KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YARIK–HALKA REZONATÖRÜ MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cumhur CENK

Anabilim Dalı: Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi

Danışman: Doç. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YARIK–HALKA REZONATÖRÜ MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI

YÜKSEK LİSANS

Cumhur CENK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23 Mayıs 2007

Tezin Savunulduğu Tarih: 05 Haziran 2007

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç. Dr. Yunus E. ERDEMLİ	Yrd. Doç. Dr. Güllü KIZILTAŞ ŞENDUR	Yrd. Doç. Dr. Gonca ÇAKIR
.....	.....	.....

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasıyla, yeni yarık-halka rezonatörü mikroşerit filtre tasarımları literatüre kazandırılmıştır. Bu tasarımların özgünlüğü, rezonatör halkaları arasına yerleştirilen anahtarlar sayesinde frekans ayarlamalı bant-geçiren filtre performansının sağlanabilmesidir.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde, sahip olduğu bilgi birikimini benimle paylaşıp, bana yol gösteren ve katkılarıyla tezin bugünlere gelmesini sağlayan danışmanım Doç. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ'ye ve değerli yorumları için tez jüri üyelerine şükran ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, yardımlarını benden esirgemeyen Arş. Gör. Adnan SONDAŞ'a ve Arş. Gör. Mustafa H. B. UÇAR'a; tasarlanan mikroşerit filtre yapıların üretimi ve ölçümlerinin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı, TÜBİTAK/UEKAE birimine ve özellikle Dr. Fatih ÜSTÜNER'e; çalışmalarım esnasında benden destek ve fedakârlıklarını esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Cumhur CENK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR vi
ÖZET viii
İNGİLİZCE ÖZET ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
BÖLÜM 2. YARIK-HALKA REZONATÖRÜ FİLTRE TASARIMI 4
2.1. Giriş 4
2.2. Başlangıç Tasarımı 5
2.3. Tasarım–I 11
2.4. Tasarım–II 12
2.5. Tasarım–III 15
BÖLÜM 3. ANAHTARLAMALI SRR FİLTRE TASARIMLARI 17
3.1. Giriş 17
3.2. Tasarım–IV 17
3.3. Tasarım–V 22
3.4. Tasarım–VI 25
3.5. Tasarım–VII 27
BÖLÜM 4. ÖLÇÜMLER VE PRATİK ANAHTAR MODELLEMESİ 29
4.1. Giriş 29
4.2. Ölçümler 29
4.3. PIN Diyotlu Anahtar Gerçeklemesi ve Modellemesi 32
BÖLÜM 5. SONUÇLAR 37
KAYNAKLAR 40
EKLER 44
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER 60
ÖZGEÇMİŞ 61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Anahtarlı SRR filtre konfigürasyonu (port: kapı) 3
Şekil 2.1. (a) Elektriksel, (b) manyetiksel, (c) karma (elektriksel+manyetiksel) kuplaj etkisi gösteren SRR konfigürasyonları [4] 5
Şekil 2.2. Hong ve Lancaster'ın SRR filtre tasarımı [4]: L_{SRR}=7, y_M=2, d_M=1.5, g=0.1, w=1, P_L=5, P_W=1 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.8 6
Şekil 2.3. Hong ve Lancaster'ın [4] önerdiği SRR filtresinin (a) S_{11}, (b) S_{21} karakteristikleri 7
Şekil 2.4. SRR boyutunun (L_{SRR}) rezonans frekansı (f_r) üzerindeki etkisi 9
Şekil 2.5. SRR'lar arası yatay mesafenin (y_M) S_{11} ve S_{21} karakteristiklerine etkisi .. 9
Şekil 2.6. İç içe halkalardan oluşan SRR filtre konfigürasyonu: P_L=7.125, P_W=1.125, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, y_M=1.30, d_M=2.30, g=0.375, x=0.375, w=1.125 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2 10
Şekil 2.7. Şekil 2.6'daki SRR filtre tasarımının, içteki halkalar varken (──) ve yokken (------) S_{11} ve S_{21} karakteristikleri 10
Şekil 2.8. Tasarım–I geometrisi: P_L=5.0, P_W=1.125, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, w=1.125, g=0.5, x=0.375, y_M=1.0, ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2 11
Şekil 2.9. SRR'lar arası yatay mesafenin (y_M) S_{11} ve S_{21} karakteristiklerine etkisi 12
Şekil 2.10. Tasarım–I'in S_{11} ve S_{21} karakteristikleri 12
Şekil 2.11. Tasarım–II geometrisi: L_1=8.45, L_2=14.5, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, g=0.5, x=0.375, b=0.235, w=1.125 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2 13
Şekil 2.12. Tasarım–II'nin S_{11} ve S_{21} karakteristikleri 13
Şekil 2.13. Yarıklı iletim hattı uzunluğu L_2'nin (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristiklerine etkisi (L_{SRR}=7.125 mm) 14
Şekil 2.14. Tasarım–III geometrisi: L_1=7, P_L=2, L_{SRR}=7, L_X=4, g=0.5, x=0.5, b=0.3, w=1 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2 15
Şekil 2.15. Tasarım–III'ün S_{11} ve S_{21} karakteristikleri 16
Şekil 3.1. Tasarım–IV konfigürasyonu: P_L=5.0, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, w=1.125, g=0.5, x=0.375, y_M=1.0, h=1.27 ve anahtar boyutları= 0.375x0.375 (mm), ε_r=10.2 18
Şekil 3.2. Tasarım–IV'ün frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri 19
Şekil 3.3. Tasarım–IV konfigürasyonu için akım yoğunluk grafikleri 20
Şekil 3.4. Tasarım–IV'ün frekans ayarlamalı çift-bant (a) S_{11}, (b) S_{21} karakteristikleri 21
Şekil 3.5. Tasarım–V konfigürasyonu: L_1=8.45, L_2=14.5, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, g=0.5, x=0.375, b=0.235, w=1.125, h=1.27 ve anahtar boyutları=0.375x0.375 (mm), ε_r=10.2 22
Şekil 3.6. Tasarım–V'in frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri 23

Şekil 3.7. Tasarım–V'in çift-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri 24
Şekil 3.8. Tasarım–VI geometrisi: L_1=7, P_L=2, L_{SRR}=7, L_X=4, g=0.5, x=0.5, b=0.3, w=1, anahtar boyutları=0.5x0.5 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2 25
Şekil 3.9. Tasarım–VI'nın frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri 26
Şekil 3.10. Tasarım–VII geometrisi: L_1=8.45, L_2=14.5, L_{SRR}=7.125, g=0.5, x=0.375, b=0.235, w=1.125, h=1.27 ve anahtar boyutları=0.5x0.5 (mm), ε_r=10.227
Şekil 3.11. Tasarım–VII'nin frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri 28
Şekil 4.1. Gerçeklenmiş anahtarsız filtre prototipinin üstten görünüşü 30
Şekil 4.2. Anahtarsız (metalik parçalar yokken) filtre prototipinin benzetim ve ölçüm sonuçları 31
Şekil 4.3. Gerçeklenmiş anahtarlı (metal-parçalı) filtre prototipinin üstten görünüşü 31
Şekil 4.4. Anahtarlı (metalik parçalar varken) filtre prototipinin benzetim ve ölçüm sonuçları 32
Şekil 4.5. PIN diyot anahtarlı filtre prototipinin üstten görünüşü 33
Şekil 4.6. Üç farklı filtre prototipinin ölçüm sonuçları 33
Şekil 4.7. İki bacaklı köprü şeklindeki PIN elemanların yer aldığı filtre modeli 35
Şekil 4.8. İki PIN diyot ve iki metal parçalı anahtar modeli içeren filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçları 35
Şekil 4.9. Köprü biçimindeki PIN eleman modelinin açık-kapalı durumları 36
Şekil 4.10. Köprü ve metal-parçalı anahtar modellemelerine ait simülasyon sonuçları 36

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Mikroşerit filtre teorisine katkı sağlayan çalışmaların tarihsel akışı 2
Tablo 2.1. SRR filtre tasarımı [4] referans alınarak gerçekleştirilen parametrik çalışmalar (» : olumlu etkilenme, « : olumsuz etkilenme, f_r : rezonans frekansı, ▲ : değerde yükselme, ▼ : değerde düşme, ◊ : etki az veya yok) 8
Tablo 4.1. Prototip tasarımının (Şekil 3.1) geometrik parametreleri 30
Tablo 5.1. Tezde önerilen anahtarlamalı filtre tasarımları 39

SİMGELER VE KISALTMALAR

b	:	Dış SRR ile yarıklı hat arası uzaklık (mm)
d_M	:	Dış halkalar arası dikey mesafe (mm)
EM	:	Elektromanyetik
f_r	:	Rezonans frekansı (GHz)
FEM	:	Sonlu Eleman Metodu
g	:	Halkaların yarık genişliği (mm)
h	:	Alttaş kalınlığı (mm)
L_1	:	Tekli yapının Y eksenindeki boyutu (mm)
L_2	:	Tekli yapının X eksenindeki boyutu (mm)
LHM	:	Sol-Elli Bileşik Metamateryaller
L_{SRR}	:	Dıştaki SRR hücresi boyutu (mm)
L_X	:	İçteki SRR hücresi boyutu (mm)
MoM	:	Moment Metodu
PCB	:	Baskılı Devre Levhası
P_{IN}	:	Giriş Portu
P_L	:	Port uzunluğu (mm)
P_{OUT}	:	Çıkış portu
P_W	:	Port genişliği (mm)
S_a, S_b, S_1, S_2, S_3	:	Kapa/Aç anahtarlar
S_{11}	:	Yansıma kaybı (dB)
S_{21}	:	İletim kazancı (dB)
SRR	:	Yarık Halka Rezonatör
w	:	İletken şerit kalınlığı (mm)
x	:	İç-dış halkalar arası mesafe (mm)

y_M	:	Dış halkalar arası yatay mesafe (mm)
ε_r	:	Bağıl elektrik geçirgenlik katsayısı
Ω	:	Direnç birimi (Ohm)

YARIK–HALKA REZONATÖRÜ MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI

Cumhur CENK

Anahtar Kelimeler: Mikroşerit filtre, Yarık-halka rezonatörü, S-parametreleri, Rezonans frekansı, Kapa/aç anahtar, PIN diyot, MEMS, Tek-Bant, Çift-Bant.

Özet: Mikroşerit yapılar, düşük maliyet, küçük boyut, yüzeye uyumluluk, kolay üretim ve yüksek frekanslarda kararlılık özellikleri sebebiyle günümüz mikrodalga teknolojisinin vazgeçilmez elemanlarıdırlar. Özel olarak mikroşerit filtreler, belirli frekans bantlarında gösterdikleri kayda değer iletim performansları ile mikrodalga uygulamalarında önemli bir yer teşkil etmektedirler.

Bu tez çalışmasında; yarık-halka rezonatörünü (SRR) temel alan, anahtarlamalı mikroşerit bant-geçiren filtre tasarımları önerilmektedir. Hazır bir benzetim programı yardımıyla gerçekleştirilen tasarımlar, kapa/aç anahtarlar aracılığıyla 2.5–4.0 GHz frekans bandında, frekans ayarlamalı iletim performansı sağlamaktadırlar. Üretilen prototip bir filtre yapısının ölçüm sonuçları, önerilen anahtarlama konfigürasyonunun pratikte uygulanabilirliğini göstermiştir. Pratik uygulamalarda, küçük boyutlu, az kayıplı ve yüzeye uyumlu PIN diyot veya MEMS türü anahtarların kullanılması öngörülmektedir.

SPLIT–RING REZONATOR MICROSTRIP FILTER DESIGN

Cumhur CENK

Keywords: Microstrip filter, Split-Ring Rezonator, S-parameters, Resonance frequency, ON/OFF switch, PIN diode, MEMS, Single-Band, Dual-Band.

Abstract: Microstrip structures have been essential elements of microwave technology due to their low-cost, compact size, conformability, ease of fabrication and high-frequency stability features. Especially, microstrip filters play an important role in microwave applications, with their distinctive transmission characteristics in particular frequency bands.

In this thesis work, novel switchable microstrip filter designs based on split-ring resonators (SRRs) are introduced. The proposed designs offer frequency-tunable band-pass filter performance in 2.5–4.0 GHz band by means of on/off switches. The applicability of the proposed switching configuration is confirmed by measurements of fabricated prototypes. In practical implementation, PIN diodes or MEMS switches with compact-size, surface-mounted, and low-loss features are to be considered.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

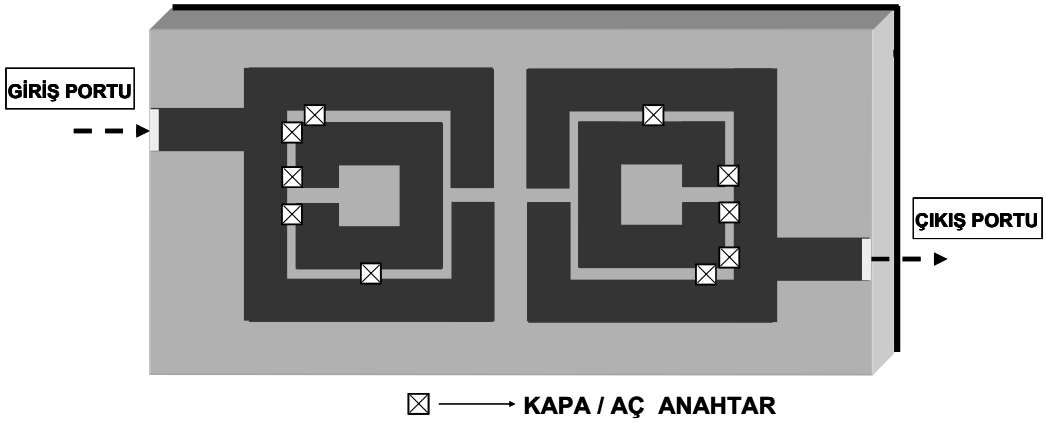
Düşük maliyet, küçük boyut, yüzeye uyumluluk, kolay üretim ve yüksek-frekans kararlılığı gibi önemli özellikleriyle, mikroşerit temelli mikrodalga elemanları, ölçüm ve test düzeneklerinden hücresel haberleşme sistemlerine, mikrodalga devrelerinden radar sistemlerine uzanan geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler.

İlk düzlemsel mikroşerit iletim hatları, II. Dünya Savaşı yıllarında, radar sistemlerinde kullanılan, sınırlı-bant performansına sahip yüksek güç iletiminde kullanılan dalga kılavuzlarına alternatif olarak geliştirilmiştir [1]. Büyük bir ivmeyle günümüze kadar gelen gelişim sürecinde, mikroşerit elemanlar (iletim hatları, filtreler, antenler, pasif ve aktif devre elemanları, vb.) mikrodalga uygulamalarının vazgeçilmezi haline gelmişlerdir. Tablo 1.1'de, bu tezin de ana konusu olan mikroşerit filtre tasarımının tarihsel gelişiminde yer alan çalışmaların bir kısmı listelenmiştir. Geçtiğimiz on yıllık süreçte, metamateryaller [2] konusunda yapılan araştırma çalışmalarındaki artış paralelinde, bu malzemelerin gerçekleştirilmesinde kullanılan temel elemanlardan biri olan yarık-halka rezonatörlerinin (split-ring resonator: SRR) filtre tasarımlarında da ön plana çıktığı gözlenmektedir [3].

Bu tez çalışmasında, yarık halka rezonatörü (split-ring resonator: SRR [4]) elemanlarını esas alan, anahtarlamalı bant-geçiren mikroşerit filtre tasarımlarına yer verilmektedir. Anahtarlı SRR geometrisi Şekil 1.1'de görülmekte olan bu yeni tasarımların en önemli özelliği, filtre karakteristiğinin kapa/aç anahtarlar yardımıyla, dinamik olarak farklı frekans bantlarına kaydırılabilmesidir. Daha önce, sol-elli metamateryal yapılar için önerilen SRR halkaları arasına anahtar yerleştirme fikri [5], bu tez çalışmasında farklı mikroşerit filtre tasarımlarında başarıyla uygulanmaktadır.

Tablo 1.1: Mikroşerit filtre teorisine katkı sağlayan çalışmaların tarihsel akışı

YIL	ÇALIŞMA	KATKISI
1948	Richards [6]	Ayrık iletim hatlarıyla filtre tasarımı teoremi
1952	Grieg & Engelmann [7]	Laboratuar ortamında ilk mikroşerit iletim hattı üretimi
1958	Ishii & Ozaki [8]	Şerit iletim hatlarından oluşan filtrelerin birleştirilmesi
1961	Sparks [9]	Halka biçiminde bant-geçiren filtre tasarımı
1968	Bryant & Weiss [10]	Mikroşerit hatta iletimi etkileyen parametrelerin analizi
1974	Itoh [11]	Alttaş özelliklerinin tespitinde kullanılabilen bir yöntem
1974	Lee [12]	Alttaş özelliklerini değiştirerek empedans uygunlaştırma
1977	Pozar [13]	Yapı geometrisiyle rezonans frekansı arasındaki ilişki
1978	Thomson & Gopinath [14]	Mikroşerit yapıların endüktif etkilerinin hesaplanması
1979	Wong [15]	Çift/tek bant-geçiren mikroşerit filtre tasarımı
1983	Shih & Itoh [16]	Sonlu sayıda sıralı yapılar ile düzlemsel filtre tasarımı
1985	Podcament [17]	Bant genişliği ayarlanabilir mikroşerit filtre tasarımı
1987	Itoh & Wang [18]	Rezonatör ve düzlemsel filtrelerin devreye entegrasyonu
1987	Pozar & Das & Voda [19]	Alttaş (dielektrik) sabitinin ölçen bir yöntem
1988	Roan & Zaki [20]	Eşdeğer devre metoduyla mikroşerit filtrelerin analizi
1992	Schwab [21]	Çok-katmanlı mikroşerit yapılarla filtre tasarımı
1996	Sagawa & Makimoto [22]	Halka rezonatörlerin mikrodalga devrelere montajı
1996	Hong & Lancaster [4]	Yarık halka rezonatörlü filtre üretimi
1997	Ye & Mansour [23]	Mikroşerit filtre tasarımı için bilgisayar kodu yazımı
1997	Willke & Gearhart [24]	Dışı metal kaplamalı mikroşerit hat ve filtre üretimleri
1999	Zhu & Wu [25]	Halka rezonatörlü çift-bant mikroşerit filtre tasarımı
2001	Makimoto & Yabuki [26]	Halka rezonatörlü çift-bant mikroşerit filtre tasarımı
2002	Hsieh & Chang [27]	Frekans ayarlamalı halka rezonatörlü filtre üretimi
2003	Matthaei [28]	Tarak şeklinde kıvrımlı rezonatörler ile filtre tasarımları
2004	Kuo & Jiang [29]	Eşdeğer devre modeli ile mikroşerit filtre tasarımı
2006	Djaiz & Denidni [30]	Tarak şeklinde kıvrımlı rezonatörlerle filtre üretimi
2006	Leong & Itoh [31]	Mikroşerit rezonatörlerle sağ/sol elli iletim hattı tasarımı
2006	Jeng & Chen [32]	Halka rezonatörlü çift/tek bant-geçiren filtre üretimi



Şekil 1.1: Anahtarlı SRR filtre konfigürasyonu (port: kapı)

SRR yapıların en önemli özelliği, iç içe geçmiş iki metalik halka ve her bir halkada yer alan yarıkların (açıklıkların) sağladığı yüksek kapasitif etkidir. Halkalardaki yarıklar, herhangi bir halka üzerinden akım geçişine izin vermese de, halkalar arasında oluşan yüksek kapasitif etki neticesinde, halkalar üzerinde oluşan efektif akım ile iletim gerçekleşmektedir. Kapa/aç anahtarlar kullanılarak iç ve dış halkaların belirli noktalardan fiziksel bağlantısı sağlanmakta ve yapının rezonans karakteristiği değiştirilebilmektedir. Böylece anahtarlama konfigürasyonlu tek bir filtre ile farklı frekans bantlarında performans sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında yer alan SRR mikroşerit filtre tasarımlarının benzetimleri, moment metodu (MoM) [33] ve sonlu-eleman metodu (finite-element method: FEM) [34] tabanlı Ansoft Designer v1.1 ve Ansoft HFSS v10.0 hazır yazılım programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ek'te, bu yazılım programlarının kullanımına dair özet açıklamalara yer verilmektedir.

Bu tez, giriş bölümü dahil beş ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de, SRR elemanlarını temel alan bant-geçiren mikroşerit filtre tasarımları tanıtılmakta ve bu tasarımların gerçekleştirilmesi sürecindeki parametrik çalışmalardan söz edilmektedir. Bölüm 3'te, anahtarlamalı SRR filtre tasarımları tanıtılmakta ve Bölüm 4'te ise, bu tasarımlarından birine ait ölçüm sonuçları ve pratik anahtar modellemesine yer verilmektedir. Son olarak Bölüm 5'te, tez çalışmasının katkıları özetlenmektedir.

BÖLÜM 2. YARIK-HALKA REZONATÖRÜ FİLTRE TASARIMI

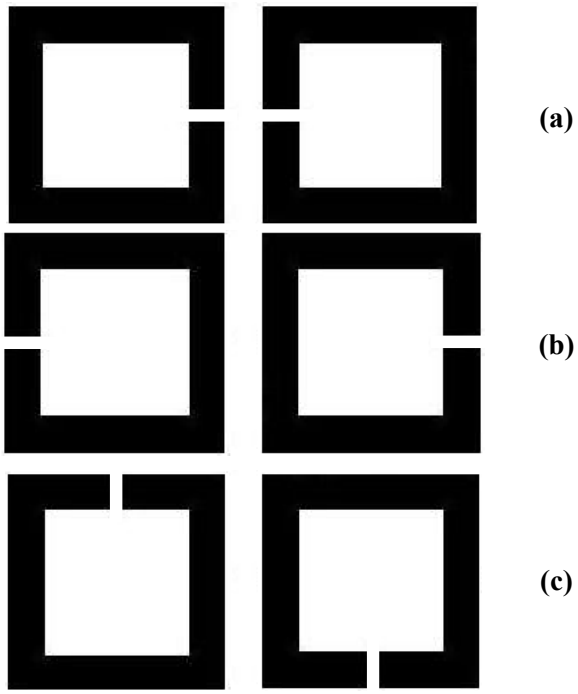
2.1. Giriş

Bu bölümde, yarık-halka rezonatörü (split-ring resonator: SRR) elemanlarını temel alan bant-geçiren mikroşerit filtre tasarımları tanıtılmaktadır. Tasarım sürecinde gerçekleştirilen parametrik çalışmalar özetlenmekte ve en iyileştirilmiş tasarım sonuçları sunulmaktadır. Bu tasarımların sanal ortamda modellenmesi ve sayısal analizleri Ansoft Designer v1.1 benzetim programı (Ek'e bakınız) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

İki kapılı bir filtre performansı değerlendirilirken, tasarımın frekansa (f) göre sergilediği iletim [$S_{21}(f)$] ve yansıma davranışları [$S_{11}(f)$] göz önünde bulundurulmaktadır. S_{21} ve S_{11}, iki kapılı filtrenin, sırasıyla, iletim kazancını ve yansıma (geri dönüşüm) kaybını temsil eden ilgili S-parametreleridir. Bant-geçiren filtre tasarımında temel amaç; belirli bir frekans bandında, $|S_{21}|$ değerini 0 dB (mükemmel iletim) seviyesine yakın (> -3 dB) ve $|S_{11}|$ değerini is -10 dB seviyesinin altında (VSWR < 2) tutabilmektir. Tasarımda bir diğer önemli amaç ise; iletim bandında S-parametrelerini istenilen seviyelerde tutmayı sağlayacak filtrenin fiziksel boyutlarını olabildiğince küçük tutmaya (minyatürleştirme) çalışmaktır. Bu çabanın paralelinde; farklı frekanslarda performans gösterebilecek ayrı filtre tasarımları yerine, tek bir filtre yapısının uygun bir anahtarlama konfigürasyonu ile çoklu frekans başarımı göstermesi amaçlanmıştır. Bu tezde sunulan optimize edilmiş tasarımlar, bu amaçlara yönelik gerçekleştirilen parametrik çalışmaların birer ürünüdür.

