

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANAHTARLAMALI YARIK-HALKA FREKANS SEÇİCİ
YÜZEY TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS

Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR

Anabilim Dalı: Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi

Danışman: Doç. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANAHTARLAMALI YARIK-HALKA FREKANS SEÇİCİ
YÜZEY TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Haziran 2007

Tezin Savunulduğu Tarih: 19 Temmuz 2007

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Yunus E. ERDEMLİ

(..........)

Üye

Doç. Dr. A. Arif ERGİN

(..........)

Üye

Yrd. Doç. Dr. Gonca ÇAKIR

(..........)

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında; askeri ve sivil amaçlı, birçok uygulamada, elektromanyetik (EM) filtre olarak kullanılan frekans seçici yüzeyler (FSS) genel özellikleri ile incelenerek SRR elemanını temel alan, anahtarlama, yeni FSS tasarımları tanıtılmıştır. Ayrıca önerilen FSS tasarımlarının pratik uygulamalarda performansını görmek için, biri anahtarlı diğeri anahtarsız iki prototipin fabrikasyonu gerçekleştirilerek frekans/iletim ölçümleri yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde, sahip olduğu bilgi birikimini benimle paylaşıp, bana yol gösteren ve katkılarıyla tezimin bugünlere gelmesini sağlayan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ'ye, desteklerini esirgemeyen çok değerli hocam Doç Dr. İsmail ERTÜRK'e sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, sonsuz yardımları için Arş. Gör. Adnan SONDAŞ'a, tasarlanan FSS prototiplerinin gerçekleştirilmesi ve ölçümlerinin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı TÜBİTAK/UEKAE birimine ve özellikle Dr. Fatih ÜSTÜNER'e, çalışmalarım sırasında her zaman değerli destek ve fedakârlıklarını esirgemeyen, bugünlerimi borçlu olduğum biricik aileme ve tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SEMBOLLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	vii
Özet:	viii
Abstract:	ix
1. GİRİŞ	1
2. FREKANS-SEÇİCİ YÜZEYLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.1. Giriş	4
2.2. FSS Eleman Tipi	5
2.3. FSS Eleman Kalınlığı	6
2.4. Eleman Şekli	7
2.5. FSS Eleman Boyutu	8
2.6. Dielektrik Etkisi	8
2.7. Birim Hücre Boyutu	9
2.8. FSS Analiz ve Ölçüm Teknikleri	10
2.9. FSS Uygulamaları	11
3. YARIK-HALKA FSS TASARIMLARI	14
3.1. Giriş	14
3.2. SRR-FSS Tasarımı	14
3.3. DSRR-FSS Tasarımı	18
3.4. CSRR-FSS Tasarımı	19
3.5. FSRR-FSS Tasarımı	20
4. ANAHTARLAMALI FSS TASARIMLARI	22
4.1. Giriş	22
4.2. Anahtarlamalı SRR-FSS Tasarımı	22
4.3. Anahtarlamalı DSRR-FSS Tasarımı	25
4.4. Anahtarlamalı CSRR-FSS Tasarımı	27
4.5. Anahtarlamalı FSRR-FSS Tasarımı	27
5. ÖLÇÜMLER VE GERÇEK ANAHTAR MODELLEMESİ	29
5.1. Giriş	29
5.2. Ölçümler	29
5.3. PIN Diyot Anahtar Modeli	33
5.4. MEMS Anahtar Modeli	35
6. SONUÇLAR	38
KAYNAKLAR	40
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	43
ÖZGEÇMİŞ	44

SEMBOLLER

d	: SRR'lar arası yatay mesafe
ΔS	: Anahtar konum değişimi
D_x, D_y, a	: Birim hücre boyutları
E	: Elektrik alan
ϵ_r	: Baęıl elektrik geęirgenlik
ϕ	: Yüzeysel açı
f_r, f_0	: Rezonans frekansı
g	: İ içe olan halkalar arası mesafe
H	: Manyetik alan
h	: Alttaş kalınlığı
h_k	: MEMS köprü yüksekliği
k	: FSRR geometrisinde dış halka köşelerindeki metalik uzantı boyutu
L_1	: SRR dış halka boyutu
L_2	: SRR iç halka boyutu
λ_g	: Kılavuzlanmış dalga boyu
λ_0	: Rezonans anındaki dalga boyu
μ_r	: Baęıl manyetik geęirgenlik
θ	: EM dalganın geliş açısı
R	: Yansıma değeri
T	: İletim değeri
t	: Metal yüzey malzemesinin kalınlığı
w	: SRR şerit kalınlığı

Kısaltmalar

AEM/S	: Entegre anten direği sistemi
AG	: Alçak-geçiren filtre
BD	: Bant-durduran filtre
BG	: Bant-geçiren filtre
CSRR-FSS	: Tamamlayıcı yarık-halka frekans seçici yüzey
DSRR-FSS	: Çift-katmanlı yarık-halka frekans seçici yüzey
EM	: Elektromanyetik
FE-BI	: Sonlu eleman-sınır integrali
FSRR-FSS	: “Fan” tipindeki frekans seçici yüzey
FSS	: Frekans seçici yüzey
IR	: Kızılötesi
LHM	: Sol-elli metamateryal
MEMS	: Mikro elektromekanik sistemler
MMIC	: Tümleşik mikrodalga devreleri
NASA	: Ulusal havacılık ve uzay daresi
RF	: Radyo frekans
RFID	: Radyo frekans tanımlama

RKA	: Radar kesit alanı
SRR	: Yarık halka rezonatörü
SRR-FSS	: Yarık halka frekans seçici yüzey
TCSRR-FSS	: Anahtarlamaalı CSRR-FSS
TDSRR-FSS	: Anahtarlamaalı DSRR-FSS
TE	: Enine elektrik
TM	: Enine manyetik
TSRR-FSS	: Anahtarlamaalı yarık halka frekans seçici yüzey
YG	: Yüksek-geçiren filtre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Dipol FSS'in yandan ve üstten görünüşü.	2
Şekil 1.2: SRR-FSS geometrisi.	3
Şekil 2.1: Tipik FSS geometrisi.	4
Şekil 2.2: Kare-yama ve kare-açıklık FSS'lere ait iletim karakteristikleri.	5
Şekil 2.3: FSS elemanları ve göstermiş oldukları filtre karakteristikleri; (a) kare-yama (AG), (b) kare-açıklık (YG), (c) kare-döngü (BD), (d) kare-döngü açıklık (BG) [15].	6
Şekil 2.4: (a) Kalın-ekran FSS ve (b) ince-ekran FSS.	7
Şekil 2.5: Fiziksel görünüşlerine göre FSS eleman grupları.	7
Şekil 2.6: (a) Şerit dipol ve (b) dairesel-döngü FSS yapılarına ait iletim karakteristikleri; eleman boyutu ile rezonans frekansı (f_0) arasındaki ilişki.	8
Şekil 2.7: İkincil ana hüzmeye içeren tipik saçınım örüntüsü.	9
Şekil 2.8: Kare-yama dizisinin iletim-hattı prensibini temel alan eş-değer devre modeli [19].	10
Şekil 2.9: Difraksiyon etkilerini azaltıcı hassas FSS ölçüm düzeneği.	10
Şekil 2.10: FSS'nin, Cassegrain çift-yansıtıcılı anten sisteminde alt-yansıtıcı olarak kullanılması.	12
Şekil 2.11: (a) F-117 hayalet uçağı [21] ve (b)USS Arthur W. Radford savaş gemisi (DD-968) [22].	13
Şekil 3.1: SRR-FSS'nin birim hücre geometrisi: $L_1=5.7$, $L_2=3.3$, $g=0.3$, $w=0.9$, $D_x=D_y=7.5$, $h=0.6$ (mm), $\epsilon_r=3.0$	15
Şekil 3.2: SRR-FSS (a) ve [23]'deki metamateriyal yapılara (b) ait konfigürasyonlar.	15
Şekil 3.3: SRR-FSS'nin iletim ve yansıma karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).	15
Şekil 3.4: SRR-FSS'de halka yarıklarının konumlarının ve açık/kapalı durumlarının filtre performansına etkisi.	16
Şekil 3.5: SRR-FSS'nin rezonans frekansının (f_r), dielektrik kalınlığa (h), SRR şerit kalınlığı (w), SRR yarık aralığı (g) ve SRR'lar arası yatay mesafeye (d) bağlı değişimi.	17
Şekil 3.6: SRR-FSS'nin, geliş açısı (θ) ve frekansa bağlı iletim karakteristikleri; (a) TE-pol ($\phi=0^\circ$) ve (b) TM-pol ($\phi=90^\circ$).	18
Şekil 3.7: İki katmanlı DSRR-FSS tasarımına ait iletim karakteristiği (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).	19
Şekil 3.8: CSRR-FSS tasarımının iletim ve yansıma karakteristikleri (TM-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).	20
Şekil 3.9: FSRR-FSS tasarımına ait birim hücre geometrisi: $L_1=5.7$, $L_2=3.3$, $g=0.3$, $w=0.9$, $k=1.8$, $D_x=D_y=9.9$, $h=0.6$ (mm), $\epsilon_r=3.0$	21
Şekil 3.10: FSRR-FSS ve SRR-FSS tasarımlarının iletim ve yansıma karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).	21
Şekil 4.1: TSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi ve iletim karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).	23

Şekil 4.2: TSRR-FSS'nin rezonans frekansının S_1 , S_2 , S_3 anahtar konumlarına göre değişimi.....	25
Şekil 4.3: TDSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi ve iletim karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).....	26
Şekil 4.4: TCSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi ve iletim karakteristikleri (TM-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).....	26
Şekil 4.5: TFSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi.....	28
Şekil 4.6: TFSRR-FSS'nin frekans ayarlamalı iletim karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).....	28
Şekil 5.1: Gerçeklenen (a) anahtarsız SRR-FSS ve (b) anahtarlı TSRR-FSS (S_3 : kapalı) panelleri.....	30
Şekil 5.2: FSS ölçümleri için kullanılan düzenek.....	30
Şekil 5.3: FSS prototiplerine ait ölçüm (1, 3) ve simülasyon (2, 4) sonuçları (1, 2: anahtarsız FSS; 3, 4: anahtarlı FSS, S_3 kapalı).....	32
Şekil 5.4: FSS prototiplerine ait ölçüm (1, 4), önceki (2, 5) ve sonraki (3, 6) simülasyon sonuçları (1, 2, 3: anahtarsız FSS; 4, 5, 6: anahtarlı FSS, S_3 kapalı).....	32
Şekil 5.5: Yüzeye uyumlu PIN diyot ve basit eşdeğer devre modeli.....	33
Şekil 5.6: Metal parçacık ve PIN diyot modelleri.....	34
Şekil 5.7: PIN diyot eşdeğer devre modelinin (Şekil 5.6) FSS performansına etkisi.....	34
Şekil 5.8: (a) Konsol kirişli (cantilever) [31] ve (b) iki ayaklı köprü tipi MEMS anahtar modelleri.....	36
Şekil 5.9: MEMS anahtar modeli kullanılarak oluşturulan TSRR-FSS konfigürasyonu (S_1/S_2 : OFF; S_3 : ON).....	36
Şekil 5.10: MEMS anahtar modelinin FSS performansı üzerine etkisi; Metalik parçacık modeli: (1), (5); MEMS modeli: (2) $H=0.3\text{mm}$, (3) $H=0.1\text{mm}$, (4) $H=0.05\text{mm}$, (6) $R_c=1\ \Omega$, $H=0.3\text{mm}$, (7) $R_c=1\ \Omega$, $H=0.1\text{mm}$, (8) $R_c=1\ \Omega$, $H=0.05\text{mm}$, (9) $R_c=0.5\ \Omega$, $H=0.05\text{mm}$	37

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Farklı örgü tiplerine göre ikincil ana hüzme oluşumunu önleyici ölçütler [6].	9
Tablo 6.1: Tezde önerilen anahtarlamalı, frekans ayarlamalı FSS tasarımları	39

ANAHTARLAMALI YARIK-HALKA FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

MUSTAFA H. B. UÇAR

Anahtar Kelimeler: Frekans seçici yüzey, Yarık-halka rezonatörü, Anahtarlama, Frekans ayarlama, MEMS anahtarı, PIN diyot.

Özet: 1960'lı yıllardan günümüze kadar, askeri ve sivil kablosuz haberleşme sistemlerinde, filtre uygulamalarının vazgeçilmezi olan frekans seçici yüzeyler (FSS'ler), analiz, ölçüm ve üretim teknikleri ile ilgili yapılan çalışmalarla literatürde önemli bir yer teşkil etmektedir.

FSS'ler, metalik ya da boşluk (açıklık) elemanlarının (yama, döngü, dipol, yarık-halka, v.s.) baskı devre teknolojisi kullanılarak dielektrik bir malzeme üzerine periyodik olarak yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yapılar, FSS elemanının rezonans davranışına bağlı olarak, belirli bir frekans bandında, özel yansım/iletim karakteristiği sergilerler.

Bu tez çalışmasında, manyetik rezonans karakteristiğe sahip yarık-halka rezonatörü (SRR) elemanını temel alan, yeni FSS tasarımları tanıtılmaktadır. Bu tasarımların analizi, sonlu eleman/sınır integrali metodunu kullanan periyodik bir dizi simülatörü ile gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasının özgünlüğü, SRR halkaları arasına yerleştirilen kapa/aç (on/off) anahtarlar aracılığıyla frekans ayarlamalı FSS performansının sağlanmasıdır. Tezde, bu amaçla gerçekleştirilmiş dört yeni FSS tasarımı tanıtılmakta ve ilgili iletim karakteristiklerine dair simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Tezde ayrıca, pratik uygulamalarda kullanılması öngörülen PIN diyot veya MEMS türü anahtarların, gerçeğe yakın anahtar modellerinin, FSS performansı üzerine etkileri incelenmektedir.

SWITCHED SPLIT-RING FREQUENCY-SELECTIVE SURFACE DESIGN

MUSTAFA H. B. UÇAR

Keywords: Frequency-selective surface (FSS), Split-ring resonator, Switching, Frequency tuning, MEMS switch, PIN diode.

Abstract: Frequency-selective surfaces (FSSs) have been fundamental structures for filter applications in military and civil wireless communication systems since 1960. There have been many studies regarding analysis, fabrication, and measurement techniques for FSSs in literature.

FSSs can be realized by placing metallic or aperture type elements (patch, loop, dipole, split-ring, etc.) periodically on a dielectric substrate by means of printed-circuit technology. These structures demonstrate specific reflection/transmission characteristics over a particular frequency band depending on resonance behavior of the FSS element.

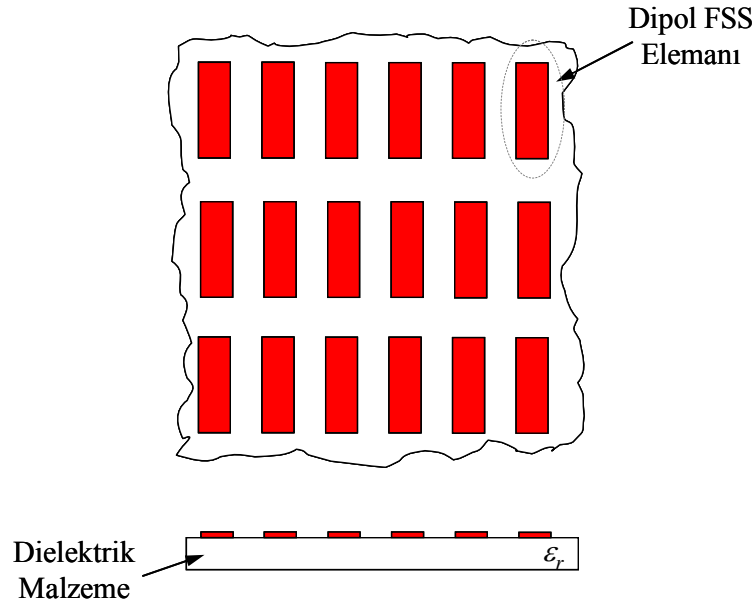
In this thesis work, novel FSS designs based on split-ring resonators (SRR) are introduced. Analyses of the proposed designs have been carried out via a periodic array simulator which employs finite-element/boundary-integral method. The novelty of this study is that frequency tunable FSS performance can be realized by placing on/off switches between the rings of SRR element. In the thesis, four new FSS designs are introduced and their simulated transmission characteristics are presented. In practical applications, PIN diodes or MEMS switches are to be used in the FSS designs. The effects of actual switch modeling on the FSS performance are also examined in the thesis.

1. GİRİŞ

18. yüzyılın sonlarında Amerikan fizikçi D. Rittenhouse, yapmış olduğu gözlemlerde ipek mendil arkasından sokak lambasına doğru bakıldığında ışık spektrumundaki bazı renklerin bastırıldığını ortaya çıkarmıştır. Bu gözlem süreksiz yüzeylerin farklı frekanslarda gelen dalgalara farklı iletim özellikleri sergileyebildiği gerçeğinin ilk kanıtı olmuştur [1]. Rittenhouse tarafından açıklanan bu optik olay, elektromanyetik (EM) uygulamalarda kullanılan frekans-seçici yüzeylerin (frequency-selective surface: FSS) de temel çalışma prensibini açıklamaktadır.

1919 yılında, “Telsiz Telgrafın Babası” olarak bilinen G. Marconi ve C. S. Franklin’in, zamanın kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan periyodik yansıtıcı yüzeyler ile ilgili patent çalışması [2], EM alanında FSS’lerle ilgili bilinen ilk kaynaktır [1]. Bundan sonraki dönemde, FSS’ler askeri uygulamaların temel unsurlarından olmuştur. Bu uygulamaların gizlilik potansiyelinden dolayı, FSS’lerle ilgili çalışmalar 1960’lardan sonra literatürde yer almaya başlamıştır [3, 4, 5]. Günümüzde FSS’ler, uydu haberleşme sistemlerinden radome uygulamalarına, güdümlü füze sistemlerinden mikro dalga fırınlara, RFID etiketlerinden EM kalkanlama uygulamalarına varan, askeri ve sivil amaçlı olmak üzere oldukça geniş yelpazede ki kullanım alanlarına sahiptir [6, 7].

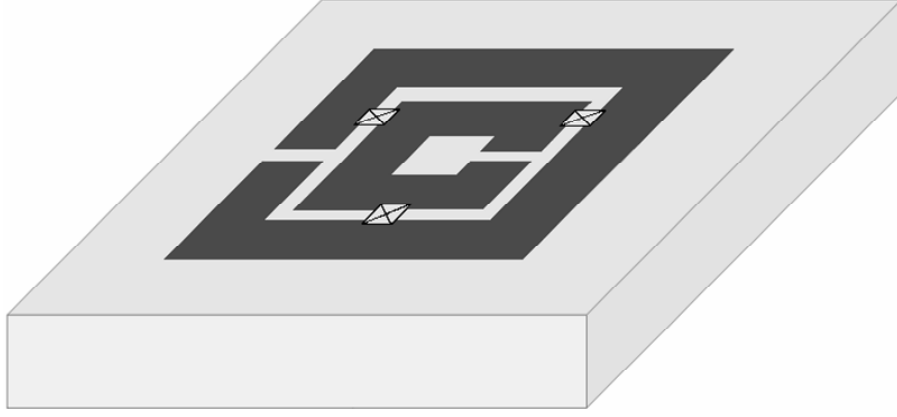
Elektrik devrelerinin en temel parçalardan biri olan filtrelerin, mikrodalga mühendisliğindeki karşılığı olan FSS’ler, yüzeye gelen EM dalganın, frekansına ve geliş açısına bağlı olarak özel iletim ve yansıma karakteristikleri sergileyen yapılardır. Bu yapılar, metalik ya da boşluk (açıklık) elemanlarının (yama, döngü, dipol, yarık-halka v.s.) baskı devre teknolojisi kullanılarak dielektrik malzeme üzerine periyodik olarak yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Örnek olarak, Şekil 1.1’de periyodik dipol elemanlarının dielektrik bir katman üzerine yerleşimiyle elde edilmiş dipol FSS görülmektedir.



