

**ULF-VLF-LF BANTLARI İÇİN ALICI TASARIMI VE  
GELİŞTİRİLMESİ**

**RECEIVER DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR THE  
ULF-VLF-LF BANDS**

**MEVLÜT SAİD SARAÇOĞLU**

**DOÇ. DR. CENK TOKER**

**TEZ DANIŞMANI**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

2019



**Mevlüt Said Saraçoğlu'nun hazırladığı "ULF-VLF-LF BANTLARI İÇİN ALICI TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ" adlı bu çalışma aŐađıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.**

Prof. Dr. Feza ARIKAN

Başkan

Doç. Dr. Cenk TOKER

Danışman

Prof. Dr. Ali Ziya ALKAR

Üye

Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Üye

Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak ..... / ..... /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. MenemŐe GÜMÜŐDERELİOĐLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



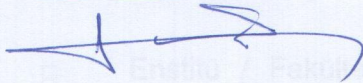
## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 08 / 2019



MEVLÜT SAİD SARAÇOĞLU

07 / 08 / 2019

MEVLÜT SAİD SARAÇOĞLU



## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

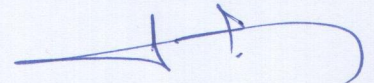
Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

07... / 08. / 2019



MEVLÜT SAİD SARAÇOĞLU



## ÖZET

### ULF-VLF-LF BANTLARI İÇİN ALICI TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

**Mevlüt Said SARAÇOĞLU**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk Toker**

**Ağustos 2019, 68 sayfa**

ULF-VLF-LF bantları yüksek dalga boylarına sahip alçak frekanslı sinyallerin yapay ya da doğal kaynaklardan yayılım gösterdiği 300 Hz - 300 kHz frekans aralığıdır. Bu frekans aralığında gözlemlenen sinyaller yerküre-iyonküre dalga kılavuzu içinde uzun mesafeler boyunca az bir sönümlenme ile yayılım gösterdiğinden yalnızca yakındaki bir kaynağın haberleşme verisini değil, gittiği uzun mesafe boyunca gözlemlenen bir çok yapay ve doğal olayın bilgisini de barındırmaktadır. VLF bandında görülebilecek dalgaların kaynakları yöngüdü, zaman bilgisi iletimi, askeri haberleşme, amatör telsiz haberleşmesi, deniz altı haberleşmesi şeklinde bilgi aktarımı amaçlı olabildiği gibi, yer altı analizi için kullanılan vericiler gibi içerikten ziyade dalga biçiminin kullanıldığı kaynaklar da olabilir. Bunların dışında şimşek, güneş patlamaları, depremler gibi doğa olayları da VLF bandında dalga oluşumuna ve şekillenmesine sebep olabilmektedir.

Bu banttaki sinyaller incelenerek iyonküre yapısı ve etkileşimleri hakkında çalışmalar yapılmaktadır. Doğa olayları ile ilgili başka bir çalışma alanı da depremlerin öncesinde ve sonrasında meydana gelen değişimleri incelemek ve tespit etmek amaçlı olarak VLF sinyallerin çalışılmasıdır.

Bu tez kapsamında VLF(3–30 kHz) ve LF (30–300 kHz) haberleşme bantları ve daha alçak frekans bantlarındaki sinyallerin alımı ve işlenmesini hedef alan bir alıcı sistemi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Yapılan uygulamada sistemin teknolojik standartlar açısından mümkün olduğu kadar hassas ve yüksek hızda doğru ölçüm alabilmesi ön planda tutulmuştur. Daha karmaşık çalışmalarda ihtiyaç duyulabilecek veri setlerinin edinilebilmesi için bu sistemin kolayca çoklanabilirliği ve uzaktan erişilebilir olması da göz önünde bulundurulmuş başka önemli unsurlardır. Geliştirilen sistem öncelikle teorik tasarım aşamalarından geçerek gerekli kısımlar bilgisayar ortamında tasarlanmış, referans ölçüm aletleri vasıtası ile prototiplenmiş ve son ürün halinde, baskı devre yöntemi ile tek başına çalışabilen gömülü bir sistem haline getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Radyo alıcısı, VLF alıcı sistemi, İyonküre veri alımı, Uzaktan algılama, Gömülü sistemli radyo alıcısı

## **ABSTRACT**

### **RECEIVER DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR THE ULF-VLF-LF BANDS**

**Mevlüt Said SARAÇOĞLU**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk Toker**

**August 2019, 68 pages**

ULF-VLF-LF bands are the frequency range of 300 Hz to 300 kHz, where the low frequency signals with long wavelengths that are emitted from artificial or natural sources propagate. Since the signals observed in this frequency range propagate with very small attenuation over long distances in the earth-ionosphere waveguide, they contain not only the communication data of a nearby source, but also the information of many artificial and natural phenomena observed over the long distance it travels. The sources of the waves that can be seen in the VLF band can be directed to transmit information in the form of time information transmission, military communication, amateur radio communication, submarine communication, or sources using waveform rather than content such as transmitters used for underground analysis. In addition to these, natural events such as lightning, solar flares and earthquakes may cause wave formation and wave shaping in the VLF band.

By examining the signals in this band, studies on ionosphere structure and interactions are made. Another field of study related to natural phenomena is the study of VLF signals in order to investigate and detect changes that occur before and after earthquakes.

Within the scope of this thesis, a receiver system design and application aiming at the reception and processing of signals in VLF (3–30 kHz) and LF (30–300 kHz) communication bands and lower frequency bands has been made. In this study, it is prioritized that the system is able to take accurate measurements as precisely and at high speed as possible in terms of current technological standards. Another important consideration is the easy multiplexing and remote accessibility of this system to obtain data sets that may be needed in more complex studies. The developed system has been firstly passed through the theoretical design stages and the necessary parts have been designed in computer environment, prototyped by means of reference measuring instruments and turned into an embedded system that can work standalone with the printed circuit method in the final product.

**Keywords:** Radio receiver, VLF receiver system, Ionosphere data acquisition, Remote sensing, Embedded system radio receiver

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmalarımda verdiği destek ve gösterdiği sonsuz sabır için tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Cenk Toker'e teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarımın gidiőatında desteğini eksik etmeyip, her zaman sabırla yanımda olan can dostum Büőra Yakıcı'ya içtenlikle teşekkür ederim.

Baőta Telekomünikasyon Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki asistan arkadaőlarım olmak üzere, gösterdikleri yakınlık ve yardımlardan ötürü tüm Hacettepeli arkadaőlarım ve hocalarıma teşekkür ederim.

Bütün eğitim ve çalışma hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile beni bu günlere getiren aileme sonsuz minnettarlıkla teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER .....	vii
ŞEKİLLER.....	viii
<b>1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 VLF Haberleşmesi .....	2
1.1.1 VLF sinyallerinin özellikleri, yayılımı ve kullanım alanları .....	2
1.1.2 VLF sinyallerinin gönderimi ve alımı .....	4
1.1.3 VLF haberleşme sistemleri .....	5
1.2 VLF bandında görülen sinyaller .....	6
1.2.1 Doğa olayları kaynaklı sinyaller .....	6
1.2.2 İnsan kaynaklı sinyaller .....	11
1.3 VLF sinyalleri üzerine yapılan çalışmalar .....	13
1.3.1 Deprem öncül işareti olarak VLF sinyalleri.....	13
1.3.2 VLF sinyalleri üzerinden iyonküre analizi çalışmaları .....	15
1.4 Literatürdeki VLF alıcı sistemleri .....	18
<b>2 VLF-LF BANTLARI İÇİN ALICI SİSTEM TASARIMI .....</b>	<b>21</b>
2.1 Sistem tasarımı ve bileşenler.....	21
2.2 Anten tasarımı .....	22
2.3 RF Önkat tasarımı .....	23
2.3.1 Yükseltici .....	24
2.3.2 Yüksek geçiren süzgeç .....	25
2.3.3 Örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç.....	27
2.4 Analog-Sayısal dönüşüm birimi .....	32
2.5 Mikrobilgisayar birimi .....	35
2.6 Kullanıcı arayüzü ve istemci yazılımı.....	37
2.7 Alıcı sisteminden elde edilen sonuçlar .....	39
<b>3 SONUÇLAR.....</b>	<b>46</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>53</b>
<b>EK.1 CYPRESS PSOC MİKRODENETLEYİCİ .....</b>	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>59</b>

## ŞEKİLLER

Şekil 1. VLF bandını içeren radyo frekans dalgaları izgesi .....	3
Şekil 2. Sferics sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	7
Şekil 3. Tweek sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	8
Şekil 4. Pure Note Whistler sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	9
Şekil 5. Diffuse Whistler sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	9
Şekil 6. Two-Hop Whistler sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	10
Şekil 7. Whistler Echo-Train sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	11
Şekil 8. Şehir şebekesinden yayılan sinyaller ve harmoniklerinin zamana bağlı izgesi .....	12
Şekil 9. Loran yöngüdü sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	12
Şekil 10. Rus Alpha yöngüdü sinyallerinin zamana bağlı izgesi .....	13
Şekil 11. VLF alıcı sisteminin blok şeması .....	22
Şekil 12. VLF alıcı anteni .....	23
Şekil 13. RF önkat devresi .....	24
Şekil 14. Yüksek geçiren süzgeç tasarımının frekans genlik tepkisi .....	26
Şekil 15. Yüksek geçiren süzgeç devresinin genişbant gürültü için frekans genlik tepkisi .....	27
Şekil 16. Örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç tasarımının frekans genlik tepkisi .....	28
Şekil 17. Örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç devresinin genişbant gürültü için frekans genlik tepkisi .....	29
Şekil 18. RF önkat devresinin yükselteç, referans gerilim üretici ve yüksek geçiren süzgeç bölümleri .....	30
Şekil 19. RF önkat devresinin örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç ve dış bağlantı bölümleri .....	31
Şekil 20. RF önkat devresinin üretime hazır devre düzeni .....	32
Şekil 21. PSoC Creator üzerinde yapılmış donanımsal tasarım .....	33
Şekil 22. Analog-sayısal dönüştürücü ve USB veri cihazı olarak kullanılan PSoC modülü .....	34
Şekil 23. Veri alımı ve aktarımı için sunucu görevi yapan Raspberry Pi 3B kartı ..	36
Şekil 24. Sistemin sinyal türleri ve arayüz modülleri ile birlikte akış diyagramı ..	38
Şekil 25. Alıcı sistemi için tasarlanan grafik arabirim istemci yazılımı .....	38
Şekil 26. İzge üzerinde Bafa VLF istasyonundan alınan sinyal .....	40
Şekil 27. İzge üzerinde Noviken VLF istasyonundan alınan sinyal .....	41
Şekil 28. İzge üzerinde HWU VLF istasyonundan alınan sinyal .....	42
Şekil 29. Sakin zaman dilimi boyunca 22.4 kHz frekansındaki HWU sinyali .....	43
Şekil 30. Şimşek sonucunda alınan sinyalde meydana gelen değişiklikler .....	44
Şekil 31. Ardarda meydana gelen şimşek çakmasının HWU sinyali üzerindeki etkisi .....	44
Şekil 32. Avrupanın çeşitli bölgelerinden gözlemlenen şimşek çakması olayları ..	45
Şekil 33. PSoC 5LP modeli iç blok yapısı .....	53
Şekil 34. PSoC 5LP modeli için analog alt sistemler bağlantı şematiği .....	55
Şekil 35. Transaction Descriptor tanımlamalarının zincir biçiminde yapılması .....	56
Şekil 36. Ardışık veri tampon belleklerinin her iletim sonrasında yenisi ile doldurulması .....	58

## ÇİZELGELER

Çizelge 1. Alçak frekanslara sahip haberleşme bantları [1] .....	1
Çizelge 2. Tez kapsamında yapılan HUEE-VLF Alıcısı ve literatürdeki diğer çalışmaların teknik özellikleri .....	47



## 1. GİRİŞ

VLF sinyalleri 3-30 kHz, LF sinyalleri 30-300 kHz frekans aralığına denk düşen radyo frekans dalgalarıdır. VLF sinyalleri için dalga boyu 100 kilometre ile 10 kilometre arasında değişirken LF sinyalleri için bu parametre 10 kilometreden 1 kilometreye kadardır (bkz. Çizelge 1).

Kısıtlı bantgenişliği VLF bandını ses iletimi için elverişsiz kıldığından, bu bantta çoğunlukla düşük hızda veri haberleşmesi yapılmaktadır. LF bandı yer yer uzun dalga genlik kiplemeli radyo yayınları için kullanılırken bazı bölgelerde seyrüsefer, hava durumu ya da zaman bilgisinin iletimi için kullanılmaktadır.

Çizelge 1. Alçak frekanslara sahip haberleşme bantları [1]

Bant	Frekans aralıkları (alt limit hariç, üst limit dahil)	Dalga boyları
ELF	0.03-0.3 Hz	10-1 Gm
	0.3-3 Hz	1000-100 Mm
	3-30 Hz	100-10 Mm
	30-300 Hz	10-1 Mm
ULF	300-3000 Hz	10000-100 km
VLF	3-30 kHz	100-10 km
LF	30-300 kHz	10-1 km

Radyo haberleşmesinde kullanılan ELF/VLF/LF bantlarında yayın yapan kaynaklardan yayılan dalgalar yeryüzü hareketleri, atmosfer olayları ve insan kaynaklı etkiler ile zamanda ve mekanda değişim göstermektedir. Bu tez çalışması, denizaltı, navigasyon sistemleri gibi kaynaklardan ELF/VLF/LF bantlarında yayılan

sinyallerin alınmasını, depolanmasını ve sayısal olarak aktarılmasını sağlayan bir gömülü alıcı sisteminin tasarımı ve gerçekleşmesi amacı ile hazırlanmıştır.

Literatürde taranan çalışmalarda bu bantlar için alıcılar kullanılarak, şimşek/yıldırım hareketleri, hava olayları, güneş püskürtüleri gibi olgular tespit edilmeye çalışılmış ve bu amaçla alıcı sistemleri geliştirilmiştir.

Literatürde bulunan bilgisayar tabanlı alıcı sistemlerinde ELF/VLF bantlarında veri alımı ve depolaması yapan sistemler mevcuttur. Bu çalışmada ELF/VLF/LF bantlarında alım yapacak alıcının daha modern teknolojiler kullanarak portatif ve tek başına çalışabilen bir sistem olarak çalışabilmesi hedeflenmiştir. Bu noktada modüler bir şekilde tasarlanan alıcı sistemi mikrobilgisayar kısmından ayrılarak herhangi bir sisteme evrensel veri yolu (USB) üzerinden entegre edilebilir.

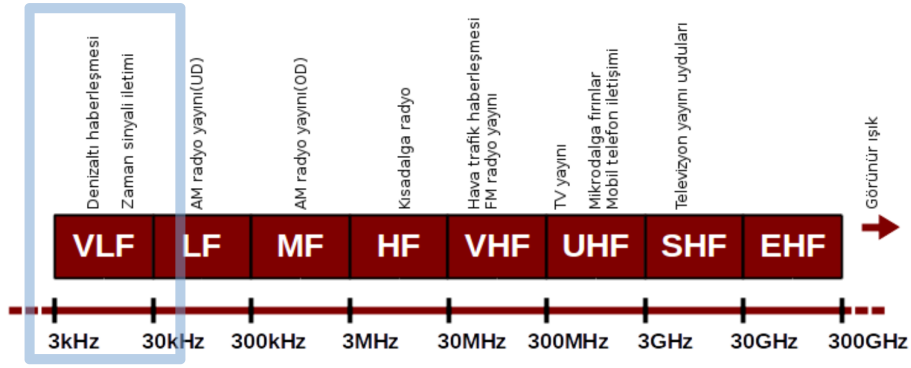
Yapılan çalışmaların bazılarında uygulanan sistemler belirli frekanslara fiziksel olarak ayarlanarak çalışmaktadır. Bu tez kapsamında günümüz teknolojilerinden yazılım tabanlı radyo olarak da nitelendirilebilecek şekilde bütün frekansların aynı anda alınıp, daha sonra bilgisayar ortamında işlenerek frekans ve diğer bileşenlerine ayrılması hedeflenmiştir. Kullanılan yazılımsal ve donanımsal araçlar hem rahatlıkla edinilebilecek şekilde yaygın hem de düşük bütçelerle karşılanabilir niteliktedir.

## **1.1. VLF Haberleşmesi**

VLF sinyalleri 3-30 kHz, LF sinyalleri 30-300 kHz frekans aralığına denk düşen (bkz. Şekil 1) radyo frekans dalgalarıdır. VLF sinyalleri için dalga boyu 100 kilometre ile 10 kilometre arasında değişirken LF sinyalleri için bu parametre 10 kilometreden 1 kilometreye kadardır. Kısıtlı bantgenişliği VLF bandını ses iletimi için elverişsiz kıldığından, bu bantta çoğunlukla düşük hızda veri haberleşmesi yapılmaktadır. LF bandı yer yer uzun dalga genlik kiplmeli radyo yayınları için kullanılırken bazı bölgelerde seyrüsefer, hava durumu ya da zaman bilgisinin iletimi için kullanılmaktadır.

### **1.1.1. VLF sinyallerinin özellikleri, yayılımı ve kullanım alanları**

Alçak frekanslı bu sinyaller büyük dalga boyları sayesinde dağlar gibi yüksek ve büyük nesnelere etrafında kırınımına uğrayıp bir engele takılmadan yayılım yapabilir.



Şekil 1. VLF bandını içeren radyo frekans dalgaları izgesi

Bu şekilde yer dalgaları olarak yayılım gösterirken yerkürenin kıvrımlı yapısını takip ederek ilerler. Yeryüzünden yaklaşık 60 km mesafede, iyonkürenin en alt katmanı olan D katmanı serbest elektron ve iyon içeriği sayesinde belirli frekanslardaki sinyalleri yansıtılabilen bir plazma ortamı sunmaktadır. Gündüz saatleri için yukarıda mesafesi verilen bu katman gece saatlerinde 85 kilometreye kadar çıkmaktadır. Yukarıda bulunan iletken katman ile iletken yerküre yüzeyi, alçak frekanslı sinyallerin dalga boyunun bir kaç katı genişliğinde bir dalga kılavuzu oluşturur. Bu dalga kılavuzu yayılım gösteren sinyallerin uzaya doğru geçişini engeller. Dalgalar yerküre etrafında zigzag şeklinde hareket ederek ilerler.

Alçak frekanslı dalgalar uzun mesafelerde az miktarda zayıflamaya uğradığından uzun mesafelere iletilebilir. Zayıflama miktarı her 1000 km için 2-3 dB civarındadır [2]. Dalgaların 5000 ile 20000 km mesafelere kadar yayılım gösterdiği görülmüştür ancak atmosfer gürültü düzeyleri yüksek olduğundan sinyal gürültü oranı düşmektedir ve ulaşılabilir bantgenişliği düşüktür (20-150 kHz) [2].

İnsan yapımı vericiler tarafından zaman ve seyrüsefer bilgisi göndermek için VLF sinyalleri üretildiği gibi şimşek ve yıldırım gibi doğa olayları da VLF bandında sinyaller üretmektedir. Oluşan sinyaller iyonküre ile yerküre arasında yayılım gösterir.

VLF ve daha alçak frekansa sahip dalgalar deniz suyunda da yayılım gösterebilmektedir. Bu amaçla deniz yüzeyinden 10 ile 40 metre aşağılara erişebilen VLF sinyalleri kullanılmakta, daha derindeki bir konumla haberleşme yapabilmek için daha ELF gibi daha alçak frekanslı bantlarda haberleşme yapılmaktadır. ELF bandındaki haberleşme genellikle suya dalmış deniz altının VLF bandında haberleşmeye uygun mesafelere çıkması için işaret olarak kullanılır. Belirtilen haberleşme tipi için bantgenişliği çok düşük olduğundan MSK gibi kipler

yöntemleri ile 8-bit ASCII veya 5-bit ITA2 (Baudot) kodlamaları kullanarak veri aktarımı yapılmaktadır. Bu tür haberleşme sistemlerinin sonucunda VLF alıcılarında görülen sinyallerin bir kısmı denizaltı haberleşmesi kaynaklıdır.

VLF/LF sinyallerinin diğer kullanım alanlarından bazıları radyo konumlama amaçlı işaretçi verisi gönderimi, zaman bilgisi vericileri, amatör telsiz haberleşmesi ( 136 kHz) ve yer altı haritalandırmasıdır.

Şimşek ve güneş parıltıları gibi doğa olayları da VLF bandında sinyallere kaynak olabilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda şimşeğin meydana geldiği konumun tespiti farklı konumlara sahip birden çok alıcı sisteminden toplanan sinyaller incelenerek bulunabilmektedir.

### **1.1.2. VLF sinyallerinin gönderimi ve alımı**

Alçak bantlarda haberleşme yapmak için kullanılması gereken anten boyutu onlarca kilometre uzunluğundaki dalga boyu ile belirlendiğinden, tam dalga boyuna sahip antenler fiziksel kısıtlardan dolayı kullanılamamaktadır. Dikey polarizasyona sahip dalgaların yayılımı için dikey pozisyonlu antenler kullanılması gerekir ancak yarım ya da çeyrek dalga boyu uzunluğundaki bir dikey antenin boyu, en yüksek VLF frekansı olan 30 kHz için 2,5 ile 5 km arasındadır. Bu durumda iletim için kullanılan antenlerin boyu dalga boyuna kıyasla çok daha kısadır. Pratik uygulamalarda antenlerin ışınım verimliliği %10-%20 civarında olduğundan uzak mesafe haberleşmesi için megawatt güç seviyelerinde yüksek iletim gücü gerekmektedir.

Yüksek güçlü VLF verici antenleri bir kaç kilometreye yayılabilen büyük kablolardan oluşur. Genellikle şemsiye iskeleti gibi biçimlendirilmiş telsiz direklerine bağlı bir kablo ağı şeklindedir. Dikey kablolar veya telsiz direkleri monopol anten görevi görürken yatay kablolar ise antenin verimliliğini artırmak amaçlı kapasitif yük oluşturur. Düşük güçlü iletim için T ya da ters L şeklindeki antenler kullanılırken yüksek güçlü iletim için şemsiye şeklinde delta ve trideco tipinde ya da çok telli düz tavanlı antenler kullanılmaktadır. Antenin çınlama durumuna geçmesi için kapasitif reaktansının dengelenmesi amacıyla besleme noktasında büyük bir yüklem bobini gerekir.