2.2. Başlangıç Tasarımı

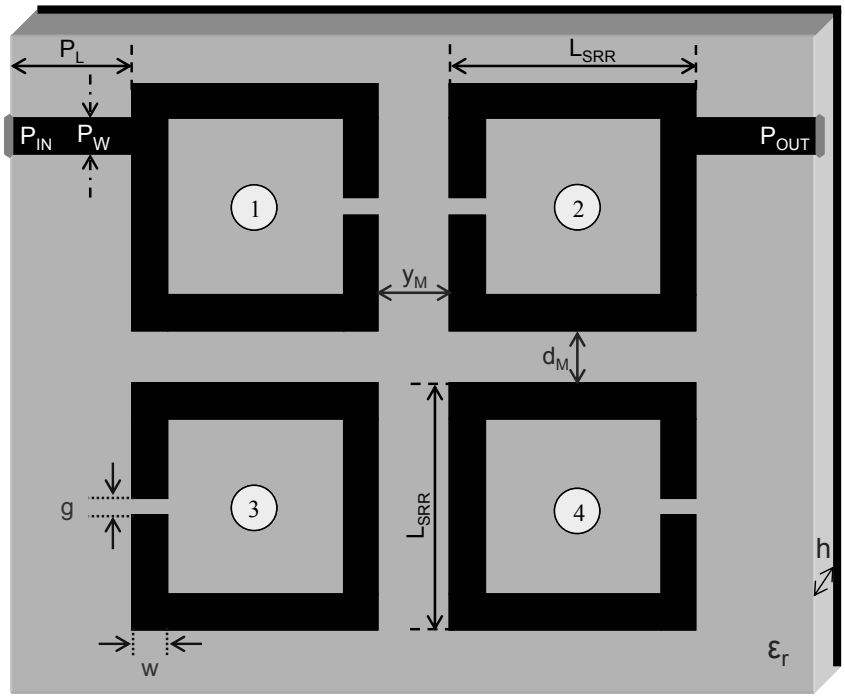
SRR elemanı, filtre tasarımlarında ilk kez Hong ve Lancaster'ın [4] çalışmalarıyla literatürdeki yerini almıştır. [4]'te incelenen temel SRR filtre yapıları Şekil 2.1'de görülmektedir. Bu geometrilerde, ilgili filtre performansını belirleyen önemli nokta, halka yarıklarının birbirlerine göre konumlarıdır. Yarıkları birbirine dönük olan SRR hücreleri arasında (Şekil 2.1 (a)) maksimum elektriksel kuplaj, yarık olmayan kenarları birbirine dönük hücreler arasında (Şekil 2.1 (b)) maksimum manyetik kuplaj oluşmaktadır. Bunlara ek olarak, çapraz-yarık yerleşimiyle (Şekil 2.1 (c)) hem elektriksel hem de manyetiksel etkileşim (karma kuplaj) sağlanabilmektedir [4].



Şekil 2.1: (a) Elektriksel, (b) manyetiksel, (c) karma (elektriksel+manyetiksel) kuplaj etkisi gösteren SRR konfigürasyonları [4]

Bu tez çalışmasının başlangıç adımını oluşturan, karma kuplaj etkisini öngören SRR filtre tasarımı [4] Şekil 2.2'de görülmektedir. Burada, 1-2 numaralı hücreler arasında elektriksel, 3-4 numaralı hücreler arasında manyetiksel, 1-3 ve 2-4 numaralı hücreler arasında ise karışık kuplaj etkisi sağlanmaktadır. 2.42 GHz merkezli, yaklaşık %4'lük 3-dB bant genişliğine sahip bu bant-geçiren filtrenin S_{11} ve S_{21} karakteristikleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, [4]'te yer alan benzetim

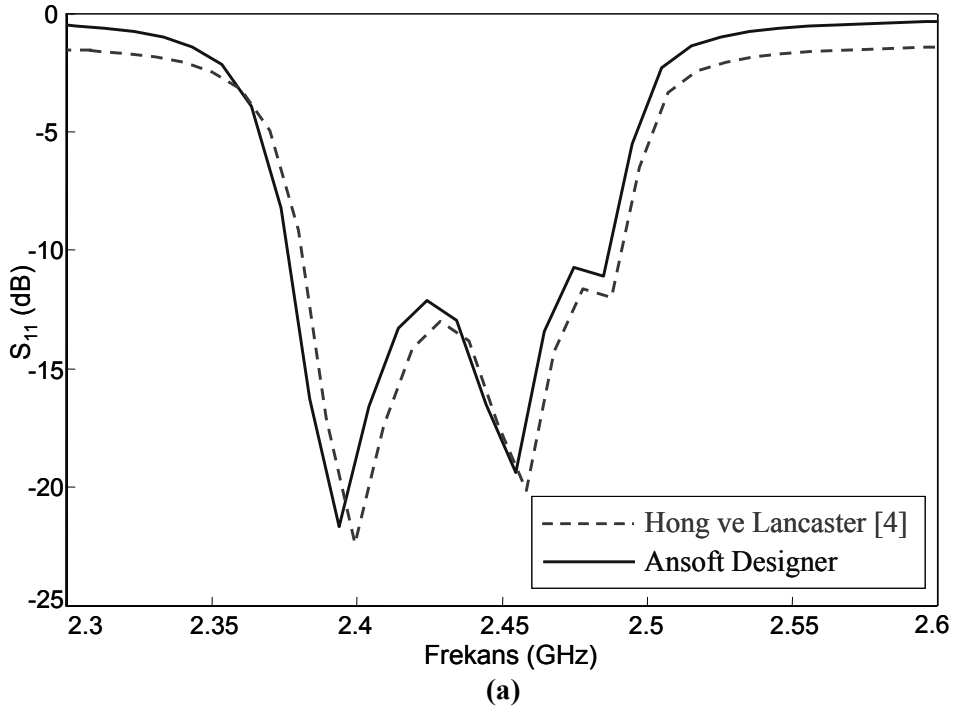
sonuçları ile Ansoft Designer ile elde edilen sonuçlar oldukça uyuşmaktadır. [4]'te kullanılan benzetim programından özel olarak bahsedilmemektedir; ancak, sonuçlar arasındaki farklılıkların farklı sayısal analizlerin kullanımından kaynaklanmış olması muhtemeldir.



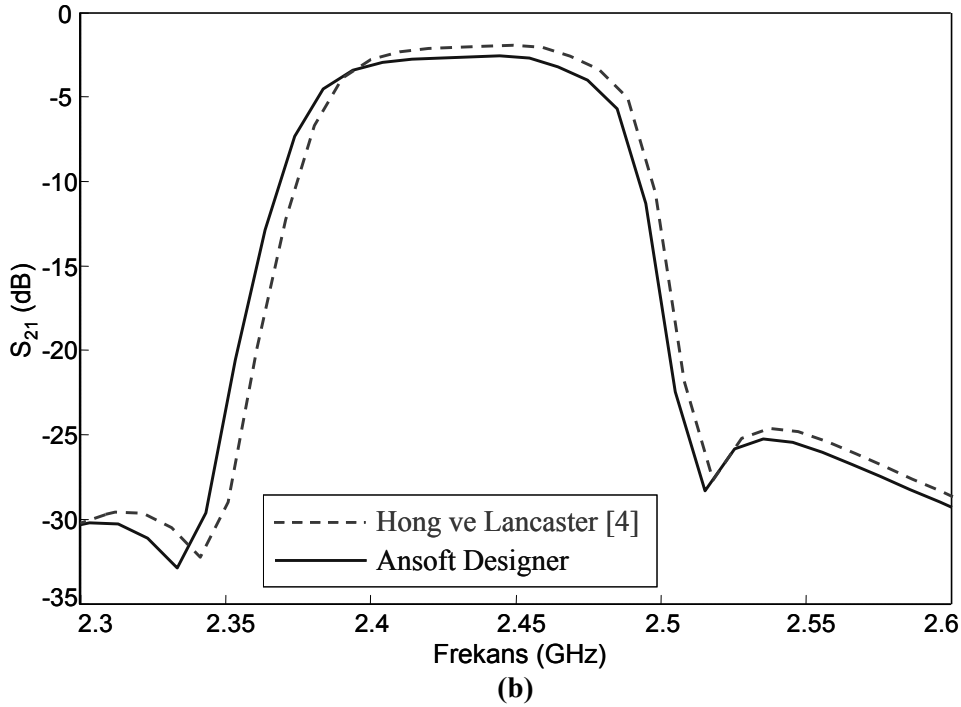
Şekil 2.2: Hong ve Lancaster'ın SRR filtre tasarımı [4]: L_{SRR}=7, y_M=2, d_M=1.5, g=0.1, w=1, P_L=5, P_W=1 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.8

Hong ve Lancaster'ın SRR filtre tasarımı, tezde önerilen yeni SRR tasarımlarının geliştirilmesinde ilk adımı teşkil etmektedir. Bu tasarım üzerinde bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilerek ilgili geometrik değişkenlerin (Şekil 2.2) filtre performansına (olumlu veya olumsuz) etkileri incelenmiştir. Port uzunluğu (P_L), Port genişliği (P_W), SRR elemanının boyutu (L_{SRR}), SRR yarık aralığı (g), SRR şerit kalınlığı (w), SRR elemanları arasındaki yatay (y_M) ve dikey (d_M) mesafeler, alttaş kalınlığı (h) ve dielektrik sabiti (ε_r) parametrelerinin rezonans frekansı, iletim ve yansıma seviyelerine etkileri nitel olarak Tablo 2.1'de özetlenmektedir. Özel olarak, SRR boyutundaki (L_{SRR}) değişimin rezonans frekansına (f_r) etkisi nicel olarak Şekil 2.4'te verilmektedir. Beklendiği üzere, halkanın bir kenar boyutundaki (dolayısıyla toplam halka uzunluğundaki) artış ilgili yapının rezonans frekansında düşüşe sebep olmaktadır. Halkalar arasındaki kuplaj etkisinde önemli rol taşıyan yatay mesafe y_M'nin S_{11} ve S_{21} seviyelerine etkisi ise Şekil 2.5'te verilmektedir. Görüldüğü üzere,

S_{11} için < −10 dB ve S_{21} için >−3 dB olarak öngörülen optimum filtre performansı, $1.4 < y_M < 2.0$ değerleri için sağlanabilmektedir. Yapılan bu nitel ve nicel parametrik çalışmalar, bu tezde önerilen yeni SRR filtre tasarımlarının gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.



(a)

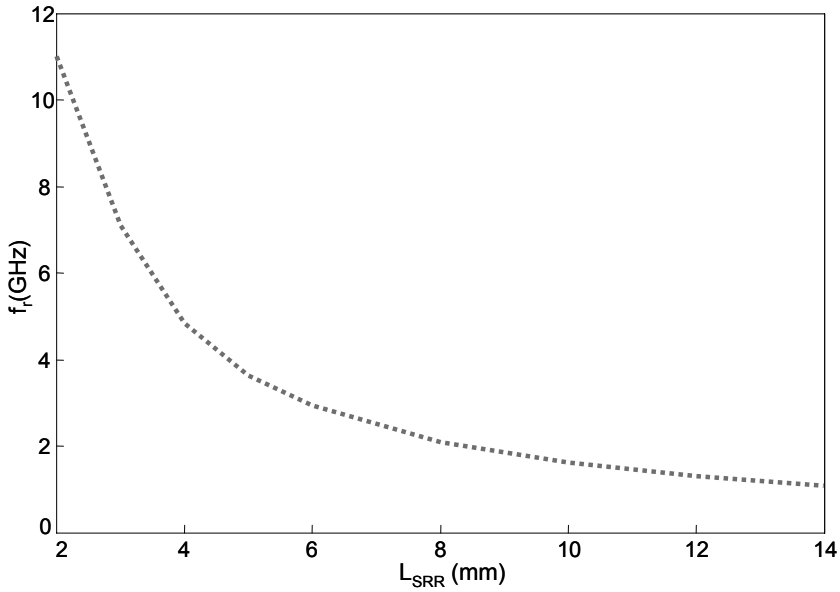


(b)

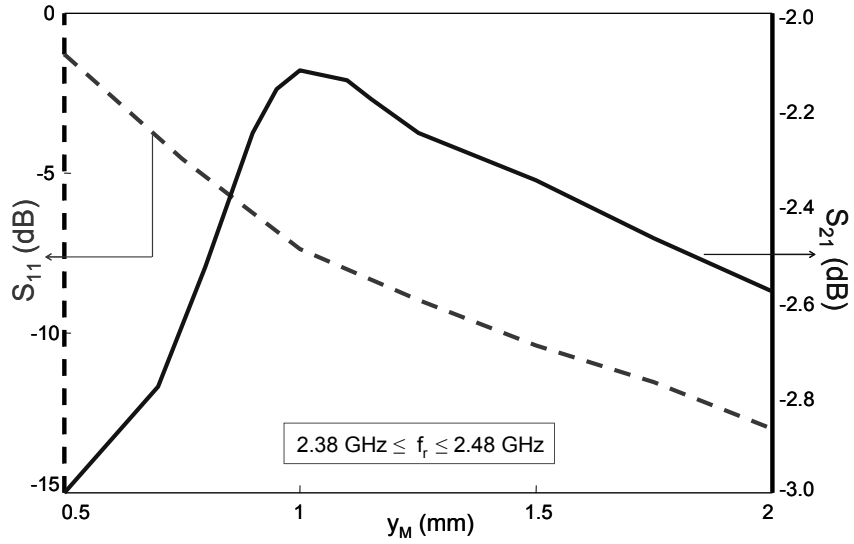
Şekil 2.3: Hong ve Lancaster'ın [4] önerdiği SRR filtresinin (a) S_{11}, (b) S_{21} karakteristikleri

Tablo 2.1: SRR filtre tasarımı [4] referans alınarak gerçekleştirilen parametrik çalışmalar (» : olumlu etkilenme, « : olumsuz etkilenme, $\mathbf{f_r}$: rezonans frekansı, ▲ : değerde yükselme, ▼ : değerde düşme, ◊ : etki az veya yok)

Parametre adı	**Değişim**	**S_{11} (yansıma)**	**S_{21} (iletim)**	**f_r (rezonans frekansı)**
P_L (port uzunluğu)	arttıkça	«	«	◊
	azaldıkça	◊	◊	◊
P_W (port genişliği)	arttıkça	«	◊	◊
	azaldıkça	«	«	◊
L_{SRR} (SRR boyutu)	büyüdükçe	»	»	▼
	küçüldükçe	«	«	▲
g (yarık aralığı)	genişledikçe	◊	◊	▲
	daraldıkça	«	«	▼
w (SRR kalınlığı)	kalınlaştıkça	»	◊	▼
	inceldikçe	«	«	▲
y_M (yatay mesafe)	uzadıkça	«	«	◊
	kısaldıkça	»	»	◊
d_M (dikey mesafe)	uzadıkça	«	«	◊
	kısaldıkça	«	«	◊
h (alttaş kalınlığı)	arttıkça	«	»	▲
	azaldıkça	»	«	▼
ε_r (dielektrik sabit)	büyüdükçe	»	«	▼
	küçüldükçe	«	»	▲



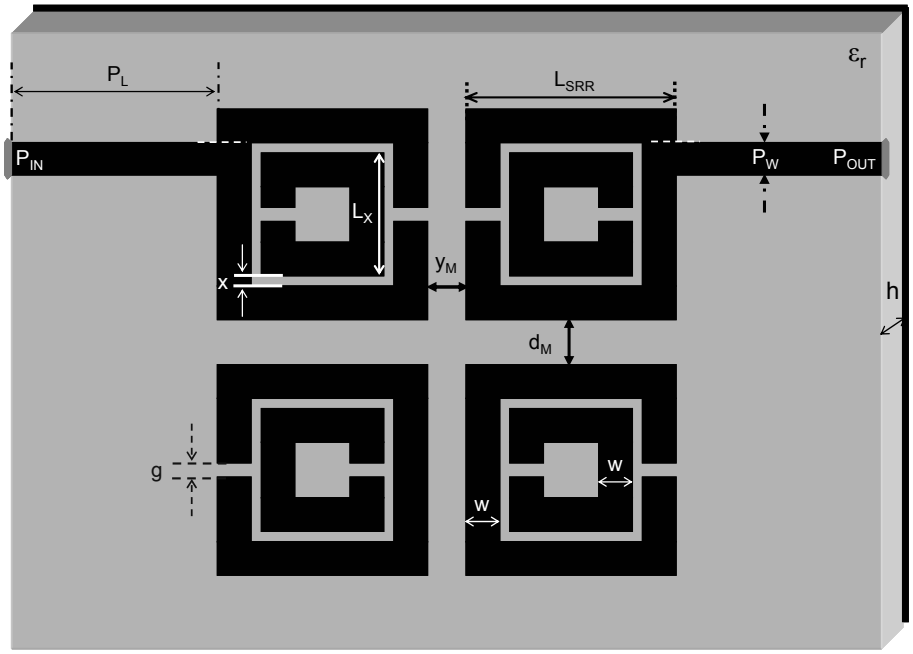
Şekil 2.4: SRR boyutunun (L_{SRR}) rezonans frekansı (f_r) üzerindeki etkisi



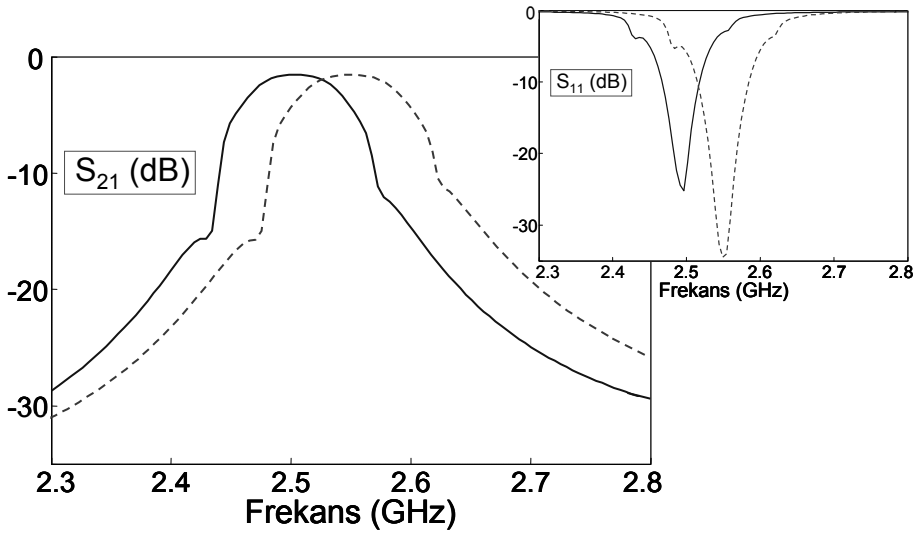
Şekil 2.5: SRR'lar arası yatay mesafenin (y_M) S_{11} ve S_{21} karakteristiklerine etkisi

Bu parametrik çalışmaların yanı sıra; anahtarlama konfigürasyonuna zemin hazırlamak amacıyla, iç içe geçmiş halkalardan oluşan SRR filtresinin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.2'deki geometriyi temel alan ve içteki halkaların yerleşimi sonucunda ilgili parametreleri optimize edilmiş SRR filtre tasarımı Şekil 2.6'da ve filtre karakteristiği Şekil 2.7'de verilmiştir. Bu yeni tasarım, 2.5 GHz etrafında %2.5 3-dB'lik bant geçiren bir görüntü sergilemektedir. Ayrıca, iç halkaların beklenen yükleme etkisiyle frekans bandında aşağıya doğru bir kayma

dışında, bant-geçiren filtre karakteristiğinin muhafaza edildiği gözlenmektedir. İç ve dış halkalar arasına aç/kapa anahtarların yerleşimiyle de öngörülen frekans ayarlamalı filtre performansı sağlanabilecektir (Bölüm 3). Bundan sonraki kısımlarda, şu ana kadar bahsedilen parametrik çalışmaların ışığı altında gerçekleştirilmiş yeni SRR filtre tasarımlarına yer verilecektir.



Şekil 2.6: İç içe halkalardan oluşan SRR filtre konfigürasyonu: P_L=7.125, P_W=1.125, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, y_M=1.30, d_M=2.30, g=0.375, x=0.375, w=1.125 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2

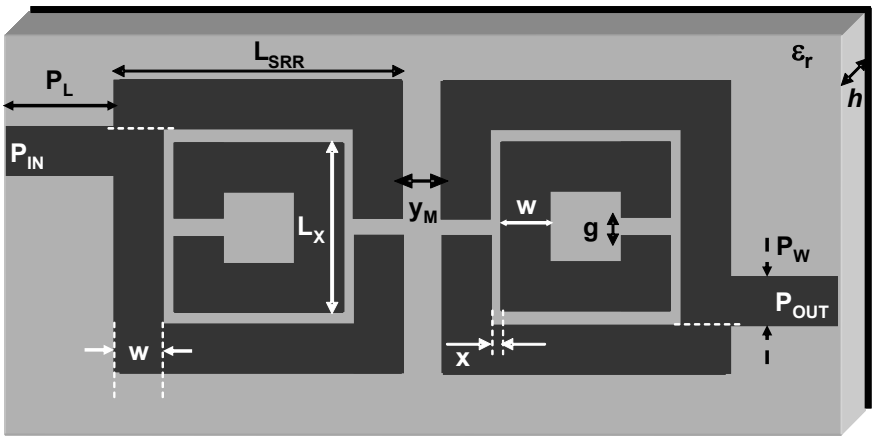


Şekil 2.7: Şekil 2.6'daki SRR filtre tasarımının, içteki halkalar varken (──) ve yokken (------) S_{11} ve S_{21} karakteristikleri

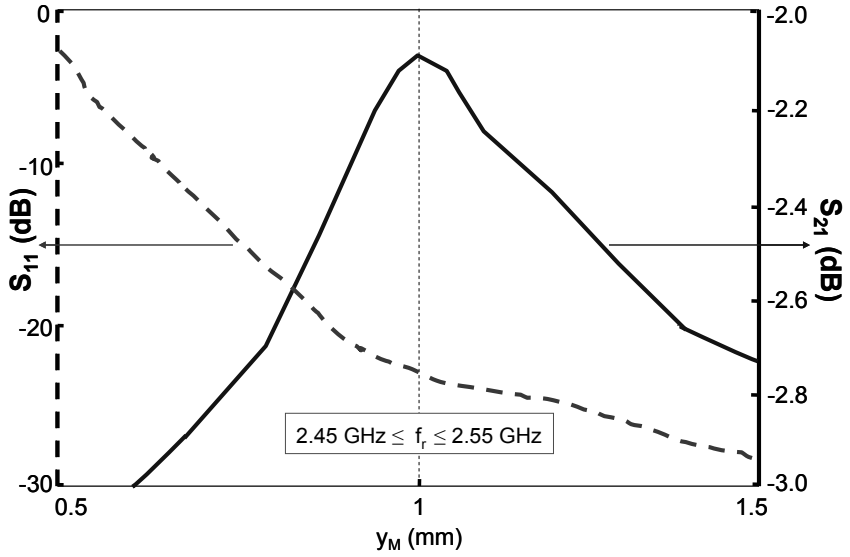
2.3. Tasarım–I

Şekil 2.6'da verilen dörtlü (2×2) çifter halkalı filtre konfigürasyonunda iç ve dış halkalar arasına anahtar yerleşimi denenmiş, ancak optimum frekans ayarlamalı bir filtre performansı elde edilememiştir. Bu duruma sebep olan parazitik SRR elemanları (dörtlü SRR yapısında giriş-çıkış kapılarına doğrudan bağlantısı bulunmayan elemanlar) filtre yapısından çıkarılıp ilgili parametreler en iyileştirildiğinde, Şekil 2.8'de görülen yeni iki SRR elemanlı filtre tasarımı (Tasarım–I) elde edilmiştir. Böylece, başlangıçtaki dörtlü yapı iki elemana düşürülerek yapıda yarı yarıya bir minyatürleştirme de gerçekleştirilmiştir. Bu yeni yapı Bölüm 3'te görüleceği üzere öngörülen anahtarlamalı konfigürasyona da olanak sağlamaktadır.

