



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

# MSc Szakmai Gyakorlat Beszámoló

Szilágyi Gábor

Konzulens: Bódi Tamás

Budapest, 2022. szeptember 25.

# 1. Bevezetés

A Silicon Laboratories Hungary kft-nél 2021 júliusában kezdtem el dolgozni gyakornokként és egészen 2022 augusztusáig maradtam a cégnél egy kisebb megszakítással télen. Az elmúlt évben sokat tanultam a munkám során. Az MSc-s szakmai gyakorlat ledokumentált időtartama alatt már komolyabb feladataim voltak, mint a gyakornokoskodásom elején. Ezeket az elvégzett feladatokat, a használt eszközöket és keretrendszert mutatom be ebben a beszámolóban. A cégen belül a „Hardware Tools” csapatban dolgoztam, ez a csapat elsősorban a rádiós demonstrációs áramkörök tervezéséért és az ezekhez kapcsolódó mérésekért felelős.

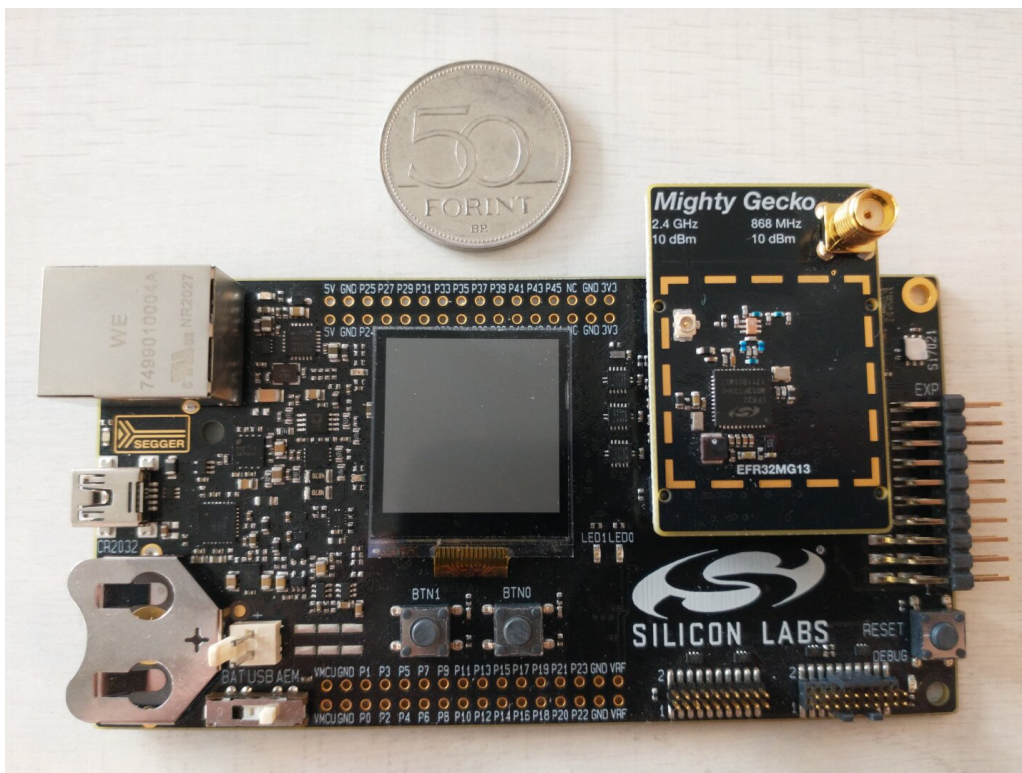
## 1.1. A cégről

A fent említett cég a Silicon Laboratories (SiLabs) austini központú (USA, Texas), multinacionális vállalat budapesti alvállalata. A cég rendelkezik irodákkal Austinon és Budaesten kívül többek között Hyderabadban (India), Osloban (Norvégia) és Rennes-ben (Franciaország). A világ több sarkában való működés ellenére összesen körülbelül 2000-en dolgoznak a cégnél, a budapesti iroda jelenlegi létszáma 200 körüli, ami a cégen belül az egyik legnépesebb helyszínnek számít. Az egyes helyszínek valamelyest specializálódtak a feladatkörükben, például Austinban történik maguknak a szilícium chipeknek a fejlesztése, Budapesten hardver validációval és szoftverfejlesztéssel foglalkoznak nagy számban, norvégiában pedig a demonstrációs áramkörök gyártása történik.

