

Nulla törésmutatójú metaanyag tervezése tölcsérantennák irányítottságának növeléséhez

Farkas Pál, Szabó Zsolt

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

1111 Budapest, Egry József utca 18. V. emelet

Absztrakt— A nulla törésmutatójú metaanyagok alkalmazhatók sík felületű lencsék létrehozására, melyekkel növelhető egy antenna elektromágneses mérete, illetve csökkenthető egy adott nyereséghez szükséges apertúra méret. Olyan FishNet típusú metaanyag lencsét tervezünk, amelyik a 5,2 GHz-en működik. Bemutatjuk a tölcsérantenna-lencse alkalmazásra megtervezett metaanyag tulajdonságait.

Kulcsszavak: metaanyag, nulla törésmutató, tölcsérantennák

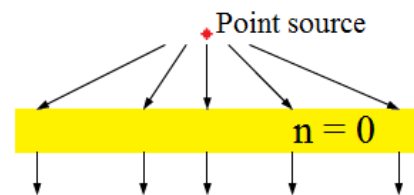
I. BEVEZETÉS

Az anyagok és az elektromágneses tér kölcsönhatása függ az anyag kémiai összetételétől, de ebben a tekintetben még inkább meghatározó a struktúráltság. Metaanyagoknak nevezzük az olyan hullámhossz alatti struktúrákat, melyek homogén anyagként viselkednek. Segítségükkel teljesen új, a természetes anyagok esetén szokatlan vagy nem létező elektromágneses tulajdonságok hozhatók létre. A gyártási technológia fejlődése lehetőséget ad az ilyen struktúrák létrehozására, akár az optikai tartományra is.

Az elmúlt tíz év során világszerte nagyon intenzív metaanyag alapú kutatás folyik a mikrohullámú frekvenciatartományban. Számos olyan metaanyag alapú eszközt demonstráltak, amelyeknek a tulajdonságai sokkal jobbak vagy a méretei lényegesen kisebbek a hagyományos mikrohullámú eszközöknél. A mikrohullámú tartományon használatos metaanyagokat alkalmazásuk szerint három fő csoportba lehet sorolni:

- hullámvezető komponensek kialakítására szolgáló metaanyagok, amelyekkel több sávú, speciális sávzélességű miniatürizált hullámvezetők, kisméretű szélessávú hullámcsatolók, kompakt rezonátorok, szűrők, egyenletes teljesítmény összegzők és osztók készíthetők[1][2],
- mikrohullámú refrakciót megvalósító metaanyagok, amelyekkel fókuszáló metaanyag rétegek, metaanyag prizmák, antireflexiós metaanyagok, szuper felbontású képalkotó rendszerek, transzformációs optikával tervezett elrejtő köpenyek[3] készíthetők,
- antennák és antennarendszerek kialakítására szolgáló metaanyagok, amelyekkel passzív vagy aktív, egyszávú vagy többsávú, egy vagy többdimenziós leaky-wave [4] vagy rezonáns antennák és visszaverők készíthetők.

A nulla törésmutatójú anyagok jellemzője, ahogy azt az 1. ábra is szemlélteti, hogy a belőlük kilépő hullámok merőlegesek az anyag felületére [5]. Ez a tulajdonság Descartes törvénnyel is alátámasztható. Ezt a jelenséget kihasználva mikrohullámon olyan sík lencsék készíthetők, melyekkel növelhető az antennák irányítottsága. Több, manapság publikált cikk is foglalkozik hasonló lencsékkel [6], [7] melyekben patch-, illetve tölcsérantennákhoz tervezett lencséket vizsgálnak.



1. ábra: Nulla törésmutatójú anyag

Ezen cikk témája egy C sávú, nulla törésmutatójú metaanyag lencse tervezése egy optimális (piramidális) tölcsérantennához. Részletezzük az effektív anyagparaméterek kiszámításának módját, majd egy analitikus modellt ismertetünk, amellyel a vizsgált struktúrák elektromágneses jellemzői meghatározhatók. Bemutatjuk a vizsgált struktúrákat, és meghatározzuk a hozzájuk rendelhető effektív anyagparamétereket.

