

Kod Kitabı İndis Modülasyonlu Dik Frekans Bölmeli Çoğullama Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Codebook Index Modulation

Emre Arslan, Ali Tuğberk Doğukan, Ertuğrul Başar
CoreLAB, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
{earslan18, adogukan18, ebasar} @ku.edu.tr

Özetçe —Yüksek güvenilirlik ve düşük gecikmeli haberleşme (ultra-reliable and low-latency communications, URLLC), gelecek nesil iletişim sistemlerinde önemli bir rol alacaktır. Bit hata oranı (bit error rate, BER) açısından üstün bir performans sağlayan seyrek vektör kodlama (sparse vector coding, SVC), gelecek URLLC ağları için önemli bir aday olarak dikkat çekmektedir. SVC’de bilgileri kodlamak ve çözmek için sanal sayısal bölge (virtual digital domain, VDD) ve sıkıştırılmış algılama (compressed sensing, CS) algoritmaları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Kod kitabı indis modülasyonlu dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM-CIM) olarak adlandırılan, OFDM tabanlı ve URLLC sistemlerinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek özgün bir sistem önerilmektedir. OFDM-CIM, bilgi bitlerini hem etkin alt taşıyıcı indisleri ile hem de kod kitabı indisleri ile iletmektedir. Yapılan bilgisayar benzetimleri sonucunda, OFDM-CIM gelecek nesil haberleşme sistemleri için güçlü bir aday olarak sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler—İndis modülasyonu (IM), OFDM, yüksek güvenilirlik ve düşük gecikmeli haberleşme (URLLC), seyrek vektör kodlama, 5G.

Abstract—Ultra-reliable and low-latency communications (URLLC) partake a major role in future communication systems. A possible strong candidate for future URLLC networks is sparse vector coding (SVC), which enables a superior performance in terms of bit error rate (BER). In SVC, virtual digital domain (VDD) and compressed sensing (CS) algorithms are used to encode and decode information. In this paper, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-based a novel system called orthogonal frequency division multiplexing with codebook index modulation (OFDM-CIM) and which can meet the needs of URLLC systems has been proposed. In OFDM-CIM, information bits are transmitted via both active subcarrier indices and codebook indices. As a result of computer simulations, OFDM-CIM is presented as a strong candidate for next generation communication systems.

Keywords—Index Modulation (IM), OFDM, codebook, ultra reliability and low latency communication (URLLC), sparse vector coding, 5G.

I. GİRİŞ

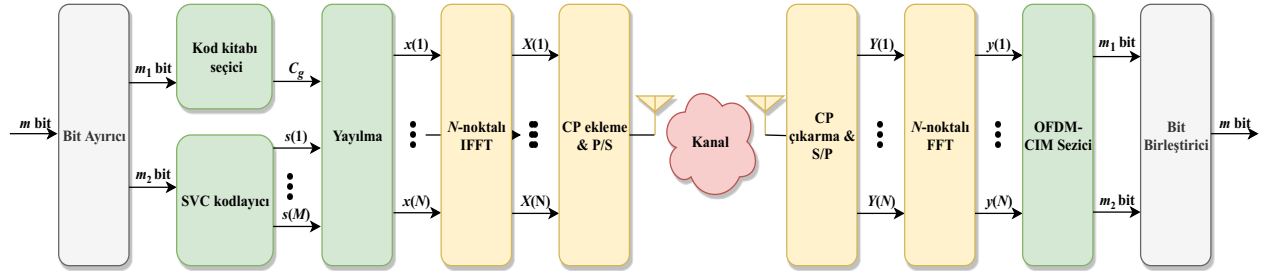
Dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), yüksek bant verimliliği, çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemlere

olan uyumluluğu ve simgeler arası girişime dayanıklılığı gibi özelliklerinden dolayı en popüler çok taşıyıcı iletim tekniklerinden biri haline gelmiştir. Bundan dolayı OFDM, 4G standartlarında yerini almıştır. Fakat 5G haberleşme sistemlerindeki uygulamaların farklı tipteki gereksinimlerinden dolayı, esnek bir OFDM şeması kullanılmasına karar verilmiştir. OFDM üzerine önemli araştırmalar yapılmış ve OFDM-indis modülasyonu (index modulation, IM) gibi bazı çalışmalar göze çarpmaktadır [1]. OFDM-IM’de alt taşıyıcılar gruplara bölünmekte ve veri, hem etkin alt taşıyıcıların indisleri ile hem de klasik OFDM’de olduğu gibi M ’li işaret kümesinden seçilen simgelerle iletilmektedir [1]–[3]. Fakat, OFDM-IM bile yüksek güvenilirlik ve düşük gecikmeli haberleşme’nin (ultra-reliable and low-latency communications, URLLC) gerekliliklerini karşılayamamaktadır. Bunun sebebi, OFDM-IM’in frekans bölgesinde çeşitleme kazancı sağlayamamasıdır.