Alıcı antenlerindeki gereksinimler alçak frekans bantlarında doğal atmosfer gürültüsünün yüksek olmasından dolayı daha esneklerdir. Atmosferik radyo gürültüsü alıcı devresinden kaynaklanan eklenir gürültüden çok daha yüksek olduğundan

sinyal gürültü oranını belirleyen unsur olur. Bu yüzden küçük boyutlu verimsiz antenler kullanılarak, antenden alınan düşük gerilimli sinyal, alıcı tarafında önemsenecek düzeyde bir gürültü oluşturmadan yükseltilebilir.

VLF haberleşme sistemlerinin alıcı tarafında döngü antenler kullanılır. Antenin kullanım amacı elektromanyetik dalgaların gerilime dönüştürülmesidir. VLF için kullanılan döngü anten genellikle bir çerçeve etrafına sarılmış bakır tellerdir. Göreceli olarak küçük boyutlu antenlerde ferromanyetik çekirdek de kullanılabilir.

Bir döngü anteni manyetik alana duyarlı olup elektrik alana duyarlı değildir, bu yüzden zaman zaman manyetik döngü olarak da adlandırılır. Faraday İndüksiyon Kanunu olarak da bilinen Faraday Yasasına göre bir bobin sargısından geçen ve zamana göre değişen manyetik akı, zamana göre değişimiyle doğru orantılı biçimde bobin üzerinde gerilim oluşturur. Bu yasaya göre kullanılan döngü antenler de elektromanyetik dalgayı elektronik devreler ile sezilebilecek bir gerilime dönüştürür.

Döngü antenlerin performansı tur sayısı ve her bir döngünün alanıyla değişir. Ferromanyetik çekirdeğe sahip bir anten için çekirdeğin geçirgenliği çıkış gerilimini artırır. Ayrıca döngü antenler toroidal bir alım örüntüsüne sahiptir. Alım örüntüsünde çerçeve düzleminde enbüyük, çerçeveye dik düzlemde de teorik olarak sıfır olur.

### **1.1.3. VLF haberleşme sistemleri**

VLF sinyallerinin alınması amacıyla uygulamaya geçirilen çeşitli alıcı sistemleri mevcuttur. Bu sistemler alınan sinyalin yorumlanması, depolanması, işlenmesi konularında değişiklik gösterdiği gibi gerçekleşirken uygulanan farklı tasarım hedefleri açısından da çeşitlilik göstermektedir. Alınan sinyalin analog ya da sayısal biçimde değerlendirilmesi, taşınabilir ya da sabit bir sistem olması, çıktı olarak analog görselleştirme yapması ya da duyulabilir bir ses sinyali üretmesi yönleri ile farklı biçimlerde uygulamalar mevcuttur.

İngiltere Radyo Astronomi Birliği (UKRAA) tarafından tasarlanıp uygulanan UKRAA VLF alıcısı güneş patlamaları kaynaklı ani iyonküre bozulmalarını kaydetmek amacıyla üretilmiştir [3]. Bu işlemi iyonküredeki değişimlerden etkilenen ve güneş olaylarının dolaylı olarak belirlenmesini sağlayan yeryüzü tabanlı işaret vericilerinin yayınlarını izleyerek yapmaktadır. Bu alıcı sistemi çıktı olarak zamanla değişen bir gerilim sinyali vermektedir. Bu sinyalin herhangi bir veri kaydediciye ya da sayısal multimetreye beslenmesi ile sinyallerin alımı hedeflenmiştir. 12 kHz ve 35 kHz

frekansları arasındaki sinyalleri alabilen sistem 15 volt doğru akım kaynağından 35 mA akım gereksinimine sahiptir.

Geonics firması tarafından üretilen EM16 modeli VLF alıcısı elektromanyetik jeofizik analiz cihazı olarak kullanılmaktadır [4]. VLF yayınlarının yerel eğilmesi ve ovallığı ölçülerek VLF tepkisi belirlenmektedir. Bu yöntemle çeşitli temel ve değerli metal cevherlerinin bulunması ve su taşıyan çatlak ve fayların keşfi yapılmıştır. 9 V luk bir kaynağa ihtiyacı olan bu sistem 15 kHz ile 25 kHz arasında çalışabilmektedir.

Explorer E202 isimli taşınabilir VLF alıcısı yıldırım ve güneş fırtınalarının oluşturduğu sinyallerin alınması için tasarlanmıştır [5]. Pil ile çalışan bu sistem çıktı olarak standart kulaklıkların kullanılabileceği bir bağlantı sunmakta ve sonuçların ses sinyali olarak incelenmesini hedeflemektedir. Alıcının çalıştığı frekans aralığı 120 Hz ile 10 kHz arasındadır.

Donanım olarak sunulan alıcı sistemlerinin yanında yazılım biçiminde sunulan sistemler de mevcuttur. Buna örnek bir çalışma olarak XiVero firmasının ürettiği VLF alıcı yazılımı kişisel bilgisayar sistemleri üzerinde çalışmakta ve radyo dalgasının kaynağı olarak kullanıcı tarafından temini gereken bir döngü anten kullanılmaktadır [6]. Opsiyonel olarak kullanıcının bir ön yükselteç üreterek kullanımı da sisteme dahil edilebilir şekilde sunulmuştur. Frekans aralığı olarak kullanıcının sahip olduğu ses kartının donanımsal limitleri belirlenmiştir.

## 1.2. VLF bandında görülen sinyaller

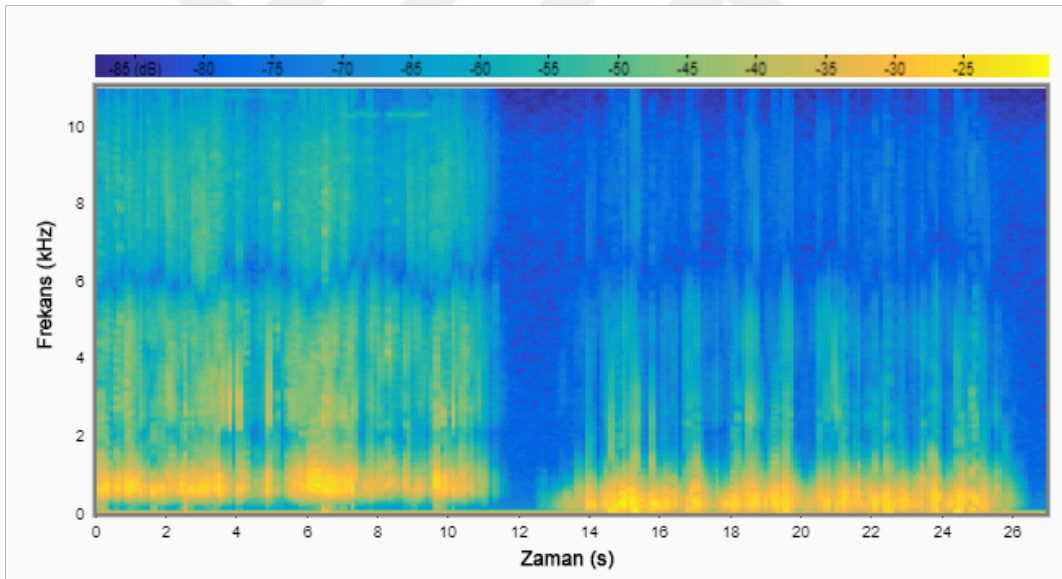
### 1.2.1. Doğa olayları kaynaklı sinyaller

**Sferic sinyalleri:** İngilizce “atmospherics” kelimesinden kısaltılarak kullanılan sferic isimli radyo atmosferik sinyalleri şimşekler kaynaklı yayılan dürtü biçimli sinyallerdir. Bu tip sinyallerin frekansı bir kaç kilohertz alt sınırından başlayarak megahertzlere kadar çıkabilir. Şimşek olayların yük boşalımından kaynaklanan sferic sinyalleri büyük bir sönümlenmeye uğramadan yerküre-iyonküre arası dalga kılavuzu içinde yayılım gösterebilir ve kaynağından binlerce kilometre öteden alınabilir.

Sferic sinyallerinin dürtü biçimindeki yayılımı 100 kHz altındaki bütün frekanslarda baskın gelse de, yüksek frekanslarda sürekli bir gürültü bileşeni de önem taşımaktadır. Bu sinyaller zaman bölgesinde yüksek genlikli bir doruk olarak

görülebılır. Spektrogramına bakıldığında genişbant yapısından dolayı dikine bir şerit biçiminde görülür (bkz. Şekil 2). Sferic sinyalleri duyulabilir frekans aralığında ses sinyali olarak incelendiğinde ince dallarını kırılmasına benzer bir ses olarak duyulabilir.

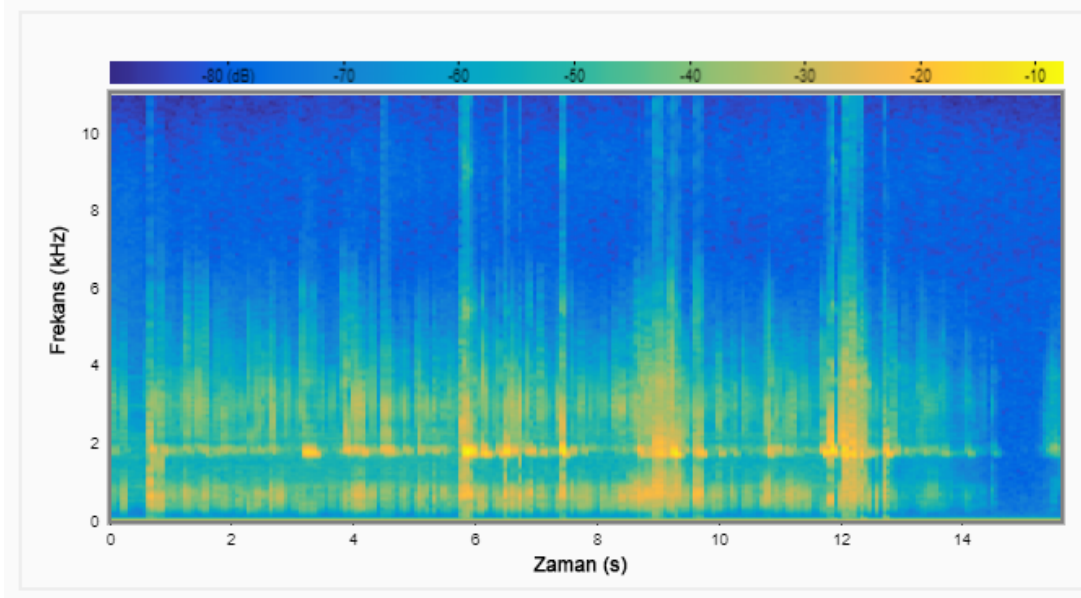
Yerküre genelinde daha çok kıta bölgelerinde görölmek üzere şimşekli fırtınalar saniyede yaklaşık 100 şimşek çakmasına sebep olmaktadır. Bu olayları gözlemlmek için sferic sinyalleri uygun bir kıstastır. Yerküre-iyonküre dalga kılavuzunun dağıtıcı özelliği göz önünde bulundurularak bir sferic sinyalinin farklı frekanslardaki geliş yönü ile birlikte grup hızı ölçümü yapılabilir. VLF bandının alt kısımlarında birbirine komşu frekansların grup zaman gecikmesi kaynağa olan mesafe ile doğru orantılıdır. Gece vakitlerinde VLF sinyallerinde batıdan doğuya doğru yayılım için sönümlenme daha az olduğundan, 10.000 km mesafeye kadar fırtına olaylarının gözlemi yapılabilir. Gündüz saatlerinde bu mesafe 5.000 kilometre civarlarındadır [7].



Şekil 2. Sferics sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

**Tweek sinyalleri:** Sferic sinyalleri yerküre-iyonküre dalga kılavuzunda bir kaç bin kilometre mesafeden daha öteye yayıldığında tweek isimli sinyaller gözlemlenir. Bu mesafe yerkürenin çevrel uzunluğunun yarısına kadar (20.000 kilometre) çıkabilir. VLF sinyalleri çok uzun mesafelerde ilerleyince daha alçak frekansların düşük frekanslara kıyasla daha az bir miktar daha hızlı hareket ettiği yayılma olayına maruz kalırlar. Bu durum özellikle 2 ile 3 kilohertz frekansları için geçerlidir. Tweek sinyalleri sferic sinyallerinden daha farklı bir ses sinyali karşılığına sahiptir. Keskin

çıtırdama sesinden ziyade, daha notasal yapıda ve seken kurşun sesine benzer bir sese benzemektedir. Tweek sinyallerinin spektrogramında görülen çizgi şeklindeki yapı daha yüksek frekanslarda kıvrımlı ve kancaya benzer bir bölgeye sahip olur (bkz. Şekil 3).

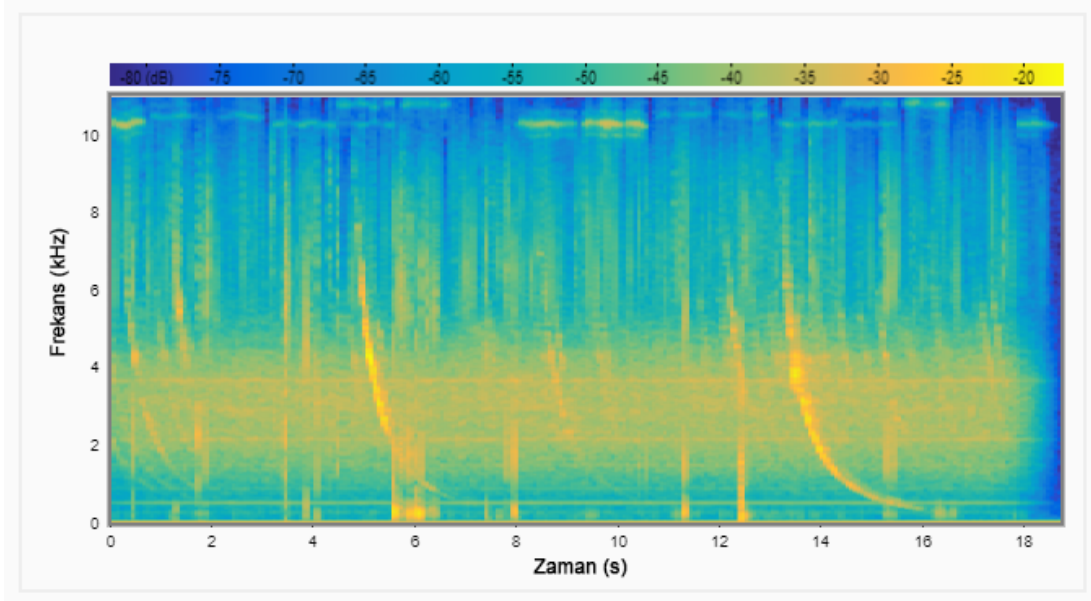


Şekil 3. Tweek sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

**Whistler sinyalleri:** Whistler sinyalleri şimşekler kaynaklı çok alçak frekansa sahip elektromanyetik dalgalardır. Karasal whistler sinyallerinin frekansı 1 kHz ile 30 kHz arasındadır. Elektromanyetik dalgalar olmalarına rağmen duyulabilir ses frekanslarında bileşenlere sahip olduklarından, uygun bir ekipman yardımı ile ses dalgası olarak duyulabilirler. Çoğunlukla şimşek çakmaları esnasında oluşan bu dalgalar yerkürenin manyetik alan çizgilerini takip ederek yayılım gösterirler. Alçak frekansların iyonküre ve manyetosfer plazma ortamlarında düşük hızlara sahip olmasından dolayı bir kaç kHz'lik dağılıma uğrarlar. Bu şekilde bir kaç saniye sürebilen ve gittikçe azalan bir tonda algılanırlar.

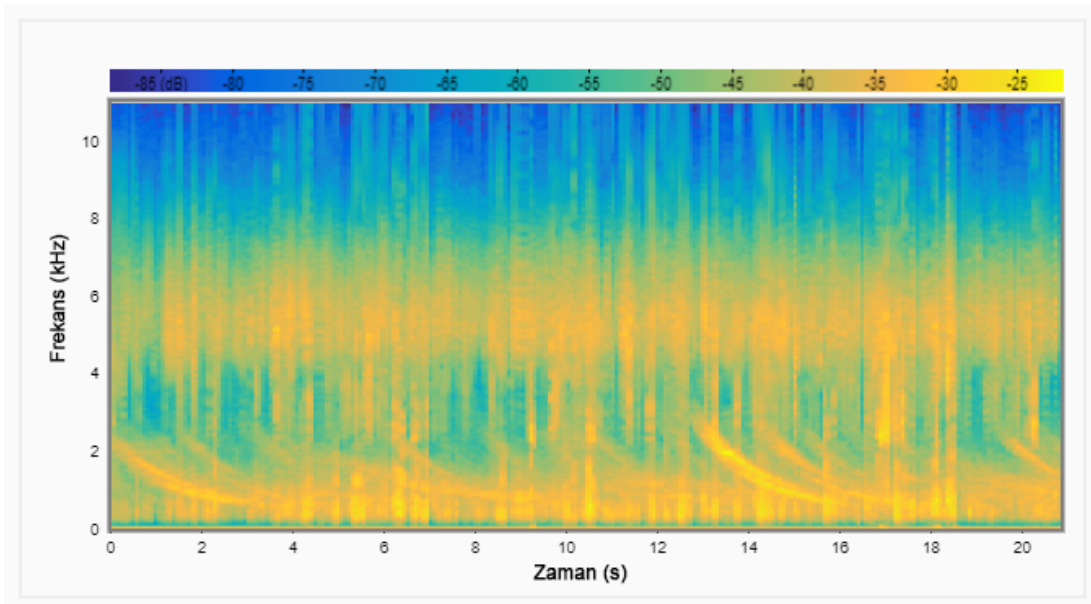
Spektrogramlarında zamansal olarak birbiri ardına gelen frekansların görüntüsü olarak yay biçiminde görülürler. Bütün frekanslardaki sinyaller aynı anda kaynaktan çıkan sferic sinyaller olmasına rağmen, uğradıkları dağılım kat ettikleri uzun yoldan ötürü baskın bir şekilde kendini belli ederek algılanmaktadır. Whistler sinyaller Pure Note, Diffuse, Two-Hop, Echo-Train gibi türlere ayrılarak incelenirler.

**Pure Note Whisler:** Belli bir manyetik alan çizgisini takip ederek yayılan whistler sinyallerine Pure Note denir. Spektrogramda tek bir yay şeklinde görülen bu sinyaller net bir ıslık sesi şeklinde duyulur (bkz. Şekil 4).



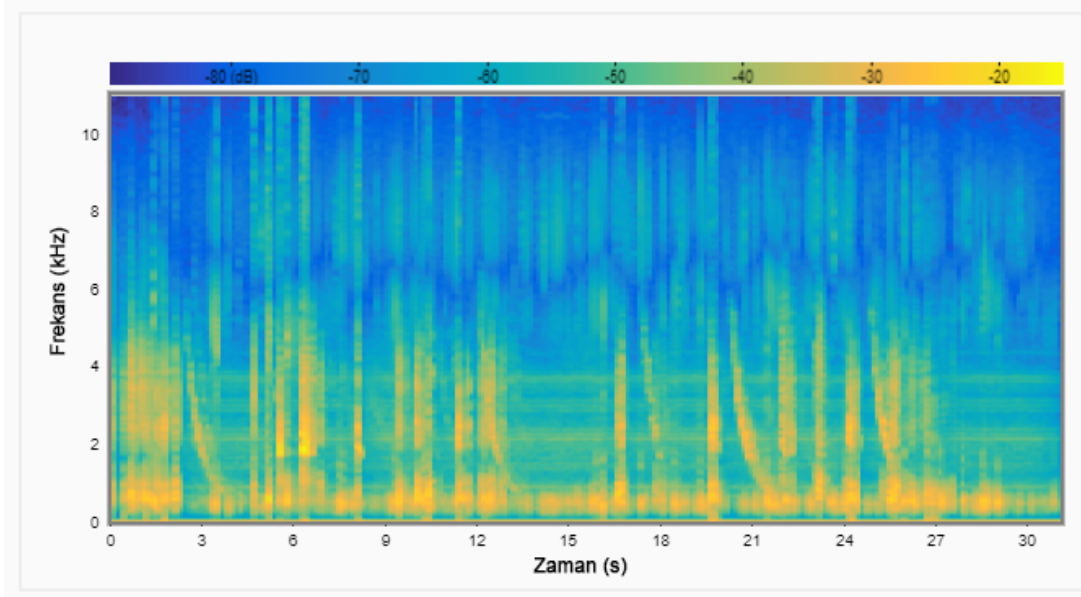
Şekil 4. Pure Note Whistler sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

**Diffuse Whistler:** Farklı uzunluklara sahip manyetik alan çizgileri üzerinde ilerlemiş olan sinyaller Diffuse Whistler sinyaller olarak adlandırılmaktadır. Bu sinyaller için duyulan ses daha nefes nefese biçimdedir. Spektrogramda daha geniş biçimli eğimli çizgiler olarak görülmektedirler (bkz. Şekil 5).



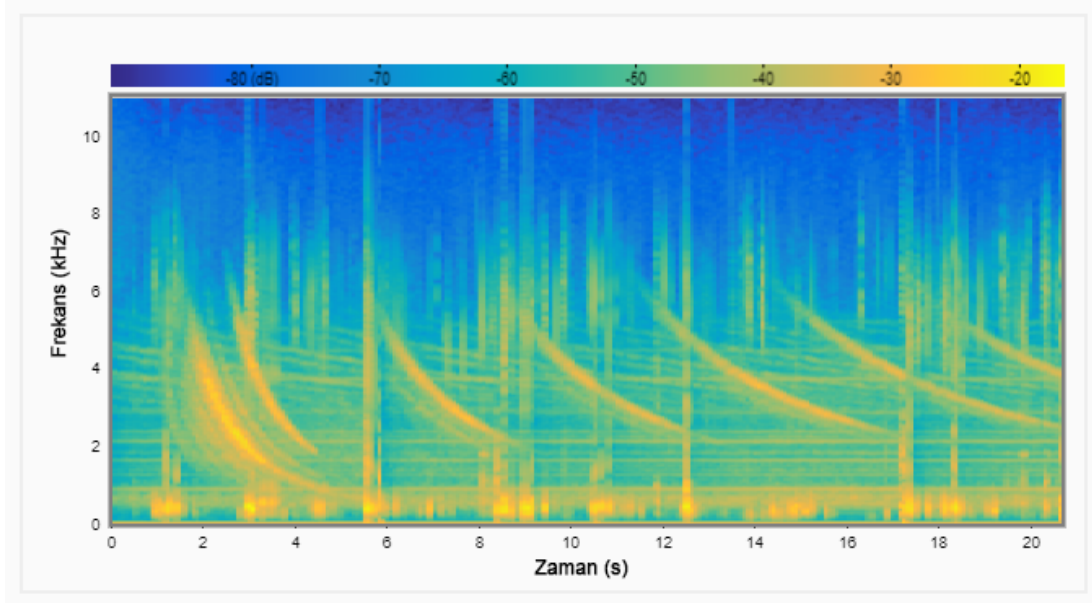
Şekil 5. Diffuse Whistler sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

**Two-Hop Whistler:** Two-hop whistler sinyalleri alıcı bölgesine yakın kaynaklı sinyallerdir. Sinyal manyetik alan çizgileri boyunca hareket ederek diğer manyetik yarımkürede iyonküreden sekerek geri dönmekte ve özgün şimşek çakmasının olduğu yerde whistler sinyali olarak duyulmaktadır. Two-hop whistler sinyalleri güçlü bir yerel sferic sinyalin ardından bir iki saniye içinde duyulan whistler sinyal ile tanınabilir (bkz. Şekil 6). Yerel olarak gerçekleşen şimşek çakması gözlem noktasına 2.000 km ya da daha yakın mesafede olmaktadır.



