

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIFIRINCI DERECE DEN REZONANSLI ANTEN TABANLI ELEKTRON
PAKETÇİK UZUNLUK MONİTÖRÜ

Can DOKUYUCU

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SIFIRINCI DERECEDEN REZONANSLI ANTEN TABANLI ELEKTRON PAKETÇİK UZUNLUK MONİTÖRÜ

Can DOKUYUCU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Bu tezde, parçacık hızlandırıcılarında kritik öneme sahip paketçik uzunluğunun ölçümü için alternatif bir yöntem ele alınmıştır. Hızlandırıcılarda elektron demeti, paketçikler halinde kesikli olarak üretilir. Elektron demetinin içerisindeki bir paketçinin uzunluğu (atma genişliği), hızlandırıcı kovukların ve çeşitli hızlandırıcı aygıtlarının düzgün bir şekilde çalıştırılabilmesi açısından önem arz etmektedir. Hali hazırda kullanılan ölçüm yöntemleri, karmaşık elektromanyetik ve optik yapılar içermektedir. Ayrıca kullanılan birçok yöntem demetin yok edilmesini gerektirmektedir. Elektron paketçikleri, iletken hat içerisinde ilerlerken elektromanyetik etkileşimlerden dolayı, ilerlediği metalik yapıların içerisinde temel frekanslarının uyarılmasına neden olur. Oluşan uyarımlar elektron paketçığının barındırdığı frekans bileşenlerinden kaynaklandığından, bu salınımların genliği paketçik uzunluğu hakkında bilgi barındırır. Düşük frekans bandındaki salınımların dalgaboyu büyük olacağından, tespit için gerekli yapı, demet hattı içerisine sığmayacaktır. Tez çalışmasında, paketçik boyutu hakkında bilgi veren harmoniklerin tespit ve analiz edilmesi için sıfırıncı dereceden rezonatör (SDR) anten kullanımı araştırılmıştır. SDR antenler, sağ ve sol elli iletim hatlarının kombinasyonu ile oluşturulan rezonatif yapılardır. Sağ elli iletim hatları doğada kendini gösterirken sol elli iletim hatları yapay olarak üretilebilir. Sol elli iletim hatları negatif kırılma indisine sahip olduklarından ters kırılma, tersine Cherenkov etkisi gibi kendine has özelliklere sahiptir. İki iletim hattının kombine olarak üretilmesi sonucunda, sıfırıncı rezonans durumu elde edilir. SDR frekansında, oluşan yapının boyutları dalgaboyundan bağımsız hale gelmektedir. Bu durum, düşük frekansta küçük yapıların oluşturulmasına olanak sağlar. Tez çalışmasında, 13MHz tekrarlama frekansı ve 450 ps atma genişliğine sahip elektron demeti için harmonik algılaması yapan SDR antenli prototip düzenek tasarlanarak üretim ve ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, 1351 MHz frekansında salınım yapan harmoniğin SDR antenler ile algılanabildiği gösterilmiştir.

Haziran 2024, 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sıfırıncı dereceden rezonans, Paketçik uzunluğu, Radyo Frekans, Spektrum, Anten, Rezonatör, Demet hattı, Atma sinyali, Hızlı Fourier Dönüşümü

ABSTRACT

Master Thesis

ZEROth ORDER RESONANT ANTENNA BASED ELECTRON BUNCH LENGTH MONITOR

Can DOKUYUCU

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

In this work, an alternative method for measuring bunch length in particle accelerators is developed. In the particle accelerators, bunch length has a crucial importance for operating accelerator devices correctly. There are currently used methods for measuring bunch length that contains complex electromagnetic and optical systems. Moving charges inside of the metallic structure causes excitations of the fundamental modes. These excitations caused by frequency components of the electron bunch. Therefore, excited modes contains information about bunch length. In order to detect mode frequencies individually, resonator structures should be used to filter out unwanted frequencies. In general principle, low frequency resonators have bigger structures than high frequency resonators. In this thesis, zeroth order resonant antenna is proposed for the detection of the frequency components. ZOR antennas are metamaterial-based structures that corresponds from combination of the right and left handed transmission lines. Right handed transmission lines widely appear in nature, meanwhile left-handed transmission lines can only be created artificially. Combination of right and left handed transmission lines creates zeroth order resonance frequency. At the ZOR frequency, size of the structure becomes independent from wavelength. Because of that, with ZOR antennas, low frequency components of the electron beam could be detected without size problem. In this work, a prototype of the designed measurement setup is prepared to detect harmonics of the electron beam with 13 MHz repetition rate and 450 ps bunch length. Results of the work showed that, ZOR antenna based measurement system can detect beam harmonic frequency at 1351 MHz.

June 2024, 68 pages

Key Words: Zeroth order resonance, Bunch length, Radio frequency, Spectrum, Antenna, Resonator, Beamline, Pulse signal, Fast Fourier transform

TEŞEKKÜR

Bütün eğitim ve öğretim hayatım boyunca, maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve her türlü fedakarlığı yaparak bu günlere gelmemi sağlayan, annem Funda TÖRÜN'e ve babam İlhan DOKUYUCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen ve metalmalzemeler ile tanışmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. Barış AKAOĞLU ve Sayın Doç. Dr. Fulya BAĞCI (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yardım ve tavsiyelerinden dolayı arkadaşım İsmail Burak ATEŞ'e teşekkür ederim.

Can DOKUYUCU
Ankara, Haziran 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1 Paketçik Uzunluğu Ölçümü İçin Kullanılan Yöntemler	10
2.1.1 Deflektör Kovuk kullanımı.....	10
2.1.2 Elektro-Optik yöntemler	12
2.1.3 Demet Pozisyon Monitörü ile paketçik uzunluğu ölçümü	14
2.1.4 Rezonatif yapılar ile paketçik uzunluğu ölçümü.....	16
2.2 Elektron Paketçiklerinin Elektromanyetik Etkileşimleri.....	19
2.2.1 Elektron paketçiklerinin oluşturduğu ışımlar (wakefields)	19
2.2.2 Elektron paketçiği kaynaklı ışımların paketçik uzunluğu ile ilişkisi	23
2.3 Sıfıncı Dereceden Rezonanslı Antenlerin Çalışma Prensipleri.....	25
2.3.1 Metamalzeme Antenlerin iletim hattı yaklaşımı	27
2.3.2 Kompozit Sağ-Sol Elli İletim Hatları	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1 Sıfıncı Dereceden Anten Tabanlı Elektron Paketçik Uzunluk Monitörü Tasarımı	39
3.2 Paketçik Kaynaklı Harmonik Sinyallerinin Belirlenmesi ve Atma Sinyali Analizi	40
3.3 SDR Anten Tasarımı ve Frekans Optimizasyonu	43
3.4 Filtre Kovuk Tasarımı	48
3.5 Düzenegin Hazırlanması.....	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	56
4.1 SDR Antenlerin Simülasyon Bulguları	56
4.2 Prototip SDR Antenlerin Karakterizasyonu	60
4.3 Prototip Düzenegin Frekans Tepkisinin Ölçümü.....	63
5. SONUÇ.....	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ.....	68

SİMGELER DİZİNİ

R	Direnç
L	İndüktans
C	Kapasitans
Z	Empedans
X_c	Kapasitif reaktans
X_L	İndüktif reaktans
ε	Dielektrik sabiti
μ	Manyetik geçirgenlik
β	Faz sabiti
σ	Paketçik uzunluğu
ω	Açısal Frekans
f	Çizgisel Frekans
E	Elektrik Alan
B	Manyetik Alan

Kısaltmalar

BPM	Beam Position Monitor (Demet Pozisyon Monitörü)
CCD	Charge coupled device (Yük bağlaşımlı aygıt)
CST	Computer Simulation Technology
dB	DesiBell
dBv	DesiBell Volt
dBm	Desibell miliwatt
GHz	Giga Hertz
MHz	Mega Hertz
ns	Nanosaniye
ps	Pikosaniye
RF	Radio frekans
SEL	Serbest elektron lazeri
SDR	Sıfırıncı Dereceden Rezonans
VNA	Vector Network Analyser (Vektör ağ analizörü)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Dünya çapında çeşitli hızlandırıcı tabanlı ışınım kaynakları (www.wayforlight.eu) sol üstten başlayarak, Flash, EuXFEL, ALBA, BESSY II.....	1
Şekil 1.2 BESSY II Sinkrotron tesisinin yapısı (www.helmholtz-berlin.de).....	2
Şekil 1.3 Serbest elektron lazeri türleri(Saldin vd. 1999) a) Yükselteç tipi SEL b) Osilatör tipi SEL.....	4
Şekil 1.4 Radyo frekans kovukların eşlenik devre yapısı(Gerigk 2010).....	5
Şekil 1.5 Çizgisel hızlandırıcılarda paketçikler halinde demet üretimi ve temel hızlandırma sisteminin çalışma prensibi.....	6
Şekil 1.6 Sol-elli materyal (Shelby vd. 2001).....	8
Şekil 2.1 Hat içerisinde ilerleyen elektron demetinin simülasyon görüntüsü ve zamana göre yük dağılımı.....	10
Şekil 2.2 Deflektör kovuğun çalışma prensibi (Arpaia vd. 2020).....	11
Şekil 2.3 Çeşitli elektro-optik paketçik uzunluğu ölçüm yöntemleri(Lefevre 2015).....	12
Şekil 2.4 BPM sisteminin şematik gösterimi(Forck 2011)	14
Şekil 2.5 Çeşitli paketçik genişlikleri için BPM sinyal spektrumu.(Evtushenko 2004)	15
Şekil 2.6 Harmonik tespiti için kullanılan bir kovuğun simülasyon görüntüsü (Wang vd. 2017).....	16
Şekil 2.7 Dalga kılavuzu ile harmoniklerin algılanmasında kullanılan düzenek (Zimmermann vd. 1998).....	17
Şekil 2.8 Dalga kılavuzunda ilerleyen modlarının filtrelenmesi için kullanılan düzenek(Zimmermann vd. 1998)	18
Şekil 2.9 Dalga kılavuzunun algıladığı harmonik spektrumu (Zimmermann vd. 1998).....	18
Şekil 2.10 Görüntü yük oluşumu (Purcell 2013)	19
Şekil 2.11 İletken bir boru içersinde görelî hızlarda ilerleyen yüklü bir parçacığın elektrik alan dağılımı(Dohlus ve Wanzenberg 2015).....	20
Şekil 2.12 Çapı genişleyen bir boruda ilerleyen elektron demetinin elektromanyetik simülasyonu (Dohlus ve Wanzenberg 2015).....	20
Şekil 2.13 Demetin ilerlediği geometrinin eşlenik devresi	22
Şekil 2.14 Değişken genişlikli atma sinyali (a) ve frekans spektrumu (b).....	23
Şekil 2.15 a) Periyodik atma sinyali b) kesikli sinyal spektrumu	24
Şekil 2.16 Bir malzeme için dielektrik ve manyetik geçirgenliklerin aldıkları işarete göre durumları (Caloz, Itoh 2006).....	26
Şekil 2.17 Sağ-elli iletim hattı eşlenik devresi.....	27
Şekil 2.18 Sağ-elli iletim hattının dağınım diyagramı	29
Şekil 2.19 Sol-elli iletim hattı eşlenik devresi	30
Şekil 2.20 Sol-elli iletim hattının diyagramı	31
Şekil 2.21 Sağ-sol elli iletim hattı eşlenik devresi(Caloz ve Itoh 2006).....	32

Şekil 2.22 Sağ-sol elli iletim hattı iletim ve yansıma parametreleri (Caloz ve Itoh 2006)	32
Şekil 2.23 Dengeli sağ-sol elli iletim hattının dağınım diyagramı (Lai vd. 2004).....	33
Şekil 2.24 Sağ-sol elli iletim hatlarında seri ve şönt rezonansının oluşumu (Caloz ve Itoh 2006)	34
Şekil 2.25 dengesiz sağ-sol elli iletim hattının dağınım diyagramı (Lai vd. 2004)	35
Şekil 2.26 ideal dengesiz sağ-sol elli iletim hattının iletim ve yansıma parametreleri (Caloz ve Itoh 2006)	35
Şekil 2.27 Çeşitli hücre sayısına sahip dengeli sağ-sol elli iletim hatlarının iletim parametreleri (Caloz ve Itoh 2006).....	37
Şekil 2.28 8 hücreli kısadevre edilmiş sağ-sol elli iletim hattının oluşturduğu rezonans frekansları	38
Şekil 3.1 Sıfıncı dereceden rezonanslı antenler ile paketçik uzunluğu ölçümü için tasarlanan düzeneğin blok diyagramı	39
Şekil 3.2 İdeal durumda hızlandırıcı parametrelerinden elde edilen paketçik zaman yapısı (13 MHz tekrarlama frekansı ve 450 ps atma genişliği)	40
Şekil 3.3 İdeal durumda periyodik elektron paketçiklerinden kaynaklanan sinyalin spektrumu	41
Şekil 3.4 Periyodik atma sinyalinin spektrumunun yakınlaştırılmış kesiti	41
Şekil 3.5 Paketçik uzunluğu değişiminin sinyal spektrumu üzerindeki etkisi ve harmonik seçimi.....	42
Şekil 3.6 a) Sağ-sol elli iletim hattı geometrisi b) Sağ-sol elli iletim hattı eşlenik devresi (Shi 2011)	43
Şekil 3.7 İnterdijital kapasitör ve stub indüktöründen oluşan sağ-sol elli iletim hattının eşlenik devresi (Caloz vd. 2004).....	44
Şekil 3.8 İnterdijital kapasitörün simülasyon görüntüsü.....	46
Şekil 3.9 Stub indüktörünün simülasyon görüntüsü	46
Şekil 3.10 Çeşitli hücre sayıları için Qucs programından elde edilen ideal durumdaki dağınım diyagramları.....	47
Şekil 3.11 Tasarımı yapılan sıfıncı dereceden anten birim hücresi	48
Şekil 3.12 Konik bir kovukta demet kaynaklı elektromanyetik dalganın ilerleyişinin simülasyon görüntüsü.....	49
Şekil 3.13 a) Elektron paketçığının kovuğun ortasında bulunduğu durumdaki elektrik alan dağılımı b) Elektron paketçığının kovuktan ayrıldıktan sonra oluşturduğu uyarımın elektrik alan dağılımı	50
Şekil 3.14 Çeşitli kovuk yarıçapları için kovuk üzerine yerleştirilen prop üzerinden alınan potansiyel ölçümleri	50
Şekil 3.15 Tasarlanan 3 segmentli düzeneğin şematik gösterimi (mavi ok işareti paketçiklerin yönünü göstermektedir.)	51
Şekil 3.16 Sıfıncı dereceden rezonanslı antenin CNC cihazı ile üretim süreci	51
Şekil 3.17 Üretimi tamamlanmış sıfıncı dereceden rezonanslı anten	52
Şekil 3.18 Çift portlu sağ-sol elli iletim hattı hücresi prototipi.....	52
Şekil 3.19 Prototip kovuğun iç görüntüsü.....	53

Şekil 3.20 Prototip kovuğun birleştirilmiş hali	53
Şekil 3.21 Eş eksenli kablunun iç iletkeninin kovuk içerisindeki konumlanması	54
Şekil 3.22 a) Sıfırıncı dereceden antenin elektrik alan dağılımı b) Kovuk içerisinde demet kaynaklı oluşan elektrik alan dağılımı ve SDR antenin kovuk içerisindeki konumu ..	54
Şekil 3.23 SDR antenin filtre kovuk içerisinde konumlandırılması	55
Şekil 4.1 Tasarlanan geometrinin empedans uyumlu durumda şematik simülasyonundan elde edilen iletim ve yansıma parametreleri (8 hücreli)	56
Şekil 4.2 Tasarlanan hücrenin empedans uyumlu durumunun Qucs simülasyon şematiği.....	57
Şekil 4.3 Empedans uyumlu durumda tek hücreli yapının yansıma ve iletim parametresi (Qucs)	57
Şekil 4.4 Tasarlanan hücrenin açık devre durumunun Qucs simülasyon şematiği	57
Şekil 4.5 Açık devre durumunda tek hücreli yapının yansıma parametresi (Qucs).....	58
Şekil 4.6 Tasarlanan hücrenin kısa devre durumunun Qucs simülasyon şematiği	58
Şekil 4.7 Kısa devre durumunda tek hücreli yapının yansıma parametresi (Qucs)	58
Şekil 4.8 Empedans uyumlu durumda tek hücreli yapının iletim parametresi (CST).....	59
Şekil 4.9 Açık devre durumunda tek hücreli yapının yansıma parametresi (CST).....	59
Şekil 4.10 Kısa devre durumunda tek hücreli yapının yansıma parametresi (CST)	59
Şekil 4.11 Rezonatör hücre (Solda) iletim hattı hücresi (sağda).....	60
Şekil 4.12 Rezonatör hücrenin S11 parametresinin ölçümü	60
Şekil 4.13 Üretilen kısa devre edilmiş SDR antenin yansıma parametresi ölçümü ve CST sonucu ile karşılaştırılması	61
Şekil 4.14 Üretilen açık devre SDR antenin yansıma parametresi ölçümü ve CST sonucu ile karşılaştırılması	61
Şekil 4.15 İki portlu SDR antenin iletim parametresinin ölçüm düzeneği.....	62
Şekil 4.16 Elde edilen dağılım diyagramının simülasyon sonuçları (CST, Qucs) ile karşılaştırılması	63
Şekil 4.17 Üretilen yapının empedans uyumlu durumunda iletim parametresinin ölçümü ve CST simülasyon sonucu ile karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.18 Tamamlanmış düzeneğin s21 parametresinin ölçümü	64
Şekil 4.19 Tamamlanmış düzeneğin yansıma (anten üzerinden) ve geçiş parametresi ölçüm sonuçları	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 ELBE hızlandırıcı parametreleri (Evtushenko 2004)40

Çizelge 3.2 Spektrum üzerinden seçilen harmonik frekansları.....42



1. GİRİŞ

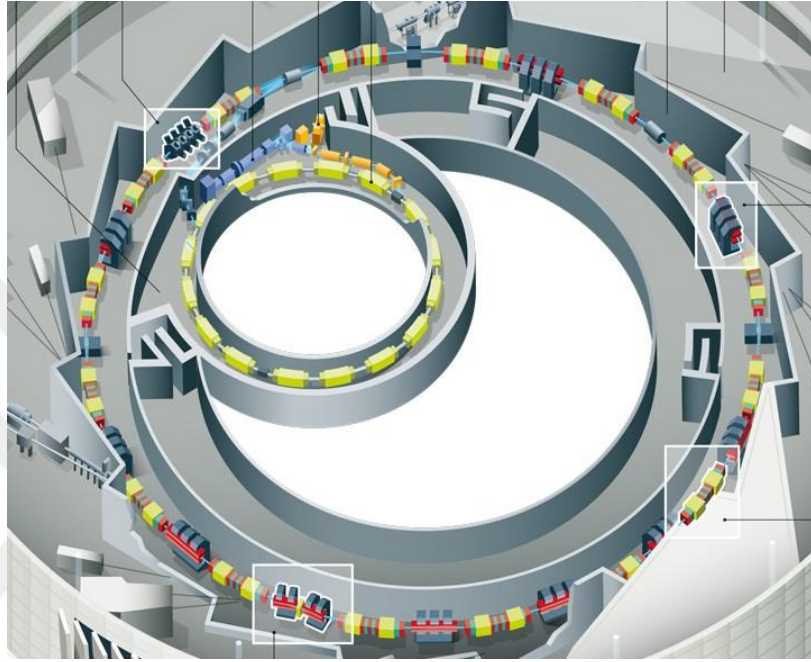
Çalışmada parçacık hızlandırıcı tabanlı ışınım kaynaklarında paketçik uzunluğunun, metamateryaller yardımı ile ölçümü ele alınmıştır. Parçacık hızlandırıcıları, çeşitli amaçlar için kullanılan karmaşık makinelerdir. Yaygın kullanım alanlarından birisi ışınım kaynağı olarak kullanımıdır. Işınım kaynakları, arkeoloji, biyoloji, ecza ve malzeme bilimi gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Dünya çapındaki çeşitli ışınım kaynağı tesisleri şekil 1.1’de görülebilir.



Şekil 1.1 Dünya çapında çeşitli hızlandırıcı tabanlı ışınım kaynakları (www.wayforlight.eu) sol üstten başlayarak, Flash, EuXFEL, ALBA, BESSY II

Işınım kaynaklarının genel olarak çembersel ve çizgisel olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Her iki ışınım kaynağının da ışık üretim prensibi manyetik alan altında yön değiştiren yüklü parçacıkların yaydığı sinkrotron radyasyonu temelli olup, üretim yöntemleri ve elde edilen ışığın yapısı farklılık göstermektedir. Çembersel hızlandırıcılar, sinkrotron tipi ışınım kaynağı olarak kullanılır. Sinkrotron tipi ışınım kaynakları genellikle iki ayrı çembersel hattan oluşur. Çembersel hatlardan birisi hızlandırma halkası olarak anılırken diğer halka depolama halkası olarak isimlendirilir. Depolama

halkalarının çevresi genel olarak hızlandırma halkalarından büyük olmaktadır. Hızlandırma halkasının işlevi, elektron demetini istenilen enerji seviyesine çıkararak depolama halkasına aktarımını sağlamaktır. Hızlandırma halkası aynı zamanda enjektör hattı olarak da anılmaktadır.



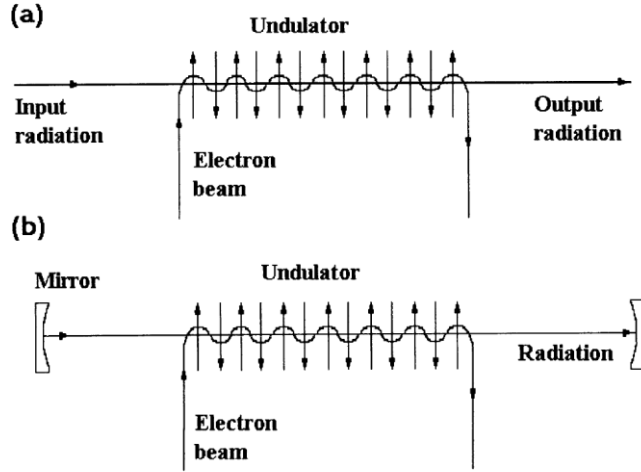
Şekil 1.2 BESSY II Sinkrotron tesisinin yapısı (www.helmholtz-berlin.de)

Uygun enerjiye çıkarılan elektron demeti, depolama halkasına uygun zamanlamada aktarılarak hat içerisindeki yük yoğunluğunun artırılması sağlanır. Aktarım işleminden sonra, hızlandırma hattı kapatılarak üretilen demetin hat içerisinde dönmesi sağlanır. Depolama hattı üzerine ışık üretimi için dipol magnet haricinde, undulator ve wiggler magnet yerleştirilerek de ışık üretimi sağlanabilir (Undulator ve Wiggler magnetleri zıt kutuplardan oluşan kalıcı magnetlerin karşılıklı ve belirli bir periyotta dizilmesi ile oluşan magnet yapılarıdır.). Dipol magnetin aksine undulator ve wiggler magnetleri belirli bir dalgaboyunda ışık üretimi sağlar ve üretilen ışığın dalgaboyu, magnetik alan değiştirilerek ayarlanabilir. Sinkrotron ışınım kaynaklarında, aynı elektron demeti tekrar tekrar kullanıldığından ve demet yapısı çembersel hızlandırıcılarda periyodik örgü olarak ilerlediğinden, birden fazla ve farklı amaçlarda ışık hatlarının kurulmasına olanak sağlar. Sinkrotron tipi ışınım kaynakları, tomografi, spektroskopi, kristalografi gibi ölçüm tekniklerinde kullanılabilir.

Çizgisel tipteki hızlandırıcılar, serbest elektron lazeri (SEL) olarak kullanılır. Serbest elektron lazerlerinde genellikle undulatör magnetler yardımı ile ışık üretilir. Serbest elektron lazerleri kullanım amacına göre genel olarak, osilatör ve yükselteç tipi olmak üzere iki türde kurulabilmektedir.

Yükselteç tipi serbest elektron lazerleri, kılavuz bir foton demeti ile göreceli hızlarda ilerleyen elektron paketçığının modüle edilerek, undulatör düzenek içerisinde koherent ışık üretiminin sağlanması prensibi ile çalışır. Normal şartlar altında undulatör ile elde edilen ışık, undulatör kutuplarına rastgele zamanlarda ulaşan elektronlardan dolayı koherent özellik taşımamaktadır. Kılavuz ışık, elektron paketçığı ile elektromanyetik olarak etkileştiğinde, paketçik içerisindeki elektronların yavaşlayarak ya da hızlanarak yeniden konumlanmasına neden olur. Yeniden konumlanan elektronlar, paketçığın alt paketçiklere bölünmesine yol açar ve bu paketçikler mikro paketçik olarak anılır. Oluşan mikro paketçikler arasındaki mesafe kılavuz ışığın dalga boyunda olacaktır. Undulatör kutuplarından geçen modüle olmuş paketçığın oluşturduğu ışık, mikro paketçiklerin zaman yapısından dolayı eş fazlı olarak oluşur. Eş fazlı oluşan ışık, yapıcı girişim oluşturarak çok yüksek şiddetlere ulaşır. Serbest elektron lazerlerinde kılavuz ışık demeti olarak undulatörden elde edilen ışığın kullanıldığı gibi harici bir ışık kaynağında kullanılabilir. Yükselteç tipi serbest elektron lazerlerinde elektron demeti, undulatörlerden tek seferde geçirilerek üretilen ışığın şiddetinin doyuma ulaşması sağlanır.

Osilatör tipteki serbest elektron lazerleri yükselteç tipi serbest elektron lazerlerinin geri beslemeli olarak kurulmuş halidir. Osilatör SEL'ler üretilen ışığın, iki ayna arasında yansıtılması vasıtasıyla, tekrar tekrar elektron demeti üzerine bindirilerek, undulatör içerisinde geçirilmesi prensibi ile çalışır. Bu prensibin çalışabilmesi için, ışık atmasının aynalar arasındaki periyodunun, elektron paketçiklerinin tekrarlama frekansı ile eşit olması gerekir. Osilatör tipi SEL'lerde senkronizasyon kritik öneme sahiptir aksi durumda, undulatörde oluşan yeni ışığın fazı ile yansıyan ışığın fazı uyuşmayacağından yapıcı girişim oluşmayacaktır. Aynalar arasında yansıyan ışığın şiddeti her tur attığında yapıcı girişimden dolayı artacaktır. SEL içerisindeki ışıyım kazancının, ışıyım kayıplarından fazla olduğu durumda lazer üretimi gerçekleşir (Saldin vd. 1999).

