



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Műholdfedélzeti szélessávú spektrumanalizátor fejlesztése

TDK dolgozat

Készítette:

Nagy Dominik Gábor

Konzulens:

dr. Dudás Levente

2021

Tartalomjegyzék

Kivonat

Abstract

1. Bevezetés	1
1.1. Előző spektrumanalizátor	1
1.2. Motiváció	2
2. Követelmények	3
2.1. Szélsőséges környezet	3
2.2. Működési elv	3
2.3. Frekvencia transzponálás	4
2.4. Frekvencia terv	5
2.5. Blokkvázlat	7
2.6. Hideg tartalék	8
3. Részegységek megtervezése	9
3.1. Szűrők	9
3.2. Követőerősítő működése	11
3.3. Erősítők	11
3.4. Keverő	12
3.5. Frekvencia háromszorozó	12
3.6. Rádiós IC	14
3.7. Mikrokontroller	14
3.8. Hőmérséklet kompenzált kristály oszcillátor	15
4. Építés és mérés	16
4.1. Szűrők	16
4.1.1. PI tagok	16
4.1.2. KF szűrő	17
4.2. JFET átvitele	18
4.3. Erősítők	19
4.4. Keverő	20
4.5. Frekvencia háromszorozó	20
4.6. Frekvencia háromszorozó és keverő együtt	22
4.7. Fogyasztások	24
5. Prototípus panel	25
5.1. A panel NYÁK terve	25
5.2. A panel 3D modellje	27

6. Továbbiak	28
Irodalomjegyzék	29
Függelék	31
F.1. KF szűrő szimulációja	31
F.2. RF szűrők szimulációja	33
F.3. A keverőhöz tartozó mérések	35
F.4. A frekvencia háromszorozóhoz tartozó mérések	38

Kivonat

Korábbi űrmissziók során, a SMOG-P és ATL-1 projektek keretében, készültek mérések a Földet körülvevő rádiófrekvenciás szennyezettségről, illetve a jelenleg is üzemelő SMOG-1 által történnek mérések mind a mai napig. Ezen műholdak fedélzetén egy-egy spektrumanalizátor kapott helyet, amely a földfelszíni digitális műsorszórók sávját monitorozta, alacsony Föld körüli pályán. Pontosabban 460MHz és 860MHz közötti frekvenciákon méri az űrbe kijutó rádiófrekvenciás jelek erősségét. Dolgozatomban egy új, szélesebb spektrumot lefedő mérőrendszert mutatok be. Ez a spektrumanalizátor 30MHz-től egészen 2500MHz-ig képes vizsgálni a rádiófrekvenciás jelek erősségét. Ebbe beletartoznak televíziós és rádiós műsorszórók, vezeték nélküli rendszerek frekvenciái, telekommunikációs és rádióamatőrök által használt frekvenciák. Ezen eszközök fedőtérerősséget hozhatnak létre, ezzel akadályozva a műholdakkal való kommunikációt, így jóval nagyobb teljesítmény szükséges adó oldalon a műholdakkal való stabil kommunikációhoz. A fent bemutatott új spektrumanalizátor egy 3PQ méretű (5cm x 5cm x 15cm) műhold fedélzetére készül.

Abstract

In previous space missions, smog-p and ATL-1 projects have produced measurements of radiofrequency pollution surrounding the Earth. The measurements of smog-1 are still being made to this day. Onboard each of these satellites is a spectrum analyzer that monitors the band of terrestrial digital broadcasters in a low orbit. Specifically, it measures the intensity of radiofrequency signals entering space at frequencies between 460MHz and 860MHz. In my thesis, I present a new measuring system covering a wider spectrum. This new spectrum analyzer is capable of examining the strength of radio frequency signals in a much wider band, from 30Mhz to 2500 Mhz. This includes television and radio broadcasters, ham frequencies, frequencies used by wireless data transmission systems, or even telecommunications equipment. These devices can create a frontal field strength, thus hindering communication with satellites, which requires much more power on the transmitter side for stable communication with satellites. The new spectrum analyzer shown above is designed to board a 3PQ (5cm x 5cm x 15cm) satellite.

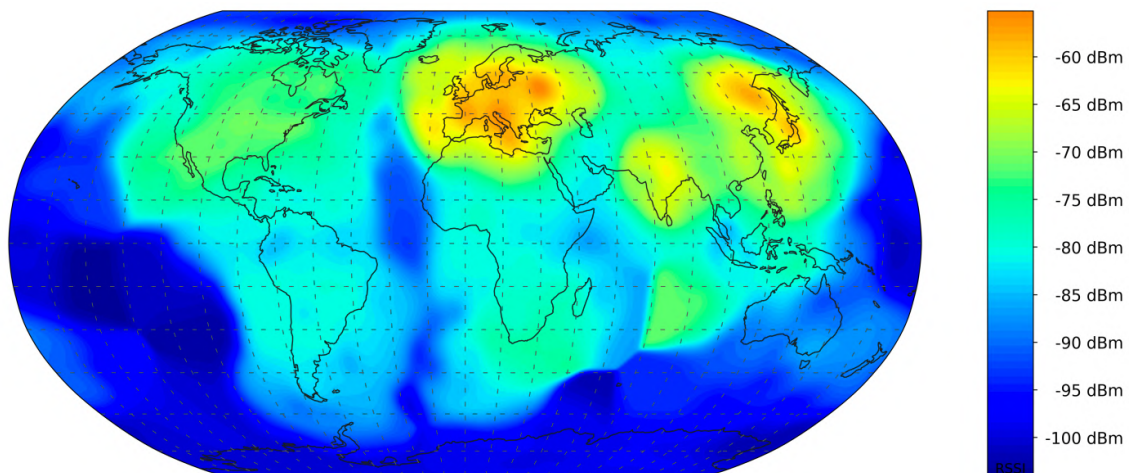
1. fejezet

Bevezetés

1.1. Előző spektrumanalizátor

Korábban a SMOG-1 és SMOG-P 1PQ¹ méretű, illetve az ATL-1 2PQ méretű zsebműholdak[14] fedélzetén kaptak már helyet mérőrendszerek, amik a digitális földfelszíni műsorszórók által használt frekvenciasávban, pontosabban 460-860MHz között mérték a Földet körülvevő rádiófrekvenciás szennyezettséget[8], amiből el is készült egy egész bolygót lefedő szennyezettségi térkép. Ez látható a 1.1 ábrán [4]. Mindhárom műhold alacsony Föld körüli poláris napszinkron pályára állt. A SMOG-P és ATL-1 műholdak 298 és 310 nap után működő állapotban zuhantak vissza és égtek el a légkörben. A SMOG-1 jelenleg is üzemel és szolgáltatja a mérési adatokat.

A térképről leolvasható jól látszik, hogy igen jelentős mértékben jutnak ki az űrbe elektromágneses jelek, amik fedőtérerősséget hozhatnak létre, ezzel esetleg akadályozva egy műholdas összeköttetést. Ezért a stabil műholdvezérléshez nem elegendő néhány Watt teljesítménnyel adni, hanem több nagyságrenddel is emelni kell az adóteljesítményt[22]. Ezentúl energiapazarlás is, hiszen a cél az, hogy a felhasználókhoz jussanak el a televíziós adók jelei, ne a világűrbe.



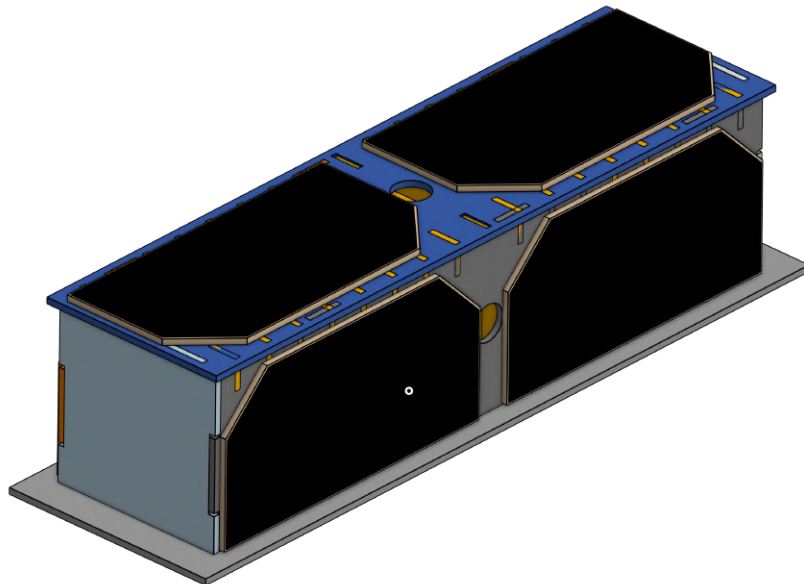
1.1. ábra. Szennyezettségi térkép

¹PocketQube, 1PQ=50x50x50mm kocka, amelynek tömege nem haladhatja meg a 250g-ot

1.2. Motiváció

Az előző missziók sikerén felbuzdulva, érdemes lehetne megvizsgálni, hogy mik tapasztalhatók egyéb frekvenciákon. A tervezendő spektrummonitorozó rendszer 30MHz-től 2500MHz-ig fogja vizsgálni az űrbe kisugárzott rádiófrekvenciás jeleket. Ez nagyjából lefedi a telekommunikáció, a televíziós és rádiós műsorszóró, a helymeghatározáshoz kapcsolódó, a rádióamatőr és egyéb más rádiófrekvencián kommunikáló berendezés által használt spektrumot. Így képet kaphatunk arról, hogy mennyi felesleges energiát sugárzunk ki a Földről, ami minőségibb antennákkal és azok helyes beállításával csökkenthető lenne.

A fejlesztés alatt álló következő magyar műhold neve MRC100. Ez a Műegyetemi Rádió Club alapításának állít emléket, ami 2022-ben, azaz a felbocsátás évében lesz 100 éves. A műhold mérete 3PQ, azaz 50x50x150mm, ami a SMOG-1 térfogatának háromszorosa.



1.2. ábra. MRC-100 3D modellje[16]

2. fejezet

Követelmények

2.1. Szélsőséges környezet

Az ilyen kis műholdak hőkapacitása igen kicsi, emiatt Földárnnyékban hamar kihűlnek a napos oldalon viszont hirtelen felmelegsznek. Így a fedélzeti elektronikának igen jelentős hőmérséklet különbségeknek kell ellenállni. Ezért olyan áramkörü elemek lettek kiválasztva amelyek képesek üzemelni -40°C és $+80^{\circ}\text{C}$ között is. Ezen kívül a műhold vákuumban fog keringeni, így a nagyobb teljesítményű elemek, amelyek jelentősebb hőt disszipálnak, nem képesek hűtadással hűlni, hiszen a levegő, mint közeg nincs jelen. A hő csak sugárzás és vezetés útján tud távozni [24], ezért nagy hangsúlyt kell fektetni arra, hogy a lehető legkisebb legyen a rendszerek fogyasztása, hiszen a túlzott melegedés az elemek károsodásához vezetne.

Egy másik káros hatás a sugárzás. A nagy energiájú ionizáló részecskék a félvezető eszközök rácsszerkezetét károsíthatják, megnövelve például a bipoláris eszközök szivárgási áramát vagy éppen csökkentve az erősítésüket. A MOS tranzisztorok esetében pedig eltolódhat a küszöb feszültség, a CMOS eszközökben pedig úgynevezett latch-up jelenség alakulhat ki[2]. Egy két FET-ből álló CMOS kapcsolásban egyszerre mindig csak az egyik tranzisztor van nyitva, viszont ha egy kellően nagy energiájú részecske ütközve az zárt FET belső rácsszerkezetével, ki tudja nyitni FET-et, így ott tápzárlat áll elő, ami túlhevülést és átégést okozhat.

2.2. Működési elv

A műhold fedélzetén a szabályzott busz feszültsége $3,3\text{V}$. A spektrumanalizátor maximális áramfelvétele 150mA -re van korlátozva, a 2.1 alpontban leírtak miatt. Így az a maximális teljesítmény amivel gazdálkodhatok $P = UI = 3,3\text{V} \cdot 150\text{mA} = 0,495\text{W}$, ez a tizede egy átlagos telefontöltő teljesítményének. Ebbe bele kell férni két széles sávban használt erősítésű blokknak, egy követőerősítő fokozatnak, a rádiós vevő IC-nek, a mikrokontrollernek, a frekvenciaháromszorozó egységnek és a keverőnek.

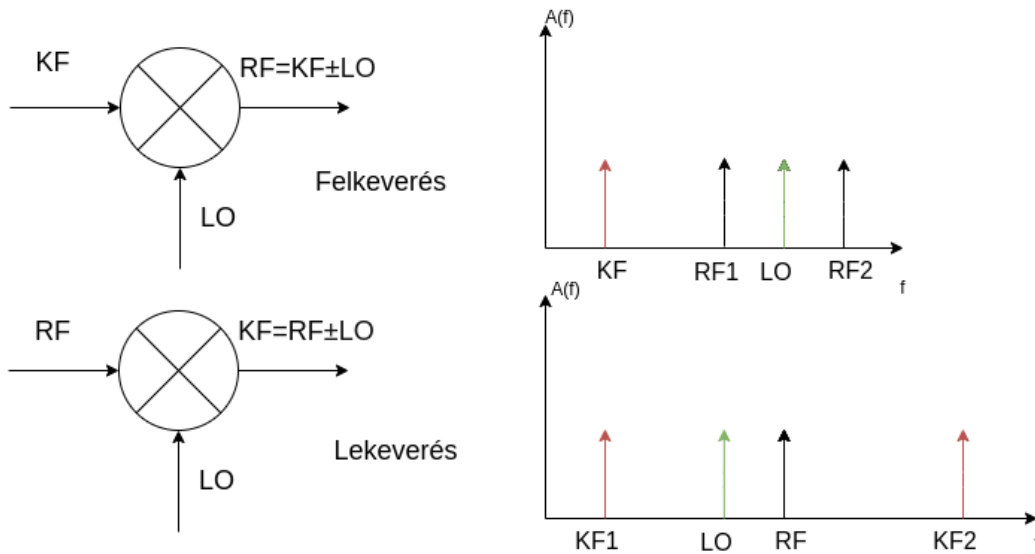
A választott rádió chip egy si4464[21] típusú adó-vevő. Ez már többször bizonyított úrmisziók során, így ennél az alkalmazásnál is rá esett a választás. Ennek a működési frekvenciája 119MHz -től 960MHz -ig terjed, a vizsgálandó vételi frekvenciatartomány viszont 30MHz és 2500MHz közötti. Ez háromszor nagyobb, mint amekkorát a vevő át tudna fogni, ezért a kilógó sávokat be kell transzponálni 119MHz és 960MHz közé. Ez a szuperheterodin vevők működése alapján valósul meg, amiről a 2.3 alpontban lesz szó. Miután megtörtén a transzponálás, és a vevő képes mérni az előírt frekvencián jelentkező elektromágnes sugárzást, adott frekvencialépésekkel végiglépked az egész tartományon, és

a bemenetére érkező jel RSSI¹ értékét rögzíti, majd tovább küldi a mikrokontrollernek SPI² interfészen, az pedig továbbítja az OBC-nek³. Amikor pedig a Földi állomás felett elhalad a műhold, lesugározza a mért adatokat, alapanyagul szolgálva egy következő, szélesebb frekvenciatartományt lefedő szennyezettségi térképnek.

2.3. Frekvencia transzponálás

Amikor a számunkra szükséges jelet egy másik hordozófrekvenciára szeretnénk transzponálni, egy úgynevezett keverő áramkörre van szükségünk. A keverőáramkörök működésének alapja, a nemlinearitásuk kihasználása[6]. A keverő kimenetén lévő jel spektrumában megjelenik a bemeneteire jutó jelek frekvenciáinak összege és különbsége. Ezt írja le az alábbi trigonometrikus összefüggés is, illetve ez látható a 2.1. ábrán. A keverőnek három kapuja van, RF - Rádió frekvencia, KF - Közép frekvencia, LO - Lokáloszcillátor. Ha KF-ről transzponálunk RF-re, akkor felkeverésről, ha fordítva akkor lekeverésről beszélünk. Azt, hogy milyen frekvenciára szeretnénk keverni a középfrekvenciás jelünket, a hangolható oszcillátor frekvenciájának változtatásával érjük el. A keletkezett spektrumból a nekünk hasznos komponenst szűréssel tudjuk megkapni.

$$\cos(x)\cos(y) = \frac{1}{2}(\cos(x - y) + \cos(x + y)) \quad (2.1)$$



2.1. ábra. Keverő működése

A keverő valamilyen nemlineáris elemből épül fel (pl: dióda, tranzisztor). Megkülönböztethetjük őket a kiegyenlítetttségük alapján is[3]. Vannak a kiegyenlítettlen keverők, egyszeresen, kétszeresen és háromszorosan kiegyenlített keverők. Ezek arra utalnak, hogy a kimenetre milyen mértékben szivárog a bemeneti jelekből. A kiegyenlítettlennél mindkét bemeneti frekvencia megjelenik a kimeneten, a kétszeresen

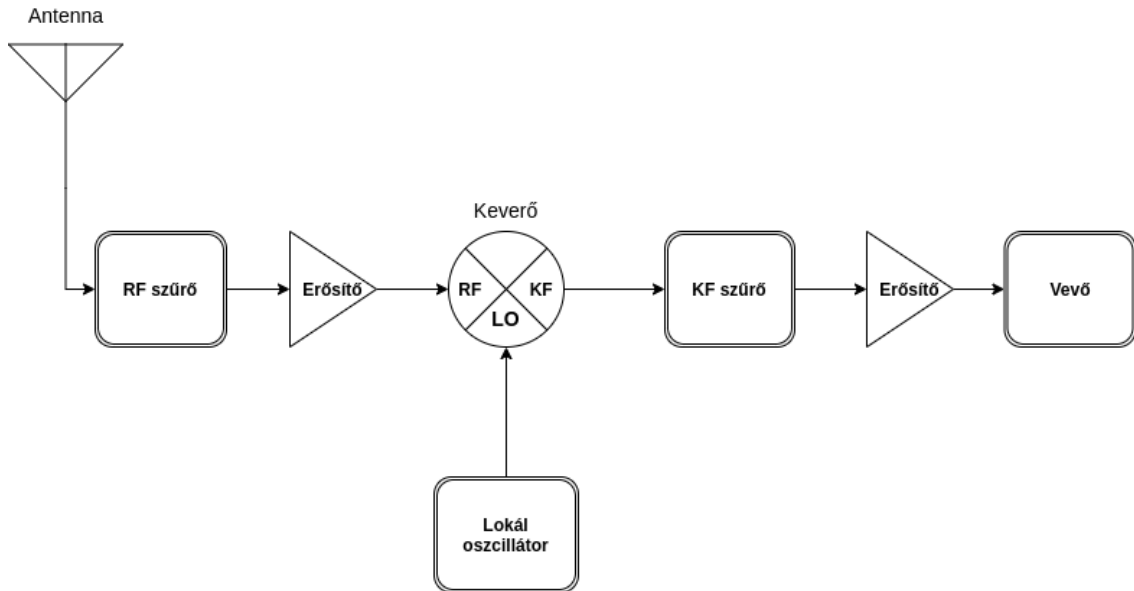
¹Received Signal Strength Indication - Vett Jelerősség Jelző

²Serial Peripheral Interface - Szinkron soros interfész

³On-Board Computer - Fedélzeti számítógép

kiegyenlített keverőnél már mindkét bemenet izolált, azaz nem jutnak a kimenetre. A háromszorosan kiegyenlített két darab kétszeresen kiegyenlített keverőből áll.

