

# Kod Kitabı Tasarımının Geleneksel SCMA Sistem Performansına Etkisi

## The Effect of Codebook Design on the Conventional SCMA System Performance

Furkan Kiracı, Emine Bardakçı, Yalçın Şadi, Serhat Erköçük  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
{furkan.kiraci, emine.bardakci, yalcin.sadi, serkucuk}@khas.edu.tr

**Özetçe** — 4G sistemleri geleneksel olarak Dikgen Frekans-Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) tekniğini kullanırlar. Bu yöntemde her kullanıcıya kendisine ait bir kaynak tahsis edildiğinden spektral verimliliği düşüktür. Bu duruma alternatif olarak geliştirilen ve yeni nesil sistemler için düşünülen Dikgen-olmayan Çoklu Erişim (Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) tekniği, farklı kullanıcıların aynı kaynakları kullanmasına izin verir ve böylece spektral verimlilik artırılır. NOMA'nın kod tabanlı yaklaşımı olan Seyrek Kodlu Çoklu Erişim (Sparse Code Multiple Access, SCMA) tekniğinin performansı kod kitabı tasarımına bağlıdır. Bu çalışmada, literatürdeki SCMA çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılan kod kitabının tasarımı incelenerek işaret kümesi noktaları arasındaki uzaklıkların artırılması ve sistem performansının iyileştirilmesi üzerine çalışılmıştır. İki farklı yaklaşım kullanılarak yaygın olarak kullanılan kod kitabı modifiye edilmiş ve yüksek işaret gürültü oranı (signal-to-noise-ratio, SNR) bölgesinde yaklaşık 1dB'lik kazanç elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** — 5G, NOMA, SCMA, kod kitabı tasarımı

**Abstract** — In 4G systems, Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) has been used conventionally for multiple access purposes. This technique has low spectral efficiency since it allocates the resources orthogonally to each user. As an alternative to this technique, Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) has been proposed for new generation systems as it allows different users to use the same resources and therefore, increases spectral efficiency. Sparse Code Multiple Access (SCMA) is a code-based NOMA technique and its performance depends on codebook design. In this study, a conventionally used codebook design in the literature has been considered and the system performance has been improved by increasing the distance between the signal constellation points. Considering two different design approaches, the conventional codebook has been modified and about 1dB gain has been achieved in the high signal-to-noise-ratio (SNR) region.

**Keywords** — 5G, NOMA, SCMA, codebook design

978-1-7281-7206-4/20/\$31.00 ©2020 IEEE

### I. GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişmesine bağlı olarak günümüzde mobil iletişimde kullanılan 4G haberleşme sistemleri, kullanıcı sayısı ve Nesnelerin İnterneti kullanımı giderek arttığından, veri hızı, hizmet kalitesi, bekleme süresi, vb. ihtiyaçlara yetersiz kalmaktadır. 5G ile birlikte yüksek veri hızı, daha iyi hizmet kalitesi ve düşük bekleme süresi gibi gereksinimlerin yeni çoklu erişim sistem modelleriyle karşılanması öngörülmektedir [1]. 4G sistemlerinde Dikgen Frekans-Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır, fakat 5G sistem gereksinimlerini yeteri kadar karşılayamadığından Dikgen-olmayan Çoklu Erişim (Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) tekniğinin kullanılması uygun görülmektedir [2]. NOMA, yüksek spektral verimlilik sağlar ve kullanıcıların aynı radyo kaynaklarını paylaşmasına izin vererek yoğun ağları destekler. Geleneksel dikgen çoklu erişim (OMA) sistemi ise birden fazla kullanıcının farklı radyo kaynaklarını frekans ve/veya zamanda ayrı bir şekilde kullanması prensibine dayanmaktadır [3]. OMA'nın aksine, NOMA, kullanıcıları güç veya kod alanına bölerek aynı kaynak bloklarında aynı anda birden fazla kullanıcının hizmet almasına olanak sağlar. Bu NOMA prensibi, vericideki süperpozisyon kodlamasına ve alıcılarda ardışık girişim iptali üzerine kuruludur [4].