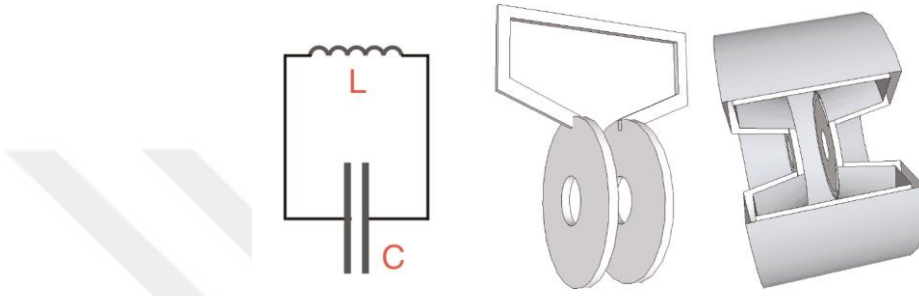


Şekil 1.3 Serbest elektron lazeri türleri(Saldin vd. 1999) a) Yükselteç tipi SEL b) Osilatör tipi SEL

Bu tezde paketçik genişliğinin ölçümü, serbest elektron lazerlerinin gereksinimleri üzerinden ele alınmıştır. Serbest elektron lazerlerinde daha önce bahsedilen prensiplerin gerçekleştirilebilmesi için uygun elektron demeti (enerji, kararlılık, paketçik genişliği, yük, vb.) parametrelerine ulaşılması gerekir(Lefevre 2015). Bu gereksinimlere ulaşılabilmesi kompleks hızlandırıcı sistemlerine ve demet tanı ekipmanlarına ihtiyaç duyulur.

Yapı itibariyle, yeni nesil ışınlam kaynaklarında paketçik başına düşen yük miktarının paketçik boyutları küçültülerek artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır(Gillespie 2018). Dar paketçik üretimi, üretilen ışığın şiddetini artırarak koherent ışığın üretilmesini sağlamaktadır. Dar paketçik üretim ve tanı yöntemleri, elektronik olarak mevcut yarı iletken tepki sürelerinden dolayı ve parazitik devre etkilerinden dolayı pahalı ve kurulumu güç sistemleri barındırmaktadır(Lefevre 2015). Serbest elektron lazerlerinde boyuna paketçik uzunluğunun öneminin anlaşılması için, çizgisel hızlandırıcıların genel çalışma prensibinden bahsetmek faydalı olacaktır. Parçacık hızlandırıcıları prensip olarak, yüklü parçacıkların elektromanyetik alanlar ile etkileşimlerini temel alır. Yüklü parçacıkların statik elektrik alanı altında ivmelenmesi en basit hızlandırıcı prensibini oluşturur. Çok yüksek enerjilerde hızlandırma yapmak için gerekli olan potansiyel farkın pratikte oluşturulması, yüksek gerilim delinmelerinden dolayı zorlayıcıdır.

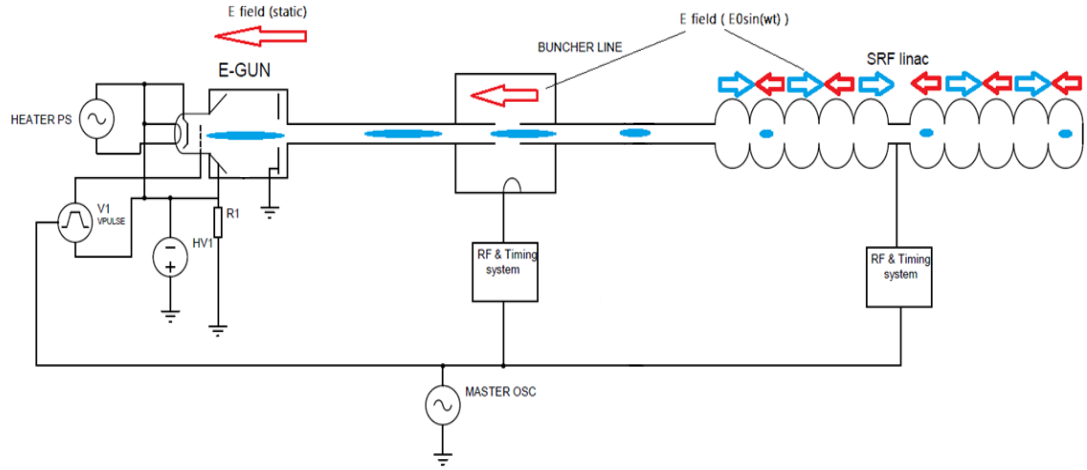
Yüksek enerjilerde hızlandırma bu sebepten dolayı paralel plakalı elektrostatik yapılar yerine radyo frekans kovukları ile yapılır. Radyo frekans kovukları çeşitli geometrilere üretilen sürekli metalik yapıları olup, eşlenik devre olarak paralel LCR devresine benzetilebilir. RF kovuklar bütün hızlandırıcı tabanlı ışınlım kaynağı sistemlerinde kilit rol oynar ve çeşitli türleri vardır.



Şekil 1.4 Radyo frekans kovukların eşlenik devre yapısı (Gerigk 2010)

RF kovukların LCR devresi karakteristiği, uygun radyo frekans sinyali ile uyarım yapıldığında rezonans durumuna neden olacağından, kovuk içerisinde zamana göre yönü ve şiddeti değişen elektrik alan oluşturacaktır. Radyo frekans sistemleri ile daha yüksek gradyan değerlerine, izolasyon problemi olmadan ulaşılabilir. RF hızlandırma sistemlerinde elektrik alanın yönü uyarım frekansı ile sürekli yön değiştirdiğinden, hızlandırma yapılabilmesi için elektron demetinin paketçikler halinde üretilmesi ve üretilen paketçiklerin, uygun zamanlamada kovuğa varması gerekir. Aksi durumda hızlandırma işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilemez (Gerigk 2010).

Hızlandırıcılarda paketçikler halinde demet üretiminin çeşitli yöntemleri vardır. Bu yöntemler hızlandırıcının çembersel veya çizgisel olmasına bağlı olduğu gibi hızlandırıcının fonksiyonuna göre de değişiklik gösterir. Çizgisel hızlandırıcılardan örnek verilirse, en temel yöntemlerden birisi triod tipi eletron tabancası kullanılarak, grid voltajının atma sinyalleri ile anahtarlanmasıdır. Parçacık kaynağının anahtarlanma süresi, başlangıçtaki paketçik uzunluğunu belirler. Katot düzeneğinden ayrılan paketçikler elektrik alanı altında hızlanarak demet hattı boyunca ilerler.



Şekil 1.5 Çizgisel hızlandırıcılarda paketçikler halinde demet üretimi ve temel hızlandırma sisteminin çalışma prensibi

Paketçik genişliği, yüksek frekanslı RF kovuklarının hücre uzunluğundan daha uzun olduğu durumda elektron demetinin balistik olarak sıkıştırılmasına ihtiyaç duyulur. Elektron paketçikleri uygun uzunluğa, paketleyici kovuklar ile getirilir. Paketleyici kovuklar paketçiklerin ön kısmını yavaşlatırken arka kısmını hızlandırır. Paketçik içerisinde oluşan enerji farklılığı paketçik boyunun hat içerisinde ilerlerken küçülmesine neden olur. Bu tür düzeneklere genellikle grid sürücü sinyalinin elektronik olarak kısa üretilmediği durumlarda ihtiyaç duyulur. Sıkıştırma yapılan paketçiklerin boyutlarının hızlandırıcı kovuklara enjekte edilmeden önce karakterize edilmesi gerekir (Evtushenko 2004). Daha önce de bahsedildiği gibi SEL koşullarının sağlanması için hızlandırıcı parametreleri önem arz etmektedir. Paketçik genişliğinin ölçümü, isinim kaynaklarında çeşitli yöntemler ile yapılabilmektedir.

Demet tanı sistemleri, hızlandırıcının kurulumunda, performans ve stabilite takibinde, güvenli bir şekilde işletimde önemli rol oynamaktadır. Tanı sistemleri, tahribatlı ve tahribatsız tanı sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Tahribatlı tanı sistemlerinde, ölçüm için elektron demetinin yok edilmesi veya kısmen yapısının değiştirilmesi gerekir. (Lefevre 2015). Tahribatsız yöntemlerde ise genellikle yüklü parçacıkların ürettiği elektromanyetik alanlardan veya demet kaynaklı oluşan ikincil ışımalardan faydalanılarak ölçüm alınmaktadır. Tahribatlı ölçüm yöntemleri genellikle kurulum

aşamasında kullanılırken tahribatsız sistemler operasyon sırasında monitörleme ve emniyet maksatlı kullanılır.

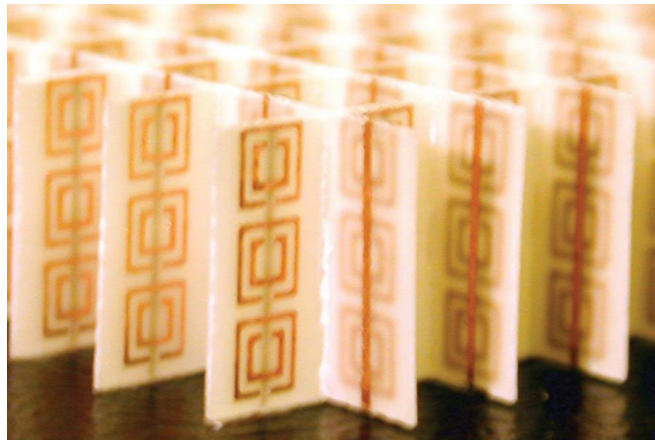
Hızlandırıcılarda, paketçik uzunluğu ölçümü için hali hazırda çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler, deflektör kovuklar, optoelektronik sistemler, elektromanyetik kuplörler, ikincil ışıma tabanlı sistemler gibi farklı mühendislik disiplinlerinden teknikler barındırmaktadır. Tez çalışmasında ağırlıklı olarak, elektromanyetik kuplör tabanlı uzunluk ölçüm teknikleri ele alınmıştır. Elektromanyetik kuplörler elektron demetinin yükünden dolayı sahip olduğu elektrik alanın yarattığı elektromanyetik değişimi algılayan sistemlerdir. Bu sistemler, demet hattına yerleştirilmiş durağan gözlem noktaları gibi çalıştığından, hat içerisinden geçen elektron paketçiklerini zamana göre değişen sinyaller olarak tespit ederler. Fakat paketçikler göreceli hızlarda hareket ettiğinden, oluşan sinyaller yüksek hızlı(<ns) sinyaller olarak oluşmaktadır. Yüksek hızlı sinyallerin analiz edilmesi ve uygun geometride kuplör tasarımının yapılması elektronik anlamda zorlayıcıdır.

Periyodik atma sinyallerinin işlenmesinin güç olması, sinyalin frekans spektrumunun yapısından kaynaklanmaktadır. Doğada çoğu yapının davranışında olduğu gibi atma sinyalleri de sinüsel bileşenlerden oluşmaktadır. Periyodik atma sinyallerinin Fourier dönüşümü yapıldığında sinyalin çok sayıda kesikli eş fazlı harmoniklerden oluştuğu gözlenir. Harmonikler spektrum üzerinde genellikle düşük frekanslardan başlayarak yüksek frekanslara kadar geniş bir bantı kapsar.(Forck 2011) Sinyalin geniş bant yapılı olması, sinyali işleyecek sistemlerinde geniş bantlı olmasını gerektirir. Fakat çoğu elektromanyetik bileşenin geometrik özellikleri sınırlı bant genişliğini desteklediğinden, bu tip sinyallerin bant yapısını kapsama konusunda sorun yaratır. Bazı mevcut demet tanı sistemlerinde bu sorunun önüne geçilmesi için, spesifik frekanslara göre tasarlanmış kovuklar gibi rezonatif yapılar kullanılmaktadır. Rezonatif yapılar genellikle, elektron demetinin seçilen frekans bileşenlerine (harmoniklerine) göre tasarlanırlar. Böylelikle sadece paketçik uzunluğu hakkında bilgi barındıran frekans bileşenlerinin genlikleri ölçülerek, geniş bantlı ölçüm sistemlerine ihtiyacı azaltılmaktadır. Fakat mevcut sistemlerde harmoniklerin tespit edilebilmesi için gerekli geometrik yapıların boyutları

Çalışma frekansına bağlıdır. Bu tezde, bu tip rezonatif ölçüm sistemlerinde alternatif olarak meta-malzemelerin kullanılması ele alınmıştır.

Metamalzemeler, 1968'de Veselago tarafından negatif kırılma indisinin etkileri üzerinden ortaya atılan doğada bulunmayan elektromanyetik yapılarıdır. Bir malzemenin kırılma indisi, doğrudan magnetik geçirgenlik ve dielektrik sabitine bağlıdır. Manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabitlerinin aynı anda negatif olduğu durumda malzemeler sol-elli malzeme olarak anılırlar. Bunun sebebi, elektromanyetik dalgaların sol-elli ortamlarda elektrik alan, manyetik alan vektörleri ve dalga vektörlerinin sol-el kuralına uyacak şekilde ilerlemesinden kaynaklanır.

Bu durum, Maxwell denklemlerinin, negatif kırılma indisi ile üzülmesi ile açıkça görülebilir. Sol-elli ortamlarda, elektromanyetik dalgaların vektör bileşenlerinin ayna simetrisi olacak şekilde evrilmesi, ortamın kendine has özelliklere sahip olmasına neden olur. rnek olarak, ters kırılma, tersine Doppler etkisi, tersine Vavilov-Cherenkov etkisi, sperlens etkileri gibi özellikler sayılabilir(Veselago 1968). Elektromanyetik meta-malzemeler, uygulamada genellikle yalıtkan alt-taş üzerine işlenen çeşitli metal geometrilerin örgüsü şeklinde üretilmektedir. Bu geometriler sürekli devreler gibi davranarak, rezonans oluşturur. Elektromanyetik dalgalar bu örgüler ile etkileştiklerinde, eğer örgünün birim hücrelerinin boyutları dalga boyunun çeyreğinden daha küçük ise, örgünün parçalı yapısı elektromanyetik olarak sürekli olarak görünür.



şekil 1.6 Sol-elli materyal (Shelby vd. 2001)

Metamalzemelerin, frekans seçici yüzeyler, elektromanyetik görünmezlik ve anten uygulamaları gibi çok çeşitli uygulamaları vardır. Uygulamalar arasında ayrıca elektromanyetik iletim hattı ve anten uygulamaları da bulunmaktadır.

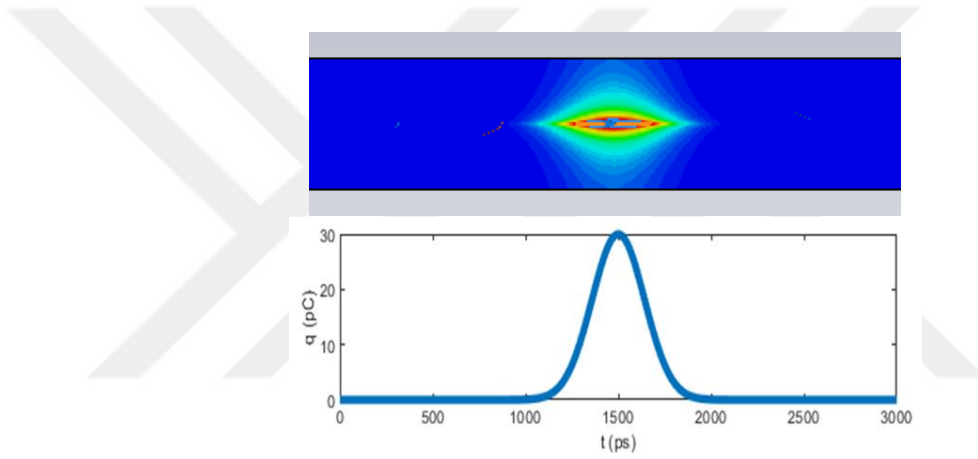
Elektromanyetik iletim hatları pratikte yaygın olarak kullanılan yapılardır. Gündelik hayatta kullanılan iletim hatları pozitif kırılma indisine sahip olmasından dolayı, sağ el kuralına uyacak şekilde, taşıdıkları dalganın kılavuzlanmasını sağlarlar. Benzer şekilde eğer iletim hatları sol-elli malzemelerden üretilen iletim hatları negatif kırılma indisinden dolayı sol-elli özellikler gösterecektir. Günümüze kadar yapılan çalışmalara göre, sol-elli iletim hatları, materyallerin parazitik kapasitif ve indüktif etkilerinden dolayı saf olarak üretilmemektedir. Bunun anlamı yapay olarak üretilen her sol-elli iletim hattının aynı zamanda sağ-elli iletim hattı özelliği taşımasıdır. Sağ ve sol iletim hatlarının özellikleri kombine olduğu durumda, yüksek frekanslarda sağ elli iletim hatlarının etkileri gözlenirken düşük frekanslarda sol elli iletim hatlarının etkileri gözlenir. Bu duruma ek olarak, sağ elli iletim hatları taşıdıkları sinyalin fazını ileri kaydırırken, sol elli iletim hatları fazın geriye doğru kaymasına neden olur. İki iletim hattı bileşeninin etkilerinin eşit olduğu durumda fazın ileri ve geri kayma miktarıda eşit olacaktır ve yapı üzerinde faz kayması meydana gelmeyecektir. Bu durum olduğu frekansta kılavuzlanan dalgaboyu sonsuza gideceğinden, geometrik yapının elektriksel uzunluğu fiziksel uzunluğundan farklı olur. Bu durum sıfırıncı dereceden rezonans olarak adlandırılır. Sıfırıncı dereceden rezonans durumunda, yapının çalışma frekansı yapının boyutlarından bağımsız olacaktır(Caloz ve Itoh 2006).

Yapılan çalışmanın motivasyonu, sıfırıncı dereceden rezonanslı anten ile elektron demetinin ürettiği harmoniklerin tespit edilmesidir. Sıfırıncı dereceden rezonatör ile harmoniklerin genliğinin ölçülebilmesi, daha kompakt ve basit ölçüm düzeneklerinin kurulabilmesine olanak sağlayacaktır. Çalışmada mevcut paketçik uzunluk ölçüm yöntemleri incelenmiştir. Ardından, paketçik uzunluğu ölçümü için demetin ilerlediği ortam içerisindeki elektromanyetik etkileşimi ele alınmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında sıfırıncı dereceden rezonanör tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın prototip düzeneği üretilerek, karakterizasyonu yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Paketçik Uzunluğu Ölçümü İçin Kullanılan Yöntemler

Parçacık hızlandırıcılarında elektron demeti genellikle, Gauss fonksiyonu formundaki paketçikler halinde üretilir. Üretilen paketçiklerin boyuna profili, genellikle zamana göre yük yoğunluğunun değişimi cinsinden ifade edilir. Paketçiklerin boyuna genişlikleri, zaman eksenindeki yük dağılımının 2σ değeri alınarak ölçülür.



Şekil 2.1 Hat içerisinde ilerleyen elektron demetinin simülasyon görüntüsü ve zamana göre yük dağılımı

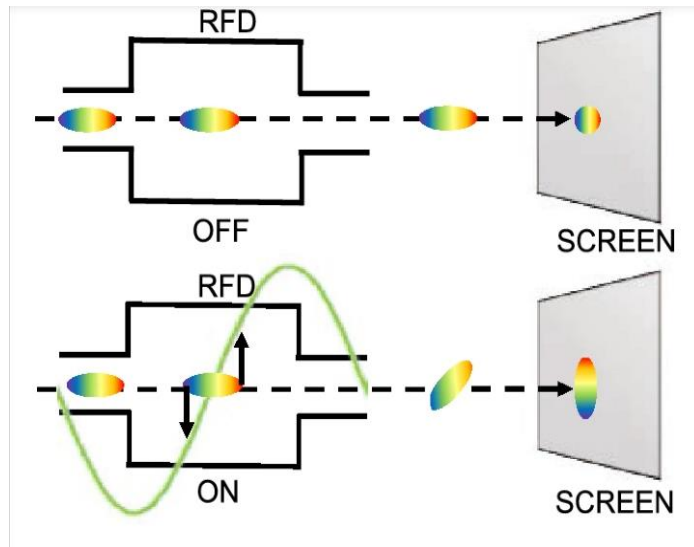
Paketçik genişliğinin belirlenmesinde çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan ölçüm yöntemleri genel olarak tahribatlı ve tahribatsız ölçüm yöntemleri olarak ikiye ayrılır. Tahribatlı ölçüm yöntemlerinde, paketçiğin yapısı bozularak uzunluk ölçümü gerçekleştirilir ve ölçüm sırasında demet hattı kullanılamaz. Tahribatsız ölçüm yöntemlerinde ise ölçüm sırasında paketçikler etkilenmediğinden normal operasyon halinde iken dahi ölçüm alınabilir.

2.1.1 Deflektör Kovuk kullanımı

Deflektör kovuklar, paketçik uzunluğu ölçümünde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisidir. Bu yöntem, hat içerisinde ilerleyen paketçiğin bir elektrik veya manyetik alan

etkisi ile döndürülmesi prensibi ile çalışır. Döndürme işlemi, elektron paketçığının ilerleme doğrultusundaki yük dağılımının korunarak ilerleme doğrultusuna dik hale getirilmesini sağlar. Bu yöntem ile demetin hızlı zamansal yapısının uzaysal hale gelmesi sağlanır. Fakat genellikle bu yöntemin kullanımı demetin tamamen veya kısmi olarak yok edilmesini gerektirir (Arpaia vd. 2020).

Deflektör kovuklar, genel prensip olarak elektrik alan vektörünün salınım doğrultusunun demetin ilerleme yönüne dik olduğu kovuk türleridir. Kuvvet vektörünün demet doğrultusuna dik olarak salınması, kovuk içerisinden geçen paketçiklerin eksensel olarak dönmesine yol açar. Bu prensip ile demetin boyuna genişliği enine genişliğine dönüşeceğinden, paketçik uzunluğunun analizi kolaylıkla ölçülebilmektedir. Saptırılan demetin uzunluğunun ölçülmesi için kovukdan uygun mesafeye, parıldak bir ekran veya konuma göre yük ölçümü sağlayan bir düzenek yerleştirilir. Bu tür sistemlerde, normal RF kovuklarda olduğu gibi paketçiklerin uçuş süresi ve RF sinyali arasındaki fazın hassas bir biçimde ayarlanması gereklidir. Elektron paketçığı RF kovuğun orta noktasına vardığında, RF periyodunun geçiş fazında olması gerekir(Arpaia vd. 2020).

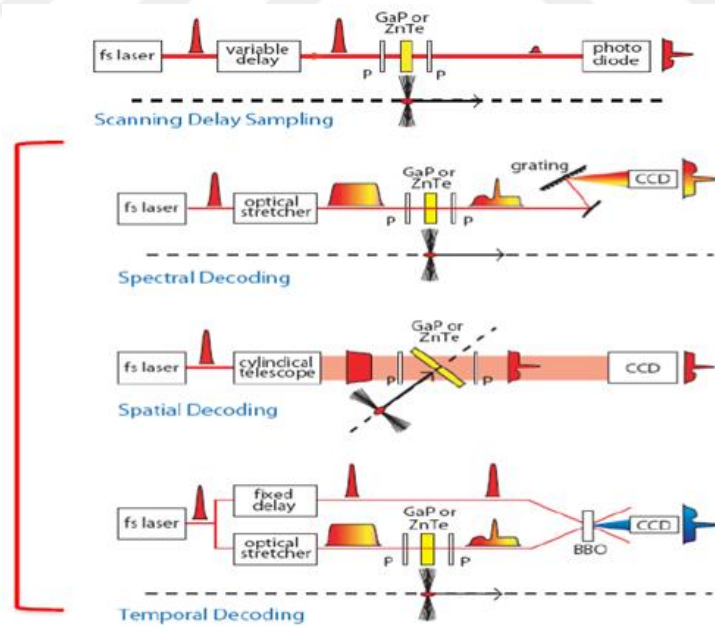


Şekil 2.2 Deflektör kovuğun çalışma prensibi (Arpaia vd. 2020)

Elektron paketçığı kovuğa giriş yaptığında, paketçığın ön kısmı RF fazına göre yukarı veya aşağı doğru hızlanır. Daha sonra paketçık, kovuğun orta noktasından geçtiğinde RF fazı da değişeceğinden elektromanyetik alan yön değiştirir. Paketçığın arka kısmı da yön değiştiren alının etkisi ile başlangıçtaki yönelimin zıttı yöne doğru hızlanır. İlerleme yönüne dik olarak hızlandırılan paketçık, belirli bir süre sonra dik konuma gelir. Demetin dik konuma geldiği mesafe, kovuk içerisindeki elektromanyetik alanın şiddetine bağlıdır. Şekil 2.2’de deflektör kovuğun çalışma prensibi görülmektedir.

2.1.2 Elektro-Optik yöntemler

Elektro-optik yöntemlerde genel olarak, paketçıkların elektrik alanının bir optik kristal ile etkileşmesi temel alınır. Bu prensibi temel alan ölçüm tekniklerinin, çeşitli uygulama şekilleri bulunmaktadır. Elektro-optik kristaller kullanılarak, tarama, uzaysal çözümleme, zamansal çözümleme, spektral çözümleme gibi yöntemlerle paketçık uzunluğu ölçülebilmektedir. Elektro-optik yöntemler ile çalışan çeşitli ölçüm sistemleri şekil 2.3’de görülebilir.



Şekil 2.3 Çeşitli elektro-optik paketçık uzunluğu ölçüm yöntemleri(Lefevre 2015)

Kullanılan yöntemler genel olarak, bir referans lazer atmasının çizgisel polarizasyonunun, elektron paketçığı ile etkileşen elektro-optik kristal ile modüle

edilmesini temel alır. Elektro-optik kristaller aynı yönelimde iki çizgisel polarizörün arasına yerleştirilir. Böylelikle, elektro-optik kristal elektrik alan ile etkileştiğinde, içerisinden geçen ışığın polarizasyonunu değiştirir. Polarizasyonu değişen ışık atmasının şiddeti de yerleştirilen polarizörler nedeniyle elektrik alana göre modüle olmuş olur. Modüle olmuş ışık atmasının işlenmesi yöntemlere göre farklılık gösterir.

