

LTE (4G)'nin Çoklu Anten Performans Analizleri

Ahmet Şafak Yıldız, Funda Ergün Yardım, Nursel Akçam ve Fatih Genç
Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Özet

Bu çalışmanın amacı, uzun vadeli evrim (LTE-Long Term Evolution) radyo erişim teknolojisi ve onun fiziksel katmanı (PHY-Physical Layer) olup, LTE'nin çoklu anten performansının analizidir. PHY'nin ana bölümlerini meydana getiren Dikey Frekans Bölmeli Çoklu Erişimin (OFDMA-Orthogonal Division Multiple Access), modülasyonun, turbo kodlamanın ve bağlantı adaptasyonunun gözden geçirilmesi, LTE standardına ait PHY modelinin tam olarak kavranmasına yardımcı olur. PHY'na daha yüksek tabakalardan aşağı iletilen veri bitleri üzerinde gerçekleştirilen tüm işlemler fiziksel katman modellemesini en güzel şekilde tanımlar. Uplink (mobil cihazdan baz istasyonuna) ve downlink (baz istasyonundan mobile cihaza) için veri iletişim protokolleri LTE standartları tarafından belirlenir. Bu çalışmada OFDMA, MIMO, Turbo kodlama ve bağlantı adaptasyonu kısaca açıklanmış olup, 50 milyon bit işleme alınarak LTE'de çoklu anten kullanımı için SNR - BER performans analizi yapılmıştır. Her bir SNR değerinde 8 yinleme, 16-QAM veya QPSK modülasyon, 1/3 oranında Turbo kodlama altında BER performansları MATLAB kullanarak simüle edilmiştir. Simülasyonlarda, standartlarda yer alan 10 MHz'lik bant genişliği değerine ulaşılmıştır. Farklı modlar için elde edilen tüm grafiksel sonuçlarda; aynı oran eşleme, karıştırma, CRC, Turbo kod, 16-QAM ve QPSK modülasyon kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: LTE, MIMO, OFDM, SC-FDM, Turbo kodlama

Abstract

The main discussion of this subject is the Long Term Evolution (LTE) radio access technology and especially its Physical Layer (PHY), also the analysis of multiple antenna performance of LTE. The PHY model of LTE can be best understood by studying PHY's most useful four sections, which are Orthogonal Division Multiple Access (OFDMA), modulation, turbo coding and link adaptation. Reviewing OFDMA, modulation, turbo coding and link adaptation, that are main leading parts of PHY, helps the PHY of LTE to be fully realized. Protocols of data communications needed for the uplink (mobile to base station) and downlink (base station to mobile) communications are defined by LTE standards. In this study OFDMA, MIMO, Turbo Coding and link adaptations were briefly explained and, the SNR-BER performance analysis for multiple antenna usage in LTE was performed by processing 50 million bite data. The BER performances were simulated by MATLAB for each SNR value under 8 repetition, 16-QAM or QPSK modulation, 1/3 Turbo Coding rate parameters. In simulations, 10 MHz band width value in the standards was achieved. In the graphical results obtained for different modes, the same coding rate, jamming, CRC, Turbo Coding, 16-QAM and QPSK modulation parameters were used.

Key Words: LTE, MIMO, OFDM, SC-FDM, Turbo Coding

1. Giriş

Günümüzde akıllı telefon, tablet ve dizüstü bilgisayar kullanıcılarının talep ettiği hizmetler ve uygulamalar kitlesel piyasa genişlemesiyle mobil iletişimin sadece ses ve telefondan çok ötesine gitmiştir. İnternette gezinme, sosyal ağlar, müzik ve videolar gibi mobil servis ve uygulamalardaki yoğun veri akışı, yeni nesil kablosuz standartların gelişimi için itici bir güç haline gelmiştir. Bu nedenle zengin multimedya uygulamalarında yüksek hız ve gerekli ağ kapasitesini karşılamak için yeni standartların geliştirilmesi gerekir.

