





## Katı Hal Güç Kuvvetlendiricisinin LC-GFDM İletim Sinyali Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

### Investigation of the Effect of Solid State Power Amplifier on LC-GFDM Transmission Signal

<sup>1</sup>Sakir ŞİMŞİR , <sup>2</sup>Necmi TAŞPINAR 

<sup>1</sup>Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye

<sup>2</sup>Erciyes Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>1</sup>sakirsimsir@nevsehir.edu.tr, <sup>2</sup>taspinar@erciyes.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 9 August 2022

Accepted : 13 September 2022

##### Keywords:

LC-GFDM, Solid State Power Amplifier, 5G, High Power Amplifier, PAPR

#### ABSTRACT

In this study, solid state power amplifier (SSPA), which is among the most widely used high power amplifiers, was applied to the transmitter of low complex-generalized frequency division multiplexing (LC-GFDM), and it is aimed to reveal the effect of such nonlinear high power amplifiers on the LC-GFDM transmission signal and system performance. To this end, both the spectral characteristic and bit error rate performance of the LC-GFDM waveform was investigated for diversified values of smoothness coefficient ( $p$ ) and input back off (IBO) parameters determining the degree of linearity and operating point of SSPA, respectively. In the simulation studies, it was observed that the distortions happening in the LC-GFDM signals with high PAPR as a result of amplification with SSPA cause serious enhancements in the amounts of both out-of-band radiation and bit error rate. On the other hand, it was demonstrated that the aforementioned enhancements can be controlled via the IBO and  $p$  parameters.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 9 Ağustos 2022

Kabul : 13 Eylül 2022

##### Anahtar Kelimeler:

LC-GFDM, Katı Hal Güç Kuvvetlendiricisi, 5G, Yüksek Güç Kuvvetlendiricisi, PAPR

#### ÖZET

Bu çalışmada, en yaygın kullanılan yüksek güç kuvvetlendiricileri arasında yer alan katı hal güç kuvvetlendiricisi (SSPA), düşük karmaşıklık-genelleştirilmiş frekans bölmeli çoğullama (LC-GFDM) vericisine uygulanmış olup, bu tür doğrusal olmayan yüksek güç kuvvetlendiricilerinin, LC-GFDM iletim sinyali ve sistem performansı üzerindeki etkisinin ortaya konması hedeflenmiştir. Bu amaçla, LC-GFDM dalga formunun hem spektral karakteristiği hem de bit hata oranı (BER) performansı, SSPA'nın sırasıyla doğrusallık derecesi ve çalışma noktasını belirleyen düzgünlük katsayısı ( $p$ ) ve giriş geri çekme (IBO) parametrelerinin çeşitli değerleri için incelenmiştir. Simülasyon çalışmalarında, yüksek PAPR'lı LC-GFDM sinyallerinde SSPA ile gerçekleştirilen kuvvetlendirme sonucu meydana gelen bozulmaların hem bant dışı radyasyon hem de bit hata oranı miktarlarında ciddi artışlara neden olduğu görülmüştür. Diğer taraftan IBO ve  $p$  parametreleri ile söz konusu artışların kontrol edilebileceği ortaya konmuştur.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Dördüncü nesil (4G) haberleşme teknolojisinin 2010 yılı civarında hayatımıza girmesiyle birlikte, yüksek veri hızlarında kaliteli iletişim olanaklarından faydalanmak mümkün hale gelmiştir. Ancak, on yıldan daha kısa bir süre içerisinde, özellikle akıllı telefonlar ve mobil internet uyumlu diğer insan odaklı akıllı cihazların kullanımındaki aşırı artış, mobil veri trafiğinin daha önce hiç olmadığı kadar artmasına neden olmuştur. Veri trafiğindeki bu büyük artışla birlikte, sürekli gelişen mobil servisler ve uygulamalar mevcut hücreli sistemlerin limitlerini artık zorlamaya başlamıştır. Bir de, nesnelere interneti (IoT) ve makine tipi haberleşme (MTC) gibi yakın gelecekte hayatımızın bir parçası olması beklenen yeni teknolojilerin yaygınlaşması ile birlikte, 4G'den 5G ve ötesi haberleşme teknolojilerine geçiş kaçınılmaz hale gelecektir [1-4].

Hali hazırda 4G haberleşme sistemlerinde, dikgen frekans bölme (OFDM) olarak isimlendirilen dalga formu kullanılmaktadır [5-7]. Çok taşıyıcı bir dalga formu olması nedeniyle OFDM, çok yönlü ortamlarda kullanılmaya oldukça uygun olup frekans seçici sönmeye karşı dayanıklı bir yapıya sahiptir. Ancak, bant dışı emisyon problemine sahip olması, kullanıcılar arası girişimi önlemek için alt taşıyıcılar arasında senkronizasyon işlemine ihtiyaç duyması ve frekans kaymalarına olan hassasiyeti, OFDM dalga formunun 5G ve ötesi haberleşme teknolojilerinin ihtiyaçlarını ne derecede karşılayabileceğinin sorgulanmasına yol açmış olup, araştırmacıları yeni nesil haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere OFDM'ye alternatif yeni dalga formları geliştirmeye itmiştir.

