

Gerçek Zamanlı 5G Teknoloji Geliştirme Platformu

Real-time 5G Technology Development Platform

Ö.F. Gemici, F. Kara, İ. Hökelek,
İ.H. Salim, H. Aşmer
TÜBİTAK-BİLGEM
PK: 74, 41470, Gebze/Kocaeli
{omerfaruk.gemici, fatih.kara, ibrahim.hokelek,
ibrahim.salim, hikmet.asmer}@tubitak.gov.tr

M.İ. Köksal, A. Telli
HAVELSAN A.Ş.
Eskişehir Yolu 7. km. 06520, Ankara
{atelli, mikoksal}@havelsan.com.tr

A. Yazar, H. Arslan
Elektrik-Elektronik Müh.
İstanbul Medipol Üniversitesi
{ayazar, huseyinarslan}
@medipol.edu.tr

Özetçe — 5G teknolojilerinin olgunluk seviyelerinin yükseltilmesi donanım geliştirme faaliyetlerini gerektirir ve altyapının yeterliliği önem arz etmektedir. Bu bildiri, 5G araştırma sonuçlarının ürünleşmesine destek olmak amacıyla çok çekirdekli ARM-DSP yonga kümesi üzerinde geliştirilen 5G teknoloji geliştirme platformu sunulmaktadır. Önerilen platformda, fiziksel katman yazılımlarının gerçek zamanlı çalışması için yüksek sinyal işleme yeteneğine sahip ve paralel çalışabilen çok çekirdekli DSP işlemciler kullanılırken üst katman yazılımları için üzerinde tümleşik işletim sistemlerinin çalıştırıldığı ARM işlemciler kullanılmaktadır. Önerilen mimarinin verimliliğini göstermek amacıyla 20 MHz bant genişliğinde çalışan fiziksel katman alıcı ve verici yazılımları çok çekirdekli DSP mimarisinde geliştirilmiş ve USRP radyolar ile gerçek zamanlı video transferi başarılı bir şekilde gösterilmiştir. 5G araştırma geliştirme faaliyetlerini desteklemek amacıyla bu platformun araştırmacıların hizmetine sunulması planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler — Kablosuz iletişim; 5G; modem; prototip.

Abstract — Advancing the readiness level of 5G technologies requires hardware development activities, where the infrastructure has utmost importance. In this paper, we present multicore ARM-DSP based 5G technology development platform which will expedite commercializing the findings of the 5G researches. In the proposed platform, multicore DSP processors with enormous signal processing capabilities are used to realize the real-time implementation of 5G physical layer algorithms while multicore ARM processors running real-time operating system are used to implement the real-time implementation of 5G higher layer protocols. To demonstrate the efficiency of the proposed platform, the proof of concept implementation of both transmitter and receiver algorithms within multicore DSP processors are performed for 20 MHz bandwidth and the real-time video transmission over the air using the USRP radios are successfully demonstrated. This platform will be made available to researchers to support 5G R&D activities.

Keywords — Wireless communications; 5G; modem; prototype.

I. GİRİŞ

Yeni nesil servislerin yaygınlaşması, makineler arası iletişim (M2M) ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarındaki artışlar sonucunda trafik talepleri her yıl üstel olarak

artmaktadır. Bu talep artışlarının yanı sıra kritik işlevleri olan araçlar ve makineler arası haberleşmede düşük gecikme isteklerini karşılamak için 5G ve ötesi teknolojilerin geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir [1]. Fiziksel katmandaki yeni teknolojilere örnek olarak 5G standartları için alternatif olarak düşünülen dalga şekilleri ile yeni modülasyon ve kodlama teknikleri verilebilir. Ayrıca, masif MIMO ve taşıyıcı çoğullama (carrier aggregation) tekniklerinin geliştirilmesi ve terahertz frekanslarda genişbant ile birlikte kullanılmasının tayftan daha fazla faydalanma imkânı sağlayacağı öngörülmektedir. Hızlı yönlenme yeteneğine sahip yeni nesil faz dizili antenlerle yüksek frekanslardaki yol ve atmosferik kayıplar giderilerek kapsama alanı genişletilebilir.