Şekil 6. Two-Hop Whistler sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

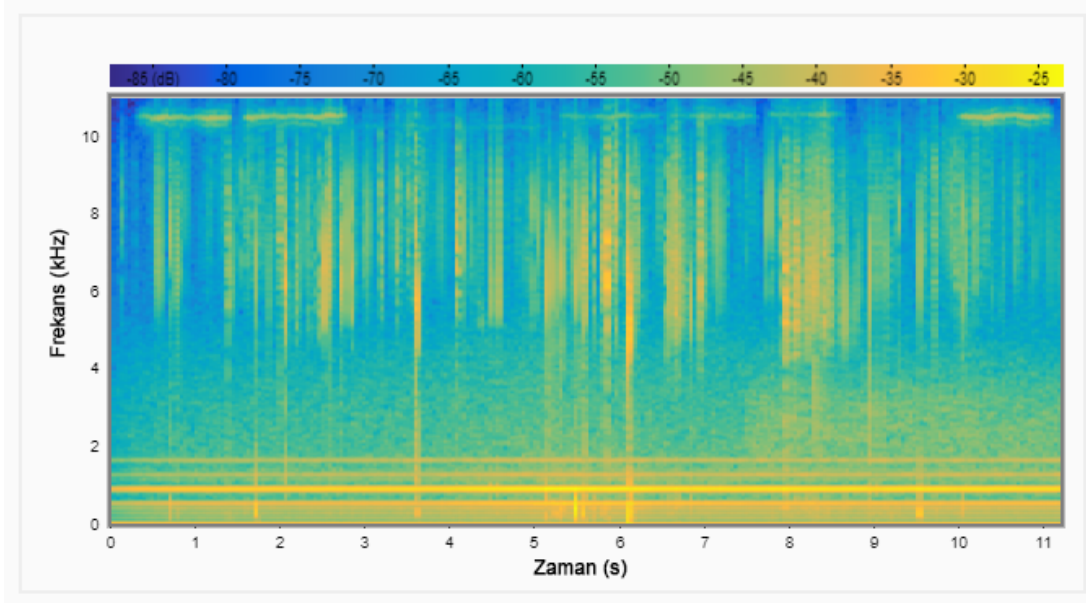
**Whistler Echo-Train:** Echo train sinyalleri, radyo dalgalarının eşlenik manyetik noktalar arasında sekip durması sonucunda oluşur. Sinyalin iyonküreden geçtiği her seferinde enerjinin bir kısmı alt atmosfere sızarak whistler sinyali olarak duyulmaktadır. Tren yapısındaki bu sinyallerde duyulan her bir whistler aslında tek bir şimşek çakmasının sonucudur. Whistler sinyalinin ardışık atlamaları arasındaki mesafe gittikçe arttığından, dağılım miktarının da gittikçe arttığı bir sinyal dizisi görülür (bkz. Şekil 7).



Şekil 7. Whistler Echo-Train sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

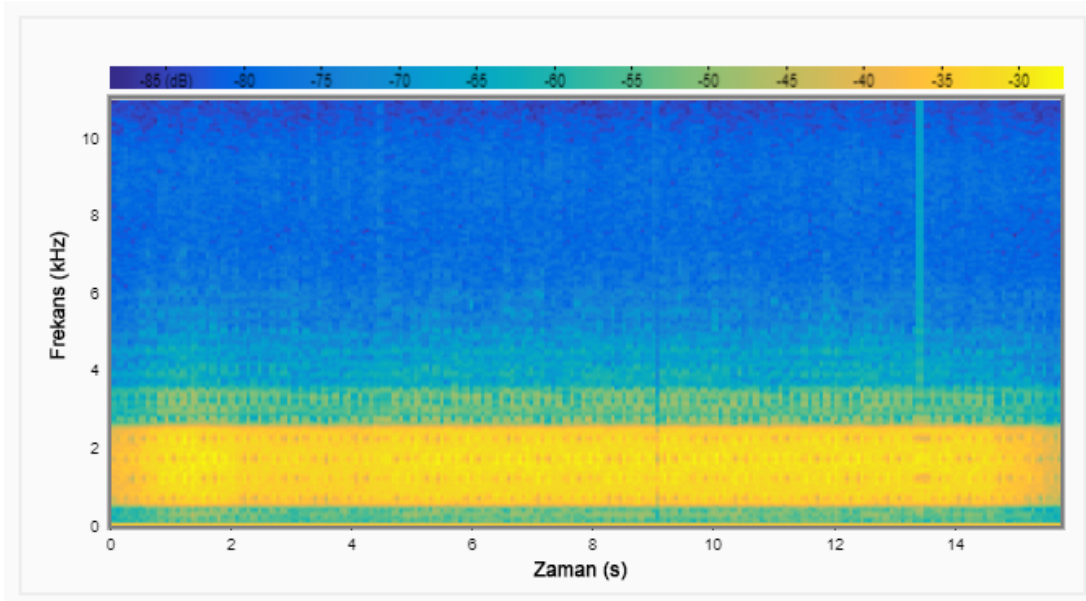
### 1.2.2. İnsan kaynaklı sinyaller

**50-60 Hz homurtusu/besleme gürültüsü:** Güç şebekeleri 50-60 Hz frekansında ve bu frekansın katlarına sahip harmonik frekanslarda VLF radyo dalgaları yaymaktadır. Alıcının kaynağa yakın olduğu ve hat geriliminin yüksek olduğu durumlarda bu homurtu daha kuvvetlidir. Spektrograma bakıldığında bu sinyaller yatay olarak seyreden bir çizgi olarak görülmektedir.



Şekil 8. Şehir şebekesinden yayılan sinyaller ve harmoniklerinin zamana bağlı izgesi [7]

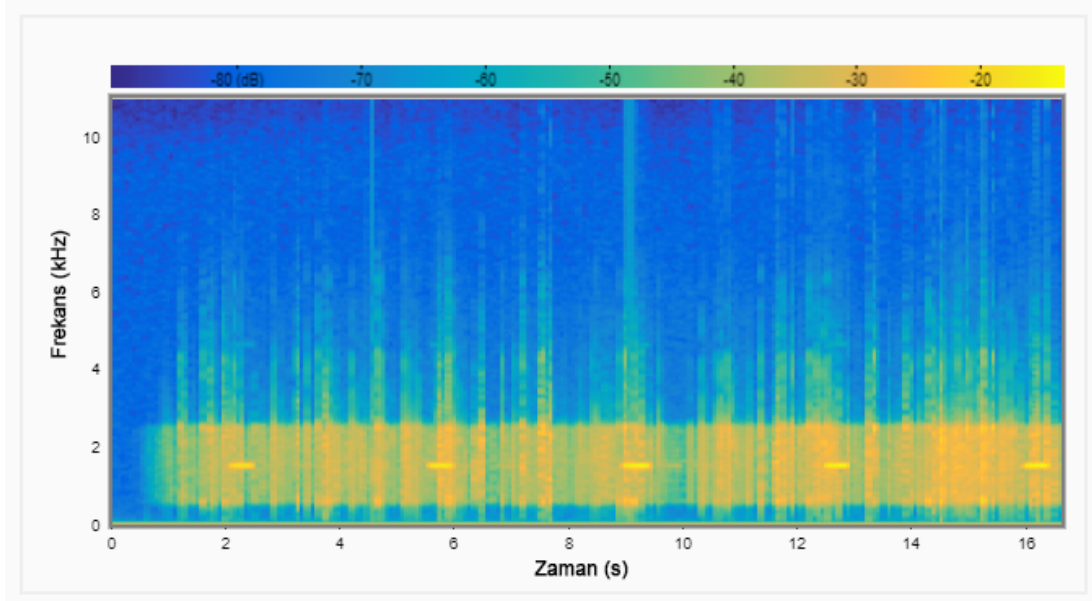
**Loran:** LORAN yöngüdüm sinyalleri VLF aralığında duyulmaktadır. Ses sinyali olarak hızlı biçimli tıklama sesine benzemektedir. Spektrogramda yatay olarak birbirine eşit mesafelerde duran noktalar şeklinde gözükmemektedir (bkz. Şekil 9).



Şekil 9. Loran yöngüdüm sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

**Rus Alpha Yöngüdüm Sinyalleri:** Üç adet Rus Alpha yöngüdüm vericisi, kendini tekrar eden ve belli ton setlerine sahip sinyaller yaymaktadır. Bu iletimin frekansları

13 ile 15 kHz arasında değişmekte olup bazen daha alçak frekanslarda da görölmektedir. Spektrogram üzerinde ALPHA sinyalleri bir dizi yatay kısa çizgiler şeklinde görölmektedir.



Şekil 10. Rus Alpha yöngüdümlü sinyallerinin zamana bağlı izgesi [7]

**Diğer:** Bu sinyallerin dışında askeri yöngüdümlü, zaman bilgisi sinyalleri, amatör telsiz haberleşmesi gibi farklı alanlarda VLF bandı kullanılmaktadır. İyonosfer araştırmaları amaçlı olarak da belli bölgelere yüksek güçlü vericiler yerleştirilerek VLF frekans bantlarında iletim yapılmaktadır.

### 1.3. VLF sinyalleri üzerine yapılan çalışmalar

#### 1.3.1. Depremin öncül işareti olarak VLF sinyalleri

Yapılan bazı çalışmalarda VLF bandından alınan radyo frekans dalgalarının yeryüzünde görölen deprem gibi sismik olayların tahminine katkıda sağlayabileceği görölmüştür. Kimi çalışmalarda ise depremler sonucunda VLF bandındaki sinyallerde anomalilerin oluştuğu belirlenmiştir.

Hayakawa tarafından yapılan çalışmada iyonküre karışıklıklarının depremlerle ilintisi istatistiksel özellikler açısından incelenmiş ve aralarındaki ilintiye dair sonuçlar elde edilmiştir [8]. Bu çalışmadaki analizlerde kalıntı genlik değeri tanımı altında anlık olarak gözlenen sinyal şiddeti ile gözlemden önceki ve sonraki günlerin

ortalamasının farkı ana veri olarak kullanılmıştır. Bu veriden yola çıkarak gece vakitlerindeki zamana bağlı genlik değeri ve gece vakitlerindeki dalgalanma miktarı parametre olarak elde edilerek bunlar üzerinden analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmada depremden 2-5 gün öncesinde gece vakti genlik değerinde belirgin bir azalma görülmüş, şiddeti 6,0 değerinden daha yüksek depremler için gece vakti dalgalanmasında çok ciddi bir artış görülmüştür.

Kazakova, Kolesnik ve Shinkevich tarafından ortaya konulan çalışmada 3 farklı istasyondan alınan veriler ele alınarak VLF bandındaki sinyal genlik değerlerinin değişimi ve deprem aktiviteleri arasında çeşitli ilintiler bulunmuştur [9]. Parametre olarak depremin başlama anı ile sinyal genliğindeki anormal davranışların başlangıç arasındaki zaman farkı, deprem merkez üssünün VLF alıcısına mesafesi ve depremin tanımlayıcı sayısal parametreleri ele alınmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda deprem işaretçisi sinyallerin yakalanabilmesi için VLF alıcısı ile deprem merkez üssü arasında olabilecek maksimum mesafe değerinin ortalaması bulunmuş, tahmin parametrelerinin dağılımlarının ilintili olduğu ortaya koyulmuştur.

Chakrabarti ve ark. tarafından yapılan çalışma VLF sinyallerinde meydana gelen anomalilerin deprem habercisi olabileceğini göstermektedir [10]. Bu çalışmada analiz parametreleri olarak gün doğumu ve gün batımı sonlanma zamanları ile D-katmanı hazırlanma zamanı ve D-katmanı kaybolma zamanı kullanılmıştır. Bütün yayılma yolları için, deprem merkez üssünün yola yakın olması durumunda o yol için enbüyük anomaliye sebep olduğu gösterilmiştir. İncelenen deprem verisi örneklerinde gün doğumu sonlanma süresinin depremin öncesi günlerde azaldığı, depremin olduğu günde ise enküçük değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Çoğunlukla sismik olay öncesinde görülen etkiler, bazı durumlarda depremin olduğu gün içinde de görülmüştür.

Ray ve Chakrabarti tarafından ortaya konulan çalışmada sismik olayların öncesinde VLF sinyallerinin gece vakti genliğindeki değişim incelenmiştir [11]. Gece vakti genliği üzerinden yapılan bu çalışmada D-katmanı oluşum ve kaybolma olaylarının etkilerinin ortadan kaldırılması için gün batımı sonlanma süresinden 1 saat sonrasında başlayarak gün doğumu sonlanma süresinden 1 saat öncesine kadar elde edilmiş veriler kullanılmıştır. Verilerdeki dalgalanmanın standart sapmanın iki katından fazla olması durumu anomali olarak nitelendirilmiş, buna göre anomali durumlarının sismik olaydan 3 gün öncesinde en şiddetli olduğu sonucuna varılmıştır. Her bir gün için elde edilen deprem verileri ile gece vakti

dalgalarının ilintisine bakıldığında, istatistiksel ilintinin olay tarihinden 3 gün önce tepe yaptığı görülmüştür.

Zhima ve ark. yaptıkları çalışmada doksan derece boylam farkına bağlı bir yöntemle VLF sinyallerinin, şiddeti 6,0 ya da daha büyük yüzeysel depremler öncesinde nasıl etkilendiğini incelemişlerdir [12]. Her bir gün aralığı için kayan ortalama şeklinde ortanca değeri hesaplanmış, bu değer üzerinden genlik değerinde depremin ana şok etkinliğinden yaklaşık 2 saat önce anomalilerin meydana geldiği bulunmuştur. 7'den daha büyük şiddete sahip güçlü yüzeysel depremlerin alt iyonküre bozulmalarına sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Hayakawa ve ark. tarafından yapılan başka bir çalışmada alt iyonküredeki bozulmalar ile VLF yayılımı ve depremlerin ilintisi incelenmiştir [13]. Bu çalışma ortalama gece vakti sinyal genliği, yayılma ve saçılma miktarlarındaki anomali durumlarını farklı yayılma yolları için şiddeti 6'dan büyük depremlerle ilintilendirmektedir. Yayılımdaki anomalinin standart sapmanın iki katından daha büyük olduğu durumların için, sığ derinlikli (<40km) depremlerle iyonküre bozulmaları arasında önemli miktarda ilinti görülmüştür.

### **1.3.2. VLF sinyalleri üzerinden iyonküre analizi çalışmaları**

VLF sinyallerinden yola çıkarak çalışılan ve ilintilendirilen olaylardan biri de iyonkürede meydana gelen olgulardır.

Gorishnya tarafından yapılan çalışmada doğal kaynaklı atma biçimindeki VLF dalgalarının yerküre-iyonküre arasındaki dalga kılavuzunda yayılımı sonucunda çıkan tweek sinyallerinin analizi ile alt iyonküre bölgesinin çözümlenmesinde yeni radyofiziksel yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir [14]. Birinci dalga kılavuzu modunun etkin yüksekliğinin genellikle ikinci dalga kılavuzu modunun etkin yüksekliğinden daha fazla olduğu gösterilmiştir. Bu bilgi alt iyonküredeki D bölgesi elektron yoğunluğunun, keskin sınırlı iyonküre modeli yaklaşımı kapsamında tweek sinyallerinin kesim frekanslarının ölçülmesi ile belirlenebileceği yeni bir yöntem geliştirmeye imkan tanımıştır. İki adet birbirine dik yatay manyetik bileşen ve bir adet dikey elektriksel bileşen olmak üzere tweek sinyallerinin üç bileşenli kayıtlarının deneysel birleşimi ortaya konulan yöntemin test edilmesi için kullanılmıştır.

Rashid ve ark. tarafından yapılan çalışmada Şubat ve Nisan 2011 döneminde güneş patlamasıyla ilişkili olarak alt iyonküre serbest elektron yoğunluğu değişikliklerinin

gözlenmesi için bir çalışma sunulmuştur [15]. İyonosfer güneş patlamaları sırasında güneşten yayılan gelişmiş X-ışını ışınmasına hızlı bir şekilde tepki vermektedir. Güneş patlamasına dayalı olarak VLF dalgalarında çeşitli sapmalar tespit edilmiştir. GOES uydusundaki verilerden yola çıkarak bu patlamaların her birine ait zaman ve tür bilgisi elde edilmiş, bunun ardından alınan sonuçlara göre meydana gelen bir X2.2 türündeki güneş patlamasının VLF bandındaki sinyallerde hem genlik hem de faz açısından bozulmalara sebep olabildiği ortaya çıkmıştır. Bu bozulmalar genlik için 4.3 dB kadar yükseklerle çıkabilirken faz için de 90 dereceye çıkabildiği görülmüştür. Güneş patlaması nedeniyle birkaç VLF sinyal bozulması tespit edilmiştir. Bu çalışmada güneş patlamalarının yayılma şiddeti ile genlik ve faz bozulmaları arasında doğrusal bir ilinti tespit edilmiştir.

Silber ve Price tarafından yapılan çalışmada alt iyonküre tabakasındaki bozulmaların VLF sinyallerin ölçümü ile analizi çalışılmıştır [16]. VLF darbant sinyalleri kullanılarak fırtınaların hem basınç dalgaları hem de elektromanyetik bozulmalardaki etkileşimi ortaya koyulmuştur. D bölgesinin ısınması ve iyonlaşması ile ilgili birçok geçici olay olmakla birlikte, uzun vadeli akustik dalga imzaları ve kısa süreli yerçekimi dalga imzaları gözlemlenmiştir.

Kvavadze ve Kvavadze tarafından yapılan çalışmada alçak iyonküre bölgesindeki VLF yayılımı incelenmiştir [17]. 10 farklı istasyondan alınan veriler kullanılarak solar akı sayısı, jeomanyetik Kp indeksi ve deprem verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarla birlikte alınan verilerin farklı coğrafi bölgeler için kıyası da yapılmıştır.

Pal, Chakraborty ve Chakrabarti tarafından yapılan çalışmada VLF radyo verileri kullanılarak kısa süreli (dakika-saat aralığında) yerçekimi dalgaları, uzun süreli (birkaç gün) gezegen dalga tipi salınımları incelenmiştir [18]. Yerçekimi dalgalarının varlığını göstermek için Temmuz, 2009 ayında gerçekleşen güneş tutulması esnasında ICSP-VLF ağı tarafından elde edilen veriler analiz edilmiştir. En fazla tutulma süresince görülen ve 10 dakika ile 1 saat arasında değişen baskın dalga periyodlarının, güneş tutulması sebebiyle atmosferik yerçekimi dalgalarının uyarılmasıyla ilintili olabileceği ortaya koyulmuştur. Ayrıca VTX (18.2 kHz) ve NWC (19.8 kHz) vericilerinden toplanmış olan 4 yıllık VLF genlik verisi mezosfer-alt iyonküre sistemindeki gezegen dalga tipi salınımlarının incelenmesi için analiz edilmiştir. Fourier ve wavelet analizleri iki vericiden gelen radyo yolları üzerinde

de 5-27 gün aralığında periyodlara sahip gezegen dalga tipi salınımların olduğunu göstermiştir.

Dowden ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada yerküre üzerinde şimşek konumlandırma amaçlı VLF dalgalarının yayılımı kullanılmıştır [19]. 30 adet şimşek sensörü kullanılarak yerküre çapındaki kaynağı yerküre-iyonküre dalga kılavuzunda yalnızca VLF dalgalarının yayılımı kullanılarak başarılı olmuştur. Yeryüzü yayılımı veya gökyüzü ve yeryüzü karışımı yayılımından yerküre-iyonküre dalga kılavuzu dağılımı gereksiniminden ötürü uzak durulmuştur. Başka bir gereksinim ise şimşek çakmasının şimşek sensörlerinin bölgesesel özellikleri tanımlayan çevreleme içinde olmasıdır. Bu koşullar altında şimşek çakmasının zamanı ve konumu belirlenebilmektedir.

Samanes, Raulin ve Jinbin tarafından yapılan çalışmada VLF dalgalarının yayılımı kullanılarak alçak iyonküre bölgesinin gece zamanındaki yüksekliği kestirilmeye çalışılmıştır [20]. Alçak iyonküre bölgesinin özellikleri incelenirken VLF modal girişim mesafesi değerleri günlük olarak gözlenmiştir. Bu mesafe yerküre-iyonküre dalga kılavuzu içindeki gece zamanı yayılım modlarına bağlı olduğundan, alçak iyonküre katmanlarının gece zamanı durumu hakkında bilgi vermektedir. Analiz verileri transekvatorial yol üzeri için yaklaşık 6 yıllık zamana yayılan uzun süreli veritabanından alınmıştır. Elde edilen sonuçlar gece zamanı yüksekliğin değişkenliğini birden çok zaman ölçütü için tanımlamıştır. Bu ölçütler arasında günden güne en fazla 5 km mesafe için değişkenlik ve kuzey yarım küre için kış ve yaz için mevsimsel değişkenlik yer almaktadır. Bunların dışında da bir ön ilinti analizi yapılarak gece zamanı yükseklik ile uzun vadeli güneş olayları arasında bir ilişki olabileceği tespit edilmiştir.

