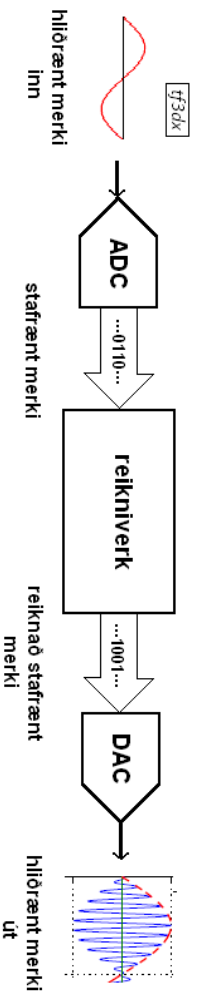
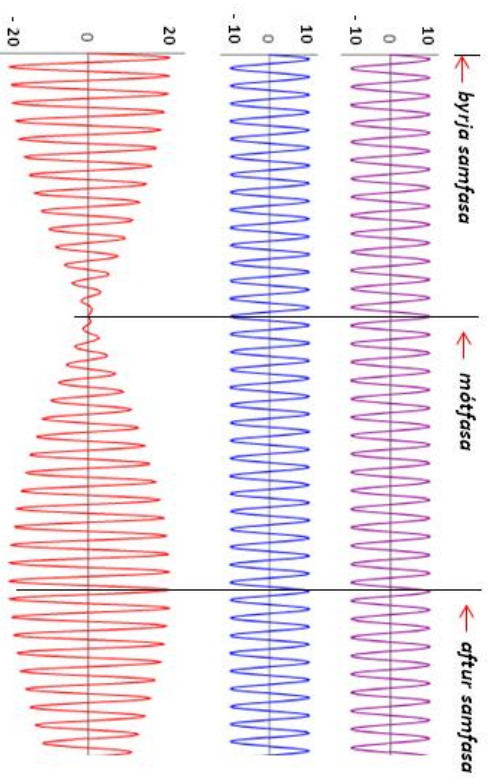


Merki og mótun

til radióamatörprófs

- frá sinussveiflu til DSP -



Formáli 3. útgáfu 2019

Með þessu hefti Merkja og mótunar er rekið smiðshöggið á verk sem hófst með 1. útgáfu árið 2011. Þá var að komast skriður á fyrirsjáanlega byltingu í gerð fjarskiptatækja, stafræn vinnsla (DSP) myndi leysa hliðrænar rásir af hólmi. Hún byggist á stærðfræði sem er með því snúnasta sem menn læra í háskóla og var að verulegu leyti þróuð af verkfræðingum og eðlisfræðingum í nokkurri óþökk stærðfræðinga*.

Prófnefnd ÍRA hefur alltaf haft að leiðarljósi að stærðfræðipekking úr grunnskóla eigi að duga fólki til að ná amatörprófi. Enn fremur að viðhafa almennt málfar eftir föngum. Það var því nokkur áskorun að búa verðandi amatöra undir nýja tíma. Heillavænlegast virtist vera að byggja sem mest á þekkingu og reynslu sem þegar væri til staðar á yfirsveiflum, mótun, hliðarböndum og truflunum. Í lesefni amatöra vítt og breitt er margt sagt um það efni með sértækum hætti og þar sem við á hverju sinni. Nú virtist tími til kominn að leggja meiri áherslu á ákveðin grundvallaratriði til að sýna að margt sem er þekkt undir aðskiljanlegum nöfnum er náskyldt, ef ekki eitt og hið sama! Því var ráðist í að kalla heftið Merki og mótun að hætti sambærilegs skólafags. Þessi efnistöð eru nokkur nýjung meðal radíóamatöra.

Hvernig hægt er að líta á margvísleg merki sem samsett úr sínuslaga sveiflum er lykilatriði. Að sjá sama merki ýmist sem fall af tíma eða tíðni er af sama toga. Heftið byrjar á þessari sérstöðu sínussveiflunnar og afleiðingum þess að breyta bylgjuforminu. Það hittir í mark með reynslu amatöra af yfirsveiflum.

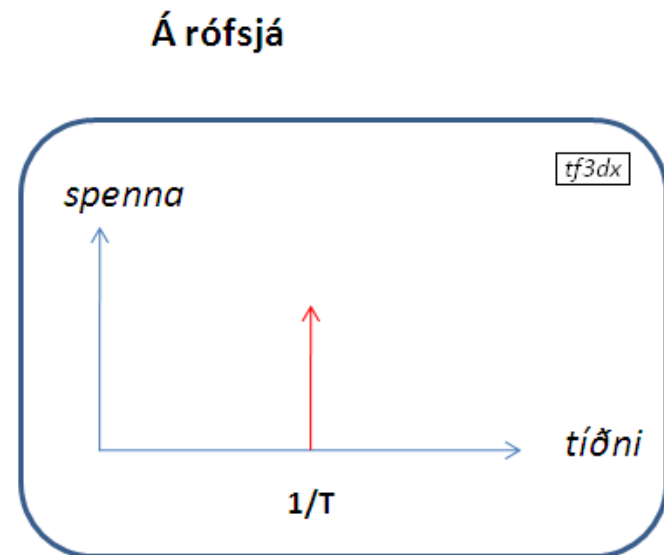
Styrkmótun (AM) er viss aflögun bylgjuforms sem kallar á nýjar tíðnir. Hvernig hún leiðir til summu- og mismunartíðna er nokkuð sem menn hafa kynnst af tækjagrúski eða hlustun með góðu viðtæki. Uppbygging hliðarbanda leiðir af þessu.

Hliðrænn margfaldari er kynntur til sögunnar í tengslum við styrkmótun og afbrigði hennar (DSB-SC og SSB). Hann er ekki lengur hugtakið einbert, margt það sem talið er upp í afrekaskrá hans í heftinu notar nú samrásir (IC) sem vinna einmitt með þeim hætti. Og nú er sýnitöku (sampling) fyrir stafræna vinnslu bætt við þann lista.

* Sjá t.d. verk Oliver Heaviside (1850 - 1925) og Paul Dirac (1902-1984).

Hinn hreini tónn

Nóbelsskáldið okkar sendi Garðar Hólm út í hinn stóra heim til að finna hinn eina og sanna hreina tón. Radíóamatörar vita betur, **sínusbylgjan er þessi tónn**. Hún er eina bylgjuformið sem inniheldur **aðeins eina tíðni**. Þetta er bylgjuform náttúrulegra sveiflukerfa eins spólu og þéttis eða fjaðrar og massa.



1. mynd *Sínusbylgja inniheldur aðeins eina tíðni*

Lögmál

Minnsta **frávik** frá sínuslögun þýðir að **aðrar tíðnir** eru með í spilinu.

Strangt til tekið þarf hrein sínussveifla því að hafa verið til frá örófi alda og verða til um alla eilífð! Tíðniliðir sem stafa af því að kveikt er á sínussveiflu, eða slökkt á henni, deyja út á skömmum tíma. En ef það er endurtekið í sífellu, eins og þegar mors er sent, verða þeir þó viðvarandi og valda lykilmellum út frá senditíðninni sé ekki að gert.

1. regla: *Sínuslögun er eina bylgjuformið sem inniheldur aðeins eina tíðni.*

Þetta má líka orða þannig:

2. regla: *Allt bylgjuform, annað en hreinn sínus, inniheldur fleiri en eina tíðni*

Þetta er grunnurinn að því skoða róf merkis í tíðni, ekki síður en bylgjuform þess í tíma. Stærðfræðilegar aðferðir þess eru kenndar við *Fourier* (1768 – 1830).

Frávik frá sínuslögun gerist með **tvennum** hætti: ólínuleg **bjögun** eða **mótun**.

Bjöguð sí sveifla

2. mynd sýnir sí sveiflu (*periodic wave*) sem er **ekki hrein** sínussveifla. Þá segir 2. regla að **fleiri en ein** tíðni komi við sögu. Nú kallast T grunnlota og $1/T$ **grunntíðni**.

Til að sveifla yfir hverja grunnlotu líti eins út og næsta sveifla á undan, þurfa **allir** tíðniliðir að vera komnir í **sömu stöðu** og þeir höfðu einni grunnlotu fyrr. Af þessu leiðir reglan:

3. regla:

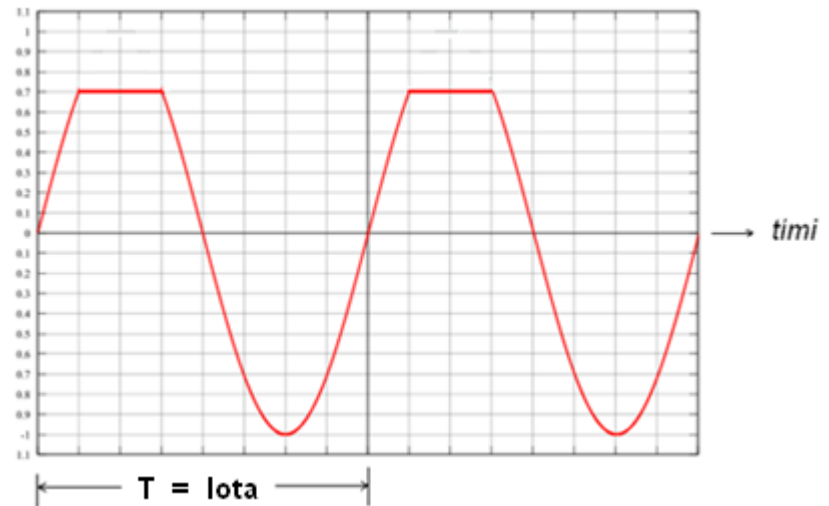
Lota sérhvers tíðniliðar verður að ganga upp í grunnlotunni T

sem jafngildir því að segja:

4. regla:

Nýju tíðnirnar eru heiltölumargfeldi af grunntíðninni.