Ahogy a 2.2. alpontban említettem, a rendszer a szuperheterodin vevők elvén működik. A rádiós műsorszórásnál az egyszerűbb átvitel érdekében a hangfrekvenciás jelet (KF jel) felkeverik rádiófrekvenciára (RF jel) majd kisugározzák. A vevőkészülék ezután ugyanazzal a LO frekvenciával visszakever hangfrekvenciára és visszakapva az eredeti jelet. A szuperheterodin vevő blokkvázlata a 2.2. ábrán látható.



2.2. ábra. Keverő működése

Az antennáról bejövő jelek szűrés és erősítés után a keverő egyik bemenetére kerülnek, a másik bemenetre a lokáloszcillátor csatlakozik. A keverő kimenetén pedig megjelenik a két jel szorzata, ami egy RF-LO és egy RF+LO frekvenciájú komponenset tartalmaz. A cél az volt, hogy a nagyfrekvenciás vett jelet lekeverjük kisebb frekvenciára, úgyhogy az összefrekvenciás komponensre nincs szükségünk, ezért azt a KF szűrővel kiszűrjük: Ezután egy erősítő blokkot követően érkezik a vevőbe az immár lekevert jel. Tehát ha egy 2000MHz-es jel érkezik az antennáról és 1500MHz-el keverjük, akkor a keverő kimenetén megjelenik egy 500MHz-es és egy 3500MHz-es összetevő, amiből KF szűrőnkkel ki tudjuk szűrni a nekünk megfelelő alacsonyabb frekvenciájú komponenset. Így képesek vagyunk venni olyan frekvenciákat is, amik adott esetben nem esnek bele a vevőnk működési frekvenciasávjába.

Gondot jelentenek azonban az úgynevezett tükörfrekvenciás komponensek. Ugyanis nem csak a 2000MHz-es jelet fogjuk tudni 500MHz-re keverni, hanem az 1000MHz-est is. Hiszen ilyenkor a különbségi frekvencia -500MHz lenne, de mivel valós jelekről van szó, az amplitúdó spektrum szimmetrikus a pozitív és negatív frekvenciákra, ezért a -500MHz-es komponens +500MHz-en is megjelenik. Tehát ha mérnénk egy adott jelszintet 500MHz-en, akkor nem lehetne eldönteni, hogy az eredetileg az 1000MHz-hez vagy a 2000MHz-hez tartozott-e. Ezért ezeket a tükörfrekvenciás komponenseket még az RF szűrővel ki kell szűrni, hogy a keverés során ne okozzanak gondot.[11]

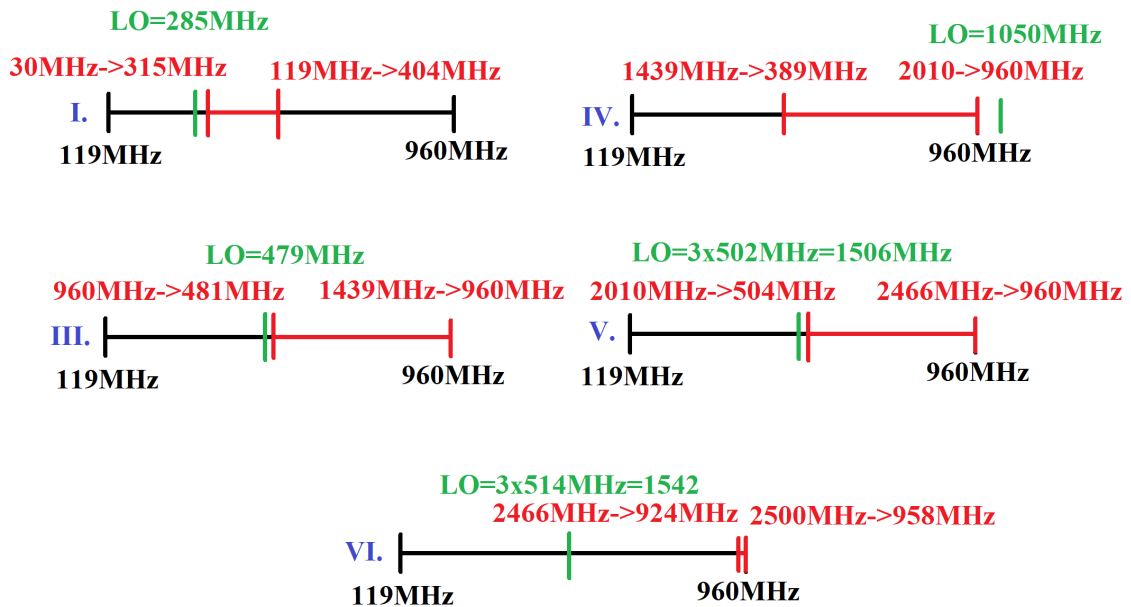
2.4. Frekvencia terv

Hangolható lokáloszcillátorként szintézert[10] használni lenne a legkézenfekvőbb, ám ezek nem felelnek meg a maximális fogyasztásra előírt kritériumnak. A használt si1060-as[20]

mikrokontroller rendelkezik beépített rádiós modullal, így ennek a kimenetét használom lokáloszcillátorként. Azonban csak bizonyos diszkrét frekvencia sávokban képes működni.

- 142-175MHz
- 283-350MHz
- 425-525MHz
- 850-960MHz
- 960-1050MHz

Az RF szűrő nem egy darab hangolható, hanem több fix szűrőből áll össze. A teljes 2470MHz széles spektrumot fel kellett darabolnom úgy, hogy le lehessen keverni az si4464 működési sávjába, de arra is kellett figyelni, hogy a keverő jel frekvenciája ne essen bele a lekevert sávba, hiszen ekkor a vevő hamisan belemérné a hasznos jelbe. Például ha $LO=500MHz$ és 800-1200MHz-es sávot szeretnénk lekeverni, akkor ez a keverés után 300-700MHz közé esne. Amikor pedig végigmérnénk a jelszinteket ezen a lekevert tartományon, elérve az 500MHz-hez egy kiugróan magas jelszintet mérnénk, ami a valóságban nem is lenne ott, csak a lokáloszcillátort mértük bele, hiszen pár centivel arrébb a keverőtől, ontja magából a vett jelhez képest nagy jelszinttel a keverő jelet. Az alábbi sávokra osztottam fel a spektrumot, amikhez a megfelelő LO frekvenciákat határoztam meg, figyelembe véve, hogy az si1060 milyen frekvenciákon képes adni.



2.3. ábra. Frekvencia terv

Minden sávhoz tartozik egy-egy szűrő, ami a tükörfrekvenciás komponenseket elnyomja, kivéve a 2. sávot, mert az közvetlenül, keverés nélkül csatlakozik a KF szűrőre, hiszen ezt egy az egyben képes venni az si4464.

A legfelső két sáv keveréséhez 1506- és 1542MHz-re van szükség, ám ekkora frekvencián az si1060 rádiós modulja nem képes adni, ezért egy frekvencia háromszorozó kapcsolás segítségével állítom elő a keveréshez szükséges jelet.

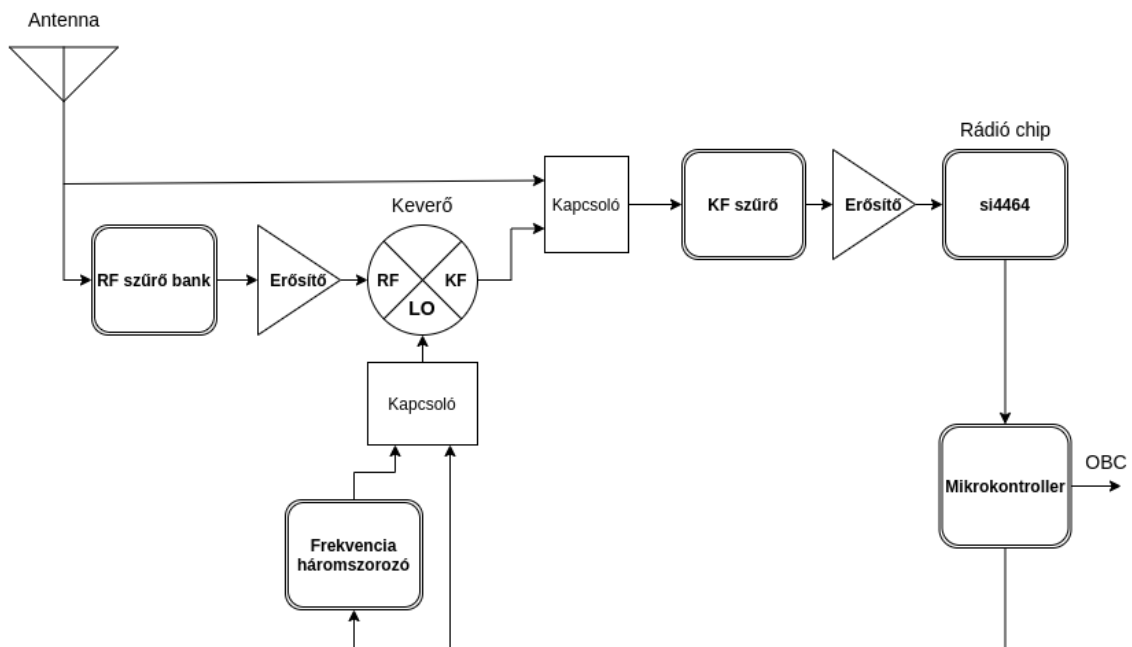
Sorszám	Frekvenciasáv	Tükörfrekvenciák
I.	30MHz-119MHz	600MHz-689MHz
II.	119MHz-960MHz	-
III.	960MHz-1439MHz	2MHz-481MHz
IV.	1439MHz-2010MHz	90MHz-661MHz
V.	2010MHz-2466MHz	546MHz-1002MHz
VI.	2466MHz-2500MHz	584MHz-618MHz

2.1. táblázat. Az egyes tartományok sávszélessége és a tükörfrekvenciák

2.5. Blokkvázlat

A frekvenciaterv alapján felosztott sávok közül, az éppen venni kívántat, RF kapcsolókkal választhatjuk ki, amiket a rádiós IC és a mikrokontroller GPIO⁴ lábairól vezérelhetünk, illetve kiválaszthatjuk, hogy szükségünk van-e a frekvenciaháromszorozóra vagy közvetlenül a mikrokontrollerről hajtjuk meg a keverőt.

A műholdra kerülő huzalantenna, a műhold méretéből adódóan, párszor 100mm lehet maximum. A lefedendő frekvenciatartomány túl nagy ahhoz, hogy az antenna kellően illesztett legyen az egész sávban, ezért a frekvencia függvényében igen eltérő viselkedést fog mutatni[19] mind az irányhatása, mind az impedanciája. Például 30MHz-hez 10m-es hullámhossz tartozik, ami azt jelenti, hogy egy rezonáns $\lambda/4$ -es monopól antenna hosszának 2,5m-nek kellene lenni, viszont ehhez képest a műholdra ennek közel csak a tizede fog kerülni. Ez azt jelenti, hogy ezen a frekvencián igen jelentős kapacitív reaktanciát fog mutatni az antenna[7]. Az erősítők bemenetei viszont 50Ω -osak, ami azt jelenti, hogy közvetlenül nem lehet az antennát terhelni ezekkel, úgyhogy impedancia illesztést kell megvalósítani.



2.4. ábra. A rendszer blokkvázlata

⁴GPIO - General Purpose Input/Output

2.6. Hideg tartalék

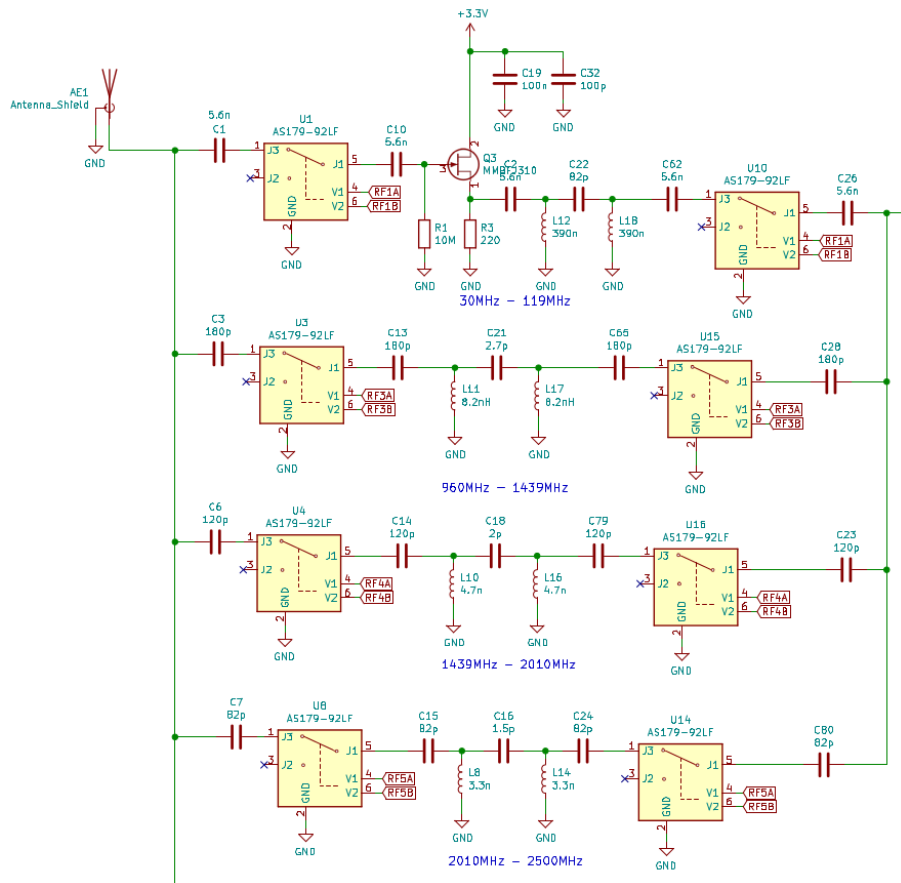
Fontos a szélsőséges űri környezetben is a stabil működés, ezért minden rendszer egy pont meghibásodásra van tervezve, minden rendszerből kettő kerül a fedélzetre[17]. Tehát, ha valamelyik egység működésében probléma lépne fel, akár átmenetileg, akár véglegesen, akkor a rendszer átkapcsol az adott egység redundáns párjára. Az egységek hideg tartalékolva lesznek a fedélzeten, ez azt jelenti, hogy egyszerre mindig csak az egyik van bekapcsolva (szemben a meleg-tartalékkal).

3. fejezet

Részegységek megtervezése

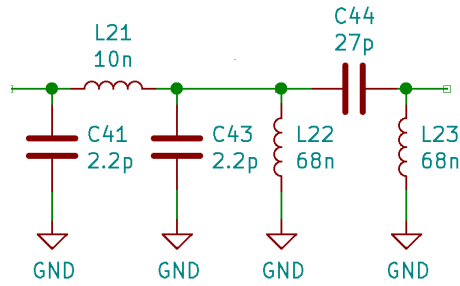
3.1. Szűrők

Hangolható szűrő helyett az egyes sávokra fix szűrőket terveztem az Elsie[9] nevű szűrőtervező programban.



3.1. ábra. RF szűrők-bank kapcsolási rajza

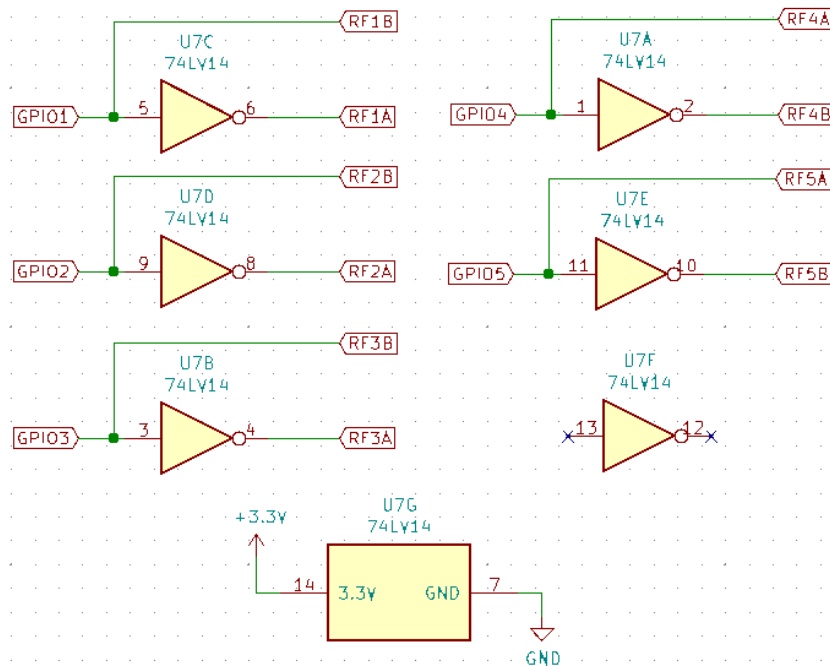
Az alsó sávon (30MHz-119MHz) van egy JFET-es követőerősítő fokozat, az impedancia illesztés miatt, ahogy a Blokkvázlat alpontban említettem, az antennának igen jelentős a kapacitív reaktanciája, ezért nem lehet közvetlenül terhelni, így egy nagy bemeneti impedanciájú fokozat oldja meg az impedanciaillesztést. Kezdetben minden sávhoz sáváteresztő szűrőt terveztem, egy felül- és egy alul-áteresztő PI tag kaszkád kapcsolásával.



