



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

# MRC-100 egyetemi műhold elsődleges hasznos terhe

**TDK dolgozat**

Készítette:

Nagy Dominik Gábor

Konzulens:

dr. Dudás Levente

2022

# Tartalomjegyzék

**Kivonat**

**Abstract**

<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
1.1. Előző spektrumanalizátor . . . . .	1
1.2. Motiváció . . . . .	2
1.3. Tudományos érték . . . . .	2
<b>2. Követelmények</b>	<b>3</b>
2.1. Szélsőséges környezet . . . . .	3
2.2. Hideg tartalék . . . . .	3
2.3. Alrendszerek . . . . .	4
2.3.1. rendszer (COM): . . . . .	4
2.3.2. S-sávú adó (STX): . . . . .	4
2.3.3. Fedélzeti számítógép (OBC): . . . . .	4
2.3.4. Áram határoló kapcsoló (LSW): . . . . .	4
2.3.5. Elektromágneses helyzetstabilizáló rendszer (ADCS): . . . . .	4
2.3.6. Teljes Ionizáló Dózis mérő és Esemény-detektor (TID): . . . . .	4
2.3.7. Nap és horizont szenzor (SUN): . . . . .	4
2.3.8. Külső egyetemi kísérletek: . . . . .	4
2.3.9. GPS és kamera (GPS, CAM): . . . . .	5
2.3.10. Rezonáns passzív reflektor: . . . . .	5
2.3.11. Spektrumanalizátor (SPA): . . . . .	5
<b>3. Spektrumanalizátor bemutatása</b>	<b>6</b>
3.1. Egyenes vevő . . . . .	6
3.2. Szuperheterodin vevő . . . . .	7
3.3. Spektrumanalizátorok működése általában . . . . .	8
3.4. Fourier-transzformáció . . . . .	9
3.5. Az általam tervezett rendszer működése . . . . .	9
<b>4. Részegységek megtervezése</b>	<b>11</b>
4.1. Antenna . . . . .	11
4.2. PIN dióda . . . . .	11
4.3. Tuner chip . . . . .	13
4.3.1. LNA - kis zajú erősítő . . . . .	13
4.3.2. RF szűrő és keverő . . . . .	13
4.3.3. VCO . . . . .	14
4.3.4. KF szűrő és változtatható végfokozat . . . . .	14
4.4. AD konverter . . . . .	15

4.5. RP2040 . . . . .	16
4.6. Hőmérséklet kompenzált kristály oszcillátor . . . . .	17
4.7. Digitális adatbusz védelme . . . . .	18
4.8. PCB tervezés . . . . .	18
<b>5. Programozás</b>	<b>21</b>
5.1. CLK előállítás . . . . .	21
5.2. DMA . . . . .	22
5.3. FFT . . . . .	22
<b>6. Mérések</b>	<b>23</b>
6.1. CLK mérése . . . . .	23
6.2. ADC mérése jelgenerátorról . . . . .	24
6.3. Tuner chip mérése jelgenerátorról . . . . .	26
6.4. Sugárzott mérés . . . . .	30
6.5. Fogyasztások . . . . .	31
<b>7. Összegzés</b>	<b>32</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>33</b>

# Kivonat

Elkészült 2020-ban egy térkép, ami az egész Földet lefedő elektromágneses szennyezettséget mutatja a digitális földfelszíni TV adók frekvenciasávjában. Ehhez a mérési adatokat a SMOG műholdak fedélzetén helyet kapó spektrumanalizátorok szolgáltatják. Dolgozatomban a következő egyetemi műhold elsődleges tudományos kísérletét mutatom be. Ez egy jóval szélesebb frekvenciatartományt lefedő spektrumanalizátor, ami 30MHz-től 1600MHz-ig képes monitorozni a rádiófrekvenciás szennyezettséget LEO pályán. Ezen elektromágneses sugárzások egyrészt zavarhatják a műholdakkal való kommunikációt (fedőtérerősséget létrehozva), másrészt energiapazarlás kisugározni például TV vagy rádió adásokat az űr felé. Ismertetem a környezeti viszonyokat, a rendszer felépítését, működését, a tervezési szempontokat és a jelfeldolgozási lépéseket. Ezen kísérlet lehetőséget nyújthat egy következő szennyezettségi térkép megalkotására, immár egy jóval szélesebb frekvenciatartományban.

# Abstract

A map was completed in 2020 that shows the electromagnetic pollution covering the entire Earth in the frequency band of digital terrestrial TV transmitters. For this, the measurement data were provided by the spectrum analyzers on board the SMOG satellites. In my thesis, I present the primary scientific experiment of the following university satellite. It is a spectrum analyzer covering a much wider frequency range, which can monitor radio frequency pollution in LEO orbit from 30MHz to 1600MHz. On the one hand, these electromagnetic radiations can interfere with communication with satellites (creating masking field strength), and on the other hand, it is a waste of energy to broadcast, for example, TV or radio broadcasts into space. I describe the environmental conditions, the structure and operation of the system, the planning aspects, and the signal processing steps. This experiment may provide an opportunity to create the next pollution map, now in a much wider frequency range.

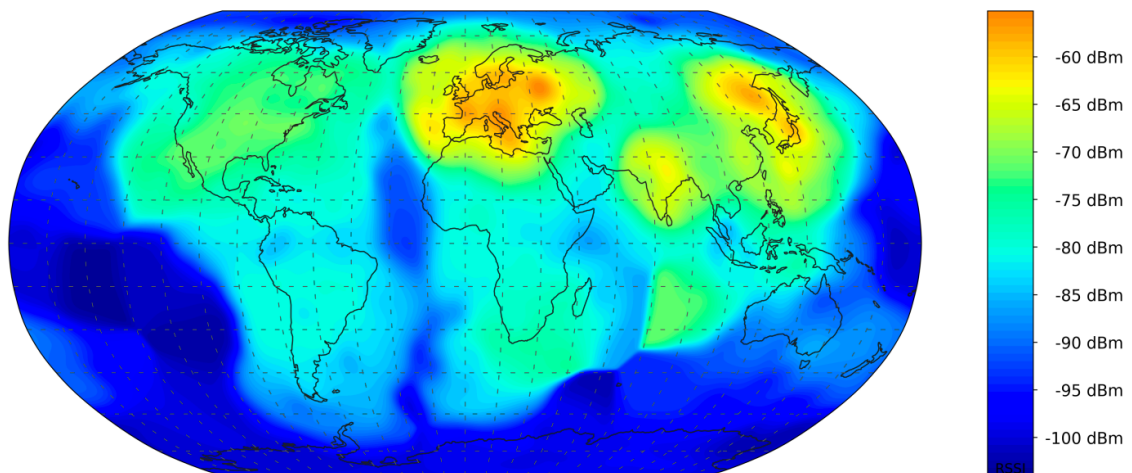
# 1. fejezet

## Bevezetés

### 1.1. Előző spektrumanalizátor

A korábbi SMOG és ATL missziók során a műholdak fedélzetén helyet kapott egy-egy spektrumanalizátor. Ezek a digitális földfelszíni műsorszórók által használt frekvenciasávban, pontosabban 460-860MHz között mérték a Földet körülvevő rádiófrekvenciás szennyezettséget[1]. Ezekből a mérésekből el is készült egy egész bolygót lefedő szennyezettségi térkép. Ez látható az 1.1-es ábrán[2]. Ezek a műholdak alacsony Föld körüli poláris napszinkron pályán keringtek és végezték a méréseket. 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. Ezek 1PQ<sup>1</sup> illetve 2PQ méretű zsebműholdak voltak.

A térképről leolvasva jól látszik, hogy igen jelentős mértékben jutnak ki az űrbe elektromágneses jelek, amik fedőtérerősséget hozhatnak létre, ezzel esetleg akadályozva a műholdas összeköttetéseket. Ezért a stabil műholdvezérléshez nem elegendő néhány Watt teljesítménnyel küldeni a parancsokat, hanem több nagyságrenddel is emelni kell az adóteljesítményt[3]. Ezentúl energiapazarlás is, hiszen a cél az, hogy a felhasználókhoz jussanak el a televíziós adók jelei, ne a világűrbe.



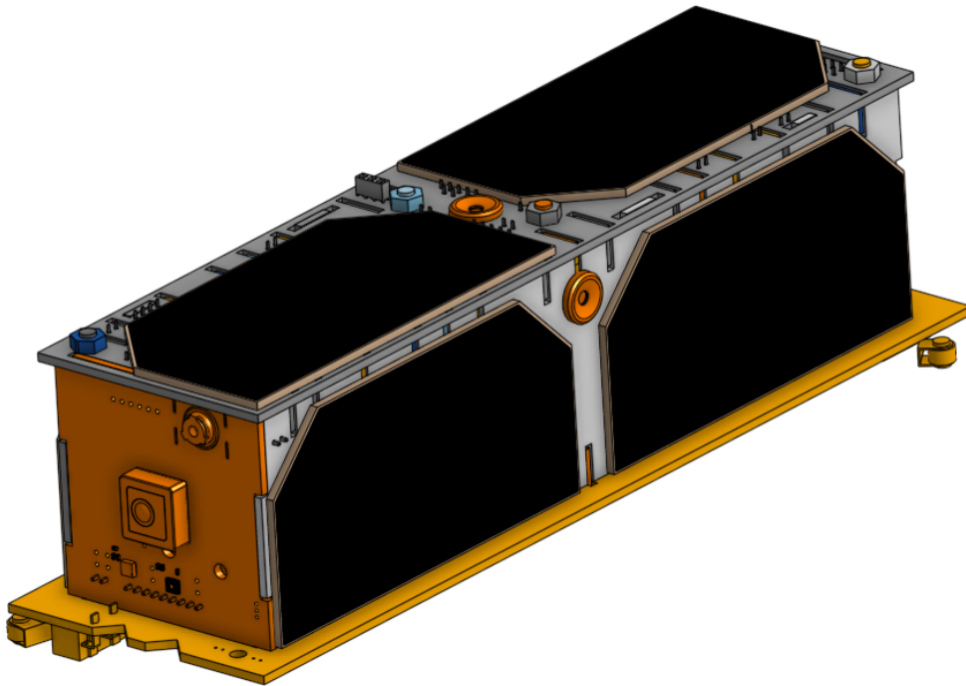
1.1. ábra. Szennyezettségi térkép

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

## 1.2. Motiváció

Az előző missziók sikerén felbuzdulva, érdemes lehet megvizsgálni, hogy milyen jelszintek mérhetők egyéb frekvenciákon. A tervezendő spektrummonitorozó rendszer 30MHz-től 1600MHz-ig vizsgálná 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 berendezések 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 idén 100 éves. A műhold mérete 3PQ, azaz 50x50x150mm. Ez a SMOG-1 térfogatának háromszorosa.



1.2. ábra. MRC-100 3D modellje[4]

## 1.3. Tudományos érték

Ballonos kísérlet alapján a SMOG-os küldetések által lefedett frekvenciatartományon kívül is jutnak jelentős teljesítménnyel jelek a világűrbe.

Ezért a kutatási témám ezeknek a jeleknek a pontos mérése, illetve az ehhez szükséges mérőrendszer létrehozása. Így LEO pályán monitorozni lehet majd a bolygót körülvevő RF szennyezettséget a frekvencia és a hely függvényében, ami további tudományos kutatásokhoz használható fel. Illetve fel lehet hívni az emberek figyelmét arra, hogy ez egy valós környezetszennyezési és energiapazarlási probléma, ezért ha megismerjük a szennyező gócpontok helyét, tehetünk az ellen, hogy ezek a szennyezők csökkentsék a villamos energia pazarlását és az űrbe sugározzák feleslegesen. Akár az antennák fejlesztésével, akár az adóteljesítmény csökkentésével, bár ez túlmutat a dolgozatom témáján.

Emellett tudományos értékkel bír, hogy még nem készült a világon ilyen kis méretben (50x25mm, hiszen az 50x50mm-es panelra redundánsan két rendszer foglal helyet), ilyen széles frekvencia átfogású spektrumanalizátor egy műhold fedélzetére sem.

## 2. fejezet

# Követelmények

Az űreszközökbe tervezett elektronikus eszközök esetén több speciális paramétert is figyelembe kell venni a tervezés során, amelyeket földi körülmények között nem biztos, hogy teljesen természetesnek gondolnánk. Ezeket a speciális követelményeket ismertetem a következőkben.

### 2.1. Szélsőséges környezet

Először is felbocsátás közben a hordozó rakéta okozta rázkódás miatt törekedni kell arra, hogy olyan alkatrészeket használjunk, amik a lehető legbiztonságosabban rögzíthetők, kicsi a tömegük és nem érzékenyek a nagy mechanikai igénybevételeknek.[5]. A fent említett zsebműholdak hőkapacitása igen kicsi, emiatt Földárnyékban hamar kihűlnek a naps oldalon viszont hirtelen felmelegsznek. Így a fedélzeti elektronikának illetve a mechanikai váznak igen jelentős hőmérséklet különbségeknek kell ellenállni. Ezért olyan áramköri elemeket választottam amelyek képesek üzemelni  $-40^{\circ}\text{C}$  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 hőátadással hűlni, hiszen a levegő, mint hűtő közeg nincs jelen. A hő csak sugárzás és vezetés útján tud távozni [6], 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[7] jelenség alakulhat ki. 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. Ezeket áram határoló kapcsolóval lehet kivédeni, amik lekapcsolják az adott alrendszert, ha túláramot vagy túlfeszültséget érzékelnek[8].

### 2.2. Hideg tartalék

Fontos a szélsőséges űri környezetben is a stabil működés, ezért minden rendszer egy pont meghibásodásra van tervezve, azaz minden rendszerből kettő kerül a fedélzetre. 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.



## **2.3. Alrendszerek**

### **2.3.1. rendszer (COM):**

A műholddal való kommunikáció a 70cm-s rádióamatőr sávban valósul meg, GMSK modulációval maximum 12,5kHz-es sávszélességgel, 22dBm adóteljesítménnyel. Antennája egy  $\lambda/4$ -es monopól lesz.

### **2.3.2. S-sávú adó (STX):**

A sok kísérlet által generált adat és a kamera által készített képek letöltésére az UHF adó sebességével a földi állomás feletti áthaladások rövidsége miatt nem lenne elég idő, ezért egy 2,2675GHz-en működő adó is helyet kap a fedélzeten, amivel 2Mbps adatátviteli sebességet érünk el.

### **2.3.3. Fedélzeti számítógép (OBC):**

A műhold fedélzeti számítógépe felelős a mérési feladatok ütemezéséért, az adatok tárolásáért, illetve a földi állomástól érkező parancsok végrehajtásáért.

### **2.3.4. Áram határoló kapcsoló (LSW):**

Minden alrendszer egy áram határoló kapcsolón keresztül csatlakozik az energiabuszra. Ennek segítségével az adott rendszert le lehet kapcsolni, valamint az alrendszer meghibásodása esetén a kapcsoló automatikusan leválasztja azt, így biztosítva, hogy a műhold többi része továbbra is működőképes maradjon.

### **2.3.5. Elektromágneses helyzetstabilizáló rendszer (ADCS):**

A műholdra három tengely mentén elhelyezett elektromágnesekkel célunk a Föld mágneses mezejével kölcsönhatva szabályozni a műhold pozícióját, hogy az S-sávú adó antennájának fő sugárzási iránya a földi állomás felé tudjon állni a stabil összeköttetéshez.

