T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN TÜMLEŞTİRMEYE UYGUN FAZ KAYDIRICI DEVRELERİNİN TASARIMI

Sena TAŞ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Fırat KAÇAR
(danışman imzalı olacaktır)

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Programı

Ekim, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Sena TAŞ tarafından, **Prof. Dr. Fırat KAÇAR** danışmanlığında hazırlanan **"YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN TÜMLEŞTİRMEYE UYGUN FAZ KAYDIRICI DEVRELERİNİN TASARIMI"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **22/10/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Fırat KAÇAR İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Yasin ÖZÇELEP İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Abdullah YEŞİL Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KONAL Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret

Annem Zeynep TAŞ, babam Ali TAŞ, abilerim; Adem ve Ercan TAŞ, ablalarım Gönül GÜLLÜCE, Züleyha IŞIK ve Fatma ATEŞ'e ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN TÜMLEŞTİRMEYE UYGUN FAZ KAYDIRICI DEVRELERİNİN TASARIMI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bir fikrin filizlenip olgunlaşması; yalnızca bilgiyle değil, sabır, inanç ve çoğu zaman görünmeyen ellerin sessiz desteğiyle mümkündür. Bu tez, uzun soluklu bir yolculuğun sonunda nice duraklardan geçerek vücut bulmuş bir emeğin meyvesidir. Bu yolda bana yoldaşlık eden herkese gönülden minnettarım. Evvela, ilmî mecrada bana yön veren, karanlıkta ışık, belirsizlikte pusula olan danışmanım Prof. Dr. Fırat KAÇAR'a şükranlarımı sunarım. Kılavuzluğuyla çıktığım fikir yolculuğu onun bilgeliği sayesinde çorak vadilerden bereketli ufuklara ulaşmıştır. Ayrıca çalışmalarım için gerekli yazılım desteği ve katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Sedat KILINÇ'a; süreci yönetmemde her türlü desteği sağlayan Prof. Dr. Vural Emir KAFADAR'a ve ablam Dr. Öğr. Üyesi Fatma ATEŞ ile eniştem Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ATEŞ'e gönülden teşekkür ederim.

Her biri ilmin sessiz işçileri olan hocalarıma… Bilimi sevdiren ve ben ortaokuldayken yüksek lisans öğrencisi Fen Bilgisi öğretmenim Prof. Dr. Sedat KANADLI'ya; sözcüklerin gücünü öğreten Türkçe öğretmenim Nurullah TEKATAŞ'a; sayılar ve mantıkla yolumu aydınlatan ortaokul matematik öğretmenlerim Ayşe SARIBAŞ YÜNTEN ve Adnan ULAKÇI'ya; lise matematiğinde tutkuyu aşılayan Hakan ULU ve Deniz KANEVETÇİ'ye; kimyanın sırlarını açan Arzu DENİZ YILMAZ'a; doğanın yasalarını sevdiren fizik öğretmenim Müjgan TEZCAN ATAKAN'a teşekkür ederim. Her katkınız, bu eserin temel taşına dönüşmüştür.

Bu emeğin harcı yalnızca akıl ve tedkikle değil; dua, sabır ve sebatla yoğrulmuştur. Bu sebeple, hayatımın her döneminde yanımda duran aileme teşekkür etmek, bu satırların en kıymetli amacıdır. Hayatın en sarp yokuşlarında nefesim yetmediğinde, adımı taşıyan her duayı bana rüzgâr gibi ulaştıran ailem… Varlığınız, gölgesine sığındığım bir çınar, sırtımı dayadığım bir dağdır. Ayrıca bu yolculukta desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Tuğba BEŞE, Ar. Gör. Şeyma DERDİYOK, Ar. Gör. Pınar GÜLER, Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEGER, Ezgi İpek ŞAHBUDAK, Ramazan–Sevgi KENDİRCİ, M. Ali–Meltem İYİKÜLAH, Samed GENÇKAYA, İbrahim Halil BAYAT, Yağmur BAYIR ve Songül–Bilal TAN'a teşekkür ederim; varlığınız bu emeğin yankısında daima hissedilecektir.

Ekim 2025 **Sena TAŞ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xv**
ABSTRACT ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Tezin Anahtarı 2
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. Yeni Nesil İletişim Sistemleri 4
2.1.1. Frekans Kullanımı ve Bant Genişliği 4
2.1.2. Faz Kaydırıcı Devrelerin Çalışma Prensibi 5
2.1.3. Faz Kaydırıcıların Kullanım Alanları 6
2.2. Faz Kaydırıcı Performans Kriterleri 6
2.2.1. Faz Kaydırma Hatası 6
2.2.2. Boyut 7
2.2.3. Anahtarlama Süresi 7
2.2.4. Güç Tüketimi 7
2.2.5. Giriş Kaybı 8
2.2.6. Dönüş Kaybı 8
2.2.7. Genlik Bozulması 8
2.3. Dijital Faz Kaydırıcı Yapısı 9
2.4. Faz Kaydırıcı Mimarisi 10
2.4.1. Schiffman Faz Kaydırıcı: 10

2.4.2. Hat Anahtarlamalı Faz Kaydırıcılar: 11
2.4.3. Yüklü Hat Faz Kaydırıcı: 11
2.4.4. Yüksek ve Alçak Geçiren Faz Kaydırıcılar: 11
2.4.5. Tüm Geçiren Faz Kaydırıcılar: 12
3. YÖNTEM 14
3.1. Simetrik Kafes Devresi ile Faz Kaydırma 14
3.2. Anahtarlamalı Kapasitörün Kullanımı 15
3.3. PIN Diyot Kullanımı 17
3.4. Simetrik Kafes Devresi ve Anahtarlamalı Kapasitör ile Tasarlanan Faz Kaydırıcı Devre I Modeli 18
3.4.1. Devre I MATLAB Simülasyonu için Empedans Hesaplamaları 22
3.5. Simetrik-T ve PIN Diyot ile Tasarlanan Faz Kaydırıcı Devre II Modeli 24
3.5.1. Devre II MATLAB Simülasyonu için Empedans Hesaplamaları 27
4. BULGULAR 30
4.1. Önerilen Devre I 30
4.2. Önerilen Devre II 41
5. TARTIŞMA 57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 61
KAYNAKLAR 63
EKLER 68
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 69
ETİK KURUL İZİN YAZISI 70
KURUM İZNİ YAZILARI 71
PATENT HAKKI İZNİ ..... Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ 72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1: Schiffman Faz Kaydırıcı 10

Şekil 2: T ve π tipi yüksek/alçak geçiren filtre blokları [23] 12

Şekil 3: Seri Endüktörlü ve Seri Kapasitörlü Tüm Geçiren Faz Kaydırıcı [26]. 13

Şekil 4: Simetrik Kafes Devresi 15

Şekil 5: Anahtarlamalı Kapasitör 16

Şekil 6: Önerilen Devre 1: simetrik LC kafes devresi. 19

Şekil 7: Önerilen simetrik kafes devresi A devresi. 20

Şekil 8: Önerilen simetrik kafes devresi B devresi 21

Şekil 9 : Önerilen T topolojisi devresi. 25

Şekil 10 : Önerilen T topolojisi A devresi. 26

Şekil 11: Önerilen T topolojisi B devresi. 26

Şekil 12: Devre I 45° için Matlab simülasyonu faz grafiği 31

Şekil 13: Devre I 45° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 31

Şekil 14: Devre I 45° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 32

Şekil 15: Devre I 90° için Matlab simülasyonu faz grafiği 33

Şekil 16: Devre I 90° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 34

Şekil 17: Devre I 90° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 35

Şekil 18: Devre I 180° için Matlab simülasyonu faz grafiği 36

Şekil 19: Devre I 180° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 36

Şekil 20: Devre I 180° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 37

Şekil 21: Devre I 45°, 90° ve 180° için faz farkları ADS grafiği 39

Şekil 22: Devre I 45° için ekleme kaybı ADS grafiği 40

Şekil 23: Devre I 90° için ekleme kaybı ADS grafiği 40
Şekil 24: Devre I 180° için ekleme kaybı ADS grafiği 41
Şekil 25: Devre II 22.5° için Matlab simülasyonu faz grafiği 42
Şekil 26: Devre II 22.5° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 43
Şekil 27: Devre II 22,5° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 44
Şekil 28: Devre II 45° için Matlab simülasyonu faz grafiği 45
Şekil 29: Devre II 45° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 45
Şekil 30: Devre II 45° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 46
Şekil 31: Devre II 90° için Matlab simülasyonu faz grafiği 47
Şekil 32: Devre II 90° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 47
Şekil 33: Devre II 90° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 48
Şekil 34: Devre II 180° için Matlab simülasyonu faz grafiği 49
Şekil 35: Devre II 180° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu 49
Şekil 36: Devre II 180° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği 50
Şekil 37: Devre II 5,125°, 11,25°, 22,5°, 45°, 90° ve 180° faz kaydırma 52
Şekil 38: Devre II 5.125° için Ekleme Kaybı 53
Şekil 39: Devre II 11.25° için Ekleme Kaybı 53
Şekil 40: Devre II 22.5° için Ekleme Kaybı 54
Şekil 41: Devre II 45° için Ekleme Kaybı 54
Şekil 42: Devre II 90° için Ekleme Kaybı 55
Şekil 43: Devre II 180° için Ekleme Kaybı 55

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: Faz Kayma Çözünürlüğü.....9

Tablo 2 : PIN Diyot Benzetim Eleman Değerleri.....17

Tablo 3: Devre I için ADS bileşen değerleri 38

Tablo 4: ADS devre II bileşen değerleri.....51

Tablo 5 : Literatürdeki faz kaydırıcılarla karşılaştırması 59

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
π	: Pi Sayısı
i	: Normalize Akım
f	: Frekans
v	: Normalize Gerilim
y	: Normalize Admitans
z	: Normalize Empedans
I	: Gerçek Akım
V	: Gerçek Gerilim
Y	: Gerçek Admitans
Z	: Gerçek Empedans
Z_0	:Karakteristik Empedans
R	: Direnç
$R_{eş}$	: Eşdeğer Direnç
R_f	: İleri Direnç
R_r	:Ters Direnç
C	: Kapasite
C_D	: Paralel Diyot Kapasitesi
L	: Endüktans
D	: Diyot
Q	: Kalite Faktörü
k	: Küplaj Katsayısı
n	: Sarım Sayısı
w	: Genişlik
ω	: Açısal Frekans

Kısaltmalar	Açıklama
1G	: 1. Jenerasyon Mobil İletişim (2nd Generation)
2G	: 2. Jenerasyon Mobil İletişim (2nd Generation)

3G : 3. Jenerasyon Mobil İletişim (3nd Generation)

4G : 4. Jenerasyon Mobil İletişim (4nd Generation)

5G : 5. Jenerasyon Mobil İletişim (3nd Generation)

6G : 6. Jenerasyon Mobil İletişim (4nd Generation)

IoT : Nesnelerin İnterneti

VR : Sanal Gerçeklik

Wi-Fi **:** Kablosuz Yerel Ağ Bağlantısı (Wireless Fidelity)

LTE-M **:** LTE üzerinden Makine Tipi Haberleşme (LTE for Machines)

mmWave **:** Milimetre Dalga

GaAs : Galyum Arsenit

ADS : Gelişmiş Tasarım Sistemi – (Advanced Design System)

PIN diyot **:** Pozitif–İntrinsik–Negatif Diyot

PIN-pHEMT : PIN Diyot ve Yüksek Elektron Hareketli Transistör (Positive-Intrinsic-Negative + Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor)

BDMA : Işın Bölmeli Çoklu Erişim (Beam-Divided Multiple Access)

CDMA : Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code-Divided Multiple Access)

CMOS : Eşlenik Metal Oksit Yarıiletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

FET : Alan Etkili Transistor (Field-Effect Transistor)

KCL : Kirchhoff'un Akım Kanunu (Kirchhoff's Current Law)

KVL : Kirchhoff'un Gerilim Kanun (Kirchhoff's Voltage Law)

MEMS :Micro Electro-Mekanik Sistemler (Micro Electro-Mechanical System)

MESFET : Metal Yarıiletken Alan Etkili Transistor (Metal- Semiconductor-Field-Effect-Transistor)

MIMO : Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış

MMIC : Monolitik Mikrodalga Entegre Devre (Monolithic Microwave Integrated

MOSFET : Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistor (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

PHEMT : Psödomorf Yüksek Hareketli Elektron Transistor (Pseudomorph High Moving Electron Transistor)

RF : Radyo Frekansı

RF MEMS : Radyo Frekansı Mikroelektromekanik Sistem (Radio Frequency Microelectromechanical System)

RFID : Radyo Frekans ile Tanımlama (Radio Frequency Identification)

RMS : Karekök Ortalama (Root Mean Square)

SMS : Kısa Mesaj

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YENİ NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN TÜMLEŞTİRMEYE UYGUN FAZ KAYDIRICI DEVRELERİNİN TASARIMI

Sena TAŞ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman: Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Bilgi paylaşımı, bilginin yayılması ve bilgiye erişim noktasında iletişim teknolojileri büyük bir rol oynamaktadır. Hızlı ve kusursuz bir şekilde erişim ve paylaşımın sağlanması için iletişim teknolojileri sürekli gelişim içerisindedir. Günümüzde bu ihtiyaçları karşılamaya yönelik geliştirilen iletişim teknolojileri: Wİ-Fİ, LTE-M, 5G ve 6G'dir. Bu teknolojilerin hedeflenen düzeyde geliştirilmesiyle aynı zamanda geniş bantlı, düşük güç tüketimli ve MMIC olan bir faz kaydırıcıya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tezde iki farklı devre literatüre sunulmuştur. Devre I, 4.5-5.5 GHz bant aralığında çalışan 3-bit Simetrik tüm geçiren LC kafes topolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. 45°, 90° ve 180° faz kaydırma işlemi yapılan 3-bit dijital faz kaydırıcı devresidir. Anahtarlı kapasitör ile anahtarlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Devre II, 8-12 GHz bant aralığında çalışan 6-bit Simetrik-T topolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. Anahtarlama elemanı olarak diyot kullanılmıştır. Her iki tasarımda da anahtarlama işlemi ile iki farklı devre oluşmaktadır. Bu devreler Devre A ve Devre B olarak isimlendirilmiştir. Devre A da, θ_A faz kayması üretirken,

Devre B de faz kayması θ_B'dir. Bu iki devre arasında faz farkı, $\Delta\theta = \theta_B - \theta_A$, toplam faz kayma derecesini verir.

3-bit LC Simetrik kafes yapılı Devre I de 45°, 90° ve 180° RMS faz hatası için sırasıyla 5,304°, 3,116°, ve 0°; maksimum RMS ekleme kaybı 7.236 dB'dir. 6-bit Simetrik-T yapılı Devre II ile ise 22.5°, 45°, 90° ve 180° RMS faz hatası için sırasıyla 0,105°, 0,185°, 0,779°, 0,768°, 1,3183° ve 2,1180°; maksimum RMS ekleme kaybı 2.13 dB'dir.

Ekim 2025 , 90 sayfa.

Anahtar kelimeler: Dijital faz kaydırıcı, Simetrik LC kafes, Simetrik-T tipi dijital faz kaydırıcı

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

PHASE SHIFTER CIRCUIT DESIGN SUITABLE FOR INTEGRATION WITH NEW GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS

Sena TAŞ

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical-Electronics Engineering, PhD Program

Supervisor : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Information sharing, dissemination of knowledge, and access to information play a major role in communication technologies. In order to ensure fast and flawless access and sharing, communication technologies are in continuous development. Today, communication technologies developed to meet these needs include Wi-Fi, LTE-M, 5G, and 6G. With the targeted advancement of these technologies, there is also a need for a broadband, low-power-consuming, and MMIC-based phase shifter.

In this thesis, two different circuits are presented to the literature. Circuit I is a 3-bit digital phase shifter operating in the 4.5–5.5 GHz band, designed using a symmetric all-pass LC lattice topology. It performs 45°, 90°, and 180° phase shifting. Switching is implemented with a switched capacitor. Circuit II is designed using a symmetric-T topology operating in the 8–12 GHz band, with a diode used as the switching element. In both designs, the switching operation results in two different circuits. These circuits are named Circuit A and Circuit B. While Circuit A produces a phase shift of θA, Circuit B produces a phase shift of θB. The phase difference between these two circuits, $\Delta\theta = \theta B - \theta A$, gives the total phase shift.

For Circuit I, the 3-bit LC symmetric lattice design, the RMS phase errors for 45°, 90°, and 180° are 5,304°, 3,116°, and 0°, respectively; the maximum RMS insertion loss is 7.236 dB. For Circuit II, the 6-bit symmetric-T design, the RMS phase errors for 5,124°, 11,25°, 22.5°, 45°, 90°, and 180° are 0,105°, 0,185°, 0.779°, 0.768°, 1.3183°, and 2.1180°, respectively; the maximum RMS insertion loss is 2.13 dB.

October 2025, 90 pages.

Keywords: Digital phase shifter, Symmetric LC lattice, Symmetric-T Digital phase shifter

1. GİRİŞ

İletişim, insanlığın varoluşundan itibaren hayatın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Başlangıçta insanlar sesli ve işaret dili gibi temel iletişim yöntemlerini kullanarak etkileşimde bulundular. Ancak zamanla artan insan nüfusu, yerleşimlerin genişlemesi ve ticaretin gelişmesi, bireyler arasında giderek artan mesafeleri köprülemek için daha gelişmiş iletişim araçlarına duyulan ihtiyacı doğurmuştur. İnsanlar önce mektuplar ve güvercinler gibi ilkel yöntemlerle iletişim kurmaya çalışmış, daha sonra telgraf, telefon gibi buluşlar bu süreçte devrim niteliğinde adımlar atılmasını sağlamıştır. Son yüzyılda ise kablosuz iletişim teknolojilerinde yaşanan büyük gelişmeler, iletişimi daha hızlı, verimli ve yaygın hale getirmiştir.

Kablosuz iletişim teknolojileri, 1980'lerin başında 1. Nesil (1G) mobil ağların insan hayatına girmesiyle dönüştürücü bir etki yaratmıştır. 1G, sadece sesli iletişim sunan analog bir teknolojiye dayanıyordu. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise 2. nesil (2G) ağlar kullanılmaya başlanmış ve bu sayede sesin yanı sıra dijital verilerin, özellikle de kısa mesajların (SMS) iletilmesi mümkün hale gelmiştir. Ardından gelen 3. nesil (3G) ve 4. Nesil (4G) teknolojileri, veri iletim hızlarını artırmış ve mobil internetin günlük yaşama entegrasyonunu sağlamıştır [1,2]. Bu nesillerle birlikte video görüşmeleri, internet üzerinden yayın akışları ve sosyal medya kullanımı büyük bir hız kazanmış, bu da dijital dünyanın günlük yaşamdaki etkisini daha da artırmıştır.

Günümüzde ise 5. Nesil (5G) ve 6. Nesil (6G) gibi yeni nesil iletişim teknolojileri, geleceğin teknolojik yeniliklerine uygun çözümler sunmak üzere geliştirilmektedir. Sanal Gerçeklik (VR), Nesnelerin İnterneti (IoT) ve otonom araçlar gibi yeni teknolojiler, yüksek hız, düşük gecikme süreleri ve gelişmiş ağ kapasitesi gerektiren sistemlerdir. Özellikle sanal ve fiziksel dünyalar arasındaki bariyerlerin kaldırılabilmesi için iletişim ağlarının çok düşük gecikme sürelerine sahip olması büyük bir gerekliliktir. İnsan algısının ve tepkilerinin milisaniyeler içinde gerçekleşmesi, bu teknolojilerin tam potansiyellerine ulaşmaları açısından kritik bir unsurdur. Bu bağlamda, insanın algılama ve tepki verme süresi olan 1 milisaniyeye sanal dünyada da ulaşılması, gelecek teknolojilerin başarıyla uygulanmasını sağlayacaktır.

Bu hedef doğrultusunda “dokunsal internet” veya “haptik teknoloji” olarak adlandırılan alan ön plana çıkmaktadır. Dokunsal internet, internet üzerinden nesnelere dokunma ve hissetme deneyimini sunmayı amaçlar. Bu teknolojinin gelişmesiyle birlikte, insanlar farklı fiziksel ortamlarda bulunmalarına rağmen, sanal dünyada aynı ortamda olduklarını hissedebilecek ve birbirleriyle dokunsal etkileşimde bulunabileceklerdir. Örneğin, farklı bir şehirdeki bir doktor, uzaktan bir ameliyatı başarılı bir şekilde gerçekleştirebilecektir. Bu tür uygulamalar, fiziksel mesafelerin insanlar arasındaki engelini tamamen ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır.

Bunun yanı sıra, yeni nesil iletişim sistemleri, Endüstri 4.0 teknolojileriyle de doğrudan ilişkilidir. Endüstri 4.0, IoT'nin endüstriyel uygulamalarıyla birlikte fabrika otomasyonunu ve uzaktan kontrol edilebilen devasa makinaların kullanılmasını sağlayan bir teknolojik devrimdir. Otonom araçlar da bu sürecin bir parçası olarak hızla hayatımıza girmektedir [3-7].

Bütün bu teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, yeni nesil iletişim sistemlerinin kapasite ve hız açısından daha da geliştirilmesine olan ihtiyaçla doğru orantılıdır. Wi-Fi, 5G ve 6G gibi teknolojiler, bu ihtiyacı karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, yeni nesil iletişim sistemlerinin ihtiyaçlarına yanıt verebilmek amacıyla iletişim ağlarında iletim faz açısını değiştiren faz kaydırma devrelerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşılmıştır. Faz kaydırma devreleri, yukarıda bahsi geçen geleceğin teknolojilerinin hayata geçirilmesinde kilit bir rol oynayacaktır.

1.1. Tezin Anahtarı

Bölüm iki de genel olarak bir faz kaydırıcı devresi kavramı açıklanmaktadır. Özelde ise bir faz kaydırıcı devresinin performans kriterlerini etkileyen: faz kaydırma hatası, boyut, anahtarlama süresi, güç tüketimi, giriş kaybı, dönüş kaybı ve genlik bozulması faktörlerinin her biri başlık altında detaylıca açıklanmıştır. Dijital faz kaydırıcı devrelerinin bit konsepti paylaşılmış ve son olarak literatürde bulunan dijital faz kaydırıcı mimarileri incelenmiştir.

Bölüm üç de simetrik kafes devresi ile faz kaydırma işleminin mantığı ve anahtarlamalı kapasitör yapısının temelleri üzerinde bilgi verilmiştir. Devamında bu iki yapının harmanlanmasıyla elde edilen bir faz kaydırıcı tasarımı oluşturulmuş ve Matlab analizi yapılmak üzeri matematiksel formülleri çıkarılmıştır.

Bölüm dört de üçüncü bölümde tasarlanan 3 fazlı dijital faz kaydırıcı devresinin Matlab ortamında faz ve güç grafikleri incelenmiştir. Matlab ortamında elde edilen veriler doğrultusunda ADS'de tasarlanan devrenin faz ve güç grafikleri incelenerek sonuçlar paylaşılmıştır.

Bölüm beşte tezdeki çalışmalar ve performans analizleri özetlenmiş literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Bölüm altı da sonuçlar sunulmuş, gelecek çalışmalara yönelik örnekler paylaşılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Yeni Nesil İletişim Sistemleri

İletişim teknolojileri, keşfiyle birlikte sürekli geliştirilmeye çalışılmıştır. Çünkü bu keşif insanlar arası iletişimi sağlayarak bilgi paylaşımı ve bilgiye erişim noktasında insanlığa çok büyük bir hizmet sağlamaktadır. Geliştirilen yeni nesil iletişim sitemleri ise yüksek oranda artan veri ihtiyacı, düşük gecikme ve artan cihaz yoğunluğu sebebiyle sürekli geliştirilmektedir. 5G ve sonrası teknolojiler: milisaniye seviyelerinde gecikme süreleri, terabit seviyelerinde veri aktarım hızı ve milyonlarca cihazı destekleyen kapasiteye sahip olmaları hedeflenmektedir [8,9]. Bu sebeple faz kaydırma devleri, yeni nesil iletişim teknolojileri için oldukça önemlidir. Faz kaydırıcı devreler: hızlanmış ışın yönlendirme (beamforming) ve çok büyük ölçekli çoklu giriş çoklu çıkış (Massive MIMO) sistemlerinde; sinyal yönlendirmesi ve çoklu anten düzeneklerinde hız ve verimliliği optimize etmek için kullanılmaktadır [10-12].

2.1.1. Frekans Kullanımı ve Bant Genişliği

Mevcut spektrum kaynaklarının çok daha verimli kullanılması, yeni nesil iletişim teknolojilerinin temel hedeflerinden biridir. 5G öncesi sistemlerde frekans bant seviyeleri nispeten daha düşükken, yeni nesil haberleşme teknolojilerinde GHz ve üzeri frekanslarda çalışılması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde daha geniş bant genişliği elde edilerek daha yüksek veri aktarım hızlarına ulaşılmaktadır.

Yeni nesil haberleşme sistemlerinde, özellikle C-band (4–6 GHz) ve X-band (8–12 GHz) aralıkları, hem askeri hem de sivil uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. C-band genellikle 5G baz istasyonları, radar sistemleri ve uydu iletişimi gibi uygulamalarda tercih edilirken, X-band frekansları yüksek çözünürlüklü radarlar, uzay haberleşmesi ve gelişmiş faz dizili anten sistemleri için kullanılmaktadır. Bu bantlar, hem geniş bant performansı hem de düşük gürültü seviyesi gereksinimlerini karşılaması bakımından faz kaydırıcı devreler için oldukça uygundur [13,14].

Bu çalışmada tasarlanan iki farklı faz kaydırıcı devre, 4.5–5.5 GHz ve 8–12 GHz bant aralıklarında çalışacak şekilde optimize edilmiştir. 4.5–5.5 GHz aralığındaki devre, C-band anten dizileri için düşük faz hatası ve düşük ekleme kaybı hedefiyle tasarlanmıştır. 8–12 GHz

aralığındaki devre ise X-band uygulamalarında yüksek çözünürlüklü sinyal yönlendirme ve hızlı faz geçişi performansı sağlayacak şekilde geliştirilmiştir.

Frekans spektrumunun bu çeşitliliği, sinyallerin daha hassas, hızlı ve doğru yönlendirilmesini gerektirir. Faz kaydırıcı devreler, özellikle mmWave ve THz frekanslarında çalışan anten sistemlerinde olduğu gibi, bu çalışmada hedeflenen GHz seviyelerinde de hassas faz kontrolü ve sinyal zamanlaması sağlar [15,16].

Yeni nesil sistemlerde gecikme sürelerinin 1 milisaniyenin altına düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu durum, otonom araçlar, uzaktan cerrahi, savunma sistemleri ve endüstriyel otomasyon gibi uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Faz kaydırma devreleri, bu düşük gecikmeyi sağlamak için anten dizilerinde doğru zamanlama ve faz kontrolünü optimize eder. Bu nedenle, hem C-band hem de X-band aralıklarında çalışan bu tasarımlar, 5G ve ötesi (6G) haberleşme sistemleri için entegre faz kaydırıcı geliştirilmesine katkı sağlayacak niteliktedir.

2.1.2. Faz Kaydırıcı Devrelerin Çalışma Prensibi

Faz kaydırıcılar, elektromanyetik dalgaların fazını önceden belirlenmiş bir miktarda değiştirerek, ışın ve sinyal yönlendirme gibi görevleri yerine getirerek çalışır. Işın yönlendirme, faz kaydırma teknolojisi kullanılarak sinyallerin anten dizileri aracılığıyla istenen yöne yönlendirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, kapsama alanını artırırken paraziti ve istenmeyen sinyal eşleşmesini azaltır. Faz kaydırıcılar genel olarak dijital veya analog olarak sınıflandırılabilir [17, 18].

Faz kaydırıcı devreler, giriş sinyalinin genliğini değiştirmeden yalnızca faz açısını değiştirme ilkesine dayanır. Bu faz değişimi, sinyalin zaman açısından gecikmesi veya ilerlemesiyle benzer bir etki oluşturur. Faz kayması, sinyalin açısal frekansı (ω) ve oluşturulan zaman gecikmesi (τ) cinsinden matematiksel olarak $\phi = \omega\tau$ bağıntısı ile tanımlanabilir. Farklı anten elemanlarından yayılan dalgaların girişim desenleri, sinyalin fazı ayarlanarak hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu fikir, özellikle faz dizili antenlerde dalga cephesinin istenen yöne yönlendirilmesi için kullanılır.

Geçmişte, faz kaydırma işlemlerini gerçekleştirmek için mekanik faz kaydırıcılar kullanılıyordu. Bu cihazlarda, iletilen sinyalin fazı, dalga kılavuzunun fiziksel uzunluğu değiştirilerek değiştiriliyordu. Ancak, mekanik yapılar, düşük tepki süreleri, aşınma ve

kararlılık sorunları nedeniyle giderek daha fazla elektronik sistemlerle yer değiştirmiştir [19,20,21].

