

Çok Kullanıcılı Masif MIMO Sistemler için Uzaysal Modülasyon Spatial Modulation for Multi-User Massive MIMO Systems

Seyfettin ULUOCAK
Mühendislik ve Tasarım Direktörlüğü,
CTECH Bilişim Teknolojileri A.Ş.
İstanbul, TÜRKİYE
seyfettin.ulucak@ctech.com.tr

Ertuğrul BAŞAR
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
basarer@itu.edu.tr

Özetçe — Bu bildiri, gelecek nesil -5. nesil (5G) ve ötesi- mobil haberleşme sistemleri için umut verici bir yöntem olan uzaysal modülasyon (SM) tekniğinin çok kullanıcılı masif (büyük ölçekli) çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemlere uygulanması incelenmiştir. Spektral verimlilik ve enerji verimliliği ele alındıktan sonra, uzaysal modülasyonun, 5G'nin önemli gereksinimlerinden olan yüksek spektral ve enerji verimliliklerini masif MIMO sistemlere uyarlanması ile sağlayabileceği ifade edilmiştir. Böylece masif MIMO sistemlerde SM kullanımını değerlendirilmiştir. Kapsamlı bir literatür taraması yapılarak aşağı ve yukarı yönde iletimde çok kullanıcılı masif MIMO-SM sistemleri üzerine yapılan çalışmalara ve çok kullanıcılı masif MIMO sistemlerin getirdiği zorluklara yer verilmiştir. Bu bilgilendirici bildirinin, 5G ve ötesi telsiz haberleşme sistemleri üzerine çalışan araştırmacı ve mühendislere yol göstermesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler — Uzaysal Modülasyon, Masif MIMO, 5G, Çok Kullanıcılı Sistemler, Spektral Verimlilik, Enerji Verimliliği

Abstract — In this paper, the application of the spatial modulation (SM), which is a promising technique proposed to be used in next generation -5. generation (5G) and beyond- mobile communication systems, to multi-user (MU) massive multi-input multi-output (MIMO) systems is investigated. After describing spectral efficiency and energy efficiency, it has been stated that SM can provide a high spectral and energy efficiencies according to 5G's requirements by adapting it to massive MIMO systems. Thus, the use of SM in massive MIMO systems is evaluated. A detailed literature survey has been done and the studies and challenges on multi-user (MU) massive MIMO-SM systems have been discussed in downlink and uplink scenarios. It is aimed that this tutorial paper will help the researchers and engineers working on 5G and beyond wireless communication systems.

Keywords — Spatial Modulation, Massive MIMO, 5G, Multi-user Systems, Spectral Efficiency, Energy Efficiency

I. GİRİŞ

Yeni nesil mobil haberleşme sistemlerinde ulaşılması beklenen zorlu gereksinimler bulunmaktadır. Bu gereksinimlerin başında ise yüksek spektral ve enerji verimliliği gelmektedir. Ulaşılması hedeflenen gereksinimlerin gelecek nesil telsiz haberleşme sistemlerine dahil edilmesi, haberleşme sisteminin bazı katmanlarının tasarımlarının yenilenmesi ve geliştirilmesi ile mümkündür. Özellikle fiziksel katmandaki modülasyon ve kodlama işlemleri 5G gereksinimlerine uygun olarak geliştirilmelidir [3-4].

Bu bilgilendirici çalışmada, 5G ve ötesi mobil haberleşme teknolojileri için MIMO sistemlere uzaysal modülasyon (SM) tekniğinin uygulanması değerlendirilmiş ve detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Özellikle SM tekniğinin masif boyutlardaki MIMO sistemlere, diğer bir deyişle baz istasyonunda (BS) 10-100 mertebelerinde anten içeren büyük boyutlu sistemlere uygulanması, spektral verimliliği, enerji verimliliğini ve hata başarımlarını önemli ölçüde arttırmaktadır [17-18]. Birden çok kullanıcının olduğu (çok kullanıcılı, MU) masif MIMO sistemlerde de SM'in uygulanması üzerine yapılan araştırmalar ve bu sistemlerin avantajları ile dezavantajları ilgili bölümlerde ele alınacaktır.