### **2.3.6. Teljes Ionizáló Dózis mérő és Esemény-detektor (TID):**

A világűrben ahol a Föld mágneses tere már nem véd a töltött részecskéktől az áramköröket erő sugárzás azokban kárt tehet. Ennek a vizsgálatára kétféle kísérlet is lesz a fedélzeten. Az egyik a műhold elektronikus alrendszereit érő teljes ionizáló sugárdózis mérésére szolgáló eszköz, ennek egy előző verziója már a SMOG-P és SMOG-1 műholdak fedélzetén is helyet kapott. A másik egy memória alapú esemény-detektor, amely a töltött részecskék által az áramkörök memóriáiban okozott bithibákat vizsgálja.

### **2.3.7. Nap és horizont szenzor (SUN):**

A műhold orientációjának a meghatározására szolgál ez az alrendszer. Négy darab, néhány pixel felbontású kamera négy különböző irányban elhelyezve figyeli a Föld horizontját valamint a Napot, majd ezek alapján kiszámolja a műhold orientációját.

### **2.3.8. Külső egyetemi kísérletek:**

A műhold fedélzetén helyet kap a debreceni, óbudai, szegedi, szabadkai és a győri egyetemek által fejlesztett egy-egy kísérlet.

### 2.3.9. GPS és kamera (GPS, CAM):

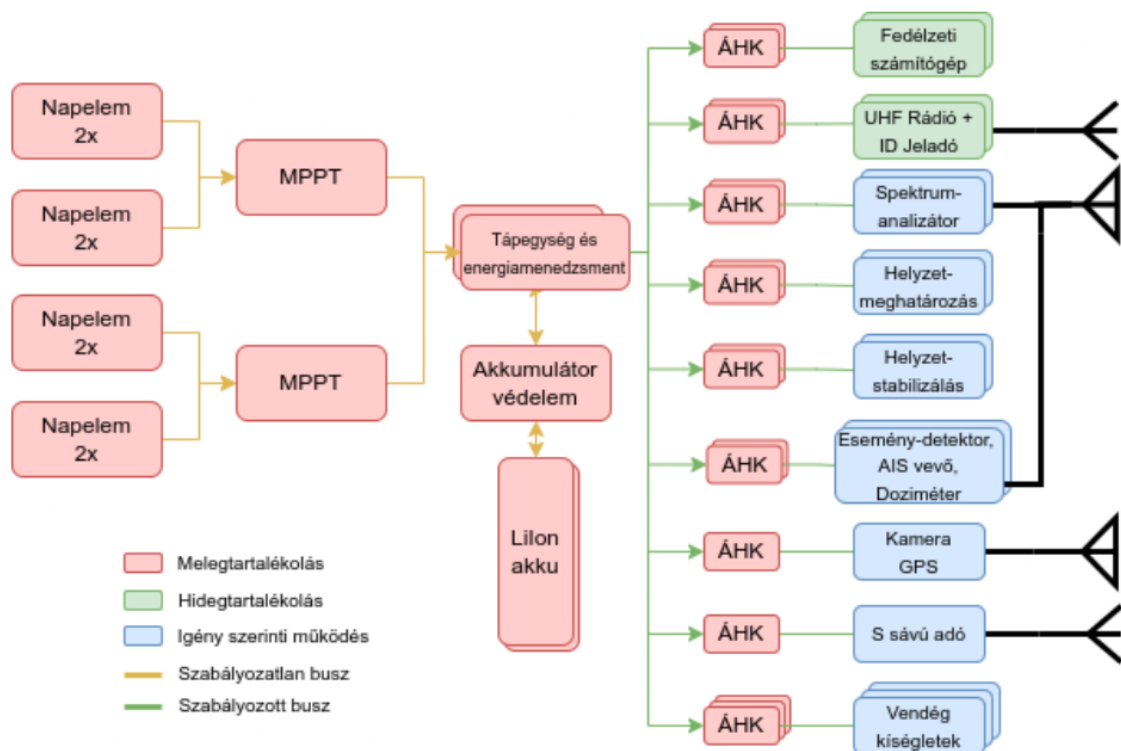
A fedélzeten helyet kap egy GPS modul valamint egy kamera is.

### 2.3.10. Rezonáns passzív reflektor:

A műhold antennáinak szakadással vagy rövidzárral történő lezárásával a reflexió tényezője +1 és -1 között változtatható. Így egy földi állomásról felküldött CW jelet képes a műhold modulálni, majd a reflektálódott jelet a egy másik állomás képes venni. A két állomás között közel -200 dB-es csillapítás kerül a rendszerbe ezért olyan kódolás használata szükséges amivel a zaj alól ki lehet emelni a jelet. Ezzel a megoldással egy olyan kommunikáció hozható létre melyet a kódolás ismerete nélkül harmadik fél nem tud detektálni.

### 2.3.11. Spektrumanalizátor (SPA):

Elsődleges küldetése az MRC-100-nak. Feladata az elektromágneses szennyezettség mérése alacsony földközeli pályán 30MHz-től 1,6 GHz-ig.



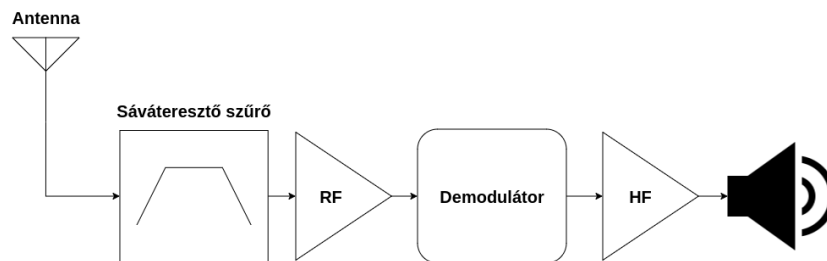
2.1. ábra. Rendszer felépítése[9]

## 3. fejezet

# Spektrumanalizátor bemutatása

A frekvenciatartománybeli mérési módszerek egyik alapvető eszköze a spektrumanalizátor. Ahhoz, hogy megértsük egy spektrumanalizátor működését, először tekintsük át a rádiófrekvenciás jelek vételéhez szükséges struktúrákat.

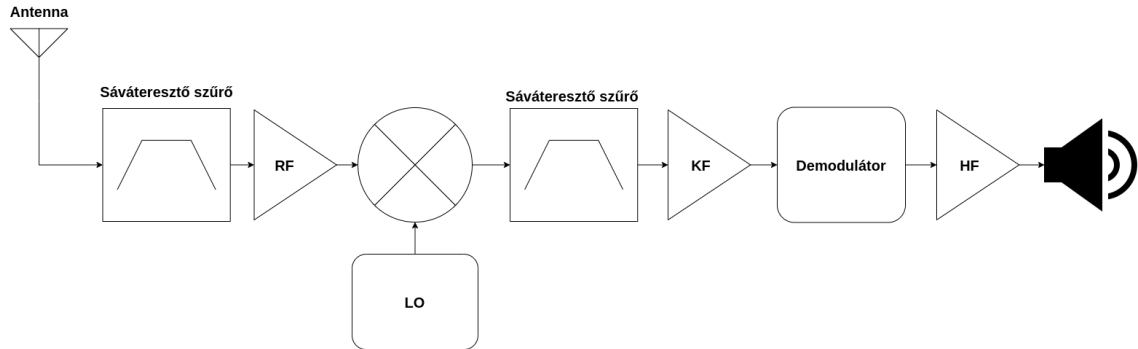
### 3.1. Egyenes vevő



3.1. ábra. Egyenes vevő működése

A 3.2. ábrán látható egyenes vevő működésének lényege, hogy a venni kívánt sávot egy hangolható sáváteresztő szűrővel választjuk ki, majd a vett rádiófrekvenciás jelet egy erősítőfokozaton átengedve közvetlenül demoduláljuk, ami által kinyerjük az alapsávi jelet. A fenti vételtechnika egy az egyben csak olyan alkalmazásoknál használható, ahol kicsiny relatív sáv szélességet szeretnénk átfogni. Ennek az az oka, hogy elvi szinten is rendkívül nehéz egy bizonyos frekvenciatartományban állandó sáv szélességű hangolható szűrőt készíteni, széles frekvenciasávban pedig szinte lehetetlen. Ezt támasztja alá, ha például elképzelünk egy egyszerű párhuzamos LC rezgőkört, aminek mindkét eleme hangolható. Ugyanazt a rezonanciafrekvenciát más és más LC párokra ki lehet hangolni, azonban attól függően, hogy az L és C értéke mekkora, változik a rezgőkör jósága, ami közvetlenül befolyásolja a sáv szélességet.

## 3.2. Szuperheterodin vevő



3.2. ábra. Szuperheterodin vevő működése

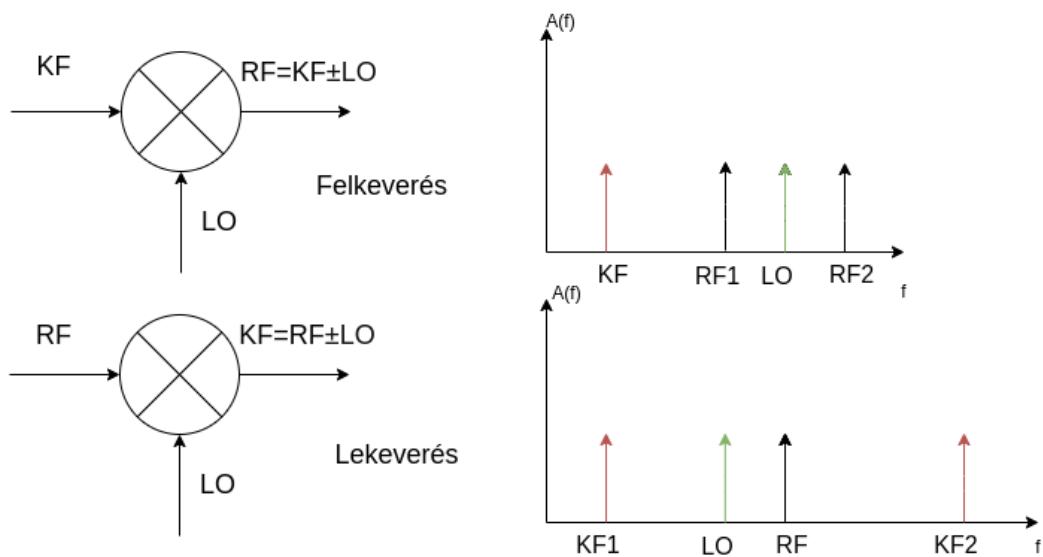
A szuperheterodin elv lényege, hogy nem a bemeneti szűrőt hangoljuk a venni kívánt frekvenciához, hanem a frekvenciát transzponáljuk adott helyre és ott, egy megfelelő karakterisztikájú középfrekvenciás (KF) szűrőn engedjük át a jelet, mely állandó sáv szélességű. A többszörös transzponálás által nagyon jó felbontású spektrummérés lesz elérhető. A frekvenciatranszponálás két különböző frekvenciájú jel időtartománybeli szorzásából áll elő.

$$\cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 - f_2)t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 + f_2)t) \quad (3.1)$$

A kifejezésből jól látható, hogy a szorzat eredménye egy különbségi és egy összegfrekvenciás komponens, azaz megvalósult a frekvenciaváltás. Ha például magasabb frekvenciáról váltunk alacsonyabbra, akkor az összegfrekvenciás tag elnyomható egy aluláteresztő szűrővel. Nagyfrekvenciás jelek közötti szorzás művelete egy nemlineáris elemmel, a keverővel valósítható meg. A keverőnek három kapuja van, RF - Rádió frekvencia, KF - Középfrekvencia, 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 keverő valamilyen nemlineáris elemből épül fel (pl: dióda, tranzisztor). Megkülönböztethetjük őket a kiegyenlítettségük alapján is[10]. Vannak a kiegyenlítetlen keverők, egyszeresen, kétszeresen és háromszorosan kiegyenlített keverők. Ezek arra utalnak, hogy a kimenetre milyen mértékben szivárog a bemeneti jelekből. A kiegyenlítetlennél mindkét bemeneti frekvencia megjelenik a kimeneten, a kétszeresen kiegyenlített keverőnél már mindkét bemenet izolált, azaz nem jutnak a kimenetre. A háromszorosan kiegyenlített két darab kétszeresen kiegyenlített keverőből áll.

A rádiós műsorszórásnál az egyszerűbb átvitel érdekében a hangfrekvenciás jeleket (KF jel) felkeverik rádiófrekvenciára (RF jel) majd kisugározzák. A vevőkészülék ezután ugyanazzal az LO frekvenciával lekeveri hangfrekvenciára, így visszakaptuk az eredeti jelet. Ha egy az egyben a hangfrekvenciás jelet szeretnénk kisugározni, akkor  $\lambda = c/f$  alapján több kilométer magas adóantennákra lenne szükség, ami kivitelezhetetlen. Ezért a hasznos jelet ráültetik egy vivőre, például 100MHz környékére. Ebben az esetben már az autók tetején megszokott antennákkal lehet venni a kilométeres antennák helyett. Vevő oldalon pedig ugyanazzal az LO frekvenciával lekeverjük és visszakapjuk az eredeti hangfrekvenciás jelet.



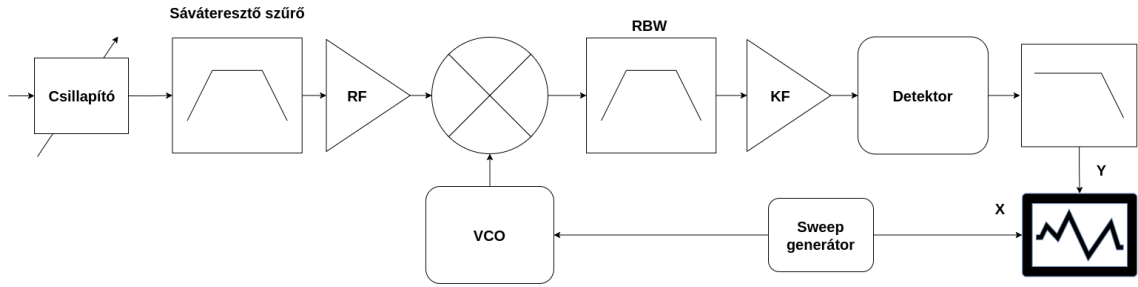
3.3. ábra. Keverő működése

Tehát ha egy 1500MHz-es jel érkezik az antennáról és 2000MHz-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 komponenst. 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 az 1500MHz-es jelet fogjuk tudni 500MHz-re keverni, hanem a 2500MHz-est is. Hiszen ilyenkor a különbségi frekvencia szintén 500MHz lenne. Tehát ha mérnénk egy adott jelszintet 500MHz-en, akkor nem lehetne eldönteni, hogy az eredetileg 2000MHz-hez vagy 2500MHz-hez tartozott-e. Ezért ezeket a tükörfrekvenciás komponenseket még az RF szűrővel ki kell szűrni, hogy a keverés során ne okozzanak gondot.[11]

### 3.3. Spektrumanalizátorok működése általában

A műszer bemenetén a szintillesztést egy vezérelhető csillapító biztosítja, amit a tükörselektivitást biztosító aluláteresztő szűrő követ. A jel ezután egy keverőre kerül, ahol egy hangolható frekvenciájú oszcillátorral az éppen aktuálisan venni kívánt frekvenciájú jelet egy állandó középfrekvenciára keverjük. A középfrekvenciás jelet a KF sávszűrő teszi spektrálisan keskenyebbé és tisztábbá. A fellépő csillapítások kompenzálása érdekében a jelet ezután egy KF erősítőre vezet. A jelteljesítményt egy detektorral mérjük, a mért értékek adatsorát egy átlagoló jellegű ún. videó szűrőn átengedve a kijelző Y tengelyén jelenítjük meg. A Y értéket pedig X függvényében ábrázoljuk, azaz vezéreljük a lokáloszcillátort, ami alapján tudjuk, hogy éppen melyik frekvencia kicsiny környezetét (RBW) monitorozzuk. A helyi oszcillátort egy feszültségvezérelt oszcillátor (VCO) valósítja meg, amit úgy vezérlünk, hogy adott idő alatt az végigpásztázzon a vizsgált frekvenciatartományon és ábrázoljuk az adott frekvenciához tartozó vett teljesítményszintet. A sweepelés idejét, azaz a frekvenciatartományon való végigpásztázás idejét lefutási időnek hívjuk. A lefutási idő nő, ha a KF szűrő sáv szélességét (RBW) csökkentem, cserében pontosabb frekvenciafelbontást kapok.



