



## Improving the BER and PAPR performances of conventional OFDM waveform with sequential LLWT-PTS-AC method

Bekir Tengizler<sup>1</sup>, Efe Kaan Çalışkan<sup>2</sup>, Alihan Gülbaz<sup>3</sup>, Ali Özen<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Organized Industrial Zone 9. Cadde No:2, 38070, Melikgazi, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Hobim Enerji, Serçeönü Mah. Ahmet Paşa Boulevard, Kocasinan, Kayseri, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering Nuh Naci Yazgan University, Kocasinan, Kayseri, Türkiye

<sup>4</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye

### Highlights:

- PAPR reduction
- Waveform design alternative to OFDM
- LLWT-PTS-AC-OFDM waveform

### Keywords:

- OFDM waveform
- PAPR reduction
- Lifting wavelet transform
- PTS
- LLWT-PTS-AC

### Article Info:

Research Article

Received: 07.07.2022

Accepted: 10.09.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1142173

### Acknowledgement:

### Correspondence:

Author: Ali Özen

e-mail: aliozen@tarsus.edu.tr

phone: +90 324-600 0033 / 2049

### Graphical/Tabular Abstract

One of the biggest disadvantages of MC radio communication systems is PAPR. In this study, it is suggested to combine PTS and AC technique with Lifting wavelet transform using Lazy wavelet to improve both BER performance and PAPR performance of MC radio communication systems. When the results are examined, it is seen that the PAPR and BER performances of the classical OFDM system have increased satisfactorily.

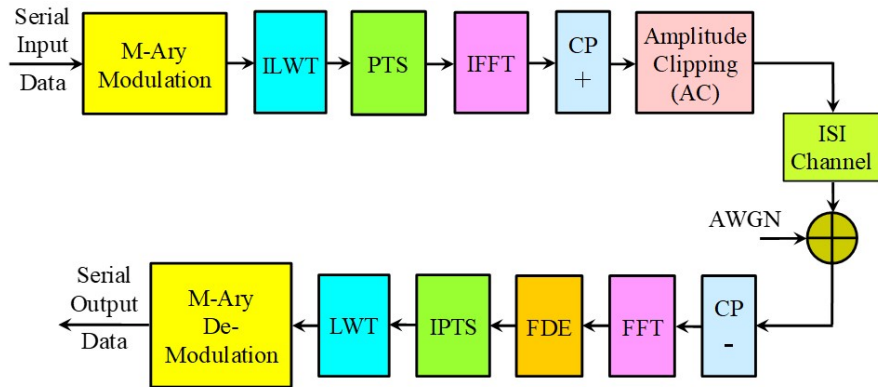


Figure A. Implementation of LLWT-PTS-AC technique to MC communication systems

**Purpose:** In this study, it is suggested to combine PTS and AC methods with LWT transform using Lazy wavelet to reduce PAPR in wireless communication systems using classical OFDM waveform. A new method combining the PAPR improvement provided by PTS and AC techniques on multi-carrier communication systems and the BER performance provided by LWT is presented in this study.

**Theory and Methods:** The proposed method is given in Figure A. In Figure A, randomly generated serial input data is modulated in the M-Ary Modulation Block. It is then propagated by applying the inverse Lifting wavelet transform to the data modulated in the ILWT Block. Next, in the PTS Block, the phases of emitted symbols are changed. Then the phase-changed signals are subjected to IFFT processing. After the IFFT process, the signal with the lowest PAPR value is selected and transmitted to the AC Block by adding CP in the CP+ Block. The produced waveform after clipping processes in the AC Block is sent from the frequency selective channel and reaches the receiving side after the AWGN is distorted. The desired performance criteria are calculated by using the data obtained at the output of the M-Ary De-Modulation Block by applying the opposite of the operations on the transmitter side on the receiver side.

**Results:** When the obtained PAPR results are analyzed, it is understood that the suggested waveform for the  $1E-3$  PAPR value is 0.5 dB better than the PTS-AC-OFDM waveform and 8 dB better than the K-OFDM waveform. In addition, when the BER performances are examined, it is observed that the suggested waveform for the  $1E-4$  BER level is 6 dB better than the PTS-AC-OFDM and K-OFDM waveforms.

**Conclusion:** In this article, significant gains were obtained in both BER performances and PAPR performances thanks to the proposed method. Thus, despite the slightly increased computational complexity, the proposed LLWT-PTS-AC-OFDM method has yielded a high-performance next-generation OFDM waveform in this study.



## Sıralı LLWT-PTS-AC yöntemi ile klasik OFDM dalga formunun BER ve PAPR performanslarının iyileştirilmesi

Bekir Tengizler<sup>1</sup>, Efe Kaan Çalışkan<sup>2</sup>, Alihan Gülbaz<sup>3</sup>, Ali Özen<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>1. Organize Sanayi Bölgesi 9. Cadde No:2, 38070, Melikgazi, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Hobim Enerji, Serçeönü Mah. Ahmet Paşa Bulvarı, Kocasinan, Kayseri, Türkiye

<sup>3</sup>Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Lisans Derecesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Kocasinan, Kayseri, Türkiye

<sup>4</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- PAPR azaltma
- OFDM'e alternatif dalga formu tasarımı
- LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formu

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.07.2022

Kabul: 10.09.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1142173

#### Anahtar Kelimeler:

OFDM dalga formu,  
PAPR azaltma,  
lifting dalgacık dönüşümü,  
PTS,  
LLWT-PTS-AC

#### ÖZ

Çok taşıyıcı (MC) telsiz iletişim sistemlerinin en büyük dezavantajlarından birisi yüksek tepe-ortalama güç oranı (PAPR)'dır. Pek çok standartta kabul edilen dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) sistemi de bu dezavantajdan etkilenmektedir. Araştırma literatüründe MC telsiz iletişim sistemlerinin yüksek PAPR seviyelerini azaltmak için genlik kırma (AC) ve filtreleme, kodlama, serpiştirme, ton rezervasyonu (TR), ton ekleme (TI), kısmi iletim dizisi (PTS) ve seçilmiş haritalama (SLM) teknikleri gibi pek çok yöntem sunulmuştur. Bunlara ek olarak, bu PAPR azaltma yöntemlerini kullanan MC telsiz iletişim sistemlerinin diğer performanslarının iyileştirilmesi amacıyla sistemlere uygulanan hızlı Walsh Hadamard dönüşümü (FWHT) ve ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) gibi dönüşümlerde sunulmuştur. Bu çalışmada, MC telsiz iletişim sistemlerinin hem bit hata oranı (BER) performansını hem de PAPR başarımını iyileştirmek için PTS ve AC tekniği ile Lazy dalgacığı kullanan Lifting dalgacık dönüşümünün (LLWT) birleştirilmesi önerilmektedir. Bu makalede, ilk defa bu çalışmada önerilen PTS ve AC tekniği ile LLWT dönüşümünün birleşimi olan LLWT-PTS-AC yöntemi, MC telsiz iletişim sistemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için klasik OFDM dalga formuna uygulanmıştır ve kayda değer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman, klasik OFDM sisteminin PAPR ve BER başarımlarının tatmin edici ölçüde arttığı görülmektedir.

## Improving the BER and PAPR performances of conventional OFDM waveform with sequential LLWT-PTS-AC method

### H I G H L I G H T S

- PAPR reduction
- Waveform design alternative to OFDM
- LLWT-PTS-AC-OFDM waveform

#### Article Info

Research Article

Received: 07.07.2022

Accepted: 10.09.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1142173

#### Keywords:

OFDM waveform,  
PAPR reduction,  
lifting wavelet transform,  
PTS,  
LLWT-PTS-AC

#### ABSTRACT

One of the major disadvantages of multi-carrier (MC) radio communication systems is the high peak-to-average power ratio (PAPR). Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, which is accepted by many standards, is also affected by this disadvantage. In the research literature, many methods, such as amplitude clipping (AC) and filtering, coding, interleaving, tone reservation (TR), tone addition (TI), partial transmit sequence (PTS) and selected mapping (SLM) methods, have been presented to decrease the high PAPR values of MC radio communication systems. In addition, transformations such as fast Walsh Hadamard transform (FWHT) and discrete wavelet transform (DWT) applied to systems are proposed in order to increase other performances of MC radio communication systems using these PAPR reduction methods. In this study, it is suggested to combine PTS and AC technique with Lifting wavelet transform (LLWT) using Lazy wavelet to improve both bit error rate (BER) performance and PAPR performance of MC wireless communication systems. In this article, the LLWT-PTS-AC method, which is the combination of PTS and AC technique with LLWT conversion, which is proposed in this study for the first time, has been applied to the classical OFDM waveform to eliminate the disadvantages of MC radio communication systems, and remarkable results have been obtained. When the results are examined, it is seen that the PAPR and BER performances of the classical OFDM system have increased satisfactorily.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : btengizler@kayseriulasm.com, efeak6110@gmail.com, aliham.376.38@gmail.com, \*aliozen@tarsus.edu.tr / Tel: +90 324-600 0033 / 2049