LTE bu dönemin gereksinimlerini karşılamak ve küresel geniş bant iletişiminin sağlanması amacı için geliştirilmektedir. LTE sistemi, evrimi ve amaçları, radyo erişim sistemi arasında daha yüksek veri hızları, geliştirilmiş sistem kapasitesi ve kapsamı, esnek bant genişliği, önemli ölçüde geliştirilmiş spektral verimliliği, düşük gecikme süresi, daha düşük işletme maliyetleri, çoklu-anten desteği ve sorunsuz internet hizmeti ve mevcut mobil iletişim sistemleri entegrasyonunu içerir [1-6]. Bazı açılardan 4. nesil (4G-4th Generation) olarak bilinen LTE, 3. nesil (3G-3rd Generation)'in organik evrimi olarak kabul edilebilir. Bu nedenle kablosuz sistemlerin gelişiminde LTE ve standartları önemlidir. LTE standardı (3GPP Release8) 300 Mbps maksimum veri hızı sunmaktadır [7-10]. Gelişmiş LTE (LTE-Advanced) olarak bilinen 3GPP Release10 ise 1 Gbps bir tepe veri hızına sahiptir. LTE ve LTE-Advanced temel olarak aynı yapıyı içerdiğinden LTE sisteminin analizinin yapılması, LTE-Advanced sistemi hakkında da fikir sağlayacaktır.

2. LTE Etkinleştirme Teknolojileri

LTE teknolojilerinin kökeni, gereksinimleri, önceki teknolojilere bağlı olarak gelişimleri önem arzeder. LTE'yi ve gelişimini sağlayan teknolojiler, OFDM, SC-FDM, MIMO, Turbo kodlama ve dinamik bağlantı adaptasyon tekniklerini içerir [11].

2.1. OFDM

Çok sayıda modüle edilmiş alt taşıyıcı kullanarak veri iletiminin paralel olarak yapıldığı tekniğe OFDM denir. Bu alt taşıyıcılar, mevcut bant genişliğini böler, daha sonra her bir taşıyıcı için yeterli frekans ayrılarak bu alt taşıyıcıların dikgen olması sağlanır [10,12].

LTE'de OFDM ve onun tek taşıyıcılı SC-FDM'nin (Single-Carrier Frequency Division Multiplexing) seçilmesinin ana nedenleri; çok-yollu sönmülenmede sağlamlılık, yüksek spektral verimlilik, düşük karmaşıklık uygulanması, esnek transmisyon bant genişliklerini sağlamak, frekans-seçici zamanlama gibi gelişmiş özellikleri desteklemek, MIMO iletim ve girişim koordinasyonunu sağlamaktır [13].

2.2. SC-FDM

SC-FDMA OFDMA'ya benzerdir, ancak OFDMA'da alt kanallar aynı anda iletilir, SC-FDMA'da ise zaman alanında art arda iletilir. OFDMA'da alt kanallarda iletilen 1'ler ve 0'lar

için harcanan tepe gücün ortalama güce oranı çok fazladır. Ancak güçlendiricilerin düzgün çalışabilmesi için az ortalama güç kullanmaları gerekir, bu da OFDMA'nın verimsiz olmasına neden olur. SC-FDMA'da ise herhangi bir anda bir alt kanal iletildiği için bu problem oluşmaz, yalnız ard arda alt kanalları iletmek için çok hızlı iletim yapmak gerekir ve bunun sonucunda semboller arası girişim oluşur. Bu nedenle alıcıda frekans alanında eş zamanlama yapılması gerekir. SC-FDMA, LTE teknolojisinde uplinkte kullanılır [14].

2.3. MIMO

MIMO yöntemleri mobil iletişimde; genel veri hızlarının ve iletişim bağlantısının güvenilirliğinin artırılması için kullanılır. LTE standardının kullanılan MIMO algoritmaları ise; alıcı çeşitliliği, gönderim çeşitliliği, hüme (beamforming) ve uzamsal çoğullama (spatial multiplexing) olmak üzere dört kategoriye ayrılır. Bu yöntemler, elde edilen veri hızlarında farklı bir artış yapmak yerine, iletişimi daha sağlam bağlantı yaparak sağlar. Uzamsal çoğullamada, sistem farklı antenler üzerinde bağımsız (yedeksiz) bilgi aktarır. Burada MIMO esas olarak belirli bir bağlantıda veri hızını artırabilir. Veri hızları geliştirilebilir ölçüde verici anten sayısı ile doğrusal olarak orantılıdır. Bu uyumu sağlamak amacıyla, LTE standardı downlinkte 4 verici antene kadar birden fazla verici konfigürasyonu içerir. Ancak LTE-Advanced downlink için, en çok 8 verici antenin kullanımını sağlar.