3.2. ábra. KF szűrő kapcsolási rajza

A mérések során kiderült, hogy azok az alul-áteresztő szűrők amik a nagyobb frekvenciájú sávokhoz tartoztak, nem voltak megfelelőek az elemek parazita hatásai miatt, ezért ezeket elhagytam a kapcsolásból. Ez nem befolyásolja a tükrőfrekvenciák elnyomását, hiszen a tükrőfrekvenciás komponensek az alsó keverés miatt a venni kívánt sávok alatt helyezkednek el. Vételkor a kívánt szűrő kiválasztása RF kapcsolókkal lehetséges. Azért szükséges a szűrők után és elé is tenni RF kapcsolókat, hiszen ha csak az egyik oldalon lenne, akkor az egyes szűrők terhelésként viselkednének az antenna vagy a másik szűrők kimenetén, ezért el kell szigetelni őket egymástól. A szűrők szimulációról ábrák a függelékben találhatóak.

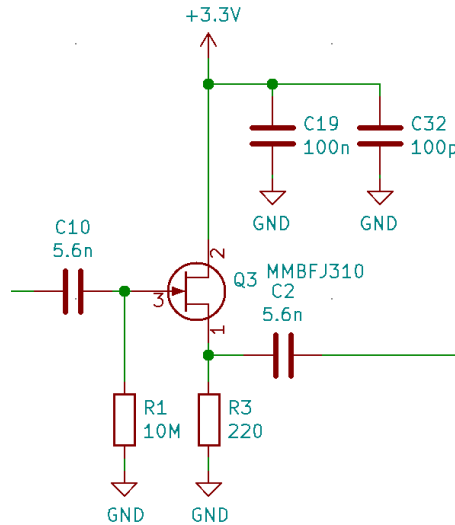
Az RF kapcsolóknak kettő logikai vezérlőbemenete van. Egyszerre csak az egyik lehet logikai 1, ekkor a másikon logikai 0-nak kell lenni. A rendszer 11 RF kapcsolót tartalmaz. Némely kapcsolók összevonhatók vezérlés szempontjából, és lehet őket közösen kapcsolni, ám ekkor is több GPIO lábra lenne szükség, mint amennyi a két IC-nek rendelkezésére áll. Mivel a kapcsolók bemenetein mindig ellentétes logikai szintnek kell lenni, ezért egy inverter segítségével a két bemenetet egy IO lábbal is meghajthatjuk. Az RF kapcsoló egyik lábára közvetlenül köthető az IO láb, a másik bemenetre pedig az inverteren keresztül. Így a kapcsoló bemenetein mindig ellentétes logikai szintek lesznek.



3.3. ábra. Inverterek kapcsolási rajza

3.2. Követőerősítő működése

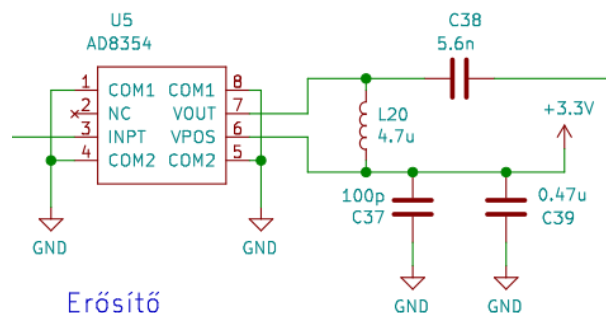
A földelt source alapkapsolás, vagy követőerősítő alapkapsolás egy nagy bemeneti impedanciával rendelkező fokozat, hiszen a gate lábán nem folyhat áram, illetve a feszültségerősítése 1 vagy annál kisebb[5]. A kapcsolásban egy MMBFJ310[15] típusú JFET-et használtam. A JFET-ek működéséhez negatív gate-source feszültség szükséges, ám a 3.1. ábrán látható, hogy a JFET gate lába egy ellenállással földre van húzva. A negatív gate-source feszültség mégis előáll, oly módon, hogy a munkaponti áram az R_3 ellenálláson feszültséget ejt, ezzel megemelve a source láb feszültségét, amihez képest a földre húzott gate láb negatívabb feszültségű lesz.



3.4. ábra. Követőerősítő kapcsolási rajza

3.3. Erősítők

Az erősítő blokk választásánál azon kívül, hogy minél szélesebb sávban képes legyen kellően erősíteni és 3,3V-ról működni, a legfontosabb szempont a fogyasztás volt. Az adatlap szerint 1-2700MHz között 20dB-es az erősítése, miközben az áramfelvétele maximum 31mA[1].

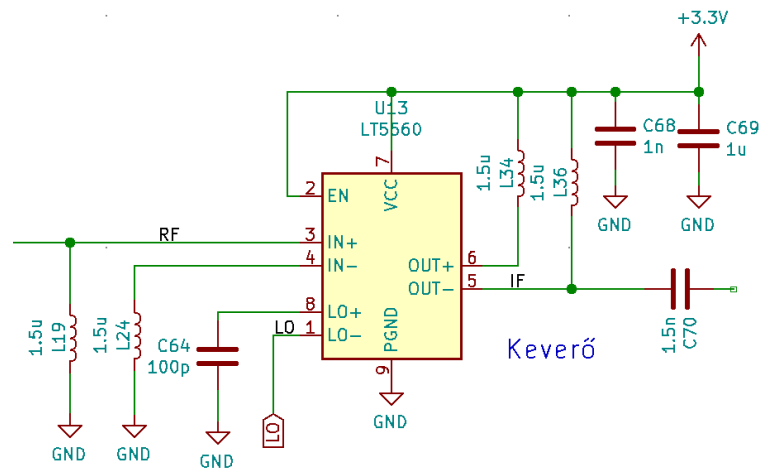


3.5. ábra. Erősítőblokk kapcsolási rajza

3.4. Keverő

Kezdetben passzív keverőket kerestem a fogyasztás minimalizálása érdekében. Ezeknél feltétel volt a 10-13dBm lokáloszcillátor jelszint. Illetve lévén, hogy transzformátorokat tartalmaznak ezek a passzív keverők, fennáll a veszély, hogy nem bírják a tekercsek rögzítései a hatalmas rázkódást, ami a rakéta felbocsátása alatt fellép. Ezért egy aktív keverőre esett a választás, aminek a LO bemenetének meghajtásához elég -2dBm és a maximális áramfelvétele 12mA, illetve az adatlapja[12] alapján 10kHz-től 4GHz-ig képes le- és felkeverni. Ez egy kétszeresen kiegyenlített keverő, ami biztosítja, hogy a kimenetére nem szivároghatnak a jelek a bemeneteiről.

Mivel a keverő széles sávban lesz használva, ezért az adatlapján szereplő referencia kapcsolásban ajánlott szimmetrizáló rezgőköri elemeket elhagytam, hiszen azok csak szűk frekvenciatartományban működnek, esetemben pedig jóval nagyobb tartományban kell üzemelni a keverőnek. Az IC egyenáramú táplálását fojtótekerceken keresztül végzem, amik nagyfrekvencián szakadásnak tekinthetők, egyenáramú szempontból pedig rövidzárnak.



3.6. ábra. Keverő kapcsolási rajza

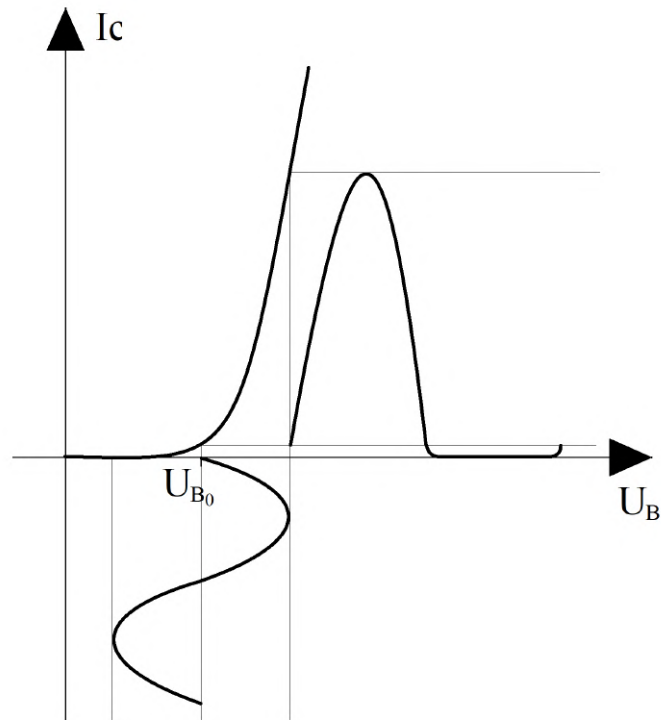
3.5. Frekvencia háromszorozó

A frekvencia háromszorozó működésének alapja, hogy a tranzisztor nemlineáris munkapontba van állítva, pontosabban a karakterisztika könyökpontjára, azaz szinte teljesen el van zárva. Ha szinuszos gerjesztést adunk a bemenetére, akkor a kimenetén egy torzított, félszinuszból álló jelalakot kapunk. Ez látható a 3.7. ábrán.

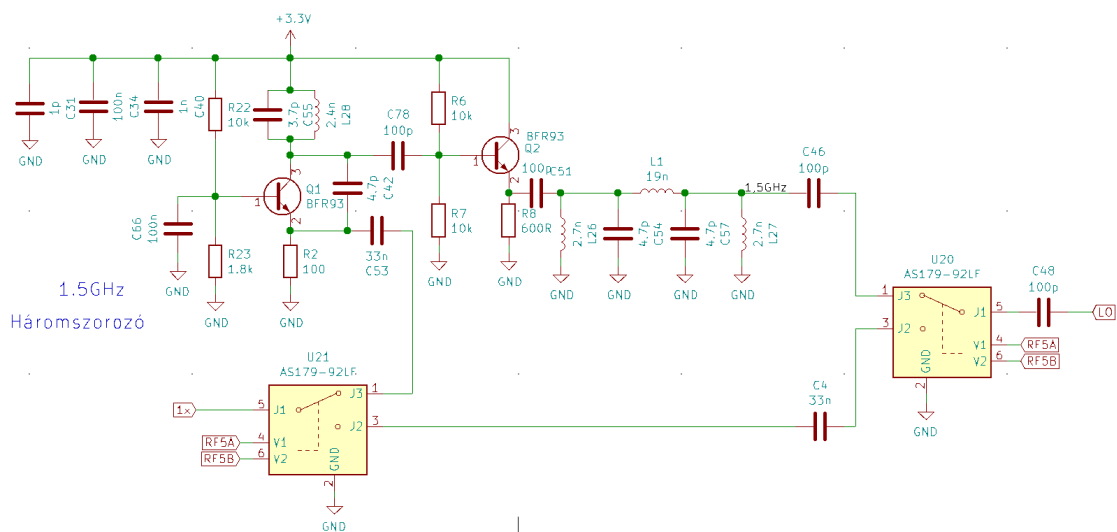
Ennek a torzított jelnek a spektrumában megjelennek az alapharmonikus egész számú többszörösei, az úgynevezett felharmonikusok, egyre csökkenő amplitúdóval. Ezek közül ki tudjuk szűrni a szükséges, jelen esetben második felharmonikusot, azaz az alapharmonikus háromszorosát.

A 3.8. ábrán az első fokozat egy földelt bázisú alapkapsolás, aminek a kollektor körében egy második felharmonikusra hangolt rezgőkör található. Ez a rezgőkör hivatott kiszűrni az egyéb frekvenciákat. Az LC tag rezonancia frekvenciája a Thomson-képlet alapján számítható:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$



3.7. ábra. Frekvencia háromszorozó működése



3.8. ábra. Frekvencia háromszorozó kapcsolási rajza

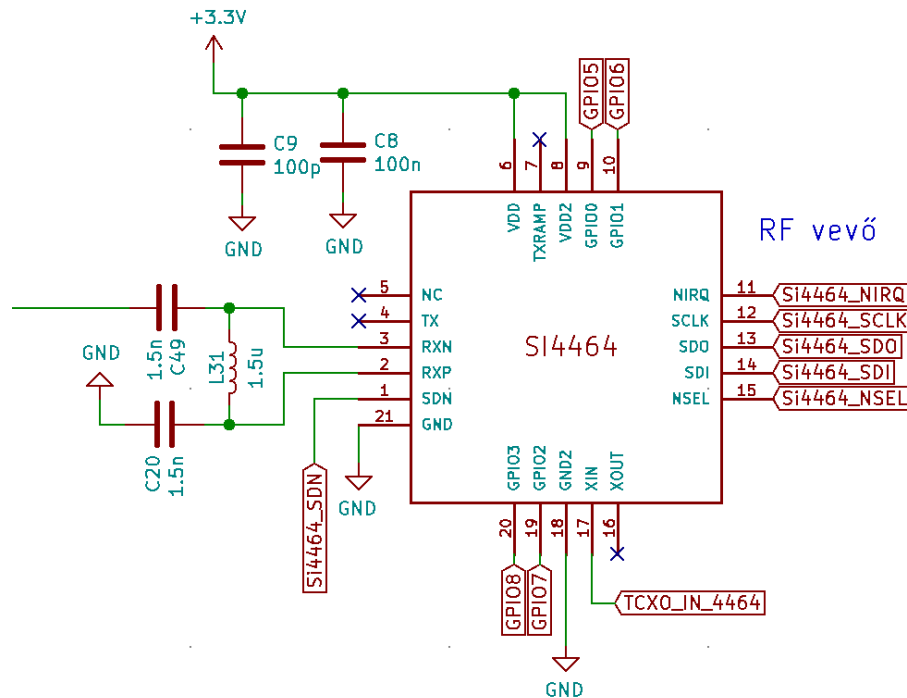
Mivel ez nagy impedanciás kimenetet eredményez, ezért közvetlenül nem terhelhető, így egy követőerősítő fokozat kapcsolódik a kimenetére, ami impedancia illesztést valósít meg, amit egy sáváteresztő szűrő követ, ami a maradék harmonikusokat hivatott kiszűrni. Kezdetben földelt emitteres kapcsolást használtam, aminek nagy negatív feszültségerősítése van, ám ahhoz, hogy a háromszorozó kimenete kellően nagy jelszintet produkáljon, túl nagy gerjesztés kellett (mérések a függelékben) a bemenetére, ami túlzott áramfelvétellel jár. Ez nem megengedhető hiszen maximalizálva van a rendszer fogyasztása. A másik kizáró ok a Miller-effektus[13] volt, ami ennél az alapkapsolásnál csökkenti a felső határfrekvenciát, ezért váltottam a földelt bázisú elrendezésre.

Földelt bázisú alapkapcsolásnak nagy pozitív feszültségerősítése van és a visszaható kapacitások a kollektor-bázis és emitter-bázis között nem csökkenti a felső határfrekvenciát. A mérések alapján még így sem sikerült elérni a kívánt jelszintet, a legnagyobb megengedhető gerjesztés esetén, ezért úgy módosítottam a kapcsolást, hogy a kollektor és a bázis közé egy kapacitást helyeztem, létrehozva egy oszcillátort.

Az oszcillátorok működésének feltétele a pozitív visszacsatolás, aminek hatására önálló rezgéseket kelt az áramkör[6]. Mivel a földelt bázisú alapkapcsolásnak pozitív a feszültségerősítése, ezért a kimenetet visszacsatolva a bemenetre, önmagát gerjeszti és a kollektorkörbe helyezett LC kör rezonanciafrekvenciája körül oszcillál. Ám ahhoz, hogy stabilan beálljon a kívánt frekvenciára, a bemenetre egy kis amplitúdójú szinkronozó jelet kapcsolok a mikrokontroller rádiós kimenetéről.

3.6. Rádiós IC

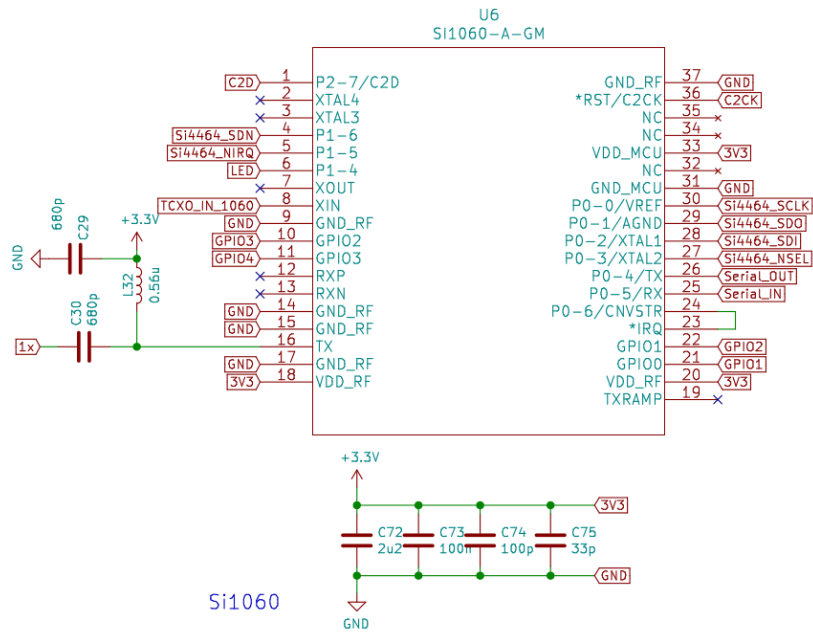
A rádiófrekvenciás ki- és bemeneteire a csatolókonduktorkondenzátorok és fojtótekerics az adatlapi ajánlás szerint kerültek. Az SPI interfészhez szükséges adatvonalak közvetlenül csatlakoznak a mikrokontrollerre.



3.9. ábra. si4464 kapcsolási rajza

3.7. Mikrokontroller

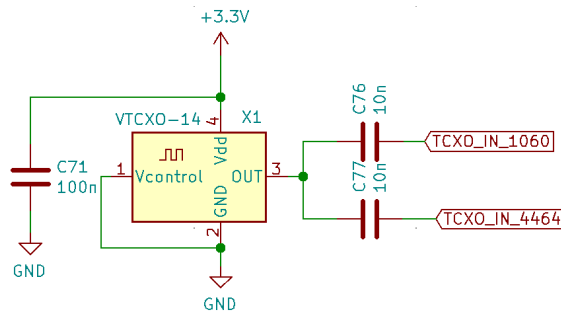
Itt szintén az adatlap szerint helyeztem el a csatoló és fojtó elemeket. Illetve itt az SPI interfész mellett a soros port is be van kötve, hiszen ezen keresztül kommunikál a fedélzeti számítógéppel.