Şekil 1.1: Dipol FSS'in yandan ve üstten görünüşü.

FSS'lerin frekans cevabını, temelde, periyodik birim hücredeki metalik ya da boşluk elemanların rezonans karakteristiği belirler. İlgili FSS elemanının parametreleri (iletkenlik, geometri v.b.), kullanılan alttaşın elektriksel geçirgenliği (ϵ_r) ve birim hücre boyutlarının uygun seçimiyle de filtre profili şekillendirilebilir. Ayrıca, filtre uygulamasının ihtiyaçları doğrultusunda, birden fazla yüzeyin bir araya getirilmesiyle de çok katmanlı FSS yapıları da oluşturulabilir [6, 7].

Bu tez çalışmasında, Şekil 1.2'de görülen yarık-halka elemanlarını temel alan anahtarlamalı FSS tasarımları sunulmaktadır. Belirli bir frekans bandında negatif manyetik geçirgenlik özelliğine ($\mu_r < 0$) sahip yarık-halka rezonatör (split-ring resonator: SRR) elemanları bant-durduran filtre performansı sergilemektedirler [8]. SRR elemanları, yakın zamanda oldukça popüler olan sol-elli metamateriyal (left-handed metamaterial: LHM) yapıların gerçekleşmesinde önemli bir rol oynamıştır [9]. Küçük elektriksel boyutlu olması ve rezonansa güçlü manyetik moment karakteristiği göstermesi sebebiyle, yarık-halka elemanları FSS tasarımları için de tercih edilir olmuşlardır [10–12]. Bu tez çalışmasının özgünlüğü, SRR halkaları arasına yerleştirilen kapa/aç (on/off) anahtarlar aracılığıyla frekans ayarlamalı FSS performansının sağlanmasıdır. Tezde sunulan SRR-FSS tasarımlarının sayısal analizi bir tam-dalga simülatörüyle gerçekleştirilmiştir.



☒ ON/OFF Anahtarlar

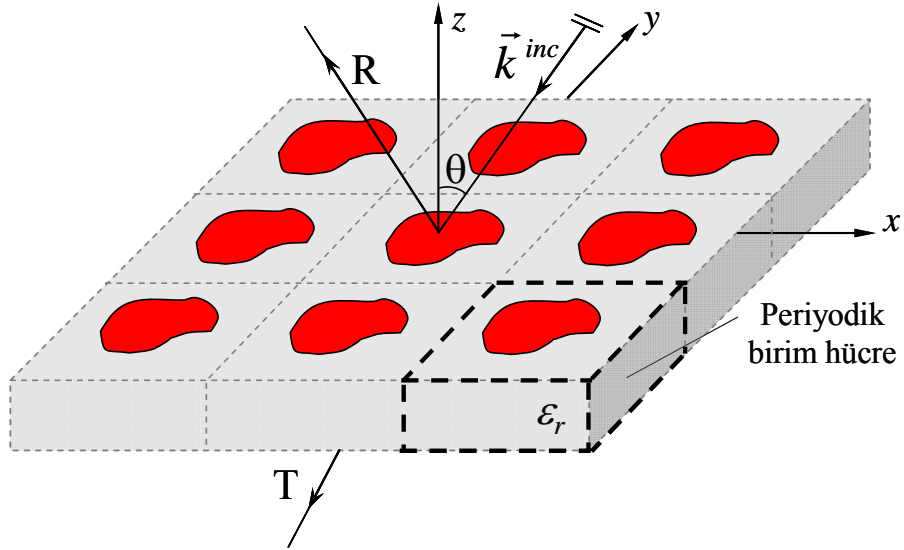
Şekil 1.2: SRR-FSS geometrisi.

Bu tez, altı ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de; FSS’lerle ilgili literatürde yer alan çalışmalar özetlenerek teze giriş yapılmıştır. Bölüm 2’de; FSS tasarım parametreleri (eleman tipi, boyutu, v.b.), ilgili analiz/ölçüm teknikleri ve FSS genel özellikleri incelenmiştir. Bölüm 3’te, SRR-FSS tasarımları, Bölüm 4’te ise, ilgili frekans-ayarlamalı SRR-FSS tasarımları tanıtılmaktadır. Bölüm 5’te; pratik anahtara modellenmesi incelenmiştir. Son olarak Bölüm 6’da, elde edilmiş sonuçlar özetlenmekte ve ileride yapılabilecek çalışmalar önerilmektedir.

2. FREKANS-SEÇİCİ YÜZEYLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

Çeşitli kablosuz haberleşme uygulamalarında EM filtre olarak kullanılan frekans-seçici yüzeyler (FSS'ler), dielektrik tabaka üzerine metalik ya da açıklık elemanların bir dizi şeklinde yerleştirilmesi ile elde edilen, bir veya daha çok katmanlı periyodik yapılardır. Şekil 2.1'de tipik bir katmanlı FSS geometrisinde belirtildiği gibi θ açısıyla yüzeye gelen EM dalganın bir kısmı iletilirken (T) bir kısmı da yüzey tarafından yansıtılmaktadır (R).



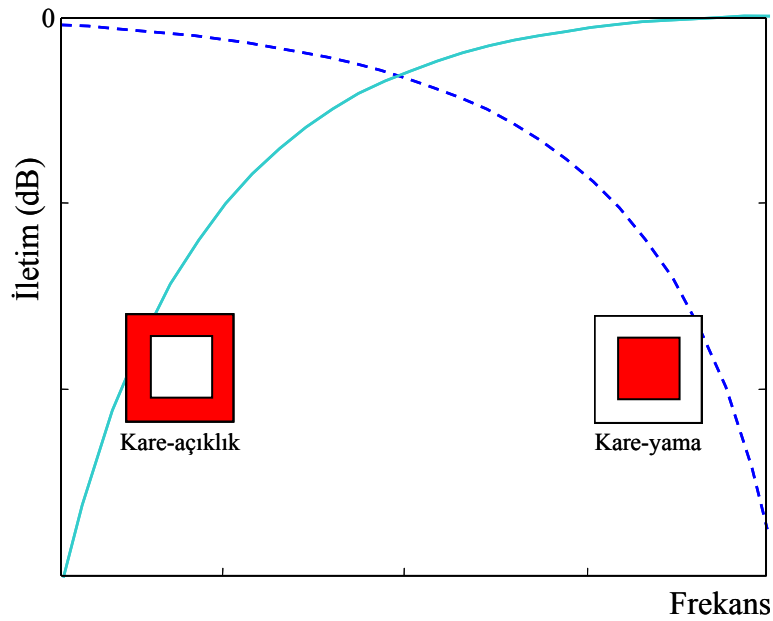
Şekil 2.1: Tipik FSS geometrisi.

FSS'ler; dipol, kare yama, halka gibi farklı geometrilere sahip metalik veya bunların tamamlayıcısı (complementary) açıklık elemanların periyodik dizilimiyle, baskı devre (printed circuit) teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilirler. Kullanılan elemanın rezonans karakteristiğine bağlı olarak, FSS yapısı ilgili frekans bandında, tam yansımaya ($|R|=1$) veya tam iletime ($|T|=1$) performansı sergiler.

Gerçekleştirilecek uygulama doğrultusunda, istenen iletim karakteristiğini sergileyecek FSS yapısı için çeşitli tasarım parametreleri ve kuralları mevcuttur [6]. Bu bölümde; eleman tipi (geometrisi), birim hücre boyutu ve alttaş parametrelerinin FSS performansı üzerine etkileri incelemekte, FSS analiz/ölçüm teknikleri ve uygulamalarına yer verilmektedir.

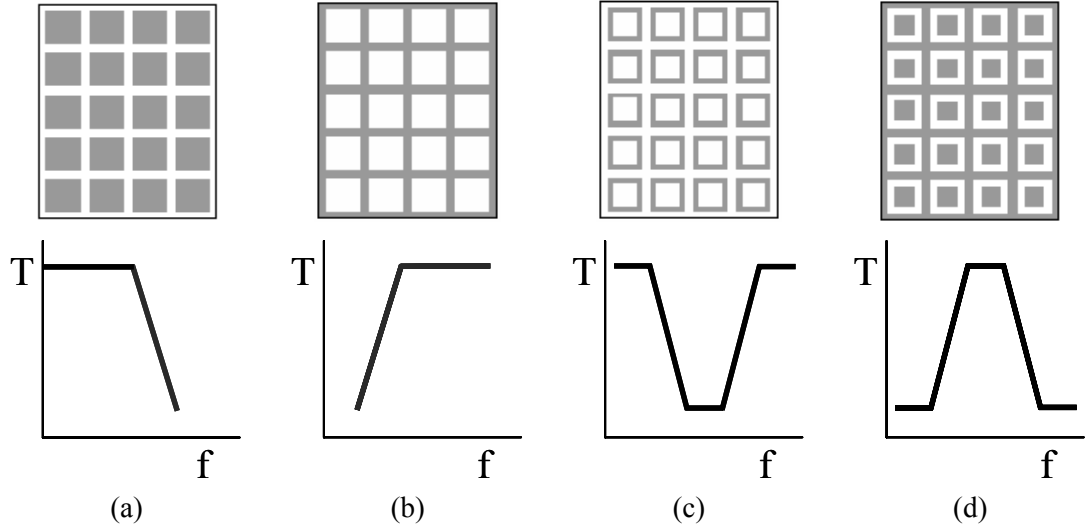
2.2. FSS Eleman Tipi

Frekans seçici yüzeyler temelde iletken yama (patch) ya da bu yapıların tamamlayıcısı olan açıklık (aperture) elemanların periyodik bir dizi şeklinde bir araya getirilmesi sonucunda oluşturulmaktadır. Dielektrik bir tabaka üzerine, iki boyutlu metalik geometrilerin yerleştirilmesi ile yama FSS elemanları; metal bir yüzey üzerinde oluşturulan boşluklar ile de açıklık FSS elemanları elde edilmektedir. Babinet kuramına göre; bir FSS'e ait yansıma/iletim karakteristiği, bu dizinin tamamlayıcısı olan yüzeye ait iletim/yansıma karakteristiğine eşdeğerdir [6, 7]. Örneğin, Şekil 2.2'de görüldüğü üzere; bir açıklık FSS yüksek geçiren, onun tamamlayıcısı olan yama FSS ise alçak geçiren filtre özelliği göstermektedir.



Şekil 2.2: Kare-yama ve kare-açıklık FSS'lere ait iletim karakteristikleri.

Şekil 2.4’de görüldüğü üzere FSS’ler, filtre karakteristiklerine göre, alçak-geçiren (AG), yüksek-geçiren (YG), bant-geçiren (BG), bant-durduran (BD) şeklinde sınıflandırılabilirler [6].

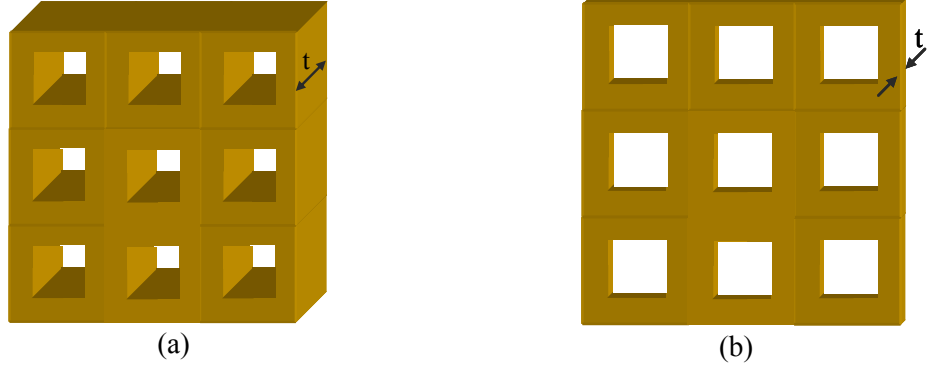


Şekil 2.3: FSS elemanları ve göstermiş oldukları filtre karakteristikleri; (a) kare-yama (AG), (b) kare-açıklık (YG), (c) kare-döngü (BD), (d) kare-döngü açıklık (BG) [15].

2.3. FSS Eleman Kalınlığı

FSS’ler, kullanılan metalik yüzey malzemesinin kalınlığına göre kalın ya da ince ekran FSS olarak da sınıflandırılabilirler. Şekil 2.4’de örnek olarak, kare-boşluk elemanından oluşan kalın-ekran ve ince-ekran FSS yapıları görülmektedir. İnce-ekran FSS ifadesi, metalik kalınlık t ’nin $0,001\lambda_0$ ’dan küçük olması durumunu tanımlamaktadır (λ_0 rezonans frekansındaki dalga boyudur). Genel olarak ince ekran FSS’ler, hafif ve küçük hacimli yapılardır. Ayrıca bu yapıların geleneksel baskı devre teknolojisiyle üretimleri oldukça kolay ve düşük maliyetlidir [6].

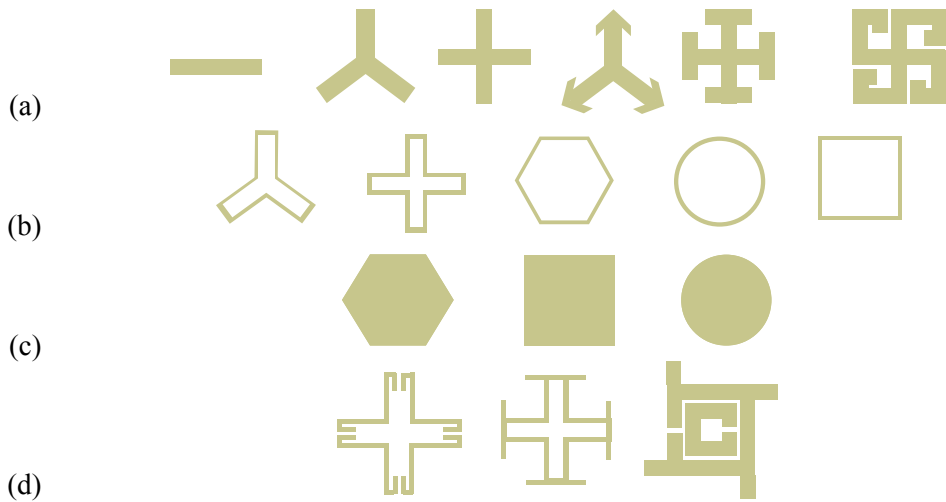
Yüksek geçiren filtre uygulamalarında tercih edilen kalın-ekran FSS’ler elektriksel olarak kalın ($t > \lambda_0$) metalik malzemeler kullanılarak üretilirler. Ağır metal blokların işlenmesi oldukça maliyetlidir ve fabrikasyonları hassasiyet gerektirir. Kalın-ekran FSS’ler, çoklu-frekans uydu haberleşme sistemlerinde ihtiyaç duyulan bant-ayrımının (iletim frekansı/yansıma frekansı) azaltılmasında avantaj sağlarlar [6].



Şekil 2.4: (a) Kalın-ekran FSS ve (b) ince-ekran FSS.

2.4. Eleman Şekli

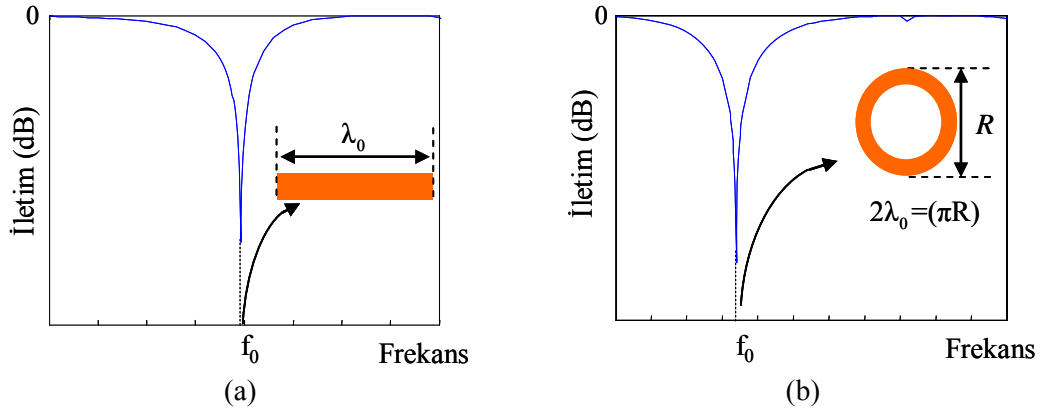
FSS tasarımında uygun eleman seçimi, elde edilecek filtre karakteristiğinin frekans cevabının doğrudan etkileyecek temel faktördür. Bu anlamda, geometrik yapılarına göre FSS elemanları, Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, dört temel grupta değerlendirilebilir [7]. Basit dipol elemanından türetilmiş FSS elemanları (Şekil 2.5(a)) dar-bantlı, döngü tipi elemanlar (Şekil 2.5(b)) ise nispeten daha geniş-bantlı bant-durduran filtre performansı sergilerler. Yama türü FSS elemanlarının (Şekil 2.5(c)) en önemli özelliği ise, EM dalganın geliş açısındaki değişime göre, oldukça kararlı filtre karakteristiği sunmasıdır. Bu üç gruptaki elemanların çeşitli kombinasyonlarıyla istenilen filtre özelliklerini karşılayabilecek yeni FSS tasarımları gerçekleştirilebilir (Şekil 2.5(d)).



Şekil 2.5: Fiziksel görünümlerine göre FSS eleman grupları.

2.5. FSS Eleman Boyutu

Eleman boyutu, FSS'in frekans bandını etkileyen temel faktördür. Örneğin; uzunluğu, çalışma frekansında (f_0) $\lambda_0/2$ 'nin tam katı olan bir dipol FSS, EM dalgayı tamamen yansıtıcı rezonans karakteristik gösterir. Diğer taraftan, bir dairesel döngü elemanın yarı-çevre uzunluğu $\lambda_0/2$ 'nin tam katı olduğunda, benzer rezonans davranışı gözlenir. Başka bir ifadeyle, her bir yarım halka, bir dipol elemanı gibi davranır [6]. Şekil 2.6'da, f_0 frekansında rezonans karakteristiği gösteren λ_0 uzunluğundaki dipol ve çevre uzunluğu $2\lambda_0$ olan döngü elemanlarının tipik iletim karakteristikleri görülmektedir.