II. UZAYSAL MODÜLASYON VE TÜREVLERİ İÇİN SPEKTRAL VE ENERJİ VERİMLİLİKLERİ

Klasik SM'de, N_T kullanılan verici anten sayısını ve M modülasyon derecesini göstermek üzere, [bit/sn/Hz] cinsinden spektral verimlilik aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta = \log_2(N_T) + \log_2(M) \quad (1)$$

SM'in çalışma ilkesi şu şekildedir. Vericiye bir işaretleme aralığında gelen $\log_2(N_T) + \log_2(M)$ bitin ilk $\log_2(N_T)$ biti hangi anten üzerinden veri gönderileceğini belirlerken, geriye kalan $\log_2(M)$ bit tarafından bu anten üzerinden iletilecek olan M 'li modülasyon simgesi belirlenmektedir [6].

Birçok avantajı olan klasik SM, istenen seviyede spektral verimliliğe sahip olması adına geliştirilmiştir. Böylece genelleştirilmiş SM (GSM), çoklu-etkin SM (MA-SM), dik SM (QSM) gibi daha yüksek spektral verimliliğe sahip SM teknikleri literatürde önerilmiştir [4].

Klasik SM dışındaki V-BLAST (Vertical-Bell laboratories layered space-time), SSK (space-shift keying) gibi bazı MIMO teknolojilerinde elde edilen spektral verimlilikler [bit/sn/Hz] cinsinden aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

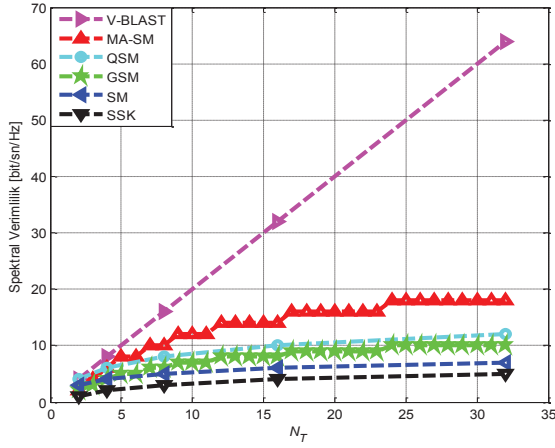
$$\text{V-BLAST: } N_T \log_2(M) \quad (2)$$

$$\text{SSK: } \log_2(N_T) \quad (3)$$

$$\text{QSM: } 2\log_2(N_T) + \log_2(M) \quad (4)$$

$$\text{MA-SM: } N_A \left[\log_2 \binom{N_T}{N_A} \right] + \log_2(M) \quad (5)$$

$$\text{GSM: } \left[\log_2 \binom{N_T}{N_A} \right] + \log_2(M) \quad (6)$$



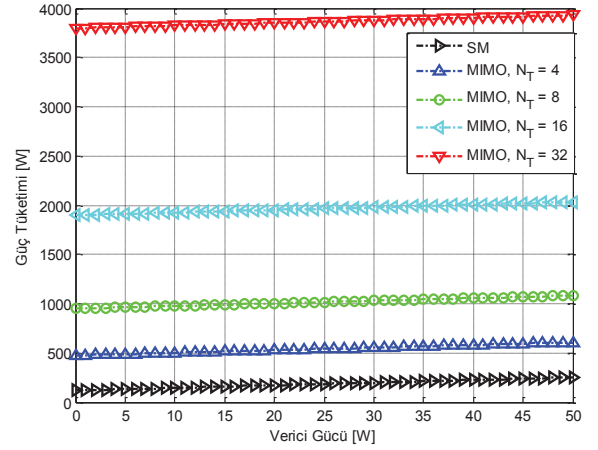
Şekil 1. Farklı MIMO Sistemlerinin Spektral Verimlilik Karşılaştırması

Şekil 1’de, aynı modülasyon türü (quadrature phase shift keying, QPSK) altında, verici antenlerin sayısına bağlı olarak farklı MIMO sistemlerinin spektral verimlilikleri gösterilmektedir. N_A etkin verici anten sayısı olmak üzere simülasyonlarda $N_A = 2$ olarak alınmıştır. Spektral verimlilik denklemlerinden ve Şekil 1’den de görüldüğü gibi, verici anten sayısına bağlı olarak spektral verimlilik V-BLAST’ta doğrusal olarak artarken, verilen diğer sistemlerde logaritmik olarak artmaktadır. Günümüzde V-BLAST’ı spektral verimlilik açısından aşan hiçbir teknoloji mevcut değildir. Bunun yanı sıra, uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) sistemi, aralarında en düşük spektral verimliliğe sahip; fakat gerçekleştirme kolaylığı, güç tüketimi ve enerji verimliliği açısından V-BLAST gibi yüksek spektral verimliliğe sahip bir sistemden daha verimli olan bir MIMO teknolojisidir.

