YAZILIM TANIMLI RADYO VE UYGULAMALARI

A. Cem HEREN, F. Nur KILIÇLI, M. Tuğrul ÖZŞAHİN

{akif.heren, fatma.kilicli, tugrul.ozsahin} @boun.edu.tr
Boğaziçi Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

***Özet* – Kablosuz haberleşmenin yaygınlaşması ve hayatın her alanında yer bulması ile, kablosuz ağlar konusundaki araştırmalar hız kazanmıştır. Yazılım Tanımlı Radyo, istenen cihaz ve protokollerin uç kullanıcı ve araştırmacılar tarafından kolayca gerçekleştirilebilmesine imkan sağlayarak bu konudaki araştırma olanaklarını artırmaktadır. Bu bildiride, Yazılım Tanımlı Radyo kavramı tanıtılmakta, bu konuda çalışmaya olanak sağlayan yazılımsal ve donanımsal sistemlerden bahsedilmektedir. Ayrıca bu sistemler kullanılarak üniversitemiz bünyesinde yapılmakta olan çalışmalar anlatılmaktadır.**

Anahtar Kelimeler – Bilişsel ağlar, yazılım tanımlı radyo, kablosuz haberleşme.

I - GİRİŞ

Günümüzde haberleşme sistemlerinin sürekli artan bant genişliği ihtiyacı, frekans spektrumunun daha verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bilişsel radyo ağları konusu, belli bir coğrafi alanda spektrum kullanımını dinamik olarak algılama ve müsait frekans aralığını kullanabilme amacı ile ortaya çıkmıştır. Bilişsel radyo ağları konusu, bant aralıklarının sabit tahsisinden doğan kullanım verimsizliğini en aza indirmek amacı ile, haberleşme ortamını dinamik olarak ölçerek, mevcut zaman dilimi içerisinde kullanımda olmayan frekans aralıklarını saptamak ve bunları, ortamda o bandın tahsis edildiği birincil kullanıcılara zarar vermeden dinamik olarak kullanabilme yeteneğini geliştirme amacı taşımaktadır. Bir bilişsel radyo ağının, yayın ortamını dinamik olarak algılama yeteneğinin temelini, dinamik algılama yeteneği olan cihazlar teşkil etmektedir. Bu cihazlar genel olarak *yazılım tanımlı radyo* olarak adlandırılmaktadır. Yazılım tabanlı radyo örneği olarak USRP verilebilir. USRP'nin yüksek maliyeti sebebiyle bilişsel ve yazılım tanımlı radyo alanlarında yapılan bazı çalışmalarda USB üzerinden bağlanan RTL2832 gibi cihazlar tercih edilmektedir.

Bu bildiride, Raspberry Pi cihazına bağlı RTL2832 alıcı bloğunu ve GNURadio yazılım geliştirme aracını kullanarak gerçekleştirdiğimiz sinyal algılama sistemi tanıtılmaktadır. Bu sistem, Raspberry Pi tek kartlı bilgisayarına bağlı bir RTL2832 radyo alıcısı ile, herhangi bir frekansta yapılan yayını dinleyip, algılanan sinyali TCP üzerinden, üzerinde GNURadio yazılımı çalışan sunucu bilgisayara aktarmaktadır. Sunucu ise alınan sinyali GNURadio sistemi ile işleyip, çeşitli özelliklerini ölçebilmekte ve kaydedebilmektedir. GNURadio içerisine yazdığımız bir blok ile bu sistem alınan sinyalin istenen zaman aralıklarındaki gücünü hesaplayarak kaydetmektedir. Daha sonra farklı mesafelerden yapılan ölçümlerin gücünün tutulduğu bu kayıtlardan oluşan veri seti kullanılarak, ortamın veri kaybı modeli oluşturulabilmektedir.

Bildirinin II. Bölümünde bilişsel ağlara dair literatür taraması verilmektedir. III. Bölümünde yazılım tanımlı radyo ve uygulamaları tanımlanmaktadır. IV. Bölümde, diğer kullanılan araçlar olan Raspberry Pi ve RTL2832 anlatılmaktadır. V. Bölümde ise, bu araçların kullanımı ile geliştirmiş olduğumuz sinyal gücü ölçüm sistemi incelenmektedir. Bildirinin VI. Bölümünde sonuçlar verilerek sonlandırılmıştır.

