

Yeni Nesil Telsiz İletişim Sistemleri için Alternatif Modülasyon Adayları: F-QAM ve F-PSK

Birhan Mert Güney*, Furkan Durukan ve Ali Özen

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi-HARGEM, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu yazar: birhanmert@gmail.com

Sunu/Bildiri Türü: Sözlü / Tam Metin

Özet – Bu bildiri, 5. Nesil (5th Generation, 5G) haberleşme sistemlerine aday modülasyon yöntemlerinden F-QAM ve F-PSK modülasyonları incelenmektedir. F-QAM ve F-PSK modülasyonlarının tek taşıyıcı haberleşme sistemlerinin başarımı üzerine etkileri incelenmektedir. F-PSK ve F-QAM modülasyonlarının başarımını değerlendirmek ve klasik QAM modülasyonlarıyla karşılaştırma yapmak için AWGN, düz Rayleigh sönmülemeli ve frekans seçici Rayleigh sönmülemeli kanallar üzerinden bilgisayar benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Bilgisayar benzetim sonuçlarından F-PSK ve F-QAM modülasyonunun klasik M-QAM modülasyonundan daha iyi başarımlara sahip olduğu gözlenmektedir.

Anahtar Kelimeler – 5G; modülasyon; F-QAM; F-PSK; M-QAM.

I. GİRİŞ

5. nesil (5th generation, 5G) mobil iletişimi, 5G sistemlerinin tasarımında önemli zorluklar oluşturan farklı ve sıklıkla farklı gereksinimleri olan çok yönlü hizmetleri desteklemeyi amaçlar. Modülasyon ve dalga formları, sistem verimini, güvenilirliğini ve karmaşıklığını belirleyen temel fiziksel katman bileşenlerinden biridir, bu nedenle tasarımları 5G hizmetlerinin çeşitli gereksinimlerini karşılamada kritik öneme sahiptir. Literatürde 5G'ye potansiyel olarak uygulandıkları düşünülen modülasyon ve dalga formları, tasarım gereksinimlerini belirleyen ve bu gereksinimleri karşılamada avantajlarını tartışan kapsamlı bir genel bakış sunulmaktadır. Fiziksel katman perspektifinden bakıldığında, modülasyon ve dalga şekli tasarımı, sistem verimini, karmaşıklığını ve güvenilirliğini belirlemede önemli rol oynayan en kritik yönlerden biridir ve bu nedenle endüstri ve araştırma topluluğu arasında büyük ilgi görmüştür.

Son zamanlarda, kaynak [1]'de modülasyon formatlarının ve dalga formlarının gözden geçirilmesi sağlanmıştır. OFDM, FBMC, TFS (Zaman Frekans Paketlenmiş Sinyalizasyon) ve SCM (Tek Taşıyıcı Modülasyonlar) gibi farklı aday dalga biçimleri esasen spektral verimlilik ve performans perspektifi açısından analiz edildi ve karşılaştırıldı.

5G için potansiyel modülasyon şemaları olarak değerlendirilmek üzere bazı aday modülasyon şemaları belirtilmiştir. Bu çalışmada, önemli avantajlarından dolayı 5G'de büyük ilgi gören üç temsili modülasyon şemasından frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK) ile karesel genlik modülasyonunun (QAM) birleşimi (F-QAM) ve FSK ile faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) modülasyonunun birleşimi (F-PSK) incelenmektedir.

Yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin tasarlanmasında en önemli bileşenlerden biri hava arayüzü tasarımı ve diğer bir önemli bileşen ise modülasyondur. Karesel genlik modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM), iyi Öklid mesafesi özellikleri sağladığı ve

demodüle edilmesi kolay olduğu için 5G'de kabul edilmesi öngörülmüştür. Klasik QAM modülasyonu yerine, QAM ve frekans kaydırmalı anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK) modülasyonunun bir kombinasyonu olarak F-QAM, OFDMA ile birlikte önerilmiş ve özellikle hücre kenarı kullanıcıları için önemli bir performans kazancı sağlamıştır [2]. F-QAM ile özellikle hücre kenarı kullanıcıları için hücreler arası girişimlerin (Inter Cell Interference, ICI) istatistiksel dağılımının Gauss olmaması muhtemeldir. Kablosuz ağlarda kanal kapasitesine göre en kötü durumdaki ilave gürültünün Gaussian dağılıma sahip olduğu kanıtlanmıştır. Bu gözlemden, kanal kapasitenin Gauss olmayan hücreler arası girişim yapan F-QAM ile artırılması beklenebilir. Ayrıca, F-QAM'de sadece az sayıda alt taşıyıcıların aktif hale getirilmesi düşük PAPR ile sonuçlanır, böylece enerji verimliliği iyileştirilir, bu nedenle katı enerji tüketimi gereksinimi olan yeni nesil kablosuz iletişim cihazları için uygun bir çözüm olabilir.