2.4. Turbo kanal kodlama

Turbo kodlama önceki tüm standartlarda kullanılan helezon şifreleme teknolojisinin yakın kanal kapasitesi performansı ile etkileyici bir evrimidir. Turbo kodlama ilk defa 1993 yılında tanıtılmış; 3G, evrensel mobil iletişim sistemi (UMTS-Universal Mobile Telecommunications System) [3] ve yüksek hızlı paket erişimi (HSPA- High Speed Packet Access) [15] sistemlerinde kullanılmıştır. Ancak bu standartlarda, bu kodlama sistemin performansını artırma, isteğe bağlı olarak kullanılır. LTE standardında ise Turbo kodlama kullanıcı verilerini işlemek için kullanılan tek kanal kodlama mekanizmasıdır. Turbo kodlama tekniği, yapısal olarak ardışık kodlama tekniğinin geliştirilmiş bir hali ile kod çözme için kullanılan bir kod çözme algoritmasından ibarettir [16].

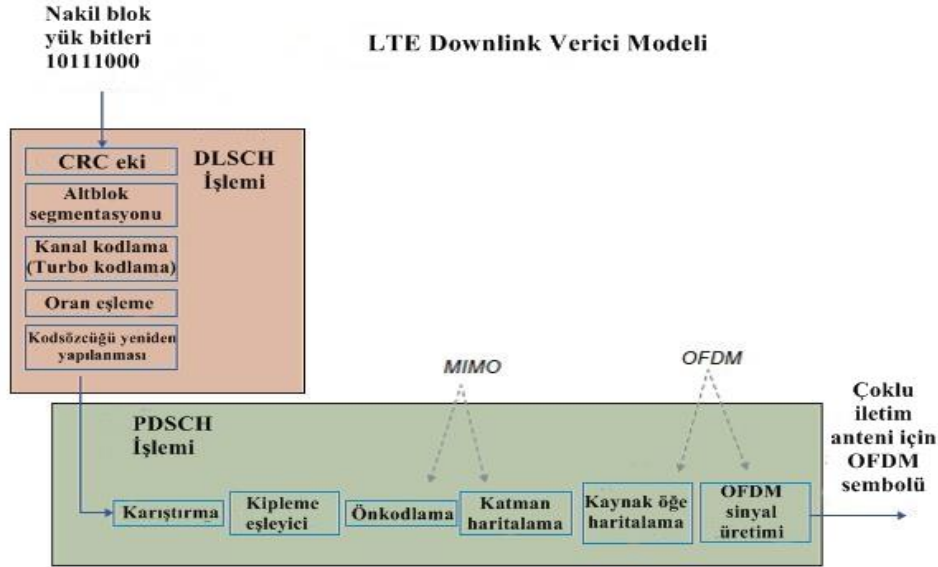
2.5. Bağlantı adaptasyonu

Bağlantı adaptasyonu, bir mobil iletişim sisteminin aktarım parametrelerinin uyarlanması için değişen tekniklerin daha iyi bir iletişim kanalının dinamik yapısına yanıtı olarak tanımlanır. Kanal kalitesine bağlı olarak, farklı modülasyon ve kodlama teknikleri kullanılabilir. Adaptif MIMO ile alım ve gönderim anten sayıları hatta iletim bant genişliği değiştirilebilir.

3. LTE Fiziksel Katmanı Modellemesi

Fiziksel katman modelleme yüksek katmanlardan aşağıya doğru olan veri bitleri üzerinde yapılan tüm işlemleri içerir. Bu işlemler çeşitli ulaşım kanallarının fiziksel kanallarla eşleştirilip, sinyal işleminin bu kanalların her birinin üzerinde nasıl gerçekleştirildiğini ve verilerin iletimi için