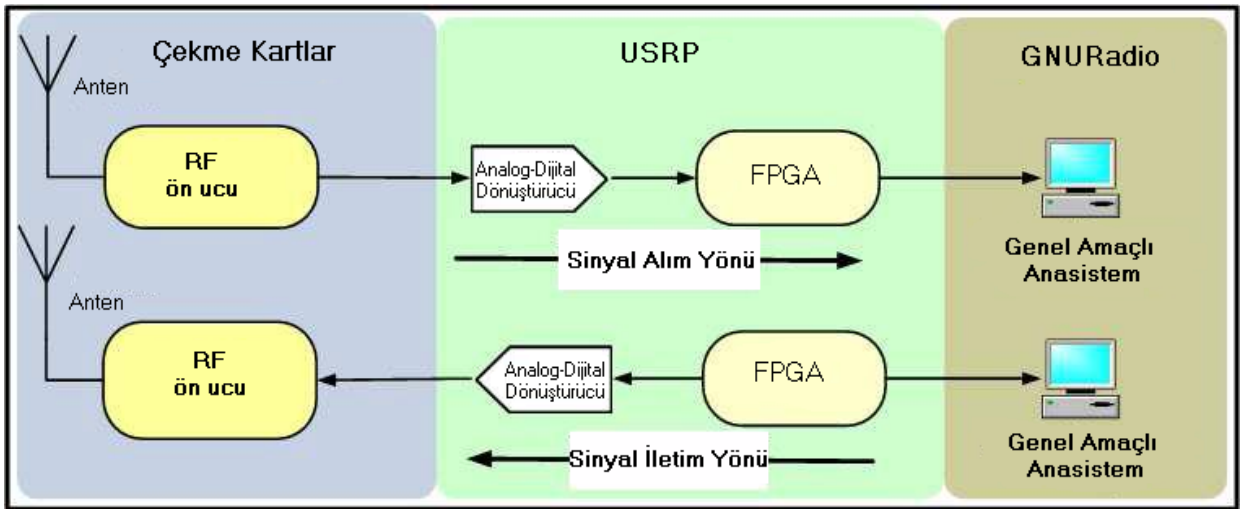
II - BİLİŞSEL AĞLAR

Bilişsel Ağların Fonksiyonları

Bir bilişsel ağın tipik fonksiyonları, spektrum frekans boşluklarının tespiti, en uygun frekans bandının seçilmesi, spektrum erişiminin kullanıcılar arasında koordinasyonu ve bir birincil kullanıcı geldiğinde o frekans bandının terk edilmesidir. Algılama yoluyla frekans boşlukları tespit edildikten sonra, bilişsel ağının spektrum yönetimi ve yayınım fonksiyonları sayesinde ikincil kullanıcılar farklı servis kalitesi gereksinimlerini karşılayabilmek için en uygun frekans bandını seçer ve zamana bağlı kanal özelliklerine göre çoklu bantlar arasında geçiş yapar. [1]

Spektrum algılama ve analizi

Spektrum algılama, bilişsel radyo ağlarında, ağın istendiği gibi çalışabilmesi için ağa gerekli olan özellikleri kazandırdığından hayati önem taşımaktadır. Spektrum algılama yöntemi bilişsel raydo ağlarının spektrum



Şekil 1. Yazılım Tanımlı Radyoların USRP ile Gerçeklenmesinin Blok Diyagramı

boşluklarını algılama, birincil kullanıcı algılama gibi temel fonksiyonlarını yerine getirmesinde kullanılabilecek en etkili, belki de tek yöntemdir. Spektrum algılama bilişsel radyo yetisine sahip cihazlarda ortamı dinleyerek spektrum elverişlilikleri veya girişim durumlarını algılamasını sağlar. Bu cihazlar radyo spektrumunu sürekli biçimde denetleyerek spektrum fırsatları kollayabilirler. [2] spektrum algılamaları sırasında yönelimsel antenler kullanılarak ikincil (bilişsel) kullanıcılara yeni spektrum fırsatları yaratılabileceğini göstermiştir. Literatürde, spektrum algılama için kullanılan yöntemler aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

Enerji Algılaması

Enerji algılayıcıları birincil kullanıcıların spektrumu kullanırken harcadıkları enerjiyi algılama esasına dayanır. Radyo kanallarının öngörülmesi zor sönümlenme karakteristikleri enerji algılama doğruluğunu azaltır. Radyo kanalının karakteristiklerine göre 'yanlış alarm' ve 'yanlış negatif' ihtimalleri ortaya çıkmaktadır. Enerji algılama metodu birincil kullanıcı varlığına ölçülen enerji seviyesinin belirli bir eşik değer üzerinde kalıp kalmadığına göre karar verir. Literatürde birçok değişik yöntem enerji algılama yönetimin kalitesini artırmak için önerilmiştir.

