

# 5G Telsiz Ağları için Uzaysal Modülasyon Teknikleri

## Spatial Modulation Techniques for 5G Wireless Networks

Ertuğrul Başar

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul.

Email: basarer@itu.edu.tr

**Özetçe** —2020 yılından itibaren kullanılmaya başlanması hedeflenen 5G telsiz iletişim ağlarının şuan birçok ülkede kullanımında olan 4G telsiz iletişim ağlarından 10 kat daha fazla bant ve enerji verimliliği sunması beklenmektedir. Bu zorlayıcı hedefleri yakalamak için gelecek nesil haberleşme sistemlerinin değişik katmanlarının yeniden tasarlanması gerekmektedir. Bu bildiriye, 5G telsiz iletişim ağlarının fiziksel katmanı için uzaysal modülasyon (SM) tekniklerinin potansiyeli ve gerçekleştirilmesine yönelik bazı senaryolar ele alınmıştır. SM teknolojilerindeki en son gelişmeler değerlendirilmiş ve yüksek bant ile enerji verimliliğine sahip 5G telsiz iletişim ağlarında SM tekniklerinin kullanımına yönelik gelecekteki araştırmalara ışık tutulmuştur.

**Anahtar Kelimeler**—5G Telsiz İletişim Ağları, MIMO Sistemler, Uzaysal Modülasyon.

**Abstract**—5G wireless communications networks, which are aimed to be introduced around 2020, are expected to provide 10 times higher spectral and energy efficiency than 4G wireless communications networks that are currently used in several countries. Different layers of next generation communications systems should be redesigned to reach these challenging goals. In this study, we deal with the potential and some implementation scenarios of spatial modulation (SM) techniques for the physical layer of 5G wireless networks. The recent advances in SM technologies are reviewed and future research directions on the use of SM techniques towards high spectral and energy efficient 5G wireless communications networks are discussed.

**Keywords**—5G Wireless Communications Networks, MIMO Systems, Spatial Modulation.

### I. GİRİŞ

Kullanıcılar ve birçok farklı nesne arasında her zaman kesintisiz ve güvenilir bir iletişimin sağlanabilmesi için 5G telsiz ağlarının daha önce görülmemiş seviyelerde bant ve enerji verimliliği sunması beklenmektedir [1]. 5G telsiz ağları için ortaya konulan bu zorlayıcı hedeflerin yakalanabilmesi için araştırmacılar masif çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemler, dik olmayan çok taşıyıcılı iletişim gibi özgün fiziksel katman tasarımlarını ortaya atmışlardır. Ancak günümüzde, 5G telsiz ağları için yeni ve daha verimli fiziksel katman tasarımlarına yönelik çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Son yıllarda araştırmacılar, uzaysal modülasyon (SM) tekniklerine yönelik ciddi bir ilgi göstermiştir. Bilgi bitlerinin iletiminde ele alınan MIMO sistemlerin verici antenlerinin indislerinin de kullanıldığı SM, yüksek bant ve enerji verimliliğine sahip bir sayısal modülasyon türüdür. Özellikle Mesleh vd.'nin

[2]'deki çığır açan çalışmasının ardından SM tekniklerine üzerine son yıllarda çok sayıda çalışma yapılmıştır [3]-[11]. Her ne kadar uzaysal çoğullama (spatial multiplexing) ve uzay-zaman kodlama (space-time coding) gibi güçlü ve uzun yıllardır yer etmiş rakipleri olsa da SM tekniği, yüksek bant ve enerji verimliliğine sahip gelecek nesil MIMO tabanlı telsiz iletişim sistemleri için olası bir aday olarak gösterilmektedir.

Bu bilgilendirici bildirinin amacı öncelikle bir çok araştırmacı tarafından henüz incelenmeyi bekleyen SM tekniğinin tanıtılması, ardından bu alandaki en güncel çalışmaların gözden geçirilmesidir. Ayrıca, SM tekniklerinin 5G telsiz iletişim ağlarına yönelik uygulama senaryoları ele alınmış ve olası gelecek araştırma konularına ışık tutulmuştur. Özellikle genelleştirilmiş, gelişmiş ve dik SM sistemleri incelenmiş, SM tekniklerinin 5G ağlarındaki masif çok kullanıcı MIMO (MU-MIMO) sistemler ve işbirlikli haberleşme sistemleri için uygulama alanları sunulmuştur.

