

S-Şeklindeki Metal İletkenlerin Çokbantlı Frekans Seçici Yüzey Özelliği

Kemal Delihacıoğlu

Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik -Elektronik Mühendisliği Bölümü

Kilis 7 Aralık Üniversitesi

kemal@kilis.edu.tr

Özet

Bu çalışmada dielektrik levha üzerine periyodik yerleştirilen S-şeklindeki metal iletkenlerin çokbantlı Frekans Seçici Yüzey (FSY) özelliği TE (Transverse Electric) düzlemsel dalga için teorik olarak incelendi. S-şekilli FSY elemanları mükemmel iletken olup, dielektrik levhanın yüzeyine periyodik olarak yerleştirilmiştir. Metal yüzeylerde gelen dalganın indüklediği bilinmeyen akım katsayıları üst üste çakışan parçalı sinüs temel fonksiyonları kullanılarak hesaplandı. Rezonans frekansının S-şeklinin kol uzunluklarına ve birim hücre boyutlarına bağlı olduğu gözlemlendi. S-şekli X-(8-12 GHz), K_u -(12-18GHz), K-(18-26 GHz) ve K_a -(26-40GHz) frekans bantlarında bant durdurucu filtre gibi davranmaktadır. S- (1-5GHz), X- ve K_u -bantlarında gelen dalgayı tamamen geçirebildiği de görülmüştür. S-şekilli FSY çokbantlı filtre uygulamalarında kullanılabileceği gösterildi.

Abstract

In this study, multiband Frequency Selective Surface (FSS) characteristic of S-shaped metal conductors placed periodically on a dielectric slab is investigated theoretically for Transverse Electric (TE) plane wave. Being perfectly conducting, the S-shaped FSS elements are placed periodically on a face of dielectric slab. The unknown current coefficients induced by incident wave on the metallic surfaces are computed using overlapping piecewise sinusoidal basis functions. It is observed that the resonance frequency depends on the arm lengths of S-shape and unit cell dimensions. S-shape acts as a bandstop filter in X- (8-12 GHz), K_u -(12-18 GHz), K- (18-26 GHz), and K_a - (26-40 GHz) bands depending on the value of arm lengths and unit cell dimensions. It is also seen that the electromagnetic wave can be fully transmitted in S- (1-5 GHz), and X- and K_u -band frequency regions. It is shown that the S-shaped FSS array can be used for multiband frequency filter applications.

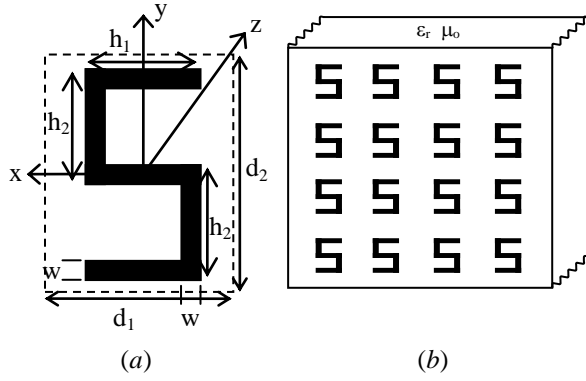
1. Giriş

Frekans Seçici Yüzey (FSY) ile ilgili tasarımlar yıllardan beri devam etmekte olup şüphesiz yeni tasarımlar devam edecektir. Çokbantlı FSY özelliği uydu iletişimde ve yansıtıcı antenlerin farklı frekans bantlarında çalışması gibi alanlarda oldukça yoğun olarak kullanılmaktadır [1]-[7]. FSY'lerden bant geçiren veya bant durdurucu filtre uygulamalarında da faydalanılmaktadır. Anten uygulamalarında S-şekilli FSY'ler

