

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÖNLÜ QUASI-YAGI MİKROŞERİT ANTENLER İLE BLUETOOTH RF
İŞARETLERİNİN APPR ALGORİTMASI KULLANARAK GÜÇ VE DoA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan SERT
1900006289

Anabilim Dalı: Elektrik - Elektronik Mühendisliği

Program: Elektrik - Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul SAATÇI

HAZİRAN 2024

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÖNLÜ QUASI-YAGI MİKROŞERİT ANTENLER İLE BLUETOOTH RF
İŞARETLERİNİN APPR ALGORİTMASI KULLANARAK GÜÇ VE DoA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gökhan SERT
1900006289

Anabilim Dalı: Elektrik - Elektronik Mühendisliği

Program: Elektrik - Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul SAATÇI

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Mehmet Oruç BİLGİÇ

Doç. Dr. Atilla ÖZMEN (Kadir Has Üniv.)

HAZİRAN 2024

ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans programımı tamamlamam için bana yeri doldurulamaz bir fırsat sunan T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Tezimin zamanında tamamlanmasını sağlayan değerli danışmanlığı ve yönlendirici sürekli destekleri için danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul SAATÇI'ya öncelikli ve en derin minnettarlığımı ifade etmek isterim. Prof. Dr. Selçuk PAKER'e, özel araştırmalarım sırasında çözüm odaklı tavsiyeleri ve faydalı katkıları için çok teşekkür ederim. Ayrıca, tezim boyunca fikirlerimi geliştirmek için pratik önerileri, yapıcı eleştirileri ve ustaca deneyimleri için Öğretim Görevlisi Nihal KARTAL'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2024

Gökhan SERT

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SİMGE LİSTESİ	xiii
KISA ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyonlar	1
1.2. Önceki Çalışmalar ve Araştırma Boşlukları	3
1.2.1. Ağ ve Uydu Bağımlı DoA ve Konumlandırma Sistemleri	3
1.2.2. Bağımsız RF Modülleri, Cihaz Ağları ve Anten Teknikleri	4
1.2.3. PCB Antenleri ve Dizileri ile APPR Tabanlı Çalışmalar	8
2. İLİNTLİ BİLİMSEL ALAN, TEKNİK VE KAVRAMLAR	10
2.1. Elektromanyetik ve İletişim Temelleri	10
2.1.1. Sinyal Modülasyonları	12
2.1.2. Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK)	12
2.1.3. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK)	13
2.1.4. Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)	15
2.1.5. Işıma ve İletişim İfadeleri	16
2.2. RF Elektronik	17
2.2.1. Baskılı Devre Kartı PCB	17
2.2.2. RF DSP Yongası & Çevre Birimleri	18
2.3. Anten Kuramları ve Temelleri	19
2.3.1. Anten Alanları	20
2.3.2. Anten Işıma Örüntüsü	21
2.3.3. Anten Işıma Şiddeti	22
2.3.4. Anten Yönlülüğü	23
2.3.5. Anten Verimliliği	23
2.3.6. Anten Kazancı	24
2.3.7. Anten Geri Dönüş Kaybı ve Bant Genişliği	24
2.3.8. Anten Polarizasyonu	25
2.3.9. Anten Giriş Empedansı	27
2.3.10. Anten Türleri	29
2.4. Gömülü Sistemler ve Mikrodenetleyiciler	37
2.4.1. CPU ve MCU Arasındaki Temel Farklar	38

2.4.2. Merkezi İşlem Birimi (CPU)	39
2.4.3. Mikrodenetleyici (MCU) ve Kullanılan Cihaz	39
3. BLUETOOTH RF MODÜLÜ & KOMUT SETİ	42
3.1. BC417 DSP Çip Özellikleri	42
3.2. Kullanılan Bluetooth RF Modülü HC-05	45
3.3. AT Komut Seti	47
4. MİKROŞERİT ANTENLERİN TASARIMI.....	49
4.1. Mikroşerit Yagi Anten Tasarımı	50
4.1.1. Üç Elemanlı Çift Uçlu Mikroşerit Yagi Anten.....	51
4.1.2. Üç Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten.....	55
4.1.3. Geliştirilmiş Üç Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten.....	61
4.1.4. Dört Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten	66
4.1.5. Beş Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten	71
4.2. Tasarlanan ve PCB Antenlerin Karşılaştırılması ve Doğrulanması	75
5. DoA TAHMİN ALGORİTMALARI.....	79
5.1. MUSIC Algoritması	79
5.2. ESPRIT Algoritması.....	80
5.3. APPR Algoritması.....	81
5.3.1. Arama Tablolu APPR Algoritması.....	82
5.3.2. Doğrusal Regresyon Yaklaşımı ile APPR Algoritması	83
6. VERİ ÖRNEKLEME VE APPR ALGORİTMASININ KULLANIMIYLA DoA TAHMİNİ	84
6.1. YagiUda3_A için Güç Kazancı Veri Örnekleme ve DoA Hesaplamaları....	85
6.2. YagiUda3_C için Güç Kazancı Veri Örnekleme ve DoA Hesaplamaları	88
6.3. YagiUda4_J için Güç Kazancı Veri Örnekleme ve DoA Hesaplamaları	92
6.4. YagiUda5_J için Güç Kazancı Veri Örnekleme ve DoA Hesaplamaları	95
6.5. Sonuçların Karşılaştırılması ve Artan Açık Çözünürlüğünün Kanıtı.....	100
7. UCA ANTEN İLE GÖMÜLÜ SİSTEM VE YAZILIMI	101
7.1. RF Anahtarı ve Bağlantı Elemanları	102
7.2. MCU ve Gömülü Sistem	104
7.3. Sistem Yazılımı ve Yapılandırmaları	106
7.3.1. Sistem Osilatörü ve Saat Yapılandırmaları.....	106
7.3.2. GPIO, UART ve Zamanlayıcı Yapılandırmaları	107
7.4. Sistem Operasyonları ve DoA Hesaplamaları için Algoritmalar	109
7.4.1. Tx, Rx ve Bluetooth Dikkat Komutları (AT)	109

7.4.2. ADS ve Sinyal Filtreleme Yazılımının (SFY) Yapısı	110
7.4.3. RSSI Verisinin Hesaplanması.....	111
7.4.4. UCA RF Anahtarlama	112
7.4.5. Sistem Yazılımında APPR Algoritması Kod Bloğu.....	112
8. SİSTEM DENEYLERİ VE DOA ÖLÇÜMLERİ.....	113
8.1. Düşük Kazançlı UCA Anten Sistemi ile DoA Ölçüm Deneyleri.....	116
8.2. Orta Kazançlı UCA Anten Sistemi ile DoA Ölçüm Deneyleri	124
8.3. Yüksek Kazançlı UCA Anten Sistemi ile DoA Ölçüm Deneyleri.....	132
9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	144
10. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER	147
KAYNAKÇA.....	149



KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
ADC	: Analog - Dijital Çevirici
ADS	: Bluetooth Tanıtım Sinyali
AFH	: Adaptive Frequency Hopping (Adaptif Frekans Atlama)
ALU	: Aritmetik Mantık Birimi
AM	: Analog Modülasyon
AMM	: Analog Modülasyon Metodu
AoA	: Geliş Açısı
AoD	: Kalkış Açısı
APPR	: Adjacent Pattern Power Ratio (Bitişik Örüntü Güç Oranı)
Arg, Argmax	: Argüman ve Maximum Argüman
ASK	: Genlik Kaydırmalı Anahtarlama
AT	: Bluetooth Dikkat Komutu
AW	: Açısal Genişlik
BFSK	: Binary (İkili) Frekans Kaydırmalı Anahtarlama
BL	: Bluetooth
BLE	: Bluetooth Low Energy
BR	: Bluetooth Sinyali Temel Oranı
BER	: Bluetooth Sinyali Bit Hata Oranı
BPSK	: Binary (İkili) Faz Kaydırmalı Anahtarlama
BW	: Bant Genişliği
CEM	: Kompozit Epoksi Materyal
CISC	: Karmaşık Komut Kümeli Bilgisayar
CF	: Taşıyıcı Frekans
CPS	: Koplanar Şerit Hattı
CPU	: Merkezi İşlemci Birimi
CRLH-LWA	: Kompozit Sağ/Sol Elli Sızdıran Dalga Antenler
CSS	: Chirp Yayılımlı Spektrum
DAC	: Dijital Analog Çevirici
DC	: Doğru Akım
DPSK	: Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama
DQPSK	: Diferansiyel Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama
DMM	: Dijital Modülasyon Metodu
DOA	: Geliş Yönü
DSP	: Dijital Sinyal İşlemcisi
EDR	: Geliştirilmiş Veri Hızı
EMF	: Elektromotor Güç
ENIAC	: Electronic Numerical Integrator And Computer
ESPAR	: Electronically Steerable Parasitic Array Radiator
ESPRIT	: Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance
Techniques	
FBR	: Ön Arka Oranı
FHSS	: Frekans Atlamalı Yayılı Spektrum
FM	: Frekans Modülasyonu
FR	: Yangın Geciktirici
FSK	: Frekans Kaydırmalı Anahtarlama
GND	: Topraklama
GFSK	: Gaussian Frekans Kaydırmalı Anahtarlama

GHz	: Giga Hertz
GNSS	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GPIO	: Genel Amaçlı Giriş Çıkış
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
GSM	: Mobil İletişim için Küresel Sistem
HAL	: Donanım Soyutlama Katmanı
HFSS	: Simülasyon Yazılımı
HPBW	: Yarı Güç Hüzme Genişliği
Hz	: Hertz
IC	: Entegre Devre
I ² C	: Inter Integrated Circuit (Entegre Devreler Arasında) Seri
İletişim Protokolü	
IDE	: Bütünleşik Geliştirme Ortamı
IF	: Ara Frekans
INQ	: Bluetooth Modülü Sorgulama Kodu
I/O	: Giriş / Çıkış
IQ	: Faz İçi ve Dörtlü
ISM	: Endüstriyel Bilimsel Tıp Bandı
LAN	: Yerel Alan Ağı
LED	: Işık Yayan Diyot
LH	: Sol El Polarize Anten
LHCP	: Sol El Dairesel Polarize Anten
LNA	: Düşük Gürültülü Yükselteç
LPWAN	: Düşük Güçlü Geniş Alan Ağı
LR, LRA	: Doğrusal Regresyon ve Doğrusal Regresyon Yaklaşımı
LT	: Arama Tablosu
MAC	: Ortam Erişim Kontrolü Cihaz Adresi
Mbps	: Mega Bit / Saniye
MCU	: Mikrodenetleyici Birimi
MHz	: Mega Hertz
MI	: Ölçüm Aralığı
MUSIC	: Multi Signal Classification
OS	: İşletim Sistemi
PA	: Güç Yükseltici
PCB	: Baskılı Devre Kartı
PLL	: Faz Kilitlemeli Döngü
PPCC	: Power Pattern Cross Correlation (Güç Örüntü Çapraz
Korelasyon)	
PSK	: Faz Kaydırmalı Anahtarlama
PTFE	: Polytetrafluoroethylene
RA	: Regresyon Yaklaşımı
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek
RF	: Radyo Frekansı
RF/SW	: RF Anahtarı
RFID	: Radyo Frekansı Kimliği
RH	: Sağ El Polarize Anten
RHCP	: Sağ El Dairesel Polarize Anten
RISC	: Azaltılmış Komut Seti Bilgisayarı
RMSE	: Kök-Ortalama-Kare Hataları
ROM	: Salt Okunur Bellek

RSSI	: Alınan Sinyal Gücü Göstergesi
R _x	: UART Veri Alma Pimi
SFY	: Sinyal Filtreleme Yazılımı
SINR	: Sinyal-Girişim artı Gürültü Oranı
SMA	: Sub Miniature Version A Connector
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı
SIM	: Abone Kimlik Modülü
SPI	: Seri Çevresel Arayüz
ToA	: Varış Zamanı
TDoA	: Varış Zaman Farkı
TTL	: Transistör -Transistör Lojiği
T _x	: UART Veri İletim Pimi
UART	: Evrensel Asenkron Alıcı Verici
USART	: Evrensel Senkron Asenkron Alıcı Verici
UCA	: Düzgün Dairesel Anten Dizisi
ULA	: Düzgün Doğrusal Anten Dizisi
VCC	: Ortak Kollektör Gerilimi
VCO	: Gerilim Kontrollü Osilatör
VDD	: Besleme Gerilimi
Wi-Fi	: Wireless Fidelity

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 IEEE Radar Bant Tanımlamaları	11
Tablo 2.2 Farklı Polarizasyonlara İlişkin Sonuçlar.....	26
Tablo 3.1 BC417 Bluetooth DSP Yonga Özellikleri	43
Tablo 3.2 Veri Hızı Tablosu	43
Tablo 3.3 $\pi/4$ DQPSK 2-Bit Ardışık Semboller Arası Faz Kayması.....	44
Tablo 3.4 8DPSK 3-Bit Ardışık Semboller Arası Faz Kayması.....	44
Tablo 3.5 HC-05 Bluetooth Modül Özellikleri.....	45
Tablo 3.6 Sorgu Modunda Bazı AT Komutları	48
Tablo 4.1 Anten Fiziksel Değişimleri ve Elektriksel Parametre Yanıtları.....	61
Tablo 6.1 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları	88
Tablo 6.2 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları	91
Tablo 6.3 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları	94
Tablo 6.4 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları	98
Tablo 7.1 RF Anahtarın Genel Özellikleri.....	103
Tablo 7.2 RF Anahtarın Fonksiyon Tablosu.....	103
Tablo 7.3 MCU Genel Özellikleri.....	105
Tablo 8.1 YagiUda3_C Sistem DoA Ölçüm Sonuçları	124
Tablo 8.2 YagiUda4_J Sistem DoA Ölçüm Sonuçları	131
Tablo 8.3 YagiUda5_J Sistem DoA Ölçüm Sonuçları	143

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 E & B Alanları ve Elektromanyetik Dalgalar	11
Şekil 2.2 AM & FM Analog Sinyal Modülasyonları	12
Şekil 2.3 ASK Veri Modülasyonu	13
Şekil 2.4 FSK Veri Modülasyonu	13
Şekil 2.5 Gauss Filtresinin Dürtü Yanıtı	14
Şekil 2.6 GFSK Modüle Edilmiş Sinyal Yanıtı	15
Şekil 2.7 PSK Veri Modülasyonu	15
Şekil 2.8 HC-05 Bluetooth Modül	17
Şekil 2.9 PCB Yapısı ve Genel Uygulama Katmanları.....	18
Şekil 2.10 CSR–BC417 Bluetooth Yongası Blok Diagramı.....	18
Şekil 2.11 CC2640 BLE v4.1/4.2 Çipi.....	19
Şekil 2.12 Anten Thevenin Eşdeğer Devresi	19
Şekil 2.13 Antenin Işıma Alanları.....	20
Şekil 2.14 İzotropik Işıma Örüntüsü	21
Şekil 2.15 10 Elementli Doğrusal Anten Dizisi Örüntüleri $d = 0.25 \lambda$	22
Şekil 2.16 Anten Kayıpları.....	23
Şekil 2.17 S_{11} Grafiğinden Bant Genişliği Belirleme	25
Şekil 2.18 Doğrusal, Dairesel ve Eliptik Polarizasyon	25
Şekil 2.19 Doğrusal ve Dairesel Polarizasyonun Etkileri	26
Şekil 2.20 İletim Modunda Antenin Giriş Empedansı ve Thevenin Eşdeğeri	27
Şekil 2.21 Alıcı Modunda Anten ve Thevenin Eşdeğeri.....	28
Şekil 2.22 Dairesel Kesitli Telde Eşit Olarak Dağıtılmış Yük	29
Şekil 2.23 Kısa Dipolün Elektrik Alan Çizgileri	30
Şekil 2.24 Farklı Boynuz Anten Türleri a) H-düzlem b) Piramidal c) E-düzlem d) Konik.....	31
Şekil 2.25 Tipik Yagi, Açıklık ve Mikroşerit Dizi Konfigürasyonları	31
Şekil 2.26 Yagi Dizi Konfigürasyonu ve Işması.....	32
Şekil 2.27 Tipik Yansıtıcı Anten Konfigürasyonları a) Önden besleme b) Cassegrain besleme c) Köşe yansıtıcı.....	34
Şekil 2.28 Tipik Lens Anten Konfigürasyonları	34
Şekil 2.29 a) Mikroşerit Yama Anten b) Işıma Örüntüsü	35
Şekil 2.30 Kesikli Dairesel Polarize Yama Anten	36
Şekil 2.31 İlk Mikroişlemci Intel 4004	38
Şekil 2.32 Mikrodenetleyici Ünitesi	38
Şekil 2.33 CPU ve Bilgisayar Sistemi İletişim ve Çalışma Blok Diyagramı.....	39
Şekil 2.34 1979’da Tasarlanmış İlk MCU’lardan Biri.....	40
Şekil 2.35 Basit Mikrodenetleyici Mimarisi	40
Şekil 3.1 Taban Hızlar ve Geliştirilmiş Veri Hızı Paket Yapısı	43
Şekil 3.2 Deneylerde Kullanılan HC-05 Bluetooth Modülü.....	45
Şekil 3.3 Tipik Meander Antenin Işıma Örüntüsü	46
Şekil 3.4 BR/EDR ve BLE Spektrumu	47
Şekil 4.1 Prototip Mikroşerit Antenin Genel Boyutlandırılması	51
Şekil 4.2 Üç Elemanlı Yagi Antenin S_{11} Parametresi	52
Şekil 4.3 Antenin 2.44 GHz Civarındaki Giriş Empedansı	52
Şekil 4.4 Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı	52
Şekil 4.5 Toplam Kazancın 3-B Görüntüsü	53
Şekil 4.6 Mutlak Kazanç ve Gerçekleşen Kazanç	53
Şekil 4.7 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazanç	53

Şekil 4.8 HFSS’de Tasarlanan Üç Elemanlı Tek Uçlu YagiUda3_A	56
Şekil 4.9 Üç Elemanlı YagiUda3_A S_{11} Parametresi	57
Şekil 4.10 YagiUda3_A Antenin 2.44 GHz’deki Giriş Empedansı	57
Şekil 4.11 YagiUda3_A’nın Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı	57
Şekil 4.12 YagiUda3_A Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü	58
Şekil 4.13 YagiUda3_A Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı	58
Şekil 4.14 YagiUda3_A Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği	58
Şekil 4.15 YagiUda3_A Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı	59
Şekil 4.16 YagiUda3_A Antenin HFSS Parametreleri	59
Şekil 4.17 İyileştirilmiş YagiUda3_C HFSS Modeli	62
Şekil 4.18 YagiUda3_C S_{11} Parametresi	63
Şekil 4.19 YagiUda3_C Antenin 2.44 GHz’deki Giriş Empedansı	63
Şekil 4.20 YagiUda3_C’nın Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı	63
Şekil 4.21 YagiUda3_C Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü	64
Şekil 4.22 YagiUda3_C Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı	64
Şekil 4.23 YagiUda3_C Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği	64
Şekil 4.24 YagiUda3_C Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı	65
Şekil 4.25 YagiUda3_C Antenin HFSS Parametreleri	65
Şekil 4.26 İyileştirilmiş YagiUda4_J HFSS Modeli	67
Şekil 4.27 YagiUda4_J S_{11} Parametresi	68
Şekil 4.28 YagiUda4_J Antenin 2.44 GHz’deki Giriş Empedansı	68
Şekil 4.29 YagiUda4_J’nin Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı	68
Şekil 4.30 YagiUda4_J Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü	69
Şekil 4.31 YagiUda4_J Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı	69
Şekil 4.32 YagiUda4_J Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği	69
Şekil 4.33 YagiUda4_J Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı	70
Şekil 4.34 YagiUda4_J Antenin HFSS Parametreleri	70
Şekil 4.35 Beş Elemanlı YagiUda5_J HFSS Modeli	71
Şekil 4.36 YagiUda5_J S_{11} Parametresi	72
Şekil 4.37 YagiUda5_J Antenin 2.44 GHz’deki Giriş Empedansı	72
Şekil 4.38 YagiUda5_J’nin Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı	73
Şekil 4.39 YagiUda5_J Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü	73
Şekil 4.40 YagiUda5_J Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı	73
Şekil 4.41 YagiUda5_J Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği	74
Şekil 4.42 YagiUda5_J Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı	74
Şekil 4.43 YagiUda5_J Antenin HFSS Parametreleri	75
Şekil 4.44 Sırasıyla Üretilen YagiUda3_C, YagiUda5_J, YagiUda4_J PCB’leri	76
Şekil 4.45 Üretilen YagiUda3_C PCB’lerin S_{11} Parametreleri	76
Şekil 4.46 Üretilen YagiUda3_C PCB’lerin Z_{11} Empedans Değerleri	77
Şekil 4.47 Üretilen YagiUda4_J PCB’lerin S_{11} Parametreleri	77
Şekil 4.48 Üretilen YagiUda4_J PCB’lerin Z_{11} Empedans Değerleri	77
Şekil 4.49 Üretilen YagiUda5_J PCB’lerin S_{11} Parametreleri	78
Şekil 4.50 Üretilen YagiUda5_J PCB’lerin Z_{11} Empedans Değerleri	78
Şekil 6.1 8-YagiUda3_A UCA’nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri	85
Şekil 6.2 YagiUda3_A için Örneklenen Veriler	86
Şekil 6.3 YagiUda3_A Regresyon Eğrileri	87
Şekil 6.4 8-YagiUda3_C UCA’nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri	89
Şekil 6.5 YagiUda3_C için Örneklenen Veriler	90
Şekil 6.6 YagiUda3_C Regresyon Eğrileri	91
Şekil 6.7 8-YagiUda4_J UCA’nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri	92

Şekil 6.8 YagiUda4_J için Örneklenen Veriler.....	93
Şekil 6.9 YagiUda4_J Regresyon Eğrileri	94
Şekil 6.10 8-YagiUda5_J UCA'nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri	96
Şekil 6.11 YagiUda5_J için Örneklenen Veriler.....	97
Şekil 6.12 YagiUda5_J Regresyon Eğrileri	98
Şekil 6.13 Açık Çözünürlüğü, Kazanç ve Kazanç Oranında Artışlar	100
Şekil 6.14 Açık Çözünürlüğü, Kazanç ve Kazanç Oranında Oransal Artışlar.....	100
Şekil 7.1 8 Çıkışlı RF Anahtar	102
Şekil 7.2 RG316 Ekranlı Kablolar ve SMA Konektörleri	104
Şekil 7.3 STM32F767ZIT ARM Cortex-M7 MCU ve Bağlantı PIN'leri	105
Şekil 7.4 NUCLEO-F767ZI Deney Kartı	105
Şekil 8.1 Sistemin Genel Çalışma Akış Şeması.....	113
Şekil 8.2 YagiUda5_J ve RF Anahtarı ile Örnek UCA Sistemi	115
Şekil 8.3 Hedef Test Konumları.....	116
Şekil 8.4 Düşük Kazançlı Anten 225° Ölçümü.....	118
Şekil 8.5 Düşük Kazançlı Anten 225.207° Ölçümü.....	119
Şekil 8.6 Düşük Kazançlı Anten 233° Ölçümü.....	119
Şekil 8.7 Düşük Kazançlı Anten 239.195° Ölçümü.....	120
Şekil 8.8 Düşük Kazançlı Anten 244.114° Ölçümü.....	120
Şekil 8.9 Düşük Kazançlı Anten 246.978° Ölçümü.....	121
Şekil 8.10 Düşük Kazançlı Anten 250.885° Ölçümü.....	121
Şekil 8.11 Düşük Kazançlı Anten 255.804° Ölçümü.....	122
Şekil 8.12 Düşük Kazançlı Anten 261.997° Ölçümü.....	122
Şekil 8.13 Düşük Kazançlı Anten 269.792° Ölçümü.....	123
Şekil 8.14 Düşük Kazançlı Anten 270° Ölçümü.....	123
Şekil 8.15 Orta Kazançlı Anten 223.586° Ölçümü	125
Şekil 8.16 Orta Kazançlı Anten 225° Ölçümü	126
Şekil 8.17 Orta Kazançlı Anten 230.982° Ölçümü	126
Şekil 8.18 Orta Kazançlı Anten 236.857° Ölçümü	127
Şekil 8.19 Orta Kazançlı Anten 241.524° Ölçümü	127
Şekil 8.20 Orta Kazançlı Anten 245.230° Ölçümü	128
Şekil 8.21 Orta Kazançlı Anten 246.824° Ölçümü	128
Şekil 8.22 Orta Kazançlı Anten 249.769° Ölçümü	129
Şekil 8.23 Orta Kazançlı Anten 253.475° Ölçümü	129
Şekil 8.24 Orta Kazançlı Anten 258.142° Ölçümü	130
Şekil 8.25 Orta Kazançlı Anten 264.017° Ölçümü	130
Şekil 8.26 Orta Kazançlı Anten 270° Ölçümü	131
Şekil 8.27 Orta Kazançlı Anten 271.413° Ölçümü	131
Şekil 8.28 Yüksek Kazançlı Anten 224.017° Ölçümü	133
Şekil 8.29 Yüksek Kazançlı Anten 225° Ölçümü	134
Şekil 8.30 Yüksek Kazançlı Anten 229.605° Ölçümü	134
Şekil 8.31 Yüksek Kazançlı Anten 234.043° Ölçümü	135
Şekil 8.32 Yüksek Kazançlı Anten 237.568° Ölçümü	135
Şekil 8.33 Yüksek Kazançlı Anten 240.368° Ölçümü	136
Şekil 8.34 Yüksek Kazançlı Anten 242.592° Ölçümü	136
Şekil 8.35 Yüksek Kazançlı Anten 244.359° Ölçümü	137
Şekil 8.36 Yüksek Kazançlı Anten 245.762° Ölçümü	137
Şekil 8.37 Yüksek Kazançlı Anten 246.877° Ölçümü	138
Şekil 8.38 Yüksek Kazançlı Anten 247.236° Ölçümü	138
Şekil 8.39 Yüksek Kazançlı Anten 248.122° Ölçümü	139

Şekil 8.40 Yüksek Kazançlı Anten 246.237° Ölçümü	139
Şekil 8.41 Yüksek Kazançlı Anten 250.640° Ölçümü	140
Şekil 8.42 Yüksek Kazançlı Anten 252.407° Ölçümü	140
Şekil 8.43 Yüksek Kazançlı Anten 254.631° Ölçümü	141
Şekil 8.44 Yüksek Kazançlı Anten 257.431° Ölçümü	141
Şekil 8.45 Yüksek Kazançlı Anten 260.956° Ölçümü	142
Şekil 8.46 Yüksek Kazançlı Anten 265.394° Ölçümü	142
Şekil 8.47 Yüksek Kazançlı Anten 270° Ölçümü	143
Şekil 8.48 Yüksek Kazançlı Anten 270.982° Ölçümü	143



SİMGE LİSTESİ

a, b	: Doğrusal Regresyon Katsayıları
A	: Anten Açıklığı
A_r	: Alıcı Antenin Etkili Alanı
A_0	: Yagi Antenin Toplam Elektrik Alanı
B	: Manyetik Alan Yoğunluğu
c	: Işık Hızı
dB	: Desibel
dBm	: Desibel Miliwatt
dB_i	: Desibel İzotropik
D_t, D_r	: Verici ve Alıcı Antenlerin Yönlülüğü
D_o	: Maksimum Anten Yönlülüğü
E	: Elektrik Alan Şiddeti
e_t, e_r	: Verici ve Alıcı Antenlerin Verimliliği
$\epsilon_r, \epsilon_{eff}, \epsilon_o$	: Elektriksel Bağıl, Etkin ve Vakum Geçirgenlikleri
$\emptyset_n^1$	: APPR Algoritmasında Örnekleme Açısı
f	: Frekans
f_L, f_H, f_o	: Alt Kesim, Üst Kesim ve Merkez Frekansları
G_{max}	: Anten Güç Kazanç Örüntüsünün Maksimum Değeri
$G_{max}\%$	: Maksimum Kazanç Değerleri Arasındaki Artış Oranı
γ	: Yayılma Sabiti
G_t, G_r	: Verici ve Alıcı Anten Kazançları
G_o, G_{re}	: Antenin Maksimum ve Gerçekleşen Kazançları
H	: Manyetik Alan Şiddeti
J	: Elektrik Akım Yoğunluğu
L	: Anten Kaybı
L_{Dr}, L_{Di}, L_{Re}	: Yagi Antenin Yönlendirici, Sürücü ve Yansıtıcı Uzunlukları
λ	: Dalga Boyu
μ_o	: Vakum İçerisinde Manyetik Alan Geçirgenliği
n	: Güç Örüntüsü Oranlarının Sayısı
P_c	: Alıcı Antenin Topladığı Toplam Güç
P_L	: Antende Kaybolan Güç
$P_n(\theta)$	: APPR Algoritması için Ölçülen Anten Güçleri
$P_n^1(\theta)$	: APPR Algoritmasında Birincil Antenin Ölçülen Gücü
$P_n(\psi)$	: APPR Algoritmasında Yönlü Güç Örüntüleri
$P^1(dBm), P_{ir}(dBm)$	: Birincil, Sol ve Sağ Bitişik Antenler için Test Değeri
$\hat{P}_t, \hat{P}_r$	: Verici ve Alıcı Antenlerin Polarizasyonu
P_t, P_r	: Gönderim ve Alım Gücü
P_{rad}	: Bir Antenin Toplam Işıma Gücü
R	: Antenden Uzaklık
R	: Geri Dönüş Kaybı
R_A	: Anten Rezistansı
R_L	: Antenin İletken ve Dielektrik Kayıpları
R_r	: Antenin Işıma Direnci
$res\angle$	: Açık Çözünürlüğü
$res\angle(\psi^1_{lr})$	: Sol ve Sağ Taraflar için Açık Çözünürlük Serisi
$res\angle(\psi)\%$	: Açık Çözünürlüğündeki Artış Oranı
Γ	: Yansıma Katsayısı

Γ	: İki Bitişik Antenin Güç Kazanç Oranı
$\Gamma_{n\max}(\psi)$	: İki Bitişik Antenin Maksimum Güç Kazanç Oranı
$\Gamma_{nl}^l(\theta), \Gamma_{nr}^l(\theta)$	: Sol ve Sağ Taraf için Ölçülen Bitişik Örüntü Güç Oranları
$\Gamma_{nl}(\psi), \Gamma_{nr}(\psi)$	: Sol ve Sağ Taraf için Güç Oranları Örnekleri
$\Gamma_{n\max}(\psi)\%$	: Maksimum Kazanç Oranlarındaki Artış Oranı
S_{11}	: Saçılma Yansıma katsayısı
$S_{_DrDi}, S_{_DrRe}$	: Sürücü-Yönlendirici ve Sürücü-Yansıtıcı Arasındaki
Uzaklıklar	
T_{Dr}, T_{Di}, T_{Re}	: Yagi Antenin Yönlendirici, Sürücü ve Yansıtıcı Kalınlıkları
$(\theta^l), \theta^l_{[o]}$	: LT ve RA APPR Algoritmalarında Tahmini DoA Açısı
$\theta^t_{[0]}$	: Hedef Aygıtın Fiziksel Yönü
U_o	: İzotropik Antenin Işıma Şiddeti
$U_{\max}$	: Maksimum Işıma Şiddeti
W_{av}	: Zaman Ortalaması Poynting Vektörü
W_o, W_t	: İzotropik ve İzotropik Olmayan Güç Yoğunluğu
x	: Her Güç Kazancı Örnek Çiftinin Oranı
X_A	: Anten Empedansının İmgesel Kısmı
y	: Her Güç Oranının Ait Olduğu Her Açının Değeri
Z_A	: Yüksüz Anten Empedansı
Z_{11}, Z_{in}	: Anten Giriş Empedansı
Z_o	: İletim Hattı Karakteristik Empedansı

Enstitüsü	:	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Dalı	:	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı	:	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı	:	Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul SAATÇI
Tez Türü ve Tarihi	:	Yüksek Lisans – Haziran 2024

KISA ÖZET

YÖNLÜ QUASI-YAGI MİKROŞERİT ANTENLER İLE BLUETOOTH RF İŞARETLERİNİN APPR ALGORİTMASI KULLANARAK GÜÇ VE DoA ANALİZİ

Gökhan Sert

Radyo Frekans (RF) tayfı aralığındaki elektromanyetik dalgaları kullanan teknolojiler, Radyo, TV, Kablosuz iletişim, Mobil Telefonlar, GSM, GPS, Uydu, İnternet, Radar ile WiFi, XBee, ZigBee, LoRa, Bluetooth gibi çeşitli iletişim protokollerini kullanan RF modülleri gibi insan yaşamındaki sayısız teknoloji, yöntem, alan ve uygulamayı kapsamaktadır.

Uygulamaların çoğu SINR (signal to interference plus noise ratio) performansını artırmak, daha iyi veri aktarımı sağlamak ve bazen de sinyal kaynağının ya da RF modülü taşıyan cihaz ya da nesnelerin konumunu bulmak için sabit ya da hareketli radyo frekans sinyal kaynaklarından alınan DoA (direction of arrival) bilgilerine gerek duyar ve bu bilgileri kullanır. Günümüzde, bu teknolojiler arasında, bilgisayarlar, cep telefonları, tabletler, kulaklıklar, otomobiller, TV'ler, ev aletleri ve endüstriyel makineler gibi elektronik cihazların çoğunda kullanılması nedeniyle RF cihazı olarak Bluetooth, sensör elemanları olarak PCB antenleri ve DoA algoritması olarak bitişik örüntü güç oranı (APPR) gibi algoritmalar daha fazla öne çıkmaktadır.

Bu yüksek lisans tezinde, tezin önerisi olarak, Mikrodenetleyici (MCU) tabanlı gömülü bir sistemin kontrolü ve yönetimi altında, yönlendirilmiş PCB Quasi-Yagi antenlerinden oluşan düzgün dairesel anten dizisi (UCA) ile birleştirilmiş basit bir tek Bluetooth modülü kullanılarak, alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) verileri APPR algoritmasının doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) ile değerlendirilerek, DoA açısının çözünürlüğünün artan anten yönlülüğü (D) ve kazancı (G) ile arttığı kanıtlanmıştır. Bir sinyal filtreleme yazılımı (SFY), ortam erişim kontrolü (MAC) adresini bulmaya ve RSSI'yi çıkarmaya yardımcı olur. Bu sayede tek merkezli bir Bluetooth sistemi için iç ve dış alan uygulamalarında herhangi bir Bluetooth sinyalinin DoA'sını bulma işleminin duyarlılık ve kullanım kolaylığı açısından da iyileştirildiği gösterilmiştir. Bu nedenle, yukarıda açıklanan özelliklere sahip önerilen çalışma, iki veya daha fazla Bluetooth taban RF cihazı arasındaki ve ayrıca çoğunlukla iç mekân kullanımı için konumu bulan sistem ve hedef RF modülleri arasındaki mesafeleri tahmin etmek için RSSI'yi değerlendiren sinyal faz farkı algılama antenlerini ve ağ bağlantılarını kullanan diğer Bluetooth DoA tahmin sistemlerinden farklıdır.

Anahtar Sözcükler: Elektromanyetik Dalga, RF Modül, Mikrodenetleyici, Bluetooth, Sinyal Geliş Yönü, Mikroşerit Yagi Anten, APPR, Doğrusal Regresyon Yaklaşımı.

Bilim Dalı Sayısal Kodu:

University	:	İstanbul Kültür University
Institute	:	Institute of Graduate Studies
Department	:	Electrical - Electronics Engineering
Programme	:	Electrical - Electronics Engineering
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Ertuğrul SAATÇI
Degree Awarded and Date	:	MSc – June 2024

ABSTRACT

POWER AND DOA ANALYSIS OF BLUETOOTH RF SIGNALS WITH DIRECTIVE QUASI-YAGI MICROSTRIP ANTENNAS USING APPR ALGORITHM

Gökhan Sert

Technologies using electromagnetic waves in the radio frequency (RF) spectrum cover countless techniques, methods, fields, and applications in human life, like radio, television, wireless communications, mobile phones, GSM, GPS, satellites, the internet, radars, and various RF modules that use several wireless connectivity protocols like Wi-Fi, XBee, ZigBee, LoRa, Bluetooth, etc.

Most of the applications need and consider direction of arrival (DoA) information from stationary or mobile radio frequency sources to increase the performance of the signal to interference plus noise ratio (SINR), achieve better data transfer, good communications and find the location of the source and objects that bear the RF device. Nowadays, among these technologies, some of them stand out more, just like Bluetooth as an RF device because it is used in most electronic devices, including laptop computers, mobile phones, tablets, headphones, automobiles, TVs, and other many home appliances and industrial machines, PCB antennas as sensor elements, and the adjacent pattern power ratio (APPR) as the DoA algorithm.

In this thesis, as the thesis proposes, it is proved that the resolution of the DoA angle increases with increasing antenna directivity (D) and gain (G) by evaluating received signal strength indicator (RSSI) data with the linear regression approximation (LRA) of the APPR algorithm, using a simple single Bluetooth module combined with a uniform circular antenna array (UCA) consisting of directive PCB Quasi-Yagi antennas, under the control and management of a microcontroller (MCU)-based embedded system. A signal filtering software (SFY) helps to find the media access control (MAC) address and extract the RSSI. In this way, it has been shown that the process of finding the DoA of any Bluetooth signal is also improved in terms of sensitivity and ease of use in indoor and outdoor applications for a single-center Bluetooth system. Thus, the proposed work with the features described above is different from other Bluetooth DoA estimation systems that use signal phase difference sensing antennas and mesh connections that evaluate RSSI to estimate the distances between two or more Bluetooth base RF devices and also between the base and target RF modules, which find the location for mostly indoor use.

Key Words: Electromagnetic Wave, RF Modules, Microcontroller, Bluetooth, Direction of Arrival, Microstrip Antenna, APPR, Linear Regression Approximation.

Science Code:

1. GİRİŞ

1.1. Motivasyonlar

Radyo frekansı, yüksek seyahat hızı, nesnelere nüfuz etme becerisi, uzayda seyahat etme özelliği ve bazen devasa antenlere sahip güçlü iletişim sistemleri tarafından kaynaktan uzayın derinliklerine kadar gönderilebilmesi nedeniyle en kullanışlı ve verimli kablosuz iletişim yöntemidir [1]. Ayrıca, daha küçük uzaklıklar için RF modülleri veri gönderme ve alma ve diğer işlemlerde önemli rol oynamaktadır. Bunlara ek olarak, farklı iletişim protokolleri, frekans spektrumları ve anten teknikleri kullanan uydular, GPS ve radyo frekansı modülleri sayesinde konumlandırma gibi bazı teknikler uygulanabilir hale gelmiştir. Günümüzde, otomobiller ve giyilebilir cihazlar da dâhil olmak üzere neredeyse tüm elektronik cihazlar, bilgi alışverişini kolaylaştırmak için bir kablosuz iletişim cihazı içermektedir.

Son zamanlarda kablosuz teknolojilerde sadece bilgi aktarımı önem kazanmamış, aynı zamanda yön bulma ve konumlandırma teknikleri de bu ürünler için önemli hale gelmiş ve farklı algoritma türleri, anten teknikleri ve iletişim protokolleri kullanılarak sivil, sağlık, endüstriyel ve askeri uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu tekniklerin bazıları diğerlerine göre daha fazla öne çıkmaktadır. DoA algoritmaları, özellikle askeri, tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda yön ve konum bulmada hayati rol oynamaktadır. Nispeten basit uygulamalar için geliştirilmiş olsa da, hesaplamada güç oranını kullanan APPR gibi algoritmaların [2], daha az sistem belleği kapladıkları ve daha az işlemci performansı gerektirdikleri için ölçüm çözünürlükleri yeterli düzeyde iyileştirilebildiğinde uygulamalarda yeterince yararlı olabilecekleri düşünülebilir. Bu noktada adı geçen yön bulma algoritmasının doğrusal regresyon matematiğine [3] başvuran yaklaşımı dikkat çekmektedir. PCB antenler, tasarımları, boyutları ve ekonomik avantajları nedeniyle Bluetooth da dâhil olmak üzere neredeyse tüm RF iletişim cihazlarının temel bileşenleri haline gelmiştir. Ayrıca, günümüzde, alışveriş merkezleri, hastaneler, fabrikalar veya benzeri kapalı veya açık alanlarda ürünlerin müşteri için konumunu belirlemek ve reklamını yapmak için varış açısı (AoA),

kalkış açısı (AoD) ve interferometri gibi özel teknikler uygulayarak Bluetooth sürüm 5.1 ve üzeri ağ bağlantısı uygulayan ana cihazlar ve hedef cihazlar olarak da kullanılan kısa menzilli veri iletimi radyo frekansı cihazları olarak her yıl milyarlarca Bluetooth cihazı üretilmekte ve satılmaktadır.

Bu tezde, belirli RF cihazlarını tespit ve takip etmek için gömülü bir sistem; bir baz istasyonu veya başka bir modülle kolektif bir ağ çalışmasına ihtiyaç duymaksızın, tek bir RF modülü ve iç ve dış alan uygulamaları için yön bulma işlemlerini yapmak amacıyla yönlendirici bir anten sistemi kullanımıyla; bir yön bulma algoritması için açı çözünürlüğü iyileştirmesi sağlayan bir yöntem önerilmiştir.

Mobil iletişim günümüz dünyasında ses, görüntü ve diğer birçok bilgi aktarımı için vazgeçilmez konumdadır. Özellikle 2007-2023 yılları arasında yaklaşık 17,1 milyar akıllı telefon satılmış ve toplumun her kesiminden insanlar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Aynı kaynağa göre, yalnızca 2021 yılında, verici gücü sırasıyla 2,5 mW ve 100 mW olan ve maksimum iletişim menzilleri sırasıyla 15 m ve 100 m olan sınıf 2 veya sınıf 1 kategorisine sahip 4,7 milyar Bluetooth modülünün üretildiği anlaşılmaktadır. Akıllı telefonlar GPS bağlantıları aracılığıyla hücresel telefon ağlarından veya uydulardan da konumlandırılabilir, ancak Bluetooth ünitelerine sahip akıllı telefonlar ve bağımsız radyo frekansı modüllerine sahip diğer cihazların herhangi bir küresel mobil sistem (GSM) istasyonundan, uydudan veya sunucudan bağımsız olarak ta konumlandırılabilmesi mümkün olmaktadır.

Tüm bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için bazı ileri teknikler geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Çok küçük ve tüm haberleşme cihazlarına kolayca entegre edilebilen yönlü Quasi-Yagi antenler de dahil olmak üzere PCB antenler, haberleşmenin sağlıklı bir şekilde yapılmasında ve bir sinyal kaynağının yönünün veya yerinin bulunmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır [1]. Yön bulma işleminde, doğrusal regresyon yaklaşımı gibi yöntemlerle anten güç örüntülerini ve alınan sinyal güçlerini uygulayan algoritmalar verimli hesaplamalar sağlamaktadır.

Bu yüksek lisans tezinde haberleşme protokolü ve radyo frekans kaynağı olarak Bluetooth, kazancı artırılmış yönlü anten elemanı olarak Quasi-Yagi anten, yön

bulma algoritması olarak da bitişik örüntü güç oranı (APPR) tekniklerini kullanarak hedefin yön açısını hesaplayan ve çözünürlüğünü artıran bir teknik önerilmiştir.

1.2. Önceki Çalışmalar ve Araştırma Boşlukları

1.2.1. Ağ ve Uydu Bağımlı DoA ve Konumlandırma Sistemleri

Konumlandırma teknikleri GPS, GNSS, GSM ağları, Wi-Fi, İnternet ve çeşitli RF modül konfigürasyonları dâhil olmak üzere birçok alan, uygulama ve teknik türünü içerir. Örneğin, GPS kullanımında, akıllı telefonlar da dâhil olmak üzere kullanıcı cihazları, yeryüzünden 20200 km yükseklikte altı farklı dünya yörüngesine yerleştirilmiş 24'ten fazla uydu ile iletişim kurabilir [5]. Bu uydular, kullanıcı cihazları için varış zamanını (ToA) uygulayan trilaterasyon [6] veya iki ToA'nın varış zaman farkını (TDoA) uygulayan veya multilaterasyon [7] gibi gerçek bir konumlandırma işlemi yapmak için gezegendeki herhangi bir noktadan en az dört tanesi görülecek şekilde konumlandırılmıştır. GPS konumlandırma ve iletişim işlemleri tüm dünyayı kapsayan küresel sistemlerdir. Ancak uzamsal nesneler olarak uydular ve kullanıcı cihazları arasındaki dikey yükseklik ve yatay farklılıklardaki büyük mesafeler; bulutlu, yağmurlu, karlı, sisli veya fırtınalı hava ve güneş rüzgârları gibi iletişimde kesintiye, yanlış konumlandırma sonuçlarına ve sistem arızasına neden olan birçok uzamsal ve atmosferik engel oluşturur.

GSM ağ tabanlı teknikler, tek bir baz istasyonundan alınan güç seviyelerini (RSSI) ve anten örüntülerini ölçerek çalışırlar. Gelişmiş sistemlerde, bitişik baz istasyonları arasındaki sinyallerin enterpolasyonu ile daha fazla yaklaşım yapılabilir ve trilaterasyonda zaman tabanlı sistemler, baz istasyonu sayısı ile artan hassasiyette en doğru sonucu verir ve eğer istasyon sayı üçten fazla ise yöntem multilaterasyon olarak adlandırılır [6][7]. Bu sistemlerin avantajı, mobil cihazın çalışmasını etkilemeden çalışabilmesidir [8]. Öte yandan, ağ tabanlı teknikler ve bunların yenilenmeleri, operatörün altyapısına donanım ve yazılım kurulmasını gerektirmekte, bu da maliyet açısından önemli bir zorluk ve masraf oluşturmaktadır. Ayrıca hava durumu ve buna ek olarak rüzgâr ve deprem etkileri gibi doğal koşullardan da etkilenirler. Buna ek olarak, daha az baz istasyonu içeren ya da hiç baz istasyonu içermeyen bölgeler daha düşük hassasiyete sahip olur veya herhangi bir yön ya da konum saptaması gerçekleştiremeyebilir.

Taşınabilir ve abone kimlik modülü (SIM) tabanlı sistemler, GSM hücrelerine bağlı olarak çalışan Hücre Kimliği, gidiş-dönüş süresi ve sinyal gücü ile kullanıcı cihazına yüklenen Google Haritalar gibi istemci yazılımlarının kullanımıyla yön veya konum bulma yetenekleri sağlar ama SIM gerekliliği de dâhil olmak üzere yukarıda belirtilen benzer dezavantajlar yine söz konusu olmaktadır. Wi-Fi tabanlı sistemler, GPS tabanlı sistemlerin derin ve kapalı alanlarda düşük performans göstermesi nedeniyle dikkat çekmeye başlasa da, baz istasyonları veya kablolu ağlar aracılığıyla İnternet ağına bağımlı olmaları, Wi-Fi'yi kırsal alanların birçoğunda az bulunur hale getirmektedir. Bununla birlikte, cep telefonları ve bilgisayar gibi cihazlara entegre edilmiş olmaları veya bağımsız olmaları fark etmeksizin, şebeke sistemleri Bluetooth da dâhil olmak üzere bir RF modülü için herhangi bir konumlandırma analizi de yapmamaktadır [8].

Cep telefonlarını çeşitli şebeke sistemleri tarafından konumlandırılacak hedef cihazlar olarak ele almış olsak da AirTag yeni bir yaklaşım olarak incelemeye değer bir tekniktir ve son zamanların bilinen DoA ve konumlandırma uygulamaları ile ön plana çıkmıştır. Bu teknikte yazar [9]'de AirTag adı verilen ve GPS olmadan ağda Bluetooth tanıtım sinyalleri (ADS) yayan diğer bazı cihazlar ve cep telefonları tarafından konumlandırılacak bir cihaz tanımlamaktadır. Bu cihazlar hedef cihazın konumunu tanımlar ve bir buluta (iCloud) gönderir. Sonunda, kullanıcı iOS veya MacOS olarak adlandırılan bir işletim sistemi üzerinde çalışan bir telefon ya da bilgisayar yardımıyla hedefi görmek ve izlemek için başka bir uygulamaya (Find My) gitmelidir. Görüldüğü gibi, sistem GPS gerektirmese de; bir kullanıcı AirTag'i, bir kullanıcı akıllı telefon cihazı ve bölgede akıllı telefon ve AirTag olarak adlandırılan bir dizi ana cihaz grubunu gerektirmektedir. Bu nedenle bu sistem de GSM baz istasyonları aracılığıyla bulut işlemine ihtiyaç duyan; yakın bir alandaki diğer birçok benzer cihazı da kendine bağlayan bir örgü bağlantı ağı işlemidir. Bu da, yakınında GSM baz istasyonları veya başka bir grup akıllı telefon kümesi konumlandırılmamışsa hedef Bluetooth cihazının bulunamayacağı anlamına gelir.

1.2.2. Bağımsız RF Modülleri, Cihaz Ağları ve Anten Teknikleri

Taşınabilir cihazlardan ayrılan RF Modüller, uydu ve GSM benzeri baz istasyonu teknolojilerine kıyasla kısa menzilli iletişim yeteneklerine sahip olmakla birlikte geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çoğunlukla modüller, ev aletleri, giyilebilir

cihazlar ve endüstriyel makineler gibi cihazları kontrol etmek ve bunlardan bilgi almak için iki veya daha fazla alıcı-verici arasında veri aktarımı için kullanılır.

En yeni ve yüksek verimli RF modül teknolojilerinden biri ilk olarak Cycleo firması tarafından geliştirilen ve daha sonra bir başka firma tarafından satın alınan LoRA'dır. LoRA, GFSK ve Chirp Spread Spectrum (CSS) tekniklerini, Avrupa'da 863-873 MHz ve diğer ülkeler için 2,4 GHz'e kadar ISM (Industrial Scientific Medical) bandında çeşitli frekansları kullanmakta ve dış alan uygulamalarında 3 km'den daha uzun veri aktarım mesafesi sağladığını iddia etmektedir. Bu iletişim mesafelerine ulaşmak için, bu modüller çoğunlukla 20 dBm düzeyinde daha fazla iletim enerjisine, 1 GHz'den düşük taşıyıcı frekanslara ve yüksek sinyal alım duyarlılığına (-140 dBm'den düşük) gereksinim duyarlar. Buna rağmen, Friis iletim denklemlerine göre 1 GHz'in altında olan düşük frekanslar nedeniyle daha büyük dalga boyları ve anten boyutları ortaya çıkar. Örneğin çalışma [10], hüzme biçimlendirme teknikleri kullanarak iç ve dış alan uygulamaları için AoA sağlamak üzere 863 MHz düşük güçlü geniş alan ağı (LPWAN) için 8 antenli ve LoRa RF modüllü yarım dalga, 350 mm uzunluğunda faz çalışmalı bir dipol dizisini göstermektedir. Menzil ve açı kestirim duyarlılıkları iyi olmasına rağmen, her bir antenin ve genel sistemin boyutları nedeniyle, bir kişi tarafından taşınmaya ve bireysel mobil kullanımına uygun değildir. [11]'deki bir başka çalışma, bir önceki çalışmada [10] AoA elde etmek için kullanılabenzer bir LoRa RF modülü ile yapılmıştır. Bu uygulamada yazar birden fazla RF modülü kullanarak modüllerin tek tek elde ettiği hedef açısını ve alanda bulunan birden fazla LoRa RF modülü arasındaki ağ haberleşmesi ile elde edilen hedefin konumunu saptamıştır. Bu sistem taşınabilir olmamakla birlikte tek elemanlı çözüm mevcut olmasına rağmen birden fazla RF modülünden oluştuğu için ekonomik bir sistem ortaya çıkmamaktadır. Bir diğer konu ise kullanım yeri ve kullanım alanıdır. LoRa, ZigBee ve XBee gibi diğer birçok RF modülü mobil teknolojilerde veri aktarım modülü olarak Bluetooth kadar yaygın kullanılmamaktadır.

Bu noktada Bluetooth DoA uygulamalarına odaklanarak çalışmalara detaylı bir şekilde göz atmak, bu tezde kullanılan yöntemin farklı RF cihaz türlerine ve ayrıca daha önce araştırmacılar tarafından yapılan diğer Bluetooth DoA uygulamalarına göre avantajları hakkında bize daha açıklayıcı bilgiler ve fikirler sağlayacaktır.

Bluetooth modülleri, LoRa ve diğer birçok RF modülü türüne kıyasla yaklaşık -85 dBm'lik daha düşük bir hassasiyetle ve 0,5 mW ile 100 mW arasında iletim güçleri ile 1 metre ile birkaç yüz metre (tipik olarak 100 m) gibi daha kısa bir aralıkta iletişim kurabilse de, diğer cihazlara göre bazı önemli avantajları vardır. Birincisi, Bluetooth akıllı telefonlarda, tabletlerde, kişisel bilgisayarlarda, kulaklıklarda, otomobillerde ve çok sayıda endüstriyel makine ve ev aletinde kullanılan neredeyse tek RF haberleşme cihazıdır. İkinci olarak, Bluetooth, ISM bandında ve 2400 MHz ile 2483,5 MHz arasındaki çalışma bandında, Bluetooth Düşük Enerji (BLE) için 40 alt kanal ve Bluetooth temel hız / geliştirilmiş veri hızı (BR / EDR) için 80 alt kanal ile frekans atlamalı yayılma spektrumu (FHSS) adı verilen etkili bir iletişim protokolü kullanır. Bu protokol, yüksek verimli SINR sağlamak ve veri aktarımı ve tanıtım sinyali süresi boyunca bit hata oranını (BER) azaltmak için gürültü ve parazitleri önler [12].

Bluetooth özel ilgi grubu (SIG) iki yön bulma yöntemi tanımlamıştır. Bunlar tek bir Bluetooth v5.1, v5.2 ve v5.3 düşük enerji (BLE) cihazı için AoA ve AoD'dir. AoA yönteminde alıcı bir anten dizisi içerirken, AoD yönteminde ise verici bir anten dizisine sahiptir. Hem AoA hem de AoD, iki anten arasındaki mesafeyi; sinyal dalga boyunu ve IQ (In-Phase and Quadrature) faz ve genlik ölçüm örneklemelerinde iki anten arasındaki sinyal gelen zaman farklarını veya faz farklarını belirleyen ve ardından basit trigonometrik hesaplamaları kullanan aynı teknik yöntemle belirler [13]. RSSI ölçümleri de eklenerek sistem hedef cihazların konumunu bulma yeteneği de kazanmıştır. DoA operasyonunda Bluetooth v5.1 ve üzeri sürümdeki cihazları daha yakından incelersek cihazların tüm yönlere bakmayan anten dizilimlerine sahip olduğunu görebiliriz.

Bir otomobil çevresel algılama sistemi örneğinde [14] yazar, otomobilin dışından gelen bir sinyalin DoA'sını tahmin etmek için iki antenden oluşan bir anten dizisi tasarlamıştır. Bluetooth (BL) modülünün mimarisine yakından baktığımızda yüksek doğrulukta ölçüm yapabilen sınırlı bir açıyı (-90° ila 90°) ve alanı kapsayan bir dizi anten görebiliriz. Bu, bir BL cihazının belirli bir açı aralığı içinde tarama yapabileceği ve çeşitli yönlerde konumlanabilecek bir hedef cihazın DoA sinyalinin,

modülü fiziksel olarak her yöne döndürmeden tek bir BL cihazı tarafından bulunamayacağı anlamına gelir.

[15]'de verilen bir başka çalışmayı incelediğimizde ise, herhangi bir sinyalin DoA değerinin doğru bir yaklaşım uygulanmadan 360° 'lik açı içerisinde tüm yönlerde tam olarak doğru değerini bulmanın zorluğunu kolayca anlayabiliriz. Çalışmada, dikey olarak yerleştirilmiş 3 mikroşerit alıcı antenden oluşan ve IQ örnekleme ile hesaplanan AoA faz farkı tekniğini uygulayan bir sistem tasarlanmıştır. Yazarın belirttiği ve ilgili referans dokümanın (6.2.1) ve (6.2.2) bölümlerinde verilen sonuçların bize gösterdiği gibi, 360 derecelik tam açıda her yönü kapsayacak ve değerlendirebilecek bir anten dizisi olmadan, AoA ve AoD'nin zaman veya faz farkı teknikleri uygulanarak çok sayıda anten tipi tasarlanmış, simüle edilmiş, üretilmiş ve prototipler üzerinde test edilmiş olmasına rağmen sistem -60 ile -150 derece arasında önemli hatalar, -60 ile -120 ve 60 ile 120 derece arasında ise kötü sonuçlar vermektedir.

Örneklerin sayısını artırabiliriz, ancak bu tür sistemlerin ve yaklaşımların fiziki doğası, görüş alanını ve sonuçların görünür açılardaki hassasiyetini sınırlar. SIG, RSSI ölçümü ve trilaterasyon tekniklerini uygulayarak DoA'yı tüm yönlerde ve ayrıca hedef cihazların konumlarını bulmak için çalışma alanına dağılmış birden fazla alıcı Bluetooth modülü kullanarak bu sorunun üstesinden gelmiştir. Gördüğümüz gibi, Bluetooth modüllerinin DoA ve konumlandırma uygulamalarında hedefi her yönde doğru biçimde bulmak bir RF cihazı grubu gerektirir. Ayrıca, bu modüller yenilikçi sistem yapılarının, anten tasarımlarının, uygulamaların ve yeni tekniklerin kullanılmadığı uygulamalarda Bluetooth v5.1 sürümüne eşit veya daha yüksek olmalıdır. Bu tezde, sadece bir RF Bluetooth modülü içeren tek merkezli bir sistemde, artırılmış yönlülük ve DoA hassasiyetine sahip mikroşerit düzgün dairesel dizi (UCA) antenlerden alınan RSSI değerlerini kullanarak Bluetooth RF hedef cihazlarının DoA'sını bulmak için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen sistem tek bir ARM Cortex Mikrodenetleyici Birimi (MCU) tarafından kontrol edilip yönetilmekte ve DoA açısı, APPR algoritması ve ortam erişim kontrolü (MAC) adresi ve RSSI değerini çıkararak hedef cihaza kilitlenen ve onu izleyen sinyal filtreleme yazılımını (SFY) uygulayan gömülü yazılım algoritmaları tarafından hesaplanmaktadır.

1.2.3. PCB Antenleri ve Dizileri ile APPR Tabanlı Çalışmalar

Yukarıdaki çalışmalar ve teknikler tezin konusu gereği çeşitli Bluetooth DoA tespit sistemleri ile kablosuz haberleşme açısından; diğer sistem türleri arasında iyi karşılaştırmalar yapılmasını sağlasa da kullanılan algoritmalar önerilen APPR algoritması tekniğinden farklıdır. APPR gibi, bir anten dizisinden alınan sinyal gücünü değerlendirerek DoA'yı tanımlayan algoritmalar; çoklu sinyal sınıflandırma (MUSIC) [16], dönme değişmezliği teknikleri ile sinyal parametrelerinin tahmini (ESPRIT) [17] ve güç örüntüsü çapraz korelasyonu (PPCC) [18] gibi bir veya daha fazla sinyal kaynağı için daha karmaşık matrisler ve matematiksel hesaplamalar uygulayan algoritmalara göre çoğunlukla daha basit bir matematiksel altyapıya sahiptir. Ancak, anlaşıldığı üzere, bu tür algoritmalar sınırlı sayıda hedef sinyaline ve hedefin yönünü belirlemede açısız çözünürlük bakımından daha sınırlı bir performansa sahiptir. Ancak bu tezin amacı, APPR DoA algoritması ile yukarıda adı geçen veya diğer DoA algoritmaları arasında herhangi bir karşılaştırma yapmak değil, APPR algoritmasının farklı anten kazançları için çözünürlük tepkisini incelemektir.

APPR algoritmasının mucitleri [2]'de iki tür alt teknik önermektedir: Bölüm 5.3'te incelendiği gibi, herhangi bir radyo frekansı sinyalinin sinyal yönlerini bulmak için arama tabloları (LT) ve doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) teknikleridir. Özellikle, tezin de ana konularından biri olan LRA alt tekniği, algoritmada kullanılacak katsayıları elde etmek için en yüksek gücü alan birincil anten ile komşu antenlerin güç kazanç modellerini analiz eder. APPR algoritmasını önerenler, anten ve dizi tipi, anten güç örüntüsü örnekleme, katsayıların çıkarılması, anten güçlerinin ölçülmesi ve algoritmanın uygulanmasından oluşan adımları açıklayarak ve uygulamışlardır. Yazarlar, simetrik olarak dizilmiş 0.25λ uzunluğunda ve $\pm 300 \Omega$ reaktans değerine sahip 6 adet pasif ışıyıcı monopol eleman ve bu pasif elemanların ortasına yerleştirilmiş bir adet aktif ışıyıcı elemandan oluşan 0.25λ yarıçaplı elektronik yönlendirilebilir parazitik dizi ışıyıcı (ESPAR) [19] anten dizisi kullanmışlardır. Yönlülük ve gerekli önden-arkaya anten ışıma örüntü oranını oluşturmak için kullanılan dizi elemanlarının karşılıklı iki monopol antenin pozitif veya negatif reaktansı eğilim gerilimleri (Bias) ile ayarlanmaktadır. Böylece, birden fazla eleman yönlendirici olarak negatif, diğerleri ise yansıtıcı olarak pozitif ayarlanmıştır. Yazarlar tüm deneyler boyunca, APPR algoritmasını tanıtmak ve DoA sonuçlarını

karşılaştırmak için, -300 veya + 300 değerlerindeki aynı reaktansları ve 0.25λ değerinde aynı anten uzunluğunu kullanmış ve böylece anten yönlülüğünün ve kazancının sabit bir değerde kalmasını sağlamışlardır. Bu nedenle, makalede anten kazancını değiştirerek açı çözünürlüğünün iyileştirilebileceğini gösteren bir deney gözlenmemiştir.

Bir başka grup araştırmacı [20], APPR algoritması ile bu tezin önerisine çok yakın görünen ilgili çalışmalar yapmış, gezgin dalga antenleri olarak bilinen ve hem negatif hem de pozitif faz hızına sahip olduğu bilinen tek veya çift kompozit sağ/sol elli sızdıran dalga antenlerin (CRLH-LWA) hedef sinyallerini birkaç yönden toplayacak şekilde ışıma lobunun genişlik veya arkadan öne yönlendirme açısından hüzmeye oluşturmaları sağlayan anten hüzmeye örüntülerini ve bunların MUSIC ve APPR algoritmalarının hassasiyetlerinin iyileştirmesine etkisini araştırmışlardır. Makalede yazarlar, 5 farklı durumda 11 farklı yöne dağıtılmış 6 farklı tekdüze olmayan anten kazanç örüntüsü uygulamışlardır. Örneğin, yazarlar en iyi performansı -47° ve 47° açıları için 3.5 dB, -28° ve 28° açıları için 5.8 dB ve -8° ve 8° açıları için 5.1 dB olarak belirlenen 2'nci koşulda, en kötü performansı ise -39° ve 39° açıları için 4.9 dB ve 0° açısı için 5 dB olarak belirlenen 5'inci koşulda gözlemlemişlerdir. Makalenin sonuçlarından ve yazarların açıklama ve yorumlarından da anlaşılabileceği üzere, MUSIC algoritmasının ve arama tabanlı (LT) APPR algoritmasının sinyal gürültü oranlarının (SNR) bir fonksiyonu olarak kök-ortalama-kare hataları (RMSE), farklı açı olasılıkları üzerinde çok sayıda farklı kazanç modeli uygulanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Ancak, doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) uygulamalarına sahip APPR algoritmasında artan anten kazancı ile DoA çözünürlüğünde bir artış olduğunu açıkça gösteren deneyler veya sonuçlar görülmemektedir. Araştırmacıların bir başka makalesinde [21], PPCC algoritması da dâhil olmak üzere dizi elemanlarının boyutuna ve sayısına bağlı olan aynı çözünürlük iyileştirme konusuna değinerek sonuçların hesaplama karmaşıklığını karşılaştırmışlardır. Ayrıca, çok yönlü ışımanın neden olduğu bazı sorunların, çözünürlüğü artırmak için daha dar bir anten demeti kullanılarak çözülebileceğini söylemiş, ancak makalede atıfta bulunulan herhangi bir çalışmada veya anten kazancı arttığında çözünürlüğün nasıl arttığına dair atıflara rastlanmamıştır. Aynı yazarlar bir başka çalışmalarında [22] donanım ve APPR algoritmasında DoA verisinin hesaplama karmaşıklıklarını azaltmak için 4×4 mikroşerit PCB dipol anten dizisi

ile elemanların demet örüntülerini şekillendirmek için bir alt dizi kullanmışlardır. Makalede, benzer çalışma farklı antenlerle aynı amaçla tekrarlanmış, daha az sayıda ışıma örüntüsü kullanıldığında, DoA ölçüm boşlukları ile hesaplama karmaşıklığının azaldığı ve anten elemanları arasındaki ölçüm açılarının da sayısının azaldığı gösterilmiştir. Ancak, bu çalışma bu tezin önerisiyle doğrudan benzerlik göstermeyip anten demet genişliği daraldıkça artan yönlülük ve kazanç ile çözünürlükteki artışı açıklamamaktadır.

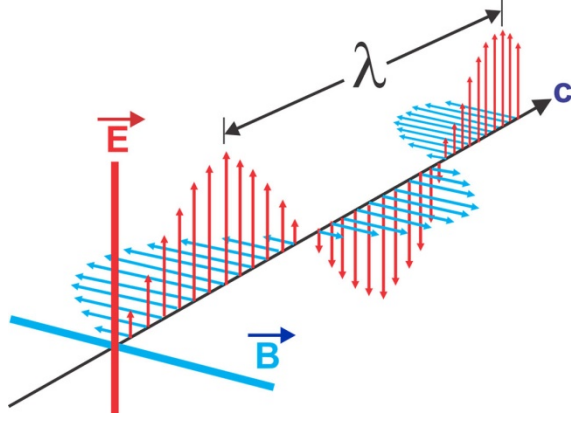
Sonuç olarak, literatür taramasında doğrusal regresyon tekniği ile APPR algoritması üzerine çok fazla referans çalışma bulunmadığı ve bu tezde önerilen konuyla doğrudan ilgili bir çalışma, deney ve sonuç olmadığı gözlemlenmiştir.

2. İLİNTİLİ BİLİMSEL ALAN, TEKNİK VE KAVRAMLAR

Tez çalışması dört ana aşamadan oluşmakta ve bu aşamalar elektromanyetik ve haberleşme, RF elektroniği, anten teorisi, yön bulma algoritması ve sistem yönetim yazılımını içeren gömülü sistem gibi farklı bilimsel alanları içermekte ve farklı teknik açıklamalar, hesaplamalar ve çalışmalarla tanımlanmaktadır. Bu nedenle, bu bölümde deneysel çalışmalar bölümünden önce ilintili teknikler hakkında temel kavramlar, tanımlar ve hesaplamalar kısaca verilecektir.

2.1. Elektromanyetik ve İletişim Temelleri

Hızlanan veya salınan bir elektrik akımının birbirine dik olan elektrik (E) ve manyetik (H) alanları, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi hem E hem de H’ye dik olan elektromanyetik bir enerji yaratır. Bu enerji her iki alana da dik yönde, gama ışınları, x-ışınları, ultraviyole ışınlar, görünür ışık, kızılötesi ve radyo dalgaları olarak boşlukta 299.792.458 m/s ışık hızında yayılır. Eğer ışık hızı c , frekans f ve dalga boyu λ ise, o zaman $c = \lambda f$ olur.



