

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

A mérés tárgya:	900 MHz-es FSK adatátviteli berendezés mérése (10. mérés) (Távoktatási verzió)
A mérést végzi:	Veszelyi Bence Balázs (V3UWB0)
Mérőcsoport:	H12, 41
A mérés időpontja:	2021-03-29

Felhasznált eszközök: az eszközökről képek a dokumentum végén találhatóak!

Oszilloszkóp	Agilent 54622A
Spektrumanalizátor	Agilent E4411B ESA-L
RF jelgenerátor	Agilent E4430B ESG-D
Tápegység	Agilent E3630
Digitális multiméter (6½ digit)	Agilent 3440A
Evaluation board	TRF 6900 EVM

Videós segítség (másolni kell a linket):

A.) RF jelgenerátor: <https://web.microsoftstream.com/video/d994ce50-2ec3-4679-9eb1-752cdea6242c>

B.) Oszilloszkóp: <https://web.microsoftstream.com/video/7a60a140-9181-4320-9a84-6a0dc056a62d>

C.) RF spektrumanalizátor: <https://web.microsoftstream.com/video/19acc773-e234-4a32-8b7e-9cdd554eee37>

D.) TRF6900A EVM: <https://web.microsoftstream.com/video/36e3fffb-e9ba-4de5-bf03-f72dcc376ecb>

E.) TRF6900A vezérő SW: <https://web.microsoftstream.com/video/fc76a65e-a5e1-4539-83bb-bffeb72f5c58>

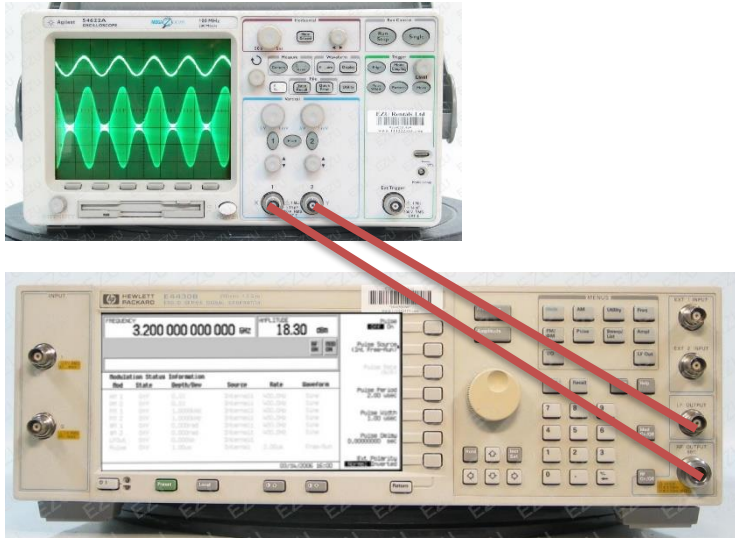
Ha a fenti linkek nem működnek, a videók egyetlen zip file-ba tömörítve letölthetőek: home.mit.bme.hu/~krebesz/hun_video.zip

Mérési feladatok

1. Az új műszerek birtokba vétele (Videós segítség A., B., és C.)

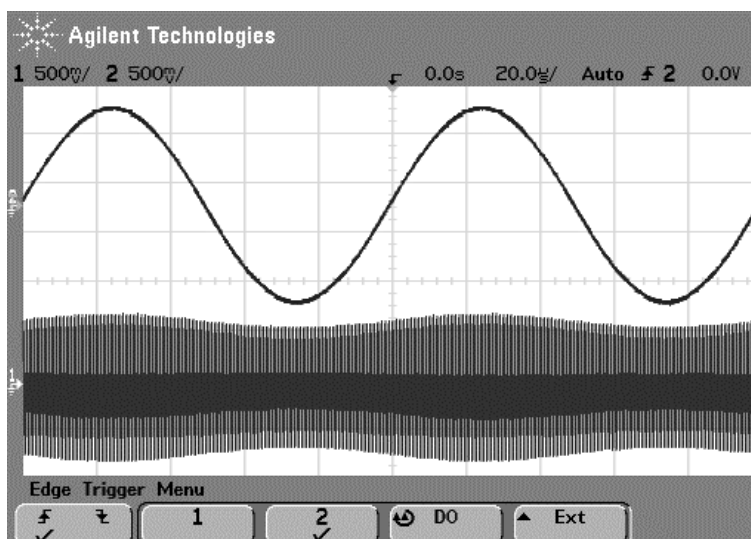
Az RF jelgenerátoron beállított 1 MHz-es, 0 dBm szintű, AM (modulációs frekvencia = 10 kHz, modulációs index = 10 %) jelet vizsgálunk.

Rajzolja le a blokkdiagramot, amely alapján megmérheti az AM jelet és komponenseit (vivő és moduláló jel) az időtartományban (használhatja az eszközök fényképeit a dokumentum végéről és a word beépített rajzolási lehetőségeit).



Az alábbi mérési eredmény és a feladat leírása alapján magyarázza el mi látható a műszeren a kérdésekre válaszolva:

- Melyik műszer kijelzője látható és mire szolgál a műszer általánosságban?
- Az 1-es csatornára kapcsolt jel frekvenciája mekkora?
- A 2-es csatornára kapcsolt jel frekvenciája mekkora?
- Melyik jel a modulált vivő és melyik a moduláló jel (csatornaszámmal azonosítsa)?
- Melyik csatornára történik a triggerelés?
- Milyen moduláció látható és a moduláció miben nyilvánul meg a jelek alapján?

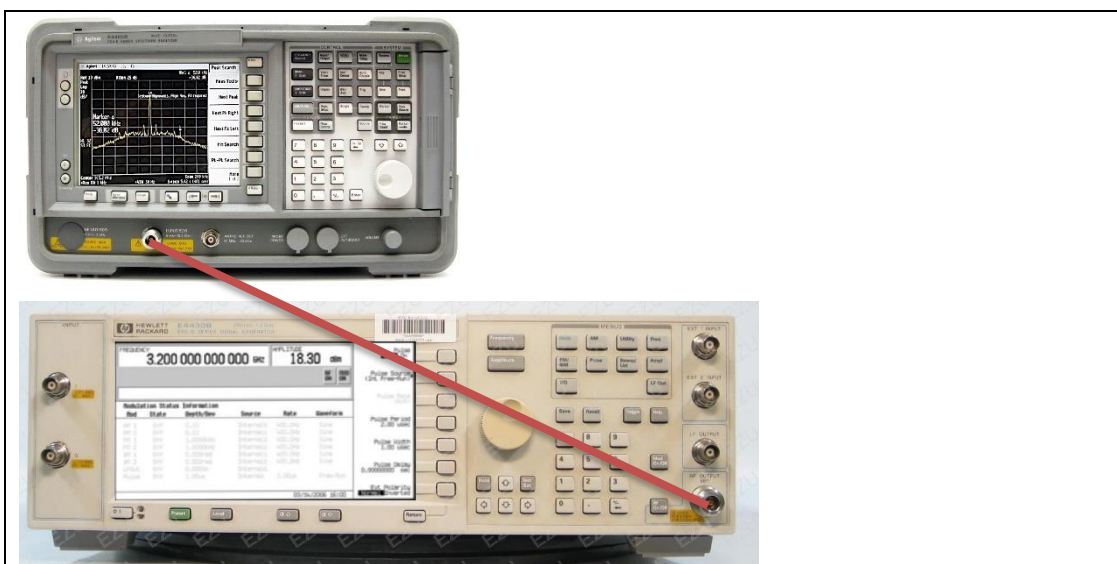


A képen egy oszcilloszkóp kijelzőjét látjuk, általánosságban jelek időtartománybeli megjelenítésére, vizsgálatára használjuk.

