

**T.C.**  
**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KABLOSUZ YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ VIDEO İLETİMİ İÇİN**  
**YAZILIM TANIMLI RADYO (SDR) TABANLI ADAPTİF**  
**PLATFORM TASARIMI**

**İbtihal ALOUCHE**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı**

**AĞUSTOS 2025**

**T.C.**  
**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KABLOSUZ YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ VIDEO İLETİMİ İÇİN**  
**YAZILIM TANIMLI RADYO (SDR) TABANLI ADAPTİF**  
**PLATFORM TASARIMI**

**İbtihal ALOUCHE**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı**

**AĞUSTOS 2025**



**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM  
ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ETİK BEYANI**

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Kablosuz Yüksek Çözünürlüklü Video İletimi İçin Yazılım Tanımlı Radyo (SDR) Tabanlı Adaptif Platform Tasarımı**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim.

13/08/2025

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, yüksek çözünürlüklü video iletiminin kablosuz ortamlarda güvenilir ve esnek bir şekilde gerçekleştirilmesine yönelik olarak SDR tabanlı bir adaptif platformun tasarımı ve uygulanmasını konu almaktadır. Çalışma sürecinde, teorik bilgilerin pratiğe aktarılması, farklı modülasyon ve sistem parametrelerinin test edilmesi ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Öncelikle, akademik yolculuğum boyunca bana verdikleri sonsuz destek, sevgi ve cesaretlendirme için annem Loubaba LİDRİSSİ'ye ve babam Abdellah ALOUCHE'a en derin şükranlarımı sunmak istiyorum. Ayrıca, bu tezin hazırlanması sırasında verdiği paha biçilmez rehberlik ve sürekli destek için danışmanım Prof. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN'a içtenlikle teşekkür etmek istiyorum. Onun içgöruları ve tavsiyeleri, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanması için çok önemliydi.

Tezin yazım sürecinde gösterdiği olağanüstü ilgi ve destek için Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Oğuz KORKMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Saatlerini ayırarak metnin her bir bölümünü dikkatle okuyup, anlatım ve yazım açısından titizlikle incelemesi, çalışmamın daha okunabilir ve anlaşılır hale gelmesine büyük katkı sağlamıştır.

Ayrıca, bu süreçte yanımda olan ve manevi desteğini esirgemeyen can dostum Samia ARSALANE'a teşekkür ederim.

Bu tezin, yazılım tanımlı radyo kullanılarak DVB-T yayıncılığının anlaşılmasını geliştirmesine yardımcı olmasını ve dijital iletişim sistemlerinde gelecekteki araştırmalar için yararlı bir referans görevi görmesini umuyorum.

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## KABLOSUZ YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ VIDEO İLETİMİ İÇİN YAZILIM TANIMLI RADYO (SDR) TABANLI ADAPTİF PLATFORM TASARIMI

İbtihal ALOUCHE

Bandırma Onyedİ Eylöl Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN

Ağustos 2025, 73 sayfa

Yazılım Tanımlı Radyo (SDR), geleneksel donanım tabanlı sistemlerin yerine geçerek radyo frekans (RF) sinyallerinin modülasyonu, demodülasyonu ve çözümlemesini yazılım aracılığıyla gerçekleştiren bir teknolojidir. Bu tezde, SDR kullanılarak yüksek hızlı veri yayıncılığına yönelik bir sistemin tasarımı, uygulanması ve performans değerlendirmesi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, verici sistemi GNU Radio ve BladeRF x40 ile tasarlanmış; alım ve sinyal analizi ise RTL-SDR ve HackRF One cihazlarıyla gerçekleştirilmiştir. Temel hedef, verilerin başarılı bir şekilde modüle edilmesi, yayınlanması ve alıcı tarafından alınarak analiz edilmesidir. Tez, modülasyon teknikleri, sinyal işleme süreçleri ve iletim parametreleri dahil olmak üzere SDR teknolojisinin yüksek hızlı veri yayıncılığı alanındaki pratik uygulamalarını ortaya koymaktadır. Ayrıca, donanımsal gürültü ve iletimi kısıtlayan sınırlamalar göz önünde bulundurularak farklı çalışma koşulları altında sinyal kalitesi analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, daha etkili alım ve yüksek performans için iletim sürecinin nasıl optimize edilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçları, SDR tabanlı dijital yayıncılık sistemlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı

sağlamakta ve yazılım tanımlı çözümlerin modern iletişim altyapılarındaki potansiyel rolünü vurgulamaktadır. Ayrıca çalışma, DVB-T verici ve alıcısının uygulanması üzerinden, yayıncılığa yönelik uyarlanabilir teknolojiler üzerine gelecekte yapılacak araştırmalar için sağlam bir pratik temel sunmaktadır. Sonuçlar, SDR teknolojisinin yeni nesil iletişim ağlarında esneklik ve verimlilik açısından nasıl önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler:** DVB-T, Dijital Yayıncılık, GNU Radio, Modülasyon Teknikleri  
Yazılım Tanımlı Radyo



## **ABSTRACT**

**M.Sc. THESIS**

# **SOFTWARE-DEFINED RADIO (SDR)-BASED ADAPTIVE PLATFORM DESIGN FOR WIRELESS HIGH-RESOLUTION VIDEO TRANSMISSION**

**İbtihal ALOUCHE**

**Bandırma Onyedi Eylül University**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN**

**August 2025, 73 pages**

Software Defined Radio (SDR) is a technology that replaces traditional hardware-based systems and performs modulation, demodulation, and analysis of radio frequency (RF) signals through software. In this thesis, the design, implementation, and performance evaluation of a system for high-speed data broadcasting using SDR is discussed. Within the scope of the study, the transmitter system was designed with GNU Radio and BladeRF x40; reception and signal analysis were carried out with RTL-SDR and HackRF One devices. The main goal is the successful modulation, broadcasting, and reception of data, followed by analysis by the receiver. The thesis presents practical applications of SDR technology in the field of high-speed data broadcasting, including modulation techniques, signal processing steps, and transmission parameters. In addition, signal quality was analyzed under different operating conditions, taking into account hardware noise and limitations that restrict transmission. The findings show how the transmission process can be optimized for more effective reception and high performance. The results of this study contribute to a better understanding of SDR-based digital broadcasting systems and emphasize the potential role of software-defined solutions in modern communication

infrastructures. Moreover, through the implementation of a DVB-T transmitter and receiver, the study provides a solid practical basis for future research on adaptable technologies for broadcasting. The results show how SDR technology can provide important contributions in terms of flexibility and efficiency in next-generation communication networks.

**Keywords:** DVB-T, Digital Broadcasting, GNU Radio, Modulation Techniques, Software-Defined Radio



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                     | i         |
| ÖZET.....                                                                      | I         |
| ABSTRACT .....                                                                 | III       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                              | V         |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                             | VIII      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                          | <b>1</b>  |
| 1.1 Yazılım Tanımlı Radyo'nun Evrimi ve DVB-T Yayıncılığındaki Rolü .....      | 1         |
| 1.2 TEZİN AMACI VE KATKILARI.....                                              | 3         |
| <b>2. YAZILIM TANIMLI RADYO (SDR) .....</b>                                    | <b>5</b>  |
| 2.1 SDR TABANLI DİJİTAL VERİ İLETİMİNİN İLKELERİ .....                         | 5         |
| 2.1.1 SDR Mimarisi .....                                                       | 5         |
| 2.1.2 SDR'de Sinyal İşleme Uygulamaları.....                                   | 6         |
| 2.1.3 SDR Sistemlerinde Yazılım Teknolojileri .....                            | 7         |
| 2.1.4 Donanım Platformları .....                                               | 7         |
| 2.1.5 SDR Avantajları.....                                                     | 8         |
| 2.1.6 SDR Dezavantajları.....                                                  | 8         |
| <b>3. DİJİTAL KARASAL GÖRÜNTÜ YAYINCILIĞI .....</b>                            | <b>9</b>  |
| 3.1 DİJİTAL KARASAL VIDEO YAYINCILIĞI.....                                     | 9         |
| 3.2 DVB-T'DEKİ TEMEL TEKNOLOJİLER.....                                         | 9         |
| 3.2.1 OFDM (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama) .....                           | 10        |
| 3.2.2 COFDM (Kodlanmış Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama) .....                | 11        |
| <b>4. SDR SİSTEMLERİNDE YAZILIM VE DONANIM.....</b>                            | <b>14</b> |
| 4.1 SDR SİSTEMİNDEKİ DONANIM.....                                              | 14        |
| 4.1.1 BladeRF x40 .....                                                        | 14        |
| 4.1.2 RTL-SDR .....                                                            | 15        |
| 4.1.3 HackRF One.....                                                          | 16        |
| 4.1.4 Anten Seçimi.....                                                        | 17        |
| 4.2 SDR SİSTEMİNDEKİ YAZILIM .....                                             | 17        |
| <b>5. DVB-T SİNYAL İLETİM VE ALIM SÜRECİ.....</b>                              | <b>19</b> |
| 5.1 DVB-T SİNYAL İLETİMİ.....                                                  | 19        |
| 5.1.1 DVB-T Sinyal Alımı (GNU Radio Tabanlı).....                              | 20        |
| 5.2 DVB-T SİNYAL ALIM SÜRECİ .....                                             | 20        |
| <b>6. AKIŞ GRAFİĞİ TASARIMI .....</b>                                          | <b>22</b> |
| 6.1 VERİCİ BLOK DİYAGRAMI .....                                                | 22        |
| 6.1.1 Sistem Parametreleri (Tüm Bloklar) .....                                 | 23        |
| 6.1.2 Dosya Kaynağı Bloğu (File Source Bloğu) .....                            | 23        |
| 6.1.3 Enerji Dağıtım Bloğu ( Energy Dispersal Block ) .....                    | 24        |
| 6.1.4 Reed-Solomon Kodlayıcı Bloğu (Reed-Solomon Encoder Block).....           | 25        |
| 6.1.5 Konvolüsyonel İç İç Geçirici bloğu (Convolutional Interleaver Block). 26 |           |
| 6.1.6 İç Kodlayıcı Bloğu (Inner Coder Block).....                              | 27        |
| 6.1.7 Bit İç Ara Bloğu (Bit Inner Interleaver Block) .....                     | 28        |
| 6.1.8 Sembol İç İçleyici Bloğu (Symbol Interleaver Block).....                 | 28        |
| 6.1.9 DVB-T Eşleyici Bloğu (DVB-T Mapper Block).....                           | 29        |
| 6.1.10 Referans Sinyalleri Bloğu (Reference Signals Block).....                | 29        |
| 6.1.11 OFDM Çevrimsel Önek Bloğu (OFDM Cyclic Prefix Block) .....              | 30        |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.12 Osmocom Sink Bloğu (Osmocom Sink Block) .....                             | 30 |
| 6.2 ALICI BLOK DİYAGRAMI .....                                                   | 31 |
| 6.2.1 Osmocom Kaynağı Bloğu (Osmocom Source Block) .....                         | 32 |
| 6.2.2 Throttle Bloğu (Throttle Block) .....                                      | 32 |
| 6.2.3 OFDM Sembol Alımı Bloğu (OFDM Symbol Acquisition Block) .....              | 32 |
| 6.2.4 Hızlı Fourier Dönüşümü Bloğu (Fast Fourier Transform Block) .....          | 33 |
| 6.2.5 Demod Referans Sinyalleri Bloğu (Demod Reference Signals Block) ....       | 33 |
| 6.2.6 Sembol İç Çözücü Deinterleaver Bloğu (Symbol Inner Deinterleaver) ...      | 33 |
| 6.2.7 Bit İç Çözücü Deinterleaver Bloğu (Bit Inner Deinterleaver) .....          | 33 |
| 6.2.8 Viterbi Kod Çözücü Bloğu (Viterbi Decoder) .....                           | 34 |
| 6.2.9 Konvolüsyonel Çözücü Deinterleaver Bloğu (Convolutional Deinterleaver)     | 34 |
| 6.2.10 Reed-Solomon Kod Çözücü Bloğu (Reed-Solomon Decoder) .....                | 34 |
| 6.2.11 Enerji Çözücü Descrambler Bloğu (Energy Descrambler) .....                | 34 |
| 6.2.12 Dosya Çıkış Bloğu (File Sink Block) .....                                 | 35 |
| <b>7. DVB-T İLETİM VE ALIMINDA SİNYAL ANALİZİ VE GÖZLEMLER... 36</b>             |    |
| 7.1 DVB-T İLETİM ZİNCİRİNDE FREKANS ALANI SİNYAL ANALİZİ.....                    | 36 |
| 7.1.1 Kaynak bloğu .....                                                         | 37 |
| 7.1.2 PRE-OFDM Bloğu .....                                                       | 37 |
| 7.1.3 POST-OFDM Bloğu .....                                                      | 38 |
| 7.2 DVB-T ALIM ZİNCİRİNDE FREKANS ALANI SİNYAL ANALİZİ .....                     | 38 |
| 7.2.1 Throttle Bloğu .....                                                       | 38 |
| 7.2.2 OFDM .....                                                                 | 40 |
| 7.2.3 Demodülasyon .....                                                         | 41 |
| 7.3 DVB-T İLETİM ZİNCİRİNDE ZAMAN DÜZLEMİ SİNYAL ANALİZİ....                     | 42 |
| 7.3.1 Kaynak bloğu .....                                                         | 42 |
| 7.3.2 PRE-OFDM Bloğu .....                                                       | 43 |
| 7.3.3 POST-OFDM Bloğu .....                                                      | 45 |
| 7.4 DVB-T ALIM ZİNCİRİNDE ZAMAN DÜZLEMİ SİNYAL ANALİZİ .....                     | 46 |
| 7.4.1 Throttle Bloğu .....                                                       | 46 |
| 7.4.2 OFDM .....                                                                 | 47 |
| 7.4.3 Demodülasyon .....                                                         | 49 |
| 7.5 DVB-T İletim Zincirinde Takımyıldız (Constellation) Alanı Sinyal Analizi..   | 50 |
| 7.5.1 Kaynak bloğu .....                                                         | 51 |
| 7.5.2 PRE-OFDM Bloğu .....                                                       | 51 |
| 7.5.3 POST-OFDM Bloğu .....                                                      | 52 |
| 7.6 DVB-T ALIM ZİNCİRİNDE TAKIMYILDIZ (CONSTELLATION) ALANI SİNYAL ANALİZİ ..... | 54 |
| 7.6.1 Throttle Bloğu .....                                                       | 54 |
| 7.6.2 OFDM .....                                                                 | 55 |
| 7.6.3 Demodülasyon .....                                                         | 57 |
| <b>8. GERÇEK DÜNYA SİNYAL ALIMI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ..... 59</b>        |    |
| 8.1 AERIAL TV KULLANARAK DVB-T SİNYALİNİN TARATILMASI VE GÖRÜNTÜLENMESİ.....     | 59 |
| 8.2 DVDVB-T DRIVER UYGULAMASI KULLANARAK SİNYAL KALİTESİ DEĞERLENDİRMESİ .....   | 60 |
| 8.2.1 QPSK Modülasyonu .....                                                     | 60 |
| 8.2.2 16-QAM Modülasyonu .....                                                   | 61 |
| 8.2.3 64-QAM Modülasyonu .....                                                   | 61 |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 8.3 SİNYAL KALİTESİ ANALİZİ (SNR) SONUCU ..... | 62        |
| 8.4 MATLAB KULLANARAK BER HESAPLAMASI .....    | 63        |
| <b>9. SONUÇLAR .....</b>                       | <b>64</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                         | <b>66</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                          | <b>73</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2-1 Yazılım tanımlı radyo mimarisi TX ve RX .....                                             | 6  |
| Şekil 3-1 OFDM alıcı-vericisinin blok diyagramı .....                                               | 11 |
| Şekil 3-2 FDM ve OFDM bant genişliği verimliliği.....                                               | 11 |
| Şekil 4-1 BladeRF x40 [30] .....                                                                    | 14 |
| Şekil 4-2 RTLSDR [29] .....                                                                         | 15 |
| Şekil 4-3 HackRF One [28].....                                                                      | 16 |
| Şekil 5-1 Çalışma prensibi .....                                                                    | 21 |
| Şekil 5-2 Test platformu.....                                                                       | 21 |
| Şekil 6-1 Verici blok diyagramı .....                                                               | 22 |
| Şekil 6-2 Konvolüsyonel karıştırıcının çalışma prensibi .....                                       | 26 |
| Şekil 6-3 Alıcı blok diyagramı .....                                                                | 31 |
| Şekil 7-1 Dosya kaynağından gelen sinyalin frekans alanı gösterimi.....                             | 37 |
| Şekil 7-2 OFDM modülasyonu öncesi sinyalin frekans alanı gösterimi.....                             | 38 |
| Şekil 7-3 OFDM-modüle edilmiş sinyalin iletimden önce spektral analizi .....                        | 38 |
| Şekil 7-4 Throttle sonrası 64-QAM modülasyonuna sahip sinyalin frekans spektrumu .....              | 39 |
| Şekil 7-5 Throttle sonrası qpsk modülasyonuna sahip sinyalin frekans spektrumu ..                   | 39 |
| Şekil 7-6 Throttle sonrası 16-qam modülasyonuna sahip sinyalin frekans spektrumu .....              | 39 |
| Şekil 7-7 64-QAM ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin frekans spektrumu.....       | 40 |
| Şekil 7-8 16-QAM ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin frekans spektrumu.....       | 40 |
| Şekil 7-9 QPSK ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin frekans spektrumu.....         | 41 |
| Şekil 7-10 64 -QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki frekans spektrumu.....       | 41 |
| Şekil 7-11 16-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki frekans spektrumu.....        | 42 |
| Şekil 7-12 QPSK ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki frekans spektrumu.....          | 42 |
| Şekil 7-13 Dosya kaynağından gelen sinyalin zaman alanı gösterimi .....                             | 43 |
| Şekil 7-14 Pre-OFDM 64-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi .....                                 | 43 |
| Şekil 7-15 Pre-OFDM 16-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi .....                                 | 44 |
| Şekil 7-16 Pre-OFDM QPSK sinyalinin zaman içindeki değişimi.....                                    | 44 |
| Şekil 7-17 Post-OFDM 64-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi.....                                 | 45 |
| Şekil 7-18 Post-OFDM 16-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi.....                                 | 45 |
| Şekil 7-19 Post-OFDM QPSK sinyalinin zaman içindeki değişimi .....                                  | 45 |
| Şekil 7-20 Throttle sonrası 64-QAM modülasyonuna sahip sinyalin zaman alanı gösterim.....           | 46 |
| Şekil 7-21 Throttle sonrası 16-QAM modülasyonuna sahip sinyalin zaman alanı gösterim.....           | 47 |
| Şekil 7-22 Throttle sonrası QPSK modülasyonuna sahip sinyalin zaman alanı gösterim .....            | 47 |
| Şekil 7-23 64-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin zaman alanı gösterimi ..... | 48 |

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7-24 16-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin zaman alanı gösterimi.....                                                                  | 48 |
| Şekil 7-25 QPSK ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin zaman alanı gösterimi.....                                                                    | 48 |
| Şekil 7-26 64-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki zaman alanı gösterimi.....                                                                    | 49 |
| Şekil 7-27 16-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki zaman alanı.....                                                                              | 50 |
| Şekil 7-28 QPSK ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki zaman alanı gösterimi.....                                                                      | 50 |
| Şekil 7-29 Dosya kaynağından gelen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                                        | 51 |
| Şekil 7-30 64-QAM modülasyonu öncesi sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                                      | 52 |
| Şekil 7-31 16-QAM modülasyonu öncesi sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                                      | 52 |
| Şekil 7-32 QPSK modülasyonu öncesi sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                                        | 52 |
| Şekil 7-33 Post-OFDM 64-QAM sinyalinin takımyıldız (constellation) alanındaki değişimi.....                                                                         | 53 |
| Şekil 7-34 Post-OFDM 16-QAM sinyalinin takımyıldız (constellation) alanındaki değişimi.....                                                                         | 53 |
| Şekil 7-35 Post-OFDM QPSK sinyalinin takımyıldız (constellation) alanındaki değişimi.....                                                                           | 53 |
| Şekil 7-36 Throttle sonrası 64-QAM modülasyonuna sahip sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                    | 54 |
| Şekil 7-37 Throttle sonrası 16-QAM modülasyonuna sahip sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                    | 55 |
| Şekil 7-38 Throttle sonrası QPSK modülasyonuna sahip sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                      | 55 |
| Şekil 7-39 64-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                            | 56 |
| Şekil 7-40 16-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                            | 56 |
| Şekil 7-41 QPSK ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                              | 56 |
| Şekil 7-42 64-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                              | 57 |
| Şekil 7-43 16-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                              | 57 |
| Şekil 7-44 QPSK ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki takımyıldız (constellation) alanı gösterimi.....                                                | 58 |
| Şekil 8-1 (a) 700 MHz frekansında DVB-T sinyal tarama ekran görüntüsü (b) tespit edilen DVB-T sinyali (c) iletilen video akışının mobil cihazda görüntülenmesi..... | 59 |
| Şekil 8-2 (a) SNR 361 için ve (b) SNR 359 için QPSK parametreleri .....                                                                                             | 60 |
| Şekil 8-3 (a) SNR 309 için ve (b) SNR 300 için 16-QAM parametreleri.....                                                                                            | 61 |
| Şekil 8-4 (a) SNR 234 için ve (b) SNR 236 için 64-QAM parametreleri.....                                                                                            | 61 |
| Şekil 8-5 (a) 64-QAM için BER değerleri (b) 16-QAM için BER değerleri (c) ) QPSK için BER değerleri.....                                                            | 63 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 6-1 Modülasyon tipine göre sembol iç işleyici giriş ve çıkış biçimleri..... | 28 |
| Tablo 8-1 Modülasyon şemalarına göre SNR, sembol hızı ve veri hızı .....          | 62 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| Simgeler | Açıklama                                           |
|----------|----------------------------------------------------|
| BER      | : Bit error rate                                   |
| COFDM    | : Coded orthogonal frequency division multiplexing |
| DAC      | : Analog to digital converter                      |
| DVB-T    | : Digital video broadcasting - terrestrial         |
| FEC      | : Forward error correction                         |
| FFT      | : Fast fourier transform                           |
| Mbps     | : Megabits per second                              |
| OFDM     | : Orthogonal frequency division multiplexing       |
| PSK      | : Phase shift keying                               |
| QAM      | : Quadrature amplitude modulation                  |
| SDR      | : Software defined radio                           |
| USRP     | : Hierarchical cluster analysis                    |

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Yazılım Tanımlı Radyo'nun Evrimi ve DVB-T Yayıncılığındaki Rolü

Yazılım Tanımlı Radyo (SDR) kavramı, 1970'ler ve 1980'lerde dijital sinyal işlemenin gelişmeye başlamasıyla birlikte ortaya çıkmıştır [1], [2]. Bu dönemde dijital işlemciler, radyo iletişimde daha esnek ve yazılım tabanlı yaklaşımların mümkün olabileceğini göstermiştir. Başlangıçta radyo sistemleri; modülasyon, demodülasyon ve filtreleme gibi işlemleri yalnızca sabit, donanım temelli bileşenlerle gerçekleştirmekteydi [1], [3]. Ancak dijital elektronik ve işlemci gücündeki ilerlemeler sayesinde, bu işlevlerin önemli bir bölümünün yazılım aracılığıyla gerçekleştirilebileceği fark edilmiştir.

İlk SDR araştırmaları, analog sinyallerin dijital ortama aktarılmasına odaklanmıştır. Böylece dijital sinyal işleme (DSP) tekniklerinin kullanımı mümkün hale gelmiş ve sistemler daha esnek hâle getirilmiştir [3]

1990'lardan 2000'li yılların başına kadar olan süreçte, SDR teknolojisi büyük bir gelişim göstermiştir. Mikroişlemciler, Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA'lar) ve DSP'lerdeki teknolojik ilerlemeler, SDR platformlarının daha karmaşık modülasyon şemalarını desteklemesine olanak tanımıştır [4]. Bu sayede SDR; ticari hücresel ağlardan DVB-T gibi dijital yayın sistemlerine kadar çok çeşitli iletişim standartlarına uyum sağlayabilecek duruma gelmiştir. Başlangıçta askeri iletişim sistemleri için geliştirilen SDR, zamanla ticari ve amatör radyo uygulamalarına da uyarlanmış, ayrıca deneysel ve eğitim amaçlı güçlü bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır [5], [6].

Günümüzde SDR, mühendislerin ve araştırmacıların DVB-T gibi yüksek hızlı ve karmaşık dijital iletişim sistemlerini geliştirmelerine, test etmelerine ve optimize etmelerine olanak tanıyan önemli bir teknolojidir. Modern SDR sistemleri; kamu güvenliği ağları, gelişmiş kablosuz iletişim sistemleri ve özel haberleşme altyapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [7], [8]. SDR, özellikle modülasyon türü, sembol hızı ve kodlama şemaları gibi parametrelerin gerçek zamanlı olarak test edilip ayarlanabilmesini sağlayarak yüksek hızlı veri iletiminde kritik bir rol oynamaktadır.

