

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OFDM TABANLI TEMEL BANT WIMAX FİZİKSEL KATMAN VERİCİNİN
FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Tansu AKTÜRK

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OFDM TABANLI TEMEL BANT WIMAX FİZİKSEL KATMAN VERİCİNİN
FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Tansu AKTÜRK
(504111302)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mesut Kartal

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111302 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet Tansu AKTÜRK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**OFDM TABANLI TEMEL BANT WIMAX FİZİKSEL KATMAN VERİCİSİNİN FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mesut KARTAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sedef KENT PINAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Aktül KAVAS
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tezin hazırlanması süresince desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, Telekomünikasyon Mühendisliği alanında bana kazandırmış olduğu bilinçten dolayı Doç. Dr. Mesut KARTAL' a sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım. İyi bir eğitim almamda bana hayatım boyunca destek olan aileme, arkadaşlarıma ve emeği geçen değerli hocalarıma da şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2014

Ahmet Tansu Aktürk
(Telekomünikasyon Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	5
İÇİNDEKİLER	7
KISALTMALAR	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Literatür Araştırması	5
2. IEEE 802.16 STANDARDI VE WIMAX.....	9
2.1 IEEE 802.16 Standardının Gelişimi	9
2.2 WIMAX' in Öne Çıkan Özellikleri.....	12
2.3 Gezgin WIMAX Fiziksel Katmanı.....	14
3. DİK FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA (OFDM) YÖNTEMİ.....	19
3.1 OFDM Yönteminin Gelişimi	19
3.2 OFDM Yöntemi ve Özellikleri	21
3.2.1 Tek ve çok taşıyıcılı haberleşme sistemleri ve OFDM	21
3.2.2 OFDM sisteminin özellikleri ve analizi	23
3.2.2.1 Diklik özelliği	23
3.2.2.2 OFDM sinyalinin analizi.....	24
3.2.2.3 OFDM sistemi ve temel kavramları	26
3.2.3 OFDM sisteminin avantaj ve dezavantajları	32
4. WIMAX FİZİKSEL KATMAN VERİCİ TASARIMI.....	35
4.1 MATLAB Üzerinde WIMAX Fiziksel Katman Tasarımı	37
4.1.1 Rastgeleleyici (Randomizer).....	37
4.1.2 Kanal kodlama	38
4.1.3 Serpiştirme (Interleaving)	39
4.1.4 Sembol modülasyonu	40
4.1.5 Pilot ve dataların yerleştirilmesi	41
4.1.6 Pilotların rastgeleleştirilmesi.....	42
4.1.7 Başlama ekinin (preamble) yerleştirilmesi	43
4.1.8 IFFT işlemi ve CP eklenmesi.....	44
4.2 FPGA Üzerinde WIMAX Fiziksel Katman Tasarımı ve Gerçeklenmesi	45
4.3 FPGA Tasarımının Donanım Kartı Üzerinde Gerçeklenmesi.....	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

ADSL	: Asenkron Sayısal Abone Hattı
ASIC	: Uygulamaya Özel Bütünleşik Devre
CP	: Çevrimsel Ön Ek
DSP	: Sayısal Sinyal İşlemcisi
DVB	: Sayısal Video Yayıncılığı
FF	: Bellek Elemanı
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FPGA	: Sahada Programlanabilen Kapı Dizisi
I2C	: Bütünleşik Devreler Arası Haberleşme
OFDM	: Dik Frekans Bölmeli Çoğullama
OFDMA	: Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
LTE	: Uzun Vadeli Evrim
SDR	: Yazılım Tanımlı Radyo
SPI	: Seri Çevresel Birimi
WIMAX	: Mikrodalga Erişim İçin Evrensel Uyumluluk
WLAN	: Kablosuz Yerel Alan Ağları
WMAN	: Kablosuz Şehir Alan Ağları

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : IEEE 802.16 standartlarının karşılaştırılması.....	11
Çizelge 2.2 : Seçimli OFDMA tekniğinin sistem parametreleri.	15
Çizelge 4.1 : Kanal kodlama algoritmaları ve kaynak kullanımı.	51
Çizelge 4.2 : FFT algoritmalarının kaynak kullanımı.	58
Çizelge 4.3 : OFDM tabanlı temel bant verici tasarımının kaynak kullanımı.....	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Temel bant sayısal vericinin genel blok gösterimi.	4
Şekil 2.1 : Direk ve direk olmayan görüş.	9
Şekil 2.2 : OFDM – OFDMA yöntemlerinin karşılaştırılması.	13
Şekil 2.3 : OFDM fiziksel katman blok gösterimi.	14
Şekil 2.4 : OFDM sembolünün spektrumu.	16
Şekil 3.1 : OFDM ve FDM sisteminin bant verimliliğinin kıyaslanması.	22
Şekil 3.2 : OFDM sinyalinin zaman ve frekans bölgesi analizi.	23
Şekil 3.3 : OFDM sinyalinin örnekleme anlarındaki alt taşıyıcı genlikleri.	24
Şekil 3.4 : OFDM sinyalinin temel kavramları.	26
Şekil 3.5 : Art arda gönderilen iki OFDM sinyalinin alıcıdaki girişimi.	27
Şekil 3.6 : Koruma bölgesinde bırakılan boş sembolün meydana getirdiği ICI.	28
Şekil 3.7 : OFDM sembolüne çevrimsel ön ek ekleme işlemi.	29
Şekil 3.8 : OFDM sembolüne eklenen çevrimsel ön ek ile ISI' nın engellenmesi. ...	30
Şekil 3.9 : OFDM sisteminin fiziksel katman blok gösterimi.	32
Şekil 3.10 : OFDM sisteminin maruz kaldığı çentik sönmüleme.	32
Şekil 3.11 : OFDM sisteminin maruz kaldığı frekans kayması ve ICI.	33
Şekil 4.1 : Tezin gerçekleştirme adımları.	36
Şekil 4.2 : MATLAB üzerindeki WIMAX fiziksel katman blokları.	37
Şekil 4.3 : Randomizer bloğu.	38
Şekil 4.4 : Katlamalı kodlayıcının yapısı.	38
Şekil 4.5 : QPSK, 16QAM ve 64QAM sembol modülasyonu ve Grey kodlaması. ...	40
Şekil 4.6 : Bilgi, pilot ve boş alt taşıyıcıların yerleştirilmesi.	42
Şekil 4.7 : Pilot işaretlerin modülasyonu.	42
Şekil 4.8 : MATLAB ortamında üretilen WIMAX çerçevesinin spektrumu.	44
Şekil 4.9 : MATLAB ortamında üretilen WIMAX çerçevesi.	45
Şekil 4.10 : FPGA üzerinde tasarlanan WIMAX fiziksel katman blokları.	46
Şekil 4.11 : Xilinx ISE geliştirme ortamı ve FPGA tasarımı.	47
Şekil 4.12 : FPGA tasarımında yer alan alt modüllerin zamanlama grafiği.	47
Şekil 4.13 : FPGA tasarımındaki rastgeleleyici bloğunun doğrulanması.	48
Şekil 4.14 : Rastgeleleyici bloğunun RTL şeması.	49
Şekil 4.15 : 16QAM sembol modülasyon haritası.	52
Şekil 4.16 : WIMAX çerçevesi.	54
Şekil 4.17 : Data, pilot ve başlama eki sembollerinin sembol modülasyonu.	55
Şekil 4.18 : Faz faktörü katsayıları.	56
Şekil 4.19 : 8-DFT işleminin radix-2 algoritması ile kelebek diyagramı.	57
Şekil 4.20 : Radix-2 algoritmasının temel kelebek diyagramı.	57
Şekil 4.21 : Radix-2 algoritmasının donanım mimarisi.	58
Şekil 4.22 : Digilent Spartan-3 kartı.	61
Şekil 4.23 : Gerçekleme adımları.	61
Şekil 4.24 : 21.4 MHz merkez frekanslı OFDM işaretinin spektrumu.	62
Şekil 4.25 : 300 MHz merkez frekanslı OFDM işaretinin spektrumu.	63

Şekil 4.26 : WIMAX çerçevesinin Arnitsu cihazındaki demodülatör çıktısı.	63
Şekil 4.27 : WIMAX çerçevesinin demodülatör çıktısının analizi.	64

OFDM TABANLI TEMEL BANT WIMAX FİZİKSEL KATMAN VERİCİNİN FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ

ÖZET

Son yıllarda internet kullanımının sabit (masa üstü bilgisayarlar), yarı gezgin (diz üstü bilgisayarlar) ve gezgin (cep telefonları ve tabletler) şebekelerde artması ile veri iletim ihtiyacı artmıştır. Bu ihtiyacın karşılanmasında dördüncü kuşak (4G) iletişim sistemlerinin gelişimi önemli çalışmaların başında gelmektedir. Bu sebeple 4G sistemlerinin üyesi olan Mikrodalga Erişim İçin Evrensel Uyumluluk (Worldwide Interoperability for Microwave Access - WIMAX) ve Uzun Vadeli Evrim (Long Term Evolution - LTE) sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar oldukça popülerdir.

Veri iletim ihtiyacının karşılanmasındaki en önemli kısıtlardan biri ise bant genişliğidir. Yeni nesil iletişim sistemleri bu kısıtla mücadele etmek için fiziksel katman tasarımlarında bant verimliliği yüksek bir teknik olan dik frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) tekniğini kullanmışlardır. Kablosuz iletişim sistemlerinde bant verimliliğinin yanı sıra iletilen bilginin kablosuz iletim ortamındaki bozucu etkilere karşı dirençli kılması ve diğer dengeleyici tabanlı alıcı sistemlerine nazaran işlem karmaşıklığının az olması OFDM tekniğinin diğer önemli avantajlarından biridir.

Yeni nesil iletişim sistemlerinde kanal koşullarına göre dinamik değişen sistem parametreleri ile toplam veri iletim hızının artırılması hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan sistemlerde sistem parametrelerinin donanım müdahalesine gerek kalmadan yazılımsal olarak değiştirilmesi sistem karmaşıklığını azaltarak donanım maliyetlerini minimuma çekmiştir. Bu tasarımlar literatürde yazılım tanımlı radyolar olarak geçmektedir.

Yazılım tanımlı radyolar Uygulamaya Özel Bütünleşik Devreler (ASIC), Sayısal Sinyal İşlemcileri (DSP) ve Sahada Programlanabilen Kapı Dizisi (FPGA) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. FPGA' lar diğer bütünleşik devrelere nazaran donanım ihtiyaçları tasarıma bağlı oluşturulabilen bütünleşik devrelerdir. Bu sayede firma ve bütünleşik devre ailesine bağımlılığı minimumda tutarak özgün tasarımlar oluşturulabilmektedir.

FPGA üzerinde yapılan gerçekleştirme çalışmalarında en önemli iki tasarım kriteri ise kullanılan FPGA kaynakları ve tasarımın çalışabileceği maksimum saat darbesi frekansıdır. Tasarlanan yapının minimum kaynak kullanımı yönünde optimize edilmesi daha sonraki donanım ihtiyaçlarına yer açmak adına önemlidir.

Bu tez çalışmasında OFDM tabanlı WIMAX temel bant verici tasarımı FPGA üzerinde kaynak optimizasyonu gözetilerek gerçekleştirilmiştir. Tasarımda Xilinx firmasının Spartan-3 FPGA ailesine ait XC3S1000 bütünleşik devresi kullanılmıştır. Kaynak optimizasyonu için temel bant verici bloklarında yer alan ve en çok kaynak tüketimine sebep olan kanal kodlayıcı, sembol modülasyonu ve IFFT işlem bloklarının tasarımı literatürde yer alan çalışmalar incelenerek oluşturulmuştur.

Kanal kodlayıcı olarak minimum kaynak kullanımı ve işlem karmaşıklığı sağladığı için 1/2 oranında katlamalı kodlayıcı seçilmiştir.

Sembol modülasyonunda oluşturulması gereken I, Q bileşenleri fazla kaynak kullanımına sebep olan IEEE-754 kayan noktalı sayı kütüphanesi yerine 10 bit çözünürlükte tam sayı kütüphanesi kullanılmıştır.

IFFT işlem bloğunun oluşturulması için incelenen algoritmalarda hafifletilmiş radix-2 algoritması minimum kaynak kullanımı sebebiyle seçilmiştir.

Tasarım ilk önce IEEE 802.16-2012 standardında yer alan sistem parametreleri gözetilerek MATLAB programı üzerinde hazırlanmıştır. Tasarımın doğruluğu standartta yer alan test dataları ile kontrol edildikten sonra FPGA tasarımı Xilinx firmasının ISE yazılım geliştirme ortamında VHDL dili kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımın kaynak kullanımı 1950 dilim saklayıcı (Slice), 2998 bellek elemanı (Flip Flop - FF) ve 3101 başvuru çizelgesi (LUT) olarak elde edilmiştir. Oluşturulan tasarım Xilinx firmasının ISIM mantık analizörü ile doğrulandıktan sonra Digilent firmasının Spartan-3 kartında gerçekleştirilmiştir. Üretilen temel bant OFDM işareti üst dönüştürücü ve RF kartına aktarılarak sonuçlar Arnitsu 2830A frekans analizörü ve demodülatöründe doğrulanmıştır.

IMPLEMENTATION OF OFDM BASED WIMAX PHYSICAL LAYER BASEBAND TRANSMITTER ON FPGA

SUMMARY

In recent years internet usage with fixed (desktop), half mobile (laptop) and mobile devices (cell phone – smart phone) increased and which brings to needs of more data traffic on communication systems. Especially 4G technologies one of the most important working field which try to overcome about this issue. Worldwide Interoperability for Microwave Access (WIMAX) is a forum which purpose clearly figured out by its name, and Long Term Evolution (LTE) are member of 4G communication systems. Working on these technologies are very popular these days.

One of the most important constraints about the needs of data transmission is bandwidth. 4G technologies consider about bandwidth efficiency while increasing data transmission on network. Constraint of bandwidth efficiency can be achieved by the help of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) based physical layer on 4G and other communication system recently. OFDM transmissions are emerging as important modulation technique because of its capacity of ensuring high level robustness against interference on wireless communication systems. OFDM system is widely used in various high speed mobile and wireless communication systems which are 802.11 (Wi-Fi), 802.16 (WIMAX), Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Video Broadcasting (DVB) and LTE.

In 4G systems has adaptif system parameters in order to increase total throughput. In wireless communication channel quality is changing very rapidly. Designed transmitter and receiver systems must adopt this situation by changing system parameter dynamicly which are transmission frame length, modulation degrees (QPSK, 16 QAM, 64QAM), channel coding, antenna array usage type (diversity or spatial multiplexing) and so on. System parameters are not change quickly and easily in hardware define radio systems. Software defined radios (SDR) can change system parameter easily by changin software input unlike hardware defined radio. SDR does not need to intervention on hardware physically, its can be done by software.

SDR can be implemented by using FPGA, ASIC and DSP' s. These integrated circuits has softwarely configurable peripherals and logic gates to implement physical layer of SDR. ASIC and DSP circuits has some communication library and ready to use peripherals to quick implementation. Communication and interaction of other integrated circuit with DSP and ASIC can be done easily Serial Peripheral Interface (SPI) and other peripheral like this. Firm which produce DSP and ASIC serve ready to use library to take FFT and correlation process. Inspite of the fact that ready to use libray and peripherals provide quick implemetation, it increase dependencies of firm and processor family. An other consideration of using DSP and ASIC is portability of software. It also depend processor family and firm. Designed software can not easily adopt another firm processor or another processor family. Ready to use library generally designed for spesific processor family. This situation effect design consideration which is using proper integrated circuit. Unlike DSP and

ASIC, FPGA software can be port another firm FPGA or different kind of FPGA family on the same firm. FPGA has important advantages over DSP and ASIC which custom designed peripherals can be define variously and not limited count.

FPGA based SDR implementation has two main design criteria which are usage of FPGA resource and maximum run time frequency. Maximizing run time frequency can be explained that try to maximize clock frequency which feeds FPGA design with properly working. Achieved maximum clock frequency effect speed of signal output of FPGA. Another consideration is usage of FPGA resources. SDR can be design with customly with FPGA but FPGA has limited logical resources which are mainly Slice, Flip Flops (FF), Look Up Tables (LUT), block RAMs and multiplexers. Designed software have to use less resource than limited counts. In SDR systems, decreasing resource usage become more important issue because of improving communication technology needs extra system requirements, adaptif system parameters like Multi Input Multi Output (MIMO) antenna system, beamforming and carrier aggregation.

In this thesis we implement OFDM based WIMAX physical layer baseband on Xilinx XC3S1000 FPGA with optimization of resource usage. Implemented physical layer of WIMAX has randomizer, channel coding, interleaver, symbol mapping, pilot an data sub carrier placement, pilot sub carrier randomization, preamble placement, Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) and Cyclic Prefix (CP) appending blocks. We design system according to IEEE 802.16 WIMAX standard with 1.25 MHz bandwith, 128 subcarrier, 1.4 MHz sampling frequency, 16 QAM symbol mapping, 128 IFFT and 1/8 guard symbol CP.

Physical layer of WIMAX has some blok which consume more resource and has complicated processing. We try to design this processing block with minimum resource usage and reduced processing complexity. These block are channel coding, symbol mapping and IFFT.

802.16 WIMAX standard define four main channel coding method which are convolutional encoder (CC), block turbo coding (BTC), convolutional turbo coding (CTC) and low density parity check (LDPC) coding. Try to figure out better resource usage search the literature for similar physical layer design. Output of research is show that BTC, CTC and LDPC coding more resistive against channel interference than convolutional coding although these techniques more complicated and needs more FPGA resource to implementation. We prefer convolutional coding in order to design channel coding block because of lower resource usage than other complicated channel coding techniques. We use Xilinx free IP-Core module to implement 1/2 rate convolutional encoder.

Symbol mapping another block which can be optimize for resource usage. We use 10 bit I, Q sample to implement complex sample instead of IEEE-754 floating point library. IEEE-754 32 bit floating point library has advantages over 10 bit I, Q resolution about mapping error. We use 10 bit integer library as floting point, first bit sign bit, next two bit is integer part and other seven bits floating parts. These resolution consideration is decided according to upconverter which integrated circuit take base band I, Q sample as 12 bit resolution and multiply with sine and cosine signal in order to modulate quadraturely and convert them to analog signal (DAC). We obtain resource optimization with taking into hardware limit consideration. We implement 10 bit resolution I, Q symbol mapping with using 23 Slice, 36 FF and 20 LUT.

IFFT block most important block in OFDM based physical layer systems which modulate I, Q samples with orthogonal sub carrier without using multi oscillators. FFT processing block is defined fast implementation of Discrete Fourier Transform (DFT). Fast implementation of long DFT blocks is done by using twiddle factors mathematical properties which are symmetry and periodicity. Long DFT block can be separated into lots of two or four pointed DFT blocks. These algorithms call Cooley and Tukey algorithm which are radix-2 or radix-4. In this thesis, implementation of FFT blocks using radix-2 butterfly algorithm which is done by Xilinx free FFT IP-Core module. Implementation resource usage is 1272 Slice, 2169 FF and 1876 LUT.

In this thesis, implementations of baseband physical layer is done with three main steps. First step, create physical layer simulation on a MATLAB program and confirm each block of physical layer with test data which is given by IEEE 802.16 standard.

On the next step, each block is designed with VHDL hardware defining language by using Xilinx ISE development studio software and simulate on Xilinx ISIM logic analyser with test bench VHDL code to confirm each block output with test data. Implementation of WIMAX physical layer baseband transmitter uses 1950 Slice, 2998 FF and 3103 LUT.

After all, last step is implementation of FPGA design on Digilent Spartan-3 board. Digilent Spartan-3 board has XC3S1000 FPGA, 8 slide switches, 4 pushbuttons, 9 LEDs and 4-digit seven segment displays, serial port, VGA port and input/output pins. Implementation loaded on FPGA with using JTAG cable. One of I/O pin is used to export WIMAX frame to send upconverter IC AD9856. AD9856 upconverter has quadrature modulator which modulate signal with 21.4 MHz (Intermediate Frequency - IF) sine and cosine signal. Quadrature modulated signal converted analog signal on the same IC. After that upconverted 21.4 MHz and 1.4 MHz bandwidth signal transfer RF synthesizer in order to modulate signal RF frequency which is 300 MHz. Obtained IF and RF WIMAX frame spectrum analyzed with Arntsu 2830A frequency analyser and connected to Arntsu 2830A WIMAX demodulator to confirm design.

1. GİRİŞ

Bilgi paylaşımı gelişen teknoloji ve haberleşme olanakları ile ivmelenerek artmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanmasındaki en büyük gelişim hücresel ağların ve yeni nesil iletişim sistemlerinin evrimidir. Teknolojinin gelişimi ile internet ağına olan ilgi, bilgi paylaşım isteği ve bilgiye erişim olanağı artmıştır [1]. Günümüzde, internet teknolojilerine erişim hem gezgin hem de sabit konumda mümkündür. Akıllı cep telefonları, tabletler ve dizüstü cihazların kullanımının artması ile internet erişimi ve haberleşme için anlık veri iletim isteği artmıştır. Sosyal ağlar, görüntülü görüşme isteği ve yüksek kalitede video yayını gibi uygulamalar gezgin olarak kullanılan cihazlarda veri iletim hızına olan ihtiyacı arttırmıştır. Gezgin ve sabit şebekeler için bu yoğun veri iletim hızını karşılayabilecek haberleşme alt yapısını karşılanabilmesi için Mikrodalga Erişim İçin Evrensel Uyumluluk (Worldwide Interoperability for Microwave Access - WIMAX) ve Uzun Vadeli Evrim (Long Term Evolution - LTE) gibi dördüncü kuşak (4G) kablosuz iletişim sistemleri üzerinde çalışılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Son yıllarda artan veri iletim ihtiyacının karşılanması için yapılan çalışmalarda 4G iletişim sistemleri oldukça popülerdir. İletişim sistemlerinde veri iletim hızı kullanılan frekans bandı ile direk olarak bağlıdır. Frekans bantları sınırlı bir kaynak olduğu için yeni nesil iletişim sistemlerinde veri iletim hızının artmasına karşın bant verimliliği yüksek sistemler oluşturulmaya çalışılmıştır. Tarihsel gelişimi uzun yıllara dayansa da son yıllarda popülerliği oldukça artan dik frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) yöntemi bant verimliliği yüksek bir sistemdir. Bant verimliliğinin yanı sıra diğer tek ve çok taşıyıcılı sayısal haberleşme sistemlerine oranla sinyali iletim ortamındaki sönmölmelere karşı dirençli kılması ve diğer dengeleyici tabanlı alıcı sistemlerine nazaran işlem karmaşıklığının az olması diğer önemli özelliklerindendir. Bu avantajlarından dolayı LTE, WIMAX, Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks - WLAN), Sayısal Video Yayını (Digital Video Broadcasting –

DVB) ve Asenkron Sayısal Abone Hattı (Asynchronous Digital Subscriber Line – ADSL) gibi birçok haberleşme sisteminin alt yapısında standart olarak yerini almıştır [2].

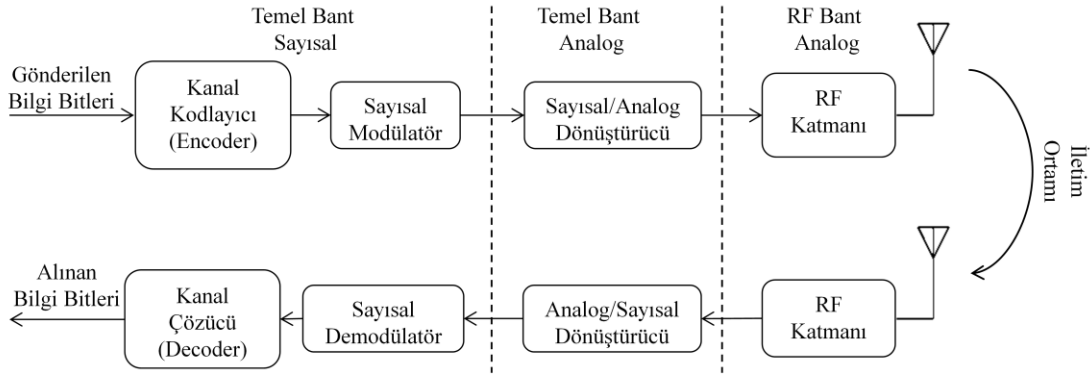
Son yıllarda gelişen haberleşme standartlarında kanal durumuna ve ihtiyaç olan veri iletim hızına bağlı olarak sistem parametreleri dinamik olarak değişebilmektedir. Bu dinamik yapı sayesinde belirli süreler ile kanal durumu dinlenerek alınan geri besleme ile modülasyon derecesinin değiştirilmesi, çoklu anten yapılarının seçimi gibi birçok karar yazılımsal olarak verilmektedir [3]. Bu ise yazılım tanımlı radyolar (Software Defined Radio - SDR) ile mümkündür. Yazılım tanımlı radyolarda donanım tanımlı radyoların aksine haberleşme donanımına fiziksel müdahalede bulunmadan sistemin çalışma frekansı, bant genişliği veya modülasyon derecesi gibi sistem parametreleri ihtiyaç doğrultusunda değiştirilebilmektedir [4]. Bu esnek yapı sayesinde toplam iletilen veri miktarı ve iletimdeki hata başarımı arttırılmaktadır.

Yazılım tanımlı radyo tasarımı birçok standart için Uygulamaya Özel Bütünleşik Devre (Application Specific Integrated Circuit - ASIC), Sayısal İşaret İşlemcisi (Digital Signal Processor - DSP) ve Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array - FPGA) gibi farklı donanım platformlarında çalışılmaktadır. ASIC ve DSP bütünleşik devreleri (Integrated Circuit) uygulamaya özel üretilen yazılım kütüphaneleri ve harici bütünleşik devreler ile (Upconverter ve Frekans Üreticiler) haberleşme için kullanılan çevresel birimleri (SPI, I2C Peripheral) sayesinde tasarımın daha hızlı yapılmasına olanak tanısa da hem bütünleşik devre üretici firmaya hem de işlemci ailesine olan bağımlılığı arttırmaktadır. Bir diğer dezavantajı ise haberleşme sistemlerinin artan ihtiyaçlarını karşılamak adına sınırlı sayıdaki çevresel birim ve giriş çıkış bağlantıları tasarımın geliştirme açısından kısıtlanmasına neden olur. FPGA bütünleşik devreleri, ASIC ve DSP gibi bütünleşik devrelerin aksine tasarımcı tarafından esnek olarak tanımlanabilen mantık kapılarına sahiptir. Bu sayede FPGA bütünleşik devreleri kullanılarak yapılan tasarımlarda istenilen sayıda çevresel birimler oluşturularak tasarım ihtiyaçlarına göre yönlendirilebilmektedir [5]. FPGA’ da tanımlı olan hazır kütüphane fonksiyonları çok temel düzeyde olduğu için ilk tasarım esnasında uygulamanız için üretilcek çevresel birimleri ve algoritmaları oluştururken diğer bütünleşik devrelere nazaran daha çok zaman harcanmasına rağmen kod taşınabilirliği fazladır. Bu sebeple firma ve bütünleşik devre ailesine olan bağlılık

minimum düzeydedir, kodlar rahatlıkla farklı bir FPGA ailesine taşınabilmektedir. FPGA bütünleşik devrelerin diğer önemli avantajı ise paralel işlem yapabilme yeteneğidir. Haberleşme alt yapısında bulunan yoğun işlem yükü gerektiren Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) ve korelasyon alma gibi işlemlerde paralel işlem yeteneği ile sonuçların elde edilmesi hızlandırılabilir.

FPGA üzerinde gerçekleştirilen tasarımlardaki en önemli tasarım kriterlerinden ikisi FPGA kaynaklarının kullanımı ve gerçekleştirilen tasarımın çalışma frekansıdır. Çalışma frekansının anlamı yapılan tasarımın tasarlanan şekilde düzgün çıktıları üretebileceği maksimum saat darbesi frekansıdır. Yani bir tasarımın gerçekleştirilmesi sonucu 110 MHz maksimum çalışma frekansı elde edildi ise ve bu tasarım 120 MHz bir saat darbesi ile sürülürse tasarım istenen çıktıları doğru şekilde üretemeyebilir demektir. Bir diğer tasarım unsuru ise FPGA’da bulunan bellek elemanları (Flip Flop - FF), başvuru çizelgesi (Look Up Table - LUT) ve Blok RAM (BRAM) gibi kaynakların kullanımıdır. Bu kaynaklar her FPGA ailesinde değişken miktarlarda ve sınırlı sayıda bulunmaktadır. Yapılan tasarımın az kaynak tüketmesi yönünde optimizasyon yapılması FPGA üzerinde yapılabilecek ek geliştirmelere olanak sağlaması açısından çok önemlidir. FPGA tasarımında seçilen algoritmalar paralel işlem yeteneğinin artması genel olarak çalışma frekansını arttıran bir unsur olsa da kaynak tüketimini arttırmaktadır, bu sebeple bu tercih tasarım açısından önemli bir unsurdur.

