

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İŞİN DEMETLEMESİ İLE HEDEF TESPİTİ**

**YILMAZ KARAKAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRONİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
YRD. DOÇ. DR. TANSAL GÜÇLÜOĞLU**

**İSTANBUL, 2015**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İŞİN DEMETLEMESİ İLE HEDEF TESPİTİ**

Yılmaz KARAKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 09.02.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Yrd. Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Yrd. Doç. Dr. Hamid TORPİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Şahabettin Taha İMECİ  
İstanbul Ticaret Üniversitesi

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Tez çalışmam boyunca motivasyonumu yüksek tutmaya çalışan ve değerli fikirlerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU'na teşekkür ederim. Öğretim hayatım boyunca emek veren bütün hocalarıma saygılarımı sunarım.

Her konuda desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Ocak, 2015

Yılmaz KARAKAYA

## İÇİNDEKİLER

|                                                    | Sayfa |
|----------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                | vi    |
| KISALTMA LİSTESİ .....                             | vii   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                 | ix    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                              | xi    |
| ÖZET .....                                         | xii   |
| ABSTRACT .....                                     | xiv   |
| BÖLÜM 1                                            |       |
| GİRİŞ .....                                        | 1     |
| 1.1    Literatür Özeti .....                       | 1     |
| 1.2    Tezin Amacı ve Katkıları .....              | 4     |
| 1.3    Hipotez .....                               | 4     |
| 1.4    Organizasyon .....                          | 5     |
| BÖLÜM 2                                            |       |
| SUALTI ORTAMI VE DİZİN YAPISI.....                 | 6     |
| 2.1    Sualtı Ortam Şartları .....                 | 7     |
| 2.1.1    Sesin Sualtında Yayılımı .....            | 7     |
| 2.1.2    Dalga Denklemi.....                       | 8     |
| 2.1.3    Yakın Alan ve Uzak Alan Tanımlaması ..... | 9     |
| 2.1.4    Transdüserler .....                       | 10    |
| 2.2    Dizin Yapısı .....                          | 12    |
| 2.2.1    Hatsal Dizin Yapısı .....                 | 14    |
| 2.2.2    Düzlemsel Dizin Yapısı .....              | 20    |
| 2.2.3    Pencereleme .....                         | 25    |
| 2.2.4    Yönlendirme .....                         | 27    |
| 2.2.5    Örtüşme .....                             | 29    |

## BÖLÜM 3

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| IŞIN DEMETLEMESİ.....                                            | 31 |
| 3.1 Işın Demetlemesi Yöntemleri.....                             | 32 |
| 3.1.1 Geleneksel Işın Demetleyiciler .....                       | 32 |
| 3.1.2 Uyarlamalı Işın Demetleyiciler .....                       | 33 |
| 3.1.2.1 Doğrusal Sınırlı Minimum Varyans Işın Demetleyicisi..... | 34 |
| 3.1.2.2 Maksimum SGO Işın Demetleyicisi.....                     | 34 |
| 3.1.2.3 Referans Sinyal Kullanımlı Işın Demetleyicisi .....      | 34 |
| 3.1.2.4 Çoklu Yan Kulakçık Engelleyici Işın Demetleyicisi .....  | 35 |
| 3.2 Zaman Alanı Işın Demetlemesi .....                           | 35 |
| 3.3 Frekans Alanı Işın Demetlemesi.....                          | 37 |
| 3.3.1 FFT ile Frekans Alanı Işın Demetlemesi .....               | 38 |
| 3.3.2 Goertzel Algoritması Frekans Alanı Işın Demetlemesi .....  | 39 |

## BÖLÜM 4

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| BENZETİM VE SAYISAL ÖRNEKLER ..... | 43 |
|------------------------------------|----|

## BÖLÜM 5

|                |    |
|----------------|----|
| SONUÇLAR.....  | 64 |
| KAYNAKLAR..... | 66 |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 71 |

## SİMGE LİSTESİ

---

|           |                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------|
| $S$       | Salinity                                            |
| $T$       | Temperature                                         |
| $c$       | Ses hızı (m/sn)                                     |
| $k$       | Dalga numarası                                      |
| $p$       | Basınç                                              |
| $z$       | Derinlik (m)                                        |
| $\mu$     | Mikro                                               |
| $\lambda$ | Dalga boyu                                          |
| $\theta$  | Sinyalin dizinin normali ile yaptığı açı            |
| $\beta$   | Esneklik katsayısı                                  |
| $\rho$    | Su yoğunluğu                                        |
| $\psi$    | Küresel koordinatlarda açı birimi                   |
| $\varphi$ | Faz bilgisi                                         |
| $\Delta$  | Laplasyan İşareti                                   |
| $\delta$  | Birim dürtü fonksiyonu                              |
| $\tau$    | Zaman Gecikmesi                                     |
| $\vec{r}$ | Dizin merkezinden noktasal kaynağa vektör gösterimi |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|          |                                                                    |
|----------|--------------------------------------------------------------------|
| c        | Ses Hızı                                                           |
| dB       | Desibel                                                            |
| DFT      | Discrete Fourier Transform                                         |
| DTFT     | Discrete Time Fourier Transform                                    |
| DSP      | Digital Signal Processor                                           |
| ESPRIT   | Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Technique |
| f        | Frekans                                                            |
| FFT      | Fast Fourier Transform                                             |
| FIR      | Finite Impulse Response                                            |
| FPGA     | Field Programmable Gate Array                                      |
| IEEE     | Institute of Electrical and Electronics Engineers                  |
| ISA      | Instrument Society of America                                      |
| Hz       | Hertz                                                              |
| LCMV     | Linearly Constrained Minimum Variance                              |
| MIMO     | Multiple Input Multiple Output                                     |
| Mhz      | MegaHertz                                                          |
| MSE      | Mean Square Error                                                  |
| MUSIC    | Multiple Signal Classification                                     |
| MVDR     | Minimum Variance Distortionless Response                           |
| m        | Metre                                                              |
| msn      | Milisaniye                                                         |
| OKH      | Ortalama Karesel Hata                                              |
| Pa       | Pascal                                                             |
| psu      | Practical Salinity Unit                                            |
| RADAR    | Radio Detecting And Ranging                                        |
| $R_{ff}$ | Uzak Alan Mesafesi                                                 |
| SGO      | Sinyal Gürültü Oranı                                               |
| SL       | Source Level                                                       |
| SNR      | Signal to Noise Ratio                                              |
| SPL      | Sound Pressure Level                                               |
| $S_v$    | Yayım Hassasiyeti                                                  |
| s        | Saniye                                                             |
| SONAR    | Sound Navigation And Ranging                                       |
| V        | Volt                                                               |

|           |                       |
|-----------|-----------------------|
| $V_{in}$  | Giriş Gerilimi        |
| $V_{ref}$ | Referans Gerilim      |
| $V_{rms}$ | Volt Root Mean Square |
| $\omega$  | Açısal Frekans        |
| $z$       | Derinlik              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                            | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2. 1 Sesin oluşumu .....                                                             | 6     |
| Şekil 2. 2 (a) Ses hızı profili, (b) Işın izi grafiği.....                                 | 8     |
| Şekil 2. 3 6 m. yarıçaplı dairesel pistonun 1.2 kHz frekansta ses basınç seviyesi (SPL) 10 |       |
| Şekil 2. 4 30 kHz rezonans frekanslı akustik transdüser .....                              | 11    |
| Şekil 2. 5 Magnetostriktif ve Piezoelektrik transdüser yapıları.....                       | 12    |
| Şekil 2. 6 Hedeften yayılan sinyallerin transdüser $\theta$ açısıyla gelişi .....          | 13    |
| Şekil 2. 7 Hatsal dizin .....                                                              | 14    |
| Şekil 2. 8 Tek transdüserin yayım/alış paterni .....                                       | 16    |
| Şekil 2. 9 Tek transdüser yayım/alış paterni polar gösterim.....                           | 16    |
| Şekil 2. 10 2 elemanlı hatsal dizin ışın demeti genişliği .....                            | 17    |
| Şekil 2. 11 2 elemanlı hatsal dizin ışın demeti polar gösterim.....                        | 17    |
| Şekil 2. 12 6 elemanlı hatsal dizin ışın demeti genişliği .....                            | 18    |
| Şekil 2. 13 6 elemanlı hatsal dizin ışın demeti polar gösterim.....                        | 18    |
| Şekil 2. 14 10 elemanlı hatsal dizin ışın demeti genişliği .....                           | 19    |
| Şekil 2. 15 10 elemanlı hatsal dizin ışın demeti polar gösterim.....                       | 19    |
| Şekil 2. 16 Düzlemsel dizin yapısı .....                                                   | 21    |
| Şekil 2. 17 Küresel koordinatlarda uzak alan noktası .....                                 | 22    |
| Şekil 2. 18 10x10 ve 6x6'lık düzlemsel dizinlerin ışın demetleri .....                     | 24    |
| Şekil 2. 19 10x10 ve 6x6'lık düzlemsel dizinlerin XZ düzlemi ışın demetleri.....           | 25    |
| Şekil 2. 20 6 elemanlı hatsal dizin pencereleme çizimleri .....                            | 27    |
| Şekil 2. 21 6 elemanlı hatsal dizin 20° yönlendirilmiş ışın demeti .....                   | 28    |
| Şekil 2. 22 6 elemanlı hatsal dizin 20° yönlendirilmiş ışın demeti polar gösterim.....     | 29    |
| Şekil 2. 23 6 elemanlı hatsal dizin örtüşme grafiği.....                                   | 30    |
| Şekil 2. 24 6 elemanlı hatsal dizin örtüşme grafiği polar gösterim .....                   | 30    |
| Şekil 3. 1 Uyarlamalı ışın demetleyicisi genel yapı .....                                  | 33    |
| Şekil 3. 2 Zaman alanı ışın demetlemesi diyagramı .....                                    | 36    |
| Şekil 3. 3 Düzlem dalga sinyallerinin hizalanması .....                                    | 36    |
| Şekil 3. 4 FFT ile frekans alanı ışın demetlemesi diyagramı .....                          | 38    |
| Şekil 3. 5 DFT hesabı için iki kutuplu rezonatör gerçekleştirilmesi .....                  | 41    |
| Şekil 3. 6 Goertzel algoritması ile frekans alanı ışın demetlemesi diyagramı .....         | 42    |
| Şekil 4. 1 Uzak alan noktasal kaynak ve düzlemsel dizin .....                              | 43    |
| Şekil 4. 2 Işın demetleri koordinat eksenine açısal gösterim .....                         | 46    |
| Şekil 4. 3 SGO = 0 dB, 0.1 saniyelik ham veri .....                                        | 47    |
| Şekil 4. 4 SGO = 0 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti .....             | 48    |

