



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Antennák gyakorlati alkalmazása (VIHVAV02)

Kereszt-Yagi antenna tervezése

SZILÁGYI GÁBOR (NOMK01)

SZABÓ ÁRON (AE0F10)

2021. JANUÁR 26.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. A feladat	2
1.2. Motiváció	2
2. Előkészítés	3
3. Tervezés	4
3.1. Teljesítmény osztó	4
3.2. Szimuláció	5
3.3. Gamma-illesztés	9
3.4. Rögzítés	12
Hivatkozások	13

1. Bevezetés

1.1. A feladat

- Kereszt Yagi antenna tervezése a 2m-es ISM sávra műholdvételekhez

1.2. Motiváció

A Schönherz Kollégium tetejére egy motorosan forgatható antennát tervezünk telepíteni a HA5KFU amatőr klubbal. A forgató vezérlési áramkörét már előző félévben elkészítette egy klubtag, ősszel pedig fel is szereltük a tetőre a forgató motorját egy tengellyel együtt. A célunk az, hogy irányítottan tudjunk kommunikálni a 2 méteres amatőr sávon, és így amatőr műholdakat is pontosan lekövethessünk.

A feladat keretein belül ezt az antennát szeretnénk megtervezni, és amint lehetőségünk nyílik rá, meg is építjük.

2. Előkészítés

A feladatra a Yagi antennát találtuk optimálisnak, mivel egyszerű szerkezettel lehet elérni nagymértékű irányítottságot, és alumínium elemekből könnyen meg tudjuk építeni. Mivel a forgatón a polarizáció síkját nem tudjuk kontrollálni, és egyébként is nehézkes lenne az optimális polarizációt megtalálni a számítógépes vezérléssel, az antennát jobbkezes körpolarizáltra építjük, így az antenna kereszt-Yagi lesz.

Az antennát az antennaforogató kereszttrúdjára tervezzük rögzíteni, ezért fontos, hogy az antenna kiegyensúlyozatlanságával ne terheljük meg túlságosan az antennaforogató motorjait. Ezt úgy tervezzük elérni, hogy a kereszttrúd két oldalára, függőlegesen eltolva, egy-egy kereszt-Yagit szerelünk, ezek együtt fogják alkotni az antennarendszert. Ez a megoldás azért is előnyös, mert a hosszirányú méret növelése nélkül növeljük meg a nyereséget, a főnyaláb szélességét horizontálisan nem változtatjuk, de elevációs irányban lecsökkentjük.

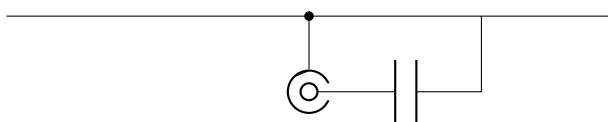
3. Tervezés

A Yagi antenna paramétereit az Antennakönyv [1] alapján határoztuk meg. Innen a "Kis sávszélességű és nagy nyereségű háromelemes Yagi antenna" paramétereit használtuk fel. Annyit módosítottunk a könyvben található antennán, hogy a gerjesztett hurok dipólust egyenes dipólusra cseréltük, mivel ez könnyebben megépíthető.



1. ábra. A Yagi modellje

Mivel az antennát koaxon keresztül tervezzük meghajtani, az antenna táplálása szimmetrikus helyett aszimmetrikus lesz. Ilyenkor az antennát egy balun segítségével csatlakozhatjuk a tápvonalhoz, vagy olyan illesztést használunk, amivel a koaxot közvetlenül az antennára köthetjük. Mi ez utóbbi lehetőséget választottuk, amit a Gamma-illesztés segítségével tervezünk megvalósítani.



2. ábra. A Gamma-illesztés modellje

A Gamma-illesztéssel $50\ \Omega$ -os impedanciájúra illesztjük mind a négy táplálási pontot, $50\ \Omega$ -os koaxiális kábelt használunk a tápláláshoz és a teljesítmény osztóhoz is. Mivel a körpolarizációt a kereszt-Yagi két rész-Yagijának a $\lambda/4$ -gyel való hosszirányú eltolásával oldjuk meg, a négy gerjesztési ponton azonos fázisban gerjesztjük az antennát a teljesítmény osztótól mérve egyforma hosszú kábeleken keresztül.