antene kadar nasıl taşındığını gösterir. Şekil 1’de LTE downlink için PHY modeli verilmiş olup, modelde veri çoklamasına aşağı yönlü bağlantı paylaşımlı kanal işleme (DL-SCH-Downlink Shared Channel) olarak bilinen bir aşamada kodlanarak başlanır. DL-SCH işlem zinciri, hata tespiti için bir dögüsel artıklık denetimi (CRC-Cyclic Redundancy Check) [1]. kodu ekleyerek karıştırır ve çerçeveler olarak bilinen küçük parçalar halinde veri segmentlere gelir. Kullanıcı verileri için Turbo kodlamaya dayalı kanal-kodlama işlemlerini üstlenen ve istenen kodlama oranını yansıtacak şekilde çıkış bit sayısını seçer. Oran eşleştirme işlemi yürüten kodkelimeleri son olarak kodblokları içine yeniden gelir. İşlemenin bir sonraki aşaması fiziksel downlink paylaşılan hattı olarak bilinir. Bu aşamada kodkelimeleri önce bir karıştırıcı işlemine tabi olur ve daha sonra bir modüle edilmiş sembol akımına neden olan bir modülasyon işlemine tabi tutulur. Bir sonraki adım, modüle edilmiş semboller tek bir akış içinde çok sayıda anten yoluyla iletim için tahsis edilmiş çok sayıda akım bölümüne bölünmüş LTE MIMO veya çok antenli işlem içerisine girer. MIMO işlemleri iki adımın bir kombinasyonu olarak kabul edilebilir: ön kodlama ve katman haritalama. Ön kodlama, ölçekler ve tahsis sembolleri her alt akış için düzenlenir ve katman haritalamayı seçer. Her alt akış içine verileri uygulamak için belirtilen dokuz farklı MIMO modları ile downlinkte yönlendirir. Downlinkte uygulanan mevcut MIMO teknikleri arasında iletim çeşitliliği, uzamsal çoğullama ve hüzme oluşturma vardır. İşleme zincirinin son adımı, çoklu taşıyıcı iletimi ile ilgilidir. Downlinkte, çoklu-işlem OFDM iletim şemasına dayanır. OFDM iletimi iki adımdan oluşur. İlk adım; kaynak eleman eşleme, bir zaman-frekans kaynağı, ızgara içinde her katmanın modüle edilmiş sembollerini düzenler. Izzaranın frekans ekseninde, veriler frekans alanında bir alt taşıyıcı ile hizalanır. İkinci adım; OFDM, sinyal oluşturma aşaması olup, OFDM simgelerine bir dizi ters Fourier uygulanarak nakledilen verileri hesaplamak için dönüştürülür. Gönderilen veriler çoklu antenlerde taşınır.

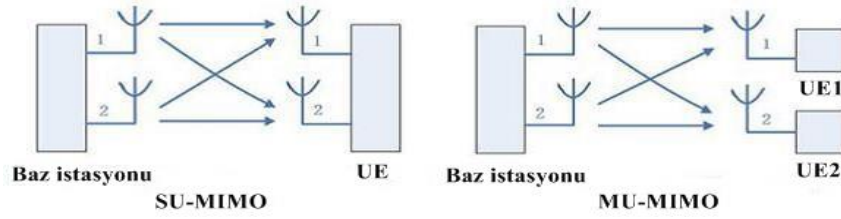


Şekil 1. LTE'nin fiziksel katman özellikleri [17]

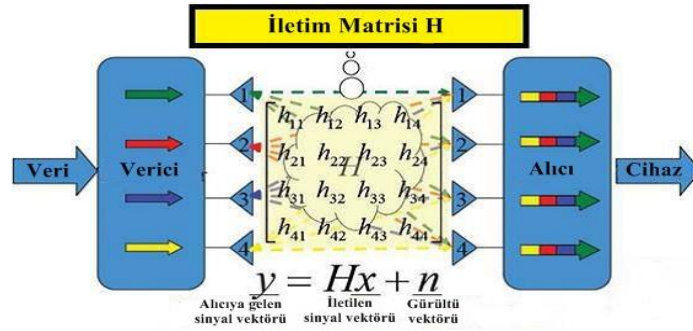
4. LTE’de Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) Yapısı