Üst katmanlarda ise, akıllı ağ yönetim araçları ve uyarlanabilir protokoller farklı OSI katmanlarında insan eli değmeden optimizasyon yaparak sınırlı kaynakların verimli kullanımını sağlar. Bu bağlamda, kendini örgütleyen ağ (Self Organizing Network - SON) ve yazılım tanımlı ağ (Software Defined Networking - SDN) önemli kavramlar olarak öne çıkmaktadır [2]. Bu kavramlarda, periyodik ölçümler ile ağ koşullarının gözetilmesi, optimizasyon algoritmaları çalıştırılarak ağ konfigürasyonlarının dinamik olarak değiştirilmesi, böylece ağ kaynaklarının verimli kullanımı ve ağ operatörleri için maliyet etkin altyapıların oluşturulması hedeflenmektedir.

Teknoloji geliştirme faaliyetlerinin ölçmek için kullanılan araçlardan birisi NASA tarafından geliştirilen Teknoloji Olgunluk Seviyesi (Technology Readiness Level - TRL) kavramıdır [3]. Üniversitemizde geliştirilen 5G ve ötesi teknolojiler ağırlıklı olarak TRL1-TRL4 olgunluk seviyelerine sahiptir ve simülasyon/emülasyon araçları kullanarak teknoloji konseptinin oluşturulmasını içerir. TRL4 seviyesindeki teknolojilerin TRL6 seviyesine kadar olgunlaştırılması prototip geliştirme faaliyetlerini içerir ve altyapının yeterliliği insan gücü kadar önem arz etmektedir.

Bu bildiri, 5G alanındaki araştırma sonuçlarının gerçek zamanlı prototip üzerinde pratik olarak uygulanarak TRL seviyelerinin yükseltilmesine yardımcı olmak amacıyla geliştirdiğimiz 5G teknoloji geliştirme platformu sunulmaktadır. Bu platformda, fiziksel katman yazılımlarının

gerçek zamanlı koşması için çok çekirdekli DSP işlemciler kullanılırken üst katman yazılımları için ise üzerinde tümleşik işletim sistemlerinin çalıştırıldığı ARM işlemciler kullanılmaktadır. Önerilen platform mimarisinin verimliliğini göstermek amacıyla 20 MHz bant genişliğinde gerçek zamanlı çalışan fiziksel katman alıcı ve verici yazılımları çok çekirdekli DSP'ye uygun olarak geliştirilmiş ve USRP radyolar ile gerçek zamanlı video transferi başarılı bir şekilde gösterilmiştir. Bu bildiride önerilen mimarinin daha fazla DSP çekirdeği kullandığı versiyonu, 5G sistemleri için öngörülen yüksek bant genişliği ve yüksek veri hızı isteklerinin gerçekleşmesi için yeterli işlemci gücünü sağlayacaktır. Üniversitemizdeki araştırmaların pratik kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla bu platformun araştırmacılarımızın kullanımına sunulması planlanmaktadır.

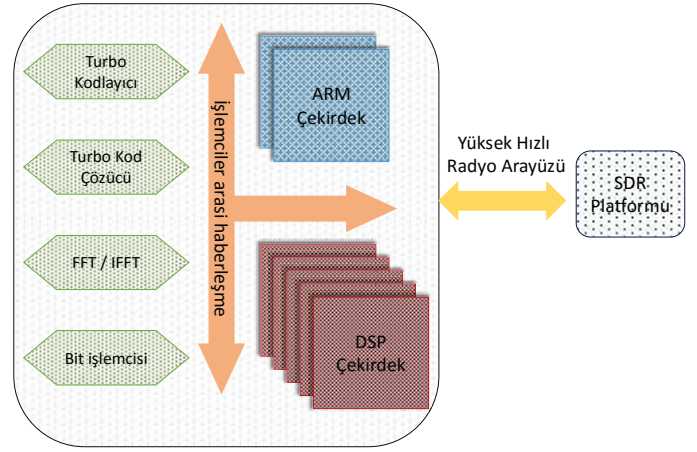
II. 5G PLATFORM MİMARİSİ

5G platformunun donanımsal olarak iki temel işlemci gereksinimi bulunmaktadır. Birinci gereksinim fiziksel katman için gerekli matematiksel işlemlerin, kodlama ve çözme algoritmalarının ve sürekli gerçek zamanda çalışan işlemlerin koşaacağı DSP veya FPGA işlemcileri ile karşılaşılır. Fiziksel katman yazılımlarının programlanabilir FPGA yongaları üzerinde gerçekleştirilmesi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [4]. Bununla birlikte, FPGA üzerinde geliştirme özel uzmanlık bilgisi gerektirmesi ve geliştirme sürelerinin uzun ve maliyetli olması nedeniyle fiziksel katman yazılımları için yüksek işlemci gücüne sahip ve paralel çalışabilen çok çekirdekli DSP işlemcilerin kullanımı öne çıkmaktadır [5]. İkinci işlemci gereksinimi ise ortam erişim kontrolü (MAC) dahil üst katman yazılımlarının ve IP protokollerin gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde çalıştığı genel amaçlı işlemciler (GPP) ile karşılaşılır.