3.1. Teljesítmény osztó

A teljesítmény osztóba a négy táplálási ponttól érkező négy kábelt két párba rendezzük, az összepárosított kábeleket párhuzamosan kötjük, így kapva két darab $25\ \Omega$ -os bemeneti impedanciájú csatlakozási pontot. Ezekről a pontokról egy-egy $\lambda/4$ hosszú kábeldarabot vezetünk tovább, amelyek az egyik végükön található $25\ \Omega$ -os terhelést a másik végükön $100\ \Omega$ -osra transzformálják. Ezeket a kábelvégeket párhuzamosan kötve egymással érjük el az $50\ \Omega$ -os bemeneti impedanciát, ezzel tervezzük megvalósítani az $1/4$ -es teljesítmény osztót. [3]

3.2. Szimuláció

A szimulációban nem szerepel a Gamma-illesztés, mert a modellben olyan sugár- és szegmenshossz arányok fordultak elő a Gamma-illesztés környékén, amik jelentősen beszűkítették a paraméterek értékeit, amikkel még lefut a szimuláció. Ezen felül ha le is futott a szimuláció valamilyen paraméterek mellett, megkérdőjelezhető végeredményt adott, például 200%-os sugárzási hatásfokot.

Az optimalizálás során kapott antennaparaméterek a következő táblázatban láthatóak.

Paraméter	Érték [mm]
A reflektor hossza	1025
Az aktív elem hossza	972
A direktor hossza	920
A Yagi elemek sugara	4
A boom sugara	10
Az antenaforgató keresztrúdjának sugara	15
A kereszt-Yagik távolsága	1700

1. táblázat. Az antenna méretei

```

CM
CE
SY D=0.415 '2 szomszedos elem tavolsaga
SY LREFLEKTOR=1.025 'A reflektor hossza
SY LAKTIV=0.972 'Az aktív elem hossza
SY LDIREKTOR=0.920 'A direktor hossza
SY R=0.004 'Az elemek sugara. A konyv szerint 2.5-4mm lehet.
SY S=21 'Szegmensek szama
SY LAMBDANEGYED=0.5172 '145 MHz-en a negyedhullam
GW 1 s -d 0 -LREFLEKTOR/2 -d 0 LREFLEKTOR/2 r 'reflektor
GW 2 s 0 0 -LAKTIV/2 0 0 LAKTIV/2 r 'aktív
GW 3 s d 0 -LDIREKTOR/2 d 0 LDIREKTOR/2 r 'direktor
GE 0
LD 5 0 0 0 37700000
GN -1
EK
EX 0 2 (S-1)/2+1 0 1000 0 0
FR 0 0 0 0 145 0
EN