Her yerde ve her zaman yüksek veri hızı bağlantısı sağlamak için, 5G'de gelişmiş küçük hücreler planlanmaktadır [2]. Bununla birlikte, 5G'de daha yüksek yoğunluklu veya daha küçük hücre boyutuna sahip küçük hücrelerin konuşlandırılması bir ikileme neden olur. Bir yandan, hücreler ne kadar küçük olursa, yol kaybı o kadar küçük olur ve bu nedenle daha yüksek veri hızı beklenir. Öte yandan, artan veri hızının böyle bir avantajı, daha küçük hücrelerin 5G'de çözülecek kritik problemlerden biri haline gelen daha ciddi hücreler arası girişimi (Inter Cell Interference, ICI) ortaya çıkarması nedeniyle azalmaktadır.

Frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK) ve karesel genlik modülasyonunun (QAM) bir kombinasyonu olarak kabul edilen frekans karesel genlik modülasyonu (F-QAM), hücre kenarı kullanıcıları için iletim hızlarını önemli ölçüde artırabilir [3, 4]. F-QAM'ın mekanizması, bir QAM sembolünün iletildiği her iletim periyodunda yalnızca bir frekans bileşeninin etkin olmasıdır. Bilgi hem QAM sembolü hem de aktif frekans bileşeni endeksi ile iletilir. F-QAM'ın

hücre kenarındaki avantajı, girişimli baz istasyonlarında F-QAM sembollerinin iletilmesiyle oluşan toplanmış ICI istatistiklerinin, özellikle hücre kenarında Gauss olmayan dağılımlı olmasından kaynaklanmaktadır. Kablosuz ağlarda kanal kapasitesine göre en kötü durumdaki ilave gürültünün Gauss dağılımına sahip olduğu kanıtlanmış olduğu için [5], F-QAM kullanılarak kanal kapasitesinin artırılması beklenebilir.

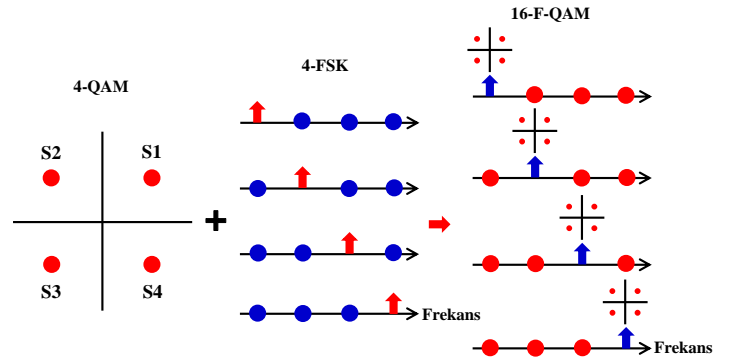
Öte yandan, ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) ağlarında, hücreler arası girişimin (ICI) dağılımının girişim sinyalinin modülasyon şemasına bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Bir aşağı bağlantı (downlink) hücresel OFDMA ağında girişim sinyalinin modülasyonu QAM olduğunda, ICI dağılımı, özellikle faydalı alt taşıyıcıların tümü kullanıldığında Gauss dağılımına yakındır [6]. Son zamanlarda, bir kablosuz ağdaki ilave gürültünün en kötü durum dağılımının, kanal kapasitesi anlamında Gauss dağılımı olduğu gösterilmiştir [5]. Ayrıca, girişim sinyalinin modülasyonu FSK olduğunda, ICI dağılımının Gauss dağılımından oldukça farklı olduğu gösterilmiştir [6]. F-QAM, FSK modülasyonuna dayandığından, F-QAM ile ortaya çıkan ICI dağılımının Gauss olmayan dağılım olması beklenir, böylece F-QAM tabanlı OFDMA ağları, ICI sınırlı kanallar altında QAM tabanlı OFDMA ağlarından önemli ölçüde daha iyi performans gösterecektir.