Bu bildiride önerdiğimiz 5G platformu, Şekil 1'de gösterilen donanım mimarisini kullanmaktadır. Bu mimaride, fiziksel katman yazılımları çok çekirdekli DSP üzerinde çalışırken MAC dâhil üst katman yazılımları ve IP tabanlı protokoller ise ARM işlemci üzerinde çalışmaktadır. Kullanılan bant genişliğinin artması, taşıyıcı çoğullama ve MIMO teknikleri ile birlikte 5G platformlarından beklenen veri hızları yüksektir ve bu hızlarda modem işlemlerinin gerçek zamanlı olarak yapılabilmesi amacıyla yeterli sayıda DSP çekirdeğinin kullanılması gerekmektedir [6]. Ayrıca, modem fonksiyonlarından yüksek işlem yükü gerektiren Turbo kodlayıcı ve çözücü, FFT, IFFT ve bit işlemleri için donanımsal hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Bu mimarinin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için en kritik bileşenlerden birisi ARM, DSP ve donanımsal hızlandırıcılar arasında ortak hafıza bölgelerini kullanarak veri alışverişini sağlayan yüksek hızlı haberleşme mekanizmasıdır. DSP çekirdeklerinde oluşturulan sayısal IQ çıktıları yüksek hızlı radyo ara yüzü üzerinden Yazılım Tabanlı Radyo (SDR) birimine gönderilir.

ARM işlemciler üzerinde gerçek zamanlı işletim sistemi çalışmaktadır ve MAC ve ağ katman yazılımlarını koşar. ARM üzerindeki MCSDK yazılım geliştirme kütüphanesi aracılığıyla yüksek işlem yükü gerektiren fiziksel katman yazılımlarının çalıştığı DSP çekirdekleri kontrol edilmektedir.

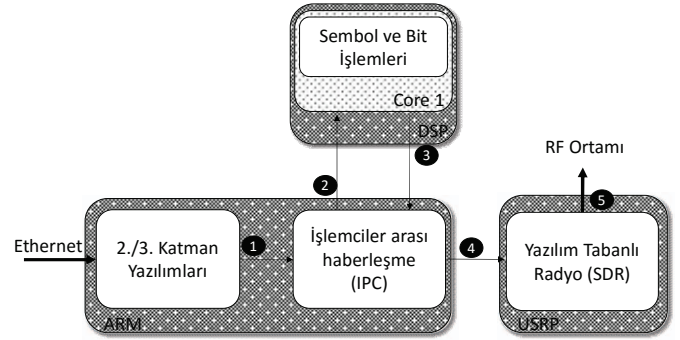
Bu bildiride önerilen platformun kavramsal ispatı amacıyla LTE'den esinlenerek OFDM tabanlı, noktadan noktaya çalışan modem fonksiyonlarının alıcı ve verici yazılımları, çok çekirdekli DSP mimarisine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



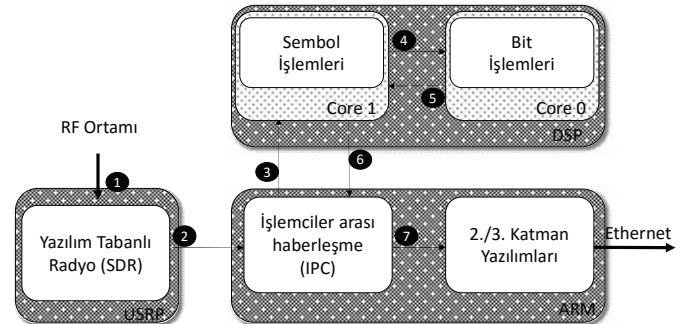
Şekil. 1. 5G kablosuz haberleşme platform mimarisini

Dalga şekillerinin tasarımı ve doğrulaması amacıyla MATLAB ortamında bu alıcı ve verici yapılarının birebir eşleniği olan benzetim altyapısı oluşturulmuştur. Bu alıcı ve verici yapılarının yazılım mimarileri Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmektedir.