URLLC, 5G uygulamaları için oldukça kritik bir servistir. Otonom sürüş, kablosuz robotik cerrahi ve gerçek zamanlı sanal gerçeklik uygulamaları, milisaniyeler veyahut daha az mertebelerde gecikme sağlayan ve 10^{-5} seviyelerine kadar düşebilen son derece düşük blok hata oranı (block error rate, BLER) performansı talep etmektedir. Bu zorlu gereklilikleri karşılayabilmek amacıyla birçok teknik ve algoritma geliştirilmiştir. Ancak, hem yüksek güvenilirlik hem de düşük gecikme sağlanması aralarındaki zıt ilişkiden kaynaklı olarak zorlayıcı olmaktadır. Kanal kodlama ve birçok çeşitleme tekniği, düşük bant verimliliği ve artan karmaşıklık pahasına daha iyi bir bit hata oranı (BER) performansı elde edebilmek amacıyla günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, işaretin yeniden iletimi, daha yüksek gecikmeye sebep olurken güvenilirliği arttırmak için kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, OFDM’in güvenilirliğini arttırmak için sırasıyla [4] ve [5]’te önerilen sıkıştırılmış algılama (CS) ve seyrek vektör kodlaması (SVC) gibi bir dizi yöntem uygulanmıştır. SVC, son derece seyrek işaret yapısı ve CS tabanlı üst düzey güvenilir algılama yöntemi sayesinde olağanüstü BLER değerleri sağlayarak OFDM için cazip bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışmalar, açgözlü (greedy), dik eşleme takibi (OMP) ve derinlik öncelikli çoklu yol eşleme takibi (MMPDF) gibi çeşitli özyinelemeli seyrek yaklaşım algoritmalarını içermektedir [6]. Bu algoritmalar, daha önceki yaklaşımlara kıyasla düşük işaret-gürültü oranı (SNR) bölgesinde daha da

Bu çalışma 218E035 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.
978-1-7281-7206-4/20/\$31.00 ©2020 IEEE



Şekil 1: OFDM-CIM'in sistem modeli

yanıklı seyrek iyileştirme sağlamaktadır. Bununla birlikte, son teknoloji ürünü sistemler, 5G ve üstü URLLC uygulamaları için kritik olması gereken OFDM ile SVC kullanıldığında düşük gecikmeli çözümler sağlamamakta ve düşük veri hızları sergilemektedirler.

Bu bildirinin amacı, URLLC uygulamaları için SVC tabanlı OFDM şemalarının gecikmesini, bant verimliliğini ve hata performansını geliştirmektir. Kod kitabı indis modülasyonlu dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM-CIM) olarak adlandırılan ve yeni olarak önerilen algoritma, bilgi biti iletimi için hem etkin alt taşıyıcı indislerinden hem de kod kitabı indislerinden faydalanmaktadır. Etkin alt taşıyıcı indislerinin tüm kombinasyonlarının sayısı ikinin tam sayı katı olmadığından tüm olası indis kombinasyonlarının kullanılmasına olanak yoktur. Bu bildiride, bu sorunu çözmek için, tüm etkin alt taşıyıcı indis kombinasyonlarını bilgi biti iletmek için kullanabilecek özgün bir algoritma önerilmektedir.

