

Dielektrik yüklü metalik dalga kılavuzları için ters saçılma uygulamaları

Serkan ŞİMŞEK*, Ercan TOPUZ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Telekomünikasyon Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Kısmen dielektrik yüklü dalga kılavuzları çok sayıda mikrodalga cihazında kullanılmaktadır. Kısmen dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzları ile malzemelerin karmaşık dielektrik geçirgenliklerinin ve dielektrik yüklü metalik dalga kılavuzlarında propagasyon karakteristiklerinin belirlenmesi birçok mühendislik uygulamasında önemlidir. Bu çalışma bahsedilen her iki alandaki mevcut literatüre katkı yapılmasını amaçlamaktadır. Dielektrik yüklü metalik dalga kılavuzları için yansıma iletim ölçmeleri ile malzemelerin karmaşık dielektrik geçirgenliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış olan çalışmalar nispeten basit durumları içermektedirler. Bu çalışmada, dikdörtgen dalga kılavuzu içerisine yerleştirilen sütun şeklindeki dielektriğin geçirgenliğinin belirlenmesi ters saçılma problemi olarak formüle edildi ve literatürdeki sınırlamalar ortadan kaldırıldı. Oldukça esnek ve genel tipteki problemleri içerecek şekilde, doğru ve sayısal olarak verimli bir algoritma verildi. Aynı zamanda bu çalışmada, kayıpsız periyodik yapılarıdaki birim hücrenin Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi için bir sakınım ilişkisi ortaya konuldu. Bu sakınım ilişkisi, tek Floquet modlu bölge içerisinde yer alan iletim/durdurma band geçiş frekanslarını doğru olarak kestiren yeni bir yöntem sağlamaktadır. Bu yöntem iletim durdurma band bölgeleri verilen/ölçülen periyodik yapıyı kullanarak belirli topolojiler için birim hücre boyutlarının belirlenmesi ters problemine uygulanabilir niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Karmaşık dielektrik geçirgenlik, periyodik yüklü dalga kılavuzu.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Serkan ŞİMŞEK. simsekser@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 36 36.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Telekomünikasyon Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Kesiti ardışık dielektrik bölgeler ile dolu em dalga kılavuzlarında iletim" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 16.04.2008 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 09.06.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Inverse scattering applications for dielectric loaded metallic waveguides

Extended abstract

Partially dielectric loaded waveguides have been used in many microwave devices. Determination of complex permittivity of materials with partially dielectric loaded rectangular waveguides and propagation characteristics of periodically dielectric loaded metallic waveguides are important in many engineering applications. This study aims to extend the grounds thus far covered in both of the areas mentioned above.

The methods reported in the literature on determination of complex permittivity of materials via transmission/reflection measurements for dielectric loaded metallic waveguides include relatively simple scenarios. These approaches either treat a simplified scenario wherein the sample fills the entire cross-section of the waveguide or in considering partial filling they do not accurately account for interactions between higher order modes. In this study the determination of the complex permittivity of dielectric posts in rectangular waveguides is formulated as an inverse scattering problem and these limitations are removed. An accurate and numerically efficient algorithm is given which is quite flexible and can easily be modified to address problems involving more general types of inhomogeneous dielectric loadings in waveguides. The predicted results are compared with measurements and good agreement is obtained. Propagation of waves in periodic structures has long been an area of interest for physicists and engineers. Periodically loaded waveguides can be considered as one of the simplest subsets of periodic structures which exhibit 1-D discrete translational symmetry and which can be completely defined by specifying the loading over an interval equal to the period p , or in other words by specifying the unit cell of the structure. Propagation characteristics of such waveguides play an important role in the design problems encountered in many engineering applications such as, slow-wave structures, filters, phase shifters, polarizers, impedance matching devices, antennas, antenna feeds, and pulse compressors. Periodicity encountered in such devices is comprised of a cascade of a limited number of unit cells connected to appropriate terminations. Unit cell approach of analysis then provides an approximate description of device propagation characteris-

tics, the accuracy of which improves with the number of unit cells utilized in the design. More than often the actual device design involves a fine-tuning of the parameters characterizing the unit cell and the terminations via a multiparameter optimization scheme. The generalized scattering matrix representation of unit cell in terms of the modes of the uniform waveguide provides a convenient and efficient approach which has been used by several researchers in addressing a fairly broad range of problems involving periodically loaded waveguides. The results reported in the literature on propagation in periodically loaded waveguides also include investigations of the features of the eigenvalue spectrum of Floquet modes supported by such structures, as well as derivations of certain conservation relations satisfied by the generalized scattering matrix in the absence of losses. Probably an interesting contribution of this paper, from an applicational point of view, is the formulation of an approximate relation between the elements of the generalized scattering matrix of a symmetric unit cell, which can be used to obtain rather accurate estimates for stop-band/pass-band transitions frequencies in single Floquet mode regions of symmetric structures. The proposed approach can be implemented in a very efficient manner, without having to impose Floquet condition and solve the resulting eigenvalue equation. The method can be used in addressing the inverse problem of determining unit cell dimensions for a specified topology using measured/given values of pass-band/stopband regions. As a result, we believe that the proposed method may effectively be used in the design of microwave bandpass/stopband filter. In order to demonstrate the validity and applicability of the several points made in this paper we present some typical results. We also investigate dependence of estimated values of the band-edge frequencies obtained via the proposed approximation scheme on the parameters of the unit cell. For verification/validation purposes we have compared our mode matching generalized scattering matrix (MM-GSM) results with those calculated via an independent commercial software package (HFSS). Numerical results obtained for a typical periodically loaded waveguide are in perfect agreement with the theory and demonstrate the validity, applicability as well as the numerical efficiency of the proposed approach.

Keywords: Complex dielectric permittivity, periodically loaded waveguide.

Giriş

Düşük kayıplı ve yüksek dielektrik sabitine sahip malzemelerin gelişmesi ile birlikte, kısmen dielektrik yüklü dalga kılavuzlarının güç taşıma kapasitelerinin ve band genişliklerinin yüksüz kılavuzlara göre yüksek olmalarından dolayı kullanımları son derece yaygınlaştı (Vartanian vd., 1958). Homojen olmayan biçimde ardışık dielektrik bölgeler ile yüklü metalik dalga kılavuzları faz değiştiricileri, empedans dönüştürücüler, filtreler ve zayıflatıcılar gibi pek çok mikrodalga elemanında uygulanmaktadır (Collin, 1960).