Temel olarak NOMA iki şekilde kullanılmaktadır [5]. Bunlar, güç tabanlı NOMA ve kod tabanlı NOMA'dır. Bu bildiriye, kod tabanlı NOMA yöntemlerinden Seyrek Kodlu Çoklu Erişim (Sparse Code Multiple Access, SCMA) tekniği üzerinde durulacaktır. Kod tabanlı NOMA yöntemlerinde çoklu erişim için Kod-Bölmeli Çoklu Erişim (Code-Division Multiple Access, CDMA) türü yaklaşımlar kullanılır. SCMA de bu bağlamda CDMA temelli Düşük Yoğunluklu İmza (Low Density Signature, LDS) yöntemi kullanılarak türetilmiş yöntemlerden birisidir [6]. LDS'e göre en önemli avantajı kullanıcıların çok boyutlu kod kelimeleri iletmeye (yani çok boyutlu işaret kümesi ile veri iletmeye eşdeğer) olanak

tanımasıdır. Bu bağlamda SCMA sistem tasarımında en önemli konuların başında kod kitabı tasarımı gelir. Kod kitabı tasarımı SCMA’de sistem performansını iyileştirme açısından halen açık uçlu bir problemdir [7]. Her kod kitabında kod kelimeleri bulunmaktadır. Kod kelimeleri ise SCMA’in kazancını belirleyen karmaşık işaret değerlerine sahip işaret kümeleridir (signal constellations). Optimum kod kitabı ise bu kod kelimelerinin birbirlerine olan uzaklıkları maksimize edildiği zaman elde edilir [8].

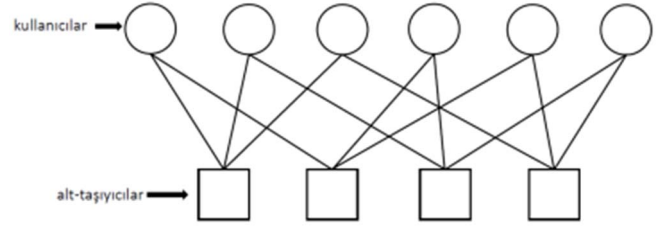
Literatürde SCMA kod kitabı tasarımı üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar vardır. [8]’deki çalışmada çoklu-girişli-çoklu-çıkışlı bir sistemin limit hızını maksimize etmek üzere işaret kümesi tasarımı yapılmıştır. [9]’daki çalışmada kullanıcılar ve baz istasyonu arasındaki mevcut kanal kazanımlarına dayanarak üç kod kitabı atama yöntemi önerilmiş ve SCMA’in geleneksel kod kitabı atama yöntemine göre kazanç sağladığı gösterilmiştir. [10]’daki çalışmada işaret kümesi döndürülmesi ile minimum Öklid uzaklığını maksimize etmek üzerine bir yöntem önerilmiştir. [11]’deki çalışmada QAM işaret kümelerinde enerji çeşitliliğinin parametrik olarak değiştirilmesi ile kod kitabı tasarımı gerçekleştirilmiştir. [12]’deki çalışmada faz-genlik yaklaşımı ile elde edilmiş iki farklı kod kitabının performans sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmaların ortak özelliği önerilen yöntemin parametrelerinin değiştirilmesi ile ne kadar performans kazancı elde edileceğinin gösterilmesidir. Diğer taraftan kod kitabı tasarımı yerine değişik SCMA kurulumu yapılan birçok çalışmada 2015 yılında Çin’de gerçekleştirilen 5G Algoritma Yenilikçilik Yarışması kapsamında sunulan kod kitabı [13] herhangi bir değişiklik yapılmadan yaygın bir şekilde kullanılmıştır [14], [15]. Bu çalışmada, literatürdeki SCMA çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılan kod kitabının tasarımı [13] incelenerek işaret kümesi noktaları arasındaki uzaklıkların artırılması ve sistem performansının iyileştirilmesi üzerine çalışılacaktır. İşaret kümesi noktaları arasındaki uzaklıklarının artırılması ve faz-genlik rotasyonu üzerine iki farklı yaklaşımla yaygın olarak kullanılan kod kitabı modifiye edilerek SCMA sistemlerinde performans kazancı incelenecektir.