|             |                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4. 5  | SGO = 0 dB için FFT ile frekans alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti ..... | 49 |
| Şekil 4. 6  | SGO = 0 dB için Goertzel algoritması ışıın demetlemesiyle hedef tespiti.....   | 49 |
| Şekil 4. 7  | SGO = -7.5 dB, 0.1 saniyelik ham veri.....                                     | 50 |
| Şekil 4. 8  | SGO = -7.5 dB için zaman alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti.....         | 51 |
| Şekil 4. 9  | SGO = -7.5 dB için FFT ile frekans alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti .. | 52 |
| Şekil 4. 10 | SGO = -7.5 dB için Goertzel algoritması ışıın demetlemesiyle hedef tespiti .   | 52 |
| Şekil 4. 11 | SGO = -14.5 dB, 0.1 saniyelik ham veri.....                                    | 53 |
| Şekil 4. 12 | SGO = -14.5 dB için zaman alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti.....        | 54 |
| Şekil 4. 13 | SGO = -14.5 dB için FFT ile frekans alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti   | 54 |
| Şekil 4. 14 | SGO = -14.5 dB için Goertzel algoritması ışıın demetlemesiyle hedef tespiti    | 55 |
| Şekil 4. 15 | SGO = -26.5 dB, 0.1 saniyelik ham veri.....                                    | 56 |
| Şekil 4. 16 | SGO = -26.5 dB için zaman alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti.....        | 56 |
| Şekil 4. 17 | SGO = -26.5 dB için FFT ile frekans alanı ışıın demetlemesiyle hedef tespiti   | 57 |
| Şekil 4. 18 | SGO = -26.5 dB için Goertzel algoritması ışıın demetlemesiyle hedef tespiti    | 57 |
| Şekil 4. 19 | SGO – Tespit olasılığı grafiği.....                                            | 60 |
| Şekil 4. 20 | SGO = 0 dB zaman alanı için örtüştürülmüş ışıın demetleri grafiği .....        | 61 |
| Şekil 4. 21 | SGO – Hedef tespit açısı OKH grafiği .....                                     | 61 |
| Şekil 4. 22 | Frekans değişimli hedef için SGO – Tespit olasılığı grafiği .....              | 62 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

|              | Sayfa                                               |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| Çizelge 2. 1 | DualSense 030 transdüser karakteristikleri ..... 11 |
| Çizelge 2. 2 | Pencereleme fonksiyonları ve denklemleri ..... 26   |
| Çizelge 4. 1 | Işın demeti hedef tespit başarımları ..... 58       |
| Çizelge 4. 2 | Işın demeti hesaplama süreleri ..... 58             |
| Çizelge 4. 3 | Sistem gereksinimleri ..... 59                      |

## İŞIN DEMETLEMESİ İLE HEDEF TESPİTİ

Yılmaz KARAKAYA

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU

Hedef tespiti bilimsel çalışmalardan günlük yaşantımıza, güvenlik alanından sağlık alanına kadar geniş bir yelpazede neredeyse hayatın her alanında kullanılmaktadır. Dizin yapısı kullanılarak hedef tespiti için birçok yöntem vardır. Fakat en çok kullanılan yöntem ışın demetlemesi yöntemidir. Işın demetlemesi, sinyal gönderiminde ve alımında dizin yapısı kullanılarak sinyale yönlülük katmak için kullanılan bir sinyal işleme yöntemidir.

Işın demetlemesi RADAR, SONAR, telsiz haberleşmesi, sismik araştırmalar, astronomi, akıllı antenler, tıbbi tanılama sistemlerinde kullanılmaktadır. Lazer sistemlerinde, konuşma işaretinde ve sualtı iletişimde uygulama alanı bulmaktadır. Işın demetlemesi ilk olarak ikinci dünya savaşı yıllarında faz dizili antenlerle birlikte RADAR sistemlerinde kullanılmıştır. Kısa süre sonra SONAR sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Işın demetlemesi veri bağımsız, istatistiksel optimum, uyarlamalı ve kısmi uyarlamalı gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar maliyet etkin, hızlı sonuç döndürme, daha az enerji tüketimi, daha net hedef tespiti, gürültülü ve yankılı ortamda hedef tespiti gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Günümüzde yan kulakçıkların bastırılması, girişim azaltma, MIMO antenler, zaman-frekans analizi konularında çalışmalar sürdürülmektedir.

Bu tezde SONAR benzetimi yapılarak yapay olarak oluşturulan hedef tespit edilmeye çalışılmaktadır. Hedef tespitinde zaman ve frekans alanında ışın demetlemesi yöntemleri kullanılarak performans sonuçları sergilenmektedir. Yapay hedef oluşturma

ve ışın demetlemesi programları MATLAB programında yazılarak, sonuçlar da aynı program aracılığıyla çizdirilmektedir. Işın demetlemesinin yapılacağı ortam olan sualtı ortamı konusu incelenmektedir. Hatal ve düzlemsel dizin yapıları irdelenerek, pencereleme, yönlendirme ve örtüşme konularına değinilmektedir. SGO artırımı ve üç boyutlu tarama için düzlemsel dizin yapısı kullanılmaktadır. Farklı SGO değerleri için zaman ve frekans alanı ışın demetlemesi yöntemleri kullanılmaktadır. Hedef tespit performansları gözlemlenmekte ve karşılaştırılmaktadır. Frekans alanında ışın demetlemesi için düşük SGO değerlerinde kullanılmak üzere Goertzel algoritması önerilmektedir. Goertzel algoritmasının düşük SGO değerlerinde başarımı artırdığı görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Zaman alanı ışın demetlemesi, frekans alanı ışın demetlemesi, Goertzel algoritması, hedef tespiti

## **TARGET DETECTION WITH BEAMFORMING**

Yilmaz KARAKAYA

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU

Target detection is almost used in any area of life as scientific study, security and medical. There are a lot of methods for target detection with using array structure. Beamforming is the most widely used technique. Beamforming is signal processing technique for adding steering to signal with using array structure when transmit or receive.

Beamforming is used in RADAR, SONAR, radio communication, seismology, astronomy, smart antennas and medical diagnostic systems. There are application areas in LASER systems, speech signals and underwater communication. Beamforming is firstly used in RADAR systems with phased array antenna during World War II. After a while it was used in SONAR systems.

Beamforming can be achieved with data independent, statistically optimum, adaptive and partial adaptive methods. In recent years, investigations has been concentrated on areas that are cost effective, fast computation, low energy consumption, sharpening target detection, detection of targets in strong reverberation environment. Nowadays, researches in cancelling side lobes, minimization interference, MIMO antennas and time-frequency analyses are ongoing.

In this thesis, target is assumed to be detected by SONAR simulation. Target detection outputs are obtained time and frequency domain beamforming methods. Target data generation and beamforming programs are produced in MATLAB. Underwater environment used in beamforming is described. Linear and planar arrays are

scrutinized. Windowing, steering and aliasing are discussed. Planar array is used for increasing SNR and 3D scanning. Time and frequency domain beamforming methods are inspected for different SNR values. Target detection performances are observed and compared. Goertzel algorithm is proposed to be used in frequency domain beamforming at low SNR values. It is observed that Goertzel algorithm can enhance target detection performance at low SNR.

**Keywords:** Time domain beamforming, frequency domain beamforming, Goertzel algorithm, target detection.

#### 1.1 Literatür Özeti

Işın demetlemesi uluslararası literatürde “*Beamforming*” olarak tanımlanmaktadır. Dizi antenlerin bulunmasıyla hedef tespiti kolaylaştırmak amacıyla ortaya konmuştur. Işın demetlemesi sinyal gönderiminde ve alımında dizin yapısı kullanılarak sinyale yönlülük katmak için kullanılan bir sinyal işleme yöntemidir [1].

IEEE’de bu konuda yayınlanan ilk makale 1966 tarihli olup RADAR sinyallerini işlemek amacıyla kullanılmıştır [2]. Daha sonra sismik dizinler [3] ve sualtı akustik görüntüleme [4] alanlarında kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda başta RADAR ve SONAR uygulamaları olmak üzere medikal, kablosuz haberleşme gibi alanlarda da kendine yer edinmiştir.

Işın demetlemesi günümüzde de yoğun olarak kullanılan işaret işleme tekniklerinden birisidir. Son yıllarda hedef yeri keskinleştirme [5], güçlü yankılaşım durumunda küçük hedef tespiti [6], haberleşme performansını artırım [7], MIMO antenler [8-10] konularında çalışmalar sürdürülmektedir. MIMO SONAR sistemleri de sualtında otomatik hedef tanımlama uygulamaları için kullanılmaktadır [11].

Bir SONAR sistemi ele alındığında, yayım için sinyali maksimum güçle istenilen doğrultuya yöneltmek ve en uzak mesafeden yankı almak istenir [12]. Elemanların fazlarının değiştirilerek sürülmesiyle ışın demeti yönlendirmesi yapılmaktadır. Alım için düşünüldüğünde dizinin her bir elemanına hedeften gelen sinyaller farklı zamanlarda ulaşmaktadır. Bu gecikmeler düzenlenerek alım sinyali maksimuma çıkarılır ve en uzak mesafeden sinyal alımı gerçekleştirilir.

SONAR sistemleri için hedef tespit etme ve lokalizasyon konularında ilk çalışmalar çoğunlukla zaman alanında ışın demetlemesi yöntemleriyle yapılmıştır. Bu çalışmalarda Cramer-Rao alt sınırı yöntemleri kullanılmıştır [13]. Cramer-Rao alt sınırı varyans için alt sınır belirlemede kullanılan bir metottur. Gelişen teknoloji ve hızlı işlemcilerin üretilmesiyle birlikte frekans alanında ışın demetlemesi yöntemleri de yaygınlaşmıştır. FFT algoritmalarının yaygınlaşması ve işlemcilere uyarlanmasıyla hızlı çözümler elde edilmiştir. Frekans alanı ışın demetlemesi yöntemlerinin daha düşük örnekleme hızına ihtiyaç duyduklarından daha az donanım isterleri ve daha az veri kullanım oranları vardır [14].

Sualtında hedef tespitinde, faz temelli çoklu ayırık SONAR platformlarından [15], sualtı lazer görüntüleme tekniklerinden [16], elektro-optik imge verilerinden de [17] yararlanılmaktadır. Dinamik değiştirilebilir transdüser dizin yapısı [18] ve fiziksel olarak yönü değiştirilen dizinler hedef tespitinde kullanılan diğer yaklaşımlardandır. Işın demetlemesi sayısal olarak gerçekleştirildiğinden yoğun fiziksel iş yükünü ortadan kaldırmaktadır.

Sualtında ışın demetlemesiyle son yıllarda 3 boyutlu görüntüleme alanında çalışmalar yapılmaktadır [19-21]. Bu çalışmalarda genel amaç, ihtiyaç duyulan hafıza ve işlemci yükünü azaltarak ışın demetlemesi yöntemlerinin verimliliğini artırmaktır.

Dar bantlı sistemlerde zaman gecikmesi faz kaymasına eşdeğerdir. Faz dizili sistemler bunu kullanmaktadır. RADAR gibi bant genişliğinin küçük ve merkez frekans etrafında değiştiği sistemler faz dizili sistemlere örnek gösterilebilir. SONAR cihazları ise geniş bantlı sistemlerdir.