LTE, hem alıcı hem de vericide çoklu anten tekniğini destekler. MIMO anten konfigürasyonunu kullanır. Sinyalin, karmaşık ağırlıklarla çarpılması yoluyla, farklı anten elemanlarının fazının (bazen genlik) ayarlanması sayesinde SNR’yi, dolayısıyla da kapasiteyi artırır. Bu konfigürasyon ile aynı zamanda iletim çeşitliliğinin de elde edilmesi mümkündür. Bu, sinyalin zamanda kaydırılmış kopyalarının iletilmeleri sayesinde gerçekleştirilmiş olur ve böylece çeşitlilik zaman bölgesinde elde edilmiş olur. Alıcıda çoklu antenler ile (SIMO veya MIMO) alım çeşitliliğinin kullanılması mümkündür. Alınan sinyalin SNR’sini yükseltmek için bir birleştirme metodu olan Maksimum Oran Birleştirmesi (MRC-Maximum Ratio Combining) uygulanır [16]. Alıcı ve vericinin her ikisinde de çoklu anten olması durumunda yukarıda anlatılan metotların hepsinin kullanımı mümkün olur. Alıcı ve vericinin her ikisinde de çoklu anten olması, aynı zamanda uzamsal çoğullamanın da sağlanmasını mümkün kılar ve radyo ara yüzünde çok sayıda katman veya veri yolu (data pipe) yaratır. Yaratılabilecek katman sayısının maksimum değeri radyo kanal karakteristiklerine ve T_x (verici), R_x (alıcı) anten sayılarına bağlıdır. Radyo kanalının destekleyebileceği katmanların maksimum değeri ise kanal derecesine eşittir. Etkin bir şekilde kullanılacak katman sayısının maksimum değeri, T_x veya R_x tarafındaki anten eleman sayısının minimum değerine veya kanal derecesine eşit veya küçüktür. Data hızı, optimal koşullar altında katman sayısı tarafından katlanabilmektedir. LTE’nin teknik özellikleri T_x tarafında 4’e, R_x tarafında ise yine 4’e kadar anten konfigürasyonu (4x4 MIMO konfigürasyonu) destekler. LTE’nin birinci sürümünde UE (User Equipment), 2 R_x anteni kullansa dahi yalnızca bir tane T_x antene sahip olması olasıdır. Tekil kullanıcı MIMO (SU-MIMO-Single User MIMO) olarak isimlendirilen bu yöntem yalnızca downlinkte desteklenir (maksimum 2x2 konfigürasyon). SU-MIMO, kullanıcıyı için birçok katman yaratarak, o tekil kullanıcı için veri hızını artırır. Uplinkte ise Çoklu Kullanıcı MIMO (MU-MIMO-Multi User MIMO) uygulanabilir (Şekil 2). Farklı UE iletimleri uzamsal olarak ayırmak için MU-MIMO’yu kullanır. Bu durum, aynı anda aynı kaynak bloğunda (aynı frekansta ve aynı anda) çok sayıda UE’nin planlanabilmesine yol açar ki, bu da hücre içerisinde kapasite artmasını sağlar. Diğer taraftan düşük SNR değerlerinde, maksimum data hızı neredeyse lineer olarak artar. Bu yüzden yalnızca yüksek SNR elde etmeyi amaçlamak verimli bir yöntem değildir. Düşük SNR değerleri ile çok sayıda veri yolu yaratmaya çalışmak daha verimli olur [4]. Çoklu antenlerin; daha iyi data hız kapsamı ve kapasitesi, daha yüksek data hızları için potansiyel ve daha yüksek spektral verim avantajları mevcuttur. MIMO sistem formu LTE throughputunu ve spektral verimliliği arttıran önemli yeniliklerinden biridir [18].

MIMO’nun iki fonksiyonel modu bulunur. İlki kullanılan moda göre farklı kazançlar elde edilmesini sağlar. Uzamsal çoğullama modu farklı veri katarının farklı uzamsal boyutlardan aynı kaynak blokları üzerinden gönderilmesi şeklinde yapılır. Bu durum veri hızını ve kapasiteyi artırır. Diğer ise iletim çeşitliliği modudur. Gönderilen sinyaldeki sönmüllemenin ve çok-yolluluğun etkilerini gidermek için aynı işaretin farklı antenlerden iletilmesi şeklinde yapılır. Uzamsal çoğullama modunda veri katarları tek kullanıcıya, ya da birden çok farklı kullanıcıya gönderilebilir. SU-MIMO tek kullanıcının veri hızını artırır, MU-MIMO ise sistemin toplam kapasitesini artırır [18].



