

Gelecek Nesil Mobil Haberleşme Sistemleri: 3G, 4G ve Ötesi

Hakkı Soy¹, Özgür Özdemir², Mehmet Bayrak³

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Karaman

² Fatih Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

³ Mevlana Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya

hakkisoy@kmu.edu.tr, oozdemir@fatih.edu.tr, mbayrak@mevlana.edu.tr

Özet: Son yıllarda, mobil haberleşme sistemleri ve ilgili standartların hızlı gelişimine tanık olduk. Bu gelişim sürecinde, standartlar sadece ses servislerini taşıyan birinci nesil (1G) analog sistemlerden ikinci nesil sistemler (2G) aracılığıyla üçüncü nesil (3G) sistemlere geliştirilmiştir. Hem 2G hem de 3G sistemler dijital karakteristiklere sahip olup, ses yanında veri servisleri sunar. Bu hızlı gelişim için itici güç kablosuz haberleşme sistemleri için her zaman artan veri hızı gereksinimleridir. Mobil iletişim sistemlerinin dördüncü nesil (4G) sistemler ve ötesinde gelişimi mobil kullanıcılara esnek, özelleştirilebilir ve her yerde kullanılabilir multimedya servis erişimi imkânı sağlar. 4G sistemler gelecek nesil mobil servisler için etkili çözümler sunmayı hedefler. Önceki üç nesil ile karşılaştırıldığında 4G mobil sistemler etkileşimli multimedya servisleri kullanımı açısından önemli ölçüde gelişmiştir. Bu bildiride dünyada mobil haberleşme sistemlerinin tarihsel gelişimi incelenmiş ve bu gelişim üzerinde başlıca kilometre taşı teknolojiler ve anahtar teknikler hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Gelecek Nesil Mobil Haberleşme Sistemleri, GSM, UMTS, HSPA, LTE.

Next Generation Mobile Communication Systems: 3G, 4G & Beyond

Abstract: During the last years, we have witnessed a swift evolution of mobile communication systems and related standards. From the first generation (1G) analog systems supplying only voice services, the standards evolved through the second generation (2G) systems to the third generation systems (3G) in this evolution process. Both the 2G and 3G systems have digital characteristics offering data services besides the voice. The propulsive force for this fast evolution is the ever increasing data rate requirements for wireless communication systems. The evolution of mobile communication systems to fourth generation (4G) systems and beyond ensures flexible, customized and ubiquitous multimedia service provision to mobile users. 4G systems aim to offer an effective solution for the next generation mobile services. Comparing with the previous three generations, 4G mobile systems have been significantly improving in terms of interactive multimedia services. In this paper, we investigate the historic evolution of mobile communication systems around the world. We also give information about the major milestone technologies and key techniques on this evolution.

Keywords: Next Generation Mobile Communication Systems, GSM, UMTS, HSPA, LTE.

1. Giriş

Yıllar önce sadece askeri uygulamalar ve özel amaçlı haberleşme için kullanılan kablosuz haberleşme sistemleri bugün insan hayatının büyük bir bölümünü doğrudan etkilemektedir. Kablosuz sistemler kullanıcıların çeşitli uygulama alanlarında ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilmiş standartlar, teknolojiler ve haberleşme tekniklerini kapsar. Kullanıma sunulan sistemler genellikle sunulan servis tipi, desteklenen veri hızı (data rate), paket dağıtım mekanizması, haberleşme kapasitesi (throughput), performans ve güvenilirlik (reliability) gibi belirleyici özellikleri doğrultusunda ortaya koyulan tanımlayıcı standartlar ile çeşitli sınıflara ayrılır [1].

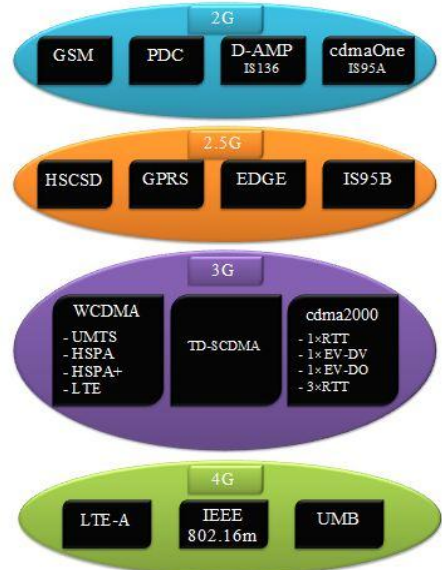
Hücrel sistemler kablosuz haberleşmenin en popüler uygulama alanlarından biridir. Teknolojinin zamanla gelişimiyle hücrel sistemlerde kullanıcı ihtiyaçları ve buna bağlı olarak gerekli bant genişliği ile sunulan servisler artmaktadır. Başlangıçta sadece ses sinyallerini taşımak üzere tasarlanan hücrel telefon sistemleri bugün yerlerini taşınabilir el terminalleri ile kolayca internet erişimine imkân sağlayan gelişmiş mobil haberleşme sistemlerine bırakmıştır.

Mobil terminal kullanımında çoğunlukla bilgiye erişimi ve bilgi paylaşımını ön plana çıkaran dinamik platformların oluşturulması hedeflenmektedir. Akıllı telefonlar ve tablet bilgisayarlar sahip oldukları dokunmatik ekranları, kullanıcı dostu grafik arabirimleri, dâhili kameraları ile fotoğraf/video yakalama gibi güçlü multimedya yetenekleri yanında elektronik posta alışıverışı yapma ve web sitelerinde gezinme gibi internet servislerinin kullanımına imkân sağlamaktadır. Son yıllarda kullanılmaya başlanan görüntülü görüşme, mobil televizyon, gerçek zamanlı video konferans ve konum tabanlı servisler gibi yeni uygulamaların popülerlik kazanması ile geniş bant mobil haberleşme teknolojilerinin gelişimi abone sayısında yaşanan artışı daha da tetiklemiştir.

