

İki Yönlü Kod İndis Modülasyonu

Two-way Code Index Modulation

Erdogan Aydin
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
İstanbul Medeniyet Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
erdogan.aydin@medeniyet.edu.tr

Fatih Cogen
Mekatronik Sistemler Mühendisliği
Türk Alman Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
cogenfatih@gmail.com

Özetçe —Bu çalışmada, yüksek enerji verimli, yüksek veri hızı ve iyi hata başarımına sahip kod indis modülasyonu (code index modulation, CIM) tabanlı iki-yönlü (two-way) ağ kodlamalı (network coded) bir işbirlikli sistem yapısı (TW-CIM) önerilmiştir. Önerilen sistem modelinde, kullanılan yayıcı kodlar birbirine dik olduğu için, üç zaman aralığında haberleşmeyi gerçekleştiren iki-yönlü geleneksel ağ kodlamalı çöz-ve-ilet tabanlı (TW-DF) işbirlikli haberleşme tekniklerinin aksine, sadece iki zaman aralığı haberleşme için kullanılır. Önerilen sistem yapısında, iletilen modülasyonlu simge verisinin yanı sıra yayıcı kod indisleri de veri taşımaktadır. TW-CIM sistemde, iki farklı kullanıcı CIM tekniğini esas alan bir yarı çift-yönlü (half-duplex) röle üzerinden haberleşmektedir. Ele alınan TW-CIM sistemi, TW-DF işbirlikli sistemi ile farklı veri hızlarında karşılaştırılmıştır. Önerilen sistemin kuramsal hata analizi yapılmış ve ortalama bit hata olasılığı başarımı elde edilmiştir. Başarım analizleri BPSK modülasyonu için Rayleigh sönmlemeli kanallarda yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler—İki-yönlü iletim, yayılı izge, enerji verimliliği, yüksek veri hızı, kod indis modülasyonu ve çöz-ve-ilet.

Abstract—In this study, a new code index modulation (CIM) aided two-way network coded (TW-CIM) scheme with high energy-efficiency, high data speed and good error performance is proposed. In the proposed system model, unlike conventional decode-and-forward (DF) cooperative network coded communication techniques that perform three time-interval communications, only two time-intervals are used for communication since the spreading codes used are orthogonal to each other. In the proposed system structure, as well as the transmitted modulated symbol data, the spreading code indices carry data. In the TW-CIM system, two different users communicate via a half-duplex relay based on the CIM technique. The considered TW-CIM system has been compared with the cooperative TW-DF system at different data rates. The theoretical error analysis of the proposed system is performed and the average bit error probability is achieved. Performance analyzes have been performed on Rayleigh fading channels for BPSK modulation.

Keywords—Two-way communication, spread spectrum, energy efficiency, code index modulation and decode-and-forward.

I. GİRİŞ

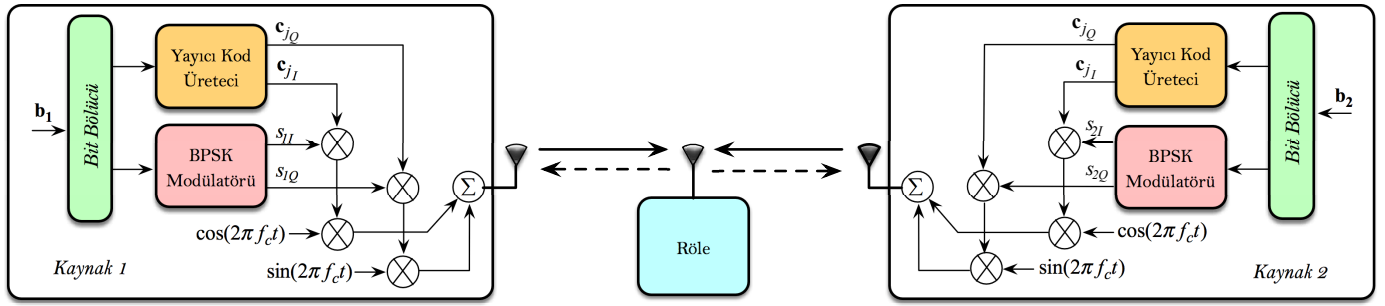
Günümüz dünyasında, yüksek hızda veri kullanımına olan talep her geçen gün katlanarak artmaktadır. Buna bağlı olarak; çevrimiçi oyunlar, büyük dosyaların kullanımı ve buluta yüklenmesi, yüksek kaliteli video ve ses yayını, düşük güç

tüketimi ihtiyaçları, her yerde ve her zaman internete bağlanma zorunluluğu vb. konseptlere olan ilgi de beraberinde artmaktadır. Uzmanlara göre 2020 yılına kadar küresel internet trafiği yaklaşık on kat artacak ve 50 milyardan fazla cihaz internete bağlı hâle gelecektir. Bu nedenle; veri hızı yüksek, enerji ve spektral verimli haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi zorunlu hâle gelmiştir [1], [2].