### II. UZAYSAL MODÜLASYON (SM)

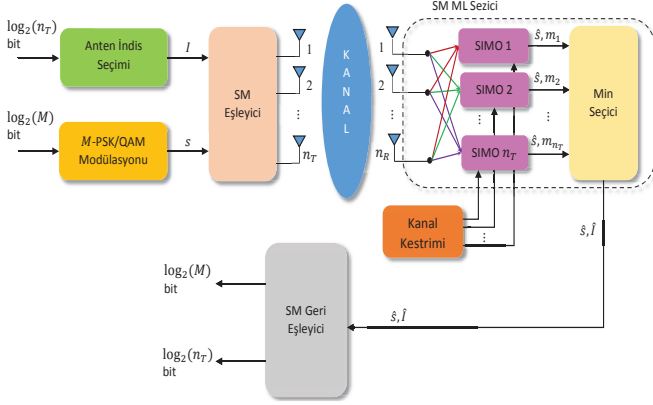
SM, geleneksel  $M$ 'li işaret uzaylarının elemanlarının yanı sıra bilgi bitlerinin bir MIMO sistemin verici antenlerinin indisleri ile de iletilmesi ilkesine dayanan özgün bir yöntemdir. Veri hızını arttırmak için uzaysal çoğullama ya da hata başarımını iyileştirmek için uzaysal çeşitleme ilkelerine dayanan geleneksel MIMO sistemlerinin aksine SM'de MIMO sistemlerin verici antenleri başka bir amaç için kullanılmaktadır. SM için veri taşıyan iki birim bulunmaktadır: i) verici antenlerin indisleri, ii) geleneksel işaret uzayı simgeleri. Şekil 1'den görüldüğü üzere her bir işaretleme aralığında

$$\log_2(n_T) + \log_2(M) \quad (1)$$

veri biti SM sisteminin vericisine gelmektedir. Burada  $n_T$  ve  $n_R$  sırasıyla verici ve alıcı anten sayıları olup  $M$  ise ele alınan faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) ya da dik genlik modülasyonu (QAM) işaret uzaylarının eleman sayısıdır. Gelen bilgi biti dizisinin ilk  $\log_2(n_T)$  biti etkin verici anten indisini ( $I$ ) belirlerken, son  $\log_2(M)$  biti ise bu etkin verici anten üzerinden iletilecek olan veri simgesinin ( $s$ ) belirlenmesinde kullanılmaktadır. SM sisteminin en büyük olabilirlikli (ML) sezicisi ise hangi verici antenin ve simgenin iletildiğini sezme amacıyla her bir verici anten için klasik bir tek-girişli çok-çıkışlı (SIMO) ML sezici kullanarak minimum karar metriklerine göre ( $m_n, n = 1, \dots, n_T$ ) etkin anteni ( $\hat{I}$ ) ve ilişkin veri simgesini ( $\hat{s}$ ) bulmaktadır.

SM sistemleri klasik MIMO sistemlere göre şu şekilde önemli avantajlar sunmaktadır: i) tek bir radyo frekans (RF) zinciri içeren basit bir verici yapısı, ii) antenler arası senkronizasyon ve kanallar arası girişim problemlerinin ortadan kaldırılması, iii) dengesiz MIMO sistemlerle çalışabilme

Bu çalışma 114E607 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmektedir.



Şekil 1.  $n_T \times n_R$  bir MIMO sistem için SM sisteminin blok şeması

( $n_T > n_R$ ) ve iv) anten indislerinin veri iletiminde kullanılması nedeniyle yüksek bant ve enerji verimliliğine sahip olması. Ancak SM sisteminin sözü geçen bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. SM sisteminin bant verimliliği  $n_T$  ile logaritmik olarak artarken uzaysal çoğullama sistemleri için doğrusal olarak artmaktadır. Ayrıca SM'de yalnızca uzaysal bölge veri iletiminde kullanıldığı için klasik SM verici çeşitlenmesi sağlayamamaktadır. Sağladığı avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda SM sistemlerinin karmaşıklık, bant verimliliği ve hata başarımı arasında ilginç bir ödünleşim sunduğu sonucuna varılabilir. Bunun sonucunda SM, yüksek bant ve enerji verimliliği 5G ağları için aday olarak gösterilmiştir [1].

