



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



Hélixantenna tervezése a 70 cm-es amatőrsávra

Önálló laboratórium beszámoló

Baráth László

Konzulens: Dr. Lénárt Ferenc és Reichardt András

2024

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Baráth László, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a önálló labpratórium beszámolót 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 autentikált 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.

Budapest, 2024. május 27.

Baráth László

Tartalomjegyzék

1. A feladat megfogalmazása	4
2. Elméleti áttekintés	6
2.1. Antennák jellemzése	6
2.1.1. Nyereség	6
2.1.2. Iránykarakterisztika	7
2.1.3. Talpponti impedancia, reflexió, illesztés	7
2.2. Hélixantennák	7
2.2.1. Normál módusú hélix	7
2.2.2. QFH antenna	8
2.2.3. Axiális módú helix	8
2.2.4. A hélix geometriai paraméterei	8
2.2.5. A hélix mint N elemű antennasor	9
2.2.6. Polarizáció	10
2.2.7. Gyakorlati képletek	11
2.3. Reflektor és betáplálás	11
2.4. Antennaparaméterek	12
3. Az antenna szimulációja és finomhangolása	13
3.1. Az antenna modellezése	13
3.2. Az eredeti modell viselkedése	14
3.3. A boom modellezése és a betáplálás változtatása	14
3.4. A változás kompenzálása a hélix átalakításával	17
3.5. Egyéb paraméterek hatása	17
3.6. Az illesztőtag elemzése	21
3.7. Végső antennterv	26
3.8. Anyaglista	29
4. Összefoglalás	31

Kivonat

Önálló laboratórium témaként egy irányított, körpolarizált antenna tervezését és építését tűztem ki célul, amely egy már létező. alacsonypályás űreszközök vételére szolgáló földi vevőállomásba illeszkedik. Az állomás célja 70 cm-es rádióamatőrsávban üzemelő űreszközök jeleinek vétele. Az antenna tervezése során a vételi paramétereken túl szempont volt a stabil mechanikai felépítés, időjárásállóság és szervizelhetőség is. Az antenna tervezéséhez az irodalomban megtalálható, jól bevált közelítő képleteket és egy korábban publikált antennát használtam fel. Az antennát az Ansys HFSS programban szimuláltam és finomhangoltam.

1. fejezet

A feladat megfogalmazása

A 70 cm-es rádióamatőr sáv egyik különleges felhasználása a műholdas amatőrszolgálat. Az amatőr űreszközök nagy része sugároz ebben a sávban, a műegyetemi kisműholdak mindegyike ezen a frekvenciasávon működött, de például a nemzetközi űrállomás egyik amatőr átjátszójának is itt van a lejövő frekvenciája.

Az alacsony földkörüli pályán levő űreszközökkel való kommunikáció két fő módon történhet. Az első, kizárólag vételre alkalmas opció egy kisebb nyereségű, omnidirekcionális antenna használata. A kis nyereség miatt ez a módszer rosszabb jel-zaj viszonyt eredményez, de a vevőállomás felépítése egyszerűbb. Ez a megoldás elterjedt például a NOAA/Meteor sorozatú időjárás-műholdak vételére is.

A másik módszer irányított antenna használata, amelyet mechanikusan („antennaforogató”-val) folyamatosan a műhold felé irányítunk. Egy ilyen vevő felépítése bonyolultabb, számítógépes vezérléssel kell az antenna irányát beállítani, de az irányított antennának köszönhetően jelentősen javul a vett jelerősség és a jel-zaj viszony.

Az amatőr űreszközök vételekor lineáris vagy körpolarizációs jel vételére tervezünk. Az adók, és így a kisugárzott adás is jellemzően lineárisan polarizált, de a polarizáció síkja nem állandó a műholdak pályamozgása, esetleges forgása miatt. A polarizációs síkok relatív elfordulása lineárisan polarizált antenna esetében fadinghez vezet. Ennek, illetve hasonló jelenségek elkerülése céljából terjedt el a körpolarizált antennák használata. Mivel a műhold által kisugárzott adás lineárisan polarizált, ez 3 dB jel-zaj viszony csökkenést eredményez, viszont kiküszöböli a fentebb vázolt problémákat. Ilyen esetben mindegy, hogy jobb („RHCP”, az óramutató járása szerinti) vagy bal kéz szerinti („LHCP”, az óramutató járásával ellentétes irányú) körkörös polarizációt használunk. Amennyiben a forrás körpolarizált jelet sugároz ki, és azt körpolarizált antennával vesszük úgy a vevő polarizációs irányának meg kell egyeznie az adóéval, pl. a NOAA és Meteor műholdak APT adása RHCP, vagy lineárisan polarizált antennával fogható.

A HA5KFU rádióamatőr klubban 2019 decemberében készült el egy irányított antennával működő vevőállomás. A fő antenna egy 6 elemes Uda-Yagi antennából összeállított „keresztgyagi” volt, amely egy Yaesu G5500 típusú forgatóra lett felszerelve. A vételi láncban az antennát egy sávszűrővel rendelkező távtáplált erősítő blokk (LNA) követte, amely rögtön a forgatónál volt elhelyezve, így biztosítva a lehető legjobb vételt. A vétel maga egy RTL-SDR V3 vevővel történt. Ezzel az állomással sikeresen vettük a SMOG-P és SMOG-1 jeleit.

2022 végére a vevőállomás elöregedett, egyre több probléma volt vele. A 2023 nyarán felbocsátott MRC-100 műhold vétele már nem sikerült ezzel a rendszerrel. 2023 június 30-án az antennát javítási célból leszereltük, így az állomás jelenleg üzemképtelen.

Az elöregedett antennát nem tudtuk megjavítani, több különböző probléma lépett

fel - többek között beázott a bekötő koaxkábel, letört több elem, az UV tönkretette a teljesítményösszegzőt, stb. Az antenna konstrukciója nem teszi lehetővé a szétszedést, emiatt több javítás nem megoldható. Az antenna eredeti készítője, Kiss Ádám HA8KDA is az antenna cseréjét javasolta.

Az eredeti specifikációk, amelyeket Ádám az „antennák gyakorlati alkalmazása” tárgyhoz készített, nem egyértelműek, így az eredeti antenna paramétereit nem ismerem pontosan. A két antennából álló rendszert alkotó egyetlen Uda-Yagi antenna nyereségére több különböző érték is szerepel a dokumentációban, így ennek nyeresége 5,76 dBi–9 dBi között alakul.

Célom a félévben egy, a korábbi felváltani képes antenna tervezése, illetve kivitelezése volt. A főbb kritériumok:

- 436 MHz–438 MHz működési frekvencia
- a korábbival megegyező, vagy nagyobb (legalább 11 dBi) nyereség
- jó illeszkedés 50 Ω -os rendszerbe, kis reflexió
- mechanikailag stabil konstrukció
- időjárásállóság
- bontható kötések alkalmazása a javíthatóság érdekében
- kis szélterhelés

Az antennaparaméterekkel szemben támasztott követelmények alapján egy monofiláris axiális módban működő hélixantennát terveztem, melynek megépítését a nyári szünetben fogom végezni.

Az antenna tervezéséhez nagyon jó alapot nyújtott egy már korábban publikált helikális antenna leírása [3]. Az antenna tervezéséhez és szimulációjához az Ansys HFSS programot használtam.

2. fejezet

Elméleti áttekintés

Az elméleti áttekintést [6] alapján kezdtem. Mivel itt viszonylag kevés szó esett az axiális módusú hélix működéséről, így [4]-al folytattam, amely mélyebben is bemutatta ezen antennák működését.

2.1. Antennák jellemzése

Az antennának három fajta tulajdonságára adtam követelményeket:

- sugárzási tulajdonságok (nyereség)
- bemeneti tulajdonságok (impedancia, reflexió)
- mechanikai tulajdonságok

Az antenna sugárzási és elektromos tulajdonságait együttesen jellemzi annak nyeresége, amely magában foglalja annak iránykarakterisztikáját és (reflexiók és belső) veszteségeit.

2.1.1. Nyereség

Az antenna D irányhatásának definíciója a 2.1 egyenlet, ahol S a teljesítménysűrűség [W m^{-2}], tehát a maximális teljesítménysűrűség aránya az „átlagoshoz” (izotróp antenna által ugyanezen távolságban előállított) képest. Az antennanyereség ettől annyiban különbözik, hogy az izotróp antenna teljesítménysűrűségét a betáplált teljesítményből számítjuk, így a G nyereség magában foglalja az esetleges dielektromos és vezetési veszteségeket. A 2.2 és a 2.3 egyenletekben e_c a vezetési, e_d a dielektromos és $e_r = 1 - |\Gamma|^2$ a reflexiók veszteség.

$$D \triangleq \frac{S_{max}}{\frac{\oint S dA}{4\pi}} \quad (2.1)$$

$$G \triangleq \frac{U_{max}}{\frac{P_{be}}{4\pi}} = e_c e_d D \quad (2.2)$$

$$e_0 \triangleq e_c e_d e_r \quad (2.3)$$

A továbbiakban az antennát nyereségével fogom jellemezni.

Az irányhatás és nyereség általában dBi-ben, azaz izotróp antennához viszonyított relatív egységben van megadva. A fenti képletekkel $D^{\text{dBi}} = 10 \log_{10} D$ Használatos még a dBd egység, amely a félhullámú dipólushoz viszonyít, így $D^{\text{dBd}} = D^{\text{dBi}} - 2,15 \text{ dBi}$

2.1.2. Iránykarakterisztika

Az antenna kisugárzott térerősség-irány karakterisztikáját nevezzük iránykarakterisztikának. Készíthető iránykarakterisztika a nyereségből és az irányhatásból is, de ezek csak konstans szorzóban különböznek.

Az iránykarakterisztika síkmetszeteit megadhatjuk polárkoordinátákban vagy Descartes-féle rendszerben (rádióamatőr gyakorlatban előbbi, ezen kívül utóbbi gyakoribb), lineáris vagy relatív (dBi, dBd) egységekben. Lineárisan polarizált antennák esetében az elektromos és mágneses térrel megegyező irányú, azaz E és H síkú metszeteket adnak meg.

Az iránykarakterisztika (illetve nyereség, irányhatás) is polarizációfüggő, a különböző polarizációs módok más és más iránykarakterisztikával rendelkeznek. Az általam tervezett antenna esetében az RHCP polarizációjú iránykarakterisztikára és nyereségre optimalizáltam.

2.1.3. Talpponti impedancia, reflexió, illesztés

Az antenna táplálása koaxiális kábelben történik, a betáplálási pontban értelmezett a talpponti impedancia. Ezen impedancia az antenna geometriájától, illetve az esetlegesen abba beletervezett elosztott paraméterű illesztőtágtól (pl. Gamma-illesztés Uda-Yagi esetében) függ. Megfelelő illesztés esetén minimális reflexió és állóhullám-arány érhető el, amely feltétele a jó antennahatásfoknak.

Az általam tervezett antennatípusra a legegyszerűbb megtáplálási módok esetében 100Ω – 200Ω -os talpponti impedancia jellemző. A legegyszerűbb illesztés egy $\frac{\lambda}{4}$ -es illesztőtágtól, amelyet kialakíthatunk könnyen hozzáférhető 75Ω -os koaxiális kábelből is, ha az antenna talpponti impedanciáját $112,5 \Omega$ -ra tervezzük. Ezt a módszert nekem Dr. Dudás Levente javasolta. Az így kialakított geometriával a közelítő képletek szerint valamivel kisebb nyereséget értem volna el, továbbá a felhasznált korábbi design egy hasonló ötletre épülő, más kialakítású illesztőtágot használt.