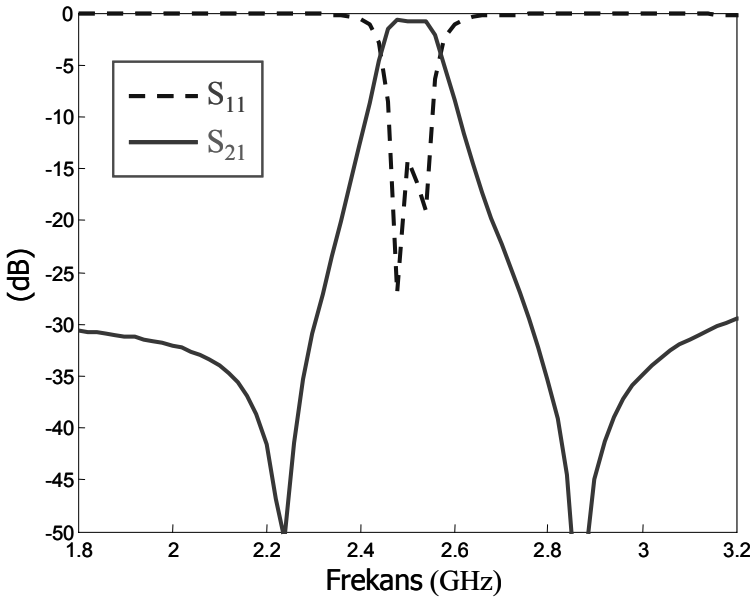
Tasarım–I için gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda, filtre performansında en etkin rol oynayan değişkenin, SRR hücreleri arasındaki elektriksel kuplajın doğrudan bağlı olduğu y_M mesafesi olduğu gözlenmiştir. Bu parametrenin S_{11} ve S_{21} seviyeleri üzerindeki etkisi Şekil 2.9'da verilmektedir. En iyi filtre performansının y_M=1.0 mm değeri için elde edildiği görülmektedir. Tasarım–I'in S_{11} ve S_{21} karakteristikleri Şekil 2.10'da verilmiştir. 2.5 GHz merkezli yaklaşık %4'lük bant genişliğine sahip bu tasarım, pratik uygulamalarda tercih edilebilecek oldukça minyatür ($0.12\lambda_0 \times 0.06\lambda_0$) bir yapıya sahiptir.



Şekil 2.8: Tasarım–I geometrisi: P_L=5.0, P_W=1.125, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, w=1.125, g=0.5, x=0.375, y_M=1.0, ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2



Şekil 2.9: SRR'lar arası yatay mesafenin (y_M) S_{11} ve S_{21} karakteristiklerine etkisi

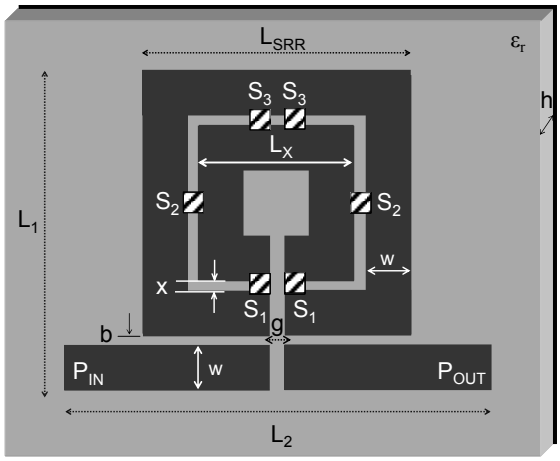


Şekil 2.10: Tasarım–I'in S_{11} ve S_{21} karakteristikleri

2.4. Tasarım–II

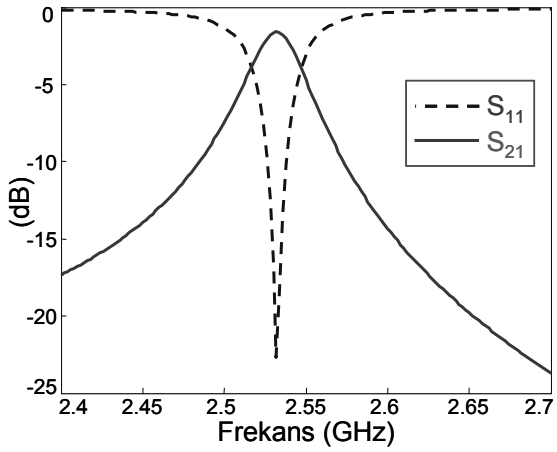
Bant-geçiren profile sahip, anahtarlamaya olanak sağlayan ve Tasarım–I'e göre daha minyatür filtre geometrisine sahip Tasarım–II konfigürasyonu Şekil 2.11'de verilmektedir. Bu yeni tasarım, [35]'te önerilen sıralı SRR-şerit filtre yapısının birim hücresinden esinlenilmiş olup, görüldüğü üzere, tek bir SRR hücresi ve giriş-çıkış

bağlantısını sağlayan yarıklı bir mikroşerit hattından oluşmaktadır. Bu yapıdaki SRR elemanıyla mikroşerit hat arasındaki kuplaj etkisi, Şekil 2.12'de görülen bant-geçiren filtre karakteristiğinin oluşumunu sağlamaktadır. Tek bir SRR hücresinin kullanımı sebebiyle, Tasarım–I'e göre yaklaşık %50'lik minyatürleştirme gerçekleşirken, yine aynı sebepten dolayı (beklenildiği üzere), Tasarım–II'nin bant-genişliği, Tasarım–I'e nazaran, oldukça daralmıştır (%0.5 3-dB bant-genişliği).



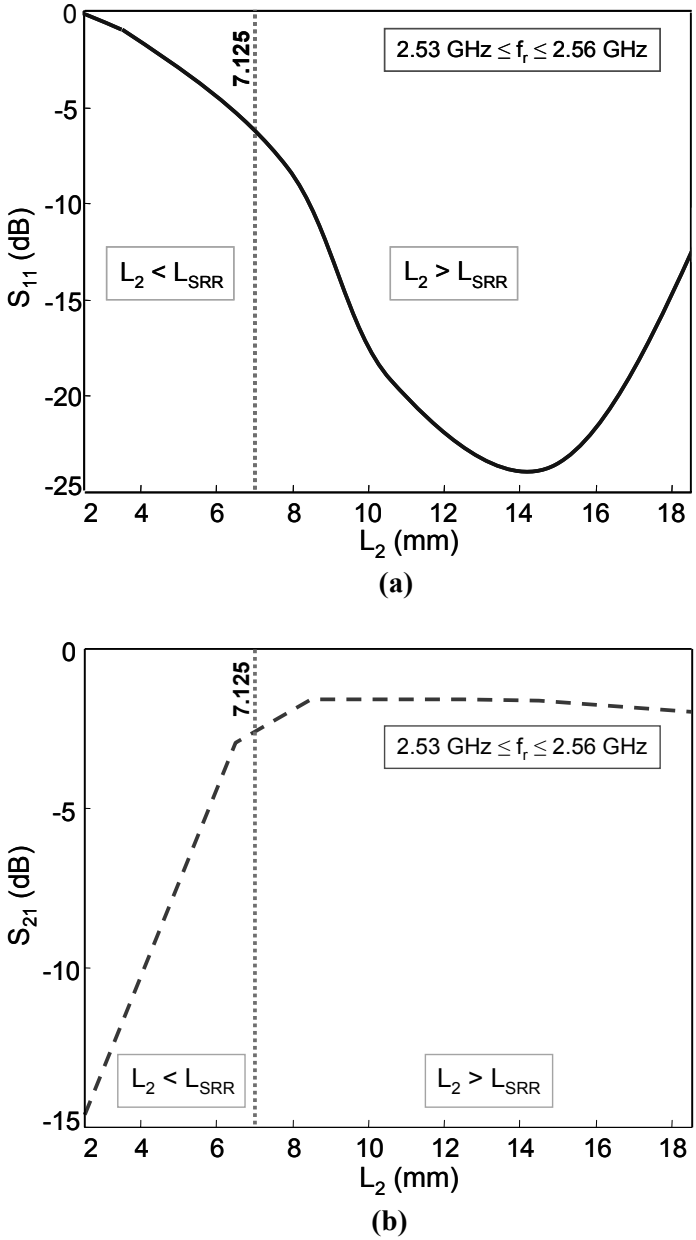
Şekil 2.11: Tasarım–II geometrisi: L_1=8.45, L_2=14.5, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, g=0.5, x=0.375, b=0.235, w=1.125 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2

Tasarım–II'deki bir başka farklılık ise, halka yarıklarının konumlarıdır. Optimum anahtarlama performansı için, iç ve dış halka yarıkları Tasarım–I'de aralarında 180^o'lik bir açıyla yerleştirilmişken (Şekil 2.8), Tasarım–II'de ilgili açı değeri 0^o'dir (Şekil 2.11).



Şekil 2.12: Tasarım–II'nin S_{11} ve S_{21} karakteristikleri

Şekil 2.12'de yer alan optimum filtre karakteristiğine ulaşmak için Tasarım–II konfigürasyonunda (Şekil 2.11) bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara örnek teşkil etmek üzere; Şekil 2.13'te, mikroşerit hat uzunluğunun (L_2) S_{11} ve S_{21} seviyelerine etkisi incelenmiştir. Görüldüğü üzere, ilgili frekans bandında optimum filtre karakteristiği için (S_{11}<–10dB ve S_{21}>–3dB) kullanılabilecek minimum hat uzunluğu (L_2) 14.5 mm'dir.

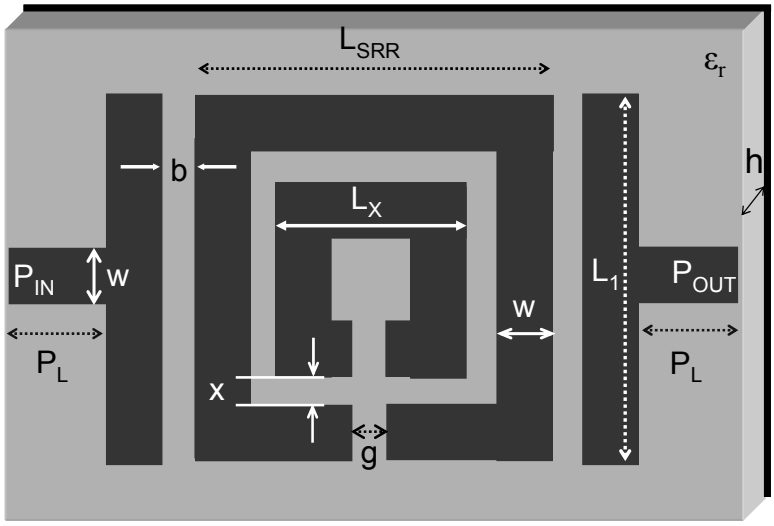


Şekil 2.13: Yarıklı iletim hattı uzunluğu L_2'nin (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristiklerine etkisi (L_{SRR}=7.125 mm)

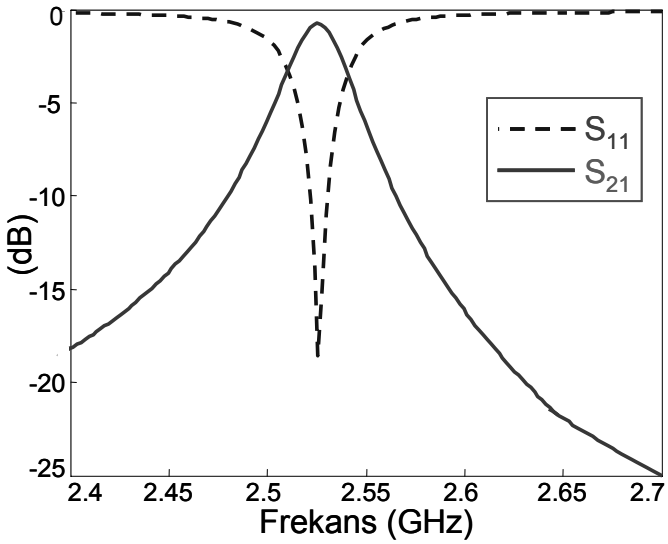
2.5. Tasarım–III

Şekil 2.14'de, Tasarım–II'deki gibi tek bir SRR hücresi içeren, alternatif giriş-çıkış port yapısının yer aldığı Tasarım–III filtre konfigürasyonu görülmektedir. Tasarım–II ile hemen hemen aynı boyutlara sahip bu yeni tasarımın filtre karakteristiği Şekil 2.15'te verilmiştir. Görüldüğü üzere Tasarım–III, 2.53 GHz merkezli, %0.8 3-dB bant-geçiren filtre profili sergilemektedir. Bu performansın sağlanmasında, giriş ve çıkışa dikey bağlantılı mikroşerit hatlarla SRR elemanı arasındaki kapasitif etkileşim önemli bir rol oynamaktadır.

Bu bölümde tanıtılan SRR filtre tasarımlarına ait S-parametrelerinin faz spektrumlarının (genel filtre uygulamalarında öncelikli ele alınmasa da) doğrusal karakteristiğe sahip oldukları gözlenmiştir.



Şekil 2.14: Tasarım–III geometrisi: L_1=7, P_L=2, L_{SRR}=7, L_X=4, g=0.5, x=0.5, b=0.3, w=1 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2



Şekil 2.15: Tasarım–III'ün S_{11} ve S_{21} karakteristikleri

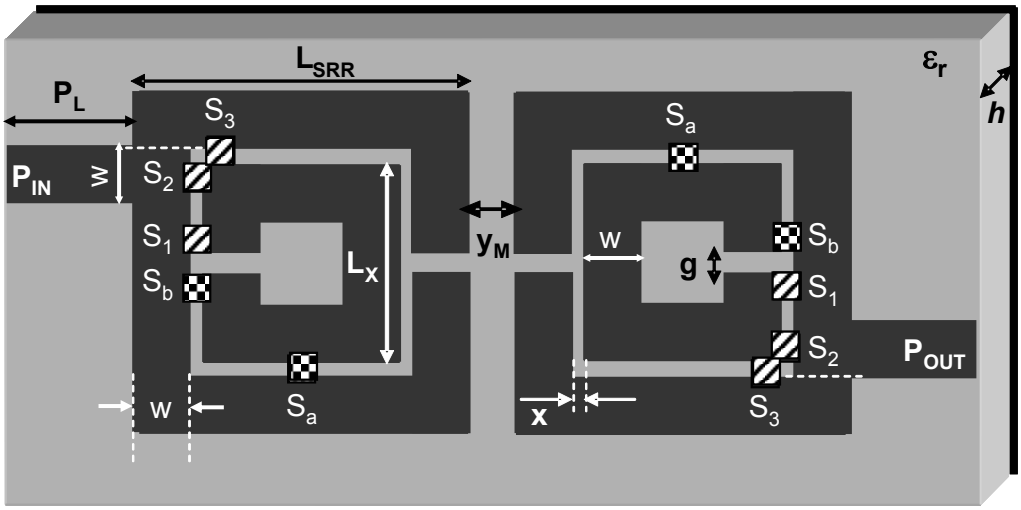
BÖLÜM 3. ANAHTARLAMALI SRR FİLTRE TASARIMLARI

3.1. Giriş

Bu bölümde, önceki bölümde tanıtılan filtre yapıları temel alınarak, anahtarlamalı dört farklı SRR filtre tasarımına yer verilmektedir. İç ve dış SRR halkaları arasına yerleştirilen kapa/aç (on/off) anahtarlar vasıtasıyla, ilgili iletim bandı farklı frekanslara kaydırılabilmekte, böylece frekans ayarlamalı tek-bant (single-band) veya çift-bant (dual-band) filtre performansı sağlanabilmektedir [36, 37, 38]. İlgili anahtarların konumları optimum filtre karakteristikleri elde edilmek üzere deneme/yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Benzetim programında, kapa/aç anahtarlar halkalar arasına metal parçacıklar yerleştirilerek modellenmiştir. İlgili anahtarın kapalı (on) veya açık (off) pozisyonları, sırasıyla, metalik parçacığın ilgili konumda bulunması veya bulunmaması ile tanımlanmaktadır. Ayrıca, pratik uygulamalarda kullanılması öngörülen PIN diyot anahtarların basit modellerine yer verilen benzetim sonuçları Bölüm 4'te sunulmaktadır.

3.2. Tasarım–IV

Tasarım–I filtre konfigürasyonunda (Şekil 2.8), her bir SRR hücresinin iç ve dış halkaları arasına, beş farklı konumda kapa/aç anahtarların yerleşimiyle gerçekleştirilen Tasarım–IV konfigürasyonu Şekil 3.1'de verilmektedir. Burada, S_a ve S_b anahtar çiftleri tek-bant ve çift-bant filtre başarımını belirleyen kontrol anahtarlarıdır. S_a anahtar çifti kapalı ve S_b anahtar çifti açık konumdayken; S_1, S_2 ve S_3 anahtar çiftlerinin teker teker kapalı olma durumlarında frekans kaydırmalı tek-bant filtre performansı sağlanmaktadır. Diğer taraftan, S_a anahtar çifti açık ve S_b anahtar çifti kapalı konumdayken; diğer anahtar çiftlerinin birer birer kapalı olma durumlarında frekans kaydırmalı çift-bant filtre başarımı gerçekleştirilmektedir.

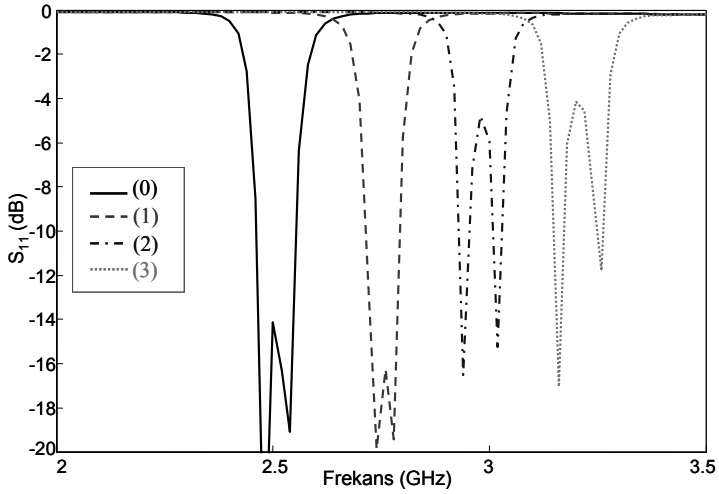


Şekil 3.1: Tasarım–IV konfigürasyonu: P_L=5.0, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, w=1.125, g=0.5, x=0.375, y_M=1.0, h=1.27 ve anahtar boyutları= 0.375x0.375 (mm), ε_r=10.2

Şekil 3.2'de Tasarım–IV'ün frekans ayarlamalı tek-bant filtre karakteristiği verilmektedir. Görüldüğü üzere, tüm anahtarlar açık konumdayken (başka bir deyişle, anahtarsız, Şekil 2.8'deki Tasarım–I konfigürasyonu için) Tasarım–IV 2.5 GHz merkezli bant-geçiren özellik göstermektedir. S_a anahtar çifti kapalı (ilgili metalik parçalar var) ve S_b anahtar çifti açık (ilgili metalik parçalar yok) olduğu durumda ise; S_1, S_2 ve S_3 anahtar çiftlerinin teker teker kapatılmasıyla rezonans frekansı (anahtarların iç halka yarıklarına olan uzaklıklarıyla orantılı olarak) daha yüksek değerlere doğru kaymaktadır. Filtre karakteristiği; iç halka yarıklarına en yakın olan S_1 anahtar çifti kapatıldığında 2.75 GHz, en uzak olan S_3 anahtar çifti kapatıldığında 3.2 GHz ve S_1 ve S_3 arasına yerleştirilmiş olan S_2 anahtar çifti kapatıldığında ise 3 GHz merkezli bant-geçiren profil sergilemektedir. Halkalar arasındaki konumlarına bağlı olarak, ilgili anahtarlar yapıya farklı kapasitif yükleme etkisi yapmakta, böylece frekans ayarlamalı tek-bant performansı gerçekleşmektedir.

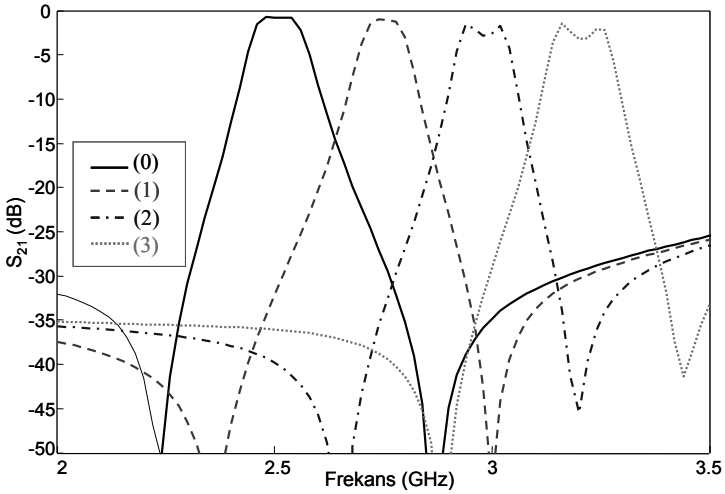
Şekil 3.3'te ise, anahtarsız (tüm anahtarlar açıkken) ve anahtarlı (S_a/S_1 kapalıyken) iki yapıya ait SRR elemanları üzerindeki eşdeğer akım yoğunluklarının vektörel gösterimi sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, mevcut anahtarlar (metalik parçalar) ile iç halkalardaki akım yoğunluklarında belirgin bir artış gözlenmektedir. Giriş ve çıkış

SRR hücreleri arasındaki kuplajı efektif olarak etkileyen bu özel durum, daha yüksek bir frekans bandında iletime olanak sağlamaktadır.