Verici yapısında ARM işlemcide çalışan 2. ve 3. katman yazılımları, Ethernet arayüzü üzerinden alınan IP paketlerini LTE standartlarına uygun çerçeve yapılarına dönüştürerek işlemciler arası haberleşmeyi sağlayan IPC yazılımına gönderir. IPC ise çerçevelenmiş paketleri daha verimli sinyal işleme amacıyla DSP'ye gönderir ve DSP üzerinde fiziksel katman sembol ve bit işlemleri gerçekleştirilir. DSP tarafından oluşturulan temel bant sinyali (IQ çıktıları) IPC'ye geri gönderilir. IPC ise IQ çıktılarını RF ortamına iletmek üzere USRP yazılım tabanlı radyoya gönderir.



Şekil. 2. Gönderici yazılım mimarisini

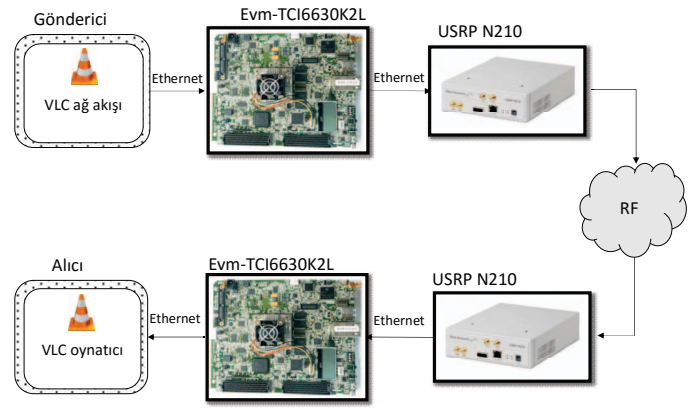


Şekil. 3. Alıcı yazılım mimarisini

Alıcı yapısında ise USRP yazılım tabanlı radyonun aldığı RF sinyaller IQ çıktılarına dönüştürülerek IPC üzerinden DSP'ye iletilir. Alıcı sembol ve bit işlemleri tamamlandıktan sonra elde edilen bit dizisi ARM'a gönderilir ve ARM üzerinde çalışan üst katman yazılımları kullanılarak IP paketleri elde edilir.

Alıcı fiziksel katman yazılımlarının vericiye göre daha fazla işlem gücü gerektirmesi nedeniyle alıcıda iki DSP çekirdeği aynı anda kullanılmaktadır. Birinci DSP çekirdeğinde (Core 1) sembol işlemleri gerçekleştirilirken ardışık düzende çalışan ikinci DSP çekirdeğinde (Core 0) ise bit işlemleri gerçekleştirilir. Birinci DSP çekirdeği tarafından sembol işlemleri gerçekleştirilen alt-çerçeve (subframe) mesajı ortak hafızaya kaydedilir ve ikinci DSP çekirdeği tarafından ortak hafızadan okunarak bit işlemleri gerçekleştirilir. Ardışık düzen yapısında bit işlemleri gerçekleştirilirken bir sonraki çerçevenin sembol işlemleri birinci DSP çekirdeği tarafından gerçekleştirilebilmektedir. Bir alt-çerçevede 75376 bit gönderilmesi ve çözülmesi sırasında DSP üzerinde gerçekleşen fonksiyonların işlemci yükü Tablo 1'de gösterilmiştir. Bahsedilen yapıda, birinci DSP çekirdeğinde alıcı sembol işlemleri yaklaşık 1 Mcycle sürerken ikinci DSP çekirdeğinde alıcı bit işlemleri yaklaşık 0,97 Mcycle sürmektedir. İşlemci hızı çekirdek başına 1,2 GHz olduğundan bir alt-çerçevenin işlenmesi 1 ms'nin altında gerçekleştirilmekte ve gerçek zamanlı çalışma mümkün olmaktadır. Mevcut veri hızı 20 MHz bant genişliğinde yaklaşık 75 Mbps seviyesindedir. Sisteme 2x2 MIMO özelliği eklendiğinde hızın 150 Mbps seviyesine çıkacağı öngörülmektedir.