kol uzunluklarına ve birim hücre boyutlarına bağlı olarak X-, K_u -, K- ve K_a - bantlarında bant durdurucu filtre olarak kullanılırken, elektromanyetik dalgaları DC den X-bandına kadar alçak geçiren filtre tasarımlarında da kullanılabilir. Elektromanyetik dalganın belirli frekans aralığında geçişinin yasaklandığı (Photonic Bandgap) yapılar olarak da kullanılabilir [8]. Mikrodalga [9],[10] ve milimetre [11] dalga alanlarında periyodik yapıyı oluşturan elemanların açıklık (aperture) ya da iletken (conductor) olmasına bağlı olarak FSY'ler bant geçiren ya da bant durdurucu filtre uygulamalarında kullanılmaktadır. Rezonans frekansı civarlarında periyodik metal elemanlar gelen dalganın polarizasyonunun, metal elemanların şeklinin ve elemanlar arasındaki mesafenin belirlediği spektral seçicilik gösterir. Dielektrik levha burada iletkenleri desteklemek amacıyla kullanılmış olup FSY'lerin spektral tepkisini değiştirir. FSY'lerle ilgili teorik ve deneysel çalışmalar ilk olarak dipol, üçkutuplu dipol (tripole), çapraz kutuplu dipol (cross dipole), halka (ring) ve kare döngü (square loop) gibi yapılarla gerçekleştirilmiştir [3]. Literatürde şu ana kadar çok farklı şekiller FSY olarak çalışılmıştır. Bunlardan bazıları şunlardır: dipol, üçkutuplu dipole, dört ayaklı yüklü elemanlar (four legged loaded elements) ve altıgen elemanlar [10], kare benzeri açık halka [12], eşmerkezli üç dairesel halka [13], ayrıık halka rezonatöründen (AHR) ve tamamlayıcı AHR'den dolayı bant durdurucu veya geçiren filtre [14], dielektrik tabaka üzerindeki periyodik yapılardan saçılma [15], dielektrik tabakanın hem altına hem de üstüne konulan periyodik yapılardan saçılma [16], bakışsımsız (chiral) FSY [17], iki döngülü kare şekilli yapılar [18], bakışsımsız levha üzerinde L-şeklindeki FSY [19] ve L-şekilli ve bir döngülü helix şeklindeki iletkenlerden oluşan FSY [20] vb.

Bu çalışmada, dielektrik levha üzerinde mükemmel iletkenlerden oluşan periyodik S-şekilli elemanların çokbantlı FSY özelliği incelenmiştir. S-şeklindeki iletken elemanlar dielektrik levha üzerine Şekil 1'de gösterildiği gibi periyodik olarak dizilmiştir. S-şekli üç yatay (x- yönünde) ve iki dikey (y- yönünde) olmak üzere beş koldan oluşmaktadır. Şekil 1a'da görüldüğü üzere S-şeklinin bükülü kısımları 90° açılı olup toplamda dört köşe yapılmıştır. Dielektrik levha iki hava ortamı arasında olup S-şeklindeki iletkenler levhanın ön yüzüne Şekil 1b'deki gibi periyodik olarak yerleştirilmiştir.

S-şekilli FSY'e TE düzlemsel dalganın hava ortamından normal açıyla geldiği kabul edilmiştir. Gelen, yansıyan ve geçen elektrik ve manyetik alan denklemleri [21]'de detaylı olarak görülebilir. Gelen elektromanyetik dalga S-şekilli periyodik metal elemanlar üzerinde elektrik akımı indükler ve

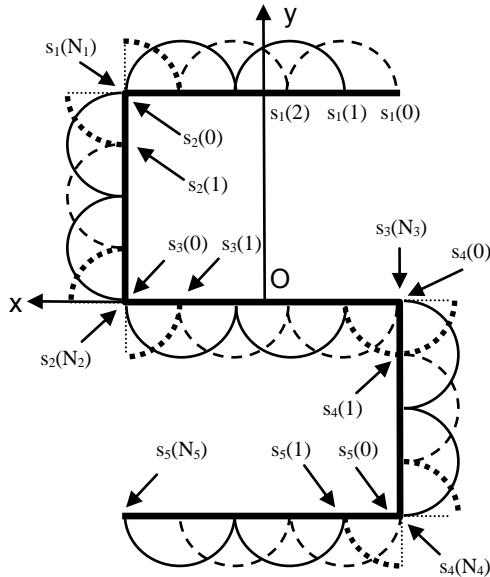


Şekil 1: S-şekilli FSY. (a) Birim hücre, (b) Önden görünüm

indüklenen bu akımlar saçılan dalga üretir. Metal yüzeylerde indüklenen akımları bulmak için Galerkin tipi Moment Metodu [22] kullanılmıştır. S-şekli üzerinde indüklenen akım üst üste çakışan parçalı sinus temel fonksiyonları olarak Şekil 2’de gösterildiği gibi genişletilebilir. Temel fonksiyonlar f_n , değişken yönde ve parametrik formda aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$f_n(s) = \mathbf{a}_s \begin{cases} \frac{\sin\beta(s-s_{n-1})}{\sin\beta(s_n-s_{n-1})} & s_{n-1} \leq s < s_n \\ \frac{\sin\beta(s_{n+1}-s)}{\sin\beta(s_{n+1}-s_n)} & s_n \leq s < s_{n+1} \end{cases} \quad (1)$$

