

Dik Frekans Bölüşümlü Çoğullama Sistemlerinde Tepe/Ortalama Güç Oranının Azaltılması

Farman Shalizada

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2020

Peak-To-Average Power Ratio Reduction In Orthogonal Frequency Division Multiplexing
Systems

Farman Shalizada

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical and Electronics Engineering

June 2020

Dik Frekans Bölüşümlü Çoğullama Sistemlerinde Tepe/Ortalama Güç Oranının Azaltılması

Farman Shalizada

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon-Sinyal İşleme Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Erol Seke

Haziran 2020

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Erol Seke danışmanlığında hazırlamış olduğum “Dik Frekans Bölüşümlü Çoğullama Sistemlerinde Tepe/Ortalama Güç Oranının Azaltılması” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 02/06/2020

Farman Shalizada

ÖZET

Modern kablosuz iletişim sistemleri yüksek veri iletim oranlarına ihtiyaç olan yerlerde tek taşıyıcı yerine çok sayıda taşıyıcı kullanarak veriyi paralel taşır. Dikgen Frekans Bölüşümlü Çoğullama (OFDM) çok sayıda taşıyıcı kullanan en yaygın ve avantajlı yöntemdir.

OFDM sistemlerinde iletilecek çok sayıda bitten oluşan semboller alt-sembollere bölünür ve her alt-sembol için alt-taşıyıcı faz ve frekansını temsil eden karmaşık sayılar Ters Hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) işlemi ile zaman alanındaki işaret oluşturulmak üzere birleştirilir. Ancak, bazı sembol değerleri için zaman alanındaki taşıyıcıların özel durumlarında toplam işaret anlık olarak oldukça yüksek değerler alabilmektedir. Tek taşıyıcılı sistemlerde karşılaşılmayan bu olay OFDM sistemlerinde Tepe/Ortalama Güç Oranı (PAPR) ile nitelendirilir ve ölçümlenebilir. PAPR, analog güçlendirici ve anten katı elektroniğinde bir tasarım problemi ve dolaylı olarak maliyet oluşturmaktadır çünkü yüksek tepe değerleri bu elektroniğin karakteristiklerinin çalışma şartlarının dışına yani doğrusal olmayan kısmına karşı gelebilmektedir. Böylelikle yayınlanan işaretle bozulmaya ve tayfta istenmeyen etkilerin oluşmasına sebep olurlar. Ayrıca, alıcılar açısından bozulan işaret tabiki doğru sembol kararlarının üretilmesine engel olur. O nedenle, yayınlanacak işaretlerde PAPR değerinin mümkün olduğunca düşük olması tercih edilir, mümkün ise düşürülür.

PAPR değerlerini düşürmek için bu çalışmada önerdiğimiz yöntem negatif etkilere sahip olmayıp önemli bir işlem yükü de getirmemektedir. Yöntemin esası her bir taşıyıcının faz ve genliğini alıcıda sembolleri belirlemede problem yaratmayacak kadar değiştirmek ve bunu PAPR'ı düşürecek yönde yapmaktır. Ayrıca, bu değişiklikleri OFDM sembolünün ortalama gücü değişmeyecek yada çok az değişecek şekilde yapılmaktadır.

Yöntemin avantajları, ilave yan bilgi gerektirmemesi, BER'i çok az değiştirmesi ve pratikte uygulanabilir olmasıdır. Benzetim sonuçlarında umut verici PAPR başarımları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dikgen Frekans Bölütlemeli Çoğullama (OFDM), Tepe/Ortalama Güç Oranı (PAPR), Bit Hata Oranı (BER), Yan Bilgi (SI)

SUMMARY

Modern wireless communication systems carry information over multiple carriers instead of single carrier especially when high data rates are required. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is the most used and advantageous multicarrier system.

In OFDM systems, the multi-bit symbols are split into sub-symbols and the complex numbers that represent the phase and amplitude of the carriers that carry each sub-symbol are combined using Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) to create the time signal that is composed of all. However, for some symbol values, the composition of their carriers in time domain can assume quite high values at some instants in time. This phenomenon which is not seen in single-carrier systems, is named as Peak/Average Power Ratio (PAPR) in OFDM systems and can be measured as such. PAPR poses design problems and inherently introduces cost in analog amplifiers in antenna circuitry, because high peak signal values may be outside of the normal operation conditions and may be inside the nonlinear portion of the characteristics of these circuits. Consequently, it will cause distortions in the transmitted signal and unwanted effects in the spectrum. In addition, such distortions will eventually cause false detections on the receiver side. Therefore, it is desired for PAPR of the OFDM signal to be transmitted to be as low as possible, and is reduced if possible.

The technique we proposed in this paper for PAPR reduction, on the other hand, does not have negative sides while not imposing significant computational load. The principle of the technique is to alter phases and amplitudes of individual sub-carriers in the direction that reduces PAPR but in the levels that would not cause additional detection problems at the receiver. In addition, the alterations are carried out such that the average power stays approximately the same.

The technique has advantages of not requiring transmission additional bits, not causing considerable BER deterioration and being practical to apply. We obtained promising simulation results.

Keywords: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Peak to Average Power Ratio (PAPR), Bit Error Rate (BER), Side Information (SI)

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde, tez sürecinde ve tezimin tamamlanmasında, yapılan araştırmalarda, karşılaştığım sorunlarda ve yönlendirmesinde, tezimin tamamlanmasında destek olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Erol Seke'ye teşekkür ederim.

Türkiye'de öğretim görmemde katkıda bulunan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman olduğu gibi bu süreçte de her türlü destekleriyle yanımda olan, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	12
3.1 PAPR'ın Tanımı	12
3.2 PAPR Azaltma Teknikleri	13
3.2.1 Tepe Pencereleme (PW) tekniği	14
3.2.2 Tepe Azaltma Taşıyıcı (PRC) tekniği.....	15
3.2.3 Kırpma ve Filtreleme (C&F) tekniği	16
3.2.4 Zarf Ölçekleme (ES) tekniği.....	17
3.2.5 Blok Kodlama (BC) tekniği.....	17
3.2.6 Seçici Haritalama (SLM) tekniği.....	17
3.2.7 Kısmi İletim Dizisi (PTS) tekniği.....	19
3.2.8 Ton Rezervasyonu (TR) tekniği	20
3.2.9 Ton Enjeksiyonu (TI) tekniği	22
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR	23
4.1 OFDM Alıcısı ve Vericisi	23
4.1.1 İleri Hata Düzeltme	25
4.1.2 Bit Serpiştirici.....	26
4.1.3 OFDM Sistemlerinde Dikliğin Sağlanması	26
4.1.4 Döngüsel Önek (CP).....	27

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.5 Modülasyon ve Demodülasyon	28
4.1.6 Bit hata Oranı (BER)	30
4.2 Genlik Değişirme ve Faz Kaydırma	31
4.2.1 Genlik Değişirme	34
4.2.2 Faz Kayması	35
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR DİZİNİ	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Bantgeçiren PAM vericisi	13
3.2 Tepe pencereleme tekniği blok şeması	15
3.3 PAPR azaltmak için kullanılan C&F tekniğinin blok şeması	17
3.4 PAPR azaltmak için kullanılan SLM tekniğinin blok şeması	20
3.5 PAPR azaltmak için kullanılan PTS tekniğinin blok şeması	21
3.6 PAPR azaltmak için kullanılan TR tekniğinin blok şeması	23
3.7 PAPR azaltmak için kullanılan TI tekniğinin blok şeması	24
4.1 IDFT uygulanan bir OFDM şeması	25
4.2 OFDM iletişim sistemi genel blok şeması	26
4.3 OFDM alt-bantların yerleşimi	27
4.4 Döngüsel Önek'in eklenmesi	30
4.5 OFDM şemasının modülasyonu ve demodülasyonunun blok şeması	30
4.6 OFDM iletişim sisteminin prensip blok şeması	31
4.7. Toplamları bir zaman aralığında yüksek bir değer alan dört dik taşıyıcı	32
4.8. PAPR azaltmak için kullanılan genlik değiştirme ve faz kaydırma tekniğinin blok şeması	33
4.9 Genlikleri değiştirecek olan BPSK ve QPSK sistemlerinin kümeleşme diyagramı	34
4.10 a) Orjinal OFDM zaman alan sinyali b) Genliği değiştirilmiş OFDM zaman alan sinyali	35
4.11 Genlikleri ve fazları değiştirecek olan QPSK ve BPSK sistemlerinin kümeleşme diyagramları ve değişim aralıkları	36
4.12 64 Taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği	38
4.13 128 Taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği	39
4.14 256 Taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği	39
4.15 512 Taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

Açıklama

ABC	Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
ACE	Active Constellation Extension (Aktif Takımyıldız Uzantısı)
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line (Asimetrik Sayısal Abone Hattı)
AWGN	Additive White Gaussian Noise (Toplamalı Beyaz Gauss Gürültüsü)
BER	Bit Error Rate (Bit Hata Oranı)
BPSK	Binary Phase Shift Keying (İkili Faz Kaydırma Anahtarlaması)
CARI	Cross-Antenna Rotation&Inversion (Çapraz Anten Dönüşü ve Ters Çevirme)
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function (Tamamlayıcı Birikimli Dağılım İşlevi)
CCM	Convolutional Constellation Mapping (Konvolüsyonel Takımyıldız Haritalaması)
CE	Cross Entropy (Çapraz Entropi)
CMA	Constant Modulus Algorithm (Sabit Modül Algoritması)
CO	Convex Optimization (Dışbükey Optimizasyon)
DAB	Digital Audio Broadcasting (Dijital Ses Yayını)
DAC	Digital To Analog Converter (Dijital-Analog Dönüştürücü)
DPD	Digital Pre-Distortion (Dijital Bozulma)
DSP	Dynamic Symbol Pairing (Dinamik Sembol Eşleştirme)
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial (Dijital Video Yayını-Karasal)
FBMC	Filter Bank Multi-Carrier (Filtre Bankası Çoklu Taşıyıcı)
FFT	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
HPA	High Power Amplifier (Yüksek Güçlü Amplifikatör)
IAPR	Instantaneous to Average Power Ratio (Anlık Ortalama Güç Oranı)
IBO	Input Back-Off (Giriş Geri Çekimi)
ICI	Inter Carrier Interference (Taşıyıcılar Arası Girişim)
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform (Ters Ayrık Fourier Dönüşümü)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısıltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü)
ISI	Inter Symbol Interference (Semboller Arası Girişim)
LDPC	Low Density Parity Check (Düşük Yoğunluklu Parite Kontrolü)
LPAPR	Local Peak to Average Power Ratio (Yerel Tepe Ortalama Güç Oranı)
LSE	Least Square Error (En Küçük Kare Hatası)
LTE	Long Term Evolution (Uzun Vadeli Evrim)
LUT	Look Up Table (Arama Tablosu)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış)
NCT	Nonlinear Companding Transform (Doğrusal Olmayan Sıkıştırma
Dönüşümü)	
OBO	Output Back-Off (Çıktı Geri Çekimi)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dik Frekans Bölüşümlü
Çoğullama)	
PA	Power Amplifier (Güç Amplifikatörü)
PAPR	Peak to Average Power Ratio (Tepe Ortalama Güç Oranı)
PCE	Peak-restricted Constellation Extension (Tepe Kısıtlamalı Takımyıldız
Uzantısı)	
PRT	Peak Reduction Tones (Tepe Azaltma Tonları)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu)
PTS	Partial Transmit Sequence (Kısmi İletim Dizisi)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (Dörtlü Genlik Modülasyonu)
RB	Resource blocks (Kaynak blokları)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
ROF	Radio Over Fiber (Fiber Üzerinden Radyo)
SDT	Signal Distortion Techniques (Sinyal Bozulma Teknikleri)
SFBC	Space Frequency Block Coding (Alan Frekans Blok Kodlama)
SI	Side Information (Yan Bilgi)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısıltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SDCMA	Steepest Descent Constant Modulus Algorithm (En Dik İniş Sabit Modül Algoritması)
SFPI	Space-Frequency Permutation&Inversion (Uzay-Frekans Permütasyonu ve İnversiyon)
SISO	Single Input Single Output (Tek Giriş Tek Çıkış)
SLM	Selective Mapping (Seçici Haritalama)
SNR	Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
ST	Scrambling Techniques (Karıştırma Teknikleri)
STBC	Space Time Block Coding (Uzay Zaman Bloğu Kodlaması)
SQP	Sequential Quadratic Programming (Sıralı Kuadratik Programlama)
TDM	Time Division Multiplexing (Zaman Bölüşümlü Çoğullama)
TI	Tone Injection (Ton Enjeksiyonu)
TR	Tone Reservation (Ton Rezervasyonu)
UWB	Ultra Wideband (Ultra Geniş Bant)
WPACMA	Weight Pattern Adaptive Constant Modulus Algorithm (Ağırlık Düzeni Uyarlamalı Sabit Modül Algoritması)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

İletişim bilgiyi bir yerden, kişiden veya gruptan diğerine aktarma eylemidir. Her iletişim (en az) bir gönderen, bir mesaj ve bir alıcı içerir. Elektronik sayısal haberleşme ise günümüzün en yaygın iletişim yöntemidir. Haberleşme, bilgi içeren verinin bir noktadan başka bir noktaya bir iletişim ortamı üzerinden iletilmesidir.

Yaşadığımız çağın iletişim çağı olarak adlandırılması elektronik alanındaki gelişmelerin 1804 yılında İspanyol bilim adamı Francisco Salva Campillo'nun elektrokimyasal telgrafı, 1876 yılında Alexander Graham Bell'in telefonu, 1900 yılının başında radyo, 1923 yılında John Logie Baird'ın televizyon ve 1941 yılında ve John Vincent Atanasoff'un bilgisayar gibi icatları ardısıra son birkaç on yıl içinde hızlanarak ve yaygınlaşarak vazgeçilmez hale gelmesiyle olmuştur.

Haberleşme sistemlerinde bilgi iletişimi kablolu ve kablosuz olarak yapılmaktadır. Modern kablosuz iletişim sistemleri yüksek veri iletim oranlarına ihtiyaç olan yerlerde tek taşıyıcı yerine çok sayıda taşıyıcı kullanarak veriyi paralel taşımaktadır. Çok taşıyıcılı modülasyon yöntemlerinden biri de frekans bölütleme çoğullaması (FDM: frequency division multiplexing) yöntemidir.

Taşıyıcı sayısı ile bu taşıyıcılara ayrılan frekans bandının çarpımı bize bant genişliğini vermektedir. FDM yönteminde iletişim kapasitesinde sağlamak için bant genişliği de aynı oranda arttırılmalıdır. Bu sınırlamayı bir miktar aşmak için bant içinde FDM'de olduğundan daha fazla taşıyıcı bulunması gerekmektedir. Bunun için de FDM sistemlerinde taşıyıcılar birbirine dik seçilmelidir. FDM'deki taşıyıcılar dik seçildiğinde dik frekans bölütleme çoğullaması (OFDM: orthogonal frequency division multiplexing) elde edilir. Kısacası OFDM geliştirilmiş bir FDM'dir.

FDM sistemlerinin tarihi 1870 yıllarına dayanmaktadır. Telgraf şirketleri kendi karlarını arttırmak için telgraf iletim hattının kapasitesini arttırmaları gerekiyordu. Bunun için araştırmalara büyük yatırımlar yapıldı ve Emili Baudot tarafından zaman bölütleme

çoğullaması (TDM: time division multiplexing) sistemi icat edildi. Emili Baudot TDM şemasını birden fazla Hughes telgraf makinesine uygulayarak aynı anda 5 mesaj iletebildi.

Tüm bunlara rağmen TDM şemasına göre daha verimli, daha avantajlı olan bir FDM şemasının icatı uzun sürmedi. 1870 yıllarında Graham Bell, Elisha Gray, Thomas Edison gibi rakipler çok tonlu telgraf peşindeydiler. Graham Bell'in amacı telgraftan farklı olarak analog ses iletimine yönelik bir şey icat etmekti.

FDM şeması ilk kez ABD'nin Ordu Sinyal Birliği (ASC) tarafından 1910 yılında bir geçiş bandı olan cihazda kullanıldığı söylenilmektedir. FDM şeması kendi devrinin en kullanışlı ve en verimli şemasına çevrilmiştir.

TDM şeması artık 1970 yıllarında yerini tamamen FDM şemasına verdi. Bunun nedeni FDM sisteminin daha avantajlı olması idi. Çünkü FDM şemasında kanalın bant genişliği ne kadar fazla ise, iletilecek veri de o kadar arttırılabilmekteydi..

FDM şemasında iletişim kapasitesinde artış elde etmek için yapılan çalışmalar 1966 yılında Chang tarafından Bell laboratuvarında OFDM sisteminin icat edilmesiyle sonuçlandı.

1971 yılında Weinstein ve Ebert OFDM sistemini daha da geliştirerek, koruma aralığının eklenmesiyle iletim kanallarında verimli bir diklik elde ettiler.

Zaman zaman geliştirilen OFDM şeması bir çok kablosuz uygulamalarda kullanılmaya başlandı. Örneğin, 1995 yılından itibaren Dijital Ses Yayımında (DAB), 1997 yılında dijital televizyonda (DVB), 1999 yılında da Kablosuz Yerel Alan Ağlarında (WLAN), 4G teknolojisinde kullanılmaya başlandı.