Rodger, Wait ve Thomson tarafından yapılan çalışmada iyonkürede gözlenen kızıl çizgilerin VLF saçılmaları üzerindeki etkileri incelenmiştir [21]. Kısa süreli gözlenen ( 50 ms) bu çizgiler 40 km ile 85 km yükseltiler arasında görülmektedir. Gözlenen çizgiler yaklaşık 1 km genişliğine sahip pembeye çalan kırmızılıkta ışıldayan sütunlar halindedir. Kızıl çizgi boşalmaları yerküre-iyonküre dalga kılavuzu içinde sütun şeklinde iyonlaşmış bölgelere sebep olmaktadır. Yüksek irtifalarda bu iyonlaşma 100 saniye sürelerle kadar kalıcı şekilde devam edebilmektedir. İyonlaşmış sütunlar bu çalışma kapsamında iyonküre altı VLF iletimlerindeki faz ve/veya genlik bozulmaları üzerinden gözlenmiştir. Daha önceki teorik çalışmalarda kızıl çizgi sütunları kolonların sonsuz uzunlukta olması ve düzlemsel yeryüzü

dalga kılavuzu içinde gözlenmesi varsayımlarını yaparak problemin tanımını basite indirgemıştır. Bu çalışmada iyi tanımlanmış VLF yayılım yöntemleri üzerinden sonlu uzunluğa sahip sütunlar daha gerçekçi bir yerküre-iyonküre dalga kılavuzu içinde hesaplanmış ve tanımlanmıştır.

Li, Wang ve Liu tarafından yapılan çalışmada VLF dalgalarının yerküre-iyonküre dalga kılavuzu içinde yayılımı incelenmiştir [22]. Yeryüzü elektriksel özelliklerinin, ionküre elektriksel özelliklerinin ve dalga karakteristik parametrelerinin sualtı platformlarının iletişimi üzerindeki etkisi belirtilmiştir. Bu kurallar incelenerek ve VLF bandının iyi biçimde öngürülebilirliği kullanılarak, yayılma sürecindeki zayıflama ve bozulmalar tahmin edilebilmektedir. Böylece haberleşme için en iyi koşullar belirlenebileceği ve sualtı platformu için VLF haberleşmesinin güvenilirliğinin artırılabilceği öngörülmüştür.

#### **1.4. Literatürdeki VLF alıcı sistemleri**

VLF sinyallerinin alımı için farklı öncelikler ve fiziksel biçimlerde çeşitlilik gösteren sistemler tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu uygulamaların literatürdeki örnekleri bu kısımda incelenerek bu tez kapsamında ortaya çıkarılan çalışmanın hangi açılardan avantaj ve iyileştirmelere sahip olduğu konusunda yapılabilecek karşılaştırmalara zemin oluşturacaktır.

VLF alıcıları konusunda Burhans tarafından yapılan çalışmada bir RF ön kat tasarımı ortaya koyulmuştur [23]. Tasarımın odağında 10,2 kHz frekansındaki omega kanalı olup, 10,2-20 kHz aralığındaki herhangi bir VLF frekansına uyumlu çalışabilir şekilde tasarlanmıştır. 9V pil gibi taşınabilir bir kaynaktan beslenebilen ön kat sistemi, üretildiği dönemin imkanlarıyla paralel olarak tek transistörlü önyükselteç ve sonrasında hem geçiş bant kazancı getiren hem de yüksek ve alçak geçiren süzgeç görevi gören işlevsel yükselteçler ile tasarlanmıştır.

Ana çıktı olarak ayarlanan sabit frekansın zarfını veren bu sistem devre üzerindeki farklı gösterge noktalarına bağlı çeşitli renklere sahip ledlerle de kullanıcıya alıcı kazancını ayarlarken kullanabileceği ek bilgiler sağlamaktadır. Geçiş bandındaki kazanç değeri, çalışılan frekans ile ters orantılı olarak doğrusala yakın bir şekilde düşmektedir. Bu çalışmanın veri analizi için hedeflediği ortam uygun türde bir sayısal mantık devresi, mikroişlemci ya da analog sinyal işleyicisidir.

Kusnandar ve ark. tarafından yapılan çalışmada yüksek hassasiyete sahip VLF alıcı yükselticisi tasarlanmıştır [24]. Alıcıda hedeflenen frekans aralığı 10-30 kHz olarak belirlenmiştir. Yekpare bir işlevsel yükselteç entegrasi kullanılarak yapılan tasarımda kazanç ve hassasiyet parametreleri ağırlıklı olarak göz önünde tutulmuştur. Bazı uygulamalarda çıkış yükünün dengelenmesi için kullanılan transformatör yerine entegre biçiminde bir hat sürücüsü kullanılmıştır. Antenden alınan sinyal yalnızca bir RC alçak geçiren süzgeçten geçirildikten sonra doğrudan yükseltme işlemine tabi tutulmuş, hat sürücüsü vasıtası ile analog sinyalin işlenebilir hali elde edilmiştir. Yapılan tasarımda veri alma yöntemi olarak bir kişisel bilgisayarın ses kartına bağlanabilirlik ön planda tutulup, devre buna uygun bağlantı soketi ile donatılmıştır.

Wah ve ark. ani iyonküre bozukluklarının yakalanması için bir VLF alıcı sistemi tasarlamıştır [25]. UKM-SuperSID adını verdikleri alıcı sistemi vasıtası ile ekvator bölgesinde gerçekleşen ani iyonküre bozukluklarının gözlemlenmesini hedeflemişlerdir. 19.8 kHz frekansına ayarlanmış olan alıcı sistemi North West Cape (NWC) istasyonundan yapılan yayının sinyallerini yakalayabilmektedir. Alınan veriler üzerinden güneş alevi olayları takip edilmiş, ani iyonküre bozuklukları esnasında sinyal şiddetindeki anlık yükselmeler incelenmiştir.

Suryadi, Abdullah ve Husain tarafından yapılan çalışmada iki tür VLF alıcısı tasarımı ortaya koyulmuştur [26]. Bunlardan birisi belirli bir frekansa ayarlanarak o frekanstaki sinyalin genlik bilgisini sürekli olarak alan ve bu genlik bilgisinden yola çıkarak ani iyonküre bozukluklarını sezmeyi hedeflemektedir. Diğer alıcı sistemi 10 kHz ve daha alçak frekanslı sinyallerin tamamını alarak atmosferde meydana gelen ve birden çok frekansa etki eden sferics gibi olayları incelemek amacıyla yapılmıştır. Sistemlerden ilki bir hazır veri alım seti ile kullanılırken, diğeri bir kişisel bilgisayarın ses kartı girişinden yararlanarak kullanılmıştır. Hazırlanan bilgisayar yazılımı vasıtasıyla şehir şebekesinden yayılan besleme gürültüsü ve sferics sinyalleri gözlenmiştir.

Peterson ve ark. tarafından yapılan çalışmada Omega yöngüdü vericisinin sinyallerinin alınması amacı ile mikrodenetleyici tabanlı bir alıcı sistemi taşınabilir bir kişisel bilgisayara uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır [27]. Bu çalışmada alıcı anteni ve yükselteç modülü ile birlikte bir frekans referans sistemi kullanılmıştır. Frekans referansını veren sistem üzerinden 10.2 kHz, 11.33 kHz ve 13.6 kHz frekansları elde edilerek alınan RF sinyali bu frekanslardaki sinüs ve kosinüs

sinyalleri ile çarpılıp tabanbant verisi elde edilmiştir. Tabanbant sinyalinden genlik ve faz bilgileri elde edilmiştir.

Soon, Gan ve Abdullah tarafından ortaya konulan çalışma, bu tez kapsamında uygulanan tasarımla bazı ortak özelliklere sahip olup hedeflenen sistemin VLF verilerini almak için bir kişisel bilgisayara bağımlı olması durumu ortadan kaldırılmıştır [28]. Tasarlanan sistem Fransa ve Avustralya kaynaklı 16.8 kHz ve 19.8 kHz frekanslarındaki sinyalleri yakalayabilecek şekilde uygulanmıştır. Bir çok sistemde ortak bulunması gereken anten, önyükselteç, analog-sayısal dönüştürücü ve sayısal alıcı devresi şeklinde bileşenlerden oluşan bu sistem kişisel bilgisayar tabanlı bir çok sistemde olduğu gibi mikrobilgisayarın desteklediği harici bir ses kartından faydalanmıştır. Bu tercih ses sinyallerinin Nyquist gereksinimlerinden dolayı ses kartının en fazla 44.1 kHz frekansı ile örnekleme yapmasıyla sonuçlanmıştır. Bu frekansın örtüşme olmadan örnekeleyebileceği en büyük frekans olan 22.05 kHz, sistem tarafından yakalanan 19.8 kHz frekansına oldukça yakındır.

Cohen, Inan ve Paschal tarafından yapılan çalışmada ELF ve VLF bantlarındaki sinyallerin iki kanal üzerinden senkron bir şekilde alınabileceği bir alıcı yapısı oluşturulmuştur [29]. Asıl hedeflenen frekans aralığı bahsedilen bantların birleşimi olarak 300 Hz ile 30 kHz arası olup, anten ve önyükselteç devrelerinden geçen VLF sinyallerinin 100 kHz frekansta örneklenmesi ile örtüşme olmadan en yüksek 50 kHz frekanstaki sinyaller alınabilmektedir. Kullanılan hat transformatörü bu sistem içinde bir yüksek geçiren süzgeç gibi davranarak alçak frekanslar için bir kesim limiti koymaktadır. Şehir şebekesinin gürültüsünden uzak bölgelerde bu alt limit 80 Hz, 350 Hz ya da 800 Hz şeklinde ayarlanabilirken 7 kHz lik yüksek geçiren süzgeç seçeneği alçak frekanslarda daha yoğun gürültü olan bölgelerde devreye sokulabilmektedir.

Analog hattan gelen sinyallerin alımı bir dahili bilgisayar veri edinim kartı vasıtasıyla yapılmıştır. Öncesinde 50 kHz kesim frekansına sahip örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeçten geçirilen sinyal 100 kHz örnekleme hızında iki farklı antenden alınarak iki kanal şeklinde örneklenmektedir. Alınan veriler sonucunda insan kaynaklı çeşitli deniz kuvvetleri kaynaklı sinyaller ve yöngüdümlü sinyalleri gözlenmiştir. Bunlarla birlikte şimşek olayları kaynaklı meydana gelen whistler sinyalleri de gözlemlenmiştir.

## 2. VLF-LF BANTLARI İÇİN ALICI SİSTEM TASARIMI

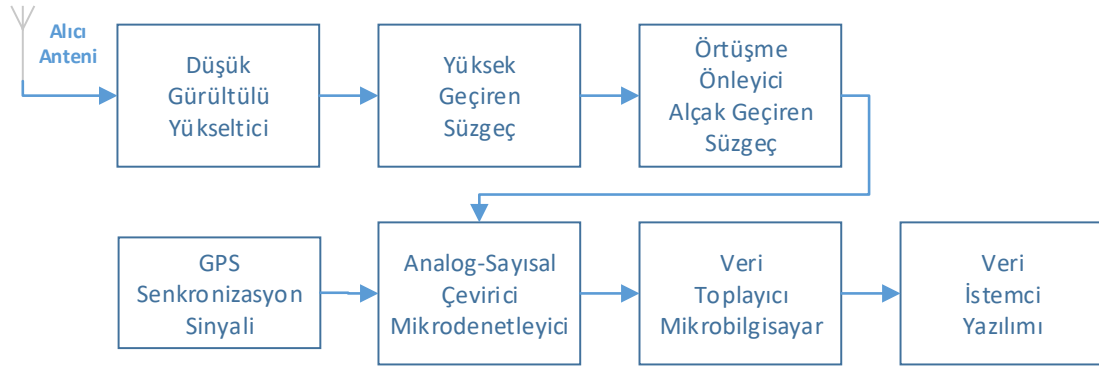
### 2.1. Sistem tasarımı ve bileşenler

Bu tez kapsamında tasarımı ve uygulaması yapılan alıcı sisteminin bilgisayar tabanlı geleneksel sinyal/veri alma sistemlerinden farklı olarak taşınabilir olması, düşük güç tüketimi, yüksek bantgenişliği ve yüksek örnekleme hızına sahip olması hedeflenmiştir. Aynı zamanda gerçekleştirilen sistem bilgisayar sisteminden bağımsız şekilde kullanılıp, ağ ya da internet bağlantısı bulunan herhangi bir cihaz ile sinyal alımına imkan vermektedir.

Alıcı sistemin analog ön katmanı, radyo frekans dalgalarının alımını sağlayan bir anten, sinyallerin daha yüksek dinamik aralıkta sayısal dönüşürülebilmesi için düşük gürültülü bir yükselteç, şehir şebekesi gibi çok alçak frekansa sahip sinyaller ve bu sinyallerin harmoniklerini bastıran bir yüksek geçiren süzgeç, analog sinyallerin sayısal sinyallere dönüşümü esnasında örtüşme olmaması için örtüşme önleyici bir alçak geçiren süzgeçten oluşmaktadır.

Yükseltme ve süzgeçten geçirme işleminden sonra uygun genlik aralığına getirilmiş sinyaller bir mikrodenetleyici ve mikrodenetleyici dahilindeki bir analog-sayısal çevirici ile örneklenerek sayısal değerlere dönüşürülmektedir. Mikrodenetleyici üzerinde tampon bellekte tutulan bir dizi sinyal değeri, istemcilerin alınan sinyale ulaşmasını sağlayan bir mikrobilgisayar kartına aktarılmaktadır.

Kullanıcı herhangi bir işletim sistemi üzerinde çalışabilen evrensel istemci yazılımı ile bu mikrobilgisayara ağ alt yapısı üzerinden bağlanabilmekte ve canlı olarak sinyalleri alıp kaydedebilmektedir. İstemci yazılımı üzerinde alınan sinyalin çeşitli yönlerden analizini yapmayı mümkün kılan özellikler mevcuttur.



Şekil 11. VLF alıcı sisteminin blok şeması

## 2.2. Anten tasarımı

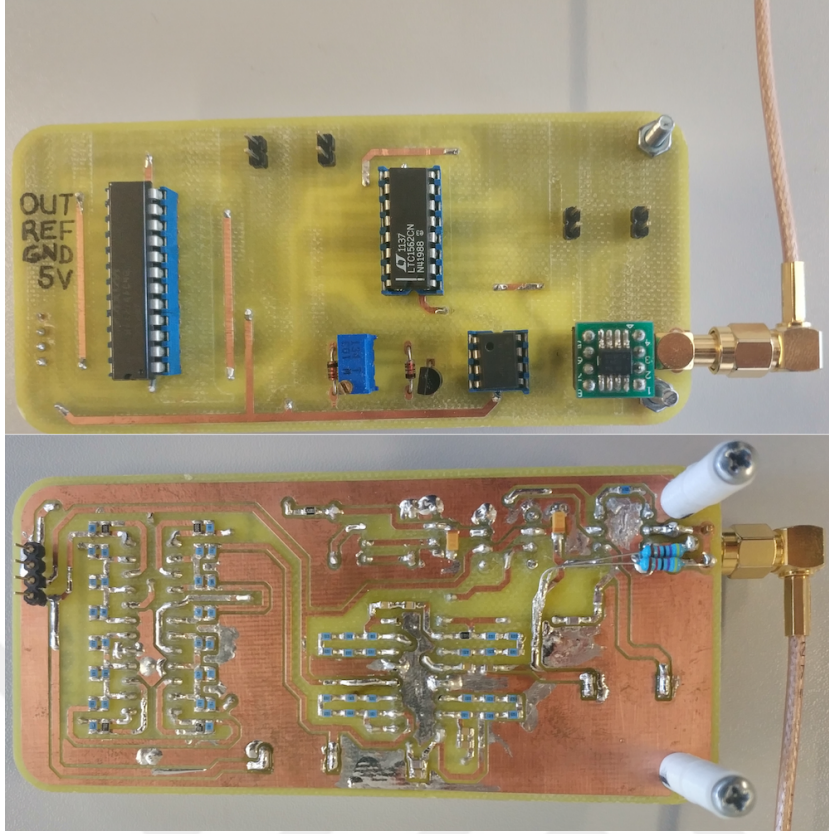
Alçak frekanslı radyo frekans dalgalarının alınarak düşük genlikli elektriksel sinyallere dönüştürülmesi için çok sarımlı bir döngü anten kullanılmıştır. Bu antenin döngüsel şekli kare biçiminde olup her bir kenarı 60 cm uzunluğundadır. 0.4 mm çapına sahip 26 AWG standardındaki bakır kablolardan sarılan 40 tur sonucunda antenin rezistif direnci teorik olarak 12.8 ohm olarak hesaplanmış, fiziksel anten üzerinde 14.3 ohm olarak ölçülmüştür. Anten sarımlarının toplam endüktans değeri RLC ölçüm devresi vasıtasıyla 5.1 mH bulunmuştur, bu değer teorik karşılığı 5 mH'dir. Tahta bir iskelet etrafına sarılan anten, uçlarına eklenen SMA konektör ile RF önkat devresine bağlanmaktadır (bkz. Şekil 12).



Şekil 12. VLF alıcı anteni

### 2.3. RF Önkat tasarımı

RF önkatını barındıran modül tek başına bir devre kartı olarak baskı devre ile üretilmiştir. Her bir önkat kartı bir VLF kanalı için gereken yükseltici, yüksek geçiren süzgeç, alçak geçiren süzgeç ve bu sistemlerin 0-5 Volt aralığında çalışırken toprak referansı olarak kullandığı 2.5 Volt referans gerilim üreticisi barındırmaktadır.



Şekil 13. RF önkat devresi

### 2.3.1. Yükseltici

Radyo frekans dalgalarının alımında dalga boyuna kıyasla çok küçük boyutlu çok turlu bir anten kullanıldığından, gelen dalganın anten çıkışında oluşturduğu elektriksel sinyalin gerilimi çok düşüktür. Yükselteç seçiminde göz önünde bulundurulacak unsurlar düşük ofset gerilimine sahip olması, düşük ön akım değerine sahip olması, yüksek ortak mod bastırma oranına sahip olmasıdır.

Alıcı girişindeki düşük genliğe sahip sinyalde bilgi kaybı ve ek bir gürültü olmaması amacı ile INA128 modelli yüksek hassasiyetli, düşük güç tüketimine sahip bir ölçme yükseltici (instrumentation amplifier) kullanılmıştır. Bu yükselteç ile yaklaşık 100 kat yükseltme işlemi uygulanmaktadır. Yükseltme katsayısının tam değeri entegrenin veri sayfasında verilen kazanç formülünden bulunmaktadır ve mevcut sistem için 47 ohm değerine sahip kazanç direnci ile birlikte 107,4'tür. Kullanılan analog-sayısal çeviricinin genlik limitlerine yakın seviyelerde çıkış elde etmek amacı ile alınan sinyallerin ampirik olarak incelenmesi sonucunda bu değere karar verilmiştir.

Kullanılan antenin empedans değeri ohmlar seviyesindedir ve sonsuz giriş empedansına sahip yükselteç girişinde oluşacak giriş önakımının akacağı bir yola ihtiyaç vardır, bunun için yükseltecin farksal girişleri devre üzerinde pozitif ve negatif beslemelere göreceli olarak toprak noktası olarak belirlenen gerilim düğümüne 47 kohm değerine sahip dirençler ile bağlanmıştır. Bu bağlantıların eksik olması halinde topraksız gerilim değeri ortak mod limitlerini aşarak giriş yükselteçlerini doyum noktasına getirmektedir.

### **2.3.2. Yüksek geçiren süzgeç**

Yükseltmiş olan sinyalin, alıcı sistemi şebekeden beslenirken besleyici bağlantıları üzerinden ve antenden, pille çalışma sırasında da yalnızca anten üzerinden sisteme dahil olabilecek 50 Hz frekanslı şehir şebekesi sinyalleri ve bu sinyalin harmoniklerinden arındırılması için 5 kHz kesim frekansına sahip bir yüksek geçiren süzgeçten geçirilmesi uygun görülmüştür.

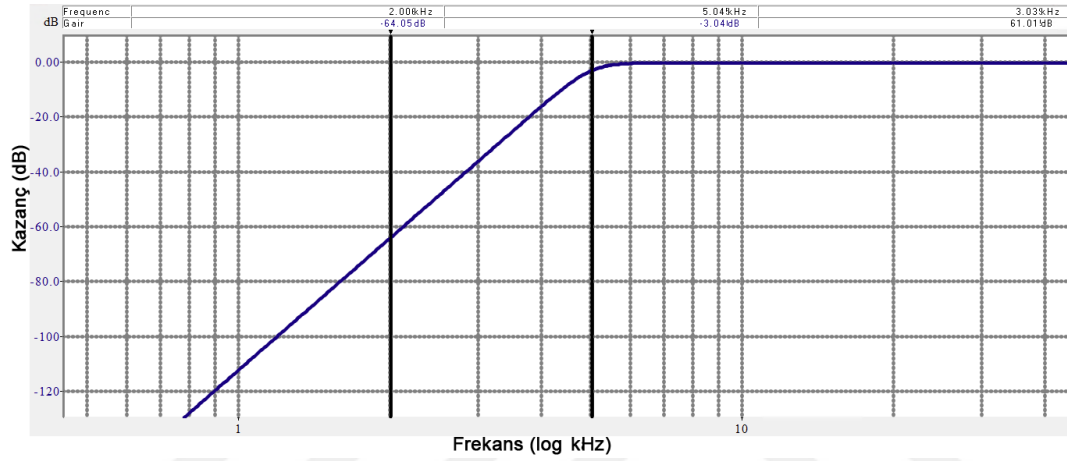
Sinyalin bulunduğu mevcut katmanda henüz örtüşme önleyici süzgeç bulunmadığından sayısal bir süzgeç bloğu yerine örnekleme hızı sınırları bulunmayan bir analog süzgeç kullanımı uygun görülmüştür. Bu amaçla Linear Technologies tarafından üretilen LTC1562 modelli düşük gürültü ve düşük bozulmaya sahip RC süzgeç bloklarından oluşan sürekli zaman süzgeç entegresi kullanılmıştır. Yüksek geçiren süzgecin tasarımında entegre içinde bulunan ikinci derece süzgeçlerden dört adet süzgeç zincir şeklinde arka arkaya bağlanarak sekizinci derece bir süzgeç yapısı elde edilmiştir.

Geçiş bandındaki tepkinin sabit kazançlı düz bir genlik tepkisi olması için süzgeçlerin tasarım parametreleri süzgeç türü Butterworth olacak şekilde hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler kullanılarak entegreye ait veri sayfasında açıklanan formüller yardımı ile harici olarak bağlanması gereken direnç ve kapasitör değerleri belirlenmiştir.