A SiLabs profilja a rádiós vagy rádió nélküli mikrokontroller integrált áramkörök (IC-k) tervezése, eladása, valamint hardveres és szoftveres támogatás nyújtása ezekhez az ügyfeleknek. Az ügyfelek nem végfelhasználók, hanem más cégek, akik a SiLabs chipjeit és támogatását felhasználva készítenek termékeket. Ilyen ügyfél például az Ikea, az Amazon, a Google és az Apple. Az Ikea példájánál maradva, a projekt, amivel személyesen találkoztam és ehhez az ügyfélhez köthető, az okos villanykörtékbe szánt rádiós modulok. Egy másik egyszerűbb alkalmazása a SiLabs rádióinak a kapunyitó távirányító, amikkel gyakran találkozom a laborban a munkatársaimnál. A komplexebb alkalmazások közé tartoznak az okos otthon kialakításához használható eszközök. Ilyen az Amazon Alexa nevű terméke, amely az okos otthon rendszer egy központi, irányító eleme lehet, de ennek a rendszernek más elemei is használhatnak SiLabs chipeket, mint például az okos szenzorok vagy vezérlőeszközök.

A Hardware Tools csapat által tervezett és tesztelt demonstrációs áramkörök referencia implementációként szolgálnak a kérdéses IC-keket használó eszközökhöz. Ezeknek az áramköröknek a rádiófrekvenciás része főleg nagyobb frekvenciákon (pl. 2,4 GHz) nagyon érzékeny a nyomtatott áramköri rajz mintázatára és a beültetett alkatrészek elhelyezkedésére. Egy jól működő implementációtól való kis mértékű eltérés is nagyban ronthatja az áramkör teljesítményét több szempontból is. Ilyenkor legtöbbször az fordul elő, hogy az alapharmonikus frekvencián, ahol a hasznos adatátvitel történik, lecsökken a kisugárzott teljesítmény és a vételi érzékenység. Egy másik tünete a rosszul megtervezett NYÁK-nak a felharmonikus frekvenciákon a megnövekedett kisugárzott teljesítmény. Az első probléma miatt az eszköz nem tudja elég jól vagy egyáltalán ellátni a feladatát, a második probléma miatt pedig más eszközök működését akadályozhatja, mivel nem felel meg az elektromágneses kompatibilitási (EMC) követelményeknek.

A csapat által tervezett demonstrációs kitek egy néhány évvel ezelőtti példánya látható az 1. ábrán. A nagy Silicon Labs logóval ellátott alaplap a Wireless Starter Kit Mainboard, amit „WSTK” néven szoktunk emlegetni. A kisebb, „Mighty Gecko” feliratú NYÁK a „radio board”, amit a WSTK vezérel.

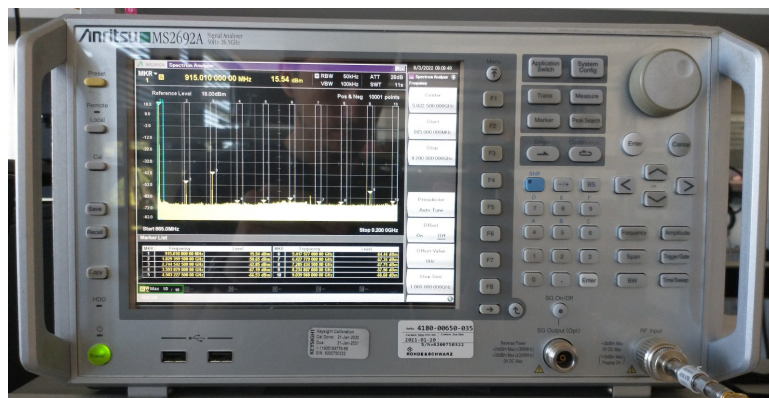


1. ábra. WSTK + radio board.

## 2. Rádiófrekvenciás Mérés

A szakmai gyakorlatom során elsősorban a demonstrációs áramkörök rádiófrekvenciás részének fejlesztésével, tesztelésével foglalkoztam. A kérdéses áramköröknél rádiófrekvenciás (RF) szempontból a legtöbb fejfájást az antenna és a végfokerosztó közötti illesztőhálózat okozza. Ez a hálózat azokon az áramkörökön, amikkel én találkoztam, legtöbbször egy 5-elemű szűrő- és illesztőfokozat, ami diszkrét tekercsekből és kondenzátorokból van felépítve az NyHL-en. Egy másik alkatrész, amit elsősorban szub-GHz-en használnak a cégnél, az integrált balun használata, ami az 1. ábrán lehet kivehető az U.FL csatlakozótól jobbra a „Mighty Gecko” feliratú NyHL-en, mint barna, hatlábú alkatrész. Az illesztőhálózatnak sokféle változata van használatban a különböző áramkörökön, mert több szempont határozza meg együttesen az ideális tulajdonságokat.