Spektral verimlilik gibi enerji verimliliği de yeni nesil teknolojilerde geliştirilmesi hedeflenen bir başarımlı kriteridir. C toplam kapasiteyi, P ise sistemdeki toplam güç tüketimini göstermek üzere, enerji verimliliği (EV) [bit/Joule] cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [8]:

$$EV = \frac{\text{İletilen Toplam Veri Miktarı}}{\text{Toplam Güç Tüketimi}} = C/P \quad (7)$$

Yüksek enerji verimliliği, mümkün olan minimum güç ile maksimum veri iletimi ilkesine dayanmaktadır. Veri iletimi ile spektral verimlilik ilişkilendirildiğinde, spektral verimliliğin artması aynı zamanda enerji verimliliğini de artıracaktır [7-8]. Bununla beraber RF zinciri çıkışında kullanılan güç kuvvetlendiricilerinin (power amplifier, PA), sistemin toplam güç tüketiminde büyük etkisi olduğu ve toplam güç tüketiminin yaklaşık %65’ini oluşturduğu bilinmektedir [17]. Kullanılan RF zinciri sayısı ve dolayısıyla PA sayısının azalması ile de enerji verimliliği önemli oranda artmaktadır. SM’in tek RF zinciri kullanması enerji verimliliği açısından umut verici olarak görülmektedir. Böylece yeşil haberleşme sistemleri de denilen enerji verimli haberleşme sistemleri SM ile tasarlanabilecektir.



Şekil 2. Farklı Sayıda Verici Antene Sahip Klasik MIMO Sistemi ve SM’in

Güç Tüketimi Karşılaştırması

[8]’deki güç modeli göz önüne alınarak yapılan simülasyon sonucu Şekil 2’de görülmektedir. Bu şekilde, aynı verici gücü altında SM’in toplam güç tüketimi verici anten sayısından bağımsız olup V-BLAST gibi klasik MIMO sistemlere göre daha azdır. Dolayısıyla V-BLAST spektral verimlilik açısından en iyi performansa sahip olsa da, güç tüketimi ve dolayısıyla enerji verimliliği açısından, özellikle artan verici anten sayısına, yani kullanılan RF zinciri sayısına da bağlı olarak, SM’in gerisinde kalmaktadır.

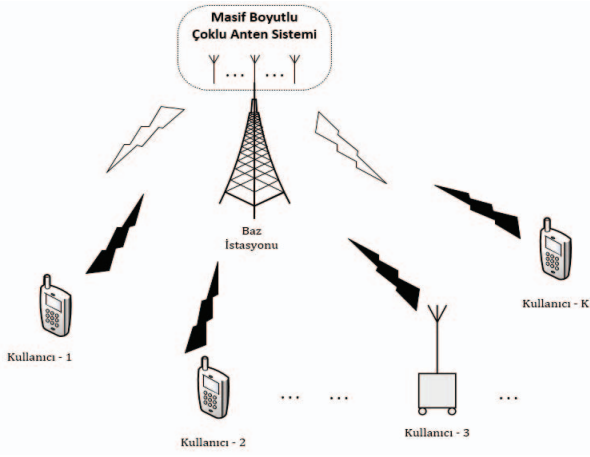
Bölüm II’den hareketle, masif boyutlardaki MIMO sistemlere SM uygulanması durumunda artan anten sayısına da bağlı olarak spektral ve enerji verimliliklerinin, ve aynı zamanda çeşitleme kazancı dolayısıyla da hata başarımının artması beklenmektedir.