I. F. Akyildiz, [3]'de değişken bir gürültü seviyesi tahmini yöntemi önermiştir. Önerilen yöntemde en düşük gürültü seviyesi, gürültü ve ortamdaki sinyaller birbirinden ayrılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. [4] her aşamada yenilenen bir eşik değer ile birincil kullanıcı algılaması yapmayı önermiş, bu sayede 'yanlış alarm' ve 'yanlış negatif' ihtimallerini en aza indirmeyi hedeflemiştir.

Uygun Filtre ve Uyumlu Algılama

Birincil kullanıcının göndereceği bir sinyalin bilinmesi durumunda veya birincil kullanıcı iletişime geçmeden önce bilinen bir sinyal yollarsa bu sinyal uygun filtreleme yöntemi ile ortam gürültüsünden ayrılır ve algılanabilir. Bu metot birincil kullanıcının göndereceği sinyalin tam anlamı ile bilinmesini gerektirdiğinden tüm birincil kullanıcı çeşitleri için uygulamaya geçirmek oldukça zahmetlidir. Eğer birincil kullanıcının göndereceği sinyalde bir bilinmezlik varsa bu algılama performansını ciddi biçimde düşürecektir.

III - YAZILIM TANIMLI RADYO

Yazılım tanımlı radyo, 90lı yılların başında, radyo teknolojisinin yazılımsal olarak konfigüre edilebileceği düşüncesi ile ortaya çıkmıştır. Tamamen analog olarak tasarlanmış bu aygıtların dijital ortama uyum sağlaması aşamasında yazılım tanımlı radyo kavramı önemli bir adım sayılmaktadır. [5] Klasik radyo sistemlerindeki donanım üzerinden ayarlanan filtreleme ve sinyal işleme teknikleri programlanılarak, gerekli değişiklerin kolayca yapılabilmesi sağlanmıştır.

Yazılım tanımlı radyoya örnek olarak USRP verilebilir. Universal Software Radio Peripheral (USRP) cihazları, yazılım tanımlı radyo uygulamaları için çok uygun olan esnek, açık kaynak tasarımlı ve yüksek hızlı donanımlardır. Bu cihazlar GNU radyo projesi ile ortak çalışma ürünü olarak geliştirilmekte olup geniş bir kullanıcı ve geliştirici kitlesinin yardımları ile sürekli olarak iyileştirilmektedir. Açık kaynaklı yazılımlardan gelen bu sürekli katkı ve kombinasyon, USRP platformunu yazılım tanımlı radyo uygulamaları için çok cazip hale getirmektedir.

USRP radyo frekans ortamı ile bilgisayar arasında köprü görevi görür. Cihaz bilgisayara radyo sinyalini asgari seviyede değişiklik ile ulaştırır ve geriye kalan sinyal işleme yazılım ile sağlanır. Bu yüzden

USRP'lerin esas görevi tüm yüksek hızda genel amaçlı işlemleri (Analog – Dijital çevirme, interpolasyon gibi) FPGA devresi üzerinde yapmak ve tüm dalga özellikleri ile ilgili işlemleri bilgisayar işlemcisine bırakmaktır. Yazılım Tanımlı Radyoların yapısı hakkında aşağıdaki *Şekil 1* fikir vermektedir. [6] Bu şekilde Yazılım Tanımlı Radyoların USRP ile implementasyonunu gösteren bir blok diyagramı verilmektedir.

GNURadio

GNU Radio yazılımı açık kaynak yazılım tanımlı radyo geliştirme platformudur. GNU Radio yazılımı ile ölçümler donanım değişikliği gerektirmeden, çalışma esnasında farklı parametrelerle tekrar konfigüre edilerek yapılabilmektedir. Ölçümler alındıktan sonra sinyal işleme teknikleri yardımıyla radyo ortam farkındalığı sağlanabilmektedir. GNURadio, yazılım tabanlı radio geliştiricilerinin kullanabileceği açık kaynaklı bir yazılım araç takımıdır. Düşük maliyetli RF donanımlarının dışarıdan bilgisayara entegre edilmesi yoluyla veya donanım kullanmaksızın benzetim ortamlarında uygulamaya açıktır. GNURadio çoğu sinyal işleme görevlerini yerine getirebilmektedir. Dijital akımlardan veri elde etmek veya dijital akımlara veri girmek gibi işlemleri yapacak yazılımlar, bu araç takımı yoluyla üretilebilir. Bunun yanı sıra GNURadio, radio sistemlerinde bulunan birçok elementi içinde bulundurmaktadır. Ancak bundan daha önemlisi, GNURadio, içerisindeki bir metot yardımıyla bu radyo sistemlerine ait bloklardaki veri akımının nasıl olduğunu gösterebilmektedir. Ayrıca, GNURadio üzerinde bulunmayan blokların eklenmesi de zor bir işlem değildir.