3.10. ábra. si1060 kapcsolási rajza

3.8. Hőmérséklet kompenzált kristály oszcillátor

A mikrokontrollernek és a rádiós IC-nek szüksége van stabil órajelre. A kompenzálatlan kristály oszcillátorok frekvenciájának hőmérséklet függése a legnagyobb. Tekintve, hogy szélsőséges környezeti viszonyok között fog működni a rendszer, ez nem megoldás, hiszen nem megengedhető az, hogy az IC-k órajele instabil legyen. Ezért órajelgenerátornak TCXO¹-t használunk. Itt a rezgőkristály mellé egy kompenzáló áramkör kerül, ami a hőmérséklet változásból adódó frekvencia hibát küszöböli ki[23]. A két IC ugyanarról a TCXO-ról működik. Csatoló kondenzátorokkal vannak elválasztva egymástól.



3.11. ábra. TCXO kapcsolási rajza

¹Temperature Compensated Crystal Oscillator

4. fejezet

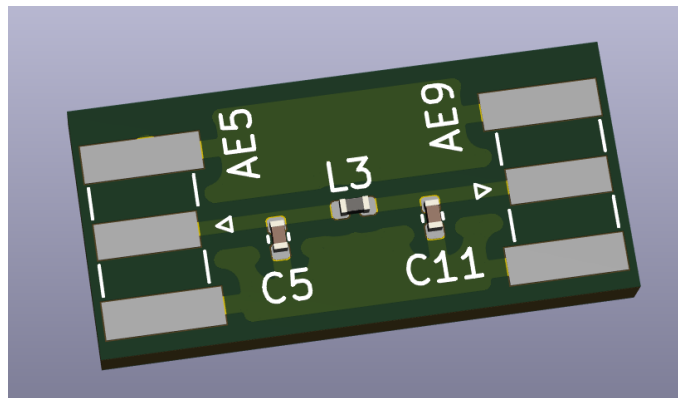
Építés és mérés

Minden áramköri részegységet egy-egy otthon gyártott kétoldalas NYÁK-ra ültettem be, és külön-külön méréseket végeztem az önálló áramkörökön, majd ha azok megfelelően működtek, az összetartozó részegységeket egybekapcsolva, szintén méréseket végeztem. Az aktív áramkörök tápfeszültségének 3,3V-ot állítottam be, hiszen a műhold fedélzetén a buszfeszültség is ennyi lesz.

4.1. Szűrők

4.1.1. PI tagok

A szűrők átvitelét vektor-hálózatanalizátor, spektrumanalizátor segítségével vizsgáltam.

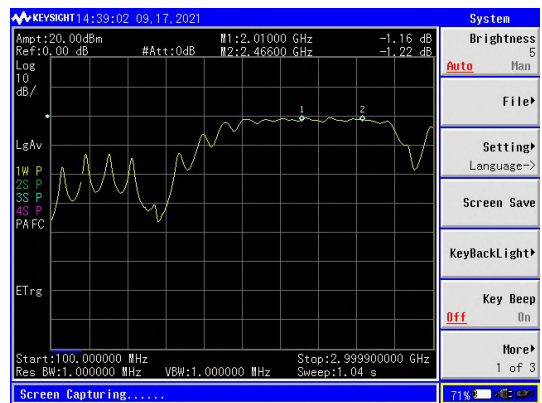
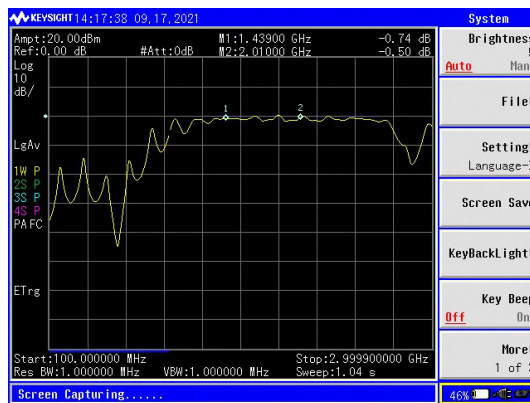
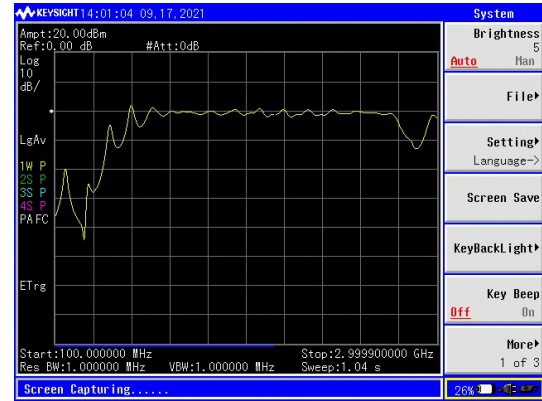
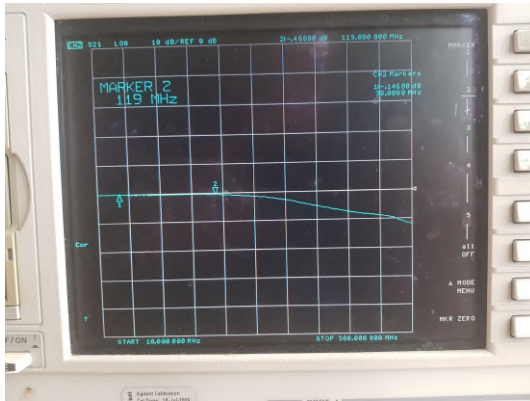


4.1. ábra. RF szűrők nyákterve

A 4.2. ábrán az RF szűrők mérési eredményei láthatók. Jobbról-balra és fentről-lefelé egymás után a 30-119MHz-es sáv aluláteresztő szűrőjének és a 960-1439MHz, 1439-2010MHz, 2010-2500MHz tartományok felül-áteresztő szűrőinek átvitele látható.

Az átvitel az áteresztő tartományban kellően sima mindegyiknél, viszont igen nagy hullámszám tapasztalható ezen tartományon kívül. Szerencsére a tükrörfrekvenciák közelében kellően nagy az elnyomása, így az elvárt feladatát megfelelően végzi. A hullámszám a komponensek parazita hatása miatt, illetve az otthon gyártott nyákok parazita hatásai miatt jelentkezhet. A nagyfrekvenciás alkalmazásoknál használt NYÁK-oknál a vezetősáv mellett végig viákat helyeznek, csökkentve a NYÁK soros induktivitásának értékét[18], ami esetben nem volt kivitelezhető otthoni körülmények között.

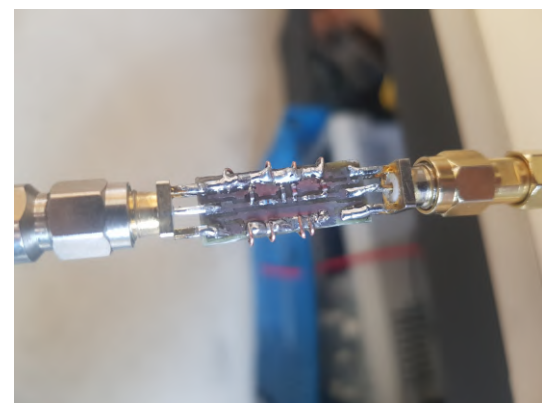
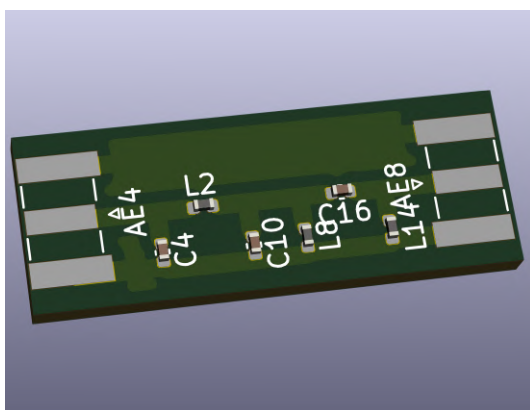
Ilyen nagy frekvenciákon már nem érdemes koncentrált paraméterű modellekkel dolgozni, hiszen az alkatrészek jóságai tényezője véges, így a frekvencia növekedtével az



4.2. ábra. RF szűrők mérési eredményei

parazita hatások kezdenek dominálni. Ebben az esetben célszerűbb az elosztott paraméterű modellek használata, például tápvonalszakaszokkal kialakítani a szűrőké. Ám ezeknek a hossza összemérhető a hullámhosszokkal, így ezek a szűrők nem férnének el a fedélzeten, hiszen a spektrumanalizátor rendelkezésére álló hely 40x40mm, ami nem teszi lehetővé a több 10mm hosszú vezetősáv szakaszokból kialakított szűrők elhelyezését.

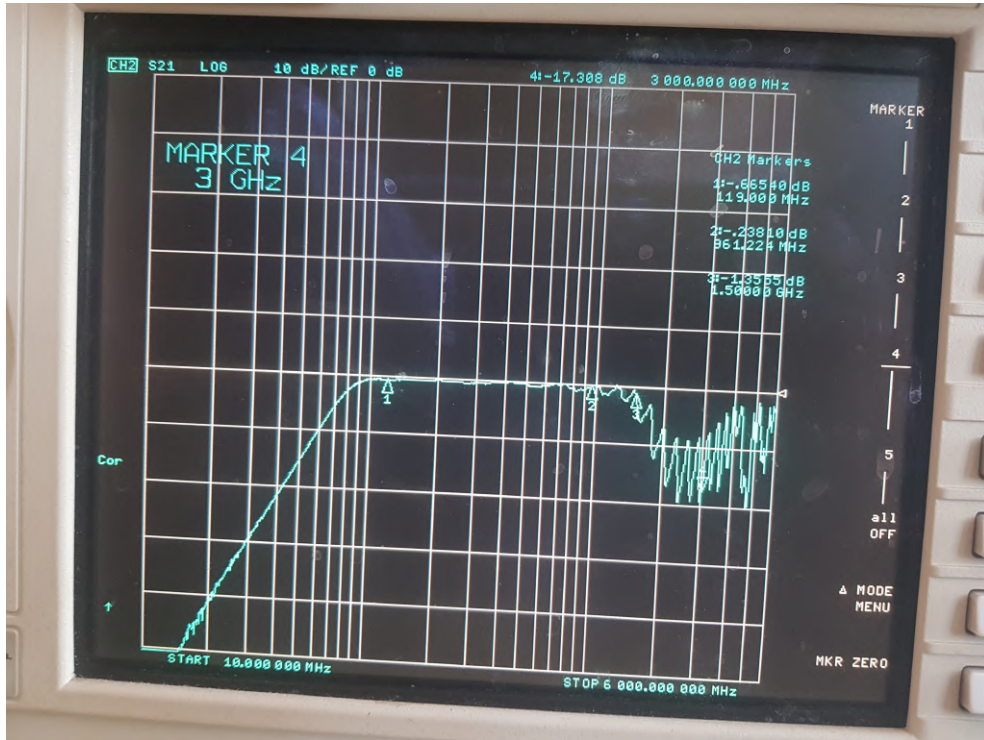
4.1.2. KF szűrő



4.3. ábra. KF szűrő NYÁK terve

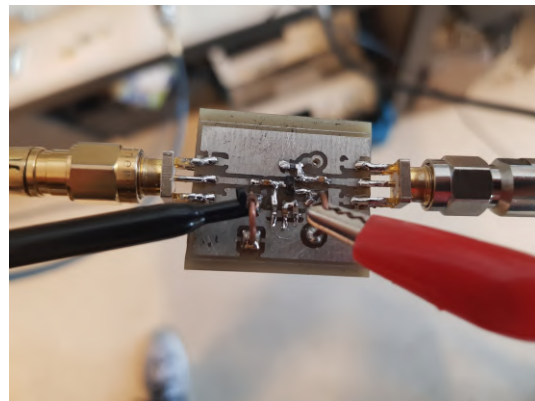
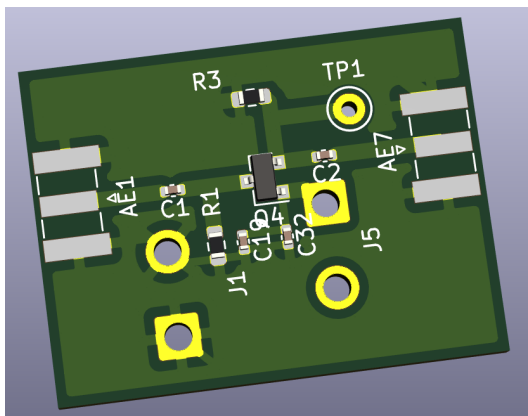
Az átviteli karakterisztikája 119MHz alatt 20dB/dekáddal csökken, illetve jellegre ez tapasztalható 960MHz felett is, ám látható, hogy 2GHz környékén és afelett a parazita

hatások dominálnak, amik elrontják a frekvenciamenetet. Ezek ellenére is kellően szeletív, és megfelel az elvárásoknak.



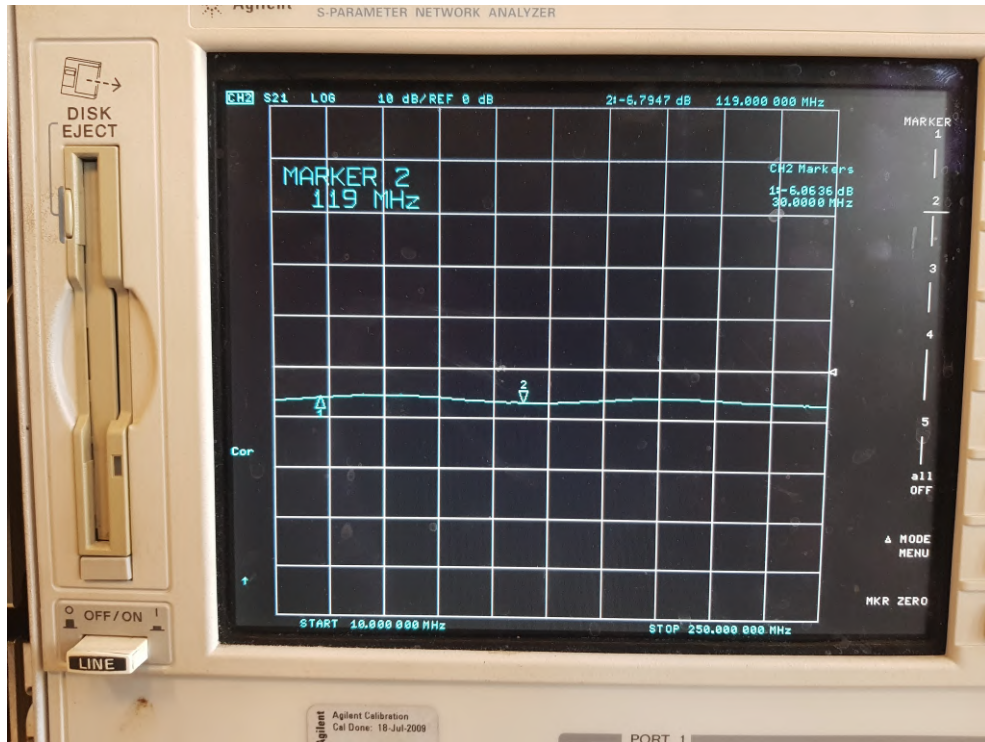
4.4. ábra. KF szűrő mérési eredménye

4.2. JFET átvitele



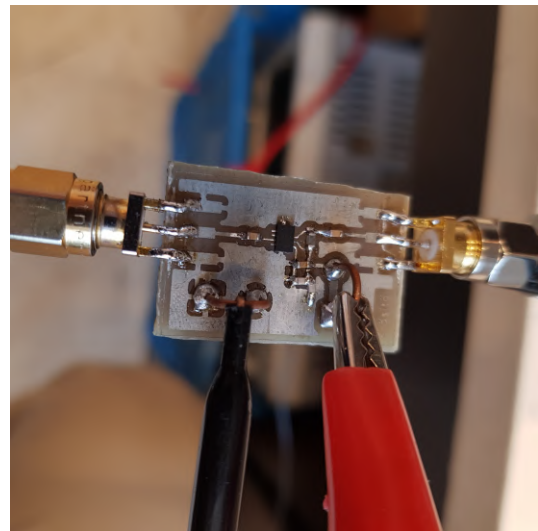
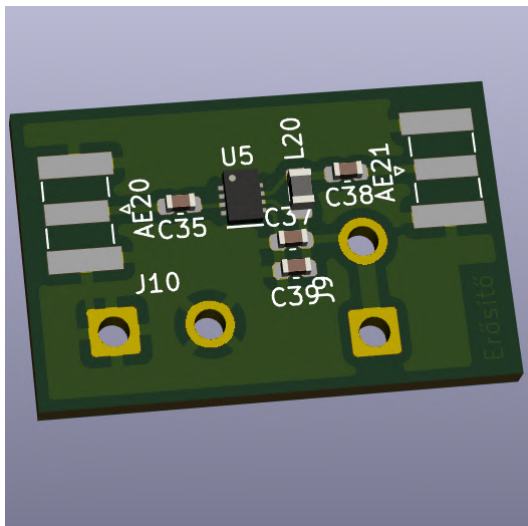
4.5. ábra. JFET NYÁK terve

A JFET source lábán mérhető feszültség 1,89V és 12mA az áramfelvétele (mérési ábra a függelékben). Követő erősítő lévén az erősítése 1 vagy annál kisebb. Jelen esetben átlagosan -6dB az erősítése. A továbbiakban ezen még növelnem kell, illetve az áramfelvételen pedig csökkentenem. Az átvitele kellően sima, tekintve, hogy mekkora tartományban lesz használva, így ez is megfelel az elvárásoknak.