## 1. Giriş (Introduction)

Dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM), yüksek hızlı data dizilerini birbirlerine dik olan alt taşıyıcılar üzerinden aynı anda düşük hızlarda iletir. Ayrıca semboller arası girişime (ISI) karşı dayanıklı oluşu ve düşük karmaşıklığa sahip olması onu 4G ve 5G haberleşme sistemleri için standart haline getirdi. 5G haberleşme sisteminde OFDM yeniden kullanılmasındaki en büyük etken, OFDM'in başarılarını yakalayabilen ve düşük karmaşıklığa sahip uygun bir dalga formunun bulunamamasıdır. Ancak bu başarıya rağmen OFDM kullanan haberleşme sistemlerinin mobiliteye karşı dirençsizlik ve yüksek tepe-ortalama güç oranı (PAPR) gibi mücadele edilmesi gereken bazı problemler vardır. OFDM'nin temel sorunu, iletilen sinyalin PAPR'ının yüksek değeridir. PAPR, zaman domeninde alt taşıyıcı işaretlerinin toplanmasıyla elde edilen iletim işaretinin zarfının gücünün maksimum olduğu seviye ile iletim işaretinin ortalama gücünün oranı olarak tanımlanır. Yüksek PAPR ise telsiz iletişim sistemlerinin verici tarafında yüksek güç amplifikatörü (HPA), dijital analog konverter (DAC) ve analog dijital konverter (ADC) gibi lineer olmayan elemanların kullanılması nedeniyle gönderilecek olan sinyaller üzerinde parazitlere yani bilgi kayıplarına neden olmakta ve haberleşme sistemlerinin performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Birçok veri alt taşıyıcısının üst üste binmesi nedeniyle OFDM sinyali Rayleigh benzeri özellikler sergiler. Büyük genlik varyasyonları, PAPR için yüksek değerlere yol açar. Bu tepe noktaları, geniş doğrusal dinamik aralığı desteklemek için yüksek güçlü amplifikatörler gerektirir. HPA'nın girişindeki daha yüksek sinyal seviyesi, çıkışında doğrusal olmayan bozulmalara neden olarak HPA'nın verimsiz çalışmasına neden olur. Bu bozulmalar, istenmeyen bant dışı güçle sonuçlanan intermodülasyon ürünlerine neden olur. OFDM sinyallerinin PAPR'ını azaltmak için birçok çözüm önerilmiş ve analiz edilmiştir. Bu yöntemlerin temel özelliklerinden bazıları, doğrusal olmama, hesaplama karmaşıklığı ve alıcıya gönderilmesi gereken yan bilgilerin boyutudur.

İyi bilinen lineer yöntemlerden bazıları, seçici haritalama (SLM) [1], kısmi iletim dizisi (PTS) [2] ve ton rezervasyonu (TR) [3]'dür.

SLM yönteminde, orijinal frekans alanı OFDM sinyalinden gelen vektörler, bir dizi önceden tanımlanmış faz dizisine dayalı olarak döndürülür. Elde edilen her sinyal varyantı için karşılık gelen PAPR değerlendirilir. İletim için PAPR değeri en düşük olan seçilir [4].

PTS yöntemi, aynı dönme açısının birden fazla vektöre uygulanması farkıyla benzer bir ilke kullanır. Yöntem, OFDM sinyal vektörlerini temsil eden  $N$  karmaşık değerini, her biri  $N/K$  elemanlarının  $K$  alt blokları halinde gruplanmış olarak kabul eder. Bitişik taşıyıcı blokların durumu basitlik avantajına sahiptir ve algılama sistemleri için daha uygundur. Bitişik olmayan taşıyıcı blokların durumu, ekstra karmaşıklık pahasına daha iyi tepe faktörü (PF) azaltma kapasitesi sunar. Yöntem, belirli bir sonlu kümeden değerlerle belirli bir  $K$  faz kümesinden bir faz ile her blokta vektörleri döndürerek bir dizi sinyal varyantı üretir. Ardından, her sinyal varyantının karşılık gelen PAPR'ının hesaplanmasından sonra, iletim için minimum PAPR'ye sahip olanı seçilir. Bu yöntemlerin etkinliği, ele alınan kümedeki faz sayısı ile artar. PTS yönteminin verimliliği, daha fazla sayıda blok kullanıldığında da artar. Dezavantajı, daha iyi bir verimliliğin, verici tarafında ve alıcı tarafında artan miktarda hesaplama gerektirmesidir. Alıcının bu faz setlerini ve blok boyutlarını bilmesi gerektiğinden, bu yöntemlerin bir diğer dezavantajı, alıcıya gönderilmesi gereken ek bilgilerdir. Bu yöntemlerin optimizasyonları birkaç makalede önerilmiştir [4, 5]. TR yöntemi, mevcut veri alt taşıyıcılarını değiştirmek yerine ek bir veri olmayan alt taşıyıcılar kümesinden vektörleri değiştiren başka bir doğrusal tekniği temsil eder. Yöntem, tahsis edilen ayrılmış alt taşıyıcılara karşılık gelen sinyalin PAPR

değerlerini hesaplar. İletim için minimum PAPR'ye karşılık gelen sinyal kopyası seçilir. Bu tekniğin önemli avantajı, alıcı tarafında hiçbir ek bilgi ve hesaplama gerektirmemesidir. Tüm alt taşıyıcılar yararlı bilgileri iletmek için kullanılmadığından, bu yöntemin daha düşük bir veri hızı dezavantajı vardır. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve performansı iyileştirmek için, orijinal ton rezervasyon yönteminden çeşitli PAPR azaltma teknikleri türetilmiştir: kısmi tonların seçici haritalanması (SMOPT) [6], Tek Ton Tek Tepe (OTOP) [7], bire bir yineleme [8] ve [9]'da açıklanan hızlı TR.

Doğrusal olmayan yöntemler sınıfı, kırpma, kısmi kırpma (PC), sinyal sıkıştırma ve aktif takımyıldız uzantısı (ACE) gibi yaklaşımlarla temsil edilir.

Kırpma yöntemi, sinyalin genliğinin belirli bir eşik ile sınırlı olduğu, çok iyi bilinen bir başka doğrusal olmayan PAPR azaltma tekniğidir. A/D dönüşümünden önce sinyalin enterpolasyonu yapılması gerektiği göz önüne alındığında, çeşitli kırpma yöntemleri önerilmiştir. Bazı yöntemler, tepe noktalarının yeniden büyümesinin dezavantajına sahip olarak, enterpolasyondan önce kırpmayı önerir. Diğer yöntemler, enterpolasyondan sonra, bant dışı güç üretiminin dezavantajına sahip olan kırpmayı önerir. Bu problemin üstesinden gelmek için farklı filtreleme teknikleri önerilmiştir. Filtrelemede ayrıca tepe yeniden büyümeye neden olabilir, ancak enterpolasyondan önceki kırpmadan daha azdır [10].

Kısmi kırpma, sinyal spektrumundaki bozulmaları azaltmak için frekans bölgesindeki ek sinyal işleme gerçekleştiren bir başka doğrusal olmayan PAPR indirgeme yöntemidir. Bu yöntem, yalnızca orijinal sinyal ile kırılmış varyantı arasında en yüksek faz farkına sahip olan alt taşıyıcıların değiştirileceğini varsayar [11].

ACE yöntemi, iletilen sinyalin PAPR seviyesini azaltmak için orijinal takımyıldızın dış noktalarının dışarıya doğru hareket ettirilebileceği fikrini aktarır. İzin verilen alternatif noktalar için alan, sinyal işlemenin takımyıldızın minimum mesafesini azaltmaması ve PAPR seviyesini düşürmesi için seçilir [12].

Sinyal sıkıştırma, PAPR azalmasını iyileştiren doğrusal olmayan yöntemlerin başka bir grubudur. Bu amaçla bazı çalışmalar, kırpmadan sonra  $\mu$ -yasa/A-yasası birleştirme fonksiyonları [13], üstel sıkıştırma fonksiyonu [14], parçalı ölçekler [15] veya polinom oran fonksiyonları [16] önerdi. Bu yöntemlerin dezavantajlarından biri, karşılık gelen sinyal dekompresyonu tarafından üretilen artan gürültü seviyesidir.

