

Bilişsel Radyo Ağları için İkincil Kullanıcılarda Uzaysal Modülasyon Kullanarak İşbirlikli Spektrum Paylaşımı

Cooperative Spectrum Sharing for Cognitive Radio Networks Using Spatial Modulation at Secondary Users^{*}

Seda Üstünbaş, Ertuğrul Başar ve Ümit Aygölü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
{ustunbass, basarer, aygolu}@itu.edu.tr

Özetçe - Bu bildiri, ikincil kullanıcılarında uzaysal modülasyon uygulayarak birincil ve ikincil kullanıcılar arasındaki karşılıklı girişimi ortadan kaldıran yeni bir bilişsel radyo ağı önerilmiştir. Farklı anten sayıları ve modülasyon düzeyi için önerilen sistemin birincil ve ikincil kullanıcılarının servis dışı kalma olasılıkları analitik olarak hesaplanmış, işbirlikli iletim ve her iki kullanıcıda M'li faz kaydırmalı anahtarlama (M-PSK) modülasyonunun kullanıldığı referans sistemlere olan üstünlükleri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler – Bilişsel radyo; uzaysal modülasyon.

Abstract - In this paper, a new cognitive radio network, which avoids the mutual interference between the primary and secondary users by applying spatial modulation at the secondary user, is proposed. The outage probabilities for the primary and secondary users are analytically derived and the superiority of the proposed system over non-cooperative transmission and the reference system where the M-ary phase shift keying (M-PSK) modulation is employed at both users is demonstrated.

Keywords – Cognitive radio; spatial modulation.

1. GİRİŞ

Bilişsel radyo, spektrum kullanımını verimli hale getirmek ve böylece artan spektral yığılmayı azaltmak amacıyla ortaya atılmış bir tekniktir [1]. Bilişsel radyoda iletim ortamının kiralayıcısı olan kullanıcılar birincil kullanıcı olarak, aynı iletim ortamını paylaşmak için belli koşulların sağlanıp sağlanmadığını denetleyen kullanıcılar ise ikincil kullanıcı olarak adlandırılmaktadır. Birincil kullanıcılar kendi iletim ortamlarını ikincil kullanıcılara kullanırmak için bunların kendi başarımlarına katkıda bulunmalarını veya en azından başarımlarını düşürmemelerini bekler. Bu nedenle ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların etkinlikleri, iletim ortam bilgileri gibi bilgilere erişebilen akıllı aygıtlardır. Erişilebilen ortam bilgilerinin türüne bağlı olarak bilişsel radyo ağlarında üç temel yaklaşım söz konusudur: *altına serme* (underlay), *üstüne serme* (overlay) ve *araya karıştırma* (interweave). *Altına serme* yaklaşımında ikincil kullanıcılar ancak birincil kullanıcılarında oluşturdukları girişim belli bir eşğin altında ise iletim ortamını kullanabilmektedir. *Üstüne serme* yaklaşımında ikincil kullanıcılar birincil kullanıcıları dinleyerek onların başarımlarını artırıcı veya en azından koruyucu birtakım

işlemler gerçekleştirerek aynı ortamdan kendi bilgilerini iletme olanağı bulurlar. Burada temel problem her iki tür kullanıcının birbirlerinde yarattığı girişimin nasıl yok edileceği ya da azaltılacağıdır. *Araya karıştırma* yaklaşımında ikincil kullanıcılar iletim ortamındaki zaman, frekans ya da uzay boşluklarını saptayıp bu boşlukları kendi işaretlerini iletme için kullanabilmektedir.

Diğer yandan, *uzaysal modülasyon* (spatial modulation, SM) son yıllarda oldukça ilgi çeken yeni bir çok-girişli çok-çıkışlı iletim tekniğidir [2-3]. Uzaysal modülasyonda vericide birden fazla anten bulundurulmakta ve bilgi klasik M-PSK, M-QAM gibi modülasyonlu simgelerin yanı sıra verici antenlerin indisleri yardımıyla da taşınmaktadır. SM çok-antenli sistemlerdeki, eşzamanlama, kanallararası girişim gibi problemleri her işaretleme aralığında tek antenden iletim yaparak çözmekte, ek olarak iletim için tek bir radyo frekans (RF) devresi yeterli olduğundan karmaşıklığı da azaltmaktadır. SM'in yalnız anten indisleriyle bilgi taşıyan özel biçimi uzay-kaydırmalı anahtarlama (SSK) olarak adlandırılmaktadır [4].

