

# Alt Taşıyıcı ve Alt Sembol Seçim Sayısı ile Roll-Off Faktörünün GFDM Dalga Formunun Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Meryem Maraş, Elif Nur Ayvaz, Asuman Savaşçıhabeş, Ali Özen

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi - HARGEM

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Kayseri

marasfunda@gmail.com, elifnurayvaz@gmail.com, ahabes@nny.edu.tr, aozen@nny.edu.tr

**Özet:** 5G ve ötesi telsiz haberleşme sistemlerinin dalga formu adaylarından Genelleştirilmiş Frekans Bölmeli Çoğullama (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM) dalga biçiminin esnek yapısı sayesinde gelecek nesil dalga formları arasında önemli bir yeri bulunmaktadır. GFDM, farklı kanal modelleri için SER performansının analizi, alıcıları kullanarak kanal kodlu GFDM iletimi için BER performansı sağlayabilmesi açısından tercih edilmektedir. Bununla birlikte, GFDM dalga formunda alt taşıyıcı sayısı  $K$  ile alt sembol sayısı  $M$ 'nin seçiminin problemleri bilinmektedir, bu seçim büyük roll-off değerlerinde daha kötü performanslara neden olmaktadır. Bu bildiriye, farklı  $M$  ve  $K$  sayıları ile farklı roll-off faktörü değerlerinin GFDM dalga formunun performansları üzerine etkileri incelenmektedir.

**Abstract:** Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) waveform, one of the waveform candidates of 5G and beyond wireless communication systems, has an important place among the next generation waveforms thanks to its flexible structure. GFDM is preferred in terms of its ability to provide BER performance for the analysis of SER performance for different channel models, channel coded GFDM transmission using receivers. However, it is known that the selection of subcarrier number  $K$  and sub symbol number  $M$  in GFDM waveform is problematic, this selection causes worse performances at large roll-off values. In this paper, the effects of different  $M$  and  $K$  numbers and different roll-off factor values on the performances of the GFDM waveform are examined.

## 1. Giriş

Haberleşme teknolojisini sadece ses, veri ve görüntü iletiminden başka bir boyuta taşıyacak olan 5G planlaması, mevcut 4G'den daha yüksek kapasiteye, daha yüksek mobil geniş bant kullanıcı yoğunluğuna, ultra güvenilir ve kitlesel makine haberleşmesine destek sağlamaktadır. 5G, 4G teknolojisinden daha düşük bir gecikmeyi ve daha düşük pil tüketimini, nesnelerin internetinin daha iyi uygulanmasını hedeflemektedir.

Bununla birlikte, 5G telsiz haberleşmesi için düşük sistem karmaşıklığı, esnek spektrum koordinasyonu ve OFDM ile karşılaştırıldığında daha yüksek güç verimliliği sağlayan düşük tepe-ortalama-güç oranı (Peak to Average Power Ratio, PAPR) nedeniyle Genelleştirilmiş Frekans Bölmeli Çoğullama (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM) dalga formu önerildi. GFDM'in esnekliği, tek taşıyıcı frekans bölgesi denkleştirici (SC-FDE) ve filtre bankası çoklu taşıyıcı (Filter Bank Multi Carrier, FBMC) sistemleri ile işbirliğini kolaylaştırır.

GFDM, her bir alt taşıyıcının ayrı ayrı ve bağımsız olarak çoklu sembollerle modüle edildiği alt taşıyıcı başına modülasyona dayanmaktadır [1]. Bu modülasyonda alt taşıyıcı zaman ve frekans bölgelerinde dairesel olarak kaydırılan bir prototip filtre ile filtrelenir. Bu filtreleme işlemi, bant dışı yayılım (Out of Band Emission, OOB) kalıntılarının azaltılmasını ve böylece GFDM sistemine veya diğer kullanıcılara ciddi girişim oluşturmadan bölünmüş spektrum ve dinamik spektrum dağılımlarını kolaylaştırmayı amaçlar. Öte yandan, alt taşıyıcılar arasında hem ISI hem de taşıyıcılar arası girişim (Inter Carrier Interference, ICI) böyle bir filtreleme işlemi ile ortaya çıkabilir.