Bu tez çalışmasında IEEE 802.16-2012 WIMAX standardına uygun OFDM tabanlı temel bant fiziksel katman verici tasarımı minimum kaynak kullanımı gözetilerek FPGA üzerinde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Standartta belirtilen sistem parametrelerinin seçimi ve kullanılan algoritmalar FPGA kaynaklarının kullanımını minimize edecek şekilde seçilmiştir. Algoritmaların işlem karmaşıklığı da minimum düzeyde tutularak gerçekleştirme açısından sistem karmaşıklığı azaltılmıştır. Şekil 1.1’de tez kapsamında ele alınan temel bant sayısal vericinin genel blokları verilmiştir.



Şekil 1.1 : Temel bant sayısal vericinin genel blok gösterimi.

Tez çalışması kapsamında ikinci bölümde ilk olarak IEEE 802.16 standardı ve WIMAX hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra IEEE 802.16 standardının ilk ortaya çıkışından günümüze kadar olan önemli gelişmeleri ve standardın evrimi anlatılmıştır. Gelişim basamaklarının ardından WIMAX sisteminin ön plana çıkan özellikleri verilmiştir. Bu sayede WIMAX sisteminin kablosuz ağlardaki hangi ihtiyacı karşıladığı ve avantajları genel hatlarıyla vurgulanmak istenmiştir. Bu vurgu ile birlikte tez kapsamında ele alınan OFDM tabanlı ve bant genişliği tasarıma göre değişebilen gezgin WIMAX sisteminin fiziksel katmanı ve sistemin parametreleri genel hatlarıyla verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise tez kapsamında ele alınan WIMAX standardı dahil olmak üzere birçok sayısal haberleşme sisteminin fiziksel katmanında yer alan OFDM tekniği anlatılmıştır. İlk olarak OFDM tekniğinin gelişmesindeki önemli çalışmalar kronolojik açıdan sıralı olarak aktarılmıştır. Daha sonra OFDM tekniği ile diğer sayısal haberleşme sistemleri kıyaslanarak neden ön plana çıktığı vurgulanmıştır. OFDM tekniğinin özellikleri ve OFDM tekniğinde yer alan tasarıma yönelik temel kavramlar detaylı olarak aktarıldıktan sonra OFDM tekniğinin işlem blokları verilmiştir. Son kısımda OFDM sisteminin avantajları ve dezavantajları aktarılmıştır. Birçok kaynak kullanılarak aktarılan tasarım parametreleri ve görseller sayesinde OFDM tekniğinin ve tasarım unsurlarının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

Dördüncü bölümde gezgin WIMAX sisteminin temel bant fiziksel katman gerçekleştirme adımları aktarılmıştır. İlk olarak MATLAB programında hazırlanan fiziksel katman benzetiminin tüm alt blokları detaylı olarak aktarılmıştır. Hazırlanan MATLAB benzetiminin IEEE 802.16-2012 standardında bulunan test verileri ile doğrulanmasının ardından FPGA üzerinde gerçekleştirilen fiziksel katman blokları,

kaynak optimizasyonu için seçilen parametreler ve yöntemlerin detaylı açıklaması verilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan FPGA Xilinx firmasının Spartan-3 ailesine bağlı XC3S1000 bütünleşik devresidir. Tasarım için kullanılan donanım tanımlama dili ise VHDL' dir. FPGA tasarımının geliştirilmesinde Xilinx firmasının ürettiği yazılım geliştirme ortamı olan ISE (Integrated Software Environment), benzetimi için ise aynı firmanın ürettiği ISIM (ISE Simulator) kullanılmıştır. FPGA tasarımının oluşturulmasında ISIM benzetim ortamı ile MATLAB ortamında hazırlanan benzetim kullanılmıştır. FPGA tasarımının doğrulanması yine standartta yer alan test verileri ile yapılmıştır. Gerçeklenen FPGA tasarımı donanım kartına yüklenerek temel bantta 1.4 MHz bant genişlikli WIMAX çerçevesi oluşturulmuştur. Elde edilen temel bant işaret üst dönüştürücü (Upconverter) ve frekans sentezleyiciler yardımıyla RF katına çıkartılarak antene gönderilmiştir. Üretilen 300 MHz RF işaret Arnitsu firmasının 2830A frekans analizöründe incelenmiş ve aynı cihaz üzerindeki WIMAX alıcı uygulamasında gönderilen çerçevenin doğru yakalandığı gözlemlenmiştir.

Sonuçlar bölümünde tez kapsamında ele alınan tasarım kriterleri ile yapılan tasarımın kazançları ile ilgili çıkarımlar yapılmıştır. Sonrasında ise bu çalışma temel alınarak ileride yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

OFDM tabanlı fiziksel katman tasarımı konusunda FPGA üzerinde birçok gerçekleştirme ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda tasarımın hız, kaynak kullanımı ve kullanılan algoritmaların karmaşıklığının azaltılması gibi unsurlar göz önünde bulundurulmuştur.

Veilleux ve diğerleri 2005 yılında günümüz kablosuz iletişimde popüler olarak çalışılan kanal durumuna göre adaptif modülasyon sağlayan OFDM tabanlı bir sistemi Xilinx firmasının Virtex-II ailesinden XC2V6000 FPGA üzerinde gerçeklemiştir. Bu sistemde vericiden gönderilecek olan bilgi sembolleri kanal durumuna göre 16QAM, 4QAM ve BPSK olarak değişebilmektedir. Böylece standart sembol modülasyon türüne göre hem hata başarımları hem de toplam veri iletim hızı arttırılmıştır. Sistemde seçilen FFT uzunluğu 1024 olarak belirlenmiş ve 128 uzunluklu çevrimsel ön ek (Cyclic Prefix - CP) kullanılmıştır. IFFT işleminin gerçekleştirilmesi için Xilinx firmasının çekirdek modül olarak kullanıcılarına sunduğu FFT/IFFT IP-Core kullanılmıştır. Kullanılan algoritma ise radix-4 seçilmiştir.

Adaptif verici tasarımının belirlenen tasarım kriterlerine göre kaynak kullanımı 4176 adet FF-LUT ikilisinden 2'şer adet içeren dilim saklayıcı (Slice) ve 6 adet 18 Kbit BRam kullanılmıştır ve tasarım 110 MHz maksimum saat darbesi ile çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır [6].

Garcia ve diğerleri 2005 yılında 802.11a kablosuz yerel ağları için OFDM tabanlı verici tasarımını Xilinx firmasının System Generator aracı ile tamamlamıştır. Tasarım üst seviye tasarım aracı kullanılarak yapılmış ve OFDM sisteminin güç tüketimi ve kaynak kullanımı analiz edilmeye çalışılmıştır. Standartta yer aldığı gibi FFT uzunluğu olarak 64 seçilmiş ve 16 uzunluklu CP ile sistemin benzetimi Xilinx firmasının Virtex-II FPGA ailesinden XC2V3000 bütünleşik devresi üzerinde yapılmıştır. IFFT işlemi Xilinx firmasının IP-Core modülü kullanılarak radix-4 ile yapılmıştır. Tasarım sonucunda 1678 Slice, 2353 FF, 2814 LUT ve 12 BRAM kaynağı kullanılmış ve yaklaşık 92 MHz çalışma frekansı elde edilmiştir [7].

Sghaier ve diğerleri 2008 yılında 802.16-2004 WIMAX standardı üzerinde çalışan OFDM tabanlı verici tasarımını hem VHDL tasarım dilini kullanarak hem de Xilinx firmasının ürünü olan MATLAB dili ile üst seviye tasarım olanağı sağlayan AccelDSP sentezleyicisini kullanarak yapmıştır. Tasarım Xilinx firmasının Virtex-II Pro ailesinin XV2P30 bütünleşik devresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan FFT uzunluğu 256, CP uzunluğu ise 64 olarak belirlenmiştir. VHDL kullanılarak yapılan tasarım için Xilinx firmasının IP-Core modülü kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar sonucunda VHDL ile yapılan tasarımda 3526 Slice, 4752 FF, 5884 LUT ve 23 BRAM kullanılarak 171.8 MHz çalışma frekansı elde edilmiştir. Tasarımın yapılma süresi ortalama olarak 60 gün olarak verilmiştir. AccelDSP üst seviye tasarım aracı ile yapılan tasarım sonucunda 5982 Slice, 6485 FF, 7856 LUT ve 40 BRAM kullanılarak 41.1 MHz çalışma frekansı elde edilmiştir. Kaynak kullanımı ve çalışma frekansı açısından VHDL dili ile yapılan tasarımın üstünlüğü verilse de AccelDSP aracı kullanılarak yapılan tasarımın süresi 30 gün olarak belirtilmiştir. Sistemin sonuçlarını gözlemlemek ve hızlı tasarım söz konusu olduğunda AccelDSP tasarım aracının kullanılabileceği gösterilmiştir [8].

Jinsong ve diğerleri 2008 yılında OFDM tabanlı 802.15 ultra geniş bant (Ultra Wide Band - UWB) standardı üzerinde çalışan çok bantlı OFDM (MB-OFDM) verici tasarımını Xilinx firmasının Virtex-II ailesini kullanarak gerçeklemiştir. Tasarım için belirlenen FFT uzunluğu 128 olarak seçilmiştir. Semboller arası girişimin

engellenmesi için seçilen koruma bölgesi ise 37 olarak belirtilmiştir. IFFT algoritması gerçekleştirirken IP-Core kullanılmadan radix-2 algoritması kullanılmıştır. Bu tasarımın oluşturulmasında 2685 Slice, 3694 FF, 4811 LUT kullanılmıştır. Bu çalışma ile 128 noktalı FFT uzunluğu kullanan OFDM tabanlı sistemin Xilinx firmasının FFT IP-Core modülü kullanılmadan gerektirdiği kaynak kullanımı aktarılmıştır [9].

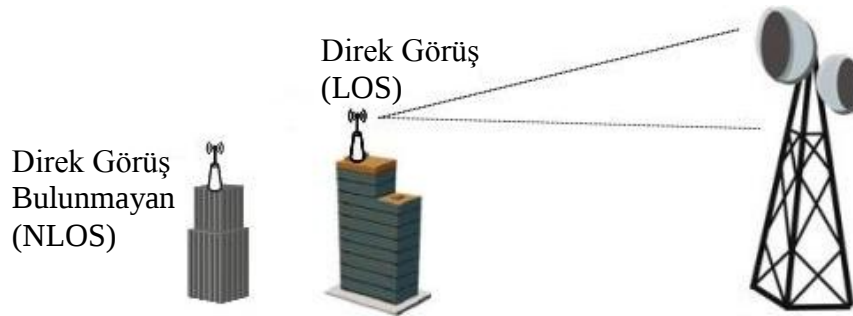
Suhap Şahin 2010 yılındaki doktora tezinde 802.16 standardı üzerinde çalışan OFDM tabanlı modem tasarımını Virtex-5 ailesinin XC5VLX110T bütünleşik devresi üzerinde gerçeklemiştir. Tasarım ele alınırken esneklik ön planda tutularak hazır IP-Core modülleri kullanılmadan firma bağıllığı azaltılarak oluşturulmuştur. Tasarımda FFT uzunluğu 128, sembol modülasyonu olarak 16QAM olarak seçilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde FPGA üzerindeki aritmetik işlem kütüphanesi ele alınarak IEEE-754 kayan noktalı kütüphanesi yerine 16 ve 32 bit çözünürlüklü I,Q kütüphanesi önerilmiştir. İkinci bölümünde ise IFFT işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada 9335 adet Slice, 14290 FF ve 42429 LUT kullanılmıştır [5].

2. IEEE 802.16 STANDARDI VE WIMAX

Günümüz dünyasında internet teknolojisinin ve mobil cihazların gelişimi ile birlikte veri hızına ve olan ihtiyaç artmıştır. Yüksek veri hızları ve mobil haberleşmeye olan ihtiyaç, beraberinde farklı haberleşme tekniklerinin gelişmesini sağlamıştır. Bu ihtiyacı karşılamak adına 4G iletişim sistemleri üzerinde yoğun şekilde çalışılmaktadır. IEEE 802.16 standardı 4G iletişim sistemlerinin önemli bir üyesidir. Bu standart kablosuz şehir alan ağları (Wireless Metropolitan Area Networks - WMAN) ismi ile tanımlanmıştır. WMAN standardı, kablosuz yerel ağlar grubuna göre daha geniş kapsama alanı önermektedir. Bu bölümde 802.16 standardının gelişimi ve getirdiği avantajlar aktarıldıktan sonra gezgin şebekeler için önerilen OFDMA fiziksel katmanı hakkında bilgiler verilecektir.

2.1 IEEE 802.16 Standardının Gelişimi

Önde gelen teknoloji şirketlerinin katılımıyla 2001 yılında WMAN standardının tüm dünyada evrensel olarak çalışabilmesi ve standarda uygun ürünlerin tasarlanması amacıyla kar amacı gütmeyen WIMAX adı altında bir forum oluşturulmuştur. WIMAX, birbirini direk gören (Line of Sight - LOS), alıcı ve verici şebekelerinde 50 km, birbiri arasında direk görüş bulunmayan (Non Line of Sight - NLOS) şebekelerde ise coğrafi konuma bağlı olarak 10-15 km teorik haberleşme mesafesinde ve 72 Mbps iletim hızında iletişimi desteklemek üzere oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 2.1’ de direk görüş bulunan ve bulunmayan şebekeler gösterilmiştir [10].



Şekil 2.1 : Direk ve direk olmayan görüş.

IEEE 802.16-2001 ilk yayımlanan standart olup 10-66 GHz bandında, yerleşik haberleşme noktaları arasında ve birbirini direk gören alıcı verici sistemleri için önerilmiştir [11].

Daha sonra 2003 yılında 2-11 GHz frekans bantlarında birbirini direk olarak görmeyen yerleşik şebekeler için 802.16a standardı önerilmiştir [12]. Bu geliştirme ile WMAN standardında tek taşıyıcılı (WMAN-SC), 256 noktalı FFT içeren OFDM tabanlı çok taşıyıcılı (WMAN-OFDM) ve 2048 noktalı FFT içeren OFDMA tabanlı çok taşıyıcılı (WMAN-OFDMA) olmak üzere üç farklı fiziksel katman modeli önerilmiştir. Dik frekans bölmeli çoğullama tekniği iletişim için kullanılacak bant genişliğini çok sayıda (256 FFT için 256 tane) alt taşıyıcıya bölerek iletim sağlamaktadır. OFDM tekniğinin bant genişliğini verimli kullanma ve kanal sönümlmelerine karşı önemli avantajları bulunmaktadır. OFDMA tekniği ise OFDM yöntemini kullanarak alt taşıyıcılara ayırdığımız iletim bandını her bir kullanıcı için belirli sayıda alt taşıyıcı içeren alt kanallar tahsis ederek iletim yapılabilmesini sağlar. 2004 yılında yerleşik şebekeler için yapılan geliştirmeler tek bir başlık altında toplanarak 802.16-2004 standardı yayınlanmıştır [13]. 802.16-2004 standardı yerleşik şebekeler için tanımlandığından endüstrideki adı sabit (fixed) WIMAX olarak adlandırılmıştır [14].

802.16a standardının yayınlanmasından sonra 2005 yılında gezgin (mobil) şebekeler için 802.16e gezgin (mobile) WIMAX standardı önerilmiştir [15]. Gezgin şebekeler için seçimli OFDMA yapısı önerilmiştir. Bu yapıda, bant genişliği kısıtlamalarına karşı 128, 512, 1024 ve 2048 seçimli FFT uzunluğu ile OFDMA yapısı önerilerek 1.25MHz ile 20 MHz arası değişken bant genişliği desteği getirilmiştir (scalable mobile WIMAX). 802.16e standardı gezgin şebekeler için önerildiğinden gezgin (mobile) WIMAX ismiyle de anılmaktadır. 802.16e gezgin şebekelerin birbirini direk görmeyen ve şehir alanlarında çalışabilmesi için optimum çalışma karakteristikleri belirlenmiştir. Gezgin şebekelerin haberleşmesindeki en önemli sorunlarından biri olan Doppler frekans kayması etkisine karşı, WIMAX çalışma frekansları ve gezgin şebekenin hızı göze alınarak optimum alt taşıyıcı aralığı (sub-carrier spacing) belirlenmiştir. Aşağıdaki Çizelge 2.1' de IEEE 802.16 standartlarının karşılaştırılması verilmiştir [15].

Çizelge 2.1 : IEEE 802.16 standartlarının karşılaştırılması.

Parametre	IEEE 802.16-2001	IEEE 802.16a	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005
Tamamlanma Zamanı	Aralık 2001	Ocak 2003	Haziran 2004	Aralık 2005
Spektrum	10-66 GHz	2-11 GHz	2-11 GHz	2-6 GHz
Yayılma Şartları	LOS	NLOS	NLOS	NLOS
Bit Hızı	134 Mbps'e kadar (28 MHz)	75 Mbps'e kadar (20 MHz)	75 Mbps'e kadar (20 MHz)	15 Mbps'e kadar (5 MHz)
Modülasyon	QPSK, 16QAM, 64QAM (Seçimli)	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM (Seçimli)	256 alt taşıyıcılı OFDM, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	OFDMA, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM (Seçimli)
Hareketlilik	Sabit	Sabit	Sabit/Taşınabilir	Sabit/Hareketli

Son gelinen noktada yerleşik ve gezgin şebekeler için önerilen 802.16-2004, 802.16e gibi standartlar 802.16-2009 yılında tek bir standart altında toplanmıştır [17]. Daha sonra bu standarda yapılan ek geliştirmeler ile 802.16-2012 standardı yayınlanmıştır. Şu an IEEE 802.16 çalışma gurubunda aktif olarak yer alan standart 802.16-2012' dir [18]. Böylece WIMAX standardı yerleşik ve gezgin şebekeler için tanımlanmış olup temelde 4 tip fiziksel katman modeli önerilmiştir.

WirelessMAN-SC: Tek taşıyıcılı fiziksel katman modelidir. Birbirini direk gören (LOS) şebekeler için 10-66 GHz arasında çalışabilen frekans bantları için önerilmiştir.

WMAN-OFDM: 11 GHz altındaki frekans bantlarında kullanılmak üzere birbirini direk olarak görmeyen (NLOS) şebekeler için çok taşıyıcılı OFDM yöntemi önerilmiştir. OFDM yönteminde kullanılacak olan FFT nokta sayısı 256 olarak belirlenmiştir.

WMAN-OFDMA: 11 GHz altındaki frekans bantlarında kullanılmak üzere birbirini direk olarak görmeyen (NLOS) şebekeler için çok taşıyıcılı OFDM yöntemi önerilmiştir. Lisanslı frekans bantlarının kısıtlarına uygun olarak değişken bant genişliği seçimi yapılabilmektedir. OFDM yönteminde kullanılacak olan FFT nokta

sayısı 128,512,1024,2048 olarak seçimli kullanılabilir. Çok sayıdaki gezgin şebekenin haberleşmesi için tahsis edilecek kaynaklar OFDMA yöntemi ile alt kanallara bölünerek dinamik olarak belirlenmektedir.

WMAN-HUMAN: 5-6 GHz arasında bulunan lisanssız frekans bantlarında kullanılmak üzere tanımlanmıştır. Yüksek hızlı lisanssız şehir alan ağları (High Speed Unlicensed - MAN) olarak isimlendirilmiştir. Uluslararası lisanssız bilgi alt yapısı (Unlicensed National Information Infrastructure - UNII) olarak belirlenen frekans bantlarında iletim için önerilmiştir.

2.2 WIMAX' in Öne Çıkan Özellikleri

WIMAX' in sabit ve gezgin şebekelerde kablosuz geniş bant iletimi için esneklik sağlayan çok sayıda özelliği bulunmaktadır. Bu özellikler kablosuz iletişim kalitesini arttırmak ve mevcut frekans bandı ve kısıtlara uyum sağlamak için önerilmiştir. WIMAX standardının öne çıkan avantajları aşağıdaki maddeler altında aktarılmıştır [19].

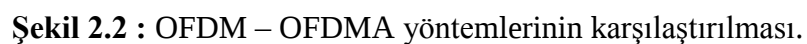
OFDM tabanlı bir fiziksel katmana sahiptir. Gezgin şebekelerde veri iletimi çok sayıda alt taşıyıcı ile yapıldığından çok yol sönmülmesine ve derin sönmüleme etkisine karşı dirençlidir. Teknolojinin ilerlemesi ve FFT algoritmalarının özelleşmiş işlemciler tarafından çok hızlı ve minimum güç harcanarak yapılabildiğinden alıcı performansı ve basitliği artmıştır.

WIMAX önerdiği OFDM altyapısı ve 64 QAM sembol modülasyonu sayesinde teorik olarak 20 MHz bant genişliği kullanarak 75 Mbps gibi çok yüksek veri iletim hızlarına erişebilmektedir.

WIMAX izin verilen frekans bandının ve iletim ortamının koşullarına göre 1.25 MHz ile 20 MHz arasında seçilebilen bant genişliği sunmaktadır. Seçilen bant genişliğine göre 128 ile 2048 noktalı FFT alt yapısı kullanılmaktadır. Bu esneklik sayesinde ihtiyaca göre istenen bant genişliğinde iletim yapılabilmektedir.

İletim kanalının kalitesine göre değişebilen modülasyon derecesi sunmaktadır. Örneğin kanal koşulları belirli periyodlar ile pilot işaretler gönderilip analiz edildikten sonra 64 veya 16 QAM ya da QPSK modülasyonu kullanılabilir. Bu seçimli yapılar ortalama iletim hızını sabit sistemlere göre hem arttırmaktadır hem de iletim kalitesinden ödün vermemektedir.

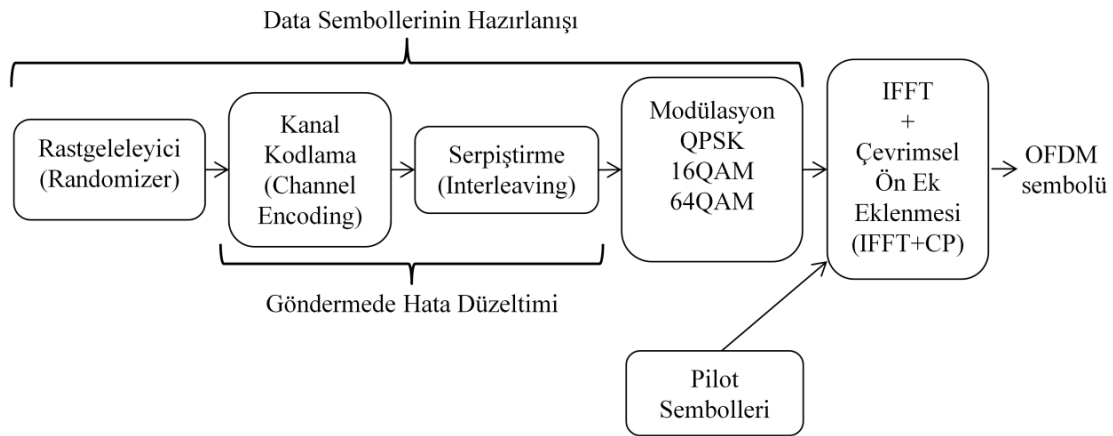
WIMAX gezgin yerleşkelerin baz istasyonu ile arasındaki veri iletim hızı ihtiyacına göre, dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) tekniği sayesinde her kullanıcıya belirli sayıda alt taşıyıcıyı kapsayan alt kanallardan ayırarak toplam iletim bant genişliğini verimli şekilde kullanmayı sağlamaktadır. Bu sayede her bir OFDM sembolünde farklı kullanıcıların bilgileri taşınarak toplam veri iletim hızı artırılmış olur. Şekil 2.2’ de OFDM ve OFDMA için kaynak kullanım karşılaştırması verilmiştir [10].



2.3 Gezgin WIMAX Fiziksel Katmanı

WIMAX' in gezgin şebekeler için tanımlanan fiziksel katman yapısı 802.16-2012 standardında yer alan kablosuz şehir alan ağları dik frekans bölmeli çoklu erişim fiziksel katmanı (WirelessMAN-OFDMA PHY) bölümünde açıklanmaktadır. Bu bölümde ileri (downlink) ve geri (uplink) yön iletim çerçeveleri (frame), OFDMA parametreleri, kanal kodlama teknikleri gibi fiziksel katmanı ilgilendiren temel tasarım bilgileri verilmektedir [18].

İletilmek istenen ham veri ilk önce Rastgeleleştirme (Randomizer) işlem bloğundan geçerek ham bilgi içerisindeki ard arda gelen uzun “0” ve “1” bitlerinin sözde rastgele ikili dizi kuralınca rastgeleleştirmektedir. Daha sonra iletilen bilginin iletim ortamındaki bozulmalara karşın dirençli kılınması için Kanal Kodlama (Channel Encoding) ve Serpiştirme (Interleaving) yapılmaktadır. Gezgin WIMAX standardı kanal kodlama tekniklerinde katlamalı kodlar (Convolutional Coding), blok turbo kodlar (Block Turbo Coding), katlamalı turbo kodlar (Convolutional Turbo Codes) ve düşük yoğunluklu parite kontrol kodları (Low Density Parity Check Code) seçimli olarak tasarıma özgü bırakılmıştır. Göndermede hata düzeltimi (FEC) yöntemlerinden sonra bitlerin sembollere çevrilmesi için dik genlik modülasyonu yapılmaktadır. Modülasyon derecesi iletim ortamının kalitesine göre dik faz kaydırmalı anahtarlama (QPSK), 16 veya 64 seviyeli dik genlik modülasyonu (16-64 QAM) olarak seçilebilmektedir. Bilgi sembolleri hazırlandıktan sonra alıcı katında kanal kestirimi yapılabilmesi için pilot sembolleri de hazırlanarak IFFT işleminden geçirilip çevrimsel ön ek eklenerek temel bant OFDM sembolü hazırlanmış olur. Şekil 2.3' de OFDM iletiminin fiziksel katman işlem blokları gösterilmiştir [20].



Şekil 2.3 : OFDM fiziksel katman blok gösterimi.

Yukardaki işlemlerden sonra elde edilen OFDM sembolü sayısal bir işaret, sonrasında sayısal-analog çeviriciler (DAC) yardımıyla analog bir sinyal elde edilir. Elde edilen analog sinyalin bant genişliği, iletmek istenen verinin iletim hızına bağlı olarak değişir. Bu ihtiyaca göre fiziksel katman tasarım parametrelerinde FFT uzunluğu belirlenir. Gezgin WIMAX standardında seçimli olarak bu değer FFT uzunluğu 128, 512, 1024 veya 2048 olarak seçilebilir. Bu değerlere karşılık gelen bant genişlikleri ise 1.25, 5, 10, 20 MHz olarak belirlenmiştir [18].

Çizelge 2.2 : Seçimli OFDMA tekniğinin sistem parametreleri.

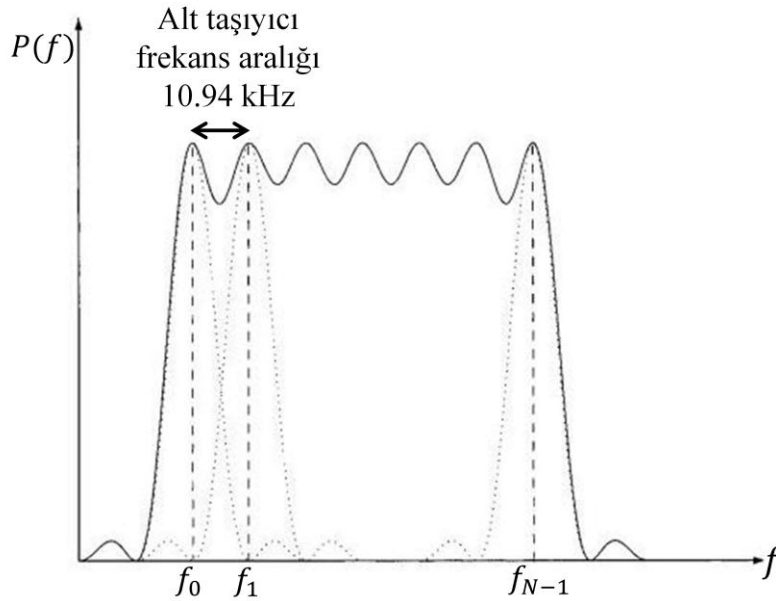
Bant Genişliği	1.25 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz
Örnekleme Faktörü	28/25			
Örnekleme Frekansı	1.4 MHz	5.6 MHz	11.2 MHz	22.4 MHz
FFT Uzunluğu	128	512	1024	2048
Veri Alt Taşıyıcı Sayısı	72	360	720	1440
Pilot Alt Taşıyıcı Sayısı	12	60	120	240
Koruma Bandı Alt Taşıyıcı Sayısı (DC Alt Taşıyıcısı dahil)	44	92	184	368
Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı	128	512	1024	2048
Alt Taşıyıcı Frekans Aralığı	10.94 kHz			
Çevrimsel Ön Ek Oranı	Tasarıma göre seçimli olarak 1/4, 1/8, 1/16, 1/32			
Anlamlı Sembol Süresi	91.4 us			
Çevrimsel Ön Ek Süresi (Koruma Bandı)	11.4 us (Çevrimsel Öne Ek Oranı = 1/8 için)			
OFDM Toplam Sembol Süresi	102.9 us			

Yukarıdaki Çizelge 2.2' de seçimli olarak belirlenebilen dik frekans bölmeli çoklu erişim tekniğinin (Scalable-OFDMA) fiziksel katman tasarım parametreleri verilmiştir. Gezgin WIMAX fiziksel katmanındaki parametreler veri iletim hızı ve iletim ortamının şartlarına göre farklı seçilebilmektedir.