Dikdörtgen prizması biçimdeki dielektrikle yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarının saçılma parametreleri ile ilgili literatür kapsamında; Modal Açılım Tekniği ile çözümler Arndt ve diğerleri (1984) ve (1985), Siakavara ve Sahalos (1991), Abdulnour ve Marchildon (1993), Şimşek ve diğerleri (2006)'da yer almaktadır. Kısmen dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarının, faz kaydırıcı ve empedans uygunlaştırıcı olarak kullanılması Arndt ve diğerleri (1984) ve (1985), filtre olarak kullanılması ise Siakavara ve Sahalos (1991) tarafından incelendi.

Malzemelerin dielektrik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan iletim hattı yöntemlerinde, Nicolson ve Ross (1970), Belhadj-Tahar ve diğerleri (1990), Gorriti ve Slob (2005) tarafından incelenen dielektrik malzemenin koaksiyel hat içine yerleştirilmesi veya dikdörtgen dalga kılavuzunun kesitine yerleştirilmesi durumu (Weir, 1974) ele alınabilir. Ölçülen saçılma parametrelerinden malzemenin dielektrik özelliği belirlenmektedir. Koaksiyel hatlı uygulamada malzemenin koaksiyel hattın iç ve dış iletkenleri arasına silindirik olarak çok düzgün şekilde yerleştirilmesi oldukça zordur. Bunun aksine, dikdörtgen dalga kılavuzu içerisine dikdörtgen prizması şeklinde malzemenin yerleştirilmesi çok daha kolay olmaktadır. Dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarını kullanarak malzemenin karmaşık dielektrik geçirgenliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar kapsamında dalga kılavuzunun kesitinin dielektrik malzeme ile tamamen dolu olması durumu Jarvis ve diğerleri (1990), malzemenin kılavu-

zun ortasına kısmen yüklü olarak yerleştirilme durumu ise Akhtar ve diğerleri (2007) tarafından incelendi. Dielektriğin boru kesitini kısmen doldurması durumu Civera ve diğerleri (2003) tarafından incelendi, ancak yüksek dereceli mod interaksyonu göz önüne alınmadı.

Kısmen dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarının önemli kullanım alanlarından biri de periyodik yapılardır. Periyodik yapıların Brillouin (1953) ve Collin (1960)'da belirtilen yavaş dalgaları desteklemeleri ve spektral cevaplarında iletim/durdurma bandlarının mevcut olması özelliklerinin sonucu, bu yapılar literatürde yaygın biçimde incelenmektedir. Periyodik yüklü dalga kılavuzları da periyodik yapıların ana alt kümelerinden biridir ve propagasyon karakteristikleri, yavaş dalgalı yapılar, filtreler, faz kaydırıcıları, polarizörler, empedans uygunlaştırıcı cihazlar, antenler, anten beslemeleri ve darbe sıkıştırıcıları gibi pek çok mühendislik uygulamasının tasarım problemlerinde önemli rol oynamaktadır Düzgün dalga kılavuzu modları cinsinden periyodik birim hücrenin Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi gösterimleri Omar ve Schunemann (1987a), Amari ve diğerleri (2000), Lech ve Mazur (2004) tarafından periyodik yüklü dalga kılavuzlarını içeren oldukça geniş bölgedeki problemleri kapsayacak şekilde kullanılmış olan elverişli ve verimli bir yaklaşımdır. Periyodik yüklü dalga kılavuzlarında propagasyon üzerine literatürde yer alan çalışmalar arasında, bu tarz yapılar tarafından desteklenen Floquet modlarının özdeğer spektrumu için Amari ve diğerleri (2000), Omar ve Schunemann (1987b), Rozzi ve diğerleri (1997) ve kayıpsız yapılarda Genelleştirilmiş Saçılma Matrisleri tarafından sağlanan belirli sakinim ilişkileri konusunda ise Haskal (1964), Knetsch (1968), Eleftheriades ve diğerleri (1994), Rozzi ve diğerleri (1998), Morini ve Rozzi (2001), Liu ve Dong (2006) tarafından yapılmış olan çalışmalar sayılabilir. Kısmen dielektrik yüklü dalga kılavuzları üzerine literatürdeki mevcut yayınlarda matematiksel modelin kurulması ve sınırlamalarının genel bir çerçeve içinde ortaya konulması, tasarım parametrelerinin etkin biçimde belirlenmesi ve optimizasyonu, modelin elektromagnetik ters problemlere uygulanabilir-

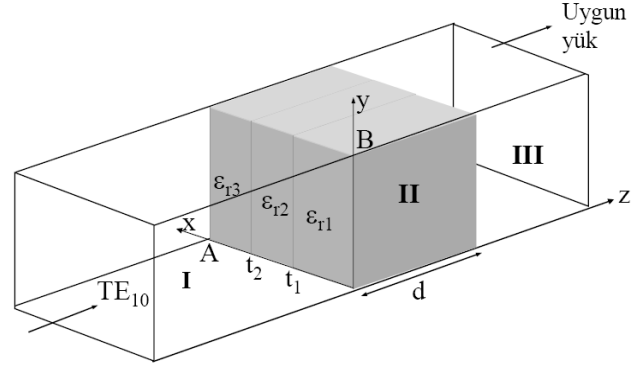
liğinin incelenmesi açılarından eksiklikler bulunmaktadır. Bu çalışma dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarının iki önemli ters saçılma uygulaması üzerine geliştirilen yöntemleri içermektedir. İlk uygulamada dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarını kullanarak malzemelerin karmaşık dielektrik geçirgenliğinin belirlenmesi amacıyla yüksek dereceli mod interaksyonunu hesaba katacak genellikte yeni bir çözüm yöntemi verilmektedir. İkinci uygulamada periyodik olarak kayıpsız dielektriklerle yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarında, istenen iletim durdurma band bölgeleri için birim hücrenin boyutlarının bulunmasını sağlayan yeni bir yöntem verilmektedir.