Yukarıda bahsi geçen bu gelişmelerle beraber enerji verimliliğine olan ilgi son derece artmıştır. Bu yüzden, yeni kablosuz haberleşme sistemlerinin tasarımında ve işletilmesinde enerji tüketimi öncelikli bir endişe haline gelmiştir. Nitekim; ekonomik, operasyonel ve çevresel kaygılar nedeniyle veri hızı, verimlilik, gecikme vb. performans ölçütlerinin yanı sıra enerji verimli sistemler ile ilgili akademik çalışmalar gün gittikçe artmaktadır. Yakın gelecekte akıllı arabalar, drone'lar, tıbbi ve giyilebilir cihazlar, sensörler ve nesnelerin-interneti (internet of things, IoT) kullanan cihazlar birbirleriyle bağlantı kurmak için hücresele ağları kullanacak ve ağların mevcut kapasitelerini bir hayli artırmaları gerekecektir. 5G ağlarındaki trafik hacminin bu denli artması mevcut hücresele sistemlerin daha düzenli, başarılı ve enerji verimli olması ile mümkündür [3], [4].

Geçtiğimiz son on yılda, 5G ve ötesi haberleşme tekniklerinin en önemli enerji verimli yöntemlerinden biri olan indis modülasyonuna (index modulation, IM) olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. IM, ekstra bilgi bitlerini iletmek için çeşitli ortamların indislerine bilgi biti yükleyen modülasyon teknikleri ailesini ifade eder. Bu ortamlar, anten, alt taşıyıcılar, frekans taşıyıcıları gibi pratik veya zaman dilimi, uzay-zaman matrisi, anten aktivasyon sırası, modülasyon tipleri, yayıcı kodlar gibi sanal olabilir. Geleneksel modülasyon tekniklerinden farklı olarak, IM'de bilgiler sinyale gömülü bir şekilde iletilir. Bu akıllı yapı sayesinde çok az enerji kullanılarak ek bilgi iletilir, spektral verimlilik artar ve ek donanım maliyeti minimum seviyeye indirilir [5]–[7].

Bu çalışmada kullanılan IM tekniği, birçok verimli IM tekniğine rakip olan ve son zamanlarda popüler hâle gelen kod indis modülasyonlu yayılı izge (code index modulation based spread spectrum, CIM-SS) tekniğidir. CIM-SS yönteminin temeli, modülasyonlu sembolleri yayıcı kodlar ile çarparak alıcı tarafa gönderen ve böylece sinyalin gürültüden veya sıkışmadan etkilenmesini engelleyen doğrudan dizilimli yayılı izge (direct sequence spread spectrum, DS-SS) yöntemine dayanır [8]. CIM-SS yapısında, modüleli sembollere ek olarak yayıcı kod indisleri de sinyale gömülü bir şekilde iletilerek



Şekil 1: TW-CIM sistem yapısı.

ilaveten veri taşımaktadır. Bu nedenle, CIM-SS yapısı hem DS-SS yönteminin avantajlarını barındırır hem de daha hızlı bir mimari sunar [9], [10].

Bu çalışmada, yüksek enerji verimli, yüksek veri hızlı ve iyi hata başarımına sahip CIM tabanlı iki-yönlü (two-way) ağ kodlamalı bir işbirlikli (TW-CIM) sistem yapısı önerilmiştir. Ele alınan sistem modelinde, iki farklı kullanıcı CIM tekniğini esas alan bir yarı çift-yönlü (half-duplex) ağ kodlaması kullanan röle yardımı ile bilgi alış verişimde bulunmaktadır. TW-CIM sisteminin, çöz ve ilet (decode and forward, DF) tekniğini esas alan iki yönlü ağ kodlamalı (TW-DF) teknik ile farklı iletim hızlarında başarımlarını performansları karşılaştırılmıştır. Önerilen sistemin kuramsal hata analizleri yapılmış ve ortalama bit hata olasılığı (average bit error probability, ABEP) başarımı elde edilmiş ve başarımlarını analizleri BPSK modülasyonu için Rayleigh sönümlenmeli kanallarda yapılmıştır.

