

FELADATKIÍRÁS

Légrádi Máté

BSC villamosmérnök hallgató részére

UHF sávú primérsugárzó parabola reflektorhoz

Végezzen irodalomkutatást a UHF sávú parabola reflektoros antennák megvalósítási lehetőségeiről.

Tervezzen és valósítson meg egy a 70 cm-es rádióamatőr frekvenciasávban működő parabola antenna primérsugárzót az alábbi paraméterekkel:

-parabola tükör átmérő:	3 m
-parabola tükör f/D:	0.45
-működési frekvencia sáv:	432 MHz-438 MHz
-polarizáció:	duál

Tervezzen mérési eljárást az elkészült antenna bemérésére.

Vizsgálja meg az antenna felhasználhatóságát a MASAT-1 műhold vételére.

Ajánlott szakirodalom:

Paul Wade: The W1GHZ Online Microwave Antenna Book 1994-2006

Rastislav Galuscak, Pavel Hazdra, and Milos Mazanek:

Compact Circular/Linear Polarization Dual band Prime-Focus Feed for Space Communication

International Journal of Antennas and Propagation Volume 2012

Tanszéki konzulens: Szűcs László tanszéki mérnök

Külső konzulens:

Budapest, 2014-10-07

.....
egyetemi docens
tanszékvezető



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

Légrádi Máté

UHF SÁVÚ PRIMÉRSUGÁRZÓ PARABOLA REFLEKTORHOZ

KONZULENS

Szűcs László

BUDAPEST, 2014

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	5
Abstract.....	6
1 Bevezetés	7
2 A parabola tulajdonságai	8
2.1 Fókuszpont.....	8
2.2 Nyalábszélesség	9
2.3 A nyalábszélesség és a megvilágítás kapcsolata.....	12
2.4 A parabola veszteségei.....	13
2.5 Parabolafajták	15
3 Parabola tápfej lehetőségek	19
4 A tápfej tervezése	22
4.1 Tervezési megfontolások	22
4.2 A tervezés menete	22
4.3 A tervezés eredménye	26
4.4 Parabolatükör és a tápfej	28
5 Teljesítményösszegző	30
5.1 Wilkinson-féle teljesítményfelező	30
5.2 Az osztó tervezése és elkészítése	32
5.3 Az osztó mérése	33
6 Balun	35
6.1 Lehetőségek	35
6.2 A balun tervezése	37
6.3 Szerelés és mérés	38
7 Összeszerelés.....	41
7.1 Tápfej	41
7.2 Vevőegység.....	42
7.3 Mérés	43
8 Összefoglalás.....	46
9 Irodalomjegyzék.....	47
10 Függelék.....	48

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Légrádi Máté**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2014. 12. 12.

.....
Légrádi Máté

Összefoglaló

Ezen szakdolgozat célkitűzése egy olyan primér sugárzóból és reflektorfalból álló antennarendszer tervezése, elkészítése és bemérése, ami alkalmas lehet műholdas kommunikációra. Az adatátvitel során fellép a Föld-műhold távolságból adódó szabadtéri csillapítás, ennek leküzdésére nagy nyereségű és irányított antennára van szükség. Ezeknek a feltételeknek megfelel a műholdas televíziózáshoz használt parabola és a Yagi-Uda antenna is, de a Masat-1 miatt az egyetem már rendelkezik az utóbbi antennatípussal, ezért a választás a parabolára esett.

A parabola reflektor adott, így a dolgozat az antennarendszer táplálásához szükséges tápfej három főbb elemével foglalkozik:

- a parabola megvilágításához szükséges sugárzó elem(ek)
- a tápfejet a tápvonallal összekötő és illesztő balun
- a választott primér sugárzó elrendezéséhez szükséges teljesítményösszegző

Az alkalmazott frekvenciasáv az ún. „70 cm band”, a rádióamatőrök és a Masat-1 által használt ISM-sáv.

A parabola megvilágítása duális polarizációval történik, ami két tápfejjel valósul meg, az egyik antenna vízszintes, míg a másik függőleges polarizációjú, ezáltal egy forgó adóantenna síkbeli vetületére és forgás frekvenciájára a vett jelszint-különbségekből becslés adható.

Abstract

The aim of this thesis is to design, build and measure an antenna system consisting a prime-focus feed and a parabolic dish which would be capable of space communication. During data transfer, a phenomena called free space path loss or attenuation occurs, because of the distance between Earth and the satellite. To overcome this loss an antenna with high gain and directivity is required. The parabolic antenna used for satellite TV broadcast and the Yagi-Uda antenna meet these conditions, but because of the Masat-1, the university already has one Yagi so the chosen type is the parabolic.

The parabolic dish is given, so the thesis only contains the three major parts needed for the feed:

- the radiator element(s) used to illuminate the dish
- the balun used to connect the feed with the transmission line
- also a power divider/combiner is required because of the chosen primer feed

The applied frequency range is the so called „70-cm band” ISM band used by radio amateurs and the Masat-1.

The illumination of the dish is carried out with dual polarization, which is done with two antenna feeds, the first one with horizontal and the second one with vertical polarization. Hence an estimation to the rotating frequency and a two dimensional projection of the cube can be given of a rotating transmitter from the difference of the received signal strengths.

1 Bevezetés

Mint az összefoglalóban olvasható a dolgozat célja egyirányú műholdas kommunikációt (vétel) megvalósító parabola tükörből és tápfejből álló antennarendszer elkészítése, majd a mérési eredmények feldolgozása. Ezek az eredmények egy becslést adhatnak a műhold antennájának a földi állomás antennájához viszonyított helyzetére. Ez a becslés magyarázatot adhat például arra, hogy egy adott magyarországi áthaladás során miért olyan kevés a helyesen vett csomag, vagy miért olyan ritkán éri el a műholdat egy vezérlési parancs.

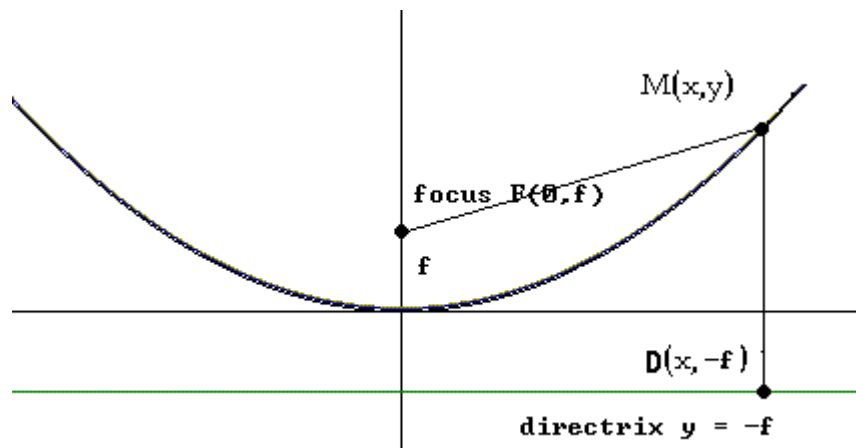
A dolgozat inkább egy gyakorlati útmutató és dokumentáció összessége, ezért csak az általam legszükségesebbnek vélt fogalmakat ismertetem röviden, a szárazabb elméleteket mellőzve. Az írás terjedelmi korlátaiból adódóan részletesebb elméleti leírásokat nem is lehetne adni, hiszen némely területekből önálló dolgozat is születhetne (és születtek már).

A struktúra az összefoglalóban említett három részegység köré épül. Elsőként bemutatom a parabolák legfontosabb tulajdonságait és ezeknek az alkalmazás során betöltött szerepét, később a szakirodalmakban szereplő tápfej lehetőségek előnyeit és hátrányait figyelembe véve következik a tápfej tervezése. Ezek után a sugárzó elemektől távolodva kerül sorra a szükséges teljesítményösszegző és balun a tervezéstől bemérésig. A sort végül az elkészült tápfej parabolába illesztése zárja egy összefoglalóval és kitekintéssel a további lehetőségekre.

2 A parabola tulajdonságai

2.1 Fókuszpont

Elemi tanulmányokból tudjuk, hogy a parabola azon mértani pontok helye a síkon, amelyek egyenlő távolságra vannak egy adott ponttól (fókuszpont, gyújtópont), és a ponton át nem menő egyenestől (vezéregyenes, direktrix).

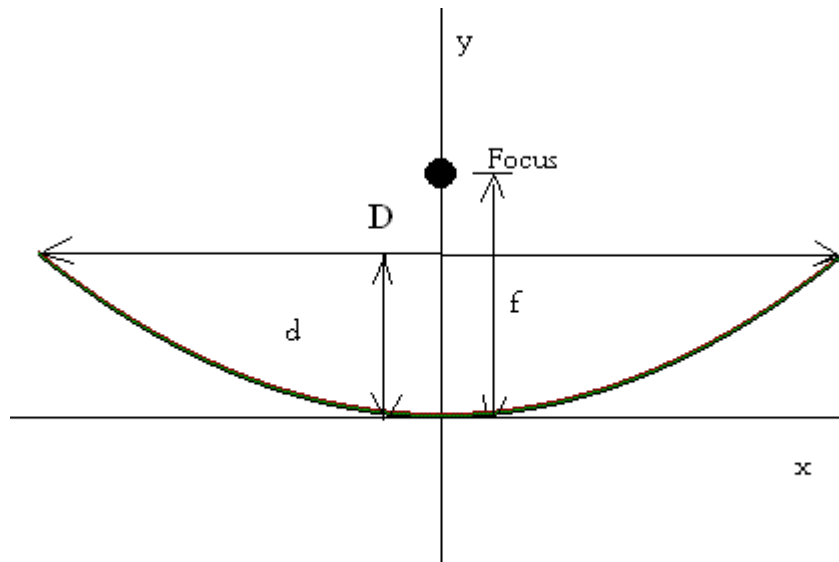


2-1. ábra Egy origó talppontú parabola az f fókuszpontjával, tetszőleges M pontjával és az y vezéregyenes annak egy D pontjával [1]

A valóságban egy véges méretű parabolát használunk, ezért a parabolából csak egy szeletre van szükség (2-2. ábra), így a főbb paraméterek a D átmérő, az f fókusz-távolság és d mélység. A két dimenziós síkparabolából a függőleges tengely mentén történő elforgatással kapunk három dimenziós forgásparaboloidot (a következőkben a „parabola” alatt is forgásparaboloid értendő).

Az antenna technikában a fókusz-távolság és az átmérő kapcsolatát legtöbbször hányadosukkal adják meg (f/D viszony vagy egyszerűbben f/D). Az f/D fizikai jelentése, hogy mennyire mély az elkészített antenna, azaz mekkora szeletet vettünk a végtelen parabolából. A gyakorlatban használt parabola antennák f/D -je 0,25 és 0,65 között változik.[2]

Az egyetemen lévő antenna f/D -je a kiírás szerint 0,45 és az átmérője 3 m így a fókusz-távolsága 1,35 m.



2-2. ábra Egy origó talppontú, f fókusz-távolságú és d mélységű (sík) parabola [1]

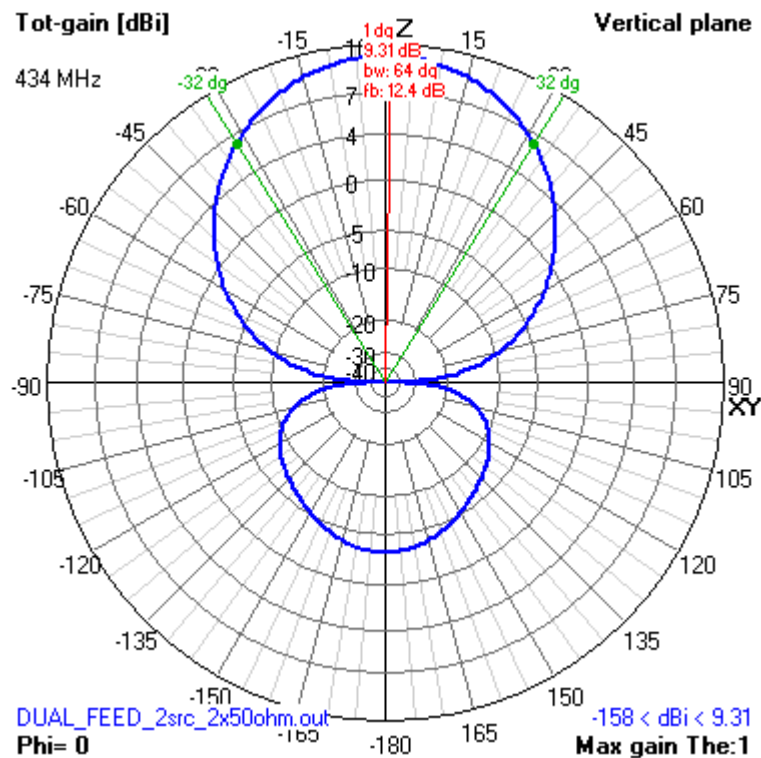
2.2 Nyalábszélesség

A parabola antennánál a parabolának azt a tulajdonságát használják ki, hogy a fókuszpontjába helyezett sugárzó elem által keltett elektromágneses sugárzást a parabola hossz tengelyével párhuzamosan, egy irányba veri vissza. Az így létrejövő antenna egy apertúra antenna, melynek apertúrája egy parabola átmérőjű körlap, és az ezen kilépő elektromágneses hullámok amplitúdó és fázisviszonyai jó közelítéssel azonosnak tekinthetők az egész apertúra felületén. A kilépő hullámok polarizáltsága változatlan.

Nyalábszélesség: Ha iránykarakteristikájával adott egy tetszőleges sugárzó, akkor a főnyaláb félteljesítményű (-3 dB) pontjainak fokban megadott távolsága a nyalábszélesség. A 2-3. ábra által adott iránykarakterisztika maximuma 9.31 dB, a félteljesítményű pontjaihoz (6.31 dB) tartozó fokok $\pm 32^\circ$, így a nyalábszélesség 64° . A 2-3. ábra ezt bw -vel (beamwidth) jelöli.

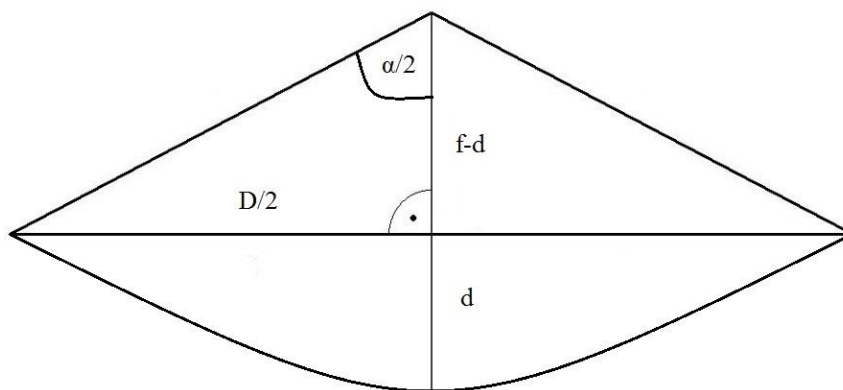
Előre-hátra viszony: Az antenna fő irányában mért nyereség, és a főiránnyal ellentétes irányban mért nyereség különbsége. A 2-3. ábra ezt fb -vel (front-to-back ratio) jelöli.

Melléknyalábelnyomás: Melléknyalábelnyomásnak hívjuk a főnyaláb és a legnagyobb melléknyaláb értékének különbségét dB-ben. Általánosságban elmondható, hogy a melléknyalábelnyomás elégséges 13-15 dB, és már elfogadható 20 dB esetén. (F.5)



2-3. ábra A nyalábszélesség

A parabola megvilágítási szöge: A megvilágítási szög egy szögtartomány, amin belül összpontosul a kisugárzott elektromágneses teljesítmény nagy része. Szemléletesen fogalmazva e szögtartományon kívül eső sugárzás már nem éri el a parabolát, hanem elhalad mellette (részletesebben a következő fejezetben). Ahhoz, hogy a parabola felületét a lehető legjobban kihasználjuk a parabola megvilágítási szögének és a nyalábszélességnek közel azonos értéket célszerű választani. Mivel a parabola geometriai méretei adottak, ezért csak a primér sugárzó tervezésénél lehet ezt figyelembe venni.



2-4. ábra A parabola megvilágítási szögének számítása

A 2-4. ábra derékszögű háromszögből meghatározható α , a parabola megvilágítási szöge.

Elemi megfontolások alapján felírható a parabola fókuszpontja és mélysége közötti összefüggés[1]:

$$f = \frac{D^2}{16d} \quad (1)$$

Egyszerű trigonometriai összefüggések alapján felírható, hogy:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{D/2}{f-d} \quad (2)$$

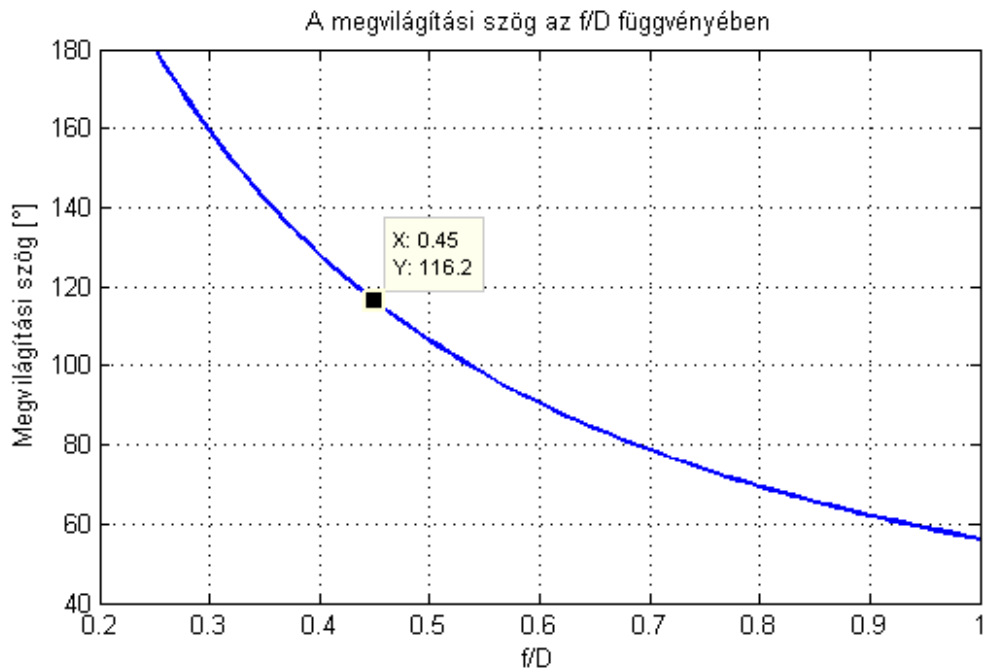
$$\alpha = 2 \operatorname{atan}\left(\frac{D/2}{f-d}\right) \quad (3)$$

Az atan (arkusz tangens) argumentumát kifejtve:

$$\frac{\frac{D}{2}}{\frac{16f^2-D^2}{16f}} = \frac{D}{2} * \frac{16f}{16f^2-D^2} = 8 \frac{fD}{16f^2-D^2} = 8 \frac{D^2 \frac{f}{D}}{D^2(16\frac{f^2}{D^2}-1)} \quad (4)$$

Így kapjuk a megvilágítási szöget f/D függvényében:

$$\alpha = 2 \operatorname{atan}\left(8 \frac{\frac{f}{D}}{\left(\frac{4f}{D}\right)^2-1}\right) \quad (5)$$



2-5. ábra A megvilágítási szög az f/D függvényében

A 2-5. ábra mutatja a függvényt Matlabbal ábrázolva (ami megegyezik a [3] irodalomban bemutatott ábrával), amiről leolvasható, hogy a 0,45-ös f/D-vel adott parabola megvilágítási szöge 116,2°, vagy, ahogy később hivatkozok rá ±58,1°.