Bant genişliği seçimi WIMAX sisteminin kullanılacağı frekans bandına göre izin verilen bant genişliği sınırlarına uygun olarak 1.25 MHz ile 20 MHz arasında

seçilebilmektedir. Çizelgede yer almayan frekans bantlarında tasarım seçimi yapılması halinde örnekleme faktörünü 8/7 olarak belirlenmelidir [18].

Örnekleme faktörü 1.25 MHz ve katlarında çizelgede belirtildiği üzere 28/25 olarak standartta belirtilmiştir. Bu değer OFDM sembolünün alıcıdaki örnekleme frekansını belirtmektedir. OFDM sembolü verici tarafında gönderilirken bu değer dikkate alınarak uygun saat frekansı ile DAC' a verilerin iletilmesini gerekir. Bu faktör her bir alt taşıyıcının birbirleri ile olan frekans aralığını belirler. Bu aralık, gezgin WIMAX şebekelerinin şehir alanlarında seyir halindeki durumuna göre optimum olarak 10.94 kHz seçilmiştir [19]. Şekil 2.4' de OFDM sembolünün spektrumu görülmektedir. Her bir alt taşıyıcının frekans aralığı sabit ve 10.94 kHz' dir [21].



Şekil 2.4 : OFDM sembolünün spektrumu.

FFT uzunluğu veri iletim hızı ihtiyacına uygun olarak 128, 512, 1024 ve 2048 olarak seçilebilmektedir. Bu değer aynı zamanda veri iletimi için kullanılacak olan alt taşıyıcıların sayısını da belirlemektedir. Bant genişliğine göre seçilen alt taşıyıcıların her biri bilgi iletimi için kullanılmaz. Her bant genişliğine göre değişen veri, pilot ve koruma bandı alt taşıyıcısı bulunur. Veri alt taşıyıcıları iletilmek istenen bilgileri taşır. Pilot alt taşıyıcıları, verici ve alıcıda ortak olarak sabit belirlenen pilot işaretlerdir. İletilecek olan bilgiye, iletim ortamının etkisini kestirilmek için kullanılır. Literatürde pilot işaret yardımı ile kanal kestirimi olarak geçmektedir. Koruma bandı alt taşıyıcıları ise her hangi bir bilgi içermez ve genlikleri sıfırdır. Bu alt taşıyıcılar OFDM sembolünün frekans bandını izin verilen bant aralığında tutmak

ve yan bantlara gürültü teşkil etmemek amaçlı önlem için konulmuştur. Frekans bölmeli çoğullamalarda yer alan koruma bandının işlevini görür.

Kablosuz iletim hatlarında gönderilen bilgi alıcıya çeşitli yollardan ve yansılardan geçerek ulaşır. Bu durum OFDM sembol süresince örneklenen alış bilgilerinin bozulmasına sebep olur. Bu durum literatürde çoklu yol sönümlemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı zamanlarda alıcıya ulaşan sembollerin birbirine girişim yaparak alınan sembolün bozulmasına sebep olur ve bu duruma rağmen alıcıda sağlıklı geri eldesi için çevrimsel ön ek kullanılır. Bu iletilen sembolün zaman olarak sonlarından belirli orandaki kısmı alınıp sembolün başına yerleştirilerek yapılır. Bu oran gezgin şebeke sisteminin kurulacağı hücrenin çapı ile orantılı olarak sembolün $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$ oranında seçilebilir. Bu işlem, zaman domeninde OFDM sinyalinin korunması olarak ifade edilebilir.

3. DİK FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA (OFDM) YÖNTEMİ

Gelişen teknoloji ile birlikte iletişim sistemlerindeki veri iletim hızına olan ihtiyaç katlanarak artmıştır. Bu ihtiyacın doğmasındaki en büyük sebep ise büyük oranda taşınabilir cihazların artması olarak gösterilebilir. İnternet ve sosyal ağların bu cihazlarda yaygınlaşması ile anlık veri iletim isteği artmıştır. Bu sebeple iletişim sistemlerinin, hızlı veri iletimine uygun ve gezgin şebekelere destek verecek şekilde gelişmesini sağlamıştır. Teknolojinin gelişimi ile video ve ses yayınlarının kalitesi artmış, sosyal paylaşım ortamlarının ve anlık veri iletimi yapan uygulamaların yaygınlaşması ile veri iletim ihtiyacı katlanmıştır. Bu iletim alt yapısının sağlanmasındaki en önemli gereksinim olan frekans bandı ise kısıtlı bir kaynaktır. Son zamanlarda iletişim sistemlerinde bant verimliliği yüksek olan Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) tekniği popülerlik kazanmıştır. OFDM artan veri iletim ihtiyacını karşılamak için çok taşıyıcılı sistemlere göre bant verimliliği oldukça yüksek bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Şu an Sayısal Ses Yayıncılığı (DAB), Sayısal Video Yayıncılığı (DVB), Asenkron Sayısal Abone Hattı (ADSL), Kablosuz Yerel Alan Ağları (802.11), Kablosuz Şehir Alan Ağları (802.16) ve LTE gibi iletişim sistemlerinin alt yapısında bulunmaktadır [2].

3.1 OFDM Yönteminin Gelişimi

OFDM sisteminin son yıllarda popülerleşmesinin aksine gelişimi 1950' li yıllardan başlamıştır. Bu yıllarda frekans bölmeli çoğullama tekniği ile çoklu kanal modülasyon yöntemi olan OFDM KINEPLEX, ANDEFT ve KATHRYN gibi askeri iletişim sistemlerinde kullanılmıştır. 1966 yılında Robert W. Chang ilk OFDM sistemini çok sayıda osilatör kullanarak bilginin eş zamanlı gönderilebileceğini matematiksel olarak öne sürmüştür. Daha sonra 1970 yılında Amerika Birleşik Devlet' inden sistemin patentini almıştır.

OFDM sistemi bu haliyle çok sayıda osilatör kullanımını gerektirdiğinden uygulanabilmesi zor olan bir sistem olarak tanımlanmıştır. 1971 yılında Weinstein ve Ebert ayrık fourier dönüşümü (DFT) tekniği ile OFDM sistemini gerçeklemeyi

önermiştir. DFT tekniği OFDM sistemindeki çok sayıda osilatör kullanım gereksinimi ortadan kaldırarak sistemin karmaşıklığı azaltmış ve daha kolay uygulanabilir bir tasarıma dönüştürmüştür.

OFDM sisteminin diğer bir sorunu ise kablosuz iletişim sistemlerindeki çoklu yol iletiminden dolayı sembollerin alıcıda farklı zamanlarda alınmasıdır. Bu OFDM sembollerinin girişimine sebep olduğu için her bir sembol iletiminden sonra bir süre beklenerek diğer sembol gönderilmiş böylece semboller arası girişim engellenmeye çalışılmıştır. Bu yöntemin ise farklı bir sorunu bulunmaktadır. Alıcıda FFT penceresi ile OFDM sembolü örneklenirken, o anki iletilen sembolün farklı zamanlarda alıcıya ulaşan tekrarlarının, frekans bileşenlerindeki kayıplardan dolayı alt taşıyıcılar arası girişim (ICI) meydana getirmektedir. 1980' de iletilen OFDM sembollerinin alıcıda birbirine girişmesi probleminin çözümü için önemli bir çalışma yapıldı. Ruiz ve Pelet IFFT işlemi sonrasında OFDM sembolüne çevrimsel ön ek kullanarak semboller arası girişimi engellemeyi önermiştir. Çevrimsel ön ek ekleme işlemi bir OFDM sembolünün son iletilen örneklerinden belirli bir kısmı kopyalanarak OFDM sembolünün başına eklenmesi işlemidir. Bu sayede OFDM sembolleri arasında boş süre bırakmak yerine sembolün FFT penceresindeki frekans bütünlüğü korunarak, hem alt taşıyıcılar arası girişim hem de semboller arası girişim engellenmiştir. Bu yöntemle semboller arası boş süre bırakmak yerine sembolün bir çevrimsel ön ek kısmı iletildiği için enerji verimliliği düşük olsa da OFDM sisteminin karmaşıklığını azaltmak adına günümüze kadar uzanan önemli bir gelişmedir.

Bu gelişmeler ışığında OFDM sisteminin ilk ticari uygulaması 1987' de Sayısal Ses Yayıncılığının geliştirilmeye başlaması ile olmuştur, 1994' te ise standartlaşmıştır [10]. 1990' larda OFDM teknolojisi HDSL, ADSL, VDSL gibi sayısal haberleşme sistemlerinde kullanılmıştır. Daha sonra Sayısal Video Yayıncılığında (DVB), Kablosuz Yerel Ağlarda (WLAN) ve 4. Nesil kablosuz iletişim sistemleri olan WIMAX ve LTE sistemlerinin fiziksel katman standartlarında yerini almıştır. Böylece OFDM sistemi, günümüz haberleşme sistemlerinde en çok tercih edilen alt yapı olarak standartlara geçmiştir.

3.2 OFDM Yöntemi ve Özellikleri

3.2.1 Tek ve çok taşıyıcılı haberleşme sistemleri ve OFDM

Haberleşme sistemlerinde iletilecek olan verinin, iletimin yapılacağı ortam şartlarına uygun hale getirilmesi işlemine modülasyon adı verilmiştir. Bilginin, istenen iletim şekline uygun olarak hangi frekansta iletilmesi gerektiği önceden belirlendikten sonra alt taşıyıcı ile çarpılması işlemi modülasyonun bir parçasıdır. Haberleşme sistemlerinde tek taşıyıcı ile bu işlem yapılabildiği gibi çok sayıda taşıyıcı kullanarak da iletilmek istenen bilginin aktarılması mümkündür.

Çok taşıyıcılı sistemler her ne kadar OFDM tekniği ile günümüzde yaygınlaşsa da 1960' larda Kineplex askeri haberleşme sistemlerinde dahi kullanılmıştır. OFDM tekniğinin kablosuz haberleşme sistemleri için çok önemli avantajları bulunduğundan günümüzde popülerliği artmıştır.

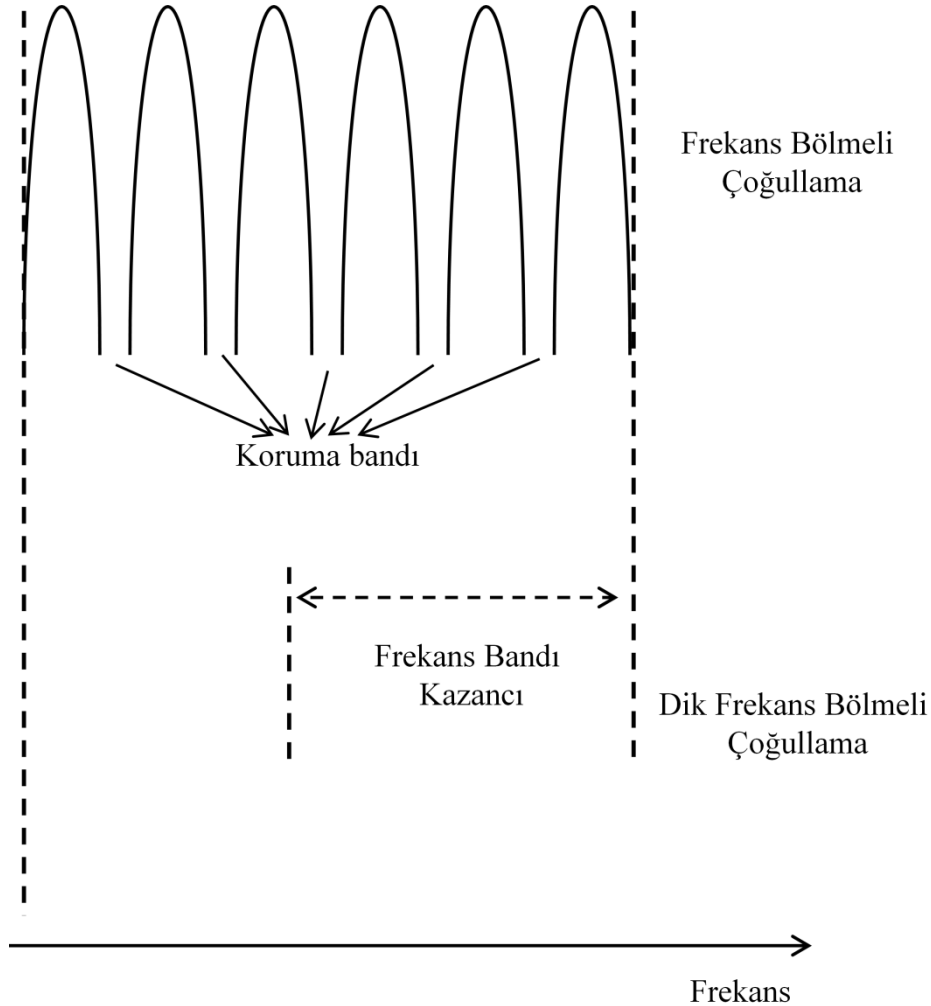
Bu avantajlardan ilki derin çentik sönmölmelere karşı bilgiyi daha dirençli kılar. Bunun sebebi taşınacak olan bilgi bütünü belirli bir kurala göre alt taşıyıcılara ayrıştırıldığından hata düzeltme yöntemleri ile kaybolan bilginin geri kazanımı daha kolaydır.

Çok sayıda bilgi eğer fazla frekans bandı kullanarak tek taşıyıcıda iletilmek istenirse bu zaman domeninde sinyalin çok kısa sürede gönderilmesine sebep olur. Bu yöntem sistemi semboller arası girişime (ISI) daha duyarlı hale getirir. Eğer iletilmek istenen veri toplamda aynı frekans bandını kullanan alt taşıyıcılara bölünerek gönderilirse her bir sembolün gönderim süresi uzayacağı için semboller arası girişim (ISI) duyarlılığı da önemli ölçüde azalmış olur.

İletilmek istenen veri miktarı arttığında kullanılan frekans bandı da artacağından bunu tek taşıyıcı kullanarak yaptığımızda sinyali, frekans seçici sönmölmeye karşı hassas hale getirmektedir. İletim ortamının frekans cevabına göre bu duyarlılık değişkenlik gösterse de çok taşıyıcılı sistemler kullanıldığında frekans bandı çok sayıda alt taşıyıcıya bölünerek sistemin frekans seçici sönmölmeye karşı duyarlılığı azaltılabilmektedir.

Çok taşıyıcılı sistemlerin tüm bu faydalarının yanı sıra veri iletim hızının artırılması için bant genişliğinin fazla kullanımı önemli bir tasarım unsurudur. OFDM tekniği

bant genişliğinin verimli kullanımı açısından çok taşıyıcılı sistemlere göre çok önemli bir avantaj sağlamaktadır. Frekans bölmeli çoğullama tekniğinde alt taşıyıcılar arası frekans bantlarının örtüşmesi istenmeyen bir unsurdur. Bu örtüşme, alıcıda bilginin tekrar elde edilmesini güçleştiren alt taşıyıcılar arası girişim (ICI) olarak adlandırılır. Bu örtüşmeyi engellemek için alt taşıyıcılar arasında koruma bantları bırakılmıştır. OFDM tekniğinde ise alt taşıyıcıların kontrollü olarak örtüşmesine izin veren bir yapı önerilmektedir. Birbirine dik olarak belirlenen frekanslarda seçilen alt taşıyıcılar ile frekans bölgesinde örtüşme olsa dahi alıcıdaki örnekleme anlarında diğer alt taşıyıcıların bozucu etkisi teorik olarak engellenmiştir. Bu kavram OFDM tekniğinde alt taşıyıcıların diklik özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.1’ de OFDM tekniğinin bant verimliliği bakımından FDM’ e olan üstünlüğü gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : OFDM ve FDM sisteminin bant verimliliğinin kıyaslanması.

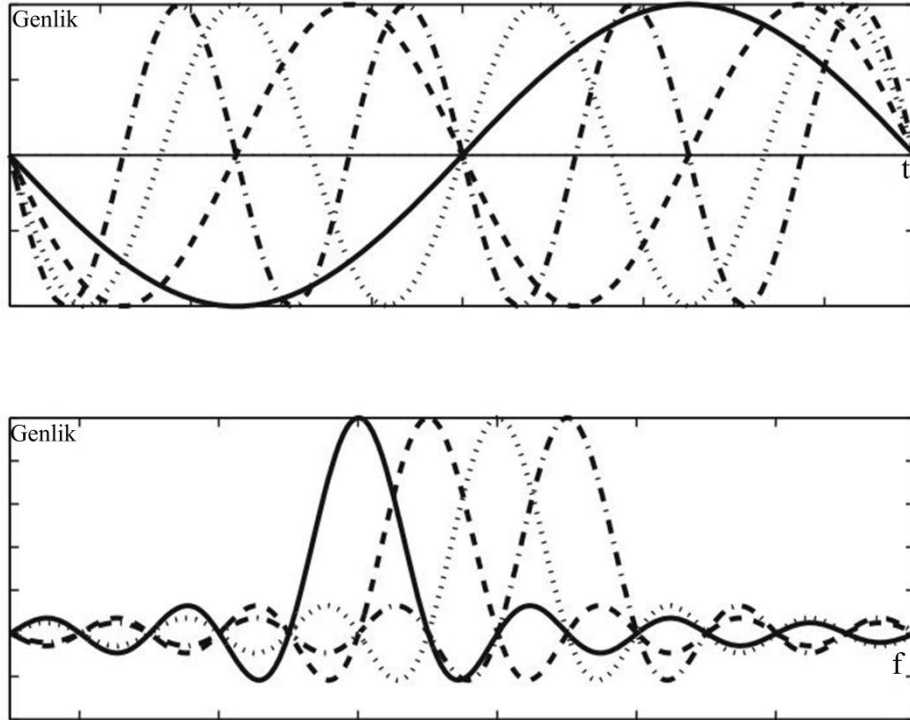
3.2.2 OFDM sisteminin özellikleri ve analizi

3.2.2.1 Diklik özelliği

Dik Frekans Bölmeli Çoğullama tekniğinin temel özelliklerinden birisi sistemde tanımlanan alt taşıyıcıların birbirine dik olması özelliğidir. Bu teknikte kullanılan alt taşıyıcılar belirli bir periyod için tanımlanan sinüzoidal işaretler kullanılarak oluşturulmuştur. Eğer frekansı 1 Hertz olan bir sinüzoidal işaret ile frekansı 2, 3, 4 Hertz vb. gibi 1 Hertz' in tam sayı katları frekansında olan diğer sinüzoidal işaretlerin her birinin birbirleri ile ayrı ayrı çarpımlarının oluşturduğu işaretin integrali 1 saniyelik periyod için alınırsa sonuç sifıra eşit olur. Bu diklik koşulunun tanımlanmasıdır (3.1).

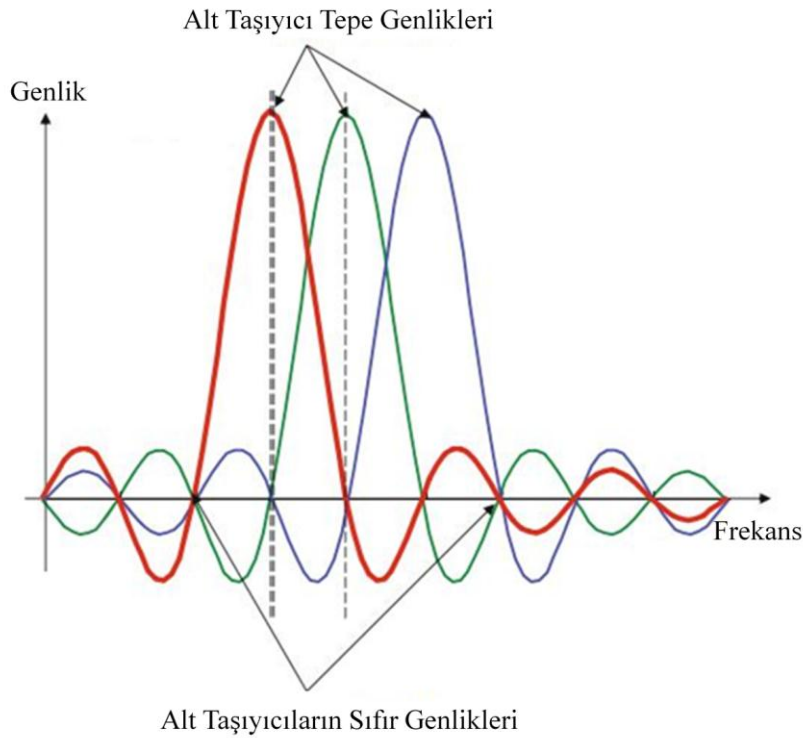
$$\int_0^T e^{\frac{j2\pi t(i-m)}{T}} dt = \begin{cases} 0 & i \neq m \\ T & i = m \end{cases} \quad (3.1)$$

Eğer biz birbirine dik olan alt taşıyıcılar oluşturmak istiyorsak her bir alt taşıyıcıyı ifade eden sinüzoidal işaretinin periyodunu 1 sn. olarak pencerelemeliyiz. T sinüs işaretlerinin periyodunu göstermek üzere seçilen herhangi alt taşıyıcının indisi i ve m ile gösterilmiştir. Şekil 3.2' de bir tam periyod boyunca verilen 4 alt taşıyıcılı OFDM sinyalinin zaman ve frekans bölgesindeki çıktısı gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : OFDM sinyalinin zaman ve frekans bölgesi analizi.

Belirli bir periyod için bu analiz yapıldığından sinüzoidal işaretlerin spektrumu da “sinc” fonksiyonuna karşılık gelir. Bu işaretlerin her birine 1 Hertz’ lik sinüzoidal işaretin harmonikleri olarak adlandırılır. Bu sebeple her bir alt taşıyıcı diğer alt taşıyıcıların tam katı olan frekanslarda üretildiği için birbirlerinin harmonikleri olarak tanımlanır. Bu özelliğin faydası üretilen OFDM sembolünün frekans bölgesindeki analizinde görülür. Her bir alt taşıyıcının frekans bölgesindeki maksimum genliğe ulaştığı frekansta diğer alt taşıyıcıların genliği teorik olarak sıfırdır. Bu sayede üretilen alt taşıyıcıların her birinde taşınan bilgi diğer alt taşıyıcılar ile girişime uğramaz. Bu teorik sonucun bir getirisi fakat gerçekte alt taşıyıcıların diklik koşulunun kaybolması, örnekleme anlarında örneklenen alt taşıyıcının bilgisinin bozulmasına sebep olur. Bu problem alt taşıyıcılar arası girişim (ICI) olarak adlandırılır. Şekil 3.3’ de alt taşıyıcıların örnekleme anlarındaki tepe genlikleri ve komşu alt taşıyıcıların örnekleme anlarında sıfır genlikte olduğu gösterilmiştir [10].



Şekil 3.3 : OFDM sinyalinin örnekleme anlarındaki alt taşıyıcı genlikleri.

3.2.2.2 OFDM sinyalinin analizi

OFDM sinyali bilgiyi, birden fazla alt taşıyıcı üzerinde bölerek paralel taşıdığından genel bir toplam sembolü ile ifade edilebilirler. WIMAX standardında belirtilen OFDM işareti denklem (3.2) ile belirtilmiştir [18].

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{k=-(N_{\text{kullanilan}}-1)/2}^{(N_{\text{kullanilan}}-1)/2} c_k \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t-T_g)} \right\} \quad k \neq 0 \quad (3.2)$$

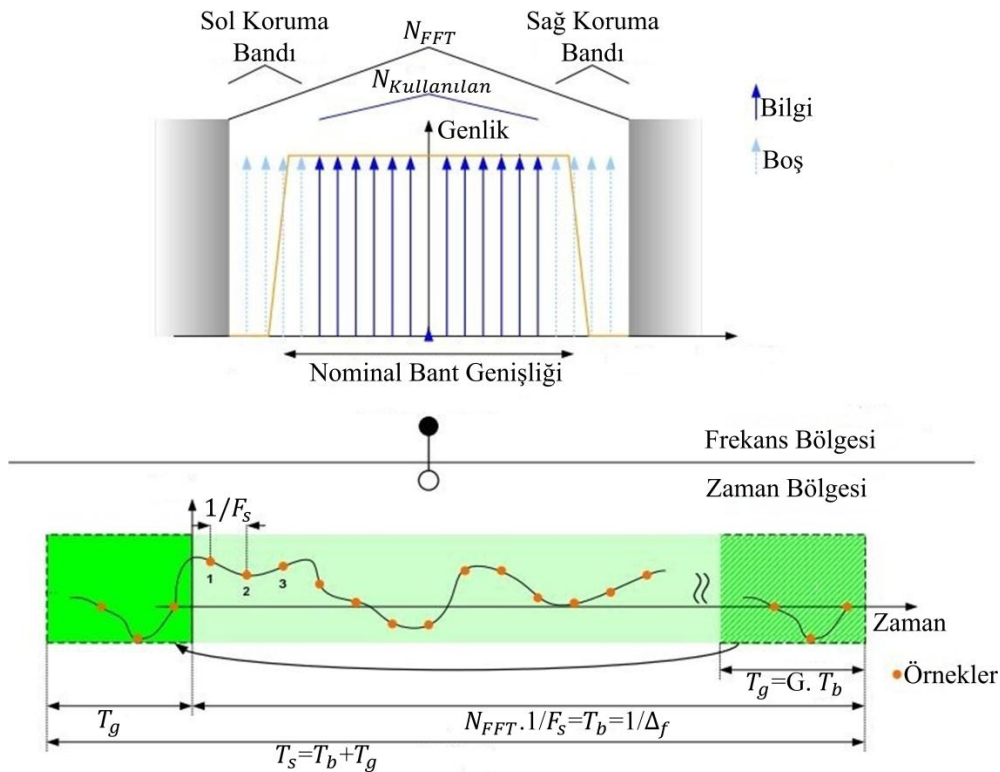
Belirtilen denklemde, k kullanılan alt taşıyıcının indisini, N kullanılacak olan alt taşıyıcı sayısını, c_k dik genlik modülasyonu ile üretilen ve her bir alt taşıyıcıda taşınan bilgi sembolünü, Δf alt taşıyıcılar arasındaki frekans aralığını, T_g üretilen OFDM sembolünün zaman bölgesindeki koruma bandı olan çevrimsel ön ek uzunluğunu ve f_c ise üretilen OFDM sembolünün RF bantlarda taşınacağını frekansı belirtir.

Denkleme uygun olarak üretilen OFDM sembolünde her bir alt taşıyıcının frekansı k indisi ile belirlenir. Her bir c_k bilgisi ise k . alt taşıyıcıda taşınacak olan bilgiyi temsil eder. OFDM sembolünün bir periyodu için belirlenen alt taşıyıcıların bir birine dik olmasından dolayı alıcıda, bilgisi geri elde edilmek istenen alt taşıyıcının frekansı ile OFDM sembolü çarpılıp integrali OFDM sembolü periyodunca alınırsa o taşıyıcıya ait bilgiyi elde etmiş oluruz. Alt taşıyıcıların dik olmasından dolayı OFDM sembolünde bulunan diğer alt taşıyıcının aynı işlemdeki integralinin sonucu sıfıra eşit olur. Dolayısı ile eğer iletmek istediğimiz bilgiyi alt parçalara ayırdıktan ve bilgi sembollerini istenen modülasyon derecesi ile oluşturduktan sonra her birini diklik koşulunu sağlayacak şekilde ürettiğimiz sinüzoidal işaretler ile çarpıp toplayarak kablosuz ortama iletirsek alt taşıyıcıların frekanstaki örtüşmelerine rağmen alıcıda, her bir bilgi parçasını taşıdığı frekanslarda ayrı ayrı çarparak demodüle edip geri elde edebiliriz. 1971’de bu işlevin ayrık fourier dönüşümü ile yapılabildiği gösterilmiştir.

Böylece OFDM sinyalinin üretilmesi için ayrık fourier dönüşümü algoritmalarının kullanılması çok sayıdaki osilatör ihtiyacını da ortadan kaldırmıştır. Denklemde belirtilen formül vericide ters ayrık fourier dönüşümü (IDFT) kullanmayı ifade etmektedir (3.2). Matematiksel gerçekleştirme açısından fourier dönüşüm çiftinin OFDM sinyalinin üretilmesinde bir farklılık oluşturmamaktadır. Örneğin vericide IDFT, alıcıda DFT kullanmanız ile vericide DFT kullanılıp, alıcıda IDFT kullanmanız arasında gerçekleştirme açısından bir fark bulunmaz. OFDM sisteminde DFT matematiksel bir işlev olarak kullanılmıştır ve bilgi parçalarını her bir alt taşıyıcı ile çarpma görevini üstlenir.

3.2.2.3 OFDM sistemi ve temel kavramları

OFDM tekniğinin tasarımı yapılırken, ihtiyaç olan veri iletim hızı ve bunun için gerekli olan bant genişliği en temel unsurdur. İzin verilen frekans bandında izin verilen maksimum bant genişliğine göre tasarım yapılır. Kullanılacak frekans bandına göre yayın yapılacak olan f_c frekansı belirlenir. Bant genişliği seçiminden sonra standartta belirtilen alt taşıyıcı sayısı ve örnekleme faktörüne göre alt taşıyıcılar arası frekans bandı belirlenir. Örnekleme frekansı vericide sayısal analog dönüştürücünün, alıcıda ise analog sayısal dönüştürücünün çalışma frekansını belirler. Şekil 3.4’ de OFDM sinyalinin frekans ve zaman bölgesindeki analizi gösterilmektedir. Her bir alt taşıyıcı frekans aralığı Δf ile anlamlı sembol süresi ise T_b ile verilmiştir. Diklik koşulu gereği alt taşıyıcıların merkez frekans $1/T_b$ değerinin tam sayı katları ile değişir. Örnekleme frekansı ise WIMAX parametrelerinde belirtilen örnekleme faktörü ile belirlenir.