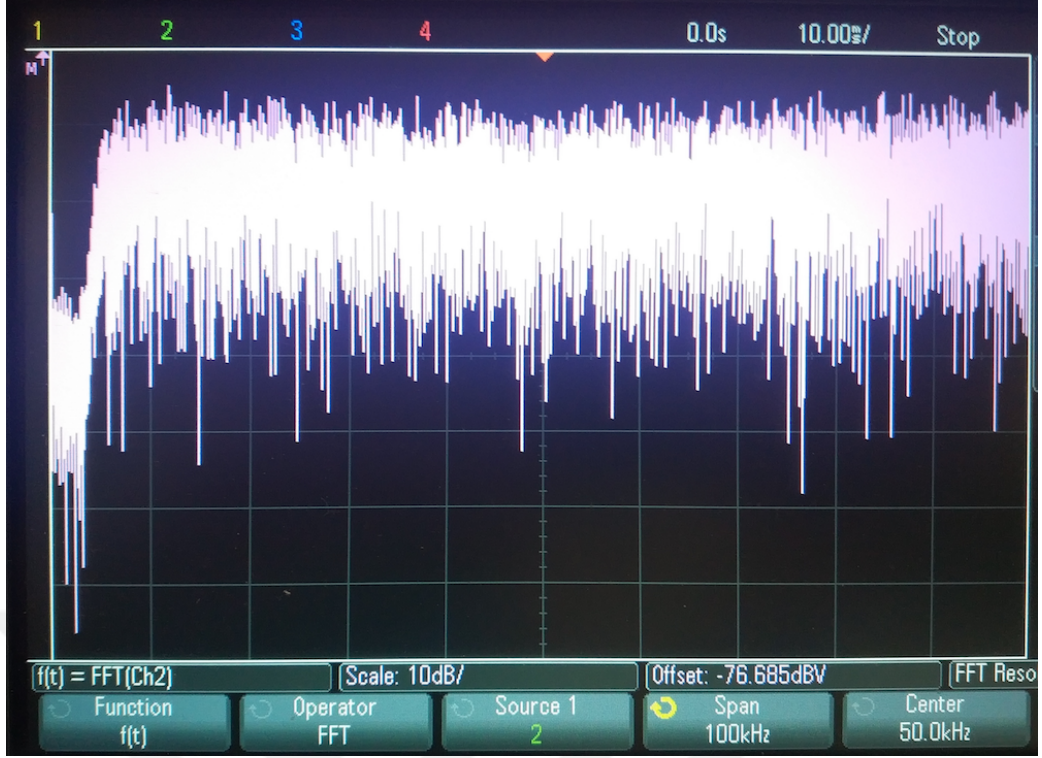
Hesaplanan ideal çalışma düzenine erişebilmek, standart dışı direnç ve kapasitör değerlerinin sağlanabilmesi ile mümkündür. Bu amaçla seri ve paralel düzende ara değerlere ulaşabilen direnç ve kapasitör değerleri kısa bir kod betiği ile hesaplanarak devre tasarımında kullanılmıştır. Böylece 5 kHz frekansında giriş sinyalini 3 dB bastıran sekizinci dereceden yüksek geçiren süzgecin 2 kHz

frekansındaki bastırma değeri 64 dB'ye ulaşmaktadır (bkz. Şekil 14). Bu frekans 50 Hz şehir şebekesi sinyalin kırkinci harmoniğine denk gelmektedir.

Bu tasarımın hayata geçirilen hali gerekli aralıkta sinyal üreticiden sinüs sinyali ile beslenerek test edilmiş ve kesim noktalarının doğru frekans ve bastırma değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Süzgecin bütün frekanslar için tepkisinin aynı zamanda ölçümü için sinyal üreticiden geniş bant gauss gürültü sinyali üretilerek sistemin çıkışı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda kesim frekansı altındaki sinyallerin bastırıldığı devre üzerinden de onaylanmıştır (bkz. Şekil 15).



Şekil 14. Yüksek geçiren süzgeç tasarımının frekans genlik tepkisi



Şekil 15. Yüksek geçiren süzgeç devresinin genişbant gürültü için frekans genlik tepkisi

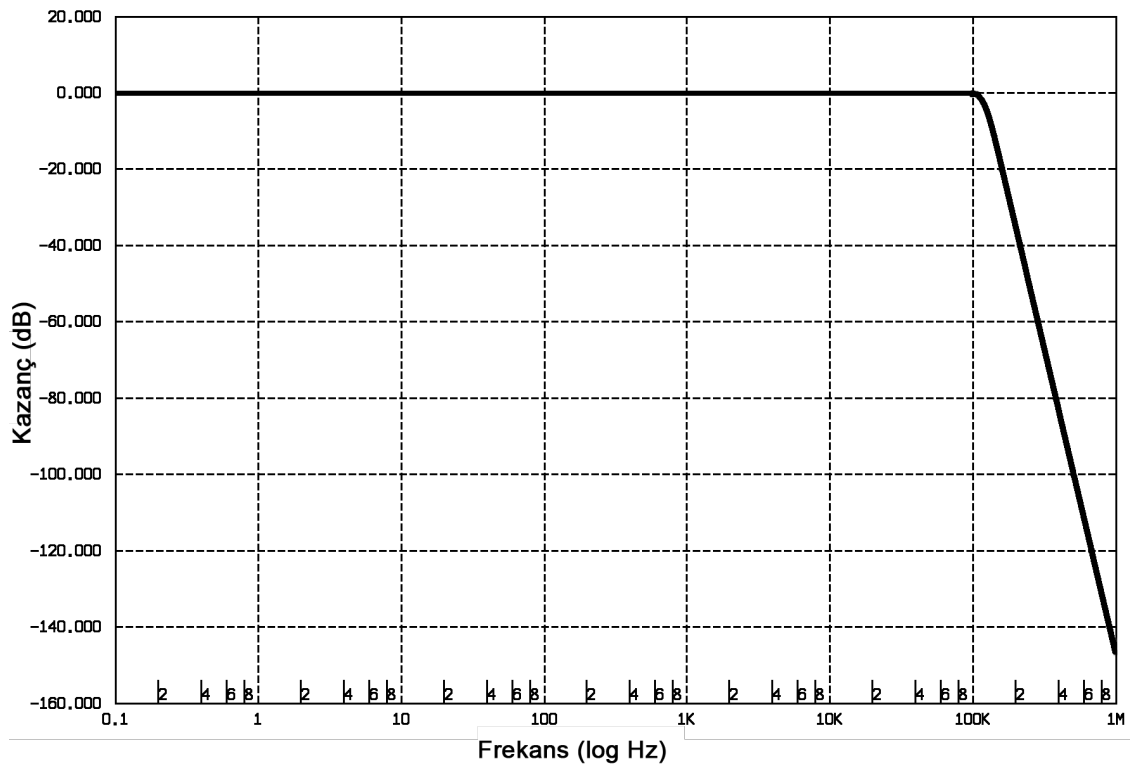
### 2.3.3. Örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç

Alınan sinyaller bir sonraki işlem bloğunda sayısal verilere dönüştürülmek üzere örneklenecektir, bu işlem sonrasında Nyquist örnekleme teoremine göre örnekleme frekansının yarısından daha yüksek frekansların örtüşmeye sebep olup sinyale hatalı veriler eklemesini önlemek amacıyla örtüşme önleyici bir süzgeç kullanımı uygun görülmüştür. Bu süzgeç kesim frekansı 120 kHz olan bir alçak geçiren süzgeçtir.

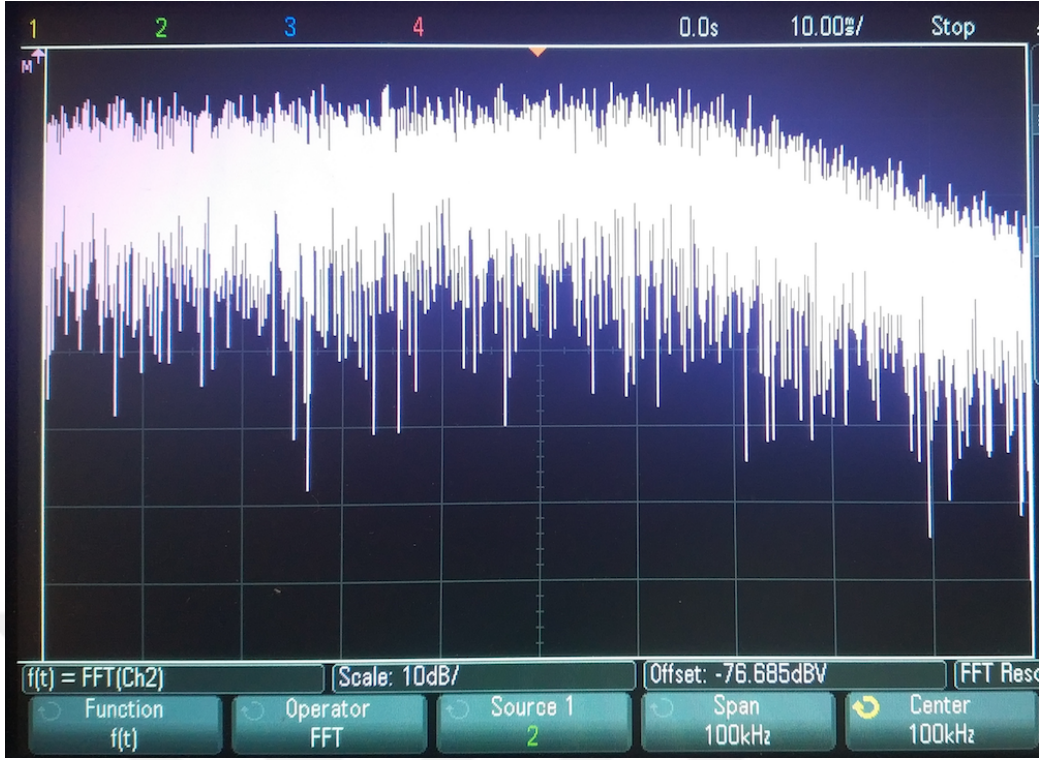
Örtüşme önleyici süzgecin de yüksek geçiren süzgeç katmanında olduğu gibi örnekleme öncesinde kullanılması sebebi ile analog bir süzgeç olmasına karar verilmiştir. Bu amaçla Maxim Integrated tarafından üretilen MAX274 sürekli zaman aktif süzgeç kullanılmıştır. Bu süzgeç ikinci derece süzgeç katmanlarından 4 adet barındırmaktadır. Bu katmanların arka arkaya bağlanması sonucunda sekizinci derece bir alçak geçiren süzgeç elde edilmektedir. Geçiş bandında yine sabit değerli bir genlik tepkisi alabilmek adına Butterworth türünde tasarım yapılmıştır. Geçiş bandında 0 dB kazanç görülecek şekilde her bir süzgeç katmanının frekans

tepkisindeki derece, kutup ve kesim frekansı değerleri hesaplanarak süzgeç yapısı oluşturulmuştur (bkz. Şekil 16). Elde edilen değerler üzerinden her bir süzgeç katmanına eklenmesi gereken harici direnç değerleri entegreye ait veri sayfasındaki formüller vasıtası ile bulunmuştur. Bu değerlerin birebir karşılanması adına yüksek geçiren süzgeç yapısında olduğu gibi kod betiği yardımı ile ara değerleri veren seri ve paralel direnç düzenleri bulunmuştur.

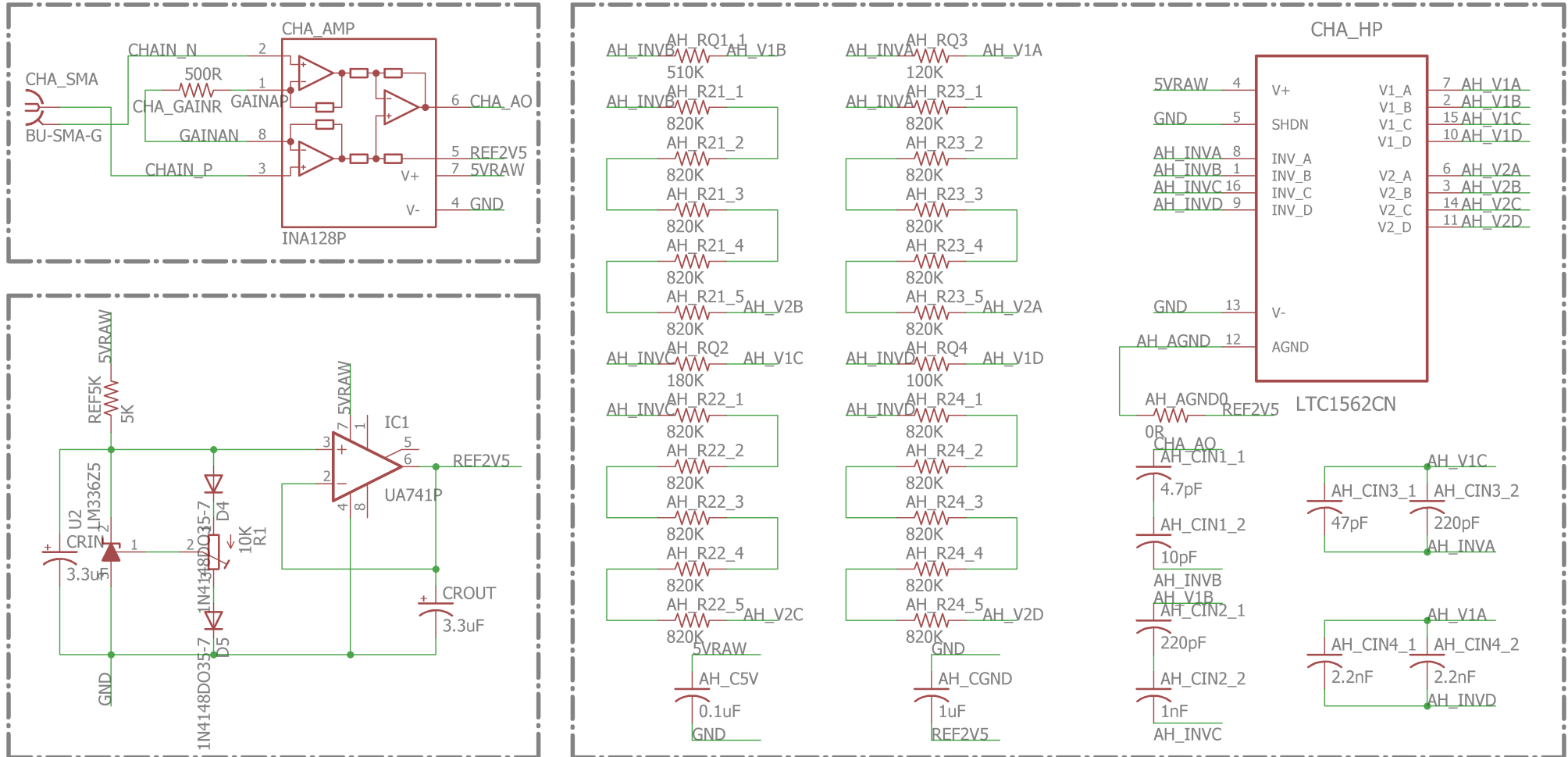
Yüksek geçiren süzgeçte olduğu gibi yapılan tasarımın devresi çalışılan frekanslarla ayrıca test edilmiş ve bütün frekanslar için geniş bant gürültü ile tepkisi test edilmiştir (bkz. Şekil 17).



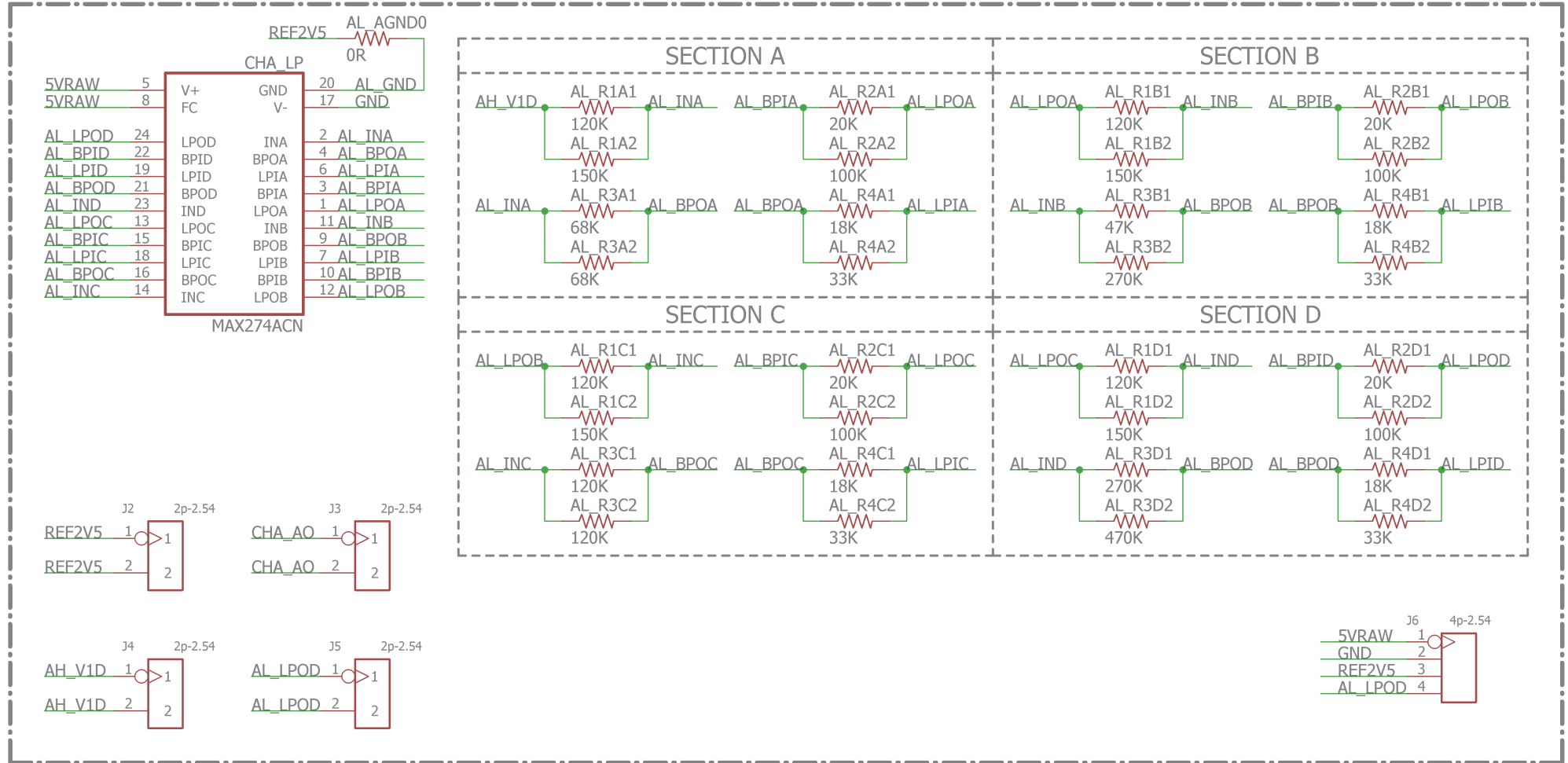
Şekil 16. Örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç tasarımının frekans genlik tepkisi



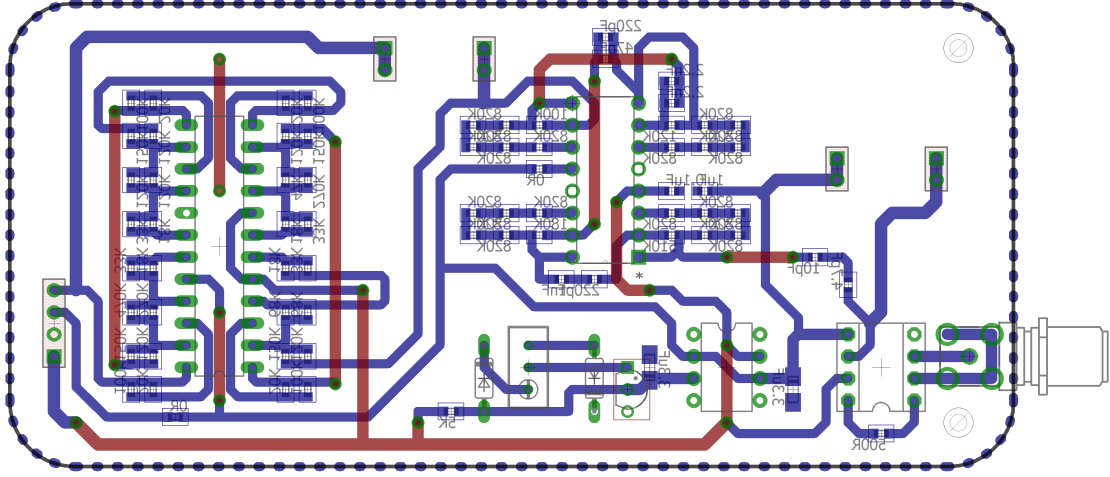
Şekil 17. Örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç devresinin genişbant gürültü için frekans genlik tepkisi



Şekil 18. RF önkat devresinin yükselteç, referans gerilim üretici ve yüksek geçiren süzgeç bölümleri



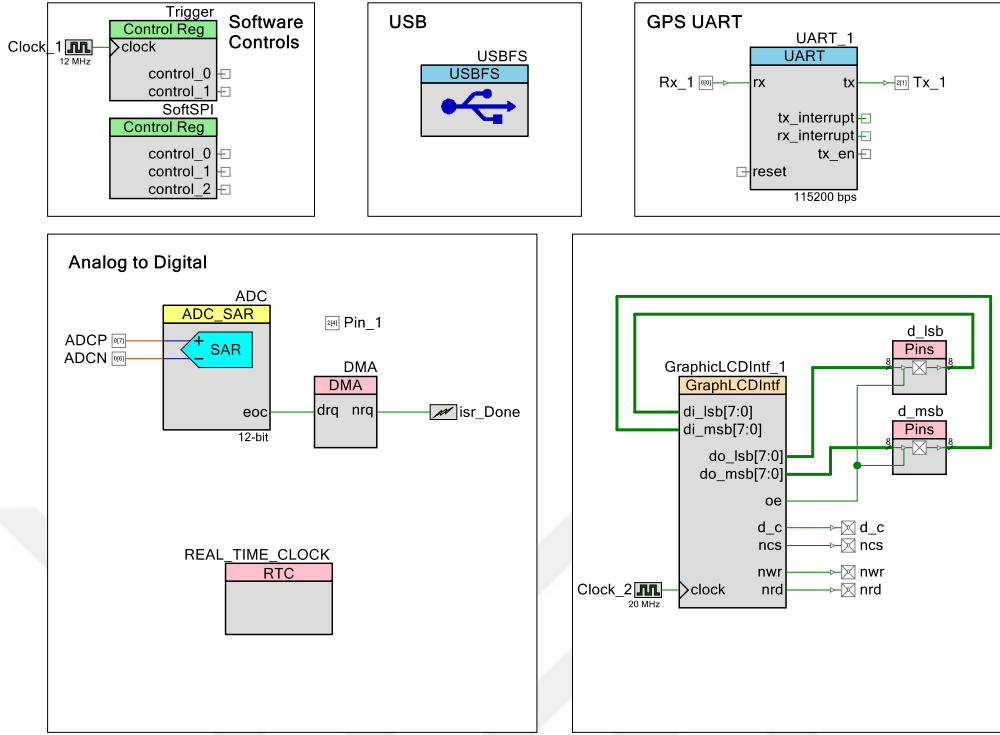
Şekil 19. RF önkat devresinin örtüşme önleyici alçak geçiren süzgeç ve dış bağlantı bölümleri



Şekil 20. RF önkat devresinin üretime hazır devre düzeni

#### 2.4. Analog-Sayısal dönüşüm birimi

Yükseltme ve süzme işlemleri sonrası elde edilen gerilim sinyali bir analog-sayısal dönüştürücü yardımı ile sayısal veriye dönüştürülmektedir. Bu amaçla Cypress firması tarafından üretilen PSoC modelli mikrodeneyleyici ve içinde bulunan analog-sayısal dönüştürücü kullanılmıştır (bkz. Şekil 22). İçerdiği donanım modülleri dinamik olarak yeniden şekillendirilebilen PSoC mikrodeneyleyicisi, içinde hem analog hem de sayısal altsistemler barındırmaktadır. Bu sistemler öncelikle PSoC Creator adı verilen arayüz üzerinden blok şema olarak düzenlenip donanım olarak sentezleme işlemi yapılmaktadır. Bu tez kapsamında kullanılan donanımsal tasarım Şekil 21 içinde gösterilmiştir. Sonrasında ana işlemci üzerinde çalışacak ve diğer çevre birimlerini ayarlayıp veri akışını yapacak olan kodlar C diliyle yazılmış, gerek performans iyileştirmeleri gerekse donanıma düşük seviye erişim için yer yer Assembly kodları ile düzenlemeler yapılmıştır.