Bununla birlikte, dalgacık dönüşümü sinyal işleme çalışmalarında uzun senelerdir uygulanmasına rağmen, son yıllarda telsiz iletişim sistemlerinin hemen her alanında da olumlu olarak kullanılmaya başlanmıştır [17-19]. Bu çalışmada, son yıllarda telsiz iletişim sistemlerinin hemen hemen her alanında kullanılmaya başlanan dalgacık dönüşümünün özellikle, çok taşıyıcı haberleşme sistemlerinde sağladığı avantajların klasik OFDM sistemleri ile birleştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, wavelet dönüşümü temelli OFDM dalga biçiminde temel prensip sadece sırasıyla ayrık Fourier dönüşümünü (DFT) ve ters DFT'yi (IDFT) ile ayrık Wavelet dönüşümü (DWT) ve ters DWT (IDWT) yer değiştirmektedir. Dalgacık transformunun esnek yapısı ve alt-taşıyıcılar üstündeki adaptif zaman-frekans aralıkları yardımıyla DWT destekli OFDM (DWT-OFDM) şeması FFT destekli OFDM şemasına alternatif olarak önerilmektedir [20]. DWT-OFDM şemasında gönderilecek olan giriş datasının farklı frekans bantlarına ayrıştırılması alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeç çiftleri yardımıyla yapılmaktadır. Bununla birlikte, klasik ayrık dalgacık dönüşüm işlemlerinde yararlanılan süzgeçler karmaşık matematiksel hesaplar ihtiva eder, bu dezavantajı

azaltmak için Lifting dalgacık dönüşümü (LWT) tekniği önerilmiştir. Lifting tekniği dalgacık dönüşümü için basit ve en verimli tekniktir [21]. Bu çalışmada, klasik OFDM dalga formunun kullanıldığı kablosuz haberleşme sistemlerinde PAPR'ın düşürülmesi için PTS ve AC yöntemleri ile Lazy dalgacığını kullanan LWT dönüşümünün birleştirilmesi önerilmektedir. PTS ve AC tekniklerinin çok taşıyıcı haberleşme sistemleri üzerinde sağladığı PAPR iyileştirmesi ile LWT'nin sağladığı BER performansını birleştiren yeni bir yöntem bu çalışma ile sunulmaktadır. Böylece, LLWT-PTS-AC yönteminin uygulandığı kablosuz haberleşme sistemlerinde hem PAPR performanslarında hem de BER performanslarında kayda değer başarımların elde edildiği bilgisayar benzetin sonuçlarından görülmektedir. Bu çalışma, PTS tekniği, AC tekniği ve LWT dönüşümünün OFDM dalga formunda birleştirildiği literatürdeki ilk çalışmadır. PAPR azaltma amacıyla DWT-OFDM sistemi üzerine literatürde birkaç çalışma [22-24] olmasına rağmen, yazarların bildiği kadarıyla PTS ve AC ile LWT'yi birleştirerek OFDM dalga formu üzerinde inceleyen bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Çalışmanın sonraki bölümleri aşağıdaki gibi planlanmaktadır: PAPR azaltmada kullanılan PTS tekniği 2. Bölümde açıklanmaktadır. 3. Bölümde Kırpma yöntemi verilmektedir. LWT dönüşümünün ayrıntıları 4. Bölümde sunulmaktadır. Önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formu tasarımı 5. Bölümde ayrıntıları ile tanıtılmaktadır. Ardından elde edilen sonuçlar 6. Bölümde paylaşılmaktadır. Değerlendirmeler ve çıkarımlar son bölümde tartışılmaktadır.

## 2. PAPR Azaltma için PTS Yöntemi (PTS Method for PAPR Reduction)

Stokastik bir yöntem olan PTS yöntemi, giriş sinyalini alt-bloklara ayırarak ve simgelerin fazlarında değişiklik oluşturarak PAPR azaltma sağlar [25-27]. PTS tekniğinin blok şeması Şekil 1'de verilmiştir.

$N$  tane alt-taşıyıcıdan oluşan bir OFDM şemasında giriş verisi Eş. 1'deki gibi yazılabilir.

$$X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}] \quad (1)$$

Çok taşıyıcı haberleşme sistemlerinde PAPR azaltma tekniği olarak kullanılan PTS tekniğinde öncelikle Eş. 1'de tanımlanan giriş işareti, rastgele veya bir yonteme göre dağıtılarak  $V$  tane alt bloğa ayrıştırılır. Bu durumda  $X$  giriş sinyali aşağıdaki Eş. 2'deki gibi tanımlanabilir.

$$X = \sum_{v=0}^{V-1} X^v \quad (2)$$

Burada her bir alt bloğa ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) işlemi gerçekleştirildikten sonra her bir data elemanının faz açısı Eş. 3'teki  $b^v$  faz çarpanı ile değiştirilir.

$$b^v = [b_0, b_1, b_2, \dots, b_{V-1}], v = 1, 2, \dots, V - 1 \quad (3)$$

Faz çarpanları genelde  $\{1, -1, j, -j\}$  elemanlarından oluşan rastgele dizilerdir. PTS tekniğinde son aşama ise faz değişikliği gerçekleştirilen alt-blokların yeniden bir araya toplanmasıdır. PTS dönüşümü ile üretilen sinyal Eş. 4'teki gibi verilebilir.

$$\tilde{x}[n] = \sum_{v=0}^{V-1} b^v \text{IFFT}\{X^v\}, 0 \leq n \leq V - 1 \quad (4)$$

PTS tekniğinde en düşük PAPR seviyesini veren faz çarpanının  $b^{en\ iyi}$ , sistemin alıcı tarafına yan bilgi olarak gönderilmesi gerekir. PTS tekniğinde ideal  $b^{en\ iyi}$  hesaplanması esnasında çözüm uzayının boyutu  $W^{V-1}$  olmaktadır. Burada,  $W$ , alternatif faz çarpanının sayısıdır.  $b^v \in \{+1, -1, j, -j\}$  için  $W = 4$  olur.

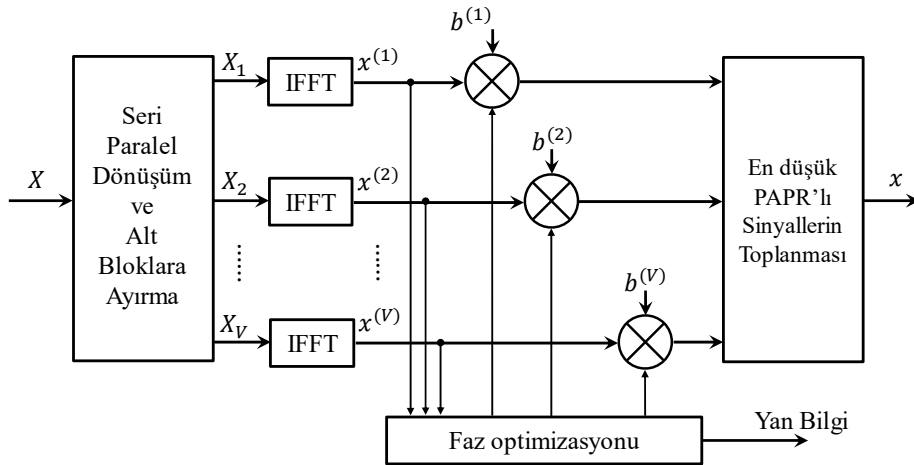
## 3. Genlik Kırpma Tekniği (Amplitude Clipping Technique)

Genlik kırpma yönteminin çalışma tekniği ise yüksek PAPR'a neden olan büyük genlikli alt-taşıyıcıların genliklerinin belirlenen bir eşik seviyesini geçmesi durumunda kırılmasına dayanır [28, 29]. Geleneksel OFDM dalga formunda IFFT dönüşümü ile datalar zaman domeninde kompleks bir işarete dönüştürülür. Kırpma işlemi, bu işaretlerin genlikleri kontrol edilerek gerçekleştirilir. Kırpma işlemi tamamlandıktan sonra işaretler vericiye iletilir. Bu teknikte alıcı kısmında klasik de-modülasyon işlemlerinden başka herhangi bir işleme gerek yoktur.

Kırpma eşik seviyesi  $\kappa$  aşağıdaki Eş. 5 ile tanımlanır.

$$\kappa = \vartheta \max[|x|] \quad (5)$$

Burada  $x$ ,  $N$  adet alt taşıyıcıdan oluşmuş zaman bölgesi OFDM sembolünü temsil etmektedir.  $\vartheta$  ise eşik seviyesini tanımlayacak katsayıdır. OFDM sinyalinin en yüksek genliği  $\vartheta$  katsayısı ile çarpılarak kırpma işlemi için eşik seviyesi tanımlanır. Eşik seviyesi tanımlandıktan sonra OFDM sinyalindeki alt-taşıyıcı genlikleri Eş. 6 ile kontrol edilerek Eş. 5'te hesaplanan  $\kappa$  eşik seviyesini geçen alt-taşıyıcıların genlikleri eşik seviyesine eşitlenerek tekrar üretilir.



Şekil 1. PTS tekniğinin blok şeması (Block scheme of PTS technique)

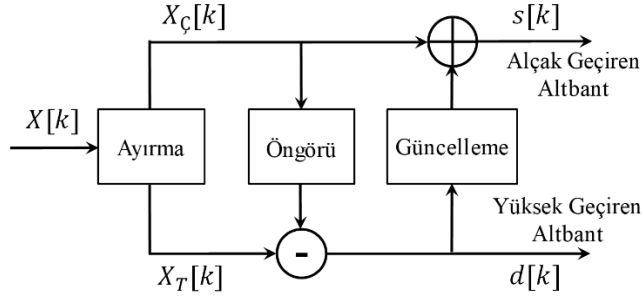
$$x_n^c = \begin{cases} x_n, & |x_n| \leq \kappa \\ Ae^{j\theta}, & |x_n| > \kappa \end{cases} \quad (6)$$

Burada  $x_n^c$  kırpma işlemine tabi tutulmuş zaman bölgesi simgesi,  $e^{j\theta}$  ise bu simgenin fazını göstermektedir. Kırpma işlemi sırasında işaretlerin fazlarında herhangi bir değişiklik yapılmaz. Kırpma işlemlerinden sonra zaman bölgesi OFDM sinyali  $x^c = [x_0^c, x_1^c, \dots, x_{N-1}^c]$  olarak tekrar üretilir ve vericiye iletilir.