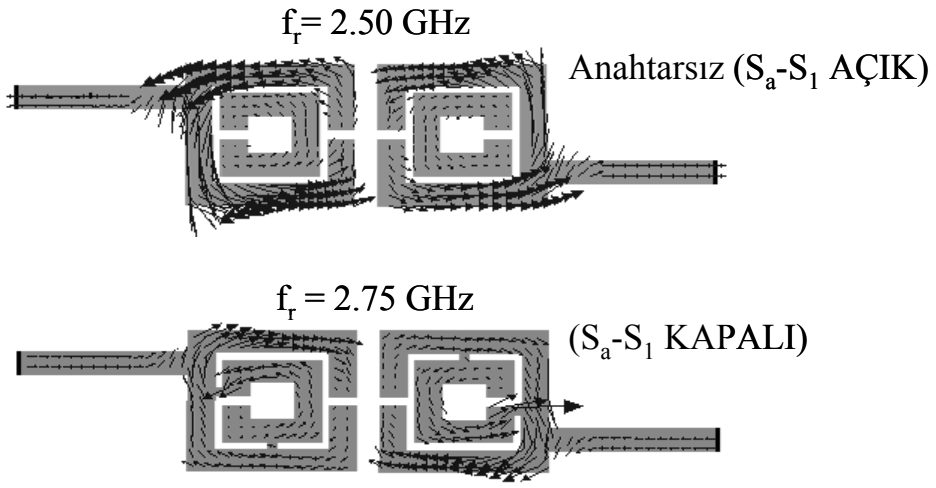
(a)

(0) : Tüm anahtarlar AÇIK
(1) : S_a /S_1 -KAPALI, S_b /S_2 /S_3 -AÇIK
(2) : S_a /S_2 -KAPALI, S_b /S_1 /S_3 -AÇIK
(3) : S_a /S_3 -KAPALI, S_b /S_1 /S_2 -AÇIK



(b)

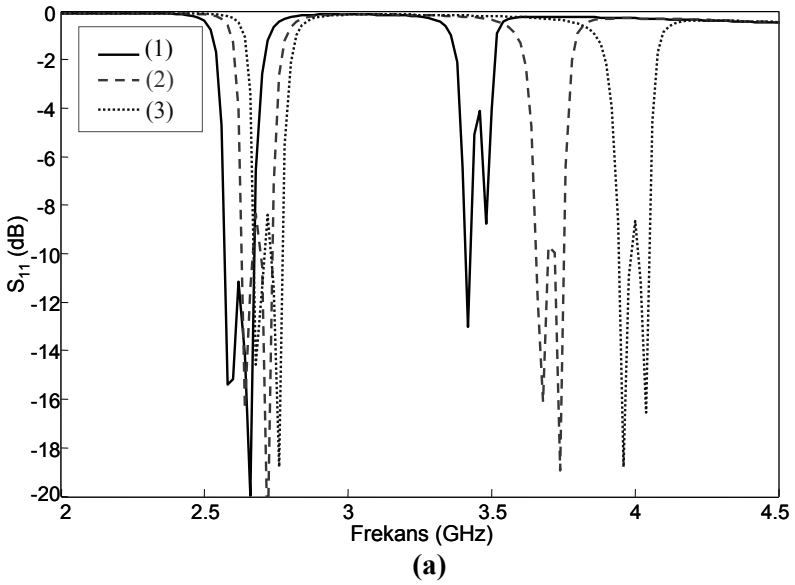
Şekil 3.2: Tasarım–IV'ün frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri



Şekil 3.3: Tasarım–IV konfigürasyonu için akım yoğunluk grafikleri

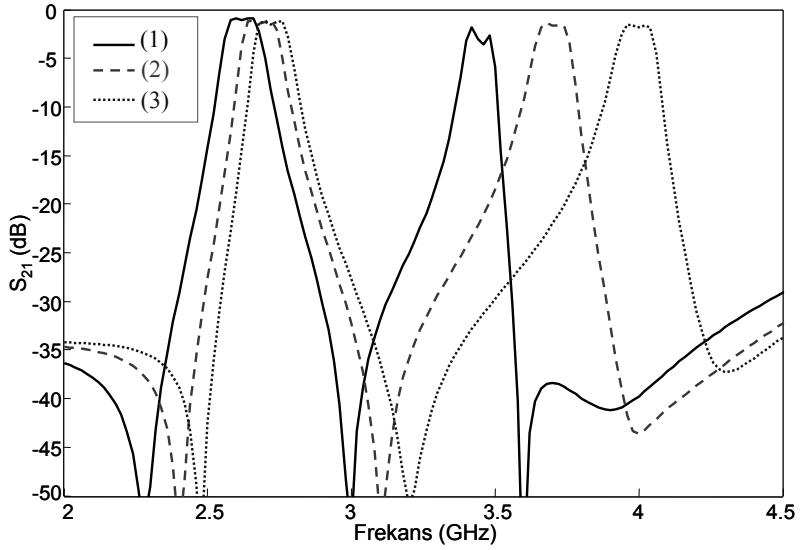
Şekil 3.4'te Tasarım–IV'ün frekans ayarlamalı çift-bant filtre karakteristiği verilmektedir. S_b anahtar çifti kapalı (ilgili metalik parçalar var) ve S_a anahtar çifti açık (ilgili metalik parçalar yok) olduğu bu durumda; S_1, S_2 ve S_3 anahtar çiftlerinin birer birer kapatılmasıyla frekans ayarlamalı çift-bant performansı sağlanabilmektedir. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere; S_1 anahtar çifti kapatıldığında 2.6 GHz ile 3.5 GHz, S_2 anahtar çifti kapatıldığında 2.7 GHz ile 3.7 GHz ve S_3 anahtar çifti kapatıldığında ise 2.8 GHz ile 4 GHz merkezli çift-bant başarımı elde edilmektedir. Anahtarlamalı tek-bant tasarımında (Şekil 3.2) olduğu gibi çift-bant uygulamasında da, kapatılan anahtar çiftinin (S_1, S_2 ya da S_3) iç halka yarıklarına uzaklığıyla, frekans bandında yukarıya doğru kayma miktarı arasında bir orantı olduğu gözlenmektedir.

Özetle; anahtarlamalı Tasarım–IV konfigürasyonu, 2.5–4 GHz bandında, frekans ayarlamalı tek-bant ve çift-bant filtre performansı sağlamaktadır.



(a)

(1) : S_b /S_1 -KAPALI, S_a /S_2 /S_3 -AÇIK
(2) : S_b /S_2 -KAPALI, S_a /S_1 /S_3 -AÇIK
(3) : S_b /S_3 -KAPALI, S_a /S_1 /S_2 -AÇIK

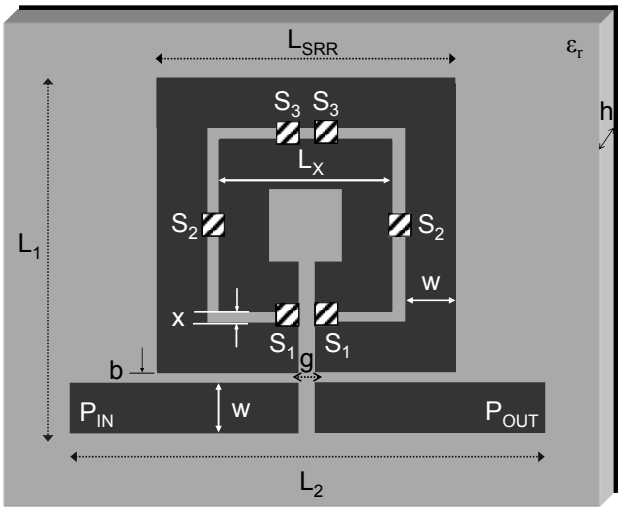


(b)

Şekil 3.4: Tasarım–IV'ün frekans ayarlamalı çift-bant (a) S_{11}, (b) S_{21} karakteristikleri

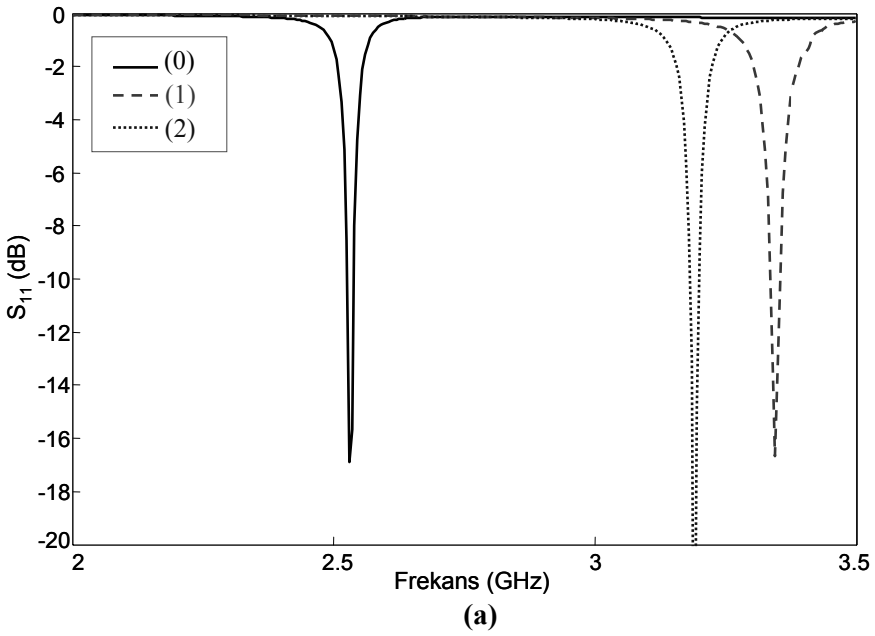
3.3. Tasarım–V

Tasarım–II filtre konfigürasyonunda (Şekil 2.11), SRR halkaları arasına altı farklı konumda üç çift kapa/aç anahtarların yerleşimiyle gerçekleştirilen Tasarım–V konfigürasyonu Şekil 3.5'te verilmektedir. Burada, S_1 ve S_2 frekans ayarlamalı tek-bant, S_3 ise çift-bant filtre başarımını belirleyen anahtar çiftleridir. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere; tüm anahtarlar açık konumdayken (başka bir deyişle, anahtarsız, Şekil 2.11'deki Tasarım–II konfigürasyonu için) Tasarım–V 2.55 GHz merkezli bant-geçiren özellik gösterirken, S_3 anahtar çifti açık konumda ve S_2 ve S_1 anahtar çiftleri ayrı ayrı kapatıldığında rezonans frekansı, sırasıyla, 3.2 GHz ve 3.35 GHz frekanslarına kaymakta, böylece frekans ayarlamalı tek-bant performansı sağlanmaktadır. Diğer taraftan, S_1 ve S_2 anahtar çifti açıkken S_3 anahtar çifti kapatıldığında, biri 2.57 GHz diğeri 3.45 GHz merkezli iki ayrı frekans bandında çift-bant filtre başarımı elde edilmektedir (Şekil 3.7).



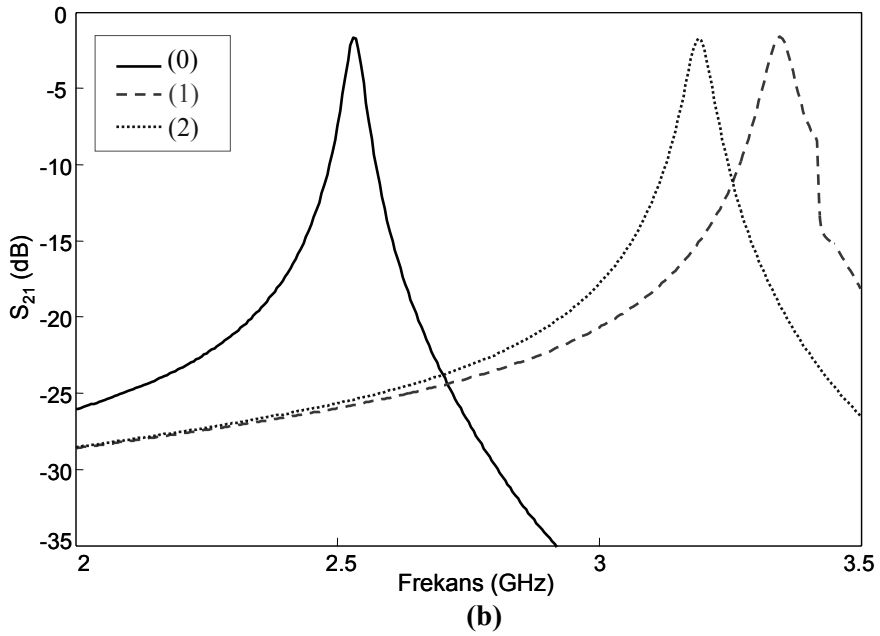
Şekil 3.5: Tasarım–V konfigürasyonu: L_1=8.45, L_2=14.5, L_{SRR}=7.125, L_X=4.125, g=0.5, x=0.375, b=0.235, w=1.125, h=1.27 ve anahtar boyutları=0.375x0.375 (mm), ε_r=10.2

Özetle; anahtarlamalı Tasarım–V konfigürasyonu, 2.55–3.45 GHz bandında, çift-bant ve frekans ayarlamalı tek-bant filtre performansı sağlamaktadır.



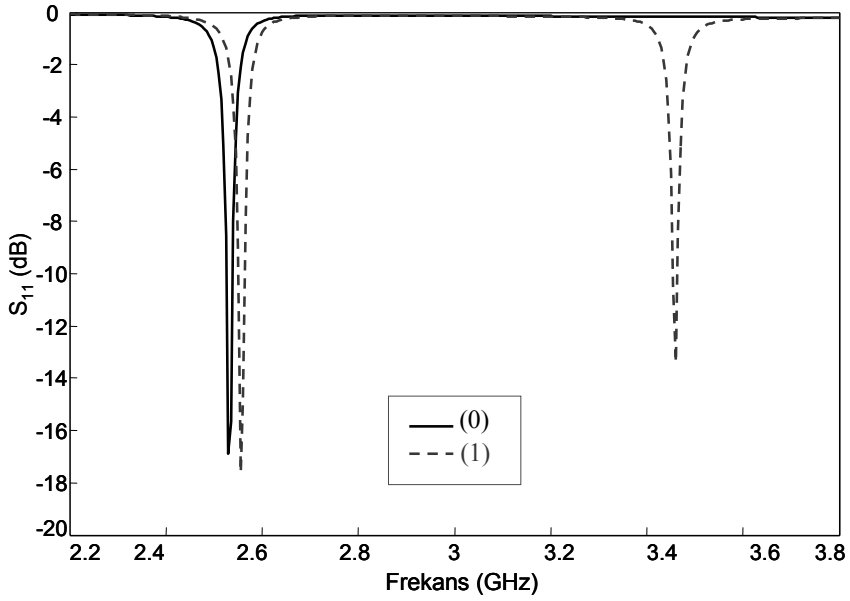
(a)

(0) : Tüm Anahtarlar AÇIK
(1) : S_1 KAPALI, S_2 / S_3 -AÇIK
(2) : S_2 KAPALI, S_1 / S_3 -AÇIK



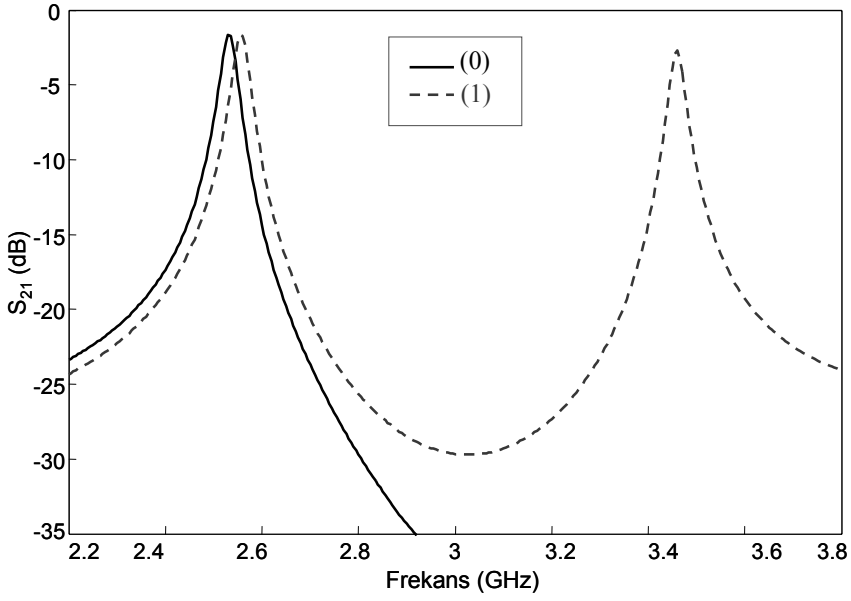
(b)

Şekil 3.6: Tasarım–V'in frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri



(a)

(0) : Tüm Anahtarlar AÇIK
(1) : S_3 KAPALI, S_1 / S_2 -AÇIK

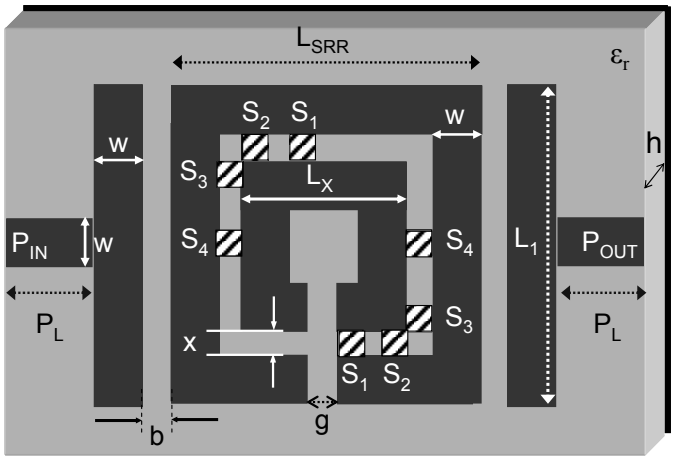


(b)

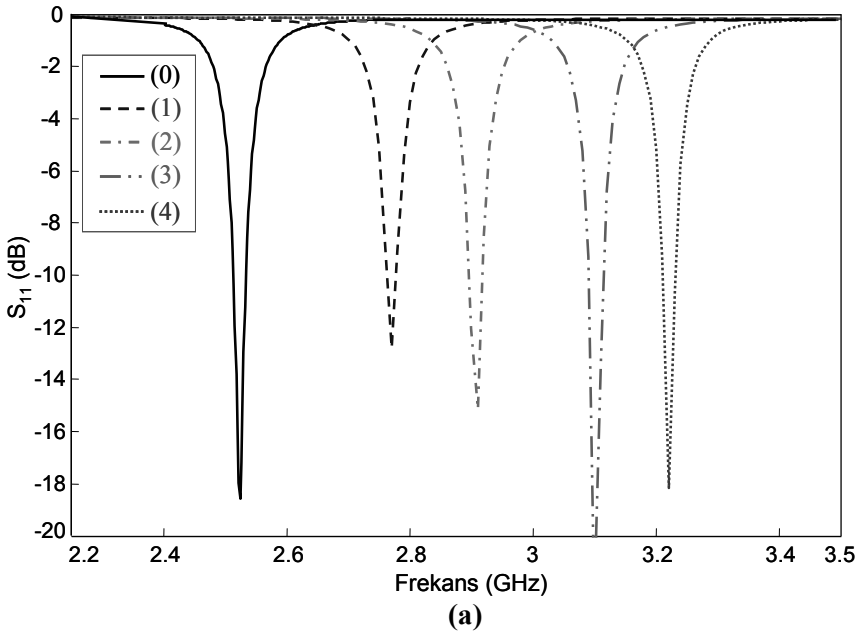
Şekil 3.7: Tasarım–V'in çift-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri

3.4. Tasarım–VI

Tasarım–III filtre konfigürasyonunda (Şekil 2.14), SRR halkaları arasına sekiz farklı konumda dört çift kapa/aç anahtarların yerleşimiyle gerçekleştirilen Tasarım–VI konfigürasyonu Şekil 3.8'de ve ilgili filtre karakteristikleri Şekil 3.9'da verilmektedir. Görüldüğü üzere; tüm anahtarlar açık konumdayken (başka bir deyişle, anahtarsız, Şekil 2.14'teki Tasarım–III konfigürasyonu için) Tasarım–VI 2.52 GHz merkezli bant-geçiren özellik gösterirken; S_1, S_2, S_3 ve S_4 anahtar çiftleri teker teker kapatıldığında, rezonans frekansı sırasıyla, 2.77 GHz, 2.9 GHz, 3.1 GHz ve 3.22 GHz frekanslarına kaymaktadır. Böylece, Tasarım–VI konfigürasyonuyla, 2.52–3.22 GHz bandında frekans ayarlamalı tek-bant filtre performansı sağlanabilmektedir.