Þær kallast **yfirsveiflur** (*harmonics*).



2. mynd *Bjöguð sínussveifla*

Grunntíðni og yfirsveiflur

grunntíðni	f	t.d.	7 MHz
2. yfirsveifla	2 f		14 MHz
3. yfirsveifla	3 f		21 MHz o.s.frv.

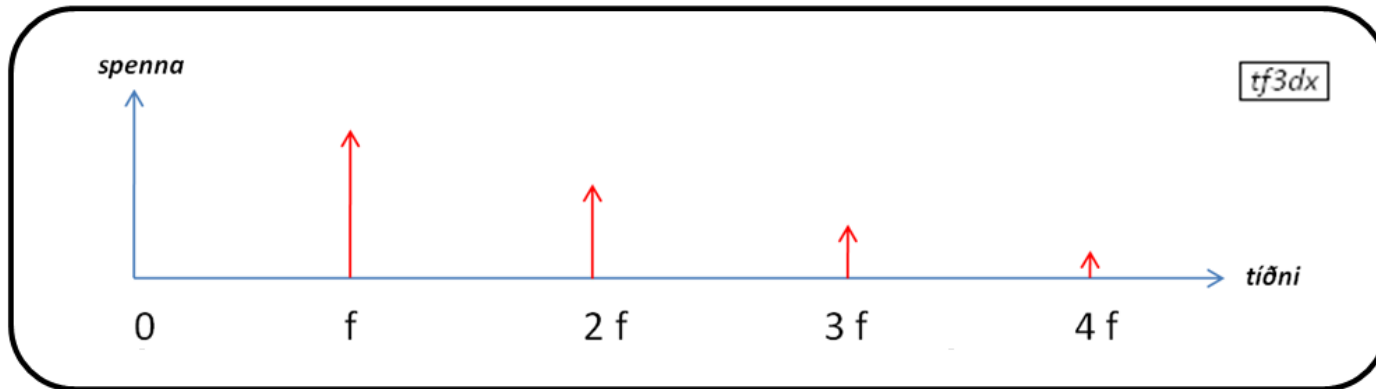
Athygli vekur að það sem kallast 2. yfirsveifla er í raun **fyrsta** yfirsveiflan! Málvenjan er að miða samt við margeldisstuðulinn, eins og gert er á öðrum tungumálum. Íslenska orðið yfirsveifla er ekki bein þýðing á alþjóðlega orðinu *harmonic*, sem vísar til **samhljóms**.

Bæði grunnsveifla og yfirsveiflur eru hver um sig ein tíðni. Þær eru því **alltaf sínussveiflur** óháð bylgjuformi samettu sveiflunnar!

Almennt leiðir bjögun sínussveiflu til þess að **allar hugsanlegar** yfirsveiflur myndast. Samhverfa af mismunandi gerð getur þó leitt til þess að annað hvort oddamargfeldin eða sléttu margfeldin vanti. Samhverf kassabylgja (50/50 í tíma) er dæmi um það síðara.

Öll rafeindatól, eins og díóður, tvískeyttir nórar (*bipolar transistors*) og fetar eru ólínuleg og búa til yfirsveiflur með því að bjaga sveifluna. Þess vegna **þurfa** band- eða lághleypisíur að vera aftast í **öllum sendum** svo yfirsveiflur dragi ekki langt.

Yfirsveiflur á rófsjá



3. mynd *Tíðniróf sveiflu sem er ekki hreinn sínus*

Almennt séð **dofnar** yfirsveiflur **með hækkingi** margfeldi, það getur þó gerst með sveiflandi hætti. Í samhverfri kassabylgju er spennan í öfugu hlutfalli við númer yfirsveiflu. Ef grunntíðni er 1 V, þá er þriðja yfirsveifla 1/3 V, fimmta 1/5 V o.s.frv. Slétt margfeldi birtast ef jákvætt og neikvætt útslag vara ekki jafnlengi og stefnir í að **allir tíðniliðir** verði **jafnsterkir** þegar kassabylgja breytist í röð af **púlsum**.

Að senda röð af punktum með morssendi er eins og að styrkmóta sendinn með samhverfri kassabylgju, því einn punktur í morsi er jafnlangur bilinu á milli.

Mótun

Það er hægt að aflaga sínussveiflu með því að auka og minnka sveifluvíddina á lóðréttan veginn í takt við upplýsingar, það er **styrkmótun** (AM).

Það er líka hægt að þjappa og teygja sveifluna á láréttan veginn í takt við upplýsingar, það er **tíðni-** eða **fasamótun** (FM eða PM). Sjá síðar um skyldleikann.

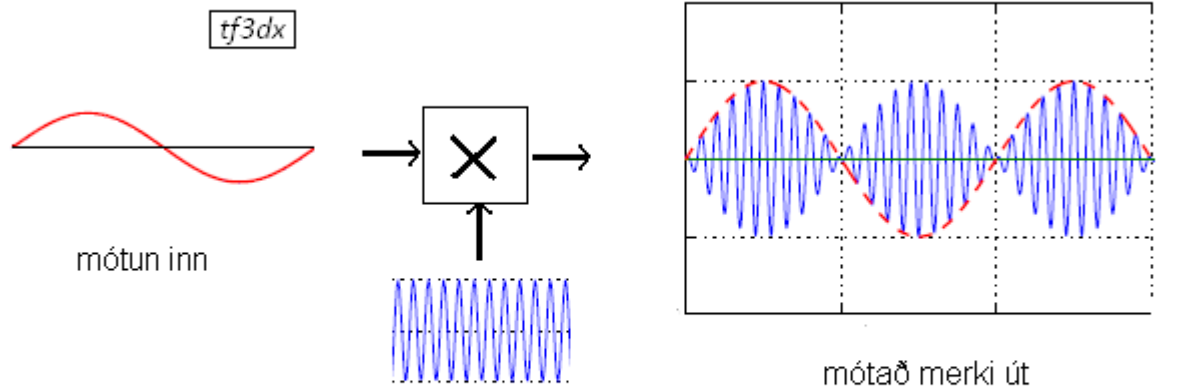
Sveiflan sem mótuð er kallast burðarbylgja (*carrier*) og er venjulega af miklu hærri tíðni en upplýsingarnar sem hún ber. Sem er eins gott svo fyrir smíði loftneta! Þau þurfa að vera þokkalegur hluti af bylgjulengd. Mismunandi tíðni burðarbylgju leyfir líka margar rásir.

Aflögun sínusbylgjunnar við móttun **kallar á nýja tíðniliði**. Flutningur upplýsinga krefst því ætíð **tíðnibils**. Ein tíðni væri bara óbreytanleg sínusbylgja, sem segir engum neitt! Talað er um **bandbreidd** upplýsinga. Grunneiningin er 1 biti, nei eða já, 0 eða 1. Svo hefur móttunaraðferðin líka sín áhrif á bandbreidd í sendingu.

Nýju tíðniliðirnir koma fram sitt hvorum megin við burðarbylgjuna í svo kölluðum **hliðarböndum** (*sidebands*). **Efra hliðarband** (**USB**) og **neðra hliðarband** (**LSB**) eru **spiegelmynd** hvors annars um burðarbylgjuna.

Hliðrænn margfaldari

Með vissum aðferðum er hægt að búa til rás sem hefur 2 innganga og 1 útgang og vinnur þannig, að **útspennan á hverju augnabliki** er í réttu hlutfalli við **margfeldi** spennunnar á inngöngunum. Þá er hægt að setja burðarbylgjuna á annan innganginn og stjórna stærð hennar frá útganginum með spennunni inn á hinn innganginn.



rauða punktalínan er ekki raunveruleg, en sýnir hvernig mótun fylgir innmerki

4. mynd *Hliðrænn margfaldari*

Rauða merkið gæti komið frá hljóðnema og bláa merkið frá sveifluvaka á radiótíðni. Útmerkið er DSB-SC (*double sideband - suppressed carrier*). Takið eftir **fasavendingunni** þegar rauða merkið er **neikvætt**.

Hvaða tíðniliðir eru í útmerkinu?