Bu gelişmeler doğrultusunda gelecek nesil mobil haberleşme sistemlerinde kablosuz multimedya veri akışının, ses aktarımından çok daha hızlı büyüyerek şebeke üzerindeki trafiği büyük ölçüde işgal edeceği ve yüksek bant genişliği ihtiyacına cevap verebilecek yeni sistemlere gereksinim duyulacağı rahatlıkla öngörülebilir. En basit çözüm bu tip servislere daha fazla bant genişliği ayırmak gibi görünse de elektromanyetik spektrumun sınırlı kaynağa sahip olması gelecek nesil mobil sistemlerde sunulacak servislerin kullanım bedellerini oldukça yükseltecektir. Bu sebepten geliştirilecek sistemler için mevcut frekansların verimli kullanımı büyük öneme sahiptir.

2. Mobil Haberleşme Gelişim Süreci

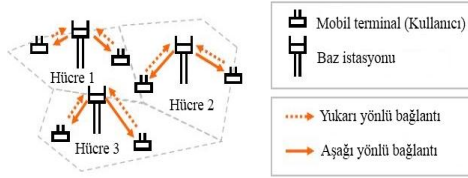
Hücrel haberleşme kavramının temeli 1947 yılında ABD’de Bell Labs tarafından ortaya koyulmuştur. Ticari amaçlı ilk hücrel telefon sistemi 1978’de Bahreyn’de kurulmuş olup 1980’li yılların başlarından bugüne devam eden mobil haberleşme sistemlerinin gelişim süreci Şekil 1’de gösterilmiştir [2].



Şekil 1. Mobil haberleşmenin gelişimi

2.1 Birinci Nesil (1G) Sistemler

Hücrel haberleşmede coğrafi alan çok sayıda hücelere bölünürken Şekil 2’de gösterildiği gibi her bir hücre içinde baz istasyonu kendisine atanmış kullanıcılar ile kablosuz olarak haberleşir. Birinci nesil (1G) hücrel sistemlerinin önemli örneklerinden biri Temmuz 1978’de Chicago, ABD’de servis vermeye başlayan AMPS (Advanced Mobile Phone Service) sistemidir. Tamamen analog teknikler ve FDMA ile hizmet veren AMPS oldukça düşük servis kalitesi ve verimsiz frekans spektrumu kullanımı dezavantajlarına sahiptir. Bunun dışında İskandinav ülkeleri için Ericsson ve Nokia tarafından birlikte geliştirilen NMT (Nordic Mobile Telephone) ile İngiltere için Motorola tarafından geliştirilen TACS (Total Access Communications System) sistemleri 1G hücrel sistemlere örnek verilebilir [2].



Şekil 2. Hücrel haberleşme sistemi örneği

Her kullanıcıya bağlantı süresince iki yönlü görüşme yapabilmesi için iki kanal ayıran FDMA tabanlı 1G sistemler statik kanal ayırma planı nedeniyle oldukça sınırlı sistem kapasitesine sahiptir. 1G sistemlerin tümü ses iletimi için FM kanal kullanırken AMPS (IS41 olarak da isimlendirilir) için 30 KHz, NMT ve TACS için 25 KHz bant genişliği ayrılmıştır. 1G sistemler genellikle 900 MHz frekansında çalışırken NMT için 450 MHz frekansı tercih edilmiştir [2,3].

2.2 İkinci Nesil (2G) Sistemler

Hem abone sayısında yaşanan artış hem de kullanıma sunulan servis sayısı, servis kalitesi ve güvenlik açısından hızlı gelişim gösteren dijital özellikte ikinci nesil (2G) sistemler 1990’lı yıllarda başlangıçta sadece ses iletimi

için kullanılırken daha sonra kısa mesaj servisi (SMS) ve internet erişimi için veri haberleşmesi amacıyla da kullanılmıştır. 2G için temel standart olan GSM (Global System for Mobile Communications) ilk defa 1991 yılında Finlandiya’da kullanıma sunulmuştur. GSM’in sistem tasarımında temel hedef ülke sınırları arasında dolaşımı destekleyecek yetenekte ve 1G sistemlere göre daha yüksek kapasiteye sahip bir dijital haberleşme sisteminin ortaya çıkarılmasıdır. GSM kanal erişimi için TDMA ile birlikte FDMA tekniklerini kullanır. FDMA ile 25 MHz bant genişliğine sahip ve aralarından 200 KHz boşluk bırakılan 124 adet taşıyıcı frekans sağlanırken, TDMA ile taşıyıcılar zaman dilimlerinde birbirinden ayrılmıştır. Çalışma frekansı olarak başlangıçta 900 MHz frekansı kullanımı hedeflenirken daha sonra 1800, 1900 ve son olarak 800 MHz frekansları da kullanılmaya başlanmıştır [2].

Avrupa’da yaygın olarak kullanılan GSM sistemi ile birlikte Kuzey Amerika’da Digital AMPS (D-AMPS) ve cdmaOne, Japonya’da PDC (Pacific Digital Cellular) isimli eşdeğer sistemler kullanılmıştır. D-AMPS (kısaca TDMA olarak bilinir) sistemi IS54 standardı (sonradan IS136 olarak değişti) üzerinde geliştirilmiş olup TDMA, FDMA ve PSK modülasyonu ile çalışır. Mevcut 1G AMPS teknolojisi ile olabildiğince uyumlu olarak geliştirilen D-AMPS için yine 30 KHz kanallar kullanılmasına rağmen aynı zaman dilinin üç farklı dijital ses kanalı için kullanılmasıyla üç kat fazla ses trafiği taşınması sağlanmıştır. Buna paralel olarak Qualcomm Inc. şirketi tarafından tasarlanan cdmaOne sistemi IS95 standardı üzerinde geliştirilip CDMA, PSK modülasyonu ve kodlama ile çalışır. PDC sistemi ise düşük hareketlilik sağlamasına rağmen 64 Kbps gibi yüksek hızlarla veri transferi imkânı sunsa da Japonya dışında kullanım görmemiştir [2-4].