II. SİSTEM MODELİ

A. Kodlayıcı

Dikkate alınan OFDM-CIM sisteminin blok diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. İlk olarak, sisteme gelen m sayıda bit m_1 ve m_2 bit olarak ikiye ayrılmaktadır. m_1 sayıda bit, ikili-ondalık çevirici vasıtasıyla ondalık eşdeğerine (d) çevrilmektedir. $i_k \in \{1, \dots, M\}$ olmak üzere, değişen d değerlerine göre, sanal sayısal bölgede (virtual digital domain, VDD), K tane sıfır olmayan elemana sahip $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ vektörü (i_1, i_2, \dots, i_K) indisleri yardımıyla eşlenmektedir. (i_1, i_2, \dots, i_K) seçildikten sonra, bu etkin indislerle uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) [7] şemasına benzer bir şekilde bilgi taşımayan K sabit birim enerjili simgeler atanmaktadır. $\mathbf{b}_1 = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_K]^T$ bu simgelerin vektörü olup $(\cdot)^T$ evriği göstermektedir. İndis kombinasyonları, girdi olarak d değerini alan kombinatoriyal metodu [1] kullanılarak toplamda $\binom{M}{K}$ sayıda oluşturulmaktadır, (\cdot) binom katsayısını göstermektedir. Ancak, yalnızca $2^{\lfloor a \rfloor}$ sayıda indis kombinasyonu kullanılabilir ve bu da tüm olası indis kombinasyonlarının kullanılmasına engel olmaktadır, $a = \log_2 \binom{M}{K}$ ve $\lfloor \cdot \rfloor$ ise taban işlevini göstermektedir. Bu noktada, sabit simgeler kümesini $\mathbf{b}_2 = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \dots \ \tilde{x}_K]^T$ olarak genişleterek geriye kalan $2^{\lfloor a \rfloor + 1} - \binom{M}{K}$ sayıda indis kombinasyonunu yeniden kullanan akıllı bir teknik önerilmektedir. Böylece, her bir OFDM bloğu için alt taşıyıcı indisleri vasıtasıyla toplamda $m_1 = \lfloor a \rfloor + 1$ bilgi biti iletilmektedir. Bu teknik, tüm olası indis kombinasyonlarının kullanılmasına ve ek olarak bir bit daha iletilmesine olanak tanımaktadır. Eğer d

TABLO I: Gelen bitlere göre indis kombinasyonları

Bitler	d	İlk İndis (i_1)	İkinci İndis (i_2)	İlk Simge	İkinci Simge
[000]	0	1	2	1	\tilde{j}
[001]	1	3	4	1	\tilde{j}
[010]	2	1	3	1	\tilde{j}
[011]	3	2	4	1	\tilde{j}
[100]	4	1	4	1	\tilde{j}
[101]	5	2	3	1	\tilde{j}
[110]	6	1	2	-1	$-\tilde{j}$
[111]	7	3	4	-1	$-\tilde{j}$

$\binom{M}{K} - 1$ 'den büyükse, $d - \binom{M}{K}$ değerine karşılık gelen indisler, sabit simge kümesi genişletilerek tekrar kullanılır. Böylece yasak kombinasyonlardan da sakınılmış olunur.

Örnek olarak, $M = 4$ ve $K = 2$ için etkin indislerle iki sabit ve birim enerjili simgenin $x_1 = 1$ ve $x_2 = j$ olarak iletildiği varsayılmıştır. Tablo I'de görüldüğü üzere sabit simgeler kümesinin $\tilde{x}_1 = -1$ ve $\tilde{x}_2 = -j$ ile genişletilmesiyle beraber ilk iki indis kombinasyonunun yeniden kullanılmasıyla tüm olası indis kombinasyonlarından yararlanılmaktadır.

Yukarıdaki anlatıldığı gibi \mathbf{s} 'in oluşturulmasından sonra, ek olarak gelen $m_2 = \log_2 G$ bilgi bitine göre g 'nci kod kitabı $\mathbf{C}_g \in \mathbb{C}^{N \times M}$ seçilmektedir. Burada G rastgele oluşturulmuş ve Bernoulli dağıtılmış kod kitabı matrislerinin toplam sayısını ifade eder ve $g \in \{1, \dots, G\}$. G sayısı, 2'nin tamsayı katı olmalıdır. \mathbf{s} 'in kod kitabı ile çarpılıp yayılması ile alıcı tarafında CS-tabanlı algılama yapılması mümkün kılınmaktadır [5]. \mathbf{s} vektörünün yayılmasından sonra, tüm alt taşıyıcıları sıfırdan farklı olan OFDM bloğu şu şekilde elde edilmektedir:

$$\mathbf{x}_F = [x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N)]^T = \mathbf{C}\mathbf{s}. \quad (1)$$