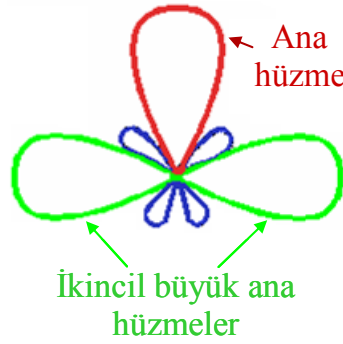
Şekil 2.6: (a) Şerit dipol ve (b) dairesel-döngü FSS yapılarına ait iletim karakteristikleri; eleman boyutu ile rezonans frekansı (f_0) arasındaki ilişki.

2.6. Dielektrik Etkisi

Metalik FSS elemanlarına yapısal destek sağlamak için kullanılan dielektrik malzemeler, farklı geliş açılarında FSS'in rezonans frekansında meydana gelebilecek kaymaları dengede tutmada önemli bir rol oynar. Alttaş kalınlığı veya dielektrik malzemenin elektrik geçirgenliğinin artırılmasıyla FSS yapısının rezonans karakteristiği daha düşük frekanslara kaydırılabilir [6]. Ayrıca, rezonans frekansı yakınlarında, iletim karakteristiğindeki sıfırların (nulls) oluşumuyla kendini gösteren Wood anomalisi, dielektrik kalınlığın artışıyla daha düşük frekanslarda gözlenmektedir. İletim profilindeki bu bozunum, periyodik yüzey boyunca yayılan yüzey dalgalarından (surface waves) kaynaklanmaktadır [6].

2.7. Birim Hücre Boyutu

FSS yapısında, periyodik elemanlar arasındaki mesafe, birim hücre boyutunu (D_x, D_y) belirlemektedir. Birim hücre boyutu, çalışma frekansındaki dalga boyundan büyük olduğunda ($D_x, D_y > \lambda_0$), FSS'nin saçınım örüntüsünde birden fazla ana hüzmeye gözlenmektedir (Şekil 2.7). Grating veya Bragg lobe diye adlandırılan bu ikincil hüzmeler, açısal FSS performansını olumsuz etkileyebilecek sonuçlar doğurabilir [6]. Genellikle istenmeyen bu durumu önlemek için genel kural (normal veya dik geliş açısı için, $\theta = 0^\circ$), D_x ve D_y 'nin λ_0 'dan daha küçük seçilmesidir. $\theta > 0^\circ$ için ise, D_x ve D_y 'nin $\lambda_0/2$ 'den daha küçük seçilmesiyle grating fenomeninin önüne geçilebilir. Tablo 2.1'de farklı birim hücre dizilimlerine (örgülerine) göre, ikincil ana hüzmeye oluşumunu önleyici birim hücre boyutu ($D_x=D_y=a$) ölçütleri tanımlanmaktadır [6].



Şekil 2.7: İkincil ana hüzmeye içeren tipik saçınım örüntüsü.

Tablo 2.1: Farklı örgü tiplerine göre ikincil ana hüzmeye oluşumunu önleyici ölçütler [6].

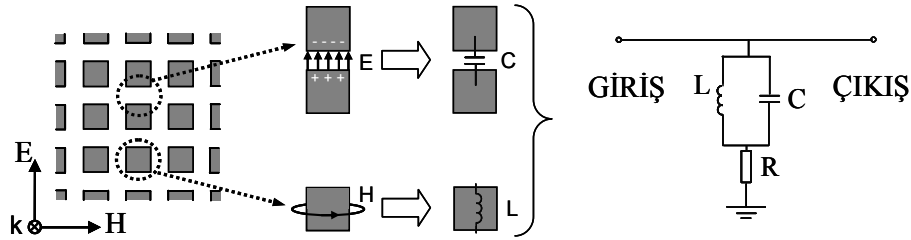
	Kare Yerleşim	Üçgensel Yerleşim	Tuğla Yerleşimi
Örgü Tipi			
Ölçüt	$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1}{1+\sin\theta}$	$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1.15}{1+\sin\theta}$	$\frac{a}{\lambda_0} < \frac{1.12}{1+\sin\theta}$

2.8. FSS Analiz ve Ölçüm Teknikleri

Literatürde, FSS'lerin sayısal analizi için önerilmiş dört temel yöntem aşağıda belirtilmektedir.

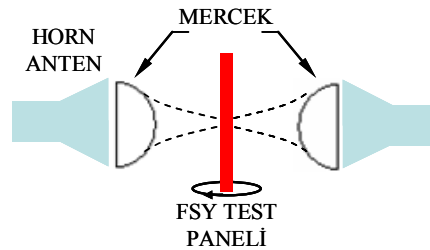
- (1) Mod eşleme (mode matching) metodu [14, 15]
- (2) Eşdeğer devre (equivalent circuit) modeli metodu [16] (Şekil 2.8)
- (3) Moment metodu [15]
- (4) Hibrit sonlu elemanlar-integral denklemi (FE-BI) metodu [17]

Bu tez çalışmasında önerilen yeni FSS tasarımları, hibrit FE-BI metodunu temel alan bir tam-dalga simülatörüyle [18] gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.8: Kare-yama dizisinin iletim-hattı prensibini temel alan eş-değer devre modeli [19].

FSS iletim ve yansımaya ölçümleri, yansımatsız odalarda (anechoic chamber), standart kazançlı alıcı ve verici horn antenler kullanılarak gerçekleştirilebilir. İki anten arasında yerleştirilen FSS'in, enine elektrik alan (TE) ve enine manyetik alan (TM) iletim/yansımaya karakteristikleri, sırasıyla, anten polarizasyonlarının dikeyden yataya değiştirilmesiyle ölçülebilir. Yansımaya ölçümlerinde, FSS test panelinde oluşan güçlü kenar difraksiyonları, hatalı sonuçlar doğurabilir. Şekil 2.9'da görülen horn ve mercekle antenlerden oluşan hassas ölçüm düzeneği ile bu istenmeyen difraksiyon etkileri büyük ölçüde azaltılabilmektedir.



Şekil 2.9: Difraksiyon etkilerini azaltıcı hassas FSS ölçüm düzeneği.

2.9. FSS Uygulamaları

EM spektrumunda, mikrodalga frekanslarından kızılötesi frekanslara kadar çeşitlilik gösteren FSS uygulamaları [6, 7] aşağıdaki listede özetlenmiştir:

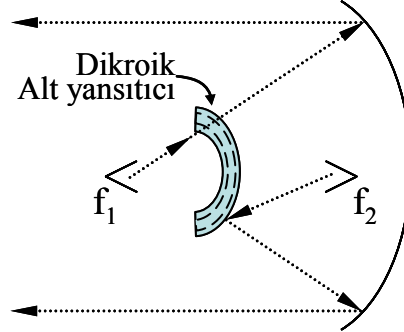
- (1) Yansıtıcı (reflector) antenler
- (2) Radome uygulamaları
- (3) Tümlüşik mikrodalga devreleri (MMIC)
- (4) Hüzme kontrolü veya çoklayıcı uygulamaları
- (5) Polarizasyon değiştirici (polarizer)
- (6) Lazer ve çoklu-bant kızılötesi (IR) filtreler
- (7) Radyo frekansı tanımlama etiketleri (RFID tags)
- (8) Mikrodalga fırınlar
- (9) Yansıtıcı mercek diziler
- (10) Alt-yansıtıcı (sub-reflector) anten uygulamaları.

Geçmişten günümüze FSS uygulamaları genel olarak kablosuz haberleşme sistemleri odaklı olmasına rağmen, yaşam standardımızı geliştirmeye yönelik önemli uygulama alanları da mevcuttur. Örneğin; mikrodalga fırınların kapağında kullanılan metalik boşluk eleman dizisinden oluşan FSS, yiyeceğin ısınması için gerekli olan 2.45 GHz'deki mikrodalga enerjisinin fırın içine geri yansıtılmasını sağlarken, yiyeceği görmemizi sağlayacak ışığın geçmesine de izin vermektedir.

FSS'lerin haberleşme sistemlerinde kullanımına örnek olarak, NASA'nın uzay araştırmaları için, Cassini 96 ve Voyager 77 uzay araçlarında kullandığı Cassegrain¹ parabolik çift-yansıtıcı anten sistemi gösterilebilir [1]. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere; böyle bir sistemde FSS'ler, dikroik alt-yansıtıcı (dichroic sub-reflector) panel olarak kullanılmaktadır [5]. İlgili düzenekte, f_1 ve f_2 frekanslarında çalışan kaynaklar, sırasıyla, ana yansıtıcının (büyük paraboloidin) ve alt-yansıtıcının (küçük paraboloidin) odak noktalarına yerleştirilmiştir. Alt-yansıtıcı olarak kullanılan

¹ 1672 yılında Laurent Cassegrain tarafından geliştirilmiş, birçok teleskopta kullanılan, parabolik birincil ayna ve ışığı tekrar birincil aynadan yansıtan hiperbolik ikincil aynadan oluşan iki aynalı sistem.

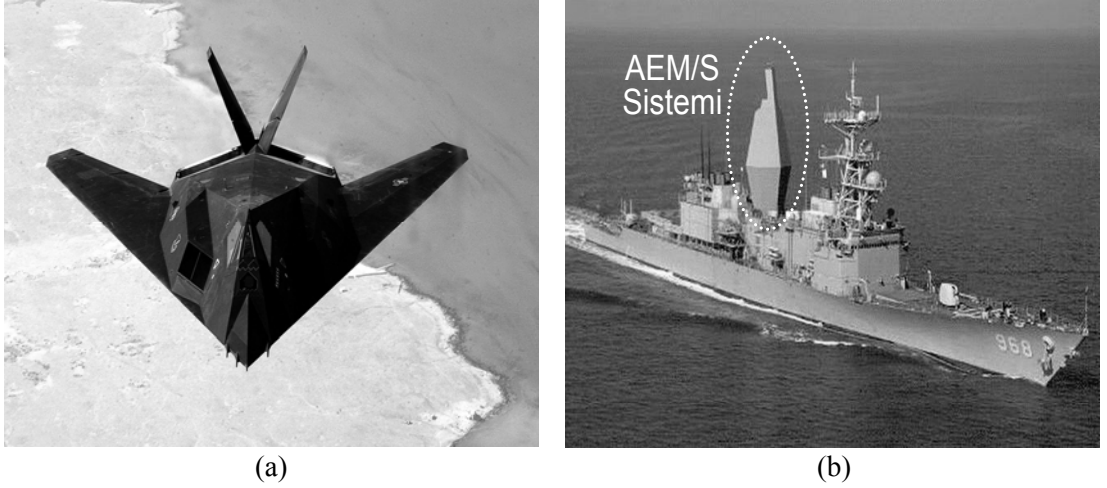
dikroik FSS, f_1 frekansında tamamen geçirgenken, f_2 frekansında tamamen yansıtıcı özellik göstermekte, böylece çoklu-frekans performansı sağlanmaktadır.



Şekil 2.10: FSS'nin, Cassegrain çift-yansıtıcı anten sisteminde alt-yansıtıcı olarak kullanılması.

Haberleşme sistemlerindeki bir diğer önemli FSS uygulaması, ilgili anteni fiziksel ve EM olarak dış ortamdan izole etmek amaçlı kullanılan radome yapılarıdır. Örnek olarak; savaş uçaklarında radar anteninin yer aldığı uçağın uç kısmında kullanılan radome FSS, radarın çalışma frekansı dışındaki tüm frekanslarda tam yansıma sağlarken, özel fiziksel tasarımıyla da radar sinyallerini farklı yönlere dağıtmaktadır. Böylece, geri yansıma yönünde sinyal zayıflayarak uçağın radar kesit alanı (RKA) düşürülebilmektedir. ABD ordusu tarafından kullanılan hayalet uçaklardaki (F-117 stealth fighter aircraft; Şekil 2.11(a)) radome yapısıyla, düşman radarlarına yakalanmadan, radar frekansı dışındaki frekanslarda haberleşmek ve güdümlü silah sistemlerini kullanabilmek mümkün olabilmektedir. Başka bir deyişle hayalet uçaklar, elektromanyetik açıdan radar sistemlerine karşı görünmez olmaktadır.

ABD deniz kuvvetlerindeki savaş gemilerinde yer alan (Şekil 2.11(b)) entegre anten direği sistemi (Advanced Enclosed Mast/Sensor: AEM/S), FSS'lerin askeri alanda kullanımına diğer bir örnek olarak gösterilebilir. AEM/S dış yüzeyi FSS ile kaplı radome yapısına sahip olup, içerdiği antenleri fiziksel ve elektromanyetik açıdan korumaktadır. Frekans-seçici karakteristiğiyle belirli frekanslar haricinde yansıtıcı olarak davranan dış yüzey, düşük RKA elde edilmesine yönelik olarak şekillendirilebilir [20].



Şekil 2.11: (a) F-117 hayalet uçağı [21] ve (b)USS Arthur W. Radford savaş gemisi (DD-968) [22].

Ayrıca, güneş enerjisinin depolanması ya da bloke edilmesi için tasarlanmış özel sistemlerde, FSS'ler önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin; kalın-ekran dikdörtgensel ya da dairesel açıklık tipi FSS'ler, güneş pillerinde güneş enerjisinin depolanması için kullanılmaktadırlar. Bant-geçiren filtre karakteristiği sergileyen bu özel FSS'ler, enerji sinyallerinin ilgili spektrumunda tamamen iletim, bu bandın dışındaki frekanslarda ise tamamen yansıtıcı özellik gösterirler. Diğer taraftan, uzay aracı antenlerinin lokal ısı kontrolleri için kullanılan güneş kalkanlama sistemlerindeki FSS'ler, güneş enerjisini bloke ederken RF sinyallerinin ise iletimine izin verirler [6].

Bu bölümde, genel FSS özellikleri ve uygulamalarına yer verilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde, bu tez çalışmasında gerçekleştirilen yeni FSS tasarımları sunulacaktır.

3. YARIK-HALKA FSS TASARIMLARI

3.1. Giriş

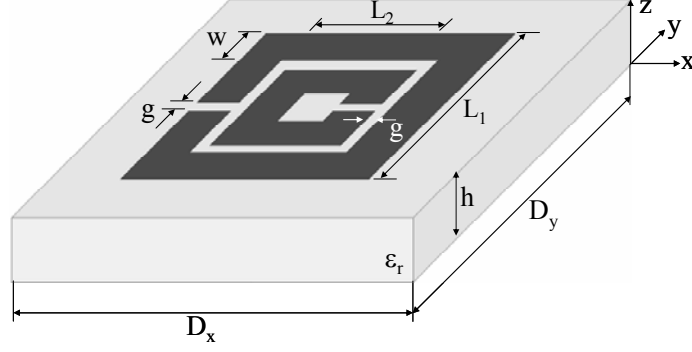
Bu bölümde, bu tez çalışmasının ürünü olan yarık-halka rezonatör (split-ring resonator: SRR) elemanını temel alan yeni FSS tasarımları tanıtılacaktır. Önerilen SRR-FSS tasarımlarının sayısal analizi, özel bir algoritmayla hızlandırılmış hibrit sonlu-eleman/sınır-integrali metodunu temel alan periyodik bir dizi simülatörü yardımıyla gerçekleştirilmiştir [18]. Simülatörde, z-boyutunda sonlu, x-y düzleminde sonsuz periyodik kabul edilen dizinin sadece bir birim hücresi, prizmatik sonlu elemanlarla modellenmektedir. Kullanılan benzetim programı, farklı boyutlardaki periyodik birim hücrelere sahip çok katlı FSS yapılarının analizine olanak sağlamaktadır.

Bu bölümde sırasıyla, tek-katlı (SRR-FSS), çift-katlı (dual-layer SRR; DSRR-FSS), tamamlayıcı (complementary SRR; CSRR-FSS) ve “fan” tipinde (fan-SRR; FSRR-FSS) olmak üzere dört farklı FSS tasarımına ait iletim ve yansıma karakteristikleri incelenecektir.

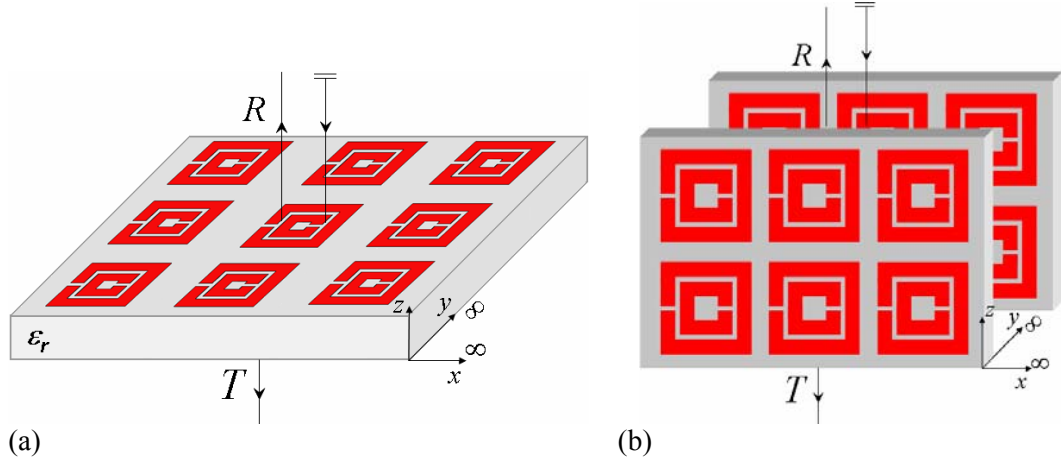
3.2. SRR-FSS Tasarımı

Birim hücre geometrisi Şekil 3.1’de verilmiş olan, iç içe geçmiş yarıklı iki karesel metal halkadan oluşan SRR-FSS tasarımı, dielektrik sabiti $\epsilon_r=3.0$ ve kalınlığı $h=0.6$ mm olan alüminyum üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. SRR geometrisine ait parametreler, [23]’de önerilen metamateriyal yapısının ilgili parametreleriyle aynı olmakla birlikte; her bir yapının genel konfigürasyonu ve her bir yapıya uygulanan EM ışınması, Şekil 3.2’de görüldüğü üzere farklılık göstermektedir. Şekil 3.3’de, SRR-FSS tasarımına ait frekansa bağlı iletim (T) ve yansıma (R) karakteristikleri verilmiştir. Bu analizde, TE polarizasyonlu (TE-pol) EM dalga yüzeye $-z$ yönünde dik olarak ($\theta=0^\circ$) gelmektedir. Görüldüğü üzere SRR-FSS, 5.4 GHz merkezli, 10-dB

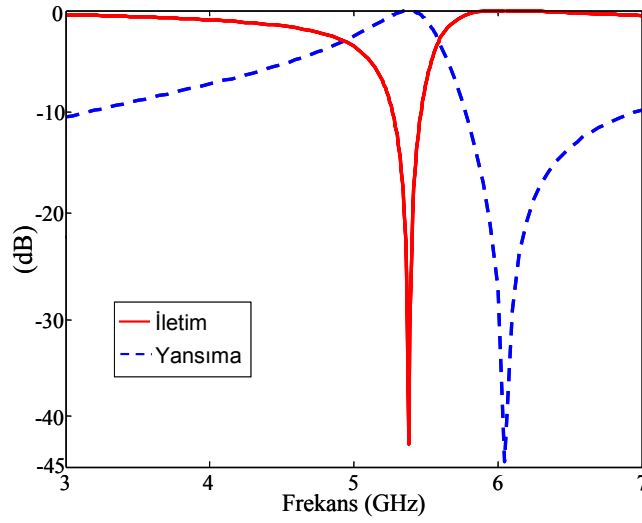
bant genişliği %3.5 olan frekans bandında iletme izin vermemekte, dolayısıyla bant-durduran filtre gibi davranmaktadır.



