

DARBANT VE GENİŞBANT SANAL İYONOSONDA İÇİN SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ

SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR NARROWBAND AND WIDEBAND VIRTUAL IONOSONDE

MEHMET KABASAKAL

Doç. Dr. Cenk TOKER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

Mehmet KABASAKAL'ın hazırladığı "Darbant ve Genişbant Sanal İyonosonda için Sinyal İşleme Teknikleri" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

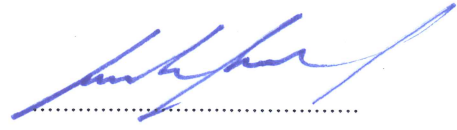
Prof. Dr. Orhan ARIKAN

Başkan



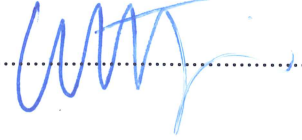
Doç. Dr. Cenk TOKER

Danışman



Prof. Dr. Çağatay CANDAN

Üye



Doç. Dr. Umut SEZEN

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Yakup Özkazanç

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe Gümüşderelioğlu

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI 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.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

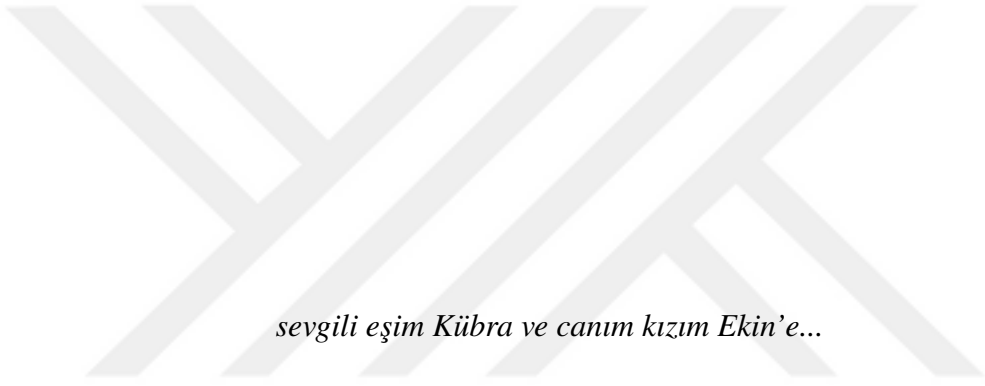
- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

17 / 7 / 2018


(İmza)

Mehmet Kabasakal



sevgili eşim Kübra ve canım kızım Ekin'e...

ETİK

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.

17.7.2018

Mehmet KABASAKAL

ÖZET

DARBANT VE GENİŞBANT SANAL İYONOSONDA İÇİN SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ

MEHMET KABASAKAL

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk TOKER

Haziran 2018, 173 sayfa

Uzak mesafelerle haberleşme yapmak için sıklıkla kullanılan bantlardan biri Kısa Dalga (KD) bandıdır. KD bandı frekans aralığındaki (3 – 30 MHz) radyo dalgalarının, atmosferin tabakalarından biri olan iyonosfer tabakasından yansıtılarak yeryüzüne ulaşması neticesinde, binlerce km uzaklıktaki iki nokta arasında iletişim gerçekleştirilebilmektedir. Bu sebeple, zamana, konuma, güneş aktiviteleri vb. etkilere bağlı olarak değişken özelliklere sahip olan iyonosfer tabakasının iyi karakterize edilmesi önemlidir. Bu amaçla iyonosonda adı verilen cihazlar kullanılmaktadır. İyonosondalar, KD bandında çalışan bir tür radar olarak değerlendirilebilmektedir. İyonosferik katmanların kritik frekansları ve yansıma yükseklikleri arasındaki ilişki kullanılarak, iyonosondalar tarafından oluşturulan sinyaller, iyonosfer tabakasına gönderilerek, alınan ve gönderilen sinyal arasındaki zaman farkı üzerinden iyonosferik katman yüksekliklerini hesaplanmaktadır.

İyonosonda istasyonlarının kurulumu maliyetlidir ve işletilmeleri belirli bir uzmanlık gerektirmektedir. Bu nedenle, dünya üzerinde belirli bölgelerde yoğunlaşmış, sınırlı sayıda istasyon bulunmaktadır. Dolayısıyla, ölçüm sonucu alınamayan noktalar bulunmaktadır. Bu eksikliği gidermek adına, uydularla gerçekleştirilen tomografik ölçüm yöntemleri ve yer ölçüm noktaları arası aradeğerleme yaklaşımları ile ölçüm alınamayan noktalar için veri oluşturulmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında, bu problem

iyonosonda operasyonu açısından ele alınmış ve iyonosonda operasyonunda gerçekleştirilen aşamalar benzetim ortamına aktarılmıştır. Bu amaçla, 3B ışın izleme yöntemi, ITS kanal modeli ve IRI-Plas iyon yoğunluğu kestirim araçları bir araya getirilerek entegre bir şekilde kullanılmıştır. IRI-Plas ile oluşturulan iyon yoğunluğu profilleri, TEİ, hmF2, foF2 verileri ile beslenerek iyileştirilmiş ve oluşturulan iyonosonda benzetim altyapısı, iyonosferik fırtınalı ve sakin günler için gerçek iyonosonda ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, oluşturulan benzetim altyapısı, gerçek ölçümlere yakın hmF2 ve foF2 değerleri ile beslenebildiği sürece, hem fırtınalı hem de sakin günlerde, ionogram şekli, katman yükseklikleri ve en büyük kullanılabilir frekans değerleri anlamında, iyonosonda ölçüm sonuçları ile benzer sonuçların alınabildiği görülmüştür.

İyonosondalarla ilgili bir diğer problem, 100 – 600 W mertebelerinde çıkış güçlerine sahip olmaları ve anlık dar bir bantgenişliğinde çalıştıklarından, sonuç oluşturmak için belirli bir frekans bandını taramalarıdır. Yüksek çıkış gücü ile frekans bandının taranması, halihazırda kalabalık bir spektruma sahip olan KD bandı için istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında, genişbant (1 MHz bantgenişliği) dalgaşekilleri, ITS kanal modeli ve zaman frekans analiz yöntemleri kullanılarak, iyonosonda çıktısı olan ionogram verisinin düşük çıkış gücüyle (20 W) üretilebileceği gösterilmiştir. Bu amaçla, faz kodlu dalgaşekillerinden Barker, PN, Golay, frekans modülasyonlu dalgaşekillerinden Doğrusal Frekans Modülasyonu (DFM), Costas kodlu ve Doğrusal Olmayan Frekans Modülasyonu (DOFM) dalgaşekilleri belirsizlik fonksiyonları ve ionogram çıktıları üzerinden karşılaştırılmıştır. İstenilen uzunlukta üretilebilmeleri, taradıkları frekans bandı içerisinde düz bir spektrum görüntüsüne sahip olmaları ve frekans değişimlerine olan dayanıklılıkları nedeniyle DFM dalgaşekillerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Zaman frekans analiz yöntemleri içinse, Wigner-Ville Dağılımı (WVD), Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) ve Yeniden Atama yöntemleri incelenmiş, yüksek çözünürlük, sinyal ayırt edicilik ve çapraz terim oluşturmamaları nedeniyle Yeniden Atama yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, mevcut durumda kullanılan darbant iyonosonda yöntemi ve önerilen genişbant ölçüm yöntemi benzetim ortamında farklı SNR değerlerinde karşılaştırılmış, düşük SNR seviyelerinde genişbant ölçüm yönteminin daha yüksek başarıma sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca

her iki yöntem iyonogram oluşturma süreleri açısından karşılaştırılmış, önerilen genişbant ölçüm yöntemi ile 20 – 70 ms sürede sonuç üretilebildiği gösterilmiştir. Sonuç olarak, genişbant ölçüm yöntemi kullanılarak düşük çıkış gücüyle diğer KD bandı kullanıcılarına girişim yaratmadan, yüksek hızlarda sonuç üretilebileceği görülmüştür. Kısa sürelerde alınan iyonogram sonuçlarının, özellikle hızlı değişimlerin gerçekleştiği iyonosferik fırtınalı günlerde kullanılabilen değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: HF bandı, İyonosfer, İyonosonda, İyonogram, IRI-Plas, Zaman frekans analizi, Kanal Kestirimi



ABSTRACT

SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR NARROWBAND AND WIDEBAND VIRTUAL IONOSONDE

MEHMET KABASAKAL

**Doctor of Philosophy, Department of
Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk TOKER

June 2018, 173 pages

One of the mostly used band for long range communication is High Frequency (HF) band. Radio waves in the HF band range (3 – 30 MHz) are reflected from ionosphere which is one of the layers of atmosphere. So, a communication link can be set between two nodes which are thousands of kilometers away from each other. Hence, it is important to characterize the ionosphere state of which depends on date, time, location, sun activities etc. Ionosondes are used for this purpose. Ionosondes can be considered as HF band radar, so the ionospheric layer heights can be calculated by measuring the time delay between transmitted and received signals through the relation between critical frequencies and reflection heights.

The construction of ionosonde stations are costly and requires special expertise. That's why, there are limited number of stations around the world and they are sparsely distributed. So, there are still some blind zones. To compensate the missing data for blind zones, tomographical methods using satellites and interpolation methods through earth measurement points are utilized. In this thesis, this problem is handled by considering ionosonde operation and the steps of ionosonde operations are realized in simulation environment. Hence, 3D ray tracing, ITS channel model and IRI-Plas estimation tools are integrated together to construct an ionosonde structure. Total Electron Content (TEC), h_mF_2 and f_oF_2 values are fed into IRI-Plas to improve the electron density

estimation results. The ionosonde structure results are compared with the real ionosonde measurement results for ionospheric stormy and calm days. The results show that, as long as the ionosonde structure is fed by true hmF2, foF2 values, it is possible to take similar results with real ionosonde measurements in terms of ionogram shape, layer heights and maximum usable frequency (MUF) results.

Another problem about ionosondes is their high output power (i.e. around 100 – 600 W) and frequency sweep due to their narrow instantaneous bandwidth. Sweeping a large band in HF with relatively high output power is a problem for other HF band users, since it produces interference for other users. So in this thesis, wideband waveforms (1 MHz bandwidth), ITS channel model and time frequency analysis methods are utilised to construct ionogram trace with relatively low output power (20 W). For this purpose, Barker, PN and Golay codes are investigated among phase coded waveforms. Linear Frequency Modulation (LFM), Costas coded and Non Linear Frequency Modulation (NLFM) waveforms are investigated among frequency modulated waveforms. All waveforms are evaluated in terms of their ambiguity functions and their effects on ionogram traces. LFM waveforms are selected because of their flat spectral view along their bandwidth, robustness to frequency variations and availability for long duration pulses. Wigner-Viller Distribution (WVD), Short Time Fourier Transform (STFT) and Reassignment methods are investigated for time frequency analysis. As a result, Reassignment method is selected due to its high resolution, distinction capability and cross term features. In the simulations, the current narrowband ionosonde waveforms and operations are compared with those of the proposed wideband method. The results show that, for low SNR values the proposed method performs better than the current narrowband method. One more comparison is performed for ionogram construction durations and it is concluded that, wideband method is able to construct the ionogram trace in 20 – 70 ms. As a result, it is shown that, in order to construct ionogram traces with low output power, without interfering other HF band users and in very short time duration is possible by using the proposed wideband method. This result emphasizes that it can be easily adapted to track sudden changes in the ionosphere, especially for stormy ionospheric days when rapid changes occur.

Keywords: HF band, Ionosphere, Ionosonde, Ionogram, IRI-Plas, Time Frequency Analysis, Channel Estimation



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans ve Doktora süresi boyunca danışman olarak akademik çalışmalarına destek veren, bu yolda bana rehberlik eden değerli hocam Doç. Dr. Cenk Toker'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez jürimdeki saygıdeğer hocalarıma görüşleri ve değerli katkıları için teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında kullandığım araçların geliştirilmesine katkı veren IONOLAB grubu üyelerinden Dr. Esra Erdem ve Muhammet Necat Deviren'e teşekkür ederim.

Tez çalışmaları boyunca bana destek veren çalışma arkadaşlarım Dr. Serkan Karakütük, Dr. Handan Ağırman, Ufuk Tamer ve Türker Dolapçı'ya, gösterdikleri anlayış için yöneticilerim Ediz Çelik ve Erkan Dora'ya teşekkür ederim.

Sevgi ve destekleriyle bana daima güç veren, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan, tez çalışmaları boyunca pek çok konuda gösterdikleri olgunluk ve anlayış için annem Zehra Kabasakal ve babam Burhan Kabasakal'a teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca hırsı, azmi ve vizyonu ile bana örnek olan sevgili ablam Berrak Aslıtürk'e teşekkür ederim. Her koşulda bana moral ve destek veren, zamanını, enerjisini, neşesini benimle paylaşan sevgili eşim Kübra ve canım kızım Ekin'e teşekkür ederim. Sizler olmasaydınız bu tez yazılamazdı.

Bu tez kapsamındaki çalışmalar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından EEEAG 115E915 projesi kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER	xi
ÇİZELGELER	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
SÖZLÜK DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon	2
1.2. Literatürde Yer Alan Çalışmalar	3
1.3. Tez Çalışmasının Literatüre Katkıları	12
2. İYONOSFER ÖZELLİKLERİ ve İYONOSONDALAR	14
2.1. İyonosferin Özellikleri	14
2.2. İyonosondalar	17
2.2.1. İyonosondaların Tarihsel Gelişimi	22
2.2.2. İyonosondaların Çalışma Prensipleri	24
2.2.2.1. Darbeli İyonosonda	24
2.2.2.2. Frekans Modülasyonlu İyonosonda	27
3. DARBANT İYONOSONDA BENZETİM ORTAMI	32
3.1. Giriş	32
3.2. Kullanılan Araçlar ve Yöntemler	35
3.2.1. ITS Kanal Modeli	35
3.2.1.1. Gecikme Güç Profili	35
3.2.1.2. Belirlenimci Faz Fonksiyonu	37

3.2.1.3. Rasgele Modülasyon Fonksiyonu	37
3.2.2. IRI-Plas Modeli	38
3.2.3. Üç Boyutlu (3B) Işın İzleme	41
3.2.4. İyonogram Oluşturma	42
3.2.4.1. Aşama 1: Yol Özelliklerinin Hesaplanması	45
3.2.4.2. Aşama 2: Parametre Çıkarımı	47
3.2.4.3. Aşama 3: Kanal Oluşturma	50
3.2.4.4. Aşama 4: Analiz	51
3.3. Benzetim Çalışmaları ve Yorumlar	55
3.4. Sonuç	68
4. GENİŞBANT İYONOSFERİK KANAL KESTİRİMİ	70
4.1. Giriş	70
4.2. Kullanılan Araçlar ve Yöntemler	73
4.2.1. Kanal Modeli	73
4.2.2. Geniş Bant İyonosferik Kanal Kestirimi	77
4.2.2.1. Yaklaşım	77
4.2.2.2. Sistem Tanıma	83
4.2.2.3. Kanal Kestirim Geometrisi	89
4.2.2.4. Bağ Bütçe Analizi	92
4.2.3. Dalgaşekli İncelemeleri	96
4.2.3.1. Faz Kodlu Dalga Şekilleri	99
4.2.3.2. Frekans Modülasyonlu Dalga Şekilleri	108
4.2.3.3. Genişbant İyonosferik Kanal Kestirimi için Dalga Şeklinin Belirlenmesi	118
4.2.4. Zaman Frekans Analiz Yöntemleri	127
4.2.4.1. Wigner-Ville Dağılımı	128
4.2.4.2. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü	130
4.2.4.3. Yeniden Atama Yöntemi	132

4.3. Benzetim Çalışmaları ve Yorumlar	135
4.4. Sonuç	157
5. SONUÇ ve GELECEK ÇALIŞMALAR	158
KAYNAKLAR	163
EK-1: ITS KANAL MODELİ GECİKME GÜÇ PROFİLİ HESABI	172
ÖZGEÇMİŞ	174



ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Üç hücreli frekans modülasyonu	6
Şekil 2.1. Gündüz saatlerinde tipik olarak iyonosfer elektron yoğunluğunu dağılımı [1]	15
Şekil 2.2. Snell Yasası'na göre ışının kırılması	16
Şekil 2.3. Dikey ve eğik iyonosonda kullanım geometrileri	18
Şekil 2.4. Ölçüm sonucunda elde edilmiş örnek bir dikey ionogram sonucu [2]	19
Şekil 2.5. Ölçüm sonucunda elde edilmiş örnek bir eğik ionogram sonucu [3]	21
Şekil 2.6. Eğik iyonosonda ve tipik dikey ionogram sonucu.....	22
Şekil 2.7. <i>Digisonde</i> iyonosondasının zamanla fiziksel değişimi	23
Şekil 2.8. <i>Wuhan</i> iyonosondasının zamanla fiziksel değişimi.....	23
Şekil 2.9. Katman yükseklikleri ve darbeleri iyonosonda parametreleri ile ilişkisi	24
Şekil 2.10. Darbeleri iyonosonda dalgaşekli	26
Şekil 2.11. Frekans modülasyonlu iyonosonda dalgaşekli	29
Şekil 3.1. Güç Gecikme Profili	36
Şekil 3.2. ITS kanal modeli için kullanılan yapı	38
Şekil 3.3. İyonosondalar ile üç noktadan alınan ölçümler kullanılarak veri düzlemlerinin oluşturulması	41
Şekil 3.4. 7 MHz frekans ve 30°, 35°, 40° yükseliş açılarındaki bir ışın için sıradan ve sıradışı dalgaların iyonosferde izlediği yollar	42
Şekil 3.5. İyonogram oluşturma akış diagramı	44
Şekil 3.6. Alıcı verici arasında ışının izlediği yolun geometrik gösterimi	48
Şekil 3.7. Zaman gecikmesi ve frekans arasındaki ilişki.	49
Şekil 3.8. Alıcı işletim karakteristiği eğrileri	51
Şekil 3.9. Uyumlu filtre çıkışı (genlik değeri en yüksek tepe değerine göre normalize edilmiştir)	54
Şekil 3.10. Uyumlu filtre çıkışındaki tepe noktalar ve eşik değerinin üzerinde kalan noktalar	54

Şekil 3.11. Güney Afrika'da yer alan iyonosonda istasyonları yıldız ile gösterilmektedir. Siyah daire içerisindeki istasyonlara ait veriler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.	56
Şekil 3.12. Avrupa'da yer alan iyonosonda istasyonları yıldız ile gösterilmektedir. Siyah daire içerisindeki istasyonlara ait veriler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.	56
Şekil 3.13. 16 Mart 2015 16:00 UT tarih ve saatinde Güney Afrika bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Lousvile (LV), alıcı Hermanus (HE) istasyonları	59
Şekil 3.14. 17 Mart 2015 16:00 UT tarih ve saatinde Güney Afrika bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Lousvile (LV), alıcı Hermanus (HE) istasyonları	60
Şekil 3.15. 18 Mart 2015 16:00 UT tarih ve saatinde Güney Afrika bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Lousvile (LV), alıcı Hermanus (HE) istasyonları	61
Şekil 3.16. 16 Mart 2015 05:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Ebro (EB), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları	63
Şekil 3.17. 17 Mart 2015 05:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Ebro (EB), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları	64
Şekil 3.18. 18 Mart 2015 05:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Ebro (EB), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları	65
Şekil 3.19. 17 Mart 2015 11:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Juliusruh (JR), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları	67
Şekil 4.1. Geniş bant KD kanal transfer fonksiyonu	74
Şekil 4.2. Taylor serisi açılımı ile doğrusal parçalara ayırma	76
Şekil 4.3. İyonosferik kanal kestirimi	77
Şekil 4.4. ISAR hedef menzil profili oluşturma yaklaşımı [4]	79

Şekil 4.5.	15 Nisan 2008 00:00 UT tarihinde Millstone Hill istasyonundan alınan iyonogram görüntüsü [2]	82
Şekil 4.6.	Zaman frekans analizi ile sistem tanıma	85
Şekil 4.7.	0 dB SNR durumunda 50 – 450 Hz bandını tarayan cıvıltı sinyalinin zaman (üst) ve frekans (alt) görüntüsü	86
Şekil 4.8.	0 dB SNR durumdaki doğrusal cıvıltı sinyalinin zaman frekans düzlemindeki görüntüsü	87
Şekil 4.9.	Zaman frekans düzleminde oluşturulan maske	88
Şekil 4.10.	Maskeleme işlemi sonrasında elde edilen sinyalin zaman frekans düzlemi görüntüsü	88
Şekil 4.11.	Maskeleme işlemi sonrasında elde edilen sinyalin zaman alanı (üst) ve frekans alanı (alt) görüntüsü	89
Şekil 4.12.	İyonosferik kanal kestirimi geometrisi	91
Şekil 4.13.	Alıcı işletim karakteristiği eğrileri	94
Şekil 4.14.	İdeal belirsizlik fonksiyonu	99
Şekil 4.15.	Barker-13 kodu için özilinti fonksiyonu	100
Şekil 4.16.	$T_c = 1 \mu s$, $N = 13$ Barker kodlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu ..	102
Şekil 4.17.	PN-15 kodu için özilinti fonksiyonu	103
Şekil 4.18.	$T_c = 1 \mu s$, $N = 15$ PN kodlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu	104
Şekil 4.19.	PN-15 kodu için periyodik özilinti fonksiyonu	105
Şekil 4.20.	Golay-8 kod çifti için özilinti fonksiyonları	106
Şekil 4.21.	Golay-8 kod çifti için toplam özilinti fonksiyonu	106
Şekil 4.22.	Doppler değişiminin Golay kodu özilinti fonksiyonu üzerindeki etkisi	107
Şekil 4.23.	$T_c = 1 \mu s$, $N = 16$ Golay kodlu sinyal çifti için belirsizlik fonksiyonu	108
Şekil 4.24.	Doğrusal frekans modülasyonlu dalgaşekli için özilinti fonksiyonu ..	109
Şekil 4.25.	$T_p = 16 \mu s$, $B = 1$ MHz doğrusal frekans modülasyonu için belirsizlik fonksiyonu	111
Şekil 4.26.	Doğrusal frekans modülasyonu ve Costas frekans kodunun zaman frekans düzleminde gösterimi [5]	112

Şekil 4.27. Doğrusal frekans modülasyonu ve Costas frekans kodunun zaman frekans düzleminde gösterimi [5]	113
Şekil 4.28. Costas frekans kodlu dalgaşekli için özilinti fonksiyonu	114
Şekil 4.29. $T_p = 20 \mu s$, $B = 1 \text{ MHz}$, $M = 5$ Costas frekans kodlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu	115
Şekil 4.30. Doğrusal olmayan frekans modülasyonlu dalgaşekli için anlık frekansın zamana göre değişimi	116
Şekil 4.31. Doğrusal olmayan frekans modülasyonlu dalgaşekli için özilinti fonksiyonu	117
Şekil 4.32. $T_p = 16 \mu s$, $B = 1 \text{ MHz}$, doğrusal olmayan frekans modülasyonlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu	118
Şekil 4.33. Farklı pencere fonksiyonlarına ait spektrum görüntüleri	120
Şekil 4.34. Farklı BT_p değerleri için DFM dalga şekline ait spektrum görüntüleri	121
Şekil 4.35. Farklı T_c ve M değerleri için Costas frekans kodlu dalga şekline ait spektrum görüntüleri	122
Şekil 4.36. Farklı B_L ve B_N değerleri için DOFM dalga şekline ait spektrum görüntüleri	123
Şekil 4.37. $T_c = 40 \mu s$, Barker-13 kodu için belirsizlik fonksiyonu $\tau = 0$ kesiti .	124
Şekil 4.38. Tipik bir güç yükselteci için giriş-çıkış gücü karakteristiği	125
Şekil 4.39. $BT = 500$ için DFM dalga şekline ait özilinti fonksiyonu	127
Şekil 4.40. DFM dalgaşekli için WVD sonucu	129
Şekil 4.41. DOFM dalgaşekli için WVD sonucu	129
Şekil 4.42. DFM dalgaşekli için spektrogram sonucu	131
Şekil 4.43. DOFM dalgaşekli için spektrogram sonucu	132
Şekil 4.44. DFM dalgaşekli için yeniden atama analiz sonucu	134
Şekil 4.45. DOFM dalgaşekli için yeniden atama analiz sonucu	134

Şekil 4.46. Barker-13 dizisi ile (a) Spektrogram, (b) Yeniden Atanmış Spektrogram, (c) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. M-Dizisi-511 ile (d) Spektrogram, (e) Yeniden Atanmış Spektrogram, (f) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. Golay-512 dizi çifti ile (g) Spektrogram, (h) Yeniden Atanmış Spektrogram, (i) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar.	138
Şekil 4.47. DFM dalgaşekli ile (a) Spektrogram, (b) Yeniden Atanmış Spektrogram, (c) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. Costas kodlu dalgaşekli ile (d) Spektrogram, (e) Yeniden Atanmış Spektrogram, (f) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. DOFM dalgaşekli ile (g) Spektrogram, (h) Yeniden Atanmış Spektrogram, (i) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar.	140
Şekil 4.48. Yüksek Doppler kayması altında, Golay-512 dizisi ve (a) yeniden atama yöntemi, (b) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç. Yüksek Doppler kayması altında, DFM dalgaşekli ve (c) yeniden atama yöntemi, (d) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç. Girişim sinyali ve yüksek Doppler kayması altında, Golay-512 dizisi ve (e) yeniden atama yöntemi, (f) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç. Girişim sinyali ve yüksek Doppler kayması altında, DFM dalgaşekli ve (g) yeniden atama yöntemi, (h) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç.	143
Şekil 4.49. Darbant iyosonoda ve GBİKK yöntemlerinin benzetim ortamında karşılaştırılması	145
Şekil 4.50. Düşük SNR seviyeleri için oluşturulan AİK eğrileri	146
Şekil 4.51. Düşük SNR seviyelerinde darbant ve genişbant yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması	148
Şekil 4.52. 08 Ocak 2017 23:30 UT tarihinde Pruhonice istasyonundan alınan dikey iyonosonda ölçümü	150
Şekil 4.53. 08 Ocak 2017 23:30 UT tarihinde Pruhonice istasyonu için genişbant iyonosferik kanal kestirimi ile elde edilen sonuç	151
Şekil 4.54. Gecikme yayılması $\sigma_\tau = 0 \mu s$ iken aralarında 2 km mesafe bulunan katmanlara ait sonuç	152

- Şekil 4.55. Gecikme yayılması $\sigma_\tau = 10 \mu s$ iken aralarında 2 km mesafe bulunan katmanlara ait sonuç 153
- Şekil 4.56. 01 Nisan 1996 19:34 UT tarihinde Millstone Hill istasyonundan alınan dikey iyonosonda ölçümü..... 154
- Şekil 4.57. 01 Nisan 1996 19:34 UT tarihinde Millstone Hill istasyon ölçümü için genişbant iyonosferik kanal kestirimi ile elde edilen sonuç 154



ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Dikey iyonogram ile elde edilen kritik frekans ve katman yükseklik bilgileri	20
Çizelge 3.1. Yol özellikleri hesabı için kullanılan girdi parametreleri listesi ...	45
Çizelge 3.2. Güney Afrika ve Avrupa için benzetim yapılan istasyon koordinatları	55
Çizelge 4.1. Eşitlik 4.5'te geçen ifadeler ve açıklamaları	77
Çizelge 4.2. KD bandındaki gürültü kaynakları	93
Çizelge 4.3. İyonosferik kayıp değerleri [6]	95
Çizelge 4.4. İkili faz Barker kodları	100
Çizelge 4.5. Dalga şekillerine ait Crest faktörü değerleri	126
Çizelge 4.6. Zaman frekans analiz yöntemleri karşılaştırma	135
Çizelge 4.7. Kullanılan dalgaşekilleri ve parametreleri	136
Çizelge 4.8. Klasik darbant iyonosonda ve genişbant iyonosferik kanal kestirim yöntemleri için iyonogram oluşturma süreleri	156

SİMGELER VE KISALTMALAR

ADC	Analog Digital Converter
AİK	Alıcı İşletim Karakteristiği
AR	Auto Regressive
ARMA	Auto Regressive Moving Average
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CF	Crest Faktörü
CORS	Continuosly Operating Reference Station
DFM	Doğrusal Frekans Modülasyonu
DOFM	Doğrusal Olmayan Frekans Modülasyonu
DPS	Digital Portable Sounder
DSTO	Defense Science and Technology Organization
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FPGA	Field Programmable Gate Array
FFT	Fast Fourier Transform
GBİKK	Geniş Bant İyonosferik Kanal Kestirimi
GIM	Global Ionospheric Map
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
IGS	Internation GNSS Service
IRI	International Reference Ionosphere
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
ITS	Institute for Telecommunication Science
ITU	International Telecommunication Union
KSFD	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
LPI	Low Probabilty of Intercept

MA	Moving Average
MUF	Maxmum Usable Frequency
PGH	Precision Group Height
PN	Pseudo Noise
PPM	Parts Per Million
RFIM	Radio Frequency Interference Mitigation
RKA	Radar Kesit Alanı
SNR	Signal to Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SSN	Sun Spot Number
TEİ	Toplam Elektron İçeriği
TID	Travelling Ionospheric Disturbance
TYH	Tepe Yan Hüzme
UT	Universal Time
WGS	World Geodetic System
WVD	Wigner Ville Dağılımı

SÖZLÜK DİZİNİ

İkili	: Binary
Sözde Rasgele	: Pseudo Random
Yayılm	: Dispersion
Sondalama	: Probing
Cıvıltı	: Chirp
Tamamlayıcı	: Complementary
Hassas Grup Yüksekliği	: Precision Group Height
Döngü	: Duty Cycle
Darbe Sıkıştırma	: Pulse Compression
Eşvreli Toplama	: Coherent Integration
Darbeler Arası	: Interpulse
Darbe İçi	: Intrapulse
Gezen İyonosferik Bozulma	: Travelling Ionospheric Disturbance
Ters Sentetik Açıklıklı Radar	: Inverse Synthetic Aperture Radar
Menzil	: Range
Yakalanma Olasılığı Düşük	: Low Probability of Intercept
Dalgaşekli	: Waveform
Eşleşme	: Coupling
Yeniden Atama	: Reassignment
En büyük Kullanılabilir Frekans	: Maximum Usable Frequency
Yayılı İzge	: Spread Spectrum
Yüklü Parçacık	: Photon
Çarpışma Frekansı	: Collision Frequency
Vuru	: Beat
Belirlenimci	: Deterministic
Rasgele	: Stochastic
Bağ	: Link
Yayıлма	: Spread

Kayma	:	Shift
Verici	:	Transmitter
Alıcı	:	Receiver
Uyumlu	:	Macthed
Yazmaç	:	Register



1. GİRİŞ

Günümüzde uzak mesafe ile haberleşme amacıyla kullanılan yöntemlerden biri kısa dalga (KD) haberleşmedir. KD bandındaki sinyaller atmosferin üst tabakalarından biri olan iyonosferden kırılma ve yansıma mekanizması ile uzak mesafelere erişebilirler. İyonosfer, farklı yüksekliklerde farklı yoğunluğa sahip iyonlaşmış gazlardan oluşur. İyon yoğunluğundaki bu farklılık, KD bandında yer alan ve iyonosfere ulaşan radyo dalgalarının farklı yükseklik ve açılardan yansıyarak yeryüzüne ulaşmasına neden olur. Bu etki nedeniyle iyonosferik KD kanalı, standart kablolu bir iletişim kanalına kıyasla farklı problemleri içerisinde barındırmaktadır.

1960'lı yıllara kadar yoğun olarak kullanılan KD haberleşme, uydu teknolojilerinin gelişmesi ile ikinci plana atılmıştır. Uyduların kurulum ve bakım maliyetlerinin yüksekliğine rağmen uzak mesafelerde yüksek hızlarda iletişime imkan tanımaları, KD sistemlerine olan ilgiyi azaltmıştır. Bu nedenle KD sistemler uzak mesafe haberleşme için ikincil sistem olarak kullanılmışlardır. Ancak son yıllarda KD bandı çalışmaları yeniden araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamıştır. Uydu teknolojilerinin geliştirme maliyetleri, her ülkenin bu teknoloji alt yapısına sahip olmaması, savaş zamanlarında uyduların tehditlere açık konumda olması bu ilginin artmasındaki başlıca etkenlerdir. Araştırmacılar bu amaçla KD kanal yapısını, bu kanalda kullanılacak genişbantlı yüksek veri hızına sahip iletişim tekniklerini, iyonosfer tabakasının özelliklerini detaylı olarak incelemektedir.

İyonosfer araştırmaları kapsamında yapılan çalışmalar içerisinde coğrafi lokasyona, tarihe, saate bağlı olarak iyonosfer özelliklerini kestiren yazılımlar, uydu sistemlerini kullanarak yapılan tomografik iyonosfer görüntülemeleri, yüksek güçlü ufuk ötesi radarlar ile yapılan alt ve üst iyonosfer ölçümleri sayılabilmektedir. Bunun haricinde, yeryüzünde çeşitli lokasyonlara konumlandırılmış olan ve kısa zaman dilimleri içerisinde iyonosfer tabakasından detaylı ölçüm toplayabilen iyonosondalar için de geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu cihazlar temel olarak istenilen bölge üzerindeki iyon yoğunluğunu bulmak için kullanılırlar. İyonosondalar, KD radar ve KD radyo gibi iyonosfer kanalını kullanan sistemler için destek amaçlı kullanımlarının yanında

plazma fizikçilerinin ilgi alanına giren iyonosferdeki farklı iyon yoğunluğuna sahip yapıların, güneş patlamaları, dünyanın manyetik alanı vb. dış etkenler ile değişimini incelemek amacıyla da kullanılmaktadırlar.

Bu tez kapsamında, iyonosonda ölçümlerinin oluşturulması ve ölçüm yönteminde yapılabilecek iyileştirmeler üzerinde durulmuştur. Halihazırda bu amaçla kullanılabilecek bir iyonosonda donanımı bulunmadığından, öncelikle mevcut iyonosonda operasyonu benzetim ortamında yeniden oluşturulmuştur. Darbant İyonosonda Benzetim Ortamı başlığı verilen Bölüm 3'te, gerçek bir iyonosonda ölçümünü meydana getiren aşamalar; ışın izleme, iyon yoğunluğu kestirimi ve KD kanal modeli araçlarının bir arada entegre bir şekilde kullanılması ile benzetim ortamına aktarılmıştır. Oluşturulan benzetim ortamı kullanılarak elde edilen sonuçlar, gerçek iyonosonda ölçümleri ile farklı iyonosferik koşullar altında karşılaştırılmış ve benzetim ortamının doğrulanması sağlanmıştır. Aynı zamanda bu çalışmalar, mevcut iyonosonda operasyonunda iyileştirme yapılabilecek noktaların tespit edilmesini sağlamıştır. Bu nedenle bir sonraki aşamada, yüksekliğe bağlı iyon yoğunluğu bulma problemi, farklı bir yaklaşımla ele alınmış ve Bölüm 4'te Genişbant İyonosferik Kanal Kestirimi başlığı altında incelenmiştir. Buna göre, iyonosondaların temel çıktısı olan iyonogram verisinin, zaman frekans analizi ile kanal kestirimi yapılarak, daha düşük güç ve daha kısa sürede oluşturulabildiği görülmüştür. Ayrıca önerilen yöntemle, iyonosferik koşullara bağlı olarak daha yüksek menzil çözünürlüğüne sahip sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Bölüm 3 ve 4'te yapılan çalışmaların detaylarının daha iyi anlaşılması için iyonosfer özellikleri ve iyonosondalar ile ilgili bilgiler Bölüm 2'de verilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve yapılması planlanan gelecek çalışmaları Bölüm 5'te yer almaktadır.

1.1 Motivasyon

Konum, tarih ve saat, mevsim, güneş faaliyetleri gibi pek çok parametreye bağlı olarak değişiklik gösteren iyonosfer tabakası hakkında bilgi toplamak için sıklıkla kullanılan araçlardan birisi iyonosondadır. İyonosonda istasyonlarının kurulumu maliyetlidir ve işletilmeleri belirli bir uzmanlık gerektirmektedir. Bu nedenle, dünya üzerinde belirli

bölgelere toplanmış, sınırlı sayıda istasyon bulunmaktadır. Dolayısıyla bazı noktalar için ölçüm toplanamamaktadır. Bu zaafiyeti gidermek üzere, uzaydan tomografik ölçüm yöntemleri ve yer ölçüm noktaları arası aradeğerleme yaklaşımları ile iyonosonda ölçümü alınamayan noktalar için veri oluşturulmaya çalışılmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, benzer problem iyonosonda operasyonu açısından ele alınmış ve iyonosonda operasyonunda gerçekleşen aşamalar benzetim ortamına aktarılarak, dünya üzerindeki herhangi iki nokta arasında iyonosonda ölçümüne benzer ölçümleri oluşturabilen bir yazılım altyapısı geliştirilmiştir. Bu çalışmalara ait detaylar Bölüm 3'te yer almaktadır.

İyonosonda istasyonları dünya üzerinde kurulu oldukları birçok noktadan günün her saatinde belirli aralıklarla ölçüm almaktadır. Dolayısıyla sürekli aktif olarak çalıştıkları varsayılabilir. İyonosondaların çalıştıkları KD bandında, iyonosferin özelliğinden dolayı yapılan yayın yansıyarak pek çok noktaya ulaşmaktadır. Bu nedenle, iyonosonda operasyonlarının belirli kriterler içerisinde düzenlenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Günümüzde kullanılan iyonosondalar için bu tür bir kriter bulunmadığından, günün herhangi bir saatinde yapılan KD spektrum izlemesinde, aktif bir iyonosonda yayınına rastlanabilmektedir. Bu amaçla tez kapsamında yapılan çalışmalarda, hem iyonosonda ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde alınması hem de bu esnada diğer KD spektrum kullanıcılarının mümkün olduğunca az etkilenmesini sağlayacak yöntemler üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmalara ait detaylar Bölüm 4'te yer almaktadır.

1.2 Literatürde Yer Alan Çalışmalar

İyonosondaların tarihsel gelişimleri incelendiğinde, darbeli iyonosondalar ile ilgili ilk ciddi sinyal işleme çalışması 1964 yılında Coll ve Storey tarafından yapılmıştır [7]. Araştırmacılar klasik darbeli iyonosonda üzerinde darbe içi çipler kullanarak çıkış tepe gücünün düşürülebildiğini göstermişlerdir. Çalışmada tek darbe kullanan 100 kW çıkış gücüne sahip bir iyonosonda yerine, 17 çip uzunluğuna sahip bir ikili dizi ve 1 kW çıkış gücü ile iyonosferik katman yüksekliklerinin belirlenebildiği gösterilmiştir.

Fenwick ve Barry, 1965 yılında benzer bir amaçla o güne kadar kullanılan darbeli iyonosondaların çıkış güçlerini düşürmek için, frekans modülasyonlu iyonosonda prensibini kullanmayı önermişlerdir [8]. Çalışmalarında iyonosonda için frekans modülasyon sinyallerini kullanmışlar ve çıkış gücünü 25 – 250 W mertebelerine düşürmüşlerdir. Bu yapıda darbant girişim sinyallerinin klasik darbeli iyonosondaya göre performansı daha az etkilediği görülmüştür. Ancak iyonosondada kullandıkları frekans modülasyon sinyallerini uygun şekilde algılayabilmek için alıcı ve vericinin birbirinden ayrık olması gereksinimi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum özellikle dikey ölçümler için problem yaratmaktadır.

Wright çalışmasında darbeli iyonosonda prensibinden yararlanmış 0 – 50 MHz arasında 0.01 Hz frekans çözünürlüğünde darbeler üretebilen tasarımını anlatmıştır [9]. *Dynasonde* ismi verilen iyonosondanın o dönemde kullanılan iyonosondalardan farkı, bilgisayarla programlanabilen bir frekans örüntüsü ile KD bandını tarayabilmesidir. Cihaz klasik darbeli radar prensibi ile çalışmaktadır ve 30 kW çıkış tepe gücüne sahiptir.

1971 yılında yaptığı çalışmada Barry, dikey iyonosondalar için kullanılacak bir FMCW sinyal yapısı önermiştir. Buna göre iyonosfere gönderilen FMCW sinyalde darbeli iyonosondadakine benzer aktif ve pasif olma süreleri eklenmiştir [10]. Sinyal periyodunun yarısında aktif kalıp kalan yarıda da dinlemeye geçmektedir. Bu şekilde aynı lokasyona yerleştirilmiş alıcı ve verici anten birbirinden etkilenmemektedir. Ancak bu durumda dinleme anlarında sinyal üretilmemesi nedeniyle alıcıya ulaşan sinyal gücü daha düşük olmaktadır. Buna rağmen denemeler sırasında 8 W'lık çıkış tepe gücü ile iyi sonuçlar alınabilmektedir.

Barrick, FMCW radarlar üzerine yaptığı çalışmada *dechirping* kavramını ortaya çıkarmıştır. Buna göre göndericiden çıkan FMCW sinyal alıcıya geldiğinde gönderilen sinyalin zaman geciktirilmiş haliyle çarpılıp düşük geçiren filtre ile filtrelenmektedir [11]. Böylece alınan sinyal içerisinde hedefe ait menzil ve Doppler bilgilerinin bulunduğu bir dalgaşekli elde edilmektedir. Barrick günümüzde vuru frekansı adı verilen kavram üzerinde durmuş ve vuru frekansı ile menzil ve Doppler frekansı arasındaki ilişkileri açıklamıştır. Gerçekleştirdiği çalışmalarda FFT yapısını kullanarak gerçek za-

manlı sonuçlar elde etmiştir. Barrick'in bu çalışması sonrasında frekans modülasyonlu iyonosondalar için de benzer yaklaşımlar ile alıcı tasarımları geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

Bibl ve Reinisch, darbeleri sinyalleşme tekniğini kullanan ve iyonosfer ile ilgili pek çok veriyi aynı anda üretebilen bir iyonosonda geliştirmişlerdir [12]. *Digital Ionosonde* ismini verdikleri iyonosonda ile menzile, genlik, faz, Doppler kayması, geliş açısı ve dalga polarizasyonu ölçümlerini yapmışlardır. Klasik darbe radar prensibi ile çalışan iyonosondada *ionogram* ve *drift* olmak üzere iki temel mod bulunmaktadır. *Ionogram* modunda yüksek menzile çözünürlüğü (5 km) elde edilirken *drift* modunda yüksek Doppler (0.1 Hz) çözünürlüğü elde edilmektedir. Çalışmada Fourier dönüşümü ile eşvreli spektral toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Doppler frekansının sabit olmadığı durumlarda bu yöntemden yararlanılarak alıcıda yüksek SNR elde edilmiştir.

Poole, alıcı ve vericinin aynı lokasyonda olduğu frekans modülasyonlu iyonosondalar için sözde rasgele çipleri kullanarak yayın yapma ve dinleme bölgeleri oluşturan bir alıcı mimarisi üzerinde durmuştur [13]. Buna göre oluşturulan sinyal gönderilmeden önce vericide 1 ve 0 lardan oluşan darbe dizisi $g(t)$ ile çarpılırken alıcıdaki referans sinyali $1 - g(t)$ dizine göre anahtarlanarak aktif ve pasif bölgelerin kesişmesi engellenmiştir.

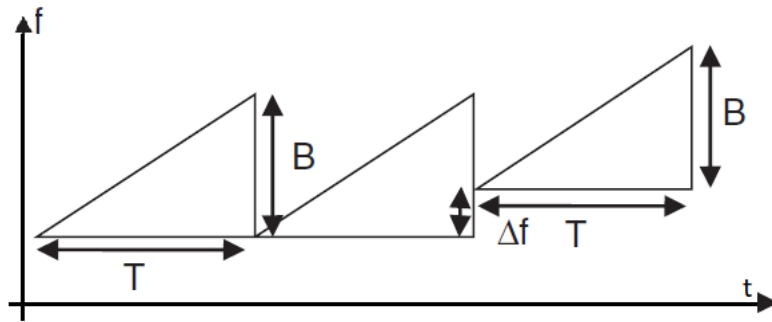
Poole'nin çalışması üzerine Shearman, FMCW sinyallerde kullanılan yapay rasgele çiplerin sinyal spektrumunda yarattığı etkileri incelemiştir [14]. Çalışmada bu sinyallerin klasik FMCW sinyallerine kıyasla spektrumu genişlettiği ve yan bantlardaki sinyallerden gelen karışmalara daha açık olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun üzerine yapay rasgele çipler belirli bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak sinyalin spektrumunda kapladığı alan kısıtlanmıştır. Bu şekilde sinyalin yan bantlarda yer alan darbent sinyallere karışması engellenmiştir.

Skaug ise makalesinde yüksek yayılıma sahip KD kanalı için yayılı izge sinyallerde kullanılacak bantgenişliğini bulmayı amaçlamıştır [15]. Çalışmada BPSK modüli sinyaller ile 64 uzunluğunda çip dizisi kullanılmıştır. Modem tarafından üretilen sinyal KD kanalından geçtikten sonra uyumlu filtre çıkışları incelenmiştir. 64 bitlik

çiplerden oluşan sinyallerin uyumlu filtre çıkışında temiz bir tepe noktası oluşturması beklenmiştir. Arkaya arkaya gönderilen sinyaller arasında oluşan farklı bir tepe noktası ise çok yollu yayılım etkisi olarak nitelendirilmiştir. Belirli periyotlarda gönderilen sinyaller 2.5, 10, 40, 80 ve 160 kHz alıcı bantgenişliklerinde incelenmiş ve genişletilmiş spektrumlu sinyaller için en uygun bantgenişliğinin 80 kHz olduğu sonucuna varılmıştır.

Wagner ve Goldstein da çalışmalarında 1 MHz bantgenişliğine sahip bir KD kanalının yayılım karakteristiğini ortaya koymuşlardır. Deneysel düzenek olarak kodlu-darbeli iyonosonda kullanmış ve sondalama yöntemi ile zaman düzleminde $1 \mu s$ çözünürlüğündeki veriler üzerinden grup gecikmesi, alınan sinyalin genliği, fazı ve gecikme yayılımını hesaplamışlardır [16]. Çalışma sonucunda KD kanalında kullanılabilecek anlık bantgenişliğinin, iyonogramdaki gecikme karakteristiğinin eğimine ve kanalın genişbant darbeye yarattığı yayılıma bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Poole yaptığı çalışmada, FMCW (frekans modülasyonlu sürekli dalga) sinyal tekniğini kullanan iyonosondalar için Şekil 1.1’de gösterilen üç hücre yapısını önermiştir [17]. Bu yapıda tarama süresi T en uzak mesafeden gelen yansıma sinyaline, hücreler arası faz farkı ise çözümlenecek Doppler – menzil belirsizliğine göre seçilmektedir. Geliştirilen sinyal yapısında ilk iki frekans tarama bölümünün başlangıç ve bitiş frekansları aynı iken son bölümündeki tarama paterni Δf farkla üretilmektedir. Δf çözümlenecek en yüksek Doppler frekansına göre seçilmektedir.



Şekil 1.1. Üç hücreli frekans modülasyonu

Salous, FMCW sinyallerini kullanan iyonosondalara olan ilginin artması üzerine frekans modülasyonlu dalgaşekillerinin sayısal olarak nasıl üretilebileceğini anlatan bir çalışma yapmıştır [18]. Salous öncelikle sinyal üretme tekniklerini sınıflandırmış ve sayısal yöntemleri ayrıntılandırmıştır. Buna göre frekans sentezleme yönteminde kullanılan frekans basamaklarının oluşan cıvıltı sinyalinin spektrumunda yan bantlar yarattığı temel bantta üretilen cıvıltı sinyallerinin ise daha kontrol edilebilir bir spektrum yaratma imkanı verdiği gözlenmiştir.

Lubdborg ve Lundgren, cıvıltı sinyalleri kullanılarak oluşturulmuş eğik iyonogram verileri üzerinde durmuşlardır [19]. Araştırmacılar, grup zaman gecikmesi eğrisinin eğimi ile iyonosferden yansıyan cıvıltı sinyalinin bantgenişliği arasındaki ilişkiyi bir formülasyona bağlamışlardır. Ayrıca buldukları formülasyonu sakin iyonosfer koşullarında alınmış veriler üzerinde deneyerek, ölçüm verileri ile formül sonucunda elde edilen verilerin birbirine yakın olduğunu göstermişlerdir.

Salous, Lubdborg ve Lundgren'nin çalışmasına benzer bir çalışma yapmıştır. O güne kadar yapılan çalışmalarda iyonogram verileri üzerinden bantgenişliği hesabı ancak kanal bantgenişliğinin gönderilen sinyalin bantgenişliğinden büyük olduğu durumlarda geçerlidir. Salous makalesinde bu yaklaşımı cıvıltı sinyalinin zaman-bantgenişliği çarpımı ile ilişkilendirerek daha genel bir formülasyon üzerinde durmuştur. Geliştirilen formülasyon gerçek veriler üzerinde deneyerek doğrulanmıştır [20].

Haines, doktora çalışmasında iyonosfer ile ilgili verilerin uzaktan algılanmasına yönelik olarak darbe radar prensibi ile çalışan iyonosondanın çıkış gücünü düşürmeyi ve fonksiyonel özelliklerini arttırmayı amaçlamıştır. Çalışmada eşevreli darbe sıkıştırma ve toplama, darbeler arası faz kodlama, sayısal hüzme şekillendirme, basamaklı frekans atlama ile menzil çözünürlüğünü artırma, süper çözünürlüklü geliş açısı hesaplama gibi sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. Ayrıca farklı darbe sıkıştırma yöntemleri dikey ve eğik iyonosondalar için incelenmiş; tamamlayıcı kodların dikey, m-kodların ise eğik iyonosondalar için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır [21].

Reinisch, çalışmasında Massachusetts Üniversitesi, Lowell tarafından 1993 yılında ge-

liştirilen *Digisonde-DPS* isimli iyonosondanın KD radar uygulamalarında kullanılabilceğini göstermiştir. Çalışmanın dikkat çeken noktası Hassas Grup Yüksekliği (HGY) adı verilen ve darbe genişliğinin ötesinde bir menzil çözünürlüğü elde etmeyi amaçlayan yöntemden bahsedilmesidir. Bu yöntemde komşu iki frekansta yer alan (5 kHz aralıklı) ve iyonosfere gönderilen darbelerin içerisindeki sinyalin faz değişimleri kullanılarak daha hassas menzil bilgisinin elde edilebileceği gösterilmiştir [22]. Ancak bu yöntemde farklı frekansta iyonosfere gönderilen sinyallerin aynı düzlemde yansıdığı varsayımı yapılmıştır.

Salous, tek antenli monostatik iyonosonda uygulamalarında kullanılan FMCW teknikleri için geliştirilmiş anahtarlama dizileri üzerinde durmuştur. O zamana kadar bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda anahtarlama dizilerinin yan etkileri olan menzil belirsizliğinin artması ve göndericideki ve alıcıdaki ortalama gücün düşmesi gibi etkiler için önlemler alınmıştır. Ancak anahtarlama dizilerinin sinyal spektrumunda yarattığı genişleme etkisi ve bu etki nedeniyle yan bantlardaki sinyaller ile olan girişim yeterince çalışılmamıştır. Salous makalesinde bu konuya yer vermiş ve farklı anahtarlama dizileri için kullanılacak farklı spektrum ağırlıklandırma fonksiyonları önermiştir. Anahtarlama dizileri için m-dizileri, Barry dizileri, %23 döngü dalga dizileri ve 20 bit Salous-Nattour dizileri kullanılmıştır. Buna göre yapılan çalışmalarda -60 dBW'den fazla gürültü tabanı olan sistemler için Hamming pencere fonksiyonunun kullanılması, daha düşük gürültü tabanına sahip sistemler için ise Von Hann pencere fonksiyonunun kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Zuccheretti ve arkadaşları, çalışmalarında düşük güçlü, küçük boyutlara sahip ve hafif bir iyonosonda tasarlamayı amaçlamışlardır. Bu yüzden geliştirdikleri iyonosondada darbe sıkıştırma ve eşevreli toplama gibi modern darbe radar tekniklerini kullanmışlardır. Darbe sıkıştırma işlemi için 16 bitlik tamamlayıcı faz kodunu kullanmışlar ve çıkış gücünü 250 W, menzil çözünürlüğünü ise 5 km mertebelerine getirmişlerdir. Çalışmacılar darbe sıkıştırma ve eşevreli toplama işlemleri sonrasında 25 dB işlem kazancı elde etmişlerdir [24].

Bibl, KD bandında en az gürültü kadar etkin olan darbantlı girişim sinyallerinin etkisini

gidermek için önerdiği yöntem ile patent almıştır [25]. Patentinde girişim sinyalinin frekansının tam olarak nasıl kestirildiğinden bahsetmiştir. Bibl sayısal olarak oluşturulan spektrum verisinin çözünürlüğünün eşvrelili toplama süresi ile ilişkili olduğunu söylemiş ve ara değerlerde oluşması muhtemel girişim sinyallerinin tam frekans kestirimi için bir yöntem önermiştir. Girişim sinyalinin frekansı kestirildikten sonra zaman ekseninde sinyalin tekrar oluşturulması için tek satırlı Fourier dönüşümü işlemi gerçekleştirilmektedir. Sonuçta elde edilen sinyal, alınan sinyalden eş evrelili olarak çıkarılarak girişim sinyalinin etkisi azaltılmaktadır. Çalışmada, algılanmak istenen sinyalden 40 dB yüksek değere sahip bir girişim sinyali olduğu durumda dahi, girişim sinyalinin etkin bir şekilde bastırıldığı gösterilmiştir.

Reinisch, Galkin, Khmyrov ve arkadaşları, gelişen sayısal teknoloji ile birlikte tamamen sayısal almaç mimarisine dayanan DPS-4D ismini verdikleri bir iyonosonda geliştirmişlerdir. İyonosonda 160 MHz saat hızında çalışan bir analog-sayısal dönüştürücü ile bütün bir KD bandını hiçbir analog çevrim olmaksızın sayısallaştırabilmektedir. Bu sayede geliştirilen iyonosonda ağırlık ve hacim olarak büyük bir avantaja sahiptir. İyonosondanın RF katında takipçi bant geçirgen filtreler kullanılmıştır. Bu filtrelerin amacı yüksek girişim sinyal ortamına sahip KD bandındaki karışım sinyallerinin analog sayısal dönüştürücüyü satüre etmesini engellemektir. Böylece asıl algılanmak istenen düşük güçlü yansıma sinyalinin uygun şekilde sayısallaştırılması sağlanmaktadır. Geliştirilen iyonosondada ayrıca Bibl tarafından 2005 yılında patenti alınan RF girişim önleme algoritması uygulanarak karışım sinyallerinin varlığında yüksek SNR değerlerinin elde edilmesi sağlanmıştır. İyonosondalarda yüksek SNR değerine sahip yansıma sinyallerinin olması, iyonogramların hızlı elde edilmesini sağlamaktadır. Çünkü belli bir frekansta sağlıklı iyonogram verisini oluşturmak için alıcı o frekansta kalarak yeterince fazla örnek toplamaya çalışmaktadır. DPS-4D eşvrelili darbe sıkıştırma ve toplama işlemlerinin yanı sıra, yüksek çözünürlüklü Doppler kestirimi, geliş açısı kestirimi, yüksek çözünürlüklü menzil kestirimi gibi birçok sinyal işleme tekniğini içeren oldukça gelişmiş yeni nesil bir iyonosonda olarak ön plana çıkmaktadır [26].

Landreth, Davis ve Robison, yaptıkları patent çalışmasında ultra düşük güçlü iyo-

sonda ismini verdikleri iyonosondanın çalışma prensibi ile ilgili detayları açıklamışlardır. Sistem temelde bir frekans modülasyonlu iyonosondadır. Ancak klasik iyonosondalardan farklı olarak hem alıcı hem de gönderici kısımları sürekli olarak aktiftir. Bilindiği gibi dikey iyonosondalarda alıcı ve gönderici antenler birbirlerine yakın konumda bulunmak durumundadır. Bu yapıda göndericinin alıcıyı satüre etmemesi gerekmektedir. Ancak algılanmak istenen yansıma sinyalinin belirli bir SNR değerinde olması için çıkış gücü yeterince yüksek olmalıdır. Araştırmacılar bu problemi çözmek için alıcıyı satüre etmeyen en yüksek güçteki çıkış gücünü esas almışlar ve iyonosfere göndermişlerdir. Alıcı tarafında çok düşük olarak algılanan yansıma sinyali uzun süreli eşvrelili toplama işlemi sonrasında istenen SNR değerine getirilmektedir. Klasik frekans modülasyonlu iyonosondalardaki gibi sadece alıcının veya sadece göndericinin aktif olduğu süreler olmadığı için eşvrelili toplama süresi belli limitler içerisinde istenildiği kadar uzatılabilir. Bu limitler iyonosfer tabakasındaki yansıma yüzeyinin hareketinden kaynaklanan Doppler frekansına ve alıcıdaki osilatörün faz gürültüsüne bağlıdır. Alıcıya ulaşan yüksek güçlü gönderici sinyali kendisi ile aynı frekansta salınan bir osilatör ile çarpılarak sıfır frekansına indirilip filtrelenmektedir. Böylece alıcı tarafında yalnızca belli bir yükseklikteki iyonosfer tabakasından yansıyan ve yansıdığı yüksekliğe bağlı olarak frekansı değişmiş eko sinyali elde edilmektedir. Çalışmada 100 mW çıkış gücü ile elde edilen iyonogram sonuçları paylaşılmıştır [27].

Shun, Ziwei, Feng ve Guangyou, çalışmalarında darbe sıkıştırma ve eşvrelili toplama işlemlerinin yanında KD bandındaki sinyallerin yüksek hızlı ADC ile direk sayısal çevrimini ve yüksek karışım sinyali durumlarında değişken merkezli bant geçirgen filtre yapılarını içeren bir iyonosonda tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Reinisch'in DPS-4D mimarisine çok benzeyen bu iyonosondada sayısal alt çevrim işlemleri analog bir çip yerine ADC örnekleme sonrasında yer alan FPGA entegresinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca darbe sıkıştırma işlemi için farklı kodlar incelenmiş ve 13 bit Barker kod ile 22 dB, 16 bit tamamlayıcı kod ile 35 dB işlem kazancı sağlandığı gösterilmiştir [28].

Barnes, Earl ve arkadaşları, gelişen sayısal sinyal sentezleme teknolojilerinden yararlan-

narak, KD bandında farklı frekanslarda oluşturdukları çok sayıda darbantlı frekans modülasyonlu sinyali kullanarak iyonogram sonucu elde edebildiklerini göstermişlerdir. Araştırmacılar, önerdikleri yöntemi kullanarak 10 W çıkış gücü ile alıcı-verici arasında 1610 km bulunan iki nokta arasına eğik iyonogram sonucu oluşturmuşlardır [29].

Yao, Chen, Zhao, Wang ve Bai, yaptıkları çalışmada geliştirdikleri iyonosondanın çıkış gücünü düşürmek için darbe sıkıştırma yöntemlerinden faydalanmışlardır [30]. Ancak çalışmanın dikkat çeken yanı klasik iyonosondalarda kullanılan darbe sıkıştırma yöntemlerinden farklı olarak darbeler arası ve darbe içi kodlama yapılarının kullanılmasıdır. Çalışmada darbe içi kodlama için 13 bit Barker ve 8 bit tamamlayıcı kodları, darbeler arası kodlama için ise 15 bit m-kodları ve 12 bit Wolfman-Goutelard kodları kullanılmıştır. Araştırmacıların sinyal yapılarını bu şekilde iki grupta toplamalarının nedeni, çalışmada kullanılan kodlama türlerinin özilinti fonksiyonlarının özellikleridir. Özilinti fonksiyonlarında aranan özellik tepe-yan hüzme (TYH) oranının yüksek olmasıdır. Barker ve tamamlayıcı kodların aperiodyik özilinti fonksiyonlarının TYH oranları yüksektir. Benzer şekilde m-kodlarının ve Wolfman-Goutelard (WG) kodlarının da periyodik özilinti fonksiyonlarının TYH oranları yüksektir. Bu nedenle her iki grupta yer alan kodlama türlerinin özelliklerinden en doğru şekilde yararlanmak adına darbe içi ve darbeler arası kodlama yapıları kullanılmıştır. Çalışmada TYH oranı açısından iyi periyodik özilinti özelliğine sahip m-kodları ve WG kodlarının faz hatalarına duyarlı oldukları, çok yol bileşenleri nedeniyle oluşan faz hatalarının sinyalin özilinti özelliğini bozarak menzil çözünürlüğünü etkilediği görülmüştür. Bu nedenle bu dalgaşekillerinin uzak mesafede ve düşük menzil çözünürlüğü gerektiren durumlarda daha kullanışlı olacağı değerlendirilmiştir. Bu özellik eğik iyonosondaları işaret etmektedir. Bunun tersi olarak Barker ve tamamlayıcı kodların da düşük darbe sıkıştırma kazancına sahip olduğu ancak çok yol bileşenlerine daha az duyarlı oldukları görülmüştür. Bu nedenle bu dalgaşeklinin dikey iyonosondalar için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada kullanılan iyonosonda dikey modda 100 W çıkış tepe gücü ile eğik modda ise 200 W çıkış tepe gücü ile kullanılmıştır.