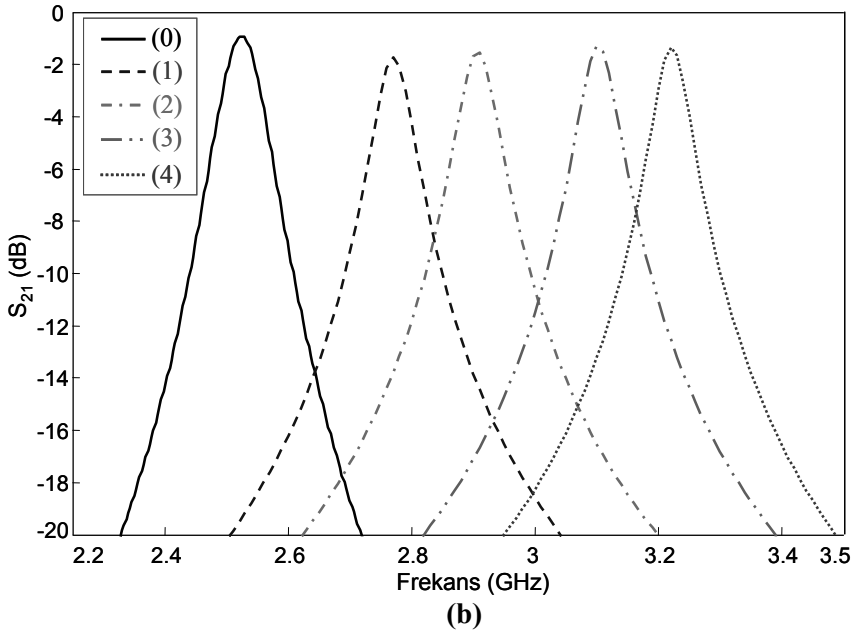


Şekil 3.8: Tasarım–VI geometrisi: L_1=7, P_L=2, L_{SRR}=7, L_X=4, g=0.5, x=0.5, b=0.3, w=1, anahtar boyutları=0.5x0.5 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2



(a)

(0) : Tüm Anahtarlar AÇIK
(1) : S_1 KAPALI, S_2 / S_3 / S_4 – AÇIK
(2) : S_2 KAPALI, S_1 / S_3 / S_4 – AÇIK
(3) : S_3 KAPALI, S_1 / S_2 / S_4 – AÇIK
(4) : S_4 KAPALI, S_1 / S_2 / S_3 – AÇIK

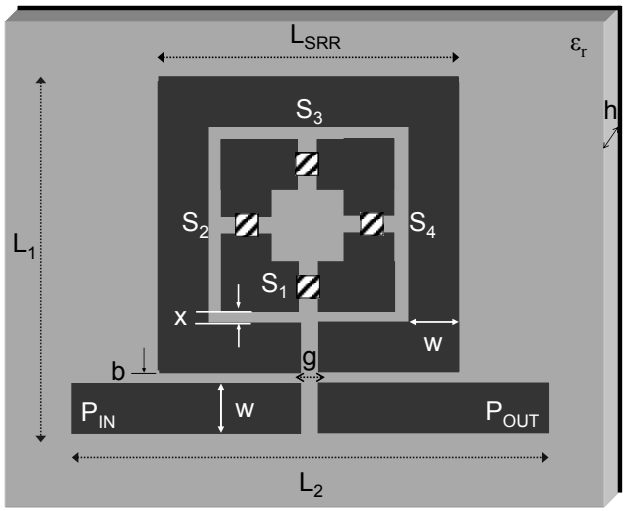


(b)

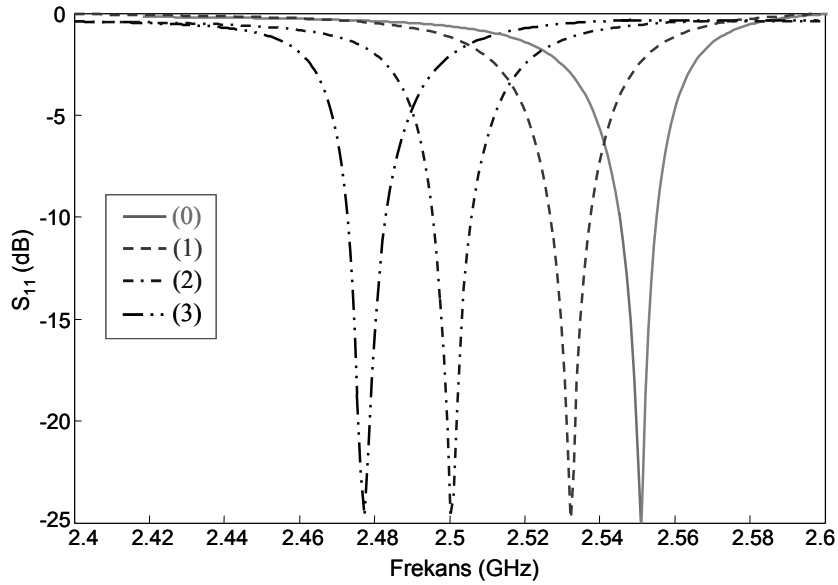
Şekil 3.9: Tasarım–VI'nın frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri

3.5. Tasarım–VII

Bu aşamaya kadar incelenen anahtarlamalı filtre tasarımlarında (Tasarım–IV, Tasarım–V ve Tasarım–VI) SRR halkaları arasına yerleştirilen aç/kapa anahtarlarıyla frekans ayarlamalı tek-bant ve çift-bant filtre performansları elde edilmişti. Bu tasarımlarda, özel olarak, tek-bant filtre profillerinin anahtarlamayla yüksek frekanslara 100–200 MHz aralıklarla kaydırılması sağlanmıştı. Şekil 3.10'da görülen Tasarım–VII konfigürasyonuyla ise, içteki halkaya konuşlandırılmış dört anahtarın teker teker açılmasıyla, aşağı doğru 20–30 MHz aralıklarla frekans kaydırmalı tek-bant filtre performansı sağlanabilmektedir. Şekil 3.11'de görüleceği gibi; tüm anahtarların kapalı olduğu filtre yapısı 2.55 GHz merkezli bant-geçiren özellik gösterirken, S_1, S_2 (veya S_4) ve S_3 anahtarları ayrı ayrı açıldığında, rezonans frekansı sırasıyla, 2.53 GHz, 2.50 GHz ve 2.47 GHz daha düşük frekans değerlerine kaymaktadır. S_2 ve S_4 anahtarlarının yapı içindeki simetrik yerleşimlerinden dolayı, her birinin açık olma durumlarında aynı filtre karakteristikleri gözlenmektedir. Sonuç olarak; Tasarım–VII konfigürasyonuyla, 2.47–2.55 GHz bandında daha küçük frekans adımlarıyla (daha hassas) frekans ayarlamalı filtre performansı sağlanabilmektedir.



Şekil 3.10: Tasarım–VII geometrisi: L_1=8.45, L_2=14.5, L_{SRR}=7.125, g=0.5, x=0.375, b=0.235, w=1.125, h=1.27 ve anahtar boyutları=0.5x0.5 (mm), ε_r=10.2



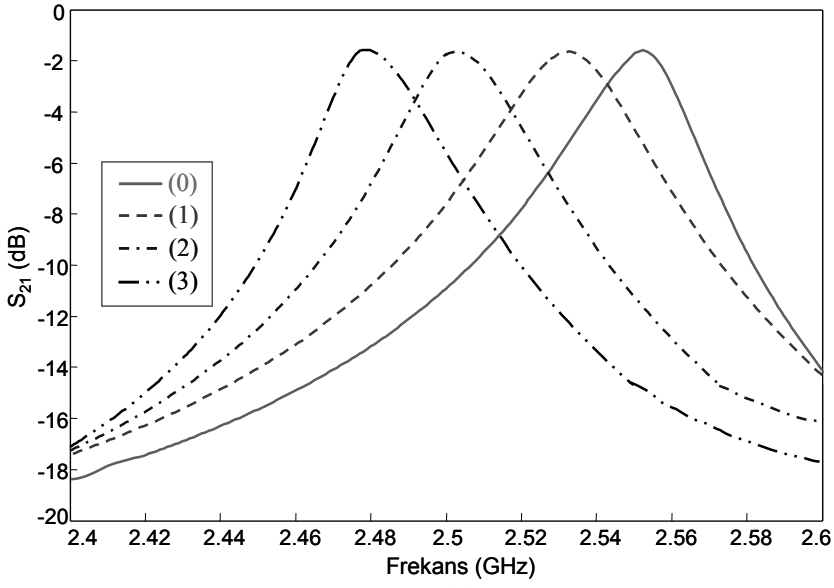
(a)

(0) : Tüm Anahtarlar KAPALI

(1) : S_1 AÇIK, S_2 / S_3 / S_4 – KAPALI

(2) : S_2 AÇIK, S_1 / S_3 / S_4 – KAPALI
veya
S_4 AÇIK, S_1 / S_2 / S_3 – KAPALI

(3) : S_3 AÇIK, S_1 / S_2 / S_4 – KAPALI



(b)

Şekil 3.11: Tasarım–VII'nin frekans ayarlamalı tek-bant (a) S_{11} ve (b) S_{21} karakteristikleri

BÖLÜM 4. ÖLÇÜMLER VE PRATİK ANAHTAR MODELLEMESİ

4.1. Giriş

Bölüm 3'te anahtarlamalı SRR filtre tasarımlarının benzetim sonuçları incelenmişti. Bu bölümde, özel olarak, Tasarım–IV'ün (Şekil 3.1) fiziksel prototipinin ölçüm sonuçlarına yer verilmektedir. Böylece, sayısal tasarımların ölçümlerle doğrulanması sağlanacak ve olası farklılıkların sebepleri irdelenecektir. Ayrıca, pratikte anahtarlama için kullanılması öngörülen PIN diyotlu filtre yapılarının benzetim ve ölçüm sonuçları da bu bölümde sunulmaktadır. Prototip filtrelerin üretimi ve ölçümleri TÜBİTAK/UEKAE laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

4.2. Ölçümler

Tasarım–IV ile üretimi gerçekleştirilen prototip tasarımı aynı filtre mimarisine (Şekil 3.1) sahip olmakla birlikte, geometrik boyutlarında farklılıklar bulunmaktadır. Bunun temel sebebi, prototip filtrenin sayısal tasarımı ve ölçümlerinin, parametreleri optimize edilmiş Tasarım–IV'ten önce gerçekleştirilmiş olmasıdır. Prototip filtrenin Tasarım–IV'ten (Şekil 3.1) farklılık gösteren geometrik parametreleri Tablo 4.1'de verilmektedir.

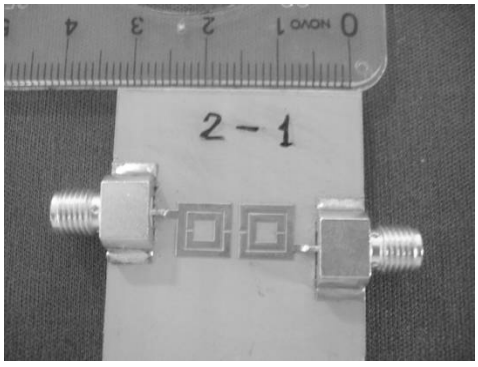
Ölçümler için, biri anahtarsız (modellemede olduğu gibi ilgili anahtar konumlarında metalik parçalar yok iken) diğeri anahtarlı (modellemede olduğu gibi ilgili anahtar konumlarında metalik parçalar var iken) olmak üzere iki ayrı prototip, alt yüzeyi topraklanmış 1.27 mm kalınlığındaki RO3210 alttaşın (ε_r=10.2, tanδ=0.003) üzerine baskı devre teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Anahtarlı yapının ölçümleri yapıldıktan sonra, SRR halkaların birindeki metalik parçalar yerine, PIN diyotlar

yerleştirilmiş ve ölçümler tekrarlanmıştır. S-parametre ölçümleri için HP-8753E Network Analyzer (6 GHz) kullanılmıştır.

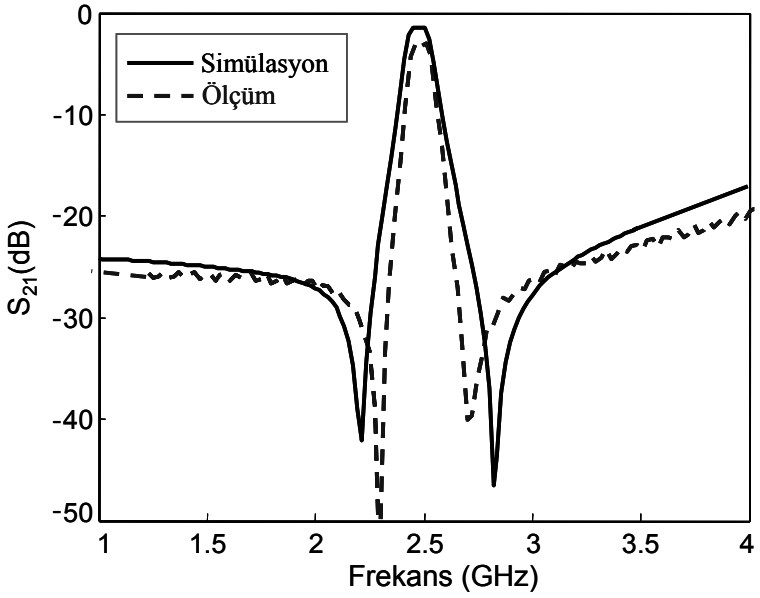
Anahtarsız (eşdeğer olarak tüm anahtarların açık olduğu) prototip filtrenin fotoğrafı Şekil 4.1'de ve ilgili iletim karakteristiği Şekil 4.2'de verilmektedir. Görüldüğü üzere; benzetim sonuçlarının öngördüğü 2.5 GHz merkezli iletim bandı ölçüm sonuçlarıyla oldukça iyi örtüşmektedir. Ölçüm sonuçlarında gözlenen iletim seviyelerindeki ~1.5 dB'lik düşüş ve frekans bandındaki bir miktar daralma, modellemede ihmal edilen, ancak beklendiği üzere, fiziksel prototipte yer alan iletkenlik/dielektrik kayıplarına ve fabrikasyon sürecindeki muhtemel tolerans hatalarına bağlanabilir.

Tablo 4.1: Prototip tasarımının (Şekil 3.1) geometrik parametreleri

Parametre	**Prototip (mm)**
P_L	3.0
P_W	1.0
L_{SRR}	7.0
L_X	4.6
w	1.0
g	0.2
x	0.2
anahtar boyut	0.2×0.2

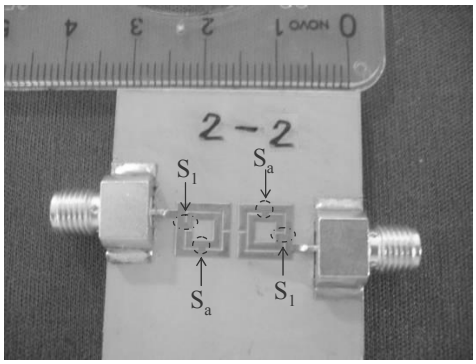


Şekil 4.1: Gerçeklenmiş anahtarsız filtre prototipinin üstten görünüşü

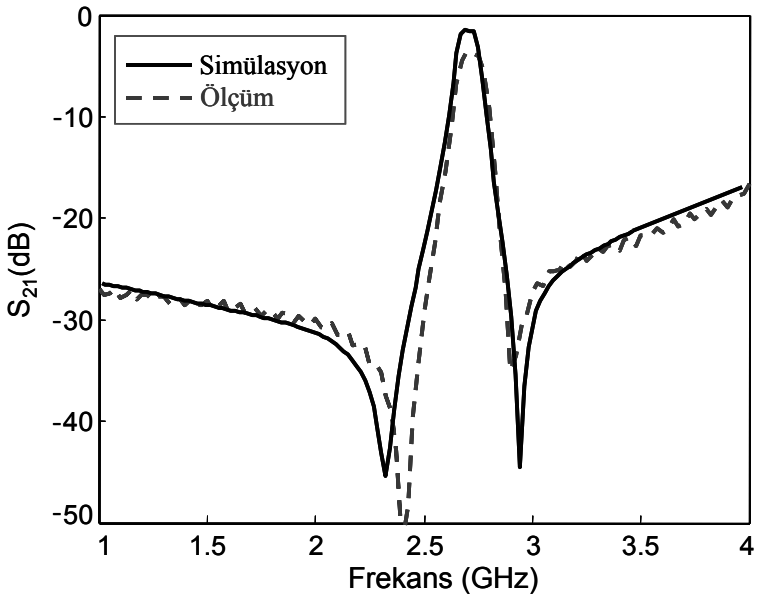


Şekil 4.2: Anahtarsız (metalik parçalar yokken) filtre prototipinin benzetim ve ölçüm sonuçları

Anahtarlı prototip filtrenin fotoğrafı Şekil 4.3'te ve ilgili iletim karakteristiği Şekil 4.4'te verilmektedir. Bu prototip, sadece S_1 ve S_a anahtar çiftlerinin kapalı olduğu durumda, modellemede olduğu gibi, ilgili anahtar konumlarına metalik parçalar yerleştirilerek gerçeklenmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere; daha önce anahtarsız filtrenin sağladığı 2.5 GHz'deki (Şekil 4.2) iletim bandı, anahtarlamayla 2.7 GHz bandına kaymış durumdadır. Ayrıca, fiziksel prototipteki kayıplardan ve üretimdeki olası tolerans hatalarından kaynaklanan iletim seviyelerindeki ufak farklılıklar dışında, benzetim ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyuştuğu gözlenmektedir.



Şekil 4.3: Gerçeklenmiş anahtarlı (metal-parçalı) filtre prototipinin üstten görünüşü



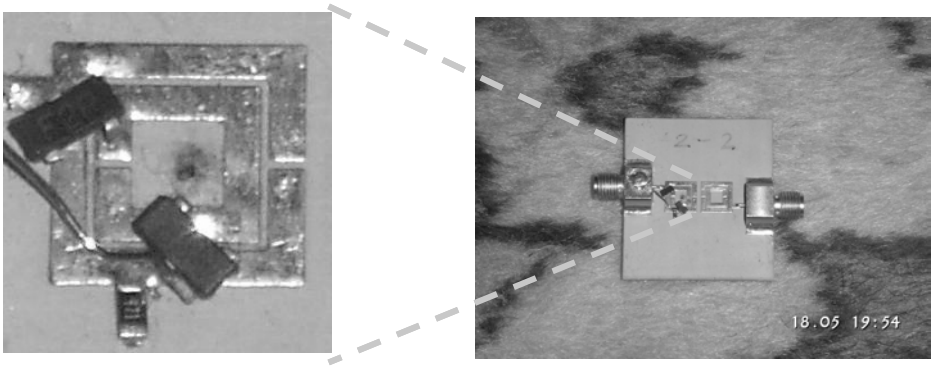
Şekil 4.4: Anahtarlı (metalik parçalar varken) filtre prototipinin benzetim ve ölçüm sonuçları

4.3. PIN Diyotlu Anahtar Gerçeklemesi ve Modellemesi

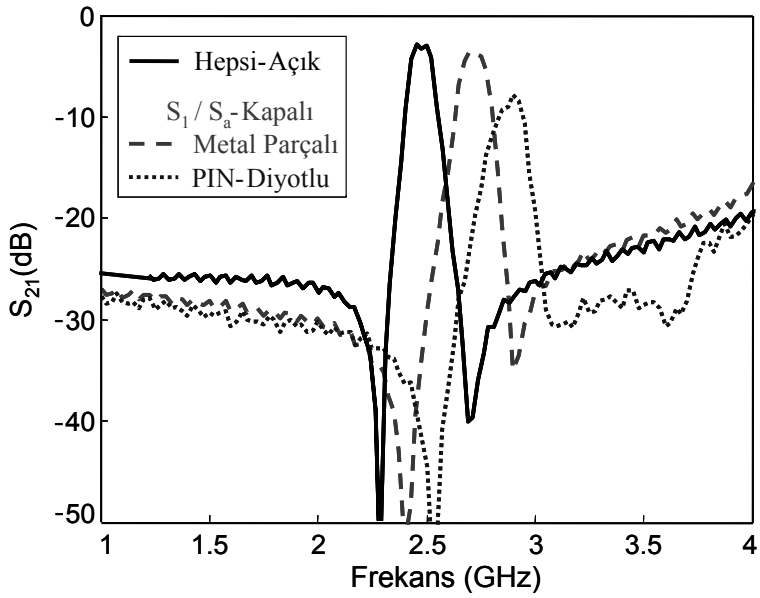
Şu ana kadar incelenen anahtarlı filtre tasarımlarında, gerçeklemesi daha kolay olması sebebiyle, SRR halkaları arasına metal parçalar yerleştirilerek kapalı anahtar modellemesi sağlanmıştı. Ancak pratikteki uygulamalarda, PIN diyot gibi elemanların kullanımıyla dinamik olarak aç/kapa anahtarlama operasyonu gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla; Şekil 4.3'te görülen 2. prototip yapısının giriş kısmındaki (sol taraftaki) SRR hücresinde yer alan metalik S_1 ve S_a anahtar elemanları yerine iki adet PIN diyot[1] yerleştirilmiş, çıkış tarafındaki (sağ taraftaki) metalik anahtarlara ise dokunulmamıştır. Test amaçlı gerçeklenen, bir hücresinde PIN diyotlar, diğerinde metal parçaların yer aldığı bu simetrik olmayan filtre yapısının fotoğrafı Şekil 4.5'te ve ilgili filtre karakteristiği Şekil 4.6'da verilmektedir. Görüldüğü üzere; PIN diyotlu prototip (Şekil 4.5) ile tümü metal-parçalı prototipin (Şekil 4.3) filtre karakteristiklerinde iki önemli fark göze çarpmaktadır. Bu farklar; metal-parçalı filtrenin 2.7 GHz merkezli iletim bandının,

[1] Ölçümler esnasında kullanılabilecek sadece iki adet genel amaçlı SOT paketli PIN diyot bulunmaktaydı. Bu diyotların, maksimum 16 mA'lik DC besleme durumunda eşdeğer 5 Ω'luk direnç ve ters beslemede ise eşdeğer 5 pF'lık kapasitif etki gösterdikleri öngörülmektedir.

PIN diyotlar yerleştirilince 2.9 GHz bandına kayması ve ilgili frekans bandında PIN diyotlu yapının iletim seviyelerinde gözlenen yaklaşık 5 dB'lik azalmadır. İletim bandının yaklaşık 0.2 GHz kadar daha yüksek frekanslara kaymasının, anahtarlama konfigürasyondaki simetrinin bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, iletim badında görülen kayıplar, her bir diyotun doğru besleme durumunda (kapalı pozisyondayken) eşdeğer olarak yaklaşık 5 Ω'luk direnç etkisi göstermesine bağlanabilir. Ayrıca, PIN diyotların DC besleme devresinde yer alan kondansatör ve direnç elemanlarının ve ilgili bağlantı tellerinin de filtre performansını olumsuz yönde etkilemiş olabileceği muhtemeldir.



Şekil 4.5: PIN diyot anahtarlı filtre prototipinin üstten görünüşü



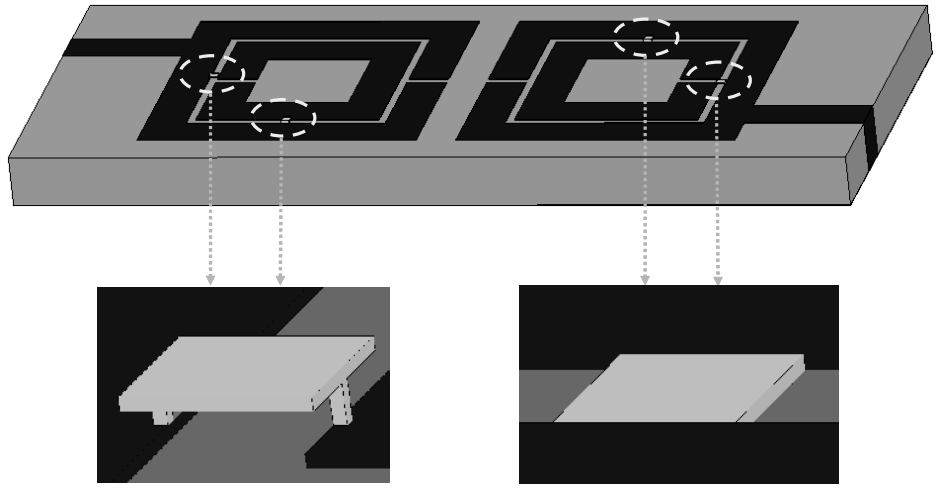
Şekil 4.6: Üç farklı filtre prototipinin ölçüm sonuçları

Bir sonraki aşamada; ilgili ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmak amacıyla, PIN diyotlu prototipin üç boyutlu fiziksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla; sadece düzlemsel (iki boyutlu) mikroşerit filtre modellemesine izin veren Ansoft Designer yerine, üç boyutlu modelleme kapasitesine sahip Ansoft HFSS simülatörü kullanılmıştır. Benzetim programında gerçeklenen filtre modeli Şekil 4.7'de verilmektedir. Görüldüğü üzere; fiziksel prototipte (Şekil 4.5) olduğu gibi, bir SRR hücresinde yer alan PIN diyotlar iki bacaklı köprü şeklinde modellenmiş, diğer SRR elemanında ise metal-parçalı modele yer verilmiştir. Ayrıca, basit PIN modelinde kullanılan metalik parçalar, sonlu iletkenlik değerine ($\sigma < \infty$) sahip elemanlar olarak tanımlanmış, böylece, gerçek diyot elemanlarının iletim kayıpları modellenmeye çalışılmıştır.