İletim yansıma ölçümleri ile malzemelerin karmaşık dielektrik geçirgenliklerinin belirlenmesi

Dielektrik yüklü dalga kılavuzlarını kullanarak malzemenin karmaşık dielektrik geçirgenliğinin belirlenmesi pratik öneme sahip bir ters saçılma uygulamasıdır. Bu kısımda, iletim/yansıma ölçümleri ile malzemelerin karmaşık dielektrik geçirgenliklerinin belirlenmesi için önerilen bir yöntem yer almaktadır.

Kısmen dielektrik yüklü yapılar kullanılarak saçılma parametrelerinin belirlenmesi işlemi düz saçılma problemi olarak, ölçülen saçılma parametrelerinden yararlanarak tanımlanan amaç fonksiyonlarını kullanarak malzemenin dielektrik özelliğinin belirlenmesini ters saçılma problemi olarak tanımlamak uygundur. Dikdörtgen dalga kılavuzunda frekans domeninde yansıma/iletim ölçmeleri için Şekil 1’de verilen problem ele alındı. Ölçülmek istenen malzeme dikdörtgen prizması biçiminde, dalga kılavuzunun dar kenarını tamamen dolduracak şekilde eksen boyunca d uzunluğundadır (Şekil 1’de II. Bölge). Üç dielektrik tabakanın kalınlıklarının ve dielektrik özelliklerinin uygun seçimi ile kılavuzun geniş eksenini boyunca herhangi bir pozisyona ve duruma göre yerleştirilebilen malzeme numunesi modellenebilmektedir. I ve III bölgelerinin boş olduğu ve sadece baskın TE_{10} modunun yayıldığı, dalga kılavuzunun soldan uyarıldığı ve sağdan uygun empedansla sonlandırıldığı varsayılmaktadır.

II bölgesinin dışında bu saçılma problemi iki kapılı olarak modellendiğinde S parametreleri belirlenebilir. Referans giriş düzlemi $z=0^-$ ve çıkış düzlemi $z=d^+$ seçilerek yapının S parametreleri modal açılımla bulunabilir. Bu durumda S matrisi simetrik olduğundan sadece S_{11} ve S_{21} parametrelerinin belirlenmesi yeterlidir.



Şekil 1. Kesiti ardışık dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzu

Düz problemin çözümü standard yöntemlerle elde edilebilir (Harrington, 1961). Diğer taraftan, mevcut literatürde Şekil 1’de verilen problemin çözümü için yeterli genellikte olan herhangi bir yöntem mevcut değildir. Şekil 1’de gösterilen saçılma problemi TE_{m0} $m=1,2 \dots N$ modlarını içeren bir modal açılım ile çözülebilir. I ve III bölgelerindeki aksenal propagasyon sabitleri ve modal fonksiyonları β_m ve $f_m(x)$ ile, II bölgesindekileri ise $\bar{\beta}_m$ ve $\bar{f}_m(x)$ ile gösterebilir. Her bir bölgedeki alanlar bu bölgeler içindeki modal bileşenler cinsinden bir açılımla ifade edildiklerinde ve standart modal açılım tekniğinin aşamaları izlenerek yapının saçılma parametrelerinden S_{11} ve S_{21}

$$S_{11} \cong \sum_{t=1}^N C_t \langle \bar{f}_t, f_1 \rangle - 1 \quad (1)$$

$$S_{21} \cong \sum_{t=1}^N D_t \langle \bar{f}_t, f_1 \rangle \quad (2)$$

olarak bulunur. **C** ve **D** açılım katsayılarına ilişkin alt matrisleri de

$$U_\gamma = 2\beta_1 \langle f_1, \bar{f}_\gamma \rangle \quad (3)$$

$$Q_{\gamma,t} = \sum_{m=1}^P \beta_m \langle f_m, \bar{f}_\gamma \rangle \langle f_m, \bar{f}_t \rangle - j \bar{\beta}_t \cot(\bar{\beta}_t d) \delta_{\gamma,t} \quad (4)$$

$$M_{\gamma,t} = \frac{-j \bar{\beta}_t \delta_{\gamma,t}}{\sin \bar{\beta}_t d} \quad (5)$$

$$\mathbf{C} = \{\mathbf{Q} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{M}\}^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{C} \quad (7)$$

olarak bulunur (Şimşek vd., 2006). Buradaki amaç, ölçülen yansıma/iletim katsayı değerlerinden ele alınan malzemenin karmaşık dielektrik geçirgenliğini hesaplayan bir algoritma geliştirmektir. Ölçülen S parametreleri S_{11}^m ve S_{21}^m ile gösterildiğinde malzemenin karmaşık dielektrik geçirgenliğinin belirlenmesi için aşağıda tanımlanan iki amaç fonksiyonu kullanılabilir (Şimşek vd., 2006):

$$F_1(\varepsilon) = \sum_{t=1}^N C_t \langle \bar{f}_t, f_1 \rangle - S_{11}^m - 1 \quad (8)$$

$$F_2(\varepsilon) = \sum_{t=1}^N D_t \langle \bar{f}_t, f_1 \rangle - S_{21}^m \quad (9)$$

$F_i(\varepsilon)$ $i=1,2$ malzemenin dielektrik geçirgenliğinin fonksiyonlarıdır. Bu amaç fonksiyonlarının her ikisi de ölçülen malzemenin doğru ε_r değeri için sıfır olurlar. O halde problem kök bulma problemine indirgenir. ε_r 'nin tahmini ilk değerinden başlayarak daha iyi değerlere geçen ve nihayetinde $F_i(\varepsilon)$ 'nin sıfırı olan doğru değere yakınsayan bir algoritmaya ihtiyaç vardır. Bu problemin çözümü için iyi bir ilk değer kullanıldığında (8), (9) denklemlerinin köklerinin hızlı bir şekilde belirlenmesi için Newton-Raphson yöntemi uygulanabilir. Bu durumda ardışık ε değerleri ε_n ile gösterilmek üzere iterasyon adımları

$$\varepsilon_{n+1} = \varepsilon_n - F(\varepsilon_n) / F'(\varepsilon_n) \quad (10)$$

bağıntısı ile belirlenir. Buradaki F_ε , F_1 veya F_2 'nin ε 'na göre her bir aşamada sayısal olarak hesaplanan kısmi türevlerini göstermektedir. Amaç fonksiyonlarının durağan noktalarına rastlayan ilk değerler için yukarıda belirtilen iterasyon yakınsamayabilir. Uygun seçilmeyen ilk değerlerin belirlenmesi ve atılması kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Buradaki esas zorluk ise ters problemin doğası sonucu ortaya çıkan fiziksel olmayan çözümlerin atılmasıdır. Malzemenin dielektrik geçirgenliğini belirlemek için birbirine yakın iki frekansta yapılan ölçmenin fiziksel olmayan çözümlerin atılması için yeterli olacağı Şimşek ve diğerleri (2006) tarafından ortaya konuldu ve ters problemin çözümü için aşağıdaki algoritma önerildi:

- (i) Malzemenin beklenen ε_r değeri etrafında reel eksen üzerinde geniş bir bölge seçin.
- (ii) Verilen amaç fonksiyonlarından (8) veya (9)'dan herhangi birine ölçüm değeri girilerek, ölçülen frekansta bu aralıkta tüm olası karmaşık ε_r değerlerini (10) ile belirleyin.
- (iii) Aynı işlemi başka bir frekanstaki ölçüm değeri için tekrarlayın.
- (iv) Ortak olmayan çözüm dışındaki tüm fiziksel olmayan çözümleri atarak eleyin.

Ortaya konan yaklaşımın doğruluğunu ve sayısal verimliliğini göstermek amacıyla deneysel ölçüm yapılarak polipropilen malzeme WR-90 X bandı dalga kılavuzuna Şekil 1'de gösterildiği gibi kesilerek yerleştirildi ($t_1 = 0$ mm, $t_2 = 9.6$ mm, $d = 24.90$ mm, $\varepsilon_{r3} = 1$). Tablo 1'de parametre değerleri verilen malzeme için HP 8410B network analizör ile iki farklı frekansta yapılan yansıma katsayısı ölçme sonuçları ve önerilen algoritmada (8) amaç fonksiyonunda 10 modluk modal açılım kullanarak ε_r 'nin 1 ile 10 arasında taranması sonucunda hesaplanan ε_r değerleri gösterilmektedir.

Önerilen algoritma ile malzemenin ε_r değerleri için her iki ölçme frekansında farklı değerlere yakınsamanın olduğu Tablo 1'de görülmektedir. Ancak Tablo 1'de koyu olarak gösterildiği üzere

her iki hesaplamada ortak olan tek çözüm mevcuttur ve bu çözüm fiziksel olan çözümdür. Böylelikle her iki ölçüme ortak olmayan çözümlerin fiziksel olmadıkları tespit edilerek atılmaları mümkün olur. Yapılan ölçümlerin önerilen yöntemde kullanılması sonucunda malzemenin ϵ_r değeri $\epsilon_r = 2.36 - j0.028$ olarak bulunur.

Tablo 1. Fiziksel olmayan çözümlerin elenmesi

(GHz)	Ölçülen S_{11}	Karmaşık ϵ_r
$f = 8.585$	$S_{11} = 0.402e^{j183.5^\circ}$	$\epsilon_r = 1.8689 - j2.7640$
		$\epsilon_r = 2.3565 - j0.0286$
		$\epsilon_r = 4.4592 - j0.2139$
		$\epsilon_r = 7.5037 - j0.6078$
$f = 9.001$	$S_{11} = 0.396e^{j163^\circ}$	$\epsilon_r = 2.2047 - j2.9545$
		$\epsilon_r = 2.3582 - j0.0282$
		$\epsilon_r = 4.2370 - j0.3898$
		$\epsilon_r = 6.9511 - j0.9162$
		$\epsilon_r = 7.5546 - j3.8736$
		$\epsilon_r = 8.6064 - j0.0040$
		$\epsilon_r = 9.8028 - j0.6361$

İletim durdurma band bölgeleri verilen periyodik yapının birim hücre boyutlarının belirlenmesi

Kayıpsız dielektrik bölgeler ile yüklü düzgün metalik dalga kılavuzlarında harmonik dalgaların yayılımını ele alalım. Dalga kılavuzu kesitte bağlı dielektrik sabiti $\epsilon_{r,i}(x,y)$ ve eksenel uzunlukları l_i , $i = 1, N$ olan dielektrik bölgelerle $p = \sum l_i$ periyodu ile periyodik olarak yüklenmiş olsun. Birim hücre dalga kılavuzunun $z=z_1$ ve $z=z_2=z_1+p$ düzlemleri ile sınırlı kısmı olarak tanımlansın. Periyodik yapıların transfer karakteristiği periyodik birim hücreden tam olarak belirlenir. Bu durumda, $z=z_1$ ve $z=z_2$ 'deki enine alan bileşenleri sırasıyla $\vec{E}_1(x,y)$, $\vec{H}_1(x,y)$ ve $\vec{E}_2(x,y)$, $\vec{H}_2(x,y)$ olsun. Buna göre Floquet teoremi gereği,

$$(\vec{E}_2, \vec{H}_2) = \lambda (\vec{E}_1, \vec{H}_1) \quad (11)$$

yazılabilir. Burada λ , verilen frekansta birim hücre tarafından belirlenen özdeğeri ifade etmektedir ve birim hücrenin tanımlanmasında