OFDM sistemlerinde iletilecek çok sayıda bitten oluşan semboller alt-sembollere bölünür ve her alt-sembol için alt-taşıyıcının faz ve genliğini temsil eden karmaşık sayılar Ters Hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) işlemi ile zaman alanındaki işaret oluşturulmak üzere birleştirilir. Tek taşıyıcılı sistemlerle çoktaşıyıcılı OFDM sistemleri karşılaştırıldığında, her ikisinin de kendine has problemleri ve avantajları olduğu görülür. OFDM sistemlerindeki uygulama zorluklarından birisinin Tepe/Ortalama Güç Oranı (PAPR) olduğu görülür.

Bazı sembol değerleri için zaman alanındaki taşıyıcıların özel durumlarında toplam işaret anlık olarak oldukça yüksek değerler alabilmektedir. Tek taşıyıcılı sistemlerde karşılaşılmayan bu olay OFDM sistemlerinde Tepe/Ortalama Güç Oranı (PAPR) ile nitelendirilir ve ölçümlenebilir. PAPR, analog güçlendirici ve anten katı elektroniğinde bir tasarım problemi ve dolaylı olarak maliyet oluşturmaktadır çünkü yüksek tepe değerleri bu elektroniğin karakteristiklerinin çalışma şartlarının dışına yani doğrusal olmayan kısmına karşı gelebilmektedir. Böylelikle yayınlanan işaretle bozulmaya ve tayfta istenmeyen etkilerin oluşmasına sebep olurlar. Ayrıca, alıcılar açısından bozulan işaret tabiki doğru sembol kararlarının üretilmesine engel olur. O nedenle, yayınlanacak işaretlerde PAPR değerinin mümkün olduğunca düşük olması tercih edilir, mümkün ise düşürülür.

PAPR'ı azaltmak için, herbirisinin bazı dezavantajları olmakla birlikte, bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu dezavantajlara veri kaybı olabilmesi, ilave yan bilgi gerektirmesi, karmaşık işlemler yapma ihtiyacı, bit hata oranının (BER) yüksek olması, zaman kaybı vb. dahildir.

Bu tez çalışmasında amaç PAPR değerlerini düşürmek için kullanılan yöntemleri inceleyerek daha zayıf negatif etkilere sahip yeni bir yöntem önermektir. Önerdiğimiz yöntem PAPR değerlerini ilave yan bilgi gerektirmeden, BER'i önemli oranda etkilemeden düşürmekte ve en önemlisi pratikte de uygulanabilir olmasıdır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

OFDM sistemleri son zamanlarda yüksek veri hızlı kablosuz iletişim sağlamakta kullanılmaktadır. Birçok üstünlüğüyle beraber, OFDM'in bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan biri olan PAPR, OFDM'in uygulamadaki maliyetini düşürmekteki engellerden birisidir. OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için bir çok teknik kullanılmıştır.

Bu teknikler genel olarak iki gruba ayrılmaktadır:

- Sinyal Karıştırma Yöntemleri (SSM): En yaygın olan yöntemler Sinyal Karıştırma Yöntemleridir. Blok Kodlama Şeması (BCS), Seçili Haritalama (SLM), Kısmi İletim Dizisi (PTS), Serpiştirme Tekniği (IT), Ton Rezervasyonu (TR), Ton Enjeksiyonu (TI) gibi yöntemler SSM yöntemleri içindedir.

- Sinyal Bozulma Yöntemleri (SDM): OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için kullanılan yöntemlerden diğeri de Sinyal Bozulma Yöntemleridir. Bunlar Tepe Penceresi (PW), Zarf Ölçekleme (ES), Tepe Azaltma Taşıyıcısı (PRC), Kırpma ve Filtreleme (CF) yöntemlerinden oluşmaktadır.

Aşağıda bu alanda yapılan bir sıra çalışmaya değinilmektedir.

Xiaowen Gu vd. (2010) çalışmasında daha verimli SLM tekniği kullanarak OFDM sinyallerinde PAPR'ı azaltmıştır. Çalışmada, sınırlı yan bilgileri olan SLM – OFDM için daha verimli faz döndürme parametrelerini seçmek üzere yeni bir yöntem sunulmuştur. Yöntem bir yada birkaç tablo kullanmaktadır (Look – Up Table) (LUT). Yöntem, verimli faz döndürme parametreleri seçilmesine ilişkin düzenlemeleri belirlemektedir.

Mandeep Kaur vd. (2015) çalışmasında PAPR'ı azaltmak için Ağırlık Örüntüsü Uyarlamalı Sabit Modülü Algoritması (WPACMA) tekniği uygulamıştır. Kullanılan bu teknik diğer tekniklere göre daha fazla avantaj sağlamaktadır. Sabit modül algoritması (CMA) tekniğinde PAPR değeri uyarlanabilir ağırlık düzeni değiştirildikten sonra hesaplanır.

Uygulanan bu teknikte ağırlık düzeni (0.3-0.7) çifti en iyi PAPR sağlamaktadır. PAPR değeri 5.213 db'e kadar indirilmiştir.

Latinovic vd. (2005) çalışmasında çapraz anten döndürme ve ters çevirme (CARI) yöntemiyle PAPR'ı azaltmıştır. Çalışmada birbirini izleyen alt – basamaklı ve rastgele altgrup olarak adlandırılan iki alt şema önerilmiştir. Bu iki şema hesaplama karmaşıklığını basitleştirmekle beraber, önemli performans avantajları sağlamaktadır. Yöntemde birden fazla anten, ardışık suboptimal CARI (SS-CARI) ve rasgele suboptimal (RS-CARI) şemaları kullanılmıştır. Çalışmanın en büyük avantajı diğer yöntemlere göre gönderilecek yan bilginin ve hesaplama karmaşıklığının daha az olmasıdır. Simulasyon sonuçlarında bu yöntemin en iyi durumda PAPR'ı 8 dB'e kadar indirdiği bildirilmiştir.

OFDM sistemlerinde PAPR'ı indirmek için yapılan çalışmalardan biri de Zhongli Wu vd. (2008) uzay – frekans permütasyon ve inversiyona (SFPI) göre azaltma tekniğidir. Bu teknikte de birbirini izleyen alt – basamaklı SFPI (RS – SFPI) ve rasgele altgrup SFPI (RS – SFPI) olarak adlandırılan iki alt şema önerilmiştir. Latinovic vd. (2005) çalışması gibi sadece PAPR'sı indirmekle kalmayıp aynı zamanda bunu düşük karmaşıklıkla yapabilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı maliyetinin yüksek olmasıdır.

Isabela Braz vd. (2010) çalışmasında birden çok anten kullanarak ve kullanılmayan tonları (taşıyıcıları) kullanarak OFDM sisteminde PAPR'ı azaltmıştır. Bu yöntemin özelliği her bir vericideki sinyallerle ayrı ayrı işlemler gerekmemesindedir. Sadece bir antende tepe iptal sinyali üretilir, daha sonra da basit işlemlerle diğer antenlere de uygulanır. Sinyal işlemi sadece bir vericide yapıldığından sistemin maliyeti önemli şekilde azaltılabilir. Araştırmanın benzetim sonuçlarında PAPR'ın 2 dB azaldığı gösterilmiştir. Bu yöntemde birden fazla anten kullanılmasına rağmen, sadece bir vericide işlem yapılır. Diğer vericilerde işlem yapılmadığından yöntem daha maliyetli olmamaktadır.

Lin Yang vd. (2009) çalışmasında OFDM sisteminde PAPR'ı azaltmak için dinamik sembol eşleme (DSP) tekniğini sunmuşlar. DSP tekniği SLM tekniğine benzese de, bu teknikte her bir OFDM sembolü için farklı kopyalar üretilmektedir. Üretilen kopyalardan

PAPR'ı en fazla azaltan kopya seçilir. Seçilen kopya SLM tekniğinde belirtilen işlemler yapılarak iletilir. DSP tekniğinde PAPR 7.8 dB'e kadar indirilmiştir.

Jung-Chieh Chen vd. (2010) çalışmasında OFDM sinyallerinin PAPR değerini azaltmak için TR yöntemiyle yakın optimal tepe azaltıcı ton (PRT) dizisi seçim algoritması uygulamıştır. Bu yöntemde uygulanan algoritmayla PAPR azaltma performansı, bir araya getirilmiş ton seti ile elde edilir. PRT setinin dezavantajı polinom zamanlı olmayan (NP) PRT setlerinin tüm kombinasyonlarının kapsamlı bir araştırmaya olanak tanımamasıdır. Bu dezavantaj ise çapraz entropi (CE) yöntemi uygulanarak kaldırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada PAPR'ı azaltmak için kullanılan PRT setlerini elde etmek için CE yöntemi uygulanmış ve simülasyon sonuçlarında yüksek PAPR performansı elde edilmiştir.

OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri de dışbükey optimizasyon (CO) yöntemidir. Charles Nader vd. (2010) çalışmasında bu yöntemi kullanarak çok iyi bir PAPR performansı elde etmiştir. Çalışmada üretilen OFDM sinyalleri bir radio frekans (RF) güç amplifikatöründe (PA) değerlendirilmiş, çıkış gücünde ekstra 1 dB kazanç elde edilmiştir. Ayrıca %5.4'lük güç verimliliği (PAE) ve çıkış gücünde 5 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı hesaplama karmaşıklığının fazla olmasıdır. Ama pratikte uygulanması yüksek maliyet gerektirmemesi diğer yöntemlere göre önemli bir avantajdır.

OFDM sinyallerinin PAPR'nı indirmek için kullanılan yöntemlerden biri de kodlama yöntemidir. Slimane (2007) çalışmasında OFDM sinyallerinde PAPR'ı azaltmak için bu yöntemi kullanmıştır. Kullanılan bu yöntemin özelliği veriden bağımsız olması ve iletilen her bir OFDM sinyalleri için yeni bir işlem, optimizasyon gerektirmemesidir. Her bir veri bloğunun OFDM modülasyonu ve iletimi öncesinde bir ön kodlama matrisi ile çarpılır. Bu tekniğin başka bir özelliği de istediğimiz sayıda alt taşıyıcı ve kullanılan her tür temel bant modülasyonu ile çalışabilir olmasıdır. Bu yöntemde simülasyon sonuçları çok iyi PAPR performansı gösterdiğine rağmen, en büyük dezavantajı hesaplama karmaşıklığından dolayı pratikte uygulanmasının neredeyse imkansız olmasıdır.

Jing Gao vd. (2009) çalışmasında geliştirilmiş kısmi iletim dizisi (IPTS) ile PAPR azaltmışlardır. Bu çalışmanın diğer PTS tekniklerinden farkı optimal tepe faktörünün araştırılması için “olasılık kabul” kriteri sunulmasıdır. Bu teknik sayesinde PAPR performansı geliştirilmiştir.

Shahid Haleem ve Shoab A.Khan (2009) çalışmasında OFDM sistemlerinde PAPR’ı azaltmak için optimize edilmiş ön kodlama tekniğini kullanmışlar. PAPR’ı azaltmak için genel alt – ifade kısaltması sunmuşlar. Kısaltma sistem karmaşıklığını azaltmak için kullanılmıştır. İlk önce ön kodlamaya dahil olan işlemler sabit çarpımlar, kaydırmalar ve eklemeler halinde ayrıştırılır. Sonraki adımda sistem karmaşıklığını azaltmak için birden fazla değişkeni içeren genel alt – ifade kısaltması kullanılmıştır. Daha iyi bir PAPR başarımının elde edildiği bildirilmiştir.

Wei Wang vd. (2018) çalışmasında PAPR’ı azaltmak için yapılandırılmış kümeleşme genişletme tasarımı ile geliştirilmiş Çapraz Entropi Tabanlı (CEB) Güç Enjeksiyon (TI) şeması önermiştir. Yöntemin hesaplama karmaşıklığı diğerlerine göre daha azdır. Önerilen şemada ilk olarak dikdörtgen şekilli QAM için yapılandırılmış bir kümeleşme daha fazla bağımsızlık sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu da güc artışıyla bağımsızlık derecesi arasında daha iyi bir uyum sağlar. Sonrakı adımda geleneksel CEB TI şemasını analiz ederek alt taşıyıcı aday popülasyonunun büyüklüğünün belirlenmesi için açık bir ifade elde edilmiş, daha sonra da uygun alt taşıyıcılar seçildikten sonra, geliştirilmiş CEB TI şemasında gereken işlemler yapılarak PAPR azaltılmıştır.

Bo Wang, Daiming Qu (2017) çalışmasında OFDM sistemlerinde PAPR’ı azaltmak için ters altkümüli düşük yoğunluklu benzerlik kontrolü (IS – LDPC) yöntemini sunmuşlar. Bu yöntemde önerilen şema IS – LDPC kod kelimelerinin alt kümelerini, alt simge üzerine dönüştürülebilir sembol alt kümeleri oluşturmak için eşler. Bundan sonra OFDM sistemlerinin alıcı tarafında PAPR’ı azaltmak için IS – LDPC’i bağımsız olarak ters çevrilir. IS – LDPC tekniğinin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı ek bilgiler aktarmaya gerek kalmamasıdır. Bu da sistemin karmaşıklığını azaltır ve sistemin tasarımını kolaylaştırır. Yapılan çalışmanın simülasyon sonuçlarında iyi bir PAPR performansı elde edilmiştir.

Stephen P. DelMarco (2018) çalışmasında PAPR'ı indirmek için parçalı doğrusal segmentlerin optimal karışıklığını kullanarak bir sıkıştırıcı tasarımı yapmıştır. Çalışmada işaret genlik dağılım uçlarının değiştirilmesi için çok bileşenli (Multi – component), parçalı doğrusal segmentler kullanılarak sıkıştırıcı tasarlamasında optimal karıştırma (optimal perturbation) yaklaşımı sunulmuştur. Çok bileşenli tasarım, sinyal genliği olasılık yoğunluğu işlev kısıtlamalarının bozulmasından dolayı tek bileşenli çözümlerin mevcut olmadığı durumlarda, telafi edici çözümler sağlar. Bu tasarımın en büyük dezavantajı sistem maliyetinin yüksek olmasıdır.

Miin-Jong Hao and Chiu-Hsiung Lai (2008) çalışmasında OFDM sinyallerinin PAPR'nı minimum hata olasılığı ile azaltmak için Darbe (Pulse) Şekillendirme Tabanlı (PS) yöntemi kullanmıştır. Bu çalışmada seçilmiş PS dalga formlarıyla minimum hata olasılığının elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Nitelikli PS dalga biçimi böylece ayrı bir PS matrisi kullanarak uygulanabildiğinden minimum hata olasılığı ile PAPR'ı indirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında iyi bir PAPR performansı sağlanmıştır.

Miin-Jong Hao ve Chiu-Hsiung Lai (2010) başka bir çalışmasında ön kodlama yöntemiyle minimum hata olasılığı (MEP) ile OFDM sinyallerinin PAPR'nı azaltmıştır. Çalışmada ön kodlama matrisleri ile ek beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) kanalında OFDM sisteminin hata olasılığı minimuma indirilmiştir. Bu çalışmadaki ön kodlama tekniğinin daha önce yapılan kodlama tekniklerinden temel farkı optimal bir ön kodlama matrisi tasarlanmasıdır. Böylece iyi PAPR performansı ve AWGN altında minimum hata olasılığı ile elde edilmiştir. Sonuç olarak diğer yöntemlerde olduğu gibi bu yöntemin de ana dezavantajı alıcıya yan bilginin iletilmesidir.

Jianping Wang vd. (2009) çalışmasında OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için tepe sınırlı kümeleşme uzantısı (PCE) algoritmasını kullanmıştır. PCE algoritması PAPR'ı azaltmak için tepe noktalarını azaltabilen dış kümelenme noktalarını seçer ve bu noktaları dinamik olarak değiştirir. Bu algoritmanın özelliği alıcıya herhangi bir yan bilginin iletilmesini gerektirmez. Bir başka avantajı da bit hata oranının yüksek olmamasıdır. Çalışma sonucunda yapılmış similasyon sonuçları diğer PAPR azaltma yöntemlerine göre çok daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Yongjun Kwak vd. (2011) çalışmasında diğer kod tekniklerinden daha farklı bir kod tekniği sunmuştur. Çalışmada Shannon limitine yakın ve düşük PAPR için turbo blok kodlu (TBC) OFDM önermişler. Önerilen şemada sınırlandırılmış bir PAPR elde etmek için frekans alanı bileşenlerini şekillendirmişlerdir. Hesaplama karmaşıklığına sahip olsa da iyi bir PAPR başarımı sağlamıştır.

Nisila Binu ve Dr. Suriyakala C.D (2016) çalışmasında kırpma ve penereleme (Hann pencereleme) teknikleriyle Hadamard dönüşümü kullanarak OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmıştır. Bu yöntemde OFDM sinyali önceden tanımlanmış banda sınırlandırılır. Daha sonra işaret Hann penceresi ile çarpılır. Çalışma ile Hadamard dönüşümü ve Hann pencereleme metodu ile PAPR kısmen de olsa azaltılmıştır. Pratikte uygulanması sistem karmaşıklığından dolayı neredeyse imkansızdır.

T. S. N. Murthy vd. (2016) çalışmasında PAPR'ı azaltmak için faz-ofset SLM kullanarak Alamouti kodlu (AC) MB-OFDM (çoklu bant) Ultra Geniş Bant (UWB) yöntemini kullanmıştır. Yüksek kapasiteye ve yüksek veri hızına ulaşmak için hem MIMO hem de kodlama teknikleri kullanılmıştır. UWB sistemlerinin kapasitesinin artması, kodlama kazancı sağlanması ve sistemin genel performansının iyileşmesinin nedeni MB-OFDM UWB ve Alamouti alan frekans blok kodlama (SFBC) kombinasyonudur.