Yukarıdaki başlıklarda yer alan çalışmalar, farklı dalgaşekilleri, spektrum tarama yön-

temleri, alıcı donanım mimarileri ve sinyal işleme teknikleri kullanarak, iyonosonda operasyonunu ve ölçüm sonuçlarını iyileştirmeye yönelik faaliyetleri içermektedir. Ancak bu faaliyetlerin gerçekleştirilmesi ve doğrulanabilmesi için ya gerçek bir iyonosonda donanımına sahip olunması ya da gerçekçi bir benzetim ortamının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında, mevcut iyonosonda operasyonuna ait aşamalar benzetim ortamında gerçekleşmiş ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca literatürde yer alan güncel çalışmalar, 100 – 600 W gibi yüksek çıkış güçlerinde ve 25 – 150 kHz/s mertebelerindeki düşük tarama hızlarında çalışan iyonosondalardan bahsetmektedir. Pek çok kullanıcı tarafından ortak olarak kullanılan KD spektrumunun, belirtilen güç ve tarama hızlarında, günün bütün saatlerinde işgal edilmesi, kullanıcılar açısından girişim problemi yaratmaktadır. Ayrıca düşük tarama hızı, anlık değişimlerin yaşandığı iyonosferik koşullarda, anlamlı sonuçların alınamamasına neden olmaktadır. Bu amaçla tez kapsamında yapılan çalışmalarda, düşük çıkış gücü ile hızlı sonuç oluşturmak için kullanılabilen bir yöntem önerilmiş ve iyonosonda ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak yöntemin geçerliliği doğrulanmıştır.

1.3 Tez Çalışmasının Literatüre Katkıları

Tez kapsamında yapılan çalışmalar "Darbant İyonosonda Benzetim Ortamı" ve "Genişbant İyonosferik Kanal Kestirimi" başlıkları altında toplanmaktadır. Her bir grupta yapılan çalışma için, literatüre katkı verdiği değerlendirilen noktalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Darbant İyonosonda Benzetim Ortamı;
 - Bir iyonosonda istasyonunun kurulması maliyetlidir ve uzmanlık gerektirmektedir. Bu yüzden gerçekçi bir benzetim ortamının oluşturulması önemlidir. Tez kapsamında, farklı coğrafi lokasyonlarda, fırtınalı ve sakin iyonosferik koşullar altında, ölçüm sonuçları ile benzer sonuçları üretebilen bir benzetim altyapısı geliştirilmiştir.
 - Dünya üzerinde kurulu çok sayıda iyonosonda istasyonu bulunmaktadır. Ancak buna rağmen ölçüm sonucu alınamayan çok fazla nokta bulunmaktadır.

tadır. Tez kapsamında oluşturulan altyapı ile ölçüm alınamayan noktalar için gerçekçi sonuçlar üretilebilmektedir.

– Geliştirilen benzetim ortamı, kanal koşullarını simüle edebilen bir kanal modelini içermektedir. Bu nedenle, gerçek bir iyonosonda donanımına ihtiyaç duymadan, farklı dalgaşekillerinin ve alıcı mimarilerinin başarımları, oluşturulan altyapı kullanılarak test edilebilmektedir.

- Genişbant İyonosferik Kanal Kestirimi;

– Mevcut darbant iyonosonda tekniği ile 2 – 15 dk mertebelerinde sonuç üretilebilmektedir. Önerilen yöntemde kullanılan yüksek anlık bantgenişliği nedeniyle, 20 – 70 ms mertebelerindeki sürelerde iyonogram izi oluşturulabileceği gösterilmiştir. Bu sayede özellikle, iyonosferin hızlı değişim gösterdiği fırtına durumlarında daha sağlıklı ölçüm alınabileceği değerlendirilmektedir.

– Mevcut iyonosondalar 100 – 600 W çıkış güçleri ile çalışmaktadır. Önerilen yöntem ile 20 W mertebelerinde çıkış gücü ile iyonogram izlerinin oluşturulabileceği gösterilmiştir. Yüksek bantgenişliği nedeniyle hızlı spektrum tarama ve düşük çıkış gücü sayesinde, önerilen yöntemin KD spektrumunda yer alan diğer kullanıcılara daha az girişim yaratacağı değerlendirilmektedir.

– Mevcut iyonosondalarda kullanılan 30 kHz mertebelerindeki anlık bantgenişliği nedeniyle, ölçüm sonuçları 5 km civarında çözünürlüğe sahiptir. Önerilen yöntemde kullanılan yüksek anlık bantgenişliği sayesinde, iyonosferik kanal koşulları uygun olduğu sürece, yüksek menzil çözünürlüğünde sonuçların oluşturulabileceği gösterilmiştir.

2. İYONOSFER ÖZELLİKLERİ ve İYONOSONDALAR

İyonosfer güneş ışınlarının etkisi ile iyonize olan gazlardan oluşan bir atmosfer tabakasıdır. Bu tabaka içerisinde keskin olmayan sınırlarla birbirinden ayrılmış katmanlara sahip olan ve 60 km ile 1100 km yükseklik arasında kalan katman, iyonosfer olarak isimlendirilmektedir. Güneş ve dünyanın manyetik alanındaki aktiviteler iyonosferin yapısı üzerinde değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimlerle beraber iyonosfer düzgün dağılmamış ve zamana göre değişim gösteren karmaşık bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla iyonosferin zamana ve konuma göre değişimi dağınık olmaktadır. İyonosondalar, birçok parametreye bağlı olarak değişen iyonosfer üzerinden ölçüm almak için kullanılan cihazlardır. Farklı konumlarda ve farklı zaman dilimlerinde topladıkları ölçüm verileri ile iyonosfer tabakasında gerçekleşen değişimlerin takip edilmesi açısından kritik öneme sahiptirler. Aşağıdaki başlıklar altında iyonosfer tabakası ve iyonosondalar ile ilgili temel bilgiler paylaşılmış olup, daha detaylı bilgiler için [1] ve [31] kaynaklarından yararlanılabilir.

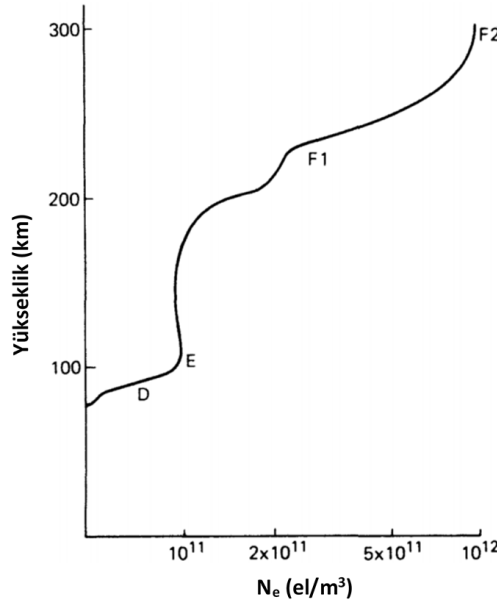
2.1 İyonosferin Özellikleri

İyonosfer, yerküreden 60 – 1100 km yükseklikte yer alan bir atmosfer tabakasıdır. Atmosfer içerisinde yer alan diğer tabakalardan farklı olarak iyonosfer, güneş kaynaklı radyasyon sebebiyle iyonize olmaktadır. İyonosfer tabakasında meydana gelen iyonlaşma, özellikle KD bandında yer alan radyo dalgalarının yayılımında kritik rol oynamaktadır.

İyonosfer tabakasını modellemek için kullanılan en önemli parametre elektron yoğunluk profilidir. Çünkü radyo dalgalarının yayılım patikaları, elektron yoğunluğuna göre belirlenen yansıma katsayılarına bağlı oluşmaktadır. Yaklaşık 30 MHz ve altındaki frekanslarda yer alan radyo dalgaları iyonosferden yansırken, bu frekansın üzerindeki radyo dalgaları iyonosfer etkisiyle yavaşlamaktadır. Örneğin günümüzde yaygın olarak hassas konum belirleme için kullanılan GPS sistemlerinde, iyonosfer etkisiyle meydana gelen gecikmeler alıcı sistemler tarafından düzeltilmektedir. İyonosferik aktivitelerin yoğun olduğu günlerde GPS alıcılarının beklenen hassasiyette çalışmadığı bilinmekte-

dir [32].

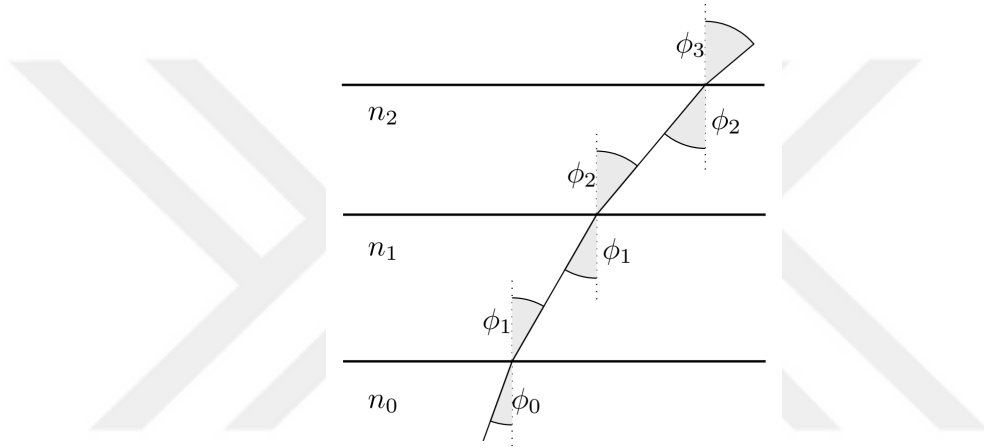
İyonosfer tabakasında meydana gelen iyonlaşmanın temel nedeni, güneşten kaynaklanan elektromanyetik radyasyondur [31]. Bu nedenle, güneşte meydana gelen aktiviteler ve dünya ile güneşin birbirine göre konumu, iyonlaşma miktarını etkilemektedir. Gündüz saatlerinde, güneş etkisiyle oluşan iyonlaşma miktarı en yüksek değerinde iken, gece saatlerinde iyonlaşma seviyesi düşmektedir. İyonlaşma, güneşten dünyaya ulaşan yüklü parçacıkların, atmosferde yer alan moleküllere çarparak elektron koparması ile meydana gelmektedir. İyonlaşma ile oluşan her bir elektrona karşılık pozitif yüklü bir iyon da oluşmaktadır. Ancak elektronlar, pozitif yüklü iyonlara kıyasla daha hızlı parçacıklar oldukları için, iyonosferin modellenmesinde elektron yoğunluğu kullanılmaktadır. İyonosfer tabakası içerisinde elektron yoğunluğu genel trendinin yüksekliğe bağlı olarak arttığı söylenebilmektedir. Şekil 2.1’de gündüz saatlerinde yüksekliğe bağlı elektron yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.1. Gündüz saatlerinde tipik olarak iyonosfer elektron yoğunluğunu dağılımı [1]

Şekil 2.1’de iyonosfer tabakasında yer alan katmanlar D, E ve F harfleri ile gösterilmiştir. Bu katmanlar arası keskin sınırla birbirinden ayrılmamakla birlikte, 60 – 85 km arası D katmanı, 85 – 140 km arası E katmanı, 140 – 500 km arası ise F katmanı olarak

tanımlanmaktadır. D katmanı, iyonosferde en düşük yüksekliğe sahip katmandır. İçerisinde yer alan iyonların çarpışma frekanslarının yüksek olması nedeniyle, bu katman içerisinde radyo dalgaları yüksek oranda soğurulmaktadır. İyonlaşmanın düşük olduğu gece saatlerinde D katmanı kaybolmaktadır. E katmanı ise düşük elektron yoğunluğuna sahip olmasına rağmen genellikle hem gece hem gündüz saatlerinde iyonosferde yer almaktadır. En üst iyonosfer katmanı olan F katmanı ise, yüksek elektron yoğunluğuna sahip olması nedeniyle en önemli iyonosfer katmanı olarak bilinmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, gündüz saatlerinde F katmanı F1 ve F2 olmak üzere alt katmanlara ayrılmaktadır.



Şekil 2.2. Snell Yasası’na göre ışının kırılması

İyonosfer tabakasına dik geliş açısı ile gelen bir radyo dalgası için elektron yoğunluğu ile yansıma frekansı arasındaki ilişki

$$f_c = 9\sqrt{N_e} \quad (2.1)$$

ile verilmektedir. Eşitlik 2.1’de geçen N_e (el/m^3) elektron yoğunluğunu, f_c ise yansıma frekansını ifade etmektedir. Farklı katmanlardan oluşan bir yapıda farklı her katman için bir kırılma indisi vardır. Bu tür bir durumda katmanlar arasında ilerleyen ışının kırılması Eşitlik 2.2’de verilen Snell Yasası’na göre

$$n_0 \sin(\phi_0) = n_1 \sin(\phi_1) = \dots = n_N \sin(\phi_N) \quad (2.2)$$

olarak hesaplanır. Eşitlikte geçen n kırılma indisini, ϕ ise gelen ışının normalle yaptığı açıyı ifade etmektedir. Şekil 2.2’de Snell Yasası’na göre katmanlar arası ışının kırılımı gösterilmektedir. İyonosfer için katmanlara ait kırılma indisleri

$$n^2 = 1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 \quad (2.3)$$

şeklinde hesaplanır. f_c ve n ışının geçmek istediği katmanın kritik frekansını ve kırılma indisini, f ise gelen ışının frekansını ifade etmektedir. Gelen ışının çarptığı yüzeyden yansımaları için $n = 0$ olmalıdır. Bu durumda Eşitlik 2.3’te kritik frekans ile gelen ışının frekansı birbirine eşit olduğunda $f_c = f$ yansıma gerçekleşmektedir. Ayrıca yansıma frekansı açığa bağlı olarak

$$f_0 = f_c \sec(\phi_0) \quad (2.4)$$

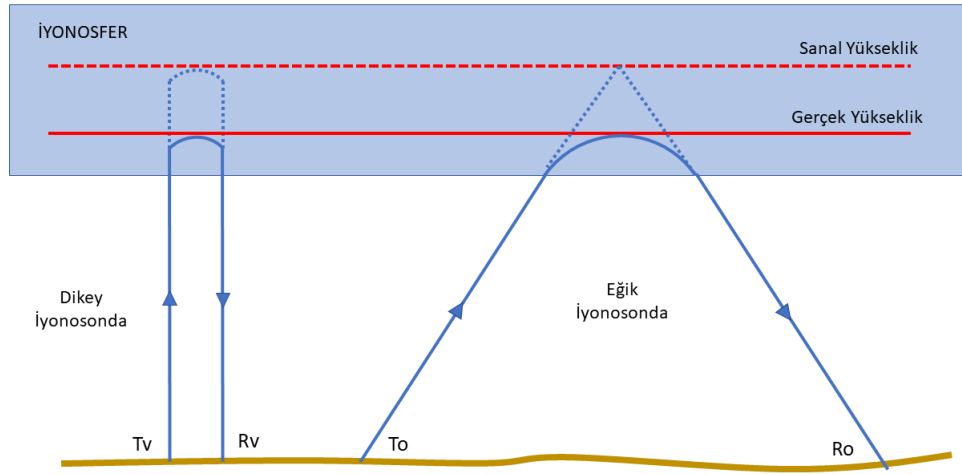
ile hesaplanmaktadır. f_0 iyonosfere ϕ_0 açısıyla ulaşan sinyalin frekansını ifade etmektedir. Eşitlik 2.4’te verilen ilişki nedeniyle, eğik açı ile iyonosfere ulaşan radyo dalgaları, daha yüksek frekanslarda yansımaya uğramaktadır.

Yukarıdaki paragraflarda anlatılanlar ışığında, iyonosfer içerisinde bulunan katmanların yüksekliklerinin ve elektron yoğunluklarının önemli parametreler olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle bahsi geçen parametrelerin hesaplanması veya kestirim yoluyla elde edilmesi gerekmektedir. Dinamik bir ortam olan iyonosfer için bu parametrelerin gerçek veya gerçeğe yakın zamanlı olarak bulunması kritik öneme sahiptir. Bu nedenle ölçümler yoluyla iyonosfer katmanları hakkında bilgi toplayan iyonosondaların KD iletişim ve radar sistemleri için önemli bir destek unsuru oldukları değerlendirilmektedir.

2.2 İyonosondalar

İyonosonda ismi İngilizce ‘*Ionospheric Sounding - Ionosonde*’ isimlerinin kısaltmasından türetilmiştir. İyonosondalar, KD bandında çalışan bir tür radar olarak değerlendirilebilmektedir. Prensip olarak radar ile aynı şekilde çalışmaktadır. İyonosfere gönderilen radar sinyalinin zaman gecikmesi ve frekansı ölçülerek ilgili iyonosfer katmanı için

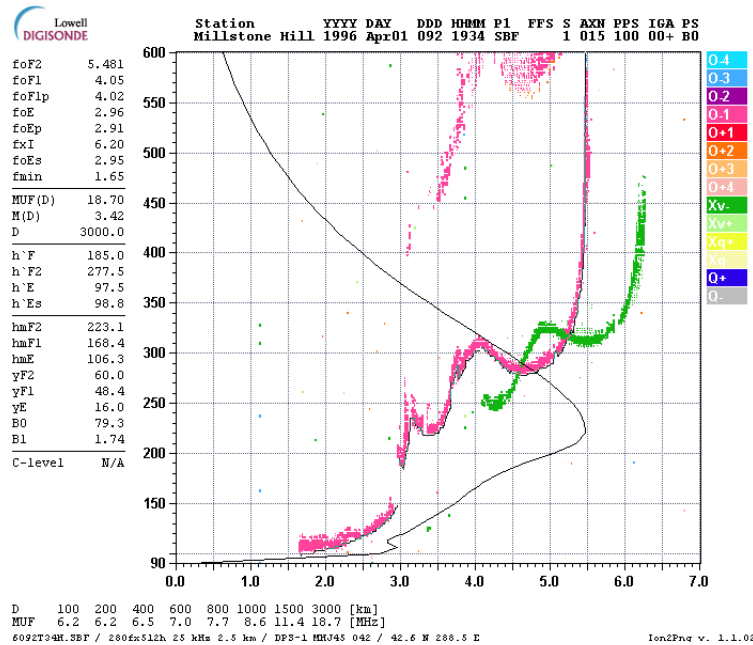
yükseklik ve elektron yoğunluğu bilgisi elde edilmektedir. İyonosondalar dikey ve eğik olmak üzere operasyonel olarak iki temel modda kullanılmaktadır. Dikey iyonosondalar çalışma alanı üzerinde bulunan, belirli bir alanı kapsayan iyonosfer tabakası ile ilgili bilgi vermektedir. Eğik iyonosondalar ise vericinin ve alıcının farklı konumlarda olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Özellikle deniz veya çöl gibi erişimin zor olduğu bölgeler üzerindeki iyonosfer tabakası hakkında bilgi edinmek için elverişlidirler. Alıcı ve vericinin bulunduğu her iki istasyonda GPS üzerinden aldıkları ortak referans ile zaman senkronizasyonunu sağlamaktadır. Şekil 2.3'te dikey ve eğik iyonosondaların çalışma geometrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Dikey ve eğik iyonosonda kullanım geometrileri

Şekilde görüldüğü gibi, iyonosonda vericisinden çıkan radyo dalgaları iyonosfer katmanlarından yansırarak yeryüzüne dönmektedir. Ancak, iyonosfer iyonlaşmış gazlardan oluşan yoğun bir ortam olduğu için radyo dalgalarının yayılım hızı düşmektedir. Bu sebeple Şekil 2.3'de gösterilen sanal yükseklik ve gerçek yükseklik tanımlamaları yapılmaktadır. Sanal yükseklik, radyo dalgalarının hızını, ışığın boşluktaki hızına eşit varsayarak hesaplanan yükseklik bilgisini vermektedir. Gerçek yükseklik bilgisi ise, sanal yükseklik ve iyonosferdeki iyon yoğunluğuna bağlı olarak geliştirilen ölçekleme yöntemleri ile elde edilmektedir [33].

Operasyonel olarak farklı senaryolarda kullanılan bu iki tür ionosondanın çıktıları da farklı olmaktadır. İyonosondalardan elde edilen çıktıya ionogram adı verilmiştir. Dikey ve eğik ionosonda kullanımı sonucunda elde edilen ionogram görüntüleri Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te verilmiştir. Her iki ionogram birbirine benzerlikler içermekle birlikte operasyonel kullanım senaryoları gereği bazı farkları bulunmaktadır. Temel mantığı anlamak açısından öncelikle dikey ionogram incelenmiştir. Dikey ionogram görüntüsünün verildiği Şekil 2.4'te yatay eksen frekansı, dikey eksen ise yansımanın gerçekleştiği sanal yüksekliği göstermektedir. İyonosonda için öncelikle sanal yükseklik hesabı daha sonra ise geliştirilen ölçekleme yöntemleri ile gerçek yükseklik hesabı yapılmaktadır. Şekil 2.4'te pembe renkle belirtilen noktalar sanal yüksekliği ifade etmektedir. Bunun altında yer alan siyah çizgi ise ölçekleme sonucunda elde edilen gerçek yükseklik bilgisini göstermektedir. Görüldüğü gibi ionosfer içinde yol alan dalganın hızı düşük olduğundan gerçek yükseklik değerleri daha küçüktür. Şekil 2.4'te sanal yükseklik noktalarının üzerinde yine pembe renkte ama daha dağınık şekilde bazı sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar bir kere ionosfere çarpıp dönen sinyallerin yeryüzüne çarpıp tekrar ionosfere dönmesi nedeniyle oluşan ölçüm sonuçlarıdır. Bu sonuçlar ölçekleme yöntemlerinde hesaba katılmazlar.

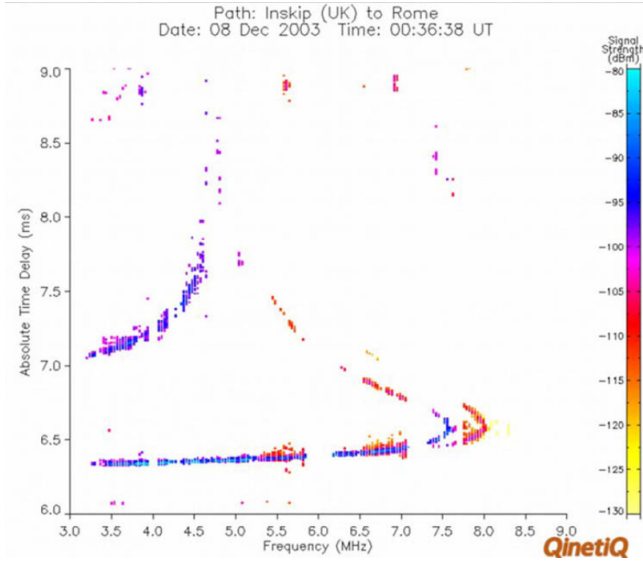


Şekil 2.4. Ölçüm sonucunda elde edilmiş örnek bir dikey ionogram sonucu [2]

Çizelge 2.1. Dikey ionogram ile elde edilen kritik frekans ve katman yükseklik bilgileri

f_oF2	F2 katmanı için ölçekleme sonrası hesaplanan kritik frekansı
f_oF1	F1 katmanı için ölçekleme sonrası hesaplanan kritik frekansı
f_oE	E katmanı için ölçekleme sonrası hesaplanan kritik frekansı
MUF	en yüksek kullanılabilir frekans
h_mF2	F2 katmanının ölçekleme sonrası hesaplanan yüksekliğini
h_mF1	F1 katmanının ölçekleme sonrası hesaplanan yüksekliğini
h_mE	E katmanının ölçekleme sonrası hesaplanan yüksekliğini

Dikey ionogram üzerinde pek çok farklı renkte gösterim yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi yukarıda bahsedilen sanal ve gerçek yükseklik çizgileridir. Bununla beraber şekilde yeşil noktalarla belirtilen sonuçlar farklı polarizasyona sahip yansıma sinyallerini göstermektedir. Pembe noktalarla belirtilen sonuçlar sıradan, yeşil noktalarla belirtilen sonuçlar ise sıradışı dalgalara ait sonuçlardır. Günümüzde geliştirilen modern ionosondalar, frekans, yükseklik, genlik, faz, Doppler kayması ve yayılması, geliş açısı, dalga polarizasyonu gibi birçok parametreyi ölçebilmektedir [26]. Bunlardan frekans, yükseklik ve Doppler kayması KD iletişim için kullanılan kritik bilgileri içermektedir. Bununla beraber KD yön kestirim sistemleri için geliş açısı bilgisi de önemli ionogram çıktılarından birisidir. Bu sayede ionosferin ilgili bölgesindeki katmanların eğimleri bulunarak o katmandan yansıyan sinyal için daha hassas yön kestirimi yapılabilmektedir. Şekil 2.4'te sol kolonda elde edilen ionogram üzerinden hesaplanmış kritik frekans ve yükseklik bilgileri yer almaktadır. Gerekli açıklamalar Çizelge 2.1'de verilmiştir. Alt satırda ise farklı menzil değerleri için en yüksek kullanılabilir frekans (MUF) değerleri verilmiştir. MUF hesabında daha önce anlatılan, 2.4'te kritik frekans ile ışının gelme açısı arasındaki ilişki kullanılmaktadır.

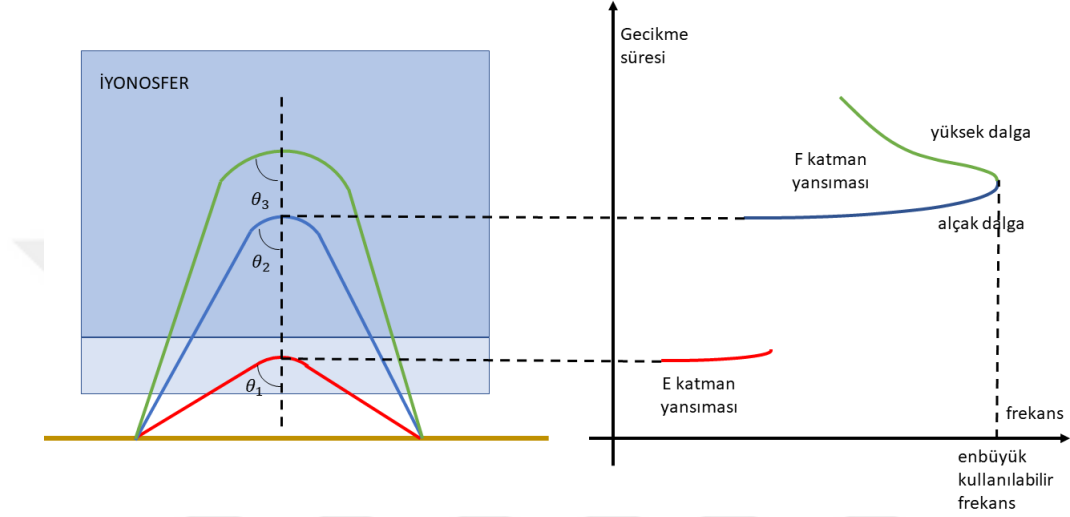


Şekil 2.5. Ölçüm sonucunda elde edilmiş örnek bir eğik ionogram sonucu [3]

Şekil 2.5'te ise eğik ionosonda ile alınan bir ionogram sonucu verilmiştir. Dikey ionogramdan farklı olarak dikey eksen gecikme süresini göstermektedir. Yatay eksenindeki frekans değerlerinin, radyo dalgalarının ionosfere geliş açısı nedeniyle, dikey ionograma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bazı frekans değerlerinde iki farklı zaman gecikmesi elde edilmiştir. Çünkü vericiden belli bir hüzmeye genişliğinde çıkan radyo dalgaları ionosfere farklı geliş açıları ile ulaşmakta, dolayısıyla farklı yükseklikteki katmanlarından yansımaktadır. Bu durum, Şekil 2.6'de görsel olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.6'da kırmızı ile gösterilen ışın ionosferdeki E katmanına θ_1 açısıyla ulaşmış ve kırılarak alıcıya doğru yönelmiştir. E katmanı yüksekliği ve kritik frekansı nedeniyle, Şekil 2.6'da verilen şekilde ionogram izi oluşturmaktadır. Mavi ve yeşil ile gösterilen ışınlar ise bazı bölgelerde aynı frekansa sahip olmalarına rağmen farklı yüksekliklerden yansydıkları görülmektedir. Bunun nedeni mavi ışının θ_2 , yeşil ışının θ_3 geliş açısına sahip olması ve $\theta_2 > \theta_3$ olmasıdır. Dolayısıyla Şekil 2.6'de verilen şekilde benzer frekanslarda farklı gecikme sürelerine sahip ionogram izleri oluşturmaktadır. Bu durumu nümerik bir örnek ile açıklamak gerekirse, ionosfere ulaşan ışının frekansı $f_0 = 5$ MHz ve sırasıyla geliş açılarının $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$ olduğu varsayıldığında,

Eşitlik 2.4’de verilen ilişki kullanılarak, yansımaların gerçekleştiği kritik frekans f_c değerleri sırasıyla $f_{c2} = 3.535$ MHz ve $f_{c3} = 4.330$ MHz olmaktadır. Kritik frekans ve iyon yoğunluğu arasında Eşitlik 2.1’de verilen ilişki ve Şekil 2.1’de iyon yoğunluğunun yüksekliğe bağlı değişimi incelendiğinde, iyonosfere θ_3 açısıyla ulaşan ışının, θ_2 açısıyla ulaşan ışına göre daha yüksek katmanlardan yansıtacağı anlaşılabilmektedir.



Şekil 2.6. Eğik iyonosonda ve tipik dikey iyonogram sonucu

2.2.1 İyonosondaların Tarihsel Gelişimi

İyonosfer tabakası ile ilgili çalışmalar, Marconi’nin KD bandında uzun mesafeler arasında haberleşmeyi başarmasından sonra başlamıştır. Araştırmacılar birbirinden oldukça uzak noktalar arasında haberleşme yapılmasını sağlayan atmosferdeki yansıtıcı yüzey ile ilgili daha fazla bilgi edinmek istemişlerdir. Bu amaçla ilk olarak 1925 yılında Appleton ve Barnett iyonosfer tabakasının yüksekliğini bulmak için çalışmalar yapmışlardır [34]. Bunun ardından 1926 yılında Breit ve Tuve benzer bir yaklaşımla iyonosfer katmanlarının atmosfer içindeki konumlarını bulmak için yöntemler geliştirmişlerdir [35]. Ancak geliştirilen her iki iyonosonda da operatör kontrollü olarak frekans değiştirmekte dolayısıyla oldukça uzun sürede bütün KD bandı için sonuç üretebilmektedir. II. Dünya Savaşı’ndan sonra geliştirilen frekans taramalı osilatörler sayesinde bu süreler saatler mertebelerine kadar indirilebilmiştir. Ancak bu defa

problem yüksek girişim sinyallerinin ionosonda performansını düşürmesi olmuştur. Bunun üzerine girişim sinyalleri için analog devrelerde alınan önlemler geliştirilen ionosondanın boyutlarını oldukça büyütülmüştür [36]. Ayrıca o yıllarda radar sinyal işleme tekniklerinin yeterince gelişmemiş olması sinyal çıkış güçlerinin de yüksek olmasını gerektirmektedir. Örneğin 1960'lı yıllarda Avrupa'nın pek çok noktasında kullanılan *Panaroma Ionosonde* yaklaşık 50 kW'lık çıkış gücüne sahiptir. Sonrasında sayısal devre elemanlarının gelişmesi ile ionosondalar da daha küçük boyutlara ve çıkış güçlerine sahip hale gelmeye başlamıştır. 1970 yılında geliştirilen *Digisonde-128* sayısal sinyal işleme tekniklerini kullanarak çıkış gücünü 10 kW mertebelerine düşürmüştür ve boyutları da büyüklüğünden dolayı büyüklüğüne indirmiştir. Bu aşamadan sonra ionosondaları oluşturan bileşenler geliştikçe, ionosonda mimarisi de benzer şekilde değişmiştir [36]. Cihazlar giderek daha küçük boyutlara ulaşmış ve daha düşük çıkış güçlerinde çalışmışlardır. Günümüzde kullanılan darbeli ionosondalar yaklaşık 100 W çıkış gücü ile sağlıklı sonuçlar elde edebilmektedir. Tarihsel açıdan ionosondaların fiziksel değişimi Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmiştir [37].



Şekil 2.7. *Digisonde* ionosondasının zamanla fiziksel değişimi



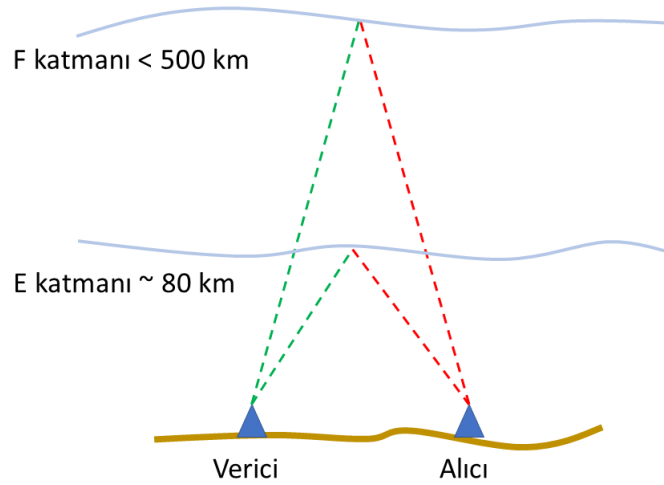
Şekil 2.8. *Wuhan* ionosondasının zamanla fiziksel değişimi

2.2.2 İyonosondaların Çalışma Prensipleri

Yukarıda anlatıldığı gibi iyonosonda KD bandında çalışan bir tür radar olacak tanımlanabilmektedir. Tipik bir radar uygulamasında olduğu gibi iyonosondalar da, iyonosfere gönderilen radyo dalgalarının frekansa bağlı gecikme süreleri ölçülerek ilgili iyonosfer katmanı için yükseklik ve elektron yoğunluğu bilgisi elde edilmektedir. İyonosondalar, kullandıkları dalgaşekline bağlı olarak darbeli ve frekans modülasyonlu olmak üzere iki başlık altında incelenebilmektedir.

2.2.2.1 Darbeli İyonosonda

Darbeli iyonosondalar, darbe radarlarında olduğu gibi, darbe genişliği ve darbe tekrarlama periyodu gibi temel parametreleri kullanarak ölçüm yapmaktadır. İyonosonda aslında iyonosfer ölçümleri için geliştirilen bir radar olduğu için radar parametrelerinin bu ölçüm için uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.9. Katman yükseklikleri ve darbeli iyonosonda parametreleri ile ilişkisi

Şekil 2.9’da iyonosferin en alt katmanlarından olan E katmanı ile F katmanının yaklaşık yükseklikleri verilmiştir. Buna göre tasarlanan darbeli radarın darbe genişliği ve darbe tekrarlama periyodu uygun şekilde belirlenmelidir. 80 – 90 km yükseklikte E katmanından yansıyan sinyal gönderildikten yaklaşık 600 μ s sonra geri dönmektedir. Bu nedenle

bu değerden daha büyük seçilecek darbe genişliği değeri E katmanından yansıyan sinyalleri ayırt edemeyecektir. Bununla beraber en yüksek katman olan F katmanı yaklaşık 500 km'de yer almaktadır. Bu yükseklikten yansıyan sinyal de gönderildikten 3.3 ms sonra alıcıya ulaşmaktadır. Dolayısıyla darbe tekrarlama periyodunun bu değerden daha büyük seçilmesi gerekmektedir. Bu şekilde darbeleri bir radar için temel parametrelerden olan darbe genişliği ve darbe tekrarlama periyodu belirlenmektedir. Yaygın olarak kullanılan DPS-4D iyonosondasında darbe genişliği $533 \mu s$, darbe tekrarlama periyodu 5 ms olarak belirlenmiştir [38].

Darbeleri bir iyonosonda için hesaplanması gereken parametrelerden biri de darbenin tepe gücüdür. İyonosferde ilerleyen elektromanyetik dalga yüksek yayılım kaybına uğramaktadır. Bu durum iki yönlü (gidiş-dönüş) radar operasyonunda alınan sinyalin SNR değerini düşürmektedir. Bu nedenle darbeleri iyonosondalarda SNR değerini yükseltmek için çeşitli sinyal işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Darbe birleştirme bu yöntemlerden biridir. Bu yöntemde arka arkaya alınan darbeler eş evreli olacak şekilde toplanarak oluşan sinyalin SNR değeri yükseltilir. Bu yöntemi bir örnek üzerinden incelemek gerekirse; A genliğinde bir darbe için M tane eş evreli darbe toplanırsa, sonuçta oluşan darbenin gücü,

$$P_s = M^2 A^2 \quad (2.5)$$

olur. Bu durumda sinyal üzerindeki beyaz Gauss gürültüsünün gücü ise,

$$P_n = M \sigma_n^2 \quad (2.6)$$

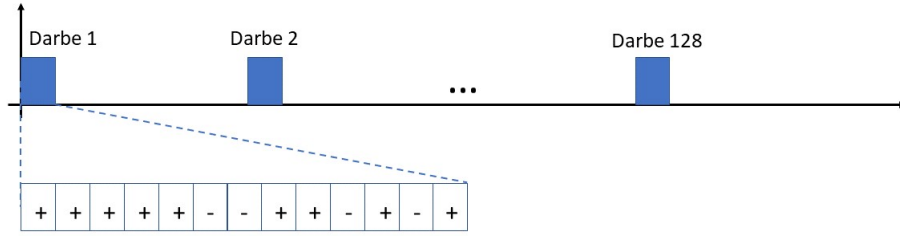
olarak hesaplanır. σ_n^2 gürültünün değışintisini ifade etmektedir. Buna göre hesaplanan SNR değeri,

$$SNR = \frac{M^2 A^2}{M \sigma_n^2} = \frac{M A^2}{\sigma_n^2} \quad (2.7)$$

olur. Dolayısıyla oluşan sinyalin SNR değeri toplanan darbelerin sayısı arttıkça artmaktadır. Bu sonucun oluşmasındaki temel neden gürültü sinyalini oluşturan örneklerin

birbirinden bağımsız süreçlere ait örnekler olmasıdır. Ancak darbeyi oluşturan sinyal örnekleri eş evreli örneklerdir ve yapıcı olarak toplanarak sinyal gücünü arttırmaktadır. Darbe toplama ile elde edilen işlem kazancı, Eşitlik 2.7’de görüldüğü gibi, darbe sayısı (M) ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla işlem kazancı $G = 10 \log_{10}(M)$ ile hesaplanabilmektedir.

Darbeler fazları bozulmadıkları sürece eş evreli olarak toplanabilirler. Ancak gerçek koşullarda sinyal fazının Doppler etkisiyle bozulması veya ani faz değişikliklerinin oluşması muhtemeldir. Bu nedenle belirli bir süre içindeki darbeler eş evreli olarak toplanabilir. Bu süreye eşevreli toplama süresi adı verilmiştir [39].



Şekil 2.10. Darbeli iyonosonda dalgaşekli

Sinyalin SNR değerini arttırmak için kullanılan yöntemlerden biri de darbe içerisinde faz veya frekans modüleli kodlar yerleştirmektir. Darbe içerisindeki sinyalin fazı veya frekansı uygulanacak kodun türüne göre değiştirilerek darbe içerisinde modülasyon oluşturulur. Kullanılan kodlar ötilinti fonksiyonlarının özelliklerine göre seçilmektedir. Ötilinti fonksiyonlarının yüksek tepe ve düşük yan hüzme seviyesine sahip olması istenmektedir. Bu sayede, alıcıda uyumlu filtre çıkışında yapılan tespit işleminin başarımı arttırılmaktadır. Darbe içi modülasyon yöntemi ile elde edilen işlem kazancı (G), bantgenişliği (B) ve darbe süresiyle (T_p) ilişkidir ve

$$G = 10 \log_{10}(BT_p) \quad (2.8)$$

$$= 10 \log_{10}(BNT_c) \quad (2.9)$$

ile hesaplanabilmektedir. Faz modüleli kodlar için her bir faz bileşeni çip süresi (T_c)

kadar süre kullanılmaktadır. Kod uzunluğu (N) ve çip süresi (T_c) değerlerinin çarpımı darbe süresini (T_p) vermektedir. Ayrıca faz modüleli kodlar için bantgenişliği ($B = 1/T_c$) olduğundan, işlem kazancı $G = 10 \log_{10}(N)$ olarak hesaplanabilmektedir. Frekans modüleli kodlarda ise, bantgenişliği ve darbe süresi birbirinden bağımsız olarak değişebildiği için işlem kazancı, $G = 10 \log_{10}(BT_p)$ ile hesaplanabilmektedir

Yaygın olarak kullanılan DPS-4D, darbeleri bir iyonosonda olup kanal koşullarına bağlı olarak darbe birleştirme için $M = 128$ darbeyi kullanabilmekte ve $N = 13$ bitlik Barker faz kodu ile ölçüm yapmaktadır. Bu parametreler için işlem kazancı hesabı yapıldığında,

$$G(\text{dB}) = 10 \log_{10}(M) + 10 \log_{10}(N) \quad (2.10)$$

$$= 21.07 + 11.13 \quad (2.11)$$

$$= 32.2 \quad (2.12)$$

sonucu elde edilmektedir. Belirtilen işlem kazancı, düşük SNR değerine sahip kanallarda tespit yapılmasını kolaylaştırmaktadır.

2.2.2.2 Frekans Modülasyonlu İyonosonda

Frekans modülasyonlu iyonosondalar, KD bandında ürettikleri cıvıltı sinyallerini iyonosfere göndererek yansıyan sinyalin zaman gecikmesi üzerinden yükseklik hesabı yapmaktadırlar. Cıvıltı sinyallerinin bir başlangıç ve bitiş frekansları vardır. Sinyalin anlık frekansı başlangıç frekansından bitiş frekansına doğru artar ya da azalır. Frekans modülasyonlu cıvıltı sinyalleri, matematiksel olarak

$$s(t) = \cos(2\pi f_i(t)t) = \cos(2\pi(f_0 + \beta t)t) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Eşitlik 2.13'te geçen f_0 başlangıç frekansını, f_i anlık frekansı β ise frekans değişim hızını ifade etmektedir. Eşitlikte frekansı ifade eden formül doğrusal bir denklemdir. Bu ifade yerine yüksek dereceden polinom veya farklı türden denklemler de kullanılabilir. Bu şekilde farklı frekans değişimlerine sahip doğrusal

olmayan cıvıltı sinyalleri elde edilebilmektedir [40].

Darbeli iyonosondalarda olduğu gibi frekans modülasyonlu iyonosondalar için de göz önüne alınması gereken tasarım parametreleri bulunmaktadır. Şekil 2.11’de FMCW radarda kullanılan dalgaşekillerinden biri olan testere dişi dalgaşekli için frekans zaman değişimi gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi gönderilen ve alınan sinyaller arasında τ kadar bir zaman gecikmesi bulunmaktadır. Hedeften yansıyan sinyal için zaman gecikmesi

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (2.14)$$

ile hesaplanabilmektedir. Eşitlik 2.14’te geçen R hedef menziline, c ışık hızını ifade etmektedir. FMCW radarlarda hedef menzili R ’yi bulmak için Şekil 2.11’de gösterilen vuru frekansı f_b kullanılmaktadır. Vuru frekansı, gönderilen ve alınan sinyaldeki zaman gecikmesinden ve dalgaşeklinin frekans modülasyonlu olmasından kaynaklanan frekans farkından dolayı oluşmaktadır. Eşitlik 2.13’te geçen ifade vericiden çıkan cıvıltı sinyalini ifade etmektedir. Bu sinyal alıcıya menzile bağlı bir zaman gecikmesi ile ulaşmaktadır ve

$$r(t) = \cos(2\pi[f_0(t - \tau) + \beta(t - \tau)^2]) \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir. FMCW radar alıcısında, vericiden gönderilen sinyal ile alıcıya ulaşan sinyal çarpılarak düşük geçirgen filtreden geçirilir. Buna göre,

$$r(t)s(t) = \cos(2\pi(f_0 + \beta t)t) \cos(2\pi[f_0(t - \tau) + \beta(t - \tau)^2]) \quad (2.16)$$

$$= \frac{1}{2} \left[\cos(2\pi f_0 \tau - 2\beta \tau^2 + 4\pi \beta t \tau) \right] + YDT \quad (2.17)$$

ile düşük geçirgen filtre çıkışındaki sinyal elde edilmektedir. Yüksek dereceden terimler (YDT) düşük geçirgen filtre ile filtrelenmektedir. Eşitlik 2.17’de verilen ifadenin anlık frekansı, vuru frekansını vermektedir. Buna göre,

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2.18)$$

$$= 2\beta\tau \quad (2.19)$$

olarak yazılabilmektedir. Eşitlik 2.13'te verilen cıvıltı sinyalinin bantgenişiği $B = 2\beta T_s$ olduğundan

$$\beta = \frac{B}{2T_s} \quad (2.20)$$

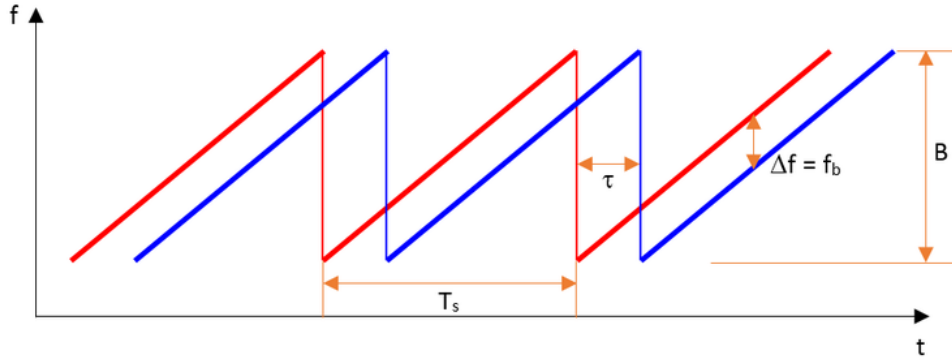
olarak hesaplanmaktadır. T_s modülasyon periyodunu ifade etmektedir. Eşitlik 2.20, Eşitlik 2.19'da yerine yazıldığında vuru frekansı

$$f_b = \frac{B}{T_s}\tau \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Dolayısıyla hedef menzili ile vuru frekansı arasındaki ilişki

$$R = \frac{c\tau}{2} = \frac{cT_s}{2B} f_b \quad (2.22)$$

şekinde ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.11. Frekans modülasyonlu iyonosonda dalgaşekli

Frekans modülasyonlu iyonosondalar için belirlenmesi gereken temel parametreler başlangıç frekansı (f_0), modülasyon bantgenişiği (B) ve modülasyon periyodudur (T_s). Darbeli iyonosondalarda darbe tekrarlama periyodu yerine frekans modülasyonlu iyonosondalarda modülasyon periyodu, belirlenebilecek en yüksek menzile ilişkilendirilir.

dirilmektedir. Ancak darbeli iyonosondalarda belirlenmek istenen en yakın iyonosfer katmanına bağılı olarak darbe genişliğı değişirken frekans modülasyonlu iyonosondalarda böyle bir gereksinim bulunmamaktadır. Çünkü gönderilen sinyal ile alınan sinyal arasındaki zaman gecikmesi frekans zaman eksenini üzerinden hesaplanmaktadır ve gönderilen sinyal sürekli aktiftir. Darbeli iyonosondalarda olduğu gibi sinyal içerisinde gönderme ve alma için ayrı bölümler bulunmamaktadır.

Frekans modülasyonlu iyonosondalarda gönderilen sinyal sürekli aktif durumda olduğu için, iyonosonda alıcısının ve göndericisinin aynı konumda olduğu durumlarda yüksek çıkış gücüne sahip gönderme sinyali alıcıyı doyuma sokabilmektedir. Bu nedenle alıcı ve verici birbirinden farklı pozisyonlarda olmalı ya da birbirinden çok iyi şekilde izole edilmelidir. Dolayısıyla alıcı ve vericinin aynı pozisyonda olduğu dikey ölçümlerde frekans modülasyonlu iyonosondalar tercih edilmemektedir. Darbeli iyonosondalarda darbe tekrarlama periyodu içerisinde yer alan dinleme alanları sebebiyle, alıcı ve göndericinin aynı pozisyonda olması problem yaratmamaktadır.

Frekans modülasyonlu iyonosondalar, belirlenen bir frekans aralığını tarayarak çalıştıklarından anlık bantgenişlikleri düşüktür. Genellikle 500 – 1000 Hz aralığında anlık bantgenişliklerini kullanırlar. Darbeli iyonosondalar ise, kullandıkları darbe içi modülasyon sebebiyle 25 – 50 kHz anlık bantgenişliklerinde çalışmaktadır. Bu bakımdan bir karşılaştırma yapıldığında, $50.000/500 = 100$ kat (20 dB) bantgenişliğine varan fark olduğu görülmektedir. Bu fark nedeniyle iyonosonda alıcılarındaki gürültü seviyesi ve dolayısıyla SNR değerleri de 20 dB farklı olmaktadır. Darbeli iyonosondalar Eşitlik 2.12'de verilen işlem kazancı ile bu farkı kapatsa da, bütün kanal koşullarında eşvreli darbe birleştirme süresi nedeniyle, 128 adet darbe kullanılamamakta ve işlem kazancı düşmektedir. Bu nedenle, frekans modülasyonlu iyonosondalar genellikle 10 – 20 W çıkış güçlerinde çalışırken, darbeli iyonosondalar 100 – 600 W çıkış güçlerinde çalışmaktadır [24], [37], [41].

Yukarıdaki paragraflarda anlatılan farklı özelliklere sahip iyonosondalar için geliştirme ve iyileştirme faaliyetlerinin idealde gerçek bir iyonosonda donanımı ile yapılması gerekmektedir. Ancak tez çalışmaları sırasında böyle bir altyapının bulunmaması nede-

niyle, gerçek bir iyonsonda ölçümünde izlenen aşamalar, mümkün mertebe benzetim ortamına aktarılmış ve bir sonraki bölümde detayları verilen darbant iyonsonda benzetim altyapısı oluşturulmuştur.



3. DARBANT İYONOSONDA BENZETİM ORTAMI

İyonosfer tabakasında meydana gelen faaliyetler, dünya üzerinde dağılmış olan çok sayıda iyonosonda istasyonu tarafından izlenmektedir. Bu istasyonlar sınırlı sayıda ve ayrık bir şekilde dağılmış olduklarından iyonosfer faaliyetlerinin izlenemediği durumlar oluşabilmektedir. Tezin bu bölümünde, üç boyutlu ışın izleme yöntemi, KD kanal modeli ve IRI-Plas iyon yoğunluğu kestirim aracı yardımıyla, iyonosondaların çıktısı olan iyonogram verisini benzetim ortamında elde etmek için geliştirilen altyapı anlatılmaktadır. İyonosferik kanal koşullarını benzetim ortamında oluşturmak için ITS kanal modeli kullanılmıştır. TEİ, hmF2 (en büyük iyonizasyon yüksekliği) ve foF2 (F2 katmanı kritik frekansı) verilerini girdi olarak kullanabilme özelliği nedeniyle iyon yoğunluğu kestirim aracı olarak IRI-Plas-2015 kullanılmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen iyonogram oluşturma altyapısı *St. Patrick's Day* fırtınasını içeren 16-17-18 Mart 2015 tarihlerinde Güney Afrika ve Avrupa bölgelerinde test edilmiştir. Belirtilen günler iyonosferik fırtınalı ve sakin günleri içermektedir. Benzetim sonuçları, geliştirilen altyapı gerçek ölçümlere yakın hmF2 ve foF2 değerleri ile beslenebildiği sürece hem fırtınalı hem de sakin günlerde, iyonogram şekli, katman yükseklikleri ve en yüksek kullanılabilir frekans (MUF) değerleri anlamında iyonosonda ölçüm sonuçları ile benzer çıktılar elde edilebileceğini göstermektedir.

3.1 Giriş

İyonosonda ölçümleri, elektron yoğunluğu ve sürüklenme hızı başta olmak üzere iyonosfere ait çeşitli özellikleri incelemek için kullanılmaktadır. Dünya üzerinde pek çok iyonosonda istasyonu bulunmaktadır. İyonosondalar dikey ve eğik olmak üzere iki temel modda kullanılmaktadır. Kurulu oldukları alan üzerindeki iyonosfer tabakası ile ilgili ölçüm yapılmak istendiğinde dikey, farklı alanlar ile ilgili ölçüm yapılmak istendiğinde ise eğik modda çalıştırılmaktadır. Eğik modda alıcı ve verici farklı konumlarda yer almaktadır. Bu sayede dikey ölçüm yapmanın mümkün olmadığı okyanus, çöl, dağlık araziler gibi alanlar için sonuç üretilebilmektedir. Dünya üzerinde çok sayıda iyonosonda bulunmasına rağmen dikey veya eğik ölçüm alınamayan noktalar bulunmaktadır. Üç boyutlu ışın izleme, IRI-Plas ve ITS kanal modeli kullanılarak dünya üzerindeki

herhangi iki nokta arasında iyonogram sonucu üretebilen, sanal bir iyonosonda altyapısı geliştirilmiştir.

Işın izleme kullanılarak iyonogram oluşturma, birçok araştırmacı tarafından uzun yıllardır çalışılmaktadır. Bu kapsamdaki çalışmalar 1960'lı yıllarında sonunda başlamıştır. Kopka ve Möller [42]'de yer alan çalışmalarında, yerküre manyetik alanının iyonogram sonuçlarına etkisini incelemek üzere, teorik eğik iyonogram oluşturabilen bir ışın izleme programı geliştirmişlerdir. Gething [43]'te, iyonosfer tabakalarının eşmerkezli kürelerden oluştuğunu varsayarak ışın izleme ile iyonogram oluşturulabildiğini göstermiştir. Cheng ve arkadaşları [44]'te yaptıkları çalışmada, iyonosferin çok sayıda yarı parabolik kesitten oluştuğunu varsayarak dikey ve eğik iyonogram oluşturulabileceğini göstermiştir. Coleman, [45] ve [46]'da yaptığı çalışmalarda manyetoiyonik etkileri içerecek şekilde eğik ve geri saçılım iyonogram sonuçlarını benzetim ortamında oluşturmuştur. Sonuçları üretirken, işlem yükünü hafifletmek adına üç boyutlu ışın izleme yerine, iki boyutlu ışın izleme yöntemini tercih etmiştir.

Konu ile ilgili yapılan yakın tarihli çalışmalarda, Settimi ve arkadaşları, üç boyutlu ışın izleme yöntemi ile eğik iyonogram üretebilen bir altyapı geliştirmiştir [47]. Bu yapı, ölçeklenmiş iyonosonda istasyon verisi, foF2 ve M(3000)F2 bölgesel değerleri ve IRI'dan oluşan üçlü veri kombinasyonu kullanılmaktadır. Geliştirilen yapı kullanılarak çok sayıda eğik iyonogram sentezlenmiş ve Akdeniz bölgesinde alınan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma iyonogram şekli ve MUF değerleri bazında ele alınmıştır.

Cervera ve Harris yaptıkları çalışmada sıradan ve sıradışı polarizasyon durumlarındaki iyonosferik bozulma özelliklerini modellemek için manyetoiyonik etkileri içeren üç boyutlu bir ışın izleme aracı geliştirmişlerdir [48]. Ölçüm sonuçları ve sentezlenen yarıdikey iyonogram sonuçları karşılaştırılarak, küçük ve büyük ölçekli kayan iyonosferik bozulma durumları incelenmiştir.

Settimi ve arkadaşları, [47]'de anlatılan iyonogram oluşturma altyapısını, elektron çarpışma frekansı modeli ve çoklu atlama özelliğini ekleyerek geliştirmişlerdir [49]. Bu

model, yol kaybının yüksek olduğu D-katmanının soğurma özelliklerini içermektedir. Çalışma kapsamında, ölçüm sonuçları ve sentezlenen ionogramlar karşılaştırılarak, MUF değerleri ve gece-gündüz saatlerindeki ionosferik soğurulma özellikleri incelenmiştir.

Song ve arkadaşları, MUF, hmF2, foF2, M(3000)F2 gibi ionogram parametrelerini hesaplamak için, sentezlenmiş eğik ionogram verilerini kullanan otomatik bir ölçeklendirme yöntemi geliştirmişlerdir [50]. Ölçeklendirme performansı, melez genetik algoritma yardımıyla, ölçüm sonuçları ve sentezlenen ionogram verileri arasındaki en iyi eşleme bulunarak iyileştirilmiştir.

Yukarıdaki paragraflarda bahsedilen çalışmalarda, belirli bir frekans aralığı, istenilen yükseliş ve yanca açısı aralığında taranarak ionogram verisi oluşturulmaktadır. Bu durumda, ionosondaların çok darbantlı sürekli dalga (SD) sinyallerini kullandıkları varsayılmaktadır. Ancak gerçek ionosondalar, Bölüm 2’de anlatıldığı gibi, verici ile alıcı arasındaki iletişimi sağlamak için frekans modülasyonu veya darbe tekniklerini kullanmaktadır. Bu sinyaller, SD sinyaller ile ifade edilemeyen belirli bir bantgenişliğini kapsamaktadır. Bununla birlikte ionosferik aktiviteler nedeniyle oluşan kanal koşulları, ionosfer faaliyetlerini etkilemekte ve zayıf ionogram izlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. SD sinyaller ile ışın izleme yaklaşımı, kanal etkilerinin sonuçlara dahil edilmemesini ve gerçek ionosonda ölçüm sonuçlarında görülen bazı fenomenlerin açıklanamamasına neden olmaktadır. İyonosferik kanalın ölçüm sonuçlarına etkisini modellemek için ITS kanal modeli kullanılmıştır [51]. Kanal modeli ve üç boyutlu ışın izleme [48] yöntemi birleştirilerek, genel amaçlı bir ionogram oluşturma yapıları geliştirilmiştir. İyonosferdeki iyon yoğunluğu kestirimi için IRI-Plas tercih edilmiştir [52]. Bunun nedeni, IRI-Plas’ın TEİ, hmF2 ve foF2 verilerini girdi olarak alıp, buna göre iyon yoğunluk profili oluşturabilmesidir. TEİ verilerinin oluşturulması için IONOLAB-TEC tekniği kullanılmıştır [53]. Bu yöntem için gereken Rinex verileri, IGS, EUREF, TRIGNET gibi CORS ağı içerisindeki bir ağdan elde edilebilmektedir. hmF2 ve foF2 verileri için, GIM haritaları ve ölçeklenmiş ionosonda ölçüm sonuçları kullanılmıştır.

3.2 Kullanılan Araçlar ve Yöntemler

3.2.1 ITS Kanal Modeli

KD bandı için benzetim ortamında gerçekleştirilen çalışmalar çoğunlukla Watterson kanal modelini kullanmaktadır [54]. Ancak bu model bazı varsayımları ve kısıtlamaları beraberinde getirmektedir. En önemli kısıt, modelin 12 kHz'den küçük bantgenişlikleri için geçerli olmasıdır. Bunun yanında Watterson kanal modeli, kanal koşulları nedeniyle oluşan gecikme yayılımını hesaba katmamakta ve kanalın zaman ve frekansta durağan olduğunu varsaymaktadır [54]. Belirtilen varsayımlar ve kısıtlamalar nedeniyle Telekomünikasyon Bilimleri Enstitüsü tarafından ITS kanal modeli geliştirilmiştir [55]. ITS modeli, 1 MHz'e kadar olan bantgenişliklerinde ve farklı iyonosferik koşullar altında alınan ölçüm sonuçlarının, matematiksel bir forma aktarılması ile ortaya çıkmış bir modeldir. ITS modeli hem darbant hem de genişbant iyonosferik kanallar için kullanılabilir.

KD kanalı, genellikle çok yol bileşenlerine ve zamanda değişken özelliğe sahip bir kanaldır. ITS modelinde kanal dürtü tepkisi

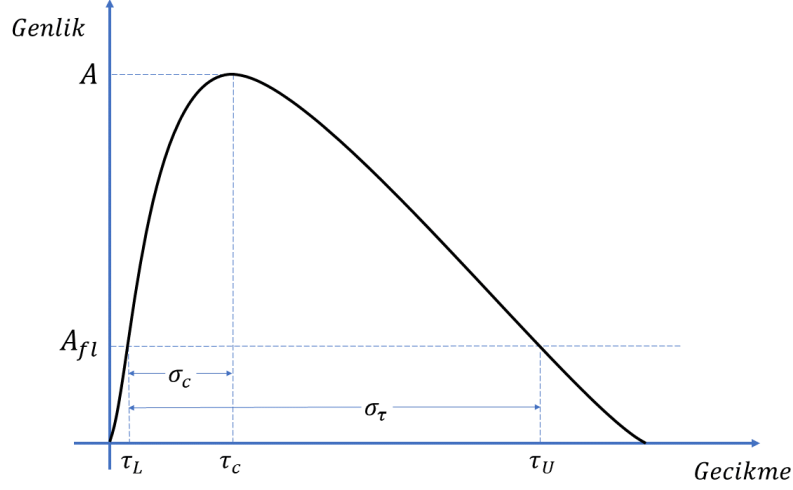
$$h(t, \tau) = \sum_n h_n(t, \tau) = \sum_n \sqrt{P_n(\tau)} D_n(t, \tau) \psi_n(t, \tau) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik 3.1'de geçen t zamanı, τ gecikme süresini ifade etmektedir. Toplam ifadesinde yer alan n , sıradan ve sıradışı dalgalar, tekli-çoklu atlama, alçak-yüksek ışın gibi farklı iyonosferik modlar nedeniyle oluşan çok yol bileşenlerinin sayısını ifade etmek için kullanılmaktadır. Eşitlik 3.1'deki modelde kanal dürtü tepkisinin üç temel bileşenden oluştuğu göz önüne alınmaktadır. $P_n(\tau)$ gecikme güç profilini, $D_n(t, \tau)$ belirlenimci faz fonksiyonunu, $\psi_n(t, \tau)$ rasgele modülasyon fonksiyonunu ifade etmektedir.