Günümüzde artan iletişim ihtiyacıyla birlikte çoklu anten dizilerinin anahtar teknolojisi olduğu, kullanıcıların yüksek oranlı veri hızlarına ulaşabildiği kablosuz haberleşme uygulamaları ışın demetlemesi çalışmaları için itici bir güç olmuştur [22].

Işın demetlemesiyle birlikte çeşitli yön bulma algoritmaları da geliştirilmiştir. Bu algoritmalar genel olarak spektrum tabanlı, alt uzay tabanlı ve istatistiksel modeller olarak sınıflandırılabilirler [23]. Bartlett ve Capon (MVDR) spektrum tabanlı, MUSIC ve ESPRIT alt uzay tabanlı algoritmalara örnek gösterilebilir. Bartlett ve Capon algoritmaları basit ve düşük hesaplama karmaşıklığına sahip olmasına rağmen düşük

Çözünürlük sunmaktadırlar. Dizinin fiziksel yapısına bağımlıdırlar. Alt uzay tabanlı yön bulma algoritmaları öz vektörleri kullanmaktadır [24]. MUSIC ve ESPRIT algoritmaları yüksek çözünürlük ve daha doğru sonuçlar sunmaktadır. Ayrıca bu algoritmalar dizinin fiziksel yapısıyla sınırlı değildir. Bu avantajlarının yanında MUSIC ve ESPRIT algoritmaları kaynak sayısı kestirimine ve ilintisiz sinyal ortamına ihtiyaç duymaktadır. Yüksek hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Gerçek uygulamalarda çoklu yayılım yüzünden ilintili sinyaller oluşmakta ve kaynak sayısı tespiti doğru şekilde kestirilememektedir. Bu problemlerden kaçınmak için düşük çözünürlük sunan Capon algoritması kullanılabilir [24]. Çoęu yön bulma algoritması her yöne yayım yapabilen transdüserler için düzgün çalışmaktadır. Fakat ışın yönlendirme kullanımından dolayı bazı transdüserler farklı kazançlarla kullanılabilmektedir. Bu da yön bulma algoritmalarıyla çalışmanın zorluklarını ortaya koymaktadır. Bahsi geçen teknikler dışında uyumlu alan işleme yöntemi de kullanılmaktadır. Bu yöntem özellikle güçlü yankılaşım durumunda kullanılmaktadır. Bilgisayar tarafından üretilen model verisi ile gerçek zamanlı alınan verinin ilintilenmesi ile gerçeklenmektedir.

Günümüzde çok fazla sayıda ışın demetleme yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar genel olarak geleneksel ve uyarlamalı ışın demetleme yöntemleri olarak ayrılabilir. Geleneksel yöntemler hedef sinyalinden bağımsız sistem cevabına sahiptir. Uyarlamalı yöntemler ise hedef verisini maksimize edecek şekilde ağırlık katsayılarını güncellemektedir. Genelleştirilmiş yan lob engelleyici, düzgün kısıtlı minimum varyans, sıfır yönlendirme, sabit genlik, en küçük kareler yöntemi, yinelenen en küçük kareler yöntemi, örnek matris inversiyonu, alt dizi gecikme-toplama, maksimum SGO gibi yöntemler popüler ışın demetlemesi yöntemleridir.

Işın demetlemesinin ana gerçekleştirme alanı olan zaman ve frekans alanında ışın demetlemeleri performans karşılaştırmı güncelliğini koruyan bir konudur [25-26]. Özellikle sistem gerçekleme ve pratik uygulamalar için sinyal işleme alanının seçimi çok önemlidir. Her yöntemin sistem gereksinimleri ve maliyetleri farklıdır. Başarım sonuçları ve cevap süreleri bu yöntemlerin daha fazla irdelenmesine sebep olmaktadır. Günümüzde iki yöntemin başarımları ve sistem gereksinimlerinin analizi konusunda çalışmalar sürdürölmektedir [27]. Her iki yöntemin performans artırımı ve maliyet azaltımı üzerindeki araştırmalar da sürdürölmektedir.

## 1.2 Tezin Amacı ve Katkıları

Bu tezin amacı ışın demetlemesi yönteminin benzetimler yardımıyla anlaşılmasını sağlamak, zaman ve frekans alanında ışın demetlemesi yöntemlerinin performanslarını karşılaştırarak hedef tespiti yapmaktır. Zaman ve frekans alanında benzetimler yardımıyla hedef tespiti sonuçları görsel olarak sunulmaktadır. Bu tezde ışın demetlemesi gerçekleştirilmesi için düşük frekanslarda çalışılması ve gösterim kolaylığı sağlaması sebebiyle sualtı ortamı kullanılmaktadır. Yapay olarak hedef üretilerek hedef kerterizi ilgili ışın demetlemesi yöntemleriyle tespit edilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca düşük SGO değerlerinde frekans alanında ışın demetlemesi başarımını artırmak için Goertzel algoritması önerilmektedir.

Bu tezde yapılan çalışmaların radar ve akustiğin tüm alanlarında da uygulanabilmesi mümkündür. Benzetim yapılan çalışmanın pratik uygulamalar için de kaynak olabilmesi amaçlanmaktadır.

## 1.3 Hipotez

Bu tezde sualtındaki bir hedefin kerterizinin tespit edilebilmesi için zaman ve frekans alanı ışın demetlemesi yöntemleri kullanılmaktadır. İki yöntemin başarımları sergilenmektedir.

Hatsal dizin ve düzlemsel dizinin ışın demeti yapıları sergilenmektedir. Hedef kerterizinin 3 boyutlu tespitine olanak sağlayan düzlemsel dizinle çalışılmaktadır [28-29].

Zaman alanı ışın demetlemesinin daha doğru sonuçlar verdiği fakat frekans alanı ışın demetlemesinin daha hızlı ve uygulanabilir olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Frekans alanı ışın demetlemesinin başarımını artırmak için Goertzel algoritması önerilmektedir. Benzetim sonuçlarından uygulanabilir olduğu çıkarımı elde edilmektedir. Fakat değişken frekanslı işaretler için kullanımının uygun olmadığı değerlendirilmektedir. Sualtı çalışmalarının en büyük engellerinden biri olan yüksek yankılaşım [30-31] durumu için de çalışmalar devam etmektedir.

#### 1.4 Organizasyon

Birinci bölümde literatürde yapılan çalışmalar, uygulanan yöntemler ve bu tezin katkıları ortaya konmaktadır.

İkinci bölümde ışın demetlemesi için seçilen sualtı ortamı ve dizin yapısı tanıtılmaktadır. Işın demetlemesinde kullanılan transdüserler için örnek transdüser karakteristikleri verilmektedir. Hatal ve düzlemsel dizin yapısı incelenmektedir. Pencereleme, yönlendirme ve örtüşmenin ışın demetine etkisi gösterilmektedir.

Üçüncü bölümde ışın demetlemesi ve bazı ışın demetlemesi yöntemleri tanıtılmaktadır. Zaman alanı ve frekans alanı ışın demetleri ayrıntılı olarak incelenmektedir.

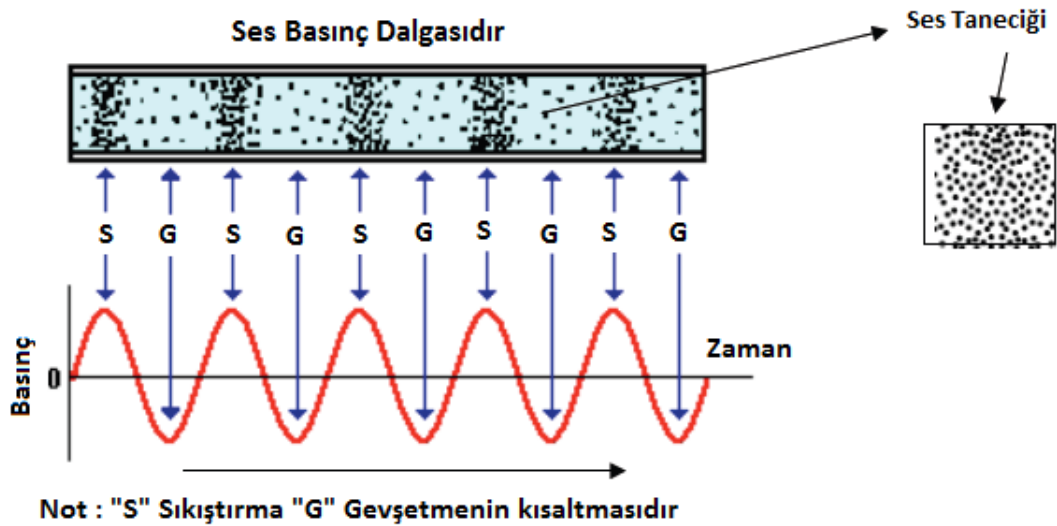
Dördüncü bölümde yapay olarak hedef verisi üretilerek bu veri zaman alanı, FFT ile frekans alanı ve Goertzel algoritması ışın demetlemeleriyle tespit edilmeye çalışılmaktadır. Farklı SGO değerleri için ışın demetlerinin performansları karşılaştırılmaktadır.

Beşinci bölümde sonuçlar irdelenmekte ve gelecekteki araştırma konuları belirtilmektedir.

## BÖLÜM 2

### SUALTI ORTAMI VE DİZİN YAPISI

Bu bölümde hedefin bulunduğu sualtı ortam şartları ve bu ortamda kullanılacak olan dizin yapısı anlatılmaktadır. Sualtındaki ortam şartları havadaki ortam şartlarından bazı farklılıklar göstermektedir. Sualtında sinyal iletimi için genellikle ses kullanılmaktadır. Sesin sualtındaki yayılımı doğrusal değildir. Sualtı hareketli bir ortam olduğundan dolayı modellenmesi zordur. Gürültü etkisi diğer ortamlara göre çok fazladır. Bu etkinin kompanse edilebilmesi için dizin yapısı kullanılmaktadır.



Şekil 2. 1 Sesin oluşumu

Ses dalgasının hareketi Şekil 2. 1'de gösterildiği üzere basıncın ortamda yayılımı ile organize edilmektedir. Ses taneciklerinin hacimsel yer değiştirmesi ile işaret taşınmaktadır.

## 2.1 Sualtı Ortam Şartları

Ses, sualtında ses hızı profiline bağlı olarak yayılım yapmaktadır. Sualtı ortamının sıcaklık, tuzluluk, basınç, dip tabiatı yapısı gibi faktörleri ses iletimini etkilemektedir. Yağmur, rüzgâr, dalgalar, sualtı canlılarının hareketleri, yeryüzü hareketleri ve termal değişimler de anlık olarak ses hızını değiştirmektedir ve bu parametreler ortamda bir arka plan gürültüsü oluşmasına sebep olmaktadır [32].

Bu tezde sualtı ortamının, ortam gürültüsünün her yerde aynı olduğu izotropik gürültüye sahip olduğu varsayılmaktadır [33]. Sualtı ortamında sinyal yayılımında etkili olan çok yolluluk etkisinin olmadığı kabul edilmektedir.