2.3 A nyalábszélesség és a megvilágítás kapcsolata

Az előzőekben leírtak alapján a primér sugárzó nyalábszélessége nagyban befolyásolja a parabolatükör megvilágítottságát. Ahhoz, hogy a tükör teljes felszínét megvilágítsuk, gondos tervezés szükséges. A tükör geometriája miatt a fókuszpont általában távolabb esik a tükör szélétől, mint a parabola közepétől, így a szabadtéri csillapítás miatt a parabola széle felé nagyobb teljesítménnyel kellene sugározni, mint a közepe felé, hogy az apertúrára azonos teljesítmények jussanak. Ez a valóságban nehezen teljesíthető, ezért a szélek felé csökkenő teljesítmény értékére hüvelykujj-szabályként ún. „10 dB edge taper”-t ajánlanak, ami tulajdonképpen annyit tesz, hogy a nyalábszélességet nem a -3 dB félteljesítményű, hanem a -10 dB tizedteljesítményű szöggel azonosítják. Ez a -10 dB csak egy ajánlás, főként a 0,4-0,6 f/D-jű antennáknál érvényes, pl. egy 0,25 f/D-vel rendelkező antennához már csak 6 dB *edge taper* szükséges, de ez 180°-os nyalábszélességet követelne meg, ami a majdnem megvalósíthatatlan kategóriába tartozik.[2]

A megfelelő megvilágításhoz szükséges még a fázisközéppont és fókuszpont azonossága.

Fázisközéppont: Az antennák véges méretei ellenére egy szögterületen belül található egy pont, ami pontforrásként viselkedik, így az onnét kilépő elektromágneses hullámok a reflektort elérve már jó közelítéssel síkhullámoknak tekinthetők, azaz a reflektort elhagyó hullámok amplitúdó és fázisviszonyai változatlanok egy tetszőleges keresztmetszetre nézve.[4]

Fontos még megemlíteni, hogy a megvilágításnak minél inkább szimmetrikusnak kell lennie, azaz a nyalábszélesség mind az E és H-sík esetén jelentősen ne térjen el egymástól. Azonban a fázisközéppont nem feltétlenül esik egybe az E és a H-sík esetén, így nem mindig megoldható, hogy mindkét sík fázisközéppontja egyúttal a fókuszpont is legyen. A fázisközéppont általában nem ismert, meghatározása történhet térszámító programokkal (pl. CST), vagy empirikus módon az antenna helyzetének változtatásával, és a legnagyobb nyereségű pont megkeresésével.

2.4 A parabola veszteségei

A megvilágítás során fellépnek bizonyos veszteségek is, a minél nagyobb apertúra határfok érdekében ezeket célszerű a tervezésnél figyelembe venni.

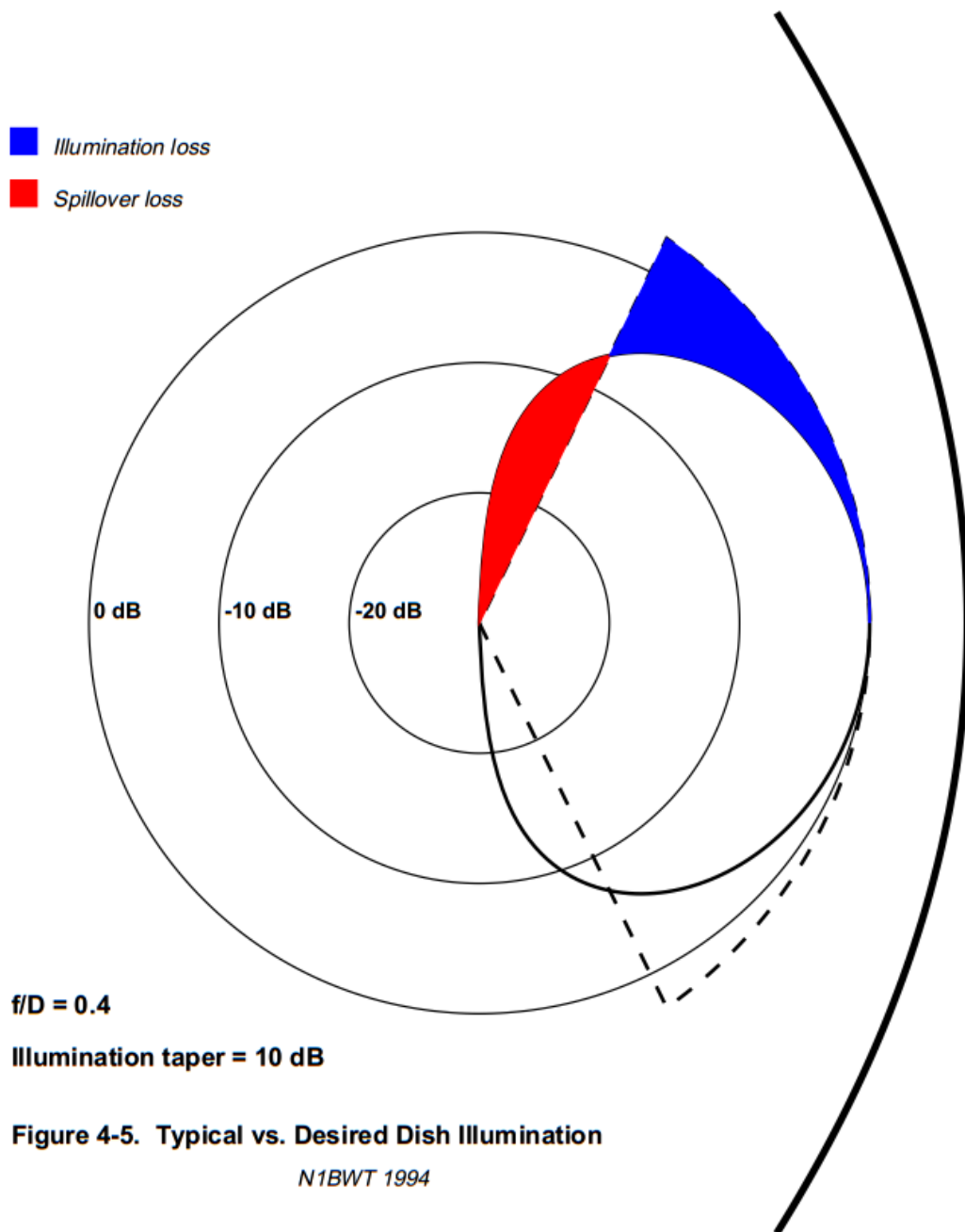
Az egyik ilyen veszteség az ún. kitakarási veszteség (*feed blockage*), ami a tápfej fizikai kiterjedéséből adódik, és a kitakarás miatt csökkenti az antenna határos felületét.[5][6] Alacsonyabb frekvenciákon, ahol a megvilágító antenna és/vagy a reflektorfa összemérhető a parabola geometriai méreteivel, ez a veszteség jelentős lehet (lásd később a tervezés során).

A másik veszteség, vagy veszteségek, mert egymástól nem függetlenek, a túllövés (*spillover loss*) és a megvilágítási veszteség (*illumination loss* vagy *under illumination*). A spillover loss a nem megfelelő iránykarakterisztika esetén lép fel, és azt az elsugárzott teljesítményt jelenti, ami nem a parabola irányába halad. Ez persze fellép minden iránykarakterisztika esetén, pl. a melléknyalábok által elsugárzott teljesítmény is ebbe a kategóriába tartozik, de a tervezés során mértéke jelentősen csökkenthető. Ennek a párja, ha nincsen teljesen megvilágítva a felület, és így nincs a lehető legjobban kihasználva a rendelkezésre álló reflektor. A 2-6. ábra egy általános (folytonos vonal) és a szükséges (szaggatott vonal) iránykarakterisztikát ábrázolja, szemléltetve a veszteségeket.

Az apertúra hatásfok több tényezőből áll, és ezek szorzata adja az eredő hatásfokot[6]:

$$k = k_r k_t k_s k_m \quad (6)$$

Ahol k_r az antenna sugárzási (ohmos) ellenállásából adódó veszteség (radiation efficiency), de ez a gyakorlatban nagyon közel áll 1-hez. A k_t a megvilágítás hatásfoka (illumination efficiency) és k_s a túllövésből eredő hatásfokcsökkenés (spillover efficiency), míg k_m több veszteség összessége pl. kitakarási veszteség, keresztpolarizációs veszteség, a több fázisközéppont miatti interferencia (és ebből adódó minimumhelyek) által okozott veszteség és a felületi hiba. A felületi hiba lehet anyaghiba vagy a súlycsökkentés és szélterhelés minimalizálás céljából alkalmazott reflektáló háló, ez akkor elhanyagolható, ha nem haladja meg a hullámhossz tizedét.[6]



2-6. ábra Az illumination és spillover loss ábrázolása [2]

2.5 Parabolafajták

Általánosságban elmondható, hogy parabola reflektorokkal nagyon nagy antennanyereségek és kis nyalábszélességek érhetők el. Minél nagyobb a tükör átmérője annál nagyobb a nyeresége, és annál jobban fókuszált a nyaláb.

A parabola apertúrája egy A felületű körlap:

$$A = r^2\pi \quad (7)$$

Ahol r a parabola átmérőjének a fele.

Az adott átmérő mellett elérhető maximális nyereséget és nyalábszélességet a következő összefüggések adják meg[6]:

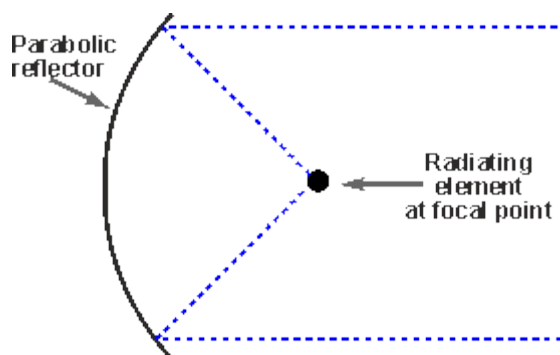
$$G_{dBi} = 10 \lg \left(\eta \frac{4\pi}{\lambda^2} A \right) = 10 \lg \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (8)$$

$$\psi = \frac{70\lambda}{D} \quad (9)$$

Ahol η az apertúra hatásfok, λ a használni kívánt hullámhossz és D az apertúra átmérője. A források szerint kis antennával (kisebb, mint 10λ) reálisan a maximális hatásfok 45-50% körül alakul.[2] A nyereség alatt ezentúl minden esetben izotróp antennára vonatkoztatott nyereség értendő.

A parabola és a tápfej egymáshoz viszonyított helyzete alapján többféle konfiguráció is használatos a gyakorlatban, ezek röviden[7]:

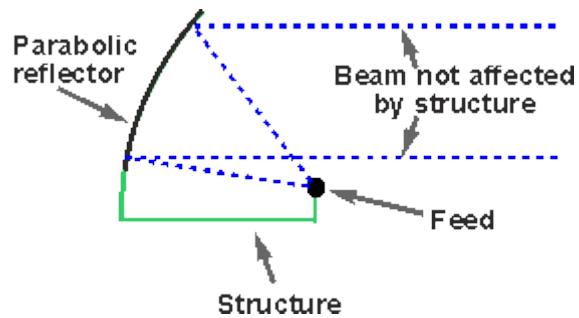
- primfókuszos antenna (axial/front/focal feed): A tápfej pontosan a parabola fókuszában van elhelyezve (2-7. ábra). Hátránya, hogy az antenna tápfej és felerősítő szerkezetei miatt jelentős lehet a kitakarási veszteség, és a hatásfoka a fentebb említett 50% körül alakul. A fizikai megvalósítás során még gondot okozhat a szélterhelés és a Föld felől érkező alapzaj.



2-7. ábra Parabola primfókuszos táplálással [7]

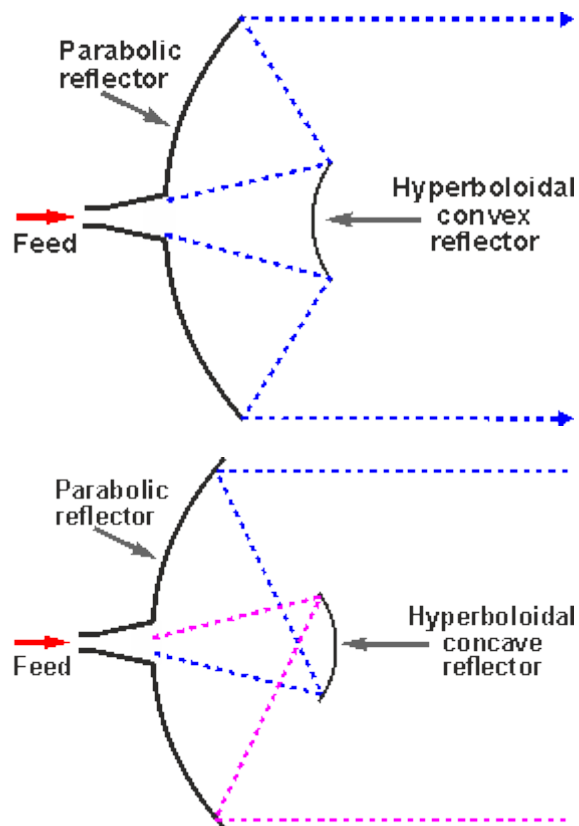
- off-axis/offset feed antenna: Ebben a konstrukcióban a parabolának egy aszimmetrikus szeletét vesszük, és a tápláló antenna a nyáláb útján kívül, a reflektor oldalán helyezkedik el, így csökkentve a kitakarási veszteséget, és esetlegesen a méretbeli csökkenés miatt a szélterhelést (2-8. ábra). Egy másik nagy előnye, főleg a műholdas kommunikációnál és a földfelszíni televízió sugárzásnál jelenik meg, vagyis a geometriájából adódóan nagy

részben az ég felé néz, és onnét kisebb alapzajt vesz, mint a Föld irányából (a Napzajtól eltekintve).



2-8. ábra Parabola offset táplálással [7]

- Cassegrain és Gregorian: E két antennatípus csak a másodlagos reflektoruk geometriájában különbözik (domború vagy homorú tükör, 2-9. ábra), és ilyen elrendezés mellett a hatásfok elérheti a 70%-ot is. Egyes esetekben még előny lehet, hogy a sugárzó elem és a parabola közti távolság lecsökken, így az antennarendszer kevesebb helyet foglal.



2-9. ábra Parabola Cassegrain és Gregorian táplálással [7]

Az egyetemen lévő antenna egy 3 méter átmérőjű primfokuszos, alumíniumvázas parabola antenna, melynek borítása egy 6 GHz-ig reflektáló alumíniumháló. A (8) és (9) képletekből 50%-os hatásfokkal, 434 MHz sávközépi frekvencián és 3 m átmérővel számolva a maximálisan elérhető nyereség és nyalábszélesség ezzel az antennával:

$$G_{max} \leq 19,7 \text{ dB}$$

$$\psi_{max} \geq 16,1^\circ$$

3 Parabola tápfej lehetőségek

Mint korábban láttuk, a parabola felületének teljes kihasználásához a parabola fókuszába egy izotróp (pontoszerű) antennát kellene helyezni. Az izotróp antenna a valóságban nem megvalósítható, de mivel a tápláló antennák véges kiterjedésűek, ezért található egy pont (a fázisközéppont), ami bizonyos szögtartományon belül pontforrásnak tekinthető.

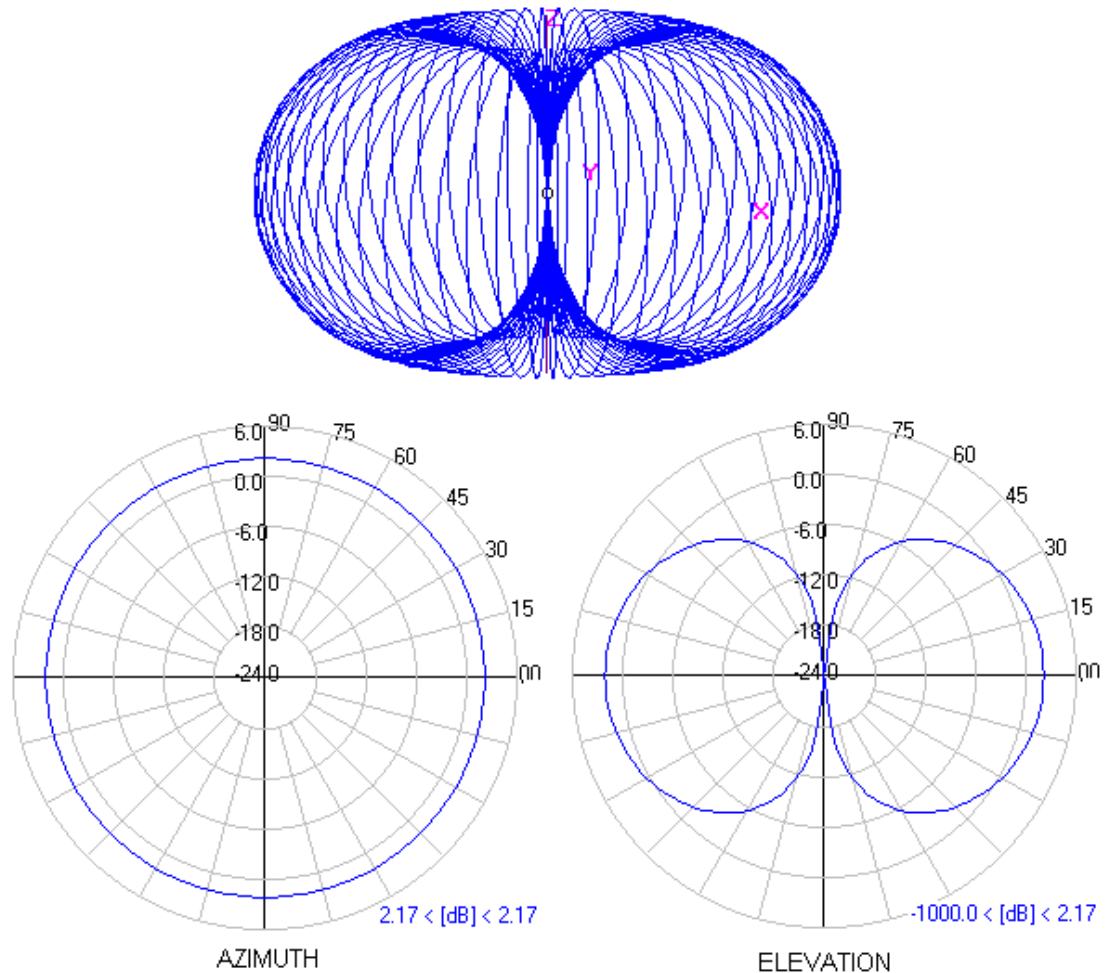
Frekvenciától függően a tápfejeknek több megvalósítása is lehetséges. Alacsonyabb frekvenciákon (gyakran UHF sávban, 300 MHz és 3 GHz között) a tápfej általában huzaltenna, leggyakrabban félhullámú dipól (vagy dipólok), esetlegesen reflektorfallal (splash plate) kiegészítve. Magasabb frekvenciákon (de már akár 1 GHz felett is), ahol a tápfej mérete egyre csökken, a leggyakoribb megoldás a tölcser, de használatos még a helix és akár a patch antenna is.