Két csatorna jele látható: az egyes csatornán látható mondulált vivő jel, frekvenciája ~ 1 MHz, míg a kettes csatornán megjelenített moduláló jel frekvenciája ~ 10 kHz, itt van a triggerelés is.

Amplitúdó modulációról beszélhetünk, mivel a vivő jel amplitúdója változik a moduláló jel szerint az időben.

Rajzolja le a blokkdiagramot, amely alapján megmérheti az AM jelet és komponenseit (vivő és moduláló jel) a frekvenciatományban (használhatja az eszközök fényképeit a dokumentum végéről és a MS-Word beépített rajzolási lehetőségeit).



Elemezze az AM jel spektrumát 2 különböző RBW¹ (1kHz/3kHz), 2 különböző VBW² (30Hz/300Hz) és adott SPAN³ (100kHz) beállítások mellett az alábbi kérdésekre válaszolva, ha a mérési eredmények a lenti ábrákon láthatóak:

- Melyik műszer kijelzője látható és mire szolgál a műszer általánosságban?
- Honnan tudjuk a mérési eredmény alapján, hogy AM jelet mérünk?
- Mi a Resolution BandWidth (RBW) paraméter szerepe a spektrumanalizátor működésében?
- Mi a Video BandWidth (VBW) paraméter szerepe a spektrumanalizátor működésében?
- Mi a Center Frequency, mekkora az értéke jelen mérésben és miért annyi?
- Mi a Span, mekkora az értéke jelen mérésben és miért annyi?
- Vonjon le következtetést, hogy a mérési eredményt hogyan befolyásolja a VBW és RBW értéke?
- Mi a Sweep Time és mi köze az RBW és VBW paraméterekhez?

A képen egy spektrumanalizátor kijelzőjét láthatjuk, általánosságban jelek frekvenciatartománybeli megjelenítésére és vizsgálatára használjuk.

Amplitúdó moduláció esetén van egy vivőnk, jelen esetben 1 MHz-nél és ez frekvenciatartományban nagyobb amplitúdóval kell megjelenjen mint a moduláló jelek. Itt ezt tapasztalhatjuk, illetve mivel a vivő mindkét oldalán megjelenik a moduláló jel, így AM-DSB-ről van szó.

A Resolution BandWidth a felbontást adja meg.

A Video BandWidth a spektrum varianciájával arányos értéket ad meg.

A Center Frequency a kijelzőn középen látható frekvencia érték, itt az 1MHz-es vivőjelre van állítva.

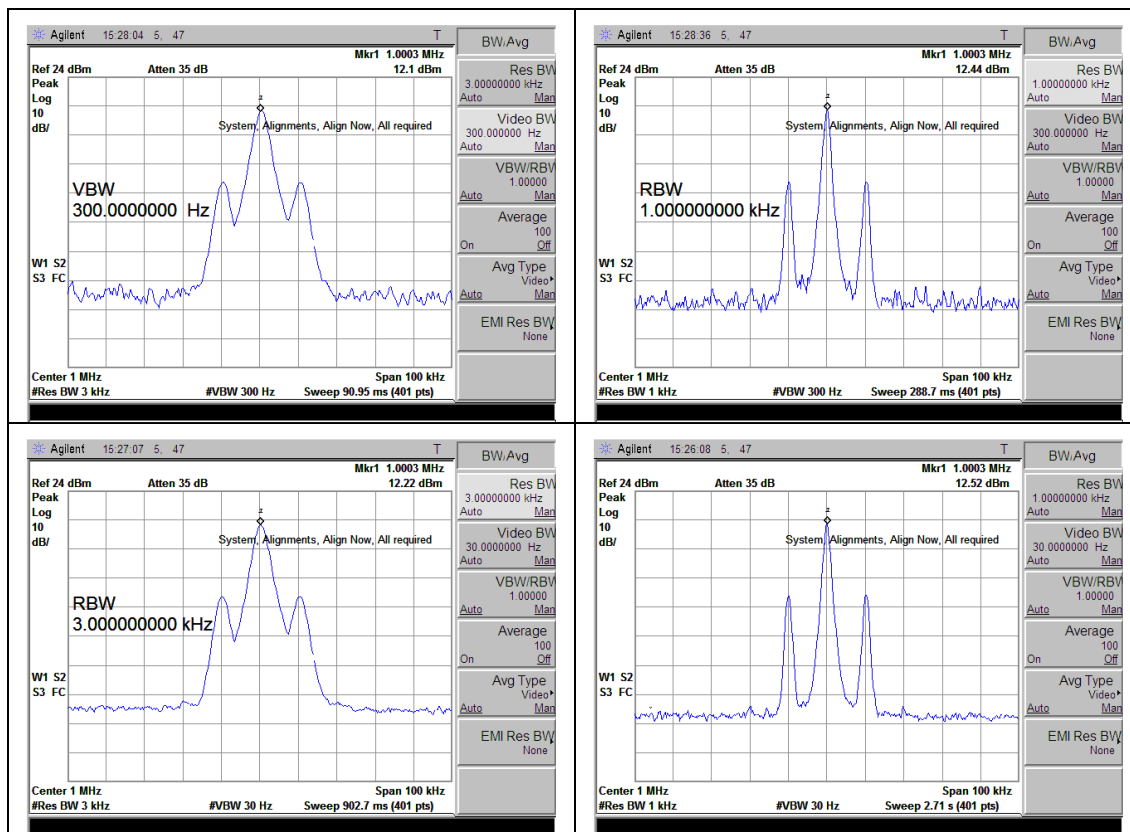
A Span a vizsgált frekvenciák közötti különbség (végpontok), itt 100 kHz-et fog mutatni a műszer, mivel 10 vízszintes osztásköz (grid) található a kijelzőn, egyesével 10 kHz-es szélességgel.

A sweep time azt az időtartamot jelenti, amíg a vizsgálat a mérendő frekvenciatartományon megtörténik. Minél kisebb az RBW és a VBW annál több ideig tart ez.

¹ RBW: Resolution BandWidth – sávszűrő sáv szélessége, amely szűrő “végighalad (sweep-el) a kijelzőn” megmérve a sáv szélességébe eső jelteljesítményt; ezt a teljesítményt folyamatosan kirajzolva kapjuk a spektrumot – minél keskenyebb a sáv szélesség, annál jobb a kijelzés “felbontása”

² VBW: Video BandWidth – a kijelzőn megjelenő spektrum varianciáját csökkenti, ha VBW csökken

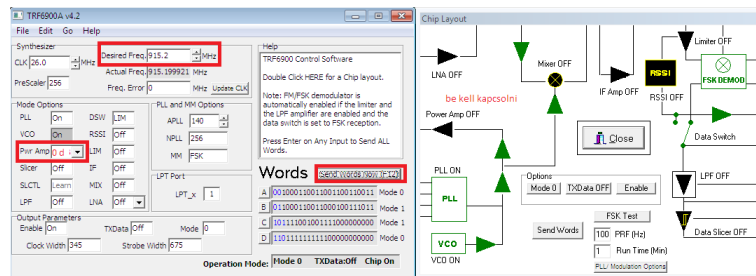
³ SPAN: a vizsgált frekvenciatartomány szélessége – a frekvenciatartomány a középfrekvencia (CENTER) körül, azaz [CENTER +/- SPAN/2]