### 2.1.1 Sesin Sualtında Yayılımı

Ses sualtında basınç tarafından oluşturulan dalgalar halinde yayılır. Ses yayılımı komşu parçacıkların bağlantısıyla sağlanmaktadır. Sesin yayılım yapabilmesi için katı, sıvı veya gaz gibi bir ortam olması gerekir. Sıvı içinde parçacık hareketi yayılım yönüne paralel ve ileri-geri şekilde olur ve bu yüzden ses dalgaları boyuna dalgalardır [33].

Ses sinyallerinin sualtında yayılımı derin su ve sığ su yayılımı olarak sınıflandırılabilir. Sığ su yayılımında dipten ve yüzeyden çok fazla yansıma oluşmaktadır. Sesin sualtındaki yayılma hızı (2.1) denklemiyle gösterilebilir [34].

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (2.1)$$

$\beta$  elastik özelliği,  $\rho$  su yoğunluğunu göstermektedir. Elastik özelliği  $\beta = -V \frac{du}{dv}$  formülü ile tanımlanabilir.  $V$  hacim,  $u$  akustik basıncı göstermektedir.

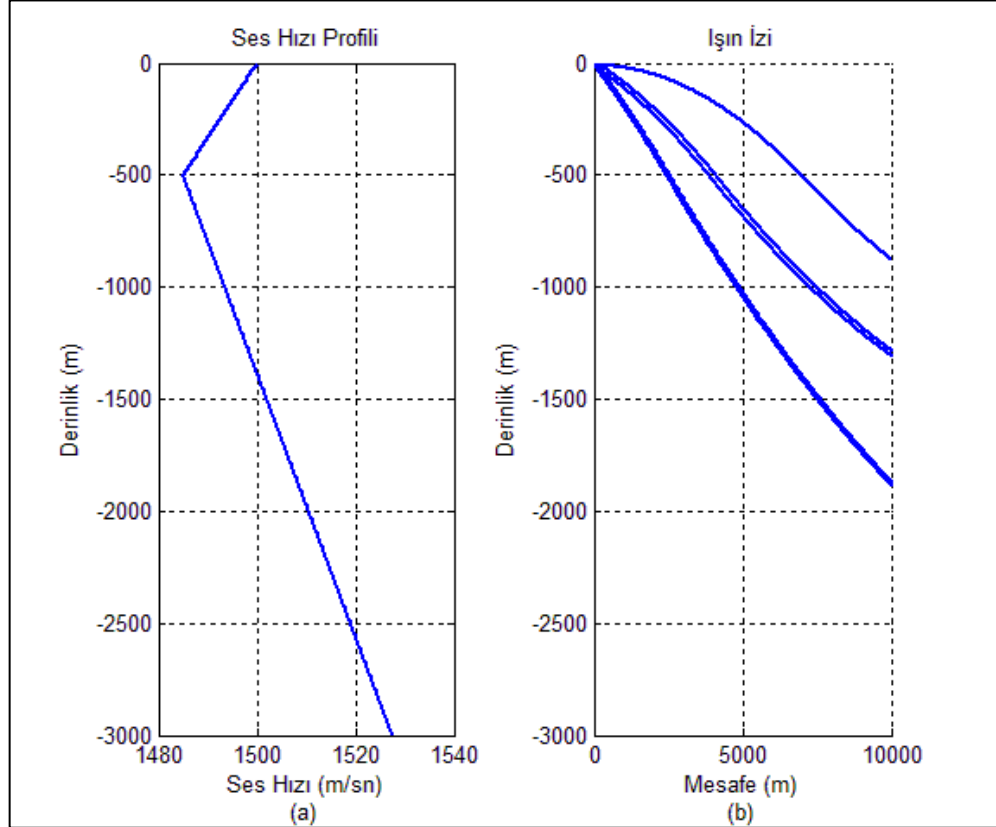
Sudaki ses hızını etkileyen ana faktörler aşağıda belirtilmektedir:

- Sıcaklık
- Tuzluluk
- Basınç

DeneySEL tecrübeler sonucu ses hızı; sıcaklık, tuzluluk ve basınç değişkenleriyle gösterildiğinde denklem (2.2) ile formülize edilebilir [35].

$$c = 1449.2 + 4.6xT - 5.5x10^{-2}T^2 + 2.9x10^{-4}T^3 + (1.34 - T)(S - 35) + 1.6x10^{-2}z \quad (2.2)$$

$c$  ses hızını,  $T$  °C cinsinden sıcaklık,  $z$  derinlik ve  $S$  psu cinsinden tuzluluğu göstermektedir. Örnek bir ses hızı profili için ışın izi grafiği Şekil 2. 2’de çizdirilmektedir. Ses hızı profil grafiğinde derinliğe bağlı olarak ses hızı çizdirilmektedir. Işın izi grafiğinde de 0 metredeki bir kaynaktan yayılan sinyallerin izlediği patern, derinlik ve mesafeye bağlı olarak sergilenmektedir.



Şekil 2. 2 (a) Ses hızı profili, (b) Işın izi grafiği

Şekil 2. 2’de görüldüğü üzere ses, ses hızının yavaş olduğu derinliğe doğru kırınım uğramaktadır. Bu çalışmada yapılan benzetimlerde ses hızının sabit olduğu varsayılmaktadır. Ses hızı sabit kabul edildiğinde ışın izinde herhangi bir kırılma olmamaktadır.

### 2.1.2 Dalga Denklemi

Ses dalgalarının sıvı ve gaz ortamında yayılımı akışkanlar mekaniği kuralları ile açıklanabilir [36].

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

$p$  akustik basıncı,  $(x, y, z)$  Kartezyen koordinatları,  $t$  zaman fonksiyonu,  $c(x, y, z)$  ses hızını göstermektedir.  $f_0$  frekanslı sinüsoidal dalga için Helmholtz denklemi (2.4) yazılabilir.

$$\Delta p + k^2(x, y, z)p = 0 \quad (2.4)$$

$k(x, y, z) = \frac{w}{c(x, y, z)} = \frac{2\pi f_0}{c(x, y, z)}$  dalga numarası kullanılarak sabit ses hızı için  $z$  ekseninde  $\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{w^2}{c^2} p = 0$  denkleminde yola çıkılarak zamana bağlı basınç denklemi (2.5) yazılabilir.

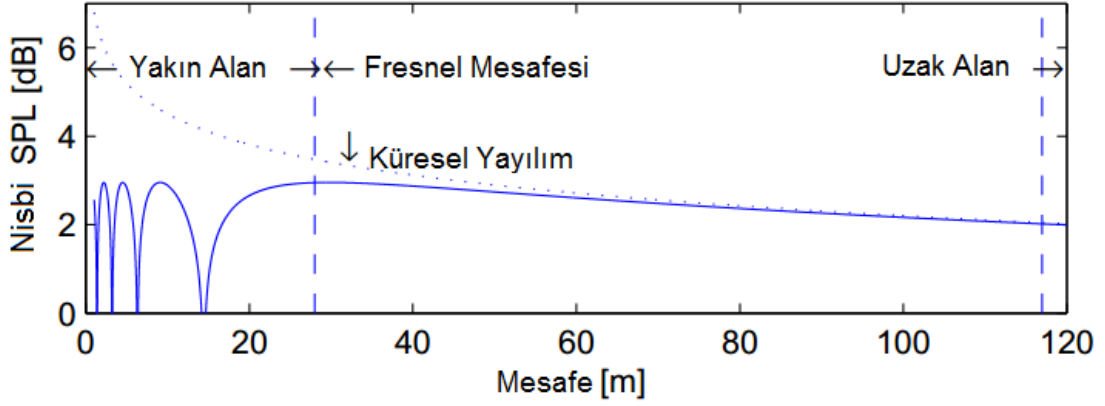
$$p(z, t) = p_0 e^{j\omega(t - \frac{z}{c})} \quad (2.5)$$

$p_0$  sabit genlik,  $t$  zaman,  $c$  ses hızı,  $p$  basıncı,  $z$  kaynağa olan uzaklığı göstermektedir.

### 2.1.3 Yakın Alan ve Uzak Alan Tanımlaması

Yakın alan ve uzak alan tanımlaması sinyal davranışlarının incelenmesi açısından önem arz etmektedir. Uzak alanda düzlem dalga yaklaşımı yapılabildiği halde yakın alanda yapılamamaktadır.

**Yakın Alan:** Birçok bilimsel yayında Fresnel Zone olarak da ifade edilmektedir. Dairesel açıklı yayılım paternini hacimsel olarak tanımlayan eş merkezli elipsoid sayısıdır. Fresnel bölgesi dairesel açıklıkla kırınımdan meydana gelmektedir. Çok sayıda transdüserden oluşan noktasal kaynaklar düşünüldüğünde transdüserin yakın alanındaki herhangi bir noktada, bireysel basınç dalgaları farklı uzaklıklara farklı fazlarda erişecektir. Bundan dolayı yakın alan yapıcı ve yıkıcı girişimlerden oluşmaktadır. Fresnel mesafesi genliğin salınım yapmadığı fakat monoton biçimde azaldığı kaynaktan olan uzaklıktır. Salınım, iki kaynak noktası arasındaki mesafenin en fazla uzunluğunun yarım dalga boyundan daha küçük olduğu durumda mümkündür.



Şekil 2. 3 6 m. yarıçaplı dairesel pistonun 1.2 kHz frekansta ses basınç seviyesi (SPL)

**Uzak Alan:** Birçok bilimsel yayında Fraunhofer Zone olarak da ifade edilmektedir. Kaynaktan uzakta olan alıcılar için farklı konumda bulunan transdüserlere sinyaller  $\frac{1}{R^2}$  yoğunluk azalmasıyla ulaşmaktadır. Yoğunluk monoton olarak azalırken Fresnel uzaklığından büyük mesafeler için, yoğunluğun küresel yayılıma yaklaştığı Fresnel uzaklığının 4 katı uzak alan olarak tanımlanır. Çeşitli dizinler için  $R_{ff}$  uzak alan mesafesi aşağıdaki şekilde verilebilir [37].

- Hatsal dizin için  $R_{ff} = l^2/\lambda$ ,  $\lambda$  dalga boyu,  $l$  dizin uzunluğunu göstermektedir.
- Dairesel piston dizin için  $R_{ff} = \pi r^2/\lambda$ ,  $r$  piston yarıçapını göstermektedir.

#### 2.1.4 Transdüserler

Transdüserler, 1969 yılında ISA tarafından ölçülen fiziksel özellik, miktar ve koşulları kullanılabilir elektriksel miktara dönüştüren bir araç olarak tanımlanmıştır. Bu tezde bahsi geçen transdüserler; sualtında kullanılmakta olup elektrik enerjisini basınçla ses sinyaline, ses sinyalinin oluşturduğu basıncı elektrik enerjisine çeviren cihazlardır [38]. Bazı kaynaklarda sensör olarak da geçmektedir. Tez çalışmasında anılan transdüserlerin her yöne eşit miktarda yayım/alış yaptığı ve türdeş olarak kullanıldığı varsayılmaktadır. Hedeften gelen sinyaller işleneceği için transdüserlerin alış fonksiyonu kullanılmaktadır. Transdüserlerin aldığı sinyaller normalize kabul edilmektedir. Bu tezde yaygın kullanımda olduğu üzere transdüser yerine eleman veya sensör terimleri de kullanılmaktadır.