Şekil 3.1: SRR-FSS'nin birim hücre geometrisi: $L_1=5.7$, $L_2=3.3$, $g=0.3$, $w=0.9$, $D_x=D_y=7.5$, $h=0.6$ (mm), $\epsilon_r=3.0$.

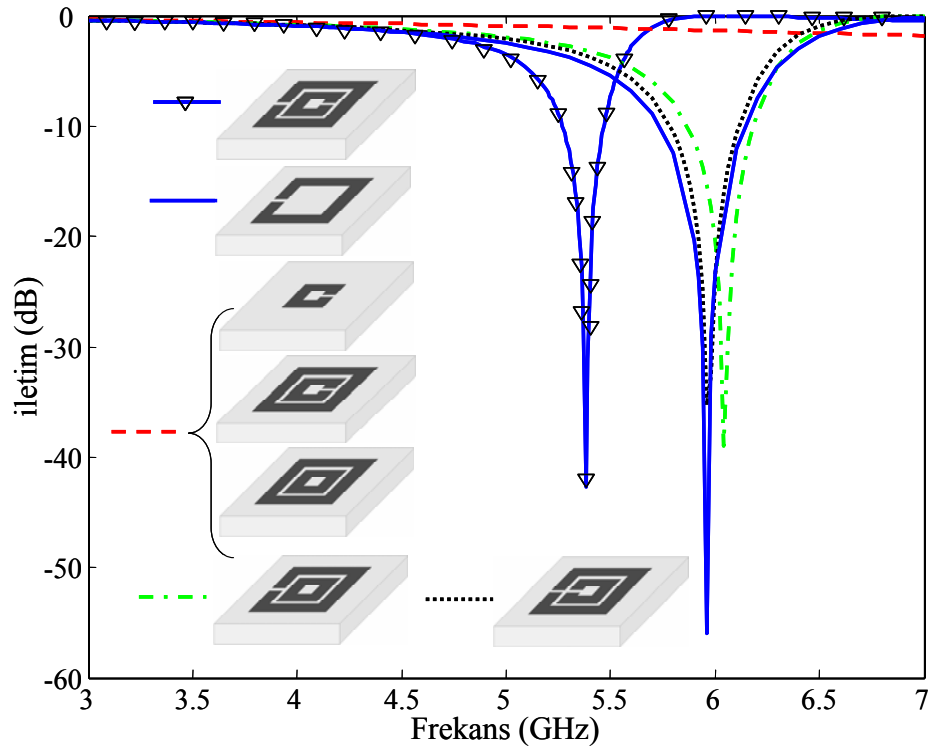


Şekil 3.2: SRR-FSS (a) ve [23]'deki metamateryal yapılar (b) ait konfigürasyonlar.



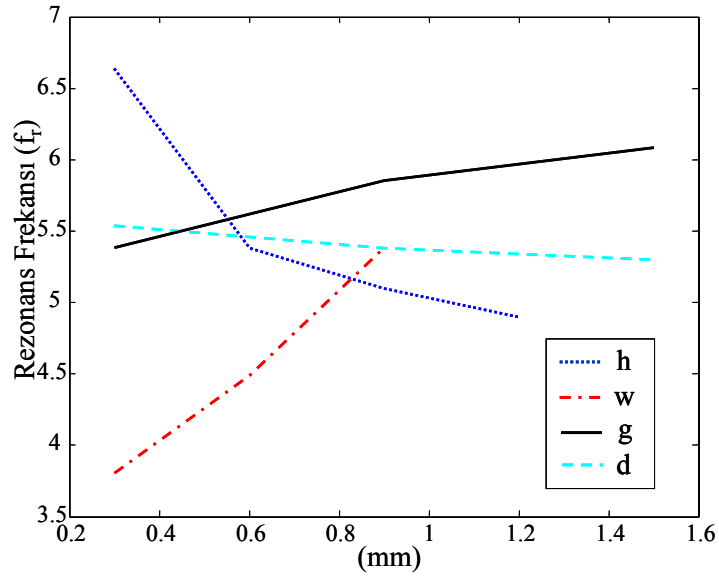
Şekil 3.3: SRR-FSS'nin iletim ve yansımaya karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

SRR-FSS'in rezonant bant-durdurma karakteristiği, halkaların ve yarıkların oluşturduğu, sırasıyla, endüktif ve yüksek kapasitif etkilerin bir sonucudur. Özel olarak, yarıkların konumları ve yarıkların açık/kapalı durumlarının filtre performansına etkisi parametrik olarak incelenmiş olup, ilgili benzetim sonuçları Şekil 3.4'te verilmektedir. Görüldüğü üzere; ilgili frekans bandında, rezonant filtre karakteristiğinin oluşumunda temel faktör, dış (büyük) halkadaki yarığın mevcudiyetidir. Sadece yarıklı dış halkadan oluşan FSS yapısı, yaklaşık 6 GHz'te rezonans profili sergilemektedir. Altaşın az da olsa yükleme etkisi de göz önüne alındığında ($h=0.6\text{mm} \approx \lambda_g/48 = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$, $\epsilon_r=3.0$, $\lambda_0 @ f_0=6\text{ GHz}$), dış halkanın uzunluğu (22.5 mm) yaklaşık $\lambda_0/2$ 'dir. Yarıklı veya yarıksız iç halka ise, yaptığı yükleme etkisiyle rezonans frekansının daha düşük değerlere kaymasını sağlamaktadır. İç ve dış halkaların yarıkları birbirlerine göre ters konuşlandırıldığında (yani aralarındaki açı 180° olduğunda), yarıkların kapasitif (yükleme) etkisi ve dolayısıyla frekans kayması maksimize edilmektedir. Böylece, 6.0 GHz etrafındaki durdurma bandının, bu özel yüklemeyle 600 MHz kadar aşağıya kaydığı gözlenmektedir.



Şekil 3.4: SRR-FSS'de halka yarıklarının konumlarının ve açık/kapalı durumlarının filtre performansına etkisi.

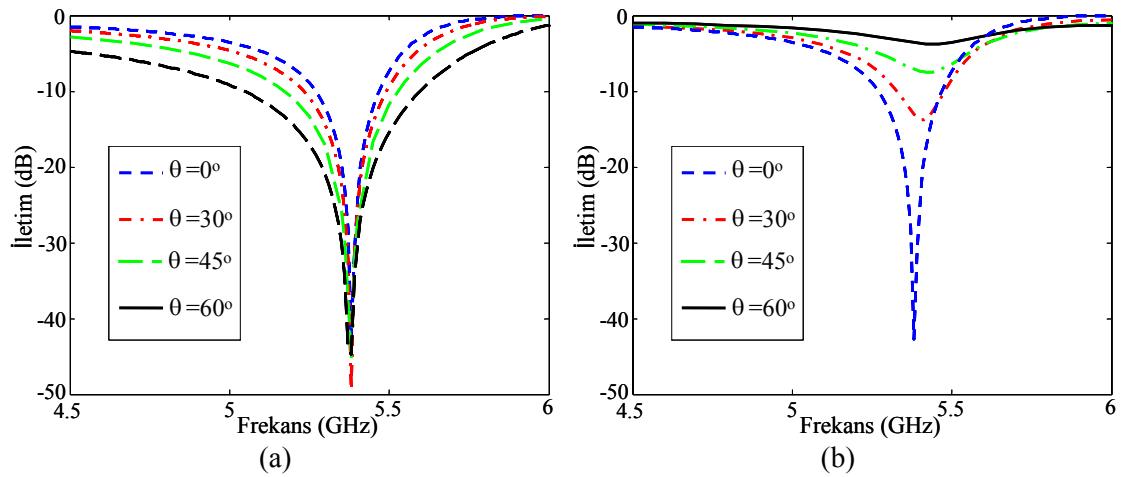
Yarıkların yanı sıra, diğer SRR parametrelerinin de rezonans frekansına (f_r) etkileri incelenmiş olup, ilgili parametrik çalışma sonuçları Şekil 3.5'te verilmektedir. Beklendiği üzere; dielektrik kalınlık (h) arttıkça, f_r daha düşük frekanslara doğru kaymaktadır (benzer durum, ϵ_r 'nin artışında da geçerlidir). Diğer taraftan, SRR kalınlığı (w) ve yarık aralığı (g) arttıkça, kapasitif etki azalmakta, dolayısıyla, rezonans karakteristiği daha yüksek frekanslarda gözlenmektedir. SRR'lar arası yatay mesafedeki (d) değişimin ise, rezonans frekansında önemli bir değişiklik yapmadığı görülmektedir. Ayrıca, bu parametrelerin (h , w , g , d), ilgili durdurma bant genişliğine etkileri de incelenmiştir. SRR kalınlığının (w) artışı bant genişliğini arttırırken, SRR'lar arası yatay mesafenin (d) artışıyla ilgili bant daralmaktadır. Diğer parametrelerin (h , g , ϵ_r) ise, bant genişliğine önemli sayılabilecek derecede etkilerinin olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 3.5: SRR-FSS'nin rezonans frekansının (f_r), dielektrik kalınlığa (h), SRR şerit kalınlığı (w), SRR yarık aralığı (g) ve SRR'lar arası yatay mesafeye (d) bağlı değişimi.

SRR-FSS'nin iletim karakteristiğinin, EM düzlem dalganın geliş açısına (θ) ve polarizasyonuna bağlılığını görmek amacıyla bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. Yapı, dalganın geliş doğrultusunda simetrik bir geometriye sahip olmadığından; ilgili frekans bandında, TE-pol için $\phi=0^\circ$ ve TM-pol için $\phi=90^\circ$ kesitlerinde rezonans karakteristiği gözlenebilmektedir. SRR-FSS'nin polarizasyon, geliş açısı ve frekansa bağlı filtre karakteristikleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Görüldüğü üzere; TE-pol'da θ artarken (dik geliş açısı 0° 'den yatay geliş açısı 90° 'ye doğru), FSS'nin rezonans

davranışı korunmakta, ancak durdurma bandında bir miktar artış gözlenmektedir. Diğer taraftan TM-pol'da, θ artarken, rezonant bant-durdurma karakteristiği bozulmakta ve yatay düzlem boyunca SRR-FSS iletim karakteristiği sergilemektedir. Farklı polarizasyonlardaki bu açısal spektruma bağımlılığın temelinde çapraz (cross) polarizasyon bileşenlerinin etkisi önemli rol oynamaktadır. Bu etkiyi sayısal olarak belirlemek için, gerçekleştirilen simülasyonlarda, çapraz polarizasyon bileşenlerinin de iletim seviyeleri hesaplanmıştır. Buna göre; ilgili frekans ve açısal spektrumda, TE-pol için -40 dB seviyelerindeki TM-pol çapraz polarizasyon bileşenleri FSS performansını hemen hemen etkilemezken, TM-pol'da -6 dB seviyelerindeki TE-pol çapraz polarizasyon bileşenlerinin FSS performansını oldukça olumsuz etkilediği Şekil 3.6'da gözlenmektedir.

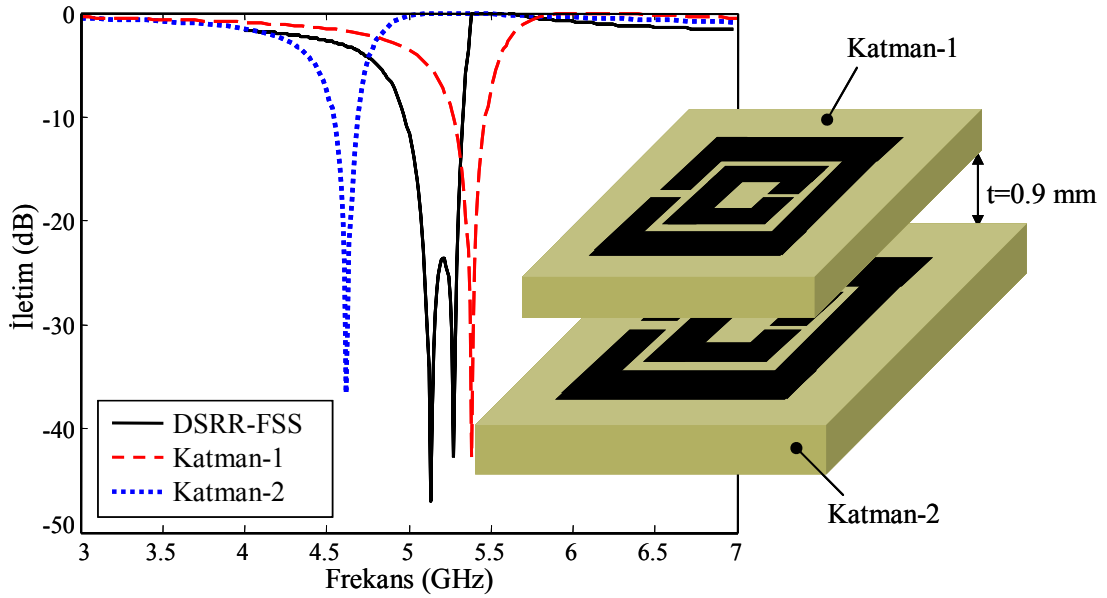


Şekil 3.6: SRR-FSS'nin, geliş açısı (θ) ve frekansa bağlı iletim karakteristikleri; (a) TE-pol ($\phi=0^\circ$) ve (b) TM-pol ($\phi=90^\circ$).

3.3. DSRR-FSS Tasarımı

Birden fazla FSS katmanının bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok-katlı FSS'ler, çoklu-bant veya geniş-bant uygulamaları [24, 25] için tercih edilebilen yapılardır. Burada önerilen iki katlı DSRR-FSS yapısıyla, tek katlı SRR-FSS'nin durdurma bant genişliğini arttırmak amaçlanmıştır. DSRR-FSS tasarımına ait birim hücre geometrisi ve ilgili iletim karakteristikleri Şekil 3.8'de verilmektedir. Görüldüğü üzere; her bir katman (Katman-1 ve Katman-2) sırasıyla, 4.6 GHz ve 5.4 GHz'de bant durdurma karakteristiği sergilemektedirler. Katman-1 olarak anılan FSS, yukarıda incelenen tek katlı SRR-FSS tasarımının aynısıdır (Şekil 3.1). Katman-2 ise, birim hücre (D_x , D_y)

ve halka boyutları (w , L_1 , L_2) Katman-1'in yaklaşık 1.25 katı olacak şekilde seçilerek elde edilmiştir. Bu iki katman bir araya getirilerek oluşturulan iki katlı DSRR-FSS yapısının 5.2 merkezli durdurma bandının, (beklendiği üzere) her iki katmanın ilgili bantları arasında yer aldığı görülmektedir. Katman-1 ve Katman-2, sırasıyla, %3.7 ve %2.6 durdurma bant genişliği sağlarken, iki katlı DSRR-FSS tasarımı %6.9 bant genişliği sunmaktadır. Bant-genişliğindeki bu artış, iki FSS katmanının arasındaki etkileşimin bir sonucudur. DSRR-FSS tasarımının optimum bant-genişliği ve ilgili bastırma seviyeleri, katmanlar arasındaki mesafenin (t) optimizasyonu ile elde edilmiştir.

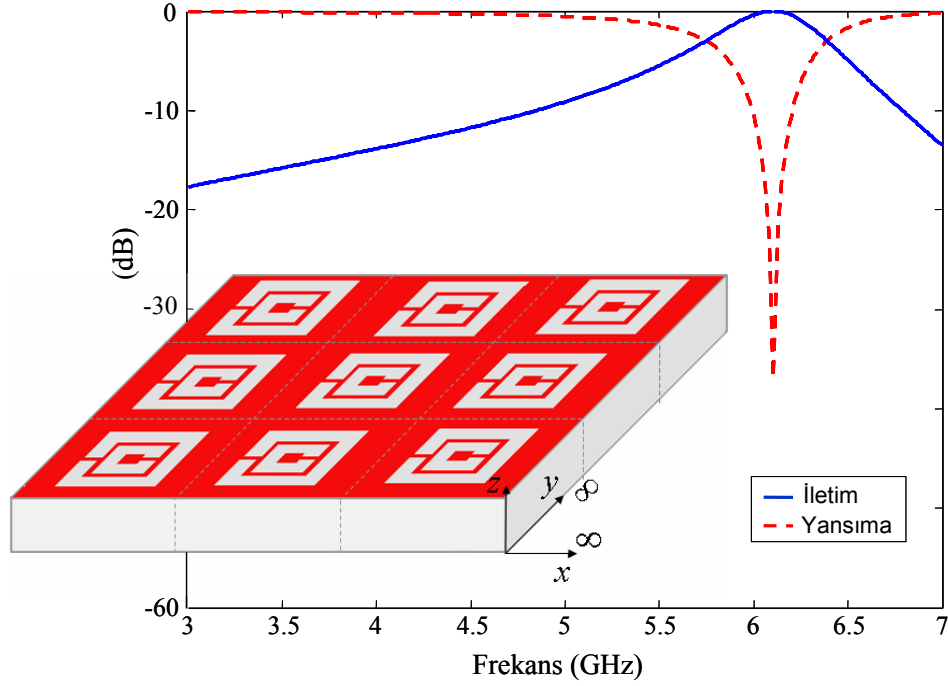


Şekil 3.7: İki katmanlı DSRR-FSS tasarımına ait iletim karakteristiği (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

3.4. CSRR-FSS Tasarımı

Yukarıda incelendiği üzere, SRR-FSS tasarımları ilgili frekans bandında bant-durduran filtre performansı sağlamaktadırlar. Babinet prensibine göre; ilgili tümleyici veya tamamlayıcı (complementary) SRR (CSRR) konfigürasyonunun, bant-geçiren FSS karakteristiği göstermesi beklenmektedir. CSRR-FSS yapısı, metalik SRR elemanlarından oluşan SRR-FSS'nin aksine, açıklık SRR elemanlarıyla oluşturulmuştur. Geometrik parametreleri SRR-FSS'ninkilerle (Şekil 3.1) aynı olan CSRR-FSS tasarımının iletim karakteristiği Şekil 3.8'de verilmektedir. Görüldüğü

üzere; CSRR-FSS, 6.1 GHz merkezli %10 3-dB'lik bant-geçiren iletim performansı sağlamaktadır. Burada dikkat çekilmesi gereken önemli bir husus; $\phi=0^\circ$ kesitinde, SRR-FSS TE-pol'da bant-durduran, CSRR-FSS ise TM-pol'da bant-geçiren karakteristik sergilemektedirler. Aslında bu husus, tamamlayıcı yapıların, farklı polarizasyonlardaki dalgalara karşı gösterdikleri tepkinin özel bir sonucudur.

