

## Oluklu Düzlemsel Goubau Hatları'nın Efektif Dielektrik Sabitinin Modellenmesi

M. Abdullah Unutmaz, A. Behzat Şahin ve Mehmet Ünlü  
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi  
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ankara

[maunutmaz@ybu.edu.tr](mailto:maunutmaz@ybu.edu.tr), [absahin@ybu.edu.tr](mailto:absahin@ybu.edu.tr), [munlu@ybu.edu.tr](mailto:munlu@ybu.edu.tr)

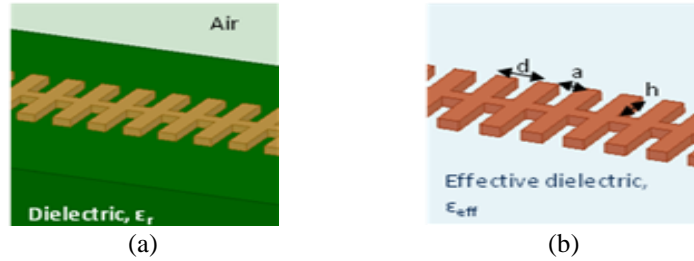
**Özet:** Bu bildiriye, oluklu düzlemsel Goubau hatlarının efektif dielektrik sabitinin modelleme çalışması sunulmaktadır. Efektif dielektrik modeli farklı elektriksel uzunluklara sahip hatların HFSS ortamında sonlu eleman metodu (SEM) yöntemiyle elde edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasıyla çıkarılmıştır. Bu simülasyonlarda, hattın açıklık ( $a$ ), periyot ( $d$ ) ve dış uzunlukları ( $h$ ) gibi fiziksel parametreleri değiştirilmiştir. Elde edilen formül ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında %8.5'ten daha iyi bir hata oranı elde edilmiştir. Belirli bir benzetim için yapılan üretimde elde edilen ölçümlerin simülasyon sonuçları ile çok yüksek oranda örtüşmeleri ile benzetim çalışmalarının tutarlılığı teyit edilmiştir. Önerdiğimiz formülün kapalı formatta dalga boyuna bağlı olarak önerilen ilk çözüm olduğu bilinmektedir.

**Abstract:** We present a closed form solution to the calculation of the effective dielectric constant of corrugated planar Goubau lines (CPGLs). The effective dielectric constant of the CPGL is extracted empirically by relating the simulation results of different electrical lengths of CPGLs with each other. The sizes of only the additional part of the longer CPGL are varied. The reliability of our data is justified by comparing simulation and measurement results of a sample simulation. In our knowledge, we are the first group providing a reliable solution with an error rate better than 8.5% as a function of the wavelength.

### 1. Giriş

Yüzey plazmon polariton (YPP) dalgaları dielektrik malzeme ve metal arasındaki yüzeyde ilerleyen elektromanyetik dalgalardır. İlk olarak optik frekans bantlarında incelenen [1] bu dalgaların, metallerin mükemmel iletkenliklerinden dolayı terahertz (THz) ve mikrodalga (MD) frekanslarında var olamayacakları gösterilmiştir. Buna karşın, bu frekans bantlarında yüzey dalgaları (YD) oluk vb. yapılarla şekillendirilmiş dalga kılavuzları ile iletelebilmektedir [2] - [3].

Düzlemsel yapıya sahip olan oluklu düzlemsel Goubau hatları (ODGH) gibi dalga kılavuzları kolay üretilebilmelerinden dolayı ilgi odağı olmuştur [3], ancak bu yapıların tasarımında temel parametre olan efektif dielektrik sabiti,  $\epsilon_{eff}$ , ile ilgili çok kısıtlı çalışmalar yapılmış ve bunlar kesim ya da rezonans frekansına bağlı formülasyonlar değildir [3]. Bu çalışmada ODGH'lerin efektif dielektrik sabiti hedeflenen minimum kesim frekansındaki,  $f_c$ , dalga boyuna,  $\lambda_c$ , göre formülize edilmektedir. Aşağıda verilen Şekil 1'de ODGH'ler temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Dielektrik malzeme üzerinde ODGH (a), efektif dielektrik içerisinde ODGH (b)