### III. SM ALANINDAKİ GÜNCEL GELİŞMELER

SM fikri üzerine yapılan ilk çalışmalar 2000'li yılların başlarına dayansa da, SM isminin ilk olarak kullanıldığı ve ilham verici bir çalışma olan [2]'den sonra SM alanında çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda araştırmacılar tarafından bant ve enerji verimliliği SM sistemleri, düşük karmaşıklıkla alıcı yapıları, çeşitlenme sağlayan blok ve kafes kodlamalı SM sistemleri, uyarlamalı modülasyonlu, verici anten seçimli ve ön kodlamalı SM, değişik kanal tipleri ve kanal kestirim hataları için ayrıntılı başarımlar analizleri, işbirlikli SM sistemleri ve vb. diğer konular ele alınmıştır. İlgili okurlar SM üzerine birçok çalışmanın değerlendirildiği [3] ve [4]'e başvurabilirler. Bu bölümde, SM teknolojileri için oldukça yeni ve umut verici olan bazı gelişmeler ele alınacaktır.

#### A. Genelleştirilmiş, Gelişmiş ve Dik SM Sistemleri

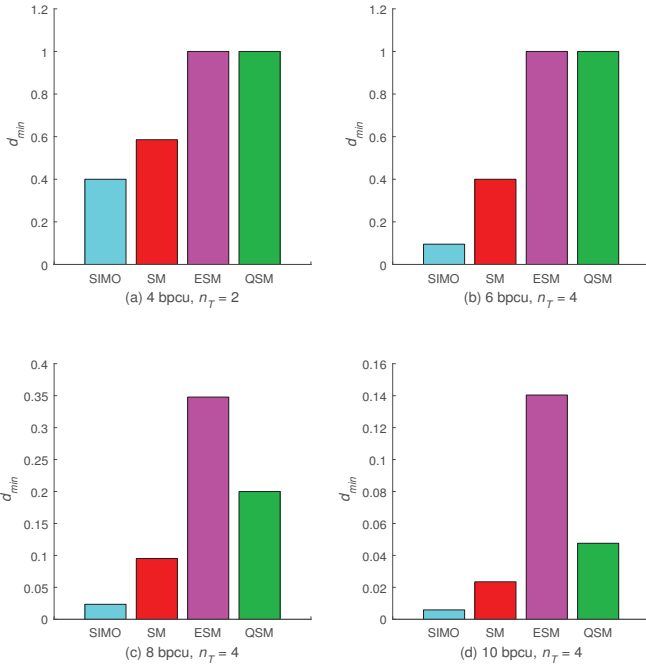
SM sistemlerinde her ne kadar verici antenlerin indisleri ile hatırı sayılır miktarda bilgi bitleri iletilmesine rağmen özellikle yüksek mertebeli MIMO sistemler ve işaret uzayları için SM, uzaysal çoğullama ile veri hızında rekabet etmekte zorlanmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, klasik SM'in bant verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Hem SM'in bant verimliliğini arttırmak hem de verici anten sayısının ikinin tam katı olması kısıtını kaldırabilmek amacıyla ilk olarak genelleştirilmiş SM (GSM) önerilmiştir [5]. GSM sisteminde birden çok sayıda verici anten etkinleştirilerek bu antenlerden aynı veri simgesi iletilmiştir. Etkin antenlerin sayısı  $n_A$  ( $n_A < n_T$ ) ile gösterilirse her bir işaretleme aralığında veri simgeleri ile iletilen  $\log_2(M)$  bite ek olarak  $\lfloor \log_2 \binom{n_T}{n_A} \rfloor$  bilgi bitleri anten indisleri ile iletilmektedir.  $n_T = 2^n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) için

$\log_2(n_T) \leq \lfloor \log_2 \binom{n_T}{n_A} \rfloor$  olması nedeniyle uzaysal bölge, GSM ile daha verimli kullanılmaktadır. [6]'da önerilen çoklu etkin SM (MA-SM) sisteminde ise GSM'den farklı olarak etkin antenlerin her birinden farklı bir veri simgesi iletilerek bant verimliliği daha da artırılmıştır. Böylece, MA-SM sisteminin bant verimliliği  $\lfloor \log_2 \binom{n_T}{n_A} \rfloor + n_A \log_2(M)$  kanal kullanımı başına bit (bpcu) olmaktadır ki bu değer klasik SM'in bant verimliliğinden hatırı sayılır derecede yüksektir.