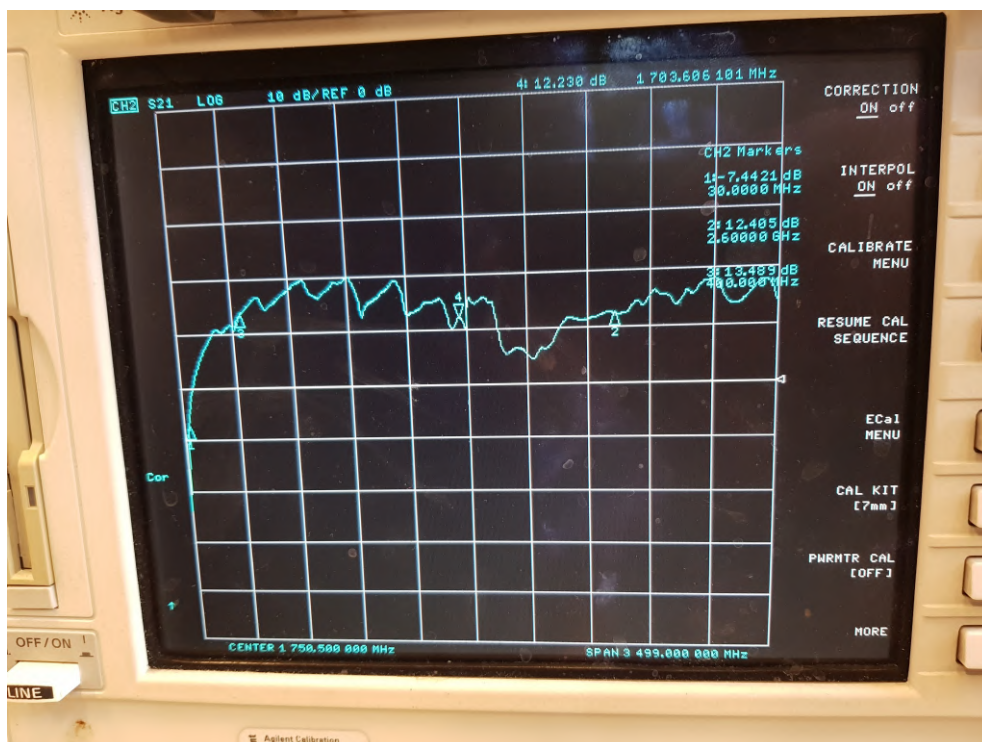
4.6. ábra. JFET mérési eredménye

4.3. Erősítők



4.7. ábra. Gain block NYÁK terve

Az adatlapi ajánlás szerint helyeztem el a fojtótekercest illetve a csatoló kondenzátorokat úgy, hogy a tekercs impedanciája minimum egy nagyságrenddel nagyobb, a kondenzátor impedanciája pedig minimum egy nagyságrenddel kisebb legyen az adott hullámimpedanciájú környezethez képest (50Ω). Mégsem olyan az átvitel, mint amit a gyártó ígér. Az erősítése jelentősen fluktuál a frekvencia függvényében, és az ígért 20dB-t csak helyenként éri el. A továbbiakban vagy keresnem kell egy hasonló paraméterekkel bíró erősítőt vagy más elrendezést kell alkalmaznom, és a lehető legoptimálisabban



4.8. ábra. Gain block mérési eredménye

kell megterveznem a próba panelt amin az erősítőt újra megvizsgálom. Ahogy a 4.1.1. alpontban is említettem, például viázással csökkenthetem a NYÁK soros induktivitását, ami javíthatja a frekvencia menetet. A fogyasztásra előírt adatlapi értéket tartotta, ez 20mA volt.

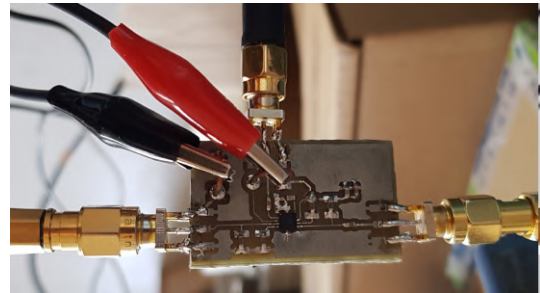
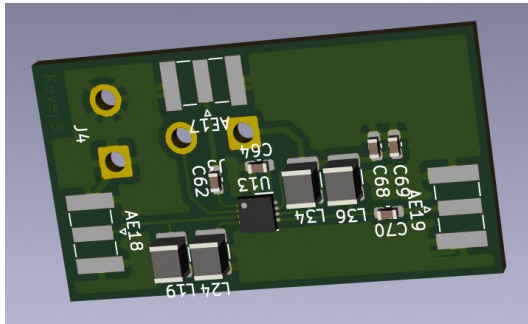
4.4. Keverő

A keverőt először önmagában, a frekvencia háromszorozó nélkül mértem meg, két nagyfrekvenciás jelgenerátort és egy spektrumanalizátort használva. Az egyik generátoron az adott sávhoz tartozó LO frekvenciát állítottam be -5dBm jelszinttel, a másikkal pedig végiglépkedtem a sáv elejétől a végéig. A 4.10. ábrán a 960-1439MHz-hez tartozó sáv keverés utáni tartománya látszik. Itt a második jelgenerátoron beállított 960MHz, -40dBm jelszinttel lekeveredik 480,984MHzre (elviekben 481MHz-re adódna). Keverés hatására a -40dBm-ből -70dBm lesz, azaz 30dB a konverziós veszteség. A rádiós IC érzékenysége -126dBm, ami azt jelenti, hogy 30dB-es konverziós veszteség esetén még -96dBm-es jelszinteket képes megmérni a rendszer. A keverő eközben 15mA áramot vesz fel. A többi sávhoz tartozó mérési eredmények a függelékben találhatóak.

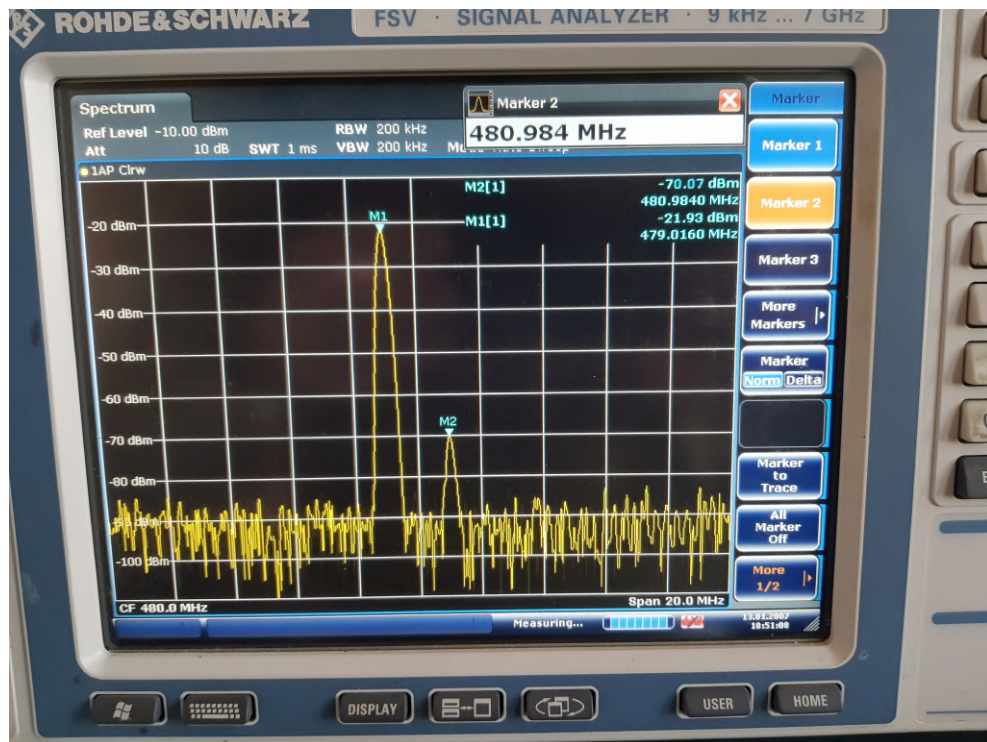
4.5. Frekvencia háromszorozó

A frekvencia háromszorozó kapcsolás mögé egy sáv-áteresztő szűrőt kapcsoltam, és a jelgenerátoron 0dBm-es 502MHz-es szinkronozó jel jelet állítottam be. A szűrő nélküli, illetve más jelszintekkel gerjesztett eredmények szintén a függelékben találhatóak. Az áramkör 5mA áramot vesz fel.

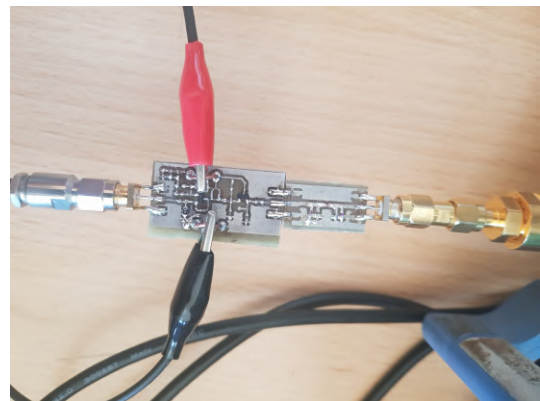
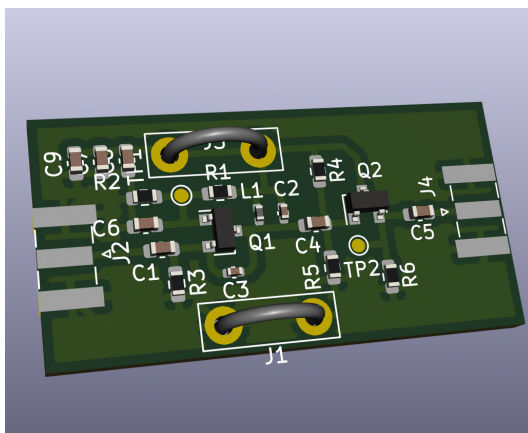
Az alábbi ábrán a szinkronozatlan, szabadon futó oszcillátor kimenete látható:



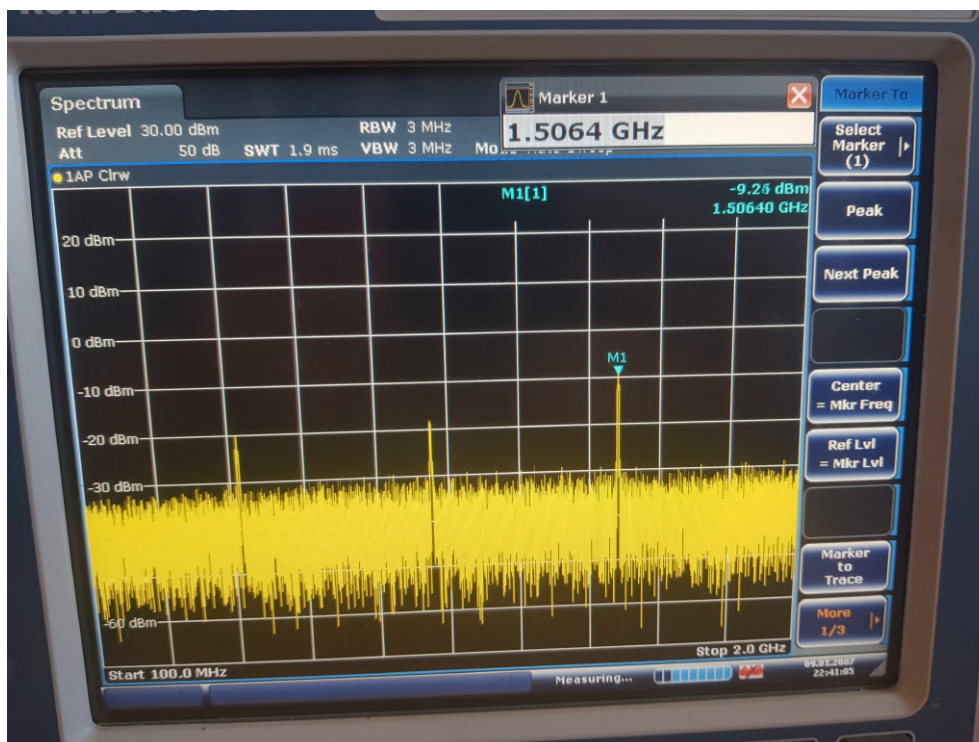
4.9. ábra. Keverő NYÁK terve



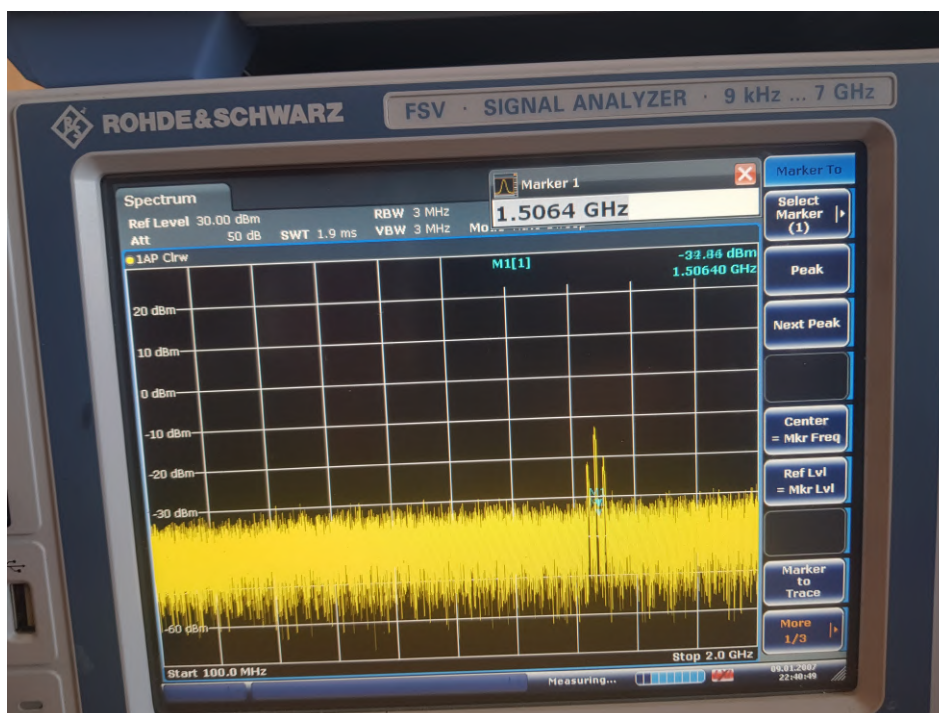
4.10. ábra. Keverő mérési eredménye (RF=960MHz, LO=479MHz)



4.11. ábra. Frekvencia háromszorozó NYÁK terve



4.12. ábra. Frekvencia háromszorozó mérési eredménye

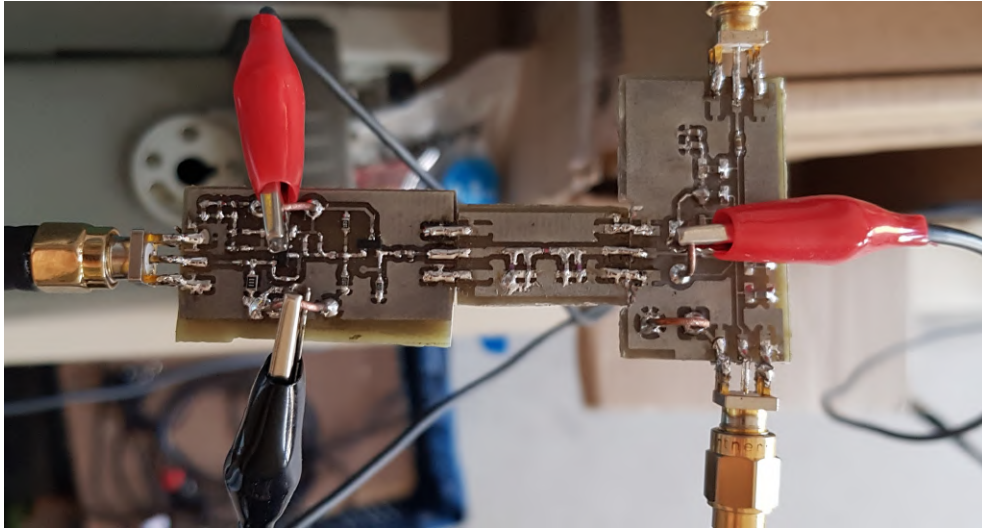


4.13. ábra. Szabadonfutó oszcillátor

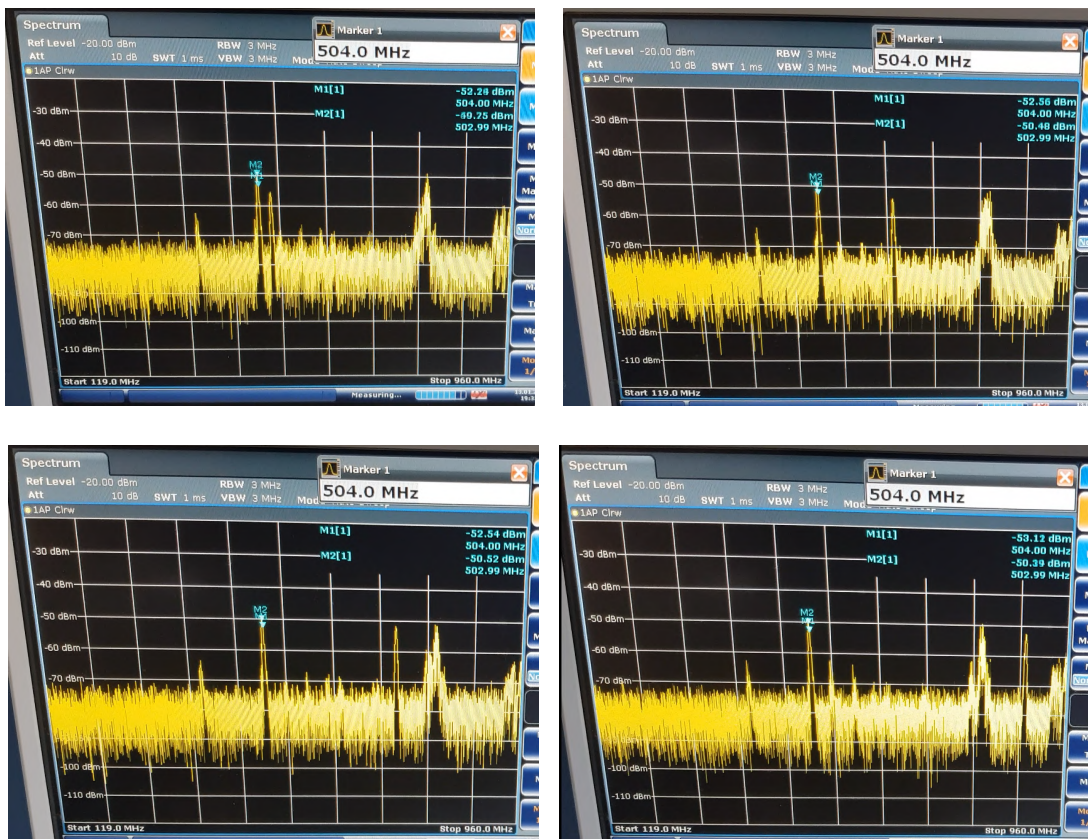
4.6. Frekvencia háromszorozó és keverő együtt

Miután külön a frekvenciaháromszorozó és a keverő is jól működött, összeforrasztottam őket, hogy egyben is letezteljem a működést. A mérés úgy történt, hogy az RF jelgenerátorral végiglépkedtem a spektrumon, és néztem a keverő kimenetét

spektrumanalizátorral. Videót készítettem a léptetésről, amiből 4 képet kivágtam az illusztráció kedvéért. Ez látható a 4.15. ábrán. Látható egy nagyjából -55dBm jelszinttel rendelkező túske, ami képről képre vándorol balról jobbra. Ez a túske a 2010-2466MHz közti frekvenciák lekevert terméke. Van egy kiugrás 800MHz környékén, az csak környezeti zaj, nem a keverőből vagy a háromszorozóból szivárog.