GNURadio'yu çalışmalarımızda kullanmamızın sebebi, ham sinyali aldıktan sonra, donanımsal radyoların gerçekleştirdiği temel sinyal işleme görevlerini, modülasyon ve kodlama işlemlerini yapabilen modülleri içermesidir. Bu modüller sayesinde, tüm radyo sisteminin tamamını baştan üretme ihtiyacı ortadan kalkmakta olup, sadece sürecin üzerinde çalışılmak istenen kısmı üzerinde işlem yapabilme olanağı sağlamaktadır.

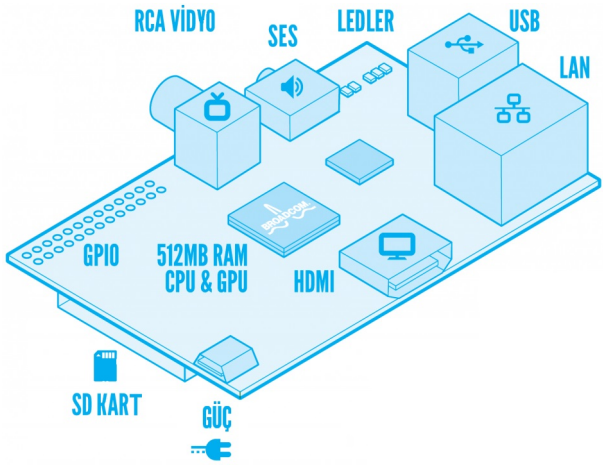
IV. KULLANILAN ARAÇLAR

Raspberry Pi

Raspberry Pi, çok küçük boyutuna rağmen bir bilgisayarın sahip olduğu fonksiyonların bir çoğunu barındıran bir mini-bilgisayardır. Temel programlara dilleri kullanılarak proglamlanabilen bu bilgisayar, ağırlıklı olarak Linux çekirdek tabanlı işletim sistemleri kullanmaktadır. Bunun yanı sıra, UNIX, AROS gibi işletim sistemleri de Raspberry Pi bilgisayarlarında çalıştırılabilmektedir. Üretim merkezi olan İngiltere başta olmak üzere, üniversite düzeyinde eğitim amaçlı da kullanılmaktadır.

2013 yılının başlarından itibaren piyasaya sürülen A Modeli daha düşük maliyeli olmasına rağmen, tek USB girişi olması ve Ethernet denetleyicisi olmaması sebeplerinden ötürü bizim çalışmalarımızda B modeli kullanılmaktadır. B modeli, 2 USB girişine ve 10/100 Ethernet denetleyicisine sahiptir. *Şekil 2* de detaylı bir B modeli şeması gösterilmektedir.

Gerçekleştirdiğimiz sinyal ölçüm uygulamasında Raspberry Pi cihazını kullanma amacımız, RTL2832 radyo alıcı bloğunu USB girişinden bu cihaza bağlayarak, gelen sinyali TCP protokolü ile sunucu bilgisayara iletebilmemize olanak vermesidir. Bu cihaz, RTL2832 gibi düşük maliyetli radyo alıcı aparatları ile birlikte kullanıldığında, düşük enerji tüketimli bir algılama ünitesine dönüştürülebilmektedir.