II. SİSTEM MODELİ

Önerilen TW-CIM sistem modeli Şekil 1'de sunulmaktadır. Ele alınan sistem modelinde, kaynak 1 (S_1), kaynak 2 (S_2) ve röle terminali (R) tek antene sahiptir. Her bir kaynak için, N_c uzunluklu çip dizisinden meydana gelen N adet farklı yayıcı Walsh Hadamard kod kullanılmıştır. S_1 için yayıcı kod dizisi $\mathbf{c}_1^1 = [c_{i,1}^1, c_{i,2}^1, \dots, c_{i,N_c}^1]^T$ olarak ifade edilirken, S_2 için $\mathbf{c}_j^2 = [c_{j,1}^2, c_{j,2}^2, \dots, c_{j,N_c}^2]^T$ 'dir, burada $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$. Dolayısıyla S_1 ve S_2 için toplamda $2N$ tane farklı yayıcı kod kullanılmıştır. S_1 ve S_2 kaynaklarına ait yayıcı kodlar matrisel formda sırasıyla $\mathbf{C}_1 = [\mathbf{c}_1^1, \mathbf{c}_2^1, \dots, \mathbf{c}_N^1]$ ve $\mathbf{C}_2 = [\mathbf{c}_1^2, \mathbf{c}_2^2, \dots, \mathbf{c}_N^2]$ şeklinde yazılabilir. \mathbf{C}_1 ve \mathbf{C}_2 yayıcı kodları, S_1 , S_2 ve R 'de bilindiği varsayılmaktadır. Şekil 1'de de gösterildiği gibi, sistemin veri hızını arttırmak için, verici ve alıcı yapısında eşevreli (in-phase, I) ve dik evreli (quadrature, Q) kanal bileşenleri bulunmaktadır. Ele alınan sistemde, BPSK modülasyonu kullanılmış olup $\{\pm 1\}$ simgeleri ile temsil edilmektedir. Genel itibarıyla sistem yapısı; ağ kodlama, CIM tekniği ve BPSK modülasyonu yöntemlerinin birbirine uyarlanmasıyla elde edilmiştir.

Ele alınan sistem modelinde, iletişim protokolü iki yönlü iletim tekniğinden meydana gelmektedir. Böylece ortamda var olan iki kullanıcı, iki farklı zaman aralığında sadece veri ileten veya alan yarı çift-yönlü R yardımıyla haberleşmektedir. Kullanıcılara ait yayıcı kodlar birbirine dik olduğundan haberleşme için iki zaman dilimi yeterlidir. Geleneksel ağ kodlamalı DF işbirlikli yöntemde ise iki kaynağın birbiriyle haberleşmesi için en az 3 zaman aralığına ihtiyaç duyulmaktadır. İletişim protokolünün birinci zaman aralığında, S_1 ve S_2 kullanıcıla-

rından R 'ye gelen yayılmış IQ -bileşenli işaretler R 'de ilgili korelatör ve en büyük olasılıklı (maximum likelihood, ML) detektörler yardımı ile ayrı ayrı çözülerek $\hat{\mathbf{b}}_1^R$ ve $\hat{\mathbf{b}}_2^R$ kestirilmiş bitleri elde edilir. İletişim protokolünün ikinci zaman diliminde ise, R 'de bit düzeyinde elde edilen kullanıcılara ait veriler XOR işlemine tabi tutulduktan sonra S_1 ve S_2 kullanıcılarının yayıcı kodlarıyla çarpılıp tekrar kullanıcılara IQ -bileşenli işaretler vasıtasıyla iletilir. R 'den kaynaklara gelen işaretler, ilgili korelatörler ve ML detektörler yardımı ile tekrar bit düzeyinde kestirilir. Son olarak, her bir kullanıcı elde ettiği bit dizisini, kendine ait bit dizisi ile XOR işlemine tabi tutarak diğer kaynağın verisini elde eder.