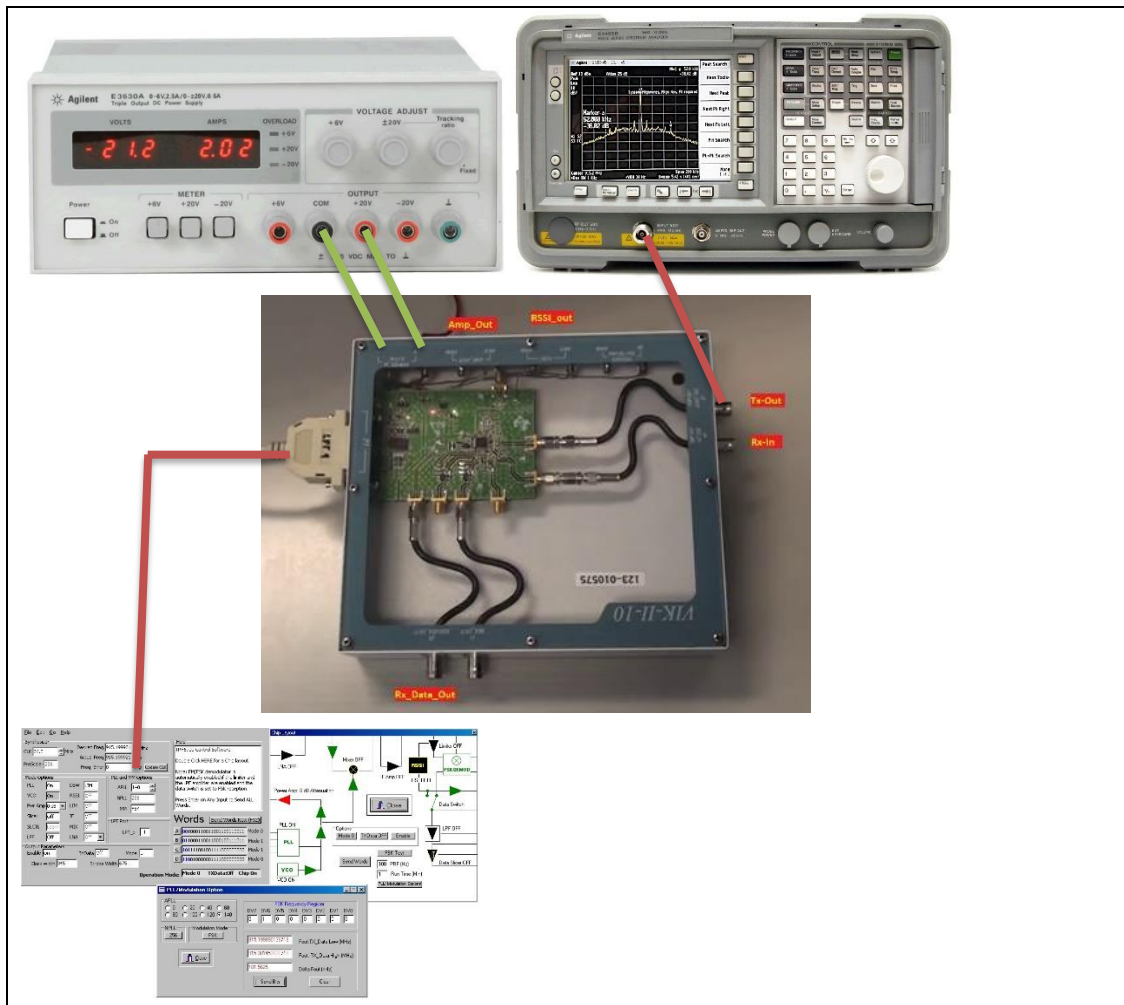
2. Az FSK adatátviteli berendezés adóegységének vizsgálata moduláció nélkül (Videós segítség D., és E.)

Javasolt beállítások a board-on végzett mérések számára:

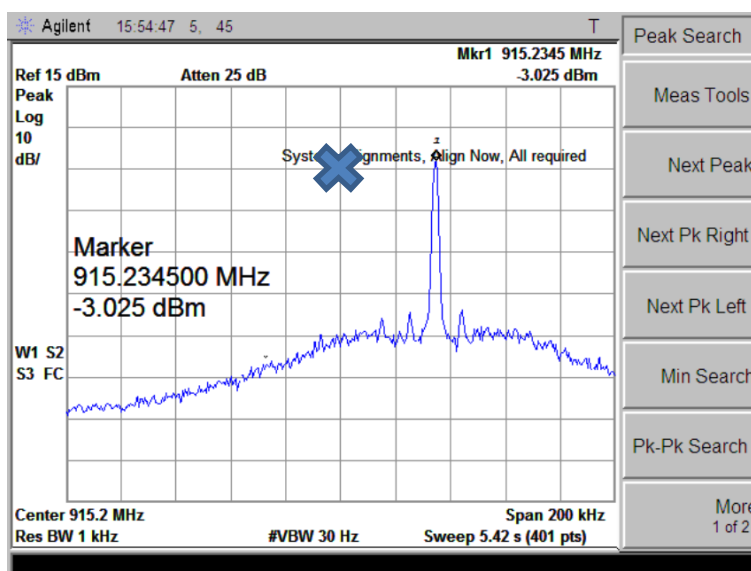
- Tápfeszültség: 8.5 VDC
- Desired frequency = 915.2 MHz
- (beállítani kívánt kimenő frekvencia a a chipen - TRF6900A vezérlő szoftverében *Send Words Now* (F12) gombbal jut érvényre)
- SPAN = 200 kHz
- RBW = 1 kHz
- VBW = 30 Hz



Rajzolja le a blokkdiagramot amely alapján az evaluation board RF adójának a kimeneti jele megmérhető a frekvenciatartományban (használhatja az eszközök fényképeit a dokumentum végéről és a MS-Word beépített rajzolási lehetőségeit)!



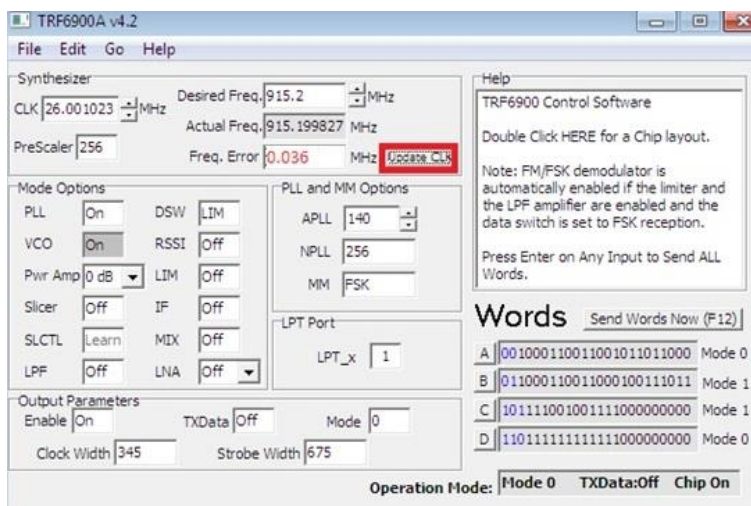
Az evaluation board adójának kimenetét megmérve az alábbi spektrum látható:



- A mérési eredmény alapján adja meg a tényleges kimenő frekvencia értékét!
- Megfelel-e ez az érték az elvártnak?

A tényleges kimenő frekvencia értéke 915.2345 MHz, az elvárt frekvencia 915.2 MHz lett volna, a különbség 34.5 kHz, ami miatt nem felel meg az elvártaknak.

A kezelői program segítségével az órajel frekvenciahibája kompenzálható!

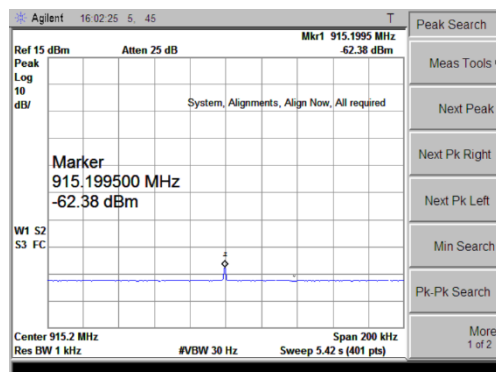


- Mi okozza ezt a frekvenciahibát?
- Jelölje a fenti spektrumon, hogy mekkora frekvencián és milyen jelszinten fog megjelenni a vivő (pl. tegyen egy „x”-et az adott helyre) a frekvenciahiba kompenzálása után!