#### 4. Lifting Dalgacık Dönüşümü (Lifting Wavelet Transform)

Klasik dalgacık transformu hesaplamalarında süzgeçler ve alt-örnekleme kullanılmaktadır. Süzgeçlerde kullanılan karmaşık matematiksel işlemleri azaltmak için 1996 yılında Sweldens tarafından Lifting tekniği önerilmiştir. Lifting tekniği dalgacık dönüşümü için en basit ve en verimli tekniktir [21].

Lifting tekniğinde işaret tek ve çift örneklerine ayrıştırılır. Süzgeçlerin yerine daha basit olan öngörü ve güncelleme işlemleri uygulanır. Bu işlemler için klasik tekniklerdeki gibi karmaşık hesaplamalara gerek duyulmaz. Şekil 2'de Lifting dalgacık dönüşümünün blok şeması görülmektedir.



Şekil 2. Lifting dalgacık dönüşümünün blok şeması (Block scheme of Lifting wavelet transform)

Orijinal  $X[k]$  sinyali öncelikle Eş. 7 ve Eş. 8'deki gibi tek ve çift bileşenlerine ayrıştırılır.

$$X_T[k] = X[2k + 1] \quad (7)$$

$$X_C[k] = X[2k] \quad (8)$$

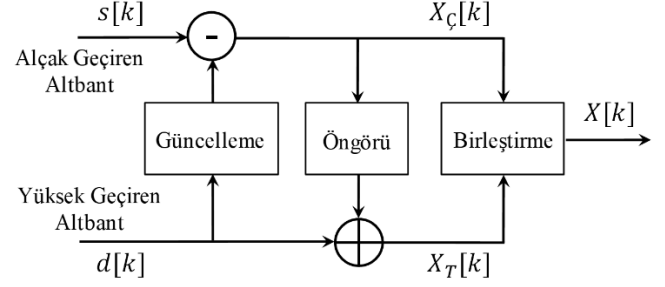
Bu iki örnek arasında güçlü bir bağıntı vardır. Öngörü adımında tek bileşenler çift bileşenlerden faydalanılarak yaklaşık olarak hesaplanmaya çalışılır. Bu adım yüksek geçiren süzgeç görevi görür ve işaretin yüksek frekanslı bileşenleri ( $d[k]$ ) Eş. 9'daki gibi hesaplanır.

$$d[k] = X_T[k] - P(X_C[k]) \quad (9)$$

Güncelleme adımında örnekleri düzeltmek için ölçeklendirme yapılır ve daha sonra dönüşüm için alçak geçiren süzgeçli değerleri üretmek için çift örneklerle eklenir. Bu örnekler işaret hakkında yaklaşık bilgiyi ( $s[k]$ ) veren alçak frekanslı bileşenleri içerir.

$$s[k] = X_C[k] + U(d[k]) \quad (10)$$

Eş. 9 ve Eş. 10'da hesaplanan  $d[k]$  ve  $s[k]$  işaretlerine transformda yararlanılan işlemlerin tam tersi uygulanarak Eş. 11 ve Eş. 12'deki gibi ters transformları hesaplanır. Ters Lifting dalgacık dönüşümünün blok diyagramı Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Ters Lifting dalgacık dönüşümünün blok şeması (Block scheme of inverse Lifting wavelet transform)

$$X_T[k] = d[k] + P(X_C[k]) \quad (11)$$

$$X_C[k] = s[k] - U(d[k]) \quad (12)$$

Ters dönüşüm işleminden sonra, Eş. 13'te verildiği gibi tek indisli ve çift indisli örnekler  $M$  birleştirme operatörü ile birleştirilerek orijinal sinyal elde edilir.

$$X[k] = M\{X_T[k], X_C[k]\} \quad (13)$$

#### 5. Önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM Dalga Formu (Proposed LLWT-PTS-AC-OFDM Waveform)

Klasik OFDM dalga formunun PAPR ve BER performansını iyileştirmek için önerilen LLWT-PTS-AC tekniğinin çok taşıyıcı (Multi Carrier, MC) haberleşme sistemlerine uygulanışı Şekil 4'te verilmektedir.

Rastgele üretilen seri giriş dataları  $M$  Seviyeli Modülasyon Bloğunda istenilen modülasyon yöntemlerinden biri ile modüle edilir. Sonra ILWT Bloğunda modüle edilen datalara Eş. 14 yardımıyla ters Lifting dalgacık dönüşümü (ILWT) uygulanarak yayılır.

$$X_{ILWT}[k] = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{N-1} y^n[z] 2^{\frac{n}{2}} \varphi[2^n k - z] \quad (14)$$

Burada,  $y^n[z]$  module edilen datayı gösterir ve  $\varphi[k]$  da  $z$ 'inci dereceden alt taşıyıcı için dalgacık fonksiyonunu göstermektedir.

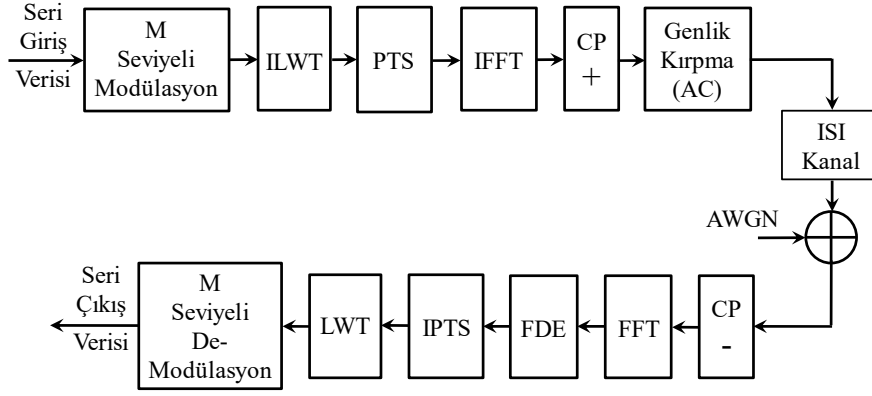
Daha sonra, bir önceki bölümde detaylı olarak açıklandığı gibi PTS Bloğunda ILWT ile yayılan sembollerin fazları  $b^m$  faz çarpanlarıyla aşağıdaki Eş. 15 yardımıyla değiştirilir.

$$x_{PTS}[m] = \sum_{k=0}^{N-1} (X_{ILWT}[k] \cdot b^v[k]), v = 1, 2, \dots, V, m = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (15)$$

Fazları değiştirilen  $V$  adet işaret aşağıdaki Eş. 16 yardımıyla IFFT işlemine tabi tutulur.

$$\tilde{x}_{PTS}[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} x_{PTS}[m] e^{j \frac{2\pi mn}{N}}, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (16)$$

Burada,  $\tilde{x}_{PTS}[n]$  zaman bölgesindeki sinyali ve  $x_{PTS}[m]$ 'de PTS bloğu çıkışındaki fazı değiştirilmiş verileri göstermektedir. IFFT işleminden sonra CP+ Bloğunda periyodik örnek eklenen  $V$  adet zaman bölgesi sinyallerin aralarından PAPR değeri en az olan sinyal seçilerek Genlik Kırpma Bloğuna iletilir. Genlik Kırpma Bloğunda genlik kırpma işlemleri gerçekleştirildikten sonra önerilen dalga formu üretilmiş olur. En düşük PAPR değerini sağlayan  $b^{eni}$  faz çarpanı yan bilgi olarak alıcıya iletilmelidir. Üretilen dalga formu



**Şekil 4.** LLWT-PTS-AC tekniğinin MC haberleşme sistemlerine uygulaması  
(Implementation of LLWT-PTS-AC technique to MC communication systems)

frekans seçici kanaldan geçip toplanır beyaz Gauss gürültüsüyle (AWGN) deforme olduktan sonra alıcı tarafa gelmektedir. Alıcı tarafta bozulan verilere FFT bloğunda aşağıdaki Eş. 17 yardımıyla FFT işlemi uygulanır.

$$w[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x_u[i] e^{-\frac{j2\pi k i}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (17)$$

Burada,  $w[k]$  frekans bölgesindeki sinyali ve  $x_u[i]$  de frekans seçici kanal ve AWGN ile bozulmuş sinyali göstermektedir. FFT bloğu çıkışında elde edilen veriler frekans bölgesi denkleştirici (FDE) ile denkleştirildikten sonra IPTS bloğunda aşağıdaki Eş. 18 yardımıyla sembollerin fazları, yan bilgi olarak gelen  $b^{eniye}$  faz dizilerini kullanarak eski haline getirilir.

$$\hat{y}_{IPTS}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (w[k] \cdot b^{eniye}[k]), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (18)$$

Burada,  $w[k]$  FDE bloğu çıkışındaki denkleştirilmiş verileri göstermektedir. Fazları düzeltilen sembollere LWT bloğunda aşağıdaki Eş. 19 yardımıyla LWT işlemi uygulanır.

$$X_{LWT}^z[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{y}_{IPTS}[n] 2^{\frac{k}{2}} \varphi[2^k n - z], \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, z = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (19)$$

LWT bloğu çıkışında ters yayma işlemi gerçekleştirilen veriler M Seviyeli De-Modülasyon Bloğu yardımıyla de-modülasyona tabi tutularak istenen performans ölçütleri hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada,  $V = 4$  ve  $V = 8$  olan rastgele faz dizilerinden yararlanılmıştır ve faz dizilerinin alıcıda bilindiği varsayılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, klasik PTS yöntemiyle kıyaslanıp en iyi PAPR başarımını sağlayan dalgacık aileleri grafiklere eklenmiştir. Diğer dalgacık aileleri klasik PTS'nin PAPR başarımına göre daha kötü PAPR başarımını göstermiştir.