Şekil 1'de TW-CIM sistem yapısı dikkate alındığında, \mathbf{b}_1 ve \mathbf{b}_2 vektörleri T_s simge süresi boyunca karşılıklı olarak iletilecek $m \times 1$ boyutlu ikili (binary) bilgi bitleri vektörleridir. Her iki kullanıcıda, $m = 2 \log_2(M) + 2 \log_2(N)$ sayıda bilgi bitleri, $2 \log_2(M)$ ve $2 \log_2(N)$ bitlik alt vektörlere ayrılır. Burada her bir kullanıcı için, $\log_2(M)$ bit bir BPSK simgesini, $\log_2(N)$ bit ise bir yayıcı kodu seçerek IQ -bileşenlerinde ayrı ayrı iletilir. Böylece, her bir kullanıcı için $2 \log_2(M)$ ve $2 \log_2(N)$ bitleri sırasıyla IQ -bileşenlerinin BPSK'lı simgesinde ve yayıcı kod indisinde iletilmektedir.

Birinci zaman aralığında, R 'ye gelen ve sönümlenmeye uğramış gürültülü işaret mükemmel taşıyıcı sezimi ve çip hızında örneklenerek sayısal çevrildikten sonra IQ -bileşenleri için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{r}_R^I = s_{1I} \mathbf{c}_{i_1}^1 h_1 + s_{2I} \mathbf{c}_{i_2}^2 h_2 + \mathbf{n}^I \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_R^Q = s_{1Q} \mathbf{c}_{i_1}^1 h_1 + s_{2Q} \mathbf{c}_{i_2}^2 h_2 + \mathbf{n}^Q, \quad (2)$$

burada, $s_{1I}, s_{1Q}, s_{2I}, s_{2Q} \in \{\pm 1\}$ olup BPSK simgesidir. h_1 ve h_2 Rayleigh sönümlenmeli kanal katsayısı olup $h_1, h_2 \sim \mathcal{C}(0, 1)$ 'dir. $\mathbf{n} \sim \mathcal{C}(0, N_0)$ sıfır ortalamalı ve boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss rastgele değişkenidir. R 'de alınan \mathbf{r}_R^I ve \mathbf{r}_R^Q işaretlerinden öncelikle kullanıcılara ait yayıcı kod indisleri kestirilir. Bunun için korelatör çıktıların maksimum indisli elemanı aranır ve maksimum elemana ait indis seçilir. Çünkü, eğer $i = j$, $\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_j = 1$ 'dir; eğer $i \neq j$, $\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_j = 0$ 'dir. Böylece, $\hat{i}_{1I}, \hat{i}_{1Q}, \hat{i}_{2I}$ ve \hat{i}_{2Q} indisleri kestirilmiş olur. R 'de korelatör çıktıları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^I &= \mathbf{C}_1^T \mathbf{r}_R^I = \mathbf{C}_1^T \left(s_{1I} \mathbf{c}_{i_{1I}}^1 h_1 + s_{2I} \mathbf{c}_{i_{2I}}^2 h_2 + \mathbf{n}^I \right) \\ &= \left[\underbrace{\tilde{n}_1^I, \tilde{n}_2^I, \dots, \tilde{n}_i^I}_{i \neq i_{1I}}, \underbrace{(E_c s_{1I} h_1 + \tilde{n}_{i_{1I}}^I)}_{i = i_{1I}}, \underbrace{\tilde{n}_{i+1}^I, \dots, \tilde{n}_N^I}_{i \neq i_{1I}} \right]^T \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^Q &= \mathbf{C}_1^T \mathbf{r}_R^Q = \mathbf{C}_1^T \left(s_{1Q} \mathbf{c}_{i_{1Q}}^1 h_1 + s_{2Q} \mathbf{c}_{i_{2Q}}^2 h_2 + \mathbf{n}^Q \right) \\ &= \left[\underbrace{\tilde{n}_1^Q, \tilde{n}_2^Q, \dots, \tilde{n}_i^Q}_{i \neq i_{1I}}, \underbrace{(E_c s_{1Q} h_1 + \tilde{n}_{i_{1Q}}^Q)}_{i=i_{1Q}}, \underbrace{\tilde{n}_{i+1}^Q, \dots, \tilde{n}_N^Q}_{i \neq i_{1Q}} \right]^T\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^I &= \mathbf{C}_2^T \mathbf{r}_R^I = \mathbf{C}_2^T \left(s_{1I} \mathbf{c}_{i_{1I}}^1 h_1 + s_{2I} \mathbf{c}_{i_{2I}}^2 h_2 + \mathbf{n}^I \right) \\ &= \left[\underbrace{\tilde{n}_1^I, \tilde{n}_2^I, \dots, \tilde{n}_i^I}_{i \neq i_{2I}}, \underbrace{(E_c s_{2I} h_2 + \tilde{n}_{i_{2I}}^I)}_{i=i_{2I}}, \underbrace{\tilde{n}_{i+1}^I, \dots, \tilde{n}_N^I}_{i \neq i_{2I}} \right]^T\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^Q &= \mathbf{C}_2^T \mathbf{r}_R^Q = \mathbf{C}_2^T \left(s_{1Q} \mathbf{c}_{i_{1Q}}^1 h_1 + s_{2Q} \mathbf{c}_{i_{2Q}}^2 h_2 + \mathbf{n}^Q \right) \\ &= \left[\underbrace{\tilde{n}_1^Q, \tilde{n}_2^Q, \dots, \tilde{n}_i^Q}_{i \neq i_{2I}}, \underbrace{(E_c s_{2Q} h_2 + \tilde{n}_{i_{2Q}}^Q)}_{i=i_{2Q}}, \underbrace{\tilde{n}_{i+1}^Q, \dots, \tilde{n}_N^Q}_{i \neq i_{2Q}} \right]^T\end{aligned}\quad (6)$$