Bu denklemde β serbest uzay faz katsayısını ve \mathbf{a}_s x- veya y-yönünde birim vektörü göstermektedir. Akım sadece S-şeklinin kolları boyunca aktığından x- ya da y-’ye bağlıdır. Akımın referans yönü $s_1(0)$ dan $s_1(1)$ ’e doğru seçilmiştir. S-şeklinin eni, kol uzunluğu ve dalga boyuna göre çok küçük seçildiğinden o yöndeki akım ihmal edilmiştir.



Şekil 2: Üst üste çakışık parçalı sinus fonksiyonlarının S-şekli üzerinde şematik gösterimi

S-şekli üzerindeki akım katsayılarını bulmak için öncelikle her bir kolu s_1, s_2, s_3, s_4 ve s_5 olarak adlandırılır. Her bir kol Şekil 2’de gösterildiği gibi kendi içinde küçük parçalara bölünür. $\{s_1(0), s_1(1), \dots, s_1(N_1)\}$, $\{s_2(0), s_2(1), \dots, s_2(N_2)\}$ vb. Köşe noktalarında bir kolun son parçası ile kendinden sonra gelen kolun ilk parçası çakışır. (örnek $s_1(N_1)$ ve $s_2(0)$ gibi). Her bir kol $(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5)$ diye adlandırılan kendi temel fonksiyonlarına ve h_1 ya da h_2 uzunluklarından birine sahiptir. Akım sürekliliğinin sağlanması için köşelerde akım birisi x- diğeri y- yönlerinde olmak üzere iki yarıdan oluşmaktadır (Şekil 2 koyu noktalı çizgi). Toplam kullanılan parça sayısı (N) her bir koldaki parça sayılarının toplamına eşittir ($N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$). S-şeklinin uç kısımlarında akım katsayısı olmadığından dolayı kullanılan temel fonksiyonların sayısı ve empedans matrisinin boyutu N-1’e eşittir.

FSY yapısı iki boyutlu ve periyodik olduğundan S-şekli üzerinde indüklenen akımdan dolayı saçılan dalgaların bazıları yayınıparken bazıları da sönümlüdür. Saçılan dalgalar Floquet teoremi [23] kullanılarak hava ve dielektrik ortamlarında sonsuz düzlemsel dalgaların toplamı olarak ifade edilir. Saçılan elektrik alanlarındaki her bir Floquet modu aşağıdaki sınır şartlarını sağlamalıdır.

1. Elektrik ve manyetik alanların teğetsel bileşenleri $z=d$ ’de süreklidir.
2. Elektrik alanın teğetsel bileşeni $z=0$ ’da süreklidir.
3. Manyetik alanın teğetsel bileşeni $z=0$ ’da sürekli olmayıp yüzeydeki akım yoğunluğuna eşittir.

Tek bir birim hücre üzerinde sınır şartları ve Floquet modlarının dikgen özelliklerinin birleştirilmesiyle, gelen düzlemsel dalga iletken S-şekli üzerinde bilinmeyen akım yoğunluğu cinsinden bir integral denklemi ile gösterilir. Yukarıdaki sınır şartlarına ek olarak; elektrik alanların toplamı yüzeydeki iletken üzerinde sıfır olmalıdır.