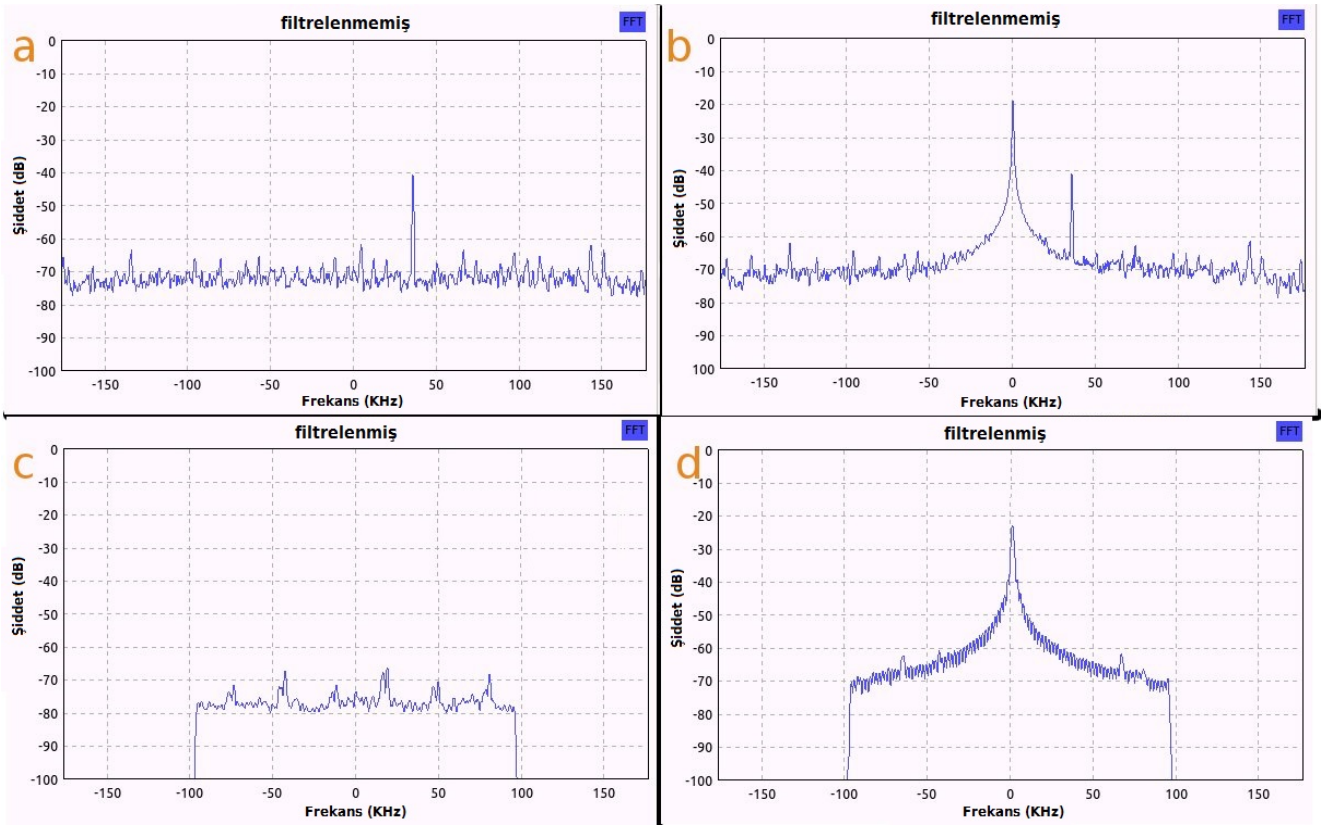


Şekil 2. Raspberry Pi B Modeli şeması

RTL2832

RTL2832, anteni yardımıyla algıladığı dijital televizyon sinyallerini çözerek USB aracılığıyla anasistem bilgisayara aktarabilen bir alıcı bloğudur. Uygun bir ayarlayıcı yardımıyla RTL2832, 24MHz ve 1850MHz aralığındaki sinyalleri sadece bilgisayar kullanarak ayarlayabilmektedir. Bu sinyaller FM Radyo, AM sinyalleri, vs. olarak belirtilebilir. Teorik olarak RTL2832 nin örnekleme hızı 3.2 MHz olsa da kayıp olmayan, etkin örnekleme için bu hız 2.8 MHz olarak belirtilmektedir.

RTL2832 cihazını çalışmalarımızda kullanmamızın sebebi, bu cihazın düşük maliyetli bir alıcı olmasına karşın, akademik çalışmalara olanak sağlayacak genişlikte bir frekans aralığını dinlemeye olanak sağlaması ve yazılımsal olarak kontrol edilebilmesidir. Bu cihaz sayesinde radyo sinyalini algılama işlemi için ayrı bir zahmete girme gereği ortadan kalkmaktadır.