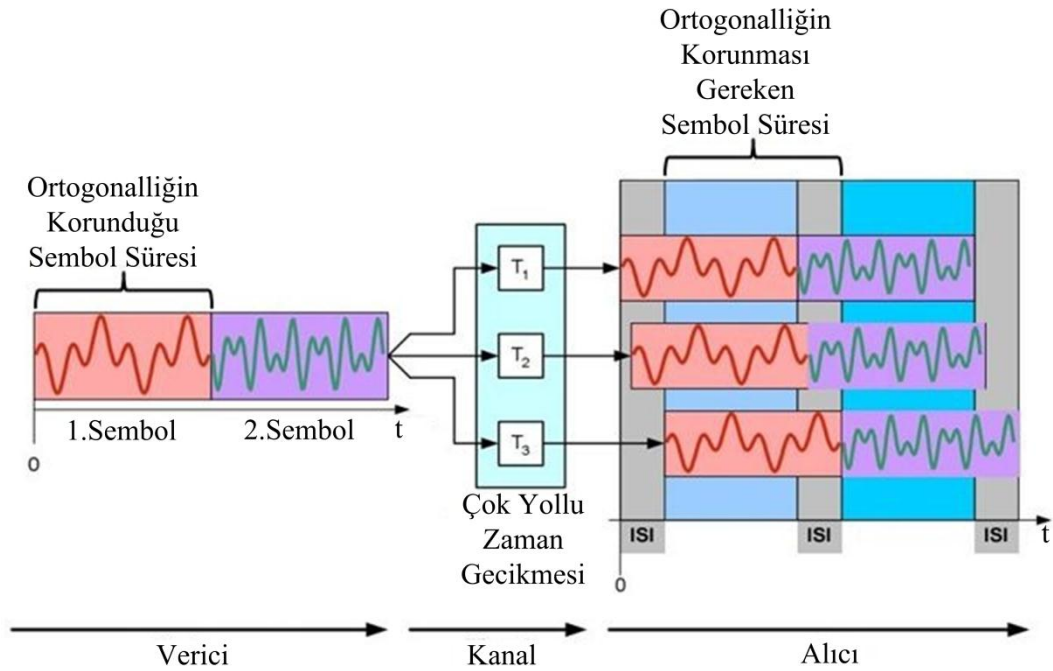


Şekil 3.4 : OFDM sinyalinin temel kavramları.

OFDM sistemindeki alt taşıyıcıları üç farklı alt başlıkta sınıflandırabiliriz. Birincisi bilgi iletiminde kullanılacak olan veri alt taşıyıcılarıdır. İletilecek olan bilgi sembolü modülasyon derecesine göre oluşturulduktan sonra bu alt taşıyıcılar tarafından taşınır. İkinci grup pilot alt taşıyıcılar olarak isimlendirilir. Bu işaretler hem verici

hem de alıcı tarafından bilinen özel işaretlerdir. Alıcıda kanal kestirimi için kullanılır. Veri iletimine direk katkısı yoktur. Literatürde pilot yardımıyla kanal kestirimi yapmak olarak adlandırılır. Üçüncü grup alt taşıyıcılar ise kullanılmayan ve sıfır genlikli olarak gönderilen işaretlerdir. Frekans bölgesindeki komşu bantlarla OFDM işareti arasında koruma bandı oluşturur.

Diğer bir tasarım unsuru ise koruma bandının (Guard Interval) anlamlı OFDM sembolüne oranla ne kadar uzunlukta olacağını belirlemektir. Kablosuz iletişim sistemlerinde meydana gelen çok yol girişim problemi OFDM sembollerinin birbiri ile girişimine sebep olmaktadır. Bu literatürde semboller arası girişim (ISI) olarak adlandırılır. Bu durumu engellemek için her bir OFDM sembolüne koruma bandı eklenir. Koruma bandı, OFDM sembolüne çevrimsel ön ek (CP) ekleme işlemi ile yapılmaktadır. Şekil 3.5’ de koruma bandı olmadan art arda gönderilen iki OFDM sembolünün alıcıdaki örneklem penceresi ve semboller arası girişim gösterilmiştir.

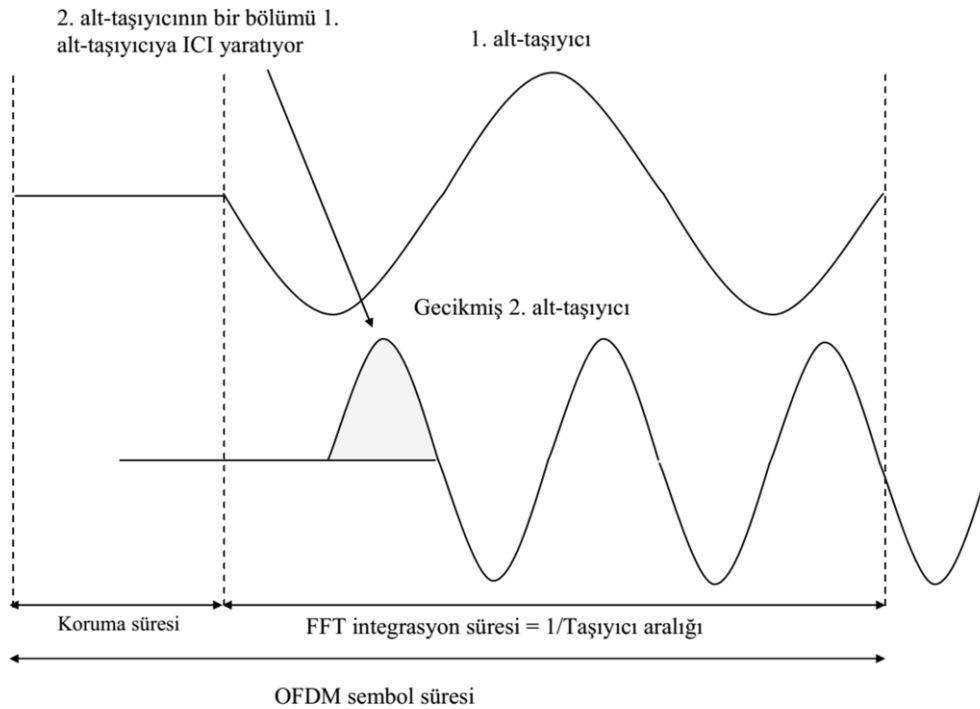


Şekil 3.5 : Art arda gönderilen iki OFDM sinyalinin alıcıdaki girişimi.

Çoklu yol iletiminden kaynaklanan farklı zaman gecikmeleri iki farklı semboller arası girişime sebep olmaktadır. Birinci girişim mavi bölgede kalan kısımda o an gönderilen sembolün aynısının farklı zamanlarda alıcıya ulaşması ile oluşan girişimdir. Bu etki OFDM sistemlerinde olumlu bir etki olarak karşımıza çıkmaktadır. Her bir alt taşıyıcının diğerleri ile dik olduğu için aynı işaretin frekans

bileşenlerinin artmasını sağlar. Bu da her bir alt taşıyıcının sinyal/gürültü oranını artırır.

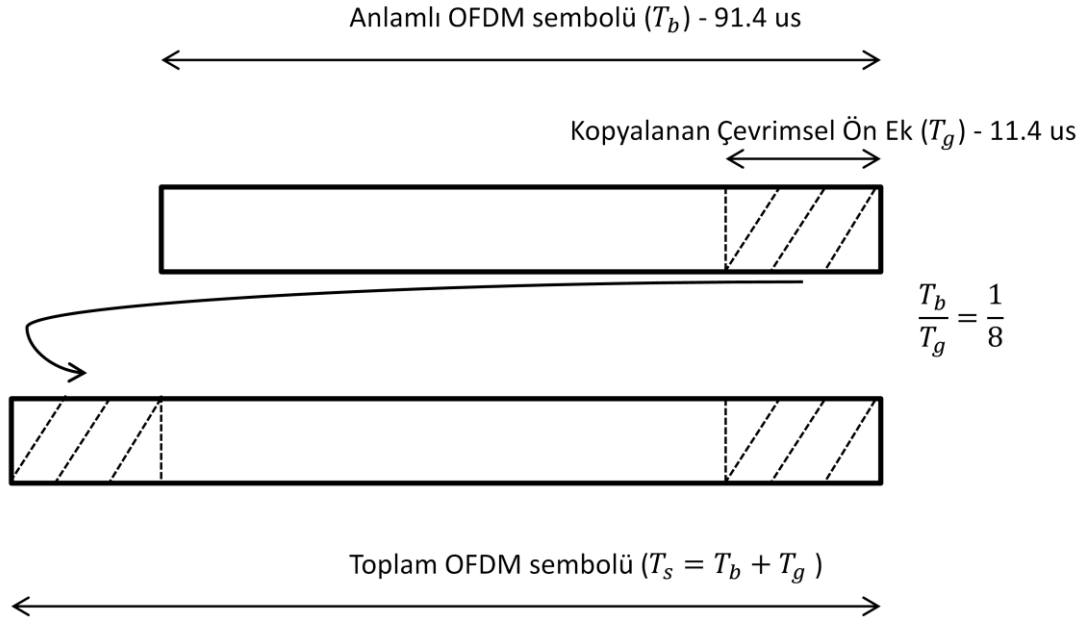
İkincisi ise iki farklı sembolün alıcıda girişimidir. 1980’ deki Ruiz ve Peled’ in çevrimsel ön ek öneren çalışmasından önce iki sembol arasında boş zaman bırakarak koruma bandı oluşturulmaktaydı. Bu durum art arda gönderilen iki sembolün girişimini engellese de aynı sembolün alıcıda farklı zamanlarda alınmasından kaynaklanan alt taşıyıcılar arası girişim meydana geliyordu. Şekil 3.6’ da aynı sembolün iki farklı zamanda alıcıya ulaşan örneklerinden iki farklı alt taşıyıcısı gösterilmiştir [16]. Farklı zamanda ulaşan sembolün ikinci alt taşıyıcısının FFT integrasyon süresince frekans bütünlüğü korunmuyor, geciken alt taşıyıcının spektrumunda meydana gelen bozulma alt taşıyıcılar arası girişime (ICI) neden oluyordu.



Şekil 3.6 : Koruma bölgesinde bırakılan boş sembolün meydana getirdiği ICI.

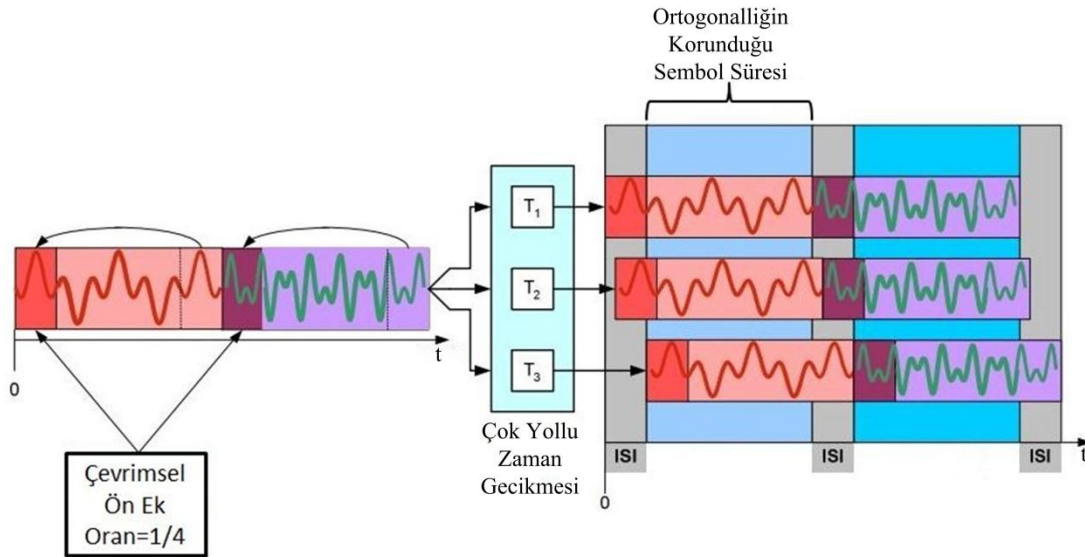
1980’ de koruma bandı süresince çevrimsel ön eklenmesi ile hem semboller arası girişim hem de alt taşıyıcılar arası girişim teorik olarak engellenmiş oldu. Bu yöntemde çevrimsel ön ek eklenmemiş OFDM sembolüne anlamlı sembol süresi olarak adlandırılır. Koruma bandının eklenmesinin ardından toplam OFDM sembolü elde edilir. Çevrimsel ön ek oranı WIMAX standardına göre 1/4, 1/8, 1/16, 1/32

seçilebilmektedir. Bu seçimin yapılmasında iletim ortamının yayılım gecikmesi (delay spread) göz önünde bulundurulmalıdır. Bu süre gönderilen sembolün alıcıya ilk ulaşan bileşeni ile aynı sembolün son ulaşan bileşeni arasındaki süre olarak tanımlanır. Bu süre iletim kanalının karakterine göre değişiklik gösterir. Eğer koruma bandının süresi yayılım gecikmesinden uzun tutulursa semboller arası girişim engellenmiş olur. Bu faydasının yanı sıra uzun koruma bandı ise enerji verimliliği açısından olumsuz bir faktördür. Koruma bandının seçimi yapılırken semboller arası girişimin engellendiği mümkün olan en kısa süre seçilmelidir. Şekil 3.7’ de çevrimsel ön ek ekleme işlemiyle koruma bandının oluşturulması gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : OFDM sembolüne çevrimsel ön ek ekleme işlemi.

OFDM sembolüne çevrimsel ön ek eklenerek semboller arası girişimin engellenmesi Şekil 3.8’ de gösterilmiştir. Eklenen çevrimsel ön ek ile alt taşıyıcıların birbirine dik olması özelliği korunmuş ve böylece teorik olarak alt taşıyıcılar arası girişim (ICI) ortadan kalkmıştır.



Şekil 3.8 : OFDM sembolüne eklenen çevrimsel ön ek ile ISI' nın engellenmesi.

Kablosuz iletim ortamında diğer önemli kavram olan evre uyumlu bant genişliği (coherence bandwidth), yayılım gecikmesi (delay spread) ile ters orantılıdır. OFDM sistemlerindeki alt taşıyıcıların frekans aralığı iletim ortamının evre uyumlu bant genişliğine oranla çok küçük seçilmesi alt taşıyıcıların her birinin düz sönümlenmeye uğramasını sağlar. Tam tersi durumda eğer alt taşıyıcı frekans aralığı evre uyumlu bant genişliğinden büyük seçilirse her bir alt taşıyıcı iletim ortamında frekans seçici sönümlenmeye maruz kalır. Bu durum alıcıda, düz sönümlenmeye nazaran sistem başarımını azaltan bir unsurdur. Yayılım gecikmesi 10us civarı olan bir iletim ortamını ele alırsak evre uyumlu bant genişliği 100 kHz olacaktır ve bu değer gezgin WIMAX sisteminde 10.94 kHz olarak seçilen sabit alt taşıyıcı frekans aralığına oranla 10 kat daha büyüktür.

Kablosuz iletişim sistemlerinin gezgin şebekelerde kullanılmasından kaynaklanan bir diğer önemli bozucu etki ise Doppler frekans kaymasıdır. Birbirine göre hareketli olan şebekelerde hareket hızına, haberleşmede kullanılan taşıyıcı frekansa ve dalganın yayılım doğrultusuna bağlı olarak frekansta kayma meydana gelir. Gönderici sistem ile alıcı sistem arasındaki bu frekans kayması alt taşıyıcıların örnekleme anlarında girişime sebep olur. Denklem (3.3)' de D_s Doppler kaymasını, V gezgin şebekenin hızını, F iletişim frekansını, C ışık hızını ve A dalganın geliş doğrultusu ile gezgin şebekenin hareket doğrultusu arasındaki açıyı temsil etmektedir.

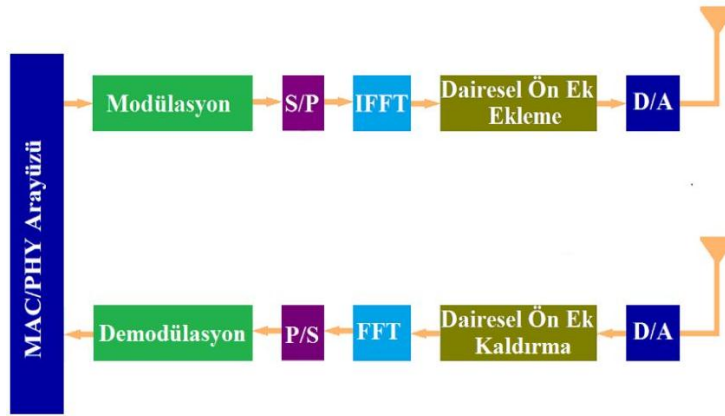
$$D_s = \left(\frac{VF}{c}\right) \cos(A) \quad (3.3)$$

Bu denklemden yola çıkarak 3.5 GHz frekans bandını kullanan ve 120 km/sa gezgin hıza sahip olan bir şebekenin maksimum Doppler frekans kayması ≈ 378 Hertz bulunmaktadır (3.3). Bu kayma alıcı ve verici sistemler arası eş zamanlama sorununa sebep olur. Bu durumun etkisini minimumda tutmak ve eş zamanlama problemini aşabilmek için alt taşıyıcılar arası frekans aralığı Doppler frekans kaymasının en az 10 katı olmalıdır ve bu etki göz önünde bulundurularak WIMAX sisteminde alt taşıyıcılar arası frekans aralığı sabit ≈ 10.94 kHz seçilmiştir.

Kablosuz gezgin iletişim sistemlerinde Doppler etkisi ile ters orantılı olan evre uyumlu zaman kavramı bulunmaktadır. Bu kavram iletim kanalının sönümleme hızı belirler. Bir başka deyişle kanal frekans cevabının ne sıklıkla değiştiğinin bilgisini verir. Eğer iletim sembolü evre uyumlu zaman süresinden kısa ise kanal durumu sembole göre yavaş değişir. Bu durum literatürde yavaş sönümleme olarak isimlendirilmiştir. Bu sebeple OFDM sembolü bu süreye oranla çok kısa tutulmaktadır. Bu durum gönderilen OFDM sembolü süresince kanal durumunun yavaş değişmesinden faydalanarak kanal kestirim performansını arttırmayı sağlar. Eğer çok kısa OFDM sembolü kullanırsak alt taşıyıcılar arası frekans aralığı da buna nazaran artacağından bant verimliliğinden ödün vermiş oluruz.

WIMAX standardı tüm bu tasarım unsurları doğrultusunda gezgin şebekeler için, sabit OFDM sembol süresi ve sabit alt taşıyıcı frekans aralığı belirlemiştir [18].

OFDM sembolünü oluşturmak için genel sistemin sinyal işleme blokları Şekil 3.9' da verilmiştir [5]. İletilmek istenen bilgi bitleri fiziksel katmana ulaştığında tasarımın modülasyon derecesine göre QAM sembollerine dönüştürülür. Elde edilen semboller paralelleştirme işlemi ile IFFT bloğuna gönderilir. IFFT bloğu bilgi sembollerini birbirine dik olan alt taşıyıcılar ile çarparak modüle eder. Sonrasında elde edilen OFDM sembolünün alıcıda ISI ya maruz kalmaması için çevrimsel ön ek eklenir. Elde ettiğimiz sayısal veriler analog dönüştürücüden geçerek RF katmanına iletilir ve antene gönderilir.



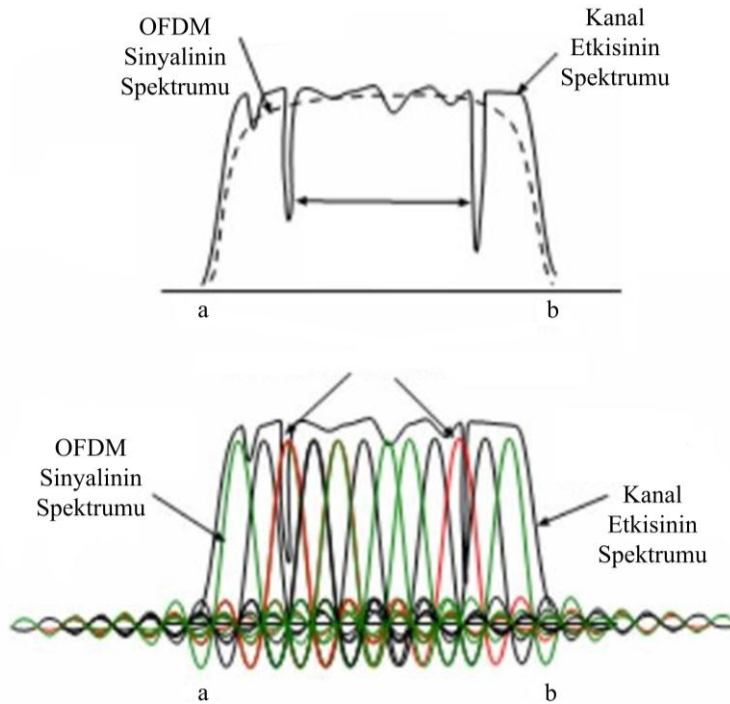
Şekil 3.9 : OFDM sisteminin fiziksel katman blok gösterimi.

3.2.3 OFDM sisteminin avantaj ve dezavantajları

OFDM sisteminin kablosuz iletişim sistemleri için önemli avantajları bulunmaktadır. Bu avantajların bazıları önceki konu başlıklarında değinilmesine rağmen bu bölümde maddeler halinde aşağıdaki şekilde toplanmıştır.

OFDM sistemi frekans bandının kullanımı açısından verimli bir sistemdir. Birbirine kontrollü olarak örtüşen alt taşıyıcılar kullanılır.

OFDM sisteminde bilgi alt taşıyıcılara bölerek iletildiğinden dar bant çentik sönümlemelere karşı hata düzeltme algoritmaları ile sistemi dirençli kılar. Şekil 3.10’da kanaldaki anlık çentik sönümlemelere karşı sadece bazı alt taşıyıcıların bilgi kaybı yaşadığı gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : OFDM sisteminin maruz kaldığı çentik sönümleme.

OFDM sisteminde iletilecek bilgi alt taşıyıcılara bölünerek taşındığından her bir alt taşıyıcı düz sönümlemeye uğrar. Bu durum dengeleyici tabanlı diğer alıcı sistemlerine nazaran işlem karmaşıklığını azaltır [10].

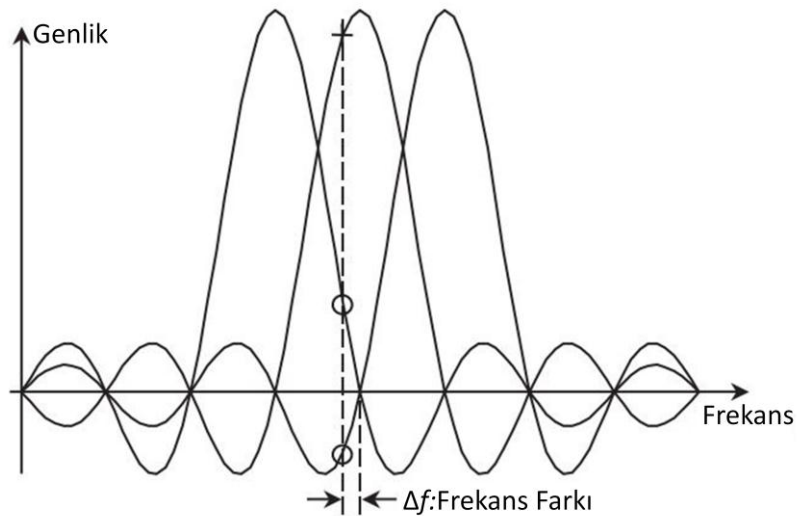
OFDM sistemi diğer tek taşıyıcılı sistemlere nazaran frekans seçici sönümlemeye karşı dirençlidir.

OFDM sistemindeki sembol süreleri kanalın evre uyumluluk süresine oranla kısa olduğundan yavaş sönümlemeye uğrar. Bu durum kanal kestirim başarımını artırır. Böylece sistemin hata başarımı iyileşir.

OFDM verici sistem tasarımı işlemsel karmaşıklık olarak standart dengeleyici tabanlı alıcı sistemlerine nazaran düşüktür. IFFT işlemi sayesinde iletilecek bilgiler çok sayıda alt taşıyıcılara kolayca yerleştirilmiş olur.

OFDM sisteminin sahip olduğu avantajlara rağmen önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bu unsurlar sistem tasarımı açısından göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu dezavantajlar maddeler halinde aşağıdaki gibi toplanmıştır.

OFDM sistemi alıcı ve verici arasındaki frekans ve zaman senkronizasyonuna oldukça duyarlıdır. Verici ve alıcı sistemlerindeki çalışma frekansları elbette teorideki gibi kusursuz olamaz. Bu durum alıcıda alt taşıyıcıların tepe genliklerinde örneklenmemesine sebep olur. Bu durum literatürde taşıyıcı frekanslar arasındaki fark (Carrier Frequency Offset) olarak isimlendirilir ve alt taşıyıcılar arası girişime (ICI) neden olur. Şekil 3.11’ de frekans kayması ve alt taşıyıcılar arası girişim gösterilmiştir [21].



Şekil 3.11 : OFDM sisteminin maruz kaldığı frekans kayması ve ICI.

Her iki taraftaki frekans eş zamanlaması sağlansa bile gezgin şebekelerdeki Doppler etkisi yine bu frekans kaymasına sebep olabilir. Bunun yanı sıra verici ve alıcı sistemlerinde zaman senkronizasyonu da gereklidir. Bu işlem alıcıda OFDM sembolünün doğru zamanda örneklenmesini sağlar. Doğru anda örneklenmeyen OFDM sembolünün çıktıları anlamsız olur ve FFT ile demodülasyonu mümkün olmaz. Özetle alıcı ve verici sistemleri hem frekans hem de zaman bölgesinde senkronizasyona çok duyarlıdır. Bu sebeple alıcı tarafında frekans ve zaman bölgesinde senkronizasyon algoritmaları işletilir.

OFDM sisteminde iletimin tepe gücü ile ortalama güç arasındaki oran (Peak to Average Ratio - PAPR) fazladır. Bu oran tüm OFDM sembolü göz önünde bulundurulduğunda anlık olarak genliği maksimum olan örnek alınarak ortalama güce bölünmesi ile bulunur. Hem genliği maksimum olan örneğin gönderilmesini hem de ortalama genliğin gönderilmesini desteklemek ADC ve DAC tasarımlarının performansını azaltır. Sadece az sayıda örneğin gönderilmesini desteklemek adına ADC ve DAC çözünürlüğünden feragat etmeniz gerekir. Bu da sistemin sinyal/gürültü oranını maksimize etmenizi engeller. Benzer bir problem RF katmanındaki güç kuvvetlendiricilerde de görülür. Genlik çözünürlüğü fazla olan güç kuvvetlendiricisi tasarımı sistem maliyetini de arttırır. Bu oranı azaltmak için verici sistemlerinde istemli olarak sinyal bozucuları, gönderimde hata kodlama algoritmaları ve serpiştirme teknikleri kullanılmaktadır [21].

4. WIMAX FİZİKSEL KATMAN VERİCİ TASARIMI

Gezgin WIMAX standardında yer alan sistem parametreleri gezgin iletim ortamına uygun, kanal kalitesine ve bant genişliği sınırlarına göre dinamik olarak seçilebilmektedir. Bu dinamik yapı sayesinde ortam koşullarına uyum artmış ve toplam veri iletimi maksimize edilmeye çalışılmıştır. Tez kapsamında OFDM tabanlı gezgin WIMAX fiziksel katman verici tasarımı yapılmış ve gerçekleştirilmiştir.