A feladatban kiírt alkalmazáshoz szükséges, hogy az antenna lineárisan polarizáltan sugározzon, ezért a körpolarizált helix antenna elvetendő. A tölcserantennák tulajdonképpen szétnyíló tápvonalak (vagy egy sugárzóval táplált üreges hullámvezetők), így a geometriájának megfelelő kialakításával befolyásolható a polarizáltsága, de 434 MHz-en a fizikai mérete szinte használhatatlanul nagyvá válna, ami miatt a kitakarási vesztesége a hatásfokot nagyon lerontaná, ezért már csak a félhullámú dipól jöhet számításba.

A [5] irodalom alapján a dipólok elrendezésének széles választéka áll rendelkezésre. Ismerve a félhullámú dipól iránykarakterisztikáját (3-1. ábra), megállapítható, hogy ilyen formában nem alkalmas egy parabolatükör megvilágítására. Ha ezt a dipólt kiegészítjük egy másik szintén félhullámú dipóllal, ami nincs meghajtva, csak reflektorként szolgál, akkor tekinthetünk rá úgy, mint egy kételemes Yagi-Uda antennára, ezáltal jobb irányítottság érhető el, de az E és a H-sík nem lesz szimmetrikus. Ugyan ez a hatás elérhető, ha a második dipól helyett egy λ átmérőjű kör alakú vagy szögletes reflektorfalat alkalmazunk. Ezzel a megoldással nagy nyalábszélességet kapunk, ami mély parabolák táplálásánál hasznos.

Az egy dipólos táplálás legnagyobb hátránya, hogy a H-sík sokkal szélesebb, mint az E-sík. Erre kielégítő megoldást jelent, ha egy másik dipólt párhuzamosan helyezünk az előbbivel, és fázisban tápláljuk. Egy általános elrendezés ilyen esetben: 2 db

félhullámú dipól antenna, egymástól fél hullámhosszyra és negyed hullámhosszyi távolságra egy egész hullámhosszyi oldalhosszúságú négyzetes reflektortól. Az értékek úgy lettek megválasztva, hogy az antenna referencia antennaként könnyen megépíthető, mérhető és módosítható legyen.

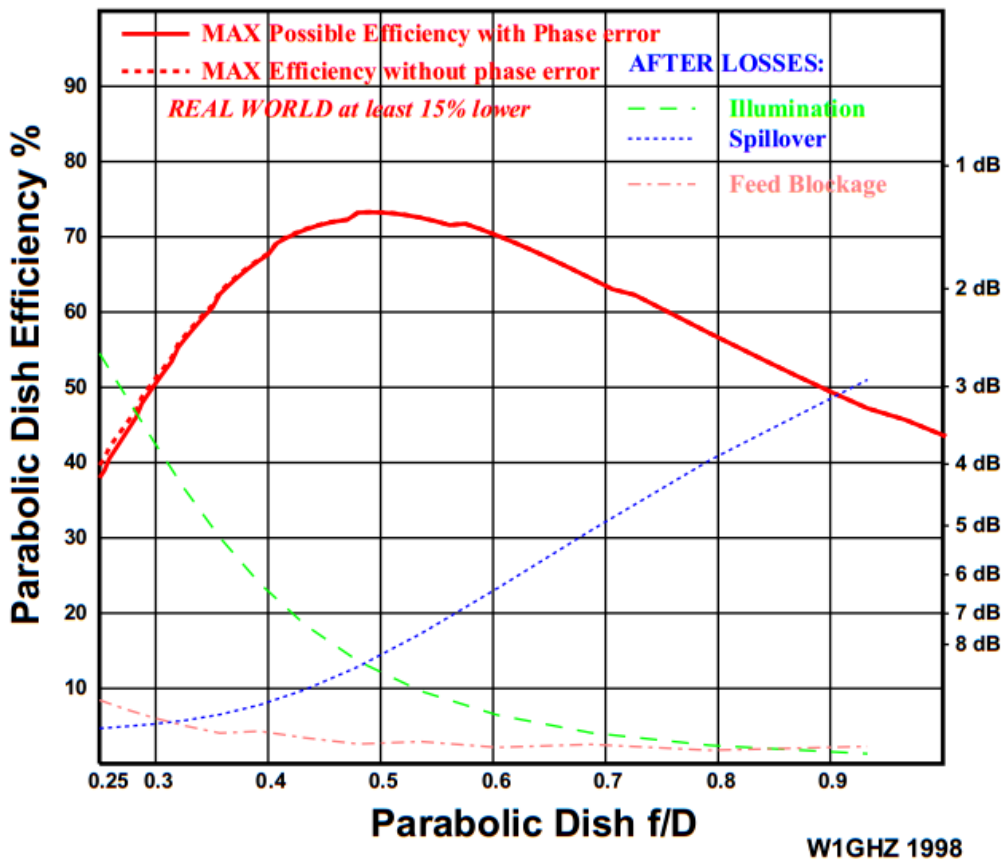
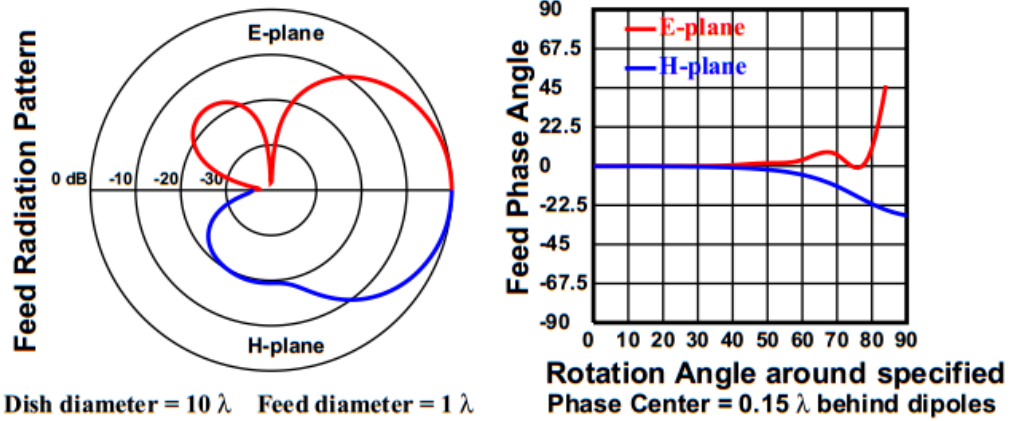


3-1. ábra A félhullámú dipólantenna iránykarakterisztikája [8]

A 3-2. ábra egy 4NEC2-vel szimulált két dipólos (referencia) antenna tulajdonságait mutatja tápfejként. Jól látható a „Feed Radiation Pattern” részben, hogy az E és a H-sík viszonylag jól illeszkedik egymáshoz, és hogy a kalkulált fázisközéppont $0,15\lambda$ -ra van a dipólok síkjától a reflektorfal felé. Az ábráról leolvasható még, hogy a legjobb apertúra hatásfok $0,5 f/D$ -nél érhető el, több mint 70%, amiből ha levonjuk a szerző által javasolt 15%-ot, akkor kapjuk a korábban is említett nagyjából 50%-ot. Az ábra egy 10λ átmérőjű parabolára és λ átmérőjű tápfejre vonatkozik.

EIA dual-dipole reference antenna as feed, by NEC2

Figure 6.2-6



3-2. ábra A párhuzamos dipólok viselkedése tápfejként [5]

4 A tápfej tervezése

4.1 Tervezési megfontolások

A tápfej tervezése során az antenna paramétereit úgy kell megválasztani, hogy az előírt és bizonyos elvárt tulajdonságoknak megfeleljenek. Ezek a követelmények az alábbiak:

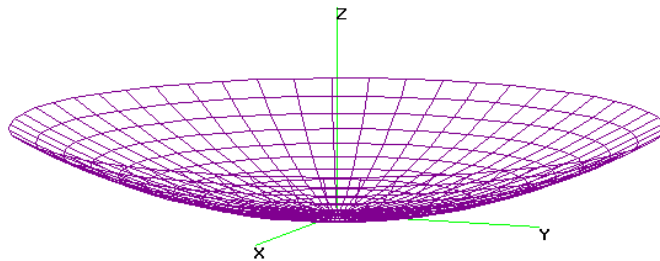
- az antenna nyalábszélessége a parabola megvilágítási szögébe essen
- a tápfej és a parabolával alkotott antennarendszer nyeresége minél nagyobb legyen
- a dipólok bemeneti impedanciája minél könnyebben legyen illeszthető 50Ω -hoz
- a dipólok bemeneti reflexiója legyen legalább -10 dB
- a kitakarási veszteség legyen minimális
- a tápfej előre-hátra viszonya legyen legalább 15 dB

4.2 A tervezés menete

A tervezéshez a 4NEC2 ingyenes programot használom, ami huzalantennák szimulációjához ideális, kis szegmensszám esetén gyorsan számol egy frekvencián bemeneti impedanciát, bemeneti reflexiót, állóhullámarányt, 3D távolteret vagy ezeket a frekvencia függvényében. Beépített funkciója az ún. Geometry Builder, ami különböző alakzatok létrehozását könnyíti meg beépített rutinok segítségével, így sík vagy térbeli struktúrák könnyen létrehozhatók pár paraméter megadásával. Lehetőség van reflektáló háló, sík, kocka, gömb, helix és parabola létrehozására. A testeket a felhasználó által megadott számú szegmensre osztja, ezeket egyenként analizálja majd az eredményeket szuperponálja. A szegmensek számának felső korlátot a használt számítógép memóriája vagy a beépített határ állít.

A parabolát meghatározza az átmérője és a fókusz távolsága, és a felhasználó által beállítható a sugárirányú és terület menti szegmensek darabszáma, ezen felül lehetőség van a parabolát tetszőleges pontba eltolni az (X, Y, Z) koordináták mentén. A 4-1. ábra egy origó talppontú drótvázis parabolát ábrázol. Azonban ez nem a legtökéletesebb

reflektáló felület 434 MHz-en (ahol $\lambda=0,691$ m, ennek tized része pedig $\sim 0,07$ m), mert a tükör kerülete mentén lévő legnagyobb téglalapok oldalai $0,17 \times 0,14$ m szélesek, ami összemérhető az alkalmazott hullámhosszal. A háló így nem viselkedik tökéletes reflektorként, de ez volt a legfinomabb beállítható felosztás, amit a 4NEC2 beépített szegmens korlátja megengedett. Ilyen felosztás mellett is a számítási idő jelentősen, több órára növekedett. Természetesen komolyabb térszámító szoftver segítségével (pl. a korábban is említett CST) pontosabb eredmények kaphatók, de a szoftver kezelésének megtanulásához szükséges idő nem állt arányban a pontosság javulásával, így megelégszek a 4NEC2 által szolgáltatott eredményekkel.



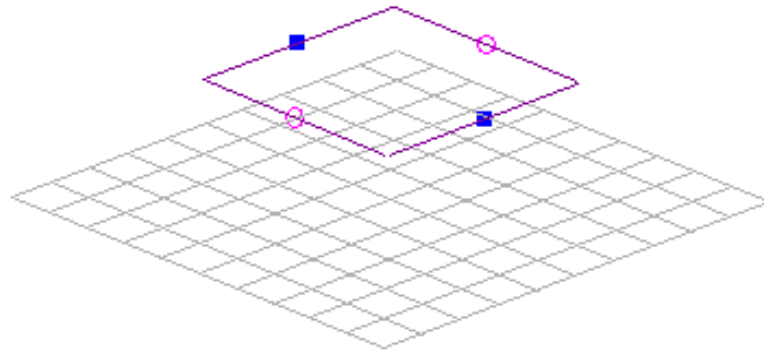
4-1. ábra A 4NEC2 által generált drótvázás parabola

A kiindulási alap a 3. fejezetben említett elrendezés, 2 db félhullámú dipól, fél hullámhosszynyra egymástól és negyed hullámhosszynyi távolságra egy egész hullámhosszynyi oldalhosszúságú reflektorlap felett. Ennek egy kicsivel módosított változata a [9]-es irodalomban részletezett elrendezés, amely annyiban különbözik, hogy két párhuzamos dipól párral operál. Abban az esetben, ha a 4 antennát egyszerre és fázisban tápláljuk, akkor körkörös polarizáció érhető el. Ellenben, ha a párhuzamos dipólokat párosával és fázisban tápláljuk, akkor lineáris polarizáció érhető el mind függőleges, mind vízszintes irányban, és a keresztpolarizációs csillapítás akár 20 dB is lehet. Ahhoz, hogy a Masat-1 térbeli elhelyezkedéséről használható információhoz juthassunk, az utóbbi megoldást kell alapul venni.

A 4NEC2 programba a kívánt geometriát egy 3D Descartes-koordináta rendszerben kell megadni. A program által használt .nec kiterjesztés tulajdonképpen egy szövegfájl, tehát a geometria tetszőleges szövegszerkesztővel bevihető, de ennek megkönnyítésére a szoftver újabb verzióiban többféle beviteli mód közül lehet választani (pl. grafikus vagy táblázatos). A geometria két fő elemtípusból épülhet fel, az egyenesből

és a síkból. Az egyenest (ami dróthuzalt reprezentál) megadja két végpontjának (X, Y, Z) koordinátája és átmérője, ezen felül szükséges még egy sorszám, és hogy az adott huzalt a program hány szegmensre ossza. A síkot (ami egy 2D fémlapot reprezentál), meghatározza három (X, Y, Z) koordinátájával adott pontja, és ez a három pont alapján számolt felületi normális irányába reflektál, továbbá meg kell még adni, hogy az oldalai mentén (X és Y tengelye mentén) a síkot hány részre darabolja.

A 4NEC2 képes akár több változó szerint is sweepelni, ezért érdemes a struktúrát a lehető legnagyobb mértékben parametrizálni. A kiindulási referencia antenna (4-2. ábra), melynek paraméterei és bevitele az F.1 függelékben található.



4-2. ábra Kiindulás a referencia antenna

Tehetnénk azt, hogy egyetlen dipólantenna hosszát a rövidülési tényező alapján meghatározzuk, hogy impedanciája $\sim(70+j0)\Omega$ legyen a $(73+j42)\Omega$ helyett (F.2), de a valós alkalmazás során a hozzáadott másik dipóllal módosul a bemeneti impedancia. Ahhoz, hogy a számítás a valósághoz jobban illeszkedjen, azaz hogy a dipólokat párosával használjuk, mind a 4 dipólnak szerepelnie kell, de csak 2-2 dipól kap táplálást (lila kör az ábrán), és a nem meghajtott párt a közepén 50Ω lezárással helyettesítjük (kék négyszög az ábrán). Így minden számítás dipólpárokra vonatkozik. Az antenna főbb tulajdonságai ebben az esetben (1. táblázat, F.3):

Bemeneti impedancia [Ω]	Állóhullámarány (50 Ω -ra)	Nyereség (főirányban) [dB]	Előre-hátra viszony [dB]	Nyalábszélesség E és H síkban (-10 dB pontban) [°]
111 + j40,6	2,58	10	17,8	± 55 és ± 53

1. táblázat

A táblázatban szereplő értékek alapján, a referencia antenna a nyereség, előre-hátra viszony és nyalábszélesség szempontjából ígéretesnek tűnik, a másik két érték egymással szorosan összefügg, tehát, ha a geometria változtatásával az antenna impedanciáját közelítjük a tisztán valós 50 Ω -hoz, akkor javul az állóhullámarány is. Az impedanciának nem kell pontosan 50 Ω értékűnek lennie, mert viszonylag tág határok között is üzemeltethető az antenna (legrosszabb esetben 3-as állóhullámarány is elfogadható, főleg egy dedikált vevőantennával), a cél inkább a képzetes rész csökkentése. A geometriával beállított érték még a parabolatükör nélkül kalkulált, így akár jelentős változásokra is számítani kell, amint a tápfejet és a parabolát egyszerre modellezzük.

Tehát a referencia antenna kiindulásnak jó, de több gond is akad vele. Az egyik az előbb említett bemeneti impedancia értéke, ami a dipólok hosszával viszonylag jól kézben tartható, és ezért a kisebb probléma. A nagyobbik probléma a reflektorlap λ oldalhosszúságából adódik, mert így a hasznos felület nagyjából 0,5 m^2 -rel csökkentjük! Ezen a frekvencián a 3 m átmérőjű parabola sajnos közel sincs az irodalmak által javasolt, és alapul vett 10λ mérettartományhoz, így ilyen mértékű kitakarás nem feltétlenül engedhető meg. A kitakarás csökkentéséhez a reflektorfal méretének csökkentése szükséges, de ez óhatatlanul a nyalábszélesség növekedésével jár, mert minél nagyobb a reflektor felülete, annál nagyobb mértékben fókuszálja az általa visszavert sugarakat (pont, amit a parabolánál kihasználunk). A reflektor méretcsökkenéséből adódó nyalábszélesség növekedést a szerkezet más paramétereinek szisztematikus változtatásával kompenzálhatjuk. Ezek a főbb változtatható paraméterek: a dipólantennák hossza, egymástól és a reflektortól mért távolságuk és a reflektorfal oldalhossza.

Mint említettem a 4NEC2 képes akár több változó szerint sweepelni, azaz adott egy intervallum, amit feloszt a felhasználó szerint megadott részre, és a diszkrét pontokban behelyettesített változókkal kiszámol bizonyos értékeket, és táblázatos formában

megjeleníti. Ezen felül a számításhoz szükséges egy felbontás fokokban és egy gömbi koordináta-rendszerben megadott (Θ, Φ) irány, ami a főirányt jelenti, és ehhez képest számolja a nyereséget és az előre-hátra viszonyt. A számított értékek közül a fontosabbak az állóhullámarány, nyereség, előre-hátra viszony és a bemeneti impedancia valós és képzetes része. A sweep végén a program eredményként diagramokat generál, ezek az állóhullámarány, bemeneti reflexió, nyereség, előre-hátra viszony és az impedancia valós és képzetes része a változó függvényében, valamint a távolféri iránykarakterisztika egy metszete (E vagy H síkban), szintén a változó függvényében.