4.14. ábra. Keverő és frek. háromszorozó



4.15. ábra. Keverő és frek. háromszorozó mérési eredményei

A keverő és a frekvencia háromszorozó külön-külön és egyben is az elvártaknak megfelelően működött. Ezek egy az egyben átkerülhetnek a spektrumanalizátor prototípus paneljére.

4.7. Fogyasztások

Az előírt 150mA-es áramkorlátba sikerült beleférni a rendszerrel. A JFET-es követő fokozat munkaponti áramát csökkentve a továbbiakban, lehetőségem lesz 100mA alá is menni. Az alábbi táblázat összefoglalja az egyes részáramkörök fogyasztását külön-külön, a végén pedig összegzi a teljes rendszerre nézve. Erősítő blokkból kettő darab van, ezért annak a fogyasztását duplán kell számolni. Az RF kapcsolók bemenetén nem folyik áram, mert térvezérlésű tranzisztorokból épülnek fel. Ebből következően az inverterek sem vesznek fel áramot, hiszen nem kell meghajtaniuk az őket követő fokozatokat, azaz az RF kapcsolókat. A mikrokontroller és a rádiós IC fogyasztása adatlapi érték.

Részegység	Áram	Teljesítmény
JFET-es követőerősítő	12mA	39,6mW
Erősítő blokk	20mA	66mW
Keverő	15mA	49,5mW
Frekvencia háromszorozó	5mA	16,5mW
si4464	12mA	39,6mW
si1060.	18mA	59,4mW
Összesen:	102mA	336,6mW

4.1. táblázat. A rendszer fogyasztása

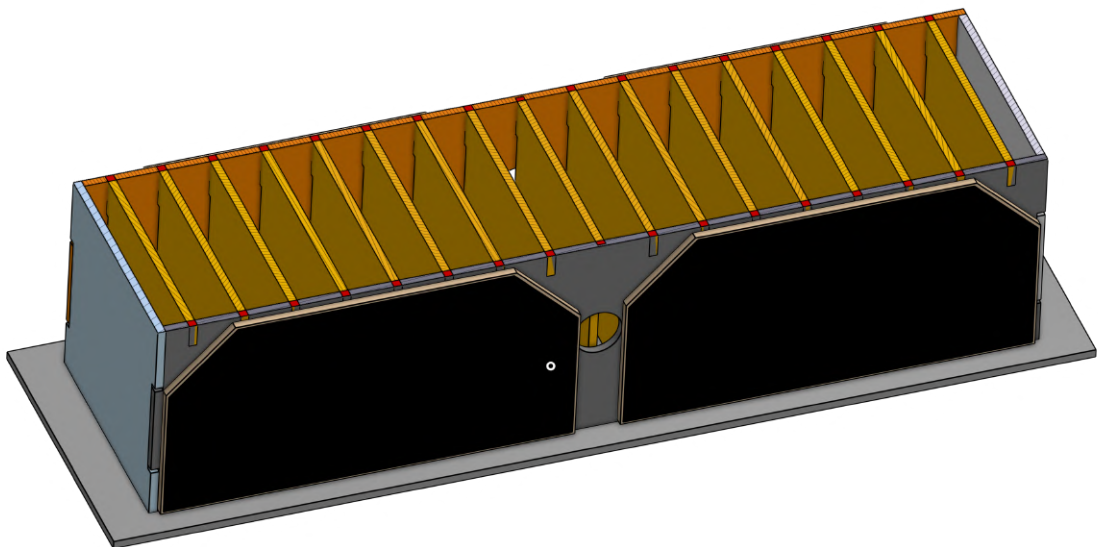
5. fejezet

Prototípus panel

A dolgozat leadásának határidejére még nem készült el a prototípus panel, de a prezentáció idejére elkészül a NYÁK, beültetésre kerülnek az alkatrészek, a mikrokontroller és a rádiós IC felprogramozásra kerül és mérések készülnek a spektrumanalizátor prototípusával. A panel teljes kapcsolási rajza a függelékben található.

5.1. A panel NYÁK terve

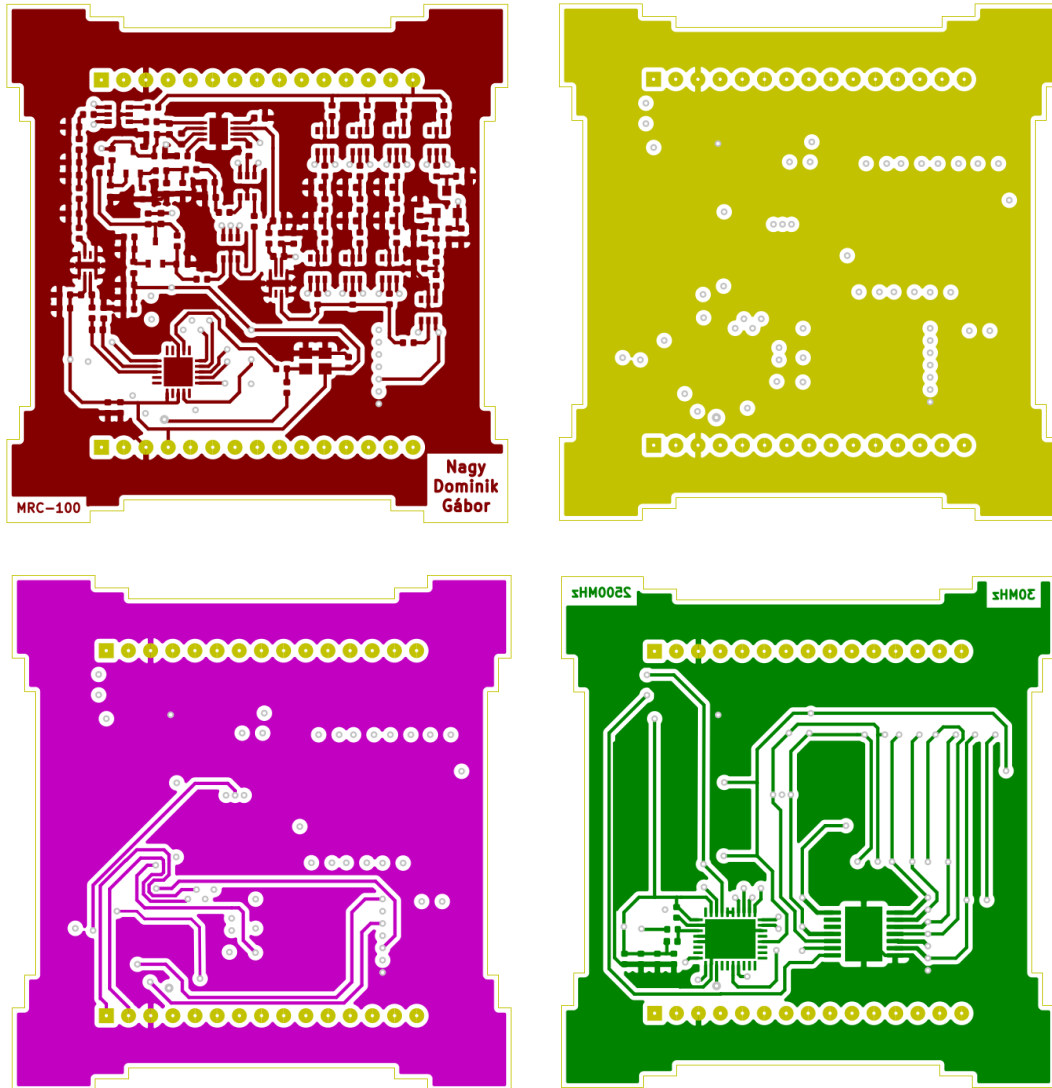
A prototípus panel NYÁK terve 4 rajzolati rétegen valósult meg. A műhold fedélzetén a busz csatlakozókhoz tűksor segítségével kapcsolódnak az egyes részek az alábbi elrendezésben:



5.1. ábra. Fedélzeti panelek[16]

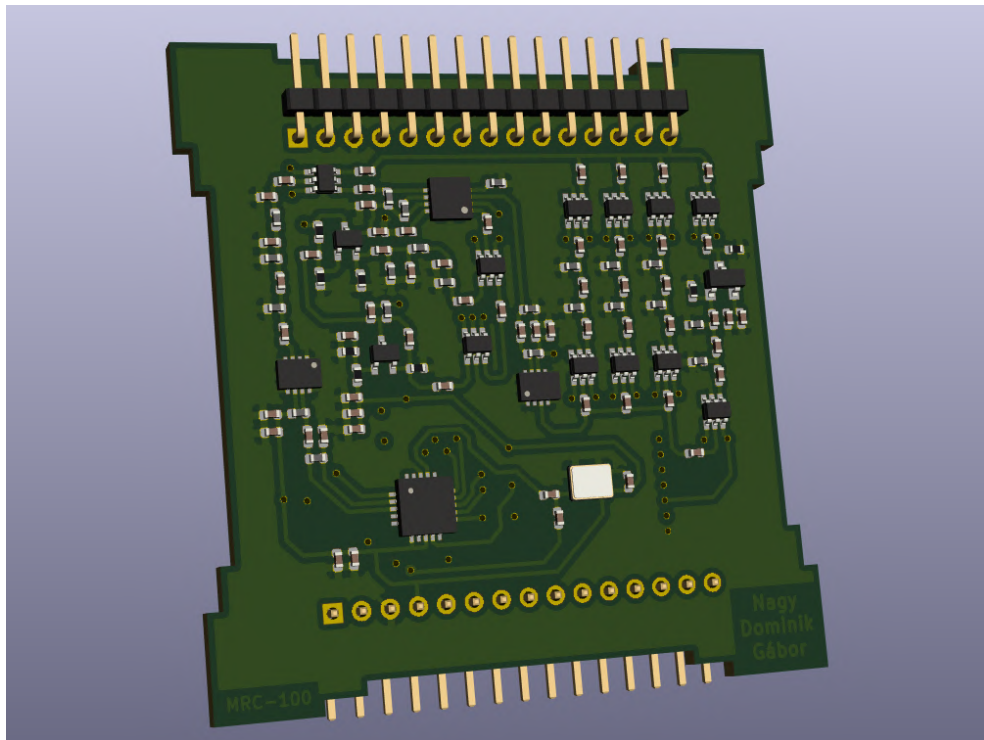
A felső rézrétegen a nagyfrekvenciás részek kaptak helyet. Itt található az RF szűrők, az erősítő blokkok, a keverő, a frekvenciaháromszorozó és a rádiós IC. Ez alatt helyezkedik el egy teljes föld réteg. Ez árnyékolást valósít meg és nagyfrekvenciás jelvezetés szempontjából is előnyösebb, mint vékony vezetősávokat használni. Az alatta lévő, második belső rézrétegen logikai vezetékek találhatók, illetve a mikrokontroller soros portja itt csatlakozik a busz csatlakozókhoz. A legalsó rézrétegen pedig a mikrokontroller és az inverter található. Ezen a rétegen szintén megtalálhatók logikai vezetékek, amikkel

az RF kapcsolókat lehet vezérelni. A passzív komponensek mind 0402 tokozásúak, a helytakarékoság érdekében.

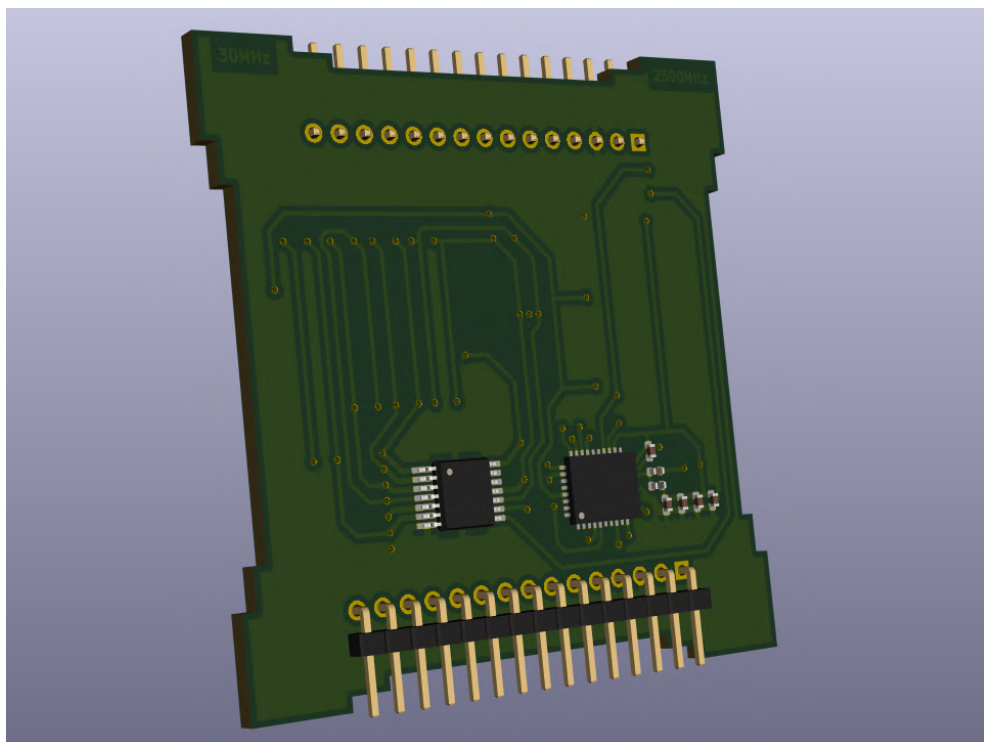


5.2. ábra. A prototípus panel rézrétegei

5.2. A panel 3D modellje



5.3. ábra. A prototípus panel 3D modellje felülről



5.4. ábra. A prototípus panel 3D modellje hátról

6. fejezet

Továbbiak

Megtervezésre került a spektrumanalizátor funkcionális felépítése, majd az egyes részegységeket konkretizáltam, megterveztem és bemértem. A részáramkörök önállóan, magukban az elvártak szerint teljesítettek. Kivétel az erősítő blokk, erre még megoldást kell találnom. Illetve a keverő és a frekvencia háromszorozó összeépítésre került és a mérések alapján megfelelően működtek.

A továbbiakban az elkészült NYÁK-terv alapján le lesz gyártatva a prototípus panel, amin megtörténik a már működő részegységek rendszer szintű integrációja és validációja. Megfelelő működés esetén, a következő lépés az antenna szimulációja és megtervezése lesz. Ezek után a szimulált antennát legyártva és méréseket végezve rajta, integrálható lesz a rendszerbe. A műholdat termo-vákuum kamrás méréseknek is alá kell vetni, hogy megvizsgálhassuk, hogyan is teljesítene abban a környezetben ahová szánjuk.

Ha a műhold és a fedélzetén lévő spektrummonitorozó egység megfelel ezeken a teszteken, akkor ez lehet a világon a legelső ilyen rendszer, ami ilyen kis méretben, ilyen kis fogyasztással, ekkora frekvencia tartományban vizsgálja a Földet körülvevő rádiófrekvenciás szennyezettséget. A mérések alapján pedig elkészíthető egy következő szennyezettségi térkép.

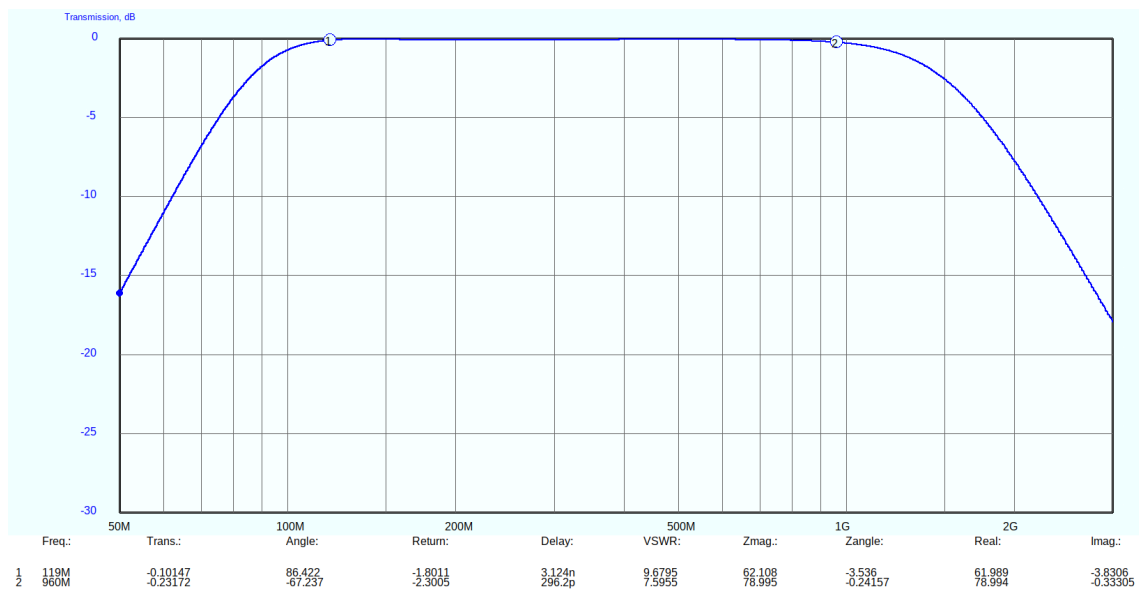
Irodalomjegyzék

- [1] Ad8354 adatlapja, elérés dátuma: 2021.okt.25. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8354.pdf/>.
- [2] Szimler András: Űrkörnyezet, előadás, 2021. 03.
- [3] Cseppentő Bence: Mikrohullámú keverés módszereinek vizsgálata, 2016.
- [4] Markotics Boldizsár–Takács Donát: A föld körüli, űrbéli rádiófrekvenciás szennyezettség ábrázolása a smog projekt mérései alapján, 2020. 10.
- [5] Zombori Béla: *Elektronika*. 2001, Nemzeti Tankönyvkiadó.
- [6] dr. Kovács Ferenc: *Félvezetők nagyfrekvenciás alkalmazása*. 1973, Műszaki Könyvkiadó.
- [7] dr. Nagy Lajos: Nagyfrekvenciás rendszerek előadás, 2020. 11.
- [8] Levente Dudás–László Szűcs–dr. András Gschwindt: The spectrum monitoring system of smog-1 satellite, 2015.
- [9] Elsie szoftver weblapja, elérés dátuma: 2021.okt.25. <http://http://tonnesoftware.com/elsie.html/>.
- [10] Négyesi Gábor: Szintézeres lokáloszcillátor tervezése szoftverrádió alkalmazásához, 2002.
- [11] Chen-Yu Hsieh: Wide frequency range superheterodyne receiver design and simulation, 2011. 01.
- [12] Lt5560 adatlapja, elérés dátuma: 2021.okt.25. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/5560f.pdf/>.
- [13] Dr. Pap László: *Elektronika I*. 2013.
- [14] Magyar világrekord az űrben, cikk, elérés dátuma: 2021.okt.27. http://www.urvilag.hu/hazai_kutatohelyek_es_uripar/20191216_magyar_vilagrekord_az_urben/.
- [15] Mmbfj310 adatlapja, elérés dátuma: 2021.okt.27. <https://www.mouser.com/datasheet/2/149/MMBFJ310-889834.pdf/>.
- [16] Mrc-100 3d modellje, elérés dátuma: 2021.okt.27. <https://cad.onshape.com/documents/6c932044474b24211b121543/w/46d70bf41f956574068dde7d/e/508e87580fef70270f319dc1/>.
- [17] NASA: *State-of-the-Art Small Spacecraft Technology*. 2021.