3.4. ábra. Spektrumanalizátorok működése

Egy másik lehetséges megoldás, amikor nem detektorra vezetjük a mérni kívánt jelet, hanem egy AD konverterrel digitalizáljuk, és így végzünk vele számításokat. Például Fourier-transzformáljuk, és abból számoljuk az egyes frekvenciákon lévő jelteljesítményeket.

### 3.4. Fourier-transzformáció

A Diszkrét Fourier Transzformáció (DFT) egy matematikai módszer, amellyel szinuszos bázisfüggvények szerinti felbontást végezhetünk. A DFT használható digitalizált jelek feldolgozására, hiszen diszkrét bemeneti és kimeneti jelekkel dolgozik. A bemeneti jelek az időtartományban vannak, ezek egyenlő időközökkel történt mintavételezésből származnak. A kimeneti minták a frekvenciatartományban vannak, a minták amplitúdója megmondja, hogy az adott mintához tartozó bázisfüggvényből mekkora amplitúdójúra van szükség a vizsgált jel előállításához. Több módszere van a DFT számításának, de a leggyorsabb a Fast Fourier Transzformáció (FFT - gyors Fourier Transzformáció). Az FFT felfedezése tett lehetővé nagyon sok műszaki vívmányt, és hozzájárult a digitális jelfeldolgozás elterjedéséhez.

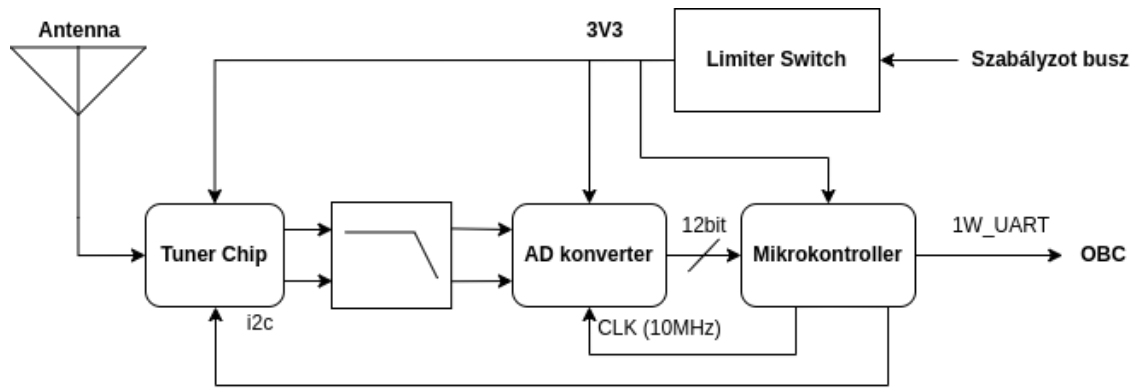
Egy  $N$  mintát tartalmazó  $x[n]$  időtartománybeli jelből az alábbi módon kapjuk meg az  $X[k]$  frekvenciatartománybeli adathalmazt:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j \frac{2\pi}{N} kn} = 0 \quad k = 0 \dots N - 1. \quad (3.2)$$

Ez számításigényes, mert  $N$  darab komplex szorzás és  $N-1$  darab összeadás szükséges egy darab  $X$  kiszámolásához.

### 3.5. Az általam tervezett rendszer működése

Több alrendszer is fogja használni a spektrumanalizátor antennáját, ezért egy PIN diódás leválasztó áramkörrel vannak elválasztva egymástól ezek a rendszerek. Ezután következik a rádiós IC amivel 30MHz és 1600MHz között bármilyen frekvenciáról le lehet keverni, illetve változtatható az erősítése maximum 50dB-ig. Ez valósítja meg a superheterodin struktúrát. Ezután egy aluláteresztő szűrőn keresztül a differenciális jel egy AD konverterre kerül, ami 10MHz-el mintavételezi azt. Ezt a mintavételezést a mikrokontroller ütemezi. Mintavételezés után az ADC a 12bit-es adatbuszán keresztül elküldi a mikrokontrollernek a mért értékeket. A mikrokontroller Fourier-transzformálja a vett jelet, majd küldi tovább az RSSI értékeket a fedélzeti számítógép felé. Ha megfelelő pontra ér a műhold, és látja a földi állomást, akkor lesugározza neki a mért adatokat.



**3.5. ábra.** A rendszer blokkvázlata

Minden alrendszerhez tartozik egy LSW<sup>1</sup>, ami túláram/túlfeszültség esetén lekapcsolja az alrendszert a buszról.

A műhold fedélzetén a szabályzott busz feszültsége 3,3V. A spektrumanalizátor maximális áramfelvétele 250mA-re van korlátozva, a 2.1 alpontban leírtak miatt. Így az a maximális teljesítmény amivel gazdálkodhatok  $P = U \cdot I = 3,3V \cdot 250mA = 0,825W$ , ez a hatoda egy átlagos telefontöltő teljesítményének. Ebbe az áramkorlátba bele kell férnie az egész rendszernek. A másik megkötés, hogy a fedélzetre nem lehet akármilyen és akármekkora antennát elhelyezni. Pályára állításkor a műhold egy rekeszből fog kilöködni, ezt a rekeszt teljesen kitölti a műhold, így nem sok hely marad az antennának. Fedélzeten belül sem lehet elhelyezni, majd pályára állás után a fedélzeten belülről nyitni, mert minden rendelkezésre álló térfogatot elfoglalnak az alrendszerek paneljei. Ezért egy kompromisszumos megoldást kellett választani, amit a következőkben részletesen kifejték.

<sup>1</sup>Limiter Switch - Áram határoló kapcsoló

## 4. fejezet

# Részegységek megtervezése

### 4.1. Antenna

A műholdra kerülő huzalantenna, a műhold méretéből adódóan, párszor 100mm lehet maximum. Egy 500mm hosszú monopól lesz az antenna amit a spektrumanalizátor használni fog. A lefedendő frekvenciatartomány túl nagy ahhoz, hogy az antennát illeszteni lehessen az egész sávban, ezért a frekvencia függvényében igen eltérő viselkedést fog mutatni. 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 az ötöde fog kerülni. Ez azt jelenti, hogy ezen a frekvencián igen jelentős kapacitív reaktanciát fog mutatni az antenna. Viszont 1600MHz-en 46mm hosszú antenna lenne az ideális.

Mivel lesz egy rezonáns reflektor kísérlet és egy AIS vevő, ezért az a döntés született, hogy az antenna hossza ezekhez a kísérletekhez tartozó 140MHz körüli frekvenciákon legyen jó hatásfokú. Így adódott az 500mm-es hossz. A spektrumméréshez pedig tartozni fog egy kalibráció, ami az antenna illesztetlensége miatti hibákat küszöböli ki. Ezt egy reflexiómentesített és árnyékolt mérőszobában fogom elvégezni.

### 4.2. PIN dióda

Ahogy említettem több alrendszer is használja ugyanazt az antennát, ezért biztosítani kell a leválasztásukat. Erre egy PIN diódás kapcsolót használok. A PIN diódán átfolyó áram függvényében változik annak ellenállása (4.1. ábra). Ahhoz, hogy a diódán áramot tudjak átfolytatni, a katódját DC-ben földre kell kötni. Ezt szolgálják a fojtótekercecsek (4.2. ábra).

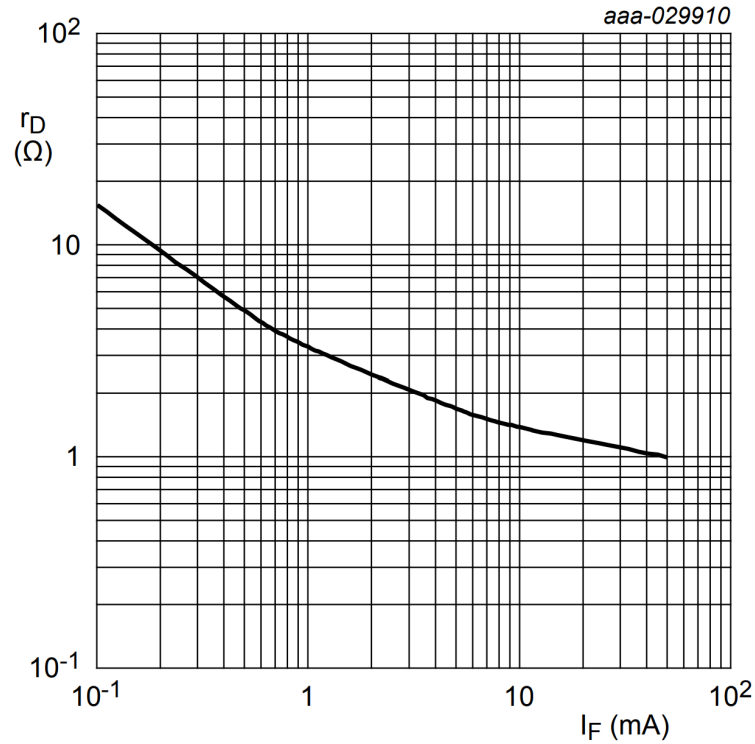
Az áramerősséget úgy választottam meg, hogy bekapcsolt állapotban 1-1,5Ω-ot mutasson a PIN dióda, amit az  $R_4$ -gyel állítok be (4.2. ábra). Lehetőleg legyen minél kisebb az ellenállása a lehető legkisebb áramfelvétel mellett.

A dióda katódja DC-ben földön van, az anódja pedig 0.9V-on. A P csatornás FET-en elhanyagolhatóan kicsi feszültség esik, ezért 3,3V-tal számolhatok a Drain lábán. A kívánt áram pedig 10-11mA.

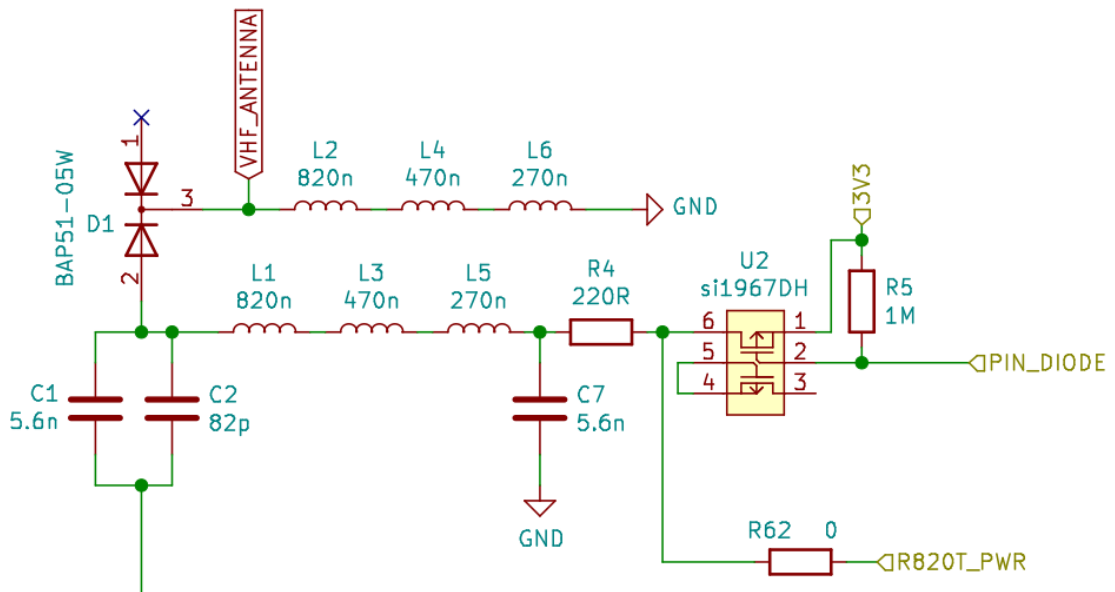
$$R = \frac{3,3V - 0,9V}{11mA} = 218\Omega \quad (4.1)$$

Én a 220Ω-os szabvány értéket választottam, amivel az áram 10,9mA. Emellett a tuner chip tápfeszültségét is ezzel a FET-tel kapcsolom. Így amikor nincs mérés, és a rendszer nincs rákapcsolva az antennára, akkor a tuner chip sem fogyaszt feleslegesen.





4.1. ábra. PIN dióda ellenállása[12]



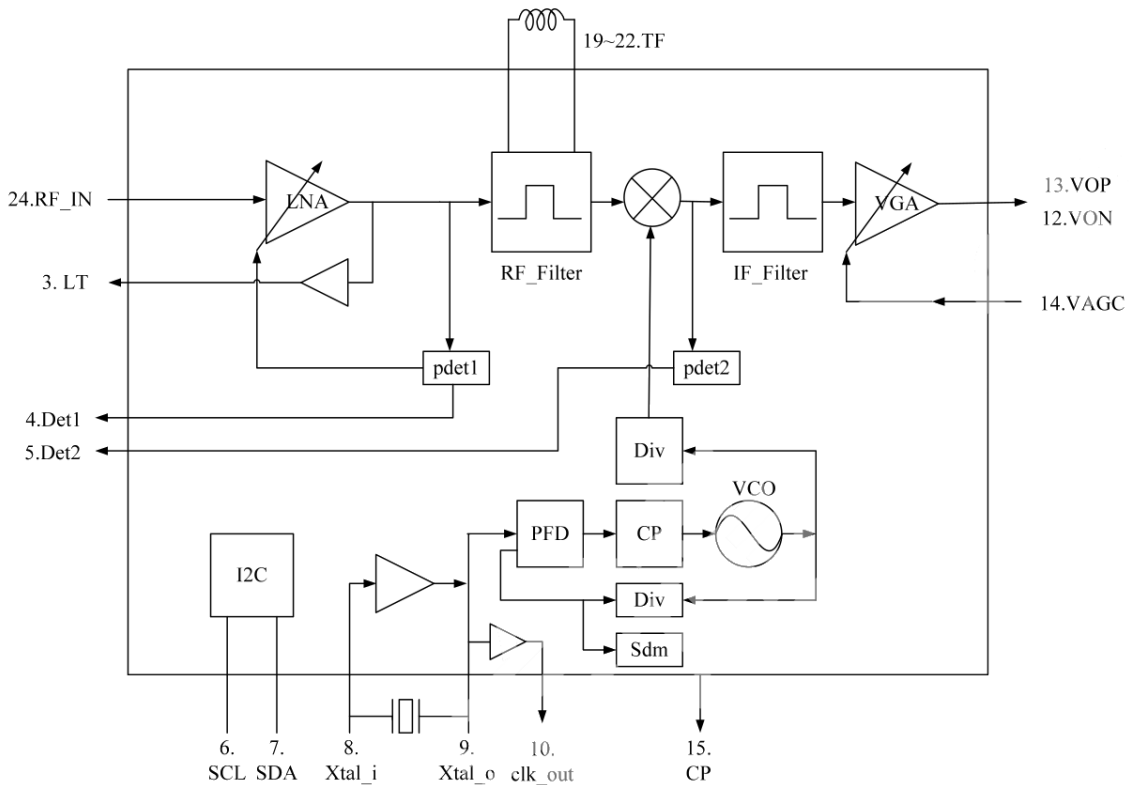
4.2. ábra. PIN diódás kapcsoló

A dióda utáni fokozatot egyenáramúlag csatoló kondenzátorokkal választom el. Ezeknek az impedanciáinak az adott karakterisztikus impedanciájú környezethez képest (jelen esetben  $50\Omega$ ) minimum egy nagyságrenddel kisebbnek kell lenni az üzemi frekvenciákon.

$$Z_C = \frac{1}{j \cdot \omega C} \leq \frac{Z_{körny}}{10} \quad (4.2)$$

### 4.3. Tuner chip

A választott IC egy R820T2[13] rádiós chip, ami 30MHz-től 1600MHz-ig képes lefedni a spektrumot. Az első fokozata egy kis zajú erősítő aminek állítható az erősítése. Ezt követi egy RF szűrő ami a tükrőfrekvenciák kiszűrésére szolgál. A következő részegység a keverő, amivel középfrekvenciára lehet keverni. Majd következik egy KF szűrő, ami a nemkívánatos keveredési terméket szűri ki, majd egy erősítővel zárul a blokk, aminek szintén változtatható az erősítése. A keverőhöz egy változtatható frekvenciájú lokáloszcillátor szolgáltatja a jelet.