II. A C- SÁVBAN MŰKÖDŐ ANTENNA PARAMÉTEREI

Az antenna nyeresége 19 dBi, a tölcsér bennfoglaló méretei (apertúra méretek, magasság): 254mm, 199 mm, 277mm. A tölcsérantennák nyeresége méretük növelésével elviekben akármeddig növelhető, azonban a nyereség növekedése mellett az egy dB nyereségnövekményhez szükséges hossznövekmény is egyre nagyobb lesz [9]. Például a jelenlegivel megegyező üzemi frekvencián működő 20, illetve 21 dB-es optimális tölcsérek méretei rendre: 284 mm, 223 mm, 355 mm illetve 318 mm, 251 mm, 455 mm. Tehát nagy előírt nyereség esetén érdemes alternatív módszereket alkalmazni az irányítottság növelése érdekében. A dielektrikum lencsékhez képest a nulla törésmutatójú lencse előnye, hogy sík felületű, és C sávban a nyomtatott huzalozású lemezek gyártási technológiájával legyártható.

Az antennát tápláló csőtápvonal geometriája miatt az antennában csak az alapmódus van jelen. A tölcsérben

közelítőleg gömbhullámok terjednek. Ezért a térerősség eloszlás az apertúrán vertikálisan polarizált, abszolút értékben az alapmódusnak megfelelően súlyozott. Ezért az alkalmazott metaanyag lencse vizsgálatok a gerjesztés vertikálisan polarizált síkhullámmal modellezhető.

III. METAANYAG STRUKTÚRÁK HOMOGENIZÁLÁSA

A. Effektív anyagparaméterek kiszámítása, transzmissziós és reflexiós adatokból

Egy sík felületű homogén anyag elektromágneses jellemzői: a komplex törésmutató (N_{eff}) és a hullámimpedancia (Z_{eff}) az anyagra merőlegesen beeső, síkhullám gerjesztés esetén meghatározhatóak az az anyag effektív vastagsága (d_{eff}) és a reflexiós együttható (S_{11}) illetve a transzmissziós együttható (S_{21}) ismeretében az alábbi összefüggésekből

$$Z_{\text{eff}} = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1)$$

$$e^{iN_{\text{eff}}k_0d_{\text{eff}}} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}^*R_{01}} \quad (2)$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{1}{k_0d_{\text{eff}}} \left[\Im \left\{ \ln \left(e^{iN_{\text{eff}}k_0d_{\text{eff}}} \right) \right\} + \frac{2m\pi}{k_0d_{\text{eff}}} - i \Re \left\{ \ln \left(e^{iN_{\text{eff}}k_0d_{\text{eff}}} \right) \right\} \right] \quad (3)$$

A további paraméter: k_0 : a vákuumbeli terjedési tényező, m egész szám. Ezen összefüggéseket egy metaanyag struktúra paramétereire alkalmazva a kérdéses struktúra effektív paraméterei adódnak. Látszik, hogy a törésmutató ($n_{\text{eff}} = \text{Re}\{N_{\text{eff}}\}$) a fenti egyenletekből nem meghatározható. A Kramers - König egyenlet segítségével viszont N_{eff} képzetes része alapján (κ_{eff}) felhasználásával kiválasztható a megfelelő megoldás. A módszerről, és megvalósításáról [8]- ban pontos leírás található.

A struktúra effektív vastagsága a geometriából adódik, jelen esetben megegyezik a vastagsággal, az S_{11} , S_{21} értékek elektromágneses tér szimulációs szoftverrel számíthatóak. Erre a célra az időtartománybeli megoldók alkalmazása kézenfekvő, mivel egy futással széles frekvenciatartományra kiszámíthatóak a keresett paraméterek.