Bu bağlamda yüksek hızlı veri iletimini mümkün kılan temel teknolojilerden biri de Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM)'dir. OFDM, veri aktarımını birden fazla ortogonal alt taşıyıcıya bölerek gerçekleştirir ve bu sayede spektral verimliliği artırırken çok yollu yayılım ve girişim gibi sorunlara karşı da dayanıklılık sağlar. DVB-T, LTE ve Wi-Fi gibi birçok modern iletişim standardının temelinde bu teknik yer almaktadır [9], [10], [11]. SDR platformlarında OFDM'nin uygulanması sayesinde, araştırmacılar FFT boyutu, çevrimsel önek uzunluğu ve koruma aralıkları gibi sistem parametrelerini değiştirerek farklı koşullar altındaki performansları analiz edebilmektedir [12].

2000'li yılların başlarından itibaren SDR, DVB-T sistemlerinin araştırılması ve geliştirilmesi amacıyla yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [13], [14]. Özellikle GNU Radio gibi açık kaynak platformlar; BladeRF, RTL-SDR, USRP ve HackRF gibi donanımlarla birlikte kullanılarak, DVB-T iletim ve alım sistemlerinin daha erişilebilir ve esnek şekilde geliştirilmesine olanak tanımıştır. Bu gelişmeler, pahalı özel donanımlara ihtiyaç duyulmaksızın farklı modülasyon şemaları, hata düzeltme teknikleri ve senkronizasyon yöntemlerinin test edilmesini mümkün kılmıştır [15], [16].

Son yıllarda DVB-T ve SDR teknolojilerinin birleşimi hem akademik araştırmalar hem de pratik uygulamalar açısından önemli bir araç hâline gelmiştir. Bu sayede dijital yayıncılık alanında daha derinlemesine anlayış sağlanmış ve gelişmiş iletişim sistemlerinin temelini oluşturabilecek esnek bir platform sunulmuştur.

SDR tabanlı DVB-T uygulamalarının ilk örneklerinden biri, Vincenzo Pellegrini tarafından 2008 yılında geliştirilmiştir. Bu uygulama, 2/3 oranında evrişimli kodlama kullanarak yaklaşık 2 Mbps hızında bir DVB-T sinyali üretmiştir [17]. Daha sonra Bogdan Diaconescu, GNU Radio 3.7 sürümü ile uyumlu çalışan açık kaynaklı bir DVB-T kodlayıcı ve kod çözücü geliştirerek bu alanda önemli katkılar sunmuştur. 2015 yılında Diaconescu'nun bu çalışması, gr-dtv modülü altında GNU Radio'ya dâhil edilerek kullanıcılar için daha erişilebilir hâle getirilmiştir [18], [19].

Tüm bu gelişmeler, SDR platformlarını kullanan araştırmacı ve hobicilere DVB-T sistemleri üzerinde deney yapma ve çeşitli uygulamaları hayata geçirme olanağı sağlamıştır [19], [20], [21]. SDR ile OFDM teknolojilerinin birleşimi, modern iletişim sistemlerine yalnızca esneklik kazandırmakla kalmamış; aynı zamanda daha

yüksek veri hızları, iyileştirilmiş sinyal kalitesi ve daha verimli spektrum kullanımı gibi avantajları da beraberinde getirmiştir.

## 1.2 TEZİN AMACI VE KATKILARI

Yazılım Tanımlı Radyo (SDR), yüksek hızlı veri iletimi de dâhil olmak üzere modern iletişim sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Esnek yapısı sayesinde SDR, donanım değişikliğine gerek kalmadan, iletim ve alım tekniklerinin tamamen yazılım aracılığıyla değiştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu özelliği sayesinde, yüksek hızlı veri iletimi amacıyla SDR tabanlı sistemler literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir.

Erken dönem SDR çalışmalarında, sınırlı bant genişliği ve işlem kapasitesi nedeniyle yalnızca basit modülasyon şemaları kullanılabilmektedir. Ancak teknolojinin gelişmesiyle birlikte, daha yüksek işlem gücüne sahip donanımların ve daha gelişmiş modülasyon ile hata düzeltme tekniklerinin kullanılması mümkün hale gelmiştir. Günümüzde GNU Radio gibi açık kaynaklı yazılımlar ve BladeRF x40 ile RTL-SDR gibi SDR donanımları sayesinde, iletim ve alım sistemlerinin kolaylıkla simüle edilmesi, özelleştirilmesi ve uygulanması mümkün hâle gelmiştir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, GNU Radio kullanarak SDR tabanlı bir iletişim sistemi geliştirmek ve uygulamaktır. Hedef, yazılım tabanlı sinyal işleme teknikleri kullanarak veri hızı, sinyal kalitesi ve genel sistem performansını optimize etmek; aynı zamanda gerçek zamanlı video akışı gibi yüksek hızlı verilerin iletimini ve alınmasını sağlamaktır.

Bu doğrultuda tez kapsamında, farklı iletim parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. GNU Radio'nun sunduğu standart yapıların ötesine geçilerek, gerçek zamanlı yayın sırasında sistem verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli sinyal işleme yöntemleri uygulanmıştır. Böylece modülasyon, kodlama ve senkronizasyon gibi faktörlerin SDR tabanlı yüksek hızlı veri iletimi üzerindeki etkileri daha kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.

Tez kapsamında yürütülen bu çalışma, yazılım tabanlı yayın sistemlerine çeşitli katkılar sunmaktadır. BladeRF x40 ve GNU Radio kullanılarak gerçek zamanlı bir DVB-T iletim sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır; bu sayede yazılım tanımlı

yayıncılığın pratik bir örneği ortaya konmuştur. Sinyal kaybını en aza indirmek ve iletim verimliliğini artırmak amacıyla farklı modülasyon ve kanal kodlama parametreleri test edilmiş, en uygun kombinasyonlar belirlenmiştir. Ayrıca, FFT boyutu ve çevrimsel Önek (Cyclic Prefix- CP) uzunluğu gibi farklı OFDM parametreleri değiştirilerek sistemin zamanlama ve frekans ofsetlerine karşı dayanıklılığı artırılmıştır. İletim kalitesi ise, RTL-SDR ve HackRF One alıcıları kullanılarak çeşitli çalışma koşulları altında değerlendirilmiştir.

Genel olarak bu tez, SDR'nin yüksek hızlı veri iletimindeki potansiyelini ortaya koymakta ve bu alandaki teknik bilgi birikimine katkı sağlamaktadır. GNU Radio'nun sağladığı esneklikten yararlanarak geliştirilen bu sistemin, dijital iletişim ve yayın teknolojileri alanında yapılacak gelecekteki çalışmalara rehberlik etmesi amaçlanmaktadır.

## 2. YAZILIM TANIMLI RADYO (SDR)

Yazılım Tanımlı Radyo (SDR), kablosuz haberleşme sistemlerinde esnek mimarisi sayesinde dijital veri iletim protokollerinin yazılım tabanlı olarak uygulanmasına olanak tanımaktadır. Geleneksel donanım tabanlı radyo mimarilerinin aksine, SDR sistemleri sinyal işleme işlemlerini dijital sinyal işleyiciler (DSP), FPGA'lar veya genel amaçlı işlemciler üzerinde gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım; hızlı prototipleme, modülasyon/demodülasyon şemalarının kolayca değiştirilmesi ve çoklu iletişim standartlarına dinamik uyum gibi avantajlar sunar [22].

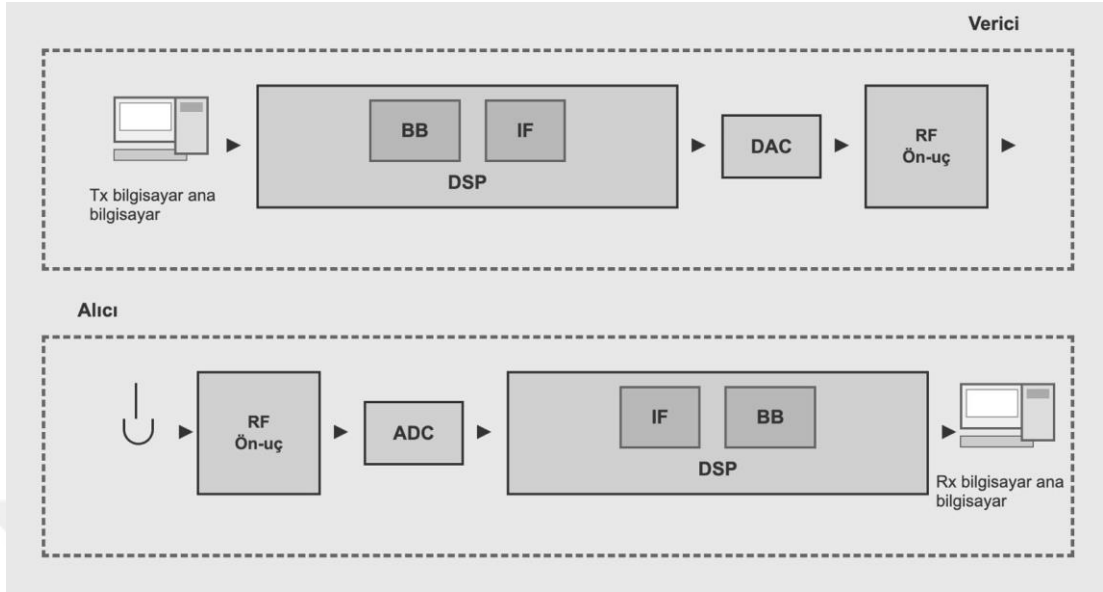
### 2.1 SDR TABANLI DİJİTAL VERİ İLETİMİNİN İLKELERİ

#### 2.1.1 SDR Mimarisi

Genel olarak, bir SDR sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- RF Ön Ucu (RF Front-End): Amplifikasyon, frekans dönüştürme ve filtreleme gibi tüm analog sinyal işleme operasyonlarını yönetmektedir.
- Analogdan Dijitale Dönüştürücü (ADC): Aldığı sinyali analog formattan, yazılım işlemesi için dijital sinyale dönüştürmektedir.
- Dijital Sinyal İşleme (DSP): Yazılımdaki tüm modülasyon, demodülasyon, filtreleme ve diğer sinyal işleme görevlerinin performansını desteklemektedir.
- Dijital Sinyalden Analoga Dönüştürücü (DAC): İşlenmiş dijital verileri tekrar analog formata dönüştürmektedir.
- Yazılım Platformu: Sinyal işleme algoritmaları ve çeşitli iletişim protokolleri, yazılım kullanılarak uygun bir çerçeve içinde uygulanmaktadır.

Bahsi geçen tüm bu bileşenlerin genel yapısı ve birbirleriyle olan ilişkisi Şekil 2-1'de sunulmaktadır.



Şekil 2-1 Yazılım tanımlı radyo mimarisi TX ve RX

### 2.1.2 SDR'de Sinyal İşleme Uygulamaları

SDR sistemlerinde sinyal işleme süreci, antenin bir radyo sinyali yakalamasıyla başlar. Yakalanan sinyal, filtreler ve amplifikatörler yardımıyla gürültüden arındırılır. Ardından analog-sayısal dönüştürücü (ADC), bu temizlenmiş sinyali yazılım tarafından işlenebilecek dijital verilere çevirir. Bu dijital örnekler, temel banda indirgenir ve bant dışı girişimleri engellemek için dijital filtrelerden geçirilir.

Modülasyon işlemi, bitleri dalga formlarına (örneğin QPSK veya OFDM) dönüştürürken; demodülasyon, bu dalga formlarını tekrar bitlere çevirerek verinin alıcıda yeniden oluşturulmasını sağlar. Hata düzeltme kodları, iletim sırasında oluşabilecek bit hatalarını düzeltir; senkronizasyon blokları ise zamanlama ve frekans uyumunu sağlar. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT), doğru zamanlama ve frekansa kilitlenmeyi sağlar, hataları düzeltebilir ve gerektiğinde spektrumu analiz ederek sinyali birden fazla kanala ayırabilir (DVB-T sistemlerinde olduğu gibi). Son olarak, dijital-analog dönüştürücü ve RF mikserleri yardımıyla işlenen veriler yeniden bir radyo sinyaline dönüştürülerek iletilir. Tüm bu işlemler yazılımla gerçekleştirildiğinden, filtreleri ayarlamak, modülasyon şemalarını değiştirmek veya

senkronizasyon yöntemlerini geliştirmek donanım değişikliği olmadan mümkündür [3], [23].

### 2.1.3 SDR Sistemlerinde Yazılım Teknolojileri

SDR sistemleri, esnek ve yeniden yapılandırılabilir sinyal işleme yetenekleri sayesinde çeşitli yazılım teknolojilerine ihtiyaç duyar. Bu teknolojiler; programlama dilleri, sinyal işleme kütüphaneleri ve SDR uygulamalarının geliştirilmesini kolaylaştıran yazılım çerçevelerinden oluşur. C++, Python ve MATLAB gibi diller SDR algoritmalarının geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılır. LiquidDSP ve VOLK gibi optimize edilmiş DSP kütüphaneleri, işlem hızını artırarak performansı yükseltir.

Buna ek olarak, birçok SDR platformu düşük gecikmeli ve gerçek zamanlı işlem için Linux tabanlı sistemleri veya gerçek zamanlı işletim sistemlerini tercih etmektedir.

GNU Radio, SDRangel ve Pothos gibi araçlar; görsel, modüler yapıları sayesinde karmaşık SDR uygulamalarının daha kolay geliştirilmesini sağlamaktadır [24], [25], [26]. Bu yazılımlar sayesinde SDR sistemleri, geleneksel donanım tabanlı sistemlerin ötesine geçerek daha yüksek performans ve uyarlanabilirlik sunmaktadır.

### 2.1.4 Donanım Platformları

SDR sistemlerinde kullanılacak donanım, uygulamanın gereksinimlerine ve bütçeye göre belirlenir. USRP (Universal Software Radio Peripheral), yüksek performansı sayesinde araştırma ve geliştirme alanlarında sıklıkla tercih edilen güçlü bir platformdur. HackRF One ise daha uygun fiyatlı olmasına rağmen güçlü özellikler sunarak hobi projeleri ve eğitim amaçlı kullanımlar için popüler bir seçenek haline gelmiştir. RTL-SDR, en ekonomik ve basit çözüm olarak temel uygulamalarda veya yeni başlayanlar için idealdir. BladeRF x40 ise fiyat-performans dengesini başarıyla sağlayarak geniş frekans aralığı ve yüksek hızlı veri aktarımı desteğiyle hem akademik projelerde hem de profesyonel uygulamalarda kullanılabilir [27], [28], [29], [30], [31].

### 2.1.5 SDR Avantajları

Truong ve Yu, SDR teknolojisinin sağladığı bazı temel avantajları şu şekilde sıralamıştır [15], [32] :

- **Yeniden yapılandırılabilirlik:** Yeni iletişim standartlarına kolayca uyum sağlanabilir.
- **Esneklik:** İşlev ve uygulama açısından yüksek esneklik sunar.
- **Bilişsel yetenek:** Akıllı ve uyarlanabilir radyo sistemlerini destekler.
- **Yükseltilebilirlik:** Donanım değişimi gerekmeden yazılımsal güncellemelerle kolayca geliştirilebilir.
- **Filtreleme kapasitesi:** Gelişmiş sinyal işleme ve filtreleme olanakları sunar.

### 2.1.6 SDR Dezavantajları

SDR sistemleri birçok avantaj sunsa da bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir [32] :

- Geniş frekans aralığını desteklemek için RF donanımında farklı frekans bantlarına yönelik ek devreler gerekebilir.
- RF performansı, günümüz teknolojinin fiziksel sınırlamalarıyla kısıtlıdır.
- Dijital devrelerin çalışabileceği maksimum frekans, ADC'nin kapasitesiyle sınırlıdır.
- İşlem ve kontrol için bilgisayar gereksinimi vardır.
- Yazılım temelli çözümlerde performans sınırlamaları yaşanabilir.

### **3. DİJİTAL KARASAL GÖRÜNTÜ YAYINCILIĞI**

#### **3.1 DİJİTAL KARASAL VİDEO YAYINCILIĞI**

1997 yılında ETSI tarafından EN 300 744 standardı olarak yayımlanan DVB-T (Digital Video Broadcasting- Terrestrial), dijital ses ve görüntü yayıncılığı için geliştirilen, Avrupa merkezli DVB konsorsiyumunun bir standardıdır[33]. Bu yeni standart, spektrum kaynaklarını verimli kullanarak yüksek kaliteli ses ve görüntü iletimi sağlamak üzere tasarlanmıştır [34].

DVB-T, temel modülasyon tekniği olarak OFDM'yi kullanır. İleri Hata Düzeltmesi (FEC) desteğiyle birlikte, farklı iletim kanallarında dahi güçlü ve kararlı bir sinyal sunar [34]. QPSK, 16-QAM ve 64-QAM gibi çeşitli modülasyon şemalarını destekleyerek, farklı yayın ihtiyaçlarına uygun veri hızı ve sinyal kalitesi arasında denge kurma esnekliği sağlar.

Sistemin sunduğu esneklik sayesinde, DVB-T ve geliştirilmiş versiyonu olan DVB-T2, günümüzde dünya genelinde sayısız ülkede karasal dijital televizyon (DTT) hizmetleri için yaygın olarak tercih edilmektedir [35]. DVB-T standardı, analog sistemlere kıyasla aynı bant genişliği içinde daha fazla kanal ve hizmet sunarak spektrum kullanımında önemli avantajlar sağlamaktadır.

Ancak, yüksek parazit seviyeleri ya da düşük sinyal gücü gibi olumsuz koşullarda DVB-T performans sorunlarıyla karşılaşabilmektedir. Bu nedenle DVB Projesi, bu eksiklikleri gidermek amacıyla daha gelişmiş bir standart olan DVB-T2'yi geliştirmiştir [36]. DVB-T2, gelişmiş FEC kodlama teknikleriyle daha iyi hata düzeltme, daha yüksek veri hızları ve zorlu alım koşullarında daha güçlü performans sunmaktadır [34].

#### **3.2 DVB-T'DEKİ TEMEL TEKNOLOJİLER**

DVB-T sistemi, yüksek verimliliğe ve dayanıklılığa sahip dijital yayıncılık sunabilmek için, FEC ile entegre edilmiş bir OFDM türü olan COFDM (Kodlanmış Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama) teknolojisini kullanmaktadır. OFDM ve FEC

kombinasyonu, sinyal bozulmasını önlemekte ve değişken kanal koşullarında güvenilir iletim sağlamaktadır [37], [38], [39], [40].

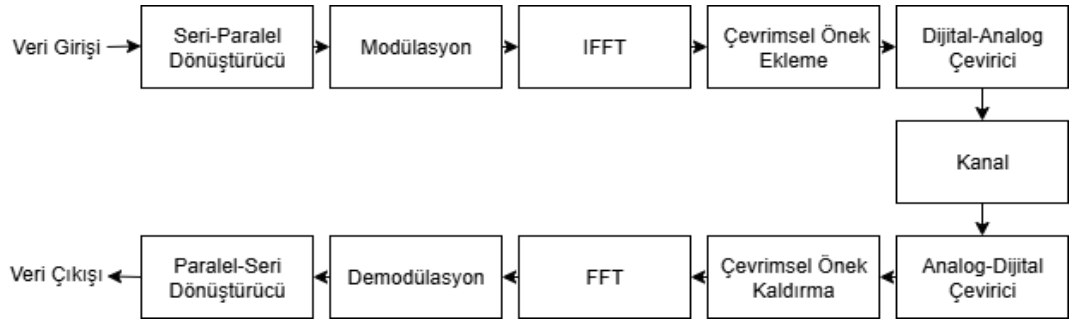
### 3.2.1 OFDM (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama)

OFDM, ilk olarak 1960'lerde Bell Labs ve UCLA'daki araştırmacılar tarafından, kablosuz iletişimde sinyal bozulması problemini çözmek amacıyla geliştirilmiştir. 1966'da R.W. Chang, spektral verimliliği artırmak amacıyla çok sayıda ortogonal alt taşıyıcının kullanıldığı yapıyı önermiştir [41], [42]. 1970'lerde ve 1980'lerde Weinstein ve Ebert, Hızlı Fourier Dönüşümü'nü (FFT) bu yapıya entegre ederek, yöntemi pratik uygulamalar için uygun hale getirmiştir. OFDM, çoklu yol girişimine dayanıklılığı ve bant genişliğinin verimli kullanımı sayesinde DAB, DVB, Wi-Fi (IEEE 802.11) ve 4G/5G gibi birçok iletişim standardında temel teknoloji haline gelmiştir [43].

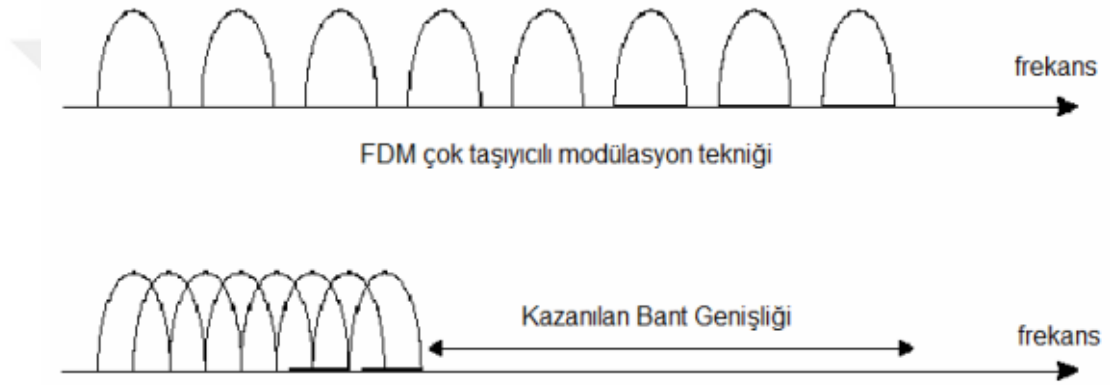
Bu modülasyon tekniği, yüksek hızlı veri akışını birbirine yakın frekanslardaki alt taşıyıcılara bölerek iletir. Her bir alt taşıyıcı, toplam verinin bir bölümünü taşır ve bu yapı, özellikle sinyalin yansımalara uğradığı çoklu yol etkilerinin olumsuz etkilerini azaltmak için oldukça etkilidir [40]. Şekil 3-1, OFDM'in nasıl çalıştığını şematik olarak göstermektedir.

Şekil 3-1, OFDM sisteminin temel blok diyagramını göstermektedir. Bu diyagramda, yüksek hızlı veri dijitalden analoğa dönüştürülmekte, ardından ortogonallığı sağlamak amacıyla ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) uygulanmaktadır. Böylece veri paralel alt taşıyıcılara dağıtılarak modüle edilmekte ve iletim için hazırlanmakta, sistemin çoklu yol girişimlerine karşı dayanıklılığı ve spektral verimliliği sağlanmaktadır.

Buna ek olarak, Şekil 3-2'de OFDM ile klasik frekans bölmeli çoklu erişim (FDM) yöntemlerinin bant genişliği kullanımları karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü üzere, OFDM ortogonal alt taşıyıcılar sayesinde frekans spektrumunu daha sık ve etkin kullanmakta; buna karşılık FDM'de alt taşıyıcılar arasında boşluk bırakılması gerektiğinden spektral verimlilik daha düşük kalmaktadır. Bu özellik, OFDM'in günümüzde yaygın olarak tercih edilmesinin önemli sebeplerindendir.



Şekil 3-1 OFDM alıcı-vericisinin blok diyagramı



Şekil 3-2 FDM ve OFDM bant genişliği verimliliği

#### 3.2.1.1 DVB-T'de OFDM'nin Avantajları

- Çoklu yol girişimine karşı yüksek direnç: Bu özellik sayesinde, binaların ve yapısal engellerin yoğun olduğu kentsel alanlarda güvenilir performans sağlar.
- Verimli spektrum kullanımı: Aynı bant genişliğinde daha fazla veri iletimine olanak tanır.
- Uyarlanabilir modülasyon: Sinyal kalitesine göre modülasyon şemalarının esnek bir şekilde değiştirilmesini sağlar.

#### 3.2.2 COFDM (Kodlanmış Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama)

COFDM teknolojisi, 1986 yılında Michel Alard tarafından geliştirilmiştir. İlk olarak Eureka 147 projesi kapsamında dijital ses yayıncılığı (DAB) için kullanılmış, daha sonra DVB-T standardında modülasyon yöntemi olarak benimsenmiştir [44].

COFDM, OFDM'nin avantajlarını, güçlü hata düzeltme özellikleriyle birleştirir. FEC sayesinde iletim sırasında oluşabilecek hatalar düzeltilirken, koruma aralığı adı verilen bir zaman boşluğu, çoklu yol parazitinden kaynaklanan gecikmeli sinyallerin etkisini azaltır [45].

#### 3.2.2.1 DVB-T'de COFDM'nin rolü

- Hata düzeltme: Reed-Solomon ve evrişimsel kodlama ile iletim sırasında oluşan hatalar tespit edilip düzeltilir.
- Koruma aralığı: Gecikmeli sinyallerin doğru şekilde yorumlanmasını sağlar, frekans seçici sönmüleme ve çoklu yol etkilerine karşı dayanıklılığı artırır.
- Tek Frekanslı Ağlar (SFN): Aynı sinyalin, farklı vericiler tarafından aynı frekansta iletildiği ağ yapılarını mümkün kılar. Koruma aralığı süresince bu yansımalar hata olarak değerlendirilmez, kapsam alanı verimli şekilde artırılır.