4.3. ábra. Tuner chip felépítése

#### 4.3.1. LNA - kis zajú erősítő

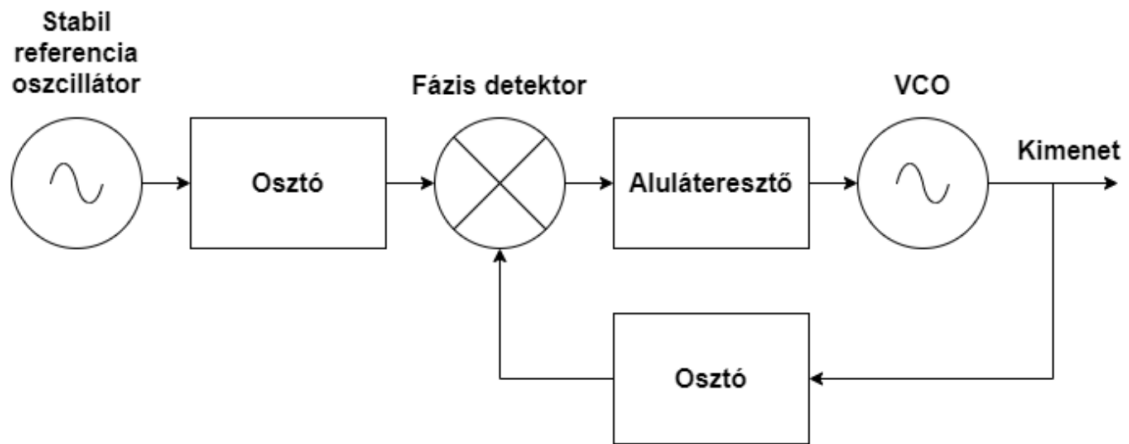
Minden jeltovábbító eszköz fontos tulajdonsága, hogy milyen mértékben járul hozzá a rendszer kimenetén mérhető jel-zaj viszonyhoz. Ezt a tulajdonságát a zajtényező nevű mértékegység nélküli mennyiséggel jellemezzük. Egy rendszer, eredő zajtényezőjét a legelső elem zajtényezője, illetve erősítése határozza meg legnagyobb mértékben. A gyakorlatban az első elem szokott kritikus lenni a továbbiaknál kevésbé szigorú megkötésekkel is élhetünk általában. Ezért indul a tuner chip felépítése is egy kis-zajú erősítővel.

#### 4.3.2. RF szűrő és keverő

A tükrőfrekvenciák kiszűrését szolgálja az RF szűrő, a keverő pedig a frekvencia transzponálást valósítja meg, ahogy már bemutattam a korábbi fejezetekben.

### 4.3.3. VCO

A VCO<sup>1</sup> szolgáltatja a lokálfrekvenciát a keverőnek.



4.4. ábra. PLL működése

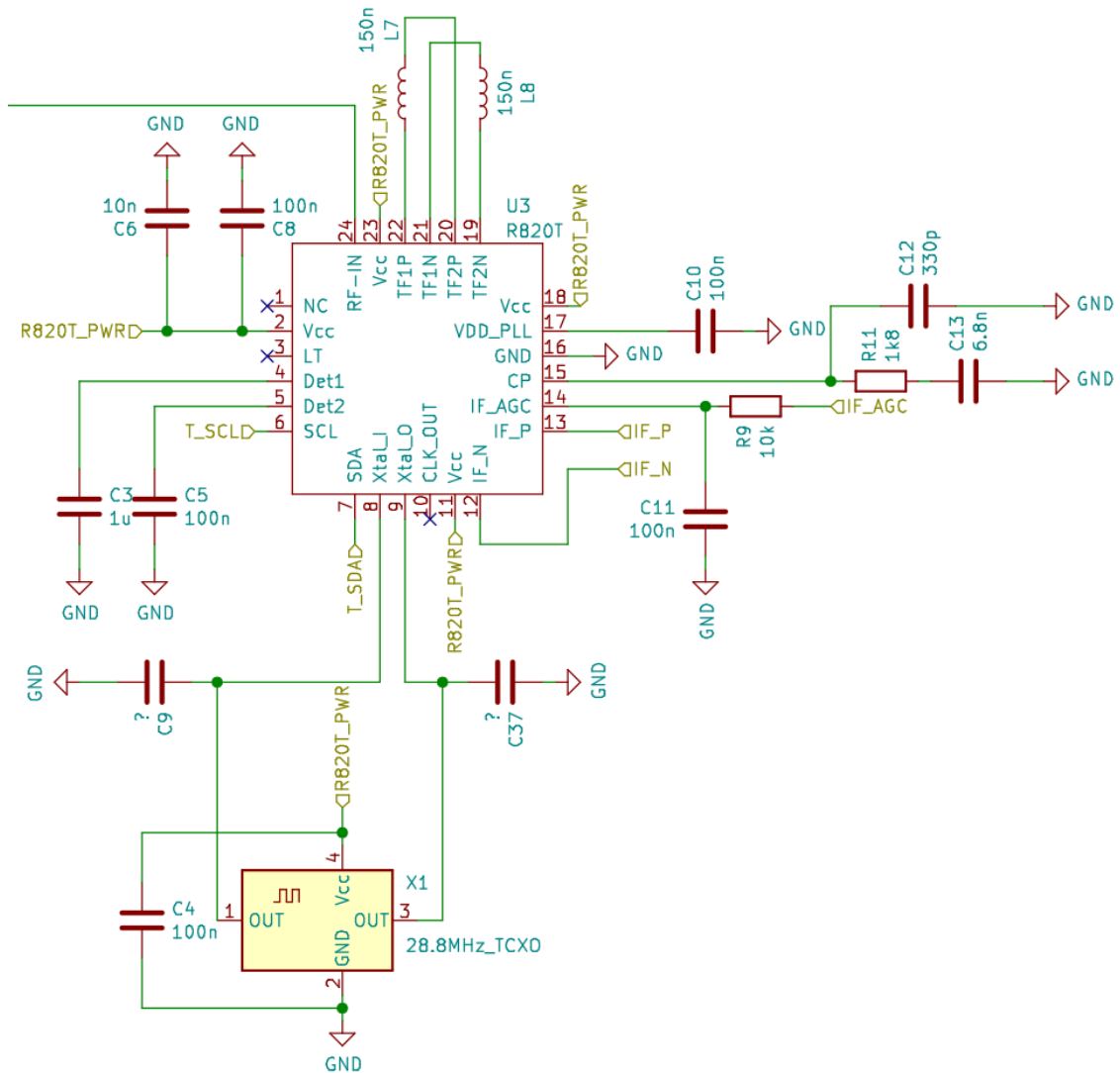
Egy stabil, de fix frekvenciájú oszcillátor egy fázisdetektorra kapcsolódik amelynek kimeneti feszültsége a bemeneteire jutó jelek fáziskülönbségével arányos. Ez a feszültség meghajt egy olyan oszcillátort, amelynek a kimenetén a frekvencia a bemenetere jutó feszültséggel arányos. Ez a változtatható frekvencia egy osztóra kerül, ami azt általunk megadott arányban osztja le a bemenetere érkező frekvenciát és ez jut aztán az előbb említett fázisdetektor másik bemenetere. Ha például a referenciánk 50MHz és a PLL<sup>2</sup> kimenetén 200MHz-et szeretnénk, akkor az osztásarány 4 lesz. Ez azt jelenti, hogy a kimenet frekvenciájának negyede csatolódik vissza a fázisdetektorra, és ha ennek a fázisa kicsit is eltér a referencia fázisától, akkor ez a hibajel a VCO frekvenciáját növeli vagy csökkenti, addig amíg a kettő nem lesz fázisban. Így stabilizálva a kimenet frekvenciáját. A chip utóosztót is tartalmaz a finomabb frekvencia felbontásért.

### 4.3.4. KF szűrő és változtatható végfokozat

A nemkívánatos keveredési termékeket szűri ki. A végfokozattal a szükséges erősítést tudjuk elérni.

<sup>1</sup>Voltage controlled oscillator - Feszültségvezérelt oszcillátor

<sup>2</sup>Phase locked loop - Fáziszárt hurok



4.5. ábra. Tuner chip kapcsolási rajza

A chip egy 28,8MHz-es kristályról működik. Ezt sokszorozza fel a belső PLL a keveréshez.

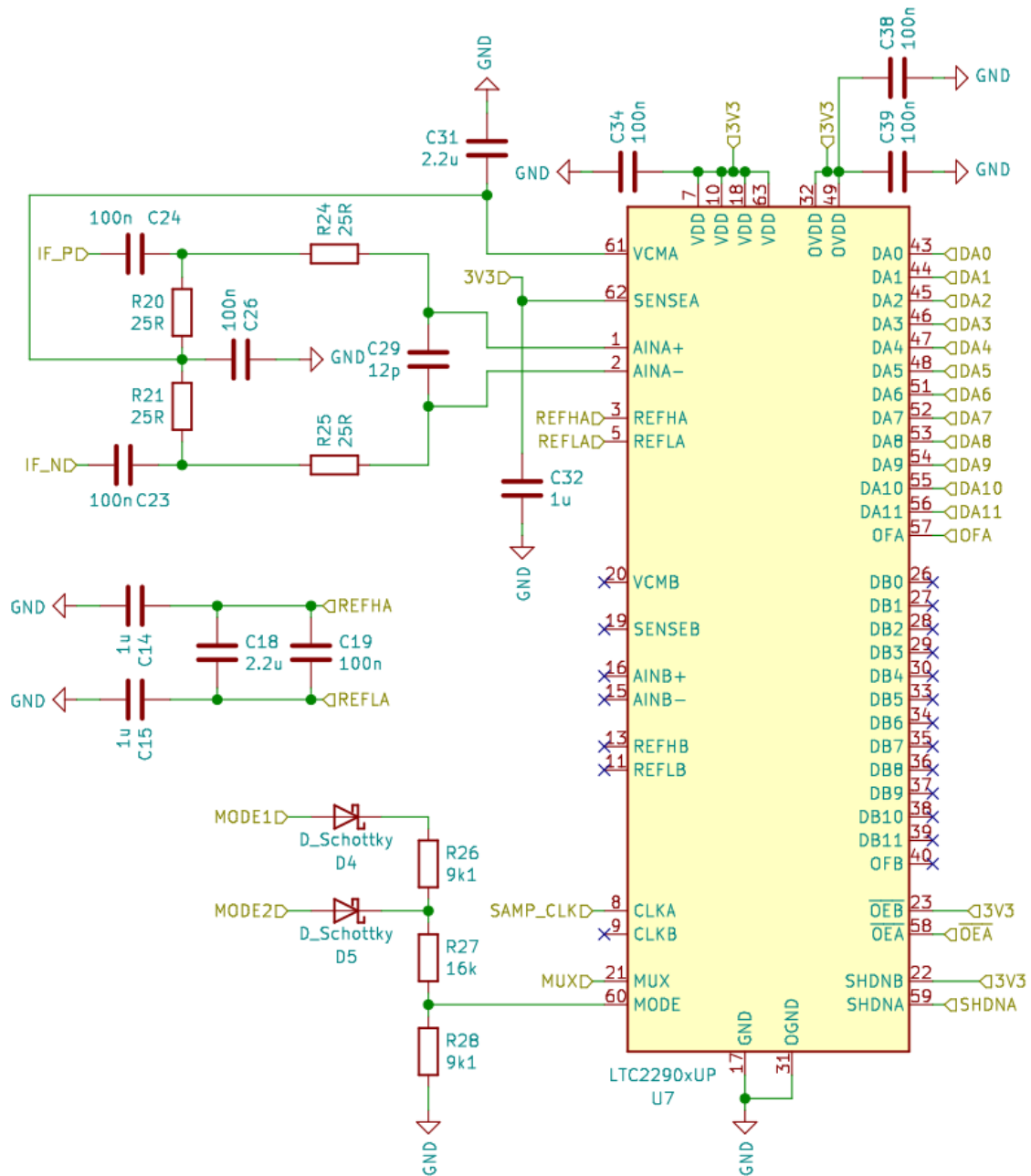
#### 4.4. AD konverter

A tuner chip differenciális kimenete aluláteresztő szűrőt követően az ADC[14] bemenetére kapcsolódik. Az ADC bemenetén megengedett maximális feszültség  $\pm 1V$ , ezért a tuner chip erősítését úgy kell beállítani, hogy ne vezérelje túl az ADC-t. Abban az esetben ha ez mégis megtörténne, az OFA bit bebillen, és azt mikrokontroller oldalon érzékelem, és lejjebb tudom venni a tuner erősítését.

A bemenetére érkező jelet egy belső stabil feszültségreferenciához hasonlítja, ami 1,5V. Ahhoz, hogy ez kellően stabil maradjon, hidegíteni kell a REFHA és REFLA lábakon keresztül. Összehasonlítás után egy 12 bites digitális számot rendel az adott feszültségértékhez.

A MODE lábán keresztül, különböző feszültség szintekkel, különböző állapotba kapcsolható az ADC. Alapértelmezetten vagy kettes komplementben is tudja küldeni a mért értékeket, illetve van egy beépített órajel stabilizátora, amire akkor lehet szükség, ha nem teljesen szimmetrikus az órajel amivel ütemezzük a mintavételezést.

Mivel 2V az ADC átfogása, és ezt 12bit-en tudja megjeleníteni, így 0,000488281V az egyes feszültség lépések közti különbség.