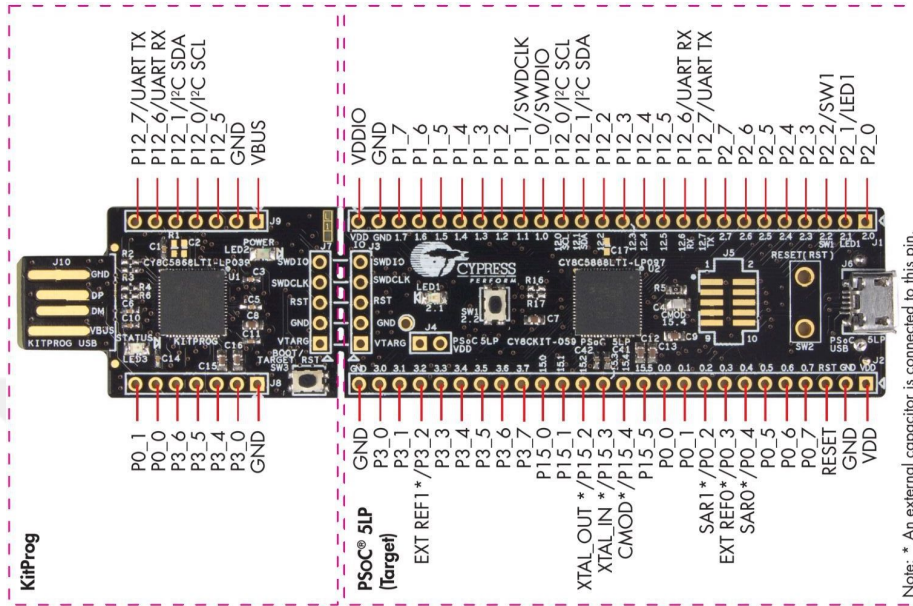


Şekil 21. PSoC Creator üzerinde yapılmış donanımsal tasarım

Alınan verilerin zaman damgasının keskin bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla NEO-6M modeline sahip bir GPS alıcısı kullanılarak analog-sayısal dönüşümü yapan mikroişlemci modülünün dönüştürücü saat sinyali GPS sisteminden gelen ve her saniyede bir atma veren PPS sinyaliyle senkronlanmıştır. Bu senkronizasyon işlemi sonucunda UART seri protokol bağlantısı üzerinden içinde bulunan zaman dilimi bilgisi de GPS verileri üzerinden alınarak USB bağlantısı ile gönderilen verilere iliştilmiştir. Mikrobilgisayar sistemi üzerinde bulunan sunucu yazılımı bu verileri alırken parçalarına ayırarak gerekli başlık bilgilerini düzenlemektedir.

Tasarıma dahil edilen analog altsistemler sinyal yolunun sinyale en az etki edeceği biçimde düzenlenmiştir. Mikrodenetleyicinin veri sayfasında da belirtildiği şekilde atanan modül ve pinler yüksek saat hızına sahip sayısal altsistemlerden uzak tutulmuş ve sinyalin geçtiği yolların direnci özdeş ve mümkün olduğunda küçük olacak şekilde seçilmiştir [30]. Kullanılan bu mikrodenetleyicinin 12 bit çözünürlüğe sahip analog-sayısal dönüştürücü modülü 250000 örnek/s hızda kullanılarak örnekleme yapılmıştır. Mikrodenetleyici seçimindeki diğer bir etken

günümüz için çok yaygın ve güncel şekilde kullanılan USB bağlantı desteğidir. Mikrodenetleyicinin bulunduğu devre kartı kişisel bilgisayar ve tablet bilgisayar gibi USB bağlantısı destekleyen herhangi bir sayısal donanıma bağlanarak veri aktarımı yapılabilmektedir.



Şekil 22. Analog-sayısal dönüştürücü ve USB veri cihazı olarak kullanılan PSoC modülü

PSoC denetleyicisi USB haberleşmesinin saat hızı olan 48 MHz frekansına kıyaslanabilir şekilde yakın olarak 72 MHz hızında çalıştığı için işlemci çekirdeğinin veri alış verişini tek başına yazılımsal operasyonlar ile gerçek zamanlı olarak sürdürmesi mümkün değildir. Bununla birlikte yazılımın içindeki farklı uzunluktaki dallanmalar tekrar eden operasyonların farklı sürelerde tamamlanmasına sebep olmaktadır. Analog-sayısal dönüştürücüden değişken aralıklarla veri alımı yapmak doğrusal olmayan ve geri dönüştürülemez şekilde hatalı örneklemeyle sonuçlanmaktadır.

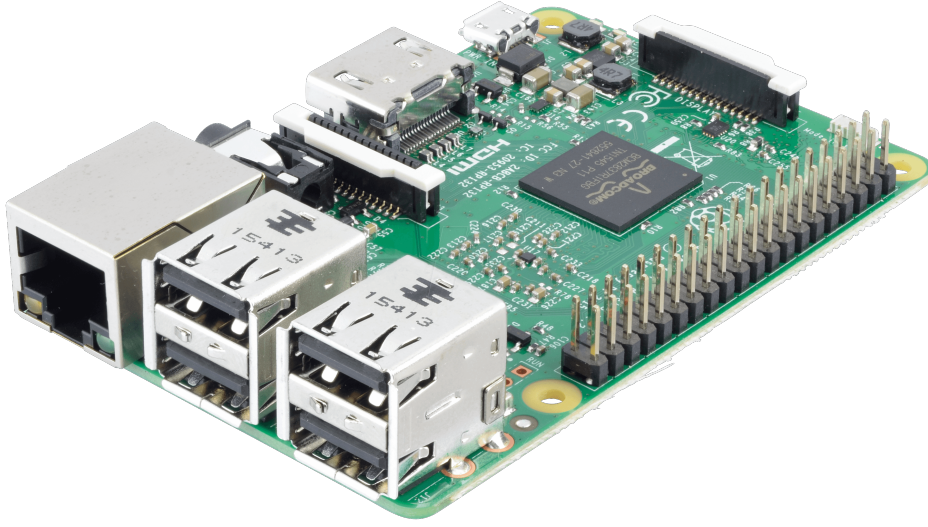
Bahsedilen problemlerin donanım üzerinde çözümü için hem analog-sayısal dönüşüm ile veri alımında, hem de USB bağlantısı üzerinden sayısal veri gönderiminde doğrudan bellek erişimi (Direct memory access-DMA) denen donanım modüllerine başvurulmuştur. Örnekleme sonrası her biri 12 bit uzunluğunda olan sayısal değerler 2 byte uzunluğunda 16 bitlik adres bölgelerinde tutulmaktadır. Sürekli örnekleme moduna ayarlanan analog-sayısal dönüştürücü modülü her çevrim sonunda DMA modülüne işaret göndermekte, DMA modülü

gelen verileri geçici belleğe ardışık biçimde yerleştirmektedir. Toplamda 256 örnek toplanarak 512 byte uzunluğunda bir tampon bellekte depolanmaktadır. Bir çevrim sonrasında DMA modülü bir sonraki tampon bellek üzerinden işlem yaparken, önceki döngüde elde edilmiş örnekler 64 byte uzunluğunda 8 parça halinde ikinci bir DMA modülü sayesinde USB haberleşmesiyle gönderilmek üzere USB donanımına taşınmaktadır. Ardışık olarak tekrar edilen işlemlerde kullanılan birden çok tampon belleğin indislenmesi donanımsal olarak yapıldığından aktarım operasyonları yazılımın içindeki gecikme veya dallanmalardan etkilenmemektedir.

## **2.5. Mikrobilgisayar birimi**

Veri alımının uzaktan erişim ile yapılabilmesi, hem donanım hem de yazılım bağımsız olarak gerçekleştirilebilmesi için mikrodenetleyici kartı, Raspberry Pi 3B modeline sahip kredi kartı büyüklüğünde bir mikrobilgisayara USB bağlantısı ile bağlanmıştır. Bu mikrobilgisayar alınan verinin ağ üzerinden aktarımından, ihtiyaç halinde aktarılan verilerin sıkıştırılarak boyutunun küçültülmesinden ve istendiği durumlarda ön işlemden geçirilmesinden sorumludur. Sunucu yazılımı ve USB cihaz haberleşmesinden sorumlu yazılım için yüksek performans ve diğer platformlara taşınabilir olduğundan C++ dili uygun görülüp kullanılmıştır.

Linux işletim sistemi çalışan bu karta güvenli ve şifreli SSH bağlantısı yoluyla bağlanıp yönetim işlemleri yapılabilmektedir. Aynı zamanda uzaktan yazılım güncelleme, derleme ve canlı hata ayıklama yapmak da mümkündür. İstenildiği takdirde monitör ve klavye birimleri takılarak yazılım geliştirme ve sinyal işleme gibi işlemler doğrudan mikrobilgisayar üzerinde yapılabilir. Düşük güç tüketimi sayesinde alıcı sisteminin taşınabilir yapısına uygun olarak fiziksel olarak birlikte çalışacak şekilde kurulumu yapılabilir.



Şekil 23. Veri alımı ve aktarımı için sunucu görevi yapan Raspberry Pi 3B kartı

Alınan verilerin aktarımı için Raspberry Pi kartı üzerinde sunucu görevi gören bir yazılım çalışmaktadır. Bu yazılım USB bağlantısı üzerinden PSoC denetleyicisi ile iletişim kurarak sayısallaştırılmış verilerin hatasız bir şekilde alımını gerçekleştirmekte, aynı zamanda kablolu ya da kablosuz ağ bağlantısı üzerinden verileri aktaracak bir TCP sunucusu çalıştırmaktadır.

Çoklu iş parçacıkları kullanılarak yapılan işlemlerin birbirini engellemesi önlenmiştir. Bu yöntemle veri toplayan donanımın hazırlanması, veri alımı, gelen ağ bağlantı isteklerinin yönetimi ve kurulan bağlantılar üzerinden verinin aktarılması farklı iş parçacıkları tarafından eş zamanlı olarak yürütülmektedir. 4 adet işlemci çekirdeğine sahip Raspberry Pi mikrobilgisayarının 2 çekirdeği işletim sisteminin çalışmaya başladığı ilk anda diğer işlemlere kapatılarak yalnızca veri alımı ve gönderiminin sağlanmasına ayrılmıştır. Bu sayede farklı çekirdekler arasında iş yükü dağılımı ve değişiminin önüne geçilerek veri aktarımındaki bekleme ve hata durumlarının önüne geçilmiştir. Veri aktarımından sorumlu çekirdekler için yüksek performans modu seçilmiştir, bu sayede frekans ölçeklemesinden dolayı operasyonlar sekteye uğramamaktadır. Kalan 2 işlemci çekirdeği de işletim sisteminin yönetimine bırakılmış ve sistemin sağlıklı çalışması için ayrılmıştır. Sürekli bir yüke sahip olmayan bu çekirdekler daha düşük saat hızlarına inerek güç tüketimini de azaltmaktadır.

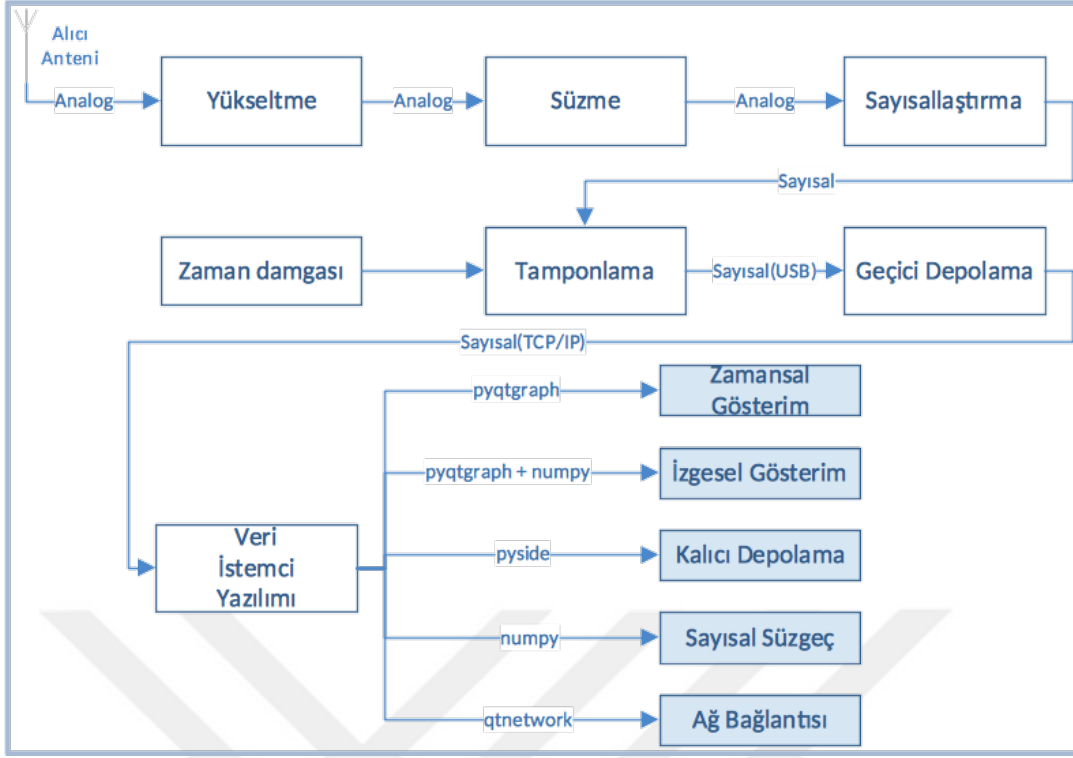
Yüksek çözünürlük veya örnekleme hızı gerekmeyen ölçümlerde bu parametreler sunucu yazılımı üzerinden değiştirilebilir, opsiyonel olarak veri sıkıştırması da etkinleştirilebilir. Tam çözünürlük (12 bit) ve hızda (250 kbps) saniyede 500 kByte

depolama alanı gerektiren veriler için sıkıştırma özelliği aktifleştirilirse %48 daha az veri aktarımı ile aynı miktarda veri kayıpsız alınabilmektedir. Bu amaçla yüksek hızda sıkıştırma ve genişletme yapabilen LZ4 algoritması sunucu yazılımının içine entegre edilmiştir. Bu da 24 saatlik bir zaman dilim gereken 43.2 GByte depolama alanını 22.5 GByte boyutuna indirmektedir. İstenilen çözünürlük ve örnekleme hızı seçilerek bu gereksinimler ihtiyaca göre ölçeklenebilir.

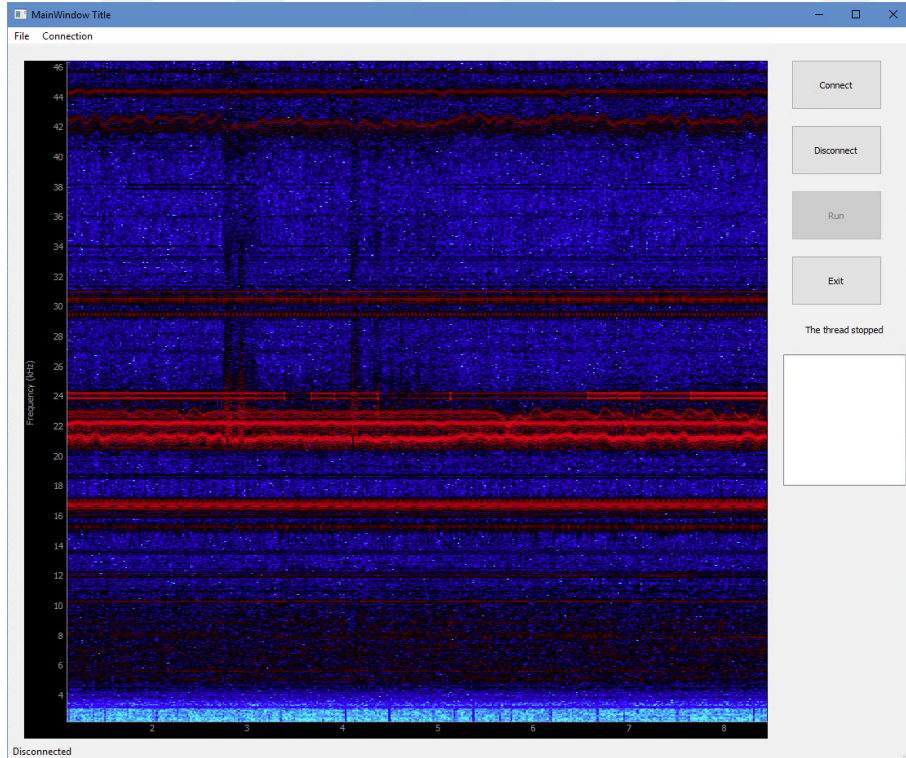
Aynı anda birden çok kullanıcıdan bağlantı kabul edebilen sunucu yazılımı TCP paketler ile veri aktarımı yapmaktadır. Basit bir başlık ve veri yapısına sahip olan verici paketleri TCP türünde ağ bağlantısı destekleyen herhangi bir cihaz ve programlama diliyle alınabilir. İstenildiği takdirde veri alımı için açılacak ağ bağlantısı mikrobilgisayar üzerinde çalışan SSH servisi üzerinden tünellenerek veriler tamamen şifrelenmiş biçimde aktarılabilir. Bu işlem için kullanıcı istemci yazılımında herhangi bir değişim ya da eklemeye ihtiyaç yoktur.

## **2.6. Kullanıcı arayüzü ve istemci yazılımı**

Verilerin kullanıcı dostu bir arayüz ile alınabilmesi ve bu arayüzün farklı türlerdeki işletim sisteminde çalışabilmesi amacıyla python programlama dili kullanılarak bir istemci yazılımı geliştirilmiştir. Grafik arayüzüne sahip bu yazılımla canlı olarak alınan sinyalin zaman ve frekans bölgelerindeki hali incelenebilirken bir yandan da mevcut bilgisayara dosya olarak kaydedilmektedir. Sunucu yazılımına ağ üzerinden bağlanan bu programın bağlanması veya bağlantıyı kesmesi durumlarında sunucu tarafında veri alımı açısından herhangi bir aksaklık olmamaktadır.