Bu noktadan sonra klasik OFDM'e uygulanan aynı işlemler uygulanmaktadır. Zaman bölgesinde ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) uygulanmaktadır:

$$\mathbf{x}_T = \text{IFFT}\{\mathbf{x}_F\} = [X(1) \ X(2) \ \dots \ X(N)]^T. \quad (2)$$

IFFT işleminden sonra, OFDM bloğunun başına L örnek uzunluğundaki bir çevrimsel önek (CP) $[X(N-L+1) \ \dots \ X(N-1)X(N)]^T$ eklenir. Paralel/seri (P/S) ve sayısal/analog dönüşümlerinin uygulanmasından sonra işaretler, v adımı bir frekans seçici Rayleigh sönümlmeli kanal üzerinden iletilir. Son olarak, bu OFDM şemasının frekans bölgesindeki eşdeğer giriş-çıkış ilişkisi şu şekilde verilebilir:

$$y_F(\beta) = x_F(\beta)h_F(\beta) + w_F(\beta), \quad \beta = 1, \dots, N. \quad (3)$$

TABLO II: MMP-DF Girdileri ve Parametreleri

Girdiler	Gösterim
Düzenlenmiş alınan vektör	$\hat{\mathbf{y}}_F$
Algılama matrisi	Ψ
Etkin alt taşıyıcıların sayısı	K
Arama genişletme sayısı	Ω
Durdurma eşiği	Λ
Maksimum yinleme	Υ

Burada $y_F(\beta)$, $h_F(\beta)$ ve $w_F(\beta)$ sırasıyla frekans bölgesindeki alınan işaretler, kanal sönmülme katsayıları ve gürültü örnekleridir ve vektör formları sırasıyla \mathbf{y}_F , \mathbf{h}_F ve \mathbf{w}_F şeklinde ifade edilmektedir. $h_F(\beta)$ ve $w_F(\beta)$ 'nin dağılımları sırasıyla $\mathcal{CN}(0, 1)$ ve $\mathcal{CN}(0, N_0)$ şeklinde verilmektedir ve burada N_0 frekans bölgesindeki gürültü varyansındır, bu da zaman bölgesindeki gürültü varyansına eşittir. İşaret-gürültü oranı (SNR) E_b/N_0 olarak tanımlanır; burada $E_b = (N + L)/m$, bit başına iletilen ortalama enerjidir. Önerilen şemanın bant verimliliği şu şekilde elde edilir:

$$\eta = m/(N + L) \text{ [bits/s/Hz]}. \quad (4)$$

B. Çözücü

Alıcı tarafında, CP'yi çıkardıktan ve FFT uyguladıktan sonra, girdileri Tablo 2'de verilen MMP-DF algoritması [6], kusursuz kanal durumu bilgisi varsayımı altında \mathbf{y}_F 'i çözmek için uygulanır. MMP-DF algoritması, tam seyrek vektör iyileştirmesi ve kontrol edilebilir karmaşıklık gibi özelliklerinden dolayı seçilmiştir. MMP-DF algoritması, çıktı olarak bir seyrek vektör $\hat{\mathbf{s}} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ vermektedir. Düşük ağaç boyutlarında performans kazancı yüksek olduğu sürece, MMP algoritmasının kullanımı önerilmektedir [6]. [5]'te olduğu gibi, K değeri, algoritmanın verimli çalışması için ikiye sabitlenmiştir. MMP-DF algoritmasını uygulayabilmek için \mathbf{y}_F ve \mathbf{h}_F düzenlenmekte ve algoritma için girdi olarak kullanılmaktadırlar. Düzenlenmiş alınan vektör şu şekilde ifade edilebilir [5]:

$$\hat{\mathbf{y}}_F = \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_F) \mathbf{y}_F \quad (5)$$

