

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 1.

# 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.

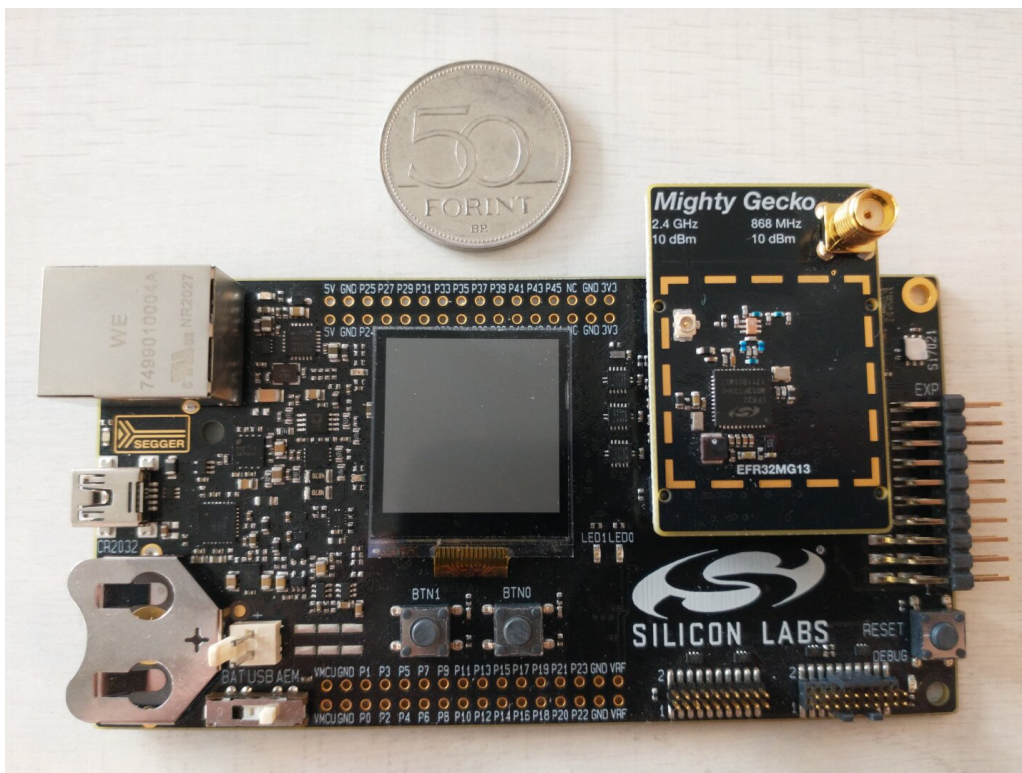
## 1.1. A cégről

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 helyszínné 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 chipet, 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 teljesítőképességét 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



1. ábra. WSTK + radio board.

„WSTK” néven szoktunk emlegetni. A kisebb, „Mighty Gecko” feliratú NyÁK a „radio board”, amit a WSTK vezérel.

## 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 végfokerősítő 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 mindenféle helytakarékossági és egyéb szempont alapján, persze a topológia megtartásával.

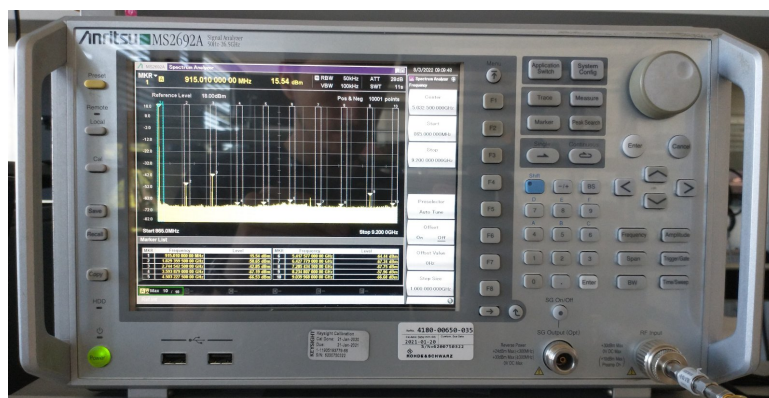
Egy másik szempont az illesztőhálózat tervezésénél a rádió végfokerősítőjének a kimeneti impedanciája. Az illesztőhálózat egyik fontos feladata, hogy kis reflexióval és veszteséggel illessze a végfok kimeneti impedanciáját a NyHL-en található 50 OHm-os mikroszalagvonalhoz (microstrip line). Az egyes 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 szubszt-rát 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.