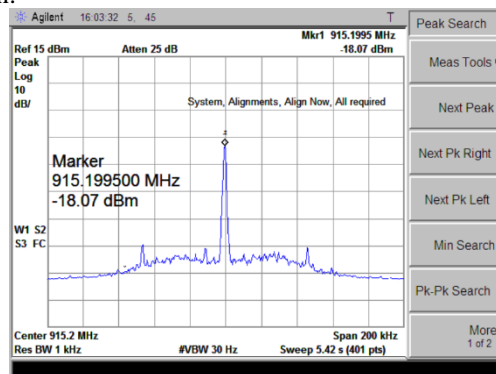
A frekvencia hibát az órajelgenerátor kvarc pontatlansága okozza, a korrigálás után a kívánt helyen (915.2 MHz) lesz a csúcs.

Jegyzőkönyvezzze a kimenő teljesítmény értékét valamennyi Pwr Amp⁴ beállítás mellett a megadott mérési eredmények alapján és határozza meg a valós csillapítások értékét. Ne feledje beírni a mértékegységeket! A táblázatba dolgozzon!

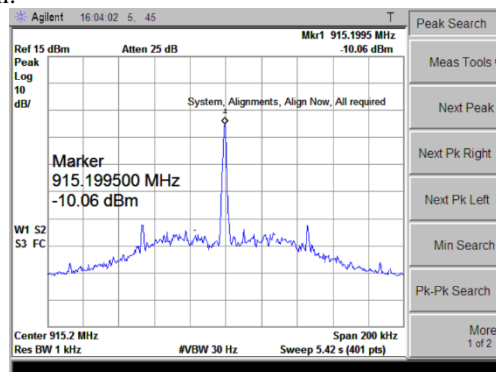
Pwr Amp=Off:



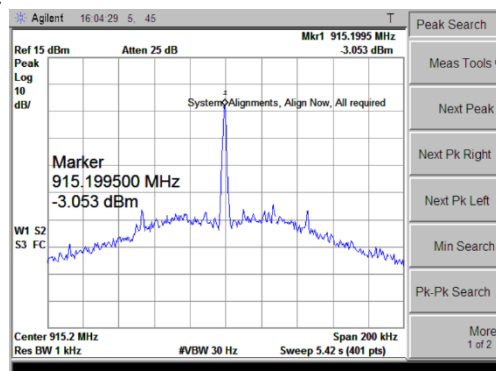
Pwr Amp=20dB attenuation:



Pwr Amp=10dB attenuation:



Pwr Amp=0dB attenuation:

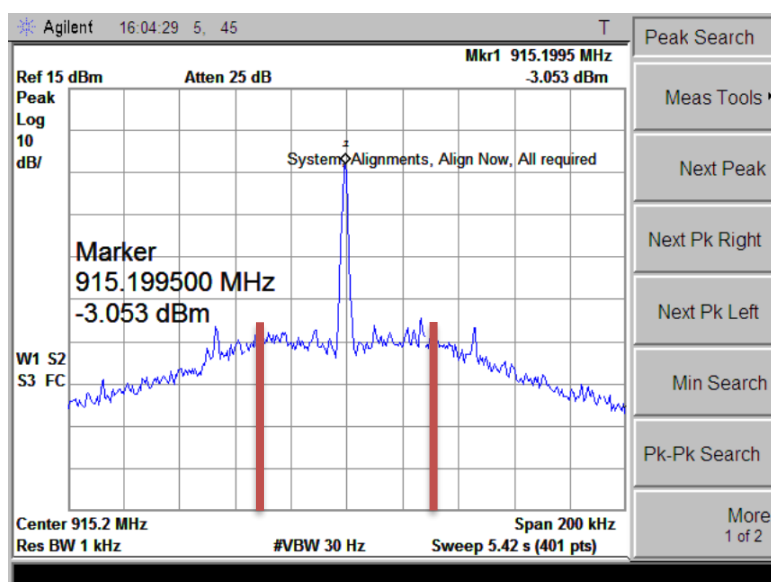


⁴ Pwr Amp gyakorlati használata: a vevő chip visszajelez, hogy túl sok az adóteljesítmény és az adó chip csökkenti azt. Itt vezérelt csillapítások beiktatásával történik a csökkentés.

Pwr Amp beállítása	Mért teljesítmény	Kiszámolt valós csillapítás 0 dB csillapításhoz képest
Off	-62.38 dBm	59.327 dB
20 dB csillapítás	-18.07 dBm	15.017 dB
10 dB csillapítás	-10.06 dBm	7.007 dB
0 dB csillapítás	-3.053 dBm	Ezt vesszük referenciának, azaz itt 0 dB

A mért spektrum alapján becsülje meg és jegyzőkönyvezzé a PLL zárthurkú sávszélességét⁵. Jelölje az alábbi spektrumban a sávszélességet.

(Segítségként a felkészülési anyag 12. oldalát ajánlom figyelembe, miszerint a (915.2 MHz-re állított) lokáloszcillátor zajának „spektrumát általában a lokálfrekvenciától való elhangolás függvényében adjuk meg. A PLL zárthurkú sávszélességének alkalmas megválasztásával optimalizálni lehet a lokálzaj spektrumát. A PLL **zárthurkú huroksávszélességén belül** a lokálzaj **spektruma állandó értékű**, és azt a DDS áramkör N2 arányban felsokszorozott zaja határozza meg. A **zárthurkú sávszélességnél nagyobb elhangolások esetén** a lokálzaj spektruma megegyezik a VCO zajával, azaz az elhangolás függvényében egy **-20 dB/D meredekségű egyenes szerint csökken.**”)



A becsült sávszélességet függőleges, piros vonalakkal jelöltem, értékét ~60kHz-re állapítottam meg (összesen 3 vízszintes osztás, amely 3*20 kHz-et jelent).