III. ÇOK KULLANICILI MASİF MIMO SİSTEMLER İÇİN UZAYSAL MODÜLASYON

5G ve ötesi mobil haberleşme sistemlerinde SM kullanımının birçok açıdan avantaj sağlayabileceği literatürdeki çalışmalardan ön görülmektedir. Bu makalede, gelecek nesil teknolojilerde masif MIMO sistemlere SM uygulanması değerlendirilmiştir. Masif MIMO sistemleri, baz istasyonlarında onlarca ila yüzlerce antenin kullanılmasına bağlı olarak çok yüksek spektral ve enerji verimliliği gibi avantajlarından ötürü, 5G ve ötesi haberleşme sistemleri için muhtemel teknolojilerden biri olarak görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, masif MIMO sistemlerinde, sınırlı sayıda RF zinciri ile çalışılsa bile önemli sayıda bilgi biti iletmek mümkün olduğundan, masif MIMO sistemleri, SM sistemleri için önemli bir uygulama alanıdır.

SM sistemlerinin spektral verimliliği, masif MIMO sistemleri için V-BLAST gibi geleneksel sistemlere kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen (bkz. Şekil 1), büyük boyutlardaki MIMO sisteminin iletim antenleri için indis modülasyonu tekniği kullanımı, yüksek enerji verimliliği ve düşük maliyetli uygulama gibi SM sistemlerinin mevcut avantajları sayesinde umut verici çözümler sağlayabilir. Ayrıca SM, V-BLAST tabanlı sistemlerin sıfıra zorlama (ZF) ve minimum ortalama karesel hata (MMSE) gibi doğrusal algılama yöntemleriyle çalışmayacağı dengersiz masif MIMO yapılarına da uygundur.

Şekil 3’te görüldüğü gibi SM teknikleri, masif MU-MIMO sistemlere hem yukarı hem de aşağı yönlü iletim için uygulanabilir.



Şekil 3. Yukarı ve Aşağı Yönde İletim için Çok Kullanıcılı Masif MIMO Sistemi

Son birkaç yılda, masif MU-MIMO sistemleri için SM tekniklerinin uygulanmasına odaklanan bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aşağıda bu çalışmalara ait incelemelerimiz verilmiştir.

A. Yukarı Yönde İletim için Çok Kullanıcılı Masif MIMO-SM

[9]-[18]'de, yukarı yönlü iletim senaryosu araştırılmış ve yeni SM temelli çözümler önerilmiştir. Bu senaryoda, çoklu anten bulunan kullanıcılar daha az sayıda RF zinciri kullanarak SM'i (veya GSM, QSM gibi türevlerini) kullanırken, baz istasyonu, işaret alımı için çok sayıda (onlarca/yüzlerce) anten kullanmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda yazarlar, SM iletim vektörlerinin seyreklik (sparsity) özelliğini göz önüne alarak, düşük karmaşıklıkla algılama algoritmalarını araştırmaktadırlar.

[9]'da SSK ve geliştirilmiş SSK (GSSK) modülasyonlarının başarımlarını literatürde ilk kez çok kullanıcı girişim ortamında araştırılmıştır. Çalışılan sisteme uygun dedektörler önerilmiştir ve sistemin ortalama bit hata olasılığı (ABEP) Rayleigh sönümlenmeli kanallarda incelenmiştir. SSK/GSSK modülasyonlarının, çoklu erişim girişiminin bulunduğu ortamda klasik sistemlere nazaran daha iyi bir başarımlar gösterebileceği kapsamlı bilgisayar simülasyonları ile gösterilmiştir.

Özellikle noktadan noktaya haberleşme senaryoları için ele alınan, fakat yukarı yönde iletim için de uygulanabilecek olan [10] ve [11]'deki çalışmalardan [10]'daki, noktadan noktaya SM şemasını iki kullanıcıya ait çoklu erişim SM şemasına genişletmiştir. İki kullanıcı aynı anda SM kullanarak haberleşmektedir. Her iki kullanıcı için de bit hata oranını (BER) en aza indiren bir en büyük olabilirlikli (ML) dedektör önerilmiştir. [11] ise, [10]'daki şemayı SM kullanan çok sayıda kullanıcı için genişletmiştir.