Multimedya servislerde karşılaşılan büyük ilgi ile veri aktarımında yaşanan hızlı artış doğrultusunda devre anahtarlamalı ve çok

düşük veri transfer hızına sahip 2G sistemler (GSM için maksimum veri hızı 14.4 Kbps) geliştirilerek önce zaman dilimlerinin birleştirilmesiyle 64 Kbps veri transfer hızına ulaşılmasına rağmen yaygın kullanımı olmayan HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) sistemi geliştirilmiştir. Mobil sistemlerde veri transferinin kısa süreliğine anlık olarak yükselen ve yoğunlukla uzun süreler durağan bekleyen kanal trafiğine sahip olmasından dolayı devre anahtarlama tekniğinde ağ kaynakları verimli olarak kullanılamaz. Bu sebepten veri trafiğini daha etkin şekilde yönetmek için veri paketleri oluşturularak paket anahtarlama tekniğiyle daha hızlı veri transferine imkân sağlayan 2.5G sistemler 1990'lı yılların sonundan itibaren kullanılmaya başlanmıştır [3,5].

GPRS (General Packet Radio System) ve EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) gibi 2.5G sistemlerde kullanıcılara ait veri paketleri sistem bant genişliği kullanımı için rekabet ederken kullanıcılar sadece gönderdikleri veri miktarı kadar ödeme yaparlar. GPRS ve EDGE arasındaki temel fark kullanılan modülasyon çeşididir. GPRS için GMSK (Gaussian Minimum Frequency Shift Keying) modülasyonu kullanılırken EDGE için 8PSK (Phase Shift Keying) modülasyonu kullanılmıştır. GPRS için veri hızı 140 Kbps iken EDGE ile yüksek seviyeli modülasyon ve kodlama kullanımı sayesinde veri transfer hızı yaklaşık üç kat artırılarak 384 Kbps değerine ulaşmıştır [2].

3G mobil sistemlerin gelişimi için önemli bir kilometre taşı sayılabilecek EDGE yüksek veri hızı vaadini ancak ideal kanal şartları oluşması durumunda gerçekleştirir. EDGE uyumlu telefonlar uyarlama modülasyon ve kodlama tekniği (Adaptive Modulation and Coding - AMC) kullanılır. Bu şekilde ölçülen sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio - SNR) geri besleme değerine bağlı olarak en iyi modülasyon tipi belirlenir. Uygun kanal şartları ortaya çıktığında gürültüye karşı çok

hassas olan 8PSK modülasyonla veri iletişimi yapılırken, gürültülü kanal koşullarında ise GMSK modülasyonu kullanılır [2].

GPRS ve EDGE gerçekte ses iletimi için tasarlanmış olan 2G sistemlerin geliştirilmesi ile elde edildiklerinden öncelikli olarak haberleşmede düşük gecikme süresi hedefler. Özellikle multimedya servis kullanımının hızlı artışı ile veri transferi odaklı tasarlanmış ve yüksek haberleşme kapasitesi sağlamayı hedefleyen gelişmiş mobil haberleşme sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

2.3 Üçüncü Nesil (3G) Sistemler

2G sistemlerin gelişimi ve yaygın olarak kullanımını göz önünde bulunduran ITU (International Telecommunication Union) üçüncü nesil (3G) mobil sistemlerinde kullanılacak olan ve IMT 2000 (International Mobile Telecommunications 2000) olarak isimlendirilen standartları tanımlamak üzere 1990'lı yıllarda çalışmalara başlamıştır. Bu kapsamda 2G sistemler için farklı ülkelerde ortaya çıkan farklı ve uyumsuz standartların ortadan kaldırılması ile tamamen evrensel nitelikte mobil haberleşme sistemi geliştirmek üzere çalışmalar 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ve 3GPP2 şeklinde isimlendirilen iki farklı çalışma grubu tarafından gerçekleştirmiştir [6].

3GPP grubu GSM standardının geliştirilmesi için çalışırken 3GPP2 grubu cdmaOne standardının gelişimini amaçlamıştır. Bu iki çalışma grubunun birbirleri arasındaki farklılıklar üzerinde uzlaşamaması nedeniyle 3G için de farklı standartlar ortaya çıkmıştır. Bu standartlar 3GPP tarafından geliştirilip Avrupa ve Asya'da kullanılan W-CDMA (Wideband CDMA), 3GPP2 tarafından 2002 yılından itibaren geliştirilerek Kuzey Amerika'da kullanılan CDMA2000 ve CATT (Chinese Academy of Telecommunications Technology) tarafından geliştirilip Çin'de kullanılan TD-SCDMA (Time Division Synchronous CDMA) standartları olmak üzere üç farklı grupta incelenebilir [3,5].

Dünya genelinde en fazla kullanılan W-CDMA standardı 5 MHz bant genişliğine sahip olup veri hızı mobil kullanıcılar için 144 Kbps, yaya olarak ve şehirsiz kullanımda 384 Kbps, sabit kullanım için 2 Mbps olarak öngörölmüştür. 1.25 MHz bant genişliğine sahip CDMA2000 standardı 2G CDMA standardı ile geriye doğru uyumlu olarak 153 Kbps veri hızını destekler. QPSK ile 8PSK arasında uyarlamalı modölasyon desteğı ve 1.6 MHz bant genişliğine sahip TD-SCDMA için aşğı yönlü bağlantı veri hızı turbo kodlama ile maksimum 2 Mbps'dir [2,5].

3G sistemler paket ve devre anahtarlama ile hem IP hem de IP olmayan veri trafiğini destekler. Avrupa'da ilk ticari 3G sistemler 2003 yılından başlayarak önce İngiltere ve İtalya'da görölmeye başlanmıştır. 3G sistemler içinde en fazla kullanılan UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) teknolojisi mobil sistemlerin gelişiminde GSM ve EDGE'den sonra önemli bir yer teşkil eder. İlk olarak ETSI (European Telecommunications Standard Institute) tarafından geliştirme çalışmalarına başlanılan UMTS'nin teknik özellikleri 1998 yılında dünyanın farklı bölgelerinden çok sayıda ortağın katıldığı 3GPP grubu tarafından tamamlanmıştır. Radyo arabirimi olarak W-CDMA tekniğini kullanan UMTS teknolojisi 2G sistemlerde kullanılan TDMA ve FDMA tekniklerine göre daha yüksek veri hızı ve spektral verimlilik sunar. UMTS teknolojisi asimetrik veri hızı desteğı ile 5 MHz bant genişliği üzerinden multimedya servislerden faydalanma imkânı sağlar [7].