OFDM, tüm mevcut Wi-Fi standartlarının ve LTE'nin ve dijital abone hatları, dijital TV ve ticari radyo gibi kablolu hat teknolojilerinin temelini oluşturan yüksek hızlı kablosuz iletişim için baskın sinyal haline gelmiştir. Bu etkileyici nitelikler ve lehindeki büyük etkilere girmemesi göz önüne alındığında, OFDM, 5G için tartışılmaz bir öncüdür.

Bununla birlikte, 5G ağlarında muhtemelen daha belirgin hale gelebilecek bazı zayıf noktaları vardır. Örneğin; PAPR, OFDM'de daha yüksektir, çünkü zarf örnekleri, IFFT'deki ilişkisiz girdilerin toplamından dolayı neredeyse Gauss'tur. Her ne kadar bir Gauss sinyali dağıtım, fiili bir güç yükselticisi karşısında ortalama bir güç kısıtlaması altında kapasiteye sahip olsa da yüksek bir PAPR iletilen sinyalin doğrusallığı ile yükselticinin maliyeti arasında çekici olmayan bir işlem başlatır. Bu gibi dezavantajlar doğrultusunda yeni dalga formu arayışları ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, farklı  $K$  alt taşıyıcı ve  $M$  alt sembol sayıları ile farklı roll-off faktörü değerlerinin GFDM dalga formunun kullanıldığı çok taşıyıcı kablosuz haberleşme sistemlerinin başarımı üzerine etkileri incelenmektedir. Bu bildiriye, en iyi performansı verecek  $K$  ve  $M$  sayıları ile roll-off faktörü değerlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bildirinin geri kalan kısmında, 2. bölümde GFDM dalga formu ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. 3. bölümde bilgisayar benzetim çalışmaları ve elde edilen sonuçlar verilmektedir. Son bölümünde ise yapılan bu çalışmanın sonuçları yorumlanmaktadır.

