

NEGATİF MANYETİK ETKİSİNE SAHİP YAPAY MALZEMELER KULLANILARAK DALGA KILAVUZU EBATLARININ AZALTILMASI

Muharrem Karaaslan¹, Faruk Karadag², and M.Zeki Kurt²

¹ Teknik Bilimler MYO, Mersin Üniversitesi, Çiftlikköy, Mersin, Turkey
mkaraaslan@mersin.edu.tr

²Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Cukurova Üniversitesi, Adana, Turkey
fkaradag@cu.edu.tr, mzkurt@cu.edu.tr

Anahtar Sözcükler: Meta-malzeme, Dalga Kılavuzu, Negatif Manyetik Geçirgenlik

ÖZET

Bu bildiriye öncelikle meta-malzemeler hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra dikkörtgensel dalga kılavuzları içerisinde yerleştirilecek farklı ortamlar durumunda dalga kılavuzunun içerisinde elektromanyetik alanların ilerlemesi hakkında teorik araştırmalar yapılmıştır. Özellikle negatif manyetik özellikli ortam yerleştirilmesi durumunda dalga kılavuzunun dalga boyundan düşük frekanslarda iletimi araştırılmıştır.

1. Giriş

Dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik katsayısı (μ), uygulanan elektrik ve manyetik alanlara karşı homojen bir ortamın tepkisini karakterize eden sabitlerdir. Bunlar makroskobik parametrelerdir, çünkü yeterince uzun zaman ve yeterince büyük hacimler için ölçülmüşlerdir.

Bütün bu parametreler, dış alanlar tarafından etkilenen atomik veya moleküler osilatörlerin frekansa bağlı olarak makroskopik ölçümlerinin ortalamalarıdır. Bu fikir homojen olmayan daha büyük hacimler içinde ortaya konulabilir, mesela ortam içerisindeki homojenliği bozan yapılar, uygulanacak elektromanyetik alanların dalga boyundan çok küçük fakat atom ve moleküllerden büyük ise “etkin ortam teorisi” geçerli olabilecektir. Bu özellikteki yapılar meta malzeme olarak adlandırılmaktadırlar [1,2] ve uygulanan elektromanyetik alanlara karşı tepkisi, tıpkı homojen materyallerde olduğu gibi ϵ ve μ parametrelerine bağlı olarak ifade edilebilecektirler.

Metamalzemeler, yapay olarak üretilen fotonik materyallerden farklıdır, bu tip yapılarda, periyodik dielektrik saçıcılardan Bragg saçılması sonucunda bant boşluğu yada duran bant aralığı oluşmaktadır [3,4,5]. Fotonik kristallerde periyodik yapıların boyutları dalgaboyu ile kıyaslanabilecek seviyede olduğundan homojenlikten söz etmek mümkün değildir. Metamalzemelerde ise periyodiklik ön planda değildir ve bütün özellikler tek bir saçıcının rezonansına bağlıdır.

Pek çok malzeme, radyo frekansından morötesi frekanslara kadar, iyi bir elektrik tepkisi ortaya koymasına rağmen, manyetik tepkileri mikrodalga frekansı ile sınırlıdır. Manyetik polarizasyon ya eşlenmemiş elektron spinlerinden ya da orbital elektron akımlarından oluştuğundan, bu etkenlerin topluca etkilenmesi düşük frekanslarda olma eğilimindedir. Fakat yapay olarak mikro ve nano seviyede malzemeler üretilebilmesi, birkaç hertz değerinden [6] radyo frekansını [7, 8,9], mikrodalga ve terahertz frekanslarını da içeren ve kızılötesi frekanslara kadar uzanan, manyetik özelliğe sahip metamalzeme üretilebilmesinin önünü açmıştır. Bu durumda istenen frekans değerinde negatif manyetik özelliğe sahip yapay malzemelerin üretilebilmesi söz konusu olabilmektedir.