3.2.1.1 Gecikme Güç Profili

Gecikme güç profili, Eşitlik 3.1'de n ile belirtilen her bir mod için gecikme eksenindeki profili oluşturmak için kullanılmaktadır. Gecikme güç profili Şekil 3.1'de gösterildiği

gibi, A profil merkez genlik değeri, A_{fl} genlik eşik değeri, τ_c profil merkezi, τ_L profil başlangıcı ve τ_U profil bitiş parametreleri kullanılarak oluşturulmaktadır. τ_L ve τ_U parametreleri gecikme güç profilinde, belirli bir eşik seviyesinin üzerindeki değerlerin hesaba dahil edilmesini sağlayan A_{fl} parametresine bağlı olarak hesaplanmaktadır. σ_c ve σ_τ süreleri ise ayrı ayrı, profilin yükselme süresi ve toplam gecikme yayılımı değerlerini vermektedir.



Şekil 3.1. Güç Gecikme Profili

Gecikme güç profili $P(\tau)$ matematiksel olarak

$$P(\tau) = Ae^{(\alpha[\ln(z)+1-z])} \quad (3.2)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik 3.2'de geçen z ,

$$z = \frac{(\tau - \tau_L)}{(\tau_c - \tau_L)} > 0 \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.2'de geçen α ve τ_L profilin genişliğini ve simetrisini kontrol etmektedir. Bu parametrelerin hesaplamalarına ait detaylar EK-1'de verilmiştir.

3.2.1.2 Belirlenimci Faz Fonksiyonu

Eşitlik 3.1’de verilen her bir moda ait Doppler kayması belirlenimci faz fonksiyonu ile oluşturulmaktadır ve

$$D(t, \tau) = e^{(i2\pi[f_s + m(\tau - \tau_c)]t)} \quad (3.4)$$

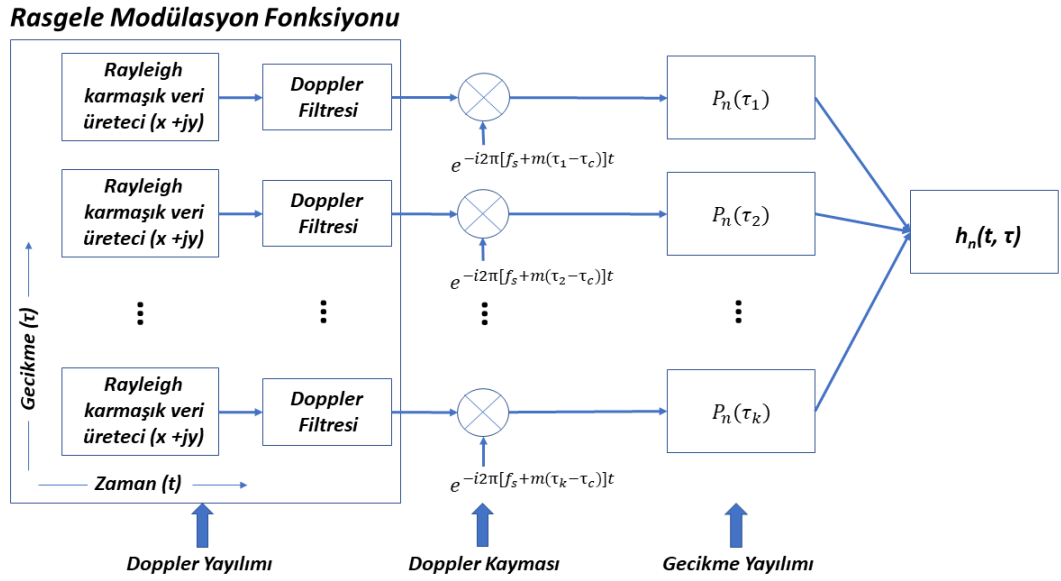
ile hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.4’te geçen t zaman, τ gecikmeyi ifade etmektedir. $f_s, \tau = \tau_c$ gecikmesindeki Doppler kaymasını göstermektedir. m katsayısı, Doppler kaymasının gecikmeye bağlı değişimini eşitliğe dahil etmek için kullanılmıştır ve

$$m = \frac{f_s - f_{sL}}{\tau_c - \tau_L} \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.5’de geçen $f_{sL}, \tau = \tau_L$ gecikmesindeki Doppler kaymasını ifade etmek için kullanılmaktadır. Böylece, gecikme merkezinden, gecikme bitişine kadar değişen Doppler kaymaları modellenenmektedir.

3.2.1.3 Rasgele Modülasyon Fonksiyonu

ITS modelinde kanalın zamana bağlı olarak Doppler değişimini ifade etmek için $\psi(t, \tau)$ rasgele modülasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyonun oluşturulması için birbirinden bağımsız rasgele süreçlerden alınan karmaşık değerli örnekler kullanılmaktadır. Her bir gecikme süresi için, gerçel ve sanal kısımları birbirinden bağımsız, beyaz Gauss dağılımlarına sahip rasgele değişkenler kullanılmaktadır. Sanal ve gerçel kısımları Gauss dağılımına sahip bu veri dizilerininin mutlak genlikleri Rayleigh dağılımına sahip olmaktadır. Kanalın Doppler değişiminin, sinyal spektrumunda yaratacağı yayılma Doppler yayılımı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre sinyalin spektrumda kapladığı bölge ve bu bölgenin şekli belirlenmektedir. Bu sebeple birbirinden bağımsız süreçlerin örnekleri kullanılarak oluşturulan rasgele veri setleri, elde edilmek istenen spektrum şekline göre filtrelenmektedir. ITS modeli, ölçümlere dayalı olarak oluşturulan matematiksel bir model olduğu için, yapılan ölçümlerde elde edilen Doppler spektrumlarının Gauss ve Lorentz spektrumları ile ifade edilebileceği belirtilmiştir [55].



Şekil 3.2. ITS kanal modeli için kullanılan yapı

Şekil 3.2’de, gecikme güç profili, belirlenimci faz fonksiyonu ve rasgele modülasyon fonksiyonu kullanılarak her bir mod için kanal dürtü tepkisi elde etmek için kullanılan yapı gösterilmektedir [56]. Bu çalışma kapsamında kullanılan kanal dürtü fonksiyonları Şekil 3.2’de verilen yapı ile oluşturulmuştur.

3.2.2 IRI-Plas Modeli

IRI, iyonosferik fiziksel özellikler ve geçmişte alınmış iyonosferik ölçümler kullanılarak geliştirilen, ampirik bir modeldir [57]. IRI modeli, yaklaşık 60 km ile 2.000 km yükseklik aralığı için aylık-saatlik ortalama iyon yoğunluğu profillerini üretebilmektedir.

IRI-Plas ise, plazma küreye kadar uzanan sonuçlar üretebilme yeteneği ile, yaygın olarak kullanılan IRI modelinin gelişmiş bir versiyonudur. IRI-Plas ile GPS uydularının bulunduğu yükseklik olan 20.200 km’lik yüksekliğe kadar iyon yoğunluğu kestirimi yapılabilmektedir. Gulyaeva ve Bilitza tarafından yapılan ve [52]’de yer alan çalışmada, IRI-Plas’ın uluslararası standart model olarak kullanılabilceği belirtilmiştir. IRI-Plas, TEİ, hmF2 ve foF2 parametrelerini girdi verisi olarak kullanıp, ürettiği iyon yoğunluğu kestirimlerini güncelleyebilmektedir.

TEİ, iyonosferin değişkenliğini gözlemlemek ve izlemek için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. TEİ, yerküreden iyonosfere doğru belirlenen bir hattaki iyon yoğunluğunun çizgi integrali alınarak

$$TEI = \int_L N_e dl \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. TEİ'nin birimi TECU'dur ve 10^{16} el/m², 1 TECU olarak tanımlanmaktadır. TEİ sonucu, belirtilen yol üzerinde 1 m² çapındaki silindir içerisindeki toplam elektron sayısını vermektedir. Bu parametrenin kestirimi için iki frekanslı GPS alıcıları kullanılmaktadır [58], [59]. Ancak GPS alıcıları sınırlı sayıda ve ayrıık şekilde dağıtılmış olduklarından, uzayda ve zamanda aradeğerleme yapılarak veri olmayan noktaların doldurulması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen [60]'da yapılan çalışmanın güvenilir sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu sebeple tez çalışmaları kapsamında kullanılan TEİ haritaları, [60]'da belirtilen yöntemler kullanılarak oluşturulmuştur. Avrupa TEİ haritaları için EUREF, Güney Afrika TEİ haritaları için TRIGNET GPS ağlarındaki alıcı verileri kullanılmıştır.

TEİ verisi dışında, IRI-Plas'a girdi sağlayabilen veriler, hmF2 ve foF2 değerleridir. Her iki veri de iyonosonda ölçümlerinden elde edilebilmektedir. Ancak GPS alıcılarında olduğu gibi, iyonosonda istasyonları da dünya üzerinde birbirlerinden ayrıık konumlarda yer almaktadır. Bu sebeple hmF2 ve foF2 ölçümleri için ara değerleme yapılmış haritalara erişim sağlayan internet servisleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, IZMIRAN enstitüsü tarafından oluşturulmuş, enlemde 2.5°, boylamda 5° çözünürlüğe sahip GIM haritaları kullanılmıştır. Haritalara (www.izmiran.ru/services/iweather/daily) adresinden ulaşılabilmektedir.

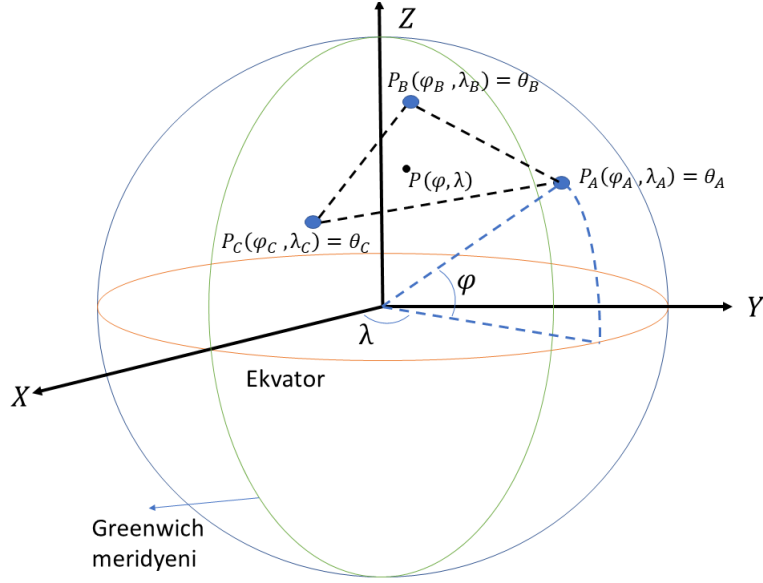
Bu çalışma kapsamında, aradeğerleme yapılarak oluşturulmuş hmF2 ve foF2 GIM haritaları haricinde, ilgilenilen bölgedeki iyonosonda istasyonlarından alınan ölçeklenmiş hmF2 ve foF2 sonuçları kullanılarak, bölge üzerinde hmF2 ve foF2 değerlerini içeren veri düzlemleri oluşturulmuştur. Belirtilen veri düzlemlerinin oluşturulmasında ölçüm sonuçlarına dayalı daha gerçekçi verilerin kullanılması amaçlanmıştır. İnternet ser-

visleri üzerinden alınan hmF2-foF2 harita verileri, zamanda ve uzayda aradeğerleme yapılarak oluşturulduğundan bir takım hataları da içinde barındırmaktadır. Bu sebeple ionosonda istasyonlarından alınan anlık ölçüm verileri ile ilgilenilen bölge üzerinde veri düzlemi oluşturmanın daha doğru sonuç vereceği değerlendirilmiştir. Veri düzlemlerini oluşturmak için,

$$\alpha\boldsymbol{\varphi} + \beta\boldsymbol{\lambda} + \gamma = \boldsymbol{\theta}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_0 & \lambda_0 & 1 \\ \varphi_1 & \lambda_1 & 1 \\ \varphi_2 & \lambda_2 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}}_{\mathbf{p}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.7)$$

ifadesi kullanılmaktadır. $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2]^T$ üç noktaya ait enlem değerlerini, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2]^T$ üç noktaya ait boylam değerlerini, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_0, \theta_1, \theta_2]^T$ ise üç noktaya ait hmF2 veya foF2 değerini ifade etmektedir. Eşitlik 3.7'de verilen ifade $\mathbf{p} = \mathbf{A}^\dagger \boldsymbol{\theta}$ ile en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözülebilmektedir. \mathbf{A}^\dagger ifadesi \mathbf{A} matrisinin sözde tersini ifade etmektedir ve $\mathbf{A}^\dagger = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$ ile hesaplanmaktadır. Şekil 3.3'te P_A , P_B ve P_C ile verilen noktalar ionosonda istasyonlarının bulunduğu noktaları göstermektedir. Her bir ionosonda istasyonunun bulunduğu noktada φ_n enlem, λ_n boylam, θ_n ise hmF2 veya foF2 değerini ifade etmektedir. Şekil 3.3'te belirtilen geometri ve Eşitlik 3.7 kullanılarak, P_A , P_B , P_C noktaları arasında kalan herhangi bir enlem-boylam yani $P(\varphi, \lambda)$ noktası için $\boldsymbol{\theta}$ yani o noktaya ait hmF2 veya foF2 değeri elde edilebilmektedir.



Şekil 3.3. İyonosondalar ile üç noktadan alınan ölçümler kullanılarak veri düzlemlerinin oluşturulması

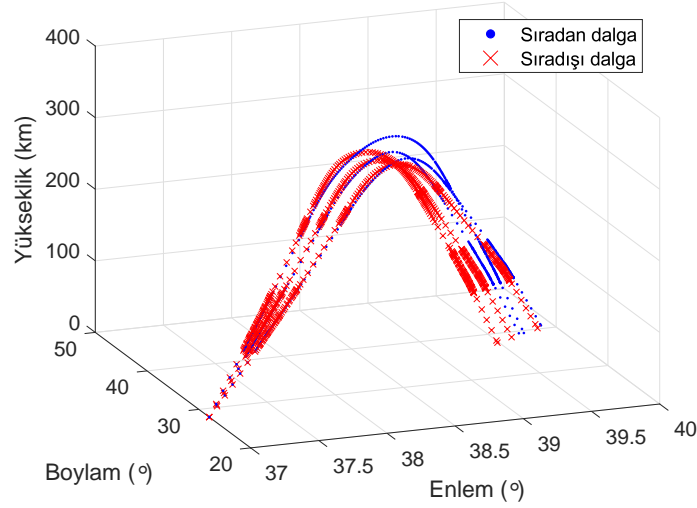
3.2.3 Üç Boyutlu (3B) Işın İzleme

KD bandında yer alan elektromanyetik dalgalar iyonosferde belirli yansıma ve kırılma kurallarına göre yol almaktadır. İyonosferde yer alan D, E ve F katmanları farklı iyon yoğunluklarına ve dolayısıyla farklı kritik frekans değerlerine sahiptirler. İyon yoğunluğu ve kritik frekans arasındaki ilişki

$$f_c \approx 9\sqrt{N_e} \quad (3.8)$$

ile gösterilmektedir. Eşitlik 3.8'te geçen N_e (el/m^3) iyon yoğunluğunu, f_c belirtilen iyon yoğunluğuna sahip iyonosfer tabakasına ait MHz cinsinden kritik frekansı ifade etmektedir. Bu sebeple, iyonosferik bir hacim içerisindeki iyon yoğunluğunun bilinmesi durumunda, bu hacim içerisine giren bir ışının izleyeceği yol takip edilebilmektedir. Buna yönelik olarak IONOLAB grubu tarafından geliştirilen bir ışın izleme yazılımı bulunmaktadır [61]. Ancak belirtilen çalışma ve bu tez kapsamında yapılan çalışmalarla ilgili geliştirme faaliyetleri benzer zamanlarda yürütüldüğü için IONOLAB grubu tarafından geliştirilen ışın izleme yazılımı kullanılamamıştır. Bu nedenle Avustralya'nın DSTO kurumu tarafından geliştirilen, KD bandında ışın izleme yapabilen PHaRLAP

adında bir yazılım aracı kullanılmıştır [48]. Belirtilen yazılım ile Haselgrove denklemleri kullanılarak üç boyutlu ışın izleme yapılabilmektedir [62]. PHaRLAP, koordinat sistemi olarak WGS84 sistemini kullanmaktadır. Şekil 3.4’de PHaRLAP kullanılarak sıradan ve sıradışı dalgalar için yapılmış üç boyutlu bir ışın izleme sonucu görülmektedir.



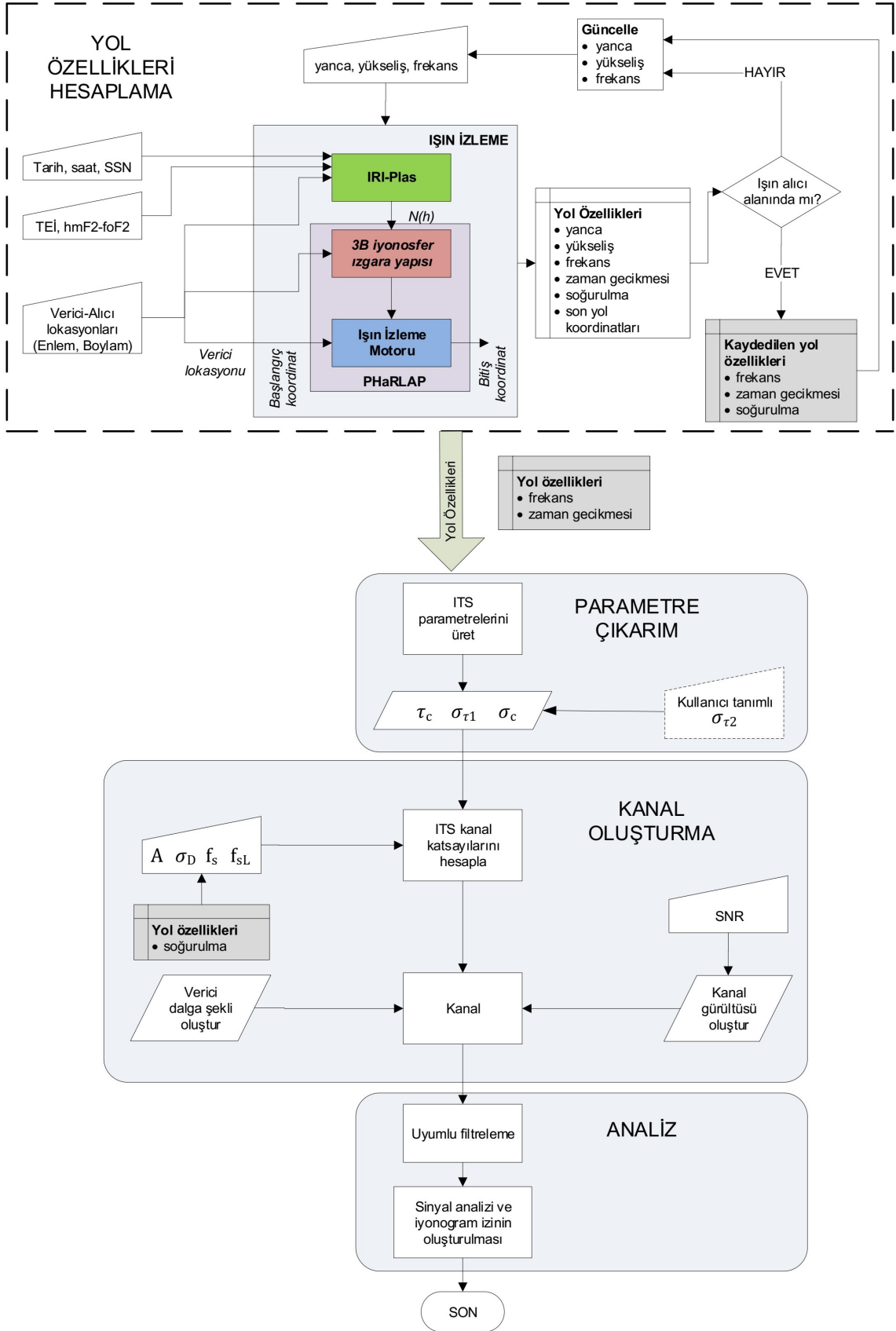
Şekil 3.4. 7 MHz frekans ve 30°, 35°, 40° yükseliş açılarındaki bir ışın için sıradan ve sıradışı dalgaların iyonosferde izlediği yollar

3.2.4 İyonogram Oluşturma

Bölüm 2’de belirtildiği gibi iyonogram frekans ve zaman gecikmesi eksenlerinden oluşan bir iyonosonda çıktısı olarak tanımlanabilmektedir. Tipik bir iyonosonda vericisi önceden belirlenmiş bir frekans aralığını belirli adımlar ile tararken, iyonosonda alıcısı her bir frekansdaki sinyalin alıcıdan vericiye ulaşması için geçen süreyi ölçmektedir. Belirtilen işlem, ışın izleme yoluyla da gerçekleştirilebilmektedir. Bölüm 3.1’de bahsedildiği gibi literatürde birçok araştırmacı tarafından iki ve üç boyutlu ışın izleme yöntemleri kullanılarak, iyonogram sentezleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, iyonogram izinin oluşturulması için, belirli bir frekans aralığı taranarak, ışınların alıcıya ulaşma süreleri hesaplanmıştır. Ancak alıcı verici arasındaki kanal koşulları dikkate alınmamıştır. Gerçek iyonosonda ölçümlerinde, alıcıya ulaşan sinyal iyonosferik KD kanal etkisine maruz kalmaktadır. Örneğin yayılmış-F katmanı durumunda görülen

kanal gecikme süresinin artması veya Gezen İyonosferik Bozulma (GIB) durumunda artan Doppler kayması gibi iyonosferik koşullara bağlı olarak değişen kanal koşulları, alıcıya ulaşan sinyalin özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu çalışmada iyonosferik kanal koşullarını benzetim ortamına aktarmak için ITS kanal modeli kullanılmıştır.





Şekil 3.5. İyonogram oluşturma akış diagramı

Çizelge 3.1. Yol özellikleri hesabı için kullanılan girdi parametreleri listesi

Girdi Parametreleri
Alıcı-Verici lokasyonları (enlem°, boylam°)
Tarih-Saat (<i>Universal Time</i> - UT)
<i>Sun Spot Number</i> (SSN)
TEİ profili
hmF2 haritası
foF2 haritası
hmF2 ölçüm verisi
foF2 ölçüm verisi
yanca açısı aralığı (°)
yükseliş açısı aralığı (°)
frekans aralığı (MHz)

İyonogram üretmek için kullanılan akış Şekil 3.5'te verilmiştir. Yapılan işlemde dört ana aşama bulunmaktadır; yol özellikleri hesaplama, parametre çıkarımı, kanal oluşturma ve analiz.

3.2.4.1 Aşama 1: Yol Özelliklerinin Hesaplanması

Birinci aşama olan yol özellikleri hesaplama işleminde, vericiden gönderilen her ışın için yol özellikleri hesaplanmaktadır. Yol özellikleri kapsamında, vericiden çıkan ışının yanca ve yükselme açısı, frekansı, zaman gecikmesi, soğrulma miktarı ve son yol koordinat bilgileri yer almaktadır. Yol özelliklerinin hesaplanabilmesi için öncelikle ışın izleme için gerekli bir takım girdi parametrelerinin sağlanması gerekmektedir. Girdi parametreleri listesi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Girdi parametreleri listesinde yer alan alıcı-verici lokasyonları ışın izleme işleminin hangi noktalar arasında yapılacağı belirlenmesi için kullanılmaktadır. Tarih ve saat bilgisi, ışın izleme yapılan iyonosferik hacim içerisindeki tarih ve saate göre değişkenlik gösteren iyon yoğunluğunun hesaplanabilmesi için gerekmektedir. SSN parametresi, güneşte meydana gelen aktiviteler nedeniyle iyonosferde oluşan iyon yoğunluğu değişimlerini takip edebilmek için kullanılmaktadır. TEİ, hmF2 ve foF2 haritaları, IRI-Plas ile oluşturulan iyon yoğunluklarının, harita verileri kullanılarak güncellenmesini sağlamaktadır. TEİ haritalarının oluşturulması için CORS ağı içerisindeki herhangi bir GPS alıcı ağından alınan veriler kullanılmaktadır. Alıcı istasyonlardan toplanan veriler

ve [60]'de yer alan ara değerlenme algoritması kullanılarak, enlem ve boylamda 1° çözünlükte TEİ haritaları oluşturulmaktadır. hmF2 ve foF2 verileri için ise IZMIRAN enstitüsü veritabanında yer alan, enlemdede 2.5° , boylamda 5° çözünlüğe sahip GIM formatındaki haritalar kullanılmaktadır. Girdi parametreleri listesinde yer alan hmF2 ve foF2 ölçüm verileri ise, DIDBase veri tabanında yer alan iyonosonda istasyonları tarafından alınan ölçümler sonucu oluşturulmuştur. SAO Explorer yazılımı kullanılarak, DIDBase veritabanında yer alan bir iyonosonda istasyonu tarafından 15 dakika aralıklarla alınmış hmF2 ve foF2 verisi toplanabilmektedir. Çalışma alanı içerisinde belirlenen üç iyonosonda istasyonu tarafından toplanan hmF2-foF2 verisi ve Eşitlik 3.7 kullanılarak, ilgilenilen bölge üzerinde ölçüm verilerine dayalı doğrusal düzlemler elde edilebilmektedir. Işın izleme işlemi için vericiden gönderilen ışınların yanca ve yükselişte taradıkları açı aralıklarının ve frekansta taradıkları frekans aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında yükselişte $[10^\circ-80^\circ]$ aralığı 1° çözünlükle taranmıştır. Işın izleme yöntemi olarak 3B ışın izleme tercih edildiğinden, özellikle uzun mesafelerde, ışının izlediği yolda yancada meydana gelebilecek değişimleri kapsamak için yancada $[-0.2^\circ-0.2^\circ]$ aralığı 0.2° çözünlükle taranmıştır [47]. Frekansta ise, gerçek iyonosonda istasyonlarında olduğu gibi $[1 - 20 \text{ MHz}]$ aralığı 0.25 MHz adımlarla taranmıştır.

Şekil 3.5'te yol özelliklerinin hesaplanması aşaması için gerekli girdi parametrelerinin sağlanması ardından, akış başlatılmaktadır. Yol özelliklerinin hesaplanması aşamasının merkezinde ışın izleme işlemi yer almaktadır. PHaRLAP ve IRI-Plas yazılımları ile, verici-alıcı lokasyonlarının arasında kalan bölge için 3B iyonosfer ızgara yapısı ve bu yapı içerisindeki iyon yoğunluğu profilleri oluşturulmaktadır. Ayrıca PHaRLAP yazılımı içerisinde yer alan ışın izleme motoru kullanılarak, oluşturulan 3B iyonosfer ızgara yapısı içerisinde başlangıç koordinatları verilen ışının bir sonraki adımda ulaştığı noktanın koordinatları hesaplanabilmektedir. Böylece belirlenen yanca, yükseliş ve frekans aralıkları içerisindeki her bir ışın için ışın izleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Belirtilen aralıklarda yer alan ışınlar vericiden alıcıya kadar tanımlanan yollarını tamamladıklarında, her bir ışın için zaman gecikmesi, son yol koordinatları ve soğurulma miktarı değerleri hesaplanmaktadır. Soğurulma miktarı hesabı için PHaRLAP

içerisinde yer alan ve [63]'de yer alan modele dayalı iyonosferik soğurulma modülü kullanılmaktadır. Son yol koordinatları vericiden alıcıya gönderilen ışınların, alıcı noktası için tanımlanan alan içerisinde olup olmadıklarına karar vermek için kullanılmaktadır. Alıcının bulunduğu noktanın enlem ve boylamda $\pm 0.05^\circ$ uzaklığında olan noktaların, alıcıya ulaştığı varsayımı yapılmıştır. Son yol koordinatları belirtilen alan içerisinde olan ışınlar için frekans, zaman gecikmesi ve soğurulma miktarı verileri kaydedilmektedir. Aksi durumda vericiden çıkan ışının yanca, yükseliş ve frekans değerleri güncellenerek işlem devam etmektedir.

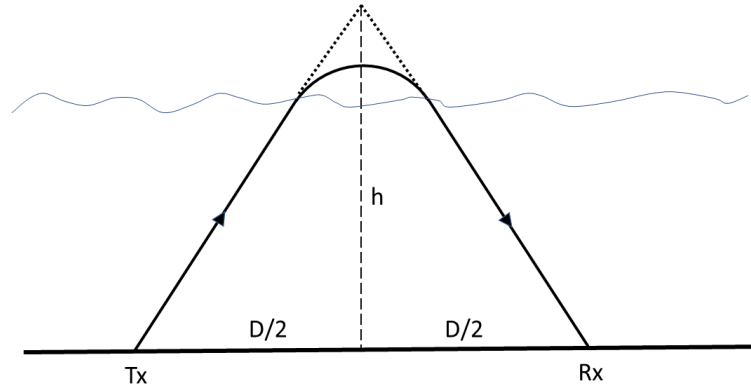
3.2.4.2 Aşama 2: Parametre Çıkarımı

Şekil 3.5'te verilen akışta ikinci aşama parametre çıkarım aşamasıdır. Bu aşamada ITS kanal modeli için girdi olan bir takım parametreler, yol özelliklerinin hesaplanması sonucunda kaydedilen frekans ve zaman gecikmesi bilgileri kullanılarak oluşturulmaktadır. Bölüm 3.2.1 verilen ITS modelinde, gecikme merkezi parametresi olan τ_c , detayları EK-1'de verilen,

$$f_c = f_p \left(\frac{\left[1 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right]}{1 + \exp\left(\frac{h_0 - h}{\sigma}\right)} \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

$$h = \left[\left(\frac{c\tau_c}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

ifadelerinin birlikte çözülmesi ile elde edilmektedir. Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10 ile verilen ifadeler, Breit ve Tuve'nin kullandığı düz dünya yaklaşımının [35] ve Budden'in yüksekliğe bağlı sech^2 iyon yoğunluğu fonksiyonunun [64] kullanılması varsayımına dayanmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan geometrik yaklaşım Şekil 3.6'da verilmiştir.

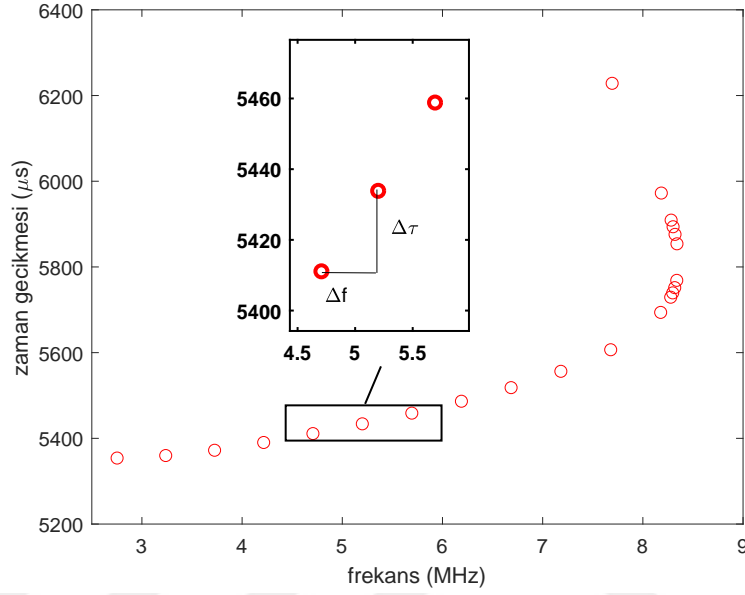


Şekil 3.6. Alıcı verici arasında ışının izlediği yolun geometrik gösterimi

Özünde, Eşitlik 3.9, Eşitlik 3.10 ve Şekil 3.6’da verilen yaklaşım ile yapılan, penetrasyon frekansı (f_p), iyonosfer katman kalınlığı (σ) ve en yüksek iyonlaşma yüksekliği (h_0) parametrelerine sahip bir iyonosfer ortamında, alıcı-verici arası (D) uzaklığındaki iki nokta arasında, f_c frekansındaki bir ışının alıcıya ne kadar sürede vardığının hesaplanmasıdır. Sonuç olarak eşitliklerde geçen h yansıma yüksekliği ve τ_c gecikme merkezi parametreleri elde edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, vericiden alıcıya radyo dalgasının izlediği yol ışın izleme ve IRI-Plas kullanılarak hesaplanabildiği için, gecikme merkezi τ_c parametresi doğrudan elde edilebilmektedir. Bu sayede, ITS modelinde kullanılan, D , f_p , σ ve h_0 parametrelerinin kullanılmasına gerek kalmamaktadır.

ITS kanal modelinde kullanılan bir diğer parametre gecikme yayılımını ifade eden σ_τ parametresidir. KD kanalda gecikme yayılımını oluşturan iki ana bileşen bulunmaktadır; birincisi farklı frekans bileşenlerinin farklı katmanlardan yansımalarından dolayı oluşan yayılma, ikincisi iyonosferik düzensizlikler nedeniyle oluşan yayılmadır [65]. Gecikme yayılımını oluşturan ilk bileşen, yol özelliklerinin hesaplanması sonucunda kaydedilen frekans ve zaman gecikmesi parametreleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Örnek bir durum Şekil 3.7’te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi gecikme yayılımı, kullanılan bantgenişliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bantgenişliği

ile kastedilen, iyonosfere gönderilen sinyalin kapsadığı frekans bandıdır. Bantgenişliği arttıkça, gecikme yayılımının artacağı söylenebilmektedir. Bu ilişki nedeniyle gecikme yayılımı parametresinin ilk bileşeni σ_{τ_1} , frekans ve zaman gecikmesi bilgileri kullanılarak $\mu\text{s}/\text{MHz}$ türünden hesaplanabilmektedir. şekil 3.7'te görüldüğü gibi her frekans değerri farklı gecikme süresine sahiptir. Eğrinin eğimini σ_{τ_1} değerini vermektedir ve



şekil 3.7. Zaman gecikmesi ve frekans arasındaki ilişki.

$$\sigma_{\tau_1} = \frac{\Delta\tau}{\Delta f} \quad (3.11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Gecikme yayılımının ikinci bileşeni σ_{τ_2} , iyonosferik koşullara bağlı olarak değişmektedir. İyonosferik olarak sakin ve fırtınalı günler için bu değerlerin tipik olarak $10 \mu\text{s}/\text{MHz}$ ile $240 \mu\text{s}/\text{MHz}$ mertebelerinde olduğu bildirilmiştir [66]. İyonosferik koşullara bağlı olarak belirtilen aralıkta tipik bir değer seçilebilmektedir.

Gecikme yayılımını oluşturan iki bileşenin toplamının, kanalın toplam gecikme yayılı-

mını verdiği varsayımı yapılmıştır. Gecikme yayılımının hesabı için

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau_1} + \sigma_{\tau_2} \quad (3.12)$$

ifadesi kullanılmaktadır.

Bölüm 3.2.1’de anlatılan ve güç gecikme profilinde, başlangıç noktasından gecikme merkezine kadar olan bölgeyi ifade etmek için kullanılan σ_c ifadesi için toplam gecikme süresi σ_{τ} üzerinden bir hesaplama yapılmış ve $\sigma_c = \sigma_{\tau}/4$ olduğu varsayılmıştır.

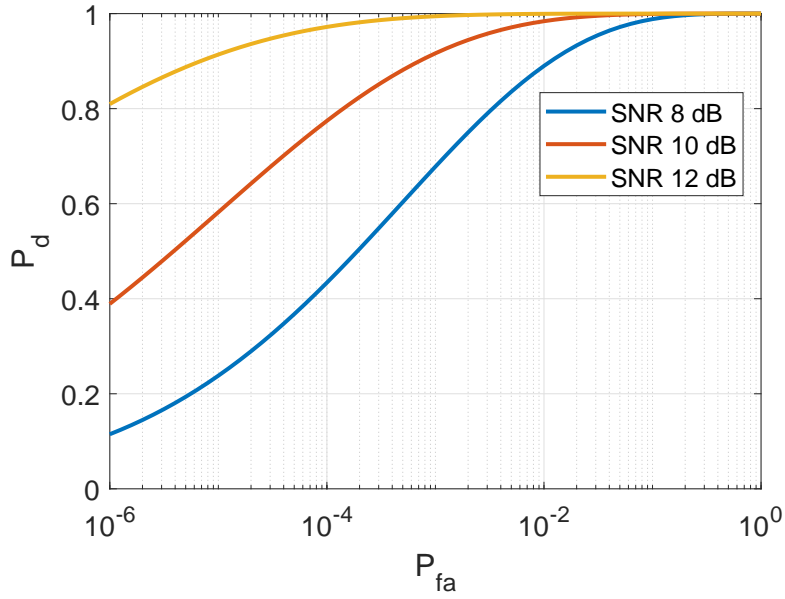
3.2.4.3 Aşama 3: Kanal Oluşturma

İyonogram üretme işleminin üçüncü basamağı, kanal oluşturma aşamasıdır. Bir önceki basamak olan parametre çıkarım aşamasında elde edilen parametrelere ek olarak ITS model parametrelerinden normalize tepe genlik (A), Doppler yayılımı (σ_D), gecikme merkezi Doppler kayması (f_s) ve τ_L noktasındaki Doppler kayması (f_{sL}) bu aşamada kullanılmaktadır. A parametresi, yol özelliklerinin hesaplanması sırasında kaydedilen soğurulma miktarı değerine göre ağırlıklandırılarak hesaplamalara dahil edilmektedir. σ_D , f_s ve f_{sL} , kanalın Doppler karakteristiğine bağlı olarak değişeceğinden, benzetim yapılmak istenen kanalın Doppler yayılım ve Doppler kayma özelliklerine göre belirlenen değerler girdi olarak verilebilmektedir. ITS modeli için gereken bütün parametreler hesaplandıktan ve hazırlandıktan sonra kanal katsayıları elde edilmektedir.

İyonogram sonucu üretmek için vericiden gönderilen sinyal bu aşamada kullanılmaktadır. Gerçek iyonosondalarda olduğu gibi Barker, M-Dizi, Golay vb. kodlu sinyaller verici sinyal dalgaşekli olarak kullanılabilir. Ayrıca kanala eklenmek istenen gü-rültü, SNR parametresi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Son olarak verici dalgaşekli, hesaplanan kanal katsayıları ile oluşturulmuş kanaldan geçirilmekte ve hesaplanan gü-rültü sinyal üzerine eklenerek alıcıya ulaşan dalgaşekli elde edilmektedir.

3.2.4.4 Aşama 4: Analiz

İyonogram üretme işlemindeki son aşama, alıcıya ulaşan sinyallerin, iyonogram izi elde etmek üzere analiz edildiği aşamadır. Bunun için alıcıya ulaşan sinyal vericide gönderilen dalgaşekli ile uyumlu olan, uyumlu filtreden geçirilmektedir. Uyumlu filtre alıcıya ulaşan sinyalin maksimum SNR ile alınabilmesini sağlamak için kullanılmaktadır [67]. Uyumlu filtrenin çıkışı önceden belirlenen bir eşik değeri ile karşılaştırılarak tespit işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.8. Alıcı işletim karakteristiği eğrileri

Eşik seviyesini belirlemek için alıcı işletim karakteristiği (AİK) eğrileri kullanılmaktadır [68]. AİK eğrileri, belirli bir SNR değeri için alıcının yanlış alarm ve tespit olasılıklarının değişimini göstermektedir. Gauss dağılımlı gürültüye sahip bir kanal için farklı SNR koşullarında elde edilen AİK eğrileri Şekil 3.8’de verilmiştir. Şekilde yatay eksen yanlış alarm olasılığını (P_{fa}), dikey eksen tespit olasılığını (P_d) göstermektedir. Alıcıda elde edilmek istenen P_{fa} ve P_d performansına göre eğri üzerinde bir çalışma noktası belirlenmekte ve buna bağlı olarak eşik seviyesi hesaplanmaktadır. DPS-4D iyonosondası tespit yapmak için sabit bir eşik seviyesi belirlemek yerine, uyumlu filtre çıkışında elde edilen dalga şeklinin tamamını kaydetmektedir. Bu nedenle, çevirimdışı olarak

farklı eşik değerleri ile değişen iyonogram izleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada da aynı yöntem kullanılmıştır.

Uyumlu filtre performansı ile ilgili olarak vurgulanması gereken bir diğer nokta, Doppler değişimlerinin uyumlu filtre çıkışındaki SNR seviyesinde düşüşe yol açmasıdır. SNR değerindeki bu düşüş oluşan Doppler kayma miktarına bağlı olarak önemli seviyelere ulaşabilmektedir. Ayrık zamanda tanımlı bir sistemde frekans kayması,

$$w_D = 2\pi \frac{2v_R}{c} f_0 T_s \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir [69]. Eşitlik 3.13'te geçen, c ışık hızını, v_R hedefin hızını, f_0 taşıyıcı frekansını, T_s ise örnekleme periyodunu ifade etmektedir. Alıcıda kullanılan uyumlu filtrenin çıkışı ise,

$$\phi(m) = \sum_{k=0}^{N-1} u_k v_{k+m}^* \quad (3.14)$$

ile gösterilmektedir. Eşitlik 3.14'da u_n ve v_n ayrı ayrı gönderilen ve alınan sinyalleri göstermektedir. Gönderilen sinyalde oluşan frekans kayması nedeniyle $v_n = u_n e^{jw_D n}$ şeklinde yazılabilmektedir. Vericiden gönderilen sinyalin kodlu bir c_n dizisi olduğu düşünüldüğünde, uyumlu filtrenin çıkışı,

$$\phi(m) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k c_{k+m}^* e^{jw_D(k+m)} \quad (3.15)$$

olarak yazılabilmektedir. Bu durumda uyumlu filtre çıkışı, ideal örnekleme noktası olan $m = 0$ noktasında örneklenip, N uzunluğuna göre normalize edilirse, frekans kayması durumundaki uyumlu filtre çıkışı,

$$\phi(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{jw_D k} \quad (3.16)$$

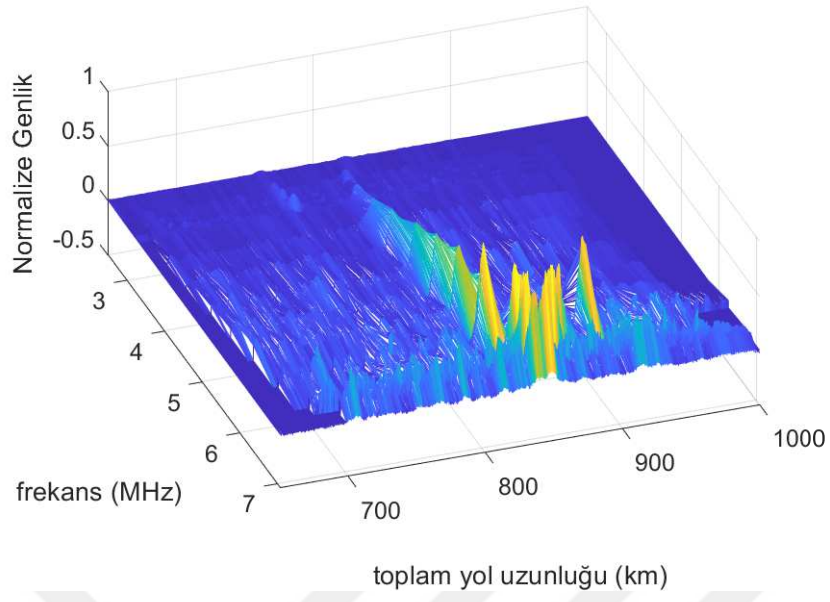
şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik 3.16'dan uyumlu filtre çıkışındaki sinyalin, frekans kaymasına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Eşitlikteki ifade, toplam açılımı

kullanılarak,

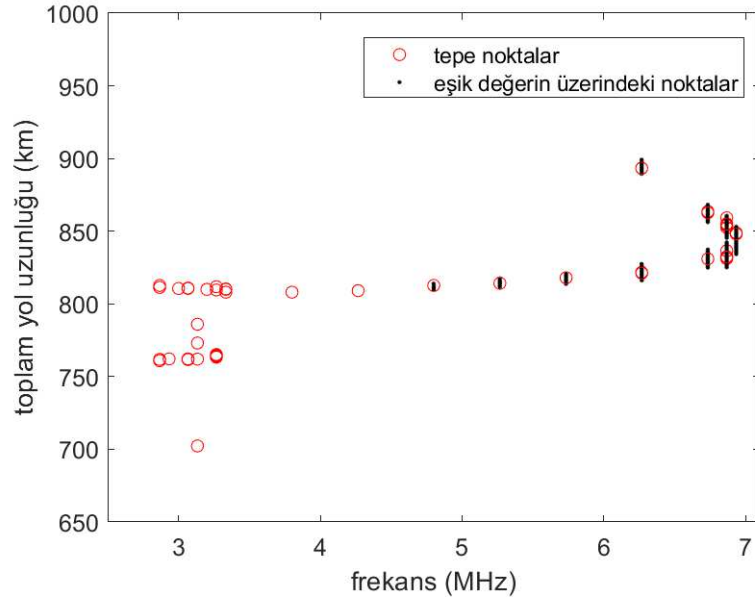
$$\phi(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{jw_D k} = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(\frac{w_D N}{2})}{\sin(\frac{w_D}{2})} e^{j\frac{w_D(N-1)}{2}} \right| = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(\frac{w_D N}{2})}{\sin(\frac{w_D}{2})} \right| \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu durumda, Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.17 kullanılarak frekans kaymasının yarattığı SNR kaybı hesaplanabilmektedir. Örneğin, tipik bir darbant iyonosonda uygulaması için $f_0 = 5$ MHz, $T_s = 40 \mu s$, $v_R = 300$ m/s ($f_D = 10$ Hz) ve $N = 13$ olduğu varsayıldığında, uyumlu filtre çıkışındaki tepe noktası seviyesi yaklaşık 4×10^{-4} dB düşmektedir. Yani belirtilen parametrelerle KD bandından kaynaklanan bir frekans kayması durumunda uyumlu filtre çıkışının önemli ölçüde kayba uğramadığı söylenebilmektedir. SNR değerinde 3 dB kaybın oluştuğu nokta $f_0 = 5$ MHz değerinde $f_D = 850$ Hz'tir. KD bandında bu seviyede bir frekans kaymasının oluşması gerçekçi değildir.

Şekil 3.9'da 13 bit uzunluğundaki Barker serisi ile kodlanmış verici dalgaşekli için, uyumlu filtre çıkışında elde edilen sinyal görülmektedir. Şekil üzerinde düşük frekanslarda (özellikle D-E katmanlarında) iyonosferik soğurulma nedeniyle alıcıya ulaşan sinyal seviyelerinin düşük olduğu görülmektedir. Vericide kullanılan 13 bitlik Barker dizisi nedeniyle, uyumlu filtre çıkışında SNR değerinin maksimum olduğu tepe noktalar elde edilmiştir. Şekil 3.10'da ise, uyumlu filtre çıkışındaki tepe noktalar ve eşik seviyesinin üzerinde kalan noktalar görülmektedir.



Şekil 3.9. Uyumlu filtre çıkışı (genlik değeri en yüksek tepe değerine göre normalize edilmiştir)



Şekil 3.10. Uyumlu filtre çıkışındaki tepe noktalar ve eşik değerin üzerinde kalan noktalar

Çizelge 3.2. Güney Afrika ve Avrupa için benzetim yapılan istasyon koordinatları

	Güney Afrika		Avrupa	
	Hermanus (HE)	Lousville (LV)	Pruhonce (PQ)	Ebro (EB)
Enlem (°)	-34.42	-28.50	50.00	40.80
Boylam (°)	19.22	21.20	14.60	0.50
Uzaklık (km)	680		1520	

3.3 Benzetim Çalışmaları ve Yorumlar

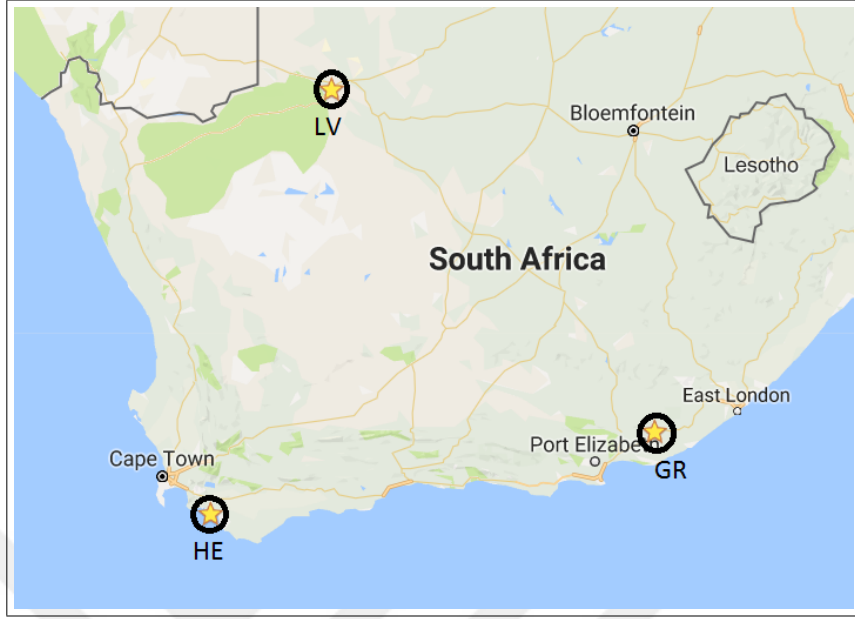
Benzetim çalışmalarında, ITS kanal parametrelerinin hesaplanması için Bölüm 3.2.4'te anlatılan yöntemler izlenmiştir. Gecikme süresinin birinci bileşeni σ_{τ_1} hesabı için Eşitlik 3.11 kullanılmıştır. İkinci bileşen σ_{τ_2} değerinin $50 \mu\text{s}/\text{MHz}$ olduğu varsayılmıştır [70]. Diğer bir gecikme parametresi olan σ_c ise $\sigma_c = \sigma_{\tau}/4$ olarak alınmıştır. Doppler kayması için kullanılan f_s ve f_{sL} 2 Hz, Doppler yayılımı σ_D ise 0.5 Hz olarak alınmıştır. Seçilen Doppler değerleri için benzetim yapılan bölgelerdeki iyonosonda istasyonları tarafından toplanan ölçüm verileri Drift Explorer yazılımı kullanılarak incelenmiş ve sonrasında yukarıda belirtilen ortalama değerler kullanılmıştır [71].

Benzetim çalışmalarında dalgaşekli olarak, 13 bit Barker dizisi, $41 \mu\text{s}$ (25 kHz bantgenişliği) çip süresi ile kullanılmıştır. Kanaldaki gürültü, 25 kHz bantgenişliği içerisindeki SNR seviyesi 20 dB olacak şekilde ayarlanmıştır. İyonosonda ölçüm sonuçları ile karşılaştırmada kolaylık sağlaması açısından, yalnızca sıradan dalgalar için yapılan benzetim çalışması sonuçları paylaşılmıştır.

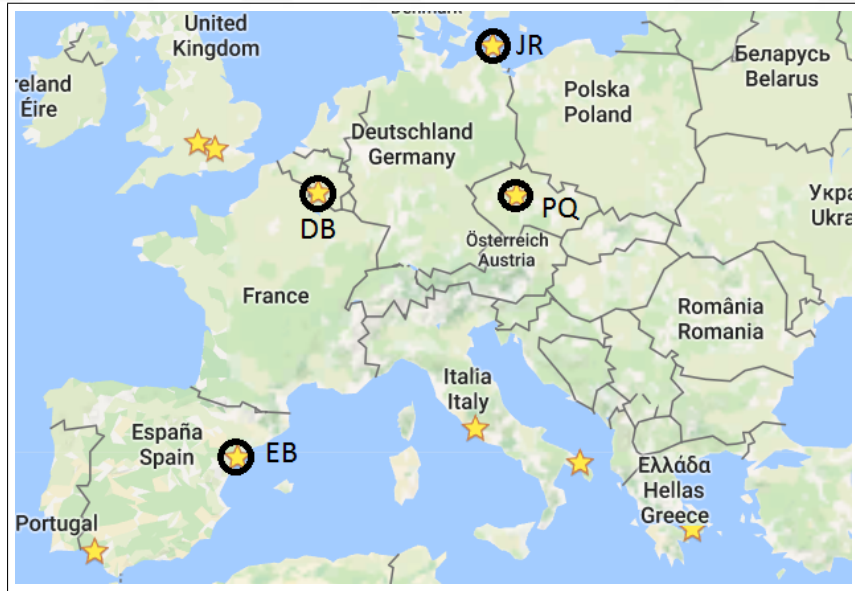
Benzetim çalışmaları kapsamında, Güney Afrika ve Avrupa bölgelerinde, fırtınalı ve sakin günler için eğik iyonogram sonuçları üretilmiştir. Bu amaçla 16-17-18 Mart 2015 tarihleri incelenmiştir. 16 Mart iyonosferik olarak sakin bir günken, 17 Mart sabah saatlerinde (07:30 UT) iyonosferik fırtına başlamış ve 18 Mart gece yarısına kadar devam etmiştir [72], [73].

Çizelge 3.2'de, benzetim çalışmalarında kullanılan iyonosonda istasyonları, koordinatları ve alıcı-verici arası uzaklıkları gösterilmiştir. Güney Afrika bölgesinde, Hermanus (HE), Avrupa bölgesinde ise Pruhonce (PQ) istasyonları alıcı olarak seçilmiştir. Belir-

tilen iyonosonda istasyonlarının harita üzerindeki konumları Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Güney Afrika’da yer alan iyonosonda istasyonları yıldız ile gösterilmektedir. Siyah daire içerisindeki istasyonlara ait veriler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Avrupa’da yer alan iyonosonda istasyonları yıldız ile gösterilmektedir. Siyah daire içerisindeki istasyonlara ait veriler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Bölüm 3.2.4'te bahsedildiği gibi, iyon yoğunluğu hesaplamaları için IRI-Plas kullanılmıştır. IRI-Plas ile iyon yoğunluğu profillerinin üretilmesinde, aşağıda sıralanan dört yöntem izlenmiştir;

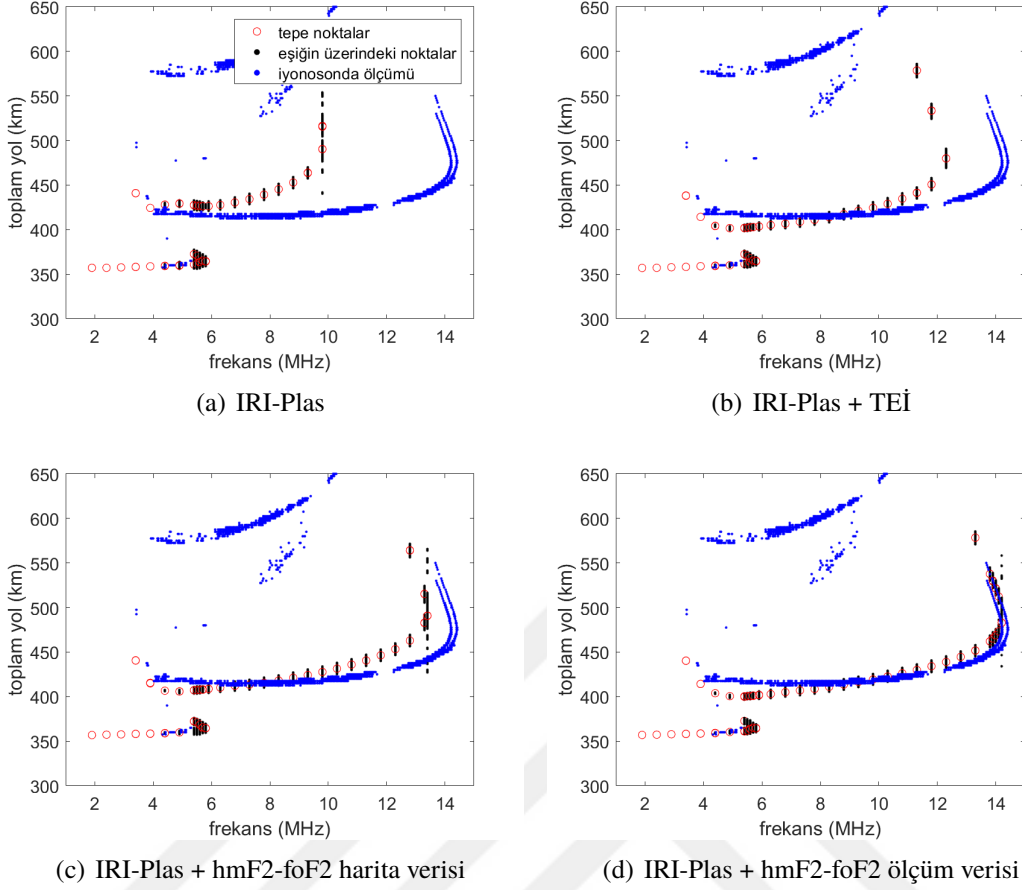
- IRI-Plas, girdi verisi olmadan
- IRI-Plas, TEİ girdi verisi ile
- IRI-Plas, hmF2 ve foF2 GIM harita verisi ile
- IRI-Plas, hmF2 ve foF2 ölçüm verisi ile

hmF2 ve foF2 ölçüm verileri ile ölçüm düzlemleri oluşturmak için kullanılan Eşitlik 3.7'de verilmiştir. Bu işlem için kullanılan üç iyonosonda istasyonundan ikisi alıcı ve verici istasyonları, üçüncü istasyon ise Güney Afrika'da Grahamstown (GR) [-33.30° , 26.50°], Avrupa'da ise Dourbes (DB) [50.10° , 04.60°] istasyonlarıdır. Belirtilen istasyonların harita üzerindeki konumları Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir.

Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te Güney Afrika bölgesi için üretilen eğik iyonogram sonuçları görülmektedir. Şekil 3.13'te sonuçları verilen 16 Mart 2015 tarihi, iyonosferik aktiviler açısından sakin bir gün olarak kabul edilmektedir. Buna rağmen girdi verisi kullanılmadan, yalnızca IRI-Plas ile üretilen iyon yoğunluk profilleri ile gerçek ölçüm sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilemediği görülmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları MUF değerleri açısından karşılaştırıldığında, aralarında 4.4 MHz fark olduğu görülmektedir. IRI-Plas, TEİ verisi ile beslendiği durumda MUF değerleri arasındaki farkın 1.9 MHz mertebelerine indiği, ölçüm ve benzetim sonucu elde edilen iyonogram izlerinin şeklen birbirlerine daha çok benzediği görülmektedir. IRI-Plas'ın hmF2-foF2 GIM haritaları ile beslendiği diğer bir durumda, MUF değerleri arasındaki farkın 0.8 MHz'e kadar indiği görülmektedir. Buna göre IRI-Plas yazılımının hmF2-foF2 değerleri ile beslenmesi durumunda, TEİ verisi ile beslendiği duruma kıyasla gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebileceği söylenebilmektedir. Son durumda, IRI-Plas yazılımı hmF2-foF2 ölçüm verileri ile beslendiğinde, MUF değerleri

arasındaki farkın 0.02 MHz civarına indiği ve iyonogramların oldukça benzer şekillerde elde edilebildiği görülmektedir.