A publikált eredményekhez elektromágneses tér szimulációs program, illetve az effektív paraméterek kiszámítására a [8]- ban megadott, online elérhető MATLAB program került felhasználásra.

B. Analitikus közelítés

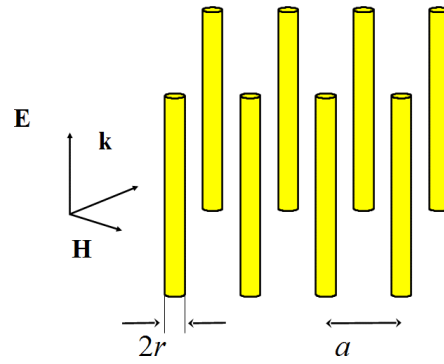
A Drude modellt felhasználva analitikus becslés adható az effektív paraméterekre: az elektronok mozgását egy csillapított oszcillátorral modellezve kiszámítható a vezetőképesség (4), illetve az anyag komplex permittivitása (5).

$$\sigma = \frac{\eta q^2 \tau}{m} \frac{1}{1+i\tau\omega} \quad (4)$$

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{-\omega^2 + \Gamma i\omega} \quad (5)$$

$$\omega_p = \frac{\eta q^2}{m} \quad (6)$$

η az elektron sűrűség, τ : az elektronok átlagos relaxációs ideje, q : az elektron töltése, m az elektron tömege, $\Gamma=1/(m*\tau)$. Az ω_p pedig az anyagra jellemző, úgynevezett plazma frekvencia. Az $\omega \ll \omega_p$ esetben az anyag vezetőként, $\omega \gg \omega_p$ esetén pedig dielektrikumként viselkedik, míg $\omega \sim \omega_p$ esetén $\epsilon_{\text{eff}} \approx 0$, ezen a tartományon nulla törésmutató tulajdonságokat mutat. Valódi fémek esetén ω_p a látható tartományban van, de megfelelő struktúra alkalmazásával a töltéssűrűség csökkenthető, mely révén a ω_p a mikrohullámú tartományba helyezhető át. Erre példa a 2. ábrán látható elrendezés. Ez r sugarú, párhuzamos, egymástól a távolságra lévő hengeres vezetőkészletből áll, melyek egy négyzetrács sarokpontjaiban állnak. Itt az r/a aránnyal kontrollálható a plazma frekvencia.



2. ábra: Párhuzamos vezető rudak

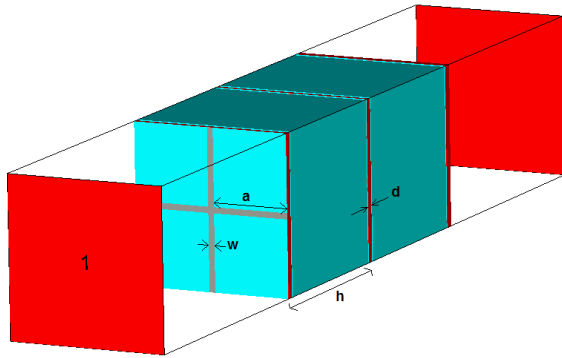
A metaanyag struktúra paramétereinek analitikus becslésére további módszer az elemi cella adott módusú gerjesztés esetére vonatkozó koncentrált paraméterű helyettesítőképének alkalmazása. A 2. ábrán látható elrendezés esetén ez a anyag ellenállását és a huzal öninduktivitását jellemző soros RL tag. Ezzel a modellel az egymástól r távolságra lévő párhuzamos w szélességű vezetősávok effektív permeabilitása is becslhető az $r = w/4$ helyettesítéssel.

IV. C-SÁVÚ NULLA TÖRÉSMUTATÓJÚ METAANYAG STRUKTÚRÁK TERVEZÉSE

A tervezés célja egy 5,2 GHz sávközépi frekvenciájú, metaanyag lencse paramétereinek meghatározása, illetve tulajdonságainak vizsgálata.