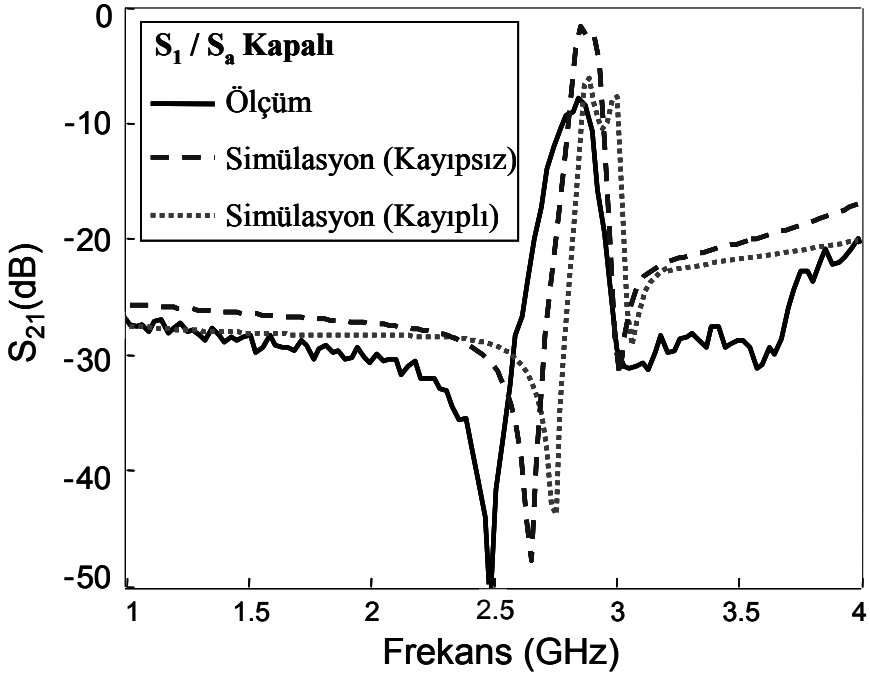
İki PIN diyot ve iki metal parçalı anahtar modeli içeren filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 4.8'de verilmektedir. Görüldüğü üzere; bu simetrik olmayan yapının simülasyon modelinin iletim frekans bandı, ölçüm sonuçlarıyla oldukça örtüşmektedir. Fiziksel prototipteki PIN diyotların iletim kayıpları; benzetim programında, iki bacaklı köprü modelini oluşturan metal parçaların bakır malzeme ($\tan\delta=0.05$) olarak tanımlanmasıyla modellenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere; kayıpların da simülasyon modeline eklenmesiyle, frekans bandında az da olsa gerçekleşen kaymaya rağmen, ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyuşan iletim seviyeleri gözlenmektedir. Böylece, PIN anahtarlamalı prototipin filtre performansını olabildiğince öngören eşdeğer bir benzetim modeli gerçekleştirilmiştir.

Daha öncede belirtildiği üzere, S_a ve S_1 anahtar elemanlarının tümünün PIN elemanlar kullanılarak fiziksel gerçeklenmesi mümkün olamamıştı. Ancak, PIN elemanların basit köprü modellemesinin oldukça iyi sonuçlar vermesi üzerine; bu anahtarların tümünün bu şekilde modellendiği filtre yapısının benzetimi gerçekleştirilebilmiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere; S_a ve S_1 anahtar çiftlerinin kapalı pozisyonları iki bacaklı, açık pozisyonları ise tek bacaklı köprü yapılarıyla modellenmektedir. Şekil 4.10'da, köprü ve metal-parçalı anahtar modellemesine dair simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Görüldüğü üzere, her iki

modele ait sonuçlar, ufak frekans kaymaları ve iletim seviye farkları dışında oldukça benzer profil sergilemektedirler.



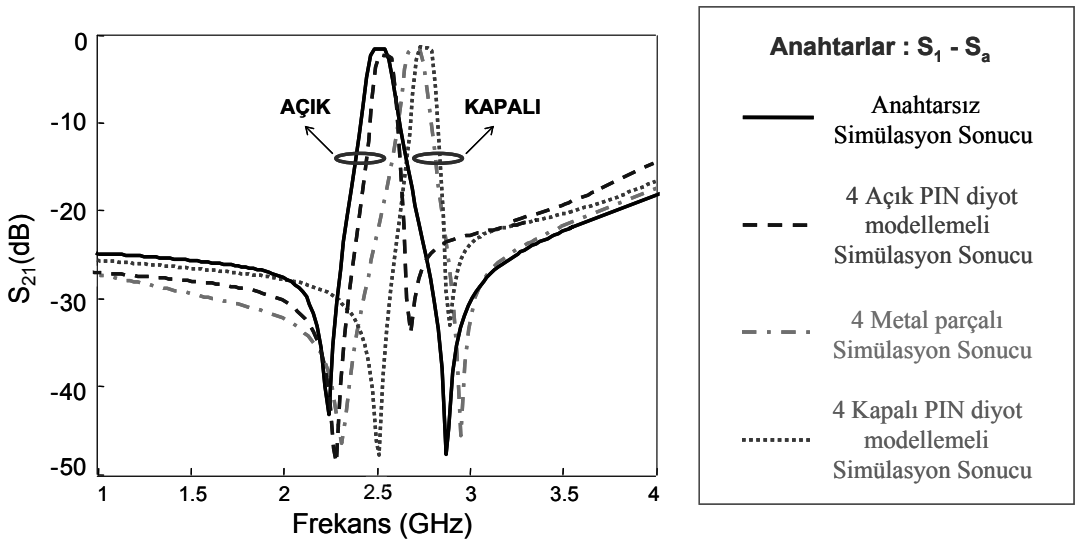
Şekil 4.7: İki bacaklı köprü şeklindeki PIN elemanların yer aldığı filtre modeli



Şekil 4.8: İki PIN diyot ve iki metal parçalı anahtar modeli içeren filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçları



Şekil 4.9: Köprü biçimindeki PIN eleman modelinin açık-kapalı durumları



Şekil 4.10: Köprü ve metal-parçalı anahtar modellemelerine ait simülasyon sonuçları

Bu bölümde, anahtarlamalı SRR filtre prototiplerinin ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırılmış ve ilgili filtre karakteristiklerinin oldukça uyum içinde oldukları gözlenmiştir. Pratik uygulamalarda kullanılması düşünülen PIN diyot elemanları için önerilen basit köprü modeli yapısının, gerçek anahtarlama performansına oldukça yakın benzetim sonuçları verdiği görülmüştür.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, yarık-halka rezonatörü (SRR) yapılarını temel alan, anahtarlamalı, bant-geçiren mikroşerit filtre tasarımları tanıtılmıştır. Bu tasarımlarda, yarık halkalar arasına uygun konumlarda yerleştirilmiş aç/kapa anahtarlar aracılığıyla, ilgili iletim karakteristiğinin farklı frekans bantlarına kaydırılması sağlanmış ve böylece frekans ayarlamalı filtre performansı gerçekleştirilmiştir. Tezde önerilen anahtarlamalı filtre tasarımları ve ilgili performansları Tablo 5.1'de özetlenmektedir.

Tezde sunulan tasarımlar, Ansoft Designer hazır benzetim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen filtre tasarımlarının pratik uygulamalarda performansını görmek için, biri anahtarsız diğeri anahtarlı (metal parçalı ve PIN diyotlu) iki filtre prototipi üretilmiş ve ilgili S-parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir; benzetim ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Bu tezde yer alan tasarımlar, filtre parametrelerinin deneme/yanılma yöntemiyle optimizasyonu sonucunda elde edilmiştir. İlgili parametrik çalışmalar ışığında aşağıda belirtilen hususların, benzer tasarımları gerçekleştirmek isteyebilecek tasarımcılara yol göstermesi beklenmektedir:

1) SRR filtrelerinin rezonans frekansını belirleyen temel parametre, dış SRR halkasının çevre uzunluğudur.

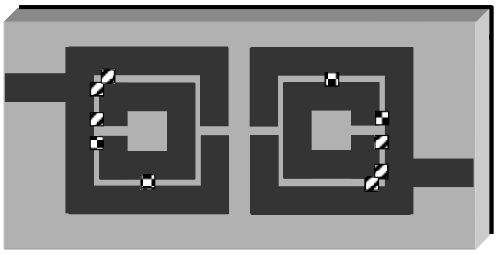
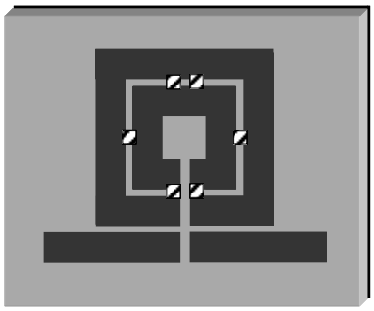
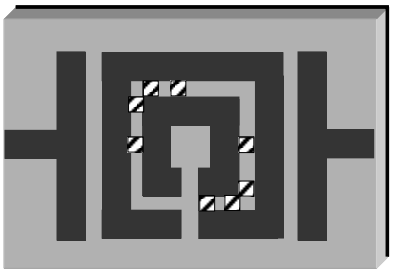
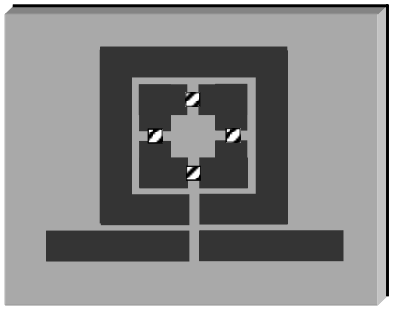
2) Etkin elektriksel kuplajın sağlanmasında, dolayısıyla, optimum bant-geçiren filtre performansının elde edilmesinde rol oynayan en önemli parametre, dıştaki SRR halkaları (Tasarım–I) veya dış SRR halkası ile besleme mikroşerit hattı (Tasarım–II, Tasarım–III) arasındaki mesafedir.

3) SRR halka kalınlıklarının, sistem empedansıyla (50 Ω) uyumlu giriş/çıkış portlarındaki mikroşerit hat genişlikleriyle aynı seçilmesinin ve ilgili port uzunluklarının mümkün oldukça kısa tutulmasının filtre performansını iyileştirdiği gözlenmiştir.

İleri bir çalışma olarak; deneme/yanılma yöntemini temel alan optimizasyon yerine, SRR elemanlarının eşdeğer devre modeli kullanılarak, tasarımların daha sistematik bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanabilir. Tezde önerilen bant-geçiren mikroşerit SRR filtrelerinin yanı sıra, ilgili yapıların tümleyicisi (complementary) filtre konfigürasyonları ile bant-durduran filtre performansları elde etmek mümkündür. Pratik uygulamalarda kullanılacak olan anahtarların, yüzeye uyumlu (surface-mounted), az kayıplı, küçük boyutlu olmaları, filtre performansının olabildiğince az etkilenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu özelliklere sahip PIN diyotlara alternatif olarak, günümüz mikrodalga teknolojisinde kullanımı yaygınlaşan MEMS (micro-electro-mechanical-system) türü anahtarlar da tercih edilebilir.

Bu tez çalışmasında yer alan Tasarım–IV ve Tasarım–V filtre tasarımları, sırasıyla, Akdeniz Mikrodalga Sempozyumu'nda [36] ve URSI-Türkiye Ulusal Kongresi'nde [37] konferans bildirisi olarak sunulmuştur. Tasarım–VI filtre tasarımı ise Haziran 2007'de yapılacak olan UMES konferansında [38] sunulacaktır.

Tablo 5.1: Tezde önerilen anahtarlamalı filtre tasarımları

Filtre Konfigürasyonu	Performans
Tasarım–IV 	Anahtarlamayla 2.5–4.0 GHz frekans bandında, frekans ayarlamalı tek-bant ve çift-bant filtre performansı sağlanmaktadır.
Tasarım–V 	Anahtarlamayla 2.55–3.45 GHz frekans bandında, çift-bant ve frekans ayarlamalı tek-bant filtre performansı sağlanmaktadır.
Tasarım–VI 	Anahtarlamayla 2.52–3.22 GHz frekans bandında, frekans ayarlamalı tek-bant filtre performansı sağlanmaktadır.
Tasarım–VII 	Anahtarlamayla 2.47–2.55 GHz frekans bandında, hassas frekans ayarlamalı tek-bant filtre performansı sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Bronwell, A., "Transmission-Line Analogies of Plane Electromagnetic Wave Reflections", ***Proc. IRE,*** Vol. 32, No. 4, 233–241, (1944).

[2] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C., Schultz, S., "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity", ***Phys. Rev. Lett.,*** Vol.84, 4184–4187, (2000).

[3] Yu, C.-C., Chang, K., "Novel Compact Elliptic-Function Narrow-Band Bandpass Filters Using Microstrip Open-Loop Resonators with Coupled and Crossing Lines", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 46, No. 7, 952–958, (1998).

[4] Hong, J.-S., Lancaster, M.J., "Couplings of Microstrip Square Open-Loop Resonators for Cross-Coupled Planar Microwave Filters", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 44, No. 12, 2099–2109, (1996).

[5] Erdemli, Y.E., Sondas, A., "Dual-Polarized Frequency-Tunable Composite Left-Handed Slab", ***J. Electromagn. Waves and Appl.,*** Vol. 19, No. 14, 1907–1918, (2005).

[6] Richards, P., "Resistor Transmission-Line Circuits", ***Proc. IRE,*** Vol. 36, 217–220, (1948).

[7] Grieg, D., Engelman, H., "A New Transmission Technique for Microstrip", ***Kilomgacycle Range. Pr oc. IRE,*** Vol.40, 644–1650, (1952).

[8] Ozaki, H., Ishii J., "Synthesis of a Class of Stripline Filters", ***IRE Trans. Circuit Theory,*** Vol. 5, 104–109, (1958).

[9] Sparks, R.A., Kaiser, J.A., "A Technique for Obtaining DC Isolation in Coaxial Cable RF Transmission Lines", ***IRE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 16, 359–360, (1961).

[10] Bryant, T.G., Weiss, J.A., "Parameters of Microstrip Transmission Lines and of Coupled Pairs of Microstrip Lines", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 16, No. 12, 1021–1027, (1968).

[11] Itoh, T., "A New Method for Measuring Properties of Dielectric Materials Using a Microstrip Cavity", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 20, 572–576, (1974).

[12] Lee, Y.S., "Mode Compensation Applied to Parallel-Coupled Microstrip Directional Filter Design", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 22, 66–69, (1974).

[13] Pozar, D.M., "Resonant Frequency and Q of an Open-Ended Rectangular Cavity", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 25, No. 7, 589–593, (1977).

[14] Thomson, A., Gopinath, A., "Microstrip Discontinuity Inductances", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 26, No. 10, 827–831, (1978).

[15] Wong, J.S., "Microstrip Tapped-Line Filter Design", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 27, No. 1, 44–50, (1979).

[16] Shih, Y.C., Itoh, T., "E-Plane Filters with Finite-Thickness Septa", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 31, No. 12, 1009–1013, (1983).

[17] Podcament, A., Conrado, L.F.M., "Design of Microwave Oscillators and Filters Using Transmission-Mode Dielectric Resonators Coupled to Microstrip Lines", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 33, No. 12, 1329–1332, (1985).

[18] Wang, T.H., Itoh, T., "Compact Grating Structure for Application to Filters and Resonators in Monolithic Microwave Integrated Circuits", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 35, No. 12, 1176–1182, (1987).

[19] Das, N.K., Voda, S.M., Pozar, D.M., "Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 35, No. 7, 636–642, (1987).

[20] Roan, G.T., Zaki, K.A., "Computer-Aided Design of Microstrip Filters by Iterated Analysis", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 36, No. 11, 1482–1487, (1988).

[21] Schwab, W., Menzel, W., "On The Design of Planar Microwave Components Using Multilayer Structures", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 40, No. 1, 67–72, (1992).

[22] Yabuki, H., Sagawa, M., Matsuo, M., Makimoto, M., "S tripline Dual-Mode Ring Resonators and Their Application to Microwave Devices", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 44, No. 5, 723–729, (1996).

[23] Ye, S., Mansour, R.R., "An Innovative CAD Technique for Microstrip Filter Design", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 45, No. 5, 780–786, (1997).

[24] Willke, T.L., Gearhart, S.S., "LIGA Micromachined Planar Transmission Lines and Filters", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 45, No. 10, 1681–1688, (1997).

[25] Zhu, L., Wu, K., "A Joint Field/Circuit Model of Line-to-Ring Coupling Structures and Its Application to the Design of Microstrip Dual-Mode Filters and Ring Resonator Circuits", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 47, No. 10, 1938–1948, (1999).

[26] Matsuo, M., Yabuki, H., Makimoto, M., "Dual-Mode Stepped Impedance Ring Resonator for Bandpass Filter Applications", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 49, No. 7, 1235–1240, (2001).

[27] Hsieh, L.H., Chang, K., "Dual-Mode Quasi-Elliptic-Function Bandpass Filters Using Ring Resonators With Enhanced-Coupling Tuning Stubs", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 50, No. 5, 1340–1345, (2002).

[28] Matthaei, G.L., "Narrow-Band, Fixed-Tuned, and Tunable Bandpass Filters With Zig–Zag Hairpin–Comb Resonators", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 51, No. 4, 1214–1219, (2003).

[29] Kuo, J.T., Jiang, M., Chang, H.J., "Design of Parallel-Coupled Microstrip Filters With Suppression of Spurious Resonances Using Substrate Suspension", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 52, No. 1, 83–89, (2004).

[30] Djaiz, A., Denidni, T.A., "A New Compact Microstrip Two-Layer Bandpass Filter Using Aperture-Coupled SIR-Hairpin Resonators With Transmission Zeros", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 54, No. 5, 1929–1936, (2006).

[31] Allen, C.A., Leong, M.K.M.H., Itoh, T., "Design of Microstrip Resonators Using Balanced and Unbalanced Composite Right/Left-Handed Transmission Lines", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 54, No. 7, 3104–3112, (2006).

[32] Jeng, Y.H., Chang, S.F.R., Chen, Y.M., Huang, Y.J., "A Novel Self-Coupled Dual-Mode Ring Resonator and Its Applications to Bandpass Filters", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 54, No. 5, 2146–2152, (2006).

[33] Harrington, R.F., "Field Computation by Moment Methods", ***Wiley-IEEE Pres,*** (2001).

[34] Volakis, J.L., Chatterjee, A., Kempel, L.C., "Finite Element Method for Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits and Scattering Applications", ***IEEE Press and Oxford University Pres,*** (1998).

[35] Yu, C.-C., Chang, K., "Novel Compact Elliptic-Function Narrow-Band Bandpass Filters Using Microstrip Open-Loop Resonators With Coupled and Crossing Lines", ***IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,*** Vol. 46, No. 7, 952–958, (1998).

[36] Cenk, C., Sondas, A., Erdemli, Y.E., "Tunable Split Ring Resonator Microstrip Filter Design", ***Mediterranean Microwave Symposium***, Starhotel President, Genova, Italy, 20–23, (2006).

[37] Cenk, C., Sondaş, A., Erdemli, Y.E., "Anahtarlanabilir Yarık-Halkalı Bant-Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı", ***URSI-Türkiye İkinci Ulusal Kongresi,*** Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 332–334, (2006).

[38] Sondaş, A., Cenk, C., Erdemli, Y.E., "Frekans-Ayarlamalı Bant-Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı", ***UMES Türkiye Ulusal Kongresi,*** Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, (20–22 Haziran 2007).

EKLER

Ek A. Ansoft Designer Programının Kullanımı

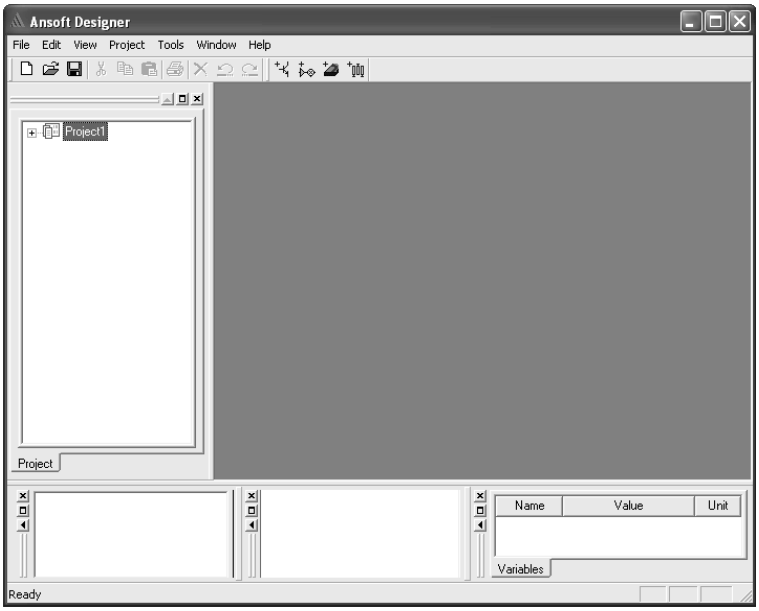
Bu tez çalışmasında yer alan mikroşerit filtre tasarımlarının benzetimi, Ansoft Designer v1.1 hazır simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu geometrik yapıların modellenebildiği programda, alttaş kalınlığı ve dielektrik sabiti ile mikroşerit kalınlığı gibi parametrelerin seçimi mümkün olabilmektedir.

Bu Ek bölümünün amacı, Ansoft Designer yazılımını ilk defa kullanacak tasarımcılara rehber olabilecek özet bir doküman sunmaktır. Bu amaçla, basit bir mikroşerit iletim hattı yapısının modellenmesi ve ilgili analiz işlemleri adım adım açıklanmıştır.

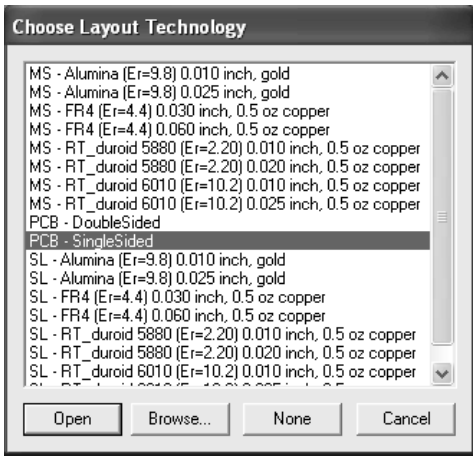
Başlangıç Ayarları

Öncelikle masaüstü ya da "Başla"t menüsündeki  kısayol simgesine çift tıklanarak programın ekrana gelmesi sağlanır. Şekil A.1'de ekrana gelen pencere görülmektedir.