[12] ve [13]'te GSM, birden çok kullanıcının yukarı yönlü iletiminde ele alınmıştır. ML sezim yöntemi için ABEP analizi yapılmış olup yerel arama (local search) tabanlı bir dedektör tanıtılmıştır. İndis modülasyonunun daha etkili bir şekilde kullanılması sebebiyle MU-GSM şemasının, MU-SM'in yanı sıra geleneksel MU-MIMO şemasına göre de daha iyi başarımlar sunabileceği gösterilmiştir.

[14] ve [15]'te, sıkıştırılmış algılama (compressed sensing, CS) tabanlı bir dedektör önerilmiştir. Önerilen dedektörün sezim karmaşıklığı analiz edilmiştir. Düşük karmaşıklığa sahip CS tabanlı bu dedektör, masif MU-SM sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak için umut verici bir alternatif olarak görülebilir.

[16]'da, masif MU-SM sisteminde, her bir kullanıcıdan gelen girişimi engellemek için uzay dönüşümlü geliştirilmiş beklenti maksimizasyonu (space-alternating generalized expectation maximization, SAGE) dedektörü önerilmiştir. SAGE tabanlı dedektörün tek kullanıcı sistemine BER başarımına yaklaşılabileceği bilgisayar simülasyonları ile gösterilmiştir.

Son zamanlarda, [17]'nin yazarları, çok hücreli MU masif MIMO sistemlerinde GSM üzerine çalışmışlardır. Pratik bozulmalar altında sistemin ulaşılabilir toplam veri hızı araştırılmıştır. Spektral, enerji ve ekonomik verimliliği göz önünde bulunduran kapsamlı bir başarımlar değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Doğrusal işleme (linear processing) dayalı bir algılama algoritması, çok hücreli sistem için önerilmiş ve spektral verimliliği sınırlı olmasına rağmen SM'in klasik MIMO şemasından daha iyi enerji verimliliği sağladığı gösterilmiştir.

Son olarak [18]'de, çok hücreli bir masif MIMO-SM sisteminin yukarı yönlü iletimde ulaşılabilir spektral verimliliği, kullanıcıların rasgele dağılımı ve pilot kullanma şemalarına göre sönümlenmeli ve girişimli kanallar için ilişki (korelasyon) katsayıları göz önüne alınarak araştırılmıştır. Masif MIMO-SM sistemleri ile klasik masif MIMO sistemlerden daha iyi başarımlar elde edilebileceği gösterilmiştir.

B. Aşağı Yönde İletim için Çok Kullanıcılı Masif MIMO-SM

Yukarı yönlü iletimin yanı sıra, [19]-[29]'daki çalışmalarda SM tabanlı aşağı yönlü iletim senaryoları araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, genelde farklı kullanıcıların verilerini eşzamanlı olarak iletmek için ön kodlamalı tasarımlara odaklanılmıştır.

[20]'de MU-SM sistemi için kanal bilgisinin korunumu olarak adlandırılan yeni bir ön kodlama şeması önerilmiştir. Bu ön kodlama şemasıyla, MU girişiminin engellenmesi ve bilgi taşıyıcısının SM simgeleri ile korunması hedeflenmiştir. Bilgisayar simülasyonlarıyla, önerilen ön kodlama şemasının ZF ön kodlamadan daha iyi BER başarımlar sağladığı gösterilmiştir.

[21]'de verici kısmında kanal durum bilgisi (CSI) gerektirmeyen bir MU algılama tekniği geliştirilmiştir. [20] ve [21]'deki çalışmaların her ikisinde de, BS'nin mevcut verici antenleri çoklu bloklara bölünerek her bir blok bir kullanıcıya tahsis edilmiştir.

[22]'de ise farklı bir SM çoklu erişim şeması tanıtılmıştır. Bu çalışmada, BS'nin verici antenleri adaptif olarak farklı kullanıcılara atanmakta ve dolayısıyla kapasite artırılmaktadır. Ayrıca [22]'de, [21] şemasından farklı olarak alıcı antenlerin yanı sıra verici antenlerin seçimi de birlikte gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar benzetimleri ile [21]'deki MU-SM şemasına kıyasla BER başarımında önemli gelişmelerin elde edilebileceği gösterilmiştir.