## 6. Nümerik Sonuçlar ve Tartışmalar (Numerical Results and Discussions)

Bilgisayar benzetim çalışmaları iki bölümden oluşmaktadır. Klasik OFDM (K-OFDM), PTS-AC-OFDM ve önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formlarının, birinci bölümde karşılaştırmalı PAPR başarımları ve ikinci bölümde AWGN kanal BER-SNR başarımları analiz edilmektedir. Bilgisayar benzetimleri 4-QAM modülasyonu

için birbirinden bağımsız 1000 Monte Carlo kanal çevrimi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Simülasyon çalışmalarının tamamı 1000 OFDM paketi, 64 bit CP, 192 alt taşıyıcı ve 256 noktalı FFT işlemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Genlik kırpma yöntemi uygulanırken  $\theta = 0.6$  kırpma katsayısı kullanılmıştır [30].

### 6.1. PAPR Benzetim Sonuçları (PAPR Simulation Results)

Yapılan çalışmanın ilk bölümünde, yukarıda bahsedilen dalga formlarının PAPR performansları karşılaştırılmaktadır. PAPR performansları aşağıdaki Eş. 20'de hesaplanmaktadır.

$$PAPR_{dB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\max |X[n]|^2}{E[|X[n]|^2]} \right] \quad (20)$$

Burada,  $X[n]$  bu çalışmada kullanılan şemaların iletilen işaretini ve  $E[\cdot]$  simgesi de istatistiksel ortalama değeri ifade etmektedir. Bu makalede, PAPR başarımları, PAPR'ın tümleyici kümülatif dağılım fonksiyonu (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) ile elde edilmektedir.  $PAPR_0 > 0$  referans değeri dikkate alındığında,  $PAPR_{dB}$ 'nin referans seviyesinden daha yüksek olması olasılığı CCDF ile hesaplanır ve aşağıda gösterilen Eş. 21'deki gibi verilebilir:

$$CCDF(PAPR_0) = Pr\{PAPR_{dB} > PAPR_0\} \quad (21)$$

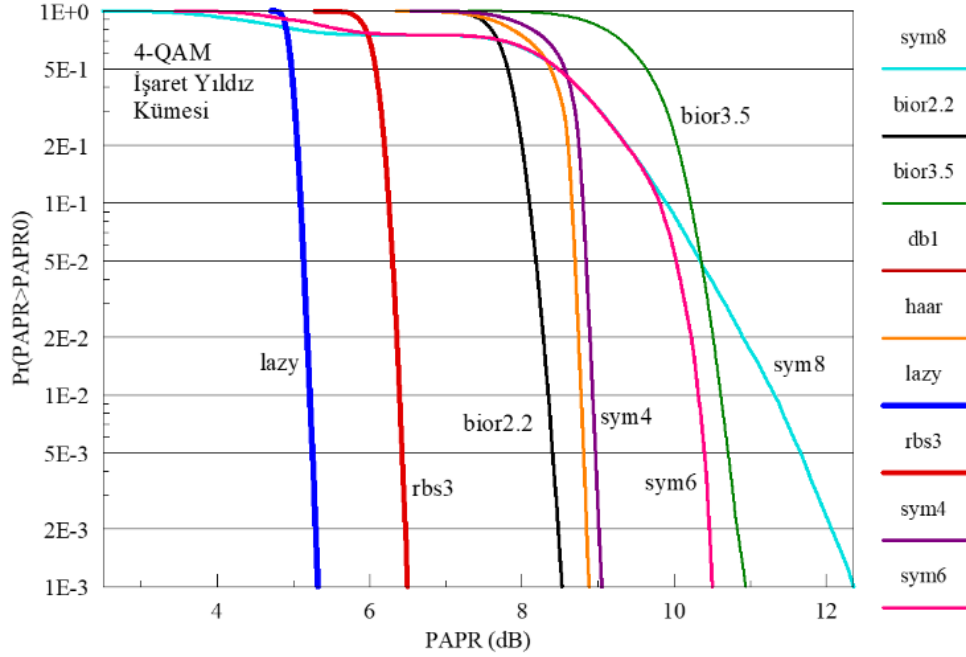
4-QAM modülasyonu için farklı dalgacık ailelerinin önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formunun PAPR performansı üzerine etkileri Şekil 5'te verilmektedir.

Şekil 5'te, en iyi performansın lazy dalgacık ailesiyle elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada en iyi performansın lazy dalgacık ailesiyle elde edilmesinden dolayı bundan sonraki karşılaştırmalarda lazy dalgacık ailesi önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formunda kullanılmaktadır.

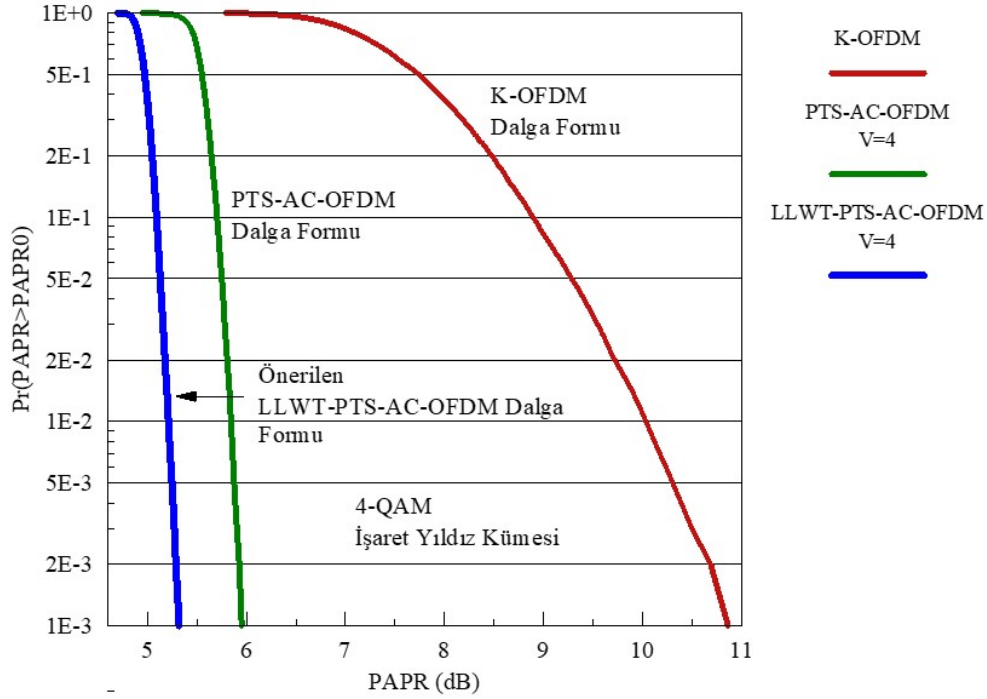
Şekil 6'da rastgele faz dizilerinin boyu  $V = 4$  alınarak yukarıda bahsedilen yöntemlerin 4-QAM işaret yıldız kümesi için hesaplanan PAPR performanslarının kıyaslanması gösterilmektedir.

Şekil 6'daki performanslar incelendiğinde,  $1E-3$  PAPR değeri için önerilen dalga formunun PTS-AC-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 0.7 dB ve K-OFDM dalga formundan da yaklaşık olarak 5.5 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Elde edilen bu kazanımlar önerilen çalışmanın katkısını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 7'de rastgele faz dizilerinin boyu  $V = 8$  alınarak ilgili dalga formlarının 4-QAM işaret yıldız kümesi için hesaplanan PAPR başarımlarının kıyaslanması sunulmaktadır.