Az első és legnyilvánvalóbb ilyen szempont a működési frekvencia. Értelmszerűen ha más frekvencián működik a rádió, akkor más elemértékekkel lehet hasonló szűrő és impedanciaillesztő hatást elérni. A gyakran előforduló működési frekvenciák: 2.4 GHz, 915 MHz, 868 MHz és 470 MHz, de előfordulhatnak még olyanok, amikkel csak én nem találkoztam a munkám során, de tervez ilyen frekvenciákra is eszközöket a cég. Ezek elsősorban 915 MHz vagy 470 MHz környékén lehetnek, amelyek tartományokban tudtommal a világ különböző részein más-más frekvenciasáv van kijelölve ISM (Industrial Scientific Medical) használatra, amilyen sávokban ezek az eszközök működhetnek. Az elemértékek meghatározásán kívül még egy érdekes hatása van a működési frekvenciának az áramkör tervezésénél. A 2.4 GHz-es és szub-GHz-es áramköröknél jelentős különbség van abban, hogy mennyire érzékeny az illesztőhálózat viselkedése a struktúra geometriájára. Nem meglepő módon nagyobb frekvencián, ahol a működési hullámhossz, de főleg a felharmonikus hullámhosszak közelebb vannak az RF áramköri rész méreteihez, a viselkedést komolyan befolyásolja a geometria. Ezzel szemben nagyobb hullámhosszaknál ez a hatás lecsökken és sokkal szabadabban lehet átrendezgetni az NyHL-en az alkatrészeket min-



2. ábra. Anritsu MS2692A

denféle helytakarékosági és egyéb szempont alapján, persze a topológia megtartásával.

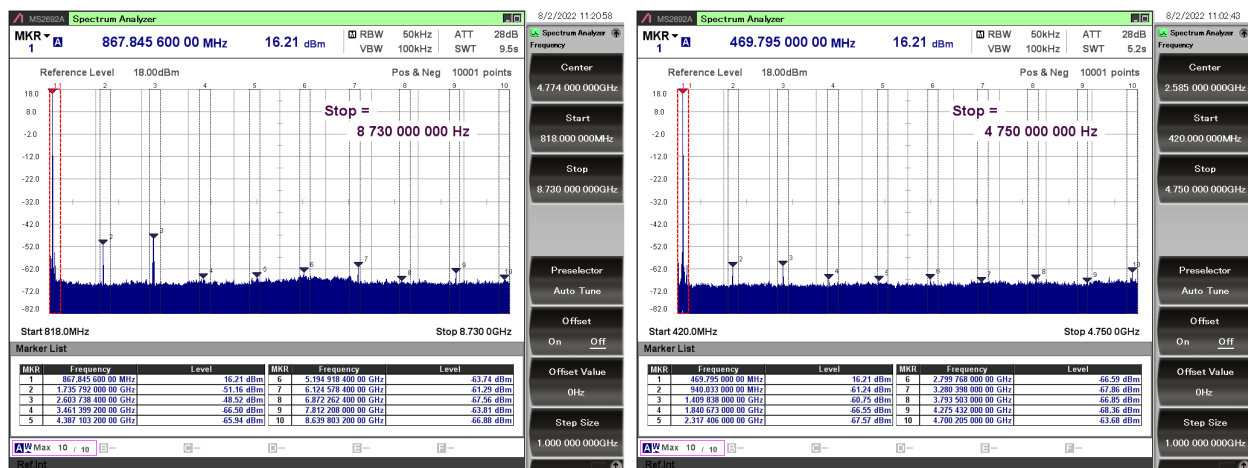
Egy másik szempont az illesztőhálózat tervezésénél a rádió végfokerősítőjének a kimeneti impedanciája. Az illesztőhálózat egyik fontos feladata, hogy kis reflexióval és veszteséggel illessze a végfok kimeneti impedanciáját a NyHL-en található 50 OHm-os mikroszalagvonalhoz (microstrip line). Az egyes rádiós IC-k többféle teljesítményszinttel készülnek, így még egy típuson belül is többféle végfokerősítőhöz kell különböző illesztőhálózatot tervezni. A gyakran előforduló teljesítményszintek közül néhány: 0 dBm, 6 dBm, 10 dBm, 14 dBm, 16 dBm és 20 dBm.

Még egy fontos szempontcsoportot alkotnak a hordozó paraméterei. Ilyenek például a szubsztrát dielektromos állandója és a rézrétegek közötti távolság. Mindkettő a parazita hatások kialakulásában játszik fontos szerepet, emiatt előfordul, hogy csak a rézrétegek közötti hézag változtatása miatt (pl. áttérés 4 rétegű hordozóról 2 rétegűre) teljesen újra kell tervezni az illesztőhálózatot. A fenti példában a nagyobb rétegtávolság a szomszédos rézrétegek között csökkenti a parazita kapacitást, ugyanakkor megnöveli a szomszédos rétegek között kialakuló áramhurok hosszát, így növelve annak az áramútnak parazita induktivitását. Hasonló jelenségek miatt ilyen helyzetben könnyen lehet, hogy még az illesztőhálózat topológiáján vagy elemszámán is változtatni kell, hogy megfelelően működjön.