Fljótt á litið mætti ætla að eina tíðnin í merkinu sé burðarbylgjutíðnin, sveiflan bara missterk og með fasavendingu. En í framhaldsskóla er leidd út hornafallajafnan:

$$\sin A \cdot \sin B = \frac{1}{2} \cos(A - B) - \cos(A + B)$$

Nei, þið þurfið **hvorki að kunna né skilja** þessa jöfnu til að ná amatörprófi, bara að þið **trúið** útkomunni! Með því að stinga inn $A = 2\pi f_1 t$ og $B = 2\pi f_2 t$ er komist að eftir farandi niðurstöðu:

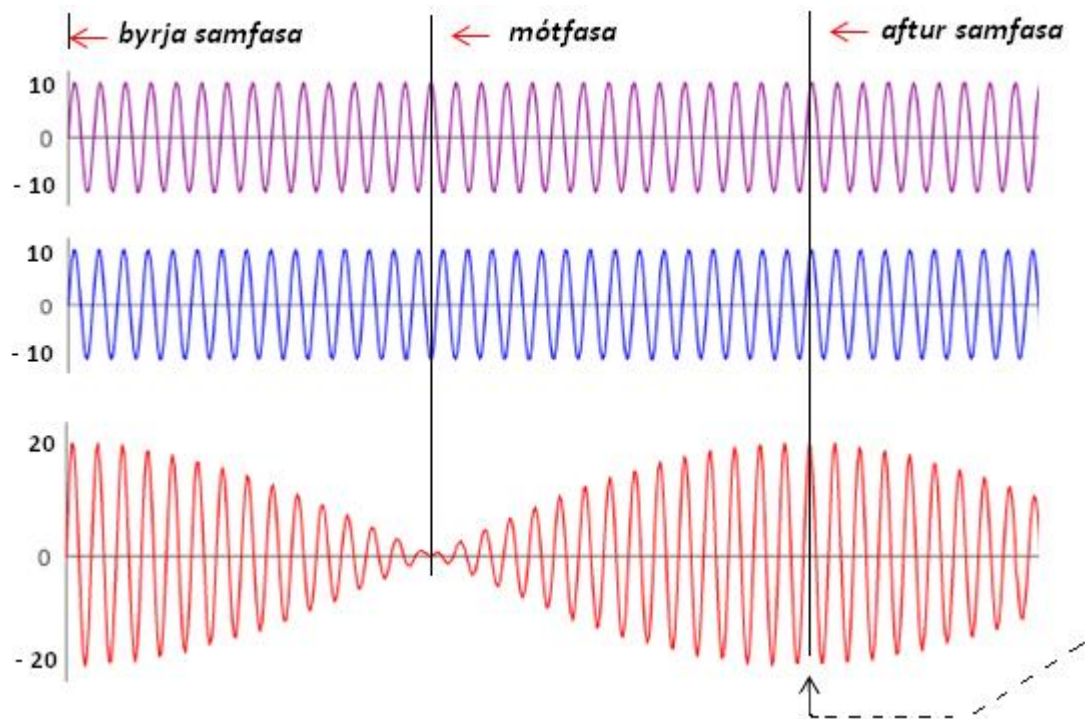
*Ef margfaldaðar eru saman sínuslaga sveiflur, önnur með tíðnina f_1 og hin með tíðnina f_2 , fást 2 sínuslaga sveiflur. Ein með tíðnina **$(f_1 - f_2)$** og önnur með tíðnina **$(f_1 + f_2)$** .*

Kósínussveifla er sínussveifla flýtt í fasa um 90° . Framan af síðustu öld deildu menn um það hvort þessar tíðnir væru raunverulegar eða aðeins stærðfræðileg leikfimi. Með skarpari síum í viðtækjum hljóðnaði sú umræða.

Bláa sveiflan í útmerkinu á 4. mynd hefur vissulega tíðni burðarbylgjunnar, en hún er ekki hrein sínussveifla heldur **samanlögð sveifla** nýju tíðnanna.

Samliðun

Þetta snýst ekki bara um greiningu bylgjuforms í sínusliði, það er líka hægt að **búa bylgjuform til** með því að leggja saman réttar sínussveiflur, punkt fyrir punkt.



Fjólubláa sveiflan hefur **lægsta** tíðni, er á 30. riði við aftara strikið.

Bláa sveiflan hefur **hæsta** tíðni, er á 31. riði.

Summa þessara tveggja sker núllið með tíðni sem er **mitt á milli**. Er á 30. riði og *hálfu betur*. Lesist að neðan vegna fasavendingar.

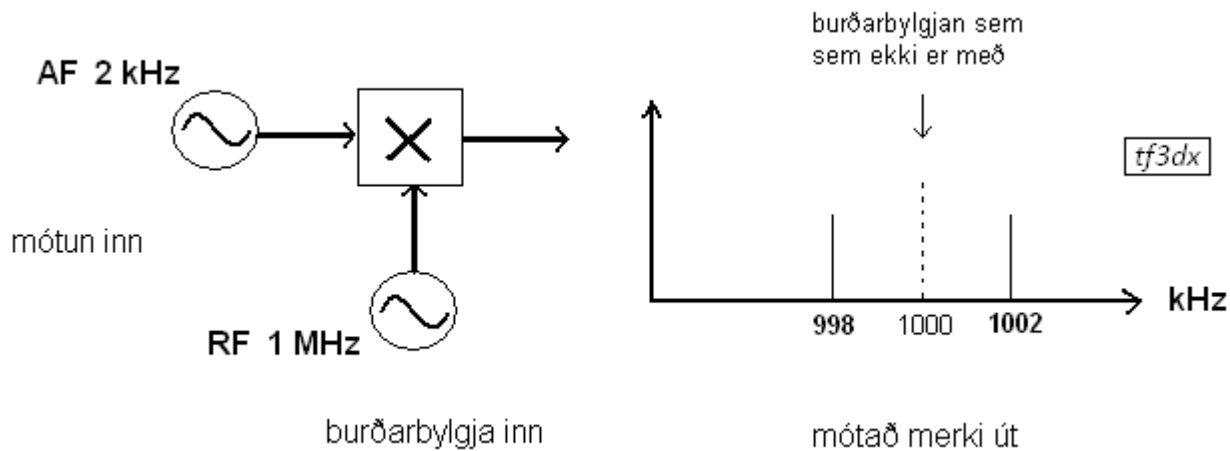
Styrksveiflan kallast **sláttur** (*beat*).

5. mynd *Tvær jafnsterkar sínusveiflur lagðar saman*

- i) Þetta **sýnir** að 2 tíðnir **a.m.k.** eru nauðsynlegar til að framkalla styrksveiflu.
- ii) Samanburður við 4. og 6. mynd styrkir trúna á **réttmæti jöfnunnar!**

DSB-SC með sínustóni

Skoðum nú DSB-SC merkið með tölum. Gerum ráð fyrir 2 kHz profumerki frá tóngjafa inn á hljóðinnganginn og 1 MHz = 1000 kHz radiótíðni inn á hinn.



6. mynd *DSB-SC mótari við 1 MHz*

mismunartíðni: $1000 \text{ kHz} - 2 \text{ kHz} = 998 \text{ kHz}$

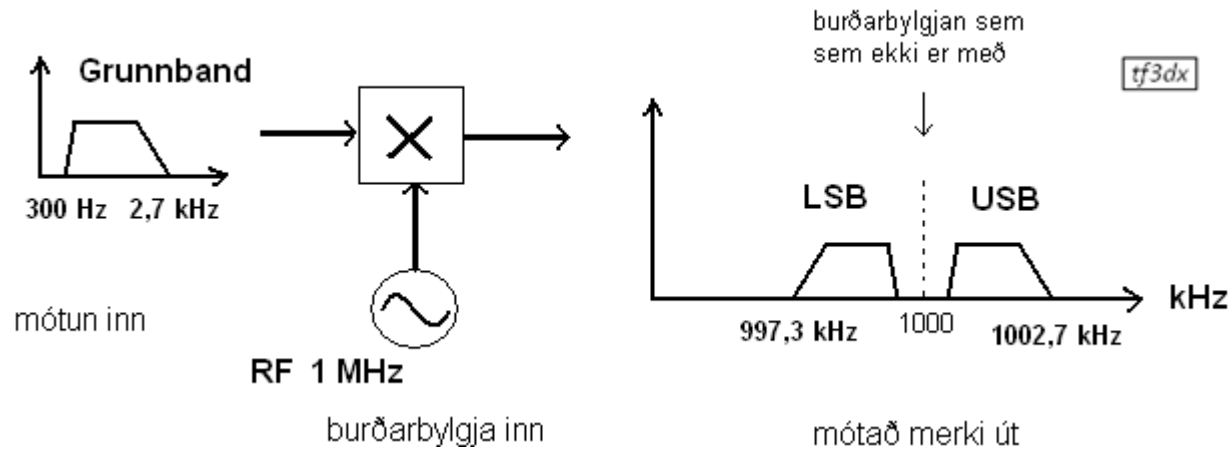
neðri hliðartíðni

summutíðni: $1000 \text{ kHz} + 2 \text{ kHz} = 1002 \text{ kHz}$

efri hliðartíðni

Mótað með grunnbandi

Tal og tónar innihalda samtímis **margar tíðnir** innan tíðnisviðs sem kallast **grunnband** (*baseband*). Við mótun flyst **hver einstakur tíðniliður** upp, eins og 6. mynd sýnir. Þannig **flyst allt tíðnisvið** grunnbandsins á 7. mynd upp og gefur **samhverf hliðarbönd**, **LSB** og **USB**. Hvort um sig geymir **allar upplýsingarnar** grunnbandsins.



7. mynd *DSB-SC mótun með grunnbandi, takið eftir viðsnúningi rófs í LSB*

Hver tíðniliður er jafnlangt frá burðarbylgjutíðninni og hann var frá 0 Hz í grunnbandinu. **Einu upplýsingarnar** sem burðarbylgjan flytur væri hún send með, er hversu **hátt í tíðni** ætti að **setja** grunnbandið að nýju **í viðtöku**.