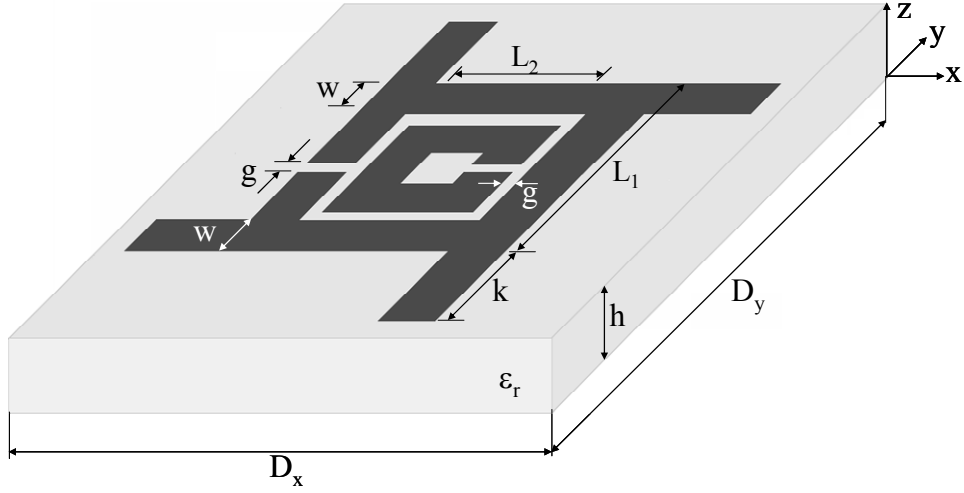


Şekil 3.8: CSRR-FSS tasarımının iletim ve yansımaya karakteristikleri (TM-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

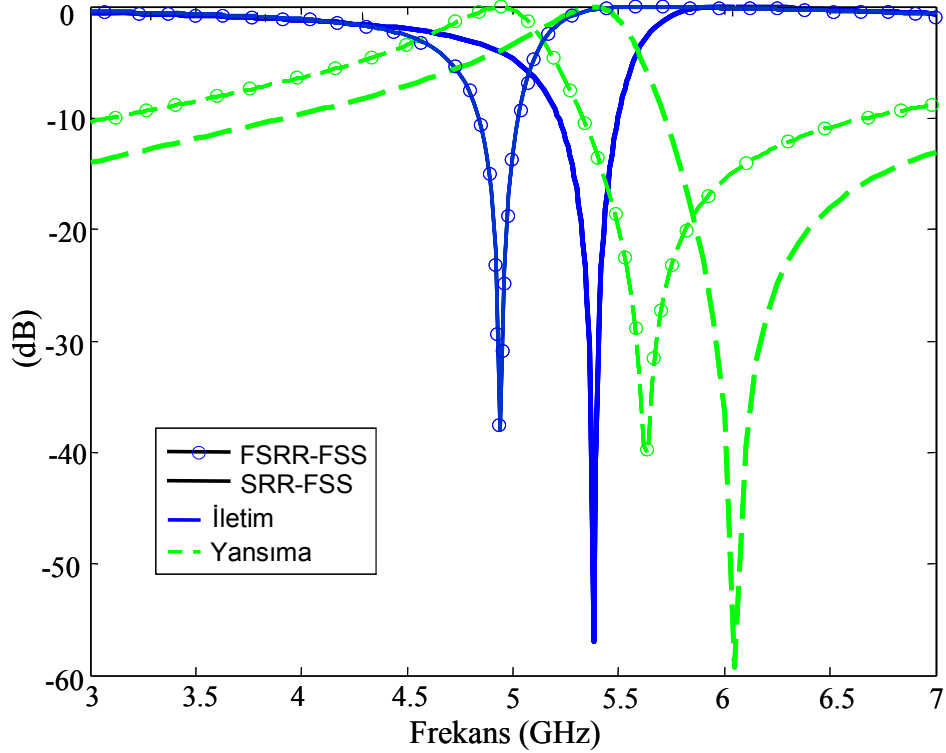
3.5. FSRR-FSS Tasarımı

SRR geometrisinde, dış halkanın köşelerindeki metalik uzantılar ile oluşturulan yeni fan şeklindeki SRR-FSS (FSRR-FSS) tasarımı Şekil 3.9'da görülmektedir. Bu uzantıların yerleşimine olanak sağlamak için genişletilen birim hücre boyutları (D_x , D_y) dışında, bu tasarımın geometrik parametreleri SRR-FSS'ninkilerle aynıdır (Şekil 3.1). Şekil 3.10'da görüldüğü üzere; FSRR-FSS tasarımı, metalik uzantıların yükleme etkisiyle SRR-FSS'e göre daha düşük bir frekans bandında (4.9 GHz), benzer bir bant-durduran filtre karakteristiği sergilemektedir.

Fan şeklindeki yarıksız tek bir halkadan oluşan FSS elemanı, [24, 25]'de çoklu-bant anten uygulamalarında suni altaş olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada ise fan şeklindeki SRR-FSS yapısı, Bölüm 4'te incelenecek olan ince-ayar (fine-tuning) anahtarlama konfigürasyonunun gerçekleştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3.9: FSRR-FSS tasarımına ait birim hücre geometrisi: $L_1=5.7$, $L_2=3.3$, $g=0.3$, $w=0.9$, $k=1.8$, $D_x=D_y=9.9$, $h = 0.6$ (mm), $\epsilon_r = 3.0$.



Şekil 3.10: FSRR-FSS ve SRR-FSS tasarımlarının iletim ve yansımaya karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

4. ANAHTARLAMALI FSS TASARIMLARI

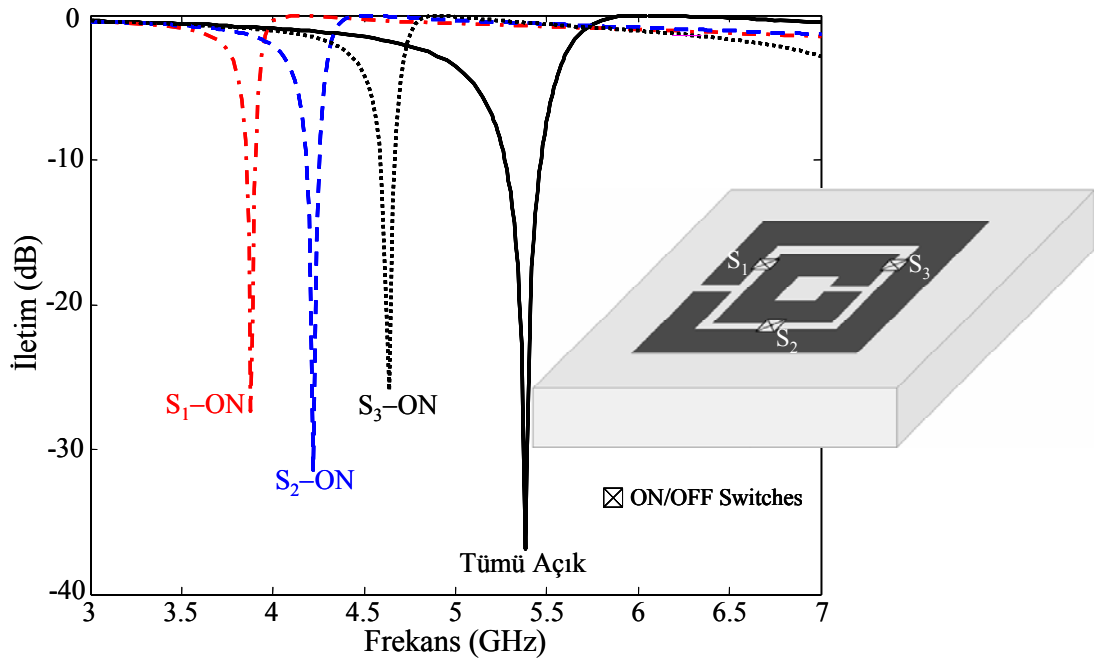
4.1. Giriş

Bölüm 3'te, yarık-halka FSS tasarımları tanıtılmış ve ilgili filtre performansları incelenmiştir. Farklı frekans bantlarında benzer iletim karakteristikleri elde edilebilmesi, her bir frekans bandı için ayrı birer FSS tasarımı gerektirmektedir. Alternatif olarak; tek bir FSS yapısında yapılacak uygun bir konfigürasyon değişikliğiyle, birden fazla frekans bandında istenen performans elde edilebilir. Böyle bir yapılandırma, SRR halkaları arasına yerleştirilmiş kapa/aç (on/off) anahtarlar yardımıyla, sol-elli metamateryal bir yapıda gerçekleştirilmiş ve frekans-ayarlamalı bant-geçiren filtre performansı sağlanmıştır [26]. Bu bölümde, [26]'da önerilen anahtarlama konfigürasyonunun Bölüm 3'te sunulan FSS yapılarına uyarlanması sonucunda elde edilen yeni filtre tasarımlarına yer verilecektir.

4.2. Anahtarlama SRR-FSS Tasarımı

Bölüm 3'te incelenen tek katlı SRR-FSS tasarımı (Şekil 3.1), SRR yarıklarının oluşturduğu yüksek kapasitif etkinin sonucunda, rezonant bant-durduran filtre profili sergilemekteydi. FSS yapısına yapılacak uygun bir yüklemeye, bu kapasitif etki artırılabilir ve dolayısıyla ilgili frekans bandı daha düşük frekans değerlerine kaydırılabilir. Böyle bir yükleme, halkalar arasına uygun konumlara yerleştirilecek on/off anahtarlar ile sağlanabilmektedir. Anahtarlama, frekans-ayarlamalı SRR-FSS (tunable SRR-FSS: TSRR-FSS) konfigürasyonu ve ilgili filtre karakteristiği Şekil 4.1'de verilmiştir. Görüldüğü üzere; SRR halkaları arasına, üç farklı konumda on/off anahtarları (S_1 , S_2 , S_3) yerleştirilmiştir. Bu anahtarların simülörde modellenmesi, halkalar arasına yerleştirilen metalik parçalar ($0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$) vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. İlgili anahtarın on (kapalı) veya off (açık) pozisyonları, metalik parçanın, sırasıyla, ilgili konumda bulunması veya bulunmaması ile tanımlanmaktadır.

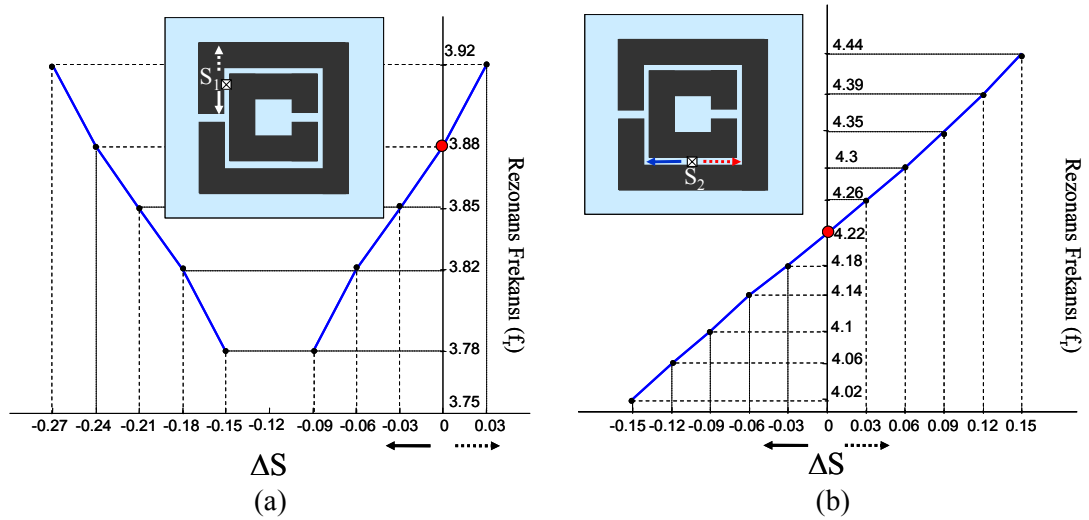
Şekil 4.1’de görüldüğü üzere; anahtarsız (başka bir deyişle tüm anahtarlar açık konumdayken) TSRR-FSS yapısı 5.4 GHz merkezli bant-durduran özellik göstermektedir. Anahtarlar tek tek kapatıldığında (kapalı anahtarın konumuyla bağlantılı olarak) yapının iletim bandı daha düşük frekans değerlerine kaymaktadır. Halkalardaki yarıklardan eşit uzaklıkta bulunan S_2 anahtarı kapatıldığında (on), 4.25 GHz; dıştaki halkanın yarığına yakın S_1 anahtarı kapatıldığında, 3.85 GHz; içteki halkanın yarığına yakın S_3 anahtarı kapatıldığında ise, 4.6 GHz merkezli durdurma bantları oluşmaktadır. Bununla birlikte; yapılan simülasyon çalışmalarında aynı anda S_1 ve S_3 anahtarlarının ve sadece S_3 anahtarının kapalı olma durumlarının aynı bant-durduran karakteristiği sergilediği gözlenmiştir. Diğer anahtarlama pozisyonlarında (iki veya üç anahtar birden kapatıldığında) ise, halkalar tamamen kısa devre yapılmakta, böylece yapının rezonant profili kaybolmakta ve ilgili frekans bandında tamamen iletim sağlanmaktadır. Sonuçta bu anahtarlama konfigürasyonu ile tek bir FSS yapısı kullanılarak, 3.8–5.5 GHz frekans aralığında dört farklı bantta bant-durduran filtre karakteristiği elde edilmiştir.



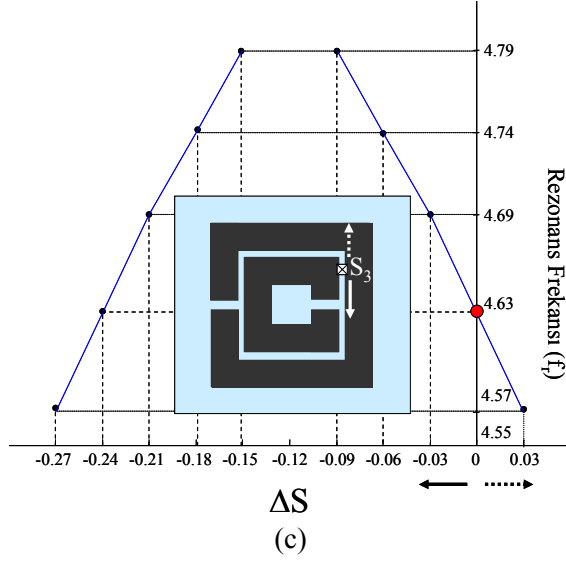
Şekil 4.1: TSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi ve iletim karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

Ayrıca, halkalar arasındaki döngü boyunca anahtar konumlarının yerleri değiştirilerek yüzeyin frekans cevabı istenen frekanslara ayarlanabilmektedir. Her bir

anahtara (S_1 , S_2 , S_3) ait konum değişiminin (ΔS), rezonans frekansına (f_r) etkisini gösteren simülasyon sonuçları Şekil 4.2’de verilmektedir. İlgili grafiklerde, referans anahtar konumlarında (Şekil 4.1) $\Delta S=0$ olarak tanımlanmıştır. Görüldüğü üzere; S_1 anahtarının konumu dış halka yarığına yaklaştıkça ($\Delta S<0$; Şekil 4.2(a)) rezonans frekansı (f_r) düşük frekanslara, S_3 anahtarının konumu iç halka yarığına yaklaştıkça ($\Delta S<0$; Şekil 4.2(c)) f_r yüksek frekanslara kaymaktadır. Özel olarak, S_1 anahtarı dış halka yarık hizasına konuşturıldığında ($\Delta S=-0.12$ mm), yapı kısa devre olmaktadır ve ilgili bantta rezonans karakteristik oluşmamaktadır. S_3 anahtarı iç halka yarık hizasına konuşturıldığında ($\Delta S=0.12$ mm) ise, 6.1 GHz’te rezonans karakteristik gözlenmektedir. Bu iki özel duruma Şekil 4.2’de yer verilmemiştir. Diğer taraftan, referans konumu iki halka yarığına eşit uzaklıkta bulunan S_2 anahtarı, dış halka yarığına yaklaştıkça ($\Delta S<0$) f_r düşük frekanslara, iç halka yarığına yaklaştığında ($\Delta S>0$) ise yüksek frekanslara kaydığı gözlenmektedir (Şekil 4.2(b)). Bu parametrik çalışma sonucunda elde edilmiş Şekil 4.3’teki tasarım eğrileri kullanılarak, istenilen frekans bandında bant-durduran filtre performansı sağlanabilmektedir.



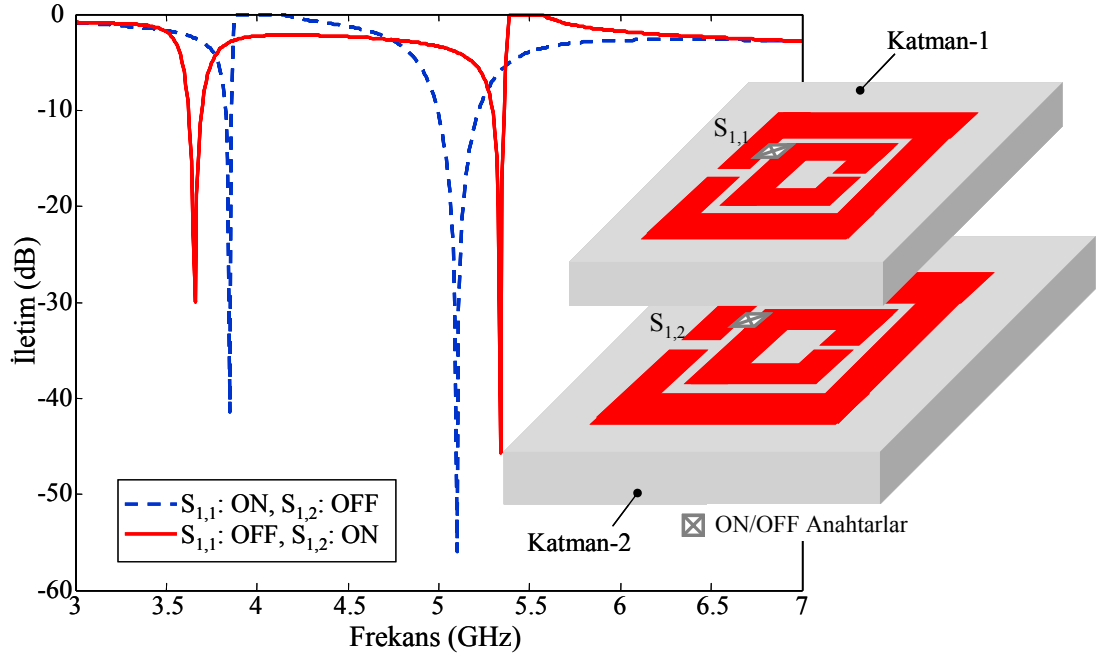
Şekil 4.2: TSRR-FSS’nin rezonans frekansının S_1 , S_2 , S_3 anahtar konumlarına göre değişimi.