Analog faz kaydırıcılar, sürekli ayarlanabilir faz kaymaları sağlar. Özellikle frekans duyarlı uygulamalarda tercih edilir. Dijital faz kaydırıcılar ise kesikli faz adımları sunar (Örneğin: 45°, 90°, 180°) ve bu devreler sayısal işaret işleme teknikleriyle kombine edilir. Entegre devre teknolojileriyle kolayca üretilebilirler. Yeni nesil haberleşme sistemlerinde, dijital faz kaydırıcılar sahip oldukları teknolojik üstünlükler nedeniyle analog faz kaydırıcılara kıyasla daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu üstünlükler; yüksek hassasiyet ve kararlılık, entegre devre tasarımlarına uygunluk, hızlı ve programlanabilir kontrol imkânı ile sayısal işaret işleme sistemleriyle yüksek uyumluluk gibi özelliklerden kaynaklanmaktadır [22-24].

2.1.3. Faz Kaydırıcıların Kullanım Alanları

Faz kaydırıcılar çoklu anten dizilerinde kullanılmaktadır. Anten elemanlarının şehir içi veya uzun mesafe kapsama senaryolarına uygun şekilde optimize edilmesini sağlar. Burada ışın yönlendirme özelliği ile hem yukarı bağlantı (uplink) hem de aşağı bağlantı (downlink) sinyallerde maksimum kazanç sağlamaktadır.

Faz kaydırıcılar, elektromanyetik dalgaların şehir içi yoğun veri iletim senaryolarında belirli bir hedefe odaklanmasını sağlar. Bu odaklanma, enerji verimliliğini artırırken parazitlerin ve sinyal kayıplarının minimize edilmesine yardımcı olur. Özellikle milimetre dalga (mmWave) bantlarındaki yoğun iletişimde, faz kaydırıcıların doğruluğu kapsama alanı performansını önemli ölçüde etkiler.

Faz kaydırma teknolojisi, sinyal zamanlamasının ve doğru faz kontrolünün hassas bir şekilde yapılmasına olanak tanır. Bu, gecikmenin milisaniye altı seviyelere düşürülmesi ve veri aktarım hızlarının gigabit seviyelerini aşması için önemlidir. Örneğin, endüstriyel otomasyon uygulamalarında zamanlama hatalarını minimize eden faz kaydırma devreleri, robotik kontrol ve otonom sistemlerin senkronizasyonu için kritik rol oynar [22,25,26].

2.2. Faz Kaydırıcı Performans Kriterleri

2.2.1. Faz Kaydırma Hatası

Bir faz kaydırıcının birincil performans ölçütü faz kaydırma hatasıdır. İdeal hedef faz kaydırma değerinden faz sapması miktarı faz hatası olarak bilinir. Faz kaydırıcının ilgilenilen frekans

bandı üzerindeki maksimum faz kaydırma hatası tipik olarak verici/alıcı sistem gereksinimleri tarafından belirlenir. Kök ortalama kare (RMS) faz hatası, çok bitli faz kaydırıcıların faz kaydırma hatası performansını değerlendirmek için kullanılır. RMS faz hatasının tanımına göre,

$$RMS \text{ Faz Hatası}(f)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left|\theta_{i,hata}(f)\right|^2}{N}} \quad (2.1)$$

Burada frekansın bir fonksiyonu olarak I bit durumunun faz kaydırma hatası $\theta(f)i$, hata ile gösterilir.

Faz bit durumlarının toplam sayısı N ile gösterilir.

2.2.2. Boyut

5G faz dizi sistemleri gibi yeni nesil iletişim sistemlerinde, faz kaydırıcılar hem verici hem de alıcı taraftaki her anten ünitesinde kullanılan temel bileşenlerdir. Faz kaydırıcının boyutunun küçültülmesi, diğer parçalarla iletişimi büyük ölçüde iyileştirir ve sistem giderlerini önemli ölçüde azaltır. Bu sebeple bir faz kaydırıcının boyutunun küçük olması son derece önem arz etmektedir.

2.2.3. Anahtarlama Süresi

Bir faz kaydırıcının gerekli faz kaydırmasındaki bir değişikliğe verdiği tepki süresi, anahtarlama hızı olarak adlandırılır. Belirli uygulamaya bağlı olarak, anahtarlama hızının farklı önem seviyeleri vardır. Örneğin, faz dizili antenlerde, faz kaydırıcının anahtarlama hızı doğrudan ışın yönlendirme hızını etkiler. IC tabanlı faz kaydırıcılarda kullanılan teknoloji ve devre mimarisi, anahtarlama hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, ferrit malzemenin gecikme özellikleri, ferrit faz kaydırıcılardaki anahtarlama hızını belirlemede esastır. Analog faz kaydırıcılar, öngörüldüğü gibi, dijital faz kaydırıcılara göre önemli ölçüde daha düşük bir faz değişim oranı sergiler.

PIN diyot, CMOS ve FET transistörler gibi literatürde farklı tip faz kaydırıcılar kullanılmaktadır.

2.2.4. Güç Tüketimi

Faz kaydırıcılar, faz dizili sistemlerin hem verici hem de alıcı zincirlerinde yaygın olarak kullanıldıkları için mümkün olan en düşük güç tüketimine sahip olmalıdır. Pasif devreler doğal

olarak statik güç kullanmadığından, yeni nesil verici sistemlerinde pasif bir uygulama kullanmayı düşünmek mantıklıdır.

2.2.5. Giriş Kaybı

Giriş kaybı ideal koşullar altında istenmeyen bir durumdur, ancak pratikte sıfır giriş kaybına ulaşmak imkânsızdır. Sistem gereksinimleri, ekleme kaybının ne kadar olacağını belirler. Faz kaydırıcı bitlerinin kademeli yapısı nedeniyle, daha fazla bit gerekiyorsa daha büyük bir ekleme kaybı kabul edilmelidir. Ayrıca, daha yüksek bit sayısının gerektiği geniş bant uygulamalarında ekleme kaybı beklenenden daha büyük olabilir. Sistem, çalışma frekans aralığı boyunca düz bir faz karakteristiği veya belirli bir bit sayısıyla minimum geri dönüş kaybı gerektiriyorsa, faz kaydırıcıların daha yüksek ekleme kaybından maruz kalması muhtemeldir. Ancak, bu sorunu etkili bir şekilde telafi etmek için diğer sistem bileşenleri kullanılabilir.

2.2.6. Dönüş Kaybı

Faz kaydırıcılar sıklıkla sistemi daha karmaşık hale getirebilecek ek parçalarla birleştirilir. Bu, yalnızca bu belirli sistemler için değil, geri dönüş kaybı değerinin kritik olduğu tüm mikrodalga sistemleri için geçerlidir. Faz kaydırıcının geri dönüş kaybı, parçalarının veya sistemin bir bütün olarak çalışmasında herhangi bir arızayı önlemek için mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Geri dönüş kaybı uygun şekilde ayarlanmazsa sistemin faz ve genlik özellikleri sinyal yansımalarından etkilenebilir. Bu nedenle, kararlı çalışmayı garantilemek için faz kaydırıcılar genellikle kademeli bir sistemdeki zayıflatıcılar gibi diğer bileşenler tarafından desteklenir.

2.2.7. Genlik Bozulması

Faz kaydırıcılar teorik olarak radyo frekansı iletimlerinin genliğini değiştirmemelidir. Ancak bu beklenti gerçek dünya uygulamalarında nadiren karşılanır ve radyo frekansı (RF) sinyal genliğinde dalgalanmalar meydana gelebilir. Genellikle, faz kaydırıcının çalıştığı frekans bu genlik değişikliklerini belirler. Faz kaydırıcılar, özellikle anten huzmesinin yönlendirilmesi söz konusu olduğunda, genlik dağılımı ile ilgili karmaşık sorunlara yol açabilir. Sonuç olarak, genlik bozulmasının azaltılması faz kaydırıcı tasarımlarında çok önemli bir faktördür. Faz kaydırıcılar sistemin genel performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir, bu nedenle bu bozulmaları dengelemek için diğer sistem bileşenlerini kullanmak çok önemlidir [25,26].

2.3. Dijital Faz Kaydırıcı Yapısı

Bir dijital faz kaydırıcının girişine RF sinyali uygulandığında devrede bulunan anahtar aracılığıyla iki farklı devre meydana gelir. Bu iki devrenin giriş fazlarının farkı sayısal faz kaydırıcılarda faz kaymasını oluşturur.

Sayısal faz kaydırıcılarda faz kayma çözünürlüğü bit sayısıyla belirlenir ve her eklenen bit, çözünürlüğün iki katına çıkmasını sağlar. Tablo 1 de farklı bit sayıları için giriş fazı ve faz çözünürlüğü gösterilmektedir:

Tablo 1: Faz Kayma Çözünürlüğü

Bit Sayısı (N)	$(\frac{360}{2^N})$
1	180º
2	90º
3	45º
4	22.5º
5	11.25º

Örneğin, 3 bitli bir faz kaydırıcıda en az önemli bitin giriş fazı 45º (Tablo' da 3. satır); 4 bitli faz kaydırıcıda bu değer 22.5º (Tablo' da 4. satır); 5 bitli faz kaydırıcıda ise 11.25º (Tablo' da 5. satır) olarak belirlenir. Bu durum, sistemin hassasiyetini artırır.

Faz bitleri en uygun kombinasyonla yerleştirildiğinde, adım aralığı $\frac{360}{2^N}$ olarak tanımlanır ve böylece 2^N adımda dört bölgenin tamamı çevrelenmiş olur. 180º faz kayması her zaman sayısal faz kaydırıcının en önemli biti tarafından kontrol edilir; ancak N bitli faz kaydırıcılarda, en az önemli bit bu kaymayı $(\frac{360}{2^N})^{\circ}$ olarak denetler. Alternatif olarak, en küçük bit birim olarak düşünülebilir ve bu işlem 2^N kez tekrarlanabilir. Fakat bu yöntem daha basit görünse de N network ile karşılaştırıldığında, bu teknikten kaynaklanan giriş kayıpları 2^N network kaskad

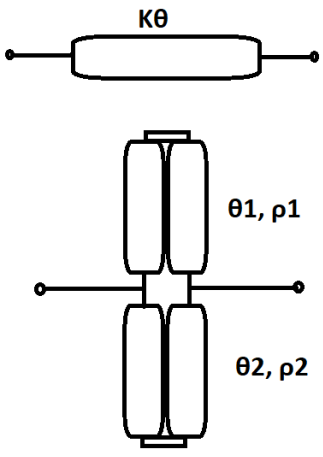
yapılarında dikkate alınmalıdır. Bu durum, N network ile kıyaslandığında kaskad yapıların sonuçlarında göz ardı edilemeyecek bir giriş kaybı yaratır [25,26].

2.4. Faz Kaydırıcı Mimarisi

Belirlenen hedeflere ulaşmak için çeşitli faz kaydırıcı topolojileri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve literatürde yer alan faz kaydırıcı çalışmalarına dair detaylı bir analiz yapılmıştır. Bu analiz sürecinde, her faz kaydırıcı türünün teknik özellikleri, avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuş; her bir topolojinin performansı, verimliliği ve uygulama alanlarına olan uygunluğu değerlendirilmiştir. Faz kaydırıcı mimarileri, kullanılan teknoloji ve uygulama gereksinimlerine göre optimize edilmiştir. Bu bağlamda, frekans aralığı, faz kayma çözünürlüğü, kayıplar ve doğruluk gibi parametreler dikkatle analiz edilmiştir. Farklı faz kaydırıcı yapılarına ilişkin değerlendirmeler, her birinin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarken, bu yapıların teknik özellikleri aşağıda detaylandırılacaktır.

2.4.1. Schiffman Faz Kaydırıcı:

Schiffman faz kaydırıcı, diferansiyel faz kaydırıcı türlerinden biridir ve iki transmisyon hattı içerir. Bu faz kaydırıcıda, dielektrik sabitinin düşük olduğu durumlarda beklenen performans elde edilemeyebilir. Dielektrik sabitinin düşük olduğu ortamlarda, faz kaydırma performansını artırmak ve istenen sonuca ulaşabilmek için paralel Schiffman faz kaydırıcı tasarımı kullanılması önerilmektedir. Şekil 1'de gösterilen paralel Schiffman faz kaydırıcı topolojisi, faz kaydırıcı devrelerde kullanılan farklı bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu devre, özellikle geniş bantlı faz kaydırma ihtiyacı duyulan uygulamalarda tercih edilmektedir [27].



Şekil 1: Schiffman Faz Kaydırıcı

2.4.2. Hat Anahtarlamalı Faz Kaydırıcılar:

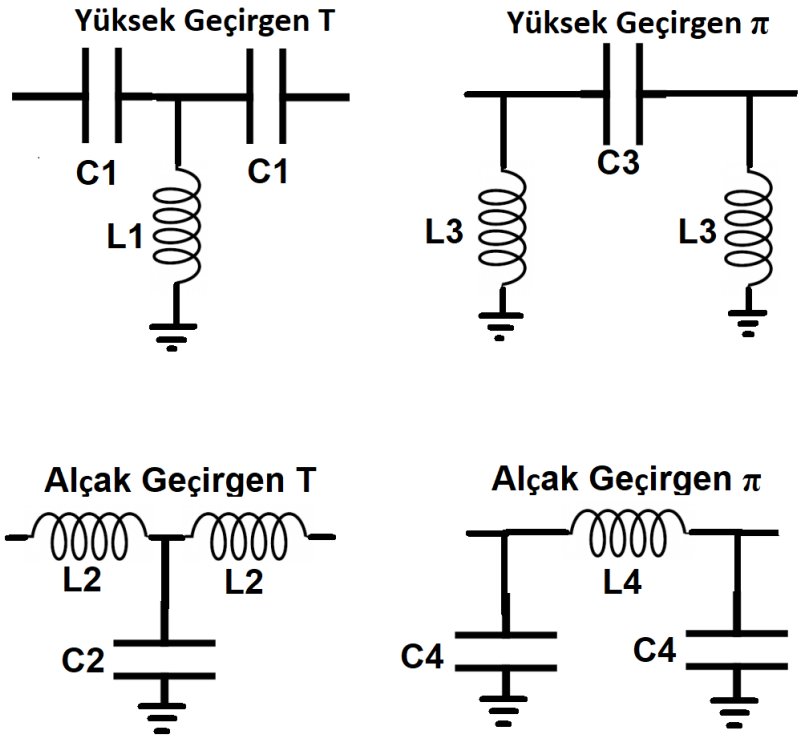
Hat anahtarlamalı faz kaydırıcılar, sinyalin fazını değiştirmek için Alan Etkili Transistör (FET), diyot veya Mikro Elektromekanik Sistemler (MEMS) gibi anahtarların kullanıldığı devrelerdir. Bu devrelerde, anahtarların giriş kayıpları, devrenin genel kayıplarının büyük bir bölümünü oluşturur. Dolayısıyla, bu faz kaydırıcıların performansı büyük ölçüde kullanılan anahtarların kalitesine ve teknik özelliklerine bağlıdır. Hat anahtarlamalı faz kaydırıcılar, özellikle hızlı faz kaydırma ve düşük gecikme süresi gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu tür devrelerin tasarımında, anahtarların optimize edilmesi büyük önem taşır [28,29].

2.4.3. Yüklü Hat Faz Kaydırıcı:

Yüklü hat faz kaydırıcıları, 0-45° arası faz kaydırmaları için tercih edilen bir devre türüdür. Bu faz kaydırıcılar, 45° ve üzerindeki faz kaydırmalarında dar bir frekans bandı ile sınırlı kalabilir. Yüklü hat faz kaydırıcılarının en önemli avantajı, dijital uygulamalara uyumlu olmalarıdır. Bu özellik, dijital sinyal işleme ve haberleşme sistemlerinde yaygın kullanım alanı bulmalarını sağlamaktadır. Faz kaydırma aralığının genişletilmesi ve frekans bandının artırılması, yüklü hat faz kaydırıcılarının performansını artırmak adına önemlidir. Bu faz kaydırıcılar, dijital teknolojilerle uyumlu olmaları sebebiyle özellikle endüstriyel ve ticari uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir [30-31].

2.4.4. Yüksek ve Alçak Geçiren Faz Kaydırıcılar:

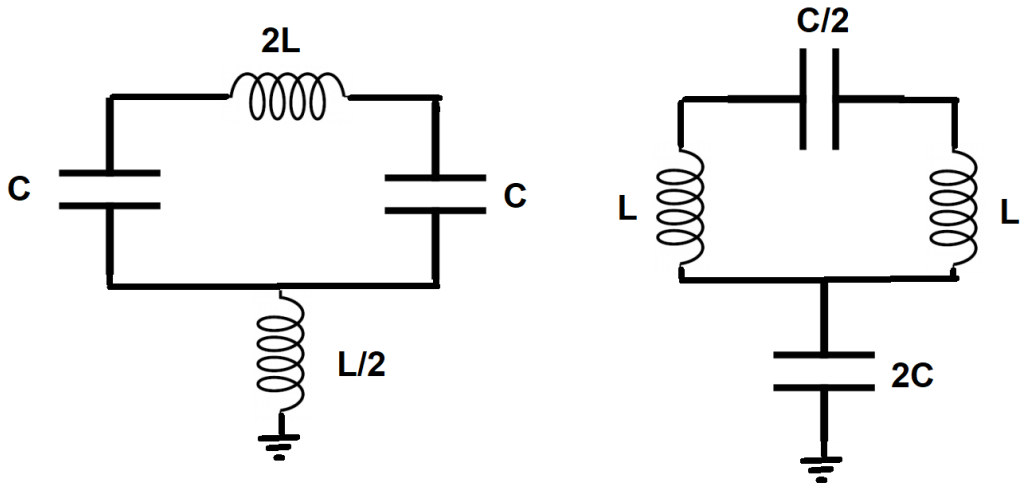
Yüksek ve alçak geçiren faz kaydırıcılar, geniş bant genişliklerinde sabit faz değişimi sağlayabilen devrelerdir. Bu tür faz kaydırıcılar hem pozitif hem de negatif faz değişimi sağlayabilme özellikleriyle dikkat çeker. Yüksek geçiren filtreler negatif faz değişimi sağlarken, alçak geçiren filtreler pozitif faz değişimi sağlamaktadır. Sonuç olarak, iki faz değişiminin toplamı, devrede elde edilen net faz değişimini belirler. Bu faz kaydırıcılar, özellikle geniş bant genişliği ve yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda tercih edilir. T tipi ve π tipi yüksek/alçak geçiren filtre blokları, literatürde yaygın olarak kullanılan tasarım yapılarına örnek olarak gösterilebilir. Şekil 2'de T tipi ve π tipi yüksek/alçak geçiren filtre bloklarının temsili diyagramları verilmiştir. Bu devreler, geniş bant faz kaydırma gerektiren iletişim sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır [26].



Şekil 2: T ve π tipi yüksek/alçak geçiren filtre blokları [23]

2.4.5. Tüm Geçiren Faz Kaydırıcılar:

Tüm geçiren faz kaydırıcı devreleri (Şekil 3), empedans uyumlu olmaları nedeniyle büyük bant genişliklerinde faz cevaplarını sentezlemek için oldukça uygundur. Tüm geçiren devrelerin empedans uyumu, geniş bantlı uygulamalarda yüksek performans sağlar ve faz kaydırma devrelerinin daha kararlı çalışmasını mümkün kılar. Tüm geçiren faz kaydırıcılar, geniş bant aralıklarında yüksek hassasiyet ve doğruluk sunar. Aşağıdaki şekillerde en yaygın kullanılan iki tüm geçiren faz kaydırıcı tasarımı gösterilmiştir: biri seri endüktörlü, diğeri ise seri kapasiteli tüm geçiren faz kaydırıcıdır. Bu devreler, geniş bant faz kaydırma ihtiyacı duyulan birçok uygulamada kullanılabilir ve özellikle düşük gecikme süresi ile yüksek faz doğruluğu sağlayan haberleşme sistemlerinde önemli bir yer tutar.



Şekil 3: Seri Endüktörlü ve Seri Kapasitörlü Tüm Geçiren Faz Kaydırıcı [26].

Bu çalışmada ele alınan faz kaydırıcı topolojileri, yeni nesil iletişim teknolojilerinin ihtiyaçlarına uygun çözümler sunmak üzere incelenmiştir. Her bir faz kaydırıcı türünün kendine has avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin, Schiffman faz kaydırıcılar, geniş bant uygulamalarında başarılı sonuçlar verirken, hat anahtarlamalı faz kaydırıcılar hızlı anahtarlama ve düşük gecikme süreleri gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Yüklü hat faz kaydırıcılar dijital uygulamalara uyumlu olmalarıyla öne çıkarken, yüksek/alçak geçiren faz kaydırıcılar geniş bantlı uygulamalarda sabit faz değişimi sağlayarak öne çıkmaktadır. Tüm geçiren faz kaydırıcılar ise empedans uyumlu olmaları sayesinde geniş bant faz kaydırma işlemlerinde büyük avantaj sağlar.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında faz kaydırıcı devre tasarımlarının geliştirilmesi ve optimize edilmesi, yeni nesil iletişim teknolojilerinin daha verimli ve hızlı çalışabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Geliştirilen faz kaydırıcı devreler, haberleşme sistemlerindeki sinyal işleme süreçlerini iyileştirerek, daha yüksek hızda veri iletimi ve daha düşük gecikme süreleri sağlayacaktır.

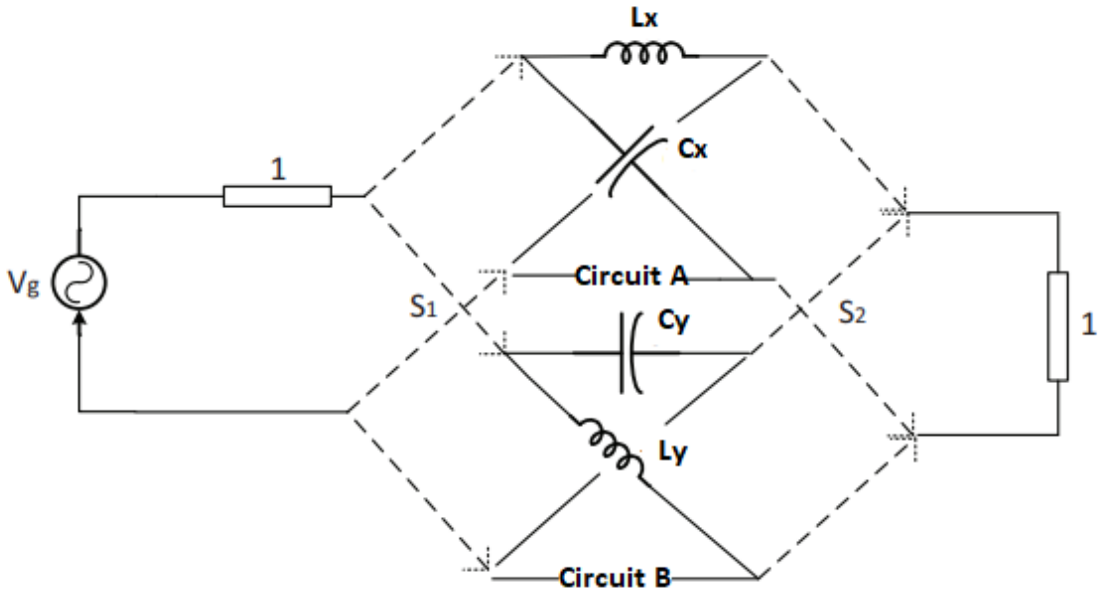
3. YÖNTEM

Dijital faz kaydırıcı devreleri, genellikle bit kavramı üzerine kuruludur. Bir sinyal devreye giriş yaptığında, iki farklı yol izleyerek iki farklı devre oluşur. Faz kayması, bu iki devrenin giriş fazları arasındaki fark ile oluşturulur. Bu fark, anahtarlama elemanları ile sağlanmaktadır. Dijital faz kaydırıcılarda kullanılan anahtarlama elemanları, devrenin performansını doğrudan etkileyen önemli unsurlardır. Bu elemanlar, sinyalin fazının nasıl değiştirileceğini belirler ve faz kaymasının hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Literatürde anahtarlama elemanı olarak genellikle MEMS anahtarları, Pozitif-Intrinsik-Negatif (PIN) diyotlar ve FET'ler ile karşılaşılmıştır. Bu çalışmada, önerilen faz kaydırıcı devresinde kullanılmak üzere anahtarlı kapasitör ve diyot seçilmiştir.

Dijital faz kaydırıcı devrelerinin tasarımında, anahtar elemanlarının devreye giriş ve çıkışlardaki kayıpları minimize etmesi önemlidir. Giriş kayıpları genellikle devrede kullanılan anahtar elemanlarının kayıplarından kaynaklanır. Bu kayıplar minimize edildiğinde, faz kayması daha verimli bir şekilde sağlanabilir. Çalışmada, dijital faz kaydırıcı devrelerinin analizi için iki kapılı devre topolojileri kullanılmıştır. İki kapılı devre topolojileri, faz kaydırma devrelerinde sinyalin giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılır.

3.1. Simetrik Kafes Devresi ile Faz Kaydırma

Dijital faz kaydırıcı devrelerinin analizi genellikle iki kapılı devre topolojileri ile yapılır. Simetrik kafes devresi, bu tür faz kaydırıcıların önemli bir örneğidir. Bir sinyal bu devreye giriş yaptığında, devrede yapılan anahtarlamalara bağlı olarak iki farklı devre oluşur. Bu iki devrede oluşan sinyal faz farkı, toplam faz kaymasını verir. Simetrik kafes devresi (Şekil 4), giriş sinyallerini iki farklı yola yönlendirir ve her iki yolun sonunda sinyal, faz kaymasıyla çıkışa ulaşır. Simetrik yapısı sayesinde, bu devre faz kaydırıcı tasarımlarında sıklıkla tercih edilir [22, 25, 26, 33-35].

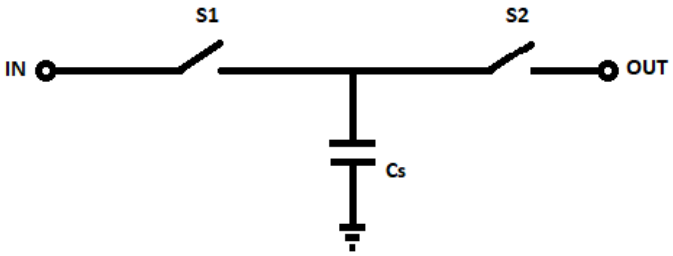


Şekil 4: Simetrik Kafes Devresi

Simetrik kafes devresi, faz kaydırıcı devrelerde yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlayan bir yapıdır. Bu devre topolojisi, özellikle yüksek frekanslarda sinyalin faz kaydırılması gerektiğinde tercih edilmektedir. Simetrik yapısı sayesinde, devrede oluşan dengesizlikler minimize edilir ve faz kaydırma işlemi daha kararlı bir şekilde gerçekleştirilir. Ayrıca, simetrik kafes devrelerinde kullanılan elemanların empedans uyumlu olması, devrede oluşabilecek faz hatalarını minimize eder ve geniş bant genişliğinde sabit faz kaydırma sağlanabilir [25,26].

3.2. Anahtarlamalı Kapasitörün Kullanımı

Bu çalışmada önerilen Devre I de anahtarlama elemanı olarak anahtarlamalı kapasitör kullanılmıştır. Anahtarlamalı kapasitör Şekil 5 de gösterilmiştir. Bu kapasitör, zaman sabitlerini kapasitörlerin oranına göre ayarlayabilme yeteneği sayesinde, faz kaydırma devrelerinde oldukça etkili bir anahtarlama elemanı olarak kullanılmaktadır. Anahtarlamalı kapasitör devresi, sinyalin geçiş yolunu değiştiren ve böylece faz kaymasını sağlayan bir anahtarlama mekanizması sunar.



Şekil 5: Anahtarlamalı Kapasitör

Anahtarlamalı kapasitör devresi, faz kaydırıcı devrelerde zaman sabitlerini kontrol etmek için kullanılır. Bu devrede, anahtarlama elemanı olarak kullanılan kapasitörler, sinyalin fazını değiştirmek için kullanılır. Kapasitörlerin oranları, faz kaymasının miktarını belirler ve devrede istenilen faz kayması bu oranlarla hassas bir şekilde ayarlanabilir. Bu çalışmada kullanılan anahtarlamalı kapasitörün eşdeğer direnci hesaplaması denklem 3.1 de verilmiştir.

$$R_{eş}=\frac{V_{in-out}}{I_{in-out}}=\frac{(V_{in}-V_{out})}{Cs(V_{in}-V_{out})}=\frac{1}{Csf} \quad (3.1)$$

Bu formüle göre, R=0.2 Ω seçildiğinde, f=5GHz için Cs=1nF bulunmuştur. Bu değer, tasarlanan faz kaydırıcı devrede kullanılmıştır.

Anahtarlamalı kapasitör devresi, yüksek frekanslı uygulamalarda faz kaydırma işleminin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca, bu devre elemanının kullanılması, devrenin güç tüketimini azaltır ve verimliliği artırır. Anahtarlamalı kapasitörlerin hızlı anahtarlama yeteneği, faz kaydırıcı devrelerde yüksek hız gerektiren uygulamalar için idealdir [36-38].