Bandbreidd sendingar

Heyritíðni spannar u.þ.b. 15 Hz – 15 kHz. Ef senda ætti út allar tíðnir sem heyrast yrði bandbreidd útsendingarinnar 30 kHz með þessari aðferð. Það er of mikið bruðl með tíðni á LF, MF og HF. Talsending síma og fjarskipta er talin nógu góð ef mótað með tíðni á bilinu **300 Hz - 2,7 kHz**.

Einhliðarband, SSB

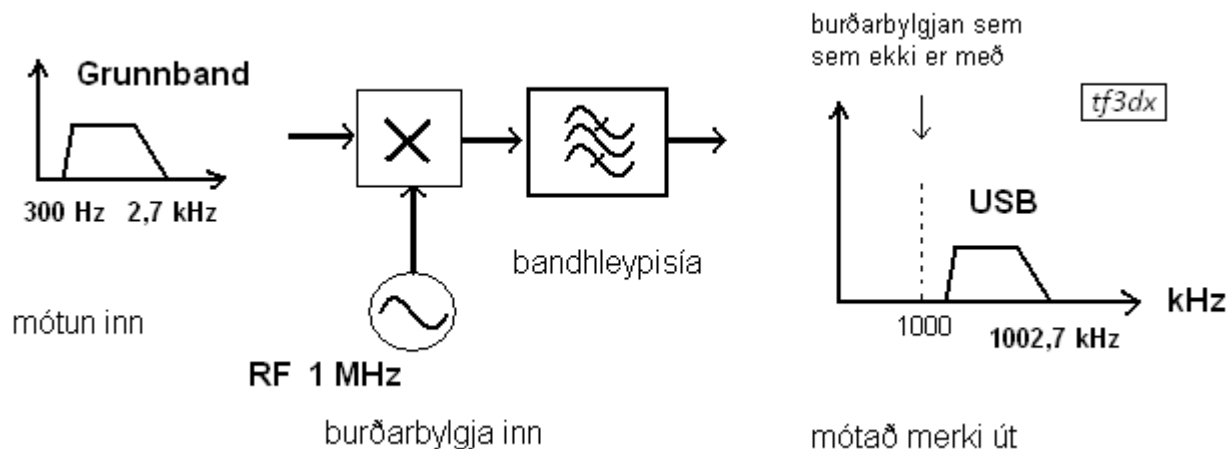
Talmótað DSB merki tekur samkvæmt ofansögðu um 5,4 kHz. Efra og neðra hliðarband eru spegilmynd hvort af öðru um burðarbylgjutíðnina. **Hvorugt** flytur upplýsingar sem ekki eru **fólgna í hinu**. Þess vegna er snjallt að senda aðeins út annað hliðarbandið. Bandbreiddin fer þá niður í $2,7 \text{ kHz} - 0,3 \text{ kHz} = \mathbf{2,4 \text{ kHz}}$, því venjulega er burðarbylgjan ekki með heldur. Annað hvort sammælast menn um nákvæma tíðni hennar eða stilla fyrir eðlilegan hljóm í mannsrödd.

Þetta er **einhliðarbandsmerki**, SSB (*single sideband*). Hægt er að nota hvort sem er USB eða LSB. Hjá amatörum hefur skapast sú venja að nota LSB á 40 m og **lægri** böndum en USB á 20 m og **hærri**, önnur þjónusta notar eingöngu USB.

Í árdaga SSB hjá amatörum (um 1950) var samspil 0° og 90° merkja (*phasing method*) notað til að fá eitt hliðarband. Virkar líka til viðtöku. Heimasmíðarar hafa sumir haldið tryggð við aðferðina. Nú er hún **aðalmálið** í stafrænni merkjavinnslu undir nýju nafni, **I** (*in-phase*) og **Q** (*quadrature*). Önnur aðferð varð ráðandi í millitíðinni.

SSB fengið með síu

Með framförum í kristalsíum varð eftir farandi aðferð ofan á. Fyrst er DSB-SC búið til eins og áður er lýst og síðan annað hliðarbandið valið úr með skarpri **bandhleypisíu**.



8. mynd USB með síuaðferð

Sían þarf að greina á milli RF merkja sem eru aðeins í um $2 \times 300 \text{ Hz} = 600 \text{ Hz}$ fjarlægð hvort frá öðru. Það krefst lítillar bandbreiddar og mjög **brattrá hliða**. Það næst ekki nema sían vinni alltaf á sömu tíðni, **millitíðni** IF (*intermediate frequency*) tækisins. Það er líka þörf fyrir góða síu í **viðtöku** svo millitíðnihlutinn er jafnan **samnýttur** í það. En hliðra þarf merkinu að og frá vinnutíðninni. Það er auðvelt með réttum sveifluvaka og hliðrænum margfaldara, sem þá kallast blandari (*mixer*).

Dulargervi hliðræna margfaldarans

mótari (*modulator*): *mótar burðabylgju með grunnbandi (baseband)*

blandari (*mixer*): *færir loftnetsmerki á millitíðni í viðtöku eða öfuga leið í sendingu*

sérhver önnur not þar sem þörf er á tíðnihliðrun merkis

afmótari, skynjari (*demodulator, detector*): *færir merki aftur niður í grunnband*

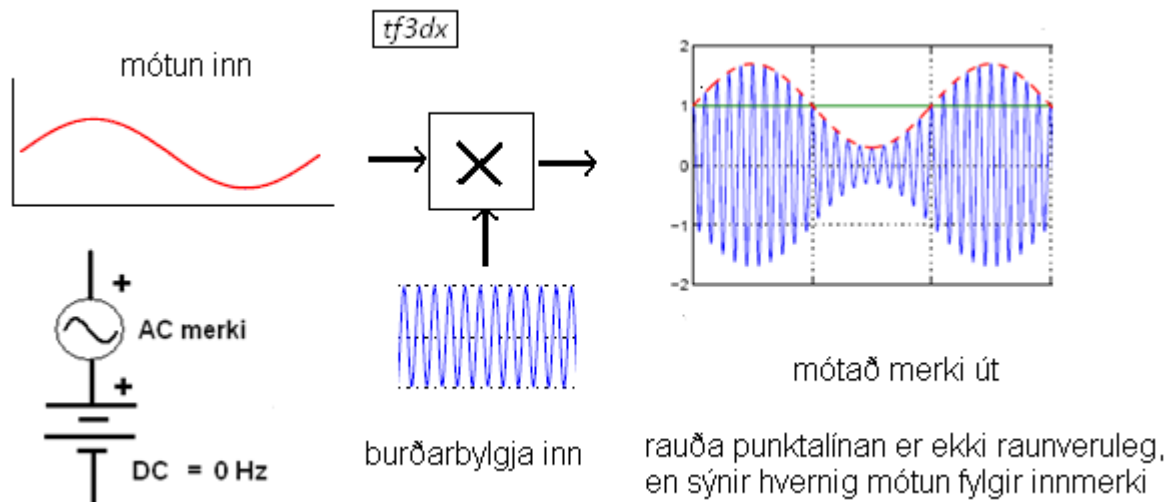
margfeldisskynjari (*product detector*): *skynjari sem notar hliðrænan margfaldara*

sýnitökurás (*sampler*): *tekur sýni af hliðrænu merki á völdum augnablikum*

Í öllum tilvikum **hliðrast merki, sem nemur gefinni tíðni** frá sveifluvaka. Mismunar- eða summutíðnin er valin sem útmerki með síun.

Hefðbundin styrkmótun, AM

Við hefðbundna styrkmótun er alltaf send út burðarbylgja. Tal og tónar sem senda skal eru riðspenna. Við jákvætt útslag hækkar útsendur styrkur en neikvætt útslag lækkar hann, mest niður í núll. Því verður **aldrei fasavending** eins og í DSB-SC.



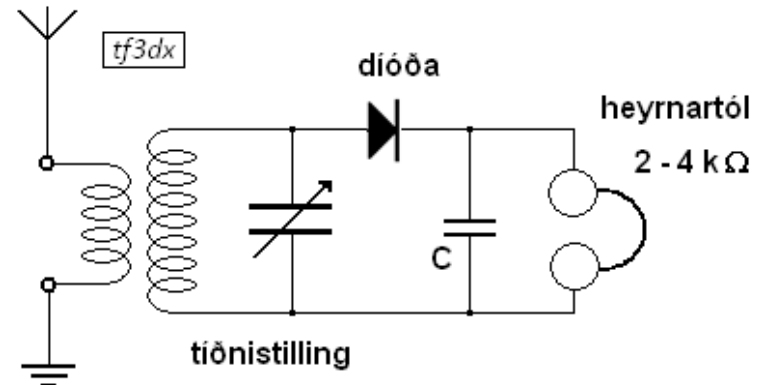
9. mynd AM mótun

Til að mótunarspennan fari aldrei niður fyrir núll er jafnspennu er bætt við riðspennumerkið. **Mótunarstuðull** segir hve sveiflan í útspennunni er stór hluti af burðarbylgjunni. Á myndinni er hann 0,7 eða 70%. **Mest** má móta **100%**.