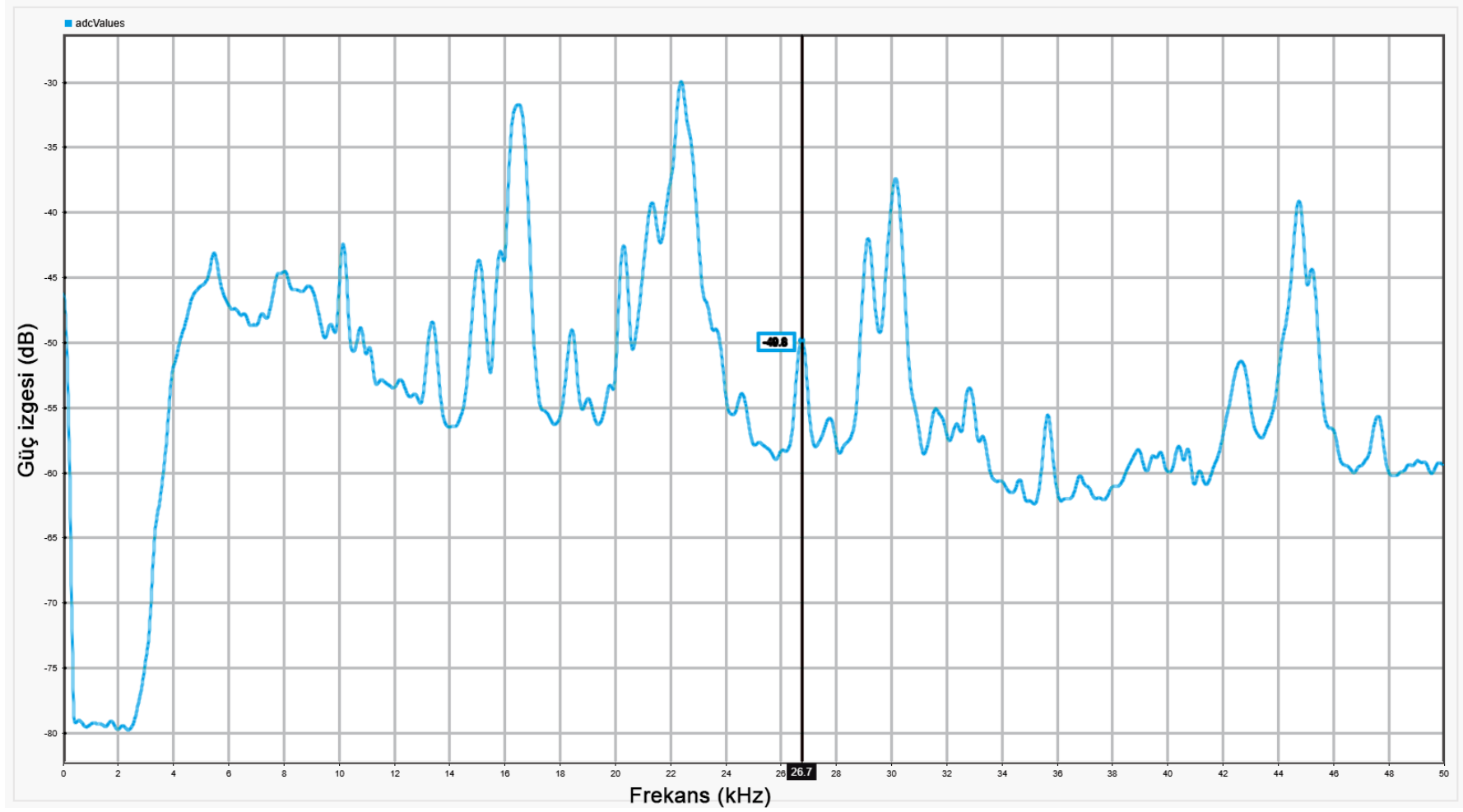
Şekil 24. Sistemin sinyal türleri ve arayüz modülleri ile birlikte akış diyagramı



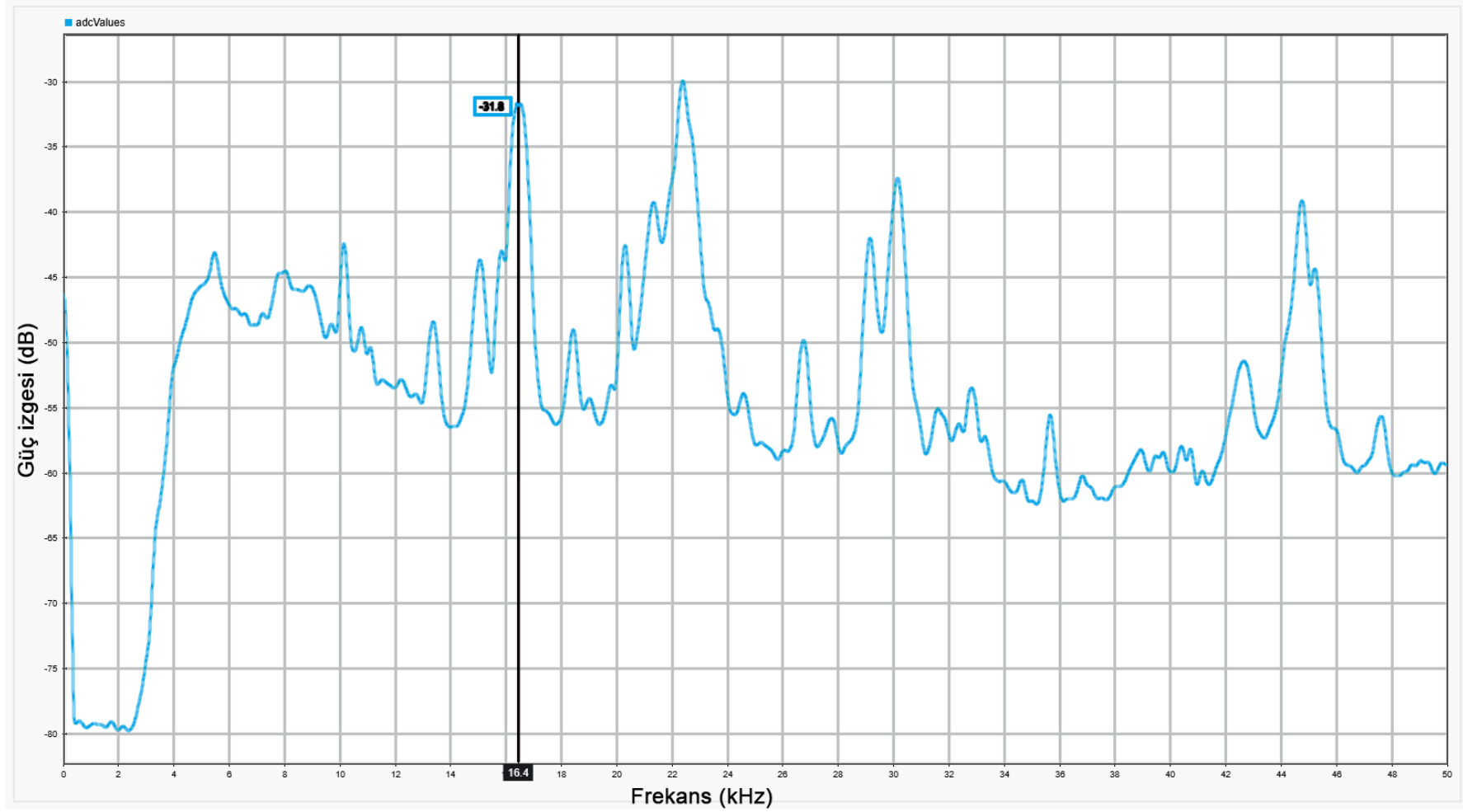
Şekil 25. Alıcı sistemi için tasarlanan grafik arabirim istemci yazılımı

## 2.7. Alıcı sisteminden elde edilen sonuçlar

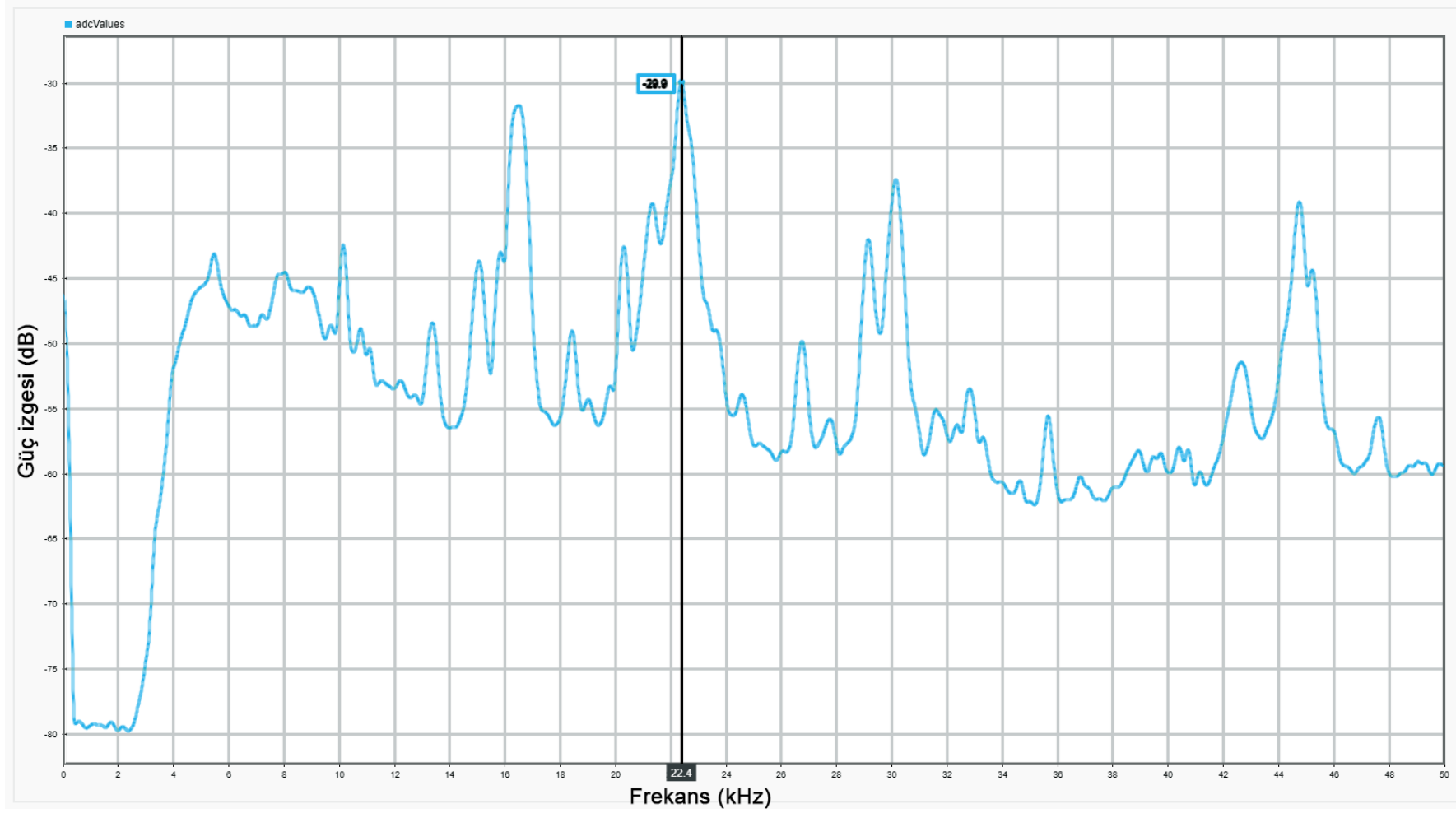
Alınan sinyaller incelendiğinde frekans izgesinde hem insan kaynaklı hem de doğa olayları kaynaklı bir takım etkiler incelenmiştir. Aydın ilinin Didim ilçesine bağlı Denizköy bölgesinde bulunan, aynı zamanda Bafa VLF vericisi olarak da bilinen TBB çağrı işaretine sahip istasyonun sinyalleri 26.7 kHz frekansında gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 26). VLF vericileri kaynaklı görülen başka bir sinyal de Noviken VLF vericisinin sinyalidir. Norveçin Gildeskal bölgesi yakınlarındaki vericinin sinyali 16.4 kHz frekansında gözlenmiştir (bkz. Şekil 27). Gözlenen başka bir sinyal de Fransada Rosnay yakınlarında yayın yapmakta olan HWU vericisinin sinyalleridir. Bu sinyaller 22.4 kHz frekansında güçlü bir şekilde gözlenmiştir (bkz. Şekil 28).



Şekil 26. İzge üzerinde Bafa VLF istasyonundan alınan sinyal



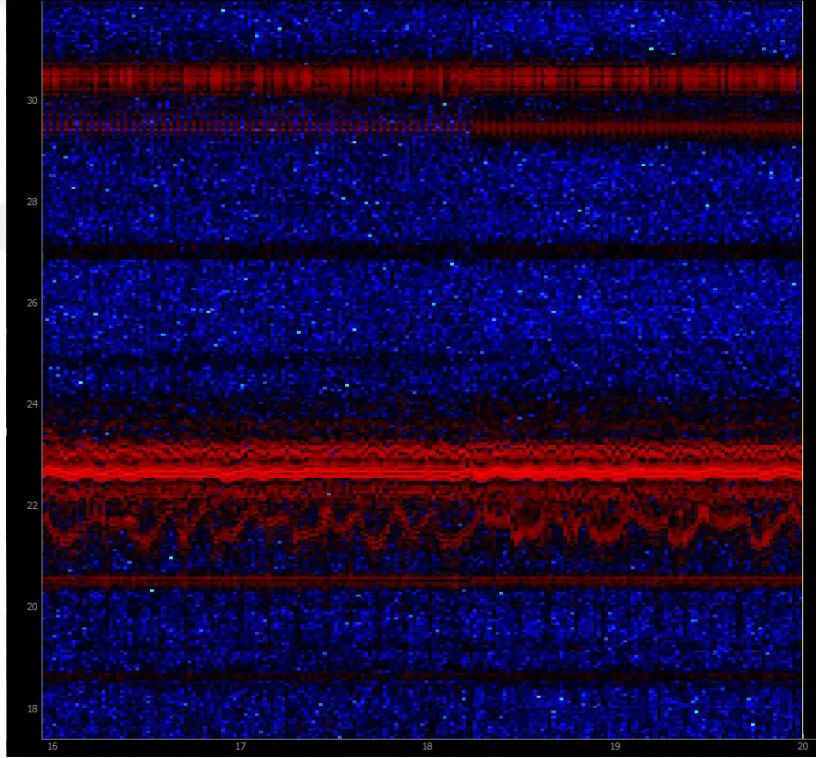
Şekil 27. İzge üzerinde Noviken VLF istasyonundan alınan sinyal



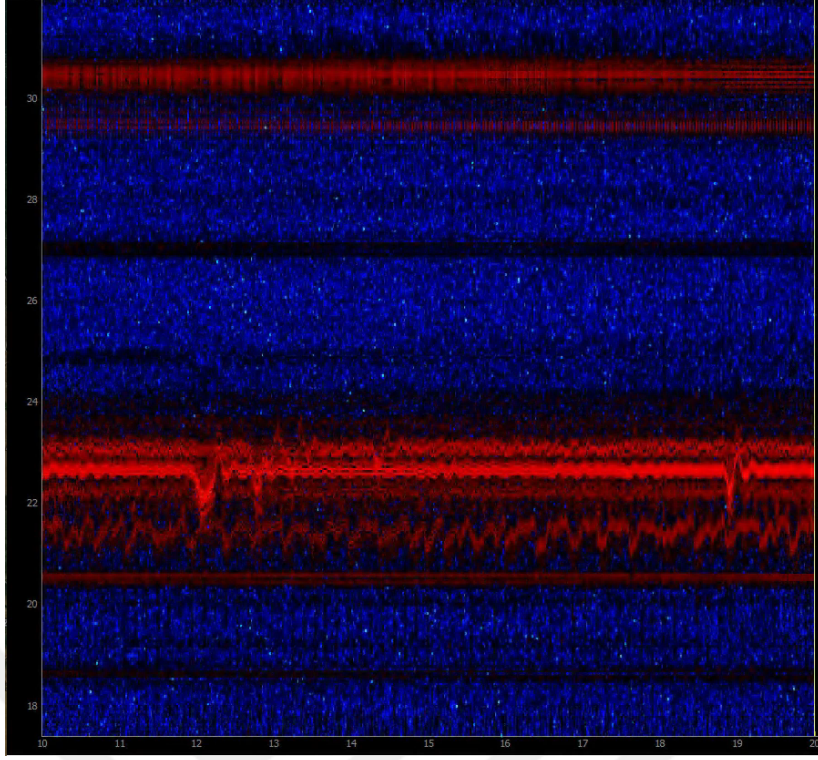
Şekil 28. İzge üzerinde HWU VLF istasyonundan alınan sinyal

VLF sisteminden alınan sinyaller canlı olarak yerküre üzerindeki şimşek çakmalarını gösteren Blitzortung [31] sistemi ile kıyaslanarak incelenmiştir. Şimşeklerin konum ve zaman bilgisi yalnızca harita üzerinden canlı yayınlandığından, bu gözlemlerle ilgili kayıtlar VLF spektrogramına eş zamanlı olarak Blitzortung haritasının video kaydı alınarak yapılmıştır.

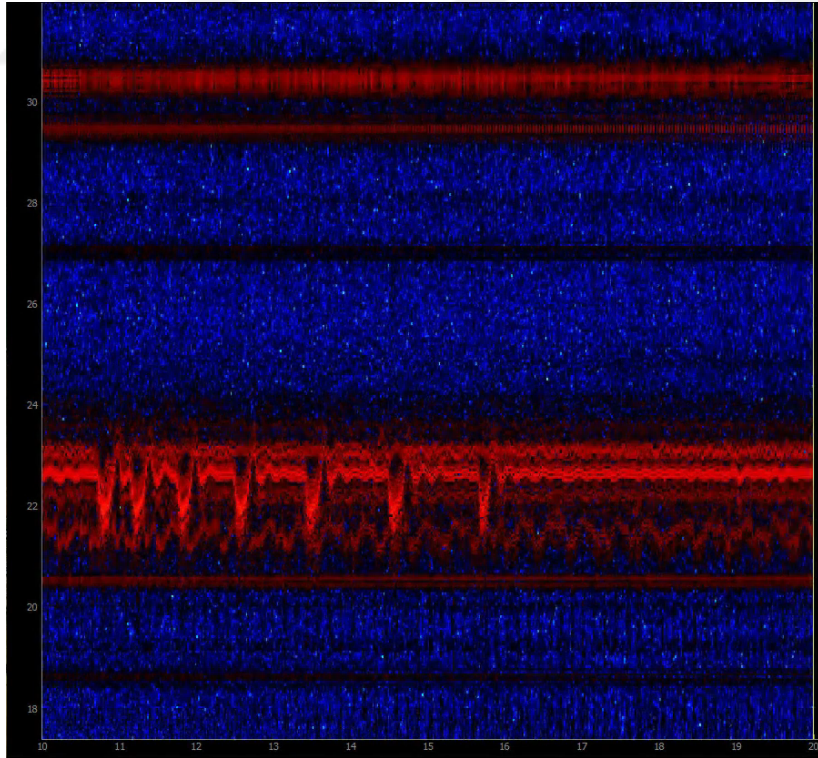
Hava olaylarının VLF sinyallerine etkisi Fransa'da Rosnay bölgesinde bulunan HWU vericisinin 22.4 kHz frekansındaki yayını üzerinde gece vakitlerinde güçlü olarak gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 29). Alıcının bulunduğu konum (Beytepe, Ankara) HWU vericisine yaklaşık 2645 kilometre mesafeye sahiptir. Gözlemler sırasında baskın etkiye sahip olduğu görülen şimşek çakmalarının bir çoğu Bosna-Hersek, Macaristan, Romanya ve Bulgaristan üzerinde görülmüştür. Meydana gelen hava olaylarının bir çoğu en yakında yaklaşık 700 km mesafedeki Bulgaristan ile yaklaşık 1400 km mesafedeki Macaristan arasında kalan bölgede meydana gelmiştir.



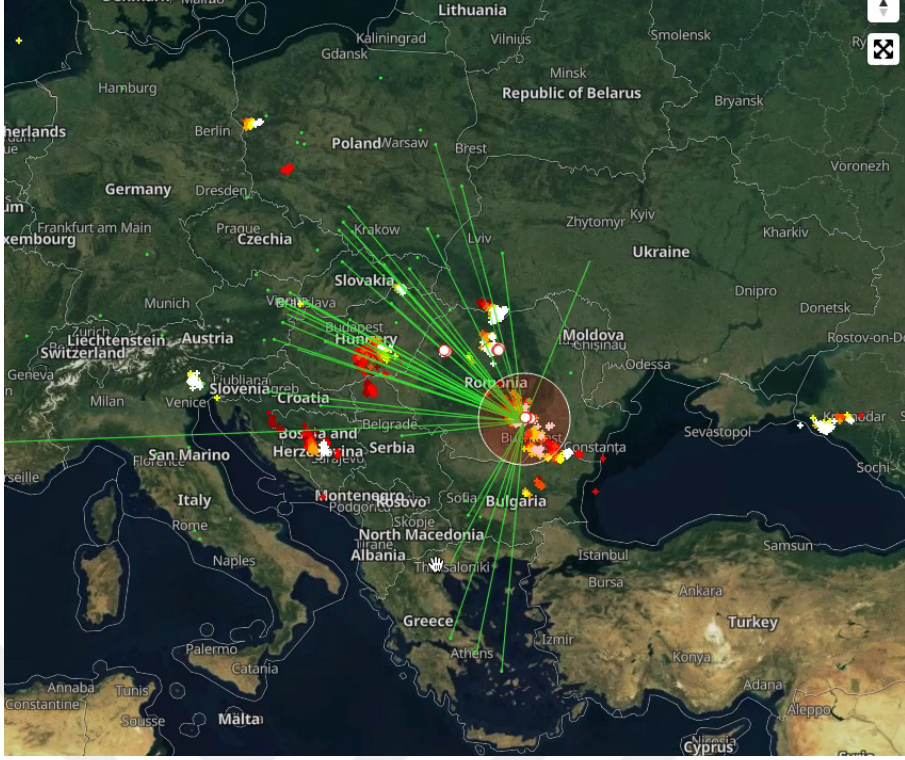
Şekil 29. Sakin zaman dilimi boyunca 22.4 kHz frekansındaki HWU sinyali



Şekil 30. Şimşek sonucunda alınan sinyalde meydana gelen değişiklikler



Şekil 31. Ardarda meydana gelen şimşek çakmasının HWU sinyali üzerindeki etkisi



Şekil 32. Avrupanın çeşitli bölgelerinden gözlemlenen şimşek çakması olayları

### 3. SONUÇLAR

VLF sinyalleri bir çok alanda hem haberleşme amaçlı hem de doğa olaylarının gözlemi amaçlı kullanılan, araştırma ve çalışmaların uzun yıllardır sürdüğü bir olgudur. Bu kapsamda yapılan çalışmalar yıllar geçtikçe günün standartlarının gerisinde kalmakta ve sürekli olarak yenilik ve iyileştirmeler gerektirmektedir. İyonosfer araştırmaları konusunda GPS ve diğer uydu haberleşme sistemlerinden alınan verilerle birlikte VLF bandında meydana gelen olaylar da incelenerek doğruluk oranı daha yüksek ve daha geniş ayrıntılara sahip çalışmalara olanak vermektedir.

Bu tez kapsamında yapılan alıcı sistemi tasarımı ve uygulaması her bir katmanın ayrı ayrı tasarlanıp güvenilir ölçüm araçlarıyla denetimi sonrasında bir araya getirilmesi ile yapılmıştır. Tasarım aşamalarında verilen kararlar için yüksek çözünürlük ve örnekleme hızına sahip bir alıcı sisteminin gereksinimleri ağırlıklı olarak göz önünde bulundurulmuş, bununla birlikte bir takım teknik sınırlamalar da etkin rol oynamıştır. Birden çok yönün analizi ve tayini için 2 ya da daha fazla anten kullanarak gerçekleştirilen yöntemler kullanılan mikrodenetleyicinin hız limitlerinden ötürü bu uygulamada hayata geçirilmemiştir. İleride yapılacak çalışmalar için birden çok kanal verisinin aynı anda senkron bir şekilde alınabilmesi adına USB 3.0 gibi daha yüksek veri aktarım protokollerine sahip bir mikrodenetleyici kullanımı öngörülmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda hem sentetik olarak üretilen VLF bandı sinyallerinin sisteme girdi olarak verilip test edilmesinde hem de gerçek bir döngü antenden alınan verilerin incelenmesinde alıcı sisteminin başarılı bir şekilde gelen sinyalleri yükselttiği, doğru frekans kesim noktalarında bastırıldığı ve geçirdiği test edilmiştir. Belirlenen örnekleme frekansında alınan sinyallerin herhangi bir örtüşmeye maruz kalmadan sayısal hale dönüştürüldüğü ve ağ üzerinde herhangi bir aktarım hatasına maruz kalmadan iletilebildiği görülmüştür. Literatürdeki diğer çalışmalara göre iyileştirilmiş teknik özelliklere ait alıcının kıyası Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Tez kapsamında yapılan HUEE-VLF Alıcısı ve literatürdeki diğer çalışmaların teknik özellikleri

Alıcı sistemi	Frekans aralığı	Çalışma frekansı	Çözünürlük	Örnekleme frekansı	Besleme gerilimleri	Veriye erişim
HUEE-VLF	5-120 kHz	Bütün izge	12 bit	250 kHz	5 V	USB, TCP/IP
UKM-SuperSID[25]	0-48 kHz	19.8 kHz	-	96 kHz	$\pm 5$ V	Yerel bilgisayar
SID Receiver[26]	16-32 kHz	25 kHz	8 bit	100 Hz	5 V	USB
Natural Radio Receiver[26]	0.5-10 kHz	-	-	-	-	Multimetre
CIS VLF Receiver[27]	10-15 kHz	10.2, 14.8 kHz	16 bit	20 kHz	$\pm 5$ V, $\pm 12$ V	Yerel bilgisayar
RaspberryPi SuperSID[28]	0-22 kHz	Bütün izge	-	48 kHz	5 V	Yerel mikrobilgisayar
AWESOME[29]	0-50 kHz	Bütün izge	16 bit	100 kHz	$\pm 15$ V	Yerel bilgisayar

Alınan sinyallerin günlük depolama alanı gereksinimi ham veri için 43.2 GByte, sıkıştırılmış veriler için de yaklaşık yarısı olarak 22.5 GByte olarak belirlenmiştir. Anlık olarak saniyede yaklaşık 500 kByte olarak rahatça aktarılabilen veriler için alıcı mikrobilgisayarı üzerinde yeterli günlük depolama alanı varsayılan olarak bulunmamaktadır. Ancak Linux işletim sistemi çalıştıran kart üzerinde fazladan bulunan 3 USB portu kullanılarak harici depolama seçenekleri eklenebilir. Sunucu yazılımı üzerinde dahili kayıt özelliği açılarak ve mikrobilgisayar üzerindeki kısıtlı alan kullanılarak verilerin hem yerel depolama alanında hem de uzak bilgisayara gönderimi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda yerel ve uzak veriler bütün bitleri test edilecek şekilde eşleştirilmiş, hiç bir hata olmadan aktarıldığı görülmüştür.