#### 3.2.2.2 İletim Modları

Her iki modda da sinyalin bant genişliği 6, 7 veya 8 MHz olabilir ve bu değer ülkeye göre değişiklik gösterebilir [46], [47], [48]. Koruma aralığı, ağ tasarımı ve beklenen çoklu yol gecikmelerine göre ayarlanabilir.

- 2k Modu: 1.705 taşıyıcı içerir. Tek vericili sistemler veya küçük SFN uygulamaları için uygundur.
- 8k Modu: 6.817 taşıyıcı içerir. Geniş alan kapsamı ve kararlılık için daha elverişlidir.

#### 3.2.2.3 Hiyerarşik İletim

DVB-T, aynı anda iki farklı veri akışını iletmeye olanak tanıyan hiyerarşik iletim özelliğini destekler [49], [50]:

- Yüksek Öncelikli (HP) Akış: Daha düşük veri hızına sahip olmakla birlikte, güçlü hata düzeltme sağlar. Mobil ve taşınabilir alımlar için idealdir.
- Düşük Öncelikli (LP) Akış: Daha yüksek veri hızını destekler ancak hata düzeltmesi daha zayıftır. Sabit alım koşulları için uygundur.

COFDM, zorlu çevresel koşullarda dahi kararlı ve yüksek kaliteli dijital yayın yapılmasını mümkün kılan temel teknolojilerden biridir. Güçlü hata düzeltme mekanizmaları, esnek iletim seçenekleri ve SFN gibi yenilikçi yaklaşımlarla DVB-T, modern dijital yayıncılığın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.



## 4. SDR SİSTEMLERİNDE YAZILIM VE DONANIM

### 4.1 SDR SİSTEMİNDEKİ DONANIM

#### 4.1.1 BladeRF x40

BladeRF x40, şekil 4-1’de görüldüğü gibi, çok çeşitli kablosuz uygulamaları destekleyebilen güçlü bir yazılım tanımlı radyo (SDR) cihazıdır. Gelişmiş donanım özellikleri sayesinde karasal sayısal televizyon yayıncılığı (DVB-T) gibi uygulamalar için oldukça uygundur. Cihaz, gerçek zamanlı sinyal işleme kapasitesine sahip 40KLE boyutunda bir FPGA içerir. 300 MHz ila 3.8 GHz arasında geniş bir frekans aralığını desteklemesi sayesinde UHF bandındaki dijital televizyon sinyallerinin iletimi için ideal bir çözüm sunar. Ayrıca, 12 bit çözünürlüklü ADC ve DAC birimleri sayesinde modülasyon ve iletim süreçlerinde yüksek sinyal kalitesi sağlamaktadır [30]. Bu çalışmada BladeRF x40, bir DVB-T sistemi kapsamında verici olarak konfigüre edilmiştir. Yayınlama öncesinde dijital televizyon sinyali oluşturulmakta, modüle edilmekte ve ardından iletilmektedir. Modülasyon tipi (QPSK veya QAM), bant genişliği ve taşıyıcı frekans gibi sinyal parametreleri; GNU Radio yazılımı ve Osmocom Sink bileşeni kullanılarak kontrol edilmektedir. BladeRF x40’ın çoklu anten (MIMO) desteği ve yüksek hızlı USB 3.0 arayüzü, hızlı ve verimli veri işleme imkânı sunarak sistemin genel performansını artırmaktadır.



Şekil 4-1 BladeRF x40 [30]

#### 4.1.2 RTL-SDR

Şekil 4-2'de gösterilen Şekil 4-2'de gösterilen RTL-SDR (Realtek Software Defined Radio), düşük maliyetli ve esnek yapısıyla öne çıkan bir SDR alıcısıdır. Başlangıçta tüketici elektroniği ürünlerinde DVB-T sinyallerini almak amacıyla geliştirilmiş olsa da günümüzde radyo iletişimi, spektrum analizi ve sayısal televizyon alımı gibi çok çeşitli SDR tabanlı projelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Cihaz, 500 kHz ile 1.75 GHz arasında değişen frekans aralığında çalışabilen ve doğrudan örnekleme (direct sampling) modunu destekleyen RTL2832U yonga setini temel almaktadır. Bu çalışmada RTL-SDR, alıcı olarak görev yapmaktadır ve havadan iletilen DVB-T video sinyallerini almada kullanılmaktadır. Kurulumda, RTL-SDR bir OTG (On-The-Go) kablosu aracılığıyla bir akıllı telefona bağlanmıştır. Bu sayede, mobil cihaz taşınabilir bir alıcı haline gelmektedir. Gerçek zamanlı video sinyali demodülasyonu ve görselleştirmesi, bu amaca yönelik özel bir mobil uygulama kullanılarak gerçekleştirilmektedir [29].



Şekil 4-2 RTLSDR [29]

#### 4.1.3 HackRF One

Şekil 4-3'te gösterilen HackRF One hem iletim hem de alım işlevlerini yerine getirebilen çok yönlü bir yazılım tanımlı radyo (SDR) cihazıdır. Great Scott Gadgets tarafından geliştirilen bu cihaz, bant genişliğine bağlı olarak 1 MHz ile 6 GHz arasında geniş bir frekans aralığında çalışabilir. Maksimum çıkış gücü ise 15 dBm'ye kadar ulaşabilmektedir. HackRF One, birçok farklı kablosuz iletişim protokolü için test ve analiz aracı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. GNU Radio gibi popüler SDR yazılımlarıyla tam uyumlu şekilde çalışır. Bu çalışmada HackRF One, DVB-T iletim sisteminin doğrulanması ve spektrum analizi için alternatif bir alıcı ve analiz aracı olarak konumlandırılmıştır. 8 bit çözünürlüğe sahip ADC/DAC birimleri sayesinde orta düzeyde örnekleme hassasiyeti sunmakta ve gerçek zamanlı spektrum izleme için esneklik sağlamaktadır [28].



Şekil 4-3 HackRF One [28]

#### 4.1.4 Anten Seçimi

Bu tez kapsamında kullanılan anten, 698 MHz – 2.7 GHz frekans aralığında çalışmakta olup, hem DVB-T sinyallerinin iletimi hem de analizi için uygundur. Aynı zamanda BladeRF x40 (verici) ve HackRF One (alıcı/spektrum analizörü) cihazlarının desteklediği frekans aralığını da kapsadığı için tercih edilmiştir.

Sinyalin iletimi BladeRF x40 üzerinden gerçekleştirilirken, iletilen sinyaller HackRF One ile analiz edilmiştir. Anten yerleşimi, sağlıklı sinyal iletimi ve alımı için kritik bir faktördür. Özellikle kapalı ortamlarda yansıma, engeller ve parazit gibi etkiler anten performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, optimum sonuç elde edebilmek için antenin konumlandırılması dikkatli bir şekilde yapılmış ve gerekli ayarlamalar gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2 SDR SİSTEMİNDEKİ YAZILIM

GNU Radio, Eric Blossom tarafından 2001 yılında geliştirilen açık kaynaklı bir yazılım geliştirme platformudur. Yazılım tanımlı radyo sistemleri oluşturmak için çok sayıda sinyal işleme bloğu sunar. GNU Radio Companion adlı grafiksel kullanıcı arayüzü sayesinde kullanıcılar, sinyal işleme akışlarını sürükleyip bırak yöntemiyle görsel olarak tasarlayabilmektedir. Yazılımın çekirdek kısmı yüksek performanslı işlemler için C++ diliyle geliştirilmişken, kullanıcılar sinyal akışlarını kontrol etmek ve özel bloklar oluşturmak için Python dilini kullanabilmektedir.

GNU Radio; modülasyon, demodülasyon, filtreleme, kanal kodlama, hata düzeltme, spektrum analizi gibi birçok işleve sahip önceden tanımlanmış bloklar sunar. Bu özellikler, DVB-T gibi gerçek dünya iletişim sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. En büyük avantajlarından biri hem gerçek zamanlı hem de çevrimdışı sinyal işleme desteği sunmasıdır. Örneğin, kullanıcılar DVB-T sinyallerini gerçek zamanlı olarak iletebilir ve alabilir; ayrıca File Sink ve File Source gibi bloklarla sinyalleri kaydedip daha sonra analiz edebilir. Bu da hata ayıklama ve deneysel çalışmalar için büyük kolaylık sağlamaktadır [24].

GNU Radio Companion, BladeRF x40 (verici) ve HackRF One (alıcı) cihazlarıyla birlikte çalışarak DVB-T iletim ve alım sistemi tasarımı, testi ve uygulaması için esnek bir geliştirme ortamı sunar. Her iki cihaz da GNU Radio'ya Osmocom Sink (verici için) ve Osmocom Source (alıcı için) blokları üzerinden bağlanmaktadır. Bu bloklar, GNU Radio ile SDR donanımları arasında bir köprü görevi görür ve iletim parametrelerinin (frekans, bant genişliği, kazanç, örnekleme hızı vb.) yazılımdan kontrol edilmesine olanak tanır.

Verici tarafında, Osmocom Sink bloğu üzerinden yapılandırılan modüle edilmiş DVB-T sinyali, BladeRF x40 cihazı aracılığıyla yayınlanır. Alıcı tarafında ise HackRF One, bu sinyali anten yardımıyla yakalar ve Osmocom Source bloğu sayesinde GNU Radio içinde analiz edilip doğrulanır.

## 5. DVB-T SİNYAL İLETİM VE ALIM SÜRECİ

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan iletim ve alım sisteminin genel yapısı açıklanmaktadır. Sistemin genel mimarisi ve laboratuvar ortamında kurulan gerçek düzenek sırasıyla Şekil 5-1 ve Şekil 5-2’de gösterilmiştir.

### 5.1 DVB-T SİNYAL İLETİMİ

İletim sürecinin ilk adımı, verileri yayına uygun şekilde hazırlamaktır. Dijital televizyon sinyalleri genellikle Taşıma Akışı (Transport Stream- TS) formatında iletilmektedir. Bant genişliğini verimli kullanmak amacıyla, belirli bir video içeriğini içeren TS dosyası, MPEG-TS formatında kodlanmakta ve GNU Radio’daki File Source (Dosya Kaynağı) bloğu aracılığıyla sisteme aktarılmaktadır. Bu veri akışı, dijital yayının temelini oluşturur ve iletim için gerekli işlemlere tabi tutulmak üzere bir sonraki bloklara yönlendirilir.

İletim öncesinde, bu taşıma akışının modüle edilmesi gerekmektedir. İlk olarak TS verisi, DVB-T sistemine uygun bir kanal kodlama sürecinden geçer. Bu süreçte önce örnekleme (puncturing) işlemi uygulanır, ardından modülasyon gerçekleştirilir. Bu çalışmada QPSK, 16-QAM ve 64-QAM gibi farklı modülasyon teknikleri kullanılarak performansları karşılaştırmalı olarak test edilmiştir:

- 64-QAM (64 Quadrature Amplitude Modulation): Sembol başına 6 bit iletir, daha yüksek veri hızları sunar.
- 16-QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation): Sembol başına 4 bit iletir, veri hızı ile parazit dayanıklılığı arasında denge sağlar.
- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying): Sembol başına 2 bit iletir, daha düşük veri hızına karşın yüksek parazit dayanıklılığı sunar.

Modüle edilen sinyal daha sonrasında OFDM sistemine aktarılmaktadır. Burada, OFDM sinyali birbirine yakın frekansta bulunan çok sayıda alt taşıyıcıya bölünerek, özellikle çoklu yol girişimini azaltmakta ve kentsel ortamlarda sinyal

sağlamlığını artırmaktadır. OFDM yapısı, FFT boyutu ve Çevrimsel Önek (Cyclic Prefix- CP) uzunluğu gibi parametrelerle oluşturulmaktadır.

Modülasyon ve OFDM işlemlerinin ardından elde edilen sinyal, RF (Radyo Frekansı) sinyaline dönüştürülür ve anten aracılığıyla yayınlanır. Bu işlem için Osmocom Sink bloğu ve BladeRF x40 SDR cihazı kullanılmaktadır. Çıkış frekansı, Türkiye’de kullanılan DVB-T bandına (470 MHz- 862 MHz) ayarlanmakta, kazanç (gain) değerleri ise sinyalin iletim ve alım kalitesini optimize edecek şekilde ayarlanmaktadır.

### **5.1.1 DVB-T Sinyal Alımı (GNU Radio Tabanlı)**

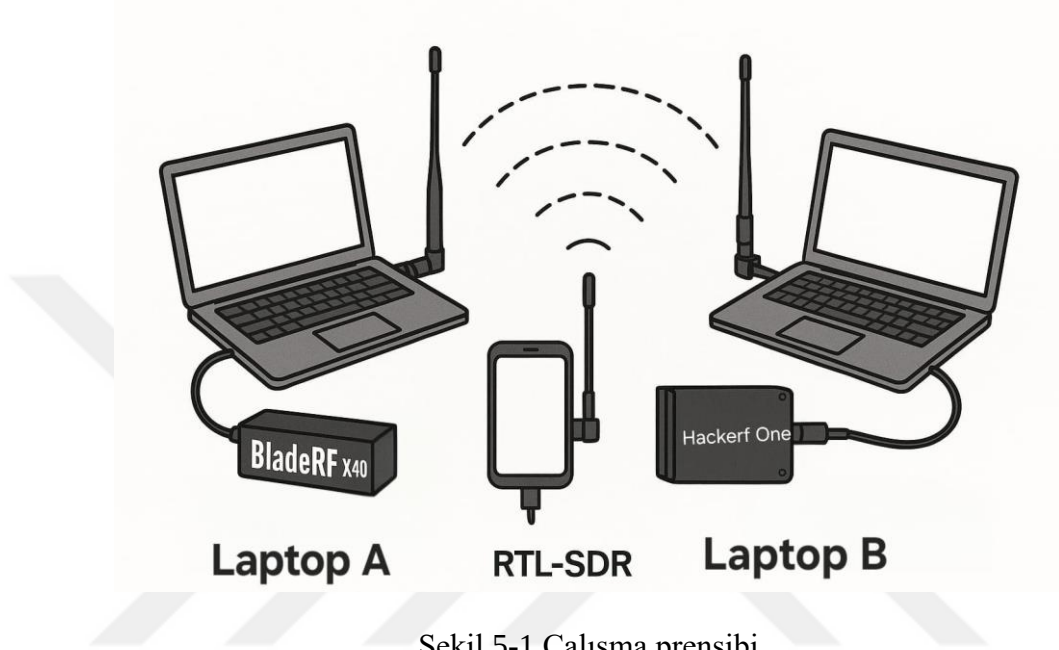
Alıcı tarafında HackRF One ve RTL-SDR olmak üzere iki farklı SDR cihazı kullanılmıştır. HackRF One, RF sinyallerini havadan alır ve bu sinyaller, iletim sırasında uygulanan işlemlerin tersine çevrilmesiyle demodüle edilip çözülür. Elde edilen TS verisi, daha fazla analiz için bir dosyaya kaydedilebilir ya da GNU Radio’nun GUI arayüzü ile gerçek zamanlı olarak görselleştirilebilir. Bu yaklaşım, sinyalin anlık takibini ve performans analizini mümkün kılmaktadır.

## **5.2 DVB-T SİNYAL ALIM SÜRECİ**

Bu bölümde, alıcı sistem donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşmaktadır. USB tabanlı bir DVB-T tuner, DVB-T sürücüsü (driver) ve bir TV oynatma uygulaması (örneğin Aerial TV) ile sinyal alımı ve oynatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Süreç adım adım şu şekilde özetlenebilir:

1. Harici anten, BladeRF X40 cihazından OTA (Over-the-Air) olarak gönderilen DVB-T sinyalini alır.
2. RTL2832U yongasına sahip tuner, RF sinyallerini yakalayıp içeriğindeki sıkıştırılmış video, ses ve meta verileri taşıyan TS akışını çıkarır.
3. Aerial TV uygulaması, TS verisini DVB-T driver üzerinden alır; video ve ses akışlarının kodunu çözerek kullanıcıya sunar.
4. Sinyal tamamen çözüldüğünde, elde edilen içerik mobil cihazda veya bilgisayarda gerçek zamanlı olarak görüntülenir.

Aerial TV uygulaması, internet bağlantısına ihtiyaç duymadan çalışarak gerçek yayın kanallarını gösterir; bu yönüyle taşınabilir bir TV deneyimi sunmaktadır. Uygulama, gerçek zamanlı ve kararlı bir performans sergilemektedir.



Şekil 5-1 Çalışma prensibi



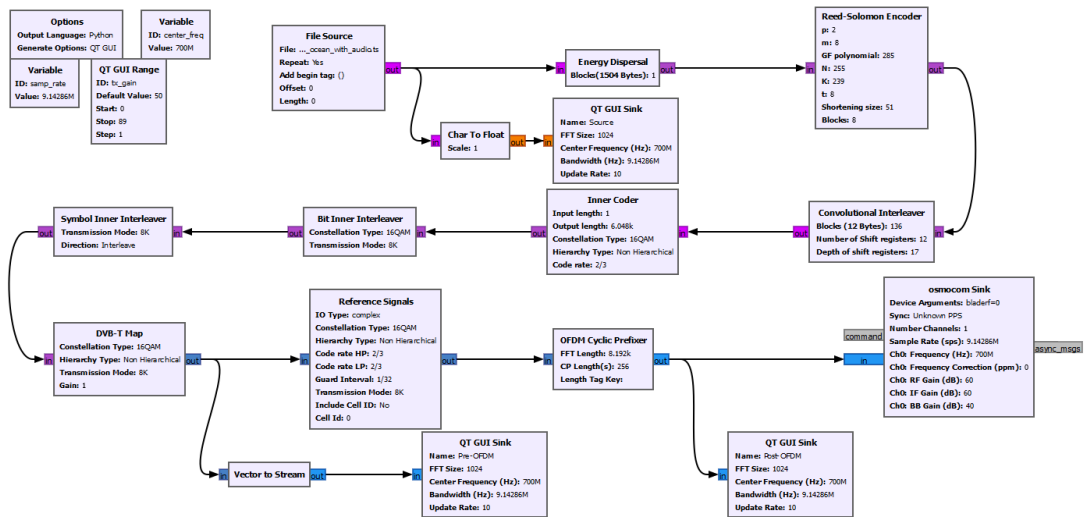
Şekil 5-2 Test platformu

## 6. AKIŞ GRAFİĞİ TASARIMI

Yazılım tanımlı radyo (SDR) sistemlerinde, bir akış grafiği, bir sinyal üzerinde gerçekleştirilen işlemlerin sırasını tanımlayan sıralı bir sinyal işleme blokları setidir. Bir akış grafiğindeki her blok, filtreleme, modülasyon veya kodlama gibi belirli bir görevi yerine getirmektedir ve bloklar arasındaki bağlantılar tüm veri akışını belirlemektedir. Akış grafikleri, iletişim sistemlerinin geliştirilmesini, test edilmesini ve görselleştirilmesini kolaylaştırmaktadır [51].

### 6.1 VERİCİ BLOK DİYAGRAMI

Bu bölümde, bir DVB-T iletim sisteminde gerçekleştirilen her adım incelenmekte; video verilerinin nasıl işlendiği, modüle edildiği ve ardından iletiildiği açıklanmaktadır. Her blok, Taşıma Akışını (TS) işlemede ve onu herhangi bir DVB-T uyumlu cihaz tarafından yakalanabilen bir RF sinyaline dönüştürmede önemli bir rol oynamaktadır. Sistemin genel akış diyagramı Şekil 6-1’de sunulmakta olup, ETSI EN 300 744 standardına dayanarak her bloğun ayrıntılı açıklaması Bölüm 6.1.1’de verilmektedir [52], [53].



Şekil 6-1 Verici blok diyagramı

### 6.1.1 Sistem Parametreleri (Tüm Bloklar)

- Constellation Type (Takımyıldız Türü): QPSK, 16-QAM ve 64-QAM, Tüm üç modülasyon şeması karşılaştırma için değerlendirilecektir.
- Hierarchy Type (Hiyerarşi Türü): Hiyerarşik Olmayan, Hiyerarşik olmayan mod tüm verileri eşit olarak işlemektedir, bu da tüm alıcıların öncelikli akışlar olmadan tutarlı kaliteye ihtiyaç duyduğu durumlarda en iyi şekilde çalışmaktadır.
- Transmission Mode (İletim Modu): 8K modu (8.192 taşıyıcı), geniş alan kapsamı ve daha iyi sinyal kararlılığı sağlamaktadır.

### 6.1.2 Dosya Kaynağı Bloğu (File Source Bloğu)

File Source bloğu, bir dosyadan ikili verileri okumaktadır ve bunları sürekli bir akış olarak çıkışa iletmektedir. Genellikle kaydedilmiş sinyalleri oynatmak, önceden üretilmiş verileri bir akış grafiğine beslemek veya ham multimedya dosyalarını işlemek için kullanılmaktadır. Bu blok, belirtilen bir dosyadan veri okur ve bunu bir sonraki işlem adımına iletmektedir. Dosya, yakalanmış sinyaller, ham video veya önceden üretilmiş test sinyalleri içerebilir. İkili dosyalar formatları hakkında metadata saklamaz, bu nedenle değerlerin doğru şekilde yorumlanabilmesi için veri türünü belirtmek önemlidir. Dosya kaynağı bloğunun anahtar parametreleri aşağıda verilmiştir.

- File (Dosya): Okunacak dosyanın yolunu belirtmektedir (Yerel olarak depolanmış olmalıdır).
- Output Type (Çıkış Türü): Okunan verinin türünü tanımlamaktadır (float, complex, int).
- Repeat (Tekrarla): Etkinleştirilirse, dosya sonsuza kadar döngüye girer ve asla sona ermez.
- Add Begin Tag (Başlangıç Etiketini Ekle): Akışın başlangıcını işaretlemek için isteğe bağlı olarak ilk örneğe etiket eklemektedir.

- Offset (Ofset): Okumaya başlamadan önce atlanacak örnek sayısını ayarlamaktadır.
- Length (Uzunluk): Kaç örnek okunması gerektiğini belirtir. 0, tüm dosyanın okunacağı anlamına gelmektedir.

DVB-T iletim kurulumunda, File Source bloğu MPEG-TS kodlu video ve ses verilerini içeren bir Taşıma Akışı (TS) dosyasını yüklemek için kullanılmaktadır. Yol, bilgisayarda saklanan önceden indirilmiş ham MPEG-TS akışına ayarlanmıştır, TS dosyası ham ikili verilerden oluşmaktadır, bu nedenle çıkış türü byte (uint8) olarak ayarlanmıştır. Sürekli bir iletim sağlamak için Repeat seçeneği etkinleştirilmiştir. Son olarak, hiçbir offset veya uzunluk uygulanmamaktadır. Bu, DVB-T iletim zincirinin doğru MPEG-TS byte akışını almasını sağlamaktadır, bu da ardından modüle edilip iletmektedir.

### 6.1.3 Enerji Dağıtım Bloğu ( Energy Dispersal Block )

Enerji Dağılımı, sinyal işlemede iletilen sinyalin enerjisinin daha geniş bir frekans aralığına yayılmasına yardımcı olan bir DVB-T (Dijital Video Yayını - Karasal) özelliğidir. Bu işlem, örneğin uzun 0 dizileri veya uzun 1 dizileri gibi aynı bitlerin uzun dizilerini önlemeye odaklanmaktadır, çünkü bu senkronizasyon sorunlarına neden olabilmekte ve sinyali parazite karşı daha duyarlı hale getirebilmektedir.

Bu adım gereklidir çünkü gerçek dünyadaki iletim koşulları öngörülemeyen gürültü, çok yollu solma ve parazit ile karakterize özelliklerine sahiptir. Eğer bir kaynaktan gelen enerji iyi bir şekilde dağıtılmazsa, sinyal verimsiz hale gelebilir ve sinyal bozulmasına neden olabilir.

Enerji dağılımı genellikle sahte-rasgele ikili dizi (PRBS) karıştırıcısı kullanılarak yapılmaktadır. Bu karıştırıcı, orijinal taşıyıcı akış (TS) verisini sahte-rasgele bir dizi ile XOR işlemi yaparak değiştirmektedir. Alıcı aynı diziyi bildiği için, karıştırmayı geri alarak orijinal veriyi geri elde edebilmektedir. Enerji dağıtım bloğunda karıştırıcı, 1504 baytlık bloklar üzerinde çalışmaktadır. Bu da tipik DVB-T taşıyıcı akış paketlerinin boyutudur.  $(188 \text{ bayt/paket} \times 8 \text{ paket} = 1504 \text{ bayt})$

DVB-T’de, MPEG-TS (Taşıyıcı Akış) paketleri genellikle yalnızca 188 bayttır, ancak karıştırıcı ardışık 8 paket üzerinde çalışmaktadır ve bu da 1504 baytlık blok boyutuna yol açmaktadır. Enerjinin doğru bir şekilde dağıtıldığından ve DVB-T ile uyumsuz bir formatta olmadığından emin olunmaktadır.

#### 6.1.4 Reed-Solomon Kodlayıcı Bloğu (Reed-Solomon Encoder Block)

DVB-T Reed-Solomon Kodlayıcı, veri akışına ekstra parite baytları ekleyerek iletilen verileri hatalardan koruyan bir ileri hata düzeltme (FEC) bloğudur; bu da alıcının parazit, gürültü veya sinyal azalmasından kaynaklanan hataları algılamasını ve düzeltmesini sağlamaktadır.