## II. SİSTEM MODELİ

SCMA sisteminde, her kod kitabının  $K$  uzunluğunda  $M$  adet kod kelimesinden oluştuğu bu modelde,  $J$  kullanıcı sayısını temsil etsin. Burada  $K$  aynı zamanda alt-taşıyıcı sayısını da göstermektedir. Her kod kelimesinde sıfır olmayan eleman sayısı  $N$  ile gösterilmektedir. Buna göre  $N < K$  durumu seyrekliği,  $J > K$  durumu ise fazla yükleme olduğunu göstermektedir. Bu aynı zamanda  $J$  adet kod kelimesinin  $K$  alt-taşıyıcı üzerinden gönderildiği anlamını da taşımaktadır.

Faktör grafik matrisi  $\mathbf{F}$ ,  $K$  satırı ve  $J$  sütunu olan bir matristir ve kullanıcılarla alt-taşıyıcı ilişkisini belirler. Literatürde en sık kullanılan matris (1)’de, bu matrisin faktör grafik gösterimi ise  $J = 6$  and  $K = 4$  için Şekil 1’de verilmiştir.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



Şekil 1.  $J = 6$  ve  $K = 4$  için SCMA’in faktör grafik gösterimi

Bu matrise göre  $J$  kullanıcıdan her biri (yani her bir sütun)  $K$  alt-taşıyıcının  $d_v = 2$  tanesi üzerinden veri iletimi gerçekleştirir. Diğer taraftan  $K$  alt-taşıyıcı açısından değerlendirecek olursak, her alt-taşıyıcı (yani her bir satır) aynı anda  $d_f = 3$  kullanıcı tarafından kullanılmaktadır.

Alıcıda  $k$ . alt-taşıyıcıya ulaşan işaret

$$y_k = \sum_{j=1}^J h_{kj} x_{kj} + n_k \quad (2)$$

olarak gösterilebilir. Burada  $x_{kj}$ ,  $\mathbf{x}_j$  kod kelimesinin  $j$ . kullanıcı için  $k$ . elemanını,  $h_{kj}$   $j$ . kullanıcının  $k$ . alt-taşıyıcıdaki kanal katsayı kazancını,  $n_k$  ise karmaşık-değerli gürültü terimini göstermektedir. Alıcıdaki işaret, vektör gösterimi olarak tüm alt-taşıyıcılar için şu şekilde ifade edilebilir:

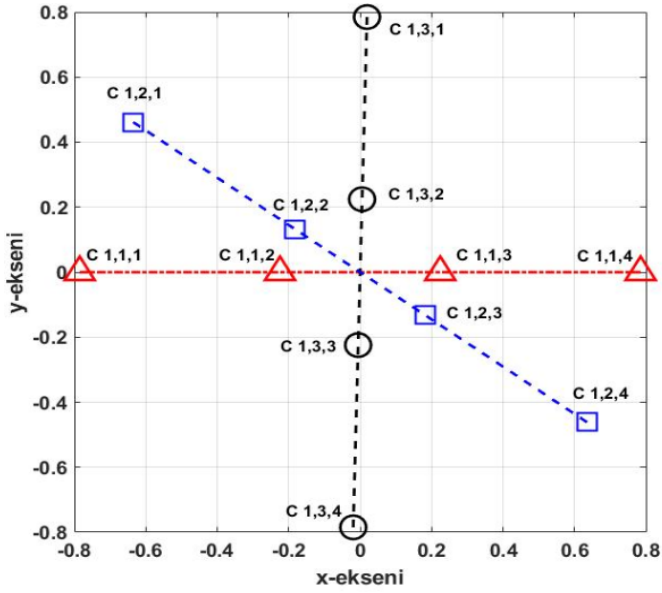
$$\mathbf{y} = \sum_{j=1}^J \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_j + \mathbf{n} \quad (3)$$