Projenin mevcut durumunun gösterimi için Şekil 4'te gösterilen akan video demo kurulumu hazırlanmıştır. Akan video uygulaması, EVM-TCI6630K2L ve USRP N210 geliştirme araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gönderici kısımda EVM kartı, gönderici PC'den alınan akan video IP paketlerini işler. EVM kartında fiziksel ve MAC katmanı sinyal işleme fonksiyonları çalıştırılır ve oluşturulan temel-bant örnekleri sayısal-analog dönüştürme ve RF uç-birim işlemlerinin gerçekleştirilmesi için USRP cihazına gönderilir. Alıcı kısımda RF sinyali USRP tarafından alınır ve temel-bant örnekleri EVM kartına gönderilir. EVM'de fiziksel ve MAC katmanı alıcı fonksiyonları çalıştırılır ve oluşturulan IP paketleri, akan videoyu oynatması için alıcı PC'ye gönderilir.



Şekil 4. Akan video uygulama kurulumu

III. PLATFORMUN 5G TEKNOLOJİLERİNİ GELİŞTİRME AMAÇLI KULLANIM SENARYOLARI

Avrupa Birliği'nde 5G ile ilgili araştırma ve geliştirme faaliyetleri 5G-PPP (5G Public Private Partnership) koordinasyonunda yürütülmektedir [13]. Avrupa Birliği H2020 kapsamında 19 adet Faz-1 projesinde 5G sistem mimarisi ve topolojisi üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. H2020 çağrılarında yeni önerilecek projeler için, Faz-1 projelerinin çıktılarının kullanılması gerektiği özellikle vurgulanmaktadır. Bu motivasyon doğrultusunda, 5G-PPP METIS [14] projesinde öne çıkan 5G mimarisi baz alınarak çalışmalar yürütülmektedir.

Mimari yapıda, 5G fonksiyon ve kontrol koordinatörü, fonksiyonel elemanlar tarafından yürütülen ağ fonksiyonlarının esnek olarak dağıtılması ve uygulanması, C/U düzlem (Control-Plane, User-plane) topolojilerinin servise bağlı olarak fiziksel kaynaklara eşleştirilerek 5G ağının sanallaştırılması ve servis akış yöneticisi tarafından bildirilen servis gereksinimlerine bağlı olarak konfigürasyonu gerçekleştiren fonksiyon ajanları yardımıyla radyo ve çekirdek ağ elemanları ile etkileşimden sorumludur. Servis akış yöneticisi, müşteri istekli servisleri analiz ederek ağ yapısındaki veri akışı için gereksinimleri belirlemek ve bu gereksinimleri 5G fonksiyon ve kontrol koordinatörüne ve 5G SDN yöneticisine bildirmekten sorumludur. Sanal olarak da gerçekleştirilebilen 5G SDN yöneticisi, 5G fonksiyon ve kontrol koordinatörüne belirlenen konfigürasyona bağlı olarak servis zincirinin fiziksel ağda oluşturulması, fiziksel ağdaki radyo ve çekirdek ağ elemanları arasındaki bağlantıların kurulması, veri akışı için U-düzlemi işlenmesinin oluşturulması ve anahtarlama elemanlarının konfigüre edilmelerinden sorumludur. Fonksiyon ajanı ise fiziksel ağ elemanlarındaki sınırlamaları, 5G fonksiyon ve kontrol koordinatörüne rapor etmekten sorumludur [14]. Böylece bu noktaların kapasiteleri hesaba katılarak servis kalitesi artırılabilir. Bu bildiriye önerilen 5G platformu, METIS mimarisini destekleyecek teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılabilir.

Düşük gecikme ve yüksek veri hızı istenilenler olan ve birbirine yakın iki cihazın uzaktaki bir baz istasyonu üzerinden haberleşmesi verimli bir yöntem olarak görünmemektedir. Baz istasyonlarının yükünü hafifletmek ve hareketli araçlar arası iletişim uygulamaları için önerilen cihazdan cihaza (device to device, D2D) doğrudan haberleşme teknolojilerinin 5G sisteminin önemli bir bileşeni olacağı öngörülmektedir. Düşük gecikme ve yüksek veri hızının yanı sıra D2D teknolojileri