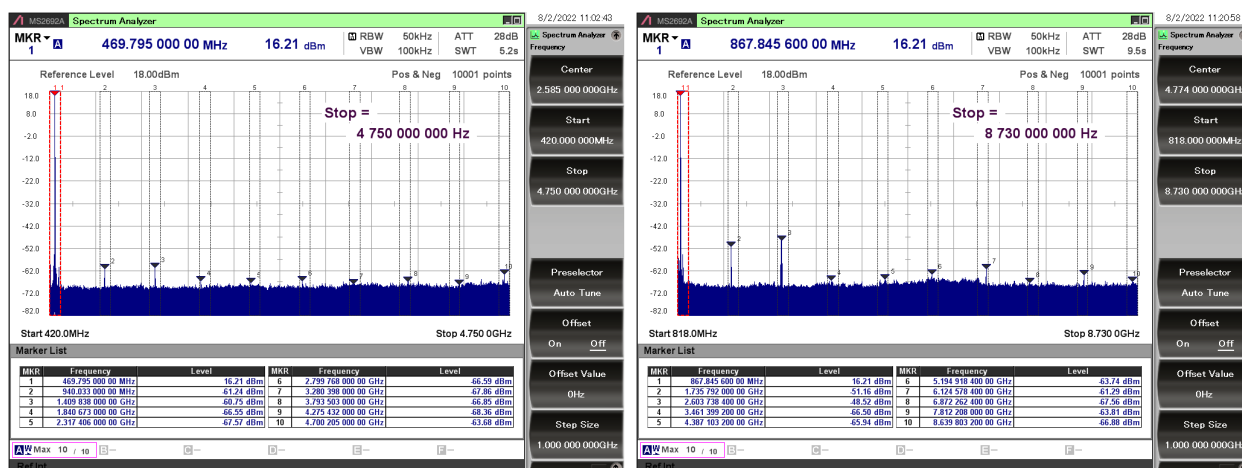
## 2.1. Vezetett mérés

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 kapcsolom és a kiadott jelet elemzem. Ilyen méréseknél általában egy egyszerű szinuszos jelet generáltak 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 kódnév 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 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 le-



2. ábra. Anritsu MS2692A



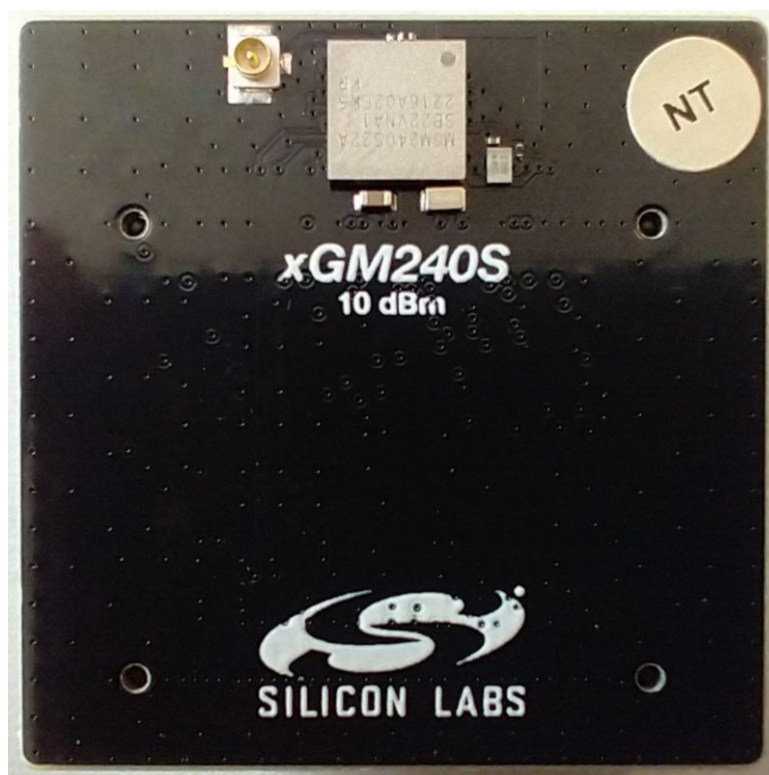
3. ábra. 470 és 868 MHz-es Sol radio board-ok kimeneti spektruma.