Genelleştirilmiş frekans bölme (GFDM) [8], mevcut 4G haberleşme sistemlerinde etkin olarak kullanılmakta olan OFDM dalga formunun sahip olduğu zayıflıklar göz önünde bulundurularak 5G ve ötesi haberleşme teknolojilerinin ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilmiş olan yeni bir dalga formudur. Sahip olduğu eşsiz özellikler sayesinde, GFDM dalga formunun ilerde OFDM yerine kullanılma potansiyeline sahip 5G ve ötesi dalga formu adayları arasında yerini alması çok uzun sürmemiştir. GFDM sisteminde alt taşıyıcıların her biri hem zaman hem de frekans domeninde dairesel olarak kaydırılan prototip bir filtre vasıtasıyla filtrelenmektedir. Bu filtreleme işlemi, bant dışı emisyonun bastırılmasını mümkün kılıp, kullanıcılar arasında ciddi bir girişime mahal vermeden dinamik bir spektrum tahsisi gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bunun haricinde, GFDM sisteminin verici kısmında ayarlanabilir filtre kullanımı sayesinde, yüksek frekans lokalizasyon karakteristiklerine sahip iletim sinyalleri elde edilebilmektedir. Ayrıca, GFDM sisteminde hem zaman hem de frekans domeninde çok kullanıcı düzenleme yapmak mümkündür [8-10].

Diğer taraftan, GFDM dalga formunun bilim dünyasına sunulması üzerinden çok fazla süre geçmeden, ilgili dalga formunun LC-GFDM olarak isimlendirilen düşük karmaşıklık (LC) bir versiyonu geliştirilmiştir [11]. Bu yeni GFDM varyantında hem iletim sinyali üretimi hem de alınan sinyalin demodülasyonu, orijinal GFDM sistemine göre daha az hesaplama karmaşıklığı ile gerçekleştirilebilmektedir. LC-GFDM dalga formu ile, OFDM'ye ait birçok zayıflık giderilmiştir. Ancak çok taşıyıcı dalga formlarının kronik bir sorunu olarak bilinen yüksek tepe gücü/ortalama güç oranı (PAPR) problemine, LC-GFDM dalga formunda da rastlanmaktadır. Doğrusal olmayan yüksek güç kuvvetlendiricileri (HPA), iletim sinyallerinin kuvvetlendirilmesinde kullanılan, haberleşme sistemlerinin vazgeçilmez elemanlarından bir tanesidir. Bu tür kuvvetlendiricilerin doğru bir şekilde çalışabilmesi için, girişlerine uygulanan iletim sinyallerinin düşük PAPR değerlerine sahip olması gerekir. Aksi takdirde, yüksek PAPR'lı sinyaller, doğrusal olmayan HPA'ları doyuma ulaştırarak sağlıklı bir kuvvetlendirme işlemi gerçekleştirilmesine engel olmaktadır. Bunun sonucunda da sinyallerde bozulmalar meydana gelmekte ve sistem performansı düşmektedir. Bu çalışmada, oldukça yaygın bir kullanım alanına sahip bir tür doğrusal olmayan HPA modeli olan katı hal güç kuvvetlendiricisi (SSPA) [12], LC-GFDM vericisine entegre edilerek, LC-GFDM dalga formunun güç spektral yoğunluğu (PSD) ve bit hata oranı (BER) performansında meydana gelen değişim, söz konusu kuvvetlendiricinin çalışma noktasını belirleyen giriş geri çekme (IBO) parametresi ile doğrusallık derecesini tayin eden düzgünlük katsayısının ( $p$ ) farklı değerleri için incelenmiştir.

Doğrusal olmayan HPA'ların OFDM sistem performansı üzerindeki etkisi ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur [13-16]: [13]'te, OFDM sisteminin bit hata oranı performansının SSPA tabanlı sinyal kuvvetlendirme işlemi kaynaklı doğrusal olmayan bozulmalar tarafından nasıl etkilendiği üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Aynı çalışmada, doğrusal olmayan bozulma yoğunluğunu belirleyen parametreleri kontrol etmek için bazı analitik ifadeler geliştirilmiştir. [14]'te, farklı HPA türleri, OFDM sisteminin bit hata oranı ve güç spektral yoğunluğu performansı üzerindeki etkileri bakımından, değişik alt taşıyıcı sayıları, modülasyon teknikleri ve IBO değerleri için analiz edilmiştir. [15]'te, HPA'nın doğrusal olmama durumunu telafi etmek için kullanılan ön-bozucunun varlığında, OFDM sisteminin bit hata oranı performansında meydana gelen değişim, birkaç IBO değeri için incelenmiştir. [16]'da, frekans çoğullamalı OFDM sinyallerinin doğrusal olmayan bir HPA ile kuvvetlendirilmesinin spektral büyüme ve bit hata oranı performansı üzerindeki etkisi simülasyon çalışmaları vasıtasıyla değerlendirilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de, LC-GFDM sisteminde sinyal üretimi açıklanmıştır. Bölüm 3'te, SSPA ve çalışma prosedürü hakkında detaylı bir bilgilendirme yapılmıştır. Bölüm 4'te simülasyon sonuçlarının sunumu gerçekleştirilmiştir ve son olarak Bölüm 5'te verilen sonuç kısmıyla makale sonlandırılmıştır.