Zamansal çözümleme yönteminde, hızlandırıcı RF sistemi ile eş fazlı çalışan bir lazerden elde edilen atmalar ikiye bölünerek bir atma sabit gecikme hattına diğer atma ise atma genişleticiye gidecek şekilde yönlendirilir. Yönlendirilen genişletilmiş atma bir demet hattı içerisinde bulunan ZnTe kristalinden paketçik ile eş fazlı olarak geçer. Paketçinin elektrik alanı ZnTe kristalinin çift kırıcılık etkisinin değişmesine neden olur ve genişletilmiş atmanın polarizasyonu değişir. Polarizasyonu değişen atma yarım dalga ve çeyrek dalga plakalarından geçirilerek şiddet modüleli hale gelir. Modüle olmuş sinyal paketçik profilinin bilgisini taşır. Modüle edilmiş ve referans atmanın kristal üzerinde birbirini üzerinden çapraz geçmesi konuma bağlı faz farkı oluşmasına neden olur. Bu durum oluşacak ikincil harmonik ışımalarının konuma bağlı olarak şiddet değiştirmesine neden olur. Şiddet değişimi bir CCD kamera ile algılanarak paketçik profili tespit edilmiş olur(Lefevre 2015).

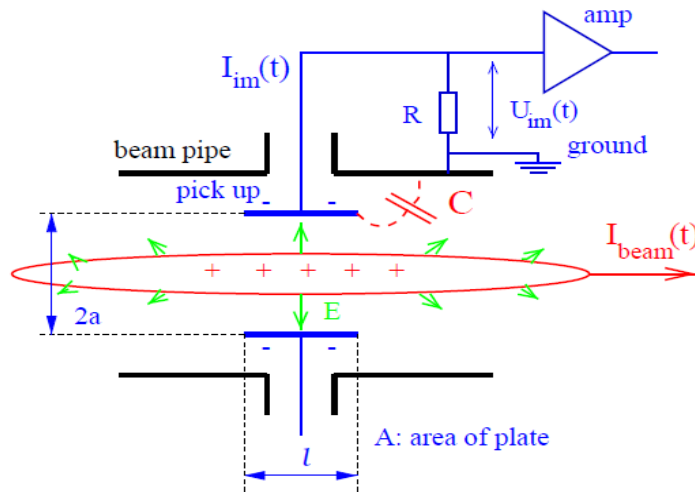
Uzaysal çözümleme yönteminde ise referans ışık atması silindirik bir lensten geçirilerek geniş bir hüzme haline getirilir. Hüzme haline gelen ışık atması benzer şekilde elektro-optik kristal içerisinden geçirilir fakat kristal referans ışık atmasının ilerleme eksenine göre çapraz bir pozisyonda yerleştirilir. Böylelikle geniş ışık atmasının enine parlaklık dağılımı, elektron demet profiline göre modüle edilir. Elde edilen enine modüle edilmiş ışık atması bir ekran üzerine düşürülerek veya bir CCD ile analiz edilebilir. Bu çalışma prensibine benzer olarak, spektral çözümleme işleminde ise referans ışık atması genişletilmek yerine spektral olarak genişletilir. Genişletilen ışık atmasının frekans bileşenleri, ışığın ilerleme doğrultusunda ayrılarak frekans bileşenlerinin elektro-optik kristale belirli bir sıra ile varması sağlanır. Kristalden geçen genişletilmiş atma, daha sonra bir kırınım ağından geçirilerek uzaysal çözümleme yöntemine benzer şekilde analiz edilir.

Tarama yöntemi ise elektro-optik yöntemler arasında en az bilşene sahip olan ölçüm yöntemi olup hassas ve maliyetli ekipman barındıran yöntemdir. Bu yöntemde, üretilen dar bir referans ışık atması ayarlanabilir gecikmeli bir hattan geçirilerek, referans atmanın elektron atması üzerindeki konumu ayarlanır. Her bir yeni paketçikte referans atmasının konumu değiştirilerek, elektron paketçikleri üzerinde tarama yapılır.

Böylelikle her bir atmada, elektro-optik kristalden gelen ışın parlaklığı bir fotodiyot ile kaydedilerek paketçiğin uzunluğu ölçülmüş olur. Bu yöntemde, fotodiyottan elde edilen sinyalin zaman yapısı çok hızlı olduğundan ve ayarlı gecikme düzeneğinin kararlı olması gerektiğinden, kullanılan ekipmanların maliyeti artmaktadır.

2.1.3 Demet Pozisyon Monitörü ile paketçik uzunluğu ölçümü

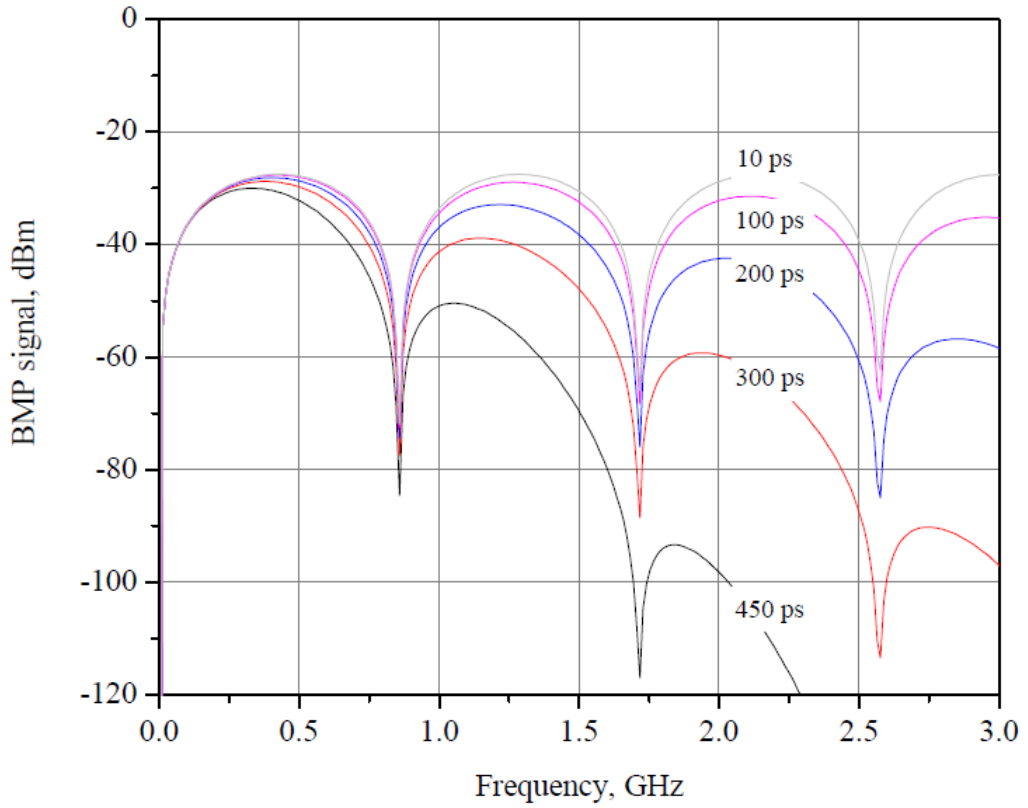
Demet pozisyon monitörleri (BPM), genellikle dört adet anten ile demetin hat içerisindeki enine pozisyonunun tespitinde kullanılan demet hattı ekipmanlarıdır. Demetin elektrik alanından kaynaklanan görüntü yüklerin antenler ile algılanması prensibi ile çalışır. Hat içerisine yerleştirilen dört adet antenden elde edilen sinyallerin genliklerine göre demetin enine pozisyonu ölçülebilir. Anten geometrileri çeşitli şekillerde olabilir (düğme tipi, kovuk tipi, şerit tipi). BPM antenleri geniş bir frekans bandında algılama yapabilir. Şekil 2.1.3'te düğme tipi bir demet pozisyon monitörünün çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.4 BPM sisteminin şematik gösterimi(Forck 2011)

Demet pozisyon monitörlerinin frekans tepkileri geometrik yapılarına göre farklılık gösterir. Bu sebepten dolayı, hem pozisyon hem de paketçik uzunluğunun ölçülmesi için bir kalibrasyon faktörüne ihtiyaç duyulur.

Atmalı elektron demetinin frekans spektrumu geniş frekans bantlarına kadar harmonik barındırır. Paketçiklerin boyutları kısaldıkça yüksek frekanslarda gözlenen harmoniklerin genlikleri de artacaktır. Şekil 2.5’ te ELBE SEL tesisinde $\frac{3}{4}\lambda$ şerit tipi demet pozisyon monitörü üzerinden alınan bir sinyalin spektrum analizi görülmektedir. Yapılan analizde de görüldüğü üzere hat içerisinde ilerleyen paketçiklerin genişliği arttıkça, spektrumun yüksek frekanslı bileşenlerinin genliği azalmaktadır (Evtushenko 2004).



Şekil 2.5 Çeşitli paketçik genişlikleri için BPM sinyal spektrumu.(Evtushenko 2004)

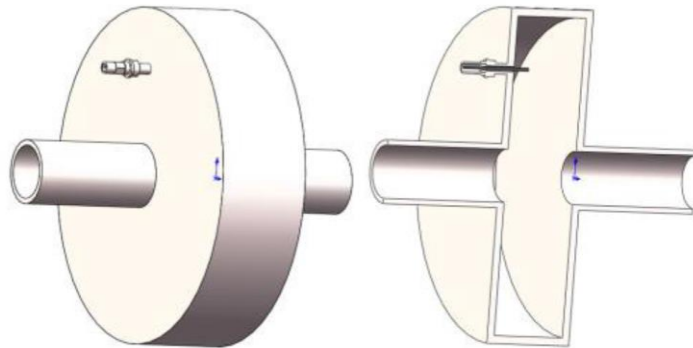
Demet pozisyon monitörü ile alınan ölçümlerde kullanılan yapının frekans tepkisi ayrıca ölçümün çözünürlüğünü de etkilemektedir. Şekil 2.5’te de görüldüğü gibi ölçüm 100 ps -10ps arasındaki farkı çözebilirken, 10ps - 20ps arasındaki farkı çözemeyebilir.

Bu tip paketçik uzunluğu ölçüm yöntemlerinde sinyal analizi için geniş bantlı elektronik sistemler gerektiğinden, elektronik olarak zorlayıcı olabilmektedir.

2.1.4 Rezonatif yapılar ile paketçik uzunluğu ölçümü

Daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi elektron paketçığının uzunluğu, demetin barındırdığı frekans bileşenleri üzerinden analiz edilebilir. Fakat frekans bileşenlerin tümünün algılanması, algılama için gerekli elektronik sistemin karmaşıklaşmasına neden olmaktadır. Hızlandırıcılarda, tahribatsız paketçik uzunluğu ölçüm yöntemlerinden birisi de rezonatif yapılar ile parçacık demetinin neden olduğu harmoniklerin algılanmasıdır. Bu tip ölçüm yöntemlerinde RF kovuklar, dalga kılavuzları gibi belli uyarım modlarına sahip yapıların demet ile olan etkileşimi prensip alınır.

RF kovuk kullanılan yöntemlerde genellikle, demetin ilerlediği vakum çemberinin çapı belirli bir bölgede değiştirilmesiyle oluşan kovuk ile ölçüm yapılır. Oluşan kovuğun geometrisi, uygun şekilde ayarlandığında kovuk modları elektron demetinin dedekte edilmek istenen frekans bileşeninin yükseltilmesini, istenmeyen bileşenlerin bastırılmasını sağlar. Uyarılan modların algılanması için genellikle bir prop veya dalga kılavuzu kullanılır. Probun kovuk içerisindeki konumu salınım modunun maksimum olduğu konuma yerleştirilir. Şekil 2.6'da paketçik uzunluğu ölçümü için, temel harmonik frekansta bir kovuğun simülasyon görüntüsü görülebilir (Wang vd. 2017).

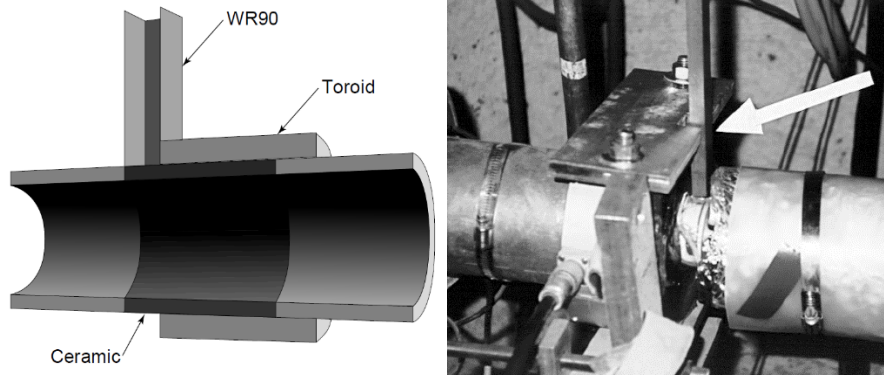


Şekil 2.6 Harmonik tespiti için kullanılan bir kovuğun simülasyon görüntüsü (Wang vd. 2017)

Paketçik uzunluğu ölçümünde, kovuk vasıtasıyla ölçülen harmonik sinyali genellikle hızlandırıcıların temel frekansının yüksek mertebe modlarında seçilmektedir. Yüksek frekanslı mod sinyallerinin genliği paketçik genişliği ile ters orantılı olduğundan kovuk ile ölçümü yapılan sinyalin genliği paketçik genişliği daraldıkça artmaktadır.

Paketçik uzunluğu ölçümü, tek kovuk kullanılarak yapılabildiği gibi hat üzerine farklı harmonik frekanslarında ölçüm yapan kovuklar kullanılarak da yapılabilir. İki farklı kovuk kullanıldığı durumda iki harmoniğin genliklerinin oranı paketçik genişliği hakkında bilgi verecektir (Wang vd. 2017).

Başka bir rezonatif ölçüm yöntemi ise, demetin yüksek frekanslı harmoniklerinin bir dalga kılavuzu ile algılanmasıdır. Bu yöntemde, elektron demetinin ilerlediği vakum çemberi üzerine seramik bir açıklık eklenerek, elektriksel olarak bir süreksizlik yaratılır. Oluşan bu süreksizlik, elektron demetinin ürettiği elektromanyetik alanın hattın dışına çıkmasına izin verir ve kırınım oluşmasına neden olur. Seramik açıklığın önüne açık uçlu bir dalga kılavuzu yerleştirildiğinde elektron demetinden kaynaklı elektromanyetik alan, dalga kılavuzunun temel modlarını uyarmaya başlar. Şekil 2.7’de ölçüm düzeneğinin kesiti ve hat üzerindeki görüntüsü görülmektedir.

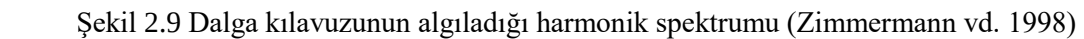


Şekil 2.7 Dalga kılavuzu ile harmoniklerin algılanmasında kullanılan düzenek (Zimmermann vd. 1998)

Dalga kılavuzu içerisinde uyarılan modlar, kılavuz boyunca taşınarak çeşitli filtreleme işlemlerinden geçirilir. Filtreleme işlemi modların, çeşitli frekans aralıklarına sahip

Şekil 2.8 Dalga kılavuzunda ilerleyen modlarının filtrelenmesi için kullanılan düzenek(Zimmermann vd. 1998)

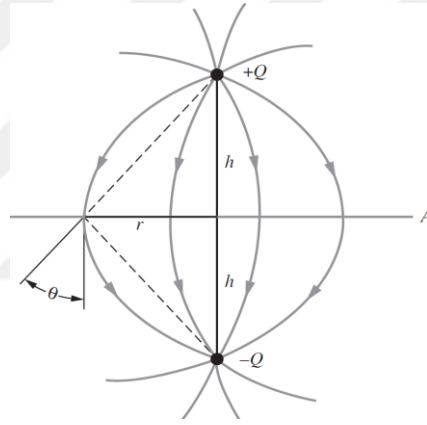
Kanallardan alınan RF güç ölçümü, kovuk ile paketçik ölçüm yöntemindekine benzer şekilde paketçiğin ürettiği harmoniklerin genliklerinin analiz edilmesi ile belirlenir. Dolayısıyla yüksek frekanslı modların ayrıştırıldığı dalga kılavuzu kanalından alınan ölçümü dar paketçiklerin ölçümü için daha yüksek çözünürlüklü sonuç verecektir. Şekil 2.9’ da dalgakılavuzu ile demet üzerinden alınan bir ölçümün spektrumu ve ölçüm kanallarının bu spektrum üzerinde kapsadığı bölgeler gözükmemektedir (Zimmermann vd. 1998).



2.2 Elektron Paketçiklerinin Elektromanyetik Etkileşimleri

2.2.1 Elektron paketçiklerinin oluşturduğu ışımlar (wakefields)

Bir iletken yüzeyin yakınında bulunan bir yük yoğunluğu, iletken yüzeyinde bulunan serbest elektronlar ile elektrostatik etkileşime girecektir. Yük yoğunluğundan kaynaklı elektrik alan, yüzeyde bulunan elektronların yer değiştirerek yüzeyde net bir yük yoğunluğu oluşturmaya neden olur. Yüzeyde oluşan yeni yük yoğunluğu, iletken yüzeyin yakınında bulunan yükün ayna simetrisi ve zıt yüklüsü olacaktır. Bu durum görüntü yük metodu ile açıklanabilir (Purcell 2013).



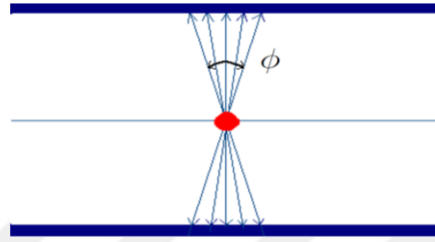
Şekil 2.10 Görüntü yük oluşumu (Purcell 2013)

Benzer şekilde, elektron paketçığının iletken bir boru içerisinde ilerlemesi borunun yüzeylerinde ilerleyen bir görüntü yük yoğunluğu oluşturur. Parçacık hızlandırıcılarında elektron paketçikleri göreceli hızlarda hareket ettiğinden, nokta yükün elektrik alan dağılımı şekil 2.10’da görüldüğü gibi radyal dağılımda olmayacaktır. Göreceli hızlarda hareket eden yüklü parçacığın elektrik alan dağılımı Lorentz büzülmesine maruz kaldığından alan çizgileri, parçacığın hızı arttıkça ilerleme doğrultusuna dik olarak toplanmaya başlar. Göreceli hızlarda hareket eden yüklü parçacığın elektrik alan dağılımı şekil 2.11’de görülebilir. Bir elektronun hızı ışık hızına yaklaştığında, şekil 2.11’de görülen θ açısı,

$$\theta = \frac{1}{\gamma} = \frac{0.511 \text{ MeV}}{E} \quad (2.2.1)$$

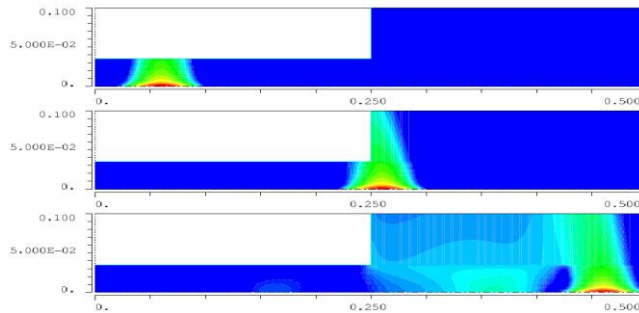
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.2.2)$$

ifadeleri ile hesaplanır. Bu ifade de görüldüğü üzere parçacığın enerjisi arttıkça elektrik alan hüzmesinin oluşturduğu açı da daralmaktadır. Elektrik alan çizgilerinin belirli bir bölgede yoğunlaşması, yük yoğunluğunun sabit olmasından dolayı net elektrik alan şiddetinin artmasına neden olur(Dohlus ve Wanzenberg 2015).



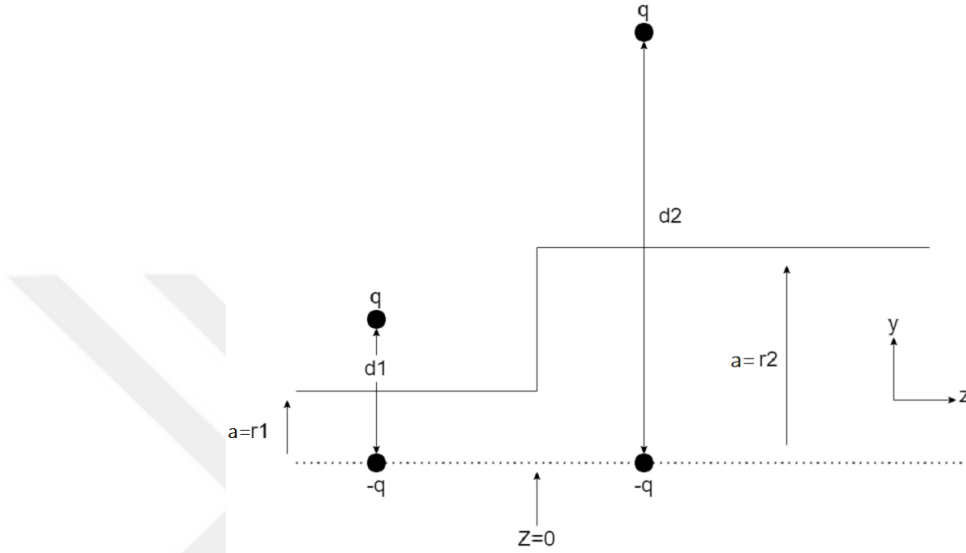
Şekil 2.11 İletken bir boru içersinde görelî hızlarda ilerleyen yüklü bir parçacığın elektrik alan dağılımı(Dohlus ve Wanzenberg 2015)

Mükemmel iletken, çapı değişmeyen bir borunun içerisinde ilerleyen elektron paketçığı ele alınırsa, hareket süresince paketçik ve görüntü yükler arasında oluşan elektrik alan simetrik kalacağından herhangi elektromanyetik ışımaya meydana gelmeyecektir. Fakat mükemmel iletken borunun çapının bir noktada genişlediği durumu incelersek, elektron paketçığı ile görüntü yükler arasındaki elektrik alan aniden değişeceğinden bir ışımaya meydana gelir. Çapı değişen mükemmel iletken bir boruda ilerleyen elektron paketçığının çeşitli zamanlardaki elektromanyetik simülasyon görüntüsü şekil 2.12’de görülebilir (Dohlus ve Wanzenberg 2015).



Şekil 2.12 Çapı genişleyen bir boruda ilerleyen elektron demetinin elektromanyetik simülasyonu (Dohlus ve Wanzenberg 2015)

Oluşan elektromanyetik ışımanın sebebinin anlaşılması için bir nokta yükün genişleme noktasından geçtiği durumu incelemek faydalı olacaktır. Şekil 2.12’de görüldüğü üzere, $z=0$ noktasında boru genişliği arttığında görüntü yük ile boruda ilerleyen yükün arasındaki mesafe de artmaktadır.



Şekil 2.12 Genişleyen hattaki görüntü yüklerin durumu.

Genel bir yaklaşım altında, görüntü yük ile gerçek yük arasındaki mesafe arttığında, aralarındaki elektrik alanın değişimi, yüklerin birbirine göre yataydaki bağıl hızı sıfır olduğundan(Purcell 2013),

$$\vec{E} = -\frac{aq}{2\pi(a^2+r^2)^{3/2}} \quad (2.2.3)$$

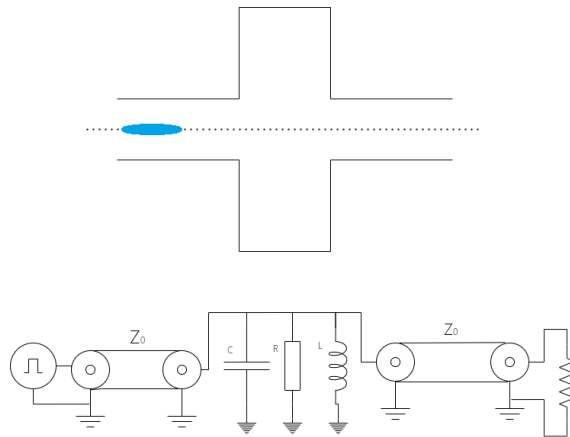
Şeklinde ifade edilebilir. Burada, a yükün metalik yüzeyden uzaklığı olup $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ şeklindedir. Parçacık $z=0$ konumundan geçtiğinde, 2.2.3 ifadesine göre elektrik alan aniden azalacaktır. Elektrik alan değişimi parçacık hareket ettiğinde zamana göre de değişeceğinden, aşağıdaki Maxwell denklemlerine göre,

$$\nabla \times \vec{B} = \mu\epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (2.2.4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (2.2.5)$$

Zamana göre değişen elektrik alan, rotasyonel bir manyetik alan oluşmasına neden olur. Aynı zamanda bu durum zamana göre değişen manyetik alan oluşturacağından rotasyonel elektrik alan oluşturarak alan şiddetlerinin birbirini üretmesine neden olur. Ayrıca bu durum ışık hızı sonlu değere sahip olduğundan nedensellik ilkesiyle de (Causality) açıklanabilir(Griffiths 1999).Böylelikle, genişleme noktasında geçen elektron paketçığı arkasında elektromanyetik dalga (wakefield) bırakmış olur. Geometri değişikliğinden kaynaklı oluşan dalga cephesi, elektromanyetik olarak paketçıkların taşındığı iletken haznenin sınır koşullarına maruz kalmaktadır. Bu durum paketçığın ilerlediği borunun aynı zamanda dalga kılavuzu gibi davranacağı anlamına gelmektedir. Bundan dolayı oluşan elektromanyetik dalganın frekans bileşenleri, kesim frekansının altında sönümlenecektir. Benzer şekilde, eğer borunun genişliği sadece belli bir uzunlukta genişleyip tekrar eski çapına dönerse, geçen yüklü parçacıklar sadece oluşan kovuğun izin verdiği modları uyacaktır(Ferrario vd. 2014).

Yapı itibarıyla, bir demet hattında ilerleyen elektron paketçığı ile eş eksenli bir kablo içerisinde ilerleyen atma sinyali benzer karakteristikler göstermektedir(Denard 2008). Kablo boyunca oluşan ani empedans değişimi, kablo içerisinde ilerleyen bir atmanın kablo içerisinde yansıma meydana getirmesine neden olmaktadır. Oluşan yansımalar, paketçıkların ilerlediği değişken geometrili hat içerisinde oluşturduğu ışımalara benzetilebilir.