seçilen z_1 'den bağımsızdır. Özdeğerler genellikle kompleks ve dördütlü halde $\lambda_{1-4} = \lambda$, $1/\lambda$, λ^* , $1/\lambda^*$ (* simgesi kompleks eşleniği göstermektedir) olarak ortaya çıkarlar (Amari vd., 2000; Rozzi vd., 1998). Her bir λ 'ya karşı düşen çözümden periyodik yapının bir Floquet modu olarak bahsedilebilir. Bu çözümler kullanıldığında eksenel düzlemlerdeki modal alanlar, kendisinden p kadar uzaktaki alandan λ kadar farklı olmaktadır. Ardışık süreksizlikler arasındaki etkileşim elektromagnetik dalganın periyodik yapı boyunca belirli frekans aralıklarında iletimine izin vermektedir. Yani bu etkileşim periyodik yapının frekans karakteristiğinde iletim/durdurma bandlarının oluşmasına neden olmaktadır. İletim ve durdurma bandları, ele alınan frekans bölgesinde periyodik yapıda en az bir Floquet modunun propagasyon yapıp yapmadığına göre karakterize edilebilir. Diğer bir deyişle istenen frekans bölgesinde en az bir Floquet modu iletimde ise bu bölge iletim bandıdır. Aksi takdirde mod iletimi söz konusu olmadığı için bir durdurma bandı söz konusudur. Verilen bir frekansta Floquet modunun iletilmesi için o moda karşı düşen özdeğer saf faz faktörüne sahip olmalıdır. Bu durumda, $\lambda = 1/\lambda^*$, $1/\lambda = \lambda^*$ olur ve özdeğerler λ_{1-4} dördütlü değerden $\lambda_{1,2}$ $|\lambda_1| = |\lambda_2| = 1$ çiftlerine indirgenir. Böylelikle

$$\lambda_{1,2} = e^{\pm j\theta}, \quad \theta = \beta p \in (0, \pi) \quad (12)$$

yazılabilir. Zamana bağımlılık $e^{j\omega t}$ olarak seçildiğinde, (12) denklemindeki - ve + işaretlerine karşı düşen dalga çözümleri, sırasıyla pozitif ve negatif yönlerde β Floquet faz faktörü ile propagasyon yapan dalgaları göstermektedir.

Periyodik yapının propagasyon karakteristikleri birim hücrenin Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi ile tanımlanabilir (Eleftheriades vd., 1994; Rozzi vd., 1998). Birim hücre için Saçılma Matrisi gösterilimlerinde, genelliği kaybetmeden giriş çıkış portlarının referansları boş dalga kılavuzuna göre alınabilir. Düzgün boş dalga kılavuzunda TE veya TM tipi öz fonksiyonları $\vec{e}_i(x,y)$ olarak tanımlandığında normalizasyonun aşağıdaki gibi yapıldığı varsayılacaktır:

$$\langle \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j \rangle = \int_{S_i} \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j ds = \delta_{i,j}. \quad (13)$$

Burada, i, j mod indislerini, $\delta_{i,j}$ kroneker delta-sını göstermekte, integral ise boş dalga kılavuzunun S_i kesiti üzerinde alınmaktadır. Birim hücrenin giriş ($z=z_1$) ve çıkış ($z=z_2=z_1+p$) kapılarındaki enine alan bileşenleri, boş dalga kılavuzunun öz fonksiyonları cinsinden temsil edildiğinde

$$\vec{E}(z_1) = \vec{E}_1 = (\mathbf{a}_1 + \mathbf{b}_1)' \mathbf{Z}^{1/2} \vec{e} \quad (14a)$$

$$\vec{H}(z_1) = \vec{H}_1 = (\mathbf{a}_1 - \mathbf{b}_1)' \mathbf{Z}^{-1/2} \vec{u}_z \times \vec{e} \quad (14b)$$

$$\vec{E}(z_2) = \vec{E}_2 = (\mathbf{a}_2 + \mathbf{b}_2)' \mathbf{Z}^{1/2} \vec{e} \quad (14c)$$

$$\vec{H}(z_2) = \vec{H}_2 = -(\mathbf{a}_2 - \mathbf{b}_2)' \mathbf{Z}^{-1/2} \vec{u}_z \times \vec{e} \quad (14d)$$

olur. Burada t transpoz operatörünü, \vec{e} modal fonksiyonları gösteren sütun vektörünü, \mathbf{Z} ise modal empedansları gösteren diyagonal matrisi simgelemektedir. $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ $i=1,2$ ise sırasıyla, Şekil 2'de gösterilen birim hücrenin kapılarından içeri ve dışarı doğru propagasyon yapan dalgaların modal genliklerine karşı düşen sütun vektörleridir.



Şekil 2. Birim hücrenin kapılarındaki saçılma parametrelerinin tanımlanması

\mathbf{a} ve \mathbf{b} 'nin elemanlarının yukarıdaki normalizasyonu, propagasyon yapan modlar için, birim hücrenin kapılarından içeri ve dışarı yönde güç akışı ölçüsünü verecektir. (11) ve (14) denklemlerini kullanarak Floquet teoremi alternatif bir biçimde

$$\mathbf{b}_2 = \lambda \mathbf{a}_1, \quad \mathbf{a}_2 = \lambda \mathbf{b}_1 \quad (15)$$

olarak yazılabilir. Kapılardaki modal genlikler \mathbf{a} ve \mathbf{b} Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi ile $\mathbf{b}=\mathbf{S} \cdot \mathbf{a}$

olarak birbirlerine bağlıdır. (14)'de verilen gösterim modal açılımda N mod kullanılarak kesildiğinde, $2N \times 2N$ boyutlu Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi elde edilir. Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi alt blok matrislere bölüldüğünde

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

elde edilir. \mathbf{S} Matrisinin hesaplanması birim hücre için boş dalga kılavuzunun \vec{e} modlarını kullanarak tam dalga analizini gerektirmektedir. Bu işlem ise genellikle oldukça zordur. Bununla birlikte pratik uygulamalarda karşılaşılan yüklü dalga kılavuzlarında oldukça geniş problem grupları için kullanılabilir Saçılma Matrisi gösterimleri geliştirildi (Shibata ve Itoh 1998; Yakovlev vd., 2000; Wu ve Wang 2001, Şimşek vd., 2006). (16) içerisinde (15)'i kullanarak periyodik yapının özdeğer matris denklemini aşağıdaki gibi elde edilir (Lech ve Mazur, 2004):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{S}_{11} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{S}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{a}_1 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -\mathbf{S}_{12} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{S}_{22} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{a}_1 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (17)$$