## 2. LC-GFDM SİSTEMİNDE SİNYAL ÜRETİMİ

LC-GFDM iletim sinyalinin üretilmesi için gereken işlemlerin yer aldığı blok diyagram Şekil 1'de gösterilmektedir [11, 17]. Şekil 1'den de açıkça görüleceği üzere, sinyal üretim sürecinde gerçekleştirilmesi gereken ilk işlem, bilgi bitlerinin ( $b$ ) dördün genlik modülasyonu (QAM) sembollerine dönüştürülmesidir. QAM modülasyon işleminin ardından elde edilmiş olan ve  $N$  adet QAM sembolü içeren  $d$  veri vektörü, aşağıdaki gibi tanımlanan  $K$ -uzunluklu veri dizilerine ayrılır [11, 17]:

$$d_m = [d_{0,m}, d_{1,m}, \dots, d_{K-1,m}] \quad , \quad 1 \leq m \leq M \quad (1)$$

Burada  $M$  değişkeni,  $K$ -uzunluklu veri dizilerinin sayısını ifade etmektedir. Daha sonra, ilgili veri dizilerinin her birine aşağıdaki gibi ters hızlı Fourier dönüşüm (IFFT) işlemi uygulanır [11, 17]:

$$d_m[n] = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{K-1} d_{k,m} e^{j\frac{2\pi kn}{K}} \quad , \quad 0 \leq n \leq K-1 \quad , \quad 1 \leq m \leq M \quad (2)$$

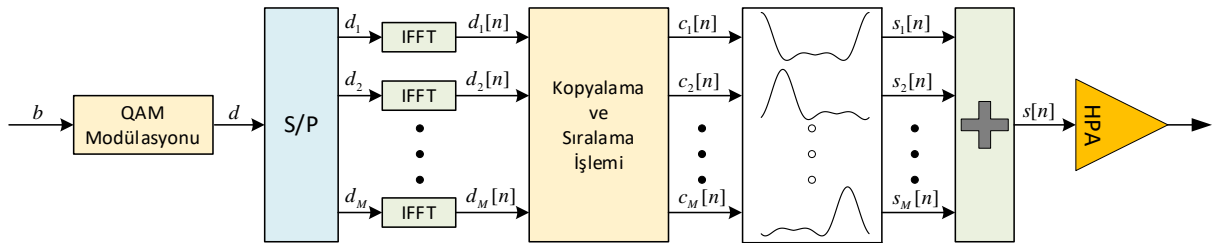
IFFT işleminin ardından, her bir  $d_m[n]$  dizisinin  $M$  adet kopyası alınır. Sonrasında, elde edilen kopyalar, zaman domeninde yan yana sıralanarak her biri  $N = MK$  uzunluğuna sahip olan  $c_m[n]$  dizileri aşağıdaki gibi elde edilir [11, 17]:

$$c_m[n] = \left[ \begin{array}{c} \overbrace{[d_m[0], d_m[1], \dots, d_m[K-1]]}^1, \overbrace{[d_m[0], d_m[1], \dots, d_m[K-1]]}^2 \\ \vdots \\ \overbrace{[d_m[0], d_m[1], \dots, d_m[K-1]]}^M \end{array} \right] \quad , \quad 0 \leq n \leq MK-1 \quad (3)$$

Sonuç olarak, iletim sinyali aşağıdaki gibi elde edilir [11, 17]:

$$s[n] = \sum_{m=1}^M g \left[ \langle n - (m-1)K \rangle_N \right] c_m[n] \quad , \quad 0 \leq n \leq MK-1 \quad , \quad 1 \leq m \leq M \quad (4)$$

Yukarıdaki ifadede, prototip filtreye ait  $g[n]$  ile belirtilen dürtü cevabı,  $\langle \bullet \rangle_N$  modülü operatörü kullanılarak her bir  $m$  değeri için dairesel olarak kaydırılmaktadır. LC-GFDM çıkışından elde edilen iletim sinyali daha sonra doğrusal olmayan HPA girişine beslenerek kuvvetlendirme işlemi gerçekleştirilir. Son olarak kuvvetlendirilmiş sinyal, kanala verilerek iletme sokulur.

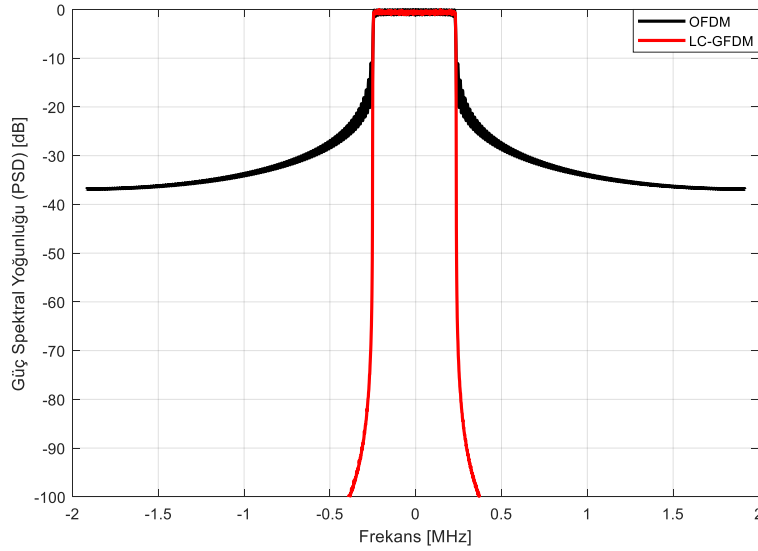


Şekil 1. LC-GFDM blok diyagramı.

Şekil 2'de, geleneksel OFDM ve LC-GFDM dalga formlarına ait güç spektral yoğunluğu grafikleri karşılaştırılmıştır. Sahip olduğu spektral karakteristik bakımından, LC-GFDM dalga formunun OFDM üzerindeki üstünlüğü Şekil 2'de net bir şekilde görülmektedir. LC-GFDM dalga formunda gerçekleştirilen sinyal üretim prosedürü sayesinde, şekilde görüldüğü gibi çok düşük yan lob seviyeleri elde etmek mümkündür. Söz konusu güç spektral yoğunluğu grafiklerinin elde edilmesi için kullanılan parametre değerleri Tablo 1'de yer almaktadır.