```

1. Kód. A Yagi 4NEC2 modellje boom nélkül

```

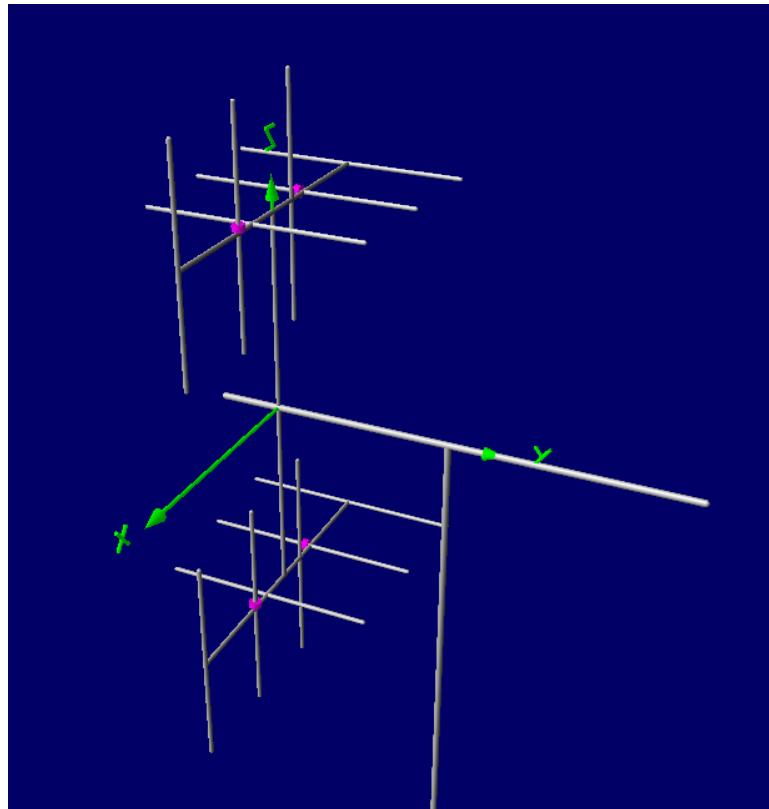
CM
CE
SY d=0.415 '2 szomszedos elem tavolsaga
SY Lreflektor=1.025 'A reflektor hossza
SY Laktiv=0.972 'Az aktiv elem hossza
SY Ldirektor=0.920 'A direktor hossza
SY r=0.004 'Az elemek sugara. A konyv szerint 2.5-4mm lehet.
SY s=11 'Szegmenssek szama
SY lambdanegyed=0.5172 '145 MHz-en a negyedhullam
SY RNAGY=0.010 'A boom sugara
SY LNAGY=2 'Az antenنافorgato keresztrudjanak hossza
SY RFORG=0.015 'Az antenنافorgato keresztrud sugara
SY Eltolas=1.7
GW 1 s -d 0 -Lreflektor/2 -d 0 0 r 'reflektor
GW 2 s -d 0 0 -d 0 Lreflektor/2 r 'reflektor
GW 3 s 0 0 -Laktiv/2 0 0 0 r 'aktiv
GW 4 s 0 0 0 0 0 Laktiv/2 r 'aktiv
GW 5 s d 0 -LDIREKTOR/2 d 0 0 R 'Direktor
GW 6 s d 0 0 d 0 LDIREKTOR/2 R 'Direktor
GM 100 1 90 0 0 -lambdanegyed 0 0 1
GW 13 11 D 0 0 0 0 0 RNAGY 'boom 1
GW 14 5 0 0 0 -lambdanegyed+d 0 0 RNAGY 'boom 2
GW 15 5 -lambdanegyed+d 0 0 -lambdanegyed/2 0 0 RNAGY 'boom3
GW 16 5 -lambdanegyed/2 0 0 -d 0 0 RNAGY 'boom 4
GW 17 5 -d 0 0 -lambdanegyed 0 0 RNAGY 'boom 5
GW 18 11 -lambdanegyed 0 0 -d-lambdanegyed 0 0 RNAGY 'boom 6
GM 0 0 0 0 0 lambdanegyed/2 0 -eltolas/2 1
GM 1000 1 0 0 0 0 0 eltolas 1
GW 2000 20 0 0 -eltolas/2 0 0 0 RNAGY
GW 2001 20 0 0 0 0 0 eltolas/2 RNAGY
GW 3000 20 0 -LNAGY/8 0 0 3/8*LNAGY 0 RFORG
GW 4000 20 0 3/8*LNAGY 0 0 7/8*LNAGY 0 RFORG
GW 5000 20 0 3/8*LNAGY 0 0 3/8*LNAGY -2*LNAGY RFORG
GE 0
LD 5 0 0 0 37700000
GN -1
EK
EX 0 4 1 0 1000 0 0
EX 0 104 1 0 1000 0 0
EX 0 1004 1 0 1000 0 0
EX 0 1104 1 0 1000 0 0
FR 0 0 0 0 145 0
EN