$$\mathbf{E}_1(x, y, 0) + \mathbf{E}_s(x, y, 0) = 0 \quad (2)$$

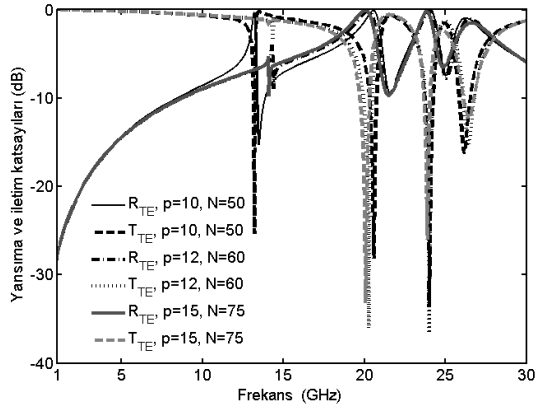
Bu denklemde \mathbf{E}_1 $z < 0$ olduğu bölgedeki gelen ve yansıyan elektrik alanların toplamını, \mathbf{E}_s ’de saçılan elektrik alanı göstermektedir. Denklem (2) elektrik alan integral denklemi (EAİD) olarak adlandırılır ve MM kullanılarak çözülebilir. Temel fonksiyonları EAİD’de yerine koyup, birim hücre üzerinde integrali alınırsa denklem (2) bir matris denklemine dönüşür. Bilinmeyen akım katsayıları matris tersinin alınmasıyla hesaplanır. Bilinmeyen akım katsayıları bulunduktan sonra dielektrik levhadan yansıma ve iletim katsayıları hesaplanabilir.

2. Sayısal Sonuçlar ve Yorum

Dielektrik levha üzerine periyodik olarak dizilmiş S-şekli iletkenlerin çokbantlı filtre özelliği yüzeye dik açıyla ($\theta_i = \theta_r = 0^\circ$) gelen TE düzlemsel dalgası için teorik olarak incelendi. Kol uzunluğu ve birim hücre boyutlarındaki değişimlere göre yansıma (R_{TE}) ve iletim (T_{TE}) katsayılarının frekansa göre grafikleri çizildi. Yine yansıma ve iletim katsayılarının farklı Floquet modlarına göre de grafikleri çizildi. Dielektrik levhanın kalınlığı (d), dielektrik sabiti (ϵ_r), ve iletkenin eni (w) sırasıyla 2 mm, 2.1 ve $h_1/10$ olarak alındı. Kullanılan Floquet modlarının sayısı $(2p + 1)(2q + 1)$ olup p

x-yönündeki, q 'da y- yönündeki Floquet sayısını göstermektedir. Bilinen kadarıyla literatürde S-şekli ile ilgili sonuçları karşılaştırabilecek bir çalışma olmadığından dolayı yapıyı şerit şekline indirgeyerek yansımaya ve iletim güç katsayıları karşılaştırıldığında sonuçlar [24]'te hesaplanan ve [25]'teki deneysel sonuçlarla uyumaktadır. Yine elde edilen sonuçlar enerjinin korunumu kanununu sağlamaktadır.

Çalışma boyunca, farklı Floquet sayıları ve temel fonksiyon sayısı deneyerek yansımaya ve iletim katsayılarının frekansa göre grafikleri Şekil 3'te çizildi. Farklı Floquet sayılarına göre elde edilen sonuçlar arasında çok fark olmayıp sonuçlar birbirine yakındır. Şekil 3'te görüleceği üzere üç rezonans tepesi gözlenmiştir. Üçüncü tepe değeri bire yakın olup 0 dB çizgisinin biraz altındadır. S-şekli FSY dizisi K-bandında band durdurucu filtre gibi davranırken S-, X- ve kısmen de Ku-bantlarında alçak geçiren filtre gibi davranmaktadır. Bu çok bant özelliğinden dolayı anten uygulamalarında kullanılabilir. Farklı temel fonksiyon ve Floquet sayılarına göre elde edilen üç rezonans frekansı da K- bandında olup Tablo 1'de özetlenmiştir.



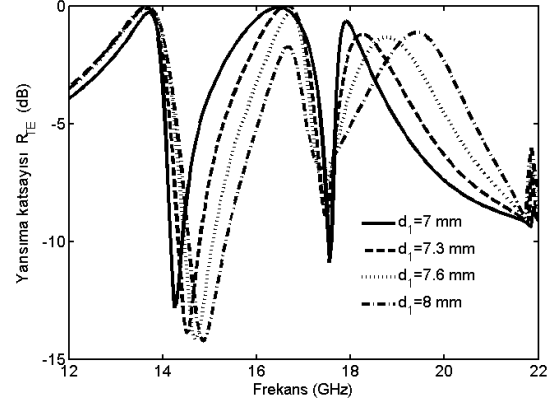
Şekil 3: Farklı temel fonksiyon ve Floquet sayılarına göre yansımaya ve iletim katsayılarının frekansa göre değişimi. $d_1 = 5 \text{ mm}$, $d_2 = 9 \text{ mm}$, $h_1 = h_2 = 4 \text{ mm}$, $q = p$.