## 3. SSPA'NIN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Doğrusal olmayan HPA'ların popüler bir temsilcisi olarak SSPA, belirli bir seviyenin üzerinde PAPR değerlerine sahip sinyallerde, kuvvetlendirme işlemi sırasında bozulmalar meydana getirmektedir. Bu gibi sinyal bozulmaları, sadece spektral büyüme ile sonuçlanmayıp, bit hata oranı performansını da olumsuz yönde etkilemektedir. SSPA girişine verilen sinyal ve ilgili sinyalin kuvvetlendirilmiş versiyonu sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [12]:



Şekil 2. OFDM ve LC-GFDM dalga formları arasında güç spektral yoğunluğu karşılaştırması.

$$x(n) = |x(n)|e^{j\theta(n)} \quad (5)$$

$$r(n) = A_{SSPA}(|x(n)|)e^{j\{\theta(n)+\phi_{SSPA}(|x(n)|)\}} \quad (6)$$

Burada  $|x(n)|$ ,  $\theta(n)$ ,  $A_{SSPA}(|x(n)|)$  ve  $\phi_{SSPA}(|x(n)|)$  sırasıyla giriş sinyali genliği, giriş sinyali fazı, çıkış sinyali genliği ve çıkış sinyali fazını ifade etmektedir.  $A_{SSPA}(|x(n)|)$  ve  $\phi_{SSPA}(|x(n)|)$  ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [12]:

$$A_{SSPA}(|x(n)|) = \frac{|x(n)|}{\left[1 + (|x(n)|/A_0)^{2p}\right]^{1/2p}} \quad (7)$$

$$\phi_{SSPA}(|x(n)|) = 0 \quad (8)$$

Burada  $p$  ve  $A_0$ , sırasıyla SSPA'nın doğrusallığını belirleyen düzgünlük parametresi ve çıkış doyum genliğini sembolize etmektedir.  $p$  parametresi SSPA'nın doğrusallığını kontrol ettiğinden dolayı,  $p$  değerindeki artış, kuvvetlendirilen sinyallerde daha az bozulma meydana gelmesini sağlamaktadır.

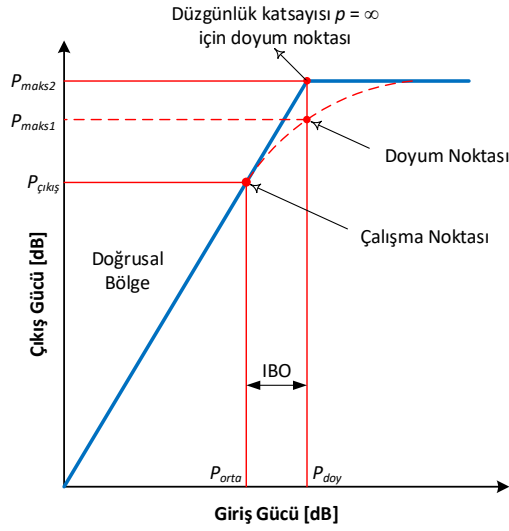
Diğer taraftan, aşağıdaki gibi ifade edilen IBO parametresi ayarlanarak SSPA'nın çalışma noktasının belirlenmesi mümkün olabilmektedir [12]:

$$IBO = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{doy}}{P_{orta}} \right) \quad (9)$$

Burada giriş sinyaline ait ortalama güç değeri ve SSPA'nın doyum gücü, sırasıyla  $P_{orta}$  ve  $P_{doy}$  ile ifade edilmektedir. Büyük IBO değerleri için, SSPA'nın çalışma noktası doğrusal bölge civarında olacaktır ve buna bağlı olarak sinyaller daha az bozulmayla kuvvetlendirilecektir. Bu durum, daha iyi bit hata oranı performansı ve daha az spektral büyüme ile sonuçlanacaktır. Ancak, IBO değeri ile kuvvetlendirme verimi arasında bir ödünleşim mevcuttur. IBO değeri artırıldıkça, SSPA'nın kuvvetlendirme veriminin kötüye gittiği unutulmamalıdır. Doğrusal olmayan bir HPA'nın kuvvetlendirme karakteristiği Şekil 3'te gösterilmektedir [12].

#### 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada ilk olarak, iletim sinyallerinin kuvvetlendirilmesi için SSPA'nın LC-GFDM vericisine entegrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra SSPA'nın, LC-GFDM dalga formunun hem bant dışı radyasyon hem de bit hata oranı performansı üzerindeki etkisi, sırasıyla PSD ve sinyal/gürültü oranı (SNR) – BER grafikleri vasıtasıyla incelenmiştir. Simülasyon parametreleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