Umlykja (*envelope*)

Rauða **hjálparlínan** með útmerkinu á 9. mynd sýnir styrksveiflu útsendingarinnar. Hún kallast **umlykja**. Líka hefur verið notað orðið hjúplína, en umlykja er beinni þýðing á erlenda orðinu *envelope*. Við **AM** er umlykjan nákvæm eftirmynd sveiflu tals og tóna inn á mótaranann.

Hefðbundinn umlykjuskynjari frá árdaga útvarps og talsendinga er díóða sem **afriðar** hátíðnimerkið og skilar út “jafnspennu”, sem þó nær að fylgja eftir breytingum í styrk hátíðnimerkisins. Svo kölluð kristaltæki voru vinsæl til beinnar móttöku á **nálægum AM** útvarpsstöðvum í árdaga útvarps.



10. mynd *Kristaltæki*

Þéttirinn C er nógu stór til að jafna RF gárur eftir afriðun, en nógu lítill til að spennan yfir hann fylgi hæstu heyrítíðni. Enn þann dag í dag er þetta **algengasti AM-skynjarinn** í útvarpstækjum og talstöðvum. Þá kemur merkið frá útgangi millitíðnimagnara, ekki loftnetinu. Meðalgildi spennunnar (DC) yfir C er mælikvarði á móttökustyrk. Það er jafnan notað til að drífa S-mæli og sjálfvirka mögnunarstillingu, **AGC** (*automatic gain control*).

Tíðniliðir AM

Sveiflan í mótunarkerkinu inn á 9. mynd veldur hliðartíðnum nákvæmlega eins og við DSB-SC á 6. mynd. En hvað gerist við mótun **jafnspennunnar**?

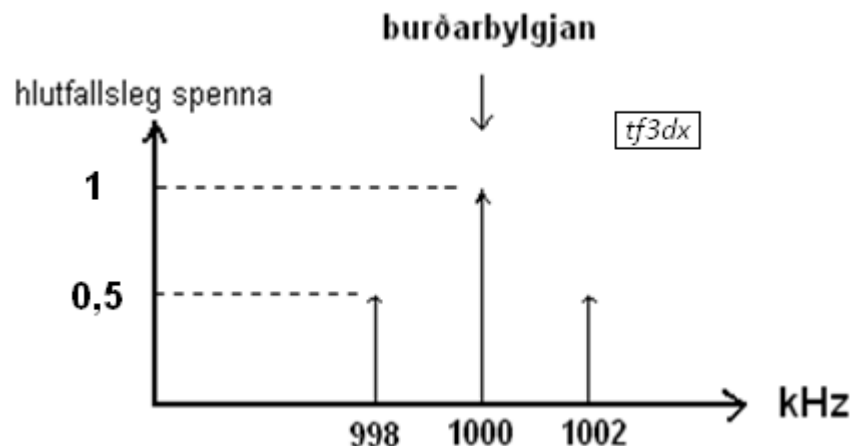
Ef sveiflutíðni tóngjafa er lækkuð uns útspena hans stendur alveg í stað er komin jafnspenna. Því má líta á jafnspennu sem sínussveflu með **tíðnina núll!**

Ef við notum töludæmið í 6. mynd fáum við “hliðartíðnir” jafnspennunnar:

mismunartíðni	1000 kHz – 0 Hz	=	1000 kHz	neðri hliðartíðni
summutíðni	1000 kHz + 0 Hz	=	1000 kHz	efri hliðartíðni

“Hliðartíðnir” jafnspennunnar eru á sömu tíðni og samfasa. Þær leggjast því saman og gefa **burðarbylgjuna**!

Hliðartíðnir riðspennunnar eru hins vegar á sitt hvorri tíðninni. Hvor um sig nær helmingi af spennu **burðarbylgjunnar** ef mótað er 100%.



11. mynd AM, 100% mótun

Afl í AM

Hellingsspenna þýðir **fjórðungsafl**. Gerum nú ráð fyrir að burðarbylgjan á 11. mynd sé 100 W. Þá lítur bókhald fyrir samanlagt afl þannig út:

burðarbylgja	100 W
LSB	25 W
USB	25 W
<hr/>	
<i>sendiafl alls</i>	150 W

2/3 hlutar aflsins fara í burðarbylgjuna, sem er óbreytanleg sínussveifla. Upplýsingarnar liggja í hliðarböndunum, með 1/3 hluti aflsins! Rétt er að ítreka, að þetta á við um 100% mótun með sínussveiflu.

Hlutfallið verður **enn óhagstæðara** með **talmótun**. Meðalafli tals er miklu lægra en sínusbylgju með sömu toppspennu. Því var rakin ástæða til þess að **hætta að eyða** afli í burðarbylgju og nota DSB-SC eða SSB. En það var tiltölulega einfalt að breyta CW (*continuous wave*) sendi í AM sendi á sínum tíma og sömuleiðis að afmóta með kristaldíóðu!

PEP (*peak envelope power*)

PEP táknar **aflið þegar umlykjan er í toppi**. Afl AM sendis er venjulega miðað við ómótaða burðarbylgju. Við 100 % mótun **tvöfaldast** RF spennan út og aflið **fjórfoldast**. Það gerir 400 W PEP fyrir 100 W **AM** sendi.

Krafan um línuleika

Þegar magna þarf merki með **sveiflandi umlykju** má hún **ekki bjagast**! Ef það gerist er **eins og** mótað hafi verið með **bjöguðu** merki sem inniheldur **yfirsveiflur** af heyrítíðni. Það margfaldar bandbreiddina með tilheyrandi **skvettum** (*splatter*) inn á grannrásir. Slíkt er öðrum til mikils ama og ber vitni um kunnáttuleysi þess sem sendir. **Aflinu** í skvettunum er líka **kastað á glæ**, því það fellur jafnan utan bandbreiddar viðtækis þess sem sendingin er ætluð.

Þegar talað er um línulega sendimagnara er átt við að þeir séu **línulegir** gagnvart **umlykju** merkisins, ekki endilega RF sveiflunni sjálfri. Yfirsveiflur af henni er auðvelt að sía frá í útganginum vegna þess hve langt þær eru frá í tíðni.

Enginn magnari getur bætt í útafl endalaust, svo þeir eru **gefnir upp** fyrir tiltekið hámark sem **PEP má ekki yfirskríða**. Þetta varðar AM, DSB-SC, SSB og sumar gerðir stafrænnar mótunar, en hrein FM eða PM mótun hefur fast útslag. Sama gildir um CW (continuous wave) en þó þarf að huga að nægilega mjúku risi og falli morsmerkja til að forðast lykilsmeili.

Talmótun og SSB

Það er **ekki einfalt** samhengi milli umlykju SSB og mótunarmerkis með þeim hætti sem sást hér að framan fyrir AM og DSB-SC. Engu að síður er hlutfall meðalafls í umlykju SSB merkis **svipað** og í talinu sjálfu **ef mótunin er óbjöguð**. Meðalafli tals er talið vera um **7 % af toppaflinu**. Því er alveg eðlilegt að venjulegur aflmælir sýni **10 W eða minna** þegar talað er í SSB sendi sem er gefinn upp fyrir 100 W PEP.

Það væru því **skelfileg mistök** að skrúfa upp í hljóðnemanum eða auka kný (*drive*) til útgangsstigsins í von um að nálgast 100 W á aflmælinum!

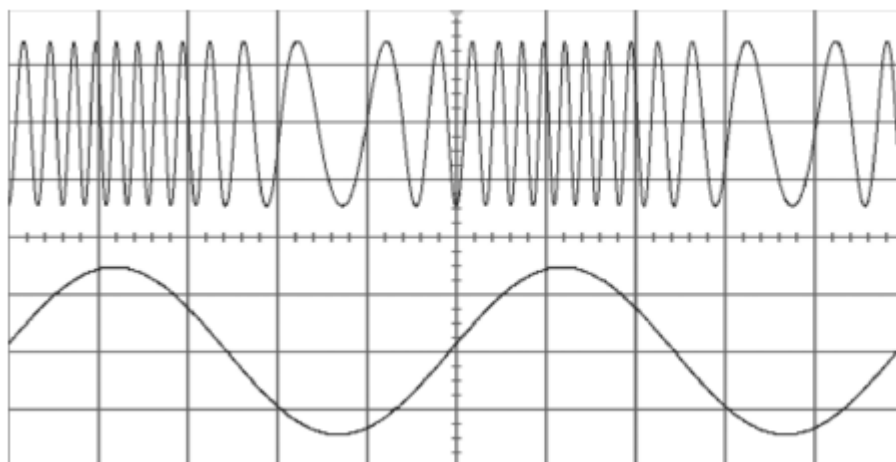
Til eru aflmælar sem grípa toppafli og halda vísun þess í nokkra stund. Eftir slíkum mæli ætti að stilla svo að hann fari aðeins af og til upp að því PEP sem sendinum er ætlað að ráða við. Þegar dæma skal mótun með hlustun, skiptir öllu máli að gá að skvettum inn á grannrásir. Hvernig merkið hljómar eða lítur út á rófsjá eftir ferð þess um góða SSB síu viðtækisins segir langt í frá alla söguna.

Þjöppun tals

Þegar illa heyrast getur verið til bóta að auka meðalafli tals með þjöppun. Hún **þjagar** þó merkið og ætti **eingöngu** gerast **fyrir framan** kristalsíu sem velur hliðarbandið og sker skvettur utan af merkinu um leið. Með nýrri stafrænni tækni getur fleira komið til. Aldrei má fletja toppa mótunar í **útgangsstigi** eða **eftirmagnara**.