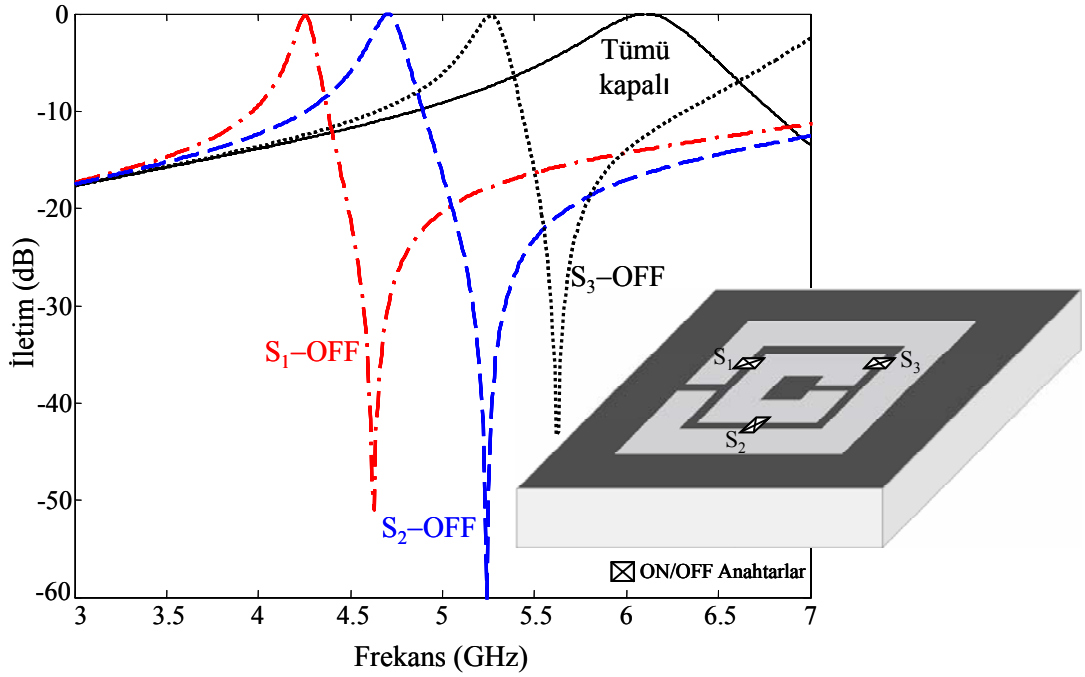
Şekil 4.2 (Devamı): TSRR-FSS'nin rezonans frekansının S_1 , S_2 , S_3 anahtar konumlarına göre değişimi.

4.3. Anahtarlama DSRR-FSS Tasarımı

TSRR-FSS için önerilen anahtarlama konfigürasyonunun, çift katmanlı FSS (Şekil 3.7) tasarımında kullanımıyla oluşturulan, frekans ayarlamalı DSRR-FSS tasarımı (tunable DSRR-FSS: TDSRR-FSS) ve ilgili frekans cevabı Şekil 4.3'de verilmiştir. Bu tasarımda, sadece her iki katmandaki dış halka yarıklarına yakın anahtarlara ($S_{1,1}$ ve $S_{1,2}$) yer verilmiştir. Diğer anahtar elemanlarının (TSRR-FSS'teki S_2 ve S_3) benzer filtre karakteristikleri sergilemesi beklenmektedir. Şekil 4.3'de görüldüğü üzere; her bir FSS katmanındaki anahtarların teker teker kapatılmasıyla, frekans ayarlamalı çift-bant performans elde edilmektedir. Sadece katman-1'deki $S_{1,1}$ anahtarı kapatıldığında ($S_{1,2}$ açıkken), 3.85 GHz ve 5.1 GHz merkezli çift durdurma-bant karakteristiği oluşmaktadır. Diğer taraftan, sadece katman-2'ye yerleştirilmiş $S_{1,2}$ anahtarının kapatılmasıyla ($S_{1,1}$ açıkken), çift-bant durdurma performansı 3.6 GHz ve 5.34 GHz merkezli frekans bantlarına gözlenmektedir. $S_{1,1}$ anahtarının kapatıldığı durumda durdurma bantları arasında 1.25 GHz'lik bir iletim bandı bulunurken, $S_{1,2}$ anahtarının kapatılmasıyla bantlar arasındaki fark artarak 1.74 GHz olarak gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, anahtarlama çift-katmanlı FSS yapısıyla, frekans ayarlamalı, çift-bantlı bant-durduran filtre karakteristiği elde edilmiştir.



Şekil 4.3: TDSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi ve iletim karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).



Şekil 4.4: TCSR-FSS'nin birim hücre geometrisi ve iletim karakteristikleri (TM-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

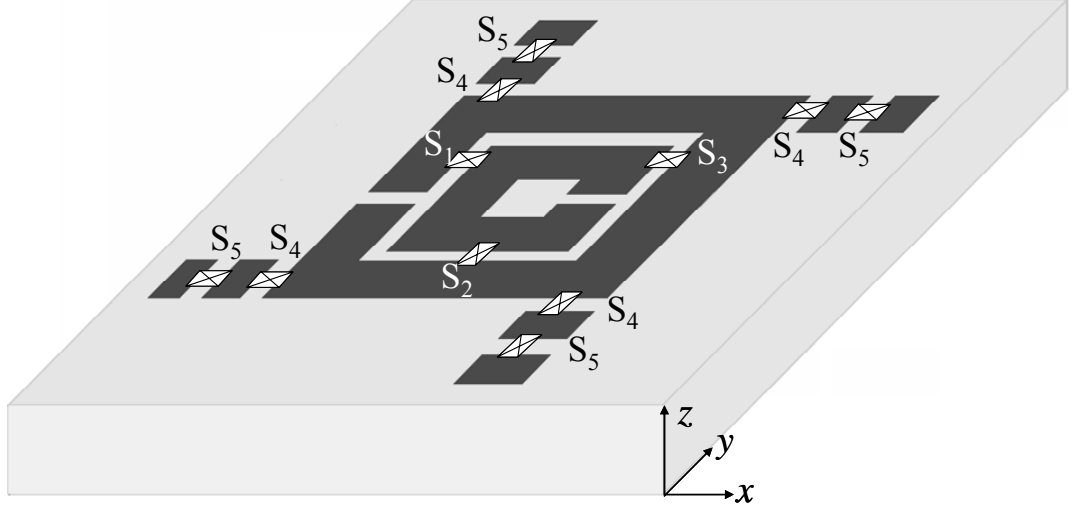
4.4. Anahtarlamaalı CSRR-FSS Tasarımı

TSRR-FSS'te kullanılan anahtarlama konfigürasyonunun bir benzeri (Şekil 4.1), SRR-FSS yapısının tümleyeni olan CSRR-FSS (Şekil 3.8) tasarımında da kullanılmıştır. Frekans ayarlamalı bu yeni CSRR-FSS (tunable CSRR-FSS: TCSRR-FSS) tasarımı ve ilgili iletim karakteristikleri Şekil 4.4'te verilmektedir. Görüldüğü üzere; tüm anahtarların kapalı olduğu durumda (metal parçalar varken), 6.1 GHz merkezli iletim bandı oluşmaktadır. S_1 , S_2 ve S_3 anahtarlarının teker teker açılmasıyla (diğer ikisi kapalıyken), sırasıyla, 4.25 GHz, 4.7 GHz ve 5.25 GHz merkezli bantlarda, yüzey tamamen iletim sağlamaktadır. Böylece, anahtarlamaalı CSRR-FSS (Tunable CSRR-FSS) yapısı 4.0-6.5 GHz frekans aralığında, frekans-ayarlamalı bant-geçiren filtre performansı sergilemektedir.

4.5. Anahtarlamaalı FSRR-FSS Tasarımı

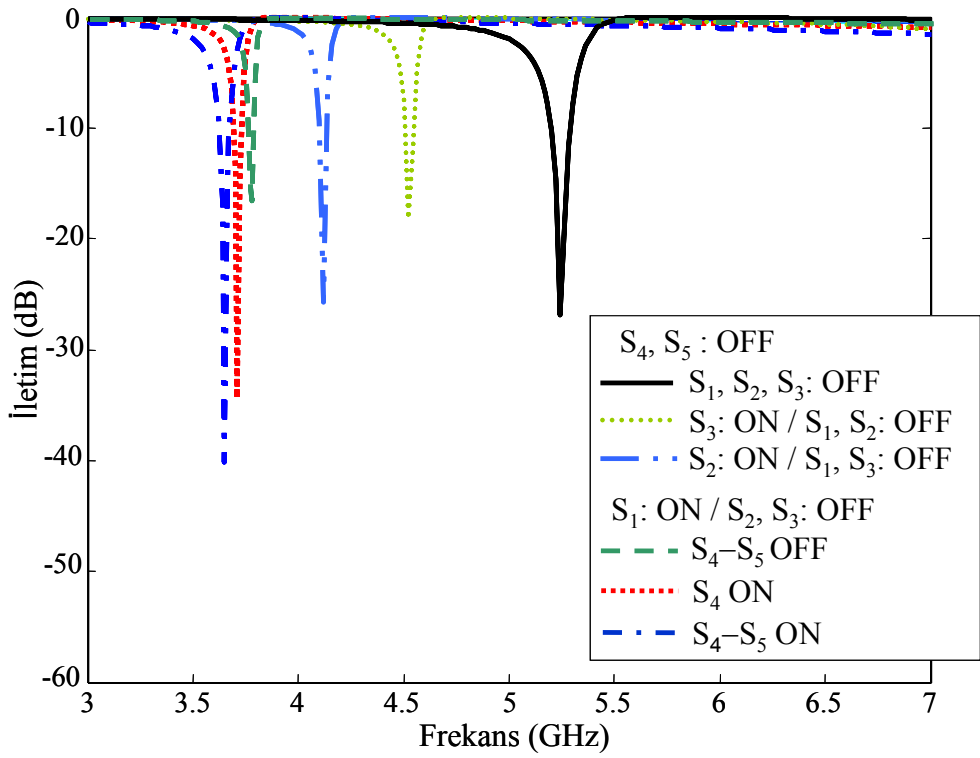
FSRR-FSS tasarımında (Şekil 3.9), TSRR-FSS'teki gibi halkalar arasına yerleştirilen anahtarlar ile benzer frekans kaydırmalı filtre performansı sağlanabilir. Ayrıca, FSRR-FSS yapısındaki yüklenme amaçlı kullanılan metal parçalara yerleştirilecek yeni aç/kapa anahtarlar ile daha hassas (ince-ayar: fine-tuning) frekans ayarlaması gerçekleştirilebilir. Bu amaçla tasarlanmış frekans ayarlamalı FSRR-FSS (tunable FSRR-FSS: TFSRR-FSS) konfigürasyonunda (Şekil 4.5), SRR halkaları arasına yerleştirilen anahtarların (S_1 , S_2 , S_3) yanı sıra, metalik yüklemelerin uzunluklarının kontrol edilebileceği dörder adet S_4 ve S_5 anahtarları bulunmaktadır. Şekil 4.6'da ilgili filtre karakteristikleri verilmektedir. Görüldüğü üzere; tüm anahtarların açık olduğu durumda 5.25 GHz merkezli durdurma bandı, sadece S_1 anahtarının kapatılmasıyla 1.25 GHz'lik bir düşüşle 3.75 GHz, sadece S_2 anahtarının kapatılmasıyla 4.10 GHz ve sadece S_3 anahtarının kapatılmasıyla 4.50 GHz bandına kaymaktadır. S_1 anahtarı kapalı pozisyondayken, S_4 ve S_5 anahtar gruplarının sırayla kapatılmasıyla, 3.75 GHz'deki durdurma bandı, yaklaşık 50 MHz'lik düşüşlerle, sırasıyla, 3.70 GHz (S_1 -on/ S_4 'ler-on/ S_5 'ler-off) ve 3.65 GHz (S_1 -on/ S_4 'ler-on/ S_5 'ler-on) frekanslarına kaymaktadır. Sadece S_2 veya S_3 anahtarlarının kapalı durumlarında ise, S_4 ve S_5 anahtarlarının açılıp kapatılmasıyla, benzer filtre karakteristikleri gözlenmektedir. Özetle; halkalar arasındaki anahtarlar ile (S_1 , S_2 , S_3) bir nevi kaba

frekansı ayarı (coarse-tuning), yüklemelere yerleştirilen anahtarlarla (S_4 , S_5) ise daha hassas frekans ayarı (fine-tuning) sağlanmakta ve 3.70–5.25 GHz bandında frekans ayarlamalı filtre performansı elde edilmektedir.



⊗ ON/OFF Anahtarlar

Şekil 4.5: TFSRR-FSS'nin birim hücre geometrisi.



Şekil 4.6: TFSRR-FSS'nin frekans ayarlamalı iletim karakteristikleri (TE-pol, $\theta=\phi=0^\circ$).

5. ÖLÇÜMLER VE GERÇEK ANAHTAR MODELLEMESİ

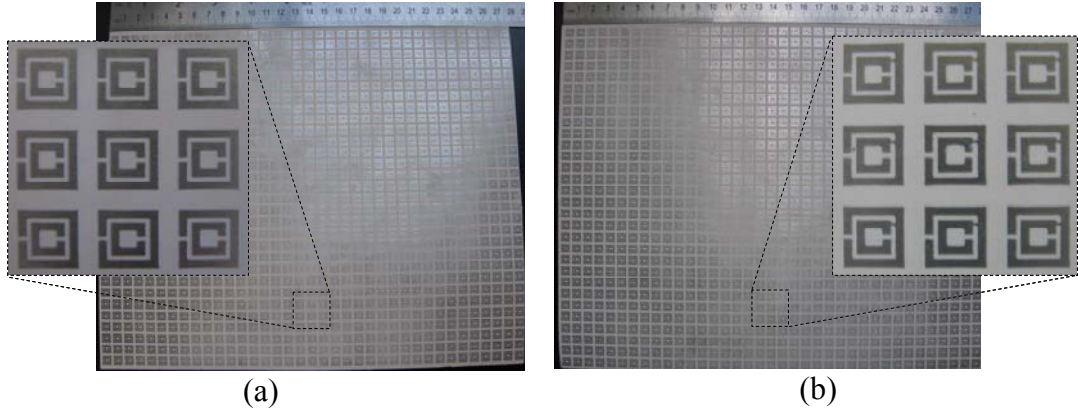
5.1. Giriş

Kapa/aç anahtarlar aracılığıyla frekans ayarlamalı filtre performansı sergileyen SRR-FSS tasarımları ve ilgili benzetim sonuçları Bölüm 4’de sunulmuştu. Bu anahtarların simülâtörde modellenmesi, SRR halkaları arasına yerleştirilen metalik parçalar vasıtasıyla gerçekleştirilmişti. İlgili anahtarın kapalı veya açık pozisyonları, metalik parçanın, sırasıyla, ilgili konumda bulunması veya bulunmaması ile tanımlanmaktaydı. Bu bölümde, TÜBİTAK/UEKAE laboratuvarının katkılarıyla fabrikasyonu gerçekleştirilmiş, biri anahtarsız, diğeri anahtarlı iki adet SRR-FSS prototipinin ölçüm sonuçlarına yer verilecektir. Anahtarlı prototipte, benzetimde olduğu gibi, ilgili anahtar konumlarında metalik parçalar kullanılmıştır. Pratik uygulamada ise, FSS frekans cevabının dinamik bir şekilde ayarlanabilmesi için, PIN diyotlar [27] ya da MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) türü anahtarların kullanımı [28] öngörülmektedir. Bu amaçla, bu bölümde, pratik anahtarların FSS performansı üzerindeki olası etkilerini incelemek için, gerçek anahtarların basit eşdeğer devre (PIN diyot) ve fiziksel modellerinin (MEMS) yer aldığı SRR-FSS tasarımlarına ait simülasyon sonuçları sunulmaktadır.

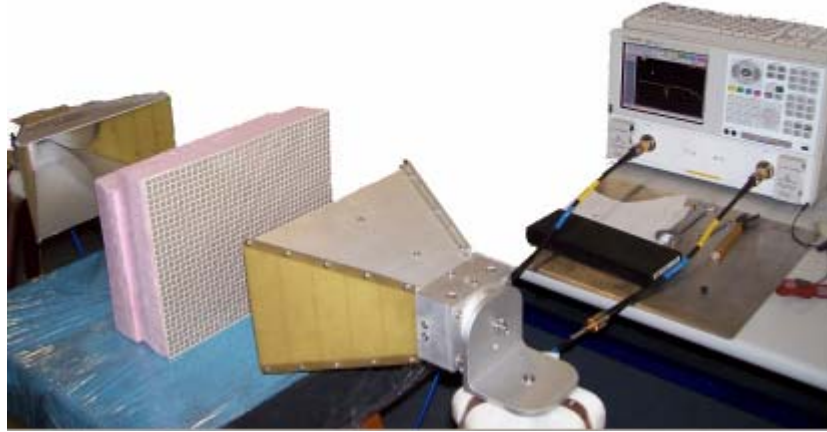
5.2. Ölçümler

Daha önceki bölümlerde sayısal analiz sonuçları incelenen anahtarsız (SRR-FSS, Şekil 3.1) ve anahtarlı (TSRR-FSS, Şekil 4.1) FSS tasarımlarının fabrikasyonu gerçekleştirilerek ilgili iletim/frekans ölçümleri yapılmıştır. Anahtarlı FSS’e örnek teşkil etmek üzere, sadece S_3 anahtarının kapalı olduğu (S_3 anahtar konumunda metalik parçanın bulunduğu) bir prototip gerçekleştirilmiştir. Metalik SRR elemanlarının, 0.50 mm (0.02 inç) kalınlığındaki RO3003 alüminyum oksit ($\epsilon_r=3.0\pm 0.04$, $\tan\delta=0.0013$) üzerine baskı devre teknolojisi kullanılarak yerleştirilmesiyle oluşturulan 37×30’luk (27.8×22.8 cm²) prototip FSS panelleri Şekil 5.1’de

görülmektedir. FSS prototiplerinin iletim/frekans ölçümleri, 1–18 GHz bandında çalışan iki adet horn anten (ETS-Lindgren Model-3115) ve Agilent™ E8362B PNA Network Analyzer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere, iki anten birbirini görecek şekilde aynı doğrultuda ve aralarındaki uzaklığı yaklaşık yarım metre olacak şekilde yerleştirilmiştir.



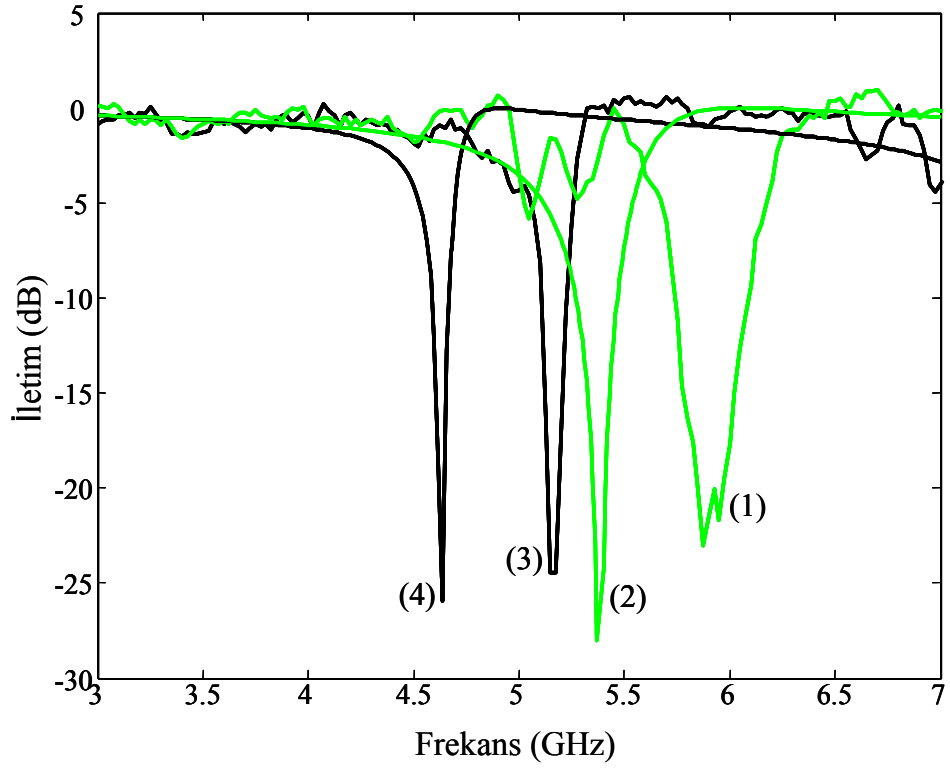
Şekil 5.1: Gerçeklenen (a) anahtarsız SRR-FSS ve (b) anahtarlı TSRR-FSS (S_3 : kapalı) panelleri.