burada, $E_c = 1/\sqrt{N_c} \sum_{l=1}^{N_c} c_{i,l}^2$, \tilde{n}_i^I ve \tilde{n}_i^Q gürültünün geri yayılmış halidir. $\hat{i}_{1I}, \hat{i}_{1Q}, \hat{i}_{2I}$ ve \hat{i}_{2Q} indisleri $\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^I, \tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^Q, \tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^I$ ve $\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^Q$ vektörlerinin maksimum genlikli elemanının indislerine eşittir ve aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}\hat{i}_{1I} &= \arg \max_i \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^I| \right\}, \quad \hat{i}_{1Q} = \arg \max_i \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^Q| \right\} \\ \hat{i}_{2I} &= \arg \max_i \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^I| \right\}, \quad \hat{i}_{2Q} = \arg \max_i \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^Q| \right\}.\end{aligned}\quad (7)$$

$\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^I, \tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^Q, \tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^I$ ve $\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^Q$ vektörlerinin $\hat{i}_{1I}, \hat{i}_{1Q}, \hat{i}_{2I}$ ve \hat{i}_{2Q} indisli elemanları üzerinden optimum ML sezici kullanılırsa, $\hat{s}_{1I}, \hat{s}_{1Q}, \hat{s}_{2I}$ ve \hat{s}_{2Q} simgeleri R' 'de aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}\hat{s}_{1I}^R &= \arg \min_{s \in \{+1, -1\}} \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^I - E_c s h_1|^2 \right\}, \quad \hat{s}_{1Q}^R = \arg \min_{s \in \{+1, -1\}} \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_1}^Q - E_c s h_1|^2 \right\} \\ \hat{s}_{2I}^R &= \arg \min_{s \in \{+1, -1\}} \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^I - E_c s h_2|^2 \right\}, \quad \hat{s}_{2Q}^R = \arg \min_{s \in \{+1, -1\}} \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_{R,S_2}^Q - E_c s h_2|^2 \right\}.\end{aligned}\quad (8)$$

R' 'de elde edilen $(\hat{i}_{1I}, \hat{i}_{1Q}, \hat{i}_{2I}, \hat{i}_{2Q})$ indisleri ve $\hat{s}_{1I}, \hat{s}_{1Q}, \hat{s}_{2I}, \hat{s}_{2Q}$ simgeleri kullanılarak S_1 ve S_2 kullanıcılarına ait bit dizileri $\hat{\mathbf{b}}_1^R$ ve $\hat{\mathbf{b}}_2^R$ elde edilir. R' 'de elde edilen bit dizisine aşağıdaki gibi XOR işlemi uygulanarak ağ kodlaması elde edilir:

$$\mathbf{b}_R = \hat{\mathbf{b}}_1^R \oplus \hat{\mathbf{b}}_2^R.\quad (9)$$

İletişim protokolünün ikinci zaman diliminde, R' 'de, S_1 ve S_2 kullanıcılarının vericilerinde olduğu gibi, \mathbf{b}_R bit dizisi, $2\log_2(M)$ ve $2\log_2(N)$ bitlik alt vektörlere ayrılır. $2\log_2(M)$ bit s_{RI} ve s_{RQ} BPSK simgelerini, $2\log_2(N)$ bit ise hem S_1 hem de S_2 için ayrı ayrı yayıcı kodu seçerek IQ -bileşenlerinde kullanıcılara iletmektedir. Sonuç olarak, $j \in \{1, 2\}$ olmak üzere, j 'nci kullanıcıya gelen sönülmeye uğramış gürültülü işaret mükemmel taşıyıcı sezimi ve çip hızında örneklenerek sayısal çevrildikten sonra IQ -bileşenleri için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{r}_j^I = s_{RI} (\mathbf{c}_{i_{1I}}^1 + \mathbf{c}_{i_{2I}}^2) h_j + \mathbf{n}^I\quad (10)$$

$$\mathbf{r}_j^Q = s_{RQ} (\mathbf{c}_{i_{1Q}}^1 + \mathbf{c}_{i_{2Q}}^2) h_j + \mathbf{n}^Q.\quad (11)$$