Bu bildiride  $\epsilon_{eff}$ 'i hesaplamak için kapalı formatta çıkarılan bir denklem, çıkartım metodu ve bu denklem ile yapılan bir tasarım sunulmaktadır. İzlenen yöntem oluklu yapılar için geliştirilmiş konformal haritalama (conformal mapping) yöntemlerinin birinden türetilmiştir [4]. Sunulan denklem türetilirken ampirik metotlarla referans alınan bir hat ile sadece eklenen kısmının  $a$ ,  $d$  ve  $h$  parametreleri değiştirilip,  $\epsilon_{eff}$  hesabındaki hataları minimize etmek amacıyla referans denklem değiştirilmiştir. Ampirik analizlerde SEM programı olarak HFSS kullanılmıştır. Formülde yer alan boyutların tamamı  $\lambda_c$  ile normalize edilmiştir. Formül türetilirken ODGH'lerin

dağılıcı (dispersive) etkilerinden kaçınmak amacıyla dağılma (dispersion) eğrisinin doğrusal kısmı göz önünde bulundurulmuştur. Dağılma eğrisinin doğrusal kısmından öncelikle efektif kırılma indisi,  $n_{\text{eff}}$ , elde edilmiş, ardından  $n_{\text{eff}}$  yardımıyla  $\epsilon_{\text{eff}}$  bulunmuştur.  $\epsilon_{\text{eff}}$  aşağıdaki gibi formülize edilmiştir.

$$\epsilon_{\text{eff}} = 3.015 - 15.04(-0.2019(\epsilon_r - 4.225) / 3.5215 + 1.4325)d / (\pi((1+d-a)(1+h))^{1/2})((d-a-1)F(\text{mtan}(w/2)|k) + 2\Pi(\text{mtan}(w/2)|m^2, k)) + A + B + C + D \quad (1)$$

$$A = \begin{cases} -0.175\sin(24\pi(0.068-d)), & \text{eğer } d \geq 0.068 \\ -0.5\sin(24\pi(0.068-d)), & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (2)$$

$$B = 3.25\sin(2\pi(t_{\text{die}} - 0.0173))F(\pi/4 | (t_{\text{die}} - 0.0173)) \quad (3)$$

$$C = \begin{cases} 0.0625F(\pi/2 | (0.085-h))|\sin(2\pi(0.085-h))|, & \text{eğer } h \geq 0.085 \\ -0.1 F(\pi/2 | (0.085-h))|\sin(2\pi(0.085-h))|, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (4)$$

$$D = \begin{cases} 0.325\sin(24\pi(a-0.034)), & \text{eğer } a \geq 0.034 \\ -50.5F(\pi/2 | (a-0.034)) a - 0.034\sin(2\pi(a-0.034)), & \text{eğer } a < 0.0102 \\ -8.5F(\pi/2 | (a-0.034)) a - 0.034\sin(9\pi(a-0.034)), & \text{eğer } a \geq 0.0102 \text{ yada } a \leq 0.0204 \end{cases} \quad (4)$$

3a, aksi takdirde

$$m = ((1-h)/(1+h))^{1/2} \quad (5)$$

$$w(z) = dF(\text{sn}((Kz/d)|k) / \text{sn}(K(ih/d+0.5)|k)) / K_n \quad (6)$$

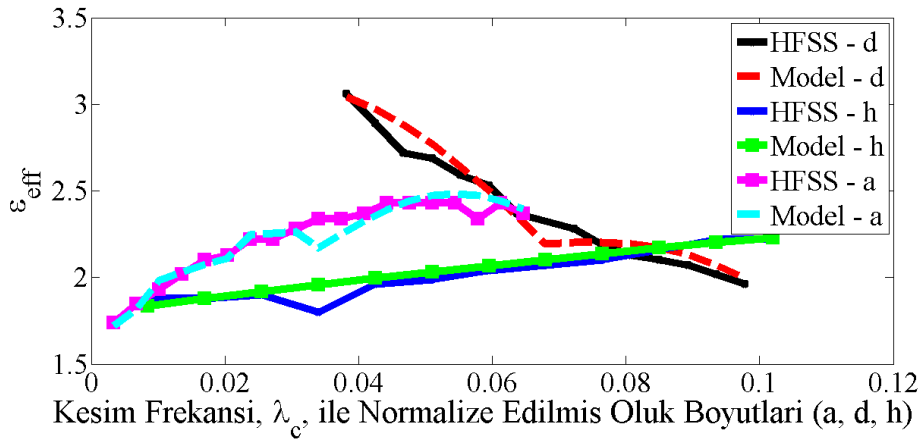
$$K_n = F(\pi/2 | k) \quad (7)$$

$$K = 4K_n \quad (8)$$

$$k = ((1-d+a)(1+h) / ((1+d-a)(1-h)))^{1/2} \quad (9)$$

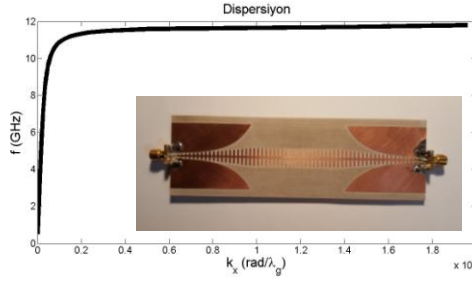
Yukarıdaki denklemlerde  $F(\cdot)$  1. dereceden eliptik integrali ifade ederken,  $\Pi(\cdot)$  ise 3. dereceden eliptik integrali ifade etmektedir [4].