Şekil 2. 4 30 kHz rezonans frekanslı akustik transdüser

Şekil 2. 4'te 30 kHz frekansında çalışan Chelsea Technologies firmasının DualSense 030 modeli örnek bir transdüser olarak gösterilmektedir. Bu transdüserle ait karakteristikler Çizelge 2. 1'de sunulmaktadır.

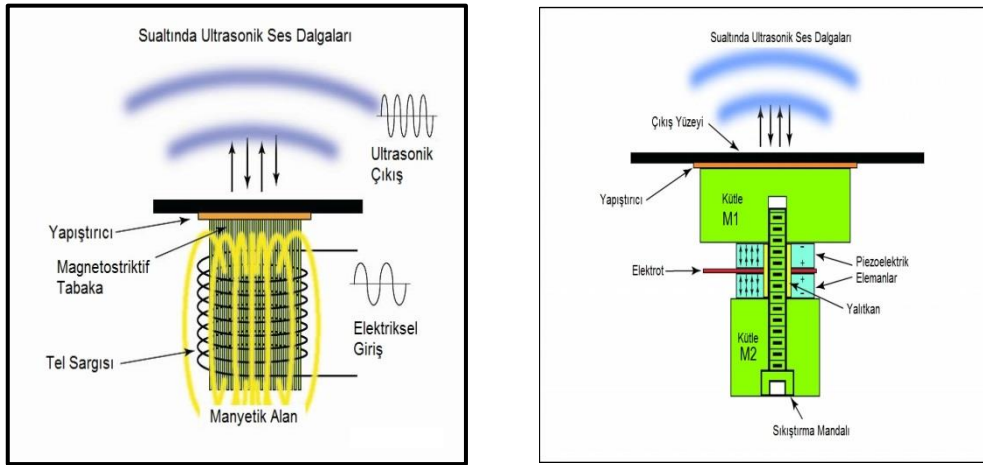
Çizelge 2. 1 DualSense 030 transdüser karakteristikleri

|                                      |                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Nominal Rezonans Frekansı            | 30 kHz                                |
| Alış Hassasiyeti @30 kHz             | -191 dB re 1V/ $\mu$ Pa               |
| Tavsiye Edilen Alış Frekans Aralığı  | 10 Hz – 50 kHz                        |
| Maksimum Akustik Giriş @30 kHz       | + 251 dB re 1 $\mu$ Pa                |
| Yayım Hassasiyeti @30 kHz            | +149 dB re 1 $\mu$ Pa/V at 1m         |
| Tavsiye Edilen Yayım Frekans Aralığı | 20 – 60kHz                            |
| Maksimum Kaynak Seviyesi @30 kHz     | +209 dB re 1 $\mu$ Pa at 1m           |
| Maksimum Uygulanabilir Gerilim       | 1000 Vrms                             |
| Yatay Işın İzi                       | Yönsüz (Her yöne yayım/alım yapmakta) |
| Dikey Işın İzi                       | Yarı Küresel                          |

Çizelge 2. 1'de belirtilen rezonans frekansı transdüserin maksimum enerji verimliliğini sağladığı frekanstır. Alış hassasiyeti alınan genliğin 1V/ $\mu$ Pa referansına oranlanarak ilgili değerle dB cinsinden toplanarak bulunmaktadır. Kaynak seviyesi de sürülen genliğin referans gerilimine oranlanarak yayım hassasiyeti ile toplanmasıyla bulunur.  $SL = S_V + 20\log(V_{in}/V_{ref})$  ile formülize edilebilir.  $SL$  kaynak seviyesi,  $S_V$  yayım

hassasiyeti,  $V_{in}$  alınan sinyal genliği,  $V_{ref}$  referans sinyaldir. Örnek olarak 500 Vrms ile sürülen transdüser  $20 \cdot \log(500V/1V) + 149 \text{ dB} = 202 \text{ dB}$  1 metrede kaynak seviyesine sahiptir. İlgili transdüser yatay olarak her yöne yayım yapmakta veya sinyal almaktadır. Dikey olarak ise yarı küresel yayım yapmakta ve sinyal almaktadır. Küresel düzlemde bir x-y düzleminde kaideye sıralanmış transdüser dizini düşünüldüğünde sadece +z yönüne yayım yapılabilir. Monte edildiği kaidenin arka tarafına doğru yayım/alış yapmamaktadır.

Şekil 2. 5'te sualtında çalışan transdüser çeşitlerinden magnetostriktif ve piezoelektrik tipte olanlar gösterilmektedir. Magnetostriktif transdüserler manyetik alan vasıtasıyla, piezoelektrik transdüserler elektrotların seramikleri itip çekmesiyle çalışırlar.

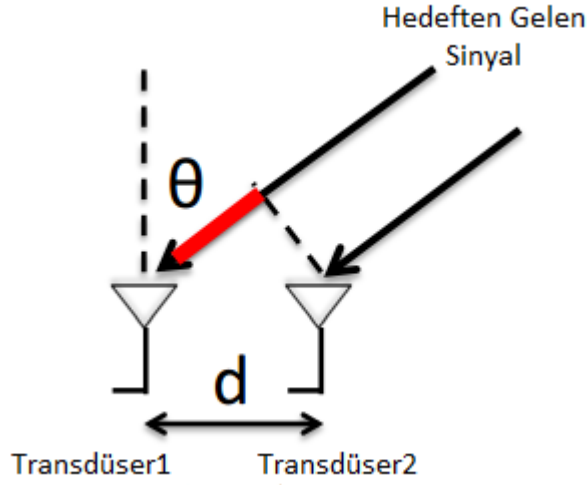


Şekil 2. 5 Magnetostriktif ve Piezoelektrik transdüser yapıları

## 2.2 Dizin Yapısı

Dizin yapısı, sinyal alımında ve gönderiminde kullanılan transdüserlerin hedef tespiti için en uygun yerleşimle çoklu olarak dizilimini tanımlamaktadır. Taranacak hedef açısı ve tespit için kullanılacak küresel eksenlere göre hatsal, piston, düzlemsel, silindirik dizin gibi yapılar kullanılabilir. Hatsal dizinlerle 2 boyutlu, iki eksenli oluşturulmuş dizinlerle 3 boyutlu tarama yapılabilir. Dizin yapısının kullanılmasındaki amaç dizinle birlikte istenilen sinyal kazancını artırmaktır, aynı zamanda doğal bir filtreleme yapılarak istenmeyen bozucu sinyallerin minimize edilmesidir.

Dizin yapısı yerine iki elemanla da hedef kerterizi bulunabilir [39]. Denklem (2.6)'dan görüldüğü üzere her bir transdüser gelen sinyaller arasındaki faz farkı,  $d$  mesafesinin dalga boyuna bölünmesiyle bulunabilir.  $\theta$  hedeften gelen sinyallerin transdüser normaline ile yaptığı açı,  $d$  transdüserler arasındaki mesafe,  $\lambda$  sinyalin dalga boyu,  $\varphi_1$  1. transdüser gelen sinyalin fazı,  $\varphi_2$  2. transdüser gelen sinyalin fazını göstermektedir. Transdüserlere gelen sinyalin  $f$  frekansında periyodik bir sinyal olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2. 6 Hedeften yayılan sinyallerin transdüser  $\theta$  açısıyla gelişi

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (2.6)$$

Fakat bu yaklaşım çok ideal ve gürültüsüz ortamlarda kullanılabilir. Gerçek durumlarda, özellikle sualtı ortamında hatalı sonuçlar verecektir.

Dizin yapısı kullanılarak tekli elemanlara göre kazanç elde edilmektedir. Dizinin tekli elemana göre kazancı  $10 \log_{10}(N)$  denklemi ile hesaplanabilmektedir.  $N$  dizindeki eleman sayısını göstermektedir.

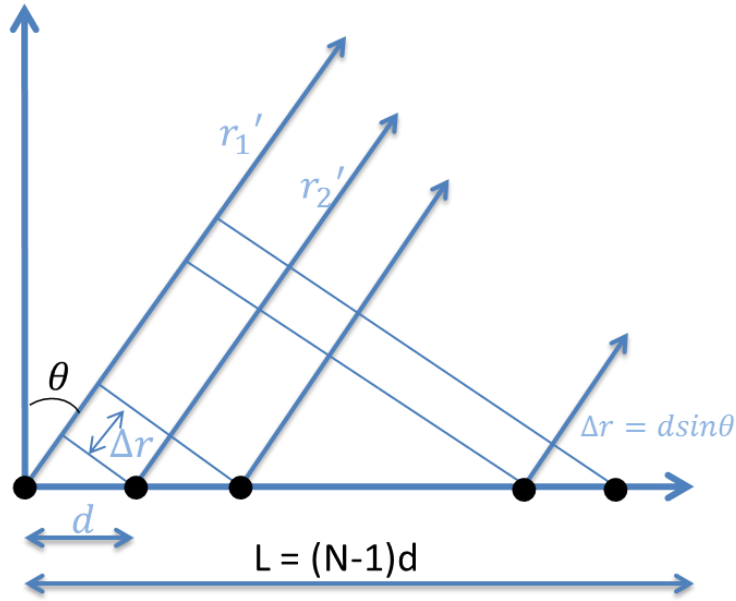
Dizin yapısı kullanılarak sinyal gürültü oranı artırılabilir. SGO yaygın bilinen ismi SNR (Signal to Noise Ratio) ile de anılmaktadır [29]. Sinyal gürültü oranı denklem (2.7) ile hesaplanabilmektedir.

$$SGO = \frac{E\{|s_o(t)|^2\}}{E\{|n_o(t)|^2\}} \quad (2.7)$$

dB cinsinden  $SGO = 10 \cdot \log_{10}(SGO)$  olarak hesaplanmaktadır.  $|s_o(t)|^2$  dizin çıkışındaki sinyal gücü,  $|n_o(t)|^2$  dizin çıkışındaki gürültü gücünü göstermektedir.