Düzlem harmonik bir dalga için Maxwell eşitlikleri ele alınacak olursa;

$$\vec{k} \times \vec{E} = w\mu\vec{H} \quad (1)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -w\epsilon\vec{E} \quad (2)$$

Burada \vec{E} elektrik alanı, \vec{H} manyetik alanı ve \vec{k} dalga vektörünü temsil etmektedir. Eğer her iki parametresi (ϵ , μ) negatif olan bir ortam farz edilip sanal kısımları çok küçük alınıp ihmal edilirse; ortam içerisinde \vec{E} , \vec{H} ve \vec{k} dalga bileşenleri sol el kuralına uygun üçlü bileşen şeklinde hareket edeceklerdir. Bu özelliğinden dolayı, böyle bir ortam solak malzeme olarak adlandırılmaktadır.

Dalga vektörü ile ortamın kırılma indisi arasındaki ilişki kullanılırsa;

$$\vec{k} = \frac{nw}{c}\vec{n} \quad (3)$$

kırılma indisinin de negatif olduğu gözlenebilir. Burada w açısız frekansı temsil etmektedir. Bu tip bir ortamda dalganın zıt faz hızı ile ilerleyebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca poynting vektör ($\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$) ile faz vektörünün (\vec{k}) zıt yönde hareket ettiği görülmektedir. $\epsilon - \mu$ parametreleri için dört farklı bölgenin elektromanyetik özellikleri göz önünde bulunduralım. Birinci bölgede (üçüncü bölgede) her iki parametre pozitifdir (negatifdir), EM dalgalar ilerler ve sağ el kuralına (sol el kuralına) uyarlar. İkinci (dördüncü) bölgede ise dielektrik katsayısı negatif (pozitif) ve manyetik geçirgenlik katsayısı pozitifdir (negatifdir), parametreler zıt işaretli olduğundan EM sönümlenecektir.

Dikkörtgen dalga kılavuzları mikrodalga, radar ve anten teknolojilerinde uzun zamandır kullanılmakta olan temel mikrodalga elemanlarıdır. Pek çok uygulamada mikrostrip gibi düzlemsel kılavuzlama elemanları dalga kılavuzunun yerini almış olsa da dalga kılavuzlarının, özellikle anten teknolojilerinde hala kaçınılmaz olduğu yerler vardır. Dalga kılavuzlarının fiziksel ebatları önemli bir parametredir ve minyatürizasyonda bunların küçültülmesi gerekmektedir. Temel elektromanyetik bilgilerden, dalga kılavuzunun propagasyon yapabilmesi için enine ebatların dalga boyunun yarısına eşit yada büyük olması gerekmektedir. Ancak bu durumda dalga kılavuzu boyunca EM dalgaların ilerlemesi için gerekli sınır koşulları sağlanmış olacaktır.

2.MANYETİK ORTAM İÇEREN DİKDÖRTGEN DALGA KILAVUZU

Dalga kılavuzu minyatürizasyonu için en genel yol kılavuz içerisine dielektrik malzeme yerleştirerek, dalga boyunda $l/\sqrt{\epsilon_r}$ oranında azaltma yapmaktır. Böylece minimum enine ebatlar da aynı oranda düşürülebilir. Fakat yüksek dielektrik katsayılı yalıtkan malzemelerin düşük kayıplı olmaması bu yaklaşımı oldukça sınırlandırmaktadır. Burada AHR ile doldurulmuş bir dalga kılavuzunun kesim frekansından daha düşük frekanslarda propagasyonu isbat edilecektir. AHR yapılar enine negatif manyetik tepki oluşturmak için kullanılmaktadır.