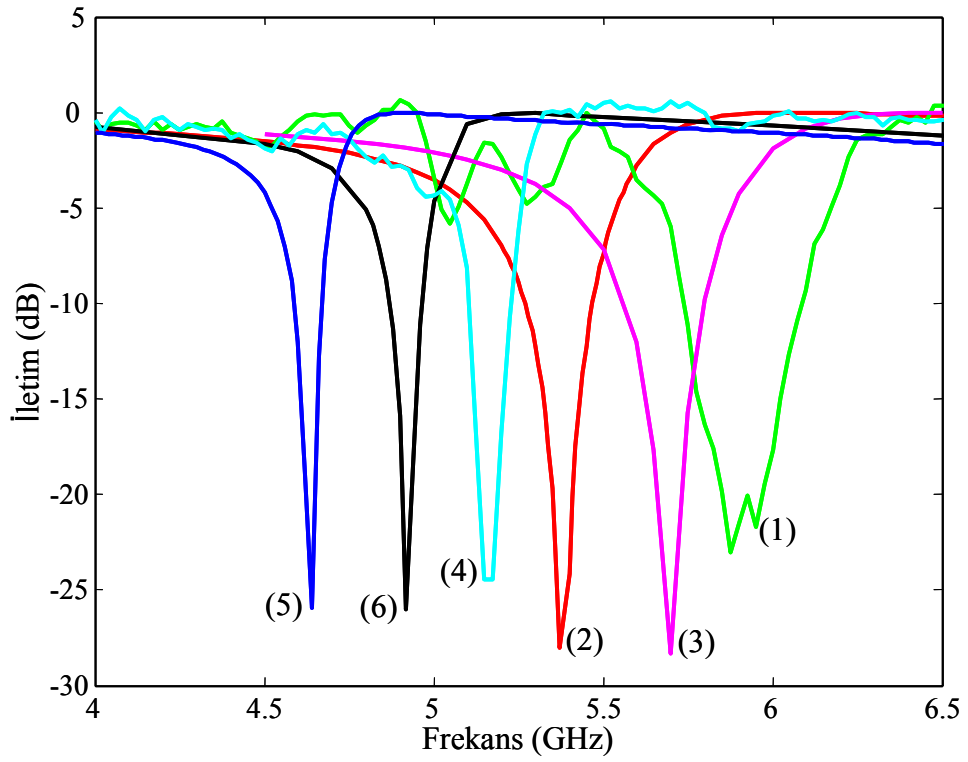
Şekil 5.2: FSS ölçümleri için kullanılan düzenek.

Ölçüm ve ilgili simülasyon sonuçları Şekil 5.3’te verilmektedir. Görüldüğü üzere; benzetim sonuçlarının öngördüğü frekans ayarlamalı bant-durduran filtre performansı ölçüm sonuçlarında da gözlenmektedir. Ancak ölçümlerde elde edilen durdurma bantları, simülasyondakilere göre yaklaşık 0.5 GHz daha yüksek frekanslarda oluşmaktadır. Çalışma bandı göz önüne alındığında (4–6 GHz), yaklaşık

%10'luk bu frekans kaymasının, modellenen ve gerçekleşen yapıların fiziksel parametreleri arasındaki bazı farklılıklardan (alttaş kalınlığı ve dielektrik toleransı, FSS metal kalınlığı) kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu farklılıkların giderilmesi doğrultusunda, prototip parametrelerinin olabildiğince modellenmesine çalışılmış ve bir dizi yeni simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, daha önce 0.6 mm olarak öngörülen alttaş kalınlığı prototipteki gibi 0.5 mm alınmıştır. Bunun yanı sıra, daha hassas modelleme için, alttaşın bir (1×0.5 mm) yerine iki prizmatik sonlu eleman (2×0.25 mm) ile benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, SRR elemanlarının sıfır metal kalınlığı yerine gerçekteki $35 \mu\text{m}$ kalınlığı tanımlanmış ve dielektrik tolerans değeri göz önüne alınarak $\epsilon_r=3.0$ yerine $\epsilon_r=2.96$ seçilerek modelleme yapılmıştır. Şekil 5.4'te, önceki ve sonraki parametrelere dair elde edilmiş simülasyon ve ilgili ölçüm sonuçları karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü üzere, daha önce 0.5 GHz olan simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki frekans farklılığı, yukarıda belirtilen değişiklikler sonrasında yaklaşık 0.2 GHz'e düşmüştür. Sonuçlar arasındaki bu 0.3 GHz'lik yakınlaşmada, beklendiği üzere, dielektrik kalınlığı ve bu kalınlığın daha hassas modellenmesi önemli rol oynamıştır. Metal kalınlığı ve dielektrik tolerans değerinin ise, yaklaşık 0.05 GHz'lik bir katkı sağladığı gözlenmiştir. Bu iyileştirmelere rağmen, ölçüm ve simülasyon sonuçlarındaki mevcut 0.2 GHz'lik farklılığın sebepleri arasında, sonlu periyodik (37×30 'luk) FSS panellerinin benzetiminin, sonsuz periyodik bir dizi simülatörüyle gerçekleştirilmiş olması gösterilebilir. Mevcut FSS prototiplerinin elektriksel büyüklüğünün ($\sim 5\lambda \times 5\lambda$) arttırılmasıyla ($10\lambda \times 10\lambda$ gibi), ölçüm sonuçlarının modelleme sonuçlarına daha da yaklaşması beklenmektedir. Ayrıca, ölçüm düzeneğinin ideal uzak alan ölçümleri için fiziksel olarak yetersiz kalmasının, ilgili farklılığın oluşmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Buna göre, ölçümlerde kullanılan antenler arası yaklaşık yarım metrelik mesafenin, $2D^2/\lambda$ ideal uzak alan mesafe kriterine göre, 2.5 metreye çıkarılması daha sağlıklı ölçüm yapılmasına sağlayacaktır. Bu durumda ise, verici anten ışımalarının olabildiğince FSS paneline odaklanmasını sağlayacak hassas bir ölçüm düzeneğinin kurulmasına ihtiyaç vardır.



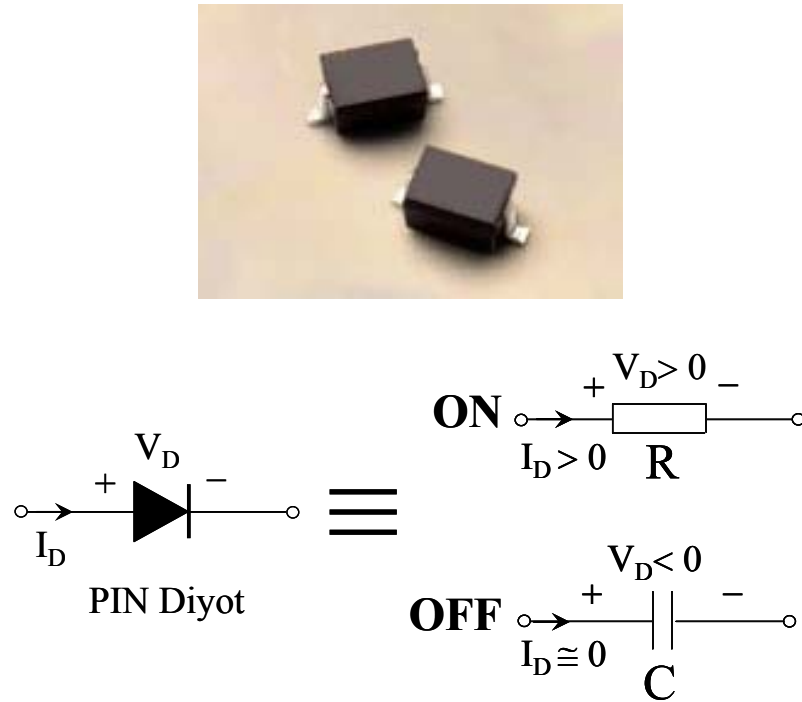
Şekil 5.3: FSS prototiplerine ait ölçüm (1, 3) ve simülasyon (2, 4) sonuçları (1, 2: anahtarsız FSS; 3, 4: anahtarlı FSS, S_3 kapalı).



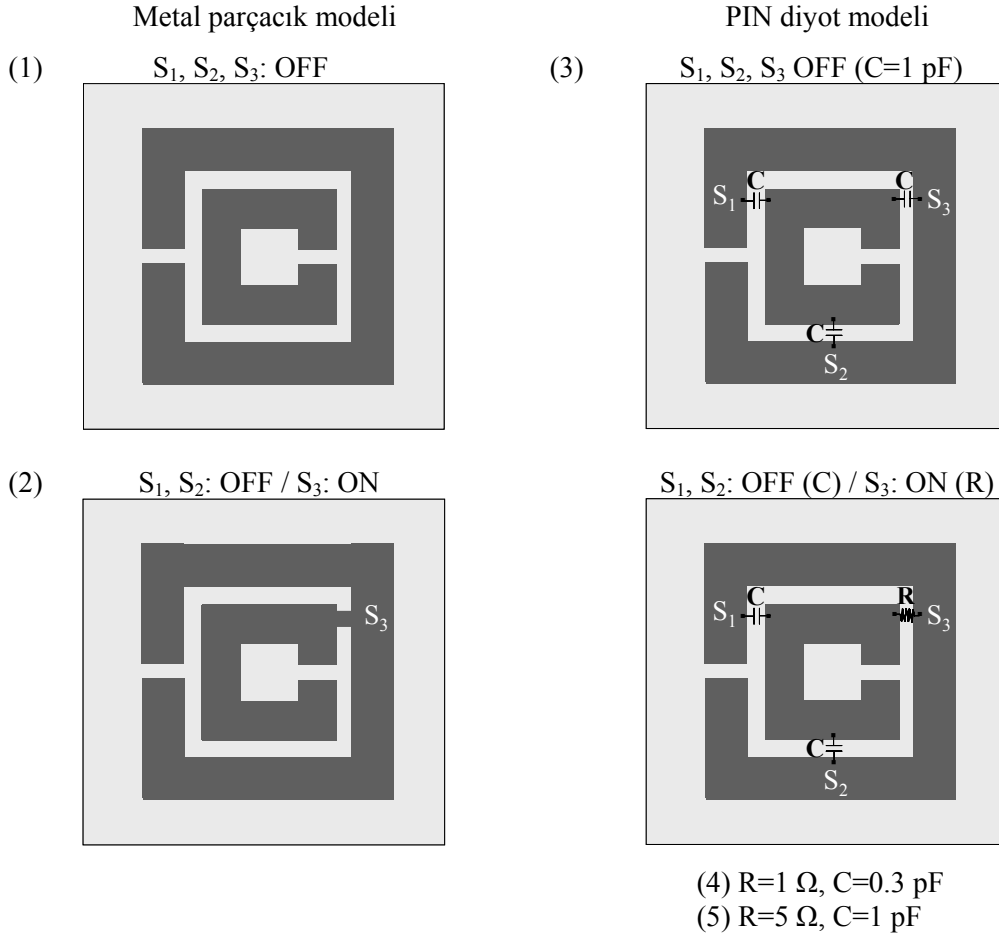
Şekil 5.4: FSS prototiplerine ait ölçüm (1, 4), önceki (2, 5) ve sonraki (3, 6) simülasyon sonuçları (1, 2, 3: anahtarsız FSS; 4, 5, 6: anahtarlı FSS, S_3 kapalı).

5.3. PIN Diyot Anahtar Modeli

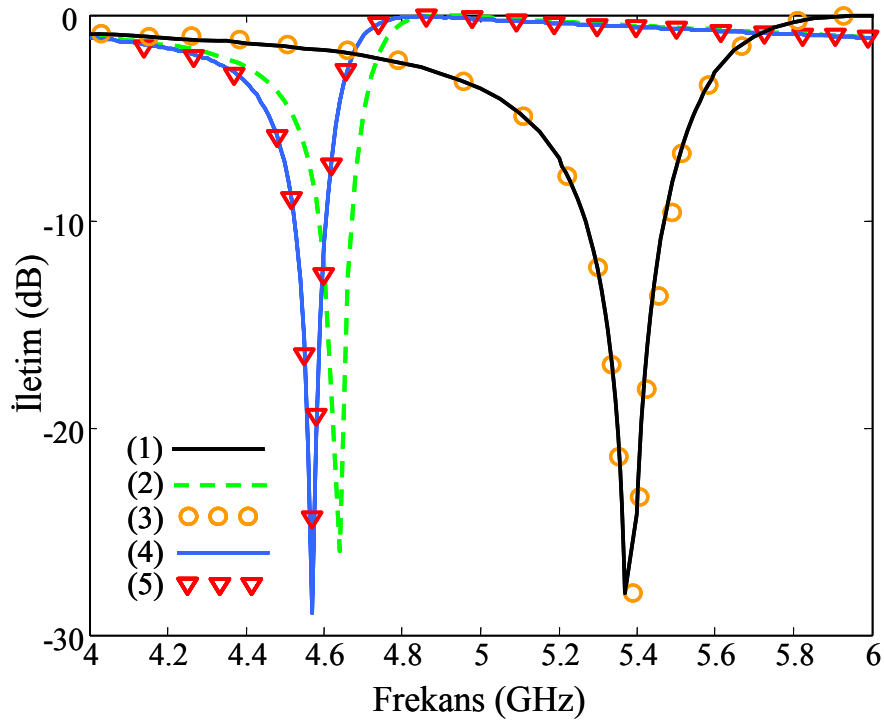
Pratik uygulamada kapa/aç anahtarlama için kullanılacak, yarı-iletken teknolojisiyle üretilmiş, yüzeye montajlı PIN diyot ve bu elemana ait eşdeğer devre anahtar modeli Şekil 5.5’de verilmektedir. Bu basit modele göre PIN diyot, üzerinden akımın geçişine izin verildiği doğru besleme durumunda (kapalı pozisyonda) seri direnç elemanı (R), akım geçişine izin verilmediği ters besleme durumunda (açık pozisyonda) ise, seri kondansatör elemanı (C) olarak tanımlanmaktadır. Pratikte kullanılan PIN diyotlar için, ilgili direnç ve kondansatör değerleri, sırasıyla, $R=1-5 \Omega$ ve $C=0.3-1 \text{ pF}$ olarak tanımlanmaktadır [29]. Gerçek anahtar davranışını temsil eden bu eşdeğer devre elemanlarının modellendiği SRR-FSS tasarımı ve ilgili benzetim sonuçları, sırasıyla, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmektedir. Görüldüğü üzere, PIN diyot modelinin yer aldığı FSS’nin frekans cevabı, kayıpsız metal-parçalı modelleme ile karşılaştırıldığında, hafifçe ($\sim 0.1 \text{ GHz}$) aşağı doğru kaymakta ve ilgili bastırma seviyelerinde 5–10 dB arasında iyileşme gözlenmektedir. Buna göre, pratik uygulamada PIN diyot kullanımının, anahtarlama SRR-FSS performansını önemli derecede etkilemeyeceği sonucuna varılabilir.



Şekil 5.5: Yüzeye uyumlu PIN diyot ve basit eşdeğer devre modeli.



Şekil 5.6: Metal parçacık ve PIN diyot modelleri.



Şekil 5.7: PIN diyot eşdeğer devre modelinin (Şekil 5.6) FSS performansına etkisi.

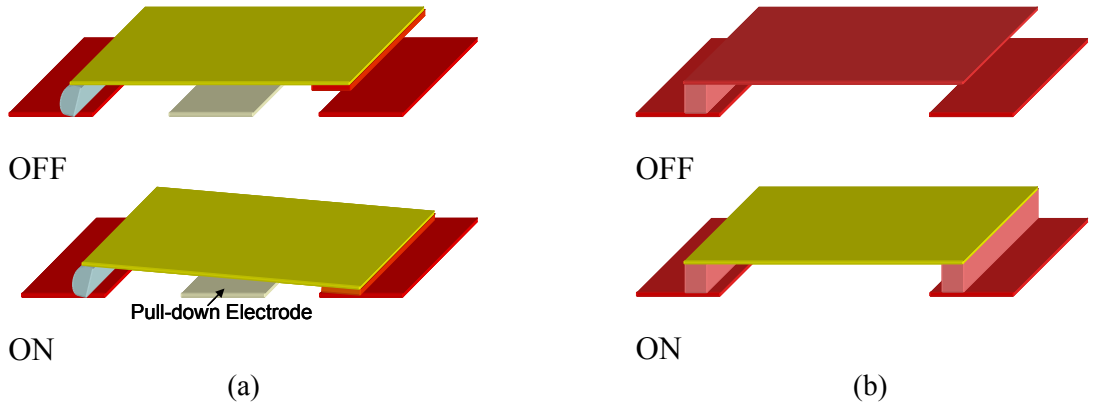
5.4. MEMS Anahtar Modeli

Mekanik elemanlar, duyarlar (sensors) ve uyarıcıların (actuators), gelişmiş mikro-elektronik teknolojisiyle tümleşik bir devrede bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılar, mikro-elektromekanik sistemler (micro-electro-mechanical systems, MEMS) olarak anılmaktadır. MEMS teknolojisinin küçük ve hareketli parçalar üretebilme özelliği kullanılarak RF-MEMS mikro-anahtar yapıları geliştirilmiştir. RF-MEMS anahtarlarının, diğer yarı iletken anahtarlarla (PIN diyotlar gibi) karşılaştırıldığında, oldukça küçük boyutlu ve hafif olmalarının yanı sıra, düşük iletim kaybı, yüksek yalıtım ve düşük güç tüketimi gibi üstünlükleri bulunmaktadır [30, 31]. Özel olarak [28]'de, anahtarlama bir FSS uygulamasında, RF-MEMS anahtarları kullanılmıştır.