Bu çalışmada, birincil kullanıcıda M-PSK modülasyonu, ikincil kullanıcıda SM (N_t verici anten ve M-PSK modülasyonu) kullanıldığı, bu yolla her iki tür kullanıcının karşılıklı girişimlerini ortadan kaldıran *üstüne serme* tekniğine dayalı, spektrum paylaşımını yeni bir bilişsel radyo ağı önerilmiştir. Birincil ve ikincil kullanıcılar birer verici ve alıcıdan oluşmakta olup ilk işaretleme aralığında birincil verici (PT) birincil alıcıya (PR) M-PSK işareti yollamaktadır. Bu M-PSK işaret aynı zamanda ikincil verici (ST) tarafından da dinlenmektedir. İkincil verici bu işareti doğru çözdüğüne karar verirse, ikinci zaman aralığında birincil sistem için çöz-ve-aktar (decode-and-forward, DF) yöntemiyle röle görevi yaparak bir önceki aralıkta aldığı M-PSK birincil işareti kendi veri dizisi yardımıyla belirlediği antenden hem PR'ye hem de ikincil alıcı SR'ye iletmektedir. Uzaysal modülasyonlu bu işareten PR, M-PSK modülasyonu ile taşınan bilgiye, SR ise anten indisleri ile taşınan bilgiye ulaşmaktadır. Literatürde DF yöntemiyle röle görevi yapan ikincil verici genellikle birincil ve ikincil işaretleri belli güç katsayılarıyla ağırlaştırıp toplayarak iletmektedir [5]. Bu çalışmada SM sayesinde güç paylaşımı problemi ortadan kaldırılmakta, ilk zaman aralığında birincil işaretin SR tarafından alınmasına da gerek kalmamaktadır. Diğer yandan, ST'nin SM kullanması nedeniyle sahip olduğu N_t anten, ilk zaman aralığında birincil işaretle çeşitlenmeli olarak alınmasını da sağlamaktadır. Farklı anten sayıları ve

^{*} Bu çalışma 114E607 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

modülasyon düzeyleri için önerilen sistemin birincil ve ikincil kullanıcılarının servis dışı kalma olasılıkları analitik olarak hesaplanmış, işbirliksiz iletim ve her iki kullanıcıda M -PSK modülasyonunun kullanıldığı referans sistemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ikincil kullanıcıda SM kullanımının hem birincil hem de ikincil kullanıcıların servis dışı kalma başarımlarını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

2. SİSTEM MODELİ

Ele alınan iki-zaman aralıklı işbirlikli bilişsel radyo ağının yapısı Şekil 1'de verilmiştir (düz-çizgili geçişler birinci zaman aralığını, kesikli-çizgili geçişler ikinci zaman aralığını göstermektedir). Burada düğüm çiftleri arasında $h_1, h_{2j}, h_{3j}, h_{4j}$, ($j=1,2,\dots,N_t$) ile gösterilen kanal sönümlenme katsayıları sıfır ortalamalı karmaşık Gauss rastlantı değişkenleri olup, $d_i, i=1,2,3,4$, iki düğüm arasındaki uzaklığı, ν ise yol kaybı katsayısını göstermek üzere, bu katsayıların varyansları $d_i^{-\nu}$ alınmaktadır $h_i, h_{2j}, h_{3j}, h_{4j} \sim \mathcal{CN}(0, d_i^{-\nu})$ ¹. Kanal katsayılarının ilişkin kanalın alıcısında ideal olarak elde edildiği varsayılmaktadır. Sistemdeki tüm uzaklıklar PT ile PR arasındaki uzaklığa göre normalize edilmiştir ($d_1=1$). Her kanalın alıcısındaki toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN), dağılımlıdır. $h_k, k \in \{1,2,3,4\}$, $j=1,2,\dots,N_t$, kanal katsayıları karmaşık Gauss dağılımlı olmak üzere $\gamma_k = |h_k|^2$ üstel dağılımlıdır^{II}. Kanallardan iletilen birincil ve ikincil semboller birim enerjili alınmıştır: $E[|x_p|^2] = E[|x_s|^2] = 1$. Şekil 1'de birincil kullanıcı M -PSK ile, ikincil kullanıcı ise SM ile (N_t anten + M -PSK) iletim yapmakta, toplam iletim iki evrede gerçekleşmektedir. Birinci iletim evresi sonunda PR'de ve ST'nin j . ($j=1,2,\dots,N_t$) anteninde alınan işaretler, sırasıyla,