## 2.1. Vezetett mérés

Az általam rendszeresen végzett RF mérések közül a vezetett mérés az egyszerűbb. Ez gyakorlatilag abban áll, hogy a radio board RF kimenetét, ami egy U.FL vagy SMA csatlakozó, egy spektrumanalizátorra csatlakozom és a kiadott jelet elemzem. Ilyen méréseknél általában egy egyszerű szinuszos jelet generálatok a radio boarddal és az alapharmonikus, valamint a felharmonikusok teljesítményszintjeit vizsgálom. Ilyen célra legtöbbször az Anritsu MS2692A típusú spektrumanalizátort használtam, ami a 2. ábrán látható, mert ennek a műszernek elég alacsony a zajszintje. Két ilyen mérési eredmény látható a 3. ábrán, ahol megfigyelhető, hogy a más frekvenciára készült két testvér radio board közül (mindkettő rádiós chipje a „Sol” cégen belül használt kódnev alatt) a 470 MHz-esnek kisebbek a felharmonikus teljesítményei. Tudtommal alacsonyabb frekvencián szigorúbbak a követelmények a felharmonikus teljesítményekkel szemben, mégis az a tapasztalat, hogy alacsonyabb frekvenciájú board-okon kisebb problémát okoznak a felharmonikusok, nagyobb szokott lenni a tartalék a ténylegesen kimért teljesítményszintek és az EMC szabványban meghatározottak között.

Vezetett mérést elsősorban két helyzetben végeztem. Egyrészt skkor, amikor már egy más téren letesztelt radio boardról el kellett dönteni, hogy megfelel-e a szabványnak a vezetett teljesítményszintek alapján. Ugyan rádiókról van szó, így elvileg elég lehetne kizárólag csak



(a) 868 MHz (b) 470 MHz

3. ábra. 470 és 868 MHz-es Sol radio board-ok kimeneti spektruma.

a sugárzott teljesítményszinteket vizsgálni, de szükség van a vezetetten kicsatolt kimeneti jel minőségbiztosítására is, hogy megfeleljen a szabványnak. A második helyzet, amikor vezetett méréseket végeztem, az volt, amikor egy radio board diszkrét alkatrészekből kialakított illesztőhálózatát kellett próbálkozás útján tökéletesíteni, majd minden változtatás után dokumentálni az adódó teljesítményspektrumot. A 2.4 GHz-nél fellépő jelentős parazitahatások miatt gyakorlatilag lehetetlen lenne jó áramköri modellt alkotni a kérdéses illesztőhálózathoz, a 3D-s elektromágneses szimuláció előkészítése pedig túl hosszadalmas lenne, így maradt a próbálkozásos és méregetős módszer. Szub-GHz-en nem okoztak ilyen gondot az illesztőhálózatok, ilyen board-okon elegendő volt a régen kikísérletezett, jól bevált illesztőhálózatok használata, főleg, hogy amint fentebb említettem, szub-GHz-en szabadabban lehet a geometriát változtatni, így sokféle elrendezésnél használható marad a megegyező topológiájú hálózat.

## 2.2. Sugárzott mérés

A vezetett mérés mellett a másik módszer, ahogy egy radio board teljesítmőképességét vizsgáltuk a sugárzott mérés, amihez a budapesti irodában lévő antenaszobát használtuk. Maga az antenaszoba egy RF szempontból külső zajtól elszigetelt és belül a felületeket borító tüskékkel reflexiósökkentett helyiség. Bent található egy mérőantenna, kicsit pontosabban egy bordás tölcserantenna, aminek ismert a nyereség-frekvencia karakterisztikája körülbelül 0.3 GHz-től 15 GHz-ig. Az antennától 3 m-re található egy hungarocelltorony léptetőmotorral az alján, ami forgóasztalként funkcionál. Erre az asztalra tesszük méréshez a vizsgálandó rádióadót, vagyis a DUT-ot (Device Under Test) és az antennára csatlakoztatott spektrumanalizátor segítségével mérjük a különböző irányokban és frekvenciákon kisugárzott teljesítményt. Az antenaszoba két vége a 4. ábrán látható.

Az antenaszobának van egy előszobája, ami már a leárnýékolt helyiségen kívül van, itt található a sugárzott mérésekhez dedikált Rohde & Schwarz FSQ típusú spektrumanalizátor, a szobában található léptetőmotorok vezérlője és az egész mérést irányító számítógép, ami az előszoba többi eszközére van csatlakoztatva. Az antenaszobában háromféle mérést lehet végezni, ezek közül én kettővel foglalkoztam, de a harmadik mérés tárgyához, egy speciális radio boardhoz is volt valamennyi közöm.