Innentől a kívánt eredményig (vagy kompromisszumig) jól megválasztott paraméterpárok és intervallumok valamint bonyolultabb alakzatok esetén akár jelentős processzoridő szükséges.

4.3 A tervezés eredménye

Első közelítésben érdemes megvizsgálni, hogy csak a reflektorlap méretének csökkentésével elérhető-e a kívánt eredmény. A számítások során, ha az eredetileg 70 cm szélesnek vett reflektorlap hosszát 50 cm-re csökkentjük, a nyalábszélesség a megfelelő értékűre nő, de a többi paraméter leromlik (2. táblázat).

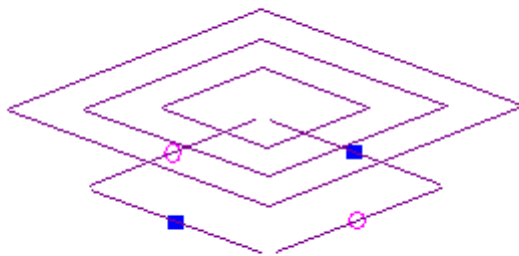
Bemeneti impedancia [Ω]	Állóhullámarány (50Ω -ra)	Nyereség (főirányban) [dB]	Előre-hátra viszony [dB]	Nyalábszélesség E és H síkban (-10 dB pontban) [$^\circ$]
84,9+j70,4	3,13	9,31	12,4	± 58 és ± 54

2. táblázat

Felvetődik a kérdés, hogy csökkenthető-e a reflektorlap felülete még jobban úgy, hogy a fémlap közepéből is elhagyunk. Ennek bevitele a 4NEC2-ben diszkrét reflektorlapokként eléggé idő- és számolásigényes volna, ezért egy járható út lehet csak a reflektorlap két szélét és középvonalát egy-egy fémhuzallal helyettesíteni, ami újfent tekinthető egy többelemes Yagi antennának (4-3. ábra). A másik előnye ennek az elrendezésnek, hogy paraméterezhető úgy a külső és belső huzalnégyszög, hogy együtt vagy külön-külön is módosíthatók legyenek. A megfelelő értékek megkeresése és beállítása után a végleges tápfej tulajdonságai a következők (3. táblázat, F.4):

Bemeneti impedancia [Ω]	Állóhullámarány (50 Ω -ra)	Nyereség (főirányban) [dB]	Előre-hátra viszony [dB]	Nyalábszélesség E és H síkban (-10 dB pontban) [°]
134+j56,5	3,22	9,36	19,2	± 61 és ± 57

3. táblázat



4-3. ábra A végleges geometria

A végleges geometriában a nyereség, előre-hátra viszony és a nyalábszélességek már megfelelőek, ellenben az impedancia és állóhullámarány romlott az előző verziókhöz képest. Ezt a romlást most figyelmen kívül lehet hagyni, mert még módosulni fog, ha a parabola is szerepel a modellben. A 4NEC2 a számítások során a hosszakat tized milliméter pontossággal adja meg, de ezeket bőven elegendő milliméterekre kerekíteni, mert a megmunkálás és az elkészítés során még a milliméteres pontosság is nehezen tartható.

Az antenna végleges méretei a következők:

- a reflektorfal szélessége: 51,5 cm
- a reflektorfalból kihagyott négyzet szélessége: 20,5 cm
- a dipólok egymástól mért távolsága: 36 cm
- a dipólok reflektorfaltól mért távolsága: 18 cm
- a dipólok hossza: 33,5 cm

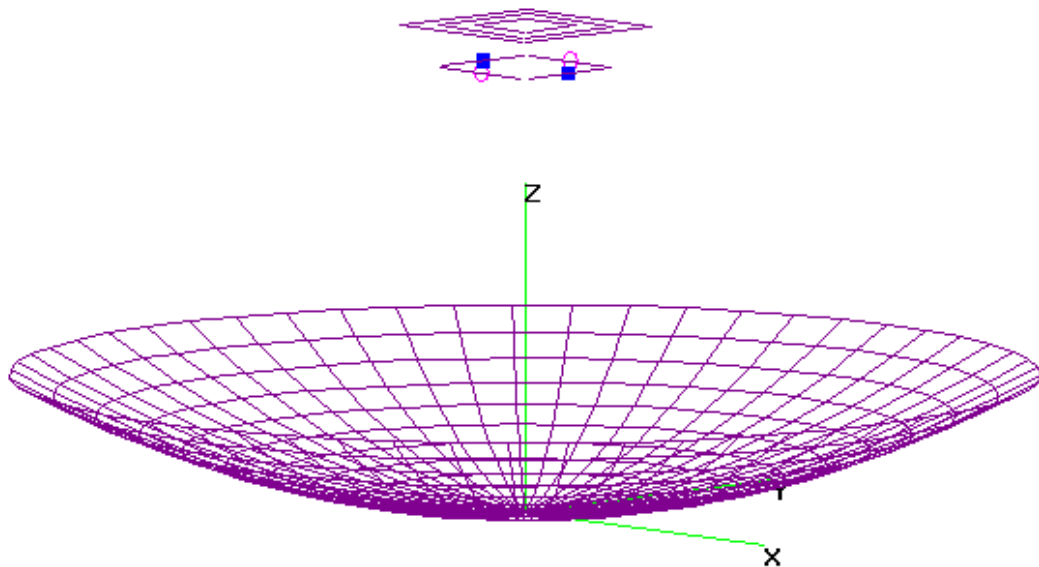
4.4 Parabolatükör és a tápfej

A tápfejet a parabola tükör fókuszába helyezve a 4-4. ábra mutatja. A számítás során nem vettem figyelembe a táp fázisközéppontjának eltolódását, így a dipólok síkja 1,35 m-re helyezkedik el az origótól, ami a parabola talppontja is egyben.

Az antennarendszer számított tulajdonságai (4. táblázat, F.5):

Bemeneti impedancia [Ω]	Állóhullámarány (50Ω-ra)	Nyereség (főirányban) [dB]	Előre-hátra viszony [dB]	Nyalábszélesség E és H síkban (-3 dB pontban) [°]
147-j9,59	2,96	19	26,5	±14 és ±14

4. táblázat



4-4. ábra A kész antennarendszer modellje a 4NEC2-ben

Látható, hogy az antennarendszer tulajdonságai majdnem minden tekintetben kielégítőek, csak a bemeneti impedanciája nem a kívánt 50Ω felé mozdult el, de tekintettel arra, hogy a dipólokhoz még balunok és teljesítményösszegzők is csatlakoznak nem tudható biztosra, hogy milyen irányba, és mennyit változik az impedancia, ha egyáltalán változik. A 14°-os nyalábszélesség viszont ellentmond a 2. fejezetben becsült 16°-nak, de az említett pontatlanságok (a szélein nem tökéletesen reflektáló háló és nem tökéletes reflektorfal), valamint a program által feltételezett 100%-os hatásfok miatt ez egy erőteljes felső becslés, ami a valóságban nem megvalósítható.

Az (F.5) függelékben található ábrákon észrevehető, hogy a főnyaláb mellett jelentős számú melléknyaláb is jelen van. Ezek túlnyomórésze a 0 alatti dB tartományban van, és a bejelölt szögekhez tartozó melléknyalábok a legnagyobbak az első 180°-ban. A melléknyalábelnyomás fogalmából adódik, hogy mindkét sík esetében ez az érték 18 és 20 dB közé esik, ami már a célnak megfelel.

5 Teljesítményösszegző

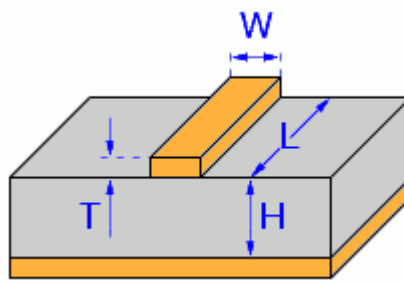
A négy dipólos elrendezéshez szükséges még két teljesítményösszegző, hogy a dipólok párosával lehessen használni. A teljesítményösszegző, vagy ha a másik irányból tekintünk rá akkor teljesítményosztó, elvileg egy szimmetrikus és passzív eszköz (ezért a későbbiek során a teljesítményosztó elnevezést használom rá). Feladata, hogy a bemeneti portjába táplált rádiófrekvenciás teljesítmény meghatározott hányadát az egyik kimeneti portjára (vagy portjaira) csatolja. A dipólok táplálásához egy teljesítményfelező (-3 dB osztó) szükséges, ennek megvalósítása történhet többféleképpen. A leggyakoribb típus a Wilkinson-féle osztó és a hibrid gyűrűs osztó. A gyűrűs osztó tervezése és szimulációja összetettebb, mint a másik alternatíváé, ezért az egyszerűsége miatt a Wilkinson-osztóra esett a választás.

5.1 Wilkinson-féle teljesítményfelező

A teljesítményfelező egy háromkapunak tekinthető, aminek egy bemenete és két kimenete van. Az általános elrendezés két párhuzamos $\lambda/4$ hosszúságú, csatolatlan hullámvezető egyik végükön összekötve, és párhuzamosan táplálva, a másik két vég közé pedig a vonali impedanciák kétszeresének megfelelő méretű ellenállás kerül. Ez az elrendezés alacsony állóhullámarányt és jó kimenetek közti izolációt biztosít. Ezt a teljesítményfelezőt a legtöbbször koaxiális kábelekből készítik el az egyszerűsége miatt, de megvalósítható planár technikával is, csak több tervezést igényel. Koaxiális kábelben gondolkodva a negyed hullámhosszúságú vezeték nagyjából 17 cm lenne, ami nem sok. De célszerű lenne minden elemet úgy megtervezni, hogy csak a legszükségesebbek legyenek kitéve az időjárásnak, minden más pedig egy villanyszerelő doboz védelmében legyen. Így viszont egy nyomtatott huzalozással megvalósított összegző akár a koaxiális kábeles verzió méretének a fele is lehet.[10][11]

Az összegző kivitelezése tehát mikroszalagvonal lesz. Szalagvonalak és más rádiófrekvenciás tápvonalak tervezéséhez viszonylag széles választék áll rendelkezésre szoftverekből (pl. AWR Microwave Office vagy HFSS), de ebben az esetben is igazak a korábban leírtak, miszerint a készségi szintű használatukhoz szükséges idő miatt nem praktikus ilyen egyszerű problémákhoz felhasználni. Egyszerű a probléma azért, mert csak bizonyos impedanciájú tápvonalak létrehozása szükséges, ami a használandó nyomtatott huzalozású lemez és a tápvonal geometriai tulajdonságaitól függ.

Ezekhez jól meghatározott képletek és számító programok érhetők el. Én a KiCAD áramkörtervező szoftver „Pcb calculator” és a TXLINE szoftvereket vettem igénybe.



5-1. ábra Mikroszalagvonal (microstrip line) [kép: KiCAD]

A számításhoz az alábbi tulajdonságok szükségesek:

- a dielektrikum relatív permittivitása: ϵ_r
- a dielektrikum veszteségi tényezője: $\tan D$
- a réz fajlagos ellenállása (vagy vezetése): ρ
- a dielektrikum vastagsága: H
- a rézfólia vastagsága: T
- a frekvencia: f
- a kívánt impedancia: Z_0

Ezek után a program kiszámolja a szükséges W szélességet és alpból az L hosszúságra 0 értéket. Ahhoz, hogy ez 0-tól különböző legyen meg kell adni az elektromos hosszat, ami 90° (ez jelenti a $\lambda/4$ hosszúságot), ebben az esetben még a relatív permittivitás gyökével súlyozva, ezért érhető el méretcsökkenés a koaxiális kábelhez képest (6. táblázat).

A felhasznált FR-4-es lemez tulajdonságai (5. táblázat):

ϵ_r	$\tan D$	ρ [Ωm]	H [mm]	T [μm]	f [MHz]
4,8	0,02	1,68e-8	1,55	35	434

5. táblázat

Z0 [Ω]	Elektromos hossz [°]	W [mm]	L [mm]
50	0	2,83	0
70,71	90	1,45	94,06

6. táblázat

A számított értékek a két programban két tizedes jegyig azonosak. Az 50Ω-os vonal tetszőlegesen hosszú lehet, csak a rajta haladó hullám fázisa változik, viszont a 70,71Ω-os vonalnak (a [10]-es irodalomban részletesen ki van fejtve, hogy miért szükséges az illesztő tápvonal impedanciájának $50\sqrt{2}$ értékűnek lennie) pontosan 94,06 mm hosszúnak kell lennie.

5.2 Az osztó tervezése és elkészítése

A teljesítményosztó elkészítéséhez szintén a KiCAD szoftvert használtam, és annak a nyomtatott áramkör tervező funkcióját. A beállítható legfinomabb háló (grid) felosztás pontosan 0.01 mm felbontású, így az áramkör bevihető az igényelt pontossággal. A megtervezett osztó képét az 5-2. ábra mutatja. Az F.6 függelékben található pontos méretekkel is ellátott ábra. A rajzon mellékelt számok a portok számozását jelölik, ahogy később hivatkozok rájuk. A 2. és 3. számú port között a KiCAD által ábrázolható legvékonyabb csíkszélességgel húzott vonal végein egy 0603-as méretű SMD ellenállás rajzolata található a szükséges 100Ω-hoz.



5-2. ábra A teljesítményfelező 1:1 arányú rajza

Az 1:1-es ábra importálható a tervezőszoftverből, hogy aztán nyomtatható legyen. Az osztó elkészítését saját kézzel végeztem, a valós méretű ábrát lézernyomtatóval fényes papírra nyomtatva, majd azt negatívként felhasználva egy forró vasalóval átvittem egy FR-4-es lemezre. A papír eltávolítása után vas-klorid oldatban áztatva a rézfólia lemaródik ott, ahol nem takarta festékréteg. Az FR-4-et méretre vágva, és a szükséges

SMA csatlakozókat, valamint a 100Ω-os ellenállást felforrasztva az osztó készen áll a mérésre.

5.3 Az osztó mérése

A méréshez egy Agilent 8753ES S-paramter network analyzert vagy vector network analyzert, röviden VNA-t használtam. A mérések előtt szükség volt egy teljes 2 portos kalibrálásra, hogy az alkalmazott csatlakozók, toldók és kábelek csillapítását kiküszöböljük.

A mérés menetét a 7. táblázat részletezi:

	1. port	2. port	3. port
1. mérés	IN	OUT	50Ω
2. mérés	IN	50Ω	OUT
3. mérés	50Ω	OUT	IN
4. mérés	50Ω	IN	OUT

7. táblázat

A fenti megoldással egy port mindig illesztetten lezárt, onnét reflektálódó jel gyakorlatilag nincs. A másik két port egy kétkapunak felel meg, aminek a szórási paramétereit méri és ábrázolja az analizátor. Az 1. és 2. méréssel határozható meg a 4 db szórási paraméter, míg a 3. és 4. méréssel a portok közti izoláció (a 3. és 4. mérés egymástól nem sokban különbözik, csak egymás megerősítéseiként szolgálnak).

Egy tetszőleges háromkapu szórási mátrixa a következő:

$$\underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

De ez a következőképp módosul a teljesítményfelező esetében[10]:

$$\underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

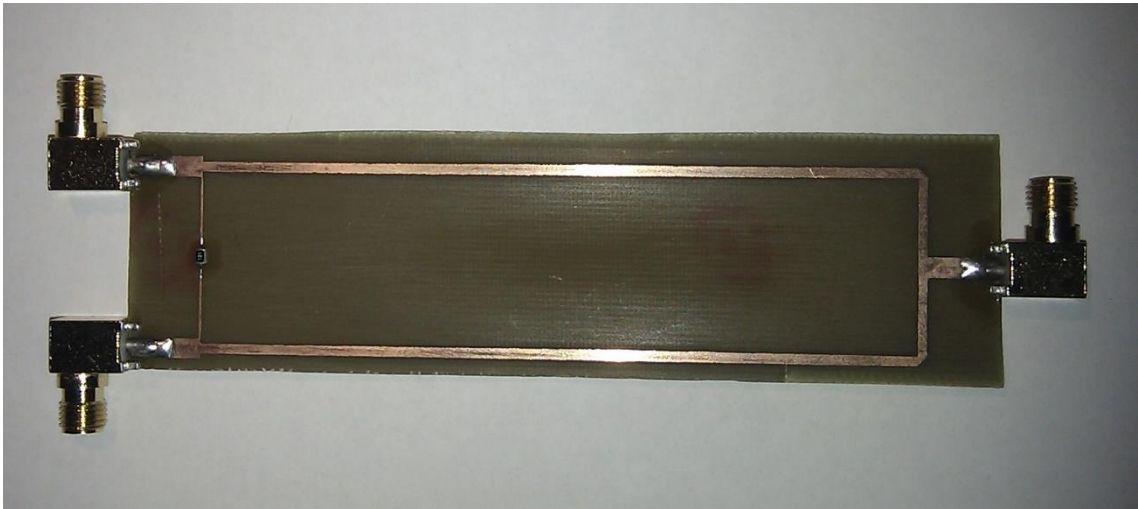
Ahol az s_{jj} a reflexió és az s_{jk} az átviteli tényezők.

Az 1-4. méréseken keresztül mindkét teljesítményosztó szórási mátrixa meghatározható. A mérések részletes eredményei a F.6 függelékben található.

$$\underline{\underline{S}}_1 = \begin{bmatrix} -22,8 & -3,3 & -3,3 \\ -2,9 & -20,1 & -22,8 \\ -2,9 & -23 & -21 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\underline{\underline{S}}_2 = \begin{bmatrix} -25,5 & -3,3 & -3,2 \\ -2,9 & -21 & -24,2 \\ -2,9 & -24,4 & -22 \end{bmatrix} \quad (13)$$

A fenti mátrixokból látható, hogy a teljesítményfelező nem tökéletesen szimmetrikus, de a számunkra fontos teljesítményösszegzés irányban a -2,9 dB jó közelítéssel tekinthető -3 dB-nek. Ez a pár tized dB fluktuáció elenyésző és nem is túl lényeges, a jelentős eredmény, hogy az osztás portonként szimmetrikus. A főátlóból látható, hogy mindegyik port bemeneti reflexiója -20 dB alatt van ezen felül a csatornák közti áthallás is -23 és -24 dB között alakul, ami kifejezetten jó eredmény.