```

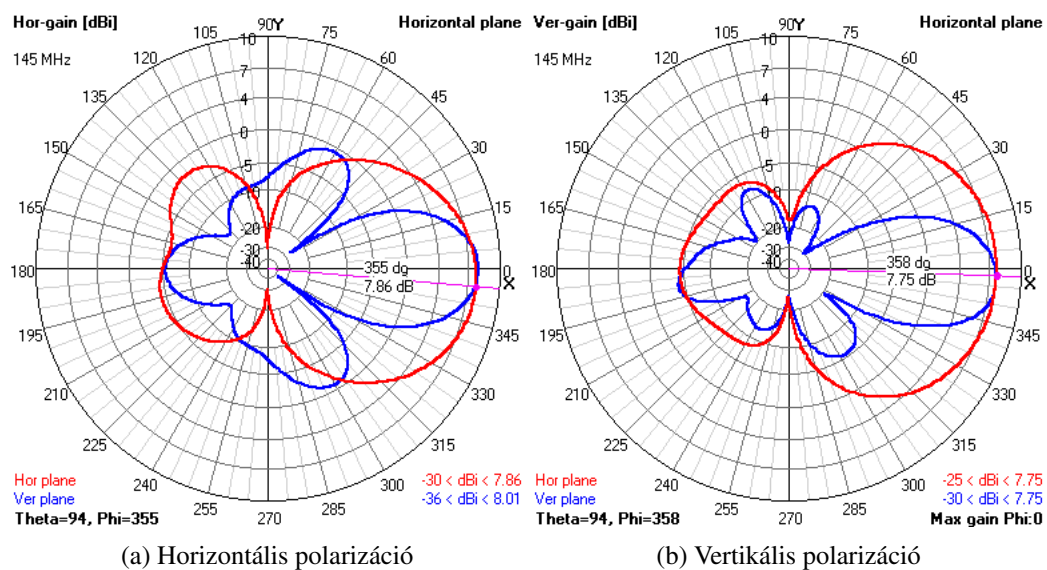
2. Kód. A kereszt-Yagi 4NEC2 modellje boommal és tartóelemekkel

A szimulációt kétféle modellel végeztük: az egyik a boom nélküli, magában álló háromelemes Yagi antenna, aminek a gerjesztését a meghajtott elem középső szegmensére vettük fel; a másik pedig a jóval bonyolultabb, két kereszt-Yagiból álló antennarendszer boommal és tartóelemekkel, ahol a gerjesztést a meghajtott elem egyik felének a boommal szomszédos szegmensére vettük fel mind a négy rész-Yagi antennára.

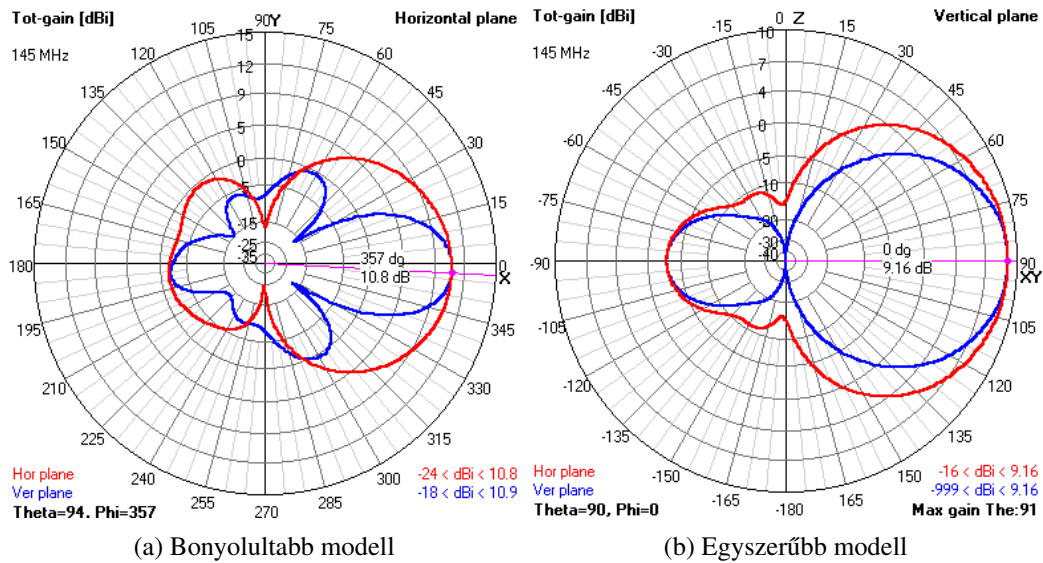
A szimulációs eredmények közül a lényegesek a sugárzási karakterisztikák és az illesztetlen antennák talponti impedanciái, valamint a melléknyalábok viszonya. Az iránykarakterisztikák vizsgálatát a kérdéses sáv közepén, vagyis 145 MHz-en végeztük. Ezek a következő ábrákon láthatóak:



3. ábra. Az antenna 3D modellje (a pozitív X irány a fő sugárzási irány)



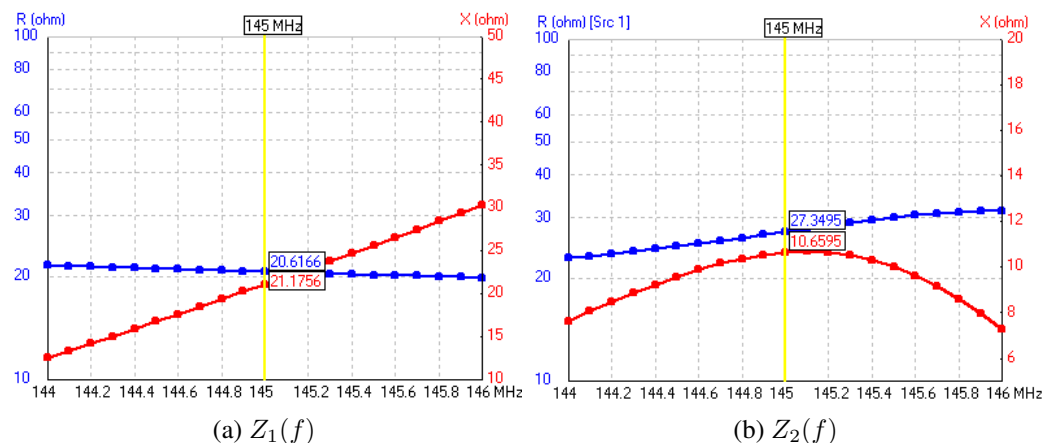
4. ábra. Az bonyolultabb modell iránykarakterisztikája lineáris polarizáció esetén



5. ábra. Az összesített nyereség síkmetszetei

Az iránykarakteristikákon látható, hogy mind horizontális, mind vertikális polarizációra a nyereség jó közelítéssel 8 dB az antennarendszer esetében a főirányban. A Yagi nyeresége a főirányában 9.16 dB. Tehát a szimpla Yagi-hoz képest a két kereszt-Yagiból álló antennarendszerrel körülbelül 1 dB nyereség feláldozásával leszűkítettük a főnyaláb vertikális szélességét és körpolarizálttá tettük az antennát. Mivel főként lineárisan polarizált antennákkal rendelkező műholdakkal tervezünk kommunikálni, ezért számolunk a polarizációs veszteséggel. Az 1 dB-es főiránybeli nyereség különbség a 3 dB-es polarizációs veszteség és az egy kereszt-Yagi helyett 2-ből álló antennarendszerről adódó, körülbelül 2 dB-es többletnyereség együttes hatása.

Az illesztetlen antenna bemeneti impedanciájának meghatározására két opciónk is van: az egyik, hogy a leginkább idealizált modellnek, a magában álló, boom nélküli Yaginak vegyük a bemeneti impedanciáját – legyen ez Z_1 ; a másik pedig az, hogy a bonyolultabb antennarendszer-modell bemeneti impedanciáját vegyük, aminek aszimmetrikus a táplálása, amint ahogy azt fentebb leírtuk – legyen ez Z_2 . Ezek frekvenciafüggése lent látható.