Bár nem szorosan az illesztéshez tartozik, de szimmetrikus antennák esetében szükséges szimmetrizáló transzformátor használata is. Uda-Yagi antennák esetében ez gyakran koaxkábelből kialakított transzformátort vagy gamma-illesztést jelent. A hélixantennák aszimmetrikus gerjesztésűek, így itt szimmetrizáló tagra nincs szükség.

2.2. Hélixantennák

A hélix mint sugárzó elem több antennatípus alapja. A legelterjedtebbek a normál és axiális módusú monofiláris hélixek, illetve az irányítatlan multifiláris, jellemzően kvadrifilár hélixek (QFH).

2.2.1. Normál módusú hélix

[4] szerint a normál módú működés feltétele, hogy a sugárzóelem összhossza sokkal kisebb legyen, mint egy egész hullámhossz.

Ezen feltétel teljesülése esetén a hélix rövid dipólushoz hasonló iránykarakterisztikával rendelkezik, és a tengely mentén nullhelye van. A kerület és menetemelkedés arányától függően lehet lineárisan vagy körkörösen polarizált.

Valamivel hosszabb, a hullámhosszal összemérhető összhosszú sugárzó elem általában a kézirádiók antennája („rubber ducky” antenna), amely szintén irányítatlan antenna. Hasonló módon felhasználásra kerülhet más antennák építőelemeként, mint rövidített mono- vagy dipóluselem.

2.2.2. QFH antenna

A QFH antenna geometriai méretei a szabadtéri hullámhosszal egy nagyságrendbe esnek. Összesen négy helikális elemből áll, melyek közül kettő-kettő szembenlevő össze van kötve, ezek összhossza nagyjából egy hullámhossznak felel meg. Ezen típus leggyakrabban félgömb karakterisztikával rendelkezik. A HA5KFU-ban egy, a HA5MRC-től kapott QFH antennát használunk NOAA és Meteor műholdak vételére.

2.2.3. Axiális módú helix

Az axiális sugárzási mód feltétele, hogy a hélix kerülete közel megegyezzen egy hullámhosszal, továbbá a menetemelkedése kb. negyed hullámhossz legyen.

Ezen módban a hélix irány sugárzó, főiránya a tengelyével esik egybe, és a betáplálási ponttól elfelé mutat. Az ilyen kialakítású antennát gyakran kiegészítik egy reflektorral, amely növeli az előre-hátra viszonyt és a nyereséget.

Az antenna főirányban körkörös polarizációban sugároz. Nyeresége viszonylag nagy, sáv szélessége pedig nagyon nagy. A geometriai paraméterekre kevésbé érzékeny, így meglehetősen toleráns, könnyen építhető.

2.2.4. A hélix geometriai paraméterei

A hélixet a következő paraméterek jellemzik:

- $C = D\pi$ kerület
- D átmérő
- d menetemelkedés - két menet közötti távolság
- $L_0 = \sqrt{C^2 + S^2}$ egy menet hossza
- N menetszám
- $\alpha = \tan^{-1} \frac{S}{C}$ menetemelkedési szög

Ezen jellemzők a legmeghatározóbbak az iránykarakterisztika szempontjából. Valamivel kisebb jelentőséggel bír a vezető huzal vagy cső átmérője, illetve a reflektor mérete és alakja.

A C kerületet és d menetemelkedést szokás szabadtéri hullámhosszhoz viszonyítani: $C_\lambda \approx 1$ és $d_\lambda \approx 0,25$.

Az axiális mód az $\alpha = 12^\circ - 14^\circ$ tartományban jellemző.

2.2.5. A hélix mint N elemű antenasor

Könnyen belátható, hogy a hélix periodikus struktúrát valósít meg. [4] szerint a hélix iránykarakterisztikája jól közelíthető egy N elemű antenasorral, amely a Hansen-Woodyard feltétel szerint működik.

Ekkor a hélixet N db, egymástól d távolságra elhelyezett ekvidisztáns forrásnak tekintjük, melyek azonos amplitúdóban vannak gerjesztve, az egyes elemek közötti fáziskülönbség pedig δ . Ezen elrendezés eredő iránykarakterisztikáját [4] is levezeti.

Egy távoli pontból, amely az antenasort θ szög alatt látja, más fáziskülönbség adódik:

$$\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta + \delta \quad (2.4)$$

A fáziskülönbségből adódóan az eredő térerősség-fazor:

$$E = E_0 (1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j(n-1)\psi}) \quad (2.5)$$

$$= E_0 \frac{1 - e^{jn\psi}}{1 - e^{j\psi}} \quad (2.6)$$

$$= E_0 \frac{e^{jn\psi/2}}{e^{j\psi/2}} \left(\frac{e^{jn\psi/2} - e^{-jn\psi/2}}{e^{j\psi/2} - e^{-j\psi/2}} \right) \quad (2.7)$$

$$= E_0 e^{j\xi} \frac{\sin(n\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2.8)$$

Ahol

$$\xi = \frac{n-1}{2} \psi \quad (2.9)$$

Amennyiben az antenasor középső elemének fázisa a referencia, úgy a 2.8 egyenletből kiesik a $e^{j\xi}$ tag.

2.8 maximuma $\psi \rightarrow 0$ esetben van:

$$\lim_{\psi \rightarrow 0} E_0 \frac{\sin(n\psi/2)}{\sin(\psi/2)} = nE_0 \quad (2.10)$$

Ezen maximummal normalizálva az iránykarakterisztikát megkapjuk az „array factor”-t:

$$E = \frac{1}{n} \frac{\sin(n\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2.11)$$

Ha $\delta = 0$, azaz minden forrás azonos fázisban van, úgy a $\psi = 0$ feltétel a sor tengelyére merőlegesen teljesül, az eredő iránykarakterisztika két szimmetrikus főnyalábbal rendelkezik, ez a broadside sor esete.

Ha $\delta = -\frac{2\pi d}{\lambda}$, úgy a főnyaláb(ok) az antenasor tengelyébe esnek, ez az end-fire sor. Ha $d = \frac{\lambda}{2}$, akkor a karakterisztika szimmetrikus, egyébként egy kitüntetett főnyalábbal rendelkezik.

A Hansen-Woodyard sor esetében

$$\delta = -\left(\frac{2\pi d}{\lambda} + \frac{\pi}{n} \right) \quad (2.12)$$

Ezen esetben a főnyaláb élesebb lesz, növekszik az irányhatás, de túl nagy d esetében

jelentősen romlik az előre-hátra viszony. A probléma elkerülhető, ha

$$|\psi(\theta = -180^\circ)| \approx \pi \quad (2.13)$$

Amennyiben az egyes pontforrások nem izotróp sugárzók, úgy az eredő iránykarakterisztika az antennasor és az elemi sugárzó iránykarakterisztikájának szorzata lesz.

Kraus szerint az axiális módban működő hélixen „automatikusan” ilyen fázisviszonyok alakulnak ki az egész működési sávban.

A hélix esetében ebből számítható a teljes iránykarakterisztika. Mivel az antennasor karakterisztikája jóval élesebb, mint egyetlen meneté, így jó közelítés az egyes elemi sugárzókat izotróp forrásnak tekinteni. A Hansen-Woodyard feltételből közelíthető a hélix mentén a relatív fázissebesség $p = v/c$, mivel

$$\psi = 2\pi \left(d_\lambda \cos \theta - \frac{L_\lambda}{p} \right) \quad (2.14)$$

és a Hansen-Woodyard szerint

$$\psi = 2\pi m \quad (2.15)$$

A kettőt egyenlítve $\phi = 0$ mellett:

$$\frac{L_\lambda}{p} = d_\lambda + m \quad (2.16)$$

A működési mód határát az $m = 1$ és $p = 1$ feltétel adja, ebből

$$L_\lambda - d_\lambda = 1 \quad (2.17)$$

Más módon

$$C_\lambda = \sqrt{2d_\lambda + 1} \quad (2.18)$$

Ennél nagyobb kerület esetében a működéshez egynél nagyobb relatív fázissebesség lenne szükséges.

Ezen működési módban v értéke a H-W feltételből jó közelítéssel

$$p \approx \frac{L_\lambda}{d_\lambda + \frac{2n+1}{2n}} \quad (2.19)$$

Ezen eredmény felhasználásával számítva jól közelíthető az antenna iránykarakterisztikája.

2.2.6. Polarizáció

[4] 7-8-as fejezete szerint az antenna a főirányban elliptikusan polarizált, és a polarizáció ellipticitása (a két merőleges komponens aránya, angolul „axial ratio”) 2.19 szerinti fázissebesség mellett:

$$AR = \frac{2n + 1}{2n} \quad (2.20)$$

Látható, hogy a menetszám növekedésével ez egyre jobban megközelíti a tökéletes körpolarizált állapotot, és $n = 5$ menet fölött a hibája 10 %, azaz 0,9 dB alatti.

Sima ($\delta = -\frac{2\pi d}{\lambda}$) end-fire működést feltételezve $AR = 1$ adódna a menetszámtól függetlenül.

2.2.7. Gyakorlati képletek

Az antenna tervezéséhez Kraus[4] a következő, gyakorlatban is jól használható összefüggéseket adja:

Írányhatás vagy nyereség:

$$D \approx 12C_\lambda^2 n S_\lambda \quad (2.21)$$

Talpponti impedancia (axiális betáplálás esetén):

$$R \approx 140 \Omega \cdot C_\lambda \quad (2.22)$$

Talpponti impedancia (kerület menti betáplálás esetén):

$$R \approx \frac{150 \Omega}{\sqrt{C_\lambda}} \quad (2.23)$$

Nyalábélesség:

$$\text{HPBW} \approx \frac{52^\circ}{C_\lambda \sqrt{n S_\lambda}} \quad (2.24)$$

Ezek a közelítő képletek jól használhatók ($\pm 20\%$ -en belüli vagy jobb eredményt adnak), ha $0,8 \leq C_\lambda \leq 1,15$, $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ és $n \geq 4$

Az írányhatásra adott összefüggés Kraus szerint „realisztikusabb”, optimistább becslésben 15-ös szorzót használ.

Alternatív formák

[6] a fenti összefüggéseket más formában adja meg. Nem használja a C_λ , S_λ jelölést, helyette explicit módon oszt λ -val. A 2.21 összefüggés helyett az optimistább verziót adja meg.

A talpponti impedanciák közül gyakorlatilag minden forrás az axiális betáplálásnak megfelelőt vette át, a betáplálás módjának kifejtése nélkül. A két közelítő összefüggés hasonló eredményt ad a gyakorlatban használt geometriákra, így a hiba viszonylag alacsony.

[5] a 2.21 összefüggést a következő formában fogalmazta meg:

$$\text{Gain(dBi)} = 11,8 + 10 \log(C_\lambda^2 n S_\lambda) \quad (2.25)$$

(Itt G -vel a reflektor méretét jelöli, így a nyereségre már nem volt használható.) Itt $11,8 = 10 \log_{10} 15$ -ből adódott, tehát ismét a jóval optimistább becslést vette át. Ez a könyv \log -al a tízes alapú logaritmust jelöli, míg a programozási nyelvek (Matlab, Octave, C és minden amire rá épül) a természetes logaritmust érti \log alatt, így a képlet egy-az-egyben történő implementációja hibás eredményt adhat. A <https://sgcderek.github.io/tools/helix-calc.html> címen elérhető kalkulátor is elkövette ezt az implementációs hibát, ezt egy hibajegyen jeleztem is a készítőnek: <https://github.com/sgcderek/sgcderek.github.io/issues/3>.