Manyetik alanın AHR'lerin merkezi yönünde ki $-x$ bileşeni AHR'ye dik olduğundan dolayı akım indükleyecek ve x yönünde negatif bir permeabilite gözlenecektir. Sonuçta ortam tek eksenli yön bağımlı permeabilite değeri gösterecektir.

$$\bar{\mu} = \mu_0 \mu = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_e & 0 & 0 \\ 0 & \mu_b & 0 \\ 0 & 0 & \mu_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dalga kılavuzu içerisinde Maxwell eşitlikleri sağlanacağından dolayı zamanla değişen alan durumunda;

$$\begin{bmatrix} \nabla \cdot X\vec{E} \\ \nabla \cdot X\vec{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\omega\mu_0\mu_r \\ j\omega\epsilon_0\epsilon_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{H} \\ \vec{E} \end{bmatrix} \quad (5)$$

eşitlikleri kullanılarak elektrik alan vektörü için dalga denklemi;

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{E}) + jk_0^2 \epsilon \vec{E} = 0 \quad (6)$$

Sıradan bir dalga kılavuzu ele alınacak olursa; ($\epsilon > 0, \mu_e' > 0, \mu_e'' > 0, \mu_b > 0$) bu durumda;

$$k_z^2 = \epsilon(\mu_e' - j\mu_e'')(k_0^2 - \frac{k_x^2}{\epsilon\mu_b}) \quad (7)$$

denkleminde $f > f_c$ ise başka bir deyişle ($k_0^2 > \frac{k_x^2}{\epsilon\mu_b}$) ise;

κ açısı kompleks düzlemin dördüncü bölgesinde kalacak ve dolayısı ile zayıflama sabiti pozitif olacaktır. Ortamı kayıpsız kabul ettiğimizde ise dalga vektörü pozitif olacaktır. Uygulanan EM alanın frekansı, kesim frekansından küçük ise, yani kesim frekansının altında ise κ açısı 2. bölgede yer alacağından fiziksel olarak bir mana ifade etmeyecektir ve doğru sonuç $\kappa/2 + \pi$ ile 3. bölgede yer alacaktır. Kayıpsız durum için dalga vektörü;

$$k_{z2} = -k_0 \sqrt{\epsilon\mu_e' [1 - (\frac{f_k}{f})^2]} \quad (8)$$

Bu eşitlik sanal bir değere sahip olacağından ($f < f_c$) dalga kılavuzu boyunca bir ilerleme olmayacaktır. Bu durumda dalga kılavuzu yüksek geçiren filtre özelliği göstermektedir.

Dalga kılavuzu eğer negatif kırılma indisine sahip bir ortam ile doldurulmuş ise ($\epsilon < 0, \mu_e' < 0, \mu_e'' > 0, \mu_b < 0$) frekansa bağımlılığı şu şekilde ifade edebiliriz;

1.Eğer $f > f_k$ ise κ açısı 1. bölgede olacak fiziksel çözüm ise 3. bölgeyi alacağız $\kappa/2 + \pi$. Burada $\beta_z < 0$ olduğundan propagasyon geri tarafa doğru olacaktır.

2.Eğer $f < f_k$ ise κ açısı 3. Bölgede olacağından kayıpsız alırsak;

$$k_{z2} = -k_0 \sqrt{\epsilon\mu_e' [1 - (\frac{f_k}{f})^2]} \quad (9)$$

Bu durumda dalga vektörü sanal olacağından kesim frekansının altında iletim olmayacağından dalga kılavuzu yine yüksek geçiren filtre özelliği gösterecektir.

Dalga kılavuzu negatif enine manyetik geçirgenliğe sahip tek eksenli materyal ile doldurulduğunda da çok farklı bir durum ortaya çıkmaktadır $\epsilon > 0, \mu_e' < 0, \mu_e'' > 0, \mu_b > 0$. Ortam kayıplı olarak düşünüldüğünde;

1. Kesim frekansının üzerinde ($f > f_k$) κ açısı 3. bölge de olduğundan;

$$k_{zi} = |k_z| e^{j\kappa/2} = \beta_{zi} - j\alpha_{zi} \quad (10)$$

Ortamı kayıpsız kabul ettiğimizde ilerleme sabiti (9) eşitliğinde ki gibi olacaktır. Burada dalga vektörü sanal olduğundan iletim olmayacaktır.