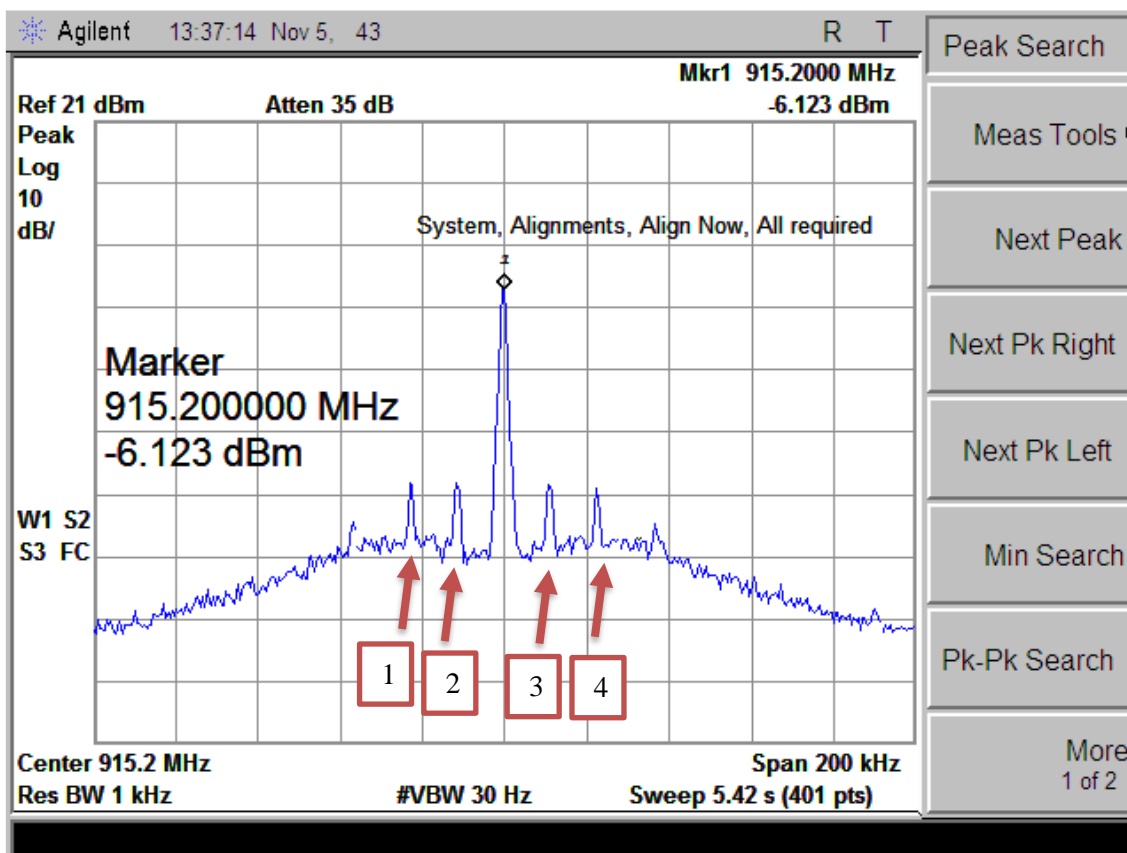
Mérje meg és jegyzőkönyvezzé a kimenő spektrumban fellépő periodikus zavarjelek (spurious signals) vivőtől való frekvencia-távolságát és vivőhöz viszonyított relatív szintjét dBc⁶-ben.

⁵ Sávszűrő jellegű spektrum azonosítása a spektrumanalizátoron.

⁶ dBc: a vivőhöz (carrier, innét a “c” dBc-ben) viszonyítva: $P_{dBc_spuri} = P_{dBm_spuri} - P_{dBm_vivő}$

- Ehhez vegyen fel egy táblázatot és legalább három periódikus zavarjel vivőhöz viszonyított (i) (hózzávetőleges) frekvenciáját, és (ii) (hózzávetőleges) szintjét adja meg dBc-ben alábbi mérési eredmény alapján!
- Jelölje a vizsgált zavarjelet a spektrumképen!

(Emlékeztetőként, a periódikus jelek spektruma vonalas, azaz a mérésben „tűskeként” jelennek meg.)



Zavarjel sorszáma

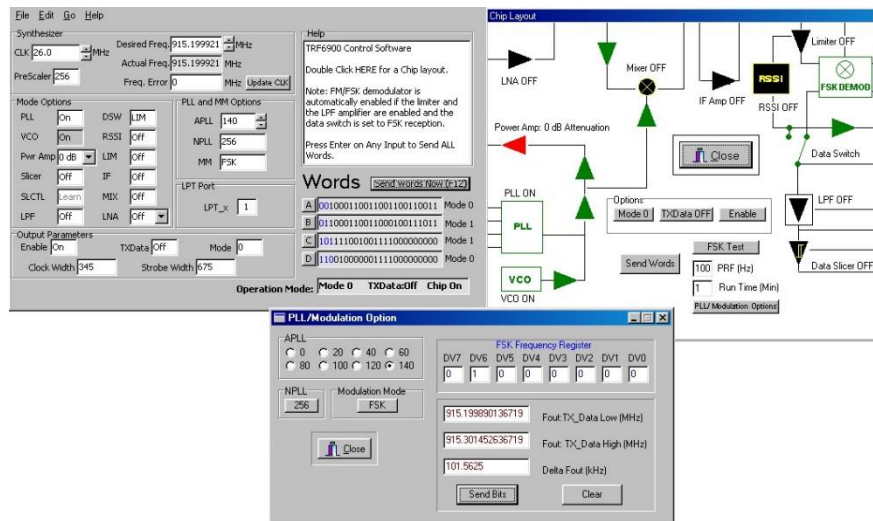
Vivőhöz viszonyított
frekvencia [kHz]

Vivőhöz viszonyított
teljesítmény [dBc]

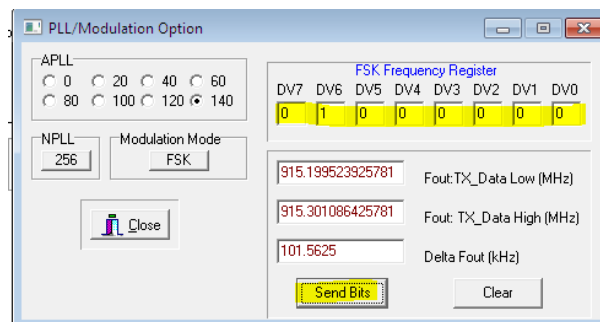
1	-25	-35
2	-12.5	-35
3	12.5	-35
4	25	-35

3. Az FSK adatátviteli berendezés adóegységének vizsgálata nagylökötű FSK moduláció esetén

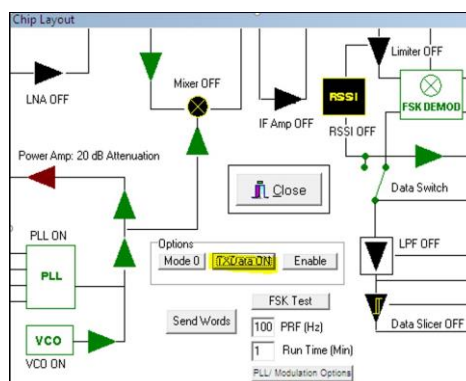
A vezérlő szoftver Help mezőjébe duplrát kattintva felugrik a chip blokkdiagram nézete.



A blokkdiagram ablak PLL/Modulation Options gombjára kattintva indítsa el a PLL/FSK moduláció ablakot, majd abban az alábbiak szerint állítsa be a FSK moduláció löketét meghatározó DEV értéket: DV6=1, a többi bit értéke 0, ami 50kHz löketnek felel meg. Send Bits gombbal kiszámítja a moduláció paramétereit. A bináris FSK jel "0" és "1" bitekhez tartozó kimenő frekvenciáit Tx_Data Low és Tx_Data High, míg a frekvencialöket kétszeresét a Delta Fout adja meg.



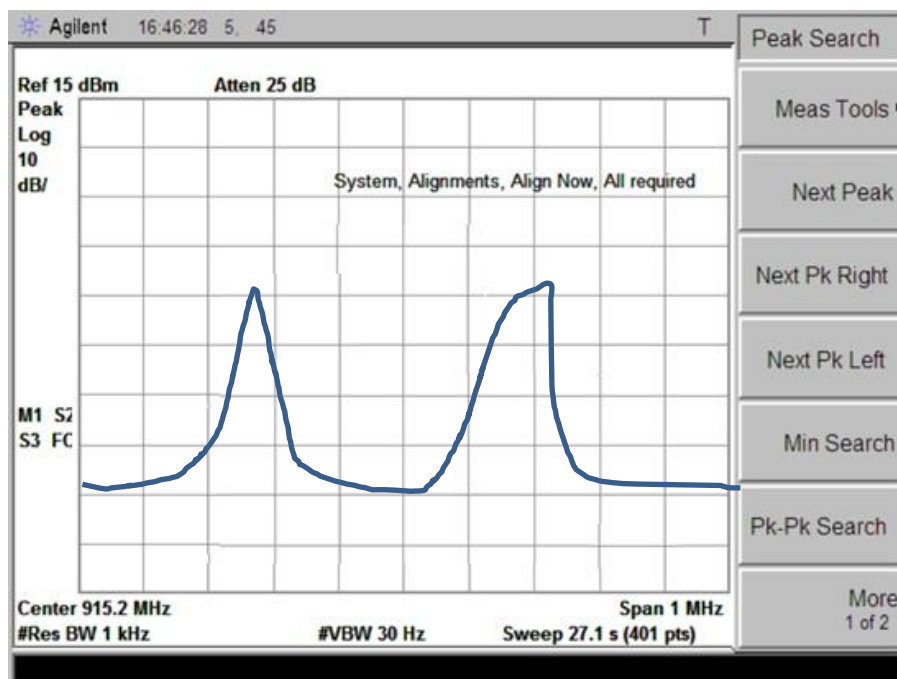
A Vezérlő ablakban a Send Words Now (F12) nyomógombbal léptesse be a beállított frekvencialöket értékét a TRF6900A integrált áramkörbe. A Vezérlő ablakban a TXData bemenetre kattintva statikus üzemmódban a spektrumanalizátor segítségével mérje meg a bináris FSK jel "0" és "1" bitekhez tartozó kimenő frekvenciáit. Javasolt a spektrumanalizátoron a Max Hold funkció használata!