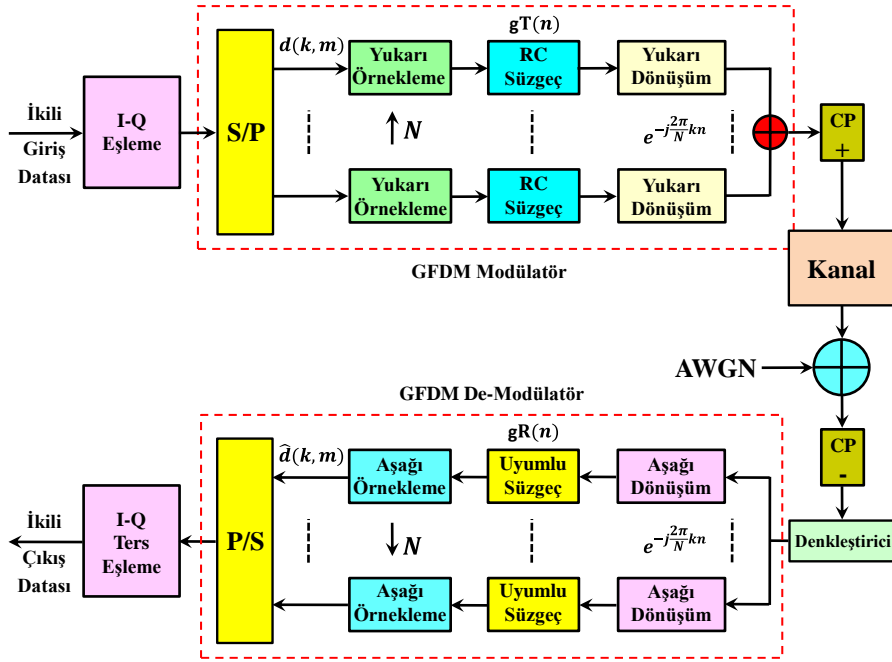
## 2. GFDM Dalga Formu

GFDM, 5G PHY tabakası için ümit vaat eden bir çözümdür çünkü esnekliği farklı ihtiyaçlara cevap verebilmektedir. Gerçek zamanlı uygulamalar için, sinyal süresi, belirli gecikme koşullarını tam olarak doldurmak için azaltılmalıdır. GFDM,  $K$  alt taşıyıcılarının her biri  $M$  alt sembollerini taşıdığı  $MK$  örneklerinin bir blok yapısında sınırlı olduğundan, düşük gecikmeli uygulamaların zaman kısıtlamalarına uymak için zaman-frekans yapısını tasarlamak mümkündür.

GFDM dalga formunu kullanan iletişim sisteminin temel alıcı-verici blok şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.

Şekil 1'de verilen GFDM sisteminin verici tarafında rastgele oluşturulan seri giriş ikili verileri, I-Q eşleme bloğu tarafından modüle edilir. Modüle edilmiş veriler, GFDM modülatör bloğunda eşleştirilir, her bir alt taşıyıcı, bir darbe şekillendirme filtresi olarak Yükseltilmiş Kosinüs (RC) filtresiyle şekillendirilir ve alt taşıyıcı,  $e^{-j2\pi kn/N}$  merkez frekansı ile modüle edilir. Nyquist kriterlerini yerine getirmek için her sembol, alt katmanda  $MN$ 'nin bir vektörünü veren  $N$  düzeyinde örneklenir. Darbe şekillendirme filtresi  $M \times N$

periyodikliğine sahip olacak şekilde seçilir. Alt taşıyıcıları şekillendirmek için farklı darbe yanıt filtreleri kullanılabilir ve bu yöntem OOBE ve Sembol Hata Oranı (SER) performansını etkiler.



Şekil 1. GFDM dalga formunun blok diyagramı.

GFDM, her bloğun bir dizi alt taşıyıcı ve alt sembolenen oluşturduğu ayrı blokların modülasyonuna dayanır. Alt taşıyıcılar, zaman ve frekans bölgesinde dögüsel olarak kaydırılan bir darbe şekillendirme filtresi olarak RC filtresi ile filtrelendirir. Bu prosedür, gömülü hizmetlerde veya diğer kullanıcılarda ciddi müdahaleye neden olmadan OOBE'yi azaltarak bölünmüş spektrum ve dinamik spektrum tahsisine izin verir. Veri sembolleri bir  $d(k, m)$  sütununa yerleştirildikten sonra, tüm semboller toplanır ve GFDM sinyali üretilir. İletişim sisteminde,  $d(k, m)$  karmaşık veri sembollerini,  $K$  taşıyıcılarını ve  $M$  alt sembollerini [2] içerir. Bu sütunları birleştirerek  $d$  matrisini elde ederiz:

$$d = \begin{bmatrix} d(0,0) & \dots & d(0, M-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(K-1) & \dots & d(K-1, M-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$K \times M$  matrisi bir bilgi bloğu olarak değerlendirilecektir. Yani,  $k = 0 \dots K-1$  alt taşıyıcıları indeksler ve  $m = 0 \dots M-1$  bir zaman aralığının elemanlarını indeksler. İletim sinyali şu şekilde ifade edilebilir;

$$x(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} d(k, m) [gT(n - mN) \bmod NM] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad 0 \leq n \leq NM-1 \quad (2)$$

Frekans seçici kanal aracılığıyla, elde edilen GFDM sinyali toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) tarafından bozulur.  $Y(n)$ 'nin alıcıda elde edilen zaman örnekleri olduğu varsayılarak, alıcıda veri denkleştirilmesi yapılır, burada  $\hat{d}(k, m)$  frekans kaymasının tersine çevrilmesi, eşleşen filtre  $gR(n)$  uygulanması ve aşağı örnekleme ile elde edilir. Bu nedenle,  $n = mN$ 'de veren sinyal (3) nolu denklemle tanımlanır:

$$\hat{d}(k, m) = \left( y(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \right) \otimes gR(n) \Big|_{n=mN} \quad (3)$$