2. Kesim frekansının altında ise açı 1. bölgede olacağından kayıplı durumda;

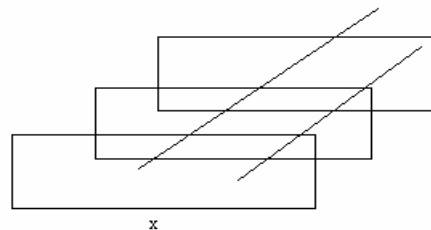
$$k_{z2} = |k_z| e^{j\kappa/2 + j\pi} = \beta_{z2} - j\alpha_{z2} \quad (11)$$

Kayıpsız durumda ise (10) eşitliği kullanılacaktır. Fakat şimdi kesim frekansının altında propagasyon mümkün görülmemekte $\beta_{z2} < 0$ olduğundan negatif yönde olmaktadır. Buradan anlaşılmaktadır ki bütün TE modlar için kesim frekansının altında iletim mümkündür.

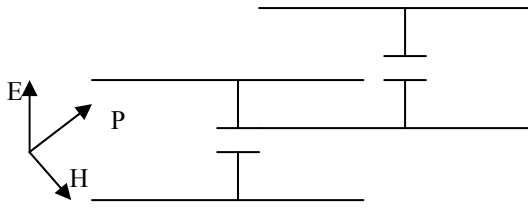
Dolayısı ile negatif enine permeabiliteye sahip tek eksenli yön bağımlı manyetik materyallerle dolu dalga kılavuzu düşük geçiren özellik gösterir ve davranışı normal bir dalga kılavuzu ile zıttır.

3. DALGA KILAVUZUNUN İLETİM HATTI MODELİ

Tek eksenli negatif permeabiliteye sahip materyallerle doldurulmuş dalga kılavuzunda ilerleme, iletim hattı modeli kullanılarak basit bir şekilde anlatılabilir. Sonuca daha kolay ulaşabilmek için dolgu malzemesi kayıpsız kabul edilebilir. Dikdörtgen dalga kılavuzunu sonsuz sayıda kısa devre edilmiş C-L yüklü iki telli TEM iletim hattı gibi düşünülebilir (şekil1.). Ana iki tel iletim hattı seri endüktans ve paralel kapasitans ile modellenilebilir. Ana hattın kapasitansı dolgu materyalinin permitivitesini temsil eder.



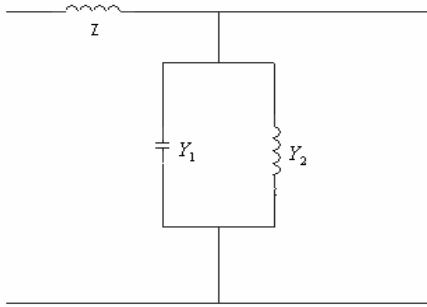
Şekil 1. Dikdörtgen dalga kılavuzunun iletim hattı modeli



Şekil 2. Dikdörtgen dalga kılavuzunun TE durumu için eşdeğer devresi

Dalga kılavuzu boyunca enerji akışı düşünülecek olursa, (bu da poynting vektörün boyuna bileşenini gösterir), bu boyuna akış manyetik alan vektörü H_t 'den kaynaklanmaktadır, ve bundan dolayı enine permeabilite endüktansın varlığından da sorumludur. Yük üzerinden enerji akışı sıfır olmayan boyuna manyetik alan vektörü H_l ile ilişkilidir ve dolayısı ile boyuna permeabilite seri endüktans yükünden sorumludur.

Bu durumda kısa devre edilmiş yükün giriş empedansı paralel tank devresi olarak modellenebilir. Bu durumda şekil 2.'deki gibi tek eksensli manyetik materyalle doldurulmuş dalga kılavuzunun eşdeğer devresi elde edilir. Şekil 3.'da ki eşdeğer devrede Z dalga kılavuzunun birim uzunluk başına düşen empedansı göstermektedir. Y_1 ve Y_2 paralel admitansı ifade eder ve a dalga kılavuzunun enine boyutunu gösterir.