Gelişmiş SM (ESM), SM'e alternatif olarak oldukça yakın zamanda önerilmiş bir MIMO iletişim tekniğidir [7]. ESM sisteminde etkin verici antenlerin sayısı her işaretleme aralığında değişmekte ve bilgi yalnızca etkin verici antenlerin indisleri ile değil aynı zamanda seçilen işaret uzayları ile taşınmaktadır. Diğer bir deyişle ESM, birden çok işaret uzayı kullanarak veriyi etkin verici antenlerin ve işaret uzaylarının bir kombinasyonu şeklinde iletmektedir. Örneğin, geleneksel veri simgelerine ek olarak iki bitlik  $\{0, 0\}$ ,  $\{0, 1\}$ ,  $\{1, 0\}$  ve  $\{1, 1\}$  dizilerinin iletimi için ESM sırasıyla şu iletim vektörlerini kullanmaktadır:  $[S_4 \ 0]^T$ ,  $[0 \ S_4]^T$ ,  $[S_2 \ S_2]^T$  ve  $[S_2 e^{j\theta} \ S_2 e^{j\theta}]^T$ . Burada  $S_m$ ,  $m = 2, 4$ , M-PSK işaret uzayını,  $\theta = \pi/2$  ise BPSK ve QPSK işaret uzaylarına ek üçüncü bir işaret uzayı elde etmek için kullanılan döndürme açısını göstermektedir. Görüldüğü üzere bu örnek için ESM'in ilk iki iletim vektörü QPSK kullanan klasik SM ile aynıdır. Ancak son iki iletim vektöründe BPSK ve döndürülmüş BPSK işaret uzaylarından seçilen simgeler iki verici antenden eş zamanlı olarak iletilmektedir. İşaret uzayının boyutunun dörtten ikiye düşürülmesinin nedeni ise etkin anten sayısından bağımsız olarak  $M$ 'li işaret uzayı ile aynı sayıda bilgi bitinin iletilmesini sağlamaktır.

Dik SM (QSM) ise SM'in basitlik avantajını kaybetmeden veri hızını arttırmayı amaçlayan özgün bir yaklaşımdır [8]. QSM sisteminde karmaşık veri simgelerinin gerçek ve sanal kısımları SM ilkesi ile ayrı olarak iletilmektedir.  $n_T$  verici antenli bir MIMO sistem için QSM'in bant verimliliği  $2 \log_2(n_T) + \log_2(M)$  bpcu olmaktadır ki bunun nedeni veri simgelerinin gerçek ve sanal kısımları için etkin anten seçiminin ayrı ayrı yapılmasıdır. Etkin verici antenlerin sayısı QSM için bir ya da iki olabilmektedir ancak vericide yalnızca iki taşıyıcı (sinüs ve kosinüs) kullanılması nedeniyle tek bir RF zinciri yeterli olmaktadır. Örneğin  $n_T = 2$  ve  $M = 4$  için, QPSK ile iletilen iki bite ek olarak uzaysal bölgede sırasıyla  $\{0, 0\}$ ,  $\{0, 1\}$ ,  $\{1, 0\}$  ve  $\{1, 1\}$  bit dizileri için şu iletim vektörleri kullanılarak iki bit iletilir:  $[s_R + j s_I \ 0]^T$ ,  $[s_R \ j s_I]^T$ ,  $[j s_I \ s_R]^T$  ve  $[0 \ s_R + j s_I]^T$ . Burada  $s_R$  ve  $s_I$ ,  $s = s_R + j s_I$ 'nin gerçek ve sanal kısımlarıdır. Görüldüğü üzere iki bitlik dizinin birinci ve ikinci bitleri sırasıyla veri simgesinin gerçek ve sanal kısımlarının pozisyonunu belirlemektedir.

Şekil 2'de SIMO, SM, ESM ve QSM sistemleri için iletim vektörleri arasındaki minimum karesel Öklit uzaklığı ( $d_{min}$ ) değişik kurulumlar için incelenmiştir.  $d_{min}$ , yarıdurağan Rayleigh sönümlenmeli kanallar için önemli bir tasarım parametresi olup hata başarımına doğrudan etkilidir. Sağlıklı karşılaştırma yapabilmek için tüm kurulumlarda ortalama iletilen toplam enerji birim alınmıştır. Şekil 2'den 4 ve 6 bpcu durumunda ESM ve QSM aynı  $d_{min}$  değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Ancak daha yüksek bant verimlilik değerleri için QSM'in  $d_{min}$  değeri ESM'e göre kötüleşmektedir. Ancak ESM'in verici yapısı iki adet RF zinciri gerektirdiğinden