Burada  $\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T$   $j$ . kullanıcının SCMA kod kelimesini,  $\mathbf{h}_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj}]^T$   $j$ . kullanıcı için kanal vektörünü,  $\mathbf{n}$  ise Gauss gürültüsünü göstermektedir. Alıcıda, her alt-taşıyıcıda toplam kullanıcı sayısından az sayıda kullanıcı işareti olacağı için makul karmaşıklıkta mesaj iletme algoritmasına (Message Passing Algorithm, MPA) dayalı çoklu kullanıcı algılama teknikleri uygulanabilir. MPA yönteminin detayları [6]’da bulunabilir.

## III. İŞARET KÜMESİ VE KOD KİTABI TASARIMI

SCMA’de kod kitabındaki işaret kümelerinin tasarımı, SCMA sisteminin performansında önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde  $J = 6$  ve  $K = 4$  için (1)’de verilen faktör grafik matrisine uygun olarak tasarlanmış olan kod kitabı [13]’te verilmiştir. Buna göre her bir kullanıcı 2-bitlik bilgiyi  $M = 4$  işaret kümesi noktalarından birisini seçerek  $d_v = 2$  farklı alt-taşıyıcı üzerinden gönderir. Dolayısıyla her bir alt-taşıyıcıda  $d_f = 3$  kullanıcının işareti iletilir. [13]’teki kod kitabı tasarımı dikkate alındığında birinci alt-taşıyıcı üzerinden iletilen işaret kümeleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere tasarlanmış olan işaret kümeleri kendi aralarında doğrusal işaret

kümesi noktalarından oluşmakta ve açısız rotasyonla elde edilebilmektedirler.



Şekil 2. [13]'te verilen kod kitabının birinci alt-taşıyıcısındaki işaret kümeleri.

Denklem (3)'te verilen SCMA kod kelimesi gösterimini daha detaylı anlatabilmek için karmaşık değerlere sahip işaret kümesi noktasını  $c_{k,j,m}$  olarak yeniden tanımlayalım. Burada  $k \in \{1,2, \dots, K\}$  alt-taşıyıcı indeksini,  $j \in \{1,2, \dots, d_f\}$  kullanıcı indeksini,  $m \in \{1,2, \dots, M\}$  ise mesaj bilgisini belirtmektedir. Şekil 2'de  $k = 1$  olduğu durumda  $d_f = 3$  ve  $M = 4$  durumları için işaret kümeleri sunulmuştur.

Bu çalışmada geleneksel (yaygın olarak kullanılan) kod kitabında bulunan işaret kümelerindeki noktalar arası mesafeyi maksimize ederek geleneksel kod kitabı kullanımına göre daha iyi bir sistem performansı elde edilmesi hedeflenmektedir. Bununla ilgili iki farklı yaklaşım uygulanmıştır. İlk yaklaşımda işaret kümelerindeki noktalar arasındaki uzaklıklar hesaplanıp, işaret kümelerinin en yakın noktalarının arasındaki uzaklık kademeli olarak artırılıp, enerjileri sabit kalacak şekilde o noktalardan yeni işaret kümeleri oluşturulmuştur. Bu yaklaşım Algoritma 1'de sunulmuştur. Burada,  $\varepsilon_{k,j}$   $k$ . alt-taşıyıcıdaki  $j$ . kullanıcının işaret kümesinin enerjisini,  $\|\cdot\|$  operatörü Öklid normunu,  $d_{k,j,m}$  diğer işaret kümesi noktalarının  $m$ . işaret kümesi noktasına göre uzaklık değerlerini,  $(d_{k,j,m})_{\min}$  ise en küçük Öklid uzaklık değerini vermektedir. En küçük uzaklık değerini  $\Delta$  kadar artırarak yeni işaret kümesi noktaları tanımlanmakta, enerjinin sabit kalması koşuluyla da Öklid uzaklığı en büyük olan noktalar ise birbirlerine yakın konuma getirilmektedir.