- Javasolt beállítások a spektrumanalizátoron:

- SPAN = 1 MHz
- RBW = 1 kHz
- VBW = 30 Hz

Az alábbi „üres” spektrumkép kiegészítésével és a fenti beállítások alapján,



határozza meg és jegyzőkönyvezzé az alábbiakat:

- jellegre helyesen rajzolja be a fenti beállítások mellett előállított nagylöketű FSK jel spektrumát,
- bináris FSK jel „0” és „1” bitekhez tartozó kimenő frekvenciáit,

A bináris „0”-hoz 915.1998901367179 kHz, az „1”-hez pedig 915.301452636719 kHz-es frekvencia tartozik.

- FSK jel sávszélességét⁷.

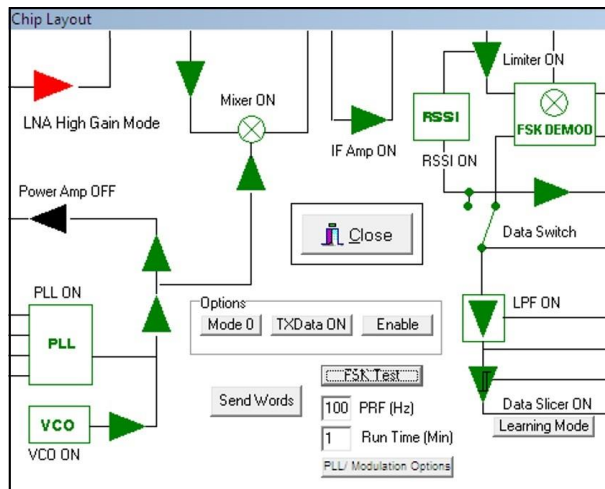
A $\Delta f_{\text{out}} = 101.5625$ kHz a fenti ábrán, ebből a Carson szabályt alkalmazva tudunk sávszélességet számolni:

$$B = 2 * (f_D + f_m) = 2 * \left(\frac{\Delta f_{\text{out}}}{2} + 0.1 \right) = 101.7625 \text{ kHz}$$

⁷ A Carson szabályt nézze meg!

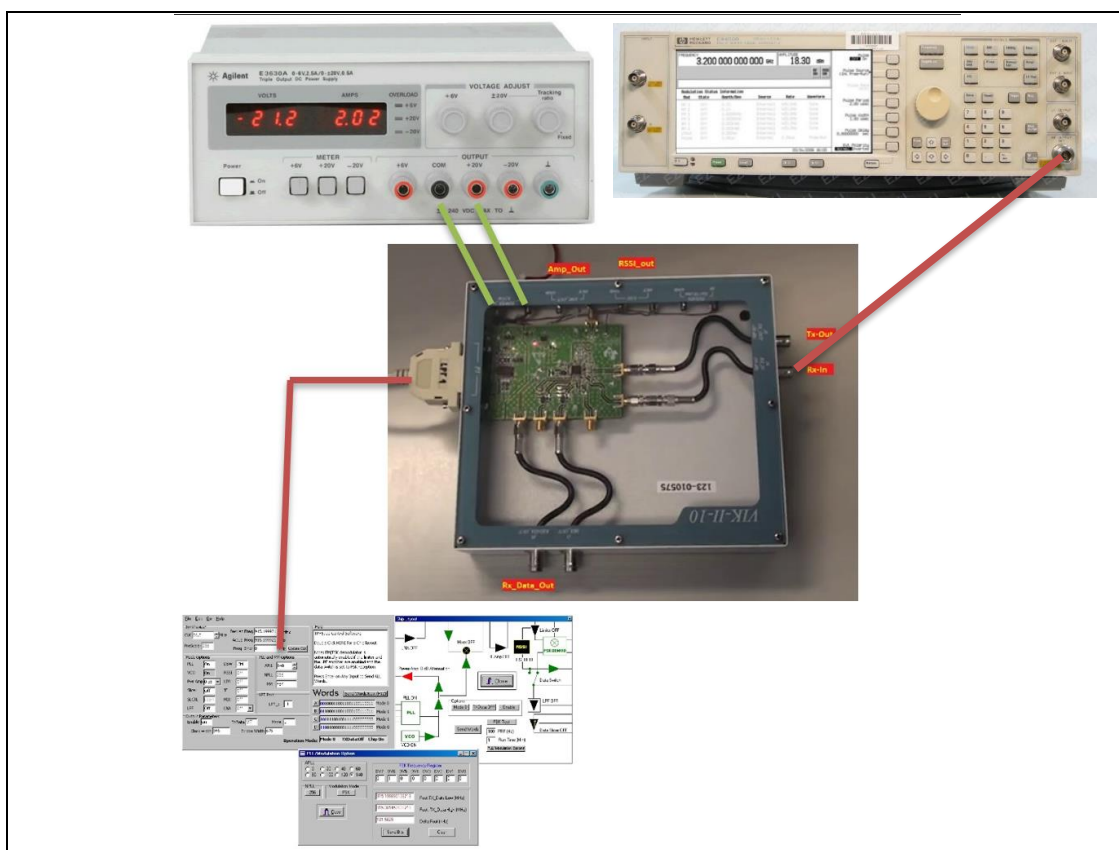
4. Az FSK adatátviteli berendezés vevőegységének vizsgálata

- A vezérlő szoftver blokkdiagram ablakában kapcsolja ki az adót (a PA egységet feketítse be) és kapcsolja be a vevő áramköröit (zöldre kell váltani a fekete blokkokat). A mérések során a kiszajú előerősítő (LNA) nagy (High) erősítésű állásba legyen kapcsolva (élénkpiros szín).



4.1 Az RF jelgenerátor segítségével FSK jelet⁸ állítunk elő, amelyet a TRF board RF vevő bemenetére kapcsolunk.

- Rajzolja le a mérési elrendezés blokkdiagramját! (használhatja az eszközök fényképeit a dokumentum végéről és a MS-Word beépített rajzolási lehetőségeit).



⁸ A jelgenerátor csak FM modulációt tud, de ha a moduláló jel négyzög, az lényegében FSK.

- Javasolt beállítások az RF jelgenerátoron:
 - frekvencia = 915,200 MHz
 - kimenő teljesítmény = -50 dBm
 - belső FSK moduláció (belső FM moduláció négyszögjellel)
 - forrás jelzési sebesség = 20 kbit/s (ezért a beállítandó moduláló frekvencia = 10 kHz)
 - frekvencialököt = 50 kHz

4.2 Számítsa ki és jegyzőkönyvezzé a vevő tényleges bemeneti szintjét a vevő áramkör bemenetén és a 10,7 MHz-es KF frekvenciához tartozó lokálfrekvencia⁹ értékét (ne feledje figyelembe venni a csillapítót a fizikai csatlakozó és az evaluation board között).