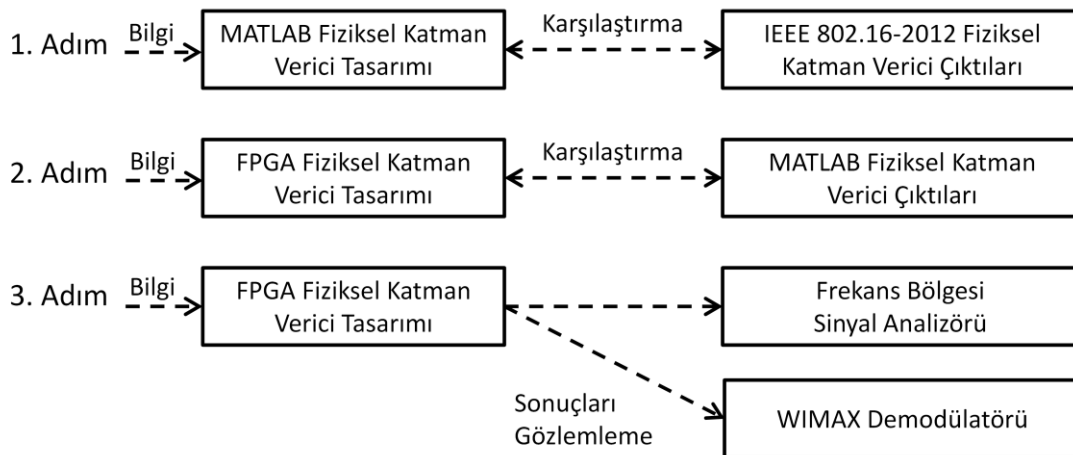
Gezgin WIMAX’ de bulunan dinamik fiziksel katmanın gerçekleştirilmesi için yazılım tanımlı sayısal radyo tasarımı yapılmıştır. Yazılım tanımlı radyolar haberleşme yapısının yazılım kullanılarak dinamik şekilde tanımlanabildiği yapılardır. Bant genişliği, FFT uzunluğu, WIMAX çerçevesindeki sembol sayısı, WIMAX çerçevesinin uzunluğu, modülasyon derecesi, koruma bandının seçimi, iletişim frekansının seçimi gibi yerel regülasyonlara ve kanal durumuna bağlı olan parametrelerin dinamik olarak seçilebilmesi yazılım tanımlı radyolarla yapılmaktadır. Donanım tanımlı radyo yapılarında haberleşme yapısındaki değişiklik ancak donanımsal müdahaleler ile mümkün iken yazılım tanımlı radyolarda yazılımsal değişiklikler ile donanıma yön verilebilmektedir. Yazılım tanımlı radyoların kullanılması ile üretim ve bakım maliyetleri azaltılmıştır.

Yazılım tanımlı radyolarda tasarıma bağlı olarak donanım ihtiyaçları değişkenlik göstermektedir. Elektronik donanım pazarında bu dinamik yapının oluşturulması için uygulamaya özel tümdevreler (ASIC), sayısal sinyal işlemcileri (DSP) ve Sahada Programlanabilen Kapı Dizileri (FPGA) mevcuttur. DSP ve ASIC’ ler OFDM tasarımı açısından bazı özel çekirdekler (IFFT ve Viterbi Decoder) ve yazılım kütüphaneleri sunmalarına karşın firma bağımlılığını arttırmaktadır. Yazılım tasarımı için kullanılan kodların evrenselliği aynı firmanın farklı işlemcilerinde dahi kaybolabilmektedir. Bu kod taşınabilirliği açısından büyük bir dezavantaj taşımaktadır. DSP ve ASIC’ ler sundukları çevresel birimlerle hızlı tasarım geliştirme için kolaylık sunmalarına karşın kısıtlı sayıdaki çevresel birimler tasarım açısından sonraki evrelerde gelişmeye açık değildir. Bu sebepler ışığında yazılım tanımlı sayısal radyo tasarımında FPGA kullanılmıştır. FPGA’ lar yazılım geliştirme

hızı olarak birçok çevresel ara yüzü ihtiyacınıza yönelik tasarlamanız sırasında zaman kaybettirirse de yazılan kodların taşınabilirliği yüksektir. Bu sayede tasarım ihtiyacına göre çevresel ara birimler tasarlanabilmektedir. Ayrıca bu birimler paralel, sıralı veya gecikmeli olarak çalıştırılabilmektedir. Paralel çalışma mantığı DSP ve ASIC' lerin aksine tasarımdaki alt blokların birbirini beklemeden aynı saat darbesi ile eş zamanlı çalışabilmesi olanağı sunar. Bu sayede işlem karmaşıklığı fazla olan FFT ve korelasyon gibi işlemler daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. FPGA' larda, DSP ve ASIC' lerin aksine aritmetik işlemlerinin 32 bit veya 16 bit sayılarla yapılması zorunluluğu yoktur.

Tezin gerçekleşmesindeki ilk adım standartta yer alan sistem parametrelerinin belirlenmesi olmuştur. Bu parametrelerin belirlenmesi için IEEE 802.16-2012 standardı baz alınmıştır [18]. Gerçekleme parametreleri Çizelge 2.2' de belirtilen en küçük bant genişliği esas alınarak 1.25 MHz olarak seçilmiştir. Temel amaç standardın desteklediği minimum bant genişliğinde tüm fiziksel katman bloklarını kapsayan tasarımı gerçekleştirmektir. Sistem parametrelerinin minimum seçilmesi ile FPGA üzerinde gerçekleştirilecek tasarımın kaynak optimizasyonu için temel bir karar verilmiştir.

Parametrelerin belirlenmesinin ardından Tezin gerçekleştirme adımlarını Şekil 4.1' deki gibi üç temel adımda toplayabiliriz.



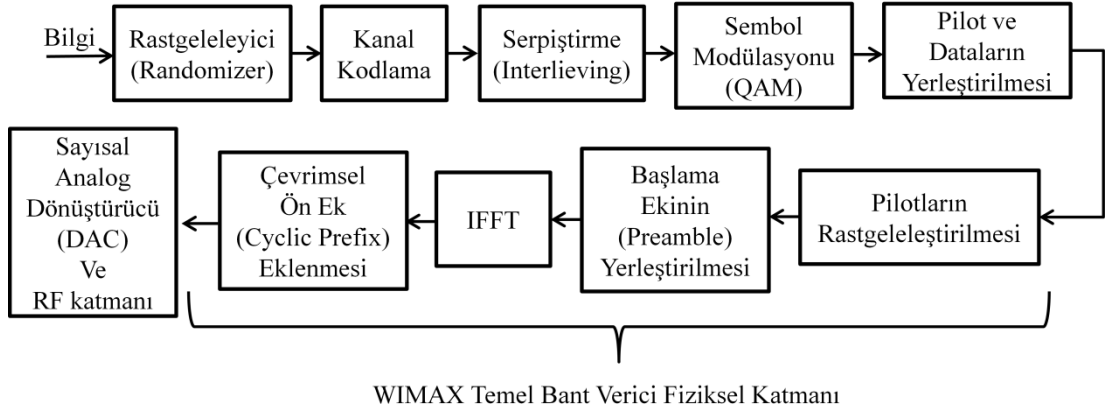
Şekil 4.1 : Tezin gerçekleştirme adımları.

İlk adımda IEEE 802.16-2012 standardında yer alan gezgin WIMAX fiziksel katman tasarım bilgilerine uygun olarak MATLAB ortamında fiziksel katman simülasyonu hazırlanmıştır. Bu simülasyonun alt bloklarının çıktıları 802.16-2012 standardında yer alan test verileri ile kıyaslanarak doğrulanmıştır [18]. Daha sonra mevcut verici

tasarımı FPGA simülasyon programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen FPGA tasarımının her blok sonrasındaki çıktıları yine MATLAB verici simülasyonu ile kontrol edilmiştir. En son adımda tasarlanan verici FPGA donanımına yüklenerek temel bant işaret üretilmiştir. Üretilen temel bant işaret RF kartına gönderilerek çıktılar frekans bölgesinde analiz edilmiştir. Üretilen RF işaret, frekans bölgesinde analiz edildikten sonra WIMAX alıcı test cihazına bağlanarak gönderilen sembol çerçevelerinin doğru olarak yakalandığı gözlenmiştir.

4.1 MATLAB Üzerinde WIMAX Fiziksel Katman Tasarımı

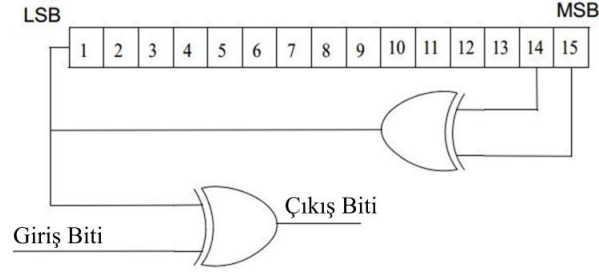
IEEE 802.16-2012 standardında yer alan gezgin WIMAX fiziksel katman tasarım blokları Şekil 4.2’ de yer almaktadır. Her bir tasarım bloğunun içeriği detaylı olarak açıklanacaktır.



Şekil 4.2 : MATLAB üzerindeki WIMAX fiziksel katman blokları.

4.1.1 Rastgeleyici (Randomizer)

Fiziksel katmana iletilen bilgi ilk önce Rastgeleyici bloğundan geçer. Bu bloğun temel amacı bilgi bitlerinde yer alan uzun ‘0’ ve ‘1’ bitlerinin belirli bir kurala göre sözde rasgele olarak dağıtmaktır. Bunun sebebi iletilecek olan bilginin güç dağılımındaki dengesizliğini bir nebze olsun düzenlemektir. Rastgeleştirme işlemi sözde rastgele ikili dizisi (PRBS) kullanılarak yapılır. Bu yapının mantık kapıları ile oluşturulması Şekil 4.3’ de gösterilmiştir [18].

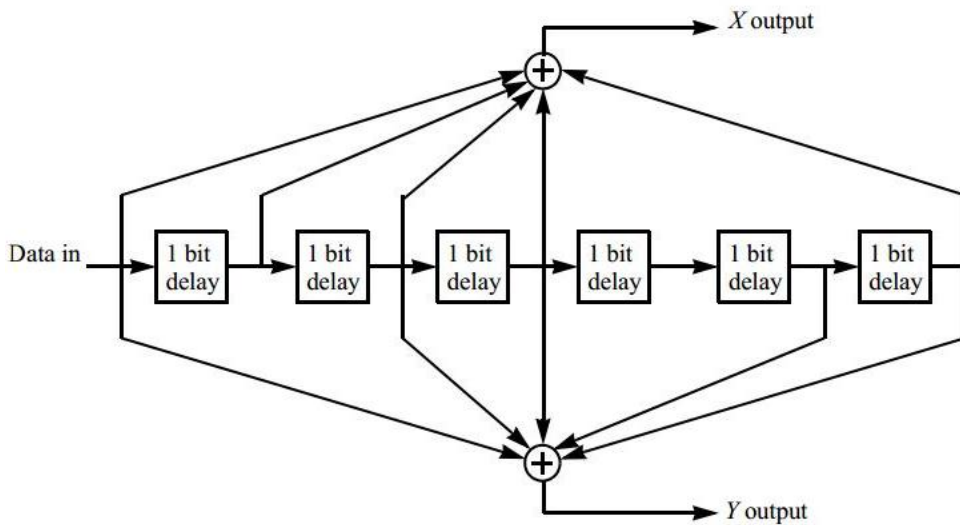


Şekil 4.3 : Randomizer bloğu.

PRBS üreticinin 15 bit uzunluğunda kaynak dizisi bulunur. Bu dizinin ilk başlangıç değeri standartta “011011100010101” olarak tanımlanmıştır. Gelen bilgi bitleri kaynak dizisinin en yüksek anlamlı (MSB) iki bitinin XOR işleminden geçen sonucu ile XOR’lanarak rastgeleştirilmiş çıktılar elde edilir.

4.1.2 Kanal kodlama

Üretilen rastgeleştirilmiş çıktılar göndermede hata düzeltme bloğunun ilk üyesi olan kanal kodlama bloğuna gönderilir. Bu blokta seçimli olarak Katlamalı Kodlar, Blok Turbo Kodlama, Katlamalı Turbo Kodlar ve Düşük Yoğunluklu Parite Kontrol Kodları kullanılabilir. Tez kapsamında 1/2 oranında katlamalı kodlama kullanılmıştır. Katlamalı kodu oluşturmak için kullanılacak kafes yapısının sınır uzunluğu 7 bit olarak belirlenmiştir. Üretilen çıkış bitleri ise “1111001” ve “1011011” kafes yapısı ile tanımlanmıştır. Bu yapının oluşturulma mantığı Şekil 4.4’ deki gibi verilmiştir [18].



Şekil 4.4 : Katlamalı kodlayıcının yapısı.

X ve Y olarak belirtilen çıktılar verilen kafes yapısı ile oluşturulmuştur. Her bir bilgi biti için 2 bit çıkış üretilir. Bu katlamalı kod üretim oranını verir. Katlamalı kodlama tekniği blok kodlama olmadığı için sıralı bilgi girişi için sıralı çıkışlar üretir. Bu sebeple bellekte bulunan bit dizisi üretilecek kod çıkışını etkiler. Verici bloğunda katlamalı kodlamada üretilen kodlanmış bilginin alıcıdaki kod çözücünde doğru şekilde elde edilmesi için Tail-biting yöntemi kullanılmıştır. İletilecek bilginin son 6 biti, bit dizisinin başına eklenerek katlamalı kodlayıcıya girilir. Örneğin 96 bit iletim yapabilmeniz için 102 bit uzunluğunda bit dizisi elde edersiniz ve bu diziye katlamalı kodlayıcıya girmelisiniz. FPGA tasarımında minimum kaynak tüketimi amaçlandığı için sıralı yapı kurularak sistemin mümkün olan en hızlı çıktıyı üretmesi sağlanmıştır.

4.1.3 Serpiştirme (Interleaving)

OFDM yöntemi bilgiyi alt taşıyıcılara bölerek taşır. Bu sayede elde ettiği faydalardan biri ise kanalda meydana gelebilecek rastlantısal derin çentik sönümlmelerine karşı sistemi dirençli kılmaktadır. Bu işlevin faydalı olması için serpiştirme işlemi kullanılır. İki farklı işlevi sayesinde göndermede hata düzeltme bloğunun ikinci elemanı olarak görev yapar. İlk işlevi iletilen bilgi belirli bir kurala göre serpiştirilerek ardışık bilgiler farklı frekanslardaki alt taşıyıcılarda taşınması sağlanır. Böylece kanaldaki belli frekanslarda meydana gelen sönümleme etkilerinde ardışık bilgiler etkilenmediği için kanal kodlama tekniği ile hatalı bitlerin düzeltilmesi yapılabilir. İkinci işlevi ise sembol içerisindeki komşu olarak kodlanmış bilgi bitlerinin modülasyon derecesine göre sembol arasında serpiştirme uygulamasıdır. Sembol içerisinde yer alan bitleri MSB ve ya en düşük anlamlı (LSB) olarak serpiştirir. Modülasyon derecesi 16QAM ve 64QAM için önemli bir katkısı vardır. 16QAM ve 64 QAM sembol haritasındaki tüm bitlerin hata oranı aynı değildir. MSB bitlerin hata olasılığı daha düşüktür. Bu sebeple yapılan serpiştirme sonucu hata oranı daha az olacak şekilde bilgi sembolleri oluşturulabilir. Denklem (4.1)' de birinci işlevi ve denklem (4.2)' de ise serpiştiricinin 2. işlevi tanımlanmıştır [18].

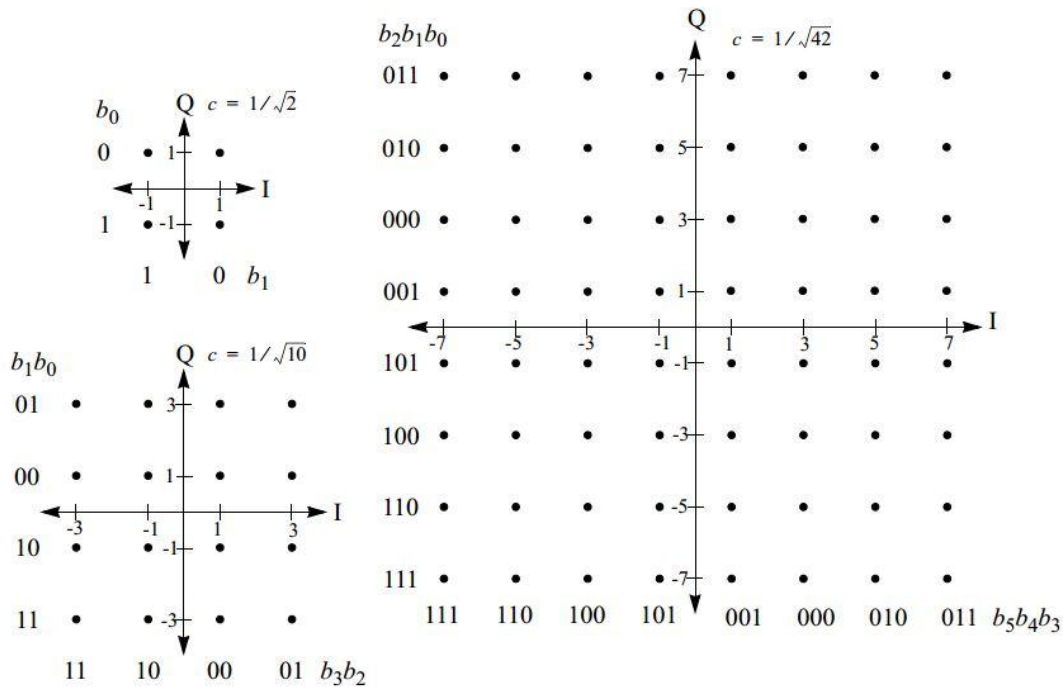
$$m_k = (N_{cbps}/d) \cdot \text{mod}_d(k) + \text{floor}(k/d) \quad k = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1, \quad d = 16 \quad (4.1)$$

$$j_k = s \cdot \text{floor}\left(\frac{m_k}{s}\right) + \text{mod}_s\left(m_k + N_{cbps} - \text{floor}(d \cdot m_k / N_{cbps})\right) \quad (4.2)$$

N_{cbps} değeri QPSK, 16 QAM ve 64 QAM için sıra ile 2,4 veya 6 olarak, s değeri ise N_{cbps} değerinin yarısı olarak belirtilmiştir. Serpiştirme öncesi alt taşıyıcının indeksi k ile serpiştirme sonrasında alt taşıyıcının yerini belirten indeks ise j_k ile belirtilmiştir. İlk serpiştirme işlevinin sonucu m_k ara indeksi ile gösterilir işlevler arasındaki geçiş için kullanılır.

4.1.4 Sembol modülasyonu

Gezgin WIMAX standardının en önemli özelliklerinden biri veri iletim hızına olan ihtiyaca göre bilgi sembollerinin oluşturulmasına izin vermesidir. Böylece hem kanal durumuna hem de ihtiyaç olan veri iletim hızına göre modülasyon derecesi belirlenebilmektedir. Şekil 4.5’ de WIMAX’ de belirlenen QPSK, 16 QAM ve 64 QAM sembol haritası gösterilmiştir [18].



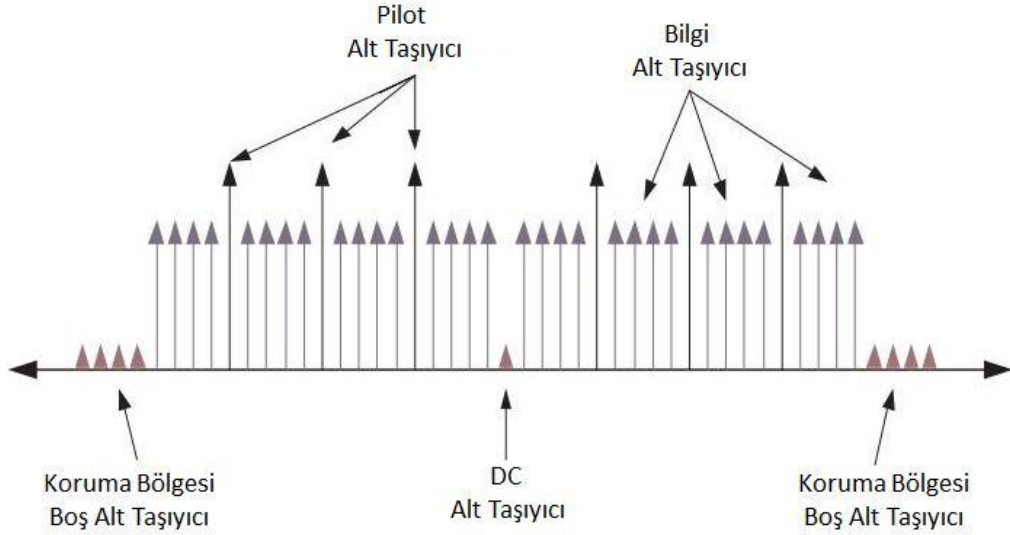
Şekil 4.5 : QPSK, 16QAM ve 64QAM sembol modülasyonu ve Grey kodlaması.

Tez kapsamındaki verici tasarımında bilgi bitlerinin sembol modülasyonu olarak 16 QAM kullanılmıştır. 16 QAM modülasyonu tercih edildiği için her bir QAM sembolünü oluşturabilmek için 4 bit kullanılmaktadır. Her 4 bit yukarıdaki sembol haritasına göre kompleks düzleme aktarılmış olur. Bilgi sembollerinin oluşturulmasında Grey kodlama kullanılmaktadır. Örneğin “1101” bitlerinin oluşturduğu sembolün notasyonu $b_3b_2b_1b_0$ şeklinde kodlandığında kompleks sembolün gerçel kısmı -3 olurken sanal kısmı +3 olmaktadır. Oluşturulan her bir

sembol modülasyon derecesinde göre farklı bir c katsayısı ile çarpılır. Bu işlem sembollerin ortalama gücünü dengeleyebilmek için yapılmaktadır. Yukarıda belirtilen modülasyonlar haricinde BPSK modülasyonu da başlama ekinin üretiminde ve pilot sembollerin üretiminde kullanılmaktadır.

4.1.5 Pilot ve dataların yerleştirilmesi

Kablosuz haberleşme sistemlerinde vericiden iletilen bilgi kanalda bozucu etkilere maruz kalır. OFDM tekniğinde kanal kestiriminin yapılması için pilot işaretler kullanılır. Her bir alt taşıyıcıda bilgi taşınmaz. Bazı alt taşıyıcılarda hem verici hem de alıcıda ortak olarak bilinen pilot işaretler taşınır. Bu işaretlerin alıcıda ne olması gerektiği bilindiğinden bilgi işaretlerine etki eden kanal etkisi bu şekilde hesaplanabilmektedir. Bu yöntemle pilot işaret yardımıyla kanal kestirimi denilir. Daha önce belirtildiği gibi pilot alt taşıyıcıların sembolleri BPSK modülasyon yöntemi ile oluşturulur. Bilgi sembollerinin oluşturulması gibi pilot sembolleri de bir c katsayısı ile çarpılır. Bu değer pilotlar için $4/3$ olarak belirlenmiştir. BPSK modülasyonu ile üretilen pilot verileri $\{1, -1\}$ değerlerini alır. Kompleks bileşenleri bulunmaz. Tez kapsamında belirlenen pilot yerleşim tasarımı ile bilginin alıcıda elde edilmesi için $4/3$ lük oran kullanılmıştır. Seçilen bant genişliğine uygun olarak 128 noktalı FFT alındığından elimizde 128 adet alt taşıyıcı bulunur. Bunların tamamı bilgi ve pilot işaret gönderimi için kullanılmaz. Üretilen OFDM sinyalinin frekans bölgesindeki diğer bantlara zarar vermesini engellemek için koruma bantları bırakılır. Bu değerler standartta belirlendiği şekilde sol tarafta 22 adet, sağ tarafta ise 21 adet boş alt taşıyıcılar bırakılarak oluşturulur [18]. Bunların haricinde DC alt taşıyıcıda bilgi taşınmaz. Böylece toplamda 44 adet kullanılmayan alt taşıyıcımız bulunmaktadır. 128 adet olan toplam alt taşıyıcı sayımızdan geriye bilgi ve pilot işaretlerin taşınması için elimizde kalan 84 adet alt taşıyıcıdır. Bu alt taşıyıcıların komşu olan her 14 tanesi küme (cluster) olarak isimlendirelim. Tasarımda 1.25 MHz bant genişliği seçimi yapıldığı için toplamda 6 adet kümemiz bulunmaktadır. DC alt taşıyıcının sol tarafında 3, sağ tarafında ise 3 adet olarak simetriktir. Şekil 4.6' da pilot ve bilgi alt taşıyıcıların frekans bölgesindeki yerleşimleri sembolik olarak verilmiştir.

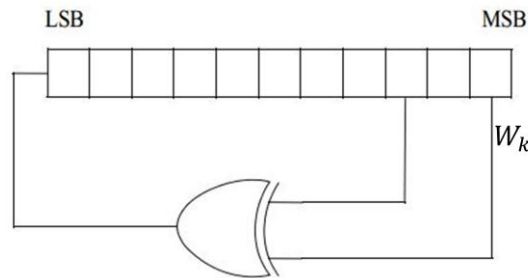


Şekil 4.6 : Bilgi, pilot ve boş alt taşıyıcıların yerleştirilmesi.

Şekilden de görüldüğü gibi pilot alt taşıyıcıların gücü bilgi alt taşıyıcılarına göre fazladır. Bu farklılık bilgi ve pilot işaretlerin modülasyonundan sonra farklı katsayılar ile çarpılmasından kaynaklanır. Kanal kestirimi için pilot işaretler kullanıldığından güçlü gönderilmesi kestirimin başarımını da arttırmaktadır.

4.1.6 Pilotların rastgeleleştirilmesi

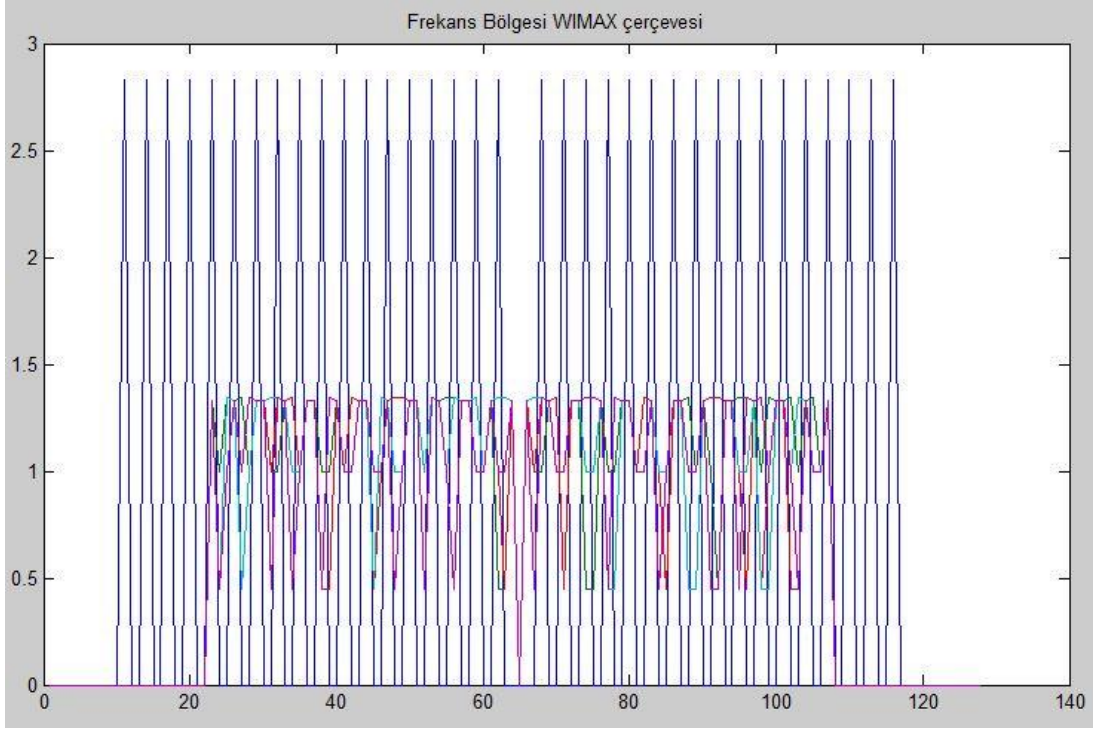
Oluşturulan pilot işaretlerin 1 veya -1 olarak BPSK şeklinde modüle edilmesini bu adım sağlar. Bu işlem standartta PRBS üretici kullanılarak yapılmıştır. PRBS üreticinin fonksiyonu Şekil 4.7’ de aşağıdaki gibi verilmiştir [18]. PRBS üretici ile sözde rastgele diziler elde edildikten sonra BPSK modülasyonu ile pilot sembolleri oluşturulmuştur. PRBS belleğinin ilk başlangıç dizisi ise “00000011111” olarak standartta belirtilmiştir. Elde edilen semboller bir önceki adımda belirlenen alt taşıyıcılara atanmıştır.



Şekil 4.7 : Pilot işaretlerin modülasyonu.