"Project" menüsünden "Insert Planar EM Design" seçeneğine veya ekrandaki  simgesine tıklanarak mikroşerit bir tasarım gerçekleştirileceği belirlenir. Bu noktadan sonra ekrana "Choose Layout Technology" dosyası gelir (Şekil A.2). Dosyadan, yapılacak benzetimin özelliklerine uygun malzeme seçimi yapılır.

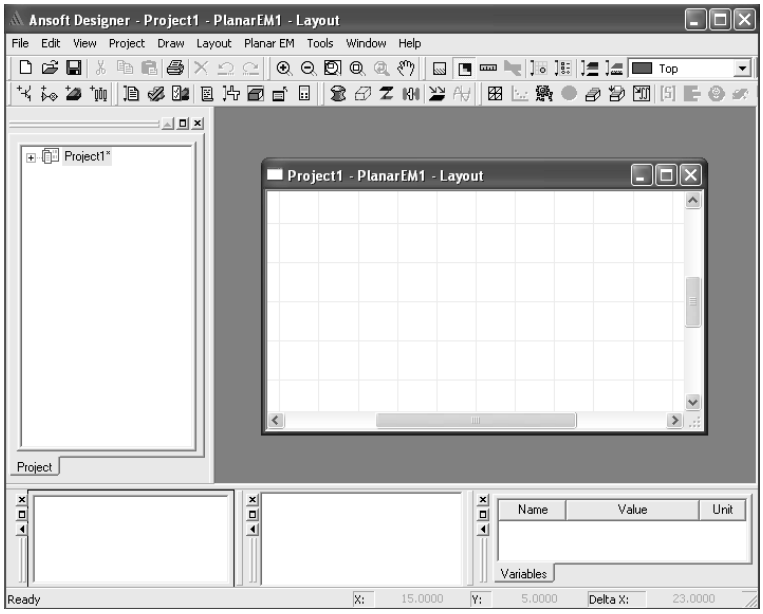


Şekil A.1: Designer programı ana ekranı



Şekil A.2: "Choose Layout Technology" dosyası

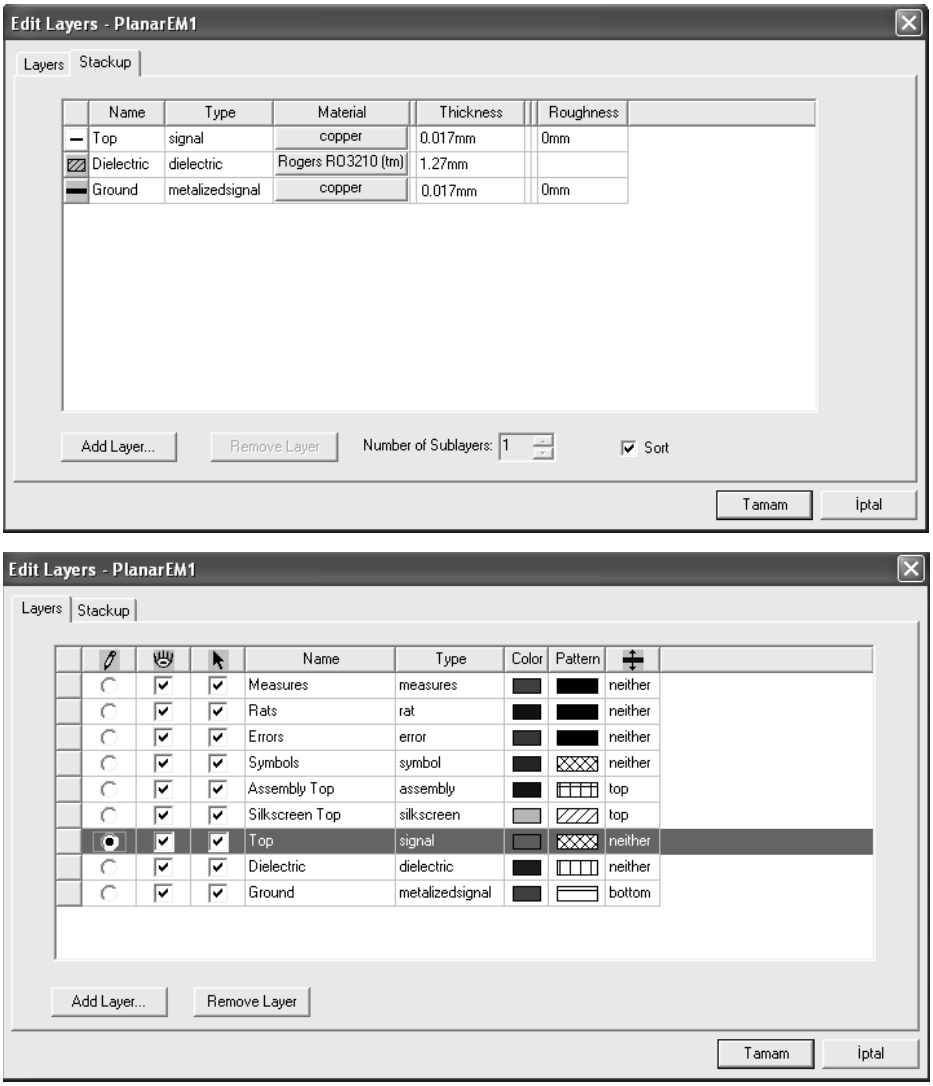
Programın kütüphanesinde, üretimlerde kullanılan 1.27 mm kalınlığındaki RO3210 alttaşın (ε_r=10.2, tanδ=0.003, metal kalınlığı=0.017mm) özelliklerine sahip malzeme olmadığından; varsayılan olarak "PCB-SingleSided" seçilir. İstenilen özellikler, ilerleyen adımlarda kullanıcı tarafından girilecektir. Seçim işlemi bittikten sonra ekrana, gerekli çizim işlemlerinin yapılacağı tasarım penceresi gelir (Şekil A.3).



Şekil A.3: Tasarım penceresi

Katman Özelliklerinin Tanımı

"Layout" menüsüne veya  simgesine tıklanır. Ekrana "Edit Layers" isminde seçilen malzemedeki katman özelliklerinin değiştirilebildiği bir pencere çıkar (Şekil A.4). Bu penceredeki "Stackup" sekmesinden; kullanılan alttaş, metal ve toprak levhası yüzeylerin kalınlık, pürüzlülük, dielektirik-manyetik geçirgenlik katsayıları gibi parametreleri sayısal olarak girilebilir ya da tasarım bittikten sonra değiştirilebilir. Tezde kullanılan malzemenin aynısından kütüphanede mevcut olmadığı daha önce belirtilmişti. Bu aşamada, sözü edilen eksikliği ortadan kaldırmak için her bir katman sırayla seçilerek özellikleri, Şekil A.4'te görüldüğü gibi, karşılarındaki boş kutucuklara girilmiş; "material" anahtarına basılarak da ekrana gelen kütüphaneden malzeme seçimi yapılmıştır. Mevcut kütüphanesinde bulunan malzemelerden birinin üzerinde değişiklikler yapıldıktan sonra farklı yahut aynı isimle kayıt edilebilmektedir. "Layers" sekmesinde ise katmanların benzetim programındaki renk ve desen gibi özellikleri görülebilir veya değiştirilebilir. Bu denemede görsel bir değişime gerek duyulmamıştır.



Şekil A.4: "Edit Layers" menüsü

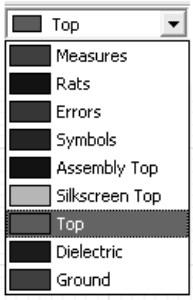
Model Çizimi

Üst kısımdaki menüde, 

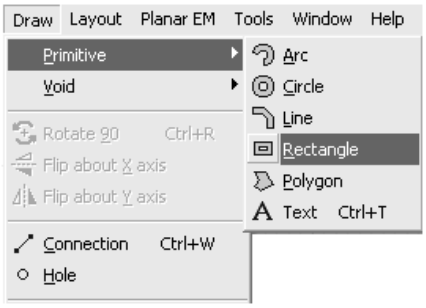
araç çubuğunun üzerine tıklandığında Şekil A.5'te görülen açılım oluşur. Burada kullanıcı, hangi katman üzerinde çizim yapacağını seçerek belirtir. Örnek çalışmada alt katman toprak levha (ground plane), orta katman da alttaş (dielectric) olarak belirlendiği için sadece üst yüzeyde (top) çizime ihtiyaç vardır. Dolayısıyla imleç, Şekil A.5'teki "Top" yazısının üzerine getirilir.

"Draw" menüsünde "Primitive" seçeneği işaretlenir. Bu seçenek, en temel geometrik şekillerin bulunduğu ve kullanıcının yapacağı çizim hangisine benziyorsa onu

belirttiği kısımdır (Şekil A.6). Benzetim programında, karmaşık cisimleri oluşturmanın yolu; bu yapıları temel geometrilere uyan şekillerde parça parça çizmektir. Mesela tez çalışmasındaki SRR yapılar, gerekli sayı ve boyutta dikdörtgen levhanın bir araya getirilmesiyle benzetilmiştir. Burada ele alınan yapı da temel olarak iki basit dikdörtgensel yapıdan oluşmaktadır. Bu sebeple "Draw" menüsünde önce "Primitive" seçeneği; sonra da "Rectangle" sembolüne tıklanır (Şekil A.6).

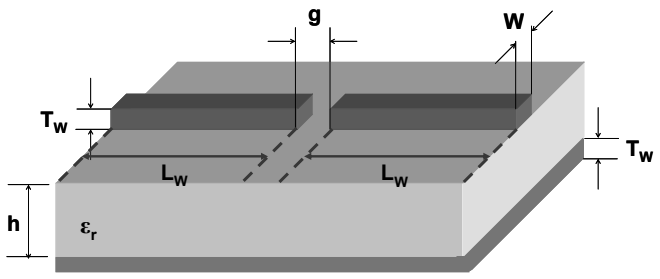


Şekil A.5: "Layout" araç çubuğu



Şekil A.6: "Draw" menüsü

Benzerlik teşkil etmesi açısından, Bölüm 2'de ele alınan Tasarım–II geometrisindeki yarıklı hat kısmının aynen modellenmesine karar verildi. Benzetimi gerçekleştirilen yapının ön görünüşü ve boyutları (hatırlanması için) Şekil A.7'de verilmiştir.

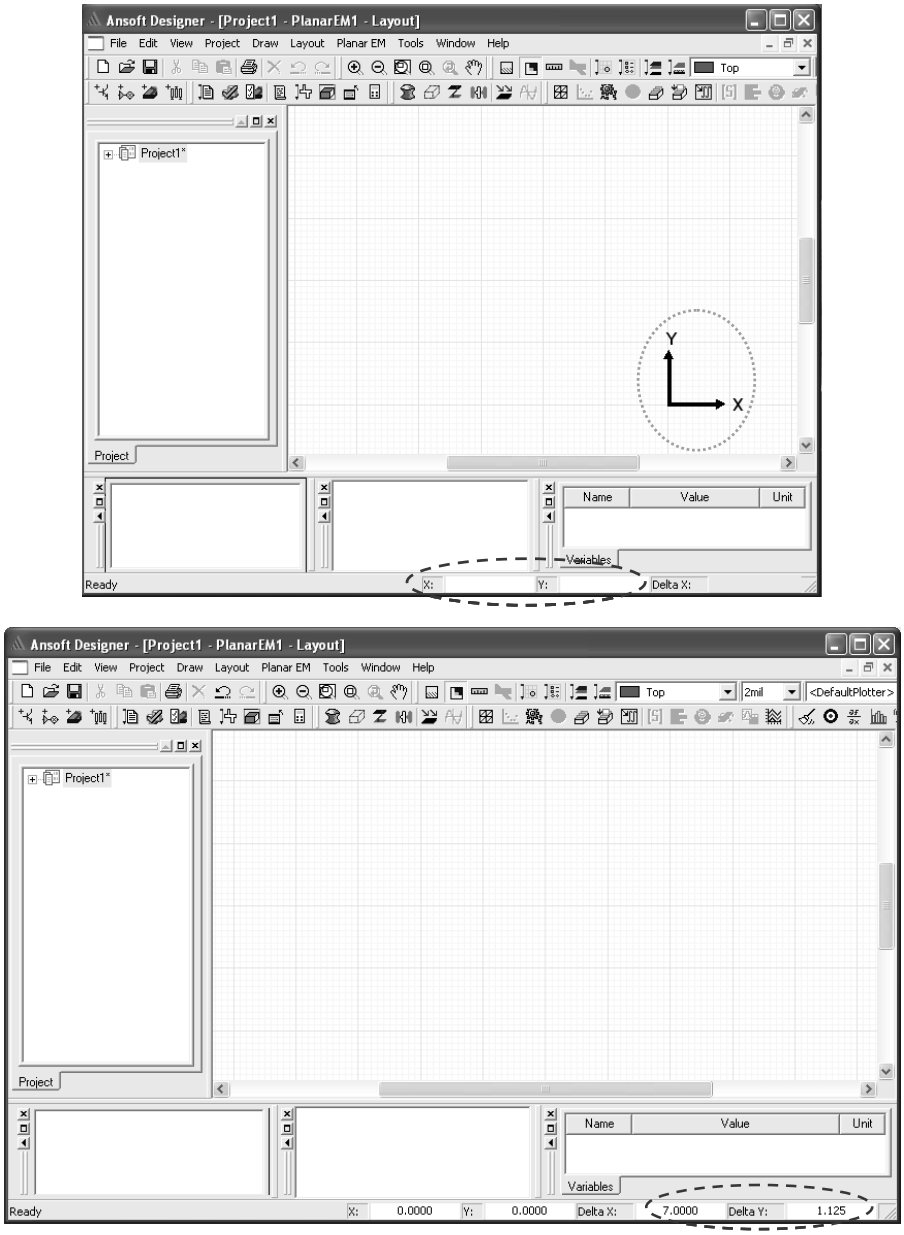


Şekil A.7: Benzetimi gerçekleştirilecek mikroşerit yapı boyutları: g=0.5, W=1.125, T_W=0.017, L_W=7 ve h=1.27 (mm), ε_r=10.2

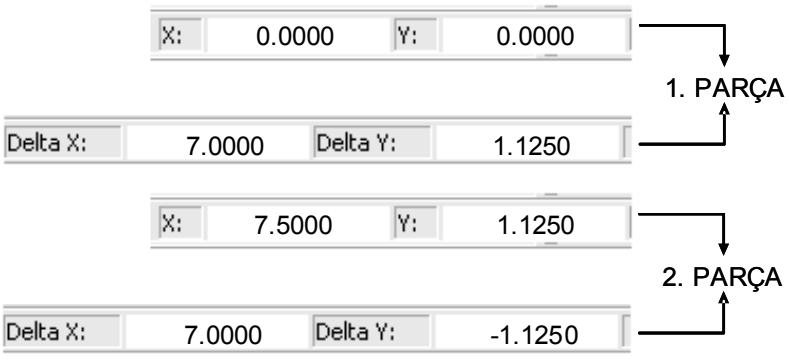
Programda, tüm yapılar iki boyutlu olarak çizilmektedir. Bunun için de ikili bir koordinat ekseni kullanılmaktadır. “X” ve “Y” olarak adlandırılan koordinatların yönleri Şekil A.8’de gösterildiği gibidir. Üçüncü boyut olan malzeme kalınlıkları ise “Edit Layers” menüsündeki “Stackup” sekmesinde önceden girilir (Şekil A.4).

Koordinatlar, çalışma ekranının alt kısmında bulunan ilgili yerlere () klavye yardımıyla girilir (Şekil A.8). Girilen ilk değerler, çizilecek geometrinin başlangıç noktasının koordinatlarıdır. Bu değerler girildikten sonra “Enter” tuşuna basıldığında şeklinde yeni kutucuklar ekrana gelir (Şekil A.8). Buradaki amaç, geometrinin çizimi tamamlanırken başlangıç koordinatlarından hangi yönde ve ne kadar uzaklaşıldığının bildirilmesidir. Esasen klavyeden hiç değer girmeden, sadece fare kullanılarak da geometrik çizimler gerçekleştirilebilir. Fakat klavyeden girilen değerlerle oluşturulan yapılar gibi hassas olamaz. Sadece kabataslak çizimler olacaktır. Şekil A.7’deki tasarımı programda benzetmek için girilmesi gereken koordinatlar Şekil A.9’da sunulmuştur. Modelin adım adım oluşumu ise Şekil A.10’da verilmiştir. Çalışma ekranında yapı her ne kadar iki boyutlu gibi gözükse de analizler gerçekleştirilirken üçüncü boyut olan malzeme kalınlıkları program tarafından hesaba katılmaktadır.

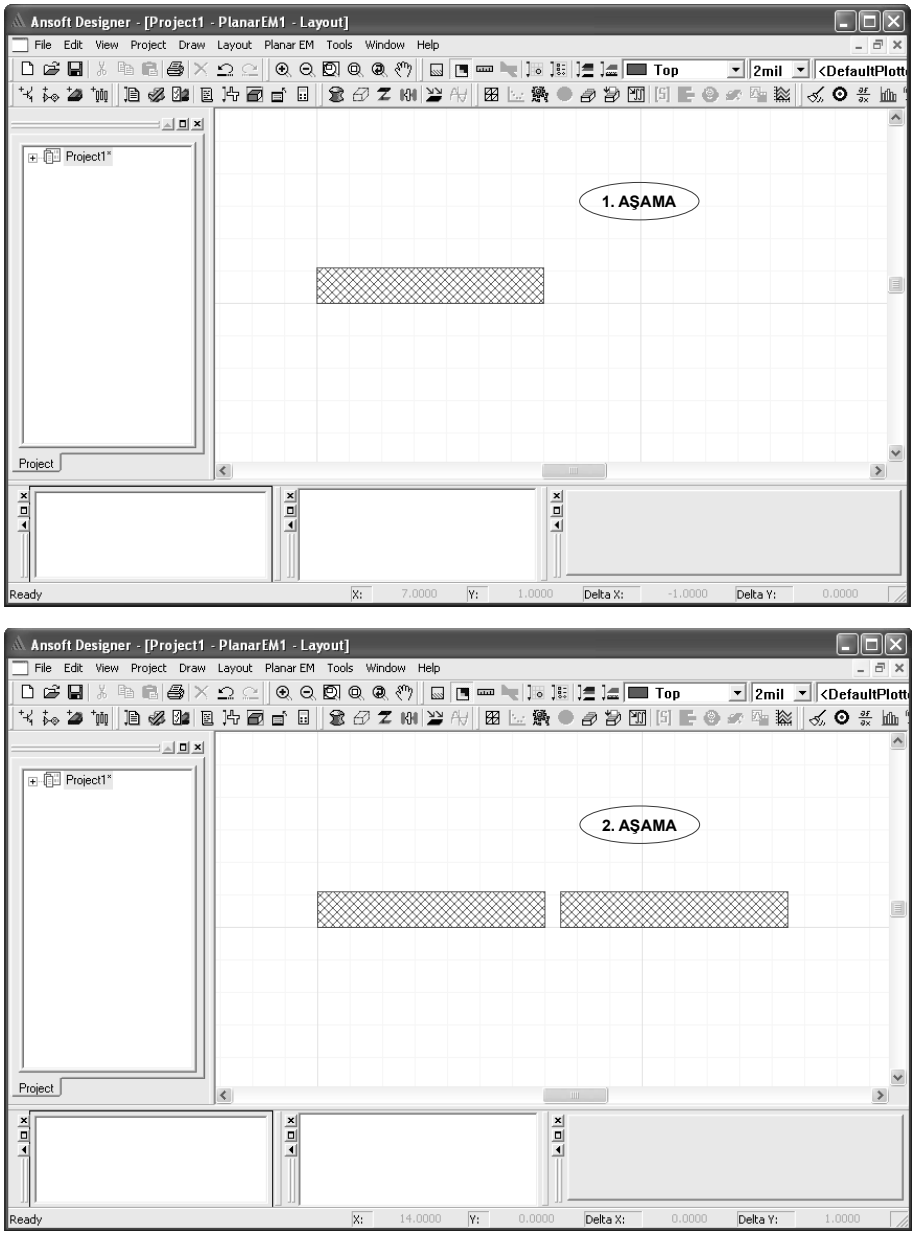
Çizim yapılırken oluşan görüntüyü ekranda ortalamak ve uygun büyüklüğe getirebilmek için Ctrl+D kısayolunu; seçili olan bir geometriyi olduğu yerden döndürmek içinse Ctrl+R kısayolunu kullanmak yeterlidir. Kesme, kopyalama ve yapıştırma gibi işlemler ise, tıpkı office programlarında olduğu gibi, Ctrl+X, Ctrl+C ve Ctrl+V kısayollarıyla veya cismin üzerinde sağ tıklanarak gerçekleştirilir.



Şekil A.8: Programa ait koordinat ekseni ile koordinatların girildiği kısımlar



Şekil A.9: Model oluşturulurken sırasıyla girilen tüm koordinatlar

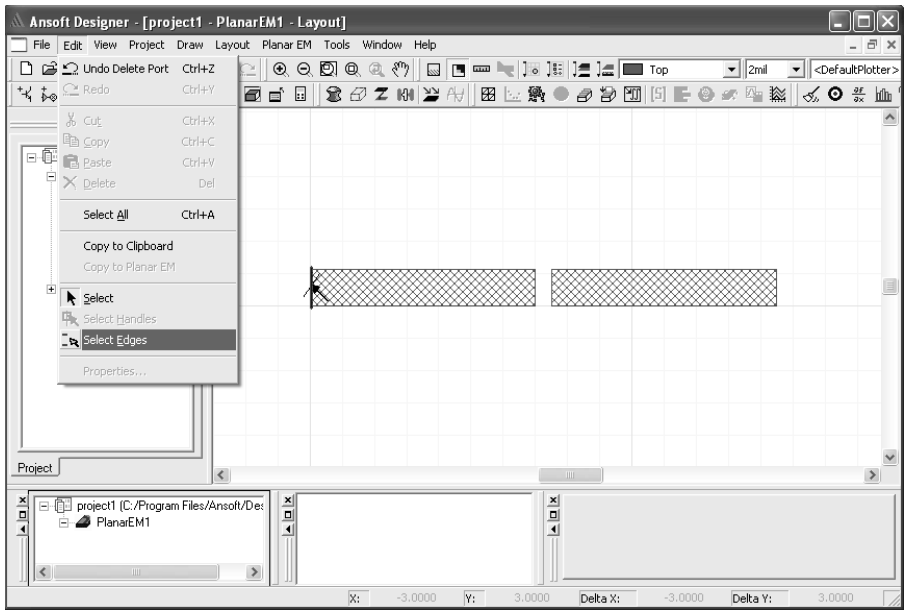


Şekil A.10: Model kademeli olarak çizilirken ekranda görülenler

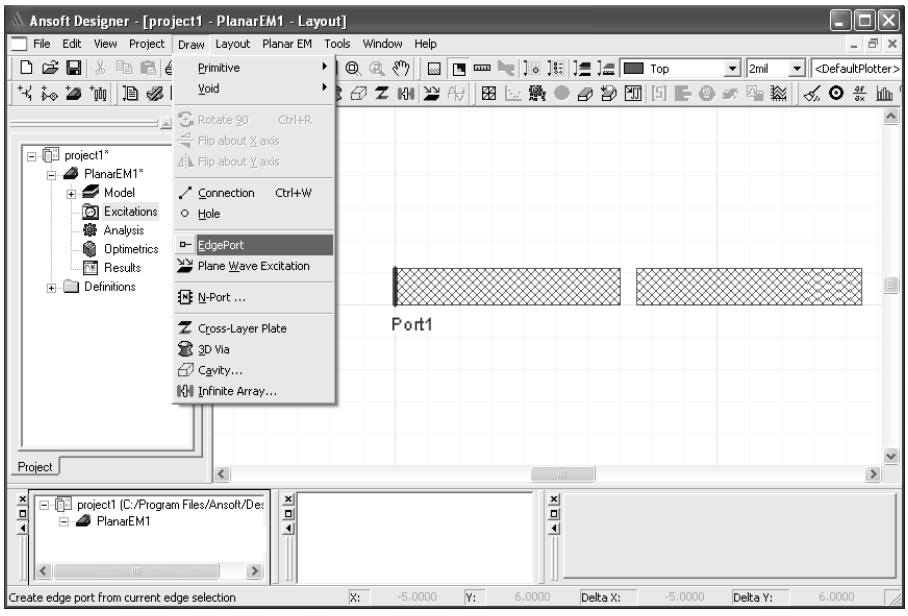
Portların Tanımlanması

Öncelikle besleme ve çıkış sinyallerinin alınacağı kenarların sırayla belirlenmesi gerekir. Bu işlem için "Edit" menüsünden "Select Edges" şıkkı ya da ekranın üst kısmındaki simgesi tıklanır; daha sonra da port olarak belirlenecek kenarlardan bir tanesinin fare yardımıyla işaretlenmesi gerçekleştirilir (Şekil A.11). Seçilen kenarın port olarak tanımlanması "Draw" menüsünde aktif hale gelen "Edge Port"

seçeneği tıklanarak yapılır. Bu işlemden sonra seçilen kenarın Port1 ismini aldığı görülür (Şekil A.12). İkinci portun belirlenmesinde de aynı işlemler sırayla yapılır.