TABLO I. FİZİKSEL KATMAN FONKSİYONLARININ İŞLEM SÜRELERİ

Bir alt-çerçeve işlenmesinde kullanılan fonksiyonlar		Süre (MCycle)	Toplam Süre (MCycle)	
Alıcı	Sembol İşlemleri	Zaman Kayması Düzeltme	0,1246	1,023
		Frekans Kayması Düzeltme	0,318	
		IFFT ve CP çıkarma	0,1985	
		Kanal Dengeleyici	0,3819	
	Bit İşlemleri	Demodülasyon	0,0681	0,9731
		Geri Çarpma	0,0332	
		Kodblok Ayrıştırma	0,0715	
		Kodblok Çözme İşlemleri	0,7567	
Verici	Bit İşlemleri	CRC Kontrol	0,0436	0,953
		CRC Ekleme	0,0436	
		Kodblok Kodlama İşlemleri	0,6334	
		Çarpma	0,0326	
	Sembol İşlemleri	Modülasyon	0,0723	0,2037
		FFT ve CP ekleme	0,2037	

haberleşme altyapılarının çalışamaz hale geldiği doğal afetler ve kriz durumlarında haberleşmenin sürekliliği açısından önemli bir alternatiftir. Başlangıçta kablolu ağlar için önerilen SDN teknolojilerinin kablosuz ağların yönetimi için kullanılması diğer bir 5G teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Bu bildiride önerdiğimiz 5G teknoloji geliştirme platformu, yeni nesil SDN ve D2D teknolojilerini içeren IP tabanlı 5G kablosuz haberleşme sisteminin geliştirilmesi amacıyla doğrudan kullanılabilir. Önerilen sistemde, sınırlı ağ kaynaklarının verimli kullanımı SDN istemcilerin ARM üzerinde ve SDN yöneticinin ise çekirdek ağda çalıştığı SDN teknolojileri ile sağlanabilir. Kullanıcılar ve ağ koşulları ile ilgili yazılımsal olarak ve en az sinyalleşme kullanılarak elde edilen bilgiler (örn., kullanıcı sayısı, trafik bilgisi, kablosuz hat özellikleri, vb.) gerçek zamanlı çalışan akıllı SDN yöneticisinin optimizasyon karar sürecinde kullanılabilir.

5G D2D teknolojilerini de içermekte olan 5G hücrel haberleşme sistemleri ile ilgili standart çalışmalarında sunulmak üzere OFDM yöntemine alternatif olarak farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen dalga şekilleri arasında Windowed OFDM (W-OFDM), Filtered OFDM (F-OFDM), Filter-Bank Multi-Carrier (FBMC), Universal-Filtered Multi-Carrier (UFMC), Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM), Unique-Word OFDM (UW-OFDM) ve Zero-Tail DFT-Spread OFDM (ZT DFT-s OFDM) gibi yöntemler bulunmaktadır [7]. Bu dalga şekilleri ile ilgili birçok karşılaştırma çalışması [8, 9] yapılmasına rağmen halen hangisinin diğerlerine daha çok üstünlük sağladığına dair net bir sonuca ulaşılamamıştır. Ayrıca, 2016 yılı içerisinde yapılan 3GPP standart toplantılarının raporları incelendiğinde, OFDM yönteminin biraz daha iyileştirilmiş halinin 5G hücrel haberleşme sistemlerinin dalga şekli olarak kullanılabilmesi görülmektedir [10]. Dolayısıyla, OFDM haricindeki diğer dalga şekli yöntemlerinin şu an için 5G yerine 5G sonrasında ele alınabileceği söylenebilir. 5G hücrel haberleşme sistemleri içerisinde yer alan D2D teknolojileri ile ilgili olarak, kullanılacak dalga şekli yönteminde düşük gecikme sürelerinin olması gerekecek, kullanıcılar arası girişim ve bant dışı yayılım miktarlarının düşük seviyelerde tutulması tercih edilecek, zaman ve frekansta asenkron çalışabilmesi beklenmektedir. 4G hücrel haberleşme sistemlerinde kullanılan OFDM dalga şeklinin bu ölçütler açısından genel olarak zayıf kaldığı düşünüldüğünde, D2D haberleşmesi için dalga şekli tasarımı araştırmaları, 5G ve sonrası hücrel haberleşme sistemleri kapsamında önem kazanmaktadır. Ayrıca, OFDM alternatifi olarak geliştirilen mevcut dalga şekli yaklaşımlarının hesaplama karmaşıklığı açısından yarar sağlamaması sebebiyle 5G sistemleri için düşük gecikme sürelerinin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, 5G sonrası için, esnek dalga şekli yaklaşımları [11] ya da esnek numeroloji yapıları [12] sayesinde D2D haberleşme sistemlerinin daha etkin ve işlevsel şekilde tasarlanabileceği değerlendirilmektedir. Bu bildiride önerilen platform, 5G dalga şekillerinin gerçek zamanlı olarak hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için önemli bir altyapı sağlayacaktır.