S_1 ve S_2 anahtarlarının benzetimi için 180nm TSMC 0.18 µm NMOS transistörleri tercih edilmiştir. RF ve mikrodalga entegre devrelerinde anahtarlama elemanı olarak en çok tercih edilen yarıiletken elemanlar arasındadır.

Açık durumda (V_{GS}=1.8 V), transistörün davranışını belirleyen en baskın parametre kanal direncidir (Ron). TSMC 0.18 µm sürecinde bu direnç 7.5 Ω ile 60 Ω aralığında değişmektedir. Çalışmada optimum anahtarlama performansı elde edebilmek için Ron=7.4667 Ω değeri kullanılmıştır.

Kapalı durumda (VGS=0 V), transistör esas olarak bir kapasitör gibi davranır ve dren–source uçları arasında Coff kapasitansı oluşur. Bu durumda MOSFET'in modellemesinde aktif eleman bu kapasitans olmaktadır. TSMC 0.18 µm süreci için Ron×Coff çarpımı sabit bir değere sahiptir ve literatürde denklem 3.2 de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Ron}(\Omega)\times\text{Coff}(\text{F})=672\times10^{-15} \qquad (3.2)$$

Bu sabit ilişki dikkate alınarak, seçilen Ron değeri için uygun Coff=90 fF kapasitans değeri belirlenmiştir [25].

Elde edilen bu parametrelerle oluşturulan CMOS anahtar modeli üzerinden, faz kaydırıcının iki temel çalışma modu olan Durum-A ve Durum-B analizleri bir sonraki bölümde detaylı biçimde incelenmiştir.

3.3. PIN Diyot Kullanımı

Önerilen Devre II de anahtarlama elemanı olarak PIN diyot kullanılmıştır. PIN diyotlar; yüksek frekanslı çalışma, hızlı anahtarlama süreleri ve minimum ek devre karmaşıklığı gibi avantajları nedeniyle faz kaydırma devrelerinde oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Kullanılan PIN diyot eleman değerleri 8-12 GHz bant aralığında çalışmaya uygun şekilde oluşturulmuştur. Kullanılan PIN diyot modeli Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2 : PIN Diyot Benzetim Eleman Değerleri

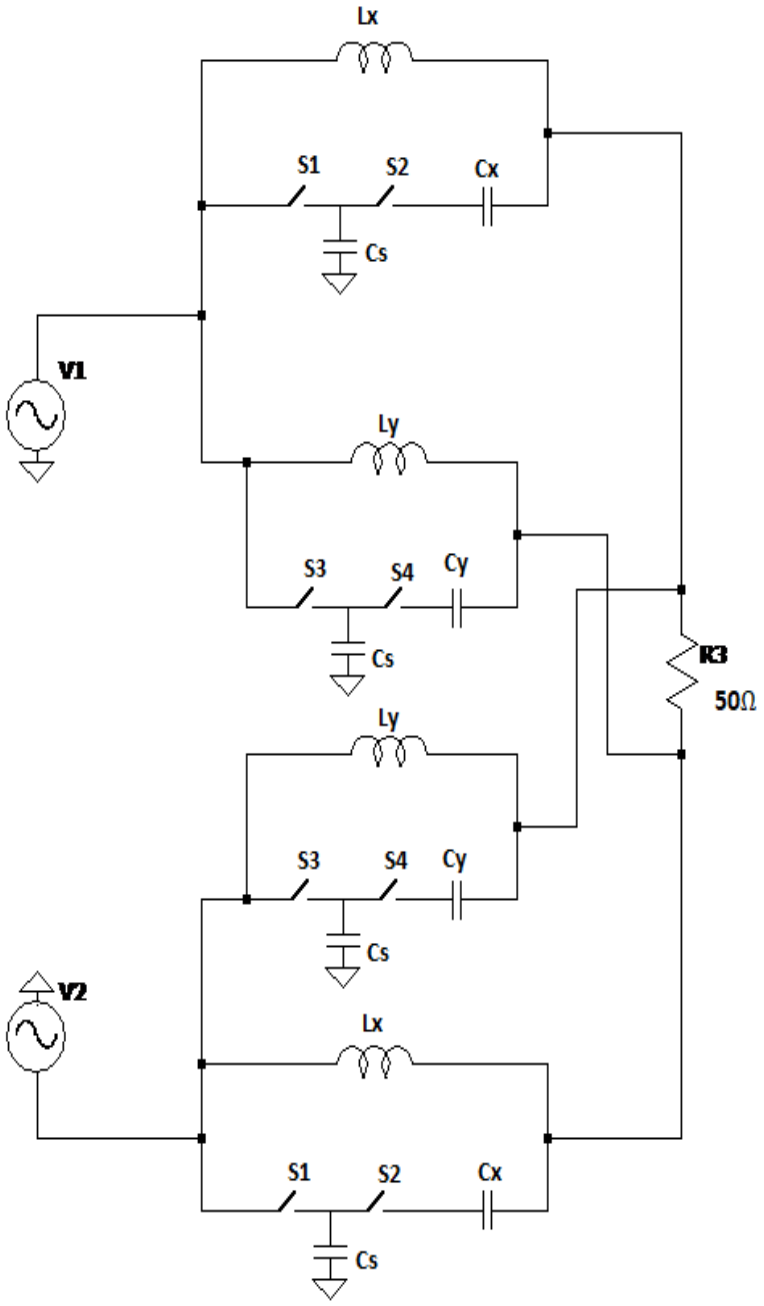
Parametre	Değer
İleri Akım (I_F)	250 mA
İleri Direnç (R_f)	0.4 Ω
Ters Direnç (R_r)	1 kΩ
Paralel Diyot Kapasitesi (C_D)	0.168 pF

Tabloda verilen değerler kullanılarak ADS programında diyotun hem açık hem de kapalı

durumu simüle edilmiştir. PIN diyot açık durumdayken bir direnç ile modellenerek (R_f) düşük dirençli bir anahtar görevi görür. Kapalı durumda ise izolasyon koşulu küçük bir kapasitans (C_D) ve yüksek bir ters direnç (R_r) ile temsil edilir [22].

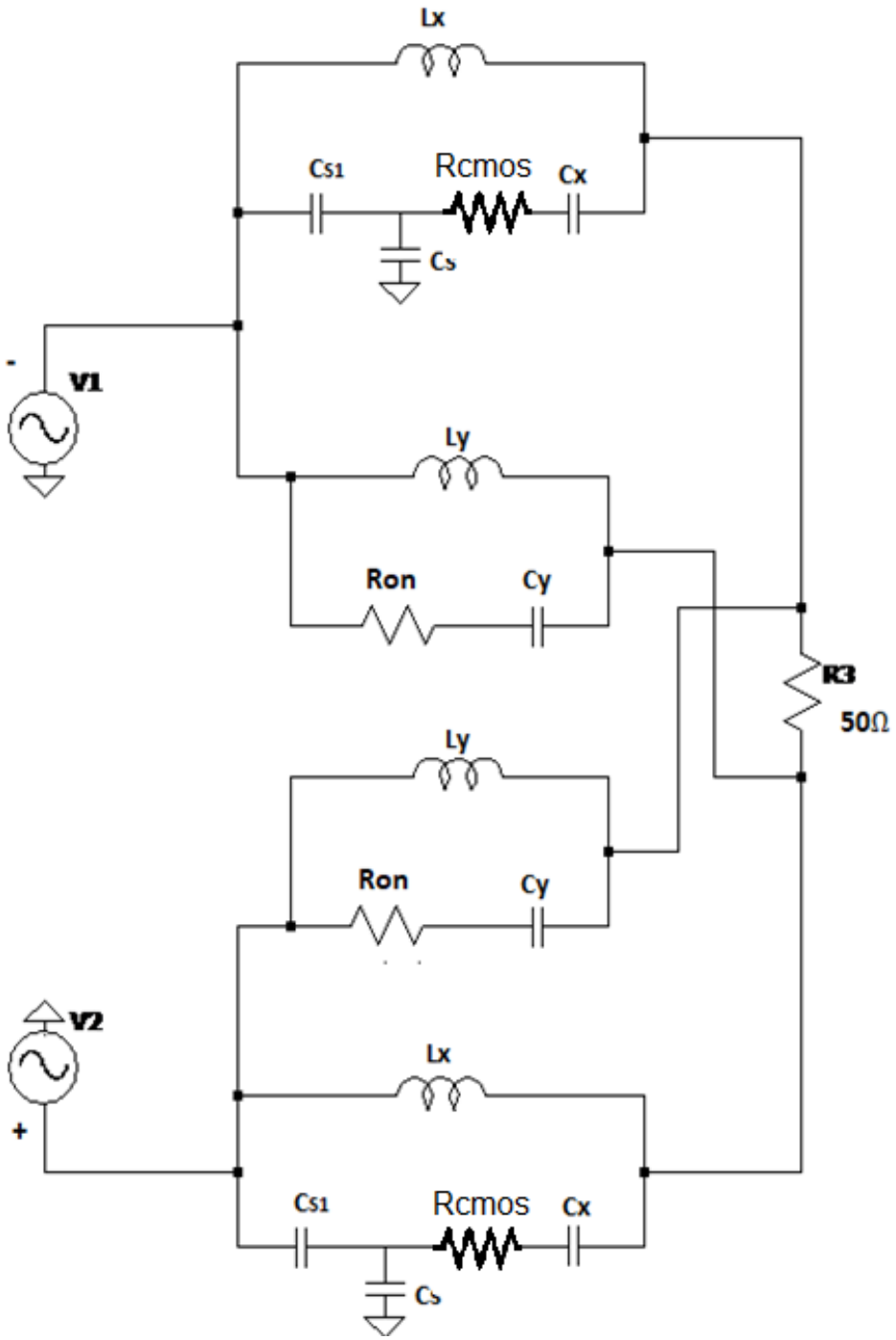
3.4. Simetrik Kafes Devresi ve Anahtarlamalı Kapasitör ile Tasarlanan Faz Kaydırıcı Devre I Modeli

Bu çalışmada, anahtarlamalı kapasitör ve simetrik kafes faz kaydırıcı prensiplerine dayanan bir faz kaydırıcı devre tasarlanmıştır. Şekil 6 da önerilen simetrik kafes devresi ve bu devrenin Şekil 7 de A ve Şekil 8 de B devreleri verilmiştir. Devredeki anahtarlama, anahtarlamalı kapasitör ile yapılmıştır.



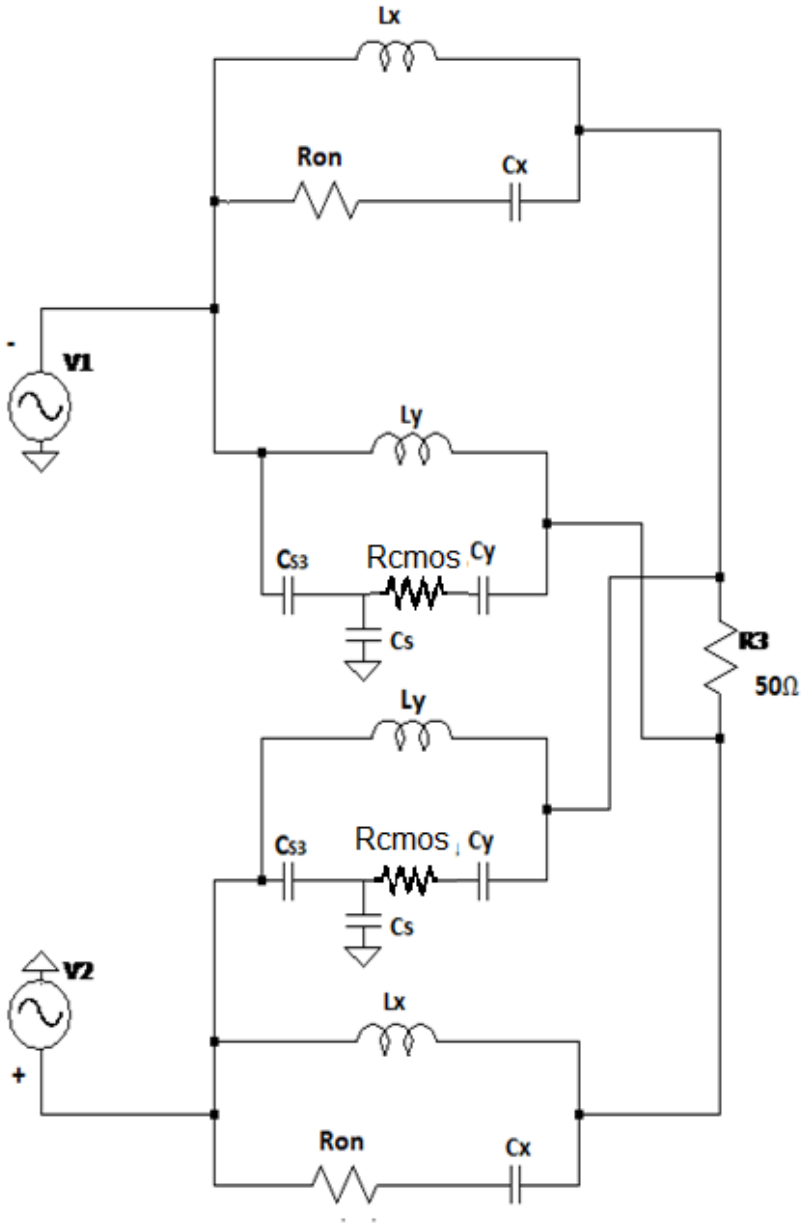
Şekil 6: Önerilen Devre I: simetrik LC kafes devresi.

Eğer S1&S4 kapalı, S2&S3 açık ise B devresi oluşur. Eğer S1&S4 açık ve S2&S3 kapalı ise A devresi oluşur. Bu sayede sinyal, iki farklı yoldan ilerleyerek farklı faz kaymaları oluşturur ve toplam faz kayması hesaplanır.



Şekil 7: Önerilen Devre I A devresi.

A devresi Şekil 7 de gösterilmiştir. Anahtarın kapalı olması durumu bir direnç değeri göstermektedir. Bu çizilen devrede Ron olarak isimlendirilmiştir. Anahtarın açık olması durumunda ise kapasitif bir değer gözlemlenmektedir. Bu devrede C_{S1} olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 8: Önerilen Devre I devresi B devresi.

B devresi (şekil 8) A devresinde bahsedildiği şekilde anahtarın kapalı olması durumu bir direnç değeri göstermektedir. Bu çizilen devrede Ron olarak isimlendirilmiştir. Anahtarın açık olması durumunda ise kapasitif bir değer gözlemlenmektedir.

Bu devre topolojisi, sinyalin farklı yollar izlemesi sonucu faz kaymasının dinamik olarak değiştirilebilmesini sağlar. Anahtarlamalı kapasitör kullanımı, devrenin düşük güç tüketimi ile çalışmasını ve hızlı faz kayması sağlanmasını mümkün kılar. Simetrik kafes yapısı ise, devrenin dengeli ve güvenilir çalışmasını sağlar.

3.4.1. Devre I MATLAB Simülasyonu için Empedans Hesaplamaları

MATLAB programında faz kaydırıcı devrenin simülasyonunu gerçekleştirmek için, her bir koldaki empedans değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu empedans değerleri, sinyalin devrede nasıl ilerleyeceğini ve faz kaymasının ne kadar olacağını belirler. Aşağıda her bir kol için empedans hesaplamaları verilmiştir.

Kapasitör ve indüktörler sırasıyla denklem 3.3 ve 3.4 de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$Z_C=\frac{1}{j\omega C} \tag{3.3}$$

$$Z_L= j\omega L \tag{3.4}$$

A devresi için C_T değerinin hesaplaması denklem 3.5 de verilmiştir.

$$C_{par} = R_{cmos} + \frac{1}{j\omega(C_x+C_S)} \tag{3.5}$$

C_{S1} ile seri 3.6 da ifade edilmiştir.

$$C_{T,\,A}= \frac{C_{par}C_{S1}}{C_{par}+C_{S1}} \tag{3.6}$$

Devre A de alt ve üst koların paralel eşdeğeri bulunarak toplam giriş empedansı denklem 3.7 de gösterilmiştir.

$$Z_{in,A} = Z_{\text{üst}}Z_{alt} \tag{3.7}$$

Üst kolda indüktör L_x ile eşdeğer kapasitans C_T paralel bağlıdır. Bu işlem denklem 3.8 de verilmiştir.

$$Z_{\text{üst}} = \frac{Z_{LX}Z_{CT}}{Z_{Lx}+Z_{CT}} \tag{3.8}$$

Alt kolda indüktör L_y, seri bağlı R_{on} + Z_{Cy} ile paralel bağlanmıştır. Be denklem 3.9 da ifade edilmiştir.

$$Z_{alt} = \frac{Z_{Ly}(R_{on}+Z_{Cy})}{Z_{Ly}+(R_{on}+Z_{Cy})} \tag{3.9}$$

Devre A toplam empedansı denklem 3.10 da verilmiştir.

$$Z_{in,A} = \frac{Z_{Lx}Z_{CT}}{Z_{Lx}+Z_{CT}} + \frac{Z_{Ly}(R_{on}+Z_{Cy})}{Z_{Ly}+(R_{on}+Z_{Cy})} + R3 \quad (3.10)$$

Devre B için toplam C_T değeri hesaplaması yapılmıştır. C_{S2} ve C_x'nin seri eşdeğeri denklem 3.11 de verilmiştir.

$$C_{S2x}=\frac{C_{S2}C_x}{C_{S2}C_x} \quad (3.11)$$

Bu eşdeğerin C_S ile paralel eşdeğeri denklem 3.12 de verilmiştir.

$$C_{par} = C_{S2x} + C_s \quad (3.12)$$

C_{par} ile C_{s1} seri kombinasyonu denklem 3.13 deki gibi hesaplanmıştır.

$$C_{T,\,B}= \frac{C_{par}C_{S1}}{C_{par}+C_{S1}} \quad (3.13)$$

Devre B toplam giriş empedansı, alt ve üst kolların paralel eşdeğerinden oluşmaktadır. Bu ifade denklem 3.14 de verilmiştir.

$$Z_{in,B} = Z_{\text{üst}}Z_{alt} \quad (3.14)$$

Üst kolda indüktör L_x, direnç R_{on} ve kondansatör C_x bulunmaktadır. İndüktör L_x, seri bağlı $R_{on}+Z_{cx}$ ile paraleldir. Bunun sonucunda üst kolun eşdeğer empedansı denklem 3.15 de verilmiştir.

$$Z_{\text{üst}}\,\frac{Z_{Lx}(R_{on}Z_{Cx})}{Z_{Lx}(R_{on}Z_{cx})} \quad (3.15)$$

Alt kolda indüktör C_T ile L_y eşdeğer kapasitansı paralel bağlıdır. Bunun sonucunda alt kolun empedansı denklem 3.16 da verilmiştir.

$$Z_{alt}\,\frac{Z_{Ly}Z_{CT}}{Z_{Ly}+Z_{CT}} \quad (3.16)$$

Sonuç olarak, Devre B'nın toplam empedansı denklem 3.17 de verilmiştir.

$$Z_{in,B} = \frac{Z_{Lx}(R_{on}+Z_{cx})}{Z_{Lx}+(R_{on}+Z_{cx})} + \frac{Z_{Ly}Z_{CT}}{Z_{Ly}+Z_{CT}} + R3 \quad (3.17)$$

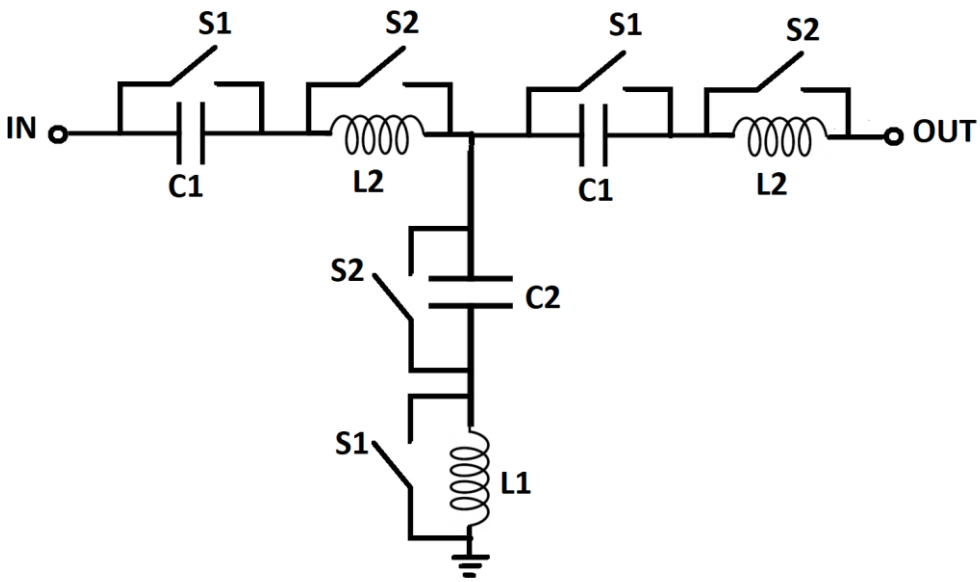
Bu empedans hesaplamaları, devrenin her iki yolunda sinyalin ilerleme şeklini belirler ve toplam faz kaymasının ne kadar olacağını gösterir. MATLAB simülasyonunda bu empedans değerleri kullanılarak faz kaydırıcı devrenin performansı modellenmiştir. Simülasyon sonuçları, devrenin faz kaydırma kabiliyetini ve farklı frekanslardaki performansını ortaya koymaktadır.

Faz kaydırıcı devreler, modern iletişim ve sinyal işleme sistemlerinin önemli bileşenleri arasında yer alır. Bu devreler, özellikle RF ve mikrodalga alanlarında, belirli bir sinyalin fazını değiştirerek çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bir 3-bit dijital faz kaydırıcı devresi, MATLAB ortamında performans değerlendirmesi amacıyla tasarlanmış ve sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

3.5. Simetrik-T ve PIN Diyot ile Tasarlanan Faz Kaydırıcı Devre II Modeli

Simetrik bir T devresi, belirli devre bileşenlerinin giriş ve çıkış portları arasında T şeklinde bir konfigürasyonda düzenlenmesiyle oluşturulur. Bu topoloji hem empedans uyumunu hem de farklı ağ konfigürasyonları aracılığıyla hassas faz kaymalarının oluşturulmasını kolaylaştırdığı için avantajlıdır. Bu araştırmada 5,125°, 11,25°, 22,5°, 45°, 90° ve 180° olmak üzere altı farklı faz kayması elde edilmiştir. Her hedef faz kayması için iki farklı devre koşulu geliştirildi ve bu yapılandırmalar PIN diyotları kullanılarak seçilebilir hale getirilmiştir.

Önerilen simetrik T faz kaydırma devresinin genel blok diyagramı ve ayrıntılı şeması Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu devre, PIN diyotlar aracılığıyla belirli LC bileşenlerini etkinleştirip devre dışı bırakarak iki farklı topoloji arasında geçiş yapacak şekilde tasarlanmıştır. İstenen her faz kayması değeri, iki ayrı anahtarlama koşulunun (Devre A ve Devre B) faz tepkisi karşılaştırılarak elde edilir. Bu iki koşul arasındaki faz açısı uyuşmazlığı genel faz kayması sonucunu verir.



Şekil 9 : Önerilen T topolojisi devresi.

Eğer S1 kapalı, S2 açık ise A devresi oluşur. Eğer S1 açık ve S2 kapalı ise B devresi oluşur. Bu sayede iki farklı devre oluşturularak, bu devreler içinde ilerleyen sinyal farklı faz kaymaları oluşturur ve toplam faz kayması hesaplanır.

Bu devrede anahtar olarak diyot kullanılmıştır. 3.3' de diyotun özellikleri ve kullanımı bahsedilmiş.

Simetrik-T faz kaydırıcının endüktans (L) ve kapasitans (C) değerleri, karakteristik empedans Z_0, açısal frekans $\omega = 2\pi f$ ve istenen faz kayması θ'nın fonksiyonları olarak hesaplanabilir [20]. Bunlar denklem 3.18, 3.19, 3.20 ve 3.21 de gösterilmiştir.

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0 Z_0 \tan\left|\frac{\theta}{2}\right|} \tag{3.18}$$

$$L_1 = \frac{Z_0 \times \tan\left|\frac{\theta}{2}\right|}{\omega_0} \tag{3.19}$$

$$C_2 = \frac{\sin|\theta|}{\omega_0 Z_0} \tag{3.20}$$

$$L_2 = \frac{Z_0}{\omega_0 \times \sin|\theta|} \tag{3.21}$$

Burada:

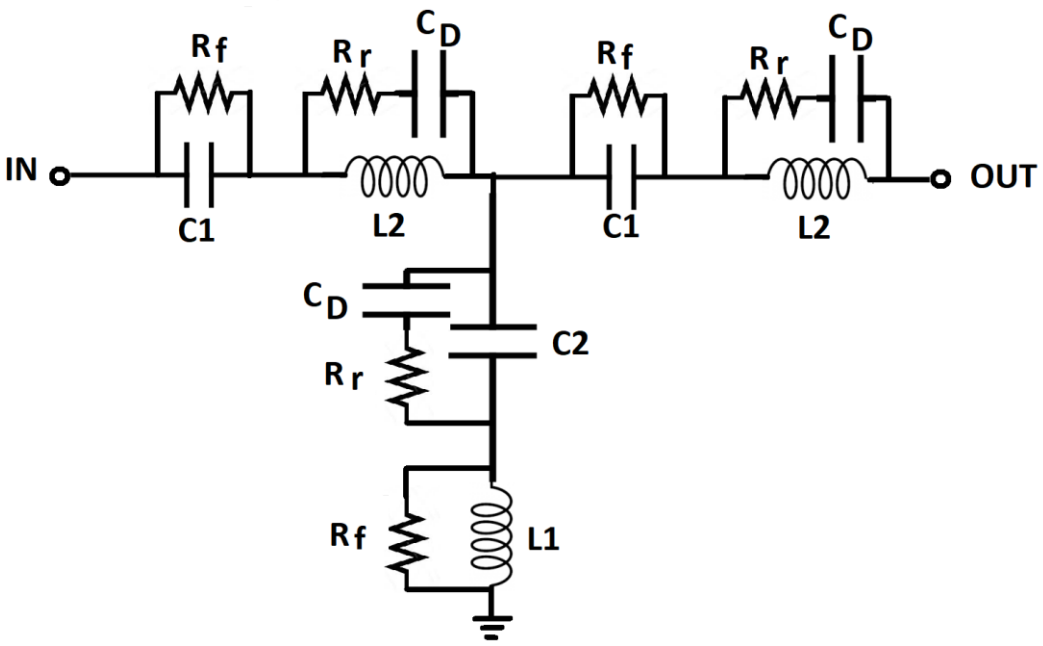
Z_0: Karakteristik empedans (ohm) (Ω)

$\omega_0 = 2\pi f_0$: Merkez frekans f_0'deki açısal frekans, radyan/saniye (rad/s) cinsinden

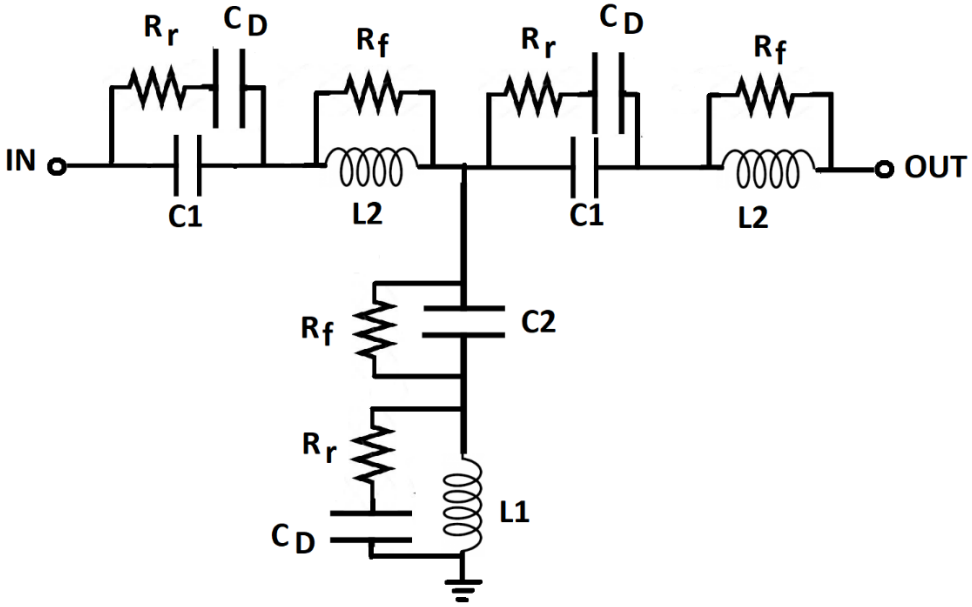
θ: İstenen faz kayması (radyan)

L: Endüktans (henry) (H)

C: Kapasitans faradlar (F)



Şekil 10 : Önerilen T topolojisi A devresi.