Resonance Frekansları (GHz)	$N=50$, $p=q=10$	$N=60$, $p=q=12$	$N=75$, $p=q=15$
f_{r1}	20.55	20.25	20.1
f_{r2}	23.85	24.00	24.00
f_{r3}	26.20	26.50	26.60

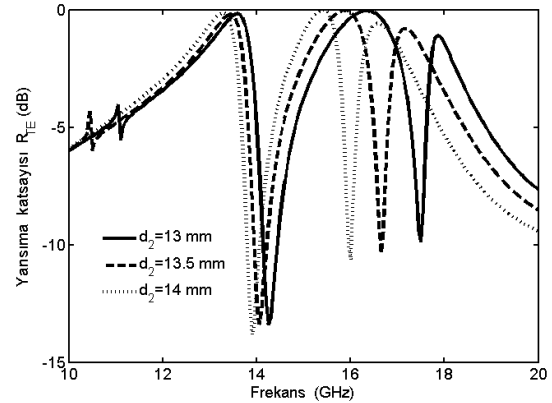
Çizelge 1: S-şekli FSY'in farklı Floquet sayıları ve temel fonksiyonlara göre rezonans frekansları.

Şekil 4'te x-yönündeki birim hücre boyutundaki değişimin yansımaya katsayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. d_1 değişimi için Ku-bandında iki rezonans frekansı gözlemlendi. d_1 'in değeri arttıkça, $d_1=7 \text{ mm}$ hariç, birinci rezonans frekansı hemen hemen değişmezken bant aralığı biraz artmaktadır. İkinci rezonans frekansı biraz değişirken bant aralığı da daralmaktadır. $d_1=8 \text{ mm}$ için ikinci rezonans kaybolmaktadır. Şekil 5'te y-yönündeki birim hücre boyutundaki değişimin yansımaya katsayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Yine Ku-bantta iki rezonans frekansı mevcuttur. d_2 'nin değeri arttıkça

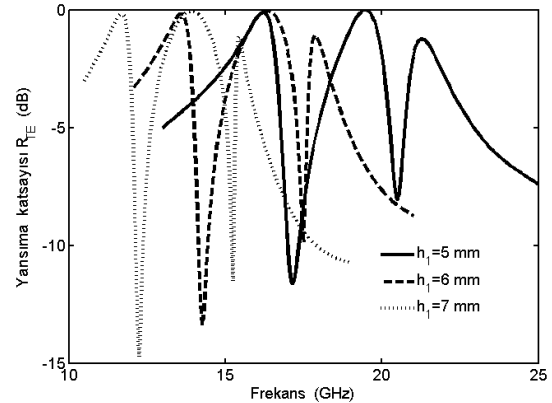
birinci rezonans frekansı biraz azalmakta ve bant aralığı değişmemektedir. İkinci rezonans bant aralığı azalarak frekansı yaklaşık olarak 400 MHz aşağı kaymaktadır. d_2 boyutu değiştirilerek rezonans frekansı ve bant aralığı ayarlanabileceği görülmektedir.



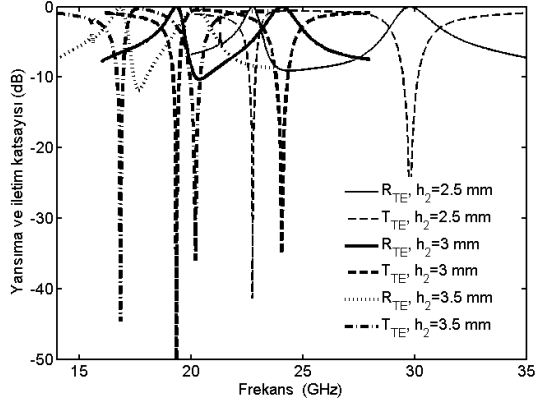
Şekil 4: d_1 değişimi için frekansa karşılık yansımaya katsayısı $d_2 = 13 \text{ mm}$, $h_1 = h_2 = 6 \text{ mm}$, $N=75$, $p = q = 15$.