4.6. ábra. AD konverter kapcsolási rajza

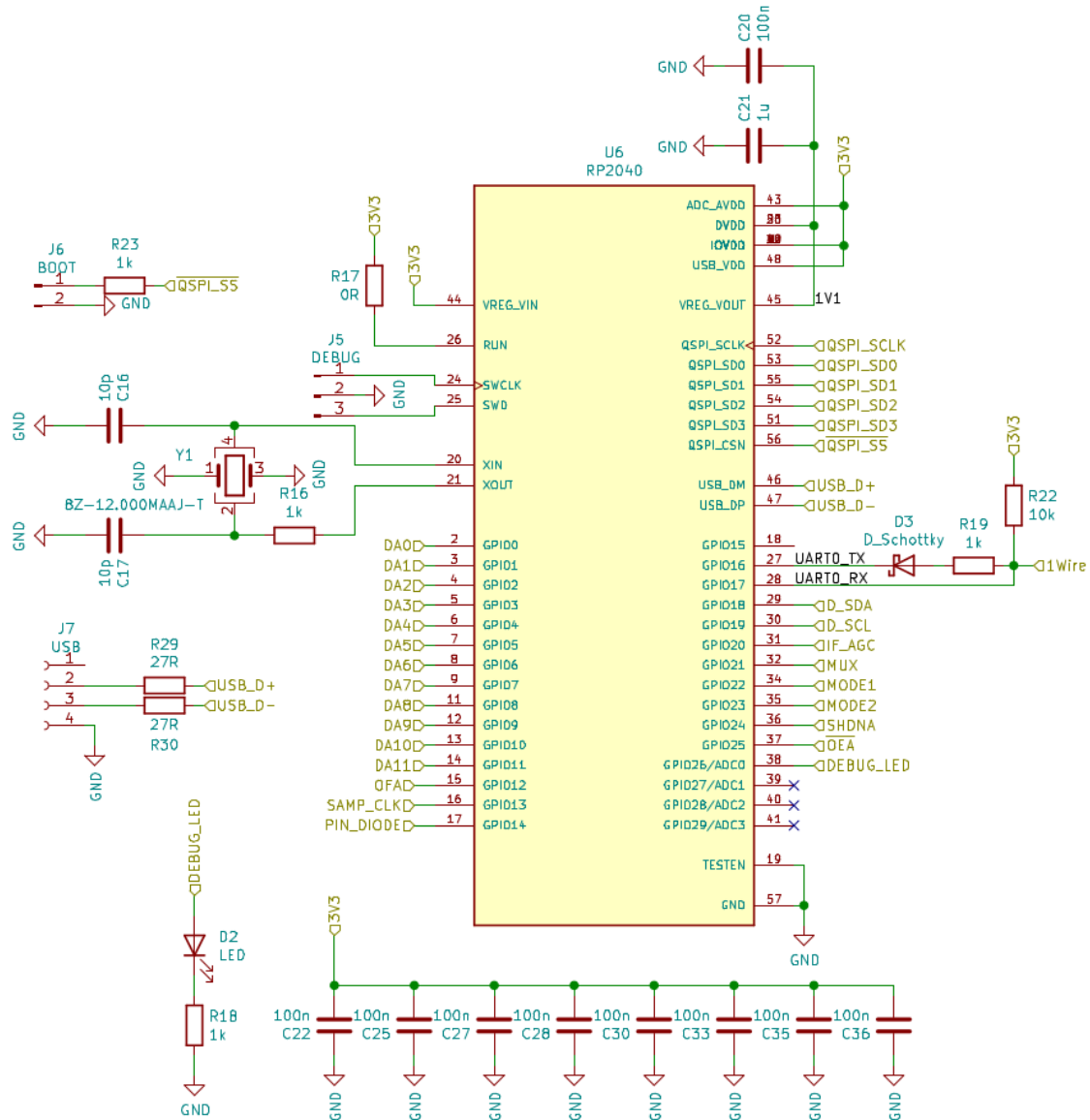
## 4.5. RP2040

A mikrokontrolleren belül két 32-bites ARM Cortex-M0+[15] processzormag foglal helyet. Támogatja a 16MB-os Flash chip használatát, ami a sok digitalizált adat esetén indokolt lehet. Rendelkezik többek közt 2db UART<sup>3</sup> és 2db I2C<sup>4</sup> modullal, amiken keresztül az

<sup>3</sup>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - Univerzális aszinkron adóvevő

<sup>4</sup>Inter-Integrated Circuit

OBC-hez illetve a tuner chiphez tud csatlakozni. Helyet kapott benne 2db programozható IO blokk, amire a későbbiekben még részletesebben kitérek.



4.7. ábra. Mikrokontroller kapcsolási rajza

## 4.6. Hőmérséklet kompenzált kristály oszcillátor

A mikrokontrollernek és a tuner 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 TCXO<sup>5</sup>-t használok. Itt a rezgőkristály mellé egy kompenzáló áramkör kerül, ami a hőmérséklet változásból adódó frekvencia hibát küszöböli ki[16].

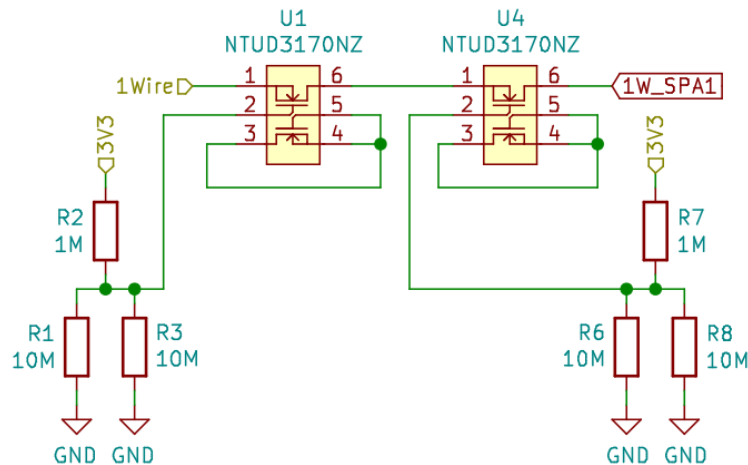
<sup>5</sup>Temperature Compensated Crystal Oscillator

## 4.7. Digitális adatbusz védelme

Rendszer szinten a soros kommunikáció egy vezetéken történik (TX-RX közös). A 4.8 ábrán látható kapcsolás a fedélzeti számítógépnél tükör szimmetrikusan ugyanígy megtalálható. A mikrokontroller UART kimenete van használva a 1Wire kommunikációra. Ekkor viszont adás esetén, amikor a TX kimenet lemegy logikai 0-ba, azt érzékeli az RX láb, és azt hinné, hogy a fedélzeti számítógép üzen neki. Ezért ilyenkor az RX bemenet semmisnek tekinti ezt az információt.

Védő FET-ek funkciói:

- FET-ek nélkül, ha táp-föld zárlat keletkezne, az egész adatbusz logikai 0-ra kerülne, és az egész műhold kommunikációja leállna. Ezért ha egy ilyen zárlat keletkezik a spektrumanalizátor oldalán, akkor a FET gate elektródája földre kerül és zárva tartja a FET-et, ezáltal leválasztva az adatbuszt.
- Az egy pont-meghibásodás miatt két FET került a kapcsolásba, hiszen ha az egyiknél a drain-source rövidzárba megy, a másik FET még meg tudja védeni a buszt.
- A cél az, hogy bármilyen meghibásodás is áll fent, a FET kikapcsoljon. Ezért ha valamelyik lehúzó ellenállás szakadásba megy át, a másik még mindig tudja helyettesíteni. Ha a felhúzó ellenállás megy szakadásba, akkor legrosszabb esetben a FET kikapcsol és a spektrumanalizátor többé nem lesz kapcsolatban az adatbusszal.
- Ez a típus a legkisebb méretű kapható FET, annak ellenére, hogy egy pár van a tokban. Az elrendezést azért nem egy tokon belül valósítottam meg, hiszen ha egy nagy energiájú részecske áthalad a tokon és kárt tesz az egyik FET-ben, akkor az igen nagy valószínűséggel kárt tesz a másikban is. Ezért használok két külön tokban lévő.



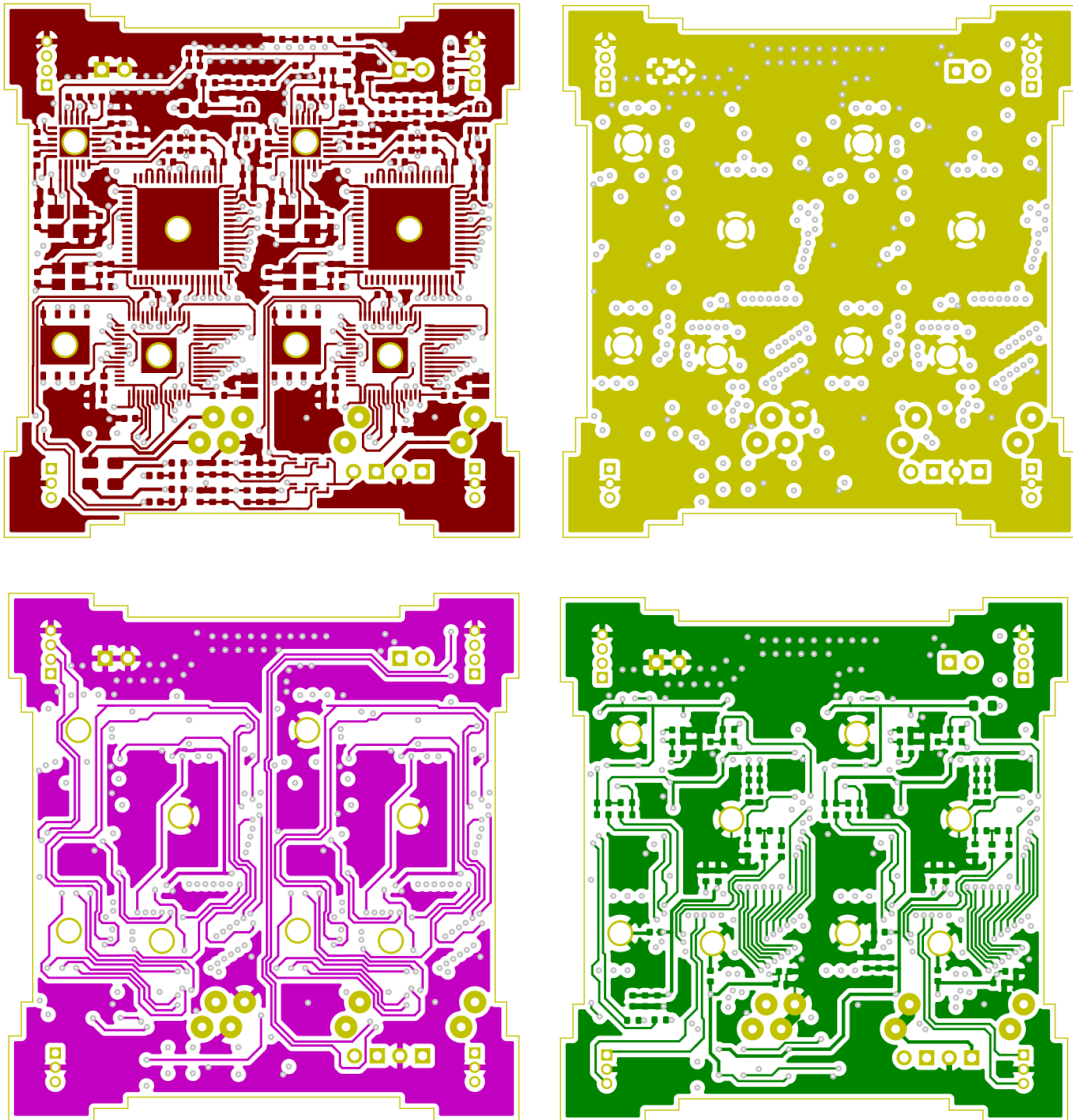
4.8. ábra. Védő FET-ek kapcsolási rajza

## 4.8. PCB tervezés

Az egyik fő határparaméter az 50x50mm-es panel méret volt. Erre kell ráférti redundánisan a rendszernek, azaz mindenből kettőnek. Szimmetrikusan rendeztem el az alkatrészeket a panel középvonalára, figyelve arra, hogy az RF jelutakba ne legyenek indokolatlan

megtörések, illetve amennyire csak tudtam körbe ültettem viákkal, hogy minimalizálja az átcsatolóadásokat a vonalak között, illetve, hogy sehol ne legyen izolált föld kitöltés.

A legfelső réz réteg alatt közvetlenül egy teli föld réteg helyezkedik el, a megfelelő RF jelvezetés és árnyékolás érdekében. Az alatta lévő két rétegen pedig digitális vonalak helyezkednek el.



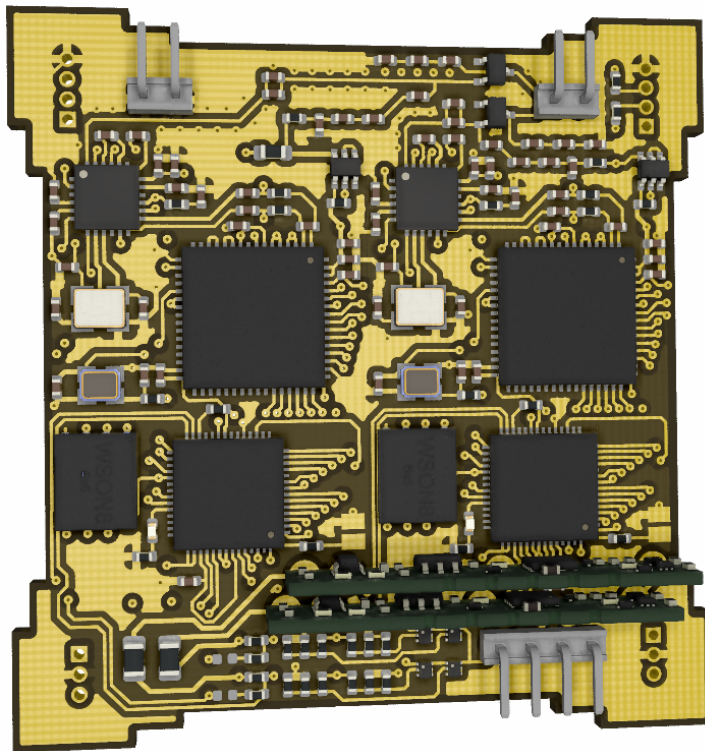
4.9. ábra. A panel rézrétegei

A panel alsó és felső élénél egy-egy 15 pólusú csatlakozó helyezkedik el, amin a fedélzeti buszhoz tud csatlakozni. Viszont ebből minimalizáltam a használt lábak számát, ezért csak az antennához, a GND-hez, az OBC 1Wire vonalához és a 3,3V-os buszhoz csatlakozom. Így a saját panelemon is több hely maradt, amit nem vett el a 15 pólusú csatlakozó, illetve a műhold oldalpanelén is könnyebb a huzalozásokat elvezetni, amin az egyes alrendszerek egymáshoz csatlakoznak.

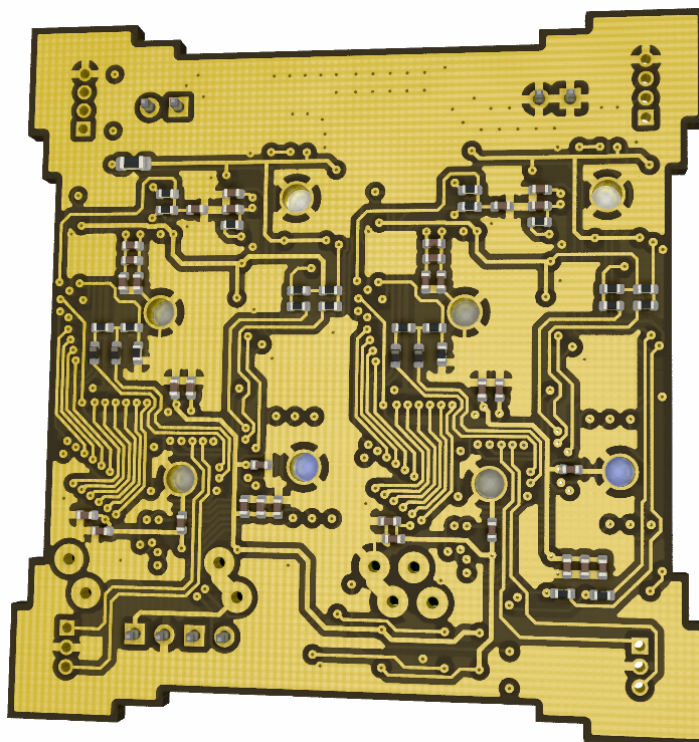
A hordozón helyet kellett szorítani 2db LSW panelnek, aminek már csak élére állítva maradt hely. Mindegyik alkatrész elhelyezésénél figyelni kellett arra, hogy ne lógjon bele egy másik alrendszer paneljének alkatrészébe, ez különösen a két LSW panelnél volt kihívás. Minden passzív komponens 0402 méretű a helytakarékoság miatt, illetve a minimális



parazita hatások miatt. A kondenzátorok Murata, a tekercsek Coilcraft márkájúak. Ezek jó minőségű, nagy jóságú alkatrészek. A hordozó FR4-es lemez.