Kodlayıcı, 239 baytlık MPEG-TS paketlerini işlemektedir ve 16 bayt eşlik ekleyerek 255 baytlık kodlanmış paketler oluşturmaktadır. Sonuç olarak, hata tespiti ve düzeltmeye olanak tanıyarak bozulmuş paketlerin kod çözme işleminden önce onarılmasını sağlamaktadır.

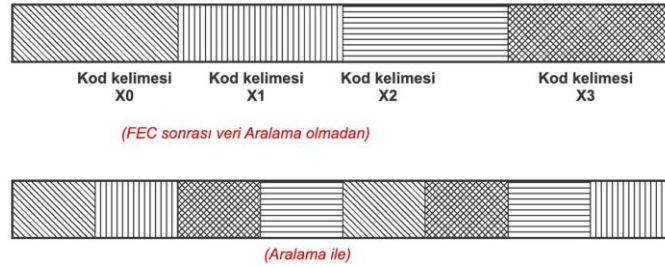
DVB-T, RS (255,239,8) kodunu kullanmaktadır, yani: 239 bayt orijinal veri, 16 bayt hata düzeltme verisi (eşlik) ve paket başına 8 hatalı bayta kadar düzeltme yapabilmektedir. Eğer 8 bayttan fazla veri bozulmuşsa, paket kurtarılamaz ve atılır. Reed-Solomon kodlayıcı bloğunun parametreleri aşağıda verilmiştir.

- $p = 2$  :  $GF(2^m)$  üzerinde çalışır.
- $m = 8$ : Bir sembol = 8 bit (1 bayt).
- GF polinomu = 285: Galois Alanı aritmetiğinin tanımlandığı yer.
- $N = 255$ : Kod kelimesi uzunluğu (blok başına toplam sembol sayısı).
- $K = 239$ : Mesaj uzunluğu (blok başına gerçek veri sembolleri).
- $t = 8$ : Blok başına 8 sembol hatasını düzeltebilir.
- Kısaltma boyutu = 51: Pratik nedenlerle çıkarılan sembol sayısı.
- Bloklar = 8: İşlenen RS kod kelimesi sayısı.

### 6.1.5 Konvolüsyonel İç İç Geçirici bloğu (Convolutional Interleaver Block)

Konvolüsyonel İç İç Geçirici, DVB-T iletiminde önemli bir bileşendir. Solma, parazit veya ani gürültü nedeniyle oluşan ani hata kümelerini düzeltmektedir. Verilerin sırasını yeniden düzenleyerek hataların zaman içinde maskelenmesini sağlamaktadır, bu da FEC'nin onları daha kolay düzeltmesine olanak vermektedir. Bu sürecin çalışma prensibi Şekil 6-2'de gösterilmektedir.

Sistem, veri akışının bazı bölümlerini geciktirmek için kaydırma kayıtları kullanmaktadır. Baytları zaman içinde yayarak, hata kümelerini kısa tutmaktadır. Böylelikle düzeltme daha iyi çalışmaktadır. Hataların farklı paketler üzerine dağıtılması, Reed-Solomon kod çözücünün işlevselliğini artırmaktadır. Bir hata kümesinin tüm bir paketi kurtarılamayacak şekilde bozması yerine, hatalar yayılır ve başarılı bir düzeltmeye olanak tanımaktadır.



Şekil 6-2 Konvolüsyonel karıştırıcının çalışma prensibi

Anahtar parametreler aşağıda verilmiştir.

- Blok boyutu: Bu parametre, aynı anda izlenecek blok sayısını belirtmektedir. Konvolüsyonel İç İç Geçirici durumunda, "blok" terimi iç içe geçirilen veri baytlarının bir koleksiyonunu ifade etmektedir. Her blok 12 bayttır.
- Kaydırma Kaydı Sayısı: Bu, temel olarak iç içe geçirme için kaç paralel kaydırma kaydı (veya gecikme hattı) kullanılacağını tanımlamaktadır.

- **Kaydırma Kayıtlarının Derinliği:** Bu parametre, bireysel kaydırma kayıtlarının uzunluğunu belirtmektedir. Bu, ani hata kümelerini zaman içinde yaymak ve etkilerini azaltmak için yeterli iç içe geçirme sağlamak amacıyla veriye uygulanan maksimum gecikmedir.

#### 6.1.6 İç Kodlayıcı Bloğu (Inner Coder Block)

Yüksek kodlama oranları sağlamak ve veri çıkışını optimize etmek için kodlayıcı, ilk kodlamadan sonra belirli bitlerin hariç tutulduğu bir yöntem olan delikleme (puncturing) kullanılmaktadır.

Desteklenen kodlama oranları  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$  ve  $7/8$ 'dir. Bu, verilerin karıştırılarak hataların belirgin hale getirilip düzeltilebilmesini sağlayan akıllı bir yöntem olan evrişimli kodlama (convolutional coding) ile gerçekleştirilmektedir.

Blok, ana kod oranı  $1/2$  olan bir evrişimli kod uygulamaktadır; böylece her giriş biti iki çıkış bitine dönüştürülmektedir. DVB-T iletim yapısında, İç Kodlayıcı bloğu aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır.

- **Giriş Uzunluğu:** Kodlama öncesi orijinal veri bloğunun boyutudur. Evrişimli kodlayıcı veriyi bit-bit işlediğinden, giriş uzunluğunun 1-bit olarak ayarlanması her bir bitin doğru kodlanmasını garanti etmektedir.
- **Çıkış Uzunluğu:** Kodlanmış veri bloğunun çıkış uzunluğunu belirtmektedir. Seçilen kod oranı ve modülasyonla tam bir çerçeve kodlandıktan sonra, sistem 6.048 kodlanmış bit üretmektedir.
- **Kod Oranı:** Evrişimli kodun oranını ayarlamaktadır, bu da hata düzeltme yeteneği ile veri hızı arasındaki dengeyi etkilemektedir.  $2/3$ , karşılaştırmalı analiz için hata düzeltme yeteneği ile veri çıkışı arasında optimal bir denge sağlamaktadır.

### 6.1.7 Bit İç Ara Bloğu (Bit Inner Interleaver Block)

Gürültü ve girişimden kaynaklanan hatalardan sinyali korumaya yardımcı olmak için, Bit İç İşleyici modülasyondan önce bitlerin sırasını değiştirir ve onları farklı iletim birimleri üzerinde karıştırmaktadır.

İç işleme süreci, seçilen modülasyon şemasına (QPSK, 16-QAM veya 64-QAM) ve iletim moduna (2K veya 8K) göre yapılandırılmıştır, bu işlem Evrişimli İşleyici ve Reed-Solomon Kodlayıcı ile birlikte çalışır ve iletilen sinyalin gücünü artırmaktadır.

Bu adım, hataların büyük veri kümelerini bozmamasını sağlar ve iletimin kalitesini artırmaktadır.

### 6.1.8 Sembol İç İşleyici Bloğu (Symbol Interleaver Block)

Sembol İç İşleyici, Bit İç İşleyici ile aynı amaca sahiptir, temel fark, bireysel bitler yerine semboller üzerinde çalışmasıdır. Sembol İç İşleyici, iletimden önce sembolleri karıştırarak ani hata patlamalarının tüm veri bölümlerini etkilemesini önlemektedir.

İç işleme işlemi, ETSI EN 300 744 Madde 4.3.4.2'yi takip etmektedir. Bu bağlamda, bir blok  $12 \text{ grup} \times 126 \text{ veri kelimesi} = 1512 \text{ veri kelimesinden}$  oluşmaktadır. Giriş ve çıkış formatları ise kullanılan modülasyon tipine bağlı olarak değişmektedir. Modülasyon tipine göre sembol iç işleyici giriş ve çıkış biçimleri Tablo 6-1'de gösterilmiştir.

Tablo 6-1 Modülasyon tipine göre sembol iç işleyici giriş ve çıkış biçimleri

| Modülasyon | Veri Giriş Biçimi | Veri Çıkış Biçimi |
|------------|-------------------|-------------------|
| QPSK       | 000000I0I1        | 000000Y0Y1        |
| 16-QAM     | 0000I0I1I2I3      | 0000Y0Y1Y2Y3      |
| 64-QAM     | 00I0I1I2I3I4I5    | 00Y0Y1Y2Y3Y4Y5    |

### 6.1.9 DVB-T Eşleyici Bloğu (DVB-T Mapper Block)

DVB-T Eşleyici, iç içlenmiş veri bitlerini almaktadır ve iletme uygun sembollere dönüştürmektedir. Verinin nasıl temsil edileceğini belirlemek için seçilen modülasyon şemasını (QPSK, 16QAM veya 64QAM) kullanmaktadır. Sinyalin bütünlüğünü gereksiz yükseltme uygulamadan korumak için kazanç 1 olarak ayarlanmaktadır. Bu adım aynı zamanda sembolleri belirli taşıyıcı frekanslara eşleyerek sinyali OFDM işlemeye hazır hale getirmektedir.

### 6.1.10 Referans Sinyalleri Bloğu (Reference Signals Block)

Referans Sinyalleri Bloğu, alıcının orijinal veriyi geri kazanmasına yardımcı olmak için iletilen veri akışına bilinen sinyaller eklemektedir. Bu sinyaller, senkronizasyon, kanal kestirimi ve eşitleme işlemlerinde önemli bir rol oynamaktadır; böylece alınan sinyal, gürültü, girişim veya çok yol etkilerinden kaynaklanan bozulmalardan etkilenmeden doğru şekilde çözümlenmektedir. Referans sinyalleri bloğu temel parametreleri aşağıdaki gibidir.

- G/Ç Türü: Karmaşık (Complex), çünkü referans sinyalleri frekans alanında çalışmaktadır.
- Kod Oranı HP: 2/3, yüksek öncelikli veriler için iletim hatası düzeltme seviyesini tanımlamaktadır.
- Kod Oranı LP: 2/3, düşük öncelikli veriler için iletim hatası düzeltme seviyesini tanımlamaktadır.
- Koruma Aralığı: 1/32, çok yol sinyallerinden kaynaklanan sorunları azaltmak için sembol süresinin küçük bir kısmı kadar çevrimsel ön ek ayarlamaktadır.
- Hücre Kimliği Dahil Et: Hayır, bu, sinyalde benzersiz bir verici kimliği gönderilmediği anlamına gelmektedir.
- Hücre Kimliği: 0, sadece herhangi bir verici kimliği kullanılmadığını doğrulamaktadır.

Bu blok, senkronizasyon ve hata düzeltme için önemli referans noktaları sağlayarak DVB-T alıcısının sinyali doğru şekilde okumasına yardımcı olmaktadır.

### 6.1.11 OFDM Çevrimsel Önek Bloğu (OFDM Cyclic Prefix Block)

OFDM çevrimsel Önek (Cyclic Prefix – CP) Bloğu, iletilen sinyale bir çevrimsel önek ekleyerek semboller arası girişimi (ISI) ve çok yollu sönümlemeyi ortadan kaldırmaktadır. çevrimsel önek, her OFDM sembolünün son kısmını kopyalayarak başına eklemektedir; bu teknik, sinyal geçişinin daha yumuşak olmasını sağlamaktadır ve zorlu ortamlarda daha iyi alım imkânı sunmaktadır. OFDM çevrimsel önek bloğu temel parametreleri aşağıdaki gibidir.

- FFT Uzunluğu: Bu OFDM iletiminde kullanılan alt taşıyıcı sayısını belirtmektedir (8K modu = 8192).
- CP Uzunluğu (çevrimsel önek uzunluğu): 256 örnek uzunluğunda çevrimsel önek, gecikmeli sinyal yankılarını sönümleyen bir koruma aralığı görevi görerek çok yollu girişimi azaltmaktadır.
- Uzunluk Etiket Anahtarı: Boş bırakılmıştır, yani ekstra etiketleme kullanılmamıştır.

Bu yapı, sinyal kararlılığını koruyarak ve gerçek dünya iletim zorluklarına karşı direnç sağlayarak DVB-T performansının sağlamlığını garanti etmektedir.

### 6.1.12 Osmocom Sink Bloğu (Osmocom Sink Block)

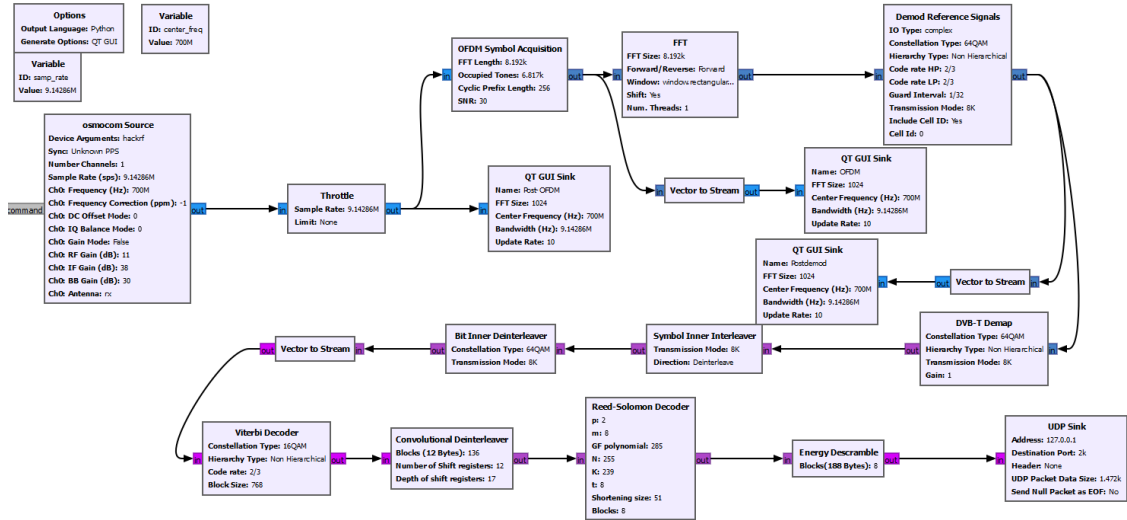
Osmocom Sink bloğu, DVB-T iletim sisteminde son adımdır. Bu bloğun amacı, doğru bir iletişimi sağlamak ve donanım üzerinde büyük bir kontrol sağlamak için uç cihazla bağlantı kurmaktır. Osmocom Sink, modüle edilmiş dijital baseband sinyalini, hava yoluyla yayın için uygun bir RF sinyaline dönüştürürken, iletim gücünü yapılandırmak ve DVB-T parametreleriyle eşleştirmek için kazanç ve frekans değişikliklerine olanak tanımaktadır. Osmocom Sink bloğu temel parametreleri aşağıdaki gibidir.

- Cihaz Argümanları: Kullanılan cihazı gösterir.
- Senkronizasyon: Dahili saatin kullanıldığını gösterir.
- Kanal Sayısı: İletim için kaç tane RF kanalı kullanıldığını belirtir.
- Kanal 0 Frekansı (Hz): İletim frekansını 700 MHz olarak ayarlar.
- Örnekleme Hızı: İletimden önce sinyalin hangi hızda örneklendiğini gösterir.

- Kanal 0 Frekans Düzeltmesi (ppm): Frekans kayması düzeltmesi uygulanmaz.
- Kanal 0 RF Kazancı (dB): İletilen RF sinyalinin güç seviyesini kontrol eder.
- Kanal 0 IF Kazancı (dB): Ara frekans kazanç ayarı.
- Kanal 0 BB Kazancı (dB): Baseband kazanç ayarı.

## 6.2 ALICI BLOK DİYAGRAMI

Bu bölümde, bir DVB-T alıcısında gerçekleştirilen her adım incelenmekte; alınan sinyalin nasıl çözümlendiği, demodüle edildiği ve ardından video verilerine dönüştürüldüğü açıklanmaktadır. DVB-T alıcısı, temelde doğru sinyal geri kazanımı ve kod çözme sağlamak amacıyla, verici bloklarının tersini gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Her blok, alınan RF sinyalinden anlamlı dijital verilere ulaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Sistemin genel akış diyagramı Şekil 6-3'te sunulmakta olup, her bloğun işlevine dair ayrıntılı açıklama Bölüm 6.2.1'de verilmektedir.



Şekil 6-3 Alıcı blok diyagramı

### 6.2.1 Osmocom Kaynağı Bloğu (Osmocom Source Block)

Alıcı, bir SDR cihazı kullanarak belirtilen frekansta ve örnekleme hızında RF sinyali yakalayan Osmocom Kaynağı ile başlamaktadır. Doğru alımı sağlamak için, alıcının frekans, örnekleme hızı ve kazanç ayarlarının vericinin kazanç ayarları ile eşleşmesi gerekmektedir.

### 6.2.2 Throttle Bloğu (Throttle Block)

Yazılım tanımlı bir ortamda sinyaller işlenirken, veri akışı genellikle sürekli ve yüksek hacimli olur. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı işlemlerde CPU kaynaklarının aşırı kullanımına yol açabilir. Throttle (akış sınırlayıcı) bloğu, bu gibi durumlarda sistemin kararlılığını korumak amacıyla kullanılır. Bu blok, işleme zincirindeki veri akış hızını kontrol ederek, belirli bir örnekleme oranının üzerine çıkılmasını engeller. Böylece, sistem kaynaklarının verimli kullanımı sağlarken, diğer işlemlerin de kesintisiz çalışmasına olanak tanınır.

### 6.2.3 OFDM Sembol Alımı Bloğu (OFDM Symbol Acquisition Block)

OFDM Sembol Alımı bloğunun ana amacı, alıcı sistemin zamanlama açısından doğru bir şekilde senkronize edilmesini sağlamaktır. Bu blok, özellikle Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) bloğuna aktarılacak olan sinyalin zaman domeninde hatasız ve temiz bir şekilde alınmasını hedefler. Senkronizasyon işlemi, alınan sinyal içerisindeki OFDM sembol başlangıçlarının doğru bir şekilde tespit edilmesine dayanır. Bu doğruluk, hem zaman kaymalarını düzeltmek hem de döngüsel önek (cyclic prefix) süresi içerisinde gelen çoklu yol girişimlerini minimize etmek açısından kritik öneme sahiptir. Eğer doğru bir sembol başlangıcı belirlenemezse, FFT işlemi sonucunda alt taşıyıcılarda ciddi karışmalar (ICI - Inter-Carrier Interference) meydana gelir ve veri çözümleme başarısız olur. Bu nedenle, OFDM Sembol Alımı bloğu, tüm alıcı zincirinin doğru çalışabilmesi için temel bir adımdır.

#### **6.2.4 Hızlı Fourier Dönüşümü Bloğu (Fast Fourier Transform Block)**

FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) bloğu, alınan zaman domeni sinyalini frekans domenine dönüştürmektedir. Bu dönüşüm sayesinde, OFDM sisteminde yer alan alt taşıyıcılar ayrıştırılarak her birine karşılık gelen veriler elde edilir. FFT işlemi, çok taşıyıcılı modülasyonun alıcı tarafındaki temel adımlarından biridir ve sonrasında yapılacak kanal düzeltme ve sembol çözümleme işlemleri için gerekli frekans domeni verisini sağlar.

#### **6.2.5 Demod Referans Sinyalleri Bloğu (Demod Reference Signals Block)**

Referans Sinyalleri bloğu, alıcıda çeşitli işlemlerin doğru bir şekilde yapılabilmesi için önemli bilgiler sağlar. Bu blok, özellikle demodülasyon, kanal kestirimi ve faz gürültüsü telafisi gibi işlemler için kullanılır. İletim sırasında gönderilen referans sinyalleri, alıcıda kanalın etkilerini tahmin etmek ve alınan sinyal üzerinde gerekli düzeltmeleri yapmak amacıyla kullanılır. Böylece, değişken kanal koşullarına rağmen veri çözümleme işlemleri daha doğru ve kararlı hale gelir.

#### **6.2.6 Sembol İç Çözücü Deinterleaver Bloğu (Symbol Inner Deinterleaver)**

Demodülasyondan sonra, Sembol İç Çözücü Deinterleaver bloğu, iletim sırasında uygulanan karıştırmayı geri alacak şekilde alınan bitleri yeniden sıralamaktadır. Bu, kod çözmeden önce darbe hatalarını düzeltmeye yardımcı olmaktadır.

#### **6.2.7 Bit İç Çözücü Deinterleaver Bloğu (Bit Inner Deinterleaver)**

Sembol çözme işlemine benzer şekilde, bu blok da alınan bitlerin iletim sırasında uygulanan iç işleme (interleaving) işlemini tersine çevirerek, bitlerin orijinal sıralarına geri dönmesini sağlar. Bu adım, özellikle ileri hata düzeltme (FEC) kodlarının doğru çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bitlerin doğru sıraya

yerleştirilmesi, hata düzeltme algoritmalarının etkili bir şekilde uygulanmasına ve iletilen verinin güvenilir bir şekilde geri kazanılmasına olanak tanır.

#### **6.2.8 Viterbi Kod Çözücü Bloğu (Viterbi Decoder)**

Viterbi Kod Çözücü bloğu, gürültülü, kodlanmış bitleri alır ve iletim sırasında oluşan hataları düzeltmeye yardımcı olmak için en muhtemel orijinal bit dizisini tahmin etmek üzere ileri hata düzeltme (FEC) kullanmaktadır.

#### **6.2.9 Konvolüsyonel Çözücü Deinterleaver Bloğu (Convolutional Deinterleaver)**

Konvolüsyonel Çözücü Deinterleaver bloğu, darbe hatalarını düzeltmek ve sonraki adımlarda başarılı kod çözümünü garanti altına almak için vericide uygulanan konvolüsyonel karıştırmayı geri almaktadır.

#### **6.2.10 Reed-Solomon Kod Çözücü Bloğu (Reed-Solomon Decoder)**

Reed-Solomon Kod Çözücü bloğu, iletim sırasında oluşan çoklu sembol hatalarını tespit etmek ve düzeltmek için özel matematik kullanarak veri bloklarındaki hataları düzeltmektedir. Bu başka bir önemli ileri hata düzeltme (FEC) mekanizmasıdır.

#### **6.2.11 Enerji Çözücü Descrambler Bloğu (Energy Descrambler)**

Enerji Çözücü (Descrambler) bloğu, verici tarafında uygulanan karıştırma işlemini tersine çevirerek, alınan bit akışını orijinal haline geri döndürür. Bu işlem, bit akışının istatistiksel yapısını düzenleyerek iletim sırasında oluşabilecek uzun sabit bit dizilerinden kaynaklanan sorunları önlemiştir. Alıcı tarafında ise descrambler, bu karıştırmayı ortadan kaldırarak veriyi kanal kod çözme işlemleri için uygun hale getirir.

### 6.2.12 Dosya Çıkış Bloğu (File Sink Block)

Dosya Çıkış Bloğu, son çıktı verisini bilgisayarda bir dosyaya kaydetmektedir. Bu, depolama veya daha sonra kullanım için yapılmaktadır. Bu blokların her biri, iletilen DVB-T sinyalinin yeniden oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu sürecin tamamının çalışması için, alıcının frekans, modülasyon şeması, sembol hızı ve hata düzeltme ayarları dahil olmak üzere vericinin ayarlarıyla eşleşmesi gerekmektedir.



## 7. DVB-T İLETİM VE ALIMINDA SİNYAL ANALİZİ VE GÖZLEMLER

DVB-T sinyalinin farklı işleme aşamalarındaki tepkisini anlamak, sistemin performansını değerlendirmek için önemlidir. Bu bölüm, GNU Radyo'daki QT GUI Frequency Sink, Time Sink ve Constellation Sink kullanılarak yakalanan bir dizi frekans alanı, zaman alanı ve takımyıldızı grafiğini göstermektedir. Bu akış grafikleri, sinyalin orijinal dijital gösteriminden modüle edilmiş ve iletilen biçimine ve son olarak demodüle edilmiş ve kurtarılmış durumuna nasıl değiştiğini göstermektedir.

Bu akış grafiklerini inceleyerek, OFDM modülasyonunun ve farklı modülasyon türlerinin (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) etkisi ve sinyalin iletimden önce ve sonra nasıl oluştuğu gibi önemli değişiklikler fark edilmektedir. Her bölüm, sinyal işleme zincirindeki belirli noktalara odaklanmaktadır. Parametrelerin ve işleme aşamalarının iletilen verileri nasıl etkilediğini göstermeye yardımcı olmaktadır.

Önemli bir gözlem, iletim ve alım zincirleri boyunca frekans alanı davranışıyla ilgilidir. İletim kısmında, kullanılan modülasyon şemasından bağımsız olarak frekans alanı gösterimi neredeyse hiç değişmeden kalmaktadır. QPSK, 16-QAM veya 64-QAM uygulansa da, tutarlı OFDM yapısı ve aynı bant genişliği işgali nedeniyle frekans spektrumu benzer görünmektedir. Ancak, alım kısmında, modülasyon şemaları arasında ince farklar gözlemlemeye başlanmaktadır. Bu farklar, modülasyonun karmaşıklığına bağlı olarak frekans gösterimini hafifçe bozabilen kanal etkileri, gürültü ve demodülasyon doğruluğu gibi gerçek dünya koşullarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, aşağıdaki bölümlerde, iletim kısmının frekans alanı analizi, tüm şemalarda benzer şekilde davrandığı için bir kez sunulurken, alım tarafındaki frekans alanı analizi, bu değişiklikleri vurgulamak için her modülasyon şeması için ayrı ayrı ele alınmaktadır.