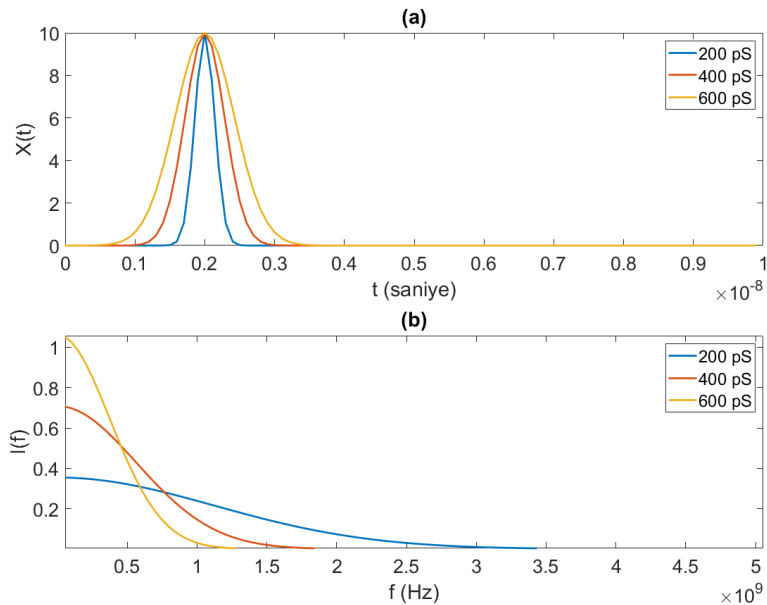


Şekil 2.13 Demetin ilerlediği geometrinin eşlenik devresi

Eş eksenli bir kablonun karakteristik empedansa sahip olduğu gibi, elektron demetinin de hat içerisinde gördüğü bir empedans oluşur. Demetin göreceği empedans borunun çapı ile ilişkili olduğundan borunun çapı sabit kaldığı sürece eş eksenli kablunun bir atma sinyalini taşıdığı gibi elektron demetinin sahip olduğu elektrik alan bileşenlerini taşıyacaktır. Borunun genişlediği aralıkta ise empedans değişecektir. Bu değişimin sonucu olarak sistem yeni frekans tepkilerine sahip olacaktır. Frekans tepkisi, belirli bir aralıkta genişleyen demet hattında sistemin tıpkı bir paralel RLC devresi gibidir. Borunun genişledikten sonra oluşan yan yüzeyleri yüksek frekanslarda kapasitans, uzun yüzeyi indüktans ve duvarların sahip olduğu öz direnç gibi davranır. Karmaşık geometrik değişimlerin hat içerisinde oluşturacağı tepkiler eşlenik devre modellemesi yapılarak basite indirgenebilir(Ferrario vd. 2014).

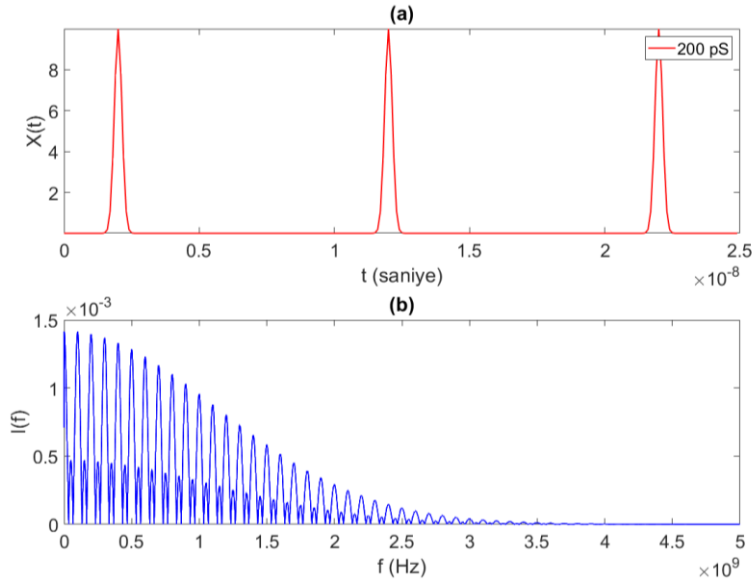
2.2.2 Elektron paketçığı kaynaklı ışımların paketçik uzunluğu ile ilişkisi

Daha öncede bahsedildiği gibi atma sinyalleri frekans bölgesinde kompozit bir yapıya sahiptir. İdeal bir elektron paketçığının zamana göre yük değişimini Gaussian bir atma olarak kabul edilip, Fourier dönüşümü yapılırsa, sinyalin frekans bölgesindeki değişiminin de Gaussian bir formda olduğu görülür. Şekil 2.14'te Gaussian bir atma sinyalinin Fourier dönüşümü görülmektedir.



Şekil 2.14 Değişken genişlikli atma sinyali (a) ve frekans spektrumu (b)

Şekil 2.14'te dönüşümü yapılan sinyalin frekans spektrumunun I eksenini etrafında simetrik olduğu görülebilir. Gaussian atmanın zaman bölgesindeki genişliği ile frekans bölgesindeki genişliği ters orantılıdır. Bu sonuç, Gaussian atma ne kadar hızlı (dar) olursa frekans spektrumunun da o kadar geniş bantlarda bileşen içereceğini göstermektedir. Tekli gauss sinyalinin spektrumu sürekli olarak değişmektedir. Bu durum, tekli gauss sinyal spektrumunun belirli bir frekans bandı içerisinde sonsuz sayıda ayırık sinüsel bileşenler barındırdığı anlamına gelir. Bu bilgiler ışığında, elektron paketçisi kaynaklı ışımların frekans bileşenlerinin, paketçik profili hakkında bilgi barındırdığı görülebilir. Hızlandırıcılarda daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi paketçikler belirli tekrarlar periyotlarında üretilmektedir. Paketçiklerin periyodik olarak bir hattan geçmesi durumunda, durgun gözlem çerçevesinden paketçikler periyodik atma sinyalleri olarak gözükacaktır. Periyodik atma sinyalinin spektrumu benzer şekilde kesikli şekilde oluşmaktadır. Periyodik atma sinyalinin Fourier dönüşümü şekil 2.15'de görülmektedir.



Şekil 2.15 a) Periyodik atma sinyali b) kesikli sinyal spektrumu

Burada, harmoniklerin pozisyonunun ve birbirleri arasındaki mesafenin, tekrarlar frekansı ile ters orantılı değiştiği görülür. Ayrıca, harmoniklerin genlikleri üzerinde oluşan zarfın tekli atmanın spektrumunun karakterini taşıdığı görülmektedir.

2.3 Sıfıncı Dereceden Rezonanslı Antenlerin Çalışma Prensibi

Sıfıncı dereceden rezonans, kombine sağ-sol elli iletim hatlarının karakteristik bir özelliğidir. Sağ sol elli iletim hatlarına değinmeden önce, meta-malzemeler ve sol elli malzemelerin özelliklerinden bahsetmek faydalı olacaktır. Elektromanyetik dalganın davranışı ve etkileşimleri bulunduğu ortamın özelliklerine ve sınır koşullarına bağlıdır. Ortamda ilerleyen elektromanyetik dalgayı ele alırsak, Maxwell denklemlerinden,

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3.2)$$

ifadeleri elde edilir. Burada,

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.3.3)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.3.4)$$

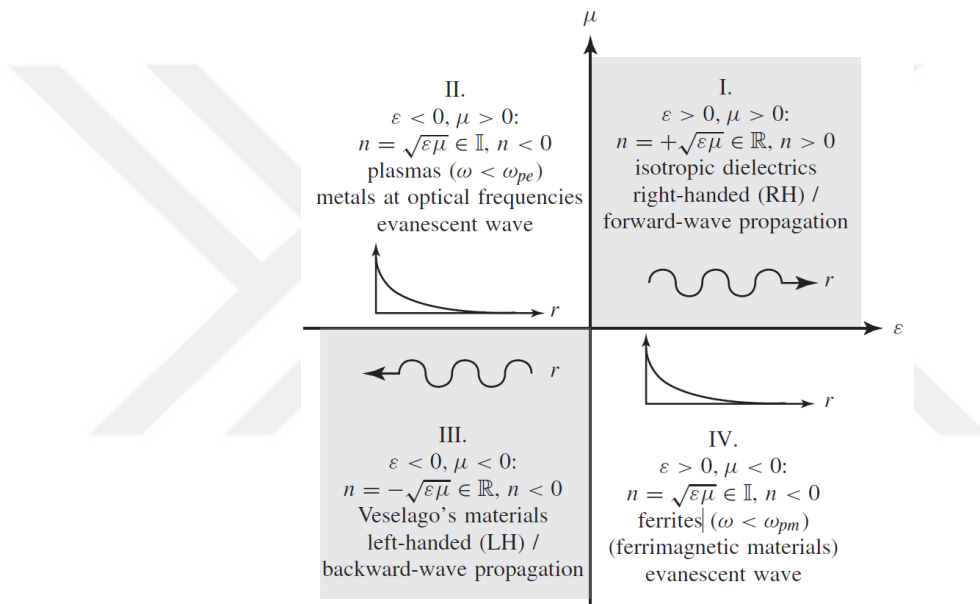
olduğundan, dalga denklemindeki ışık hızını içeren terim yeniden düzenlenirse dalganın bir ortamdaki hızının bulunduğu ortamın dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliği ile ilişkili olduğu görülür. Tek renkli düzlem dalga için bütün nicelikler $e^{i(kz-\omega t)}$ ile orantılı olacağından 2.3.1 ve 2.3.2 denklemleri,

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H} \quad (2.3.4)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\frac{\omega}{c} \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.3.5)$$

İfadelerine indirgenir. Burada elektromanyetik dalgayı oluşturan vektörlerin yönlerinin, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğin işaretine bağlı olduğu görülebilir (Veselago 1968). Doğada kendiliğinden Negatif manyetik ve dielektrik geçirgenlik katsayılarına sahip malzemeler şu ana kadar gözlemlenememiştir. Fakat bu tür yapılar yapay olarak üretilerek kendine has karaktere sahip yapılar üretilebilir. Negatif dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarına sahip materyaller, birim hücre büyüklükleri etkileştikleri elektromanyetik dalganın çeyrek dalgaboyundan ($p = \lambda g/4$) küçük örgüler oluşturularak üretilebilir. Bu tip yapay malzemelerde kılavuzlanan dalgaboyunun çeyreği homojenlik sınırı olarak tanımlanır(Caloz ve Itoh 2006). Homojenlik sınırının altında oluşan örgüler,

elektromanyetik dalganın örgü ile sürekli bir yapı ile etkileşir gibi etkileşmesine neden olur. Bu durumda örgüyü oluşturan hücreler bir araya geldiğinde tekli davranışlarından farklı olarak, farklı bir malzeme karakteristiği kazanır. Böylelikle, negatif kırılma indisli, manyetik ve dielektrik geçirgenlik sabitine sahip materyaller üretmek mümkün hale gelir. Bu tip malzemelere Metamalzeme adı verilir. Bir malzemenin manyetik ve dielektrik geçirgenlik katsayıları için 4 farklı işaret durumu vardır(Veselago, 1968). Bu kombinasyonlar ϵ , μ sıralaması için (+,+), (+,-), (-,+), (-,-) şeklindedir. Bu durumlarda oluşan malzemenin özellikleri şekil 2.16’da görülebilir.



Şekil 2.16 Bir malzeme için dielektrik ve manyetik geçirgenliklerin aldıkları işarete göre durumları (Caloz,Itoh 2006)

Şekil 2.16’da görüldüğü üzere, dielektrik ve manyetik geçirgenliklerin aynı anda negatif olması durumunda Veselago’nun ortaya attığı sol elli malzeme karakteristikleri ortaya çıkmaktadır.

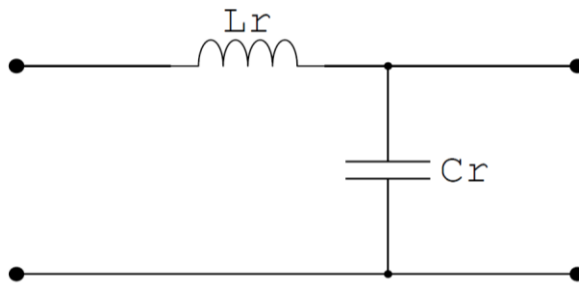
Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, Sürekli iletken ve dielektrik yapılar, yüksek frekanslar altında ani akım ve gerilim değişimlerinden dolayı parazitik kapasitans ve indüktans oluşturur. Yüksek frekanslar altında uzun iletkenler, indüktif etki gösterirken, geniş iletken yüzeyler kapasitif etki gösterir. Sürekli metalik ve yalıtkan yapıların oluşturduğu parazitik indüktans ve kapasitans, çeşitli geometrilerde üretilerek belirli

fonksiyonlara sahip yapılara dönüştürülebilirler. Bu yapılara örnek olarak RF kovuklar, mikro-şerit filtreler, antenler vb. çeşitli sistemler gösterilebilir. Bu yapılarda olduğu gibi iletim hatları da benzer karakteristiklere sahiptir ve eşlenik devre modeli olarak gösterilebilir. Sağ-elli iletim hattına bir örnek olarak eş eksenli kablo ele alınırsa, kablonun içerisindeki dielektrik malzeme paralel bağlı sürekli bir kapasitans, ve iç ve dış iletken uzunluğundan dolayı seri bağlı bir indüktans olarak kendini gösterir. Ayrıca, hattın kaybı hesaba katılırsa seri bağlı bir direnç ve paralel bağlı bir iletken bu eşlenik devreye dahil olacaktır.

2.3.1 Metamalzeme Antenlerin iletim hattı yaklaşımı

Sağ sol elli malzemelerin yapısının, iletim hattı olarak incelenmesi teorik ve pratik anlamda kolaylık sağlamaktadır. Elektromanyetik iletim hatları, temel olarak sınır koşulları ile elektromanyetik dalgaların kılavuzlanması sağlayan pasif yapılardır. Genel olarak iletim hatları, iletken ve yalıtkan malzemelerin çeşitli şekillerde kombine edilmesi ile oluşturulur. İletim hatlarının RF teknolojisinde optik sistemlerde yaygın olarak kullanımı olup, birçok çeşidi bulunmaktadır. Teknolojide kullanılan çoğu iletim hattı sağ-elli iletim hatlarına örnek olarak gösterilebilir.

Sağ elli iletim hatları şekil 2.16’da görüldüğü üzere, pozitif dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarına sahiptir. Sağ elli iletim hatlarına örnek olarak eş eksenli bir kablo incelenirse devre tepkisi olarak alçak geçiren bir filtreye benzetilebilir. Şekil 2.17 de sağ elli iletim hatlarının eşlenik devresi görülmektedir.



Şekil 2.17 Sağ-elli iletim hattı eşlenik devresi

Şekil 2.17’de görülen devre modeli belirli bir eş eksenli kablunun birim hücre elemanı olarak kabul edilirse, bu hücre kablunun etkisinin diferansiyel bir kesiti olarak davranacaktır. Devrede görülen paralel kapasitans, eş eksenli kablunun dış ve iç iletkeni arasındaki yalıtkan malzemenin birim uzunluktaki kapasitansı olarak kabul edilirken, seri indüktans ise kablunun iç iletkeninin birim uzunluktaki indüktansı olarak kabul edilir. İletim hattına uygulanan sinyalin frekansı yükseldikçe iletim hattının geçirgenliğinin azaldığı görülür. Bu durum, iletim hattının empedans karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 2.17’de görülen devre bileşenlerinin reaktansları,

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_r} \quad (2.3.6)$$

$$X_L = 2\pi f L_r \quad (2.3.7)$$

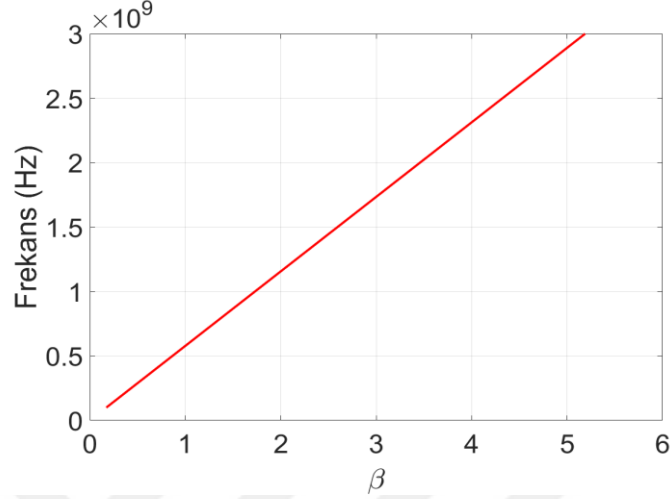
şeklinde olduğundan frekans yükseldikçe devre içerisindeki kapasitif reaktansın azaldığı, indüktif reaktansının ise yükseldiği açıkça görülebilir. Bu durumun bir sonucu olarak sağ elli iletim hatlarının kayıp değerinin yüksek frekanslarda daha fazla olduğu söylenebilir. Yapılan bu yaklaşım ideal durum olduğundan, rezistif veya dielektrik kayıpların hesaba katılmadığı göz önünde bulundurulması gerekir.

İletim hatlarının bir diğer karakteristik özelliği ise sinyalin fazı üzerindedir. Faz bilgisi bir sinyalin veya elektromanyetik dalganın geçirdiği süreç hakkında kritik bilgiler taşımaktadır. Örnek vermek gerekirse sağ-elli iletim hatları üzerinde taşıdıkları sinyalin fazının geriye düşmesine sebep olmaktadır. Pratikte, bu durum eş eksenli bir kablunun uzunluğu ile fazı geriye kaydırma miktarının artması ile açıklanabilir. Bu durum aslında sağ-elli ortamlarda Poynting vektörünün dalga vektörü ile paralel olmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir. Elde edilen faz bilgisi ayrıca, iletim hattının faz sabitiyle de ilişkilidir. Faz sabiti, elektromanyetik dalganın ilerlediği ortamın karakteristikleri hakkında kritik bilgiler barındırmaktadır. Kayıpsız ortamlar için faz sabiti (Pozar, 2012),

$$\beta_R = \omega \sqrt{L_R C_R} \quad (2.3.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eğer sağ-elli bir elli bir iletim hattının frekansa göre faz sabitinin grafiği çizdirilirse şekil 2.18’deki gibi bir karakteristik gözlenecektir.

Gözlenen karakteristik aynı zamanda elektromanyetik dalganın ilerlediği ortamın dağınım diyagramı olarak da anılır.



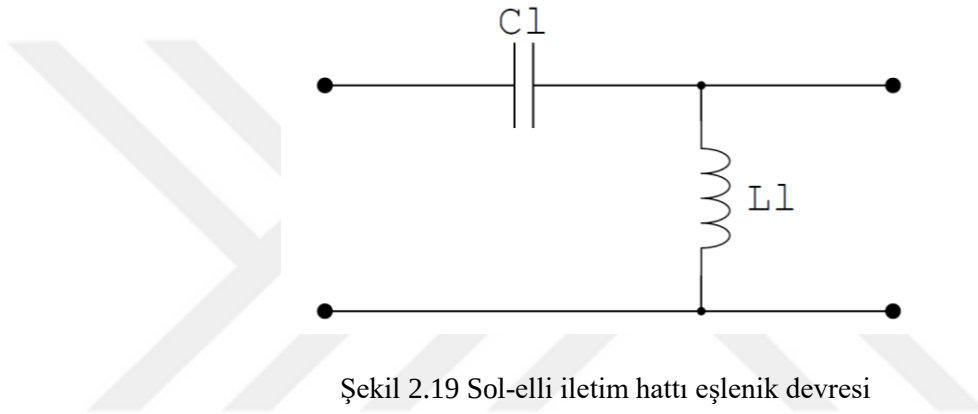
Şekil 2.18 Sağ-elli iletim hattının dağınım diyagramı

Sağ-elli iletim hattının dağınım diyagramının davranışı, faz sabitinin, frekans arttıkça artması yönündedir. Bu durum sağ-elli iletim hatlarının birim uzunlukta üzerlerinden geçen sinyalin fazını, frekans yükseldikçe daha fazla kaydıracakları anlamına gelmektedir. Aynı zamanda faz sabiti kırılma indisiyle de ifade edilebildiğinden, iletim hattına karşılık gelen ortamın kırılma indisinin de frekans arttıkça artacağı görülebilir.

iletim hatları açık veya kapalı devre olarak sonlandırıldıklarında, kablo içerisinde empedans uyumsuzluğundan dolayı yansımalar meydana gelmektedir. Oluşan yansımalar hat içerisinde bir duran dalga oluşmasına ve iletim hattının bir rezonatör olarak davranmasına neden olur. Bu tip rezonatörlere monopol, dipol anten vb. yapılar örnek gösterilebilir. Rezonatörler, belirli salınım modlarına sahiptir. Salınım modları, rezonatörün desteklediği temel frekansın tam katlarında oluşmaktadır. Oluşan mod frekanslarında yapılar, uygulanan sinyalin fazını kaydırmamaktadır. Burada faz değerinin görelî bir parametre olduğundan ve genellikle 360 derecede bir tekrarlayan açısal bir ifade olarak belirtildiğinden sıfır faz kaymasının doğrudan faz sabitini sıfır yapan değer olmadığını göz önünde bulundurmak gerekir (Faz sabitindeki faz bilgisi kümülatif faz

bilgisini taşımaktadır.). Şekil 2.18’de görülen dağınım diyagramında, sağ-elli rezonatif yapıların rezonans frekansının, yapının boyutları küçüldükçe arttığı görülebilir.

Sol-elli iletim hatları daha önce de bahsedildiği gibi doğada doğrudan gözlenebilir değildirler. Fakat sağ-elli hatlar ile karşılaştırılarak analiz edildiğinde daha anlaşılır hale gelmektedir. Benzer olarak sol-elli iletim hatları incelendiğinde, karakteristik itibariyle eşlenik devre olarak LC yüksek geçiren filtresine benzetilebilir. Sol-elli iletim hatlarının eşlenik devresi şekil 2.19’de görülebilir.



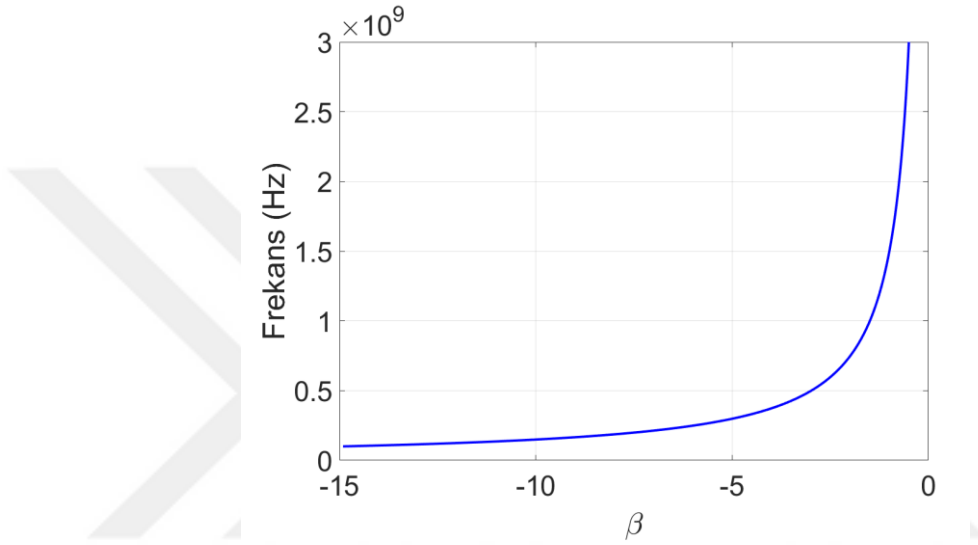
Sol- elli iletim hatlarının frekans tepkisi sağ-elli iletim hatlarının tersi karaktere sahiptir. Sol elli hatlarda yüksek frekanslarda geçirgenlik artmaktadır. Bu durum sağ-elli iletim hatlarına benzer şekilde, (2.3.6) ve (2.3.7) ifadeleri ile açıklanabilir.

İdeal sol elli iletim hatlarının taşıdıkları sinyalin fazını geriye doğru kaydardıkları eşlenik devre modelinden çıkarılabilir. Sinyalin fazının geriye doğru kayması sol elli hatlarda manyetik ve elektrik geçirgenlik değerlerinin negatif olmasının bir sonucudur. Sol-elli hat içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalganın Poynting vektörü ve dalga vektörü zıt yönelimde olduğundan net faz kayması geriye doğru oluşmaktadır. Bu durum, faz sabitini(Lai vd. 2004),

$$\beta_L = -\frac{1}{\omega\sqrt{L_L C_L}} \quad (2.3.9)$$

formuna getireceğinden dağınım diyagramı da değişecektir. Sol-elli iletim hatları için dağınım diyagramı bu bilgiler ışığında şekil 2.20’deki gibi olacaktır. Dağınım

diyagramında, faz sabitinin frekans yükseldikçe arttığı fakat sol-elli ortamların frekansa göre faz sabiti değişiminin çizgisel karakterde olmadığı açıkça görülebilir. Ayrıca sol-elli iletim hatlarının bütün frekans değerlerinde faz sabitinin negatif olduğu görülmektedir. Negatif faz sabiti, sağ-elli iletim hatlarının tersine şekil 2.20’ de de görüldüğü gibi ortamın negatif kırılma indisine sahip olduğunu göstermektedir. Sol-elli iletim hatlarında da rezonatif durumda rezonans frekansı yapının boyutlarına bağlı olmaktadır.



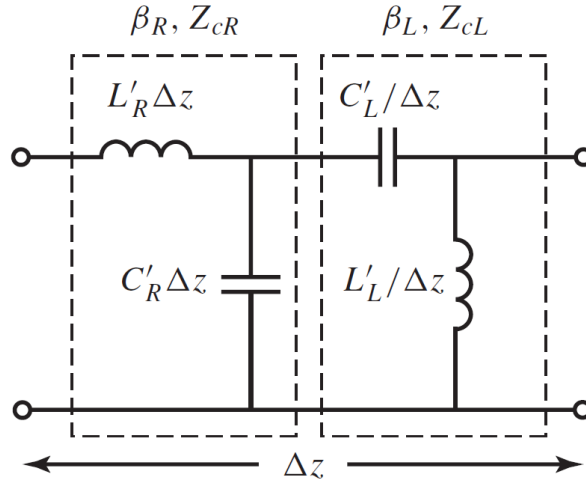
Şekil 2.20 Sol-elli iletim hattının diyagramı

Her iki durumda da dağınım diyagramlarının karakteristik özelliklerini belirleyen ana parametreler C_r , L_r , C_l , L_l parametreleridir. Bu parametreler gerçek hayatta sanal bileşenlere ait olduklarından, bu tip sürekli yapıların eşlenik devre parametreleri, empedans karakteristikleri üzerinden hesaplanmaktadır (Caloz vd. 2004). Eşlenik devre karakteristiklerinin analizi ilerleyen bölümlerde ele alınmıştır.