2.3. Reflektor és betáplálás

A hélixantenna gyakorlatilag minden esetben kiegészítésre kerül egy reflektorral. A reflektor mérete nem kritikus, [5] szerint a mérete (kör esetén átmérő, négyzet alak esetében oldalhossz) $0,8$ – $1,1$ hullámhossz közé kell hogy essen. A reflektor kialakítására kevésbé érzékeny az antenna, főként az előre-hátra viszonyt, illetve a melléknyalábszinteket befolyá-

Paraméter	Relatív egység [λ]	Abszolút egység [mm]
Kerület C	1,08	745
Átmérő $D = \frac{C}{\pi}$	0,344	237
Menethossz $L = \sqrt{C^2 + S^2}$	1,108	764
Menetemelkedés S	0,245	170
Huzalvastagság d	0,014	10
Reflektor oldalhossz R	0,87	600
Emelkedési szög α	-	12,8°
Menetszám n	-	9

2.1. táblázat. A [3]-féle antenna fontosabb paraméterei

solja. Készíthető backfire hélix is, amelyet jellemzően parabolaantennák megvilágítására használnak.

A betáplálásra az egyik leggyakoribb módszer az első menet ellaposítása, szinte a reflektorral párhuzamos vezetése. A fémsík és vezető így egy tápvonalat alkot, amely hatékonyan illeszti az antennát a betápláló koaxhoz. Ennek feltétele, hogy a vezető-reflektor távolság kicsi legyen, amennyiben ez túl nagy, úgy valamivel keskenyebb sávú javulás érhető el, ha a kettő közé szigetelő anyagot rakunk, annak ϵ_r -ével növelve a kapacitást. Egy másik lehetséges megoldás egy fémlemez ráforrasztása a vezetőre, így növelve a kapacitást. Szintén a kapacitás növelését valósíthatja meg egy, a reflektorra merőlegesen forrasztott fémlemez, amely a hélixel párhuzamosan van vezetve. Mindegyik megoldással megvalósítható homogén, illetve inhomogén impedanciájú tápvonal a távolságok változtatásával.

2.4. Antennaparaméterek

Az elmélet átolvasásával párhuzamosan igyekeztem keresni már létező realizációkat amelyeket felhasználhatnék, így találtam rá [3]-re, amely gyakorlatilag ugyanazon célokat tűzte ki maga elé, amelyeket én is. A cikk két antennát közöl, amelyek csak a menetek számában térnek el egymástól. Az antennák leírásához anyaglistát és tervrajzokat is ad, így ezek az antennák könnyebben megépíthetőek.

A paramétereket a 2.1 táblázat foglalja össze. A hélixet $d = 10$ mm átmérőjű rézcsőből készítette el. Az ígért antennanyereség (mérés alapján) kb. 12,8 dBi.

Ez az antenna paramétereiben megfelel a céljaimnak, így minimális módosításokat hajtottam csak rajta végre.

3. fejezet

Az antenna szimulációja és finomhangolása

Az antenna szimulációját Dr. Lénárt Ferenc javaslatára először a *4nec2* programmal próbáltam meg, de ezzel, valószínűleg mivel nincs vele tapasztalatom, nem sikerült jó eredményt elérnem. A szimulációk instabilak voltak, és a vártnál jóval érzékenyebbek a geometriai paraméterekre, különösen a vezető átmérőjére. Szintén problémám volt a betáplálás megvalósításával is. Mivel azzal több tapasztalatom volt, az Ansys HFSS programmal folytattam a szimulációt, amely egy 3D végelemes térszámító program.

3.1. Az antenna modellezése

Az antenna modelljét paraméteresen építettem fel a következő paraméterekkel:

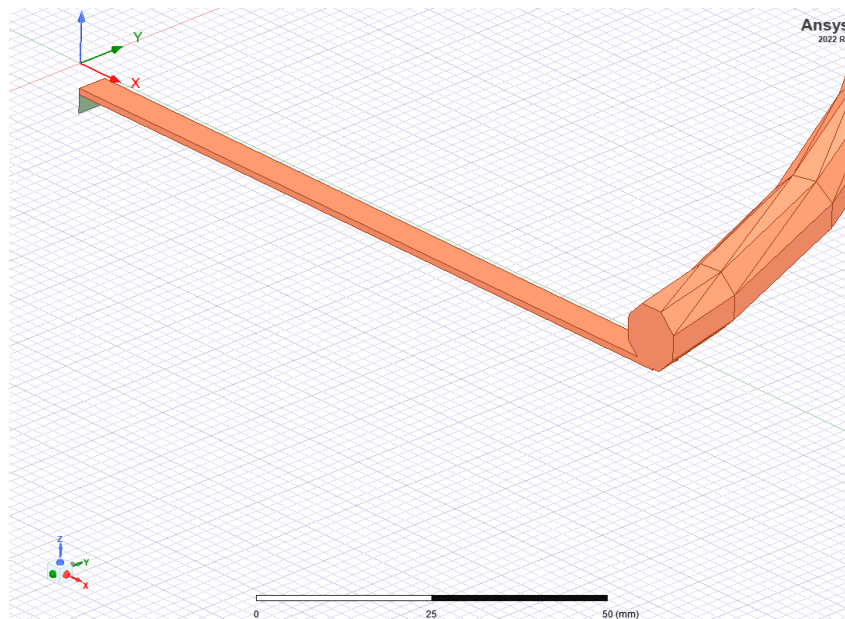
- *turns* menetszám (9)
- *helixRadius* hélixsugár (118,5 mm)
- *spacing* menetemelkedés (170 mm)
- *reflectorSize* reflektor méret (oldalhossz vagy átmérő, 600 mm)
- *wireDiameter* a sugárzó elem átmérője (10 mm)
- *feed_gap* a reflektor és az illesztőtag közötti légrés mérete (3 mm)

Az antenna modellezéséhez a „CreateUserDefinedPart” modellt használtam, ahol a „SegmentedHelix/PolygonHelix.dll”-t választottam. Nyolcszögletű vezető-keresztmetszetet és menetenkénti 32 szegmenst állítottam be. A sugárzó elem anyagának rezet állítottam be, mivel én is rézcsőből tervezem megépíteni az antennát.

A reflektort egy 1 mm vastag lemezként modelleztem.

A betáplálást egy 5 mm széles, 1 mm vastag, *helixRadius*, azaz 118,5 mm hosszú, a reflektortól *feed_gap*, azaz 3 mm távolságra elhelyezett rézcsíkkal oldottam meg, amely a sugárzó elem aljához csatlakozik. A csík megtáplált vége nem pont középen helyezkedik el. A megtáplálást egy áramsíkkal mint lumped porttal implementáltam. A megtáplálás a 3.1 képen látható.

Bár [3] 6. ábráján úgy tűnik, mintha a hélix első menete el lenne laposítva, a 4. ábrán látható fúrési segédlet alapján kiszámolható, hogy ennek menetemelkedése megegyezik a többi menetével.



3.1. ábra. Az első betáplálás - a lumped port áramsíkja majdnem pontosan a reflektor közepén helyezkedik el

A HFSS modell terminal network típusú. Hozzáadtam egy 2 m sugarú gömböt mint sugárzási peremfeltételt.

A teljes modell (a sugárzási perem nélkül) a 3.2 ábrán látható. Ezen modell nem tartalmazza a boom-ot vagy a távtartókat.

3.2. Az eredeti modell viselkedése

Az antenna logaritmikus léptelű iránydiagramja a 3.3 ábrán látható. A főnyaláb irányában a nyereség kb. 13,3 dBi, a fél teljesítményhez tartozó nyalábszög kb. 34° . Ugyanezen antennára 2.24 $32,4^\circ$ -t jósol, így ez megfelel a várt értéknek. A nyereség valamivel alacsonyabb, mint a közelítő képlet által becsült 14,9 dBi, de megfelel a [3]-féle értéknek. A melléknyaláb irányában kb. 12,5 dB az irányhatás, míg az előre-hátra viszony 15,7 dB.

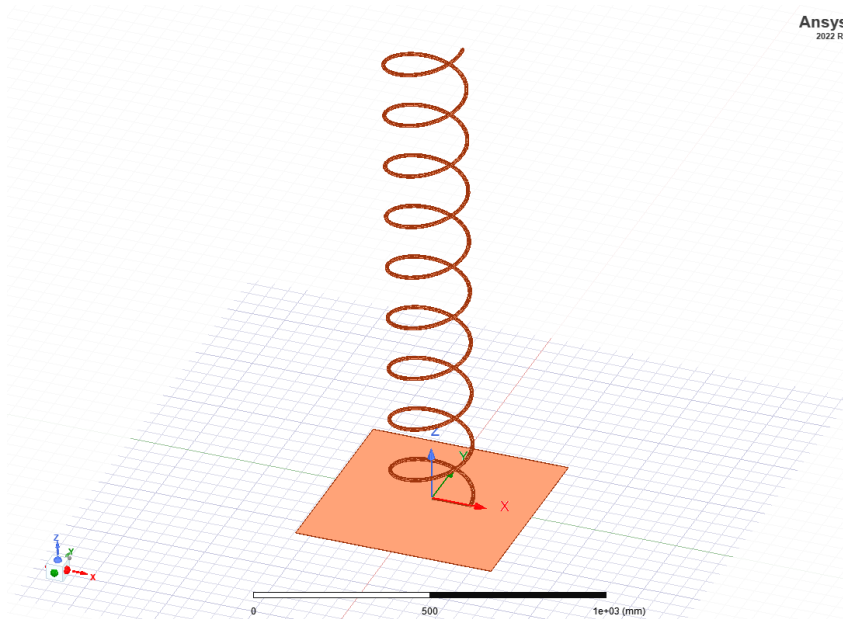
A reflexió a 3.4 és a 3.5 ábrákon látható. A bemeneti reflexió a teljes 70 cm-es amatőrsávban -30 dB vagy kisebb, amely 1,065-ös maximális VSWR-nek felel meg a sávban. Egy valós realizáció esetében ezen paramétereknél valamivel rosszabb, de még mindig jó értékek várhatóak.

A nyereség-frekvencia görbe a 3.6 ábrán látható. A teljes sávban eléri a 13 dBi-s nyereséget. A 3.4 és a 3.6 ábrákból látható, hogy az antenna nagyon széles sávban működik.

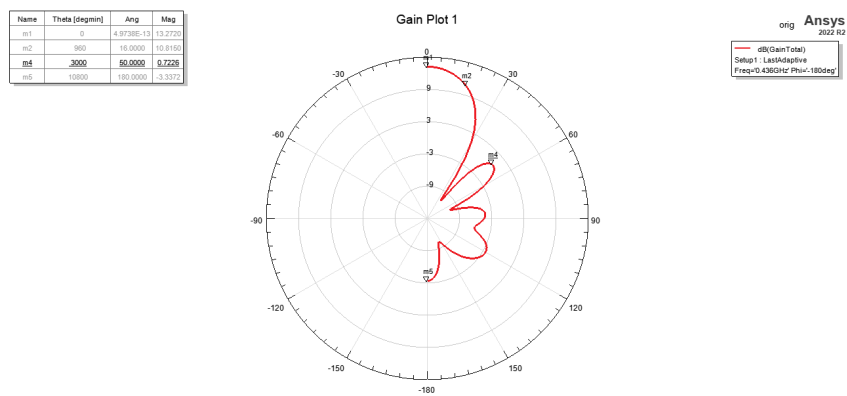
Elmondható, hogy ha a megvalósított antenna csak fele ilyen jól teljesít, akkor is nagyon jó paraméterekkel rendelkezik.

