

Bileşik Metamateryal Yapıların Sonlu Eleman Metoduyla Sayısal Analizi

Adnan Sondaş, Yunus E. Erdemli
Kocaeli Üniversitesi
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü
İzmit, Kocaeli
asondas@kou.edu.tr, yunusee@kou.edu.tr

Özet: Bu bildiride, yarık halka rezonatör ve metal şerit tel dizilerini temel alan bileşik metamateryal yapıların elektromanyetik özellikleri, modelleme kapasitesi ve hesaplama hızı yüksek, hibrit sonlu eleman-sınır integrali metodu kullanılarak, incelenmektedir. Biri μ -negatif (MNG) ve diğeri ε -negatif (ENG) özelliğe sahip iki metamateryal yapının bir araya getirilmesiyle oluşturulan bileşik metamateryal yapılar, aynı frekans bandında hem MNG hem de ENG özelliği göstermektedirler. MNG ve ENG yapılarda elektromanyetik dalganın iletilmediği frekans bandında, negatif kırılma indisine sahip ENG/MNG ortamından ise iletim sağlanabilmektedir.

1. Giriş

Bileşik metamateryal yapılar, doğadaki maddelerden farklı elektromanyetik (EM) özellikleri nedeniyle, son yıllarda büyük ilgi duyulan malzemelerdir. Bu yapıların en ilginç özelliği, hem efektif elektrik geçirgenlik (ε_{eff}) hem de efektif manyetik geçirgenlik (μ_{eff}) katsayılarının, aynı frekans bandında negatif değeriye sahip olabilmeleridir. Doğada bulunan maddelerde, genelde bu iki parametre pozitif değeriye olup; ε -negatif (ENG) materyaller (metaller gibi) olmasına karşın, doğal μ -negatif (MNG) materyaller bulunmamaktadır. Ancak, “sol-elli” (LHM: left-handed material) olarak adlandırılan bileşik metamateryaller, aynı anda ENG ve MNG özelliklerini göstermekte ve bu yapılarda kırılma indisi negatif değeriye olmaktadır. Bu durumun en önemli sonucu ise, EM dalganın yayılma yönü ile EM enerjinin yayılma yönünün zıt olmasıdır (Şekil 1(a)). Bu özellikten dolayı da, negatif kırılma indisli ortamlarda, “sağ el kuralı” yerine “sol el kuralı” geçerlidir. Yine negatif kırılma indisinin bir sonucu olarak, LHM yapılarda, Snell’in kırılma kanunu tersine işlemekte (Şekil 1(b)) ve ters Doppler etkisi gözlenmektedir.

Negatif indisli materyaller, ilk kez 1968 yılında Veselago [1] tarafından önerilmiş ve teorik olarak incelenmiştir. Son bir kaç yılda, ENG/MNG materyaller, özellikle yüksek frekans uygulamalarında gösterdikleri özgün performanslarıyla ilgi çekmektedirler ve bunun paralelinde metamateryaller üzerine yapılan teorik ve deneysel çalışmalarda artış görülmektedir. IEEE T-AP’nin Ekim 2003 özel sayısı [2] bu konuda yapılan en yeni teorik ve deneysel çalışmaları içermesi bakımından, önemli bir kaynak niteliğindedir.

LHM yapılar, biri ENG diğeri MNG özelliğine sahip iki farklı periyodik dizinin bir araya getirilmesiyle gerçekleştirilebilir. ENG özelliğine sahip metal şerit tel dizisi ile MNG özelliğine sahip yarık halka rezonatör (split ring resonator: SRR) dizisi bir araya getirildiğinde, negatif indisli, SRR/şerit bileşik metamateryal yapısı (Şekil 2) oluşturmak mümkün olabilmektedir [3]. Bildiride, bu şekilde oluşturulmuş LHM yapıların elektromanyetik özellikleri, modelleme kapasitesi ve hesaplama hızı yüksek, hibrit sonlu eleman-sınır integrali metodu kullanılarak, incelenmektedir.

2. Sayısal Analiz

Bu çalışmada incelenen metamateryal yapıların sayısal analizi, iki boyutlu sonsuz periyodik dizilerin analizi için geliştirilmiş bir tam dalga simülatörü ile gerçekleştirilmektedir. Bu simülatörde, modelleme kapasitesi yüksek FE metodu ve hızlandırılmış BI algoritmasını kullanan, hibrit sonlu eleman-sınır integrali (finite element-boundary integral: FE-BI) yöntemi [4] kullanılmaktadır.

Şekil 2(a)’da, simülatör ile modellenen 5-kat SRR/şerit dizisinin geometrisi yer almaktadır. Bu bileşik yapı, z yönünde sonlu ve xy düzleminde sonsuz periyodik bir dizilime sahiptir. Şekil 2(b)’de ise, bu periyodik yapının birim hücresi görülmektedir. Yayılma yönü $-z$ olan EM dalganın, bu bileşik metamateryal yapıdan iletimine ait

analiz sonuçları ise, Şekil 3(a)'da verilmektedir. Bu şekilde ayrıca, 5-kat SRR ve 5-kat şerit dizilerine ait iletim karakteristikleri de yer almaktadır. Görüldüğü üzere, hem ENG (şerit) hem de MNG (SRR) ortam için iletimin olmadığı veya zayıf olduğu 7.95-8.15 GHz bandında, LHM (SRR/şerit) ortamından iletim sağlanabilmektedir. Bu durum, ENG/MNG ortamın bu frekans bandında negatif kırılma indis değeri almasından kaynaklanmaktadır.