Şekil 2.1 E & B Alanları ve Elektromanyetik Dalgalar

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1a)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.1b)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1c)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.1d)$$

Bu enerji, iletişimde, anten adı verilen yayıcı veya alıcı elemanlar kullanılarak kablosuz sinyal ve veri göndermek ve almak için kullanılmaktadır. Eşitlik 2.1, elektrik ve manyetik alanların birbirileri, yükler ve akımlar tarafından nasıl üretildiğini ve değiştirildiği açıklamaktadır.

Tablo 2.1 IEEE Radar Bant Tanımlamaları

HF (Yüksek Frekans):	3 – 30	MHz
VHF (Çok Yüksek Frekans):	30 – 300	MHz
UHF (Ultra Yüksek Frekans):	300 – 1000	MHz
L-bant:	1 – 2	GHz
S-bant:	2 – 4	GHz
C-bant:	4 – 8	GHz
X-bant:	8 – 12	GHz
Ku-bant:	12 – 18	GHz
K-bant:	18 – 27	GHz
Ka-bant:	27 – 40	GHz
Milimetre dalga bandı:	40 – 300	GHz

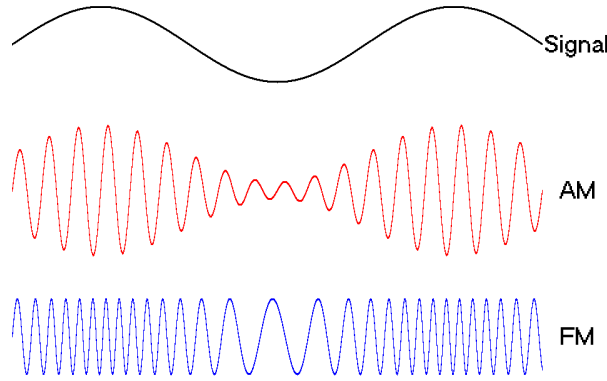
Tablo 2.1, bir kaynak tarafından üretilen ve yayımlanan ya da alınan, radyo frekansı uygulamaları için kullanılan frekans aralıklarını göstermektedir. Bluetooth protokolleri tarafından kullanılan 2.44 GHz frekansının S-bandı olarak kategorize edildiği görülmektedir.

2.1.1. Sinyal Modülasyonları

Modülasyon, veri sinyallerinin bir taşıyıcı frekans (CF) etrafında genlik veya frekans değişimi açısından elektriksel ve daha sonra elektromanyetik sinyallerle kodlanması ve bütünleştirilmesidir. Veri sinyalleri önce elektrik sinyalleriyle birleştirilir ve bazı tekniklerle elektromanyetik sinyallere dönüştürülür, bu teknikler temel olarak ikiye ayrılır: analog modülasyon yöntemi (AMM) ve dijital modülasyon yöntemi (DMM). Başka teknikler de olmakla birlikte, en yaygın kullanılan AMM teknikleri Şekil 2.2’de görüleceği üzere genlik modülasyonu (AM) ve frekans modülasyonudur (FM). Eşitlik 2.2’de ise, AM’de veri sinyallerinin sabit bir taşıyıcı frekans ile genlik olarak değiştiği, FM’de ise sinyal frekansının bir taşıyıcı frekans etrafında değiştiği ifade edilmiştir.

$$s_{AM}(t) = \cos(2\pi f_m t)[A_c + A_m \cos(2\pi f_m t)] \quad (2.2a)$$

$$s_{FM}(t) = V_{co} \sin \left(2\pi \left[f_c + \left(\frac{\Delta f}{V_{mo}} \right) V_m(t) \right] t + \phi \right) \quad (2.2b)$$



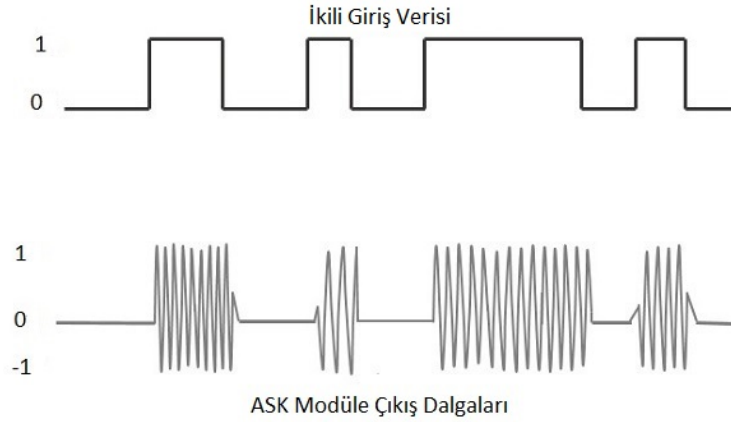
Şekil 2.2 AM & FM Analog Sinyal Modülasyonları

Dijital modülasyon, ayrık bir veri sinyalinin tanımlı frekans, faz veya genlik değerlerinde analog bir taşıyıcı frekansla bütünleştirilmesiyle elde edilir. Anahtarlama yöntemlerine dayanan en temel ve uygulanabilir DMM’ler frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK), faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) ve genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK). Anahtarlama yöntemi, modülasyon sinyalinin önceden belirlenmiş, belirli sayıda değerler almasını sağlar.

2.1.2. Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK)

Şekil 2.3’te görüldüğü gibi, Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK), dijital veriyi modüle etmek için taşıyıcı frekansın genlik değerinde bir değişiklik uygular. Eşitlik

2.3 ise bir vericinin sabit bir taşıyıcı sinyal frekansında belirli bir genlik değerine sahip 0 veya 1 anlamında ikili sayı sisteminde gönderdiği bir biti ifade etmektedir. Burada $d(t)/V$ normalize ikili sayısal sinyal ve $A/2$ sinyalin genliğidir.

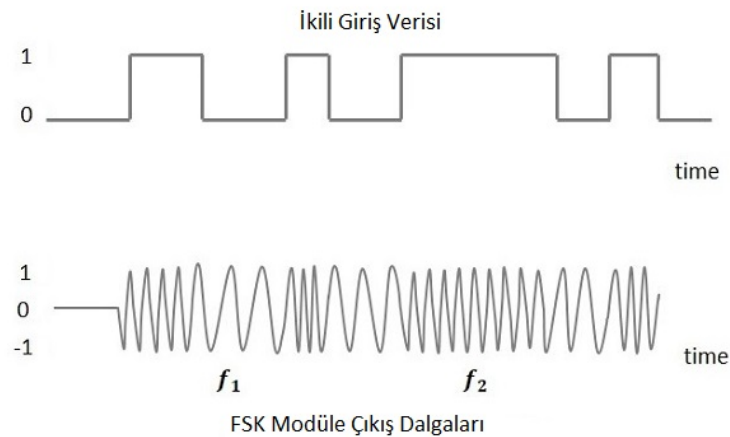


Şekil 2.3 ASK Veri Modülasyonu

$$s_{ASK}(t) = \left[1 + \frac{d(t)}{V}\right] \frac{A}{2} \cos(\omega_c t) \quad (2.3)$$

2.1.3. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK)

Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK), dijital veri sinyalinin taşıyıcı sinyalinin ayrık frekans değişikliklerine dönüştürüldüğü bir frekans modülasyon tekniğidir. İkili frekans kaydırmalı anahtarlama (BFSK), ikili bilgileri 0 ve 1 olarak iletmek için bir ayrık frekansa çifti olarak uygulanan en basit FSK tekniğidir.



Şekil 2.4 FSK Veri Modülasyonu

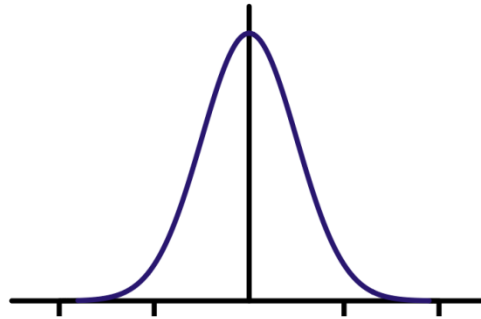
Şekil 2.4'te gösterilen FSK modülasyonu iyi bir bit hata oranı (BER) ve sinyal gürültü oranı (SNR) sağlar, ancak düşük veri iletim hızına ve daha düşük bant genişliği kullanım verimliliğine sahiptir.

$$BW = (f_{ch} - f_{cl}) + N_{band} \quad (2.4)$$

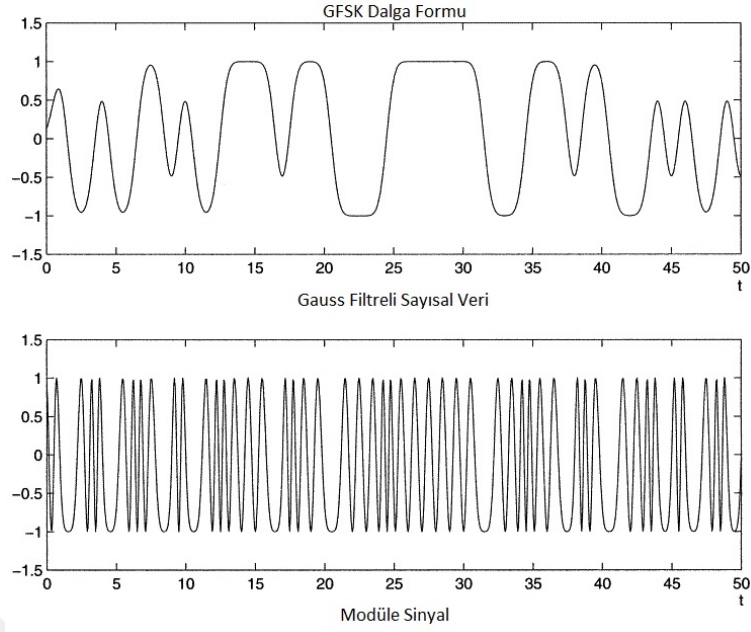
Eşitlik 2.4'te, f_c taşıyıcı merkez frekans, N_{band} bant ya da bit hızı, $f_{ch} = f_c + \Delta f$ ikili 1'i gösteren işaret frekansı ve $f_{cl} = f_c - \Delta f$ ikili 0'i gösteren boşluk frekansıdır. Dolayısıyla, toplam BFSK sinyali Eşitlik 2.5'te temsil edildiği gibidir. Bu eşitlikte A sinyalin genliğidir.

$$s_{FSK}(t) = A \cos(2\pi(f_c \pm \Delta f)t) \quad (2.5)$$

Genellikle düşük frekanslı uygulamalarda kullanılmasına ve bant dışı spektrumdan etkilenmesine rağmen, bir başka teknik olan ve Şekil 2.6'da gösterilen ve Eşitlik 2.6'da ifade edilen Gauss frekans kaydırmalı anahtarlama (GFSK), Bluetooth ve benzeri GHz uygulamaları tarafından kullanılmaktadır. GFSK'de, frekansı aniden değiştiren veri sembolleri ile taşıyıcı frekansı doğrudan modüle etmek yerine, GFSK, modülasyondan önce her sembole Şekil 2.5'te gösterildiği gibi bir Gauss filtresi uygular, bu da modülasyon spektrum bant genişliğini sınırlamak, yan bant gücünü ve komşu kanallarla paraziti azaltmak, güç amplifikatörü verimliliğini artırmak ve ayrıca semboller arası paraziti azaltmak için frekans geçişlerini daha yumuşak hale getirir.



Şekil 2.5 Gauss Filtresinin Dürtü Yanıtı



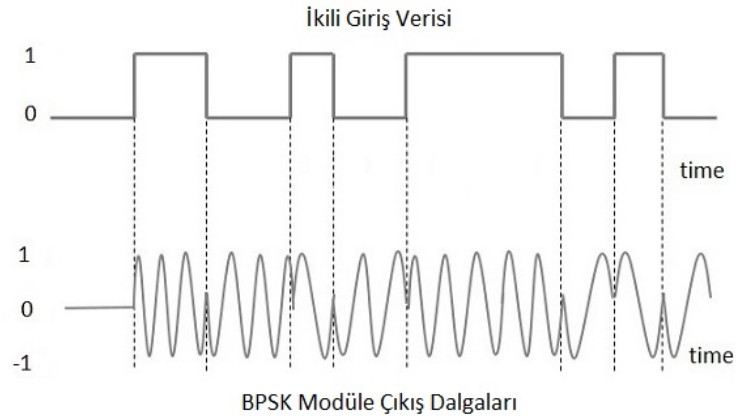
Şekil 2.6 GFSK Modüle Edilmiş Sinyal Yanıtı

$$\hat{g}(f) = e^{-f^2/(2\sigma^2_f)} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6'da, f kesim frekansı ve σ sapmadır.

2.1.4. Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)

Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK), Cos ve Sin sinyal girişlerini zaman içinde değiştirerek dijital sinyalleri modüle etmek için her biri farklı bir rakam basamak değeri atayıp sonlu sayıda faz kullanarak sinyal fazını değiştirir. Şekil 2.7, her bir kare dalga veri sinyalinin başlangıç ve bitiş noktalarındaki faz kaydırma işlemini anlatmaktadır.



Şekil 2.7 PSK Veri Modülasyonu

Örneğin, Eşitlik 2.7’de ifade edilen faz kaydırmalı anahtarlamanın en basit yöntemi olan ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK), birbirine göre 180° ile ayrılmış iki farklı faz uygular. Burada E_b bir bitin enerjisi, T_b ise bit periyodudur. PSK ayrıca kablolu LAN, RFID ve Bluetooth iletişim protokolleri tarafından da kullanılır.

$$s_{PSK_n}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f t + \pi(1 - n)) \quad n = 0,1 \quad (2.7)$$

Diferansiyel karesel faz kaydırmalı anahtarlama (DQPSK), faz kaymaları 0°, 90°, 180° ve 270°’dir ve 00, 01, 11 ve 10 verilerine karşılık gelir. Bluetooth ve birçok protokol tarafından da kullanılan diğer iki DPSK biçimi 8 diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama (8DPSK) ve $\pi/4$ diferansiyel karesel faz kaydırmalı anahtarlama ($\pi/4$ DQPSK).

2.1.5. Işıma ve İletişim İfadeleri

İletişim sistemleri ve sinyalleri yayın, veri transferi ve alım sırasında bazı fiziksel kanunlara tabidir. Kablosuz haberleşmede iletilen ve alınan sinyaller arasındaki hesaplamalarda en kullanışlı denklem, iletim gücü (P_t) ve alınan güç (P_r), frekans (f), yol kayıpları (L), anten yönlülükleri (D_{tr}), verimlilikleri (e_{tr}), anten açıklığı (A), anten kazancı (G_{tr}), sistem uzaklıkları (R) ve polarizasyonu ($\hat{p}$) içeren Friis İletim Denklemdir [1].

İletim gücü P_t , ışıma verimliliği e_t ise, R mesafesindeki izotropik güç yoğunluğu Eşitlik 2.8’de verilmiştir.

$$W_o = e_t \frac{P_t}{4\pi R^2} \text{ Watt/m}^2 \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.9 ise izotropik olmayan ve bir yönlülüğe sahip bir verici anten için θ_t ve φ_t yönlerinde güç yoğunluğunu vermektedir.

$$W_t = \frac{P_t G_t \theta_t \varphi_t}{4\pi R^2} = e_t \frac{P_t D_t \theta_t \varphi_t}{4\pi R^2} \text{ Watt/m}^2 \quad (2.9)$$

Anten verimliliği ve yönlülüğü ile ilgili olan antenin etkin alanı da $A_r = e_r D_r(\theta_r, \varphi_r)(\lambda^2/4\pi)$ olarak göz önüne alındığında, alıcı anten tarafından toplanan güç miktarı P_r , Eşitlik 2.10’da verildiği gibi olacaktır.

$$P_r = e_t e_r \frac{P_t D_t(\theta_t, \varphi_t) D_r(\theta_r, \varphi_r) \lambda^2}{(4\pi R)^2} \text{ Watt} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki Friis denklemi, yansıma katsayılarının bir olması ve polarizasyonların dikkate alınmaması durumunda geçerlidir. Sonuçta, bu iki terim de biliniyorsa ve denkleme eklenirse, Friis iletim ifadesi Eşitlik 2.11'deki hali alır.

$$P_r = e_t e_r \frac{P_t D_t(\theta_t, \varphi_t) D_r(\theta_r, \varphi_r) \lambda^2}{(4\pi R)^2} (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) |\hat{p}_t \cdot \hat{p}_r|^2 \text{ Watt} \quad (2.11)$$

2.2. RF Elektroniği

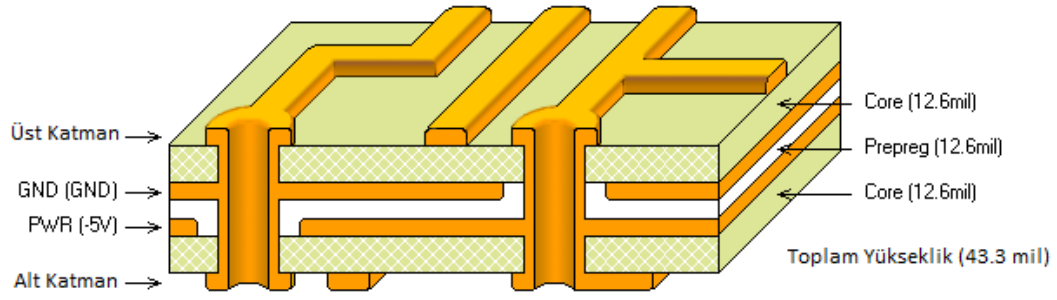
Radyo frekansı iletişimi, iletim hattının iki tarafında bulunan verici, alıcı veya alıcı-verici modüller gerektirir. Bu modüller bir PCB, bir DSP yongası, bir anten veya anten dizisi ve bazı çevresel bileşenlerden oluşur. Şekil 2.8 örnek bir Bluetooth modülü göstermektedir.



Şekil 2.8 HC-05 Bluetooth Modül

2.2.1. Baskılı Devre Kartı PCB

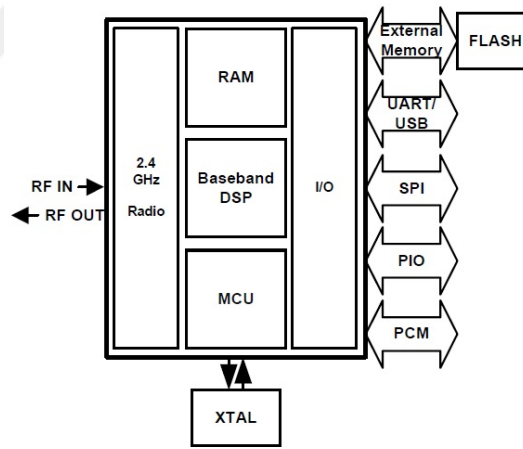
Baskılı devre kartları (PCB), daha önce bahsedilen tüm diğer temel bileşenleri üzerinde bulunduran RF modül teknolojisinin vazgeçilmezleridir. PCB'ler, cihazların kullanım alanını ve davranışını belirleyen bazı fiziksel, malzeme ve teknik özelliklere sahiptir. Tipik bir PCB, iki veya daha fazla katmanlı ve her elektrik katmanında genellikle 35 µm kalınlığında bakır kaplaması bulunduran FR-4 olarak adlandırılan, $\epsilon_r \approx 4.4$ olan ve 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4 mm veya üzeri kalınlıklarda genellikle fiberglas alt tabakaya sahip bir tür epoksi katman yığınınından yapılırlar. Şekil 2.9 PCB yapısı ve genel uygulama katmanlarını göstermektedir.



Şekil 2.9 PCB Yapısı ve Genel Uygulama Katmanları

2.2.2. RF DSP Yongası & Çevre Birimleri

RF entegre devresi (IC), sinyali modüle eden, kodlayan ve kodunu çözen ve alınan yüksek hızlı RF frekansları örneklemek üzere karıştırıcılar yardımıyla IF orta frekanslara ve bunun tersine dönüştüren modül üzerindeki en önemli elektronik bileşendir. Bir RF yongası temelde bir DSP merkezi işlemci birimi (CPU), rastgele erişimli bellek (RAM), giriş ve çıkış pinleri (I/O), bir RF anten giriş/çıkış portu, UART gibi bir seri iletişim portu ve bir flaş bellek ile bunun içerisindeki bir gömülü sistem yazılımından oluşur.



Şekil 2.10 CSR-BC417 Bluetooth Yongası Blok Diagramı

Şekil 2.10'da HC-05 genel amaçlı Bluetooth V2.0 EDR (geliştirilmiş veri hızı) modülünde CSR-BC417 DSP yongasının blok diyagramı gösterilmiştir. Bu modüller tezde ana birimler ve test cihazları olarak kullanılmıştır. Bu yonga sayesinde 802.11b/g Standardı altında Bluetooth RF modülü 2.4 GHz taşıyıcı frekansı, +4 dBm'ye (2.5 mW) kadar iletim gücü, %0.1 BER'de -85 dBm alıcı gücü, $\pi/4$ DQPSK (2 Mbps) ve 8DPSK (3 Mbps) modülasyonları ve RSSI ölçümlerine sahiptir [23].

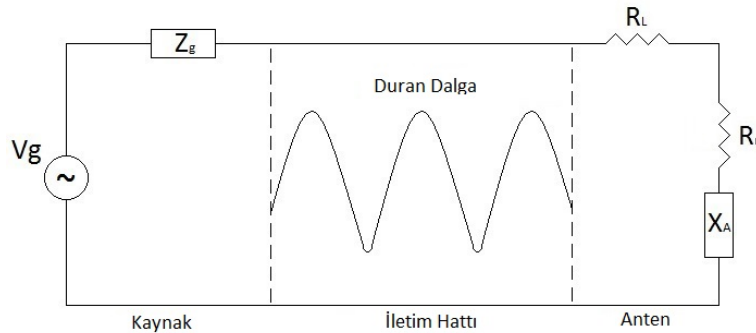


Şekil 2.11 CC2640 BLE v4.1/4.2 Çipi

En çok kullanılan bir diğer Bluetooth modülü ise 2.4 GHz taşıyıcı frekansı, +5 dBm'ye (3 mW) kadar iletim gücü, %0.1 BER'de -97 dBm alıcı gücü, GFSK (1 Mbps'den 5 Mbps'ye kadar), düşük enerji haberleşmeleri ve RSSI ölçümlerine sahip ve Şekil 2.11'de gösterilen CC2640 DSP yongasını içeren BLE (Bluetooth Low Energy) HM-17 v4.1/4.2'dir [24]. Harici kristal osilatör, dirençler, kapasitörler ve yarı iletken gerilim ayarlayıcıları gibi diğer bileşenler çipin tamamlayıcı bileşenleridir.

2.3. Anten Kuramları ve Temelleri

1890'ların başında Nikola Tesla yüksek frekanslı enerjinin iletilmesi ve buna uygun antenler konusunda bir dizi araştırma ve çalışma yapmış ve kablosuz haberleşmenin ilk kez tanım ve uygulamasını ifade etmiştir [25]. Anten, elektronik bir kablosuz iletişim sisteminde, devreden gelen elektrik sinyallerini elektromanyetik enerji olarak ileten ve/veya ortamdaki elektromanyetik sinyalleri alarak sistem tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülmesini sağlayan elektriksel bileşenlerdir. RF haberleşme sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan antenler PCB mikroşerit veya yama tipi antenler ve anten dizileridir.



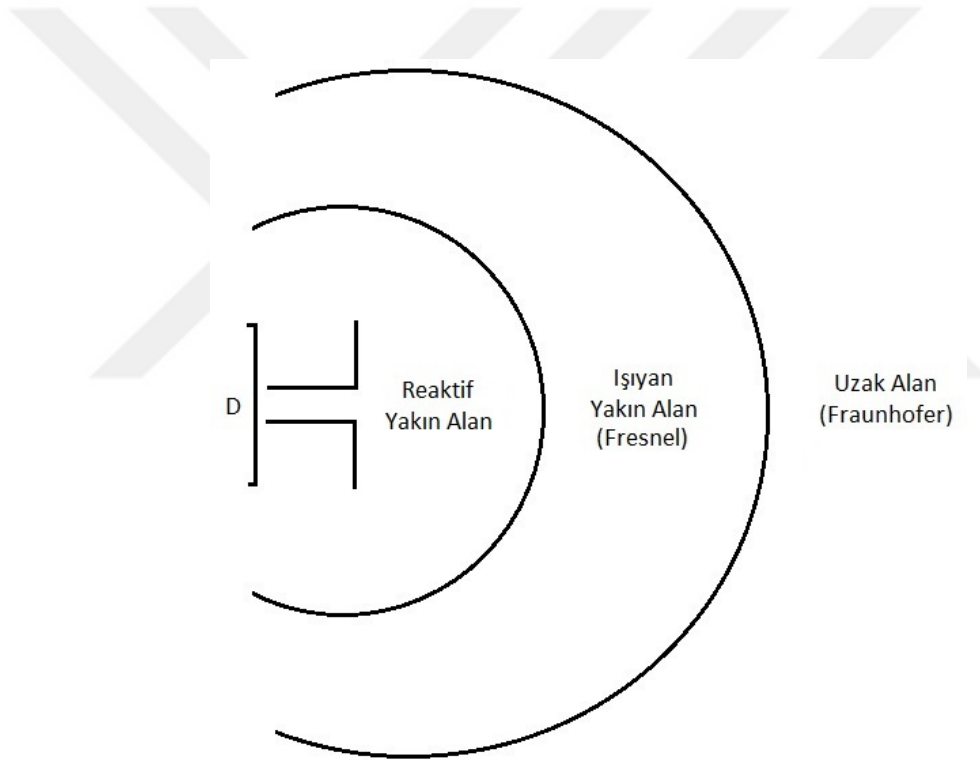
Şekil 2.12 Anten Thevenin Eşdeğer Devresi

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A \quad (2.12)$$

Şekil 2.12’de anten iletim modundadır ve kaynak idealdir. Eşitlik 2.12’de Z_A anten empedansıdır ve yük olarak temsil edilir. R_L iletim ve dielektrik kayıpları, R_r ise antenin ışıma direncidir. X_A , anten tarafından ışıma ile ilişkili empedansın imajiner kısmıdır [1]. Yansıyan dalgalar, durağan dalgalar olarak adlandırılan yapıcı ve yıkıcı girişim örüntülerine neden olur ve bunlar yoğunlaşan enerji paketlerini ve yığınlarını temsil eder.

2.3.1. Anten Alanları

Antenlerin reaktif yakın alan, ışıyan yakın alan (Fresnel) ve uzak alan (Fraunhofer) olarak adlandırılan ve Şekil 2.13’de gösterilen üç ışıma alanı veya bölgesi vardır [1].



Şekil 2.13 Antenin Işıma Alanları

Çoğu anten için, *reaktif yakın alan* anten yüzeyinden $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ gibi bir uzaklığa kadardır. Burada λ dalga boyu ve D antenin en büyük boyutudur. Sonsuz küçük uzunlukta bir dipol düşünülürse, mesafe $\lambda/2\pi$ olarak ifade edilebilir.

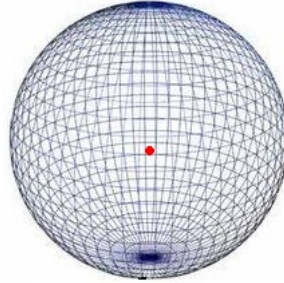
İşıyan yakın alan, *reaktif yakın alan* ve *uzak alan* bölgeleri arasındadır. Anten boyutu dalga boyuna kıyasla çok küçükse, bu bölge mevcut olmayabilir ve sonsuza odaklanmışsa, *ışıyan yakın alan* bölgesi bazen optik terminolojide Fresnel bölgesi

olarak adlandırılır. Bu anten $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ ile $R < 2D^2/\lambda$ arasında bir yakın alana sahiptir, maksimum faz hatası $\pi/8$ 'dir ve alan örüntüsü radyal mesafenin bir fonksiyonudur.

Uzak alan bölgesinin antenden $2D^2/\lambda$ 'dan daha büyük mesafelerde var olduğu kabul edilir. Burada antenin maksimum toplam boyutu D , λ dalga boyudur ve açısal alan dağılımı esasen antenden uzaklıktan bağımsızdır. Ortamdaki yayılma sabiti $|\gamma|$ olmak üzere, bir ortamdaki antenler vakumdakinden farklılık gösterebilir ve $\pi/|\gamma|$ ile karşılaştırıldığında büyük olan D 'nin maksimum boyutuna sahiptir ve de başlangıç mesafesi $|\gamma|D^2/\pi$ 'den alınabilir.

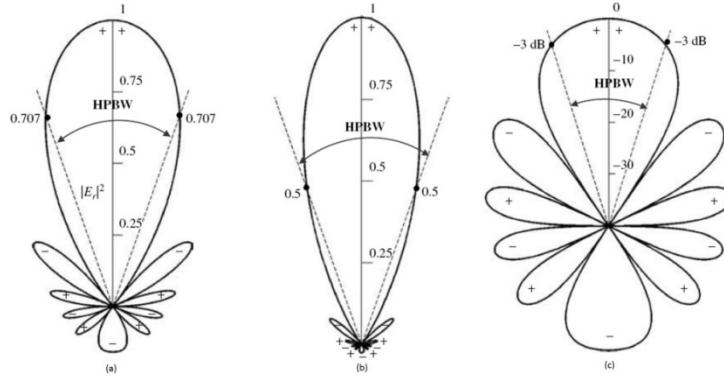
2.3.2. Anten Işıma Örüntüsü

Genellikle uzak alan bölgesinde elde edilen anten ışıma örüntüsü, antenin güç akı yoğunluğu, ışıma yoğunluğu, alan şiddeti, yönlülük, faz veya polarizasyon gibi ışıma özelliklerinin yönlü uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak matematiksel veya grafiksel gösterimidir. İdeal izotropik ışıma için, Şekil 2.14'de gösterildiği gibi örüntü şekli yaklaşık olarak bir küre ile aynıdır, ancak fiziksel tasarım kısıtlamaları nedeniyle bu ışıma örüntü şekli pek mümkün değildir.



Şekil 2.14 İzotropik Işıma Örüntüsü

Genel olarak, alan ve güç örüntüleri maksimum değerlerine göre normalize edilir. Bir alan şekli genellikle doğrusal bir ölçekte açısal alanın bir fonksiyonu olarak bir elektrik veya manyetik alanın büyüklüğünün grafik temsidir. Güç örüntüsü ise doğrusal ölçekte bir elektrik veya manyetik alanın büyüklüğünün karesi veya açısal alanın bir fonksiyonu olarak desibel (dB) ölçeğinde bir elektrik veya manyetik alanın büyüklüğüdür.



Şekil 2.15 10 Elementli Doğrusal Anten Dizisi Örüntüleri $d = 0.25 \lambda$

10 elemanlı bir anten dizisinde HPBW desenlerinin doğrusal ölçekli elektrik alan ışıma örüntüsü, doğrusal ölçekli güç örüntüsü ve logaritmik ölçekli güç örüntüsü sırasıyla Şekil 2.15 a, b ve c’de verilmiştir.

Poynting vektörü, bir periyot boyunca entegre edilerek ve bir periyoda bölünerek ortalama güç yoğunluğunu belirlemek için kullanılır.

$$E_{(x,y,z;t)} = \text{Re}[E_{(x,y,z)} e^{j\omega t}] \quad (2.13a)$$

$$H_{(x,y,z;t)} = \text{Re}[H_{(x,y,z)} e^{j\omega t}] \quad (2.13b)$$

Eşitlik 2.13’te verilen $E_{(x,y,z)}$ ve $H_{(x,y,z)}$ karmaşık elektrik ve manyetik alanlardır ve $E_{(x,y,z;t)}$ ve $H_{(x,y,z;t)}$ bunların anlık karşılıklarıdır. Zaman ortalama Poynting vektörü veya ortalama güç yoğunluğu ise Eşitlik 2.14’deki gibi tanımlanabilir.

$$W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \text{ W/m}^2 \quad (2.14)$$

2.3.3. Anten Işıma Şiddeti

Belirli bir yönde birim katı açı başına bir antenden yayılan güç, ışıma şiddeti olarak adlandırılır ve Eşitlik 2.15 ile verilir.

$$U = r^2 W_{\text{rad}} \text{ w/sr} \quad (2.15)$$

U ışıma şiddeti (W/birim katı açı), r gözlem uzaklığı ve W_{rad} ışıma yoğunluğudur (W/m^2).

2.3.4. Anten Yönlülüğü

Bir antenin yönlülüğü, antenden belirli bir yöndeki ışıma şiddetinin tüm yönlerdeki ortalama ışıma şiddetine oranı olarak tanımlanır. Eğer U_o , $P_{rad}/4\pi$, ise yönlülük (D) Eşitlik 2.16'daki gibi verilebilir.

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.16)$$

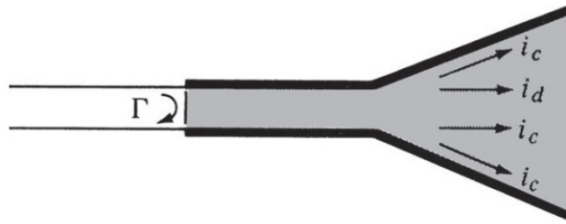
Eşitlik 2.17'de verilen maksimum yönlülük D_o , yön bilinmediğinde maksimum radyasyon şiddetini ifade eder.

$$D_{max} = D_o = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.17)$$

Burada U_{max} maksimum ışıma şiddeti (W/birim katı açı), U_o izotropik bir antenin ışıma şiddeti ve P_{rad} antenin toplam ışıma gücüdür (W).

2.3.5. Anten Verimliliği

Toplam anten verimliliği e_o , giriş terminallerindeki ve antenin yapısındaki kayıpları içerir. Bu kayıplar Şekil 2.16'da gösterilen iletim hattı ve anten arasındaki uyumsuz yansımalar, iletim (I^2R) ve dielektrik kayıplardır. Toplam anten verimliliğini $e_o = e_r e_c e_d$ olarak tanımlayabiliriz. Burada e_d dielektrik verimliliği, e_c iletim verimliliği ve e_r yansıma verimliliğidir ($1-|\Gamma|^2$). e_c ve e_d 'yi doğrudan hesaplamak genellikle kolay değildir, ancak deneylerle belirlenebilir ve e_{cd} olarak ifade edilebilir.



Şekil 2.16 Anten Kayıpları

Eşitlik 2.18'de verilen yansıma katsayısı ve verimlilik, antenin çalışma frekansını ve çoğunlukla -10 dB veya daha az olması beklenen minimum yansıma değerini belirlemek için anten tasarımında her zaman dikkate alınması gereken önemli konulardır.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.18)$$

Genel anten verimliliği ise Eşitlik 2.19 ile verilebilir.

$$e_o = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (2.19)$$

2.3.6. Anten Kazancı

Bir antenin belirli bir yönde kazancı, yine belirli bir yönde, anten tarafından kabul edilen gücün izotropik olarak yayılması durumunda elde edilecek ışıma yoğunluğuna oranıdır. Kazanç, antenin verimliliğini ‘e’ ve yönlülüğünü ‘D’ dikkate alır. Gerçekleşen kazanç kavramında ise, G_{re} yansıma / uyumsuzluk kayıpları da dikkate alınır. Giriş gücü, toplam yayılan güç $P_{rad} = e_{cd}P_{in}$ ile ilişkilidir. Böylece, kazancı ve maksimum kazancı Eşitlik 2.20’deki gibi tanımlayabiliriz.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[\frac{4\pi U_{\theta, \phi}}{P_{rad}} \right] = e_{cd} D_{\theta, \phi} \quad (2.20a)$$

$$G_o = G(\theta, \phi)|_{max} = e_{cd} D_{\theta, \phi}|_{max} = e_{cd} D_o \quad (2.20b)$$

Burada sırasıyla $G_{(\theta\phi)}$ ve G_o anten kazancını ve maksimum kazancını, e_{cd} antenin iletim ve yalıtım kayıplarına göre verimini, $U_{(\theta\phi)}$ ve $D_{(\theta\phi)}$ ise sırasıyla antenin her iki ekseninde ışıma şiddetini ve yönlülüğünü belirtir.

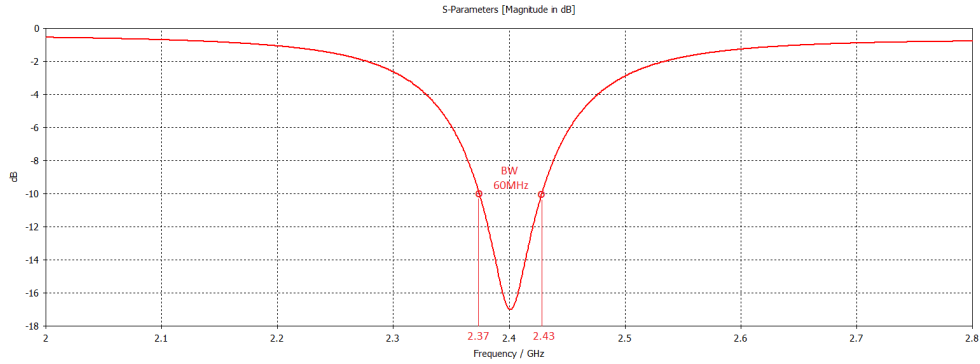
2.3.7. Anten Geri Dönüş Kaybı ve Bant Genişliği

Geri dönüş kaybı (R), bir antenin çalışma frekansında kaynaktan aldığı ya da havadan topladığı gücün geri yansıyan güce oranıdır ve Eşitlik 2.21’den de anlaşıldığı üzere empedans uyumsuzluğu nedeniyle hesaplanan yansıma katsayısının mutlak değerinin negatif logaritmasıdır. Geri dönüş kaybı anten tasarımında en önemli parametrelerden biridir ve rezonans frekansındaki S_{11} saçılma değerinin de negatiftir. Dolayısıyla, bu parametrenin büyümesi yansıyan kayıp güce oranla antenin aldığı gücün arttığı anlamına gelir.

$$R = -20\log_{10}|\Gamma| \text{ dB} \quad (2.21)$$

Bant genişliği (BW), anten giriş empedansının, ışıma örüntüsünün, demet genişliğinin, polarizasyonunun, yan lob seviyesinin, kazancının, ışıma yönünün ve ışıma veriminin kabul edilebilir değerler arasında olduğu ve antenin bazı karakteristiklere göre performansının belirli bir standarda uygun olduğu merkez ya da rezonans frekansının her iki tarafındaki frekans aralığıdır. Genel olarak, simülatörler ve/veya spektrometreler sayesinde, S_{11} parametresi bize -10 dB

büyüklik değerlerinde iki nokta arasındaki farkın Şekil 2.17’de gösterilen V-şeklinde bir grafiği üzerinde bant genişliğini gösterir.

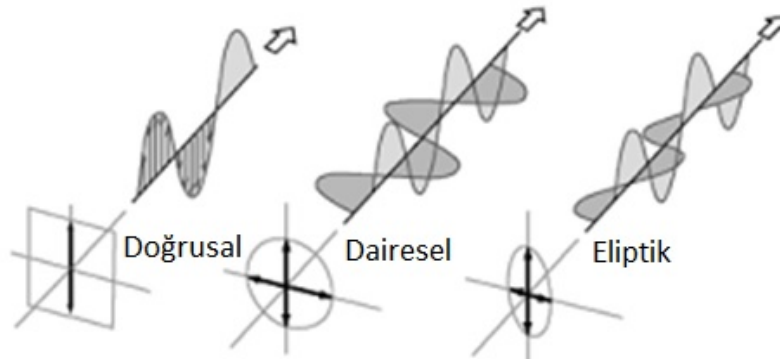


Şekil 2.17 S₁₁ Grafiğinden Bant Genişliği Belirleme

İki tür anten bant genişliğinden söz edebiliriz: üst ve alt frekansların oranı olarak ifade edilen geniş bant ve üst ve alt frekanslar arasındaki frekans farkının merkez frekans üzerindeki yüzdesi olarak ifade edilen dar bant.

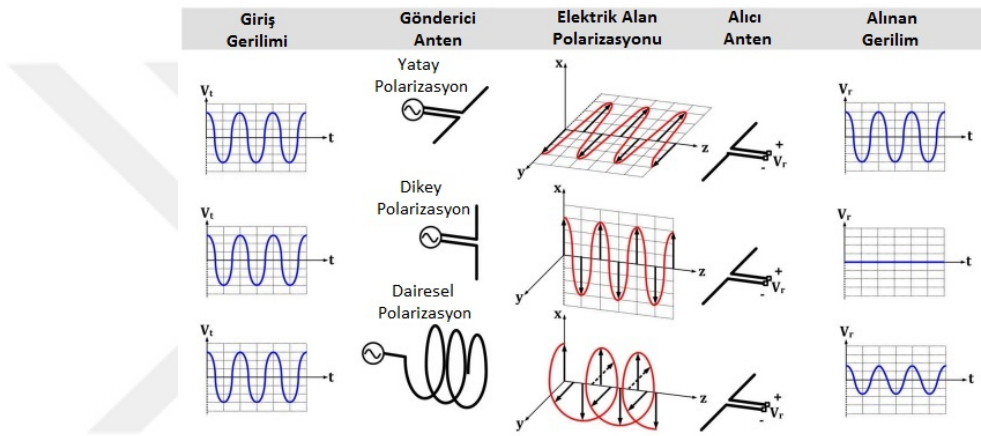
2.3.8. Anten Polarizasyonu

Polarizasyon, salınan elektrik alanının yönü ve büyüklüğünün belirli bir şekilde ilişkili olduğu belirli elektromanyetik radyasyonların özelliğidir. Anten polarizasyonu, elektrik alanının veya bir radyo dalgasının bir ortamda yayılırken salınım yaptığı yön olarak da tanımlanabilir. Polarizasyon, alıcı ve verici antenin kullanım alanını ve sinyal kalitesini belirleyen çok önemli bir parametredir. Genel olarak Şekil 2.18’de gösterildiği gibi üç tip polarizasyondan söz edilir: doğrusal, dairesel ve eliptik.



Şekil 2.18 Doğrusal, Dairesel ve Eliptik Polarizasyon

Eğer anten doğrusal olarak polarize edilmişse, elektromanyetik dalgaları tek bir düzlemde, dünya yüzeyine göre dikey ya da yatay olarak veya her ikisi arasında herhangi bir açıda yayar. Dairesel ve eliptik polarizasyonlarda, elektrik akımı sırasıyla daireSEL ve eliptik izleri takip eder. Dairesel polarizasyon, 90 derece faz dışı olan yatay ve dikey polarize eşit büyüklükteki doğrusal bir kombinasyon olarak tanımlanır ve sol veya sağ polarize olan ve yatay ve dikey düzlemleri ve aralarındaki tüm düzlemleri içeren sabit bir oranda zaman içinde dönen bir dalgaya eşittir. Eliptik polarizasyon, elektrik alanının iki doğrusal dik bileşeninin 90 derece faz dışında olması, eşit olmayan büyüklüğe sahip olması ve sol (LH) veya sağ (RH) polarize olması durumunda meydana gelir.



Şekil 2.19 Doğrusal ve Dairesel Polarizasyonun Etkileri

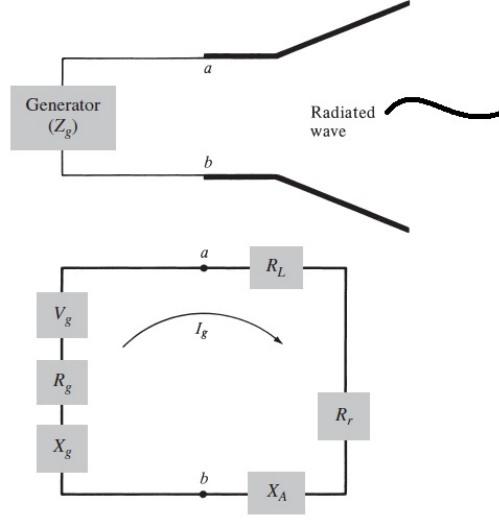
Şekil 2.19'dan görüldüğü üzere, uyuşmayan veya yanlış hizalanan polarizasyonlar sinyal kaybına neden olur. Ek bir örnek olarak, Tablo 2.2'de listelendiği gibi sistemde bir doğrusal polarizasyonlu ve bir daireSEL polarizasyonlu anten varsa, daireSEL polarizasyonlu anten gücünü iki düzleme eşit olarak böleceği için alınan sinyal gücünü ve bağlantının menzilini düşürecek ve kazancı 3 dB azaltacaktır.

Tablo 2.2 Farklı Polarizasyonlara İlişkin Sonuçlar

<i>Tr Anten Polarizasyonu</i>	<i>Re Anten Polarizasyonu</i>	<i>Alınan Gücün Maksimum Güce Oranı</i>
Dikey	Dikey	0 dB
Dikey	Eğik 45° ya da 135°	-3 dB
Dikey	Yatay	-∞ dB
Dikey	Dairesel (Sağ ya da Sol El)	-3 dB
Yatay	Yatay	0 dB
Yatay	Eğik 45° ya da 135°	-3 dB
Yatay	Dairesel (Sağ ya da Sol El)	-3 dB
Dairesel (Sağ El)	Dairesel (Sağ El)	0 dB
Dairesel (Sağ El)	Dairesel (Sol El)	-∞ dB
Dairesel (Sağ ya da Sol El)	Eğik 45° or 135°	-3 dB

2.3.9. Anten Giriş Empedansı

Giriş empedansı, gerilimin akıma oranının veya iki anten terminali arasındaki elektrik ve manyetik alanların uygun bileşenlerinin oranının empedans değeridir.



Şekil 2.20 İletim Modunda Antenin Giriş Empedansı ve Thevenin Eşdeğeri

Şekil 2.20 iletim modunda antenin giriş empedansı ve Thevenin eşdeğerini göstermektedir. Yüksüz anten empedansı Eşitlik 2.22'deki gibi verilir.

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.22)$$

Burada Z_A , R_A ve X_A sırasıyla anten terminalinin empedansı, direnci ve reaktansıdır. R_A genellikle $R_L + R_r$ biçiminde iki bileşenden oluşur. Burada R_L ve R_r sırasıyla anten terminallerindeki kayıp ve ışıma dirençleridir. Bir jeneratörün iç empedansı biçiminde düşünülürse, $Z_g = R_g + jX_g$ 'dir ve burada R_g ve X_g sırasıyla jeneratörün empedansının direnci ve reaktansıdır. Dolayısıyla, Eşitlik 2.23'te akım, radyasyon için R_r 'ye verilen güç miktarı ve ısı olarak dağıtılan R_L miktarı aşağıdaki gibidir:

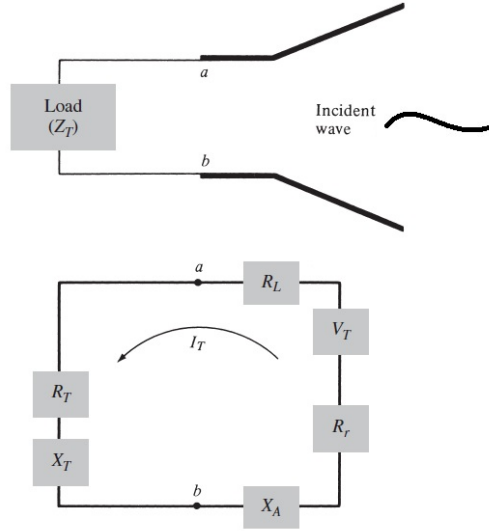
$$I_g = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} \quad 2.23a$$

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r \quad 2.23b$$

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L \quad 2.23c$$

Dolayısıyla, eşlenik eşleştirme sırasında jeneratör tarafından sağlanan güç Eşitlik 2.24'de verilmiştir.

$$P_s = \frac{1}{2} V_g I_g^* \quad (2.24)$$



Şekil 2.21 Alıcı Modunda Anten ve Thevenin Eşdeğeri

Şekil 2.21 alıcı modunda anten ve Thevenin eşdeğerini göstermektedir. Anten alıcı modundayken, gelen dalga antene çarpar ve iletim devresindeki V_g 'ye benzer bir V_T gerilimi indükler. Anten empedans değerleriyle yükün toplam rezistansı ve endüktansı $R_T = R_L + R_r$ ve $-X_T = X_A$ biçiminde eşlenik eşleşmesi altında ise güç tamamıyla R_T , R_L , ve R_r 'ye iletilir. Yük gücü Eşitlik 2.25'de, saçılan veya yeniden yayılan güç Eşitlik 2.26'da ve alıcı anten kayıp gücü ise Eşitlik 2.27'de verilmiştir.

$$P_T = \frac{|V_T|^2}{8} \left[\frac{R_T}{(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_T|^2}{8R_T} \text{ Watt} \quad (2.25)$$

$$P_r = \frac{|V_T|^2}{2} \left[\frac{R_r}{4(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_T|^2}{8} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L)^2} \right] \text{ Watt} \quad (2.26)$$

$$P_L = \frac{|V_T|^2}{8} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \text{ Watt} \quad (2.27)$$

Böylece, alıcı antende indüklenen veya toplanan güç Eşitlik 2.28'deki gibi elde edilir.

$$P_c = \frac{1}{2} V_T I_T^* = \frac{|V_T|^2}{4} \left[\frac{1}{R_r + R_L} \right] \text{ Watt} \quad (2.28)$$

Açıklık verimliliği %100'e yakın olsa bile, saçılan ve dağılan güç nedeniyle yakalanan gücün tamamı yüke iletilemez. Frekans, giriş empedansını büyük ölçüde etkiler, ancak antenin geometrisi, elektriksel uyarımlar ve çevredeki nesneler,

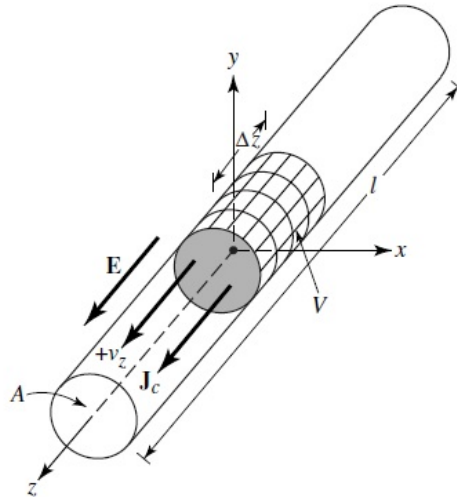
yalnızca sınırlı sayıda pratik antenin analitik olarak incelenebildiğini, diğer anten giriş empedanslarının çoğunun deneysel olarak belirlenebileceğini göstermektedir.

2.3.10. Anten Türleri

Antenler genel olarak altı kategoride incelenir: tel antenler, açıklık antenleri, dizi antenler, yansıtıcı antenler, mercek antenler ve mikroşerit antenler. Aşağıdaki bölümlerde ilk beş tür için kısa bilgiler, Yagi dizileri ve mikroşerit (PCB) antenler olarak adlandırılan son tür için ayrıntılı bilgiler verilmektedir.

2.3.10.1. Tel Antenler

Binalar, otomobiller, radyolar, televizyonlar, telsizler, cep telefonları, uçaklar, uzay araçları gibi geniş kullanım alanlarına sahip monopol çubuk, dipol, döngü (dairesel, dikdörtgen, kare ve elips) ve sarmal gibi birçok tel anten türü vardır.



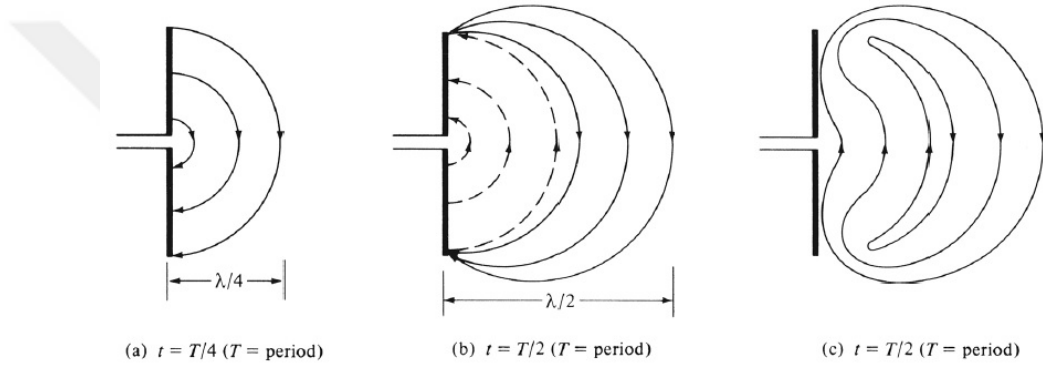
Şekil 2.22 Dairesel Kesitli Telde Eşit Olarak Dağıtılmış Yük

İdeal olmayan iletkenler için akım yoğunluğu $J_z = q_v v_z$, ideal iletkenler için $J_s = q_s v_z$ ve ideal çok ince (ideal olarak sıfır yarıçaplı) iletkenler için $I_z = q_l v_z$ 'dir. Burada J_z (A/m^2), J_s (A/m), q_l (Coulombs/m), q_v (Coulombs/ m^3), q_s (Coulombs/ m^2) ve v_z (m/sn) simgeleri sırasıyla kesit üzerindeki akım yoğunluğu, yüzeyde bulunan akım yoğunluğu, birim uzunluk başına yük, hacim yük yoğunluğu, yüzey yük yoğunluğu ve z yönündeki yük hızıdır. Akım zamanla değişiyorsa ve tel ideal olarak sıfır yarıçap ve uzunluğa sahipse, Eşitlik 2.29 ışığında akım ve yük arasındaki temel ilişkinin yanı sıra elektromanyetik radyasyon arasındaki temel ilişkiyi de tanımlar.

$$l \frac{dI_z}{dt} = l q_l \frac{dv_z}{dt} = l q_l a_z \quad (2.29)$$

Burada, $dv_z/dt = a_z$ (metre/sn²) yüklerin ivmesidir.

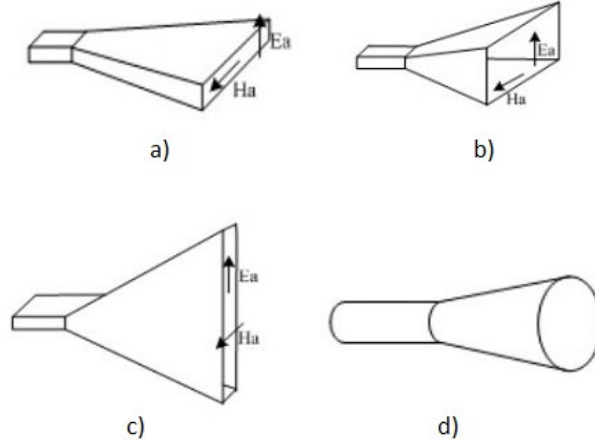
Merkezden beslenen küçük bir dipol anten düşünüldüğünde, Şekil 2.23’de gösterildiği gibi periyodun ilk çeyreğinde kollar arasında oluşan kuvvet çizgisi dışarıya doğru $\lambda/4$ radyal mesafe kat eder. Periyodun bir sonraki çeyreğinde bir $\lambda/4$ daha eklenerek başlangıç noktasından itibaren toplam $\lambda/2$ ’lik bir mesafe elde edilir ve iletken üzerindeki yük yoğunluğu azalmaya başlar. İlk yarının ikinci çeyreği sırasında, yükler tarafından zıt kuvvetler oluşturulur ve $\lambda/4$ ’lük bir mesafe kat ederler. Sonuç olarak, iki çeyreklik kuvvet çizgisi kendilerini ayırır. Sinyal periyodunun kalan ikinci yarısında da aynı prosedür izlenir, ancak ters yöndedir.



Şekil 2.23 Kısa Dipolün Elektrik Alan Çizgileri

2.3.10.2. Açıklık Antenler

Açıklıklı antenler genellikle yüksek frekanslı uygulamalar için çok farklı biçim ve şekillerde seçilir ve genellikle uçak ve uzay araçlarına aynı hızda monte edilirler. Açıklık antenlerinin en bilinen türlerinden biri Şekil 2.24’te gösterilen boynuz antendir.

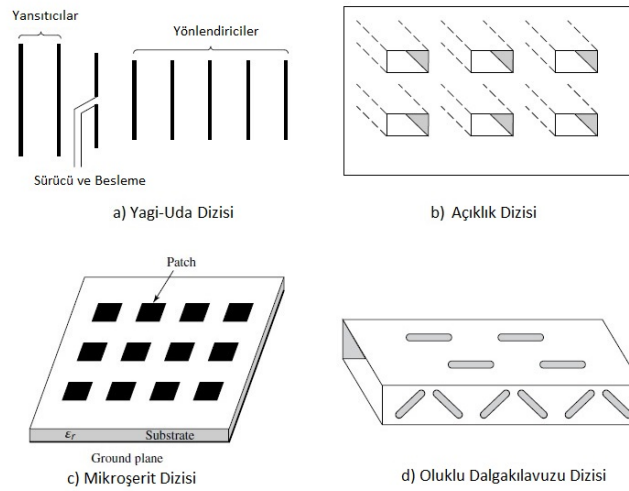


Şekil 2.24 Farklı Boynuz Anten Türleri a) H-düzlem b) Piramidal c) E-düzlem d) Konik

Şekilde görüldüğü gibi, boynuz anten daha fazla yönlülük sağlayan ve verimliliği artırmak için anten empedansını boş alan empedansı ile eşleştirmeye yardımcı olan genişletilmiş bir dalga kılavuzuna sahiptir.

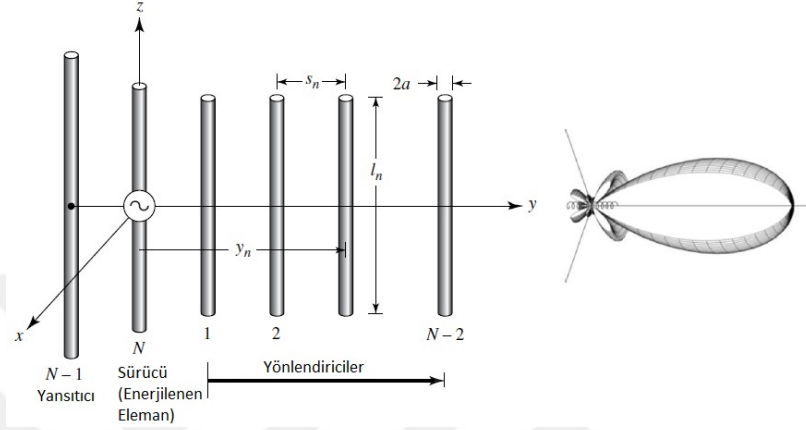
2.3.10.3. Yagi-Uda ve Dizi Antenler

Son iletişim teknolojileri, gürültü ve diğer girişimcilerden kaçınırken daha iyi sinyal aktarımı elde etmek ve iletişim kalitesini artırmak için çoğunlukla hedef odaklı ışımaya ihtiyaç duymaktadır. Özellikle mobil baz istasyonları ve benzeri teknolojiler, bu koşulları sağlamak için ana ışıma lobunun yönlülüğünü artırırken yan lobları azaltan ve ana lobu hedef cihazın belirli yönüne eğen bir sensör dizisinden oluşan oluşan ve Şekil 2.25’de gösterilenlere benzer dizi antenler kullanmaktadır.



Şekil 2.25 Tipik Yagi, Açıklık ve Mikroşerit Dizi Konfigürasyonları

Yagi anteni genellikle 3 GHz'e kadar olan frekanslarda iyi bir verimliliğe sahip, oldukça yönlendirici bir parazitik dizi antendir. Şekil 2.26'da gösterildiği gibi yansıtıcılar, sürücü elemanları (besleme elemanları) ve yönlendiricilerden oluşur. Yagi dizisinin genel yapısı, doğru bir şekilde tasarlanması için açık literatürdeki kapsamlı analitik ve deneysel araştırmalardan belirlenen bazı kuralları ve hesaplamaları içerir.



Şekil 2.26 Yagi Dizi Konfigürasyonu ve Işıması

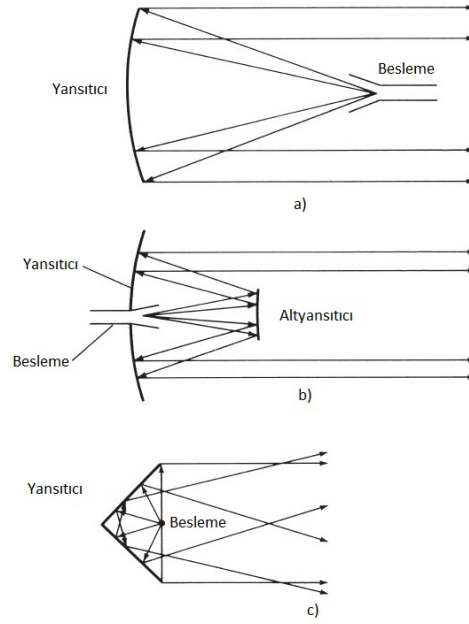
Tipik olarak, sürücü eleman rezonanstadır ve uzunluğu $\lambda/2$ 'den biraz daha az bir değerde, genellikle $0,45-0,49 \lambda$ kadardır. Yönlendiriciler aynı veya farklı uzunluklarda olabilmelerine rağmen, yaklaşık $0,4$ ila $0,45 \lambda$ arasında olan sürücü uzunluğundan biraz daha küçük olmalıdırlar ve yönlendiriciler arasındaki mesafelerde aynı boyutta olmaları gerekmez de, tipik olarak $0,3$ ve $0,4 \lambda$ 'dır. Yönlendiricilerin ileri kazanç, geri kazanç ve giriş empedansı üzerinde önemli etkileri vardır. Besleyici uzunluğu ve kalınlığı, giriş empedansı ve geri lob kazancı üzerinde yüksek bir etkiye sahiptir, ancak ileri lob kazancı üzerinde zayıf bir etkiye sahiptir. Yansıtıcı eleman uzunluğu sürücü elemanından biraz daha büyük olmalı ve aralarındaki boşluk (optimum $0,25 \lambda$), sürücü ve ilk yönlendirici arasındaki boşluktan daha az olmalıdır. Yansıtıcı aralığı ve boyutunun ileri lob kazancı üzerinde zayıf bir etkisi, ancak giriş empedansı üzerinde yüksek bir etkisi vardır ve geri lob kazancını azaltarak önden arkaya oranını (FBR) iyileştirmeye yardımcı olur. Herhangi bir yönlendiricinin uzunluğu rezonans uzunluğundan daha küçük olduğundan, akım indüklenen emf'ye yol açtığından elemanın empedansı kapasitif hale gelir. Benzer şekilde, reflektörlerin empedansı endüktiftir ve uzunluğu rezonans uzunluğundan biraz daha büyük olduğu için akım indüklenen emf'nin gerisinde kalır. Elemanlar arasındaki mesafenin de empedansı etkilediği dikkate alınmalıdır. Örneğin, toplam

anten dizi uzunluğu 6 λ olan tipik bir anten dizisinin kazancı 30 ile 53 arasındadır (14,8 ile 17,3 dB). Besleme hattı etkisini azaltmak için genellikle tek sayıda yönlendirici kullanılır. Giriş empedansı, ileri kazanç, geri kazanç, küçük lobların büyüklüğü, bant genişliği, yönlülük ve FBR ön-arka oranı değeri, Yagi-Uda dizisinin besleyici, sürücü ve yönlendirici olarak adlandırılan elemanlarının uzunlukları, çapları (kalınlıkları) ve aralarındaki boşluk tarafından belirlenir. Yagi dizileri nispeten düşük giriş empedansına ve f_0 merkez frekansının yaklaşık %2'si kadar dar bir bant genişliğine sahiptir [1].

Akım dağılım denklemi, radyasyon integralleri ve Pocklington integrallerine dayanarak, akım dağılımları ve ışıma örüntü davranışı belirlenebilir. Yagi dizisinin akım dağılımlarını ve E alanlarını hesaplamamanın çok zahmetli ve zaman alıcı olduğu açıktır. Ancak tezde, karmaşık formüller ve PCB malzeme tipi, kalınlığı ve benzeri diğer koşulların etkileri nedeniyle HFSS adlı programın sağladığı tasarım ve simülasyon uygulamaları kullanılmıştır. Farklı yöntem ve teknolojiler kullanan uyarlanabilir hüzmleme tekniklerini uygulayan düzgün doğrusal dizi (ULA) ve düzgün dairesel dizi (UCA) antenler tez kapsamı dışında tutulmuştur.

2.3.10.4. Yansıtıcı Antenler

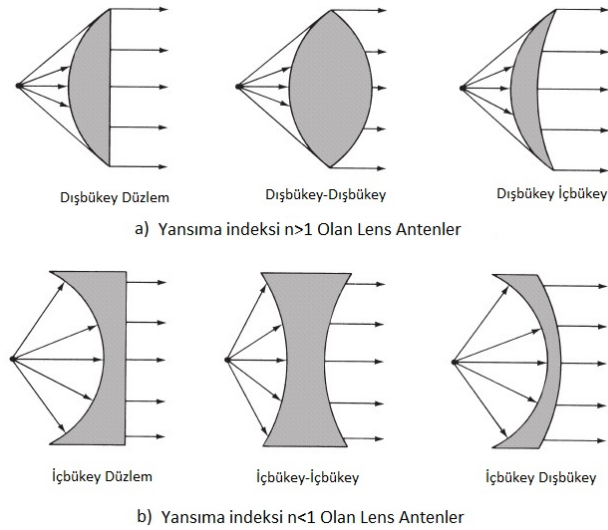
Örneğin uzay haberleşmesinde milyonlarca kilometre gibi çok yüksek mesafeler ve femtowatt (10^{-15} W) ya da bunun da altındaki çok düşük sinyal güçleri söz konusu olduğunda, antenler Şekil 2.27'de gösterilen ve yansıtıcı antenler olarak adlandırılan çok karmaşık biçimler alırlar. Anten alıcı tarafında kullanıldığında, yaygın tip, genellikle birkaç metreden yüzlerce metre çapa kadar değışen boyutlarda üretilen bir parabolik yansıtıcı biçimindedir.



Şekil 2.27 Tipik Yansıtıcı Anten Konfigürasyonları a) Önden besleme b) Cassegrain besleme c) Köşe yansıtıcı

2.3.10.5. Lens Antenler

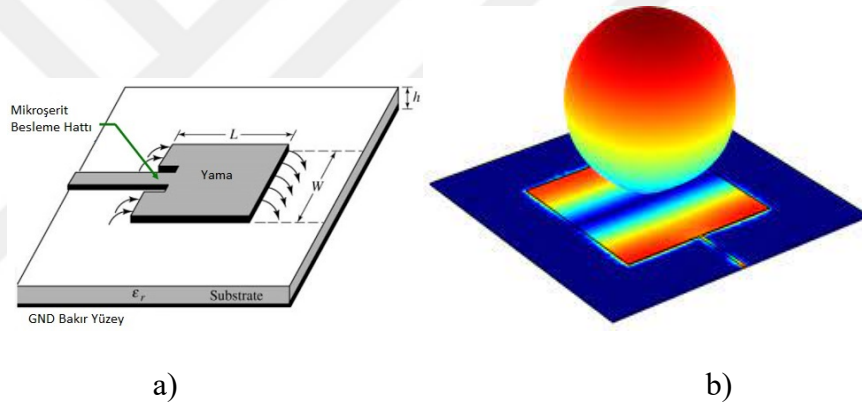
Gelen sinyal, toplanan enerjiyi artırmak için anten üzerindeki bir noktaya hizalanacak veya odaklanacaksa, Şekil 2.28’de gösterilen mercek antenler iyi bir seçenektir. Parabolik yansıtıcılardan daha yüksek frekanslarda elektromanyetik enerjiyi düzlem dalgalara dönüştürebilirler. Düşük frekanslarda daha büyük boyutlara ve daha yüksek bir ağırlığa sahip olurlar [1].