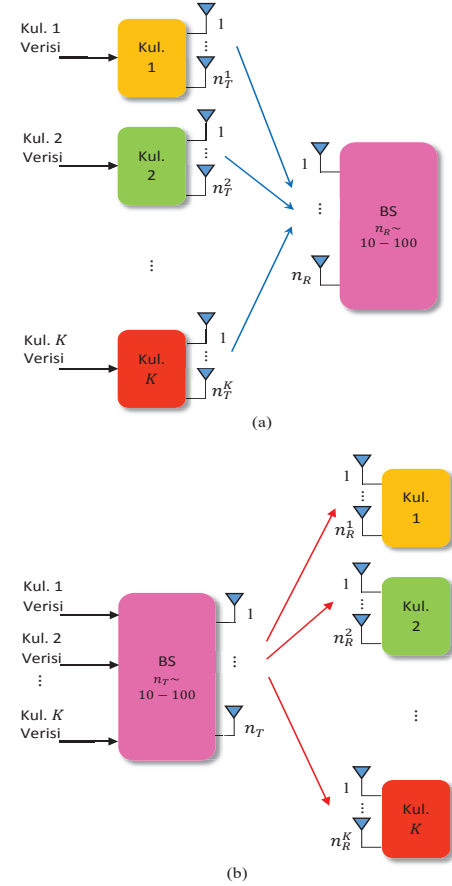
Şekil 2. SIMO, SM, ESM ve QSM için Minimum karesel Öklit uzaklığı

QSM'e göre daha karmaşıktır. Son olarak Şekil 2'den SM tabanlı yapıların klasik SIMO sisteme göre göreceli  $d_{min}$  avantajının artan bant verimliliği ile arttığı görülmektedir. Buna göre SM sistemleri yüksek bant verimliliklerinde SIMO sistemlere göre daha avantajlıdır.

### B. SM Kullanan Masif Çok Kullanıcılı MIMO Sistemler

Baz istasyonlarının (BS) onlarca antene sahip olduğu çok yüksek bant ve enerji verimlilikli masif MIMO sistemler, 5G telsiz haberleşme ağlarında kullanılacak ana teknolojilerden biri olarak gösterilmektedir. MIMO sistemler üzerine yapılan ilk çalışmalar genellikle iki kullanıcının noktadan noktaya haberleştiği senaryoları ele almıştır ancak günümüzde çok kullanıcı (MU-MIMO) sistemler giderek önem kazanmaktadır. MIMO sistemlerin masif boyutlara geliştirilmesi SM için oldukça uygun olup mevcut RF zincirlerinin sayısı oldukça sınırlı olsa dahi çok sayıda veri bitinin anten indislerine eşlenmesine olanak sağlamaktadır. Her ne kadar masif MIMO sistemler için SM'in bant verimliliği uzaysal çoğullama ile rekabet edemese de SM, masif MIMO sistemler için oldukça verimli ve ucuz bir gerçekleştirme yöntemleri sunma potansiyeline sahiptir. Dahası SM, verici anten sayısının alıcı anten sayısından fazla olduğu dengesiz MIMO sistemler için de oldukça uygundur [9].

Şekil 3(a)'da,  $K$  kullanıcının yukarı yönde (uplink) iletişim için SM tekniklerini uyguladığı bir masif MU-MIMO sistemi verilmiştir. Kullanıcıların tek verici antenli olduğu duruma göre SM ile karmaşıklık artırılmadan veri hızı artırılabilir. Kullanıcılarda GSM, ESM ve QSM teknikleri kullanılarak veri hızı daha da yükseltilebilir. Alıcıda (BS) kullanıcılar arası girişimden dolayı ise yüksek karmaşıklıkla optimum ya da daha basit optimum olmayan sezim yöntemleri kullanılacaktır. SM teknikleri Şekil 3(b)'de gösterilen aşağı yönde (downlink) iletişim için de kullanılabilir. Çok sayıda kullanıcıyı desteklemek için BS'in masif antenleri SM tekniklerinin her