Periyodik dizi simülatörü ile iletim karakteristikleri elde edilen metamateriyal yapıların efektif EM parametreleri (ϵ_{eff} , μ_{eff}) ve kırılma indis değerleri (n), bir eğri uyurma algoritmasıyla (Gauss-Newton gibi) hesaplanabilir. Bunun için, (1) ve (2) nolu eşitliklerde verilen efektif ortam parametreleri [5], (4) nolu denklemde yer alan homojen bir ortama ait iletim formülasyonu [6] içinde, Şekil 3(a)'daki iletim karakteristikleri göz önüne alınarak optimize edilmektedir. Bu şekilde elde edilen, SRR, şerit ve SRR/şerit yapılarına ait indis karakteristikleri Şekil 3(b)'de verilmektedir. Beklendiği gibi, SRR/şerit yapısı için iletimin gerçekleştiği 7.95-8.15 GHz bandında (Şekil 3(a)), kırılma indisinin reel kısmı negatif değerlikli olmaktadır.

$$\epsilon_{eff}^{ENG}(f) = 1 - \frac{f_{ep}^2}{f^2 - j\Gamma_{ep}f} \quad (1)$$

$$\mu_{eff}^{MNG}(f) = 1 - \frac{f_{mp}^2}{f^2 - f_{m0}^2 - j\Gamma_{mp}f} \quad (2)$$

$$n(f) = \sqrt{\epsilon_{eff}(f)} \cdot \sqrt{\mu_{eff}(f)} \quad (3)$$

$$T = \frac{4}{(1-Z)(1-Z^{-1})e^{-\gamma d} + (1+Z)(1+Z^{-1})e^{\gamma d}} \quad (4)$$

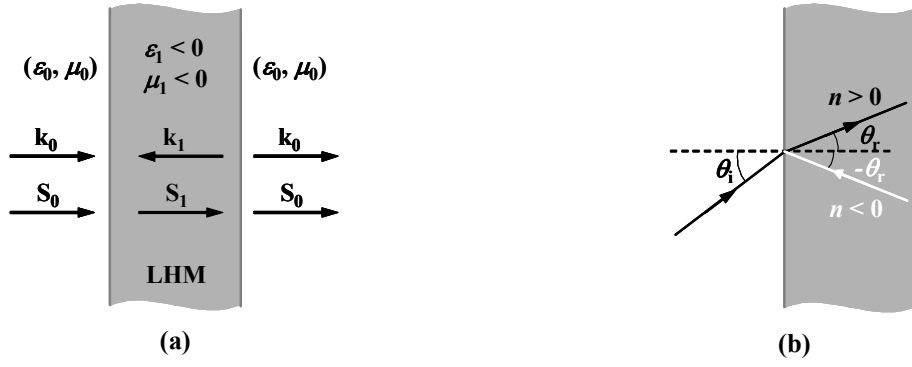
$$Z = \sqrt{\mu_{eff}(f)} / \sqrt{\epsilon_{eff}(f)}, \quad \gamma = j(2\pi f)n(f)/c_0, \quad c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/sn} \quad (5)$$

3. Sonuçlar

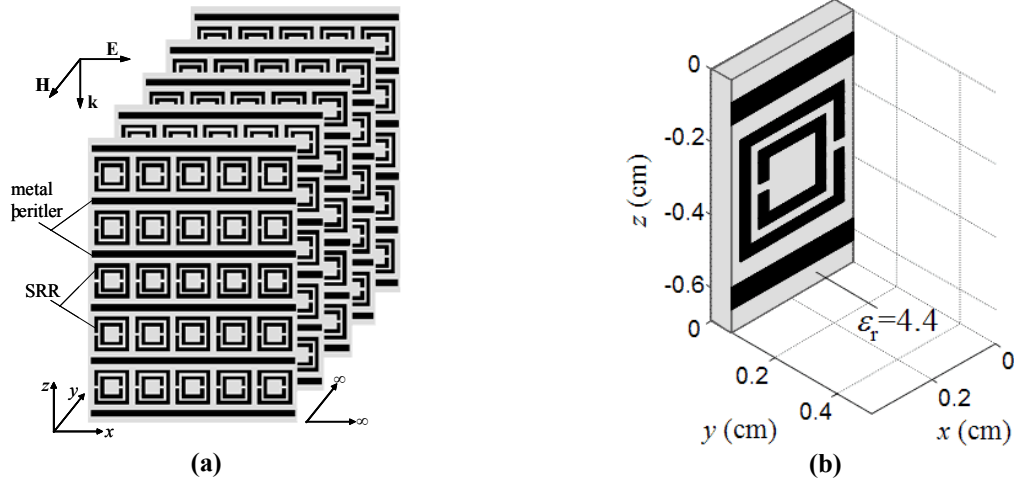
Bu çalışmada, SRR ve metal şerit dizilerini temel alan bileşik metamateriyal yapıların elektromanyetik karakteristikleri, sonlu eleman metodunu kullanan periyodik bir dizi simülatörü ile incelenmiştir. Biri MNG ve diğeri ENG özelliğe sahip bu iki metamateriyal yapının bir araya getirilmesiyle oluşturulan ENG/MNG bileşik metamateriyal ortamın, belli bir frekans aralığında negatif kırılma indis değerleri alabildiği ayrıca MNG ve ENG yapılarda elektromanyetik dalganın iletilmediği bu frekans bandında, LHM ortamından iletim sağlanabildiği gösterilmiştir. Bu bildiride yer alan çalışmanın yanı sıra, incelenen metamateriyal yapıların geometrik parametrelerinin, efektif EM parametrelerine ve iletim karakteristiklerine etkileri de incelenmiştir. Elde edilen bu parametrik sayısal analiz sonuçları konferansta sunulacaktır.