Burada \mathbf{I} birim matrisi temsil etmektedir. Frekansın taranması ile her bir adımda özdeğerler hesaplanarak, β - k dispersiyon diyagramı elde edilir. Böylelikle periyodik yapının iletim/durdurma bandları belirlenir. Diğer yandan (14)'ü kullanarak birim hücrede depo edilen kompleks güç Ψ aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\Psi = \mathbf{a}' \mathbf{Q} \mathbf{a}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11} & \mathbf{Q}_{12} \\ \mathbf{Q}_{21} & \mathbf{Q}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix}^* \quad (18a)$$

$$\mathbf{Q}_{11} = (\mathbf{I} + \mathbf{S}_{11}) \mathbf{U} (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{11}^*) - \mathbf{S}_{12} \mathbf{U} \mathbf{S}_{12}^* \quad (18b)$$

$$\mathbf{Q}_{12} = \mathbf{S}_{12} \mathbf{U} (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{22}^*) - (\mathbf{I} + \mathbf{S}_{11}) \mathbf{U} \mathbf{S}_{12}^* \quad (18c)$$

$$\mathbf{Q}_{21} = \mathbf{S}_{12} \mathbf{U} (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{11}^*) - (\mathbf{I} + \mathbf{S}_{22}) \mathbf{U} \mathbf{S}_{12}^* \quad (18d)$$

$$\mathbf{Q}_{22} = (\mathbf{I} + \mathbf{S}_{22}) \mathbf{U} (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{22}^*) - \mathbf{S}_{12} \mathbf{U} \mathbf{S}_{12}^* \quad (18e)$$

(Şimşek ve Topuz, 2007). Burada \mathbf{U} elemanları propagasyon yapan modlar için 1 'e, kesimde

olan TE ve TM modları için j ve $-j$ 'ye eşit olan $N \times N$ boyutlu diyagonal matrisi göstermektedir. Kayıpsız yapılarda Ψ 'nin reel kısmı özdeş olarak sıfır olacağı için, \mathbf{Q} matrisinin elemanları $\mathbf{Q}_{ij} = -\mathbf{Q}_{ji}^*$ bağıntısını sağlamak zorunda kalır (Morini ve Rozzi, 2001). Diğer taraftan, kayıpsızlık koşulunu zorladığımızda iletim bandında Ψ özdeş olarak sıfıra, durdurma bandında sonlu sanal değerlere eşit olur. Ψ 'nin bu özelliği transfer fonksiyonu genliğinin periyodik yapının iletim durdurma bandlarında $1/0$ değerleri alınmasının beklenen bir sonucudur. Ψ boş dalga kılavuzunun dik modal fonksiyonları ile ifade edilen, birim hücre içerisinde depolanan kompleks gücü temsil etmektedir. Böylelikle Ψ 'nin ilgilenilen frekans bandında hesaplanması ve iletim/durdurma band kenarlarının Ψ 'nin sıfır geçişlerinin gözlemlenmesi ile belirlenmesi, dispersiyon diyagramının hesaplanmasını gerektiren geleneksel yaklaşıma alternatif bir yaklaşımdır (Şimşek ve Topuz, 2007). Bununla birlikte, Ψ 'nin (18) ile hesaplanması için (17) özdeş denkleminin çözümü olan özvektörler gerektiğinden, doğrudan uygulandığında, bu yaklaşım geleneksel yöntemle göre bir üstünlük sağlamayacaktır.

Band kenarlarına karşı düşen frekanslarda Ψ tam olarak sıfırdan geçer. İşte bu gerçekten hareket ederek her bir frekans adımıyla özdeş denkleminin çözülmesini gerektirmeksizin sadece yapının Saçılma Matrisi bilgisinin kullanılmasıyla band kenar frekanslarının belirlenmesini sağlamak için geliştirilen yaklaşık bir çözüm yöntemi aşağıda verilecektir. Simetrik hücre durumunda, çift ve tek modlar tarafından depolanan kompleks güç

$$\Psi_e = 2\mathbf{a}_1^t \mathbf{\Omega} \mathbf{a}_1^* \quad (19a)$$

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2 = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_{11} + \mathbf{S}_{12}] \mathbf{U} [\mathbf{I} - \mathbf{S}_{11}^* - \mathbf{S}_{12}^*] \quad (19b)$$

ve

$$\Psi_o = 2\mathbf{a}_1^t \mathbf{\Delta} \mathbf{a}_1^* \quad (19c)$$

$$\mathbf{\Delta} = \mathbf{Q}_1 - \mathbf{Q}_2 = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_{11} - \mathbf{S}_{12}] \mathbf{U} [\mathbf{I} - \mathbf{S}_{11}^* + \mathbf{S}_{12}^*] \quad (19d)$$

olarak elde edilir (Şimşek ve Topuz, 2007).

Kayıpsız yapılarda reel güç sakınımı gereği iletim ve durdurma bandında çift veya tek modlar tarafından depolanan reel güç sıfıra eşit olduğundan

$$\text{Re}\{\Psi_e, \Psi_o\} = 0, \text{Re}\{\mathbf{a}^t \mathbf{\Omega} \mathbf{a}^*\} = 0 \quad (20)$$

elde edilir. Diğer taraftan band kenarlarında Ψ_e veya Ψ_o 'nun sanal kısmı sıfırdan geçmek zorundadır. Ψ_e ve Ψ_o çift ve tek simetrik Floquet modları tarafından birim hücrede depolanan kompleks gücü ifade etmektedir. Depolanan kompleks güce en büyük katkı kılavuz içerisinde iletimde olan modlardan gelir ve yaklaşık olarak

$$\Psi_e, \Psi_o \cong 2\mathbf{a}_p^t \{2\text{Im}(\mathbf{W}_{p,p}) - \mathbf{W}_{p,np} \mathbf{W}_{p,np}^{t*}\} \mathbf{a}_p^* \quad (21)$$

(21) ile ifade edilebilir. \mathbf{W} 'nin tanımına göre çift ve tek modlar tarafından depolanan kompleks güç ifade edilebilir. Çalışma frekans bölgesinde pek çok uygulamada \mathbf{S} matrisi gösterimleri iletilen tek bir mod içermektedir. Bu durumda