Bu çalışmada, 5G'ye aday modülasyon yöntemlerinden biri olan 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonlarının tek taşıyıcı haberleşme sistemlerinin performansı üzerine etkileri incelenmektedir. 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyon adaylarının başarımını doğrulamak ve AWGN, düz Rayleigh sönümlmeli ve frekans seçici Rayleigh sönümlmeli kanallarda klasik 16-QAM modülasyonu ile karşılaştırmak için bilgisayar benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Elde edilen sonuçların son derece tatmin edici olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılan çalışmanın kalan kısmında: 16-F-QAM modülasyon yöntemi 2. bölümde özetlenmektedir. 3. bölümde 16-F-PSK modülasyon adayının yapısı ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. 4. bölümde gerçekleştirilen bilgisayar benzetim çalışmaları tanıtılmaktadır. Son bölümde ise bilgisayar benzetim sonuçları ele alınarak elde edilen sonuçlar verilmektedir.

II. F-QAM MODÜLASYONU

F-QAM'in işaret yıldız kümesi QAM ve FSK modülasyonunun birleşimi olarak düşünülebilir. F-QAM sembolünün yıldız kümesi M seviyeli FSK (M-FSK) modülasyonu ve M seviyeli QAM (M-QAM) modülasyonu ile oluşturulur. Kaynak [2]'de belirtildiği gibi M-FSK ve M-QAM bitlerinin toplamı bir F-QAM sembolüne eşleştirilir. F-QAM sembolünün ilk yarısındaki bitler frekans endeksini ve son yarısındaki Gray eşlemeyi kullanan bitler de QAM endeksini göstermektedir. Şekil 1'de 4-FSK ve 4-QAM'den oluşan 16-F-QAM modülasyonunun işaret yıldız diyagramı verilmektedir.



Şekil 1. 16-F-QAM işaret yıldız kümesinin üretilmesi [1].

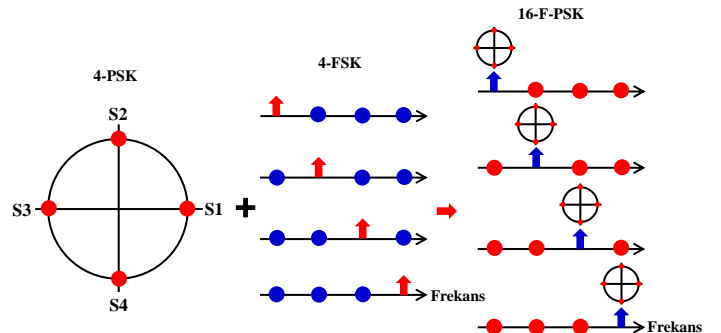
M seviyeli F-QAM, M adet frekans arasından aktif bir frekansı seçerek ve seçilen bu frekansta M seviyeli QAM yıldız kümesi ile modüle ederek $N = \log_2 M$ bilgi bitlerini taşır. Böylece, F-QAM'in modülasyon derecesi M-FSK ile M-QAM modülasyonlarının derecelerinin çarpımına eşit olur. Tablo 1'de 16-F-QAM modülasyonunun sembol eşleme kuralı Şekil 1'de verilen işaret yıldız diyagramına göre çıkarılmaktadır.

TABLO I. 16-F-QAM SEMBOL EŞLEME KURALI [2].

Giriş Bitleri	4-FSK	4-QAM	16-F-QAM
0000	f_0	s_1	x_1
0001	f_0	s_2	x_2
0010	f_0	s_4	x_4
0011	f_0	s_3	x_3
0100	f_1	s_1	x_5
0101	f_1	s_2	x_6
0110	f_1	s_4	x_8
0111	f_1	s_3	x_7
1000	f_2	s_1	x_9
1001	f_2	s_2	x_{10}
1010	f_2	s_4	x_{12}
1011	f_2	s_3	x_{11}
1100	f_3	s_1	x_{13}
1101	f_3	s_2	x_{14}
1110	f_3	s_4	x_{16}
1111	f_3	s_3	x_{15}

III. F-PSK MODÜLASYONU

16-F-PSK işaret yıldız diyagramının elde edilişi Şekil 2'de gösterilmektedir. İncelenen 16-F-PSK işaret yıldız diyagramı 16-F-QAM modülasyonuna benzer olarak üretilmiştir.