Az első méréstípus a harmonikus teljesítményszint mérés, röviden „performance” mérésnént szoktuk emlegetni. Ebben az esetben a tesztelni kívánt adót a forgóasztalra helyezzük és az egy helyben álló mérőantenna segítségével mérjük az antennához érkező teljesítmény maximumát,





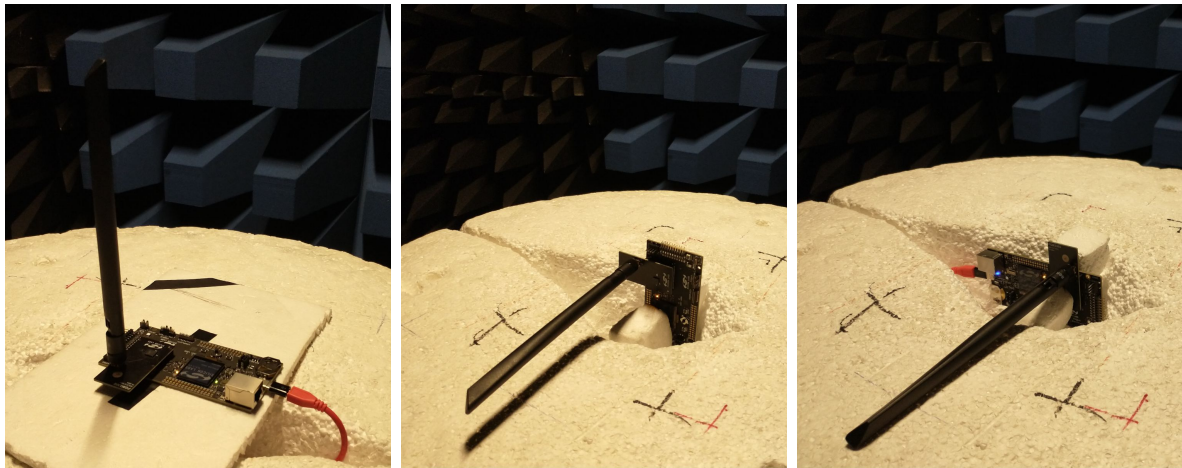
(a) Mérőantenna

(b) Forgóasztal

4. ábra. Berendezés az antenaszobában.

amíg körbefordul az asztal a DUT-tal. Ezáltal a DUT 3-dimenziós iránykarakterisztikájának egy bizonyos síkmetszetén belül tudjuk meghatározni a maximális kisugárzott teljesítménysűrűséget. A DUT-ot a forgóasztalra az 5. ábra szerinti orientációkban helyezhetjük el. A performance méréshez hozzátartozik még az, hogy milyen frekvencián mérünk, pontosabban az alapharmonikus hányadik felharmonikusán (vagy magán az alapharmonikuson). Ez gyakorlatilag csak a spektrumanalizátor vezérlésének és a mért nyers teljesítményszintek korrekciójának kérdése. Még egy fontos mérési paraméter a mérőantenna polarizációja, ami szerint vízszintes és függőleges orientációjú méréseket szoktunk végezni. Összességében a performance mérésnél tehát a paraméterek: az alapharmonikus frekvencia, a felharmonikus sorszáma, a DUT orientációja és a mérőantenna polarizációja. A performance méréseknél általában az a lényeges adat, hogy minden mért orientációban, polarizációval és felharmonikuson megfelel-e az EMC követelményeknek a DUT. Ha a mérés alapján megfelel, akkor elég jó biztossággal lehet állítani, hogy a le nem tapogatott irányokban nincs kiugró nyaláb a felharmonikusok sugárzásában, tehát tényleg megfelel a követelményeknek. Ha esetleg nem ment át a teszten, akkor a mérés paramétereiből lehet valamelyest arra következtetni, hogy honnan jöhet a nemkívánt felharmonikus sugárzás, esetleg mivel lehetne ezt orvosolni.

Egy másik antenaszobai mérés az iránykarakterisztika mérése. A mérés előkészítése fizikailag ugyanabból áll, mint a performance mérés esetében. Annyi a különbség, hogy itt csak az alapharmonikuson szoktunk mérni (a felharmonikusok sugárzásának karakterisztikája érdektelen, ha a megadott küszöbszint alatt vannak), valamint amért teljesítményszintek feldolgozásában. A spektrumanalizátor zero span módban az alapharmonikus frekvencián mér, amíg a forgóasztal egyszer körbefordul a DUT-tal, addig ezzel szinkronban a spektrumanalizátor egyet sweepel, így a körbefordulás végére a kijelzőjén megjelenik az adott síkhoz tartozó iránydiagram derékszögű koordináta-rendszerben ábrázolva.