Şekil 3. GNURadio'da , alınan spektrum sinyalinin görselleştirilmesi

V. ÇALIŞMALAR

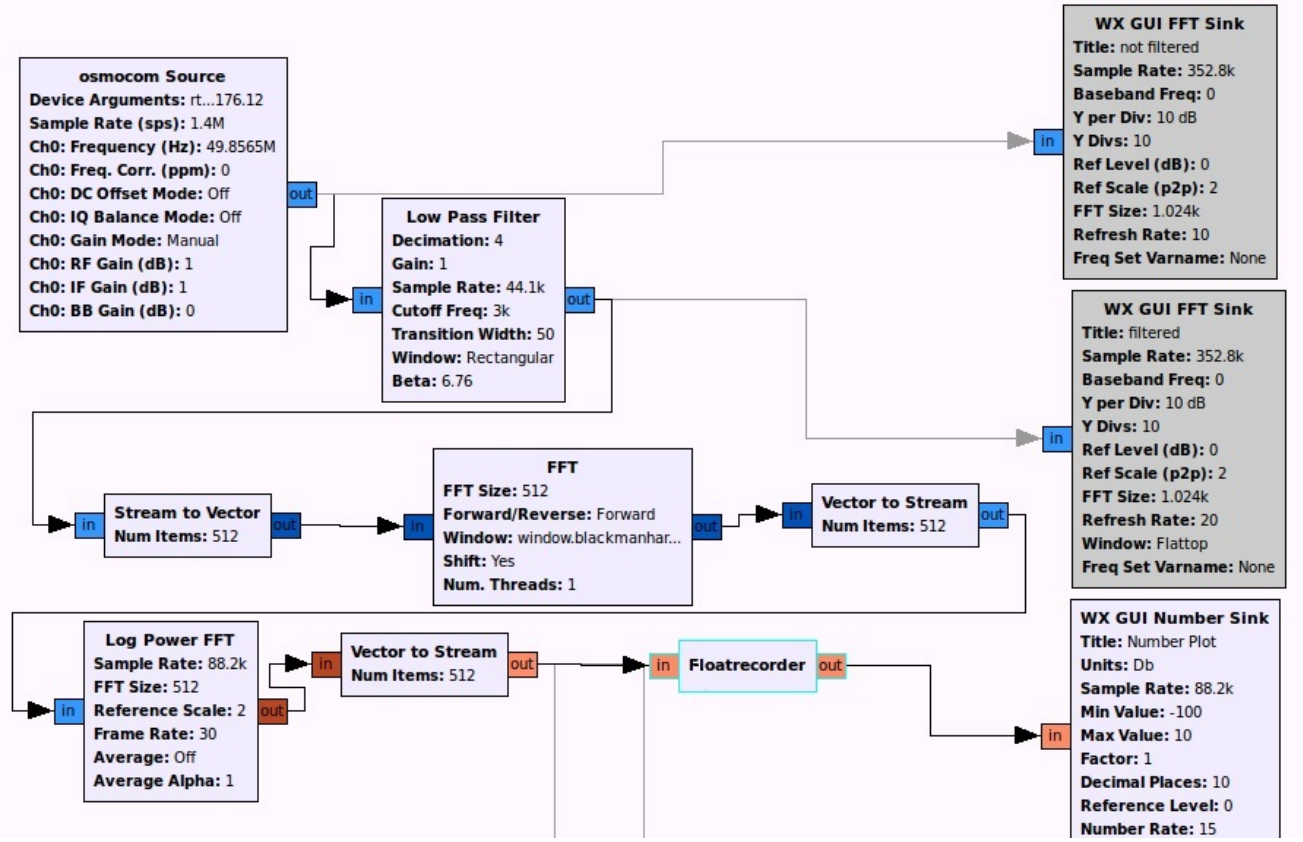
Bu bölümde, bu bildirinin önceki bölümlerinde bahsedilen yazılım tabanlı radyo geliştirme donanım ve yazılım araçları kullanılarak yapılmakta olan çalışmalar anlatılmaktadır.

Raspbian (Linux Sürümü) işletim sistemi kurulu olan Raspberry Pi cihazları üzerinde RTL2832 alıcı bloğunun sürücü yazılımı derlenerek, bu alıcının USB'den bağlanmak suretiyle cihaza entegrasyonu sağlanmıştır. Bu sayede, Raspberry Pi + RTL2832 kombinasyonu tek başına bir dinleme istasyonu niteliği taşımaktadır. Bu dinleme istasyonu, üzerinde Ubuntu Linux sürümü ve GNURadio araç takımı kurulu bulunan sunucu bilgisayarla aynı yerel ağa ethernet yardımıyla bağlanmıştır. Dinleme istasyonu aktive edildikten sonra, RTL2832 nin sürücü yazılımı olan RTL_SDR 'ın alıcının aldığı ham sinyali TCP protokolü üzerinden dijital olarak göndermeye olanak sağlayan komutu kullanılarak dönüştürülmiş dijital veri, ağ üzerinden sunucu bilgisayara aktarılmaktadır.