4.10. ábra. A panel 3D modellje (felülnézet)



4.11. ábra. A panel 3D modellje (alulnézet)

## 5. fejezet

# Programozás

### 5.1. CLK előállítás

Ez az órajel ütemezi az AD konvertert, hogy mikor vegyen mintát a bemenetére érkező jelből. Esetemben ez 10MHz. Először a mikrokontroller PWM modulját használva állítottam elő a 10MHz-es négyszögjelet, és minden periódus végén generáltattam egy interruptot, ami után beolvastam a megfelelő GPIO-kon lévő logikai értékeket (ezek jöttek az AD konvertertől - 12bit) és betöltöttem egy tömbbe. Ez egészen 2MHz-ig működött, ám ahogy emeltem a frekvenciát, az interrupt rutin nem tudott elég gyorsan lefutni, miközben a PWM modul már újra generálta az interruptot. Ezért más megoldást kellett keresnem, hogy 10MHz-en is képes legyen működni a rendszer.

A mikrokontrollernek vannak úgynevezett PIO blokkjai. Ezek a fő processzortól függetlenül képesek működni, saját assembly-ben megírt kódokkal, és minden utasításhoz 1 órajel ciklus szükséges. Ezért pontosan időzíthetők a parancsok.

Mivel 120MHz-en üzemel a mikrokontroller, ezért a 10MHz-es CLK jelhez 12 órajelciklus áll rendelkezésre. A PIO blokkba töltött kód működése a következő: Először a CLK kimenetet 1-be állítja, ez 1 órajelciklus, majd vár még 5-öt. Utána 0-ba állítja, vár 3-at (lefutó élre már érvényes az AD konverter kimenetén az adat), beolvassa megfelelő 12 lábat (ez bekerül egy regiszterbe), majd ugrik a ciklus elejére.

Utasítás	Leírás	Ciklus
SET	1-be állítja a CLK lábat	1
WAIT	vár	5
SET	0-be állítja a CLK lábat	1
WAIT	vár	3
IN	beolvassa a 12 lábat	1
JMP	ugrik a ciklus elejére	1
Összesen:		12

**5.1. táblázat.** A rendszer fogyasztása

Amikor beolvasás után a 12bit bekerül a PIO blokk FIFO<sup>1</sup>-jába, az automatikusan generál egy interruptot a DMA<sup>2</sup>-nak, hogy töltsse át egy tömbbe a beolvasott adatot.

<sup>1</sup>First in, first out

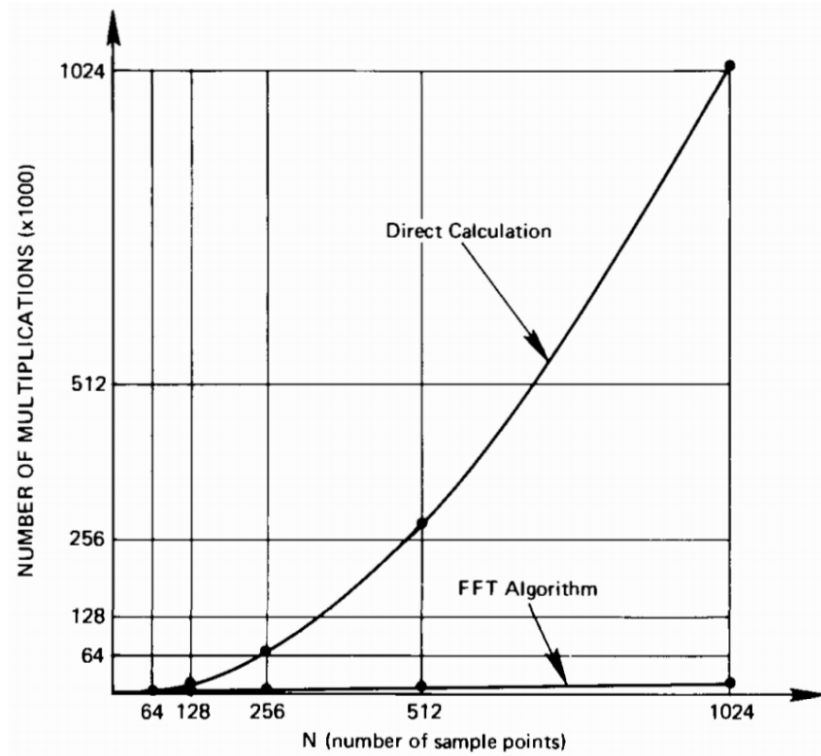
<sup>2</sup>Direct memory access

## 5.2. DMA

A mikrokontroller működésétől függetlenül működik. Közvetlenül tölti át a PIO blokk RX FIFO-jából az adatokat a megadott memóriacímre, és automatikusan inkrementálja azt. Ez az egész 1 órajel ciklus alatt megtörténik. Így nem foglalja le feleslegesen a processzort azzal, hogy adatot töltsön egyik címről a másikra.

## 5.3. FFT

A Fourier-transzformációhoz a Cooley-Tukey algoritmust választottam, ami az egyik legelterjedtebb FFT típus. Ez egy rekurzív algoritmus, és a műveletigénye  $N \log_2 N$ , ahol  $N$  a mintaszám. Könnyű implementálhatósága és gyorsasága miatt használom ezt.



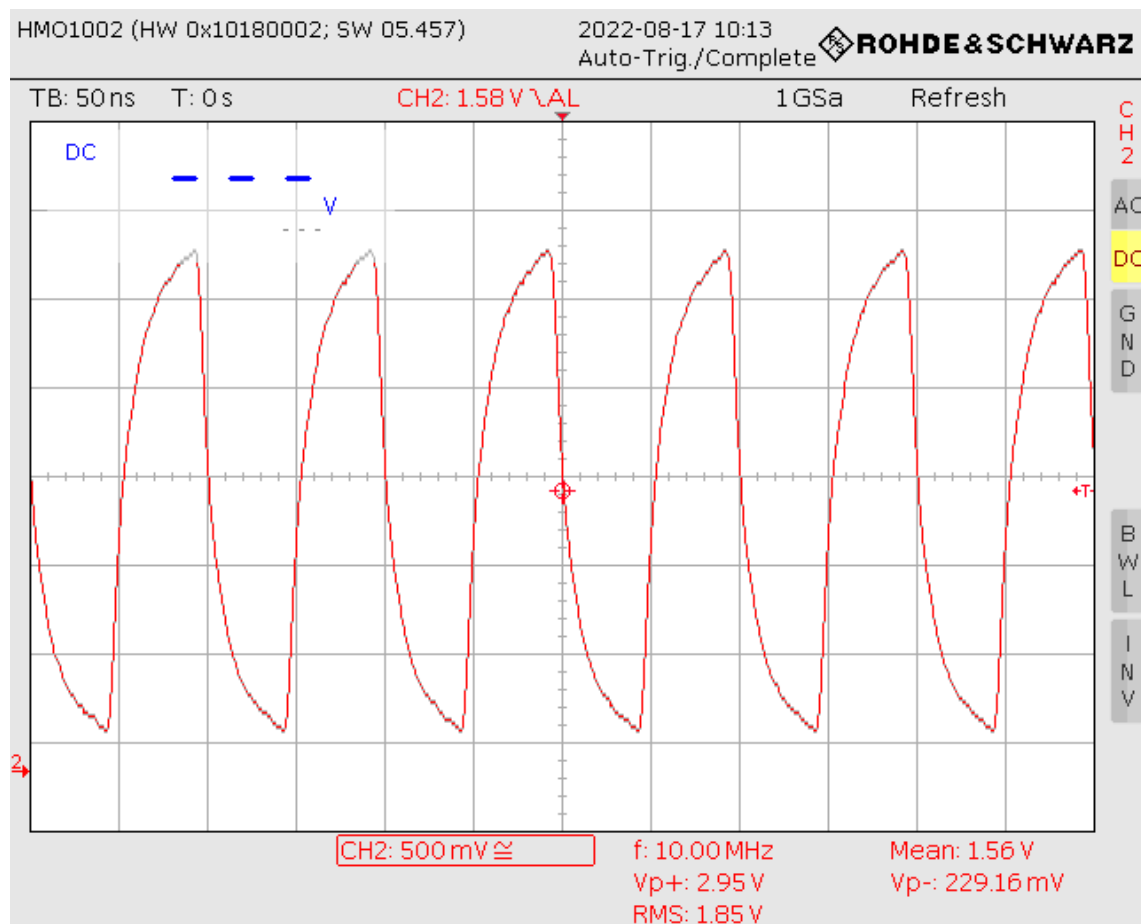
5.1. ábra. DFT és FFT szorzásigénye

## 6. fejezet

# Mérések

### 6.1. CLK mérése

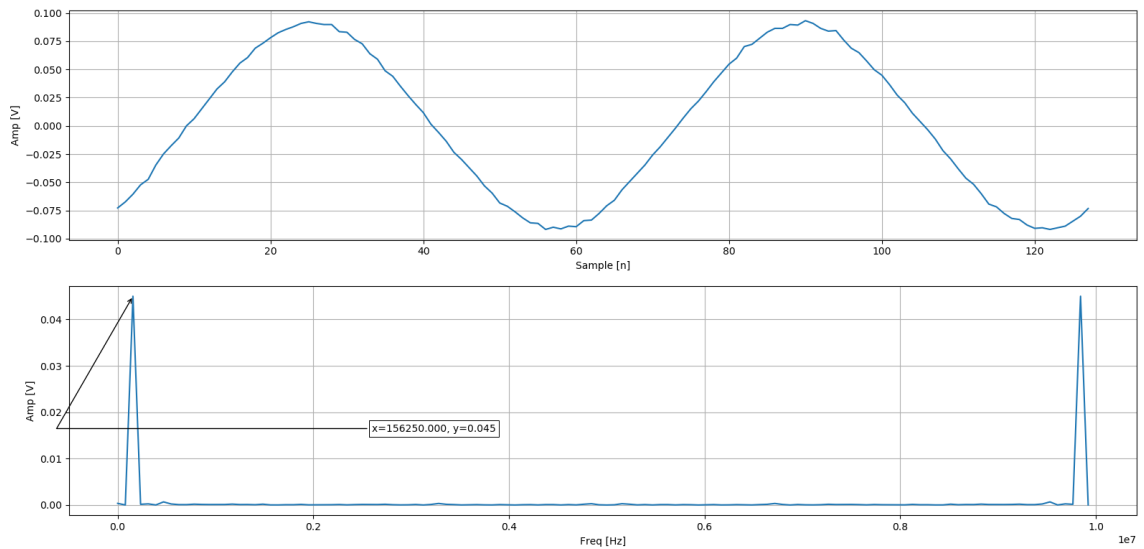
Oszilloszkópon vizsgáltam, hogy mennyire stabil és szimmetrikus az ADC mintavételét ütemező 10MHz-es jel. Mivel szimmetrikus, így nincs szükség az ADC-ba épített órajel stabilizátor bekapcsolására. Ez annál inkább jó, mert ahhoz hogy az a stabilizátor működni tudjon, 100-150 órajelciklusnak meg kell történnie, hogy az ADC belső PLL-je rá tudjon szinkronizálni az általam előállított órajelre, ezzel meghosszabbítva a mérés idejét.



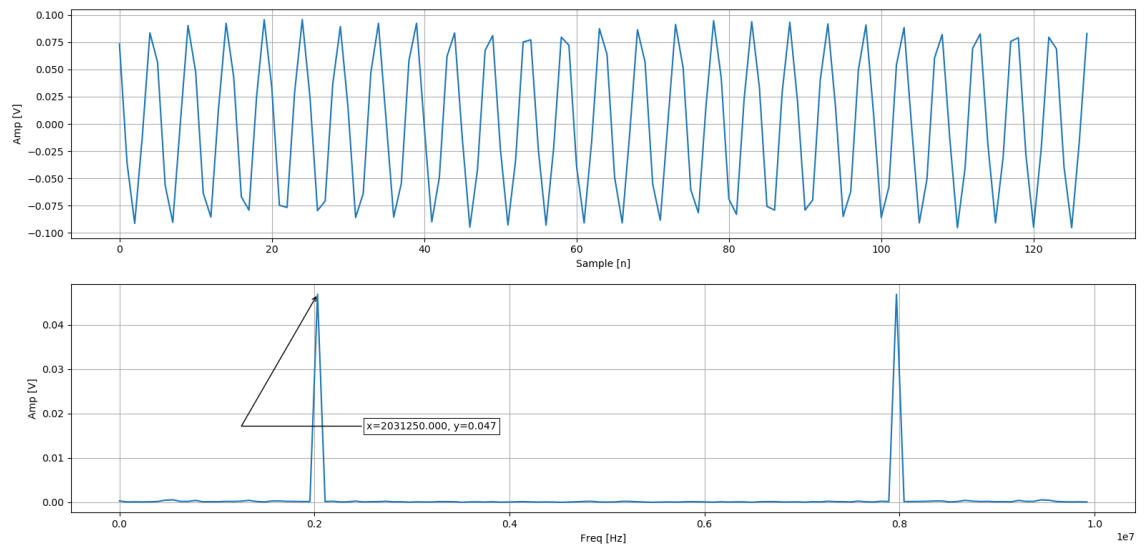
6.1. ábra. 10MHz-es négyszögjel

## 6.2. ADC mérése jelgenerátorról

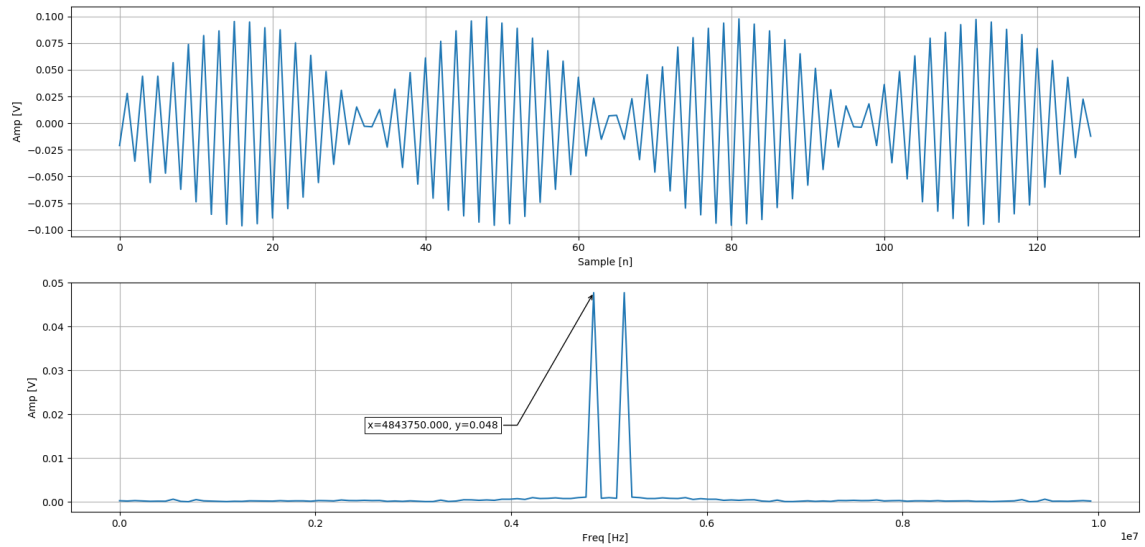
Miután beültettem a mikrokontrollert és az ADC-t, közvetlenül jelgenerátorról megtápláltam, hogy leteszteljem a működését. Először egy 0,1V-os jellel hajtottam meg, aminek a frekvenciája FFT pontra esett. Ez 156.25kHz volt, azaz a második pontra esett a 128-ból, ami szimmetrikusan megjelent a spektrumban, hiszen valós jelet mintavételeztem. Csak a mérésekkor használtam ilyen alacsony mintaszámot. A végső felhasználáshoz ez úgyis paraméteresen állítható, és a Földről küldött parancsokkal lehet választani.