**Algoritma 1:** İşaret kümesi noktaları arasındaki uzaklığı artırma yaklaşımı

- 1: **for**  $c_{k,j} = [c_{k,j,1}, c_{k,j,2}, \dots, c_{k,j,M}]$  **do**
- 2: Hesapla  $\varepsilon_{k,j} = \|c_{k,j}\|^2$

- 3: **for**  $k = 1:K$ ;  $j = 1:d_f$ ;  $m = 1:M$
- 4:  $d_{k,j,m} = \|c_{k,j,m} - c_{k,j,m'}\|$ ;  $m \neq m'$
- 5: **end**
- 6: **for**  $(d_{k,j,m})_{\min}$ ;  $j = 1:d_f$
- 7:  $(d_{k,j,m})_{\min} \leftarrow (d_{k,j,m})_{\min} + \Delta$
- 8:  $c_{k,j,m} \leftarrow (c_{k,j,m})_{\text{new}}$
- 9: Kontrol et  $\varepsilon_{k,j} = (\varepsilon_{k,j})_{\text{new}}$
- 10: **end**
- 11: **end**

İkinci yaklaşımda ise farklı alt-taşıyıcılarda bulunan işaret kümeleri kendi aralarında farklı açılara göre konumlandırıldığı için kullanıcıya ait işaret kümelerinin aralarındaki açılar eşit olarak  $\pi/d_f$  olacak şekilde ayarlanmış ve işaret kümeleri oluşturulmuştur. Ardışık iki işaret kümesi arasındaki dar açı  $\theta_{k,j}$  ile gösterildiği durumda yeni işaret kümesi elde etme yaklaşımı Algoritma 2'de sunulmuştur. Burada,  $x$  ve  $y$  değişkenleri doğrusal olan  $j$ . işaret kümesindeki her bir noktanın koordinatlarını belirtmekte ve her bir işaret kümesi noktası  $(\pi/d_f - \theta_{k,j})$  açısıyla saat yönünde döndürülmektedir. Yeni oluşan işaret kümelerinin enerjileri ise değişmemektedir.

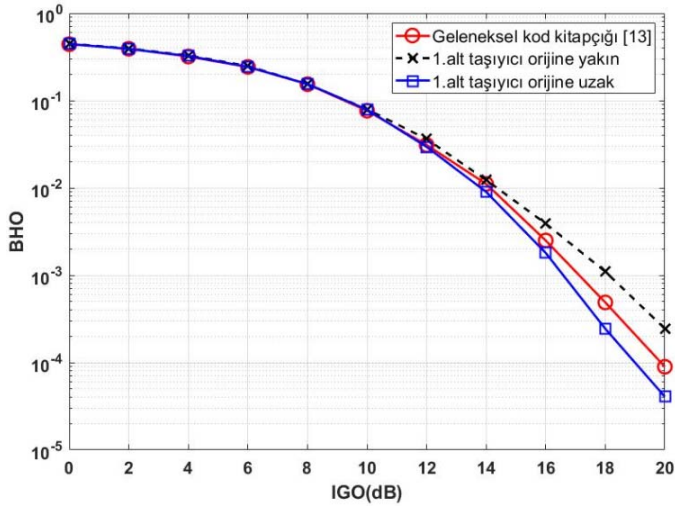
**Algoritma 2:** Faz-genlik rotasyonu ile işaret kümesi elde etme

- 1: **for**  $c_{k,j} = [c_{k,j,1}, c_{k,j,2}, \dots, c_{k,j,M}]$  **do**
- 2:  $\theta_{k,j}$  açılarını hesapla;  $j = 1:d_f$
- 3: **for**  $j = 1:d_f$
- 4:  $(c_{k,j})_{\text{new}} = (x \cos(\pi/d_f - \theta_{k,j}) - y \sin(\pi/d_f - \theta_{k,j}), x \sin(\pi/d_f - \theta_{k,j}) + y \cos(\pi/d_f - \theta_{k,j}))$
- 5:  $c_{k,j,m} \leftarrow (c_{k,j,m})_{\text{new}}$
- 6: **end**
- 7: **end**