Şekil 5. 4-QAM işaret yıldız kümesi için farklı dalgacıkların önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formunun PAPR performansına etkileri (Effects of distinctive wavelets on the PAPR outcome of the recommended LLWT-PTS-AC-OFDM waveform for the 4-QAM constellation)

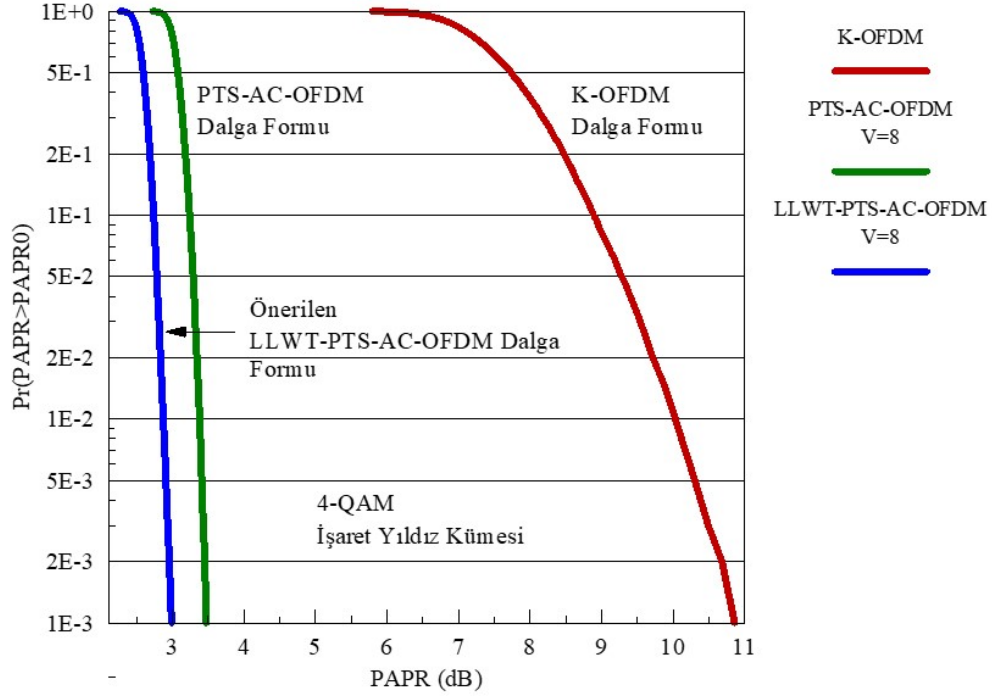


Şekil 6. 4-QAM işaret yıldız kümesi için ilgili dalga formlarının PAPR performanslarının karşılaştırılması (Comparison of PAPR outcomes of respective waveforms for the 4-QAM constellation)

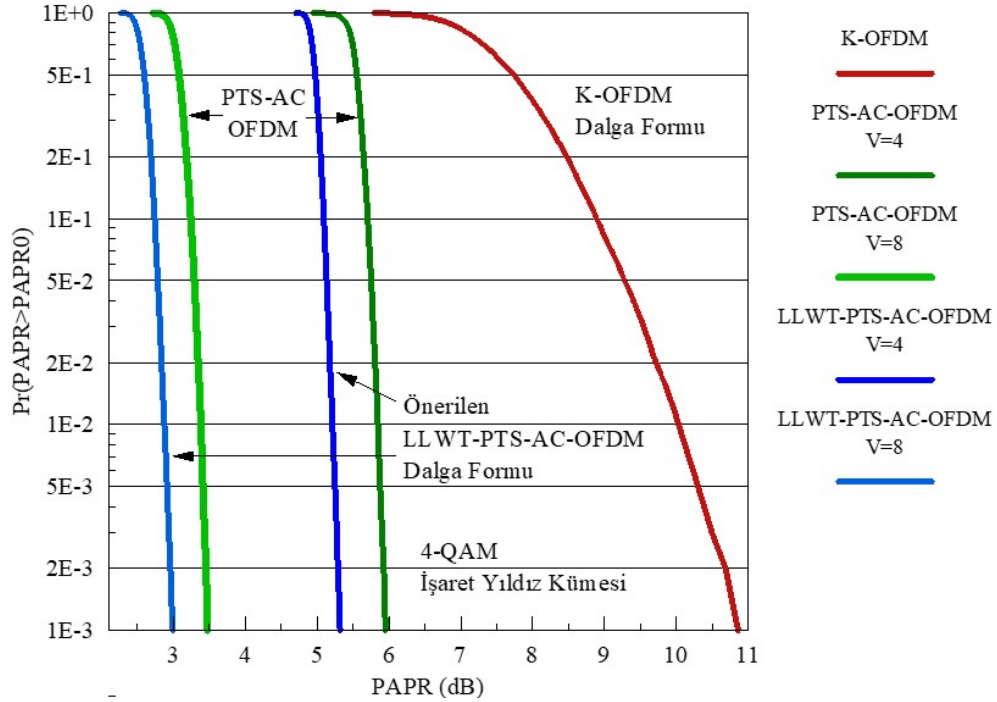
Şekil 7'deki PAPR başarımları analiz edildiğinde, faz dizilerinin boyunun arttırılmasının hem önerilen dalga formuna hem de PTS-AC-OFDM dalga formuna katkı sağladığı anlaşılmaktadır.  $1E-3$  PAPR değeri için önerilen dalga formunun PTS-AC-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak  $0.5$  dB ve K-OFDM dalga formundan da yaklaşık olarak  $8$  dB daha iyi olduğu tespit edilmektedir. Elde edilen bu kazanımlar önerilen çalışmanın katkısını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Rastgele faz dizilerinin boyu  $V = 4$  ve  $V = 8$  olarak

alındığında, bu çalışmada dikkate alınan dalga formlarının 4-QAM işaret yıldız kümesi için elde edilen PAPR performanslarının karşılaştırılması Şekil 8'de sunulmaktadır. Şekil 8'deki PAPR başarımları değerlendirildiğinde, faz dizilerinin boyunun  $4$ 'ten  $8$ 'e çıkartılmasının önerilen dalga formuna  $2.3$  dB ve PTS-AC-OFDM dalga formuna da  $2.5$  dB'lik bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Elde edilen bu kazançlara karşılık hesaplama karmaşıklığında bir artış olduğu unutulmamalıdır.





Şekil 7.  $V = 8$  için ilgili dalga formlarının PAPR performanslarının karşılaştırılması  
(Comparison of PAPR outcomes of respective waveforms for the  $V = 8$ )



Şekil 8.  $V = 4$  ve  $V = 8$  için ilgili dalga formlarının PAPR performanslarının karşılaştırılması  
(Comparison of PAPR outcomes of respective waveforms for the  $V = 4$  and  $V = 8$ )

## 6.2. BER Benzetim Sonuçları (BER Simulation Results)

Sunulan çalışmanın ikinci bölümünde, önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formu ile PTS-AC-OFDM ve K-OFDM dalga formlarının AWGN kanalındaki BER-SNR başarımları karşılaştırılmaktadır.

4-QAM modülasyonu için farklı dalgacık ailelerinin önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formunun BER performansı üzerine etkileri Şekil 9'da verilmektedir.

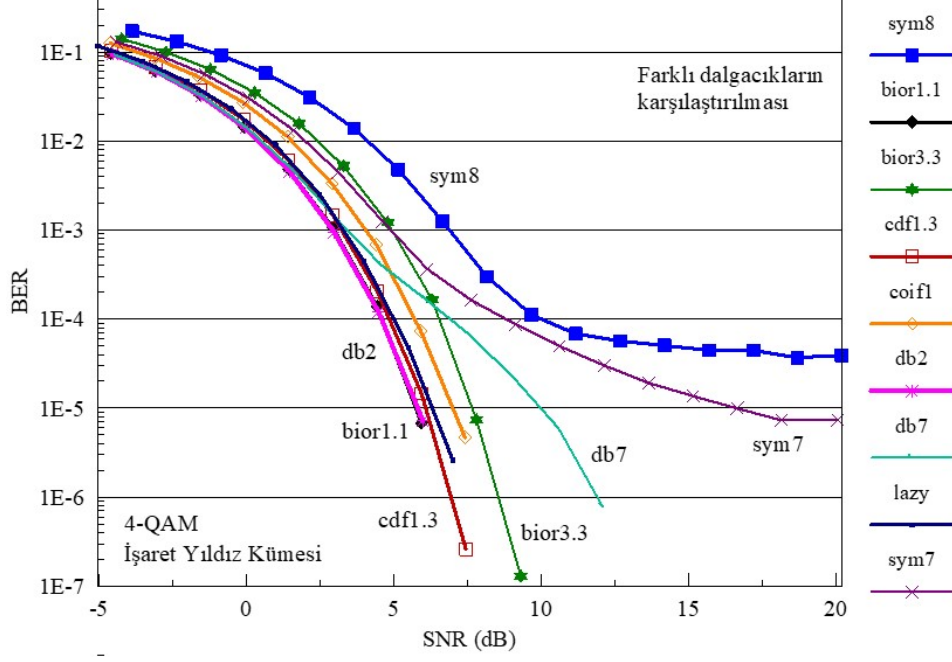
Önerilen dalga formunun BER-SNR performansının sunulduğu Şekil 9'da en iyi performansın birli.1 dalgacığıyla sağlandığı