Xing Cheng vd. (2017) çalışmasında PAPR'ı azaltmak için Artificial Bee Colony (ABC) tabanlı SLM şeması kullanılmıştır. SLM tekniğiyle PAPR çözümü hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Bu çalışmada kullanılan ABC-SLM tekniği karmaşıklığı düşürmektedir. Şemanın uyarlanması çok kolaydır. Normal SLM şemasında olduğu gibi yan bilgilerin iletilmesi gerekmektedir.

Potchara Puttawanchai vd. (2011) çalışmasında MIMO-OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için SLM tekniği kullanmışlar. Çalışmada diğer SLM tekniklerinden farklı olarak çağrı merkezleme (CC) matrisinin bir türüne dayanan yeni merkezleme faz dizi (CPS) matrisi önerilmiştir. Çalışmada SLM tekniğinde önerilen bu (CPS) matrisi Riemann matrisi ve Hadamard matrisi gibi daha iyi performans sağlamıştır. Simülasyon sonuçlarında önerilen bu

matris yöntemi hem SISO-OFDM hemde MIMO-OFDM sistemlerinde düşük PAPR değeri vermiştir.

MIMO-OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için yapılan çalışmalardan biri de Ezmin Abdullah vd. (2017) çalışmasıdır. Bu çalışmada uzay-zaman blok kodları (STBC) sistemlerinde SCS-SLM PAPR azaltma tekniği kullanmışlar. Bu teknik önceden önerilen SCS tekniğinin daha gelişmiş bir şeklidir. Benzetim sonuçlarında PAPR'ın yaklaşık 3 dB azaldığı görülmüştür. SCS-SLM tekniğinin başka bir özelliği ise OFDM sinyallerinde bit hata oranı (BER) başarımını yaklaşık 9.8 dB arttırmasıdır.

Ton rezervasyonu (TR) PAPR indirgemesi için en yüksek çıkarma sinyalini tasarlayan bir dizi ayrılmış tonu kullanan popüler PAPR azaltma tekniklerinden biridir. Magnus Sandell vd. (2016) çalışmasında TR yöntemiyle PAPR'ı azaltılmıştır. Magnus Sandell küre (alan) kodlaması (SC) yoluyla daha optimal yaklaşımını sunmuştur. Kare sınırlandırılmış karmaşık bir kuadratik program (QCQP) gerektirmeyen TR yöntemiyle PAPR azaltılmıştır. Önerilen algoritmada, frekans-alanı TR değerleri önceden belirlenmiş dikdörtken bir kafes içi ile sınırlandırılmıştır. Daha sonra TR sinyalinin ortalama gücü üzerinde bir kısıtlama ve aday TR sinyallerinin tepe noktasını düşürmesi koşulu uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmanın benzetim sonuçlarında yüksek PAPR başarımı elde edilmiştir. Bu tekniğin dezavantajları ise yan bilginin iletilmesinin gerekliliği ve ekonomik olmamasıdır.

Marwa Chafii vd. (2016) çalışmasında PAPR'ı indirmek için geliştirilmiş TR yöntemi kullanmıştır. Bu yöntem gradyan izdüşüm algoritmasına dayanan en iyi uzlaşmayı sağlar. Bu yüzden bu çalışmada TR tekniğinin yapısının değiştirilmesi önerilmiştir. Karmaşıklığı arttırmadan normal yonteme göre 1.2 dB'ye kadar daha iyi başarımlar sağlamıştır. Çalışma hem teorik analiz, hemde benzetim ile onaylanmıştır.

TR tekniğinin en büyük dezavantajlarından biri iletişim hızını düşürmesidir. Bu problemi çözmek için Bo Li vd. (2018) çalışmasında PAPR'ı azaltmak için eniyilenmiş TR tekniğini sunmuşlardır. Eniyilenmiş TR tekniğinin genel TR tekniklerinden temel farkı tüm OFDM sembolü için değil, sadece tepelerin olduğu noktalar için düzenlemeler yapılmasıdır. Bu yaklaşım hesaplama karmaşıklığını arttırsa da, diğer TR tekniklerindeki gibi veri iletim

hızında düşmeye neden olmamaktadır. Çalışmada benzetim ile analiz doğrulanmış ve önerilen yakın optimal çözümün daha iyi başarımlar sağladığı gösterilmiştir.

Ashraf A. Eltholth vd. (2017) çalışmasında, süzgeç setli çoklu taşıyıcısında (FBMC) PAPR azaltmak için Evrimsel Kümeleşme Haritalaması (CCM) tekniği kullanılmıştır. Çalışmada ana amaç, önerilen CCM algoritması ve telafi edici tekniklerin birleştirilmiş şemasını kullanarak PAPR değerini azaltmaktır. Sıkıştırma ve CCM tekniklerini birleştirilerek PAPR değeri çok daha hızlı şekilde indirilmiştir. Benzetim sonuçlarında PAPR değeri 15.2 dB'den 8 dB'e kadar indirilmiştir. Bu başarımlar SLM tekniği sonuçlarından daha iyidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

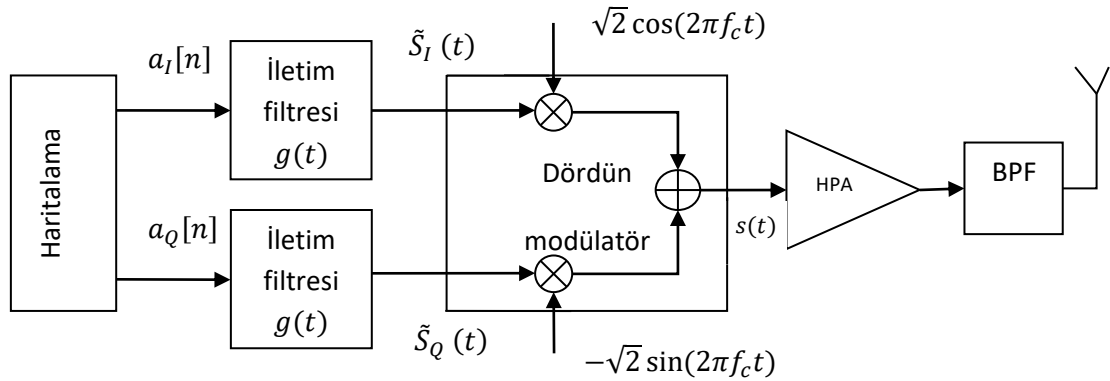
Giriş kısmında belirtildiği gibi OFDM sistemlerinin en büyük dezavantajlarından birisi PAPR değerlerinin yüksek olabilmesidir. PAPR, OFDM'in uygulamadaki maliyetini düşürmekteki engellerden birisidir. Bu yüzden, veri iletilmeden önce sinyallerin yüksek tepe değerlerinin azaltılması önemli hedeflerdendir.

3.1 PAPR'ın Tanımı

Her sembol için iletim darbesi (pulse) $g(t)$, sembol süresi T_s olan karmaşık veri dizisi $\{a[n]\}$ için bir temel bant Darbe Genlik Modülasyonu işareti

$$\tilde{s}(t) = \sum_k a[n]g(t - kT_s) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 3.1 Bantgeçiren PAM vericisi.

Şekil 3.1'de bantgeçiren PAM vericisinin kavramsal şeması gösterilmiştir. Bantgeçiren dördün modülatorünün çıkışındaki işaret aşağıdaki gibi olacaktır:

$$s(t) = \sqrt{2} \text{Re}\{(\tilde{s}_I(t) + j\tilde{s}_Q(t))e^{j2\pi f_c t}\} \quad (3.2)$$

Burada, $\tilde{s}_I(t)$ faz-ıçı, \tilde{s}_Q dik bileşenleridir.

Tepe/Ortalama Zarf Güç Oranı (PMEPR) bir ana bant karmaşık işaretinin $\tilde{s}(t)$ zarfının en yüksek gücü ile ortalama gücü arasındaki orandır. PMEPR aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$PMEPR\{\tilde{s}(t)\} = \frac{\max|\tilde{s}(t)|^2}{E\{|\tilde{s}(t)|^2\}} \quad (3.3)$$

Tepe Zarf Gücü (PEP) karmaşık bir temel bant işaretinin $\tilde{s}(t)$ maksimum gücünü temsil eder. PEP matematiksel olarak,

$$PEP\{\tilde{s}(t)\} = \max|\tilde{s}(t)|^2 \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır. Ortalama işaret gücü $E\{|\tilde{s}(t)|^2\}$ normalize edilirse, yani, $E\{|\tilde{s}(t)|^2\} = 1$ alınrsa, Tepe-Ortalama Zarf Gücü, Tepe Zarf Gücüne eşit olacaktır.

Tepe-Ortalama Güç Oranı (PAPR) belirli bir OFDM sembolünün tepe noktasının P_{pik} , ortalama güce $P_{ortalama}$ oranıdır. OFDM sistemlerinde oluşan PAPR aşağıdaki fomülle ifade edilir.

$$PAPR\{\tilde{s}(t)\} = \frac{\max|Re\{\tilde{s}(t)e^{j2\pi f_c t}\}|^2}{E\{|Re\{\tilde{s}(t)e^{j2\pi f_c t}\}|^2\}} = \frac{\max|s(t)|^2}{E\{|s(t)|^2\}} = 10 \log_{10} \frac{P_{pik}}{P_{ortalama}} \quad (dB) \quad (3.5)$$

OFDM sistemlerinde maksimum güç, tüm N-alt taşıyıcı bileşenleri aynı fazlarda eklendiğinde meydana gelir. Denklem (3.6)'dan görüldüğü gibi $E\{|s(t)|^2\} = 1$ olarsa, maksimum güç ortalama güce eşit olacaktır.

3.2 PAPR Azaltma Teknikleri

OFDM sistemlerinde PAPR, kuvvetlendiricinin (PA) çıkışında sinyal bozulmasına neden olmaktadır. Bu yüzden OFDM sistemlerinde PAPR en büyük sorunlardan biridir. PAPR'ı azaltmak için çeşitli teknikler kullanılmıştır. Genel olarak PAPR 2 ana yöntemle dayanarak farklı tekniklerle azaltılmaktadır.

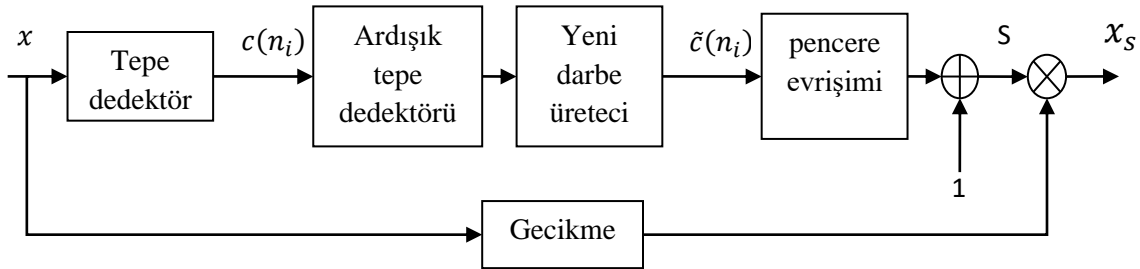
1. Sinyal bozulma teknikleri:
 - a. Tepe Pencereleme (PW) tekniği
 - b. Tepe Azaltma Taşıyıcı (PRC) tekniği
 - c. Kırpma ve Filtreleme (CF) tekniği

- d. Zarf Ölçekleme (ES) tekniği
- 2. Sinyal karıştırma teknikleri:
 - a. Blok Kodlama (BC) tekniği
 - b. Seçici Haritalama (SLM) tekniği
 - c. Kısmi İletim Dizisi (PTS) tekniği
 - d. Ton Rezervasyonu (TR) tekniği
 - e. Ton Enjeksiyonu (TI) tekniği

Bütün bu tekniklerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. En yaygın kullanılan yöntemler TR, SLM, PTS teknikleridir. PAPR azaltımı için kullanılan bu farklı yöntemlere kısaca değinelim.

3.2.1 Tepe Pencereleme (PW) tekniği

Tepe Pencereleme (Peak Windowing) tekniği ile yüksek PAPR başarımı elde edilmektedir. PW tekniği Van Nee ve Wild (2011), Xiaodong Li ve Leonard J. Cimini (2016), Nisila Binu ve Dr. Suriyakala C.D (2016), Borisav Jovanović, Srdan Milenković (2018) vb. tarafından araştırılmıştır.



Şekil 3.2 Tepe pencereleme tekniği blok şeması.

Şekil 3.2’de PW tekniğinin blok şeması verilmiştir. Ardışık tepe detektörü bloğu, tepe detektörü bloğundan gelen sinyalin önceki tepe noktalarının mesafesinin pencere uzunluğunun yarısından daha az ($W/2$), olup olmadığını izler. Yeni darbe üretici bloğu da pencere uzunluğunun yarısı içinde tepe noktalarının ortaya çıkması durumunda yeni ağırlık katsayısı $\check{c}(n_i)$ hesaplar. Yeni ağırlık katsayılarının $\check{c}(n_i)$ matematiksel analizi için pencere işlevinin

yarısı $w_h(n)$ ve ardışık tepe noktaları (n_i ve n_j) arasındaki görece mesafeyi d_{ij} olarak tanımlayalım:

$$w_h(n) = w(n)u(n-1), n \geq 1, \quad d_{ij} = |n_i - n_j|, d_{ij} \geq 1 \quad (3.6)$$

Burada, $u(n)$ birim-adım işlevini belirtir.

(3.7)'deki denklemleri dikkate alarak, geleneksel ağırlık katsayısı $c(n_i)$ ile yeni ağırlık katsayısı $\tilde{c}(n_i)$ arasındaki genel ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} c(n_1) &= \tilde{c}(n_1) + w_h(d_{12})\tilde{c}(n_2) + \dots + w_h(d_{1M})\tilde{c}(n_M) \\ c(n_1) &= w_h(d_{12})\tilde{c}(n_2) + \tilde{c}(n_2) + \dots + w_h(d_{2M})\tilde{c}(n_M) \\ c(n_M) &= w_h(d_{M1})\tilde{c}(n_1) + w_h(d_{M2})\tilde{c}(n_2) + \tilde{c}(n_M) \end{aligned} \quad (3.7)$$

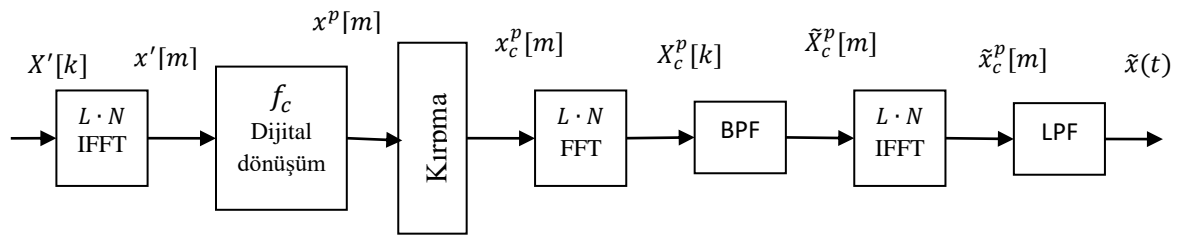
PW yönteminde OFDM sinyallerinde oluşan tepe noktalar önceden belirlenmiş bir pencere fonksiyonu ile çarpılır. Tepe pencereler normal görünümlü, kosinüs, Kaiser, Hamming gibi farklı şekillerde olabilir. Tepe noktalar pencere fonksiyonu ile çarpıldıktan sonra sonuç tayf orijinal OFDM tayfindan farklılık gösterir. Uygulanan pencere mümkün olduğunca dar banta sahip olmalıdır. Aksi halde sistemde başka bir dezavantaj olan BER'in artmasına neden olur. Bu tekniğin özelliği BER ve bant dışı yayılımın artması ile PAPR'sı azaltabilmesidir.

3.2.2 Tepe Azaltıcı Taşıyıcı (PRC) tekniği

Tepe Azaltma Taşıyıcıları (PRC) tekniğinde düşük bir dizi modülasyon sembolünü göstermek için daha yüksek bir dizi modülasyon şeması kullanılmaktadır. Böylelikle PRC'nin genliğini ve fazını iletilecek veri sembolünü simgeleyen kümeleşme bölgesinde konumlandırmasına izin verilir. Yöntem halihazırda QPSK modülasyon tekniğinde kullanılmakta. Ancak OFDM sistemlerinde QAM modülasyon şeması uygulandığında da kullanılabilir. PRC tekniği her ne kadar PAPR'ı düşürse de, bit hata oranının (BER) kötüleşmesine neden olur. PRC tekniğini ilk defa E. Lawrey ve C. J. Kikkert (1999) önermiştir.

3.2.3 Kırpma ve Filtreleme (C&F) tekniği

OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için kullanılan bu yöntemde sinyalin önceden belirlenmiş en yüksek değerleri aşmasına izin verilmeyip, aşan kısmı kırılmakta. Kırpma tekniğinin doğrusal olmaması nedeniyle kırpma gürültüsü meydana gelmektedir. Bu ise işaretin tayfının genişlemesine sebep olmaktadır. Tayfsal verimliliği azaltmasının yanında, ayrıca BER'in artmasına yol açar ki bu ikisi birbirine bağlıdır. Tayfin yayılan bileşenleri süzme yoluyla işaretten çıkarılır. Ancak bu işlem, tepe noktalarının tekrar artmasına sebep olabilmektedir. Yani, birbirine bağlı üç etkinin (tayf genişliği, tepe değerleri, BER) hangisi düzeltmeye çalışılırsa diğerlerinde bozulmaya sebep olmaktadır.



Şekil 3.3 C&F tekniğinin blok şeması.