Tíðnimótun

Í stað þess að sveifla styrk með útslagi mótunarmerkis, er hægt að **sveifla tíðninni**. Það kallast tíðnimótun, FM (*frequency modulation*). **Hliðrun** frá ómótaðri tíðni burðarbylgjunnar er **í réttu hlutfalli við útslagið** á mótunarmerkinu á hverju augnabliki.



mótuð bylgja
RF

mótunarmerki
AF

12. mynd *FM mótun*

Í hliðrænu tæki verður tíðnin aðeins mótuð í **sveiflurásum sjálfum**. Venjan er að móta rýmdina í LC sveiflurás og nota til þess bakspenna kísildíóðu sem vinnur eins og lítill **spennustilltur þéttir**. Allar díóður úr hálfleiðara hafa þennan eiginleika, en þær sem eru sérstaklega framleiddar til þess kallast **rýmdardíóður** eða “varicap”.

Tíðniliðir FM

FM mótuð bylgja er **ekki hrein** sínusbylgja og inniheldur þar af leiðandi **fleiri** en eina tíðni. Mótunin leiðir til hliðartíðna, rétt eins og við AM, en þó með þeirri viðbót að það koma líka **hliðartíðnir af yfirsveiflum** mótunartíðninnar. Þetta gerist þó mótunarkerkið sé tandurhrein sínussveifla og er eðlilegur **eiginleiki FM**. Ef lítið er mótað eru þessar hærri hliðartíðnir daufar, en stíga sveiflukennt með vaxandi mótun.

Það sem ræður styrkleika hliðartíðnanna er tíðnivik sem hlutfall af mótunartíðninni. Það kallast **mótunartala**:

$$m = \frac{\Delta f}{f_m}$$

Þannig fást jafnsterkar hliðartíðnir með 1 kHz tíðniviki frá 200 Hz tóni og með 5 kHz tíðniviki frá 1 kHz tóni. En auðvitað liggja hliðartíðnirnar fimmfalt lengra frá burðarbylgjutíðninni í síðara tilfellinu, sem þýðir meiri bandbreidd.

Ef mótunartalan er um **1** eða minna, eru fyrstu hliðartíðnirnar **ríkjandi**. Þá er talað um bandmjóa tíðnimótun, NBFM (*narrow band FM*).

Oft er FM búið til á **lægri** tíðni en senda skal og notuð nokkur stig af tíðnimargföldun. T.d. 8 MHz x 2 x 3 x 3 = 144 MHz. Þá **margfaldast** tíðnivikið tilsvarandi.

Bandbreidd FM

Regla kennd við Carson áætlar bandbreidd FM merkis sem:

$$BW = 2(\Delta f + f_m)$$

Lengi var miðað við að VHF/UHF talstöð hefði **5 kHz** tíðnivik og mótaði með tíðni upp **að 3 kHz**. Þá gefur regla Carsons $2(5 \text{ kHz} + 3 \text{ kHz}) = \mathbf{16 \text{ kHz}}$ bandbreidd, sem hentar vel **25 kHz rásabili**. Í seinni tíð hefur 12,5 kHz rásabil unnið á með tilsvarendi minna tíðniviki.

Íslenska reglugerðin um starfsemi radióamatöra leyfir okkur að nota mest **18 kHz** bandbreidd á 2 m og **30 kHz** á 70 cm. Það er talsvert, en eins og alltaf, skal líka hafa hliðsjón af þeirri þjónustu sem er í gangi á viðkomandi hluta bandsins og tilmælum IARU. Athugið að einangrun okkar frá umheiminum er rofin á þessu tíðnisviði af miklum fjölda gervitungla sem amatörar hafa smíðað og fengið far fyrir út í geim!

FM útvarp notar 75 kHz tíðnivik og mótar með miklu hærri tíðni en talstöð. Það er WBFM (*wide band FM*) og fer langt út fyrir þau mörk sem NBFM skynjari í talstöð ræður almennt við án bjögunar.

Afl í FM

Heildaraflíð í útsendingunni er **óbreytt** þó mótað sé, því sveifluvíddin er alltaf sú sama. Þegar hliðarböndin styrkjast **dofnar** því upphaflega burðarbylgjan að sama skapi. Þegar mótunartalan nær gildinu **2,4** fer burðarbylgjan í gegn um **núll**. Það er hægt að nota til að finna hvaða stærð mótunarmerkis framkallar tiltekið tíðnivik svo hægt sé að **stilla** það rétt án þess að ráða yfir tíðniviksmæli.

Ekki er nauðsynlegt að nota **umlykjulínulega** magnara fyrir **FM** (né CW), því það er engin sveiflandi umlykja sem gæti bjagast. Athugið að aflíð heldur fullu gildi allan tímann sem sent er (**100 % iðnilota**), sem gerir það að verkum að sendir þolir ekki að ganga á FM nema örstutta stund á sama afli og hann þolir sem toppafl við SSB eða lyklað CW.

Tíðnilyklun

Frá upphafi RTTY (*radio teletype*) hefur tíðkast að lykla senditíðnina með stökki milli 2ja tíðna. Það kallast **FSK** (frequency shift keying). Þetta er í raun tíðnimótun út frá meðaltíðninni með kassalaga merki. Tíðnivikið er **helmingurinn** af mismun þessara tíðna og er haft nógu lítið til að bandbreidd sé lítil þrátt fyrir kassalögun og FM. Nýrri hættir til stafrænna sendinga nota gjarnan fasalyklun **PSK** (phase shift keying).

Fasamótun

Í raun er fasamótun **PM** (phase modulation) og **FM** mótun af sama toga, annað getur **ekki verið** án hins. Hækkuð tíðni flýtir fasa en lækkuð seinkar. Munurinn er þessi:

- FM** **tíðnihliðrun** er í réttu hlutfalli við útslag mótunarmerkis
- PM** **fasahliðrun** er í réttu hlutfalli við útslag mótunarmerkis

Í síðara tilvikinu verður **tíðnihliðrun** í réttu hlutfalli við **breytingarhraða** mótunarmerkis.

Breytingarhraðinn vex með hækkandi mótunartíðni. FM sem leiðir af PM **hyglir** því **hækkandi** mótunartíðni í vaxandi mæli. Ef merkið frá hljóðnema fer fyrst í gegn um síu sem deyfir það í réttu hlutfalli við tíðni og síðan inn á PM mótara, er útkoman eins og vera myndi frá venjulegum FM mótara. Það kallast **óbein tíðnimótun** og er oft notuð, einkum þegar kvartskristall stýrir senditíðninni. Þá gerir sá eiginleiki hans að vera stífur á tíðni sinni óhægt um vik með tíðnimótun.

PM er hægt að framkalla hvar sem er **á eftir** sveifluvaknum. Einungis þarf þverviðnám sem hægt er að móta til að spila nægilega á faskvik. Rétt eins og við beina tíðnimótun sveifluvaka eru rýmdardíóður mest notaðar nú til dags við fasamótun.

Hliðræn merki og vinnsla

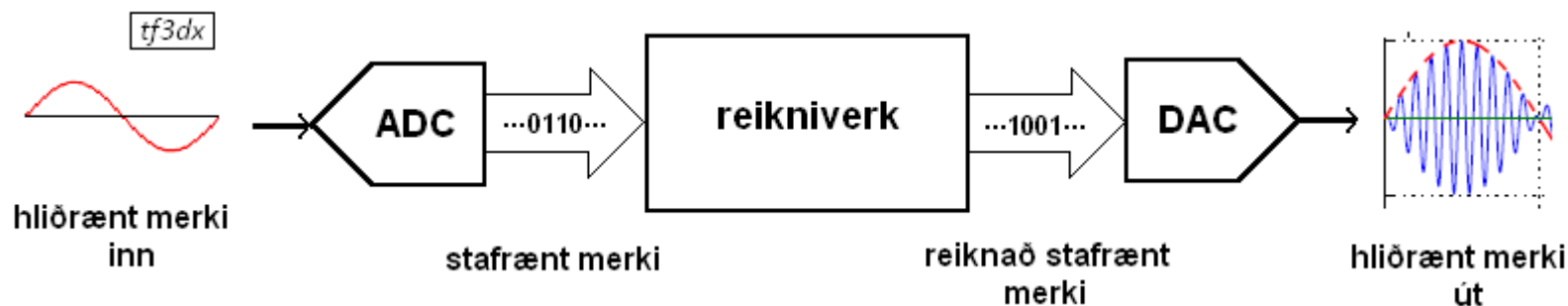
Rafeinda- og radiótæknin þróaðist sem hliðræn (*analog*) tækni. Þá er merkið fólgið í **breytilegri spennu og straumi**, er sveiflast sem eftirmynd þess sem kemur frá uppsprettunni. Spennusveifla frá hljóðnema hermir eftir loft sveiflum hljóðsins, svo dæmi sé tekið. **Hliðræn vinnsla merkja byggist á eðlisfræðilegum eiginleikum íhlutanna í tækinu**, sér í lagi samhengi spennu og straums. Með þeim hætti þróuðust tækjaeiningar eins og síur, magnarar, skynjarar, blandarar, mótatarar og annað sem þið hafið kynnst framar í þessu hefti.