(a) XY sík

(b) XZ sík

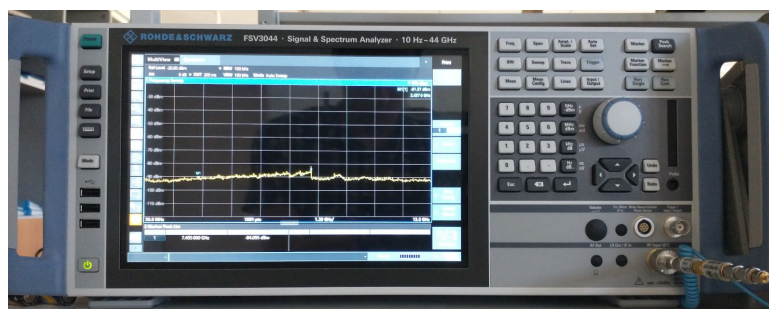
(c) YZ sík

5. ábra. Az iránykarakterisztika három metszetének mérése az antenaszobában.

### 2.3. Modulációs faktor

Az EMC szabványok szerint a valós alkalmazás körülményei között kell az eszköznek megfelelnie a felharmonikusok teljesítményszintjeivel szemben támasztott követelményeknek. A laborban a méréseket viszont CW (Continuous Wave), vagyis modulálatlan vivő adása mellett teszteljük. Azért van erre szükség, mert modulált jelnél a felharmonikus frekvenciák körül szétkenődött jel spektrális teljesítménysűrűsége olyan kicsi, hogy a zajszint alá kerül, emiatt nem lehet effektíven megmérni. Megjegyzem, hogy gyakorlatilag a CW jel modulációja nem hat a kimeneti jel összteljesítményére, tehát a moduláció az adott, CW esetben egyszerűen mérhető jelteljesítményt nem növeli vagy csökkenti, csak nagyobb sáv szélességen osztja el. A boardjainkat érintő szabvány kiköti, hogy a megfelelés eldöntéséhez használt spektrumanalizátoron 1 MHz-es RBW (Resolution BandWidth) legyen beállítva, ami egyszerre csak közelítőleg egy 1 MHz széles frekvenciasávba eső összteljesítmény mérését jelenti. A modulálatlan jel sáv szélessége nagyon kicsi, habár nem 0, mivel elég kicsi a rádió oszcillátorának fáziszaja. Egy konzervatív felső becslésként vegyük ezt a sáv szélességet 1 kHz-nek, a konkrét jellemző értékekre nem emlékszem. Az alapharmonikuson ülő jelkomponens sáv szélességének  $n$ -szerese az  $n$ -edik felharmonikus körül ülő komponens sáv szélessége. Eszerint még a sokadik felharmonikus frekvencia körül is csak nagyon kis sáv szélességet foglalna el a jel, például a 20. harmonikus körül is csak  $\pm 10$  kHz-et, ami még bőven teljesen bele esik a megadott 1 MHz-es sávba. Ha a fentiekkel szemben nem CW jellel mérünk, hanem valamilyen szélesebb frekvencialöketű modulált jellel, akkor könnyen elképzelhető, hogy már a 3–4. harmonikus frekvencia környékén is a keltett zavaró jelkomponens sáv szélessége lényegesen szélesebb, akár többszörösen is, mint az emlegetett 1 MHz-es határ. Emiatt akármelyik konkrét frekvencia környezetében végezzük is a mérést, a mérésnél használt RBW-t meghatározó szűrő az adott harmonikus környékén szétszórt jelteljesítménynek mindig csak egy részét engedi át, ez pedig csökkenti a modulált mérésnél kapott harmonikus teljesítményszinteket a CW mérés eredményeihez képest. A két mérési eredmény eltérése a modulációs faktor (lineáris skálán a két összetartozó teljesítményszint hányadosa; logaritmikus skálán, például dBm-ben megadott teljesítmények számértékének különbsége dB-ben).

Ez alapvetően egy előnyös dolog, de azért hogy teljesen kihasználhassuk a jelenségben rejlő lehetőségeket, kicsit mérni és számolni kell. A fentiek miatt a CW (modulálatlan) jellel végzett mérés a lehető legszigorúbb a moduláció szempontjából. Tehát ha egy rádió CW esetben átmegy a teszten, akkor biztosak lehetünk benne, hogy modulált esetben is átmenne, mert az eredmény nem lehetne rosszabb, legfeljebb hasonló, kislöketű modulációk esetén. Akkor lesz érdemes a



6. ábra. Rohde & Schwarz FSVA3044 Spektrumanalizátor.

modulációs faktoral számolni, ha a rádió megbukik a teszten, de nem sokkal, például csak 2–3 dB-vel. Ekkor egyszerűen a modulációs faktort ki kell vonni a mért teljesítményszintből és az így kapott, kompenzált értéket kell összehasonlítani a szabványban megadott határértékkel. Mint fent említettem, az aktuális modulációs faktor függ a felharmonikus sorszámától és a modulációs eljárástól. A Silabs-féle rádiós IC-k többféle modulációt támogatnak, az egyes modulációs eljárásokon belül (BPSK, QAM, stb.) is többféle változat használható, más-más bitsebességgel és frekvencialökettel, ezáltal sávszélességgel.