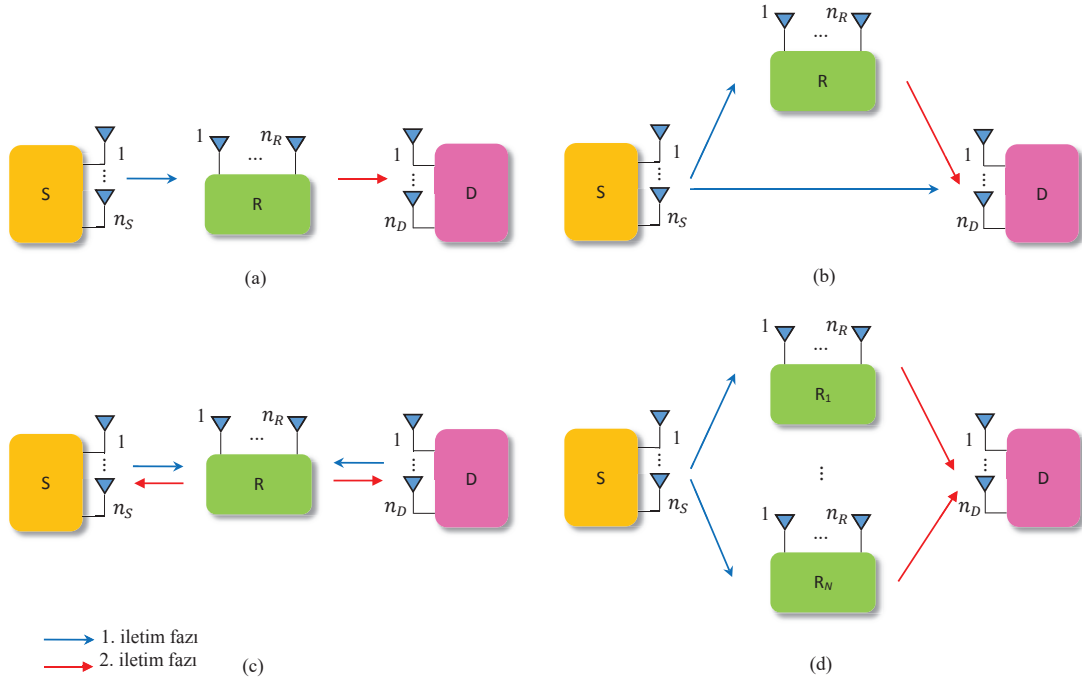


Şekil 3. SM Kullanan  $K$  kullanıcılu masif MU-MIMO sistemleri (a) Yukarı yönde (uplink) iletim (b) Aşağı yönde (downlink) iletim

bir kullanıcı için uygulanacağı daha az sayıda anten içeren alt gruplara ayrılabilir [10]. Örneğin iki kullanıcı olması durumunda Kullanıcı 1'in verisi anten indisleriyle, Kullanıcı 2'nin verisi ise veri simgeleriyle iletilebilir. BS'de GSM, ESM ve QSM teknikleri kullanılarak farklı kullanıcıların verileri değişik yollarla taşınabilir.

### C. İşbirlikli SM Sistemleri

Temel ilkesi kullanıcıların bilgilerinin sadece ilgili kullanıcının anteni üzerinden değil, ortamdaki uygun diğer etkin ya da edilgen birimler üzerinden de iletimi olan işbirlikli haberleşme sistemleri, telsiz haberleşme alanında son yıllarda oldukça ilgi gösterilen konulardan biri olmuştur. İşbirlikli haberleşme sistemleri, başlangıçta gezgin birimlere birden çok antenin yerleştirilmesinin maliyet ve donanım büyüklüğü gibi sorunlardan dolayı sağlanamadığı durumlarda gezgin birimler için sanal MIMO sistemler oluşturarak verici çeşitlemesi elde etmek için önerilmiştir. Ancak özellikle günümüzdeki teknolojik gelişmeler sayesinde gezgin birimlere yerleştirilebilecek anten sayılarının artık birden fazla da olabilmesi sonucu işbirlikli haberleşme sistemleri, ek çeşitleme kazançları elde edilmesi ve kapsama alanlarının genişletilerek yüksek veri hızlarına ulaşılmasında verimli bir teknik olarak ortaya çıkmış ve son yıllar içerisinde çok sayıda röleli ve işbirlikli iletim sistemi literatürde önerilmiştir. Bunların sonucu olarak aktarım teknolojileri Long Term Evolution Advanced (LTE-A) gibi önemli telsiz iletişim standartlarında yer almıştır. SM



Şekil 4. İşbirlikli SM sistemleri (a) İki-atlamalı SM (b) İşbirlikli SM (c) Ağ kodlamalı SM (d) Çok röleli ve dağıtılmış SM

tekniklerinin ve işbirlikli haberleşmenin gelecek nesil telsiz iletişim sistemleri için sundukları verimli çözümler göz önünde bulundurulduğunda bu iki teknolojinin bütünleştirilmesi fikri doğal olarak karşımıza çıkmaktadır [3], [11].