Şekil 3.3'de PAPR azaltmak için kullanılan C&F tekniğinin blok şeması verilmiştir. Şemada L örnekleme faktörü N ise alt taşıyıcıların sayısını göstermektedir. Burada IFFT ile zaman alanına dönüştürülüp f_c frekansına çıkarılan işaret kırıldıktan sonra tekrar frekans alanına dönüştürülür ve bant sınırlayıcı süzgeçten geçirilir. Daha sonra işaret tekrar zaman alanına dönüştürülür. Kırpma bloğundaki işlemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz:

$$x_c^p[m] = \begin{cases} -A & x^p[m] \leq -A \\ x^p[m] & |x^p[m]| < A \\ A & x^p[m] \geq A \end{cases} = \begin{cases} x^p[m] & |x^p[m]| < A \\ \frac{x^p[m]}{|x^p[m]|} \cdot A & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.8)$$

Burada A , önceden belirlenmiş kırpma seviyesidir. Buradan da, σ kök kare ortalama (RMS) değeri olmak üzere, Kırpma oranını (CR) bulunabilir:

$$CR = \frac{A}{\sigma} \quad (3.9)$$

PAPR azaltmak için kullanılan C&F tekniğinin de en büyük dezavantajı BER'in bozulmasıdır.

3.2.4 Zarf Ölçekleme (ES) tekniği

Zarf Ölçekleme (ES) tekniği Foomooljareon ve Fernando (2002) tarafından OFDM işaretlerinde PAPR'ı azaltmak için önerilmiştir. ES tekniğinde bazı alt taşıyıcılar IFFT'ye gönderilmeden önce ölçeklenir. Araştırmalarında QPSK modülasyon tekniği ile 256 alt taşıyıcı kullanmışlardır. Başlangıçta bu alt taşıyıcıların hepsinin zarfları eşittir. Amaç IFFT'nin çıkışındaki en küçük PAPR miktarını elde etmek üzere bazı alt taşıyıcılardaki giriş zarfının ölçeklendirilmesidir. Uygulanan şema sadece QPSK modülasyonu için geçerlidir.

3.2.5 Blok Kodlama (BC) tekniği

OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için kullanılan en eski yöntemlerden biri BC tekniğidir. Farklı blok kodlama ve kod sözcükleri kullanarak PAPR'ı azaltmayı hedefleyen bu tekniği ilk defa Wilkinson ve Jones (1965) önermişler. Bu teknikte öncelikle uygun kod kelime setlerinin seçimi yapılır. Kod çözme işleminin yetkin bir şekilde uygulanabilmesini sağlayacak şekilde kod sözcük kümeleri toplanır. Tüm olası toplamlar için tepe zarf gücü (PEP) hesaplandığından, bu yöntem aşırı hesaplama gerektirmektedir. Kısa kodlar ile basitleştirilmeye çalışılmaktadır. Uzun kod kelimelerinin toplanması için ise doğal algoritmalar gibi gelişmiş arama teknikleri kullanılmaktadır. BC tekniğinde M – dizileri, Golay tamamlayıcı diziler, Shapiro – Rudin dizileri vb. kodları kullanılabilir.

3.2.6 Seçici Haritalama (SLM) tekniği

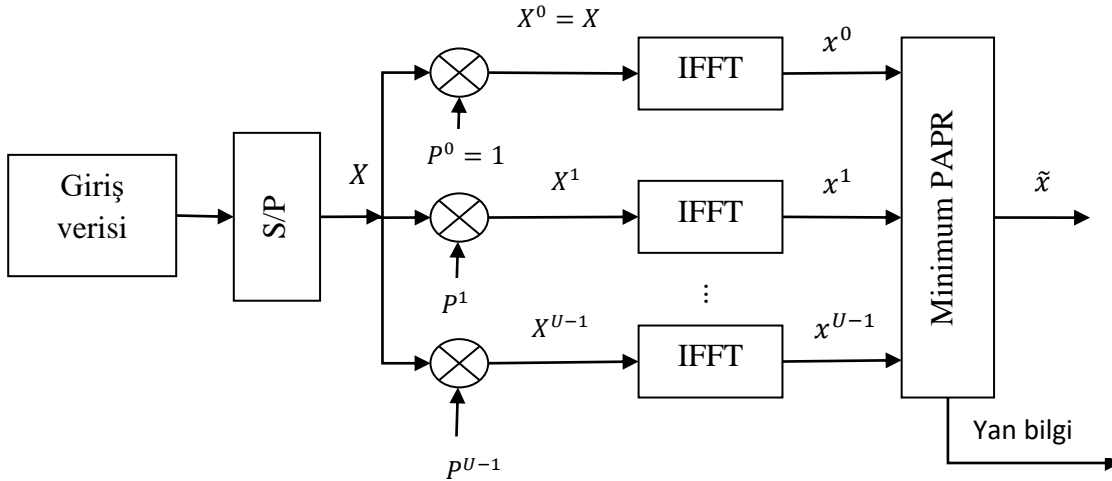
OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için kullanılan en yaygın yöntem Seçici Haritalama (SLM) yöntemidir. Teknik Bauml vd. (1996) tarafından önerilmiştir. SLM tekniğinde aynı bilgiyi farklı dizilimlerle temsil eden aday sinyal seti oluşturulur. Aday set

içinde PAPR'ı en düşük OFDM işaretini üreten dizilim ile ilgili bilgi yan bilgi olarak OFDM işareti yanında (içinde) gönderilir. Farklı dizilimler genelde rastgele olarak belirlenir.

Şekil 3.4'de PAPR'ı azaltmak için kullanılan SLM tekniğinin blok şeması verilmiştir. Burada, $X = [X[0], X[1], \dots, X[N-1]]$ giriş veri bloğu U sayıda $P^u = [P_0^u, P_1^u, \dots, P_{N-1}^u]^T$ farklı faz sekansları ile çarpılır. Daha sonra giriş veri bloğu ile farklı faz sekansları çarpıldıktan sonra, $P_v^u = e^{j\varphi_v^u}$ ve $\varphi_v^u \in [0, 2\pi]$ 'i değiştiren $X^u = [X^u[1], X^u[2], \dots, X^u[N-1]]^T$ veri bloğu üretir ($v = 0, 1, \dots, N-1, u = 1, 2, \dots, U$). Daha sonra elde edilen U sayıda $\{X^u[v]\}$ veri bloğunun IFFT'si alınarak, $x^u = [x^u[0], x^u[1], \dots, x^u[N-1]]^T$ dizileri elde edilir. En sonda da elde edilen dizilerden en düşük PAPR'a sahip $\tilde{x} = x^{\tilde{u}}$ dizisi

$$\tilde{u} = \underset{u=1,2,\dots,U}{\operatorname{argmin}} (\max_{n=0,1,\dots,N-1} |x^u[n]|) \quad (3.10)$$

ile seçilerek iletilir.

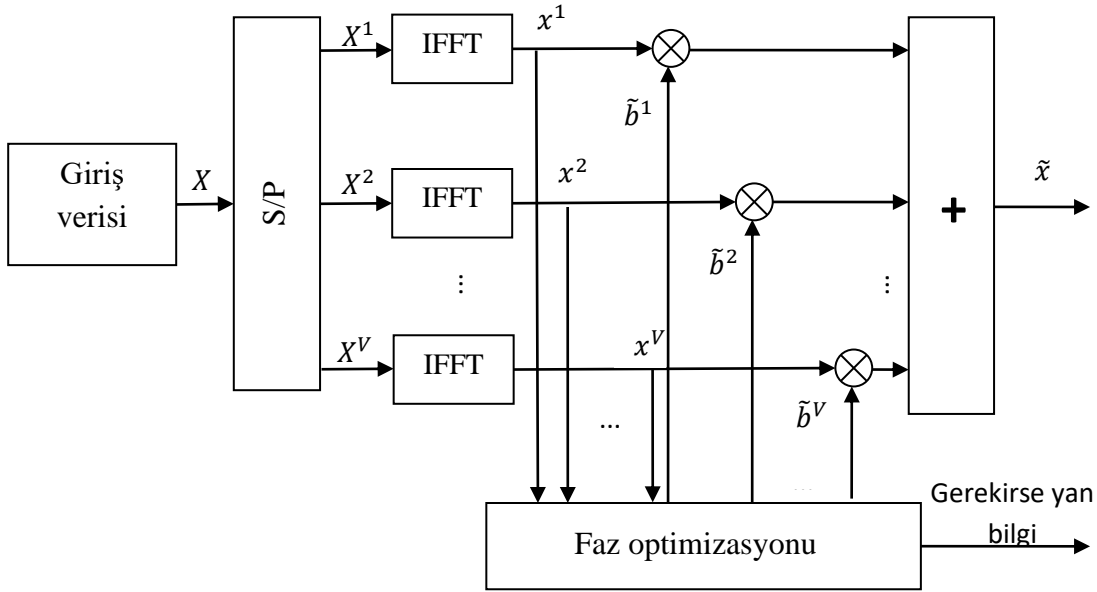


Şekil 3.4 SLM tekniğinin blok şeması.

Tekniğin en iyi dizilimi bulması garanti olmasa da PAPR'ı düşük bir dizilim bulunabilir. Ancak hem işlem yükü hem de yan bilgi iletilmesini gerektirmesi gibi dezavantajlara sahiptir.

3.2.7 Kısmi İletim Dizisi (PTS) tekniği

PTS tekniği OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için kullanılan en yaygın tekniklerden biridir. Yaygın kullanımın nedeni bazı avantajlar sağlamasıdır. Bu avantajlardan biri OFDM sistemlerinde düşük oranlı alt taşıyıcıların güç kontrolü için kullanılabilmesidir. Yöntem dar bant girişime karşı oldukça dayanıklı olması ile de avantajlıdır. Başka bir avantajı da istediğimiz gibi bant genişliği ve tayfsal verimliliği sağlayabilmesi ve tüm alt bloklarda diferansiyel modülasyon uygulandığında alıcıya herhangi bir yan bilginin gönderilmesine gerek olmamasıdır. PTS tekniği verilerin alt bloklarının fazlarının kaydırılmasına ve alt blokların isteğe bağlı şekilde çoğaltılabilmesine dayanır. Bu teknik SLM tekniğine benzese de SLM tekniğinden daha iyi PAPR başarımı sağlamaktadır.



Şekil 3.5 PTS tekniğinin blok şeması.

Şekil 3.5’de PAPR’ı azaltmak için kullanılan PTS tekniğinin blok şeması verilmiştir. Blok şemadan görüldüğü gibi giriş verisi seriden paralele bloğu ile, V ayrı alt-bloklara bölünmüştür:

$$X = [X^0, X^1, X^2, \dots, X^{V-1}]^T \quad (3.11)$$

Burada, X^i art arda yerleştirilmiş ve aynı büyüklükte alt bloklardır.

Ardından, her alt-blok IFFT çıkışı karşılık gelen faz faktörü $b^v = e^{j\varphi^v}$ ($v = 1, 2, 3, \dots, V$) ile çarpılır. Faz kaydırma IFFT'den önce de yapılabilir di.

$$x = IFFT\{\sum_{v=1}^V b^v X^v\} = \sum_{v=1}^V b^v \cdot IFFT\{X^v\} = \sum_{v=1}^V b^v x^v \quad (3.12)$$

Burada, $\{x^v\}$ kısmı iletim dizisidir (PTS). Her alt-bloka karşılık gelen faz faktörleri PAPR'ı minimize edecek şekilde aşağıdaki förmülle seçilir.

$$[\tilde{b}^1, \tilde{b}^2, \dots, \tilde{b}^V] = \arg \min_{[\tilde{b}^1, \tilde{b}^2, \dots, \tilde{b}^V]} (\max_{n=0,1,\dots,N-1} |\sum_{v=1}^V b^v x^v[n]|) \quad (3.13)$$

Ardından, en düşük PAPR vektörüne sahip zaman alanı sinyali aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tilde{x} = \sum_{v=1}^V \tilde{b}^v x^v \quad (3.14)$$

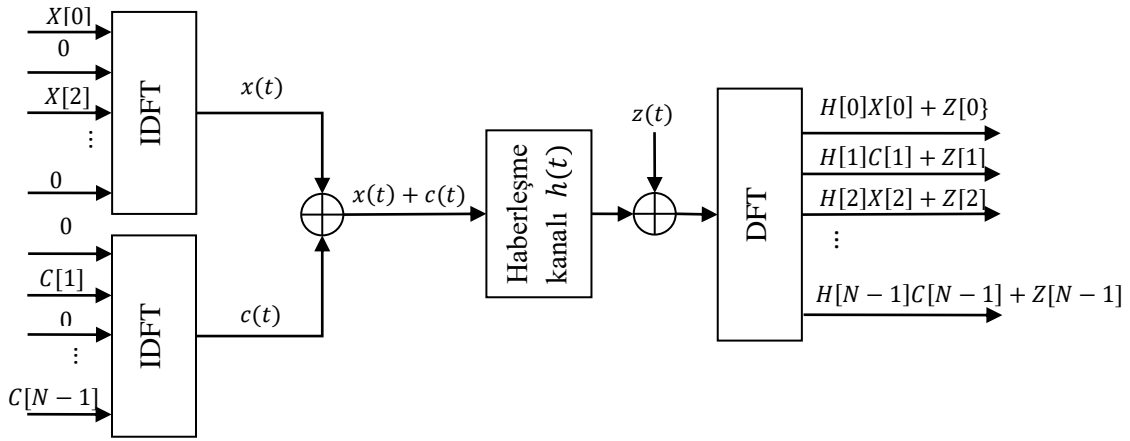
Genel olarak, $\{b^v\}_{v=1}^V$ faz faktörlerinin seçimi, arama karmaşıklığını azaltmak için sınırlandırılır. İzin verilen faz faktörü kümesi $b = \{e^{j2\pi i/W} | i = 0, 1, \dots, W - 1\}$ olduğundan, optimum faz vektörleri kümesini bulmak için W^{V-1} faz faktörü kümesi aranmalıdır. Bu nedenle, arama karmaşıklığı alt-blokların sayısı ile katlanarak artar. Arama karmaşıklığının artmasını önlemek için farklı alt-blok ayırma şemaları kullanılabilir. Genel olarak 3 alt-blok ayırma şema türü vardır; Bitişik, serpiştirilmiş ve sahte-rasgele ayırma şemaları. Bu ayırma şemalarından en iyi başarımları sağlayan sahte-rastgele (pseudo random) şemasıdır.

3.2.8 Ton Rezervasyonu (TR) tekniği

OFDM sistemlerinde PAPR'ı azaltmak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri de TR tekniğidir. Bu teknikte küçük bir ton (sinüsoidal işaret) seti PAPR'ı azaltmak üzere zaman alanı işareti üzerine eklenir. PAPR'ın azalma miktarı ayrılmış ton sayısı, bu tonların frekansı, fazı ve frekanslarda izin verilen güce bağlıdır. Avantajı ise sistem karmaşıklığının daha az olması ve yan bilgi iletilmesinin gerekmemesi, dolayısıyla alıcı tarafında özel bir işlem gerektirmemesidir.

Şekil 3.6'da PAPR'ı azaltmak için kullanılan TR tekniğinin blok şeması verilmiştir. Tepe azaltma tonlarındaki (PRT) semboller, zaman alanındaki OFDM işaretinin daha düşük bir PAPR'a sahip olacağı şekilde seçilmektedir.

Veri tonları (DT) ve PRT'ler özel olarak belirlendiğinden, IFFT bloğuna giriş vektörü veri vektörü X ve PAPR azaltma vektörü C 'ye bölünür. $R = \{i_0, i_1, \dots, i_{R-1}\}$ R PRT pozisyonlarını, R^c PRT tamamlayıcısını gösterir. Burada, R tepe noktasının azaltılması için ayrılan ton sayısını gösterir.



Şekil 3.6 TR tekniğinin blok şeması.

IFFT bloğuna giriş sembolleri matematiksel olarak aşağıdaki gibidir:

$$X[k] + C[k] = \begin{cases} C[k], & k \in R \\ X[k], & k \in R^c \end{cases} \quad (3.15)$$

Burada, $X[k]$ veri sembolü, $C[k]$ PRT sembolüdür. Sonuçta veri sembolü ile PRT sembolünün IFFT'si alınarak iletilecek olan OFDM sembolü elde edilir:

$$x[n] + c[n] = \frac{1}{N} \sum_{k \in R} X[k] e^{j2\pi kn/N} + \frac{1}{N} \sum_{k \in R^c} C[k] e^{j2\pi kn/N} \quad (3.16)$$

Döngüsel önekin (CP) kanal dürtü yanıtından uzun olduğu varsayılırsa, frekans alanındaki OFDM sembolünü aşağıdaki gibi gösterebiliriz:

$$H[k](X[k] + C[k]) + Z[k] = \begin{cases} H[k]C[k] + Z[k], & k \in R \\ H[k]X[k] + Z[k], & k \in R^c \end{cases} \quad (3.17)$$

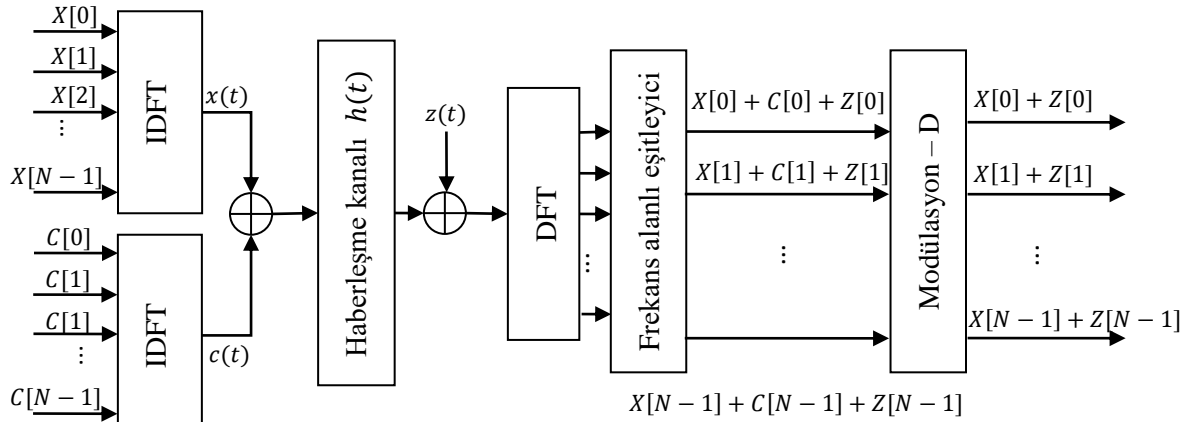
Burada, $H[k]$ kanal-frekans tepkisi, $Z[k]$ ilave gürültünün DFT'sidir.