2.3.2 Kompozit Sağ-Sol Elli İletim Hatları

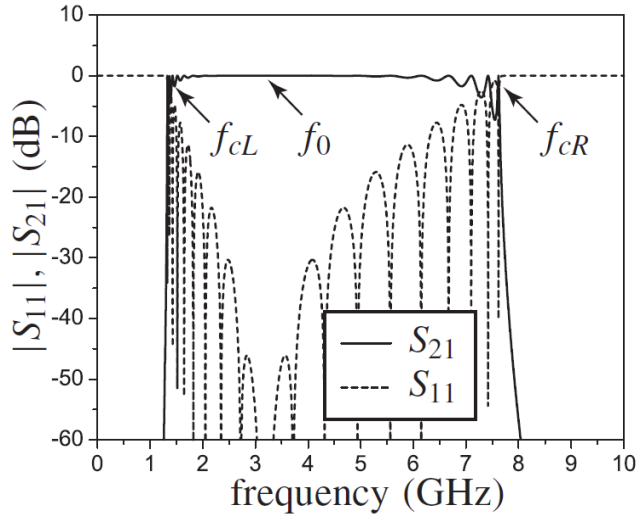
Sağ ve sol elli iletim hatları kombine olduklarında, her iki hattında karakteristiklerinin korunduğu yeni bir yapı meydana gelmektedir. İletim hatlarının karakterleri bir araya geldiğinde beklenildiği gibi devre karakteristiği açısından, geniş bantlı bir bant geçiren

filtre devresi oluşmaktadır (Caloz ve Itoh 2006). Şekil 2.22’de bir sağ-sol elli hattın frekans tepkisi görülebilir.



Şekil 2.21 Sağ-sol elli iletim hattı eşlenik devresi(Caloz ve Itoh 2006)

Oluşan bant geçiren filtrenin düşük frekanstaki kesim frekansı sol elli iletim hattı parametreleri tarafından belirlenirken, yüksek frekanstaki kesim frekansı sağ elli iletim hattı parametreleri tarafından belirlenmektedir.



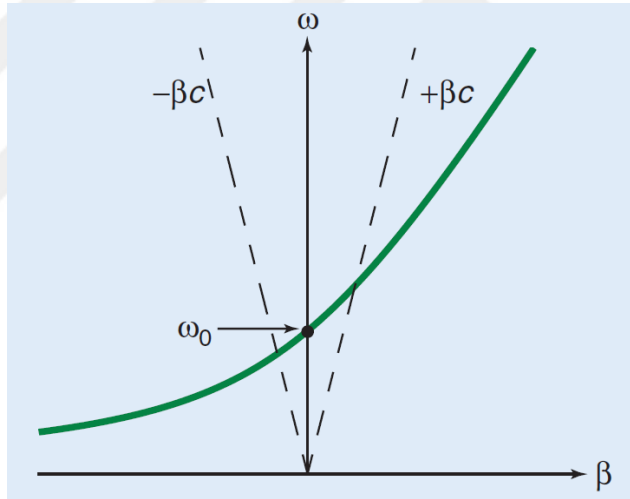
Şekil 2.22 Sağ-sol elli iletim hattı iletim ve yansıma parametreleri (Caloz ve Itoh 2006)

İki hattın kombine olmasının yapının üzerine uygulanan sinyalin fazı üzerinde de kritik etkileri vardır. Her iki iletim hattının dağınım diyagramları birleştiğinde iki diyagramın geçiş noktasında faz sabiti sıfır olmayan bir frekansta sıfır değerini almaktadır.

Sağ ve sol elli hatların ayrı ayrı etkilerinden farklı olarak bu geçiş durumunda, taşınan sinyale etki eden kümülatif faz kayması sıfır olmaktadır. Faz sabitinin,

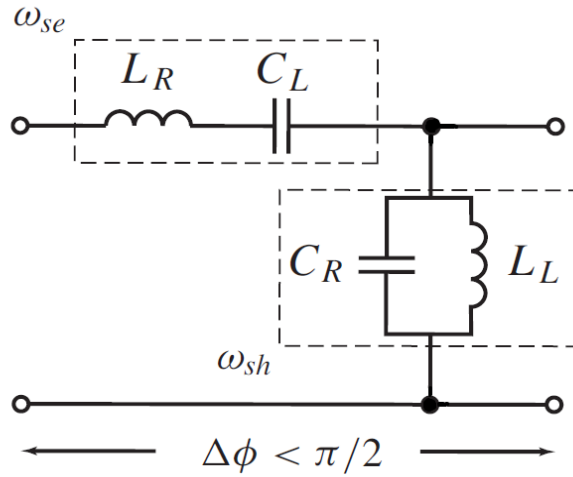
$$\lambda_g = \frac{2\pi}{|\beta|} \quad (2.3.10)$$

olduğu göz önünde bulundurulursa geçiş frekansında kılavuzlanan dalgaboyunun sonsuza gittiği görülebilir. Bu durumun fiziksel anlamı, geçiş frekansında iletim durumunda faz kaymasının frekanstan bağımsız hale gelmesidir. Pratikte örnek vermek gerekirse, belirli faz kaymasına sahip sağ-elli bir iletim hattı, belli bir frekansta tek bir boyutta olabilirken, kombine sağ-sol elli iletim hatları aynı faz kaydırma değerini keyfi bir boyut ile sağlayabilir. Şekil 2.23’de kombine sağ-sol elli iletim hattının dağınım diyagramı görülebilir.



Şekil 2.23 Dengeli sağ-sol elli iletim hattının dağınım diyagramı (Lai vd. 2004)

Sağ-sol elli iletim hatlarının iletim hattı olarak kullanıldığı durumda geçiş frekansında yansıma parametresi minimum değerde olmaktadır. Bu durum şekil 2.22’de görülmektedir. Önceki bölümde de bahsedildiği gibi iletim hatlarının dağınım diyagramlarının karakteristikleri eşlenik komponent değerleri ile belirlenmektedir. Eğer sağ-sol elli iletim hattı eşlenik devresi tekrar düzenlenirse şekil 2.24’deki devre elde edilir.



Şekil 2.24 Sağ-sol elli iletim hatlarında seri ve şönt rezonansının oluşumu (Caloz ve Itoh 2006)

Yeni oluşan şematikte de görüldüğü üzere seri ve şönt bileşenleri olarak iki farklı grup oluşmaktadır. Oluşan bu iki bileşen grubu kendi içlerinde rezonans frekansına sahiptir. Bu rezonans frekansları,

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} \quad (2.3.11)$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} \quad (2.3.12)$$

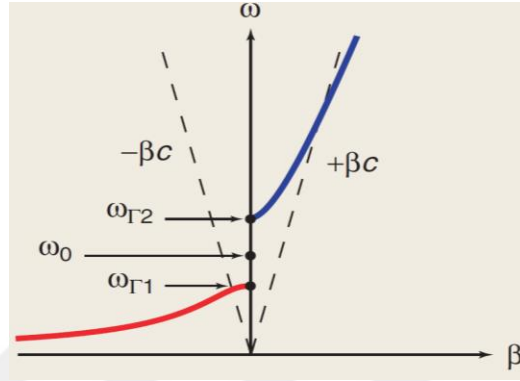
Şeklinde ifade edilir. Seri ve şönt rezonans frekansları, sağ-sol elli iletim hattının geçiş frekansını belirlemektedir. Seri ve şönt rezonans frekansları birbirine eşit olduğu durumda iletim hattı daha öncede bahsedildiği gibi geçirgenlik, geçiş frekansında maksimum olmaktadır. Ayrıca bu durumda iletim hattının dağınım diyagramı şekil 2.23’ deki gibi sürekli olmaktadır. İki rezonans frekansının dengeli olduğu durumda iletim hattı dengeli iletim hattı olarak anılır. Dengeli iletim hatlarının oluşturulabilmesi için,

$$\omega_o = \omega_{se} = \omega_{sh} \quad (2.3.13)$$

koşulunun sağlanması gerekir(Lai vd. 2004). Sağ-sol elli iletim hatları iki ayrı karakteristik barındırdığından iki sağ ve sol elli empedans değerine sahiptir. Dengeli iletim hatlarında, bu empedans değerleri birbirine eşit olup aynı zamanda sağ-sol elli iletim hattının karakteristik empedans değerine de eşit olmaktadır. Dengeli sağ ve sol iletim hatlarında, empedans değerleri,

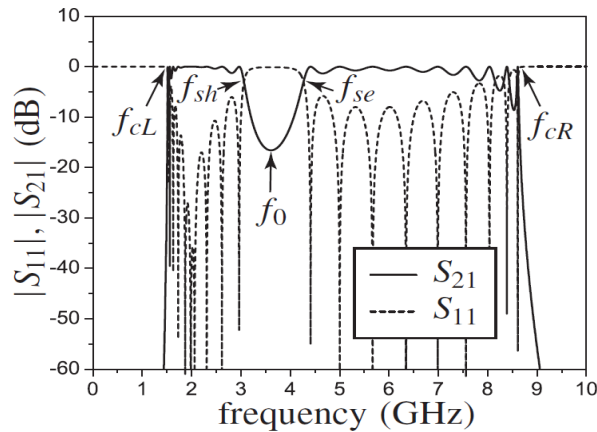
$$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = Z_O \quad (2.3.14)$$

şeklinde belirlenmektedir. Seri ve şönt rezonanslarının birbirinden farklı olduğu durumda, iletim hattının dağınım diyagramı şekil 2.25 deki formu alarak geçiş frekansında bir süreksizlik oluşacaktır. Geçiş frekansında oluşan bu süreksizlik bir durdurma bandının oluşmasına neden olur. Bu durumda üretilen iletim hatları dengesiz iletim hattı olarak anılırlar.



Şekil 2.25 dengesiz sağ-sol elli iletim hattının dağınım diyagramı (Lai vd. 2004)

Dengesiz durumdaki sağ-sol elli iletim hatlarının geçirgenlik (S_{21}) ve yansıma (S_{11}) parametreleri şekil 2.26’da görülebilir. Şekil 2.26’da görüldüğü üzere dengesiz durumda, durdurma bandını oluşturan ilave iki kesim frekansı daha oluşmaktadır. Kesim frekanslarından yüksek frekanslı olanı (f_{se}), seri bileşenlerin rezonansı tarafından oluşturulurken, düşük frekanslı kesim frekansının rezonansı (f_{sh}), şönt bileşenleri tarafından oluşturulmaktadır.



Şekil 2.26 ideal dengesiz sağ-sol elli iletim hattının iletim ve yansıma parametreleri (Caloz ve Itoh 2006)

Durdurma bandının bant genişliği, seri ve şönt rezonans değerleri ile belirlenebilmektedir. Ancak, iletim hattının geçiş frekansı her iki rezonans frekansına da eşit bant uzaklıkta olmalıdır. Bu durumun sağlanabilmesi için rezonans değerleri,

$$\sqrt{\omega_R \omega_L} = \sqrt{\omega_{sh} \omega_{se}} = \omega_o \quad (2.3.15)$$

ifadesine göre belirlenmelidir. Ayrıca dengesiz durumda iletim hattının giriş empedansı,

$$Z_O = Z_L \sqrt{\frac{L_R C_L \omega^2 - 1}{L_L C_R \omega^2 - 1}}, \quad Z_L \neq Z_R \quad (2.3.16)$$

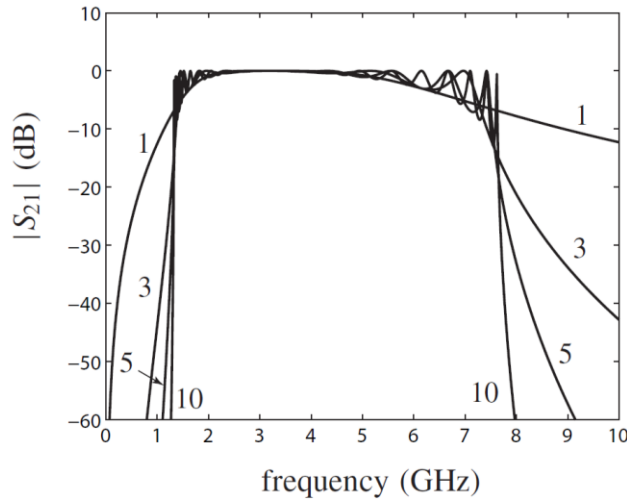
Şeklinde belirlenmektedir. Dengeli iletim hatlarından farklı olarak dengesiz iletim hatlarında çıkış empedansının frekans bağımlılığı açık olarak görülebilir. Bu durum dengeli iletim hatlarının geniş bir frekans bandı boyunca empedans uyumluluğunun sağlanabilirken, dengesiz hatlarda empedans uyumluluğunun belli bir bant genişliğinde sağlanabildiği anlamına gelmektedir (Lai vd. 2004).

Sağ-sol elli iletim hatlarının açık veya kısa devre ile sonlandırıldığı durumda, normal iletim hatlarında olduğu gibi rezonatif karakteristikler açığa çıkmaktadır. Dengeli iletim hatlarında, geçiş frekansı rezonans durumunda bir uyarılma modu haline gelmektedir. Geçiş frekansında faz kayması yapının boyutlarından bağımsız hale geldiğinden, aynı zamanda oluşan rezonans frekansının da yapının boyutlarından bağımsız hale gelmesine neden olmaktadır. Bu durumda oluşan uyarılma moduna sıfırcı dereceden rezonans (SDR) adı verilmektedir. Sıfırcı dereceden rezonans pratikte, boyutları frekansından bağımsız yapıların üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Sıfırcı dereceden rezonans frekansı, dengeli iletim hatlarında açık ve kısa devre sonlandırma durumunda, seri ve şönt rezonans frekansları eşit olduğundan, aynı karakteristikleri göstermektedir. Fakat dengesiz iletim hatlarında iki farklı geçiş frekansı bulunduğundan, açık ve kısa devre olarak sonlandırıldığında farklı sıfırcı dereceden rezonans frekansları oluşmaktadır. Dengesiz iletim hatlarının kısa devre ile sonlandırıldığı durumda, paralel empedans değeri kısa devreden dolayı düşeceğinden şönt bileşenleri etkisiz kalacaktır. Bu durum, dengesiz iletim hattının sıfırcı dereceden rezonans frekansının sadece seri bileşenlerin rezonansı tarafından belirleneceği anlamına gelir. Dolayısıyla kısa devre ile sonlandırılmış bir iletim hattının sıfırcı dereceden rezonans frekansı sadece 2.3.11 ifadesine bağlı olacaktır. Bu durumun aksine iletim hattı

açık uçlu olarak sonlandırıldığında, oluşan yapı üzerinde oluşacak akım şiddeti paralel bileşenler tarafından belirleneceğinden sıfırıncı dereceden rezonans frekansı 2.3.12 ifadesindeki şönt rezonans frekansına göre belirlenecektir (Caloz ve Itoh 2006).

Oluşan sıfırıncı dereceden rezonatörlerin karakteristikleri, hücre sayısı ile ilişkilidir. Yapılar örgü olarak üretildiklerinde, bu bölümde bahsi geçen karakteristikler belirgin hale gelirken, hücre sayısı azaldığında yapıların karakteristikleri teorik olarak tasarlandıkları etkiyi göstermemektedir. Şekil 2.27’de bu duruma örnek olarak, çeşitli hücre sayısına sahip dengeli sağ-sol iletim hatlarının iletim parametreleri görülebilir (Caloz ve Itoh, 2006).



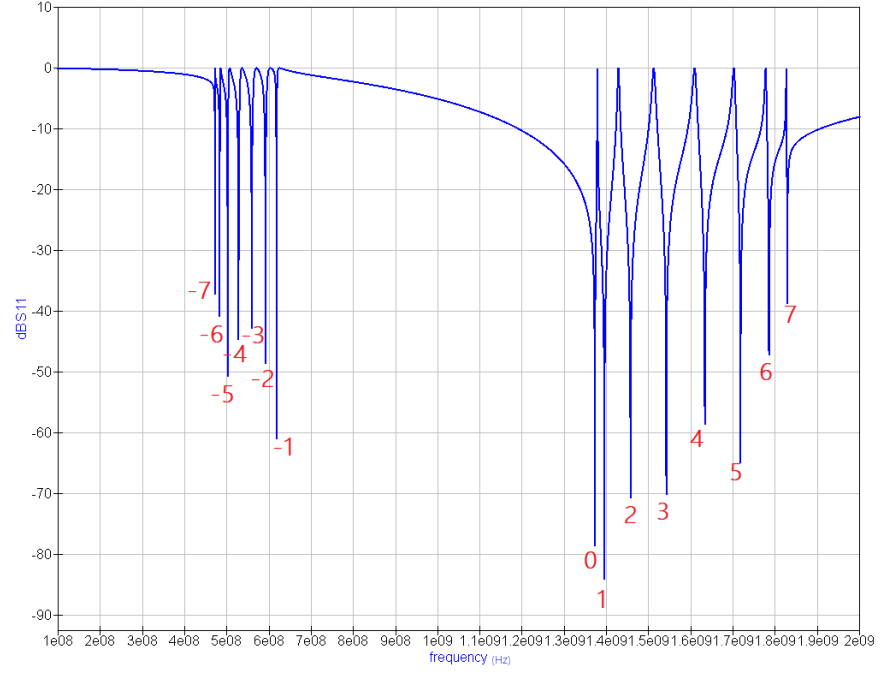
Şekil 2.27 Çeşitli hücre sayısına sahip dengeli sağ-sol elli iletim hatlarının iletim parametreleri (Caloz ve Itoh 2006)

Hücre sayısının artmasının sıfırıncı dereceden rezonatörler üzerine bir diğer etkisi ise rezonatörün yüksek ve düşük mertebeden modlarının ortaya çıkmasıdır. Teorik olarak ortaya çıkan rezonans frekansları,

$$\beta_n = \frac{n\pi}{l} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (2.3.17)$$

şeklinde belirlenir (Shi 2011). Burada, l iletim hattının fiziksel uzunluğu olup, n mod mertebesidir. Örnek olarak, 8 hücreli kısadevre edilmiş sıfırıncı dereceden rezonatörün,

yansıma parametresi şekil 2.28’ de görülmektedir. Hücre sayısının artmasıyla, oluşan modların da arttığı görülebilir.

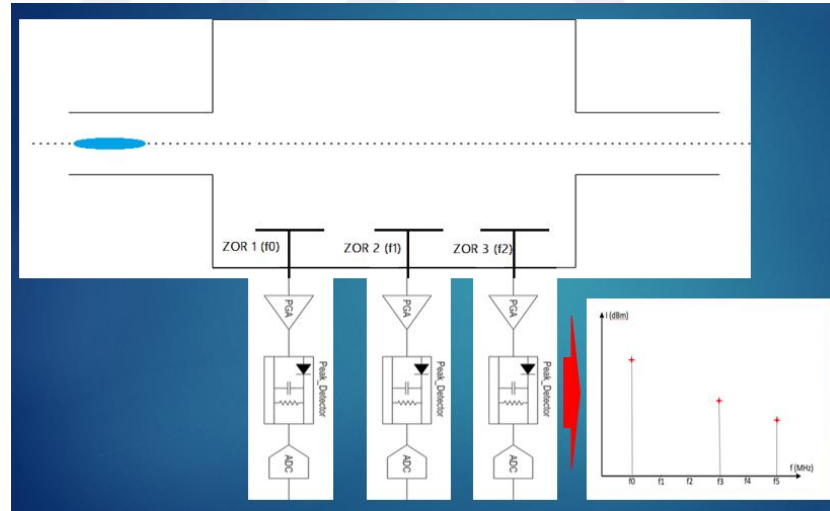


Şekil 2.28 8 hücreli kısadevre edilmiş sağ-sol elli iletim hattının oluşturduğu rezonans frekansları

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Sıfırıncı Dereceden Anten Tabanlı Elektron Paketçik Uzunluk Monitörü Tasarımı

Tasarlanan ölçüm düzeneği, 2.1.4 bölümündeki mevcut ölçüm düzeneklerine benzer olarak, rezonatif ölçüm metodu kullanmaktadır. Fakat tespit edilmesi istenilen harmoniklerin frekansı azaldıkça, gerekli rezonatif yapının boyutları büyümektedir. Sıfırıncı dereceden rezonanslı antenler, doğaları gereği dar bantlı olduklarından ve boyutlarının çalışma frekanslarından bağımsız olmasından dolayı daha kompakt bir düzenek kurulmasına olanak sağlamaktadır. Düzenek, demetin oluşturduğu periyodik atma sinyalinin spektrumu üzerinde oluşan zarfı tespit edecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarım 3 ayrı frekansta çalışan antenler barındırmaktadır. Antenlerin çalışma frekanslarının, spektrumun zarfını belli eden harmoniklerin frekansına göre belirlenmesi gerekir. İdeal durumda, düzeneğin her bir anten çıkışının tasarlandığı frekansta sinüsel bir sinyal sentezlemesi gerekir. Anten sayısı artırıldığında, ölçüm hassasiyeti artacaktır.



Şekil 3.1 Sıfırıncı dereceden rezonanslı antenler ile paketçik uzunluğu ölçümü için tasarlanan düzeneğin blok diyagramı

Düzeneğin çıkış sinyalinin pik dedektör devresi ile ölçülesi hedeflenmektedir. Böylelikle çıkış sinyalleri DC seviyesinde olacağından, analiz edilmesi için hızlı elektronik sistemlerin (spektrum analizör, osiloskop, hızlı analog dijital çeviriciler vb.) gereksinimi ortadan kalkacaktır. Tasarlanan düzeneğin blok diyagramı şekil 3.1’de görülebilir.

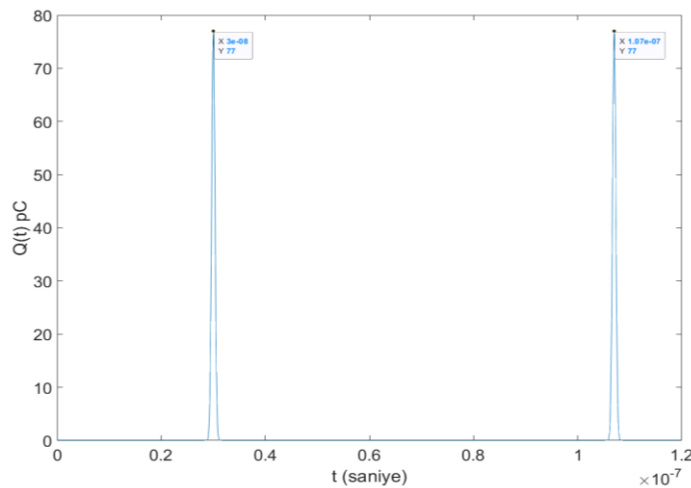
3.2 Paketçik Kaynaklı Harmonik Sinyallerinin Belirlenmesi ve Atma Sinyali Analizi

Düzenekte kullanılacak olan ZOR antenlerin çalışma frekansları demet parametrelerine göre belirlenmektedir. Çalışmada Almanya’da bulunan ELBE serbest elektron lazer tesisinin enjektör hattı parametreleri baz alınarak gerekli hesaplamalar ve tasarım yapılmıştır. Parametreler, çizelge 3.1’de görülebilir. Farklı demet parametreleri ile benzer hesaplamalar yapılarak istenilen hızlandırıcıya göre düzeneğin optimizasyonu yapılabilir.

Çizelge 3.1 ELBE hızlandırıcı parametreleri (Evtushenko 2004)

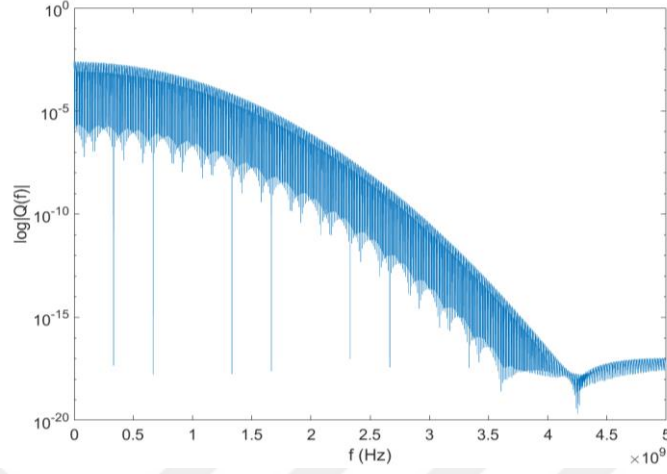
Enerji	250 KeV
Tekrarlama Frekansı	13 MHz
Paketçik uzunluğu	450 ps
Paketçik yükü	77 pC
Temel Frekans	1.3GHz

Periyodik atma sinyalinin frekans spektrumu, daha önce de bahsedildiği gibi harmoniklerden oluşmaktadır. Oluşan harmoniklerin genliklerinin değişimi, atma profili ile ilişkilidir. Çizelge 3.2.1’de verilen hızlandırıcı parametrelerine göre elektron demetinin zaman yapısı şekil 3.2’deki gibi olacaktır.



Şekil 3.2 İdeal durumda hızlandırıcı parametrelerinden elde edilen paketçik zaman yapısı (13 MHz tekrarlama frekansı ve 450 ps atma genişliği)

Parametrelere göre elde edilen sinyalin Fourier dönüşümü yapılırsa, şekil 3.3’ deki gibi bir frekans dağılımı gözlenir.