Amerika'da benimsenen CDMA2000 standardı 2G CDMA standardı olan IS95 (cdmaOne) üzerinde geliştirilmiş olup ilk ticari uygulaması Ekim 2000'de Güney Kore'de CDMA2000 1xRTT sistemiyle 1.25-MHz tek kanal bant genişliğinde (1x) yapılmıştır. Daha önceki 2G cdmaOne sistemlerin ses taşıma kapasitesini iki katına çıkaran 1xRTT sisteminde veri transfer hızı 144 Kbps olup 3G sistemler için öngörülen

veri hızlarına ulaşılammıştır. Ancak Ocak 2002'de yine Güney Kore'de sadece veri iletişim servisi vermeye başlayan CDMA2000 1xEV-DO (Single Channel Bandwidth Evolution Data Only) sistemi aşğı yönlü bağlantı için 3.1 Mbps, yukarı yönlü bağlantı için 154 Kbps veri hızı değerleriyle 3G sistem hedeflerine ulaşmıştır. CDMA2000 standardının bir sonraki aşaması olarak 2006 yılında kullanıma sunulan 1xEV-DV (Single Channel Bandwidth Evolution Data Voice) sisteminde hem ses hem de veri iletişimi için QPSK ile 16QAM arasında uyarlamalı modölasyon ve kodlama teknikleri kullanılarak aşğı yönlü bağlantı için 3.1 Mbps, yukarı yönlü bağlantı için 451 Kbps veri hızı elde edilmiştir. Son olarak üç kat fazla kanal bant genişliği kullanan (3x) CDMA2000 3xRTT sistemi ile veri transfer hızı 2 Mbps değerine ulaşmıştır [5,7,8].

3GPP standardının ilk sürümü (sürüm 99) ile IMT-2000 standartları karşılanırken aynı zamanda UMTS teknolojisinin de temeli oluşturulmuştur. 3G sistemlerde mobil servis kullanımının giderek yaygınlaşması ile artan kapasite ve veri hızı ihtiyaçları doğrultusunda 3GPP tarafından sürüm 5 ile HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ve sürüm 6 ile HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) geliştirilmiştir. Kullanılan mobil servislerin pek çoğunda kullanıcılar aşğı yönlü bağlantı (downlink) için daha fazla veri transferi gerçekleştirir. Karşıdan veri yükleme (download) için ortaya çıkan bu dengesizlik sonucunda 2005 yılında ilk ticari uygulaması yapılan HSDPA teknolojisi ile maksimum veri hızı 14.4 Mbps değerine çıkartılmıştır. Buna karşın VoIP (Voice over IP) ve gerçek zamanlı video konferans gibi uygulamalarda hem aşğı hem de yukarı yönlü bağlantı (uplink) için yüksek veri transfer hızlarına ihtiyaç duyulur. Bu ihtiyaç doğrultusunda Şubat 2007'de kullanıma başlanan HSUPA teknolojisi geliştirilmiştir. Böylece aşğı yönlü bağlantı için 14.4 Mbps, yukarı yönlü bağlantı için ise 5.76 Mbps veri hızlarına ulaşılmıştır [3,7,9].

Aşağı yönlü bağlantıda HSDPA için kullanılan pek çok özellik yukarı yönlü bağlantıda HSUPA içinde kullanılmıştır. HSDPA ve HSUPA teknolojileri birlikte kısaca UMTS teknolojisinin gelişiminde en önemli basamak olan HSPA (High Speed Packet Access) şeklinde isimlendirilir. 3.5G olarak da değerlendirilen HSPA teknolojisi radyo arabirimi yine W-CDMA tabanlı olup UMTS ile geriye doğru tamamen uyumludur. HSPA'da aşağı yönlü bağlantı için 16QAM modülasyonu, yukarı yönlü bağlantı içinse QPSK modülasyonu kullanılır. 3GPP2 tarafından geliştirilen CDMA2000 standardı ile elde edilen 1xEV-DO ve 1xEV-DV teknolojileri gibi HSPA teknolojisi de 3GPP tarafından geliştirilerek 3GPP sürüm 7 ile 64QAM ve MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) desteği (2x2, 3x2 ve 4x2 formunda) gibi yeni özelliklere sahip HSPA+ teknolojisi elde edilmiştir. HSPA+ için veri transfer hızı 42 Mbps değerine (64QAM ile 2x2 MIMO konfigürasyon ile) kadar yükselmiştir [3,5,8].

3GPP standartlarının bir sonraki aşaması sürüm 8 ile LTE (Long Term Evolution) teknolojisidir. LTE teknolojisi GSM, UMTS ve HSPA'dan tamamen farklı bir radyo arabirimine sahiptir. Ayrıca sayısal sinyal işleme (DSP) yeteneği, 1.25-20 MHz arasında ölçeklenebilir bant genişliği desteği ve yeni modülasyon tekniklerinin kullanımı ile mevcut 3G sistemlerin haberleşme kapasitesi ve veri transfer hızı LTE sayesinde daha da artırılmıştır. Dünyada ilk LTE servisi Aralık 2009'da İsveç ve Norveç'in başkentlerinde gerçekleştirilmiştir. HSPA'nın tersine LTE teknolojisi UMTS ile geriye doğru uyumluluk sağlamaz. LTE teknolojisi aşağı yönlü bağlantı için OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) tekniği ile veri hızını 100 Mbps ve yukarı yönlü bağlantı için SC-FDMA (Single-Carrier FDMA) kullanımı ile veri hızını 50 Mbps değerine çıkarmıştır. Elde edilen veri hızları HSDPA ve HSUPA ile karşılaştırıldığında yaklaşık üç kat artış sağlanmıştır. Ayrıca MIMO desteği ile veri hızı 326 Mbps değerine çıkartılabilir. Bu

bakımdan 4G sistemler için öngörülen IMT Advanced standartlarının karşılanmasında LTE teknolojisi önemli bir basamak olarak değerlendirilebilir [6,7,9].