Şekil 5: d_2 değişimi için frekansa karşılık yansımaya katsayısı. $d_1 = 7 \text{ mm}$, $h_1 = h_2 = 6 \text{ mm}$, $N=75$, $p = q = 15$.



Şekil 6: Kol uzunluğu h_1 değişimi için frekansa karşılık yansımaya katsayısı. $d_1 = (h_1 + 1) \text{ mm}$, $d_2 = (2h_1 + 1) \text{ mm}$, $N=75$, $p = q = 15$, $h_2 = h_1$.



Şekil 7: Kol uzunluğu h_2 değişimi için frekansa karşılık yansıma ve iletim katsayısı. $d_1 = d_2 = (2h_2 + 1)mm$, $h_1 = 2h_2$, $N=72$, $p = q = 16$.

Şekil 6'da h_1 kol uzunluğundaki değişimin yansıma katsayısına etkisi görülmektedir. h_2 değeri h_1 ile aynı seçilmiştir. Üç rezonans tepesi elde edilmiştir. Rezonanslar $h_1=5$ mm için K_u - ve K- bandında, $h_1=6$ mm için K_u - bandında ve $h_1=7$ mm için X- ve K_u - bandındadır. h_1 değeri arttıkça rezonans frekansı daha düşük frekanslara kaymaktadır. Birinci ve ikinci rezonansların bant aralıkları h_1 değişiminden etkilenmezken, üçüncü tepenin bant aralığı daralmaktadır. Şekil 7'de yansıma ve iletim katsayılarının frekansa göre grafikleri h_2 değerinin değişimi için çizilmiştir. h_2 'nin değeri h_1 'in yarısına eşittir. Temel fonksiyonların sayısı dikey kollarla 8 yatay kollarla ise 16 olarak alınmıştır. h_2 'değeri h_1 'in yarısına eşit olduğu durumda iki rezonans görülüyor. Rezonanslar $h_2=2.5$ mm için K-ve K_u - bandında, $h_2=3$ mm için K-bandında ve $h_2=3.5$ mm için K_u - ve K-bantlarında gözlenmiştir. Her iki rezonansın bant aralığı h_2 'nin üç farklı değerinde de aynıdır. h_2 değeri arttıkça iki rezonans tepesi birbirine yaklaşmaktadır. İki rezonans arasında iletim penceresi olup bant geçiren filtre özelliği göstermektedir.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, S-şekilli iletkenlerden yapılmış yeni tip FSY'in çokbantlı filtre özelliği teorik olarak analiz edildi. Üst üste çakışık parçalı sinüs fonksiyonu kullanılarak gelen elektromanyetik dalganın metal yüzeylerde oluşturduğu bilinmeyen akım katsayıları bulundu. S-şeklinin gelen elektromanyetik dalgaya karşılık bant durduran ve bant geçiren filtre gibi davrandığı gözlemlendi. Birim hücre boyutunun ve S-şeklinin kol uzunluklarının rezonans frekansının ve bant aralığının belirlenmesinde etkili olduğu görüldü. S-şekilli FSY DC'den K_u -bandına kadar tamamen geçiren özelliğinden dolayı alçak geçiren filtre olarak kullanılabilceği gibi, çok bantlı (X-, K_u -, K- ve K_u -bantları) bant durduran filtre uygulamalarında da kullanılabilir.

4. Kaynaklar

[1] Mittra R. ve Lee D. "Analysis of a Frequency Selective Surface (FSS) Radome in a closed Proximity of a Phased Array Antenna", *IEEE APS Int Symp* . cilt 4, 370-373, 2001.

[2] Agrawal V. D. ve Imbriale W. A., "Design of a dichroic Cassegrain subreflector", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 27, sayı 4, 466-473, 1979.

[3] Mittra R., Chan C.H., ve Cwik T., "Techniques for analyzing frequency selective surfaces- A review", *IEEE Proceedings*, cilt 76, sayı 12, 1593-1615, 1988.

[4] Wu T. K. ve Lee S. W., "Multiband frequency selective surface with multiring patch elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 42, sayı 11, 1484-1490, 1994.