3.3. A boom modellezése és a betáplálás változtatása

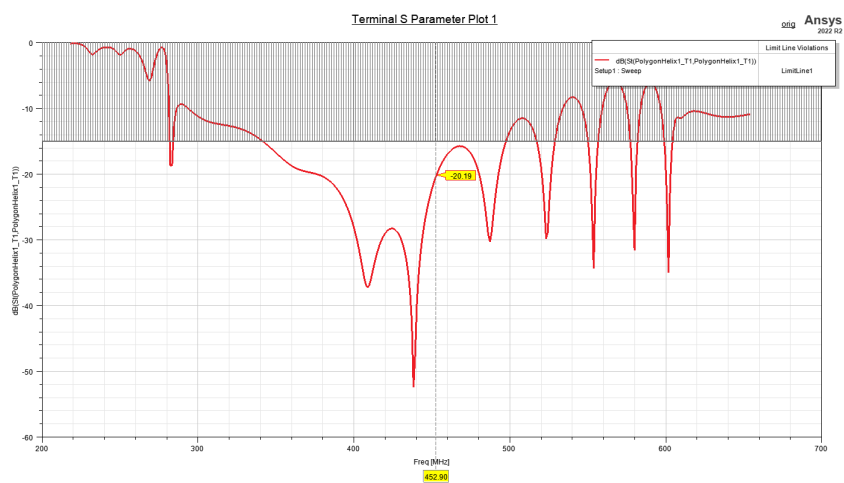
Az előző modellben a betáplálás majdnem pontosan a reflektor középpontján történt. A távtartó boom miatt ez nem működőképes, így át kellett tervezni. A rézhuzal rövidítéssel kintebb mozgattam a betáplálást 20 mm-el (3.8 ábra), de ez elrontotta az illesztést, nagyobb reflexióhoz vezetett. A boom behelyezése ezek után nem módosította az antenna paramétereit, de az illesztést újra kellett tervezni. A rövidített illesztőtag hatására az



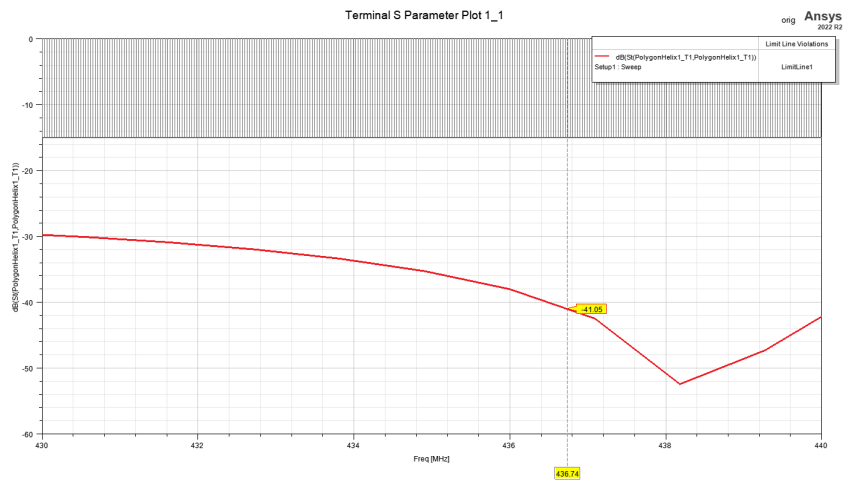
3.2. ábra. Az antenna modellje



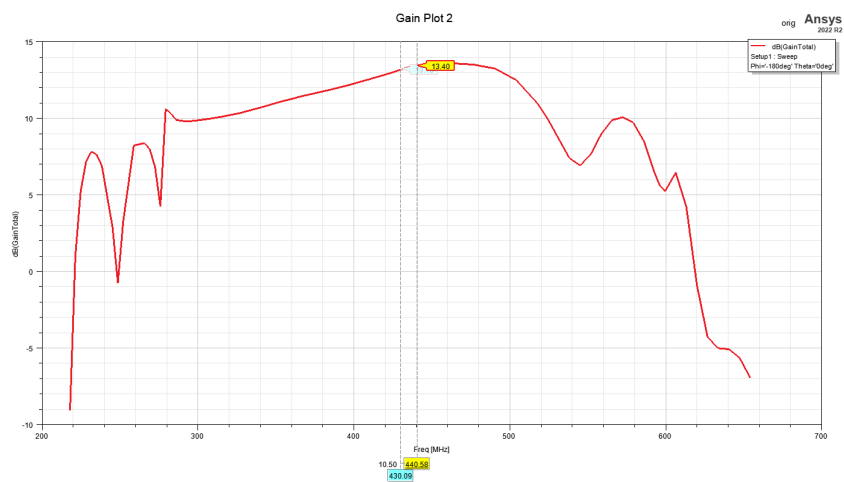
3.3. ábra. A modellezett antenna iránykarakterisztikája



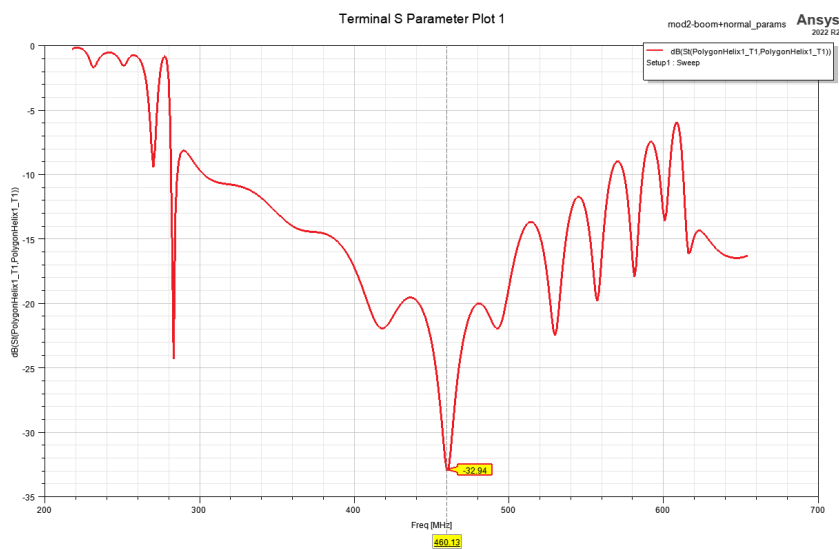
3.4. ábra. Az antenna bemeneti reflexiója



3.5. ábra. A bemeneti reflexió az amatőrsávban



3.6. ábra. Az antennanyereség a frekvencia függvényében



3.7. ábra. A módosított feed és az eredő reflexió

SWR minimumhoz tartozó frekvencia 460 MHz-re módosult (3.7 ábra).

3.4. A változás kompenzálása a hélix átalakításával

Az eltolódás kompenzálására, bár azt az illesztőtag megváltozása okozta, először a hélix módosításával próbálkoztam. Megpróbálkoztam a hélix átmérőjének növelésével 237 mm-ről 250 mm-re. Ez csökkentette a nyereséget (3.9 ábra) és növelte a reflexiót (3.10).

Megpróbálkoztam az illesztőtag szélességének változtatásával is. Az eredeti szélessége 5 mm, a változót 2,5 mm–7,5 mm között változtattam 5 lépésben. A 3.11 ábrán látható, hogy ilyen módon sajnos csak tovább rontani tudtam a problémát. Ezen variációk hatására a nyereség nem változott.

Szintén megpróbálkoztam a betáplálás és a reflektor közötti légrés méretének változtatásával a nominális 3 mm-ről, 2 mm–10 mm között 5 lépésben. Az eredmény a 3.12 ábrán látható - ismét nem sikerült javítani a helyzetet. Ugyanekkor a nyereség továbbra is közel változatlan maradt.

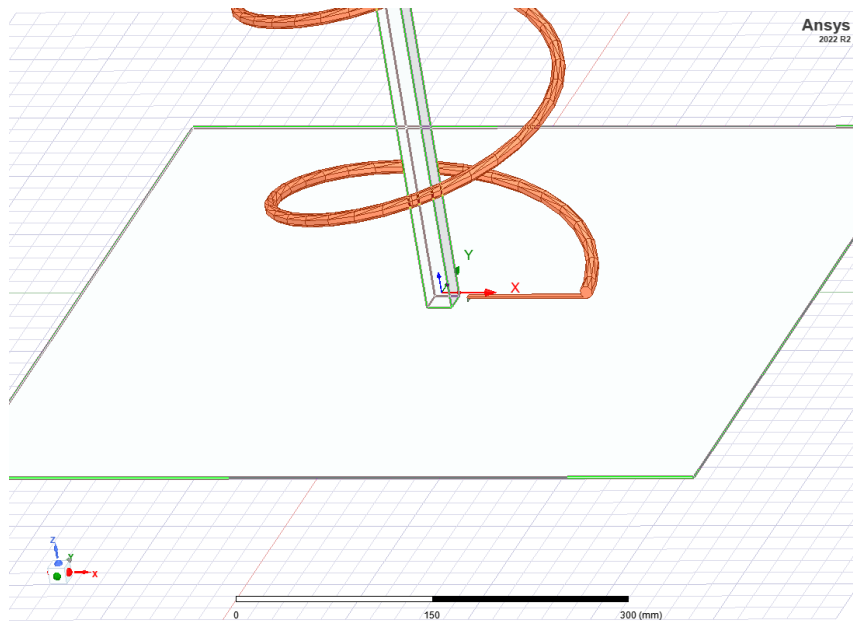
Jobb eredményt értem el a hélix menetemelkedésének variálásával. Itt több variációt is kipróbáltam 150 mm–200 mm között, amelyek közül a legjobb eredményt a 150 mm-es menetemelkedés adta, amely mellett gyakorlatilag visszakaptam a kezdőállapotot a reflexió görbén (3.15 ábra). A nyereség minimálisan változott (3.13 ábra), az iránykarakteristikán az előre-hátra viszony javult (3.14 ábra).

A változtatás után a hélix emelkedési szöge $11,4^\circ$, amely kicsit alacsonyabb a megszokott értékeknél.

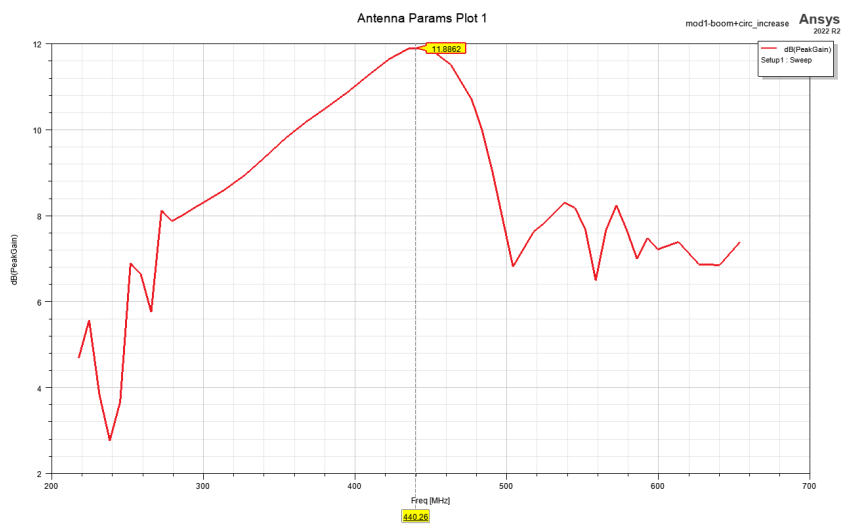
3.5. Egyéb paraméterek hatása

Megvizsgáltam a hélixet alkotó vezető átmérőjének hatását is. Az átmérőt 4 mm–12 mm között 6 lépésben változtattam. Ezen szimuláció során a hélix egyéb paraméterei a kezdeti állapotot tükrözték, a betáplálás viszont a boomot tartalmazó volt.