Şekil 3. Manyetik bir malzeme ile doldurulmuş dalga kılavuzunun eşdeğer iletim hattı devresi

Bu durumda tek eksensli yön bağımlı manyetik materyal ile doldurulmuş dalga kılavuzunun dalga empedansı;

$$Z_D = \pm \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (8)$$

şeklinde elde edilir.

$$Z_D = \mp \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_e}{j\omega\epsilon + \frac{1}{j\omega\mu_b} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (9)$$

Empedans ve admitans değerleri yerine yazılıp $j\omega\epsilon_0$ ortak parantezine alınır;

$$Z_D = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_{er}}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \frac{1}{w^2\mu_0\mu_b} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right)}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_{er}}{\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \frac{1}{w^2\epsilon_0\mu_0\epsilon_r\mu_{br}} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right)}} \quad (10)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_0\mu_{er}}{\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \frac{c^2}{(2\pi f)^2 \epsilon_r\mu_{br}} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right)}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_{er}}{\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \frac{c^2}{(2\pi f)^2 \epsilon_r\mu_{br}} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right)}} \quad (11)$$

$f_{k0} = \frac{c}{2a}$ olduğundan dolayı;

$$\sqrt{\frac{\mu_0\mu_{er}}{\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \frac{1}{f^2 \epsilon_r\mu_{br}} \left(\frac{c}{2a}\right)^2\right)}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_{er}}{\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r\mu_{br}} \left(\frac{f_{k0}}{f}\right)^2\right)}} \quad (12)$$

$f_k = \frac{f_{k0}}{\sqrt{\mu_{br}\epsilon_r}}$ şeklinde ifade edilirse;

$$= \sqrt{\frac{\mu_0\mu_{er}}{\epsilon_0\epsilon_r \left(1 - \left(\frac{f_k}{f}\right)^2\right)}} \quad (13)$$

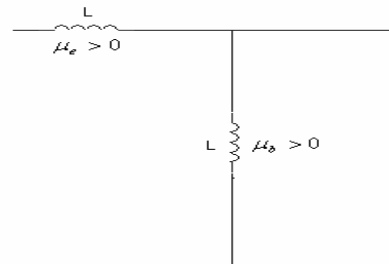
şeklinde yazılabilir.

Bu ifade elde edildikten sonra dalga kılavuzlarının farklı durumları için iletim hattı temsili kullanılarak açıklama yapmak kolaylaşacaktır.

1. Eğer ortam EM parametreleri pozitif ise ($\epsilon > 0, \mu > 0$); seri reaktans frekanstan bağımsız olarak daima sıfır olacaktır,

a. Kesim frekansının altında ($f < f_k$) yükler- L-C'den oluşan birim hücre- dalga boyunun çeyrek katından daha kısa olacaktır ve Y_2 endüktif karakter gösterecektir. Paralel kapasitans ve paralel endüktanstan oluşan tank devresi de kesim frekansının altında çalışacak ve toplam paralel admitans endüktif değer gösterecektir. Bu durumda Z/Y oranı negatif olacak ve dalga empedansı sanal olup propagasyona izin vermeyecektir. Dalga kılavuzuna seri empedans ve endüktif karaktere sahip paralel admitanslı iletim hattı gibi davranacaktır.(L-L şekil 4.). Bu tip bir hat EM dalgaların propagasyonunu desteklemez.

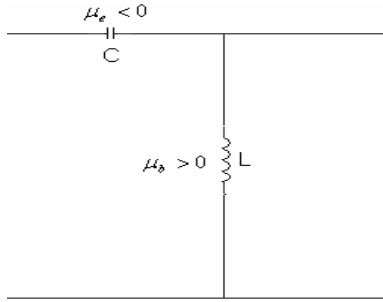
b. Rezonans frekans değerinin üzerinde, tank devresinin admitansı kapasitif davranış gösterecek ve Z/Y oranı pozitif reel bir sayı olacağından dalga empedansıda pozitif bir değer olacaktır. İletim hattı seri endüktans ve paralel kapasitansa sahip L-C devresi gibi davranacağından propagasyon sırasında bilinen ilerleyen dalgalar şeklinde mümkün olacaktır.