### 2.2.1 Hatsal Dizin Yapısı

$N$  adet transdüserden oluşan birbirlerinden  $d$  mesafe aralıklarıyla yan yana dizilmiş bir dizinin  $r$  mesafesinde oluşturduğu  $p$  basıncı (2.8) denklemi ile gösterilmektedir [12]. Bütün transdüserlerin türdeş olduğu varsayılmaktadır. Hatsal dizin Şekil 2. 7’de gösterilmektedir.  $d$  mesafesinin,  $\lambda$  sinyal dalga boyunun yarısı seçilmesi ideal durumdur [40].  $d$  mesafesi  $\lambda/2$  değerinden yüksek seçilirse dizinin ışın demeti genişler,  $\lambda/2$  değerinden düşük seçilirse örtüşme meydana gelir [41]. Transdüserlere gelen sinyalin  $f$  frekansında periyodik sinüsoidal sinyal olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2. 7 Hatsal dizin

$$p(r, \theta, t) = \sum_{i=1}^N \frac{A}{r_i'} e^{j(\omega t - k r_i')} \quad (2.8)$$

$A$  sinyal genliğini,  $r_i'$  her bir transdüserin kaynak noktasına uzaklığını,  $k$  dalga numarasını,  $\theta$  transdüserlerin normali ile sinyalin yaptığı açığı,  $t$  zaman değişkenini

göstermektedir.  $r$  mesafesinin  $L$  dizin uzunluğundan çok çok büyük olduğu varsayılmaktadır. Dizin uzunluğu  $L = (N - 1)d$  eleman uzunluğuna eşittir. Herbir transdüserin kaynağa olan uzaklığı  $r_i = r_1 - (i - 1)\Delta r$  , ( $\Delta r = d\sin\theta$ ) ile ifade edilebilir. Dizinin merkez noktası  $r = r_1 - \frac{1}{2}(\frac{L}{d})\Delta r$  şeklinde yazılabilir. (2.8) denklemi yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$p(r, \theta, t) = \frac{A}{r} e^{-j(\frac{L}{2d})k\Delta r} e^{j(\omega t - kr)} \sum_{i=1}^N e^{j(i-1)k\Delta r} \quad (2.9)$$

Trigonometrik eşitlikler kullanıldığında basınç fonksiyonu aşağıdaki şekilde sadeleşir:

$$p(r, \theta, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left( \frac{\sin[(N/2)k\Delta r]}{\sin[(1/2)k\Delta r]} \right). \quad (2.10)$$

$\theta = 0$  olduğunda basınç  $p(r, 0, t) = N(A/r)e^{j(\omega t - kr)}$  değerine eşittir ve mümkün olan maksimum basınç  $P_{ax}(r) = N(A/r)$  olarak bulunur. Yönlülük fonksiyonu  $H(\theta)$  denklem (2.11) ile gösterilmektedir [12].

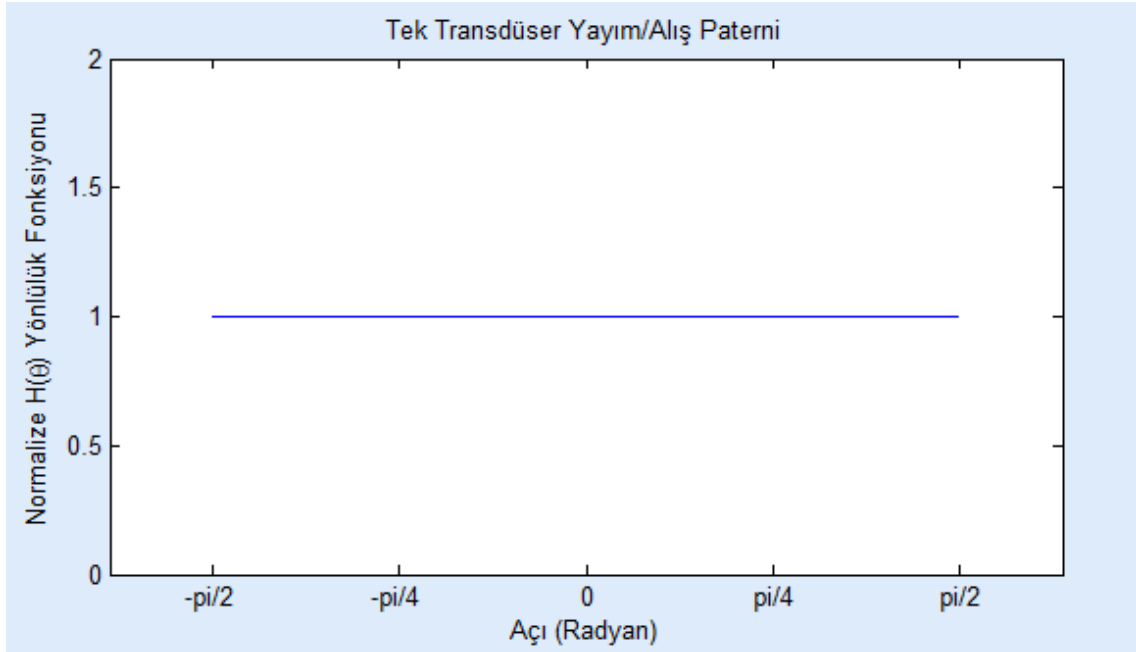
$$H(\theta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin[(N/2)kdsin\theta]}{\sin[(1/2)kdsin\theta]} \right| \quad (2.11)$$

$w = 2\pi f$  açısal frekans ve  $c$  ses hızı olmak üzere  $k = w/c$  dalga numarasını göstermektedir. Basınç genliği  $P(r, \theta) = P_{ax}(r)H(\theta)$  olarak yazılabilir. Bu denklemden yola çıkılarak  $P_{ax}(r)$  sabit olarak kabul edildiğinde dizinin ışın demeti karakteristiğini çıkarmak için  $H(\theta)$  yönlülük fonksiyonunun çizimi yeterli olmaktadır.

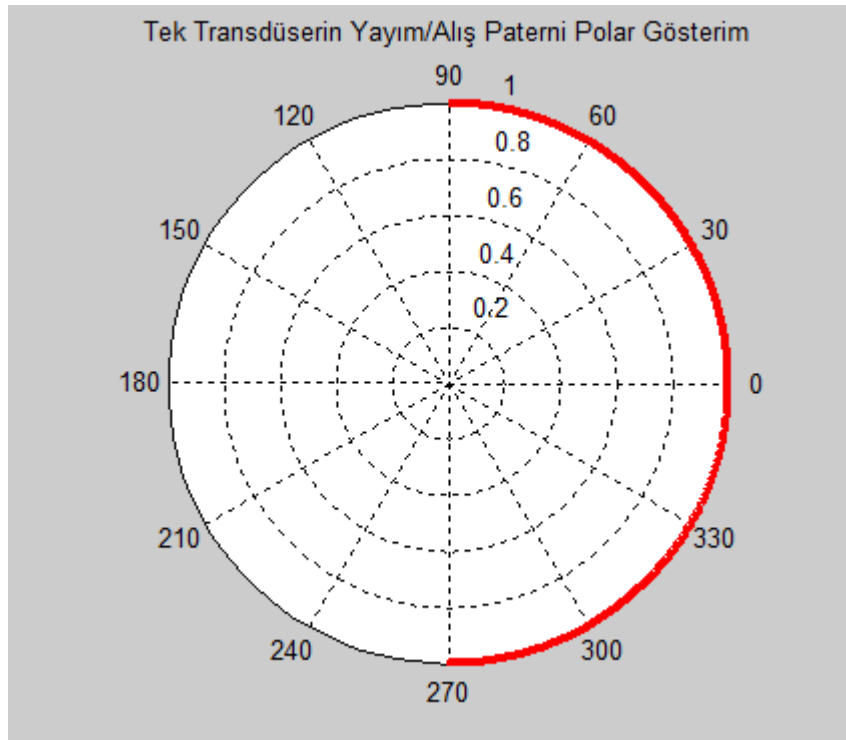
Bu kapsamda MATLAB programında bir arayüz hazırlanarak  $N$  elemanlı  $d$  aralıklarla konumlandırılmış dizinin  $f$  frekansında alınan sinyal için ışın demeti istenilen yönlendirme açısıyla çizdirilebilmektedir. Arayüz üzerinde maksimum ışın demeti genişliği hesabı da yapılmaktadır. Maksimum ışın demeti genişliği, genliğin maksimum noktasının  $1/\sqrt{2}$  değerine indiği noktalar arasından hesaplanabilmektedir [42].

37500 Hz frekansta tek transdüserin yayım/alış paterni Şekil 2. 8'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere yönsüz (her yöne yayım/alış yapan) transdüserin  $-\pi/2 \rightarrow \pi/2$  aralığında genliği sürekli 1'dir. Şekil 2. 9'dan görüldüğü üzere tekli transdüserin

yayım/alış paterni polar gösteriminde de  $-\pi/2 \rightarrow \pi/2$  aralığında genliği sürekli 1'dir. Şekillerden de görüldüğü üzere sabit tek elemanla dizin yapısı oluşmadığından yönlendirme yapılamaz ve transdüserin paterni değiştirilemez.