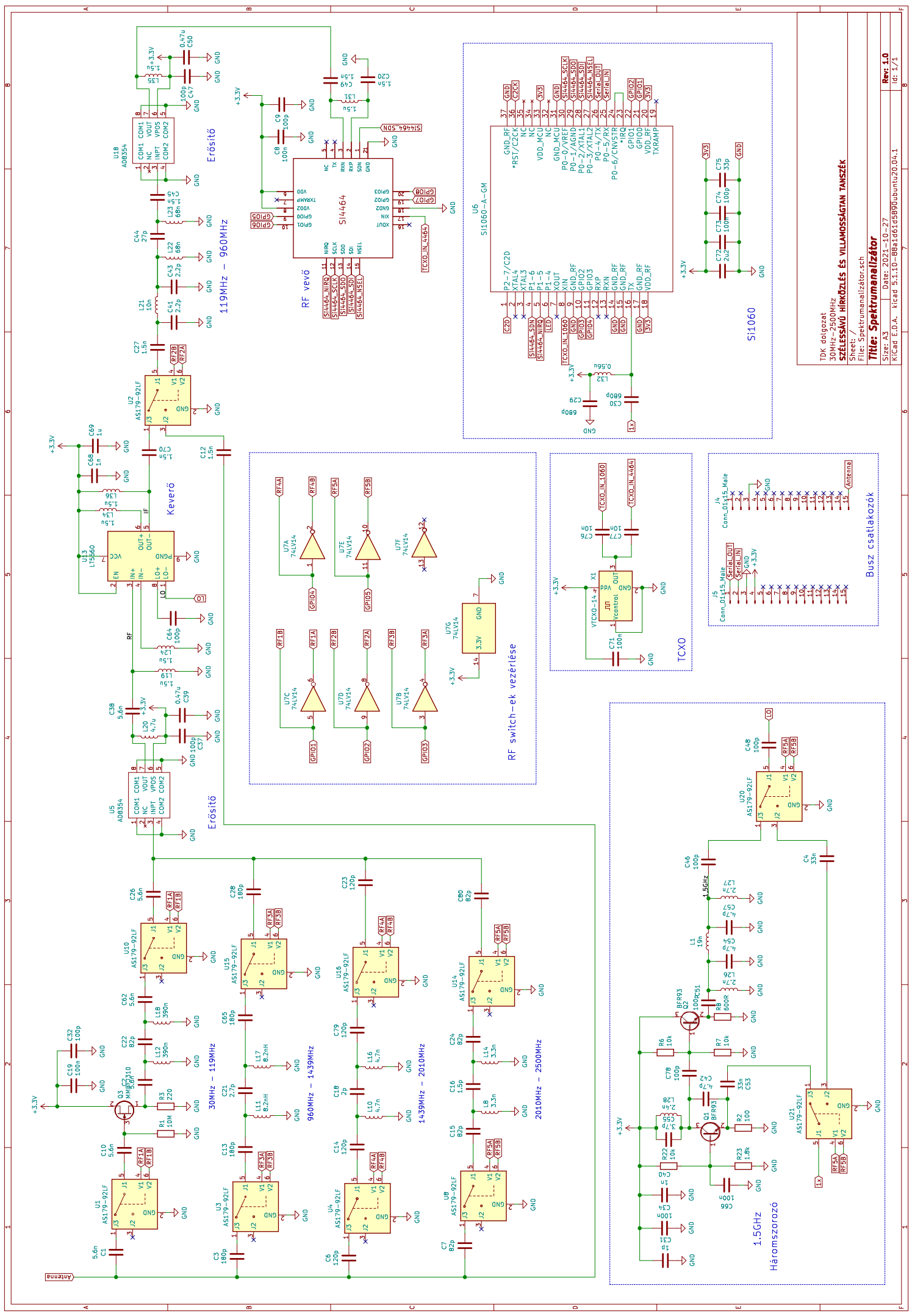
- [18] Optimized rf board layout for stm32wl series,application note, elérés dátuma: 2021.okt.27. https://www.st.com/resource/en/application_note/an5407-optimized-rf-board-layout-for-stm32wl-series-stmicroelectronics.pdf/.
- [19] Karl Rothammel: *Antena könyv*. 1975, Műszaki Könyvkiadó.
- [20] si1060 adatlapja, elérés dátuma: 2021.okt.27. <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si106x-8x.pdf/>.
- [21] si4464 adatlapja, elérés dátuma: 2021.okt.27. <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si4464-63-61-60.pdf/>.
- [22] Herman Tibor: A smog-1 pocketcube els@dleges energiaellátó rendszere, 2015. 12.
- [23] Vozár Viktor: Oszcillátorok hőmérséklet-frekvencia összefüggésének identifikációja, 2020.
- [24] Welsz Ágnes: A smog-1 műhold hőáramhálózatos modellezése, 2016.

Függelék

F.1. KF szűrő szimulációja

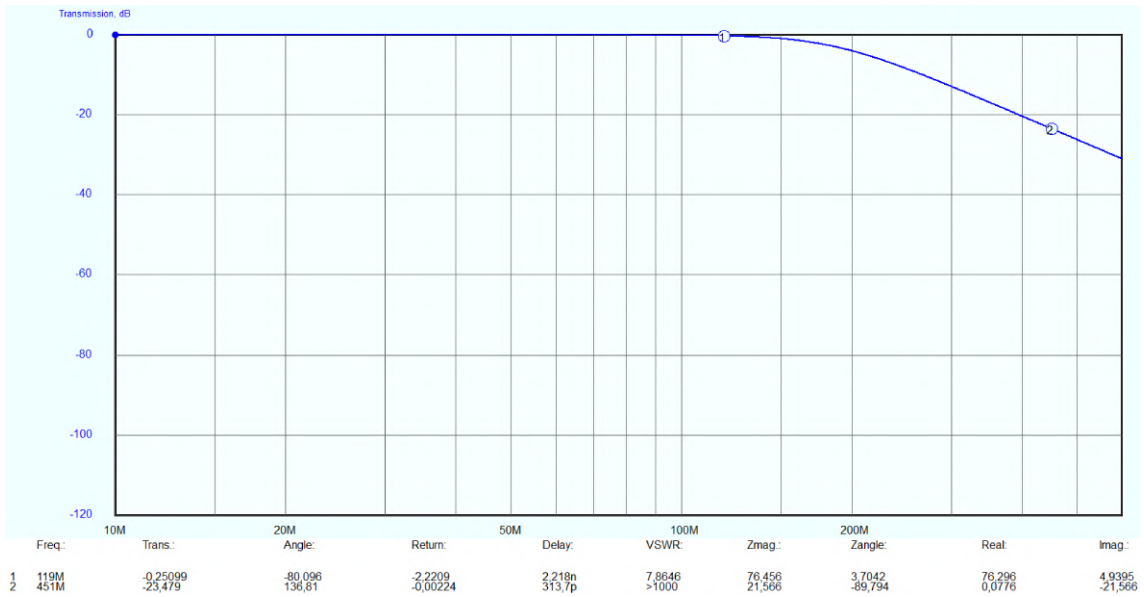


F.1.1. ábra. II. sáv szűrője

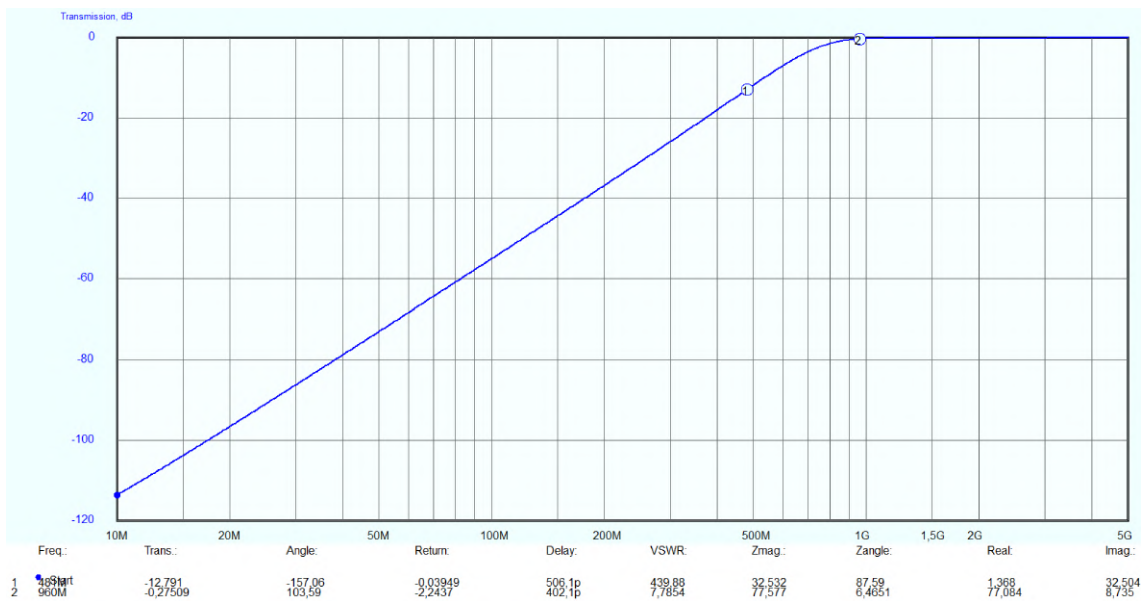


TDK dolgozat
 30MHz-2500MHz
SZÉLSZÁV HÍRKÖZLÉS ÉS VILLAMOSSÁGTAN TANSZÉK
 File: Spektrumanalizator.sch
Titel: Spektrumanalizátor
 Szer: AS Date: 2021-10-27
 K/Cad E.D.A. Kicad 5.1.10-88ba1d6d990ubunt0.04.1

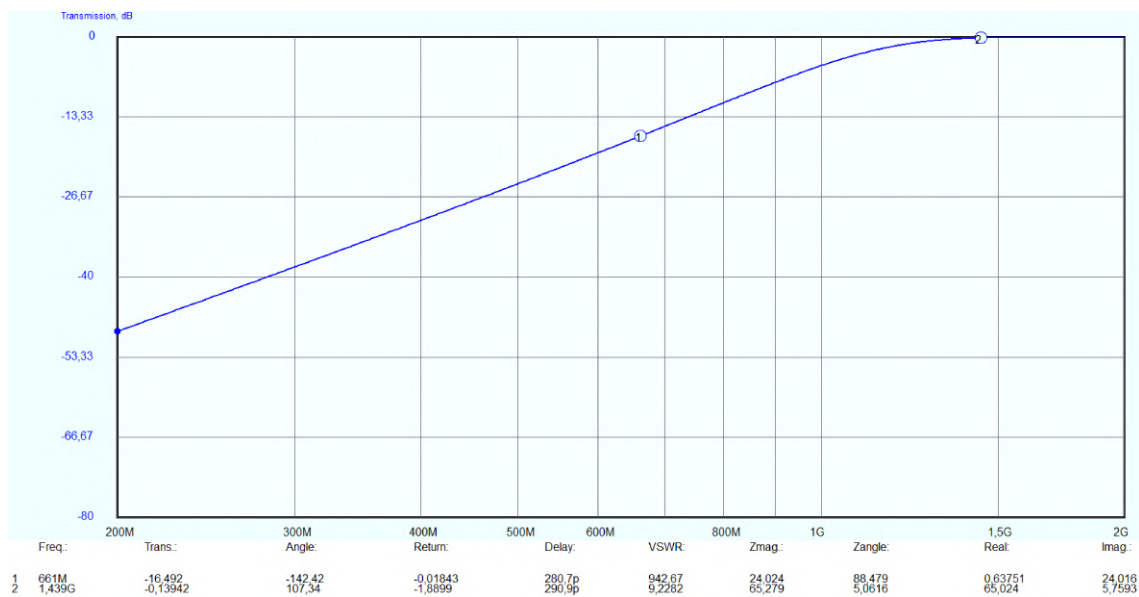
F.2. RF szűrők szimulációja



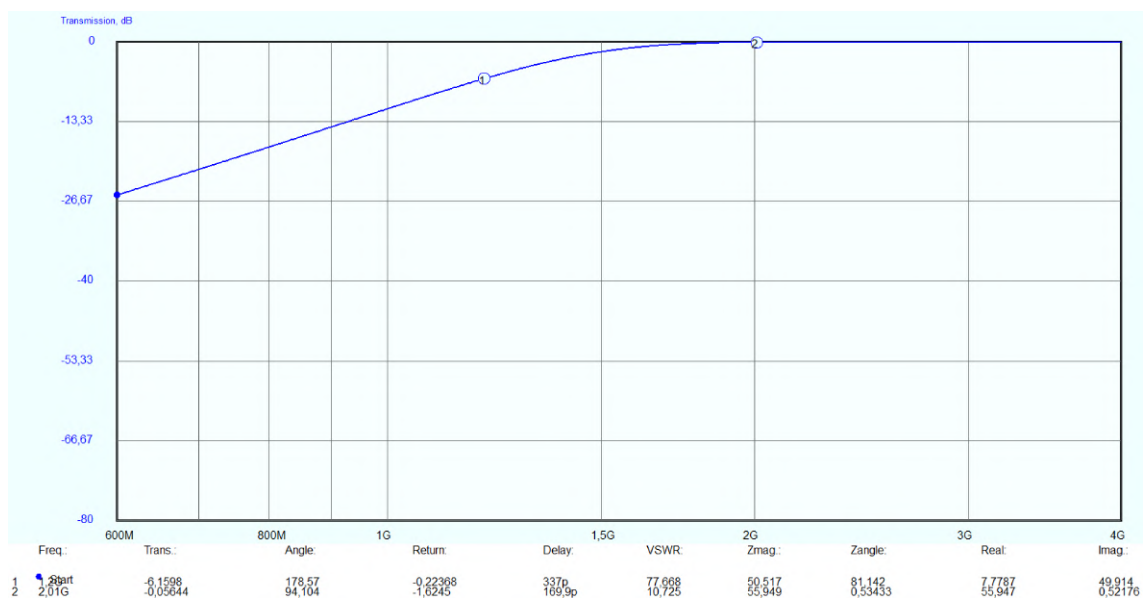
F.2.1. ábra. I. sáv aluláteresztő szűrője