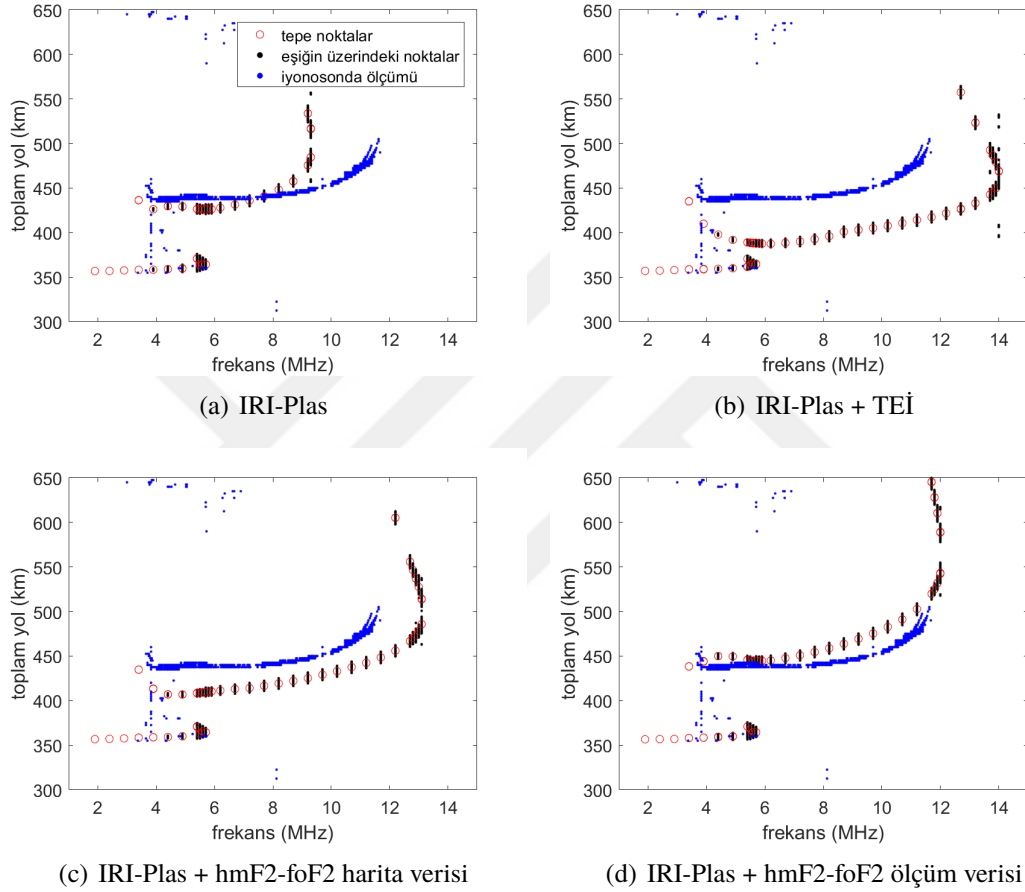
Şekil 3.14'te 17 Mart 2015 16:00 UT için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Belirtilen saatte, iyonosferik fırtına nedeniyle iyonosfer kaynaklı değişiklikler gözlemlenebilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, sadece IRI-Plas kullanılarak elde edilen sonuçların 16 Mart tarihindeki sonuçlar ile benzer olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, IRI-Plas yazılımının aylık-saatlik ortanca iyon yoğunluğu profilleri üretmesidir. Dolayısıyla 16 ve 17 Mart tarihleri için elde edilen sonuçlar birbirine benzerdir. 17 Mart tarihi için ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları MUF değerleri arasındaki farkın 3 MHz civarında olduğu görülmektedir. İkinci durumda, TEİ beslemeli profiller kullanılmış ve sonuçlarda hem iyonogram şekli hem de MUF değeri anlamında büyük değişiklik olduğu gözlenmiştir. Bu değişikliğin temel nedeninin iyonosferik fırtına olduğu düşünülmektedir. Fırtına, iyonosfer parametrelerinde anlık değişimlere yol açmaktadır. TEİ haritaları ise GPS alıcılarından toplanan ölçümler ve dolaylı dönüşüm teknikleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu sebeple, iyonosferik fırtına durumunda, TEİ verileri ile beslenen IRI-Plas yazılımının gerçek sonuçları yansıtmak için yeterince doğru iyon yoğunluğu profilleri üretmediği söylenebilmektedir. Benzer bir durumun, hmF2-foF2 harita verisi ile beslenen sonuçlar için de geçerli olduğu görülmektedir. Fırtına, hmF2 ve foF2 değerlerinde anlık değişimlere yol açmakta ancak uzay ve zamanda ara değerlendirme yapılarak oluşturulan hmF2-foF2 haritaları bu değişimleri içerecek veriye sahip olamamaktadır. Dolayısıyla, fırtınalı günler için hmF2-foF2 GIM haritaları kullanılarak üretilen profillerin, gerçek ölçüm sonuçları elde etmek için kullanılabilir olmadığı değerlendirilmektedir. hmF2-foF2 ölçüm verileri ile beslenen IRI-Plas profillerinin kullanıldığı durumda ise, benzetim sonuçlarının ölçüm sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. Bunun sebebi, hmF2-foF2 ölçüm verilerinin belirtilen tarih ve saatte iyonosondalar tarafından ölçülen anlık değerlerden oluşmasıdır. İyonosferde fırtına nedeniyle oluşan anlık değişimler, ölçüm sonuçlarına yansımakta dolayısıyla IRI-Plas tarafından üretilen profillerin iyileşmesini sağlamaktadır. Bu durumda ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında, iyonogram izlerinin birbirlerine benzediği ve MUF değerleri arasındaki farkın 0.2 MHz civarında olduğu görülmektedir.



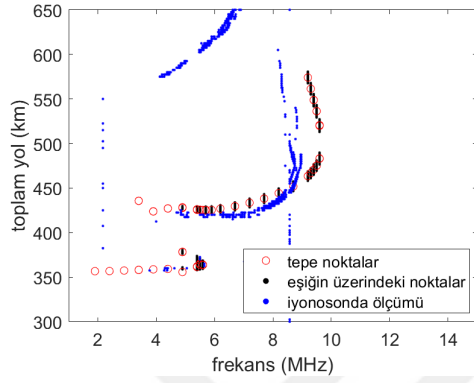
Şekil 3.13. 16 Mart 2015 16:00 UT tarih ve saatinde Güney Afrika bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Lousville (LV), alıcı Hermanus (HE) istasyonları

18 Mart 2015 tarihi için elde edilen sonuçlar Şekil 3.15'te verilmiştir. Belirtilen tarihte iyonosferik fırtına devam etmektedir. Sadece IRI-Plas kullanılarak elde edilen sonuçların 16 ve 17 Mart sonuçları ile benzer olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları MUF değerleri arasında 1 MHz civarında fark olduğu görülmektedir. TEİ beslemeli ve hmF2-foF2 harita verisi beslemeli profillerin kullanıldığı durumlarda 17 Mart için elde edilen sonuçlara benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Fırtına nedeniyle iyonosfer koşullarında oluşan anlık değişimlerin sonuçları etkilediği değerlendirilmektedir. hmF2-foF2 ölçüm verilerinin kullanıldığı son durumda ise benzetim sonucunda oluşturulan ionogram izlerinin ölçüm sonuçları ile benzer olduğu ve MUF değerleri arasındaki farkın 0.1 MHz mertebelerinde olduğu görülmektedir.

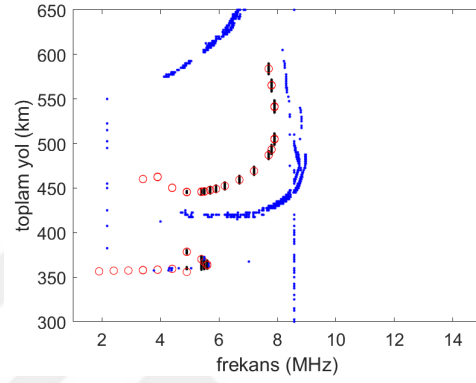
Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de ionogram üretme altyapısı Avrupa bölgesi



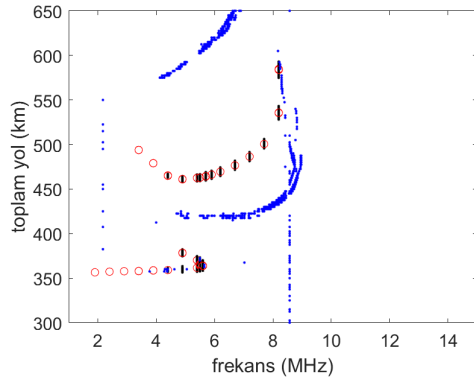
Şekil 3.14. 17 Mart 2015 16:00 UT tarih ve saatinde Güney Afrika bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Lousville (LV), alıcı Hermanus (HE) istasyonları



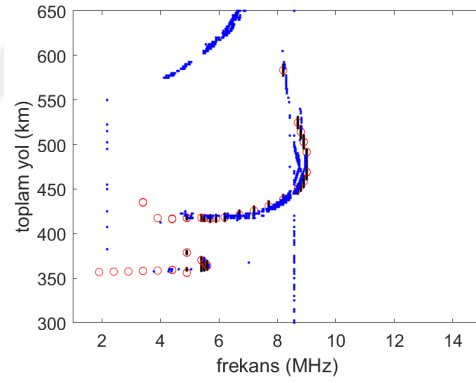
(a) IRI-Plas



(b) IRI-Plas + TEİ



(c) IRI-Plas + hmF2-foF2 harita verisi

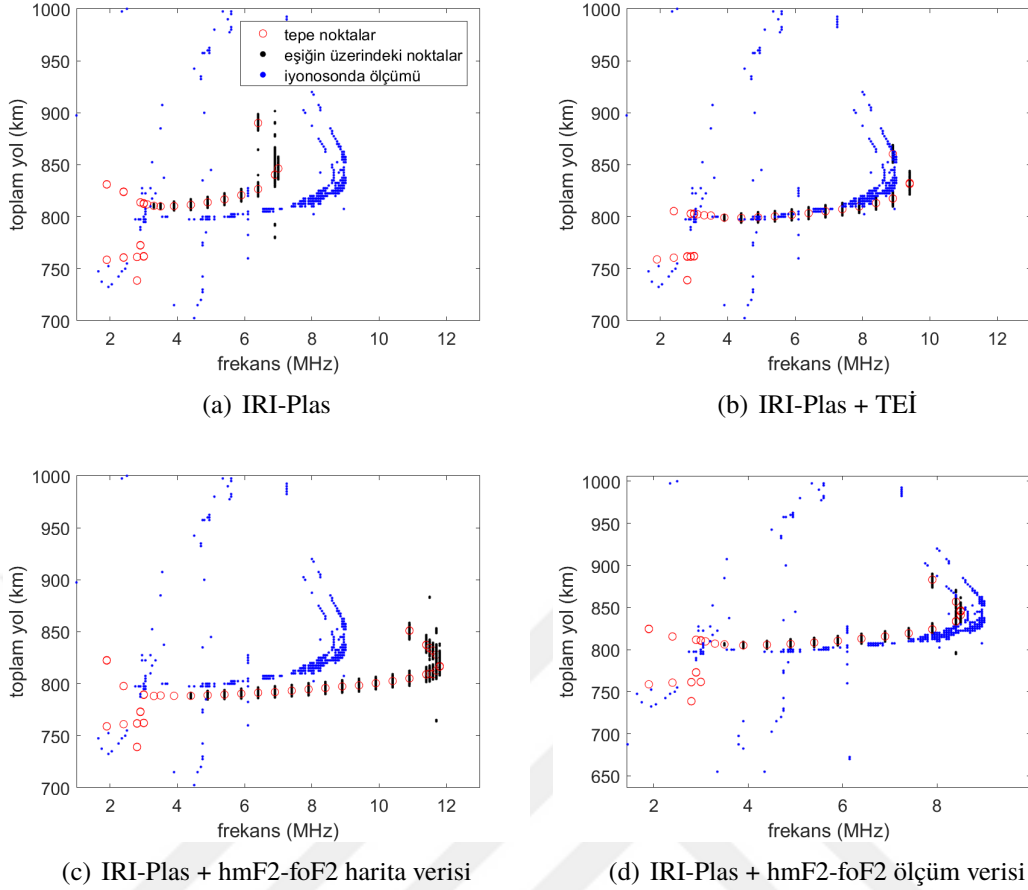


(d) IRI-Plas + hmF2-foF2 ölçüm verisi

Şekil 3.15. 18 Mart 2015 16:00 UT tarih ve saatinde Güney Afrika bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Lousville (LV), alıcı Hermanus (HE) istasyonları

üzerinde 16-17-18 Mart 2015 05:00 UT tarihleri için test edilmiştir. Şekil 3.16'da İyonosferik aktiviteler anlamında sakin bir gün olan 16 Mart için, sadece IRI-Plas kullanılarak elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile farklı olduğu görülmektedir. MUF değerleri arasındaki fark 1.65 MHz'dir. IRI-Plas TEİ verisi ile beslendiğinde ise, benzetim sonuçlarının ölçüm sonuçlarına yaklaştığı ve MUF farkının 0.8 MHz'e indiği görülmektedir. Üçüncü durumda, hmF2-foF2 harita verisi ile beslenen sonuçlar ile ölçüm sonuçları arasında büyük fark olduğu görülmektedir. MUF değerleri arasındaki fark 3.1 MHz'e çıkmıştır. Bu beklenen bir durum değildir. Sonuçlarda görülen bu farkın, harita verileri oluşturulurken yapılan kestirim hatalarından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. IRI-Plas yazılımının hmF2-foF2 ölçüm verileri ile beslendiği son durumda, benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının benzer olduğu ve MUF değerleri arasındaki farkın 0.15 MHz mertebelerine indiği görülmektedir.

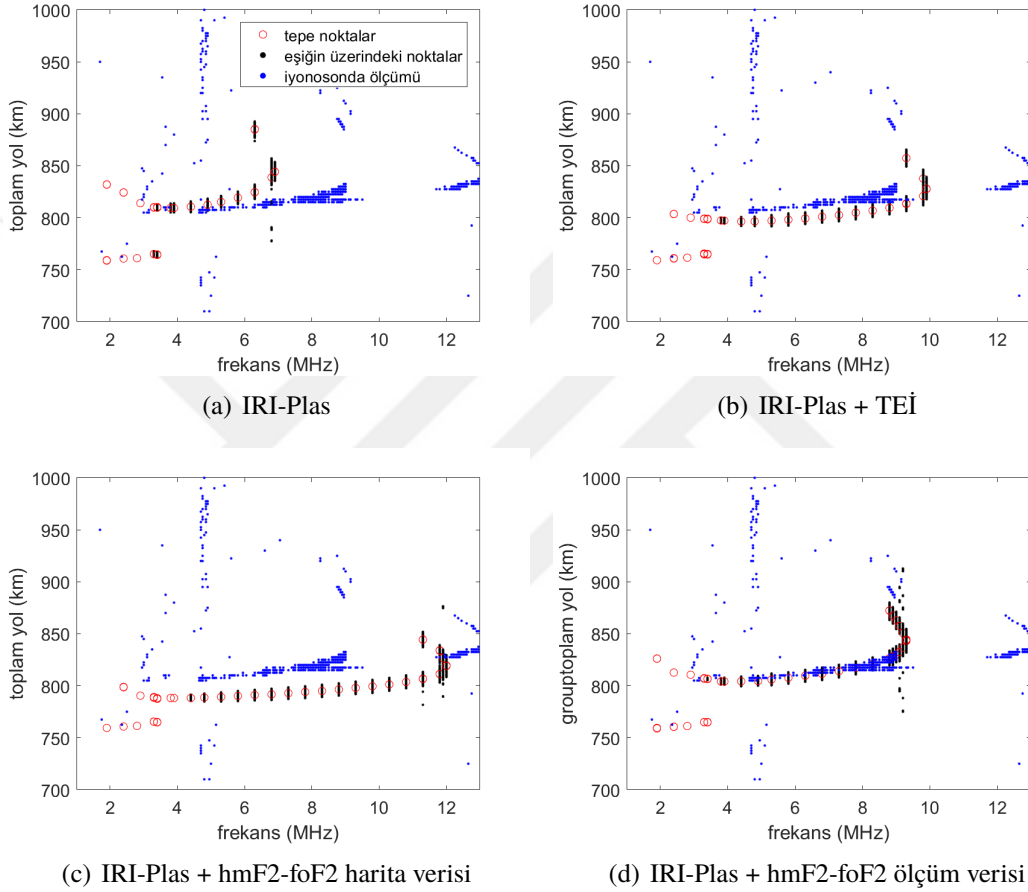
17 Mart 05:00 UT tarih ve saatine ait Şekil 3.17'de verilen sonuçlar, iyonosferik fırtınanın 07:30 UT'de başlayan ana fazından hemen önceki sonuçları göstermektedir. Sonuçlarda fırtına etkisiyle oluşan bir takım anomaliler görülebilmektedir. IRI-Plas yazılımına veri beslemesi yapılmadan elde edilen sonuçlar 16 Mart sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi bunun sebebi IRI-Plas yazılımının aylık-saatlik ortanca profiller üretmesidir. Ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları MUF değerleri arasındaki fark 2.5 MHz civarındadır. IRI-Plas'ın TEİ verisi ile beslendiği ikinci durumda, TEİ verisinin profili ölçüm sonuçlarında elde edilen MUF değerine yaklaştırdığı ancak profil yüksekliklerinde yapılan hatadan dolayı, toplam yol bilgisinin ölçüm değerinden uzaklaştığı görülmektedir. Fırtınanın ön fazlarında meydana gelen iyonosferik değişikliklerin bu sonucun oluşmasına neden olduğu değerlendirilmektedir. hmF2-foF2 harita verilerinin kullanıldığı durumda da TEİ beslemeli sonuçlardakine benzer bir sonuç elde edilmiştir. İyonosferik fırtına etkisiyle hmF2-foF2 değerlerinde meydana gelen anlık değişimler, kullanılan harita değerleri içerisinde yer almadığından, sonuçta benzetim yoluyla elde edilen iyonogram izleri, ölçüm sonuçları ile farklı olmaktadır. hmF2-foF2 ölçüm verilerinin kullanıldığı son durumda ise, oluşturulan iyonogram şeklinin ölçüm sonuçları ile benzer olduğu ve MUF değerleri arasındaki farkın 0.1 MHz civarında olduğu görülmektedir.



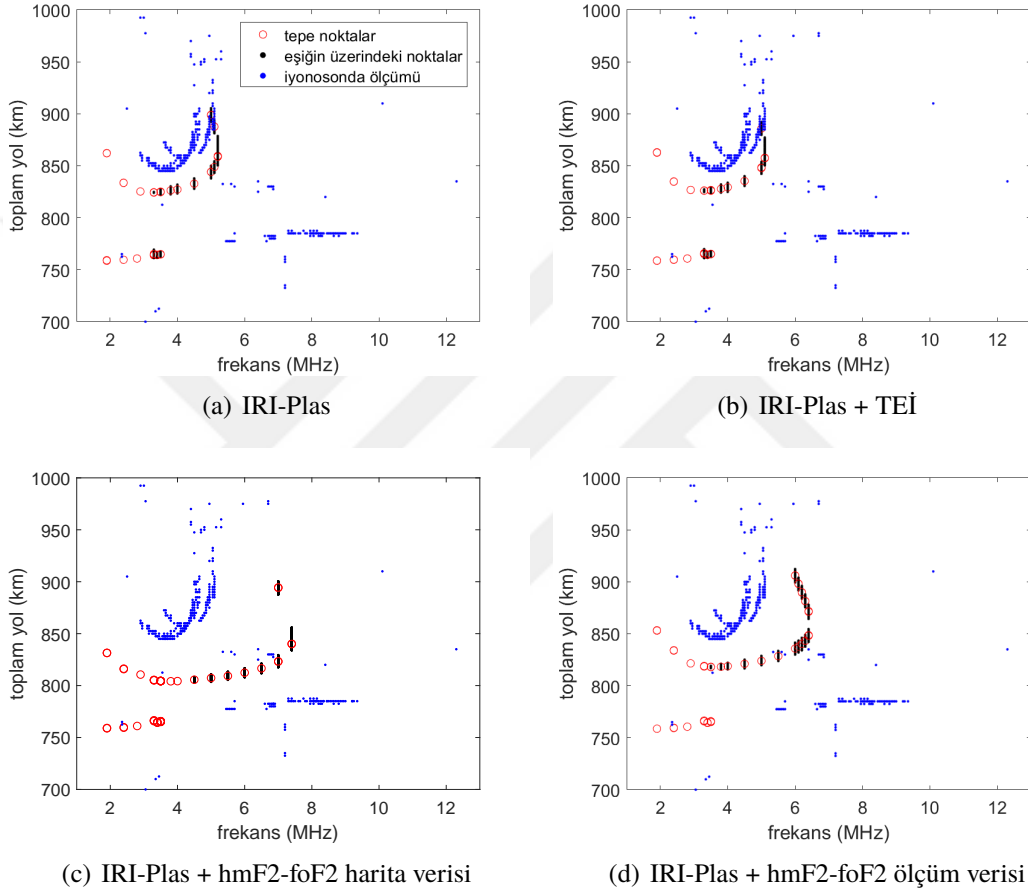
Şekil 3.16. 16 Mart 2015 05:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Ebro (EB), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları

Şekil 3.18’de verilen 18 Mart 2015 05:00 UT tarihine ait sonuçlar, iyonosferik fırtınanın yoğun olarak yaşandığı anları içermektedir. Veri beslemesinin yapılmadığı birinci durumda elde edilen sonuçların, hem toplam yol hem de frekans anlamında ölçüm sonuçları ile farklı olduğu görülmektedir. Fırtına etkisiyle oluşan bu durum beklenen bir durumdur. TEİ ve hmF2-foF2 harita verilerinin kullanıldığı sonuçlar incelendiğinde, her iki veri setinin de fırtına nedeniyle oluşan değişiklikleri takip etmek için yararlı olmadığı görülmektedir. hmF2-foF2 ölçüm sonuçları kullanılarak elde edilen sonuçlara bakıldığında, hmF2-foF2 ölçüm verilerinin benzetim sonuçlarını iyileştirmedeği görülmektedir.

Güney Afrika bölgesinde 18 Mart 2015 tarihi için hmF2-foF2 ölçüm verisi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları ionosonda ölçüm sonuçları ile benzerlik göstermesine

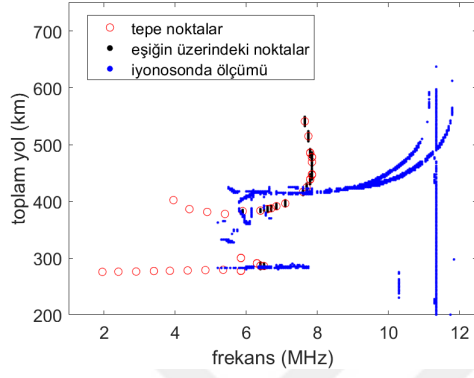


Şekil 3.17. 17 Mart 2015 05:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Ebro (EB), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları

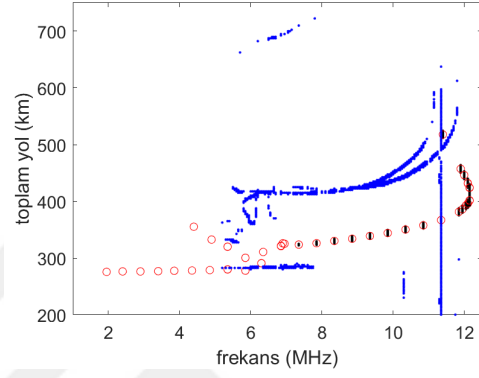


Şekil 3.18. 18 Mart 2015 05:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Ebro (EB), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları

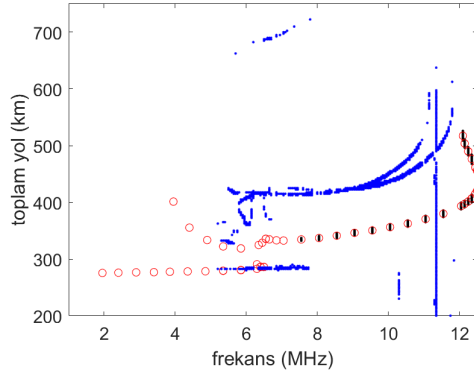
rağmen, Avrupa bölgesinde 18 Mart 2015 tarihinde, hmF2-foF2 ölçüm verisi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları iyonosonda ölçüm sonuçlarına benzememektedir. Bunun temel nedeni Şekil 3.12, Şekil 3.11 ve Çizelge 3.2'de belirtildiği gibi, her iki bölgedeki alıcı-verici istasyonlar arası mesafelerin farklı olmasıdır. Güney Afrika bölgesindeki alıcı-verisi noktaları arası 680 km iken, Avrupa'da iki nokta arası 1520 km'dir. İyonosondalardan alınan hmF2-foF2 ölçüm verileriyle, Eşitlik 3.7 kullanılarak doğrusal bir düzlem oluşturulmaktadır. Alıcı-verici arasındaki mesafe büyüdükçe, ölçüm verileri kullanılarak oluşturulan düzlem gerçek sonuçlara kıyasla hatalı sonuçlar üretmektedir. Bu durumu daha net anlamak için Avrupa bölgesinde, Güney Afrika'daki Lousville-Hermanus istasyonları arası uzaklığa yakın uzaklıkta iki iyonosonda istasyonu seçilmiştir. Şekil 3.12'de görülen Juliusruh (JR) [54.60°, 13.40°] ve Pruhonice (PQ) [50.00°, 14.60°] bu amaçla verici ve alıcı olarak seçilen istasyonlardır. İki istasyon arası mesafe yaklaşık 515 km'dir. Belirtilen istasyonlar için fırtınalı saatleri içeren 17 Mart 2015 11:00 UT için benzetim çalışması yapılmıştır. Şekil 3.19'de hmF2-foF2 ölçüm verileri ile beslenen IRI-Plas yazılımının, TEİ ve hmF2-foF2 haritaları ile beslenen sonuçlara göre çok daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bu durumda, geliştirilen iyonogram üretme altyapısı, doğru hmF2-foF2 verileri ile beslenebildiği sürece, hem sakin hem de fırtınalı günlerde iyonosonda ölçüm sonuçları ile benzer sonuçların elde edilebileceği sonucuna varılmaktadır.



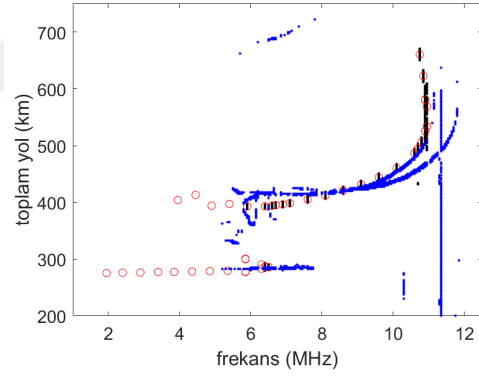
(a) IRI-Plas



(b) IRI-Plas + TEİ



(c) IRI-Plas + hmF2-foF2 harita verisi



(d) IRI-Plas + hmF2-foF2 ölçüm verisi

Şekil 3.19. 17 Mart 2015 11:00 UT tarih ve saatinde Avrupa bölgesi için yapılan benzetim sonuçları. Verici Juliusruh (JR), alıcı Pruhonice (PQ) istasyonları

3.4 Sonuç

Tezin bu bölümde yapılan çalışmada, alıcı-verici arasındaki iletişim kanalı etkilerini içerecek şekilde, iyonogram oluşturmak için geliştirilmiş alt yapı ve detaylarından bahsedilmiştir. Geliştirilen yapı farklı coğrafi bölgelerde, sakin ve fırtınalı iyonosferik koşullar altında test edilmiş, elde edilen benzetim sonuçları iyonosonda ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak, geliştirilen yapının geçerliliği doğrulanmıştır.

Bahsi geçen iyonogram oluşturma yapısı içerisinde, 3B ışın izleme, IRI-Plas iyon yoğunluğu kestirim aracı ve ITS kanal modeli entegre edilerek birlikte kullanılmıştır. Gerçek bir iyonosonda operasyonunda olduğu gibi, vericide oluşturulan dalgaşekillerinin, ITS kanal modeli kullanılarak elde edilen iyonosferik kanal üzerinden alıcıya ulaşması sağlanmıştır. Vericiden alıcıya kadar ışınların izledikleri yollar 3B ışın izleme yapılarak takip edilmiştir. Alıcıya ulaşan sinyaller vericide kullanılan dalgaşekli ile uyumlu olan uyumlu filtreden geçirilerek analiz edilmiş ve iyonogram izlerinin oluşturulması sağlanmıştır.

Geliştirilen yapıda, ışın izleme yardımıyla, çok sayıda girdi parametresine ihtiyaç duyan ITS kanal modelinin daha az girdi parametresi kullanılarak sadeleştirilebileceği görülmüştür. Standart ITS modelinde gecikme merkezi τ_c hesabı için kullanılan beş parametrenin (D (alıcı-verici arası uzaklık), f_c (kritik frekans), f_p (penetrasyon frekansı), σ (maksimum katman kalınlığı) ve h_0 (maksimum iyonlaşma yüksekliği)), ışın izleme yapıldığı durumda, kullanılmasına gerek olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca ITS modelinde gecikme yayılımı σ_τ olarak belirtilen parametrenin iki temel bileşenden oluştuğu belirtilmiş, ilk bileşen olan σ_{τ_1} parametresinin kullanılan bantgenişliğine bağlı olduğu ve ışın izleme ile hesaplanabileceği gösterilmiştir. İkinci bileşen σ_{τ_2} parametresinin ise iyonosferik koşullara bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirtilmiştir.

Yapılan benzetimler sonucunda, sakin iyonosfere sahip günlerde IRI-Plas yazılımına veri (TEİ, hmF2-foF2 harita, hmF2-foF2 ölçüm) beslendiği durumda sonuçların, iyonosonda ölçüm sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür. Fırtınalı günlerde ise hmF2-foF2 ölçüm verileri kullanılarak üretilmiş sonuçların, TEİ ve hmF2-foF2 harita verileri kul-

lanılarak üretilen sonuçlara göre daha doğru çıktılar ürettiği gösterilmiştir. Bu sonucun, fırtınalı günlerde iyonosferde meydana gelen anlık değişimlerin, hmF2-foF2 ölçüm verileri ile daha doğru şekilde takip edilebilmesi sayesinde oluştuğu belirtilmiştir. Ancak hmF2-foF2 ölçüm verilerini sağlayan iyonosonda istasyonlarının aralarındaki uzaklığın sonuçları etkilediği görülmüş, 500 – 600 km uzaklığındaki iyonosonda istasyonlarından alınan hmF2-foF2 verileri ile fırtınalı günlerde dahi gerçek iyonosonda ölçüm sonuçları ile benzer sonuçların üretilebildiği gösterilmiştir. Sonuç olarak yapılan benzetim çalışmaları, doğru hmF2-foF2 verileri sağlandığı sürece, geliştirilen iyonogram oluşturma alt yapısının sanal bir iyonosonda istasyonu gibi gerçeğe yakın sonuçlar üretebileceğini göstermiştir. Bu sayede, farklı kanal ve iyonosferik koşullarda, farklı verici dalga şekillerinin test edilebileceği bir altyapı oluşması sağlanmıştır. Bu yapının, iyonosonda istasyonu bulunmayan noktalar için sonuç üretmede ve kurulumu uzmanlık ve maliyet gerektiren iyonosonda istasyonlarının kurulum bölgelerinin belirlenmesinde katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Darbant iyonosonda benzetim ortamının oluşturulması, yukarıdaki paragraflar anlatılan katkıları vermesinin yanında, bu yöntemin zaafiyetlerinin anlaşılmasına da yardımcı olmuştur. Bu nedenle, iyonosondalar ile iyonogram izi oluşturma problemine yönelik alternatif bir yaklaşım geliştirilmiş ve bir sonraki bölümde detayları verilen genişbant iyonosferik kanal kestirim yöntemi için çalışmalar yürütülmüştür.

4. GENİŞBANT İYONOSFERİK KANAL KESTİRİMİ

İyonosferik faaliyetlerin yeryüzünden takip edilebilmesi için iyonosonda istasyonları kullanılmaktadır. Bölüm 2’de anlatıldığı gibi günümüzde kullanılan darbeli iyonosondalar, 100 – 600 W aralığında değişen çıkış güçlerine sahiptirler. Ayrıca anlık dar bir bant genişliğinde çalıştıklarından, sonuç oluşturmak için belirli bir frekans aralığını taramaları gerekmektedir. Yüksek çıkış gücü ile frekans bandının taranması, halihazırda kalabalık bir spektruma sahip olan KD bandı için istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. Tezin bu bölümünde, vericide genişbant dalgaşekilleri, ITS kanal modeli ve alıcıda zaman frekans analiz yöntemleri yardımıyla, iyonosondaların çıktısı olan iyonogram verisinin, düşük çıkış gücü kullanarak, klasik yöntemler kıyasla daha hızlı bir şekilde elde edilebileceği gösterilmiştir. Belirtilen işleme genişbant iyonosferik kanal kestirimi adı verilmiştir. Farklı özelliklere sahip dalgaşekilleri için incelemeler yapılmış, spektrum özellikleri ve frekans değişimlerine olan dayanıklılıkları nedeniyle vericide doğrusal frekans modülasyonlu (DFM) dalgaşekilleri kullanılmıştır. Geniş bant iyonosferik kanal katsayıları ITS kanal modeli ile oluşturulmuştur. Kanalın, zaman ve frekansa bağlı değişiminin tespit edilebilmesi için, alıcıda zaman frekans analizi ile sistem tanıma yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen altyapı sayesinde, düşük çıkış gücüyle kısa süreler içerisinde iyonosonda ölçüm sonuçlarına benzer iyonogram izlerinin oluşturulabildiği görülmüştür.

4.1 Giriş

Dikey ve eğik olmak üzere iki temel modda kullanılan iyonosondalar, katman yüksekliklerine bağlı elektron yoğunluğu başta olmak üzere, iyonosfere ait çeşitli özellikleri incelemek için kullanılmaktadır. Dünya üzerinde kurulu yüzün üzerinde iyonosonda istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlar zamana ve konuma bağlı olarak değişken özellik gösteren iyonosfer tabakası hakkında sürekli veri toplamaktadır. Günümüzde kullanılan iyonosondalar, Bölüm 2’de anlatılan frekans ve elektron yoğunluğu arasındaki ilişki nedeniyle, tipik bir radar gibi çalışmaktadır. Belirli bir frekansta iyonosfere gönderilen radyo dalgası yansıtılarak iyonosonda alıcısına döndüğünde aradaki gecikme süresi ölçülerek, ilgili iyonosfer katmanı için sanal yükseklik bilgisi üretilmektedir. İyono-

sondalar prensip olarak radara benzer şekilde çalıştıklarından, tipik darbeleri radar uygulamalarında kullanılan sinyal işleme teknikleri iyonosondalarda da kullanılmaktadır. Özellikle işlem kazancını arttırarak, çıkış gücünü düşürmeye yönelik olarak kullanılan darbe sıkıştırma ve darbe birleştirme teknikleri, günümüz modern iyonosondalarında kullanılmaktadır. Ancak buna rağmen darbeleri iyonosondalar 100 – 600 W çıkış güçlerinde çalışmaktadır. Ayrıca iyonosferik katmanlara ait kritik frekans değerleri dikey ölçümler için 1 – 10 MHz, eğik ölçümler için 1 – 20 MHz aralığında yer aldığından, halihazırda oldukça dolu bir spektruma sahip olan KD bandı, yüksek çıkış gücüne sahip iyonosondalar tarafından taranarak işgal edilmektedir. Bununla birlikte frekansta yapılan tarama işlemi nedeniyle tipik bir iyonogram sonucunun oluşturulması, iyonosferik koşullara bağlı olarak, 2 – 15 dk sürmektedir. Bu sebeple tez çalışması kapsamında, iyonosonda ile iyonogram oluşturma problemi yeniden ele alınmış, vericide genişbant dalgaşekilleri ve alıcıda zaman frekans analiz yöntemleri kullanılarak düşük çıkış gücü ile hızlı iyonogram sonucu üretebilen bir iyonosonda geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

İyonosondalarla ilgili geliştirme çalışmalarının 1920'li yıllarda başlamasından sonra yapılan çalışmalar, hem yüksek çıkış gücüne sahip iyonosondaların çıkış güçlerini düşürmeyi hem de iyonogram oluşturma süresini kısaltmayı amaçlamıştır. Coll ve Storey ikili diziler ile oluşturulmuş darbe içi modülasyon tekniğini kullanarak 1 kW çıkış gücü ile iyonogram sonucu oluşturulabileceğini göstermiştir [7]. Bibl ve Reinisch ise geliştirdikleri iyonosonda ile iyonosfer üzerinden, katman yüksekliği, genlik, faz, Doppler değişimi, yansıma geliş açısı ve dalga polarizasyonu bilgilerini üretebilen bir iyonosonda tasarlamışlardır [12]. Bu iyonosonda ile eşevreli darbe birleştirme yöntemi kullanılarak çıkış gücünün 1 kW'nin altında olması sağlanmıştır. Ancak darbe birleştirme işlemi nedeniyle iyonogram oluşturma süresinin arttığı görülmüştür. Zuccheretti ve arkadaşları, gelişen sayısal donanım mimarilerini kullanarak düşük güçlü ve küçük boyutlara sahip bir iyonosonda geliştirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar yüksek hızlı analog sayısal çeviriciler ve 16 bit Golay kodlarını kullanarak 250 W çıkış gücüne sahip ve tek bir standart rak içerisine yerleştirilebilen boyutlarda bir iyonosonda geliştirmişlerdir [6]. Reinisch, Galkin ve arkadaşları [12]'da yer alan çalışmalarını geliştirerek, daha

küçük boyutlarda ve düşük çıkış gücüne sahip sayısal bir iyonosonda tasarımı yapmışlardır. Geliştirilen iyonosonda içerisinde, KD bandı için problem teşkil eden çok sayıda darbantlı girişim sinyalinin etkisini azaltan ve 2005 yılında Klaus Bibl tarafından patenti alınan RFIM özelliği yer almaktadır. Belirtilen özelliklere sahip iyonosonda dünyada pek çok istasyon tarafından kullanılan ve DPS-4D adıyla bilinen iyonosondadır [25]. Darbeli iyonosondalarla ilgili geliştirme faaliyetlerine 2004 yılından itibaren Wuhan Üniversitesi (Çin) araştırmacıları da katılmıştır. Araştırmacılar daha çok dikey ve eğik ölçümler için kullanılan iyonosondalarla, geri yansıma ölçümleri için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. İyonosondalar ile alınan geri yansıma ölçümleri, KD ufuk ötesi radarlarda hedef tespiti için kullanılmaktadır [74], [75], [76].

Bazı araştırmacılar, kullandıkları anlık bant genişlikleri nedeniyle, darbeli iyonosondalara kıyasla daha düşük çıkış güçlerinde çalışan frekans modülasyonlu iyonosondalar üzerine çalışmalar yapmıştır. Frekans modülasyonlu iyonosondalar için alıcı ve vericinin birbirlerine yakın konumlarda olduğu dikey ölçümlerde, alıcının doyuma ulaşması problemi bulunmaktadır. Bu nedenle bazı araştırmacılar düşük çıkış gücüne sahip frekans modülasyonlu iyonosondaların, dikey ölçümler alabilecek şekilde kullanılmasına yönelik çalışmalar yapmıştır. Poole, rasgele ikili dizileri kullanarak yayın yapma ve dinleme bölgeleri oluşturan bir iyonosonda mimarisi geliştirmiştir [13]. Böylece vericide yayın yapılan anlarda, alıcının doyuma girmesi engellenmiştir. Ancak bu çalışma sonrasında Shearman rasgele ikili diziler kullanılmasının, klasik frekans modülasyonlu iyonosondalara göre daha büyük bant genişliği işgal ettiğini ve yan bantlardan gelen girişim sinyali etkilerine daha duyarlı olduklarını göstermiştir [14]. Landreth, Davis ve Robison yaptıkları çalışmada, frekans modülasyonlu bir iyonosondada alıcıyı doyuma ulaştırmayan en yüksek verici çıkış gücünde sinyalleri kullanarak dikey ölçüm almayı düşünmüşler ve alıcıda darbeli iyonosondalardakine benzer şekilde eşevreli toplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Böylece alıcıda istenen SNR seviyesi yakalanabilmektedir. Çalışmada 100 mW çıkış gücü ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır [27]. Avustralya DSTO'dan araştırmacılar Harris ve arkadaşları ise çalışmalarında, frekans modülasyonlu bir iyonosondada alıcının doyuma ulaşmaması için, alıcı donanımı üzerinde iyileştirmeler yaparak 20 W çıkış gücü ile dikey ölçüm alabilen iyonosonda mimarisini

anlatmışlardır [41].

Yukarıdaki paragraflarda bahsedildiği gibi, darbeli ve frekans modülasyonlu iki iyonosonda türü için geliştirme ve iyileştirme faaliyetleri yapılmaya devam etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların özetle, çıkış gücünü düşürmeye, iyonogram oluşturma süresini kısaltmaya ve iyonosfer tabakası hakkında mümkün olduğunca fazla bilgi toplama yönüyle olduğu görülmektedir. Ancak günümüzde kullanılan iyonosondalar halen yüksek çıkış güçlerinde çalışmakta, dakikalar mertebesindeki sürelerde iyonogram üretebilmekte, yüksek çıkış gücü ve frekans tarama özelliğinden dolayı, KD spektrumunda girişim yaratmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde, vericide genişbant dalgaşekilleri, alıcıda ise zaman frekans analizi ile sistem tanıma yöntemi kullanılarak, düşük çıkış gücü ile hızlı iyonogram üretme yeteneğine sahip bir iyonosonda tasarımı anlatılmıştır. Yapılan işleme genişbant iyonosferik kanal kestirimi adı verilmiştir. Buna göre en fazla 20 W çıkış gücü ile 20 – 70 ms içerisinde dikey iyonogram sonuçlarının elde edilebildiği gösterilmiştir. Kanal modeli olarak ITS genişbant kanal modeli kullanılmıştır. Bu model, Wagner ve Goldstein'in [16], [77], [78]'de yer alan çalışmalarında, genişbant iyonosferik kanal için yaptığı ölçümler kullanılarak, Vogler ve Hoffmeyer tarafından geliştirilmiştir [55]. Alınan ölçümler 1 MHz bant genişliğinde olduğu için ITS kanal modeli 1 MHz bant genişliğine kadar olan kanallar için doğrulanmıştır. Bu sebeple, tez kapsamında genişbant kanal için yapılan çalışmalar 1 MHz bant genişliğini kapsamaktadır.

4.2 Kullanılan Araçlar ve Yöntemler

4.2.1 Kanal Modeli

Geniş bant iyonosferik kanal kestirim işleminde, öncelikle kullanılacak kanal modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Bölüm 3.2.1'de detayları verilen ITS kanal modelinin kullanılabilmesi değerlendirilmiştir. Çünkü ITS modeli, hem darbant hem de genişbant ölçüm sonuçları kullanılarak oluşturulmuş bir model olarak öne çıkmaktadır. ITS modeli 1 MHz'e kadar bant genişliğine sahip kanalların modellenmesi için kullanılabilir [77], [78].

Bölüm 3.2.1’de detayları verilen ITS modelinde kanal dürtü tepkisi

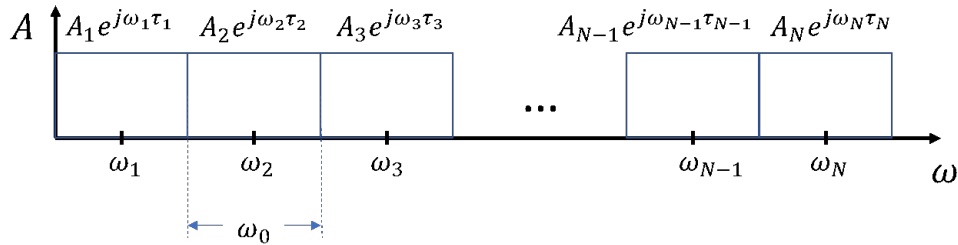
$$h(t, \tau) = \sum_n h_n(t, \tau) = \sum_n \sqrt{P_n(\tau)} D_n(t, \tau) \psi_n(t, \tau) \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik 4.1’de geçen $P_n(\tau)$ gecikme güç profilini, $D_n(t, \tau)$ deterministik faz fonksiyonunu, $\psi_n(t, \tau)$ ise stokastik modülasyon fonksiyonunu ifade etmektedir. Eşitlikte yer alan n indisi kanalda farklı şekillerde (çok yol etkisi, sıradan-sıradışı dalgalar, yüksek-alçak dalga vb.) oluşan yolların sayısını göstermektedir.

Geniş bant iyonosferik kanal frekans alanında

$$H(\omega) = A(\omega)e^{D(\omega)} = \sum_i A_i \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_i}{\omega_0}\right) e^{j\omega_i \tau_i} \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir [79]. Eşitlik 4.2’de verilen $H(\omega)$, KD kanalın frekansa bağlı transfer fonksiyonunu ifade etmektedir. $A(\omega)$ transfer fonksiyonunun genlik bileşeni, $D(\omega)$ ise faz bileşenidir. İyonosfer katmanlarının farklı yüksekliklerde yer almasından dolayı $D(\omega)$ ifadesinde yer alan her ω_i frekansına karşılık τ_i gecikmesi oluşmaktadır. Bu durum Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Geniş bant KD kanal transfer fonksiyonu

Şekil 4.1’de ω_0 ile gösterilen parametre, kanalda aynı gecikme süresine maruz kalan frekans aralığını ifade etmektedir. A_i ise her ω_i frekansına karşılık gelen genlik değerini göstermektedir.

Eşitlik 4.1’de verilen ITS modeli, Eşitlik 4.2 ve Şekil 4.1’de verilen yaklaşım ile birlikte değerlendirildiğinde, ITS modelinin genişbant kullanımında, modelde yer alan ve farklı

yolların sayısını temsil eden n indisinin, farklı frekans değerleri için kullanılabileceği görülmektedir. Çünkü Şekil 4.1’de yer alan her ω_i frekansı farklı gecikme ile alıcıya ulaşmakta dolayısıyla kanalda farklı yolları izlemektedir. Böylece ITS kanal modeli kullanılarak, darbantlı kanallar biraraya getirilerek, genişbant kanal dürtü tepkisi elde edilebilmektedir.

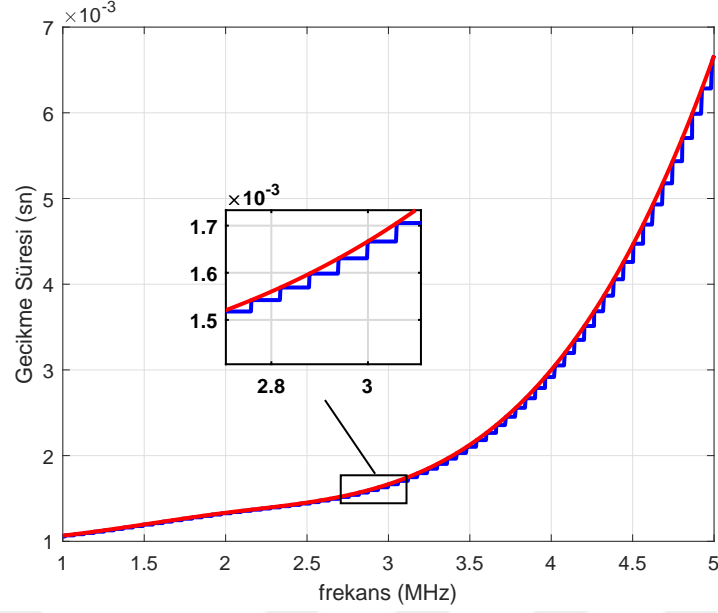
Yukarıdaki paragraflarda anlatıldığı üzere, genişbant ITS kanal modelinin oluşturulması için öncelikle Şekil 4.1’de verilen ve aynı gecikme süresine sahip bant aralığını gösteren ω_0 parametresinin hesaplanması gerekmektedir. Örnek olarak, Şekil 4.2’de sentetik olarak oluşturulmuş iyonogram verisi, aynı gecikme sürelerini veren doğrusal parçalara ayrılmıştır. Eğrinin doğrusal parçalara ayrılması için Taylor serisi açılımı kullanılmıştır. Buna göre herhangi bir $f(x)$ fonksiyonu Eşitlik 4.3’de verildiği gibi,

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + f''(a)(x - a)^2 + f^{(3)}(a)(x - a)^3 + \dots \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Eşitlikteki birinci bileşen fonksiyona ait sabit terimi, ikinci bileşen doğrusal terimi, üçüncü bileşen karesel terimi, diğerleri de yüksek dereceli fonksiyon bileşenlerini ifade etmektedir. Yani fonksiyonun herhangi bir noktasındaki sabit terim bulunmak istenirse,

$$f(x) = f(a) + \epsilon \quad (4.4)$$

ifadesi kullanılarak ve yüksek dereceli terimler küçük bir ϵ değerine eşitlenerek, $f(x)$ fonksiyonunun a noktasına ait sabit terim elde edilebilmektedir. Böylece aynı gecikme sürelerini veren doğrusal parçalardan ω_0 değeri elde edilebilmektedir. Sonrasında, ω_0 bant genişliğine sahip her bir ω_i frekansı için Eşitlik 4.1’de verilen ifade kullanılarak genişbant kanal dürtü tepkisi elde edilmektedir.



Şekil 4.2. Taylor serisi açılımı ile doğrusal parçalara ayırma

Eşitlik 4.2’de A_i ile gösterilen ve her bir frekans değerine karşılık gelen genliği ifade eden parametre, Eşitlik 4.6’de kapalı formda verilen iyonosferik soğurulma ifadesi kullanılarak hesaplanabilmektedir [31].

$$\kappa = \frac{e^2}{2\epsilon_0 mc \mu} \frac{N\nu}{(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2} \quad (4.5)$$

$$= 4.6 \times 10^{-2} \frac{N\nu}{(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.5’da \pm sıradan ve sıradışı dalgalar için kullanılmaktadır. Eşitlikte geçen ifadeler ile ilgili açıklamalar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Buna göre iyonosferde yol alan bir dalga için dB/km cisinden soğurulma miktarı; çarpışma frekansı ν , gyro frekansı ω_L , dalga frekansı ω ve elektron yoğunluğu N parametrelerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Ancak çarpışma frekansı ve gyro frekans parametreleri, iyonosferik koşullara ve dünyanın manyetik alanına bağlı olarak değişiklik gösteren parametrelerdir. Yapılan çalışmalarda bu parametreler için ortalama değerler kullanılmış ve bazı durumlarda beklenmeyen sonuçlar alınabildiği görülmüştür. Dolayısıyla bu konuda daha detaylı bir çalışmanın yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışması için ayrılan süre içerisinde iyonosferik soğurulma hesaplarına yönelik detaylı bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Çizelge 4.1. Eşitlik 4.5'te geçen ifadeler ve açıklamaları

κ	dB/km	iyonosferik soğrulma
$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$	farad/metre	dielektrik katsayısı
$m = 9.107 \times 10^{-31}$	kg	elektron kütlesi
$e = 1.602 \times 10^{-19}$	coulomb	elektron yükü
$c = 3 \times 10^8$	m/s	ışık hızı
μ	-	yansıma katsayısı
ω	rad/s	dalga frekansı
ν	rad/s	çarpışma frekansı
N	el/m ³	elektron yoğunluğu
ω_L	rad/s	gyro frekansı

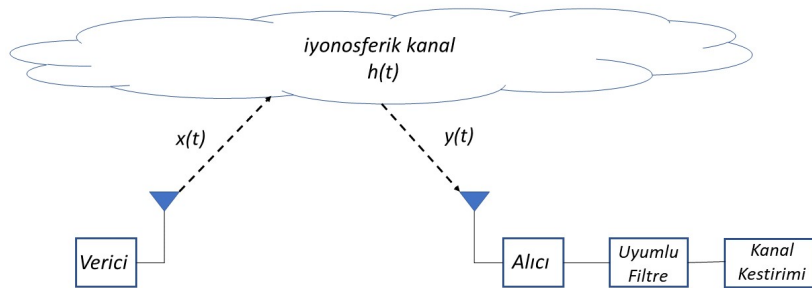
4.2.2 Geniş Bant İyonosferik Kanal Kestirimi

4.2.2.1 Yaklaşım

Geniş bantlı iyonosferik kanal dürtü tepkisinin bulunması için kanal kestirim işlemi gerçekleştirilmektedir. Kanal kestirimi için ideal dürtü özelliği taşıyan bir sinyal vericiden alıcıya gönderilmekte ve alıcıdaki sinyal kanal dürtü tepkisi olarak elde edilmektedir. Ancak ideal dürtü sinyalinin pratikte oluşturulması mümkün olmadığından, özilinti özelliği dürtü sinyaline yakın olan sinyaller, kanal kestirim işlemlerinde tercih edilmektedir. Buna göre $h(t)$ kanalının kestirimi için özilinti fonksiyonu dürtü sinyaline yakın olan $x(t)$ dalgışekli kullanıldığında, alıcıdaki $y(t)$ sinyali

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (4.7)$$

ile hesaplanmaktadır.



Şekil 4.3. İyonosferik kanal kestirimi

Gürültü ve girişim etkisi ihmal edildiğinde, Şekil 4.3’de görüldüğü gibi alıcıdaki $y(t)$ sinyali, $x(t)$ ile uyumlu filtreden geçirilerek, Eşitlik 4.8-4.11’de verilen şekilde kanal dürtü tepkisi kestirimi $\hat{h}(t)$ elde edilmektedir.

$$\hat{h}(t) = R_{xy}(\tau) = E[x^*(t)y(t - \tau)] \quad (4.8)$$

$$= h(t - \tau) * R_{xx}(\tau) \quad (4.9)$$

$$\approx h(t - \tau) * \delta(\tau) \quad (4.10)$$

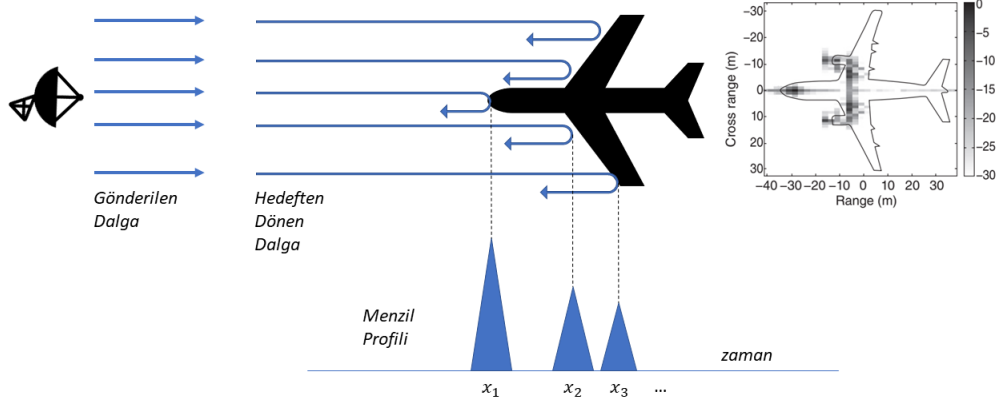
$$\hat{h}(t) \approx h(t) \quad (4.11)$$

Geniş bant iyonosferik kanal, yapısı gereği frekansa bağlı olarak değişen transfer fonksiyonuna sahiptir. İyonosfer tabakasına ulaşan sinyaller, iyon yoğunluğuna bağlı olarak farklı katmanlardan yansiyarak yeryüzüne ulaşmaktadırlar. Bu sebeple genişbant iyonosferik kanal için transfer fonksiyonu Eşitlik 4.2’de verilen şekilde yazılmaktadır. Eşitlik 4.2’deki ifadenin ters Fourier dönüşümü alınarak, Eşitlik 4.12’de verilen kanal dürtü tepkisi elde edilebilmektedir. Geniş bant iyonosferik kanal kestirim işleminde elde edilmek istenen

$$h(t) = \sum_i A_i \text{sinc}(\omega_0(t - \tau_i)) e^{j\omega_i(t - \tau_i)} \quad (4.12)$$

ifadesi ile verilen kanal dürtü fonksiyonudur.

Yapılan literatür araştırmalarında, modern radar sistemlerinde yer alan hedef menzil profili oluşturma işleminde, Eşitlik 4.12’ye benzer bir yaklaşımın kullanıldığı görülmüştür [4], [80]. Ters Sentetik Açıklıklı Radar (TSAR) adı verilen bu işlemde, Şekil 4.4’te gösterildiği gibi, hedefe gönderilen ve geri yansıyan genişbantlı sinyaller analiz edilerek, hedef profilinin görüntüsü oluşturulmaktadır.



Şekil 4.4. ISAR hedef menzil profili oluşturma yaklaşımı [4]

Şekil 4.4'te her biri x_i uzaklıkta N farklı noktadaki saçıcıdan yansıma olduğu varsayıldığında, frekansa bağlı olarak hedeften geri yansıyan elektrik alanı,

$$E^s(f) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-j2kx_i} \quad (4.13)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_i e^{-j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x_i} \quad (4.14)$$

şeklinde yazılabilmektedir. A_i geri yansıyan sinyallerin genliğini, $k = 2\pi f/c$ ise dalga numarasını ifade etmektedir. Eşitlik 4.13'te üstel ifadede geçen 2, radar sinyalinin aynı yolu gidip geldiğini ifade etmek için kullanılmaktadır. Buna göre, Eşitlik 4.14'te verilen frekansa bağlı elektrik alanı ifadesinin $(2f/c)$ 'ye göre ters Fourier dönüşümü alınarak, Eşitlik 4.15-4.18'de verildiği gibi hedef menzil profili elde edilebilmektedir [4].

$$E^s(x) = F^{-1}\{E^s(f)\} \quad (4.15)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^N A_i e^{-j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x_i} \right] e^{j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x} d\left(\frac{2f}{c}\right) \quad (4.16)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_i \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)(x-x_i)} d\left(\frac{2f}{c}\right) \quad (4.17)$$

$$= \sum_{i=1}^N A_i \delta(x - x_i) \quad (4.18)$$

$E^s(x)$ ifadesi, menzile bağlı hedef profilini vermektedir. Bu ilişki kullanılarak, hedefe ait x_i uzaklığındaki saçıcı noktaların yerleri belirlenebilmektedir. Ancak Eşitlik 4.18’de verilen ifade, sonsuz bant genişliği olduğu durumda geçerlidir. Gerçek bir senaryoda radar sinyalleri, sınırları f_L ve f_H olan bir bant aralığında yer almaktadır. Eşitlik 4.16’da verilen integral işleminin sınırları buna göre yazıldığında,

$$E^s(x) = \sum_{i=1}^N A_i \int_{f_L}^{f_H} e^{j2\pi(\frac{2f}{c})(x-x_i)} d\left(\frac{2f}{c}\right) \quad (4.19)$$

ifadesi elde edilmektedir. $f_c = (f_H + f_L)/2$ ve $B = (f_H - f_L)$ olduğuna göre,

$$f_L = f_c - \frac{B}{2} \quad (4.20)$$

$$f_H = f_c + \frac{B}{2} \quad (4.21)$$

olarak yazılabilmektedir. f_L ve f_H için verilen ifadeler, Eşitlik 4.19’da yerine yazılıp integrali alındığında,

$$E^s(x) = 2\left(\frac{B}{c}\right) \sum_{i=1}^N A_i e^{j2k_c(x-x_i)} \left[\frac{e^{j2\pi(\frac{B}{c})(x-x_i)} - e^{-j2\pi(\frac{B}{c})(x-x_i)}}{j2\pi} \right] \frac{1}{x-x_i} \quad (4.22)$$

ifadesi elde edilmektedir. Eşitlik 4.22’de köşeli parantez içerisinde verilen ifade kapalı forma dönüştürülerek sadeleştirildiğinde,

$$E^s(x) = 2\left(\frac{B}{c}\right) \sum_{i=1}^N A_i e^{j2k_c(x-x_i)} \text{sinc}\left(2\pi\left(\frac{B}{c}\right)(x-x_i)\right) \quad (4.23)$$

$$= 2\left(\frac{B}{c}\right) \sum_{i=1}^N A_i e^{j2\left(\frac{2\pi f_c}{c}\right)(x-x_i)} \text{sinc}\left(2\pi\left(\frac{B}{c}\right)(x-x_i)\right) \quad (4.24)$$

$$= 2\left(\frac{B}{c}\right) \sum_{i=1}^N A_i e^{j\omega_c(t-\tau_i)} \text{sinc}(\omega_B(t-\tau_i)) \quad (4.25)$$

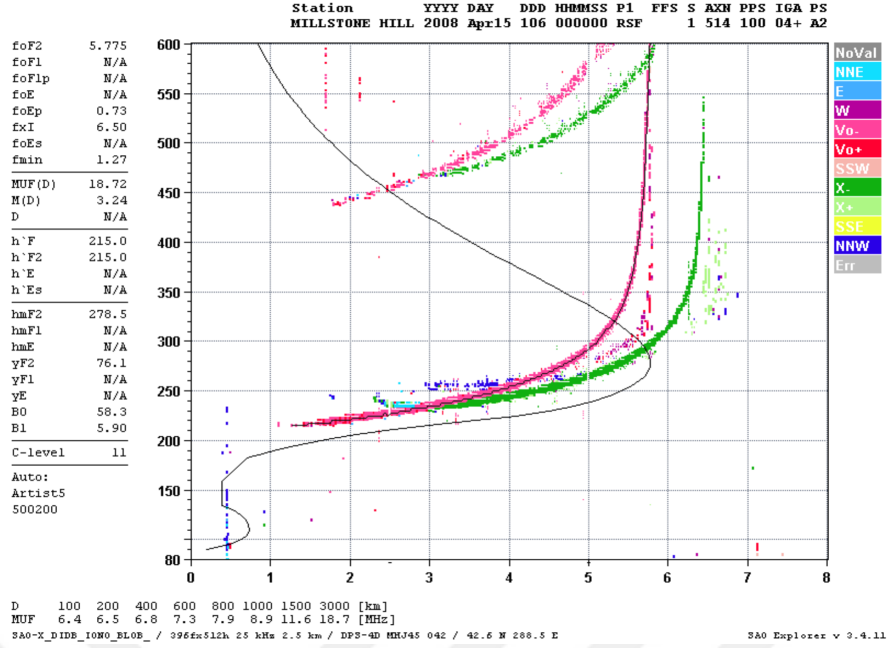
olarak yazılabilmektedir. Eşitlik 4.25’te, üstel terim faz bilgisini içermektedir ve birim genliğe sahiptir. İkinci terim olan, *sinc* fonksiyonu x_i uzaklıktaki noktasal hedeften yansırken oluşan genlik bozulmasını ifade etmektedir. Sınırlı bantgenişliğinin kullanılı-

dığı radar sistemlerinde karşılaşılan bu duruma odak bozulması, bu bozulmayı yaratan fonksiyona ise nokta yayılma fonksiyonu adı verilmektedir [80].

Geniş bant iyonosferik kanal için Eşitlik 4.12'de verilen kanal dürtü tepkisi ifadesi ile Eşitlik 4.25'te verilen hedef menzil profili ifadelerinin benzer oldukları görülmektedir. Her iki ifadede, genlik terimi A , faz terimi $e^{j\omega(t-\tau)}$ ve nokta yayılma fonksiyonu $\text{sinc}(\omega(t-\tau))$ terimleri bulunmaktadır. Eşitlik 4.12'da ω_B kullanılan sinyalin bant genişliğini ifade etmektedir. Benzer şekilde 4.25'te geçen, ω_0 terimi, KD kanalda aynı gecikmeye maruz kalan frekans bant genişliği için kullanılmıştır.