Alıcı sadece iletilen OFDM sembolü içindeki $k \in R^c$ için veri ile ilgilenmektedir. TR tekniğinin dezavantajı ise PRT sembollerini iletmek için ilave güç gerektirmesidir. Bu da veri

hızını düşürür. Aslında veri sembolü içindeki bazı bitlerin PAPR azaltmak için kullanılmasıyla eşdeğerdir.

3.2.9 Ton Enjeksiyonu (TI) tekniği

TI tekniği bazı alt taşıyıcılardaki veri sembollerini, genişletilmiş bir kümeleşme diyagramının içine uygun seçeneklerle yerleştirmektedir. Genel olarak kümeleşme diyagramındaki nokta sayısı artırılır. Böylece orjinal temel diyagram içindeki her nokta, genişletilmiş diyagramdaki birkaç noktaya eşlenebilir. PAPR'ı azaltmak için bu ek özgürlük miktarı kullanılmaktadır. Bu yöntem iyi bir PAPR performansı verse de, sistem karmaşıklığına neden olur ve sistemin alıcı tarafında işaret çözümü için yan bilgi gerektirir ve daha karmaşık IFFT işlemine neden olur.

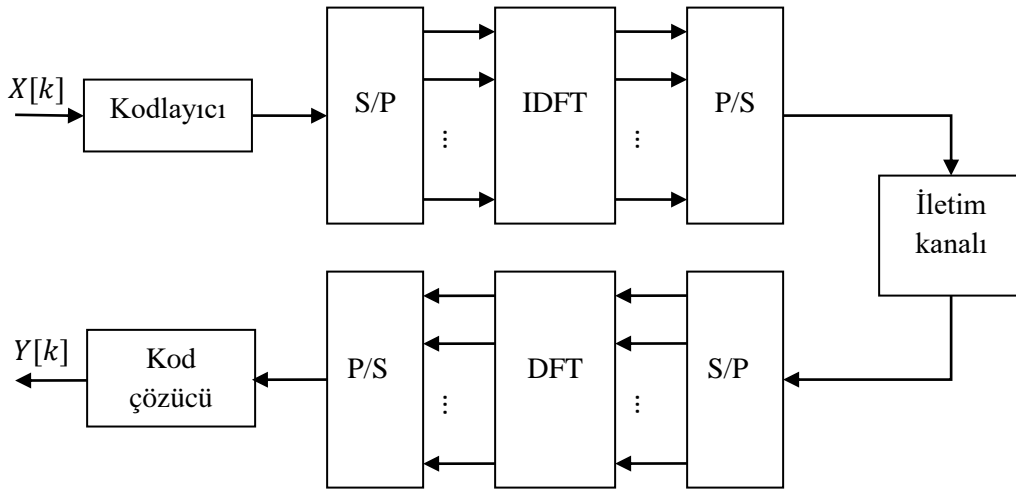


Şekil 3.7 TI tekniğinin blok şeması.

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1 OFDM Alıcısı ve Vericisi

OFDM sistemi geliştirilmiş bir FDM'dir. Yani OFDM'i elde etmek için FDM'deki alt-bant taşıyıcılar birbirlerine dik seçilir. Ancak, FDM'deki gibi iletim şemasındaki her bir alt kanal için ayrı ayrı modülatör kullanılmak yerine tüm OFDM işareti Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (IDFT) kullanılarak üretilmektedir. IDFT bileşenleri zaten birbirine dik oldukları için, bu kullanım oldukça büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Hatta IDFT (ve DFT)'siz OFDM düşünülemez. Pratikte IDFT ve DFT yerine bunların hızlı hesaplanma yöntemleri olan Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılmaktadır (DFT ve FFT farklı dönüşümler değildir, sadece hesaplanma yöntemleri farklıdır). Şekil-4.1, DFT ve IDFT'nin OFDM uygulamasındaki yerini göstermektedir.

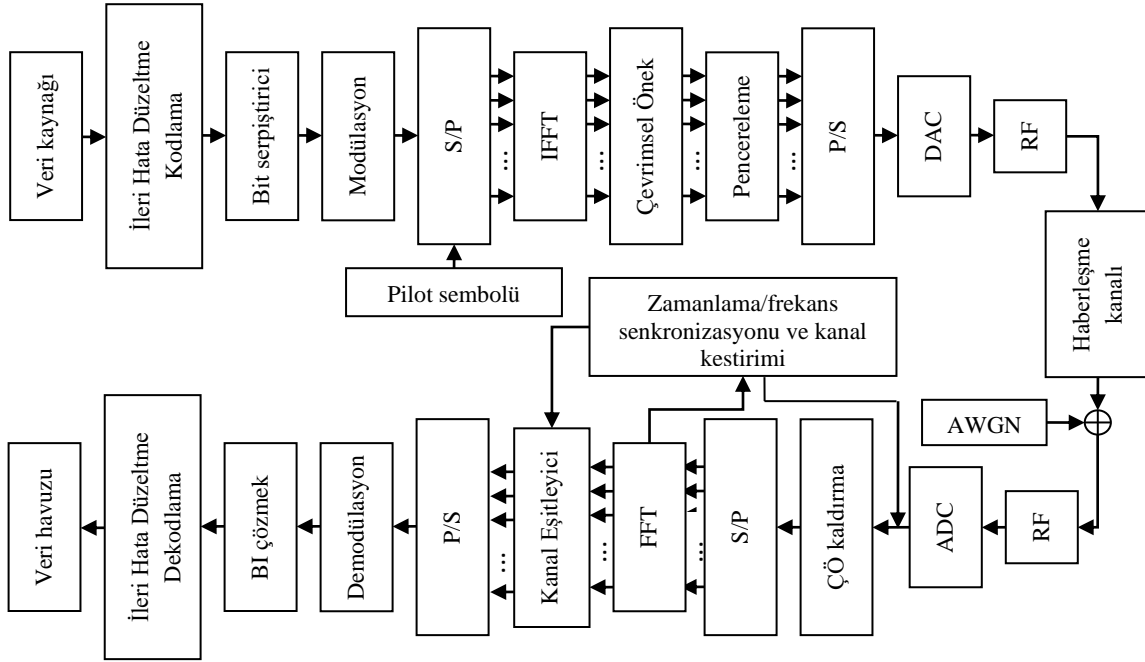


Şekil 4.1 IDFT uygulanan bir OFDM şeması

OFDM'in en büyük avantajlarından birisi frekans tayfının daha verimli kullanılmasıdır. Bir başka avantajı da, alt-taşıyıcılar dik olduğu için, sembol içi girişime (ISI) dayanıklı olmasıdır.

OFDM sistemi diğer sistemlere göre çok daha avantajlı olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Bunlar yüksek Taşıyıcı Frekans Kayması, Semboller Arası Girişim

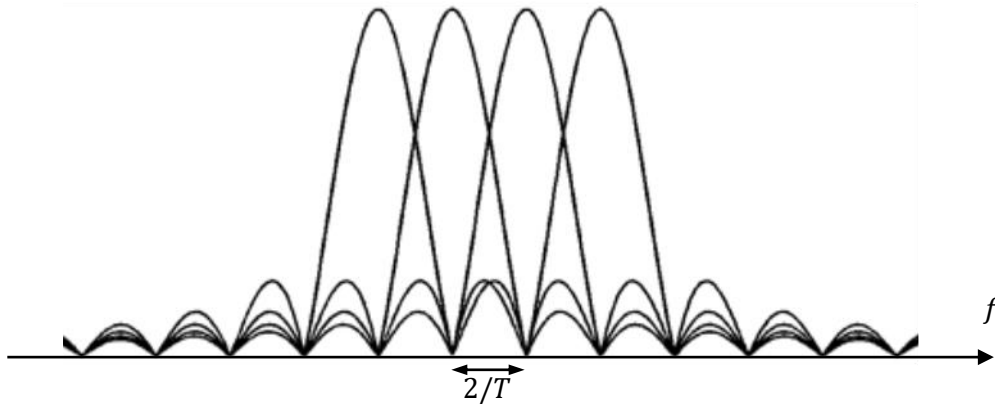
(ISI) ve Taşıyıcı Arası Girişim (ICI) neden olan zaman ve frekans kaymaları, Tepe Gücü/Ortalama Gücü Oranı (PAPR)dır.



Şekil 4.2 OFDM iletişim sistemi genel blok şeması

Şekil 4.2’de OFDM sisteminde vericinin ve alıcının blok şeması gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi vericide veri kaynağı bazı kodlama işlemlerinden sonra modüle ediliyor. Bu modülasyon işlemi hemen her zaman taşıyıcının faz ve genliğini belirleyen bir karmaşık sayı üretmek demektir (look-up table). İletilecek $\{X_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$ sembolleri ile N -noktalı IFFT elde edilir. IFFT sonucu $\{x[n]\}_{n=0}^{N-1}$ ise N dikgen alt-taşıyıcı işaretin toplamını veren işaretin örnekleridir. Bu sayısal işaret analog işarete çevrildikten sonra gerekirse yüksek frekansa (bantgeçiren) çıkarılır ve iletim kanalına verilir. Alıcıdaki işaret $x[n]$ veri işareti ile $w[n]$ kanal gürültününün $y[n] = x[n] + w[n]$ toplamından oluşmaktadır. Vericideki işlemlerin tersi uygulanarak veri geri elde edilir.

Tüm alt-taşıyıcılar T -sınırlı süreye sahip olduklarından, OFDM işaretinin tayfı, üst Şekil – 2.4’de gösterildiği gibi üste binen $1/T$ aralıklı komşu *sinc* fonksiyonlarının toplamıdır.



4.3 OFDM alt-bantların yerleşimi.

Her bir alt-taşıyıcı işareti, her bir sembol için zaman sınırlıdır. Buna göre de OFDM işareti bitişik kanal girişimine (ACI) neden olan bant dışı yayılıma maruz kalabilir. Bant dışı yayılımı azaltmak için frekans bandının etrafına koruyucu bant yerleştirilir. Bu koruyucu bant Sanal Taşıyıcılar (VC) adı verilen dış alt-taşıyıcılardan oluşur. OFDM sembolleri arasındaki başka bir sorun ardışıl semboller arası girişimdir (ISI). Semboller arası girişimi de azaltmak için Döngüsel Önek (CP) adı verilen bir koruma aralığı OFDM sembolleri arasına eklenir.

4.1.1 İleri Hata Düzeltme

İleri Hata Düzeltme (FEC), OFDM sistemlerinde veri güvenilirliğini artırmak için kullanılan sayısal bir işaret işleme tekniğidir. Yani veri iletilmeden önce kodlanır ve hataların alıcıda tespit edilerek, gidermesini temin eder. FEC önceden belirlenen bir algoritma kullanarak iletilen bilgilere ilave bitler ekler. Bu da veri hızının düşmesine neden olur. Düzeltilebilecek en yüksek hatalı bit sayısı FEC kod tasarımı ile belirlenir. FEC kodlaması kanal kodlaması olarak da bilinir. Hamming kodu ilk FEC kodu olarak 1950'lerin başlarında kullanılmaya başlanmıştır.

FEC kodları iki önemli sınıftadır; Blok kodlama ve evrişim kodlamasıdır.

Blok kodlamada gönderilecek veri sabit uzunlukta kelimeler halinde düzenlenir, daha sonra bir tablodan her kelimeye karşılık bir onu temsil eden ancak daha çok bitli kelime seçilerek gönderilir. Alıcıda da bu haritalamanın tersi yapılarak asıl veri geri elde edilir. En yaygın kullanılan blok kodlama Reed-Solomon kodlamasıdır.

Evrişim kodlamada ise blok kodlamadan farklı olarak veri akışı üzerinde işlemler yapılır. Evrişim kodlamada önceki değerleri saklamak için hafıza kullanılır ve tekrarlılık doğrudan akış üzerine eklenir. Evrişim kodlanmış veriler Viterbi algoritması kullanılarak geri elde edilir.

4.1.2 Bit Serpiştirici

Verileri sürekli olmayan bir şekilde düzenleyerek ardışıl bitlerde oluşan patlama hatalarını (burst error) verinin farklı yerlerine yaymakta kullanılır. Böylelikle küçük hatalar düzeltilebilir hale gelir. Eğer iletilen her kod kelimesinde birden fazla hata olursa, alıcı tarafından bu hata düzeltilemez. Bit serpiştirme (interleaving) işlemi ile iletilen kod kelimelerindeki bitler yerleri değiştirilerek, yani serpiştirilerek gönderilir. Alıcıda da serpiştirilen bitler orjinal yerlerine konular. Böylece kod kelimelerinde birden fazla hata olursa, alıcıda serpiştirilmiş kod kelimeleri orjinal haline dönüştürülünce hataların farklı kelimelerde olması beklenir olacak. Bu durumda da hatalar düzeltilebilir.

4.1.3 OFDM Sistemlerinde Dikliğin Sağlanması

OFDM işaretinin $f_k = k/T_{sembol}$ frekanslarında $\{e^{2\pi f_k t}\}_{k=0}^{N-1}$ karmaşık üstel taşıyıcılardan oluştuğunu varsayalım ($0 \leq t \leq T_{sembol}$). Taşıyıcılar arası diklik

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sembol}} \int_0^{T_{sembol}} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt &= \frac{1}{T_{sembol}} \int_0^{T_{sembol}} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sembol}} t} e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sembol}} t} dt = \\ &= \frac{1}{T_{sembol}} \int_0^{T_{sembol}} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T_{sembol}} t} dt = \begin{cases} 1, & \forall \text{ tamsayı } k = i \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.1)$$

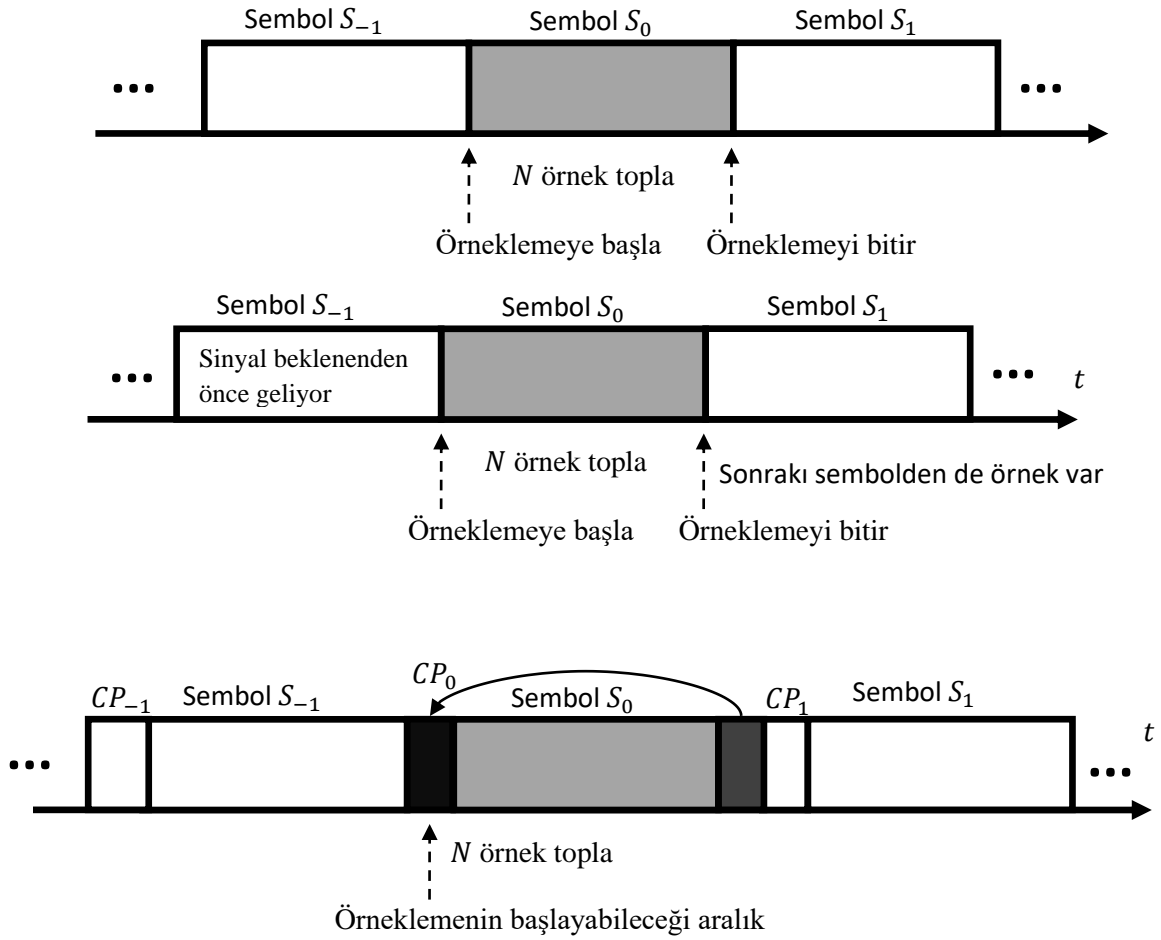
şeklinde tanımlanır. Ayrık örnekleri $t = nT_s$ 'de ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$) olmak üzere denklem (4.1)'i ayrık zamanda aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_s} nT_s} e^{-j2\pi \frac{i}{T_s} nT_s} &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sembol}} \frac{nT_s}{N}} e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sembol}} \frac{nT_s}{N}} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{N} n} \end{aligned} \quad (4.2)$$

4.1.4 Döngüsel Önek (CP)

OFDM işaretlerini semboller arası girişimlerden (ISI) korumak için bir koruma aralığı görevi görür. Sembollerin zaman aralığındaki karşılığı olan işaretler birbiri peşisıra değil, aralarında bir süre olmak üzere iletilir. Bu aralık sıfır değeriyle doldurulabilir idi. Ancak al- taşıyıcılar arası dikliğin korunması için işaretin sonundan bir kısım en başa kopyalanır ve OFDM sembolü genişletilmiş olur. Buna döngüsel önek (CP) ismi verilir. T_G 'nin örnekler cinsinden CP uzunluğunu gösterdiğini düşünelim. Genişletilmiş OFDM semboller süresi, etkin OFDM semboller süresi T_{ES} ile T_G 'nin toplamına eşit olacaktır; $T_{sembol} = T_G + T_{ES}$.