UMTS'nin gelişimi ile ortaya çıkan HSPA, HSPA+ ve LTE teknolojileri paket tabanlı servisler için haberleşme kapasitesi ve veri hızının artışı hedeflemektedir. Bunun yanında UMTS tabanlı teknolojilerin yaygınlaşması ile kullanıcıların IPTV, VoIP, yüksek çözünürlüklü video ve multimedya çevrim içi oyun (MMOG) gibi yeni servisleri kullanımı mümkün olacaktır.

2.4 Dördüncü Nesil (4G) Sistemler

Hem 3GPP hem de 3GPP2 standartları hâlen 3G standartlarının genişletilmesiyle elde edilecek tamamen IP (Internet Protocol) tabanlı ağ alt yapısına sahip teknolojilerin ortaya çıkması için geliştirilmektedir. 3G ötesindeki sistemler için başlıca ihtiyaç, multimedya haberleşme kalitesinin artırılması gereksinimi göz önünde tutulduğunda daha yüksek veri transfer hızı ve haberleşme kapasitesidir. Bu gereksinimleri yerine getirecek standartlar 2008 yılında ITU-R (ITU-Radiocommunication Sector) tarafından IMT Advanced olarak belirlenerek dördüncü nesil (4G) haberleşme sistemlerinin gelişimi planlanmıştır. 4G terimi sadece hücresel sistemleri değil aynı zamanda WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) gibi geniş bant kablosuz erişim sistemlerini de içine alır. 4G sistemler 3G için süregelen problemleri çözmek için geliştirilmekle birlikte daha önceki sistemler ile geriye doğru uyumlu ve tamamen IP tabanlıdır. Bu özelliği ile 4G sistemler geniş bant uydu sistemlerinden mevcut 3G sistemlere kadar pek çok sisteme bütünleşik olarak çalışabilir [10].

4G sistemler daha yüksek veri hızı ve haberleşme kapasitesi yanında aynı zamanda daha fazla hareketlilik (mobility), servis kalitesi (QoS), güvenlik (security) imkânı ile düşük gecikme süresi (latency) sunar. IMT

Advanced standardı ile tanımlanan hareketlilik sınıfları sabit (0 km/h), yay (0-10 km/h), araç (10-120 km/h) ve yüksek hızlı araç (120-350 km/h) şeklindedir. 4G sistemler mobil kullanıcıların sabit veya düşük hızlı hareketlilik (yaya ve sabit kullanıcı durumunda) için 1 Gbps, yüksek hızlı hareketlilik (araba ve trenle seyahat durumunda) için ise 100 Mbps gibi yüksek hızlarda veri transferine imkân sağlar. Sadece paket anahtarlama ile çalışan 4G sistemlerin yaygınlaşması ile kullanıcılara ultra geniş bant internet erişimi, internet üzerinden multimedia içerikli eğlence, yüksek kaliteli ses ve yüksek çözünürlüklü video gibi yeni nesil mobil servislerden faydalanma imkânı sağlanacaktır [6,10,11].

3GPP, IMT-Advanced standardını karşılamak üzere mobil terminaller için yüksek hızlar ile veri transferi, baz istasyonları arasında koordinasyon, heterojen ağ kullanımı ve MIMO desteği özelliklerine sahip LTE-A (LTE Advanced) teknolojisinin kullanımını planlamıştır. 3GPP sürüm 10 ile tanımlanan LTE-A teknolojisi geliştirme çalışmaları Mart 2008'de başlamış ve ilk fazı Haziran 2011'de tamamlanmıştır. Ticari kullanımının ise 2013 ile 2015 yılları arasında gerçekleşmesi beklenmektedir. LTE-A veri transfer hızının 2015 yılında 1.6 Gbps değerine ulaşması öngörülmektedir [6].

Yine IMT-Advanced standardını karşılamak üzere IEEE tarafından geliştirilen 802.16m standardı Eylül 2009'da tamamlanmıştır. LTE-A ve IEEE 802.16m standartları IMT-Advanced standardı olmak üzere ITU'ya sunulmuştur. ITU-R tarafından Ekim 2010'da ilan edilen değerlendirme sonuçlarına göre hem LTE-A hem de IEEE 802.16m teknolojileri IMT-Advanced için gerekli tüm şartları başarı ile karşılamıştır. LTE-A ve IEEE 802.16m pratikte birbirine eşdeğer olsa da kullanılan çoklu erişim planı ve kontrol parametrelerinde bazı temel farklılıklar mevcuttur. Örneğin LTE-A'da aşağı/yukarı yönlü bağlantılar için OFDMA/SC-FDMA

kullanılırken, IEEE 802.16m'de her iki yönde de OFDMA kullanılmıştır. Bir diğer 4G teknolojisinde 3GPP2 grubu tarafından 3G CDMA 1xEv-DO üzerinde geliştirilen UMB (Ultra Mobile Broadband) teknolojisidir. Uyumluluk sorununun aşılması amacıyla UMB teknolojisi 3GPP LTE ile bağlantılı olarak tanımlanmıştır. UMB'de CDMA yerine OFDM tekniği kullanılmıştır. 20 MHz bant genişliği ile aşağı yönlü bağlantı için 288 Mbps, yukarı yönlü bağlantı için 75 Mbps veri hızı sağlanır [10,11].

3. 3G ve 4G için Anahtar Teknikler

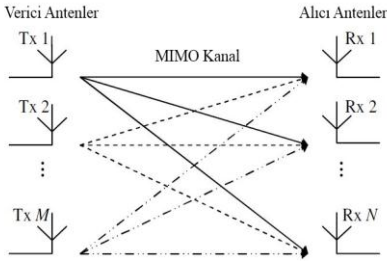
Mobil haberleşme sistemlerinin gelişimi daha fazla veri hızı ve kullanıcı hareketliliği sağlayacak şekilde hızla devam etmektedir. Yüksek veri hızlarının elde edilmesinde OFDMA radyo arabirimi, 64QAM gibi yüksek seviyeli modülasyon kullanımı, kanal kodlama ve MIMO teknikleri büyük öneme sahiptir. Yüksek kaliteli ses ve video servislerinin kullanımı için kanal gecikme süresinin 10 milisaniyenin altına indirilmesi gerekmektedir.