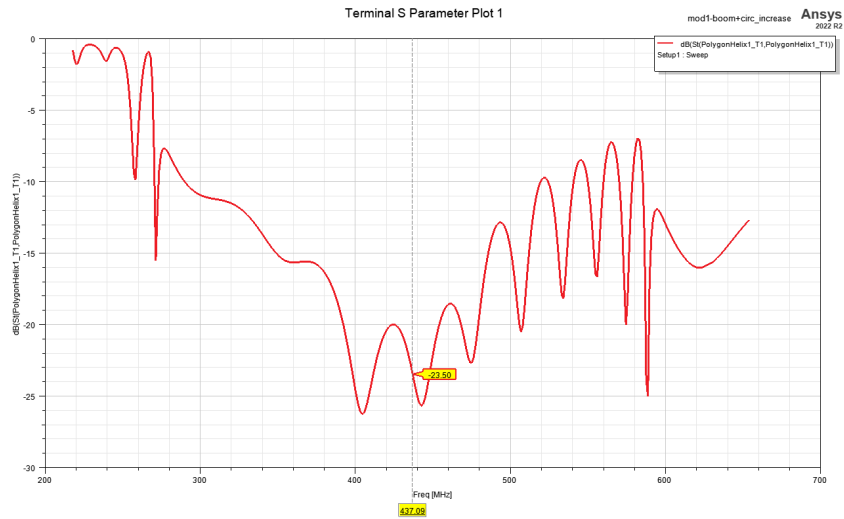
A nagyobb átmérőhöz valamivel nagyobb nyereség (3.16 ábra) és kisebb átlagos reflexió (3.17 ábra) tartozott, de az elérhető javulás nem jelentős. A szimuláció alapján megfelelő



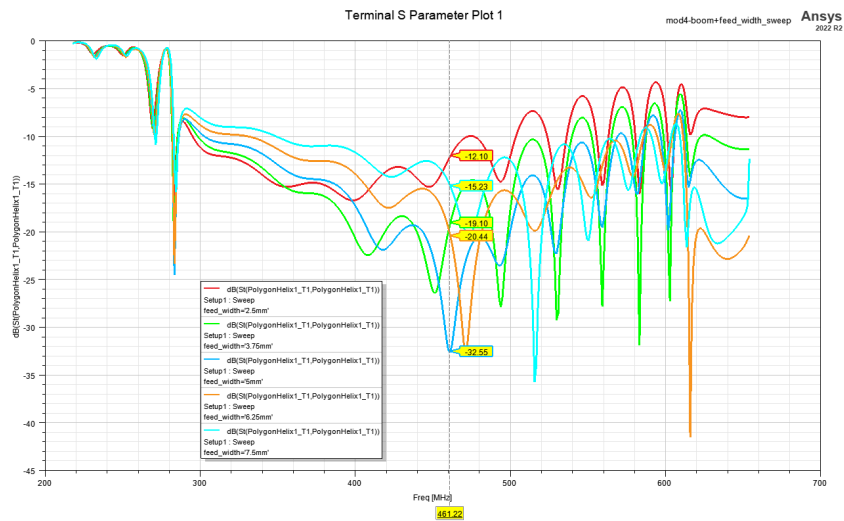
3.8. ábra. A boom és a módosított betáplálás



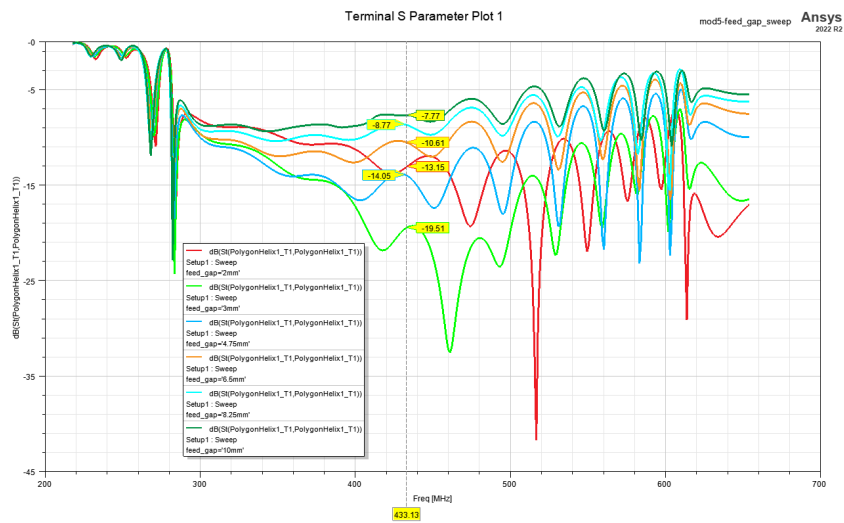
3.9. ábra. A nyereség az átmérő növelése után



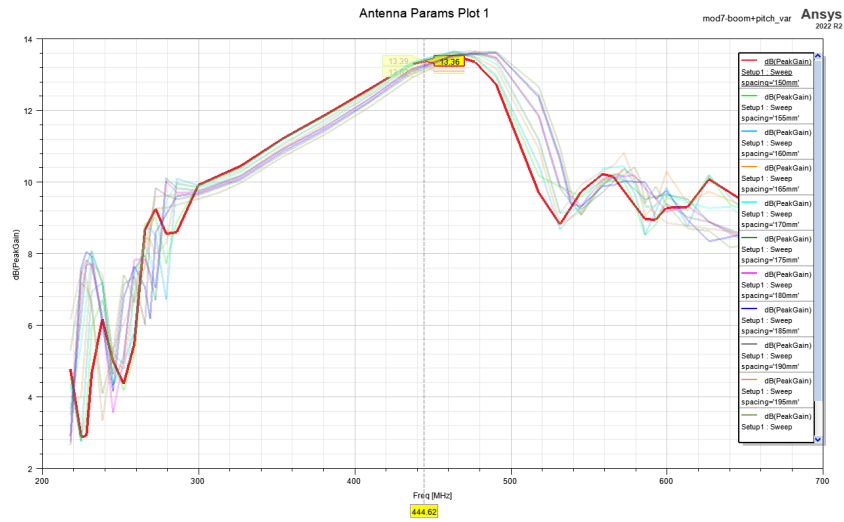
3.10. ábra. A bemeneti reflexió megnövelt átmérő esetén



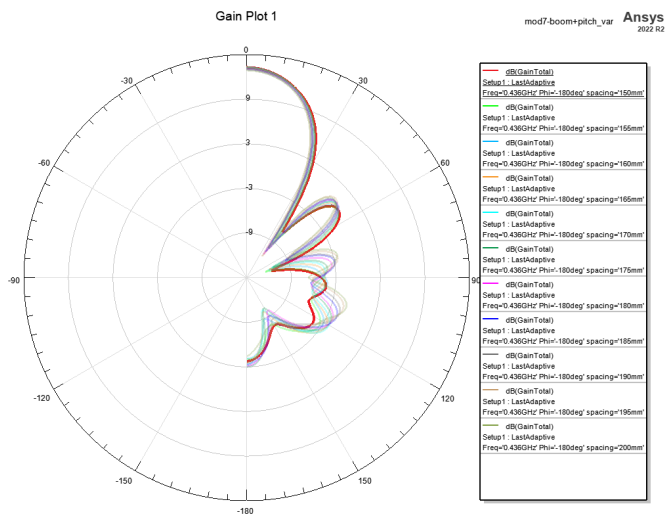
3.11. ábra. A bemeneti reflexió a betáplálás szélességének függvényében



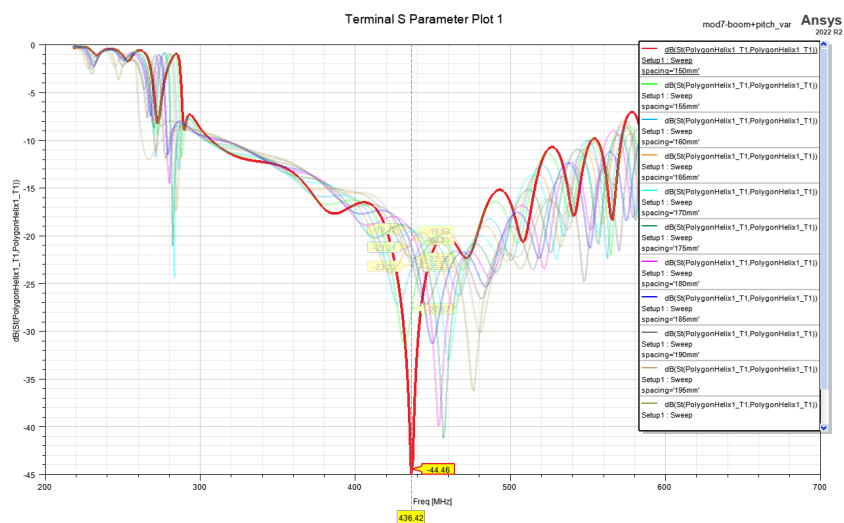
3.12. ábra. A bemeneti reflexió a betáplálás és reflektor közötti légrés méretének függvényében



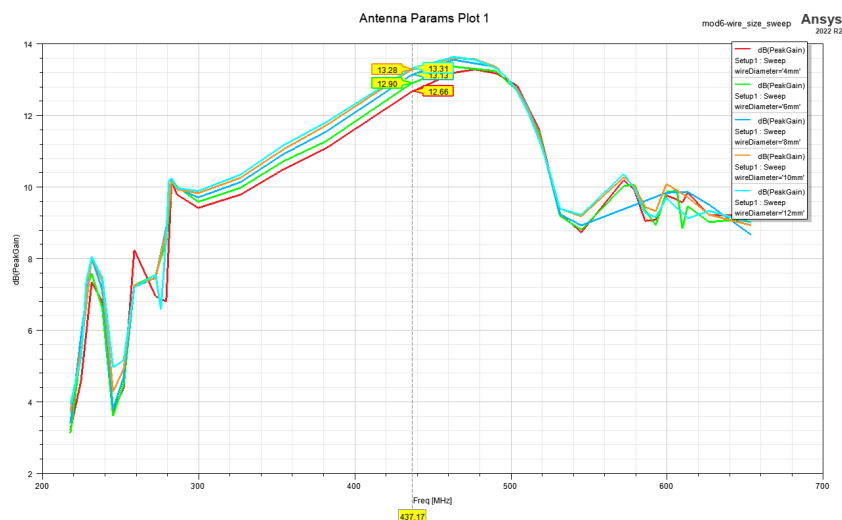
3.13. ábra. Antennanyereség a menetemelkedés függvényében



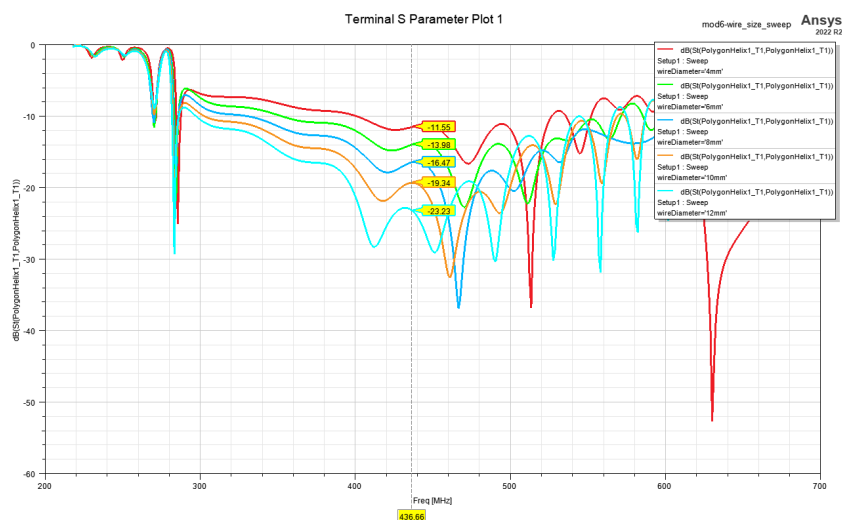
3.14. ábra. Iránykarakterisztika a menetemelkedés függvényében



3.15. ábra. Bemeneti reflexió a menetemelkedés függvényében



3.16. ábra. Antennanyereség a vezető átmérőjének függvényében



3.17. ábra. Bemeneti reflexió a vezető átmérőjének függvényében

antenna készíthető valamivel vékonyabb, pl. 8 mm-es külső átmérőjű rézcsőből is, amely olcsóbb és könnyebb.