Alınan işaretler R' 'de olduğu gibi ilk olarak korelatöre uygulanır ve daha sonra korelatör çıkışları maksimum seçiciye gönderilse, yayıcı kod indisleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}\hat{i}_{jI} &= \arg \max_i \left\{ \left| \underbrace{\tilde{n}_1^I, \dots, \tilde{n}_i^I}_{i \neq i_{jI}}, \underbrace{(E_c s_{RI} h_j + \tilde{n}_{i_{jI}}^I)}_{i=i_{jI}}, \underbrace{\tilde{n}_{i+1}^I, \dots, \tilde{n}_N^I}_{i \neq i_{jI}} \right| \right\} \\ \hat{i}_{jQ} &= \arg \max_i \left\{ \left| \underbrace{\tilde{n}_1^Q, \dots, \tilde{n}_i^Q}_{i \neq i_{jQ}}, \underbrace{(E_c s_{RQ} h_j + \tilde{n}_{i_{jQ}}^Q)}_{i=i_{jQ}}, \underbrace{\tilde{n}_{i+1}^Q, \dots, \tilde{n}_N^Q}_{i \neq i_{jQ}} \right| \right\}.\end{aligned}\quad (12)$$

$\tilde{\mathbf{r}}_j^I$ ve $\tilde{\mathbf{r}}_j^Q$ vektörlerinin \hat{i}_{jI} ve \hat{i}_{jQ} indisli elemanları üzerinden optimum ML sezimi yapılırsa, kullanıcılara ait simgeler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}\hat{s}_{jI} &= \arg \min_{s \in \{+1, -1\}} \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_j^I - E_c s h_j|^2 \right\} \\ \hat{s}_{jQ} &= \arg \min_{s \in \{+1, -1\}} \left\{ |\tilde{\mathbf{r}}_j^Q - E_c s h_j|^2 \right\}.\end{aligned}\quad (13)$$

Kullanıcılar, $\hat{i}_{jI}, \hat{i}_{jQ}, \hat{s}_{jI}$ ve \hat{s}_{jQ} indis ve simgeleri kullanarak, bit düzeyinde geri eşleme ile $\hat{\mathbf{b}}_R^j$ kestirilmiş bit dizisini elde eder. Sonuç olarak, her bir kullanıcı diğer kullanıcının bilgisine aşağıdaki gibi karar verir:

$$\hat{\mathbf{b}}_2 = \hat{\mathbf{b}}_R^1 \oplus \mathbf{b}_1 \quad \hat{\mathbf{b}}_1 = \hat{\mathbf{b}}_R^2 \oplus \mathbf{b}_2.\quad (14)$$

III. İKİ YÖNLÜ KOD İNDEKS MODÜLASYONUNUN PERFORMANS ANALİZİ

Ele alınan sistem modelinde, \mathcal{P}_{S_jR} ve \mathcal{P}_{RS_j} sırasıyla S_j 'den R' 'ye ve R' 'den S_j 'ye olan hata olasılıklarını ifade etmek üzere, herhangi bir kullanıcının toplam ortalama BER ifadesi \mathcal{P}_e aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_e &= 1 - (1 - \mathcal{P}_{S_jR})(1 - \mathcal{P}_{RS_j}) \\ &= \mathcal{P}_{S_jR} + \mathcal{P}_{RS_j} - \mathcal{P}_{S_jR} \mathcal{P}_{RS_j}.\end{aligned}\quad (15)$$

\mathcal{P}_{S_jR} olasılığı, indis ve simgede taşınan bit sayısı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathcal{P}_{S_jR} = \frac{2 \log_2(M)}{m} \mathcal{P}_m + \frac{2 \log_2(N)}{m} \mathcal{P}_c,\quad (16)$$

burada \mathcal{P}_m , modüle edilen bitlerin BER olasılığı olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