Tamamen IP tabanlı ağ alt yapısı ile multimedia servislere izin verilirken aynı zamanda sabit ve mobil ağların birlikte çalışabilirliği kolaylıkla sağlanır. Diğer taraftan spektral verimliliğin yükseltilmesi operatörlere mevcut spektrum içinde hizmet verilebilecek müşteri sayısını artırma şansı verirken servis kullanım maliyetlerini de düşürür. Mobil haberleşme sistemlerinin gelişim sürecinde veri hızı ve kapasitenin artırılması ile bant genişliği ve sistem kaynaklarının verimli kullanılmasına yönelik birçok anahtar haberleşme teknikleri kullanılmıştır.

3.1 MIMO

Alıcı ve vericide çoklu anten kullanımı kısaca MIMO (Multiple Input, Multiple Output) teknolojisi olarak isimlendirilir. Çoklu anten kullanımı ile kablosuz sistemlerde uzaysal çeşitleme (spatial diversity) ve uzaysal

çoğullama (spatial multiplexing) kazançları elde edilebilir. Uzaysal çeşitleme yardımıyla birbirinden bağımsız sönümlemeli yollar oluşturularak kablosuz bağlantı güvenilirliği artırılır. Uzaysal çoğullama kullanılarak ise MIMO kanal birbirine paralel alt kanallara ayrılarak farklı veri akışları bu kanallar üzerinden aktarılır. Böylece aynı bant genişliği için verici gücü artırılmaksızın sistem haberleşme kapasitesi yükseltilir [6].



Şekil 3. MIMO kanal yapısı

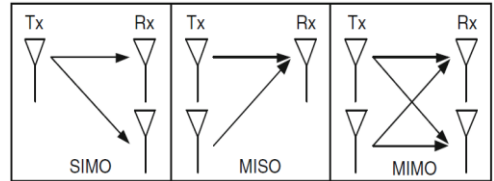
Gelecek nesil mobil sistemlerin pek çoğunda ortaya çıkan yüksek veri iletim hızı ihtiyacını karşılamak üzere çoklu antenler yardımıyla uzaysal çoğullama, verici/alıcı çeşitlemesi, hüzme biçimlendirme (beamforming) gibi anahtar tekniklerin kullanımı planlanmıştır. Örneğin LTE-A ve IEEE 802.16m standardı ile baz istasyonunda 2/4/8 antene, mobil terminallerde ise 1/2/4 antene kadar çoklu anten kullanımını desteklenmektedir [6,11].

3.2 Çeşitleme Tekniği

Kablosuz kanal üzerinde coğrafi özelliklere ve verici ile alıcı arasındaki bağıl hareketliliğe bağlı olarak genlikleri ve gecikme süreleri zamanla rastgele değişen çok sayıda birbirinden farklı sinyal yayılım yolları bulunabilir. Sinyal karakteristiklerinde görülen bu değişim sönümleme olarak isimlendirilir ve önlem alınmazsa sistem için önemli performans kayıplarına sebep olur. Sönümlemenin sinyal gücü üzerindeki etkisi düşünüldüğünde yavaş ve hızlı olmak üzere iki grupta incelenir. Yavaş sönümleme cep telefonu ile baz istasyonu arasındaki sinyali kesecek şekilde engellerden kaynaklanır. Bu durumda sinyal gücü engelin yapısına,

büyüklüğüne ve uzaklığına bağlı olarak düşer. Hızlı sönümleme ise alıcıya çeşitli yollar üzerinden ulaşan sinyaller sebebiyle ortaya çıkar. Doğrudan görüş hattında alınan sinyal yanında yansımalar sebebiyle alıcıya ulaşan sinyaller çoklu yol sönümlemesine sebep olur. Alıcıda elde edilen sinyaller farklı yollardan farklı zamanlarda ulaştığından farklı fazlarda bulunurlar [1,5,8].

Çoklu yol sönümleme etkisinin azaltılması için vericide güç kontrolü yapılabileceği gibi çeşitleme tekniğinden faydalanılması da düşünülebilir. Sinyal yayılım şekline bağlı olarak farklı zaman, frekans ve uzaylarda aynı bilgi sinyalinin bağımsız sönümlemeye sahip çok sayıda tekrarının gönderilip alınması mümkündür. Bu şekilde tekrar edilen tüm sinyallerin sönümleme sebebiyle zarar görme olasılığı azaltılır. Zaman ve frekans çeşitlemesinde aynı sinyal farklı zaman ve frekanslarda tekrarlanırken uzaysal çeşitlemede verici/alıcı üzerinde çoklu anten kullanımı (SIMO, MISO, MIMO) ile sinyalin çok sayıda farklı kopyası elde edilir [6,10].



Şekil 4. Uzaysal çeşitleme teknikleri

Aşağı yönlü bağlantı (downlink) için verici üzerinde (baz istasyonu) çoklu anten kullanımı ile aynı sinyali kopyaları bağımsız kanallar üzerinden gönderilebilir. Benzer şekilde alıcı (mobil terminal) üzerinde çoklu anten kullanımı ile gönderilen sinyalin kopyaları bağımsız kanallar üzerinden alınabilir. Alıcıda farklı antenlerden elde edilen sinyaller seçmeli birleştirme (SC), maksimum oranlı birleştirme (MRC) ve eşit kazançlı birleştirme (EGC) gibi doğrusal birleştirme yöntemlerinden biri yardımıyla birleştirilir. Böylece sönümleme etkisi en aza indirilir [9].