Şekil A.11: Kenar seçme işlemi

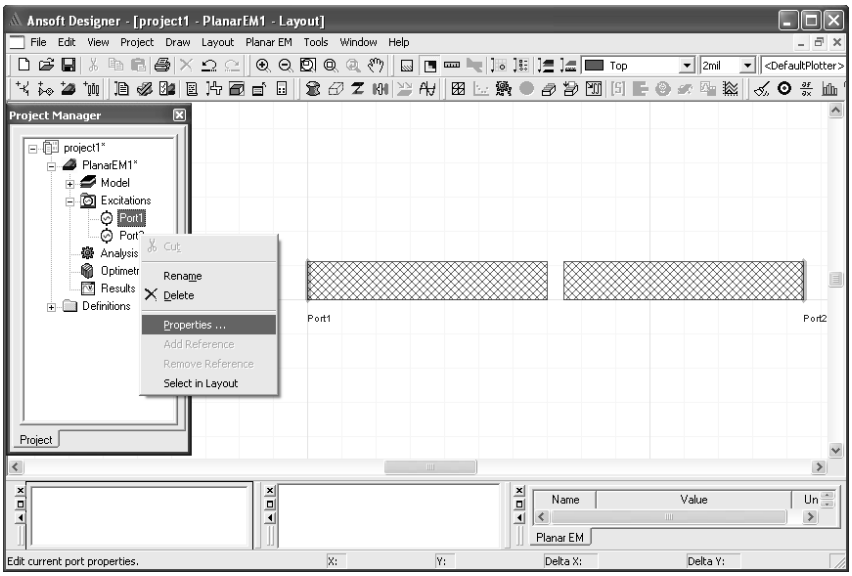


Şekil A.12: Port tanımlama işlemi

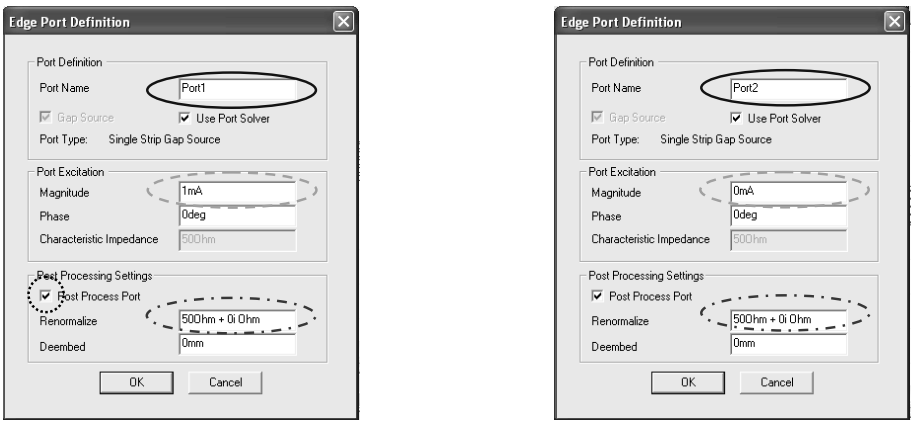
Portlar tanımlandıktan sonraki aşama, hangisinin giriş hangisinin çıkış portu olarak kullanılacağının belirlenmesidir. Bunun için ekranın sol kısmında bulunan "Project Manager" penceresindeki ""Excitations" kutusunun içinde bulunan port isimlerinin

üzerine sağ tıklanır (Şekil A.13). Çıkan menüde "Properties" seçeneği işaretlenirse ekrana Şekil A.14'de görülen "Edge Port Definition" alt menüsü gelir. Her iki port "Post Process Port" kutucuğu tıklanarak 50 Ω'a uyumlu hale getirilir. Eğer kullanıcı isterse başka değerler girerek sistemi ona uyumlu hale de dönüştürebilir.

"Port Excitation" kısmındaki "Magnitude" bölümünde; giriş olarak kullanılması düşünülen Port1 için herhangi bir değişiklik yapılmaz. Yani 1mA'lik akım değeri yeterlidir. İstenirse bu değer arttırılabilir veya azaltılabilir. Çıkış olarak belirlenen Port2 içinse bu değer 0mA'e düşürülür. Böylece Port2'den uyarım yapılmayacağı, yalnızca Port1'den sinyal girişinin olacağı programa bildirilmiş olur.



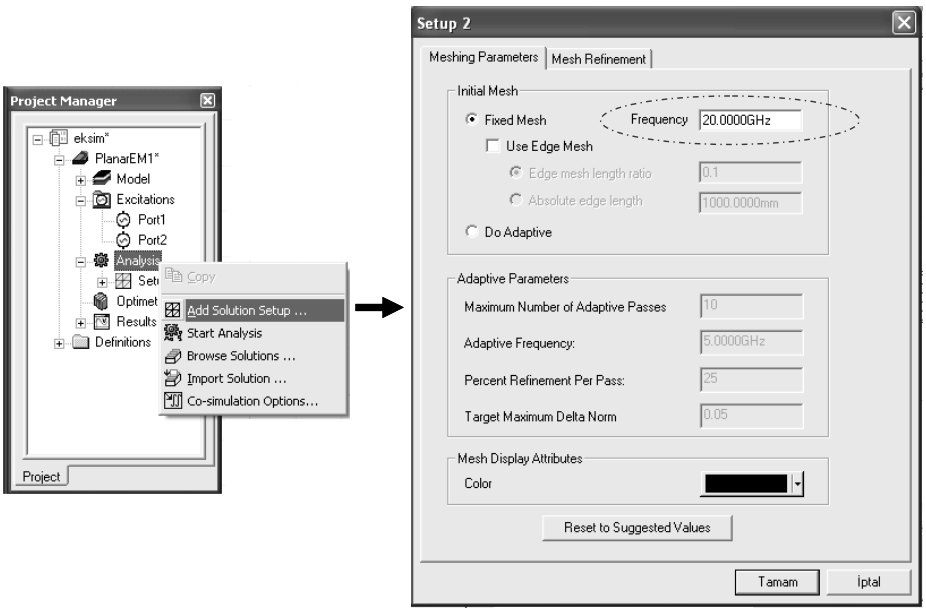
Şekil A.13: Port özelliklerinin değiştirilmesi



Şekil A.14: "Edge Port Definition" alt menüsü

Analiz Ayarları

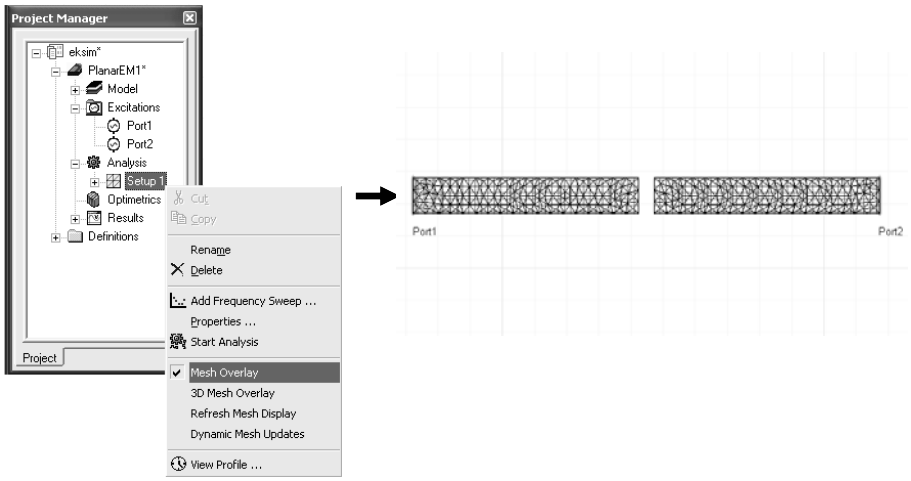
"Project Manager" penceresindeki "Analysis" simgesine sağ tıklanmak suretiyle "Add Solution Setup" penceresi ekrana açılır (Şekil A.15). Bu pencerede, analiz gerçekleştirilirken kullanılacak mesh yapısının özellikleri ve çalışılacak en büyük frekans değeri belirtilmektedir. Örnek tasarımda mesh özellikleri, başlangıç değerlerinde bırakılmış; maksimum çalışma frekansı ise 20 GHz değerine çekilmiştir. Girilen bu değerler neticesinde oluşan mesh çizimini yapı üzerinde gösterebilmek için "Project Manager" penceresindeki "Analysis" simgesinin altında oluşan "Setup1" kutucuğuna sağ tıklanır. Ekrana çıkan menüde "Mesh overlay" seçeneği işaretlenir (Şekil A.16). Böylece ekrandaki model üzerinde mesh çizimi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil A.15: "Add Solution Setup" penceresinin açılışı

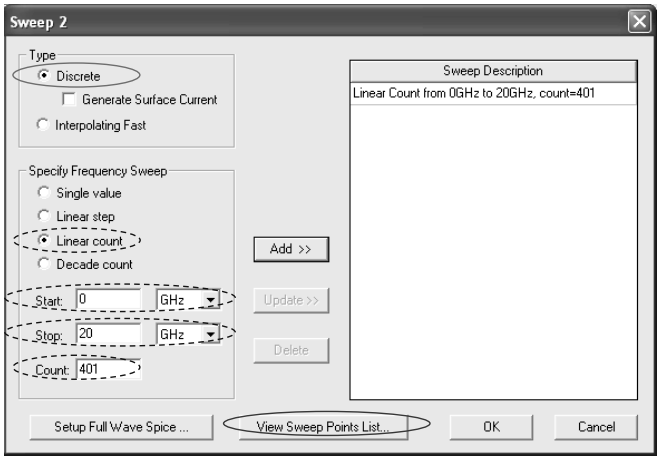
Eğer tek frekans değeri için değil de bir frekans aralığında çözüm aranacaksa bu frekans aralığının programa tanıtılması gerekir. Tez çalışmasındaki tüm yapılar ve burada incelenen örnek için de frekans aralığında bir çalışma söz konusudur. Yine "Project Manager" penceresinin altında bulunan "Setup1" kutucuğuna sağ tıklanır. Bu kez "Add Frequency Sweep" sekmesi işaretlenir. Ekrana "Sweep1" penceresi

açılır. Yapılacak analizin hızlı mı yavaş mı olacağı, frekans bandının küçük ya da büyük adımlarla mı ele alınacağı gibi durumlar bu pencereden ayarlanır.



Şekil A.16: Mesh çiziminin yapılışı

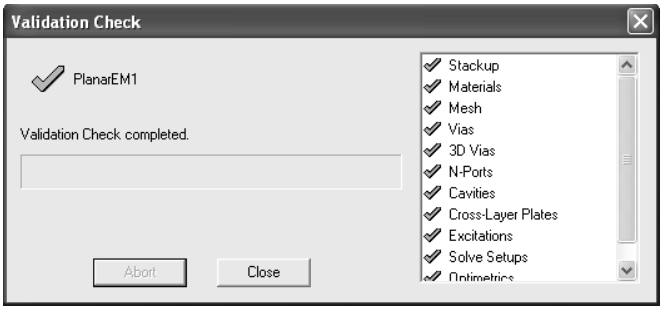
Yarıklı iletim hattı örneği için frekans ayarlamaları Şekil A.17'de gösterildiği gibidir. Tipin "Discrete" seçilmesiyle; belirtilen her bir frekans değerinde, ayrıntılı benzetim gerçekleşmektedir. Frekans tarama tipinin "Linear Count" seçilmesi, başlangıç frekansının 0 GHz, bitiş frekansının 20 GHz olarak belirlenmesi ve adım sayısının 401 olarak girilmesinin anlamı; 0–20 GHz bandında, aralıkları eşit ve yazılım tarafından belirlenmiş 401 adet frekans noktasında sonuç elde edilmesidir. Belirlenen frekans değerleri görülmek istenirse "View Sweep Points List" butonuna tıklamak yeterli olur (Şekil A.17).



Şekil A.17: Frekans bandı ayarlamalarının yapılması ("Sweep" penceresi)

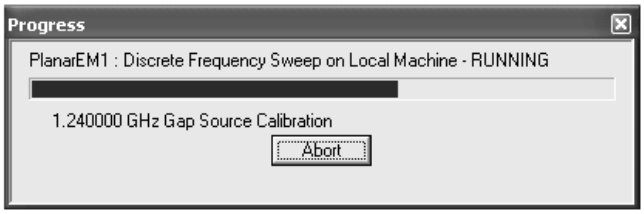
Analizin Başlatılması

Önce yapılan işlemlerde eksik veya hatalı kısımlar olup olmadığının tespiti için tasarımın program tarafından denetlenmesi uygun olmaktadır. Bu işlem için çalışma alanının üstünde bulunan  simgesine ya da "Planar EM" menüsünün içinde bulunan "Validation Check" seçeneğine tıklamak gerekir. Bundan sonra program, kendi içersinde gerekli işlemleri yapmakta; onayladığı ve onaylamadığı konuları bir liste halinde ekrana yansıtmaktadır. İncelenen mikroşerit yapı için de denetleme işlemi gerçekleştirilmiş ve Şekil A.18'de görüldüğü üzere hatasız sonuç elde edilmiştir.



Şekil A.18: Frekans bandı ayarlamalarının yapılması ("Sweep" penceresi)

Bir sonraki adımsa,  simgesine veya "Planar EM" menüsünün içinde bulunan "Analyze" seçeneğine tıklamaktır. Böylece program, uygulamayı çalıştırmaya başlayacaktır. Çalışma esnasında hangi aşamada olunduğu, Şekil A.19'da verilen "Progress" penceresi izlenerek anlaşılabilir.



Şekil A.19: "Progress" (İlerleme) Penceresi

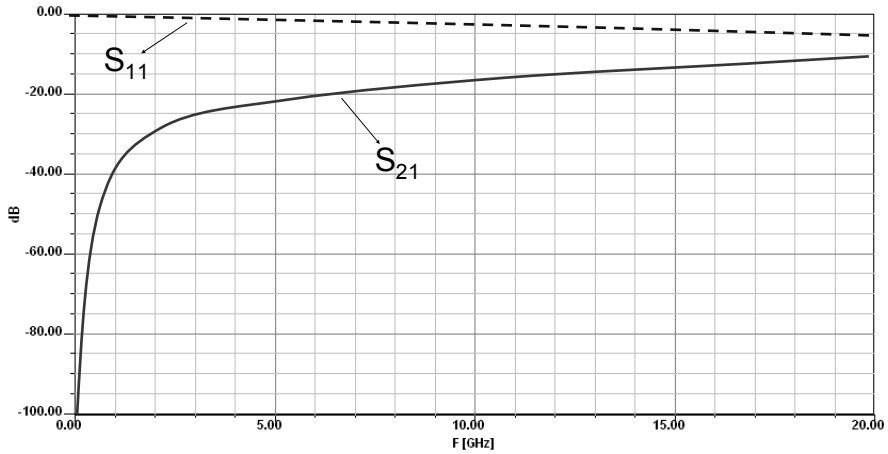
Benzetim Sonuçlarının Elde Edilmesi

Program çalışma sürecini tamamladıktan sonra fare, "Planar EM" menüsündeki "Results" kısmının üzerine getirilir. Yan tarafa açılan yeni bölümden "Create Repot" başlığı tıklanınca ekrana, istenen sonuç grafiklerinin belirtileceği "Traces" kutusu gelir (Şekil A.20). "Traces" kutusunu ekrana taşımanın diğer yolu ise "Project Manager" penceresinde "Results" seçeneğine sağ tıklayıp ekrana gelen menüde "Create Repot" yazısını işaretlemektir. Daha sonrasında ekrana gelen seçeneklerden "Standart" ve "Rectangular Plot" seçimleri yapılır. Bunun nedeni, incelenen mikroşerit yapıdan sadece S_{11} ve S_{21} sonuçlarının elde edilmek istenmesidir.



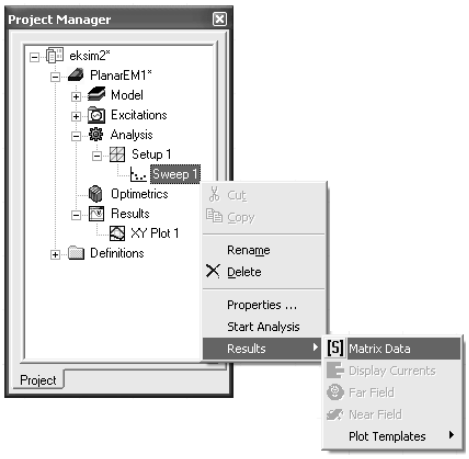
Şekil A.20: "Traces" kutusu

"Traces" kutusundaki "Category" bölümünde "S Parameter"; "Quantity" bölümünde "S(Port1,Port1)" ve "S(Port2,Port1)"; "Function" kısmında da "dB" seçenekleri işaretlenir. Sol üst kısımdaki "Add Trace" anahtarına basılmasıyla çizdirilecek grafikler belirlenmiş olur. Yapılması gereken son işlem, alt orta kısımda bulunan "Done" anahtarına veya klavyeden enter tuşuna basmaktır. Böylelikle istenen grafikler, çalışma ekranını kaplayacak biçimde ortaya çizilirler (Şekil A.21).

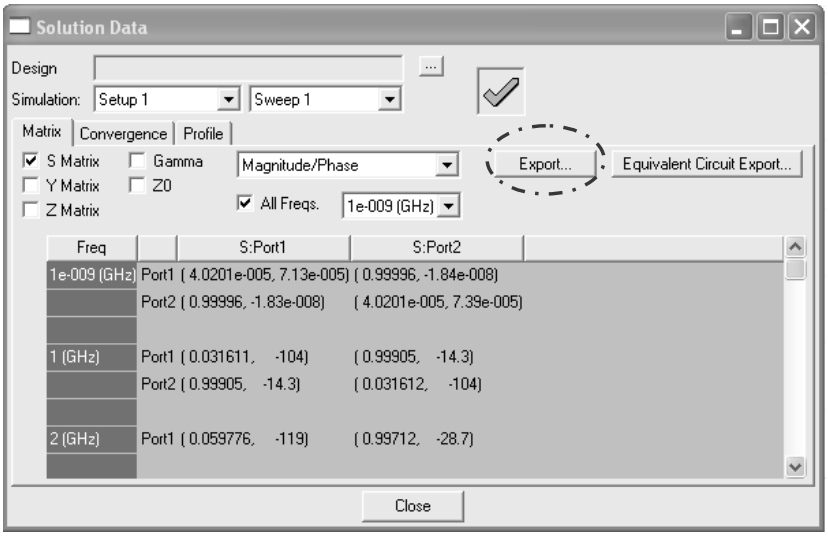


Şekil A.21: Yarıklı iletim hattının sonuç grafiği

Eğer sonuç grafikleri designer dışında başka programlarda çizdirilmek istenirse; "Project Manager" penceresinde "Sweep1" simgesine sağ tıklanır. Fare, ekrana gelen seçeneklerden "Results" üzerine getirildiğinde yan tarafa ek bir menü açılır. O menüden "Matrix Data" seçeneği işaretlenirse (Şekil A.22), ekrana "Solution Data" penceresi açılır (Şekil A.23). Açılan pencerede "Export" anahtarı tıklanırsa ekrana, bilgilerin hangi dosya formatında ve nereye kaydedileceğinin belirlendiği bir pencere açılmaktadır. Tez çalışmasında bulunan tüm sonuçlar Matlab programı kullanılarak çizdirilmiş olup, isimleri "input" ile başlayan ve uzantıları "txt" olan dosyalar halinde "Export" edilmişlerdir. Örneğin, bu ek kısmında ele alınan mikroşerit yapının sonuç bilgileri, "input1.txt" isimli bir dosya olarak kaydedilip matlab programında çizdirilebilmektedir.



Şekil A.22: "Solution Data" penceresinin açılımı



Şekil A.23: “Solution Data” penceresi ve dosya kayıt işlemi

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

A. Uluslararası / Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

1- CENK, C., SONDAS, A. and ERDEMLİ, Y.E., "Tunable Split Ring Resonator Microstrip Filter Design", ***Mediterranean Microwave Symposium,*** Starhotel President, Genova, Italy, 20–23, (2006).

2- CENK, C., SONDAŞ, A. ve ERDEMLİ, Y.E., "Anahtarlanabilir Yarık-Halkalı Bant-Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı", ***URSI-Türkiye İkinci Ulusal Kongresi,*** Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 332–334, (2006).

3- SONDAŞ, A., CENK, C., ERDEMLİ, Y.E., "Frekans-Ayarlamalı Bant-Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı", ***UMES Türkiye Ulusal Kongresi,*** Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, (20–22 Haziran 2007).

ÖZGEÇMİŞ

Cumhur CENK, 21.10.1981 yılında Kocaeli'nde doğdu. Orta öğrenimini 1998 yılında Kocaeli Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümü'nde tamamladıktan sonra Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Elektronik Öğretmenliği programını kazandı ve 2003 yılında bu programdan başarıyla mezun oldu. Aynı yıl, mezun olduğu Kocaeli Endüstri Meslek Lisesi'ne Elektronik öğretmeni olarak atandı. 2005 yılının Ekim ayında, halen çalışmakta olduğu Bahçecik Çok Programlı Lisesi Telekomünikasyon Bölüm Şefliği görevine getirildi.