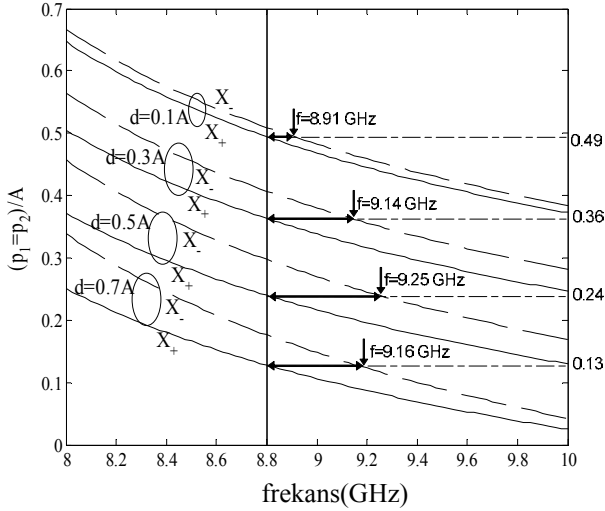
$$2\text{Im}(\mathbf{W}_{p,p}) - \mathbf{W}_{p,np} \mathbf{W}_{p,np}^{t*} = 0 \quad (22)$$

sıfır geçişini incelemek yeterli olacaktır. Bu denkleminde $\mathbf{W} = \mathbf{S}_{11} + \mathbf{S}_{12}$ veya $\mathbf{W} = \mathbf{S}_{11} - \mathbf{S}_{12}$ olarak tanımlandığında (22) matris denkleminin 1. satır, 1. sütun elemanları sırasıyla X_+ , X_- olarak elde edilerek aşağıdaki biçimde

$$X_{\pm} = 2\text{Im}\{S_{\nu,\nu} \pm S_{\nu,\nu+N}\} - \sum_{k=M+1}^N |S_{\nu,k} \pm S_{\nu,k+N}|^2 = 0 \quad (23)$$

yazılabilir (Şimşek ve Topuz, 2007). Burada, $S_{i,j}$ Genelleştirilmiş Saçılma Matrisinin elemanlarını, ν alt indisi dalga kılavuzunun iletilen ilk (baskın) modunun giriş kapısını göstermekte ve Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi gösterimlerinde ilgilenilen frekansta boş dalga kılavuzunda N adet mod kullanıldığında ve bunlardan M tanesinin propagasyon yaptığı, $N-M$ ta-

şimlari gözlemlenerek, seçilen bu parameter değerleri için sırasıyla 8.8-9.16 GHz, 8.8-9.25 GHz, 8.8-9.14 GHz ve 8.8-8.91 GHz frekans bandlarında durdurma bandı bölgelerinin mevcut olacağı belirlenmiş olur.



Şekil 4. X_+ ve X_- 'nin köklerinin değişimleri ile kestirilen iletim durdurma bandları

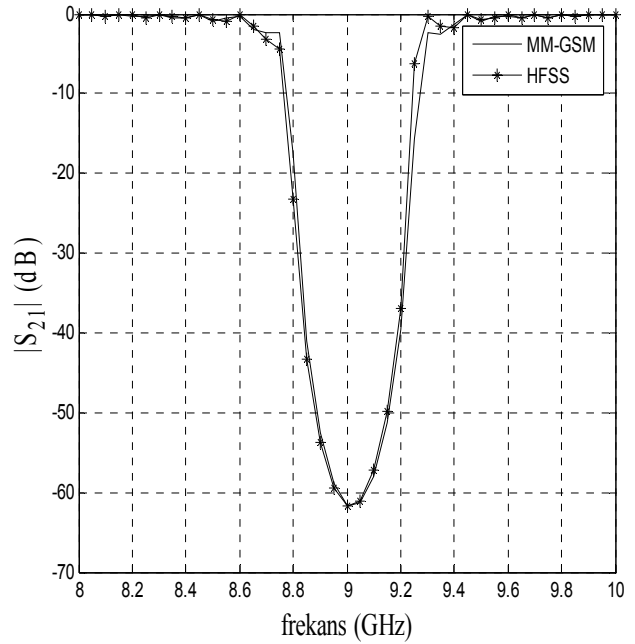
Pratik uygulamalarda ise sonlu sayıda birim hücreye sahip, sonlu periyodik yapılar kullanılabilir ve gerçekleştirilebilirler. 50 birim hücreli yarı periyodik yapı beklendiği üzere 9 GHz etrafında durdurma bandı davranışı göstermektedir ve band kenarları beklendiği üzere Şekil 5'te gösterilen 8.8 GHz ve 9.25 GHz değerlerine karşı düşmektedir. MM-GSM sonuçlarının HFSS sonuçları ile son derece tutarlı olduğu da Şekil 5'ten görülmektedir.

Bu bağlamda Şekil 4 farklı frekans bölgelerinde durdurma bandı elde etmek için gerekli birim hücrenin boş ve dielektrik yüklü bölgelerinin uzunluklarının kestirimine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem mikrodalga uygulamalarında tasarım amacıyla, periyodik yapının birim hücre parametrelerinin belirlenmesi problemi için alternatif bir yöntemdir.

Sonuçlar

Bu çalışmada dielektrik yüklü metalik dalga kılavuzlarında önemli ters saçılma uygulamaları açısından önem taşıyan iki örnek ele alındı. Bu

kapsamda ilk olarak, kesiti herhangi bir konumda sütun şeklindeki bir dielektrik malzeme ile kısmen yüklü dikdörtgen dalga kılavuzu kullanılarak, malzemelerin karmaşık dielektrik geçirgenliğini az sayıda frekans ölçmesi ile belirleyen ve yüksek dereceli mod etkileşimini hesaba katacak genellikte olan bir yöntem ve oldukça genel tipteki problemlere uygulanabilecek nitelikteki bu yöntemin değerlendirilmesinde kullanılabilir etkin bir algoritma verildi. Ayrıca, deneysel ölçümlerle yöntemin doğruluğu ve uygulanabilirliği ortaya konuldu.



Şekil 5. Elli birim hücreli yarı-periyodik yapıya ait iletim katsayısı ($d/A=0.5$, $(p_1=p_2)/A=0.24$).