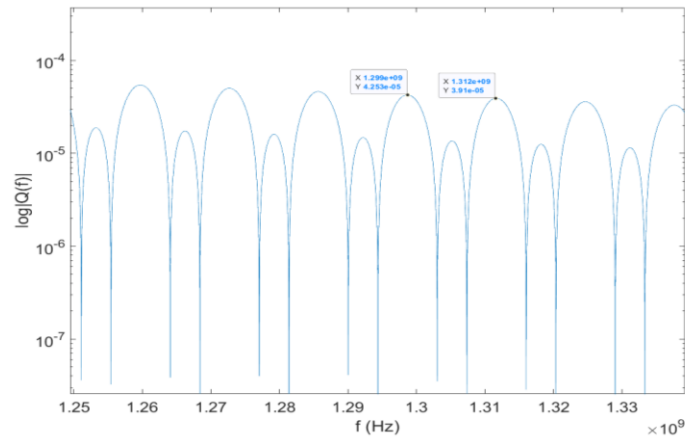


Şekil 3.3 İdeal durumda periyodik elektron paketçiklerinden kaynaklanan sinyalin spektrumu

Harmoniklerin spektrum üzerindeki konumları atmaların tekrarlama frekansına bağlıdır. Şekil 3.2’de görülen zamana göre değişen atmanın tekrarlama periyodu 77 ns olduğundan, spektrumda gözlenecek olan harmoniklerin arasındaki frekans farkı,

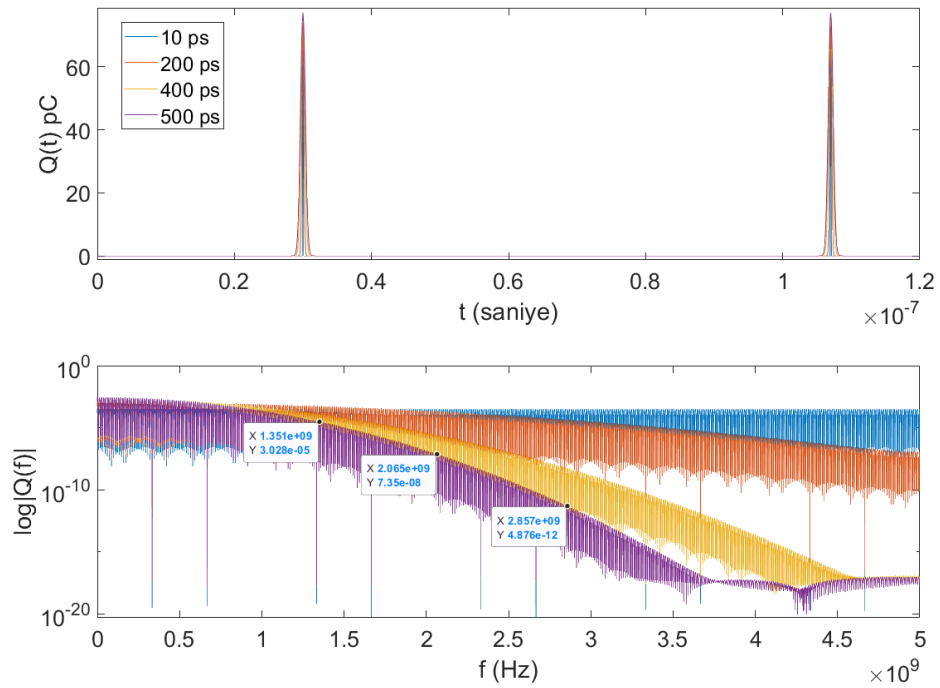
$$\Delta f = \frac{1}{T_{rep}} \quad (3.2.1)$$

Şeklinde olacaktır. Tekrarlama frekansı arttıkça spektrumdaki harmonikler arasındaki frekans farkı da artmaktadır. Bu durum şekil 3.4’de görülebilir. Sabit tekrarlama frekansına sahip paketçiklerin ürettiği harmoniklerin frekansı da sabit kalacağından, harmoniğin genlik değişimi sadece paketçiğin uzunluğu ile ilişkili olacaktır.



Şekil 3.4 Periyodik atma sinyalinin spektrumunun yakınlaştırılmış kesiti

Paketçik uzunluğunun değişimine bütün harmoniklerin genliği aynı seviyede duyarlı değildir. Geniştir 500ps-10ps arasında değıştirilen atma sinyallerinin frekans spektrumu incelendiğinde, genişlik değışimine en duyarlı olan harmonikler dedeksiyon için belirlenmiştir. Şekil 3.5’ de görüldüğü gibi zaman ekseninde genişleyen sinyalin frekans ekseninde kapladığı frekans bandı daralmaktadır. Şekil 3.5’de inceleme sonucunda belirlenen harmoniklerin spektrum üzerindeki konumu görülmektedir.



Şekil 3.5 Paketçik uzunluğu değışiminin sinyal spektrumu üzerindeki etkisi ve harmonik seçimi

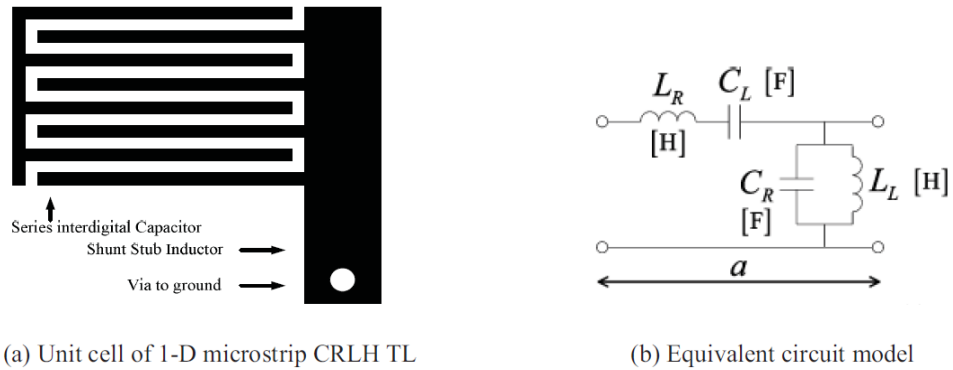
Şekil 3.5’de spektrum üzerinde seçilen harmonikler görülmektedir. Yapılan analizin sonucunda algılanacak harmonikler çizelge 3.2’deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.2 Spektrum üzerinden seçilen harmonik frekansları

Harmonik no	Frekans
F_1	1351 MHz
F_2	2065 MHz
F_3	2857 MHz

3.3 SDR Anten Tasarımı ve Frekans Optimizasyonu

Belirlenen F1, F2 ve F3 harmonikleri için anten geometrilerinin optimizasyonu yapılarak anten tasarımı belirlenmelidir. Tez çalışmasında, üretim imkanlarının kısıtlı olmasından kaynaklı olarak sadece belirlenen en düşük frekanslı harmonik için anten tasarımı yapılmıştır. Anten geometrisinin bir vakum haznesi içerisine yerleştirileceği hesaba katılırsa, olabildiğince küçük boyutlarda tasarlanmalıdır. Bu duruma ek olarak anten boyutunun aynı zamanda, üretilebilir boyutlarda tutulabilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, kısa devre ile sonlandırılmış, dengesiz SDR anten tasarımının kullanılmasına karar verilmiştir. Bunun sebebi daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi kısa devre SDR antenin sıfırıncı dereceden rezonansının sadece seri rezonansa bağlı olmasıdır. Seri rezonans, sağ-sol elli iletim hattının koşulundan dolayı şönt rezonansından büyük olmaktadır. Dolayısıyla, oluşturulacak antenin yapısı optimize edilebilir hale gelmektedir.



Şekil 3.6 a) Sağ-sol elli iletim hattı geometrisi b) Sağ-sol elli iletim hattı eşlenik devresi (Shi 2011)

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi SDR anten, mikro-şerit devre elemanları kullanılarak yapılmıştır. Mikro-şerit devre elemanları ile sol-elli iletim hattı kurulduğunda, devrenin parazitik etkilerinden dolayı sağ elli iletim hattı özellikleri de oluşmaktadır. Bu durum doğada saf sol-elli ortamın bulunmamasının bir sonucudur. Sol elli iletim hattı kurulup parazitik eşlenik devre elemanlarının etkileri hesaplanırsa sağ sol elli iletim hattının eşlenik devre elemanlarının değerleri belirlenerek gerekli ayarlamalar yapılabilir. Şekil 3.6'da 2004 yılında ortaya atılan sağ-sol elli iletim hattı birim hücresi görülmektedir(Caloz vd. 2004).

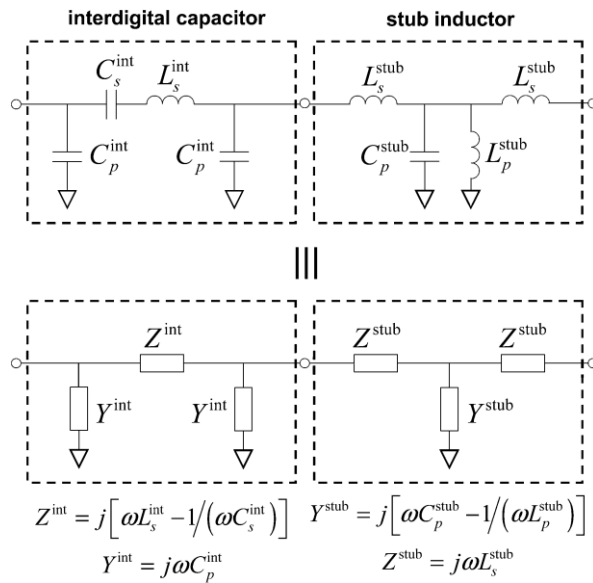
Yapılan çalışmada şekil 3.6’da görülen mikro-şerit inter dijital kapasitör ve stub indüktör ile oluşturulan yapı baz alınarak tasarım yapılmıştır. Tasarım sürecinde parametreler, üretimin yapılacağı CNC cihazının, FR4 bakır yüzeyi üzerine işleyebildiği minimum kazıma genişliği baz alınarak belirlenmiştir. Öncelikle C_L bileşeninin başlangıç değeri, üretim koşullarına göre keyfi olarak belirlenmiştir. C_L değeri, bir mikro şerit kapasitörün kapasitansı olduğundan,

$$C_L \approx (\epsilon_r + 1)l_{ic}[(N - 3)A_1 + A_2] \quad (3.3.1)$$

$$A_1 = 4.409 \tanh \left[0.55 \left(\frac{h}{w^{ic}} \right)^{0.45} \right] \cdot 10^{-6} \quad \left(\frac{pF}{\mu m} \right) \quad (3.3.2)$$

$$A_2 = 9.92 \tanh \left[0.52 \left(\frac{h}{w^{ic}} \right)^{0.5} \right] \cdot 10^{-6} \quad \left(\frac{pF}{\mu m} \right) \quad (3.3.3)$$

ifadesi kullanılarak belirlenmiştir (Caloz ve Itoh 2006). Bu ifadede h FR4 alt taşın dielektrik kalınlığı, w^{ic} inter dijital kapasitörün parmak kalınlığı, l_{ic} parmak uzunluğu ve N parmak sayısı olup işlemin sonucu pikofarad cinsindendir. Bu ifadeden elde edilen kapasitans değeri, 1.6 pF olarak belirlenmiştir. Bu değer inter dijital kapasitörün parmak kalınlığı ve aralığı 1 mm değerinde tutulularak, kapasitörün uzunluğu değiştirilerek belirlenmiştir. Bu değeri sağlayan parmak uzunluğu 22 mm olarak bulunmuştur. Burada hesaplanan değer yaklaşık değer olduğundan ve C_r , L_r değerleri doğrudan belirlenemediğinden, tasarlanan düzeneneğin tam dalga simülasyonları yapılarak, empedans ve edmitans karakteristikleri incelenmiştir.



Şekil 3.7 İnterdijital kapasitör ve stub indüktörden oluşan sağ-sol elli iletim hattının eşlenik devresi (Caloz vd. 2004)

İncelenen empedans ve admittance matris parametrelerinin ışığında eşlenik bileşen değerlerinin hesaplanmıştır. Şekil 3.7’de oluşturulan mikro-şerit yapının parazitik etkileri dahil edilmiş eşlenik devresi görülmektedir. Devrenin T ve π eşleniği alındığında empedans ve edmitans parametreleri üzerinden,

$$C_p^{int} = \frac{(Y_{11}^{int}) + (Y_{21}^{int})}{j\omega} \quad (3.3.4)$$

$$L_s^{int} = \frac{1}{2j\omega} \left(\omega \frac{\partial Z_{21}^{int}}{\partial \omega} + Z_{21}^{int} \right) \quad (3.3.5)$$

$$C_s^{int} = \frac{2}{j\omega} \left(\omega \frac{\partial Z_{21}^{int}}{\partial \omega} - Z_{21}^{int} \right)^{-1} \quad (3.3.6)$$

$$L_s^{stub} = \frac{(Z_{11}^{stub}) + (Z_{21}^{stub})}{j\omega} \quad (3.3.7)$$

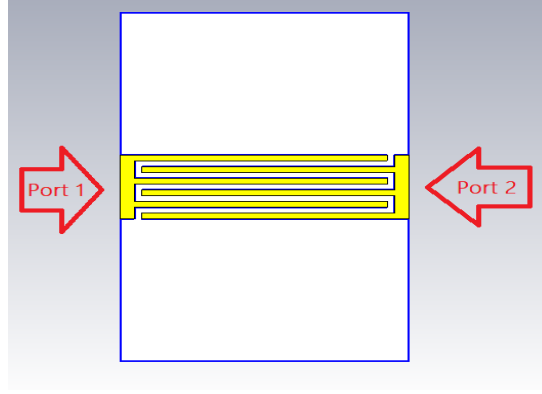
$$C_p^{stub} = \frac{1}{2j\omega} \left(\omega \frac{\partial Y^{stub}}{\partial \omega} + Y^{stub} \right) \quad (3.3.8)$$

$$L_p^{stub} = \frac{2}{j\omega} \left(\omega \frac{\partial Y^{stub}}{\partial \omega} - Y^{stub} \right)^{-1} \quad (3.3.9)$$

eşlenik devre bileşenlerinin değerleri hesaplanabilir (Caloz vd. 2004). Bu ifadelerdeki empedans ve edmitans matris parametreleri CST mikrodalga analiz programında stub indüktörü ve interdiijital kapasitörün ayrı ayrı tam dalga simülasyonu ile elde edilmiştir.

İnterdiijital kapasitörün eşlenik devre parametrelerinin belirlenmesi için, simülasyon ile elde edilen admittance matris parametreleri, (3.3.4)-(3.3.9) denklemlerinde kullanılmıştır. Yapılan analiz yardımıyla interdiijital kapasitörün parmak uzunluğu değiştirilerek, belirlenen 1.6 pF kapasitans değerini sağlayan gerçek uzunluk değeri bulunmuştur. Ayrıca bu süreçte interdiijital kapasitörün seri indüktans değeri de hesaplanarak, oluşacak yapının seri rezonans değeri de belirlenmiştir. Seri indüktans değeri, parazitik bir etki olduğundan, indüktans değeri kapasitörün parmak sayısı değiştirilerek ayarlanmıştır.

Elde edilen interdiijital kapasitörün simülasyon görüntüsü şekil 3.8’de görülmektedir. Simülasyonda, interdiijital kapasitörün iki ucuna portlar bağlanarak şekil 3.7’deki edmitans parameteleri elde edilerek uygun değer hesaplanmıştır.



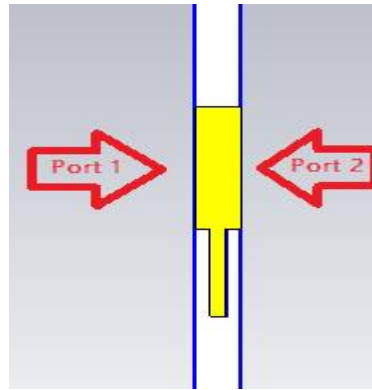
Şekil 3.8 İnterdijital kapasitörün simülasyon görüntüsü

Daha önce belirtildiği üzere, sağ-sol eli iletim hatlarında, (2.3.15) koşulunun sağlanması gerekir. Ayrıca üretilecek anten 50 Ohm standardında cihazlar ile kullanılacağından, çıkış empedansının uyumlandırılabilir seviyede olması gerekmektedir. 2.3.15 ifadesi düzenlenerek,

$$\omega_{sh} = \frac{\omega_o^2}{\omega_{se}} \quad (3.3.10)$$

formuna getirilirse ve geçiş frekansının değeri keyfi olarak (seri rezonans frekansından küçük bir değer olmak şartıyla) belirlenirse, şönt rezonansının değeri elde edilir. Ancak geçiş frekansı belirlenirken 2.3.16 denkleminin yardımıyla uygun giriş empedansını sağladığı kontrol edilmelidir.

Şönt rezonansı belirlendikten sonra, uygun mikro-şerit stub indüktörü geometrisi, interdijital kapasitörde olduğu gibi CST simülasyonu ile bulunmuştur.



Şekil 3.9 Stub indüktörünün simülasyon görüntüsü

Simülasyonda, uygun indüktans değeri, stub indüktörünün uzunluğunun değiştirilmesiyle bulunmuştur. Stub indüktörünün simülasyon görüntüsü şekil 3.9’da görülmektedir. Stub indüktörün ölçüleri, stub uzunluğu 8 mm, kalınlığı ise 1mm olarak belirlenmiştir.

Stub indüktörünün simülasyonundan elde edilen empedans matris parametreleri kullanılarak eşlenik devre bileşen parametreleri belirlenmiştir. Bütün eşlenik devre parametreleri belirlendikten sonra sağ-sol elli iletim hattının eşlenik devre bileşen değerleri,

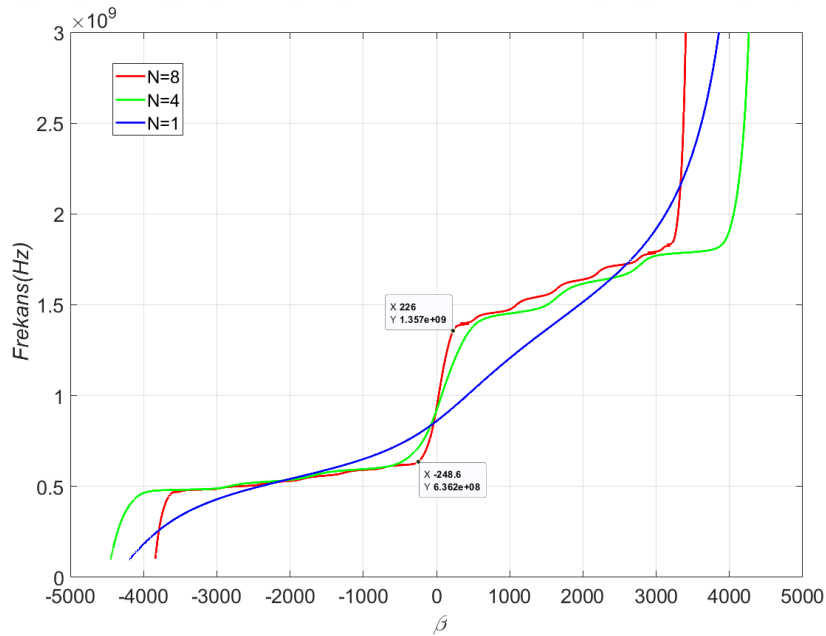
$$L_L = L_p^{stub} = 7.12 \text{ nH} \quad (3.3.11)$$

$$L_R = L_s^{int} = 8.4 \text{ nH} \quad (3.3.12)$$

$$C_L = C_s^{int} = 1.6 \text{ pF} \quad (3.3.13)$$

$$C_R = 2C_p^{int} + C_p^{stub} = 2(4.01 \text{ pF}) + (1.07 \text{ pF}) = 9.02 \text{ pF} \quad (3.3.14)$$

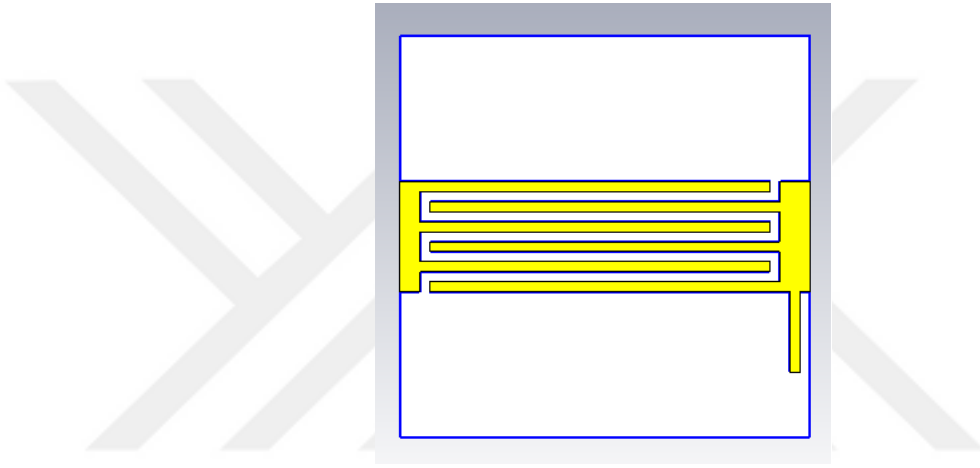
Şeklinde hesaplanmıştır. Elde edilen C_R , L_L , C_L , L_R değerleri daha sonra, Qucs devre analiz programı kullanılarak doğrulanmıştır. Qucs devre analiz programı yardımıyla, belirlenen hücrenin çeşitli örgü durumları için dağıtım diyagramları elde edilmiştir.



Şekil 3.10 Çeşitli hücre sayıları için Qucs programından elde edilen ideal durumdaki dağıtım diyagramları

Şekil'3.10 da belirlenen dağınım diagramları görüldüğü gibi burada N hücre sayısıdır. Dağınım diagramında görüldüğü gibi hücre sayısı arttıkça sağ sol elli yapının durdurma bandı açıkça görülmektedir. Dağınım diyagramında ayrıca seri rezonans değerinin 1357 MHz değerinde şönt rezonansının ise 636 MHz değerinde olduğu görülmektedir.

Son olarak belirlenen geometrinin birleştirilmiş simülasyonu CST programında yapılarak, iletim, yansıma parametreleri ve dağınım diyagramı elde edilmiştir. Elde edilen son geometri, şekil 3.11'de görülebilir.



Şekil 3.11 Tasarımı yapılan sıfırıncı dereceden anten birim hücresi

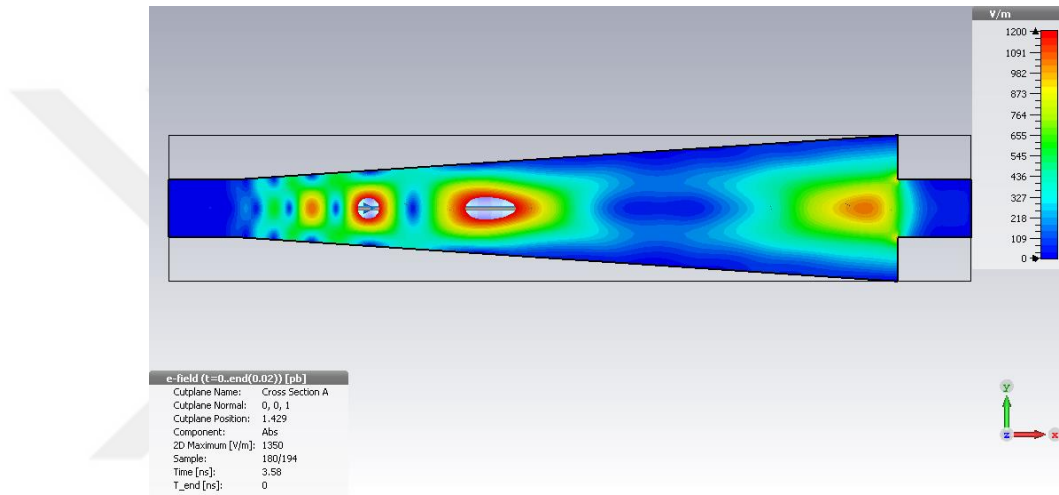
3.4 Filtre Kovuk Tasarımı

Elektron demeti kaynaklı sinyaller geniş bantlı sinyaller olduğundan, algılanacak sinyalin ön koşullandırılması gerekebilir. Ön koşullandırma işlemi, antenlerin algılayacağı sinyallerin frekans bandını limitleyerek, düşük frekanslı parazitik sinyallerin önlenmesine yardımcı olacaktır. Koşullandırma işlemi antenlerin bulunduğu hazne tarafından gerçekleştirilebilir. Hızlandırıcılarda vakum çemberleri genellikle silindirik metalik yapılardan oluşur. Silindirik metal yapılar da aynı zamanda elektromanyetik dalgalar için silindirik dalga kılavuzu görevi görür. Elektron paketçiklerinden kaynaklanan artçı ışımların düşük frekanslı bileşenleri, oluşan dalga kılavuzunun kesim frekansından dolayı soğurularak filtre edilecektir. Hattın kesim frekansının, antenlerin algılama frekansına göre ayarlanması ile antenlerin algıladığı frekans bileşenleri hat

içerisinde birbirinden ayrıştırılabilir. Elektron paketçisi kovuk içerisinde ilerlerken, ilerleme eksenine göre dik elektrik alan bileşenine sahip olduğundan, kovuğun içerisinde oluşan uyarım TM01 modunda olmaktadır. Dolayısıyla TM01 modu için kesim frekansı,

$$f_c = \frac{2.405 \times c}{2 \times \pi \times r} \quad (3.4.1)$$

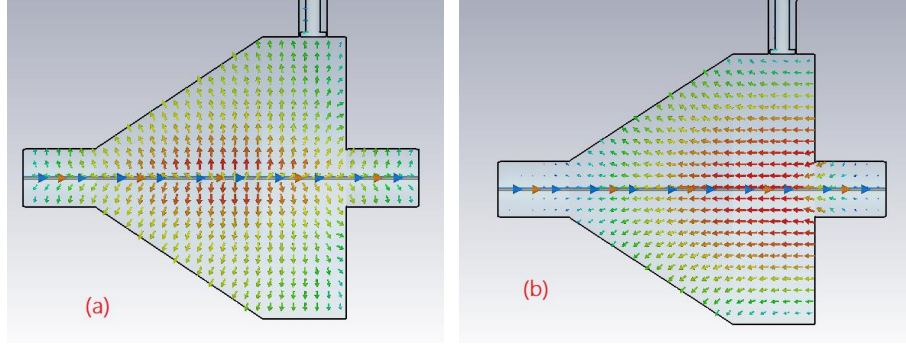
Şeklinde olacaktır (Pozar 2012). Denklem 3.41’de görüldüğü gibi silindirin çapı değiştirilerek alt kesim frekansı ayarlanabilir. Bu bilginin ışığında eğer konik bir dalga kılavuzu tasarlanırsa, konuma göre kesim frekansı değişen bir yapı elde edilmiş olur.