Megvizsgáltam a reflektor hatását is. Az alakját kör alakúra cseréltem, és a méretét 400 mm–800 mm között változtattam 12 lépésben. A hélix menetemelkedése ekkor 150 mm volt.

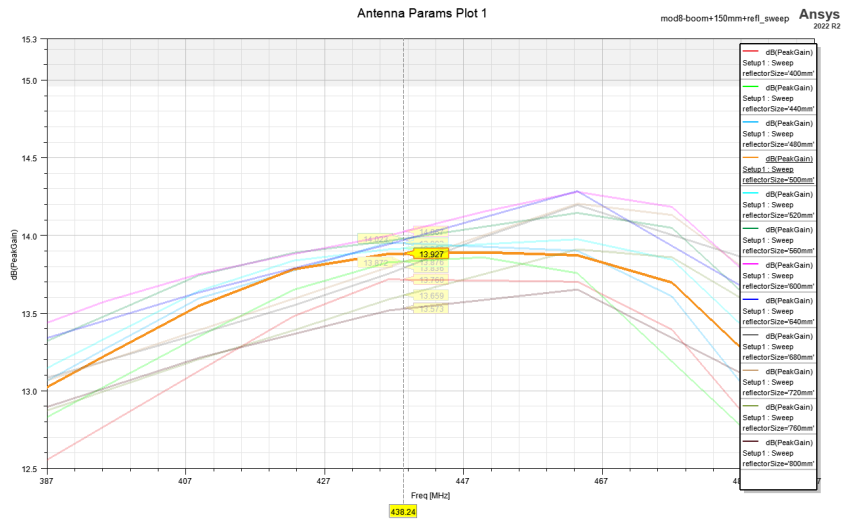
A nyereség maximuma az eredeti 600 mm-es reflektornál adódott, de az 500 mm-es reflektor esetében elhanyagolható eltérés volt tapasztalható (3.18 ábra). Mivel a legtöbb anyag fél vagy egy méteres darabokban kapható, célszerűbb lehet ilyen reflektort építeni.

A reflektor méretének növelésével a bemeneti reflexió is nő (3.20 ábra).

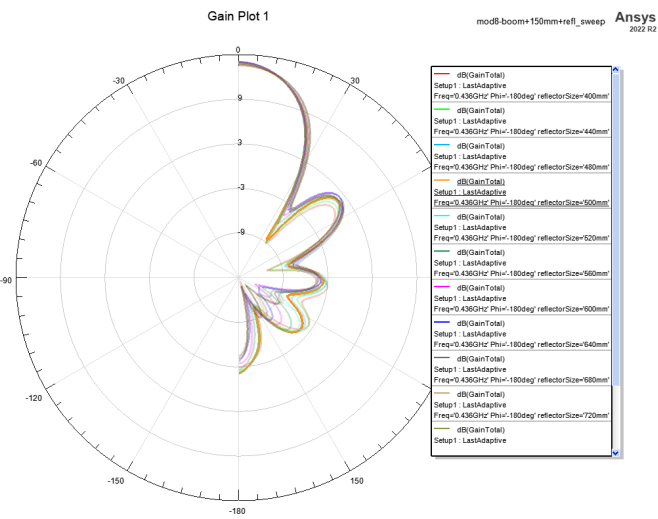
A reflektor méretének növelésével csökken a melléknyalábszint és javul az előre-hátra viszony (3.19 ábra).

3.6. Az illesztőtág elemzése

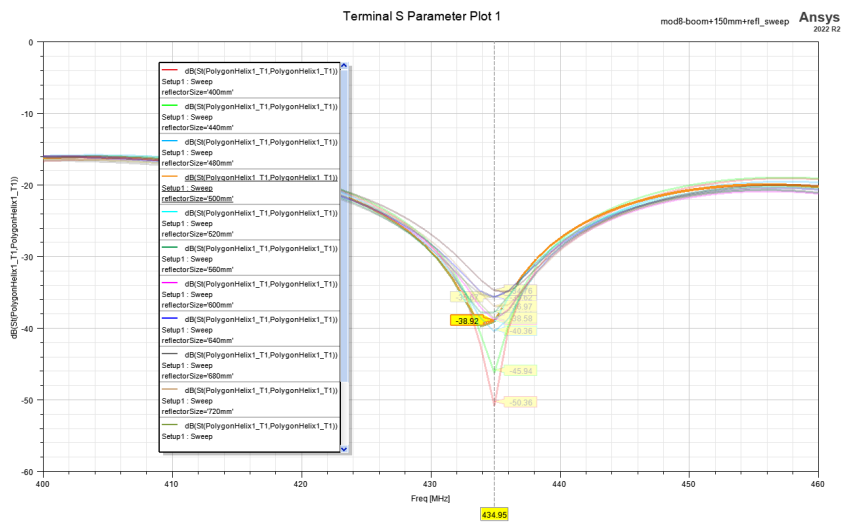
Mivel nem hagyott nyugodni, hogy a hélix módosításával kissé szokatlan geometriájú hélixet kaptam, úgy döntöttem, hogy alaposabban megvizsgálom az illesztőtág működését,



3.18. ábra. A nyereség változása a reflektor méretének hatására



3.19. ábra. Az iránykarakterisztika a reflektor méretének függvényében



3.20. ábra. A bemeneti reflexió a reflektor méretének függvényében

és így megpróbálom azt újra behangolni változatlan hélixgeometria mellett.

Az illesztőtag működése elsöre kicsit furcsának tűnt. A betápláló rézcsík mint tápvonal tudja transzformálni a talpponti impedanciát, de hossza mindenképpen rövidebb mint $\lambda/4$, tehát nem ilyen illesztőtag. Az eredeti 100 mm-es hossz a névleges frekvencián 0,145, míg a saját 118,5 mm-es illesztőtag 0,172 hullámhossznak felel meg.

Az antenna hangolására [3] az illesztőtag és reflektor közötti légrés variálását javasolja, 3 mm körüli optimummal.

Az illesztő tápvonaldarab impedanciáját mikroszalagvonallal közelítettem. Az eredeti tag szélessége 7 mm, vastagsága 16SWG, azaz 1,63 mm volt, és a reflektortól 3 mm-re volt vezetve 100 mm hosszán. Az ANSYS HFSS 3D Layout programba beépített impedancia-számítóval erre 72,4 Ω -os impedanciát számoltam.

Az általam szimulált illesztőtag szélessége 5 mm, vastagsága 1 mm, hossza 113,5 mm (hélixsugár - vezetéksugár) és a légrés 3 mm. Ezen adatokra 85 Ω -os hullámimpedanciát kaptam.

Megjegyzem, hogy mivel a megépítéshez nem találtam hasonló rézszalagot, az illesztőtagot egy 4 mm-es külső átmérőjű sárgaréz csővel tervezem megvalósítani, amely korábbról maradt megfelelő mennyiségben. A vezetősík fölötti kör keresztmetszetű vezető mint tápvonal hullámimpedanciájára van analitikus képlet, melyet én [8]-ben találtam meg, amely hivatkozza [1]-t és a levezetést pedig [7]-ből.

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_{10} \left(\frac{4h}{d} \right) \cdot 138 \Omega \quad (3.1)$$

Itt d a vezeték (cső) külső átmérője, h pedig középpontjának távolsága a síktól. Ezen összefüggés szerint a távolságot 3 mm–5 mm között változtatva 70 Ω –100 Ω -os hullámimpedanciát tudok beállítani.

Fontos megemlíteni, hogy bár a szimulációban az illesztőtag távolsága a reflektortól állandó annak hossza mentén, a valós kivitelben ez valószínűleg nem így lesz, mivel a távolság csak a tag egyik végén variálható, a koaxiális csatlakozóra rögzített vége fix. Ilyen módon a tápvonal impedanciája annak hossza mentén nem állandó.

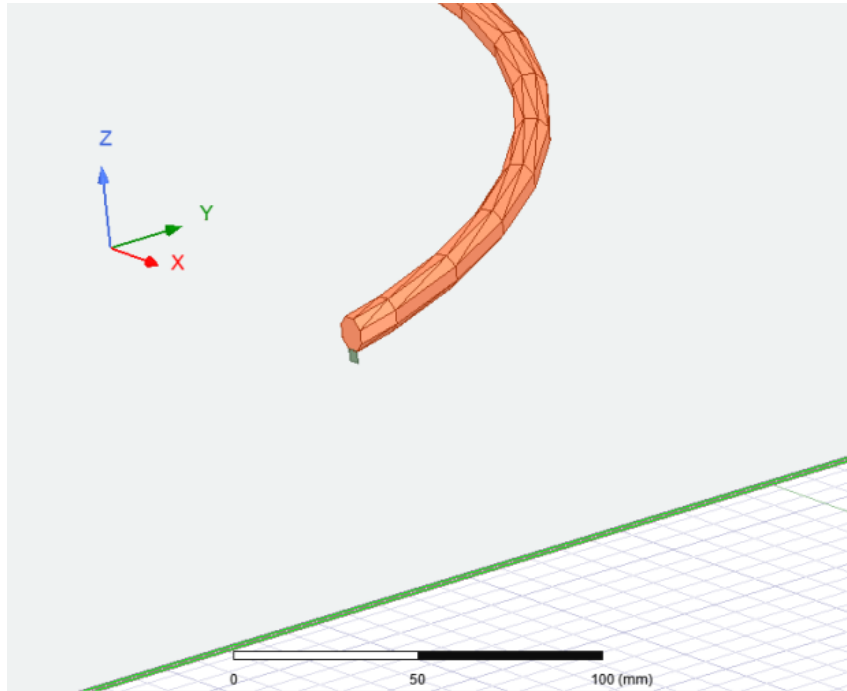
Elvégeztem az eredeti paraméterekkel rendelkező hélix szimulációját az illesztőtag nélkül is, a vezető végét direktben áramsíkkal táplálva (3.21 ábra). A talpponti impedancia és reflexió 400 MHz–500 MHz között a 3.23 és a 3.22 ábrákon látható

Megfigyelhető, hogy a hélix talpponti impedanciája nem követi sem 2.22, sem 2.23-t. 2.22 axiális betáplálás esetén érvényes. [4] szerint az impedancia tisztán valós, de ezt 2.22 kontextusában mondja. 2.23-t Kraus [2]-ből hivatkozza be, amely szintén kapacitív impedanciát tapasztalt, bár nem ilyen mértékűt.