Kaynaklar

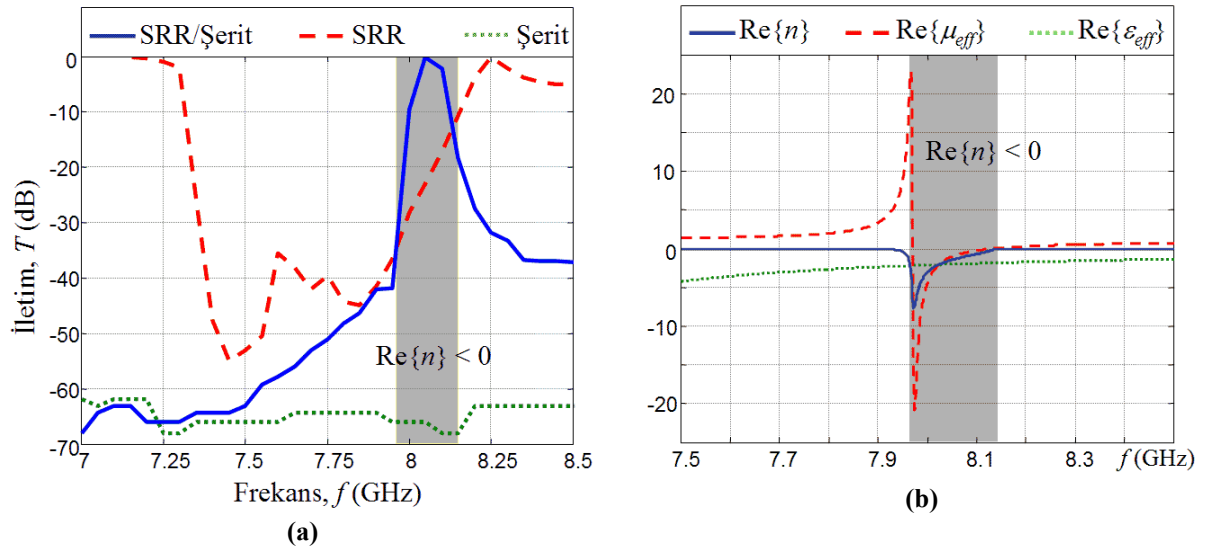
- [1]. Veselago V. G., "The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ ," Soviet Physics Uspekhi, 10(4), s. 509-514, 1968.
- [2]. Trans. on Antennas and Propagation, 51(10), 2003.
- [3]. Bayındır M., Aydın K., Özbay E., Markos P. ve Soukoulis C. M., "Transmission properties of composite metamaterials in free space," Appl. Phys. Lett., 81(1), s. 120-122, Temmuz 2002.
- [4]. Eibert T. F., Erdemli Y. E. ve Volakis J. L., "Hybrid finite element-fast spectral domain multilayer boundary integral modeling of doubly periodic structures," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 51(9), s. 2517-2520, Eylül 2003.
- [5]. Smith D. R., Schultz S., Markos P. ve Soukoulis C. M., "Determination of negative permittivity and permeability of metamaterials from scattering data," Phys. Rev. B, 65(195104), Mayıs 2002.
- [6]. Balanis C. A., Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1989.



Şekil 1. (a) LH materyallerde, EM enerjinin (Poynting vektörü) yayılma yönü (S_1) ile EM dalganın yayılma yönü (k_1) zıttır. **(b)** Snell kırılma kanunu negatif indisli LH materyallerde, tersine işlemektedir.



Şekil 2. (a) İncelenen 5-kat LHM geometrisi. **(b)** Sonlu eleman metodu ile modellenen SRR/şerit yapısının birim hücre geometrisi (şekilde sadece bir kat görülmektedir).



Şekil 3. 5-kat SRR, metal şerit ve SRR/şerit yapılarının (a) iletim, T (dB) ve (b) kırılma indis (n) karakteristikleri.