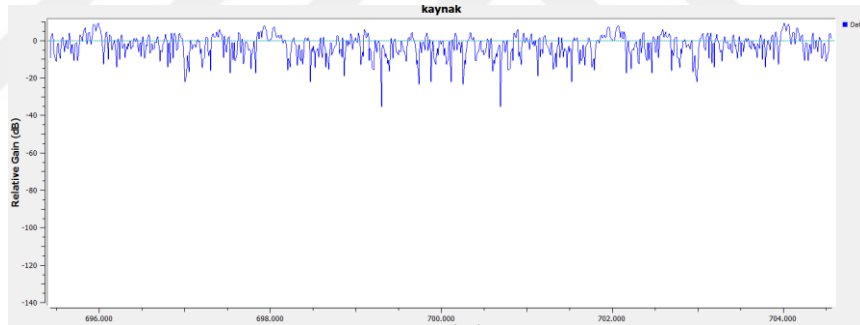
### 7.1 DVB-T İLETİM ZİNCİRİNDE FREKANS ALANI SİNYAL ANALİZİ

DVB-T iletim zincirinde frekans alanı sinyal analizi yapılırken kullanılan blokların tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

### 7.1.1 Kaynak bloğu

DVB-T sinyalinin frekans domenindeki evrimini anlamak için, GNU Radio'da QT GUI Frequency Sink kullanılarak üç aşama yakalanmış ve analiz edilmiştir. Bu grafikler, sinyalin ham taşıma akışından RF iletiminden önce tam biçimlendirilmiş OFDM sinyaline dönüşümünü göstermektedir.

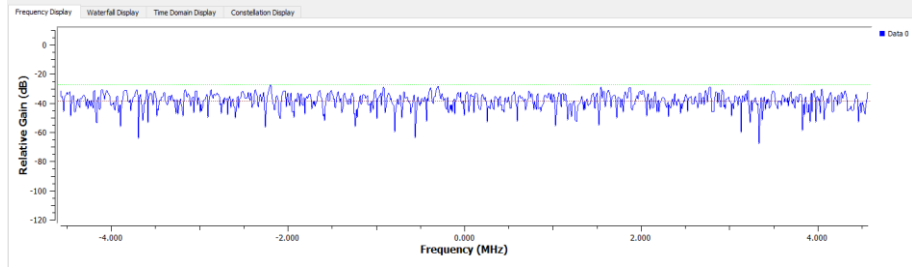
Şekil 7-1, sadece MPEG Taşıma Akışı verilerini içeren ham .ts dosyasını okuyan File Source bloğunun çıktısını göstermektedir. Bu aşamada, sinyal sadece modüle edilmemiş, RF işleminden geçmemiş dijital baytlardan oluşan bir dizidir. Bu noktada gördüğümüz şey, tüm frekanslarda rastgele, düşük seviyeli güç dalgalanmalarının olduğu düz bir spektrumdur. Ve bunun nedeni, bu noktada verinin şekillendirme, kodlama veya modülasyon gibi alışılmış sinyal işleme adımlarından geçmemiş olmasıdır.



Şekil 7-1 Dosya kaynağından gelen sinyalin frekans alanı gösterimi

### 7.1.2 PRE-OFDM Bloğu

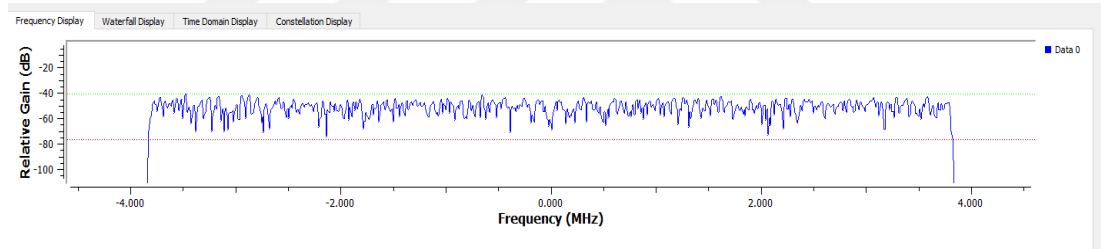
Şekil 7-2'de verilen grafikte, DVB-T Mapper bloğunun bitleri QAM sembollerine dönüştürmesinden sonra, ancak IFFT uygulanmadan önceki sinyali yakalamaktadır. Frekans grafiği, her biri bir alt taşıyıcı olan ayrı sivri uçları göstermektedir. Bu sivri uçlar, IFFT adımından önce her bir alt taşıyıcının gücünü göstermektedir. Bu noktada sinyal hâlâ frekans domenindedir ve henüz tam bir OFDM sinyali hâline gelmemiştir. Alt taşıyıcılar doğru yerlerdedir, ancak sinyal henüz son, geniş ve düzgün OFDM sinyali gibi görünmemektedir.



Şekil 7-2 OFDM modülasyonu öncesi sinyalin frekans alanı gösterimi

### 7.1.3 POST-OFDM Bloğu

Şekil 7-3’de verilen grafikte, sinyalin Osmocom Sink (BladeRF)’e gönderilmeden önceki hâlini yakalamaktadır. Bu aşamada, sinyal IFFT ve çevrimsel önek bloklarından geçmiştir ve tamamen bir OFDM dalga formuna dönüştürülmüştür.



Şekil 7-3 OFDM-modüle edilmiş sinyalin iletimden önce spektral analizi

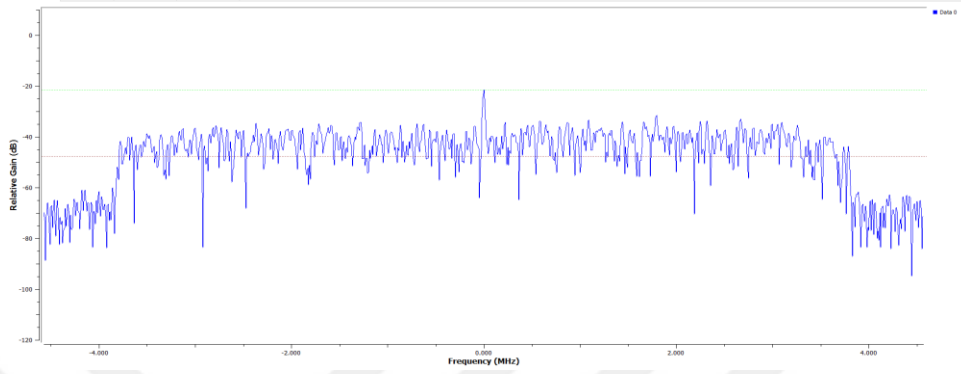
## 7.2 DVB-T ALIM ZİNCİRİNDE FREKANS ALANI SİNYAL ANALİZİ

DVB-T alım zincirinde frekans alanı sinyal sinyali analizi yapılırken kullanılan blokların tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

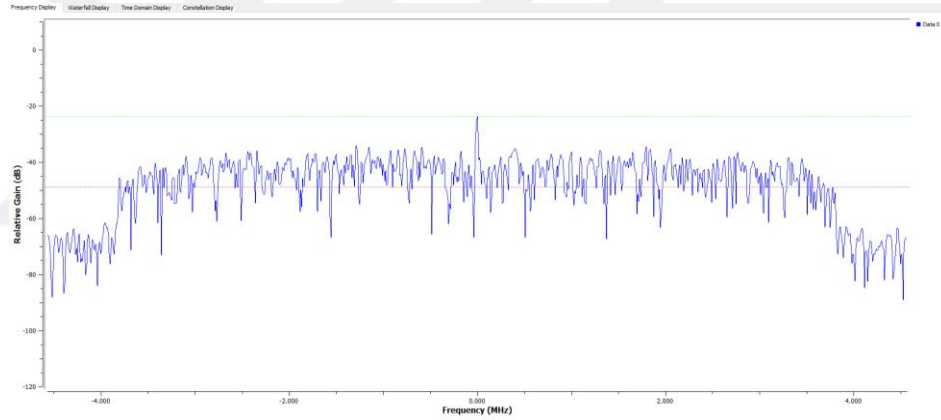
### 7.2.1 Throttle Bloğu

Şekil 7-4, Şekil 7-5 ve Şekil 7-6, henüz tam olarak işlenmemiş bir sinyal için tipik olan 0 Hz merkezli kaba ve düzensiz bir spektrumu göstermektedir. Throttle bloğu, sinyali şekillendirmeden veri akışını kontrol etmektedir. Sinyalin gücü, bant genişliği boyunca eşit olmayan bir şekilde yayılmaktadır ve düzgün bir OFDM

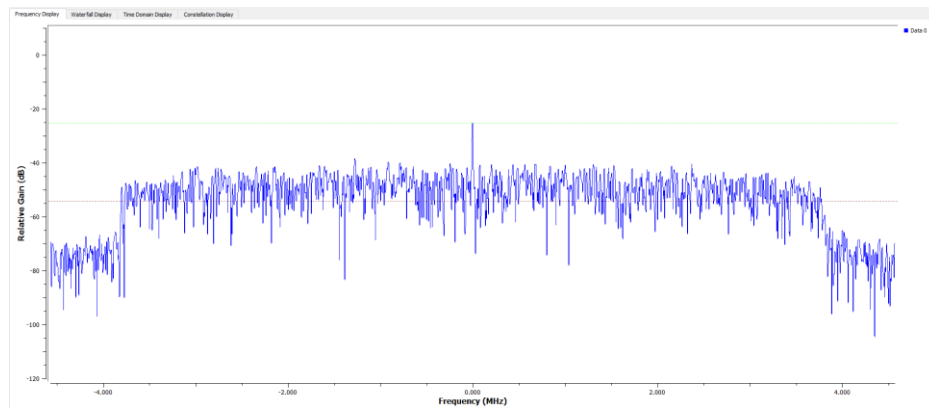
sinyaline dönüştürülmeden önce ham sembol akışını (64-QAM, 16-QAM, 64-QAM gibi) göstermektedir.



Şekil 7-4 Throttle sonrası 64-QAM modülasyonuna sahip sinyalin frekans spektrumu



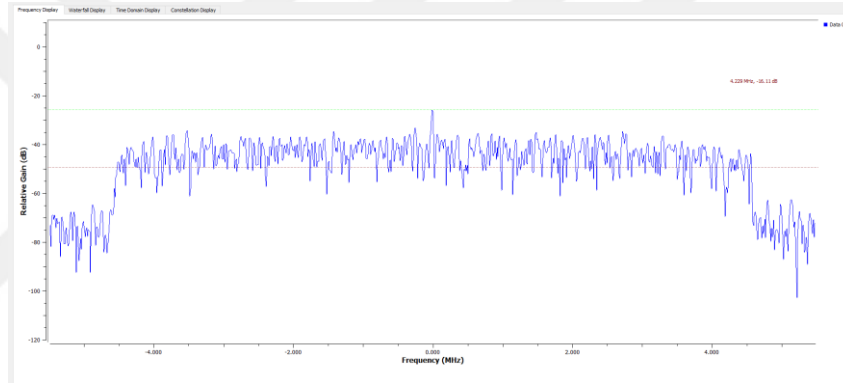
Şekil 7-5 Throttle sonrası qpsk modülasyonuna sahip sinyalin frekans spektrumu



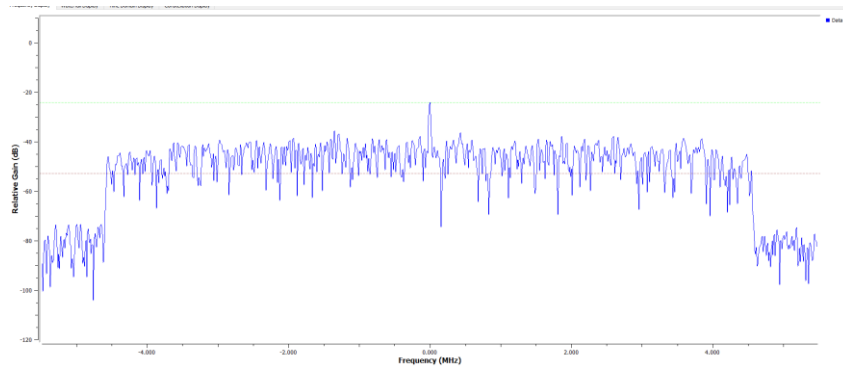
Şekil 7-6 Throttle sonrası 16-qam modülasyonuna sahip sinyalin frekans spektrumu

## 7.2.2 OFDM

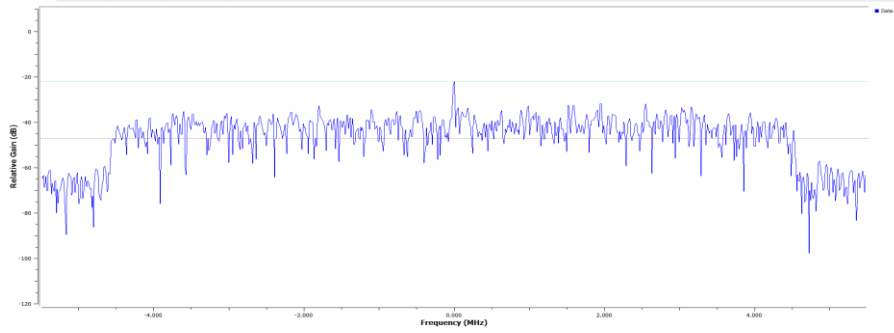
Şekil 7-7, Şekil 7-8 ve Şekil 7-9’da bir OFDM sinyalinin tipik şeklini göstermektedir. Sinyalin gücü, birden fazla ortogonal alt taşıyıcının kullanımı nedeniyle frekans bandı boyunca daha eşit bir şekilde dağıtılmaktadır. Her alt taşıyıcı, modüle edilmiş verilerin bir kısmını (örneğin, QPSK, 16-QAM veya 64-QAM) taşımaktadır ve bu da önceki duruma kıyasla daha geniş ve daha düz bir spektrumla sonuçlanmaktadır. Bu, OFDM'nin bant genişliğini verimli bir şekilde kullanmada iyi olduğunu ve semboller arası paraziti azaltmaya yardımcı olduğunu göstermektedir.



Şekil 7-7 64-QAM ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin frekans spektrumu



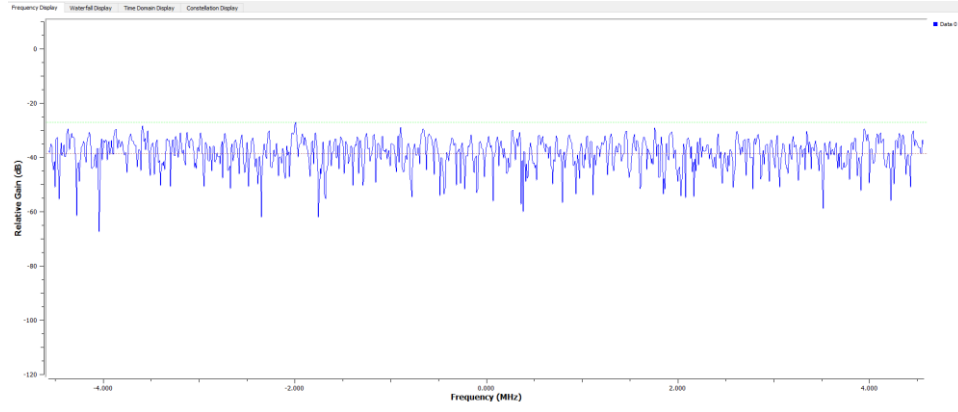
Şekil 7-8 16-QAM ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin frekans spektrumu



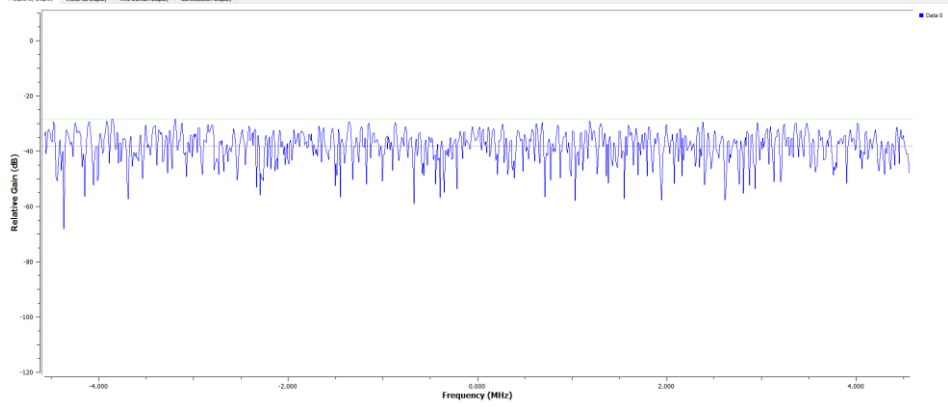
Şekil 7-9 QPSK ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin frekans spektrumu

### 7.2.3 Demodülasyon

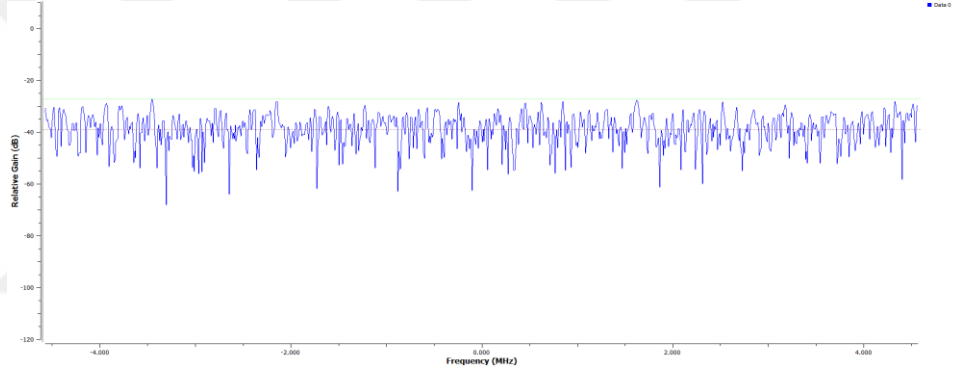
Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de Sinyal demodülasyondan geçtikten sonra, frekans grafiği daha pürüzsüz ve temiz görünmektedir. Daha az bozulma ve gürültü olmaktadır. Grafiğin düz kısımları ise bazı küçük gürültü bileşenlerinin ve kalan sinyallerin hala mevcut olduğunu göstermektedir; bu durum, verilerin geri alınmasından sonra beklenen normal bir durumdur.



Şekil 7-10 64 -QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki frekans spektrumu



Şekil 7-11 16-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki frekans spektrumu



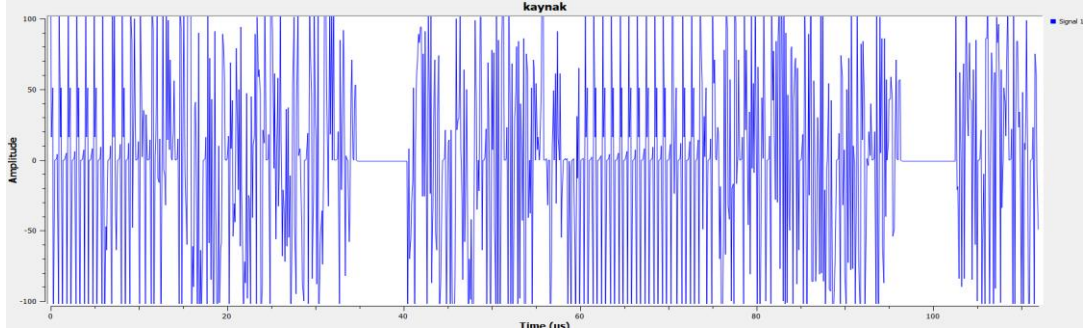
Şekil 7-12 QPSK ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki frekans spektrumu

### 7.3 DVB-T İLETİM ZİNCİRİNDE ZAMAN DÜZLEMİ SİNYAL ANALİZİ

DVB-T iletim zincirinde zaman düzlemi sinyal analizi yapılırken kullanılan blokların tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

#### 7.3.1 Kaynak bloğu

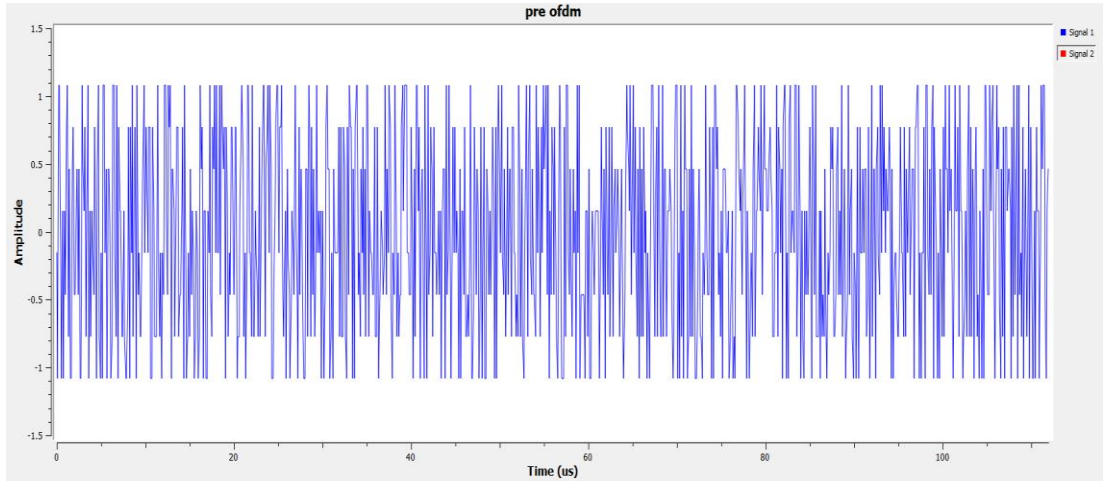
Şekil 7-13'te kaynak sinyal, herhangi bir işleme başlamadan önceki orijinal zaman domeni verisi olarak gösterilmektedir. Bu aşamada, kaynak dosyanın çıktısı tüm modülasyon şemaları (64-QAM, 16-QAM veya QPSK) için aynıdır, çünkü bu aşamada henüz modülasyon gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 7-13 Dosya kaynağından gelen sinyalin zaman alanı gösterimi

### 7.3.2 PRE-OFDM Bloğu

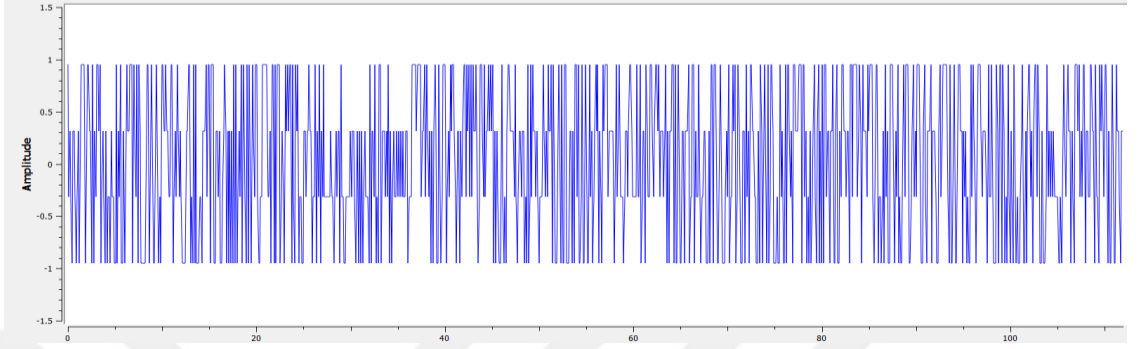
Şekil 7-14'te ikinci grafik, 64-QAM sinyalinin OFDM işleminden önceki hâlini göstermektedir. 64-QAM'de, her sembol 6 bit taşır ve genlik ile fazın 64 farklı kombinasyonunu kullanır. Zaman domeninde, semboller değiştikçe sinyalin farklı seviyeler arasında hızla atladığı gözlemlenmektedir. Bu, 64-QAM'nin normal davranışdır çünkü çok fazla veri taşımaktadır, ancak değişen şekli onu gürültüye ve sinyal bozulmasına karşı daha hassas hale getirmektedir.



Şekil 7-14 Pre-OFDM 64-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi

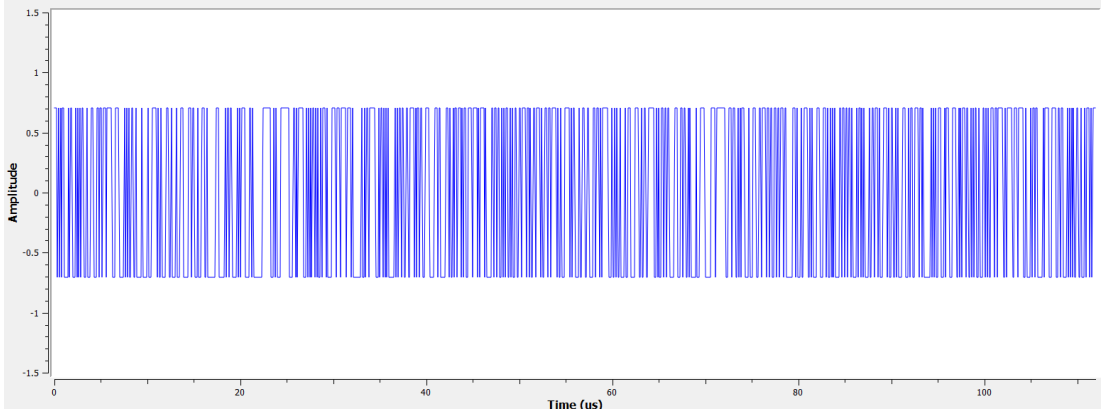
Şekil 7-15'te gösterilen grafik, 16-QAM sinyalinin OFDM işleminden önceki hâlini göstermektedir. 16-QAM'de, her sembol 4 bit taşır ve sinyal gücü ile fazın 16 farklı kombinasyonunu kullanır. Zaman grafiğinde, fazın hızlı değişimiyle birlikte

birkaç net genlik seviyesi görülmektedir. QPSK ile karşılaştırıldığında, 16-QAM daha fazla veri gönderebilir, ancak genliği değiştiği için gürültüye karşı daha hassastır.



Şekil 7-15 Pre-OFDM 16-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi

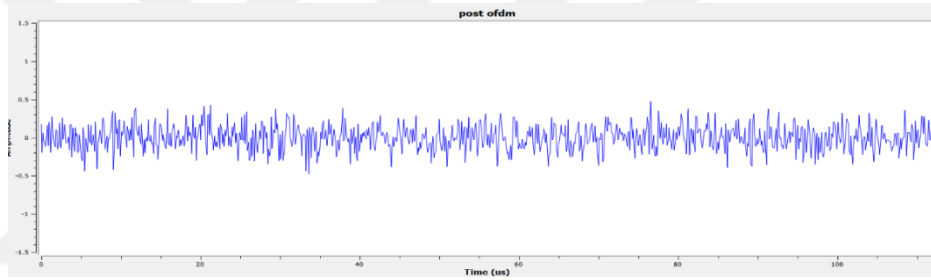
Şekil 7-16’da QPSK sinyalinin OFDM işleminden önceki durumu gösterilmektedir. QPSK modülasyonunda, her sembol 2 bitlik bilgi taşır ve sinyal dört farklı faz konumuna ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) sahip olabilir. Zaman domeninde, semboller arası geçişlerde bu faz seviyeleri arasında hızlı sıçramalar gözlemlenir. Bu davranış, QPSK sinyalinin karakteristik özelliğidir; sinyal gücünü sabit tutarken sadece fazını değiştirir.



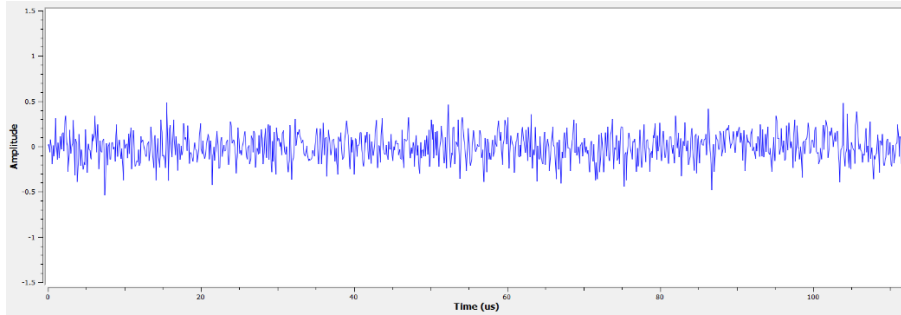
Şekil 7-16 Pre-OFDM QPSK sinyalinin zaman içindeki değişimi

### 7.3.3 POST-OFDM Bloğu

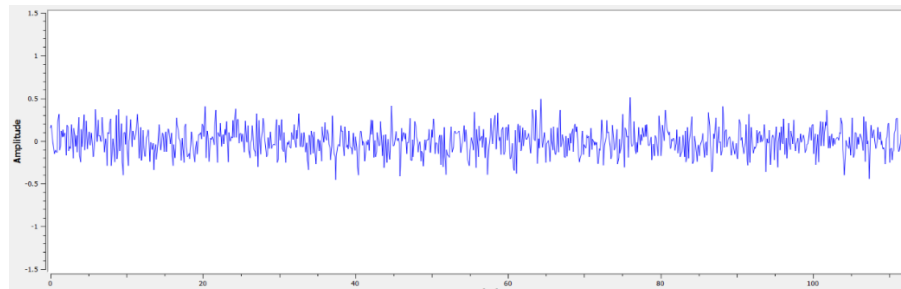
Şekil 7-17, Şekil 7-18 ve Şekil 7-19’da, sinyalin “OFDM sonrası” yani seçilen modülasyon şeması ile tamamen modüle edilmiş hâli gösterilmektedir. Bu noktada sinyal iletme hazırdır ancak kanal etkileri, faz kaymaları ve sönümlenme gibi faktörlerden kaynaklanan bozulmalar hala mevcuttur. Bahsi geçen zaman domeni dalga formları, sürecin her aşamasında sinyalde meydana gelen değişiklikleri ortaya koymakta ve farklı modülasyon yöntemleriyle birlikte OFDM’nin verileri düzenleme ve güvenilir kablosuz iletişim için sağladığı koruma fonksiyonunu gözler önüne sermektedir.



Şekil 7-17 Post-OFDM 64-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi



Şekil 7-18 Post-OFDM 16-QAM sinyalinin zaman içindeki değişimi



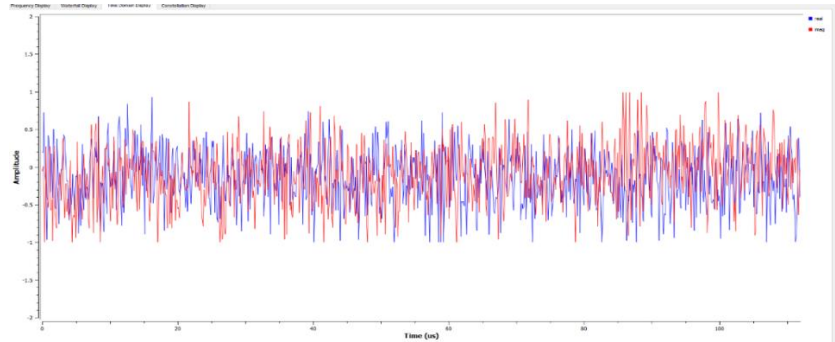
Şekil 7-19 Post-OFDM QPSK sinyalinin zaman içindeki değişimi

## 7.4 DVB-T ALIM ZİNCİRİNDE ZAMAN DÜZLEMİ SİNYAL ANALİZİ

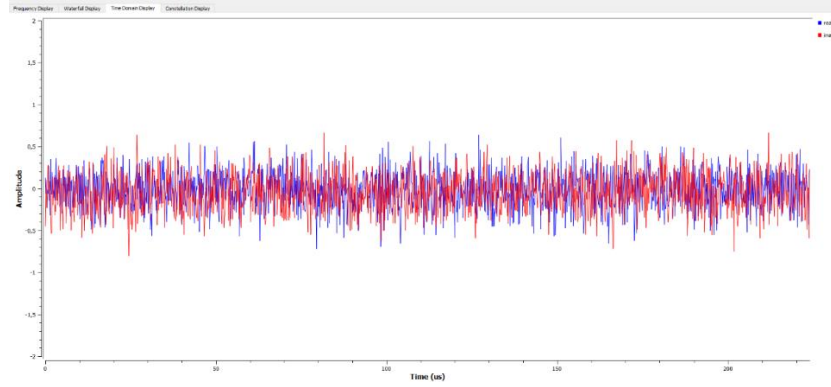
DVB-T alım zincirinde zaman düzlemi sinyal analizi yapılırken kullanılan blokların tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

### 7.4.1 Throttle Bloğu

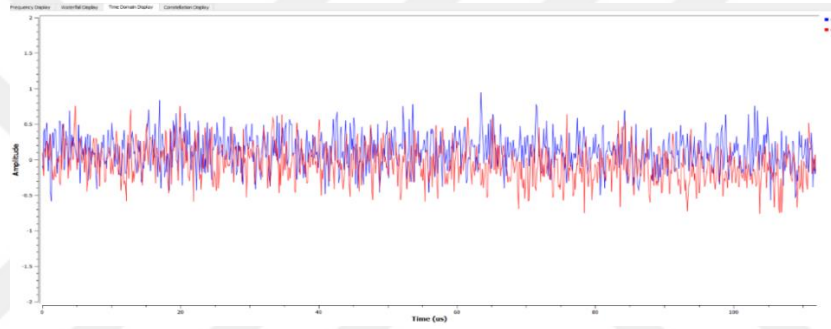
Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22’de, alım sürecinin başında HackRF tarafından yakalanan sinyal hâlâ hamdır, henüz senkronize edilmemiş veya kodu çözülmemiştir ve iletilen tüm verileri içermektedir. İlk grafikte, sinyalin zaman domeninde yakalandıktan ve throttle bloğundan geçirildikten hemen sonraki hâli gözlemlenmektedir. Sinyal, kullanılan modülasyon şemasının (QPSK, 16-QAM veya 64-QAM gibi) ve birden fazla aktif OFDM alt taşıyıcısının birleşiminin sonucu olarak hızlı ve düzensiz genlik değişimleri göstermektedir. Bu aşamada, sinyal hâlâ çevrimsel önekleri, gürültüyü ve iletim kanalından kaynaklanan olası bozulmaları içermektedir ve henüz büyük bir işlemden geçmemiştir.



Şekil 7-20 Throttle sonrası 64-QAM modülasyonuna sahip sinyalin zaman alanı gösterim



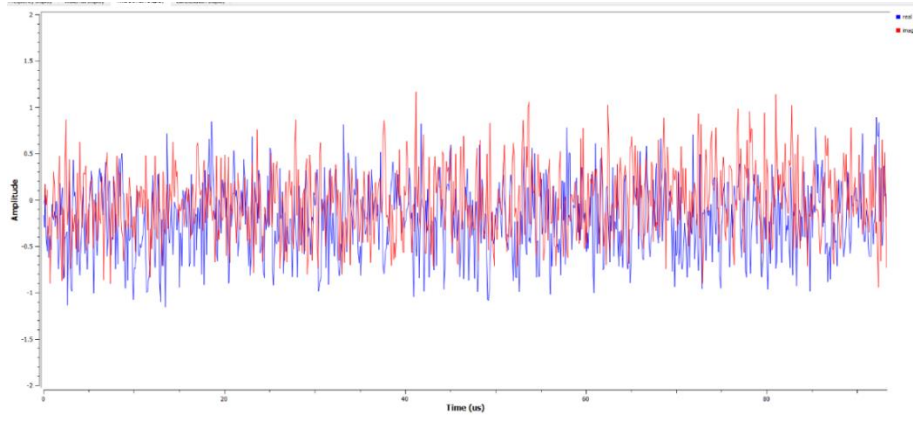
Şekil 7-21 Throttle sonrası 16-QAM modülasyonuna sahip sinyalin zaman alanı gösterim



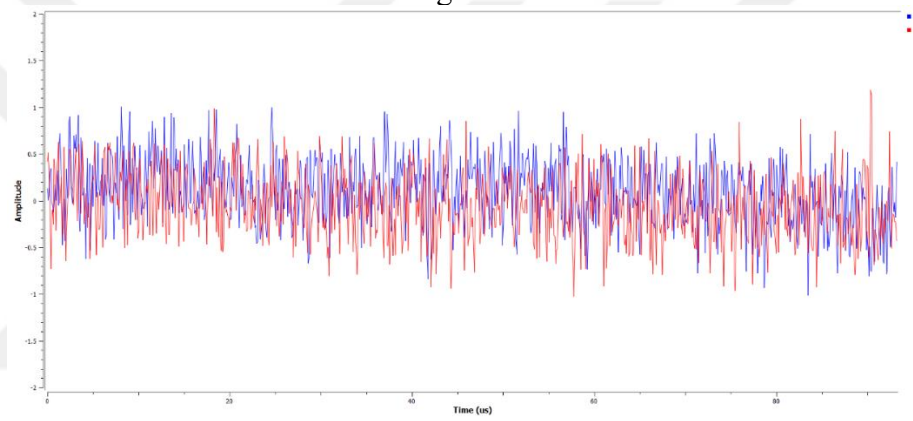
Şekil 7-22 Throttle sonrası QPSK modülasyonuna sahip sinyalin zaman alanı gösterim

#### 7.4.2 OFDM

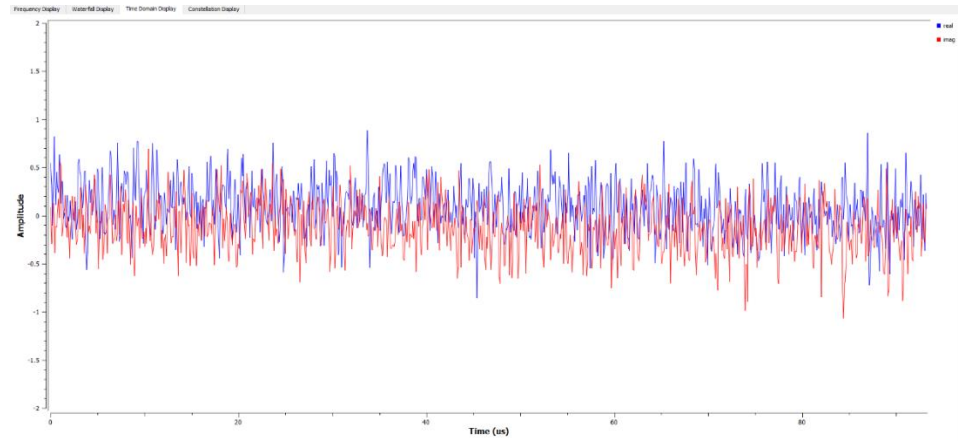
Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25’te, OFDM demodülasyonunun ardından elde edilen sinyalin daha yapıklı ve düzenli bir form aldığı görülmektedir. Bu durum, alt taşıyıcılardan gelen verilerin başarıyla ayrıldığını ve OFDM sembollerinin doğru şekilde senkronize edildiğini göstermektedir. Modülasyon şeması hâlâ QPSK, 16-QAM veya 64-QAM gibi yüksek seviyeli teknikler olsa da sinyalin bu daha temiz görünümü, demodülasyon işleminin başarıyla gerçekleştiğini doğrulamaktadır.



Şekil 7-23 64-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin zaman alanı gösterimi



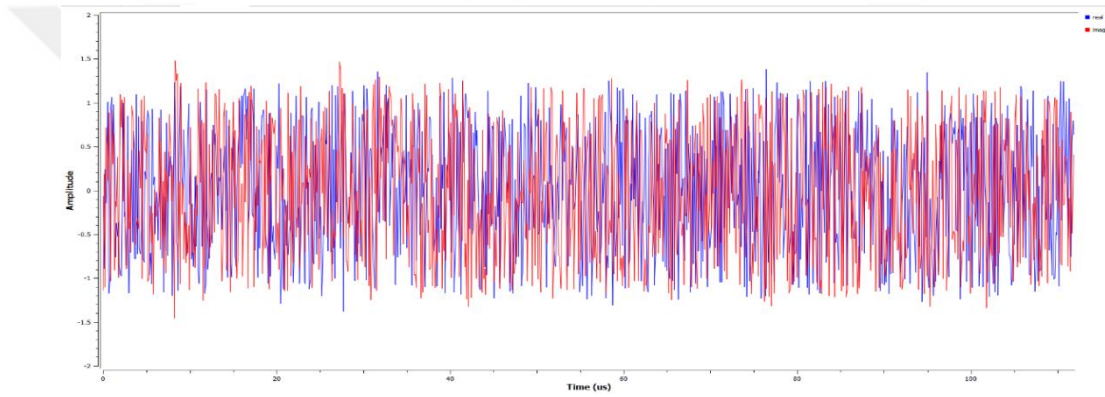
Şekil 7-24 16-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin zaman alanı gösterimi



Şekil 7-25 QPSK ile modüle edilmiş ofdm alım bloğundan geçen sinyalin zaman alanı gösterimi

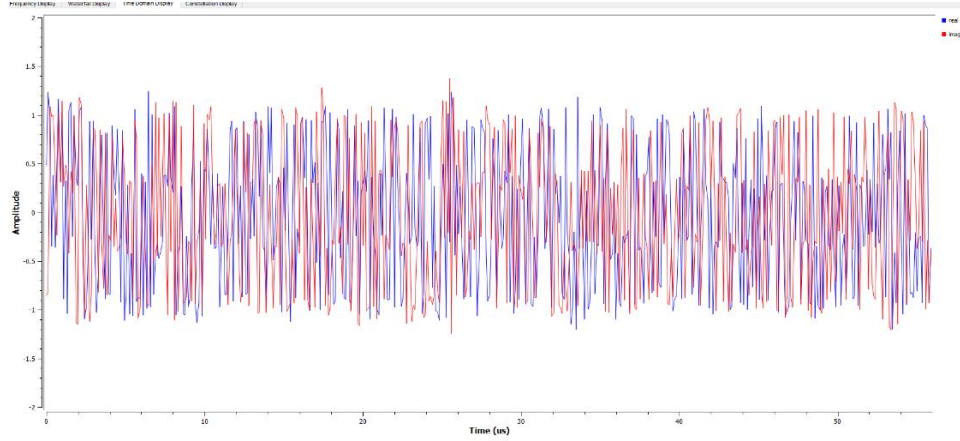
### 7.4.3 Demodülasyon

Şekil 26, 64-QAM modülasyonuna ait temel bant sinyalinin zaman alanındaki yoğun ve karmaşık yapısını ortaya koyar. Bu tür modülasyon, yüksek veri kapasitesi sağlasa da gürültüye karşı daha duyarlıdır. Ancak, otomatik kazanç kontrolü (AGC) ile sinyal seviyelerinin dengede tutulduğu görülmektedir. Noktaların çoğu ideal konumlara oldukça yakındır; bu da demodülasyon sürecinin başarılı geçtiğine işaret eder.



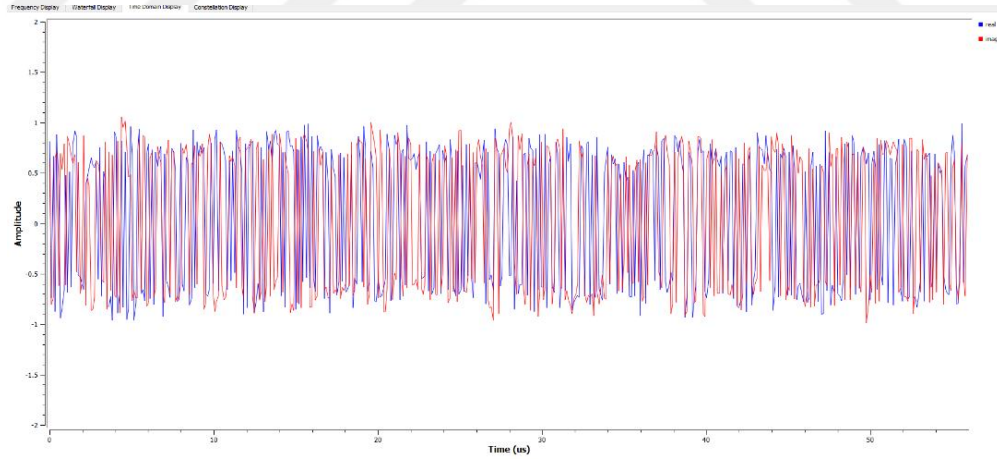
Şekil 7-26 64-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki zaman alanı gösterimi

Şekil 27, demodüle edilmiş temel bant sinyali, genlik ve fazın farklı kombinasyonlarını temsil eden 16 takımyıldız noktasını göstermektedir. Küçük gürültü ve sembol hatalarına rağmen, noktalar iyi ayrılmıştır, bu da başarılı bir demodülasyon ve iletilen verinin geri kazanımını göstermektedir.



Şekil 7-27 16-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki zaman alanı

Şekil 28, son aşamada, temel bant sinyali dört farklı faz durumunu göstermektedir. Otomatik kazanç kontrolü nedeniyle genlik stabildir ve sembol girişimi düşüktür. Faz noktaları arasındaki net ayrım, başarılı QPSK demodülasyonunu doğrulamaktadır.



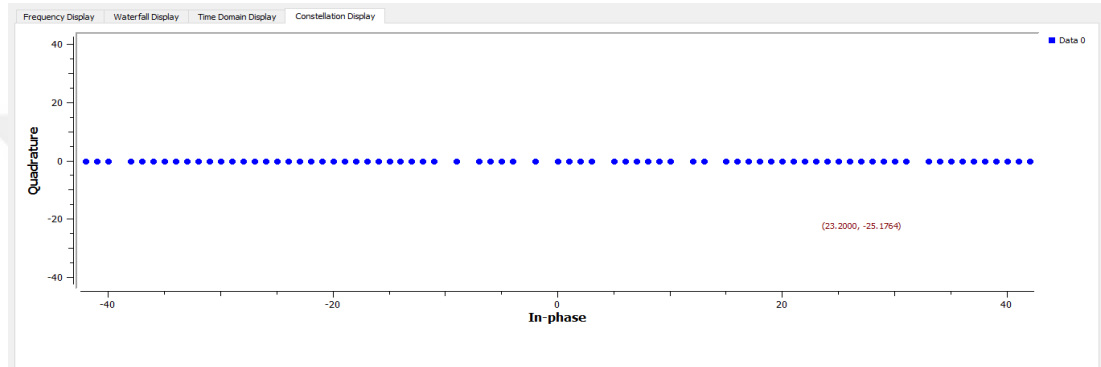
Şekil 7-28 QPSK ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki zaman alanı gösterimi

## 7.5 DVB-T İletim Zincirinde Takımyıldız (Constellation) Alanı Sinyal Analizi

DVB-T iletim zincirinde takımyıldız (constellation) alanı sinyal analizi yapılırken kullanılan blokların tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

### 7.5.1 Kaynak bloğu

Şekil 29, File Source bloğunun çıktısını (orijinal MPEG-TS verisi) göstermektedir. Veri hâlâ işlenmemiş olduğu için, noktalar rastgele dağılmıştır ve belirgin bir desen yoktur. Bu aşamada, modülasyon yoktur, sadece kodlama veya sembol eşlemesinden önceki dijital baytlar vardır.

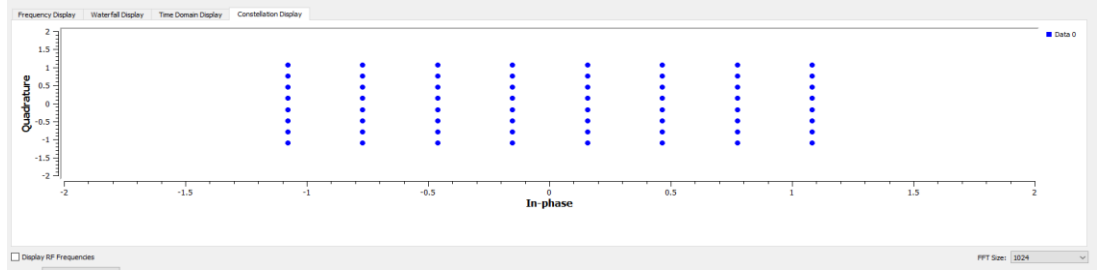


Şekil 7-29 Dosya kaynağından gelen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi

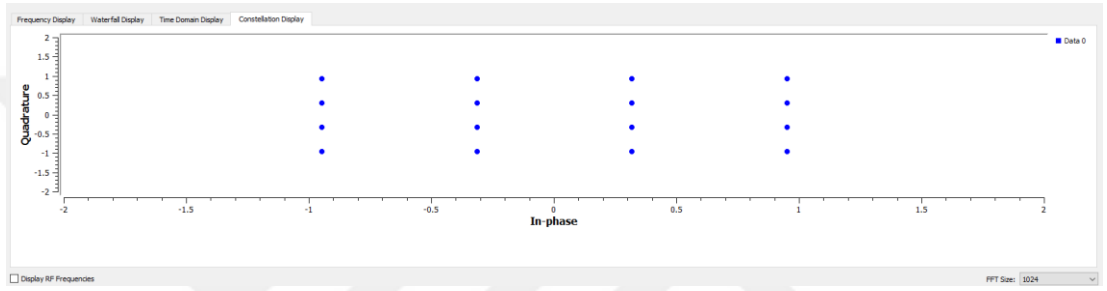
File Source bloğundan gelen sinyalin tüm modülasyon şemaları için aynı görüldüğünü belirtmek önemlidir. Çünkü bu giriş, farklı modülasyon türleri (QPSK, 16-QAM veya 64-QAM gibi) arasında geçiş yaparken değişmemektedir. Bu nedenle, farklı takımyıldızları analiz ederken tekrar tartışmaya gerek yoktur.

### 7.5.2 PRE-OFDM Bloğu

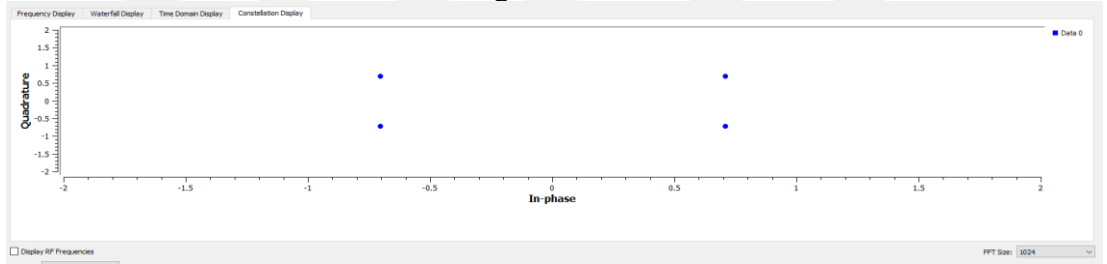
Şekil 30, Şekil 31 ve Şekil 32, veri kanal kodlaması, interleaving ve eşleme işlemlerinden geçtikten sonra, DVB-T Map bloğu bitleri seçilen modülasyon şemasına göre (QPSK, 16-QAM veya 64-QAM) karmaşık sembollere dönüştürmektedir. Modülasyon bu aşamada gerçekleşmektedir, dijital bitler sinyal noktalarına dönüştürülmektedir. Takımyıldız diyagramı, beklenen sembol konumlarıyla eşleşen net nokta gruplarını göstermektedir ve bit akışının doğru şekilde modüle edildiğini doğrulamaktadır.



Şekil 7-30 64-QAM modülasyonu öncesi sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



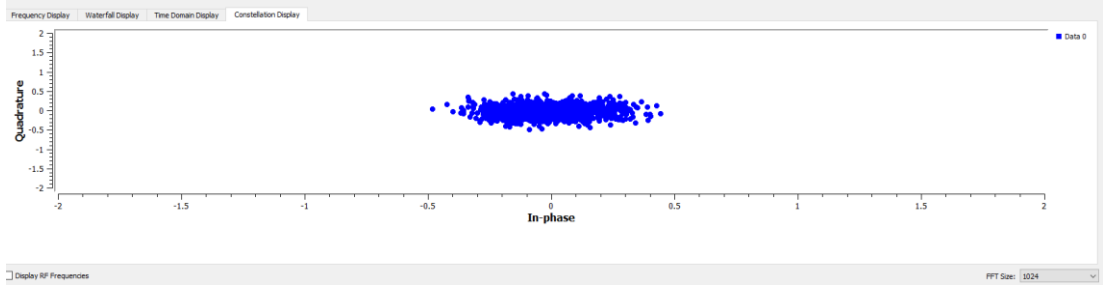
Şekil 7-31 16-QAM modülasyonu öncesi sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



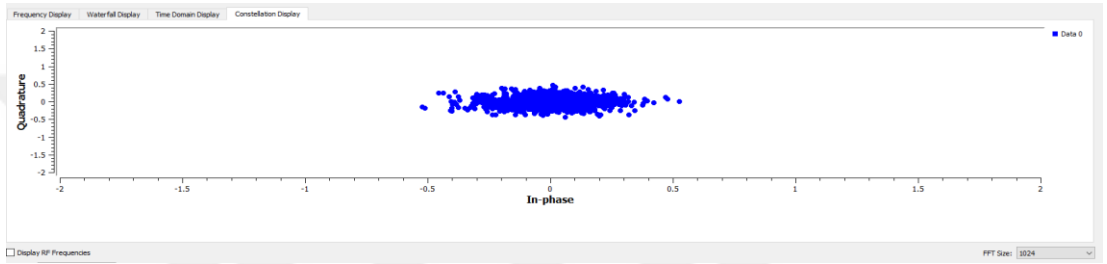
Şekil 7-32 QPSK modülasyonu öncesi sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi

### 7.5.3 POST-OFDM Bloğu

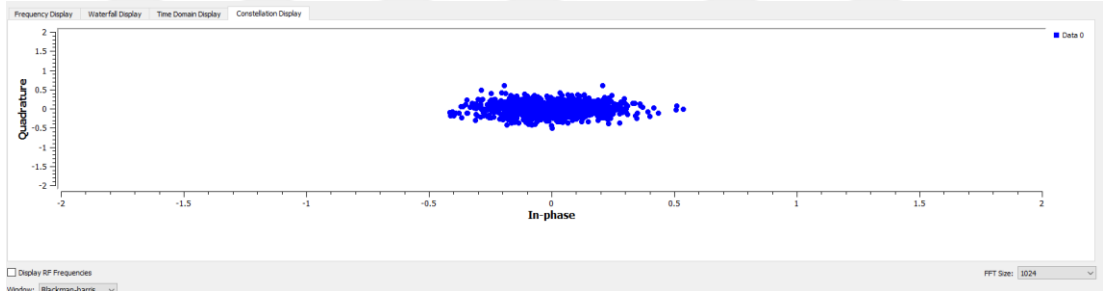
Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35, Sinyal OFDM işleminden (IFFT ve çevrimsel önek eklenmesi) geçtikten sonra, takımyıldız diyagramı dramatik şekilde değişmektedir. Orijinal modüle edilmiş semboller (QPSK, 16-QAM veya 64-QAM) bir zamanlar net, ayrılmış noktalar gösterirken, post-OFDM takımyıldızı dağınık görünmektedir. Bu, OFDM'nin birçok alt taşıyıcıyı birleştirip sembollerini tek bir dalga formunda karıştırmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7-33 Post-OFDM 64-QAM sinyalinin takımyıldız (constellation) alanındaki



Şekil 7-34 Post-OFDM 16-QAM sinyalinin takımyıldız (constellation) alanındaki değişimi



Şekil 7-35 Post-OFDM QPSK sinyalinin takımyıldız (constellation) alanındaki değişimi

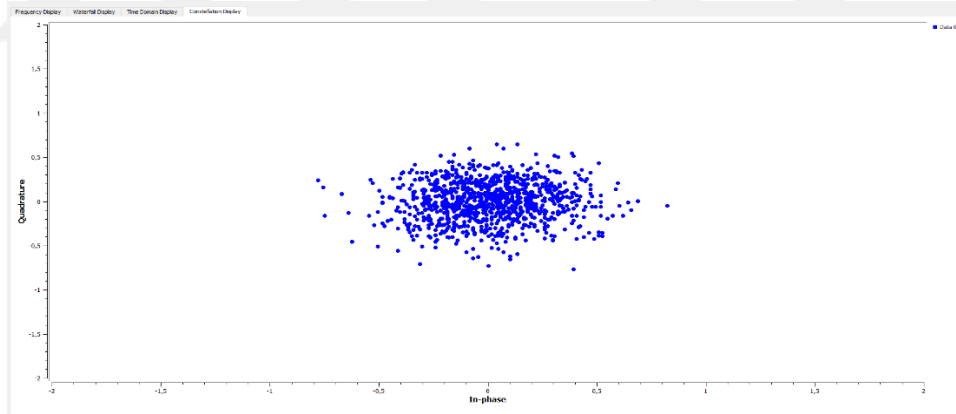
Sinyal yayılmış görünse bile, veri kaybolmamaktadır. Bu OFDM'nin gerçek dünya iletim sorunlarıyla başa çıkmak için sinyali böyle hazırlamasıdır. Daha sonra, alıcı demodülasyon sırasında ters işlemi yapmaktadır. Alt taşıyıcıları ayırmak için FFT kullanmaktadır ve sonra orijinal sembolleri geri almak için eşitleme uygulamaktadır.

## 7.6 DVB-T ALIM ZİNCİRİNDE TAKIMYILDIZ (CONSTELLATION) ALANI SİNYAL ANALİZİ

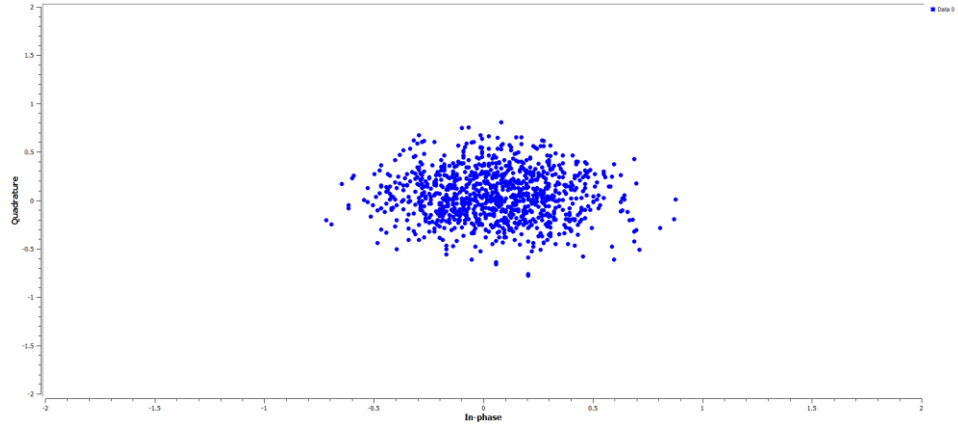
DVB-T alım zincirinde takımyıldız (constellation) alanı sinyal analizi yapılırken kullanılan blokların tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

### 7.6.1 Throttle Bloğu

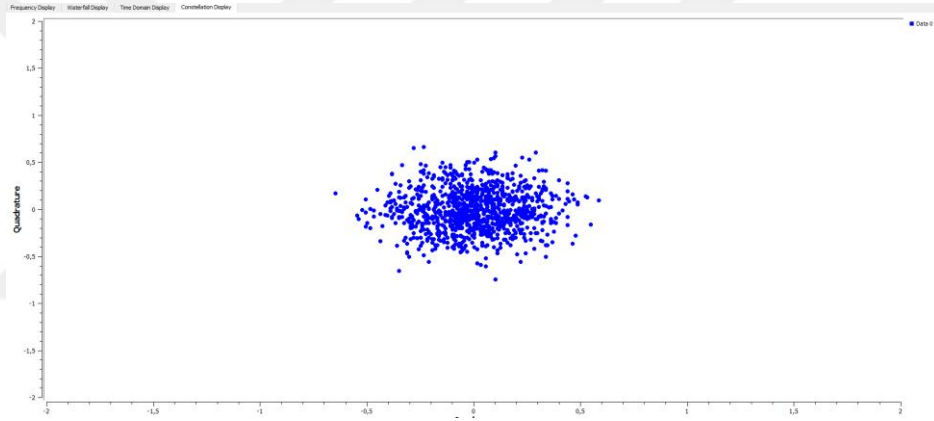
Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38, HackRF'den alınan ham IQ örneklerini, herhangi bir senkronizasyondan önce göstermektedir. Sinyal hâlâ geniş bant zaman domenli OFDM formundadır ve frekans domenine dönüştürülmemiştir, bu yüzden takımyıldızı dağınık noktalardan oluşan bir bulut gibi görünmektedir. Görünür bir yapı yoktur çünkü veri, birden fazla üst üste binen alt taşıyıcıyı ve ortamdan gelen gürültüyü içermektedir.



Şekil 7-36 Throttle sonrası 64-QAM modülasyonuna sahip sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



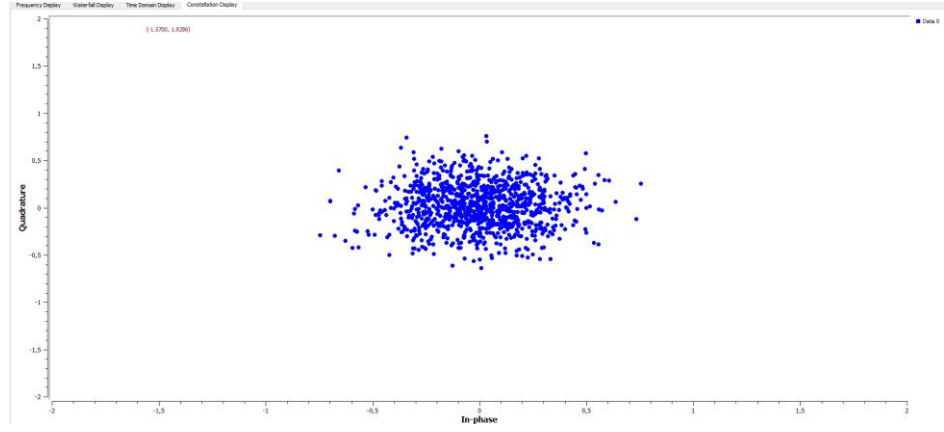
Şekil 7-37 Throttle sonrası 16-QAM modülasyonuna sahip sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



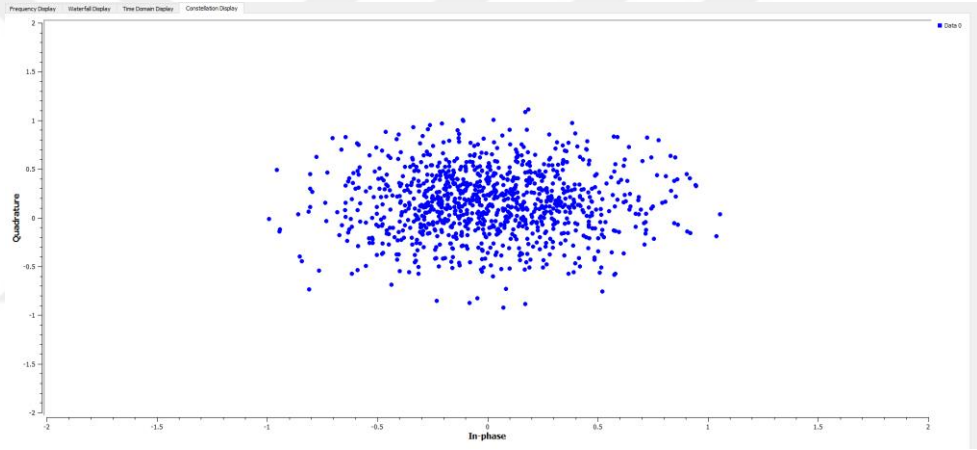
Şekil 7-38 Throttle sonrası QPSK modülasyonuna sahip sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi

## 7.6.2 OFDM

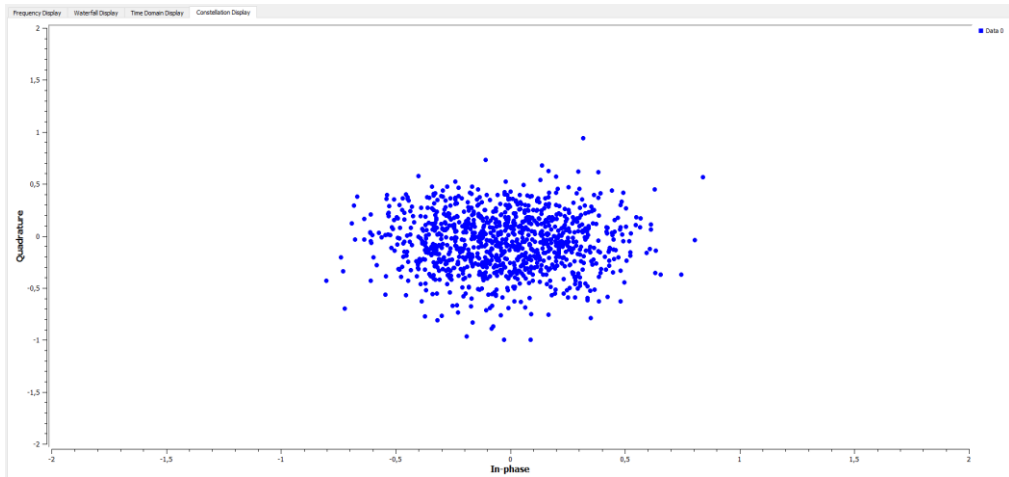
Şekil 39, Şekil 40 ve Şekil 41, çevrimsel önek çıkarımı ve zaman hizalamasından sonra ama FFT'nin sinyali frekans domenine dönüştürmesinden önceki durumu yakalamaktadır. Bu aşamada, sinyal kısmen senkronizedir, bu yüzden daha önce görülen rastgele bulut biraz küçülmeye başlamaktadır. Ancak, veri hâlâ zaman domenindedir ve alt taşıyıcılara ayrılmamıştır, bu yüzden noktalar hâlâ bulanık kalmaktadır ve net bir QAM yapısı görülmemektedir. Bu, senkronizasyonun sinyali iyileştirdiği ama takımyıldız kümelerinin henüz oluşmadığı geçiş aşamasıdır.



Şekil 7-39 64-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



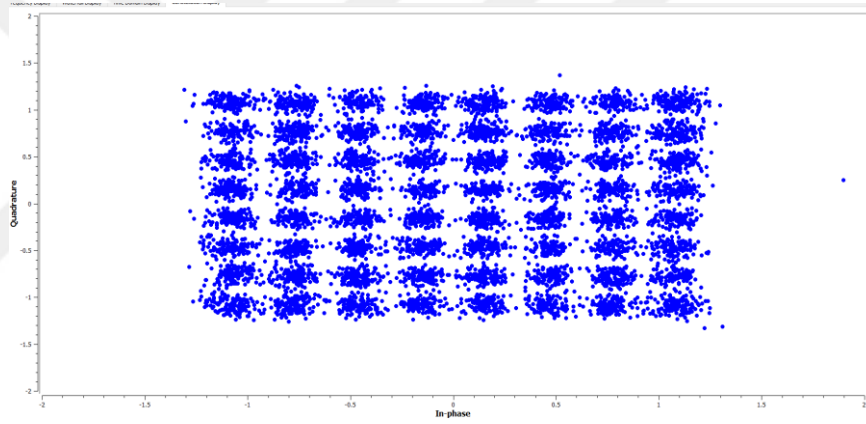
Şekil 7-40 16-QAM ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



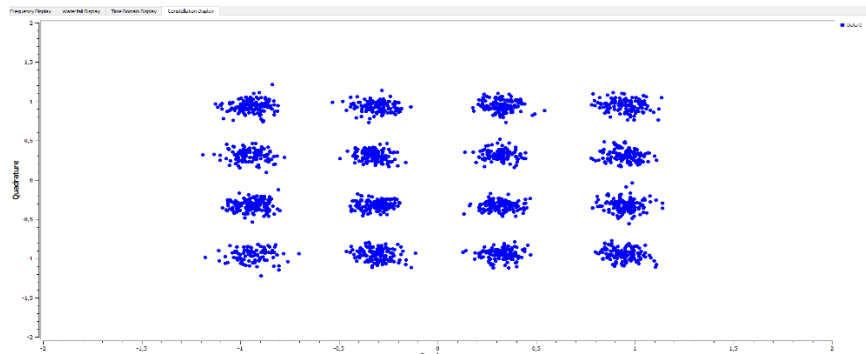
Şekil 7-41 QPSK ile modüle edilmiş OFDM alım bloğundan geçen sinyalin takımyıldız (constellation) alanı gösterimi

### 7.6.3 Demodülasyon

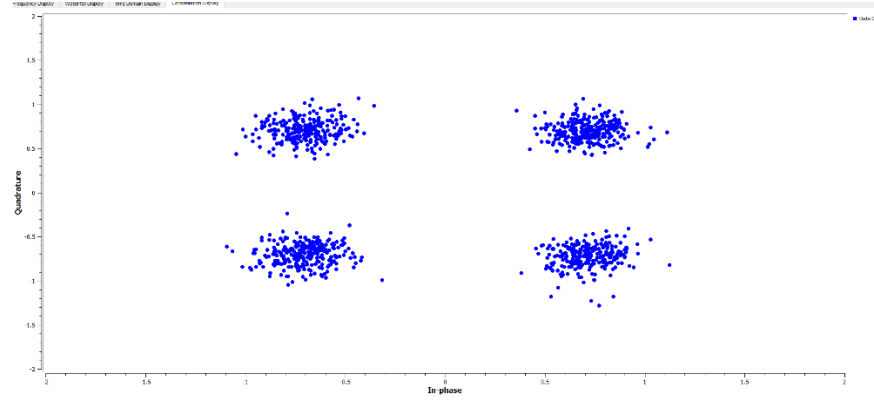
Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44, alınan sembollerin modülasyon formatlarına (QPSK, 16-QAM ve 64-QAM) başarılı şekilde yeniden eşlenmesinden sonraki takımyıldız diyagramlarını göstermektedir. Artık kümeler iyi tanımlanmıştır ve seçilen modülasyon şemasının orijinal formatına uygundur. Her noktanın küçük kümeler hâlinde sıkışması, alıcının sinyalleri doğru şekilde senkronize ettiğinin ve başarılı şekilde geri aldığıının bir göstergesidir. Bu aşama, MPEG-TS akışının doğru şekilde kodunun çözülmesi için anahtar noktadır ve sinyalin temiz şekilde demodüle edildiğini göstermektedir.



Şekil 7-42 64-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



Şekil 7-43 16-QAM ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki takımyıldız (constellation) alanı gösterimi



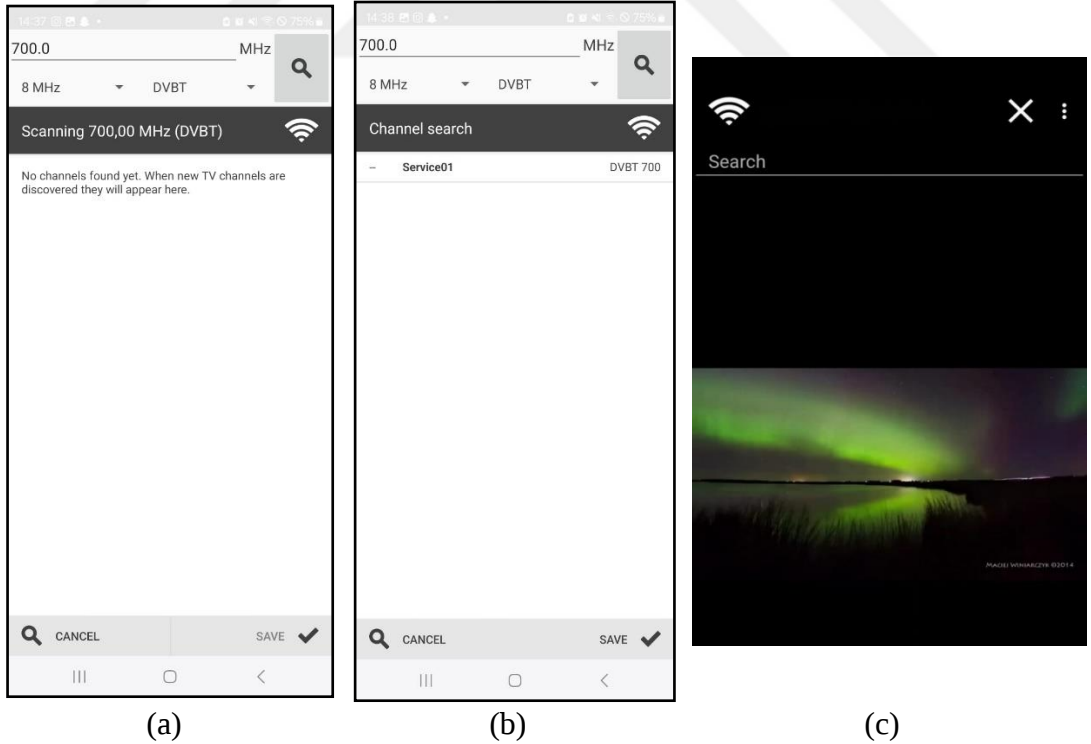
Şekil 7-44 QPSK ile modüle edilmiş sinyalin demodülasyondan sonraki takımyıldız (constellation) alanı gösterimi

## 8. GERÇEK DÜNYA SİNYAL ALIMI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölüm, iki Android tabanlı mobil uygulama olan Aerial TV ve DVB-T Driver kullanılarak iletilen DVB-T sinyalinin gerçek zamanlı testini ve doğrulanmasını göstermektedir. Bu araçlar, DVB-T sinyalini görüntülemek ve iletimin kalitesini doğrulamak amacıyla kullanılmaktadır.

### 8.1 AERIAL TV KULLANARAK DVB-T SİNYALİNİN TARATILMASI VE GÖRÜNTÜLENMESİ

Aerial TV uygulaması, 700.0 MHz frekansında ve 8 MHz bant genişliğinde iletilen DVB-T sinyallerini taramaktadır. Şekil 8-1(a)'daki ekran görüntüsü, uygulamanın bu frekans aralığında arama yaptığı anı göstermektedir.



Şekil 8-1 (a) 700 MHz frekansında DVB-T sinyal tarama ekran görüntüsü (b) tespit edilen DVB-T sinyali (c) iletilen video akışının mobil cihazda görüntülenmesi

Sinyal bulunduktan sonra, Şekil 8-1(b)'de de görüldüğü gibi uygulama bulunan kanalı göstermektedir. Kanal seçiminin ardından, iletilen video akışı Şekil 8-1(c)'de gösterildiği üzere mobil cihaz üzerinde başarıyla görüntülenmiştir.

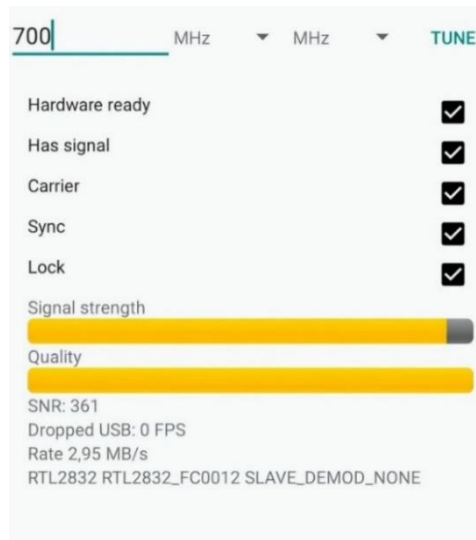
## 8.2 DVDVB-T DRIVER UYGULAMASI KULLANARAK SİNYAL KALİTESİ DEĞERLENDİRMESİ

DVB-T Driver uygulaması, sinyal-gürültü oranı (SNR), sinyal gücü ve sinyal kalitesinin genel bir görünümünü sağlayarak alınan sinyalin performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ancak, uygulamanın kodunu inceledikten sonra, SNR değerlerinin 10 ile çarpıldığı fark edilmektedir. Gerçek SNR değerlerinin hesaplanması için Denklem (8.1) kullanılmaktadır.

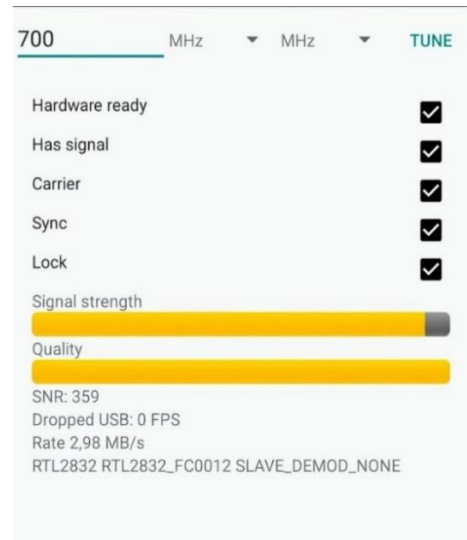
$$GERÇEK SNR = \frac{GÖSTERİLEN SNR}{10} \quad (8.1)$$

### 8.2.1 QPSK Modülasyonu

QPSK parametreleri, SNR değerlerine göre değişmektedir. SNR, 361 ve SNR 359 değerleri için parametrik değerler sırasıyla Şekil 8-2(a) ve (b)'de verilmiştir.



(a)

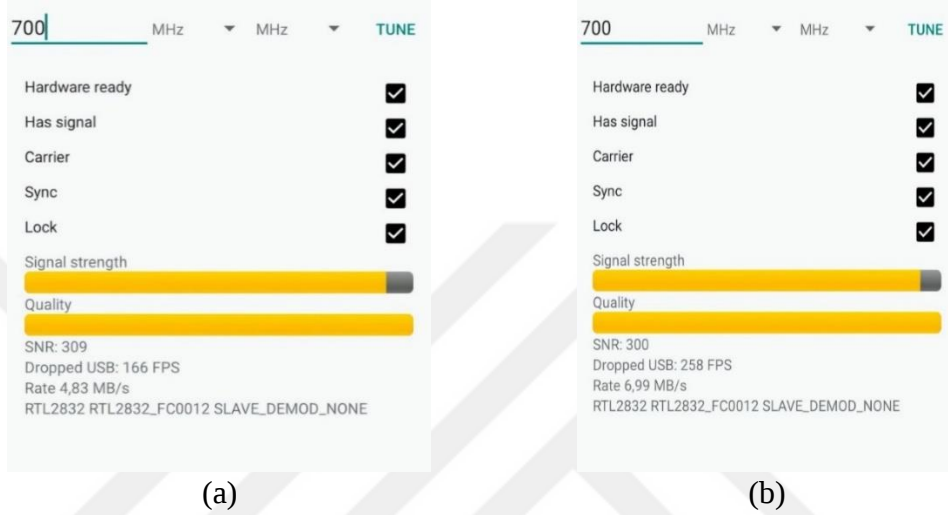


(b)

Şekil 8-2 (a) SNR 361 için ve (b) SNR 359 için QPSK parametreleri

### 8.2.2 16-QAM Modülasyonu

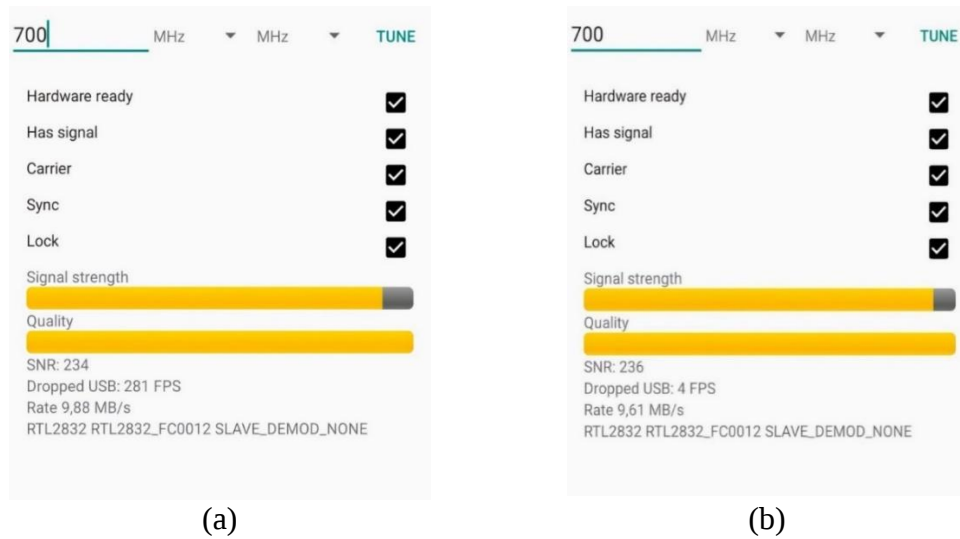
Modülasyon tekniği olarak 16-QAM seçildiğinde, SNR 309 ve SNR 300 için elde edilen değerler Şekil 8-3(a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 8-3 (a) SNR 309 için ve (b) SNR 300 için 16-QAM parametreleri

### 8.2.3 64-QAM Modülasyonu

Modülasyon tekniği olarak 64-QAM seçildiğinde, SNR 234 ve SNR 236 için elde edilen değerler Şekil 8-4(a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 8-4 (a) SNR 234 için ve (b) SNR 236 için 64-QAM parametreleri

### 8.3 SİNYAL KALİTESİ ANALİZİ (SNR) SONUCU

Sinyalin analizinden sonra, sinyal gücünün üç modülasyonda da aynı kaldığı, SNR değerlerinin ise kullanılan modülasyon şemalarına (QPSK, 16-QAM ve 64-QAM) göre değiştiği sonucuna varılmaktadır. Bu beklenen bir durumdur çünkü 64-QAM gibi daha yüksek dereceli modülasyonlar gürültüye daha duyarlıdır ve bu da SNR değerlerinin diğer modülasyon şemalarından daha düşük olmasını sağlamaktadır.

Tablo 8-1 Modülasyon şemalarına göre SNR, sembol hızı ve veri hızı

| Modülasyon | SNR (dB)    | USB Kare Hızı | Veri Hızı (MB/s) |
|------------|-------------|---------------|------------------|
| QPSK       | 35.9 - 36.1 | 0 FPS         | 2.98 - 2.95      |
| 16-QAM     | 30.0 - 30.9 | 166 - 258 FPS | 4.83 - 6.99      |
| 64-QAM     | 23.4 - 23.6 | 4 - 281 FPS   | 9.61 - 9.88      |

Tablo 8-1’de verilen sonuçlar analiz edildiğinde;

- QPSK en yüksek sinyal kalitesini (36,1 dB) ve en yavaş veri hızını (2,98 MB/s) vermektedir. Bu da onu yalnızca kararlı bağlantının hızdan daha önemli olduğu durumlarda iyi bir seçim haline getirmektedir.
- 64QAM en hızlı veri hızını (9,88 MB/s) ve en zayıf sinyal kalitesini (23,6 dB) sağlamaktadır; bu da yalnızca gürültünün olmadığı çok iyi bir iletim ortamında iyi çalışacağı anlamına gelmektedir.
- 16QAM ise orta düzeyde bir sinyal kalitesi (30,9 dB) ve veri hızı (4,83 MB/s) ile ortada yer almaktadır. Bu, hem oldukça güçlü bir sinyale hem de makul bir hıza ihtiyacınız olduğunda iyi bir seçenek haline gelmektedir.

Bu sonuçlar, kablosuz iletişimdeki temel bir kuralı doğrulamaktadır: "Modülasyon karmaşıklığı arttıkça, spektral verimlilik iyileşir, ancak sistem gürültüye ve girişime karşı daha duyarlı hale gelir."

#### 8.4 MATLAB KULLANARAK BER HESAPLAMASI

İletim kalitesini daha da değerlendirmek için, Bit Hata Oranı (BER) MATLAB kullanılarak hesaplanmıştır. BER, gönderilen toplam bit sayısına kıyasla kaç bitin yanlış alındığını ölçmektedir. Dijital iletişimlerde önemli bir performans göstergesidir. Doğrudan karşılaştırma için orijinal bit akışlarına sahip olunmadığından, BER'i DVB-T Driver uygulamasından alınan SNR ölçümlerini kullanarak bulunur.

Her modülasyon türü için, BER 10 dB ile 40 dB arasındaki bir SNR aralığında ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre Şekil 8-5(a)'da 64-QAM'de BER değerinin nispeten yüksek olduğu, Şekil 8-5(b)'de 16-QAM olarak seçildiğinde BER değerinin düştüğü ve Şekil 8-5(c)'de de gösterildiği gibi QPSK olarak seçildiğinde BER değerinin sıfır olduğu görülmektedir.

```
64-QAM BER values:
SNR = 22.0 dB -> BER = 1.7531e-03
SNR = 23.0 dB -> BER = 5.9889e-04
SNR = 24.0 dB -> BER = 1.5842e-04
SNR = 25.0 dB -> BER = 3.0401e-05
SNR = 26.0 dB -> BER = 3.8985e-06
SNR = 27.0 dB -> BER = 3.0122e-07
SNR = 28.0 dB -> BER = 1.2309e-08
```

(a)

```
16-QAM BER values:
SNR = 28.0 dB -> BER = 1.0470e-29
SNR = 29.0 dB -> BER = 7.5081e-37
SNR = 30.0 dB -> BER = 7.8318e-46
SNR = 31.0 dB -> BER = 3.9748e-57
SNR = 32.0 dB -> BER = 2.4721e-71
SNR = 33.0 dB -> BER = 3.3207e-89
SNR = 34.0 dB -> BER = 1.0833e-111
```

(b)

```
QPSK BER values:
SNR = 34.0 dB -> BER = 0.0000e+00
SNR = 35.0 dB -> BER = 0.0000e+00
SNR = 36.0 dB -> BER = 0.0000e+00
SNR = 37.0 dB -> BER = 0.0000e+00
SNR = 38.0 dB -> BER = 0.0000e+00
SNR = 39.0 dB -> BER = 0.0000e+00
SNR = 40.0 dB -> BER = 0.0000e+00
```

(c)

Şekil 8-5 (a) 64-QAM için BER değerleri (b) 16-QAM için BER değerleri (c) QPSK için BER değerleri

## 9. SONUÇLAR

Bu tezinin odak noktası, Yazılım tanımlı Radyo kullanarak çalışan esnek bir dijital veri iletim sistemini uygulamak, tasarlamak ve değerlendirmek ve sistemin pratik tarafıyla ilgili uygulamalı deneyim kazanmaktır. Ayrıca farklı modülasyon türlerinin sinyal kalitesini nasıl etkilediğini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır, ve bu amaçla 2k ve 8k FFT boyutları kullanılarak çeşitli iletim senaryoları test edilmiştir.

Tez üç aşamadan oluşmaktadır: İlk aşama, hem Yazılım tanımlı Radyo iletişim sisteminin hem de dijital video yayın TV'sinin arka plan bilgilerini elde etmektir.

İkinci aşama, GNU Radyo'da hem DVB-T vericisinin hem de alıcısının uygulanmasıdır. Son olarak üçüncü aşama kullanılan üç modülasyon türünü test etmek ve analiz etmektir.

Başlamak için, QPSK, 16-QAM ve 64-QAM gibi modülasyon tekniklerine odaklanarak daha önce yayınlanmış literatürden ve akademik makalelerden bilgi toplayarak SDR, OFDM ve DVB-T teknolojisinin ayrıntılı bir çalışması yürütülmüştür. DVB-T sistemlerinin teknik parametreleri ve standartları da pratik kısmı yönlendirmek için analiz edilmiştir.

Uygulama aşamasında üç cihaz kullanılmıştır: İletim için BladeRF x40, ana alıcı olarak RTL-SDR ve alternatif alıcı ve spektrum analizörü olarak HackRF One cihazıdır. DVB-T iletim ve alım sistemini oluşturmak ve tasarlamak için kullanılan ana yazılım GNU Radio yazılımıdır. Kullanılan diğer iki yazılım aracı ise: İletilen videoyu görüntülemek için Aerial TV ve alınan sinyalin performansını değerlendirmek için DVB-T Driver'dır.

Başarılı bir uygulama sonrasında, üç modülasyon türü test edilmiştir: QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Hangisinin en iyi sonuçları verdiğini görmek için, DVB-T DVB-T Driver'dan sinyal gücü, SNR (Sinyal-Gürültü Oranı) ve sinyal kalitesi gibi ölçümler toplanmıştır. Sonuçların analizi şunu göstermiştir:

QPSK en yüksek SNR değerlerine sahiptir, bu da en iyi görüntü kalitesi anlamına gelmektedir.

64-QAM en düşük SNR değerlerini göstermektedir, bu da gürültüden en çok etkilenen olduğu anlamına gelmektedir.

16-QAM, sinyal kalitesi ve veri hızı arasında bir denge sunarak orta düzeyde SNR değerleri sunmuştur.

BER, test sırasında ölçülen SNR değerlerine dayanarak MATLAB kullanılarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, bu tez SDR sistemleri ve DVB-T teknolojisi hakkında daha iyi bir anlayış sağlamaktadır ve farklı modülasyon tekniklerinin sinyal kalitesini nasıl etkilediğini göstermektedir. Sinyal iletimi, modülasyon ve sistem testinde pratik deneyim sağlamaktadır. Bu çalışma, dijital yayıncılık ve SDR tabanlı iletişim alanında daha ileri projeler için bir temel oluşturmaktadır

## KAYNAKLAR

- [1] A.R.R.L, *The Radio Amateur's Handbook*. Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldradiohistory.com/BOOKSHELF-ARRL/Technology/ARRL/The-Radio-Amateur's-Handbook-ARRL-1984.pdf>
- [2] "Ulrich Rohde, N1UL, Recognized for Pioneering Work on SDR." Accessed: Jul. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.arrl.org/news/ulrich-rohde-n1ul-recognized-for-pioneering-work-on-sdr>
- [3] Markus. Dillinger, Kambiz. Madani, and Nancy. Alonistioti, "Software defined radio : architectures, systems, and functions," p. 416, 2003.
- [4] I. Hatai and I. Chakrabarti, "A New High-Performance Digital FM Modulator and Demodulator for Software-Defined Radio and Its FPGA Implementation," *International Journal of Reconfigurable Computing*, vol. 2011, no. 1, p. 342532, Jan. 2011, doi: 10.1155/2011/342532.
- [5] U. Raymond I. Lackey and Donald W, "Speakeasy: The Military Software Radio IEEE Xplore Full-Text PDF:," 1995. Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=392998>
- [6] S. Dlp, F. Collins, and D. Leenaerts, "Wide band RF CMOS circuit design techniques design techniques".
- [7] H. Zamat and C. R. Nassar, "Introducing software defined radio to 4G wireless: Necessity, advantage, and impediment," *Journal of Communications and Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 344–349, 2002, doi: 10.1109/JCN.2002.6596658.
- [8] V. K. Garg, "Fourth Generation Systems and New Wireless Technologies," *Wireless Communications & Networking*, pp. 23-1-23–22, 2007, doi: 10.1016/B978-012373580-5/50057-0.
- [9] N. Yoza-Mitsuishi, Y. Ma, and J. Coder, "An SDR-Based Performance Measurement of LTE and WLAN Coexistence," *IEEE International*

- Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, vol. 2022-September, pp. 807–812, 2022, doi: 10.1109/PIMRC54779.2022.9977746.
- [10] A. Ghosh and R. Ratasuk, “Essentials of LTE and LTE-A,” *Essentials of LTE and LTE-A*, vol. 9780521768702, pp. 1–249, Jan. 2011, doi: 10.1017/CBO9780511997082.
- [11] H. Liu, Z. Geng, X. Wei, K. Zheng, and R. Xu, “Design and implementation of a LTE-WiFi aggregation system based on SDR,” *2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications, ICC3 2017*, vol. 2018-January, pp. 310–314, Jul. 2017, doi: 10.1109/COMPCOMM.2017.8322562.
- [12] M. Salah, A. H. Zekry, and M. Kamel, “An efficient FPGA implementation of OFDM physical layer for SDR-based applications,” *2014 10th International Computer Engineering Conference: Today Information Society What’s Next?, ICENCO 2014*, pp. 145–148, 2014, doi: 10.1109/ICENCO.2014.7050447.
- [13] “2001 Third IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications : (SPAWC’01): March 20-23, 2001, Taoyuan, Taiwan, R.O.C.,” p. 398, 2001.
- [14] S. S. Jeng, H. C. Lin, J. M. Lin, C. H. Yin, and C. W. Tsung, “Design of multimode modulator utilizing SDR technology for DVB-T/wireless communication systems,” *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting 2008, Broadband Multimedia Symposium 2008, BMSB*, 2008, doi: 10.1109/ISBMSB.2008.4536682.
- [15] N. B. Truong and C. Yu, “Investigating latency in GNU Software Radio with USRP embedded series SDR platform,” *Proceedings - 2013 8th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, BWCCA 2013*, pp. 9–14, 2013, doi: 10.1109/BWCCA.2013.11.
- [16] Y. Manasa, D. Dharun, U. Vamshi, and M. Gowtham, “Implementation of OFDM Using GNU Radio with HackRF One and RTL-SDR,” *2024 IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and*

- Intelligent Communication Systems, ICITEICS 2024*, 2024, doi: 10.1109/ICITEICS61368.2024.10625021.
- [17] V. Pellegrini, G. Bacci, and M. Luise, “Soft-dvb: A fully-software gnuradio-based etsi dvb-t modulator”, Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228961469>
  - [18] “GitHub - BogdanDIA/gr-dvbt: DVB-T implementation in gnuradio.” Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/BogdanDIA/gr-dvbt>
  - [19] “gr-dvbt | Radio Adventures.” Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://yo3iiu.ro/blog/?cat=4>
  - [20] “(PDF) A real-time PC-based software radio DVB-T receiver.” Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/290764277\\_A\\_real-time\\_PC-based\\_software\\_radio\\_DVB-T\\_receiver](https://www.researchgate.net/publication/290764277_A_real-time_PC-based_software_radio_DVB-T_receiver)
  - [21] “DVB-T/DVB-T2 Transmission to a TV with Gnu Radio - Mango’s Blog - Ilya\_MZP.” Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: <https://mango.vg/post/8>
  - [22] V. Grigoriev, A. Komissarov, K. Ryutin, and G. Fokin, “Software-Defined Radio Wireless Communication Technology Design. LibreSDR Board Validation,” *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2024 - Conference Proceedings*, 2024, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496728.
  - [23] R. Liu, Y. Feng, S. Zhu, Y. Tian, and M. Chang, “Research on the Power IoT System based on FSK Modulation,” *ITOEC 2023 - IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*, pp. 2076–2080, 2023, doi: 10.1109/ITOEC57671.2023.10291242.
  - [24] “What is GNU Radio? - GNU Radio.” Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/What\\_is\\_GNU\\_Radio%3F](https://wiki.gnuradio.org/index.php/What_is_GNU_Radio%3F)

- [25] “SDRangel – Open-source TX & RX Software Defined Radio.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.sdrangel.org/>
- [26] “Welcome to Pothosware.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.pothosware.com/>
- [27] “Software Defined Radio (SDR) Hardware & Kits | Digilent.” Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: [https://digilent.com/shop/about-sdr/?srsltid=AfmBOoqYVvk\\_ss42O2Q8Vgz-YaZ5eL1C1NiXzWdy2wkZ8qnEKZr9KLqj](https://digilent.com/shop/about-sdr/?srsltid=AfmBOoqYVvk_ss42O2Q8Vgz-YaZ5eL1C1NiXzWdy2wkZ8qnEKZr9KLqj)
- [28] “HackRF One - Great Scott Gadgets.” Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>
- [29] “RTL2832U.” Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.realtek.com/Product/Index?id=615>
- [30] “bladeRF x40 - Nuand.” Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.nuand.com/product/bladerf-x40/>
- [31] “Software Defined Radio (SDR) for Hackers: Choosing the Best Hardware for SDR - Hackers Arise.” Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: <https://hackers-arise.com/software-defined-radio-sdr-for-hackers-choosing-the-best-hardware-for-sdr/>
- [32] “SDR (Software Defined Radio): Advantages and Disadvantages | RF Wireless World.” Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/rf-basics/sdr-advantages-disadvantages>
- [33] “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television European Broadcasting Union Union Européenne de Radio-Télévision,” 2009, Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: [http://portal.etsi.org/chairecor/ETSI\\_support.asp](http://portal.etsi.org/chairecor/ETSI_support.asp)
- [34] L. Polák and T. Kratochvíl, “DVB-T and DVB-T2 performance in fixed terrestrial TV channels,” *2012 35th International Conference on*

*Telecommunications and Signal Processing, TSP 2012 - Proceedings*, pp. 725–729, 2012, doi: 10.1109/TSP.2012.6256392.

- [35] “DTT Deployment Data - DVB.” Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://dvb.org/solutions/dtt-deployment-data/>
- [36] JTC, “EN 302 755 - V1.2.1 - Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2),” 2010, Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: [http://portal.etsi.org/chairecor/ETSI\\_support.asp](http://portal.etsi.org/chairecor/ETSI_support.asp)
- [37] “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television European Broadcasting Union Union Européenne de Radio-Télévision,” 2004, Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <http://portal.etsi.org/tb/status/status.asp>
- [38] “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television EBU UER European Broadcasting Union Union Européenne de Radio-Télévision,” 1997, Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <http://www.etsi.fr>
- [39] “EUROPEAN ETS 300 401 TELECOMMUNICATION STANDARD Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers ETSI,” 1995.
- [40] S. G. Pasha and V. V. Kohir, “OFDM based DVB-T system implementation using MATLAB and HDL coder,” *Proceedings of the International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2017*, vol. 2018-January, pp. 256–261, Jul. 2017, doi: 10.1109/ICCMC.2017.8282686.
- [41] S. B. Weinstein, “The history of orthogonal frequency-division multiplexing,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 26–35, Nov. 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5307460.
- [42] R. W. Chang, “Synthesis of band-limited orthogonal signals for multi-channel data transmission,” *Bell System Technical Journal*, vol. 45, no. 10, pp. 1775–1796, 1966, doi: 10.1002/j.1538-7305.1966.tb02435.x.

- [43] S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 628–634, 1971, doi: 10.1109/TCOM.1971.1090705.
- [44] "• Brief History • Why use COFDM ? • Importance of Orthogonality-Allows Coherent Demodulation • Importance of Guard Interval (GI)-Used to mitigate ISI".
- [45] "COFDM • A brief history • COFDM principles • COFDM transmission sequence • Countering against echoes and reflections • DVB-T framing structure • DVB-T variable parameters".
- [46] "DVB-T - ENENSYS." Accessed: Jun. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.enensys.com/technologies/dvb-t/>
- [47] "Specifications - DVB." Accessed: Jun. 20, 2025. [Online]. Available: <https://dvb.org/specifications/>
- [48] "Decoding and reconstruction of reference DVB-T signal in passive radar systems | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5547418>
- [49] T. Kratochvíl and R. Štukavec, "Hierarchical modulation in DVB-T/H mobile TV transmission over fading channels," *2008 International Symposium on Information Theory and its Applications, ISITA2008*, 2008, doi: 10.1109/ISITA.2008.4895400.
- [50] T. P. Zieliński, "Modern Wireless Digital Communications: 4G and 5G Mobile Internet Access (with Grzegorz Cisek as a co-author)," *Textbooks in Telecommunications Engineering*, vol. Part F1370, pp. 801–853, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-49256-4\_24.
- [51] "Handling Flowgraphs - GNU Radio." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/Handling\\_Flowgraphs](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Handling_Flowgraphs)

- [52] E. Standard, “EN 300 744 - V1.6.2 - Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television,” 2015, Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <http://portal.etsi.org/tb/status/status.asp>
- [53] Y. Manasa, D. Dharun, U. Vamshi, and M. Gowtham, “Implementation of OFDM Using GNU Radio with HackRF One and RTL-SDR,” *2024 IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and Intelligent Communication Systems, ICITEICS 2024*, 2024, doi: 10.1109/ICITEICS61368.2024.10625021.

| Eğitim Bilgileri |                                         |
|------------------|-----------------------------------------|
| Lisans           |                                         |
| Üniversite       | Bandırma Onyedli Eylül                  |
| Fakülte          | Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi |
| Bölümü           | Elektrik-Elektronik Mühendisliği        |
| Mezuniyet Yılı   | 2023                                    |

| Yüksek Lisans |                                  |
|---------------|----------------------------------|
| Üniversite    | Bandırma Onyedli Eylül           |
| Enstitü Adı   | Lisansüstü Eğitim Enstitüsü      |
| Anabilim Dalı | Elektrik-Elektronik Mühendisliği |
| Programı      | Yüksek Lisans Programı           |

| Makale ve Bildiriler                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| İbtihal ALOUCHE, Muhammet Nuri SEYMAN “SDR-Based Adaptive Platform Design for Wireless High-Resolution Video Transmission” KABUL EDİLDİ |