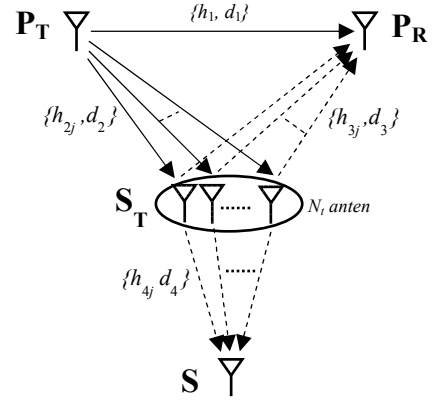
$$y_{PR1} = \sqrt{P_p} h_1 x_p + n_{PR1}, \quad (1)$$

$$y_{STj} = \sqrt{P_p} h_{2j} x_p + n_{STj} \quad (2)$$

olup burada P_p birincil verici gücünü, x_p birincil işareti, n_{PR1} ve n_{STj} sırasıyla birincil alıcıda ve ikincil vericinin j . antenindeki AWGN bileşenini göstermektedir. DF yöntemiyle röle görevini yerine getiren ST en büyük oran birleştirme (MRC) yoluyla $y_{ST} = \sum_{j=1}^{N_t} h_{2j}^* y_{STj}$ işaretini oluşturup

$$\hat{x}_p = \arg \min_{x_p \in M\text{-PSK}} \left| y_{ST} - \sum_{j=1}^{N_t} |h_{2j}|^2 x_p \right|^2 \quad (3)$$

kararını vermektedir. ST, x_p işaretini doğru çözdüğünde, iletimin ikinci evresinde x_p 'yi kendi alıcısına iletmek istediği $n = \log_2 N_t$ bit yardımıyla belirlediği j . antenden hem



Şekil 1: İşbirlikli bilişsel radyo ağ yapısı.

PR hem de SR'ye iletmektedir. PR, bu işareten yalnız M -PSK modülasyonu ile taşınan bilgiye, SR ise anten indisi ile taşınan ikincil işaret x_s 'e ulaşmak istemektedir. PR'de ikinci iletim evresinde alınan işaret

$$y_{PR2} = \sqrt{P_s} h_{3j} x_p + n_{PR2} \quad (4)$$

olup burada P_s ikincil vericinin iletim gücünü, h_{3j} ise ST'nin j . anteni ile PR arasındaki kanalın sönümlenme katsayısını, n_{PR2} ise PR'de ikinci evredeki AWGN bileşenini göstermektedir. PR birinci ve ikinci evrede aldığı işaretleri $y_{PR} = h_1^* y_{PR1} + h_{3j}^* y_{PR2}$ biçiminde birleştirerek

$$\hat{x}_p = \arg \min_{x_p \in M\text{-PSK}} |y_{PR} - P_0 x_p|^2 \quad (5)$$

kararını vermektedir. Burada $P_0 = \sqrt{P_p} |h_1|^2 + \sqrt{P_s} |h_{3j}|^2$ olarak tanımlanmıştır. ST, x_p işaretini hatalı çözdüğünde ikinci evrede sessiz kalmakta, PR yalnız birinci evrede aldığı y_{PR1} yardımıyla

$$\hat{x}_p = \arg \min_{x_p \in M\text{-PSK}} |y_{PR1} - \sqrt{P_p} |h_1|^2 x_p|^2 \quad (6)$$

kararını vermektedir. SR'de alınan işaret

$$y_{SR} = \sqrt{P_s} h_{4j} x_p + n_{SR} \quad (7)$$

olup burada h_{4j} , ST'nin j . anteni ile SR arasındaki kanal sönümlenme katsayısını, n_{SR} ise SR'deki AWGN bileşenini göstermektedir. SR ise y_{SR} 'yi bir uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) işareti [4] olarak algılayıp

$$\hat{j} = \arg \min_j |y_{SR} - \sqrt{P_s} h_{4j}|^2 \quad (8)$$

kararını vermektedir.

3. SERVİS DIŞI KALMA ANALİZİ

İletim hızı R [bit/sn/Hz]'nin kanalın anlık sıgasını geçmesi (servis dışı kalma) olasılığı P_{out} olmak üzere iletimin mümkün olması $1 - P_{out}$ olasılıklıdır. Bu bölümde önerilen sistemin birincil ve ikincil kullanıcılarına ilişkin servis dışı kalma olasılıklarının matematiksel ifadeleri elde edilecektir.

¹ 0 ortalamalı σ^2 varyanslı dairesel simetrik karmaşık Gauss dağılımına sahip bir x rastlantı değişkeni $x \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ şeklinde gösterilmiştir.