Şekil 11: Önerilen T topolojisi B devresi.

3.5.1. Devre II MATLAB Simülasyonu için Empedans Hesaplamaları

Şekil 10 da verilen önerilen T topolojisi A devresinin giriş empedansı, elemanların eşdeğer empedansları üzerinden türetilmiştir. Kapasitör ve indüktörler sırasıyla denklem 3.22 ve 3.23 deki gibi tanılanır.

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \tag{3.22}$$

$$Z_L = j\omega L \tag{3.23}$$

Giriş kolu empedansı sırasıyla 3.24, 2.25, 3.26, 3.27 ve 3.28 deki gibi hesaplanmıştır.

$$Z_{R_r C_D} = R_r + Z_{C_D} \tag{3.24}$$

$$Z_{\text{paralel-L2}} = \frac{R_{R_r - C_D} \cdot Z_{L2}}{R_{R_r - C_D} + Z_{L2}} \tag{3.25}$$

$$Z_{C1-R_f} = \frac{Z_{C1} R_f}{Z_{C1} + R_f} \tag{3.26}$$

$$Z'_{\text{giriş}} = Z_{C1}\text{-}R_f + Z_{paralel-L2} \tag{3.27}$$

$$Z_{giriş} = Z'_{giriş} + 50\Omega \tag{3.28}$$

Orta Şönt kolun empedansı hesabı 3.29, 3.30, 3.31 ve 3.32 verilmiştir.

$$Z_{R_r - C_D} = R_r + Z_{C_D} \tag{3.29}$$

$$Z_{\text{şönt}} = \frac{R_{R_r - C_D} \cdot Z_{C2}}{R_{R_r - C_D} + Z_{C2}} \tag{3.30}$$

$$Z_{R_{f-L_1}} = \frac{Z_{L1} R_f}{Z_{L1} + R_f} \tag{3.31}$$

$$Z_{alt} = Z_{şönt} Z_{R_f - L1} \tag{3.32}$$

Sağ kol empedansı 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 ve 3.37 hesaplanmıştır.

$$Z_{R_r - C_D} = R_r + Z_{C_D} \tag{3.33}$$

$$Z_{\text{paralel-L2}} = \frac{R_{R_r - C_D} \cdot Z_{L2}}{R_{R_r - C_D} + Z_{L2}} \quad (3.34)$$

$$Z_{C1-R_f} = \frac{Z_{C1} R_f}{Z_{C1} + R_f} \quad (3.35)$$

$$Z_{sag} = Z_{R_f - C_1} + Z_{paralel-L2} \quad (3.36)$$

$$Z_{yük} = Z_{sağ} + 50\ \Omega \quad (3.37)$$

Şönt kol ile sağ kol paralellik denklem 3.38 verilmiştir.

$$Z_{düğüm} = \frac{Z_{alt} R_{yük}}{Z_{alt} + R_{yük}} \quad (3.38)$$

Toplam giriş empedansı 3.39 gösterilmiştir.

$$Z_{giriş-toplam} = Z_{giriş} + Z_{düğüm} \quad (3.39)$$

Şekil 11 de verilen önerilen T topolojisi B devresinin giriş empedansı, elemanların eşdeğer empedansları üzerinden türetilmiştir.

Giriş kolu empedansı denklem 3.40, 3.41, 3.42 ve 3.43 hesaplanmıştır.

$$Z_{R_f C_D} = R_f + Z_{C_D} \quad (3.40)$$

$$Z_{par1} = \frac{Z_{R_f C_D} Z_{C1}}{Z_{R_f C_D} + Z_{C1}} \quad (3.41)$$

$$Z'_{giriş} = Z_{par1} + \frac{R_f Z_{L2}}{R_f + Z_{L2}} \quad (3.42)$$

$$Z_{giriş} = Z'_{giriş} + 50\Omega \quad (3.43)$$

Orta Şönt kolu denklem 3.44, 3.45, 3.46 ve 3.47 de hesaplanmıştır.

$$Z_{C2R_f} = \frac{R_f Z_{C2}}{R_f + Z_{C2}} \quad (3.44)$$

$$Z_{R_rC_D}=R_r + Z_{C_D} \tag{3.45}$$

$$Z_{par2} = \frac{Z_{R_rC_D}Z_{L1}}{Z_{R_rC_D}+Z_{L1}} \tag{3.46}$$

$$Z_{şönt}=Z_{C2Rf} + Z_{par2} \tag{3.47}$$

Sağ kol empedansı denklem 3.48, 3.49, 3.50 ve 3.51 deki gibi hesaplanmıştır.

$$Z_{R_rC_{D2}}=R_r + Z_{C_D} \tag{3.48}$$

$$Z_{par3} = \frac{Z_{R_rC_D}Z_{C1}}{Z_{R_rC_D}+Z_{C1}} \tag{3.49}$$

$$Z'_{çıkış} = Z_{par3}\frac{R_fZ_{L2}}{R_f+Z_{L2}} \tag{3.50}$$

$$Z_{çıkış} = Z'_{çıkış} + 50\Omega \tag{3.51}$$

Merkezi düğüm denklem 3.52 deki gibi hesaplanmıştır.

$$Z_{düğüm} = \frac{Z_{şönt}Z_{çıkış}}{Z_{şönt}+Z_{çıkış}} \tag{3.52}$$

Toplam giriş empedansı denklem 3.53 de gösterilmiştir.

$$Z_{giriş-toplam} = Z_{giriş} + Z_{düğüm} \tag{3.53}$$

4. BULGULAR

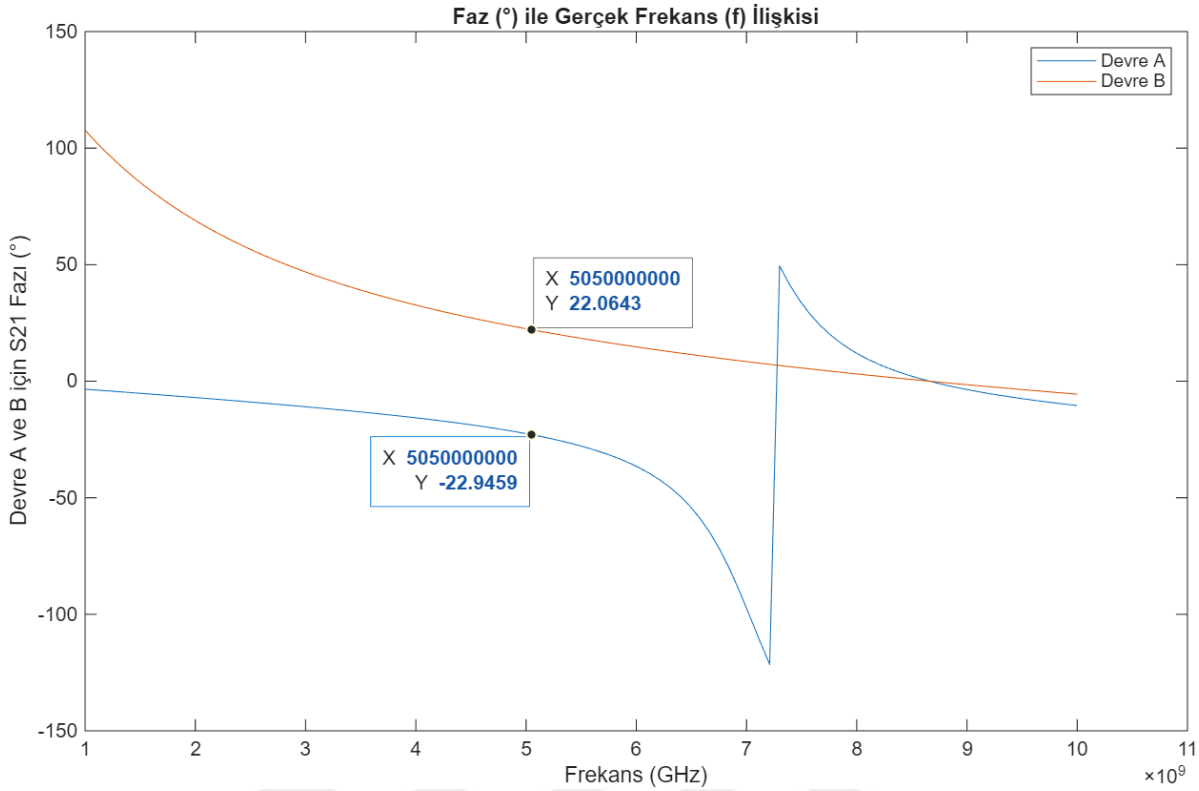
Bu bölümde, faz kaydırıcı devresinin MATLAB ve Advanced Design System (ADS) simülasyonları kullanılarak yapılan performans değerlendirmesi sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır. Bu veriler, devrenin tasarım hedeflerine ne kadar yaklaştığını ve farklı faz kaydırma açılarında nasıl performans gösterdiğini ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır.

4.1. Önerilen Devre I

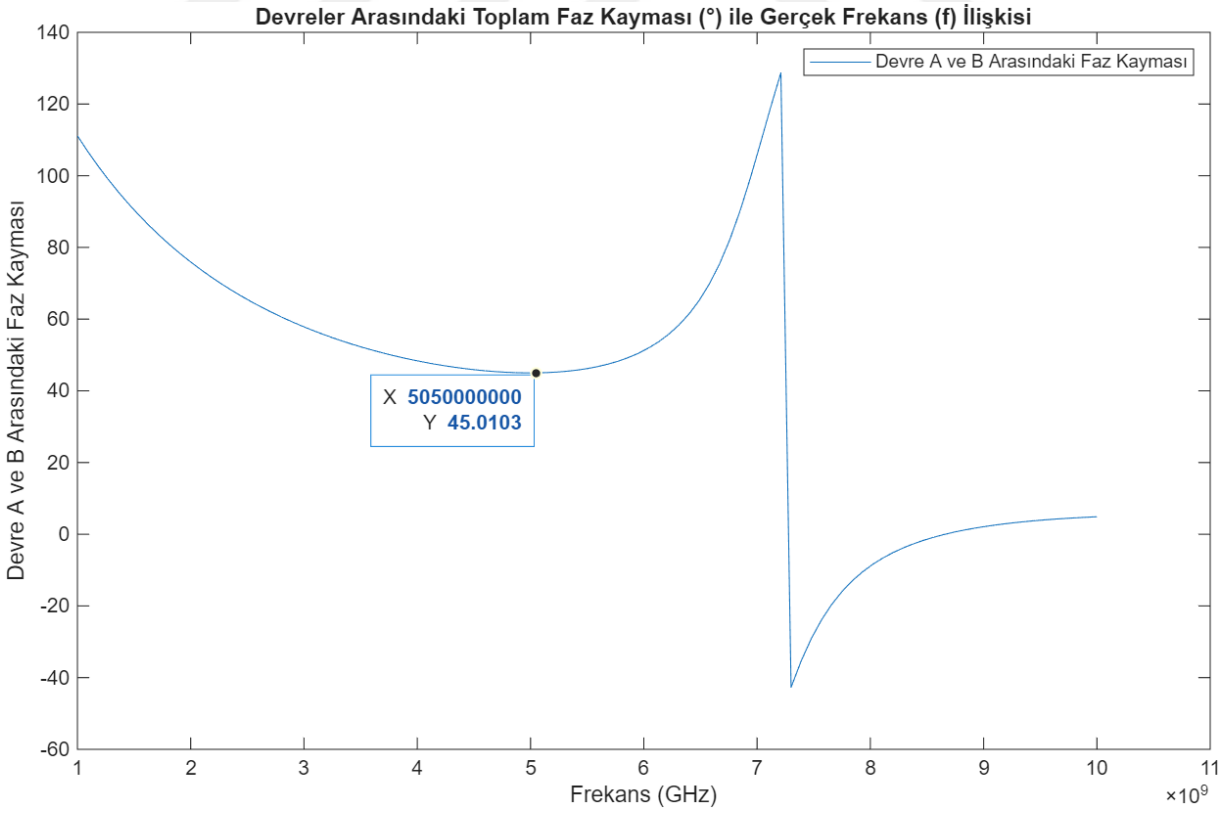
Öncelikle, önerilen 3-bit dijital LC Simetrik kafes faz kaydırıcı devresi MATLAB programında simüle edilmiştir. Bu simülasyon, devrenin 5 GHz frekansta faz kaydırma kapasitesini değerlendirmek için yapılmıştır.

Bölüm 3'te önerilen devrenin sinyalin ilerleme yoluna göre oluşturduğu A ve B devresinin empedans hesabı yapılmıştı. Oluşturulan bu empedans denklemleri MATLAB programında grafik analizleri yapılmak üzere yazılımında kullanılmıştır. Burada ise 45°, 90°, ve 180° için faz kaydırma grafikleri çizdirilerek analizi yapılacaktır.

İlk olarak 45° analizi yapılmıştır. Toplam 45° faz kaydırması için yapılan simülasyon Şekil 12 de gösterilmektedir. Devre A için elde edilen faz kaydırması -22,95° olurken, Devre B 22,06° faz kaydırması sağlamıştır. Bu iki devre arasındaki faz farkı şu şekilde hesaplanmıştır: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı +45°'dir. Bu hesaplanan sonucu yansıtan devreler arasındaki toplam faz farkı grafiği Şekil 13 de verilmiştir.

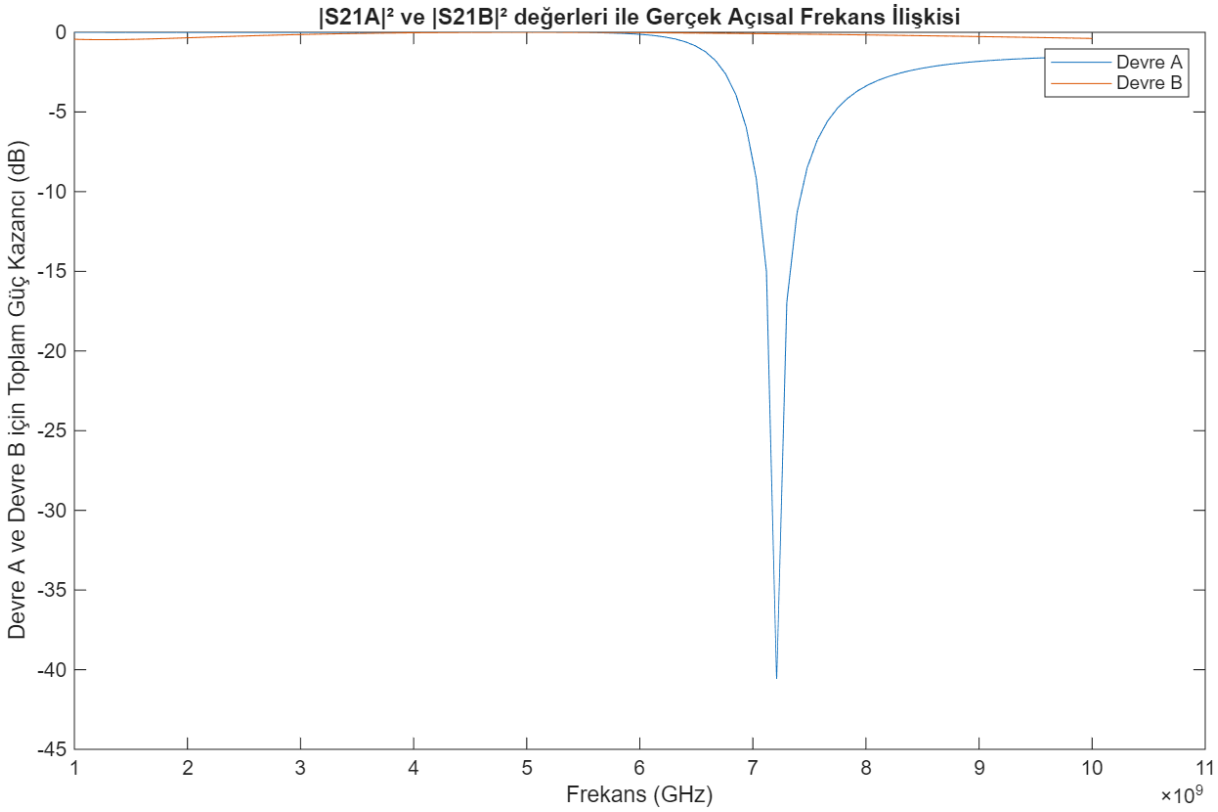


Şekil 12: Devre I 45° için Matlab simülasyonu faz grafiği



Şekil 13: Devre I 45° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

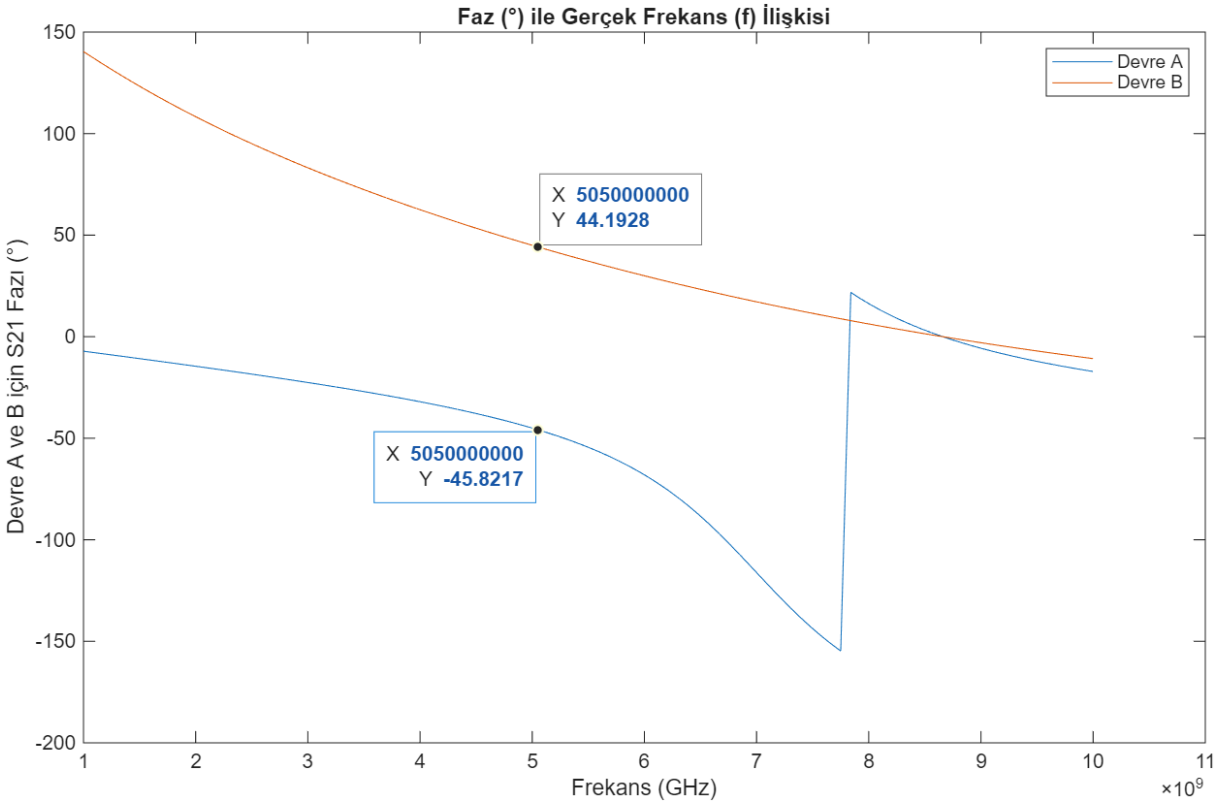
Şekil 14'te sunulan güç aktarım kazancı grafiğinde, Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Her iki devre için de 1-6 GHz bant aralığında güç aktarım kaybının olmadığını, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, devrelerin geniş bant aralığında sinyal iletimi sırasında kayıp olmadan çalıştığını, yani verimli bir şekilde güç aktarımı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu özellik, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda sinyal kalitesini korumak için önemlidir ve tasarımın güçlü bir performansa sahip olduğunu doğrulamaktadır. Bu da devrelerin istikrarlı ve güvenilir olduğunu kanıtlar.



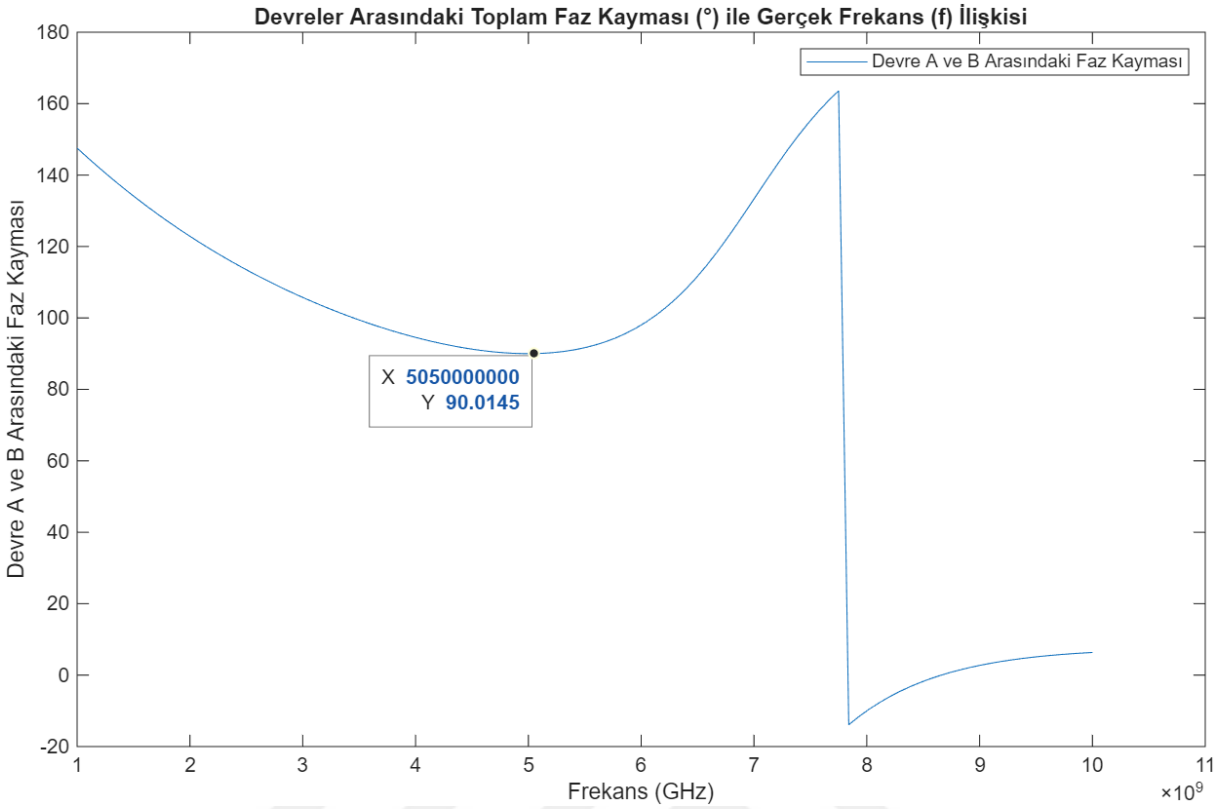
Şekil 14: Devre I 45° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

Bu yapılandırma, beklenen 45° faz kaydırmasının sağlandığını göstermektedir. Faz kaydırma devresi, iki farklı devre yolunda sinyalin iletilmesi ile sağlanan bu fark sayesinde, dijital faz kaydırıcı mekanizmasının doğruluğunu ve hassasiyetini ortaya koymaktadır. Her iki devre de belirlenen faz kaydırma değerlerine yakın sonuçlar vermiştir ve bu da tasarımın teorik olarak beklenen performansla uyumlu olduğunu göstermektedir.

İkinci olarak, toplam 90° faz kaydırması için yapılan simülasyon sonuçları Şekil 15'de sunulmuştur. Bu durumda, Devre A -45,82° faz kaydırması elde ederken, Devre B 44,19° faz kaydırması sağlamıştır. Bu iki devre arasındaki faz farkı şu şekildedir: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı yaklaşık +90°'dir. 90° için iki devre arasındaki faz farkı grafiği Şekil 16'da verilmiştir.

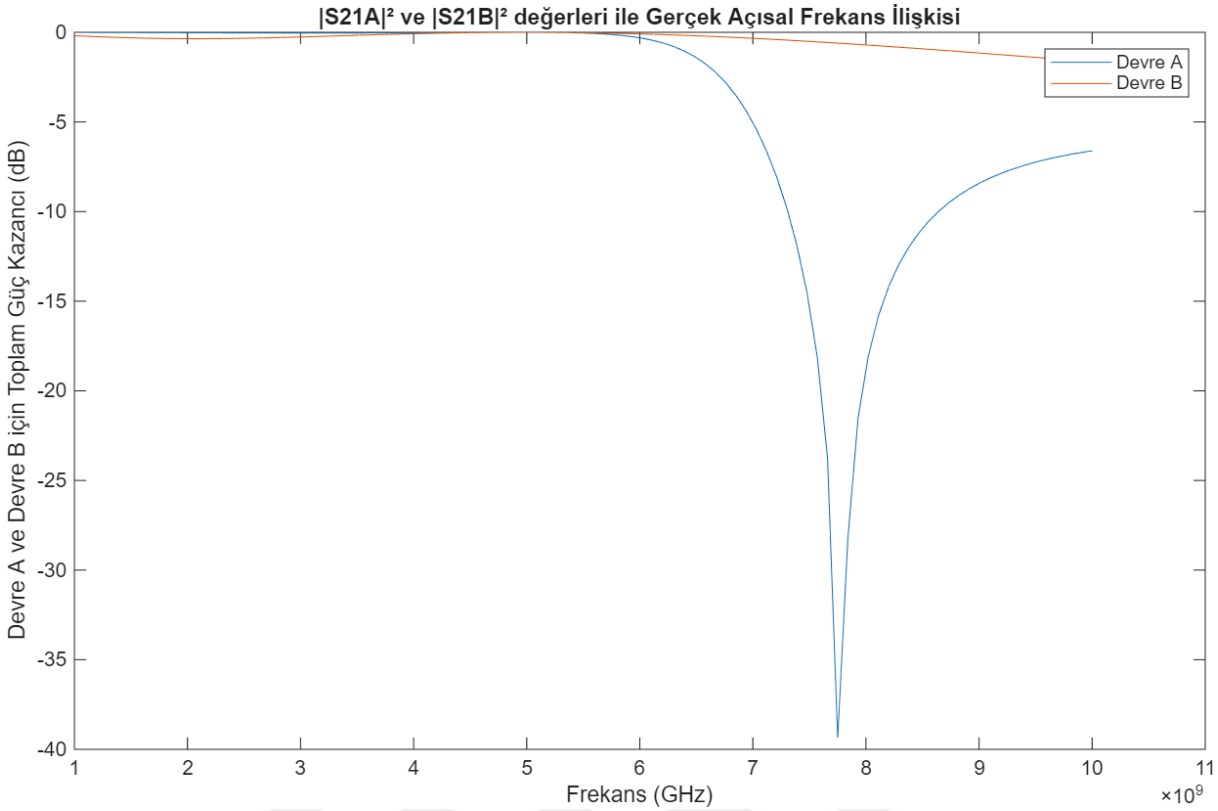


Şekil 15: Devre I 90° için Matlab simülasyonu faz grafiği



Şekil 16: Devre I 90° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

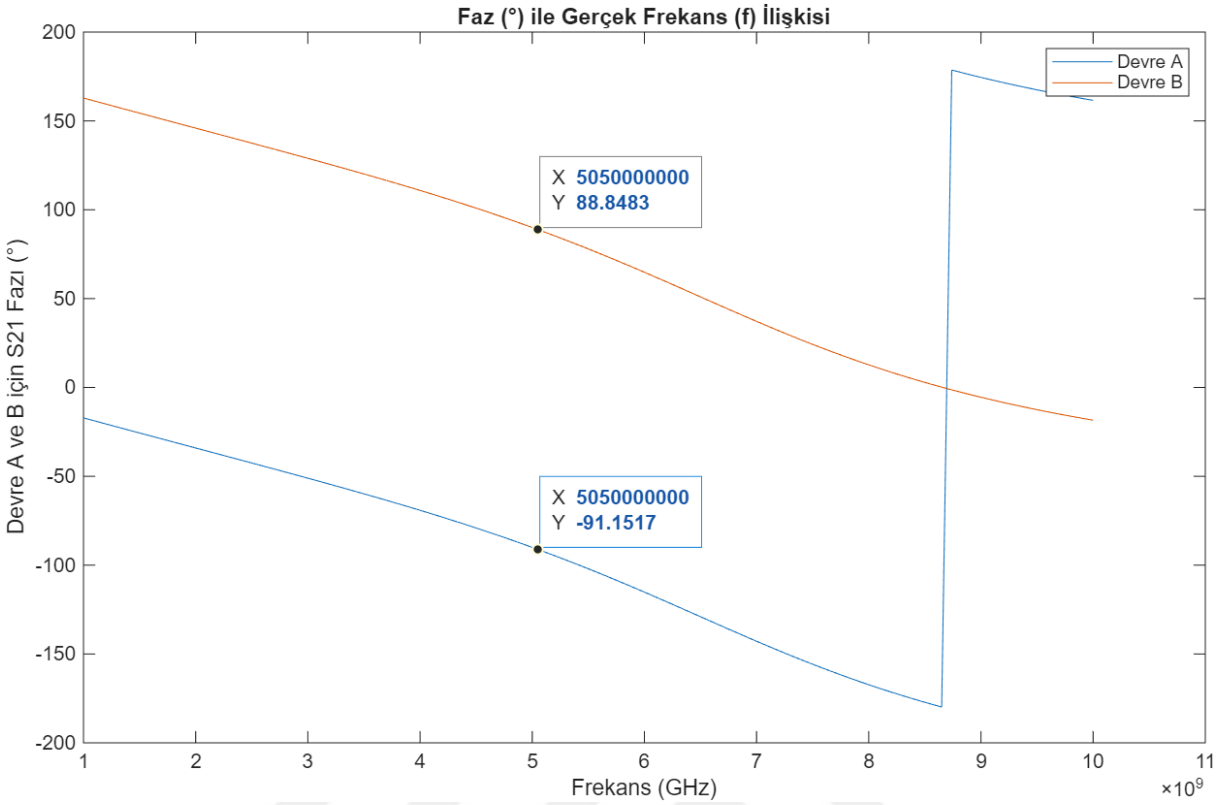
Şekil 17'te sunulan 90° için güç aktarım kazancı grafiğinde, Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Her iki devre için de 1-6 GHz bant aralığında güç kaybının olmadığını, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, devrelerin geniş bant aralığında sinyal iletimi sırasında kayıp olmadan çalıştığını, yani verimli bir şekilde güç aktarımı sağladığını ortaya koymaktadır. Yine bu sonuç tasarımın güçlü bir performansa sahip olduğunu doğrulamaktadır.