OFDM sistemlerinde ISI sorununun oluşmasının nedeni şekil-4.4'te görüldüğü gibi önceki sembolün gecikmesi (yansımalar) dolayısı ile sonraki sembolü ile toplanarak bozulmaya sebep olmasıdır. Farklı semboller arasındaki bu tür girişime Semboller Arası Girişim (Inter Symbol Interference – ISI) denir. Bu sorun da semboller arasına bir miktar boşluk koyarak çözülür. Bu da bir sembol geciktiğinde sonraki sembolün üzerine toplanmamasını sağlar (Şekil-4.4).



4.4 Döngüsel Önek'in eklenmesi

4.1.5 Modülasyon ve Demodülasyon

OFDM vericisi, veri bitlerini N -paralel akışa dönüştürmek üzere toplamda N adet M-PSK veya M-QAM alt-sembol dizisine bölüştürür. Daha sonra her bir alt-sembole atanmış modülasyon uygulanır. k -ıncı ($k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$) alt-taşıyıcıdaki l -inci ($l = 0, 1, 2, \dots, \infty$) iletim sembolü $X_l[k]$ olmak üzere, OFDM sembolü

$$\Psi_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{sembol})}, & 0 < t \leq T_{sembol} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda geçiş bandı ve temel bant OFDM işaretleri sırasıyla

$$x_l(t) = Re \left\{ \frac{1}{T_{sembol}} \sum_{l=0}^{\infty} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] \Psi_{l,k}(t) \right\} \right\} \quad (4.4)$$

$$x_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sembol})} \quad (4.5)$$

olmaktadır.

Denklem (4.5)'deki temel-bant OFDM işareti en yüksek frekanslı bileşenin Nyquist frekansı ile örneklendiğinde, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ olmak üzere

$$x_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi kn/N} \quad (4.6)$$

elde edilir. Bu ise $\{X_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$ 'in N -noktalı IDFT'sidir ve IFFT algoritmasını kullanarak hızlı bir şekilde hesaplanabilir.

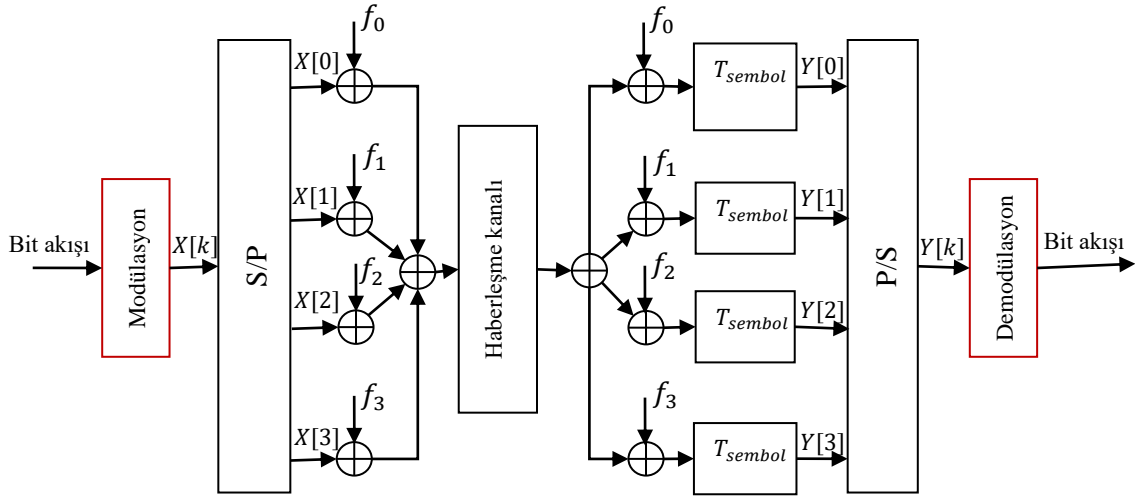
İletilen sembol $y_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sembol})}$ 'in Denklem (4.1)'deki taşıyıcılar arasındaki dikgenlik sağlanarak yeniden yapılandırılabilirdiği, alınan temel bant OFDM sembol $X_l[k]$ 'lerini düşünürsek:

$$\begin{aligned} Y_l[k] &= \frac{1}{T_{sembol}} \int_{-\infty}^{\infty} y_l(t) e^{-j2\pi f_k(t-lT_{sembol})} dt = \\ &= \frac{1}{T_{sembol}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{-j2\pi f_i(t-lT_{sembol})} \right\} e^{-j2\pi f_k(t-lT_{sembol})} dt = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] \left\{ \frac{1}{T_{sembol}} \int_0^{T_{sembol}} e^{j2\pi(f_i-f_k)(t-lT_{sembol})} dt \right\} = X_l[k] \end{aligned} \quad (4.7)$$

$\{y_l[n]\}_{n=0}^{N-1}$, $y_l(t)$ 'de alınan OFDM sembolü $t = lT_{sembol} + nT_s$ 'nin örnek değerleri olsun. Denklem (4.7) modülasyon sürecine entegrasyon, ayrık bir zamanda aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\begin{aligned} Y_l[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} y_l[n] e^{-j2\pi i^n/N} = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi i^n/N} \right\} e^{-j2\pi k^n/N} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi(i-k)^n/N} = X_l[k] \end{aligned} \quad (4.8)$$

Aslında, Denklem (4.8) $\{y_l[n]\}_{n=0}^{N-1}$ 'nin N -noktalı DFT'sidir ve FFT algoritması kullanılarak daha verimli bir şekilde hesaplanabilir.



Şekil 4.5 OFDM şemasının modülasyonu ve demodülasyonunun blok şeması

4.1.5 Bit hata Oranı (BER)

OFDM sisteminde iletilen sembollerde olan hata sayısının, iletilen toplam sembol sayısına bölünmesi ile elde edilen ortalamadır. BER'e geçmeden önce ilk önce toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (Additive White Gaussian Noise) ve Rayleigh solma kanallarına kısaca değinelim.

AWGN kablosuz haberleşme sistemlerindeki kanal modelidir. AWGN kanalı iletilen işaret $X(t)$ ile beyaz Gauss gürültüsünün (AWGN) $N(t)$ toplamından (Şekil 4.2) oluşmaktadır; $Y(t) = X(t) + N(t)$.

AWGN kanalında M-PSK veya M-QAM işaretleri için analitik BER ifadesi

$$P_e = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{6E_b}{N_0} \cdot \frac{\log_2 M}{M^2-1}} \right) \quad (4.9)$$

şeklinde verilmektedir.

Rayleigh solma çok yollu, radyo dalgalarının alıcı antenlere çoklu yayılma yolları ile ulaşmasıyla sonuçlanan yayılma olgusudur. Rayleigh solma kanalı ilk defa 1970'lerde Bell laboratuvarında tanıtılmıştır. Radyo dalgasını alıcıya ulaşmadan önce yollar üzerinde dağıtan/yansıtan birçok nesne (bina ve dağ gibi) olduğunda kabul edilir kanal modeli olarak çalışır.

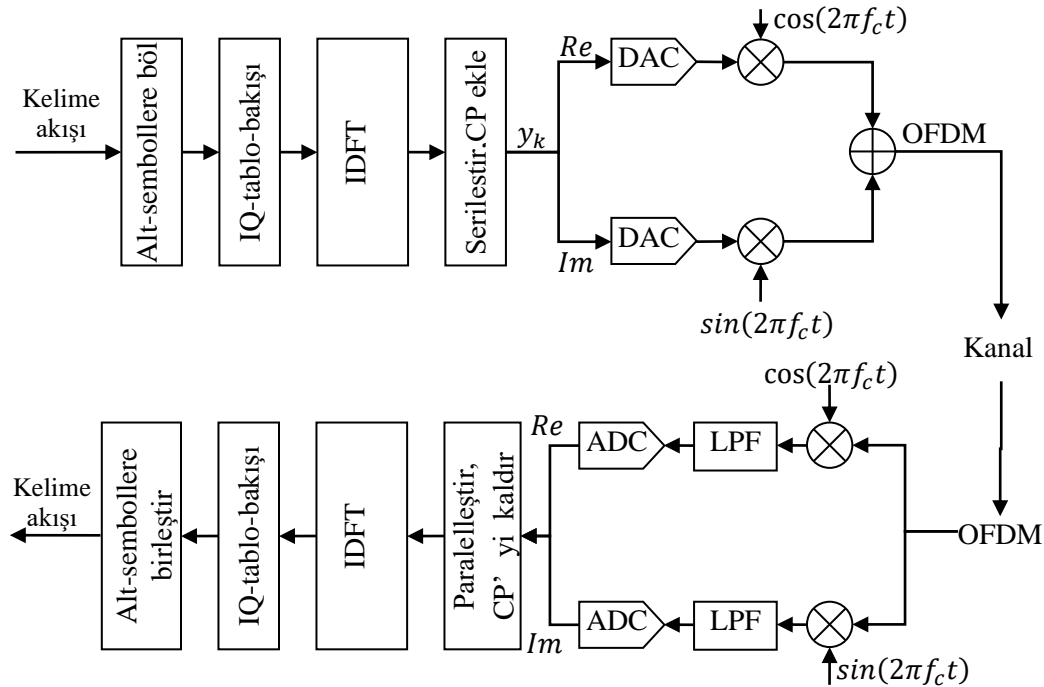
Rayleigh kanalında M-PSK veya M-QAM işaretleri için analitik BER ifadesi ise

$$P_e = \frac{M-1}{M \log_2 M} \left(1 - \sqrt{\frac{3\gamma \log_2 M / (M^2 - 1)}{3\gamma \log_2 M / (M^2 - 1) + 1}} \right) \quad (4.10)$$

şeklinde verilmektedir.

4.2 Genlik Değişirme ve Faz Kaydırma

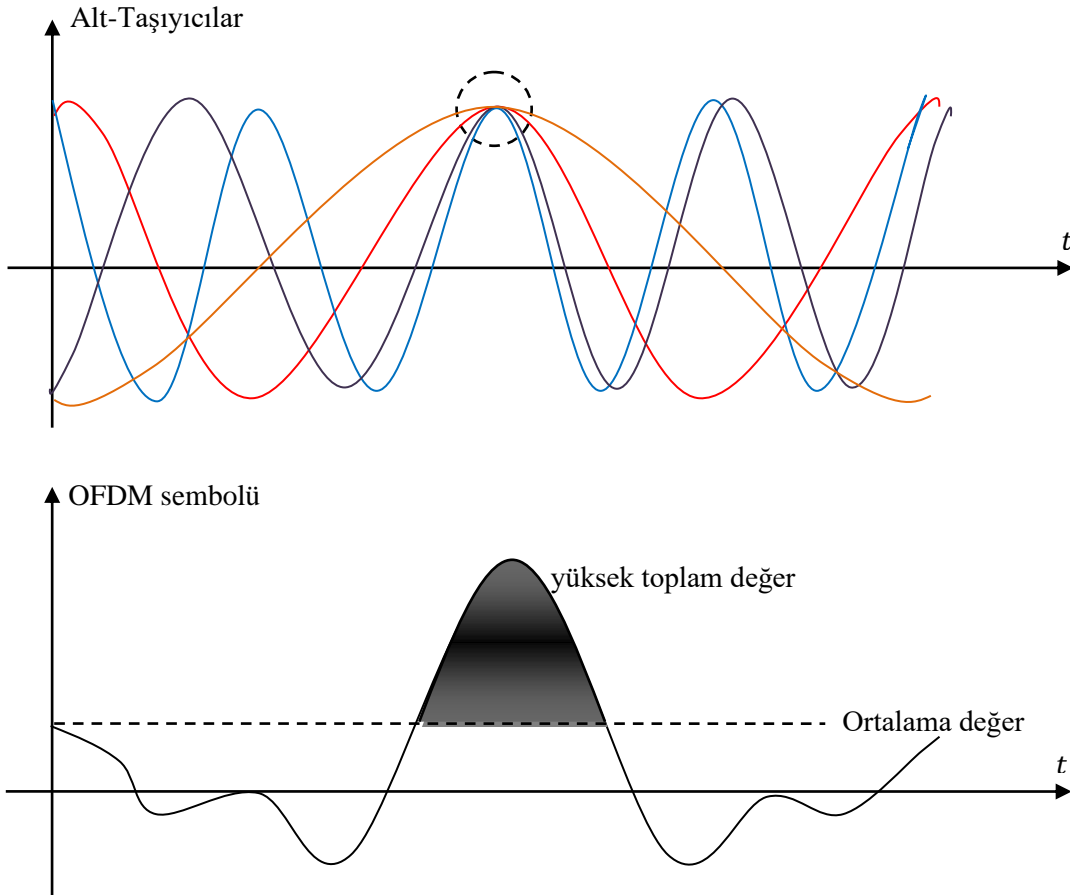
OFDM sistemlerinde vericide iletilecek çok sayıda bitten oluşan semboller alt-sembollere bölünüp ve her alt-sembol için alt-taşıyıcı faz ve frekansını temsil eden karmaşık sayılar üzerinde IFFT işlemi uygulandığında OFDM zaman alan işaretinin oluştuğunu görmüştük. Alıcı da, birçok kritik eşzamanlama işlevleri dışında, temel olarak vericide yapılan işlemlerin tersini yapar. OFDM iletişim sisteminin prensip blok şeması Şekil 4.5'de verilmiştir.



4.6 OFDM iletişim sisteminin prensip blok şeması.

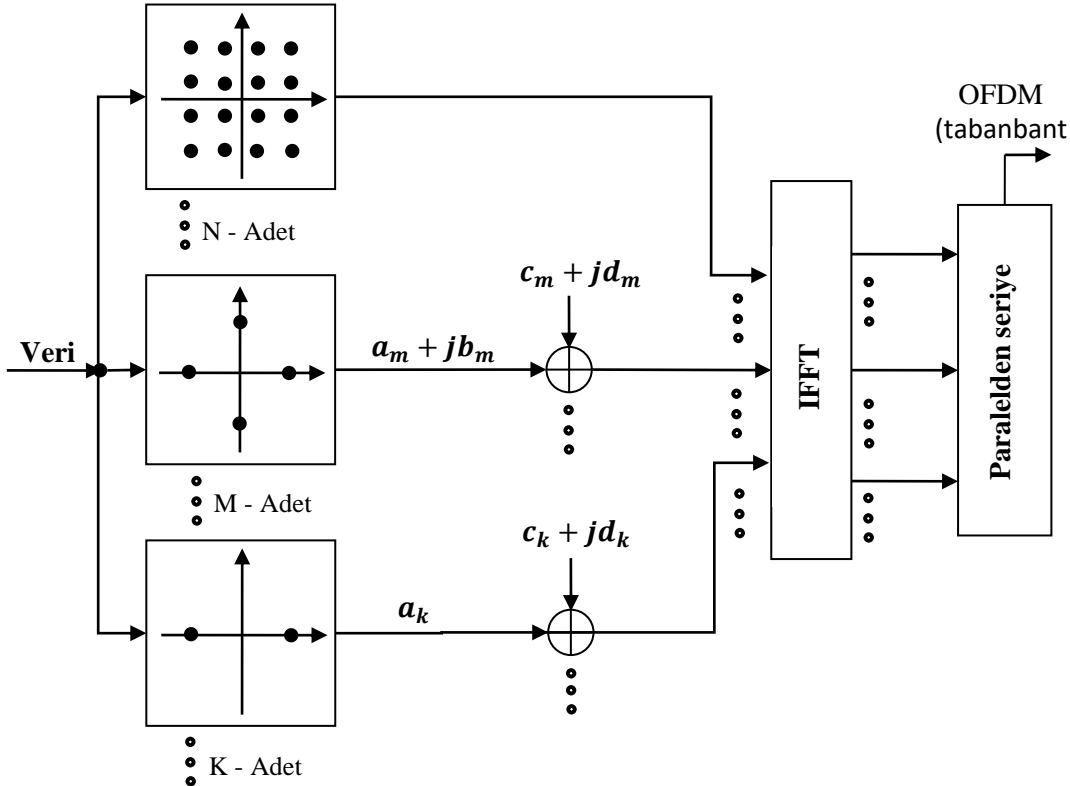
İletilecek olan bit dizileri neredeyse rastgele olacağı için bazı OFDM sembollerinin bazı anlarında alt-taşıyıcıların toplamı oldukça yüksek değerler alabilmektedir. Şekil 4.6'da yüksek değerlerin nasıl oluştuğu bir örnek verilerek gösterilmiştir. Bu yüksek değerleri düşürmek için bir çok teknik geliştirildiğini ve bu tekniklerin birbirilerine göre

avantaj/dezavantajları ve bazı tekniklerin de kendine has maliyetinin olduğu Bölüm 3'te detaylı şekilde anlatılmıştı. Bu tezde önerilen yöntem diğer yöntemlerdeki negatif etkilere sahip olmayıp önemli bir işlem yükü de getirmemektedir. Şekil 4.7'deki alt-taşıyıcılara dikkat edilirse, BER'i çok etkilemeyecek şekilde bu alt-taşıyıcıların genliğini arttırıp (azaltıp) fazları değiştirilirse, toplamların anlık değerleri aynı noktaya değil, her biri ayrı-ayrı noktalara denk gelicek, bu da anlık yüksek değer oluşmasını sağlayacaktır. Diğer birçok yöntem de faz ve genlikleri değiştirme yaklaşımını kullanmaktadır.