^{II} $1/\lambda$ ortalamalı üstel dağılımlı bir x rastlantı değişkeni $x \sim \mathcal{E}(\lambda)$ şeklinde gösterilmiştir: $(f(x) = \lambda \exp(-\lambda x), x \geq 0)$.

İşbirliksiz durumda PT ile PR arasındaki kanalda ulaşılabılır ani veri hızı

$$R_1 = \log_2 \left(1 + |h_1|^2 \frac{P_p}{\sigma^2} \right) \quad (9)$$

olarak verilebilir.

A. Birincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığı

PT ile ST arasındaki kanalda ulaşılabılır ani veri hızı,

$$R_2 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \sum_{j=1}^{N_t} |h_{2j}|^2 \frac{P_p}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

olduğundan işbirliği varken PT ile PR arasındaki ulaşılabılır ani veri hızı

$$R_{13} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + |h_1|^2 \frac{P_p}{\sigma^2} + |h_{3j}|^2 \frac{P_s}{\sigma^2} \right) \quad (11)$$

biçimindedir. (10) ve (11)'de 1/2 katsayısı işbirlikli durumda iletimin iki evrede tamamlanması nedeniyle kullanılmıştır. Birincil sistemin servis dışı kalma olasılığı

$$P_{out}^p = \Pr\{R_2 > R\} \Pr\{R > R_{13}\} + \Pr\{R_2 < R\} \Pr\left\{\frac{1}{2}R_1 < R\right\} \quad (12)$$

olarak ifade edilebilir. Burada R [bit/sn/Hz] hedeflenen normalize veri hızı olup BPSK ve QPSK için sırasıyla 1 ve 2 değerini almaktadır. $\gamma_{2j} \sim \mathcal{E}(d_2^v)$ olduğundan

$$\Pr\{R_2 > R\} = \Pr\left\{\sum_{j=1}^{N_t} \gamma_{2j} > \frac{\sigma^2}{P_p} (2^{2R} - 1)\right\} \quad (13)$$

ifadesinde toplam terimi $2N_t$ serbestlik dereceli ki-kare dağılımlı [6] olup

$$\Pr\{R_2 > R\} = \exp\left[-d_2^v \frac{\sigma^2}{P_p} (2^{2R} - 1)\right] \sum_{k=0}^{N_t-1} \frac{1}{k!} \left[d_2^v \frac{\sigma^2}{P_p} (2^{2R} - 1)\right]^k \quad (14)$$

bulunur. $\gamma_1 \sim \mathcal{E}(1)$ olduğundan

$$\begin{aligned} \Pr\left\{\frac{1}{2}R_1 < R\right\} &= 1 - \Pr\left\{\gamma_1 > \frac{\sigma^2}{P_p} (2^{2R} - 1)\right\} \\ &= 1 - \exp\left[-(2^{2R} - 1) \frac{\sigma^2}{P_p}\right] \end{aligned} \quad (15)$$

elde edilir. (11) de $|h_1|^2 + |h_{3j}|^2$ dört serbestlik dereceli ki-kare dağılımlı olduğundan

$$\begin{aligned} \Pr\{R > R_{13}\} &= 1 - \Pr\left\{|h_1|^2 + |h_{3j}|^2 > \frac{\sigma^2}{P_p} (2^{2R} - 1)\right\} \\ &= 1 - \left[1 + (2^{2R} - 1) \frac{\sigma^2}{P_p}\right] \exp\left[-(2^{2R} - 1) \frac{\sigma^2}{P_p}\right] \end{aligned} \quad (16)$$

sonucuna varılır. Burada $P_p = P_s$ ve $d_3 = d_1 = 1$ alınmıştır. (14)-(16), (12)'de yerleştirilerek ve $\varphi = (\sigma^2 / P_p)(2^{2R} - 1)$

alınarak

$$\begin{aligned} P_{out}^p &= \left[e^{-d_2^v \varphi} \sum_{k=0}^{N_t-1} \frac{1}{k!} (d_2^v \varphi)^k \right] \left[1 - (1 + \varphi)e^{-\varphi} \right] \\ &\quad + \left[1 - e^{-d_2^v \varphi} \sum_{k=0}^{N_t-1} \frac{1}{k!} (d_2^v \varphi)^k \right] \left[1 - e^{-\varphi} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

bulunur. Gerekli sadeleştirmeler yapılrsa

$$P_{out}^p = 1 - e^{-\varphi} \left[1 + \varphi e^{-d_2^v \varphi} \sum_{k=0}^{N_t-1} \frac{1}{k!} d_2^{vk} \varphi^k \right] \quad (18)$$

elde edilir.

B. İkincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığı

ST ile SR arasındaki kanalda ulaşılabılır ani hız

$$R_4 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + |h_{4j}|^2 \frac{P_s}{\sigma^2} \right) \quad (19)$$

olup ST x_p 'yi çözemezse sessiz kalmakta dolayısıyla kendi işaretini de gönderememektedir. Buna göre ikincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığı

$$P_{out}^s = 1 - \Pr\{R_2 > R\} \Pr\{R_4 > R\} \quad (20)$$

olup burada birincil ve ikincil kullanıcıların hedefledikleri hızların aynı olduğu varsayılmıştır. $\gamma_{4j} \sim \mathcal{E}(d_4^v)$ olduğu göz önüne alınırsa

$$\Pr\{R_4 > R\} = \exp\left[-d_4^v \frac{\sigma^2}{P_s} (2^{2R} - 1)\right] \quad (21)$$

bulunur. (21), (14) ile birlikte (20) de kullanılırsa

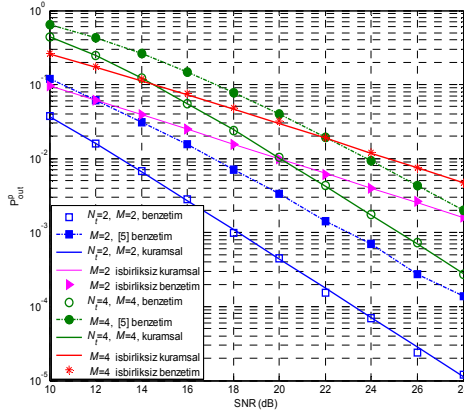
$$P_{out}^s = 1 - e^{-d_4^v \varphi} \left[e^{-d_2^v \varphi} \sum_{k=0}^{N_t-1} \frac{1}{k!} (d_2^v \varphi)^k \right] \quad (22)$$

elde edilir.

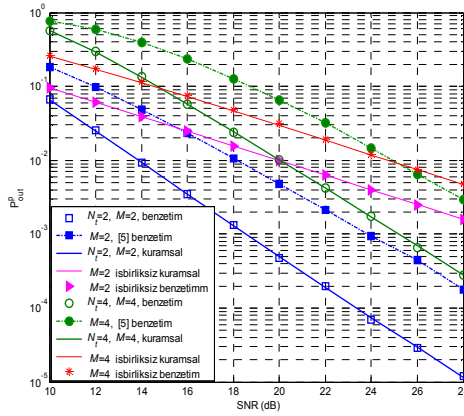
4. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, önerilen bilişsel radyo ağının birincil ve ikincil kullanıcılarına ilişkin servis dışı kalma olasılıkları, iki farklı N_t ve M değer çifti için kuramsal olarak ve bilgisayar benzetimleriyle incelenmekte, yalnız birincil kullanıcının olduğu işbirliksiz durumda ve her iki kullanıcıda M -PSK kullanılan [5]'te verilen sistemle karşılaştırılmaktadır. Verilen tüm kuramsal sonuçlarda ve yapılan tüm bilgisayar benzetimlerinde $SNR = P_p / \sigma^2 = P_s / \sigma^2$, $d_1 = d_3 = 1$ ve $\nu = 4$ alınmaktadır.

Şekil 2'de $d_2 = 0.5$ için ilk olarak birincil kullanıcıda BPSK, ikincil kullanıcıda SM ($N_t = 2$, BPSK), ardından birincil kullanıcıda QPSK, ikincil kullanıcıda SM ($N_t = 4$, QPSK) durumları için birincil kullanıcının servis dışı kalma olasılıklarına ilişkin kuramsal ve bilgisayar benzetim sonuçları SNR'a bağlı olarak verilmektedir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi kuramsal ve bilgisayar benzetim sonuçları bütünüyle örtüşmektedir.