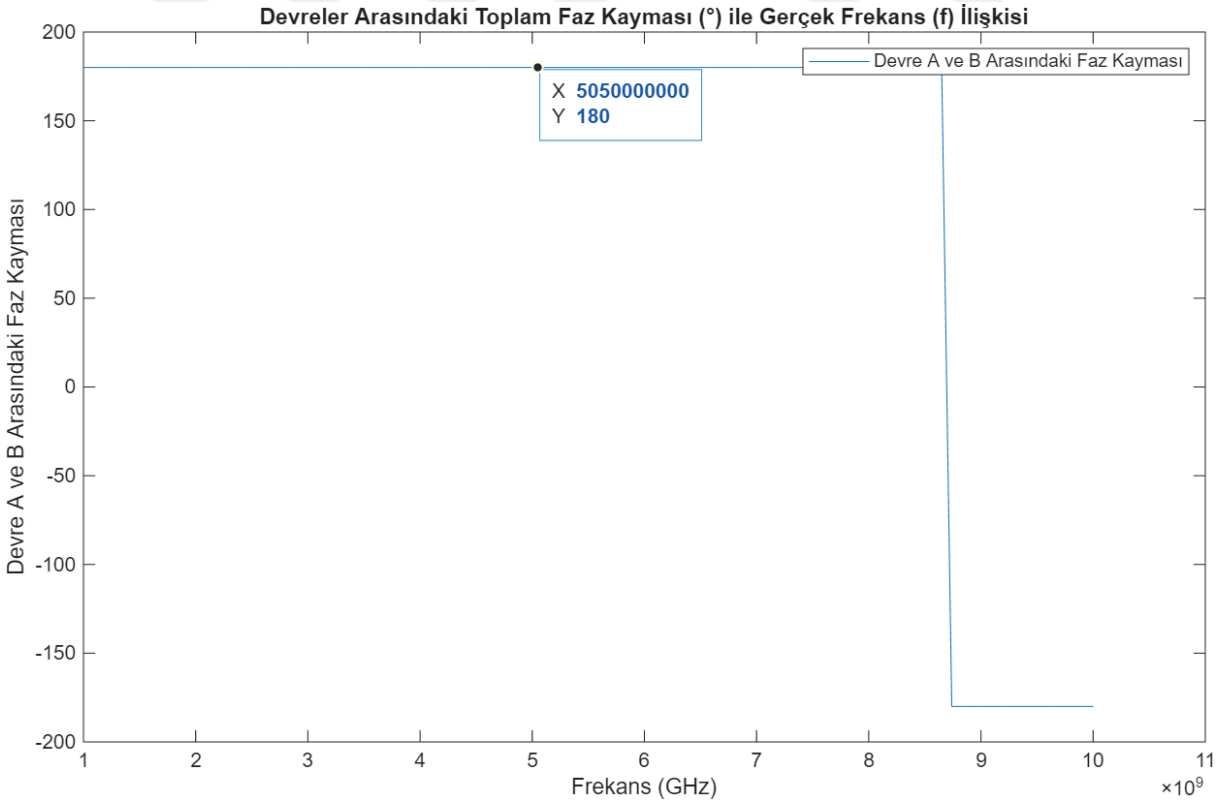
Şekil 17: Devre I 90° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

Simülasyon sırasında ölçülen faz kaydırma değerleri ile teorik olarak beklenen değerler arasındaki fark neredeyse olmayıp, devrenin yüksek hassasiyetle çalıştığını göstermektedir.

Üçüncü olarak, toplam 180° faz kaydırması için yapılan simülasyon sonuçları Şekil 18'de gösterilmiştir. Bu durumda, Devre A -91,15° faz kaydırması sağlarken, Devre B 88,85° faz kaydırması elde etmiştir. İki devre arasındaki faz farkı şu şekildedir: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı +180°'dir. 180° için iki devre arasındaki faz farkı grafiği Şekil 19'da verilmiştir.

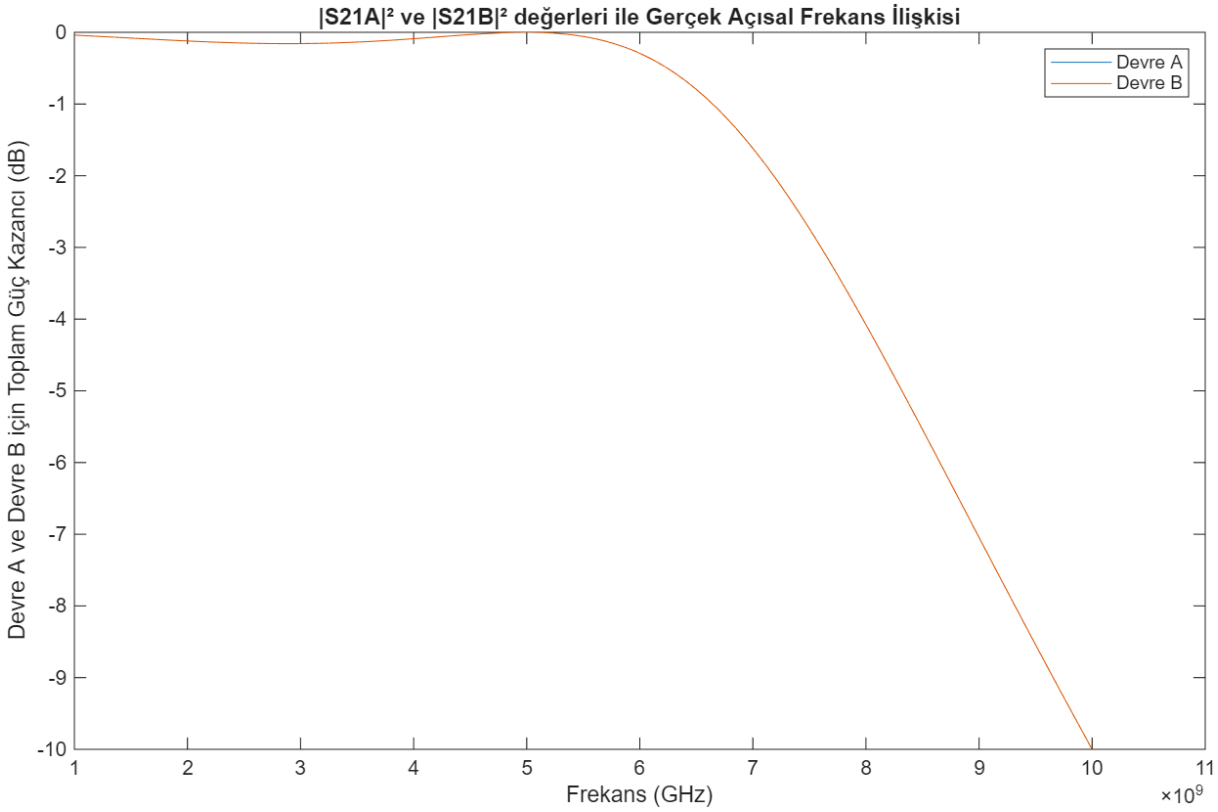


Şekil 18: Devre I 180° için Matlab simülasyonu faz grafiği



Şekil 19: Devre I 180° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

180° için güç aktarım kazancı grafiğinde de 45° ve 90° gibi Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Bu grafik Şekil 20'de verilmiştir. Her iki devre için de 1-6 GHz bant aralığında güç kaybının sıfıra oldukça yakın olduğu, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, devrelerin geniş bant aralığında sinyal iletimini kayıpsız gerçekleştirdiğini, yani gücü verimli bir şekilde aktardığını göstermektedir. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda sinyal kalitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir ve tasarımın yüksek performans sergilediğini ortaya koyar. Böylece, devrelerin kararlı ve güvenilir bir yapıya sahip olduğu doğrulanmış olur.



Şekil 20: Devre I 180° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

180° faz kaydırması sonuçları, faz kaydırma devresinin büyük faz farklarını hassas bir şekilde sağlama yeteneğini doğrulamaktadır. 180°'lik faz kaydırması uygulandığında, devrelerin simetrik bir faz kaydırması sağlaması gerektiği gibi, bu simülasyonlar da Devre A ve Devre B'nin simetrik faz kaydırma yeteneğini doğrulamaktadır. Çok minik faz hatalarına rağmen, devrelerin genel performansı oldukça başarılıdır ve bu da devrenin geniş faz kaydırma aralıklarında etkili bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir.

Tüm bu simülasyonlar (45°, 90° ve 180° faz kaydırmaları) boyunca kaydedilen sinyal kaybı 0 dB olmuştur. Bu, faz kaydırma işlemi sırasında sinyal gücünün bozulmadan korunduğunu göstermektedir. 0 dB kayıp, faz kaydırma süreci boyunca sinyalin gücünün sabit kaldığını ve herhangi bir zayıflama olmadığını ifade eder. Özellikle radar ve telekomünikasyon gibi yüksek frekanslı uygulamalarda sinyal kaybının en aza indirilmesi gerektiğinden, bu sonuçlar devrenin bu tür uygulamalara uygun olduğunu göstermektedir.

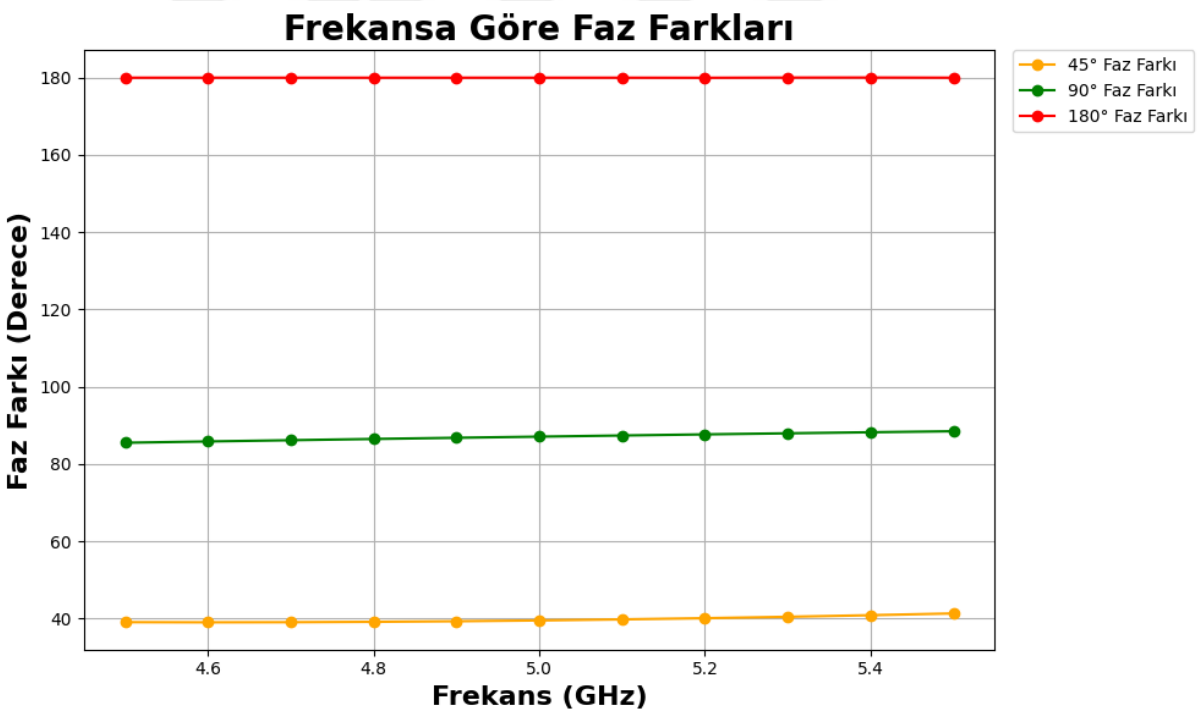
Sonuç olarak, MATLAB simülasyonları 3-bit dijital faz kaydırıcı devresinin 5 GHz frekansında yüksek doğrulukla çalıştığını ortaya koymaktadır. Devre, farklı faz kaydırma seviyelerinde (45°, 90°, 180°) tutarlı sonuçlar üretmiş ve sinyal kaybı olmadan faz kaydırmayı gerçekleştirmiştir. Bu, devrenin hassas faz kontrolü gerektiren uygulamalar için uygun olduğunu ve yüksek performans sağladığını doğrulamaktadır. Bu tür devreler, özellikle faz dizili antenler veya ileri telekomünikasyon sistemleri gibi sinyal bütünlüğünün kritik olduğu alanlarda oldukça etkili olacaktır.

ADS, RF ve mikrodalga devrelerin tasarımı için yaygın olarak kullanılan bir simülasyon yazılımıdır. ADS'de istenilen derecede faz kayması sonucunu alabilmek için eleman değerleri seçilmiştir. Simülasyonlar sırasında, devrede kullanılan eleman değerleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Bu tablo, devrenin ADS ortamında nasıl yapılandırıldığını ve farklı faz kaydırma açıları için kullanılan bileşen değerlerini içermektedir. ADS' de yapılan simülasyonlar, devrenin 45°, 90° ve 180° faz kaydırma açıları için nasıl performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

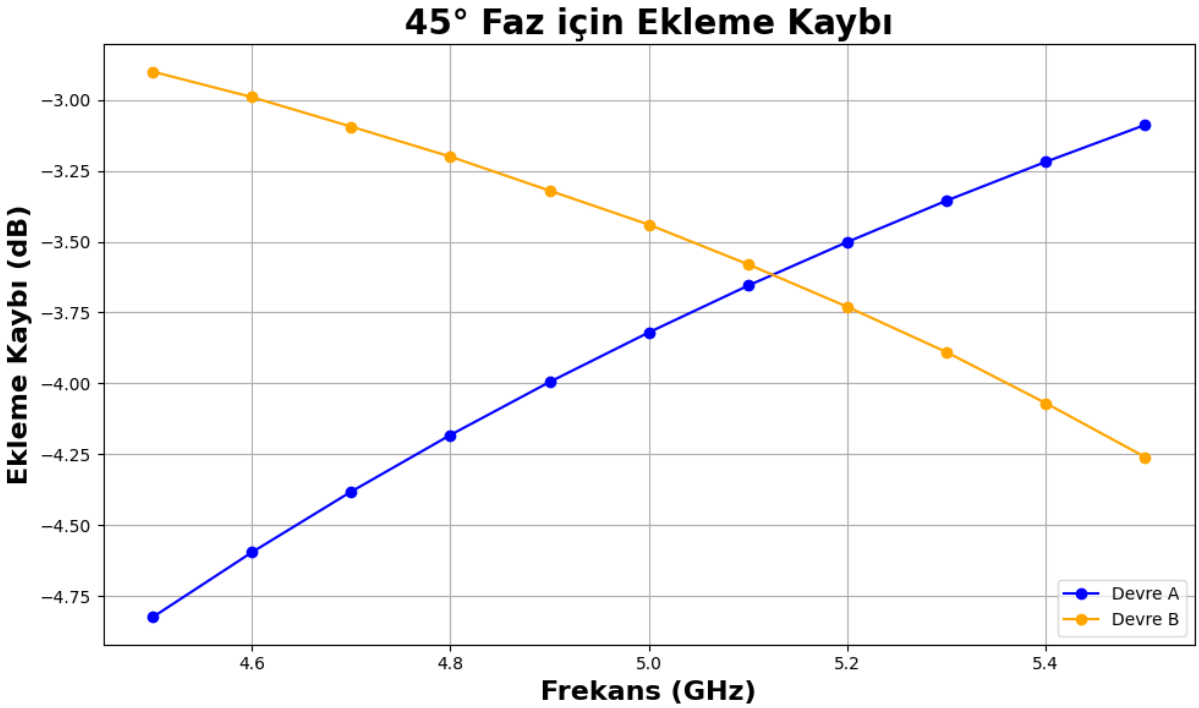
Tablo 3: Devre I için ADS bileşen değerleri

Bileşen	45° (Devre A&B)	90° (Devre A&B)	180° (Devre A&B)
Lx	$0.5\text{x}10^{-9}$ H	$0.41\text{x}10^{-9}$ H	$2\text{x}10^{-9}$ H
Ly	$50\text{x}10^{-12}$ H	$14\text{x}10^{-12}$ H	$0.6\text{x}10^{-12}$ H
Cx	$80\text{x}10^{-12}$ F	$20\text{x}10^{-9}$ F	$2\text{x}10^{-9}$ F
Cy	$8\text{x}10^{-12}$ F	$0.5\text{x}10^{-12}$ F	$0.6\text{x}10^{-12}$ F

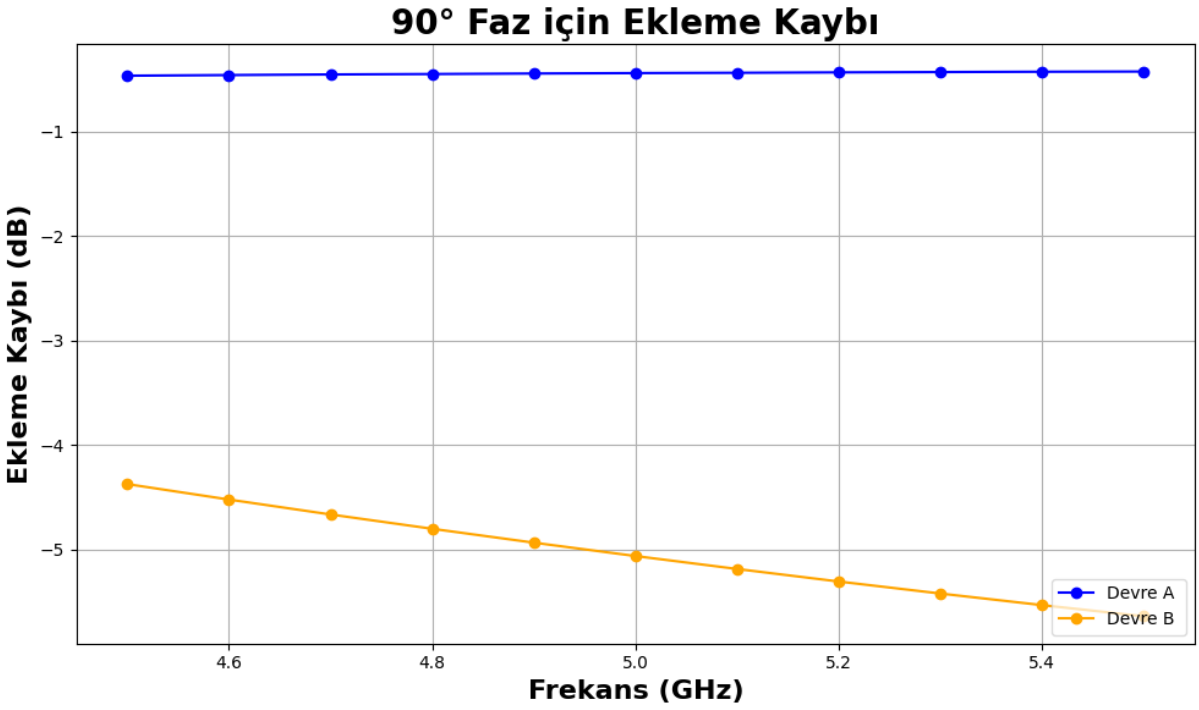
Simülasyonlar ayrıca, 4.5 GHz ile 5.5 GHz frekans bandında devrenin performansını değerlendirmeye yönelik yapılmıştır. Bu frekans aralığı, modern iletişim sistemlerinde kritik bir öneme sahiptir. 4.5-5.5 GHz bant aralığında devrenin 45°, 90° ve 180° faz kaydırması için verdiği cevap Şekil 21'de verilmiştir. 45° faz kaydırmaları için maksimum ekleme kaybı 4,825 dB (Şekil 22), maksimum faz hatası ise 6° olarak belirlenmiştir. 90° faz kaydırmaları için maksimum kayıp 5,64 dB (Şekil23) ve faz hatası 4,52° olarak kaydedilmiştir. 180° faz kaydırmalarında ise gözlemlenen kayıp 7,92 dB (Şekil 24) olup, bu durumda faz hatası gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, faz kaydırıcı devrenin çeşitli faz kaydırma açıları için gösterdiği performansı ortaya koymaktadır.



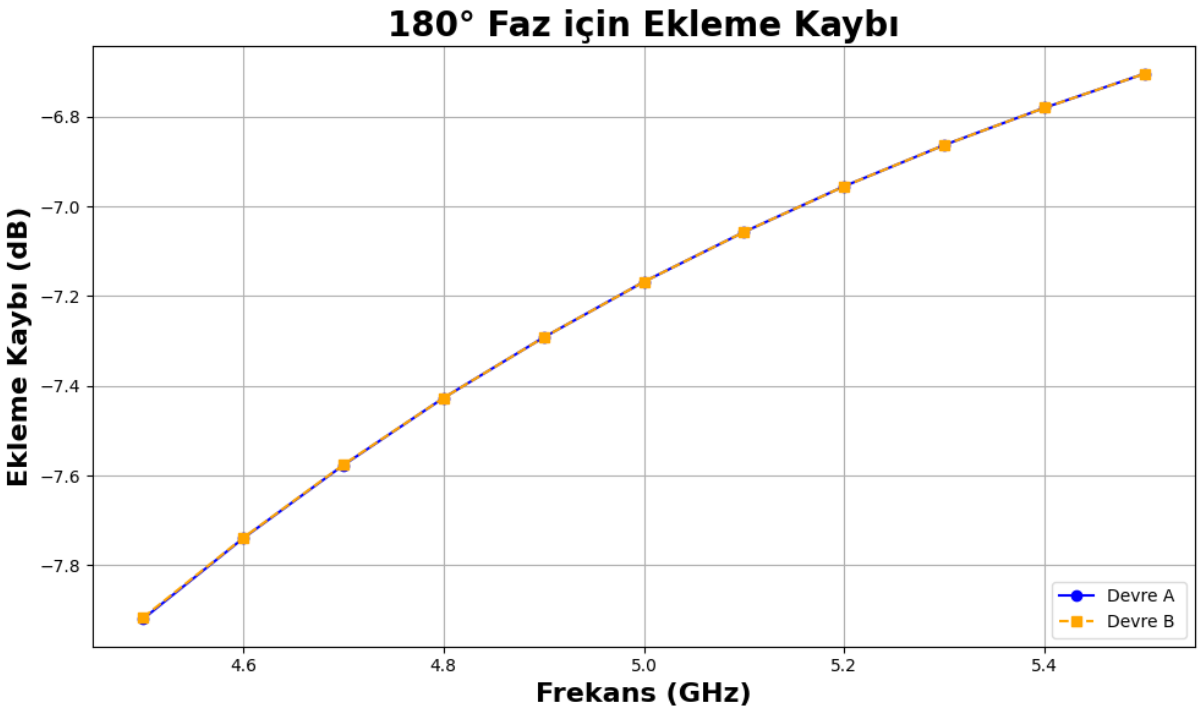
Şekil 21: Devre I 45°, 90° ve 180° için faz farkları ADS grafiği



Şekil 22: Devre I 45° için ekleme kaybı ADS grafiği



Şekil 23: Devre I 90° için ekleme kaybı ADS grafiği



Şekil 24: Devre I 180° için ekleme kaybı ADS grafiği

RMS değerleri incelendiğinde, 4.5–5.5 GHz bandında faz kaydırıcı devrenin 45°, 90° ve 180° faz kaymaları için sırasıyla 5,304°, 3,116° ve 0° RMS faz hatası sergilediği görülmektedir. Maksimum RMS faz hatası 5,304° olarak kaydedilmiştir. Aynı bantta ekleme kayıplarının RMS değerleri 45° de A ve B devresi için 0,5478 ve 0,4290 dB, 90° de A ve B devresi için 0,0126 ve 0,4003 dB ve 180° de A ve B devresi için 0,3840 ve 0,3833 dB olarak bulunmuş, maksimum RMS ekleme kaybı ise 0,5478 dB seviyesinde gerçekleşmiştir.

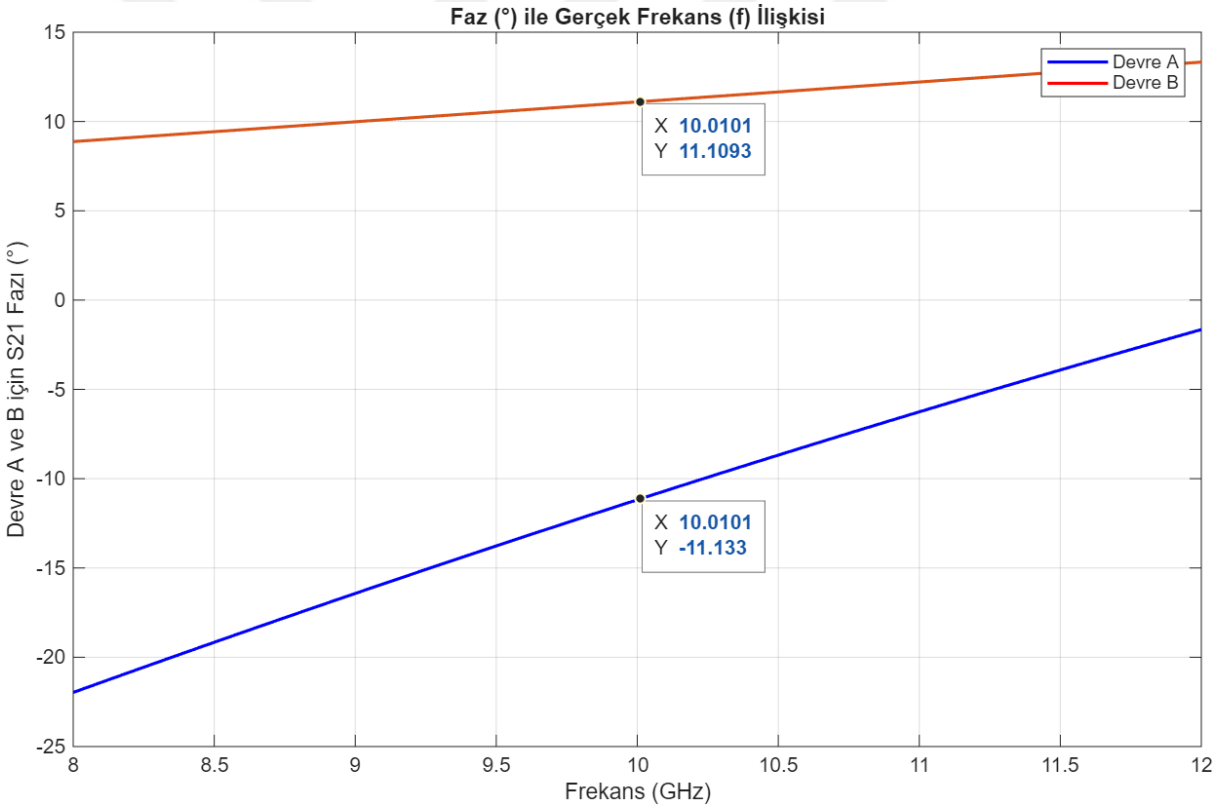
Faz kaydırıcı devrelerin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri, sinyal kayıplarının minimize edilmesidir. Bu çalışma, farklı faz kaydırma açıları için sinyal kayıplarının nasıl değiştiğini göstermektedir. Özellikle, 90° faz kaydırmaları sırasında gözlemlenen daha yüksek kayıplar, devrenin bu açıda daha fazla hassasiyet gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Ancak 180° faz kaydırmalarında elde edilen düşük kayıplar, bu açı için devrenin daha kararlı bir performans sergilediğini göstermektedir.