Şekil 3.12 Konik bir kovukta demet kaynaklı elektromanyetik dalganın ilerleyişinin simülasyon görüntüsü

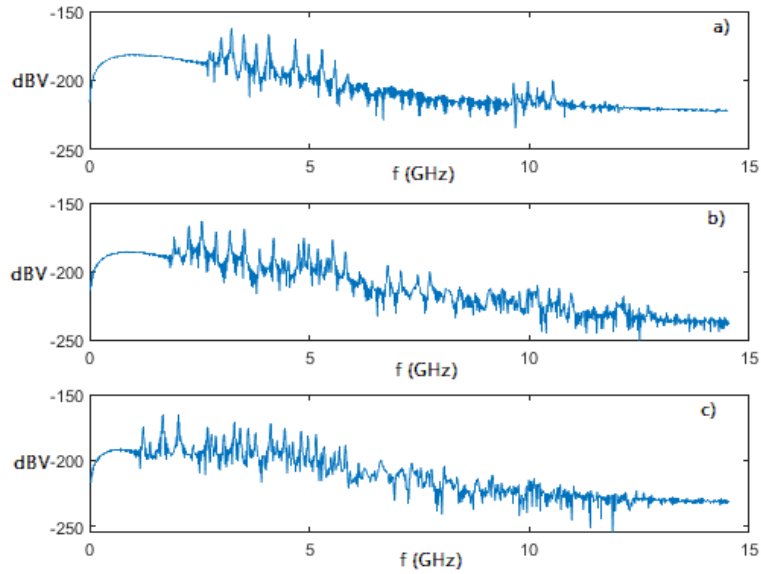
Konik yapıdaki metalik bir yapı daraldıkça sadece yüksek frekansları destekleyecektir. Bu geometri konuma göre filtreleme yapılmasını sağlayacaktır. Ayrıca konik yapı kovuk, silindirik yapıdaki geometrilerin aksine, farklı frekansı desteklediğinden geniş bir bant genişliğini destekleyecektir. Şekil 3.13’de konik geometrili iletken borunun atma sinyali ile uyarımı ile oluşan elektrik alan dağılımının simülasyonu görülmektedir. Burada konik yapı daraldıkça frekansın yükseldiği görülebilir.

Tasarlanan düzenekte, belirlenen harmonik frekanslarına göre oluşturulacak filtre kovuğun minimum kesim frekansının, en düşük harmonik frekansı olan 1306 MHz değerini kapsayacak şekilde belirlenmesi gerekir. Bu duruma göre, 1306 MHz değerine göre filtre kovuğun geniş kısmının yarıçapı, 19.2 cm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.13 a) Elektron paketçığının kovuğun ortasında bulunduğu durumdaki elektrik alan dağılımı b) Elektron paketçığının kovuktan ayrıldıktan sonra oluşturduğu uyarımın elektrik alan dağılımı

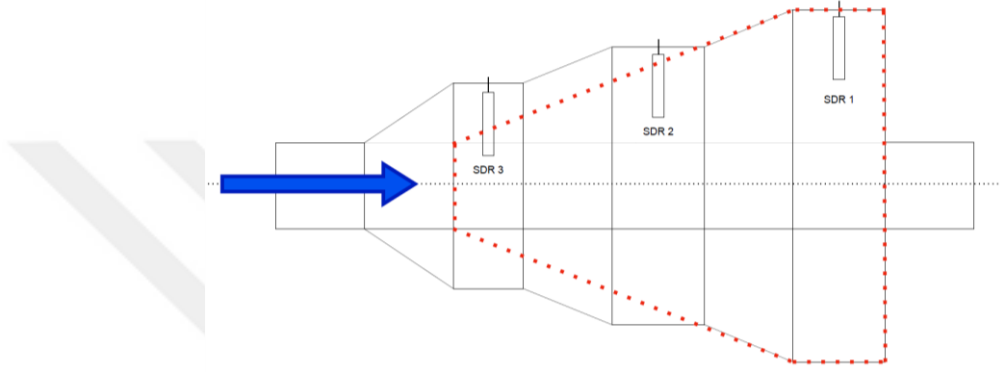
Çalışmada kullanılacak kovuğun CST simülasyon modelinin kesiti ve elektrik alan dağılımı şekil 3.12’de görülebilir. Elektrik alan dağılımından paketçik tarafından oluşturulan uyarımın TM010 modunda olduğu görülmektedir. Simülasyonda, kovuk üzerine yerleştirilen bir kapasitif prop ile kovuk içerisinde oluşan salınımların spektrumu monitörlenmiştir. Monitörlenen sinyallerin spektrumunun kovuğun yarıçapı ile değişimi şekil 3.14’ te görülebilir. Yarıçap büyüdükçe kovuğun kesim frekansının düşük frekanslara doğru kaydığı görülebilir.



Şekil 3.14 Çeşitli kovuk yarıçapları için kovuk üzerine yerleştirilen prop üzerinden alınan potansiyel ölçümleri

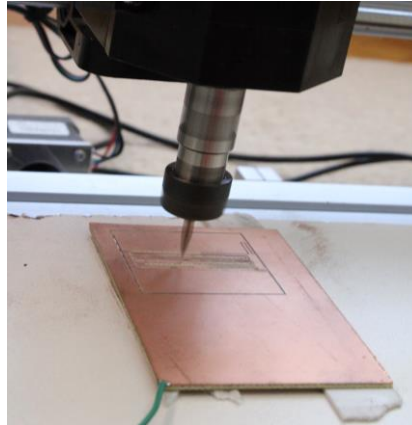
3.5 Düzeneğin Hazırlanması

Tasarlanan düzeneğin yapısı şekil 3.15’deki gibidir. Düzenek, üç segmentli haznelerden oluşmaktadır. Yapılan çalışmada, düzeneğin sınanması tek segmentli prototip yapılmıştır. Tek segmentli düzenekte, elektron demetinin oluşturduğu harmoniklerin sıfırıncı dereceden rezonanslı anten ile algılanması sınanmıştır. Yapılan prototip düzeneğin üç segmentli düzenek üzerindeki karşılığı şekil 3.15 te görülebilir.

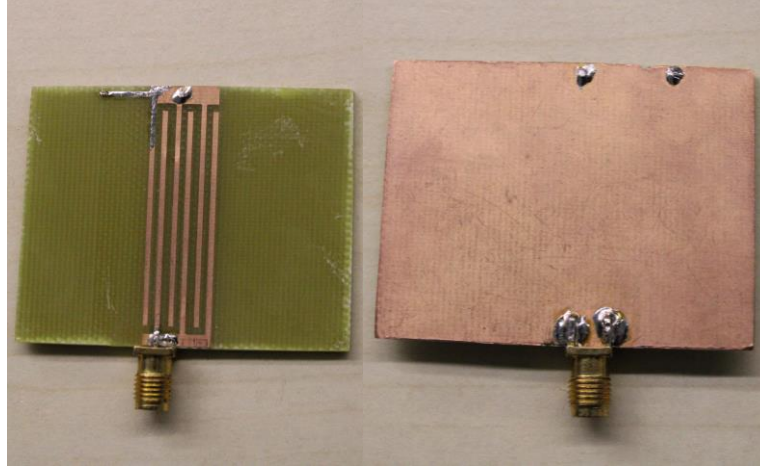


Şekil 3.15 Tasarlanan 3 segmentli düzeneğin şematik gösterimi (mavi ok işareti paketçiklerin yönünü göstermektedir.)

Düzenekte algılama için kullanılan sıfırıncı dereceden rezonanslı antenin üretimi FR4 materyal üzerine CNC kazıma işlemi uygulanarak yapılmıştır. Kullanılan FR4 materyali, 1.57 mm dielektrik kalınlığına ve 35 μm bakır kalınlığına sahiptir. Üretim işleminde 0.2 mm kalınlığında kazıma ucu kullanılmıştır. Üretimi tamamlanmış anten şekil 3.17’de görülebilir.

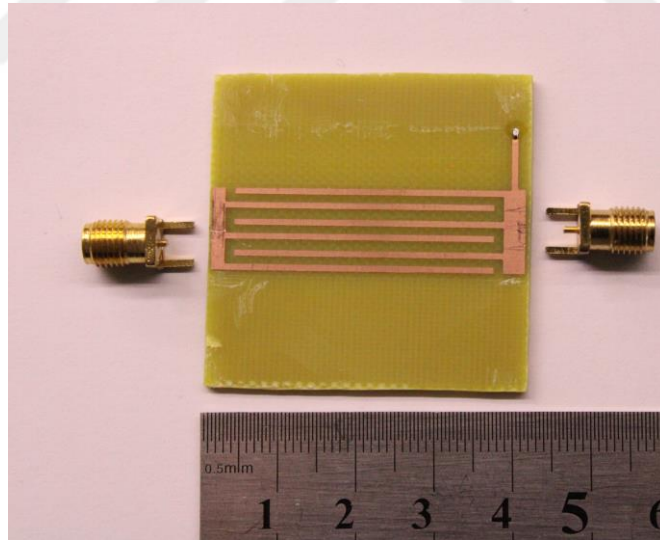


Şekil 3.16 Sıfırıncı dereceden rezonanslı antenin CNC cihazı ile üretim süreci



Şekil 3.17 Üretimi tamamlanmış sıfırıncı dereceden rezonanslı anten

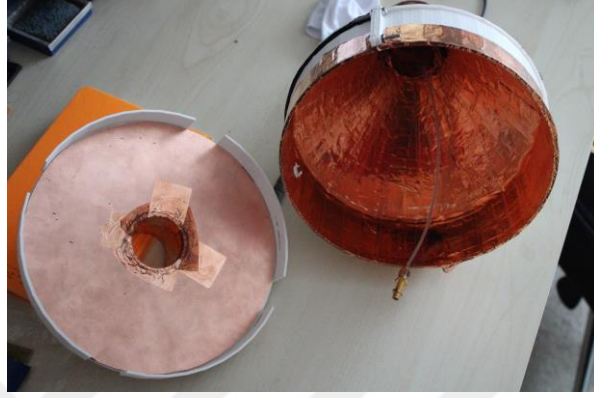
Ayrıca üretilen antenin dağınım diyagramı ve iletim parametrelerinin de karakterize edilebilmesi için aynı geometride iki geometri üretilmiştir. Üretilen geometrilerden birisi kısadevre ile sonlandırılırken diğerine iki adet port bağlanmıştır. Çift porta sahip prototip şekil 3.18’de görülebilir.



Şekil 3.18 Çift portlu sağ-sol eli iletim hattı hücresi prototipi

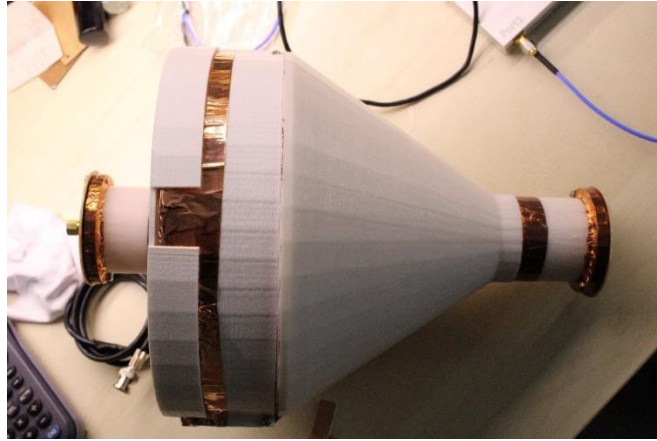
Deney düzeneğinde, daha önce tasarımı yapılan filtre kovuğun üretimi üç boyutlu yazıcı yardımı ile yapılmıştır. Üretimi yapılan parçalar, PLA (Polilaktik asit) malzeme kullanılarak üretilmiştir. Üretilen parçalar yalıtkan yapıda olduklarından, elektromanyetik alanlar ile etkileşen yüzeyler bakır folyo bant ile kaplanmıştır.

Elektromanyetik alanlar, yüzey etkisinden dolayı metalik yapılarda sadece yüzeyler ile etkileşmektedir. Kaplama yapılan parçaların bu sebepten dolayı metalden yapılmış düzeneğe benzer sonuçlar vermesi öngörülmüştür. Üretimi yapılan haznenin görüntüsü şekil 3.19’da görülebilir.



Şekil 3.19 Prototip kovuğun iç görüntüsü

Deney düzeneğinde elektron demetinin simüle edilebilmesi için daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, eş-eksenli bir kablonun üzerindeki yük dağılımından yararlanılarak testler yapılmıştır.



Şekil 3.20 Prototip kovuğun birleştirilmiş hali

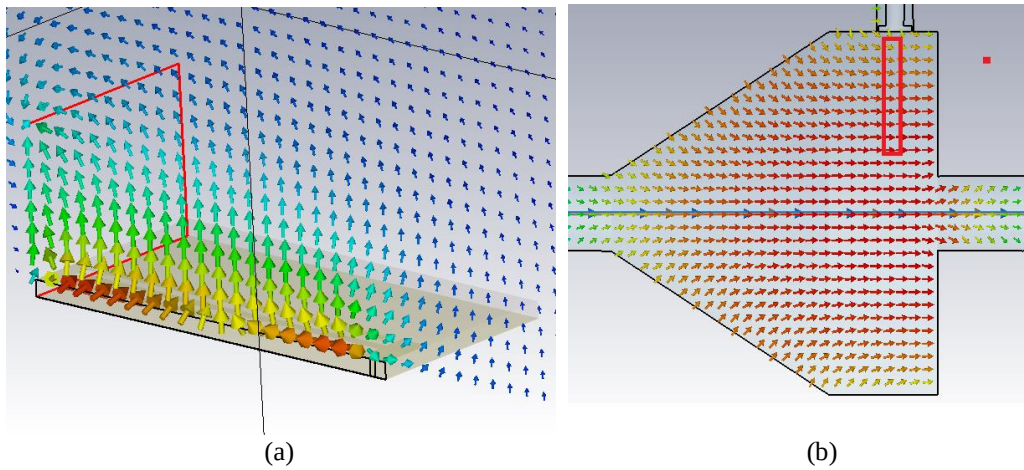
Deneyler sırasında, elektron demetinin simüle edilebilmesi için RG-58 tipi bir eş eksenli kablonun dış iletkeni çıkarılarak, tasarlanan düzeneğin içerisinden geçirilmiştir. Kurulumu yapılmış düzeneğe şekil 3.21’de görülebilir. Düzenekte RG-58 tipi kablusunun

kullanılmasının sebebi, kablonun hat empedansının kullanılacak test cihazlarının giriş/çıkış empedansı olan 50 ohm değerinde olmasıdır.



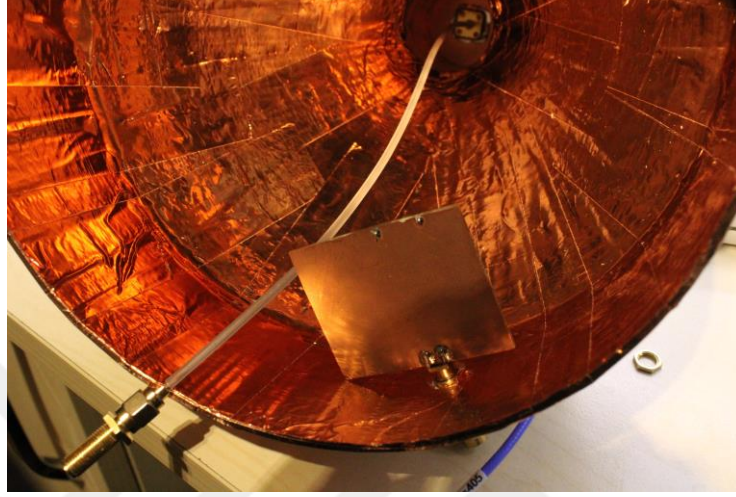
Şekil 3.21 Eş eksenli kablounun iç iletkeninin kovuk içerisindeki konumlanması

Prototip anten ve kovuk üretimi tamamlandıktan sonra sağ sol elli anten kovuk içerisine yerleştirilmiştir. Ancak antenin kovuk içerisindeki yönelimi, antenin elektrik alan yöneliminin kovuğun içerisinde oluşan uyarımın yönelimiyle paralel olarak konumlandırılması gerekmektedir. Bu durumun anlaşılması için her iki yapının da elektrik alan dağılımlarının simülasyonları incelenerek konumlandırma şekil 3.23'deki gibi yapılmıştır.



Şekil 3.22 a) Sıfırıncı dereceden antenin elektrik alan dağılımı b) Kovuk içerisinde demet kaynaklı oluşan elektrik alan dağılımı ve SDR antenin kovuk içerisindeki konumu

Elde edilen elektromanyetik simülasyon sonuçları 3.22’de görülebilir. Anten kovuğa yerleştirildikten sonra kovuk kapatılarak içerisindeki tel, kovuk uçları arasında gerilerek telin bir ucu 50 Ohm değerinde bir sonlandırıcı ile sonlandırılmıştır.

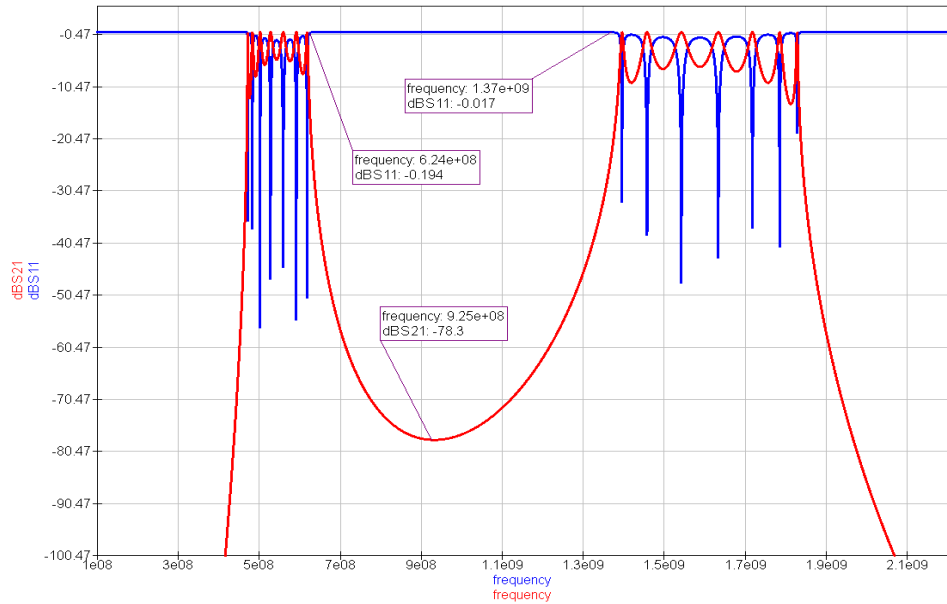


Şekil 3.23 SDR antenin filtre kovuk içerisinde konumlandırılması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

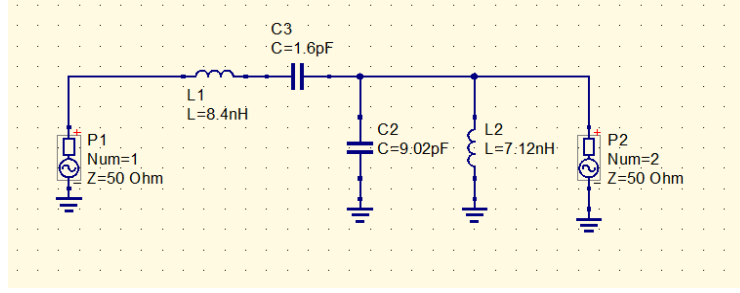
4.1 SDR Antenlerin Simülasyon Bulguları

Sıfırıncı dereceden anten tasarımında, eşlenik devre simülasyonu için Qucs mikrodalga devre analiz programı ve elektromanyetik analiz için CST programları kullanılmıştır. Parametreleri belirlenen SDR antenin ideal karakteristiklerinin belirlenmesi için öncelikle, tek hücreli ve çok hücreli olarak eşlenik devre simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar yapının, açık devre, kısa devre ve empedans uyumlu durumları için yapılmıştır. Bu durumların simülasyonları, hem CST hem de Qucs programında yapılmıştır.

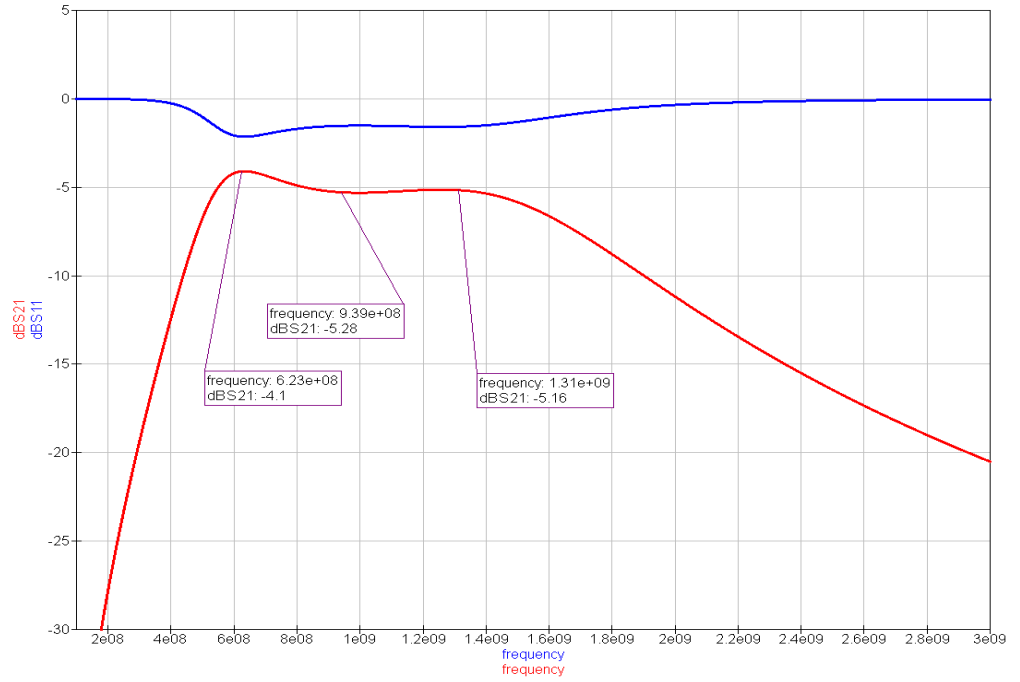


Şekil 4.1 Tasarlanan geometrinin empedans uyumlu durumda şematik simülasyonundan elde edilen iletim ve yansıma parametreleri (8 hücreli)

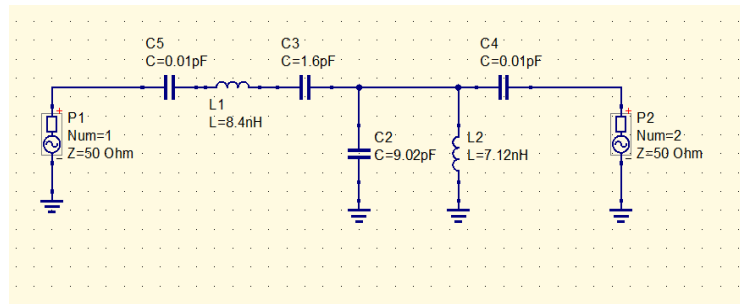
Şekil 4.1’ de elde edilen eşlenik devre parametreleri ile yapılmış, Qucs simülasyon sonucu görülmektedir. Simülasyon, yapının karakterini göstermesi için 8 hücreli olarak yapılmıştır. Simülasyon sonucunda yapının ideal şartlar altında tasarlandığı geçiş, şönt ve seri rezonansı sağladığı açıkça görülmektedir. Ayrıca yapılan diğer simülasyon sonuçları da yapının tasarlandığı gibi çalıştığını göstermektedir.