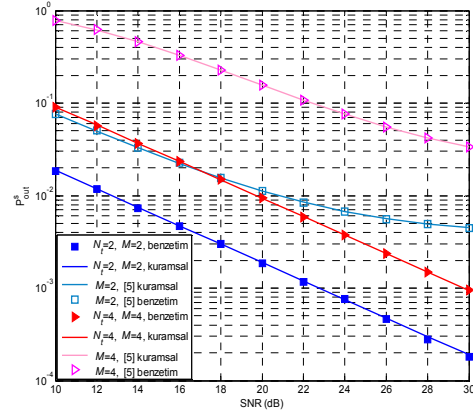
Şekil 2: Birincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığı ($d_2=0.5$)



Şekil 3: Birincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığı ($d_2=1.2$)

Aynı koşullar altında, işbirliksiz (yalnız birincil kullanıcı varken) ve her iki kullanıcının BPSK ve QPSK modülasyonu kullandığı durumlara ilişkin eğriler de Şekil 2’de verilmiştir. Bu eğrilerden ($N_t=2$, BPSK) görüldüğü üzere önerilen yapının $P_{out}^p=10^{-2}$ değeri için işbirliksiz durumuna göre 7 dB, [5]’te verilen referans sisteme göre 4 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir. ($N_t=4$, QPSK) için aynı $P_{out}^p=10^{-2}$ değerinde bu kazançlar sırasıyla 4 dB ve 2,5 dB olmaktadır.

Şekil 3’te $d_2=1,2$ alınarak aynı ($N_t=2$, BPSK) ve ($N_t=4$, QPSK) için birincil kullanıcının servis dışı kalma olasılıkları verilmektedir. $P_{out}^p=10^{-2}$ için ($N_t=2$, BPSK) ile işbirliksiz duruma göre 6 dB, [5]’teki yapıya göre 4 dB SNR kazancı sağlanmaktadır. ($N_t=4$, QPSK) için ise bu kazançlar her iki referans sisteme göre 5 dB olmaktadır. Şekil 2 ve 3’ten şu sonuca varılmaktadır: PT ve ST arasındaki uzaklık arttığında, önerilen yapı artan anten sayısı ile [5]’te verilen yapıya göre daha üstün duruma gelmektedir. Birincil kullanıcı için sağlanan bu kazançlar, iki kullanıcı arasındaki girişimin ortadan kaldırılmasının ve PT ile ST arasında alıcı çeşitlemesi sağlanmasının sonucudur.



Şekil 4: İkincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığı ($d_4=0.5$)

Şekil 4’te ikincil kullanıcıların servis dışı kalma başarımları $d_4=0,5$ ve $P_p/\sigma^2=20$ dB için karşılaştırılmaktadır. Önerilen yapının, [5]’teki yapıya üstünlüğü ikincil kullanıcılar açısından çok daha fazladır. Bu üstünlük önerilen yapıda PT ile SR arasındaki kanalın ve SR’de birincil işaretin neden olduğu girişimin bütünüyle kaldırılmış olmasından kaynaklanmaktadır.

5. SONUÇLAR

Spektrum paylaşımli bilişsel radyo ağlarının ikincil kullanıcılarında bu çalışmada önerildiği şekilde uzaysal modülasyon kullanıldığında her iki kullanıcıda klasik M -PSK modülasyonu kullanan ağ yapılarına göre servis dışı kalma başarımları önemli ölçüde artmaktadır. Bunun temel nedeni işbirliği sırasında birincil ve ikincil kullanıcıların bilgilerinin sırasıyla modülasyonlu simgelerde ve anten indislerinde taşınarak karşılıklı girişimin ortadan kaldırılmasıdır. Teorik analizler ve bilgisayar benzetimleri sonucu önerilen sistemin referans sistemlerden çok daha iyi bir servis dışı kalma başarımına sahip olduğu gösterilmiştir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Biglieri, E., Goldsmith, A., Greenstein, L.J., Mandayn, N.B., and Poor, H.V., “Principles of cognitive radio”, Cambridge University Press, New York, 2013.
- [2] Mesleh, R.Y., Haas H., Sinanovic S., Ahn, C.W. and Yun S., “Spatial modulation”, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Cilt.54, No.4, Temmuz 2008.
- [3] Jeganathan, J., Ghayeb, A. and Szczecinski, L., “Spatial modulation: optimal detection and performance analysis”, *IEEE Commun. Letters*, Cilt 12, No.8, Ağustos 2008.
- [4] Jeganathan, J., Ghayeb, A., Szczecinski, L. and Ceron, A., “Space-shift keying modulation for MIMO channels”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Cilt 8, No.7, Temmuz 2009.
- [5] Han, Y., Pandharipande A. and Ting S.H., “Cooperative Decode-and-forward relaying for secondary spectrum access”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Cilt 8, No.10, Ekim 2009.
- [6] Proakis, J., Salehi, M., “Digital Communications”, Fifth Edition, McGraw-Hill, 2008.