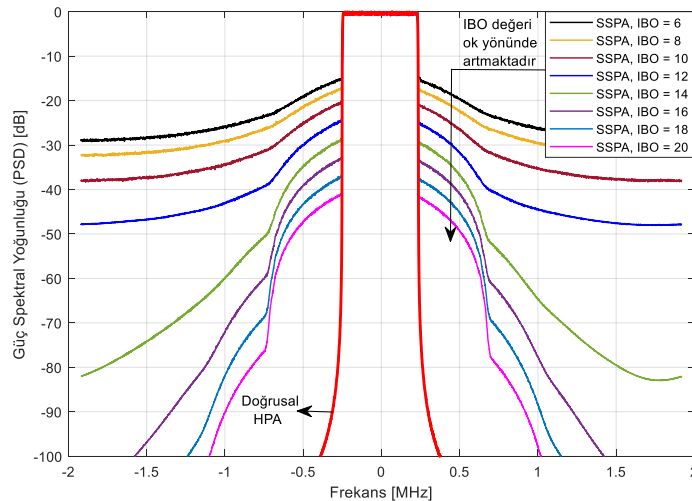


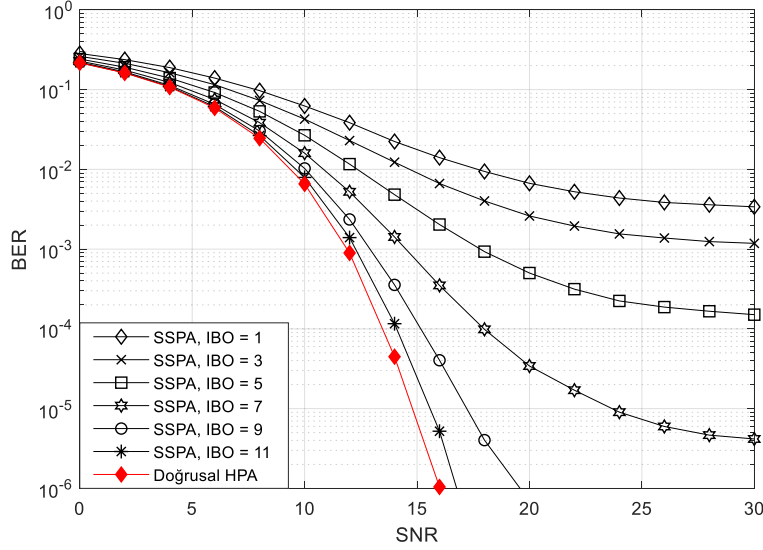
Şekil 3. Doğrusal olmayan HPA'ya ait kuvvetlendirme karakteristiği eğrisi.

Tablo 1. Simülasyon parametreleri.

FFT boyutu	256
Alt taşıyıcı sayısı	$K = 32$
GFDM sembollerinin sayısı	$M = 15$
Üst örnekleme faktörü	$L = 8$
Yuvarlanma (roll-off) faktörü	$\alpha = 0.5$
Örnekleme frekansı	3.84 MHz
Verici filtresinin türü	Kök yükseltilmiş kosinüs (rrc)
Alıcı filtresinin türü	Sıfır zorlama (ZF)
Kanal modeli	AWGN
Modülasyon türü	4-QAM
HPA modeli	SSPA

Şekil 4'te, LC-GFDM dalga formunun güç spektral yoğunluğu grafiği, 6 dB'den ikişer dB'lik aralıklarla 20 dB'ye kadar artırılan IBO değerleri için elde edilmiştir. Bu simülasyon için düzgünlük katsayısı  $p = 2$  olarak belirlenmiştir. Farklı IBO değerleri için elde edilmiş olan söz konusu PSD eğrilerinin yanı sıra, SSPA'nın neden olduğu spektral büyüme miktarını net olarak gözlemleyebilmek için, LC-GFDM sisteminde doğrusal HPA ile bozunumsuz kuvvetlendirme işleminin gerçekleştirilmesi durumunda elde edilen PSD eğrisi de Şekil 4'e eklenmiştir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, IBO değeri artırdıkça, bant dışı emisyon miktarı da bastırılmakta olup, LC-GFDM dalga formunun güç spektral yoğunluğu eğrisi, sadece doğrusal HPA kullanılarak elde edilebilen orijinal formuna yaklaşmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü IBO değeri artırıldığında, SSPA'nın çalışma noktası doyum bölgesinden doğrusal bölgeye doğru kayar. SSPA doyum bölgesinden ne kadar uzakta çalıştırılırsa, sinyaller de kuvvetlendirme işlemi boyunca o kadar az bozulmaya uğrar. Bunun sonucunda da, sinyal bozulmasından kaynaklanan bant dışı emisyon miktarı düşer ve LC-GFDM dalga formuna ait PSD eğrisi ideal formuna yaklaşır.

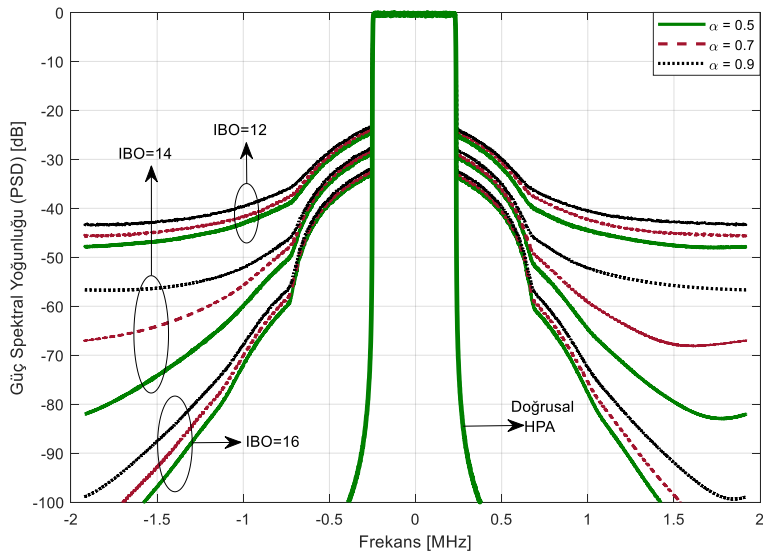
Şekil 4. Farklı IBO değerleri için LC-GFDM dalga formuna ait güç spektral yoğunluğu eğrileri ( $p = 2$ ).



Şekil 5. Çeşitli IBO değerleri için LC-GFDM dalga formunun bit hata oranı performansı ( $p = 2$ ).