4.2. Önerilen Devre II

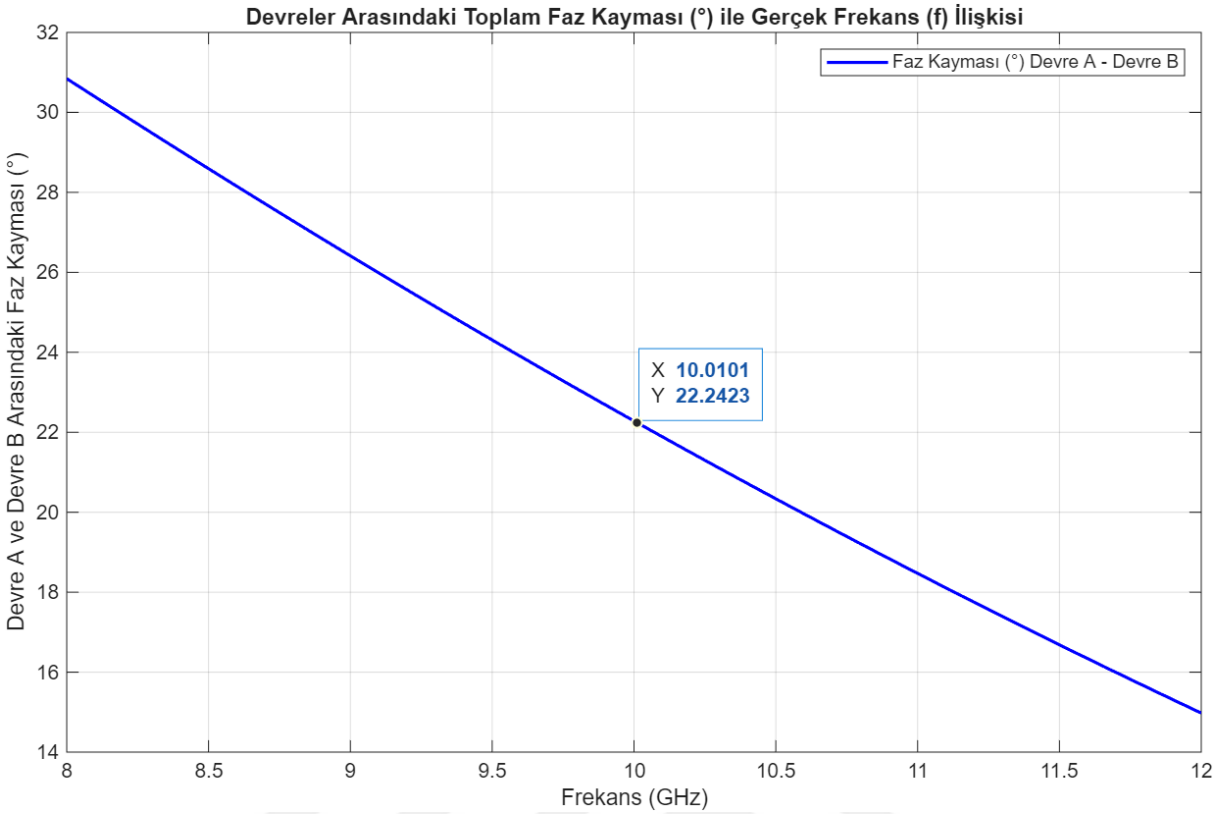
Öncelikle, önerilen 4-bit dijital faz kaydırıcı devresi MATLAB programında simüle edilmiştir. Bu simülasyon, devrenin 10GHz frekansta faz kaydırma kapasitesini değerlendirmek için yapılmıştır.

Şekil 9 da önerilen devrenin bölüm 3 de sinyalin ilerleme yoluna göre oluşturduğu A ve B devresinin empedans hesabı yapılmıştı. Oluşturulan bu empedans denklemleri MATLAB programında grafik analizleri yapılmak üzere yazılımında kullanılmıştır. Burada ise 22,5°, 45°, 90°, ve 180° için faz kaydırma grafikleri çizdirilerek analizi yapılacaktır.

İlk olarak 22,5° analizi yapılmıştır. Toplam 22,5° faz kaydırması için yapılan simülasyon Şekil 25 de gösterilmektedir. Devre A için elde edilen faz kaydırması -11,13° olurken, Devre B 11,11° faz kaydırması sağlamıştır. Bu iki devre arasındaki faz farkı şu şekilde hesaplanmıştır: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı +22,24°'dir. Bu hesaplanan sonucu yansıtan devreler arasındaki toplam faz farkı grafiği Şekil 26 de verilmiştir.

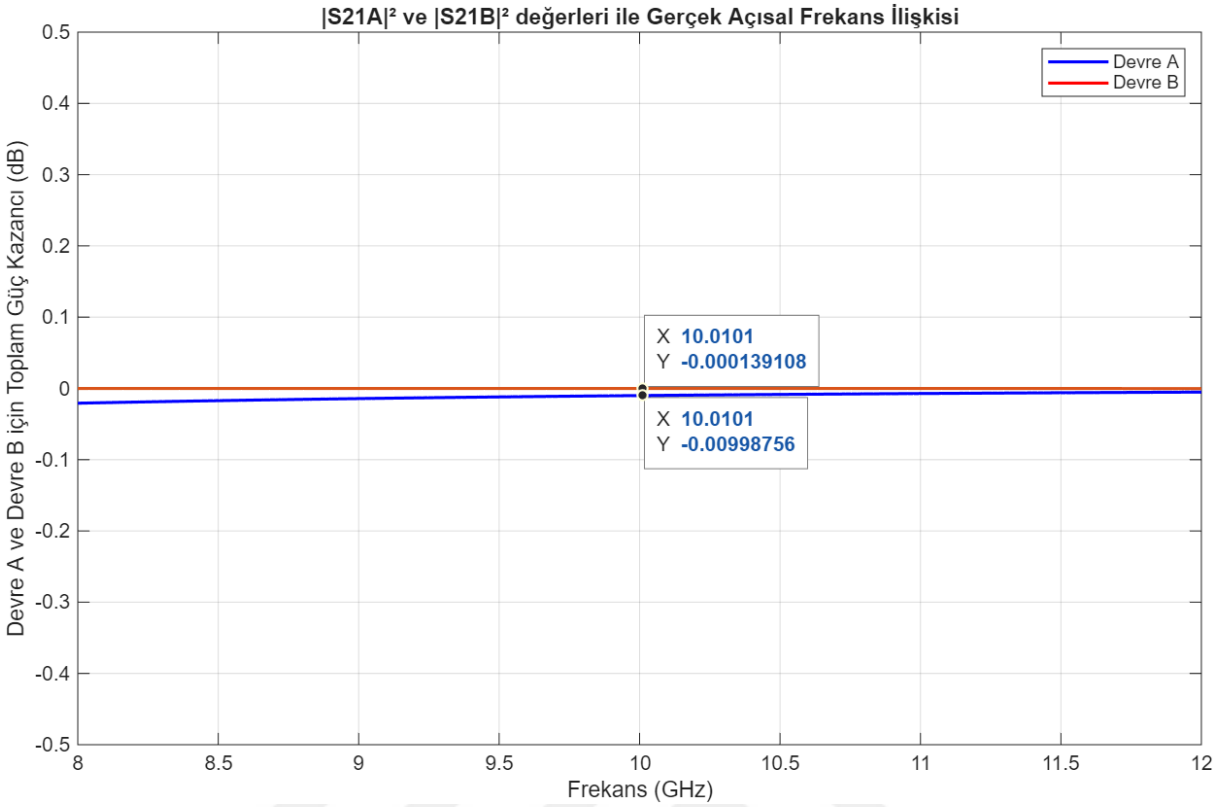


Şekil 25: Devre II 22.5° için Matlab simülasyonu faz grafiği



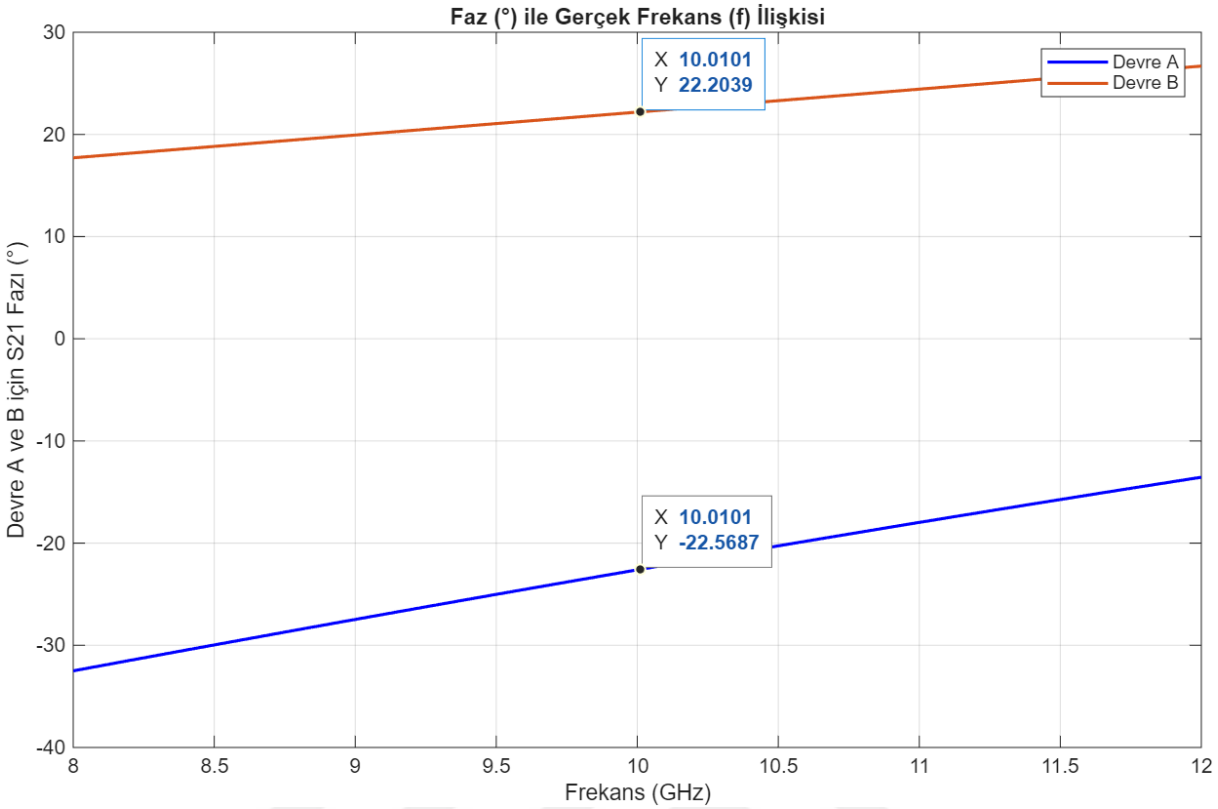
Şekil 26: Devre II 22.5° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

Şekil 27'te sunulan güç aktarım kazancı grafiğinde, önerilen Devre I de olduğu gibi Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Her iki devre için de 1-12 GHz bant aralığında güç kaybının neredeyse hiç olmadığını, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir.

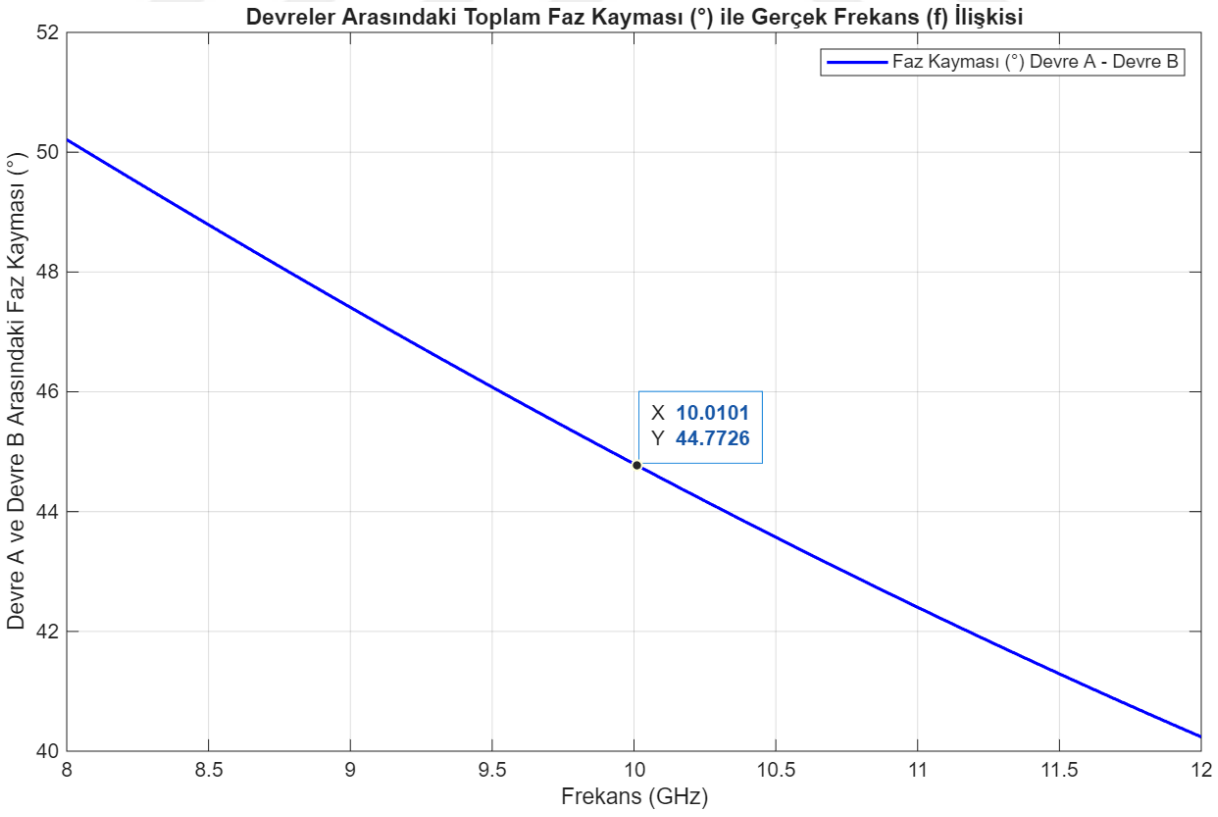


Şekil 27: Devre II 22,5° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

İkinci olarak 45° analizi yapılmıştır. Toplam 45° faz kaydırması için yapılan simülasyon Şekil 28 de gösterilmektedir. Devre A için elde edilen faz kaydırması -22,57° olurken, Devre B 22,2° faz kaydırması sağlamıştır. Bu iki devre arasındaki faz farkı şu şekilde hesaplanmıştır: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı +44.8°'dir. Bu hesaplanan sonucu yansıtan devreler arasındaki toplam faz farkı grafiği Şekil 29 de verilmiştir.

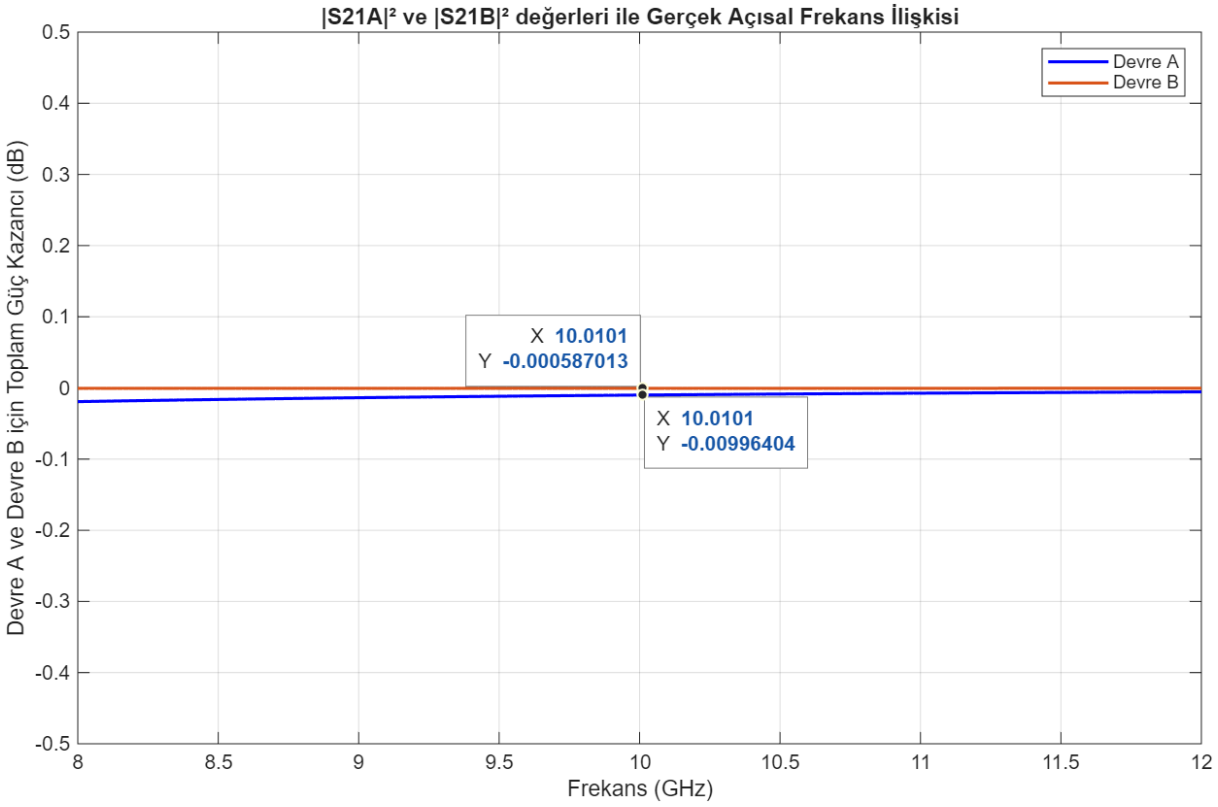


Şekil 28: Devre II 45° için Matlab simülasyonu faz grafiği



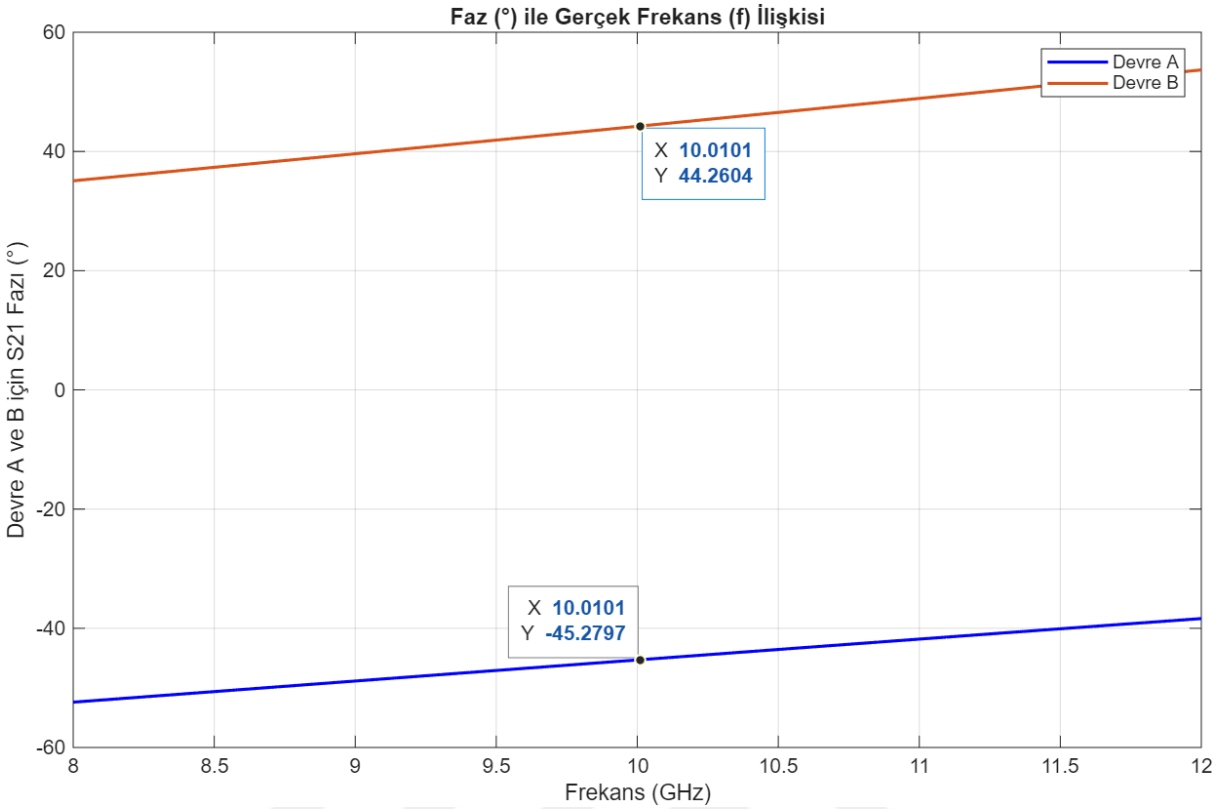
Şekil 29: Devre II 45° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

Şekil 30 da sunulan güç aktarım kazancı grafiğinde, önerilen Devre I de olduğu gibi Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Her iki devre için de 1-12 GHz bant aralığında güç kaybının olmadığını, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir.

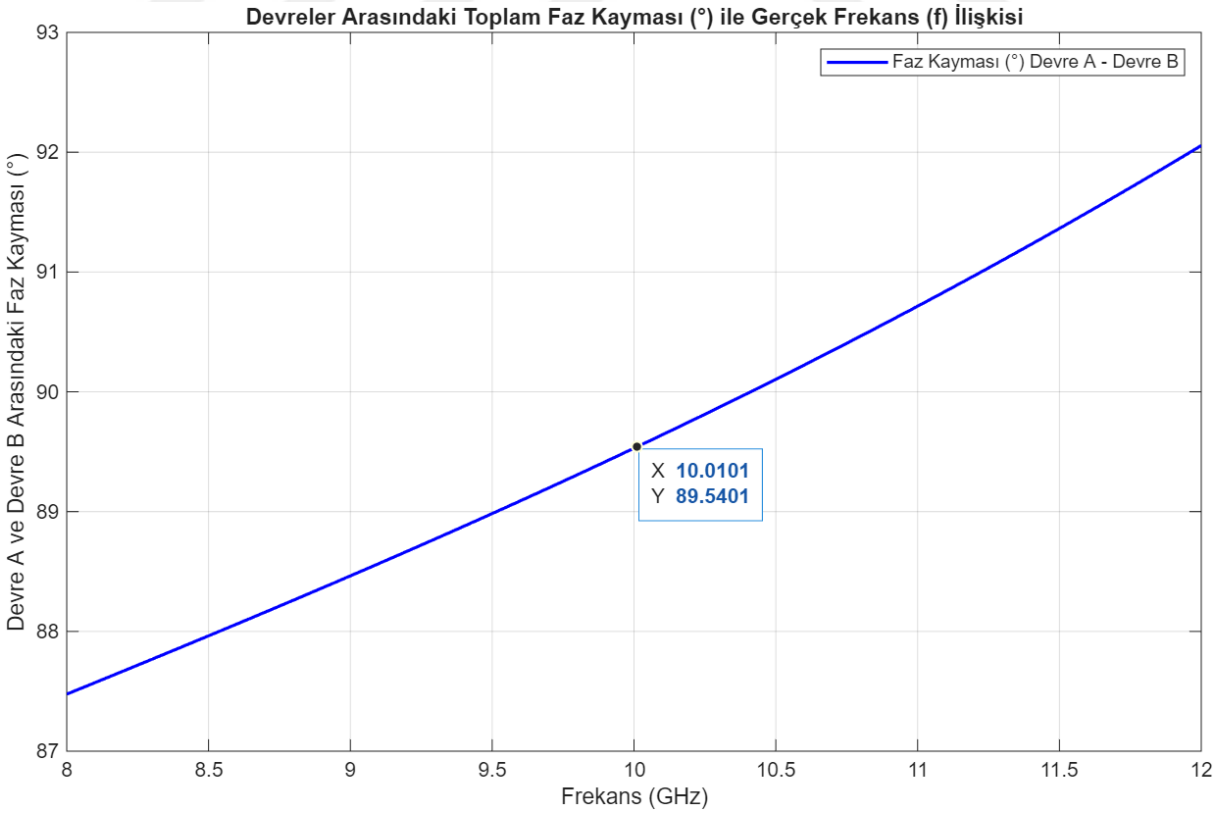


Şekil 30: Devre II 45° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

Üçüncü olarak toplam 90° faz kaydırması için yapılan simülasyon sonuçları Şekil 31 de sunulmuştur. Bu durumda, Devre A -45,28° faz kaydırması elde ederken, Devre B 44,26° faz kaydırması sağlamıştır. Bu iki devre arasındaki faz farkı şu şekildedir: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı yaklaşık +89,54°'dir. 90° için iki devre arasındaki faz farkı grafiği Şekil 32 de verilmiştir.

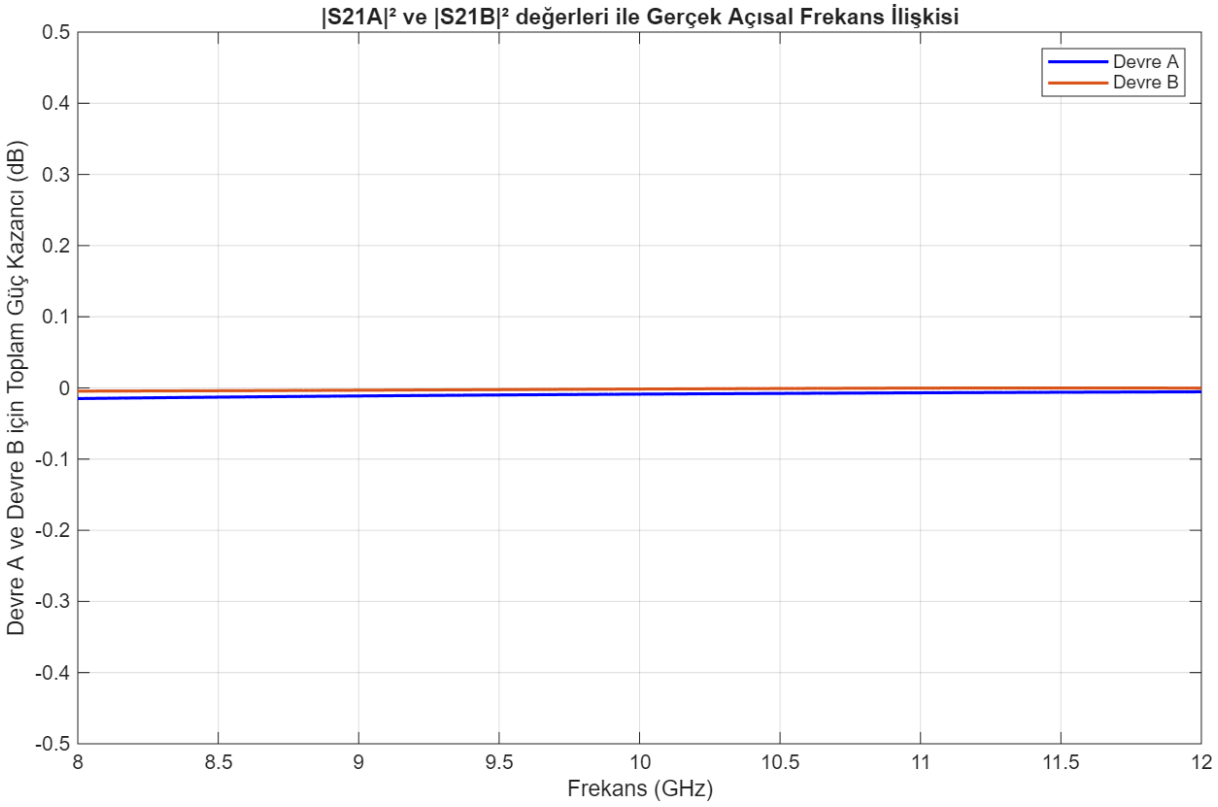


Şekil 31: Devre II 90° için Matlab simülasyonu faz grafiği



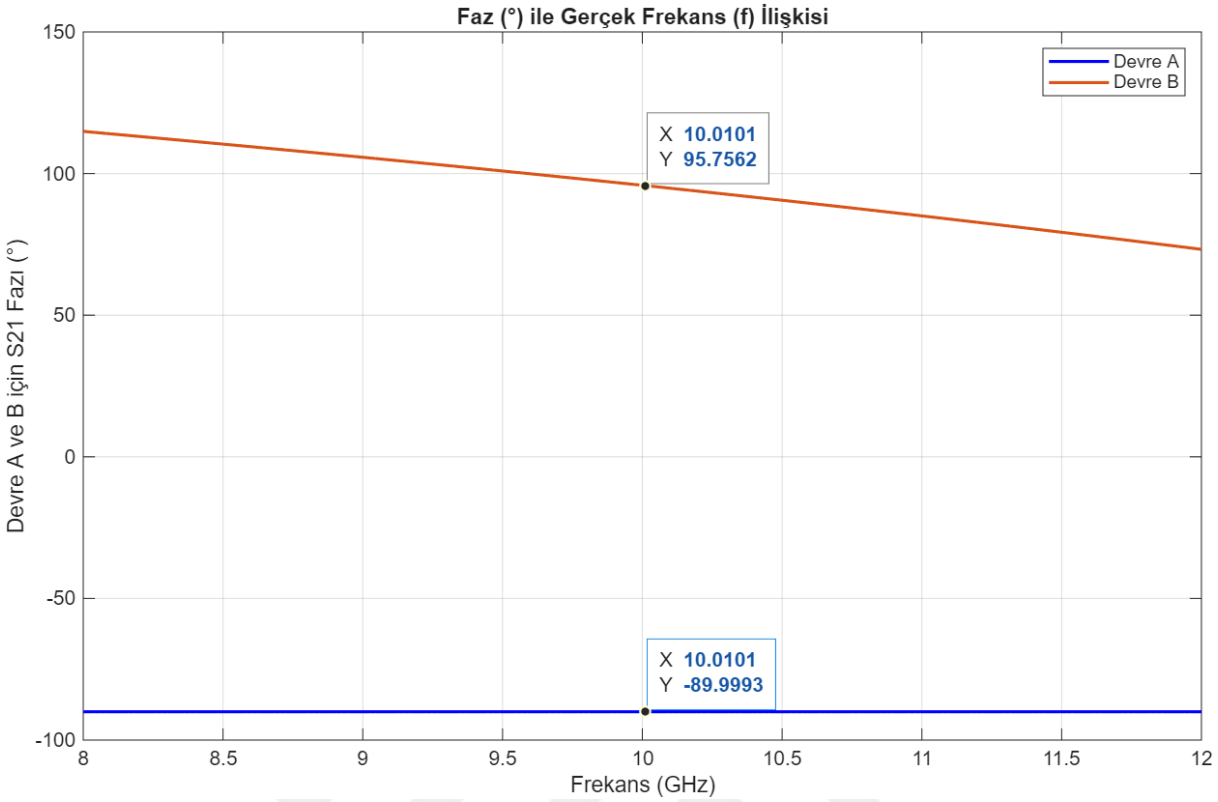
Şekil 32: Devre II 90° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

Şekil 33 de sunulan 90° için güç aktarım kazancı grafiğinde, Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Her iki devre için de 1-12 GHz bant aralığında güç kaybının olmadığını, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir.