Stafræn merkjavinnsla, DSP

Þar kom þó að menn sáu fram á **allt aðra nálgun** við tækjasmíð. Alveg frá byrjun höfðu eðlisfræðingar og verkfræðingar þróað **stærðfræðilega lýsingu** á virkni íhluta, rásareininga og kerfa. Á þeim grunni er hægt að láta **reikniverk** sem keyrir mismunandi forrit, allt eftir því hvað gera skal, sjá um hlutverk íhluta og rása. Í stað þess að skipta milli sérhæfðra eininga, svo sem afmótara fyrir SSB eða FM, nægir að **skipta milli forrita**. Þá er hægt að gera breytingar og endurbætur með nýjum hugbúnaði í stað þess að hita lóðboltann. Þegar tegund mótunar og önnur virkni radiótækis ræðst með þessum hætti, gengur það undir skammstöfuninni **SDR** (*software defined radio*). Stafræn merkjavinnsla (*digital signal processing*) varð þó ekki raunhæf í fjarskiptum fyrr en **nógu hraðir örgjörvar** (*microprocessors*) komu til.

Í fyrstu var aðeins hægt að ráða við merki á heyrítíðni (**AF**), síðan á millitíðni (**IF**) hefðbundinna sendiviðtækja. Nú um stundir (2018) er stafrænni vinnslu beitt í vaxandi mæli **beint** á sífelld hærri radiótíðni (**RF**). Þá er hægt að sleppa millitíðni og **reikna þreplaust** á milli heyrnlegrar tíðni og vinnutíðna í loftinu ef vill. Það á bæði við í viðtöku og sendingu. Skammstöfunin **DSP** vísar til allrar **stafrænnar merkjavinnslu**. Hún varð þekkt meðal amatöra strax og farið var að beita DSP til að hreinsa mótttekið merki á heyrítíðni. Því tryggir merkimiðinn DSP ekki að tæki sé SDR. Framleiðandinn myndi væntanlega láta þess sérstaklega getið.

Í grunninn er tækjabúnaður fyrir DSP **einfaldur**, nánar tiltekið **reikniverk** með viðeigandi **tengibúnað við hliðræna heiminn** beggja megin við sig.



13. mynd *Alhliða búnaður fyrir DSP merkjavinnslu, DSB-SC móttun tekin sem dæmi*

ADC (*analog digital converter*) breytir hliðrænu merki í stafrænt. Stafræna merkið er **talnaruna**, skrá yfir hæfilega þétt tekin gildi hliðræna merkisins.

DAC (*digital analog converter*) breytir stafrænu merki í hliðrænt. Merkið verður þá aftur hliðrun í spennu og straumi.

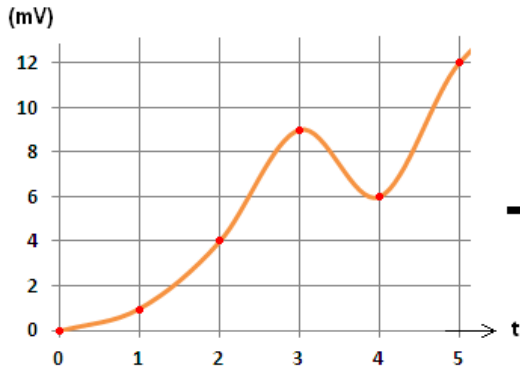
Reikniverkið á 13. mynd getur verið **tölva** af hvaða tagi sem er. Hún þarf aðeins að hafa nægan hraða og reiknigetú, ásamt samskiptasniði sem hæfir ADC og DAC einingunum. Í sjálfstæðum tækjum eru notaðir örgjörvar. Almenningsstölvur koma líka við sögu, bæði sem notandaviðmót eða hluti af DSP vinnslunni ef vill.

Sýnitaka

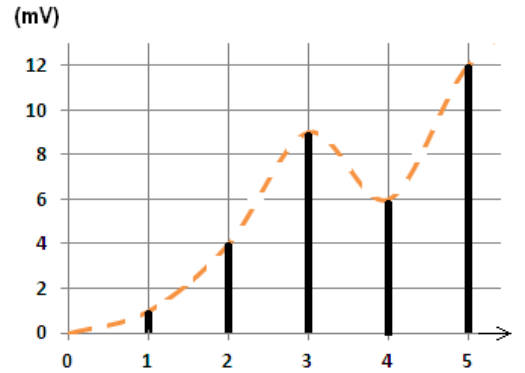
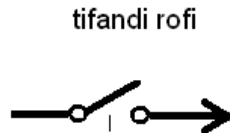
Tölvur þurfa að fá **tölur til að bryðja** og það er hlutverk ADC að skaffa þær. Hliðrænt merki sem tekur samfelldum breytingum rennir sér í gegn um óendanlega mörg mæligildi. Augljóslega er ekki vinnandi vegur að skrá þau öll. **Því hraðari** sem breytingarnar á hliðræna merkinu eru, **því styttra** þarf að líða á milli þess að sýni séu tekin. Til sýnitöku má nota hraðvirkan rofa sem tengir hliðræna merkið í **örstutta** stund við spennumæli. Venjulega er þetta gert **með jöfnu millibili**. Öllum gildum merkisins þar á milli er **fleygt**. Er það virkilega í lagi? Skoðum nú grannt mynd sem lýsir grunngerð sýnitöku.

ADC í hnotskurn

tf3dx

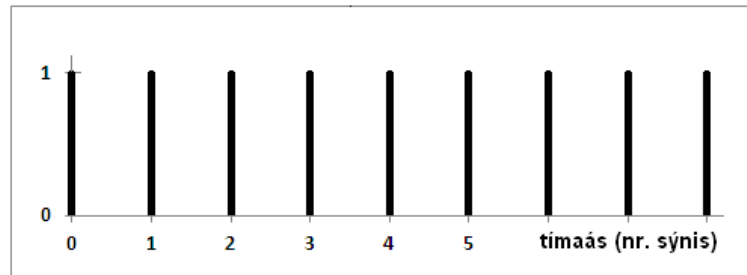


a) hliðrænt merki inn

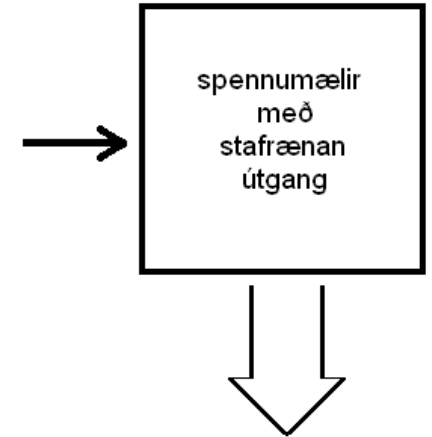


c) sýni tekið í gegn um rofa og innmerkið til samanburðar

lokaður (leiðir) →
opinn (leiðir ekki) →



b) margföldunarstuðull rofa



0000	(0 mV)
0001	(1 mV)
0100	(4 mV)
1001	(9 mV)
0110	(6 mV)
1100	(12 mV)
⋮	
⋮	

d) stafrænt útmerki

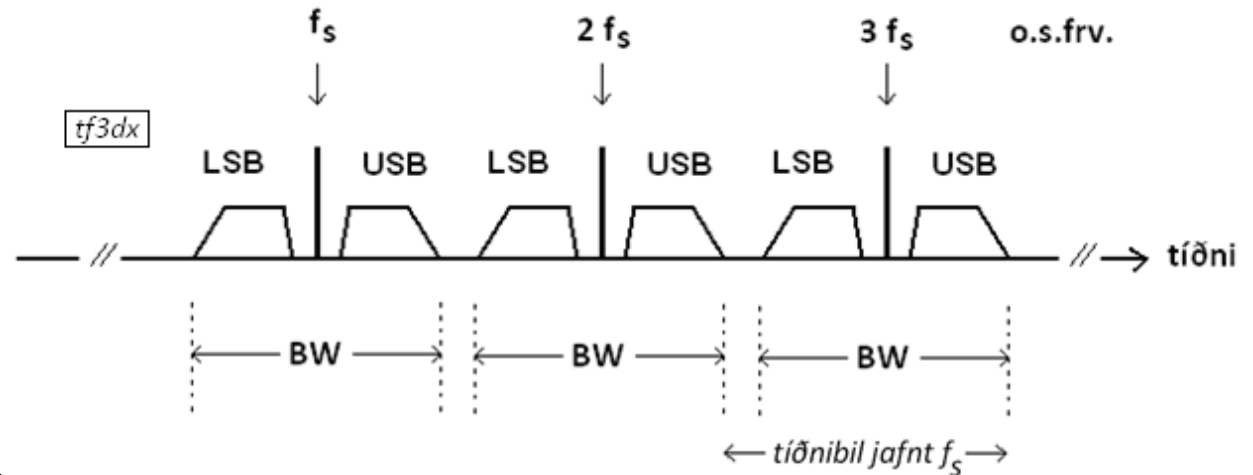
14. mynd Sýnitaka fyrir DSP merkjavinnslu

Rofinn **grisjar gögnin**, líkt og veðurathugunarmaður sem les af mælum á 3ja tíma fresti. Niðurstaðan er röð spennugilda sem ganga eins og púlsar til spennumælisins. Hann nemur toppgildi púlsanna og **skilar út tölu** í tvíundakerfinu, sem tölvur nota. Okkur 10 putta mannfólkinu til glöggvunar eru sömu gildi innan sviga á myndinni d).