Şekil 2. 16-F-PSK işaret yıldız kümesinin üretilmesi.

16-F-PSK'nın işaret yıldız kümesi 4-PSK ve 4-FSK modülasyonunun birleşimi olarak düşünülebilir. F-PSK sembolünün yıldız kümesi M seviyeli FSK (M-FSK)

modülasyonu ve M seviyeli PSK (M-PSK) modülasyonu ile oluşturulur. M-FSK ve M-PSK bitlerinin toplamı bir F-PSK sembolüne eşleştirilir. F-PSK sembolünün ilk yarısındaki bitler frekans endeksini ve son yarısındaki Gray eşlemeyi kullanan bitler de PSK endeksini göstermektedir.

M seviyeli F-PSK, M adet frekans arasından aktif bir frekansı seçerek ve seçilen bu frekansta M seviyeli PSK yıldız kümesi ile modüle ederek $N = \log_2 M$ bilgi bitlerini taşır. Böylece, F-PSK'nın modülasyon derecesi M-FSK ile M-PSK modülasyonlarının derecelerinin çarpımına eşit olur.

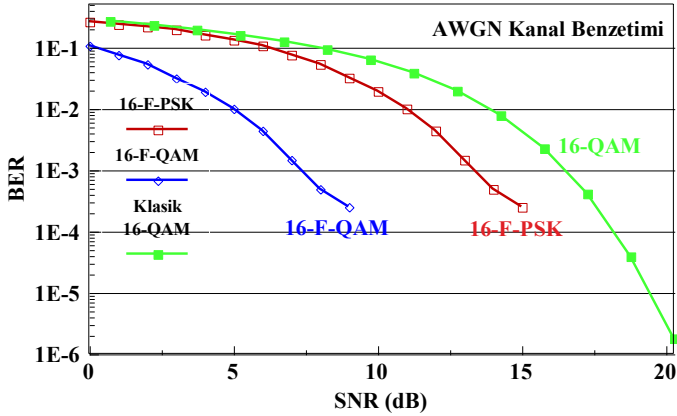
IV. BİLGİSAYAR BENZETİM SONUÇLARI

Bilgisayar benzetim sonuçları üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda AWGN kanalda, ikinci kısımda düz Rayleigh sönümlenmeli kanallarda ve Üçüncü bölümde ise frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli kanallarda klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonuna ait BER-SNR başarımları elde edilmektedir [7].

A. AWGN Kanal Benzetim Sonuçları

Çalışmanın birinci bölümünde, tek taşıyıcılı telsiz iletişim sistemleri için klasik 16-QAM modülasyonu, 16-F-QAM modülasyonu ve 16-F-PSK modülasyonları ile AWGN kanalda elde edilen BER-SNR başarımları elde edilmektedir. Benzetimler bir birinden bağımsız 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'te klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK ile AWGN kanalda BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması verilmektedir.



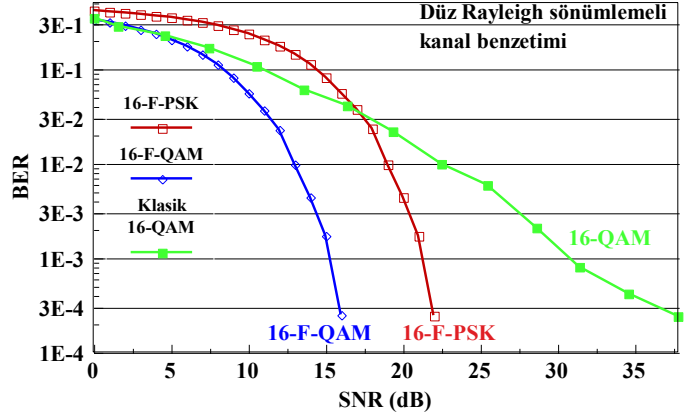
Şekil 3. Klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonlarının AWGN kanalda BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması.

AWGN kanal benzetimlerini gösteren Şekil 3 incelendiğinde, en iyi başarımın 16-F-QAM modülasyonu ile elde edildiği gözlenmektedir. 16-F-PSK modülasyonu klasik 16-QAM modülasyonunun başarımını geçerek $1E-3$ BER değeri için yaklaşık olarak 5 dB SNR kazancı sağlamaktadır. 16-F-QAM ile 16-F-PSK modülasyonlarının performansları arasında kaynak [8]'de de gösterilen başarımların farkının olduğu gözlenmektedir.