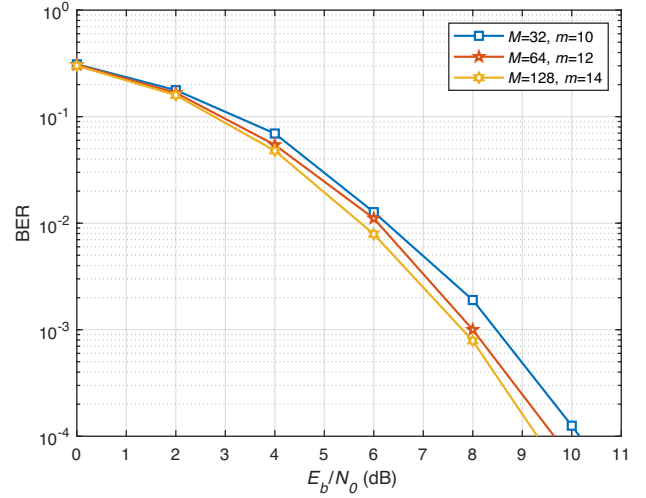
burada $\text{diag}(\cdot)$ bir vektörden diagonal bir matris oluşturur, $\hat{\mathbf{h}}_F = [e^{j\angle h_F(1)} \dots e^{j\angle h_F(N)}]^T$ ve $\angle h_F(\beta)$, $h_F(\beta)$ 'nin açısıdır. Algılama matrisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Psi = \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_F \odot \mathbf{h}_F) \mathbf{C}. \quad (6)$$

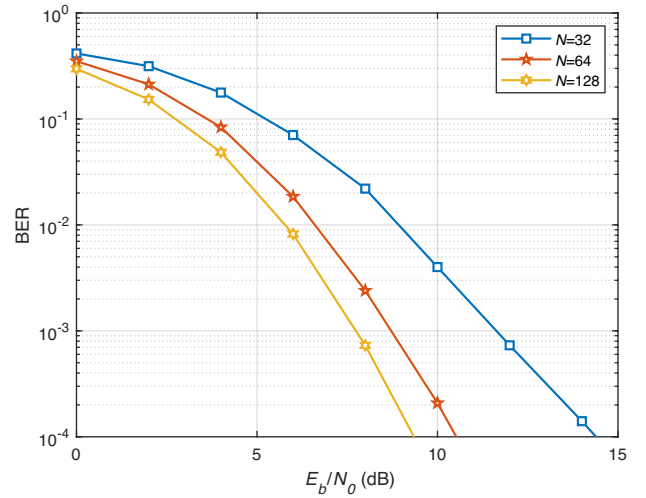
Burada, \odot Hadamard çarpımını temsil etmektedir. Diğer girdiler etkin alt taşıyıcıların sayısı K , arama genişletme sayısı Ω , durdurma eşiği değeri Λ ve maksimum yinleme Υ değerleridir. Tüm bu girdilerle, MMP-DF algoritması oluşturulmuş her kod kitabı için çalıştırılır ve G adet her biri K tane sıfırdan farklı elemana sahip $\hat{\mathbf{s}}_g$ vektörü çıktı olarak elde edilir [6]. Her bir çıktı vektörünün etkin indis kümesi $\bar{I}_g = (\hat{i}_{g,1}, \hat{i}_{g,2}, \dots, \hat{i}_{g,K})$ şeklinde verilmektedir; burada $\hat{i}_{g,k}$, g 'nci kod kitabına ilişkin çıktı vektörünün k 'nci etkin indisini temsil etmektedir. Her bir $\hat{\mathbf{s}}_g$ için, \bar{I}_g 'deki indisler kullanılarak, sırasıyla \mathbf{b}_1 ve \mathbf{b}_2 'nin elemanlarını içeren iki vektör $\bar{\mathbf{b}}_{g,1}, \bar{\mathbf{b}}_{g,2} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ üretilmektedir. Ardından, ML sezici kullanılarak çözülmüş kod kitabı indisi \hat{g} 'ye karar verilir:

$$(\hat{g}, \hat{l}) = \arg \min_{g,l} \|\hat{\mathbf{s}}_g - \bar{\mathbf{b}}_{g,l}\|^2. \quad (7)$$

\hat{g} 'ye göre, m_1 sayıda bit doğrudan çözülür. Daha sonra, karar verilmiş kod kitabına karşılık gelen etkin indisler $\bar{I}_{\hat{g}}$, ondalık



Şekil 2: Farklı parametreler için OFDM-CIM sistemlerinin $G = 2$ ve $N = 128$ için hata performansı