#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

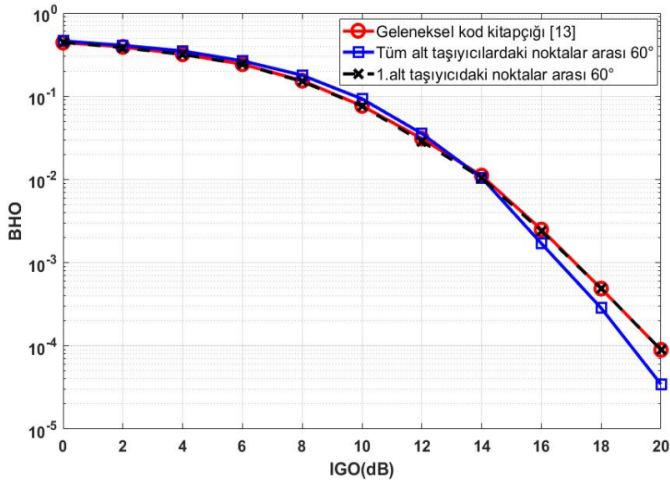
Bu bölümde, benzetim çalışmaları ile önerilen iki algoritma sonucu elde edilen kod kitaplarını ve geleneksel kod kitabını kullanarak farklı işaret-gürültü-oranlarında (IGO) SCMA sistemlerinin bit-hata oranları (BHO) elde edilmiştir. Gönderilen işaretlerin toplanır beyaz Gauss gürültüsü kanalından geçip, alıcıda kullanıcı işaretlerinin MPA yaklaşımı ile çözüldüğü durumda sistem parametreleri  $J = 6$ ,  $K = 4$ ,  $M = 4$ ,  $d_f = 3$  ve  $d_v = 2$  olarak belirlenmiştir.

Şekil 3'te Algoritma 1 ile elde edilen işaret kümeleri noktaları arasındaki uzaklığın değiştirildiği durumda karşılaştırılmalı BHO performansları sunulmuştur. İşaret kümeleri enerjilerinin sabit kaldığı durumda, yalnızca birinci alt-taşıyıcıdaki işaret kümelerinin uzaklıklarının artırılması ve azaltılması ile geleneksel kod kitabına göre sırasıyla daha iyi ve daha kötü BHO performansı elde edilmiştir. İşaret kümelerinin en küçük Öklid uzaklık değerleri artırıldıkça yaklaşık 1dB'lik kazanç elde edilmiştir.



Şekil 3. İşaret kümeleri noktaları arasındaki uzaklığın değiştirildiği durumda BHO performansı.

Şekil 4'te Algoritma 2 ile elde edilen işaret kümeleri arasındaki açıların artırılması ile ilgili karşılaştırmalı BHO performans sonuçları sunulmuştur. Bir alt-taşıyıcıdaki kullanıcı sayısı  $d_f = 3$  olduğu durumda işaret kümeleri arasındaki açılar  $60^\circ$  olmuştur. Yalnızca birinci alt-taşıyıcıdaki işaret kümelerinin açıları değiştirildiğinde, geleneksel kod kitabı kullanımı durumuna göre kazanç elde edilememiştir. Algoritma tüm alt-taşıyıcılar için uygulandığında yüksek İGO'da yaklaşık 1dB'lik kazanç elde edilmiştir.



Şekil 4. İşaret kümeleri arasındaki açının rotasyon ile değiştirildiği durumda BHO performansı.