B. Düz Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Benzetim Sonuçları

Çalışmanın ikinci bölümünde, düz Rayleigh sönümlenmeli kanallarda klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonunu kullanan tek taşıyıcılı telsiz iletişim sistemlerinde BER-SNR benzetim çalışmalarının sonuçları verilmektedir. Benzetimler bir birinden bağımsız 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4'te klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonlarının düz Rayleigh sönümlenmeli kanallarda BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 4. Klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonlarının düz Rayleigh sönümlenmeli kanallarda BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması.

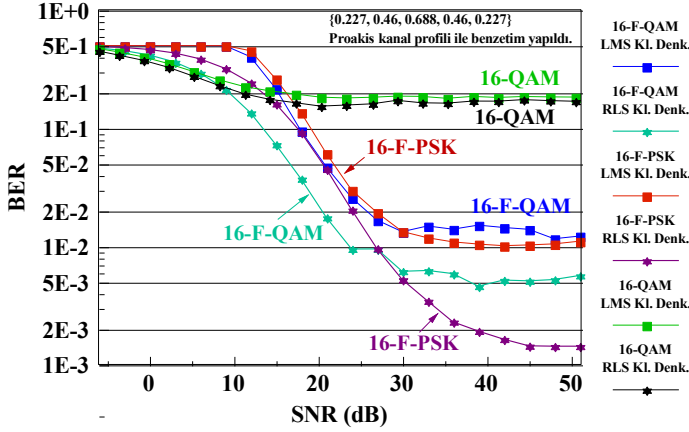
Şekil 4'teki düz Rayleigh sönümlenmeli kanallara ait BER-SNR başarımları incelendiğinde, klasik 16-QAM modülasyonunun yaklaşık olarak 35 dB SNR değerinden sonra $3E-4$ BER değerinin altına indiği görülmektedir. 16-F-PSK ile 16-F-QAM modülasyonlarına ait başarımların klasik 16-QAM başarımını geçerek hata tabanını ortadan kaldırdığı gözlenmektedir. 16-F-PSK ve 16-F-QAM arasındaki performans farkı bu benzetimde de ortaya çıkmaktadır.

C. Frekans Seçici Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Benzetim Sonuçları

Çalışmanın üçüncü bölümünde, klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonunun frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli kanallarda BER-SNR başarımlarının bilgisayar benzetimleri yapılmaktadır. Benzetim çalışmalarında, Proakis kanal profili [9] ortalama dal ağırlık katsayıları $\{0.227, 0.460, 0.688, 0.460, 0.227\}$ olan 5 dallı Rayleigh kanal modeli kullanılmaktadır. Benzetimler birbirinden bağımsız 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden tek taşıyıcılı telsiz iletişim sistemleri için gerçekleştirilmektedir.

Alıcı tarafında bozulan dataları onarmak için zaman bölgesi denkleştirici kullanılmaktadır. Benzetim çalışmalarında kanalı denkleştirmek için 5 dallı ileri beslemeli süzgeç ve 4 dallı geri beslemeli süzgeçten oluşan (5-4) karar geri beslemeli denkleştirici (Decision Feedback Equalizer, DFE)'den yararlanılmaktadır. Denkleştirici katsayılarının kestiriminde literatürdeki en küçük ortalama kareler (Least Mean Squares, LMS) [10, 11] ve özyineli en küçük kareler (Recursive Least Squares, RLS) [12, 13] algoritmalarından faydalanılmaktadır. Kanal denkleştirme çalışmalarında LMS algoritmasının adım büyüklüğü parametresi en iyi performanslar için klasik 16-QAM'de 0.085, 16-F-QAM'de 0.095 ve önerilen 16-F-PSK'de 0.15 alınarak BER performans eğrileri elde edilmektedir. RLS algoritmasının unutma faktörü parametresi de her üç modülasyon yöntemi için 0.999 alınarak BER başarımları elde edilmektedir.

Şekil 5'te bu çalışmada dikkate alınan her üç modülasyon yönteminin frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli kanallardaki BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 5. Klasik 16-QAM, 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonlarının frekans seçici Rayleigh sönmülemeli kanallarda BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması.