Ters problemlere ikinci bir örnek olarak periyodik biçimde dielektrik bölgelerle yüklenen dikdörtgen kesitli dalga kılavuzlarında, ölçme sonucu olarak veya tasarım gereksinimleri kapsamında belirlenen iletim durdurma frekans bandı bölgelerinin elde edilmesini sağlayan belirli bir konfigürasyona ilişkin birim hücre boyutlarının bulunmasını sağlayan bir yöntem verildi. Bu yöntem iletim karakteristikleri verilen periyodik yapıların tasarım ve gerçekleştirilmesi için gerekli parametre optimizasyonu süreçlerinde işlem yükünü önemli ölçüde düşürülmesini sağlayacak niteliktedir. Önerilen yöntemin bu tip uygulamalarda yaygın biçimde kullanılacağı öngörülmektedir.

Kaynaklar

- Abdulnour, J. ve Marchildon, L., (1993). Scattering by dielectric obstacle in rectangular waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **41**, 11, 1988-1994.
- Akhtar, M.J., Feher, L.E. ve Thumm, M., (2007). A closed-form solution for reconstruction of permittivity of dielectric slabs placed at the center of a rectangular waveguide, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **4**, 1, 122-126.
- Amari, S., Vahldieck, R., Bornemann, J. ve Leuchtmann, P., (2000). Spectrum of corrugated and periodically loaded waveguides from classical matrix eigenvalues, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **48**, 3, 453-460.
- Arndt, F., Bornemann, J. ve Vahldieck R., (1984). Design of multisection impedance-matched dielectric-slab filled waveguide phase shifters, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **32**, 1, 34-39.
- Arndt, F., Frye, A., Wellnitz, M. ve Wirsing, R., (1985). Double dielectric-slab-filled waveguide phase shifter, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **33**, 5, 373-381
- Belhadj-Tahar, N.E., Fourrier-Lamer, A. ve Chantillac, H., (1990). Broad-band simultaneous measurement of complex permittivity and permeability using a coaxial discontinuity, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **38**, 1, 1-7.
- Brillouin, L., (1953). *Wave propagation in periodic structures*, Dover Publications, Inc., New York.
- Civera, J.M.C, Canos, A.J., Foix, F.L.P. ve Davo, E.R., (2003). Accurate determination of the complex permittivity of materials with transmission reflection measurements in partially filled rectangular waveguides, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **51**, 1, 16-24.
- Collin, R.E., (1960). *Field theory of guided waves*, McGraw-Hill Book Comp., New York.
- Eleftheriades, G.V., Omar, A.S., Katehi L.P.B. ve Rebeiz, G.M., (1994). Some important properties of waveguide junction generalized scattering matrices in the context of the mode matching technique, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **42**, 10, 1896-1903.
- Gorriti, A.G. ve Slob, E.C., (2005). A new tool for accurate s-parameters measurements and permittivity reconstruction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**, 8, 1727-1735.
- Harrington, R.F., (1961). *Time harmonic electromagnetic waves*, McGraw-Hill Book Comp., New York.
- Haskal, H., (1964). Matrix description of waveguide discontinuities in the presence of evanescent modes, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **12**, 2, 184-188.
- Jarvis, J.B., Vanzura E.J. ve Kissick, W.A., (1990). Improved technique for determining complex permittivity with the transmission reflection method, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **38**, 8, 1096-1103.
- Knetsch, H.D., (1968). Beitrag zur theorie sprunghafter querschnitts-veraenderungen von hohlleitern, *Archive Elektrischer Uebertragung*, **22**, 12, 591-600.
- Lech, R. ve Mazur, J., (2004). Propagation in rectangular waveguides periodically loaded with cylindrical posts, *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, **14**, 4, 177-179.
- Liu, H.K. ve Dong, T.L., (2006). Propagation characteristics for periodic waveguide based on generalized conservation of complex power technique, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **54**, 9, 3479-3485.
- Morini, A. ve Rozzi, T., (2001). On the definition of the generalized scattering matrix of a lossless multiport, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49**, 1, 160-165.
- Nicolson, A.M. ve Ross, G.F., (1970). Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **19**, 4, 377-382.
- Omar, A.S. ve Schunemann, K.F., (1987a). Transmission matrix representations of finline discontinuities, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **33**, 9, 765-770.
- Omar, A.S. ve Schunemann, K.F., (1987b). Complex and backward-wave modes in inhomogeneously and anisotropically filled waveguides, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **35**, 3, 268-275.
- Rozzi, T., Pierantoni, L. ve Farina, M., (1997). Eigenvalue approach to the efficient determination of the hybrid and complex spectrum of inhomogeneous, closed waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **45**, 3, 345-353.
- Rozzi, T., Pierantoni, L. ve Farina, M., (1998). General constraints on the propagation of complex waves in closed lossless isotropic waveguides, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **46**, 5, 512-516.
- Shibata, T. ve Itoh, T., (1998). Generalized scattering matrix modeling of waveguide circuits using FDTD field simulations, *IEEE Transactions*

- on *Microwave Theory and Techniques*, **46**, 11, 1742-1751.
- Siakavara, K. ve Sahalos, J.N., (1991). The discontinuity problem of a rectangular dielectric post in rectangular waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **39**, 9, 1617-1622.
- Şimşek, S., Işık, C., Topuz, E. ve Esen, B., (2006). Determination of the complex permittivity of materials with transmission/reflection measurements in rectangular waveguides, *AEU International Journal of Electronics and Communications*, **60**, 9, 677-680.
- Şimşek, S. ve Topuz, E., (2007). Some properties of generalized scattering matrix representations for metallic waveguides with periodic dielectric loading, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **55**, 11, 2336-2344.
- Vartanian, P.H., Ayres, W.P. ve Helgesson, A.L., (1958). Propagation in dielectric slab loaded rectangular waveguides, *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **6**, 2, 215-222.
- Weir, W.B., (1974). Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies, *IEEE Proceedings*, **62**, 1, 33-36.
- Wu, K. Li. ve Wang, H., (2001). A rigorous modal analysis of h-plane waveguide t-junction loaded with partial-height post for wide-band applications, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49**, 5, 893-901.
- Yakovlev, A.B., Khalil, A.I., Hicks, C.W., Mortazawi, A. ve Steer, M.B., (2000). The generalized scattering matrix of closely spaced strip and slot layers in waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **48**, 1, 126-137.