5-3. ábra Az elkészült teljesítményösszegző

6 Balun

6.1 Lehetőségek

A balun elnevezés a **balanced-unbalanced** szavak megfelelő betűiből áll össze, és mint a neve is sejteti, a szimmetrikus és aszimmetrikus tápvonalakra vonatkozik. A balunok általános feladata, hogy az aszimmetrikus tápvonalakat (pl. koaxiális kábel) a szimmetrikus fogyasztókhoz illesszék (pl. félhullámú dipól) és vica versa. A legegyszerűbb esetben az illesztés impedanciát nem transzformál, tehát egy 50Ω -os (vagy bármilyen más hullámimpedanciájú) tápvonalhoz közvetlen illeszti a tetszőleges impedanciájú fogyasztót. Az illesztés mértéke (reflexió vagy állóhullámarány) persze függ az illesztendő impedanciáktól, nem biztos, hogy a 200Ω -ot célszerű ilyen balunnal illeszteni az 50Ω -hoz. A dipólantenna esetében, mivel annak impedanciája 70Ω körül mozog, azonban elegendő lehet egy ilyen illesztést megvalósító, és az állóhullámarány még mindig az elfogadható tartományban marad.

Ezen felül léteznek impedanciát transzformáló balunok is, ennek egyik hétköznapi példája a televíziók $\sim 300\Omega$ -os antennáját 1:4-es balun illeszti a 75Ω -os tápvonalra.

A balunok kivitelezése és működési elve alkalmazásonként eltérő lehet. A gyakorlatban legtöbbször előforduló balun tartalmaz, vasmagot és ténylegesen a transzformátor impedancia transzformáló tulajdonságát használják ki, máskor csak fojtótekeresként funkcionál. Egy frekvencián történhet az illesztés diszkrét L, C elemekkel vagy $\lambda/4$ hosszúságú tápvonal csonkokkal (kerülőutas balun).

A [12]-es irodalom egy másik, koaxiális kábellel megvalósított 1:1-es balunt részletez a korábban leírt 50Ω -os vonalhoz való 70Ω -os impedancia illesztését (6-1. ábra). Ez a balun azért is fontos, mert az elve megegyezik a [9]-es irodalomban megvalósított dipólokat illesztő balunnal (sheath/sleeve/bazooka balun, 6-2. ábra), ami merevítésként és a reflektortól való távtartóként is szolgál.

A balunnak a távolságtartó szerepét ebben az esetben is jó volna kihasználni, de a 6-2. ábra megoldása drága réz alkatrészeket és precíz gépi megmunkálást igényelne, míg a 6-1. ábra által javasolt elrendezés a flexibilis koaxiális kábelek miatt nem tartható.

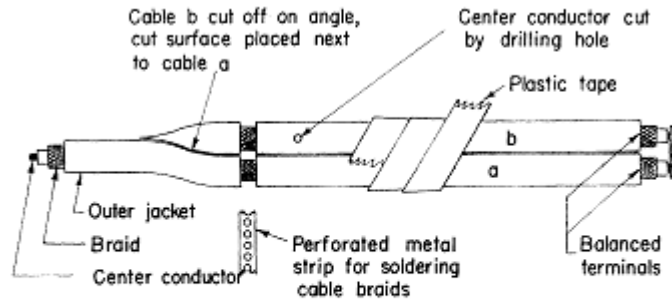
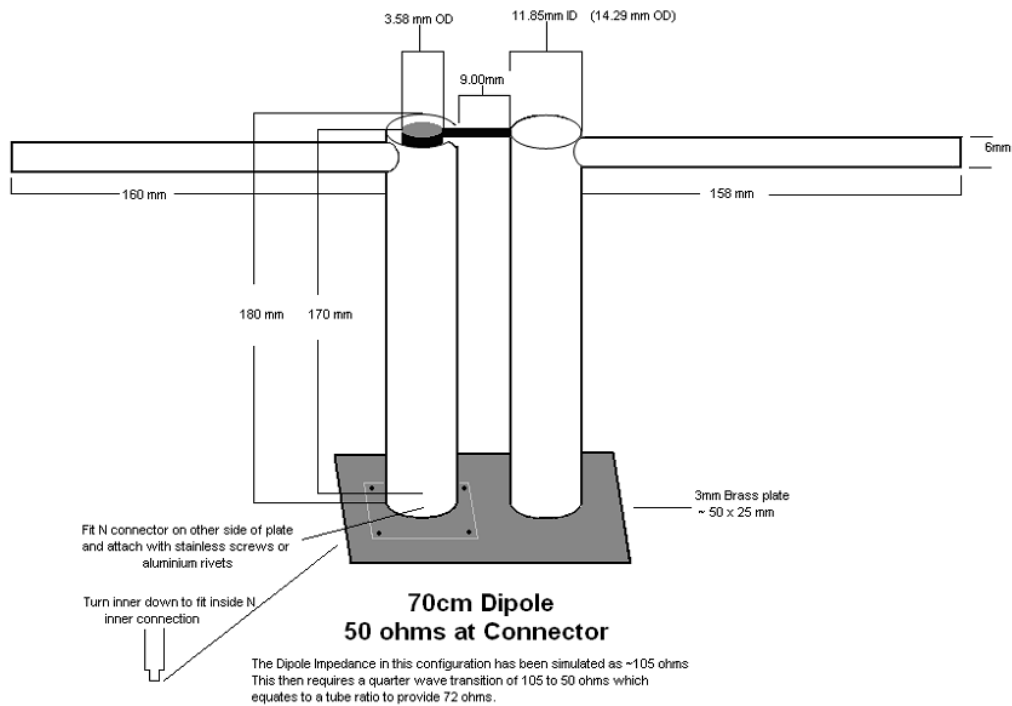


Fig. 5—The construction of a balun for matching a 50-ohm coaxial cable to a 70-ohm balanced load. The balun is made of two lengths of RG-58/U cable, held together by a wrapping of plastic tape. In use, this balun is housed inside an insulated tubing which supports the center of a half-wave dipole antenna. Alternatively, a metal housing could be employed to shield the balun.

6-1. ábra A kompenzált balun

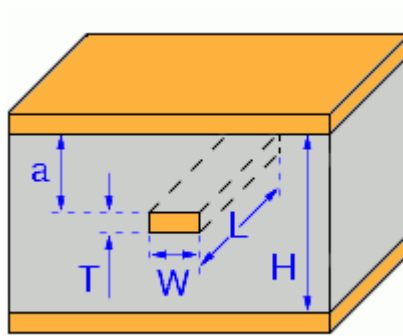


6-2. ábra Egy másik balun elrendezés [9]

Azonban, ha a korábban alkalmazott mikroszalag vonalat megtükrözzük, akkor két fémlemez között dielektrikumba ágyazva fut egy vezető, amit tekinthetünk egy koaxiális kábelnek is. Ez az elrendezés a stripline név alatt található meg a korábban használt programokban. Ez a struktúra két db FR-4-es lemez összeillesztéséből az összegzőnél használt vasalásos technikával könnyen elkészíthető, és a nagyjából 3 mm vastag gyanta erősítésű üvegszál már elég merev az antennák megtartásához.

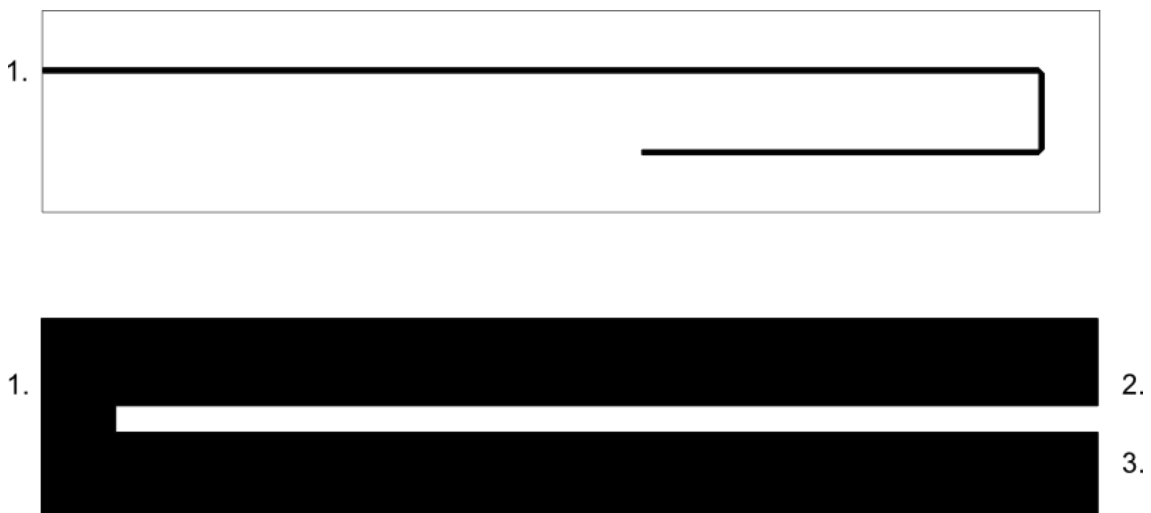
6.2 A balun tervezése

A balun tervezésének menete nem sokban tér el az összegző tervezésétől, az 5.1 fejezetben közölt értékek változatlanok, kivéve „H”, ami most az előző kétszerese, azaz 3,1 mm és „a” 1,55 mm-nek felel meg.



6-3. ábra Stripline [kép:KiCAD]

A számított értékek ebben az esetben is két tizedes jegyig azonosak, és ahhoz, hogy e konstrukció mellett a tápvonal hullámimpedanciája 50Ω legyen, a belső vezető szélességének 1,22 mm-nek kell lennie (F.7 függelék). A 6-4. ábra első képén két eltérő hosszú tápvonal szakasz látható, végükön rövidre zárva, ez a koaxiális kábelek belső erének felel meg. A rövidebb szakasz sávközépi frekvencián (434 MHz) $\lambda/4$ elektromos hosszúságú.



6-4. ábra Az első kép a belső vezetőt, míg a második a két külső vezetőt (föld) ábrázolja

Az ábrán jelzett 1-es portok az aszimmetrikus bemenetek SMA csatlakozóval ellátva, míg a 2-es és 3-as a szimmetrikus kimenetek, ahová a dipólok forrasztással csatlakoznak.

Az összeállításhoz két 1,55m vastag FR-4 lemez szükséges, ezeknek a fizikai mérete 22 cm hosszú és 4 cm szélesre lett választva. A hosszúságnak legalább 18 cm-nek kell lennie a reflektor és a dipólok közti távolság miatt, és ehhez adódott hozzá még 3 cm, hogy ez a távolság szükség szerint módosítható legyen mindkét irányba, valamint jusson elég hely a SMA csatlakozónak és a felerősítő szerkezetnek. A szélesség pusztán a mechanikai stabilitás miatt nem rövidebb.

6.3 Szerelés és mérés

A 6-4. ábra rajzai (1:1-es méretarányban) felvasalható egy méretre vágott FR-4-es lap mindkét oldalára és egy másiknak csak egy oldalára. Ezek után a balunok párosával összeszerelhetők. Mielőtt a végleges összeállítás megtörténne, két kiválasztott balunt megmértem a VNA-val, hogy megfelelő-e a reflexiójuk. Mivel egyelőre a balunokon nincsen valós terhelés, ezért a 2. és 3. portot előbb 51Ω, majd 100Ω-mal lezárva lehetett csak elvégezni a mérést (8. táblázat).

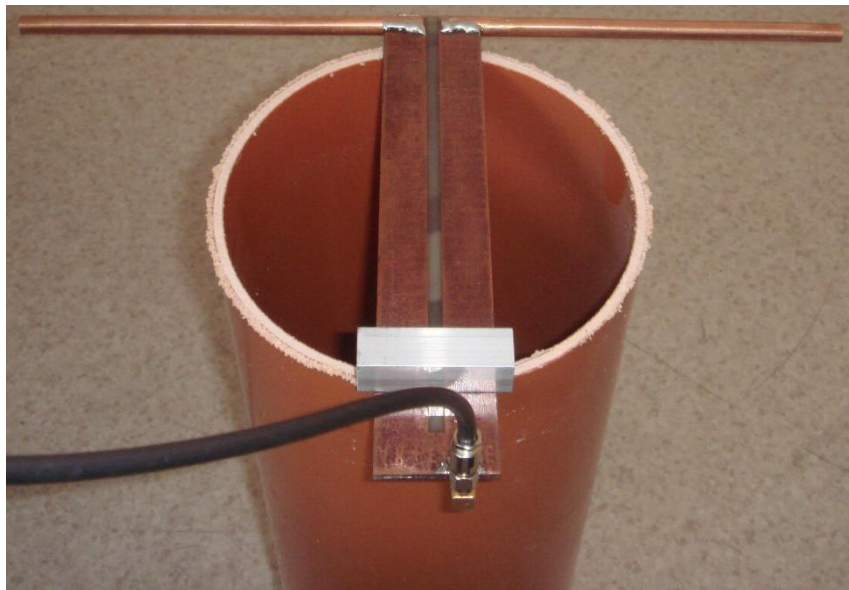
	51Ω	51Ω összenyomva	100Ω	100Ω összenyomva
1. balun s_{11} [dB]	-11,8	-12,2	-	-14,5
2. balun s_{11} [dB]	-	-17,5	-12	-13.3

8. táblázat

A mérési eredményekből látható, hogy erőteljesen számít az összenyomás mértéke, ami érthető is, hiszen a képletek adott vastagságú, homogén dielektrikumra vonatkoznak, de ezekben az esetekben jelen volt még levegő is. Fontos még megjegyezni, hogy a mérést igyekeztem minden fémes tárgytól messze végezni, de érintés vagy orientáció váltás hatására így is jelentkezett ± 2 dB fluktuáció a mérések során, ezért ezek az eredmények csak nagyságrendi becsléseknek tekinthetők. Ezek a becslések alapján egy viszonylag széles frekvenciatartományban (434 ± 25 MHz) kis hullámzással, elérhető legalább -10 dB bemeneti reflexió, ami nem a legjobb, de már használatra alkalmas.

A balunok végleges összeszerelése során a két FR-4-es lapot pillanatragasztóval illesztettem össze, erős nyomás alatt, de még így is szinte lehetetlen az összes levegő

kiszorítása. A minél szorosabb illeszkedés érdekében és a későbbi felszereléshez az SMA csatlakozó felett nem sokkal 2-2 szigetelt csavar fogja össze még jobban a szerkezetet. Az időjárási viszonyok és nem kívánt rövidzárak ellen az egész balun két réteg akril lakkbevonatot kapott. Az alumínium reflektorhoz történő rögzítéshez szükséges egy alumínium blokk, amit mind a balunhoz, mind a reflektorhoz csavarkötéssel lesz rögzítve. A szigetelt csavarok és a lakkbevonat ellenére a balun külső feléhez csavarozott rögzítő elem és reflektorfal kapacitív úton képes rövidre zárni a balunt, ezért ennek hatására is méréseket végeztem.



6-5. ábra A balun mérése a felerősítő blokkal és anélkül

A 9. táblázat mutatja a fejezet elején kiválasztott két balun mérési eredményeit már a végleges antennával. A mérést a blokk 4 helyzetében végeztem:

- blokk nélkül
- blokk a tervezett helyén
- blokk a tervezett helyétől 1 cm-rel fölfelé
- blokk egy köztes helyen, ahol s_{11} -nek minimuma van

A mérési eredményekből látható, hogy a blokk helyzete nagyon jelentősen befolyásolja a balun és ezáltal az egész antenna működését. Sajnos a -20 dB-t biztosító helyzete a blokknak mindkét balunon máshol volt és mm-es pontossággal kellett meghatározni, így ezzel a trükkkel nem lehetett javítani az antenna reflexióján.

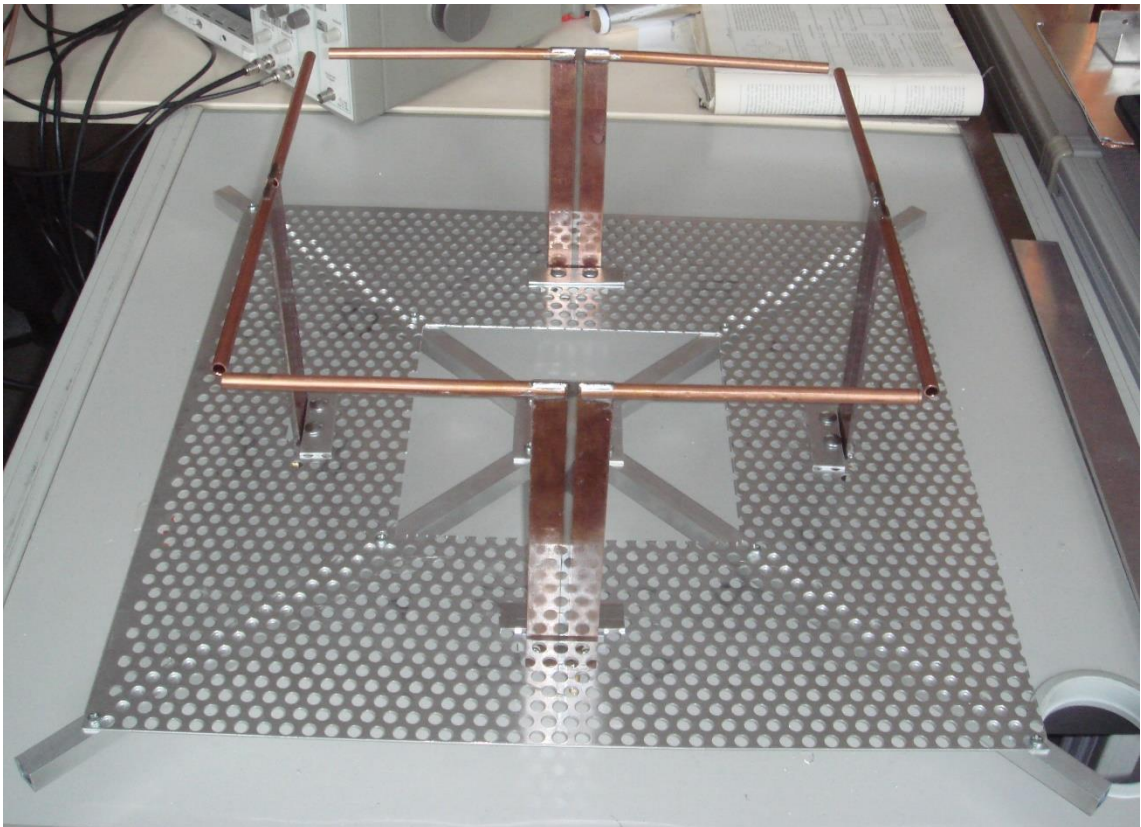
	1. mérés	2. mérés	3. mérés	4. mérés
1. balun s_{11} [dB]	-15	-13	-10	-21
2. balun s_{11} [dB]	-17	-14	-10	-22

9. táblázat

7 Összeszerelés

7.1 Tápfej

Reflektorfalként egy perforált alumíniumlemez szolgál (7-1. ábra), amit a 4.3 fejezetben megadott méretre szabtak. Látható, hogy a mechanikai stabilitáson keresztül elhelyezett alumínium zártszelvényekkel javítottak, ami viszont megkérdőjelezi a közepén kialakított négyzet alakú rés funkcióját.