A szimuláció tárgya minden esetben egy elemi cella vizsgálata, az elrendezést a 3. ábra mutatja. Kettő, illetve három rétegű lencsék szimulációjára került sor. A lencsék közötti tér kitöltése 1.08 relatív dielektromos állandójú közeg. Külön szimulációban lett megvizsgálva a Rogers 4003-as hordozók hatása. A cellasíkok a z tengelyre merőlegesek, peremfeltételként az x tengelyre merőleges felületen a tökéletes mágneses vezető (PMC), az y tengelyre merőleges felületen tökéletes elektromos vezető (PEC) lett előírva. A z tengelyre merőleges két port lett a gerjesztés, illetve a nyelő.

A három rétegű lencse geometriája a 5. ábrán látható, a paraméterek értékei: $h = 15,7$ mm, $a = 11,5$ mm, $w = 0,54$ mm, a szubsztrát vastagsága 0,8 mm a fémzés vastagsága 0,05 mm.

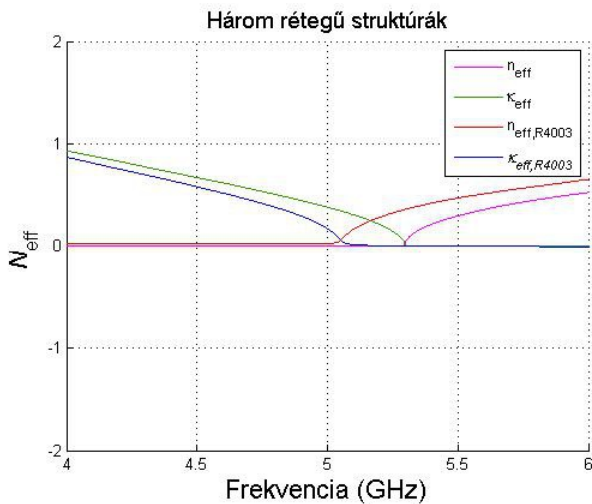


3. ábra: Szimulációs elrendezés

A 4., 5., 6., ábrákon a három rétegű, Rogers 4003 szubsztráttal, illetve a nélkül szimulált metaanyag jellemzői láthatóak. A hordozó elhangolja a metaanyagot, viszont kedvezően módosítja a transzmissziós, és a reflexiós együtthatót.

A lencse sávzélességét egyrészt a transzmissziós tényező határozza meg, másrészt a törésmutató. Ez alapján adható meg az a frekvenciatartomány, ahol a lencse valóban fókuszál. Az S_{11} , és S_{21} paraméterek a 5. ábrán láthatók. A metaanyag lencse törésmutatója a 4. ábrán látható. A meghatározott üzemi frekvenciatartományok az alábbi táblázatban láthatóak, melyek alapján az üzemi frekvenciatartomány az 5-5,6 GHz-es sáv.

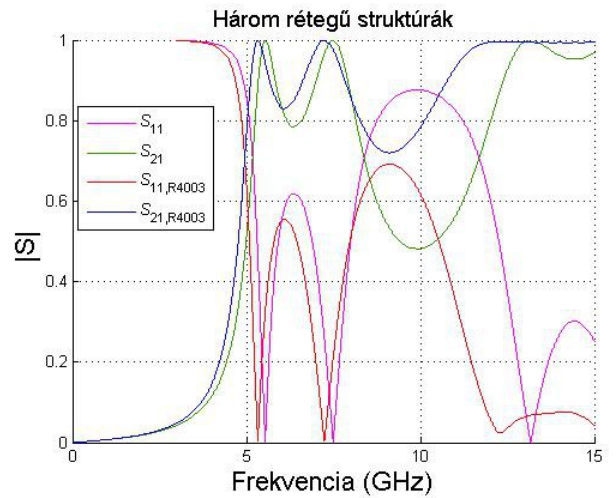
Rogers 4003 szubsztrátos lencse sávzélessége	
Előírások	Üzemi frekvencia tartomány [GHz]
$S_{21} < 0,8 (\sim -2 \text{ dB})$	$4,8 < f$
$n_{\text{eff}} < 0,5$ & $\kappa_{\text{eff}} < 0,2$	$4,98 < f < 5,6$