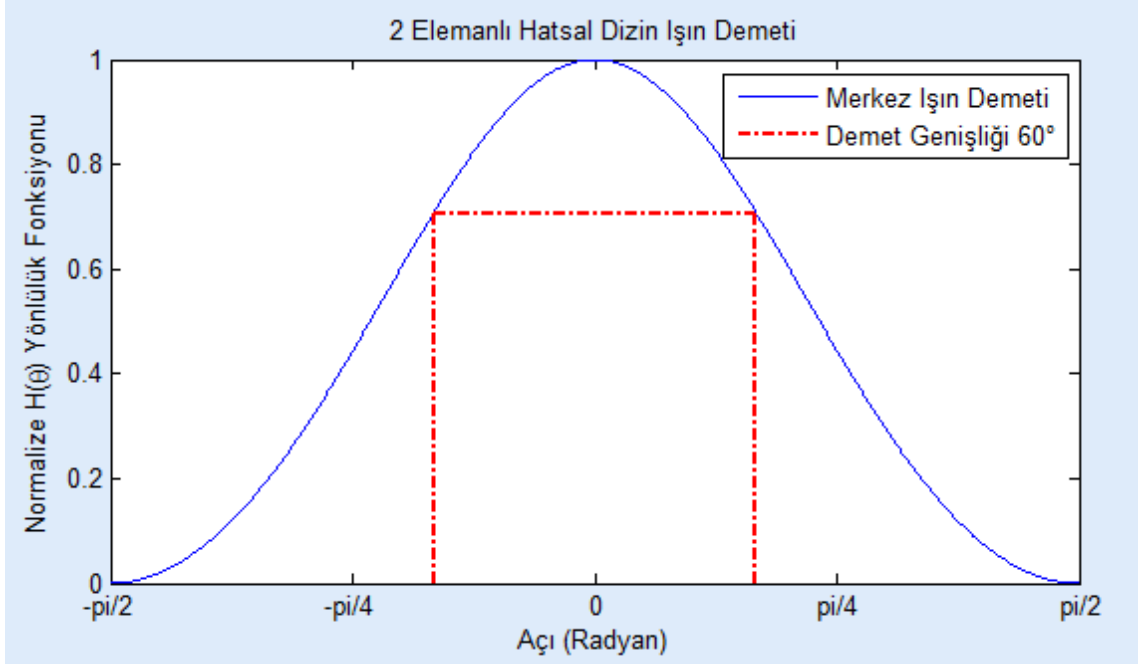


Şekil 2. 8 Tek transdüserin yayım/alış paterni

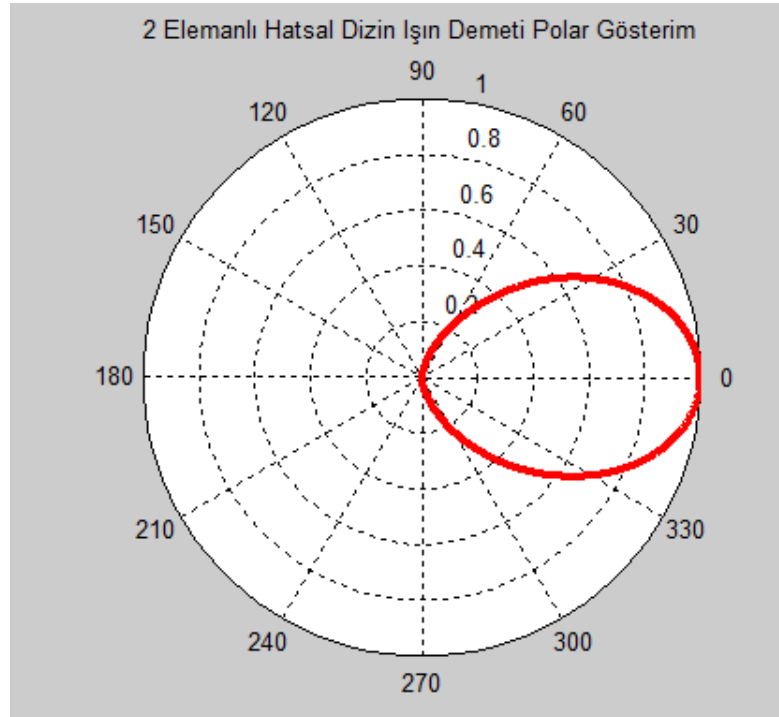


Şekil 2. 9 Tek transdüser yayım/alış paterni polar gösterim

2 elemanlı, 37500 Hz frekansta, 0.02 m aralıkla konumlandırılmış  $0^\circ$  yönlendirme açısına sahip hatsal dizinin ışın demeti genişliği Şekil 2. 10'da gösterilmektedir. Elemanlar arası mesafe  $\lambda/2$ 'dir. Şekil 2. 10'dan da görüldüğü üzere iki elemanlı dizinin ışın demeti genişliği  $60^\circ$  olarak hesaplanmaktadır. Yönlendirme açısı  $0^\circ$  olduğundan maksimum genlik  $0^\circ$  de görülmektedir.



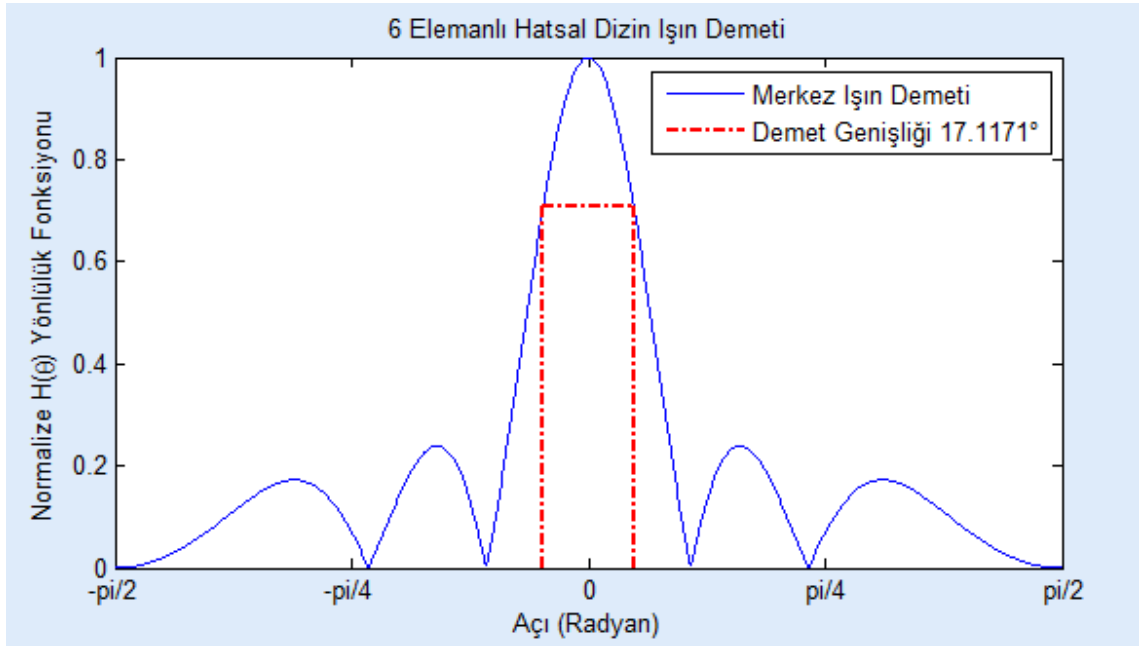
Şekil 2. 10 2 elemanlı hatsal dizin ışın demeti genişliği



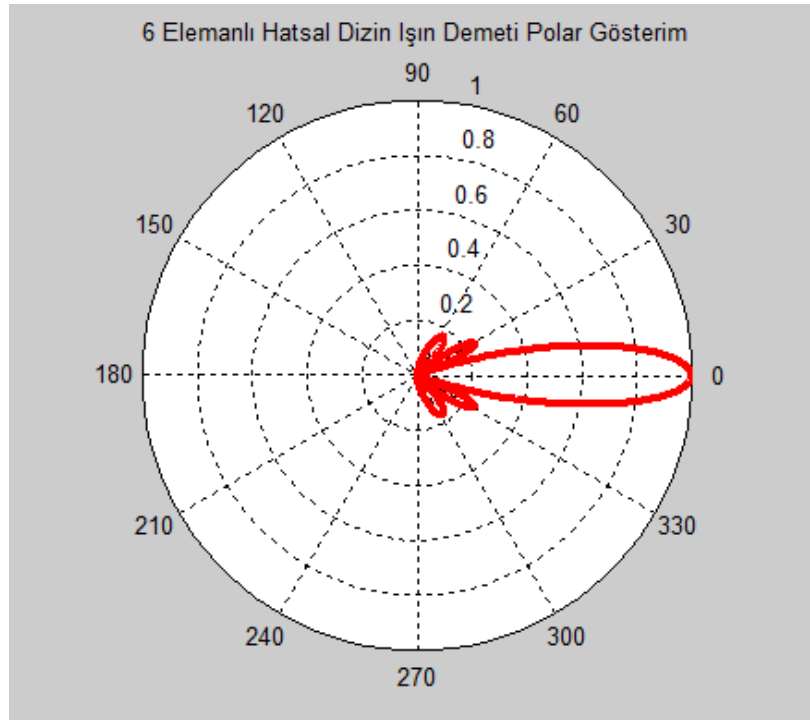
Şekil 2. 11 2 elemanlı hatsal dizin ışın demeti polar gösterim

Şekil 2. 11'den görüldüğü üzere 2 elemanlı dizinin ışın demeti çok geniştir. Hedef kerteriz açısı tespiti oldukça zordur.

37500 Hz frekansta 0.02 m. aralıklarla dizilmiş 6 elemanlı  $0^\circ$  yönlendirilmiş hatsal dizinin ışın demeti genişliği Şekil 2. 12'den de görüldüğü üzere  $17.11^\circ$  olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2. 13'te polar gösterim sergilenmektedir.

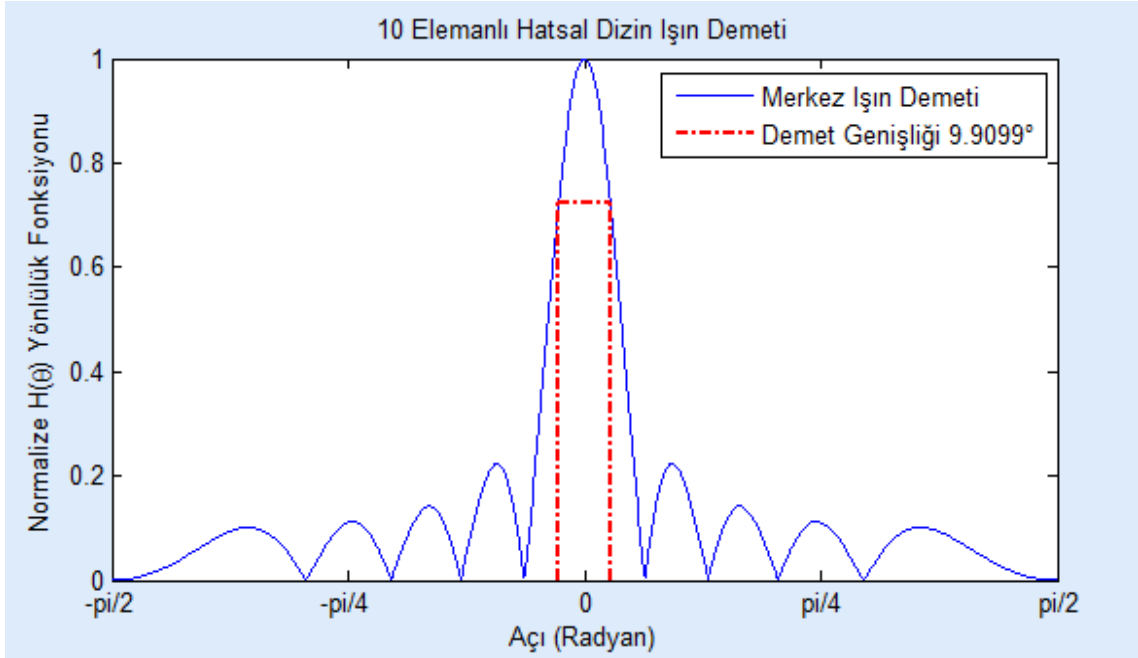


Şekil 2. 12 6 elemanlı hatsal dizin ışın demeti genişliği

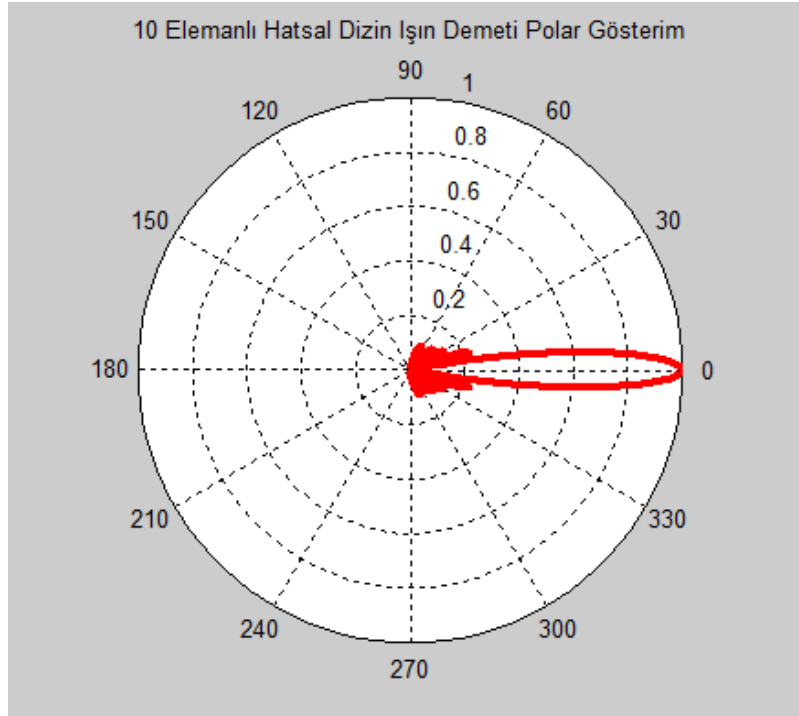


Şekil 2. 13 6 elemanlı hatsal dizin ışın demeti polar gösterim

37500 Hz frekansta 0.02 m. aralıklarla dizilmiş 10 elemanlı  $0^\circ$  yönlendirilmiş hatsal dizinin ışın demeti genişliği Şekil 2. 14'ten de görüldüğü üzere  $9.90^\circ$  olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2. 15'te polar gösterim sergilenmektedir.