7-1. ábra Elkészült antenna

Az elkészült antennát ezután ismét rátettem a VNA-ra és az összegzőkkel, párosával mérve a bemeneti reflexióra -12,3 dB adódott mindkét esetben.

A parabola fókuszába történő felerősítés alumínium zártszelvényekkel történik. Korábban a parabolán 3 felerősítő rúd volt 120°-ra egymástól, de ez nem biztosított elegendő merevséget a tápfejnek, ráadásul a mostani antenna nem is volna rögzíthető vele. Ezt a megoldást le kellett cserélni egy négy tartós megoldásra. Az új kar 2-2 alumínium zártszelvény, ami az antenna keresztmervítőit fogja közre. Ahhoz, hogy a fókuszról való távolság állítható legyen, diszkrét furatok kerültek a rudakra 1 cm-es

közönként. A rögzítéshez a parabola merevítői közül nem lehetett olyanokat választani, aminél a tápfejen lévő dipólok állásai vízszintesek illetve függőlegesek, de a térbeli elhelyezkedés vizsgálatához csak a dipólok merőlegessége szükséges.

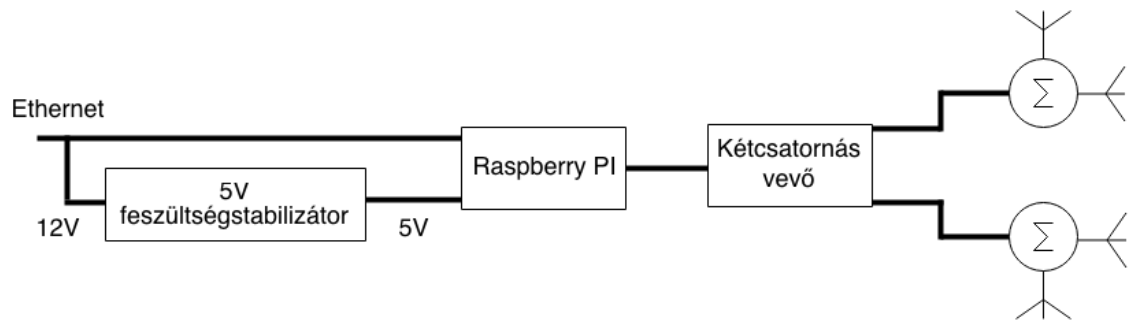


7-2. ábra A tápfej a végleges helyén

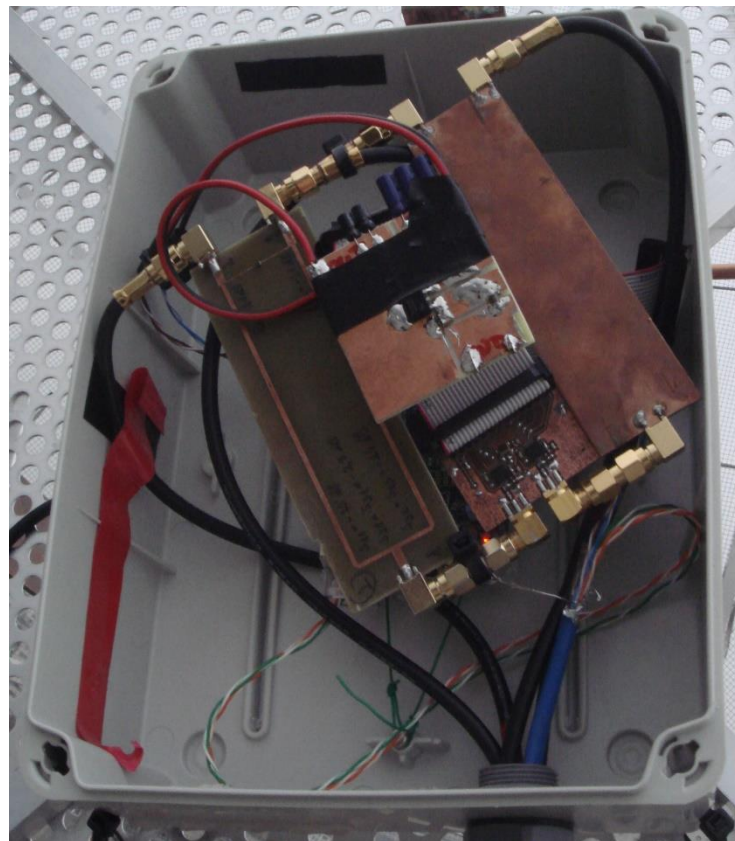
7.2 Vevőegység

Ahhoz, hogy az antenna által vett információt értelmezni tudjuk, az összegzők kimenetére szükséges egy vevőegység. Ez egy kétsatornás vevő, ami 2 db Silicon Laboratories által gyártott Si4464 általános célú adó-vevő IC-t tartalmaz, ennek tervezéséért és elkészítéséért köszönet Dudás Leventének. Meg kell jegyezni, hogy ezek az IC-k csak vételre lettek bekötve, így az antennával adni nem lehet. Az analóg jel digitalizálását is ezek az IC-k végzik, majd digitális busszal egy Raspberry Pi számítógépre csatlakoznak. A villanyszerelő dobozba így már csak egy Ethernet kábellel kell csatlakozni. A Raspberry Pi-nak a működéshez 5V szükséges, amit Power Over Ethernet (POE) biztosít, ennek lényege, hogy általános kommunikáció során az Ethernet 4 csavart érpárjából csak 2 használt, a másik 2 pedig használható a tápfeszültség

biztosítására. Az alkalmazott kábel hossza 40 m körüli, ezen a feszültségesés nagyjából 0,5 V, de ez már nem bizonyult elegendőnek a számítógép bebootolásához, ezért volt szükség egy 12V-os adapter feszültségét helyben, közvetlenül az alkalmazás előtt 5V-ra stabilizálni (7-3. ábra).



7-3. ábra Az adatfeldolgozást végző rendszer blokkvázlata



7-4. ábra A feldolgozóegység

7.3 Mérés

A parabola antennát egy antennaforgató egység irányítja, melynek pontossága egytized fok. A Masat-1-gyel való kommunikációhoz használt kereszt-Yagi antennának is hasonló forgatórendszere van, amit egy központi számítógép vezérel, hogy minden

egy alkalommal, amikor a műhold elhalad Magyarország felett, annak előre kiszámolt pályáját lekövesse. A parabola antennaforgatója is ez a számítógép által vezérelt, így minden átvonulás alkalmával követi a Masat-1-et, és rögzíti a vett csomagok RSSI-jét (Received Strength Signal Indicator), vagyis a vett jel erősségét. Ez egy negatív dBm érték, amit az Si4464 IC-k biztosítanak.

Számos Masat-1 áthaladás után az antenna nagyon rossz vételi statisztikával rendelkezik (kevesebb, mint 10 helyesen vett csomag). Egy csomagot akkor tekintünk helyesen vettnek, ha mindkét polarizációjú antenna hibamentesen veszi az adott csomagot. Felmerül a kérdés, mi okozhatja a gyenge vételt? Az ok elsőként a nagy fedőtérerősségben keresendő, mivel az antenna tápfeje egyik oldalról sincs leárnyékolva, ezért az említett melléknyalábokon, de akár a széles főnyalábon keresztül is beszűrődhet számunkra zajként megjelenő más jel. Az antenna környezetében elhelyezkedő adótornyok, mikrohullámú linkek és rádiótelefonok által keltett rádiófrekvenciás zavar könnyen elnyomhatja az érzékelt kívánt jelet.

A távolságból adódóan fellép a szabadtéri csillapítás:

$$P_v = G_a G_v P_a \left(\frac{\lambda}{4r\pi} \right)^2 \text{ vagy } P_v^{dB} = G_a^{dB} + G_v^{dB} + P_a^{dB} + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4r\pi} \right) \quad (14)$$

Ahol:

- P_v : a vett jel teljesítménye
- P_a : az adóteljesítmény (a Masat-1 esetében 100 vagy 400 mW=26dBm [13])
- G_v és G_a : a vevő- és az adóantenna nyeresége (a vevő antenna egy kereszt-Yagi legalább 15 dB nyereséggel, az adóantenna pedig egy monopól maximálisan 5 dB nyereséggel)
- r : a vevő és az adó távolsága (a Masat-1 pályájától függően akár 1500 km)
- λ : a vett jel hullámhossza (434 MHz-en ez 0,691 m)

Ezek az adatok alapján a vett jelteljesítmény -102,7 dBm. Az alkalmazott Si4464 IC-k érzékenysége -126 dBm, tehát ez a legkisebb jelszint, amit még érzékeltetni képes. Azonban, ha a környező jeltesítmények nagyobbak, mint a venni kívánt -102 dBm, akkor a vevő könnyen telítésbe mehet. Természetesen ez a -102 dBm egy optimista becslés, ami nem veszi figyelembe az adóantenna iránykarakterisztikáját és nullhelyeit.

Ahhoz, hogy a környező zajszint ne vigye telítésbe a vevőt, az összegzők kimenetére szükséges egy szűrő. A választott szűrő az ún. SAW-szűrő (surface acoustic wave), aminek működési elve a piezoelektromosság. A szűrő teste egy piezoelektromos anyag, általában kvarc, és ennek felületén meanderes formában fémezést visznek fel. Ezek a fémezések a ki- és bemeneti portok, feszültség hatására az egyik porton a kristály megváltoztatja alakját, aminek hatására felületi hullámok indulnak a másik port felé, ahol a mechanikai hullámok okozta alakváltozás feszültséget kelt, és ez jelenik meg a kimeneten. Tulajdonképpen egy elektromos-mechanikai-elektromos konverziót valósít meg egy jól meghatározott frekvenciasávon belül (F.8). A szűrő csillapítása 2 dB, ezáltal a rendszer érzékenysége 2 dB-vel romlik, ellenben a mért spektrumképen jól látható, hogy a zavaró spektrumkomponenseket a zajszint környékére csökkenti (F.9). Fontos megjegyezni, hogy a mért spektrum csak egy polarizáció esetén, egy adott pontra vonatkozik (ugyanebben a pontban a másik polarizációval jelentéktelen számú zavaró komponens volt), és a teljesebb képhez legalább egy adott eleváció mellé több diszkrét azimut pontban kellene elvégezni a mérést.

A méréshez használt Agilent Technologies N9340B kézi spektrumanalizátor tartalmaz egy belső jelgenerátort, ezzel és egy SWR-mérőhíd segítségével lehetőség nyílik helyben a bemeneti reflexió mérésére. A mérési eredményeket az F.10 függelék tartalmazza. A mérések az összegzők kimenetére vonatkoznak. Az eltérő polarizációjú antennák reflexiói (-8 és -14 dB) nagymértékben eltérnek egymástól, ami okozója is lehet a nem megfelelő működésnek. A hiba számos forrásból eredhet, ennek megállapításához további méréssorozatok szükségesek.

8 Összefoglalás

A szakdolgozatom célja egyirányú műholdas kommunikációra képes parabola tápfej tervezése és implementációja volt a 70 cm-es hullámhossz tartományban. Ennek kiindulási alapja egy, a rádióamatőrök és műholdvezérlő állomások által használt referencia antenna volt. A tápfej szerkezetiileg három fő részre tagolódott, ezáltal a tervezés, elkészítés és mérés alfeladatok is.

Az antenna geometriájának változtatásával elérhető volt a kívánt iránykarakterisztika, a hiányzó alkatrészek pedig a planár technológia sokoldalúságának köszönhetően viszonylag egyszerűen tervezhetők és gyárthatók voltak. A részegységeket külön-külön, majd együtt mérve az eredmények bizakodásra adtak okot, igaz még a parabola nélkül. A beszerelést követő tesztelési időszakban az antenna nem az elvártaknak megfelelően működött, és a helyszíni mérések több hibaforrásra utaltak. Az egyik hiba, a környező zavarokra való érzékenység, egy egyszerű szűrő beiktatásával orvosolható volt. A másik gond, amit még nem tekinthetünk hibának, az egyik antenna sokkal rosszabb illesztettsége a tápvonalhoz. Azért nem tekinthetjük még hibának, mert az illesztetlenségtől eltekintve az antenna még vehet jeleket, de ennek meghatározásához újabb vételi tesztek szükségesek.

Az antenna értékelése összességében pozitív, természetesen apróbb változtatások még szükségesek. Az antenna egyik továbbfejlesztési lehetősége, ha a későbbi mérések kizárnak minden hardveres hibát, egy LNA beépítése a szűrő áramkör mögé, hátha a parabolával alkotott antennarendszer érzékenysége nem elég a venni kívánt jelszinthez. További lehetőség a tápfej helyzetének módosítása a parabola fókuszában a nagyobb nyereség érdekében, és a tápfej tényleges iránykarakterisztikájának kimérése reflexiómentesített szobában. Azonban ezek kivitelezésére az idő szűkös, mivel jelen állás szerint a Masat-1 2015. januárjában elég a légkörben.

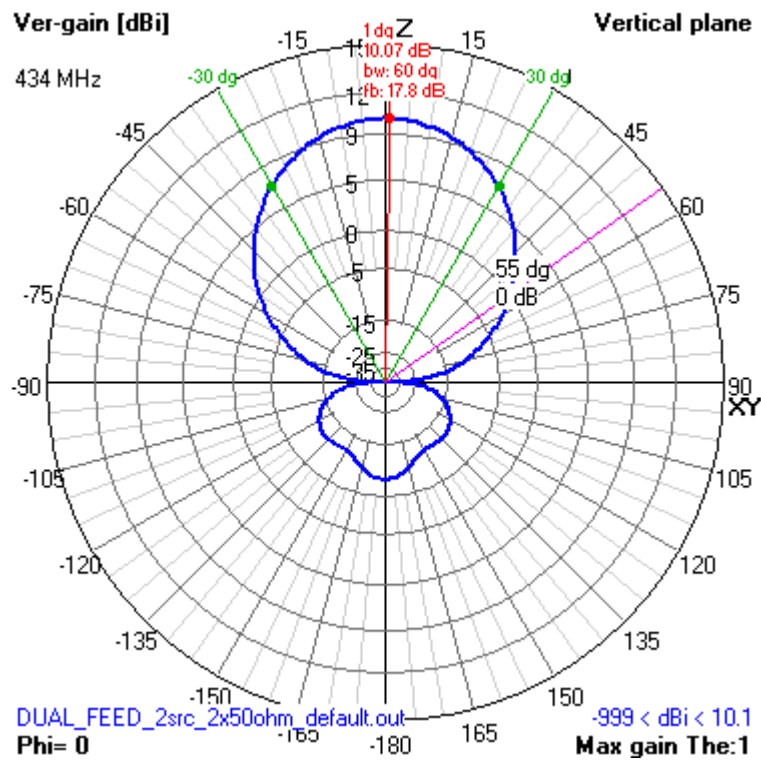
9 Irodalomjegyzék

- [1] http://www.analyzemath.com/parabola/parabola_focus.html (2014.10.)
- [2] Paul Wade: The W1GHZ Online Microwave Antenna Book 1994-2006, Chapter 4 – Parabolic Dish Antennas, 1-22. o.
- [3] Paul Wade: The W1GHZ Online Microwave Antenna Book 1994-2006, Chapter 6 – Feeds for Parabolic Dish Antennas 6.0, 1-3. o.
- [4] Paul Wade: The W1GHZ Online Microwave Antenna Book 1994-2006, Chapter 6 – Feeds for Parabolic Dish Antennas 6.1, 1-8, 13, 15. o.
- [5] Paul Wade: The W1GHZ Online Microwave Antenna Book 1994-2006, Chapter 6 – Feeds for Parabolic Dish Antennas 6.2, 1-8. o.
- [6] <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/parabolic/parabolic-reflector-antenna-gain.php> (2014.11.)
- [7] <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/parabolic/parabolic-reflector-dish-feed-systems.php> (2014.11.)
- [8] <http://www.astrosurf.com/luxorion/Radio/dipole-radiation-pattern-low.gif> (2014.11.)
- [9] Doug McArthur - VK3UM, “Dual 70 cm and 23 cm Dish Feed”, DUBUS Magazine, 2006, <http://www.vk3um.com/VK3UMweb.pdf>.
- [10] Molnár János: URH teljesítményösszegző és teljesítményosztó tervezése, 21-38. o., 1971.
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Power_dividers_and_directional_couplers
- [12] Willmar K. Roberts – A New Wide-Band Balun, Institute of Radio Engineers (IRE), 1957.
- [13] <http://cubesat.bme.hu/projektek/masat-1/muszaki-bemutatas/#com> (2014.12.)