Şekil 2.28 Tipik Lens Anten Konfigürasyonları

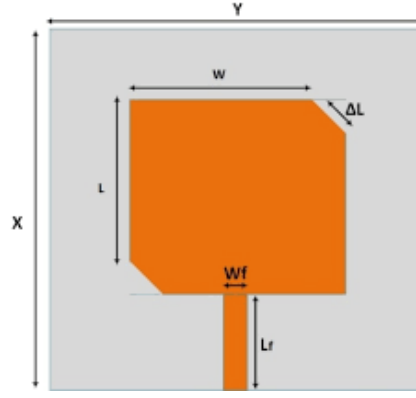
2.3.10.6. Mikroşerit (PCB) Yama Antenler

Mikroşerit antenler, analiz ve üretim kolaylığı, düşük çapraz polarizasyon, düşük profilli yapı, düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeyler, sağlamlık, rezonans frekansı, empedans, polarizasyon ve ışıma örüntüsü açısından çok yönlülük gibi iyi ışıma özellikleri nedeniyle günümüzün gelişmiş teknolojilerinde en çok kullanılan ve popüler olan iletişim sinyali aktarım elemanı türü olarak tanımlanabilir. Bir yalıtkan tabaka malzeme, bir bakır yama veya şerit ve tabaka malzemesinin diğer yüzeyinde bir topraklama düzleminde oluşurlar. Bu fiziksel, elektriksel, elektromanyetik ve davranışsal avantajlar nedeniyle, mikroşerit PCB antenler günümüzde sivil ya da savaş uçaklarında, uzay araçlarında, uydularda, füzelerde, arabalarda, akıllı telefonlarda, bilgisayarlarda ve Bluetooth dâhil olmak üzere RF iletişim cihazlarının tümünde birkaç MHz'den onlarca GHz seviyelerine kadar bir frekans aralığında kullanılmaktadırlar [1].



Şekil 2.29 a) Mikroşerit Yama Anten b) Işıma Örüntüsü

Şekil 2.29'da gösterilen mikroşerit yama anten, belirli ve öngörülebilir elektriksel, empedans ve ışıma davranışlarına sahip en kolay PCB anten türüdür. Örneğin, akıllı cep telefonları, düzgün bir ışıma yapmak, çok kanallı iletişim sağlamak ve polarizasyon uyumsuzluklarını önlemek için çoğunlukla sol el dairesel polarize (LHCP) veya sağ el dairesel polarize (RHCP) yama antene sahiptir. Dairesel polarizasyon sağlamak için, Şekil 2.30'da gösterildiği gibi yamanın iki zıt köşesini kesmek yaygın bir yöntemdir. Sağ üst köşe kesimi sol alt köşe kesiminden daha büyükse RHCP ve sol alt köşe kesimi sağ üst köşe kesiminden daha büyükse LHCP ışıma yapar.



Şekil 2.30 Kesikli Dairesel Polarize Yama Anten

PCB anten tabakaları, FR-1, FR-4, CEM-x, PTFE (politetrafloroetilen) gibi farklı özelliklere ve adlara sahip reçine, cam elyaf ve epoksiden yapılabilir. Özellikle PTFE ve FR-4 yüksek frekanslı iletişim uygulamaları için daha uygundur ve çoğunlukla tasarım mühendisleri tarafından kullanılır. FR-4 tabaka, 10 GHz'e kadar yaklaşık $\epsilon_r = 4.5$ bağıl dielektrik geçirgenliğe, Tanjant kaybı $\tan(\delta) = 0.02$ 'ye, 20 kV / mm'lik bir yalıtım dayanımına ve yangın geciktirici reaksiyonuna sahiptir.

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m \quad 2.30a$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2} F/m \quad 2.30b$$

Burada Eşitlik 2.30'da verilen ϵ_0 malzemeden geçen elektrik alanlarının davranışını belirleyen vakumdaki elektriksel geçirgenlik ve frekansın bir fonksiyonu, c ışık hızı (299792458 m/s) ve μ_0 vakumdaki manyetik geçirgenliktir. PCB tabanlı yama anten tasarımında, yamanın boyutları bazı koşullar altında hesaplanmalıdır. Çalışma frekansı (f) ve elektriksel geçirgenlik (ϵ_0) anten boyutlarının belirlenmesinde en önemli parametrelerdir. Şekil 2.29'a göre, genişlik (W) besleme hattına dik olan yama uzunluğudur ve Eşitlik 2.31'deki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$Width = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} metre \quad (2.31)$$

Eşitlikte c ışık hızı, f_0 çalışma frekansı ve ϵ_r alt tabaka malzemesinin bağıl elektriksel geçirgenliğidir.

İkinci parametre, PCB'nin kenarından başlayan ve yama antene kadar giden besleme hattına paralel olan yamanın uzunluğudur (L). L 'yi belirlemek için, önce etkin geçirgenlik ϵ_{eff} Eşitlik 2.32 yardımıyla bulunmalıdır, burada h alt tabaka kalınlığıdır:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right] F/m \quad (2.32)$$

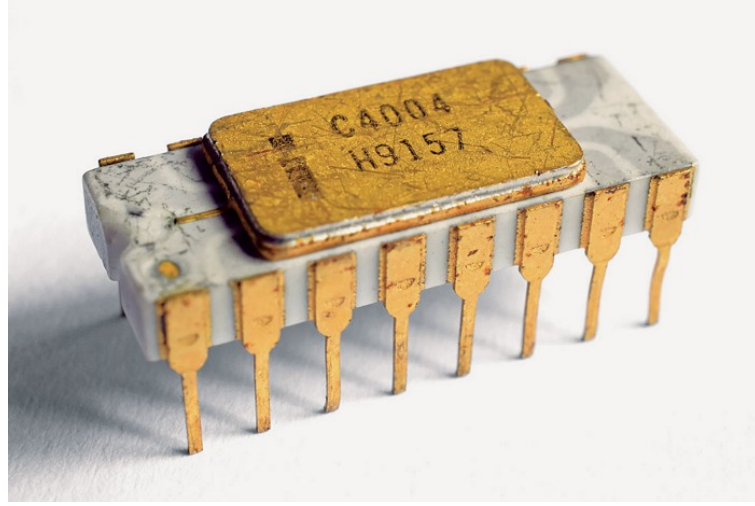
Yamanın uzunluğu (L) ise Eşitlik 2.33 kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde W yamanın genişliği ve h PCB tabakasının kalınlığıdır.

$$Length = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right) metre \quad (2.33)$$

Parametreleri ve yukarıdaki formülleri kullanarak, f çalışma frekansına göre temel bir yama antenin boyutlarını kolayca hesaplayabiliriz. Ancak yama tipi mikroşerit antenler, PCB yüzeyinden dik olarak yukarı doğru ışımadığı sürece, ışıma örüntüsünü istenen bir yöne yönlendirmek için genellikle yeterli değildir. Bu nedenle, mikroşerit antenlerin tek kutuplu çubuklar, dipoller, döngüler, Yagi dizileri, mikroşerit dizileri ve daha fazlası gibi çok yönlü yapısından yararlanarak ışıma yönünü, ışıma genişliğini, yönlülüğünü ve kazancını ayarlamak için anteni tasarlayabiliriz.

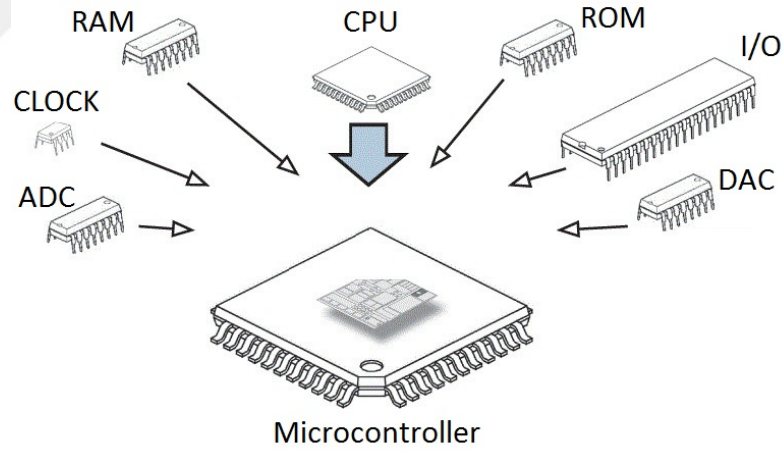
2.4. Gömülü Sistemler ve Mikrodenetleyiciler

Günümüz insan yaşamı, özellikle elektrik ve elektronik alanlarında mühendislik teknolojileri ve temelleri üzerine inşa edilmektedir. Bu teknolojiler arasında başrolü oynayan ve entegre devreler (yonga, 37ikrodenetleyici (MCU), mikroişlemci (CPU), vb.) olarak adlandırılan teknolojiler, akıllı telefonlar, otomobiller, havacılık, mimari, makineler, evler, askeri teknolojiler ve diğer mühendislik alanlarının, teknolojilerinin ve icatlarının dahi temel teknolojisini oluşturmaya başlamıştır.



Şekil 2.31 İlk Mikroişlemci Intel 4004

Teknoloji tarihine bakacak olursak, elektrik ve bilgisayar teknolojisinin gelişimine ışık tutan kilometre taşları olarak bazı kişi ve buluşları görürüz. Şekil 2.31’de gösterilen dünyanın ilk mikroişlemcisi 4004, 1969 yılında elektrik mühendisi Marcian Ted Hoff tarafından icat edildi ve daha sonra ilk olarak 1971 yılında fizikçi Federico Faggin tarafından Intel Corporation’da geliştirilmiştir.

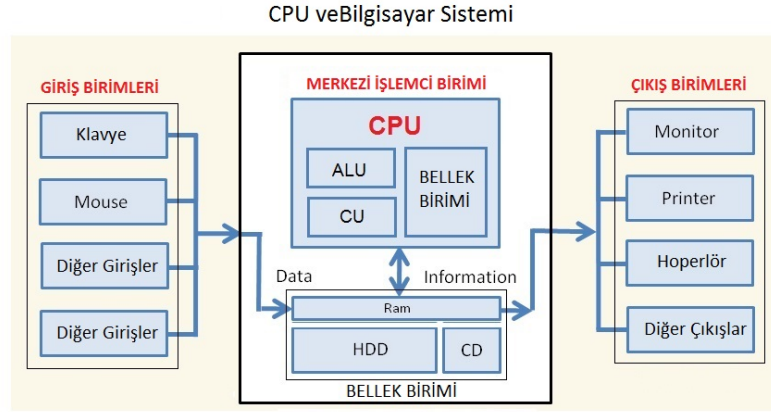


Şekil 2.32 Mikrodenetleyici Ünitesi

2.4.1. CPU ve MCU Arasındaki Temel Farklar

Bir CPU ile bir Mikrodenetleyici arasındaki temel fark, Şekil 2.32’de görüldüğü üzere bir CPU’nun sadece matematiksel ve mantıksal hesaplamalar yapan ve diğer bilgisayar çevre birimlerine gereksinim duyan bir işlemci olması, MCU’nun ise CPU, RAM, ROM, ön bellek, ADC, DAC, Zamanlayıcılar, USART, I2C, SPI gibi seri/paralel iletişim portları ve I/O portları gibi gerekli bütün çalışma donanımını tek bir tümleşik devre içinde bulunduran bir mikro bilgisayar olmasıdır.

2.4.2. Merkezi İşlem Birimi (CPU)

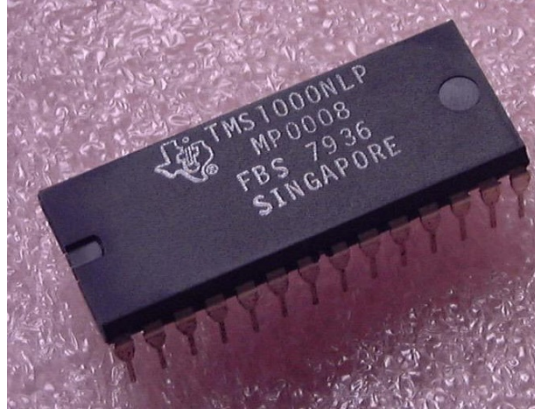


Şekil 2.33 CPU ve Bilgisayar Sistemi İletişim ve Çalışma Blok Diyagramı

CPU ve bilgisayar sistemi iletişimi ve çalışma prensibini anlatan blok diyagram Şekil 2.33’de yer almaktadır. CPU’da kontrol birimi (CU), işlemci tarafından kabul edilen talimatlara yanıt veren ön bellek, aritmetik mantık birimi (ALU) ve giriş/çıkış aygıtlarını çalıştıran işlemci işlemlerinin yöneticisidir. Modern işlemciler çoğunlukla Von Neumann mimarisindedir. Bir talimat için matematiksel işlem, onu bellekten alan ve ardından sonucu bellekte saklayan bir ALU mantık devresi tarafından yapılır. CPU’lar karmaşık komut seti bilgisayarlarıdır (CISC).

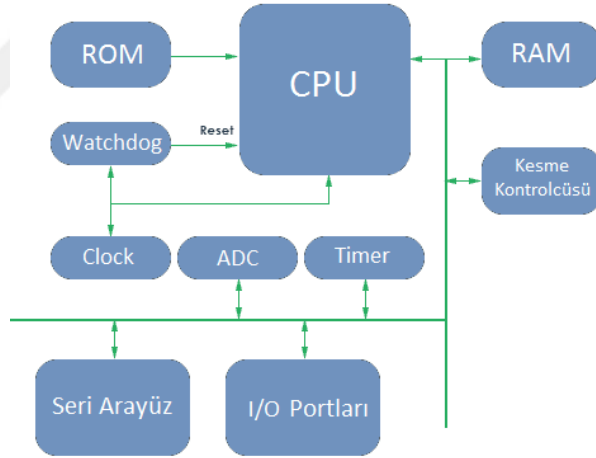
2.4.3. Mikrodenetleyici (MCU) ve Kullanılan Cihaz

Daha önce bahsedildiği üzere, bir MCU, CPU, RAM, ROM, Flash bellek, çevre birimleri ve giriş çıkış noktaları gibi birimlerden ve cihazlardan oluşan ve bağımsız bir tam mikrobilgisayarınkine eşit bir çalışma yeteneği sağlayan tümleşik bir devredir (IC). MCU’lar, birkaç MHz ile birkaç GHz arasında değişen çalışma frekansı hızları, geçici RAM bellek ve birkaç bayt ile onlarca MB arasında değişen kalıcı flaş bellek, analogdan dijitale dönüştürücüler, zamanlayıcılar, iletişim cihazları vb. ile birlikte tasarlanmakta ve üretilmektedir. MCU’ların neredeyse tamamı indirgenmiş komut seti bilgisayarlarıdır (RISC). Şekil 2.34 1979’da tasarlanmış ilk MCU’lardan birini göstermektedir.



Şekil 2.34 1979’da Tasarlanmış İlk MCU’lardan Biri

Mikrodenetleyici entegre devreleri, bir bilgisayarın herhangi bir bilgi işlem görevini yerine getirmek için ihtiyaç duyduğu tüm donanım birimlerine ve aygıtlara sahiptir. Bu aygıtlar mikrobilgisayar sistemini oluşturur ve bazıları IC tipine ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak kullanılabilir veya kullanılmayabilir. Bu kısmın devamında söz konusu birimler ve aygıtlar daha detaylı incelenecektir. Şekil 2.35 basit 40ikrodenetleyici mimarisini göstermektedir.



Şekil 2.35 Basit Mikrodenetleyici Mimarisi

CPU; sistemin beyni olarak da adlandırılan MCU’nun merkezi ve en önemli birimidir. CPU, talimatları bellekten alır ve daha sonra veri ve adres veri yolları yardımıyla yapılan ve pipelining olarak bilinen kod çözme ve yürütme işlemlerini uygular.

OSİLATÖR; MCU’nun herhangi bir görevi yapabilmesi için elektriksel saat darbe sinyallerini üreten iç veya dış bir aygıt veya devredir. Genellikle birkaç MHz’lik (1,

2, 4, 8, 20, vb.) kristal veya RC devresi kullanılır. Mikrodenetleyicilerde osilatör, sistemin hızının belirlenmesinde önemli rol oynar.

REGISTER'lar; bir program sayacı (PC), veri ve talimatları saklamak için bir yığın işaretçisi ve donanımı yapılandırmak ve çalıştırmak için çevre birimleri içeren genel amaçlar için yapılmış 8 bit, 16 bit veya 32 bit veri depolama elemanlarıdır.

ROM; adından da anlaşılacağı üzere, üretildikten sonra elektronik olarak değiştirilemeyen kalıcı verileri depolayan salt okunur bellektir. Silinebilir programlanabilir salt okunur bellek (EPROM), elektriksel olarak silinebilir programlanabilir salt okunur bellek (EEPROM) ve FLASH bellek yeniden yazılabilir tip kalıcı ROM belleklerdir.

RAM veya rastgele erişimli bellek, herhangi bir anda okunabilen ve değiştirilebilen geçici verileri depolayan ve çalışan program verilerini ve kod değişkenlerini saklamak için kullanılan bir bilgisayar belleğidir. Günümüz teknolojisinde geçici bellekler, statik rastgele erişimli bellek (SRAM) ve dinamik rastgele erişimli bellek (DRAM) olmak üzere iki ana bellek türünde metal oksit yarı iletken (MOS) bellek hücrelerinden yapılırlar.

ZAMANLAYICILAR, belirli bir süre ya da zaman aralığı sağlamak için önceden tanımlanmış ölçekte zaman gecikmeleri üretebilirler. Zamana duyarlı ve süre uygulamalarının yapıldığı herhangi bir sistemde diğer gecikme fonksiyonları yerine bir zamanlayıcı veya sayıcı olarak kullanılmaları profesyonel sistemler için uygundur.

SERİ ARAYÜZLER; MCU'ların çoğu evrensel senkron asenkron alıcı verici (USART), I²C, seri port arayüzü (SPI) vb. gibi seri arayüz cihazları içerir. Bu kablolu iletişim cihazları ve protokolleri, çoğunlukla aynı devre veya makine üzerinde birbirine bitişik olarak yerleştirilen iki cihaz arasında kısa mesafede yavaş veya orta hızlı veri aktarımı için uygundur.

ADC veya analogdan dijitale dönüştürücü, sıcaklık, basınç, nem veya diğer sensör gerilimi gibi giriş analog sinyallerini ayrık dijital ikili verilere dönüştüren bir cihazdır. ADC dâhili bir saat kullanır ve analog verileri örnekler.

KESME; Birçok hesaplama ve işlem içeren birden fazla görev kesilerek öncelikli olarak çalıştırılabilir. Bir kesme tamamlandığında, kesme yürütme MCU'su onu durdurur ve ikincisi öncelik kazanır. Özellikle zamanlayıcı kesmeleri, çok görevli yazılımlarla hassas sayıcı yapmak için önemli ticari projelerin vazgeçilmezdir.

I/O PORTLARI; Genel amaçlı giriş-çıkış (GPIO) portları genellikle cihazları veya bir yükü besleyebilen, bir sinyali alabilen veya Rx/Tx, ADC/DAC, kesme vb. gibi alternatif rollerde kullanılabilen pinler olarak adlandırılır. Genellikle besleme ve alım gerilimi ve akımı sırasıyla 3,3 V ve 25 mA'dir.

Bu çalışmada, DoA algoritmaları, anten anahtarlama, RF modül iletişimi ve kullanıcı düğmesi uygulamaları da dâhil olmak üzere tüm gömülü sistemi yönetmek ve kontrol etmek için 216 MHz maksimum saat hızına, 2 MB flaş program belleğine, 512 KB RAM belleğe, 12 bit ADC'ye ve 16 bit zamanlayıcıya sahip ARM tabanlı STM32F767 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır [26].

3. BLUETOOTH RF MODÜLÜ & KOMUT SETİ

Daha önce de söz edildiği üzere, Bluetooth RF modülleri, kulaklıklar, akıllı telefonlar, bilgisayar çevre birimleri, kısa mesafeli iletişim, alışveriş merkezlerinde ürün bilgisi ve ürün rafları, ürünler ve alışveriş yapan kişilerin konumunun bulunması gibi kullanım alanlarına göre farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Bluetooth cihazlarının hemen hepsi, diğer RF modülleri gibi, farklı bit hızları ve iletişim mesafeleri ile tanıtım sinyali yayını ve ortak veri aktarımı özelliklerine zaten sahip olmakla birlikte, bazıları, özellikle BLE'ler gibi yeni cihazlar, DoA, AOA veya tek bir modül üzerinde sınırlı açı aralıklarının kullanılması veya çoklu modül katkıları sayesinde alan takibi gibi bazı özelliklerle konum bulma yeteneklerine sahiptir.

Bu tezde, düşünülen yön bulma sistemi, anten dizileri ve diğer teknik üstünlükler veya farklılıklar dâhil olmak üzere, her türlü tanıtım sinyali yayını yapan Bluetooth cihazının varış yönünü (DoA) bulabilen bir sistem olarak düşünülmüştür.

3.1. BC417 DSP Çip Özellikleri

Üretici teknik dokümanları incelendiğinde [23], BC417 DSP yongasının Bluetooth RF iletişimi için gerekli özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Tablo 3.1'de

yonganın özellikleri özet olarak yer almaktadır. Yonga -40 °C ile 105 °C arasında farklı ortam sıcaklıklarında çalışabilse de bazı özellikler için sadece genel oda sıcaklığı olan 20 °C'nin dikkate alınması teknik davranış ve iletişim yeteneklerinin anlaşılması için yeterlidir.

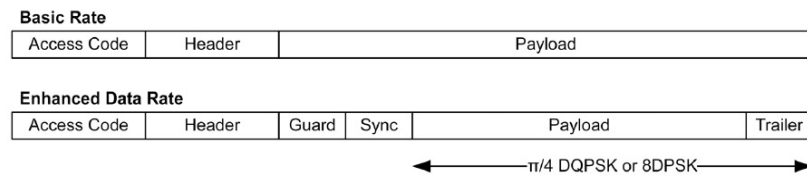
Tablo 3.1 BC417 Bluetooth DSP Yonga Özellikleri

Osilatör	8 – 32 MHz kristal, 40 MHz harici
RF Tx Güç BDR	-6 dBm – 4 dBm @ +20°C
RF Rx Duyarlı BDR	-87 dBm @ 2.441 GHz, +20°C
RF Tx Güç EDR	-6 dBm – 4 dBm @ +20°C
RF Rx Duyarlı EDR	-87 dBm @ 0.01% BER +20°C
Modülasyonlar	GFSK / $\pi/4$ DQPSK / 8DPSK
Paket	TFBGA – VFBGA
Besleme Gerilimi	1.7 V – 4.2 V
ADC	8 Bit, 0.7 ksps
Tx Akımı maksimum	51.5 – 52 mA
Rx Akımı maksimum	39 – 45.5 mA
Yazılım	HCI 19.2

Bluetooth v2.0+EDR'nin bağlantı kurma ve yönetimi, bir veri paketinin başlık ve yük kısımları için GFSK modülasyonunu kullanır. Ayrıca, temel bant düzeyinde, gelişmiş veri hızı (EDR), temel veri hızı için tanımlandığı gibi hem aynı 1,6 kHz slot hızını hem de 1 MHz sembol hızını kullanır. EDR'nin farkı, bir paketin yük kısmındaki her bir sembolün 2 ya da 3 biti temsil etmesidir. Bu, daha doğru veri aktarımı sağlayan iki yeni farklı modülasyon şeması kullanılarak elde edilir. Tablo 3.2 veri hızlarını, Şekil 3.1 ise taban hızlar ve geliştirilmiş veri hızı paket yapılarını göstermektedir.

Tablo 3.2 Veri Hızı Tablosu

Veri Hızı Şeması	Sembol Başına Bit	Modülasyon
Temel Veri Hızı	1	GFSK
EDR	2	$\pi/4$ DQPSK
EDR	3	8DPSK (opsiyonel)



Şekil 3.1 Taban Hızlar ve Geliştirilmiş Veri Hızı Paket Yapısı

Diferansiyel dördüncül faz kaydırmalı anahtarlama olarak ifade edilen $\pi/4$ DQPSK’de, belirli bir başlangıç noktası için, semboller arasındaki her faz değişimi $+3\pi/4$, $+\pi/4$, $-\pi/4$ veya $-3\pi/4$ radyan ($+135^\circ$, $+45^\circ$, -135° veya -45°) olmak üzere dört olası faz konumu ile sınırlandırılmıştır. Tablo 3.3 $\pi/4$ DQPSK’de 2-Bit ardışık semboller arası faz kaymasını göstermektedir. $\pi/4$ DQPSK modülasyonunun ilk avantajı, Bluetooth EDR olarak veri hızını iki katına (2x) çıkarmasıdır; ikincisi, DC’den RF’e kadar frekans aralığında verimliliğin yüksek olması ve sonuncusu, taşıyıcı sinyalin fazı için mutlak bir değer bilgisi olmadan demodülasyona izin vermesidir.

Tablo 3.3 $\pi/4$ DQPSK 2-Bit Ardışık Semboller Arası Faz Kayması

Bit Düzeni	Faz Kaydırma
00	$\pi/4$
01	$3\pi/4$
11	$-3\pi/4$
10	$-\pi/4$

Sekiz diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama olarak tanımlanan 8DPSK’in, $\pi/4$ DQPSK’ya benzediği görülse de, semboller arasındaki diferansiyel faz kaydırmaları sekiz olası faz durumu ile gerçekleştirilir ve konumlandırmadaki bitişik semboller arasındaki ayrımı $\pi/4$ ’e (45°) düşürür, bu da 3 Mbit gibi 3 kat daha yüksek Bluetooth veri hızı sağlar. Ancak böylece, 8 bitişik faz konumu arasındaki daha küçük faz farkı nedeniyle, modülasyon yapısının gürültü ve parazit bağışıklığı azalır. Tablo 3.4 8DPSK 3-Bit ardışık semboller arası faz kaymasını göstermektedir.

Tablo 3.4 8DPSK 3-Bit Ardışık Semboller Arası Faz Kayması

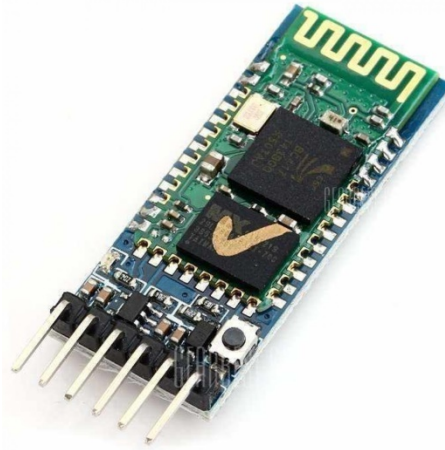
Bit Düzeni	Faz Kaydırma
000	0
001	$\pi/4$
011	$\pi/2$
010	$3\pi/4$
110	π
111	$-3\pi/4$
101	$-\pi/2$
100	$-\pi/4$

3.2. Kullanılan Bluetooth RF Modülü HC-05

Genel amaçlı RF iletişimi ve DoA tahminleri sağlamak için orta veri aktarım hızına ve periyodik tanıtım veri sinyaline (ADS) sahip olan HC-05 EDR, merkezi alıcı olarak kullanılmak için yeterlidir. Sektörde birçok tasarımcı/üretici firma tarafından üretilen çeşitli RF yongaları bulunmaktadır, ancak bunlardan Texas Instruments, Nordic, STM ve HC-05'te kullanılan BC417 Bluetooth RF entegre devresini de geliştiren Cambridge Silicon Radio gibi bazıları ön plana çıkmışlardır. HC-05 Bluetooth modül özet özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5 HC-05 Bluetooth Modül Özellikleri

Çalışma Frekansı	2.4 GHz ISM
Bluetooth Versiyonu	v2.0+EDR
Çıkış Gücü	2.5 mW / 4 dBm (Class 2)
Gerilim Aralığı	3.3V Core, 1.8V-3.6V I/O
Seri Arayüz	UART / USB 1.1/2.0
Standart	IEEE 802.11b/g
Güç Tüketimi	19 mA @ UART 38400 kbps
Modülasyon	GFSK / $\pi/4$ DQPSK / 8DPSK
UART	9600 bps – 115.2 kbps

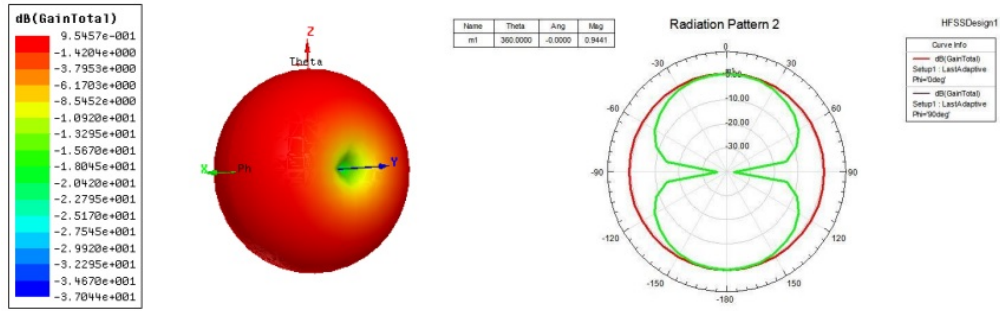


Şekil 3.2 Deneylerde Kullanılan HC-05 Bluetooth Modülü

Şekil 3.2'den görüldüğü üzere HC-05 modülü, güç girişi ve seri UART iletişiminin Tx/Rx hatlarını içeren altı tane pin, işlevsel bir düğme ve kıvrımlı bir mikroşerit PCB antene sahiptir. PCB üzerinde, 5.2 Vdc'ye kadar olan giriş gerilimini Tablo 3.5'deki yonga çalışma gerilimlerine dönüştüren üç (veya dört) pinli bir gerilim regülatörü IC görülebilir. Sol üstten başlayan pinler state, Rx, Tx, GND, VCC ve Etkinleştirme (Enable) işlevlerine sahiptir. Durum (state) pini modülün düzgün çalışıp

çalışmadığını kontrol eder, Rx ve Tx sırasıyla seri veri alma ve veri gönderme pinleridir. GND pini tüm pin sistemlerinin toprağı ve VCC güç giriş pinidir. Etkinleştirme pini, yeterli gerilim seviyesi sağlayarak veri moduna veya AT komut moduna geçiş yapmak için kullanılır.

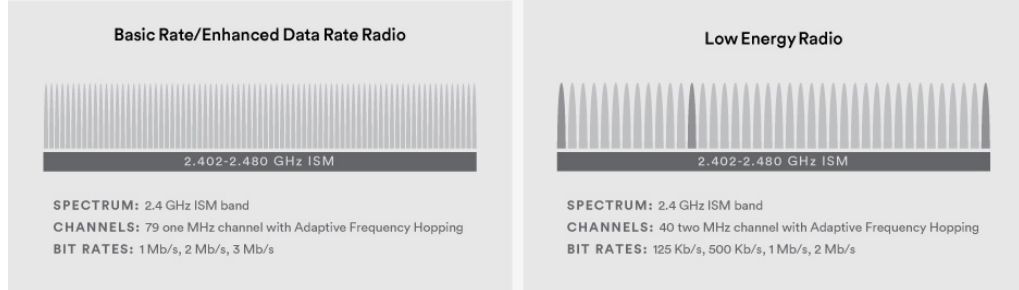
Meander anteni, yonganın teknik dokümanına [23] ve RF modülü teknik dokümanına [27] göre, gönderim tarafında güç yükselteci (PA) ve alma tarafında düşük gürültülü yükselteci (LNA) içeren ilgili uçlara bir balun ile tek uçlu bir besleme hattı bağlantısıyla irtibatlıdır. RF modülü anteni yatay ve dikey PCB şerit hatlarından oluşur ve daha yüksek verimlilikle bir dalga boyunun ' λ ' onda birinden daha küçük boyutlar sağlamak için kullanılır. Bu da dönüş sayısı ile artar veya tam tersi biçimde dönüş sayısı ile ters orantılı olarak BW bant genişliğini azaltır. Azaltma faktörü $\beta = l/L$, meander uzunluğunun eşdeğer dipol uzunluğuna oranıdır. Ayrıca, meander aralığı artar veya azalır, rezonans frekansı sırasıyla azalır veya artar [28]. Meander tipi antenlerin ışıma örüntüleri çoğunlukla küçük yönlülük 'D' ve düşük kazanç 'G' ile monopol veya dipol antenlerin çok yönlü örüntülerine benzer [29], ancak ikisine kıyasla daha iyi bir S_{11} geri dönüş kaybına sahiptirler [30]. Şekil 3.3 tipik Meander antenin ışıma örüntüsünü göstermektedir.



Şekil 3.3 Tipik Meander Antenin Işıma Örüntüsü

HC-05 Bluetooth modülü, lisanssız endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) frekans bandını kullanan bir temel hız/geliştirilmiş veri hızı (BR/EDR) cihazıdır, bu da kullanıcıların Bluetooth'u dünyanın her yerinde kullanabileceği anlamına gelir. Bluetooth modülü, 1600 uyarlanabilir frekans atlama (AFH) uygulayarak her biri için 1 MHz bant genişliğine sahip 79 alt kanaldan oluşan 2400 MHz ve 2483,5 MHz frekans aralıklarında çalışır. Her frekans $(2402 + N)$ MHz'de bulunur ve $N = 1, 2, \dots, 79$ 'dur. Yani, ilk kanal 2402 MHz'de ise alt ve üst sınırları sırasıyla 2401,5 ve

2402,5 MHz'dir ve bu şekilde alt ve üst sınırları sırasıyla 2479,5 ve 2480,5 MHz olan 2480 MHz'deki 79. Kanala kadar devam eder. Hem Bluetooth BR/EDR hem de BLE'nin frekans yayılma spektrumu sırasıyla 2 MHz ve 3,5 MHz'lik alt ve üst koruma bantlarına sahiptir. Şekil 3.4 BR/EDR ve BLE spektrumunu göstermektedir.



Şekil 3.4 BR/EDR ve BLE Spektrumu

RF modülünün sol tarafındaki durum pininin üzerinde bulunan LED etkinleştirilmeden modüle enerji verildiğinde, saniyede yaklaşık iki kez yanıp sönmeye başlar. Bu, modülün başka bir BL modülü ile eşleştirme için bekleme durumunda olduğu ve modüle daha önce doğru AT komutları gönderildiyse sistemin veri aktarım modunda olduğu anlamına gelir. Bu tez çalışmasında veri aktarım modu kullanılmayacak, yalnızca medya erişim kontrolü (MAC), cihaz tipi ve RSSI sinyal değeri hakkında bilgi taşıyan tanıtım veri sinyali hedef BL cihazlarının DoA'sını belirlemek için dikkate alınacaktır. Tanıtım sinyali veri paketlerini almak için BL modülü, etkinleştirme düğmesine birkaç saniye basılarak komut moduna geçirilmelidir, bu da LED'in her beş saniyede bir yanıp sönmeye başlamasına neden olacaktır.

3.3. AT Komut Seti

BL modülünü çalıştırmak için Attention (AT) Instruction Set adı verilen bazı komutların kullanılması gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, tezin önerilen tekniği, işlemlerde Bluetooth cihazlarının eşleştirilmesini gerektirmemektedir, bu da sistemin iletim modunda kullanılmadığı anlamına gelir. Alıcı gömülü sistem, tarama alanındaki hedef Bluetooth cihazlarından gelen ADS tanıtım veri sinyallerini kabul eder ve işler. Bu nedenle, gömülü yazılım ve 47ikrodenetleyici tarafından seri UART iletişim portu üzerinden sistemi çalıştırmak ve DoA bulmak için sadece gerekli yapılandırma komutları ve RSSI başlatma komutları yeterlidir. Sistemi çalıştırmak için gerekli AT komutları, hata kodları ve cihaz sınıfları [27]'da listelenmiş ve

açıklanmıştır. Cihazın başlatılması ve RSSI değerlerinin alınması için özellikle gerekli komutlar, kodlamalar, hesaplamalar ve dönüştürme aşamaları ilgili bölümde açıklanmış olmakla birlikte, sadece sorgulama modundaki format hakkında fikir vermesi açısından bazı genel AT komutları Tablo 3.6’da listelenmiştir. Her komutun sonuna satır başı ve yeni satır karakterleri (\r\n) de eklenmelidir.

Tablo 3.6 Sorgu Modunda Bazı AT Komutları

İşlev	AT Komutu	Yanıt
Test	AT	OK
Reset	AT+RESET	OK
Get Software Version	AT+VERSION?	+VERSION:Param1
Restore Default Status	AT+ORGL	OK
Get BL Address	AT+ADDR?	+ADDR:Param1
Inquire Device Name	AT+NAME?	+NAME:Param1
Inq. Remote Dev. N.	AT+RNAME?	+NAME:Param2
Inquire Module Role	AT+ROLE?	+ROLE:Param1
Inquire Device Type	AT+CLASS?	+CLASS:Param1
Inquire Access Code	AT+IAC?	+IAC:Param1
Inquire Access Mode	AT+INQM?	+INQM:Param1, Param2, Param3
Inq. Serial Parameter	AT+UART?	+UART: Param1, Param2, Param3
Inq. Bluetooth Device	AT+INQ?	+INQ:Param1, Param2, Param3
Get the Work Status	AT+STATE?	+STATE:Param1
Initialize the SPP	AT+INIT	OK/FAIL
Inquire Passkey	AT+PSWD?	+PSWD:Param1

Ayrıca, sorgulama fonksiyonu komutlarından farklı olarak, herhangi bir komutun ayarlanmasında, ilgili bölümde detaylı olarak kullanılacak ve uygulanacak olan komut sözcüğünün sonundaki soru işareti (?) yerine eşittir işareti (=) ve ardından ayar parametreleri bulunur. Örnek olarak AT+UART=9600,0,1 komutu sırasıyla UART parametrelerinden baud hızı, stop biti ve parite bitini ayarlamak içindir.

4. MİKROŞERİT ANTENLERİN TASARIMI

Bluetooth sistemi, 2440 MHz f_0 merkez frekansı etrafında sırasıyla alt ve üst sınırlar ISM 2400-2483,5 MHz olan f_L ve f_H frekans aralıkları ile 83,5 MHz'lik bir tam bant genişliği kullanır. Bu nedenle, her anten elemanı öncelikle Bluetooth iletişim protokolünün merkez frekansını (f_0) ve bant genişliğini (BW) karşılamalıdır, bu da çoğunlukla HFSS simülasyon yazılımı sayesinde yansıma katsayısı S_{11} grafikleri ve uzak alan ışıma desenleri gözlemlenerek çıkarılacak ve analiz edilecektir. Sistem, Bluetooth ADS tanımlı veri sinyallerini toplamak için birbirinden eşit mesafelerde ve farklı yönlere bakan eşit açılarda yerleştirilmiş mikroşerit yönlendirici antenlerden oluşan düzgün dairesel bir dizi (UCA) kullanacaktır. DoA açısını sağlamak için tasarlanan anten dizilerinin birçok avantajının yanı sıra, kuplaj, yansımalar ve büyük boyutları nedeniyle fazla yer kaplaması gibi bazı dezavantajları da vardır.

Birbirine yakın yerleştirilen antenler, ışıma örüntüsünün bozulması gibi anten parametrelerini etkileyerek birbirleriyle etkileşime girebilirler. Bu da yanlış yön tahminlerine neden olabilir. Elemanların ön-arka oranını (FBR) ve yönlülüğünü iyileştirmek, arka ve yan lobları bastırmak ve küçültmek, elemanlar arasındaki mesafeyi artırmak ve her bir anten elemanı arasına bazı bariyerler yerleştirmek önde gelen çözümler olarak görünmektedir. Bu tezde, tasarlanan antenlerin elektriksel ve ışıma özelliklerini olumsuz etkileyebilecek olan elemanlar arasındaki etkileşimi önlemek için, antenler yan ve arka ışıma örüntüleri bastırılmış daha iyi bir FBR ve daha dar bir yarı güç demet genişliği (HPBW) ışıma örüntüsü ile yönlendiriciliği artırılarak tasarlandı. Bu da sistemin DoA açı değerlerinde herhangi bir parazitik etkiye neden olmadan ölçümleri gerçekleştirmesini sağlamıştır.

Yayılan sinyallerin ölçüm alanındaki duvarlar veya diğer statik ve hareketli nesnelerden yansımaları ile ilgili zorluk, ölçüm doğruluğu açısından önemlidir. Bu nedenle, yönlülüğü artırmak veya elemanlar arasındaki boşluklarda bariyerler kullanmak gibi bazı çözümler de sorunun üstesinden gelebilir. Ayrıca, yukarıdaki koşullar ve kısıtlamalar nedeniyle dizi antenler çoğunlukla daha büyük alan kaplarlar. Özellikle bazı dizi anten elemanlarının daha yönlendirici olabilmesi için boyutlarının büyütülmesi gerekmektedir.

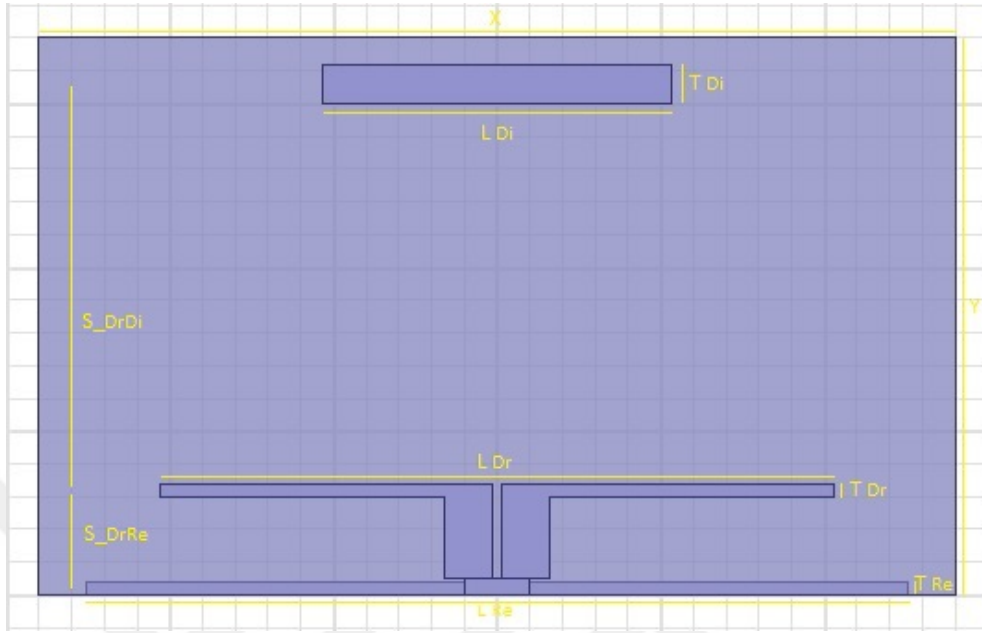
Ancak Yagi-Uda gibi bazı anten tipleri, dipol (sürücü) elemanın uzunluğunu arttırmadan, yönlendirici adı verilen bazı elemanlar kullanarak iyi bir yönlülük sağladıkları için diğerlerine göre avantajlıdır. Bu önemli avantajlarından dolayı, bu tezde Yagi anteninin bazı modifikasyonları tüm tasarım ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu tasarım yaklaşımı, yüksek FBR, yüksek yönlülük, yüksek kazanç ve küçük arka ve yan lob avantajlarının yanı sıra düzgün dairesel dizi çapını da kullanılabilir bir boyutta tutmuştur. Sonraki bölümlerde bize zorluk çıkarabilecek olan anten kuplajı ve elektromanyetik girişimleri en aza indirmek için üzerinde çalışılacak ana konular, Bluetooth bant genişliği, merkez frekansı, uygun anten empedansı ve geri dönüş kaybı gerekliliklerini sağlaması koşulu ile anten yönlülüğünün, ön-arka oranının, geri lob ve yan lob bastırma çalışmalarının iyileştirilmesi olacaktır.

Bölüm 2.3.10.3 ve 2.3.10.6 mikroşerit PCB yama antenlerin teknik parametrelerini ve genel ışıma davranışlarını açıklamaktadır. Ancak ışıma karakteristiklerinden de görüldüğü gibi geleneksel yama antenler tez çalışmasının gerekliliklerini karşılayamamaktadır ancak tasarlanması istenilen anten dizisi tipi Yagi dizisi gibi yatay olarak hizalanmış iyi FBR ve yönlülük sağlayan antenlerden oluştuğu için daha önce açıklanan antenler arası girişimi engelleme beklentilerini karşılamaktadır. Bunlara ek olarak, tek veya çift taraflı PCB, bakır topraklama tabakası ve PCB kalınlığı da önemli faktörlerdir.

4.1. Mikroşerit Yagi Anten Tasarımı

Yagi anten tasarımı, fiziksel boyutları ve yapısı ile birlikte bu bölümde verilecektir. Daha önce de açıklandığı gibi, yönlendirici sayısı arttıkça kazanç ve yönlülük artmasına rağmen, Yagi dizi elemanının toplam uzunluğu da artar. Bu nedenle, tüm UCA anten sisteminin uygun boyutlar ile iyi bir anten kazancı sağlamak için, bir yansıtıcı, bir sürücü ve tek bir yönlendiriciden oluşan en basit yapısı ile başlamak daha doğru olacaktır. Tasarımı etkileyen ilk parametreler Bluetooth $f_0 = 2,44$ GHz merkez frekansı ve $\lambda = 0,1229$ m (122,9 mm) dalga boyudur. $\lambda/2$ Dalga boyunu ve bununla orantılı diğer fiziki ölçüleri doğrudan uygulamak ilk bakışta doğru gibi görünse de, istenen elektriksel ve ışıma karakteristiklerini sağlamak, hem PCB'nin fiziki materyal yapısının belirlenmesi sırasında hem de HFSS programında yapılacak

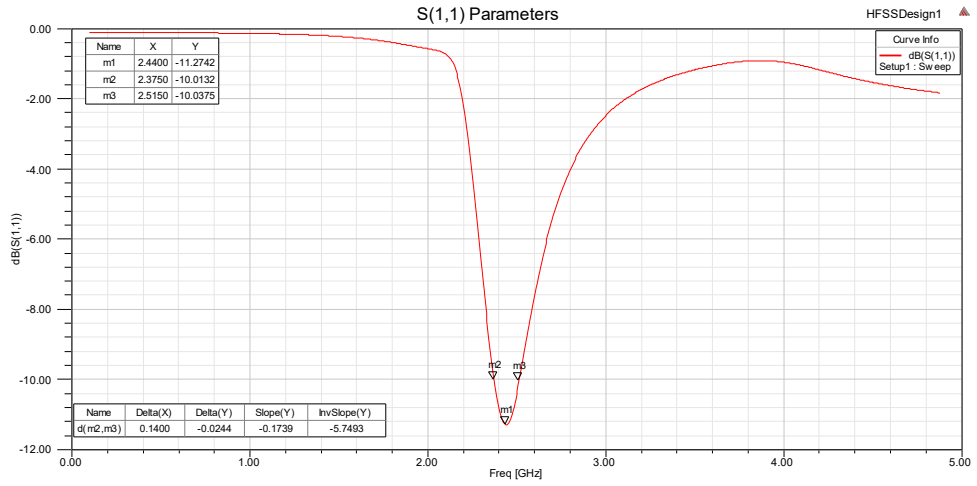
çok sayıda modifikasyon ve simülasyon ile empedans uyumu, kazanç, yönlülük, ön-arka oranı gibi parametreler arasında karmaşık bir denge gerektirir. Prototip mikroşerit antenin genel boyutlandırılması Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



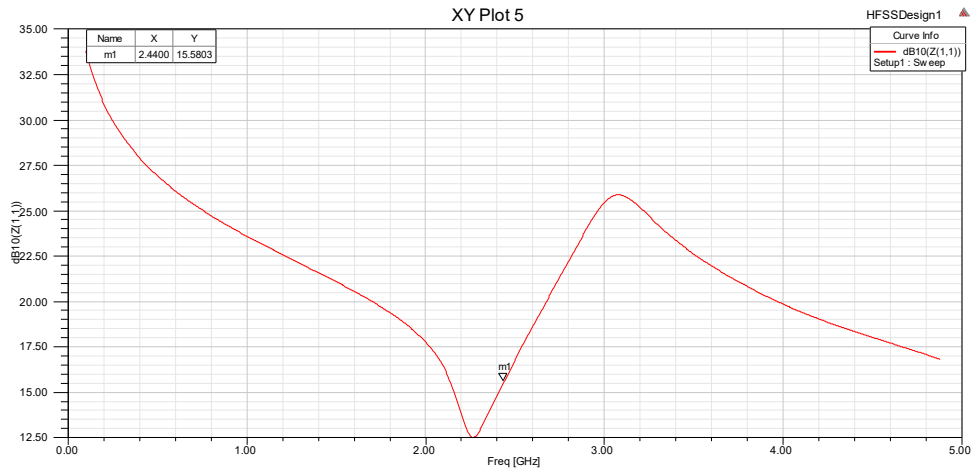
Şekil 4.1 Prototip Mikroşerit Antenin Genel Boyutlandırılması

4.1.1. Üç Elemanlı Çift Uçlu Mikroşerit Yagi Anten

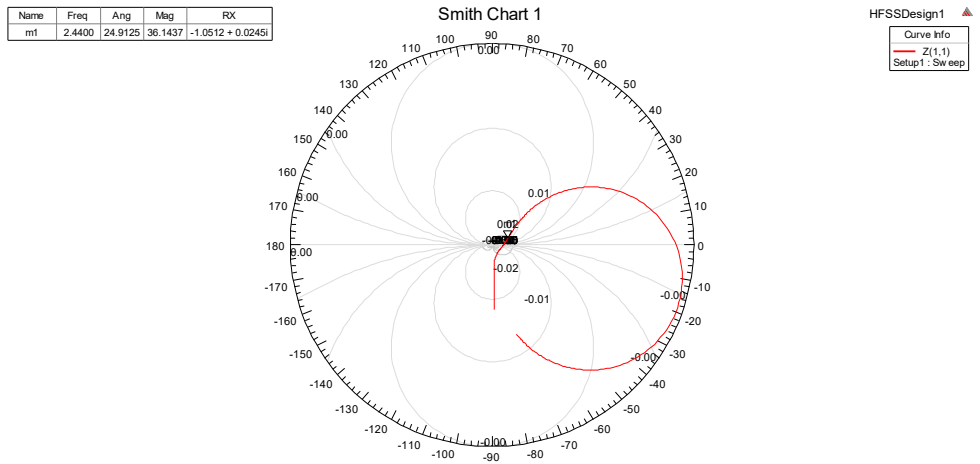
3 elemanlı Yagi dizisi için kullanılan çift taraflı ve 1,6 mm kalınlığındaki PCB’nin alt katmanında bir yansıtıcı, üst katmanında ise bir yönlendirici çift uçlu (iki kutuplu) bir dipole sürücü ve onu besleyen bir doğrusal besleme hattı vardır. Girilen parametreler ve HFSS’den alınan sonuçlar bağlamında Şekil 4.2 üç elemanlı Yagi antenin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.3 antenin giriş empedansının frekansla değişimini, Şekil 4.4 Smith grafiğinde empedans büyüklüğü ve açısını, Şekil 4.5 toplam kazancın 3-B görüntüsünü, Şekil 4.6 mutlak kazanç ve gerçekleşen kazancı ve Şekil 4.7 ise 10 dB normalize gerçekleşen kazancı göstermektedir.



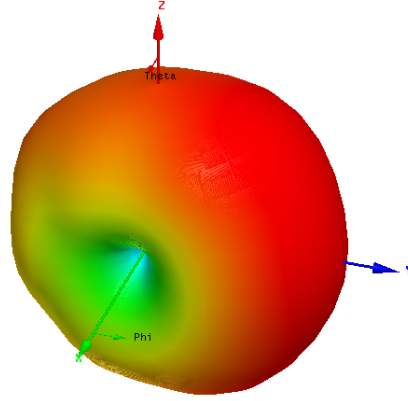
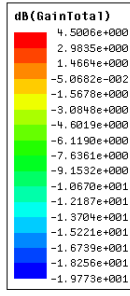
Şekil 4.2 Üç Elemanlı Yagi Antenin S_{11} Parametresi



Şekil 4.3 Antenin 2.44 GHz Civarındaki Giriş Empedansı

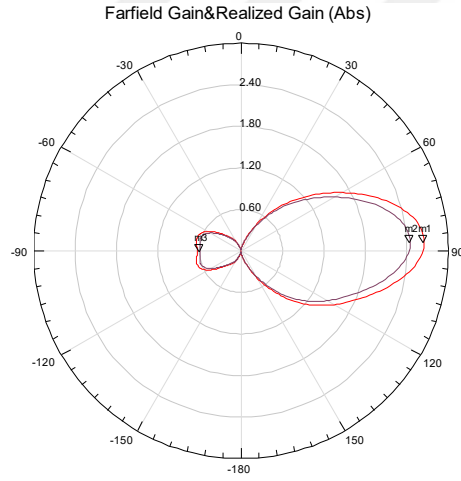


Şekil 4.4 Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı



Şekil 4.5 Toplam Kazancın 3-B Görüntüsü

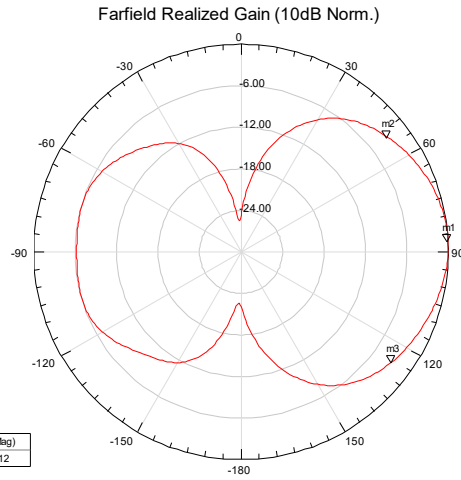
Name	Phi	Ang	Mag
m1	87.0000	87.0000	2.6528
m2	87.0000	87.0000	2.4538
m3	270.0000	-90.0000	0.5852



Curve Info
abs(GainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz* Theta=90deg
abs(RealizedGainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz* Theta=90deg

Şekil 4.6 Mutlak Kazanç ve Gerçekleşen Kazanç

Name	Phi	Ang	Mag
m1	87.0000	87.0000	-0.0000
m2	52.0000	52.0000	-3.0524
m3	126.0000	126.0000	-2.9812



Curve Info
dB10(normalize/RealizedGainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz* Theta=90deg

Name	Delta(Phi)	Delta(Ang)	Delta(Mag)
d(m2,m3)	74.0000	74.0000	0.0712

Şekil 4.7 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazanç

Simülasyonda kullanılan parametreler ve sonuçta elde edilen parametreler ise aşağıda listelenmiştir:

PCB	: $X = 56 \text{ mm}$, $Y = 34 \text{ mm}$, $Z = 1,6 \text{ mm}$
Yansıtıcı	: " $L_{Re} = 0.408 \lambda$ " $-25.1, 0, 0 / 50.2 / 0.8$
Sürücü x 2	: " $L_{Dr} = 0.332 \lambda$ " $-0.25, 6, 1.6 / -20.3 / 0.8$
Yönlendirici	: " $L_{Di} = 0.126 \lambda$ " $-10.7, 30, 1.6 / 21.4 / 2.4$
Besleme	: $-0.25, 1, 1.6 / -3 / 5$
S_{DrDi}	: " 0.201λ " 24.8 mm
S_{DrRe}	: " 0.048λ " 6 mm
f_0	: 2.44 GHz
S_{11}	: -11.27 dB
BW (-10 dB)	: 140 MHz
D_0	: 2.8187
G_{re}	: 2.4538
FBR	: 4.1810
AW (-3 dB)	: 74°
Hizalanma	: -3°

Yukarıda verilen sayısal sonuçlar ve grafiklerden, $S_{11} = -11.27 \text{ dB}$, $FBR = 4.1810$, $G_r = 2.4538$, $BW = 140 \text{ MHz}$, $Hizalama = -3^\circ$, Empedans $Z = 36.1 \angle^{24.9}$ ve Açısal Genişlik (AW) = 74° bu anten tipi için optimum tasarım olarak görünmektedir.

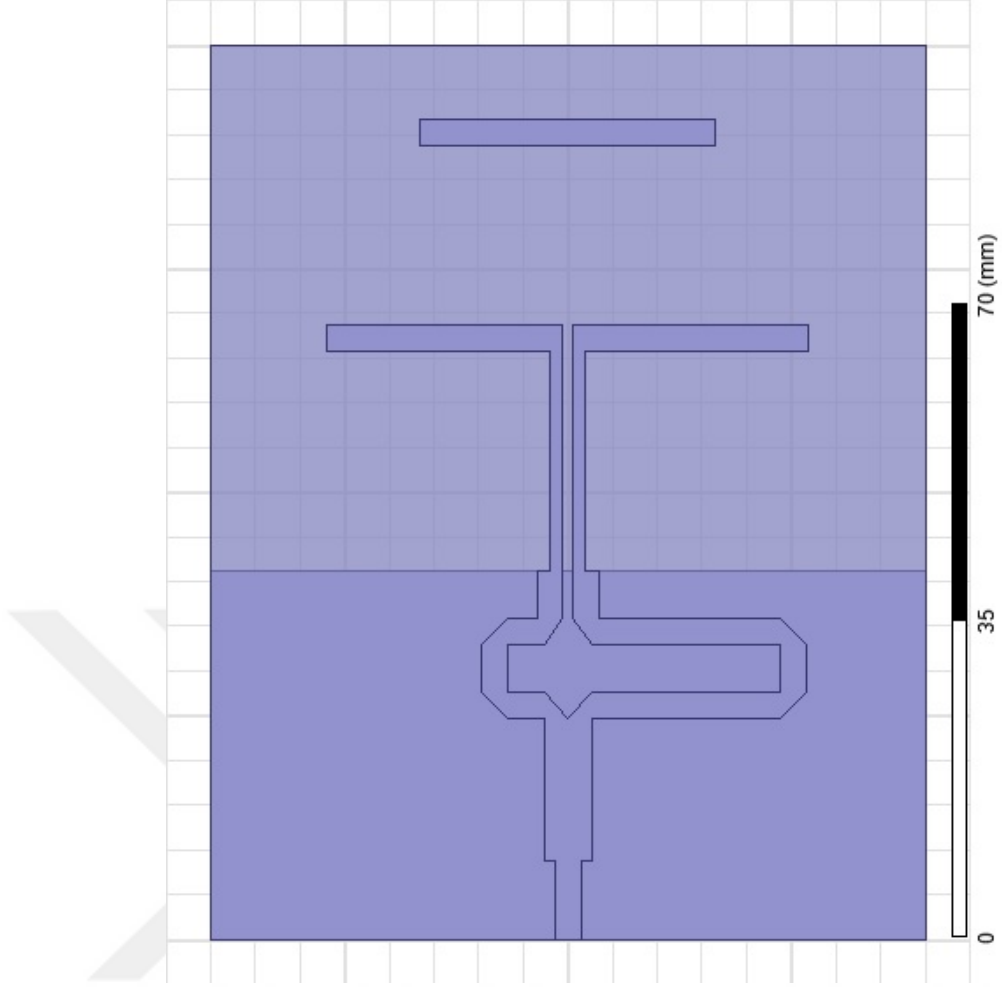
Bölüm 2'deki tanımlara ve Yagi dizisi ve alt tabaka PCB malzemesindeki fiziksel değişiklikler ve modifikasyonlar nedeniyle kazanç, ön-arka oranı, empedans ve yansıma katsayısı (S_{11}) parametreleri arasındaki etkileşime dayanarak, on taneden fazla düzenleme ve simülasyon uygulanmıştır. Örneğin, bir modifikasyon -14.77 dB gibi tatmin edici bir S_{11} sonucuna sahip olmasına rağmen, çok düşük 2.2185 FBR değerine sahiptir. Başka bir örnekte ise biraz daha fazla olan 4.2288 FBR değeri gösterirken, -10.69 dB S_{11} değeri ve empedans uyumu kötüdür.

Zaman kısıtları ve uygulanabilir anten boyutları uyarınca yapılabilecek deneyler, bu antenin kötü Z_{11} empedans uyumu, yetersiz geri S_{11} dönüş kaybı değeri, anten dizisindeki elemanların parazitik girişimleri ve yanlış DoA ölçümlerini önlemek için en az iki veya üç basamaklı uzunluk değerlerinde olması gereken ancak çok düşük

olan FBR gibi birçok eksiklikle tıklandığını göstermektedir. Bu nedenle anten tasarımının, hem boyutlar ve elde edilmesi gereken parametreler hem de Bluetooth anten gerekliliklerini karşılaması açısından daha ileri gitmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

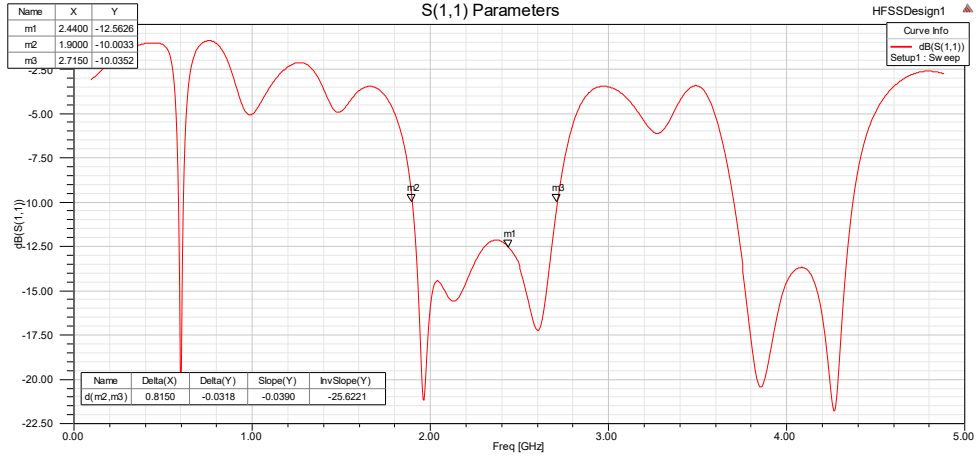
4.1.2. Üç Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten

Teknik doküman [23] dikkate alındığında, uygun anten yapısının yeterli uzunlukta tek uçlu bir besleme hattına sahip olması ve yine yeterli FBR ve anten kazancı sağlamak için bir balun içermesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu da yarı-Yagi (Quasi-Yagi) anten olarak adlandırılmaktadır. Önceki bölümde yapılan analiz dikkate alınarak ve [31]'deki gibi bir referans kaynağa göre ve [32]'de yapılan bir çalışmada tanımlanmış bazı tasarım ölçü ve tekniklerini uygulayarak, alt katmanda bir yansıtıcı, 100 mm x 80 mm x 1.6 mm ile daha büyük boyutlardaki bir PCB'nin üst katmanındaki bir yönlendirici ve dipol sürücüye ve eş düzlemli şerit hattına (CPS) bağlı bir balun elemanına sahip tek uçlu bir monopol doğrusal uzun besleme hattından oluşan üç elemanlı Yagi dizisine karar verildi. CPS'nin sağ tarafında toplam uzunluğu yaklaşık 53,32 mm olan balun, tek uçlu besleme hattının iki kolu ve dipol kolları arasında 180° faz kayması sağlar. Şekil 4.8 HFSS'de tasarlanan üç elemanlı tek uçlu YagiUda3_A şerit anteni göstermektedir.

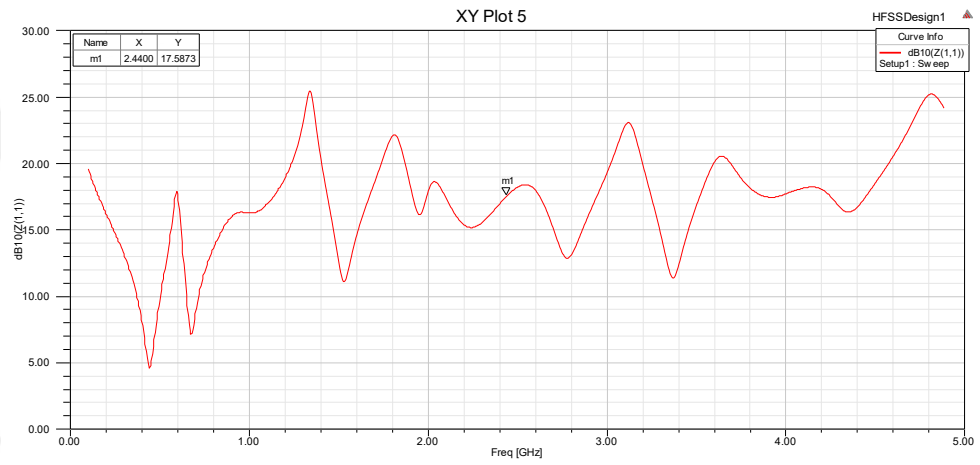


Şekil 4.8 HFSS’de Tasarlanan Üç Elemanlı Tek Uçlu YagiUda3_A

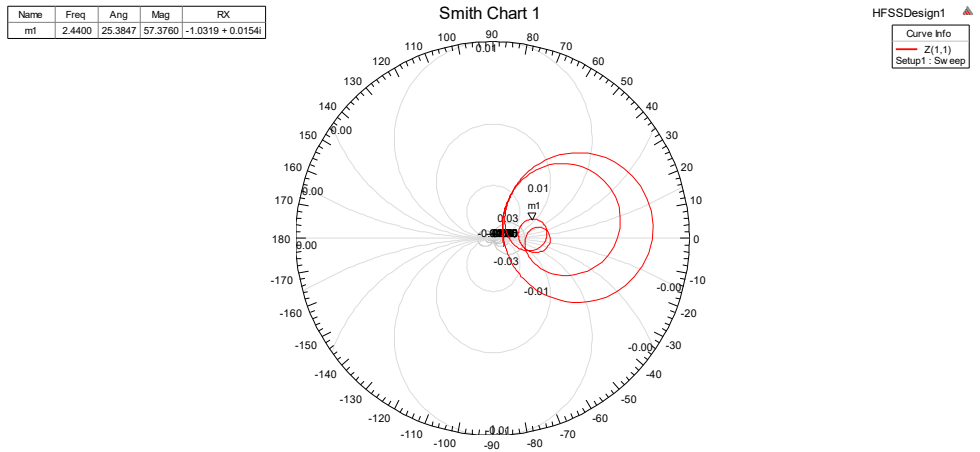
HFSS’den alınan sonuçlar bağlamında Şekil 4.9 üç elemanlı YagiUda3_A antenin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.10 antenin giriş empedansının frekansla değişimini, Şekil 4.11 Smith grafiğinde empedans büyüklüğü ve açısını, Şekil 4.12 toplam kazancın 3-B görüntüsünü, Şekil 4.13 mutlak kazanç ve gerçekleşen kazancı, Şekil 4.14 antenin XY düzleminde mutlak kazancını ve Şekil 4.15 ise 10 dB normalize gerçekleşen kazancı göstermektedir. Antenin HFSS parametreleri ise Şekil 4.16’da görülmektedir.