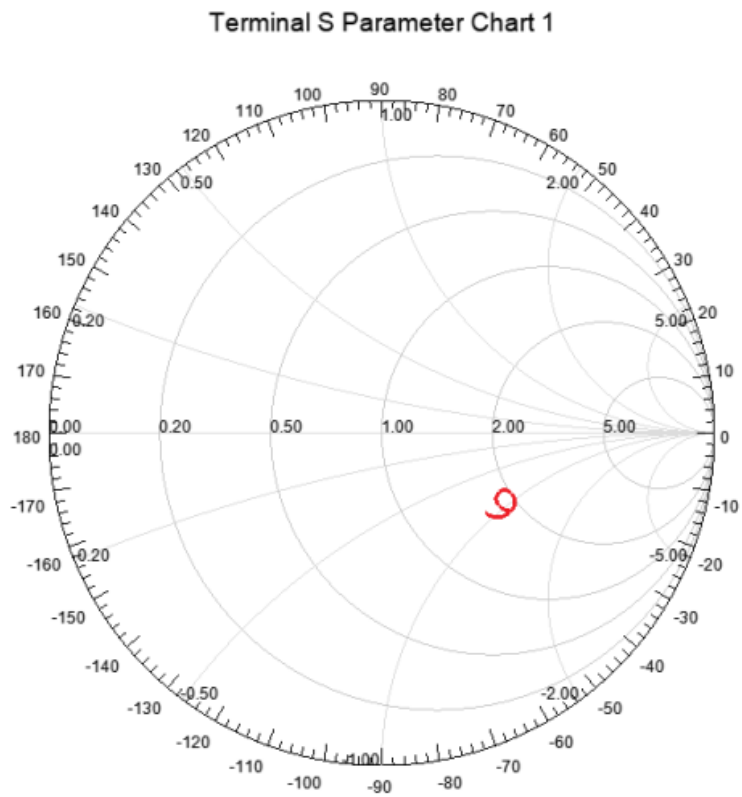
Próbaképpen beírtam a kapott impedanciát a [9] online kalkulátorba, és hozzáadva a 113,5 mm-es 85 Ω -os illesztőtagot majdnem tökéletes illesztést kaptam. Ez meggyőzött arról, hogy [3] antennája is hasonlóan kapacitív volt, és ezért volt elég a rövidebb illesztőtag.

A szimulátorból exportáltam az eredeti, illesztőtagot tartalmazó modell S-paramétereit, továbbá a kerület mentén megtáplált antenna Z-paramétereit. Az illesztőtagot ideális tápvonalként számolva Matlabban összehasonlítottam a kettőt. 113,5 mm hosszú 85 Ω -os tápvonal esetén az eredmény a 3.24 és a 3.25 ábrákon látható. A két görbe nem egyezik meg, de jellegre hasonló. Veszteséges, vagy változó impedanciás tápvonal szimulációjával valószínűleg jobban egyezne a két görbe.

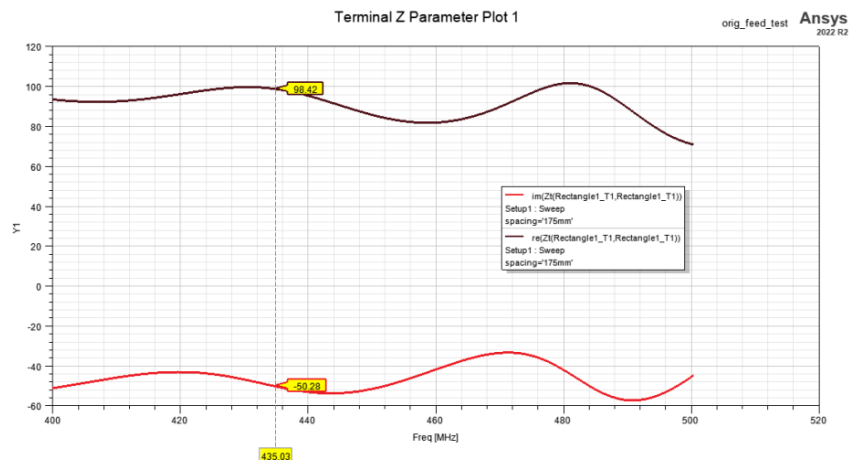
Az eddigiek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy [3] antennája hasonlóan kapacitív kerületmenti impedanciával rendelkezik, ezért elég a negyedhullámhossznál rövidebb illesztőtag. A saját szimulációim szerint a megfelelő illesztés geometriája hasonló



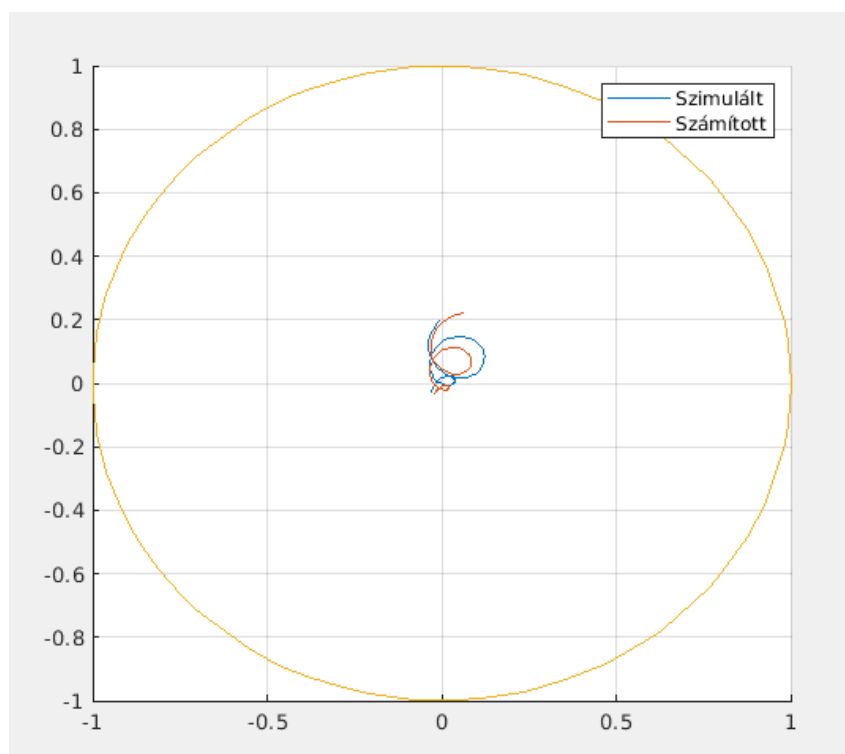
3.21. ábra. A hélix táplálása illesztőttag nélkül



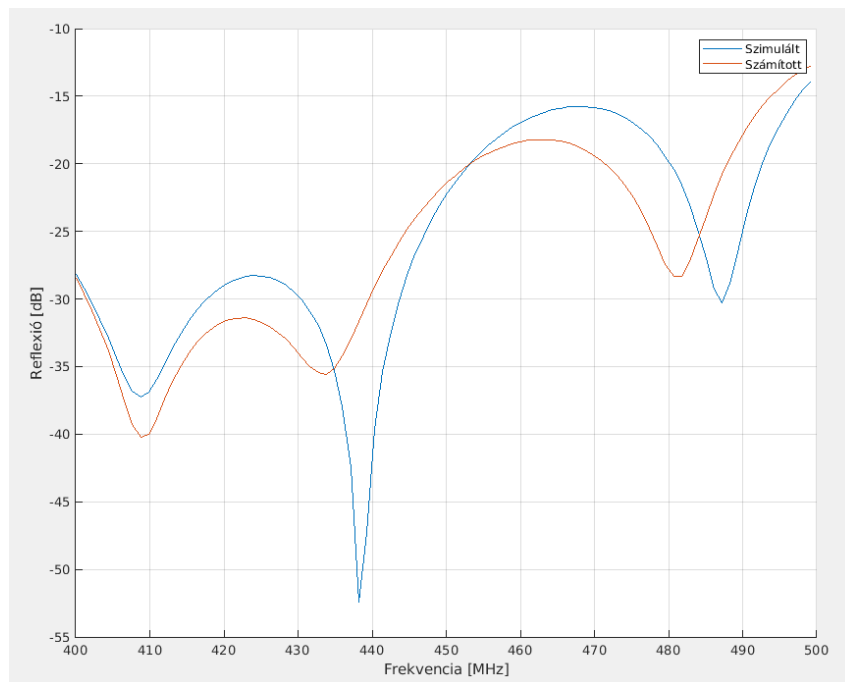
3.22. ábra. A hélix reflexiója kerület menti táplálás esetén



3.23. ábra. A talpponti impedancia illesztőtag nélkül



3.24. ábra. A szimulált és számított reflexiós tényező



3.25. ábra. A szimulált és számított reflexiós tényező

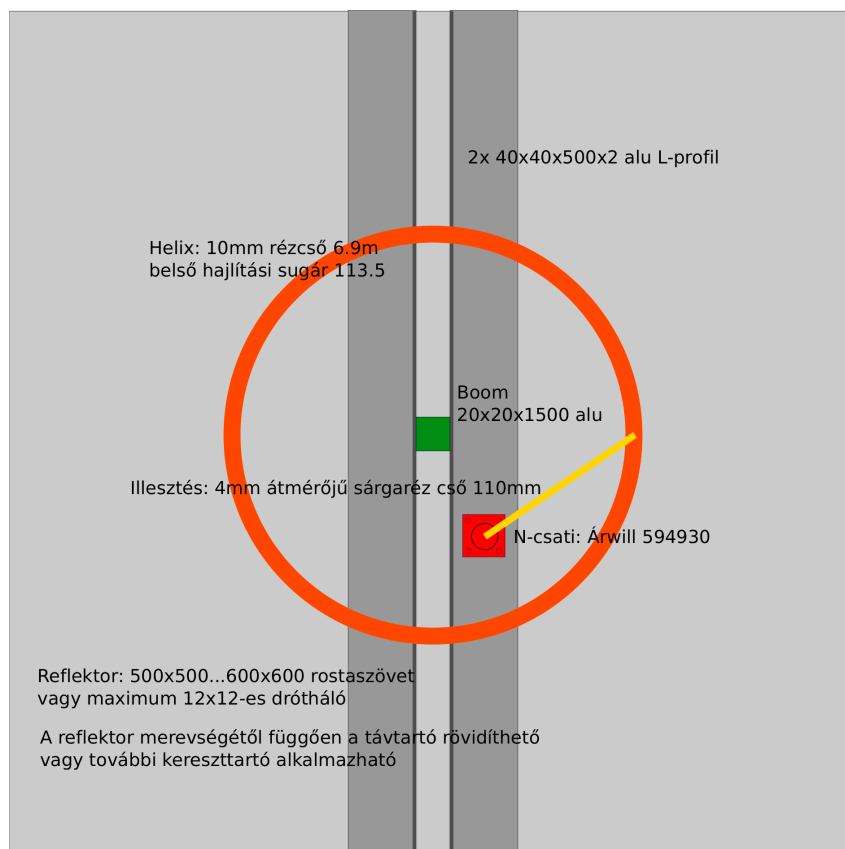
az ott használthoz, de valamivel hosszabb tag szükséges. A különbséget valószínűleg az adja, hogy nem számoltam az illesztő tápvonalszakasz hossz mentén változó hullámimpedanciájával, illetve veszteségével.