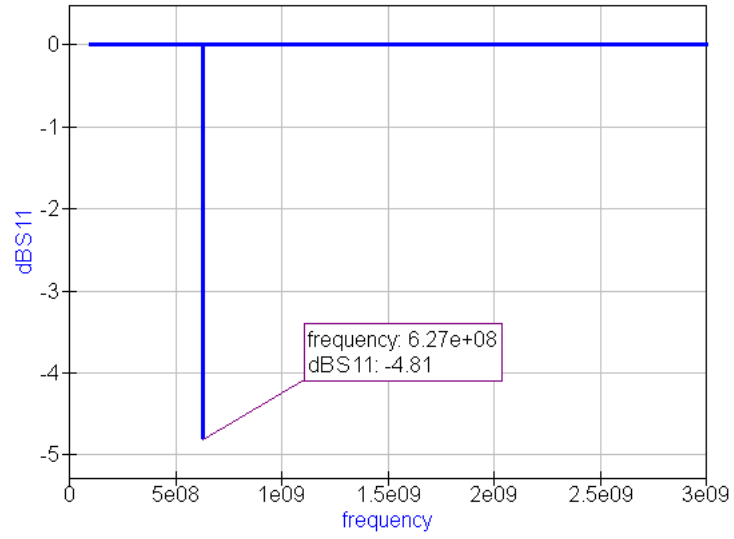
Şekil 4.2 Tasarlanan hücrenin empedans uyumlu durumunun Qucs simülasyon şematığı



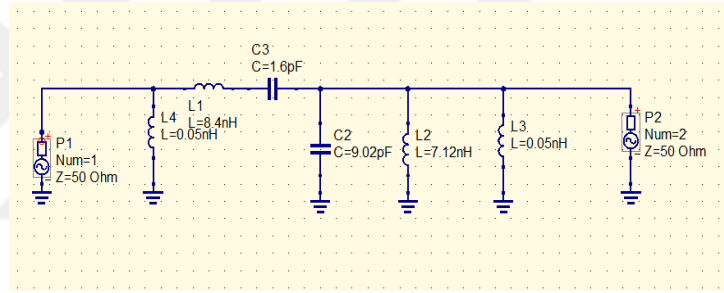
Şekil 4.3 Empedans uyumlu durumda tek hücreli yapının yansıma ve iletim parametresi (Qucs)



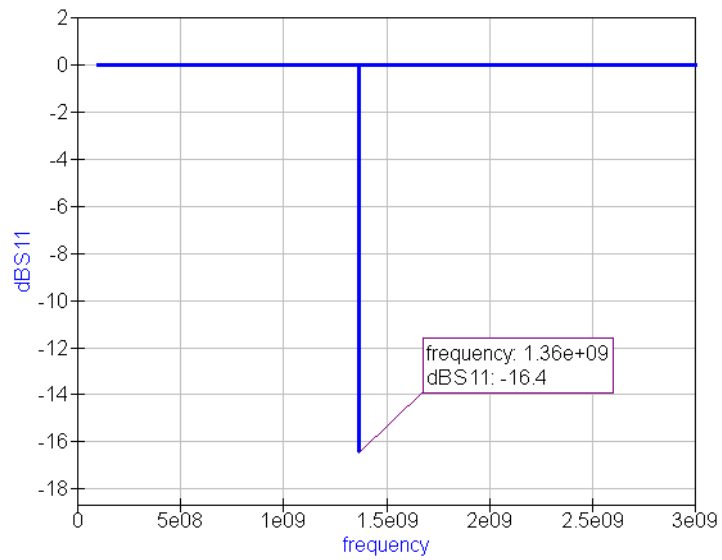
Şekil 4.4 Tasarlanan hücrenin açık devre durumunun Qucs simülasyon şematığı



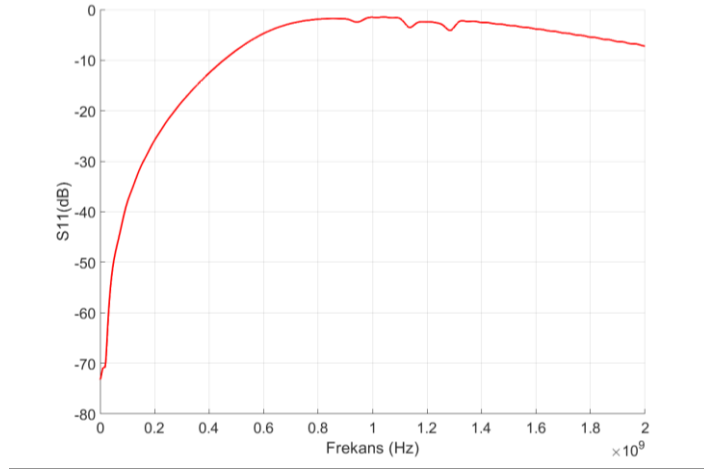
Şekil 4.5 Açık devre durumunda tek hücreli yapının yansıma parametresi (Qucs)



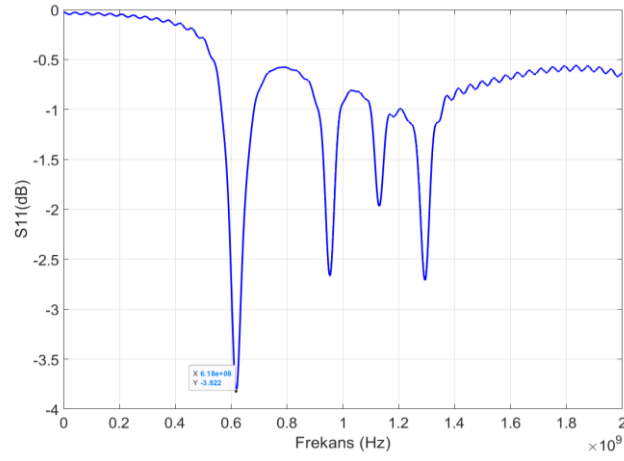
Şekil 4.6 Tasarlanan hücrenin kısa devre durumunun Qucs simülasyon şematiği



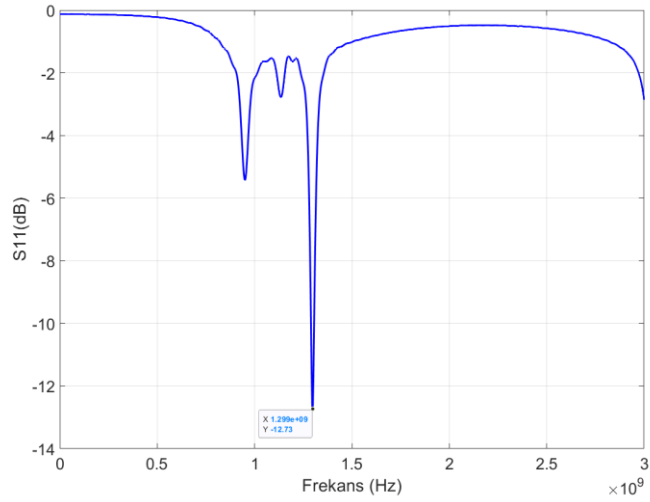
Şekil 4.7 Kısa devre durumunda tek hücreli yapının yansıma parametresi (Qucs)



Şekil 4.8 Empedans uyumlu durumda tek hücreli yapının iletim parametresi (CST)



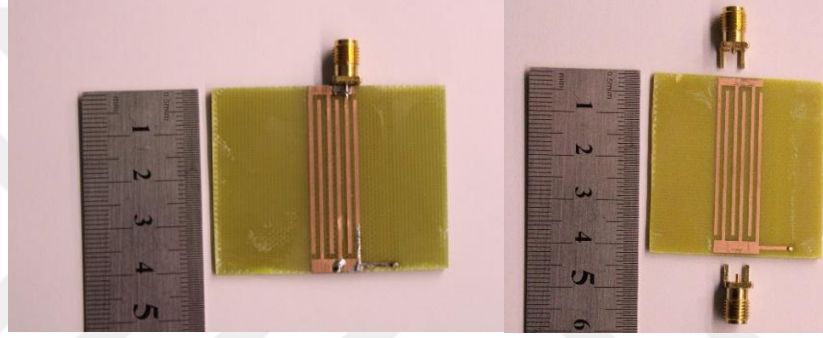
Şekil 4.9 Açık devre durumunda tek hücreli yapının yansımaya parametresi (CST)



Şekil 4.10 Kısa devre durumunda tek hücreli yapının yansımaya parametresi (CST)

4.2 Prototip SDR Antenlerin Karakterizasyonu

Tasarımı ve üretimi yapılan sıfırıncı dereceden rezonanslı antenin karakterizasyonunun yapılabilmesi için iki prototip üretilmiştir. Prototipler hücre geometrisi olarak özdeş olmak ile beraber, bir rezonatör ve bir iletim hattı oluşturacak şekilde üretilmiştir. Rezonatör hücre, kısa devre edilerek tek ölçüm portu bağlanmıştır. İletim hattı hücresinin uçlarına ise iki ölçüm portu bağlanmıştır. Rezonatör hücre ile sıfırıncı dereceden rezonans frekansı ölçülmüştür. İletim hattı hücresi ile ise yapının bant yapısının karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Üretimi yapılan hücreler şekil 4.11’de görülebilir.



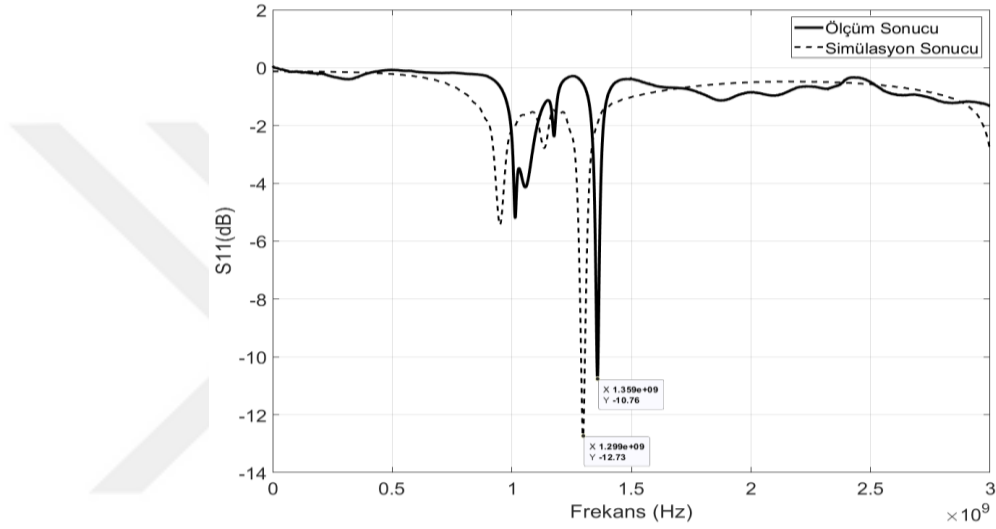
Şekil 4.11 Rezonatör hücre (Solda) iletim hattı hücresi (sağda)

Üretimi yapılan hücrelerin karakterizasyonu, bir VNA (Vector Network Analyser) yardımıyla yapılmıştır. Ölçüm sırasında, VNA bant genişliği 3 GHz olarak belirlenmiş olup, 2000 frekans örneği alınarak ölçüm yapılmıştır. Tüm ölçümlerde çıkış gücü 0 dBm olarak ayarlanmıştır.

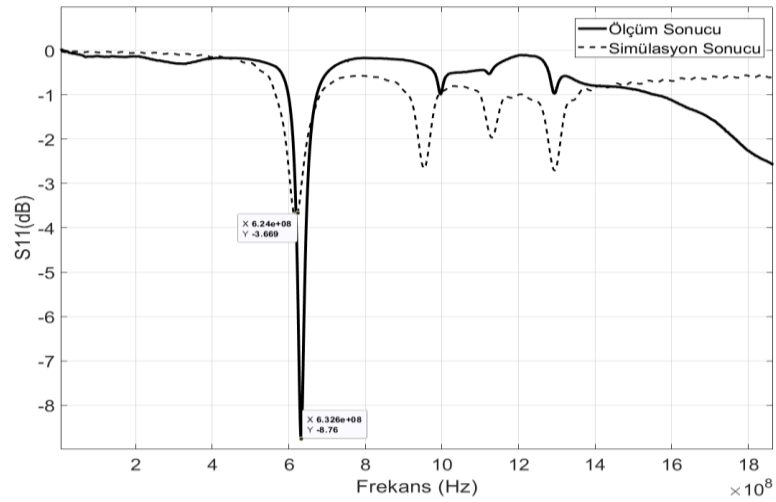


Şekil 4.12 Rezonatör hücrenin S11 parametresinin ölçümü

Öncelikle rezonatör hücrenin S11 yansıma parametresi ölçülerek, rezonans frekansı belirlenmiştir. Şekil 4.12’de S11 parametresinin ölçüm düzeneği görülmektedir. Ölçüm sonucu (şekil 4.13), sıfırıncı dereceden rezonans frekansının 1359 MHz bandında oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca anten açık devre olarak bırakıldığında oluşan şönt rezonansının değerinin 624 MHz olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.14). Önceki bölümde elde edilen simülasyon sonucuyla ölçüm sonucu karşılaştırıldığında antenin frekans tepkilerinin aynı karakterde olduğu fakat frekans bandında kayma olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.13 Üretilen kısa devre edilmiş SDR antenin yansıma parametresi ölçümü ve CST sonucu ile karşılaştırılması

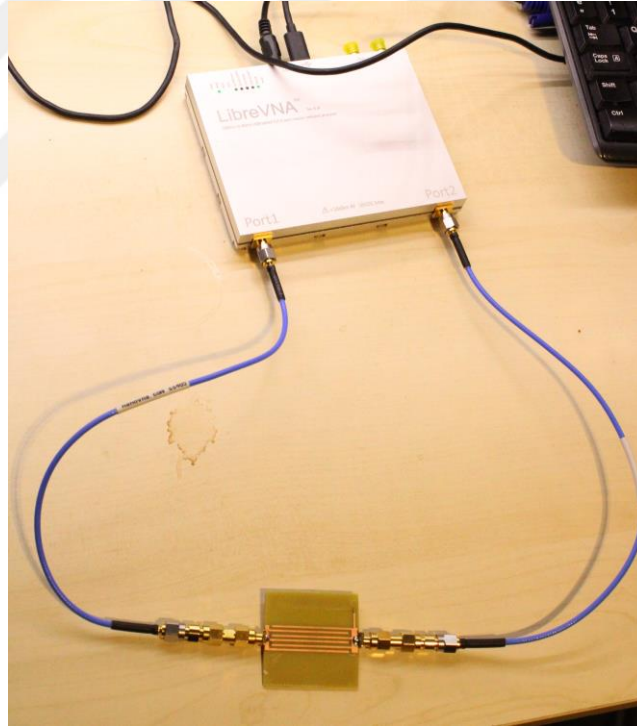


Şekil 4.14 Üretilen açık devre SDR antenin yansıma parametresi ölçümü ve CST sonucu ile karşılaştırılması

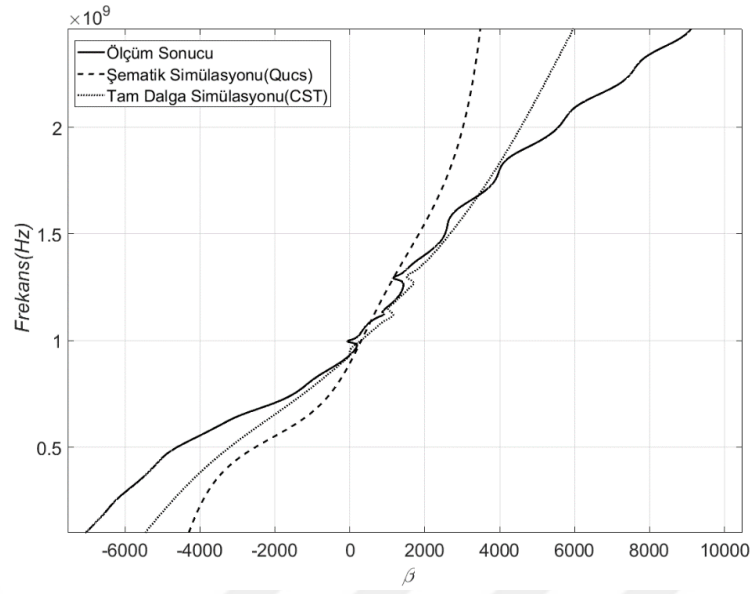
Üretilen antenin dağınım diyagramının çıkarılması ve S21 parametreleriyle uyumlu durumdaki frekans tepkisinin belirlenebilmesi için iki portlu üretilen anten ile ölçüm yapılmıştır. Yapılan lm düzeneği şekil 4.15'te görülebilir. Dağınım diyagramının elde edilmesi için öncelikle yapının neden oluğu faz kayması VNA ile ölçülerek, elde edilen faz değeri,

$$\beta = -\frac{\theta}{d} \quad (4.2.1)$$

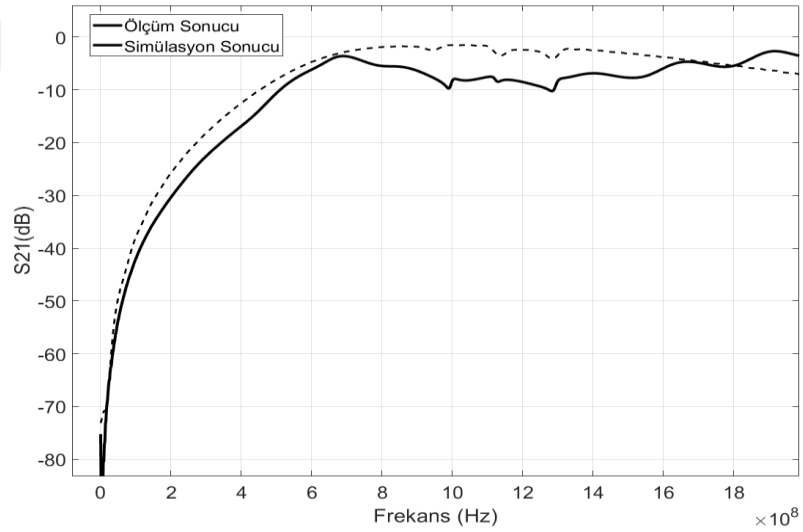
ifadesinde kullanılarak elde edilen sonucun frekansa göre değişiminin grafiği çizilmiştir. Burada θ değeri ölçülen faz değeri olup, d birim hücrenin uzunluğudur (Caloz ve İtoh 2006). Elde edilen sonucun simülasyon sonuçları ile karşılaştırması şekil 4.16'da görülebilir. Yapılan lm ile elde edilen S21 parametresinin sonucu ise şekil 4.17'de görülebilir.



şekil 4.15 İki portlu SDR antenin iletim parametresinin ölçüm düzeneği



Şekil 4.16 Elde edilen dağınım diyagramının simülasyon sonuçları (CST, Qucs) ile karşılaştırılması

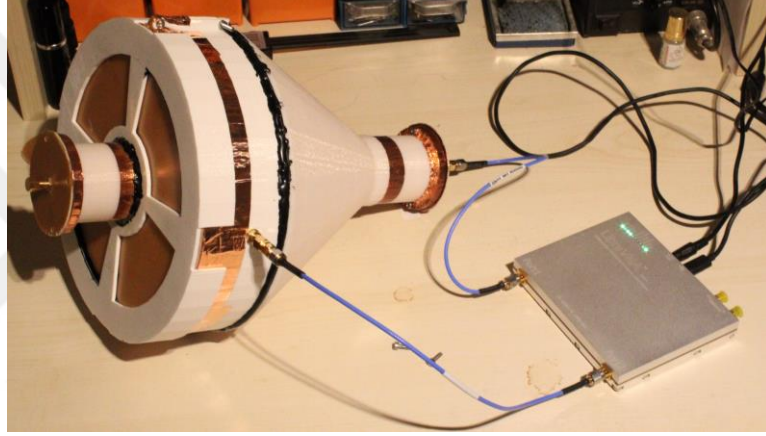


Şekil 4.17 Üretilen yapının empedans uyumlu durumunda iletim parametresinin ölçümü ve CST simülasyon sonucu ile karşılaştırılması

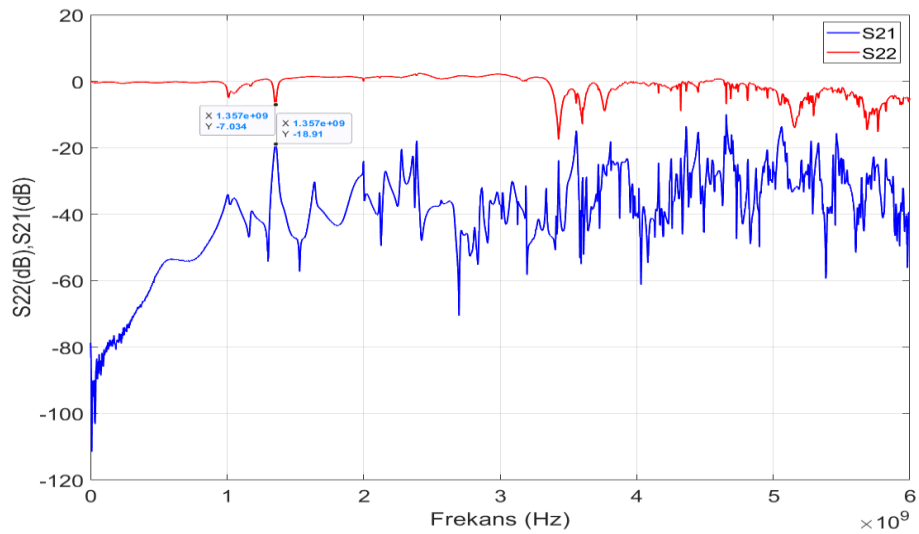
4.3 Prototip Düzeneğin Frekans Tepkisinin Ölçümü

Sıfırıncı dereceden rezonanslı anten tabanlı paketçik monitörü düzeneğinin testleri, algılanan frekans bileşenlerinin karakterize edilmesi için VNA cihazıyla yapılmıştır.

Düzenegın giriş portu, demetin barındırdığı frekans bileşelerini simüle etmesi için VNA cihazının birinci portuna bağlanmıştır. Düzenegın çıkış portu ise 50 Ohm bir sonlandırıcı ile sonlandırılarak düzenegın içerisindeki gergin tel üzerinde ilerleyen dalga oluşması sağlanmıştır. Düzenegın anten çıkışı ise VNA'nın ikinci portuna bağlanmıştır. Deney düzenegi şekil 4.18'de görülebilir. Şekil 4.19 daki ölçüm sonucunda antenin kovuk içerisinde oluşan uyarım frekanslarından antenin tasarlandığı frekans olan 1.35 GHz değerini ayırt edebildiği görülmüştür. Fakat elde edilen sonuç kayıplardan dolayı düşük S21 mertebesinde gözlenmiştir. Elde edilen sonuçta, düzenegın demet kaynaklı harmonik sinyallerini SDR anten ile ayırabildiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.18 Tamamlanmış düzenegın S21 parametresinin ölçümü



Şekil 4.19 Tamamlanmış düzenegın yansıma (anten üzerinden) ve geçiş parametresi ölçüm sonuçları

5. SONUÇ

Yapılan çalışmada, sıfırıncı dereceden antenlerin elektron paketçik uzunluğu ölçümünde kullanılabilirliği sınanmıştır. Elektron paketçik uzunluğunun SDR antenler ile ölçümü için, hızlandırıcı demet hattını simüle eden bir deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan deney düzeneği, demet hattının elektronik eşdeğer modeli üzerinden bir eş-eksenli kablo benzetimi yapılarak tasarlanmıştır. Atmalar halinde ilerleyen elektron demetinin kapalı metalik haznede oluşturduğu geniş bantlı ışımların harmoniğinin algılanması için, referans olarak belirlenen 1351 MHz harmonik frekansına göre SDR anten tasarımı yapılmıştır. Ayrıca, demet hattı içerisinde ilerleyen demetin oluşturduğu salınımlar metalik haznenin geometrisine de bağlı olduğundan, deney düzeneğinin geometrisi uygun frekansları destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada SDR anten yapısı olarak kısadevre ile sonlandırılmış, dengesiz (unbalanced) konfigürasyonu kullanılmıştır. Tasarlanan anten şematik ve tam dalga simülasyon programları ile sınanarak üretimi FR4 alttaş üzerine CNC cihazı ile işlenerek yapılmıştır. Üretimi yapılan antenin VNA cihazıyla karakterizasyonu yapıldığında, oluşan sıfırıncı dereceden rezonans frekansının (1359 MHz) hedeflenen değer ve karakteristiklerde olduğu gözlenmiştir. Üretilen anten ile demet hattını simüle eden yapı birlikte test edilerek yapı içerisinde oluşan harmoniklerin hedeflenen frekansı ayırma gücü test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, elektron demeti kaynaklı harmoniklerin sıfırıncı dereceden anten ile algılanabileceğini göstermiştir. Fakat mevcut deney düzeneğinin kayıplı karakteristiğinden dolayı düzeneğin ayırma gücünün zayıf olduğu gözlenmiştir. Düzeneğin kayıplı olmasının başlıca sebepleri, prototip rezonatör kovuğunun yüzey kaplamasının kaba olması, üretilen sıfırıncı dereceden rezonanslı antenin FR4 malzeme üzerine yapılması ve üretim toleranslarının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, yapılan çalışmada anten boyutları üretim kabiliyetlerinin sınırlı olması nedeniyle büyük geometride üretilmiştir. Üretilen anten geometrisinin boyutları daha küçük hale getirilerek, istenmeyen parazitik etkiler azaltılabilir.

Tasarımı ve testleri yapılan düzenek, temel olarak demet kaynaklı artcıl ışımların algılanması için kurgulanmıştır. Antenin kaybının azaltılması durumunda, ilerleyen zamanki çalışmalarda düzeneğin filtre kovuk olmadan daha küçük yapılarda üretilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Arpaia, P., Corsini, R., Gilardi, A., Mostacci, A., Sabato, L. ve Sjobak, K. N., 2020. Enhancing particle bunch-length measurements based on Radio Frequency Deflector by the use of focusing elements, Nature Scientific Reports, 1-11.
- Caloz, C., Sanada, A., Itoh, T., 2004. Characteristics of the Composite Right/Left-Handed Transmission Lines, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 14(2), 68-70.
- Caloz, C. ve Itoh, T., 2004. A Novel Composite Right-/Left-Handed Coupled-Line Directional Coupler With Arbitrary Coupling Level and Broad Bandwidth, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 52(3), 980-992.
- Caloz, C. ve Itoh, T., 2006. Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications The Engineering Approach, Wiley-Interscience, 352, United States of America.
- Denard, J.C., 2008, Beam Current Monitors, CERN Accelerator School on Beam Diagnostics, 28 May –6 June, Presentation, 25, Dourdan, France.
- Dohlus, M. ve Wanzenberg, R., 2015. An Introduction to Wake Fields and Impedances, CAS-CERN Accelerator School: Intensity Limitations in Particle Beams, 2–11 November, CERN Yellow Reports: School Proceedings, Vol. 3/2017, CERN, 15-41, Geneva.
- Evtushenko, P., 2004. Electron Beam Diagnostic at the ELBE Free Electron Laser. Phd thesis, der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, 111, Germany.
- Ferrario, M., Migliorati, M. ve Palumbo, L., 2013. Wakefields and Instabilities in Linear Accelerators, CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics, 19–29 August, Proceedings of the CAS-CERN, 357-375, Trondheim, Norway.
- Forck, P., 2011. Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics, Joint University Accelerator School, January-March, Darmstadt, 143, Germany.
- Gillespie, A., 2018. Bunch Length Diagnostics: Current Status and Future Directions, CERN–Accelerator–School course on Beam Instrumentation, 2 June, 1-13, Tuusula, (Finland).
- Gerigk, F., 2010. Cavity types, CERN Accelerator School RF for Accelerators, 11 June, 227-298, Denmark.
- Griffiths, D.J. ve College R., 1999. Introduction to Electrodynamics, Prentice Hall, 576, New Jersey.

- Lai, A. ve Itoh, T., 2004. Composite Right/Left-Handed Transmission Line Metamaterials, IEEE Microwave Magazine, ,34-50.
- Lefevre, T., 2015., Bunch Length Measurements, CERN Accelerator School, 27 September -09 october, Presentation,90, Warsaw.
- Pozar, D.M, 2012. Microwave Engineering, Wiley, 732, USA.
- Purcell, M.P. ve Morin, D.J., 2013. Electricity and Magnetism, Cambridge University Press,839, United States of America.
- Saldin, E.L., Schneidmiller, E.A. ve Yurkov, M.V., 1999. The Physics of Free Electron Lasers, Springer, 464, New York.
- Sanada, A., Caloz, C. ve Itoh. T., 2004. Characteristics of the Composite Right/Left-Handed Transmission Lines, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 14(2), 68-70.
- Shelby, R. A., Smith, D. R. ve Schultz, S., 2001. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, Science,292,77-79.
- Shi, R., 2011. Zeroth-Order Resonator (ZOR) Antenna Using Composite Right/Left-Handed (CRLH) Microstrip Transmission Line (TL), Master thesis, University of Cincinnati, 69, USA.
- Veselago, V.G., 1968, The Electrodynamics of Substances With Simultaneously Negative Values of ϵ and μ , Soviet Physics Uspekhi, 10(4),504-514.
- Wang, Q., Luo, Q., Sun, B. G., Yang, Y. L., Zhou, Z. R., Lu, P., Wu, F. F., Tang, L. L., Zhou, T. Y., Liu, X. Y. , Wei J. H., 2017. Design and Simulation of High Order Mode Cavity Bunch Length Monitor for Infrared Free Electron Laser, IPAC2017,14-19 May, Copenhagen, Denmark.
- Weiland, T. ve Wanzenberg, R.,1990. Wake Fields and Impedances, Joint US-CERN Accelerator Course, 14 November, Hilton Head,1-54, So. Carolina.
- Zimmermann, F., Yocky, G., Whittum, D., Seidel, M., Raimondi, P., Ng, C.K., McCormick, D. ve Bane, K., 1998. An RF Bunch-Length Monitor For The SLC Final Focus, IEEE,2189-2191.