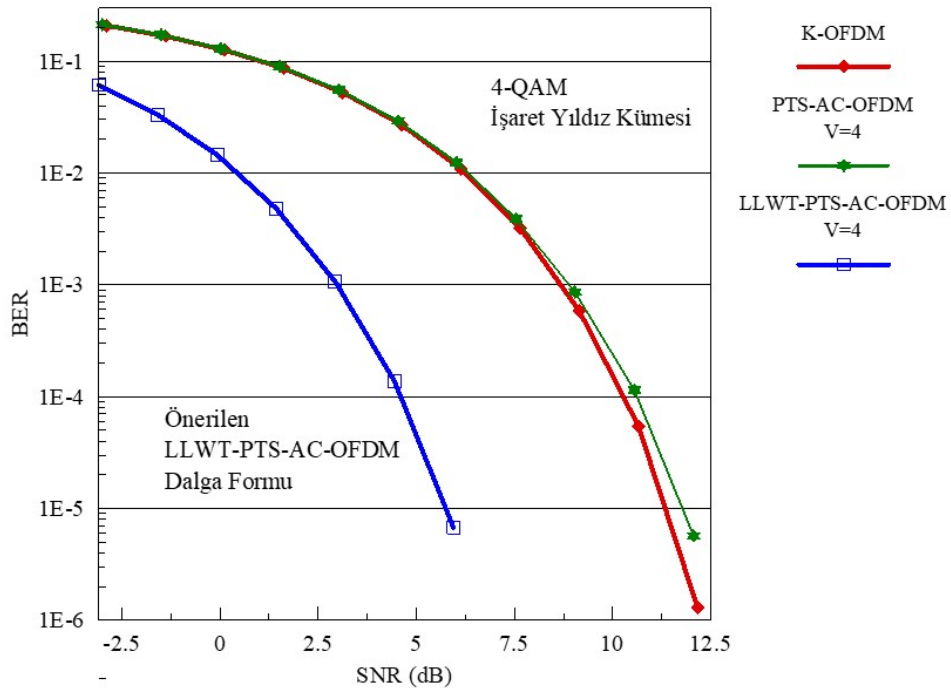
gözenmektedir. BER-SNR karşılaştırmalarında en iyi performansın bior1.1 dalgacıyla elde edilmesi nedeniyle sonraki BER-SNR karşılaştırmalarında bior1.1 dalgacı önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formunda kullanılmaktadır.

Şekil 10'da rastgele faz dizilerinin boyu  $V = 4$  alınarak ilgili dalga formlarının 4-QAM işaret yıldız kümesi için elde edilen BER performanslarının karşılaştırılması gösterilmektedir.

Bu çalışmada dikkate alınan dalga formlarının BER-SNR performanslarının gösterildiği Şekil 10 değerlendirildiğinde, PTS-AC-OFDM ve K-OFDM dalga formlarının performanslarının birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte,  $1E-4$  BER seviyesi için önerilen dalga formunun PTS-AC-OFDM ve K-OFDM dalga formlarından yaklaşık olarak 6 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen bu kazanımlar önerilen çalışmanın katkısı açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 9. 4-QAM işaret yıldız kümesi için farklı dalgacıların önerilen LLWT-PTS-AC-OFDM dalga formunun BER performansına etkileri (Effects of distinctive wavelets on the BER outcome of the recommended LLWT-PTS-AC-OFDM waveform for the 4-QAM constellation)

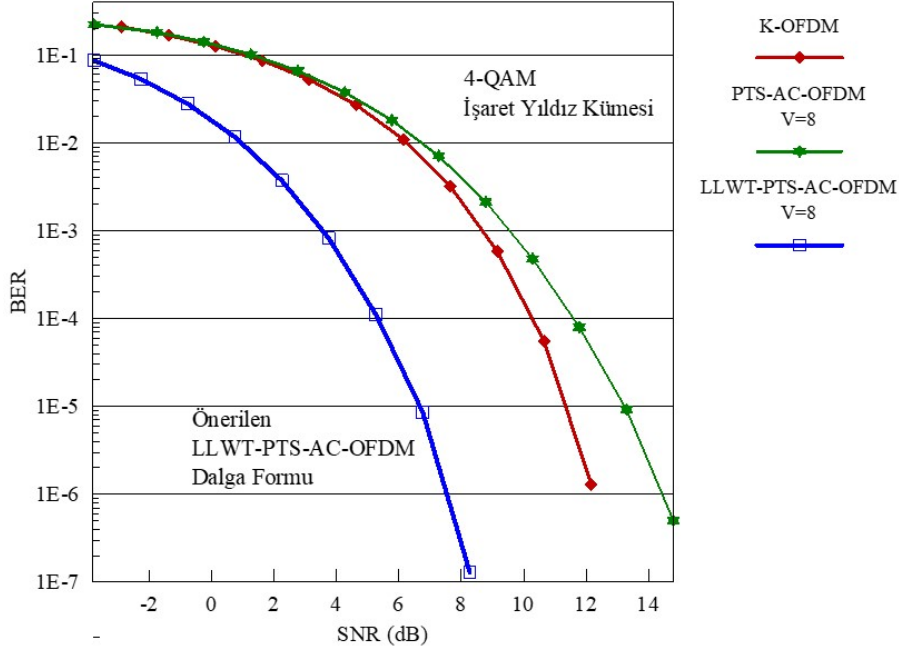


Şekil 10. 4-QAM işaret yıldız kümesi için ilgili dalga formlarının BER performanslarının karşılaştırılması (Comparison of BER outcomes of respective waveforms for the 4-QAM constellation)

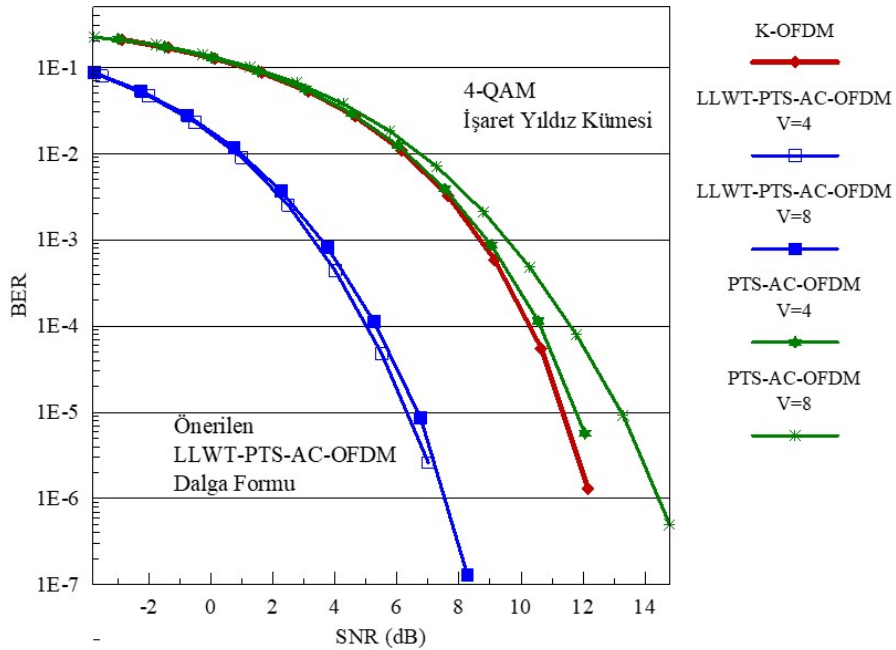
Şekil 11'de rastgele faz dizilerinin boyu  $V = 8$  alınarak yukarıda bahsedilen dalga formlarının 4-QAM işaret yıldız kümesi için elde edilen BER başarımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır.

Şekil 11'deki başarımlar analiz edildiğinde, faz dizilerinin boyunun arttırılmasının önerilen dalga formunun BER performansına herhangi bir katkı sağlamadığı anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçların faz dizilerinin boyutunun  $V = 4$  olduğu sonuçlarla (Şekil 10) yaklaşık olarak aynı olduğu Şekil 11'den gözlenmektedir. Bununla birlikte,

şaşırtıcı bir şekilde, faz dizilerinin boyunun arttırılmasının PTS-AC-OFDM dalga formunun BER performansını kötüleştirdiği tespit edilmektedir. Bunun sebebi, PTS-AC-OFDM dalga formunda rastgele faz dizilerinin boyunun arttırılmasının ve kullanılan kırpma eşiğinin BER-SNR performansı için uygun olmaması ile açıklanabilir. Rastgele faz dizilerinin boyu  $V = 4$  ve  $V = 8$  olarak alındığında, bu çalışmada incelenen dalga formlarının 4-QAM işaret yıldız kümesi için elde edilen BER başarımlarının karşılaştırılması Şekil 12'de değerlendirilmektedir.