Şekil 4.7. Toplamları bir zaman aralığında yüksek bir değer alan dört dik taşıyıcı.

OFDM sistemlerinde taşıyıcıların genlik ve fazının belirlenmesi için M-PSK ve M-QAM kullanılmaktadır. Önerdiğimiz çalışmada ise N -adet QAM, M -adet QPSK ve K -adet BPSK kullanıldığı varsayılmıştır.

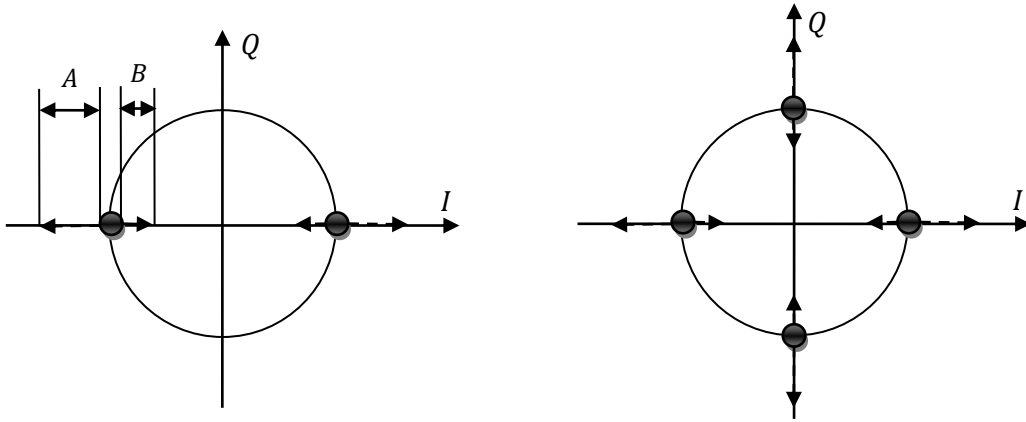


Şekil 4.8. PAPR azaltmak için kullanılan genlik değiştirme ve faz kaydırma tekniğinin blok şeması.

Şekil 4.8’de alt-taşıyıcılarda genlik ve faz değiştirmelerle PAPR değerlerini düşürmek için önerdiğimiz yöntemin blok şeması verilmiştir. Şemadan görüldüğü gibi IFFT’nin girişine karmaşık sayılardan oluşan vektörler verilir. Yöntemde IFFT’ye giden I-Q bileşenlerden QAM olanlar değil, sadece QPSK ve BPSK’dan çıkan I-Q bileşenlerin faz ve genliği değiştirilmekte. Bunun nedeni QAM kümeleşmelerinin faz ve genlik değiştirilmesinden oldukça fazla etkilenmesi ve BER’in bozulmasıdır.

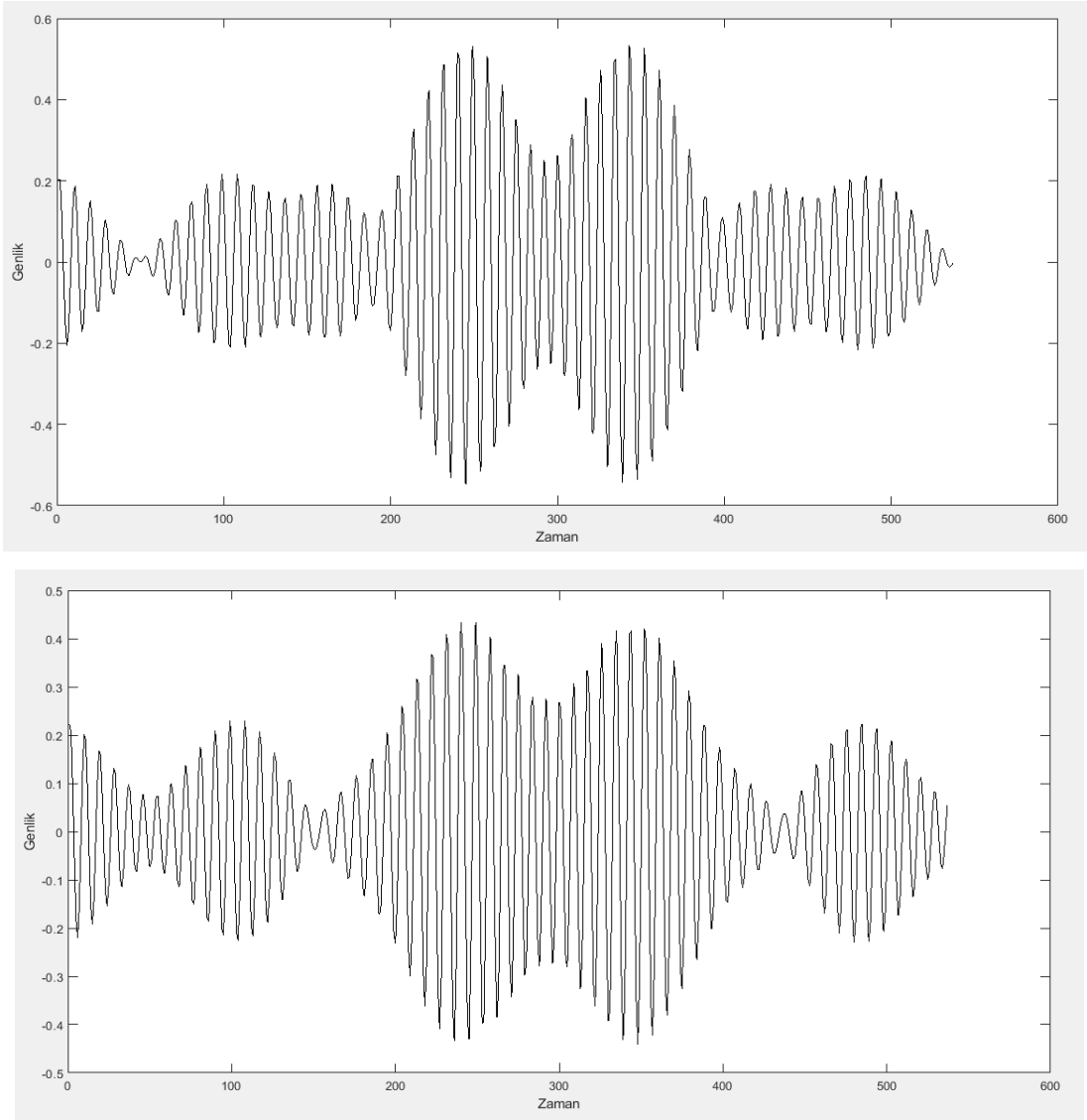
4.2.1 Genlik Değiştirme

PAPR değerlerini düşürmek için ilk önce alt-taşıyıcıların genliğini değiştiriyoruz. BPSK ve QPSK kümeleşme diyagramlarında taşıyıcıların genliklerinin değiştirilmesi şekil 4.9'da gösterilmiştir. Genlik değerleri ortalama gücü değiştirmeyecek, veya çok az değiştirecek ve BER'i çok etkilemeyecek şekilde ($A \leq 1,2$, $B \leq 0,4$) seçilmiştir.



Şekil 4.9 Genlikleri değiştirilecek olan BPSK ve QPSK sistemlerinin kümeleşme diyagramları

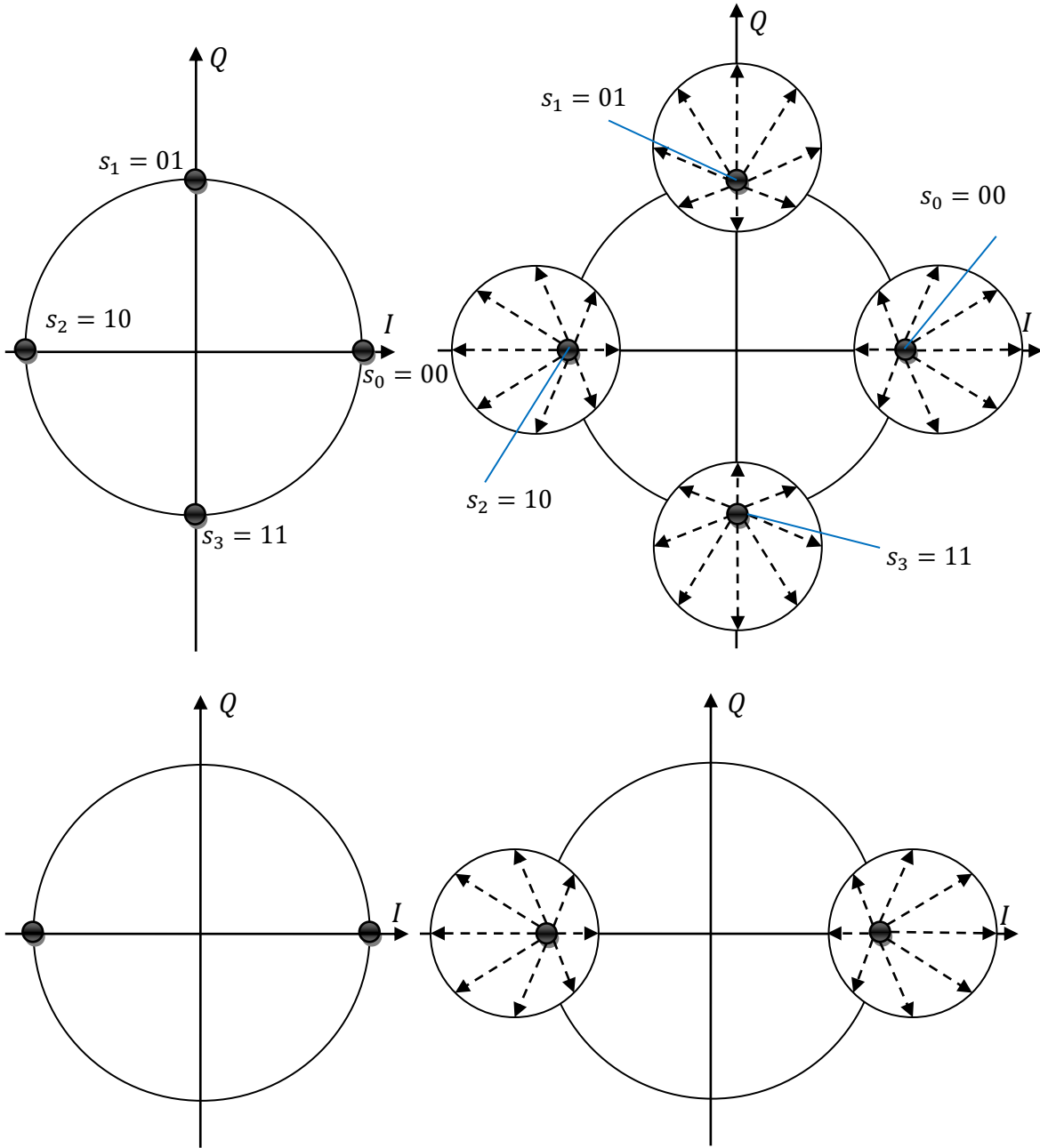
Şekil 4.10'da genliği değiştirilmiş bir OFDM sembolünün zaman grafiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi genliği değiştirilen OFDM sembolünün bazı kısımlarında genlik değerleri yükselmiş, anlık yüksek değerleri kısmen de olsa indirilmiştir. Bu genlik değiştirilmesi sonucunda ortalama gücün de değiştiğini görüyoruz. Ortalama güç ne kadar artarsa PAPR değerleri ona uygun şekilde düşecektir ve bu da bir az anlamsız olur. Yani alt-taşıyıcıların genliğini arttırırken (azaltırken) dikkat ettiğimiz en önemli husus ortalama gücü değiştirmeden veya çok az değiştirecek şekilde PAPR değerlerini düşürmektir.



Şekil 4.10 a) Orjinal OFDM zaman alan sinyali b) Genliği değiştirilmiş OFDM zaman alan sinyali.

4.2.2 Faz Kayması

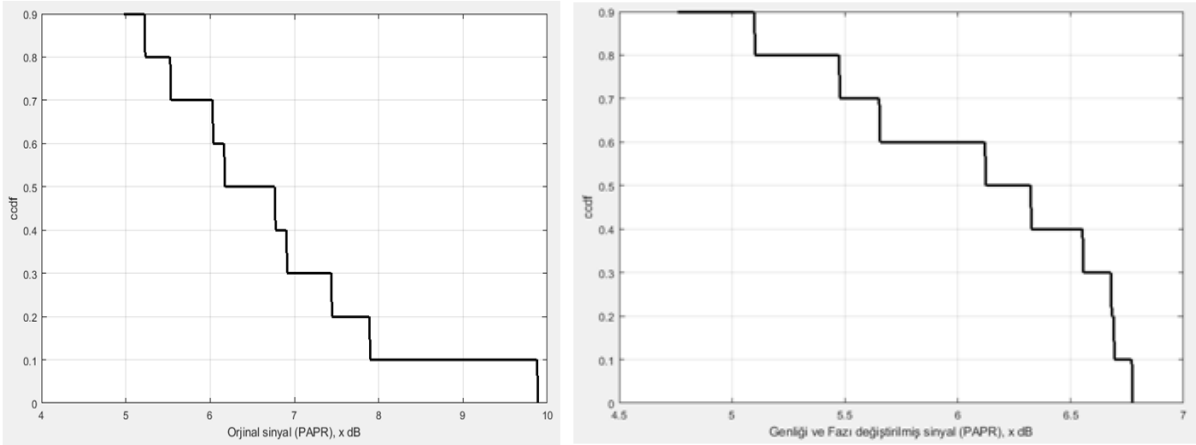
Daha sonra genlikleri değiştirilen alt-taşıyıcıların fazları kaydırılarak PAPR değerleri düşürülmüştür. Şekil 4.11’de BPSK ve QPSK kümeleşme diyagramında taşıyıcıların faz ve genlik değiştirilme aralıkları gösterilmiştir.



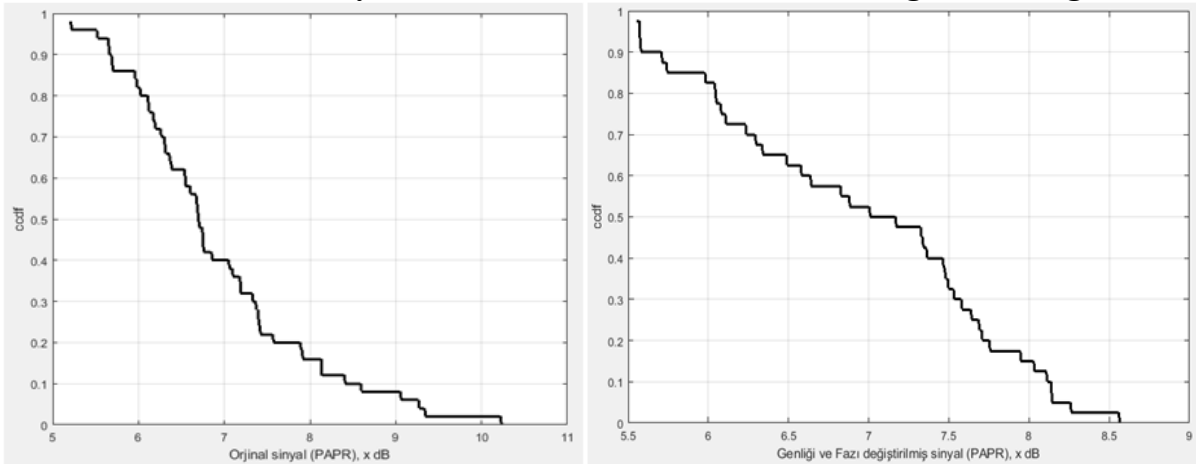
Şekil 4.11 Genlikleri ve fazları değiştirilecek olan QPSK ve BPSK sistemlerinin kümeleşme diyagramları ve değişim aralıkları.