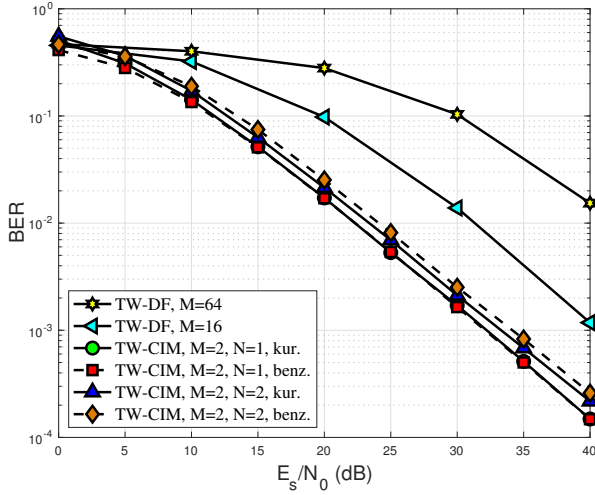
$$\mathcal{P}_m = \mathcal{P}_{yi} (1 - \mathcal{P}_c) + 0.5 \mathcal{P}_c,\quad (17)$$

burada \mathcal{P}_{yi} , geleneksel M -dereceli yayılı izgenin BER ifadesi olup $M = 2$ için (BPSK) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mathcal{P}_{yi} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E_c/N_0}{E_c/N_0 + 1}} \right).\quad (18)$$

\mathcal{P}_c yayıcı kod indislerinde taşınan eşleme bitinin hata olasılığı olup (12) nolu denklem Rayleigh kanallarda maksimize edildiğinde \mathcal{P}_c şu şekilde hesaplanır [9]:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_c &= \frac{1}{N \sqrt{\pi \alpha}} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{|h_j|^2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{|h_j|^2 \sqrt{2\alpha}} \right) \right]^{2N-1} \\ &\times \left(e^{-\frac{(x-\beta|h_j|^2)^2}{2\alpha|h_j|^4}} + e^{-\frac{(x+\beta|h_j|^2)^2}{2\alpha|h_j|^4}} \right) \frac{h_j}{\sigma_h^2} e^{-\frac{h_j^2}{2\sigma_h^2}} d h_j d x.\end{aligned}\quad (19)$$



Şekil 2: $m = 4$ ve $m = 6$ bit için, TW-CIM ve TW-DF yöntemlerinin BER başarımlarının karşılaştırılması.

Son olarak, (15)'de $\mathcal{P}_{S_j R} \approx \mathcal{P}_{RS_j}$ olarak kabul edilirse, \mathcal{P}_e aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mathcal{P}_e \approx 2\mathcal{P}_{S_j R} - \mathcal{P}_{S_j R}^2. \quad (20)$$

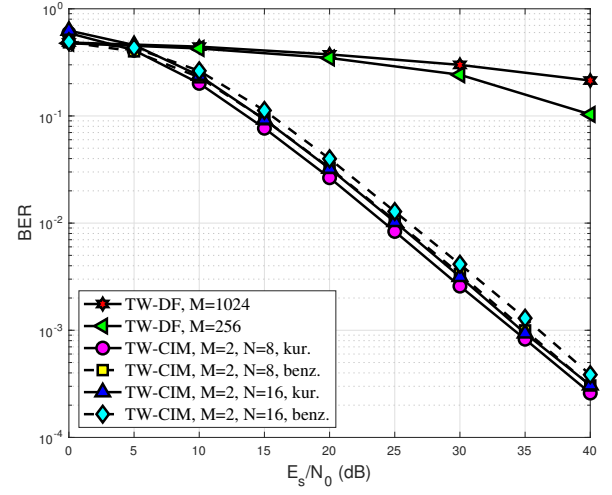
(19), (18) ve (14), (20)'de yerine yazılırsa toplam ortalama BER ifadesi elde edilmiş olur.

IV. BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ

Bu bölümde, önerilen TW-CIM sisteminin benzetim sonuçları, Rayleigh sönümlenmeli kanallarda BPSK modülasyonu için sunulmuştur. R , S_1 ve S_2 de iletilen simgelerin kestirimi için optimum ML tekniği, yayıcı kod indislerinin kestirimi için ise korelatör kullanılmıştır. Ortalama BER başarımları, Monte Carlo simülasyon yöntemi ile elde edilmiştir. $\text{SNR}(\text{dB}) = 10 \log_{10}(E_s/N_0)$ olup burada $E_s = \sum_{l=1}^{N_c} \left(\frac{c_{l,k}}{\sqrt{N_c}} \right)^2$ ortalama simge enerjisidir. Ayrıca, iletim enerjisinin sabit kalması için yayıcı kod indisinde taşımaktadır.