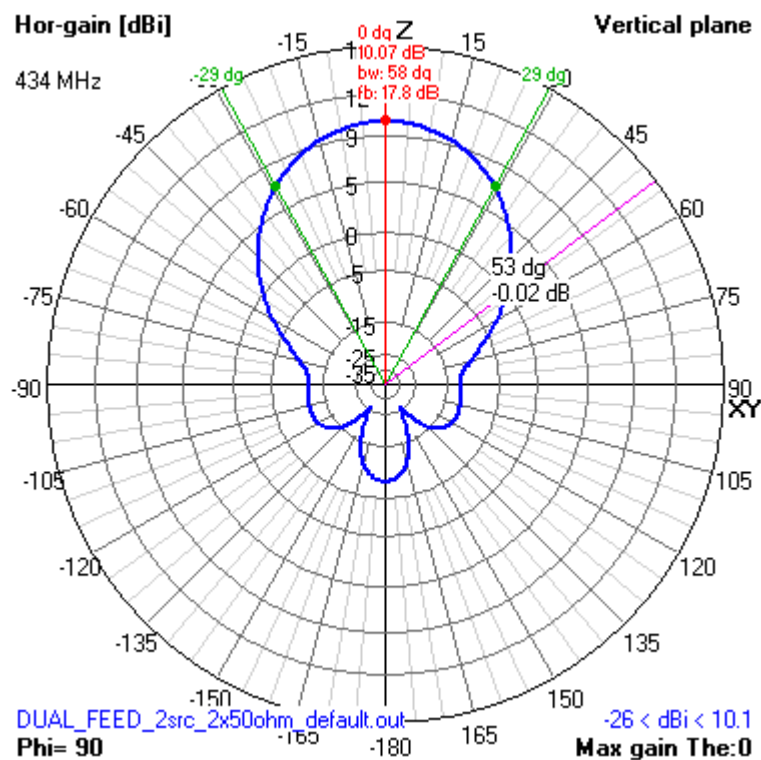
10 Függelék

F.1 A referencia antenna forráskódja és iránykarakterisztikája

```
CM
CE
SY Lambda=0.691 'wavelength
SY x=0.98 'dipole length (for sweep) (def:1)
SY l=x*Lambda/4 'half of the half-wave dipole
SY y=0.2 'fraction of the wavelength (for sweep) (def:0.2)
SY d=Lambda/4 'dipole height from the reflector plate
SY A=Lambda 'length of the reflector plate (for sweep) (def:0.7)
SY r=1e-3 'radius of the wire
SY N=21 'number of the segments
SY spacing=Lambda/4 'distance between the parallel dipoles (measured from
origo!)
SY height=1 'reflector plate distance from origo
GW 1 N -1 -spacing d+height l -spacing d+height r
GW 2 N -1 spacing d+height l spacing d+height r
SM 10 10 A/2 -A/2 height A/2 A/2 height
SC 0 0 -A/2 A/2 height
GW 3 N -spacing +l d+height -spacing -l d+height r
GW 4 N +spacing +l d+height spacing -l d+height r
GE 0
LD 4 3 (N+1)/2 0 50
LD 4 4 (N+1)/2 0 50
GN -1
EK
EX 0 1 (N+1)/2 0 1 0 0
EX 0 2 (N+1)/2 0 1 0 0
FR 0 0 0 0 434 0
EN
```

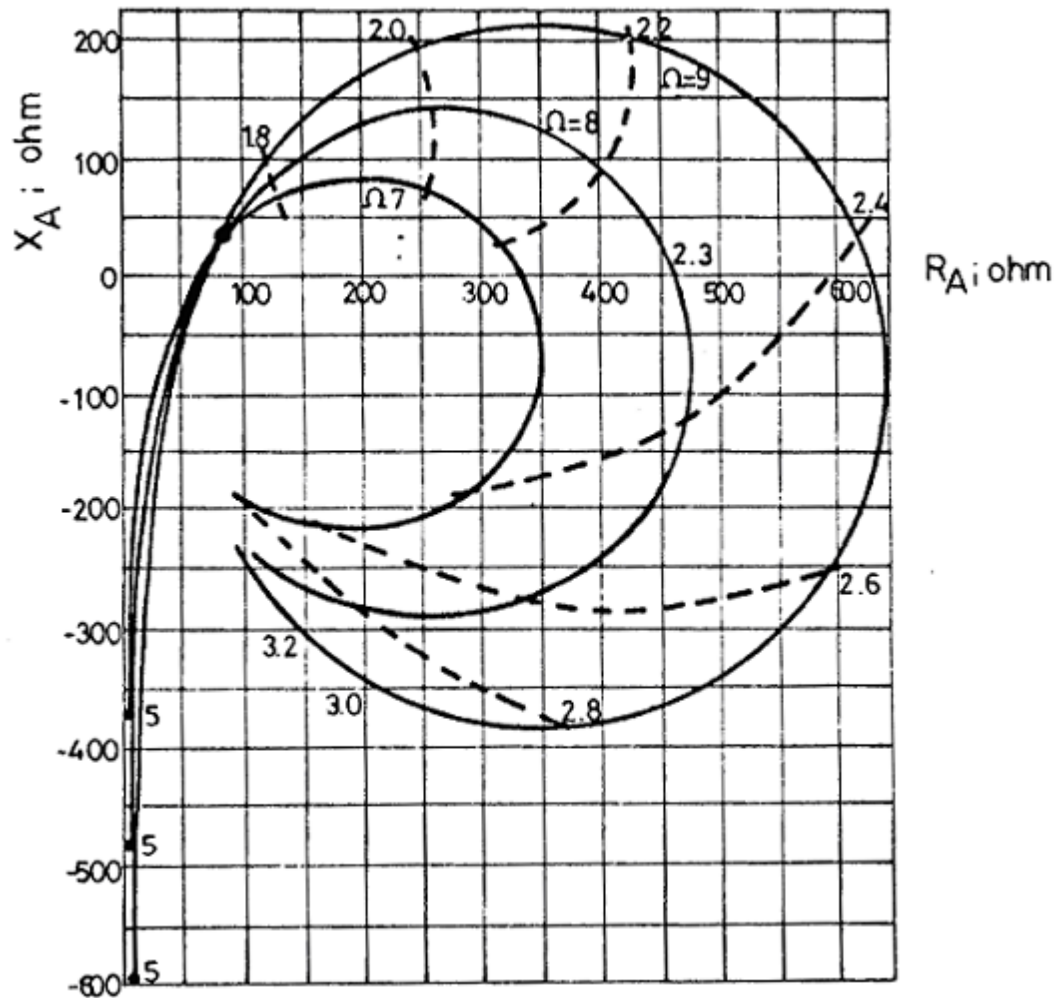



10-1. ábra A referencia antenna iránykarakterisztikájának E-síkú metszete



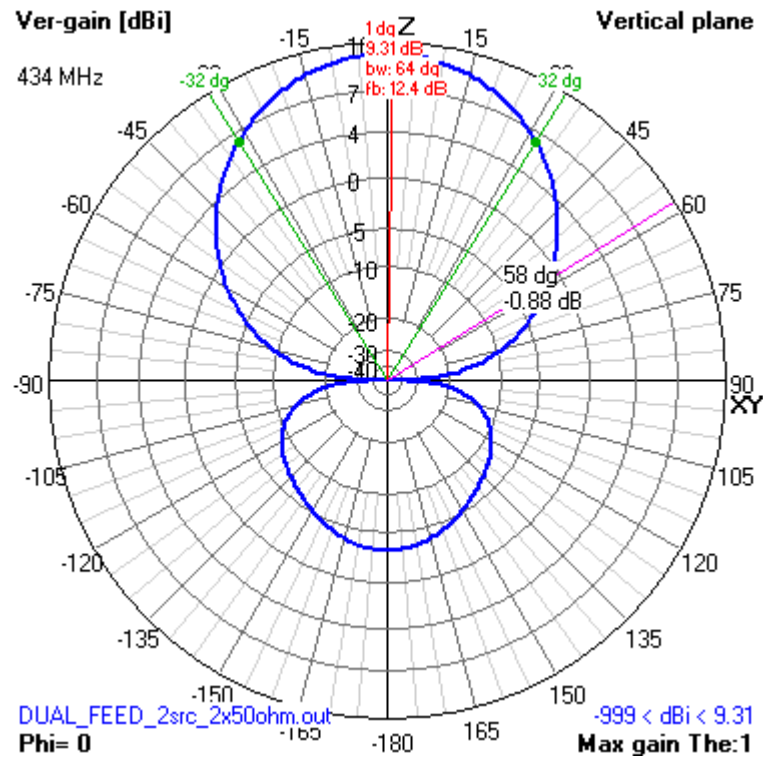
10-2. ábra A referencia antenna iránykarakterisztikájának H-síkú metszete

F.2 A félhullámú dipól bemeneti impedanciája a frekvencia és karcsúság függvényében

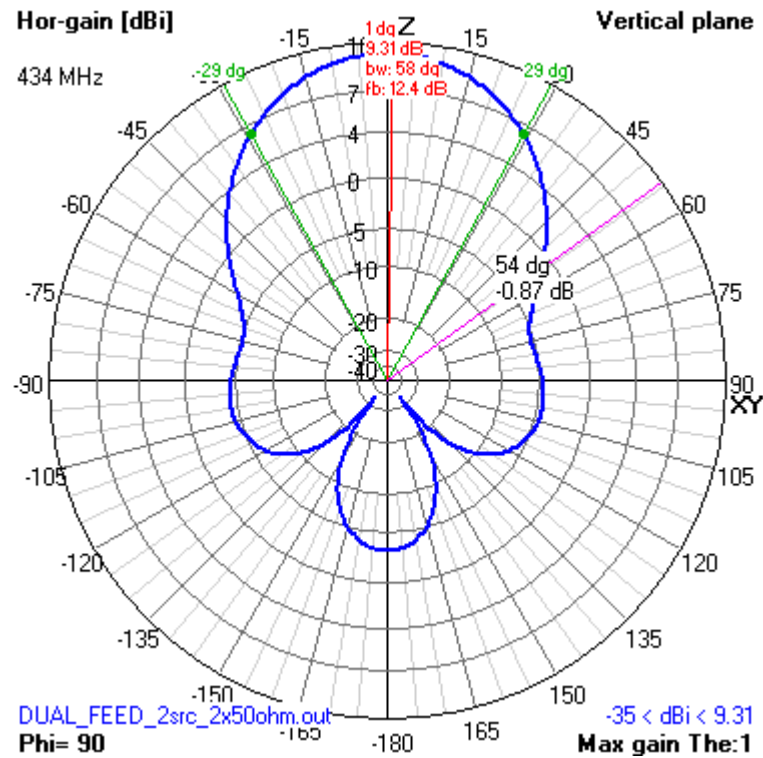


10-3. ábra A félhullámú dipólantenna bemeneti impedancia helygörbéje

F.3 A referencia antenna iránykarakterisztikája 50 cm-es reflektorfallal



10-4. ábra A módosított referencia antenna iránykarakterisztikájának E-síkú metszete



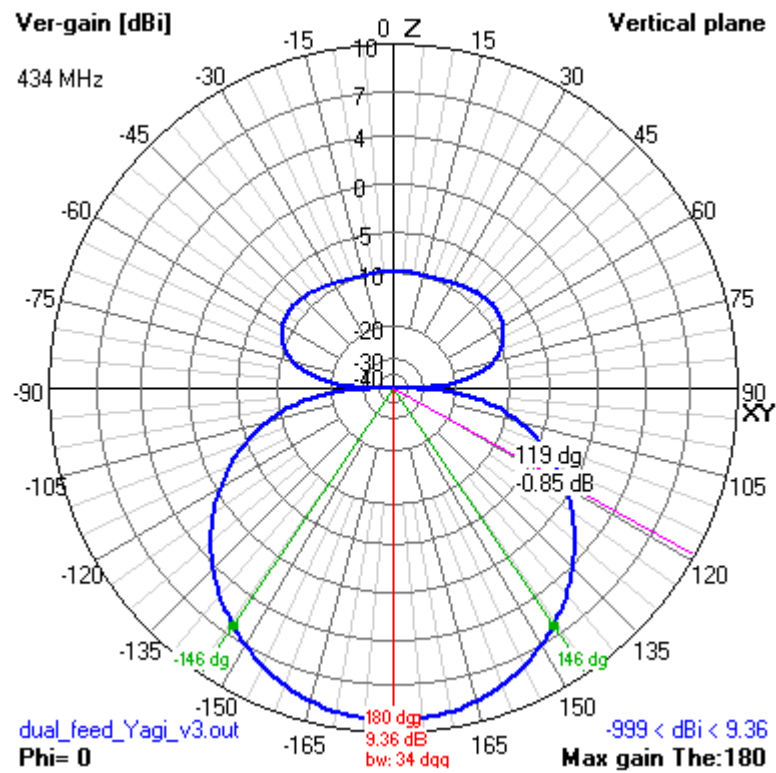
10-5. ábra A módosított referencia antenna iránykarakterisztikájának H-síkú metszete

F.4 A végleges tápfej forráskódja és iránykarakterisztikája

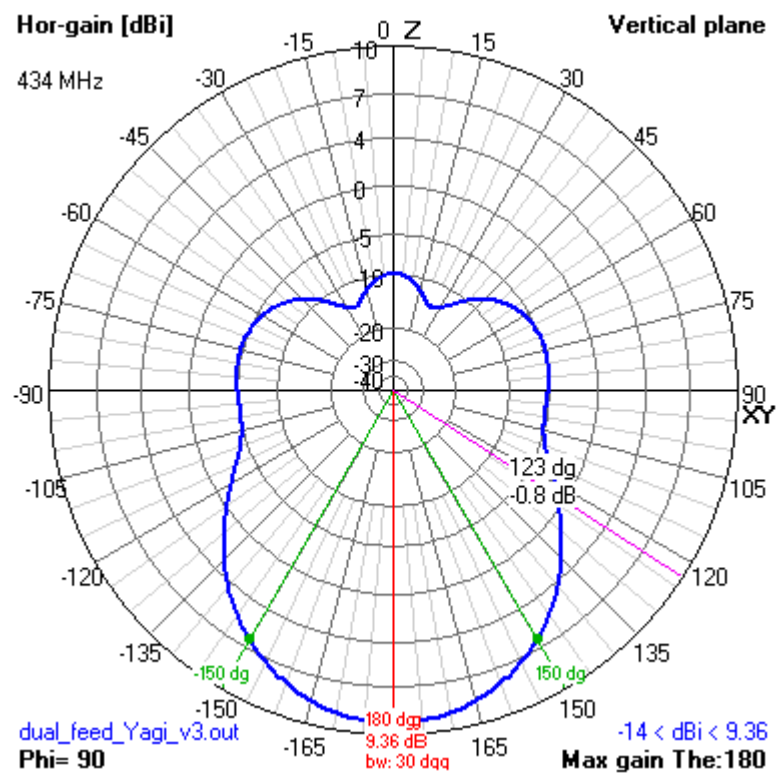
```

CM
CE
SY Lambda=0.691 'wavelength
SY x=0.97 'dipole length (for sweep) (def:1)
SY l1=x*Lambda/4 'half of the half-wave dipole
SY y=0.18 'fraction of the wavelength (for sweep) (def:0.2)
SY d=y*Lambda 'dipole distance from the reflector rod
SY z=0.95 'fraction of the wavelength (for sweep) (def:1.05)
SY r=10e-3 'radius of the wire
SY N=21 'number of the segments
SY spacing=0.18 'distance between the parallel dipoles
SY height=1.35 'driven element distance from origo
SY dist=0.0772 'distance between middle reflector and inner/outer (def:
0.05)
SY l2=spacing 'length for the reflector(s) (def:z*Lambda/4)
SY l3=spacing+dist 'outer reflector rod (def: 0.2)
SY l4=spacing-dist 'inner reflector rod (def:0.1)
SY r2=3e-3
GW 1 N -l1 -spacing height l1 -spacing height r
GW 2 N -l1 spacing height l1 spacing height r
GW 3 N -spacing +l1 height -spacing -l1 height r
GW 4 N +spacing +l1 height spacing -l1 height r
GW 5 N -l2 -spacing height+d l2 -spacing height+d r2
GW 6 N -l2 spacing height+d l2 spacing height+d r2
GW 7 N -spacing +l2 height+d -spacing -l2 height+d r2
GW 8 N +spacing +l2 height+d spacing -l2 height+d r2
GW 9 N +spacing+dist l3 height+d spacing+dist -l3
height+d r2
GW 10 N -spacing-dist +l3 height+d -spacing-dist -l3
height+d r2
GW 11 N -l3 spacing+dist height+d l3 spacing+dist
height+d r2
GW 12 N -l3 -spacing-dist height+d l3 -spacing-dist
height+d r2
GW 13 N +spacing-dist l4 height+d spacing-dist -l4
height+d r2
GW 14 N -spacing+dist +l4 height+d -spacing+dist -l4
height+d r2
GW 15 N -l4 spacing-dist height+d l4 spacing-dist
height+d r2
GW 16 N -l4 -spacing+dist height+d l4 -spacing+dist
height+d r2
GE 0
LD 4 3 (N+1)/2 0 50
LD 4 4 (N+1)/2 0 50
GN -1
EK
EX 0 1 (N+1)/2 0 1 0 0
EX 0 2 (N+1)/2 0 1 0 0
FR 0 0 0 0 434 0
EN