Şekil 5'te, LC-GFDM dalga formunun bit hata oranı performansı, farklı IBO değerleri için incelenmiştir. BER eğrileri sırasıyla 1 dB, 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB ve 11 dB IBO değerleri için elde edilmiş olup, LC-GFDM sinyalinin doğrusal HPA ile bozunumsuz olarak kuvvetlendirilmesi durumunda elde edilen BER eğrisi de Şekil 5'e eklenmiştir. Bir önceki PSD analizinde olduğu gibi SSPA'ya ait düzgünlük parametresi  $p = 2$  olarak tayin edilmiştir. Şekilden de kolayca anlaşılacağı üzere, IBO değerindeki artışla birlikte, LC-GFDM dalga formunun bit hata oranı her bir SNR değeri için düşmektedir. Örneğin, 16 dB SNR değerinde, IBO = 1 dB, 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB ve 11 dB için ulaşılan bit hata oranı seviyeleri sırasıyla  $1.40 \times 10^{-2}$ ,  $6.64 \times 10^{-3}$ ,  $2.03 \times 10^{-3}$ ,  $3.51 \times 10^{-4}$ ,  $4.04 \times 10^{-5}$  ve  $5.21 \times 10^{-6}$  olmaktadır. Bu da beklenen bir sonuçtur, çünkü Şekil 4'te de bahsedildiği üzere, IBO değerindeki artış, sinyallerin SSPA tarafından daha az bozulmayla kuvvetlendirilmesine neden olmaktadır. Alıcıya gelen sinyal ne kadar az bozulmaya maruz kalmışsa, söz konusu sinyalden bilgi biti dizisini elde etmek o kadar kolaylaşacak olup, bit hata oranı da o kadar azalacaktır.

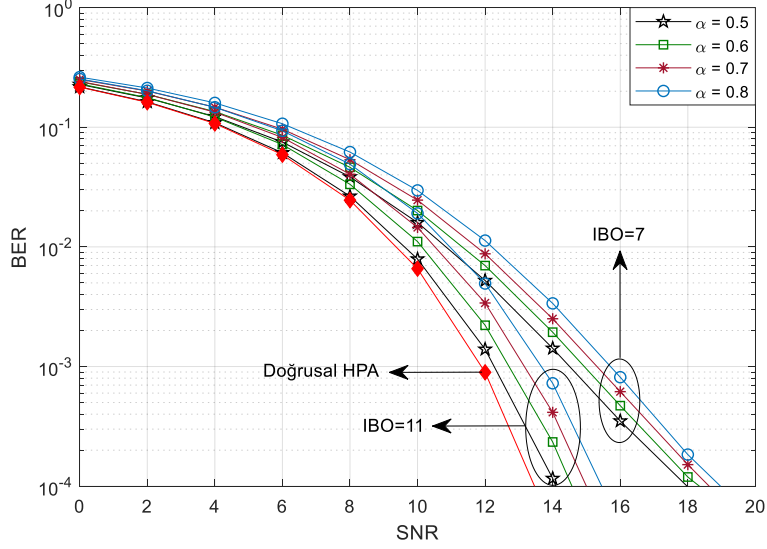
Şekil 6'da LC-GFDM vericisinde kullanılan rrc filtresinin  $\alpha = 0.5$ ,  $\alpha = 0.7$  ve  $\alpha = 0.9$  yuvarlanma faktörü değerleri için sırasıyla 12 dB, 14 dB ve 16 dB IBO değerlerinde elde edilmiş olan PSD eğrileri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, en yüksek yan lob seviyeleri IBO = 12 dB için elde edilirken, en düşük yan lob seviyeleri en yüksek IBO değeri olan 16 dB için elde edilmiştir. Diğer taraftan, yuvarlanma faktörü değerindeki artışla birlikte, yan lob seviyelerinde her bir IBO değeri için oldukça belirgin yükselmeler gözlemlenmiştir. Örneğin IBO = 14 dB için, yuvarlanma faktörü değerinin  $\alpha = 0.5$ 'ten  $\alpha = 0.9$ 'a artırılması, yan lob seviyesinde 25.33 dB'lik bir yükselişe neden olmuştur. Bu durum, yuvarlanma faktörü değerindeki artışın LC-GFDM iletim sinyalinin PAPR değerinde yol açtığı yükselmeden kaynaklanmaktadır. Söz konusu PAPR yükselmesinin arkasında yatan ana neden, iletim sinyalindeki dikgenlik kaybı sonucu meydana gelen semboller arası girişimdir. Dikgenlik kaybı, yuvarlanma faktörü değerindeki artıştan kaynaklandığı için,  $\alpha$  değerindeki her bir artış PAPR büyümesine ve buna bağlı olarak da bant dışı radyasyon miktarının yükselmesine neden olmaktadır.



Şekil 6. Kök yükseltilmiş kosinüs (rrc) filtresinin üç farklı yuvarlanma faktörü değeri için farklı IBO değerlerinde elde edilen PSD eğrileri ( $p = 2$ ).