Frekans seçici Rayleigh sönmülemeli kanal BER-SNR başarımlarını gösteren Şekil 5 incelendiğinde, LMS ve RLS kanal denkleştiricinin kullanıldığı klasik 16-QAM modülasyonunun yaklaşık olarak $2E-1$ BER hata tabanına yakınsadığı görülmektedir. LMS kanal denkleştirici kullanılan 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonunun yaklaşık olarak 18 dB SNR değerinden sonra klasik 16-QAM modülasyonunu geçerek $1E-2$ hata tabanına yakınsamaktadır. RLS kanal denkleştirici kullanıldığında, 16-F-PSK modülasyonunun performansının yaklaşık olarak 20 dB SNR değerinden sonra klasik 16-QAM ve 16-F-QAM modülasyonlarının performanslarını geçerek en iyi BER sonuçlarını elde ettiği görülmektedir.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yeni nesil telsiz iletişim sistemleri için aday modülasyon yöntemlerinden 16-F-QAM ve 16-F-PSK modülasyonlarının tek taşıyıcılı kablosuz haberleşme sistemlerinin başarımları üzerine etkileri incelenmektedir. 16-F-PSK ve 16-F-QAM yöntemlerinin performansını test etmek ve klasik 16-QAM modülasyonu ile karşılaştırmak için tek taşıyıcılı telsiz iletişim sistemlerinde AWGN, düz Rayleigh sönmülemeli ve frekans seçici Rayleigh sönmülemeli kanallarda bilgisayar benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Benzetim sonuçlarından, özellikle frekans seçici Rayleigh sönmülemeli kanallarda 16-F-PSK yöntemiyle yaklaşık olarak 20 dB SNR değerinden sonra en iyi başarımların elde edildiği gözlenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Nekovee, Y. Wang, M. Tesanovic, S. Wu, Y. Qi and M. Al-Imari "Overview of 5G modulation and waveforms candidates", Journal of Communications and Information Network, Vol. 1, No. 1, pp: 44-60, 2016.
- [2] H. Sungnam, S. Min, L. Chiwoo, Y. Kyeongcheol, C. Sunghye and C. Kyungwhoon, "Frequency and Quadrature-Amplitude Modulation for Downlink Cellular OFDMA Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 32, No. 6, pp: 1256-1267, 2014.
- [3] S. Wu, Y. Wang, M. Al-Imari and M. Nekovee, "Frequency and Quadrature Amplitude Modulation for 5G Networks", IEEE European Conference on Networks and Communications, pp: 1-5, 2016.
- [4] Y. Qi and M. Tesanovic, "FQAM-FBMC design and its application to machine type communication", IEEE 27th Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, pp: 1-6, 2016.
- [5] S. Hong, M. Sagong, C. Lim, K. Cheun and S. Cho, "FQAM: A Modulation Scheme for Beyond 4G Cellular Wireless Communication

- Systems", IEEE Globecom Conferences and Workshop – Emerging Technologies for LTE-Advanced and Beyond 4G, pp: 25-30, 2013.
- [6] P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe, A. Modenini, F. Rusek and A. Ugolini, "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM? an overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 31, no. 6, pp: 80-93, 2014.
- [7] B. M. Güney, "5G ve Ötesine Alternatif Modülasyon Yöntemlerinin İncelenmesi ve Bilgisayar Benzetimi", Lisans Tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi – HARGEM, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Haziran 2019, Kayseri.
- [8] Y. Wang, W. Liu, M. Jin, S. Jang and J. M. Kim, "FQAM/FPSK modulation for spatial modulation systems", IEEE International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC 2016), pp: 511-515, 2016.
- [9] J. G. Proakis, Digital Communications, 4th Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [10] C. Liwei, T. Zhiliang and C. Lidong, "LMS algorithm fixed point modeling designated based on system generator modules", IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, pp: 152-156, 2015.
- [11] S. J. Honade, P. V. Ingole, S. V. Dudul and N. A. Shelke, "Performance analysis of various LMS adaptive filtering algorithms", IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, pp: 504-508, 2017.
- [12] J. A. Srar and K.-S. Chung, "Adaptive array beam forming using a combined RLS-LMS algorithm", IEEE 14th Asia-Pacific Conference on Communications, pp: 1-5, 2008.
- [13] W. Gao, H. Li and G. Xing, "A new adaptive steepest descent RLS multi-user algorithm", IEEE International Conference on Computer Science and Service System, pp: 1250-1253, 2012.