```

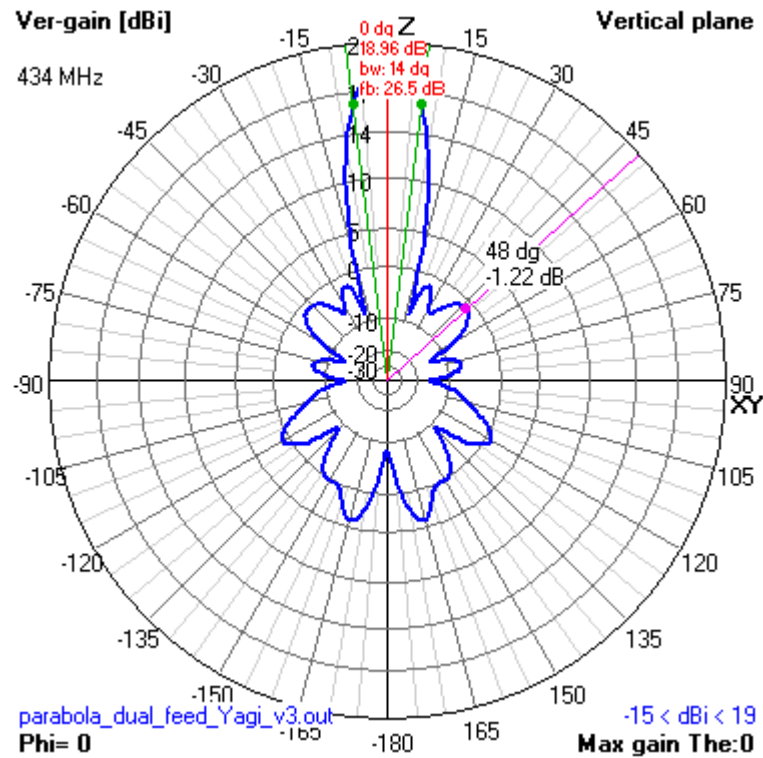


10-6. ábra A végleges tápfej iránykarakterisztikájának E-síkú metszete

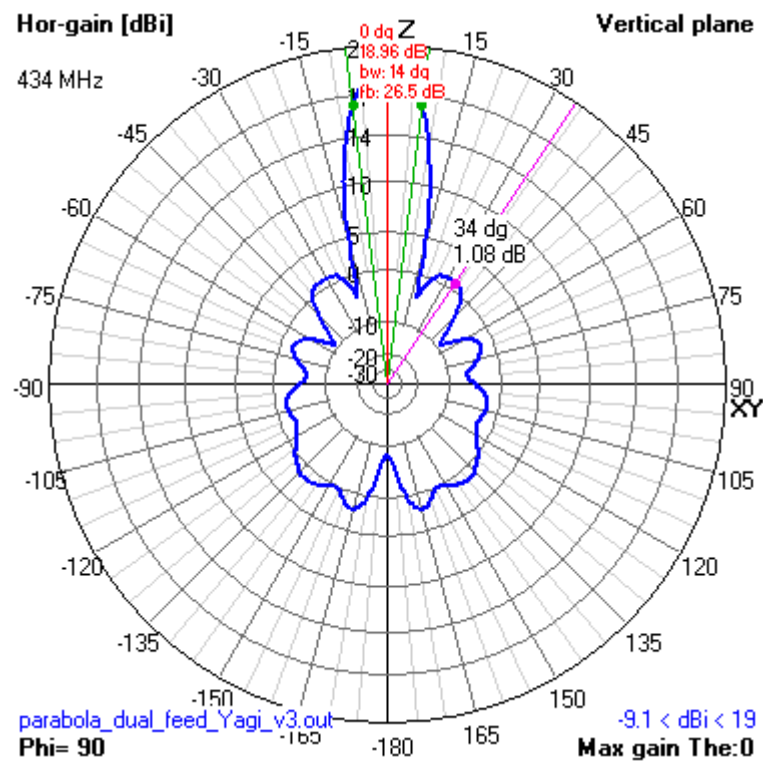


10-7. ábra A végleges tápfej iránykarakterisztikájának H-síkú metszete

F.5 A tápfej és a parabola együttes iránykarakterisztikája

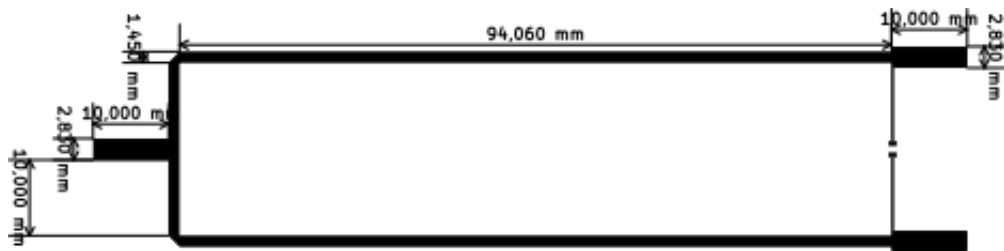


10-8. ábra A teljes antennarendszer iránykarakterisztikájának E-síkú metszete



10-9. ábra A teljes antennarendszer iránykarakterisztikájának H-síkú metszete

F.6 A teljesítményosztó fizikai méretei és mérési eredményei



10-10. ábra A teljesítményosztó fizikai méretei

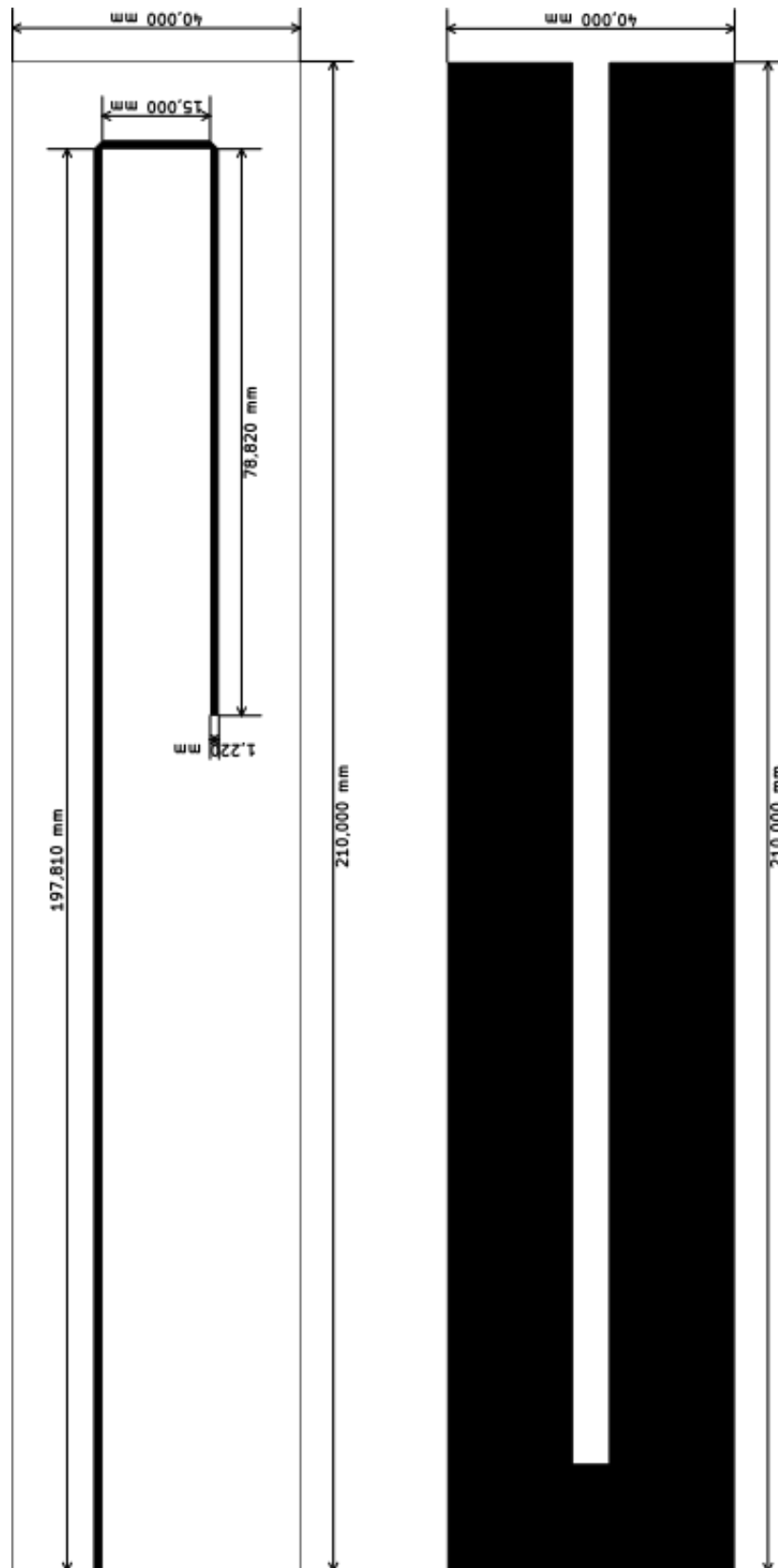
1. osztó	s_{11} [dB]	s_{12} [dB]	s_{21} [dB]	s_{22} [dB]
1. mérés	-22,8	-3,3	-2,9	-20,5
2. mérés	-22,9	-3,3	-2,9	-20,6
3. mérés	-21,6	-22,8	-23	-20,1
4. mérés	-21,2	-22,8	-23	-20,5

10. táblázat

2. osztó	s_{11} [dB]	s_{12} [dB]	s_{21} [dB]	s_{22} [dB]
1. mérés	-25,5	-3,3	-2,9	-21,1
2. mérés	-25,7	-3,2	-2,9	-21,5
3. mérés	-22,5	-24,2	-24,4	-21
4. mérés	-22,2	-24,2	-24,4	-21,2

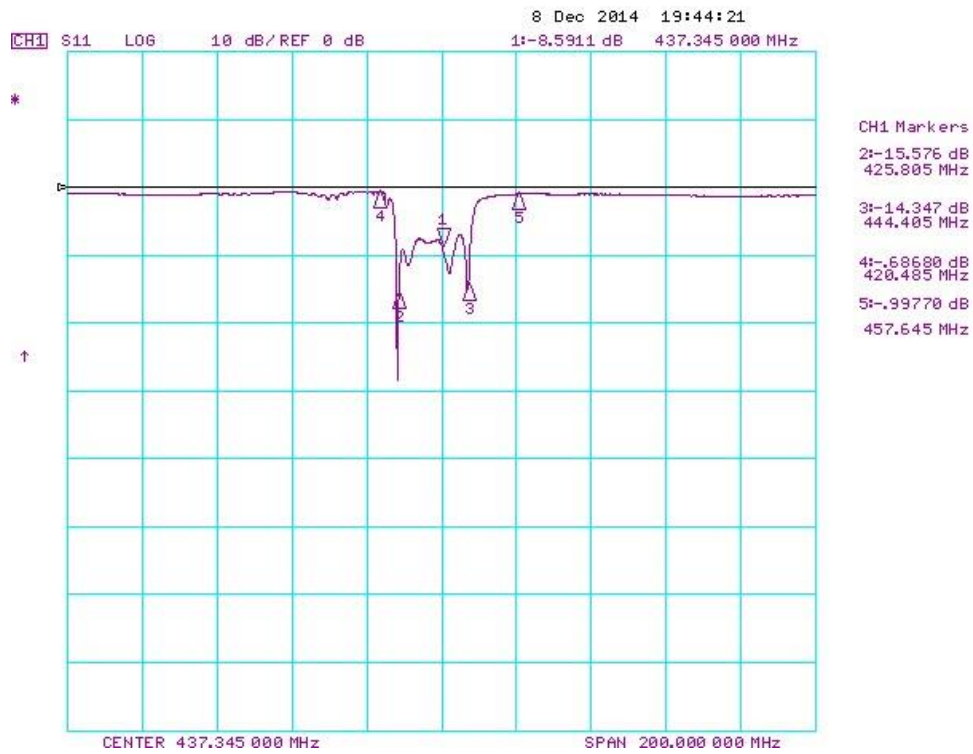
11. táblázat

F.7 A balun és fizikai méretei



10-11. ábra A balun fizikai méretei

F.8 A SAW-szűrő tulajdonságai

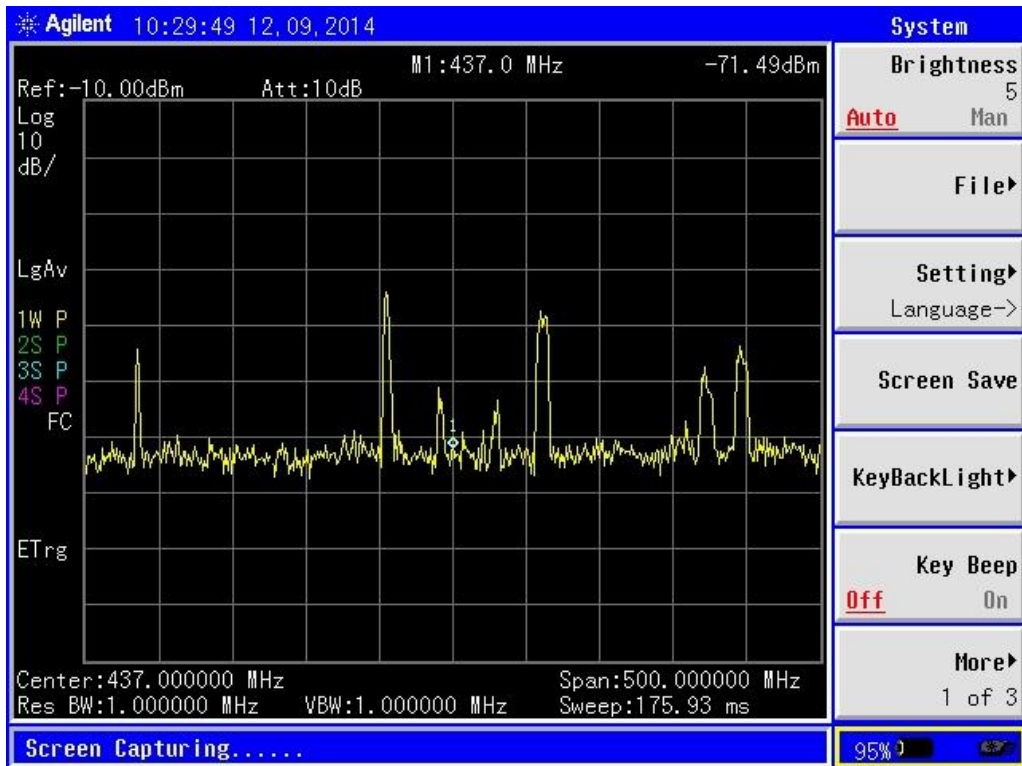


10-12. ábra A SAW-szűrő bemeneti reflexiója

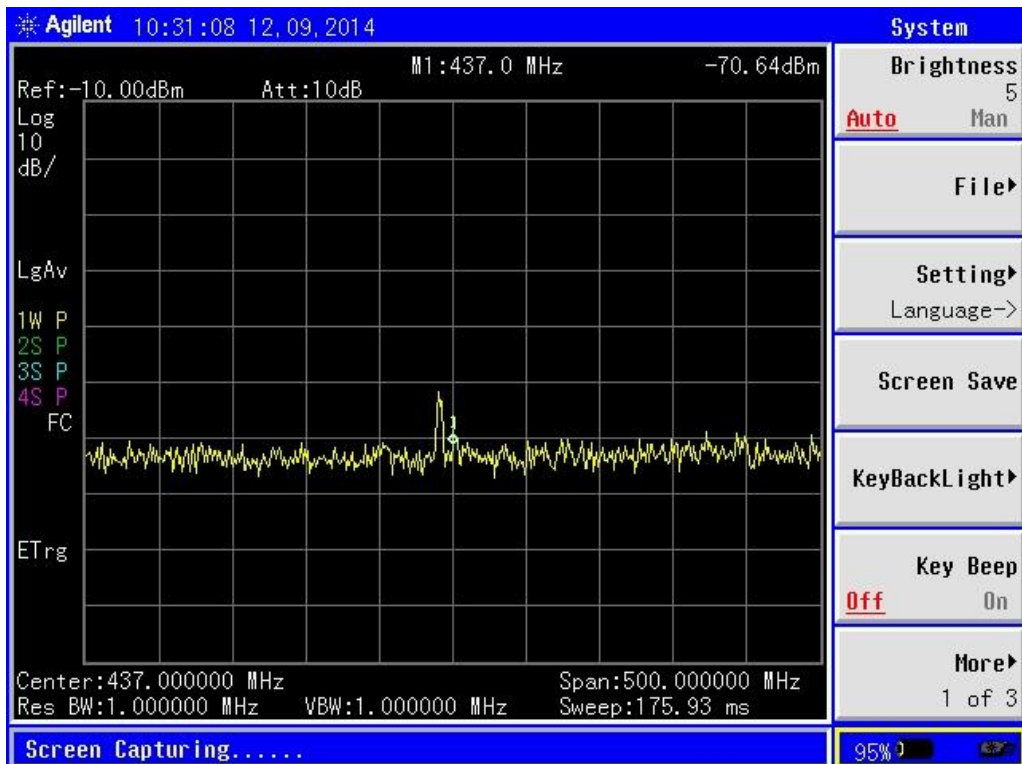


10-13. ábra A SAW-szűrő átvitele

F.9 A spektrumképek egy polarizáció esetén, a szűrő behelyezése előtt és után (egy tetszőleges pontban)

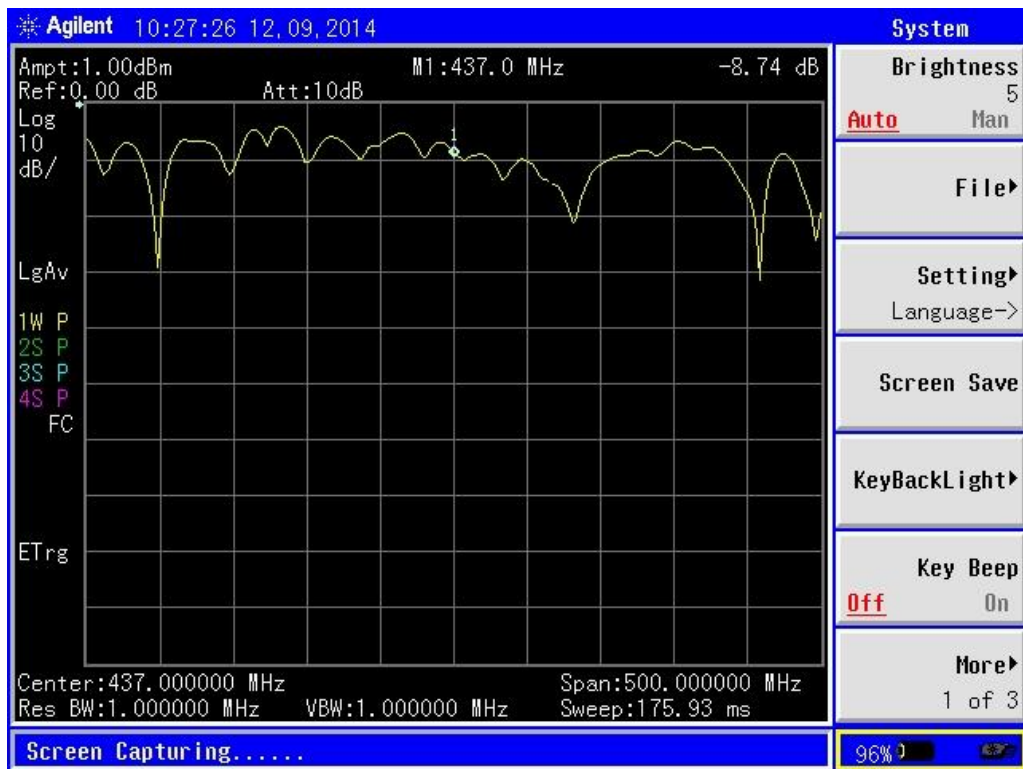


10-14. ábra Zavaró spektrumkomponensek a szűrő előtt

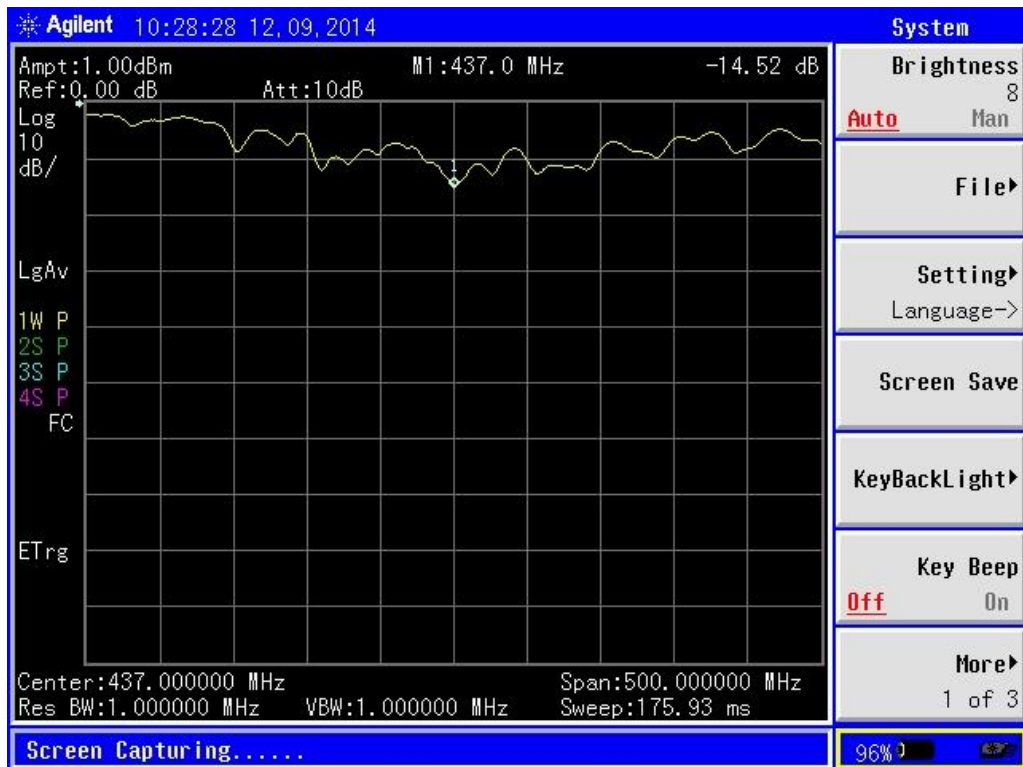


10-15. ábra Zavaró spektrumkomponens a szűrő után

F.10 A bemeneti reflexió a két antenna esetén



10-16. ábra Vízszintes polarizációjú dipólok



10-17. ábra Függőleges polarizációjú dipólok