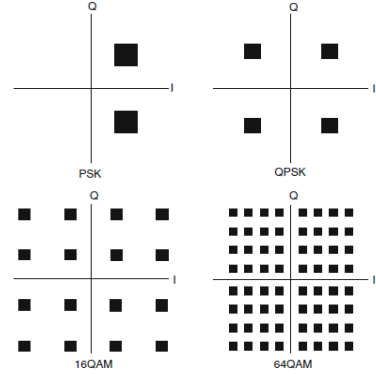
3.3 OFDM

Çok sayıda veri akışının paylaşımlı kanal üzerinde tek bir sinyalde birleştirilmesi çoğullama (multiplexing) tekniği olarak isimlendirilir. Çok taşıyıcılı iletimin özel bir biçimi olan dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) tekniğinde klasik paralel veri iletim sistemlerinde olduğu gibi frekans bant genişliği birbirleriyle örtüşmeyen çok sayıda alt kanallara bölünürken her birinde alt taşıyıcı adı verilen özel bir taşıyıcı sinyal kullanılır ve bu alt taşıyıcılar veri sembolleri ile modüle edilir. Tüm alt kanallardaki tüm modülasyon işlemleri sonucunda frekans çoğullamalı sinyal elde edilir [10].

Bozunumsuz kanallar üzerinde haberleşme için alt taşıyıcı sinyallerin birbirlerine girişim etkisi yapmadan iletilmesi gerekir. Bunun için alt taşıyıcı sinyaller arasında dikgenlik (orthogonality) şartının sağlanması gerekir. Çok taşıyıcılı olma özelliğinden dolayı OFDM tek taşıyıcılı modülasyon tekniklerine göre çok daha fazla veri hızı vaat eder. OFDM tekniğinde gönderilen veriler vericide ters Fourier dönüşümüyle (IFFT) modüle edilirken, alıcıda Fourier dönüşümü (FFT) ile tekrar demodüle edilir [8].

3.4 Uyarlamalı Modülasyon

Güvenilir haberleşme bağlantısı için en önemli parametrelerden birisi servis kalitesi (QoS) ölçümüdür. Servis kalitesi çoğunlukla sinyal girişim artı gürültü oranı (SINR) metrik değeri ölçülür. Sönümleme (fading), girişim (interference), gölgeleme (shadowing) ve yol kaybı (path loss) gibi etkenler nedeniyle kablosuz kanal koşulları zamanla değiştiğinden kullanıcıların SINR ölçümleri de zamanla değişir. Güvenilir bağlantı için gerekli minimum SINR'dan daha düşük SINR değerine sahip kullanıcının bağlantısı sonlandırılır. Uyarlamalı olmayan sistemlerde SINR değerinin yükseltilmesi için iletim gücü yükseltilirken, uyarlamalı sistemlerde sistem parametreleri değiştirilebilir [2,10,12].



Şekil 5. Dijital modülasyon teknikleri

Kablosuz kanal çoğu zaman frekans seçici sönümlemeli kanal karakteristiğine sahip olduğundan geniş bant mobil sistemlerde uyarlamalı modülasyon tekniği kullanılmıştır. İyi kanal şartları ile yüksek SINR değerinde maksimum sistem kapasitesine ulaşmak için yüksek dereceli MQAM (256QAM, 64QAM veya 16QAM) modülasyon tercih edilir. Buna karşın gürültü ve girişimin sinyal üzerinde baskın olduğu kötü kanal şartları ile düşük SINR durumunda yüksek dereceli modülasyon kötü performans vereceğinden QPSK veya 8PSK gibi basit modülasyonlar tercih edilir [9,10].

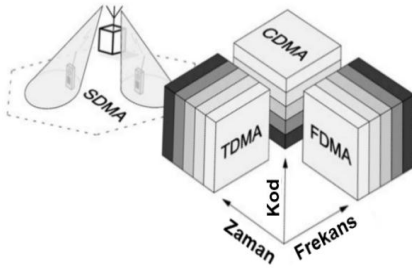
3.5 Çoklu Erişim Planları

Kablosuz kanal üzerinde temel olarak bant genişliği ve zaman olmak üzere iki temel kaynak mevcuttur. Daha sonra bu kaynaklara kod ve uzay eklenmiştir. Kaynaklar sistem içindeki çok sayıda aktif kullanıcı tarafından paylaşılır. Sistem içinde kullanıcıların kaynak kullanım haklarını düzenlemek için çoklu erişim planı kullanılır. Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) planı ile kanalın frekans boyutu dilimlere bölünerek kullanıcılar kanal üzerinde birbirinden ayrılır. FDMA için her bir kanal farklı frekans bandına sahiptir. Bir kullanıcıya atanan frekans bandı diğer kullanıcılar tarafından kullanılamaz. FDMA genellikle analog sistemlerde kullanılır. Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) planı ile kanalın zaman boyutu dilimlere bölünerek

kullanıcılar kanal üzerinde birbirinden ayrılır. TDMA için tüm bant genişliği belirli bir zaman diliminde özel bir kullanıcıya aittir [1].

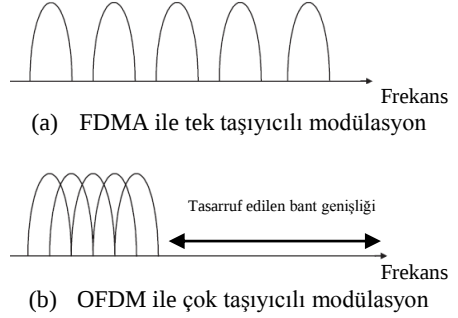
Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) planı birbirinden farklı dikgen yayılım kodları yardımıyla kullanıcıları birbirinden ayırarak tüm bant genişliğine tüm zaman dilimlerinde erişim imkânı sağlar. Böylece mobil kullanıcılar aynı zaman ve frekans diliminde kendilerini tanımlayan özel kodlar sayesinde haberleşebilir. CDMA tekniği spektrum kullanımında sağladığı verimlilik, servis kalitesi, güvenlik ve güç tüketimi gibi konularda üstün özellikleri sebebiyle ITU tarafından 3G sistemler için çoklu erişim planı olarak seçilmiştir [1,2,4].