Bu noktadan hareketle, ISAR işleminde hedef menzil profilinin oluşturulması için kullanılan zaman frekans analiz yöntemlerinin, genişbant iyonosferik kanal kestiriminde de kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi hedef menzil profili menzil ve çapraz menzil eksenlerinden oluşmaktadır. Menzil eksenindeki bilgi, hedeften yansıyan sinyallerin zaman ekseninde incelenmesi ile oluşturulmaktadır. Çapraz menzil eksenine ise, hedeften dönen sinyallerin Doppler değişimleri, frekans ekseninde incelenerek elde edilmektedir. Dolayısıyla hedef menzil profilinin oluşturulması için zaman frekans ekseninde bir takım analizlerin yapılması gerekmektedir [4]. Genişbant iyonosferik kanal kestirimi işleminde de vericiden alıcıya gönderilen genişbantlı sinyaller, farklı gecikme süreleri ile iyonosfer tabakasından yansıyarak alıcıya ulaşacaklarından, alıcıda yapılacak zaman frekans analizleri ile kanal kestiriminin gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Genişbantlı iyonosferik kanal, iyonosondaların temel çıktısı olan ve bir eksenine gecikme süresini diğer eksenine frekansı gösteren iyonogram üzerinde ifade edilebilmektedir. Tipik bir iyonogram görüntüsü Şekil 4.5'te verilmiştir. yatay eksen MHz cinsinden frekansı, dikey eksen km cinsinden yüksekliği ifade etmektedir. Yükseklik bilgisi, vericiden gönderilen sinyalin alıcıya ulaşana kadar geçen süre ölçülerek hesaplandığı için, y eksenine zaman eksenine olarak da tanımlanabilmektedir. Şekil 4.5'te, frekans arttıkça ölçülen yükseklik değerinin arttığı görülmektedir. Bu durumda, genişbant iyonosferik kanal tepkisinin, zamana bağlı olarak değiştiği, cıvıltı fonksiyonuna benzerlik gösterdiği söylenebilmektedir.



Şekil 4.5. 15 Nisan 2008 00:00 UT tarihinde Millstone Hill istasyonundan alınan iyonogram görüntüsü [2]

Literatürde, cıvıltı fonksiyonu özelliğine sahip kanalların kestirimine ve analizine yönelik olarak zaman frekans analiz yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [81–90]. Bunun temel sebebi cıvıltı fonksiyonunun anlık frekans değerinin zamana bağlı olarak değişmesidir. Cıvıltı fonksiyonu, sinüzoidal bir fonksiyonun anlık fazı değiştirilerek elde edilmektedir. Tek ton sinüzoidal bir sinyal

$$x(t) = A \cos(\theta(t)) \quad (4.26)$$

$$= A \cos(2\pi f_0 t + \phi) \quad (4.27)$$

ile ifade edilebilir. Eşitlik 4.27'de $\theta(t) = 2\pi f_0 t + \phi$ ile verilen anlık faz, zamana bağlı doğrusal olarak değişmektedir. Cıvıltı sinyallerinde ise, anlık faz zamanın yüksek dereceli bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Örneğin anlık fazın zamanın karesi ile değiştiği durumda,

$$\theta(t) = 2\pi \mu t^2 + 2\pi f_0 t + \phi \quad (4.28)$$

şeklinde bir ifade yazılabilmektedir. Bu durumda, anlık frekans,

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4.29)$$

$$= 2\mu t + f_0 \quad (4.30)$$

olarak doğrusal biçimde elde edilmektedir. Eşitlik 4.30'da geçen μ frekans değişim hızını, f_0 ise başlangıç frekansını ifade etmektedir. Genişbant iyonosferik kanallara ait faz bileşeni de Eşitlik 4.28'dekine benzer şekilde zamanın yüksek dereceli bir fonksiyonu şeklinde yazılabilir [91]. Dolayısıyla [81–90]'de yer alan zaman frekans analiz yöntemleri kullanılarak, genişbant iyonosferik kanal için kestirim işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

4.2.2.2 Sistem Tanıma

Genişbant iyonosferik kanal için kestirim işleminin gerçekleştirilmesi, kanala ait transfer fonksiyonunun bulunması anlamına gelmektedir. Bunun için Bölüm 4.2.2.1'de anlatıldığı gibi, kanala özilinti fonksiyonu dürtü özelliğine sahip bir sinyal gönderilip, alıcıya ulaşan sinyal analiz edilerek kanal hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Yapılan bu işlem, daha genel anlamda sistem tanıma olarak adlandırılabilir. Sistem tanıma, herhangi bir sistemin, girdi ve çıktıları ölçülerek, sistemin matematiksel bir ifadeye dönüştürülmesi olarak tanımlanmaktadır.

Literatürde pek çok sistem tanıma yöntemi olmasına rağmen, farklı uygulamalar için farklı yöntemlerin belirlenmesi, yüksek başarıma sahip sonuçların elde edilmesi açısından kritiktir. Bu yöntemlerden birisi parametrik sistem tanıma yöntemidir. Parametrik yöntemlerde, sistem hakkında yapılan ölçüm sayısından daha az sayıda parametre ile ifade edilebilecek bir sistem tanımı yapılması amaçlanmaktadır [92]. Parametrik sistem tanıma için kullanılan model,

$$y[n] = - \sum_{k=1}^p a_k y[n-k] + \sum_{l=0}^q b_l e[n-l] \quad (4.31)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik 4.31'de yer alan $y[n]$, sistem çıkışında alınan öl-

çümleri, a_k ve b_l model parametrelerini, $e[n]$ ise ortalaması sıfır olan beyaz gürültü sürecinin örneklerini ifade etmektedir. Eşitlik 4.31’de p ve q modele ait dereceleri ifade etmektedir. Model derecelerine bağlı olarak AR ($p > 0$ & $q = 0$), MA ($p = 0$ & $q > 0$) ve ARMA ($p > 0$ & $q > 0$) modelleri, parametrik sistem tanıma işleminde kullanılmaktadır. Parametrik model, az sayıda katsayı kullanılarak sistem tanıma yapılabilmesi açısından tercih edilmektedir. Ancak, bu yöntemde model parametrelerinin ve kullanılan model türünün belirlenmesi, yapılan sistem tanıma işleminin başarımı açısından kritiktir [93].

Sistem tanıma için kullanılan bir diğer yöntem, spektrum tabanlı kestirim yöntemidir. Ayrık zamanda tanımlı herhangi bir $h[n]$ sistemine, $x[n]$ giriş sinyali uygulanıp, $y[n]$ çıkış sinyali elde edildiğinde, $h[n]$ sistemine ait transfer fonksiyonu,

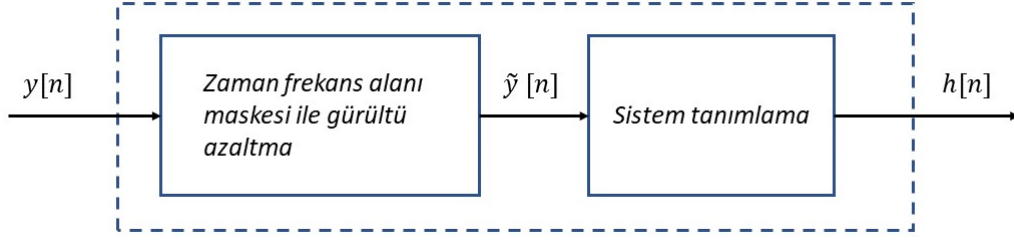
$$H(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (4.32)$$

ile hesaplanabilmektedir. $S_{xy}(\omega)$, $x[n]$ ve $y[n]$ sinyallerinin çapraz güç izge yoğunluğunu, $S_{xx}(\omega)$ ise $x[n]$ sinyalinin güç izge yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu yöntem hesaplama kolaylığı açısından avantajlı olsa da, yöntemin başarımı gürültüden doğrudan etkilenmektedir. Bu etkiyi azaltmak adına spektrum ölçümlerinin ortalamalarının alındığı ve gürültü varyansının azaltıldığı yöntemler kullanılmaktadır [93].

Sistem tanıma için kullanılan bir diğer yöntemde ise zaman frekans analizi kullanılarak transfer fonksiyonu kestirimi yapılmaktadır. Buna göre,

$$y[n] = \sum_k h[n - k]x[k] + v[n] \quad (4.33)$$

eşitliği ile tanımlanan bir sistemde, $x[n]$ sisteme giren sinyali, $h[n]$ tanımlanmak istenen sistemi, $v[n]$ gürültüyü, $y[n]$ ise sistemden çıkan sinyali ifade etmektedir. Belirtilen şekilde tanımlanan bir sistem için, zaman frekans alanında sistem tanıma öncesinde, Şekil 4.6’de verilen şekilde gürültü azaltma işlemi gerçekleştirilmektedir [89].

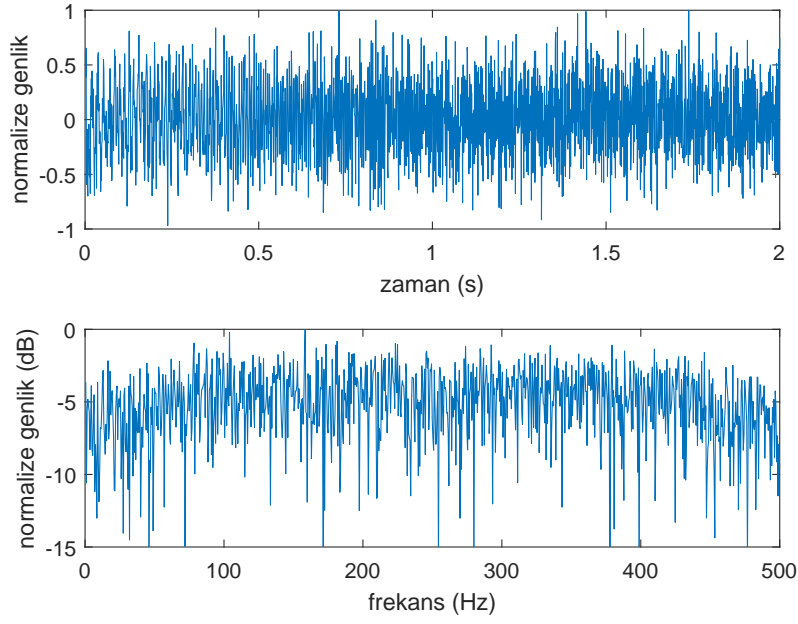


Şekil 4.6. Zaman frekans analizi ile sistem tanıma

Gürültü azaltma işlemi, zaman frekans alanında tanımlanan bir maske ile gerçekleştirilir. Sinyaller zamanda ve frekansta belirli bölümlerde yoğun olarak bulunmaktadır. Ancak gürültü, zaman ve frekans alanlarında pek çok hücre içerisine dağılıp yayılmaktadır. Bu sebeple, sadece zaman veya sadece frekans alanı üzerinde ayırt edilemeyen sinyaller, zaman frekans alanı üzerinde daha kolay ayırt edilebilmektedir [85]. Bu özellikten yararlanarak, yüksek gürültü altındaki sinyaller için, oluşturulan maskeler ile zaman frekans alanında gürültü azaltma işlemi gerçekleştirilebilmektedir [81], [89], [94], [95]. Maskeleyme işlemi sonrasında, istenilen sinyalin etkilenmediği varsayımı ile

$$\tilde{y}[n] = \sum_k h[n-k]x[k] + \tilde{v}[n] \quad (4.34)$$

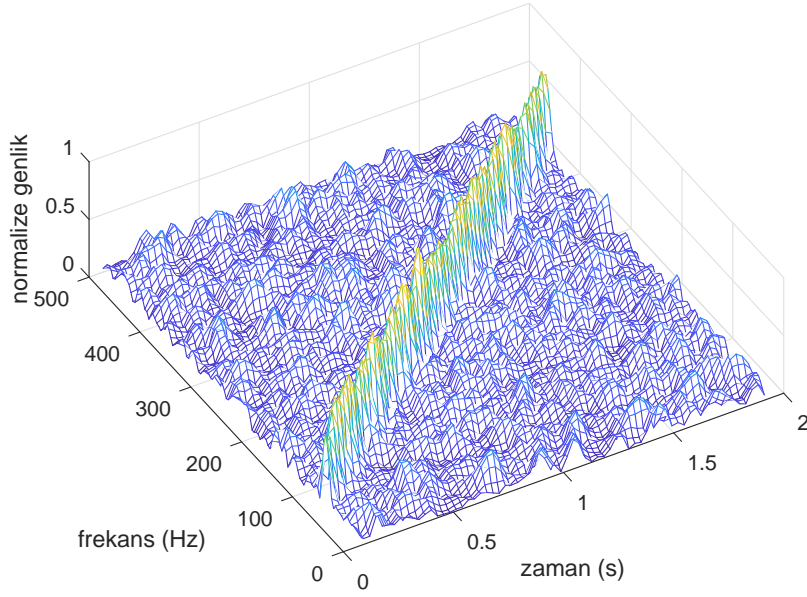
ifadesi yazılabilmektedir. $\tilde{v}[n]$ maskeleyme işlemi sonrasında oluşan gürültü sinyalini, $\tilde{y}[n]$ ise sistemden düşük gürültüyle çıkan sinyali ifade etmektedir.



Şekil 4.7. 0 dB SNR durumunda 50 – 450 Hz bandını tarayan cıvıltı sinyalinin zaman (üst) ve frekans (alt) görüntüsü

Şekil 4.7’de 0 dB SNR değerine sahip bir cıvıltı sinyalinin zaman ve frekans alanlarındaki görüntüsü verilmiştir. Belirtilen sinyal 2 s boyunca frekansı doğrusal olarak 50 Hz’den 450 Hz’e arttırılan cıvıltı ile oluşturulmuştur. Ancak Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, sinyalin hem zaman hem de frekans alanlarındaki görüntüsü üzerinde, sinyalin tespit edilmesi mümkün olmamaktadır.

Şekil 4.8’de ise aynı sinyal için frekans zaman görüntüsü verilmektedir. Frekansı doğrusal olarak artan sinyalin, zaman frekans düzleminde belirli bir bölge içerisinde enerjisinin yoğunlaştığı görülmektedir. Gürültü sinyali ise, zamanda ve frekansta farklı alanlara yayılmış ve enerjisi bütün zaman frekans düzlemine dağılmıştır. Bu nedenle, Şekil 4.7’de verilen ve 0 dB SNR değerine sahip sinyal, zaman frekans düzleminde kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

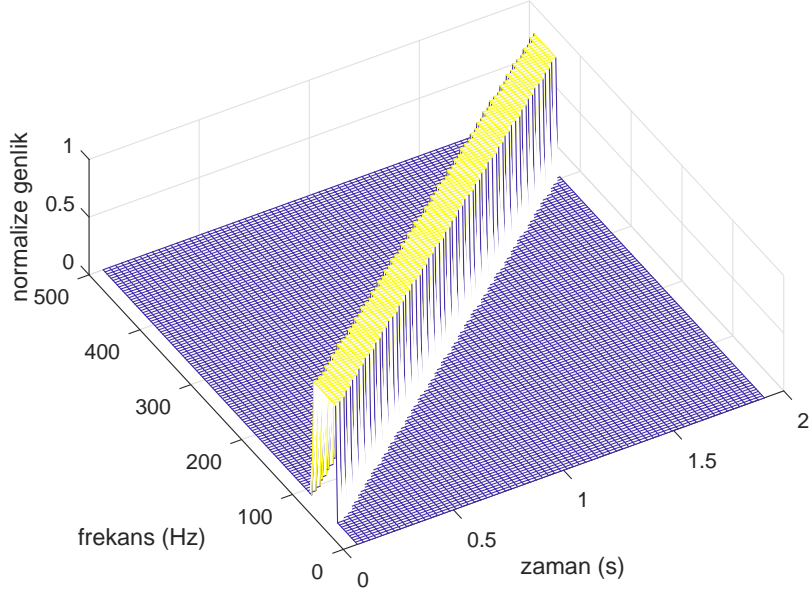


Şekil 4.8. 0 dB SNR durumdaki doğrusal cıvıltı sinyalinin zaman frekans düzlemindeki görüntüsü

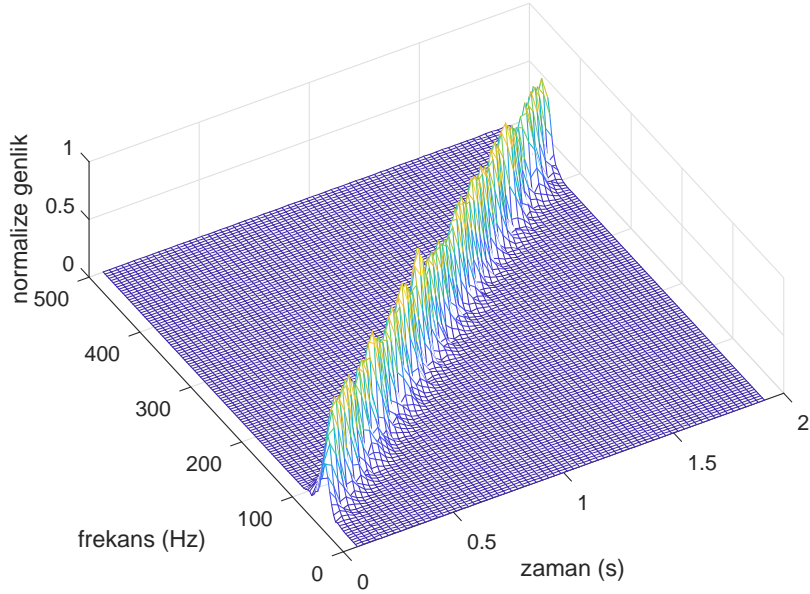
Özellikle zaman frekans düzleminde düzgün (belirli bir zaman frekans örüntüsü izleyen) dağılımlı sinyaller için, düşük SNR durumunda, zaman frekans düzleminde yapılan tespit başarımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir [96], [97]. Bu sebeple, askeri uygulamalarda kullanılan yakalanma olasılığı düşük (YOD) sinyallerin tespit işlemlerinde zaman frekans analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır [98].

Zaman frekans düzleminde sinyallerin daha görünür olması ve kolay tespit edilebilmesi sayesinde, düşük SNR altında gürültü nedeniyle tespit edilemeyen sinyaller için gürültü azaltma işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.8’de zaman frekans düzlemindeki görüntüsü verilen sinyal için, yine zaman frekans düzleminde sadece sinyalin bulunduğu bölgeleri kapsayan ve Şekil 4.9’de gösterilen maske kullanılmıştır. Bunun için, zaman frekans alanında belirli bir eşik seviyesinin üzerindeki noktaları kapsayacak şekilde bölgeler belirlenmiş, istenen noktalara 1, istemeyen noktalara 0 değeri verilerek maske oluşturulmuştur. Maskeleme sonrasında, sinyal bileşenlerinin bulunduğu bölge haricinde yer alan gürültü bileşenleri filtrelenerek, sinyalin daha yüksek SNR değerine sahip olması sağlanmış, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen zaman ve frekans alanı

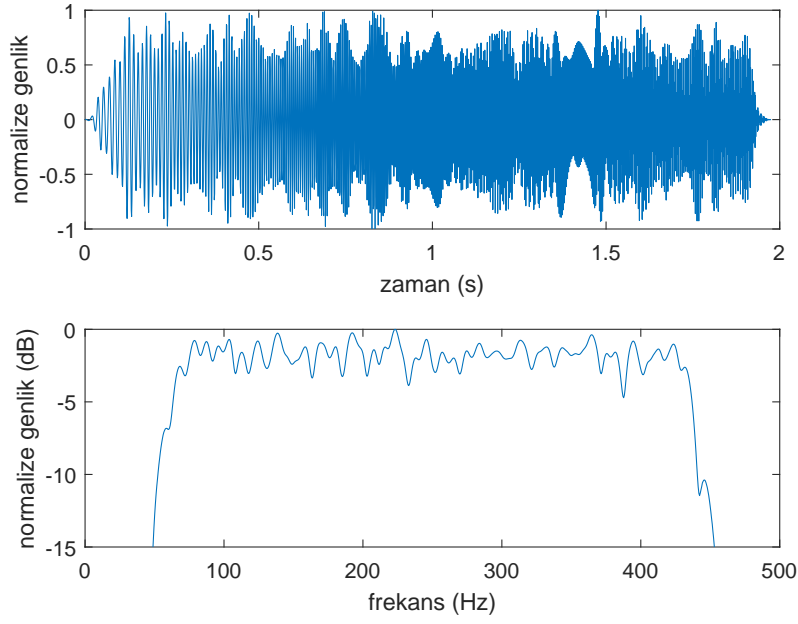
sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Zaman frekans düzleminde oluşturulan maske



Şekil 4.10. Maskeleme işlemi sonrasında elde edilen sinyalin zaman frekans düzlemi görüntüsü



Şekil 4.11. Maskeleye işlemi sonrasında elde edilen sinyalin zaman alanı (üst) ve frekans alanı (alt) görüntüsü

Geniş bant iyonosferik kanal kestirim işleminde de, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, zaman frekans alanında düzgün dağılıma sahip kanal dürtü tepkisinin maskeleye ile gürültü azaltma ve sistem tanıma adımlarının ardından belirlenebileceği değerlendirilmektedir.

4.2.2.3 Kanal Kestirim Geometrisi

Bölüm 2'de iyonosondaların radar ile benzer prensiplere sahip olduğundan bahsedilmiştir. Bu bakımdan radarlar için sıklıkla kullanılan radar denklemi ile ilgili olarak, iyonosondalar için de bir değerlendirme yapılması mümkündür.

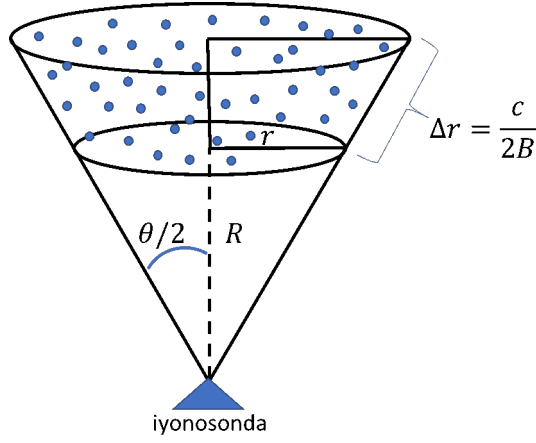
Radar uygulamalarında, radar vericisinden gönderilen sinyalin, hedefe doğru aldığı yol ve hedef özelliklerine göre yansıtılarak tekrar radar alıcısına ulaşana kadarki süreci matematiksel olarak ifade etmek için

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad (4.35)$$

$$= \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (4.36)$$

eşitliğinde verilen radar denklemi kullanılmaktadır. Eşitlik 4.36'da, $(P_t G_t / 4\pi R^2)$ ifadesi $P_t G_t$ gücü ile noktasal bir kaynaktan çıkan sinyalin küresel olarak yayıldığını ifade etmek için kullanılmaktadır. $4\pi R^2$ kürenin alanını verdiği için, R uzaklığındaki bir noktaya ulaşan sinyalin gücü $(P_t G_t / 4\pi R^2)$ ile hesaplanmaktadır. $(\sigma / 4\pi R^2)$ ise, radarın tespit etmek istediği hedeften yansıyan ve alıcıya ulaşan sinyalin gücünü hesaplamak için kullanılmaktadır. σ parametresi, radar kesit alanı (RKA) olarak tanımlanmaktadır. Her bir hedefe özgü olan radar kesit alanı parametresi, hedefin yansıtıcı özelliğinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple hedeften yansyarak tekrardan alıcıya ulaşan sinyal seviyesi $(\sigma / 4\pi R^2)$ ifadesinin çarpımı ile hesaplanabilmektedir. Eşitlik 4.36'da verilen radar denkleminde yer alan $(\lambda^2 G_r / 4\pi)$, etkin anten açıklığını vermektedir. Hedeften yansyarak düzlemsel dalga olarak ilerleyen ve alıcıya ulaşan sinyallerin, alıcıda yer alan antenle ne kadarlık kısmının alınabildiği, etkin anten açıklığı ile hesaplamalara dahil edilmektedir. Sonuç olarak Eşitlik 4.36, belirtilen çıkış gücü, anten kazancı ve radar kesit alanı için alıcıya ulaşan sinyal seviyesinin hesaplanması için kullanılabilir.

Eşitlik 4.36'da yer alan σ parametresi, tespit edilmek istenen hedefin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Hedefin büyüklüğü, geometrik yapısı, malzeme özellikleri gibi farklı parametrelere bağlı olarak, radar kesit alanının büyüklüğü değişebilmektedir. Bunun haricinde, tespit edilmek istenen hedef kimi zaman, sınırları ve geometrik yapısı bilinen bir hedefken, kimi zaman da sınırları net olarak belirlenemeyen hedefler olabilmektedir. Örneğin, hava platformları, arabalar, gemiler vb. platformlar sınırları ve geometrik yapıları belli hedeflerken, bulutlar, gaz kütleleri, deniz/su katmanları gibi sınırları belli olmayan hedefler de radarlar tarafından tespit edilebilmektedir. Bu yüzden sınır özellikleri bakımından hedefler, sert ve yumuşak hedefler olarak ayrılmaktadır [99], [100]. İyonosfer, özellikleri bakımında yumuşak hedefler içerisinde yer almaktadır. Yumuşak hedefler için radar denklemi yazılmak istendiğinde Şekil 4.12'de verilen yaklaşım kullanılmaktadır.



Şekil 4.12. İyonosferik kanal kestirimi geometrisi

Şekil 4.12’de iyonosonda vericisi tarafından Δr yüksekliğinde ve r yarıçapına sahip bir hacim aydınlatılmaktadır. Radar terminolojisinde belirtilen hacime menzil hücresi adı verilmektedir. Menzil hücresi hacminin V olduğu varsayıldığında radar denklemi,

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} V \sum_{\text{birim hacim}} \sigma_i \quad (4.37)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Eşitlik 4.37’de RKA, radar huzmesi tarafından aydınlatılan hacim içerisinde yer alan çok sayıda saçıcının kesit alanlarının toplamı olarak verilmiştir. Şekil 4.12 ve Eşitlik 4.37 kullanılarak radar denklemi,

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \pi \left[R \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \frac{c}{2B} \sum_{\text{birim hacim}} \sigma_i \quad (4.38)$$

olarak yazılabilmektedir. Eşitlik 4.38’de $(c/2B)$ menzil çözünürlüğünü, B kullanılan sinyalin bant genişliğini ifade etmektedir. Buna göre bant genişliği arttıkça, radar çözünürlüğü artmakta, dolayısıyla aydınlatılan hacim küçülerek, alıcıya ulaşan sinyal seviyesi düşmektedir. Dolayısıyla kullanılan bant genişliğine göre, alıcıya ulaşan sinyal seviyesini tespit etmek için bağ bütçe analizi yapılması gerekmektedir. Geniş bant iyonosferik kanal kestirimi için yapılan bağ bütçe analizleri Bölüm 4.2.2.4’de verilmiştir.

4.2.2.4 Bağ Bütçe Analizi

Bağ bütçe analizleri, iletişim yapan sistemlerde verici ve alıcı arasında, bütün sistem kayıpları ve kazançları dahil edilerek yapılan hesaplamaları ifade etmektedir. Bu analizlerde, alıcı sisteminin hassasiyeti ve alıcıya ulaşan sinyal seviyesi önemli parametrelerdir. Alıcı hassasiyeti, alıcının kendi gürültü seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Bu amaçla yapılan gürültü gücü hesabı için,

$$P_n = -174 \text{ dBm/Hz} + F \text{ dB} + B \text{ dBHz} \quad (4.39)$$

ifadesi kullanılmaktadır. Eşitlik 4.39'de geçen -174 (dBm/Hz), oda sıcaklığında Hertz başına düşen ısı gürültü seviyesini ifade etmektedir ve k (1.38×10^{-23}) Boltzman sabiti ve T ($290^\circ K$) sıcaklık değerlerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Isıl gürültü haricinde, alıcı donanımından kaynaklanan gürültü ise gürültü faktörü (F) olarak verilmiştir. Alıcıdaki gürültü seviyesi (P_n), kullanılan bant genişliği (B) ile ilgili olduğundan, B ifadesi eşitlikte yer almaktadır. Örneğin, tipik bir senaryoda 1 MHz bant genişliği ve 10 dB gürültü faktörü olduğu düşünüldüğünde, alıcıdaki gürültü gücü,

$$P_n = -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \text{ dB} + 60 \text{ dBHz} \quad (4.40)$$

$$= -104 \text{ dBm} \quad (4.41)$$

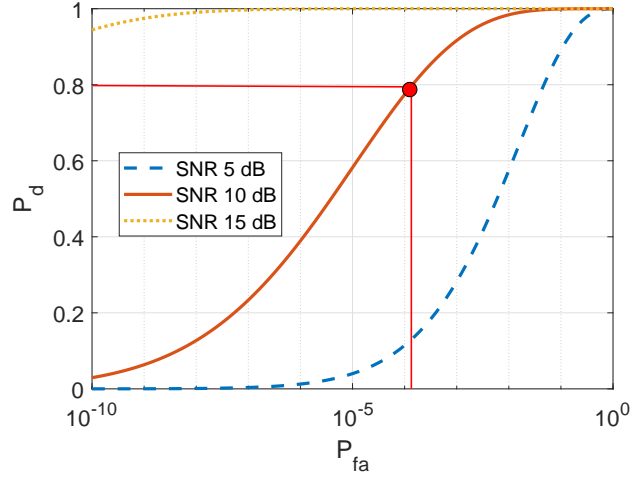
olarak hesaplanmaktadır. Ancak KD bandında ısı gürültü haricinde, fiziksel bir takım nedenlerle oluşan farklı gürültü türleri bulunmaktadır. ITU'nun hazırladığı ve [101]'de yer alan raporda belirtilen gürültü türleri kosmik/galaktik, atmosferik ve insan yapısı gürültü olarak sınıflandırılmıştır. Kosmik/galaktik gürültü uzayda gerçekleşen aktiviler nedeniyle oluşan gürültüdür. Atmosferik gürültü ise, şimşek, yıldırım gibi özellikle yüklü iyonlar arasındaki etkileşim nedeniyle meydana gelen gürültüdür. İnsan yapısı gürültü, KD bandında yer alan çok sayıda darbantlı radyo istasyonu nedeniyle oluşan gürültü olarak tanımlanmaktadır. Belirtilen gürültü türleri için [101]'de yer alan raporda ölçümler sonucu oluşturulmuş gürültü faktörü (F_a) değerleri verilmiştir. F_a değerleri frekansa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bakımdan, iyonosondalar için kritik

frekans değerlerinin bulunduğu 5 – 10 MHz aralığındaki değerler referans alınmıştır. Buna göre, Eşitlik 4.41 ve F_a değerleri kullanılarak elde edilen gürültü seviyeleri Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. Çizelgede yer alan en güçlü gürültü kaynağı –64 dBm seviyelerindeki insan yapısı gürültüdür, ancak bu gürültü darbantlı ve spektruma dağılmış çok sayıda gürültü kaynağından oluşmaktadır. Dolayısıyla sadece belirli dar bölgelerde etkilidir. Diğer gürültü kaynakları içerisinde ısı gürültü ve atmosferik gürültü, kosmik/galaktik gürültü seviyesine kıyasla daha düşük değerlere sahiptir. Bu nedenle bağ bütçe analizinde Çizelge 4.2’de yer alan değerler göz önüne alınarak ortalama –84 dBm seviyelerinde gürültü gücü (P_n) olduğu kabul edilmiştir.

Bağ bütçe analizinde, seçilen SNR değeri alıcıya ulaşan sinyalin uyumlu filtreden geçirilip tespit yapılacağı varsayımına göre belirlenmektedir. Bu amaçla alıcı işletim karakteristiği (AİK) eğrileri kullanılmaktadır [68]. AİK eğrileri, H_1 (tespit var) ve H_0 (tespit yok) hipotezlerini birbirinden ayırmak için kullanılan eşik değerinin değişimi ile yanlış alarm ve tespit olasılıklarında oluşan değişimi göstermektedir. Gauss gürültüsüne sahip bir kanal için, olabilirlik oranı testi sonucunda, farklı SNR değerleri için elde edilen alıcı işletim karakteristiği Şekil 4.13’te verilmiştir. Şekilde x ekseninde yer alan P_{fa} yanlış alarm olasılığını ve y ekseninde yer alan P_d tespit olasılığını ifade etmektedir. Şekil 4.13’te farklı SNR değerleri için verilen AİK eğrileri incelendiğinde, 10 dB SNR değeri için $P_d = 0.8$ ve $P_{fa} = 10^{-4}$ noktasının, çalışma noktası olarak seçilebileceği değerlendirilmiştir [6]. Belirtilen P_{fa} ve P_d değerleri tipik bir radar uygulaması için düşük tespit performansı anlamına gelse de, iyonosondalar gibi kritik bir görev icra etmeyen sistemler için uygun değerlerdir.

Çizelge 4.2. KD bandındaki gürültü kaynakları

Gürültü türü	Seviye (dBm)
Isıl gürültü	–104
Kosmik/Galaktik gürültü	–84
Atmosferik gürültü	–90
İnsan yapısı gürültü	–64



Şekil 4.13. Alıcı işletim karakteristiği eğrileri

Belirtilen gürültü seviyesinin 10 dB üzerinde, yani 10 dB SNR durumunda, alıcıya ulaşan sinyal gücünün (P_r),

$$P_r = P_n + SNR \quad (4.42)$$

$$= -84 \text{ dBm} + 10 \text{ dB} = -74 \text{ dBm} \quad (4.43)$$

seviyelerinde olduğu söylenebilmektedir. Bu seviyelerdeki sinyallerin alıcıya ulaşması için vericide gereken çıkış gücü hesabı, iyonosferik kayıplar göz önünde bulundurularak yapılabilmektedir. İyonosondalar için yapılmış [6]'da yer alan çalışmada, iyonosferik kanal etkisiyle meydana gelebilecek kayıplara ilişkin olarak bir aralık tarif edilmektedir. Buna göre kanalda meydana gelen kayıplar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3'te verilen kayıp türleri ile ilgili açıklamalar aşağıda yer almaktadır;

- Geometrik yol kaybı, dalganın frekasına ve aldığı yola bağlı olarak maruz kaldığı kayıp miktarıdır ve $20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{c}\right)$ ile hesaplanmaktadır. f frekansı, d dalganın aldığı yolu, c ışık hızını ifade etmektedir.
- İyonosferik soğurulma, dalganın iyonlaşmış bir ortamda ilerlemesi nedeniyle uğradığı soğurulma miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple, iyonosferik

Çizelge 4.3. İyonosferik kayıp değerleri [6]

Parametre	Seviye (dB)	
	En küçük	En büyük
Geometrik yol kaybı	80	120
İyonosferik soğrulma	1	20
Polarizasyon kaybı	3	6
Odaklanma etkileri	-8	8
Yayılma soğrulması	1	2
Sistem kayıpları	1	2
Katmanlar arası koruma kayıpları	0	2
Anten kazançları	-4	0
Toplam kayıp	74	160

soğurulma miktarı $\frac{N_e \nu}{f^2}$ ile orantılı olarak değişmektedir [31]. N_e iyon yoğunluğunu, ν çarpışma frekansını, f dalganın frekansını ifade etmektedir.

- Polarizasyon kaybı, iyonosfere gönderilen elektromanyetik dalganın polarizasyonunda meydana gelen değişiklik sebebiyle, alma anteni ile polarizasyonları arasındaki farktan kaynaklanan kayıpları göstermektedir.
- Odaklanma etkileri, yansıma yüzeyi iyonosferin tam bir düzlem gibi davranmasından kaynaklanan kayıpları ifade etmektedir. İyonosferdeki yansıma yüzeyinin geometrisine bağlı olarak Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi kazanç da elde edilebilmektedir.
- Yayılma soğurulması, iyonosferdeki dalganın kırılma sırasında maruz kaldığı soğurulma miktarını ifade etmektedir. İyonosferde geri yansıma esnasında ideal yansıma kuralları (yansıma katsayısı, $\mu = 0$) oluşamadığı için, bu esnada bir miktar kayıp yaşanmaktadır.
- Sistem kayıpları, iyonosfere sinyal gönderme ve alma işlemlerini gerçekleştiren donanım ekipmanlarından kaynaklanan kayıpların toplamı için kullanılmaktadır. Kullanılan kablolar, konektörler, aktif RF bileşenlerden gelen kayıp değerlerinin toplamı, sistem kaybı olarak ifade edilmektedir.
- Katmanlar arası koruma kayıpları, özellikle E katmanından kaynaklanan ve diğer (F1, F2) katmanlara geçiş sırasında oluşan kayıpları ifade etmektedir.

- Anten kazançları, KD bandında iyonosonda uygulamalarında kullanılan tipik anten kazançlarını ifade etmektedir.

Çizelge 4.3'te verilen değer aralıkları kullanılarak, ortalama 117 dB toplam kayıp (L_t) değerinin tipik bir senaryoda kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu durumda, Eşitlik 4.43'te verilen alıcıdaki sinyal gücü seviyesi ve 117 dB toplam kayıp değeri kullanılarak, vericiden çıkan sinyalin seviyesi,

$$P_t = P_r + L_t \quad (4.44)$$

$$= -74 \text{ dBm} + 117 \text{ dB} = 43 \text{ dBm} \quad (4.45)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde, vericiden 43 dBm yani 20 W çıkış gücü ile yayın yapılması durumunda, alıcıda 10 dB SNR seviyesinin yakalandığı söylenebilmektedir.

4.2.3 Dalgaşekli İncelemeleri

Genişbant iyonosferik kanal kestirimi için Bölüm 4.2.2.1'de anlatıldığı gibi, özilinti fonksiyonu dürtü sinyaline benzer dalgaşekilleri kullanılmaktadır. Bu özelliğe sahip pek çok sinyal bulunmakla birlikte, dalgaşekilleri farklı kanal koşullarında farklı özellikler gösterebilmektedir. Kanal koşulları ile kastedilen SNR, gecikme süresi ve Doppler kayması parametreleridir. Bu değişkenlere bağlı olarak dalga şekillerinin performansları incelenmektedir. Bu amaçla kullanılan araçlardan birisi belirsizlik fonksiyonudur. Belirsizlik fonksiyonu ile herhangi bir dalgaşekli için, gecikme süresi ve Doppler kaymasına bağlı olarak, alıcıdaki uyumlu filtre çıkışında oluşan değişim gözlemlenebilmektedir.

Tipik bir radar sisteminde, vericiden gönderilen $x(t)$ sinyali alıcıya ulaştığında, kanal sebebiyle τ_R gecikmesine ve f_D Doppler kaymasına maruz kaldığından,

$$y_R(t) = x(t - \tau_R)e^{j2\pi f_D t} \quad (4.46)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Alıcıda, $x(t)$ dalgasekli ile uyumlu filtre ise,

$$h_{MF}(t) = x^*(-t) \quad (4.47)$$

şeklinde yazılmaktadır. Alıcıya ulaşan sinyal, uyumlu filtreden geçirildikten sonra,

$$y_o(t') = \int_{-\infty}^{\infty} y_R(\tau') h_{MF}(t' - \tau') d\tau' \quad (4.48)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau' - \tau_R) x^*(\tau' - t') e^{j2\pi f_D \tau'} d\tau' \quad (4.49)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik 4.49'da $t = \tau' - \tau_R$ olarak yerine yazıldığında,

$$y_o(t') = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) x^*(t + \tau_R - t') e^{j2\pi f_D (t + \tau_R)} dt \quad (4.50)$$

$$= e^{j2\pi f_D \tau_R} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) x^*(t + \tau_R - t') e^{j2\pi f_D t} dt \quad (4.51)$$

elde edilmektedir. Eşitlik 4.51'de gecikme süresi parametresi $\tau = \tau_R - t'$ ve Doppler parametresi $\nu = f_D$ şeklinde yazılıp mutlak değeri alındığında, belirsizlik fonksiyonu $A_{xx}(\nu, \tau)$

$$A_{xx}(\nu, \tau) = e^{j2\pi f_D \tau_R} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) x^*(t + \tau) e^{j2\pi \nu t} dt \quad (4.52)$$

$$|A_{xx}(\nu, \tau)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t) x^*(t + \tau) e^{j2\pi \nu t} dt \right| \quad (4.53)$$

şeklinde elde edilmektedir. Belirsizlik fonksiyonu, gecikme süresi ve Doppler frekansı eksenlerinde, alıcıdaki uyumlu filtre çıkışının iki boyutta değişimini göstermektedir. Belirsizlik fonksiyonu üzerinden, gecikme süresi ve Doppler frekansı için belirlenen değerler için kesitler alınıp, ilgili kesit değeri için uyumlu filtre çıkışı incelenebilmektedir.

Örneğin 4.53'te verilen ifadede $\nu = 0$ olarak yazıldığında,

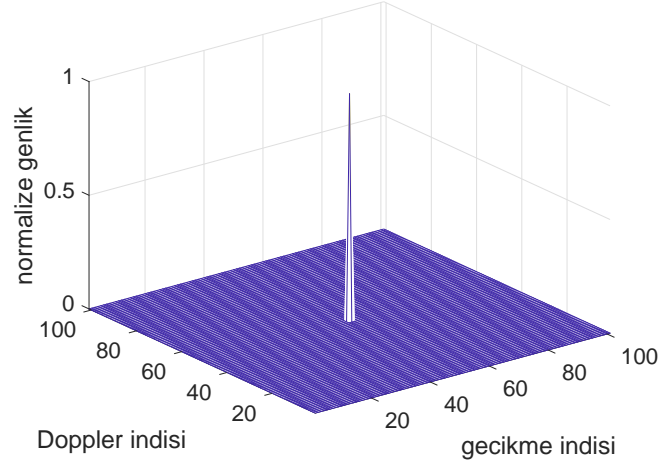
$$|A_{xx}(0, \tau)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^*(t + \tau)dt \right| = |R_{xx}(\tau)| \quad (4.54)$$

ile verilen özilinti fonksiyonu elde edilmektedir. Benzer şekilde gecikme parametresi $\tau = 0$ olduğunda,

$$|A_{xx}(\nu, 0)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 e^{j2\pi\nu t} dt \right| \quad (4.55)$$

şeklinde, $x(t)$ dalga şeklinin mutlak karesinin Fourier dönüşümü elde edilmektedir [5].

Yukarıdaki açıklamalar sonrasında, ideal bir belirsizlik fonksiyonunun nasıl olması gerektiği sorusu akla gelmektedir. İdeal belirsizlik fonksiyonu için uygulamaya bağlı bir tanım yapmak daha doğrudur. Şekil 4.14'te radar uygulamalarında, farklı hız ve menzildeki hedefleri kolayca ayırtırmak için kullanılan ideal belirsizlik fonksiyonu verilmiştir. Fonksiyon yalnızca belirli bir menzil ve hız (Doppler) değeri için tespit yapılmasını sağlamaktadır. Ancak bazı uygulamalarda, kullanılan dalga şeklinin, Doppler değişimlerinden mümkün olduğunca az etkilenmesi istenmektedir [102]. Bu durumda Şekil 4.14'te belirsizlik fonksiyonu verilen dalgaşekli yerine, Doppler değişimlerine dayanıklı bir dalgaşeklinin tercih edilmesi gerekmektedir [103]. Dolayısıyla genel bir ideal belirsizlik tanımı yapmak yerine uygulamaya bağlı bir tanım yapılmasının daha doğru olduğu değerlendirilmektedir [39].



Şekil 4.14. İdeal belirsizlik fonksiyonu

Belirsizlik fonksiyonu ile ilgili yukarıda verilen bilgiler ışığında, radar ve haberleşme uygulamalarında da sıklıkla kullanılan dalgaşekilleri için belirsizlik fonksiyonu üzerinden incelemeler ve değerlendirmeler yapılmıştır. Faz kodlu ve frekans modülasyonlu dalgaşekilleri olmak üzere iki temel grup incelenmiştir. Faz kodlu dalgaşekilleri içerisinde; Barker, PN ve Golay kodları, frekans modülasyonlu dalgaşekilleri içerisinde; doğrusal frekans modülasyonlu, doğrusal olmayan frekans modülasyonlu ve Costas frekans kodlu dalgaşekilleri incelenmiştir. Genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde, 1 MHz bant genişliğinde dalgaşekilleri kullanılmaktadır. Bu bakımdan, faz kodlu dalgaşekilleri için çip süresi $T_c = 1 \mu s$, frekans modülasyonlu dalgaşekilleri için modülasyon bant genişliği $B = 1$ MHz olarak seçilmiştir. Dalga şekillerinin birbirleri ile daha doğru karşılaştırılması açısından benzer BT çarpım değerleri için benzetim çalışmaları yapılmıştır.

4.2.3.1 Faz Kodlu Dalga Şekilleri

Radar ve haberleşme uygulamalarında, darbe sıkıştırma tekniği ile kullanılan bantgenişliği artırılarak, uyumlu filtre çıkışındaki SNR değeri yükseltilmektedir [104]. Darbe sıkıştırma amacıyla kullanılan yöntemlerden biri, darbe içerisine faz kodlu sinyaller yerleştirmektir. Daha çok ikili faz ($[0^\circ, 180^\circ]$) kodlama tercih edilse de, çoklu-faz kodlarının tercih edildiği uygulamalar da bulunmaktadır [5]. Bu çalışma kapsamında, ikili

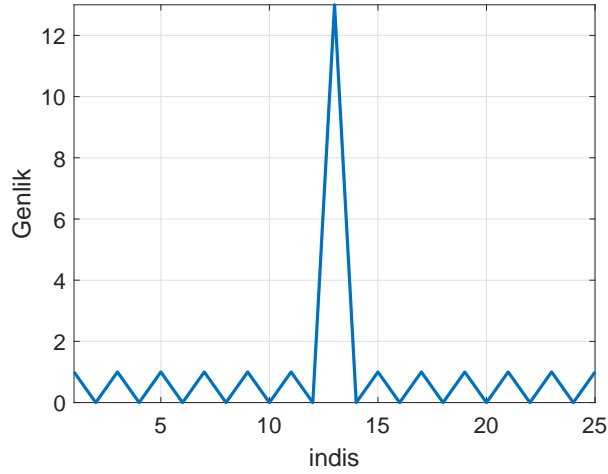
Çizelge 4.4. İkili faz Barker kodları

Kod Uzunluğu	Kod
2	11 veya 10
3	110
4	1110 veya 1101
5	11101
7	1110010
11	11100010010
13	1111100110101

faz kodlu sinyallerden Barker, PN ve Golay kodlu sinyaller incelenmiştir.

4.2.3.1.1 Barker Kodu

Yaygın olarak kullanılan faz kodlu dalga şekillerinden birisi Barker kodudur. Çizelge 4.4'te bilinen ikili faz Barker kod dizileri verilmiştir. Görüldüğü gibi Barker kodları için 2 ile 13 kod uzunluğu arasında belirli sayıda alternatif bulunmaktadır. Barker kodlarında özilinti fonksiyonu tepe seviyesi kod uzunluğuna eşitken, yan hüzmeye seviyesi 0 ve 1 değerleri arasında değişmektedir. 13 kod uzunluğundaki Barker dizisi için elde edilen özilinti fonksiyonu Şekil 4.15'te görülmektedir.

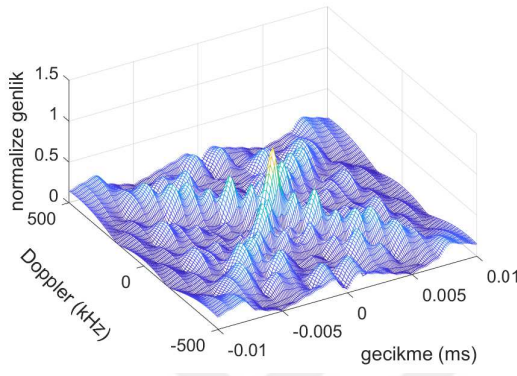


Şekil 4.15. Barker-13 kodu için özilinti fonksiyonu

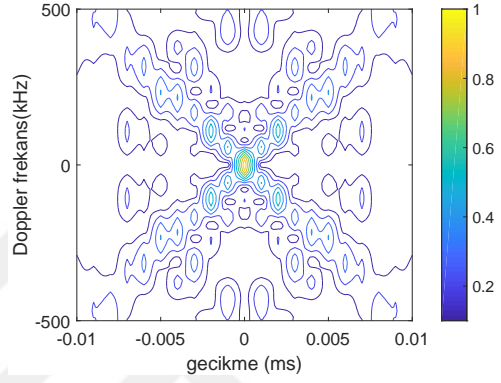
Barker kodu için yapılan belirsizlik fonksiyonu incelemelerinde, kod uzunluğu $N = 13$ ve çip süresi $T_c = 1\mu s$ olan dalgaşekli kullanılmıştır. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi,

üç boyutlu belirsizlik fonksiyonu $A(\nu, \tau)$ Doppler-gecikme düzleminde tek bir noktada tepe yapmış diğer noktalarda ise düşük genlikli yan hüzmeler oluşturmuştur. Bu özelliğe sahip dalgaşekilleri daha çok hareketli hedeflerin tespitinin yapıldığı radar uygulamalarında tercih edilmektedir. Çünkü farklı hızlardaki hedefler, farklı Doppler hücrelerinde yer alacağından birbirlerinden ayırt edilmeleri kolaylaşmaktadır. Şekil 4.16'da Doppler $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde, Şekil 4.15'te verilen özilinti fonksiyonuna benzer bir sonuç elde edilmektedir. Dikey eksen logaritmik olarak çizdirildiğinden yan hüzmeye seviyesinin $10 \log_{10}(1/13) = -11.14$ dB civarında olduğu görülmektedir. Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti ise, Eşitlik 4.55'te verildiği gibi, sinyal zarfının karesinin Fourier dönüşümünü göstermektedir.

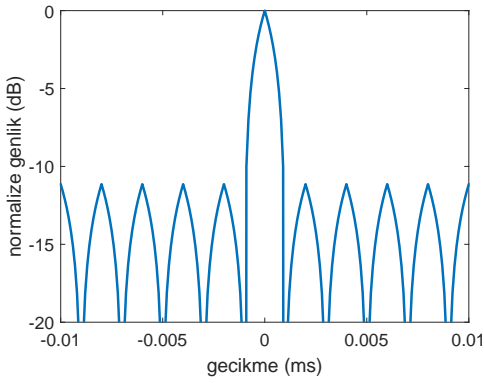
Barker kodlu dalgaşekilleri, yüksek tepe-yan hüzmeye oranı ve hareketli hedef tespiti için gereken ideal belirsizlik fonksiyonuna benzerlikleri sebebiyle, radar uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak Çizelge 4.4'da verildiği gibi, sınırlı sayıda alternatif kod olması ve kod uzunluğunun sınırlı (<13) olması gibi nedenlerle Barker koduna alternatif faz kodları geliştirilmiştir.



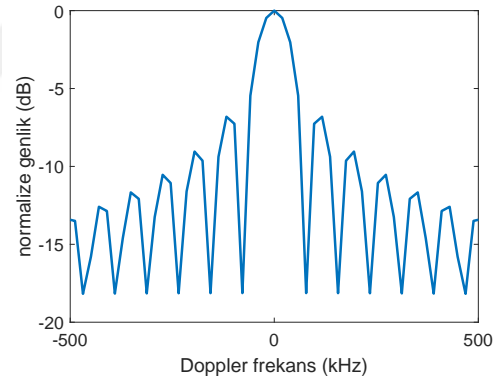
(a) Belirsizlik fonksiyonu, üç boyutlu



(b) Belirsizlik fonksiyonu, çizgi grafik



(c) Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti

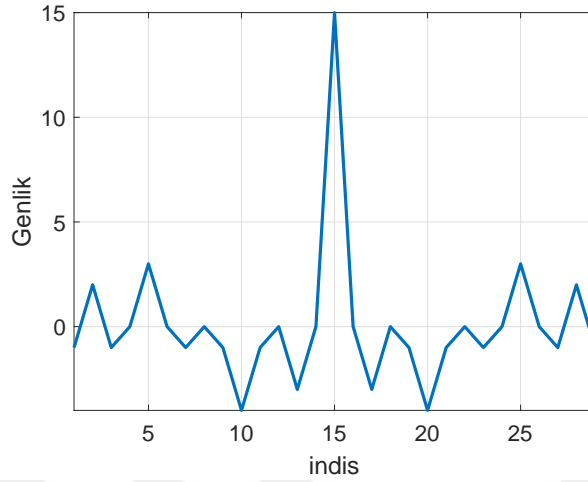


(d) Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti

Şekil 4.16. $T_c = 1 \mu s$, $N = 13$ Barker kodlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu

4.2.3.1.2 PN Kodu

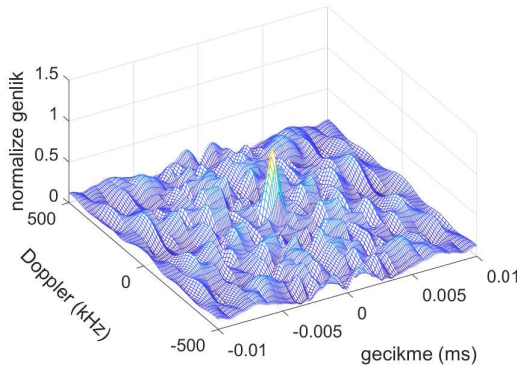
PN kodları, beyaz gürültüye benzer özelliklerinden dolayı sözde gürültü olarak adlandırılmaktadır. M-dizileri yaygın olarak kullanılan PN kodlarından biridir. n bit kullanılarak $2^n - 1$ uzunluğunda m-dizisi oluşturulabilmektedir. Barker kodlarından farklı olarak, m-dizilerinde herhangi bir boyut sınırı bulunmamaktadır. Kaydıran yazmaç yapıları ile kolaylıkla üretilmeler sebebiyle tercih edilmektedir [5]. $n = 4$ için $2^n - 1 = 15$ uzunluğundaki bir m-dizisinin özilinti fonksiyonu Şekil 4.17’de verilmiştir.



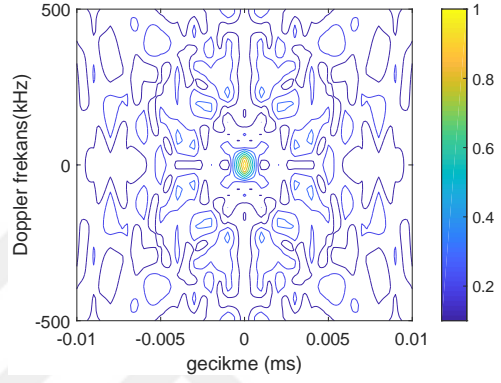
Şekil 4.17. PN-15 kodu için özilinti fonksiyonu

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, PN kodlu dalgaşekli için özilinti fonksiyonu, kod uzunluğu olan 15 değerinde tepe yapmış ancak yan hüzmeye seviyesi, Barker koda kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Benzer sonuç Şekil 4.18’de de görülmektedir. Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde, -6 dBc seviyelerine varan yan hüzmeye değerleri olduğu görülmektedir. Gecikme süresi $\tau = 0$ kesitinin ise, Barker kod için elde edilen sonuç ile benzer olduğu görülmektedir. Eşitlik 4.55’te belirtildiği gibi, sinyal zarfında bir değişiklik olmadığı sürece, $\tau = 0$ kesitinden elde edilen sonucun değişmediği görülmektedir.

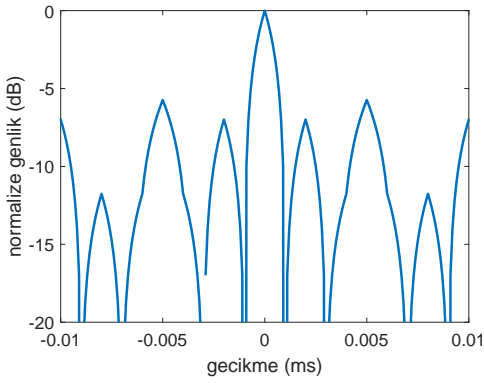
PN kodlarında özilinti fonksiyonu sonucunda yüksek olan yan hüzmeye seviyesinin düşürülmesi için periyodik özilinti fonksiyonları kullanılmaktadır. PN kodları periyodik



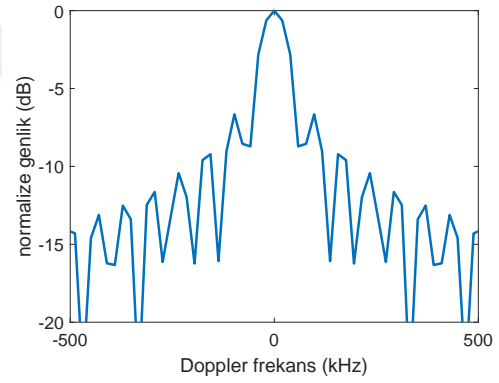
(a) Belirsizlik fonksiyonu, üç boyutlu



(b) Belirsizlik fonksiyonu, çizgi grafik



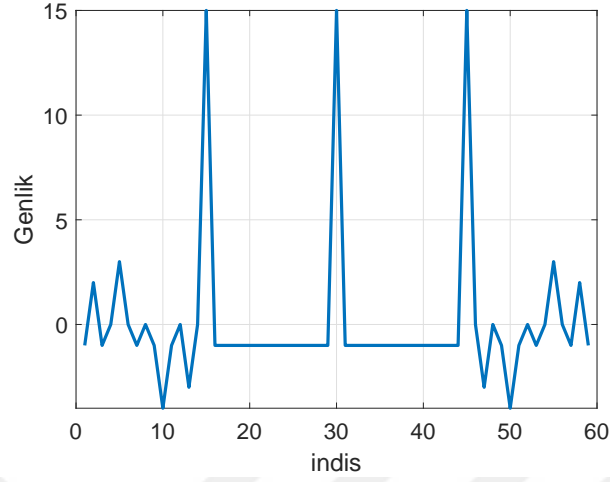
(c) Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti



(d) Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti

Şekil 4.18. $T_c = 1 \mu s$, $N = 15$ PN kodlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu

bir şekilde arka arkaya tekrarlanarak kullanıldıklarında, alıcıdaki uyumlu filtre çıkışı Şekil 4.19’da gösterilen şekilde elde edilmektedir.



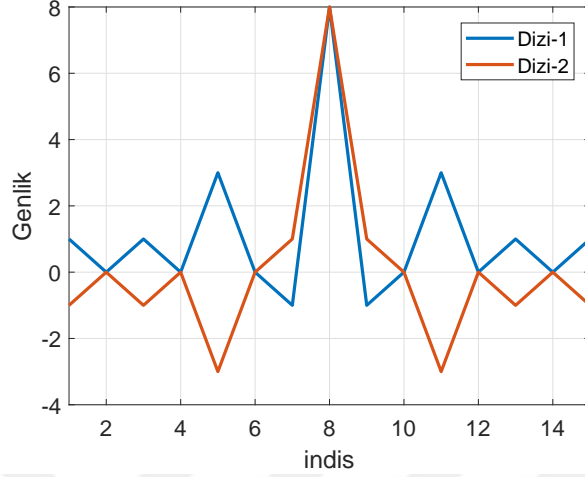
Şekil 4.19. PN-15 kodu için periyodik özilinti fonksiyonu

Şekil 4.19’da aynı PN kodlu dalgaşekli üç periyot arka arkaya tekrarlanarak kullanılmıştır. Alıcıdaki uyumlu filtre çıkışında, birinci periyodun başında ve üçüncü periyodun sonunda, Şekil 4.17’de aperiodyik özilinti fonksiyonundaki yan hüzme seviyelerine benzer sonuçların oluştuğu görülmektedir. Ancak ikinci periyot içerisinde, yan hüzme seviyesi sabit -1 değerine inerken, tepe seviyesi aynı değerde kalmıştır. PN kodları, periyodik özilinti fonksiyonlarının düşük yan hüzme seviyeleri nedeniyle tercih edilmektedir ancak belirtilen şekilde düşük yan hüzme seviyelerinin oluşması için PN kodlu dalga şekillerinin arka arkaya sürekli kullanılması gerekmektedir. Alıcı ve vericinin aynı konumda bulunduğu radar uygulamalarında belirtilen şekilde sürekli yayın yapılması, alıcı donanımını etkileyen problemlere sebep olmaktadır. Bu sebeple PN kodlu dalgaşekilleri, daha çok alıcı ve vericinin farklı konumlarda yer aldığı haberleşme ve bistatik radar uygulamalarında tercih edilmektedir.

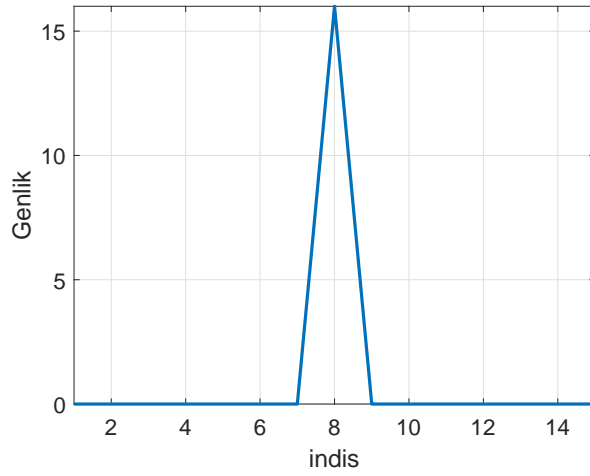
4.2.3.1.3 Golay Kodu

İkili faz kodları içerisinde yer alan bir diğer kod, tamamlayıcı veya diğer adıyla Golay kodlarıdır [105]. Golay kodu, eşit uzunluktaki iki diziden oluşmaktadır. Dizilere ait

özilinti fonksiyonları eş fazlı olarak toplandıklarında, özilinti fonksiyonlarındaki tepe seviyeleri iki katına çıkmakta, yan hüzmeye değerleri ise birbirlerini söndürerek sıfır yan hüzmeye seviyesi oluşturmaktadır.