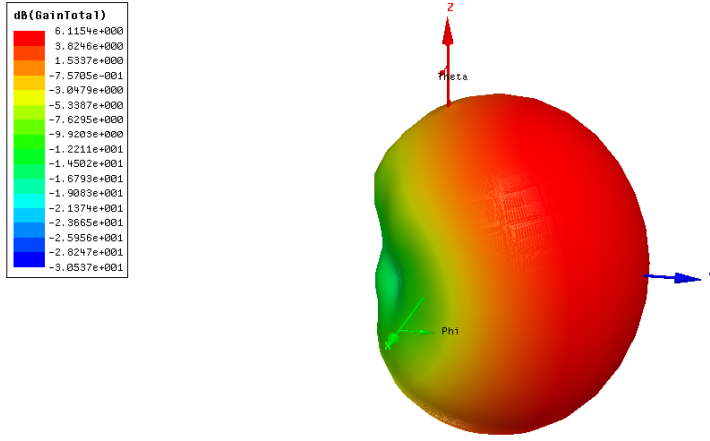
Şekil 4.9 Üç Elemanlı YagiUda3_A S_{11} Parametresi



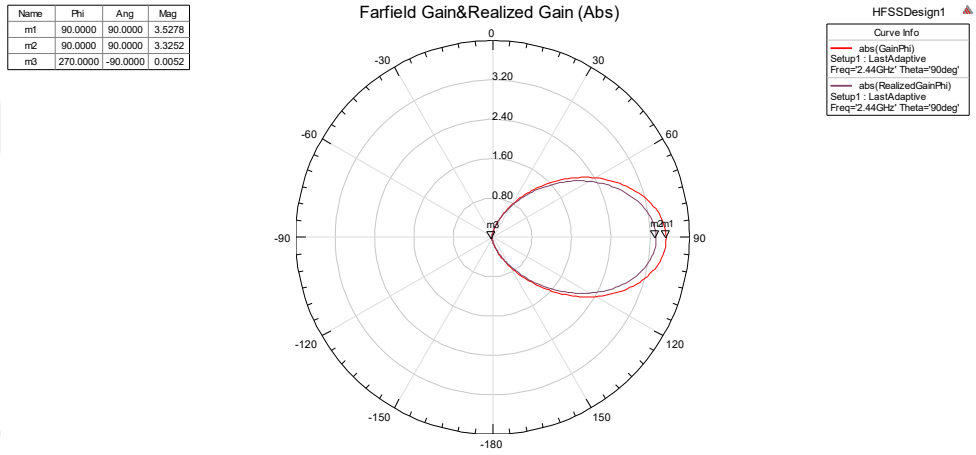
Şekil 4.10 YagiUda3_A Antenin 2.44 GHz'deki Giriş Empedansı



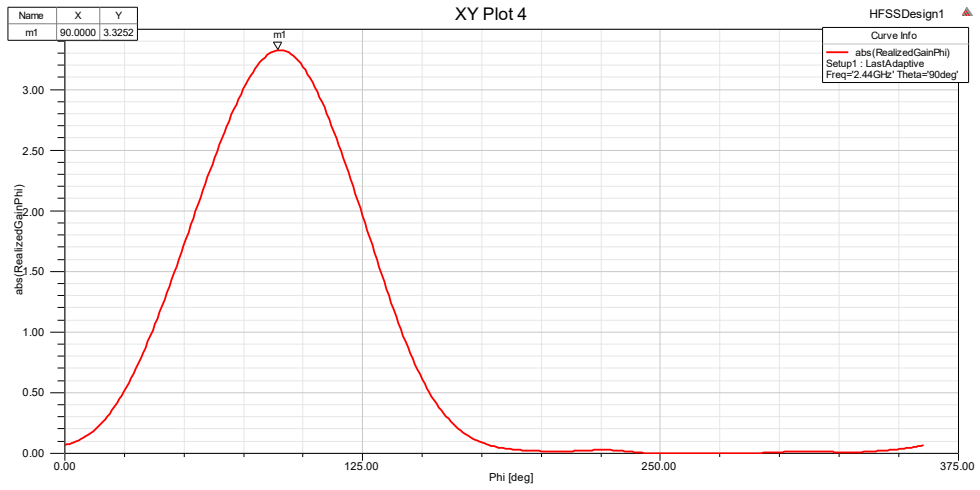
Şekil 4.11 YagiUda3_A'nın Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı



Şekil 4.12 YagiUda3_A Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü



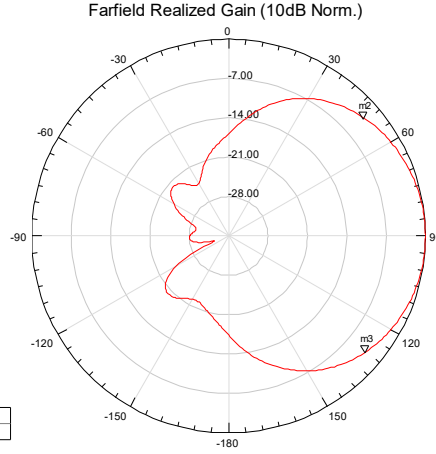
Şekil 4.13 YagiUda3_A Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı



Şekil 4.14 YagiUda3_A Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği

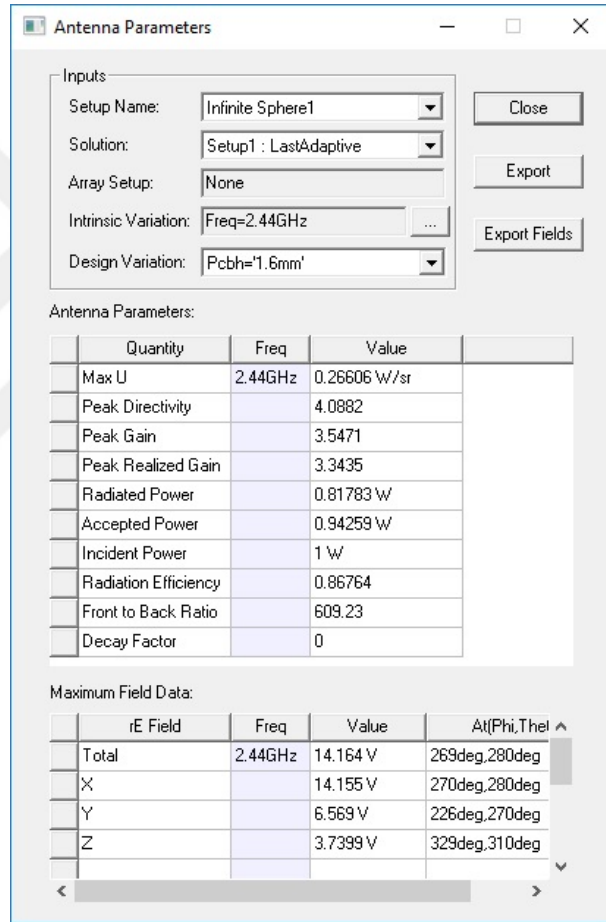
Name	Phi	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	0.0000
m2	49.0000	49.0000	-3.0222
m3	130.0000	130.0000	-3.0225

Name	Delta(Phi)	Delta(Ang)	Delta(Mag)
d(m2,m3)	81.0000	81.0000	-0.0002



Curve Info
dB10normalize(RealizedGainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz Theta=90deg

Şekil 4.15 YagiUda3_A Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı



Şekil 4.16 YagiUda3_A Antenin HFSS Parametreleri

Sonuçlar, 609'un üzerinde oldukça yüksek bir FBR değeri, yaklaşık $57.37^{25,38}$ Ohm anten giriş empedansı ve 0.2353 düzeyinde Γ yansıma katsayısıyla bir önceki antenden oldukça farklıdır. Ek olarak, beklendiği kadar yüksek olmasa da, yönlülük D_0 ve gerçekleşen kazanç G_{re} sırasıyla 4.0882 ve 3.3435 (5.2420 dBi) gibi biraz daha uygulanabilir değerlere sahiptir. Ancak bu kez bant genişliği, 830 MHz, kullanılacak

RF modülünün 83.5 MHz olan BW'sinden on kat daha geniştir ve sağlıklı bir iletişimin oluşması için olması beklenen aralık olan 200 ila 400 MHz anten bant genişliğinden en az iki kat daha yüksektir. Küçük fabrikasyon hataları göz önüne alınırsa mikroşerit yapısında meydana gelecek fiziki sapmalar sonucunda ortaya çıkacak çok dar bant genişliği iletişimde kesintilere neden olurken, çok geniş bant genişliği ise yakındaki diğer kanallardan gelecek diğer girişimcilerden ve gürültülerden etkilenme olasılığını artırır. Ancak iletişim kesintilerini veya durmalarını önlemek için çok dar bant genişliği yerine geniş bant genişliğini tercih etmek daha uygun olabilir. Geri dönüş kaybı -12.56 dB ile orta seviyede ve S_{11} parametresini gösteren grafiğin dalgalı şekli ve daha geniş bir BW ile önceki antenin V-şekilli grafiğinden açıkça farklı olduğu görülmektedir. Bu grafikte, 0.6 GHz, 3.85 GHz ve 4.25 GHz'de üç merkez frekans daha gözlemlenmekte ve antenin bu frekans noktalarından da parazit ve girişim sinyali alma olasılığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Tasarım ve simülasyonlara göre bu ekstra istenmeyen frekanslar, büyük olasılıkla balun eklentisi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, G_{re} , D_o , Z_{11} ve FBR gibi diğer beklenen parametreleri olumlu veya olumsuz etkileyecek olsa bile, 2,44 GHz merkez frekansının geri dönüş kaybı (S_{11}) parametresi ve bant genişliği (BW) iyileştirilme yönünde değiştirilmelidir. Bu ekstra frekansların S_{11} geri dönüş kaybı değerleri yok olmasa da eşit seviyede tutulması ya da 2,44 GHz merkez frekansının S_{11} değerinin biraz üzerine çıkarılması yararlı olacaktır. Bu noktada, ekstra frekans noktalarında ortaya çıkan yukarıdaki S_{11} değerlerinin etkilerine ek olarak, iyi bir empedans uyumu sağlamak için Z_{11} anten empedansı [23]'de 2.45 GHz'de 50 Ohm olarak tanımlanan BL yongasının giriş empedansına olabildiğince yakın olmalıdır. Tüm bunlara ek olarak, APPR algoritması kullanılarak derece cinsinden DoA ölçümünün çözünürlüğünün ve hassasiyetinin arttığını göstermek için, bu anten ve izleyen bölümlerdeki diğer antenlerin yönlülüğü (D_o) ve dolayısıyla gerçekleşen kazancı (G_{re}) giderek artırılarak anten parametreleri ve davranışları karşılaştırılacaktır. Bununla birlikte, sonraki bölümlerde tasarlanacak PCB antenlere büyük tasarım kolaylığı ve doğruluğu sağlayacak olan ve simülasyon sonuçlarına ve gözlemlere göre antenin tüm fiziki ölçü değişikliklerine karşın elektriksel ve elektromanyetik davranış değişimini gösteren tasarım notları Tablo 4.1'de listelenmiştir.

Tablo 4.1 Anten Fiziksel Değişimleri ve Elektriksel Parametre Yanıtları

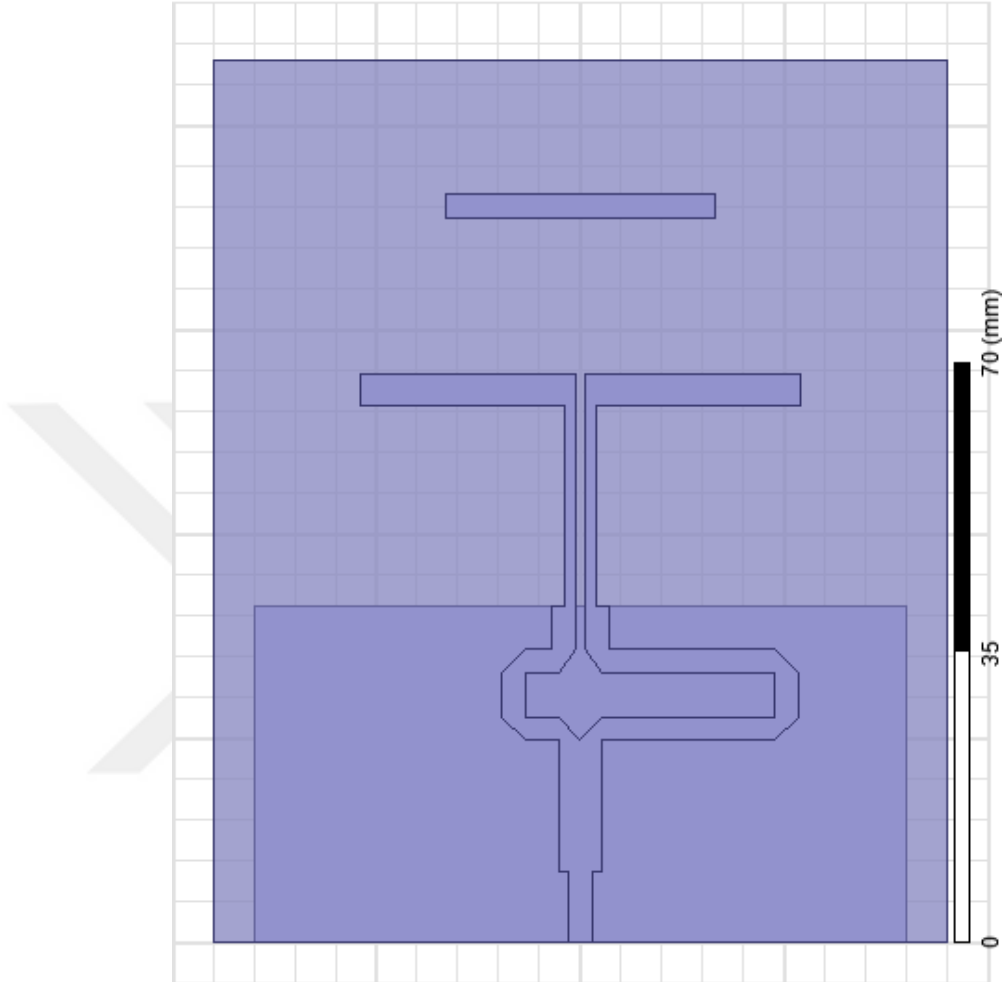
Artış	Artış	Azalış
PCB Genişlik (X)	$FBR - Z_o$	$FBR - Z_o$
PCB Uzunluk (Y)	$FBR - D_o - G_{re} - S_{11} - Z_o$	$FBR - Z_o$
PCB Kalınlık (h)	$Z_o - FBR - S_{11} - D_o - G_{re}$	$f_o - FBR - S_{11} - D_o - G_{re}$
PCB Bakır Kalınlığı	S_{11}	
Yansıtıcı Uzunluğu	$Z_o - f_o - D_o - G_{re}$	$FBR - S_{11}$
Yansıtıcı Kalınlığı	$FBR - f_o - S_{11} - Z_o$	$D_o - G_{re}$
Yansıtıcı Sürücü Aralığı	$FBR - f_o - S_{11} - D_o - G_{re}$	S_{11}
Sürücü Uzunluğu	$FBR - S_{11}$	f_o
Sürücü Kalınlığı	$FBR - S_{11} - D_o - G_{re}$	$f_o - Z_o$
Besleyici Uzunluğu	$FBR - S_{11}$	f_o
Besleyici Kalınlığı	$S_{11} - Z_o$	$FBR - D_o - G_{re}$
Yönlendirici Uzunluğu	$FBR - D_o - Z_o - f_o - S_{11} - G_{re}$	$FBR - f_o - S_{11} - D_o - G_{re}$
Yönlendirici Kalınlığı	$FBR - D_o - S_{11} - G_{re} - Z_o$	$f_o - FBR$
Yönlendirici Yönlendirici Aralığı	$FBR - f_o - S_{11} - Z_o$	$S_{11} - Z_o$
Yönlendirici Sürücü Aralığı	$FBR - D_o - G_{re} - f_o$	$f_o - S_{11}$

Fiziksel azalmalar dikkate alındığında parametrelerin değerlerinde tam tersi değişimler meydana gelmektedir. Tablonun “Yönlendirici Uzunluğu” satırındaki f_o gibi bazı parametreler ise aynı fiziksel değişim yönünde hem pozitif hem de negatif olarak elektriksel değişim göstermektedir. Kalın harflerle yazılı parametreler önemli değişim ve etkiyi, diğerleri orta ya da zayıf etkileri, yazılmayan parametreler ise ihmal edilebilir ya da hiç etki olmadığını göstermektedir. Ayrıca, fiziksel değişimler ve parametrelerin yanıtları arasındaki ilişkiler, diğer farklı iletken veya PCB alt tabakası ve ışıma ortamı koşullarında geçerli olmayabilir.

4.1.3. Geliştirilmiş Üç Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten

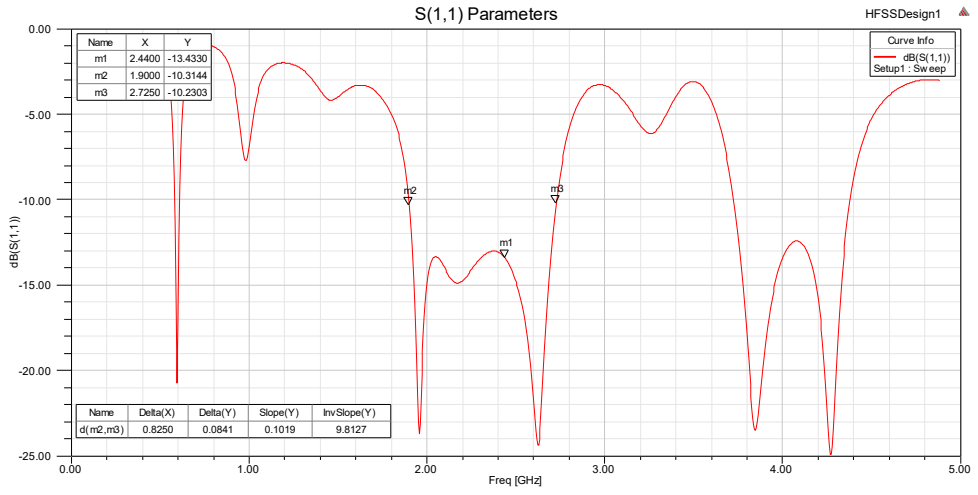
Bir önceki Yagi anten tasarımı için bakır elemanlar ve PCB tabaka malzemesinde adım adım yapılan birçok yeni fiziksel değişiklik ve simülasyondan sonra, FBR , S_{11} , Z_{11} , G_{re} ve D_o parametrelerinde yeni değerler elde edilmiştir. İlk parametre olarak Z_{11} anten giriş empedansı anten dipol sürücü kalınlığının 3 mm’den 4 mm’ye çıkarılmasıyla $57 \angle^{25}$ Ohm’dan $50.03 \angle^{24.04}$ ohm’a getirilerek empedansın rezistif değeri artırılmış reaktans değeri düşürülmüş ve önceki antene göre daha iyi bir empedans eşleşmesi sağlanmıştır. İkinci olarak, PCB tabaka boyutları 108 mm x 90 mm’ye genişletilmiş, bunun sonucunda FBR yaklaşık 2958 gibi çok yüksek bir değere ulaşmış, yansıma katsayısı $\Gamma = 0.2129$ ve S_{11} değeri -13.43 dB düzeyine, bant

genişliği 0.825 GHz'e ve yönlülük D_o 4.3622 ve anten kazancı G_{re} ise 3.583 (5.5424 dBi) gibi ayırt edilir bir değere gelmiştir. şekil 4.17 iyileştirilmiş YagiUda3_C anten HFSS modelini göstermektedir.

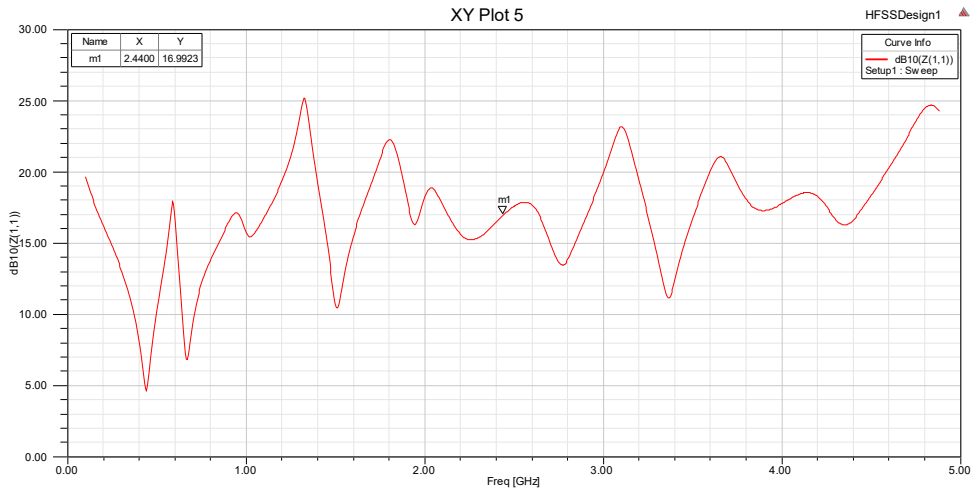


şekil 4.17 İyileştirilmiş YagiUda3_C HFSS Modeli

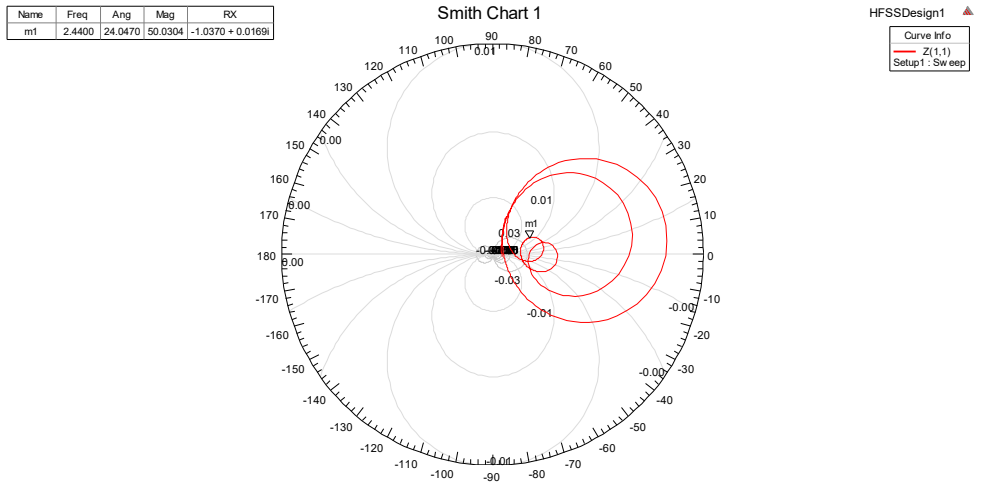
HFSS'den alınan sonuçlar bağlamında şekil 4.18  elemanlı YagiUda3_C antenin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, şekil 4.19 antenin giriş empedansının frekansla değişimini, şekil 4.20 Smith grafiğinde empedans büyüklüğü ve açısını, şekil 4.21 toplam kazancı 3-B görüntüsünü, şekil 4.22 mutlak kazanç ve gerçekleşen kazancı, şekil 4.23 antenin XY düzleminde mutlak kazancı ve şekil 4.24 ise 10 dB normalize gerçekleşen kazancı göstermektedir. Antenin HFSS parametreleri ise şekil 4.25'de görülmektedir.



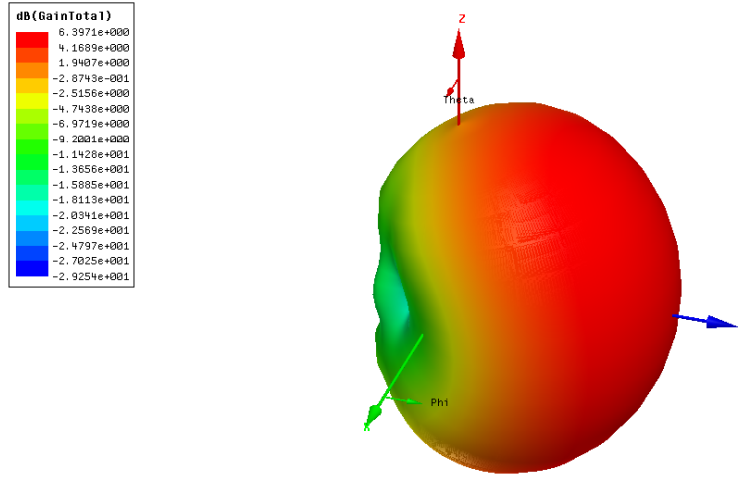
Şekil 4.18 YagiUda3_C S₁₁ Parametresi



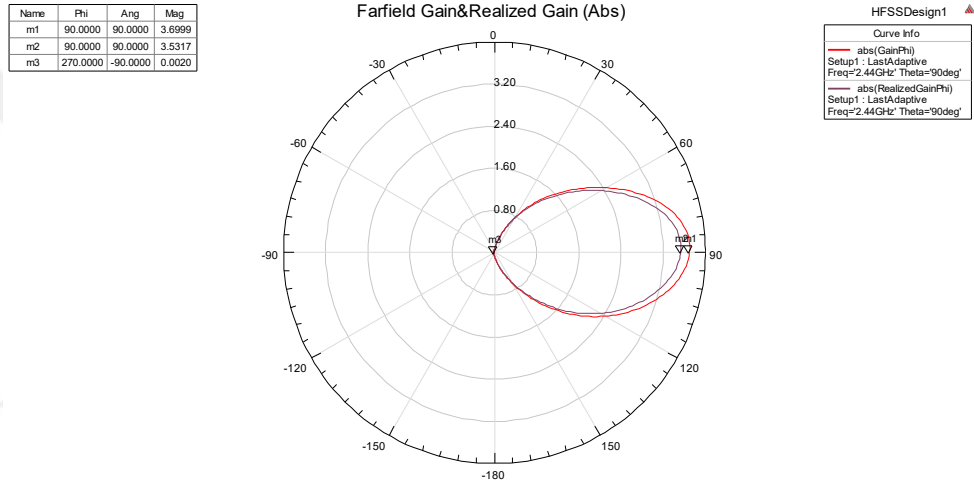
Şekil 4.19 YagiUda3_C Antenin 2.44 GHz'deki Giriş Empedansı



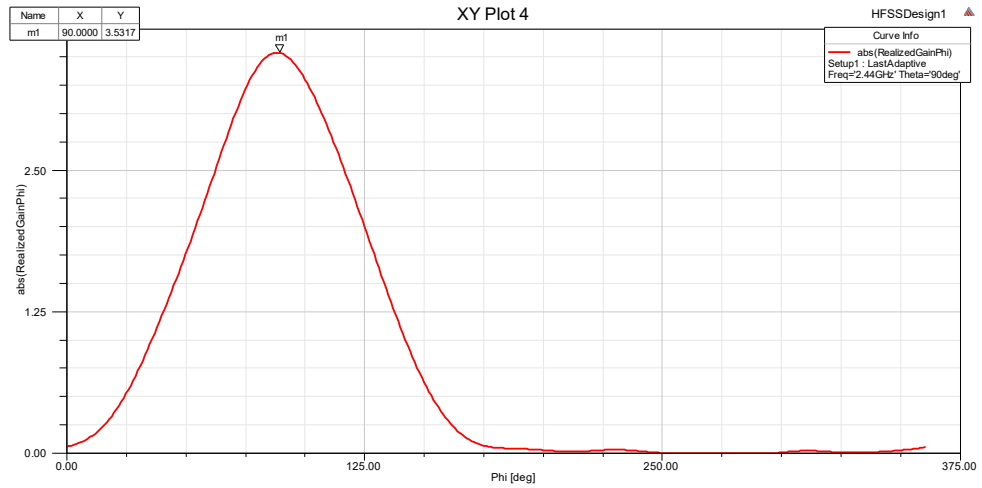
Şekil 4.20 YagiUda3_C'nın Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı



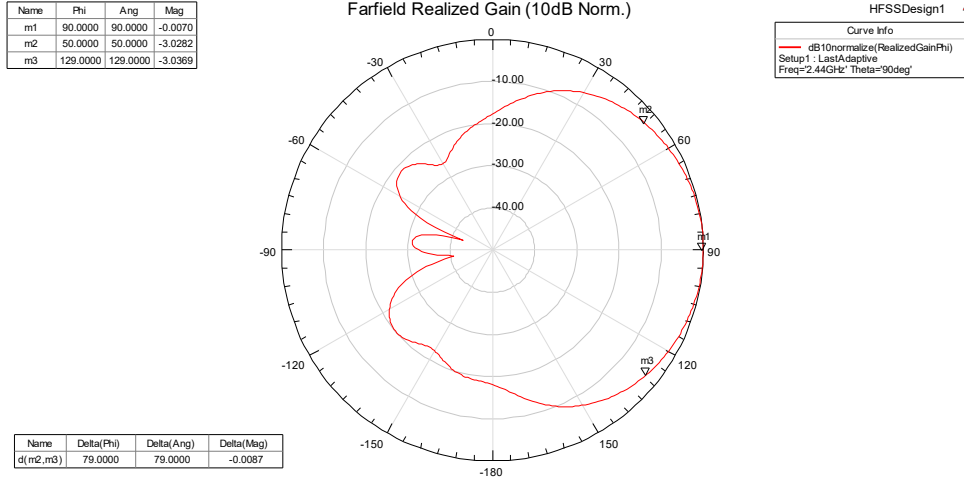
Şekil 4.21 YagiUda3_C Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü



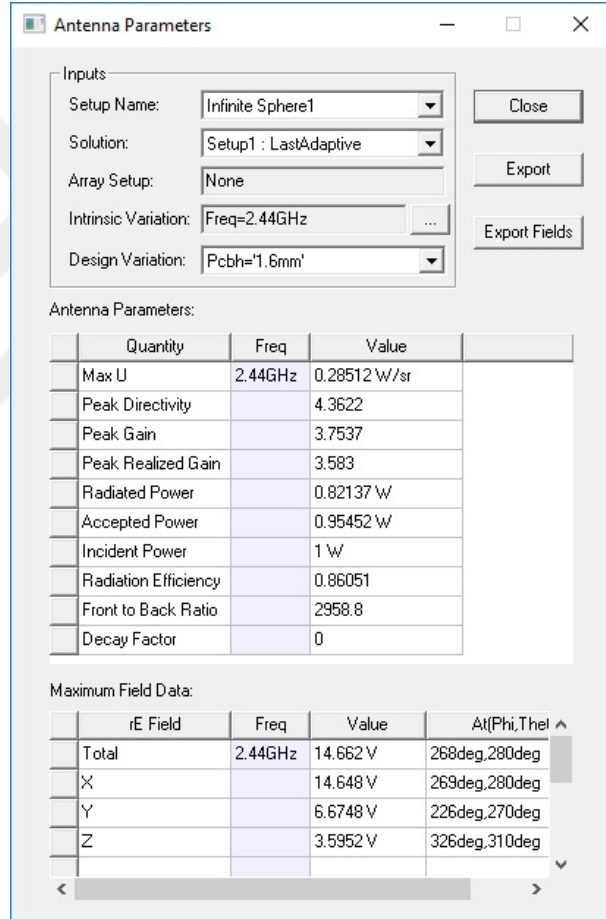
Şekil 4.22 YagiUda3_C Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı



Şekil 4.23 YagiUda3_C Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği



Şekil 4.24 YagiUda3_C Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı



Şekil 4.25 YagiUda3_C Antenin HFSS Parametreleri

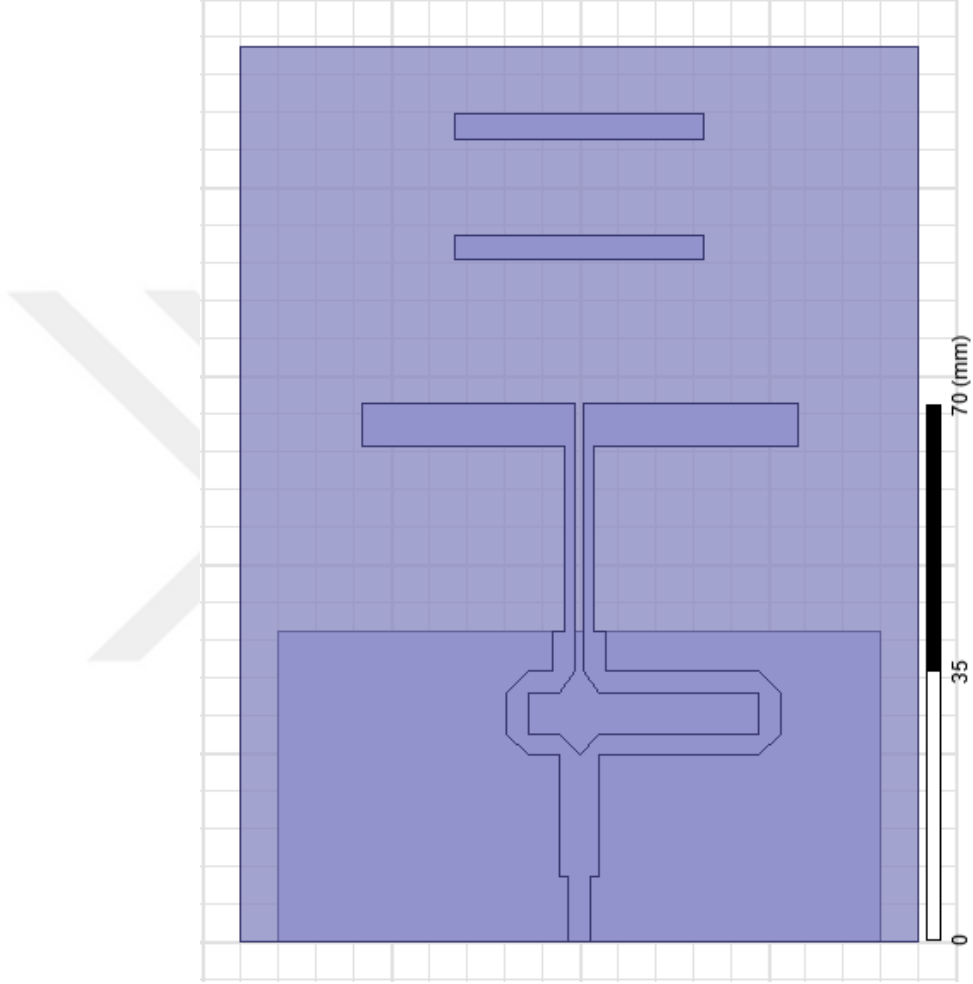
Elde edilen değerlerde, özellikle FBR açısından son modifikasyonun sonuçlarından oldukça farklı bir değer ve G_{re} kazancı, D_o yönlülüğü ve AW açışılığında da bir miktar değışiklik olduğu görünmektedir. Bölüm 4.1.2'deki ilk tek uçlu üç elemanlı anten tasarımı ve Tablo 4.1'deki sonuç çıkarımları gözden geçirilerek yapılan ikinci modifikasyonlar, neredeyse mükemmel bir tek yönlü uçtan ışışyan Yagi anten elemanı

sağlamıştır. Bu anten, çok yüksek (~ 3000) FBR değeri sayesinde UCA dairesel dizisinin diğer anten elemanları arasındaki girişim ve parazitik etkileri önleyen düzgün dairesel yapısına son derece uygundur. Buna ek olarak, yönlülük ve kazançta küçük bir artış olmasına rağmen, ana demetin 79° yarı güç ışıma genişliğinin (HPBW) daha dar olması ve sağ ve sol taraftaki komşu anten elemanlarının güç kazancı örüntüleri oranı ile APPR algoritmasında biraz daha fazla çözünürlük gösterecektir. Ancak, APPR algoritması kullanılarak doğrusal regresyon (LR) ile DoA açısı hesaplamasının anlatıldığı bölümlerde bu kaba açı çözünürlüğü ile bir DoA sisteminin olağan verimlilikte çalıştırılmasının yeterli olmadığı görülecektir. Bu nedenle, dört elemanlı bir Yagi anten yapısı kullanılarak yönlendirici sayısını birden ikiye çıkarmak, daha iyi açı hesaplamaları ve çözünürlük sağlamak için yönlülüğü ve anten kazancını artıracaktır.

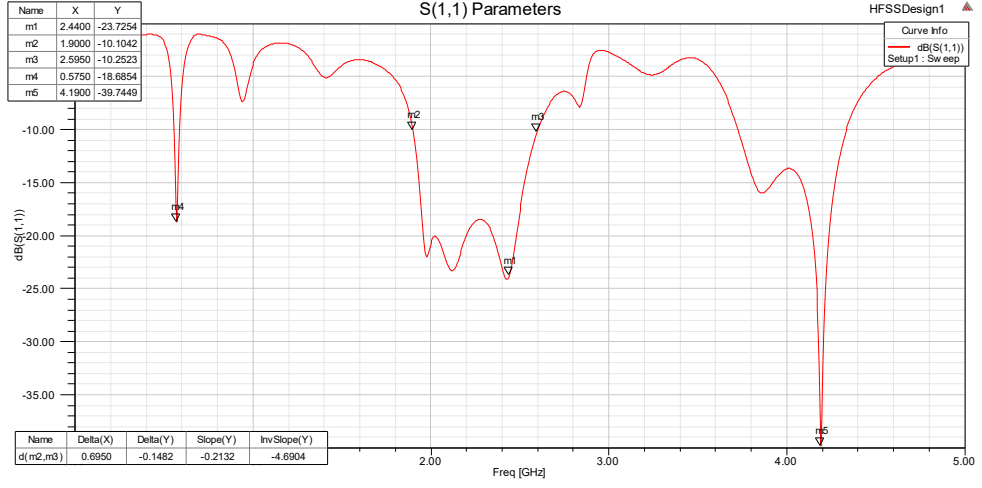
4.1.4. Dört Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten

Bu aşamada, daha ileri giderek ve yönlendirici eleman sayısını 2'ye çıkararak, yeni tasarımın daha fazla yönlülük ile daha yüksek anten kazancı sağlayacak dört elemanlı bir anten olması sağlanacaktır. Dört elemanlı antene ikinci bir yönlendirici eklemenin yanı sıra, fiziksel revizyonlarla PCB alt tabakası 118.7 mm x 90 mm x 1.6 mm, dipol sürücü 5.7 mm x 57.8 mm ve her iki yönlendirici eleman 3.3 mm x 33.14 mm olarak belirlenmiştir. İkinci yönlendiricinin eklenmesi önce anten uzunluğunu artırmış ve önceki anten parametrelerinin sağlanan değerlerini bazı olumsuz değerlere getirmiştir. Ancak kontrollü fiziksel değişiklikler ve iyileştirmeler üç elemanlı antene göre daha iyi simülasyon sonuçları elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.26 iyileştirilmiş YagiUda4_J anten HFSS modelini göstermektedir. HFSS'den alınan sonuçlar bağlamında Şekil 4.27 üç elemanlı YagiUda4_J antenin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.28 antenin giriş empedansının frekansla değişimini, Şekil 4.29 Smith grafiğinde empedans büyüklüğü ve açısını, Şekil 4.30 toplam kazancın 3-B görüntüsünü, Şekil 4.31 mutlak kazanç ve gerçekleşen kazancı, Şekil 4.32 antenin XY düzleminde mutlak kazancını ve Şekil 4.33 ise 10 dB normalize gerçekleşen kazancı göstermektedir. Antenin HFSS parametreleri ise Şekil 4.34'de görülmektedir. Grafiklerdeki sonuçlardan, $\Gamma = 0.065$ yansıma katsayısıyla S_{11} geri dönüş kaybının -23.72 dB gibi iyi bir değere ulaştığı, ancak 4.2 GHz'de -40 dB civarında başka bir geri dönüş kaybının görüldüğü, $53.9 \angle^{-6.08}$ ile yeterli bir Z_{11} empedans eşleşmesi gerçekleştiği, anten ön-arka oranının 63.8 gibi ortalama bir

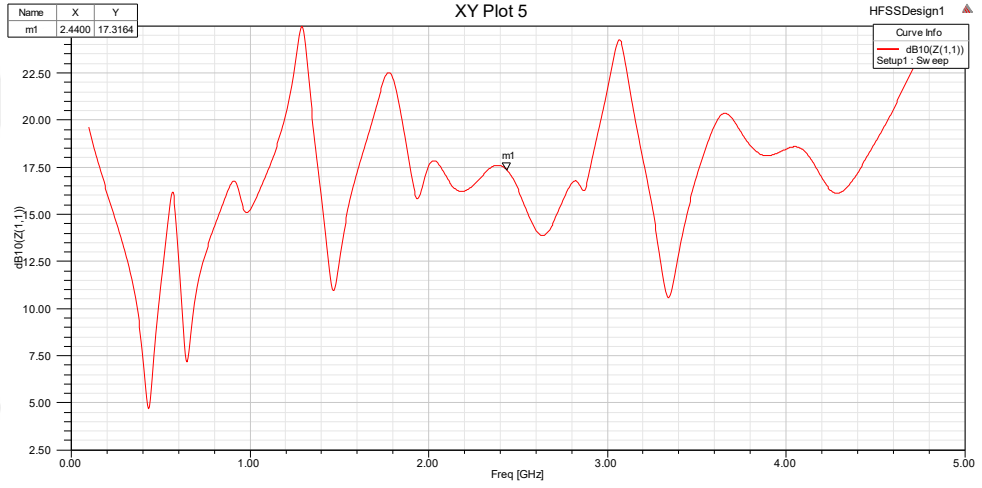
değere indiği, bant genişliğinin (BW) 130 MHz azalarak 695 MHz gibi bir değere kadar önemli ölçüde daraldığı, yönlülüğün (D_o) 5.25'e ve anten kazancının (G_{re}) 4.4627'ye (6.4959 dBi) arttığı görülecektir. Bu iyileştirmelerin daha dar bir anten güç kazanç örüntüsü ve sonuç olarak APPR algoritmasında biraz daha fazla açılı çözünürlüğü hesaplaması sağlayacağı öngörülmektedir.



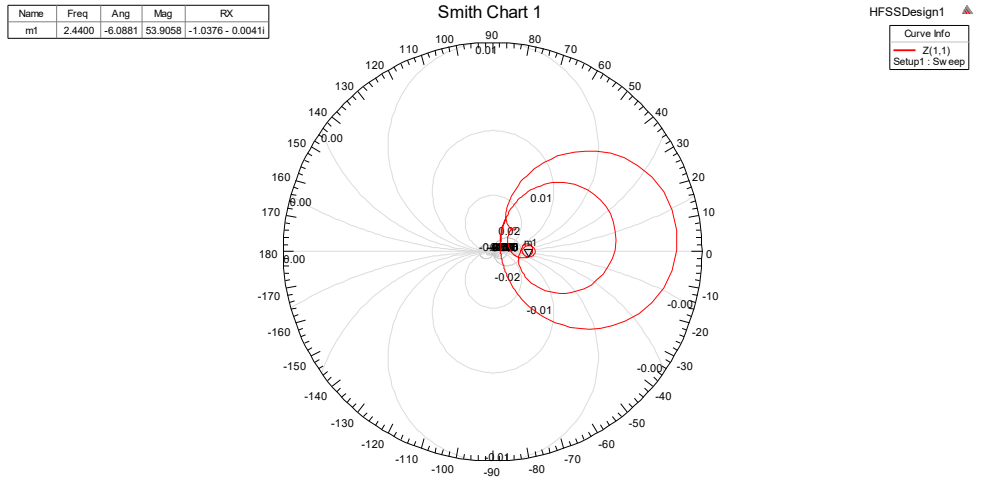
Şekil 4.26 İyileştirilmiş YagiUda4_J HFSS Modeli



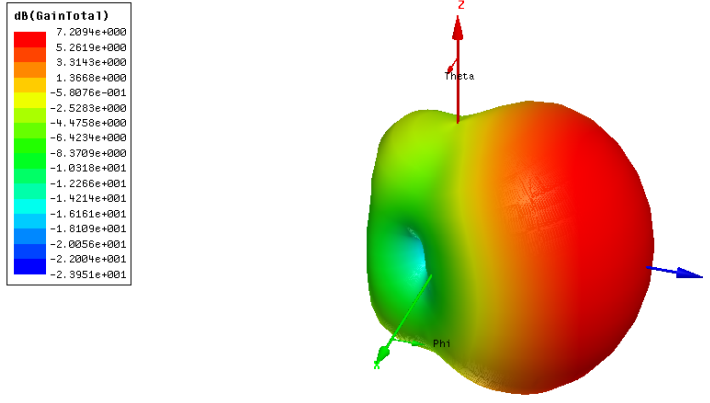
Şekil 4.27 YagiUda4_J S₁₁ Parametresi



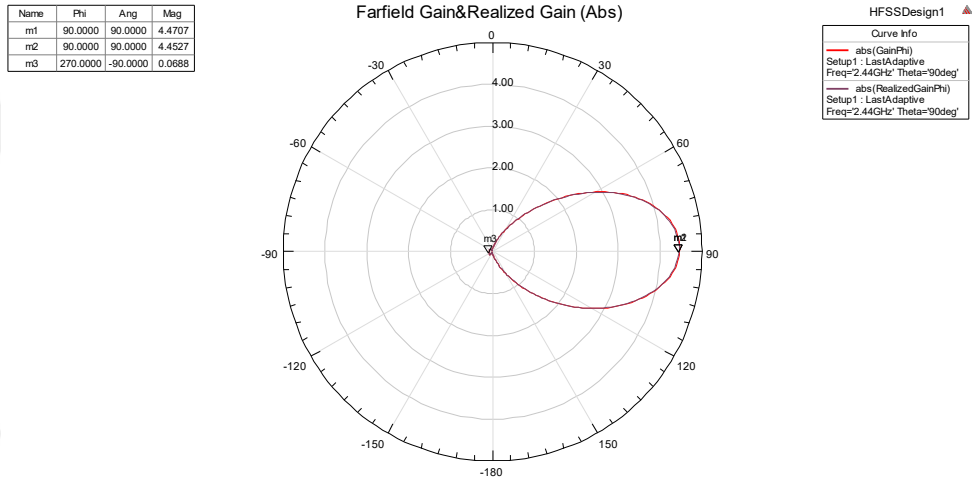
Şekil 4.28 YagiUda4_J Antenin 2.44 GHz'deki Giriş Empedansı



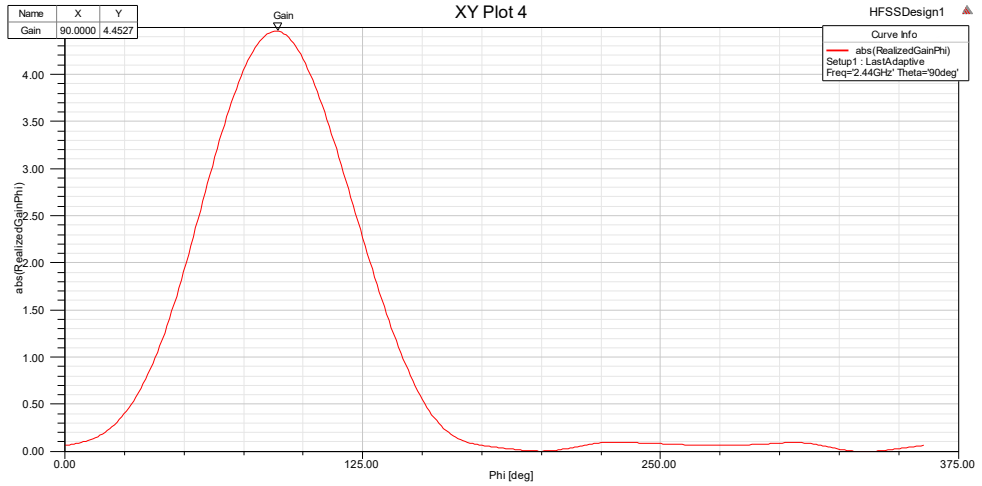
Şekil 4.29 YagiUda4_J'nin Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı



Şekil 4.30 YagiUda4_J Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü



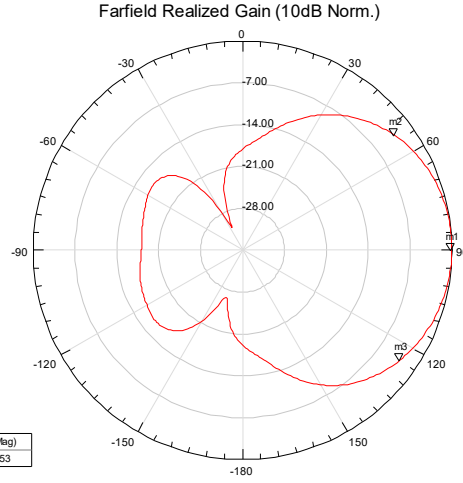
Şekil 4.31 YagiUda4_J Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı



Şekil 4.32 YagiUda4_J Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği

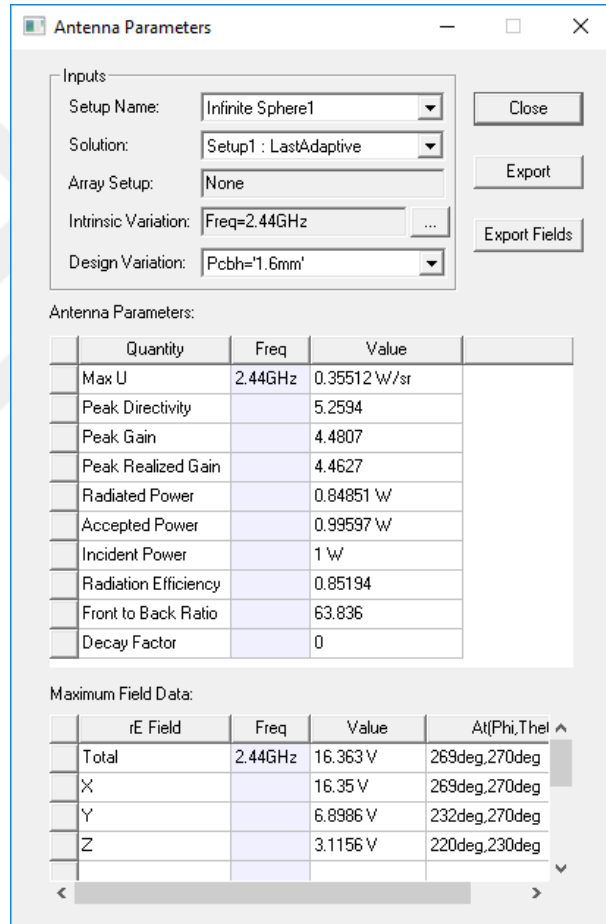
Name	Phi	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	-0.0037
m2	53.0000	53.0000	-3.0949
m3	125.0000	125.0000	-2.9296

Name	Delta(Phi)	Delta(Ang)	Delta(Mag)
d(m2,m3)	72.0000	72.0000	0.1653



Curve Info
dB10normalize(RealizedGainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz; Theta=90deg

Şekil 4.33 YagiUda4_J Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı

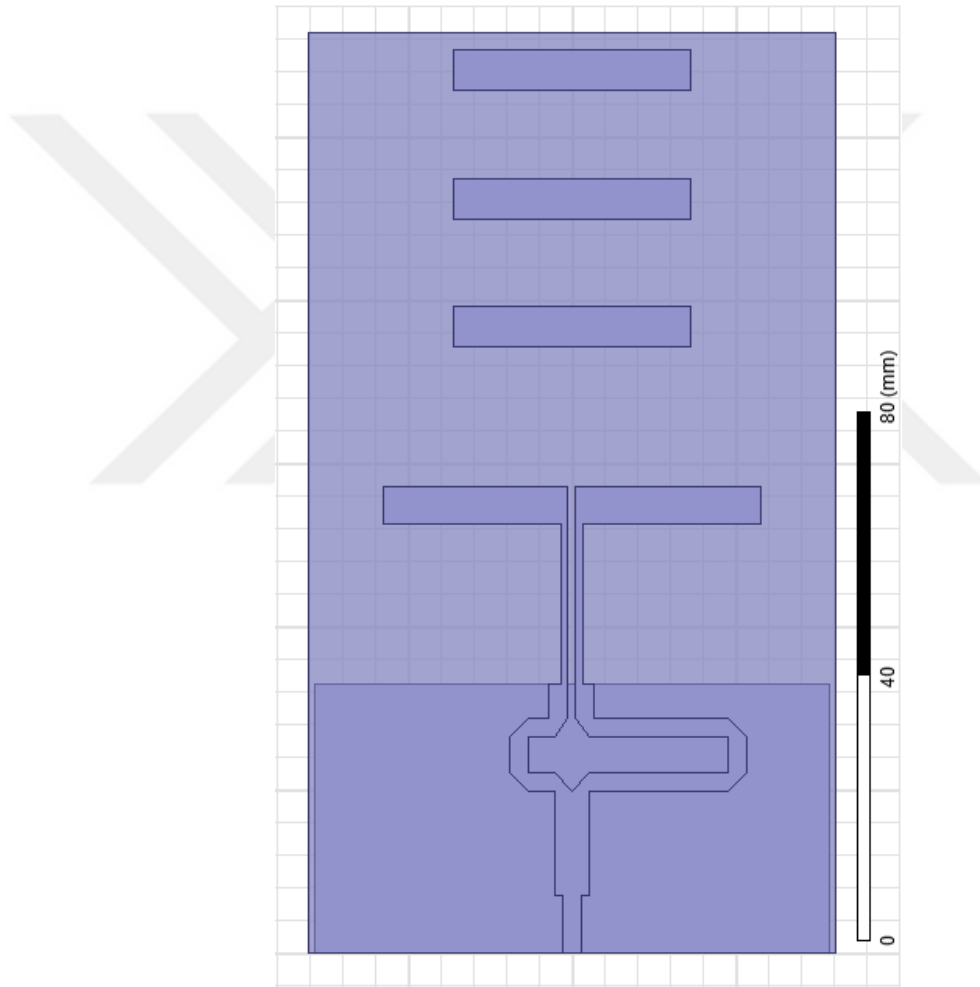


Şekil 4.34 YagiUda4_J Antenin HFSS Parametreleri

Bazı parametreler iyi seviyelere ulaşmış olsa da, anten kazancı, bant genişliği ve ön-arka oranı gibi diğer parametrelerin çözünürlük karşılaştırması için bir sonraki antende biraz daha iyileştirilmesi gerekir.

4.1.5. Beş Elemanlı Tek Uçlu Mikroşerit Yagi Anten

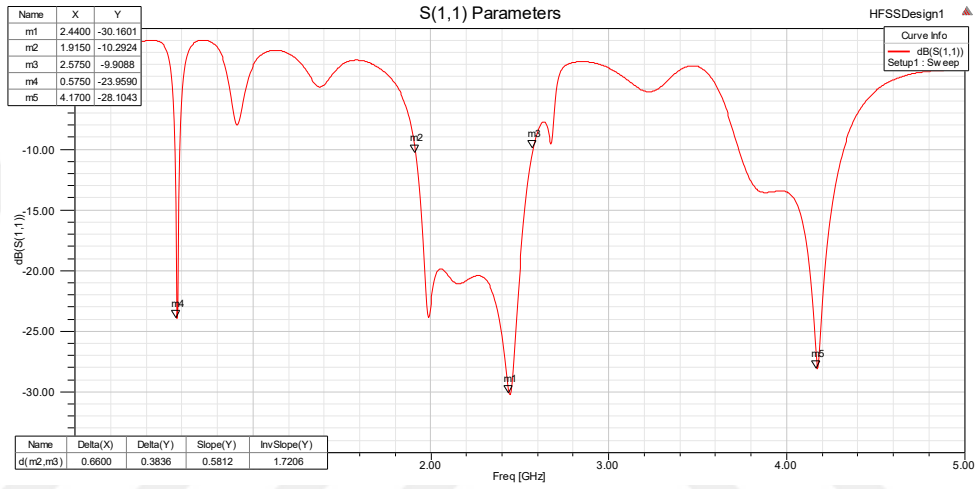
Bir önceki dört elemanlı anten modeli, HFSS simülasyon programında test edilerek orta ve iyi seviyelerde parametreler üretmiştir. Ancak üçüncü bir yönlendirici ile beş elemandan oluşan ve x 141 mm x 80.6 mm x 1.6 mm'lik PCB kart ölçüleri, dipol sürücü boyutları 5.8 mm x 57.6 mm ve birbirine eşit her üç yönlendirici eleman boyutları 6.2 mm x 36.2 mm olan anten tasarımı dört elemanlı anten tasarımından 0.94 cm daha dar ancak 2.23 cm daha uzun olmasına karşın simülasyonlarda çok daha iyi performans göstermiştir.



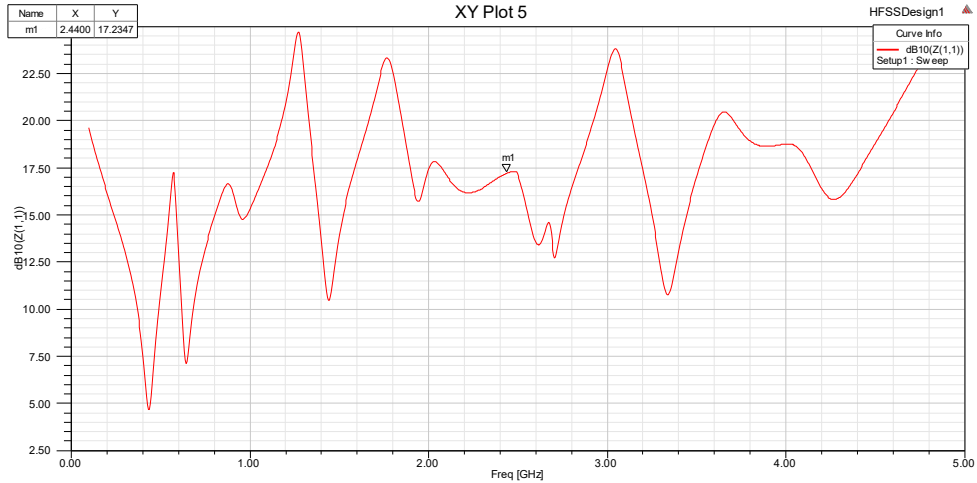
Şekil 4.35 Beş Elemanlı YagiUda5_J HFSS Modeli

Şekil 4.35 iyileştirilmiş YagiUda5_J anten HFSS modelini göstermektedir. HFSS'den alınan sonuçlar bağlamında Şekil 4.36 üç elemanlı YagiUda5_J antenin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.37 antenin giriş empedansının frekansla değişimini, Şekil 4.38 Smith grafiğinde empedans büyüklüğü ve açısını, Şekil 4.39 toplam kazancın 3-B görüntüsünü, Şekil 4.40 mutlak kazanç ve

gerçekleşen kazancı, Şekil 4.41 antenin XY düzleminde mutlak kazancını ve Şekil 4.42 ise 10 dB normalize gerçekleşen kazancı göstermektedir. Antenin HFSS parametreleri ise Şekil 4.43’de görülmektedir. Beş elemanlı anten tasarımıyla, önceki tasarımlara oranla biraz büyütülmüş olsa da, birçok denemeden sonra yönlülük $D_0 = 8.54$, kazanç $G_{re} = 6.9673$ (8.4306 dBi), empedans değeri $Z_{11} = 52.9\angle^{1.48}$, yansıma katsayısı $\Gamma = 0.031$, geri dönüş kaybı $S_{11} = -30.16$ dB, ön-arka oranı FBR = 825 ve bant genişliği BW = 660 MHz parametreleri açısından daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

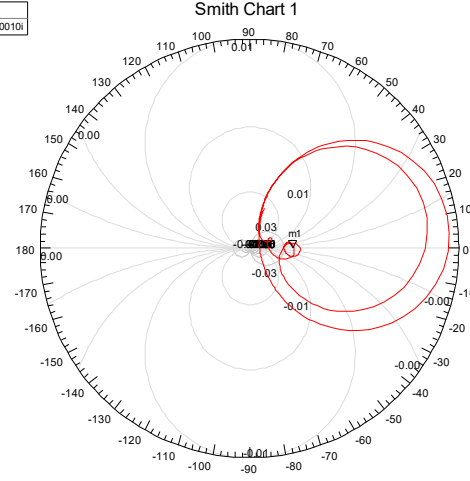


Şekil 4.36 YagiUda5_J S₁₁ Parametresi



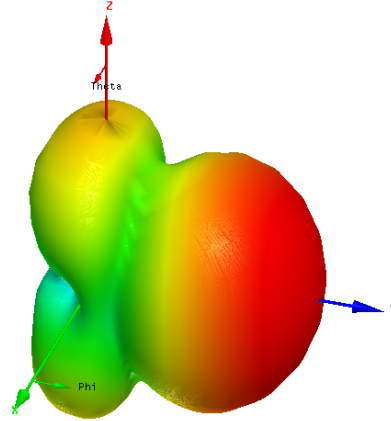
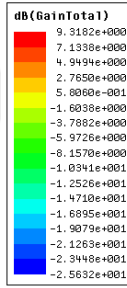
Şekil 4.37 YagiUda5_J Antenin 2.44 GHz’deki Giriş Empedansı

Name	Freq	Ang	Mag	RX
m1	2.4400	1.4866	52.9023	-1.0385 + 0.0010j



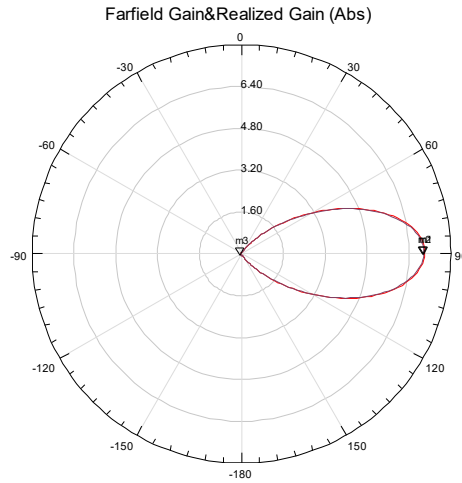
Curve Info
Z(1,1)
Setup1 : Sweep

Şekil 4.38 YagiUda5_J'nin Smith Grafiğinde Empedans Büyüklüğü ve Açısı



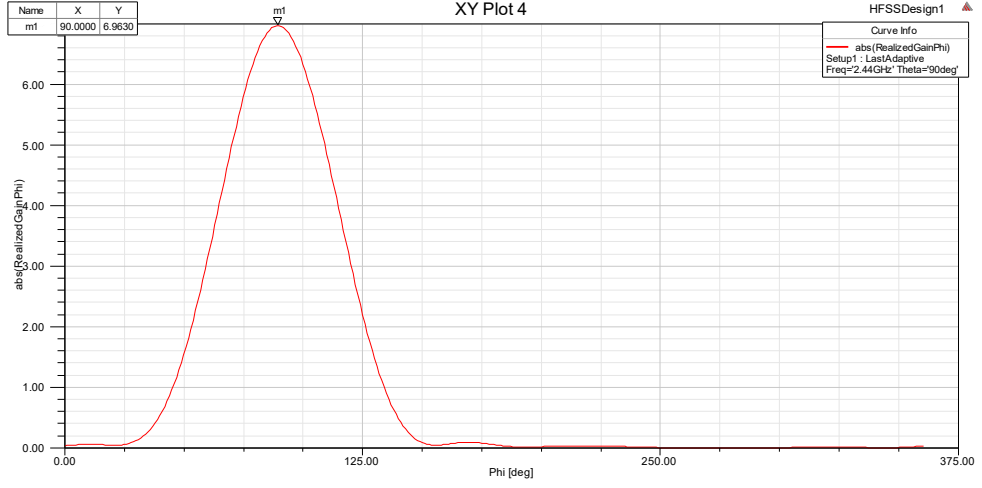
Şekil 4.39 YagiUda5_J Antenin Toplam Kazancının 3-B Görünümü

Name	Phi	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.0098
m2	90.0000	90.0000	6.9630
m3	270.0000	-90.0000	0.0075

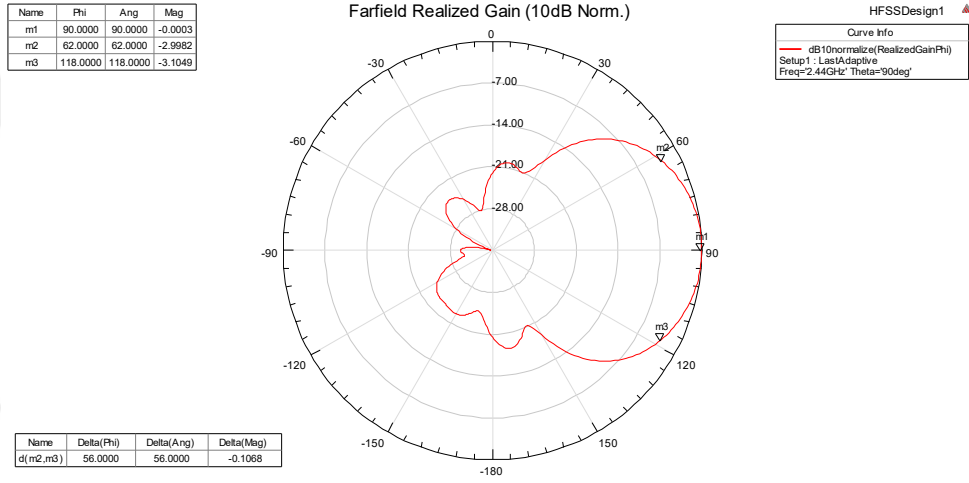


Curve Info
abs(GainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz* Theta=90deg
abs(RealizedGainPhi)
Setup1 : LastAdaptive
Freq=2.44GHz* Theta=90deg

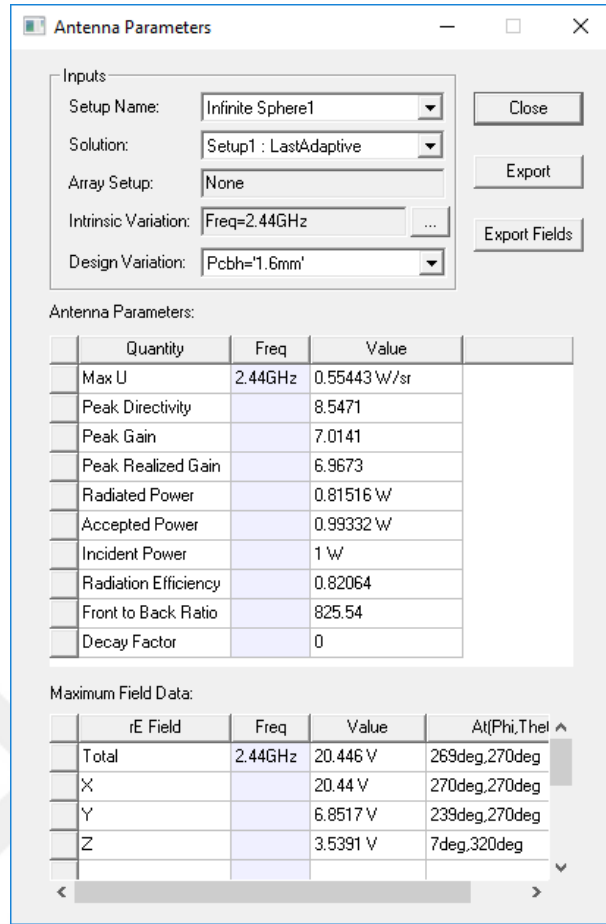
Şekil 4.40 YagiUda5_J Antenin Mutlak Kazancı ve Gerçekleşen Kazancı



Şekil 4.41 YagiUda5_J Antenin XY Düzleminde Mutlak Kazanç Grafiği



Şekil 4.42 YagiUda5_J Antenin 10 dB Normalize Gerçekleşen Kazancı

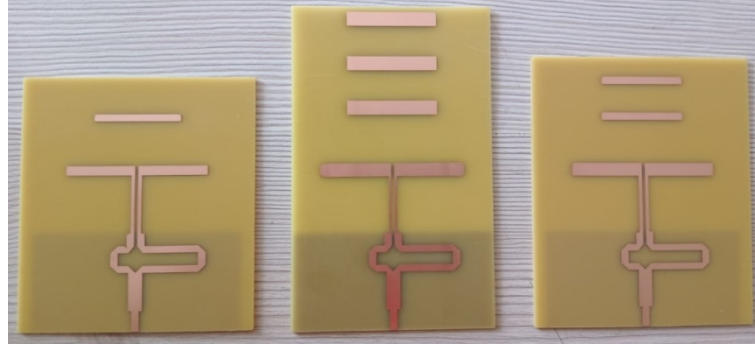


Şekil 4.43 YagiUda5_J Antenin HFSS Parametreleri

Önceki anten tasarım örnekleriyle karşılaştırıldığında, beş elemanlı mikroşerit Yagi antenin, ilerleyen bölümlerde yapılacak deneylerde APPR algoritmasından elde edilecek DoA çözünürlüğü açısından en iyi performansı göstermesi beklenmektedir.