[23]'te, [29]'daki ön-kodlama destekli SM şeması bir MU sistemi durumuna genellenmiştir. Böylece aşağı yönlü iletimde MU-SM sistemi gerçekleştirilmiştir. Bu şemada, her kullanıcının etkin alıcı antenin indeksini ek bilgi iletmek için kullanılmıştır. Bu işlem, BS'de ZF ön kodlaması dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

[24] ve [25]'te, SM kullanan yeni bir MU-MIMO şeması önerilmiştir. Bu şemada, kullanıcının antenlerinin alt kümelerinden yalnızca biri sadece gürültü olmayan bir işaret algılamak için, diğer tüm antenler sadece termal gürültüyü algılamaktadır. Bu yeni mimarinin çeşitleme ve kodlama kazançları türetilmiş ve teorik olarak kanıtlanmıştır. BER başarımları açısından klasik MU-MIMO sistemlere üstünlüğü bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir.

Yakın bir zamanda, [26]'daki çalışma ile, spektral verimliliği artırmak adına her etkin alıcı anten için farklı bir modülasyon simgesi gönderilerek [23] ve [25]'teki şemalar geliştirilmiştir. BS'nin mevcut verici antenlerinin bir alt kümesinin seçilmesi ile iletilen ortak (multicast, çok noktaya yayımlı) bir bilginin tüm kullanıcılara iletileceği düşünülmüştür.

Yine yakın bir tarihte, [27]'de katmanlı bir SM şeması önerilmiştir. Çoklu RF zincirleri kullanarak birden fazla kullanıcıya hizmet vermek için BS'nin mevcut verici antenleri birkaç gruba bölünerek [20]-[22]'deki paralel SM şemalarına alternatif olarak bu şema sunulmuştur. Her kullanıcının simgelerini iletmek için akıllı bir algoritma ile farklı verici anten kümeleri atanmıştır. Aynı anda birden fazla kullanıcıya bilgi aktarmak için her iletim anında yalnızca bir antenin etkin olması sağlanmıştır. Bu çalışma, SM tabanlı MU-MIMO şemalarına kıyasla spektral verimliliği artırmak için daha da geliştirilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Araştırmalardan ve literatür taramasından da görüldüğü gibi SM, yeni nesil mobil haberleşme sistemlerinin gereksinimlerini önemli ölçüde karşılamaktadır. Özellikle masif MIMO-SM sistemi ile spektral ve enerji verimliliklerinin çok daha yüksek seviyelere çıkması sağlanmaktadır. Alıcı ve verici kısımlardaki anten sayısında herhangi bir kısıtlama olmaması, SM'in masif MIMO sistemlere uygulanmasına ayrıca olumlu katkı sağlamaktadır. SM'in çok kullanıcı masif MIMO sistemler için spektral verimlilik, kapasite, enerji verimliliği ve hata başarımları açısından önemli avantajları olduğu belirtilmiştir.

Dolayısıyla SM, 5G ve ötesi sistemlerde adından söz ettirebilecek yeni nesil bir MIMO teknolojisidir. Bu bağlamda, 5G ve ötesi mobil haberleşme sistemlerinin yerli imkanlarla gerçekleştirilmesi adına ülkemizin SM teknolojileri alanındaki engin bilgi birikimi göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
 [2] H. Jafarkhani, "Space-Time Coding Theory and Practice", *Cambridge University Press*, 2005.
 [3] E. Basar, "Spatial modulation techniques for 5G wireless networks", *IEEE Signal Process. and Commun. Application Conf. (SIU)*, May 2016.