(A felkészülési anyag vonatkozó fejezete alapján: „A vevő RX_IN bemenetén egy 30 dB-es, az adó TX_OUT kimenetén egy 20 dB-es csillapító található. A mérési jegyzőkönyvben mindig a TRF6900EVM kártya ki- és bemenő szintjei kerüljenek rögzítésre.”)

Szuperheterodin vevő alkalmazásakor az alábbi összefüggéseket ismerjük:

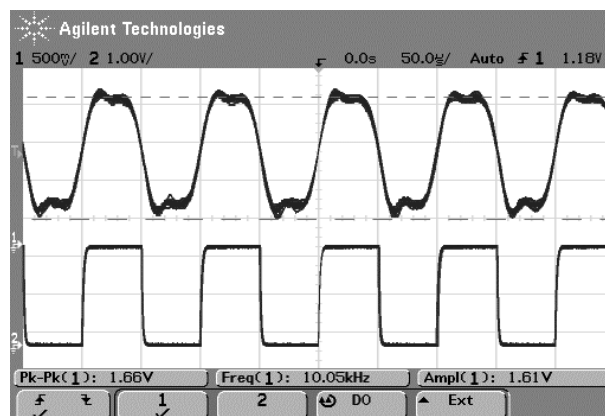
$f_{IF} = |f_{RF} \pm f_{LO}|$, ahol f_{IF} a középfrekvencia, f_{RF} a bemeneti frekvencia és f_{LO} a lokálfrekvencia. Vevő esetén a $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ frekvenciát nyomjuk el, ebből kiszámítható f_{LO} értéke:

$$f_{LO} = f_{RF} - f_{IF} = 915.2 \text{ MHz} - 10.7 \text{ MHz} = \mathbf{904.5 \text{ MHz}}$$

A jel a kimeneti teljesítmény és a kimeneti csillapító után -80 dBm teljesítménye.

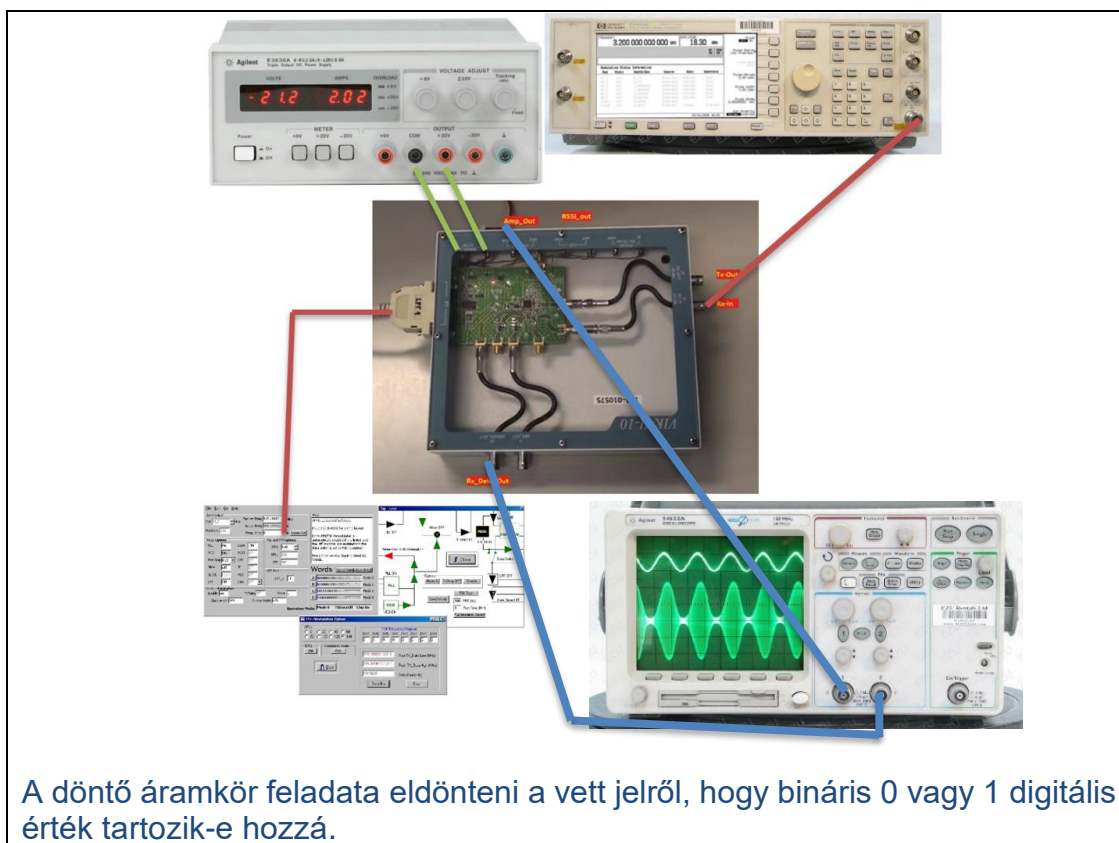
4.3 Rajzolja le a blokkdiagramot, amely alapján FSK modulált jelet adva a vevő bemenetére a demodulált jelet a döntő áramkör (Data slicer elnevezéssel a SW blokkdiagramján) be- (Amp_out) és kimenetén (Rx data_out) meg lehet jelteni az időtartományban.

Az időtartománybeli mérés eredménye:



- Melyik jel jelenik meg a döntő áramkör bemenetén és melyik a kimenetén (csatornaszámmal azonosítsa)? (használhatja az eszközök fényképeit a dokumentum végéről és a MS-Word beépített rajzolási lehetőségeit)
- Mi a döntő áramkör feladat?

⁹ Szuperheterodin vevővel van dolgunk, azaz van középfrekvenciás (KF) fokozata, itt 10,7MHz-en. Működése: a keverő szorozza a bejövő RF jelet és a lokáloszcillátor jelét, azaz felhasználható, hogy $2 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) = \cos(x+y) + \cos(x-y)$, amiből a nagyfrekvenciás komponenst elnyomó aluláteresztő szűrés után csak a különbségi frekvencia marad, tehát $(x-y)=10,7\text{MHz}$.