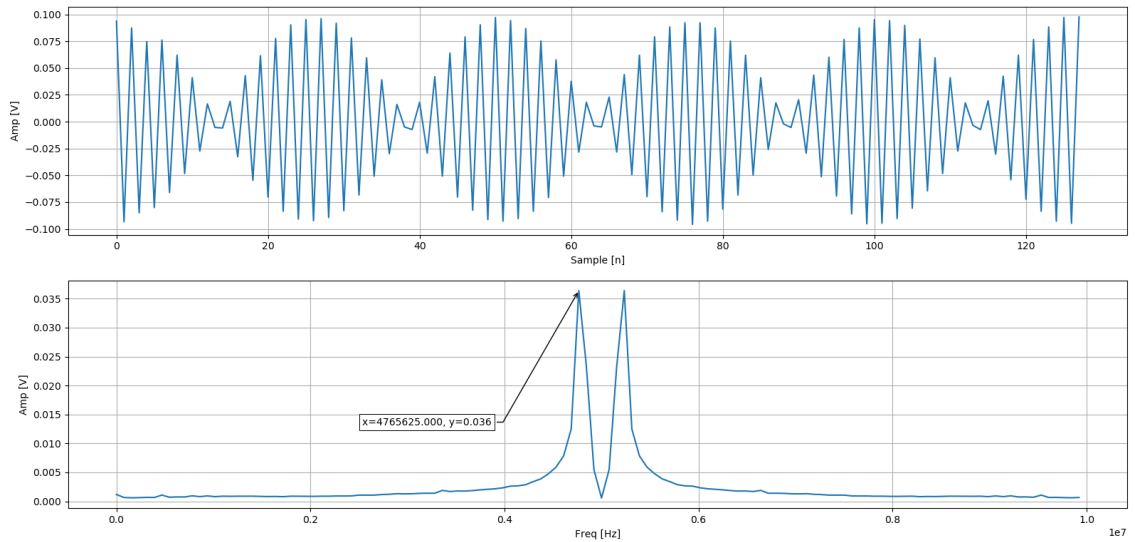
6.2. ábra. 0.1V-os 156.25kHz-es jel



6.3. ábra. 0.1V-os 2.03125MHz-es jel



**6.4. ábra.** 0.1V-os 4.843750MHz-es jel

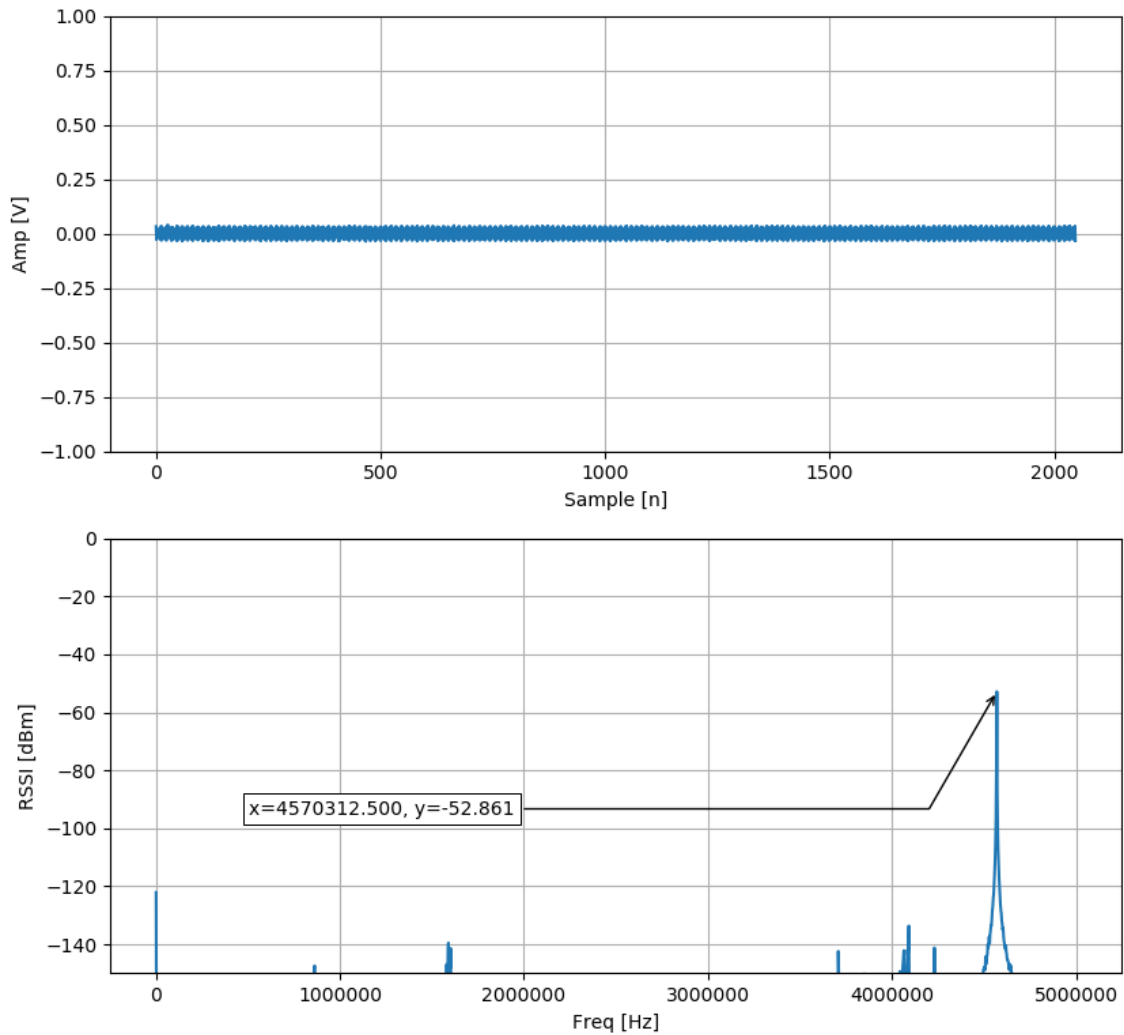


**6.5. ábra.** 0.1V-os 4.8MHz-es jel

Az utolsó ábrán az látszik, hogy a jelgenerátorból érkező szinusz, nem egy egzakt frekvenciájú jelnek látszik, mert úgynevezett szoknyája van a spektrumának. Ez a spektrumszivárgás jelensége, amikor nem koherensen vettünk mintát a jelből. Ez a jelenség megfelelő ablakfüggvényekkel csökkenthető.

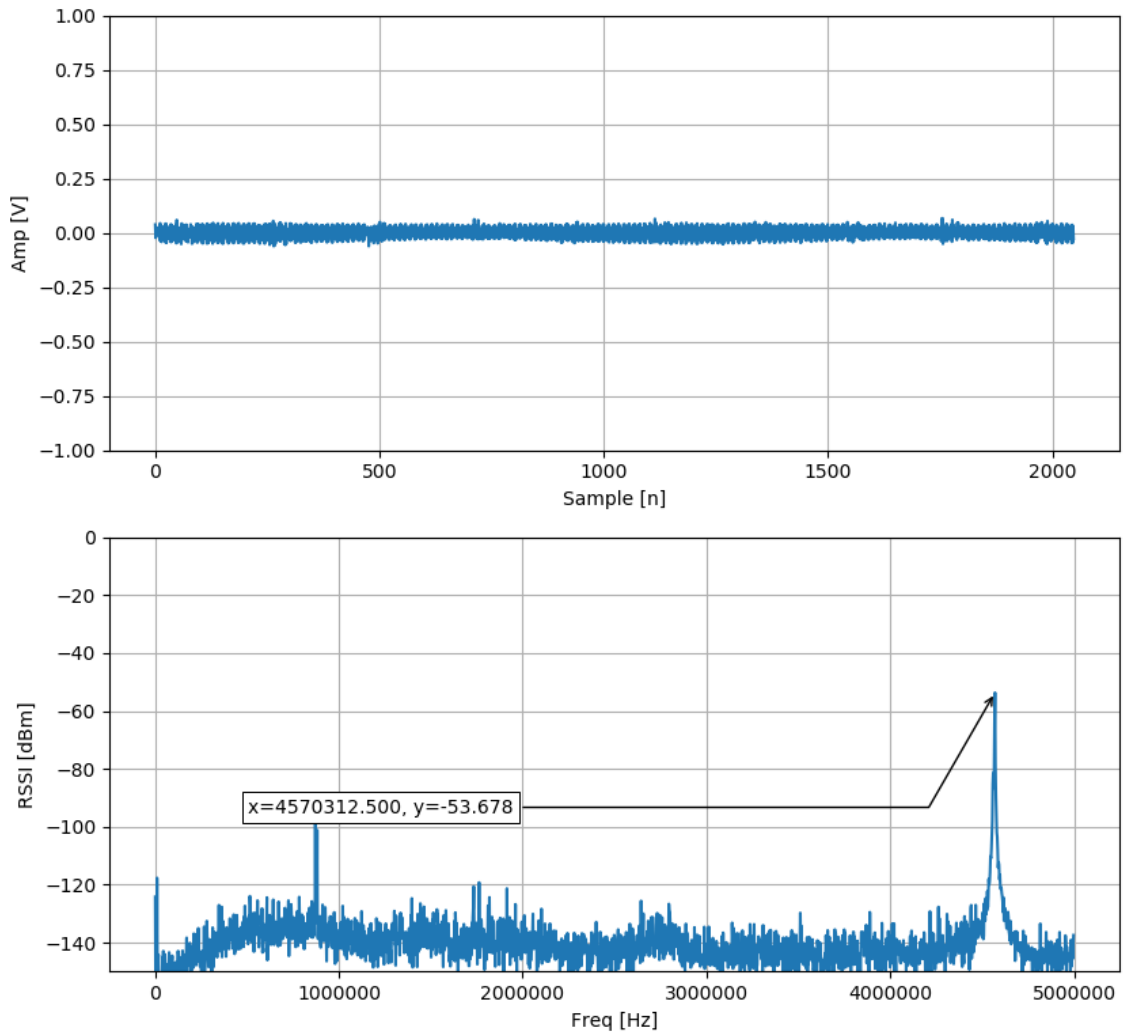
### 6.3. Tuner chip mérése jelgenerátorról

A következő méréseket szintén jelgenerátorral végeztem, amikor már a tuner chipet is beültettem és felprogramoztam. A lefedendő frekvenciasáv elején, közepén és végén végeztem a méréseket, hogy leteszteljem teljesíti-e a kívánt specifikációt a frekvenciák szempontjából. Egy 50dBm-es CW jelet vezettem az antenna csatlakozóra 30MHz, 300MHz, 1GHz és 1.6GHz frekvenciákon. A lekevert jelek 4.57MHz-en jelennek meg. Az ábrákon csak  $f_s/2$ -ig ábrázoltam a spektrumot, mert nem hordozott volna többlet információt ha  $f_s$  ig ábrázolom, hiszen valós jel spektruma páros és  $f_s$ -enként periodikus. Illetve itt már 4096 a mintaszám.



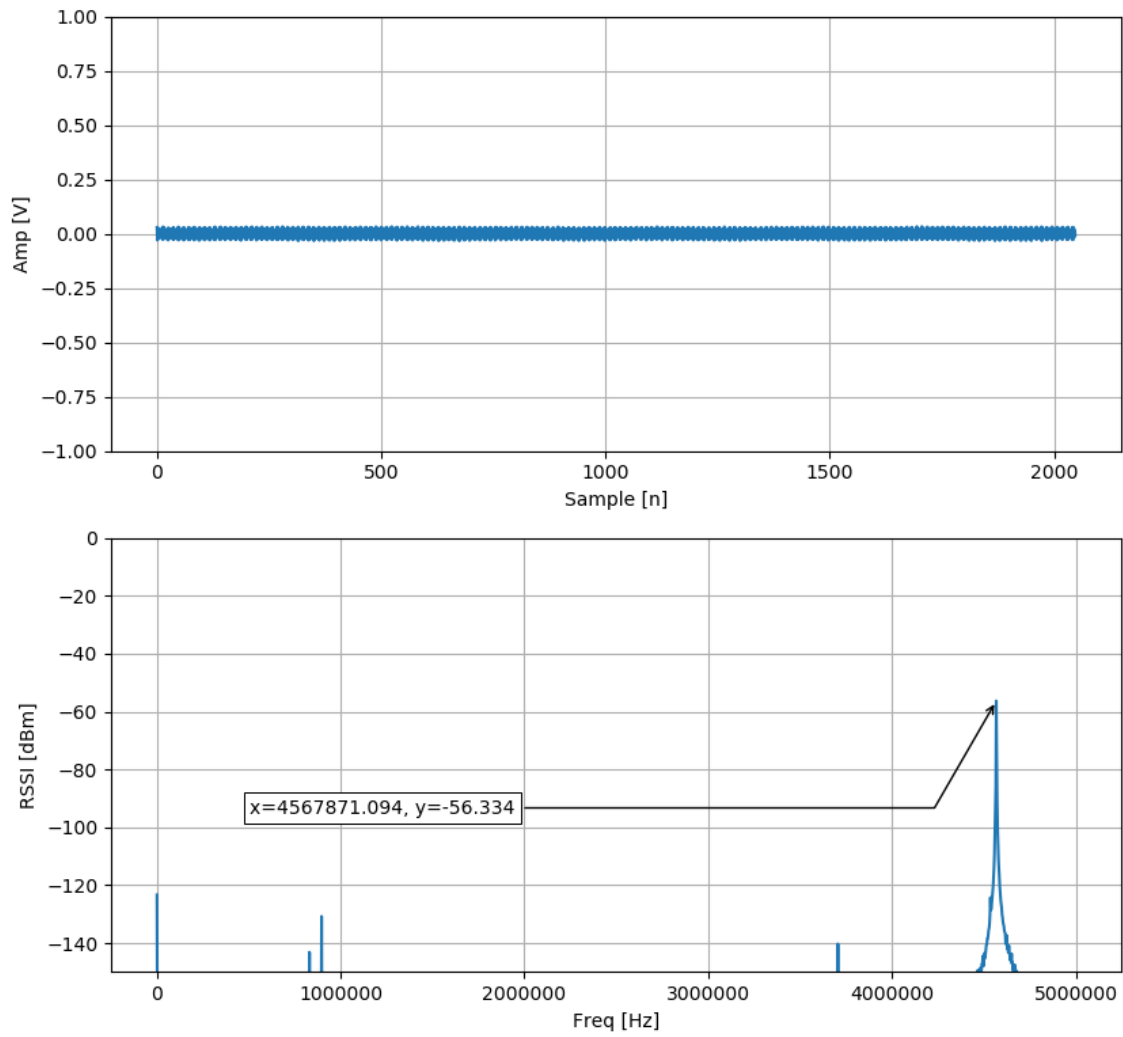
6.6. ábra. 30MHz-es jel

A mérések alapján teljesíti a specifikációban leírt 30-1600MHz-es frekvencia átfogást.