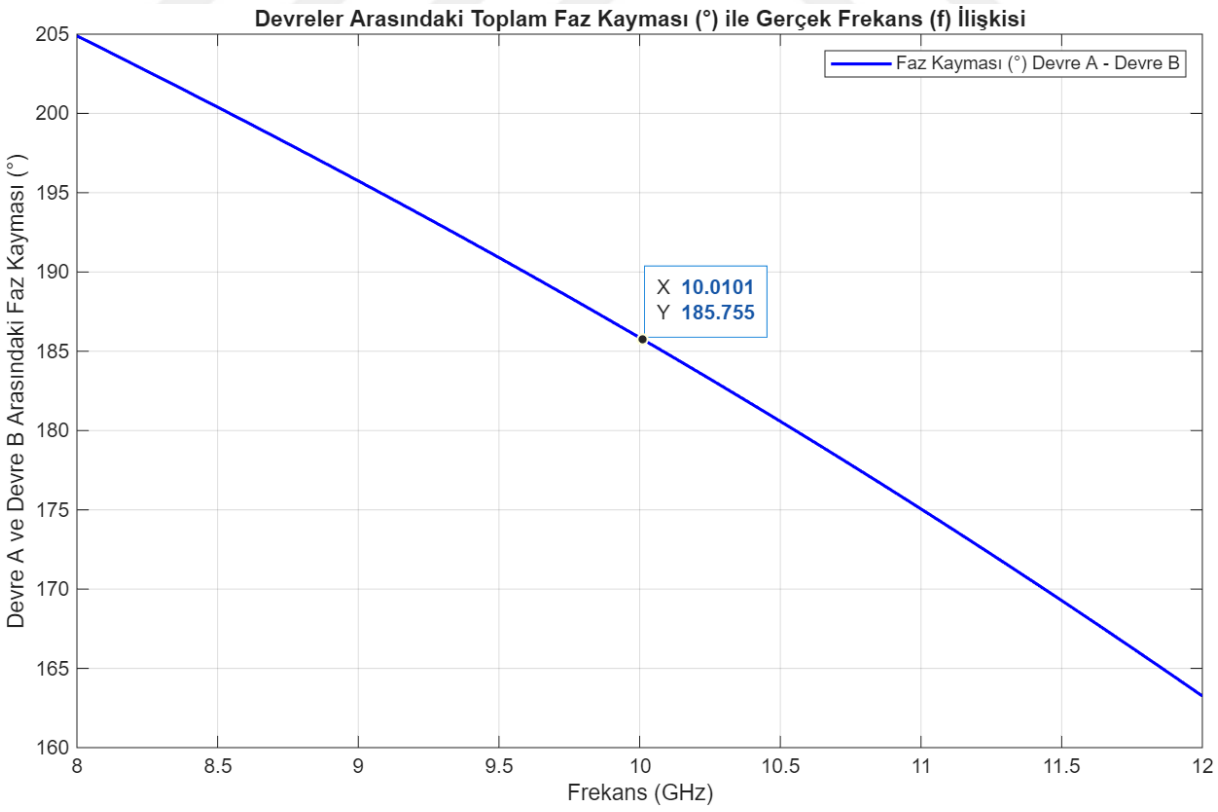


Şekil 33: Devre II 90° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

Son olarak, toplam 180° faz kaydırması için yapılan simülasyon sonuçları Şekil 34 de gösterilmiştir. Bu durumda, Devre A -90° faz kaydırması sağlarken, Devre B 95,76° faz kaydırması elde etmiştir. İki devre arasındaki faz farkı şu şekildedir: Devre B'nin faz açısı eksi Devre A'nın faz açısı +185,7°'dir. 180° için iki devre arasındaki faz farkı grafiği Şekil 35 de verilmiştir.

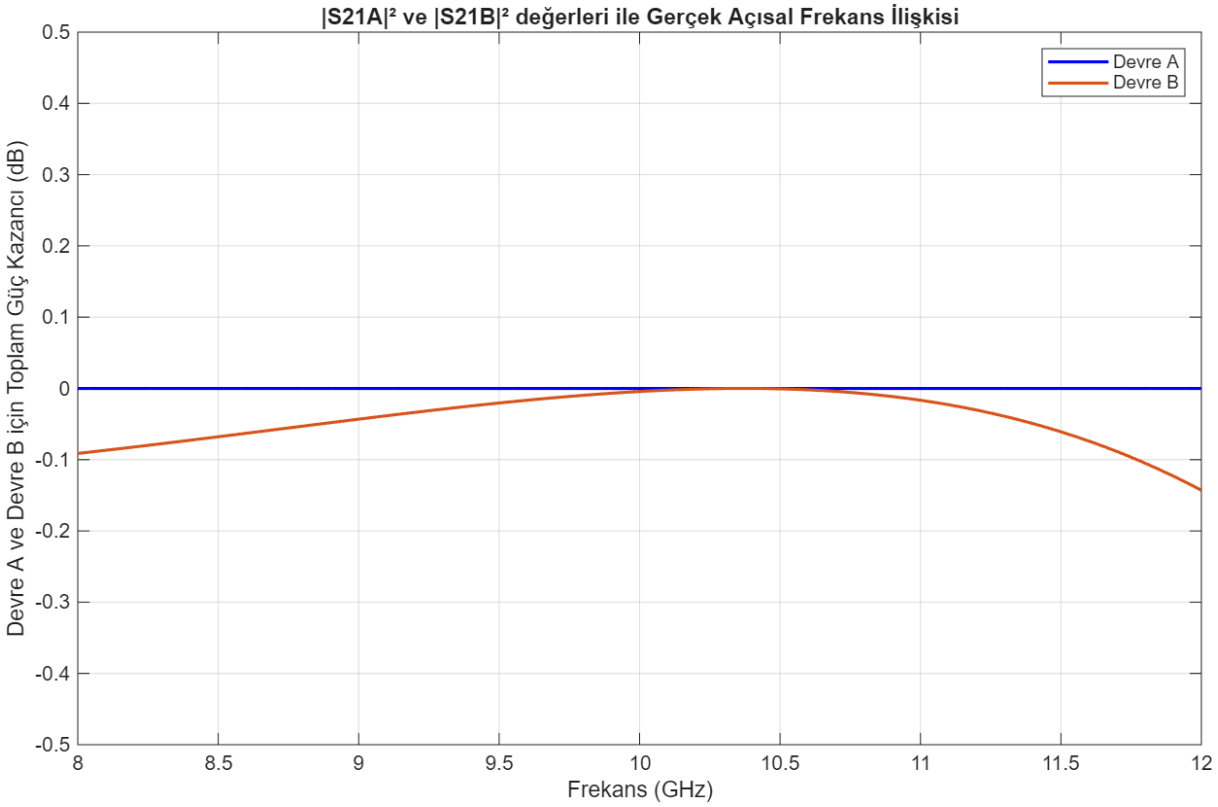


Şekil 34: Devre II 180° için Matlab simülasyonu faz grafiği



Şekil 35: Devre II 180° için Devre A ve Devre B faz farkı Matlab simülasyonu

180° için güç aktarım kazancı grafiğinde de Devre A ve Devre B'nin performansları farklı renklerle çizdirilmiştir. Şekil 36 da bu grafik verilmiştir. Her iki devre için de 1-12 GHz bant aralığında güç kaybının sıfıra oldukça yakın olduğu, yani kazanç değerinin 0 dB olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, devrelerin geniş bant aralığında sinyal iletimini kayıpsız gerçekleştirdiğini, yani gücü verimli bir şekilde aktardığını göstermektedir. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda sinyal kalitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir ve tasarımın yüksek performans sergilediğini ortaya koyar. Böylece, devrelerin kararlı ve güvenilir bir yapıya sahip olduğu doğrulanmış olur.



Şekil 36: Devre II 180° için Matlab simülasyonu kazanç grafiği

Bu sonuçlar, devre II için yapılan çalışmanın geniş bant aralığında sinyal iletimini kayıpsız gerçekleştirdiğini, yani gücü verimli bir şekilde aktardığını göstermektedir. Bu özellikler, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda sinyal kalitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir ve tasarımın yüksek performans sergilediğini ortaya koyar. Böylece, devrelerin kararlı ve güvenilir bir yapıya sahip olduğu doğrulanmış olur.

Sonuç olarak, MATLAB simülasyonları 4-bit dijital faz kaydırıcı devresinin 10 GHz frekansında yüksek doğrulukla çalıştığını ortaya koymaktadır. Devre, farklı faz kaydırma

seviyelerinde (22,5°, 45°, 90°, 180°) tutarlı sonuçlar üretmiş ve sinyal kaybı olmadan faz kaydırmayı gerçekleştirmiştir. Bu, devrenin de hassas faz kontrolü gerektiren uygulamalar için uygun olduğunu ve yüksek performans sağladığını doğrulamaktadır. Bu tür devreler, özellikle faz dizili antenler veya ileri telekomünikasyon sistemleri gibi sinyal bütünlüğünün kritik olduğu alanlarda oldukça etkili olacaktır.

Devre bileşeni değerleri, iki farklı anahtarlama senaryosu altında uygun faz değişimlerini sağlayacak şekilde titizlikle hesaplanmış ve ayarlanmıştır. Bu değerler seçilirken, amaçlanan çalışma frekans aralığı, düşük ekleme kaybı ve hassas faz kayması seviyeleri gibi faz kaydırıcının performans özellikleri dikkate alınmıştır. Simetrik T tipi LC ağında, PIN diyotlarla elde edilen iki anahtarlama durumu, farklı etkin reaktanslar ve dolayısıyla farklı faz kaymaları sağlayan farklı elektriksel yollara karşılık gelir.

Her bir dalın endüktans ve kapasitans değerleri, belirlenen frekans aralığı boyunca amaçlanan faz kayması özelliklerini korurken, empedans uyumunu 50 Ω' a kadar garanti edecek şekilde seçilmiştir. Devre seviyesi simülasyonu ve parametrik analizle keşfedilen ideal konfigürasyon, aşağıdaki Tablo 6 gösterilen bileşen değerlerine yansımıştır.

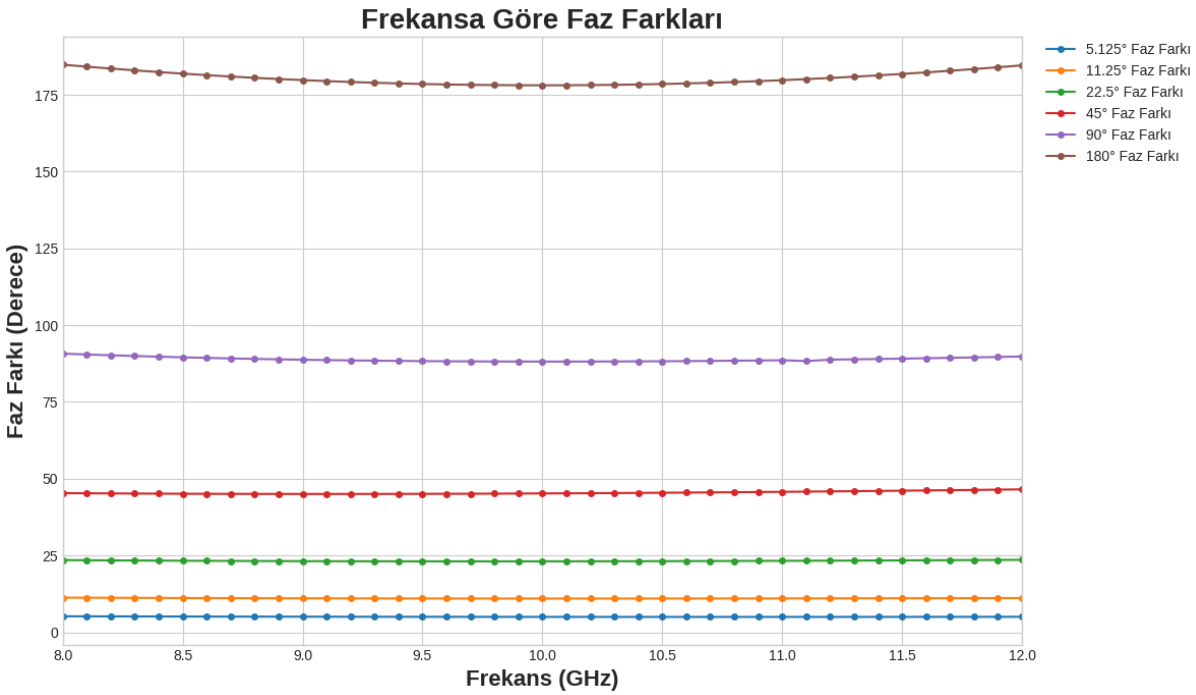
Bu iki durum arasında geçiş yaparak 22,5°, 45°, 90° veya 180° gibi farklı faz kayması açıları elde etmek mümkündür. Geniş bant ve çok bitli dijital faz kaydırıcı uygulamaları, ayrık toplu bileşenlerin kullanımıyla sağlanan tasarım esnekliği ve ayarlanabilirlik gerektirir.

Tablo 6, her anahtarlama durumuna karşılık gelen belirli bileşen değerlerini içerir.

Tablo 4: ADS devre II bileşen değerleri

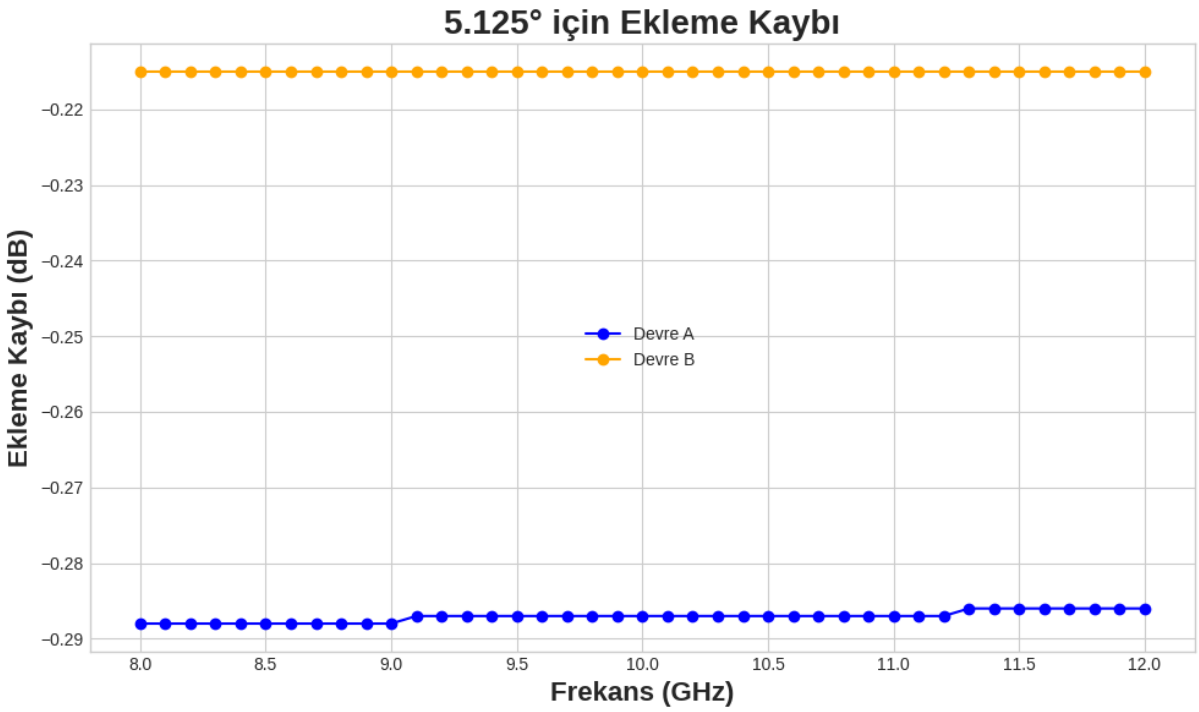
Bileşen	5.125°	11.25°	22.5°	45°	90°	180°
L1	$8x10^{-9}$ H	$4x10^{-9}$ H	$2x10^{-9}$ H	$1x10^{-9}$ H	$0.8x10^{-9}$ H	$1.2x10^{-9}$ H
C1	$240x10^{-12}$ F	$100x10^{-12}$ F	$60x10^{-12}$ F	$50x10^{-12}$ F	$1.2x10^{-12}$ F	$0.5x10^{-12}$ F
L2	$0.02x10^{-9}$ H	$0.05x10^{-9}$ H	$0.1x10^{-9}$ H	$0.2x10^{-9}$ H	$0.35x10^{-9}$ H	$0.5x10^{-9}$ H
C2	$0.01x10^{-12}$ F	$0.02x10^{-12}$ F	$0.05x10^{-12}$ F	$0.1x10^{-12}$ F	$0.2x10^{-12}$ F	$0.2x10^{-12}$ F

ADS simülasyon sonuçlarına göre, 8–12 GHz bandındaki maksimum faz hataları 5,125° için 0,121°, 11,25° için 0,261°,22,5° için 1,02°, 45° için 0,95°, 90° için 1,34° ve 180° için 4,83°'tür (faz tepkilerini gösteren Şekil 37'de gösterildiği gibi). 5,125°, 11,25°, 22,5°, 45°, 90° ve 180° kaymalar için 8–12 GHz bandındaki RMS faz hataları sırasıyla 0,105°, 0,185°, 0,779°, 0,768°, 1,3183° ve 2,1180°'dir.

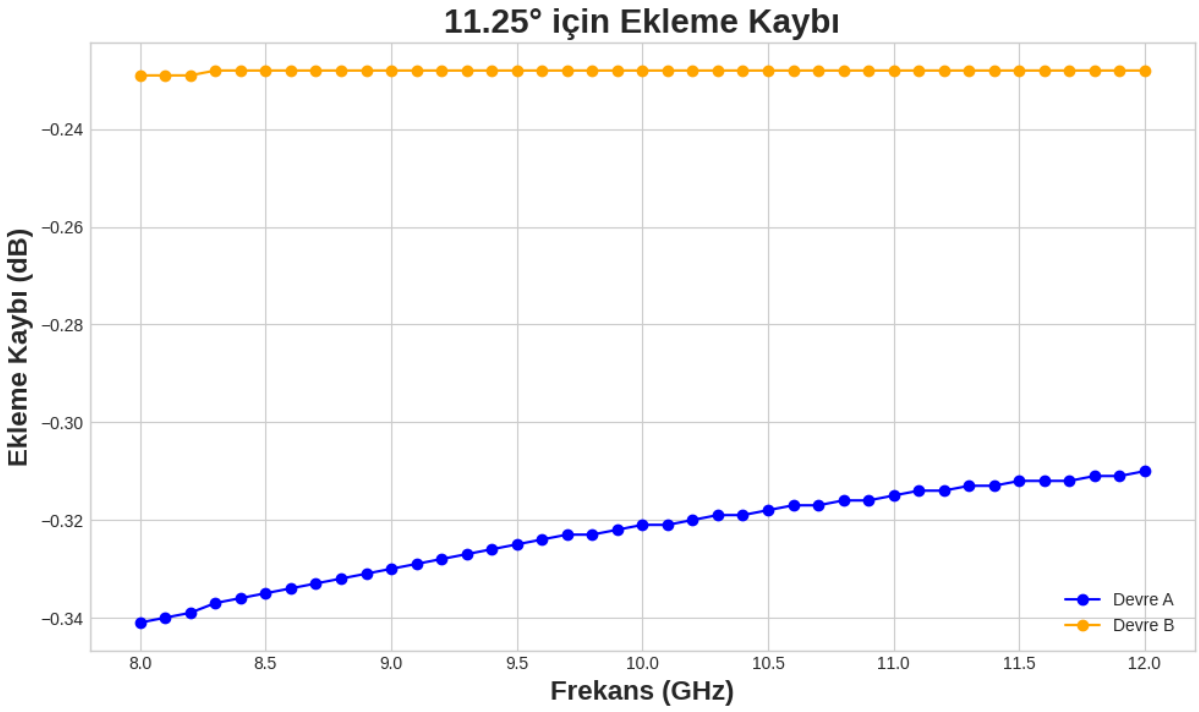


Şekil 37: Devre II 5,125°, 11,25°, 22,5°, 45°, 90° ve 180° faz kaydırma

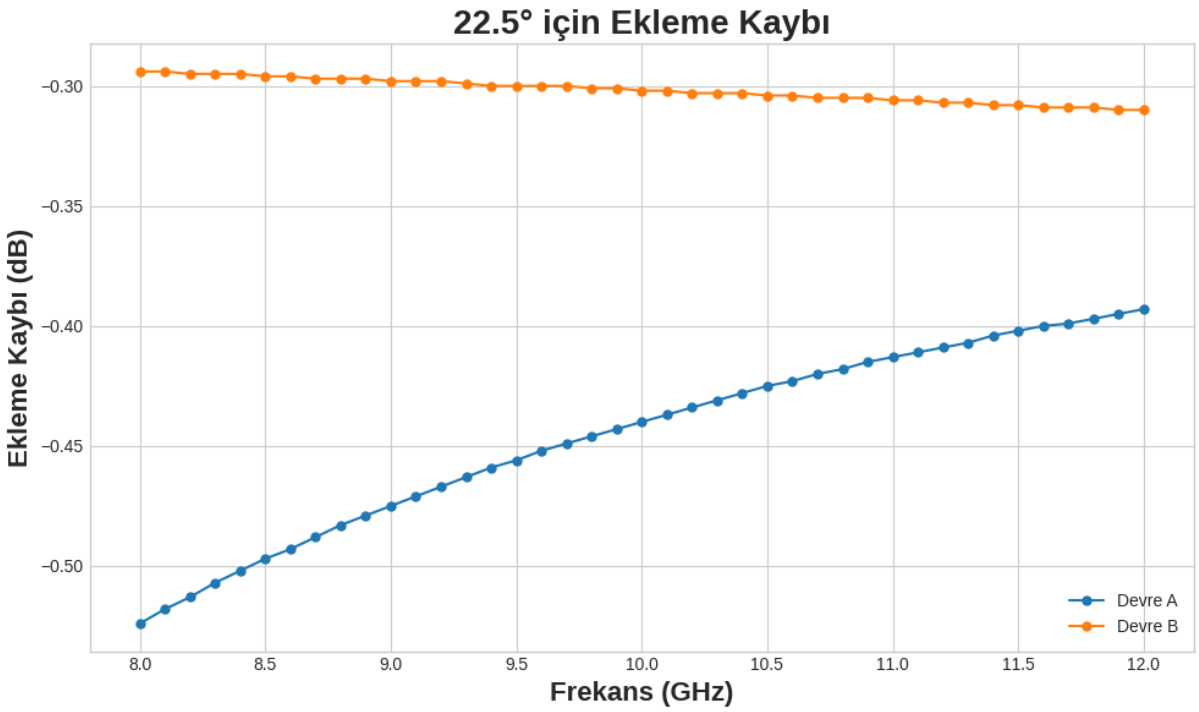
8–12 GHz bandındaki maksimum ekleme kaybı değerleri, Devre A da 5,125° kayma için 0,288 dB, 11,25° kayma için 0,321 dB, 22,5° kayma için 0,655 dB, 45° kayma için 1,503 dB, 90° kayma için 1,636 dB ve 180° kayma için 3,359 dB olarak bulunmuştur. Devre B için bu değerler 0,215 dB (5,125°), 0,229 dB (11,25°),0,547 dB (22,5°), 0,613 dB (45°), 0,713 dB (90°) ve 2,155 dB (180°)'dir. Genel ekleme kaybı özellikleri, 5,125°, 11,25°, 22,5°, 45°, 90° ve 180° faz kaydırmaları için sırasıyla Şekil 38, Şekil 39, Şekil 40, Şekil 41, Şekil 42 ve Şekil 43 de sunulmaktadır. Ayrıca, 180° faz kaydırıcı için gözlemlenen maksimum RMS ekleme kaybı, Devre A için 1,83 dB ve Devre B için 2,13 dB'dir.