Şekil 2'de $N_c = 16$ olması durumunda TW-CIM ve TW-DF yöntemlerinin $m = 4$ ve $m = 6$ bit için BER başarımları eğrileri sunulmuştur. $m = 4$ bitlik iletimde TW-CIM sistemi için $M = 2$ ve $N = 2$ iken TW-DF sistemi için ise $M = 16$; $m = 6$ bitlik iletimde TW-CIM sistemi için $M = 2$ ve $N = 4$ iken TW-DF sistemi için ise $M = 64$ 'dür. Böylece TW-CIM yöntemi, 4 bitlik iletim için 2 biti, 6 bitlik iletim için ise 4 biti yayıcı kod indisinde taşımaktadır.

Şekil 3'de $N_c = 32$ olması durumunda TW-CIM ve TW-DF yöntemlerinin $m = 8$ ve $m = 10$ bit için BER başarımları eğrileri M -PSK için karşılaştırılmıştır. $m = 8$ bitlik iletimde TW-CIM sistemi için $M = 2$ ve $N = 8$ iken TW-DF sistemi için ise $M = 256$; $m = 10$ bitlik iletimde ise TW-CIM sistemi için $M = 2$ ve $N = 16$ iken TW-DF sistemi için ise $M = 1024$ 'tür. Böylece TW-CIM yöntemi; 8 bitlik iletim için 6 biti, 10 bitlik iletim için ise 8 biti yayıcı kod indisinde taşımaktadır. Sonuç olarak, Şekil 2 ve Şekil 3 dikkate alındığında, TW-CIM yöntemin TW-DF yöntemine göre, mükemmel enerji verimli olduğu, daha iyi başarıma sahip olduğu ve hatırı sayılır bir SNR kazancına sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3: $m = 8$ ve $m = 10$ bit için, TW-CIM ve TW-DF yöntemlerinin BER başarımlarının karşılaştırılması.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, DF yöntemi kullanan iki-yönlü ağ kodlamalı işbirlikli haberleşme sistemleri için, yüksek veri hızında iletim gerçekleştiren, enerji verimli ve hata başarımları oldukça iyi olan ve TW-CIM olarak adlandırılan yeni bir iletim tekniği önerilmiştir. Geleneksel DF tabanlı iki-yönlü ağ kodlamalı sistemde iki kullanıcı arasında haberleşme için üç zaman aralığı gerekirken, önerilen sistem iki zaman aralığında daha hızlı, daha enerji verimli ve daha iyi başarımları sağlayarak haberleşmeyi gerçekleştirmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Cerwall, "Ericsson mobility report," *White Paper*, 2017.
- [2] S. Talwar, D. Choudhury, K. Dimou, E. Aryafar, B. Bangerter, and K. Stewart, "Enabling technologies and architectures for 5g wireless," in *Microwave Symposium (IMS), 2014 IEEE MTT-S International*, pp. 1–4, IEEE, 2014.
- [3] S. Buzzi, I. Chih-Lin, T. E. Klein, H. V. Poor, C. Yang, and A. Zappone, "A survey of energy-efficient techniques for 5g networks and challenges ahead," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 697–709, 2016.
- [4] P. Gandotra and R. K. Jha, "A survey on green communication and security challenges in 5g wireless communication networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 96, pp. 39–61, 2017.
- [5] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693–16746, 2017.
- [6] M. Wen, X. Cheng, and L. Yang, *Index modulation for 5G wireless communications*. Springer, 2017.
- [7] Z. Yiğit and E. Başar, "İki yönlü dik uzaysal modülasyon," *EMO BİLİMSEL DERGİ*, vol. 7, no. 14, pp. 21–27.
- [8] T. S. Rappaport *et al.*, *Wireless communications: principles and practice*, vol. 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [9] G. Kaddoum, Y. Nijssure, and H. Tran, "Generalized code index modulation technique for high-data-rate communication systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 9, pp. 7000–7009, 2016.
- [10] F. Cogen, E. Aydin, N. Kabaoglu, E. Basar, and H. Ilhan, "Code index modulation and spatial modulation: A new high rate and energy efficient scheme for MIMO systems," in *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. IEEE, pp. 1–4, 2018.