Yapılan bazı çalışmalarda analizler yalnızca belli bir bant üzerindeki verilerin daha düşük örnekleme hızı ile alınması sonucunda yapılmıştır. Bu ihtiyaca uygun olarak bu çalışmanın devamında sunucu yazılımı üzerinden bir ya da birden çok bandın izole olarak seçilip daha düşük bantgenişliği kullanılarak aktarımı planlanmaktadır. Bu şekilde belirlenen bir ya da birden çok frekans değeri için kiplenmiş veriler taban banta indirilerek doğrudan işleme alınabilecek biçimde aktarılabilir.

Mevcut durumda kablolu ya da kablosuz ağ üzerinden haberleşme yapabilen alıcı sisteminin birden çok kopyasının yerleşim yerlerinden ve şebeke gürültüsünden uzak farklı noktalara yerleştirilmesi de planlanmaktadır. Kablolu veya kablosuz haberleşme imkanı bulunamayacak mesafeler için ISM bantları gibi hem düşük güçle haberleşme yapılabilen hem de özel bir lisans gerektirmeden kullanılabilen bantlarda iletim özelliği de sisteme eklenmesi düşünülen seçeneklerdendir. 1 MByte altındaki veri aktarım hızları için rahatlıkla kullanılabilen bu bantlarda Si4432 gibi alıcı-vericiler 20 dBm verici gücü ile 1.5 kilometreye kadar haberleşme yapabilmektedir [32], [33].

Yüksek çözünürlük ve örnekleme hızında veri alımının gerçek zamanlı ve sürekli olarak yapılması sırasında algoritmik bir takım zorluklara ve hem donanım hem de yazılım içinde yarış koşulu durumlarına rastlanmıştır. Bu zorluklar EK-1 de bahsedilen yöntemlerle aşılmış, kullanılan donanımın en yüksek doğruluk ve performans verebileceği koşullar elde edilmiştir.

## 4. KAYNAKLAR

- [1] ITU, Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications, **2015**.
- [2] Hunsucker R. D., Hargreaves J. K., The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation, Cambridge University Press, **2007**.
- [3] UKRAA VLF Receiver , <http://web.archive.org/web/20120309013215/https://www.ukraa.com/www/vlf-range.html> (Erisim tarihi: **25 Haziran 2019**).
- [4] Geonics Limited - VLF Receivers, <http://web.archive.org/web/20170430193144/http://www.geonics.com/html/vlfsystems.html> (Erisim tarihi: **25 Haziran 2019**).
- [5] Explorer E202 - VLF portable receiver, <http://www.vlf.it/romero2/explorer-e202.html> (Erisim tarihi: **25 Haziran 2019**).
- [6] VLF Receiver, <https://www.xivero.com/vlfreceiver/> (Erisim tarihi: **26 Haziran 2019**).
- [7] Types of VLF Signals, <https://theinspireproject.org/default.asp?contentID=17> (Erisim tarihi: **26 Haziran 2019**).
- [8] Hayakawa M., Subionospheric VLF/LF probing of ionospheric perturbations associated with earthquakes (earthquake prediction),2008 SICE Annual Conference, 1668–1671, **2008**.
- [9] Kazakova N. A., Kolesnik A. G., Shinkevich B. M. , Research of information attributes of the VLF-range radiochannels for of the earthquakes forecast, 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 17–19, **2002**.

- [10] Chakrabarti S. K., Sasmal S., Ray S., Studies of VLF signal anomalies due to earthquake. XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), **2014**.
- [11] Ray S., Chakrabarti S. K., Precursor of earthquake using night time VLF amplitude, XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, **2011**.
- [12] Zhima Z., XueMin Z., XuHui S., VLF radio signal anomalies associated with strong earthquakes, XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), **2014**.
- [13] Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, **2011**.
- [14] Gorishnya Y., Gorishnya V., Plasma density evaluation in the sharply-bounded ionosphere model by tweaks, IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 94–97, **2017**.
- [15] Rashid M. M. A., Ismail M., Hasbie A. M., VLF observation of D-region disturbances associated with solar flares at UKM Selangor Malaysia, 2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), 249–252, **2013**.
- [16] Silber I., Price C., Short-term variability of the lower ionosphere from VLF narrowband radio observations, XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), **2017**.
- [17] Kvavadze N., Kvavadze K., VLF propagation study in low ionosphere, XVIIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 201–204, **2013**.

- [18] Pal S. , Chakraborty S., Chakrabarti S. K., Remote sensing of atmospheric gravity waves (GWs) and planetary wave type oscillations (PWTOs) in the upper mesosphere-lower ionosphere system using the very low frequency transmitter data, XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), **2014**.
- [19] Dowden R. L. , Holzworth R. H., Rodger C. J., World-wide lightning location using VLF propagation in the Earth-ionosphere waveguide, IEEE Antennas and Propagation Magazine 50.5, 40–60, **2008**.
- [20] Samanes J., Raulin J., Jinbin C., Estimation of the nighttime height of the lower ionosphere using VLF waves propagation, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), 1310–1312. , **2016**.
- [21] Rodger C. J., Wait J. R., Thomson N. R., VLF scattering from red sprites: vertical columns of ionisation in the Earth-ionosphere waveguide, MMET Conference Proceedings. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET 98 (Cat. No.98EX114). Vol. 1., 282–284 vol.1., **1998**.
- [22] Li G., Wang Y., Liu C., Analysis of VLF Radio Wave Propagation Characteristics and Its Influence on Underwater Platform Communication, IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS), 83–87, **2018**.
- [23] Burhans R. W., Low-Cost High-Performance VLF Receiver Front-End, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 26.1, 70–76, **1977**.
- [24] Kusnandar, Kusmadi, Najmurokhman A., Development of high sensitivity amplifier for VLF receiver application, International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI). 328–331, **2015**.

- [25] Wah W. P., Abdullah M., Hasbi A. M., Development of a VLF receiver system for Sudden Ionospheric Disturbances (SID) detection, IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), 98–103, **2012**.
- [26] Suryadi, Abdullah M., Husain H., Development of VLF receiver for remote sensing of low atmospheric activities, T International Conference on Space Science and Communication, 230–234, **2009**.
- [27] Peterson B., Gross K., Chamberlin E., Integrated CIS VLF/Omega receiver design, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 8.1, 9–20, **1993**.
- [28] Soon Y. L., Gan K. B., Abdullah M., Development of very low frequency (VLF) data acquisition system using Raspberry Pi, International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), 485–488, **2015**.
- [29] Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W., Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception With the AWESOME Instrument, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48.1 , 3–17, **2010**.
- [30] PSoC® 5LP: CY8C56LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip (PSoC®), <https://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c56lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc>. (Erisim tarihi: **20 Temmuz 2019**).
- [31] Lightning & Thunderstorms - World Map, [http://en.blitzortung.org/live\\_lightning\\_maps.php](http://en.blitzortung.org/live_lightning_maps.php).(Erisim tarihi: **20 Temmuz 2019**).
- [32] Si4432 EZRadioPRO ISM Band - Silicon Labs, <https://www.silabs.com/products/wireless/proprietary/ezradiopro-ism-band-transmitters-recievers-transceivers/device.si4432>,(Erisim tarihi: **20 Temmuz 2019**).
- [33] SI4432 Wireless Transceiver (433M,1.5KM Range), <https://www.electrodragon.com/product/si4432-433m-wireless-transceiver-module-distance-1500m/>.(Erisim tarihi: **20 Temmuz 2019**).



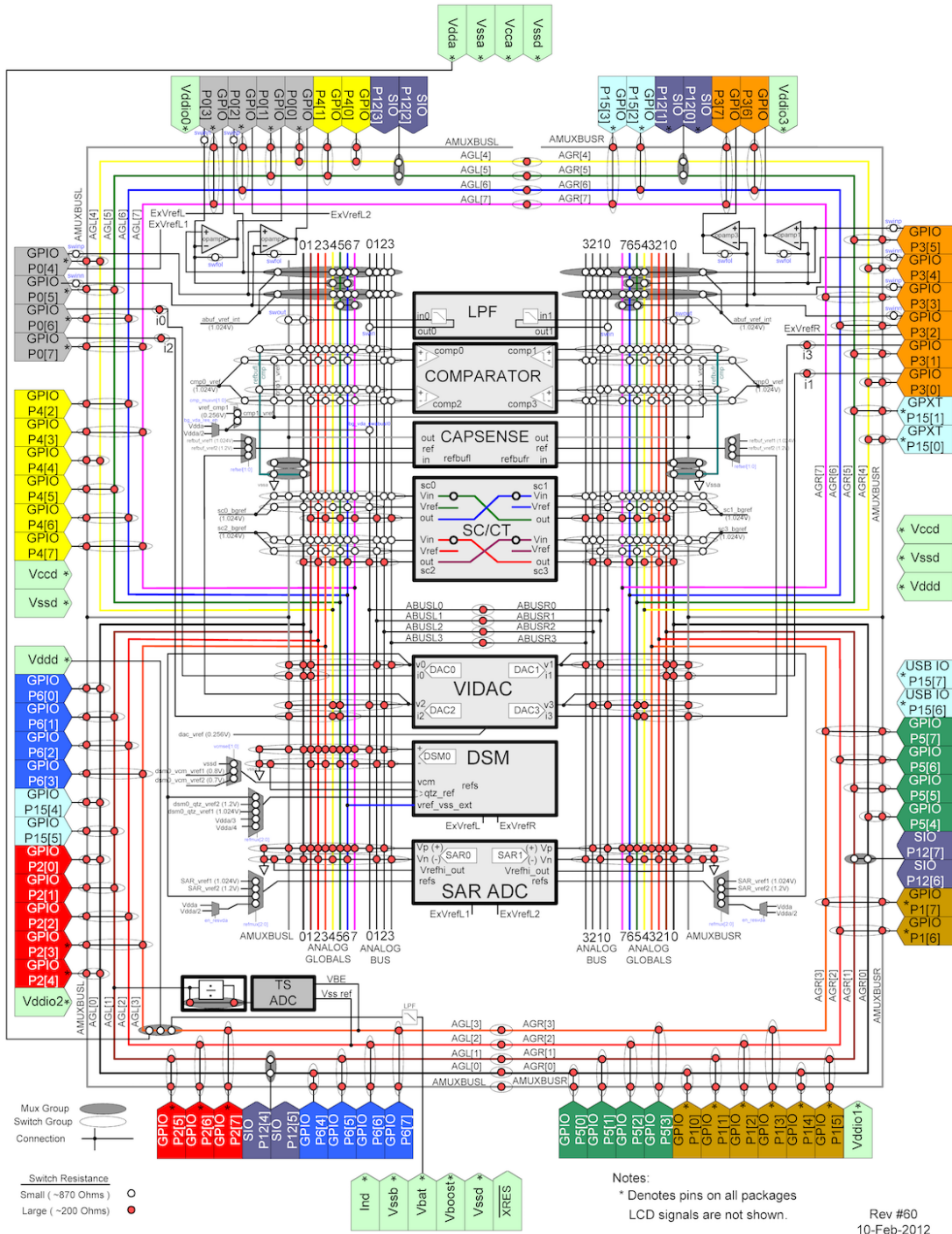
Haberleşme Blokları şeklinde iki tür sayısal blok mevcuttur. Seri girdi-çıkı modülleri yalnızca SPI, UART gibi seri haberleşme blokları içinde bulunur.

PSoC içindeki her sayısal blok 8-bitlik birer kaynak olarak geliştiriciye sunulmuştur. Bu blokların birleşimi ile 16, 24, 32 bit uzunluğunda sayısal bloklar elde edilebilir.

PSoC aygıtı içinde evrensel sayısal blok (UDB-Universal Digital Block) denen modüller bulunur. Bu modüller istenen haberleşme ya da mantıksal işleme göre özelleştirilebilir veya firma tarafından sağlanan kalıpta sisteme eklenerek kullanılabilir.

PSoC delta-sigma ve SAR türlerinde olmak üzere iki çeşit analog-sayısal dönüştürücü (ADC) modülü barındırmaktadır. Delta-sigma türündeki dönüştürücü çözünürlük bit sayısı arttıkça örnekleme hızından ödün vermektedir, bu yüzden daha yüksek hızda örnekleme yapabilmek adına SAR analog-sayısal dönüştürücü modüllerden birisi kullanılmıştır. Buradaki ortaya çıkan problemlerden birisi analog bağlantıların bütün kombinasyonlarda yapılmasının mümkün olmasıdır. PSoC Creator yazılımı için yapılan tasarım otomatik moda sentezlendiğinde analog pin bağlantıları da rastgele olarak yapılmaktadır.

Şekil 34 üzerinde görüleceği üzere iç bağlantılar için çeşitli uzunluklarda ve düğüm sayılarında yollar mevcuttur. Seçilen farklı yollar için farklı büyüklükte yol direnci gelmektedir. Uzak veya uyumsuz noktalardan seçilen yollardan dolayı hem daha büyük hem de dönüştürücünün farksal girişleri için farklı değerlere sahip yol direnç değerleri sisteme katılabilmektedir. Bu problemin farkedilmesi üzerine olabilecek en düşük direnç değerine sahip olarak elle analog tasarım düzenlemesi yapılmıştır. Bu tasarım PSoC Creator yazılımı üzerinde tasarım dosyası açıldıktan sonra Analog sekmesindeki kilitler açılarak yapılmaktadır. Şekil 34 üzerinde görülen yatay ve dikey hatların çakıştığı noktalarda aktif edilen düğüm noktaları sinyalin akacağı yolu belirlemekte ve seçimin ürettiği hat direnci yazılım üzerinde görüntülenmektedir.



Şekil 34. PSOC 5LP modeli için analog alt sistemler bağlantı şematiği

Karşılaşılan başka bir zorluk da sürekli modda analog-sayısal dönüşümü yapan sistemden alınan verilerin doğrusal bir şekilde kayba uğramadan USB altsistemine yüklenerek iletiminin yapılmasıdır. Düşük hızlarda analog veri ölçümü ve seri haberleşme ile veri gönderimi yazılımsal olarak yapılabilmektedir ancak bu şekilde uygulandığında sabit aralıkla ölçüm alınamamakta ve hız olarak saniyede birkaç yüz

örnek alımının üzerine çıkılamamaktadır. Böyle bir ihtiyaç için yapılması gereken tamamen donanımsal bir çözüm üretmektir. Mikroişlemci ve mikrodenetleyici sistemleri üzerinde sistemin üzerine ekstra bir yük getirmeden bu şekilde operasyonların yapılması için DMA denilen doğrudan bellek erişimi modülleri bulunmaktadır.

Gerekli ayarlamalar yapıp kendi başına çalışılabilir duruma getirilen her alt sistem istenen işlemler sonucunda dışarıya işaret sinyalleri gönderebilmektedir. Analog-sayısal dönüştürücü modülünün her bir çevrim sonrasında dışarıya verdiği işaret sinyali buna örnektir. Doğrudan bellek erişimi modülleri kullanılarak işareti veren altsistemin doğru bellek noktalarına işlemci üzerinden herhangi bir işlem yapmadan erişilip alınmak istenen veriler doğru formatta başka bir bellek ya da modül alanına atılabilmektedir.

Bu tez kapsamındaki uygulamada bir DMA modülü her örnekleme sonrasında elde edilen sayısal verinin bir tampon bellek noktasına ardışık olarak dizilmesinden sorumlu tutulmuştur. Alınan veriler için her bir örnek sonrasında veri iletimine başlanmamaktadır. Bunun sebebi USB haberleşmesinde sabit bir zaman aralığında en fazla belli miktarda veri gönderilebiliyor olmasıdır. Sabit zaman aralıklarının her birinde bir örnek göndermek saniyede iletilebilecek veri miktarını zaman aralıklarının sayısı ile sınırlamaktadır. Bu açıdan en verimli sonucu almak için USB iletim tamponunu doldurabilecek miktarda verinin alınması sonrasında iletim işlemi başlatılmaktadır.

```
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[0], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[1], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[1], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[2], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[2], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[3], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[3], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[4], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[4], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[5], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[5], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[6], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[6], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[7], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
CyDmaTdSetConfiguration(DMA_TD[7], (2 * NO_OF_SAMPLES), DMA_TD[0], DMA_TD_TERMOUT_EN | TD_INC_DST_ADR );
```

### Şekil 35. Transaction Descriptor tanımlamalarının zincir biçiminde yapılması

DMA tarafından sayısallaştırılmış veri ile doldurulan tampon bellekleri ikinci bir DMA kullanılarak USB iletim hattına geçirilmektedir. Bu işlem yapılırken USB modülü içinde işlem tanımlayıcısı (TD-transaction descriptor) denilen yapılar tanımlanmaktadır. DMA için her bir TD bir bellek işlem setini tanımlamaktadır. Bu işlem seti içinde okunacak bellek kaynağı, yazılacak hedef belleği, okuma ve yazma sırasında bellek adresleri içinde artış yapılarak verilerin ardışık şekilde belleğe yerleştirmesi gibi unsurlar tanımlanır. Belirtilen bellek işlemleri için başlangıç ve

bitiş sonrası atlama yapılacak adresler zincir şeklinde tanımlayarak TD[0] bitince TD[1]'in devreye geçmesi, TD[1] bitince TD[2]'nin devreye geçmesi gibi otomatik bir iletim mekanizması tanımlanabilmektedir. Bu tanımlamanın bir örneği Şekil 35'de verilen kod parçasında görülmektedir.

Alınan analog veri örneklerinin her biri 16 bitlik bellek noktalarında tutulmaktadır. PSoC üzerindeki USB haberleşme modülü için maksimum iletim belleği 512 Byte uzunluğundadır. 2 Byte ile tanımlanan örnekler için bir seferde USB tamponuna en fazla 64 Byte yani 32 örnek yazılabilmektedir. USB tamponunun her bir tamamen boşalması sonrasında 256 örnek verisi 32 örneklik parçalara ayrılıp 8 seferde tamponu tamamen dolduracak şekilde DMA yardımı ile yazılmaktadır. Bu şekilde her bir döngü sonrasında bir sonraki analog örnekler dizisi USB aktarımı için kullanılırken, analog-sayısal dönüştürücü ile birlikte çalışan DMA işi bitmiş başka bir tampon diziyeye yeni alınan verileri kaydetmektedir. Bu şekilde yarış koşulu oluşmasının önüne geçilmiş, aynı bölgeler üzerine yazma ve okuma işlemi yapan iki alt sistemin veri bozulmasına sebebiyet vermeyecek şekilde ardışık işlemler yapması sağlanmıştır. Şekil 36 içinde verilmiş örnek kod parçasında olduğu şekilde bir bayrak değişkeni sırada kaçınıcı tampon bölgesindeki verilerin gönderileceğini belirlemektedir. Buna bağlı olarak yukarıda tanımlanan 8 farklı TD ile ardışık bir şekilde verilerin USB alt sisteminin iletim belleğine yazılması sağlanmaktadır. Bu şekilde yazılımın müdahale ettiği tek kısım hem veri dönüşümünde hem de veri aktarımında donanımsal modüllerin kendi başlarına yaptıkları işlemler için bir takım adres tanımlamalarını yapmaktır.

```

switch(toggleFlag)
{
    case 0:
        //ADC_sample1[31] = bufNum++;
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[0], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[32], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[64], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[96], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[128], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[160], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[192], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample1[224], NO_OF_SAMPLES1);
        toggleFlag = 1;
        break;
    case 1:
        //ADC_sample2[31] = bufNum++;
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[0], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[32], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[64], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[96], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[128], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[160], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[192], NO_OF_SAMPLES1);
        while(USBFS_EP[EPl].apiEpState == USBFS_IN_BUFFER_FULL); //testfull
        My_USBFS_LoadInEP(EPl, (uint8 *)&ADC_sample2[224], NO_OF_SAMPLES1);
        toggleFlag = 2;
        break;
}

```

Şekil 36. Ardışık veri tampon belleklerinin her iletim sonrasında yenisi ile doldurulması



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞINA

Tarih: 06/08/2019

Tez Başlığı / Konusu: ULF-VLF-LF BANTLARI İÇİN ALICI TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 58 sayfalık kısmına ilişkin, 06/08/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

06/08/2019

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: MEVLÜT SAİD SARAÇOĞLU

Öğrenci No: N15221992

Anabilim Dalı: ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı: ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Cenk Toker

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mevlüt Said Saraçoğlu  
Doğum yeri : Erzurum  
Doğum tarihi : 06.05.1990  
Medeni hali : Bekar  
Yazışma adresi : Çiğdem Mah. 1550 Cd. 46/21 Çankaya / Ankara  
Telefon : 05426499446  
Elektronik posta adresi : msaidsaracoglu@gmail.com  
Yabancı dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA, 2007 - 2015  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA, 2016 - ...

### İş Tecrübesi

Eylül 2016 - ... : Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA