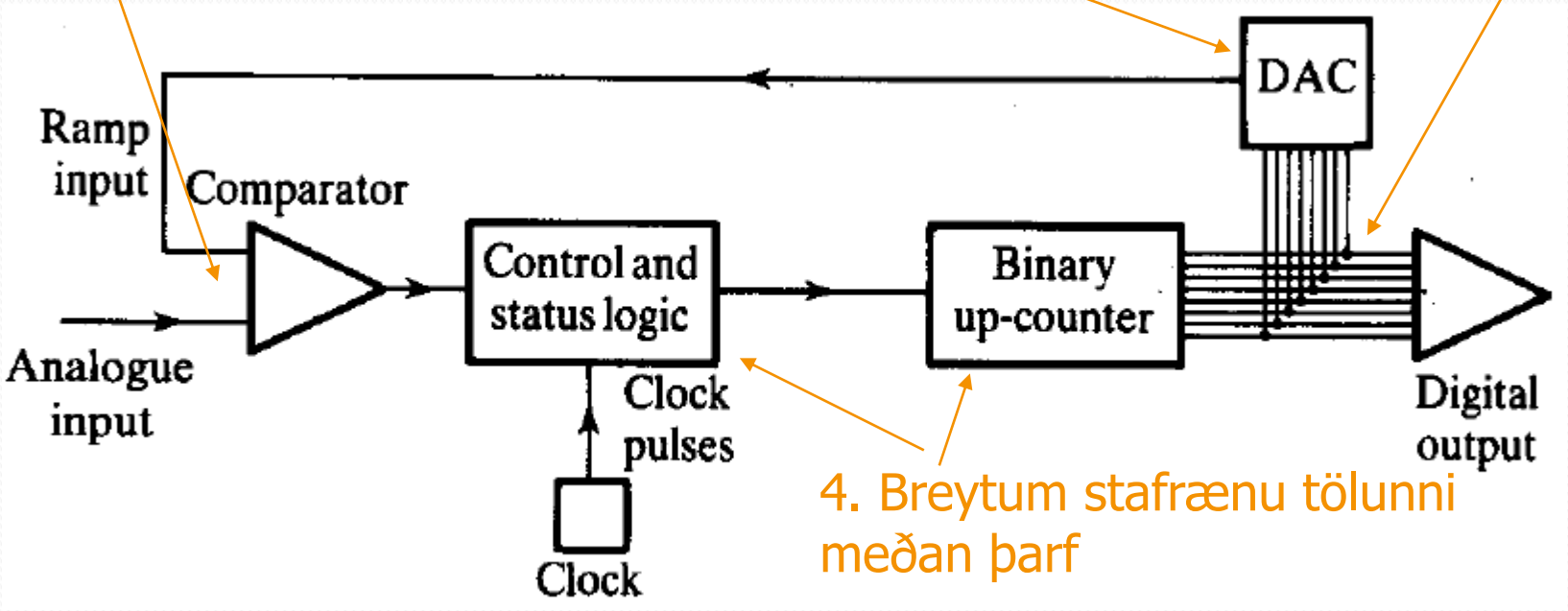
Er við 2.5V

Tröppubreyta (Up-counter / ramp-counter ADC)

3. Berum saman við óþekkta merkið

2. Breytum henni í samfellt merki

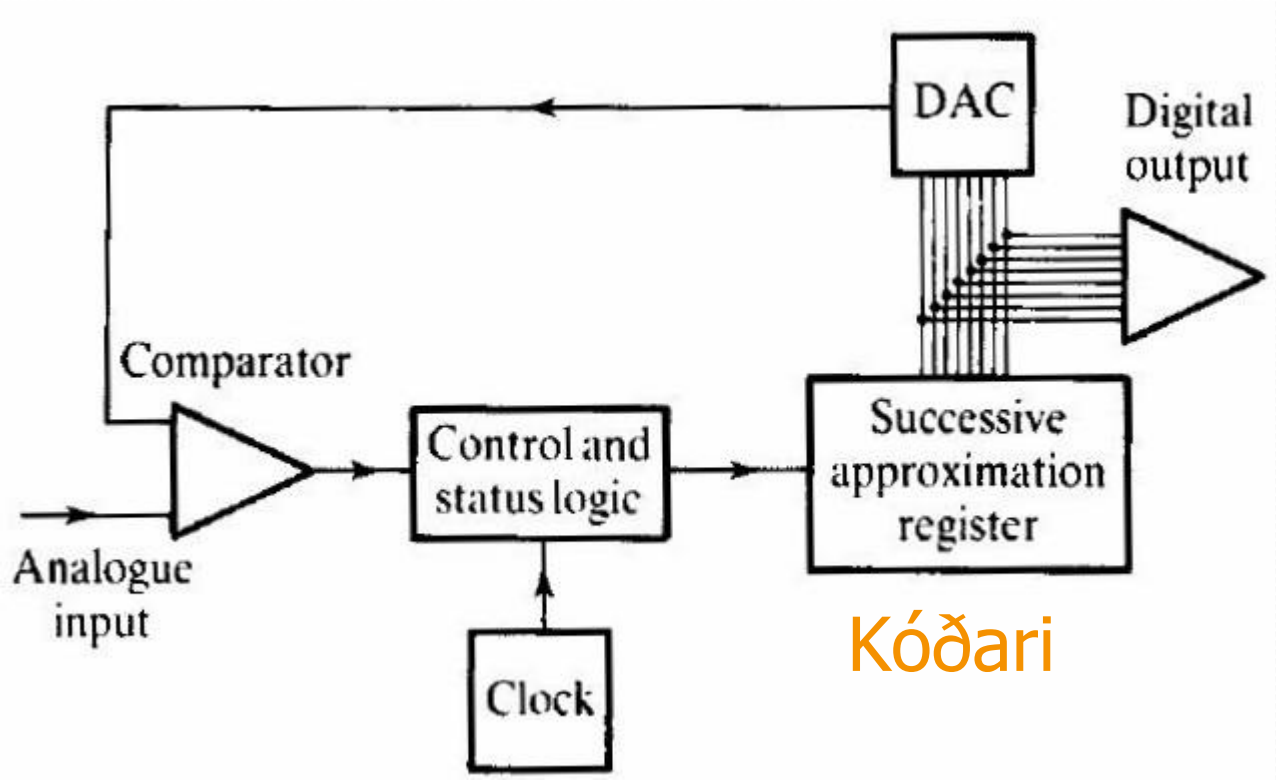
1. Búum til stafræna tölu



4. Breytum stafrænu tölunni meðan þarf

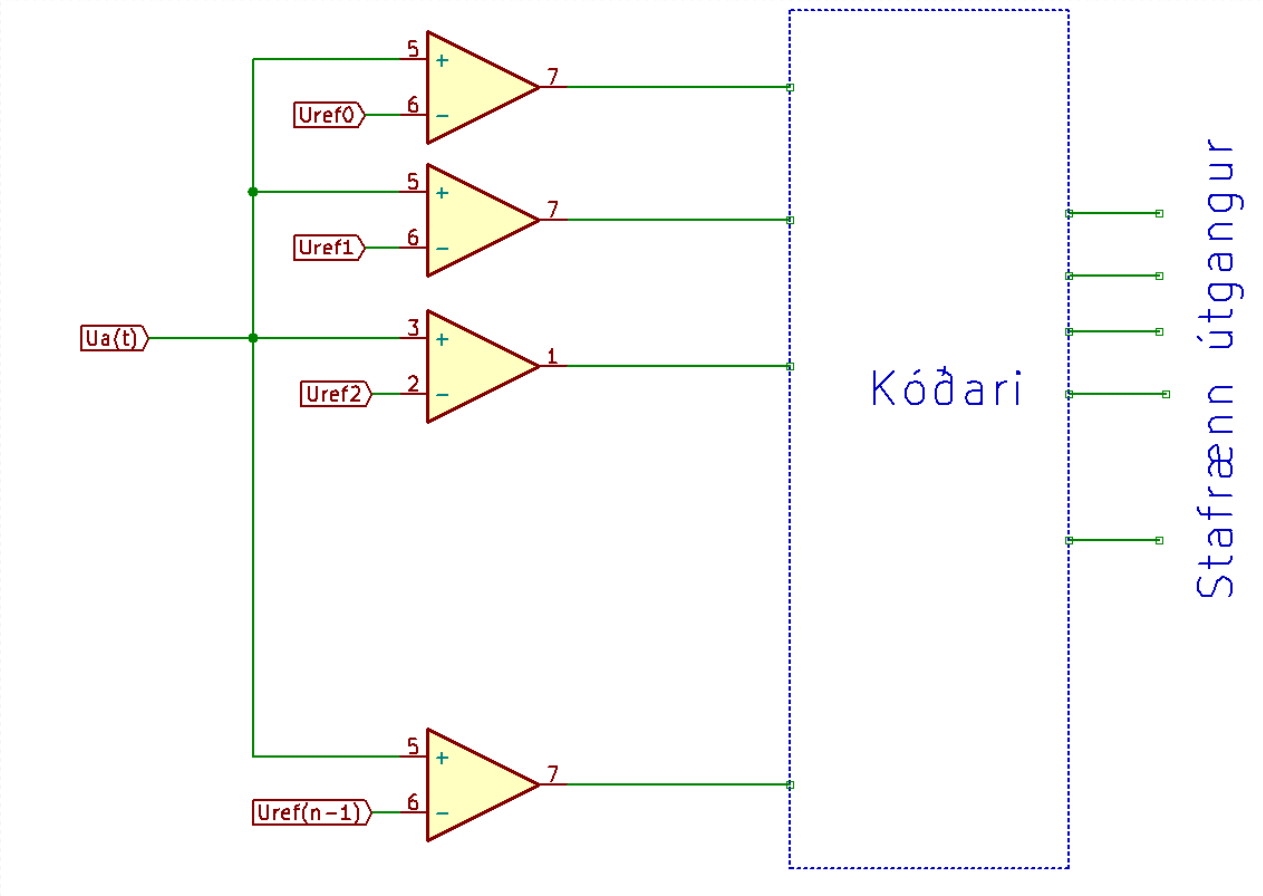
Nálgunarbreyta (Successive Approximation ADC)

Hliðræna merkið er sett inn á samanburðarrásina. Kóðarinn leitar að réttu stafrænu tölunnni þar til samanburðarrásin sýnir að hún hafi fundist. Hann fer fyrst inn á miðju sviðsins sem til greina kemur, síðan inn á miðju þess sem eftir er og s.frv. Þetta tryggir að n skref þarf ef n er fjöldi bita



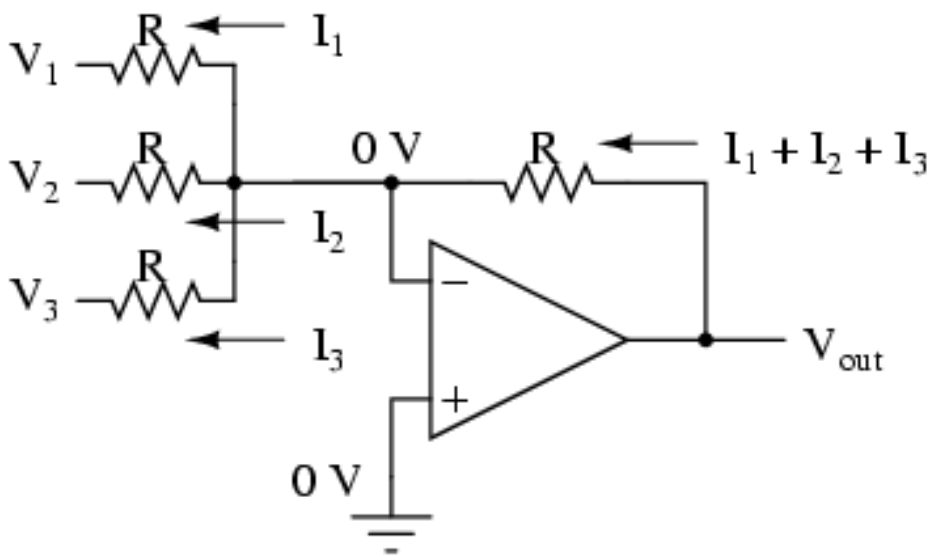
Leifturbreyta (Flash Converter)

- Hliðræna gildið $U_a(t)$ er borið saman við viðmiðunargildin U_{ref} Samanburðarrásirnar skynja hvenær $U_a(t)$ er stærra en U_{ref} og setja þá útganga sína í 1. Kóðarinn vinnur úr útgangsbitunum og framkallar stafræna tölu.
- Þessi aðferð er leifturhröð. Hún getur unnið á merkjum allt upp í hundruð MHz. Gallinn er sá að hún er flókin, fyrir 12 bita breytu þarf $2^{12} = 4096$ samanburðarrásir

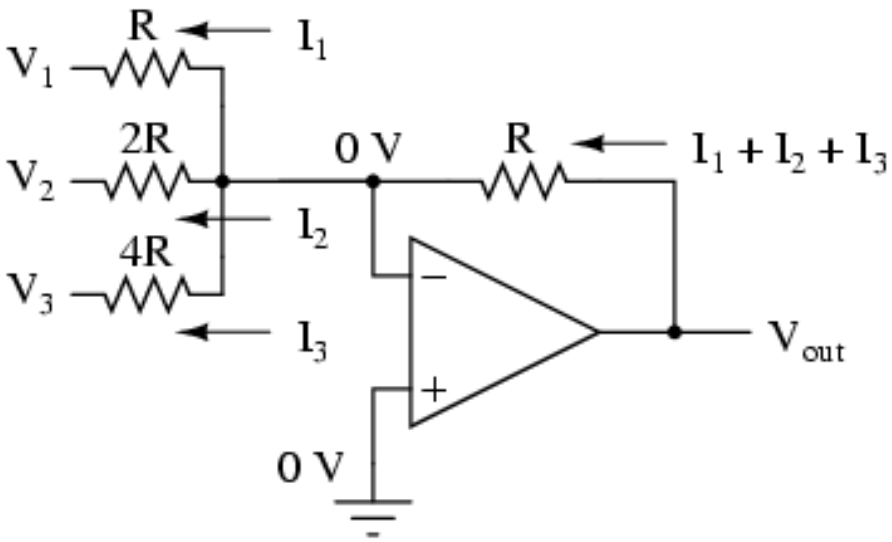


Stafrænt merki í hliðrænt (D/A breyta, D/A Converter, DAC)

Inverting summer circuit



$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3)$$



$$V_{out} = -\left(V_1 + \frac{V_2}{2} + \frac{V_3}{4}\right)$$

12 bita summubreyta (DAC)