Şekil 4.12’de 64 taşıyıcılı bir orjinal ve faz ve genliği değiştirilmiş OFDM sembolünün PAPR değerleri gösterilmiştir. Burada taşıyıcı olarak 8 adet BPSK, 8 adet QPSK ve 48 adet 16-QAM kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarında PAPR değeri ortalama olarak 8-10 dB’den

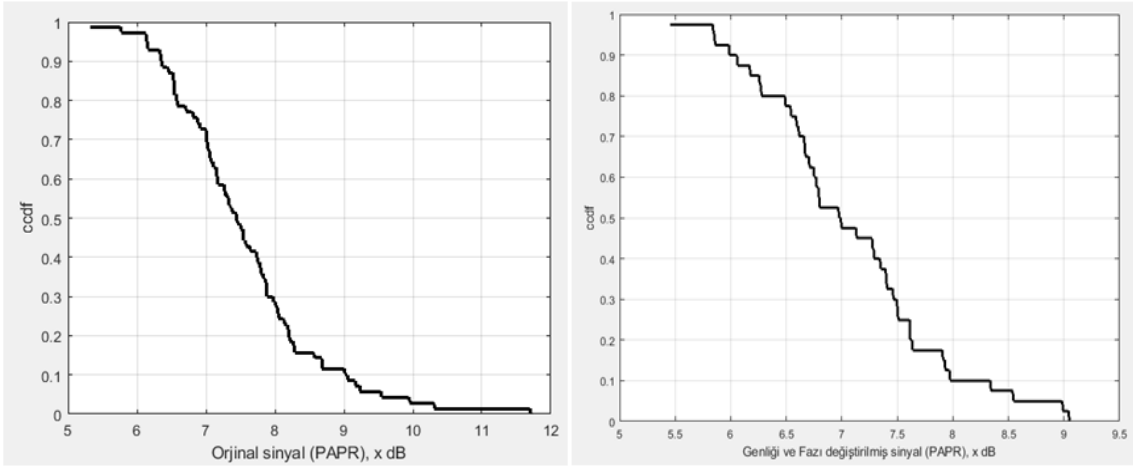
6-8 dB'ye kadar indirilmiştir. Ortalama güç neredeyse sabit tutularak ve BER'i etkilemeyecek şekilde genlik değiştirilip faz kayması eklenmiştir. Simülasyon sonuçlarında 4 dB'ye kadar PAPR değerleri düşürülmüştür.



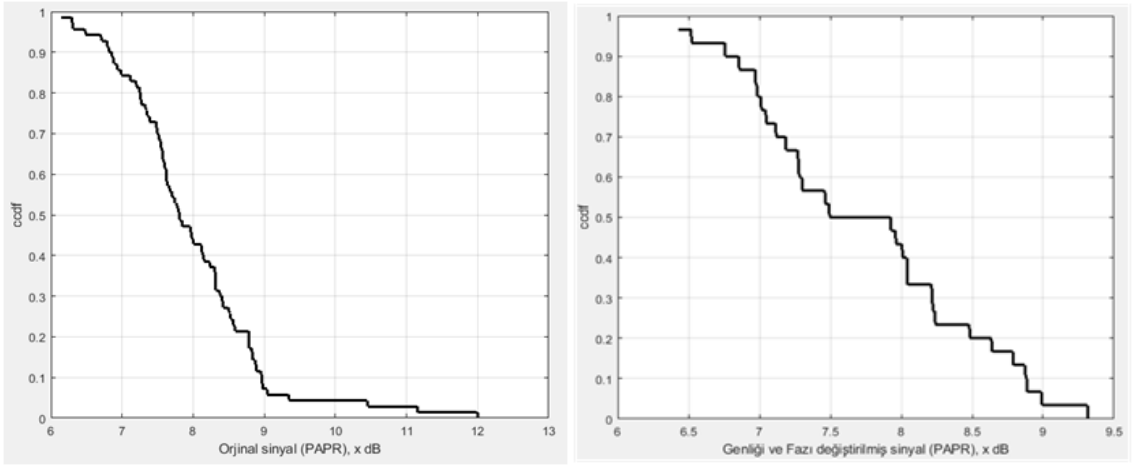
Şekil 4.12. 64 taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği.



Şekil 4.13. 128 taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği.



şekil 4.14. 256 taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği.



şekil 4.15. 512 taşıyıcısı olan OFDM sembolünün PAPR değerleri örneği.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

OFDM sistemleri modern kablosuz iletişim sistemleri içerisinde yüksek veri iletim oranlarına ihtiyaç olan yerlerde kullanılmaktadır. Bu sistem diğer çok taşıyıcılı sistemlere göre daha üstün olmasına rağmen, bazı dezavantajları gözlemlenmektedir. En büyük dezavantajı PAPR değerlerinin bazı özel durumlarında yüksek olmasıdır.

PAPR'ı değerini azaltmak için kullanılan yöntemler içinde Kırpma ve Filtreleme (CF) Seçici Haritalama (SLM), Ton Rezervasyonu (TR), Kısmi iletim dizisi (PTS) vd. sayılabilir. Bazıları teoride çok iyi PAPR değerleri elde etmeyi sağlasada, bu tekniklerin herbirinin veri kaybı, tayfsal bozulma, bit hata oranının (BER) artması, hesaplama karmaşıklığı, ilave yan bilgi gerektirdiğinden dolayı verimliliği azaltması gibi kendine has maliyetleri vardır. Bazı tekniklerin ise pratikte uygulanması neredeyse imkansızdır.

Çizelge 5.1 PAPR Azaltma Tekniklerinin Karşılaştırılması.

PAPR Azaltma Teknikleri	Karmaşıklık	Veri Hızı Kaybı	Yan Bilgi	BER	Bozulma
Seçici Haritalama	Yüksek	Yüksek	Gerekli	Yok	Düşük
Kısmi İletim Dizisi	Yüksek	Yüksek	Gerekli	Yok	Düşük
Ton Rezervasyonu	Düşük	Düşük	Gerekli	Yok	Düşük
Ton Enjeksiyonu	Düşük	Düşük	Gerekli	Yok	Düşük
Blok Kodlama	Yok	Yüksek	Gerekli	Düşük	Düşük
Kırpma ve Filtreleme	Yok	Yok	Gerek Yok	Yüksek	Yüksek
Önerilen yöntem	Düşük	Yok	Gerek Yok	Düşük	Yok

Çalışmamızda OFDM sistemlerinde oluşan PAPR değerlerini düşürmek için ilave yan bilgi gerektirmeyen, bit hata oranını çok etkilemeyen, pratikte uygulanabilir, kabul edilemez bir ek maliyet gerektirmeyen ve ortalama gücü yaklaşık sabit tutan yeni bir yöntem

sunulmuştur. Yeni yöntem ile OFDM sistemleri kullanılan tüm teknolojilere uygulanarak PAPR sorunu bir miktar azaltılabilir.

Çizelge 5.1’de PAPR azaltma tekniklerinin karşılaştırılması verilmiştir. PAPR değerlerini düşürmek için bu çalışmada önerdiğimiz yöntem diğer yöntemlerdeki negatif etkilere sahip olmayıp önemli bir işlem yükü de getirmemektedir. Diğer tekniklerin bazıları teoride çok iyi PAPR değerleri elde etmeyi sağlasa da, bu tekniklerin her birinin veri kaybı, tayfsal bozulma, bit hata oranının (BER) artması, hesaplama karmaşıklığı, veya ilave yan bilgi gerektirdiğinden dolayı verimliliği azaltması gibi kendine has maliyetleri vardır. Bazı tekniklerin ise pratikte uygulanması neredeyse imkansızdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada OFDM sistemlerinde PAPR değerlerini düşürmek için genlik değiştirme ve faz kaydırma yöntemi sunulmuştur ve simülasyon sonuçlarında umutverici PAPR değerleri elde edilmiştir.

Önerilen yöntemin başarımı benzetimlerle gözlenmiştir. İlk önce OFDM sistemlerinde iletilecek çok sayıda bitten oluşan sembolleri alt-sembollere bölüp ve her alt-sembol için alt-taşıyıcı faz ve frekansını temsil eden karmaşık sayıları IFFT işlemi uyguladıktan sonra OFDM zaman alan sinyali elde edilmiştir. İletilecek olan bit dizileri neredeyse rastgele olduğu için bazı OFDM sembollerinin bazı anlarında alt-taşıyıcıların toplamının oldukça yüksek değerler aldığı gözlemlenmiştir. Daha sonra bu alt-taşıyıcılar içinde QPSK ve BPSK kullananların genliklerini BER'i etkilemeyecek şekilde önceden belirtilen genlik aralıkları içinde arttırarak (azaltarak) oluşan yüksek PAPR değerlerinin kısmen de olsa indirildiği gözlenmiştir. Alt-taşıyıcıların genlikleri ortalama gücü değiştirmeyecek ya da çok az değiştirecek şekilde artırılmıştır (azaltılmıştır). En sonda da alt-taşıyıcılara faz kayması BER'i çok etkilemeyecek şekilde eklenmiş ve 4-6 dB'ye kadar PAPR değerlerini indirilmiştir. PAPR değerlerini indirmek için kullanılan diğer yöntemlere göre umutverici PAPR başarımı elde edilmiştir.

Yöntemde genlik değiştirme ve faz kayması sadece BPSK ve QPSK kullanan alt-taşıyıcılar üzerinde uygulanmıştır. Yöntem geliştirilerek daha iyi bir PAPR başarımı için QAM taşıyıcılarına da uygulanabilir. Çalışmada $N = 64, 128, 256, 512$ adet alt-taşıyıcı üzerinde genlik değiştirme ve faz kaydırması yapılmıştır. $N = 64$ alt-taşıyıcıda 8-adet BPSK, 8-adet QPSK ve 48-adet QAM, $N = 128$ alt-taşıyıcıda 16-adet BPSK, 16-adet QPSK ve 96-adet QAM, $N = 256$ alt-taşıyıcıda 32-adet BPSK, 32-adet QPSK ve 192-adet QAM, 512 alt-taşıyıcıda da 64-adet BPSK, 64-adet QPSK ve 384-adet QAM kullanılmış ve bu alt-taşıyıcılarda sadece BPSK'lar ve QPSK'lar için genlik değiştirilmesi ve faz kayması eklenmiştir.

Sonuç olarak bu yöntem geliştirilebilecek bir yöntemdir. İleride bu yöntemde sadece BPSK'lara ve QPSK'lara değil, QAM'lere de genlik değiştirilmesi ve faz kaydırılması

eklenebilir ve çok daha iyi PAPR değerleri elde edilebilir. Bunun için dikkat edilecek en önemli husus BER'i etkilemeyecek şekilde uygulanmasıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- A. A. Eltholth, M. Gaber, M. M. Fouda and H. A. K. Mansour, "Convolutional constellation mapping technique for PAPR reduction in filter bank multi-carrier," 2017 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), Kuching, 2017, pp. 464-468.
- B. Li, L. Hu, F. Yang, L. Ding and T. Song, "Tone reservation ratio optimization for PAPR reduction in OFDM systems," 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, 2018, pp. 1-6.
- B. Wang and D. Qu. (2017). "PAPR reduction with invertible subset LDPC codes in downlink OFDMA systems," 2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), Guangzhou, 2017, pp. 473-477.
- C. Nader, P. Händel and N. Björnsell. (2010). "OFDM PAPR reduction by convex optimization: A power amplifier point-of-view," 2010 IEEE International Microwave Workshop Series on RF Front-ends for Software Defined and Cognitive Radio Solutions (IMWS), Aveiro, 2010, pp. 1-4.
- E. Seke. (2017). VHDL Örnekleriyle Sayısal Haberleşmeye Giriş, Seçkin Yayıncılık, Ankara, s.304-311.
- En.wikipedia.org.(2009). *En.wikipedia.org.(2009). Emile Baudot. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89mile_Baudot [Accesed 1 Jun. 2020]. 2020 tarihinde https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89mile_Baudot adresinden alındı.*
- E. Abdullah and N. M. Hidayat, "SCS-SLM PAPR reduction technique in STBC MIMO-OFDM systems," 2017 7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), Penang, 2017, pp. 104-109.
- F. Tosato, M. Sandell and M. Tanahashi, "Tone reservation for PAPR reduction: An optimal approach through sphere encoding," 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-6.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- I. Braz, L. Guan, A. Zhu and T. J. Brazil. (2010). "Peak-to-average power ratio reduction of SFBC MIMO-OFDM signals using unused tones," 2010 IEEE International Microwave Workshop Series on RF Front-ends for Software Defined and Cognitive Radio Solutions (IMWS), Aveiro, 2010, pp. 1-4.
- J. Chen and C. Li. (2010). "Tone Reservation Using Near-Optimal Peak Reduction Tone Set Selection Algorithm for PAPR Reduction in OFDM Systems," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 17, no. 11, pp. 933-936, Nov. 2010.
- J. Gao, J. Wang and B. Wang. (2009). "Peak-to-average power ratio reduction with improved partial transmit sequence," 2009 International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics (ICMTCE 2009), Beijing, 2009, pp. 288-291.
- J. Wang, B. Liu and X. Zhou, "PCE algorithm for PAPR reduction in OFDM-ROF system," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1078-1082, August 2009.
- L. Yang and Y. Mingli. (2009). "Dynamic symbol pairing PAPR reduction technique for OFDM systems," 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, 2009, pp. 3129-3132.
- Marchetti, Nicola & Rahman, Muhammad & Kumar, Sanjay & Prasad, Ramjee. (2009). OFDM: Principles and challenges. 10.1007/978-1-4419-0673-1_2.
- M. Hao and C. Lai, "Pulse shaping based PAPR reduction for OFDM signals with minimum error probability," 2008 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems, Bangkok, 2009, pp. 1-4.
- M. Hao and C. Lai, "Precoding for PAPR Reduction of OFDM Signals With Minimum Error Probability," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 56, no. 1, pp. 120-128, March 2010.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- M. L. Diallo, M. Chafii, J. Palicot and F. Bader, "Modified tone reservation for PAPR reduction in OFDM systems," 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Budapest, 2016, pp. 697-701.
- M. Kaur, P. Singh and S. Singh. (2015). "CMA technique: A solution for minimum PAPR in OFDM," 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS), Chandigarh, 2015, pp. 1-4.
- M. Sabbaghian, Y. Kwak, B. Smida and V. Tarokh, "Near Shannon Limit and Low Peak to Average Power Ratio Turbo Block Coded OFDM," in IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 8, pp. 2042-2045, August 2011.
- M. Tan, Z. Latinovic and Y. Bar-Ness. (2005). "STBC MIMO-OFDM peak-to-average power ratio reduction by cross-antenna rotation and inversion," in IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 7, pp. 592-594, July 2005.
- Nisila Binu, Dr. Suriyakala C.D, "International Conference on Emerging Trends in Engineering & Management," in International Conference on Emerging Trends in Engineering & Management Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), PP 14-18, 2016
- S. B. Slimane. (2007). "Reducing the Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals Through Precoding," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 2, pp. 686-695, March 2007. doi: 10.1109/TVT.2007.891409
- Schwartz, Mischa. (2009). History of communications. IEEE Communications Magazine. 47. 24-24.
- S. Ertürk. (2016). Sayısal Haberleşme, Birsen Yayınevi, İstanbul, s291-294.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- S. Haleem and S. A. Khan. (2009). "Common sub-expression elimination in PAPR reduction of OFDM system," 2009 First Asian Himalayas International Conference on Internet, Kathmandu, 2009, pp. 1-5.
- S. P. DelMarco. (2018). "Compander Design for OFDM PAPR Reduction Using Optimal Perturbation of Piecewise Linear Segments," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 64, no. 4, pp. 900-908, Dec. 2018.
- S. P. DelMarco. (2018). "A Constrained Optimization Approach to Compander Design for OFDM PAPR Reduction," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 64, no. 2, pp. 307-318, June 2018.
- S. Weinstein and P. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," in IEEE Transactions on Communication Technology, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, October 1971, doi: 10.1109/TCOM.1971.1090705.
- T. Chanpokaiboon, P. Puttawanchai and P. Suksompong, "Enhancing PAPR performance of MIMO-OFDM systems using SLM technique with centering phase sequence matrix," The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011, Khon Kaen, 2011, pp. 405-408.
- Tr.wikipedia.org.(2012). *Tr.wikipedia.org.(2012). Alexander Graham Bell. Available at: https://tr.wikipedia.org/wiki/Alexander_Graham_Bell [Accesed 1 Jun. 2020]. 2020 tarihinde https://tr.wikipedia.org/wiki/Alexander_Graham_Bell adresinden alındı.*
- T. S. N. Murthy and K. P. Raju, "PAPR reduction of alamouti coded MB-OFDM UWB signals by using a phase-offset SLM," 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), Paralakhemundi, 2016, pp. 421-425.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- W. Wang, M. Hu, J. Yi, H. Zhang and Z. Li. (2018). "Improved Cross-Entropy-Based Tone Injection Scheme With Structured Constellation Extension Design for PAPR Reduction of OFDM Signals," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 4, pp. 3284-3294, April 2018.
- X. Cheng, D. Liu, S. Feng, H. Fang and D. Liu, "An artificial bee colony-based SLM scheme for PAPR reduction in OFDM systems," 2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA), Beijing, 2017, pp. 449-453.
- X. Gu, S. Baek and S. Park. (2010). "PAPR reduction of OFDM signal using an efficient SLM technique," 2010 The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Phoenix Park, 2010, pp. 324-328.
- Yong S. C., Jaekwon K., Won Y. Y., Chung-Gu K., 2010, MIMO-OFDM Wireless Communications With MATLAB, WILEY, p121-241.
- Z. Wu, R. Qiu and S. Zhu. (2010). "MIMO-OFDM PAPR Reduction by Space-Frequency Permutation and Inversion," 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, 2008, pp. 1-4.