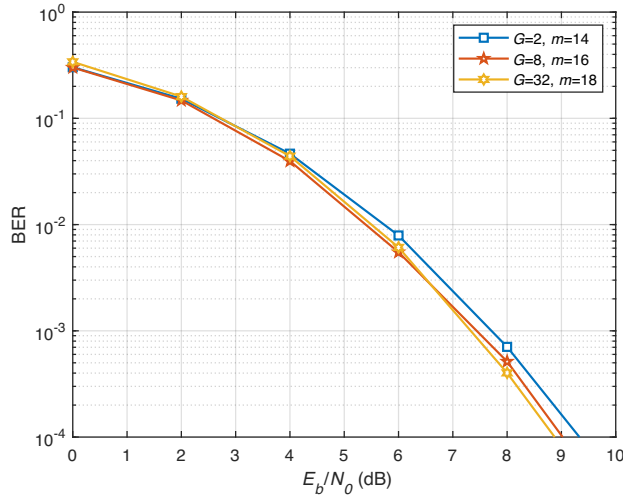


Şekil 3: Farklı parametreler için OFDM-CIM sistemlerinin $G = 2$ ve $M = 128$ için hata performansı

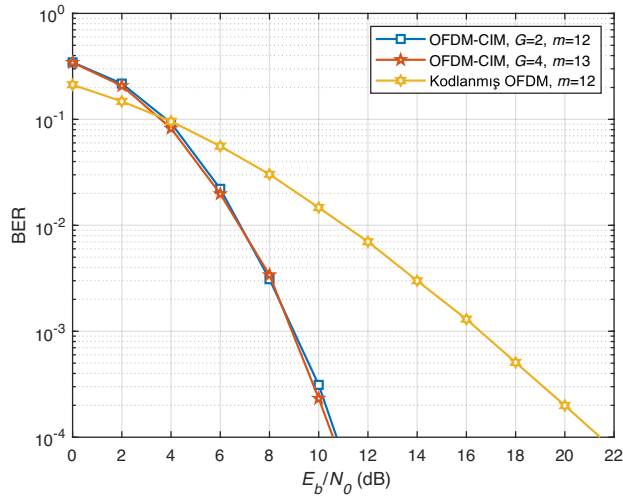
değer \hat{d} 'yi elde etmek için kombinatoryal algoritmasına [1] girdi olarak verilir. Eğer $2^{\lfloor a \rfloor + 1} - \binom{M}{K} \leq \hat{d} \leq \binom{M}{K} - 1$ ise veya $\hat{d} < 2^{\lfloor a \rfloor + 1} - \binom{M}{K}$ ve $\hat{l} = 1$ ise, \hat{d} doğrudan m_2 sayıda bite dönüştürülmektedir. Aksi takdirde, eğer $\hat{d} < 2^{\lfloor a \rfloor + 1} - \binom{M}{K}$ ve $\hat{l} = 2$ ise, $\hat{d} + \binom{M}{K}$ değeri m_2 sayıda bite dönüştürülmektedir.

III. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, farklı parametreler için OFDM-CIM sisteminin bilgisayar benzetim sonuçları sunulmaktadır. Ayrıca, katlamalı kodlanmış OFDM için bir hata performansı karşılaştırması gösterilmektedir. Bu şemaların hata performansları Monte Carlo benzetimleri ile elde edilmiştir. $x_1 = 1$, $x_2 = j$ ve $\tilde{x}_1 = -1$, $\tilde{x}_2 = -j$ olmak üzere, tüm benzetimlerde $v = 10$, $L = 16$ ve $K = 2$ olarak alınmıştır. LTE katlamalı kod oranı $1/3$ olarak seçilmiştir [8]. MMP-DF algoritması için Ω , Λ ve Υ parametreleri sırasıyla 2, 0.1 ve 2 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4: Değişen G değerlerinde OFDM-CIM sistemlerinin $M = 128$ ve $N = 128$ için hata performansı



Şekil 5: $N = 64$ için OFDM-CIM sistemlerinin kodlanmış OFDM ile karşılaştırılması

Şekil 2’de alt taşıyıcıların sayısı $N = 128$ ’de sabit tutulurken değişen M değerleri için OFDM-CIM’nin BER performansı verilmektedir. Sanal bölgenin boyutu arttıkça, hata performansının nispeten iyileştiği görülmektedir. Bunun sebebi, M değeri büyüdükçe sanal bölgedeki seyreklik artmakta ve böylece hata performansı iyileşmektedir. M ’in artması aynı zamanda iletilen bit sayısını (m) arttırmaktadır fakat sistem karmaşıklıkta ve böylece toplam gecikme artmaktadır.