F.2.2. ábra. III. sáv feluláteresztő szűrője

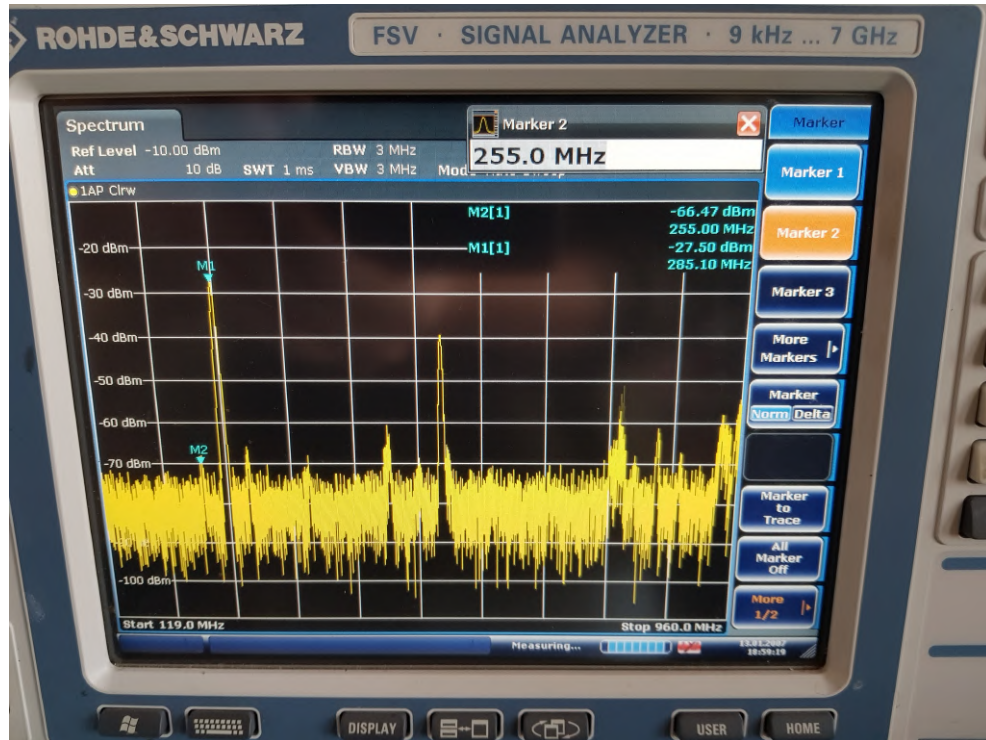


F.2.3. ábra. IV. sáv felüáteresztő szűrője

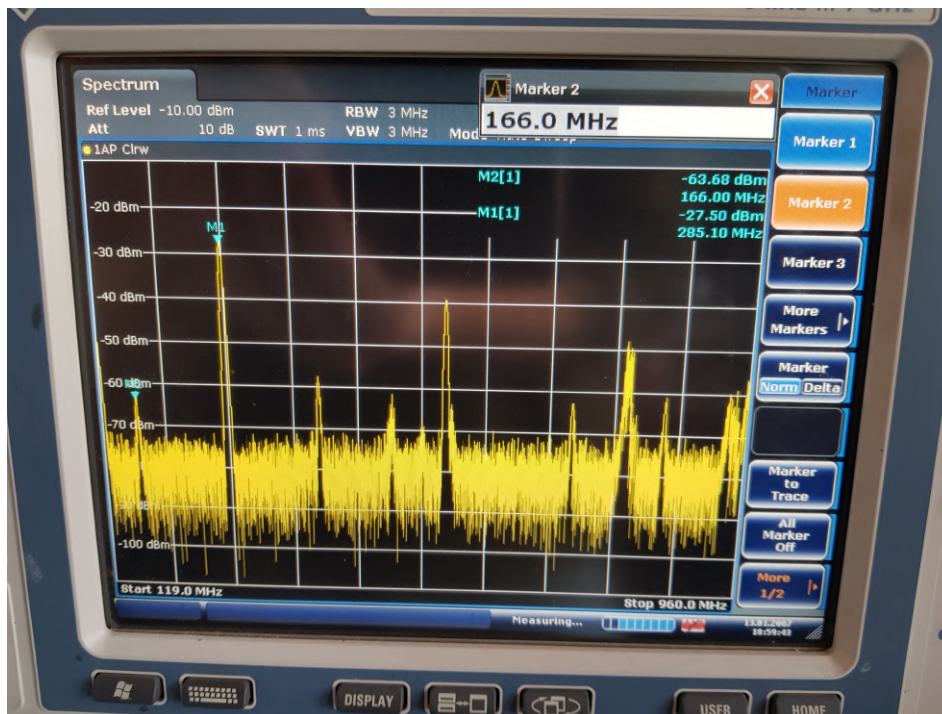


F.2.4. ábra. V. sáv felüáteresztő szűrője

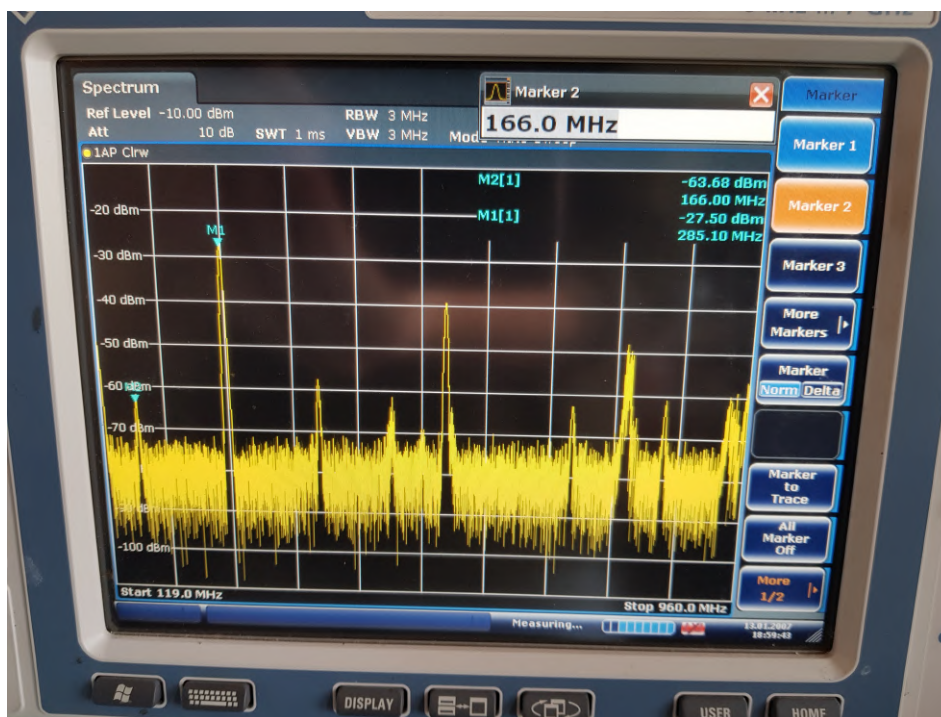
F.3. A keverőhöz tartozó mérések



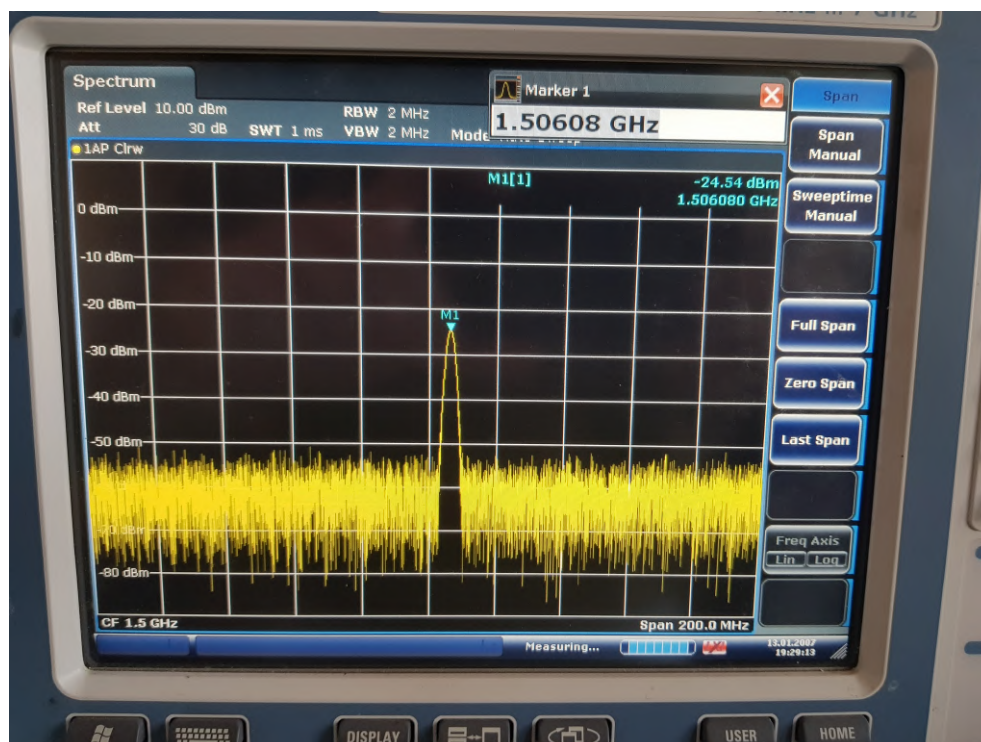
F.3.1. ábra. LO=285MHz, RF=30MHz



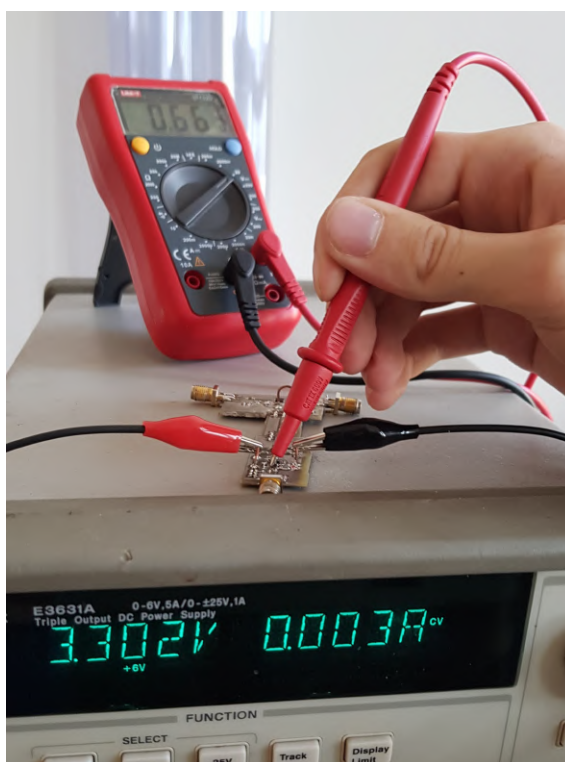
F.3.2. ábra. LO=285MHz, RF=119MHz



F.3.3. ábra. LO=1010MHz, RF=1439MHz



F.3.4. ábra. Szinkronozott oszcillátor

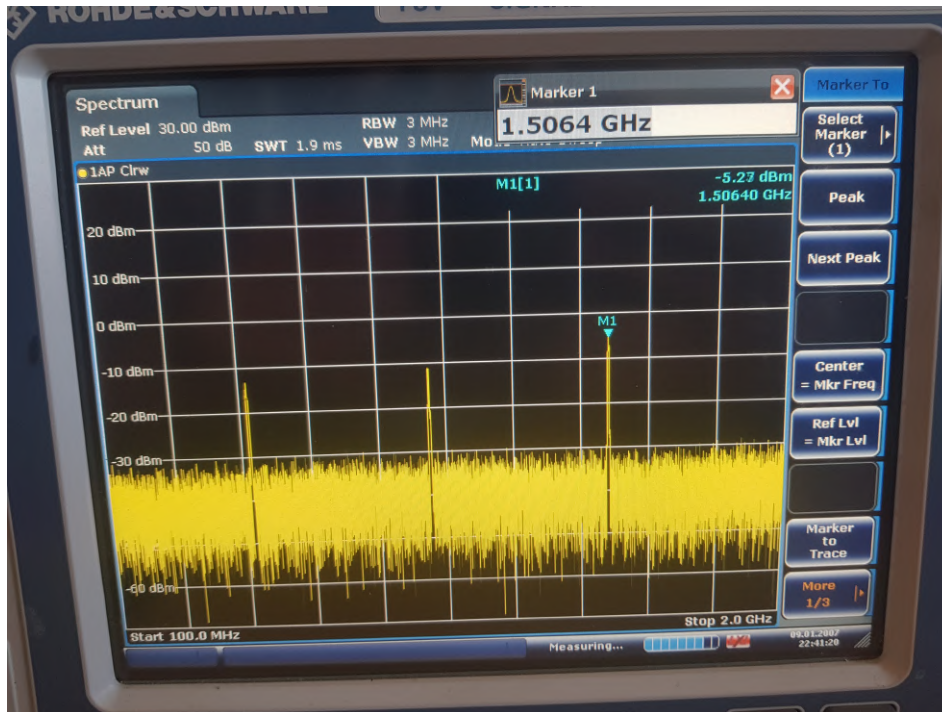


F.3.5. ábra. Bázis feszültség (frekvencia háromszorozó)

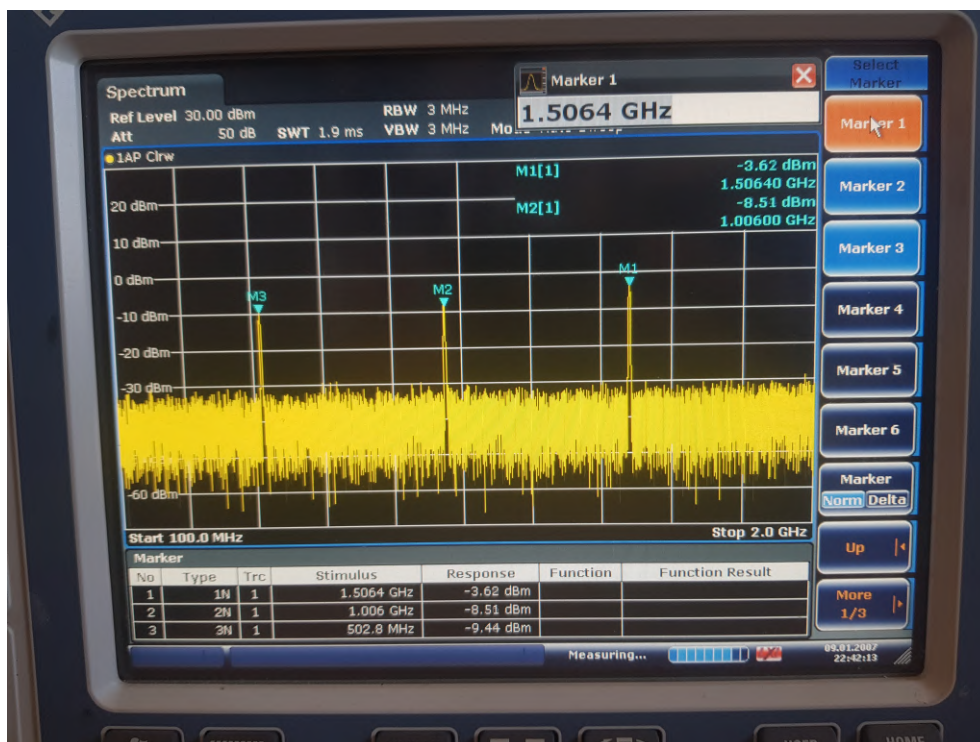


F.3.6. ábra. Emitter feszültség (követő erősítő)

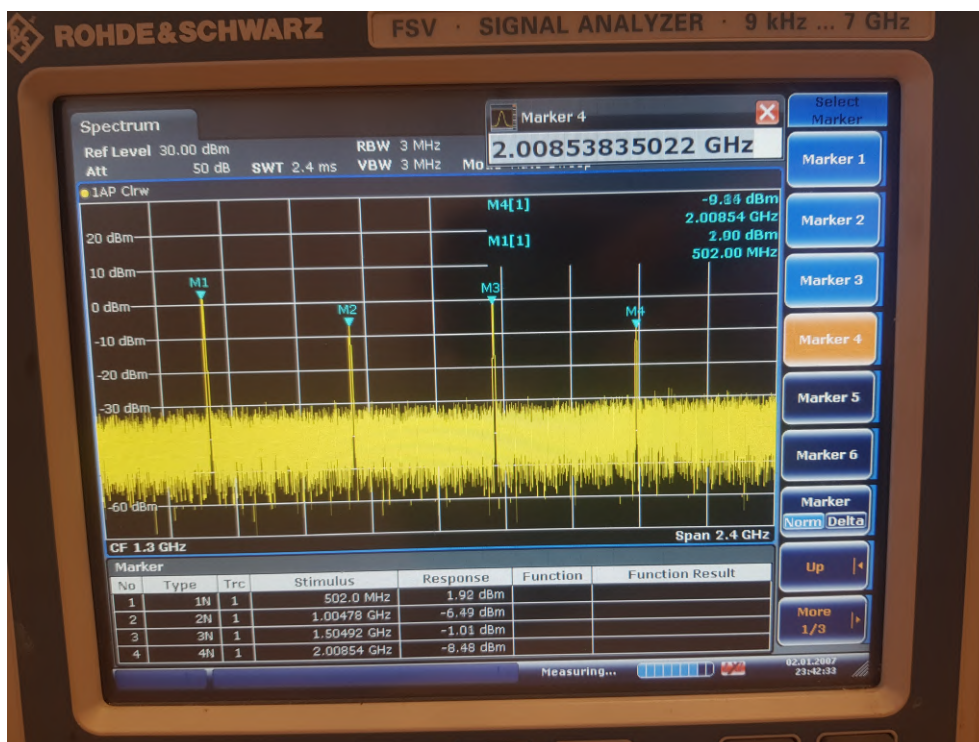
F.4. A frekvencia háromszorozóhoz tartozó mérések



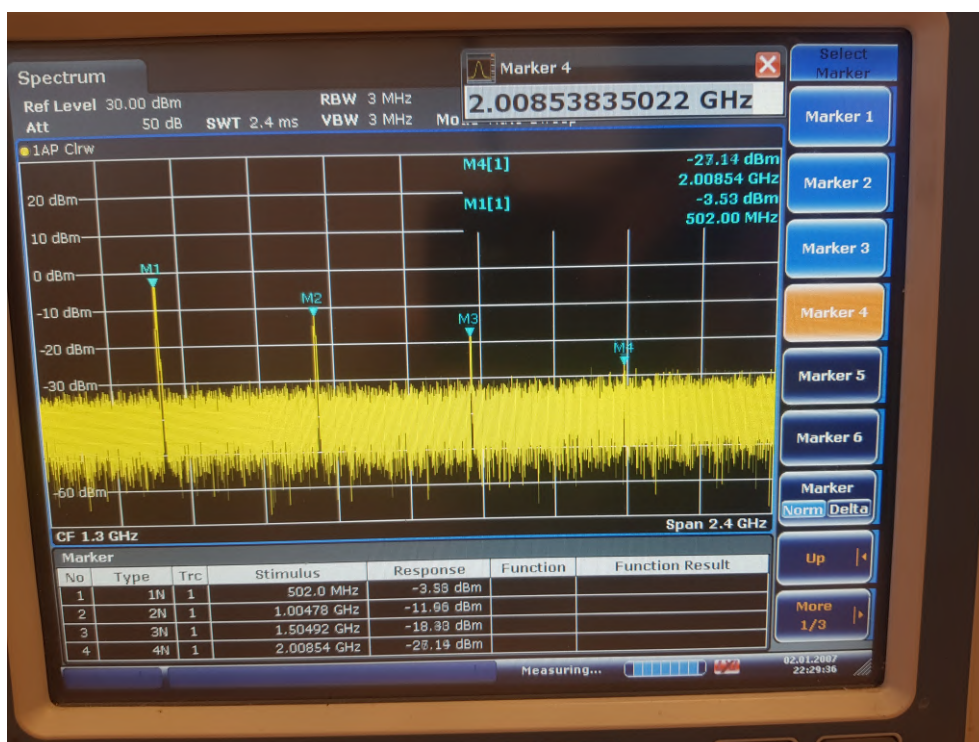
F.4.1. ábra. Szinkronozott oszcillátor (5dBm jellel)



F.4.2. ábra. Szinkronozott oszcillátor (10dBm jellel)



F.4.3. ábra. Földelt emitter alapkcsolás (19dBm jellel gerjesztve)



F.4.4. ábra. Földelt emitter alapkcsolás (10dBm jellel gerjesztve)