$2^7 = 2^3 * 2^4$

$2^{10} = 2^2 * 2^8$

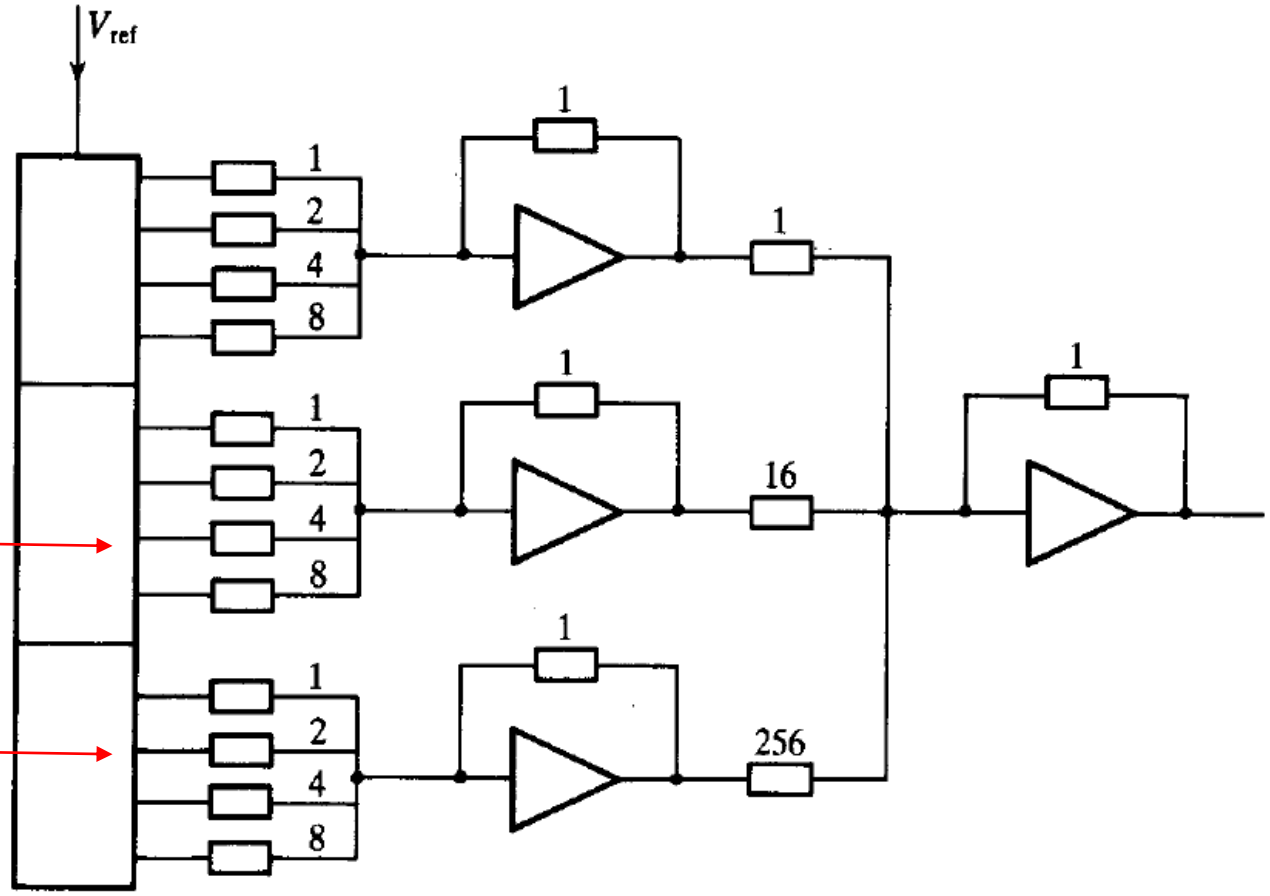
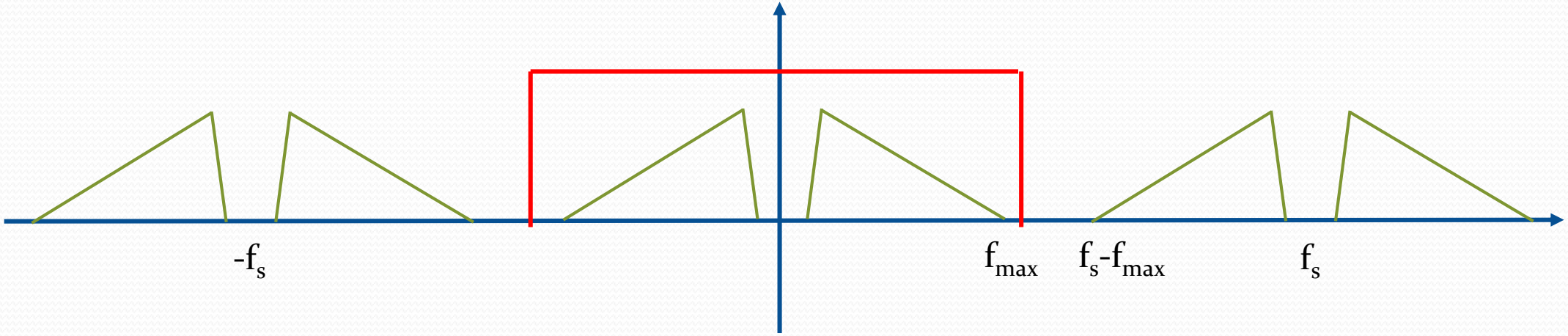


Figure 10.12 12-bit, adder-type DAC.

Endurvinnsla merkis

- Þegar merkið hefur farið um D/A breytuna þarf það að fara gegnum lághleypisíu
- Ef f_s er hátt minnka kröfurnar til þeirrar síu
- Munið „oversampling“ CD spilara!



Lokaorð og umræður

- Framtíðin er að mestu stafræn
  - Sjáum það af öllum þeim nýju tækjum sem nú streyma á markaðinn fyrir amatöra
  - Stafræna tæknin færir sig sífellt hærra upp eftir tíðnisviðinu
  - Stafræna tæknin lækkar í verði með tímanum
  - svo má lengi telja