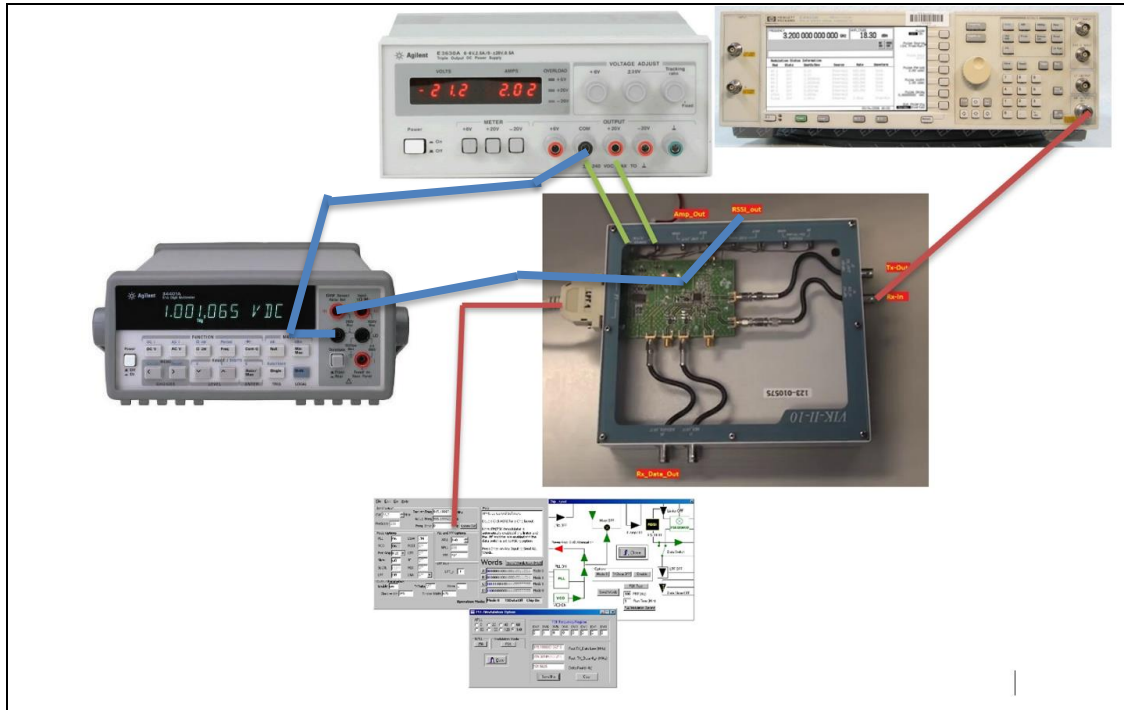


A döntő áramkör feladata eldönteni a vett jelről, hogy bináris 0 vagy 1 digitális érték tartozik-e hozzá.

4.4 Kapcsolja ki az FSK modulációt majd mérje meg és jegyzőkönyvezzé -40 dBm és -70 dBm bemenő szintekhez tartozó RSSI feszültség értékét és az RSSI karakteristika meredekségét.

- Rajzolja fel a blokkdiagramot, amely alapján a mérés elvégezhető!
- Mire szolgál az RSSI blokk?
- Adja meg az RSSI karakteristika meredekségét, ha az alábbi mérési eredményekkel rendelkezünk:

P _{in} [dBm]	V _{RSSI} [VDC]
-40	1.265
-50	1.083
-60	0.908
-70	0.780

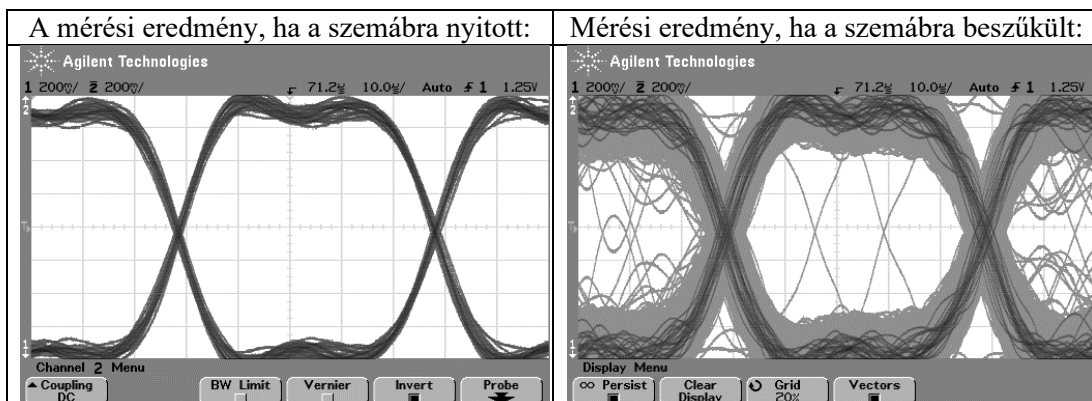


Az RSSI blokk egy egyenfeszültséget állít elő a bementre érkezett vett jelből, annak teljesítménye alapján.

A karakterisztika meredeksége az alábbi képlettel számolható ki:

$$m = \frac{V_{RSSI_{kezdeti}} - V_{RSSI_{vég}}}{P_{IN_{kezdeti}} - P_{IN_{vég}}} = \frac{1.265 - 0.780}{(-40) - (-70)} = 0.0162 \left[\frac{V}{dBm} \right]$$

4.5 Vizsgáljon meg egy szemábra jellegű hullámformát (az oszcilloszkóp segítségével állítható elő, alkalmazva mindkét csatornát és az egyik csatornán az invertálást). Az Amp_Out kimenet jele az alkalmazandó jel. Csökkentse az RF jel szintjét, amíg a „szemábra” zajosodni nem kezd (beszűkül a szemábra).



- Magyarázza el, hogy a vevő működése szempontjából milyen következménye van a nyitott és beszűkült szemábrának?

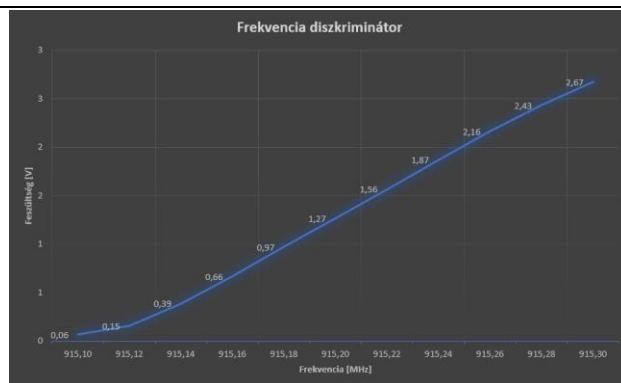
A nyitott szemábra esetén a digitális, bináris értékek könnyedén és egyértelműen elkülöníthetőek, míg beszűkült szemábra esetén a döntés sokkal nehezebb, a hibaarány sokkal magasabb lehet a döntő áramkör kimenetén.

Az RF jelgenerátorból -35 dBm szintű, modulálatlan RF jelet a vevő bemenetére csatolva felvehető a frekvenciadiszkriminátor karakterisztikája. A megadott mérési eredmények alapján a jegyzőkönyvben ábrázolja a frekvenciadiszkriminátor karakterisztikáját a vett RF jel frekvenciája körüli ± 100 kHz-es frekvenciatartományban 20 kHz-es lépésközzel¹⁰.

- Számolja ki és jegyezze fel a frekvenciadiszkriminátor meredekségét.

Frekvencia [MHz]	DC fesz. [V]
915.10	0.063
915.12	0.153
915.14	0.385
915.16	0.664
915.18	0.968
915.20	1.265
915.22	1.564
915.24	1.870
915.26	2.162
915.28	2.431
915.30	2.672

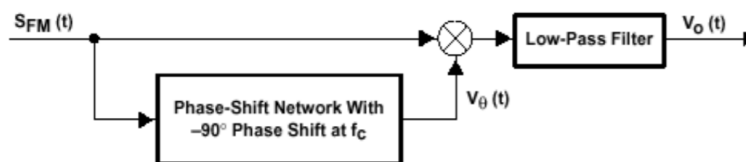
- Ismertesse lényegretörően a frekvenciadiszkriminátor működését!



A karakterisztika meredeksége az alábbi képlettel számolható ki:

$$m = \frac{V_{kezdeti} - V_{vég}}{f_{kezdeti} - f_{vég}} = \frac{2.672 - 0.063}{915.30 - 915.10} = 13.045 \left[\frac{V}{MHz} \right]$$

A frekvenciadiszkriminátor lehetővé teszi digitális FSK és analóg FM jelek vételét. Blokkvázlata:



A frekvenciamodulált jel (S_{FM}) egy RLC rezgőkörre jut, mely -90° -s fázistolást hajt végre rajta, majd egy szorzó segítségével összeszorozza a nem eltoltt jellel, végül egy alul-áteresztő szűrőre jut. A szorzó és a szűrő egy kvadratúra demodulátort alkot együtt, amely kimenetén 0V lesz, ha a bemeneti (S_{FM}) és a fázistoltt jelek kvadratúrában vannak egymással.

¹⁰ A vezérlő programban “Hold” állásba kell állítani a frekvencia-diszkriminátort. (“Learn” állásban képes kompenzálni a frekvenciahibát egy adott tartományon belül, így a mérésnek nem lenne értelme.)