Şekil 2. SU-MIMO ve MU-MIMO yapısı [4]

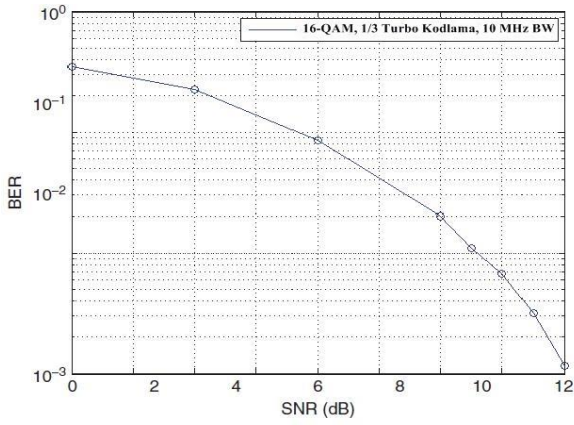


Şekil 3. MIMO çalışma yapısı [4]

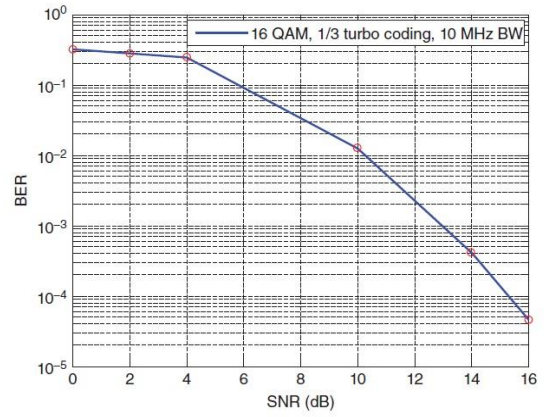
MIMO sisteminde iletim ilişkisi, iletim kanal matrisi $[H]$ ile tanımlanır (Şekil 3). Alınan sinyal vektörü \underline{y} , iletilen sinyal vektörü \underline{x} , gürültü vektörü de \underline{n} olarak alınırsa MIMO sisteminin iletim yapısı Şekil 3'de görüldüğü gibi $\underline{y} = H\underline{x} + \underline{n}$ olarak formülize edilir. Burada h_{ij} , kanal matrisi elemanları (alt indisler j verici anteni, i alıcı anteni temsil etmektedir) olmak üzere alıcı ile verici arasındaki tüm mümkün olan yolları tanımlamış olur.

4.1. MIMO antenin SNR - BER performans sonuçları

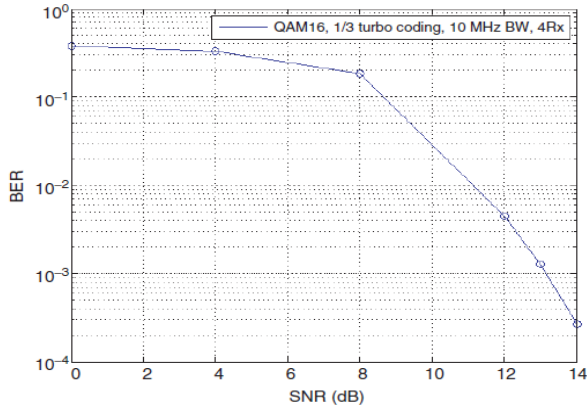
Çalışmada çoklu antenin performans analizleri için 50 milyon bit işleme alınarak SNR - BER grafikleri çizdirilmiştir. Her bir SNR değerinde 8 yinleme, 16-QAM veya QPSK modülasyon, 1/3 oranında Turbo kodlama altında BER grafikleri elde edilmiştir. Standartlarda yer alan 10 MHz'lik bant genişliği, değerine ulaşılmıştır. Grafiklerin hepsinde aynı oran eşleme, karıştırma, CRC, Turbo kod, 16-QAM veya QPSK modülasyon vardır. Şekil 4'de tek anten iletimi, Şekil 5'de tek girişli çok çıkışlı (SIMO), Şekil 6'da LTE mode 2, transmit diversity, 2×2 MIMO BER, Şekil 7'de, 2×2 MIMO (Open-loop codebook-based precoding), Şekil 8'de ise, 2×2 MIMO (Closed-loop codebook-based precoding) kullanılmıştır. Analizde kullanılan LTE downlink iletim modları ise Şekil 9'da verilmiştir.