6. ábra. A talpponti impedanciák frekvenciafüggése

Ahogy a 6. ábrán látszik, számottevően eltérnek a talpponti impedanciák egymástól a két modellre. Ezek közül a bonyolultabb modell impedanciájával számolunk a Gamma-illesztés méretezéséhez, mert abban a modellben szerepel a boom is, ami megváltoztatja a talpponti impedanciát, ezért érdemes figyelembe venni. Hogy a teljes sávban elég jó legyen az antenna illesztettsége, a sávban előforduló impedancia valós- és képzetes

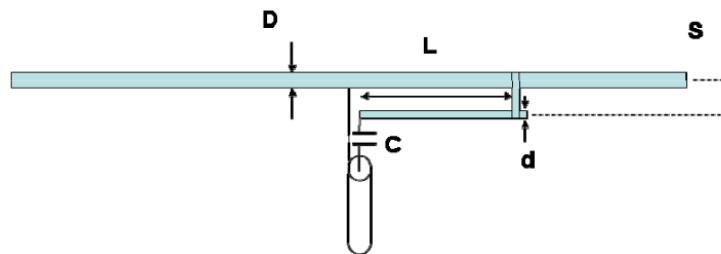
részeknek vettük a szélső értékeit, majd ezek átlagát, így kapva a közelítő mebeneti impedancia valós- és képzetes részét (R_a és X_a):

$\max\{Re\{Z_2\}\}$	31.5Ω
$\min\{Re\{Z_2\}\}$	22.9Ω
$\max\{Im\{Z_2\}\}$	10.7Ω
$\min\{Im\{Z_2\}\}$	7.3Ω
R_a	27.2Ω
X_a	9Ω

2. táblázat. A talpponti impedancia becslője

3.3. Gamma-illesztés

A Gamma-illesztés méretezéséhez a következő, részletesebb modellt és paramétereket használtuk [2]:



7. ábra. A Gamma-illesztés részletesebb modellje

D	Az aktív elem átmérője (fix 8 mm)
d	Az illesztő tag átmérője (fix 8 mm)
L	A Gamma-tag hossza (?)
C	A soros kondenzátor kapacitása (?)
S	A Gamma-tag és az aktív elem középvonalainak távolsága (?)

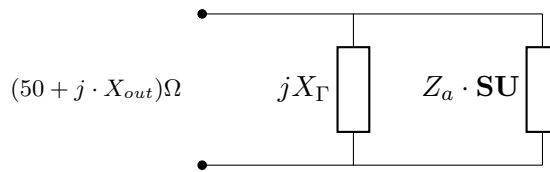
3. táblázat. A 7. ábra mennyiségei:

A méretezésnél mind az öt, a 3. táblázatban felsorolt mennyiséget megválaszthatjuk, de végeredményben az illesztett antenna bemeneti impedanciájának a valós- és képzetes részét ($Z_a = R_a + j \cdot X_a$) változtatjuk velük, így az öt bemeneti változó közül 3-at (bizonyos keretek között) szabadon megválaszthatunk, aztán a maradék 2 változót úgy állíthatjuk be, hogy a talpponti impedancia $50 + j \cdot 0 \Omega$ legyen. Ahogy a 3. táblázatban be is jelöltem, a D és a d változókat egyből lerögzítettük egyforma 8 mm-es értékekre. Ez később megkönnyíti a számolást és elég csak ilyen átmérőjű alumínium csöveket beszerezni majd, nem kell egy külön méret a Gamma-illesztéshez.

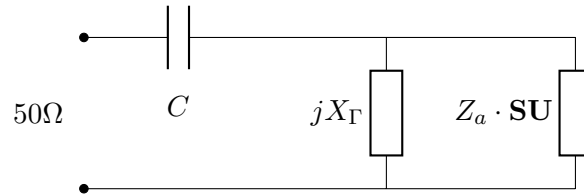
Még egy paramétert megválaszthatunk, de ezután már a megoldás egyértelmű lesz a maradék kettőre. Ez legyen az S, ami a Gamma-tag és a meghajtott elem középvonalainak a távolsága: $S = 4 \text{ cm}$

Még be kell vezetni két segédváltozót, amik lényegesen érthetőbbé teszik a számolást, ezek SU és X_Γ . Ezek használatával a talpponti impedancia így adódik az illesztéssel együtt:

$$R_{out} + j \cdot X_{out} = \frac{1}{\frac{1}{j \cdot X_\Gamma} + \frac{1}{SU \cdot (R_a + j \cdot X_a)}} \quad (1)$$



8. ábra. A Gamma-illesztés kapacitás nélkül



9. ábra. A Gamma-illesztéssel ekvivalens áramkör

Az SU "Step-up" változó az alábbi egyenlet alapján számolható:

$$SU = \left(1 + \frac{\cosh^{-1} \left(\frac{4S^2 - D^2 + d^2}{4Sd} \right)}{\cosh^{-1} \left(\frac{4S^2 + D^2 - d^2}{4SD} \right)} \right)^2 \quad (2)$$

Ha $D=d$, amit lerögzítettünk, akkor a fenti egyenlet jelentősen leegyszerűsödik és az S -től függetlenül $SU = 4$ lesz az eredmény.