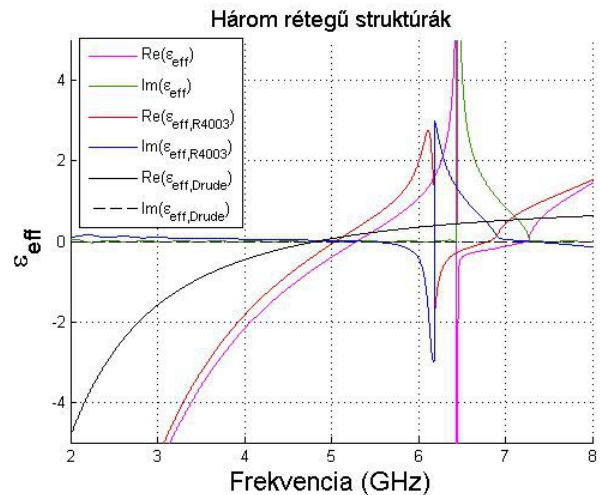
4. ábra: Törésmutató

A kiszámolt effektív permittivitás és a Drude modell alapján számítható becslés a 6. ábrán látható. Ezzel láthatólag jó közelítő becslést lehet adni a lencse plazmafrekvenciájára. A

helyettesítőkép elemeinek értékei: $L=10,4 \text{ nH}$, $R=0,0035 \text{ Ohm}$ ($5.8e7 \text{ S/m}$ vezetőképességű fémzés esetén).



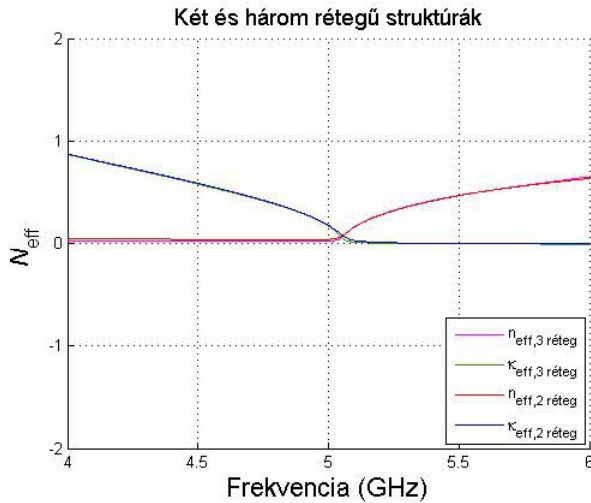
5. ábra: Reflexiós és transzmissziós együttható



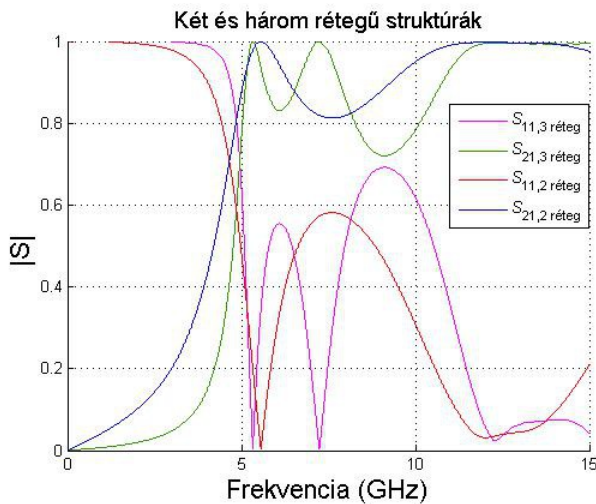
6. ábra: Relatív dielektromos állandó

A 7., 8., 9., ábrákon a három rétegű és az ugyanilyen frekvenciára hangolt két rétegű elemi cella törésmutatójának összevetése látható, mindkét esetben a szubsztrát nélkül. Utóbbi paraméterei: $a=12,8 \text{ mm}$, $h=17,5 \text{ mm}$, $w=0,6 \text{ mm}$.