A hélixet ezért az eredeti paramétereknek megfelelően tervezem, és a betáplálást a középponttól 30 mm-el kintebb és 60 mm-el „lentebb” tolva helyezem el, így a betáplálás összhossza 107 mm. Amennyiben ezzel nem érhető el jó illesztés, a betáplálás áthelyezhető.

3.7. Végső antennaterv

A végső variációban az eredetihez képest a következő módosításokat hajtottam végre:

- a betáplálást a középvonaltól 30 mm-el kintebb és 60 mm-el „lentebb” mozgattam
- az antenna közepére egy 20 mm-es oldalhosszú négyzet keresztmetszerű alumínium boomot helyeztem
- a reflektor méretét 500 mm-re csökkentettem



3.26. ábra. Az antenna felülnézeti terve

A szimulátorban megtervezett antennának elkészítettem a sematikus rajzát, ami alapján alapanyaglistát állítottam össze. A 3.26 a felülnézeti, míg a ?? az oldalnézeti terv.

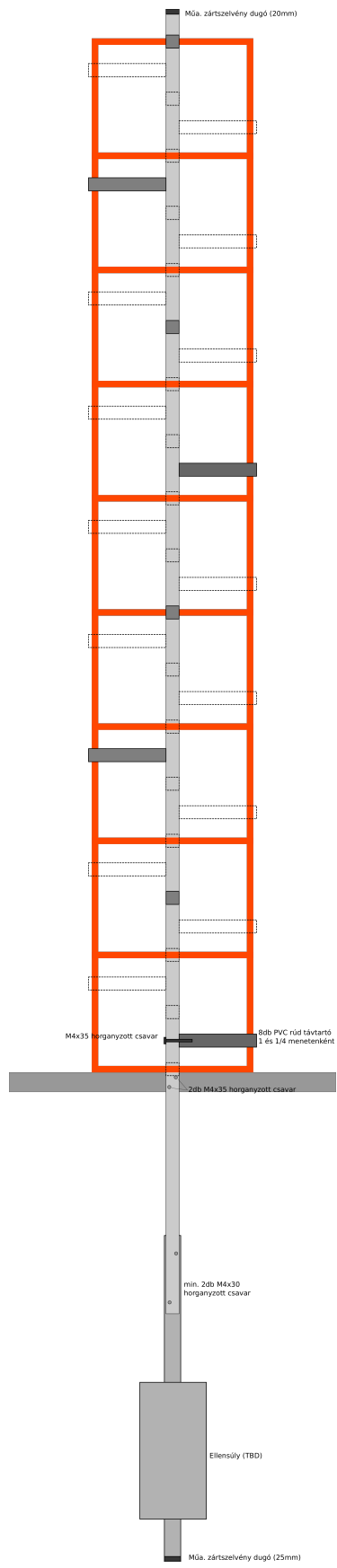
Az antenna 2m hosszú 20x20-as alu zártszelvény mint boom köré épül. A zártszelvény hélix felőli végére dugót terveztem, reflektor felőli vége pedig egy egyel nagyobb, 25x25-ös zártszelvénybe illeszkedik, amelynél fogva az antennára ellensúly rögzíthető, illetve az antenna rögzíthető a telepítési helyére.

A reflektort a szélterhelés csökkentésének érdekében dróthálóból („csirkeháló” vagy rostaszövet) tervezem készíteni, melynek szemméretét 0,5 cm–1,5 cm körülre határoztam meg. A túl ritka szövésű háló nem közelíti jól a síklemest ezért nem lesz jó reflektor, míg a túl sűrű szövésű nagy szélterhelést jelent. Kaptam egy felajánlást rostaszövetre, de még nem kaptam ezt meg, így viszonylag nehezen tudok vele tervezni. A reflektor anyaga és mérete alapján lehetséges, hogy módosítani kell annak tartószerkezetét, plusz merevítést beilleszteni, ha a reflektort feszíteni kell vagy akár csökkenti a távtartók méretét, ha a reflektor anyaga megtartja magát.

A reflektor merevítésére és rögzítésére két alumínium L-profilra terveztem a boomra csavarozni. Az egyik L-profilra előzetesen lyukat fúrva ebbe illeszkedik az N csatlakozó, amelyen keresztül az antennát tápláljuk. A reflektort a merevítéshez rövid csavarokkal tervezem rögzíteni.

A hélixet klímásboltban kapható 10mm átmérőjű lágyított rézcsőből tervezem megvalósítani. Ez az anyag viszonylag könnyen hajlítható, továbbá tekerceses kiszerezésben kapható, így könnyebb hélix alakúra hajlítani.

A hélix és a boom közé PVC rúdból készült távtartókat terveztem, melyek megegyeznek a [3] féle távtartókkal (cikk 5. ábrája). A távtartókat 1 és 1/4 menetenként tervezem rögzíteni (összesen így 8 db-ot) átmenő csavarral. Ehhez a távtartókba menetet kell majd



3.27. ábra. Az antenna oldalnézeti terve

vágni. Mivel nincs tapasztalatom a műanyag ilyen megmunkálásában, a műanyagrúdból nagyobb mennyiségű tartalékkal számoltam.

Az illesztőtagot modellezőboltban vásárolt 4 mm külső átmérőjű sárgaréz csőből terveztem, amely kb. 4 mm-re van vezetve a reflektortól. Az antenna hangolása az illesztőtag, illetve a hélix első negyed menetének deformálásával valósítható meg.

Az összeállításhoz [3] utasításait tervezem kis módosítással követni, azaz

- alanyagok beszerzése
- reflektor anyaga alapján a merevítés megtervezése és összeállítása
- távtartók elkészítése
- hélix hajlítása (hajlító sablon alapján)
- hélix és távtartók felszerelése a boomra
- reflektor rögzítése
- illesztőtag rögzítése
- hangolás
- opcionális: időjárás-állóság érdekében tisztítás és lakkozás
- rögzítés a telepítési helyre

3.8. Anyaglista

Listát készítettem az antenna építéséhez szükséges anyagokról, illetve azok általam választott beszerzési helyéről

- Klímásbolt
 - 10 mm átmérőjű lágyított vörösréz cső, 10 m-es tekercs (6,9 m szükséges)
- Vas-Színesfém KFT-től
 - Alu zártszelvény 20x20, 2 m
 - Alu zártszelvény 25x25, 1 m
 - szürke PVC rúd 15mm átmérő 1,5 m
 - Zártszelvénydugó 20mm 2db
 - Zártszelvénydugó 25mm 2db
 - Alu L profil 40x20x2 1 m
- csavarok
 - M4x35 horganyzott 30 db
 - M4x10 horganyzott 20 db (reflektor rögzítéséhez)
- Árwill
 - N csatlakozó cikkszám 594930

- Egyéb
 - Rostasövet vagy fémháló
 - Ellensúly - TBD
 - rögzítőbilincs
 - N csatlakozós bekötőkábel

4. fejezet

Összefoglalás

A félévben megismerkedtem az iránysugárzó hélixantennák elméleti és gyakorlati tulajdonságaival, működésük hátterével, fontosabb konstrukciós kérdéseivel.

Egy korábbi antenna realizáció [3] alapján szimulációkat végeztem HFSS segítségével, amellyel validáltam az antennát és optimalizáltam az illesztőtagot.

Megterveztem a hélixantenna mechanikai felépítését, összeállítottam a szükséges anyagok listáját.

A nyári szünet során tervezem megépíteni az antennát és beilleszteni azt a HA5KFU rádióamatőr klub műholdvevő állomásába.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Lénárt Ferencnek és Reichardt Andrásnak a félévben nyújtott segítségükért.

Irodalom

- [1] A. S. o. I. T. Howard W. Sands & Co. Inc. és T. Corporation, *Reference Data for Radio Engineers*, fifth. 1972, <https://www.worldradiohistory.com/BOOKSHELF-ARH/Technology/Technology-General/Reference-Data-for-Radio-Engineers-5th-ITT-1972.pdf>.
- [2] D. E. Baker, „Design of a broadband impedance matching section for peripherally fed helical antennas”, *Proceedings of the 1980 Antenna Applications Symposium*, 1980. szept., https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Baker-2/publication/335753334_Design_of_a_broadband_impedance_matching_section_for_peripherally_fed_helical_antennas/links/5d79383b4585151ee4af438f/Design-of-a-broadband-impedance-matching-section-for-peripherally-fed-helical-antennas.pdf.
- [3] J. M. B. G3RUH, „Helical antennas for 435MHz”, *ELECTRONICS & WIRELESS WORLD*, 43–46. old., 1985. jún., <https://keith-snook.info/wireless-world-articles/wireless-world-articles.html>.
- [4] J. D. Kraus, *Antennas for all applications*, second. McGraw Hill, 1988.
- [5] N. R. Dean Straw, K. Kurt Andress, W. L. B. Cebik, N. Rudy Severns és A. Frank Witt, *The ARRL antenna book*, nineteenth. ARRL, 2000.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna theory - analysis and design*, third. John Wiley & Sons, 2005.
- [7] 2013. cím: http://zakii.la.coocan.jp/tline_e/14_microstripline_z0.htm.
- [8] 2021. márc. cím: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/wire-over-ground-transmission-line>.
- [9] https://www.will-kelsey.com/smith_chart/.

Ábrák jegyzéke

3.1. Az első betáplálás - a lumped port áramsíkja majdnem pontosan a reflektor közepén helyezkedik el	14
3.2. Az antenna modellje	15
3.3. A modellezett antenna iránykarakterisztikája	15
3.4. Az antenna bemeneti reflexiója	15
3.5. A bemeneti reflexió az amatőrsávban	16
3.6. Az antennanyereség a frekvencia függvényében	16
3.7. A módosított feed és az eredő reflexió	17
3.8. A boom és a módosított betáplálás	18
3.9. A nyereség az átmérő növelése után	18
3.10. A bemeneti reflexió megnövelt átmérő esetén	19
3.11. A bemeneti reflexió a betáplálás szélességének függvényében	19
3.12. A bemeneti reflexió a betáplálás és reflektor közötti légrés méretének függvényében	19
3.13. Antennanyereség a menetemelkedés függvényében	20
3.14. Iránykarakterisztika a menetemelkedés függvényében	20
3.15. Bemeneti reflexió a menetemelkedés függvényében	20
3.16. Antennanyereség a vezető átmérőjének függvényében	21
3.17. Bemeneti reflexió a vezető átmérőjének függvényében	21
3.18. A nyereség változása a reflektor méretének hatására	22
3.19. Az iránykarakterisztika a reflektor méretének függvényében	22
3.20. A bemeneti reflexió a reflektor méretének függvényében	22
3.21. A hélix táplálása illesztőtag nélkül	24
3.22. A hélix reflexiója kerület menti táplálás esetén	24
3.23. A talpponti impedancia illesztőtag nélkül	25
3.24. A szimulált és számított reflexiós tényező	25
3.25. A szimulált és számított reflexiós tényező	26
3.26. Az antenna felülnézeti terve	27
3.27. Az antenna oldalnézeti terve	28

Táblázatok jegyzéke

2.1. A [3]-féle antenna fontosabb paramétere	12
--	----