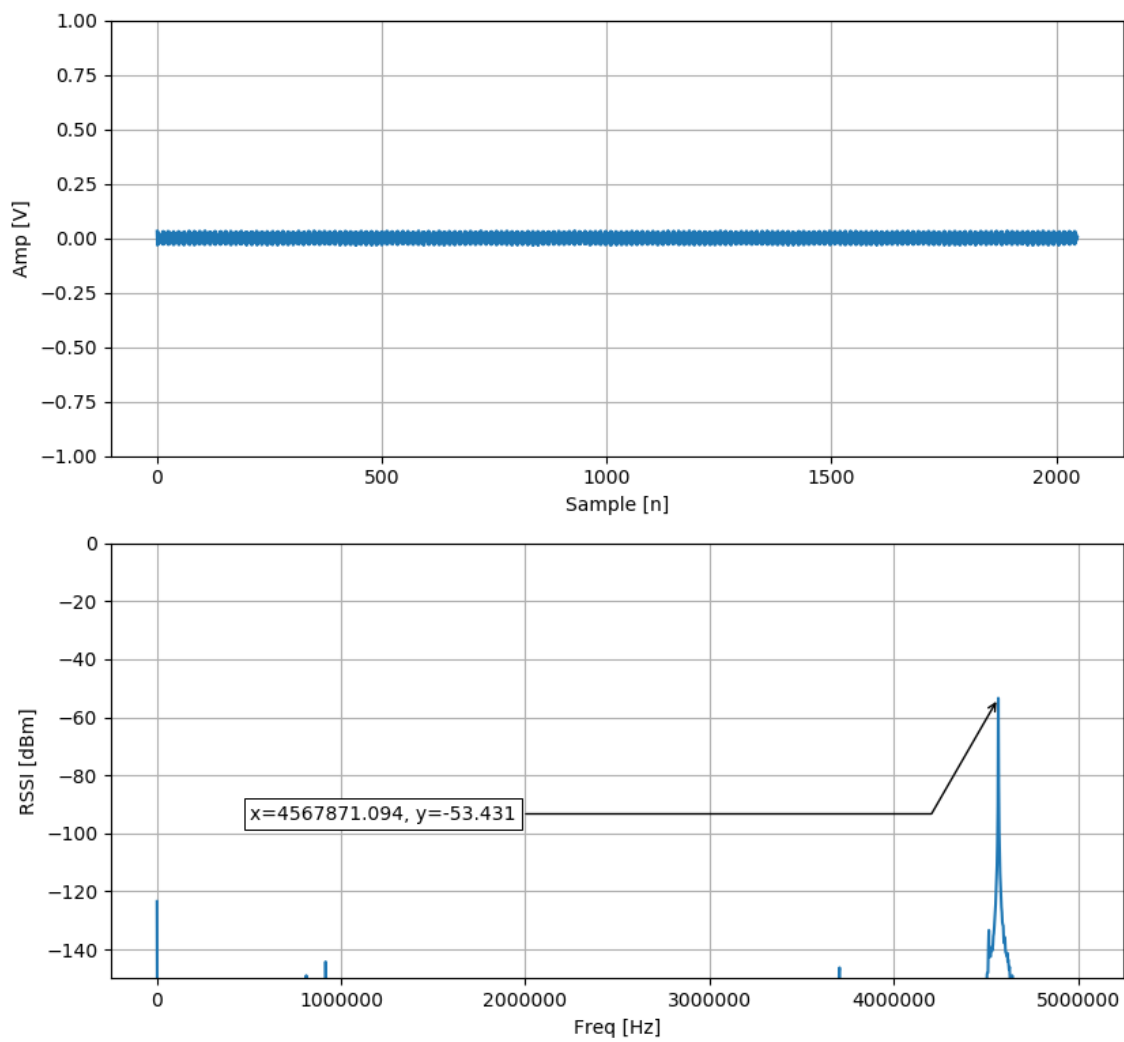


6.7. ábra. 300MHz-es jel





6.8. ábra. 1GHz-es jel



6.9. ábra. 1,6GHz-es jel

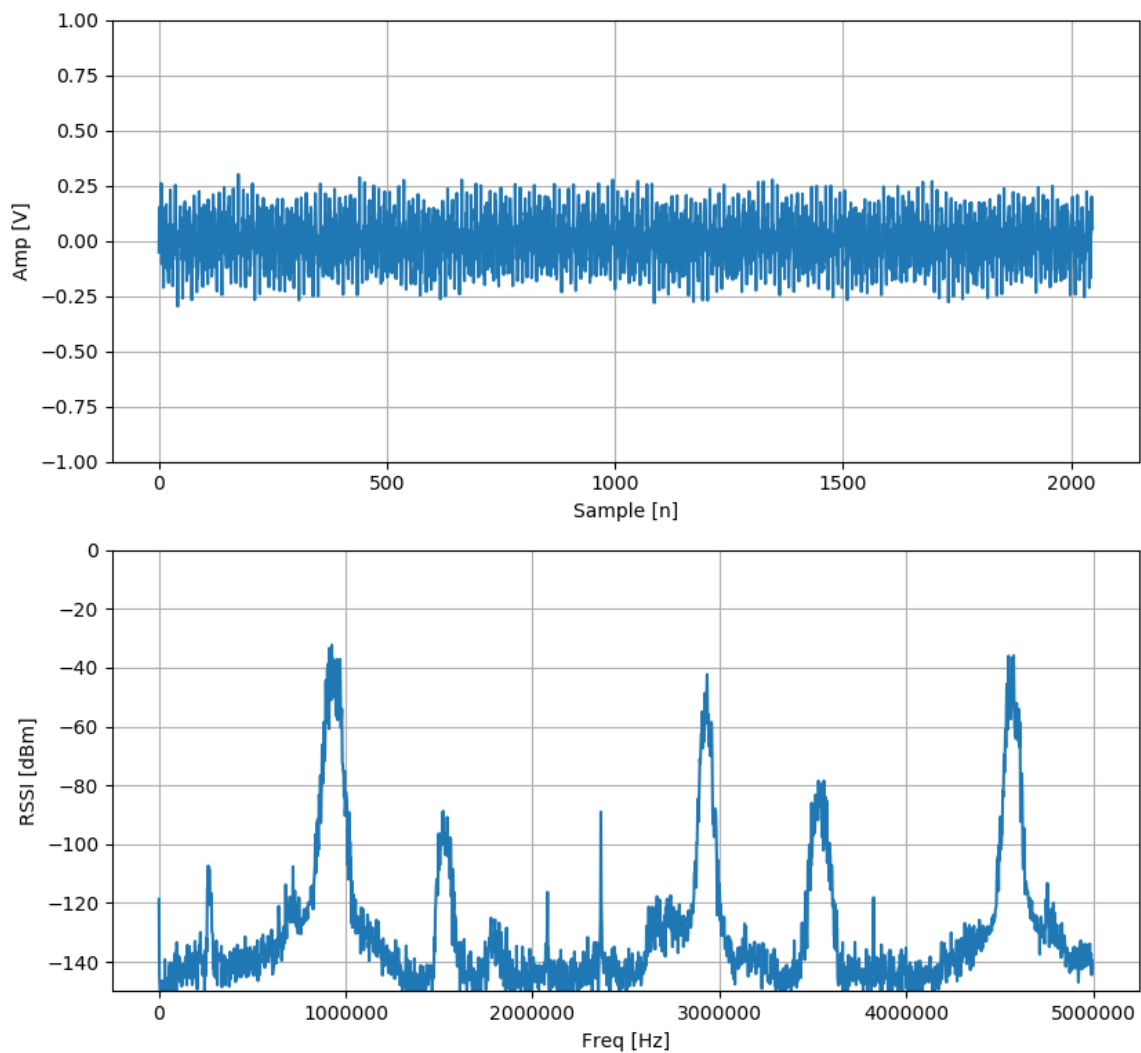
## 6.4. Sugárzott mérés

Végeztem méréseket sugárzottan is az 500mm-es antennát felhasználva. Ugyanazokon a frekvenciákon mentem végig, mint vezetett esetben. Nem volt különbség, itt is jól működött a rendszer.

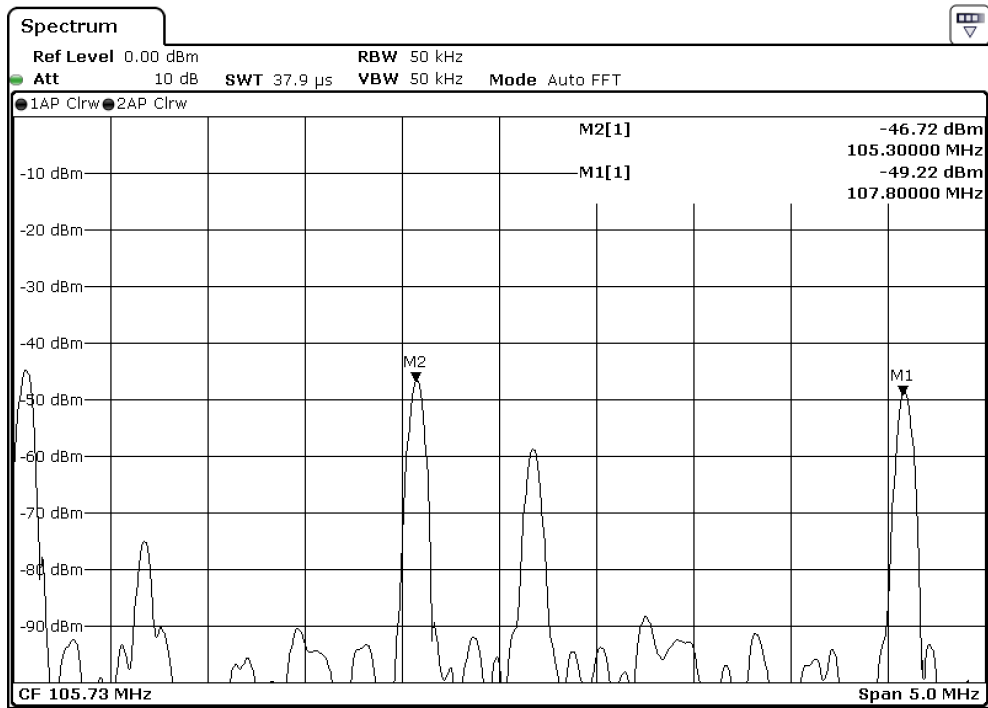
Az érdekesség kedvéért végeztem egy látványosabb mérést az FM rádiók sávjában is, illetve visszaellenőriztem egy Rohde & Schwarz FSV típusú spektrumanalizátorral is, és ugyanazt a spektrumot kaptam mindkettővel.

Balról jobbra az egyes adók:

- Retro Rádió
- A ROCK
- Bartók Rádió
- Sportrádió
- Kossuth Rádió



6.10. ábra. Rádiók spektruma



6.11. ábra. Rádiók spektruma ellenőrzés

## 6.5. Fogyasztások

A megadott áramkorlátba sikerült beleférnem, így ezt a specifikációt is kielégíti a rendszer.

Részegység	Áram	Teljesítmény
RP2040 mikrokontroller	45mA	148,5mW
AD konverter	88mA	290,4mW
Tuner chip	107mA	353,1mW
Összesen:	240mA	792mW

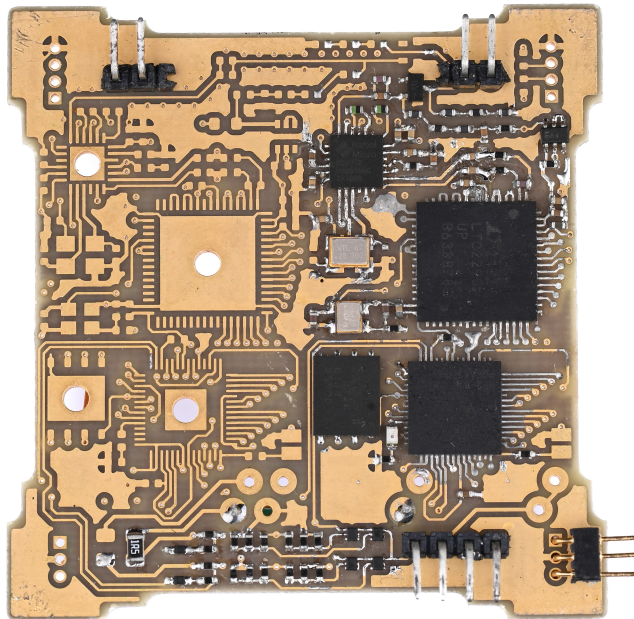
6.1. táblázat. A rendszer fogyasztása

## 7. fejezet

# Összegzés

Sikerült létrehozni egy redundáns spektrummonitorozó rendszert ami LEO pályán képes vizsgálni a Földet körülvevő rádiófrekvenciás szennyezettséget, és a specifikált határparamétereket is teljesíti. A szélsőséges környezet megismerése után elkezdtem lefektetni azokat az elvárásokat a használandó alkatrészekkel szemben, amiket teljesíteniük kell a zavartalan működéshez az űrben. Ezután megterveztem a panelt. Majd mérésekkel validáltam a működését.

Így megszületett egy rendszer ami potenciális kutatási témát szolgáltatathat a jövőben, illetve a mérései alapján elkészíthető egy kiterjesztett spektrumú szennyezettségi térkép.



7.1. ábra. Az elkészült panel

# Irodalomjegyzék

- [1] L. Dudás, L. Szűcs, and dr. András Gschwindt, „The spectrum monitoring system of smog-1 satellite,” 2015.
- [2] M. B. ands Takács Donát, „A föld körüli, úrbéli rádiófrekvenciás szennyezettség ábrázolása a smog projekt mérései alapján,” 2020.
- [3] H. Tibor, „A smog-1 pocketcube elsődleges energiaellátó rendszere,” 2015.
- [4] „Mrc-100 3d modellje.” <https://cad.onshape.com/documents/6c932044474b24211b121543/w/46d70bf41f956574068dde7d/e/508e87580fef70270f319dc1/>.
- [5] NASA, *State-of-the-Art Small Spacecraft Technology*. 2021.
- [6] W. Ágnes, „A smog-1 műhold hőáramhálózatos modellezése,” 2016.
- [7] ESA, *Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins*. 2008.
- [8] ESA, *Electrical design and interface requirements for power supply*. 2016.
- [9] L. Dudás and dr. András Gschwindt, „Zsebműholdak a műegyetemen,” 2022.
- [10] C. Bence, „Mikrohullámú keverés módszereinek vizsgálata,” 2016.
- [11] C.-Y. Hsieh, „Wide frequency range superheterodyne receiver design and simulation,” 2011.
- [12] „Pin dióda adatlapja.” <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BAP51-05W.pdf>.
- [13] „Tuner chip adatlapja.” [https://rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T\\_datasheet-Non\\_R-20111130\\_unlocked.pdf](https://rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf).
- [14] „Ad konverter adatlapja.” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2290fa.pdf>.
- [15] „Rp2040 adatlapja.” <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>.
- [16] V. Viktor, „Oszillátorok hőmérséklet-frekvencia összefüggésének identifikációja,” 2020.