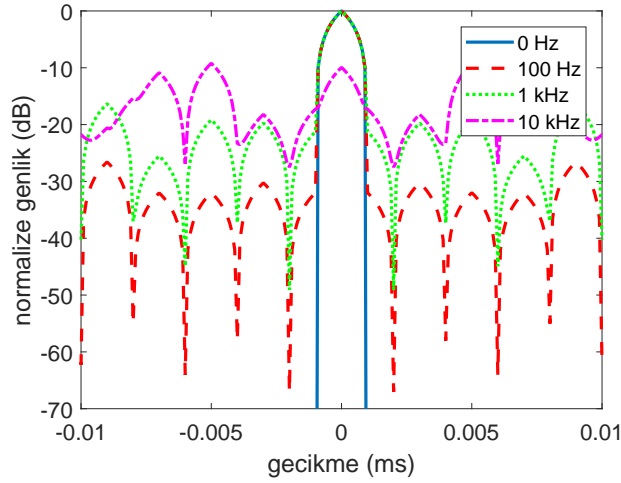
Şekil 4.20. Golay-8 kod çifti için özilinti fonksiyonları



Şekil 4.21. Golay-8 kod çifti için toplam özilinti fonksiyonu

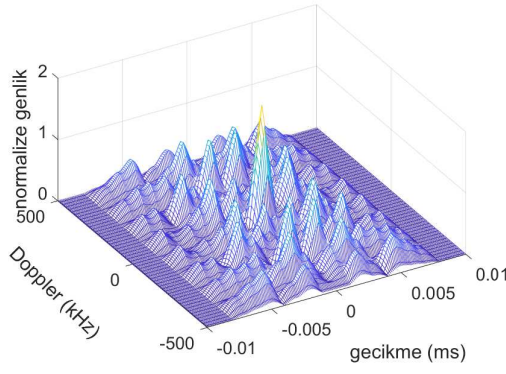
Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de 8 bitlik Golay dizi çifti için ayrı ayrı özilinti fonksiyonları ve toplamda elde edilen özilinti fonksiyonu verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, özilinti fonksiyonlarının toplamları ile tepe seviyesi iki katına çıkarken, yan hüzmeye seviyesi sıfır seviyesine inmiştir.

Golay kodu için yapılan belirsizlik fonksiyonu incelemelerinde, kod uzunluğu $N = 16$ ve çip süresi $T_c = 1\mu s$ olan dalgaşekli kullanılmıştır. Şekil 4.23'te verilen sonuçlar incelendiğinde, belirsizlik fonksiyonun diğer faz kodlu dalga şekillerinde olduğu gibi ($\nu = 0, \tau = 0$) noktasında tepe yaptığı, diğer noktalarda ise düşük genlikli yan hüzmeler olduğu görülmektedir. İki dizi çiftinin toplanması ile elde edilen ve sıfır yan hüzmeye sahip özilinti fonksiyonu ise, belirsizlik fonksiyonu Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde görülebilmektedir. Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti ise, diğer faz kodlu dalgaşekilleri ile benzer profile sahiptir. Golay kodları, iki dizi çiftinin eş evreli olarak toplanması ile oluşturulan özilinti fonksiyonunu kullandığı için, Doppler değişimlerine duyarlı bir dalgaşekli olarak bilinmektedir [106]. Doppler frekansındaki değişimin, Golay kodlu dalgaşekli üzerindeki etkisini incelemek için belirsizlik fonksiyonu üzerindeki farklı Doppler değerlerindeki kesitler incelenmiş ve Şekil 4.22'de sunulmuştur.

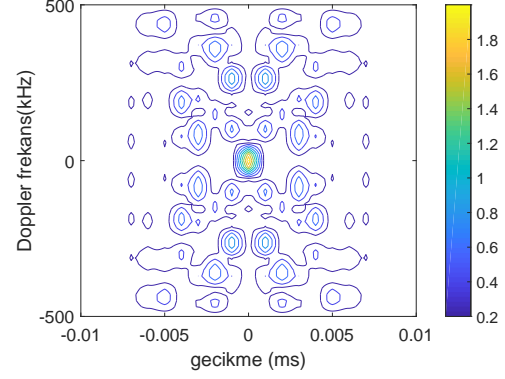


Şekil 4.22. Doppler değişiminin Golay kodu özilinti fonksiyonu üzerindeki etkisi

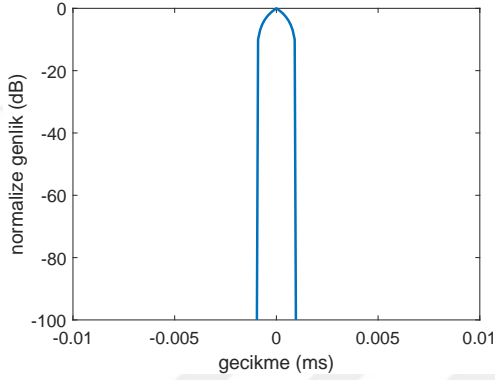
Şekilde, Doppler değişimi olmadığı durumda (0 Hz) yan hüzmeye çok düşük seviyelerdeyken, frekans değişiminin 100 Hz, 1 kHz ve 10 kHz olduğu durumlarda, yan hüzmeye seviyelerinin hızla artmakta olduğu görülmektedir. Bu bakımdan Golay kodları için frekans değişimlerine duyarlı bir kod türü tanımlaması yapılabilmektedir. Frekans değişimlerinin kaynağı kanal koşulları nedeniyle oluşan Doppler değişimleri olabileceği gibi, alıcı-verici donanımlarından kaynaklanan frekans kaymaları da Golay kodları



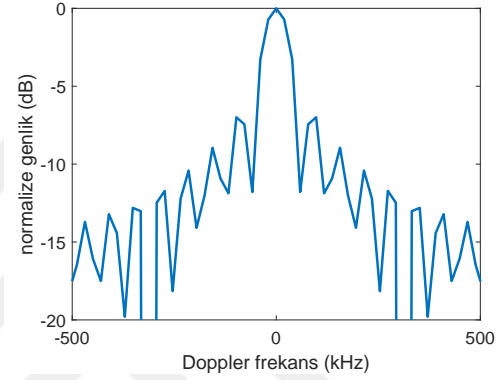
(a) Belirsizlik fonksiyonu, üç boyutlu



(b) Belirsizlik fonksiyonu, çizgi grafik



(c) Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti



(d) Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti

Şekil 4.23. $T_c = 1 \mu s$, $N = 16$ Golay kodlu sinyal çifti için belirsizlik fonksiyonu

üzerinde benzer bir etkinin oluşmasına neden olabilmektedir.

4.2.3.2 Frekans Modülasyonlu Dalga Şekilleri

Radar ve haberleşme uygulamalarında, faz kodlu sinyaller haricinde, darbe sıkıştırma amacıyla kullanılan bir diğer yöntem de darbe içerisine frekans modülasyonlu dalga şekillerinin yerleştirilmesidir. Bu çalışma kapsamında, frekans modülasyonlu dalga şekilleri arasında, doğrusal frekans modülasyonu, Costas frekans kodu ve doğrusal olmayan frekans modülasyonu için değerlendirmelerde bulunulmuştur.

4.2.3.2.1 Doğrusal Frekans Modülasyonu

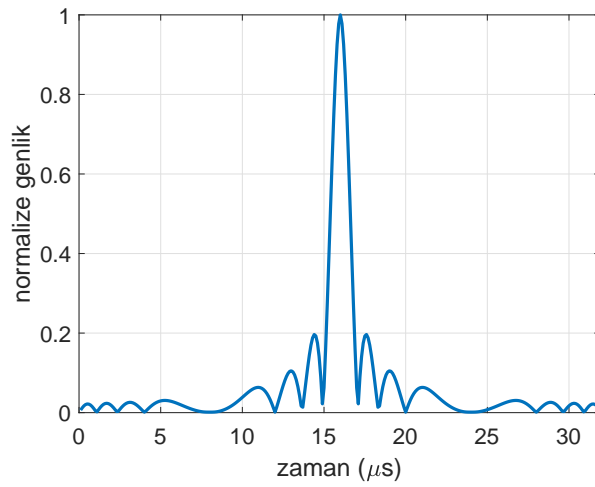
Frekans modülasyonlu dalgışekilleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan dalgışekli doğrusal frekans modülasyonudur (DFM). DFM sinyaller, sinüzoidal bir fonksiyonun

anlık fazı değiştirilerek elde edilebilmektedir. Tipik bir DFM dalgası,

$$x(t) = A \cos(\theta(t)) \quad (4.56)$$

$$= A \cos(2\pi\mu t^2 + 2\pi f_0 t) \quad (4.57)$$

ifadesi kullanılarak üretilmektedir. Eşitlik 4.57'de geçen μ frekans değişim hızını, f_0 ise başlangıç frekansını ifade etmektedir. Şekil 4.24'te 16 μs boyunca 1 MHz bant genişliğini tarayan ($BT = 16$) bir DFM dalgası için elde edilen özilinti fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 4.24. Doğrusal frekans modülasyonu için özilinti fonksiyonu

DFM dalga şekillerinde, sinyalin zarfı kare dalga olduğu durumda, yan hüzmeye seviyesi Şekil 4.24'te verilen seviyede olmaktadır ancak sinyal zarfını değiştirmek için kullanılan pencere fonksiyonları ile yan hüzmeye seviyesi düşürülebilmektedir [107]. DFM dalga şekillerinde bant genişliğinin (B) artması, özilinti fonksiyonundaki ana hüzmeye genişliğini azaltarak, zaman alanındaki çözünürlüğün artmasını sağlamaktadır.

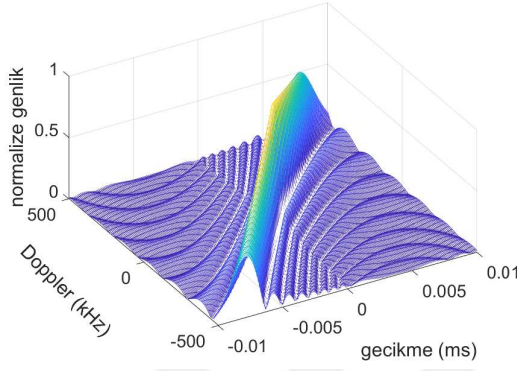
Şekil 4.25'te DFM dalgası için elde edilen belirsizlik fonksiyonu sonuçları verilmiştir. Üç boyutlu belirsizlik fonksiyonu incelendiğinde, faz kodlu dalga şekillerinden farklı olarak, ($\nu = 0, \tau = 0$) noktası merkez olmak üzere üçgen şeklinde bir tepenin oluştuğu görülmektedir. Bu durumda, farklı Doppler frekansı değerlerinde uyumlu

filtre çıkışında tespit yapılabileceği söylenebilmektedir. Ancak Şekil 4.25'te belirsizlik fonksiyonu için verilen çizgi grafikte, oluşan düzlemin Doppler-gecikme eksenlerinde belirli bir eğime sahip, köşegen şeklinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, farklı Doppler değerlerinde uyumlu filtre çıkışında sinyal tespiti yapıldığında, tespit işlemi farklı bir gecikme süresi için gerçekleşmektedir. DFM dalgasekilleri için oluşan bu duruma menzil-Doppler eşleşmesi adı verilmektedir. DFM sinyaller için oluşan bu durumu gidermek için frekansta azalan ve artan DFM sinyaller birlikte kullanılarak, oluşan pozitif ve negatif menzil hatalarının ortalaması alınmaktadır [39].

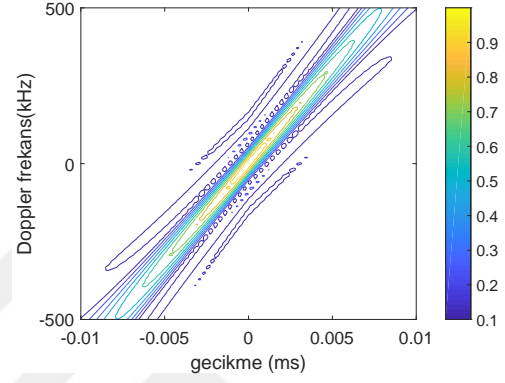
Şekil 4.25'te, Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde, Şekil 4.24'te verilen öziliinti fonksiyonu ile benzer yan hüzme seviyelerinin oluştuğu görülmektedir. En yüksek yan hüzme seviyesinin 0.2 normalize genlik değerinde olduğu görülmektedir. Bu değer logaritmik ölçekte $10 \log_{10}(0.2/1) = -6.98$ dB olarak hesaplanmaktadır. $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde, en yüksek yan hüzme değerinin belirtilen seviyede olduğu görülmektedir. DFM dalgasekilleri, günümüz sayısal donanımları ile kolay üretilebilmeleri, Doppler değişimlerine karşı dayanıklı ve hassas Doppler ölçümleri yapmaya uygun olmaları nedeniyle pek çok radar ve görüntüleme uygulamasında kullanılmaktadır [108].

4.2.3.2.2 Costas Frekans Kodu

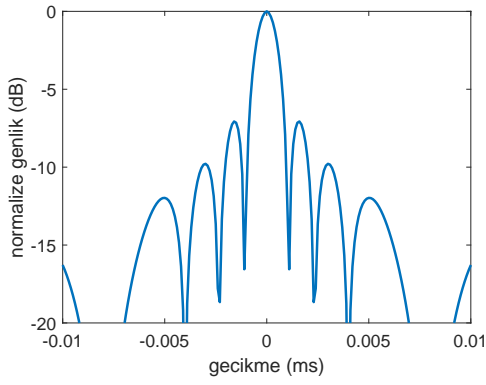
Frekans modülasyonlu dalgasekilleri içerisinde yer alan bir diğer alternatif Costas frekans kodlu dalga şekilleridir. Bölüm 4.2.3.2.1'de, DFM sinyaller için Doppler değişimi durumunda, belirsizlik fonksiyonunun tepe gücünün yavaş azalan bir fonksiyon şeklinde olduğu gösterilmiştir. Bu durum tespit yapılması açısından avatajlı olsa da, farklı hızlarda hareket eden hedeflerin birbirinden ayrılması gerektiği radar uygulamaları için istenmeyen bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Costas frekans kodları, frekans modülasyonu kullanarak, faz kodlu dalgasekilleri ile elde edilen belirsizlik fonksiyonuna benzer sonuç oluşturmak için geliştirilmişlerdir [109]. Şekil 4.26'da doğrusal frekans modülasyonu ve Costas frekans kodu için gösterim amaçlı zaman frekans matrisleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, DFM dalgasekilleri zamanla frekanslarını doğrusal olarak arttırırken, Costas frekans kodlu dalga şeklinde zamana bağlı olarak farklı frekans değerleri seçilmektedir. Frekans seçiminde, Costas frekans koduna ait be-



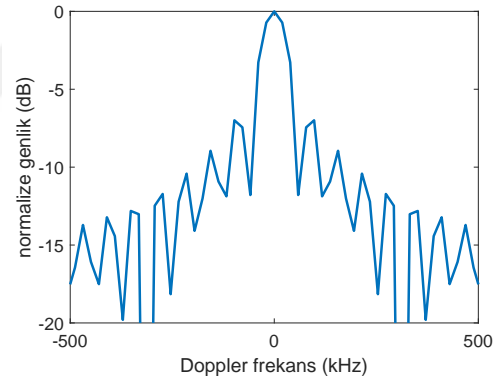
(a) Belirsizlik fonksiyonu, üç boyutlu



(b) Belirsizlik fonksiyonu, çizgi grafik



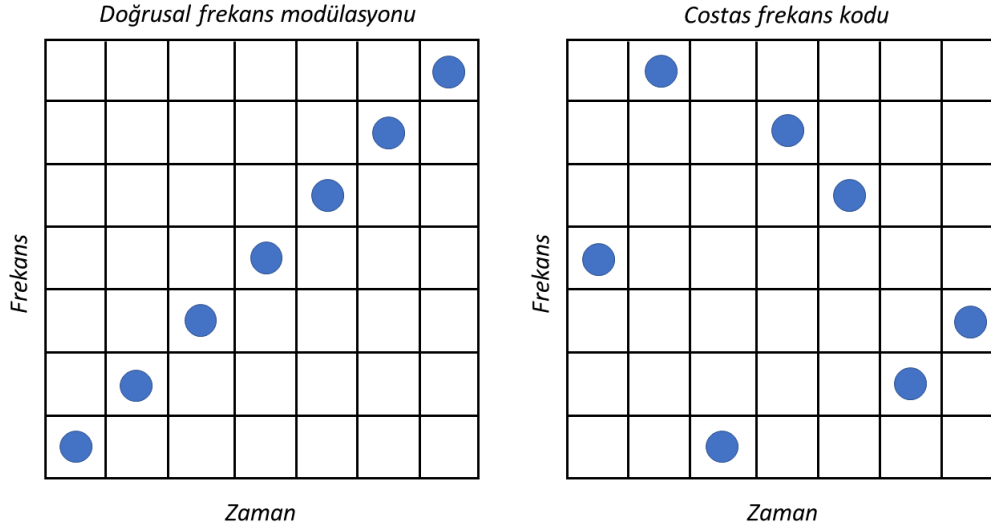
(c) Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti



(d) Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti

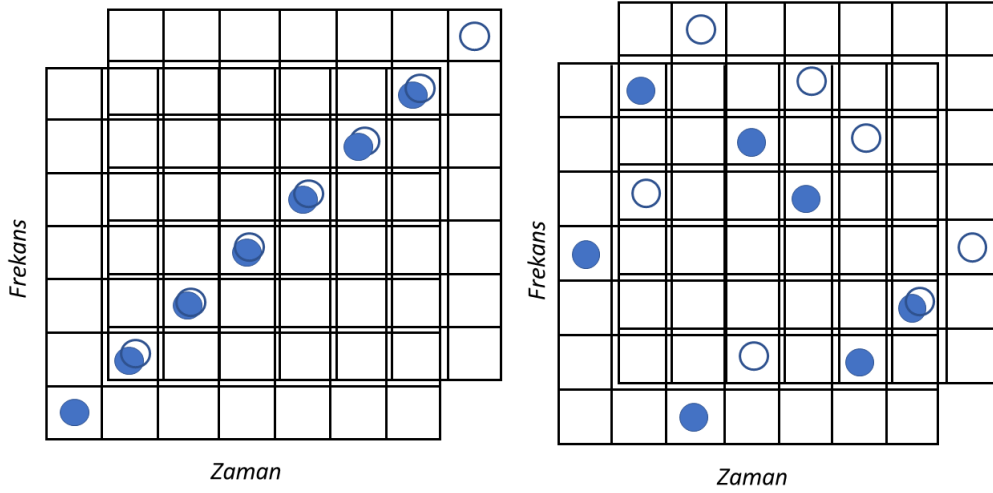
Şekil 4.25. $T_p = 16 \mu s$, $B = 1$ MHz doğrusal frekans modülasyonu için belirsizlik fonksiyonu

lirsizlik fonksiyonunun, Şekil 4.14’de verilen ideal belirsizlik fonksiyonuna benzemesi amaçlanmaktadır.



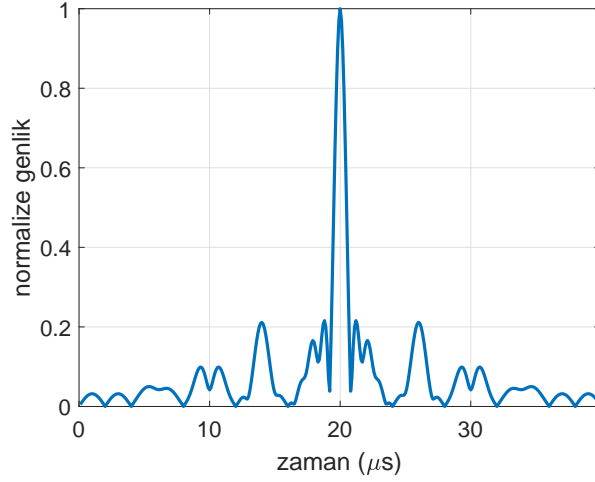
Şekil 4.26. Doğrusal frekans modülasyonu ve Costas frekans kodunun zaman frekans düzleminde gösterimi [5]

Bu durumu daha iyi anlamak için Şekil 4.27’de verilen gösterim kullanılabilir. Belirsizlik fonksiyonları Eşitlik 4.53’te verildiği gibi, zaman ve frekans (Doppler) eksenlerinde sinyallerin ilinti özelliklerini göstermektedir. Dolayısıyla Şekil 4.27’de verildiği gibi, sinyal zaman ve frekans eksenlerinde kaydırılıp orijinal sinyal ile ilintisi üzerinden, oluşan belirsizlik fonksiyonu için fikir elde edilebilmektedir. Doğrusal frekans modülasyonuna sahip dalgaşekli, zaman ve frekans eksenlerinde kaydırıldığında, her bir adımda orijinal sinyal ile kayan örnek arasındaki ilintinin yavaş yavaş azaldığı görülmektedir. Bu durumda, Şekil 4.25’de DFM dalgaşekli için verilen belirsizlik fonksiyonunun elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, Costas frekans kodu için oluşturulan düzlem, zaman ve frekans eksenlerinde kaydırıldığında, her bir adımda yalnızca bir frekans bileşeninin kesiştiği görülmektedir. Dolayısıyla sinyaller arasındaki ilinti düşük olmaktadır. Bu sayede oluşan belirsizlik fonksiyonunun tepe değeri, hem zaman hem de frekans (Doppler) değiştikçe hızla değer kaybetmektedir.



Şekil 4.27. Doğrusal frekans modülasyonu ve Costas frekans kodunun zaman frekans düzleminde gösterimi [5]

Costas frekans kodlarının oluşturulması ve üretilebilecek kod sayısı ile ilgili detaylar [5]'te yer almaktadır. Costas frekans kodları kod uzunluğu parametresi M değerine bağlı olarak üretilmektedir. M değeri kod içerisinde kullanılan frekans sayısı anlamına gelmektedir. Her bir M değeri için belirli sayıda ve sıralamada kod oluşturulabilmektedir. $M = 5$ frekanstan oluşan $([2, 1, 5, 3, 4] \times 250 \text{ kHz})$ ve her bir frekansı $4 \mu\text{s}$, toplamda $20 \mu\text{s}$ uzunluğundaki Costas frekans kodlu bir sinyale ait özilinti fonksiyonu Şekil 4.28'de verilmiştir. Özilinti fonksiyonu sonucunda oluşan yan hüzmeye seviyesinin, doğrusal frekans modülasyonlu dalgasekilleri ile benzer olduğu görülmektedir.

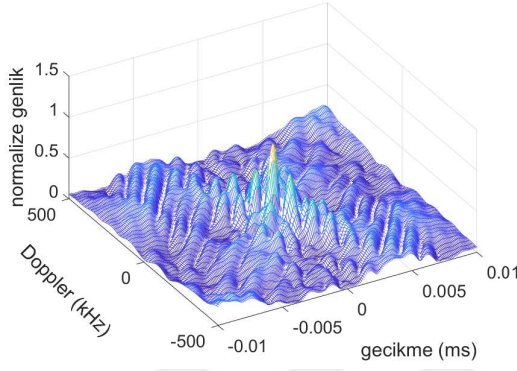


Şekil 4.28. Costas frekans kodlu dalgaşekli için özilinti fonksiyonu

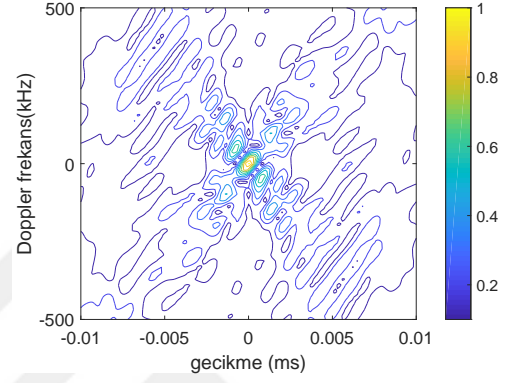
Şekil 4.29’da verilen belirsizlik fonksiyonu sonuçları incelendiğinde, elde edilen üç boyutlu belirsizlik fonksiyonunun, DFM dalga şekillerinden farklı olarak, sadece ($\nu = 0$, $\tau = 0$) noktasında tepe yaptığı görülmektedir. Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde, fonksiyon Şekil 4.28’de verilen özilinti fonksiyonuna benzer şekilde, $10 \log_{10}(0.2114/1) = -6.75$ dB seviyelerinde yan hüzmeye sahiptir. Costas frekans kodları, frekans modülasyonlu dalgaşekilleri kullanılarak farklı Doppler değişimlerine sahip hareketli hedeflerin birbirinden ayrıştırılması istenen uygulamalarda tercih edilmektedir.

4.2.3.2.3 Doğrusal Olmayan Frekans Modülasyonu

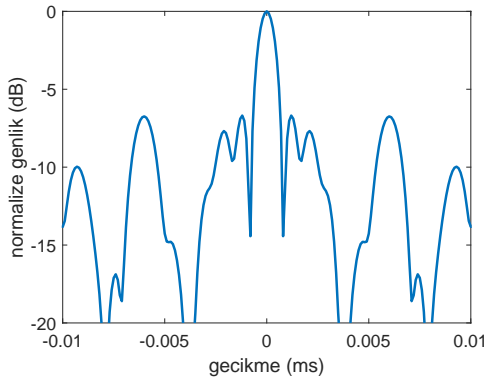
Doğrusal frekans modülasyonlu dalgaşekilleri için bahsi geçen iki temel problem bulunmaktadır. Birincisi, belirsizlik fonksiyonlarının gecikme-Doppler düzleminde köşegen şeklinde, yavaş azalan yapıda olmasıdır. Bu probleme yönelik olarak Bölüm 4.2.3.2.2’de anlatılan Costas kodları geliştirilmiştir. Bir diğer problem ise, DFM dalga şekillerinin özilinti fonksiyonlarında gözlenen yüksek yan hüzmeye seviyeleridir. Pencere fonksiyonları kullanarak, yan hüzmeye seviyelerinin düşürülmesi literatürde yer alan bir uygulamadır [107]. Ancak pencere fonksiyonları ile sinyaller zaman ve frekans alanında şekillendirilmekte dolayısıyla enerjilerinin bir kısmını kaybetmektedir. Bu nedenle pencere fonksiyonları kullanmadan, frekans modülasyonlu dalga şekillerinin



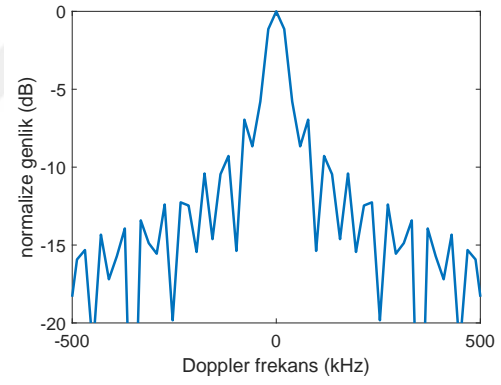
(a) Belirsizlik fonksiyonu, üç boyutlu



(b) Belirsizlik fonksiyonu, çizgi grafik



(c) Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti



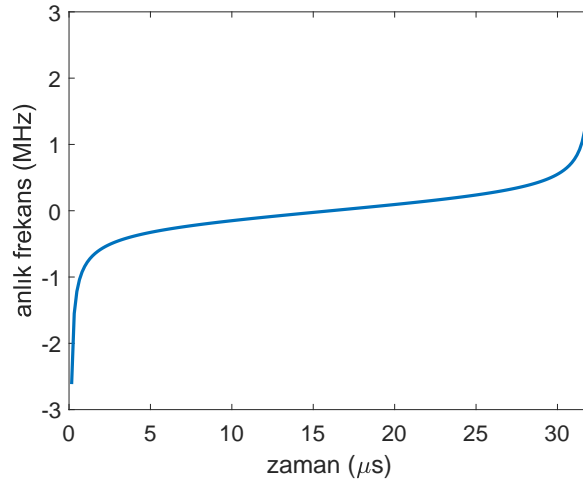
(d) Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti

Şekil 4.29. $T_p = 20 \mu s$, $B = 1 \text{ MHz}$, $M = 5$ Costas frekans kodlu sinyal için belirsizlik fonksiyonu

düşük yan hüzme değerlerine sahip olması için doğrusal olmayan frekans modülasyonu (DOFM) kullanılmaktadır.

Pencere fonksiyonu ile yan hüzme seviyesinin düşürülmesi aslında sinyalin spektral görüntüsünün değiştirilmesi sayesinde gerçekleşmektedir. Pencere fonksiyonu ile sinyale spektrumda ve dolayısıyla zamanda istenen form kazandırılmaktadır. Benzer bir yaklaşımla, frekans modülasyonlu bir sinyalin spektrum görüntüsünü pencere fonksiyonu kullanmadan da değiştirmek mümkündür. DFM sinyaller, zamanda her bir frekans için sabit bir süre geçirmektedir. DOFM sinyaller ile her bir frekansta geçirilen süre değiştirilerek sinyalin spektrumunun şekillendirilebileceği gösterilmiştir [110].

DOFM dalga şekillerinde her bir frekansta geçirilen sürenin değiştirilmesi için anlık frekans ifadesinin tanımlanması gerekmektedir. Örneğin, DFM sinyalleri için anlık frekans zamanla doğrusal olarak değişmektedir. DOFM sinyallerde ise Şekil 4.30'da verilen anlık frekans eğrisi kullanılmaktadır.



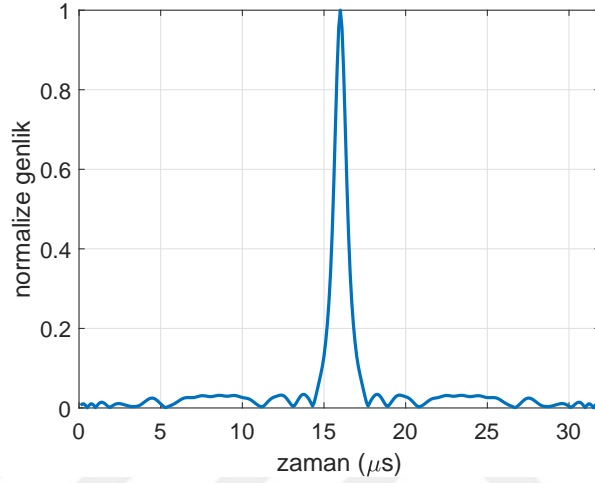
Şekil 4.30. Doğrusal olmayan frekans modülasyonlu dalgaşekli için anlık frekansın zamana göre değişimi

Şekilde belirtilen eğriyi elde etmek için

$$f(t) = \frac{t}{T} \left(B_L + B_N \frac{1}{\sqrt{1 - 4t^2/T^2}} \right) \quad (4.58)$$

ifadesi kullanılmaktadır. Eşitlik 4.58’de geçen T sinyal süresini, B_L ve B_N ise anlık frekans eğrisinde doğrusal ve doğrusal olmayan terimleri kontrol eden parametreleri ifade etmektedir. $B_L \gg B_N$ koşulunda, anlık frekans doğrusal bir denklem ile ifade edilebilmektedir [5].

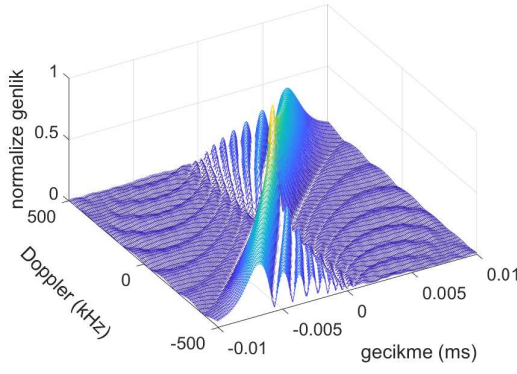
DOFM dalgaşekli için $T = 16\mu s$, $B_L = 5$ ve $B_N = 10$ değerleri ile oluşturulan dalga şekline ait özilinti fonksiyonu Şekil 4.31’da verilmiştir.



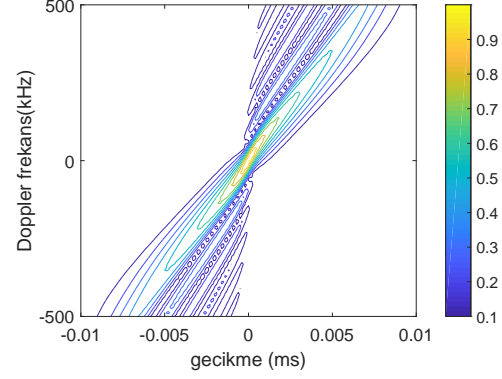
Şekil 4.31. Doğrusal olmayan frekans modülasyonlu dalgaşekli için özilinti fonksiyonu

Şekilde DOFM dalgaşekilleri için yan hüzme seviyesinin, Şekil 4.24’de verilen DFM sinyallere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Belirtilen yan hüzme seviyesi, sinyalin zarfında herhangi bir değişiklik yapılmadan, sadece sinyali oluşturan frekanslardaki kalış süresi değiştirilerek yani sinyalin spektrumu şekilledirilerek düşürülmüştür.

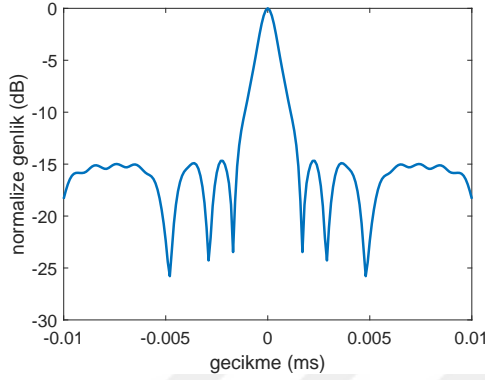
Şekil 4.32’de DOFM dalgaşekilleri için elde edilen belirsizlik fonksiyonu sonuçları görülmektedir. Üç boyutlu belirsizlik fonksiyonunda, DFM sinyallerine benzer şekilde, gecikme Doppler düzleminde köşegen şeklinde bir yapının oluştuğu görülmektedir. Ancak, $(\nu = 0, \tau = 0)$ noktasındaki tepe değerinin, Doppler frekansı değişimlerinde daha hızlı değer kaybettiği görülmektedir. Bunun nedeni, Costas frekans kodlu dalga şekillerinde olduğu gibi, DFM dalga şekline göre zaman frekans düzleminde örtüşen daha az sayıda bileşen olmasıdır. Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti incelendiğinde, Şekil 4.31’de verilen sonuç ile benzer şekilde yan hüzme seviyesinin, DFM sinyallere



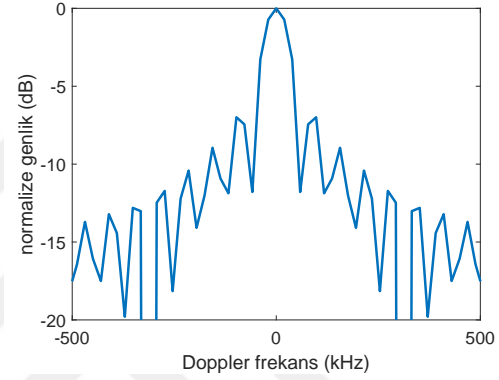
(a) Belirsizlik fonksiyonu, üç boyutlu



(b) Belirsizlik fonksiyonu, çizgi grafik



(c) Doppler frekansı $\nu = 0$ kesiti



(d) Gecikme süresi $\tau = 0$ kesiti

Şekil 4.32. $T_p = 16 \mu s$, $B = 1$ MHz, doğrusal olmayan frekans modülasyonu için belirsizlik fonksiyonu

göre daha düşük olduğu görülmektedir. DFM dalga şekillerinde -6.98 dBc olan yan hüzmeye seviyesi, DOFM dalgaşekilleri kullanılarak -15 dBc seviyelerine çekilmiştir. Bunun karşılığında ana hüzmeye genişliğinin arttığı görülmektedir. Bu nedenle, DOFM dalgaşekilleri daha çok, yüksek menzil çözünürlüğü ihtiyacının olmadığı, düşük SNR seviyelerine sahip kanallarda hedef tespiti yapmak amacıyla kullanılmaktadır.

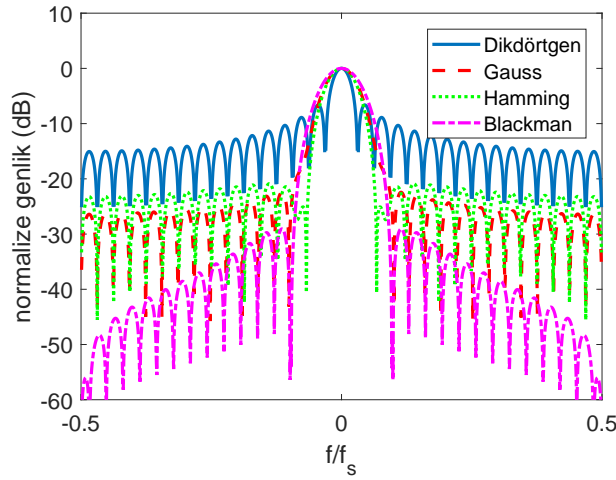
4.2.3.3 Genişbant İyonosferik Kanal Kestirimi için Dalga Şeklinin Belirlenmesi

Genişbant ionosferik kanal kestirim işleminde, Bölüm 4.2.2.1’de anlatılan yaklaşımın kullanılması için öncelikle bir takım kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bölüm 2’de belirtildiği gibi mevcut durumda kullanılan ionosondalar darbeleri ve frekans modülasyonu olmak üzere temel olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde,

darbe süresi ve darbe tekrarlama periyodu katman yüksekliklerine göre belirlenerek, hedef katmandan dönen yansıma sinyalleri analiz edilmektedir. Belirtilen işlem önceden belirlenen frekans aralığı ve frekans adımları için tekrarlanmaktadır. İkinci yöntemde ise, frekans modülasyonlu sürekli dalga sinyalleri kullanılmaktadır. Verici ve alıcı eşzamanlı olarak frekanslarını değiştirmekte ve verici-alıcı arasında sinyalin geçirdiği süre ölçülerek, katman yükseklikleri hesaplanmaktadır. Ancak bu yöntemde, alıcı ve vericinin birbirlerine yakın konumda olması, alıcının yüksek güçlü verici sinyali nedeniyle doyuma ulaşmasına neden olabilmektedir. Bu problemi çözmek için donanımsal bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir [41]. Bu sebeple, genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde, darbeli iyonosondalarda olduğu gibi belirli bir darbe süresi kadar yayın yapıp, darbe tekrarlama periyodu kadar sürede dinleme yapılması tercih edilmiştir.

Bölüm 2 ve Şekil 4.3'te belirtildiği gibi, genişbant iyonosferik kanal kestirimi için özilinti fonksiyonu dürtü sinyaline yakın olan sinyaller kullanılmaktadır. Bölüm 4.2.3'te faz kodlu ve frekans modülasyonlu dalgaşekilleri için yapılan incelemelerde, her iki grupta da düşük yan hüzmeye sahip dalgaşekilleri olduğu görülmektedir. Bu anlamda faz kodlu dalgaşekilleri içerisinde Golay kodları, frekans modülasyonlu dalgaşekilleri içerisinde DOFM dalgaşekilleri ön plana çıkmaktadır. Dalga şekillerine ait özilinti fonksiyonlarının yan hüzmeye seviyelerinin düşük olması, farklı menzillerde yer alan hedeflerin ayrıştırılmasını ve tespitini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle radar uygulamalarında kullanılan dalgaşekilleri için düşük yan hüzmeye seviyesi bir gereksinim olarak karşımıza çıkmaktadır [39]. Ancak genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde, 1 MHz bant genişliğine sahip sinyaller kullanılarak, iyonosferik kanalın bu sinyallere verdiği tepki ölçülmektedir. Bant genişliğinin standart iyonosondalarda kullanılan bant genişliklerinden (25 – 50 kHz) büyük olması, özilinti fonksiyonu sonucunda oluşan yan hüzmelerin ana hüzmeye yakın olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla yüksek seviyelerdeki yan hüzmeler, iyonosonda ölçümleri için önemsenmeyecek merteler mertebesinde menzil değerleri içerisinde yer almaktadır. Bu bakımdan yan hüzmeye seviyesinin dalgaşekli seçiminde belirleyici bir parametre olmadığı değerlendirilmektedir.

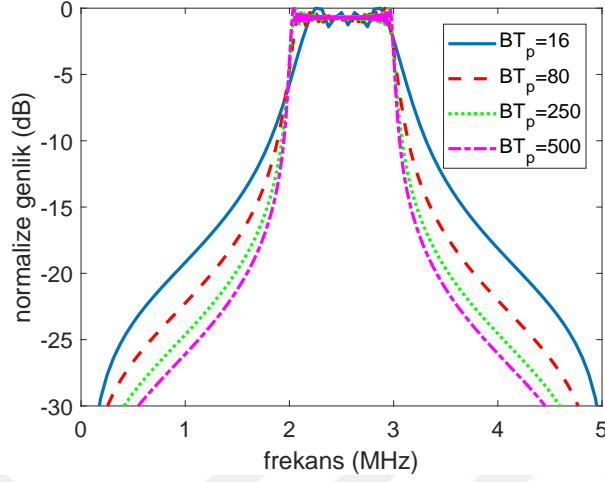
Genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer kriter, kullanılan dalgaşeklinin spektrumudur. Bölüm 4.2.2.2’de de bahsedildiği gibi, kanal kestirimi ile kanalın transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Herhangi bir n bilgi olmadan yapılan transfer fonksiyonu kestiriminde, genişbant iyonosferik kanala ait bütün frekanslar için eşit güç seviyesinde sinyal kullanılması, kanal karakteristiğinin çıkarılması açısından önem arz etmektedir. Böylece kanalda yer alan bütün frekanslar için belirli bir SNR seviyesinin yakalanması garanti edilebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, Bölüm 4.2.3.1’de yer alan faz kodlu dalga şekillerine ait spektrum görüntülerinin, kullanılan darbe şekline bağlı olduğu söylenebilmektedir. Darbe şekillendirme için çeşitli pencere fonksiyonları kullanılmaktadır. şekil 4.33’te farklı pencere fonksiyonlarına ait spektrum görüntüsü verilmiştir. şekilde grldği gibi pencere fonksiyonları ile ana hüzmenin genişliği ve yan hüzmelerin seviyesi ayarlanabilmektedir. Ancak her durumda, spektrumun merkezi daha yüksek güce sahip olmaktadır. Bu nedenle, faz kodlu dalgaşekilleri ile istenen frekans aralığına eşit güçte sinyal oluşturmak mümkün olmamaktadır.



şekil 4.33. Farklı pencere fonksiyonlarına ait spektrum görüntüleri

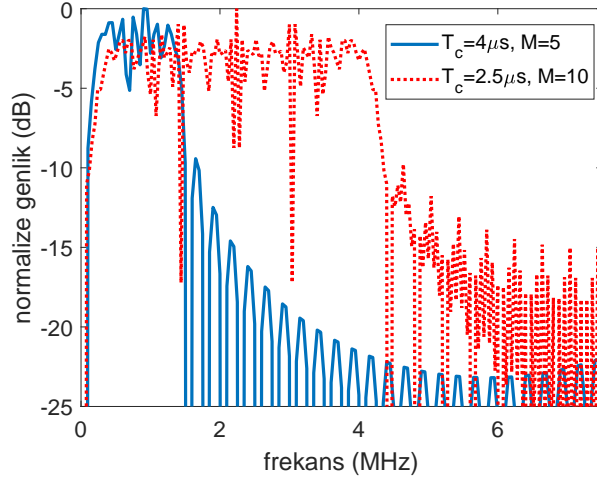
Frekans kodlu dalgaşekilleri içerisinden DFM dalgaşekli ile, bant genişliği (B) ve darbe süresi (T_p) değerlerinin çarpımına (BT_p) bağlı olarak, spektrumda belirlenen bir frekans aralığının eşit güce sahip olması sağlanabilmektedir. şekil 4.34’de farklı BT_p çarpımları ile oluşturulmuş DFM dalga şekillerine ait spektrum görüntüleri verilmiştir.

Şekilde BT_p değeri büyüdükçe sinyalin spektrumunda daha düz bir görünüme sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.34. Farklı BT_p değerleri için DFM dalga şekline ait spektrum görüntüleri

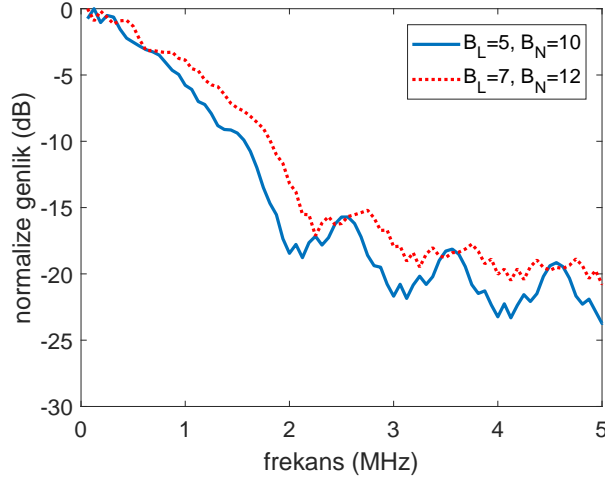
Frekans kodlu dalgaşekilleri içerisindeki bir diğer alternatif de Costas kodlu dalga şekilleridir. Costas kodları çip süresi parametresine (T_c) bağlı olarak oluşturulmaktadır. T_c , her bir frekans bileşeninin süresini ifade etmektedir. $1/T_c$ ile temel bir frekans (f_0) oluşturularak, M kod uzunluğu ve oluşan kod sıralamasına göre sinyal üretilmektedir. Örneğin kod uzunluğu $M = 5$, kod sıralaması $F = \{2, 1, 5, 3, 4\}$ ve çip süresi $T_c = 4\mu s$ için $f_0 = 250$ kHz ve Costas kodu ile oluşturulan frekanslar, $\{500, 250, 1250, 750, 1000\}$ kHz olmaktadır. Şekil 4.35'te $T_c = 4\mu s$ ve $T_c = 2.5\mu s$ için iki farklı dalgaşekli oluşturulmuştur. Bu dalga şekillerine ait temel frekanslar sırasıyla $f_{01} = 250$ kHz ve $f_{02} = 400$ kHz'dir. Dalga şekli için kod uzunlukları $M = 5$ ve $M = 10$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.35. Farklı T_c ve M değerleri için Costas frekans kodlu dalga şekline ait spektrum görüntüleri

Şekil 4.35'te görüldüğü gibi, dalgaşekilleri tarafından kapsanan frekans aralığında eşit güçte sinyal bulunmamaktadır. Bunun nedeni Costas kodlarında frekans bileşenlerinin DFM dalga şekillerindeki gibi sürekli olmayıp, kesikli adımlar şeklinde değişmesidir. Ayrıca Costas kodlu dalgaşekilleri ile istenen frekans aralığında sinyal oluşturmak, T_c ve M parametrelerini uygun seçimine bağlıdır. Bazı durumlarda istenen frekans aralığı için Costas kodları ile sinyal oluşturulamamaktadır. Örneğin $M = 5$ kod uzunluğu ile sadece 4 – 5 MHz aralığını kapsayan bir sinyal oluşturmak mümkün değildir. Çünkü bu durumda temel frekans $f_0 = 4$ MHz olması gerekmektedir. Belirtilen f_0 değeri ile 4 – 5 MHz yerine 4 – 20 MHz ($f_0 \times M = 20$ MHz) frekans aralığı taranmaktadır.

Spektrumda eşit güçte bir frekans bandı oluşturmak için, DOFM dalga şekillerinin de uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Çünkü Bölüm 4.2.3.2.3'te de anlatıldığı gibi, DOFM dalga şekillerinde yan hüzmeye seviyesini ayarlamak için dalga şekline ait spektrum şekillendirilmektedir. Bunun için sinyale ait anlık frekans zaman ilişkisi doğrusal olmayan bir şekilde, Eşitlik 4.58'de verildiği gibi ifade edilmektedir. Eşitlik 4.58'de geçen B_L ve B_N parametrelerinin farklı değerleri için DOFM dalga şekline ait spektrum görüntüleri Şekil 4.36'da verilmiştir.

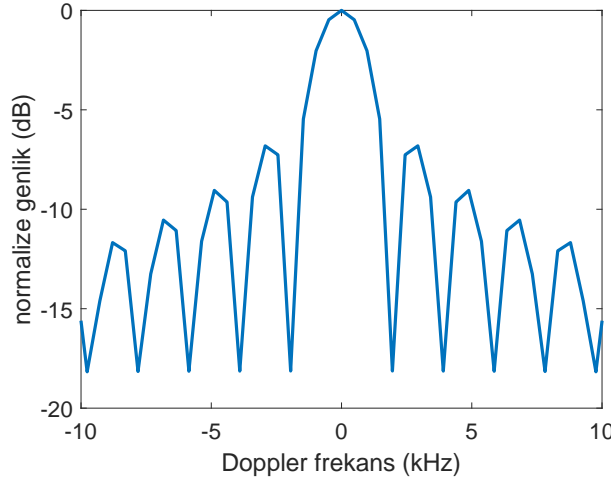


Şekil 4.36. Farklı B_L ve B_N değerleri için DOFM dalga şekline ait spektrum görüntüleri

Şekil 4.36’de merkez frekans etrafında gücün toplandığı görülmektedir. Dolayısıyla istenen frekans aralığı için düz bir spektrum oluşturulamamaktadır. Bunun yanında, Costas frekans kodlarında olduğu gibi DOFM dalga şekillerinde de sadece belirli bir frekans aralığı için sinyal üretmek mümkün olmamaktadır. Çünkü Eşitlik 4.58’de DOFM dalgaşekilleri için anlık frekans zaman ilişkisini veren ifade, sıfır frekansından başlayarak belirli bir frekans değerine kadar tanım yapılmasına imkan vermektedir.

Dalga şekli seçiminde değerlendirilmesi gereken bir diğer parametre, dalga şekillerinin frekans değişimlerine olan dayanıklılıklarıdır. Bölüm 4.2.3’te incelenen dalgaşekilleri için belirsizlik fonksiyonları gecikme $\tau = 0$ kesiti üzerinden, frekans değişimlerine olan tepkileri gösterilmiştir. Eşitlik 4.55’te belirtildiği gibi, gecikme $\tau = 0$ kesiti, sinyalin zarfının karesinin Fourier dönüşümü alınarak hesaplanmaktadır. Bu sebeple sinyalin zarfında bir değişiklik olmadığı sürece, $\tau = 0$ kesitinde bir değişiklik olması beklenmemektedir. Bölüm 4.2.3’te incelenen dalgaşekilleri benzer darbe sürelerine ve dikdörtgen sinyal zarfına sahip olduklarından, belirsizlik fonksiyonu $\tau = 0$ kesiti, bütün dalgaşekilleri için benzer sonucu vermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, 10 kHz’e kadar olan Doppler değişimlerinde, sonucun önemli ölçüde (-0.3 dBc) değişmediği görülmektedir. Ancak incelenen dalga şekillerinin tamamı 1 MHz bant genişliğine sahiptir. Daha küçük bant genişliklerinde, dalga şeklinin Doppler değişimlerinden daha

çok etkilendiği görülmektedir. Şekil 4.37’de, standart iyonosondalarda kullanılan 25 kHz bant genişliğinde Barker kodlu dalgaşekli için elde edilmiş belirsizlik fonksiyonu $\tau = 0$ kesiti verilmiştir. Bant genişliği 1 MHz yerine standart iyonosondalarda olduğu gibi 25 kHz mertebelerine indirildiğinde, 10 kHz mertebelerindeki Doppler değişiminin -15 dBc civarında SNR düşüşüne neden olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, bant genişliği azaldıkça artan çip süresi T_c ’dir. Doppler değişimi ile birlikte sinyalin zarfı da sinüzoidal olarak artıp azaltılmaktadır. Çip süresinin artması durumunda, sinyal zarfından meydana gelen bu değişimler, çip süresi boyunca dalga şeklinin bozulmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla uyumlu filtre çıkışında elde edilen sinyal beklenen seviyelerin altında değerlere sahip olmaktadır.



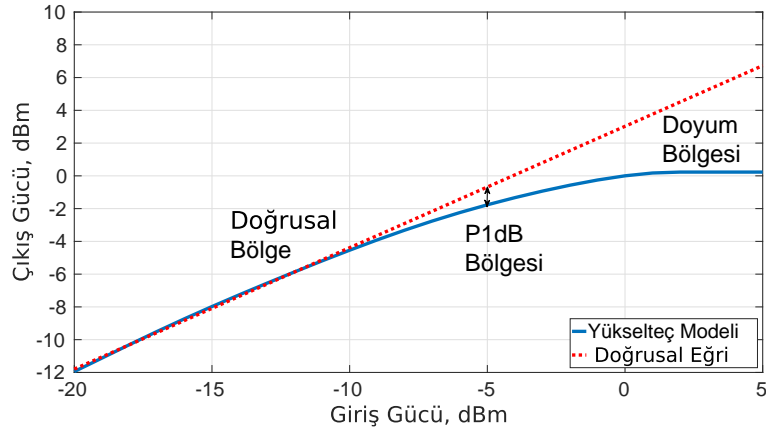
Şekil 4.37. $T_c = 40 \mu s$, Barker-13 kodu için belirsizlik fonksiyonu $\tau = 0$ kesiti

İyonosferik kanallarda Doppler frekansı değişimi tipik olarak 10 Hz’in altında gerçekleşmektedir [111]. Ancak frekans değişimlerinin sebebi sadece kanalda meydana gelen Doppler frekans değişimleri değildir. Özellikle alıcı ve vericinin farklı konumlarda olduğu durumlarda, alıcı ve verici donanımlarından kaynaklanan frekans kaymaları da Doppler frekans kaymasına benzer bir etki yaratmaktadır. Kullanılan donanıma bağlı olarak bu değerler bir kaç kHz mertebelerinde olabilmektedir. Bu nedenle, genişbant iyonosferik kanal kestiriminde Doppler değişimlerine dayanıklı dalga şekillerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu anlamda Bölüm 4.2.3’te incelenen dalgaşekilleri içerisinde, DFM dalgaşekilleri frekans değişimlerine dayanıklı yapıları ile ön plana çıkmaktadır.

Dalga şekilleri için yapılması gereken bir diğer değerlendirme, daha çok pratik uygulama anlamında önemli olan, Crest faktörü değeridir. Bu değer, sinyalin tepe gücünün, ortalama gücüne oranını vermektedir. Crest faktörü

$$CF = \frac{\|x\|_{\infty}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2}} \quad (4.59)$$

ile hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.59'de geçen $\|x\|_{\infty} = \max_i x_i$ olarak ifade edilebilmektedir. Crest faktörü değerinin önemli olmasının sebebi, verici donanımlarının kullanıldığı sistemlerde yer alan güç yükselteçleridir. Güç yükselteçleri için Şekil 4.38'de gösterildiği gibi doğrusal çalışabildikleri belirli bir bölge bulunmaktadır. Bu bölgeden sonra daha yüksek giriş gücü uygulandığında güç yükselteçleri doyum bölgesine ulaşarak, sabit güçte çıkış vermektedir. Güç yükselteçleri doyum bölgesinde kullanıldığında, Şekil 4.38'de verilen karakteristik nedeniyle, giriş sinyallerinin yapılarını bozmaktadır. Bu nedenle, giriş gücü doyum noktasından bir miktar düşük seviyede olacak şekilde çalışılmaktadır. Şekil 4.38'de P1dB noktası pek çok pratik uygulamada en uygun çalışma noktası olarak seçilmektedir [112].



Şekil 4.38. Tipik bir güç yükselteci için giriş-çıkış gücü karakteristiği

Bölüm 4.2.3'te verilen dalgaşekilleri için Crest faktörleri incelenmiştir. Yapılan incelemelerde, dalga şekline bağlı olarak hesaplanan Crest faktörü değeri temel bant CF, taşıyıcı sinyal dahil edildiğinde hesaplanan Crest faktörü değeri RF CF olarak adlandırılmıştır. Faz kodlu dalgaşekilleri için dalga şeklinden çok kullanılan pencere

Çizelge 4.5. Dalga şekillerine ait Crest faktörü değerleri

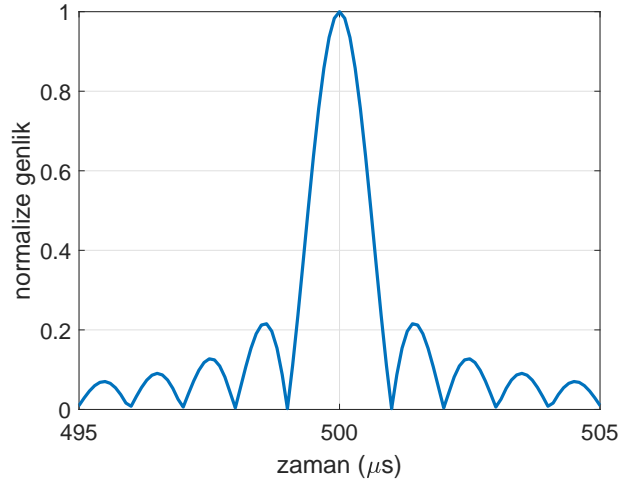
		Temel bant CF (dB)	RF CF (dB)
Faz kodlu dalgaşekilleri	Dikdörtgen	0	3
	Gauss	4.62	7.62
	Hamming	4.21	7.21
	Blackman	5.18	8.18
FM dalgaşekilleri	DFM	-	3
	Costas	-	3
	DOFM	-	3

fonksiyonu, Crest faktörü değerini belirlemektedir. Bu bakımdan bütün faz kodlu dalgaşekilleri için farklı pencere fonksiyonlarına ait Crest faktörü değerleri incelenmiştir.

Çizelge 4.5’de farklı dalgaşekilleri için hesaplanan Crest faktörü değerleri yer almaktadır. Faz kodlu dalgaşekilleri için, kullanılan pencere fonksiyonunun CF değerini değiştirdiği görülmektedir. En düşük CF değerinin dikdörtgen dalga şekline ait olduğu görülmektedir. Ancak pratik uygulamalarda, dikdörtgen pencere fonksiyonunun sebep olduğu yüksek frekanslı bileşenler nedeniyle, bu fonksiyonun kullanımı tercih edilmemektedir [88], [113]. Ayrıca faz kodlu dalgaşekilleri öncelikle temel bantta oluşturulup, bir taşıyıcı ile ilgili frekans bandına taşındığı için temel bant CF ve RF CF değerleri arasında 3 dB fark bulunmaktadır. Frekans modülasyonlu dalgaşekilleri için CF değerlerinin aynı ve 3 dB olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, frekans modülasyonunun sinyalin zarfında bir değişiklik yaratmamasıdır. Bu dalgaşekilleri doğrudan taşıyıcı modülasyonu ile oluşturuldukları için temel bant CF tanımı yapılamamaktadır. Crest faktörü açısından bir değerlendirme yapıldığında, frekans modülasyonlu dalga şekillerinin, faz kodlu dalga şekillerine göre daha avantajlı olduğu söylenebilmektedir.

Sonuç olarak, Bölüm 4.2.3’te yer alan dalgaşekilleri, belirsizlik fonksiyonları, öziliinti özellikleri, Doppler değişimlerine dayanımları, spektrum karakteristikleri ve Crest faktörü değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Bölüm 2’de darbe iyonosonda için verilen darbe genişliği ve darbe tekrarlama periyodu değerlerinin kullanılabilceği öngörülmüştür. Bu bilgiler ışığında, 500 μs darbe genişliği ve 5 ms darbe tekrarlama periyodu ile genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminin gerçekleştirilebileceği değer-

lendirilmektedir. Dalgaşeklinin bantgenişliği 1 MHz olarak seğilmiştir. Bunun nedeni, kullanılan ITS kanal modelinin 1 MHz bantgenişliğine kadar doğrulanmış olmasıdır. $500 \mu s$ ve 1 MHz bantgenişliği ile kullanılacak dalgaşeklinin BT çarpımı 500 olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, Doppler değişimlerine dayanımları, spektrum görüntüleri ve Crest faktörü değeri ile doğrusal frekans modülasyonlu (DFM) sinyallerin genişbant iyonosferik kanal kestirim işlemi için en uygun dalgaşekli olduğu değerlendirilmiştir. DFM sinyaller için negatif bir özellik olan yan hüzme seviyesinin yüksek olması, BT çarpımının 500 gibi yüksek bir değere sahip olması nedeniyle ihmal edilebilmektedir. Çünkü $BT = 500$ durumunda, yan hüzme seviyesi yüksek olsa da, belirtilen yan hüzmeler ana hüzmenin çok yakınında oluşmaktadır. Şekil 4.39'da $BT = 500$ için DFM dalga şekline ait özilinti fonksiyonu verilmiştir. Şekilde, yüksek seviyeli yan hüzme değerlerinin, ana hüzmenin $\pm 5 \mu s$ etrafında olduğu görülmektedir. Bu değerler, ölçülmek istenen katman yüksekliklerine göre oldukça küçük sayılabilecek menzil aralığına karşılık gelmektedir. $\pm 5 \mu s$ için menzilde yapılan hata ± 750 m civarında olmaktadır. Bu genişbant iyonosferik kanal kestirimi için kabul edilebilir düzeyde bir hatadır.