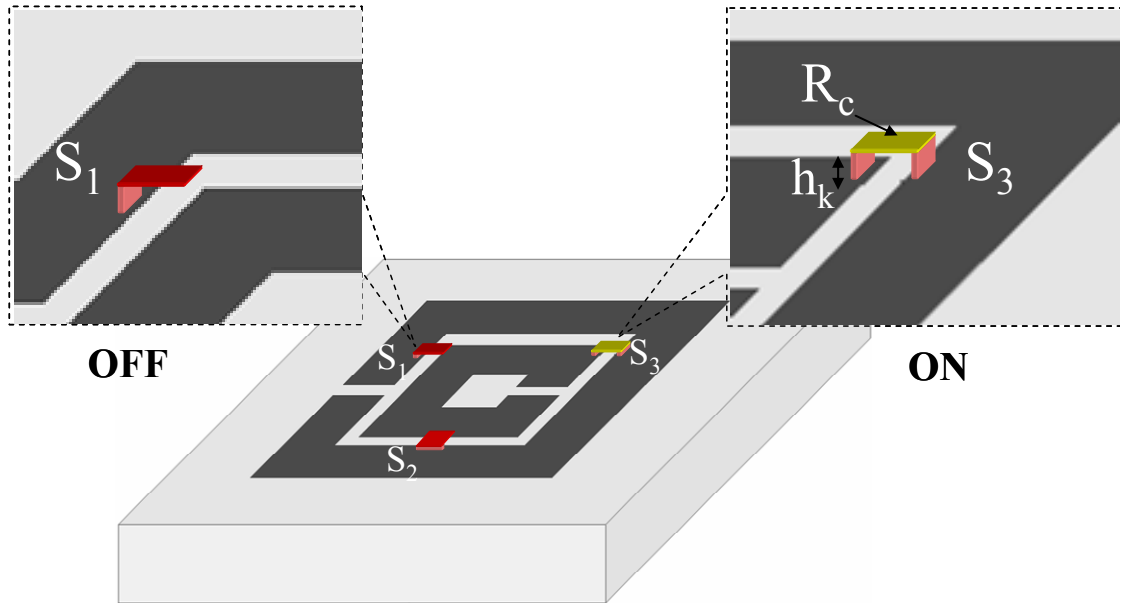
Bu çalışmada, çizimleri Şekil 5.8'de verilen, konsol kirişli (cantilever) RF-MEMS anahtar yapısından [31] esinlenilmiş, iki ayaklı köprü tipi anahtar modeli, Şekil 5.9'deki TSRR-FSS tasarımında kullanılmıştır. Bu model, FSS yüzeyine dik konumda bulunan iki metal ayak üzerine yerleştirilmiş direnç kartından (resistive card, $R_c \Omega/\text{cm}^2$) oluşmaktadır. MEMS anahtarın kapalı (on) pozisyonunda, pratikte oluşabilecek olası kayıplar bu dirençli kart tarafından temsil edilmektedir. Anahtar açık olduğunda ise, tek bacaklı köprü yapısı için kayıp tanımlaması yapılmamakta, fiziksel modelinden kaynaklanan efektif bir kapasitif etki öngörülmektedir. Şekil 5.9'da görüldüğü üzere, MEMS anahtarı kapalı (on) konumdayken bir köprü gibi SRR halkalarını birbirine bağlarken, açık (off) durumunda ise, köprü yapısındaki ayaklardan birinin olmayışıyla bağlantı kesilmekte, dolayısıyla, yalıtım gerçekleşmektedir. Ölçüm sonuçlarını değerlendirirken, durdurma frekans bandının, dielektrik alttaşın sonlu eleman modellemesine hassasiyetine değinilmiştir. Bu doğrultuda, MEMS modeli içeren FSS analizlerinde alttaş iki katmanlı prizmatik sonlu elemanlar ile modellenmiştir.

Basit MEMS anahtar modelinin kullanıldığı TSRR-FSS tasarımında, MEMS köprü yüksekliği (h_k) ve iletim kayıplarına (R_c) dair parametrik benzetim sonuçları Şekil 5.10'da verilmektedir. Görüldüğü üzere, MEMS modelinin yer aldığı FSS'nin frekans cevabı, kayıpsız metal-parçalı modelleme ile karşılaştırıldığında, 0.1–0.2 GHz kadar aşağı doğru kaymakta, ilgili bastırma seviyelerinde ise, yaklaşık 5 dB

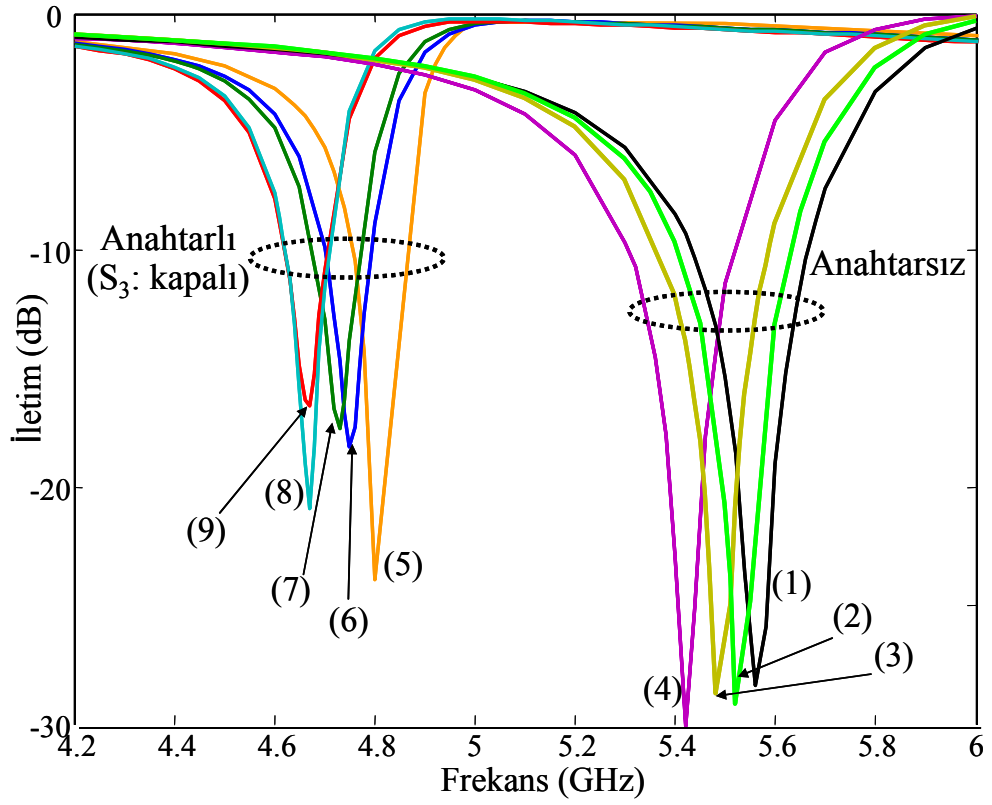
kadar düşüş gözlenmektedir. Bu çalışmada, pratik MEMS anahtarları [31] referans alınarak ilgili D ve R_c parametreleri için alt ve üst limit değerleri tanımlanmıştır. MEMS modeline ait sonuçlar, ilgili köprü yüksekliğinin $h_k=0.3$ mm ve kayıp parametresinin $R_c=1 \Omega/\text{cm}^2$ özel değerlerinde kayıpsız metal-parçalı modelleme sonuçlarına oldukça yakın bir profil sergilemektedir. Köprü yüksekliğinin artmasıyla efektif kapasitif etki azalmakta ve dolayısıyla aşağıya doğru daha az frekans kayması gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, pratik uygulamada kullanılması öngörülen MEMS anahtarlarının, TSRR-FSS performansını kabul edilebilir ölçülerde etkileyebileceği öngörülmektedir.



Şekil 5.8: (a) Konsol kirişli (cantilever) [31] ve (b) iki ayaklı köprü tipi MEMS anahtar modelleri.



Şekil 5.9: MEMS anahtar modeli kullanılarak oluşturulan TSRR-FSS konfigürasyonu (S_1/S_2 : OFF; S_3 : ON).



Şekil 5.10: MEMS anahtar modelinin FSS performansı üzerine etkisi;
 Metalik parçacık modeli: (1), (5); MEMS modeli: (2) $h_k=0.3\text{mm}$, (3) $h_k=0.1\text{mm}$,
 (4) $h_k=0.05\text{mm}$, (6) $R_c=1\ \Omega$, $h_k=0.3\text{mm}$, (7) $R_c=1\ \Omega$, $h_k=0.1\text{mm}$,
 (8) $R_c=1\ \Omega$, $h_k=0.05\text{mm}$, (9) $R_c=0.5\ \Omega$, $h_k=0.05\text{mm}$.

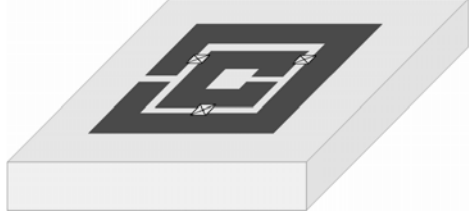
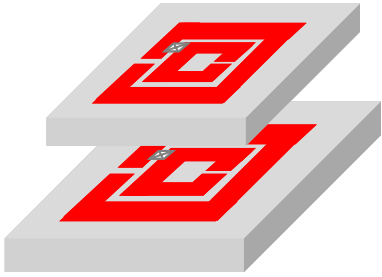
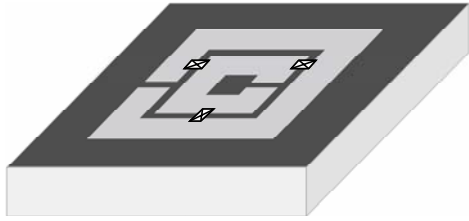
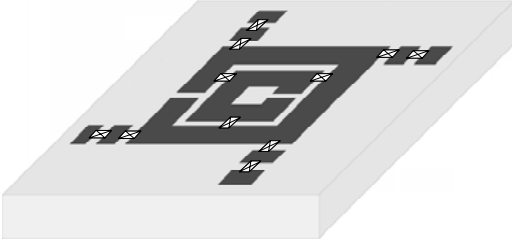
6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, SRR elemanını temel alan, anahtarlama, FSS tasarımları tanıtılmıştır. Bu tasarımların sayısal analizi, sonlu eleman-sınır integral metodunu kullanan periyodik bir dizi simülatörü ile gerçekleştirilmiştir. Tezde önerilen anahtarlama SRR-FSS tasarımları ve ilgili performansları Tablo 6.1’de özetlenmektedir. Bu tasarımların özgünlüğü; SRR halkaları arasına uygun konumlarda yerleştirilmiş aç/kapa anahtarlar aracılığıyla, ilgili filtre karakteristiklerinin farklı frekans bantlarına kaydırılmasıdır. Aç/kapa anahtarların benzetimi, metal parçaların anahtar konumlarına yerleşimiyle gerçekleştirilmiştir. Pratik uygulamalarda kullanımı öngörülen PIN diyot veya MEMS türü anahtarların gerçeğe yakın anahtar modellerinin, FSS performansına etkileri de, ayrıca incelenmiştir. Önerilen FSS tasarımlarının pratik uygulamalarda performansını görmek için, biri anahtarsız diğeri anahtarlı (metal parçalı) iki prototip üretilmiş ve ilgili iletim/frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir; benzetim ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen FSS tasarımları, sivil veya askeri haberleşme sistemlerinde, frekans-ayarlamalı, bant-geçiren, bant-durduran veya çoklu-frekans filtre uygulamalarında kullanılabilir. İstenilen frekans-bantlarında performans sağlayacak yapılar, mevcut konfigürasyonların geometrik parametrelerinin, ölçeklenmesiyle elde edilebilir. Gelecekteki çalışmalarda; önerilen FSS tasarımlarının, çoklu-frekans slot (açıklık) veya mikroşerit anten uygulamalarında kullanılması planlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında yer alan FSS tasarımları, 2006 Uluslararası Elektromanyetik Dalga Saçınım Sempozyumunda [32] sunulmuştur.

Tablo 6.1: Tezde önerilen anahtarlamalı, frekans ayarlamalı FSS tasarımları

FSS Birim Hücre Konfigürasyonu	Performans
 <p>TSRR-FSS</p>	<p>TSRR-FSS ile 3.8–5.5 GHz frekans aralığında, dört farklı bantta bant-durduran filtre performansı sağlanmaktadır</p>
 <p>TDSRR-FSS</p>	<p>TDSRR-FSS ile frekans ayarlamalı, çift-bantlı (3.85 GHz / 5.1 GHz ve 3.6 GHz / 5.34 GHz) bant-durduran filtre karakteristiği elde edilmiştir.</p>
 <p>TCSRR-FSS</p>	<p>TCSRR-FSS, 4.0–6.5 GHz frekans aralığında, dört farklı bantta bant-geçiren filtre performansı sergilemektedir.</p>
 <p>TFSRR-FSS</p>	<p>TFSRR-FSS ile 3.70–5.25 GHz bandında halkalar arasındaki anahtarlar ile kaba, yüklemelere yerleştirilen anahtarlarla ise daha hassas frekans ayarı sağlanmaktadır.</p>

KAYNAKLAR

- [1] Radia, Z., 2006, *Frequency Selective Surfaces* [online], Brno University of Technology http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia_en/chapter-5/5_0.html (**Ziyaret tarihi: 19.12.2006**).
- [2] Marconi, G., and Franklin, C. S., “Reflector for use in wireless telegraphy and telephony”, *US Patent 1,301,473*, (1919).
- [3] O’Nians, F., and Matson, J., “Antenna feed system utilizing polarisation independent frequency selective intermediate reflector”, *US Patent 3,231,892*, January (1966).
- [4] Munk, B., A., “Periodic Surface for Large Scan Angles”, *US Patent 3,789,404*, January (1974).
- [5] Agrawal, N. D., Imbriale, W. A., “Design of a dichroic cassegrain subreflector,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 27, no. 4, pp. 466–473, (1979).
- [6] Wu, T., K., “Frequency Selective Surface and Grid Array”, *John Wiley & Sons*, New York, 1-14, (1995).
- [7] Munk, B., A., “Frequency Selective Surfaces: Theory and Design”. *John Wiley & Sons*, New York, 1-25, (2000).
- [8] Pendry, J., B., Holden, A., J., Robins, D., J., and Stewart, W., J., “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, (1999)
- [9] Smith, D., R., and Kroll, N., “Negative refractive index in left-handed materials.” *Phys. Rev. Lett.*, 85(14). 2933–2936. (2000).
- [10] Bardi, I., Remski, R., Perry, D. and Cendes, Z., “Plane wave scattering from frequency-selective surfaces by the finite-element method,” *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 641-644, (2002).
- [11] Marques, R., Baena, J., D., Beruete, M., Falcone, F., Lopetegi, T., Sorolla, M. Martin, F., and Garcia, J., “Ab initio analysis of frequency selective surfaces based on conventional and complementary split ring resonators,” *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* vol. 7, pp. S38–S43 (2005).

- [12] Beruete, M., Marques, R., Baena, J., D., and Sorolla, M., “Resonance and cross-polarization effects in conventional and complementary split ring resonators periodic screens,” *IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp.*, Washington D. C., pp. 794-797, 3-8 July (2005).
- [13] Rebelo, A., P., P., “Design of Frequency Selective Windows for Improved Indoor Outdoor Communication”, *Master of Science Thesis Lund University Department of Electrosience*, Sweden, 11-3, August (2004)
- [14] Chen, C., C., “Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.21, no. 1 pp.1-6, Jan. (1973).
- [15] Mittra, R., Chan, C., H., and Cwik, T., “Techniques for analyzing frequency selective surfaces-A review,” *Proc. IEEE*, vol..76, pp.1593-1615, Dec. (1988).
- [16] Ohira, M., Deguchi, H., Tsuji, M., Shigesawa, H., “Analysis of frequency selective surface with arbitrarily shaped element by equivalent circuit model,” *Wiley Periodicals, Inc. Electronics and Communication in Japan Part II*, vol. 88, no. 6, pp. 9–17, June, (2005).
- [17] Volakis, J., L., Ozdemir, T., and Gong, J., “Hybrid finite-element methodologies for antennas and scattering,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 45(3).493–507, (1997).
- [18] Eibert, T., F., Erdemli, Y., E., and Volakis, J., L., “Hybrid finite element-fast spectral domain multilayer boundary integral modeling of doubly periodic structures,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 9, pp. 2517–2520, (2003).
- [19] Hooberman, B., May 2005 *Everything You Ever Wanted to Know About Frequency-Selective Surface Filters but Were Afraid to Ask*, http://calvin.phys.columbia.edu/group_web/filters/filter.pdf (**Ziyaret tarihi 18.11.2005**).
- [20] Ho, T., Q., Logan J., C., 1994, *An Integrated Antenna Mast for Shipboard Applications* [online], Arlington, Space and Naval Warfare Systems Command <http://www.spawar.navy.mil/sti/publications/pubs/td/2716/td2716.pdf> (**Ziyaret arihi: 11.02.2007**).
- [21] U. S. Air Force photo, *Aircraft Fighters F-117 Photos* [online] Official Website of the United States Air Force <http://www.af.mil/photos/index.asp?galleryID=27> (**Ziyaret tarihi: 30.05.2007**).

- [22] Yarnall P., R., *NavSource Online: Destroyer Photo Archive DD-968 USS ARTHUR W. RADFORD* [online] NavSource Photo Archives <http://www.navsource.org/archives/05/968.htm> (**Ziyaret tarihi: 30.05.2007**).
- [23] Erdemli, Y., E., and Sondas, A., “Dual-polarized frequency-tunable composite left-handed slab,” *J. Electromagn. Waves and App.*, 19, 1907–1918 (2005).
- [24] Erdemli, Y., E., Sertel, K., Gilbert, R., A., Wright, D., E., and Volakis, J., L., “Frequency-selective surfaces to enhance performance of broad-band reconfigurable arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 12, pp. 1716-1724, (2002).
- [25] Erdemli, Y., E., Gilbert, R., A., Volakis, J., L., “A reconfigurable slot aperture design over a broad-band substrate/feed structure,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 11, pp. 2860-2870, (2004).
- [26] Sondaş, A. “Sol-Elli Metamateryal Yapıların Sayısal Analizi ve Tasarımı”, *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Elektronik-Bilgisayar Eğitimi A.B.D.*, Türkiye, (2006).
- [27] Chang, T., K., Langley, R., J., Parker, E., A., “Active frequency-selective surfaces,” *IEE Proc-Microw. Antennas Propag.*, vol. 143, no. 1, pp. 62-66, (1996).
- [28] Schoenlineer, B., Abbaspour-Tamijani, A., Kempel, L., C., Rebeiz, G., M., “Switchable low-loss RF MEMS Ka-band frequency-selective surface,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 11, pp. 2474–2481, (2004).
- [29] Microsemi Corporation, 2000, *RF/Microwave semiconductor solutions* [online], Microsemi Co., <http://www.microsemi.com/literature/rfbrochure.pdf> (**Ziyaret tarihi: 19.05.2006**).
- [30] Brown, E., R., “RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1868-1880, (1998).
- [31] Rebeiz, G., M., Muldavin, J., B., “RF-MEMS switches and switch circuits,” *IEEE Microwave Magazine.*, vol. 2, no. 4, pp. 59-71, (2001).
- [32] Ucar, M., H., B., Sondas, A., and Erdemli, Y., E., “Switchable split-ring frequency selective surface,” *IV. Int. Workshop on EM Wave Scattering (EWS'06 Conf.*, Gebze, TURKEY, 19-22 Sept., (2006).

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

1. Ucar, M., H., B., Sondas, A., and Erdemli, Y., E.,. “Switchable split-ring frequency selective surface,” *IV. Int. Workshop on EM Wave Scattering (EWS’06) Conf.*, Gebze, TURKEY, 19-22 Sept., (2006).

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Kadıköy’de doğdu. 1999 yılında lise öğrenimini Tuzla Anadolu Meslek Lisesi’nde tamamladıktan sonra 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü Elektronik Öğretmenliği programından 2004 yılında Elektronik Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi A.B.D.’de yüksek lisans öğrenimine başladı. 2004 yılının Aralık ayında göreve başladığı, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümünde halen araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.