[4] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 168-175, July 2016.
 [5] G. R. Murthy, K. Sankhe, "Spatial modulation spatial multiplexing in massive MIMO" *arXiv:1605.02969*, May 2016.
 [6] M. Di Renzo, H. Haas, P.M. Grant, "Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: a survey", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 12, Dec. 2011.
 [7] A. Stavridis, et al., "An energy saving base station employing spatial modulation", *IEEE, Computer Aided Modeling and Design of Commun. Links and Netw. (CAMAD)*, Sept. 2012.
 [8] A. Stavridis, et al., "Energy evaluation of spatial modulation at a multi-antenna base station", *IEEE Vehicular Tech. Conf. (VTC)*, Jan. 2014.
 [9] M. Di Renzo and H. Haas, "Bit error probability of space-shift keying MIMO over multiple-access independent fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 8, pp. 3694-3711, Oct. 2011.
 [10] N. Serafimovski, S. Sinanovic, A. Younis, M. Di Renzo, and H. Haas, "2-User multiple access spatial modulation," in *2011 IEEE Global Commun. Conf. Workshops (GC Wkshps)*, Houston, Texas, USA, Dec. 2011, pp. 343-347.
 [11] N. Serafimovski, et al. "Multiple access spatial modulation," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, no. 1, p. 299, Sep. 2012.
 [12] T. L. Narasimhan, P. Raviteja, and A. Chockalingam, "Generalized spatial modulation in large-scale multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3764-3779, June 2015.
 [13] T. L. Narasimhan and A. Chockalingam, "CHEMP receiver for large-scale multiuser MIMO systems using spatial modulation," in *2014 22nd European Signal Process. Conf. (EUSIPCO)*, Lisbon, Portugal, Sep. 2014, pp. 86-90.
 [14] A. Garcia-Rodriguez and C. Masouros, "Energy-efficient spatial modulation in massive MIMO systems by means of compressive sensing," in *2015 IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, London, UK, Jun. 2015, pp. 4541-4546.
 [15] A. Garcia-Rodriguez and C. Masouros, "Low-complexity compressive sensing detection for spatial modulation in large-scale multiple access channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 7, pp. 2565-2579, July 2015.
 [16] W. Zhang, "SAGE based data detection for multiuser spatial modulation with large number of receive antennas," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 1520-1523, Sep. 2015.
 [17] P. Patcharamaneepakorn, et al. "Spectral, energy, and economic efficiency of 5G multicell massive MIMO systems with generalized spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 12, pp. 9715-9731, Dec. 2016.
 [18] L. He, J. Wang, J. Song, and L. Hanzo, "On the multi-user, multi-cell massive spatial modulation uplink: How many antennas for each user?" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1-15, Dec. 2016.
 [19] J. Wang, et al., "Performance evaluation of precoding in spatial modulation OFDM on a LTE channel," in *2012 IEEE 14th Int. Conf. on Commun. Technol.*, Chengdu, China, Nov. 2012, pp. 1188-1192.
 [20] X. Li, et al., "A novel precoding scheme for downlink multi-user spatial modulation system," in *2013 IEEE 24th Ann. Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, London, UK, Sep. 2013, pp. 1361-1365.
 [21] S. Narayanan, et al., "Multi-user spatial modulation MIMO," in *2014 IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf. (WCNC)*, Istanbul, Turkey, Apr. 2014, pp. 671-676.
 [22] X. Wu, M. Di Renzo, and H. Haas, "A novel multiple access scheme based on spatial modulation MIMO," in *2014 IEEE 19th Int. Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Commun. Links and Netw. (CAMAD)*, Athens, Greece, Dec. 2014, pp. 285-289.
 [23] K. M. Humadi, A. I. Sulyman, and A. Alsanie, "Spatial modulation concept for massive multiuser MIMO systems," *Int. J. Antennas Propagation*, vol. 2014, pp. 1-9, June 2014.
 [24] A. Stavridis, et al., "On the performance of multi-stream receive spatial modulation in the MIMO broadcast channel," in *2015 IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Washington, USA, Dec. 2015, pp. 1-6.
 [25] A. Stavridis, et al., "Performance analysis of multistream receive spatial modulation in the MIMO broadcast channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 1808-1820, Mar. 2016.
 [26] R. Pizzio, et al., "Generalized spatial modulation for downlink multiuser MIMO systems with multicasting," in *2016 IEEE 27th Ann. Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Valencia, Spain, Sep. 2016, pp. 1-6.
 [27] M. Maleki, et al., "Layered spatial modulation for multiuser communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 10, pp. 7143-7159, Oct. 2016.
 [28] I. A. Hemadeh, M. El-Hajjar, S. Won, and L. Hanzo, "Multi-user steered multi-set space-time shift-keying for millimeter-wave communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. PP, no. 99, pp. 1-6, Nov. 2016.
 [29] R. Zhang, L. et al., "Generalised pre-coding aided spatial modulation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 11, pp. 5434-5443, Nov. 2013.