GNURadio'nun ağda Raspberry Pi cihazının IP numarasından TCP ile gelen sinyali, sinyal kaynağı olarak akıma eklemeye olanak sağlayan kaynak bloğu sayesinde dijital sinyal işleme ortamına alınmış olmaktadır. Bu aşamadan sonra, RTL2832 bloğunun aldığı radyo sinyali, GNURadio'nun gerekli blokları kullanılarak istenen özellikleri ile işlenip, gerekli dönüşümlere ve ölçümlere tabi tutularak, istenen şekilde görselleştirilebilmektedir. *Şekil 3*'te görüldüğü üzere, GNURadio'nun görselleştirme araçları kullanılarak, spektrumun istenen bant aralığı, istenen detayda takip edilebilmektedir.

Çalışmanın ikinci aşaması olarak, algılayıcı sistem kurulduktan sonra düşük maliyetli bir radyo vericisi kullanılarak 49MHz'de yapılan yayın, GNURadio'da işlenmiştir. Alınan sinyal önce uygun bir alçak geçiren süzgeçten geçirilerek spektrumun geri kalan kısmı kapsam dışı bırakılmıştır. Kalan sinyal ise *fft* bloğundan geçirilmiş, ve yine GNURadio'nun *fft* bloğunun desibel cinsinden gücünü hesaplayan "*log power fft*" bloğundan geçirilmiştir.

Şekil 3, bu bildiride bahsedilen sistem kullanılarak, spektrum durumunun görselleştirilmesini içermektedir. İlk olarak *Şekil 3a,* 49 MHz merkez frekansında yaklaşık 300 MHz'lik bir bant aralığının o anki durumu görülmektedir. Burada görüldüğü üzere bazı kanallarda yayın yapılmakta olduğu anlaşılmaktadır. İkinci olarak, *Şekil 3b* aynı ortamda bahsi geçen düşük maliyetli verici ile 49 MHz'de sinyal gönderilmekte olduğu anki surum gösterilmektedir. *Şekil 3c*'de, spekturum durumunun filtrelenmiş hali gösterilmektedir. *Şekil 3d*'de ise, verici ile yayın yapılmakta olduğu anda alınan filtrelenmiş sinyalin durumu gösterilmektedir.



Şekil 4. GNURadio blok diyagramı

Bu çalışmadaki amaç, gönderilen sinyalin toplam güç değişimini algılamak olduğu için, filtrelenmemiş durumda, diğer kanallardaki yayın ve/veya gürültü de bu çıktıyı etkilemektedir. Bu yüzden, gönderilen sinyalin güç değişimini ve karakteristiğini daha net analiz edebilmek için, ilgi konusu kanalda bir alçak geçiren süzgeç uygulanmaktadır. Bu filtre ve çeşitleri de GNURadio'da hazır halde mevcuttur. Bu neredeyse tüm kablosuz haberleşme sistemlerinde uygulanan bir adımdır. Her alıcı dinlemek istediği kanalın frekansında uygun genişlikte bir alçak geçiren süzgeç uygulayarak sinyali süzer.

Bu aşamaya kadarki işlemlerde, GNURadio'nun hazır blokları kullanılmıştır. Bundan sonraki kısımda, sinyalin gücünü veri seti olarak toplama amacı güdüldüğünden, gelen verinin, GNURadio dışına aktarılması gerekmektedir. Bu aşamada da, GNURadio'nun esnek ve modüler olan blok yazma sistemi sayesinde, geçen akımı dışa aktarabilen özel bir blok kodlanarak, akıma dahil edilmiştir. Bu blok, 2.8 MHz örnekleme hızı ile gelen güç verisini toplayarak, 2 saniyede bir ortalamasını almak suretiyle, zamana göre güç durumunu diskteki bir dosyaya kaydedebilmektedir. İlerki aşamalarda bu blok geliştirilerek, veritabanına veya ağdaki başka bir toplayıcı sunucuya aktaracak hale getirilebilir.