Şekil 4.39. $BT = 500$ için DFM dalga şekline ait özilinti fonksiyonu

4.2.4 Zaman Frekans Analiz Yöntemleri

Bölüm 4.2.2.1'de belirtildiği gibi, iyonosondalar tarafından oluşturulan ve frekansa (elektron yoğunluğuna) bağlı katman yüksekliklerinin yer aldığı iyonogram sonucu,

zaman frekans alanında yapılan analizler ile oluşturulabilmektedir. Bu amaçla incelenen zaman frekans analiz yöntemleri aşağıda verilmiştir.

4.2.4.1 Wigner-Ville Dağılımı

Herhangi bir sinyale ait özilinti fonksiyonu bulunmak istendiğinde,

$$r_{zz}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t)z^*(t + \tau)dt \quad (4.60)$$

ifadesi kullanılmaktadır. Eşitlik 4.60'da özilinti fonksiyonu yalnızca gecikme parametresi olan τ 'ya bağlıdır. Özilinti fonksiyonunun zamana bağlı olarak değiştiği durum anlık özilinti fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır ve

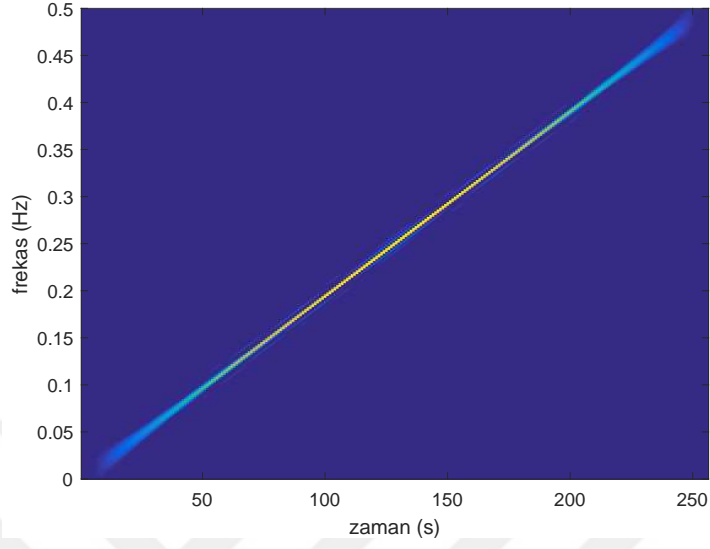
$$R_{zz}(t, \tau) = z\left(t + \frac{\tau}{2}\right)z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \quad (4.61)$$

Eşitlik 4.61'de verilen şekilde ifade edilmektedir. Wigner-Ville Dağılımı (WVD), anlık özilinti fonksiyonunun gecikme parametresi τ 'ya göre Fourier dönüşümü alınarak hesaplanmaktadır. Böylece, zaman frekans alanında sinyal enerjisinin dağılımı elde edilmektedir. WVD,

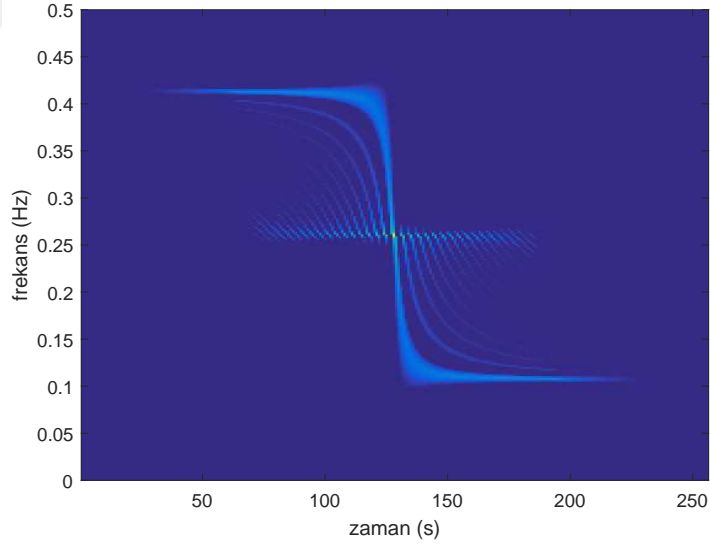
$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right)z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (4.62)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. WVD, doğrusal frekans modülasyonu gibi, genellikle zaman-frekans alanında doğrusal dağılıma sahip sinyallerin analiz edilmesi için kullanılmaktadır. Aynı zaman aralığında birden fazla frekans bileşeni içeren sinyaller olduğu durumda, çapraz terim adı verilen fazladan terimler oluşmaktadır. Çapraz terimler, zaman frekans alanındaki iki noktanın geometrik olarak ortasında meydana gelmektedir. Şekil 4.40'da doğrusal frekans modüleli bir sinyal için WVD sonucu verilmiştir. Zaman ve frekans alanında her bir noktada yalnızca bir sinyal bileşeni bulunduğu için, WVD sonucunda çapraz terimler oluşmamaktadır. Şekil 4.41'de ise, doğrusal olmayan frekans modüleli bir sinyal için WVD sonucu görülmektedir. Beklendiği gibi, zaman

frekans alanında sinyale ait bileşenler olduğu gibi, bu bileşenlere ait çapraz terimler de WVD sonucunda görülmektedir [114].



Şekil 4.40. DFMC dalgışekli için WVD sonucu



Şekil 4.41. DOFM dalgışekli için WVD sonucu

4.2.4.2 Kısa Süreli Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü, zaman alanında tanımlanmış sinyallerin frekans alanına taşınması için kullanılan bir yöntemdir. Bunun için

$$Z(f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.63)$$

ifadesi kullanılmaktadır. Eşitlik 4.63'te integralin sınırları sinyalin zaman alanında tanımlı olduğu aralık tarafından belirlenmektedir. Bu sebeple Fourier dönüşümünün sonucu, sinyalin zaman alanında tanımlı olduğu aralığa bağlı olarak değişmektedir. Fourier dönüşümünün zamana bağımlılığını görmek için sinyalin tanımlı olduğu aralık, daha küçük pencerelere bölünerek, bu aralık içerisinde Fourier dönüşümü alınabilmektedir. Bu amaçla Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) kullanılmaktadır. KSFD,

$$F_z^h(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(\tau)h^*(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.64)$$

ile hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.64'te geçen h , kısa zaman analiz penceresini ifade etmektedir. h pencere fonksiyonu, τ değişkenine bağlı olarak zamanda farklı bölgelerdeki sinyallerin Fourier Dönüşümlerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Pencere fonksiyonunun uzunluğuna bağlı olarak zaman ve frekans eksenlerinde elde edilen çözünürlük değişmektedir. Uzun zaman penceresi seçildiğinde, zaman ekseninde çözünürlük azalırken, frekans eksenindeki çözünürlük artmaktadır. Benzer şekilde kısa zaman penceresi seçildiğinde, frekans çözünürlüğü azalırken zaman çözünürlüğü ise artmaktadır [115].

KSFD, Eşitlik 4.64'ten anlaşılacağı gibi, sinyalin belirli bir pencere içerisindeki Fourier dönüşümünü hesaplamaktadır. WVD'de olduğu gibi sinyalin gücünün zaman frekans alanındaki dağılımını bulmak için KSFD sonucunun mutlak karesi alınmaktadır. Bu ifade spektrogram olarak adlandırılmaktadır ve

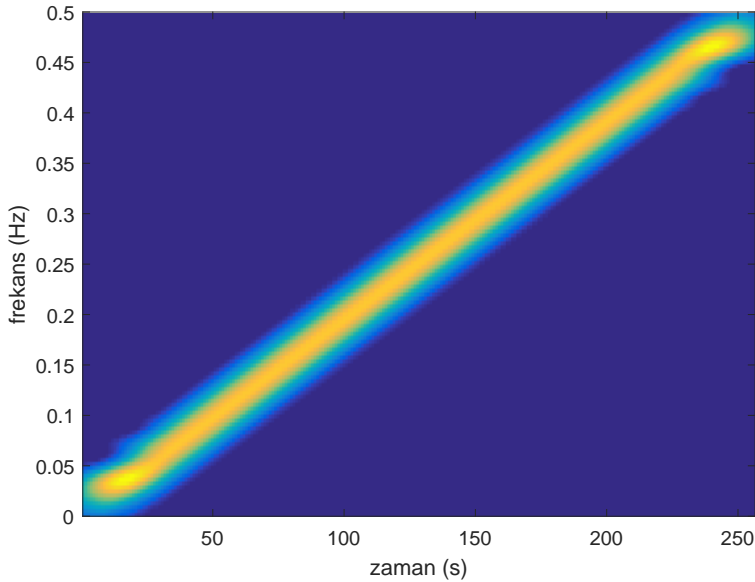
$$S_z^h(t, f) = |F_z^h(t, f)|^2 \quad (4.65)$$

$$= \left| \int_{-\infty}^{\infty} z(\tau) h^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right|^2 \quad (4.66)$$

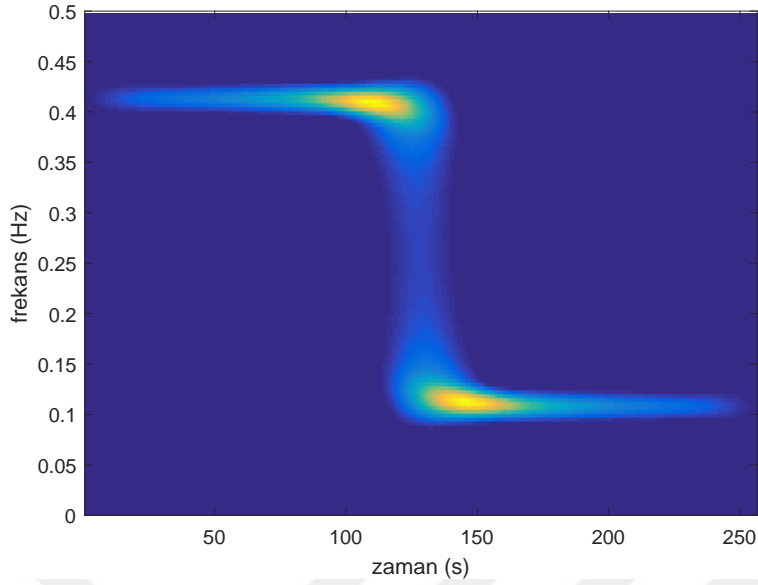
şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.66'da verilen ifade $z(t)$ sinyali ve $h(t)$ analiz pencere fonksiyonlarının Wigner-Ville Dönüşümleri cinsinden yazılmak istendiğinde,

$$S_z^h(t, f) = \iint_{-\infty}^{\infty} W_z(u, v) W_h(t - u, f - v) dudv \quad (4.67)$$

ifadesi elde edilmektedir. Eşitlik 4.67, $W_z(t, f)$ ve $W_h(t, f)$ ifadelerinin zaman ve frekans eksenlerinde iki boyutlu evrişimi olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde, WVD sonucunda oluşan çapraz terimlerin etkisinin, kullanılan analiz pencere fonksiyonu ile bastırılarak azaltıldığı söylenebilmektedir. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de kullanılan örnek sinyaller için spektrogram sonuçları Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te verilmiştir. Her iki şekil karşılaştırıldığında, WVD kullanılarak elde edilen sonucun daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğu, ancak bununla beraber yüksek seviyede çapraz terimlerin oluştuğu görülmektedir. Spektrogram sonucunda ise, pencere fonksiyonu etkisiyle kötüleşen çözünürlükle birlikte çapraz terimlerin etkisinin de azaldığı görülmektedir [114].



Şekil 4.42. DFM dalgaşekli için spektrogram sonucu



Şekil 4.43. DOFM dalgaşekli için spektrogram sonucu

4.2.4.3 Yeniden Atama Yöntemi

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, WVD ve KSFD zaman frekans analiz yöntemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. WVD frekans ve zaman eksenlerinde yüksek çözünürlük sağlarken, çapraz terimler oluşturmaktadır. KSFD ise çapraz terimlerin etkisini azaltırken, zaman ve frekans eksenlerindeki çözünürlük düşmektedir. Bu durumda yaşanan ikilemi gidermek adına, yeniden atama yöntemi geliştirilmiştir [86].

Eşitlik 4.67 incelendiğinde, (t, f) noktasındaki spektrogram değerinin, WVD sonuçlarının $(t - u, f - v)$ aralığındaki ağırlıklı toplamından elde edildiği görülmektedir. Dolayısıyla, $S_z^h(t, f)$ ifadesinin, her bir (t, f) noktasının geometrik merkezindeki enerji dağılımının toplamı olduğu söylenebilmektedir. Yeniden atama yönteminde, $(t - u, f - v)$ aralığının geometrik merkezi yerine, analiz edilen sinyalin anlık frekansı ve lokal grup gecikmesine bağlı olarak, enerji dağılımı hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, $(t - u, f - v)$ aralığının ağırlık merkezine bağlı olarak enerji dağılımı hesaplanmaktadır. Bu amaçla, spektrogram hesabının yapıldığı her (t, f) noktası için aynı zamanda sinyalin lokal

grup gecikmesi ve anlık frekansını ifade eden (\hat{t}, \hat{f}) noktaları hesaplanmaktadır. Hesaplamalar için Eşitlik 4.68 ve 4.69'da verilen ifadeler kullanılmaktadır.

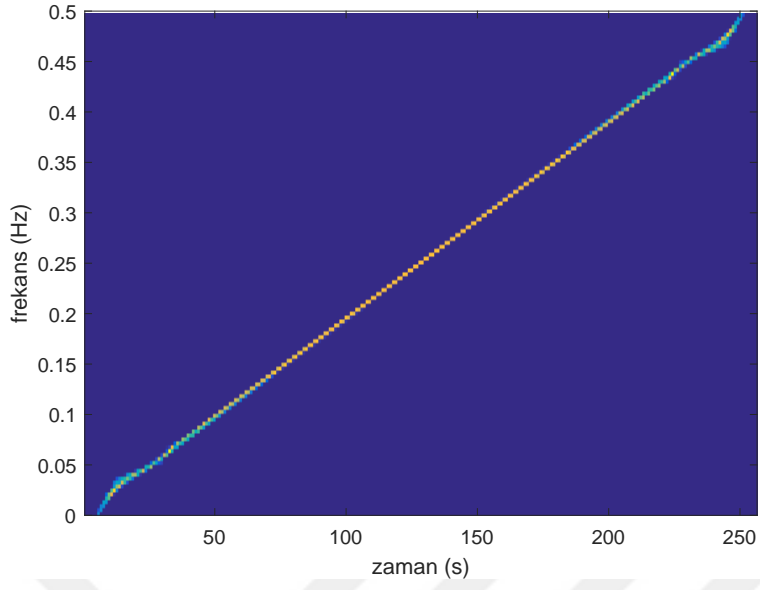
$$\hat{t}_z(t, f) = \frac{1}{S_z^h(t, f)} \iint_{-\infty}^{\infty} u W_z(u, v) W_h(t - u, f - v) dudv \quad (4.68)$$

$$\hat{f}_z(t, f) = \frac{1}{S_z^h(t, f)} \iint_{-\infty}^{\infty} v W_z(u, v) W_h(t - u, f - v) dudv \quad (4.69)$$

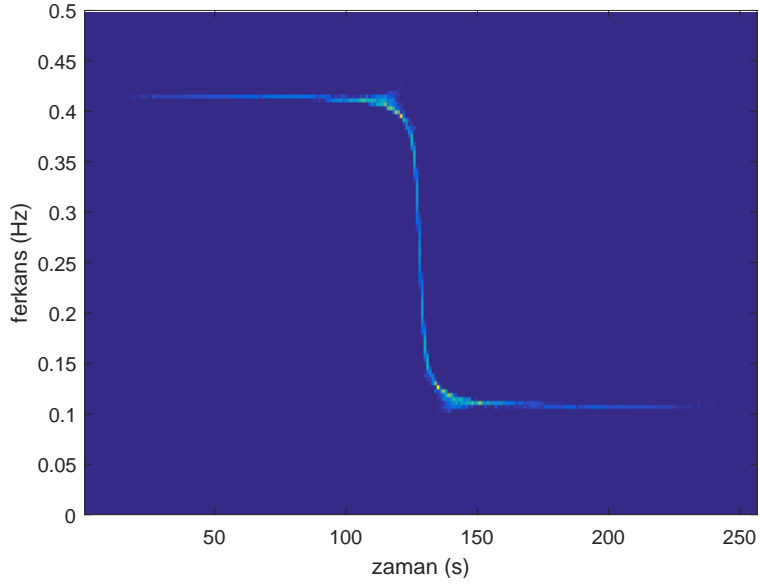
Eşitliklerde geçen $\hat{t}_z(t, f)$ lokal grup gecikmesini, $\hat{f}_z(t, f)$ ise anlık frekansı ifade etmektedir. Bu değerler hesaplandıktan sonra, spektrogram değeri Eşitlik 4.70'de verilen ifade ile (t, f) noktasından (\hat{t}, \hat{f}) noktasına taşınmaktadır. Böylece yeniden atama yöntemi ile spektrogram hesabı yapılabilir.

$$RS_z^h(t, f) = \iint_{-\infty}^{\infty} S_z^h(u, v) \delta(t - \hat{t}_z(u, v)) \delta(f - \hat{f}_z(u, v)) dudv \quad (4.70)$$

WVD ve KSFD yöntemlerinde kullanılan örnek sinyaller için yeniden atama yöntemi ile elde edilmiş spektrogram sonuçları Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te verilmiştir. Doğrusal frekans modüleli sinyal için elde edilen ve Şekil 4.44'te verilen yeniden atanmış spektrogram sonucu incelendiğinde, Şekil 4.42'de düşük çözünürlükle elde edilmiş spektrogram sonucunun, sinyalin ağırlık merkezi baz alınarak, çözünürlüğünün artırılmış olduğu görülmektedir. Benzer bir sonuç, doğrusal olmayan Şekil 4.45'te verilen ikinci sonuçta da görülmektedir. WVD sonucunda çapraz terimlerle birlikte elde edilen yüksek çözünürlük, yeniden atanmış spektrogram ile çapraz terimlerin etkisi olmadan elde edilmektedir.



Şekil 4.44. DFM dalgışekli için yeniden atama analiz sonucu



Şekil 4.45. DOFM dalgışekli için yeniden atama analiz sonucu

Yeniden atama yöntemi ile ilgili vurgulanması gereken nokta, spektrogram sonucunda elde edilen ve zaman-frekans alanında sunulan bilginin, sinyalin anlık frekans ve lokal grup gecikmeleri bilgileri kullanılarak, görsel bir iyileştirme yapıldığıdır. Sonuçta

Çizelge 4.6. Zaman frekans analiz yöntemleri karşılaştırma

	Çözünürlük	Çapraz Terim	Sinyal Ayırt Etme
Wigner-Ville Dağılımı	Yüksek	Var	Kötü (çapraz terim)
Spektrogram	Düşük	Yok	Kötü (düşük çözünürlük)
Yeniden Atanmış Spektrogram	Yüksek	Yok	İyi

spektrogram sonucunda yer almayan bir bilginin, yeniden atama yöntemi ile oluşturulması mümkün değildir. Bu sebeple yeniden atama yöntemi daha çok zaman frekans alanındaki sinyallerin daha kolay ayırt edilmesini sağlamaları sebebiyle tercih edilmektedir [114], [115].

Yukarıda yapılan değerlendirmeler sonucunda, Wigner-Ville Dağılımı, Spektrogram ve yeniden atanmış spektrogram yöntemlerinin öne çıkan özellikleri Çizelge 4.6’da özetlenmiştir.

4.3 Benzetim Çalışmaları ve Yorumlar

Geniş bant iyonosferik kanal kestirim (GBİKK) işlemi için gerçekleştirilen benzetim çalışmaları üç grup altında toplanmaktadır. Birinci grupta, Bölüm 4.2.3.3 dalga şeklinin, Bölüm 4.2.4’de ise zaman frekans analiz yönteminin belirlenmesi için yapılan tartışmanın, iyonosonda sonuçlarına etkisi açısından bir değerlendirme yapılmıştır. İkinci grupta, mevcut darbantlı iyonosonda dalgaşekilleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, GBİKK yöntemi ile elde edilen sonuçlarla farklı SNR koşullarında karşılaştırılmıştır. Üçüncü grupta ise, GBİKK işlemi ile elde edilen iyonogram izleri ile iyonosonda ölçüm sonuçları karşılaştırılarak, yöntemler ve elde edilen sonuçlar arasındaki farklar üzerinde durulmuştur.

Yapılan benzetim çalışmalarında dalgaşekilleri için kullanılan parametreler Çizelge 4.7’de verilmiştir. GBİKK işleminde Bölüm 2.2.2.1’de bahsedilen darbe iyonosonda yaklaşımı kullanılacağından, darbe süresi $T_p \leq 600 \mu s$ olacak şekilde parametre seçimi gerçekleştirilmiştir. Zaman frekans analizi için kullanılan WVD, Spektrogram ve yeniden atama spektrogram yöntemleri için pencere boyu $w_L = 488 \mu s$, örtüşme miktarı $w_O = 473 \mu s$, ve FFT nokta sayısı $N_{FFT} = 8192$ olarak alınmıştır.

Çizelge 4.7. Kullanılan dalgaşekilleri ve parametreleri

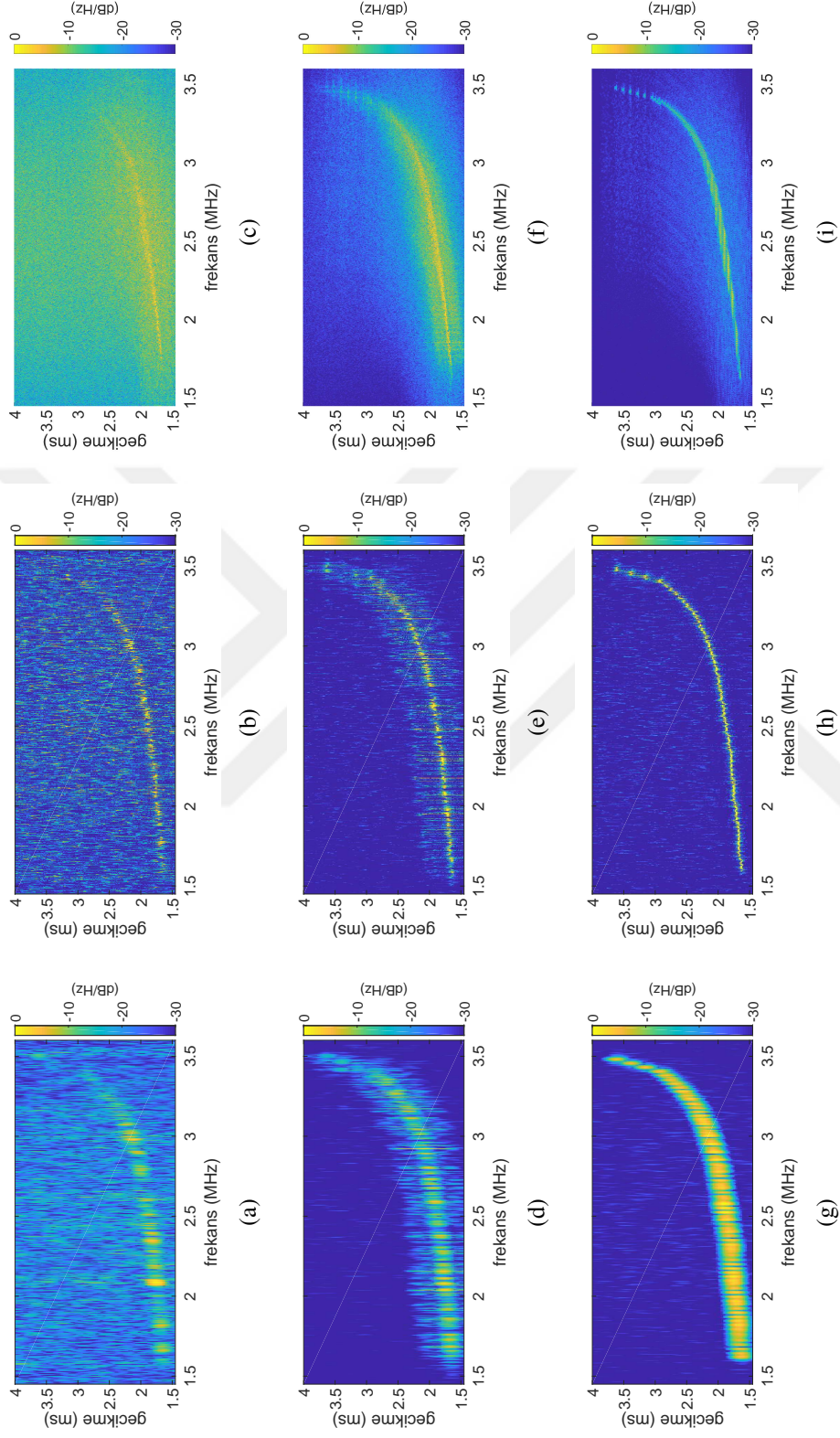
Dalgışekli	Parametreler	Açıklamalar
Barker	13 bit, $T_c = 1 \mu s$	T_c : Çip süresi
M-Dizisi	511 bit, $T_c = 1 \mu s$	T_c : Çip süresi
Golay	512 bit (2 dizi), $T_c = 1 \mu s$	T_c : Çip süresi
DFM	$T_p = 500 \mu s$ $B = 1 \text{ MHz}$	T_p : Darbe süresi B : Bantgenişliği
Costas	$T_p = 400 \mu s$ $f_0 = 100 \text{ kHz}$ $M = 40$	T_p : Darbe süresi f_0 : Costas kodu temel frekans M : Costas kodu bit sayısı
DOFM	$T_p = 480 \mu s$ $B_L = 280$ $B_N = 480$	T_p : Darbe süresi B_L : Doğrusal bileşen katsayısı B_N : Doğrusal olmayan bileşen katsayısı

Genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde kullanılan kanal katsayılarının oluşturulması için iyonosonda ölçüm sonuçlarından yararlanılmıştır. İyonosonda ölçüm sonuçlarına, SAO Explorer yazılımı kullanılarak DIDBase veri tabanı üzerinden erişilmiştir. Aynı yazılım kullanılarak, iyonosonda tarafından alınan sanal yükseklik ölçümlerinin yaklaşık ortalama değerini veren, sanal yükseklik izi verisine ulaşılabilmektedir. Bu veri, frekansa bağlı olarak değişen sanal yükseklik bilgisini içeren bir fonksiyondur. Bu fonksiyon, Şekil 4.2’de verilen doğrusal parçalara ayırma yöntemi ile altbantlara ayrılarak, Eşitlik 4.1’de verilen ITS kanal katsayıları hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.7’de belirtilen parametreler ve yukarıdaki paragrafta anlatılan kanal oluşturma yöntemi ile SNR= 10 dB, Doppler kayması $f_D = 2 \text{ Hz}$, Doppler yayılması $\sigma_D = 1 \text{ Hz}$ ve gecikme yayılması $\sigma_\tau = 60 \mu s$ olan genişbant kanal için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan dalgaşekillerinin ve analiz yöntemlerinin sonuçlara etkisini gözlemleyebilmek için Bölüm 4.2.2.2’de anlatılan zaman frekans maskesi ile gürültü azaltma işlemi bu bölümde yer alan sonuçlarda kullanılmamıştır. Faz kodlu dalgaşekilleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.46, frekans modülasyonlu dalgaşekilleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.47’de verilmiştir.

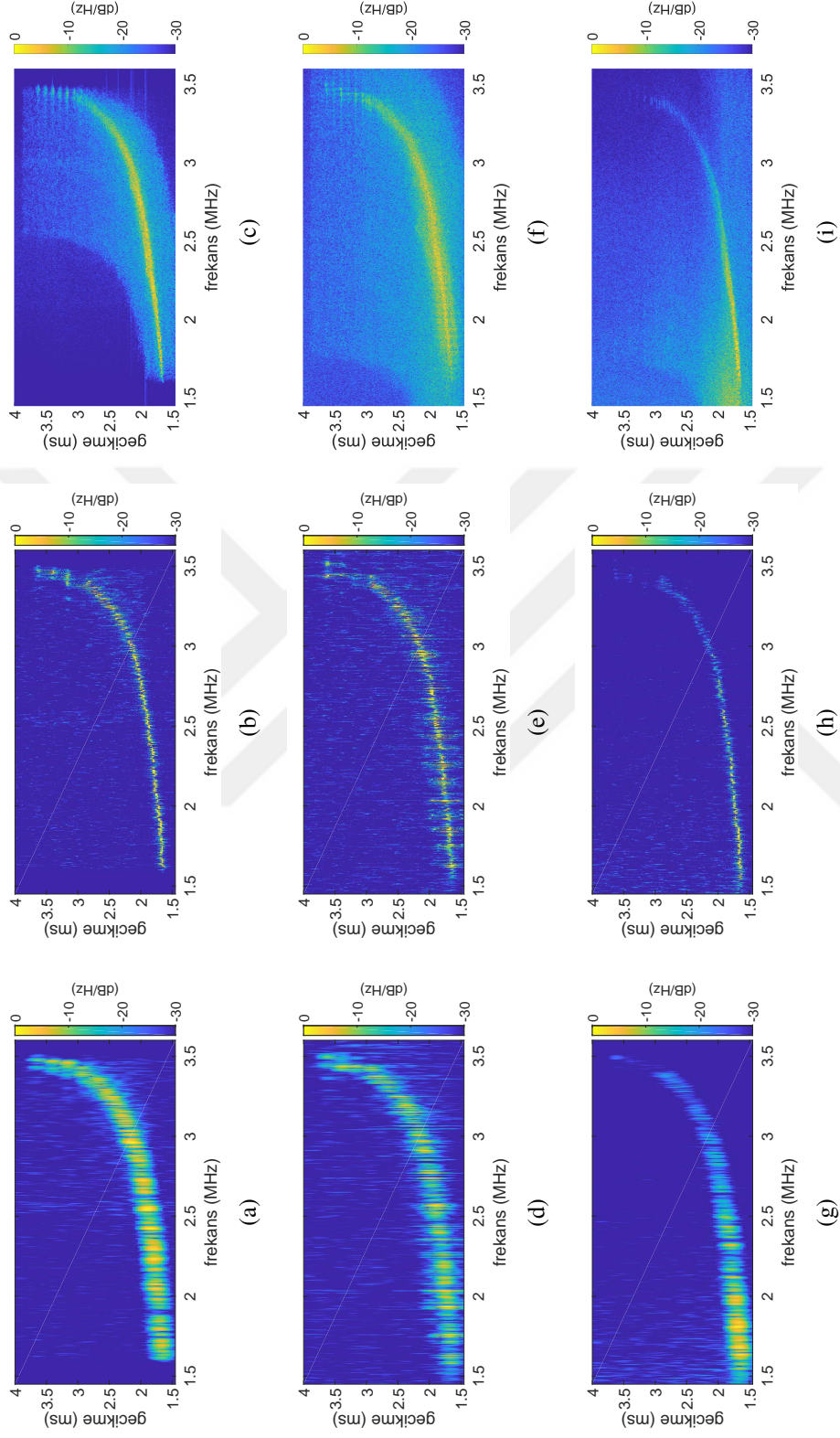
Şekil 4.46’da Barker-13, M-Dizisi-511 ve Golay-512 faz kodlu dalga şekilleri için, WVD, spektrogram ve yeniden atanmış spektrogram analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen iyonogram sonuçları görülmektedir. Şekil 4.46-(a), (b) ve (c)’de Barker-13

kodu kullanılarak elde edilen sonuçların, diğer sonuçlara kıyasla daha düşük SNR ile elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni, Barker-13 dalgaseklinin kod uzunluğunun sınırlı olmasıdır. Sonuç üretmek istenen 1 MHz bant genişliği için çip süresi $T_c = 1 \mu s$ ve darbe süresi $T_p = 13 \mu s$ olmaktadır. Dolayısıyla yaklaşık 510 μs darbe süresine sahip diğer kodlara göre daha düşük kazanç sağlanmaktadır. Şekil 4.46-(d), (e) ve (f)'de ise M-Dizisi-511 kodu ile oluşturulan sonuçlar görülmektedir. Şekil 4.46-(d) incelendiğinde, M-Dizisinin yüksek yan hüzmeye seviyeleri nedeniyle oluşan etki gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.46-(e)'de yeniden atama yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlarda, yan hüzmeye seviyesinde bir miktar iyileşme olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, yeniden atama yönteminin kullanılan zaman frekans penceresi içerisinde, sinyalin enerjisinin yoğun olduğu bölgeleri ortaya çıkarması, yani pencere içerisinde sinyalin ağırlık merkezini bulmasıdır. Şekil 4.46-(f)'de ise WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç görülmektedir. Yüksek yan hüzmeye seviyelerinin etkisi bu sonuçta da gözlemlenebilmektedir. Faz kodlu dalga şekilleri için geçerli olan ve Şekil 4.33'te verilen spektrum görüntüsü nedeniyle, WVD sonucunda özellikle başlangıç ve bitiş frekanslarında sinyal gücünün merkez frekansa göre düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.46-(g)'de Golay-512 kodu ile oluşturulan sonuç görülmektedir. Golay kodu özellikle düşük Doppler kaymasına sahip kanallarda, düşük yan hüzmeye özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Bu durum iyonogram sonuçlarında da gözlemlenmektedir. Doppler kayması $f_D = 2$ Hz, Doppler yayılması $\sigma_D = 1$ Hz değerlerine sahip kanalda yapılan benzetim çalışmalarında, yan hüzmeye seviyesinin oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Şekil 4.46-(h)'de yeniden atama yöntemi ile çözünürlüğün arttığı ve sinyalin daha kolay ayırt edildiği görülmektedir. Şekil 4.46-(i)'de WVD yöntemi ile elde edilen sonuçlarda, yan hüzmeye seviyelerinin düşüklüğüne rağmen, çapraz terimler nedeniyle oluşan istenmeyen bileşenler olduğu gözlemlenmektedir. WVD sonucunda oluşan çapraz terimler, zaman frekans düzleminde yer alan sinyallerin geometrik olarak orta noktasında olduğu için, WVD ile elde edilen sonuçlarda, iyonogram izine ait şeklin önemli olduğu söylenilmektedir. Sonuç olarak faz kodlu dalga şekilleri arasında yapılan değerlendirmeye göre, dalgasekilleri içerisinde Golay-512 kodlarının, analiz yöntemleri içerisinde yeniden atama ve WVD yöntemlerinin öne çıktığı söylenebilmektedir.



Şekil 4.46. Barker-13 dizisi ile (a) Spektrogram, (b) Yeniden Atanmış Spektrogram, (c) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. M-Dizisi-511 ile (d) Spektrogram, (e) Yeniden Atanmış Spektrogram, (f) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. Golay-512 dizi çifti ile (g) Spektrogram, (h) Yeniden Atanmış Spektrogram, (i) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar.

Frekans modülasyonlu dalgaşekilleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.47’de verilmiştir. Şekil 4.47-(a), (b) ve (c)’de DFM dalgaşekli kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yeniden atama ve WVD sonuçlarının yüksek çözünürlüğe sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, DFM dalga şekillerinin spektrumda kapladıkları bölgede düz bir görünüme sahip olması nedeniyle, WVD sonucunda tüm frekans bandı boyunca sinyal gücünün eşit olduğu görülmektedir. Şekil 4.47-(d)’de Costas kodlu dalgaşekli kullanıldığı durumda, frekansa bağlı olarak farklı güç seviyelerinde sonuç alındığı gözlemlenmektedir. Çünkü Costas kodlu dalgaşekline ait spektrum, DFM dalgaşekli spektrumuna kıyasla frekansta daha değişken bir yapıya sahiptir. Şekil 4.47-(a) ve Şekil 4.47-(d) sonuçları karşılaştırıldığında bu durum daha net anlaşılmaktadır. Şekil 4.47-(e)’de yeniden atama yönteminin sinyalin ağırlık merkezine odaklanması, Costas kodlu ve DFM dalgaşekillerine ait sonuçları, güç seviyeleri anlamında birbirine yaklaştırmıştır. Ancak, Costas kodu dalgaşeklinin yüksek yan hüzmeye seviyesi nedeniyle, DFM dalgaşekline göre iyonogram izlerinin ayrıştırılması anlamında daha kötü performansa sahip olduğu söylenebilmektedir. Şekil 4.47-(f)’de WVD yönteminin, yan hüzmeler ve iyonogram izi nedeniyle oluşturduğu çapraz terimlerin, iyonogram izinin ayırt edilmesinin güçleştirdiği görülmektedir. Şekil 4.47-(g)’de DOFM dalgaşekli ile elde edilen sonuç incelendiğinde, DOFM dalgaşekline ait spektrum nedeniyle, bazı frekans bölgelerinde düşük güçte iyonogram izlerinin oluştuğu söylenebilmektedir. Şekil 4.47-(h)’de yeniden atama, Şekil 4.47-(i)’de WVD yöntemleri ile sonuçların çözünürlüğü ve ayırt edicilik arttırılsada, bütün frekans değerleri için belirli bir güç seviyesinin tutturulamadığı görülmektedir. Sonuç olarak frekans modülasyonlu dalga şekilleri arasında yapılan değerlendirmeye göre, dalgaşekilleri içerisinde DFM, analiz yöntemleri içerisinde yeniden atama ve WVD yöntemlerinin öne çıktığı söylenebilmektedir.



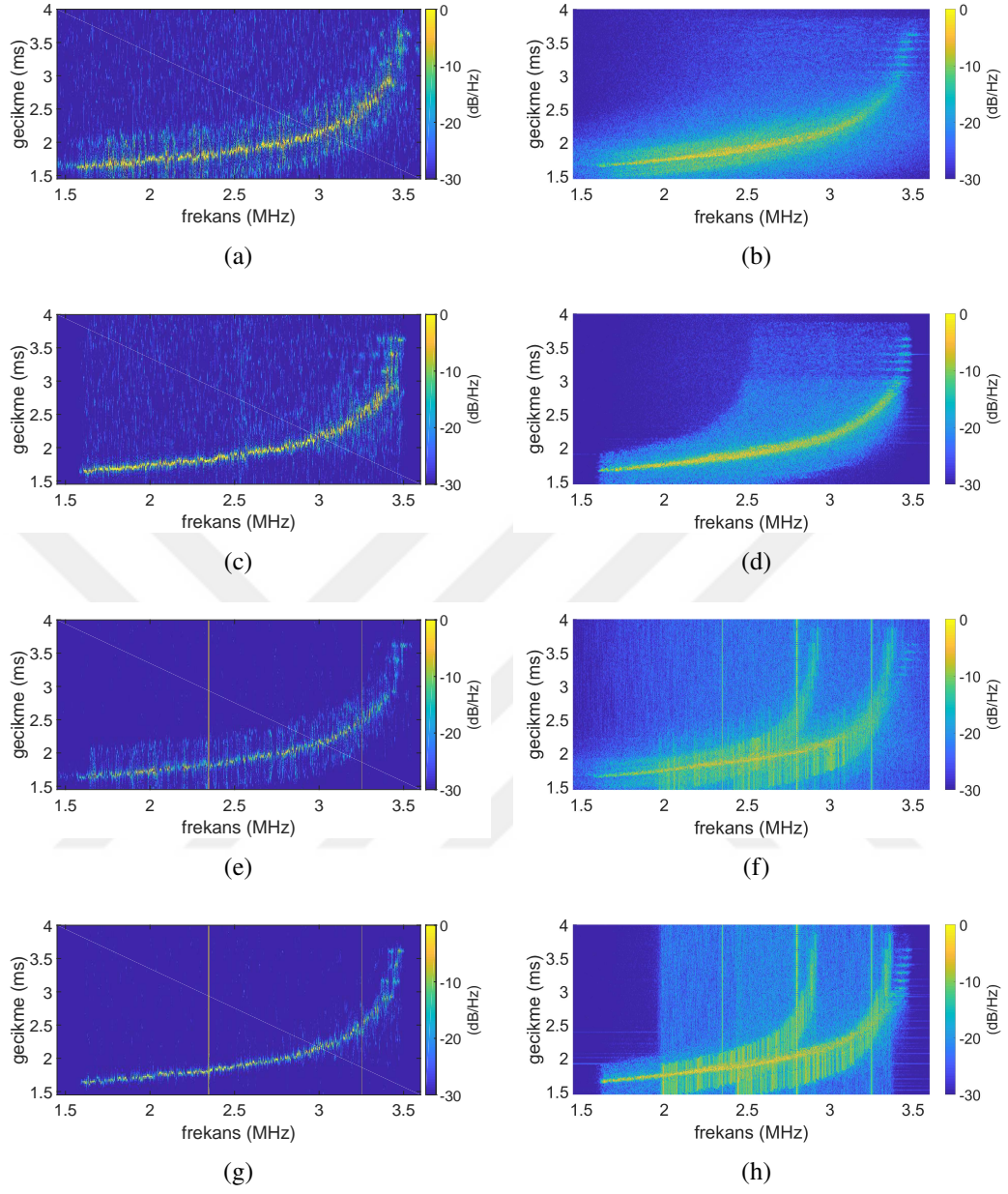
Şekil 4.47. DFM dalgışekli ile (a) Spektrogram, (b) Yeniden Atanmış Spektrogram, (c) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. Costas kodlu dalgışekli ile (d) Spektrogram, (e) Yeniden Atanmış Spektrogram, (f) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar. DOFM dalgışekli ile (g) Spektrogram, (h) Yeniden Atanmış Spektrogram, (i) WVD yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar.

Bu değerlendirmelerin ardından, faz kodlu dalga Şekilleri içerisinden Golay-512, frekans kodlu dalgaşekilleri içerisinden DFM kullanılarak, yüksek Doppler kayması ve girişim sinyali durumunda, yeniden atama ve WVD analiz yöntemleri ile elde edilen iyonogram sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, SNR= 10 dB, Doppler kayması $f_D = 100$ Hz, Doppler yayılması $\sigma_D = 50$ Hz ve gecikme yayılması $\sigma_\tau = 60 \mu s$ olarak kanal parametreleri belirlenmiştir. İyonosferik koşullara bağlı olarak gerçekleşen Doppler kaymaları tipik olarak ± 10 Hz mertebelerindedir. Ancak alıcı-verici donanımlarından kaynaklanan frekans hatalarının da dahil edildiği durumda 100 Hz mertebelerinde hataların olası olduğu bilinmektedir. Örneğin 10 MHz saat frekansına ve ± 10 ppm saat kararlılığına sahip bir osilatör, bu değerlerle oluşturduğu bir frekans için 100 Hz hata yapmaktadır.

Yukarıdaki paragrafta belirtilen kanal koşulları ve dalgaşekilleri için yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları Şekil 4.48’de verilmiştir. Şekil 4.48-(a)’da Golay-512 kodu ve yeniden atama yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç görülmektedir. Golay kodları Bölüm 4.2.3.1.3’te bahsedildiği gibi Doppler kaymalarına duyarlı kodlar olarak bilinmektedir. Şekil 4.48-(a)’da verilen sonuçta da Doppler kayması nedeniyle, yan hüzme seviyelerinin arttığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.48-(b)’de ise WVD yöntemi ile elde edilen sonuçlarda, artan yan hüzme seviyesi nedeniyle çapraz terimlerden gelen etkilerin de arttığı söylenebilmektedir. Şekil 4.48-(c)’de aynı koşullarda DFM dalga Şekli ve yeniden atama yöntemi kullanılarak oluşturulan sonuç görülmektedir. Şekilde Doppler kaymasının, Golay kodlarında olduğu gibi bir etki yaratmadığı gözlemlenmiŐtir. Bölüm 4.2.3.2.1’de DFM dalgaşekillerinin frekans değişimlerine dayanaklı oldukları belirsizlik fonksiyonu üzerinden gösterilmiştir. Şekil 4.48-(c)’de elde edilen sonucun bu anlamda tutarlı olduğu söylenebilmektedir. Şekil 4.48-(d)’de WVD yönteminin kullanıldığı durumda, Golay kodlara kıyasla daha düşük seviyelerdeki yan hüzmelerin daha az çapraz terim yarattığı görülmektedir. Şekil 4.48-(e), (f), (g) ve (h)’de, KD bandında sıklıkla rastlanan darbant yüksek güçlü girişim sinyallerinin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4.48-(e) ve (f)’de verilen sonuçlarda Golay ve DFM dalgaşekilleri ile yeniden atama yöntemi kullanıldığı durumda, girişim sinyali ve iyonogram izlerinin kolaylıkla birbirinden ayırt edilebildiği görülmektedir. Şekil 4.48-(f) ve (h)’de ise

WVD yöntemi kullanıldığı durumda, girişim sinyali nedeniyle oluşan çapraz terimler ve iyonogram izi üzerindeki etkileri görülmektedir. Bu durumda iyonogram izinin net bir şekilde ayrıştırılmadığı gözlemlenmektedir.

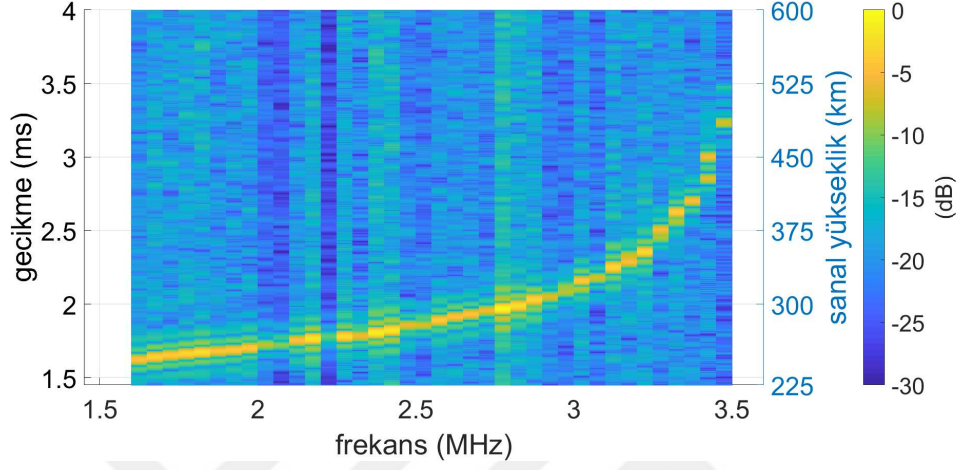
Benzetim çalışmalarının birinci bölümünde yapılan çalışmalarda, Barker, M-Dizisi, Golay, DFM, Costas ve DOFM dalgaşekilleri ile spektrogram, yeniden atanmış spektrogram ve WVD yöntemleri farklı koşullar altında iyonogram sonuçları üzerinden karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, istenilen uzunlukta darbe süresi için üretilebilmeleri, Doppler değişimlerine dayanıklılıkları ve istenilen frekans bandında eşit güçte sinyal oluşturabilmeleri nedeniyle DFM dalgaşeklinin GBİKK işlemi için kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Analiz yöntemleri içindense, yüksek çözünürlük, sinyal ayırt edicilik özellikleri ve çapraz terim oluşturmaması sebebiyle yeniden atanmış spektrogram yönteminin uygun olduğu değerlendirilmektedir.



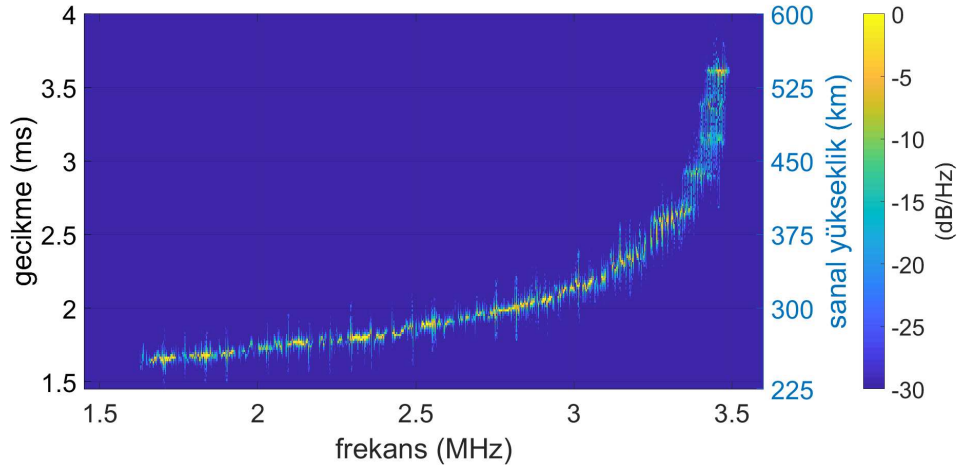
Şekil 4.48. Yüksek Doppler kayması altında, Golay-512 dizisi ve (a) yeniden atama yöntemi, (b) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç. Yüksek Doppler kayması altında, DFM dalgaşekli ve (c) yeniden atama yöntemi, (d) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç. Girişim sinyali ve yüksek Doppler kayması altında, Golay-512 dizisi ve (e) yeniden atama yöntemi, (f) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç. Girişim sinyali ve yüksek Doppler kayması altında, DFM dalgaşekli ve (g) yeniden atama yöntemi, (h) WVD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç.

Benzetim çalışmalarının ikinci bölümünde, mevcut darbantlı iyonosonda dalgaşekli ve parametreleri ile benzetimler gerçekleştirilmiş ve GBİKK yöntemi ile farklı SNR koşulları altında karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bölümde yer alan sonuçlarda, Bölüm 4.2.2.2’de anlatılan gürültü azaltma amaçlı zaman frekans maskesi kullanılmıştır. Buna göre öncelikle zaman frekans düzleminde belirli bir eşik değerinin üzerindeki noktalar kapsanacak şekilde maske oluşturulmuş ve oluşturulan maske ile gürültü azaltma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4.2.2.4’de AİK eğrileri kullanılarak, 10 dB SNR değeri için $P_d = 0.8$ ve $P_{fa} = 10^{-4}$ değerleri ile iyonogram sonuçlarının oluşturulabileceği gösterilmiştir. Buna bağlı olarak, 10 dB SNR değeri ile anlık 25 kHz bant genişliğine sahip klasik darbantlı bir iyonosonda için benzetim yapılmıştır. Dalga şekli Barker-13, çip süresi $T_c = 40 \mu s$ ve darbe süresi $T_p = 520 \mu s$ parametreleri kullanılmıştır. Bu parametreler DPS-4D iyonosondasına ait darbant dalgaşeklinin parametreleridir [38]. Elde edilen iyonogram izi Şekil 4.49-(a)’da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, $P_d = 0.8$ olması nedeniyle pek çok nokta için tespit yapılabildiği görülmektedir. Aynı kanal için, 10 dB SNR değeriyle genişbant iyonosferik kanal kestirim yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç Şekil 4.49-(b)’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, darbant iyonosonda sonuçlarına benzer iyonogram izinin oluştuğu, ancak katman yansımalarının olduğu noktalar haricinde daha düşük seviyede gürültü olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde, kanal kestirimi öncesinde uygulanan gürültü azaltma işlemidir. Genişbant iyonosferik kanal tepkisi, zaman frekans düzleminde cıvıltı sinyaline benzer şekilde belirli bir örüntü izlemektedir. Bu nedenle, zaman frekans analizi sonucunda kanal tepkisi belirli bir bölgede toplanarak, zaman frekans düzleminde yayılan gürültü sinyalinden ayırt edilebilmektedir. Bu sayede, belirli bir eşik seviyesinin üzerindeki sinyalleri kapsayacak şekilde oluşturulan zaman frekans maskesi ile gürültü sinyalleri bastırılmakta ve kanal tepkisi düşük gürültü ile elde edilmektedir.



(a) SNR=10 dB, darbant iyonosonda sonucu

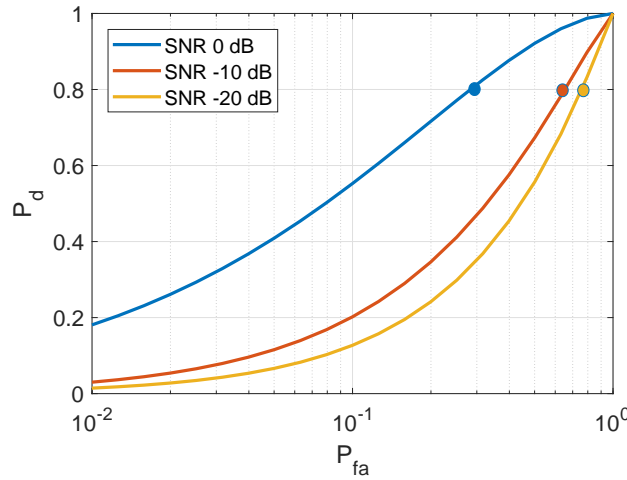


(b) SNR=10 dB, GBİKK sonucu

Şekil 4.49. Darbant iyonosonda ve GBİKK yöntemlerinin benzetim ortamında karşılaştırılması

Bölüm 4.2.2.4'te yapılan analizlere göre genişbant iyonosferik kanal kestirim işlemi için gereken çıkış gücü $P_t = 20$ W olarak hesaplanmıştır. Buna göre 1 MHz bant genişliğine sahip GBİKK ve 25 kHz bantgenişliğine sahip darbant iyonosonda yöntemleri, alıcıda 10 dB SNR oluşturdukları çıkış gücü seviyeleri açısından karşılaştırıldığında, bantgenişlikleri arasındaki oran nedeniyle, darbant iyonosonda yönteminde 500 mW civarında çıkış gücünün kullanılabilceği görülmektedir. Ancak pratikte kullanılan darbant iyonosondalar 100 – 600 W mertebelerinde çıkış güçlerine sahiptir. Bunun nedeni, KD spektrumunda yer alan yüksek güçlü darbant yayınlarıdır. İyonosondalar, bu yayınlardan etkilenmemek için çıkış güçlerini yüksek seviyelerde tutmaktadır. GBİKK yöntemi darbantlı girişim sinyallerine karşı daha dayanıklıdır. Çünkü GBİKK yönteminde kullanılan dalgaşeklinin BT çarpımı $BT = 500$ iken, darbant dalgaşekli $BT = 13$ değerine sahiptir. Alıcıdaki işlem kazançları arasında $500/13 = 38$ oranı bulunmaktadır. Bu oran sayesinde GBİKK yönteminin, alıcıda yüksek güçlü darbantlı girişim sinyallerine karşı daha dayanıklı olduğu söylenebilmektedir.

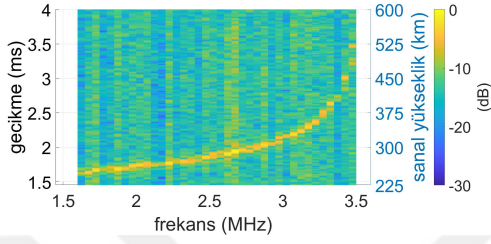
Şekil 4.51'de 0, -10 ve -20 dB SNR değerleri için klasik darbant iyonosonda tekniği ve GBİKK teknikleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Belirtilen SNR değerleri için oluşturulan AİK eğrileri Şekil 4.50'de görülmektedir.



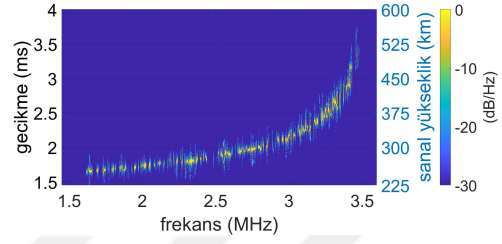
Şekil 4.50. Düşük SNR seviyeleri için oluşturulan AİK eğrileri

0 dB SNR için çizilen AİK eğrisinde, 0.3 yanlış alarm (P_{fa}) ve 0.8 tespit olasılığı

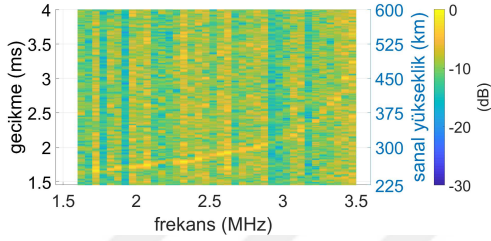
(P_d) ile çalışılan nokta mavi ile gösterilmiştir. Bu değerler baz alınarak, Şekil 4.51’de 0 dB SNR için her iki yöntemle de iyonogram izi oluşturulabilmektedir. GBİKK ile elde edilen sonuçlarda, zaman frekans maskesi kullanılarak yapılan gürültü azaltma işleminin etkisi görülmektedir. İyonogram izlerinin darbant sonuçlara benzer şekilde oluşturulduğu söylenebilmektedir. SNR seviyesi -10 dB’ye düşürüldüğünde, AİK eğrilerinde kırmızı ile gösterilen noktada, $P_d = 0.8$ değeri için yanlış alarm olasılığı $P_{fa} = 0.65$ seviyelerine çıkmaktadır. Bu değerler, yapılan tespitlerin yarıdan fazlasının yanlış alarm olduğunu göstermektedir. Şekil 4.51’de -10 dB SNR için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, darbant iyonosonda tekniğinde, gürültü etkisiyle iyonogram izinin ayırt edilmesi güçleştiği söylenebilmektedir. GBİKK yönteminde ise, hem iyonosferik kanal tepkisinin zaman frekans düzleminde belirli bir bölgede yoğunlaşması hem de gürültü azaltmak için kullanılan zaman frekans maskesi etkisiyle daha net sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Son olarak -20 dB SNR için çizilen AİK eğrisinde yer alan sarı noktada, $P_d = 0.8$ değeri $P_{fa} = 0.75$ civarında yanlış alarm ile elde edilmektedir. Tespit ve yanlış alarm olasılıkları yaklaşık olarak birbirine eşittir. Bu durum tespit yapılamadığı anlamına gelmektedir. Çünkü yaklaşık olarak eşit olasılıklara sahip P_{fa} ve P_d değerleri, yapılan tespitin doğru ya da yanlış olduğu hakkında bir fikir vermemektedir. Şekil 4.51’de darbant iyonosonda tekniği ile -20 dB SNR için elde edilen sonuçlar, bu görüşü doğrulamaktadır. Sonuçta anlamlı bir iyonogram izinin oluşturulamadığı görülmektedir. GBİKK yönteminde ise, kullanılan zaman frekans maskesi, yüksek gürültü seviyesi nedeniyle işlevini tam olarak yerine getiremese de, iyonogram izinin gürültü içerisinden seçilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla darbant iyonosonda tekniği ve genişbant iyonosferik kanal kestirim teknikleri için Gauss gürültüsü altında düşük SNR seviyesine sahip kanallar için yapılan karşılaştırma sonucunda, GBİKK yönteminin düşük SNR durumlarında iyonogram izi oluşturmak için daha elverişli bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Bu anlamda her iki yöntemin, KD bandına özgü gürültü özelliklerinin bulunduğu kanal koşulları altında karşılaştırılmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir [116].