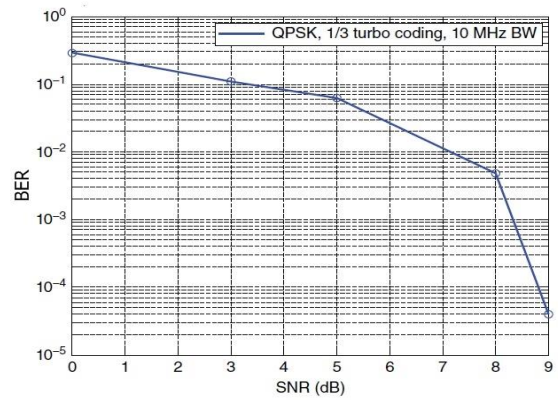
Şekil 4. SISO modeli BER sonuçları



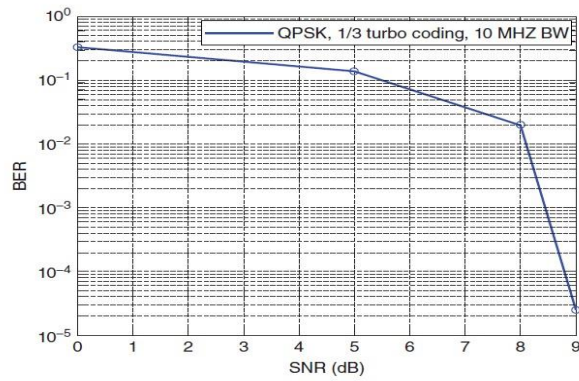
Şekil 6. LTE mode 2, 2 x 2 MIMO BER sonuçları



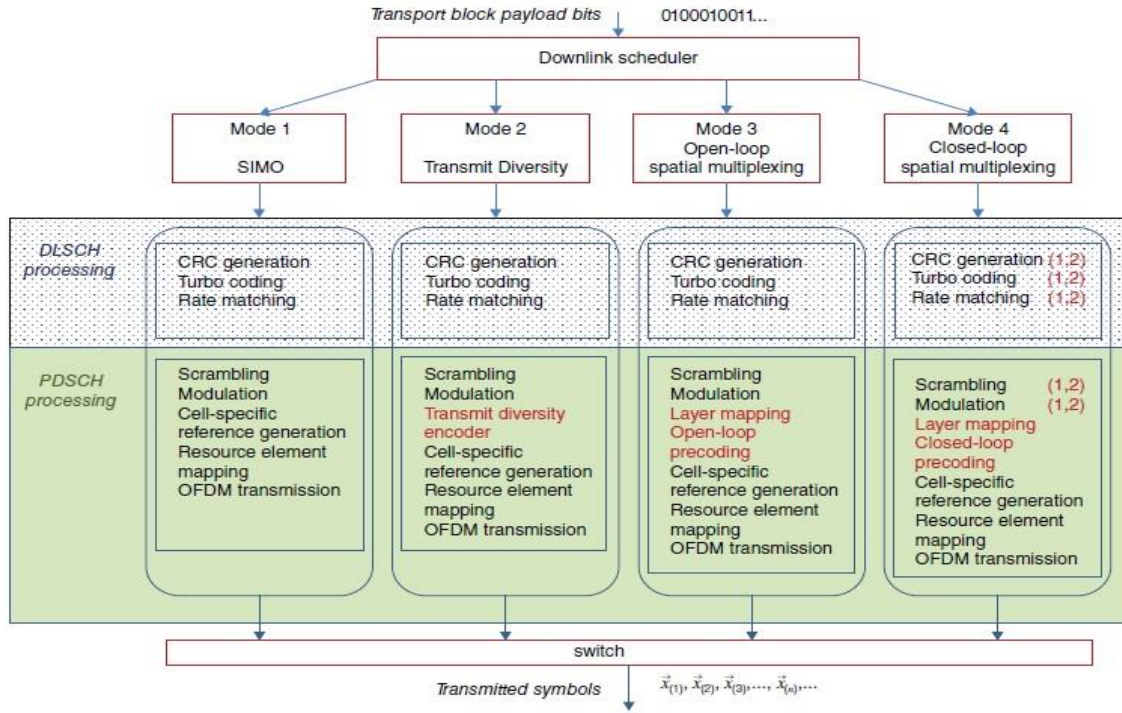
Şekil 5. LTE mode , SIMO BER sonuçları



Şekil 7. LTE mode 3, 2 x 2 MIMO BER sonuçları



Şekil 8. LTE mode 4, 2 x 2 MIMO BER sonuçları



Şekil 9. LTE iletim modları

Sonuçlar

Bu çalışmada, LTE ve gelişimini sağlayan teknolojileri; OFDM, SC-FDM, MIMO, Turbo kodlama ve dinamik bağlantı adaptasyonu kısaca açıklanmıştır. OFDM tekniklerini kullanarak LTE'nin fiziksel katmanının modellenmesi gerçekleştirilmiş ve MIMO tekniğinin LTE sistemler için önemi MATLAB yazılımıyla test edilmiştir.