hetetlen lenne jó áramköri modellt alkotni a kérdéses illesztőhálózathoz, a 3D-s elektromágneses szimuláció előkészítése pedig túl hosszadalmas lenne, így maradt a próbálkozással 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





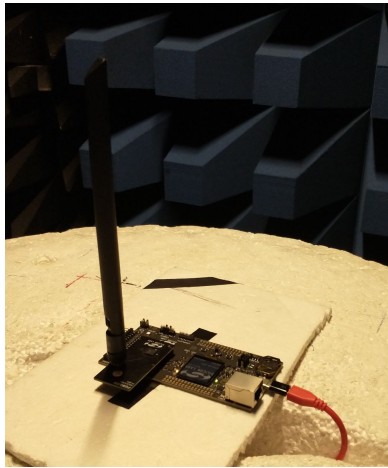
4. ábra. sip-modul

## 2.3. Modulációs faktor

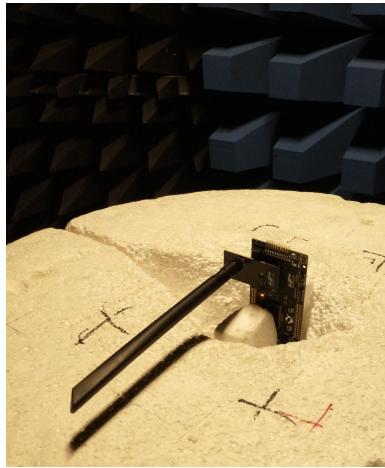
## 3. NyHL tervezés

### 3.1. Kapcsolási rajz

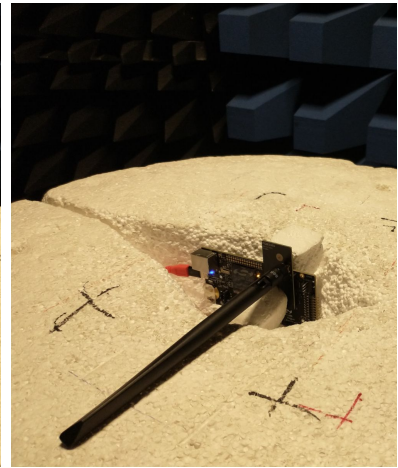