4.1.7 Başlama ekinin (preamble) yerleştirilmesi

WIMAX standardında belirli sayıda OFDM sembolünü içeren mesaj yapıları bulunur. Bunlar WIMAX mesaj çerçevesi olarak isimlendirilir. WIMAX standardında yer alan çerçeve uzunlukları 2.5 ile 20 ms arasında belirlenebilmektedir. Tasarım için bu değer 5 ms olarak seçilmiştir. Belirlenen 5 ms'lik çerçeve uzunluğunda yer alabilecek maksimum OFDM sembol adedi ise 48' dir. WIMAX standardında yer alan alıcıda her bir çerçevenin doğru zamanlama ile alınması önemli bir eş zamanlama problemidir. Çerçeve başlangıcının belirteci ise Başlama Eki (Preamble) olarak belirtilen özel bir OFDM sembolüdür. Özel olmasının sebebi ise normal OFDM sembolünden güçlü olarak gönderilir. Hem verici hem de alıcıda belirlenen 114 adet başlama eki bulunur. Her WIMAX çerçevesinin ilk OFDM sembolü başlama eki olarak gönderilir. Alıcı hangi vericiden ve hangi zamanda bilgi geldiğini bu başlama ekini doğru çözümledikten sonra belirler. Başlama ekinin alt taşıyıcılarına yerleştirilecek semboller BPSK modülasyonu ile kodlanır. Tasarımda bu sabit olarak 100 numaralı başlama eki seçilmiştir. Başlama ekini içeren OFDM sembolünün de pilot sinyalleri mevcuttur. Bu pilot işaretler diğer OFDM sembollerindeki pilotlardan farklı olarak $2\sqrt{2}$ katsayısı ile çarpılarak oluşturulurlar. 114 adet başlama ekinin bilgi sembolleri yine standart olarak belirlenmiştir. Başlama ekleri standartta birbirine olan karşılıklı ilintileri minimum olacak şekilde oluşturulmuştur. Alıcı bu özellikten faydalananarak çerçeve başlangıcını elde eder. Başlama ekinin koruma bölgesindeki boş alt taşıyıcılarının adedi ise 20' dir [18]. Şekil 4.8' de daha rahat analiz edilmesi için oluşturulan 5 sembollü WIMAX çerçevesinin IFF öncesi frekans bölgesi gösterilmiştir. Analizden anlaşıldığı gibi başlama ekinin sıfır olan alt taşıyıcıları daha azdır ve gücü normal sembollere nazaran daha fazladır.



Şekil 4.8 : MATLAB ortamında üretilen WIMAX çerçevesinin spektrumu.

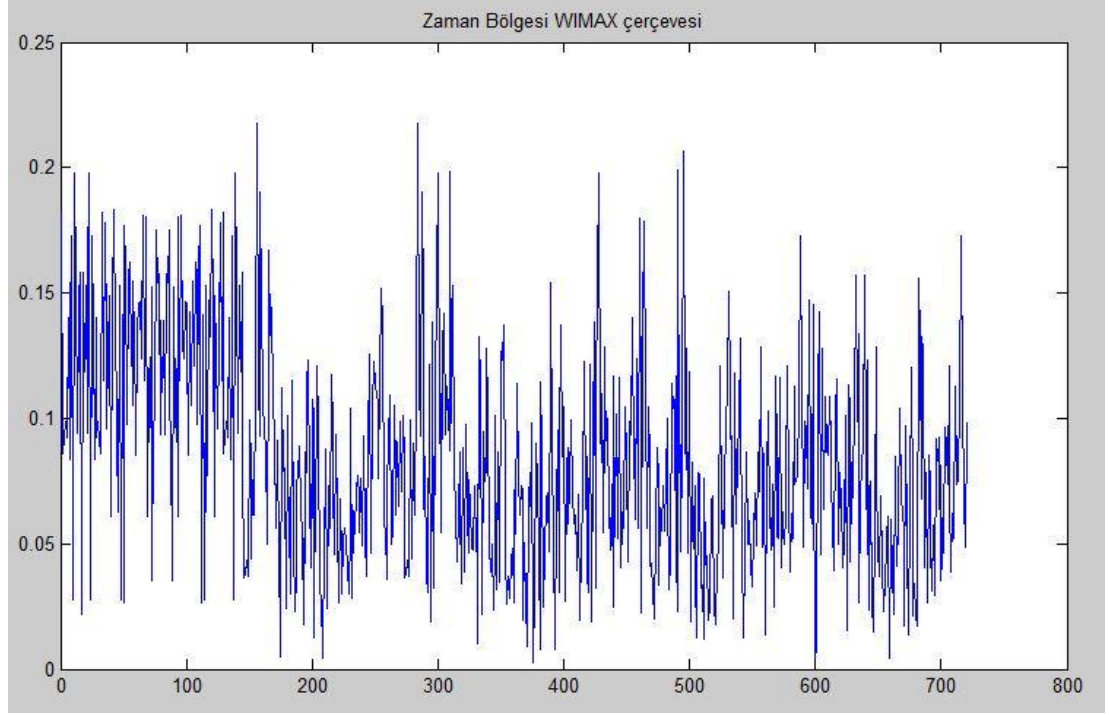
4.1.8 IFFT işlemi ve CP eklenmesi

Alt taşıyıcılara yüklenecek olan bilgiler toplamda 128 adet kompleks sayısı içerir. Bazı alt taşıyıcılarda bilgi taşınmayacağından sıfır olarak oluşturulmuştur. Elde edilen her bir kompleks sayı FFT işleminden geçirilerek alt taşıyıcılar ile çarpılmış olur. FFT işlemi bilgi sembollerini birbirine dik olan alt taşıyıcılara yerleştirmiş olur.

FFT işlemi sonucunda elde edilen 128 adet kompleks sembol alıcıda çoklu yol girişiminden kaynaklanan semboller arası girişimi engellemek adına çevrimsel ön ek eklenir. Çevrimsel ön ek oranı standartta $1/4$, $1/8$, $1/16$ ve $1/32$ olarak seçilebilmektedir. Tasarımda bu değer $1/8$ olarak belirlenmiştir. Bu sebeple FFT işlemi sonrasında elde edilen 128 adet kompleks sembolün son 16 tanesi kopyalanarak sembolün başına eklenir. Böylece 144 adet kompleks sembolü içeren OFDM sembolü hazırlanmış olur. Her bir OFDM sembolüne bu işlem uygulandıktan sonra art arda gönderimi yapılarak 5 ms' lik WIMAX çerçevesi hazırlanmış olur.

Şekil 4.9' da MATLAB ortamında hazırlanan WIMAX çerçevesi gösterilmektedir. Tasarım için parametrik tanımlanan OFDM sembol sayısı kolay analiz için 4 olarak belirlenmiştir. Çerçeve uzunluğu başlama eki ile birlikte toplam 5 OFDM sembolüdür. Her bir sembol 144 uzunluklu olduğu için 720 örnekli bir çizim

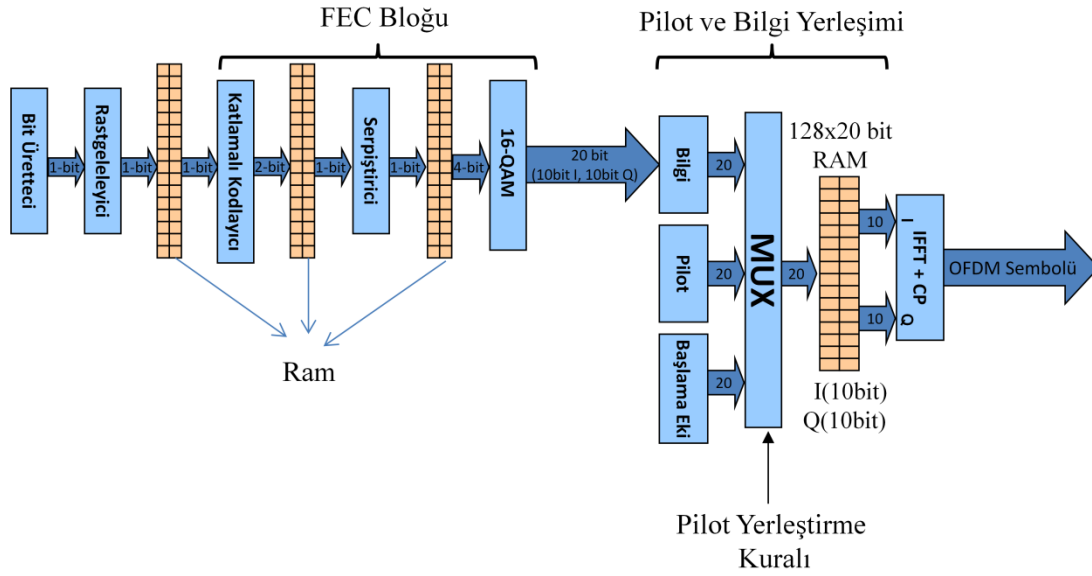
olmuştur. İlk 144 örnek zaman bölgesindeki başlama ekini göstermektedir. Beklendiği gibi diğer sembollere nazaran ortalama gücü fazladır.



Şekil 4.9 : MATLAB ortamında üretilen WIMAX çerçevesi.

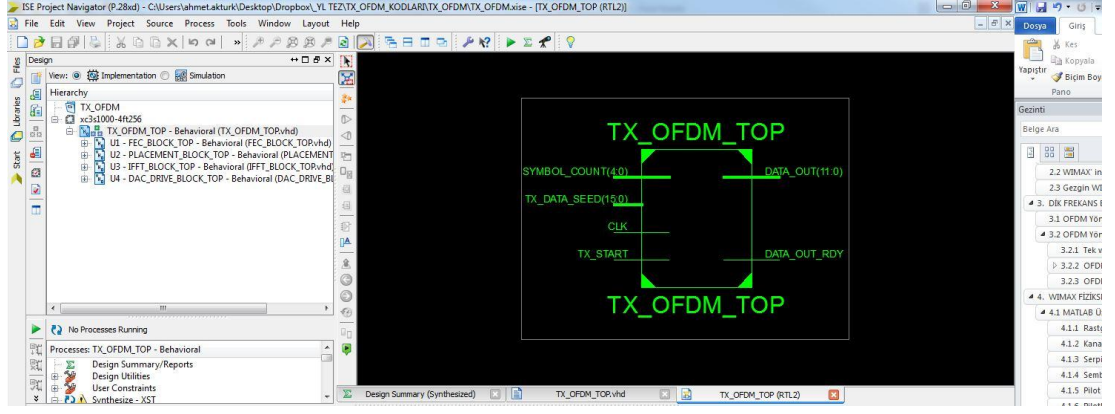
4.2 FPGA Üzerinde WIMAX Fiziksel Katman Tasarımı ve Gerçeklenmesi

MATLAB ortamında oluşturulan temel bant verici standartta yer alan test çıktıları ile doğrulandıktan sonra FPGA üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında gerçeklemek için kullanılan FPGA ise Xilinx firmasının Spartan-3 ailesine ait XC3S1000 bütünleşik devresidir. Temel bant verici tasarımını FPGA üzerinde gerçeklemek için Xilinx firmasının ISE yazılım geliştirme ortamını, tasarımın benzetimi için ISE simülatör (ISIM) yazılımı kullanılmıştır. ISIM FPGA' lara istenilen test ortamını sağlayan mantık analizörüdür. FPGA tasarımındaki her bir alt blok MATLAB ve standartta yer alan test verileri ile karşılaştırıldıktan sonra donanıma yüklenmiştir. FPGA tasarımı davranışsal kod yazma mantığı ile donanım tanımlama dili olan VHDL kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 4.10' da FPGA tasarımına ilişkin detaylı tasarım bulunmaktadır.



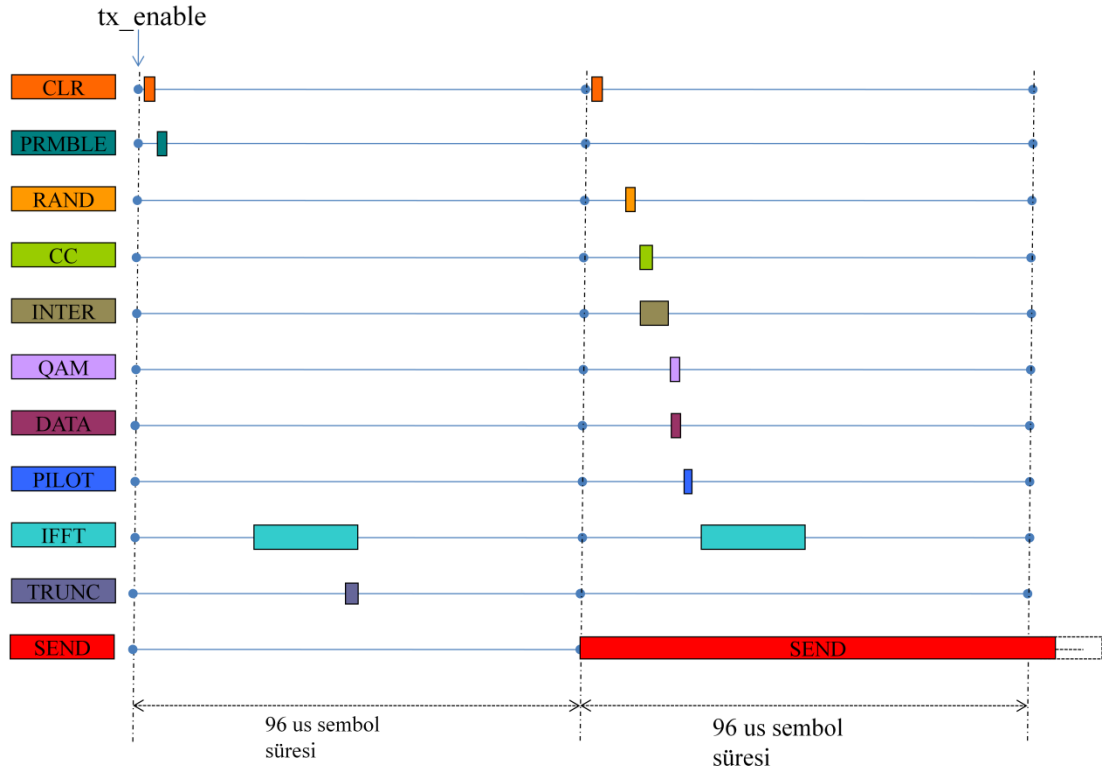
Şekil 4.10 : FPGA üzerinde tasarlanan WIMAX fiziksel katman blokları.

FPGA tasarımı OFDM verici alt bloklarının sıralı olarak (pipeline) beklemeden çalışabileceği şekilde tasarlanmıştır. Her bir alt bloğun başlama ve bitiş süreleri aktive etmek için kullanılan kontrol biti ile çalıştırılır. Tasarım tek bir saat üretici kullanılarak senkron bloklar ile oluşturulmuştur. Tasarımda kullanılan saat darbesi 50 MHz’ dir. Bu değer tasarımın gerçekleştirileceği donanım kartında bulunan saat darbesi üreticinin frekansıdır. Şekil 4.11’ deki ekran görüntüsünde mevcut FPGA tasarımıdaki “TX_OFDM_TOP” modülünün RTL (register transfer level) şeması ve Xilinx firmasının ISE ara yüzü verilmiştir. Giriş işareti olarak kullanılan “SYMBOL_COUNT(4:0)” işareti WIMAX çerçevesindeki başlama eki hariç data OFDM sembollerinin sayısını belirtir. “TX_DATA_SEED(15:0)” giriş işareti ise her data sembolünde iletilen test datalarının üretileceği vektörü belirtir. “CLK” giriş işareti bloğun çalışması için gerekli saat darbesini, “TX_START” tetikleme sinyali ise WIMAX çerçevesinin gönderimini başlatan işarettir. “DATA_OUT(11:0)” çıkış işareti ise 1.4 MHz hızında çıkışa aktarılan I,Q kompleks sembol örneklerini üretmek için üst dönüştürücü bütünleşik devresine aktarır. Bir OFDM sembolünün içerdiği 144 adet I,Q datasının I bileşeni 1.4 MHz işaretin yükselen kenarında, Q bileşeni ise düşen kenarında iletilir. AD9856 üst dönüştürücü bütünleşik devresi için gerekli olan giriş işareti bu şekilde belirtilmiştir. “DATA_OUT_RDY” sinyali ise çıkış datalarının hazır olduğunu bildirir ve kontrol amaçlı kullanılmıştır.



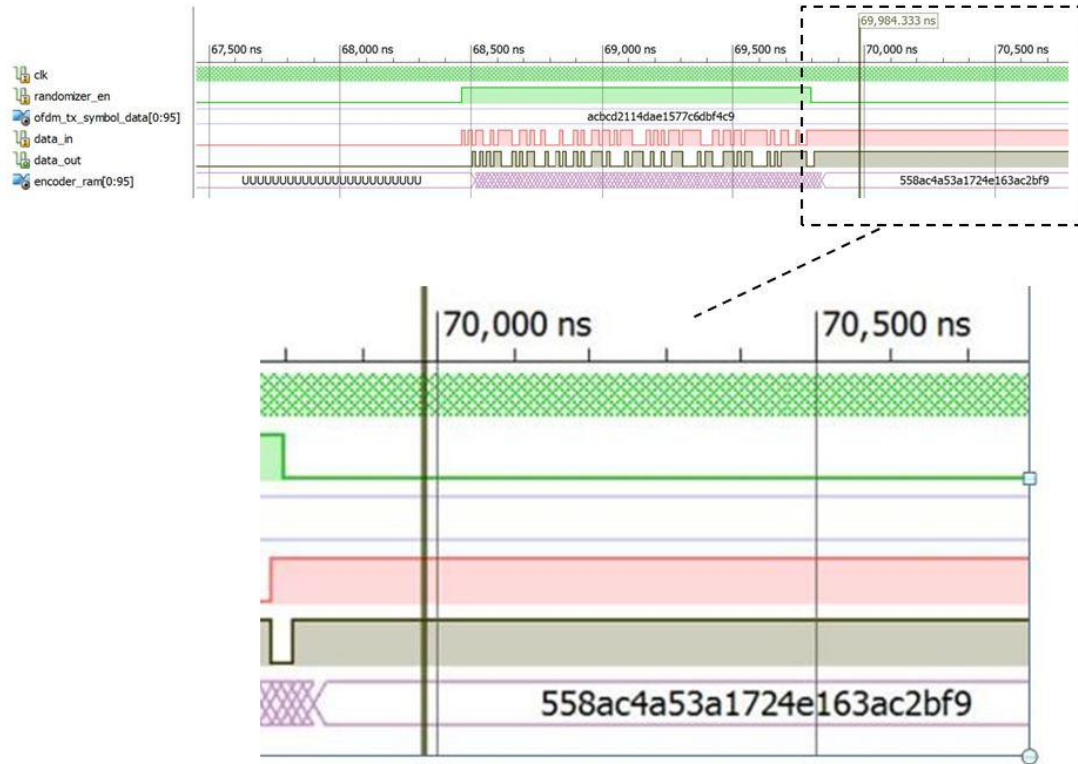
Şekil 4.11 : Xilinx ISE geliştirme ortamı ve FPGA tasarımı.

Tasarım için kullanılan tüm alt blokların “ENABLE” giriş sinyalleri bulunmaktadır. Bu kontrol sinyali sayesinde tüm blokların ne zaman açılıp kapatılacağı belirlenmiştir. Tüm blokların ne kadar saat periyodunca açık kalacağı kritik bir zamanlamadır. Sıralı tasarım yapılabilmesi için her bir bloğun son verisini ürettikten sonra kapatılması gerekir. Bu zamanlamayı “TX_OFDM_TOP” üst modülü kontrol eder. Şekil 4.12’ de alt blokların ne kadar süre ile işlemlerini tamamladıkları gösterilmiştir. Alt bloklarda yer alan “RAM” gibi bazı bloklarının içindeki veriler her bir OFDM sembolünde değişmektedir. Bu sebeple kullanılacak tüm alt bloklar başlangıç koşullarına getirilmesi için “CLR_EN” sinyali kullanılır.



Şekil 4.12 : FPGA tasarımında yer alan alt modüllerin zamanlama grafiği.

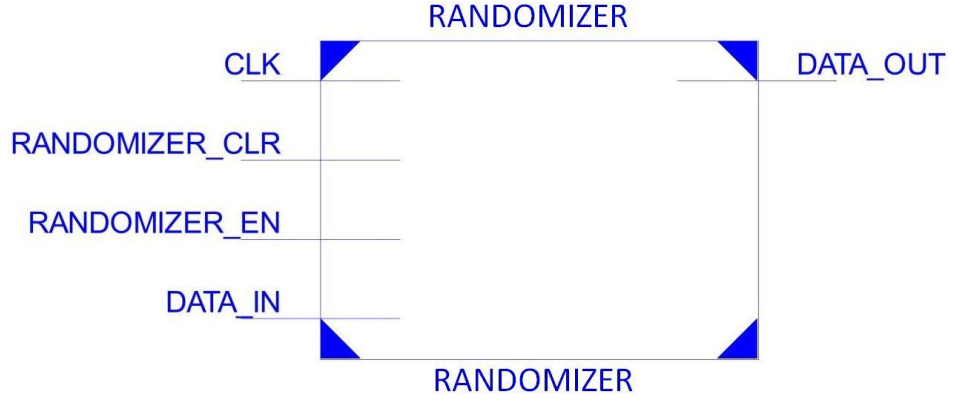
Tasarımda kullanılan alt blokların içeriği başlangıç koşuluna getirildikten sonra ilk OFDM sembolünü üretmek için “PREAMBLE_EN” sinyali aktif edilir. WIMAX çerçevesinin ilk sembolü başlama eki olduğu için bu blok sadece çerçeve başlangıçlarında çalışır. Tasarım için kullanılacak test dataları IEEE 802.16 standardından alınmıştır. Standartta belirtilen test dataları 16’ lı sayı tabanında “0xACBCD2114DAE1577C6DBF4C9” olarak verilmiştir [18]. Üretilen test bilgileri ilk olarak “Rastgeleleyici” bloğundan geçirilmiştir. Bu bloğun çıkışı standartta “0x558AC4A53A1724E163AC2BF9” olarak belirtilmiştir. FPGA tasarımı sonuçları daha rahat gözlemleyebilmek için RAM blokları konulmuştur. RAM blokları sayesinde belirli blokların çıktılarının standart ve MATLAB tasarımı ile kıyaslamak mümkündür. Rastgeleleyici bloğunun çıkışında yer alan “encoder_ram” 96 bit kanal kodlayıcı girişini gösterir. Şekil 4.13’ de “Rastgeleleyici” bloğunun standartta yer alan test verilerine uygunluğu Xilinx firmasının ISIM mantık analizöründeki çıktısı ile verilmiştir.



Şekil 4.13 : FPGA tasarımıdaki rastgeleleyici bloğunun doğrulanması.

Şekil 4.13’ de verilen görselde sıra ile “clk” saat darbesi işareti, “Rastgeleleyici” bloğunun çalışması için gereken “randomizer_en” işareti, OFDM sembolünde iletilecek 96 bit veri içeren dizi “tx_ofdm_symbol_data[0:95]”, bloğun her saat

darbesinde 1 bit veri alan “data_in” işareti, bloğun her saat darbesinde 1 bit veri çıkışı yapan “data_out” işareti ve bloğun çıkışında üretilen bit dizisinin katlamalı kodlayıcıya gönderilmeden önce tutulduğu RAM bloğunun içeriği “encoder_ram[0:96]” ile verilmiştir. Rastgeleleyici bloğunun giriş ve çıkışlarını veren RTL şeması Şekil 4.14’ de verilmiştir.



Şekil 4.14 : Rastgeleleyici bloğunun RTL şeması.

Rastgeleleyici bloğunun çıkışında üretilen ve kanalda iletilecek olan bilgi bitlerinin hatalara karşı dayanıklı kılınması için kanal kodlama yapılmaktadır. Bu yapı verici tasarımının kaynak optimizasyonu açısından önemli bir karardır. Standartta belirtilen kanal kodlama yapıları katlamalı kodlayıcı (CC), blok turbo kodlar (BTC), katlamalı turbo kodlar (CTC) ve düşük yoğunluklu parite kontrol (LDPC) kodları olarak verilmiştir.

FPGA tasarım kaynaklarındaki en temel kavramlar Slice, FF ve LUT olarak gösterilebilir. Slice içerisinde LUT ve FF barındıran temel kaynak elemanıdır. FPGA ailesine göre değişkenlik gösteren bir yapıdır. Tez kapsamında ele alınan Spartan-3 FPGA ailesinin Slice yapısında ikişer adet LUT ve FF bulunur. Daha sonra üretilen Virtex-5 ailesine ait FPGA’ larda ise dörder adet LUT ve FF ikilisi kullanılmıştır. FPGA kaynak kullanımında belirtilen Slice sayısı direk olarak kullanılan FF ve LUT’ ların sayısını belirtmez. Her Slice içerisinde bulunan iki LUT ve iki FF tasarıma göre her daim kullanılmaz. Bir Slice kullanıldı diye raporlama yapıldığında tasarım gereği içerisindeki bir LUT ve bir FF kullanılmış olabilir. Örneğin 500 Slice kullanılarak oluşturulan tasarımda, 750 LUT ve 600FF kullanılmış olabilir. Kaynak optimizasyonu için LUT ve FF’ lerin toplam kullanım sayısının yanı sıra kullanılan Slice sayısına da dikkat edilmelidir. Tez kapsamında kullanılan Spartan-3 FPGA ailesine ait XC3S1000 bütünleşik devresinde toplam 7680 Slice, 15360 FF ve 15360

LUT bulunmaktadır. Bu kaynak yapısının oluşturulması için bir milyon mantık kapısı kullanılmıştır.

Verici tasarımındaki kanal kodlayıcının seçimi için literatürde bulunan FPGA üzerinde gerçekleştirilmiş kanal kodlayıcı tasarımlarının kaynak kullanımları incelenmiştir.

Kiokos ve diğerleri 2011 yılında LDPC ve BTC kodlarının gerçekleştirmesini Virtex-4 ailesinden FPGA üzerinde yapmıştır. Turbo kodlar pratik açıdan Shannon kanal kapasitesine en çok yaklaşan ve hata başarımı oldukça yüksek bir kodlama olmasına rağmen çözücüsünün karmaşıklığı sebebi ile kaynak kullanımı yüksektir. LDPC kodların hata başarımı da Turbo kodlar gibi yüksektir ve çözücüsündeki iteratif kod çözme algoritmaları Turbo kodlara göre daha basittir. Bu çalışmada kullanılan Virtex-4 ailesinin Slice yapısında Spartan-3' te olduğu gibi ikişer adet FF ve LUT bulunmaktadır. LDPC kodlayıcının tasarımı için 901 Slice, 907 FF ve 1279 LUT kullanılmıştır. Elde edilen maksimum çalışma frekansı ise ≈ 98 MHz olmuştur. BTC kodlayıcının tasarımı için 811 Slice, 887 FF, 1236 LUT kullanılarak ≈ 102 MHz maksimum çalışma frekansı elde edilmiştir [22].

Sun ve Ding 2012 yılında CC kanal kodlayıcı tasarımının gerçekleştirmesini Virtex-II ailesinden XC2V2000 bütünleşik devresi üzerinde yapmıştır. Katlamalı kodlayıcıda kullanılan kafes yapısının uzunluğu 7, kodlama oranı ise 1/2 olarak seçilmiştir. Alıcı kısmında ise Viterbi kod çözücü kullanarak tasarımını oluşturmuştur. Bu tasarımda 316 Slice, 295 FF ve 510 LUT kullanılarak 80 MHz maksimum çalışma frekansı elde edilmiştir [23].

Xilinx firmasının 802.16e standardı için hazır IP-Core olarak sunduğu CTC kodlayıcı modülü bulunmaktadır. Bu modülün kullanım kaynaklarının analizi Virtex-5 FPGA ailesinin ürünü olan XC5VSX95T-1 bütünleşik devresi için verilmiştir. Hazır modül için ön görülen kaynak kullanımı 741 LUT ve 741 FF olarak verilmiştir [24].

Sonuçlar doğrultusunda tez kapsamında amaçlanan FPGA üzerindeki kaynak optimizasyonu için kullanılacak en optimum kanal kodlayıcı CC olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında kullanılan CC kanal kodlayıcı Xilinx firmasının ücretsiz olarak sunduğu IP-Core modülünden yararlanılarak oluşturulmuştur [25].

Çizelge 4.1’ de tasarım kapsamında oluşturulan kanal kodlayıcının diğer sistemlere oranla kaynak verimliliği gösterilmiştir.

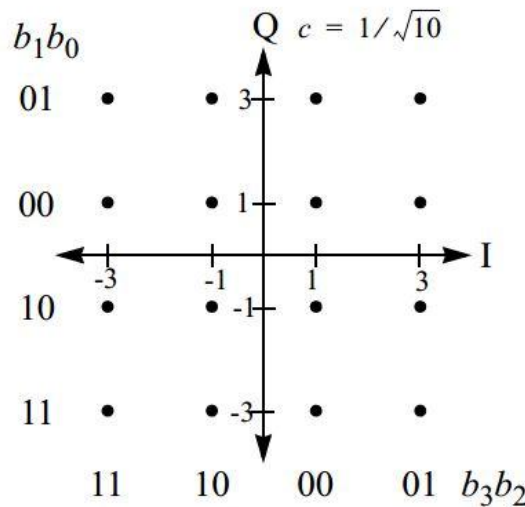
Çizelge 4.1 : Kanal kodlama algoritmaları ve kaynak kullanımı.