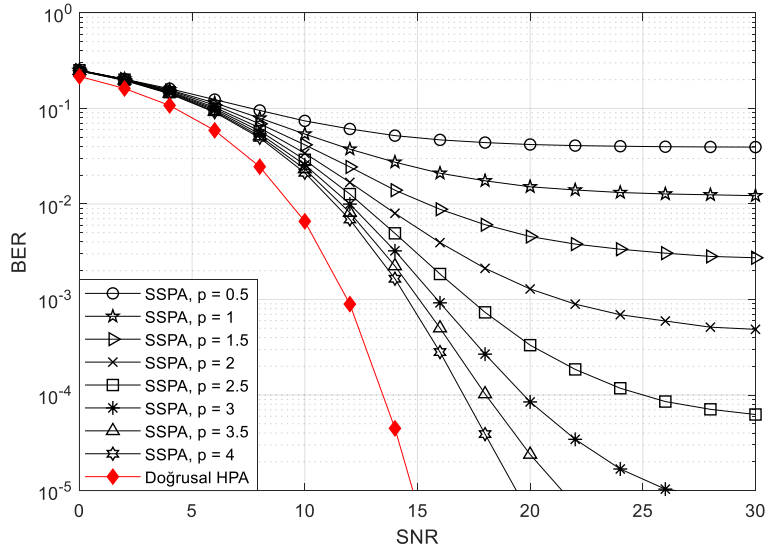


Şekil 7’de,  $\alpha = 0.5$ ,  $\alpha = 0.6$ ,  $\alpha = 0.7$  ve  $\alpha = 0.8$  yuvarlanma faktörü değerleri için LC-GFDM dalga formunun 7 dB ve 11 dB IBO değerlerinde elde edilmiş olan bit hata oranı eğrileri görülmektedir. Şekil 6’dan da bilgi sahibi olduğu gibi, yuvarlanma faktörü değerindeki artış, LC-GFDM iletim sinyalinin PAPR değerinde de artışa neden olmaktadır. PAPR değerindeki söz konusu artış, aynı zamanda SSPA tabanlı sinyal bozulmalarının da artmasına neden olmakta ve buna bağlı olarak da bit hata oranı performansının kötüleşmesine yol açmaktadır.  $\alpha$  değerindeki artışın LC-GFDM dalga formunun bit hata oranı performansında neden olduğu kötüleşme, Şekil 7’de net olarak görülmektedir. Örneğin SNR = 14 dB yatay ekseninde referans noktası olarak alınacak olursa, ilgili SNR değerinde SSPA’ya ait IBO parametresinin 11 dB olarak ayarlanması durumunda,  $\alpha = 0.5$ ,  $\alpha = 0.6$ ,  $\alpha = 0.7$  ve  $\alpha = 0.8$  yuvarlanma faktörü değerleri için sırasıyla  $1.16 \times 10^{-4}$ ,  $2.34 \times 10^{-4}$ ,  $4.14 \times 10^{-4}$  ve  $7.25 \times 10^{-4}$  bit hata oranları elde edilmektedir.



Şekil 7. İki farklı IBO değerinde rrc filtresinin artan yuvarlanma faktörü değerleri için elde edilen BER eğrileri ( $p = 2$ ).

Şekil 4-7’de düzgünlük parametresi  $p = 2$  olarak alınmıştır.  $p$  parametresi, SSPA’nın doğrusallığını belirleyen bir parametre olduğundan dolayı, söz konusu parametrenin daha büyük değerleri, LC-GFDM sisteminin güç spektral yoğunluğu ve bit hata oranı performansında iyileşmeye yol açacaktır. Daha düşük  $p$  değerlerinde ise, performans kötüleşmesi meydana gelecektir.



Şekil 8. Çeşitli  $p$  değerleri için LC-GFDM dalga formunun bit hata oranı performansı (IBO = 4 dB).

Şekil 8’de, LC-GFDM dalga formunun bit hata oranı eğrisi bu kez farklı düzgünlük katsayısı değerleri için elde edilmiştir. Bu simülasyonda, IBO değeri 4 dB olarak belirlenirken, düzgünlük katsayısı  $p = 0.5$  değerinden 0.5’lik aralıklarla  $p = 4$  değerine kadar artırılmıştır. Şekilden de kolayca anlaşılacağı üzere,  $p$  değerindeki artışla birlikte SSPA’nın doğrusallığı da artmış olup, iletim sinyali daha az bozulmayla kuvvetlendirilmiştir ve buna bağlı olarak da bit hata oranı performansında önemli iyileşmeler kaydedilmiştir. Örneğin düzgünlük katsayısının  $p = 0.5$

değerinden  $p = 4$  değerine kadar artırılması, 18 dB SNR değerindeki bit hata oranının  $4.39 \times 10^{-2}$ 'den  $3.90 \times 10^{-5}$ 'e düşmesine neden olmuştur.

Yapılan simülasyon çalışmalarından da görüldüğü üzere, SSPA ile kuvvetlendirme yapıldığı takdirde, IBO değerindeki artış, sonuçları olumlu yönde etkilerken,  $\alpha$  değerindeki artış olumsuz yönde etkilemektedir. Daha düşük yan lob seviyeleri ve bit hata oranları elde edebilmek için, SSPA ile kuvvetlendirme yapılan LC-GFDM sisteminde mantıken IBO değerinin büyük,  $\alpha$  değerinin küçük seçilmesi gerekmektedir. Ancak, yüksek IBO değerinin kuvvetlendirme verimini düşürdüğü bilinmektedir. Bu yüzden enerji veriminin geri plana atılarak spektral verimliliğe ve hatasız iletme daha fazla önem verilen sistemlerde IBO değeri yüksek seçilebilir. Enerji verimliliğinin ön plana alınarak makul bir spektral verimlilikte ve kabul edilebilir bir bit hata oranı seviyesinde haberleşme yapılması amaçlanan sistemlerde ise IBO değeri küçük seçilerek SSPA doyum bölgesine yakın çalıştırılmalıdır. Dolayısıyla, IBO değeri ve enerji verimliliği arasındaki ödünleşim de göz önünde bulundurularak, sistem gereksinimlerine göre optimum parametre değerleri belirlenmelidir.