Ez után az X_Γ meghatározása a feladat olyan megszorítás mellett, hogy ekkor $R_{out} = 50\Omega$ teljesüljön. Ezt némi próbálgatás után sikerült megoldani:

$$X_\Gamma = 141 \quad (3)$$

Ekkor:

$$R_{out} + j \cdot X_{out} = \frac{SU \cdot Z_a \cdot j \cdot X_\Gamma}{SU \cdot Z_a + j \cdot X_\Gamma} = (50.11 + j \cdot 59.48)\Omega \quad (4)$$

Ha már meghatároztuk X_Γ értékét, akkor a következő képpen lehet tovább haladni. A forrásunk [2] alapján a következők igazak:

$$Z_0 = \frac{376.73}{2 \cdot \pi} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{4 \cdot S^2 - D^2 - d^2}{2 \cdot D \cdot d} \right) = 274.9(\Omega) \quad (5)$$

$$X_\Gamma = Z_0 \cdot \tan \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda} \right) \quad (6)$$

Innen:

$$L = \tan^{-1} \left(\frac{X_{gamma}}{Z_0} \right) \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} = 16.16\text{cm} \quad (7)$$

A 16 cm-es érték a gyakorlatban is jól használható. Ezzel a C kapacitáson kívül minden paramétert meghatároztunk, és ez már egyszerűen megy:

$$Z_c = \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C} = -j \cdot X_{out} \quad (8)$$

A fenti egyenlet átrendezésével:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{out}} = 18.2 \text{ nF} \quad (9)$$

A fentebb meghatározott paraméterek közül az elemek D és d átmérője, valamint az S távolság fix lesz, de a C kapacitást forgókondenzátorral tervezzük beállítani, az L hosszt pedig csúszó bilincssel, mert a megvalósítás során fellépő pontatlanságokból származó hibákat ezeknek a finomhangolásával ki lehet küszöbölni.

Paraméter	Érték
D	8 mm
d	8 mm
L	162 mm
C	18.2 nF
S	40 mm

4. táblázat. A Gamma-illesztés végleges paraméterei

3.4. Rögzítés

A Yagi antenna elemeit egy alumíniumból készült boomra tervezzük rögzíteni: egy vastagabb (2 cm átmérőjű) alumínium csövet kifúrunk a megfelelő helyeken, és ezekbe rögzítjük az elemeket. A koaxok a boom cső belsőjében elvezethetők, így időjárásállóbbá téve az elkészült antennát. A boomok súlypontján merőleges rúddal lesz összekötve a két antenna, illetve ez a rúd lesz az antennaforgató tengelyére rögzítve (ez a szerkezet látható a 3. ábrán). A forgató másik oldalán egy másik antennával és esetleg ellensúllyal tervezzük kiegyensúlyozni a szerkezetet.

Az, hogy a rögzítés szerkezeti elemei is vezető anyagból készülnek, a szimuláció szerint nem okoz problémát, a rögzítőelemeket tartalmazó és nélküli modellek eredményei között minimális eltérés van csak.



10. ábra. Az antennaforgatót és a fő tengelyt 2020 őszén felszereltük a Schönherz tetőre

Hivatkozások

- [1] Karl Rothammel: *Antennenbuch*.
Verlag Sport und Technik 1961
- [2] What's with the gamma match equations?
<https://nonstopsystems.com/radio/pdf-ant/article-antenna-magloop-gamma-6MW.pdf>
- [3] Teljesítmény osztó leírása
<https://www.qsl.net/dk7zb/Stacking/coax.htm>
<http://amfone.net/ECSound/K1JJ23.htm>

A kapcsolások ábráit Circuitikz-zel készítettük el.