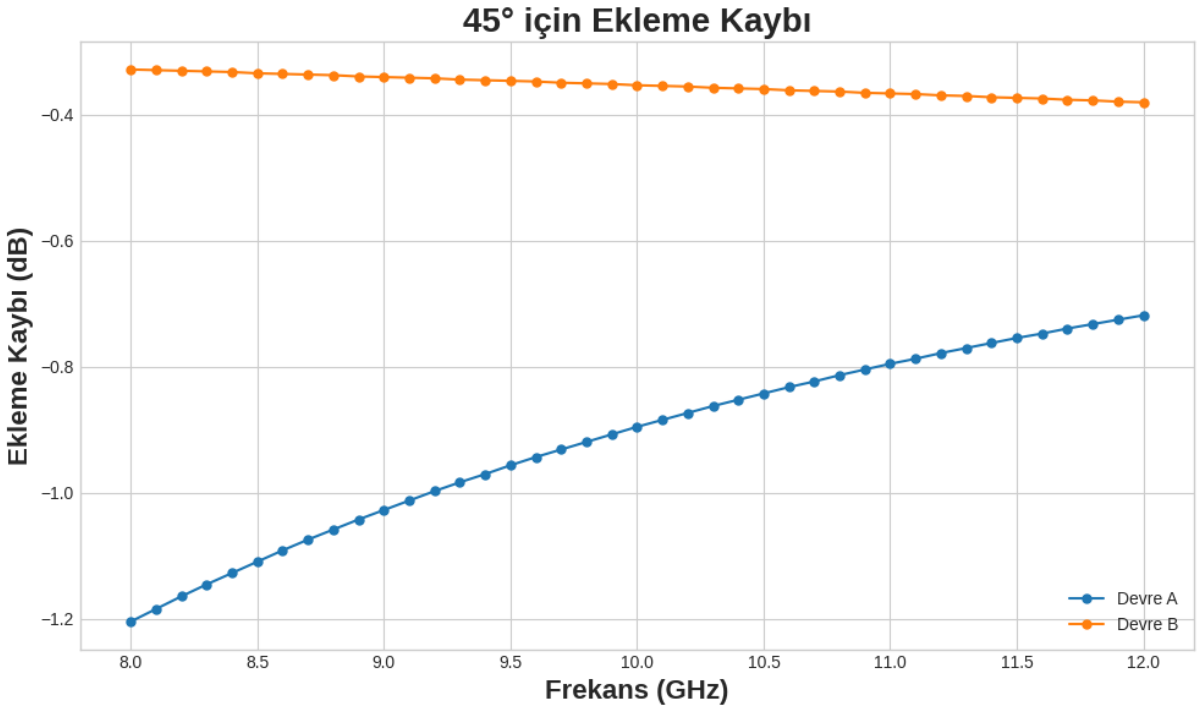
Şekil 38: Devre II 5.125° için Ekleme Kaybı



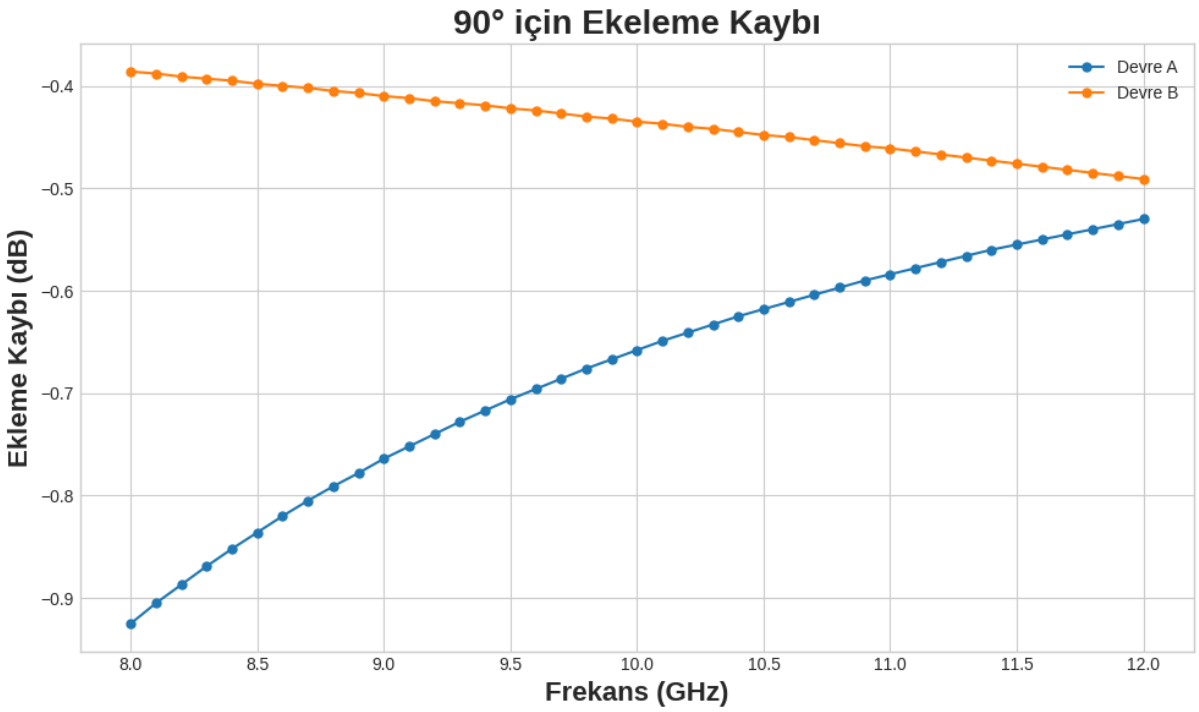
Şekil 39: Devre II 11.25° için Ekleme Kaybı



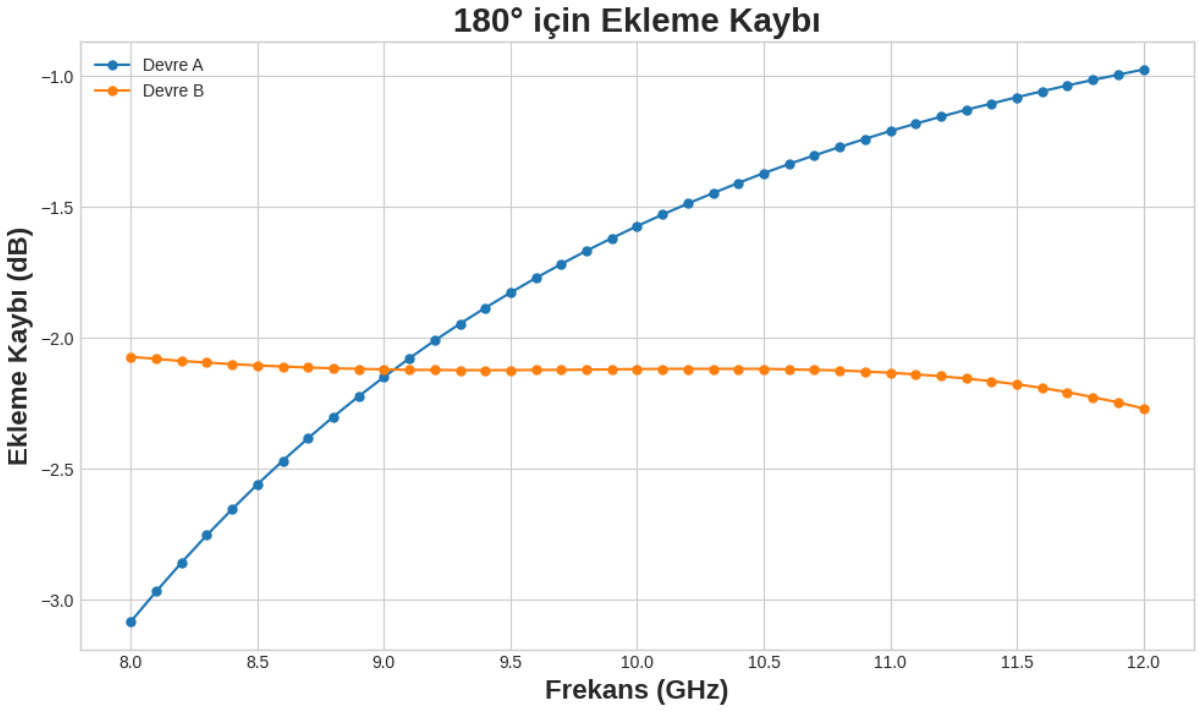
Şekil 40: Devre II 22.5° için Ekleme Kaybı



Şekil 41: Devre II 45° için Ekleme Kaybı



Şekil 42: Devre II 90° için Ekleme Kaybı



Şekil 43: Devre II 180° için Ekleme Kaybı

Faz kaydırıcı devreler, yalnızca iletişim sistemleriyle sınırlı kalmayıp, radar sistemleri, uydu iletişimi ve faz dizili anten sistemleri gibi birçok uygulamada da kritik öneme sahiptir. Özellikle anten dizileri, belirli bir yönde sinyal göndermek veya almak için faz kaydırıcı devrelere ihtiyaç duyar. Bu devreler, anten elemanları arasındaki sinyal fazlarını ayarlayarak sinyalin yönünü kontrol eder. Ayrıca, modern iletişim sistemlerinde, çoklu giriş-çoklu çıkış (MIMO) sistemleri gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, MATLAB ve ADS kullanılarak tasarlanan bir 6-bit dijital faz kaydırıcı devresinin performansını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Elde edilen bulgular, faz kaydırıcı devrelerin tasarımında ve optimizasyonunda önemli veriler sunmaktadır. Devre elemanlarının doğru bir şekilde hesaplanması, devrenin çalışma koşullarına göre ayarlanması ve ADS simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, devre performansının artırılması açısından kritik rol oynamaktadır. Özellikle, faz kaydırıcı devrelerin yüksek frekanslı sinyallerin kontrolünde gösterdiği başarı, bu tür devrelerin gelecekteki uygulamalarında daha fazla kullanım potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Faz kaydırıcı devrelerin optimize edilmesi ve sinyal kayıplarının minimize edilmesi, modern iletişim sistemlerinin etkinliğini artıracak ve daha verimli sistemlerin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, literatüre önerilen iki faz kaydırıcı devresinin yeni nesil haberleşme sistemlerinin ihtiyacına yönelik tasarlanan ve literatüre sunulan devrelerden daha güçlü sonuçlar vererek bu alanda güçlü bir alternatif olduğu görülmüştür. Her iki devrenin kafes yapıda tasarlanması ve anahtarlama yapılarak farklı faz kaydırma derecelerinde aynı devre elemanlarını kullanılması olanağını sağlamıştır. Bunun sonucunda da daha az devre elemanı kullanılarak devre karmaşıklığı giderilmiştir. Devrenin daha sade bir yapıya sahip olması çip alanını küçültecek, devre maliyetini düşürecek ve daha az parazittik etkilere maruz kalacaktır. Önerilen her iki devrede anahtarlı kapasitör ve PIN diyot olmak üzere farklı anahtarlama tekniği kullanılmıştır. Bu sayede önerilen iki devrenin literatürle anahtarlama tekniklerinin kıyaslamasının yapılmasının yanında kendi arasında kıyaslanmasının olanağı da sağlamıştır.

Önerilen Devre I' in 4.5-5.5 GHz bant aralığında maksimum RMS faz hatasının 5.304° ve maksimum RMS ekleme kaybının 7.236 dB olması bu frekans aralığında kabul edilebilir bir hata oranında çalıştığını göstermektedir. Aynı şekilde önerilen Devre II'nin 8-12 GHz bant aralığında maksimum RMS faz hatası 2.12° ve maksimum RMS ekleme kaybının 2.13 dB olması yine bu frekans aralığında kabul edilebilir bir hata oranında çalıştığını göstermektedir. Önerilen devreler performans bakımından kıyaslandığında PIN diyot teknolojisi kullanılarak anahtarlama gerçekleştirilen Devre II'nin daha yüksek frekans bandında ve daha geniş bant aralığında başarılı bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ek olarak PIN diyot anahtarlamasının Devre I' e göre daha düşük faz hatası verdiği görülmektedir.

Tablo 6' da tez kapsamında önerilen her iki devrenin literatürdeki faz kaydırıcı devrelerle karşılaştırması verilmiştir. [39]' deki çalışmada her ne kadar daha geniş frekans aralığına sahip olsa da 6dB kayıp gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında 2,13 dB maksimum RMS kayıp ile düşük kayıp gerektiren haberleşme sistemleri ve enerji verimliliği ön planda olan uygulamalar için büyü performans üstülüğü sağlayan faz kaydırıcı devresi önerilmiştir.

[40]'da önerilen çalışma 37-40 GHz gibi çok yüksek bir frekansta çalışsa da çok 10.5 dB gibi yüksek bir kayba sahiptir. Tez çalışmasında önerilen devreler ile basit ve uygulanabilirliği

kolay bir devre önerilmiştir. Önerilen bu devre ile daha düşük maliyetli uygulamalar için hızlı sonuçlar alınabilir.

Tez çalışmasında önerilen devreler, 7.236 dB ve 2.13 dB'nin altında kalan kayıp değeri ile [41]'de literatüre önerilen çalışmanın 8.1 dB'lik değerine göre daha az ekleme kaybı sağlamaktadır. Önerilen Devre II daha geniş bir frekans aralığında daha düşük faz hatası ve ekleme kaybına sahip olarak bu çalışmaya göre daha iyi bir performans sağlamaktadır.

[42]'te sunulan ve X-bandında çalışan GaN HEMT tabanlı 5 bitlik bir faz kaydırıcı, 11,8 ± 3,45 dB ekleme kaybı ve yaklaşık 6,23°'lik maksimum faz hatası sağlar. GaN teknolojisi yüksek güçte çalışmayı desteklese de genellikle PIN diyot tabanlı tasarımlara kıyasla daha karmaşık ve maliyetli uygulamalara yol açar. Önerilen çalışmalarda, PIN diyotlarının ve anahtarlı kapasitörlerin kullanımı daha kompakt ve uygun maliyetli bir çözüm sunarken, daha düşük faz hatası ve ekleme kaybı sağlar.

[43]'deki çalışma, 4,4-6 GHz C bandında çalışan 0,25 μm GaAs pHEMT teknolojisi kullanılarak üretilen 6 bitlik geniş bantlı bir faz kaydırıcı MMIC sunmaktadır. 3,7°'nin altında bir RMS faz hatası ve 4 ila 5,5 dB arasında değişen bir ekleme kaybı elde etmiştir. Mimarisi, geniş bant faz kontrolü için yüksek geçişli, düşük geçişli ve tüm geçişli ağları etkili bir şekilde entegre etse de GaAs pHEMT kullanımı önemli ölçüde üretim karmaşıklığı ve maliyet getirmektedir. Buna karşılık, bu tez çalışmasın da önerilen Devre II de daha düşük faz hatası elde etmektedir. Ayrıca Devre II daha geniş bant aralığında ve daha yüksek frekansta çalışmaktadır.

2019 yılında Avcı [25] tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında, simetrik kafes yapılı LC topolojisine dayalı özgün bir faz kaydırıcı sunulmuştur. Söz konusu çalışma geniş bir bant aralığında performans göstermiş olsa da önerilen devrelerimiz daha düşük faz hatası ve ekleme kaybı sergilemektedir. Ayrıca, iki farklı faz aralığında çalışan devrelerimiz, çalıştıkları bant aralığında sağladıkları üstün performans ile daha başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır.

S- ve L-bandı sistemlerindeki artan talepleri karşılamak üzere tasarlanan başka bir MMIC faz kaydırıcı [44]'da rapor edilmiştir. Bu tasarım, 1.5–3 GHz frekans aralığında çalışmakta olup 0.5 μm TriQuint pHEMT GaAs teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, GaAs teknolojisiyle uygulanmış olmasına rağmen devre, 10 dB gibi nispeten yüksek bir ekleme kaybı, 1.5 dB RMS ekleme kaybı ve 9° RMS faz hatası sergilemektedir. Bu bulgular, ileri

yarıiletken teknolojilerinde dahi önemli performans sınırlamalarının devam edebileceğini göstermekte ve söz konusu mimarilerin daha düşük maliyetli alternatiflere, örneğin anahtarlamalı kapasitör veya PIN diyot yaklaşımına, taşınmasının potansiyel avantajlarını vurgulamaktadır.

Tablo 5 : Literatürdeki faz kaydırıcılarla karşılaştırması

Ref/Yıl	Anahtarlama Elemanı	Bant Genişliği	RMS Ekleme Kaybı	RMS Faz Hatası
[39]/2024	2-µm GaAs	2-6 GHz	6 dB	9°
[40]/2023	150 nm GaN HEMT	37-40 GHz	5 dB	5.36°
[41]/2022	0.25-µm GaAs pHEMT	5-7.5	8.1dB	6.6°
[42]/2021	0.25 µm GaN HEMT	8-12	1.15 dB	6.23°
[43]/2020	0.25 µm GaAs	4.4-6GHz	5.5 dB	3.7°
[25]2019	0.18 µm CMOS	4.9-11.5	3.3 dB	4.9°
[44]/2017	0.5 µm TriQuint pHEMT GaAs	1.5-3	1.5 dB	9°
Önerilen Devre I	Anahtarlı Kapasitör (0.18 µm CMOS)	4.5-5.5 GHz	7.236 dB	5.3°
Önerilen Devre II	PIN diyot	8-12 GHZ	2.13 dB	2.12°

Genel olarak, önerilen her iki dijital faz kaydırıcı, GaAs ve GaN gibi ileri teknoloji tabanlı alternatiflerine kıyasla daha basit ve ekonomik bir tasarım sunmaktadır. Ayrıca, ekleme kaybı

ve faz doğruluğu açısından geliştirilmiş performans sergileyerek, kendilerini yeni nesil geniş bant haberleşme sistemleri için uygulanabilir bir seçenek haline getirmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yeni nesil iletişim teknolojilerinin gereksinim duyduğu düşük faz hatalı, düşük güç ekleme kayıplı, geniş bantlı ve sade bir yapıya sahip olan faz kaydırma devreleri geliştirilmiştir. Faz kaydırıcı devreleri bu ihtiyaçları karşılama amacında büyük rol oynamaktadır. Gelişen teknolojiyle hali hazırda bulunan faz kaydırıcı devrelerinin de yeni nesil teknolojilere ayak uydurması bu teknolojilerin verimliliğini artıracaktır. Bu sebeple faz kaydırıcı devreleri yeni nesil iletişim araçlarının performansını artırmaya yönelik sürekli gelişmesi gerekmektedir.

Önerilen dijital faz kaydırıcı devrelerinin, yeni nesil iletişim teknolojilerinin ihtiyaçlarını karşılayacak yapıda tasarlanması için öncelikle literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen bilgiler ışığında 3-bit tüm geçiren LC simetrik kafes ve 6-bit simetrik-T yapıya sahip iki farklı yeni devre tasarlanmıştır. Her iki devrede de anahtarlama elemanı kullanılarak iki farklı devre oluşumu ile 0°-360° arasında faz kaydırma elde edilebileceği açıkça girişte belirtilmiştir.

Tez kapsamında yapılan analiz sonucunda şu bulgulara ulaşılmıştır:

- Önerilen her iki devrede istenilen derecede faz kaymalarını yüksek doğrulukta sağlamış ve literatürdeki benzer tasarımlara oranla daha düşük faz hatası sağlamıştır.

- Güç aktarım kazançlarının kabul edilebilir bir seviyede olduğunu ve çıkış gücünün büyük seviyede korunabildiğini göstermiştir.

- PIN diyotun kullanıldığı devrede geniş bant, daha yüksek frekans, daha düşük ekleme kaybı ve daha düşük faz hatası elde edilmiştir.

- Tasarlanan devreler C-bant ve X-bant haberleşme uygulamalarında faz dizili anten sistemleri için çalışmaya uygundur.

- Her iki devrenin kendi bantlarında literatürle karşılaştırıldığında, düşük hata oranına ve ekleme kaybına sahip olmaları sebebiyle rekabetçi olduğu gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. **Fiziksel Prototip ve Ölçüm Çalışmaları:** Tasarlanan devrelerin çip düzeyinde gerçekleştirilmesi ve laboratuvar ortamında ölçüm sonuçlarının alınması, simülasyon sonuçlarını doğrulayacaktır.

2. **Daha Geniş Frekans Bantları:** Devrelerin daha yüksek frekans bantlarında optimize edilmesi gelecek nesil haberleşme sistemleri için kullanılabilmesini sağlayacaktır.

3. **Daha Düşük Ekleme Kaybı:** Devre elemanları ve anahtarlama teknolojileri iyileştirilerek ekleme kayıplarının azalması sağlanacaktır.

4. **Entegrasyon:** Faz kaydırıcı devreler, faz dizili anten dizileri ile entegre edilerek gerçek sistem performansı ölçülebilir.

Sonuç olarak, bu tezde sunulan faz kaydırıcı devreleri geniş bantlı, düşük faz hatalı ve kabul edilebilir seviyede ekleme kaybına sahip olmasıyla yeni nesil haberleşme sistemlerinde kullanılmak için güçlü bir adaydır. Çalışmanın geliştirilmesi ve farklı uygulama alanlarında test edilmesi, gelecek araştırmalar için önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1]. Šmahel, D. (2006). ELECTRONIC COMMUNICATION AND ITS SPECIFICS.

[2]. Nambi, T., Sakthivel, P.N., Krishna, T., Shukla, S., Sun, J., Sauvola, J.J., Hui, S.Y., & Yeung, K.H. (2014). Survey of Evolution Analytical Report on Upgradation Technology from 1G to 5G. International Journal of Computer Applications, 106, 4-10.

[3]. Çağlayan, S. F., İsbit, M., İlgün, S., & Erdoğan, E. (2020, October). Design and comparison of GFDM receivers for 5G communication systems. In 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.

[4]. Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. (2017). Technologies for 5G networks: Challenges and opportunities. It Professional, 19(1), 12-20.

[5]. Giri, G. S., Maddahi, Y., & Zareinia, K. (2021). An application-based review of haptics technology. *Robotics*, *10*(1), 29.

[6]. Hakak, S., Gadekallu, T. R., Maddikunta, P. K. R., Ramu, S. P., Parimala, M., De Alwis, C., & Liyanage, M. (2023). Autonomous Vehicles in 5G and beyond: A Survey. *Vehicular Communications*, *39*, 100551.

[7]. Devi, D. H., Duraisamy, K., Armghan, A., Alsharari, M., Aliqab, K., Sorathiya, V., ... & Rashid, N. (2023). 5g technology in healthcare and wearable devices: A review. *Sensors*, *23*(5), 2519.

[8]. Turer, B., & Yilmaz, M. (2022). Emerging technologies in 5G cellular communication systems. European Journal of Science and Technology, 36, 128-133.

[9]. Majumdar, A. K. (2022). Technology Developments, Research Challenges, and Advances for FSO Communication for Space/Aerial/Terrestrial/Underwater (SATU) Links. *Laser Communication with Constellation Satellites, UAVs, HAPs and Balloons: Fundamentals and Systems Analysis for Global Connectivity*, 129-158.

[10]. Payami, S., Ghoraishi, M., Dianati, M., & Sellathurai, M. (2018). Hybrid beamforming with a reduced number of phase shifters for massive MIMO systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67(6), 4843-4851.

[11]. Chen, J. C. (2017). Hybrid beamforming with discrete phase shifters for millimeter-wave massive MIMO systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66(8), 7604-7608.

[12]. Abose, T. A., Olwal, T. O., Daniel, A. D., & Hassen, M. R. (2024). Performance Comparison of Hybrid Switch, Phase Shifter and Lens Network over Hybrid Beamforming in Millimeter Wave Massive MIMO. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, *20*(3).

[13]. Monnai, Y., Lu, X., & Sengupta, K. (2023). Terahertz beam steering: from fundamentals to applications. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 44(3), 169-211.

[14]. Alqaisei, M. A., Sheta, A. F. A., Elshafiey, I., & Altamimi, M. (2023). Design of hybrid beamforming system based on practical circuit parameter of 6-bit millimeter-wave phase shifters. Micromachines, 14(4), 875.

[15]. Lialios, D. I., Ntetsikas, N., Paschaloudis, K. D., Zekios, C. L., Georgakopoulos, S. V., & Kyriacou, G. A. (2020). Design of true time delay millimeter wave beamformers for 5G multibeam phased arrays. Electronics, 9(8), 1331.

[16]. Sethi, A., Aikio, J. P., Shaheen, R. A., Akbar, R., Rahkonen, T., & Pärssinen, A. (2019). A four channel phased array transmitter using an active RF phase shifter for 5G wireless systems. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 98, 419-428.

[17]. Ali, E., Ismail, M., Nordin, R., & Abdulah, N. F. (2017). Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 18, 753-772.

[18]. Dreifuerst, R. M., & Heath, R. W. (2023). Massive MIMO in 5G: How beamforming, codebooks, and feedback enable larger arrays. IEEE Communications Magazine, 61(12), 18-23.

[19]. Zhuang, Q., Yan, F., Xiong, Z., Yang, M., & Liu, M. (2023). A novel high-power rotary waveguide phase shifter based on circular polarizers. *Electronics*, *12*(13), 2963.

[20]. Abdollahy, H., Farahbakhsh, A., & Ostovarzadeh, M. H. (2021). Mechanical reconfigurable phase shifter based on gap waveguide technology. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *132*, 153655.

[21]. Psychogiou, D., Li, Y., Hesselbarth, J., Peroulis, D., Hierold, C., & Hafner, C. (2013). Continuously variable W-band phase shifters based on MEMS-actuated conductive fingers. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, *5*(4), 477-489.

[22]. Yarman, B. S. (2022). *Design of Digital Phase Shifters for Multipurpose Communication Systems*. River Publishers.

[23]. Wu, X.-L., Wang, J.-B., Ye, J.-Y., Jiang, X., & Hua, G. (2023). A 2.2–4.2-GHz wideband analog phase shifter MMIC with low RMS phase/amplitude error. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 33*(4), 415–418. https://doi.org/10.1109/LMWT.2022.3221460

[24]. Singhal, N., & Hasan, S. M. R. (2022). A 25–30-GHz RMS error-minimized 360° continuous analog phase shifter using closed-loop self-tuning I/Q generator. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 30(6), 720–731. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2022.3162893

[25]. Avcı, C. (2019). Yeni simetrik kafes tabanlı geniş bant ve geniş faz aralıklı dijital faz kaydırıcı tasarımı (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[26]. Atasoy, E. (2017). Modern haberleşme sistemlerinde kullanılan ardışık anten dizileri için mini faz kaydırıcı devre tasarımları (Doktora tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[27]. Quirarte J.L.R., Starski J.P., 1993, Novel Schiffman Phase Shifters, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 41, no. 1.

[28]. Timsina R. L., Richard A. M. and Kubwimana J. L. (2017). A compact design of switched line phase shifter for a microstrip phased array antenna. Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERSFALL), pp. 1839–1844.

[29]. Zhang J. and Cheung S. W. (2014). Design of 90° switched line phase shifter with constant phase shift using CRLH TL. PIERS Proceedings, pp. 1655-1658.

[30]. Dittloff J., Arndt F. and Grauerholz D. (1988). Optimum design of waveguide E-plane stub-loaded phase shifters. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 36(3), pp. 582–587.

[31]. Atwater H. A. (1985). Circuit design of the loaded-line phase shifter. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-33, pp. 626–634.

[32]. Bahl I. J. anf Gupta K. C. (1980). Design of loaded-line p-i-n diode phase shifter circuits. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-28, pp. 219– 224.

[33]. Tander, B. (1996). Simetrik LC kafes tabanlı faz kaydırıcılar (Doktora tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

[34]. Atasoy, E., Piri, F., & Yarman, B. (n.d.). Symmetric lattice 45°, 90°, and 180° digital phase shifter at 3–6 GHz for LTE, WiFi, radar applications.

[35]. Yarman, B. S. (1991). New approaches to design digital phase shifters over the complete phase plane. Medical Journal of the Islamic World Academy of Sciences, 4, 14–25.

[36]. Liu, M. M. (2006). Demystifying switched capacitor circuits. Elsevier.

[37]. Crols, J., & Steyaert, M. (1994). Switched-opamp: An approach to realize full CMOS switched-capacitor circuits at very low power supply voltages. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 29(8), 936–942.

[38]. Sánchez-Sinencio, E., & Allen, P. E. (1984). Switched capacitor circuits. Van Nostrand Reinhold.

[39]. Wu, X., Wang, J., Ye, J., Sun, J., & Hua, G. (2024). A 2–6 GHz continuous tuned phase shifter MMIC achieving 0.9 dB RMS amplitude error. IEICE Electronics Express, 21(3), 20230504–20230504.

[40]. Song, J. H., Lee, E. G., Lee, J. E., Son, J. T., Kim, J. H., Baek, M. S., & Kim, C. Y. (2023). A 37–40 GHz 6-bits switched-filter phase shifter using 150 nm GaN HEMT. Nanomaterials, 13(20), 2752.

[41]. Luo, Q., Wu, Y., Wang, W., & Chen, W. (2022, December). Design of a Wideband Compact L-band 5-bit MMIC Phase Shifter. In 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China) (pp. 1-3). IEEE.

[42]. Chiu, H.-C., Chen, C.-M., Chang, L.-C., & Kao, H.-L. (2021). A 5-bit X-band GaN HEMT-based phase shifter. Electronics, 10(6), 658. https://doi.org/10.3390/electronics10060658

[43]. Huang, F., Chen, W., Lv, G., & Feng, Z. (2020, September). A wideband 6-bit phase shifter MMIC for C-band application. In 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) (pp. 1–3). IEEE.

[44]. Chen, J., Mou, S., Ma, K., & Meng, F. (2020). A 3–6-GHz wideband compact 6-bit phase shifter in 0.5–1 μm GaAs technology. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 30(8), 794–797. https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3007836

EKLER

Uyarı: Tez çalışmasında kullanılan hesaplamalar, tablolar, şekiller, veriler, kaynak kodları, formlar vb. materyal metin içinde akışı bölecek kadar çoksa bu bölümde ayrı başlıklar halinde ekleyebilirsiniz (Örn: Kaynak Kodlar, Anket Formları, Onam Formu Örneği başlıkları gibi). Ekler kısmına eklenmeyecek ve materyali olmayan tez çalışmaları için **EKLER** bölümü kaldırılabilir. Ekler bölümüne ait yazım kuralları ile ilgili tez yazım kılavuzu incelenmelidir. Bu uyarıyı okuduktan sonra siliniz!

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Sena_Taş

ORİJİNALLİK RAPORU

%8	%7	%3	%5
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%4
2	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	%3
3	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
4	Submitted to Ataturk Universitesi Öğrenci Ödevi	<%1
5	Heydarli, Gudrat. "Elektronik Olarak Ayarlanabilen 2.45 GHz Faz Kaydırıcı Devresi Tasarımı.", Izmir Katip Celebi University (Turkey) Yayın	<%1
6	Submitted to Excelsior College Öğrenci Ödevi	<%1
7	cdn.t3kys.com İnternet Kaynağı	<%1
8	toad.halileksi.net İnternet Kaynağı	<%1
9	eprints.utar.edu.my İnternet Kaynağı	<%1
10	K. Lasanen, J. Ko. "A 1-V analog CMOS front-end for detecting QRS complexes in a cardiac	<%1

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Öğrenci Adı SOYADI
(İmza)