Çalışmayı Yapan	Kanal Kodlayıcı	Kaynak Kullanımı	FPGA
Kiokos ve Diğerleri	LDPC	901 Slice, 907 FF, 1279 LUT	Virtex-II XC2V2000
Kiokos ve Diğerleri	BTC	901 Slice, 907 FF, 1279 LUT	Virtex-II XC2V2000
Xilinx	CTC	741 LUT-FF ikilisi	Virtex-5
Sun ve Ding	CC ve Viterbi Çözücü	316 Slice, 295 FF, 510 LUT	Virtex-II XC2V2000
Tez Çalışması	CC	36 Slice, 51 FF, 53 LUT	Spartan-3 XC3S1000

Rastgeleleyici çıkışındaki veriler “encoder_ram” bloğundan katlamalı kanal kodlayıcı bloğunun girişine gelmektedir. Katlamalı kodlayıcı blok sürekli bilgi girişi ile sürüldüğünde belleğindeki bitlerin durumuna göre tasarlanan kafes yapısına göre kodlanmış veri üretir. Tasarımda seçilen 1/2 kodlama oranına göre 96 bit girişi ile 192 bit kodlanmış bit dizisi elde edilmiştir. Katlamalı blok kodlayıcı, yapısı gereği bellekli ve sürekli veri girişi yapılarak kullanılan bir bloktur. Fakat OFDM sembollerinin üretilmesi sırasında sürekli çıkış üretmesi istenmeyen bir durumdur. O an gönderilen OFDM sembolü için gerekli olan 192 bit üretildikten sonra diğer sembol üretilene kadar durdurulmaktadır. Bu sebeple “Tail-Biting” olarak bilinen bir yöntem kullanılır. Bu yöntemde kodlanacak olan 96 bit verinin son 6 bit en başa kopyalanarak katlamalı kodlayıcı girişine 102 bit veri gönderilir. Böylece kanal kodlayıcının belleği bir önceki sembolde aynı veriler gönderiliyormuş gibi ayarlanmış olur. Kodlanan bit dizisi standartta “0x2833E48D392026D5B6DC5E4AF47ADD29494B6C89151348CA” olarak verilmiştir [18].

Kodlanan 2bitlik sembollerin son 96 tanesi alınarak 192 bit şeklinde “Serpiştirici” bloğuna aktarılır. Bu blok iletim kanalında oluşabilecek hatalara karşı alt taşıyıcılara yerleştirilecek olan bilgileri belirli bir kurala göre serpiştirmektedir. Böylece kanalda ardışık olarak bilgi kaybı olma olasılığı azaltılmış olur.

Serpiştirilen 192 bit veri ile tasarımda belirlenen modülasyon derecesine göre bilgi sembolleri oluşturulur. 16QAM sembol modülasyonuna göre her 4 bit bilgi Gray kodlama ile kodlanarak kompleks sayı düzlemine aktarılır. Her bir sembol 10 bit I, 10 bit Q olacak şekilde kodlanmıştır. Aritmetik işlemlerde kayan noktalı sayılar kullanmak kaynak kullanımı açısından optimum bir çözüm değildir. Şahin, 2010 yılında yaptığı çalışmada tasarlanan 16 ve 32 bit çözünürlüklü I,Q matematik sistemi ile IEEE 754 32 bit çözünürlüklü kayan noktalı kütüphanesinin 16 QAM sembol modülasyonu işleminde ne kadar kaynak harcadığını belirtmiştir. Bu çalışmaya göre IEEE 754 donanım kaynaklarından 96 adet LUT kullanımında bulunmuştur. Kendi tasarımında kullandığı I,Q matematik kütüphanesi ile 16 bit çözünürlükte 64 LUT, 32 bit çözünürlükte ise yine 96 LUT kaynak kullanmıştır. Bu sebeple sembollerin oluşturulması için gerekli değerleri tam sayı bit dizileri kullanılarak oluşturulmuştur. Örneğin 16QAM sembolleri $\{-3, -1, 1, 3\}$ değerlerini alabilmektedir. Bu değerlerin genlikleri üretilen sembollerdeki ortalama gücü dengeleyebilmek için c katsayı ile çarpılır. Bu değer bilgi işaretlerinde $1/\sqrt{10}$ olarak belirtilmiştir [18]. Bu sebeple eğer I veya Q değeri için +3 değeri kullanılacaksa, $3 * 1/\sqrt{10}$ değeri ≈ 0.948 eşittir. Kayan noktalı tasarım kullanılmayacağından 10 bit I ve Q değerinin ilk biti işaret biti, sonraki 2 biti tamsayı değeri, son 7 biti ise virgülden sonraki basamakları gösterecek şekilde tasarım yapılmıştır. Böylece hem kayan noktalı VHDL kütüphanesi kullanılmamış hem de kaynak optimizasyonu sağlanmıştır. 0,948 değeri 2' li sayı tabanında "0001111001" değerine denk düşmektedir. Şekil 4.15' de 16QAM sembol modülasyonu ve Gray kodlaması standartta belirtildiği gibi gösterilmiştir [18].

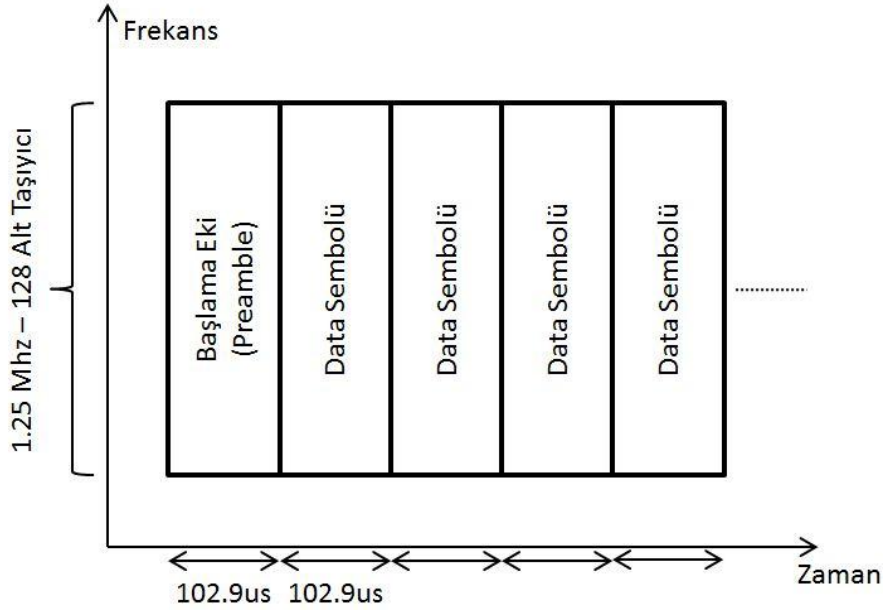


Şekil 4.15 : 16QAM sembol modülasyon haritası.

Eğer modül girişine gelen bit değeri “1101” ise “b3=1”, “b2=1”, “b1=0”, “b0=1” olarak kodlanır. Bu sembol değeri $(I,Q) = \{-3, 3\}$ olarak belirlenir. Bu sembolü üretmek için kullanılacak 10 bit dizi ise “-121” ve “121” olduğundan elde ettiğimiz bit dizimiz $I=“1110000111”$ ve $Q=“0001111001”$ olarak belirlenir. Üretilen semboller 128x20 bitlik RAM bloğuna aktarılır. Modülasyon işleminde kullanılan kaynak ise çarpıcı kullanılmadığı ve kayan noktalı VHDL kütüphanesinin kullanılmadığı için 23 Slice, 36 FF ve 20 LUT olarak elde edilmiştir. Çözünürlük dezavantajı getirse de IFFT işleminin sonucunda elde edilen bit uzunluğu 10 bit I,Q sembolü için 18 bit I,Q olacağından (daha sonra detaylı açıklanacaktır) sonraki aşamalarda kullanılacak sayısal analog dönüştürücü (DAC) bütünleşik devresinin 12 bit olan çözünürlüğüne göre (daha sonra detaylı açıklanacaktır) seçilmiştir. Bu sayede kaynak optimizasyonu sağlanmıştır.

Bilgi sembollerinin üretilmesinden sonra pilot sembollerinin de üretilerek IFFT öncesinde yer alan 128x20 bit’ lik RAM bloğuna aktarılması gerekmektedir. Pilot işaretleri BPSK modülasyonuna sahip kompleks işaretlerdir ve Q bileşeni sıfır alındığından sadece I bileşeni bulunmaktadır. Standartta belirtilen c katsayısı ise 4/3 olarak belirlenmiştir. Bilgi sembollerinin oluşturulması ile aynı mantık kullanılarak 10 bit tam sayı uzunluğu kullanılmıştır. Elde edilen değer ise $\{1, -1\}$ değerlerine karşılık “171” ve “-171” bulunmuştur.

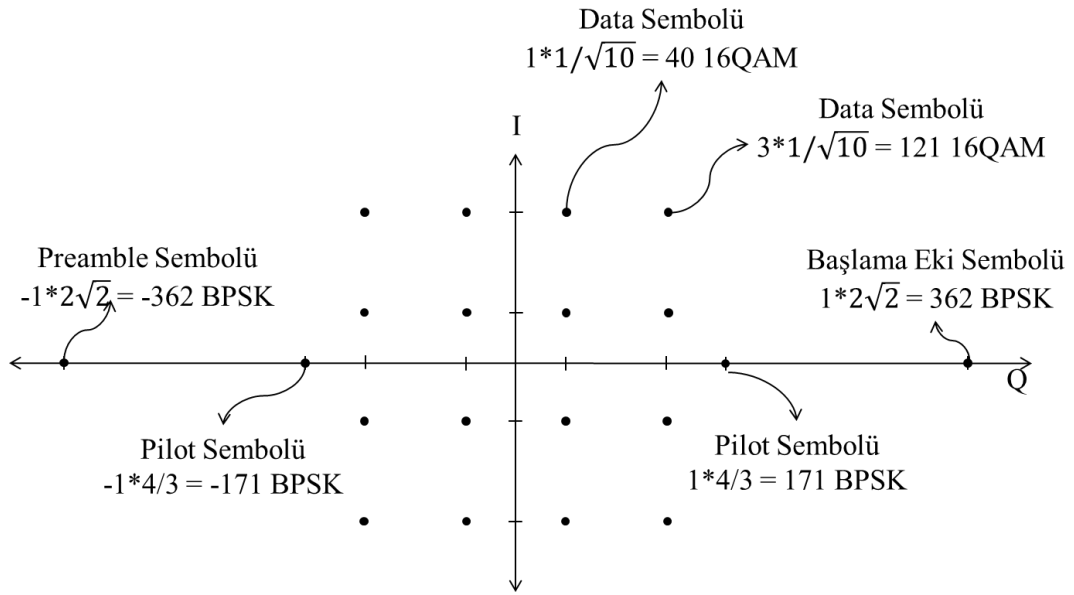
Bilgi sembollerini oluşturan OFDM sembolünün hazırlanmasından sonra WIMAX iletim çerçevesinin ilk sembolünün oluşturulması gerekmektedir. Bu başlama eki olarak belirtilen OFDM sembolüdür. Her çerçevenin ilk sembolü olarak gönderilir. Hazırlanan WIMAX çerçevesinin zaman ve frekans bölgesindeki gösterimi Şekil 4.16’ da verilmiştir.



Şekil 4.16 : WIMAX çerçevesi.

Başlama eki normal sembollere nazaran daha güçlü olarak gönderilir. Bunun sebebi alıcıda, ilk olarak eğer çerçeve başlangıcı elde edilemezse diğer data sembollerinin geri eldesi mümkün değildir. Bu sebeple alıcıdaki önemli senkronizasyon problemlerinden biri de zaman bölgesi senkronizasyonu veya çerçeve senkronizasyonu olarak geçer. Standartta 114 adet farklı başlama eki verilmiştir. Bu diziler birbiri ile çapraz korelasyonları minimumda tutularak oluşturulur. Hücresel haberleşme sisteminde her baz istasyonu farklı başlama eki kullanarak kapsama alanındaki kullanıcılara kendi data sembollerini gönderir. Fakat hücre planlamasında iki komşu hücrenin birleşim bölgesinde alıcılar her iki baz istasyonundan da veri alır. Alıcının hangi baz istasyonuna bağlı olduğu önceki konumundan dolayı belli olduğu için o hücreye ait baz istasyonunun başlama eki, kapsama alanındaki alıcılara önceden bildirilir. Alıcılar aldığı WIMAX çerçevesinin zaman senkronizasyonunu bulduğu başlama ön ekinin önceden bilinen başlama eki ile çapraz korelasyonunu alarak çıkartır. Diğer baz istasyonlarından gelen WIMAX çerçevesinin başlama eki ile bilinen başlama ekinin korelasyonu ait olduğu baz istasyonunkinden düşük olur. Böylece kapsama alanındaki baz istasyonunun WIMAX çerçevesine senkron olmuş olur. Standartta yer alan başlama eki dizisi Tablo 8-252’ de verilmiştir [18]. Tez kapsamında ele alınan başlama ön eki sembolü 100 numaralı dizi seçilerek oluşturulmuştur. Başlama ekinin standartta verilen c katsayısı ise $2\sqrt{2}$ olarak verilmiştir. Bu sayı elde edilen 10 bit tasarıma göre $\{362, -362\}$ olarak belirlenir.

Şekil 4.17’ de data, pilot ve başlama eki sembollerinin modülasyonu ve tasarımda yer alan 10 bit genlik seviyesi verilmiştir.



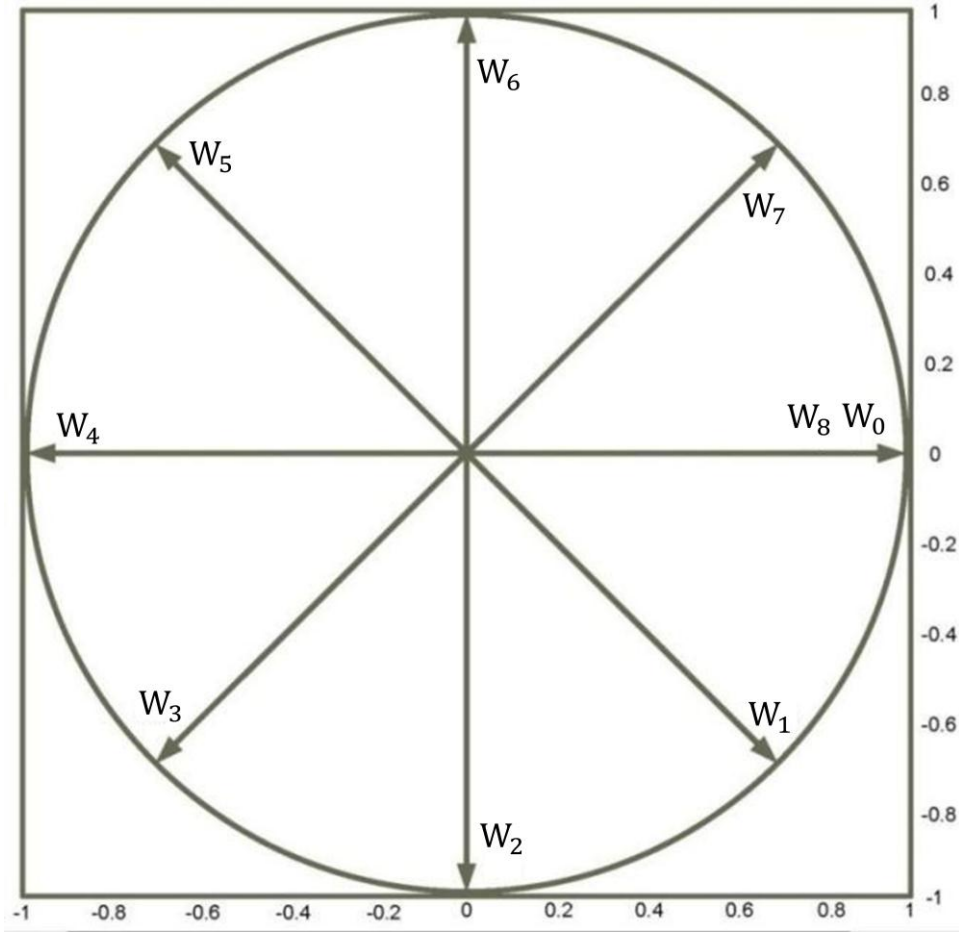
Şekil 4.17 : Data, pilot ve başlama eki sembollerinin sembol modülasyonu.

OFDM sembollerinin oluşturulmasının ardından sembollerin alt taşıyıcılara yerleştirilmesi işlemi IFFT bloğu ile yapılır. IFFT işlemi OFDM tabanlı sayısal haberleşme sistemlerinde en çok kaynak kullanan yapılardandır. Bu sebeple seçilen bant genişliğine göre optimum hız ve kaynak kullanımı gözetilerek tasarım yapılmalıdır.

FFT işlemi, adından anlaşılacağı üzere DFT işleminin hızlı yapılmasını sağlayan algoritmaları içeren bir bloktur. Bu algoritmalar en yaygın kullanılanı Cooley-Tukey algoritmasıdır. Bu algoritmalar DFT işleminde kullanılacak dizinin örneklerini belirli bir kurala göre ayrıştırıp matematiksel kısaltmalar kullanarak, uzun noktalı DFT işlemlerini 2 ve 4 uzunluklu DFT işlem bloklarına ayırıp işlem karmaşıklığını azaltarak elde etmektedir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)’ de verilen DFT işleminde N DFT uzunluğunu, x(n) DFT işlemi uygulanan giriş dizisi, X_k çıkış dizisi olarak belirtilmiştir. Denklem (4.2)’ de verilen $e^{-i2\pi kn/N}$ ifadesi faz faktörü olarak (W_N) ifade edilmektedir. Faz faktörünün katsayıları Şekil 4.18’ de 8 noktalı DFT işlemi için verilmiştir [5].



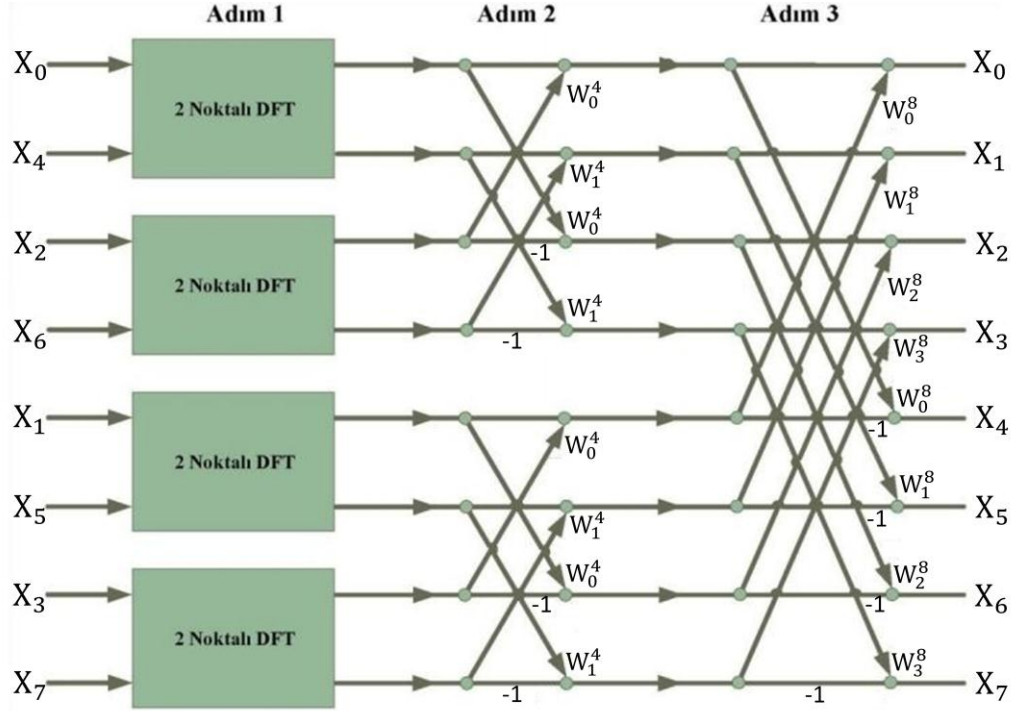
Şekil 4.18 : Faz faktörü katsayıları.

Görüldüğü üzere 8 noktalı DFT işlemi $N=8$ sayısının tam katlarında periyodik aynı W_N katsayıları elde edilirken, ($W_8 = W_0$) $N/2=4$ sayısına göre (oriijine göre) simetrik değerler almaktadır. Bu iki özellikten faydalanarak denklem düzenlendiğinde (4.3) elde edilir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)W_{N/2}^{kn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.3)$$

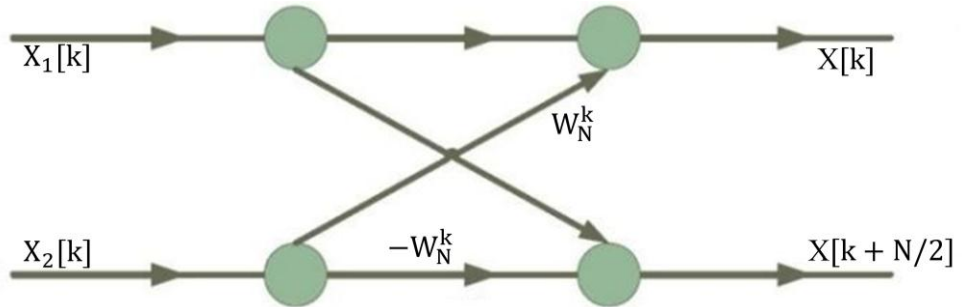
Denklem (4.3)' de görüldüğü üzere 8 noktalı bir DFT işlemi yerine, DFT' si alınacak işaretin tek ve çift bileşenleri ayrıştırılarak 4 noktalı DFT işlemine dönüşebilmektedir. Bu işlem 4 noktalı DFT' ler için tekrar uygulanırsa 2 noktalı DFT işleminin işlem karmaşıklığı oldukça az olacağından işlemin hesaplanması kolaylaşacaktır. N noktalı bir DFT işleminin direkt olarak hesaplanması yerine bu ayrışma ile işlem karmaşıklığı N^2 den $(N/2)^2$ ye düşürecektir [5]. Yüksek noktalı DFT işleminin işlem karmaşıklığını ikili DFT işlemlerine ayrıştırarak azaltıldığı algoritma radix-2 algoritmaları olarak geçmektedir. İkili DFT işlemi temel kelebek (butterfly-dragonfly) olarak adlandırılır. Eğer kelebek yapısı dörtlü DFT işlemlerine

düşürülerek yapılırsa radix-4 olarak isimlendirilmektedir. İşlem karmaşıklığının minimumda tutulması FPGA bütünleşik devresi üzerindeki kaynak kullanımını da azaltmaktadır. Şekil 4.19’ da 8 noktalı DFT işleminin radix-2 algoritmasına göre kelebek diyagramı gösterilmiştir [5].



Şekil 4.19 : 8-DFT işleminin radix-2 algoritması ile kelebek diyagramı.

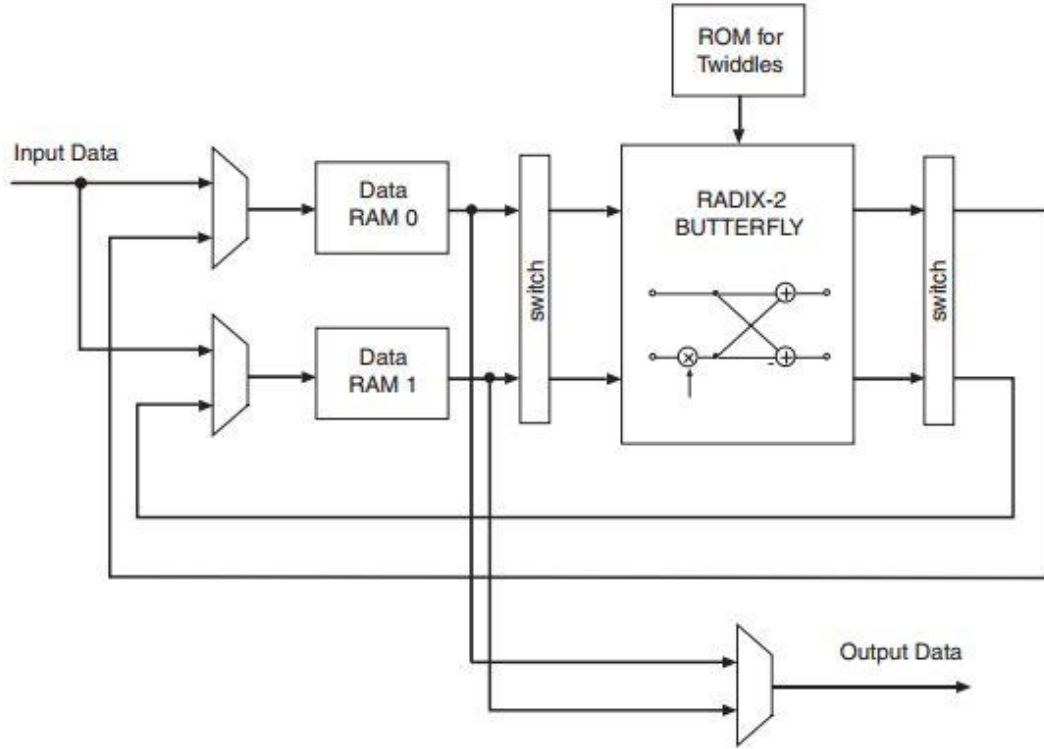
Radix-2 algoritmasının temel kelebek diyagramı ise Şekil 4.20’ de verilmiştir. İki noktalı DFT işlemi için W_N^k değeri “1” olduğu için uygulaması gerçekleştirme açısından oldukça kolaydır.



Şekil 4.20 : Radix-2 algoritmasının temel kelebek diyagramı.

Tez kapsamında ele alınan verici sisteminde Xilinx firmasının ücretsiz olarak sunduğu FFT IP-Core modülü kullanılmıştır. Kullanılan modülün hangi algoritmayı kullanacağı ve giriş sembollerinin kaç bit çözünürlükte olacağı rahatlıkla belirlenebilmektedir. Sağlanan ara yüz tasarımında FFT işleminin radix-4, radix-2 ve

hafifletilmiş radix-2 algoritmaları ile gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir. Radix-2 algoritmasının modül içerisindeki gerçekleştirme mimarisi Şekil 4.21’ de verilmiştir.



Şekil 4.21 : Radix-2 algoritmasının donanım mimarisi.

Hafifletilmiş radix-2 algoritmasında ise çift giriş çıkışlı RAM (Dual Port RAM-DPM) bloğundan bir tane kullanılarak kompleks girişin I ve Q bileşenlerini 2 ayrı işlemde (tek veri yolu ile) art arda yapar. Böylece çalışma hızından feragat ederek kaynak optimizasyonu sağlanmış olur. Algoritmanın seçimi için baz alınan kriter kaynak kullanımı olduğu için her bir algoritmanın kaynak kullanımını ölçmek adına ayrı ayrı sentezlenerek sonuçlar Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : FFT algoritmalarının kaynak kullanımı.

Algoritma	Slice	FF	LUT
Radix-4	4648	7715	7898
Radix-2	1698	2821	2864
Hafifletilmiş Radix-2	1272	2169	1876

Tez kapsamında ele alınan kaynak optimizasyonu kriterine göre hafifletilmiş radix-2 algoritması seçildikten sonra literatürde yer alan OFDM tabanlı verici tasarımları ve

IFFT bloğunun gerçekleştirme yöntemi incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda, tez kapsamında tasarlanan sistem ile adil bir kıyaslama olması açısından, vericide en çok kaynak kullanımına sebep olan FFT işleminin uzunluğunun 128 olmasına ve sadece temel bant verici tasarımı yapılmış olmasına dikkat edilmiştir.

Jinsong ve diğerleri 2008 yılında ultra geniş bant kablosuz sistemleri için çok bantlı OFDM tabanlı verici tasarımını Virtex-II FGPA üzerinde gerçekleştirmiştir. Kullanılan FFT algoritması ise radix-2' dir. Tasarım IP-Core ve hazır modül kullanılmadan algoritmanın VHDL dili kullanılarak FPGA üzerinde gerçekleştirilmesine dayanır. Ayrıca kanal kodlama bloğunda ise katlamalı kodlama kullanılarak tez kapsamında ele alınan tasarımla örtüşmektedir. Temel bant verici kapsamında tasarlanan bloklar rastgeleleyici, serpiştirici, kanal kodlayıcı, sembol modülasyonu, IFFT işlemi ve koruma bandı ekleme işlem bloklarıdır. Bu tasarım blokları oluşturulurken 2685 Slice, 3694 FF ve 4811 LUT kullanılmıştır [9].

Suhap Şahin 2010 yılındaki doktora tezinde 802.16 standardı üzerinde çalışan OFDM tabanlı modem tasarımını Virtex-5 ailesinin XC5VLX110T bütünleşik devresi üzerinde gerçekleştirmiştir. Tasarım ele alınırken esneklik ön planda tutularak hazır IP-Core modülleri kullanılmadan firma bağımlılığı azaltılarak oluşturulmuştur. Tezin ilk aşamasında, modem alt yapısında kullanılan aritmetik işlemlerin optimizasyonu için çok kaynak kullanımına sebep olan hassasiyeti yüksek IEEE-754 kayan noktalı işlem kütüphanesine alternatif IQ-Math sayı formatının kullanılması önerilmiştir. Böylece 16 ve 32 bit çözünürlükte, IEEE-754 kayan noktalı kütüphanesine yakın hata oranında çalışan sistem ortaya konmuştur. Tez çalışmasında ele alınan çözünürlük 10 bit olduğu için daha yüksek çözünürlükte bir çalışma yapılmıştır. İkinci aşamasında ise önerilen kütüphane ile OFDM modem gerçekleştirilmesi, sembol modülasyonu, IFFT ve CP ekleme işlemlerini kapsayacak şekilde yapılmıştır. Çalışmada FFT uzunluğu 128, sembol modülasyonu olarak 16QAM seçilmiştir. FFT işlemini gerçeklerken kullanılan algoritma radix-2 olarak seçilmiştir. Firmaya olan bağımlılığı azaltmak ve mevcut hazır modüllerin performansını yakalamak adına yapılan çalışmada 9335 adet Slice, 14290 FF ve 42429 LUT kullanılmıştır. Kullanılan Virtex-5 ailesine ait Slice kaynağında önceki FPGA ailelerinden farklı olarak (eski nesil ailelerde ikişer adet LUT ve FF bulunur) dörder adet LUT ve FF içerir. Firma bağımlılığı gözetilmezse mevcut hazır

kütüphane ve IP-Core modüllerinin kullanımı ile kaynak optimizasyonu yapılabileceğini de göstermiştir [5].