LTE standardının, OFDM çoklu taşıyıcı şemasının çeşitli (SIMO, MIMO) anten tipleri ile nasıl kolayca birleştirdiği gösterilmiştir. Farklı yayın modlarının, farklı tarifeli (scheduling) durumları, farklı hareket profillerini ve kanal kalitesini nasıl sağladığı da görülmüştür. Modülasyon, kodlama ve temel karıştırıcıyı karakterize eden MATLAB yazılımı ile BER performans grafikleri, OFDM çok taşıyıcılı yayın ve iletim çeşitlerini ve uzamsal çoklamayı içeren çeşitli SIMO, MIMO antenler için çizdirilmiştir. Sonuçlar standartlarda yer alan 10 MHz'lik bant genişliğine ulaşıldığını göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Sauter M. Beyond 3G – bringing networks, terminals and the web together: LTE, WiMAX, IMS, 4G devices and the mobile web 2.0. John Wiley & Sons, Ltd;2009.
- [2] Türker H. Yeni nesil mobil networkler; 3G'den 4G (LTE)'ye geçerken mimari değişim

- gereksinimleri ve uyumluluk, Y. Lisans Tezi, İ.T. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul; 2010.
- [3] Baker M., Toufik I., and Sesia S. LTE, the UMTS Long Term Evolution from theory to practice. John Wiley & Sons; 2010.
- [4] Hanzo L. and Akthman Y. MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX” John Wiley & Sons; 2011.
- [5] Ramseier S. Shuffling bits in time and frequency-an optimum interleaver for OFDM. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communication (ICC’03) 2003;3418–3422.
- [6] Taşpınar N. ve Özdemir G. 4. Nesil haberleşme teknolojilerinde OFDMA. URSI-Türkiye’2014 VII. Bilimsel Kongresi, Elazığ; 2014.
- [7] 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation. *Version 8.8.0 Release 8*; 2009.
- [8] 3GPP TS 36.101. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); user equipment (UE) radio transmission and reception. *Version 8.7.0 Release 8*; 2009.
- [9] 3GPP TS 36.211. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation. *Version 8.8.0 Release 8*; 2009.
- [10] Proakis J. G., and Salehi M. Fundamentals of communication systems, 2nd edition. Prentice Hall; 2004.
- [11] Doufexi, A. and Armour, S. Design considerations and physical layer performance results for a 4G OFDMA system employing dynamic subcarrier allocation. IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications; 2005: 1: 357-361.
- [12] Biagioni A., Fantacci R., Marabissi D., and Tarchi D. Adaptive subcarrier allocation schemes for wireless OFDMA systems in WIMAX networks. Selected Areas in Communications, IEEE Journal 2009; 27;2;217-225.
- [13] Khurshid K. and Khokhar IA. Comparison survey of 4G competitors (OFDMA, MC CDMA, UWB, IDMA). Aerospace Science & Engineering (ICASE), 2013 ;1,7, 21-23.
- [14] Narasimhan B., Al-Dhahir, N., and Minn, H. (March 2010). SFBC design tradeoffs for mobile SC-FDMA with application to LTE-advanced”, Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE; 2010; 3458,3461, 14-19.
- [15] Karşlı, İ. (2013). MIMO tekniğinin HSPA ve LTE şebekeleri için önemi ve tanımlı bir rota için deneysel olarak kıyaslanması, Y.Lisans Tezi, Çukurova Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [16] Berrou, C. Near-shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbocodes. IEEE International Conference on Communications, Geneva, Switzerland. 1993;1064-1070.
- [17] Ghosh, A. and Ratasuk, R. Essentials of LTE and LTE-A. Cambridge University Press.
- [18] Yıldız A.Ş., 4G (LTE) Haberleşme Sistemlerinin Matematiksel Modellenmesinin MATLAB Simülasyonu ve Performans Analizleri, Y. Lisans Tezi G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.