Bu çalışmada iki farklı algoritma yaklaşımı ile geleneksel kod kitabının yapısı değiştirilmiş ve performansı ölçülmüştür. Ön çalışma sonuçlarının sunulduğu bu çalışmanın ileriki aşamalarında BHO performansını domine eden işaret küme noktalarının belirlenmesi, yüksek İGO'larda performans kazancının belirlenmesi, işaret küme noktalarının uzaklığına bağlı kapalı-form BHO denklemlerinin elde edilmesi ve

geleneksel kod kitabının performansını artırıcı yeni algoritmalar önerilmesi üzerine çalışılacaktır.

## V. SONUÇ

Bu çalışmada literatürde yaygın bir şekilde kullanılan SCMA kod kitabı incelenerek işaret kümesi noktaları arasındaki uzaklıkların artırılması ve SCMA sistem performansının iyileştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bununla ilgili işaret kümesi noktaları arasındaki uzaklıkların artırılması ve faz-genlik rotasyonu gerçekleştirilmesi üzerine iki farklı yaklaşımla yaygın olarak kullanılan kod kitabı modifiye edilmiş ve SCMA sisteminin BHO performansı incelenmiştir. Yapılan çalışma ile her iki algoritma ile geleneksel kod kitabı kullanımına göre yüksek İGO'da yaklaşık 1dB'lik kazanç elde edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda yeni algoritmalar ile SCMA sisteminin performans kazancının artırılmasına çalışılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] A. Gupta, R.K. Jha, "A survey of 5G network: architecture and emerging technologies", *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206 – 1232, Aug. 2015.
- [2] L.Dai, B.Wang, Y.Yuan, S.Han, C.I and Z.Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, pp. 74–81, Sep. 2015.
- [3] Z. Wei, J. Guo, D. W. K. Ng and J. Yuan, "Fairness comparison of uplink NOMA and OMA", *IEEE 85th Vehic. Technol. Conf. (VTC Spring)*, pp. 1 – 6, June 2017.
- [4] G. Satrya and S. Shin, "Security enhancement to successive interference cancellation algorithm for non-orthogonal multiple access (NOMA)", *IEEE 28th Annual Intl. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp 1-5, Oct. 2017.
- [5] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J.Yuan, V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends", *IEEE Jour. Selected Areas Commun.*, vol. 35, pp. 2181 – 2195, Oct. 2017.
- [6] H. Nikopour, and H. Baligh, "Sparse code multiple access", *IEEE 24th Annual Intl. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, vol. 1, 332 – 336, Sep. 2013.
- [7] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, H. Baligh, "SCMA codebook design", *IEEE 80th Vehic. Technol. Conf. (VTC2014-Fall)*, pp. 1 – 5, Sep. 2014.
- [8] J. Bao, Z. Ma, Z. Ding, G. K. Karagiannidis, Z. Zhu, "On the design of multiuser codebooks for uplink SCMA systems", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, pp. 1920 – 1923, Oct. 2016.
- [9] M. Dabiri, H. Saeedi, "Dynamic SCMA codebook assignment methods: a comparative study", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, pp. 364 – 367, Feb. 2018.
- [10] Y. Zhou, Q. Yu. W. Meng, and C. Li, "SCMA codebook design based on constellation rotation", *IEEE Intl. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 1 – 6, May 2017.
- [11] M.Alam and Q. Zhang, "Performance study of SCMA codebook design", *IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC)*, pp 1-5, Mar. 2017.
- [12] F. Tekçe, E. Çatak, U. E. Ayten, and L. Durak-Ata, "The effect of codebook design on the BER performance of MTC systems employing SCMA", *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1-4, May 2018.
- [13] 5G Algorithm Innovation Competition, 2015, [online] Available: <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
- [14] M. Vameghestahbanati, E. Bedeer, I. Marsland, R. H. Gohary, H. Yanıkömeroğlu, "Enabling sphere decoding for SCMA", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, pp. 2750 – 2753, Dec. 2017.
- [15] H. Hosseini, A. Anpalagan, K. Raahemifar, and S. Erkucuk, "Wavelet-based cognitive SCMA system for mmWave 5G communication networks", *IET Commun.*, vol. 11, pp. 831 – 836, May 2017.