Uzay bölmeli çoklu erişim (SDMA) planı ile aynı hücrede farklı sektörler içinde bulunan çok sayıda kullanıcı aynı frekans ve zaman diliminde sistem kaynaklarını paylaşarak anten dizisiyle donatılmış bir baz istasyonu ile haberleşir. Böylece akıllı anten teknolojisi tarafından sağlanan uzaysal seçicilik özellikleri kullanılarak sistem haberleşme kapasitesi ve servis kalitesi yükseltilebilir [6].



Şekil 6. Çoklu erişim planları

Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) planı ile FDMA ve OFDM tekniklerinin avantajları birleştirilerek 3G ötesinde sistemler için çoklu erişim planı olarak kullanılmıştır. OFDM için kullanılan alt taşıyıcıların her biri farklı kullanıcılara bilgi dağıtmak üzere kullanılabilir. Böylece aynı radyo bağlantısı üzerinde farklı semboller frekans bandında örtüşmeyen alt taşıyıcılar ile taşınır [6,10].



Şekil 7. FDMA ve OFDM karşılaştırması

3.6 Yazılım Tanımlı Radyo

Yazılım tanımlı radyo (software defined radio) radyo sinyallerinin modülasyonu ve demodülasyonu için yazılım kullanan gelişmiş bir kablosuz haberleşme tekniğidir. Yazılım tanımlı radyo ile genel amaçlı bilgisayar veya yeniden yapılandırılabilir dijital elektronik sistemler yardımıyla sinyal işleme gücü sağlanır. Bu şekilde ortaya çıkan yeni kablosuz haberleşme standartları ile haberleşmek için alt yapı değiştirmeye gerek duyulmadan ve donanımsal olarak hiçbir değişiklik yapılmadan sadece sistem üzerinde yazılım güncellemeleri yapılması yeterlidir. Bugün sadece kablosuz modemlerde basit uygulamaları gerçekleştirilen yazılım tanımlı radyo tekniğinin 4G ve ötesi mobil haberleşme sistemlerinde önemli görevlerde kullanılması planlanmaktadır [5].

3.7 Kavramsal Radyo

Sayısı giderek artan kablosuz haberleşme teknolojileri için kullanılabilir frekans spektrumun büyük bir çoğunluğu ayrılmış ve yeni teknolojiler için boş spektrum bulmakta zorluk çekilmeye başlamıştır. Kavramsal radyo (cognitive radio) tekniği, çalışılan kablosuz ortamın frekans spektrumu kullanımını algılayarak kullanılmayan frekans spektrumlarını bulan ve uygun frekans spektrumu için otomatik olarak çalışma parametreleri ayarlayabilen bir haberleşme sistemi sağlar [5].

4. Sonuç ve Öneriler

Bu bildiride mobil haberleşme sistemlerinin otuz yıl gibi kısa sayılabilecek bir sürede yaşadığı hızlı gelişim, yeni teknolojilerin ortaya çıkmasını tetikleyen anahtar haberleşme teknikleri ve mobil teknoloji kullanımında ortaya çıkan uyumsuzluk problemlerini ortadan kaldırmak için süregelen standardizasyon çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir. Gelecek nesil mobil haberleşme sistemlerinin gelişimine ışık tutan 3G sistemler daha önceki 2G ve 2.5G sistemler ile karşılaştırıldığında, eş zamanlı olarak ses ve veri iletişimi gerçekleştirilmesi yanında yüksek kapasite ve veri transfer hızlarını desteklemektedir. Böylece görüntülü görüşme ve yüksek hızlı internet erişimi gibi multimedya servislerinin kullanımına imkân verilmiştir. 3G sistemler 2G sistemlere göre 10 kat hızlı iken, 4G sistemlerinde 3G sistemlere göre 10 kat daha hızlı veri transfer hızına sahip olması öngörülmektedir. 4G sistemlerin özellikle MIMO ve OFDM tekniklerinin kullanımı ile yüksek veri transfer hızı ve gelişmiş bit hata oranı performansı sunması beklenmektedir. Bu özellikleri ile yakın zamanda günlük yaşama birçok kolaylıklar getirecek 4G sistemlerin geleceğin yüksek performanslı mobil haberleşme sistemlerine öncülük edebilecek pek çok karakteristik özelliklere sahip olacağı düşünülebilir.

5. Kaynaklar

- [1] Goldsmith, A., "Wireless Communications", **Cambridge University Press**, UK, (2005).
- [2] Poole, I., "Cellular Communications Explained From Basics to 3G", **Elsevier Ltd.**, UK, (2006).
- [3] Garg, V.K., "Wireless Communications and Networking", **Elsevier Ltd.**, USA, (2007).
- [4] Eberspächer, J., Vögel, H.J., Bettstetter, C., Hartmann, C., " GSM – Architecture, Protocols and Services" , **John Wiley & Sons Ltd.**, UK, (2009).
- [5] Zheng, P., Zhao, F., Tipper, D., "Wireless Networking Complete", **Elsevier Ltd.**, USA, (2004).
- [6] Osseiran, A., Monserrat, J.F., Mohr, W., "Mobile and Wireless Communications for IMT-Advanced and Beyond", **John Wiley & Sons Ltd.**, UK, (2011).
- [7] Holma, H., Toskala, A., "WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE", **John Wiley & Sons Ltd.**, UK, (2007).
- [8] CDMA2000 Technologies, CDMA Development Group, <http://www.cdg.org/>.
- [9] Wang, J., "High-Speed Wireless Communications: Ultra-wideband, 3G Long-Term Evolution, and 4G Mobile Systems", **Cambridge University Press**, UK, (2008).
- [10] Ergen, M., "Mobile Broadband Including WiMAX and LTE", **Springer**, USA, (2009).
- [11] Ahmadi, S., "Mobile WiMAX A Systems Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology", **Elsevier Ltd.**, USA, (2011).
- [12] Alouini, M.S., Tang, X., Goldsmith, A., "An Adaptive Modulation Scheme for Simultaneous Voice and Data Transmission over Fading Channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(5): 837-850 (1999).