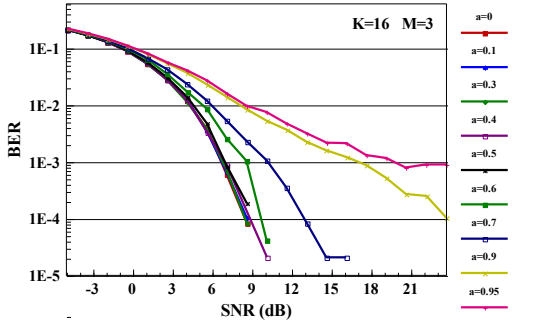
Burada,  $\otimes$ ,  $n$ 'ye göre dairesel konvolüsyonu gösterir [3]. Bozuk verileri düzelttikten sonra alıcı, Şekil 1'de gösterildiği gibi sinyali kurtarmak için verici taraftaki işlemlerin tersini gerçekleştirir.

### 3. Bilgisayar Benzetim Çalışmaları

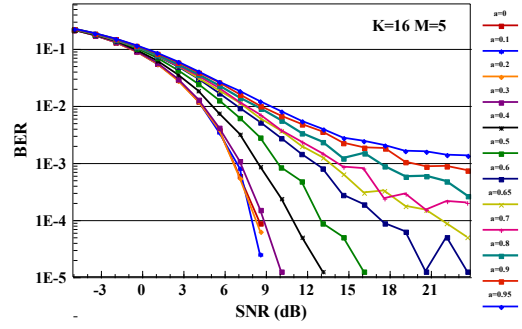
Farklı  $K$  alt taşıyıcısı ve  $M$  alt sembolleri ile farklı roll-off faktörü değerlerinin GFDM dalga formunun kullanıldığı çok taşıyıcılı kablosuz haberleşme sistemlerinin başarımı üzerine etkilerini incelenmek için bilgisayar benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Bilgisayar benzetim çalışmaları BPSK modülasyonu için AWGN kanal ortamında birbirinden bağımsız 1000 Monte Carlo kanal dögüsü üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2'de  $K = 16$  ve  $M = 3$  için ve Şekil 3'te  $K = 16$  ve  $M = 5$  için farklı roll-off değerleri ile elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmektedir.

Şekil 2 ve 3 incelendiğinde, roll-off değerleri arttıkça performansların kötüleştiği görülmektedir. En iyi performansın roll-off faktörü  $a$ 'nın 0.0 ve 0.1 olduğunda elde edildiği en kötü performansın  $a=0.95$  olduğunda elde edildiği gözlenmektedir. Aynı  $K$  değerleri için  $M$  değeri 3'ten 5'e çıkarıldığında roll-off faktörü  $a = 0.95$ ,  $a = 0.9$  ve  $a = 0.7$  değerleri için BER performanslarının kötüleştiği Şekil 2 ve 3'ten anlaşılmaktadır.

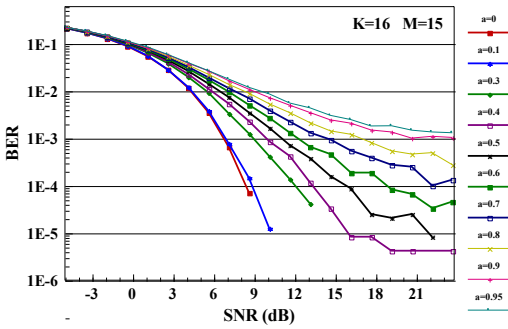


Şekil 2. K=16 ve M=3 için farklı roll-off değerleri için BER-SNR başarımları.