[5] Huang J., Wu T. K., ve Lee S. H., "Tri-band frequency selective surface with circular ring elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 42, sayı 2, 166-175, 1994.

[6] Wu T. K., "Four-band frequency selective surface with double-squareloop patch elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 42, sayı 12, 1659-1663, 1994.

[7] Ohira M., Deguchi H., Tsuji M., ve Shigesawa H., "Multiband single-layer frequency selective surface designed by combination of genetic algorithm and geometry-refinement technique", *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, cilt 52, sayı 11, 2925-2931, 2004.

[8] Lee Y. L. R., Chauraya A., Lockyer D. S., Vardaxoglu J. C., "Dipole and tripole metallodielectric photonic bandgap (MPBG) structures for microwave filter and antenna applications", *IEE Proc. -Optoelectron.*, cilt 147, 395-400, 2000.

[9] Vardaxoglu J. C., *Frequency Selective Surfaces: Analysis and Design*, Wiley, New York 1997.

[10] Munk B. A., *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, Wiley, New York 2000.

[11] Euler M., Fusco V., Cahill R., ve Dickie R., "325 GHz Single Layer Sub-Millimeter Wave FSS Based Split Slot Ring Linear to Circular Polarization Converter", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt 58, sayı 7, 2457-2459, 2010.

[12] Titaouine M., Raveu N., Neto A. G., ve Baudrand H., "Electromagnetic Modeling of Quasi-Square Open Metallic Ring Frequency Selective Surface Using Wave Concept Iterative Procedure", *ETRI Journal*, cilt 31, sayı 1, 77-79, 2009.

[13] Uçkun S., ve Ege T., "Three Concentric Rings as Frequency Selective Surfaces on Isotropic Chiral Slabs", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, cilt 8, sayı 1, 345-349, 2006.

[14] Ortiz J.D., Baena J. D., Marques R. ve Medina F., "A Band-Pass/Stop Filter Made of SRRs and C-SRRs", *IEEE AP-S URSI* 2669-2672, 2011.

[15] Wakabayashi H., Kominami M., Kusaka H., Nakashima H., "Spectral Domain Analysis for Scattering Properties of Periodic Arrays on dielectric Substrates", *IEICE Trans. Commun.*, cilt E76-B, sayı 12, 1587-1589, 1993.

[16] Wakabayashi H., Kominami M. ve Yamakita J., "Scattering of Electromagnetic Wave by Double Periodic Array with a Dielectric Substrate", *IEICE Fundamentals*, cilt E78-A, sayı 11, 1545- 1547, 1995.

[17] Koca A. O. ve Ege T., "A novel frequency-selective surface, CHIRO-FSS", *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 10, sayı 3, 157-160, 1995.

[18] Delihacioglu K., Uckun S. ve Ege T., "Frequency Selective Surfaces Comprised of Periodic Arrays of Two-Turn Square Spiral Shaped Conductors" *Int. J. Electron. Commun.*, cilt 61, sayı 182-185, 2006.

- [19] Delihacioglu K., Uckun S. ve Ege T., “L-Shaped Frequency Selective Surfaces as conducting Elements on Chiral Slab” *J. Optoelectron. Adv. M.* cilt 8, sayı 4, 1398-1401, 2006.
- [20] Delihacioglu K., Uckun S. ve Ege T., “Scattering characteristics of FSS comprised of L-shaped and one-turn helix shaped conductors for TE and TM excitation”, *Electr Eng*, cilt 89, sayı 3, 177–181, 2007.
- [21] Delihacioglu K., *Analysis of Square Spirals on Planar dielectric and Chiral Slabs*, Ph.D. Dissertation, University of Gaziantep, 2007.
- [22] Harrington R.F., *Field Computation by Moment Methods*. New York, MacMillan, 1968.
- [23] Amitay N., Galindo V. ve Wu C.P., *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*, Wiley-Interscience, New York, 1972.
- [24] Chen C.C., “Scattering by a two dimensional periodic array of conducting plates”, *IEEE Trans Antennas Propag* cilt 18, 660–665, 1970.
- [25] Ott R.H., Kouyoumjian R.G. ve Peters J. “Scattering by a two dimensional periodic array of narrow plates”, *Radio Sci*, cilt 2, 1347–1349, 1967.