Şekil 11.  $V = 8$  için ilgili dalga formlarının BER performanslarının karşılaştırılması  
(Comparison of BER outcomes of respective waveforms for the  $V = 8$ )



Şekil 12.  $V = 4$  ve  $V = 8$  için ilgili dalga formlarının BER performanslarının karşılaştırılması  
(Comparison of BER outcomes of respective waveforms for the  $V = 4$  and  $V = 8$ )

Faz dizilerinin boyunun 4 ve 8 olduğu ilgili dalga formlarının BER performanslarının sunulduğu Şekil 12 incelendiğinde, faz dizilerinin boyunun 4'ten 8'e çıkartılmasının önerilen dalga formunun BER performansına herhangi bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, faz dizilerinin boyunun artırılmasının PTS-AC-OFDM dalga formunun BER performansını zayıflatarak K-OFDM dalga formundan daha zayıf bir başarıma sahip olmasına neden olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmada dikkate alınan dalga formlarının başarımlarını farklı faz dizilerinin boyunun  $V = 4$  olduğu başarımlardaki gibi korunmaktadır.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu makalede, çok taşıyıcı iletişim teknolojilerinin en önemli dezavantajlarından biri olan PAPR sorununa bir çözüm olarak Lazy dalgacığı kullanan LLWT dönüşümü ile PTS ve AC tekniğinin birleştirilmesi önerilmiştir. Önerilen LLWT-PTS-AC yöntemi, klasik OFDM dalga formu üzerinde denemiştir. Rastgele faz dizilerinin boyunun 4 ve 8 olarak alınıp elde edilen sonuçlarda önerilen tekniğin K-OFDM dalga formunun PAPR performanslarında 5.5 ile 8 dB arasında önemli iyileştirmeler sağladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, önerilen LLWT-PTS-AC tekniğinin K-OFDM dalga formunun BER-SNR performanslarına da önemli katkıların olduğu anlaşılmıştır. Özellikle 4-QAM modülasyonunda AWGN kanal ortamında yaklaşık olarak 6 dB'lik SNR kazancı sağlanması bu çalışmanın en önemli sonuçlarında birisidir. Öte yandan, faz dizilerinin boyunun artırılmasının BER performanslarına herhangi bir katkı sağlamadığı gibi PTS-AC-OFDM dalga formunun BER performansını daha da kötüleştirdiği gözlenmiştir. Bunun sebebi, PTS-AC-OFDM dalga formunda rastgele faz dizilerinin boyunun artırılmasının ve kullanılan kırpmaya eşliğinin BER-SNR performansı için uygun olmaması ile açıklanabilir. Farklı boylardaki faz dizilerinin ve kırpmaya seviyelerinin denemesi daha sonraki çalışmalar için araştırma konusu olabilir. Böylece, önerilen yöntem sayesinde hem BER performanslarında hem de PAPR performanslarında önemli kazançlar elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntem, ZT-DFTs-OFDM, GFDM, UFMF, F-OFDM v.b. gibi OFDM dalga formuna alternatif dalga formları üzerinde de denenebilir. Bu sonuçların ışığında, Önerilen LLWT-PTS-AC yöntemi ile klasik OFDM dalga formunun birleştirilmesi tekniğinin 6G ve ötesi yeni nesil iletişim sistemlerinde rahatlıkla kendine yer bulabileceği anlaşılmaktadır.

#### Kaynaklar (References)

1. Singal A. and Kedia D., Complexity analysis of SLM PAPR reduction schemes in wireless OFDM system, 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai-India 2016-2017, 3-5 March 2016.
2. Cimini L. J. and Sollenberger N. R., Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences, IEEE Communications Letters, 4 (3), 86-88, 2000.
3. Bai J., Li Y., Cheng W., Du H. and Wang Y., A novel peak-to-average power ratio reduction scheme via tone reservation in OFDM systems, China Communications, 14 (11), 279-290, 2017.
4. Gu X., Baek S. and Park S., PAPR reduction of OFDM signal using an efficient SLM technique, 2010 The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Gangwon, Korea (South), 324-328, 7-10 February 2010.
5. Wang L. and Liu J., PAPR reduction of OFDM signals by PTS with grouping and recursive phase weighting methods, IEEE Transactions on Broadcasting, 57 (2), 299-306, 2011.
6. Yoo S., Yoon S., Kim S. Y. and Song I., A novel PAPR reduction scheme for OFDM systems: selective mapping of partial tones (SMOPT), 2006 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, NV, USA, 287-288, 7-11 January 2006.
7. Bouquet E., Haese S., Drissi M., Moullec C. and Sayegrih K., An innovative and low complexity PAPR reduction technique for multicarrier systems, 2006 European Conference on Wireless Technology, Manchester, UK, 162-165, 10-12 September 2006.
8. Wang C.-L. and Ouyang Y., Low-complexity selected mapping schemes for peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems, IEEE Transactions on Signal Processing, 53 (12), 4652-4660, 2005.
9. Jiao Y. Z., Liu X. J. and Wang X. A., A novel tone reservation scheme with fast convergence for PAPR reduction in OFDM systems, 2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, NV, USA, 398-402, 10-12 January 2008.
10. Armstrong J., New OFDM peak-to-average power reduction scheme, IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001, Rhodes, Greece, 756-760, 6-9 May 2001.
11. Deumal M., Vilella C., Pijoan J. L. and Bergada P., Partially clipping (PC) method for the peak-to-average power ratio (PAPR) reduction in OFDM, 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Barcelona, Spain, 464-468, 5-8 September 2004.
12. Kliks, A., Bogucka, H., Improving effectiveness of the active constellation extension method for PAPR reduction in generalized multicarrier signals, Wireless Personal Communications, 61, 323-334, 2011.
13. Wang X., Tjhung T. T. and Wu Y., On the SER and spectral analyses of a-law companded multicarrier modulation, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 52 (5), 1408-1412, 2003.
14. Moazzeni T.; Selvaraj H. and Jiang Y., A novel multi-exponential function-based companding technique for uniform signal compression over channels with limited dynamic range, International Journal of Electronics and Telecommunications, 56 (2), 2010.
15. Huang X., Lu J., Zheng J. and Gu J., Reduction of PAPR of OFDM signals with piecewise-scales transform, IEEE 56th Vehicular Technology Conference, Vancouver, BC, Canada, 1240-1243, 24-28 September 2002.
16. Cuteanu V. and Isar A., PAPR reduction of OFDM signals using hybrid clipping-companding scheme with sigmoid functions, 2011 International Conference on Applied Electronics, Pilsen, Czech Republic, 1-4, 7-8 September 2011.
17. Lakshmanan M. K. and Nikoogar H., A review of wavelets for digital wireless communication, Wireless Personal Communications, 37 (10), 387-420, 2006.
18. Üstündağ M., Avcı E., Gökbulut M., Ata F., Denoising of weak radar signals using wavelet packet transform and genetic algorithm, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (2), 375-383, 2014.
19. Toraman S., Türkoğlu İ., A new method for classifying colon cancer patients and healthy people from FTIR signals using wavelet transform and machine learning techniques, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 933-942, 2020.
20. Negash B. G. and Nikoogar H., Wavelet-based multicarrier transmission over multipath wireless channels, IEE Electronics Letters, 36 (21), 1787-1788, 2000.
21. Sweldens W., The lifting scheme: A construction of second generation wavelets, SIAM Journal of Mathematical Analysis, 29 (2), 511-546, 1998.
22. Baro M. and Ilow J., PAPR reduction in OFDM using wavelet packet pre-processing, 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2008), Las Vegas, NV, USA, 195-199, 10-12 January 2008.
23. Taşpınar N. and Bozkurt Y.T., PAPR reduction using genetic algorithm in lifting-based wavelet packet modulation systems, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 24, 184-195, 2016.
24. Bozkurt Y. T., Peak-to-average power ratio reduction techniques in wavelet packet modulation systems, Ph.D. Dissertation, Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kayseri, September 2017.
25. Kulkarni V. M. and Bhalchandra A. S., An overview of various techniques to reduce the Peak-to-average power ratio in multicarrier transmission systems, 2012 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Coimbatore, India, 1-5, 18-20 December 2012.
26. Yıldırım M., Peak-to-average power ratio reduction by using intelligent optimization techniques in wireless communication systems, Ph.D. Dissertation, Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kayseri, January 2018.
27. Zhang X., Duan Y. and Tao G., The research of peak-to-average power ratio performance by optimum combination of partial transmit sequences in MIMO-OFDM system, 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, China, 4476-4479, 16-18 October 2010.
28. O'Neill R. and Lopes L. B., Envelope variations and spectral splatter in clipped multicarrier signals, Proceedings of 6th International

- Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Toronto, ON, Canada, 71-75, 27-29 September 1995.
29. Tek Y. İ., Yaşar S., Sinop H., Karaerik K., Tuna E. B. and Özen A., PAPR reduction method for next generation waveforms, 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Gaziantep, Turkey, 1-4, 5-7 October 2020.
30. Tengizler B., Sequential LWT-PTS-AC-OFDM waveform for PAPR reduction, Bachelor Degree Dissertation, Nuh Naci Yazgan University, Kayseri, June 2022.