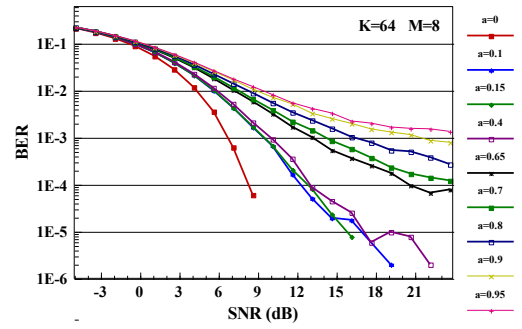


Şekil 3. K=16 ve M=5 için farklı roll-off değerleri için BER-SNR başarımları.

Şekil 4'te  $K = 16$  ve  $M = 15$  için ve Şekil 5'te  $K = 64$  ve  $M = 8$  için farklı roll-off değerleri ile elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmektedir.



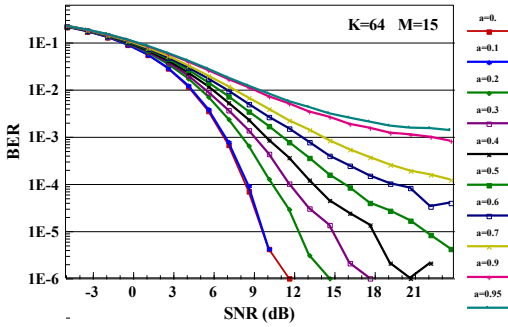
Şekil 4. K=16 ve M=15 için farklı roll-off değerleri için BER-SNR başarımları.



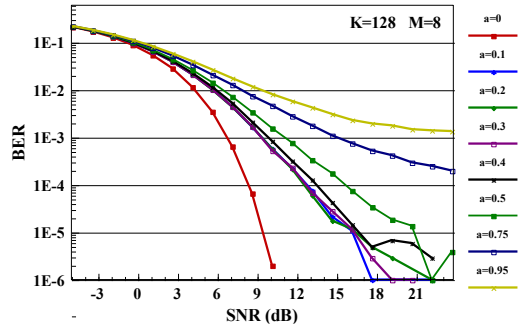
Şekil 5. K=64 ve M=8 için farklı roll-off değerleri için BER-SNR başarımları.

Şekil 4 ve 5 incelendiğinde, benzer sonuçların elde edildiği gözlenmektedir. Aynı K değerleri için M değeri arttıkça performanslar bir önceki şekillerde yorumlanan performansları doğrulamaktadır.

Şekil 6'da  $K = 64$  ve  $M = 15$  için ve Şekil 7'de  $K = 128$  ve  $M = 8$  için farklı roll-off değerleri ile elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 6. K=64 ve M=15 için farklı roll-off değerleri için BER-SNR başarımları.



Şekil 7. K=128 ve M=8 için farklı roll-off değerleri için BER-SNR başarımları.

Şekil 6 ve 7 incelendiğinde, benzer sonuçların elde edildiği ve benzer yorumların teyit edildiği gözlenmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, OFDM'e alternatif GFDM dalga formunun farklı  $K$  alt taşıyıcısı ve  $M$  alt sembol sayıları ile farklı roll-off faktörü değerlerinin kullanılması durumunda elde edilen performansları analiz edilmiştir. Roll-off faktörü değerleri arttıkça performansların kötüleştiği anlaşılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda yüksek roll-off faktörü değerlerinde GFDM dalga formunun performansını arttıracak yeni dönüşümlerle geliştirilmiş yeni bir GFDM dalga formunun literatüre kazandırılması amaçlanmaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] Maraş M., Ayvaz E. N., Gömeç M. ve A. Özen, "Improving the Performance of GFDM Waveform Employing Lifting Wavelet Transform", *IEEE 27th Signal Processing and Communications Applications SIU 2019*, s: 1-4, April 24-26, 2019, Sivas, Turkey.
- [2] Michailow N., Matthé M., Gaspar I. S., Caldevilla A. N., Mendes L. L., Festag A. ve Fettweis G., "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, September 2014.
- [3] Michailow N., Krone S., Lentmaier M. ve Fettweis G., "Bit Error Rate Performance of Generalized Frequency Division Multiplexing", 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), s. 1-5, 2012.