### 3.2. Nyomtatott huzalozási rajz



(a) XY sík

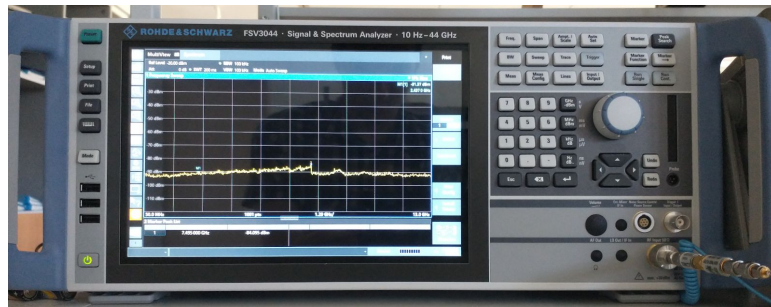


(b) XZ sík

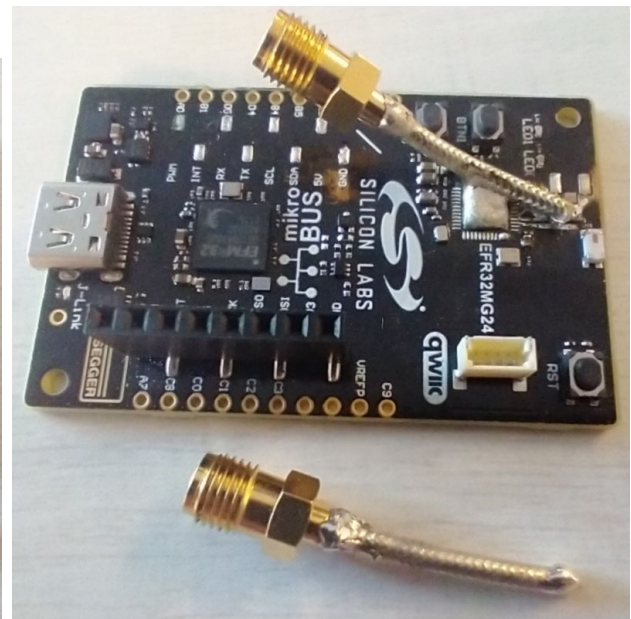
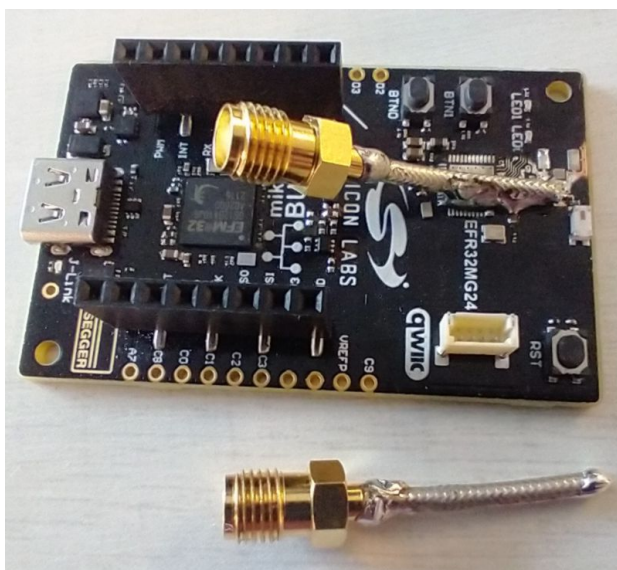


(c) YZ sík

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



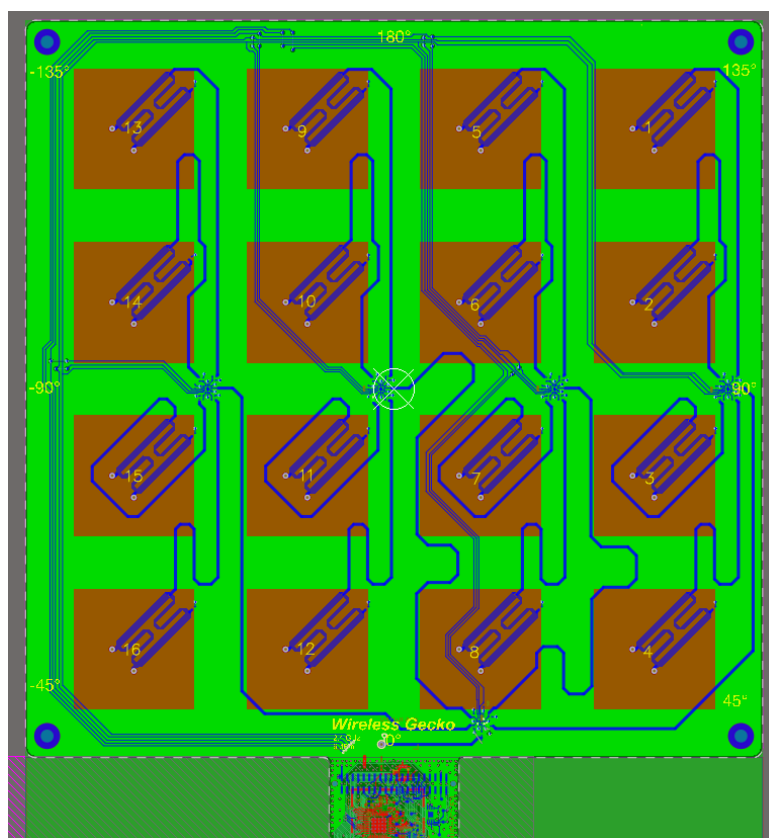
6. ábra. fsv



7. ábra. pigtailek



8. ábra. VNA



9. ábra. Beltéri iránymérő antennamátrix.