Şekil 4. Enine ve boyuna yönlerde permeabilite pozitif ve frekans, kesim frekansı değerinden küçük olduğu durumda dalga kılavuzunun eşdeğer iletim hattı devresi

1. Tek eksenli yön bağımlı malzeme ile doldurulma durumunda $\mu_{er} < 0$ olduğundan Z negatif endüktans gibi davranacaktır.

a. Kesim frekansının altında $\mu_{er} < 0$ 'nin negatif işareti Y'nin negatif işaretini kompanse edecektir. Bu durumda dalga empedansı pozitif bir reel sayı olacak ve propagasyon mümkün olacaktır. Kesim frekansının altında her hangi bir sabit frekansta Z'nin seri negatif endüktansı kapasitans olarak düşünülebilir. Bu durumda eş değer devre seri kapasitans ve paralel endüktans (C-L) halini alacaktır (şekil 5.). Bu tip bir iletim hattı geri yönelimli dalgaların iletimini destekleyecektir.



Şekil 5. Enine yönde permeabilite negatif - boyuna yönlerde permeabilite pozitif frekans, kesim frekansı değerinden küçük olduğu durumda dalga kılavuzunun eşdeğer iletim hattı devresi

SONUÇLAR

Bu çalışmada negatif manyetik geçirme katsayısına sahip olan bir yapının dalga kılavuzu içerisine yerleştirilmesi ile dalga kılavuzunun kesim frekansı değerinden oldukça düşük frekans değerlerinde iletim yapabilmesi mümkün olduğu teorik olarak ispat edilmiştir. Ayrıca bu sayede dalga kılavuzu ebatlarının azaltılmasının da mümkün olduğu ispatlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Pendry, J. B., 2004. Negative Refraction. Contemp. Phys., 45: 191.
- [2] Shen, J. T. And Platzmann, P. M., 2002. Near Field Imaging With Negative Dielectric Constant Lenses. Appl. Phys. Lett., 80: 3286.
- [3] Yen, T. J., Padilla, W. J., Fang, N., Vier, D. C., Smith, D. R., Pendry, J. B., Basov, D. N. And Zhang, X., 2004. Infrared Spectroscopy And Ellipsometry Of Magnetic Metamaterials. Science, 303: 1494.
- [4] O'brien, S. And Pendry, J. B. 2002. Magnetic Activity At Infrared Frequencies In Structured Metallic Photonic Crystals. J. Phys.: Condens. Matter, 14: 6383.
- [5] O'brien, S., Macpeake, D., Ramakrishna, S. A. And Pendry, J. B., 2004. Near-Infrared Photonic Band Gaps And Nonlinear Effects In Negative Magnetic Metamaterials. Phys. Rev. B, 69: 241101.
- [6] Pendry, J. B. And O'brien, S., 2002. Very-Low-Frequency Plasma. J. Phys.: Condens. Matter, 14: 7409.
- [7] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., And Stewart, W. J., 1999. Magnetism From Conductors And Enhanced Nonlinear Phenomena. Ieee Trans. Microwave Theory Tech., 47: 2075-2080.

- [8] Wiltshire, M. C. K., Pendry, J. B., Young, I. R., Larkman, D. J., Gilderdale, D. J. And Hajnal, J. V., 2001. Microstructured Magnetic Materials For Rf Flux Guides İn Magnetic Resonance Imaging. Science, 291: 848.
- [9] Wiltshire, M. C. K., Hajnal, J. V., Pendry, J. B., And Edwards, D. J., 2003. Metamaterial Endoscope For Magnetic Field Transfer: Near Field Imaging With Magnetic Wires. Opt. Express, 11: 709.