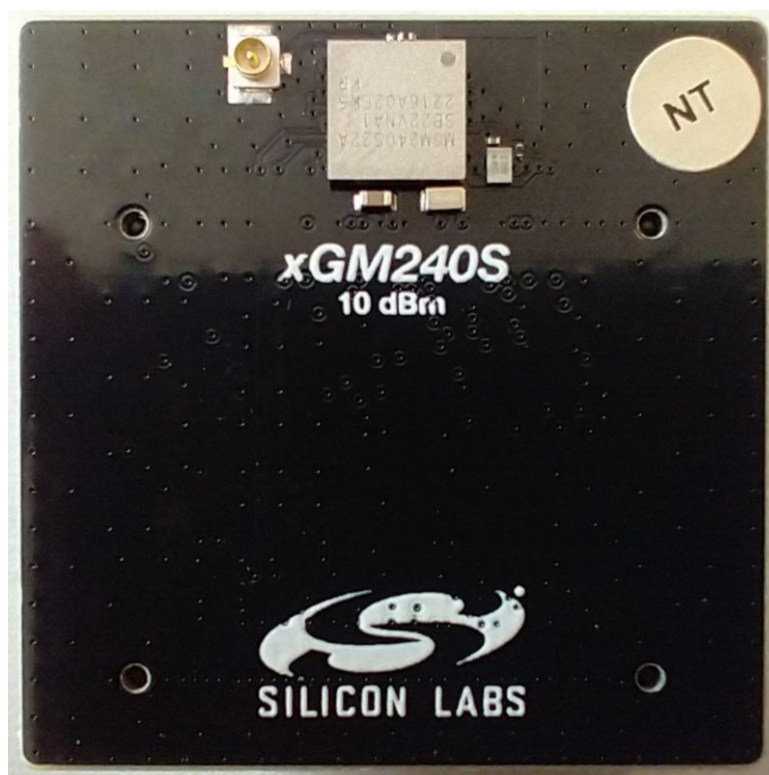
Az egyes lényeges modulációkra érdemes megmérni a modulációs faktort lehetőleg olyan műszerbeállításokkal, amilyenekkel a hivatalos EMC tesztek is végeznék. Ez volt az én egyik feladatom. A méréseket a 6. ábrán látható spektrumanalizátorral végeztem. Ennek a műszernek ugyan nincs kvázicsúcs-detektora, amilyen csak nagyon drága műszerekben szokott előfordulni és a hivatalos teszteken is használatos, de ilyen téren is lehet a szigorúbb döntés felé hibázni. Ez a szigorúbb mérést eredményező detektor a csúcsdetektor, emiatt ilyet használtam a méréseken.

### 3. NyHL tervezés

A cég által forgalmazott rádiós IC-eket használó referencia-áramkörök, leginkább az ezeket hordozó nyomtatott huzalozási lemezek tervezése a Hardware Tools csapat feladata, így ebben is részt vettem. Az egyik folyó projekt egy olyan készülékpáros tervezése volt a cégnél, ami rádiós kommunikáció alapján képes nagy pontossággal távolságot mérni két kisméretű résztvevő eszköz között. A projektet „HADM” (vagyis „High Accuracy Distance Metering”) néven emlegettük. A két résztvevő készülék nem egyforma, az egyik egy egyszerű adóvevő, ez a „tag”, ami körülbelül akkora, mint egy kézi rádiós kaputávirányító, a másik pedig egy komolyabb, többantennás mérőműszer. Az utóbbi végeredményben jelzést küld a tag-nek, ami válaszol, majd a válaszjel érkezési ideje és egyéb paraméterei alapján lehet kiszámítani a távolságot a két készülék között.

A HADM projektbe annyival segítettem be, hogy a tag layoutjának megtervezésébe segítettem be. Ehhez az Altium Designer szoftvercsomagot használtam, amit a cégnél, de elsősorban a Hardware Tools csapatban előszeretettel használnak. Az Altium Designer az NyHL tervezés minden lépését magába foglalja erősen integrált módon, a kapcsolási rajz tervezésétől a layout megszerkesztésén át a gyártási fájlok generálásáig. Ilyen szempontból hasonlít a KiCAD-hez, ami gyakorlatilag egy ingyenes és nyílt forráskódú megfelelője az Altium Designer-nek, persze sok funkció hiányzik belőle, amit az Altium Designer nyújt, lévén az utóbbi egy meglehetősen borsos árú, professzionális programcsomag. Azzal, hogy előzőleg már saját szórakozásomra terveztem NyHL-t KiCAD-ben és a cégnél egy professzionálisabb program használatával is kipróbálhattam magam