Şekil 4'te, GRC isimli GNURadio arayüzünde tasarlanmış olan ve bu bahsi geçen işlemlerin gerçekleştirildiği blok diyagramı gösterilmektedir. İlk olarak "osmocom source" adlı blok, Raspberry PI cihazı tarafından RTL cihazı ile alınarak TCP ile gönderilmekte olan dijital sinyali 1.4 MHz örnekleme hızı ile almaktadır. Bu sinyalin doğrudan "WX Gui FFT Sink" bloğuna gönderilmesi ile Şekil-3a 'da gösterilen spektrum durumu gözlemlenmektedir. Bu alınan sinyal daha sonra "low pass filter" (alçak geçiren süzgeç) bloğundan geçirilerek, istenmeyen frekans bantlarındaki sinyalleri devre dışı bırakmaktadır. Bu aşamadaki sinyal ise yine "WX Gui FFT Sink" bloğuna gönderildiğinde ise *Şekil 3c*'deki durum gözlemlenmektedir. Daha sonra bu sinyal, önce "FFT" bloğundan geçirilerek frekans domainine çevrilmekte ve daha sonra "log power fft" bloğunda ise bu sinyalin toplam gücü dB cinsinden ölçülebilmektedir. Bu ölçülen desibel güç değerleri akımın devamında, tarafımızdan geliştirilerek GNURadio diyagramına dahil edilen "floatrecorder" adlı bloktan geçmektedir. Bu blok ise, geçmekte olan bu akımı (sinyal güç değerleri içeren), 2 saniyelik aralıklarla ortalamaya tabi tutarak kaydetmektedir.

Bu çalışmalar sonunda geliştirilmesi hedeflenen sistem aşağıdaki gibi olacaktır:

- Bilişsel radyo ağlarında algılama süreci için kullanılabilecek algoritma ve yazılım
- Kablosuz haberleşme ortamının sinyal iletim özelliklerinin analiz edilebileceği bir bileşen

Bu çalışmalarda ulaşılmak istenen sonuç, bir kablosuz haberleşme ortamında, sinyal iletim karakteristiğini ölçümler yaparak algılayıp parametrelerini saptayabilecek bir sistem tasarlamaktır. Bu projenin çıktısının değeri, stabil ve kolay kullanılabilir bir sistem ve metot sunarak, kablosuz bir haberleşme ortamının sinyal iletim karakteristik ve parametrelerini saptayabilmeyi hızlandıracak olmasıdır, ve bu sayede bilişsel kablosuz ağ iletişiminde yeni keşiflere ve araştırmalara kapı açacaktır.

VI. SONUÇLAR

Kablosuz haberleşme konusundaki sayısız çalışma alanlarından biri olan bilişsel radyo ağlarını tanıtmakta olan bu bildiri, asıl olarak ise yazılım tanımlı radyo konusunu incelemekte ve uygulama örneği vermektedir. Yazılım tabanlı radyo sistemleri ve kullanım alanları tanıtılmış olup, bu konuda kullanılan yazılım ve donanım gereçleri kısaca tanıtılmıştır. Daha sonra bu gereçler kullanılarak yapılmış olan, başlangıç niteliğindeki spektrum çözümleyici uygulama anlatılmıştır.

Yazılım tanımlı radyo uygulaması olarak yapılan bu çalışmada faydalanılan temel araç takımı GNURadio olup, anasistem bilgisayarı olarak Raspberry Pi kullanılmıştır. Bu bilgisayara alıcı niteliği taşıması açısından önem arz eden RTL2832 alıcı bloğu eklenerek donanım kombinasyonu tamamlanmıştır. GNURadio'nun gerekli blokları yardımıyla işlenen sinyalden belirli zaman aralıklarına dair güç bilgisi elde edilip, projenin temel amacı olan toplam güç değişimini algılamak mümkün kılınmıştır.

Bu çalışmaların sonucu olarak kurulan sistem, genel tabirle bir spektrum çözümleyicisi olup, bundan sonra bu sistem istendiği şekilde özelleştirilerek, kablosuz haberleşme ortamı ile ilgili çeşitli deney ve çalışmalara olanak sağlayacaktır.

VII. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından 7437 numaralı proje kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 50, pp. 2127–2159, May 2006.

[2] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 16–130, First Quarter, 2009.

[3] M. P. Olivieri, G. Barnett, A. Lackpour, and A. Davis, "A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios," in *Proc.IEEE Int. Symp. New Frontiers in Dynamic pectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, MD, Nov. 2005, pp. 170–179.

[4] F.Weidling, D. Datla, V. Petty, P. Krishnan, and G. Minden, "A framework for RF spectrum measurements and analysis," in *IEEE Int. Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, MD, Nov. 005, pp. 573–576.

[5] J. Mitola, 2003. *Software Radio*. Encyclopedia of Telecommunications.

[6] G. M. Vargas , "*Development and Performance Evaluation of a Frequency-Agile Test Network*", Ms Thesis, Aachen University 2009.