### Efektif Dielektrik Sabiti ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ) - Normalize ODGH Ebatları



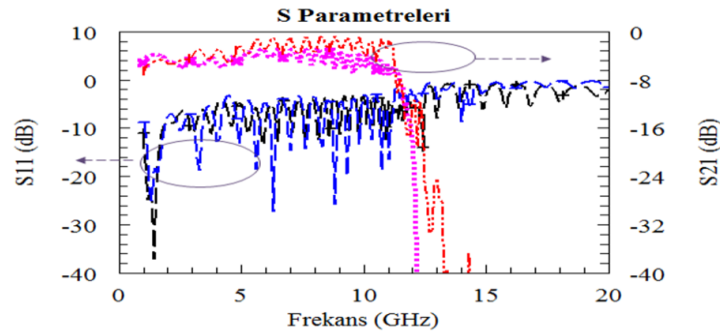
**Şekil 2.** Benzetim ve modelleme sonuçları. Sonuçlar her bir parametre, a, d ve h için etiketlenmiştir. Model ile benzetim sonuçları arasındaki en yüksek hata oranı %8.5'ten daha iyi sonuç vermektedir.

Sonuçları Şekil 2'de verilen  $\epsilon_{\text{eff}}$  modelinden yararlanılarak 0.508 mm kalınlığındaki Rogers4003 taban ile  $a = 1$  mm,  $d = 2$  mm ve  $h = 3$  mm boyutlarındaki ODGH tasarlanmıştır. Tasarlanan ODGH'nin dağılıcı karakterinden dolayı 12 GHz etrafında yansımadan kaynaklı kesime uğrayacağı analitik olarak hesaplanmıştır ve dağılma eğrisi Şekil 3'te paylaşılmaktadır.



Şekil 3. Dağılıma eğrisi.

Şekil 3'te dağılıma eğrisi paylaşılmıştır. Dağılıma eğrisinin asimptotu yaklaşık olarak kesim frekansını vermektedir. Analizlerimize göre tasarladığımız ODGH'nin dağılıcı karakterinden dolayı 12 GHz civarında yansımadan kaynaklı kesime uğrayacağı hesaplanmıştır.



Şekil 4. Benzetim sonuçları  $S_{11}$  (siyah),  $S_{21}$  (kırmızı), ölçüm sonuçları  $S_{11}$  (mavi),  $S_{21}$  (pembe).

Şekil 4'te tasarlanan ODGH'nin HFSS ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları ile HP8270D ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. 12 GHz civarında  $S_{11}$ 'in 0 dB'ye yaklaşıyor olması analitik olarak hesaplanan kesim frekansıyla örtüşürken, benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının da oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

## 2. Sonuç

Ampirik metotlarla ODGH'nin efektif dielektrik sabiti kapalı formda modellenmiştir. Bütün boyutlar hedeflenen minimum kesim frekansındaki esas dalga boyuyla normalize edilmiştir. Önerilen model ile tasarlanan devrenin üst kesim frekansının analitik kesim frekansına yakınlığı, efektif dielektrik sabiti hesabındaki hata oranının %8.5'in altında olduğu ve faz sabitinin efektif kırılma indisine bağlı olması göz önüne alınca makul ve tutarlı bir çözüm önerilmektedir. Hata oranları daha düşürülebilecek olsa da, bu çalışmanın ODGH için frekansa bağlı bir çözümü öneren ilk çalışma olduğu bilinmektedir.

## 3. Bilgilendirme

Bu araştırma TÜBİTAK 115E219, TÜBA GEBİP 2015 VE YBÜ BAP-585 projelerinin destekleri ile gerçekleştirilmiştir.

## Kaynaklar

- [1]. W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen, "Surface Plasmon subwavelength optics," cilt. 424, s. 824-830, 2003.
- [2]. D. Martin-Cano, M. L. Nesterov, A. I. Fernandez-Dominguez, F.-J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno and E. Moreno, "Domino plasmons for subwavelength terahertz circuitry," cilt. 18, s. 754-764, 2010.
- [3]. X. Liu, Y. Feng, B. Zhu, J. Zhao and T. Jiang, "High-order modes of spoof surface plasmonic wave transmission on thin film metal film structure," Optics Express, cilt. 21, s. 670-672, 2013.
- [4]. Y. A. Tsarin, "Conformal Mapping Technique in The Theory of Periodic Structures," Microwave and Optical Technology Letters, cilt 26, s. 57-61, 2000.