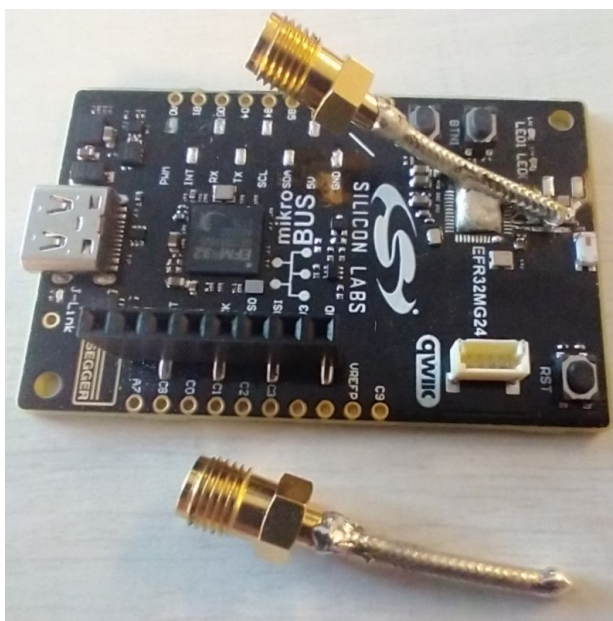
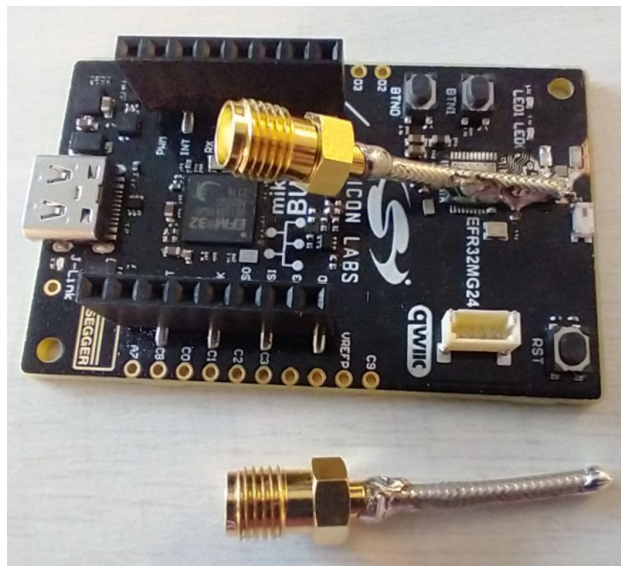




7. ábra. sip-modul

### 3.1. Kapcsolási rajz

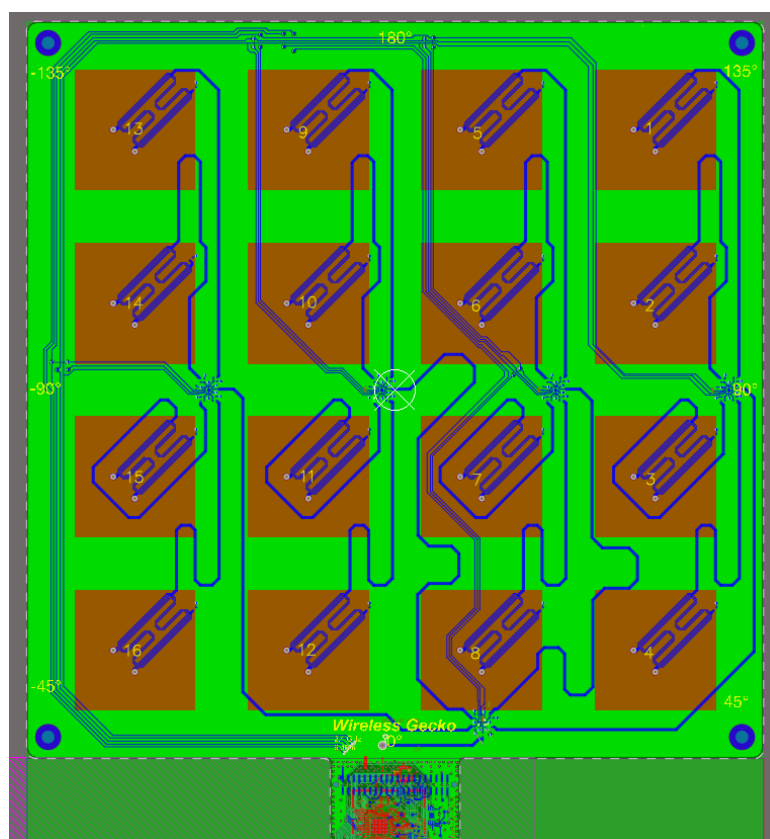
### 3.2. Nyomtatott huzalozási rajz



8. ábra. pigtailek



9. ábra. VNA



10. ábra. Beltéri iránymérő antennamátrix.