Şekil 3’te $M = 128$ ’e ve kod kitabı sayısı $G = 2$ ’ye sabitlenmişken, değişen FFT boyutu (N) değerleri için OFDM-CIM sistemlerinin hata performansı gösterilmektedir. Seyrek vektörün indis kombinasyonlarının frekans bölgesinde daha fazla kaynağa yayılmasından dolayı BER performansında belirgin bir iyileşme gözlenmektedir. Başka bir deyişle, indis kombinasyonlarının daha fazla alt taşıyıcıya yayılması bir kodlama kazancı sağlamaktadır. N arttıkça, rastgele oluşturu-

lanan kod kitapları arasındaki ilişki azalmakta ve bu sayede vektörlerin daha iyi iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte, alt taşıyıcıların sayısı arttıkça bant verimliliği azalmakta, çünkü daha fazla alt taşıyıcı ile daha fazla spektrum kullanılmaktadır.

Şekil 4’te, önerilen OFDM-CIM şemalarının kod kitaplarının sayısı (G) arttıkça BER sonuçlarındaki gelişme gösterilmektedir. Artan G ile, iletilen bit sayısının arttığı ve bunun IM özelliklerinden kaynaklı olarak biraz daha iyi bir BER sağladığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, iletilen kod kitaplarının ve bitlerin sayısı arttıkça, alıcıda aranan ilave kod kitabı sayısı artması nedeniyle de gecikme artmaktadır. Böylece OFDM-CIM sistemi ilgi çekici bir ödünleşim sunmaktadır.

Son olarak, önerilen şema Şekil 5’te sıfır dolgu (zero padded) LTE katlamalı kodlanmış OFDM [8] ile karşılaştırılmaktadır. Önerilen şema ile aynı bant verimliliğini elde etmek için kodlanmış OFDM için sıfır dolgulama yöntemi kullanılmış ve kodlanmış OFDM’in performansını artırmak için rastgele serpiştirme uygulanmıştır. OFDM-CIM, kanal kodlamaya ihtiyaç duymaması sebebiyle olağanüstü bir BER ve nispeten daha düşük karmaşıklık sağlamaktadır. Ek olarak, OFDM-CIM, kod kitabı indislerini kullanarak hata performansını düşürmeden gecikmede bir artış pahasına ilave bilgi bitleri iletebilmektedir. Bununla birlikte, önerilen düşük karmaşıklık algoritma, gecikmenin önemli ölçüde artmayacağı şekilde tasarlanmıştır.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, OFDM-CIM şeması güvenilir ve düşük gecikmeli bir dalga şekli olarak sunulmuştur. OFDM-CIM, geleneksel SVC-OFDM şemalarına kıyasla IM kullanarak daha yüksek bant verimliliğine sahip yeni bir dalga şekli olarak tanıtılmaktadır. Monte Carlo simülasyonları ile OFDM-CIM şemasının katlamalı kodlanmış OFDM şemasına üstünlük kuran hata performansı gösterilmiştir. Genelleştirilmiş tasarımlarla daha yüksek güvenilirlik ve daha düşük gecikme sağlanabilir ve bu fikir gelecek bir araştırma konusu olarak planlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, “Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, Nov. 2013.
- [2] A. M. Jaradat, J. M. Hamamreh, and H. Arslan, “OFDM with subcarrier number modulation,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 914–917, Dec. 2018.
- [3] E. Basar, “OFDM with index modulation using coordinate interleaving,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 381–384, Aug. 2015.
- [4] H. Zhang, L.-L. Yang, and L. Hanzo, “Compressed sensing improves the performance of subcarrier index-modulation-assisted OFDM,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 7859–7873, Oct. 2016.
- [5] H. Ji, S. Park, and B. Shim, “Sparse vector coding for ultra reliable and low latency communications,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 6693–6706, Oct. 2018.
- [6] S. Kwon, J. Wang, and B. Shim, “Multipath matching pursuit,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 5, pp. 2986–3001, May 2014.
- [7] E. Basar et al., “Index modulation techniques for next-generation wireless networks,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16 693–16 746, Sep. 2017.
- [8] S. Ahmadi, “LTE-Advanced: A practical systems approach to understanding 3GPP LTE releases 10 and 11 radio access technologies,” *LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies*, pp. 1–1116, Oct. 2014.