Nú kemur lykilatriði sem gerir okkur kleift að nota **áður fengna** þekkingu okkar á blöndun og mótun til að **átta okkur á takmörkunum** sýnitökunnar. Rofinn **margfaldar** innmerkið til skiptis með tölunni 0 og 1. Nákvæmlega á sama hátt og hliðrænn margfaldari myndi gera ef hann fengi innmerkið á annan innganginn og spennupúlsa sem líta út eins og mynd b) inn á hinn. Nú sakar ekki að rifja upp bls. 9 - 20 meðfram lestrinum. Bætum líka dulargervinu *sýnitökurás* inn á afrekaskrá margfaldarans!

Margföldunin með 0 og 1 leiðir til þess að púlsaröðin til spennumælisins er styrkmótuð með innmerkinu. Það sést vel í c) lið myndar. Hér er burðarbylgjan þó ekki sínuslaga eins og við venjulega AM sendingu. Hún inniheldur **allar yfirsveiflur af grunntíðni sýnitökunnar, f_s (sampling rate)**. Þessir tíðniliðir mótast allir jafnt og fá hver um sig hliðarbönd, LSB og USB. Upplýsingar mótunarmerkisins skila sér svikalaust í hliðarböndin, eins og við þekkjum frá AM. Því mætti í fljótu bragði ætla að engar upplýsingar glatist þótt lengra líði á milli þess að sýni séu tekin. En fleira kemur til. Skoðum **tíðniróf púlsanna sem bera sýnin** til mælingar.

Tíðniróf sýnanna

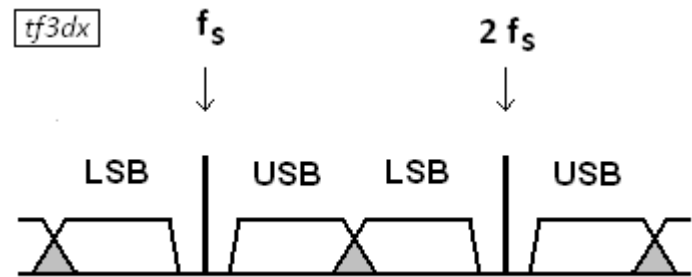


15. mynd Tíðniróf eftir sýnitöku

Tíðnirófið lítur út eins og AM stöðvum sé raðað upp allt tíðnisviðið með **jöfnu millibili**. Þær flytja sömu dagskrá svo hver stöð á sér **marga tvífara**. Í bandbreidd hverrar “stöðvar” eru **tæmandi** upplýsingar um upphaflega hliðræna merkið. **Skarist** sending samliggjandi “stöðva” verður truflun **sem bjagar** upplýsingarnar. Því þarf sýnitökutíðnin f_s að vera **að minnsta kosti jöfn bandbreiddinni** BW . Bandbreiddin er tvöföld hæsta tíðnin sem fyrirfinnst í mótunarmörkinu, eða $BW = 2 f_H$. Það leiðir til einfaldrar kröfu um sýnitökutíðni ADC:

Skilyrði: $f_s \geq 2 f_H$

Hversu hratt merki getur breyst ræðst af því hve háa tíðni það inniheldur. Uppfylli tíðni sýnitökunnar framangreint skilyrði, er tryggt að engin breyting sé svo snögg að sýnitakan missi af henni. Þá duga sýnin ein og sér til að endurgera upphaflega hliðræna merkið óbjagað. **Öðru má fleygja!**



16. mynd Skörun bjagar hliðarbönd

Tvífaratruflun* (*aliasing*)

Við val á sýnitökutíðni er **ekki nóg** að huga að hæstu tíðni sem notandi ADC hefur áhuga á, hann **verður að koma í veg fyrir** að of há tíðni **komist að** sýnitökunni. Eina tryggja leiðin til að hindra gagnaspjöll af þeim sökum er að **nota lághleypisú** fyrir framan sýnitökuna. Sían þarf að skera burt allt sem hefur hærrí tíðni en $f_s/2$. Engin sía er fullkomin, svo ekki sakar að velja sýnitökutíðnina eitthvað ríflega.

Sýnitaka bandhleyptra merkja (*band pass signals*)

Hér að ofan er gert ráð fyrir hliðrænu innmerki sem nær **frá 0 Hz** (DC) upp í f_H . Slíkt merki mætti kalla **lághleyptr** merki (*low pass signal*). Á radiótíðni er oft um að ræða merki sem hefur líka neðri marktíðni f_L . Þá helgast nauðsynleg sýnitökutíðni fyrst og fremst af bandbreiddinni, $BW = f_H - f_L$. Nota skal **bandhleypisú** á undan sýnitöku.

* Tillaga *tf3dx* að þýðingu

Í SDR tækjum er gjarnan einhver af **tvíförum** merkisins valinn til að **hliðra** því í tíðni, t.d. frá móttökutíðni loftnets á millitíðni. Það gerist eins og í blandara (*mixer*).

Upplausn og suð

Stafræna merkið kemur frá ADC sem tvíundatölur með **tiltekinn sætafjölda**. Innihald hvers sætis, 0 eða 1, kallast biti. Fjöldi þeirra **ræður því** hve mörgum gildum útgangsmarkið hefur úr að spila. Á skýringarmyndinni af ADC hér framar eru einungis notaðir 4 bitar, sem gefur 16 möguleg gildi. Fjöldinn fæst með því að hefja töluna 2 upp í veldi sem nemur fjölda bita. Átta bitar (eitt bæti) hafa dugað vel fyrir tal af talstöðvargæðum og 16 bitar (með 65.536 gildi) eru orðnir algengir í SDR.

Spennumælirinn í ADC þarf að **rúnna mælinguna af** í næsta tiltæka gildi. Þessi nálgun getur numið allt að hálfum í aftasta sæti. Hún er tilviljunarkennd og bætist við merkið **eins og truflun**. Það getur spillt SNR (*signal to noise ratio*) svo einhverju nemi. Við hvern bita sem tvíundatalan er lengd um, minnkar truflunin **um helming**.

Gagnamagn

Með því að margfalda saman bitafjölda og sýnitökutíðni **fæst gagnastreymið** frá ADC, talið í bitum á sekúndu (bit/s). Deiling með 8 gefur bæti á sekúndu (B/s).

DSP og stafræn mótun

Stafræn merkjavinnsla hefur lagt grunn að miklum **framförum** í stafrænni mótun. Radíófjarritun (sjá frammar um RTTY og FSK) krafðist lengi vel klunnalegra og háværra véla. Amatörar þurftu gjarnan að fara með lóðbolta inn á sveiflufakann í sendi sínum til að geta hliðrað tíðni hans með spennu frá snertum.

Þegar tölvur fóru að rata á borð amatöra voru **SSB talsendar** orðnir ríkjandi. Einn heyrítíðnitónn inn á **hljóðinngang** slíks sendis skilar sér í stöðugri útsendingu á einni radíótíðni. Sé tíðni tónsins breytt, **hliðrast radíótíðnin** jafnmikið. Þetta var auðvelt verkefni fyrir tölvu og fjarritvélnar fóru í brotajárn. Sú aðferð að senda og taka á móti sífelld flóknari gerðum stafrænnar mótunar með SSB talstöð, **tengdri tölvu með hljóðkorti**, er löngu orðin ríkjandi aðferð hjá amatörum. Snjallsími getur dugað.

Stilling stafrænnar mótunar

Stafrænar mótunaraðferðir nota litla bandbreidd svo margar stöðvar komast fyrir í þröngu tíðnibili. Vanstillt sending gerir því mikinn usla og vekur strax eftirtekt.

- 1) Takmarkið **styrkinn** á hljóðmerkinu frá tölvunni við það **sem nægir**.
- 2) Sé **hljóðnematengið** notað í stað gagnatengis, má þjöppun fyrir tal **EKKI** vera virk.
- 3) Sendar eru venjulega keyrðir **vel undir PEP** mörkum, bæði til að **forðast bjögun** og til að **ofhita ekki** sendinn. Meðalafll stafrænnar sendingar er meira en tals!

Viðauki

Til hliðsjónar úr “Passport to Amateur Radio”

Eftirfarandi myndir og tilheyrandi texti:

mynd 44	bls. 32
mynd 53	bls. 37
mynd 55	bls. 37
mynd 59	bls. 39
mynd 71	bls. 44
mynd 73	bls. 45
mynd 78	bls. 46
mynd 79	bls. 47
mynd 76	bls. 76

Æfingadæmi úr “Amatörpróf í raffræði og radiótækni”

Prófnefnd, ÍRA 1.útg. + viðauki 2016

www.ira.is/profnefnd

	<i>próf</i>		<i>dæmi</i>	
	okt. 1992	9.1	(9.2)	
	nóv. 1993	10.1		
	apríl 1994	9.1	10.2	
	júní 1996	9.2		
	nóv. 1996	8.1	8.3	
	sept. 1997	12.1		
	maí 1999	8.1	8.2	
	maí 2000	6.1		
	maí 2011	7.1	(8.1)	9.1
	apríl 2015	5.2	8.1	8.2