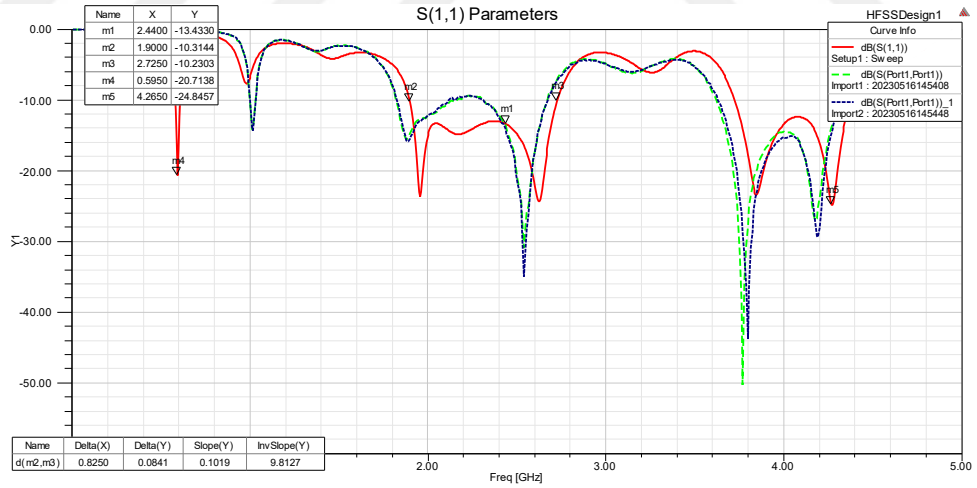
4.2. Tasarlanan ve PCB Antenlerin Karşılaştırılması ve Doğrulanması

Simülasyon sonuçlarıyla üretilen PCB antenlerin S_{11} ve Z_{11} değerlerini karşılaştırmak ve doğrulamak amacıyla, parametreler bir RF spektrum analizörü yardımıyla ölçülmüştür. Üretilen YagiUda3_C, YagiUda5_J, YagiUda4_J Mikroşerit anten PCB'leri Şekil 4.44'de gösterilmiştir.

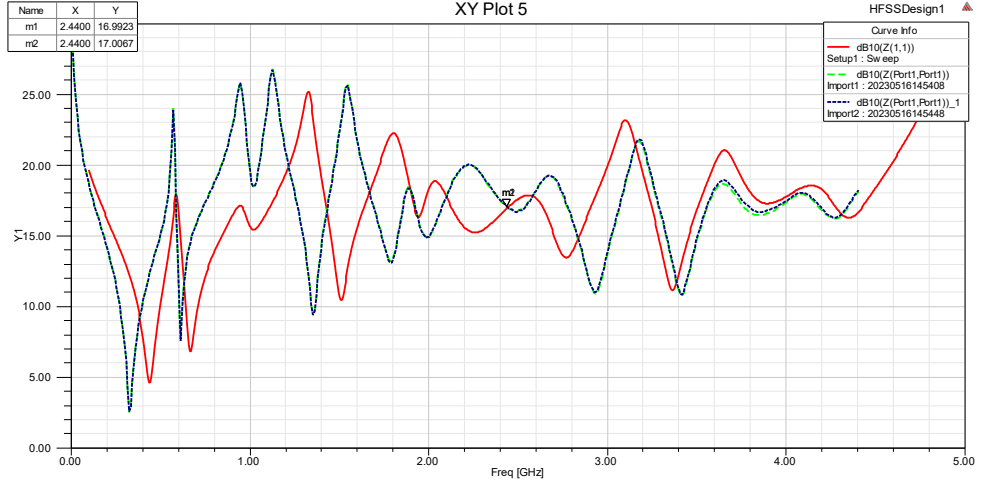


Şekil 4.44 Sırasıyla Üretilen YagiUda3_C, YagiUda5_J, YagiUda4_J PCB'leri

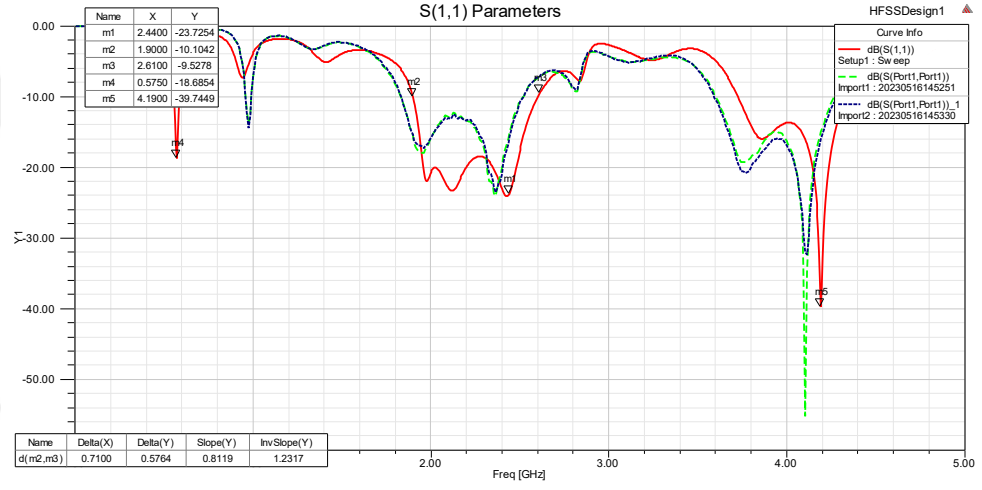
Ölçümler ve karşılaştırmaların doğruluğunu arttırmak için her anten tipinin 8 ürününden rastgele iki tane seçilmiştir. Analizör ölçümlerinden sonra, simülasyon ve üretilen antenlerin parametre değerleri ve karşılaştırmaları bağlamında Şekil 4.45 üç elemanlı YagiUda3_C antenlerin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.46 ise antenlerin Z_{11} empedansının frekansla değişimini, Şekil 4.47 üç elemanlı YagiUda4_J antenlerin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.48 ise antenlerin Z_{11} empedansının frekansla değişimini ve Şekil 4.49 üç elemanlı YagiUda5_J antenlerin S_{11} parametresinin frekansla değişimini, Şekil 4.50 ise antenlerin Z_{11} empedansının frekansla değişimini göstermektedir.



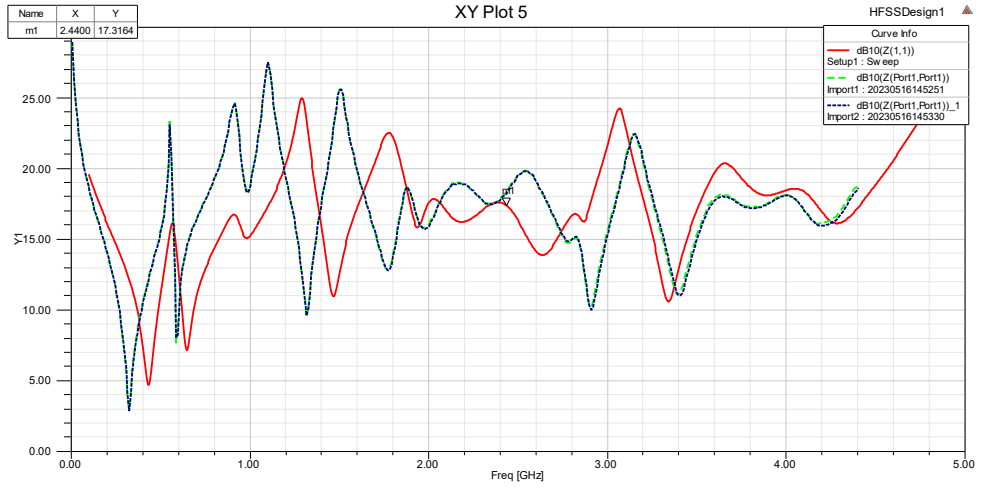
Şekil 4.45 Üretilen YagiUda3_C PCB'lerin S_{11} Parametreleri



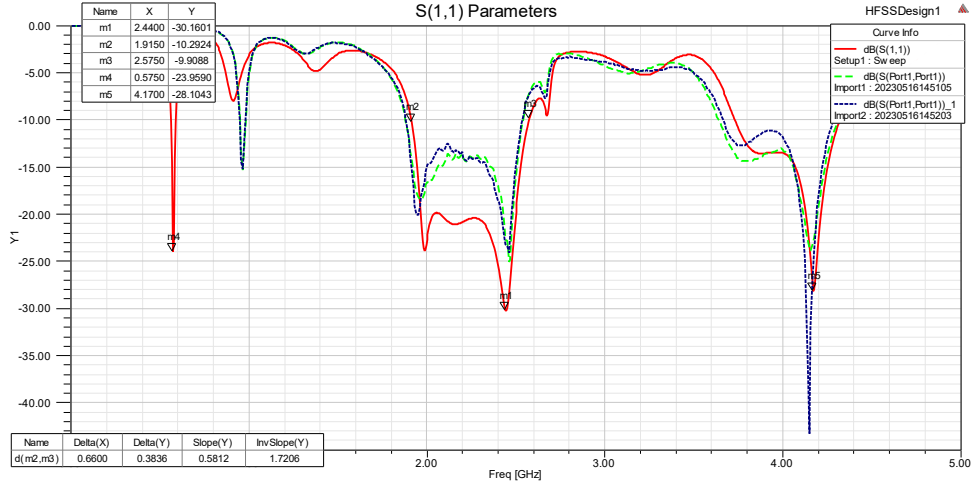
Şekil 4.46 Üretilen YagiUda3_C PCB'lerin Z_{11} Empedans Değerleri



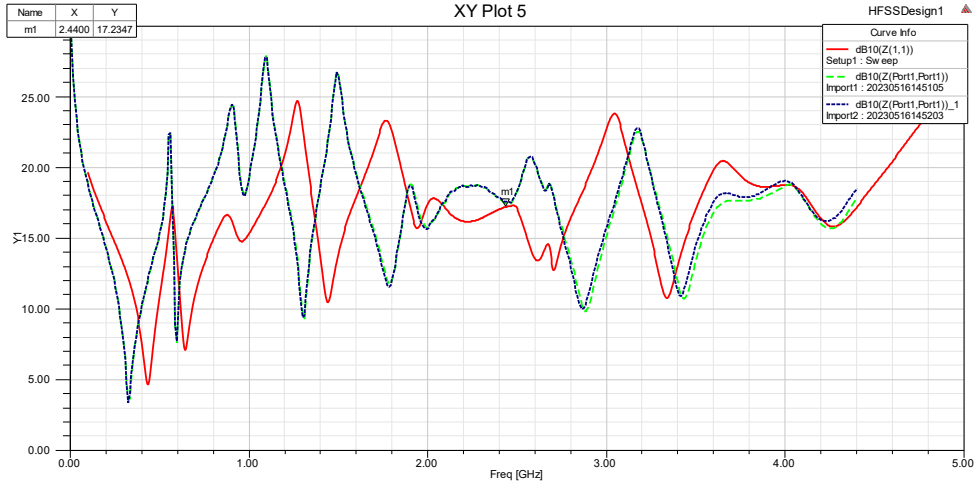
Şekil 4.47 Üretilen YagiUda4_J PCB'lerin S_{11} Parametreleri



Şekil 4.48 Üretilen YagiUda4_J PCB'lerin Z_{11} Empedans Değerleri



Şekil 4.49 Üretilen YagiUda5_J PCB'lerin S_{11} Parametreleri



Şekil 4.50 Üretilen YagiUda5_J PCB'lerin Z_{11} Empedans Değerleri

Şekil 4.45, 4.47 ve 4.49'da düz kırmızı çizgilerle çizilen simülasyonlara ait S_{11} parametre grafikleri ile kısa kesikli yeşil ve uzun kesikli mavi çizgilerle çizilen PCB ürünlerine ait S_{11} grafikleri, üretilen PCB antenlerin tasarlanandan biraz daha yüksek elektriksel geçirgenliğe sahip olduğunu ve bunun da biraz yüksek bir S_{11} değerine neden olduğunu göstermektedir. Bunun dışında PCB antenlerin genel şekli ve bant genişlikleri simülasyonlardan elde edilen istenen değerlerle hemen hemen aynıdır. Ayrıca Şekil 4.46, 4.48 ve 4.50'de simülasyon ve üretilen PCB antenlerin Z_{11} empedans grafikleri arasında küçük farklar olmasına rağmen merkez frekans olan 2.44 GHz'deki empedanslar birbiriyle neredeyse aynıdır. Bu da üretilen antenlerin ışıma ve kazanç değerlerinin de birbirlerine ayı oranlarda yakın olduğu anlamına gelmektedir. Sistem deneyleri ile elde edilecek ölçüm sonuçları bu öngörüyle ilgili bölümlerde kanıtlamıştır.

5. DoA TAHMİN ALGORİTMALARI

Doğru DoA bilgisini elde etmek için sinyallerin değerlendirilmesi, çeşitli ayrıntılı algoritmalar kullanılarak bir dizi hesaplama gerektirir. Bu algoritmalar sistem yapılarına ve amaçlarına bağlı olarak uygulanmakta ve kullanılmaktadır. Spektral Kestirim ve Özyapı en çok kullanılan DoA kestirim yöntemleri olup, Çoklu Sinyal Sınıflandırma (MUSIC) ve Dönme Değişmezliği Teknikleri ile Sinyal Parametrelerinin Kestirimi (ESPRIT) algoritmaları ise daha ileri hesaplama doğruluğu ve çözünürlüğüne sahiptir. Ancak bu algoritmalar daha karmaşıktır, daha fazla bellek işgal ederler ve daha hızlı işlemciler (MCU/CPU) gerektiren sistemlere uygulanabilirken olağan sistemlerde gözle görülür yüklenme ve yavaşlamalara neden olabilirler. Kısa bir tanım dışında bu tezde, MUSIC veya ESPRIT'e derinlemesine girilmeyecek, her iki yöntem ile ilgili sadece kısa bir tanımlama verilecektir. Bu nedenle, bu tezde, Bitişik Örüntü Güç Oranı (APPR) adı verilen teknik detaylı olarak anlatılacak ve ölçülen güç değerlerine göre varış yönü DoA tahmininde hedef sinyalleri değerlendirmek için kullanılacaktır.

5.1. MUSIC Algoritması

Ralph O. Schmidt tarafından önerilen MUSIC algoritması, dizi elemanlarındaki sinyaller üzerinde yapılan ölçümlerden bir anten dizisine gelen çoklu dalga cephelelerinin parametrelerinin belirlenmesinde yer alan deneysel ve teorik teknikleri tanımlamak için kullanılır [16]. Sinyallerin sayısı, DoA açıları, güçleri ve çapraz korelasyonları, polarizasyonları, gürültü ve girişimin gücü hakkında asimptotik olarak yansız tahminler sağlayan bir algoritma olarak uygulanabilir. Bir Özyapı tekniği olarak, Çoklu Sinyal Sınıflandırmasında (MUSIC), yönlendirme vektörü gürültü alt uzayına ortogonaldır ve vektör, arama yönlerinin yüksek çözünürlüklü sinyal alt uzayında bulunur. Farz edelim ki sinyal sayısı D ve dizideki anten sayısı M olsun, dolayısıyla özdeğerlerin ve özvektörlerin sinyal ve gürültü sayısı sırasıyla D ve $M-D$ 'dir.

Gürültü ilişkisiz ise dizi korelasyon matrisi Eşitlik 5.1'de olduğu gibi verilebilir.

$$S = APA^H + \lambda_{\min} S_o \quad \lambda_{\min} \geq 0 \quad (5.1)$$

Burada A mod vektörü, P DXD matrisi ve $\lambda_{\min}$, $|S - \lambda S_0|$ için en küçük çözümdür. S, M x M korelasyon matrisidir. Daha sonra sinyal ve gürültünün özdeğerleri ve özvektörleri bulunur. D ve M-D özvektörleri sırasıyla sinyaller ve gürültülerle ilişkilidir. N = M-D ise, $E_n = M \times N$ matrisi gürültü özvektörleri ile en küçük özdeğerlere sahip M x (M - D) alt uzayını tanımlar ve sütunları N gürültü vektörü $E_n = [e_1, e_2 \dots e_N]'$ 'dir. Gürültü alt uzaylarının özvektörleri $[e_1^1, e_2^1 \dots e_N^1]$ ve dizi yönlendirme vektörleri $\theta_1, \theta_2, \dots \theta_D$ açılarında ortogonaldır.

Bir Y vektöründen sinyal alt uzayına olan d^2 olağan karesel Öklid uzaklığı Eşitlik 5.2 ile verilir. Burada E_n , kolonları N gürültü özvektörleri olan M x N matrisidir.

$$d^2 = Y^H(\theta) E_n E_n^H Y(\theta) \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.3'den görülebildiği gibi θ 'nın bir fonksiyonu olarak $1/d^2$, belirgin ve dik tepe noktalarına sahip $a(\theta)$ boyunca noktalar için çizilebilir;

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) E_n E_n^H a(\theta)} \quad (5.3)$$

5.2. ESPRIT Algoritması

Dönme Değişmezliği Teknikleri ile Sinyal Parametrelerinin Tahmini (ESPRIT) algoritmasının yazarları, bir öteleme değişmezliği yapısına sahip bir dizi sensör tarafından indüklenen sinyal alt uzayları arasında temel bir dönme değişmezliğinden yararlanır biçiminde tanımlamışlardır [17]. ESPRIT'in MUSIC'e göre bazı avantajları vardır, örneğin dizi geometrisi ve yönlülük, kazanç veya faz gibi eleman örüntüsü özelliklerini uygulamaz. Daha az karmaşıktır çünkü arama işlemi gerekli değildir, sensör dizisinin kalibre edilmesine gerek yoktur ve aynı anda kaynak sayısını ve DoA'yı tahmin eder.

Diziyi X ve Y olmak üzere Eşitlik 5.4 ve 5.5'te verildiği gibi iki alt diziden oluşuyormuş gibi tanımlamak uygun olacaktır;

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^d s_k(t) a_i(\theta_k) + n_{xi}(t) \quad (5.4)$$

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^d s_k(t) e^{j\omega_0 \Delta \sin \theta_k / c} a_i(\theta_k) + n_{yi}(t) \quad (5.5)$$

Burada $S_k(t)$ X alt dizisinin 1. sensörü tarafından alınan k. sinyal dalga cephesi, θ_k öteleme yer değiştirme vektörünün yönüne göre k. kaynağın DoA'sı, $a_i(\theta_k)$, θ_k 'ya tek

bir dalga cephesinin çarpması durumunda aynı alt dizinin 1. sensöründeki tepkisine göre her iki alt dizinin 1. sensörünün tepkisi, Δ , iki dizi arasındaki yer değiştirme vektörünün büyüklüğü, c , ortama göre ışık hızı ve $n_{xi}()$ ve $n_{yi}()$, dizilerdeki gürültülerdir.

İki alt dizi düşünüldüğünde, iki alıcı veri vektörü Eşitlik 5.6 ve 5.7'deki gibi tanımlanır.

$$x(t) = As(t) + n_x(t) \quad (5.6)$$

$$y(t) = A\Phi s(t) + n_y(t) \quad (5.7)$$

Burada Φ , Eşitlik 5.8 ile verilen d dalga cepheleleri için çift sensörler arasındaki faz gecikmelerinin $d \times d$ diyagonal üniter matrisidir ve X ve Y alt dizilerinden alınan ölçümleri ilişkilendirir.

$$\Phi = \text{diag}[e^{j\phi^1}, \dots, e^{j\phi^d}], \phi_k = w_o \Delta \sin \theta_k / c \quad (5.8)$$

Sinyal alt uzayı için, m_1 ve m_2 alt dizileri $m_2 = \psi m_1$ olarak tanımlanabilir. Dönüşüm matrisi ise $m_1 = At$ ve $m_2 = A\Phi t$ olarak tanımlanabilir.

Böylece $t\psi t^{-1} = \Phi$ eşitliği elde edilir. Burada ψ özdeğerleri Φ ; $\lambda_1 = e^{jk\Delta \sin \theta}$, $\lambda_2 = e^{jk\Delta \sin \theta}$, $\lambda_3 = e^{jk\Delta \sin \theta}$, ... $\lambda_n = e^{jk\Delta \sin \theta}$ diyagonal elementlerine eşittir.

Böylece, her bir sinyal kaynağı için geliş yönü (DoA) aşağıdaki Eşitlik 5.9 kullanılarak hesaplanır:

$$\theta_n = \sin^{-1}(\arg \lambda_n / k\Delta) \quad (5.9)$$

5.3. APPR Algoritması

MUSIC ve ESPRIT'e göre, Bitişik Örüntü Güç Oranı (APPR) algoritmasının kodlanması daha kolaydır ve daha az bellek kaplar, ancak herhangi bir ek yaklaşım ya da donanımsal iyileştirme olmaksızın DoA açısı değerinde nispeten kaba sonuçlar verir. Y. Ozaki, APPR algoritmasının arama tablosu (LT) ve regresyon yaklaşımı (RA) olarak iki şekilde elde edildiğini söylüyor [2]. APPR yöntemlerinin her ikisi de düşük hesaplama karmaşıklığına sahiptir, ancak regresyon yaklaşımı (RA) bellekte herhangi bir veri yığını depolanmasına ve anten ya da sistem bazında herhangi bir ön

ölçüme gerek olmaması nedeniyle arama tablosu yaklaşımından daha fazla avantaj sağlar.

5.3.1. Arama Tablolu APPR Algoritması

APPR algoritmasını uygulamak için, çalışma alanında tek bir hedef sinyal göz önüne alındığında, algoritma, açıklık aralığındaki DoA'yı tahmin etmek için Eşitlik 5.10'daki gibi N tane $P_n(\psi)$ yönlü güç örüntüsünün ölçülen $\hat{P}_n(\theta)$, $n = 1, 2, \dots, N$ güçlerinden maksimum $P_n^1(\theta)$ gücünü bulur ve seçer. Tahmin hatası N'ye bağlıdır.

$$[\phi_{n^1} - \frac{\pi}{N}, \phi_{n^1} + \frac{\pi}{N}] \quad (5.10a)$$

$$n^1 = \operatorname{argmax}_n |P_n^1(\theta)| \quad (5.10b)$$

Bu noktadan itibaren iki anten arasındaki açıyı belirlemek için örüntü güç oranı uygulanır ve dBm cinsinden alınan $P_n^1(\theta)$ için mutlak değer cinsinden Eşitlik 5.11'de verilen iki bitişik örüntü güç oranı tanımlanır.

$$\Gamma_{n^1l}^1(\theta) = \frac{P_{n^1}^1(\theta)}{P_{n^1-1}^1(\theta)} \quad (5.11a)$$

$$\Gamma_{n^1r}^1(\theta) = \frac{P_{n^1}^1(\theta)}{P_{n^1+1}^1(\theta)} \quad (5.11b)$$

Böylece, tahmini DoA açısı (θ^1) Eşitlik 5.12 ile hesaplanır.

$$(\theta^1) \triangleq \psi^1 = \begin{cases} \operatorname{argmin}_{\psi} |\Gamma_{n^1l}^1(\psi) - \Gamma_{n^1l}^1(\theta)| \\ \text{if } P_{n^1+1}^1(\theta) < P_{n^1-1}^1(\theta) \\ \operatorname{argmin}_{\psi} |\Gamma_{n^1r}^1(\psi) - \Gamma_{n^1r}^1(\theta)| \\ \text{if } P_{n^1+1}^1(\theta) \geq P_{n^1-1}^1(\theta) \end{cases} \quad (5.12)$$

$$\Gamma_{nl}(\psi) = \frac{P_n(\psi)}{P_{n-1}(\psi)} \quad (5.13a)$$

$$\Gamma_{nr}(\psi) = \frac{P_n(\psi)}{P_{n+1}(\psi)} \quad (5.13b)$$

Eşitlik 5.11 (a) ve (b) kestirim için kullanılacak olan ölçülen iki komşu gücün oranlarıdır. Eğer DoA, Eşitlik 5.12'nin üst tarafına göre alınan en yüksek güçlü antenin sol tarafında ise, DoA en yakın $\Gamma_{n^1l}^1(\psi)$ ve $\Gamma_{n^1l}^1(\theta)$ değerlerinden tahmin edilir. Eşitlik 5.12, hesaplama hızını artırmak için Eşitlik 5.13'te verilen $\Gamma_{nl}(\psi)$ ($\phi_n - \pi/N \leq \psi < \phi_n$) ve $\Gamma_{nr}(\psi)$ ($\phi_n \leq \psi < \phi_n + \pi/N$) içeren bir arama tablosu ile birlikte uygulanır.

5.3.2. Doğrusal Regresyon Yaklaşımı ile APPR Algoritması

Arama tablosu yönteminin uygulanması nispeten kolay ve sistem için daha az zahmetli olmasına rağmen, hesaplanması ve uygulanması daha da kolay ve sistem belleği için daha da az yük oluşturur bir hale getirilebilir. Arama tablosu kullanmak ve sistem belleğinin bazı sektörlerini gereksiz yere işgal etmek yerine, doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) yöntemi olarak adlandırılan başka bir yaklaşım uygulanabilir. [3]'te a ve b ile gösterilen doğrusal regresyon katsayıları Eşitlik 5.14a ve 5.14b'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (5.14a)$$

$$b = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (5.14b)$$

Yukarıdaki denklemlerde "n" örnek sayısını, "x" birincil ve bitişik elemanın her bir güç kazancının örnekleme çifti oranını ve "y" her bir güç oranının karşılık geldiği her bir açının değerini gösterir.

$\Gamma_{nl}(\psi)$ ve $\Gamma_{nr}(\psi)$ olmak üzere iki bitişik örüntü güç oranı için DoA tahmini elde etmek üzere, $P_n^1(\theta)$ maksimum alınan gücün her iki tarafı için Eşitlik 5.15'te verilen iki benzer doğrusal regresyon denklemi kullanılmalıdır.

$$\psi_l^1 = a_{nl} \cdot \Gamma_{nl}(\psi) + b_{nl} + \varphi_n \quad (5.15a)$$

$$\psi_r^1 = a_{nr} \cdot \Gamma_{nr}(\psi) + b_{nr} + \varphi_n \quad (5.15b)$$

Regresyon katsayıları a_{nl} , b_{nl} , a_{nr} , ve b_{nr} , farklı yönlerdeki $(\varphi_n - \pi/N \leq \psi < \varphi_n)$ için $\Gamma_{nl}(\psi)$ ve $(\varphi_n \leq \psi < \varphi_n + \pi/N)$ için $\Gamma_{nr}(\psi)$ örnek değerlerinden en küçük kareler fonksiyonları ile belirlenir. Burada φ_n alınan maksimum gücün anten açısı, ψ açı aralıklarının örnek noktaları ve $\Gamma_{nl}(\psi)$ ve $\Gamma_{nr}(\psi)$ güç kazancı oranı dizileridir. Anten dizisinin simetrik olduğunu varsayarsak, regresyon katsayıları $a_{nl} = a_l$, $b_{nl} = b_l$, $a_{nr} = a_r$ ve $b_{nr} = b_r$ olur. Bu belirlemelerden sonra N adet güç ölçülerek birincil anten $P_n^1(\theta)$ ve komşu elemanları $P_{n+1}^1(\theta)$ ve $P_{n-1}^1(\theta)$ tarafından alınan maksimum güç dBm veya watt cinsinden seçildikten sonra doğrusal regresyon eşitliklerinden elde edilen Regresyon Yaklaşımı APPR algoritması tanımlanabilir.

$$\theta_{[o]}^l = \begin{cases} a_l \cdot \Gamma_{n^l}^l(\theta) + b_l + \varphi_{n^l} \\ \text{if } P_{n^l+1}^l(\theta) < P_{n^l-1}^l(\theta) \\ a_r \cdot \Gamma_{n^l}^l(\theta) + b_r + \varphi_{n^l} \\ \text{if } P_{n^l+1}^l(\theta) \geq P_{n^l-1}^l(\theta) \end{cases} \quad (5.16)$$

Eşitlik 5.16, $\theta_{[o]}^l$ DoA açısının, $\Gamma_{n^l}^l(\theta)$ ve $\Gamma_{n^l}^l(\theta)$ ölçülen anten güçlerinin güç oranlarının belirlenip, N-1 numaralı antenin gücü N+1'den büyükse denklemin üst tarafının tersi durumda ise denklemin alt tarafının uygulanmasıyla hesaplandığını göstermektedir.

6. VERİ ÖRNEKLEME VE APPR ALGORİTMASININ KULLANIMIYLA DoA TAHMİNİ

Uygun elektriksel ve ışıma değerlerine sahip ve farklı kazançlarda yönlü mikroşerit Quasi-Yagi dizi antenler tasarlandıktan ve APPR algoritmasının temel kavramları açıklandıktan sonra, sekiz anten arasında $P_n^l(\theta)$ maksimum sinyal gücünü alan bir birincil anten ve bu antenin sol ve sağ taraflarındaki komşu antenlerin mutlak gerçekleşen güç kazancı (G_{re}) örüntüleri yeterli sayıda kazanç örneği alınmak üzere çıkarılmalıdır. Sistemin 8 elemanlı bir UCA olarak tasarlanması düşünüldüğünden, her bir eleman sırasıyla 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315° açılarına yerleştirilir, bu da her bir komşu eleman arasındaki açının 45° olduğu ve anten elemanları arasındaki mesafelerin eşit olduğu anlamına gelir. Uygulamada kullanılacak tüm antenler eşdeğer olduğu için, her bir örnek herhangi bir birincil anten, örneğin 90° üzerindeki üç numaralı anten ile sol tarafında bulunan örneğin 45° üzerindeki ikinci antenle örtüştüğü kazanç örüntülerinden, sırasıyla oranın 1'e yakın olduğu 67.5° ve maksimum olduğu 90° olan ($\varphi_n - \pi/N \leq \psi < \varphi_n$) aralığındaki 22.5° 'lik eğri boyunca elde edilir. Ardından, doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) yaklaşımı hesaplamaları uygulanarak sol tarafın a_l ve b_l regresyon katsayıları bulunur.

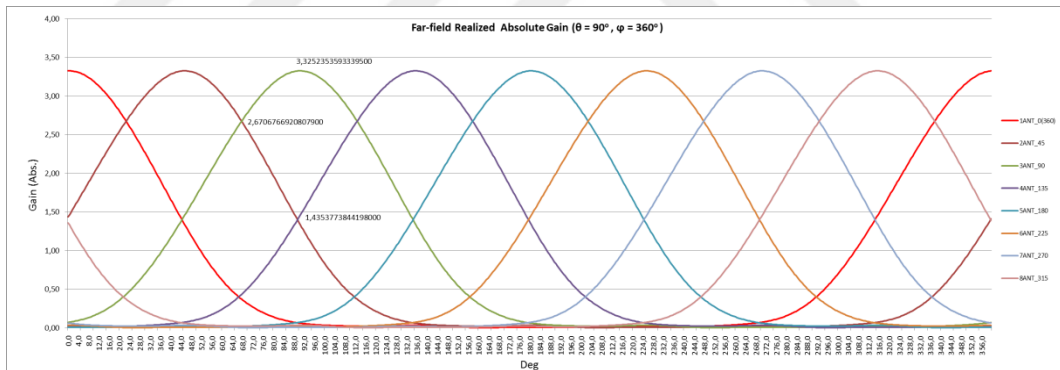
Doğrusal regresyon eşitliği 5.14b'den elde edilen b katsayısının APPR algoritmasında doğrudan kullanılması DOA açısı değerlerinde tutarsızlık ve ayrıca önemli hatalar göstermiştir. Bu nedenle tasarlanan ve simülasyon sonuçları alınan antenin a_l regresyon katsayısı ve maksimum kazanç oranı hesaba katılarak Eşitlik

5.15 yardımıyla b regresyon katsayısının elde edilmesi düşünülmüş ve bu şekilde elde edilen b katsayısı ile elde edilen açı ölçüm sonuçlarının her zaman beklenen doğrulukta olduğu gözlemlenmiş ve tüm DOA hesaplamaları bu yöntemle elde edilen b katsayısı kullanılarak yapılmıştır.

Güç kazanç örüntülerine doğrusal regresyon uygulandıktan ve a_1 ve b_1 bulunduktan sonra, a_r ve b_r 'yi bulmak için sol taraftaki katsayılar -1 ile çarpılır. Daha sonra, örneğin sol taraf için dBm cinsinden ölçülen $P_n^1(\theta)$ ve $P_{n-1}^1(\theta)$ iki anten gücünün $\Gamma_{n1}^1(\theta)$ mutlak sinyal güç oranı ve bulunan a_1 ve b_1 katsayıları, $\theta_{[0]}$ gerçek DoA açısını hesaplamak için Eşitlik 5.16'nın üst tarafına yerleştirilir.

Eğer iki komşu antenin ölçülen güç sinyali eşitse, DoA birincil anten üzerindedir. Yukarıda verilen metodoloji UCA'nın tüm elemanları için geçerlidir ve tezde önerilen DoA açı çözünürlüğünün ve Bluetooth sistem çalışmasının iyileştirilmesini kanıtlamak için tasarlanan ve simüle edilen tüm antenlere uygulanacaktır.

6.1. YagiUda3_A için Güç Kazancı Veri Örneklemesi ve DoA Hesaplamaları



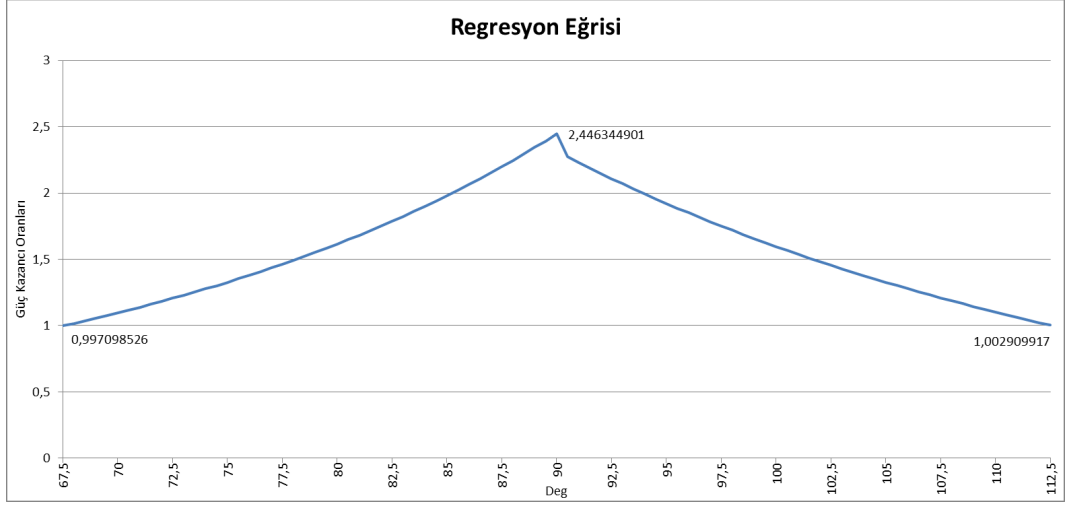
Şekil 6.1 8-YagiUda3_A UCA'nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri

UCA sistemi 8 adet YagiUda3_A anteni ile tasarlandığında uzak alan güç kazanç örüntüleri yukarıda Şekil 6.1'de verilmiştir. 3ANT_90 ve 2ANT_45 olarak adlandırılan anten elemanlarına ait eğrilerin belirtilen noktalarında görüldüğü gibi birincil antenin G_{max1} maksimum kazanç noktası, her iki antenin 67.5 derecedeki sol kesişim noktası ve yine iki antenin maksimum kazanç oranını veren kesişim noktasındaki örneklem değerleri sırasıyla 3.325235, 2.670676 ve 1.435377'dir.

33		ANT0		ANT45		ANT90		ANT135
	A	B	C	D	E	F	G	H
168	66,5	0,3989701607791620	66,5	2,7292624660628900	66,5	2,6212395126966900	66,5	0,4011530933838760
169	67,0	0,3849832055547640	67,0	2,7041913722807500	67,0	2,6462187821192300	67,0	0,4158288823585900
170	67,5	0,3717415569403400	67,5	2,6784481391336600	67,5	2,6706766920807900	67,5	0,4312350912272880
171	68,0	0,3584999083259160	68,0	2,6527049059865700	68,0	2,6951346020423500	68,0	0,4466413000959850
172	68,5	0,3459807082688190	68,5	2,6263357606839300	68,5	2,7190336779230500	68,5	0,4627728522317210
173	69,0	0,3334615082117220	69,0	2,5999666153812900	69,0	2,7429327538037400	69,0	0,4789044043674570
174	69,5	0,3216409538171200	69,5	2,5730171331311100	69,5	2,7662343554860900	69,5	0,4957538249989390
175	70,0	0,3098203994225180	70,0	2,5460676508809400	70,0	2,7895359571684400	70,0	0,5126032456304220
176	70,5	0,2986741819765140	70,5	2,5185828410731400	70,5	2,8121999776199000	70,5	0,5301607952987110
177	71,0	0,2875279645305090	71,0	2,4910980312653500	71,0	2,8348639980713500	71,0	0,5477183449670010
178	71,5	0,2770316508934890	71,5	2,4631224174918200	71,5	2,8568485964436700	71,5	0,5659721646218780
179	72,0	0,2665353372564680	72,0	2,4351468037183000	72,0	2,8788331948159900	72,0	0,5842259842767560
180	72,5	0,2566646852239740	72,5	2,4067244936144000	72,5	2,9000945850911400	72,5	0,6031622498545700
181	73,0	0,2467940331914780	73,0	2,3783021835105100	73,0	2,9213559753662800	73,0	0,622095154323840
182	73,5	0,2375252357165120	73,5	2,3494769277330200	73,5	2,9418482904849400	73,5	0,6417015998415150
183	74,0	0,2282564382415460	74,0	2,3206516719555300	74,0	2,9623406056036100	74,0	0,6613046842506470
184	74,5	0,2195662947633900	74,5	2,2914669146179100	74,5	2,9820158548299900	74,5	0,6815573246174020
185	75,0	0,2108761512852350	75,0	2,2622821572802900	75,0	3,0016911040563800	75,0	0,7018096498451560
186	75,5	0,2027421676771450	75,5	2,2327810825330300	75,5	3,0204992381139100	75,5	0,7226934327711840
187	76,0	0,1946081840690550	76,0	2,2032800077857700	76,0	3,0393073721714400	76,0	0,7435769005582130
188	76,5	0,1870086057676090	76,5	2,1735055887005600	76,5	3,0571964665368200	76,5	0,7650711717784570
189	77,0	0,1794090274661630	77,0	2,1437311696153600	77,0	3,0750855609021900	77,0	0,7865654429987010
190	77,5	0,1723228130557970	77,5	2,1137262259317600	77,5	3,0920021227285500	77,5	0,8086493652579110
191	78,0	0,1652365986454320	78,0	2,0837212822481600	78,0	3,1089186845549000	78,0	0,8307332875171220
192	78,5	0,1586433434354430	78,5	2,0535285528027200	78,5	3,1248080832192200	78,5	0,8533847401008590
193	79,0	0,1520500882254540	79,0	2,0233358235728000	79,0	3,1406974818835500	79,0	0,8760361926845950
194	79,5	0,1459299090862690	79,5	1,9929980571851200	79,5	3,1555044973701800	79,5	0,8992322354538120
195	80,0	0,1398097299470840	80,0	1,9626602910129600	80,0	3,1703115128568100	80,0	0,9224282782230280
196	80,5	0,1341431238057210	80,5	1,9322203583569700	80,5	3,1839809903819700	80,5	0,9461452847980560
197	81,0	0,1284765176643580	81,0	1,9017804257009800	81,0	3,1976504679071300	81,0	0,9698622913730840
198	81,5	0,1232442065612750	81,5	1,8712814467555900	81,5	3,2101280616621100	81,5	0,9940760620680580
199	82,0	0,1180118954581930	82,0	1,8407824678102000	82,0	3,2226056554170900	82,0	1,0182898327630300
200	82,5	0,1131946709351370	82,5	1,8102679533181800	82,5	3,2338386393648800	82,5	1,0429756830646500
201	83,0	0,1083774464120820	83,0	1,7797534388261600	83,0	3,2450716233126700	83,0	1,0676615333662700
202	83,5	0,1039560252590610	83,5	1,7492674330398100	83,5	3,2550097429028600	83,5	1,0927943544862200
203	84,0	0,0995346041060394	84,0	1,7187814272534500	84,0	3,2649478624930600	84,0	1,1179271756061700
204	84,5	0,0954895062001844	84,5	1,6883686406750100	84,5	3,2735441982175000	84,5	1,1434814647898000
205	85,0	0,0914444082943296	85,0	1,6579558450965700	85,0	3,2821405339419300	85,0	1,1690357359734400
206	85,5	0,0877558654949085	85,5	1,6276617712019400	85,5	3,2893523460373600	85,5	1,1949856137856700
207	86,0	0,0840673226954873	86,0	1,5973676883073000	86,0	3,2965641581327900	86,0	1,2209354735979000
208	86,5	0,0807152256195978	86,5	1,5672386344309200	86,5	3,3023536815788700	86,5	1,2472545812491900
209	87,0	0,0773631285437085	87,0	1,5371095805545500	87,0	3,3081432050249500	87,0	1,2735736889004800
210	87,5	0,0743270156540339	87,5	1,5071927324656600	87,5	3,3124783653337400	87,5	1,3002352386937300
211	88,0	0,0712909027643593	88,0	1,4772758843767600	88,0	3,3168135256425300	88,0	1,3268967884869800
212	88,5	0,0685499936807559	88,5	1,4476192108678100	88,5	3,3196685487516000	88,5	1,3538734124971100
213	89,0	0,0658090845971523	89,0	1,4179625373588500	89,0	3,3225235718606700	89,0	1,3808500365072500
214	89,5	0,0633423570277292	89,5	1,3886146593219500	89,5	3,3238794655973100	89,5	1,4081137104635200
215	90,0	0,0608756294583061	90,0	1,3592667812850400	90,0	3,3252353593339500	90,0	1,4353773844198000
216	90,5	0,0586619367589767	90,5	1,3302767450604900	90,5	3,3250802492037200	90,5	1,4628993272579800
217	91,0	0,0564482440596471	91,0	1,3012867088359300	91,0	3,3249251390735000	91,0	1,4904212700961700

Şekil 6.2 YagiUda3_A için Örneklenen Veriler

HFSS programı yardımıyla elektromanyetik verilerden elde edilen Şekil 6.2'deki veri dizilerinden görüldüğü gibi güç kazanç eğrilerinden öncelikle 2ANT_45, 3ANT_90 ve 4ANT_135 olmak üzere üç antenin örnekleme değerleri çıkarılmış, sonra 67.5 ile 90 derece arasındaki 22.5 derecelik aralık içinde açı değerleri yarım (0.5) derece artırılarak güç kazanç oranları ve buna bağlı olarak Şekil 6.3'teki regresyon eğrileri çıkarılmıştır.



Şekil 6.3 YagiUda3_A Regresyon Eğrileri

Daha önce açıklandığı gibi, kazanç eğrisinin sol ve sağ tarafları için regresyon katsayıları, doğrusal regresyon eşitliği kullanılarak önce a_l ve a_r olarak hesaplanmış, ardından b_l ve b_r 'yi çıkarmak için eşitlik 5.15'te gösterilen APPR algoritması regresyon eşitliklerine uyarlanmıştır.

Seçilen antenin b_l değerini bulmak için, 2.446344'lük maksimum güç kazanç oranı $\Gamma_{n\max 1}(\psi)$, 90 derecelik maksimum güç kazanç açısı ve $a_l = 15.559495$ regresyon katsayısı $\psi_l^1 = a_{nl} \cdot \Gamma_{nl}(\psi) + b_{nl} + \varphi_n$ eşitliğinde yerine konur.

Eşitlik 5.15'te değerler yerine konulduğunda $90^\circ = 15.559495 \cdot 2.446344 + b_l + 90^\circ$ eşitliğinden sırasıyla $a_l = 15.559495$, $b_l = -38.063893$, $a_r = -15.559495$, ve $b_r = 38.063893$ katsayıları bulunur.

Bu aşamada, Eşitlik 5.16'daki APPR DoA algoritması kullanılarak DoA açıları ($\theta_{[0]}^1$), açı çözünürlükleri ($res\angle$) ve maksimum ölçüm aralığını (MI) belirlemek için 45, 90 ve 135 derecelerdeki merkez açılarda bulunan her üç anten göz önüne alınmış: en yüksek değeri alan birincil antene sabit -50 dBm, sol ve sağ bitişik antenlere ise -50 dBm değerinden başlayıp Bluetooth modülü ADS sinyal duyarlılığı uyarınca 1 dBm'lik değer azaltma ile ölçülen anten gücü sanal değerleri kullanılmış, sırasıyla sol ve sağ bitişik anten ile birincil anten arasındaki tam orta açı değerleri olan 67.5° ve 112.5° 'lik açılardan 90° açığa kadar DoA ölçüm değerleri hesaplanarak Tablo 6.1'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 6.1 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları

P _i (dBm)	P _i (dBm)	P _r (dBm)	$\theta_{l[0]}^1$	$\theta_{r[0]}^1$
-50 dBm	-50 dBm	-50 dBm	67.495602°	112.504397°
-50 dBm	-51 dBm	-51 dBm	71.524351°	108.475648°
-50 dBm	-52 dBm	-52 dBm	76.596245°	103.403754°
-50 dBm	-53 dBm	-53 dBm	82.981382°	97.018617°
-50 dBm	-54 dBm	-54 dBm	91.019793°	88.980206°

Her iki taraf için hesaplanan 67.4956° ve 112.5043° orta açılar 67.5° ve 112.5° gerçek orta açı değerlerine, birincil anten için hesaplanan 91.0197° ve 88.9802° açıları ise gerçek birincil 90° açı değerine oldukça yakın görünmektedir. Bununla birlikte, tabloda listelenen toplamda beş ölçüm sonucu ile aşağıda ölçüm aralığı ve her iki taraf için ölçülen açı değerlerinin farkları alınarak DoA açı çözünürlükleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$res_1\angle(\psi_l^1)$: 4.028749°, 5.071894°, 6.385137°, 8.038411° & MI_l: 5 dBm

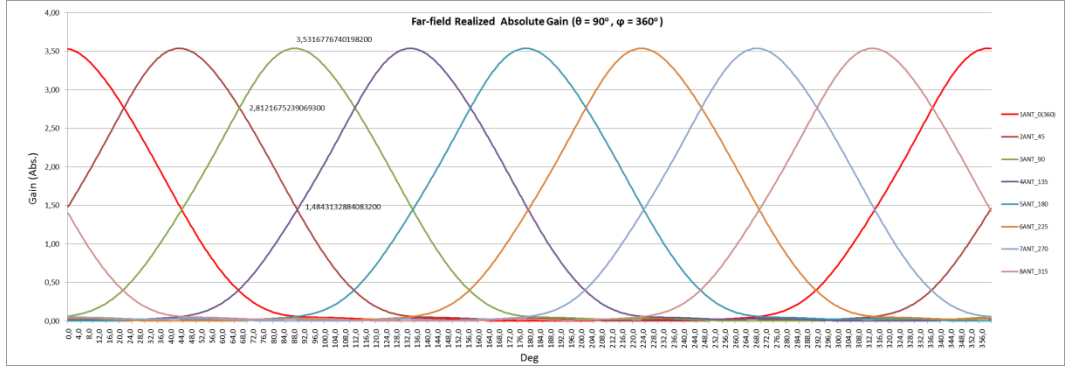
$res_1\angle(\psi_r^1)$: 4.028749°, 5.071894°, 6.385137°, 8.038411° & MI_r: 5 dBm

YagiUda3_A anteni için 90 derecenin bir derece gerisinde ve bir derece ötesindeki çözünürlük değerleri de dâhil edilirse, birincil anten ile her bir komşu anten arasındaki orta açılarının yakınında dört (4°) derece ile birincil antenin merkezine yakın olan sekiz (8°) derece arasında toplam 5 güç ve açı değeri elde edilmiş ve anten ölçüm çözünürlüğü $res_{1max}\angle(\psi_{lr}^1)$ olarak 4.028749°'lik maksimum açı hesaba alınmıştır. Açıkça görülüyor ki, pratikte bazı farklılıklar mümkün olsa da, teorik olarak birincil antenin her iki bitişik anten tarafı da çözünürlük açısından tamamen aynı değerleri verir. Değerler orta düzeydedir, ancak özellikle MI değeri olan 5 dBm çok dardır. Bu, komşu antenin güç değerinin -54 dBm'den küçük olması durumunda, sonucun algoritma tarafından yanlış hesaplanacağı anlamına gelir. Bu da dBm türünden çok az güç ölçüm verisinin hesaba alınabilmesine ve sonuç olarak Bluetooth RF modülünün DoA uygulamaları için kısıtlı bir ölçme işlemi yapabilmesine neden olur.

6.2. YagiUda3_C için Güç Kazancı Veri Örneklemesi ve DoA Hesaplamaları

İkinci antenin kazancı bir öncekine göre biraz daha yüksek olduğundan, tezin önerilen teorisi uyarınca daha iyi MI ve çözünürlük $res_2\angle(\psi_{lr}^1)$ değerleri

beklenmektedir. İkinci antene ait gerçekleşen güç kazanç eğrileri (G_{re}) Şekil 6.4'te, örnekleme verileri Şekil 6.5'te ve doğrusal regresyon eğrisi Şekil 6.6'da verilmiştir.

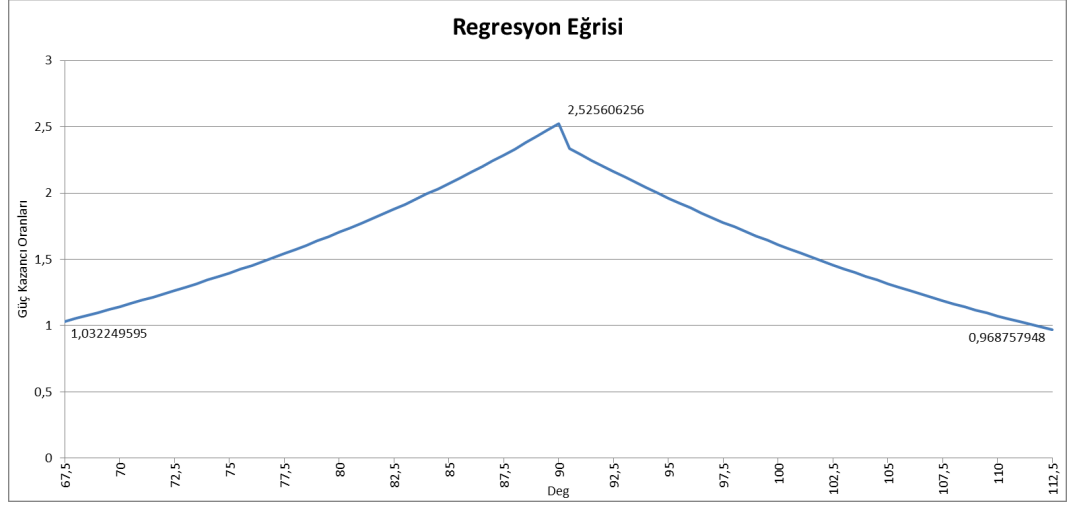


Şekil 6.4 8-YagiUda3_C UCA'nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri

Mutlak gerçekleşen kazanç G_{max2} eğrilerinin kesişme ve maksimum noktaları 66.5, 88 ve 111.5 derecelerde beklenenin yaklaşık bir derece gerisinde olmasına rağmen, Şekil 6.4'te gösterilen 90°, 67.5° ve 112.5° açılarındaki değerler, UCA'nın 45 derecelik sekiz eşit fiziki açısıyla doğru tam açı ölçümlerini sağlamak için sırasıyla 3.531677, 2.812167 ve 1.484313 olarak alınmıştır. Örnekleme verileri Şekil 6.5'te ve regresyon eğrileri Şekil 6.6'da verilmiştir.

33		ANT0		ANT45		ANT90		ANT135
	A	B	C	D	E	F	G	H
168	66,5	0,3914371604030430	66,5	2,7775494017062000	66,5	2,7525736876617600	66,5	0,4053026186867430
169	67,0	0,3757698432992280	67,0	2,7511527492746400	67,0	2,7825843799166800	67,0	0,4212329516815670
170	67,5	0,3609210628775380	67,5	2,7243096409051600	67,5	2,8121675239069300	67,5	0,4379825373086130
171	68,0	0,3460722824558480	68,0	2,6974665325356800	68,0	2,8417506678971800	68,0	0,4547321229356590
172	68,5	0,3320419853526120	68,5	2,6702021721271700	68,5	2,8708051997844400	68,5	0,4722856236049520
173	69,0	0,3180116882493770	69,0	2,6429378117186500	69,0	2,8998597316717100	69,0	0,4898391242742460
174	69,5	0,3047976233248230	69,5	2,6152757948293800	69,5	2,9282808525337200	69,5	0,5081764540313200
175	70,0	0,2915835584002690	70,0	2,5876137779401000	70,0	2,9567019733957200	70,0	0,5265137837883940
176	70,5	0,2791811939537160	70,5	2,5595768229706000	70,5	2,9843821587795200	70,5	0,5456103324704850
177	71,0	0,2667788295071620	71,0	2,5315398680010900	71,0	3,0120623441633200	71,0	0,5647068811525760
178	71,5	0,2551812529562580	71,5	2,5031504931661400	71,5	3,0388924156879300	71,5	0,5845338359172410
179	72,0	0,2435836764053530	72,0	2,4747611183311900	72,0	3,0657224872125400	72,0	0,6043607906819060
180	72,5	0,2327814833473530	72,5	2,4460422418716300	72,5	3,0915927330355100	72,5	0,6248855574057800
181	73,0	0,2219792902893520	73,0	2,4173233654120800	73,0	3,1174629788584900	73,0	0,6454103241296540
182	73,5	0,2119604716236210	73,5	2,3882988120092600	73,5	3,1422643098884500	73,5	0,6665970474470600
183	74,0	0,2019416529578900	74,0	2,3592742586064500	74,0	3,1670656409184100	74,0	0,6877837707644650
184	74,5	0,1926914899281380	74,5	2,3299691609594300	74,5	3,1906907696525900	74,5	0,7095939472168250
185	75,0	0,1834413268983870	75,0	2,3006640633124200	75,0	3,2143158983867800	75,0	0,7314041236691840
186	75,5	0,1749423044397750	75,5	2,2711051539693400	75,5	3,2366605270780200	75,5	0,7537972978012510
187	76,0	0,1664432819811630	76,0	2,2415462446262600	76,0	3,2590051557692600	76,0	0,7761904719333180
188	76,5	0,1586750306119790	76,5	2,2117620390677300	76,5	3,2799691602021200	76,5	0,7991250004827010
189	77,0	0,1509067792427950	77,0	2,1819778335092000	77,0	3,3009331646349700	77,0	0,8220595290320850
190	77,5	0,1438460549520030	77,5	2,1519987108220600	77,5	3,3204217590816500	77,5	0,8454933939230640
191	78,0	0,1367853306612130	78,0	2,1220195881349100	78,0	3,3399103535283200	78,0	0,8689272588140440
192	78,5	0,1304060408830720	78,5	2,0918777800873500	78,5	3,3578352214740000	78,5	0,8928189057965720
193	79,0	0,1240267511049310	79,0	2,0617359720397900	79,0	3,3757600894196900	79,0	0,9167105527790990
194	79,5	0,1183000330436770	79,5	2,0314654747369900	79,5	3,3920404634634900	79,5	0,9410197295388390
195	80,0	0,1125733149824230	80,0	2,0011949774341900	80,0	3,4083208375072800	80,0	0,9653289062985790
196	80,5	0,1074676703797440	80,5	1,9708314018414800	80,5	3,4228845105797700	80,5	0,9900174719468850
197	81,0	0,1023620257770650	81,0	1,9404678262487700	81,0	3,4374481836522500	81,0	1,0147060375951900
198	81,5	0,0978435138394373	81,5	1,9100482046584800	81,5	3,4502324325124700	81,5	1,0397387148056300
199	82,0	0,0933250019018097	82,0	1,8796285830681800	82,0	3,4630166813726900	82,0	1,0647713920160700
200	82,5	0,0893574896614415	82,5	1,8491911480988500	82,5	3,4739690824560700	82,5	1,0901164338001200
201	83,0	0,0853899774210734	83,0	1,8187537131295200	83,0	3,4849214835394500	83,0	1,1154614755841700
202	83,5	0,0819354444225545	83,5	1,7883376642231200	83,5	3,4940006008391400	83,5	1,1410912207958300
203	84,0	0,0784809114240356	84,0	1,7579216153167300	84,0	3,5030797181388200	84,0	1,1667209660075000
204	84,5	0,0754998034232329	84,5	1,7275668851677500	84,5	3,5102556431250200	84,5	1,1926122610455600
205	85,0	0,0725186954224303	85,0	1,6972121550187600	85,0	3,5174315681112100	85,0	1,2185035560836100
206	85,5	0,0699703198491284	85,5	1,6669591852218300	85,5	3,5226862929066200	85,5	1,2446380247466500
207	86,0	0,0674219442758265	86,0	1,6367062154249000	86,0	3,5279410177020300	86,0	1,2707724934097000
208	86,5	0,0652648986191477	86,5	1,6065957471968000	86,5	3,5312686249660400	86,5	1,2971366422084800
209	87,0	0,0631078529624689	87,0	1,5764852789687100	87,0	3,5345962322300600	87,0	1,3235007910072600
210	87,5	0,0613004760371064	87,5	1,5465581614257300	87,5	3,5360028885238900	87,5	1,3500859431553300
211	88,0	0,0594930991117438	88,0	1,5166310438827400	88,0	3,5374095448177300	88,0	1,3766710953034000
212	88,5	0,0579939343801685	88,5	1,4869280593511900	88,5	3,5369132886083400	88,5	1,4034731527691200
213	89,0	0,0564947696485931	89,0	1,4572250748196400	89,0	3,5364170323989500	89,0	1,4302752102348300
214	89,5	0,0552630294162449	89,5	1,4277867782882900	89,5	3,5340473532093800	89,5	1,4572942493215800
215	90,0	0,0540312891838967	90,0	1,3983484817569500	90,0	3,5316776740198200	90,0	1,4843132884083200
216	90,5	0,0530273085401071	90,5	1,3692150500277900	90,5	3,5274748853590600	90,5	1,5115530000354300

Şekil 6.5 YagiUda3_C için Örneklenen Veriler



Şekil 6.6 YagiUda3_C Regresyon Eğrileri

Maksimum güç kazanç oranı $\Gamma_{n\max 2}(\psi)$ 2.525606 ve regresyon katsayıları $a_l = 15.089957$, $b_l = -38.111290$, $a_r = -15.089957$ ve $b_r = 38.111290$ olarak hesaplanmıştır. Önceki bölümde uygulanan kriterlere benzer şekilde, -50 dBm aynı üç antene başlangıç test sinyal gücü olarak uygulanmış ve daha sonra MI, $\text{res}_2\angle(\psi^1_{lr})$ ve DoA açısını elde etmek için sırayla diğer test değerleri komşu antenlere uygulanmış ve Tablo 6.2'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 6.2 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları

P _l (dBm)	P _l (dBm)	P _r (dBm)	$\theta^1_{l[0]}$	$\theta^1_{r[0]}$
-50 dBm	-50 dBm	-50 dBm	66.978667°	113.021333°
-50 dBm	-51 dBm	-51 dBm	70.885840°	109.114159°
-50 dBm	-52 dBm	-52 dBm	75.804680°	104.195319°
-50 dBm	-53 dBm	-53 dBm	81.997132°	98.002867°
-50 dBm	-54 dBm	-54 dBm	89.792968°	90.207031°

Bu anten için hesaplanan 66.978667 ve 113.021333 derecelik orta açılar, anten ışıma örüntüsündeki hafif bir eğim nedeniyle beklenen değerlerden yaklaşık yarım derece sapmış görünüyor. Ölçüm aralığı (MI) hala 5 değerinde olsa bile, açı çözünürlükleri beklendiği gibi biraz artmış görünmektedir.

$\text{res}_2\angle(\psi^1_l)$: 3.907173°, 4.918884°, 6.192452°, 7.795836° & MI_l: 5 dBm

$\text{res}_2\angle(\psi^1_r)$: 3.907173°, 4.918884°, 6.192452°, 7.795836° & MI_r: 5 dBm

Birinci ve ikinci antenin maksimum kazanç oranı ve maksimum çözünürlük değerleri $\text{res}_{2\max}\angle(\psi^1_{lr})$ incelendiğinde, aşağıda verilen hesaplamalardan da görülebileceği gibi sırasıyla maksimum kazanç artış oranı $\Gamma_{\max2_1}(\psi)\%$ ve açı çözünürlüğü artış oranı $\text{res}_{2_1}\angle(\psi)\%$ neredeyse aynıdır.

$$G_{\max2_1}\% = \frac{3.531677 - 3.325235}{3.325235} \cong 6.20\%$$

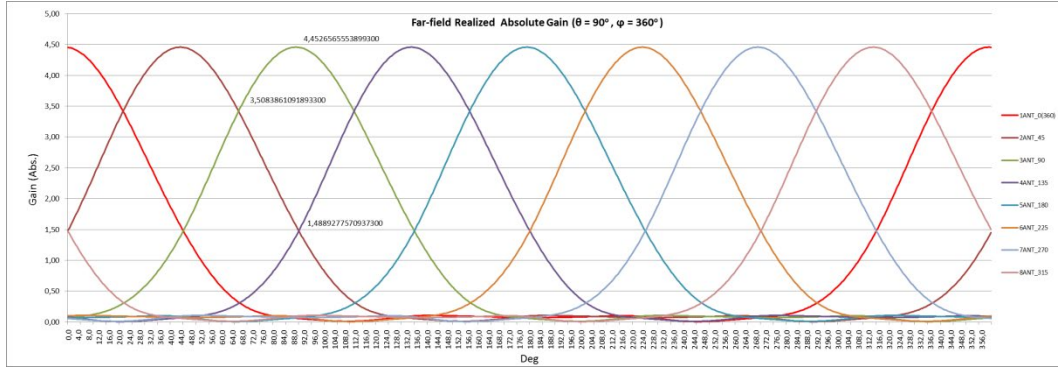
$$\Gamma_{\max2_1}(\psi)\% = \frac{2.525606 - 2.446344}{2.446344} \cong 3.24\%$$

$$\text{res}_{2_1}\angle(\psi)\% = \frac{4.028749 - 3.907173}{4.028749} \cong 3.01\%$$

Ayrıca, 90 derecelik açıda birinci ve ikinci antenlerin maksimum kazanç değerleri olan 3.531677 ve 3.325235 arasındaki artış oranı $G_{\max2_1}\% = \% 6.2$ 'dir ve bu oran çözünürlükteki artış oranı olan $\%3.01$ 'in yaklaşık iki katıdır.

6.3. YagiUda4_J için Güç Kazancı Veri Örneklemesi ve DoA Hesaplamaları

Üçüncü anten modeli için yapılan analizler, $\text{res}\angle(\psi^1_{lr})$ açı çözünürlüğündeki iyileşmeyi ve ayrıca MI ölçüm aralığını daha net bir şekilde göstermektedir.

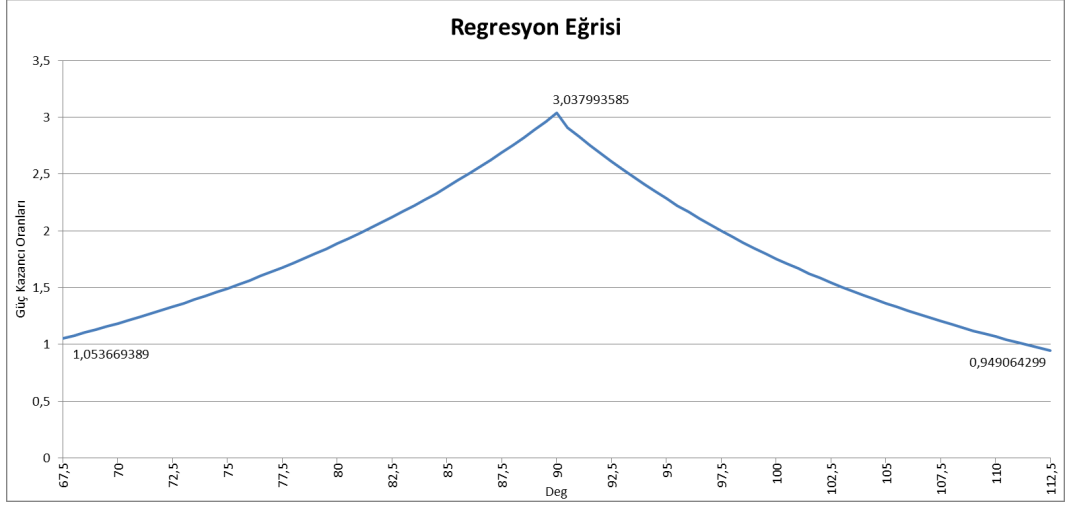


Şekil 6.7 8-YagiUda4_J UCA'nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri

İlgili 90, 67,5 ve 112,5 derecelik açılardaki anten güç kazancı, kazanç eğrilerinden alınan örnekler ve güç kazanç oranı değerleri sırasıyla Şekil 6.7, 6.8 ve 6.9'da gösterilmiştir. Bu anten için ışıma örüntüsündeki sapma yaklaşık -1 derecedir ve DoA hesaplamaları sırasında bu değer dikkate alınacaktır. Bununla birlikte, 90 derecedeki maksimum güç kazancı değeri $G_{\max3}$ ve 67.5 ve 112.5 derecelerdeki kazanç değerleri sırasıyla 4.452656, 3.508386 ve 1.488927'dir.

33		ANT0		ANT45		ANT90		ANT135
	A	B	C	D	E	F	G	H
167	66,0	0,3308802100875630	66,0	3,4485040747387400	66,0	3,3848396026586200	66,0	0,2900454528045580
168	66,5	0,3162741119054300	66,5	3,4091496271894900	66,5	3,4264167249025200	66,5	0,3023565639205970
169	67,0	0,3016680137232970	67,0	3,3697951796402500	67,0	3,4679938471464100	67,0	0,3146676750366360
170	67,5	0,2881961942832680	67,5	3,3296840017970300	67,5	3,5083861091893300	67,5	0,3279062523885650
171	68,0	0,2747243748432390	68,0	3,2895728239538100	68,0	3,5487783712322500	68,0	0,3411448297404950
172	68,5	0,2623551828883800	68,5	3,2487889230300900	68,5	3,5879042295031400	68,5	0,3553392357400820
173	69,0	0,2499859909335220	69,0	3,2080050221063700	69,0	3,6270300877740400	69,0	0,3695336417396700
174	69,5	0,2386822440090670	69,5	3,1666327705290500	69,5	3,6648133332043200	69,5	0,3847111910145700
175	70,0	0,2273784970846120	70,0	3,1252605189517200	70,0	3,7025965786346000	70,0	0,3998887402894700
176	70,5	0,2170978186645520	70,5	3,0833846387567800	70,5	3,7389654298434100	70,5	0,4160759048052410
177	71,0	0,2068171402444920	71,0	3,0415087586184000	71,0	3,7753342810522100	71,0	0,4322630693210130
178	71,5	0,1975123662502890	71,5	2,9992141871125700	71,5	3,8102204091423600	71,5	0,4494856561135260
179	72,0	0,1882075922560860	72,0	2,9569196156633100	72,0	3,8451065372325100	72,0	0,4667082429060390
180	72,5	0,1798272432159030	72,5	2,9142912506815000	72,5	3,8784440921407200	72,5	0,4849915308109930
181	73,0	0,1714468941757200	73,0	2,8716628856996900	73,0	3,9117816470489400	73,0	0,5032748187159470
182	73,5	0,1639357096231000	73,5	2,8287852172005900	73,5	3,9435063540167100	73,5	0,5226436424545410
183	74,0	0,1564245250704800	74,0	2,7859075487015000	74,0	3,9752310609844900	74,0	0,5420124661931340
184	74,5	0,1497240565719820	74,5	2,7428641943784600	74,5	4,0052794504395800	74,5	0,5624912382315080
185	75,0	0,1430235880734840	75,0	2,6998208400554200	75,0	4,0353278398946600	75,0	0,5829700102698820
186	75,5	0,1370728464277330	75,5	2,6566940084047200	75,5	4,0636366652307200	75,5	0,6045826728558640
187	76,0	0,1311221047819820	76,0	2,6135671767540300	76,0	4,0919454905667700	76,0	0,6261953354418450
188	76,5	0,1258582554700290	76,5	2,5704370882772700	76,5	4,1184513765444200	76,5	0,6489652370334630
189	77,0	0,1205944061580760	77,0	2,5273069998005000	77,0	4,1449572625220800	77,0	0,6717351386250820
190	77,5	0,1159535051608940	77,5	2,4842513005895800	77,5	4,1695966129993400	77,5	0,6956848305269350
191	78,0	0,1113126041637120	78,0	2,4411956013786600	78,0	4,1942359634766000	78,0	0,7196345224287890
192	78,5	0,1072303639846830	78,5	2,3982888050225300	78,5	4,2169451417280600	78,5	0,7447854728806110
193	79,0	0,1031481238056550	79,0	2,3535820086664100	79,0	4,2396543199795200	79,0	0,7699364233324330
194	79,5	0,0995606971796837	79,5	2,3126950016053600	79,5	4,2603700988568200	79,5	0,7963086476483500
195	80,0	0,0959732705537125	80,0	2,2700079945443000	80,0	4,2810858777341200	80,0	0,8226808719642680
196	80,5	0,0928180371449478	80,5	2,2276076367742700	80,5	4,2997461412425400	80,5	0,8502924787480470
197	81,0	0,0896628037361831	81,0	2,1852072790042400	81,0	4,3184064047509600	81,0	0,8779040855318270
198	81,5	0,0868791433675820	81,5	2,1431561265867400	81,5	4,3349510681244200	81,5	0,9067707406633500
199	82,0	0,0840954829989808	82,0	2,1011049741692400	82,0	4,3514957314978900	82,0	0,9356373957948730
200	82,5	0,0816255178267139	82,5	2,0594611426626500	82,5	4,3658678343284500	82,5	0,9657717079634010
201	83,0	0,0791555526544469	83,0	2,0178173111560700	83,0	4,3802399371590200	83,0	0,9959060201319280
202	83,5	0,0769448403489577	83,5	1,9766344903107400	83,5	4,3923868542466800	83,5	1,0273168543155800
203	84,0	0,0747341280434685	84,0	1,9354516694654200	84,0	4,4045337713343400	84,0	1,0587276884992300
204	84,5	0,0727322885471879	84,5	1,8947792898813900	84,5	4,4144084791899800	84,5	1,0914194170294600
205	85,0	0,0707304490509074	85,0	1,8541069102973700	85,0	4,4242831870456100	85,0	1,1241111455597000
206	85,5	0,0688917088560101	85,5	1,8139904528674600	85,5	4,4318455207530900	85,5	1,1580828502515300
207	86,0	0,0670529686611129	86,0	1,7738739954375500	86,0	4,4394078544605700	86,0	1,1920545549433700
208	86,5	0,0653366087241410	86,5	1,7343554249600700	86,5	4,4446256900343200	86,5	1,2272991981031900
209	87,0	0,0636202487871691	87,0	1,6948368544825800	87,0	4,4498435256080700	87,0	1,2625438412630000
210	87,5	0,0619909450455148	87,5	1,6559551504872900	87,5	4,4526938270176900	87,5	1,2990474279880400
211	88,0	0,0603616413038605	88,0	1,6170734464919900	88,0	4,4555441284273100	88,0	1,3355510147130800
212	88,5	0,0587896901121881	88,5	1,5788651976801700	88,5	4,4560138058406600	88,5	1,3732917734516900
213	89,0	0,0572177389205156	89,0	1,5406569488683400	89,0	4,4564834832540100	89,0	1,4110325321903000
214	89,5	0,0556791633876458	89,5	1,5031569731154400	89,5	4,4545700193219700	89,5	1,4499801446420100
215	90,0	0,0541405878547760	90,0	1,4656569973625500	90,0	4,4526565553899300	90,0	1,4889277570937300
216	90,5	0,0526171248309305	90,5	1,4288989473129600	90,5	4,4483683689380100	90,5	1,5290426717428300

Şekil 6.8 YagiUda4_J için Örneklenen Veriler



Şekil 6.9 YagiUda4_J Regresyon Eğrileri

Anten maksimum güç kazanç oranı $\Gamma_{nmax3}(\psi)$ 3.037993 olarak elde edilmiş ve regresyon katsayıları ise $a_1 = 11.371654$, $b_1 = -34.547013$, $a_r = -11.371654$, ve $b_r = 34.547013$ olarak hesaplanmış ve de -50 dBm başlangıç test değeri ve diğer kriterler ile birlikte APPR algoritmasında kullanılarak Tablo 6.3'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 6.3 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları

P'(dBm)	P _l (dBm)	P _r (dBm)	$\theta^l_{l[0]}$	$\theta^r_{r[0]}$
-50 dBm	-50 dBm	-50 dBm	66.824641°	113.175358°
-50 dBm	-51 dBm	-51 dBm	69.769051°	110.230948°
-50 dBm	-52 dBm	-52 dBm	73.475844°	106.524155°
-50 dBm	-53 dBm	-53 dBm	78.142420°	101.857579°
-50 dBm	-54 dBm	-54 dBm	84.017291°	95.982708°
-50 dBm	-55 dBm	-55 dBm	91.413315°	88.586684°

Birincil antenin sol ve sağ tarafındaki bitişik antenler için -50 dBm işaret gücü ile hesaplanan orta açılar sırasıyla 66.824641 ve 113.175358 derecedir ve gerçek orta açılardan yaklaşık bir derece sapma gösterirler. Ayrıca, aşağıda hesaplandığı gibi, toplamda 6 sinyal verisi ile artan bir MI anten ölçüm aralığı ve daha iyi bir açı çözünürlüğü performansı göstermektedir.

$res_3\angle(\psi^l_1)$: 2.94441°, 3.706793°, 4.666576°, 5.874871°, 7.396024° & MI_l : 6 dBm

$res_3\angle(\psi^r_1)$: 2.94441°, 3.706793°, 4.666576°, 5.874871°, 7.396024° & MI_r : 6 dBm

Burada da yine en yüksek açı çözünürlüğü olan $res_{3max}\angle(\psi^l_{1r}) = 2.94441^\circ$ dikkate alındığında, bu antenin 4.452656 kazanç değeriyle bir önceki antenin 3.037993 olan

kazanç değerine göre DoA açısı çözünürlüğünde yaklaşık 1 derecelik artışla daha başarılı olduğu açıktır.

Açısı çözünürlüğündeki artış oranı yüzde olarak hesaplanıp maksimum güç kazancı oranındaki artış oranıyla karşılaştırılırsa aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$G_{\max3_2}\% = \frac{4.452656 - 3.531677}{3.531677} \cong 26.07\%$$

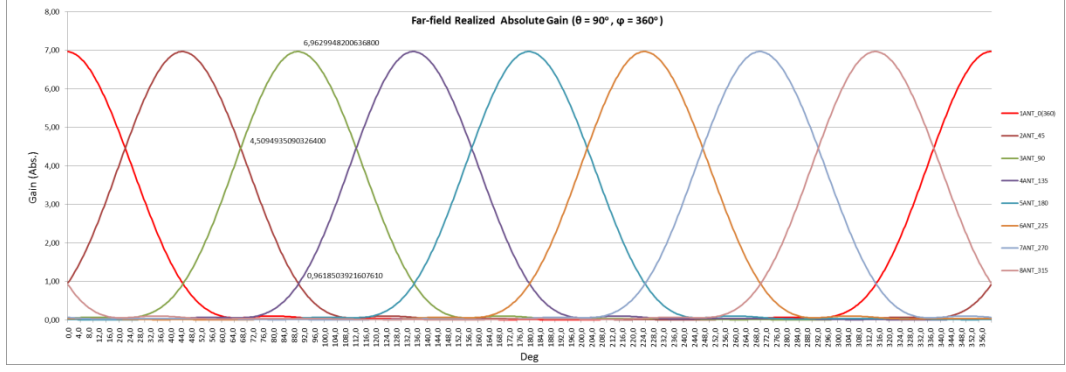
$$\Gamma_{\max3_2}(\psi)\% = \frac{3.037993 - 2.525606}{2.525606} \cong 20.28\%$$

$$\text{res}_{3_2}\angle(\psi)\% = \frac{3.907173 - 2.94441}{3.907173} \cong 24.64\%$$

İkinci ve üçüncü antenlerin 90 derecelik açıdaki maksimum kazanç değerleri olan 3.531677 ve 4.452656 arasındaki artış oranı $G_{\max3_2}\% = \% 26.07$ ve çözünürlükteki artış oranı ise $\text{res}_{3_2}\angle(\psi)\% = \% 24.64$ 'tür ve anten maksimum kazanç artış oranına oldukça yakındır.

6.4. YagiUda5_J için Güç Kazancı Veri Örneklemesi ve DoA Hesaplamaları

Bu anten 8.5471'e eşit yüksek yönlülük (D_o) ve 6.9673'e eşit (8.43 dBi) maksimum $G_{\max4}$ kazancı açısından en iyi anten tasarımı olduğundan, çok daha yüksek bir $\text{res}\angle(\psi')$ açısı çözünürlüğü, alınan RSSI sinyal veri dizisi için daha geniş bir MI ölçüm aralığı ve çok daha iyi bir DoA ölçümü sağlaması beklenmektedir. Bu antenin ayrıca, yüksek hassasiyetle tarama yapabilen daha iyi bir hedef tarama alanı oluşturmak için bir Bluetooth RF modülü ile çok sayıda anten elemanından oluşan sistemin elemanı olarak kullanılması beklenmektedir. Dördüncü antene ait gerçekleşen güç kazanç eğrileri Şekil 6.10'da, örnekleme verileri Şekil 6.11'de ve doğrusal regresyon eğrisi Şekil 6.12'de verilmiştir.



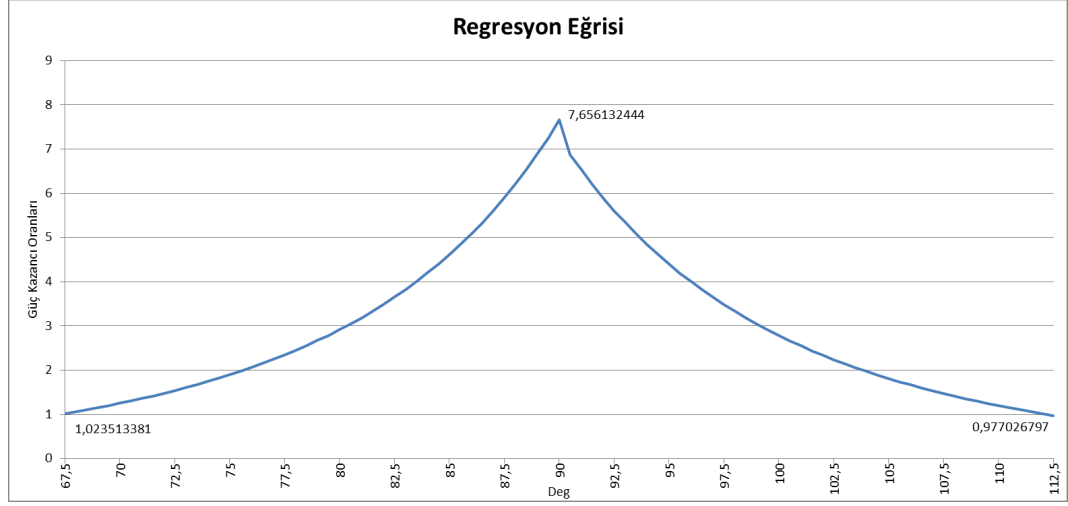
Şekil 6.10 8-YagiUda5_J UCA'nın Uzak Alan Işıma Güç Kazanç Örüntüleri

Beş elemanlı YagiUda5_J antenin 90°'deki maksimum kazancı $G_{\max}$ 6.962994, 67.5°'deki sol bitişik anten örüntüsü ile kesişim noktasındaki kazancı 4.509493 ve 90°'deki en düşük kesişim kazancı 0.961850 olarak HFSS simülasyon ve analiz programıyla hesaplanmıştır. Antenin ışıma örüntüsünde neredeyse hiç aç kayması olmadığından, orta açıların APPR algoritması içinde doğru hesaplanması beklenmektedir.

Kazanç değeri en yüksek olan bu antenin güç kazanç örüntüsü eğrisinden 67.5 dereceden 90 dereceye kadar örneklenen veriler regresyon eşitliğinde hesaplandıktan sonra, elde edilen a_1 ve b_1 katsayılarının en küçük değeri aldığı görülmektedir.

33		ANT0		ANT45		ANT90		ANT135
	A	B	C	D	E	F	G	H
167	66,0	0,0533454263494129	66,0	4,6735353879394800	66,0	4,2331137907371100	66,0	0,0546211170641638
168	66,5	0,0541055764270862	66,5	4,5846639358657100	66,5	4,3254994311381000	66,5	0,0548129119365098
169	67,0	0,0548657265047594	67,0	4,4957924837919500	67,0	4,4178850715309000	67,0	0,0550047068088558
170	67,5	0,0563268304154173	67,5	4,4058959977404100	67,5	4,5094935090326400	67,5	0,0557789761246034
171	68,0	0,0577879343260753	68,0	4,3159995116888600	68,0	4,6011019465262000	68,0	0,0565532454403509
172	68,5	0,0597777629706295	68,5	4,2253683357789700	68,5	4,6915995411085500	68,5	0,0580453866460264
173	69,0	0,0617675916151835	69,0	4,1347371598690800	69,0	4,7820971356909000	69,0	0,0595375278517019
174	69,5	0,0641218340629793	69,5	4,0436630466335300	69,5	4,8711472782363900	69,5	0,0618889557563210
175	70,0	0,0664760765107750	70,0	3,952588933979900	70,0	4,9601974207818700	70,0	0,0642403836609401
176	70,5	0,0690406432049203	70,5	3,8613641026069600	70,5	5,0474619253531600	70,5	0,0675973199839338
177	71,0	0,0716052098990656	71,0	3,7701392718159400	71,0	5,1347264299244400	71,0	0,0709542563358476
178	71,5	0,0742383424198747	71,5	3,6790551223772100	71,5	5,2198669307109200	71,5	0,0754665014181083
179	72,0	0,0768714749406837	72,0	3,5879709729384700	72,0	5,3050074314974000	72,0	0,0799787465003690
180	72,5	0,0794455948089416	72,5	3,4973164620300800	72,5	5,3876868166795000	72,5	0,0857984516252490
181	73,0	0,0820197146771997	73,0	3,4066619511216800	73,0	5,4703662018615900	73,0	0,0916181567501290
182	73,5	0,0844229533866388	73,5	3,3167216793002000	73,5	5,5502501204321100	73,5	0,0988986126033585
183	74,0	0,0868261920960779	74,0	3,2267814074787200	74,0	5,6301340390026200	74,0	0,1061790684565880
184	74,5	0,0889635562959269	74,5	3,1378334708664100	74,5	5,7068925165604200	74,5	0,1150735212980600
185	75,0	0,0911009204957758	75,0	3,0488855342540900	75,0	5,7836509941182200	75,0	0,1239679741395320
186	75,5	0,0928950594336641	75,5	2,9611992235415700	75,5	5,8569601896011500	75,5	0,1346284782609600
187	76,0	0,0946891983715523	76,0	2,8735129128290400	76,0	5,9302693850840900	76,0	0,1452889823823890
188	76,5	0,0960807547776515	76,5	2,7873463524490300	76,5	5,9998135123602500	76,5	0,1578652942835050
189	77,0	0,0974723111837507	77,0	2,7011797920690100	77,0	6,0693576396364100	77,0	0,1704416061846220
190	77,5	0,0984198511591624	77,5	2,6167776205216200	77,5	6,1348310661878400	77,5	0,1850801231959840
191	78,0	0,0993673911345741	78,0	2,5323754489742400	78,0	6,2003044927392700	78,0	0,1997186402073460
192	78,5	0,0998469227529307	78,5	2,4499666423265000	78,5	6,2614140130264700	78,5	0,2165613839019240
193	79,0	0,1003264543712870	79,0	2,3675578356787500	79,0	6,3225235333136600	79,0	0,2334041275965030
194	79,5	0,1003305580991640	79,5	2,2873537705731600	79,5	6,3789907977565300	79,5	0,2525877702614040
195	80,0	0,1003346618270410	80,0	2,2071497054675600	80,0	6,4354580621993900	80,0	0,2717714129263060
196	80,5	0,0998712680489812	80,5	2,1293425458813600	80,5	6,4870221252203200	80,5	0,2934263435817400
197	81,0	0,0994078742709210	81,0	2,0515353862951600	81,0	6,5385861882412400	81,0	0,3150812742371750
198	81,5	0,0984987337590965	81,5	1,9762968605741100	81,5	6,5850061217957800	81,5	0,3393306991733330
199	82,0	0,0975895932472721	82,0	1,9010583348530500	82,0	6,6314260553503200	82,0	0,3635801241094920
200	82,5	0,0962684950032404	82,5	1,8285389473982500	82,5	6,6724835591682900	82,5	0,3905391956706270
201	83,0	0,0949473967592088	83,0	1,7560195599434400	83,0	6,7135410629862600	83,0	0,4174982672317610
202	83,5	0,0932581940148510	83,5	1,6863482568851500	83,5	6,7490429906519600	83,5	0,4472732336543420
203	84,0	0,0915689912704931	84,0	1,6166769538268600	84,0	6,7845449183176600	84,0	0,4770482000769220
204	84,5	0,0895635003957641	84,5	1,5499612358304500	84,5	6,8143256304583600	84,5	0,5097355686674980
205	85,0	0,0875580095210351	85,0	1,4832455178340500	85,0	6,8441063425990500	85,0	0,5424229372580750
206	85,5	0,0852938480734456	85,5	1,4195719676978200	85,5	6,8680297956976900	85,5	0,5781086431895550
207	86,0	0,0830296866258561	86,0	1,3558984175615900	86,0	6,8919532487963300	86,0	0,6137943491210350
208	86,5	0,0805681158178797	86,5	1,2953335872894100	86,5	6,9099147310325100	86,5	0,6525529227615610
209	87,0	0,0781065450099035	87,0	1,2347687570172300	87,0	6,9278762132686900	87,0	0,6913114964020870
210	87,5	0,0755103785938347	87,5	1,1773603401993500	87,5	6,9398036474635800	87,5	0,7332052234879920
211	88,0	0,0729142121777658	88,0	1,1199519233814800	88,0	6,9517310816584600	88,0	0,7750989505738980
212	88,5	0,0702458483761798	88,5	1,0657301253048200	88,5	6,9575858295797700	88,5	0,8201770217819040
213	89,0	0,0675774845745936	89,0	1,0115083272281500	89,0	6,9634405775010700	89,0	0,8652550929899090
214	89,5	0,0648971105257441	89,5	0,9604873380608700	89,5	6,9632176987823700	89,5	0,9135527425753350
215	90,0	0,0622167364768946	90,0	0,9094663488935860	90,0	6,9629948200636800	90,0	0,9618503921607610
216	90,5	0,0595807460931187	90,5	0,8616458249672380	90,5	6,9567227617457300	90,5	1,0133880292451400

Şekil 6.11 YagiUda5_J için Örneklenen Veriler



Şekil 6.12 YagiUda5_J Regresyon Eğrileri

Regresyon eğrileri çıkarılıp maksimum güç örüntü oranı $\Gamma_{\text{max4}}(\psi) = 7.656132$ olarak bulunduktan sonra regresyon katsayıları $a_1 = 3.419882$, $b_1 = -26.183071$, $a_r = -3.419882$ ve $b_r = 26.183071$ olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek kazançlı antende -50 dBm'den MI'nın tanımlandığı son değere kadar RSSI test değerlerinin sayısı 10'a ulaşmaktadır. Buna ek olarak, Tablo 6.4'ten görüldüğü üzere açılı çözünürlüğü önceki antenlerin maksimum değerlerinden belirgin biçimde çok daha yüksektir.

Tablo 6.4 Girilen Anten Güç Değerlerine Karşı DoA Açıları

P'(dBm)	P _i (dBm)	P _r (dBm)	$\theta_{l 0}^1$	$\theta_{r 0}^1$
-50 dBm	-50 dBm	-50 dBm	67.236810°	112.763189°
-50 dBm	-51 dBm	-51 dBm	68.122304°	111.877695°
-50 dBm	-52 dBm	-52 dBm	69.237076°	110.762923°
-50 dBm	-53 dBm	-53 dBm	70.640490°	109.359509°
-50 dBm	-54 dBm	-54 dBm	72.407284°	107.592715°
-50 dBm	-55 dBm	-55 dBm	74.631545°	105.368454°
-50 dBm	-56 dBm	-56 dBm	77.431724°	102.568275°
-50 dBm	-57 dBm	-57 dBm	80.956941°	99.043058°
-50 dBm	-58 dBm	-58 dBm	85.394926°	94.605073°
-50 dBm	-59 dBm	-59 dBm	90.982018°	89.017981°

Tablo 6.4'te ilk satır, birincil ve bitişik antenlerde -50 dBm'lik eşit Bluetooth ADS RSSI sinyal seviyelerini gösterir. Bu test sinyali değerinin sırasıyla 45 ile 90 derece ve 90 ile 135 derece arasında sol orta açılı için 67.5° ve sağ orta açılı için 112.5° fiziksel orta açılı değeri beklenmiş ve hesaplama sonucu olarak elde edilen 67.236810° sol orta açılı ve 112.763189° sağ orta açılı değerlerinin ihmal edilebilir düzeyde küçük

sapmalarla fiziksel orta açılarla neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Uygulanan test sinyali değerleri azaltıldıkça açılar arasındaki fark biraz açılrsa da önceki anten tasarımlarına göre bu değişim çok daha az ve dağılım daha tekdüze bir yapıdadır. Bu hesaplama sonuçları bu açı dizisi ile antenin uygulama ölçümlerinde daha kararlı sonuçlar vereceği anlamına gelir.

$res_4\angle(\psi^1)$: 0.885494°, 1.114772°, 1.403414°, 1.766794°, 2.224261°, 2.800179°, 3.525217°, 4.437985°, 5.587092° & MI_l : 10 dBm

$res_4\angle(\psi^1_r)$: 0.885494°, 1.114772°, 1.403414°, 1.766794°, 2.224261°, 2.800179°, 3.525217°, 4.437985°, 5.587092° & MI_r : 10 dBm

Beş elemanlı bu Yagi anten için 67.5 ve 112.5 derecelik orta açılardan başlayarak 90 derecelik açıya kadar olan DoA algılama alanında, 1 derecenin bile altındaki $res_{4max}\angle(\psi^1_{lr}) = 0.885494^\circ$ derecelik yüksek bir maksimum çözünürlükten başlayarak yaklaşık 5 dereceye kadar etkili ve kullanışlı açı değerleri elde edilmiştir. Bu düzeydeki yüksek çözünürlüklü açılar ve toplam 10 tane RSSI sinyal değerine sahip geniş bir MI, DoA ölçümünde çok daha doğru ve gerçekçi ölçümler yapılmasını sağlayacak ve tezin bir diğer önerisi olan daha yüksek algoritma ve UCA performansı sağlayarak Bluetooth gibi kısa mesafeli ve az hassasiyet içeren sinyaller yayan kablosuz modüllerin yönünü bulma çalışmalarını daha uygulanabilir hale getirecektir.

Son olarak, anten yönlülüğü ve kazancındaki önemli iyileşme, maksimum kazanç oranlarındaki artış oranları ile açı çözünürlükleri arasındaki yaklaşık eşitliğin bozulduğunu göstermektedir.

$$G_{max4_3}\% = \frac{6.962994 - 4.452656}{4.452656} \cong 56.37\%$$

$$\Gamma_{nmax4_3}(\psi)\% = \frac{7.656132 - 3.037993}{3.037993} \cong 152.01\%$$

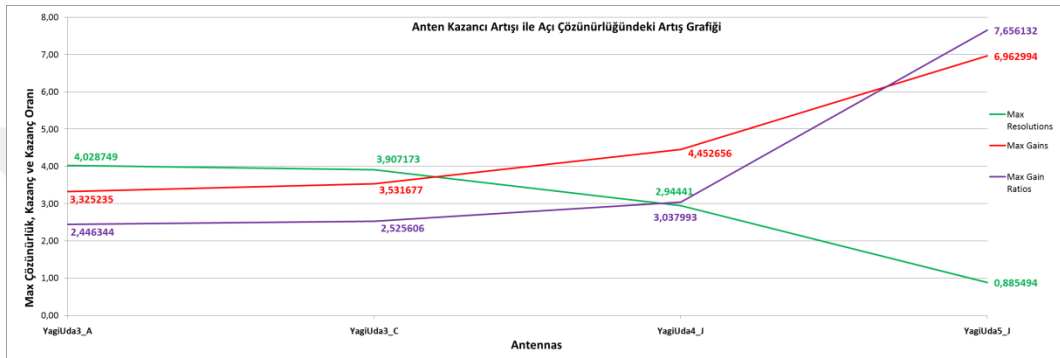
$$res_{4_3}\angle(\psi)\% = \frac{2.94441 - 0.885494}{2.94441} \cong 69.92\%$$

Buna ek olarak, üçüncü ve dördüncü antenlerin 90 derecelik açıdaki maksimum kazanç değerleri olan 4.452656 ve 6.962994 arasındaki artış oranı $G_{max4_3}\% = \%$

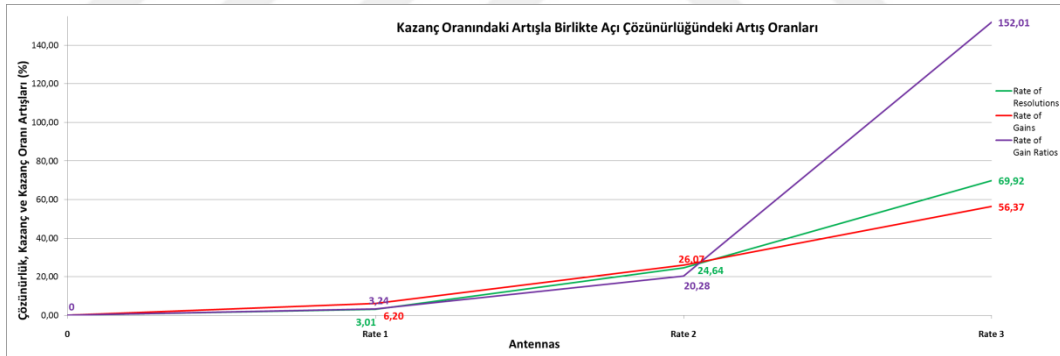
56.37 olup, bu kez maksimum kazanç ve açı çözünürlüklerindeki artış oranlarının altındadır.

6.5. Sonuçların Karşılaştırılması ve Artan Açı Çözünürlüğünün Kanıtı

Önceki dört alt bölümdeki analizler ve Şekil 6.13 ile 6.14'teki grafikler üzerindeki sonuçlar incelendiğinde, artan anten yönlülüğü D_o , güç kazancı G_{max} ve dolayısıyla güç kazanç oranı $\Gamma_{nmax}(\psi)$ ile $res_{nmax}\angle(\psi^1_{lr})$ açı çözünürlüğündeki artış açıkça görülebilir.



Şekil 6.13 Açı Çözünürlüğü, Kazanç ve Kazanç Oranında Artışlar



Şekil 6.14 Açı Çözünürlüğü, Kazanç ve Kazanç Oranında Oransal Artışlar

Şekil 6.13 ve 6.14'teki grafikler, bir yönlendirici antenin yönlülük değeri artırılarak kazanç değerinin iyileştirilmesi durumunda, doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) kullanılarak APPR algoritması ile hesaplanan DoA'nın açıları arasındaki büyüklüğün azalacağını ve çözünürlük değerlerinin artacağını göstermektedir. Tezin önermesinin kanıtı olarak Eşitlik 5.14a ve 5.14b'deki ifadeler temelinde değerlendirildiğinde görülebileceği gibi, yönlülük D_o ve güç kazancı G_{re} 'nin artmasına bağlı olarak APPR LRA algoritmasının regresyon katsayıları olan a_l , b_l , a_r ve b_r değerleri küçülmüş ve $res\angle(\psi^1)$ açı çözünürlüklerinde artış sağlanmıştır. Daha küçük regresyon katsayı değerleri, komşu antenler tarafından alınan, örneğin $P^l(\text{dBm})$ ve $P_l(\text{dBm})$ güçleri

arasındaki birim fark başına $\theta_{[0]}^1$ DoA açısında daha küçük sonuçlara neden olur. Özellikle, Şekil 6.14'teki Oran 1 noktasındaki % 3.24, % 6.20 ve % 3.01 ve ardından Oran 2 noktasındaki % 26.07, % 20.28 ve % 24.64 oranları birbirine çok yakınken, Oran 3'teki kazanç oranı artışının dik yükselişiyle üçüncü değerler olan % 56.37, % 152.01 ve % 69.92 arasında önemli bir artış farkı vardır. Bu, açılı çözünürlüğündeki $\text{res}\angle(\psi)\%$ artış oranının kazanç oranındaki $\Gamma_{\text{max}}(\psi)\%$ artış oranıyla birlikte arttığı, ancak Şekil 6.14'teki Oran 2'de olduğu gibi belirli bir orandan sonra açılı çözünürlüğü oranının kazanç oranındaki artış oranından daha yavaş arttığı anlamına gelir. Bununla birlikte anten kazancının artışıyla çözünürlük artışının neredeyse paralel olduğu, ancak Oran 2 ile Oran 3 noktaları arasında çözünürlük artışının bir miktar daha fazla olduğu da görülmektedir. Bu aynı zamanda anten kazancındaki artış oranının açılı çözünürlüğündeki artış üzerindeki etkisinin belli bir noktadan sonra az da olsa artarak devam ettiği anlamına gelmektedir. Ancak tezin önerileri dâhilinde olmadığı için bu iddiayı kanıtlamak adına gereken daha fazla sayıdaki anten tasarımına ve kazanç değeri analizine gidilmemiştir.

Bu çalışmaların ve sonuçların anten yönlülüğü ve kazancı ile doğrudan bağıntılı ancak anten tipinden bağımsız olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, bu yüksek lisans tezinin bu önerisi HSFF ve APPR algoritması sayesinde anten tasarımları, hesaplamalar ve analizlerden elde edilen sonuçlarla matematiksel olarak kanıtlanmış ve açıkça gösterilmiştir. Simülasyon ve hesaplama sonuçları, sonraki bölümlerde sadece YagiUda3_C, YagiUda4_J ve YagiUda5_J antenleri dikkate alınarak kurulacak donanım sisteminin sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

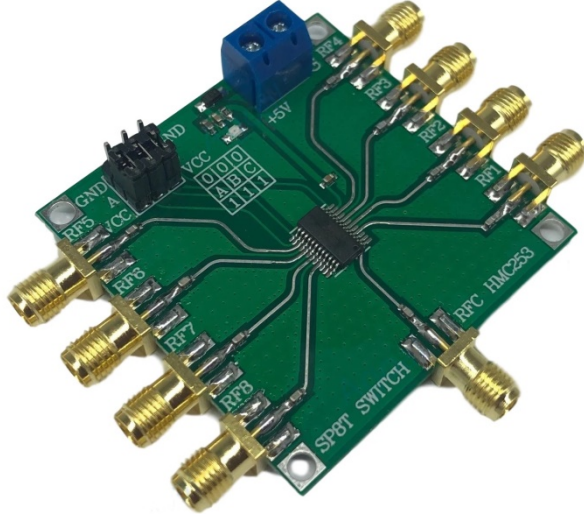
7. UCA ANTEN İLE GÖMÜLÜ SİSTEM VE YAZILIMI

Sistem, bir mikrodenetleyici birimi (MCU) ve onun temel elektronik çevre birimleri, alıcı olarak bir Bluetooth RF modülü, sekiz adet anten elemanı için bir RF anahtarlayıcısı, bir UCA anten dizisi, SMA bağlantı konektörleri ve koaksiyel kablo bağlantı elemanları gibi birimlerden oluşur. Mikrodenetleyici, I/O portlarına, düğmelere, anahtarlara ve diğer konektörlere bağlanan çeşitli konektör türlerine sahip bir uygulama deney kartı üzerindedir. UCA, önceki bölümlerde elektriksel

olarak tasarlanan sekiz adet yönlü PCB mikroşerit Yagi anten ve bu antenlerin anahtarlama işlemlerini gerçekleştirecek bir RF anahtarından meydana gelmiştir. Buna ek olarak, bir gömülü yazılım algoritması, UART seri portu üzerinden Bluetooth modülü ile iletişim, anten dizisinin anahtarlama, hedef MAC adresinin ortamdaki çok sayıda sinyal arasından alınarak hedef cihaza kilitlenmesi, RSSI değerinin dBi değerinden ondalık değere dönüştürülmesi ve APPR algoritması tarafından hesaplanan DoA'nın belirlenmesi gibi tüm işlemleri yönetir ve gerçekleştirir. Yukarıda anlatılan sistemin tüm birimleri ve işlemleri sonraki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

7.1. RF Anahtarı ve Bağlantı Elemanları

Hedef RF modülünden gelen ADS ve RSSI sinyalleri, UCA'nın tüm elemanları tek tek anahtarlara antenler üzerinden sırayla okunmalıdır. Bunu yapmak için bu tip çalışmalarda RF anahtarlar (RF/SW) kullanılır. Bu projede gerçekleştirilen deneysel sistemde Şekil 7.1'de gösterilen sekiz çıkışlı HMC253AQS24 RF anahtar [33] kullanılmıştır.



Şekil 7.1 8 Çıkışlı RF Anahtar

RF anahtarının genel özellikleri Tablo 7.1'de ve fonksiyon tablosu ise Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.1 RF Anahtarın Genel Özellikleri

RF/SW IC	HMC253AQS24
Tek Besleme	Vdd Aralığı = +5 Vdc $\pm$ 10%
Çalışma Frekansı	DC to 2.5 GHz
Dekoder	3:8
TTL Kontrol Gerilimleri	Low: 0 to + 0.8 Vdc, High: +2 to +5 Vdc
Bağlantı Kaybı	Max. 2.1 dB @ DC – 2.5 GHz
Yalıtım	Max. 33 dB @ DC – 2.5 GHz
Konektörler	9 x SMA

Tablo 7.2 RF Anahtarın Fonksiyon Tablosu

Kontrol Girişleri			Sinyal Yolu
A	B	C	RF COM To:
Low	Low	Low	RF1
High	Low	Low	RF2
Low	High	Low	RF3
High	High	Low	RF4
Low	Low	High	RF5
High	Low	High	RF6
Low	High	High	RF7
High	High	High	RF8

Anahtar, Tablo 7.1'de görülen gerilim seviyeleri ve bağlantı elemanları açısından bir sonraki bölümde tanıtılan MCU uygulama kartı tarafından çalıştırılmaya uygundur. Şekil 7.1 ve Tablo 7.2'de gösterildiği gibi, RF anahtar, uygulama kartı aracılığıyla yüksek seviye için +3.3 Vdc ve düşük seviye için 0 V ile MCU'nun üç I/O pini üzerinden RF1'den RF8'e kadar bağlı sekiz adet antenin sinyal yollarını değiştirmek için kullanılan ve 3:8 TTL kod çözücü üzerinde yer alan A, B ve C olarak adlandırılan üç kontrol girişine sahiptir. 33 dB'lik sinyal yalıtımı, komşu yollardaki sinyalleri bastırmak, engellemek ve kullanılan sinyal yolunu girişimlerden korumak için yeterlidir. Ayrıca, RSSI sinyal seviyelerinin RF anahtarının her bir iletim hattının 2.1 dB'lik kayıpları nedeniyle sabit bir değer ile azalması ve ekranlı bağlantı kablolarının ve SMA konektörlerinin ihmal edilebilir kayıplarının APPR algoritması ve DoA ölçümlerinin sonucunda kavramsal olarak bir değişikliğe neden olmayacağı anlaşılmaktadır.

Sisteme bağlı alıcı RF modülü ile RF/SW arasında bir adet ve RF/SW ile antenler arasında sekiz adet olmak üzere, iki ucunda erkek SMA konektörleri bulunan toplam

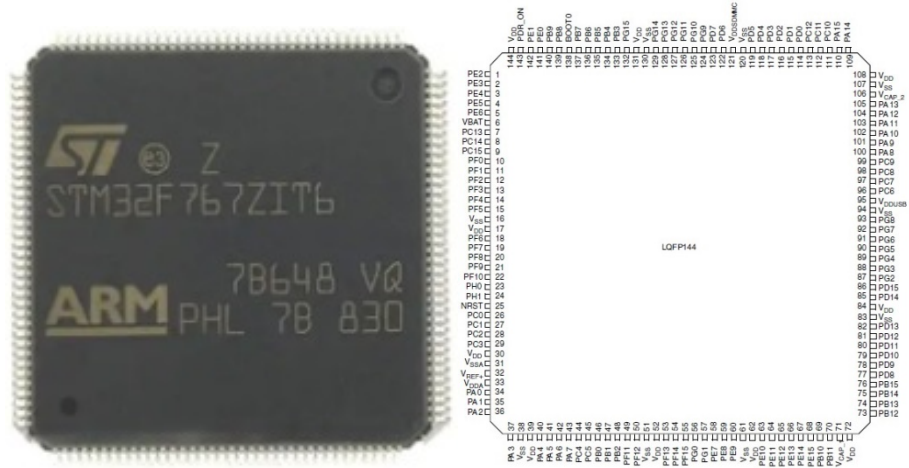
dokuz adet RG316 ekranlı kablo sistemde kullanılmıştır. Bunlara ek olarak, Şekil 7.2'de gösterilen antenlere ve RF modülüne monte edilmiş dokuz adet dişi SMA konektör kullanılmıştır.



Şekil 7.2 RG316 Ekranlı Kablolar ve SMA Konektörleri

7.2. MCU ve Gömülü Sistem

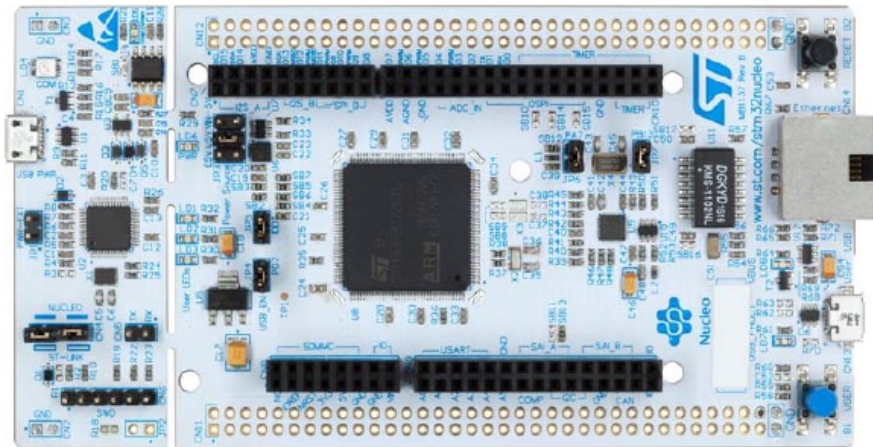
Ana kontrol birimi olarak kullanılan ve Tablo 7.3'te listelenen bazı gelişmiş yeteneklere ve özelliklere sahip olan STM32F767ZIT ARM Cortex-M7 mikrodeneleyici birimi (MCU) [26] Şekil 7.3'te ve NUCLEO-F767ZI deney kartı ise Şekil 7.4'te gösterilmiştir. MCU'nun sahip olduğu 32-bit CPU, 216 MHz saat hızı, 512 KB RAM belleği, 2 MB flaş belleği, yüksek çözünürlüklü zamanlayıcıları, ADC cihazları, UART seri iletişim portları ve alternatif fonksiyonlara sahip toplam 144 I/O pini ile performansı tezin deneysel sistemi için oldukça yeterlidir. Kullanım ve bağlantı kolaylığı için MCU, üretici firma tarafından NUCLEO-F767ZI olarak adlandırılan bir deney kartı üzerine monte edilmiştir.



Şekil 7.3 STM32F767ZIT ARM Cortex-M7 MCU ve Bağlantı PIN'leri

Tablo 7.3 MCU Genel Özellikleri

MCU	STM32F767ZIT6
CPU	ARM 32-bit Cortex-M7
Frekans	216 MHz
RAM	512 Kbytes
Flash	2 MB
Güç Kullanımı	500 mW
Güç Kaynağı	1.7 – 3.6 VDC
Osilatör	4 – 26 MHz Crystal
ADC	12-bit, 2.4 MSPS
Timer	18 Timer, 32-bite kadar
Arayüz	USART, I ² C, SPI, CAN
I/O PIN Gerilimleri	1.7 – 3.6 VDC Giriş & Çıkış için
I/O PIN Akımları	25 mA Giriş & Çıkış için
Paket	LQFP-144



Şekil 7.4 NUCLEO-F767ZI Deney Kartı

Şekil 7.4'te gösterilen [34]'teki deney kartında bir kullanıcı ve bir sıfırlama düğmesi, kırmızı, yeşil ve mavi renkte üç LED, 3,3 V ve 5 V besleme gerilimi kaynakları, mikro-AB USB, çok sayıda zio ve morfo tipi konektör, 8 MHz harici kristal osilatör, MCU pinlerinin doğrudan giriş ve çıkış konektörleri ve güç ve hata ayıklayıcı/programlayıcı işlemleri için ST-LINK/V2-1 bilgisayar bağlantı tümdevreleri bulunmaktadır.

Deney kartı üzerindeki MCU, flaş belleğinde sistem işletim yazılımını barındırır, UART seri haberleşme cihazı üzerinden Bluetooth RF modülü ile veri transferini gerçekleştirir, RF anahtarının sinyal geçiş yolunu değiştirir, alınan RSSI değerlerini hesaplar, hedef cihazın varış açısını belirler ve elde edilen verileri görüntülenmek üzere bilgisayar ekranına gönderir. Tümüleşik geliştirme ortamı (IDE) olarak µVision V5 KEIL kullanılarak sistem yapılandırma kodları, APPR algoritması ve hedef sinyal hesaplamaları 'C' yazılım dilinde geliştirilmiştir.

7.3. Sistem Yazılımı ve Yapılandırmaları

ARM Cortex-M serisi cihazların neredeyse tamamı için MCU yapılandırma kodları genelde osilatör, saat, önbellek, GPIO ve zamanlayıcı ayarlarından oluşur. Ayrıca, STM32F serisi mikrodenetleyiciler için bir donanım soyutlama katmanı olan HAL kodları sistem ayarını kolaylaştırır. Bunlar göz önüne alınarak bazı sistem ayarları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

7.3.1. Sistem Osilatörü ve Saat Yapılandırmaları

Sistem osilatörü ve saat yapılandırma kodlarının bir kısmı temel bilgi vermek amacıyla aşağıda gösterilmiştir.

```
RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
RCC_OscInitStruct.HSEState       = RCC_HSE_BYPASS;
RCC_OscInitStruct.HSISState      = RCC_HSI_OFF;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState   = RCC_PLL_ON;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource  = RCC_PLLSOURCE_HSE;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM       = 8;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN       = 432;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP       = RCC_PLLP_DIV2;
```



```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ      = 9;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR      = 7;
if(HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)

```

Tüm fonksiyonları çalıştırmak için daha düşük bir frekans yeterli olsa da sistemi olası diğer uygulamalara hazır hale getirmek için saat MCU'nun maksimum hızına ayarlanmıştır. Osilatör tipi yüksek hızlı harici (HSE), faz kilitlemeli döngü daha yüksek frekans için etkinleştirilmek üzere açık, PLLM, 8'e ayarlanmış olan PLL VCO giriş saati için ana bölme faktörü, PLLN, PLL VCO çıkış saati için ana çarpma faktörü, PLLP, 2'ye ayarlanmış olan ana sistem saati için ana bölme faktörü ve PLLQ ve PLLR sırasıyla 9 ve 7 değerleri seri iletişimin çevresel frekans yapılandırmaları için ayarlanmıştır. Yukarıdaki yapılandırma ile sistem frekansı 216 MHz olarak ayarlanmıştır.

7.3.2. GPIO, UART ve Zamanlayıcı Yapılandırmaları

Sistemim fiziki fonksiyonları, zamanlayıcı frekanslarına bağlı olarak I/O pinleri tarafından çalıştırılır. Anahtarlar ve LED'ler gibi çevresel bileşenler ve UART gibi seri iletişim cihazları MCU'nun portlarındaki I/O pinlerini kullanır. Sistem fonksiyonlarını çalıştırmak için, PORT A, PORT B ve PORT C'nin üç portu sırasıyla düğme, LED ve UART seri iletişim işlemleri için kullanılmak üzere ayarlanmıştır. Konfigürasyonların anlaşılmasına yardımcı olması amacıyla GPIO PORT C kodlarının bir kısmı aşağıda verilmiştir:

```

__HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
GPIO_InitStruct.Pin      = GPIO_PIN_13;
GPIO_InitStruct.Mode     = GPIO_MODE_INPUT;
GPIO_InitStruct.Pull     = GPIO_PULLDOWN;
GPIO_InitStruct.Speed    = GPIO_SPEED_MEDIUM;
HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);

GPIO_InitStruct.Pin      = GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_3;
GPIO_InitStruct.Mode     = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull     = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed    = GPIO_SPEED_MEDIUM;
HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);

```

Yukarıdaki yapılandırma, giriş düğmesi işlemleri için MCU'nun C portunun 13 numaralı pinini giriş pini ve RF anahtar işlemleri için A portunun 3 numaralı pini ile C portunun 3 ve 0 numaralı pinlerinin çıkış pini olarak kullanılmasını sağlar. Bunlar aynı zamanda MCU deney kartındaki CN9 konektörünün sırasıyla 5, 3 ve 1 numaralı pinlerine bağlıdır. RF modülü ile UART seri iletişim birimi arasında veri gönderimi (Tx) ve alımı (Rx) gerçekleştirebilmek için, deney kartındaki CN8 konektörünün sırasıyla 6 ve 8 numaralı pinlerine bağlı olan MCU'nun C portunun 10 ve 11 numaralı pinleri için benzer bir yapılandırma yapılmıştır. Bir seri iletişim portu olarak UART, aşağıda listelenen bazı özel ayarlara da sahiptir.

```
__HAL_RCC_USART3_CLK_ENABLE();
UART_HandleStruct.Instance      = USART3;
UART_HandleStruct.Init.BaudRate = 38400;
UART_HandleStruct.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
UART_HandleStruct.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
UART_HandleStruct.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
UART_HandleStruct.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
UART_HandleStruct.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
UART_HandleStruct.Init.OverSampling = LL_USART_OVERSAMPLING_8;
```

Kullanılan USART seri iletişim aygıtı, 8 bit sözcük uzunluğu, 1 durdurma biti, eşlik biti yok, gönderme ve alma modu açık, donanım kontrolü yok ve 8 bit örnekleme hızı ile 38400 bps gibi ortalama değerlerde bir hıza ayarlanmıştır. MCU bu ayarlar yardımıyla, Bluetooth RF cihazı ile arasında her sinyalin bir karakterinin düzgün şekilde iletilmesini ve alınmasını sağlamak ve hedef RF cihazından tam bir sinyal paketi almak için her seferinde bir bayt (8 bit) veri gönderir ve alır.

Süreç aşamalarını doğru anlarda ve doğru süreler içinde eşit veya farklı zaman aralıklarıyla gerçekleştirmek için zamanlayıcılara (TIMER) ve bunlar için doğru yapılandırmalara ihtiyaç vardır. TIM9, aşağıda verilen kod bloğu yardımıyla herhangi bir işlem için saniye cinsinden süreler sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır.

```
__HAL_RCC_TIM9_CLK_ENABLE();
HAL_TIM_ConfigClockSource(&TIM2_HandleStruct, &TIM_ClockConfigStruct);
```

```

TIM2_HandleStruct.Instance          = TIM9;
TIM2_HandleStruct.Init.Prescaler    = 8 - (1);
TIM2_HandleStruct.Init.CounterMode  = TIM_COUNTERMODE_UP;
TIM2_HandleStruct.Init.Period        = 9 - (1);
TIM2_HandleStruct.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
TIM2_HandleStruct.Init.RepetitionCounter = 0x00;
TIM2_HandleStruct.Init.AutoReloadPreload=TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;

```

Yukarıdaki kod bloğunda TIM9 zamanlayıcısının aktivasyonundan sonra pre-scaler ve periyot değerleri sırasıyla 8 ve 9 olarak ayarlanarak overdrive ile 432 MHz'den 6 MHz'lik bir zaman kesmesi sağlanmış ve yazılımda bir değişken tanımlanarak zaman sayacı elde edilmiştir.

7.4. Sistem Operasyonları ve DoA Hesaplamaları için Algoritmalar

MCU'nun genel yapılandırma ayarları ve yazılım içerisinde kullanılacak değişkenlerin tanımlanmasından sonra sistem UART haberleşme protokolünün Tx ve Rx veri iletişimi, Bluetooth AT komut algoritmalarının gerçekleştirilmesi, ADS sinyali ve tanımlı MAC adresleri için sinyal filtreleme yazılımı (SFY), RSSI sinyal değeri hesaplaması, antenlerin RF anahtarı ile anahtarlanması, doğrusal regresyon yaklaşımı (LRA) ile APPR algoritması ve DoA açılarının hesaplanması için hazırdır. Sistem yazılımının çalışma prensibinden daha önce bahsedilmiş, ancak bir sonraki bölümde daha net anlaşılabilmesi için detaylı olarak anlatılmıştır.

7.4.1. Tx, Rx ve Bluetooth Dikkat Komutları (AT)

Kullanılan AT komutları ve MCU'nun seri iletişim biriminin gönderme ve alma konfigürasyonları sırasıyla bölüm 3.3 ve 7.3.2'de açıklanmıştır. Tablo 3.6'da gösterilen satır başı ve yeni satır karakterleri "\r\n" ile AT yapılandırmalarını ve sorgulama komutlarını göndermek için bir karakter dizisi değişkeni karakteri, TxMessage[], tanımlanmıştır. Aşağıda listelenen komutlar, HC-05 RF modülünü yapılandırmak ve ADS sinyalini almaya hazırlamak için MCU'nun UART seri cihazının Tx hattı tarafından sırayla gönderilmiştir.

```
AT+INIT\r\n
AT+IAC=9e8b33\r\n
AT+CLASS=0\r\n
AT+INQM=1,9,48\r\n
AT+INQ\r\n
```

Yukarıdaki komutlar profili başlatır, Bluetooth cihazının erişim kodu olup olmadığını sorgular, cihaz türünü sorgular ve 9 cihazın RSSI değerlerini $48 \times 1.28 = 61.44$ saniye içinde sırayla tarar. Yukarıdaki tüm komutlar ve son olarak sorgulama kodu aşağıdaki yöntem kullanılarak gönderilir:

```
char TxMessage[] = "AT+INQ\r\n";
```

7.4.2. ADS ve Sinyal Filtreleme Yazılımının (SFY) Yapısı

Sistem, alıcı RF modülüne UART seri iletişim portunun Tx hattı üzerinden AT+INQ koduyla bir sorgulama verisi göndererek işleme başlar ve alıcıyı menzil içindeki arama alanındaki hedef RF cihazlarının ADS verilerini UART'ın Rx hattı üzerinden taramaya ve almaya başlatır. ADS sinyalinin formatı Bluetooth modülünün yazılımına veya cihaz sürümüne bağlı olarak değişse de kullanılan HC-05 2.0 EDR Bluetooth modülü, toplam 48 öğeden oluşan +INQ karakter dizisi, 6 baytlık 12 tane onaltılık sayı formatlı MAC verisi, 6 tane onaltılık sayı formatlı cihaz türü kodu, 4 tane onaltılık sayı formatlı RSSI sinyal değeri, 16'dan fazla basamaktan oluşan cihaz adı, 3 sütun ve 3 virgülden oluşan aşağıdaki gibi sabit bir veri formatına sahiptir:

```
+INQ:54B1:21:B355E3,5A020C,FFCC,SmartphoneGokhan
```

Hem hedef cihaz olarak hem de örnek oluşturması bakımından bir mobil telefonunun Bluetooth 4.1 cihazı için ADS verileri yukarıda gösterilmiştir. INQ: karakterlerinden sonraki iki nokta üst üste karakterleri hariç ilk 12 hane veya 6 bayt 54B1:21:B355E3, varsayılan olarak her cihaza verilen benzersiz bir kod olan MAC adresini temsil eder. Altı basamaklı 5A020C dizisi cihazın tipini belirtir. Dört basamaklı FFCC verisi, Bluetooth hedef modülünün ADS sinyal gücü olan RSSI değeridir. 16 karakterlik son dizi ise cihaza kullanıcı tarafından verilen addır. Alınan bu veri yapısal olarak ele alındığında ve verinin dizi formatı kurallarına uyulduğunda MAC adresi, cihaz tipi,

RSSI değerleri ve kullanıcı adının ayrıştırılarak yazılacak uygun bir kod ile analiz edilebileceği anlaşılmaktadır. Burada ADS verisinin MAC adresinin analizi sinyal filtreleme yazılımı (SFY) olarak adlandırdığımız ve yine MAC adresi sistem yazılımında tanımlı bir RF hedef cihaza radar benzeri bir kilitlenme ve takip sağlamak için seçilmiştir. SFY algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: İlk olarak, alandaki tüm hedef cihazların ADS verileri, aşağıdaki gibi bir dizi değişkenine alınmak üzere sistem RF alıcısı tarafından sırayla taranır.

RxBuffer[RxIndex];

Adım 2: Her hedef cihazın ADS verisinin yazılım içerisinde tanımlanmış buffer dizi değişkeni tarafından toplanması sırasında, +INQ ve üç adet iki nokta üst üste karakteri de dâhil olmak üzere veri dizisinin her bir baytı yine önceden tanımlanmış aşağıdaki gibi bir hedef Bluetooth MAC adresinin toplamda 19 karakterini içeren başka bir dizi verisi ile karşılaştırılmaya başlar.

RxBLMAC [] = "+INQ:54B1:21:B355E3";

Adım 3: Her bir ADS sinyal verisi için, karşılaştırılan bayt sayısı 19'a ulaştığında ve veri dizilerinin her ikisi de aynı ise, bu her iki MAC adresinin de eşleştiği anlamına gelir ve RSSI verisi analiz edilmek üzere çıkarılır. Böylece, MAC adresi algoritmada tanımlanan arama alanındaki herhangi bir hedefin takibi ve güç ölçümleri mümkün olmaktadır. SFY uygulaması ADS formatına bağlıdır, ancak burada hedef cihaz MAC verisi elde edilerek bulunmuştur.

7.4.3. RSSI Verisinin Hesaplanması

ADS'nin RSSI verisi, modülün anten aracılığıyla okuduğu sinyalin dBm cinsinden güç değeridir. Verileri çıkarmak ve değerlendirmek için aşağıda açıklanan yaklaşım kullanılmıştır. Sabit formatlı ADS sinyalinde MAC dizisinin son hanesinden sonra üç virgöl bulunduğundan ve RSSI verisinin ilk hanesi ikinci virgölden sonra başladığından, RSSI verisi buna uygun kod parçasıyla çözümlenerek bulunur ve okunur. Bir ADS sinyalinin RSSI verisi, ikiye tümleyenini alınarak dönüştürülmesi gereken ham bir veridir. Bildiğimiz gibi, ikili bir sayının ikiye tümleyenini almak

için, RSSI'nin ikili sayısının her biti ters çevrilmeli ve ardından saya 1 eklenmelidir. Her biti ters çevirme işlemi sayının bitleri birden çıkarılarak kolayca gerçekleştirilebilir. Dönüşümü pratik hale getirmek için aşağıda gösterildiği gibi bir kod satırı geliştirilmiştir.

$$RSSIdB = -1*((0xFFFF - HxAsciiRSSI) + 1);$$

Yukarıdaki kodda, RSSIdB ikiye tümlleme işleminden sonra dBm cinsinden hesaplamının sonucunu tutan değişken, 0xFFFF ikiye tümlleme işlemini pratik bir biçimde uygulamada kullanılacak çıkarma işlemi için birlerden oluşan sayı dizisi ve HxAsciiRSSI alınan RSSI verisidir. HC-05 Bluetooth modülünün üretim yapısı gereği sonuçlar dBm cinsindendir.

7.4.4. UCA RF Anahtarlama

Tezin uygulama deneylerinde alınan RSSI sinyal gücü her bir anten için sırayla ölçülerek analiz edilip karşılaştırılarak DoA açısının bulunması gerekmektedir. Bunun için aşağıda listelenen ve sistem algoritması için geliştirilen anahtarlama kodları sayesinde daha önce tanımlanan RF anahtarlama devresi ile 8 antenin anahtarlama gerçekleştirilmiştir.

```
if(AntennaCnt == 0b000)
{
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_3, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_3, GPIO_PIN_RESET);
}
```

Yukarıdaki kod parçası, ilk antenin sinyal yolunu açıp diğerlerini kapatmak için üç pini de sıfıra ayarlayan RF anahtarlama işlemine ait tüm kod bloğunun sadece bir parçasıdır. Diğer anten sinyal yollarını teker teker ayarlamak için, aynı üç pin Tablo 7.2'deki RF anahtar fonksiyon tablosunda açıklanan yöntemle kodlanmıştır.

7.4.5. Sistem Yazılımında APPR Algoritması Kod Bloğu

DoA açısını elde etmek için kullanılan algoritma daha önce açıklanmış ve kod bloğu olarak sistem yazılımına eklenmiştir. LRA algoritmasının a_l , b_l , a_r , ve b_r katsayıları virgüllü uzun değerlere sahip olduğundan, yüksek hassasiyetli hesaplamalar ve

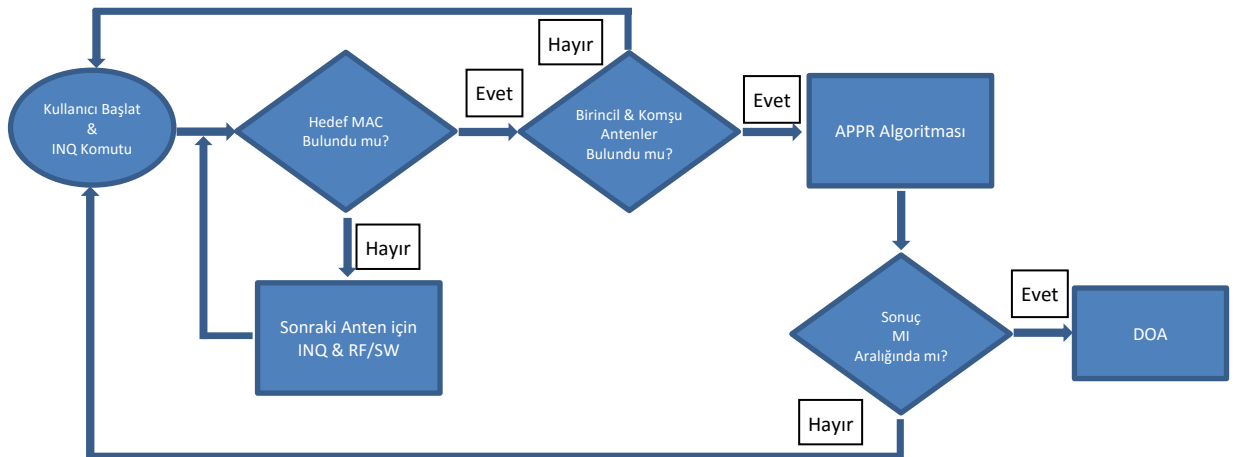
sonuçlar sağlamak için her biri 8 bayttan oluşan çift (double) değişken olarak tanımlanmıştır. Her antene ait farklı kazanç tipi için katsayı değerleri yazılımda ayrı değişkenler içerisine kaydedilmiştir. Anten güç değerleri fiziki sistem ölçümleri ile elde edildikten sonra DoA açısı örnek olarak APPR algoritmasının sol bitişik anten için yazılan aşağıda görülen kod satırında değerlendirilmiştir.

$$\text{DoA} = a_1 * \text{PowRatioL} + b_1 + \text{PrimeAngArray}[\text{PrimeAnt}];$$

Burada, a_1 ve b_1 ilgili kazanca sahip anten tipi için belirlenen katsayılar, PowRatioL alınan birincil anten gücünün alınan sol bitişik anten gücüne oranı, PrimeAngArray[PrimeAnt] değişkeni en yüksek ölçüm değerini alan birincil antenin açısını belirlemek için 8 elemanlı UCA anten dizisindeki 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 ve 315 derecelik açılarda her bir anten yönü içeren arama tablosunu, PrimeAnt ise bu dizideki sonuç açısını gösteren tamsayı indeksini ifade etmektedir.

8. SİSTEM DENEYLERİ VE DOA ÖLÇÜMLERİ

Sistemin çalışması temel olarak UCA'nın anten elemanlarının üzerinden ölçülen güce ve sistem yazılımına gömülü ölçüm algoritmasına bağlıdır. Genel çalışma prensibi olarak hedef arama ve DoA ölçüm yöntemi Şekil 8.1'deki akış şemasında gösterilmiş ve işlem adımları aşağıdaki gibi açıklanmıştır.



Şekil 8.1 Sistemin Genel Çalışma Akış Şeması

Adım 1: Deney kartı üzerindeki mavi düğmeye basıldığında, MCU ilk olarak 8 antenin RF/SW tarafından anahtarlanmasıyla uyumlu olarak belirli zaman aralıklarında bir dizi INQ sorgulama komutu göndermeye başlar.

Adım 2: Bu her bir sorgulama komutuna karşılık olarak sistem BL modülü, alandaki akıllı telefonlar, tabletler, PC'ler, kulaklıklar, RF modülleri vb. gibi Bluetooth cihazı taşıyan hedeflerin ADS sinyallerini algılamak için bir arama işlemi başlatır. INQM komutu ile BL modülü konfigürasyonlarına göre, tanımlanan bir zaman aralığında belirli sayıda cihaz alan içerisinde aranmaya başlar.

Adım 3: Bu işlem sırasında SFY filtreleme devreye girer ve önceden tanımlanmış MAC adresine sahip cihaz bulunarak alandaki diğer cihazlardan ayrılır ve işleme alınır.

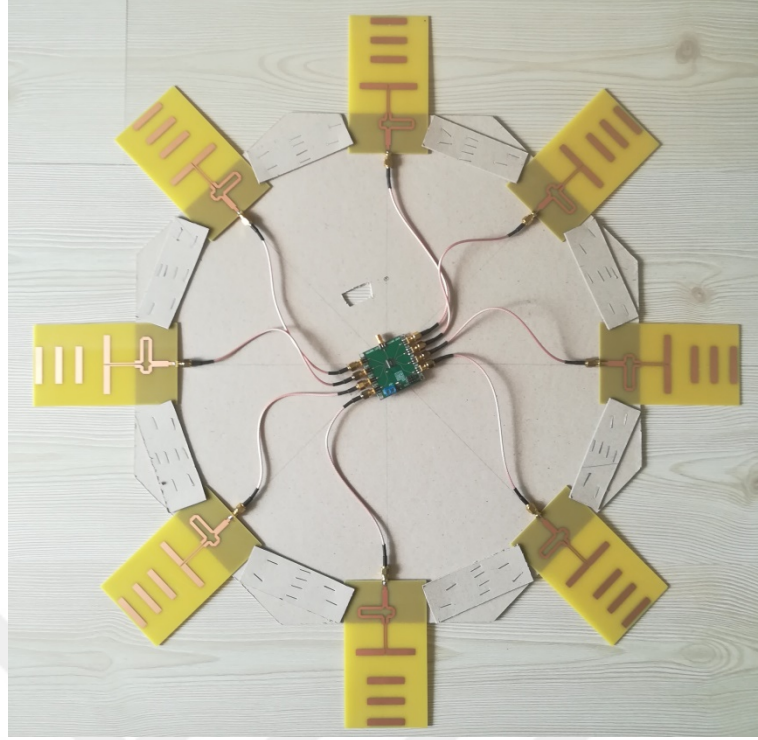
Adım 4: SFY sürecinde, filtrelenmiş ve adresine kilitlenilmiş hedef cihazın ADS sinyali içerisindeki RSSI verisinden sinyal gücü ayıklanır ve sırayla her anten için bu veri dönüştürülerek kullanıma hazır duruma getirilir. Sistemin alıcı BL modülü, önceden tanımlanan MAC adresine sahip hedef cihazını veya alandaki herhangi bir RF cihazını bulamazsa, bilgisayar ekranında "Zayıf veya İzleme Sinyali Yok" veya "Alanda Bluetooth Cihazı Yok" bilgisi görüntülenir.

Adım 5: UCA'nın 8 anteni için de arama, filtreleme, kilitleme, çıkarma ve dönüştürme işlemleri tamamlandıktan sonra sistem birincil anteni ve biri diğerinden daha yüksek güç alan komşu anten(ler)ini tanımlar.

Adım 6: Eğer birden fazla birincil anten var ise sistem kullanıcı kararıyla ya 8 anten için tekrar tarama yapar ya da sistem algoritması tarafından otomatik olarak son alınan birincil anten değeri işletilir.

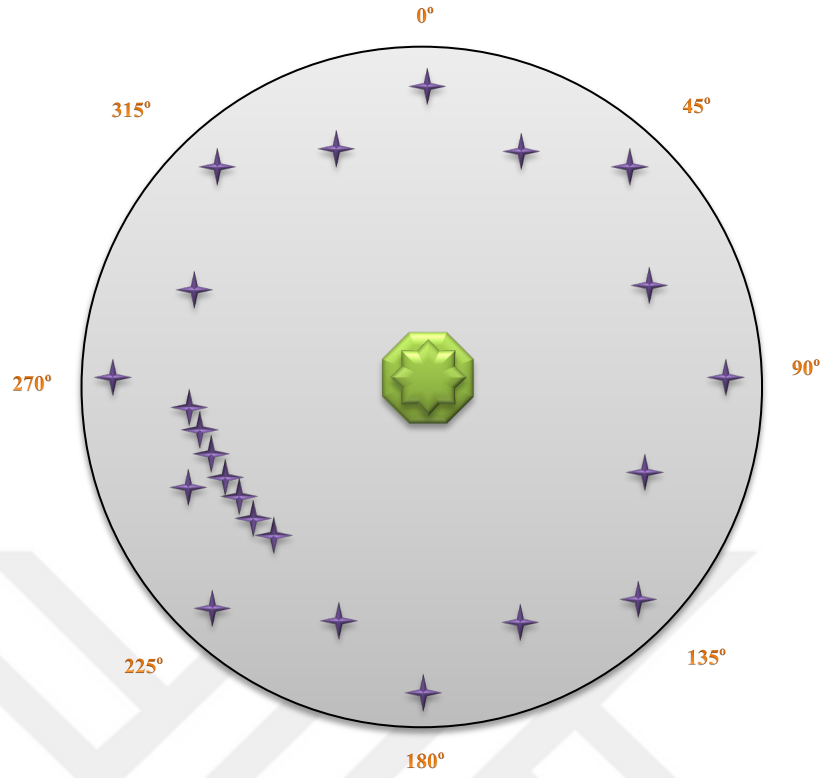
Adım 7: Eğer belirlenen birincil antenin her iki komşu anteni de eşit sinyal gücü aldıysa, APPR algoritması devre dışı kalarak sistem algoritması tarafından hedef yönü doğrudan birincil anten açısı olarak tanımlanır.

Adım 8: Eğer en yüksek sinyal gücünü alan birincil antenin komşu antenlerinden biri diğerinden yüksek sinyal aldıysa sistem yazılımı APPR algoritmasını gerçekleştirerek ilgili antenler için alınan hedef RF modülü RSSI güç sinyal değerlerini değerlendirip DoA'yı bulur.



Şekil 8.2 YagiUda5_J ve RF Anahtarı ile Örnek UCA Sistemi

Mikrodenetleyici deney kartı, Bluetooth RF modülü, RF anahtarı ve daha önce tasarlanan Şekil 4.44'te görülen tek besleme uçlu yönlü Quasi-Yagi anten tiplerinden oluşan tam bir sistem, her bir UCA seti için bağlantı elemanları ile birleştirilmiştir. Şekil 8.2 YagiUda5_J ve RF anahtarı ile örnek bir UCA sistemini göstermektedir. Birinci ve ikinci Yagi antenlerin, YagiUda3_A ve YagiUda3_C'nin, kazanç değerleri sırasıyla 5.2420 dBi ve 5.5424 dBi, birbirine çok yakındır. Bu nedenle sonuçların ayırt edilebilmesi için kayda değer farklılığın oluşmayacağı öngörüldüğünden, yalnızca son üç anten YagiUda3_C, YagiUda4_J ve YagiUda5_J'nin fiziksel deneylerinin, simülasyon analizlerden elde edilen verilerle karşılaştırılmasının yeterli olacağı düşünülmüştür. Farklı anten tasarımlarına sahip üç UCA arasında doğru ölçümler ve karşılaştırmalar yapabilmek için, sekiz antenin yerleştirildiği sekiz sabit açı ve her bir komşu anten arasındaki sekiz orta açı yerine, her bir MI DoA ölçüm aralığındaki hedef cihaz için belirli ara açılardaki örnek noktaların seçilmesi ve Şekil 8.3'de gösterildiği biçimde her üç sistemde de uygulanması gerektiği anlaşılmaktadır. Ölçüm aralıklarının herhangi bir UCA'nın herhangi bir birincil ve komşu antenleri için geçerli olduğunu göstermek amacıyla Bölüm 6'da tanımlanan 45° ve 90'deki ikinci ve üçüncü antenler arasında hesaplanan tüm referans açılar, altıncı ve yedinci antenlerin 225° ve 270'deki anten açı aralığına uyarlanmış ve testler her üç sistem için de bu aralıkta gerçekleştirilmiş ve tekrarlanmıştır.



Şekil 8.3 Hedef Test Konumları

Sonraki bölümlerde, her bir önceki tasarıma kıyasla anten kazancını artırarak elde edilen $\text{res}\angle(\psi)^{\circ}$ çözünürlük iyileştirmesini kanıtlamak, çalışma doğruluğunu göstermek ve Bluetooth cihazlarının uygulama avantajlarını anlamak için her üç UCA sistemi için de hedef cihazın hesaplanan DoA açıları $\theta_{[0]}^t$ ve hedefin gerçek konumunun açısı $\theta_{[0]}^t$ arasındaki fark analiz edilmiştir. Duvar veya diğer engellerin olmadığı geniş bir kapalı alanda yapılan deneyler, sistemin yaklaşık olarak aynı doğrulukta sonuçlar verdiğini gösterse de, ana testler her üç anten dizisi için de dış alanda devam etmiş ve tamamlanmıştır. Sekiz anten elemanının tamamının ADS sinyali almasını garanti etmek için, sistem ile Bluetooth hedefi arasındaki mesafe yüksek kazançlı anten dizisi için yaklaşık 12 metre, orta ve düşük kazançlı antenler için ise 10 metre olarak sınırlandırılmış ve alıcı Bluetooth sistem cihazının arama süresi 10 saniye olarak ayarlanmıştır.

8.1. Düşük Kazançlı UCA Anten Sistemi ile DoA Ölçüm Deneyleri

Şekil 8.2'de gösterilene benzer fakat YagiUda3_C kodlu 8 antenden oluşan ve 5.5424 dBi'lık düşük kazançlı UCA sistemi için, gerçek bir RF hedefinin sinyal

yönlerini $\text{res}_1 \angle(\psi_{lr}^1)$ DoA açısını ve açı çözünürlüklerini derece cinsinden tanımlamak ve ölçmek için ilk deneyler gerçekleştirilmiştir.

YagiUda3_C için referans değerlerden uyarlanacak açılar belirlenmesi aşağıda gösterilmiştir. APPR algoritmasına uygun 225 ile 270 derece arasındaki ölçülebilir açıları tanımlamak için, sıralı her bir referans açı ile 90° 'lık birincil referans açı arasındaki farklar, 6 numaralı antenin sağ komşusu için 247.5° 'lik orta açı elde edilene kadar yeni birincil açı olan 225° 'ye eklenir ve her bir referans sıralı açı ile referans birincil açı (90°) arasındaki farklar, 7 numaralı antenin sol komşusu için aynı orta açıya kadar yeni birincil açı olan 270° 'den çıkarılır. Aynı yöntem herhangi bir UCA'nın tüm elemanları için geçerlidir ve diğer iki anten tasarımına aynı şekilde uygulanmıştır.

P^1 Anten 6 $\rightarrow P_r$: 225°

$$P^1 - P_r = 4 \text{ dBm: } 225^\circ + (90.2070310 - 90) = 225 + 0.2070310 = 225.207031^\circ$$

$$P^1 - P_r = 3 \text{ dBm: } 225^\circ + (98.0028670 - 90) = 225 + 8.0028670 = 233.002867^\circ$$

$$P^1 - P_r = 2 \text{ dBm: } 225^\circ + (104.195319 - 90) = 225 + 14.195319 = 239.195319^\circ$$

$$P^1 - P_r = 1 \text{ dBm: } 225^\circ + (109.114159 - 90) = 225 + 19.114159 = 244.114159^\circ$$

P^1 Anten 7 $\rightarrow P_l$: 270°

$$P^1 - P_l = 0 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 66.9786670) = 270 - 23.021333 = 246.978667^\circ$$

$$P^1 - P_l = 1 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 70.8858400) = 270 - 19.114160 = 250.885840^\circ$$

$$P^1 - P_l = 2 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 75.8046800) = 270 - 14.195320 = 255.804680^\circ$$

$$P^1 - P_l = 3 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 81.9971320) = 270 - 8.0028680 = 261.997132^\circ$$

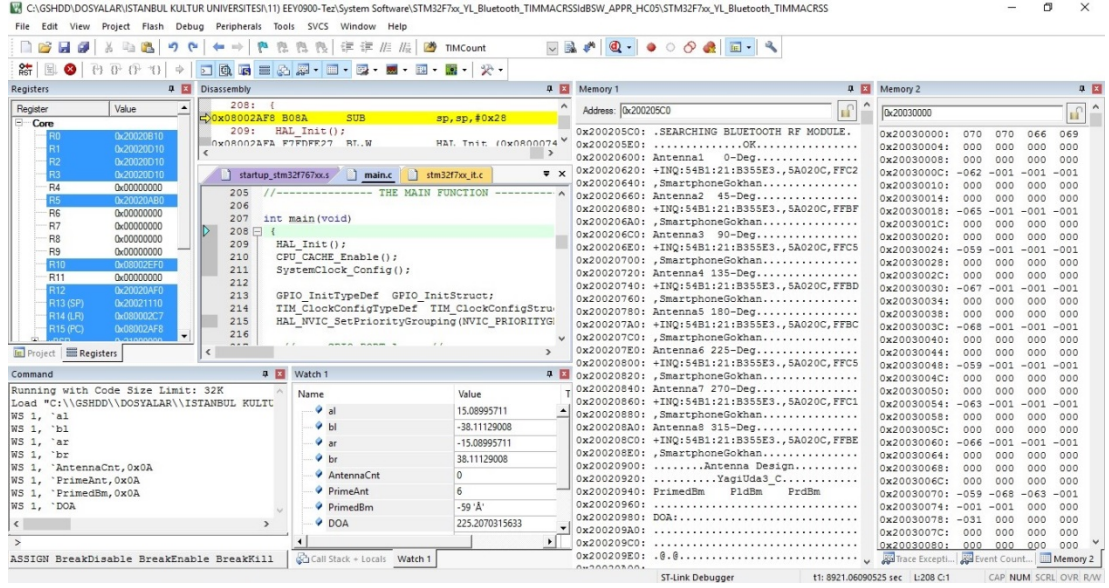
$$P^1 - P_l = 4 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 89.7929680) = 270 - 0.2070320 = 269.792968^\circ$$

Uyarlama hesaplamaları yardımıyla, 225° ve 270° 'lik iki ana anten açısı da dâhil olmak üzere bu aralıkta toplam 11 açı belirlenmiştir. Bu belirlemelerden sonra Bluetooth hedefi olarak cep telefonu, seçilen iki elemanın toplam 45° 'lik aralığında, belirlenen 11 açı noktası da içinde olmak üzere çok sayıda farklı $\theta_{[0]}^l$ fiziksel açısında konumlandırılmış ve tüm testler ve DoA ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu anten dizisi için APPR algoritması tarafından hesaplanabilen tüm ölçüm parametreleri ve her bir $\theta_{[0]}^l$ DoA açısı, μ Vision V5 KEIL IDE geliştirme ortamının gerçek zamanlı uygulamasında gözlemlenmiş ve ölçümlerin ekran görüntüleri ve fotoğrafları

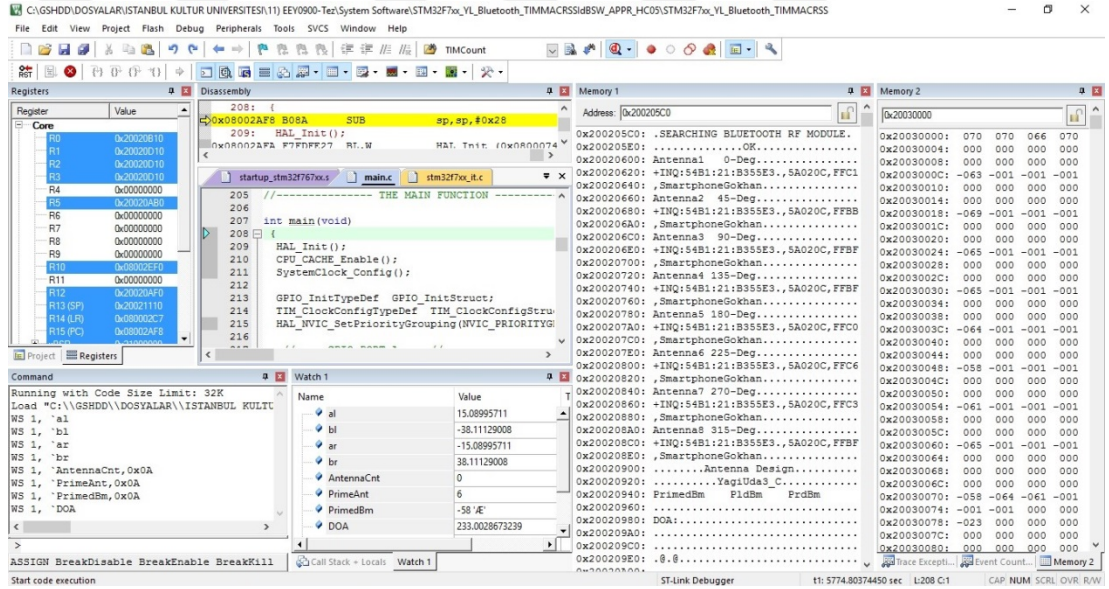
The screenshot displays the ST-Link Debugger interface, which is used for debugging and flashing firmware onto a microcontroller. The main window shows the disassembly of the firmware, with the following details:

- Registers:** Shows the current state of the processor registers. The Core register is set to 0x20020500. The R0 register contains 0x20020500, and the R1 register contains 0x20020500. The R2 register contains 0x20020500, and the R3 register contains 0x20020500. The R4 register contains 0x20020500, and the R5 register contains 0x20020500. The R6 register contains 0x20020500, and the R7 register contains 0x20020500. The R8 register contains 0x20020500, and the R9 register contains 0x20020500. The R10 register contains 0x20020500, and the R11 register contains 0x20020500. The R12 register contains 0x20020500, and the R13 register contains 0x20020500. The R14 register contains 0x20020500, and the R15 register contains 0x20020500.
- Disassembly:** Shows the assembly code for the main function. The function starts at address 0x20020500 and ends at 0x20020500. The instructions include:
 - 0x20020500: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020504: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020508: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002050C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020510: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020514: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020518: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002051C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020520: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020524: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020528: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002052C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020530: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020534: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020538: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002053C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020540: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020544: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020548: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002054C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020550: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020554: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020558: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002055C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020560: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020564: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020568: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002056C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020570: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020574: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020578: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002057C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020580: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020584: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020588: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002058C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020590: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020594: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020598: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002059C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205A0: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205A4: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205A8: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205AC: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205B0: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205B4: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205B8: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205BC: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205C0: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205C4: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205C8: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205CC: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205D0: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205D4: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205D8: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205DC: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205E0: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205E4: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205E8: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205EC: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205F0: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205F4: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205F8: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x200205FC: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020600: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020604: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020608: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002060C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020610: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020614: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020618: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002061C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020620: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020624: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020628: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002062C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020630: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020634: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x20020638: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`
 - 0x2002063C: `0x00002AF8 B08A SUB sp,sp,#0x28`

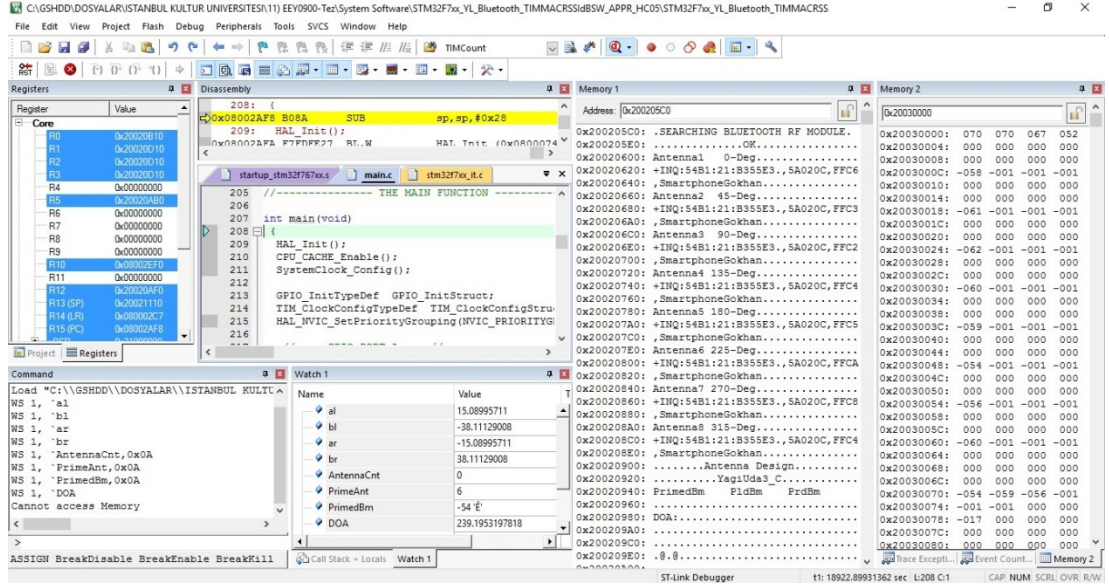
118



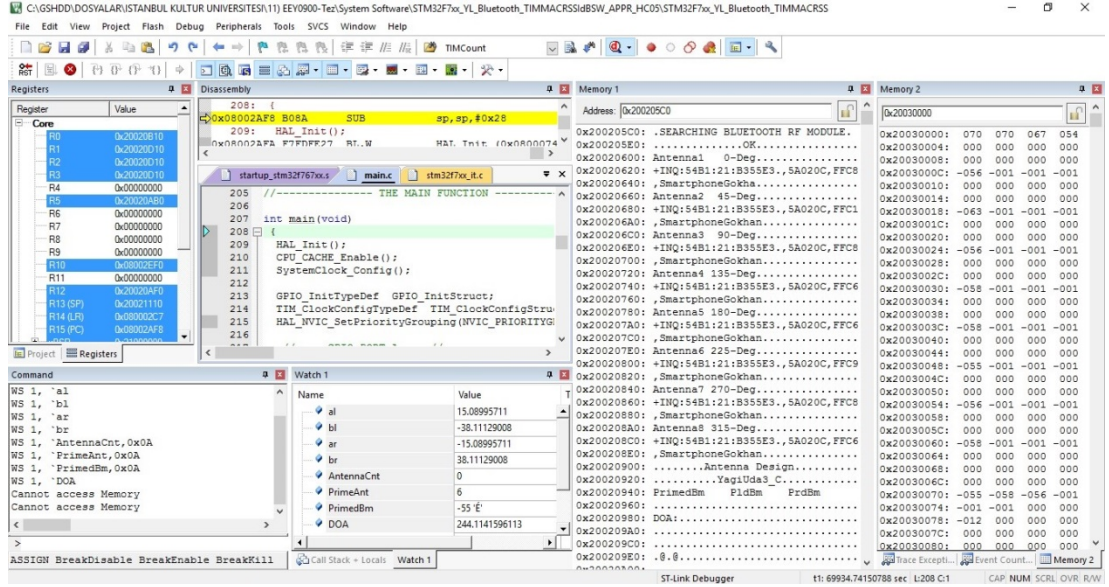
Şekil 8.5 Düşük Kazançlı Anten 225.207° Ölçümü



Şekil 8.6 Düşük Kazançlı Anten 233° Ölçümü

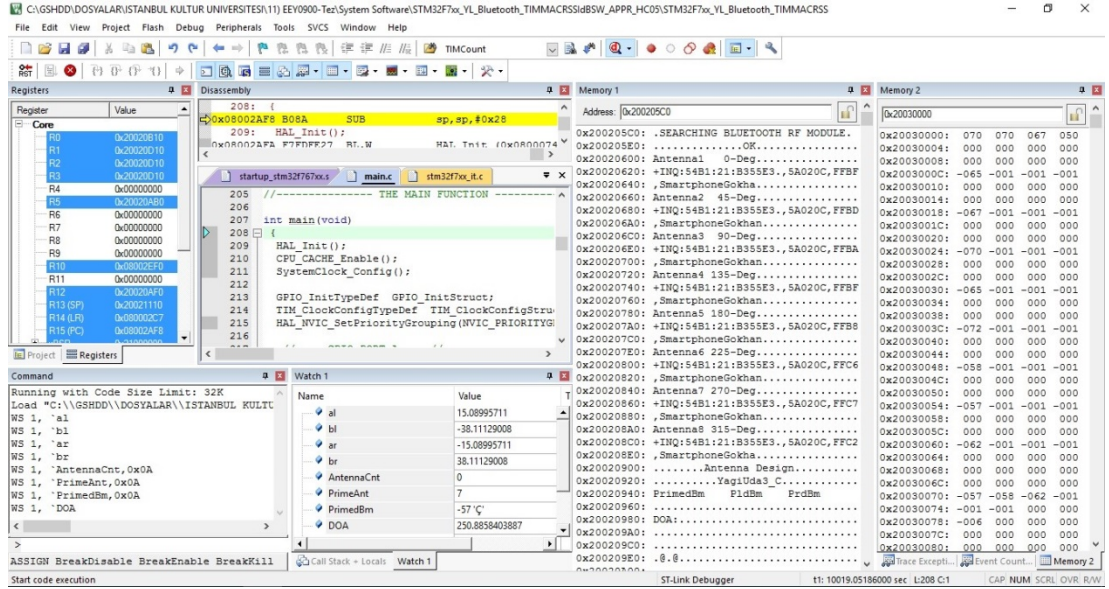
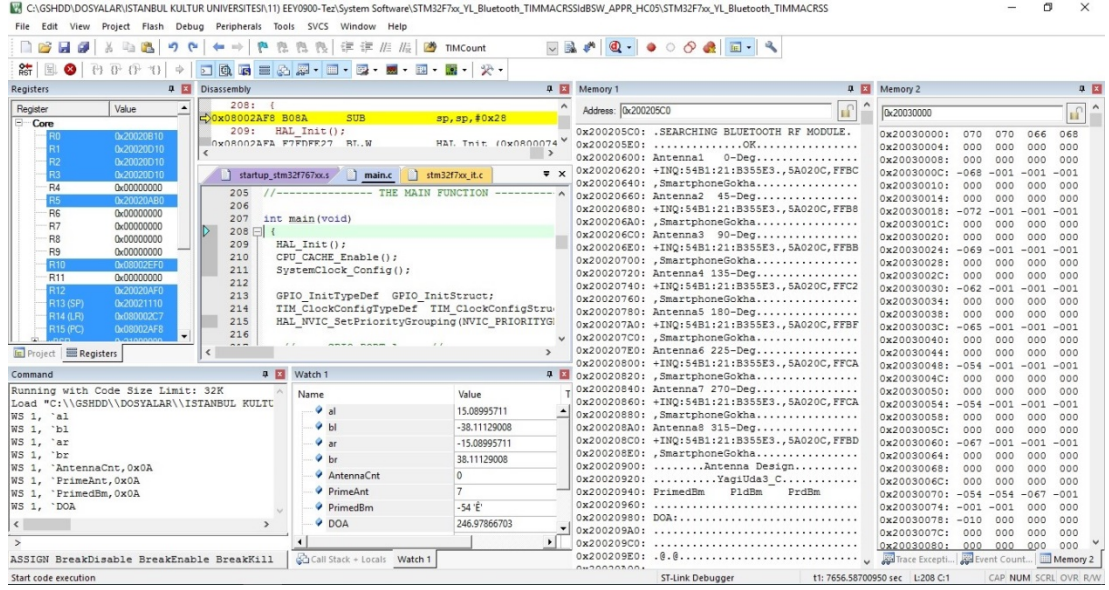


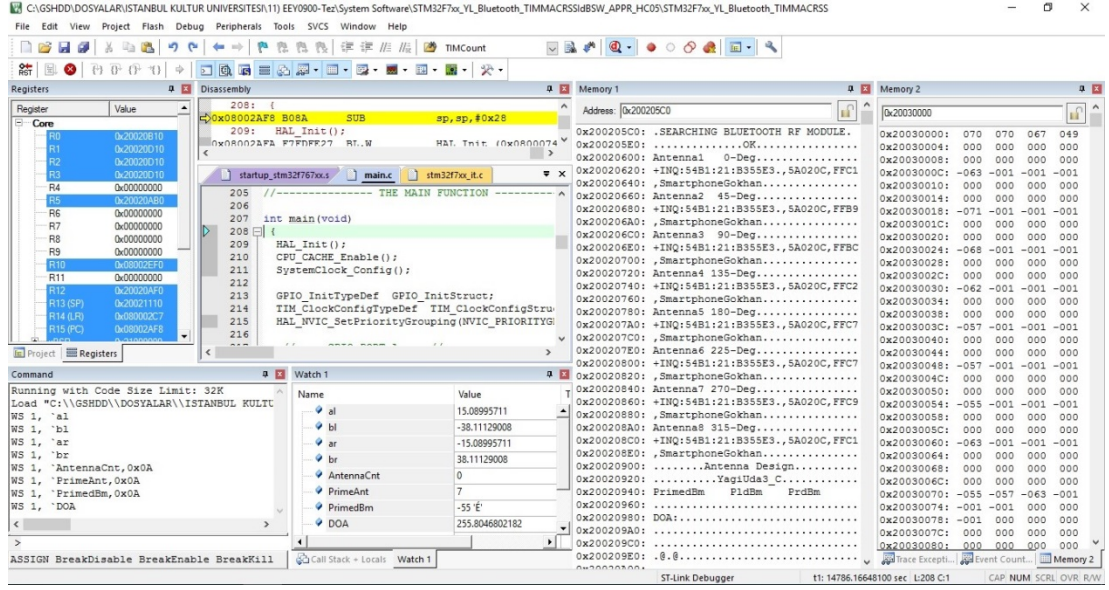
Şekil 8.7 Düşük Kazançlı Anten 239.195° Ölçümü



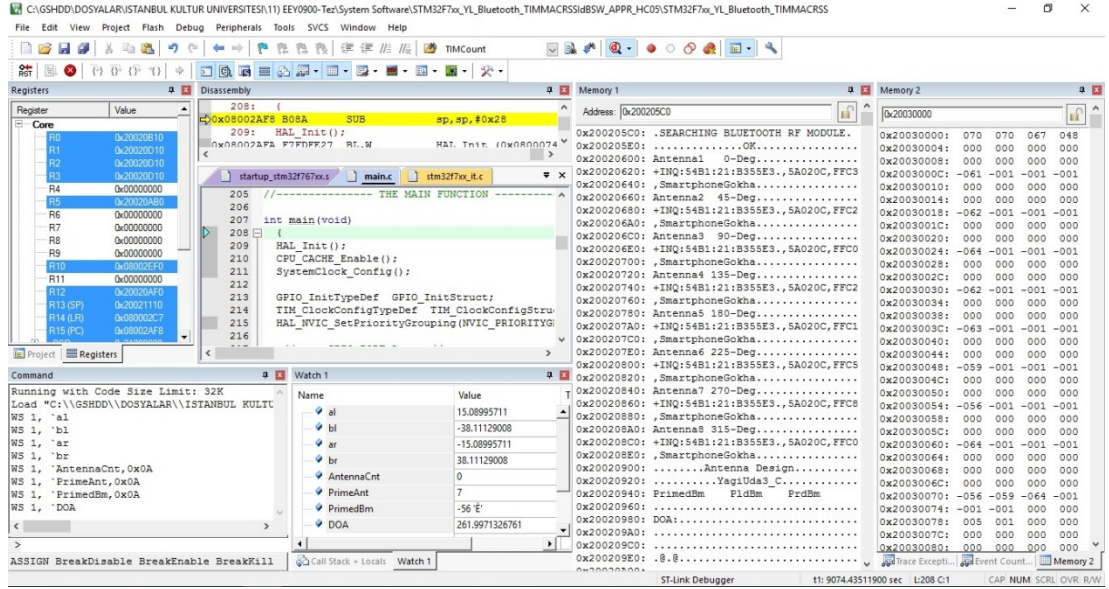
Şekil 8.8 Düşük Kazançlı Anten 244.114° Ölçümü

Yukarıdaki Şekil 8.4'ten Şekil 8.8'e kadar görülen açı değerleri düşük kazançlı dizinin 6 no'lu antenin en yüksek ölçüm değeri olarak birincil anten olduğu sonuçlardır.

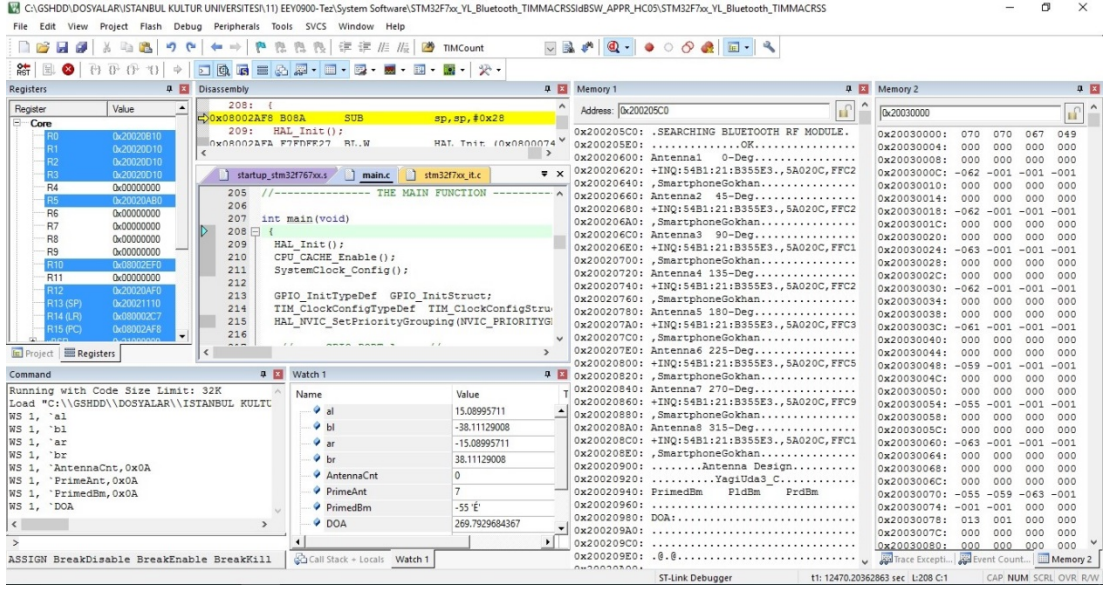




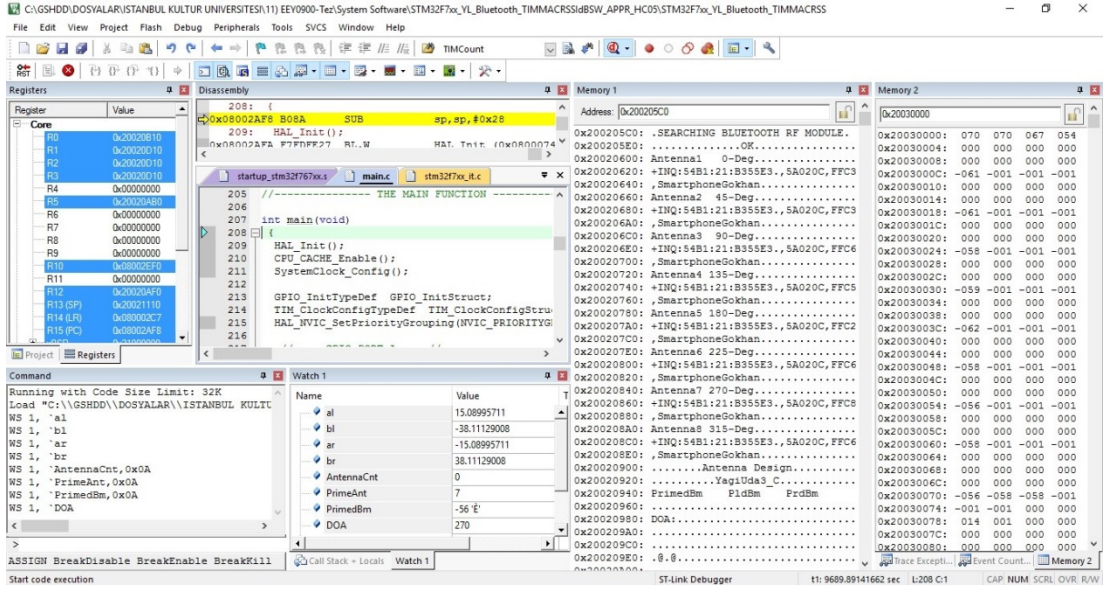
Şekil 8.11 Düşük Kazançlı Anten 255.804° Ölçümü



Şekil 8.12 Düşük Kazançlı Anten 261.997° Ölçümü



Şekil 8.13 Düşük Kazançlı Anten 269.792° Ölçümü



Şekil 8.14 Düşük Kazançlı Anten 270° Ölçümü

Sonraki Şekil 8.9’den Şekil 8.14’e kadar görülen açı değerleri düşük kazançlı dizinin 7 no’lu antenin en yüksek ölçüm değeri olarak birincil anten olduğu sonuçlardır. Test ölçüm sonuçları MI aralığında düşük kazançlı anten için hesaplanan tüm açılarda tekrarlanarak Tablo 8.1’de listelenmiştir.

Tablo 8.1 YagiUda3_C Sistem DoA Ölçüm Sonuçları

Fiziki Hedefin Yaklaşık Açısı	Anten Ölçüm Değerleri (dBm)			MI İçindeki Ölçülen Açısı
	Birincil	Komşu Sol	Komşu Sağ	
225°	-54	-61	-61	225.0000°
225°	-59	-68	-63	225.2070°
233°	-58	-64	-61	233.0028°
239°	-54	-59	-56	239.1953°
244°	-55	-58	-56	244.1141°
246°	-54	-54	-67	246.9786°
250°	-57	-58	-62	250.8858°
255°	-55	-57	-63	255.8046°
262°	-56	-59	-64	261.9971°
270°	-55	-59	-63	269.7929°
270°	-56	-58	-58	270.0000°
al	bl	ar	br	
15.08995711	-38.11129008	-15.08995711	38.11129008	

İlk anten dizisi de dâhil olmak üzere tüm anten testlerinde, hatalı ölçümler üzerinde durulmayarak, daha önce analitik ve matematiksel çalışmalarla gösterilmiş ve kanıtlanmış ve tez önerisinin amacına uygun olarak gerçekleştirilen birçok test çıktısı arasından geçerli ve doğru alınan açı ölçüm sonuçları tezde dikkate alınmıştır. Hedef Bluetooth cihazı yukarıda bahsedilen test açıklığına konumlandırılmış olmasına rağmen, ölçüm sonuçlarının bir kısmı açıklık aralığının dışında olmasına karşın çoğu aralık içinde kalmıştır. Bunlara ek olarak, az sayıda hesaplama da MI aralığı dışında alınan anten güçleri nedeniyle hatalı çıkmıştır.

8.2. Orta Kazançlı UCA Anten Sistemi ile DoA Ölçüm Deneyleri

Şekil 8.2'de gösterilene benzer UCA sisteminin 6.4959 dBi orta kazançlı YagiUda4_J antenlerinden oluşan ikinci seti aşağıda verildiği gibi uyumlandırılarak 13 yeni açı değeri belirlenmiştir. Ölçümlerin bilgisayar ekranından alınmış ekran görüntüleri ve hesaplamalar ise aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

P^1 Antenna 6 $\rightarrow P_r$: 225°

$P^1 - P_r = 5$ dBm: $225^\circ + (88.5866840 - 90) = 225 - 1.4133160 = 223.586684^\circ$

$$P^1 - P_r = 4 \text{ dBm: } 225^\circ + (95.9827080 - 90) = 225 + 5.9827080 = 230.982708^\circ$$

$$P^1 - P_r = 3 \text{ dBm: } 225^\circ + (101.857579 - 90) = 225 + 11.857579 = 236.857579^\circ$$

$$P^1 - P_r = 2 \text{ dBm: } 225^\circ + (106.524155 - 90) = 225 + 16.524155 = 241.524155^\circ$$

$$P^1 - P_r = 1 \text{ dBm: } 225^\circ + (110.230948 - 90) = 225 + 20.230948 = 245.230948^\circ$$

$$P^1 \text{ Antenna 7} \rightarrow P_1: 270^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 0 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 66.8246410) = 270 - 23.175359 = 246.824641^\circ$$

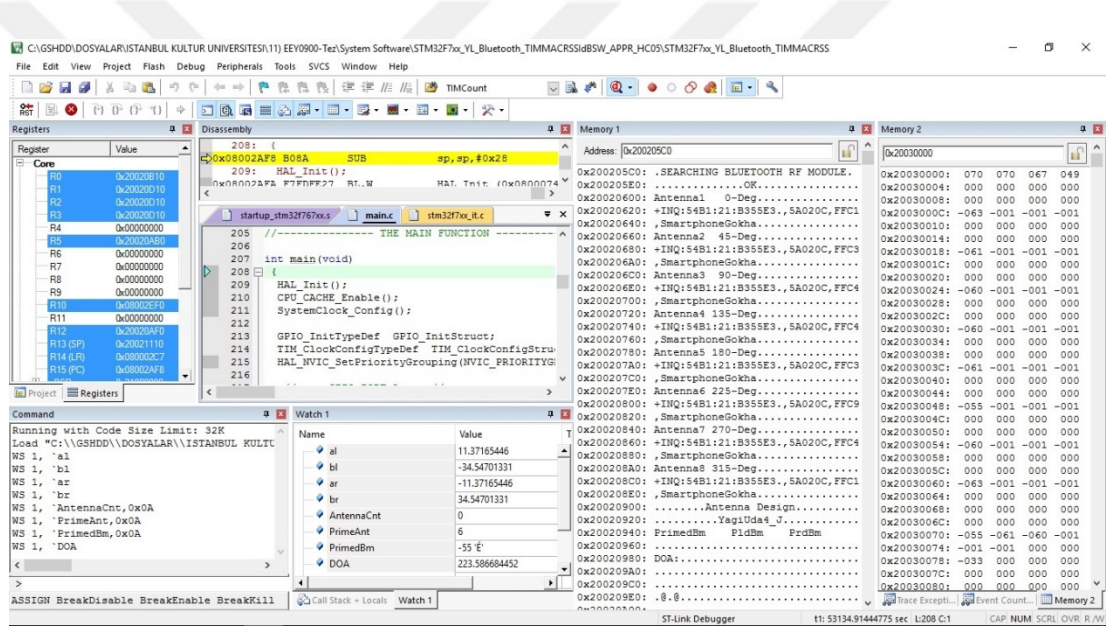
$$P^1 - P_1 = 1 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 69.7690510) = 270 - 20.230949 = 249.769051^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 2 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 73.4758440) = 270 - 16.524156 = 253.475844^\circ$$

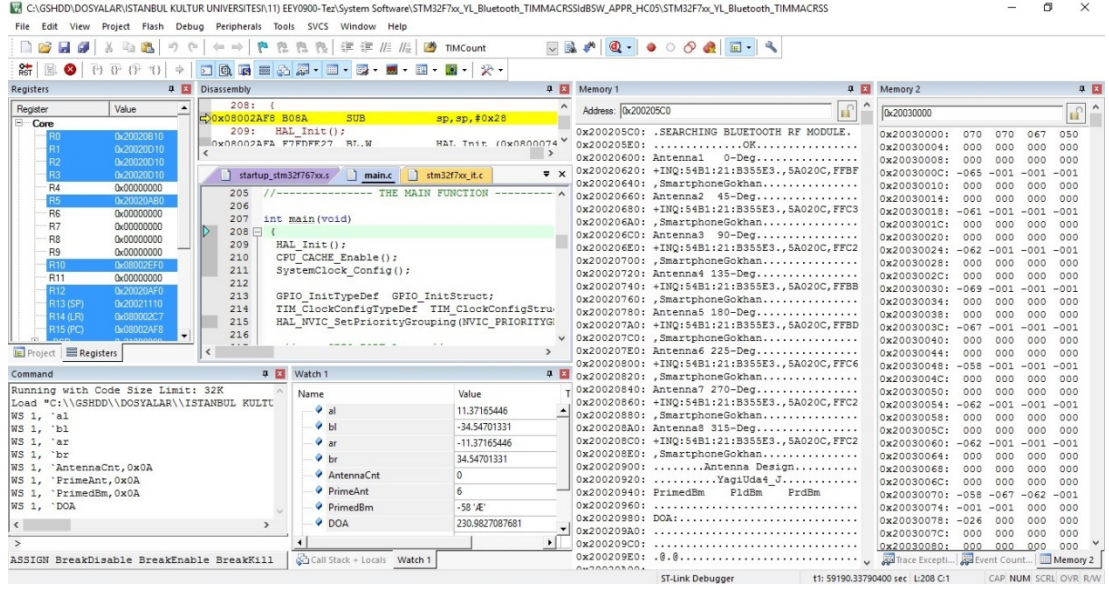
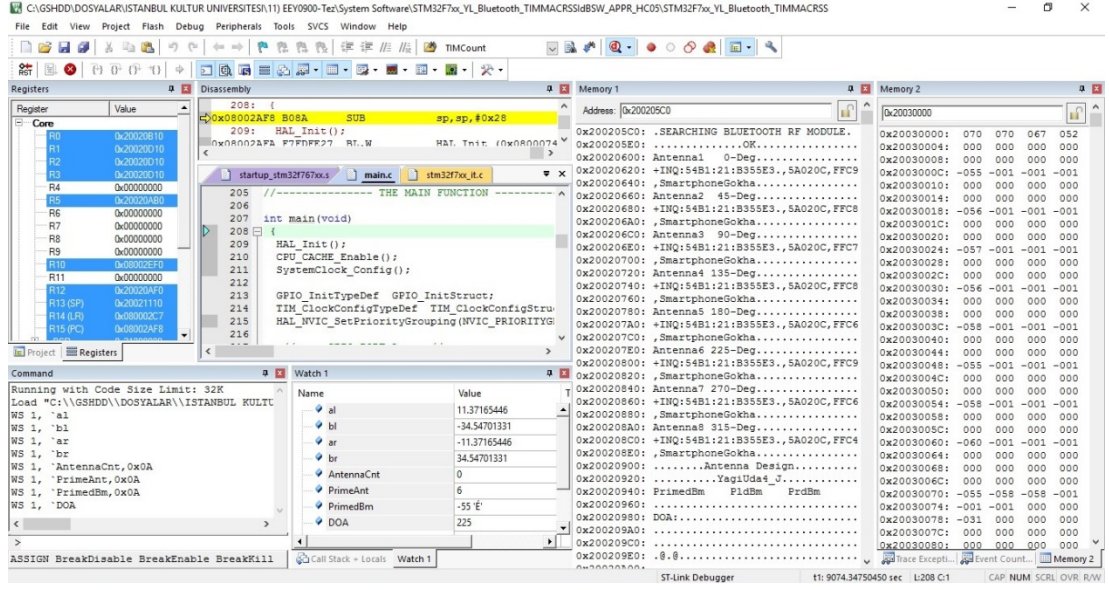
$$P^1 - P_1 = 3 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 78.1424200) = 270 - 11.857580 = 258.142420^\circ$$

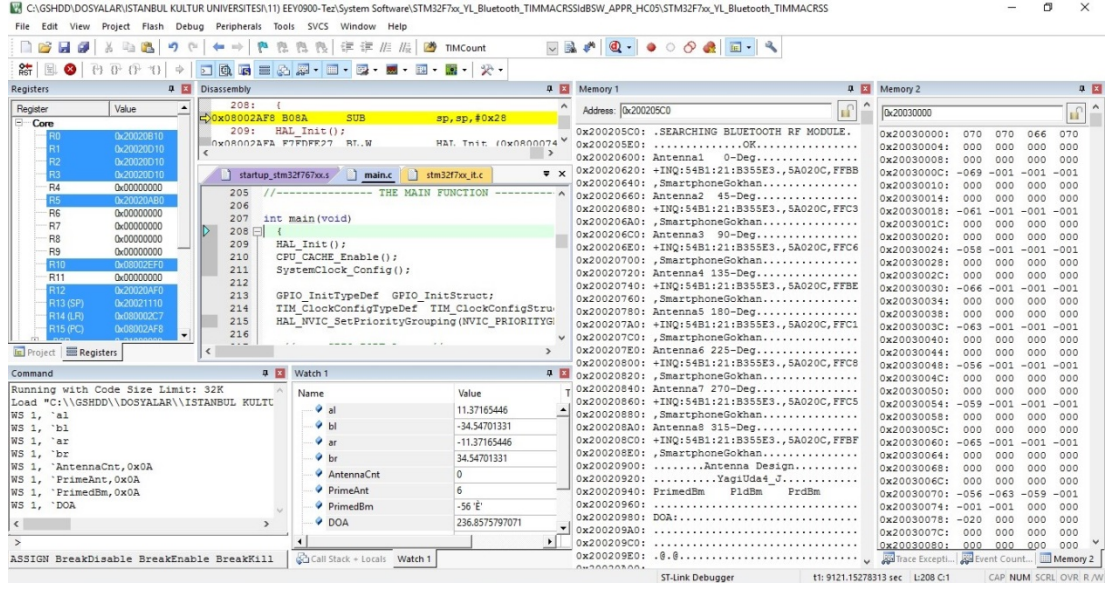
$$P^1 - P_1 = 4 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 84.0172910) = 270 - 5.9827090 = 264.017291^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 5 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 91.4133150) = 270 - 1.4133150 = 271.413315^\circ$$

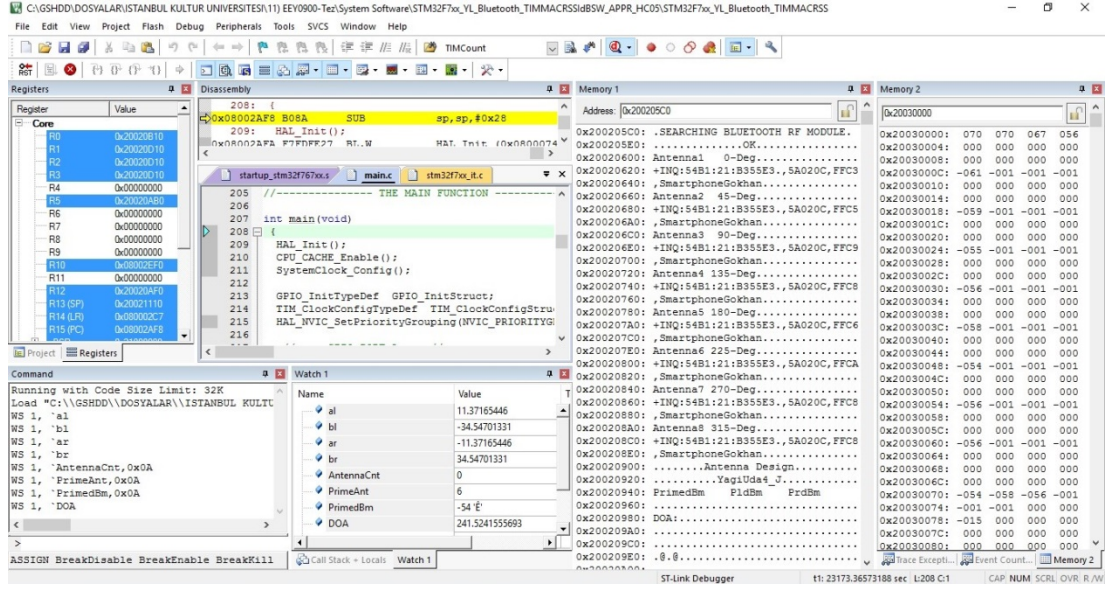


Şekil 8.15 Orta Kazançlı Anten 223.586° Ölçümü

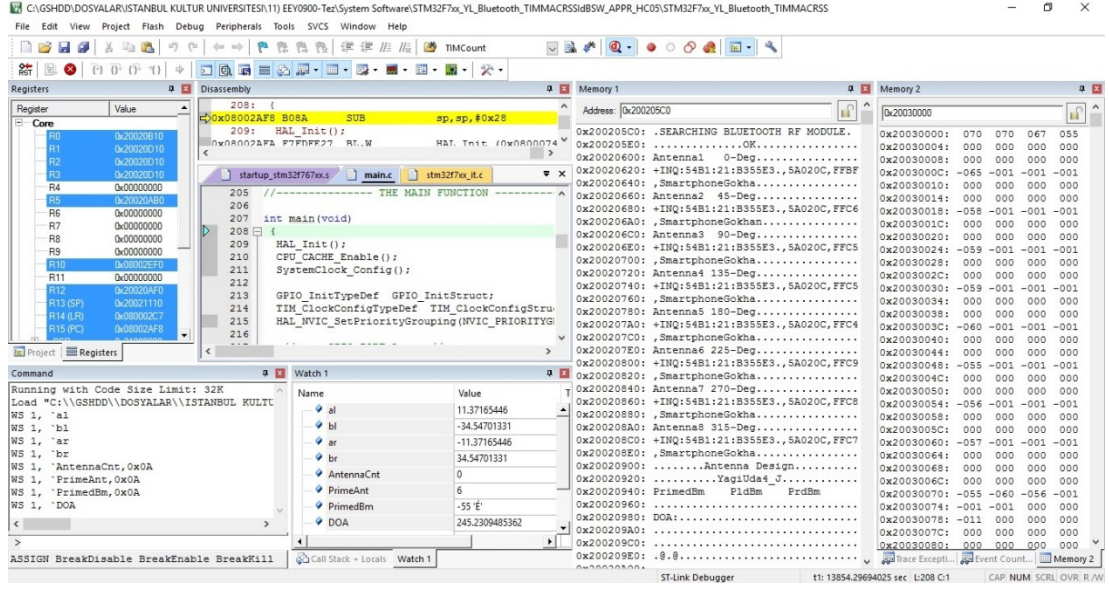




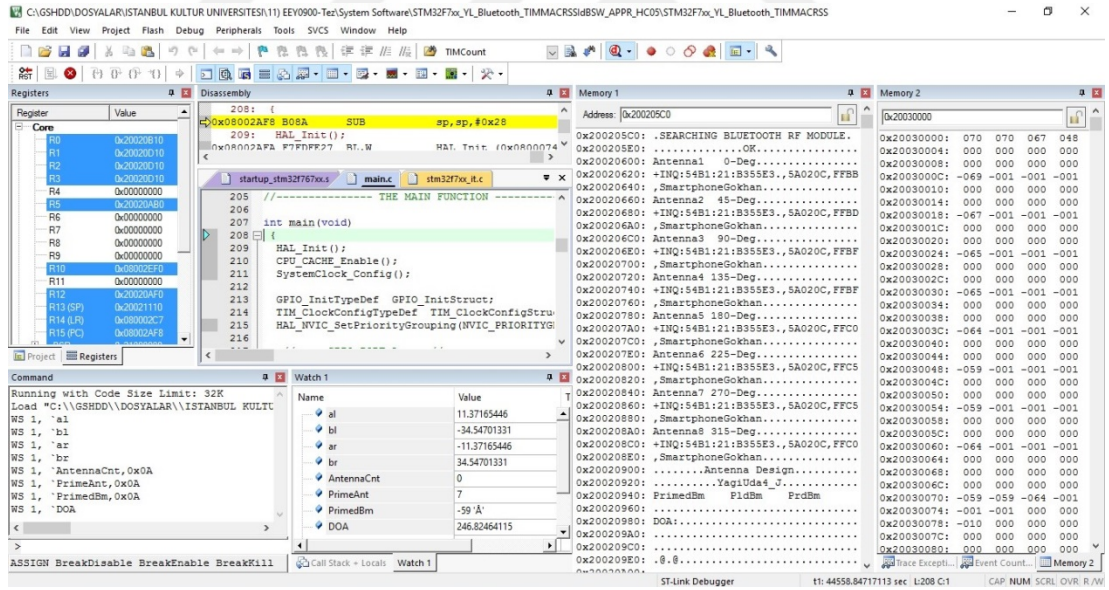
Şekil 8.18 Orta Kazançlı Anten 236.857° Ölçümü

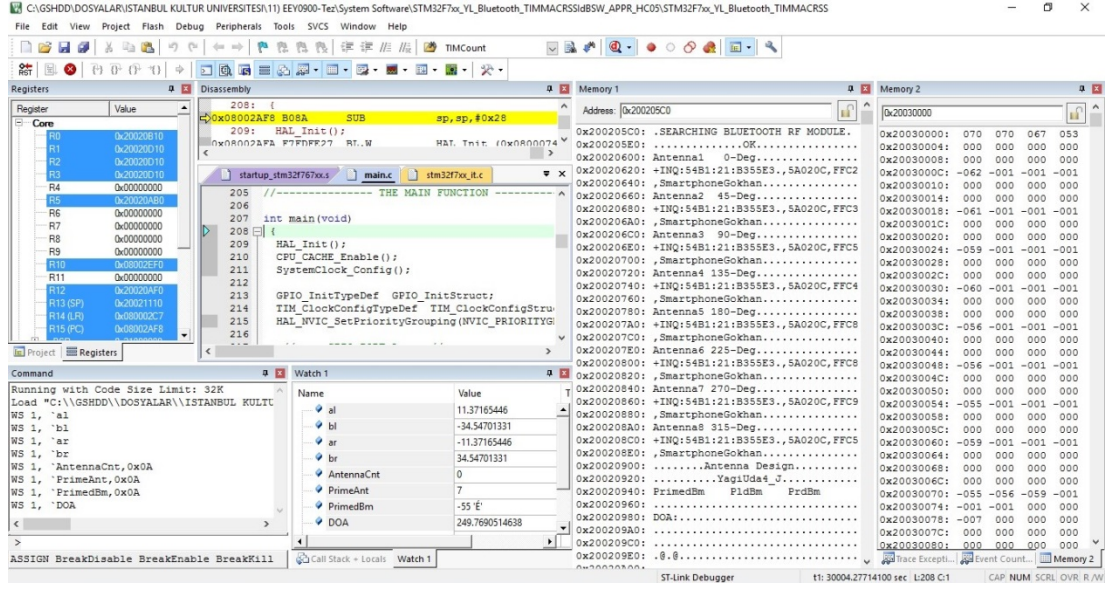


Şekil 8.19 Orta Kazançlı Anten 241.524° Ölçümü

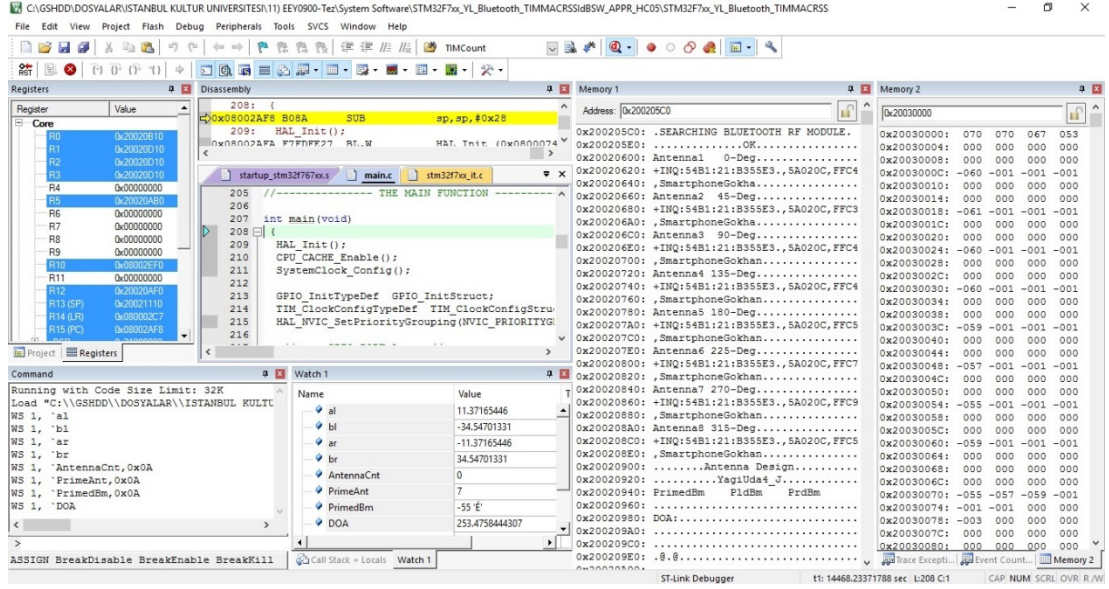


Yukarıdaki Şekil 8.15'ten Şekil 8.20'ye kadar görülen açı değerleri orta kazançlı dizinin 6 no'lu antenin en yüksek ölçüm değeri olarak birincil anten olduğu sonuçlardır.

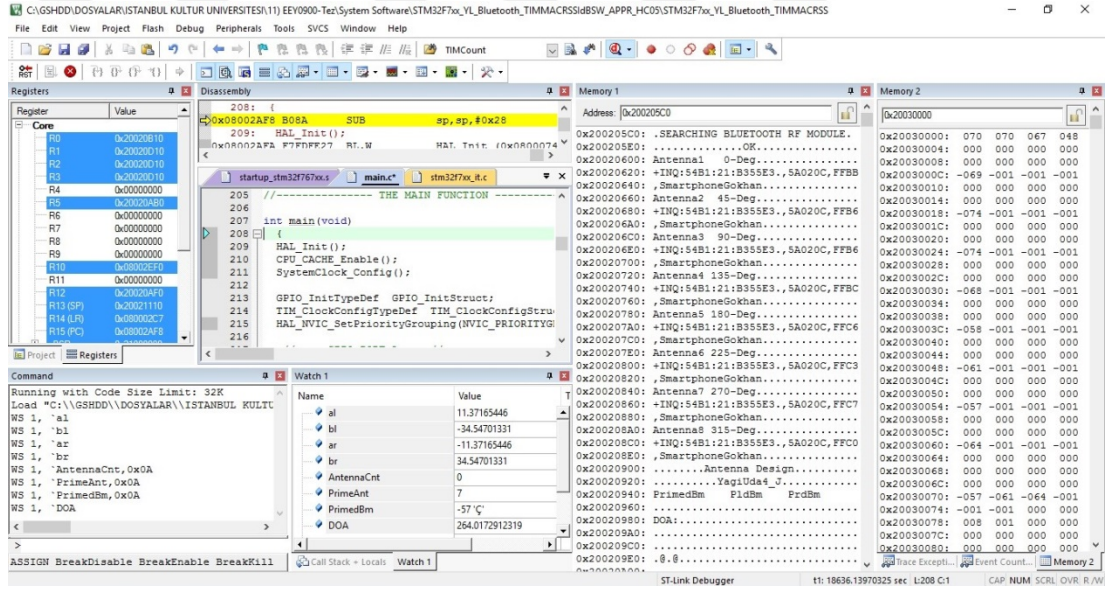
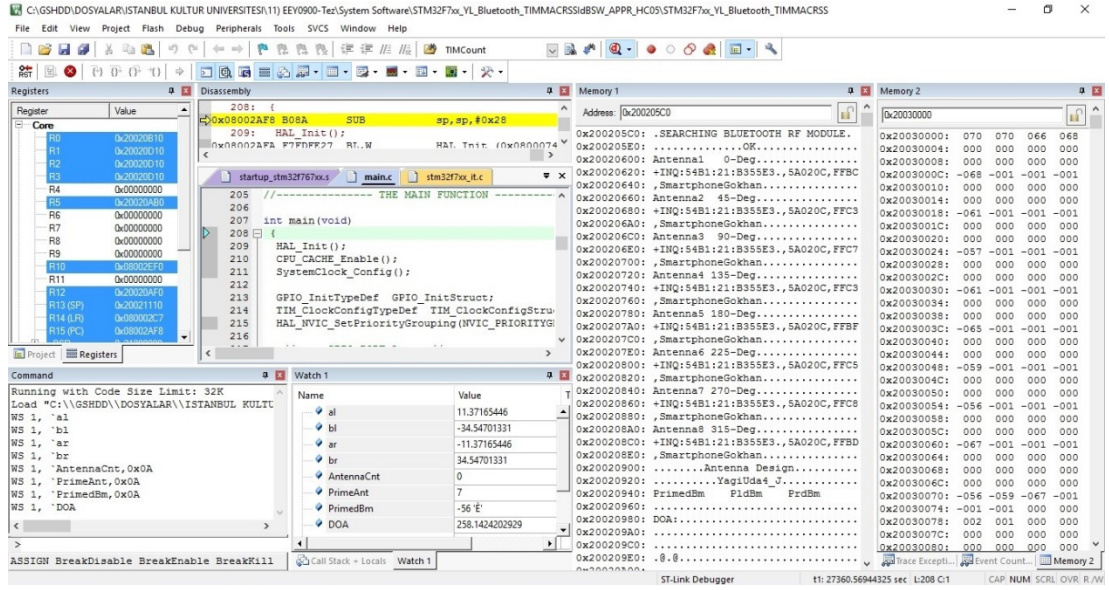


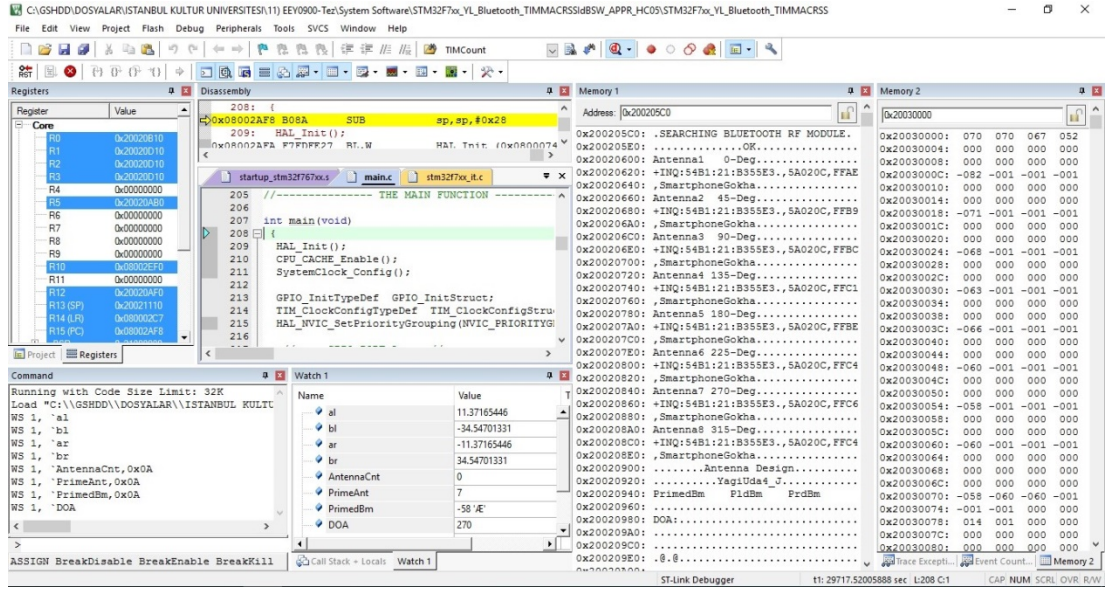


Şekil 8.22 Orta Kazançlı Anten 249.769° Ölçümü

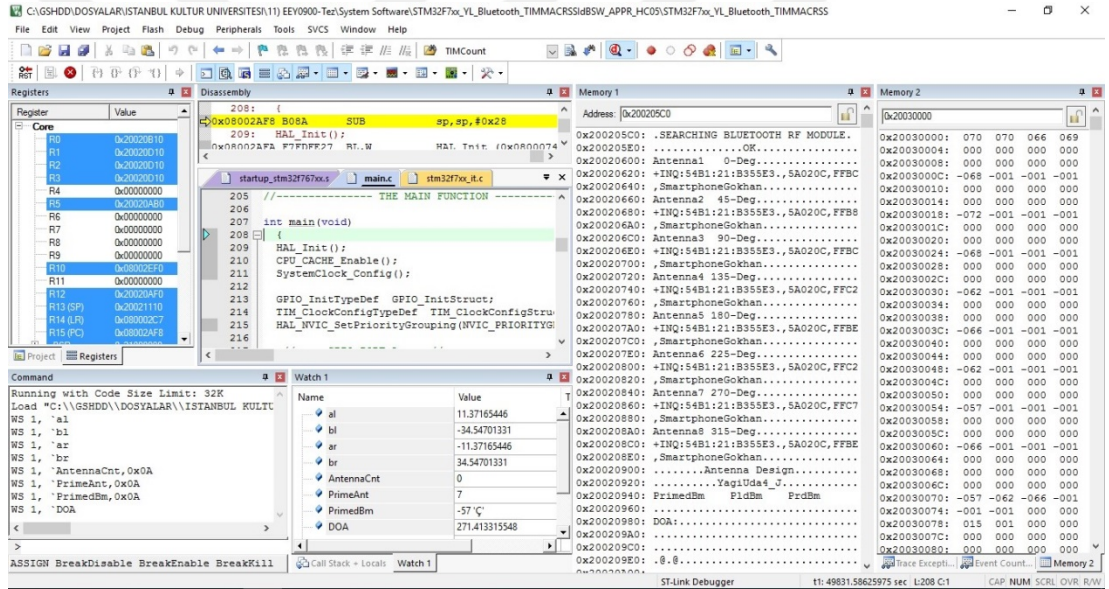


Şekil 8.23 Orta Kazançlı Anten 253.475° Ölçümü





Şekil 8.26 Orta Kazançlı Anten 270° Ölçümü



Şekil 8.27 Orta Kazançlı Anten 271.413° Ölçümü

Şekil 8.21’den Şekil 8.27’ye kadar ölçülen değerler ise orta kazançlı dizinin 7 no’lu antenin en yüksek ölçüm değeri olarak birincil anten olduğu sonuçlardır.

Tablo 8.2 YagiUda4_J Sistem DoA Ölçüm Sonuçları

Fiziki Hedefin Yaklaşık Açısı	Anten Ölçüm Değerleri (dBm)			MI İçindeki Ölçülen Aç
	Birincil	Komşu Sol	Komşu Sağ	
225°	-55	-61	-60	223.5866°
225°	-55	-58	-58	225.0000°
230°	-58	-67	-62	230.9827°

236°	-56	-63	-59	236.8576°
240°	-54	-58	-56	241.5241°
245°	-55	-60	-56	245.2309°
247°	-59	-59	-64	246.8246°
250°	-55	-56	-59	249.7690°
255°	-55	-57	-59	253.4758°
260°	-56	-59	-67	258.1424°
265°	-57	-61	-64	264.0172°
270°	-58	-60	-60	270.0000°
270°	-57	-62	-66	271.4133°
al	bl	ar	br	
11.37165446	-34.54701331	-11.37165446	34.54701331	

Veri çıktıları ve Tablo 8.2’de listelenen sonuçlardan da görülebileceği üzere, hem orta düzey kazanca sahip antenlerden oluşan sistemin fiziksel ölçüm sonuçlarının hem de Bölüm 6’da iddia edildiği ve gösterildiği gibi, MI ve $\text{res}\angle(\psi_{lr}^1)$ açı çözünürlüklerinin iyileştirildiği çıkarımı yapılabilmektedir. İkinci set için, hatalı ölçümler ve hatalı sonuçlar gözlemlenmiş olsa da, bunların sayısı bir önceki sete göre daha azdır.

8.3. Yüksek Kazançlı UCA Anten Sistemi ile DoA Ölçüm Deneyleri

Şekil 8.2’de gösterilen yüksek kazançlı 8 YagiUda5_J anteninden oluşan 8.4306 dBi’lık son setin fiziksel testleri sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmiş ve yeni açılara uyarlanmış çözünürlük değerleri ile karşılaştırılmıştır. Burada 6 ve 7 numaralı anten elemanlarının 225 ile 270 derece arasındaki 45 derecelik fiziksel açıklığı kullanıldığında, Bölüm 6’da hesaplandığı gibi, $\text{res}\angle(\psi_{lr}^1)$ ölçüm açısı çözünürlüğünde toplamda 21 ölçüm açısıyla fiziksel testlerde de DoA performansında önemli bir iyileşme olması beklenmiştir.

P^1 Antenna 6 $\rightarrow P_r$: 225°

$$P^1 - P_r = 9 \text{ dBm: } 225^\circ + (89.0179810 - 90) = 225 - 0.9820190 = 224.017981^\circ$$

$$P^1 - P_r = 8 \text{ dBm: } 225^\circ + (94.6050730 - 90) = 225 + 4.6050730 = 229.605073^\circ$$

$$P^1 - P_r = 7 \text{ dBm: } 225^\circ + (99.0430580 - 90) = 225 + 9.0430580 = 234.043058^\circ$$

$$P^1 - P_r = 6 \text{ dBm: } 225^\circ + (102.568275 - 90) = 225 + 12.568275 = 237.568275^\circ$$

$$P^1 - P_r = 5 \text{ dBm: } 225^\circ + (105.368454 - 90) = 225 + 15.368454 = 240.368454^\circ$$

$$P^1 - P_r = 4 \text{ dBm: } 225^\circ + (107.592715 - 90) = 225 + 17.592715 = 242.592715^\circ$$

$$P^1 - P_r = 3 \text{ dBm: } 225^\circ + (109.359509 - 90) = 225 + 19.359509 = 244.359509^\circ$$

$$P^1 - P_r = 2 \text{ dBm: } 225^\circ + (110.762923 - 90) = 225 + 20.762923 = 245.762923^\circ$$

$$P^1 - P_r = 1 \text{ dBm: } 225^\circ + (111.877695 - 90) = 225 + 21.877695 = 246.877695^\circ$$

$$P^1 \text{ Antenna 7} \rightarrow P_1: 270^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 0 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 67.2368100) = 270 - 22.763190 = 247.236810^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 1 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 68.1223040) = 270 - 21.877696 = 248.122304^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 2 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 69.2370760) = 270 - 20.762924 = 249.237076^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 3 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 70.6404900) = 270 - 19.359510 = 250.640490^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 4 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 72.4072840) = 270 - 17.592716 = 252.407284^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 5 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 74.6315450) = 270 - 15.368455 = 254.631545^\circ$$

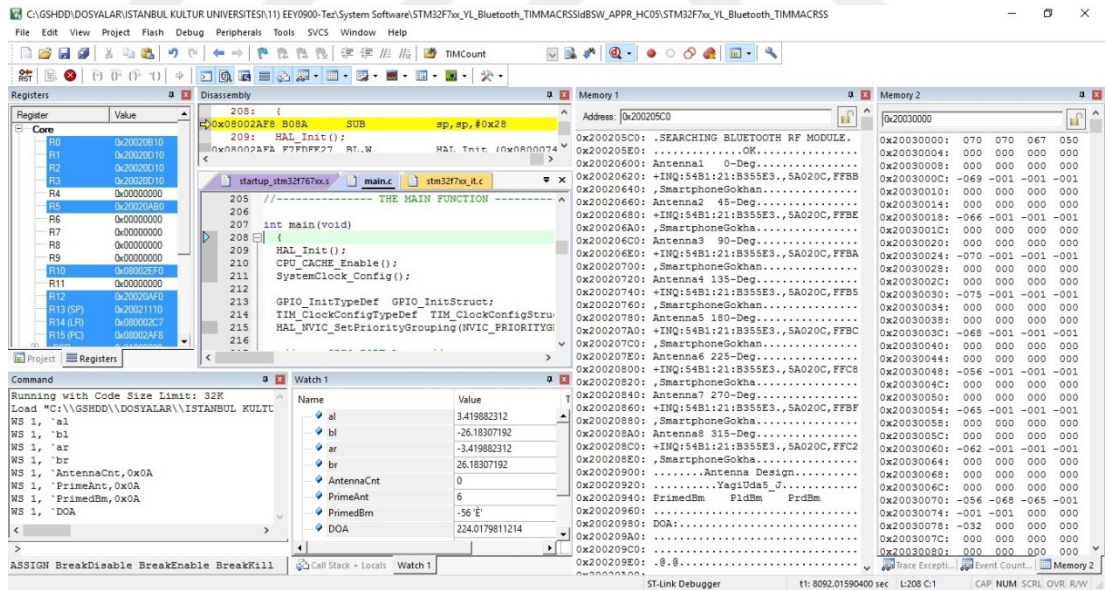
$$P^1 - P_1 = 6 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 77.4317240) = 270 - 12.568276 = 257.431724^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 7 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 80.9569410) = 270 - 9.0430590 = 260.956941^\circ$$

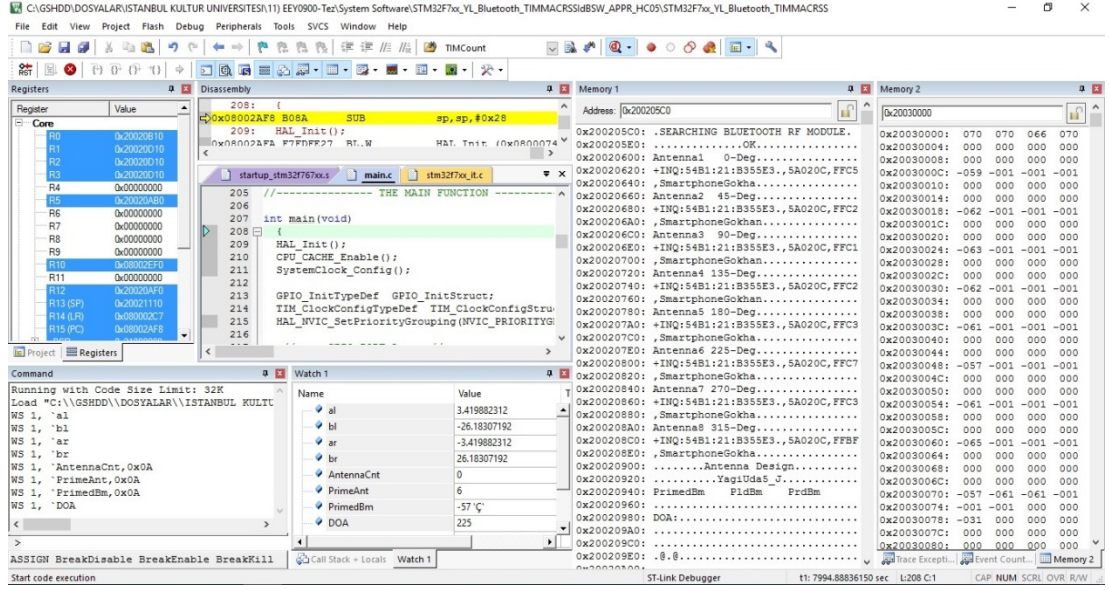
$$P^1 - P_1 = 8 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 85.3949260) = 270 - 4.6050740 = 265.394926^\circ$$

$$P^1 - P_1 = 9 \text{ dBm: } 270^\circ - (90 - 90.9820180) = 270 + 0.9820180 = 270.982018^\circ$$

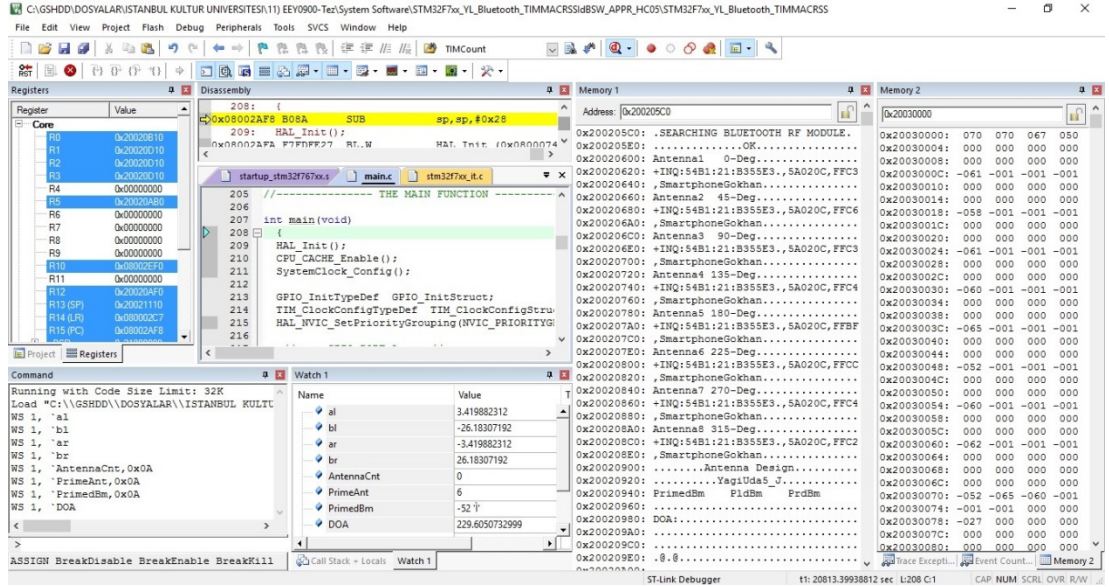
Ölçümlerin bilgisayar ekranından alınmış ekran görüntüleri aşağıda verilmiştir.



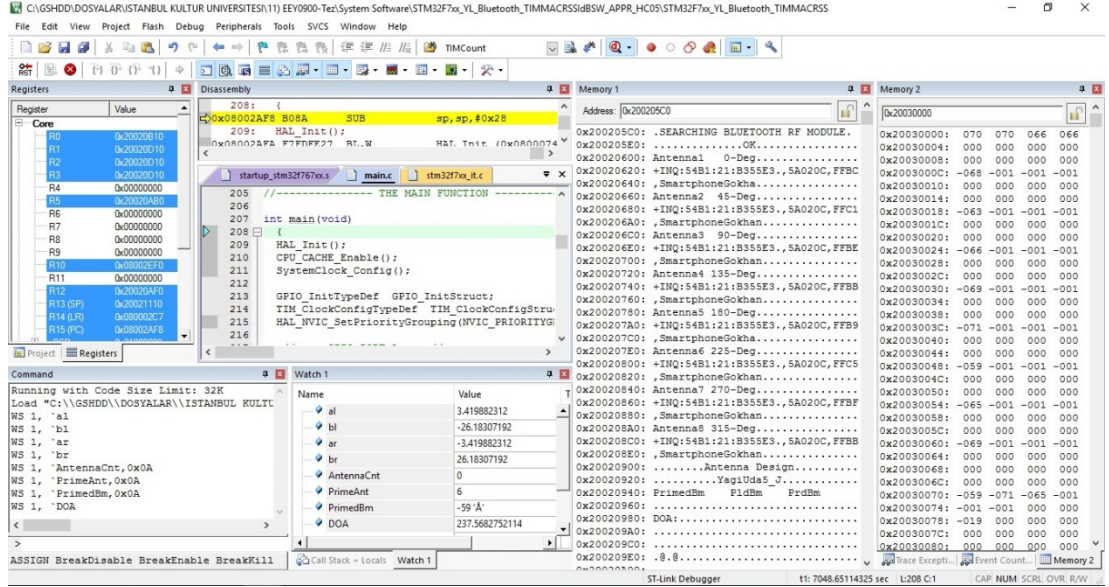
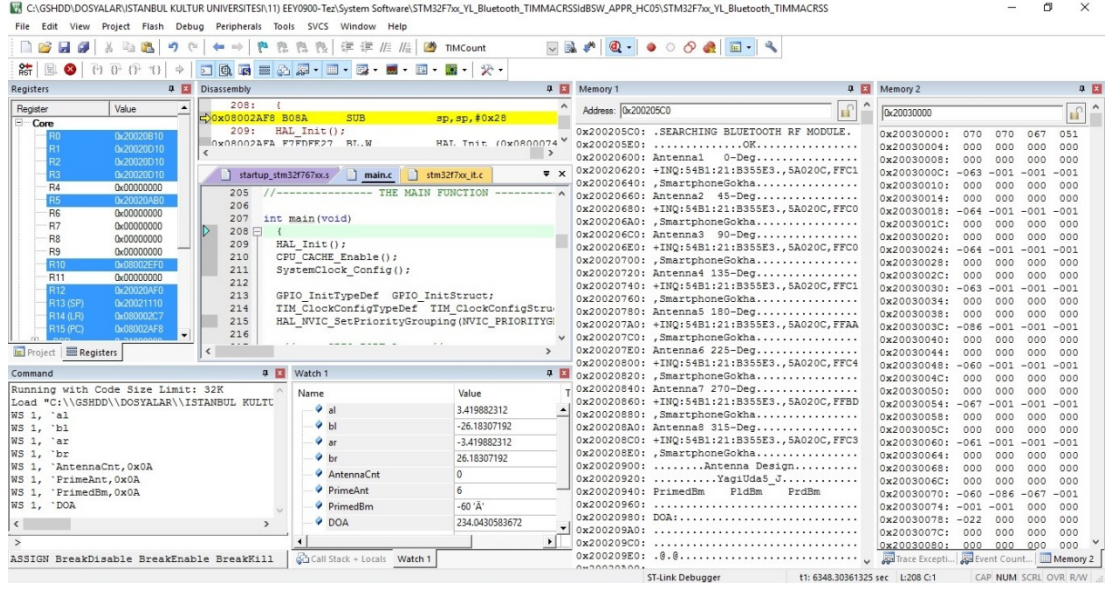
Şekil 8.28 Yüksek Kazançlı Anten 224.017° Ölçümü

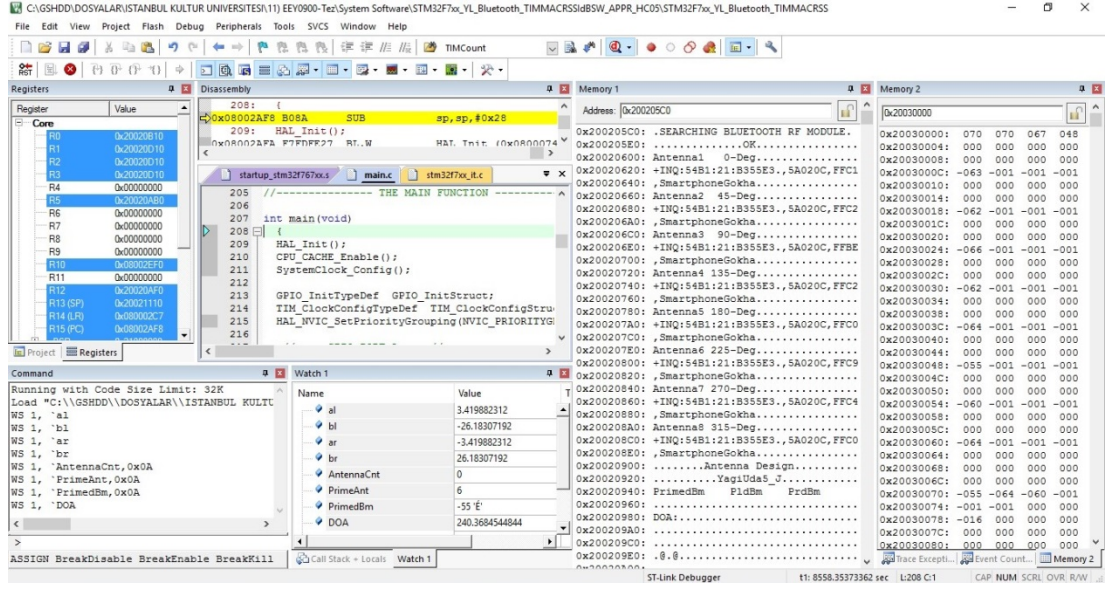


Şekil 8.29 Yüksek Kazançlı Anten 225° Ölçümü

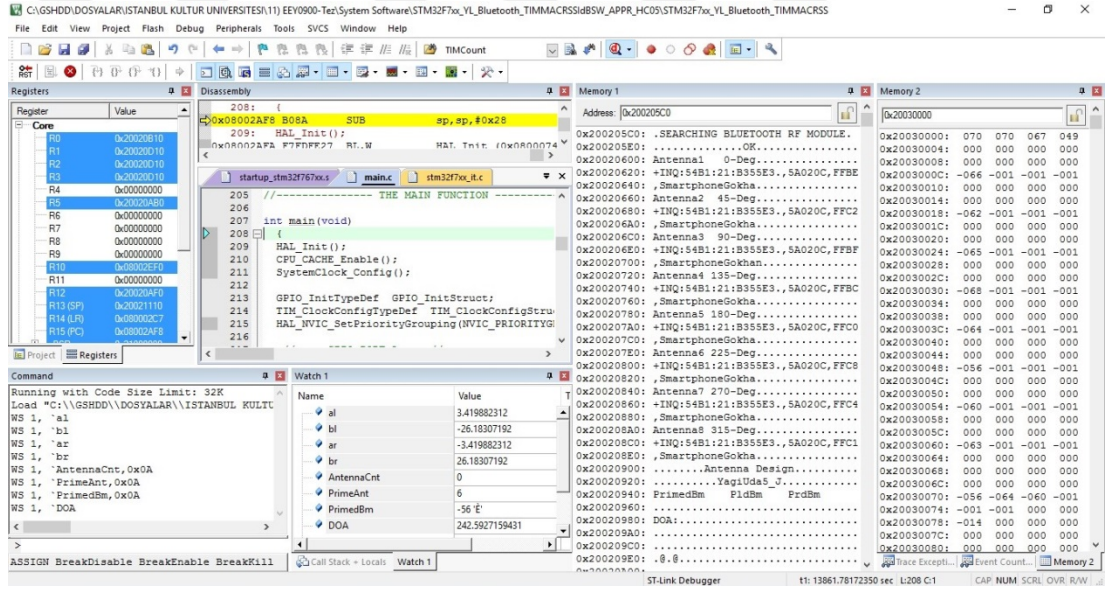


Şekil 8.30 Yüksek Kazançlı Anten 229.605° Ölçümü

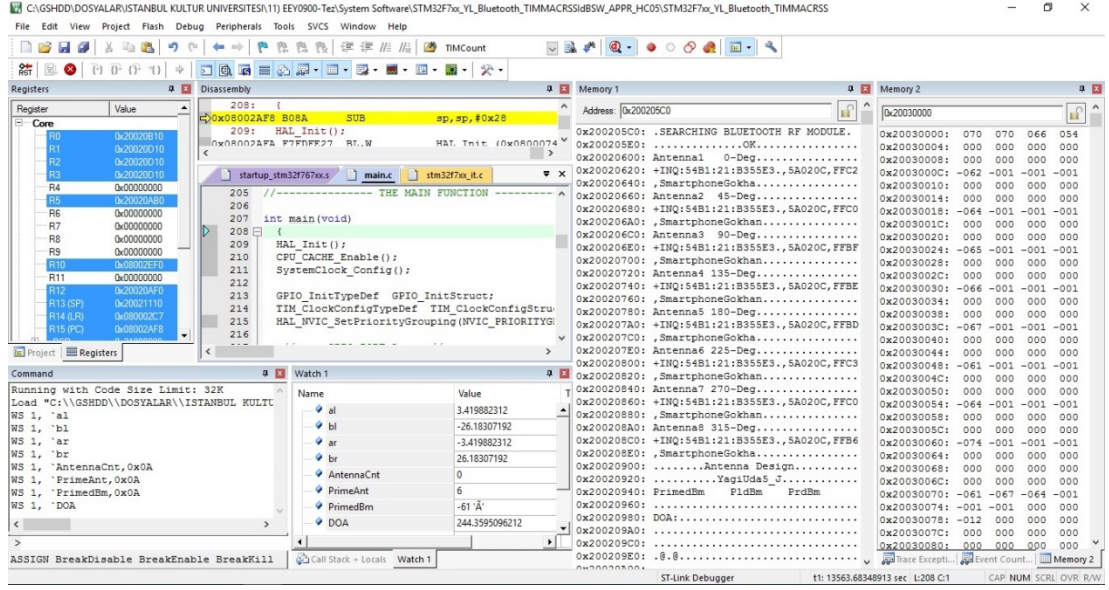




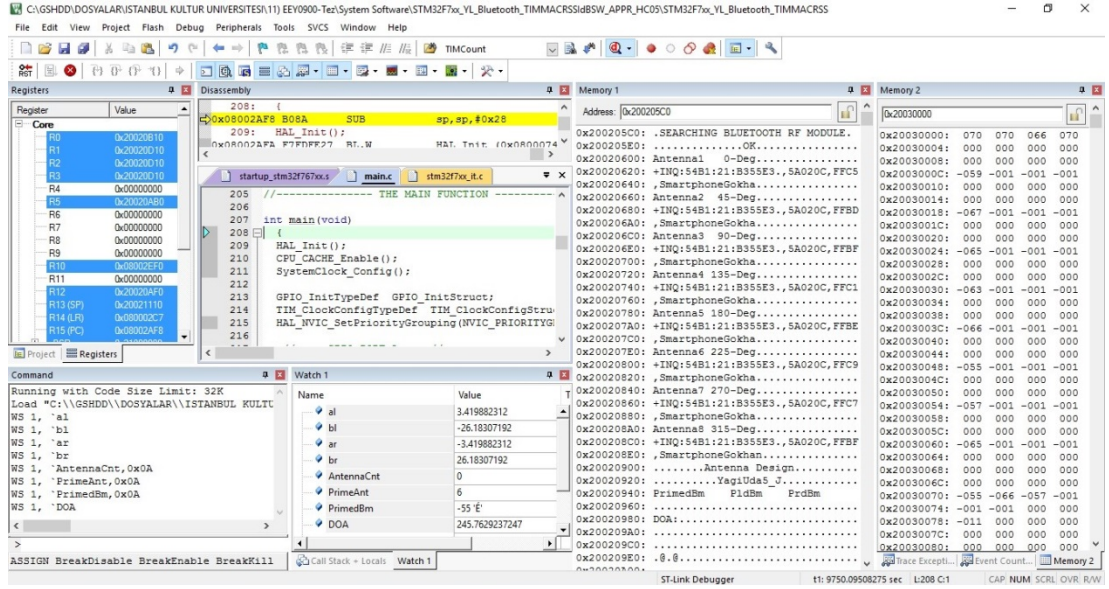
Şekil 8.33 Yüksek Kazançlı Anten 240.368° Ölçümü



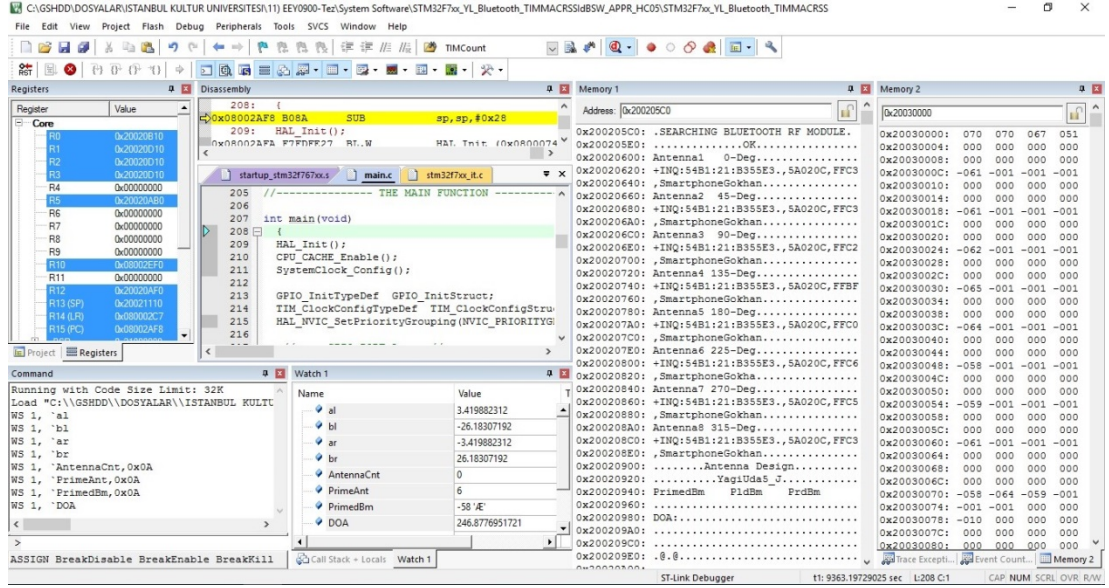
Şekil 8.34 Yüksek Kazançlı Anten 242.592° Ölçümü



Şekil 8.35 Yüksek Kazançlı Anten 244.359° Ölçümü

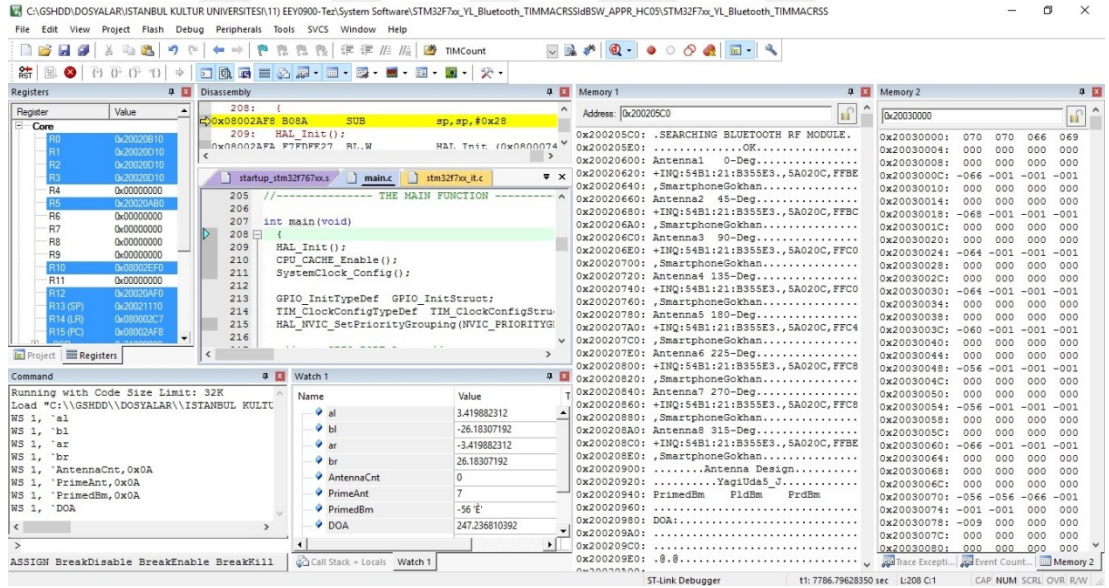


Şekil 8.36 Yüksek Kazançlı Anten 245.762° Ölçümü

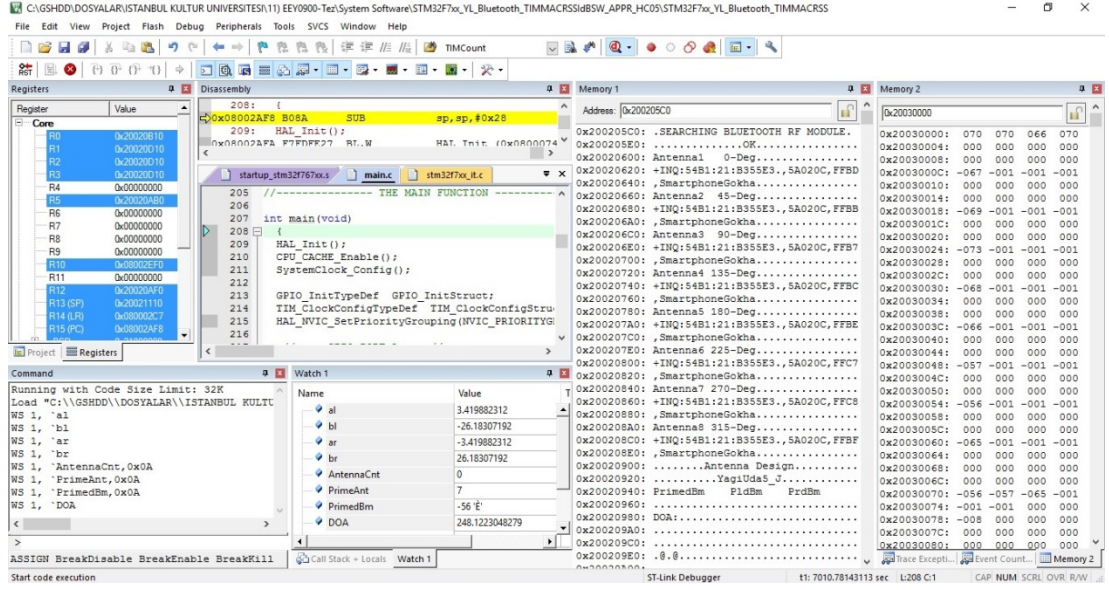


Şekil 8.37 Yüksek Kazançlı Anten 246.877° Ölçümü

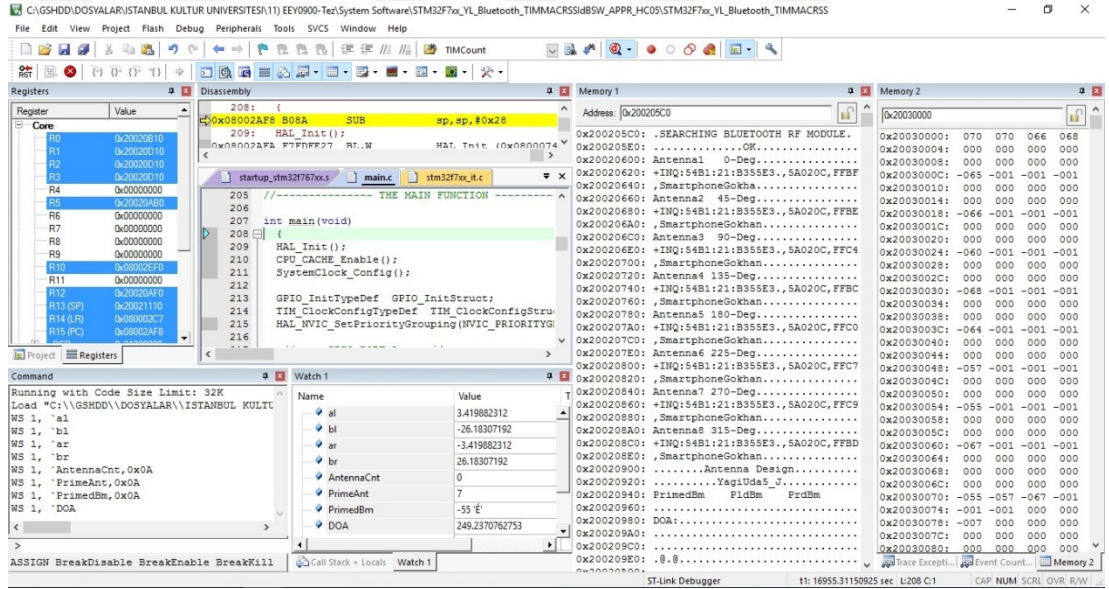
Yukarıdaki Şekil 8.28’den Şekil 8.37’ye kadar görülen açI değerleri yüksek kazançlı dizinin 6 no’lu antenin en yüksek ölçüm değeri olarak birincil anten olduğu sonuçlardır.



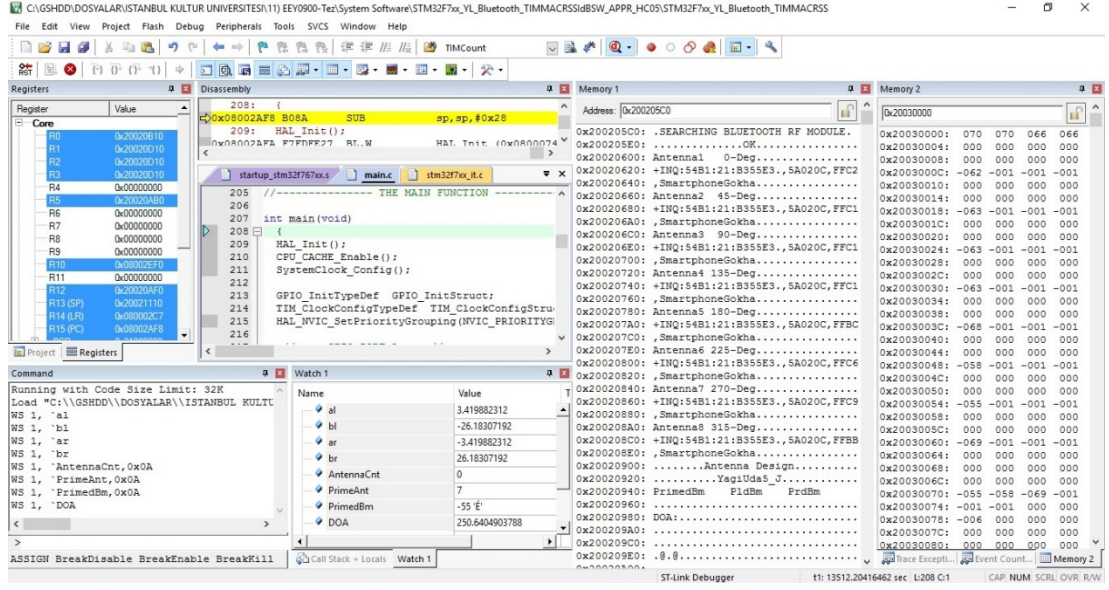
Şekil 8.38 Yüksek Kazançlı Anten 247.236° Ölçümü



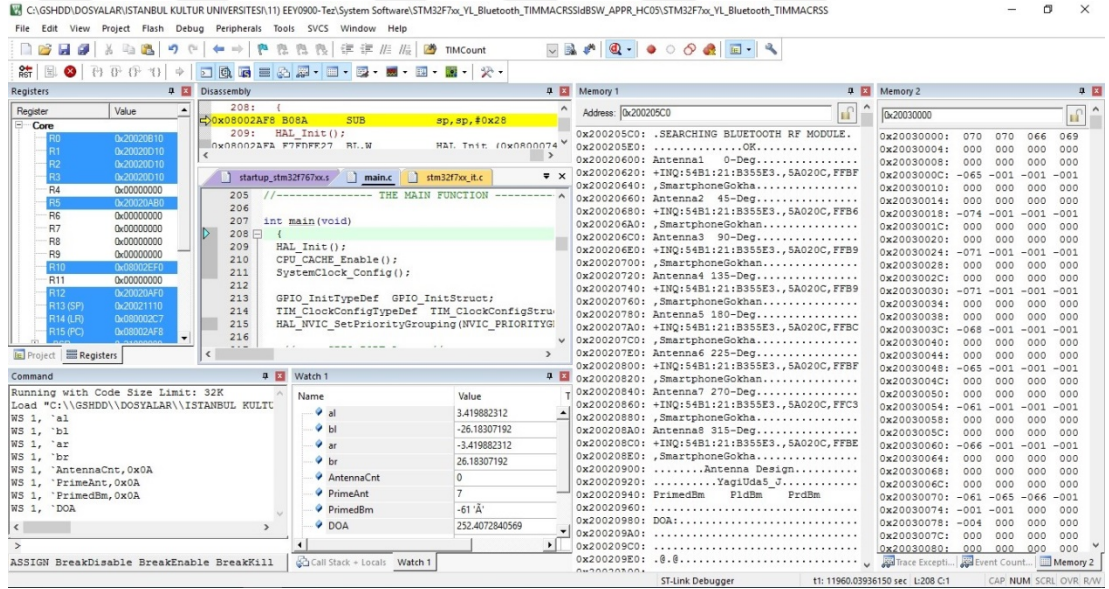
Şekil 8.39 Yüksek Kazançlı Anten 248.122° Ölçümü



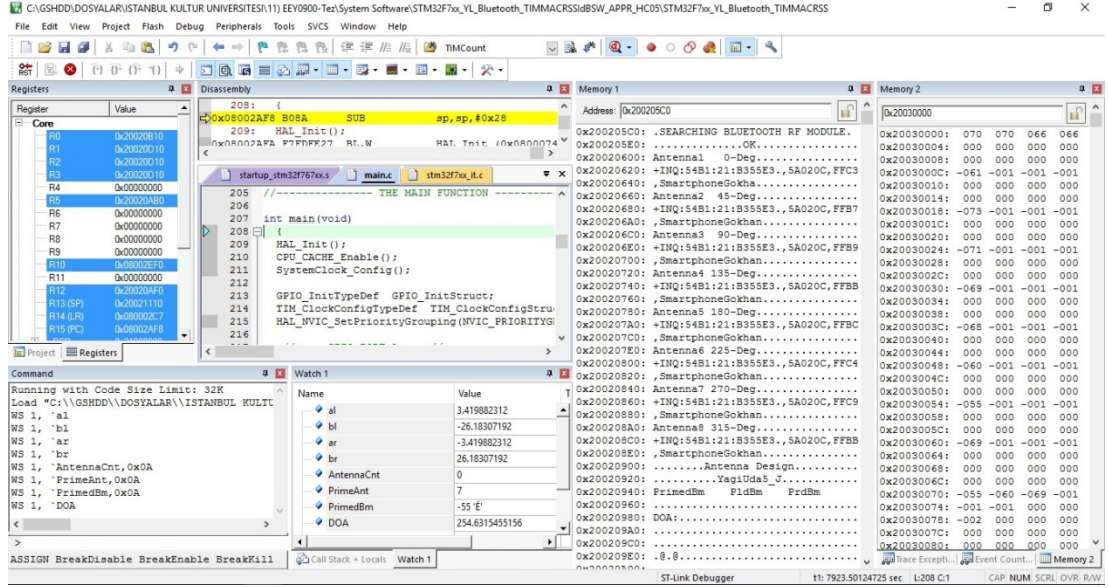
Şekil 8.40 Yüksek Kazançlı Anten 246.237° Ölçümü



Şekil 8.41 Yüksek Kazançlı Anten 250.640° Ölçümü

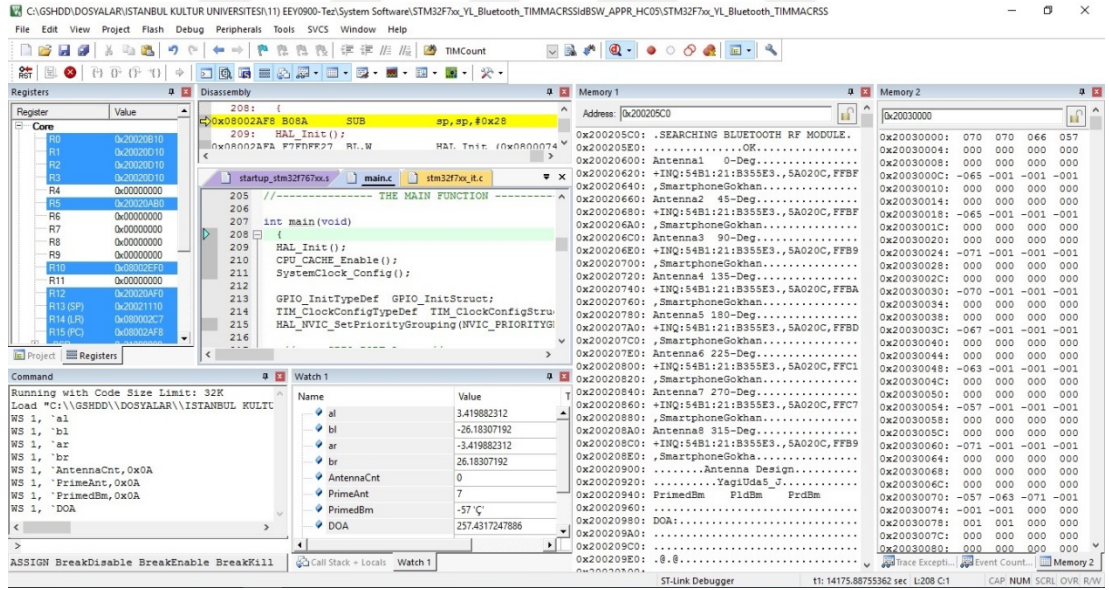


Şekil 8.42 Yüksek Kazançlı Anten 252.407° Ölçümü

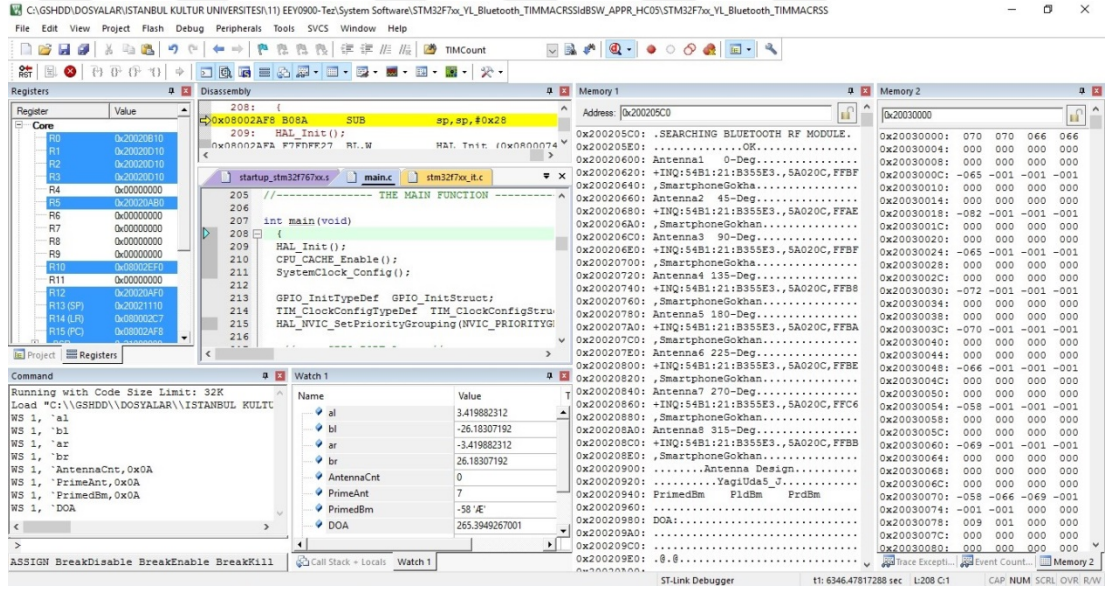
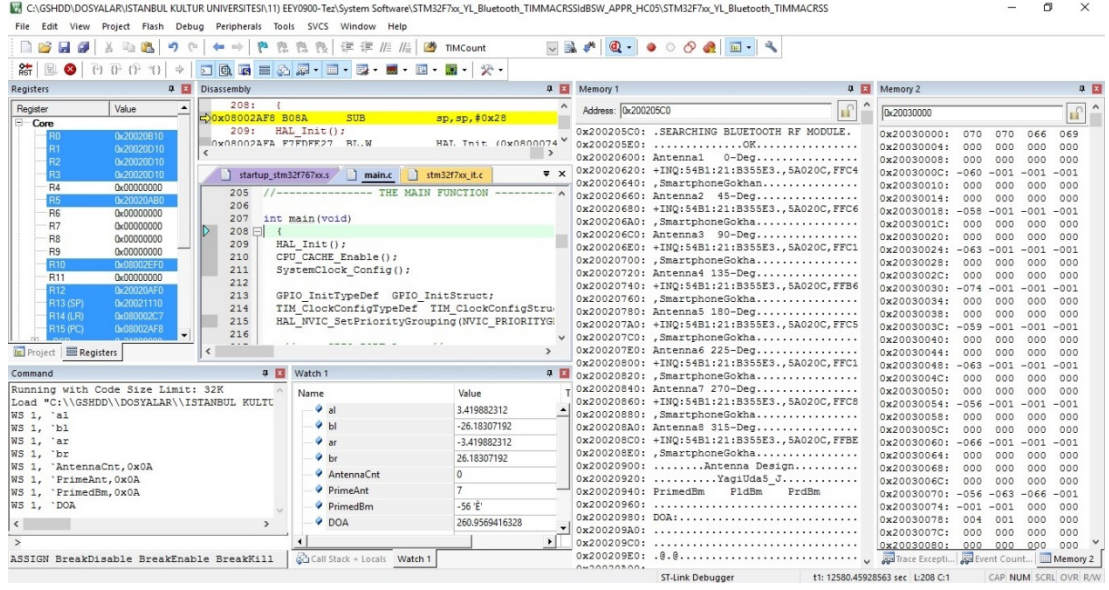


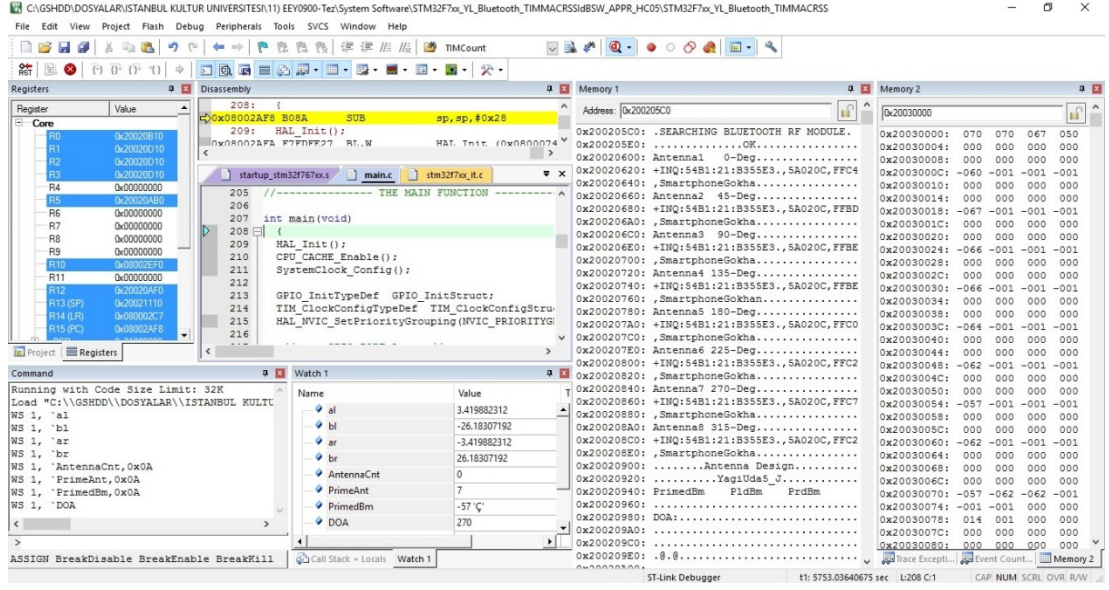
Şekil 8.43 Yüksek Kazançlı Anten 254.631° Ölçümü

Hem Şekil 8.38’den Şekil 8.43’e kadarki yukarıdaki hem de Şekil 8.44’ten Şekil 8.48’e kadar olan izleyen açı değerleri ise yüksek kazançlı dizinin 7 no’lu anteninin en yüksek ölçüm değeri olarak birincil anten olduğu sonuçlardır.

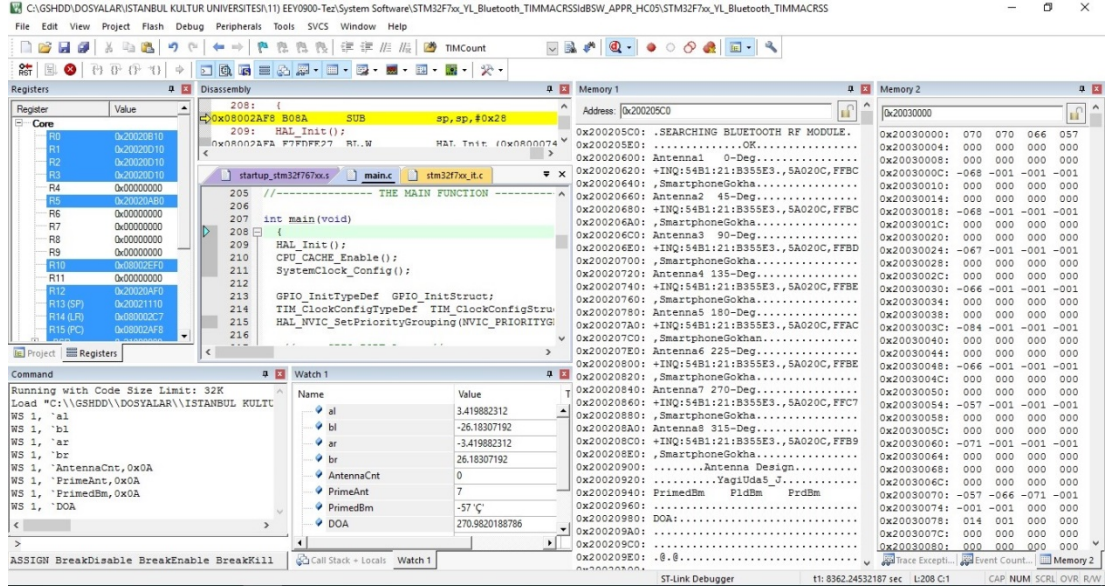


Şekil 8.44 Yüksek Kazançlı Anten 257.431° Ölçümü





Şekil 8.47 Yüksek Kazançlı Anten 270° Ölçümü



Şekil 8.48 Yüksek Kazançlı Anten 270.982° Ölçümü

Tablo 8.3 YagiUda5_J Sistem DoA Ölçüm Sonuçları

Fiziki Hedefin Yaklaşık Açısı	Anten Ölçüm Değerleri (dBm)			MI İçindeki Ölçülen Aç
	Birincil	Komşu Sol	Komşu Sağ	
225°	-56	-68	-65	224.0179°
225°	-57	-61	-61	225.0000°
230°	-52	-65	-60	229.6050°
235°	-60	-86	-67	234.0430°
237°	-59	-71	-65	237.5682°
240°	-55	-64	-60	240.3684°

242°	-56	-64	-60	242.5927°
245°	-61	-67	-64	244.3595°
245°	-55	-66	-57	245.7629°
246°	-58	-64	-59	246.8776°
247°	-56	-56	-66	247.2368°
248°	-56	-57	-65	248.1223°
249°	-55	-57	-67	249.2370°
250°	-55	-58	-69	250.6404°
252°	-61	-65	-66	252.4072°
255°	-55	-60	-69	254.6315°
257°	-57	-63	-71	257.4317°
260°	-56	-63	-66	260.9569°
265°	-58	-66	-69	265.3949°
270°	-57	-62	-62	270.0000°
270°	-57	-66	-61	270.9820°
al	bl	ar	br	
3.419882312	-26.18307192	-3.419882312	26.18307192	

Bu testler için 225° ve 270°'lik iki ana anten açısı dâhil olmak üzere, beklendiği gibi toplam 21 tane farklı doğru açı ölçümü yapılmış ve Tablo 8.3'te listelenmiştir. Yüksek kazançlı anten dizisinin sistem testleri, analitik testlerde daha önce yapılan hesaplamalarla kanıtlandığı üzere, hedef Bluetooth RF cihazının $\theta_{[0]}^t$ fiziksel DoA açı ölçümü ve tespitinin beklendiği gibi daha yüksek çözünürlükler $\text{res}_3\angle(\psi_{lr}^t)$ ve çok daha az sayıda açıklık dışı ölçüm hatası ve açıklık içi hatalı ölçüm değerleriyle birlikte, çok daha verimli ve uygulanabilir sonuçlarla tamamlanmıştır.

9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Her bir Quasi-Yagi PCB anten önce HFSS simülasyon ortamında tasarlanıp modellenerek simülasyonu yapılmış, ardından elektromanyetik kurallara uygun olarak gerekli iyileştirme tasarımları yapılarak, yönlülük (D), kazanç (G), empedans (Z) ve çözünürlük $\text{res}_n\angle(\psi_{lr}^t)$ değerlerinde tasarım karakteristiklerini beklendiği gibi gösteren antenler üretilmiş ve ölçülerek doğrulanmıştır. Bölüm 5'te matematiksel tanımlamaları anlatılan doğrusal regresyon yaklaşımı ile APPR

algoritmasının Bölüm 6'da güç kazanç örüntüsü veri örneklemeleri kullanılarak her bir anten tasarımı için ilgili katsayılar hesaplanmış, bu katsayılar ve gerçeğe uygun alıcı güç değerleri kullanılarak yine her bir anten sistemi için ölçüm çözünürlüğü elde edilmiş ve anten kazancının yükselmesi ile hedef çözünürlüğünün arttığı gösterilmiş ve matematiksel olarak ispatlanmıştır. Bölüm 8'de ise gerçek bir Bluetooth RF cihazından alınan RSSI değerlerinin yine dBm cinsinden değerlendirilip yazılım tarafından gerçek hedefin fiziksel açılarının hesaplanmasında kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar, ölçülen açı değerlerinin tüm anten tipleri ve UCA sistemleri için önceden hesaplanan ve beklenen açı değerleri ile aynı olduğunu ve kazanç artışına doğru orantılı olarak açısal çözünürlüğün arttığını bir kez daha göstermiştir. Bu deneyler aynı zamanda LR APPR algoritma prensiplerine göre geliştirilen yazılımı içeren mikrodenetleyicili bir gömülü sistemin yeterli kazanca sahip bir anten dizisiyle entegre edildiğinde gerçek DoA uygulamalarında diğer yön bulma sistemleri kadar doğru ölçümler yaparak başarılı sonuçlar verebileceğini göstermektedir.

Her üç anten tipi için de, test edilen antenler arasındaki orta açılarının yakınında anten güç kazancı eğrisinin daha dik olması nedeniyle en yüksek açı çözünürlükleri meydana gelmiştir. YagiUda3_C olarak adlandırılan anten için en düşük çözünürlük 7.79° ve en yüksek çözünürlük 3.9° ; YagiUda4_J anteni için en düşük çözünürlük 7.39° ve en yüksek çözünürlük 2.9° ; ve YagiUda5_J anteni için en düşük çözünürlük 5.58° ve en yüksek çözünürlük 0.88° 'dir. Antenlerin en yüksek çözünürlükleri dikkate alındığında çözünürlükler yaklaşık 4° 'den başlayarak önerildiği gibi geliştirilerek 1° 'nin altındaki açı değerlerine kadar inmiştir.

Bildiğimiz gibi, bir azimut açısındaki kazanç örüntüsünün yarı güç ışıma genişliği (HPBW) ve dikliği neredeyse tamamen antenin yönlülüğü ve kazancı ile orantılıdır. Bu yüksek lisans tezinde, doğrusal regresyon tekniği dikkate alınıp tasarlanan tek uçlu Quasi-Yagi PCB antenlerin anten kazancı ve buna bağlı olarak kazanç örüntüsünün dikliğinin artırılması, Eşitlik 5.14a'daki a bağıntısının paydasındaki $n(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2$ değerinin artış oranının payındaki $n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)$ değerinin artış oranından büyük olmasına, bunun sonucunda da hem a hem de b regresyon katsayılarının değerinin küçülmesiyle APPR algoritmasının DoA açı çözünürlüğünün, keskinliğinin ve doğruluğunun, dolayısıyla da MI aralığında

ölçülecek açı sayısının artmasına neden olmuştur. Bu sayede ölçüm alanındaki daha yakın fiziksel noktaların açı ölçümlerinin yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Düşük ve orta kazançlı antenler bazı ölçüm hataları ve kaba DoA çözünürlükleri gösterirken, çok daha keskin ve doğru ölçümler gösteren 8.4306 dBi'lık en yüksek kazançta sahip üçüncü anten, yalnızca 1 dBm'lik düşük çözünürlüklü RSSI üreten ve/veya alan basit bir Bluetooth 2.0 RF cihazının bile DoA'sını belirlemede çok daha başarılı olmuştur. Örneğin Tablo 8.1'de 225° ve 270°'lik tam fiziki anten açılarında yaklaşık 10 metre uzaklıktan alınan sırasıyla -54 dBm ve -56 dBm, ortalama olarak ise -55 dBm güç ölçüm değerleri göz önüne alınırsa, YagiUda3_C için simüle edilen 3.583 (5.5424 dBi) anten kazanç parametreleriyle birlikte Tablo 7.1'deki yaklaşık 2 dB'lik RF anahtar iletim kayıpları ve Bölüm 7.4.2'de belirtilen Bluetooth 4.1 verici hedef cihazının Bölüm 1.1'de bildirilen Bluetooth sınıf 2 dâhilindeki 2.5 mW verici gücü değeri hesaba katılarak Eşitlik 2.11 deki Friis iletişim denklemi yardımıyla polarizasyon uyumsuzlukları dâhil edilmeden hesaplanan anten üzerinde toplanan güç -52.87 dBm olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan güç ile sistem deneyleri sırasında ölçülen güç yaklaşık 2 dBm gibi bir farkla çok yakın bir değere sahiptir. Sistem deneyleriyle elde edilen bu küçük ölçüm farklarının nedeni Şekil 4.45, 4.46, 4.47, 4.48, 4.49 ve 4.50'deki simülasyon ve üretilen PCB mikroşerit antenler arasındaki küçük geri dönüş kaybı ve empedans farkı, verici-alıcı anten hizalama kayması, polarizasyon uyumsuzlukları ve çevresel girişim ve yansıma sinyallerinden kaynaklanan kayıplar olarak düşünülebilir.

Ayrıca tezde ayrıntılı olarak açıklanmış olmasa da doğrusal regresyon yaklaşımı APPR algoritmasının aynı simülasyonlarından ve hesaplamalarından anten dizisindeki eleman sayısı azaldıkça çözünürlüğün arttığı veya eleman sayısı arttıkça çözünürlüğün de nispeten azaldığı analitik hesaplamalarla açıkça görülebilmektedir. Örneğin, YagiUda5_J anteni ele alındığında ve sistem 6 elemanlı olarak tasarlandığında herhangi bir anten çifti aralığındaki toplam ölçülebilir açı sayısının 28'e yükseldiği, en yüksek çözünürlüğün ise orta açı noktasında 0,4 dereceye kadar indiği görülmesine rağmen, anten elemanının ana ışıma hüzme yönündeki açı üzerindeki çözünürlüğünün neredeyse hiç artmadığı ve aynı olduğu görülmüştür.

Ölçüm aralığına dağılan bu açısal farklar, maksimum ve minimum çözünürlükler arasında önemli bir farka neden olarak tekdüze olmayan görece daha bozuk bir ölçme davranışı gösterebilir. Buna ek olarak, çözünürlüğün artırılması için anten

sayısının azaltılması nedeniyle her anten çifti arasında kalan bu açıklık daha da genişleyerek daha büyük bir zayıf anten kazancı bölgesi oluşturması nedeniyle alınan sinyallerin RSSI değerinin bu orta noktalarda daha da zayıflayacağı, bunun da daha fazla girişim sinyali etkisine, ölçüm mesafelerinin azalmasına ve hatalı ölçümlere neden olacağı açıktır. Bu nedenle, anten kazancını artırarak ölçüm çözünürlüğünü artırmak, diğer yön bulma algoritmalarından daha avantajlı olabilecek APPR'nin doğrusal regresyon yaklaşımı için en yararlı yöntem gibi görünürken, aynı zamanda yaygın kullanımı nedeniyle, kısa menzilli olsa bile, pratik kullanımlarda küresel sistemlerden bile daha kullanışlı ve güvenli konumlandırma sağlamak için Bluetooth ile birlikte kullanılabilir.

Özetle, hem analitik ve teorik hesaplamalar hem de elektronik UCA fiziki sistem testleri, bu yüksek lisans tezinin önerisi olan anten kazancındaki iyileşmenin APPR yön bulma algoritması doğrusal regresyon yaklaşımı yöntemi (LRA) ile uygulandığında DoA ölçüm çözünürlüğünde görünür iyileşme sağlandığını ve Bluetooth gibi RSSI verisi ölçen herhangi bir RF haberleşme cihazı ile kullanıma uygun olduğunu kanıtlamıştır.

10. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER

Önerilen teori ve tasarlanan sistem sadece bir tez konusu olarak gerçekleştirilmemiş, aynı zamanda endüstriyel ve mühendislik çalışmaları ile geliştirilerek birçok uygulamada kullanılabileceği düşünülmüştür. APPR algoritmasının kolaylığı ve sistem belleğinde oldukça az yer kaplaması nedeniyle geliştirilen DoA sistemi düşük özelliklere sahip basit ve ucuz 8 bitlik bir MCU modeliyle de kolayca çalıştırılabilir olsa da tez çalışması sonrasında ileri uygulamalar için gelişmiş bir 32 bitlik mikrodenetleyici modeli kullanılmıştır. Bununla birlikte UCA setleri yarım dalga Yagi-tipi mikroşerit antenlerle tasarlanmış görece büyük yer deney seti yapısında olsa da, çeyrek dalga antenler kullanılarak daha küçük elemanlarla çok daha kompakt DoA belirleme cihazlarına dönüştürülebilirler, bununla birlikte tasarım geliştirmeleriyle kazanç artışı sayesinde çok daha yüksek çözünürlüklere ulaştırılabilirler. Tezin önerisi dâhilindeki teori ve analitik çalışmalar RF modüllerin

modeli ya da teknik özelliklerinden neredeyse tamamen bağımsız olduğu için kullanılan Bluetooth deney modülünün uzun tarama ve sinyal tanımlama süreleri daha hızlı çalışma metodlarına sahip modüllerle uygulandığında kolayca daha hızlı sonuçlar veren endüstriyel aygıt ya da operasyonel sistemlere dönüştürülebilirler. Bu sayede pet hayvanları, demans hastaları ya da yaşlı bireylerin izlenmesi, alışveriş merkezlerinde müşterilerin konumlandırılması, doğa sporcularının takibi, görev yapan dron, belediye hizmet araçları ve üstelik askeri uygulamalarda bile yararlı ve kullanılabilir DoA sonuçları veren sistemlere entegre edilebilir. Yine tezin önerisi dâhilindeki analitik çalışmalar ve matematiksel çıkarımların hem APPR algoritması hem de güç ölçümü ve matematiksel regresyon yaklaşımı temeliyle ilintili ileri akademik çalışmalara temel oluşturabileceği düşünülebilir.



KAYNAKÇA

- [1] Balanis, Constantine. *Antenna Theory Analysis and Design*. New Jersey: Wiley, 2016.
- [2] Ozaki, Yohei., Jun Ozawa, Eddy Taillefer, Jun Cheng and Yoichiro Watanabe. "A Simple DOA Estimator Using Adjacent Pattern Power Ratio with Switched Beam Antenna." *PIER C* 22 (2011): 55-71.
- [3] *Applied Statistics - Lesson 6 Linear Regression*. Ed. Keith G. Calkins. July 2005. Andrews University. 20 May 2022
<<https://www.andrews.edu/~calkins/math/edrm611/edrm06.htm>>.
- [4] *Number of smartphones sold to end users worldwide from 2007 to 2022*. Ed. Federica Laricchia. July 2023. Statista. 21 July 2023
<<https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/>>
- [5] *Space Segment*. June 2022. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. 3 August 2022
<<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>
- [6] *Trilateration Exercise*. November 2014. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. 11 August 2022
<<https://www.gps.gov/multimedia/tutorials/trilateration/>>
- [7] Diamond, Pat. "Broadcast Positioning System (BPS) Time and Position Using ATSC 3.0 Signals." *National Association of Broadcasters*. 37.
- [8] *Mobile phone tracking*. January 2024. Wikipedia. 11 September 2022
<https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_phone_tracking>
- [9] *Lose your knack for losing things*. January 2024. Apple. 16 September 2022
<<https://www.apple.com/airtag/>>
- [10] BniLam, Noori., Robin Janssens, Jan Steckel, Maarten Weyn. "AoA Estimates for LPWAN Technologies: Indoor Experimental Analysis." *IEEE* (2021): 1-5.
- [11] BniLam, Noori., Dennis Joosens, Michiel Aernouts, Jan Steckel, Maarten Weyn. "LoRay: AoA Estimation System for Long Range Communication Networks." *IEEE* 20 (2021): 2005-2018.
- [12] Woolley, Martin. "Understanding Reliability in Bluetooth® Technology." *Bloetooth*. 1.0.2 December 2020 43.

- [13] Woolley, Martin. "Bluetooth Direction Finding A Technical Overview." *Bloetooth*. 1.0.3 October 2021 30.
- [14] Porter, Donovan., Reidar Myhr. "Bluetooth® Angle of Arrival (AoA) Antenna Design." *Texas Instruments Incorporations*. July 2019 49.
- [15] Prokic, Theodoros. "Antenna Design for Angle of Arrival Measurement in Access Control Applications." Kth Royal Institute of Technology (2019): 98.
- [16] Schmidt, Ralph., "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation." *Iee Transactions On Antennas And Propagation* AP-34 NO. 3 (1986): 276-280.
- [17] Paulraj, A., R. Roy and T. Kailath. "Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques - Esprit." *Information Systems Laboratory Stanford University* (1986): 83-89.
- [18] Taillefer, Eddy., Akifumi Hirata and Takashi Hirata. "Direction-of-Arrival Estimation Using Radiation Power Pattern With an ESPAR Antenna." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 53 no 2 (2005): 678-684.
- [19] Harrington, Roger F. "Reactively Controlled Directive Arrays." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* AP-26 no 3 (1978): 390-395.
- [20] Paaso, Henna., Aki Hakkarinen, Nikhil Gulati, Damiano Patron, Kapil R. Dandekar, Mikko Valkama and Aarne Mammela. "Experimental Results of Novel DoA Estimation Algorithms for Compact Reconfigurable Antennas." *International Journal of Antennas and Propagation* (2017): 13.
- [21] Paaso, Henna. "Direction of Arrival Estimation Algorithms for Leaky-Wave Antennas and Antenna Arrays." *University Of Oulu* (2018): 84.
- [22] Paaso, Henna., Matti Somersalo, Mika Hoppari, Juha Korpi, Mikko Hiivala and Aarne Mammela. "APPR DoA Estimation Algorithm for Smart Antenna." *22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)* (2018): 61-64.
- [23] BlueCore. "Product Data Sheet BC417143B-DS-001Pg." *Cambridge Silicon Radio Limited*. 2005 116.
- [24] Texas Instruments. "CC2640 SimpleLink™ Bluetooth® Wireless MCU." *Texas Instruments Incorporations*. July 2016 65.
- [25] Marincic, Aleksandar., Zorica Civric. "Nikola Tesla's Contributions to Radio Development." *Museum of Science and Technology* (2007): 14.
- [26] STMicroelectronics NV. "STM32F767xx." *STMicroelectronics*. September 2017 255.
- [27] Banggood. "HC-05." *Banggood* 2022.

- [28] Ogherohwo, Enoh., S.D. Mado and M.Y. Eggah. "Design and Analysis of Meander Microstrip Antenna at Wireless Band." *International Journal of Computer Applications* 111 6 (2015): 1-4.
- [29] Jais, M.I., M.F. Jamlos, M.F. Malek, M. Jusoh, I. Adam, Nur Izzati Iliyes ans P. Saad. "Design Analysis of 2.45 GHz Meander Line Antenna (MLA)." *IEEE Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation* (2012): 628-631.
- [30] Ma, Minjie., Kai Deng. "The Study and Implementation of Meander-Line Antenna for an Integrated Transceiver Design." University of Galve (2010): 47.
- [31] Garg, Ramesh. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Boston: London, 2001.
- [32] Vinícius Ludwig-Barbosa, Edson Schlosser, RenatoMachado, Filipe Guterres Ferreira, Sabrina Müller Tolfo, and Marcos Vinício Thomas Heckler "Linear Array Design with Switched Beams for Wireless Communications Systems." *International Journal of Antennas and Propagation* 2015 (2015): 9.
- [33] Analog Devices. "HMC253AQS24." Analog Devices Inc. v01.1015.
- [34] STMicroelectronics NV. "STM32 Nucleo-144 boards." *STMicroelectronics*. DB3171 rev 7 February 2018.