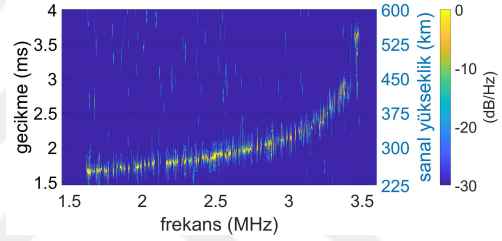
(a) Dar bant SNR=0 dB



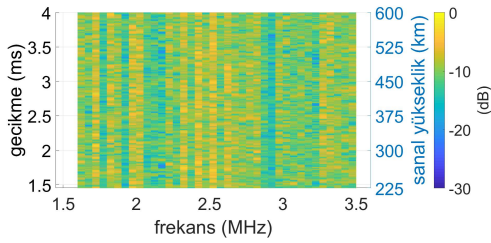
(b) Geniş bant SNR=0 dB



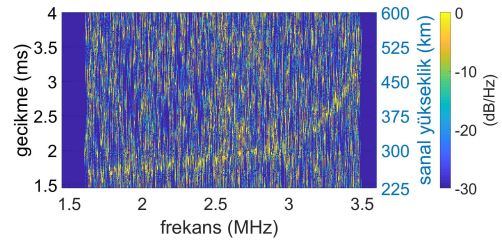
(c) Dar bant SNR=-10 dB



(d) Geniş bant SNR=-10 dB



(e) Dar bant SNR=-20 dB



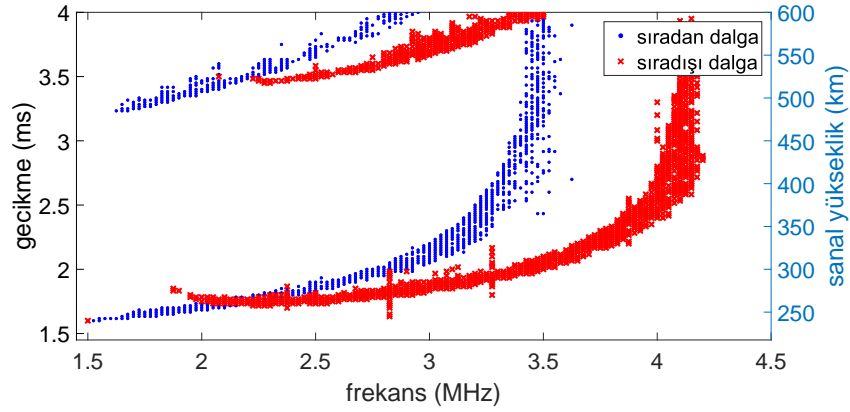
(f) Geniş bant SNR=-20 dB

Şekil 4.51. Düşük SNR seviyelerinde darbant ve genişbant yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Benzetim çalışmalarının üçüncü bölümünde, gerçek iyonosonda ölçüm sonuçları ve GBİKK işlemi kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.52’de Avrupa’da yer alan Pruhonice istasyonu tarafından 08 Ocak 2017 23.30UT tarihinde alınan ölçüm sonucu görülmektedir. Şekilde, sıradan ve sıradışı dalgalar için alınan sonuçlar birlikte verilmiştir. Pruhonice istasyonunda yer alan DPS-4D iyonosondası, radar ile benzer prensipte çalışmakta ve bant genişliği yaklaşık 30 kHz olan Barker veya Golay kodunu kullanmaktadır [113]. Tipik bir radar uygulaması için menzil çözünürlüğü,

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \quad (4.71)$$

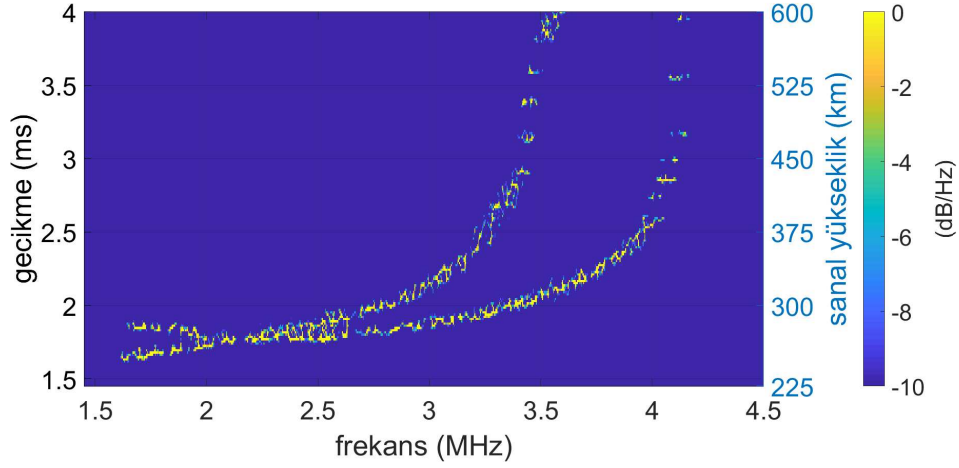
şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlikte geçen c ışık hızı, B bant genişliği için kullanılmaktadır. Eşitlik 4.71 kullanılarak, Şekil 4.52’de verilen sonuçların, 5 km menzil çözünürlüğüne sahip olduğu söylenebilmektedir. Radar terminolojisinde menzil çözünürlüğü, iki hedefin birbirinden ayrıştırılabildiği en küçük mesafe olarak tanımlanmaktadır. Ancak iyonosondalar için menzil çözünürlüğünü, sonuçların raporlanabildiği en küçük mesafe olarak tanımlamak daha doğrudur. Çünkü, Bölüm 4.2.2.3’te anlatıldığı gibi iyonosferde yer alan katmanlar iç içe geçmiş ve keskin sınırlarla birbirlerinden ayrılmayan dağıntık hedeflerdir. Bu tür hedefler için hedef tanımı Bölüm 4.2.2.3’te verilen şekilde menzil çözünürlüğü kullanılarak yapılmaktadır. Her bir menzil hücresi bir hedef olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla iyonosondalar için menzil çözünürlüğü farklı hedeflerin birbirinden ayrıştırılabildiği aralığı değil, dağıntık halde iyonosferde yer alan katmanlara ait sanal yükseklik bilgilerinin raporlandığı aralığı ifade etmektedir.



Şekil 4.52. 08 Ocak 2017 23:30 UT tarihinde Pruhonice istasyonundan alınan dikey iyonosonda ölçümü

Şekil 4.52’de sıradan ve sıradışı dalgalar için verilen sanal yükseklik bilgileri 5 km aralıklarla raporlanmıştır. Ancak, her bir frekans için dikey ekseninde $70 - 200 \mu s$ (10 – 30 km) aralığında değişen sonuçlar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, sınırları belirli olmayan iyonosferik katmanlardır. Katmanlara ait sanal yükseklik bilgisi 10 – 30 km aralığında bir doğrulukla oluşturulmaktadır. Bu bakımdan, iyonosondalar için önemli olan bir diğer parametre menzil doğruluğudur. Menzil çözünürlüğü, hedef için ölçülen değerlerin çözünürlüğünü verse de bu değerlerin doğruluğu hakkında fikir vermemektedir. Tipik bir radar uygulamasında menzil doğruluğunu ölçmek mümkün olmamaktadır. Ancak gerçek değerlerin menzil hücreleri içerisinde olduğu söylenebilmektedir. İyonosondalarda ise, bir frekansta tespit yapılan birden çok menzil hücreleri olduğundan, bu menzil hücrelerinin tamamının yer aldığı aralık gerçek menzil değerinin olduğu bölgeyi tarif etmektedir.

Şekil 4.52’de yaklaşık 2.25 MHz frekansında sıradan ve sıradışı dalgalara ait sonuçların kesiştiği, dolayısıyla iki farklı hedeften yansıma olduğu görülmektedir. Bu noktada iki farklı hedef olduğu düşünülebilir ancak sıradan ve sıradışı dalgalar farklı polarizasyonlara sahip olduklarından, iyonosonda alıcı antenleri vasıtasıyla farklı polarizasyona sahip sinyaller ayrıştırılmaktadır.

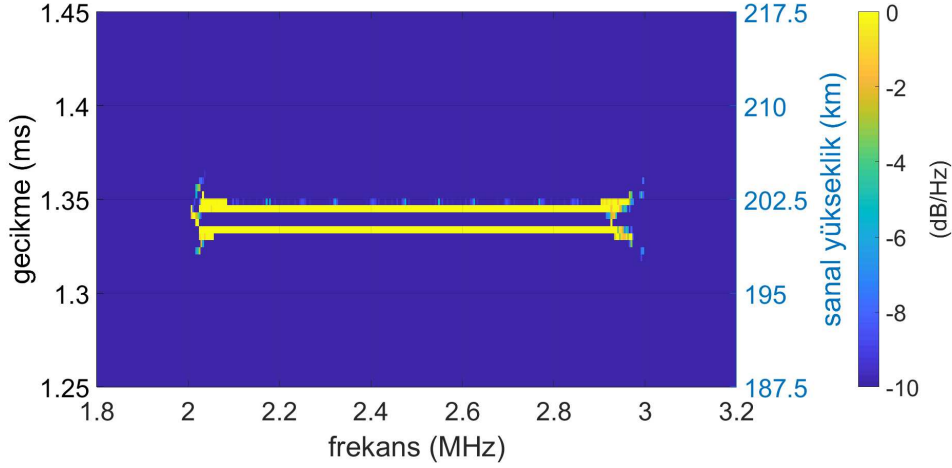


Şekil 4.53. 08 Ocak 2017 23:30 UT tarihinde Pruhonice istasyonu için genişbant iyonosferik kanal kestirimi ile elde edilen sonuç

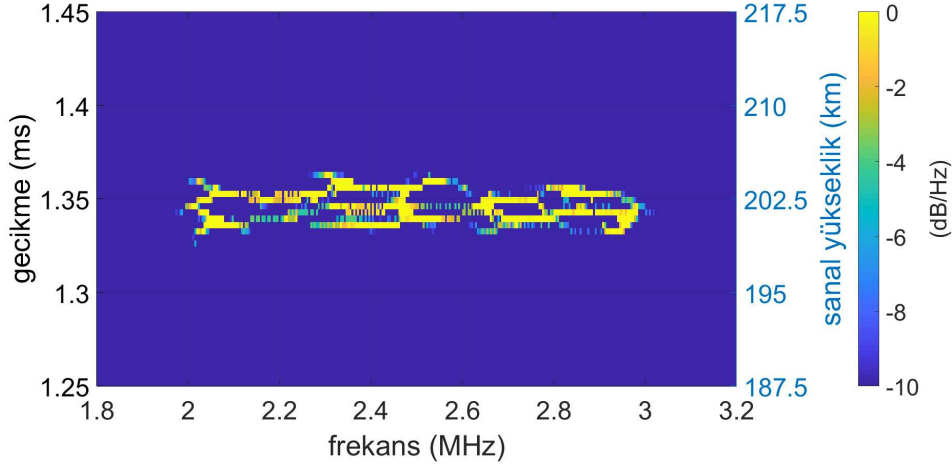
Şekil 4.53'te 08 Ocak 2017 23:30 UT tarihinde Pruhonice istasyonu için GBİKK yöntemi kullanılarak elde edilen ionogram görüntüsü verilmiştir. Şekil üzerinde sıradan ve sıradışı dalgalar birlikte gösterilmiştir. Sıradan dalgalar için 3.5 MHz, sıradışı dalgalar için 4.1 MHz civarında oluşan kesikli ölçüm sonuçlarının sebebi, ITS kanal modelini oluşturmak için yapılan alt bantlara ayırma işlemidir. Genişbant iyonosferik kanal kestirimi kullanılarak yapılan gerçek bir ölçümde bu tür bir sonucun oluşması beklenmemektedir.

Şekil 4.53'te verilen sonuçların $50 - 100 \mu s$ ($7.5 - 15$ km) aralığında değişimlerle elde edildiği görülmektedir. Bu durumun oluşmasının nedeni, gerçek iyonosonda ölçümlerinde de gözlenen, iyonosferik katman sınırlarının belirli olmamasından kaynaklanan yayılmadır. Bu durum benzetim ortamına, ITS kanal modelinde yer alan gecikme yayılması σ_τ parametresi ile aktarılmaktadır. Benzetim çalışmalarında $\sigma_\tau = 60 \mu s$ olarak alınmıştır. Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te verilen sonuçları menzil doğruluğu anlamında birbirleri ile karşılaştırmak doğru değildir. Çünkü Şekil 4.52'de darbantlı bir iyonosonda ile gerçek iyonosferik koşullar altında alınan bir ölçüm varken, Şekil 4.53'te iyonosferik koşullar belirli parametreler kullanılarak benzetim ortamına aktarılmıştır. Burada vurgulanmak istenen, iyonosferik koşullara bağlı olarak değişen gecikme yayılması parametresinin, menzil doğruluğu ve çözünürlüğü üzerindeki etkisidir. Bu

durumu daha net anlamak için Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te gecikme yayılmasının olmadığı ve olduğu durumlarda aralarında 2 km mesafe bulunan katmanlar için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, gecikme yayılmasının olmadığı durumda, katmanlar arası mesafe küçük olmasına rağmen GBİKK yöntemi ile hedefler ayrı ayrı tespit edilebilmektedir. Şekil 4.55'te ise gecikme yayılması $\sigma_\tau = 10 \mu s$ olduğu durumda katmanların birbirinden ayırtılamadığı görülmektedir. Bu açıdan bir değerlendirme yapıldığında, GBİKK yöntemi kullanılarak, düşük gecikme yayılmasının görüldüğü iyonosferik şartlarda, yüksek çözünürlüklü sonuçlar oluşturulabileceği söylenebilmektedir. Darbant iyonosonda yönteminde ise iyonosferik koşullar gereği gecikme yayılımı düşük olsa dahi, kullanılan bantgenişliği nedeniyle, 5 km'nin altında menzil çözünürlüğü elde edilememektedir.



Şekil 4.54. Gecikme yayılması $\sigma_\tau = 0 \mu s$ iken aralarında 2 km mesafe bulunan katmanlara ait sonuç

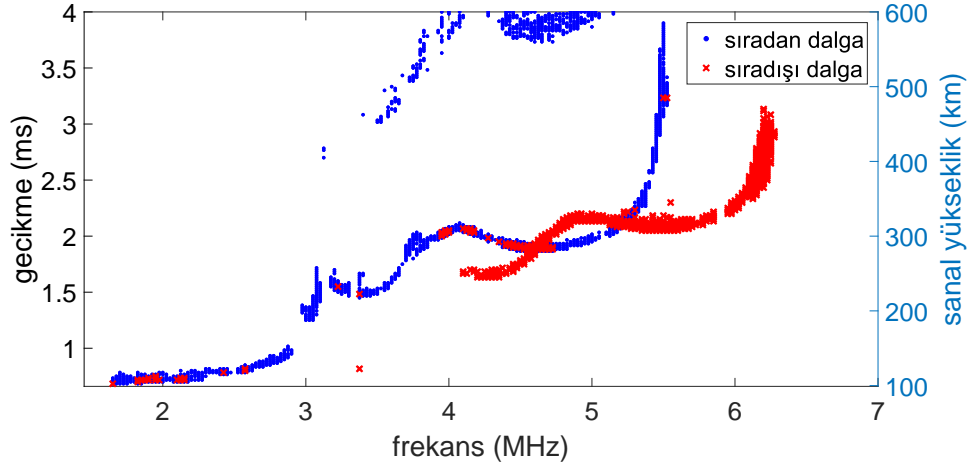


Şekil 4.55. Gecikme yayılması $\sigma_{\tau} = 10 \mu s$ iken aralarında 2 km mesafe bulunan katmanlara ait sonuç

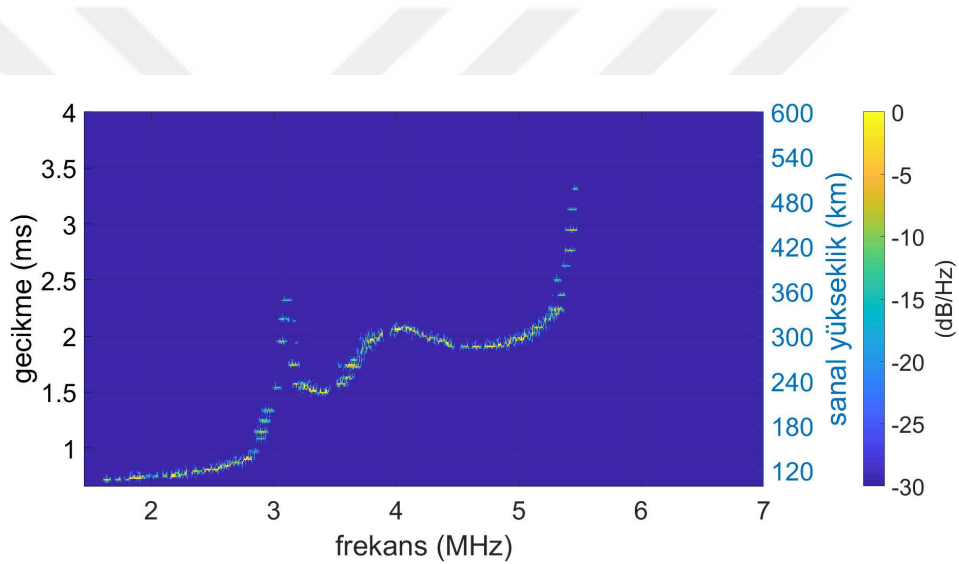
Şekil 4.52’de verilen ionogram sonucu, gece saatlerinde iyonosfer katmanlarının durumunu göstermektedir. Gece saatlerinde, güneş etkisinin azalması nedeniyle iyon yoğunlukları düşmekte, D katmanı kaybolmakta, E katmanı elektron yoğunluğu düşmekte, F1 ve F2 katmanları birleşerek tek bir F katmanı şeklinde görülmektedir [31].

Şekil 4.56’de Amerika Millstone Hill istasyonundan 01 Nisan 1996 19:34 UT tarihinde alınan ölçüm sonucu görülmektedir. Belirtilen saatler Amerika kıtasında, iyonlaşmanın en yüksek olduğu öğle saatlerine karşılık gelmektedir. Bu nedenle ionogram ölçümü üzerinde bütün iyonosferik katmanlar net olarak görülebilmektedir.

Belirtilen özelliklere sahip bir ionogram için GBİKK işlemi ile oluşturulan ionogram görüntüsü Şekil 4.57’de verilmiştir. Şekilde katmanlara ait kritik frekansların olduğu bölgelerde oluşan asimtotlar kesikli çizgiler şeklinde görülmektedir. Bunun nedeni ITS kanal modeli oluşturulurken yapılan altbantlara ayırma işlemidir. Şekil 4.57’de sıradan dalgalar için gerçekleştirilen genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde, ölçüm sonuçlarına benzer sonuçların elde edilebildiği ve E, F1 ve F2 katmanlarının net bir şekilde ayrıştırılabildiği görülmektedir.



Şekil 4.56. 01 Nisan 1996 19:34 UT tarihinde Millstone Hill istasyonundan alınan dikey iyonosonda ölçümü



Şekil 4.57. 01 Nisan 1996 19:34 UT tarihinde Millstone Hill istasyon ölçümü için genişbant iyonosferik kanal kestirimi ile elde edilen sonuç

Klasik darbant iyonosonda ve genişbant iyonosferik kanal kestirim teknikleri ile yapılan bir diğer karşılaştırma da iyonogram oluşturma süreleri ile ilgilidir. Dar bantlı iyonosondalar yaklaşık 300 W çıkış gücü ve 30 kHz anlık bant genişliğiyle belirlenen bir frekans aralığını taramaktadır. Ayrıca darbe birleştirme tekniğini kullanarak alıcıda SNR seviyesini yükseltmek istedikleri için her bir frekansta belirli bir süre geçirmektedir. SAO Explorer kullanılarak, darbant iyonosondalar için iyonogram oluşturulma sürelerine ulaşılabilmektedir.

Çizelge 4.8’de farklı zaman dilimlerinde farklı iyonosonda istasyonlarından alınmış 13 adet iyonosonda verisi yer almaktadır. Sonuçlarda son üç veri, eğik modda alınmış süre bilgisini göstermektedir. t_{NB} ve t_{WB} ayrı ayrı, darbant ve genişbant iyonosferik kanal kestirim tekniği için iyonogram oluşturma sürelerini ifade etmektedir. t_{NB} ve frekans aralığı değerlerine SAO Explorer yazılımı üzerinden erişilmiştir. t_{WB} değerinin hesaplanması için, darbe tekrarlama periyodunun 5 ms olduğu ve iyonogram izi oluşturulurken kullanılan zaman frekans analiz işlemlerinin gerçek zamanlı olarak yapılabildiği varsayılmıştır. t_{NB} ve t_{WB} süre hesaplamaları,

$$t_{NB} = PRI \times M \times K_{NB} \quad (4.72)$$

$$t_{WB} = PRI \times K_{WB} \quad (4.73)$$

eşitlikleri ile yapılabilmektedir. Eşitliklerde geçen M darbant iyonosonda tekniğinde darbe birleştirme işleminde kullanılan darbe sayısını, K_{NB} taranan frekans sayısını ifade etmektedir. K_{WB} ise genişbant iyonosferik kanal kestirim işleminde taranan frekans sayısını göstermektedir ve kullanılan bantgenişliği nedeniyle $K_{WB} < K_{NB}$ olmaktadır.

Darbant iyonosonda tekniği için iyonogram oluşturma süreleri incelendiğinde, moddan bağımsız olarak, frekans aralığı ve t_{NB} arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Ancak 3 ve 4 nolu sonuçlarda olduğu gibi, frekans aralığı küçük olmasına rağmen, iyonogram oluşturma sürelerinin daha büyük olduğu durumlar olabilmektedir. Bunun nedeni, kullanılan frekans adımlarının (Δf) ve darbe birleştirme işleminde kullanılan darbe sayısının değişken olmasıdır. Çizelge 4.8’de sunulan sonuçların oluşturulması için kullanılan DPS-4D iyonosondasında, frekans adımı (Δf) 25 kHz veya 50 kHz olarak seçilebilmekte, darbe toplama işlemi için 1 – 128 arasında bir değer belirlenebilmektedir [38]. Dolayısıyla frekans aralığı, frekans adımı ve darbe birleştirme sayısı parametrelerine bağlı olarak t_{NB} iyonogram oluşturma süresi hesaplanabilmektedir. Genişbant iyonosferik kanal kestirim tekniğinde ise bantgenişliği 1 MHz olduğu için frekans adımları 1 MHz aralıklarla belirlenmiştir. İyonogram izleri, darbe tekrarlama periyodu 5 ms olan ve her biri 1 MHz anlık bantgenişliklerinden oluşan dalgaşekilleriyle

Çizelge 4.8. Klasik darbant iyonosonda ve genişbant iyonosferik kanal kestirim yöntemleri için iyonogram oluşturma süreleri

No	Mod	Frekans Aralığı (MHz)	t_{NB} (sn)	E_{NB} (kJ)	t_{WB} (sn)	E_{WB} (J)
1	Dikey	[1 – 4.2]	40.4	1.292	0.020	0.042
2	Dikey	[1.5 – 8]	79	2.526	0.035	0.074
3	Dikey	[1 – 14]	83.2	2.660	0.065	0.138
4	Dikey	[1 – 10]	230.4	7.368	0.045	0.095
5	Dikey	[1 – 14]	166.4	5.321	0.065	0.138
6	Dikey	[1 – 15]	358.4	11.461	0.070	0.149
7	Dikey	[1 – 15]	179.2	5.730	0.070	0.149
8	Dikey	[1 – 10]	110.4	3.530	0.045	0.095
9	Dikey	[1.5 – 15]	170.4	5.449	0.070	0.149
10	Dikey	[1 – 7]	76.8	2.456	0.030	0.064
11	Eğik	[2 – 14]	307.2	9.824	0.060	0.127
12	Eğik	[1 – 10]	115.2	3.684	0.045	0.095
13	Eğik	[1.5 – 8]	83.2	2.660	0.035	0.074

elde edilmektedir. Dolayısıyla, sonuç üretilmek istenen her 1 MHz için 5 ms süre harcanmaktadır. Çizelge 4.8’de belirtilen sürelerde havaya basılan enerjileri hesaplamak için,

$$E_{NB} = \frac{P_{t_{NB}} \tau_p t_{NB}}{PRI} \quad (4.74)$$

$$E_{WB} = \frac{P_{t_{WB}} \tau_p t_{NB}}{PRI} \quad (4.75)$$

ifadeleri kullanılabilir. Eşitlikte geçen E_{NB} darbant, E_{WB} genişbant yöntemlerde iyonogram oluşturmak için kullanılan enerjiyi ifade etmektedir. Her iki yöntemde de benzer darbe süresi $\tau_p = 533 \mu s$ değeri kullanılmıştır. Çıkış güçlerinin $P_{t_{NB}} = 300$ W ve $P_{t_{WB}} = 20$ W olduğu varsayılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, genişbant iyonosferik kanal kestirim tekniği ile 20 – 70 ms aralığında, 0.2 J değerinin altında enerji kullanarak iyonogram izlerinin oluşturulabildiği görülmektedir. Zamana bağlı olarak değişken yapıda olan iyonosfer tabakasının belirtilen süreler içerisinde izlenebilmesi önemlidir. Özellikle iyonosferik fırtınalı günlerde kısa zaman dilimleri içerisinde oluşan değişikliklerin, genişbant iyonosferik kanal kestirim tekniğini kullanılarak takip edilebileceği değerlendirilmektedir.

4.4 Sonuç

Tezin bu bölümünde, ionosondaların temel çıktısı olan ionogram verisi, genişbant ionosferik kanal olarak ele alınmış ve zaman frekans analiz yöntemi ile genişbant ionosferik kanal kestiriminin yapılabildiği gösterilmiştir. Önerilen yöntem kullanılarak, gece ve gündüz saatlerine ait ionogram izleri oluşturulmuş ve ölçümler ile benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Geniş bantlı dalgaşekilleri, ITS kanal modeli ve zaman frekans analiz yöntemlerinin bir arada kullanılması ile oluşturulan altyapıda verici dalgaşekli olarak DFM dalgaşekilleri kullanılmıştır. Farklı özelliklere sahip dalgaşekilleri incelenmiş, spektral karakteristikleri ve frekans değişimlerine olan dayanıklılıkları sebebiyle DFM dalgaşekli tercih edilmiştir. Genişbant ionosferik kanal kestirim işleminde kullanılan bantgenişliği 1 MHz olarak belirlenmiştir. Belirtilen bantgenişliği nedeniyle, ionosferik katmanlara ait gecikme yayılımı düşük olduğu durumda yüksek menzil çözünürlüğünde sonuçlar alınabileceği gösterilmiştir. Yüksek bantgenişliği ve buna yönelik gerçekleştirilen bağ bütçe analizleri sonucunda, 20 W verici çıkış gücü ile ionogram izlerinin oluşturulabildiği gösterilmiştir. Önerilen yöntem, klasik darbant ionosonda tekniği ile düşük SNR koşullarında karşılaştırılmış ve genişbant ionosferik kanal kestirim yönteminde kullanılan zaman frekans maskeleyme işleminin, gürültü azaltma üzerindeki etkili olduğu görülmüştür. Bu anlamda, geliştirilecek yeni maskeleyme yöntemleri ile daha düşük SNR koşullarında yüksek performans elde edilebileceği değerlendirilmiştir. Son olarak önerilen yöntem ile klasik darbant ionosonda tekniği ionogram oluşturma süreleri açısından karşılaştırılmış ve genişbant ionosferik kanal kestirim tekniği ile 20 – 70 ms aralığındaki sürelerde ionogram izlerinin oluşturulabileceği görülmüştür. Bu değerlendirmeler ışığında, genişbant ionosferik kanal kestirim yöntemi kullanılarak, düşük çıkış gücü ile yüksek hızda ionogram oluşturulmasına imkan sağlayan bir altyapı geliştirilmiştir. İyonosfer özelliklerinin, KD bandında yer alan diğer kullanıcılara girişim yaratmadan, hızlı bir şekilde izlenmesi önemli bir kazanımdır. Özellikle ionosferik fırtınalı günlerde, ionosfer tabakasında meydana gelen anlık değişimlerin, bu altyapı ile takip edilebileceği değerlendirilmektedir.

5. SONUÇ ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar iki ana başlık altında toplanabilmektedir. Birinci başlıkta, halihazırda kullanımda olan tipik bir darbant darbeleri iyonosonda operasyonuna ait aşamalar benzetim ortamına aktarılmıştır. Yapılan çalışmada, 3B ışın izleme, IRI-Plas iyon yoğunluğu kestirim aracı ve ITS kanal modeli entegre edilerek birlikte kullanılmıştır. Vericide oluşturulan dalgasekillerin, gerçek bir iyonosonda operasyonunda olduğu gibi, belirli bir gecikme ve Doppler profillerine sahip iyonosferik kanal üzerinden alıcıya ulaşması sağlanmıştır. Alıcıya ulaşan sinyaller, vericide kullanılan dalga şekli ile uyumlu filtreden geçirilerek analiz edilmiş ve iyonogram izlerinin oluşturulması sağlanmıştır. Alıcı-verici arasındaki iletişim kanalı etkileri, kullanılan ITS kanal modeli ile hesaplamalara dahil edilmiştir. Vericiden alıcıya kadar ışınların izledikleri yollar 3B ışın izleme yöntemi ile takip edilmiştir. Işın izleme esnasında, kırılma-yansıma kurallarının belirlenmesi için gereken elektron yoğunluğu profilleri IRI-Plas yazılımı ile hesaplanmıştır. Ayrıca profiller oluşturulurken, TEİ, hmF2 ve foF2 yardımcı verileri kullanılarak sonuçların iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Geliştirilen darbant iyonosonda benzetim ortamı ile, sakin ve fırtınalı iyonosferik koşullar altında, farklı coğrafi bölgeler için iyonosonda ölçümleri ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre sakin iyonosferik günlerde, TEİ ve hmF2-foF2 harita verileri ile desteklenen sonuçların ölçüm sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür. Ancak fırtınalı günlerde, TEİ ve hmF2-foF2 harita verilerinin, sonuçlara olumlu katkı vermediği, ölçüm sonuçları üzerinden alınan hmF2-foF2 verilerinin ise gerçek iyonosonda ölçümlerine benzer sonuçlar üretmek için kullanılabilmesi gösterilmiştir. Buna göre, geliştirilen darbant iyonosonda benzetim ortamının, doğru hmF2-foF2 verileri sağlanabildiği sürece, hem sakin hem de fırtınalı günlerde, gerçek iyonosonda ölçüm sonuçlarına benzer sonuçlar üretebilen, sanal bir iyonosonda gibi davrandığı sonucuna varılabilmektedir. Bu sayede, farklı iyonosferik kanal koşullarında, farklı verici dalgasekillerin test edilebileceği bir altyapı oluşturulması sağlanmıştır. İyonosonda istasyonu bulunmayan noktalar için sonuç üretmek ve iyonosonda kurulum bölgelerinin belirlemek için bu altyapının kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Darbant iyonosonda benzetim ortamı başlığında verilen çalışmalara ek olarak, tez çalışmasının devamında, gelecek çalışmalar kapsamında incelenebilecek konular aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

- Yapılan çalışmalar sırasında, iyonosonda operasyonlarında kullanılan pek çok farklı dalgaşekli olduğu görülmüştür. Geliştirilen altyapı, kanal modelini de içerdiğinden, dalgaşekillerinin farklı kanal koşullarındaki davranışlarının izlenebilmesine olanak vermektedir. Bu anlamda, literatürde yer alan dalgaşekillerinin, iyonosondalar için uygunluklarının geliştirilen altyapı ile incelenebileceği değerlendirilmektedir.
- Geliştirilen benzetim altyapısı, Avrupa ve Güney Afrika bölgelerinden alınan sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Belirtilen bölgeler, orta enlem bölgeleri olup, ortalama iyonosfer koşullarına sahip bölgelerdir. Benzer bir çalışmanın, daha farklı iyonosfer davranışlarının gözlemlendiği ekvatorial ve kutup bölgeleri için de yapılabileceği değerlendirilmektedir.
- Darbant iyonosonda benzetim ortamına, tipik bir iyonosonda operasyonunda gerçekleşen aşamalar dahil edilmiştir. Ancak, iyonosonda donanımından kaynaklanan, yükselteç doğrusallığı, frekans kaymaları, grup gecikmeleri gibi etkenler gözardı edilmiştir. Bu etkilerin de benzetim ortamına aktarılması durumunda daha gerçekçi sonuçların oluşturulabileceği değerlendirilmektedir.

Tez çalışmaları kapsamında incelenen ikinci başlık altında, iyonosondaların temel çıktısı olan iyonogram verisi oluşturma işlemi, farklı bir yaklaşımla ele alınmış ve vericide genişbant sinyaller, alıcıda zaman frekans analizi kullanılarak, iyonogram izlerinin oluşturulabildiği gösterilmiştir. Önerilen yöntem kullanılarak, farklı bölgelerde, gece ve gündüz saatlerine ait iyonogram izleri oluşturulmuş ve ölçüm verileri ile benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Genişbantlı dalga şekilleri, ITS kanal modeli ve zaman frekans analiz yöntemlerinin bir arada kullanılması ile oluşturulan yapıda, spektral karakteristikleri ve frekans değişimlerine olan dayanıklılıkları sebebiyle vericide DFM

dalga şekilleri kullanılmıştır. Kullanılan anlık bant genişliğinin büyük olması, iyonosferik kanal koşullarına bağlı olarak, yüksek menzil çözünürlüğüne sahip sonuçların oluşturulmasına imkan sağlamaktadır. Ayrıca yüksek bant genişliği spektrumda hızlı tarama yapılarak iyonogram izlerinin kısa sürede oluşturulmasına yardımcı olmaktadır. Önerilen yöntemde verici çıkış gücü hesabı için, bağ bütçe analizleri yapılmış ve 20 W çıkış gücü ile iyonogram sonuçlarının üretilbildiği gösterilmiştir. Klasik dar bant darbeleri iyonosonda ve geniş bant iyonosferik kanal kestirim (GBİKK) yöntemleri için düşük SNR durumunda yapılan karşılaştırmada ise, zaman frekans maskeleye işleminin, gürültü azaltma üzerinde etkili olduğu ve benzer SNR koşullarında daha iyi sonuç alınmasını sağladığı görülmüştür.

Yukarıdaki paragrafta vurgulanan özellikler nedeniyle, genişbant iyonosferik kanal kestirim yönteminin, düşük çıkış gücüne ve hızlı iyonogram sonucu oluşturma yeteneği sayesinde iyonosferik değişiklikleri takip etme yeteneğine sahip ve yüksek menzil çözünürlüğünde sonuçlar üretebilen bir yöntem olduğu söylenebilmektedir. Böylece tez çalışmasının ana motivasyonlarından biri olan, KD spektrumunda yer alan diğer kullanıcılara girişim yaratmadan, iyonosonda ölçümünün yapılabilceği gösterilmiştir.

Geniş bant iyonosferik kanal kestirim başlığında verilen çalışmalara ek olarak, tez çalışmasının devamında, gelecek çalışmalar kapsamında incelenebilecek konular aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

- Bölüm 4'te genişbant iyonosferik kanal kestirimi için önerilen yöntemin, kanal modeli, bağ analizleri, farklı alıcı gürültü seviyeleri için benzetim ortamında geçerliliği doğrulanmıştır. Ancak önerilen yöntemin, gerçek bir donanım üzerinde test edilmesinin önemli olduğu değerlendirilmektedir. Günümüzde KD bandını (0 – 30 MHz) doğrudan örnekleyebilen sayısal almaç yapıları ve sayısal sinyal sentezleme yeteneğine sahip verici yapıları bulunmaktadır. Belirtilen donanım bileşenleri ile yapılacak denemelerin, genişbant iyonosferik kanal kestirim yöntemi için daha güvenilir sonuçlar üreteceği değerlendirilmektedir.
- Önerilen yöntemde, zaman frekans analiz yöntemlerinden KSFD, WVD ve yeni-

den atama yöntemi incelenmiştir. Belirtilen yöntemler haricinde, değişken boy-
larda zaman frekans pencerelerine sahip uyarlamalı zaman frekans yöntemleri
ve kesirli frekans ve zaman uzamlarını tanımlayan Kesirli Fourier Dönüşümü
gibi yöntemlerin literatürde yer aldığı bilinmektedir. İyonosfer katmanlarından
kaynaklanan gecikme yayılımının büyük olduğu durumlarda bozulan menzil çö-
zünürlüğünün iyileştirilmesi için uyarlamalı zaman frekans analiz yöntemlerinin,
farklı iyonosferik koşullar altında iyonogram izi oluşturma başarımının artırıl-
ması için Kesirli Fourier Dönüşümü yöntemlerinin çalışılmasının önemli olduğu
değerlendirilmektedir.

- Önerilen yöntemde, verici dalga şeklinin belirlenmesinde, Doppler değişimlerine dayanımları, spektrumda düz bir şekle sahip olmaları ve düşük Crest faktörü de-
ğerleri nedeniyle DFM dalga şekilleri kullanılmıştır. Ancak DFM dalga şekilleri-
nin tepe yan hüzmeye (TYH) oranlarının düşük olduğu belirtilmiştir. Bu anlamda,
DOFM dalga şekillerinin değerlendirmeye alınabileceği değerlendirilmektedir.
DOFM dalga şekilleri, Doppler değişimine dayanımları ve Crest faktörü de-
ğerleri açısından DFM dalga şekilleri ile benzer özelliklere sahiptir. Ancak spektrum
görüntüleri kullanılan parametrelere göre şekillendirilebilmektedir. İyonosferik
kanalda frekansa bağlı olarak gereken SNR seviyesine dair bir ön bilgi oluşturu-
labildiği takdirde, DOFM dalga şekillerinin spektral görüntüleri bu bilgiye uy-
gun şekilde şekillendirilebilmektedir. Bu durumda iyonosfer davranışı ve DOFM
dalga şekli spektrumu için bir optimizasyon problemi oluşturulması ve çözülmesi
gerekmektedir.
- Bölüm 4'te tipik bir darbant iyonosonda işleminde kullanılan AİK eğrileri oluş-
turulmuş ve buna yönelik analizler geliştirilmiştir. GBİKK yönteminde kanal
kestirimi öncesinde kullanılan zaman frekans maskeleyme işlemi ile benzer SNR
durumunda, darbant yönteme göre daha iyi sonuç alındığı görülmüştür. Bu ne-
denle, GBİKK yöntemi için yeni bir olabilirlik oranı testinin oluşturulabileceği
ve bu yönteme özgü AİK eğrileri ile yönteme ait alıcı işletim karakteristiğinin
çıkartılabileceği değerlendirilmektedir.

- Önerilen yöntemde kullanılan zaman frekans maskesi, belirlenen bir eşik seviyesinin üzerindeki sinyalleri kapsayacak şekilde oluşturulmaktadır. Daha detaylı ve kapsamlı maske oluşturma yöntemleri ile sonuçların iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca GBİKK yönteminde, veri zaman frekans düzlemine aktarıldığında, iki boyutlu herhangi bir veri olarak ele alınabilmektedir. Bu anlamda, özellikle görüntü işleme teknikleri kullanarak, yüksek gürültülü kanal durumlarında daha iyi sonuçlar üretilebileceği değerlendirilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Maslin, N.M., *HF Communications: A Systems Approach*, CRC Press, **2003**.
- [2] Digisonde ionogram data base, <http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>, Erişim: **2018-05-13**.
- [3] Zolesi, B., Fontana, G., Perrone, L., Pietrella, M., Romano, V., Tutone, G., Belehaki, A., Tsagouri, I., Kouris, S.S., Vallianatos, F., Makris, J.P., Angling, M.J., A new campaign for oblique-incidence ionospheric sounding over Europe and its data application, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 6, 854 – 865, **2008**.
- [4] Ozdemir, C., *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms*, Wiley, **2012**.
- [5] Levanon, N., Mozeson, E., *Radar Signals*, Wiley - IEEE. Wiley, **2004**.
- [6] Baskaradas, J. A., Bianchi, C., Sciacca, U., Tutone, G., Zuccheretti, E., The new INGV digital ionosonde: Design report, **2002**.
- [7] Coll, D.C., Storey, J.R., Ionospheric sounding using coded pulse signals, *Radio Science*, 68D, 1155–1159, **1964**.
- [8] Fenwick, R. B., Barry, G. H., Sweep-frequency oblique ionospheric sounding at medium frequencies, *IEEE Transactions on Broadcasting*, BC-12, 1, 25–27, **1966**.
- [9] Wright, J. W., Some current developments in radio systems for sounding ionospheric structure and motions, *Proceedings of the IEEE*, 57, 4, 481–486, **1969**.
- [10] Barry, G. H., A low-power vertical-incidence ionosonde, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 9, 2, 86–89, **1971**.
- [11] Barrick, D.E., *FM/CW Radar Signals and Digital Processing*, Number 55. c. Environmental Research Laboratories, **1973**.
- [12] Bibl, K., Reinisch, B. W., The universal digital ionosonde, *Radio Science*, 13, 3, 519–530, **1978**.
- [13] Poole, A., On the use of pseudorandom codes for "chirp" radar, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 27, 4, 480–485, **1979**.
- [14] Shearman, E. D. R., Unsal, R. R., Compatibility of high-frequency radar remote sensing with communications, in *International Conference on Radio Spectrum Conservation Techniques*, 103–107, **1980**.

- [15] Skaug, R., Experiment with spread spectrum modulation on an HF channel, *Communications, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings*, 131, 1, 87–91, **1984**.
- [16] Wagner, L. S., Goldstein, J. A., High-resolution probing of the HF ionospheric skywave channel: F2 layer results, *Radio Science*, 20, 3, 287–302, **1985**.
- [17] Poole, A. W. V., Advanced sounding: 1. the FMCW alternative, *Radio Science*, 20, 6, 1609–1616, **1985**.
- [18] Salous, S., IF digital generation of FMCW waveforms for waveband channel characterization, *IEE Proc. I, Communications Speech Vision*, 139, 3, **1992**.
- [19] Lundborg, B., Lundgren, M., On the spectral shape of chirp sounder signals, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54, 311–321, **1992**.
- [20] Salous, S., Switching sequences for monostatic pulse compression ionospheric sounders, *4th Bangor Communications Symposium*, 346–349, **1992**.
- [21] Haines, D.M., *A portable ionosonde using coherent spread spectrum waveforms for remote sensing of the ionosphere*, Ph.D. thesis, Univ. of Mass. Lowell, **1994**.
- [22] Reinisch, B. W., Haines, D. M., Bibl, K., Galkin, I., Huang, X., Kitrosser, D. F., Sales, G. S., Scali, J. L., Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar, *Radio Science*, 32, 4, 1681–1694, **1997**.
- [23] Salous, S., Weighted sequences for HF FMCW sounding, in *7th International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, 423–427, **1997**.
- [24] Zuccheretti, E., Tutone, G., Umberto, S., Bianchi, C., Baskaradas, J., The new AIS-INGV digital ionosonde, *Annals of Geophysics*, 46, **2010**.
- [25] Bibl, K., Iterative precision spectrum analysis, **2005**, US Patent 6,850,552.
- [26] Reinisch, B. W., Galkin, I. A., Khmyrov, G. M., Kozlov, A. V., Bibl, K., Lisysyan, I. A., Cheney, G. P., Huang, X., Kitrosser, D. F., Paznukhov, V. V., Luo, Y., Jones, W., Stelmash, S., Hamel, R., Grochmal, J., New digisonde for research and monitoring applications, *Radio Science*, 44, 01, 1–15, **2009**.
- [27] Robison, Rodney V. Landreth William D. Davis Robert W., Unswitched, ultra low power, long range radar system, **2010**, US Patent 7,821,446.
- [28] Shun, Wang, Chen, Z., Feng, Z., Guangyou, F., The new CAS-DIS digital ionosonde, *Annals of geophysics*, 56, **2013**.
- [29] Barnes, R. I., Earl, G. F., Papazoglou, M., Burchett, L., Terzuoli, A. J., The instagram: A novel sounding technique for enhanced HF propagation advice, in *IEEE Radar Conference*, 1446–1449, **2010**.

- [30] Yao, M., Deng, X., Wang, Y., Zhao, Z., Chen, G., Su, G. Y. F., Li, S., A novel low power multifunctional ionospheric sounding system, in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1–4, **2011**.
- [31] Davies, K., *Ionospheric Radio*, Peregrinus Institution of Electrical Engineers London, **1990**.
- [32] Tuna, H., *3D Electron Density Estimation in the Ionosphere by Using IRI-Plas Model and GPS Measurements*, Ph.D. thesis, Bilkent University, **2016**.
- [33] Reinisch, Bodo W., Xueqin, H., Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms: Processing of bottomside ionograms, *Radio Science*, 18, 3, 477–492, **1983**.
- [34] Appleton, E. V. Barnett M. A. F., Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere, *Nature*, 115, **1925**.
- [35] Tuve, M. A., Breit, G., Note on a radio method of estimating the height of the conducting layer, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity (Journal of Geophysical Research)*, 30, 15, **1925**.
- [36] Bibl, K., Evolution of the ionosonde, *Annals of Geophysics*, 41, 5-6, **1998**.
- [37] International, Lowell Digisonde, An HF radar system for ionospheric research and monitoring, *UMass Lowell*, **2013**.
- [38] Digisonde portable sounder system manual, *UMass Lowell*, **2008**.
- [39] Richards, M.A., *Fundamentals of Radar Signal Processing*, Professional Engineering. McGraw-Hill, **2005**.
- [40] Ivanov, V.A., Kurkin, V. I., Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 3, 3, 821–851, **2003**.
- [41] Harris, T. J., Quinn, A. D., Pederick, L. H., The DST group ionospheric sounder replacement for JORN, *Radio Science*, 51, 6, 563–572, **2016**.
- [42] Kopka, Helmut, Möller, Hans G., MUF calculations including the effect of the earth's magnetic field, *Radio Science*, 3, 1, 53–56, **1968**.
- [43] Gething, P. J. D., The calculation of electron density profiles from oblique ionograms, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 31, 347–354, **1969**.
- [44] Chen, J, A. Bennett, J, Dyson, P, Synthesis of oblique ionograms from vertical ionograms using quasi-parabolic segment models of the ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, 54, 323–331, **1992**.

- [45] Coleman, C. J., On the simulation of backscatter ionograms, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, 2089–2099, **1997**.
- [46] Coleman, C. J., A ray tracing formulation and its application to some problems in over-the-horizon radar, *Radio Science*, 33, 4, 1187–1197, **1998**.
- [47] Settimi, A., Pezzopane, M., Pietrella, M., Bianchi, C., Scotto, C., Zuccheretti, E., Makris, J., Testing the IONORT-ISP system: A comparison between synthesized and measured oblique ionograms, *Radio Science*, 48, 2, 167–179, **2013**.
- [48] Cervera, M. A., Harris, T. J., Modeling ionospheric disturbance features in quasi-vertically incident ionograms using 3-D magnetoionic ray tracing and atmospheric gravity waves, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 1, 431–440, **2014**.
- [49] Settimi, A., Pietrella, M., Pezzopane, M., Bianchi, C., The IONORT-ISP-WC system: Inclusion of an electron collision frequency model for the D-layer, *Advances in Space Research*, 55, 8, 2114 – 2123, **2015**.
- [50] Song, H., Hu, Y., Jiang, C., Zhou, C., Zhao, Z., Zou, X., An automatic scaling method for obtaining the trace and parameters from oblique ionogram based on hybrid genetic algorithm, *Radio Science*, 51, 12, 1838–1854, **2016**.
- [51] Mastrangelo, J. F., Lemmon, J. J., Vogler, L. E., Hoffmeyer, J. A., Pratt, L. E., Behm, C. J., A new wideband high frequency channel simulation system, *IEEE Transactions on Communications*, 45, 1, 26–34, **1997**.
- [52] Bilitza, D., Tamara, G., Towards ISO standard earth ionosphere and plasmasphere model, *New Developments in the Standard Model*, 192–, **2012**.
- [53] Sezen, U., Arikan, F., Arikan, O., Ugurlu, O., Sadeghimorad, A., Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC, *Space Weather*, 11, 5, 297–305, **2013**.
- [54] C. Watterson, Clark, R. Juroshek, John, D. Bensema, William, Experimental confirmation of an HF channel model, *Communication Technology, IEEE Transactions on*, 18, 792 – 803, **1971**.
- [55] Vogler, L. E., Hoffmeyer, J. A., A model for wideband hf propagation channels, *Radio Science*, 28, 06, 1131–1142, **1993**.
- [56] Angling, M. J., *Measured and Simulated Scattering Functions and Their Impact on High Frequency (HF) Systems*, UMI Dissertation Publishing, **2001**.
- [57] Bilitza, D., Altadill, D., Zhang, Y., Mertens, C., Truhlik, V., Richards, P., McKinnell, L.-A., Reinisch, B., The international reference ionosphere 2012 - a model of international collaboration, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, 27, A07, **2014**.

- [58] Wilson, B. D., Mannucci, A. J., Edwards, C. D., Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers, *Radio Science*, 30, 3, 639–648, **1995**.
- [59] Arikan, F., Arikan, O., Erol, C., Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model, *Advances in Space Research*, 39, 867–874, **2007**.
- [60] Deviren, M. N., Arikan, F., Arikan, O., Spatio-temporal interpolation of total electron content using a GPS network, *Radio Science*, 48, 3, 302–309, **2013**.
- [61] Erdem, E., *İyonkürede Elektromanyetik Dalga Yayılım Modeli ve Benzetimi*, Ph.D. thesis, Hacettepe Üniversitesi, **2017**.
- [62] Haselgrove, J., The Hamiltonian ray path equations, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 25, 397–399, **1963**.
- [63] George, P.L., Bradley, P.A., A new method of predicting the ionospheric absorption of high frequency waves at oblique incidence, *Telecommunications Journal*, 41, 307–311, **1974**.
- [64] Budden, K.G., *Radio Waves in the Ionosphere: The Mathematical Theory of the Reflection of Radio Waves from Stratified Ionised Layers*, University Press, **1961**.
- [65] E. Vogler, L. A. Hoffmeyer, J., New approach to HF channel modeling and simulation. part 3: Transfer function, *NASA STI/Recon Technical Report N*, 92, 32555, **1992**.
- [66] Hoffmeyer, J.A., Vogler, L.E., , *NASA STI/Recon Technical Report N*, 1199 – 1208 vol.3, **1990**.
- [67] Proakis, John G., *Digital Communications*, McGraw-Hill, **1995**.
- [68] Van Trees, H.L., *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*, Number Part 1. Wiley, **2004**.
- [69] Aktop, O., Optimization of Doppler Processing by Using Bank of Matched Filters,” M.S. thesis, ODTÜ, **2005**.
- [70] Yan, Z., Zhang, L., Rahman, T., Su, D., Prediction of the HF ionospheric channel stability based on the modified ITS model, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61, 6, 3321–3333, **2013**.
- [71] Reinisch, B. W., Galkin, I. A., Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO), *Earth, Planets, and Space*, 63, 377–381, **2011**.
- [72] Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Foerster, M., Ionospheric response to the 2015 St. Patrick’s Day storm: A global multi-instrumental overview, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, **2015**.

- [73] Pietrella, M., Pezzopane, M., Settimi, A., Ionospheric response under the influence of the solar eclipse occurred on 20 March 2015: Importance of autoscaled data and their assimilation for obtaining a reliable modeling of the ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146, 49–57, **2016**.
- [74] Chen, G., Zhao, Z., Pu, T., Huang, Y., Zhu, G., Almost perfect sequences applied for ionospheric oblique backscattering detection, *Radio Science*, 44, 05, 1–12, **2009**.
- [75] Shi, S. Z., Yang, G. B., Zhao, Z. Y., Liu, J. N., A novel ionospheric oblique-incidence sounding network consisting of the ionospheric oblique backscatter sounder and the parasitic oblique-incidence sounder, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12, 10, 2070–2074, **2015**.
- [76] Cui X., Chen G. Wang J. Song H. Gong W., Design and application of Wuhan ionospheric oblique backscattering sounding system with the addition of an antenna array WIOBSS-AA, *Sensors*, 16, 06, **2016**.
- [77] Wagner, L. S., Goldstein, J. A., Meyers, W. D., Bello, P. A., The HF skywave channel: measured scattering functions for midlatitude and auroral channels and estimates for short-term wideband hf rake modem performance, in *Military Communications Conference, MILCOM '89.*, 830–839 vol.3, **1989**.
- [78] Wagner, L. S., Goldstein, J. A., Response of the high latitude HF skywave channel to an isolated magnetic disturbance, in *5th International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, 233–237, **1991**.
- [79] Perry, Bernard D., Design and implementation of project 7140 wideband hf communication test facility, *The MITRE Corporation, Bedford*, ESD–TR–81–135, ADA102261, **1981**.
- [80] Chen, V.C., Ling, H., *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Artech House, **2002**.
- [81] Majdak, P., Balazs, P., Kreuzer, W., Dörfler, M., A time-frequency method for increasing the signal-to-noise ratio in system identification with exponential sweeps, in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 3812–3815, **2011**.
- [82] Matz, G., Hlawatsch, F., Time-frequency transfer function calculus (symbolic calculus) of linear time-varying systems (linear operators) based on a generalized underspread theory, *Journal of Mathematical Physics*, 39, 8, 4041–4070, **1998**.
- [83] Chassande-Mottin, E., Flandrin, P., On the time–frequency detection of chirps, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 6, 2, 252 – 281, **1999**.

- [84] Boashash, B., Mesbah, M., Signal enhancement by time-frequency peak filtering, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52, 4, 929–937, **2004**.
- [85] Qian, S., Chen, D., *Joint Time-frequency Analysis: Methods and Applications*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, **1996**.
- [86] Kodera, K., de Villedary, C., Gendrin, R., A new method for the numerical analysis of nonstationary signals, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 12, 142–150, **1976**.
- [87] Burgess, John C., Chirp design for acoustical system identification, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91, 3, 1525–1530, **1992**.
- [88] Müller, S., Massarani, P., Transfer-function measurement with sweeps, *J. Audio Eng. Soc.*, 49, 6, 443–471, **2001**.
- [89] Xia, X., System identification using chirp signals and time-variant filters in the joint time-frequency domain, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45, 8, 2072–2084, **1997**.
- [90] Avargel, Y., Cohen, I., System identification in the short-time fourier transform domain with crossband filtering, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 15, 4, 1305–1319, **2007**.
- [91] E. Vogler, L. A. Hoffmeyer, J., New approach to HF channel modeling and simulation. part 2: Stochastic model, *NASA STI/Recon Technical Report*, **1990**.
- [92] Söderström, T., Stoica, P., *System Identification*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, **1988**.
- [93] Stoica, P., Moses, R.L., *Spectral Analysis of Signals*, Prentice Hall, **2005**.
- [94] Feron, E., Brenner, M., Paduano, J., Turevskiy, A., Time-Frequency Analysis for Transfer Function Estimation and Application to Flutter Clearance, *Journal of Guidance Control Dynamics*, 21, 375–382, **1998**.
- [95] Shah, S. I., Chaparro, L. F., El-Jaroudi, A., Generalized transfer function estimation using evolutionary spectral deblurring, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 47, 8, 2335–2339, **1999**.
- [96] Xia, X., Wang, G., Chen, V. C., Quantitative SNR analysis for SAR imaging using joint time-frequency analysis-short time fourier transform, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 38, 2, 649–659, **2002**.
- [97] Xia, X., A quantitative analysis of SNR in the short-time fourier transform domain for multicomponent signals, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 46, 1, 200–203, **1998**.
- [98] Pace, P.E., *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar*, Artech House. Artech House, **2004**.

- [99] Hocking, W. K., Röttger, J., Palmer, R. D., Sato, T., Chilson, P. B., *Atmospheric Radar: Application and Science of MST Radars in the Earth's Mesosphere, Stratosphere, Troposphere, and Weakly Ionized Regions*, Cambridge University Press, **2016**.
- [100] Otto, T., Active remote sensing equation, TU Delft University Lecture Notes, **2012**.
- [101] *Radio Noise*, Recommendation ITU-R P.372-13, **2016**.
- [102] Wen, Y., Huang, W., Zhang, Z., CAZAC sequence and its application in LTE random access, in *IEEE Information Theory Workshop, Chengdu*, 544–547, **2006**.
- [103] Kebo, A., Konstantinidis, I., Benedetto, J. J., Dellomo, M. R., Sieracki, J. M., Ambiguity and sidelobe behavior of CAZAC coded waveforms, in *IEEE Radar Conference*, 99–103, **2007**.
- [104] Mahafza, B.R., Elsherbeni, A., *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, CRC Press, **2003**.
- [105] Golay, M., Complementary series, *IRE Transactions on Information Theory*, 7, 2, 82–87, **1961**.
- [106] Vázquez, A., M. G. Sánchez, I. Cuiñas, Dawood, M., *Wideband Noise Radar based in Phase Coded Sequences*, InTech, **2010**.
- [107] Nuttall, A. H., Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior, *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 29, 84–91, **1981**.
- [108] Blahut, R.E., *Theory of Remote Image Formation*, Cambridge University Press, **2012**.
- [109] Costas, J. P., A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-Doppler ambiguity properties, *Proceedings of the IEEE*, 72, 8, 996–1009, **1984**.
- [110] Fowle, E., The design of FM pulse compression signals, *IEEE Transactions on Information Theory*, 10, 1, 61–67, **1964**.
- [111] *Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators*, Recommendation-ITU-R-F.1487, **2000**.
- [112] Liang, C., Jong, J., Stark, W. E., East, J. R., Nonlinear amplifier effects in communications systems, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47, 8, 1461–1466, **1999**.
- [113] Reinisch, Bodo W., Galkin, Ivan A., Advancing Digisonde Technology: the DPS-4D, *AIP Conference Proceedings*, 974, 1, 127–143, **2008**.

- [114] Auger, F., Flandrin, P., Gonçalves, P., Lemoine, O., Time-frequency toolbox tutorial, **2005**.
- [115] Boashash, B., *Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Review*, Academic Press, **2013**.
- [116] Lemmon, J. J., Wideband model of HF atmospheric radio noise, *Radio Science*, 36, 6, 1385–1391, **2001**.



EK-1: ITS KANAL MODELİ GECİKME GÜÇ PROFİLİ HESABI

Bölüm 3.2.1.1'da ITS modelinde kullanılan güç gecikme profili oluşturmak için kullanılan parametreler ve genel yaklaşım anlatılmıştır. Profilin hesaplanması için Eşitlik 1 kullanılmaktadır.

$$P(\tau) = Ae^{(\alpha[\ln(z)+1-z])} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de geçen z parametresi,

$$z = \frac{(\tau - \tau_l)}{(\tau_c - \tau_l)} > 0 \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik 1'nin hesaplanabilmesi için α , τ_l ve τ_c parametrelerinin bulunması gerekmektedir. α ve τ_l 'nin hesaplanması için Eşitlik 3'nin sağlanması gerekmektedir [70].

$$\ln(s_\nu) = \alpha[\ln(z_L) + 1 - z_L] = \alpha[\ln(z_U) + 1 - z_U] \quad (3)$$

Eşitlikte geçen $s_\nu = A_{fl}/A$ ve profilin için kullanılan eşik seviyesi (A_{fl}) ile maksimum seviye (A) arasındaki oranı vermektedir. Eşitlik 2'de verildiği gibi,

$$z_L = \frac{(\tau_L - \tau_l)}{(\tau_c - \tau_l)} > 0 \quad (4)$$

$$z_U = \frac{(\tau_U - \tau_l)}{(\tau_c - \tau_l)} > 0 \quad (5)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, τ_L profilin başangıç, τ_U profilin bitiş süresini ifade etmektedir. Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak,

$$\alpha = \frac{\ln(s_\nu)}{\ln(z_L) + 1 - z_L} \quad (6)$$

ve

$$\tau_l = \tau_c - \frac{\tau_c - \tau_L}{1 - z_L} \quad (7)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Eşitlik 6 ve 7’de görüldüğü gibi, α ve τ_l parametrelerinin hesaplanabilmesi için z_L değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla, Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak, Eşitlik 8 ve 9’de verilen ve doğrusal olamayan iki denklem elde edilmektedir.

$$\ln(z_L) - z_L = \ln(z_U) - z_U \quad (8)$$

$$\frac{1 - z_L}{z_U - 1} = \frac{\tau_c - \tau_L}{\tau_U - \tau_c} < 1 \quad (9)$$

Belirtilen eşitliklerde τ_c , τ_L ve τ_U ifadeleri yerlerine yazılarak z_L ve z_U parametreleri, dögümlü bir çözüm yöntemi (örn: Newton yöntemi) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

ITS modelinde, gecikme merkezi τ_c parametresinin hesaplanması için geometrik bir yaklaşım kullanılmaktadır. Buna göre, iyon yoğunluğu profili sech^2 ve düz dünya varsayımı [35] kullanılarak, Eşitlik 10 ve 11 yazılabilmektedir.

$$f_c = f_p \left(\frac{\left[1 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right]}{1 + \exp\left(\frac{h_0 - h}{\sigma}\right)} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$h = \left[\left(\frac{c\tau_c}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Eşitliklerde geçen h_0 maksimum iyonlaşmanın olduğu yüksekliği, σ , sech^2 profilindeki katman kalınlığını, f_p penetrasyon frekansını, D alıcı-verici arasındaki uzaklığı, c ışık hızını ifade etmektedir. Buna göre, yukarıda iyonosfer özellikleri ile ilgili olarak verilen h_0 , σ ve f_p parametrelerine sahip bir yol için gecikme merkezi τ_c hesaplanabilmektedir. τ_c sonrasında sırasıyla, z_L , τ_l ve α elde edilerek, gecikme güç profili $P(\tau)$ hesaplanabilmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : MEHMET KABASAKAL
Doğum Yeri : Aydın
Medeni Hali : Evli
E-posta : mehmetkabasakal@hacettepe.edu.tr
Adresi : Eryaman Mah. Dil Devrimi Cad. Eryaman Evleri Hassas
Çizgi Sit. B15 Blok 54/22 Etimesgut/ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA
(2003-2008)
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA
(2008-2011)
Doktora : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA
(2012-2018)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

İş Deneyimi

Ocak 2017- ... : Lider Sistem Mühendisi,
SDT Uzay ve Savunma Teknolojileri, ANKARA
Ocak 2015- Ocak 2017 : Kıdemli Uzman Sistem Mühendisi,
ASELSAN REHİS, ANKARA
Ağustos 2008- Ocak 2015 : Uzman Sistem Mühendisi,
MİKES, ANKARA
Eylül 2007- Haziran 2008 : Aday Mühendis,
MİKES, ANKARA

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Kabasakal, M., Toker, C., Narrowband Ionosonde Simulation Environment, Advances in Space Research dergisine Ağustos 2018 tarihinde gönderilecektir.

Kabasakal, M., Toker, C., Wideband Ionospheric Channel Sounding, Advances in Space Research dergisine Eylül 2018 tarihinde gönderilecektir.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Kabasakal, M., Toker, C., Üç Boyutlu Işın İzleme Yöntemi ile İyonogram Oluşturma, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SIU2017) Kurultayı, Belek, 2017.

Kabasakal, M., Toker, C., Virtual Ionosonde Construction by using ITS and IRI-2012 models, 41st COSPAR Assembly, İstanbul, 2016.

Diğer Yayınlar

Kabasakal, M., Tamer, U., Doğrusal Olmayan Yükselteçlerin Haberleşme Sinyalleri Üzerine Etkilerini İnceleyen Bir Test Altyapısının Geliştirilmesi, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SIU2018) Kurultayı, Çeşme, 2018.

Kabasakal, M., Yeni Nesil HF Almaç Mimarileri, ASELSAN REHİS 10. Tasarım Teknolojileri Kurultayı (TTEK), Ankara, 2015.

Kabasakal, M., Toker, C., Otomatik Analog Kiplenim Sınıflandırma Algoritmalarının İncelenmesi, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SIU2012) Kurultayı, Fethiye, 2012.

Kabasakal, M., Haberleşme Sistemlerine Yönelik Sayısal Almaç Mimarisi, Çankaya Üniversitesi 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu (MTS), Ankara, 2011.



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

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 17/7/2018

Tez Başlığı / Konusu: DARBANT VE GENİŞBANT SANAL İYONOSONDA İÇİN SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ.

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 173 sayfalık kısmına ilişkin, 17/07/2018 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

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.

17/7/2018

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mehmet Kabasakal

Öğrenci No: N11147024

Anabilim Dalı: ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı: ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ - Doktora

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Cenk Tokar
(Unvan, Ad Soyad, İmza)