Tez kapsamında ele alınan radix-2 lite algoritması ile elde edilen temel bant vericinin kaynak kullanımı ve literatür araştırmasında karşılaştırılan çalışmalardaki kaynak kullanımları Çizelge 4.3’ de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : OFDM tabanlı temel bant verici tasarımının kaynak kullanımı.

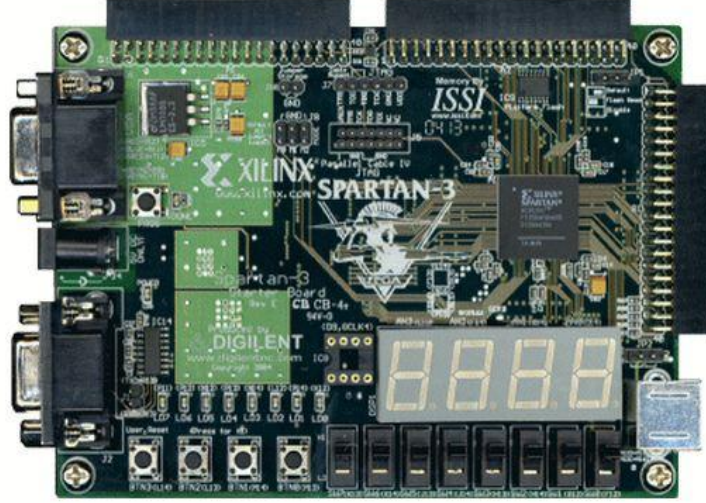
Çalışmayı Yapan	Çalışılan Algoritma	Slice	FF	LUT
Jinson ve diğerleri	Radix-2	2685	3694	4811
Suhap Şahin	Radix-2	9335	14290	42429
Tez Çalışması	Radix-2 Lite	1950	2998	3103

IFFT işlem bloğundan sonra aynı IP-Core modülü üzerinde CP ekleme işlemi de gerçekleştirilebilmektedir. Çıktı olarak alınan 128 I, Q örneğinin son 16 tanesi alınarak örneklerin başına yerleştirilmiştir. Böylece elde edilen her bir OFDM sembolünün uzunluğu 144 olmuştur. IP-Core girişinde kullanılan 10’ ar bit I, Q örneklerine karşın modül çıkışında 18’ er bit I, Q örnekleri elde edilmiştir. Elde edilen örnekler 12 bit I, Q girişlerini kabul eden üst dönüştürücü bütünleşik devresine (AD9856) aktarılacağından örneklerin anlamlı olan 12 bit uzunluğu alınmıştır (truncation). Elde edilen 12 bit uzunluğundaki I, Q örnekleri 1.4 MHz ile FPGA’ nın çıkış pinine aktarılmıştır.

4.3 FPGA Tasarımının Donanım Kartı Üzerinde Gerçeklenmesi

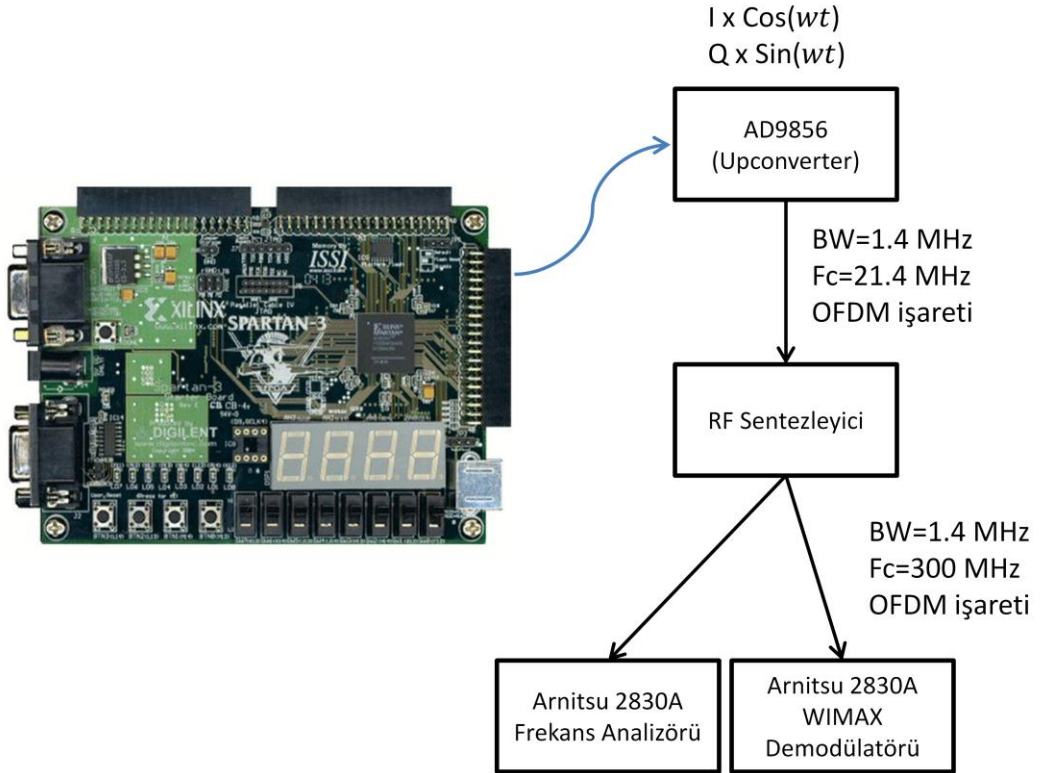
FPGA tasarımının ISE ortamında VHDL dili ile tasarlanıp ISIM programlarında benzetimi ile doğrulanmasının ardından, doğrulanan tasarım donanım kartına yüklenerek Arnitsu firmasının 2830A analizöründe incelenmiştir.

Oluşturulan tasarım Şekil 4.22’ de gösterilen Digilent firmasının Spartan-3 donanım kartına yüklenmiştir. Kart üzerinde 50 MHz saat darbesi üretici, tuşlar, anahtarlar, numaratorler ve giriş çıkış pinleri bulunmaktadır.



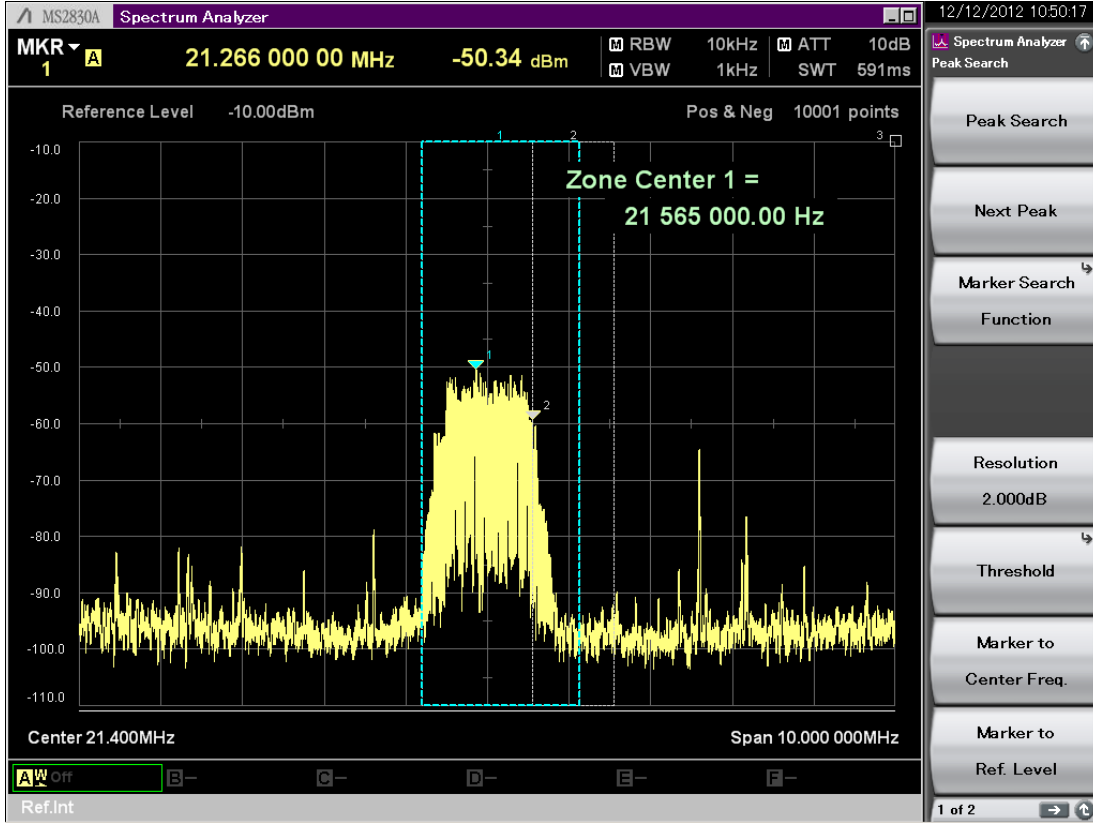
Şekil 4.22 : Digilent Spartan-3 kartı.

Üretilen WIMAX işareti kartın giriş çıkış pinleri (üstte 2 adet, sağda 1 adet pin yuvası) kullanılarak RF kartına aktarılmıştır. İşaret ilk olarak temel bant seviyesinden AD9856 üst dönüştürücü (upconverter) bütünleşik devresi kullanılarak 21.4 MHz seviyesine daha sonra RF işaret sentezleyicileri ile çarpılarak 300 MHz taşıyıcı frekansına yerleştirilmiştir. Şekil 4.23’ de gerçekleştirme aşamaları verilmiştir.



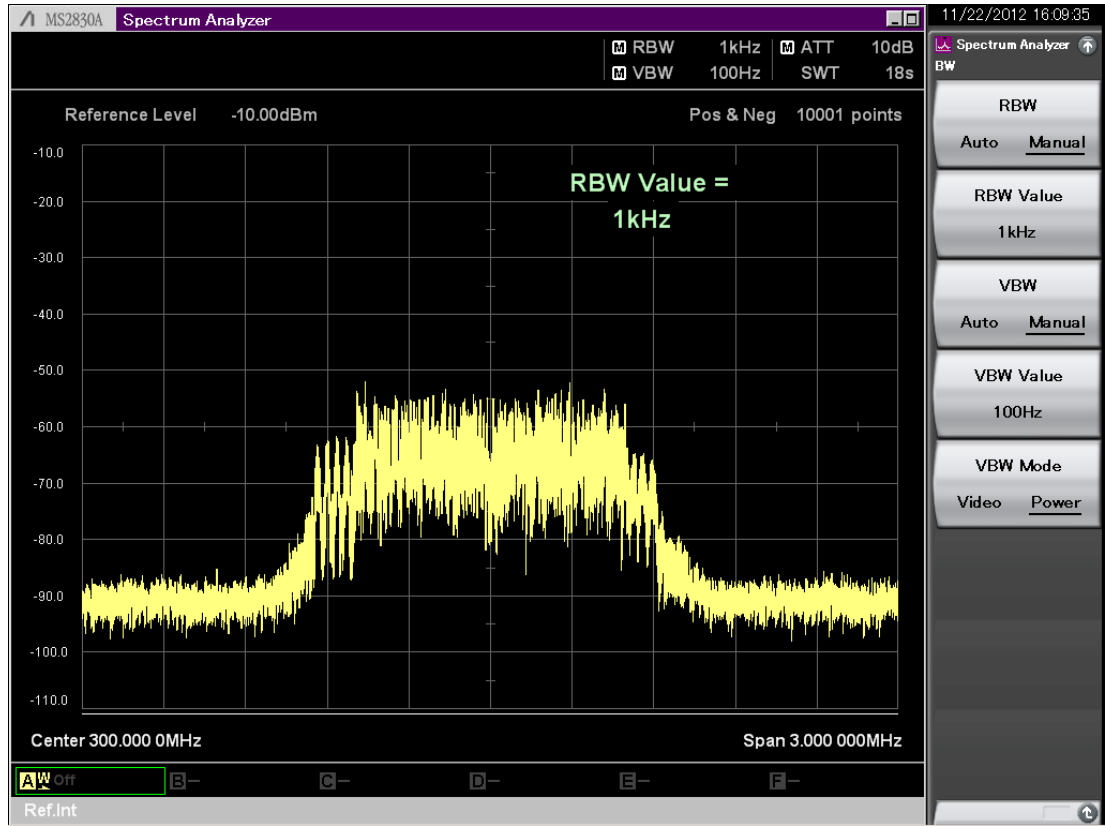
Şekil 4.23 : Gerçekleme adımları.

Ara frekansa çıkartılmış 1.4MHz bant genişlikli OFDM sinyalinin 21.4 MHz merkez frekanslı işaretinin sinyal analizöründeki çıktısı Şekil 4.24’ de verilmiştir. Görüntülenen pencere aralığı 10 MHz olup, 10 bölmeye ayrılan ekranda her bir bölmenin frekans aralığı 1 MHz’ dir. Sol alt köşede merkez frekansın 21.4 MHz olduğu görülmektedir.



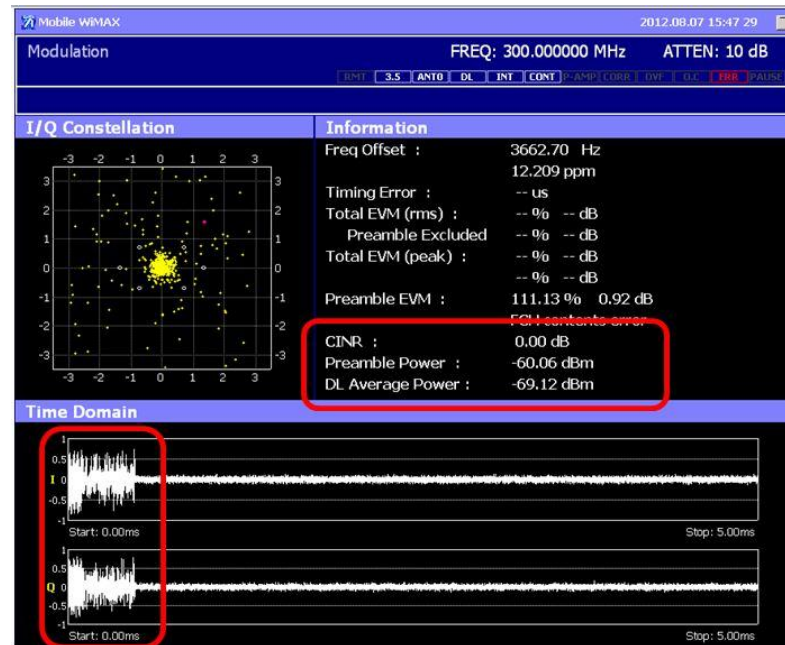
Şekil 4.24 : 21.4 MHz merkez frekanslı OFDM işaretinin spektrumu.

Ara frekansa yükseltilen sinyal RF sentezleyiciler ile 300 MHz merkez frekansına modüle edilmiştir. Şekil 4.25’ de verilen frekans spektrumunda incelenen pencere aralığı 3 MHz seçilmiştir. Her bir bölmenin aralığı 300 KHz olduğu için sinyalin yaklaşık bant genişliği 1.4 MHz olarak gösterilmiştir. Gönderilen sinyalin ortalama gücü -70 dBm olarak görülmektedir. Gönderilen sinyal WIMAX çerçevesi olduğu için ilk sembol başlama eki sonraki 4 sembol ise data sembolleridir. Analizör çıktısında genellikle data sembolleri görüntülendiğinden çıktı alındığında denk gelen güç data sembollerinin gücüdür, başlama ekinin ortama gücü ise yaklaşık 10dBm daha fazladır.



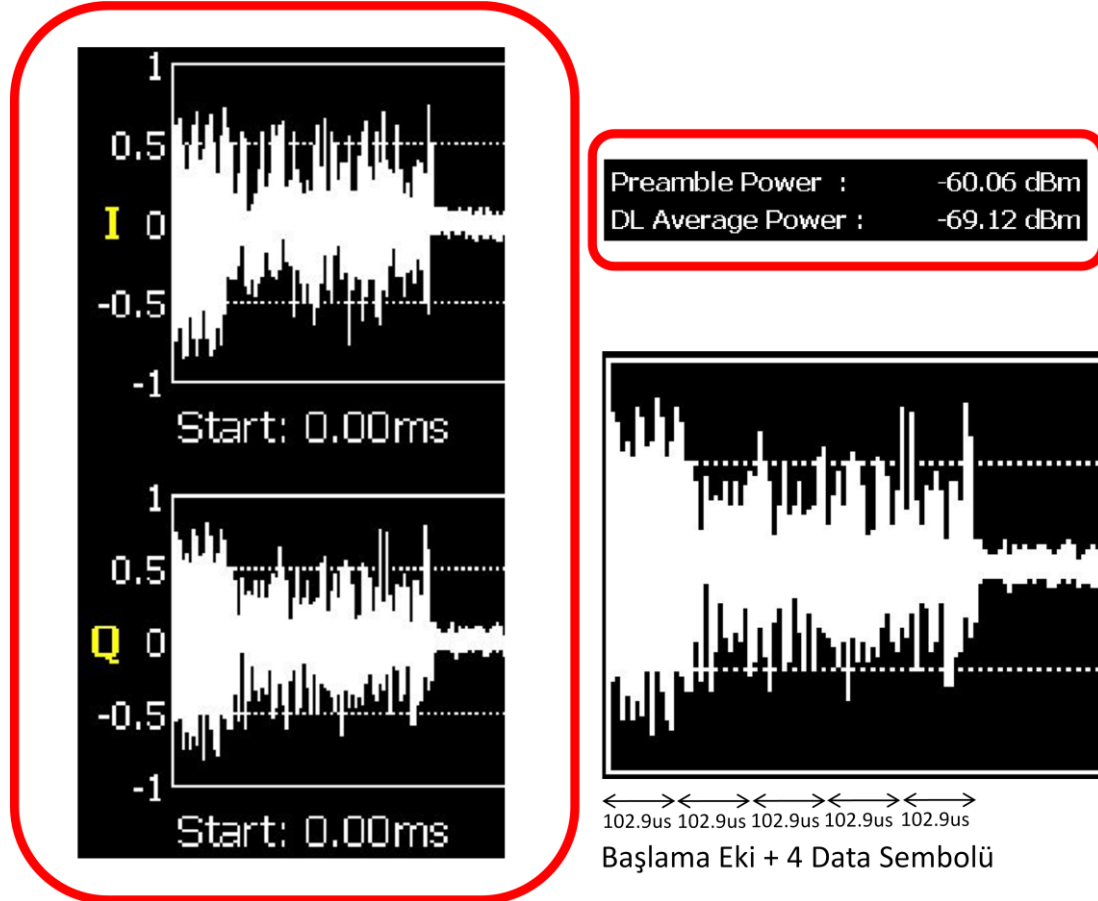
Şekil 4.25 : 300 MHz merkez frekanslı OFDM işaretinin spektrumu.

WIMAX çerçevesinin frekans analizöründeki spektrumu incelendikten sonra gönderilen çerçevenin WIMAX demodülatöründe doğru yakalandığı gözlemlenmiştir. Gönderilen işaretin demodülatör çıktısı Şekil 4.26’ da verilmiştir.



Şekil 4.26 : WIMAX çerçevesinin Arnitsu 2830A cihazındaki demodülatör çıktısı.

Gönderilen WIMAX çerçevesinin zaman bölgesindeki I ve Q örnekleri sol alt köşede gösterilirken, başlama ekinin ve data sembollerinin ortalama gücü -60.06 dBm ve -69.12 dBm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama güç ile WIMAX çerçevesinin frekans bölgesindeki analizi örtüşmektedir. Zaman bölgesindeki işaretin analizi ve ortalama güç Şekil 4.27’ de yakınlştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : WIMAX çerçevesinin demodülatör çıktısının analizi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında OFDM tabanlı temel bant WIMAX fiziksel katman vericisi FPGA üzerinde kaynak optimizasyonu gözeterek gerçekleştirilmiştir.

WIMAX fiziksel katmanında yer alan sistem parametrelerinin esnekliği sebebi ile tasarım yazılım tanımlı radyo kullanılarak yapılmıştır. Bu yapının kurulması için gelecek çalışmalara göre sistemin yönlendirilmesi ve geliştirilmesi düşünülerek DSP ve ASIC bütünleşik devreleri yerine FPGA kullanılmıştır. FPGA bütünleşik devreleri üzerindeki donanım kaynakları VHDL dili ile programlanabilen devreler olduğu için gelecekte ihtiyaç olan çevresel arabirimlerin oluşturulmasında esneklik sağlamaktadır.

WIMAX fiziksel katman sistemi gerçekleştirirken en çok kaynak tüketen yapılar incelenmiş ve bu yapılar standartta belirtilen sistem parametreleri çerçevesinde minimum kaynak tüketeceği şekilde seçilmiştir. Temel bant verici tasarımında en çok kaynak kullanımı kanal kodlama, sembol modülasyonu ve IFFT işlem bloklarında yapılmaktadır.

Standartta belirtilen kanal kodlama türleri arasında katlamalı kodlayıcı, CTC, BTC ve LDPC kodlara nazaran daha az işlem karmaşıklığı içermektedir. Bu sebeple bu yapının oluşturulmasında katlamalı kodların kullanımı kaynak optimizasyonu sağlamaktadır. Katlamalı kodların gerçekleştirme açısından kolaylığı gözetilerek Xilinx firmasının ücretsiz olarak sunduğu “Convolutional Encoder” IP-Core modülü kullanılmıştır.

Sembol modülasyonu standartta belirtildiği üzere QPSK, 16QAM ve 64 QAM olarak seçilebilmektedir. Hem modülasyonun gerçekleştirilmesi hem de fiziksel katmandaki aritmetik işlemlerin IEEE-754 kayan noktalı kütüphanesi kullanılmadan gerçekleştirilmesi çözünürlük açısından bir kayıp getirirse de kaynak optimizasyonu açısından 44 LUT kazanım getirmektedir. Tez tasarımında ele alınan 10 bit çözünürlüklü I, Q örnekleri IFFT işleminden sonra 18 bit uzunluğa sahip olacağından (çarpma işlemleri sonrası sayılar büyüyor) sonrasında kullanılacak üst dönüştürücünün çözünürlüğüne göre belirlenmesi kritik bir tasarım unsurudur. Tez kapsamında kullanılan AD9856 üst dönüştürücü bütünleşik devresinin girişi 12 bit

uzunluklu I, Q örneklerini desteklediği için IFFT bloğunun çıkışı 12 bit' e indirgenmiştir (truncation). IFFT IP-Core modülü çıkışında elde edilen kompleks örneklerin uzunluğu 10 bit I, Q girişleri için 18 bit olarak katalogunda belirtilse de elde edilen çıktılar gözlemlenerek en uygun 12 bit aralık alınmalıdır. İndirgenen 12 bit çıktılarının genliği aştığı durumlarda iletilen bitlerin bozulmasına sebep olacaktır. Sembol modülasyonundaki çözünürlük kararı verilmeden bu göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur.

IFFT işlemi temel bant verici bloğunun en çok kaynak harcayan işlem bloğudur. Bu bloğun gerçekleşmesi tasarım kolaylığı açısından Xilinx firmasının ücretsiz olarak sağladığı FFT IP-Core modülü kullanılarak yapılmıştır. Firmanın sağladığı hafifletilmiş radix-2 algoritması minimum kaynak kullanarak 1272 Slice, 2169 FF ve 1876 LUT ile bloğu gerçeklemiştir.

Xilinx firmasının ISIM mantık analizöründe benzetimi yapılan tasarım Digilent firmasının Spartan-3 FPGA kartı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen temel bant vericinin ürettiği olduğu WIMAX çerçevesi AD9856 üst dönüştürücü bütünleşik devresi ile I ve Q örnekleri cos ve sin işaretleri ile çarpılıp 21.4 MHz kompleks sinyaller elde edilmiştir. Ara frekanstaki işaret RF sentezleyicilerin ürettiği taşıyıcı işaret ile çarpılarak 300 MHz frekans bandında OFDM sinyali elde edilmiştir. Elde edilen sinyalin bant genişliği tasarımda belirlenen 1.4 MHz ile aynı olduğu ve merkez frekansının 300 MHz olduğu Arntsu 2830A test cihazında gözlemlenmiştir. Frekans analizi yapılan işaret aynı test cihazının demodülatör girişine bağlanarak gönderilen WIMAX çerçevesinin doğru şekilde alındığı test edilmiştir. Gönderilen sinyalin gücüne uygun olarak başlama eki ve data sembollerinin ortalama günü -60 ve -70dBm civarında hesaplanmıştır.

Gelecek çalışmalarda gerçekleştirilen WIMAX fiziksel katmanının sembol modülasyonunu ve çerçeve uzunluğunu her WIMAX çerçevesinin iletiminden önce kanal durumuna göre adaptif yapılması için çalışılabilir. Kaynak kullanımı minimumda tutulan sistem ile MIMO-OFDM temel bant verici tasarımının tek FPGA üzerinde modüler olarak tasarlanması, LTE ve WIMAX sistemlerinin fiziksel katmanlarının gerçekleştirilmesi için temel oluşturabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Radha Krishna Rao, G. & Radhamani, G.** (2008). *WiMAX: a wireless technology revolution*. 1st Ed. Auerbach Publications, Boca Raton.
- [2] **Ballal, B.R., Chadha, A. ve Satam, N.** (2013) Orthogonal Frequency Division Multiplexing and its Application, *International Journal of Science*, Vol. 2, Issue. 1.
- [3] **Holma, H. & Toskala, A.** (2009). *LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access*. 1st Ed. Wiley, Chichester, West Sussex.
- [4] **Kelley, B.** (2009). *Software defined radio for broadband OFDM protocols*. Sf. 2309-2314.
- [5] **Şahin, S.** (2010). FPGA Tabanlı OFDM Modem Gerçeklemesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye.
- [6] **Veillacux, J., Fortier, P. & Roy, S.** (2005). *An FPGA implementation of an OFDM adaptive modulation system*. Sf. 353-356.
- [7] **Garcia, J. & Cumplido, R.** (2005). *On the design of an FPGA-Based OFDM modulator for IEEE 802.11 a*. Sf. 114-117.
- [8] **Sghaier, A., Areibi, S. & Dony, R.** (2008). *IEEE802. 16-2004 OFDM functions implementation on FPGAS with design exploration*. Sf. 519-522.
- [9] **Jinsong, X., Xiaochun, L., Haitao, W., Yujing, B., Decai, Z., Xiaolong, Z. & Chaogang, W.** (2008). *Implementation of MB-OFDM transmitter baseband based on FPGA*. Sf. 50--54.
- [10] **Prasad, R. & Velez, F.** (2010). *WiMAX networks*. 1st Ed. Springer, Dordrecht.
- [11] **IEEE 802.16-2001.**(2002). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*.
- [12] **IEEE 802.16a.** (2003). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks --- Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems--- Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz*.
- [13] **IEEE 802.16-2004.** (2004). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems (Revision of IEEE Std 802.16-2001)*.
- [14] **Zhang, Y. & Chen, H.** (2008). *Mobile WiMAX*. 1st Ed. Auerbach Publications, New York.

- [15] **IEEE 802.16e.** (2005). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1.*
- [16] **Gümüř F.** (2008). WIMAX teknolojisi fiziksel katman parametrelerinin performansa etkisinin MATLAB kullanılarak incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi, Türkiye.*
- [17] **IEEE 802.16-2009.** (2009). *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.*
- [18] **IEEE 802.16-2012.** (2012). *IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.*
- [19] **Andrews, J., Ghosh, A. & Muhamed, R.** (2007). *Fundamentals of WiMAX.* 1st Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [20] **Nuaymi, L.** (2007). *WiMAX technology for broadband wireless access* 1st Ed. John Wiley, Chichester.
- [21] **Prasad, R.** (2004). *OFDM for wireless communications systems.* 1st Ed. Artech House, Boston.
- [22] **Kiokes, G., Economakos, G., Amditis, A. & Uzunoglu, N.** (2011). *Performance analysis and complexity study of LDPC and Turbo Coding schemes for Inter Vehicle Communications.* Sf. 559-564.
- [23] **Sun, Y. & Ding, Z.** (2012). FPGA Design and Implementation of a Convolutional Encoder and a Viterbi Decoder Based on 802.11 a for OFDM. *Wireless Engineering & Technology.* 3 (3).
- [24] **Url-1** <http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/tcc_enc_802_16e_ds525.pdf>, alındığı tarih: 04.05.2014.
- [25] **Url-2** <http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/convolution_ds248.pdf>, alındığı tarih: 04.05.2014.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ahmet Tansu Aktürk

Doğum Yeri ve Tarihi: Denizli - 02.01.1988

E-Posta: ahmettansuakturk@gmail.com

Lisans: Telekomünikasyon Mühendisliği / İstanbul Teknik Üniversitesi

Y. Lisans: Telekomünikasyon Mühendisliği / İstanbul Teknik Üniversitesi