5G teknolojilerinin yüksek veri hızı ve düşük gecikme isteklerini sağlamak için yüksek frekanslarda (örn. milimetre, THz) daha fazla bant genişliği kullanan sistemlerin yanı sıra aynı zaman ve frekans kaynağında birden fazla kullanıcının iletim yapmasına izin vererek spektral verimliliği artıran dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access,

NOMA) ortam erişim teknolojisi 5G'nin önemli araştırma konularıdır. Bu bildiride önerilen 5G platformu, NOMA teknolojisinin gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesi için de hazır bir altyapı sağlayacaktır. 5G'de yüksek frekans kullanımının fiziksel katman modem teknolojisine etkisine bakıldığında daha yüksek bant genişliğine sahip temel bant sinyalin işlenmesi için yüksek işlemci gücü gerekmektedir. Bunun yanı sıra modem bu yüksek frekanslarındaki kanal koşullarına uyumlandırılması gerekmektedir. Bu bildiride önerilen platformun daha fazla DSP çekirdeği kullandığı sürümü bu teknolojilerin gerçek zamanlı gerçekleştirilmesi için yeterli işlemci gücünü sağlayacaktır.

IV. SONUÇLAR

Bu bildiride, 5G alanındaki araştırma sonuçlarının gerçek zamanlı prototip üzerinde pratik olarak uygulanmasına yardımcı olmak amacıyla önerdiğimiz çok çekirdekli ARM-DSP yonga kümesini kullanan 5G teknoloji geliştirme platformu sunulmuştur. Önerilen platform üzerinde 20 MHz bant genişliğinde çalışan fiziksel katman alıcı ve verici yapıları çok çekirdekli DSP mimarisine uygun olarak, 2. ve 3. katman yazılımları ise ARM işlemcide koşan gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde geliştirilmiştir. USRP radyolar kullanılarak gerçek zamanlı video transferi başarılı bir şekilde gösterilmiştir. Platformun 5G teknoloji geliştirme amaçlı kullanım potansiyelini belirtmek için çeşitli 5G araştırma konularında nasıl kullanılabilmesi özetlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] I. F. Akyildiz, S. Nie, S. C. Lin, M. Chandrasekaran, "5G roadmap: 10 key enabling technologies", *Computer Networks* 106, 17-48, 2016.
- [2] I. F. Akyildiz, S. C. Lin, P. Wang, "Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation", *Computer Networks* 93, 66-79, 2015.
- [3] J. C. Mankins, "Technology readiness levels: A white paper", NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office, 1995.
- [4] N. Michailow, V. Kotsch, D. Kim, "Real-time prototyping of 5G software defined networks: Part 1", *IEEE ComSoc White Paper*, 2016.
- [5] T. Wirth, M. Mehlhose, J. Pilz, R. Lindstedt, "An advanced hardware platform to verify 5G wireless communication concepts", *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2015.
- [6] P. Moakes, "Floating point multiprocessing with C66x DSPs from Texas Instruments", *CommAgility White Paper*.
- [7] A. Yazar, F. A. Onat, H. Arslan, "New generation waveform approaches for 5G and beyond," *IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 961-964, 2016.
- [8] X. Zhang, L. Chen, J. Qiu, J. Abdoli, "On the waveform for 5G," *IEEE Communications Magazine*, 54(11), 74-80, 2016.
- [9] R. Gerzaguet, N. Bartzoudis, L. G. Baltar, V. Berg, J.-B. Dore, D. Ktenas, o. Font-Bach, X. Mestre, M. Payaro, M. Farber, K. Roth "The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017:13, 1-14, 2017.
- [10] 3GPP, "R1-1611081: Final Report of the Meeting," 3GPP TSG RAN WG1 #86bis, Lisbon, Portekiz, 10-14 Ekim 2016.
- [11] C.-L. I, S. Han, Z. Xu, S. Wang, Q. Sun, Y. Chen, "New paradigm of 5G wireless Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 474-482, 2016.
- [12] A. Sahin, H. Arslan, "Multi-user aware frame structure for OFDMA based system," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 1-5, 2012.
- [13] <https://5g-ppp.eu/>
- [14] <https://www.metis2020.com/>