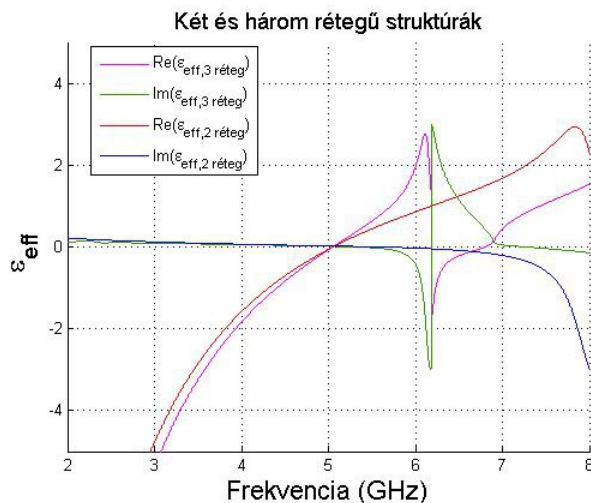
Bár a két rétegű lencse transzmissziós tényezője alapján meghatározott sávzélesség nagyobb, mint a három rétegű struktúra esetén, viszont a törésmutatók együtt futása miatt a lencse sávzélessége valójában nem lesz nagyobb.



7. ábra: Komplex törésmutató



8. ábra: Reflexiós és transzmissziós együttható



9. ábra: Relatív dielektromos állandó

V. KONKLÚZIÓ

Egy metaanyag struktúra került behangolásra, antennás alkalmazásra. A hangolás során figyelembe lett véve a veszteséges hordozó hatása is. Továbbá – a tárgyalt struktúra esetére – megállapítható, hogy a három, illetve két rétegű lencsék egyező elektromágneses tulajdonságokkal rendelkeznek, tehát alkalmazás során elegendő a két rétegből álló metaanyag alkalmazása is.

VI. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönjük a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatói Ösztöndíj és az Eureka Metafer projekt támogatását

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] F.-Y. Meng, Q.Wu, Y. Liang, K. Zhang, and Le-Wei Li "Design, Fabrication, and Testing of Three-Dimensional Miniaturized Rectangular Cavity Resonator Based on Metamaterial" IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 45, NO. 10, OCTOBER 2009
- [2] Marco Caiazzo, Student Member, IEEE, Stefano Maci, Fellow, IEEE, and Nader Engheta, Fellow, IEEE "A Metamaterial Surface for Compact Cavity Resonators", IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol. 3, 2004
- [3] Schurig, David, et al. "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies." Science 314.5801 (2006), pp. 977-980.
- [4] Sungjoon Lim, Christophe Caloz, and Tatsuo Itoh "Electronically-Controlled Metamaterial-Based Transmission Line as a Continuous-Scanning Leaky-Wave Antenna" Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International (Volume: 1)
- [5] Ziolkowski, Richard W. "Propagation in and scattering from a matched metamaterial having a zero index of refraction." Physical Review E 70.4(2004): 046608.
- [6] Dongying Li, Szabó Zsolt, Xianming Qing, Er-Ping-Li, and Zhi Ning Chen, "A High Gain Antenna With an Optimized Metamaterial Inspired Substrate" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 12, pp: 6018-6022, Dec. 2012
- [7] Q.Wu , P.Pan, F.-Y. Meng L.-W. Li, J. Wu, "A novel flat lens horn antenna designed based on zero refraction principle of metamaterials" Applied Physics A 87, pp. 151-156, 2007
- [8] Z. Szabó,G.-H. Park, R. Hedge, and E.-P.-Li,"A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-ronig relationship," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 58, no.10, pp2046-2653,Oct. 2010.
- [9] John L. Volakis: Antenna Engineering Handbook, McGrawHill, 2007