Hem kuvvetlendirme verimini yüksek tutmak hem de daha düşük yan lob seviyesi ve BER değeri elde edebilmek için, kuvvetlendirici girişine uygulanan iletim sinyalinin PAPR değeri mümkün olduğunca düşürülerek, IBO değerinin minimum seviyede tutulması gerekmektedir. Böylelikle, SSPA doyum bölgesine yakın çalıştırılabilir, kuvvetlendirilen sinyallerin düşük PAPR değerleri, ilgili kuvvetlendiricinin doyuma ulaşma sıklığını düşürecek ve bunun sonucunda da sinyaller daha az bozulmaya uğradığı için hem spektral verimlilikte hem de BER performansında artış meydana gelecektir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, LC-GFDM dalga formunun doğrusal olmayan yüksek güç kuvvetlendiricisi altındaki performansını inceleyebilmek için, ilgili dalga formunun vericisine literatürde en çok kullanılan yüksek güç kuvvetlendiricileri arasında yer alan SSPA entegre edilmiştir. Daha sonra, LC-GFDM dalga formunun güç spektral yoğunluğu ve bit hata oranı performansı, çeşitli IBO ve  $p$  değerleri için analiz edilmiştir. Simülasyonlarda, doğrusal olmayan yüksek güç kuvvetlendiricileri belirli bir güç aralığı dışında doğrusal kuvvetlendirme işlemi gerçekleştiremedikleri için, bir tür doğrusal olmayan yüksek güç kuvvetlendiricisi olarak SSPA, yüksek PAPR değerlerine sahip LC-GFDM iletim sinyallerinde kuvvetlendirme işlemi boyunca bozulmalar meydana getirmiştir. Söz konusu sinyal bozulmalarına yol açan SSPA-tabanlı sinyal kuvvetlendirme işlemi, LC-GFDM dalga formunun güç spektral yoğunluğu ve bit hata oranı performansını da olumsuz yönde etkilemiştir. Diğer yandan, IBO ve  $p$  değerlerinin artırılarak SSPA'nın sinyal bozucu etkisinin düşürülebileceği, yapılan simülasyon çalışmalarıyla ortaya konmuştur.

## Teşekkür

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: FDK-2018-8463

## Yazar Katkıları

**Şakir Şimşir:** Teorik Analiz, Metodoloji, Kodlama, Yazma, Gözden Geçirme ve Düzenleme.

**Necmi Taşınar:** Kontrol ve Denetleme, Doğrulama, Finansman Edinimi, Proje Yönetimi.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 2016.
- [2] S.-Y. Lien, S.-L. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y.-L. Hsu, and H.-Y. Wei, "5G new radio: waveform, frame structure, multiple access, and initial access," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 6, pp. 64-71, 2017.
- [3] N. Panwar, S. Sharma, and A. K. Singh, "A survey on 5G: the next generation of mobile communication," Physical Communication, vol. 18, no. 2, pp. 64-84, 2016.
- [4] A. Fuente, R. P. Leal, and A. G. Armada, "New technologies and trends for next generation mobile broadcasting services," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 11, pp. 217-223, 2016.
- [5] L. J. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," IEEE Transactions on Communications, vol. 33, no. 7, pp. 665-675, 1985.
- [6] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "OFDM and its wireless applications: a survey. IEEE Transactions on Vehicular Technology," vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, 2009.
- [7] R. Prasad, "OFDM for Wireless Communications Systems," Artech House, 2004.
- [8] G. Fettweis, M. Krondorf, and S. Bittner, "GFDM - generalized frequency division multiplexing," IEEE



- 69th Vehicular Technology Conference, pp. 1-4, Barcelona, 2009.
- [9] N. Michailow, S. Krone, M. Lentmaier, and G. Fettweis, "Bit error rate performance of generalized frequency division multiplexing," IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pp. 1-5, Quebec City, 2012.
- [10] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, "Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks," IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 9, pp. 3045-3061, 2014.
- [11] M. Matthé, L. Mendes, I. Gaspar, N. Michailow, D. Zhang, and G. Fettweis, "Precoded GFDM transceiver with low complexity time domain processing," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2016, no. 138, pp. 1-9, 2016.
- [12] D. Di Zenobio, G. Santella, and F. Mazzenga, "Adaptive linearization of power amplifier in orthogonal multicarrier schemes," IEEE Wireless Communication System Symposium, pp. 225-230, Long Island, 1995.
- [13] T. Helaly, R. Dansereau, and M. El-Tanany, "BER performance of OFDM signals in presence of nonlinear distortion due to SSPA," Wireless Personal Communications, vol. 64, no. 4, pp. 749-760, 2012.
- [14] M. C. P. Paredes, F. Grijalva, J. C. Rodrigez, and F. Sarzosa, "Performance analysis of the effects caused by HPA models on an OFDM signal with high PAPR," IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), pp. 1-5, Salinas, 2017.
- [15] H. G. Ryu, J. S. Park, and J. S. Park, "Threshold IBO of HPA in the predistorted OFDM communication system," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 50, no. 4, pp. 425-428, 2004.
- [16] P. Banelli, G. Baruffa, and S. Cacopardi, "Effects of HPA nonlinearity on frequency multiplexed OFDM signals," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 47, no. 2, pp. 123-136, 2001.
- [17] Ş. Şimşir, and N. Taşpınar, "Cumulative symbol optimization-based partial transmit sequence technique for PAPR reduction in low complexity GFDM system," Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol. 31, no. 6, pp. 1-19, 2020.