Şekil 4'te dört farklı işbirlikli SM kurumu görülmektedir. Burada S, R ve D sırasıyla kaynak, röle ve hedef düğümlerini göstermektedir. Şekil 4(a)'da, pratik ağlarda da sık sık karşılaşılan iki-atlamalı iletişim senaryosu verilmiştir. Burada SM teknikleri S ve R'de kuvvetlendirme-ve-aktar (AF) ya da çöz-ve-aktar (DF) tabanlı aktarım yöntemleriyle kullanılabilir ve özellikle S'nin bant ve enerji verimliliğini arttırmak için düşünülebilir. Şekil 4(b)'de ise S ile D arasında doğrudan bir iletişim hattı bulunmaktadır ve R farklı (sabit ya da seçimli) aktarım stratejileri ile işbirliğine katılmaktadır. Şekil 4(c)'de S ile D'ın iki-yönlü iletişim senaryosu ele alınmıştır. Burada ağ kodlama SM ile birleştirilerek yüksek bant verimliliği protokoller tasarlanabilir. Son olarak Şekil 4(d)'de dağıtılmış bir işbirlikli senaryosu verilmiştir. Burada ilk zaman aralığında S, SM teknikleri ile verisini rölelere ( $R_1 \dots R_N$ ) aktarmaktadır. İkinci zaman aralığında ise bir ya da daha çok röle iletime katılmakta ve etkinleştirilen rölelerin indisleri ile de bilgi bitleri iletilmektedir. Bu sayede röleler tek antenli olsa dahi ( $n_R = 1$ ) iletişim sağlanabilmektedir. Ele alınan tüm işbirlikli haberleşme senaryolarında S ve/veya R'de GSM/ESM/QSM teknikleri kullanılarak yeni protokoller elde edilebilir.

#### IV. SONUÇ

SM, 5G ağlarında yer alması beklenen yüksek bant ve enerji verimliliği MIMO iletişim sistemleri için potansiyel bir yöntemdir. Bu bildiride, SM'in temel ilkesi ve avantajları açıklanmış, SM teknolojilerindeki umut verici güncel gelişmeler gözden geçirilmiş ve SM'in 5G ağları için kullanım senaryoları araştırılmıştır. SM'in hata başarımı, karmaşıklık ve veri hızı arasında sağladığı ödünleşimler ile 5G ağları için umut verici bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak

bu alanda çözülmeyi bekleyen ilginç problemlerin var olduğu da unutulmamalıdır.

#### KAYNAKÇA

- [1] C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, X.-H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [2] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, Jul. 2008.
- [3] M. Di Renzo, H. Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation," *Proc. of the IEEE*, vol. 102, no. 1, pp. 56–103, 2014.
- [4] P. Yang, M. Di Renzo, Y. Xiao, S. Li, and L. Hanzo, "Design guidelines for spatial modulation," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 6–26, First quarter 2015.
- [5] A. Younis, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised spatial modulation," in *(ASILOMAR), 2010 Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, Nov. 2010, pp. 1498–1502.
- [6] J. Wang, S. Jia, and J. Song, "Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 1605–1615, Apr. 2012.
- [7] C.-C. Cheng, H. Sari, S. Sezginer, and Y. Su, "Enhanced spatial modulation with multiple signal constellations," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2237–2248, Jun. 2015.
- [8] R. Mesleh, S. Ikki, and H. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 64, no. 6, pp. 2738–2742, Jun. 2015.
- [9] D. Basnayaka, M. Di Renzo, and H. Haas, "Massive but few active MIMO," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–17, Oct. 2015.
- [10] S. Narayanan, M. Chaudhry, A. Stavridis, M. Di Renzo, F. Graziosi, and H. Haas, "Multi-user spatial modulation MIMO," in *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, 2014, pp. 671–676.
- [11] M. Di Renzo, S. Narayanan, F. Graziosi, and H. Haas, "Distributed spatial modulation: A cooperative diversity protocol for half-duplex relay-aided wireless networks," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–18, Jun. 2015.