Şekil 2. 14 10 elemanlı hatsal dizin ışın demeti genişliği



Şekil 2. 15 10 elemanlı hatsal dizin ışın demeti polar gösterim

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü üzere eleman sayısı azaltıldığında ışın demeti genişliği artmakta ve çözünürlük azalmaktadır. Bundan dolayı hedef tespiti zorlaşmaktadır. Amaç hedefi daha dar ışın demeti içerisine sokarak tespit kestirimini artırmaktır. Dolayısıyla daha fazla eleman kullanarak daha net hedef tespit bilgisi elde edilmektedir. Şekiller normalize olduğundan dolayı maksimum güç genlik gösterimi sergilenmemektedir. Yönlendirme açısı  $0^\circ$  olduğundan merkez ışın demeti  $0^\circ$  de çıkmaktadır.

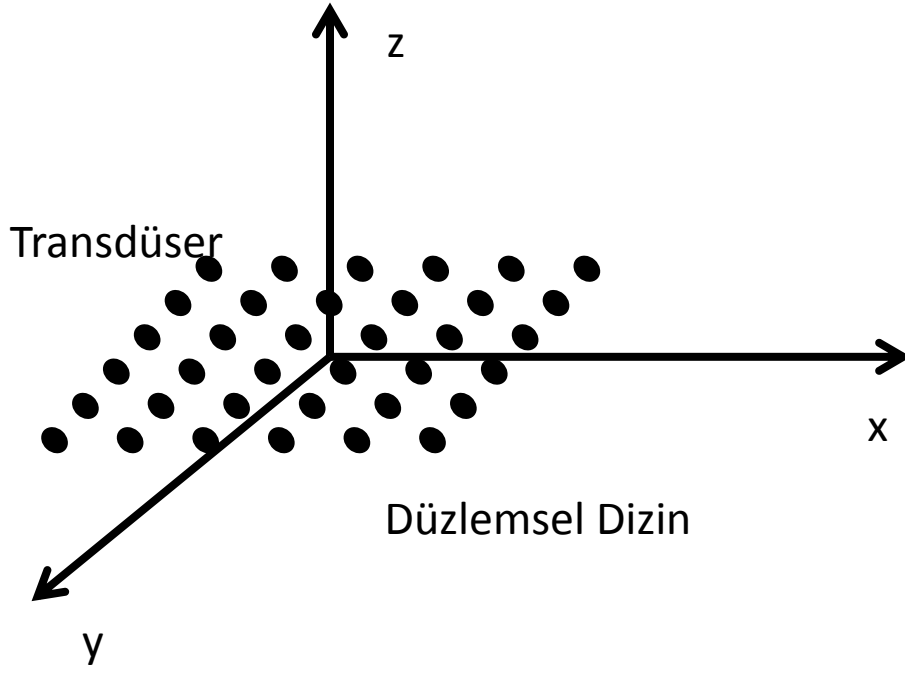
### 2.2.2 Düzlemsel Dizin Yapısı

Düzlemsel dizin Şekil 2. 16'da gösterildiği üzere X ve Y eksenini boyunca yerleştirilmiş transdüserlerden oluşmaktadır. Genellikle düzgün dağılımlı olarak kullanılmaktadır. Fakat düzgün dağılımlı olmayan farklı aralıklarla yerleştirilmiş farklı tipte transdüserlerin kullanıldığı düzlemsel dizinler de görülebilmektedir.

Düzlemsel dizinler hatsal dizinlere göre;

- Daha yüksek yönlülük,
- Daha dar ana ışın demeti,
- Daha düşük yan kulakçık,
- Daha yüksek dizin kazancı,
- Daha yüksek tarama paterni sağlamaktadır.

Bu avantajlarının yanında daha fazla alan kaplaması, daha fazla sayıda transdüser kullanılması ve daha karmaşık bir yapıya sahip olması düzlemsel dizinin hatsal dizine karşı dezavantajlarını oluşturmaktadır [43].



Şekil 2. 16 Düzlemsel dizin yapısı

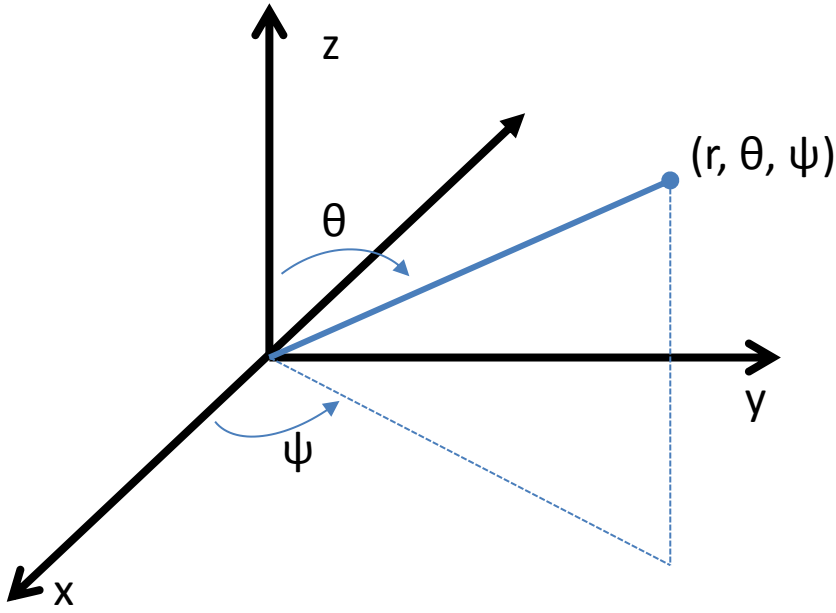
XY düzleminde yatan iki boyutlu düzlemsel dizinin uzak alan için uzamsal Fourier transformu denklem (2.12) ile gösterilebilir.

$$\begin{aligned}
 D(f, f_X, f_Y) &= F_{xa} F_{ya} \{A(f, x_a, y_a)\} \\
 &= \iint_{-\infty}^{\infty} A(f, x_a, y_a) e^{j2\pi(f_X x_a + f_Y y_a)} dx_a dy_a
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$D(f, f_X, f_Y)$  yönlülük fonksiyonunu (Directivity Function),  $A(f, x_a, y_a)$  fonksiyonu ise kompleks frekans cevabı veya kompleks açıklık fonksiyonunu (Complex Aperture Function) göstermektedir [29].  $F_{xa}$  ve  $F_{ya}$  Fourier dönüşümlerini göstermektedir.

$$f_X = \frac{u}{\lambda} = \frac{\sin\theta \cos\psi}{\lambda} \tag{2.13}$$

$$f_Y = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sin\theta \sin\psi}{\lambda} \tag{2.14}$$



Şekil 2. 17 Küresel koordinatlarda uzak alan noktası

Uzamsal frekanslar olan  $f_x$  ve  $f_y$ ,  $\theta$  ve  $\psi$ 'ye bağımlı olarak küresel koordinatlarda açıklanabilir. Dizinin uzak alan yönlülük fonksiyonunu hesaplamak için öncelikle kompleks açıklık fonksiyonu bulunmalıdır.

Tek sayılardan oluşan  $M \times N$  boyutlu  $XY$  düzleminde yatan bir düzlemsel dizin ele alındığında dizin elemanları özdeş değilse her eleman farklı kompleks frekans cevabına sahip olur ve bu elemanlar eşit aralıklarla dizilmemişse kompleks frekans cevabı denklem (2.15) ile gösterilebilir.

$$A(f, x_a, y_a) = \sum_{m=-M'}^{M'} \sum_{n=-N'}^{N'} c_{mn}(f) e_{mn}(f, x_a - x_m, y_a - y_n) \quad (2.15)$$

$$M' = \frac{M - 1}{2} \quad (2.16)$$

$$N' = \frac{N - 1}{2} \quad (2.17)$$

$M$  ve  $N$  sırasıyla  $X$  ve  $Y$  eksenlerindeki tek sayıdaki transdüser sayısını göstermektedir.

$$c_{mn}(f) = a_{mn}(f) e^{j\theta_{mn}(f)} \quad (2.18)$$

$a_{mn}(f)$  genlik ve  $e^{j\theta_{mn}(f)}$  faz ağırlıklandırması olmak üzere  $c_{mn}(f)$  frekans bağımlı kompleks ağırlıklandırmaları teşkil etmektedir.  $e_{mn}(f, x_a, y_a)$  mn. transdüserin kompleks frekans cevabını göstermektedir.  $x_m$  ve  $y_n$  merkezdeki transdüserin XY koordinatlarındaki noktalarıdır.  $x_a$  ve  $y_a$  her bir transdüserin XY koordinatlarındaki merkez noktalarıdır. Denklem (2.15)'de gösterildiği üzere dizinin frekans cevabı her bir transdüserin kompleks frekans cevabının doğrusal süperpozisyonudur.

$$D(f, f_X, f_Y) = \sum_{m=-M'}^{M'} \sum_{n=-N'}^{N'} c_{mn}(f) E_{mn}(f, f_X, f_Y) e^{j2\pi(f_X x_m + f_Y y_n)} \quad (2.19)$$

$$E_{mn}(f, f_X, f_Y) = F_{x_a} F_{y_a} \{e_{mn}(f, x_a, y_a)\} \quad (2.20)$$

Dizindeki bütün elemanlar türdeş fakat eşit aralıklarla dizilmemişse düzlemsel dizin için yönlülük fonksiyonu denklem (2.21)'deki gibi olur.

$$D(f, f_X, f_Y) = E(f, f_X, f_Y) S(f, f_X, f_Y) \quad (2.21)$$

$$E(f, f_X, f_Y) = F_{x_a} F_{y_a} \{e(f, x_a, y_a)\} \quad (2.22)$$

Yukarıda yazılan denklemlerden yola çıkarak dizinin  $D(f, f_X, f_Y)$  yönlülük fonksiyonu, kompleks ağırlıklı  $E(f, f_X, f_Y)$  ve her bir transdüserin bireysel yönlülük fonksiyonu olan  $S(f, f_X, f_Y)$  ile yazılabilir. Buradan yola çıkılarak ters uzamsal Fourier transformu ile zaman alanına dönülebilir.

$$A(f, x_a, y_a) = e(f, x_a, y_a)_{x_a, y_a}^* s(f, x_a, y_a) \quad (2.23)$$

$x_a^*, y_a^*$  işlemi  $x_a$  ve  $y_a$ ya göre iki boyutlu konvolüsyonu göstermektedir.

$$s(f, x_a, y_a) = F_{f_X}^{-1} F_{f_Y}^{-1} \{S(f, f_X, f_Y)\} \quad (2.24)$$

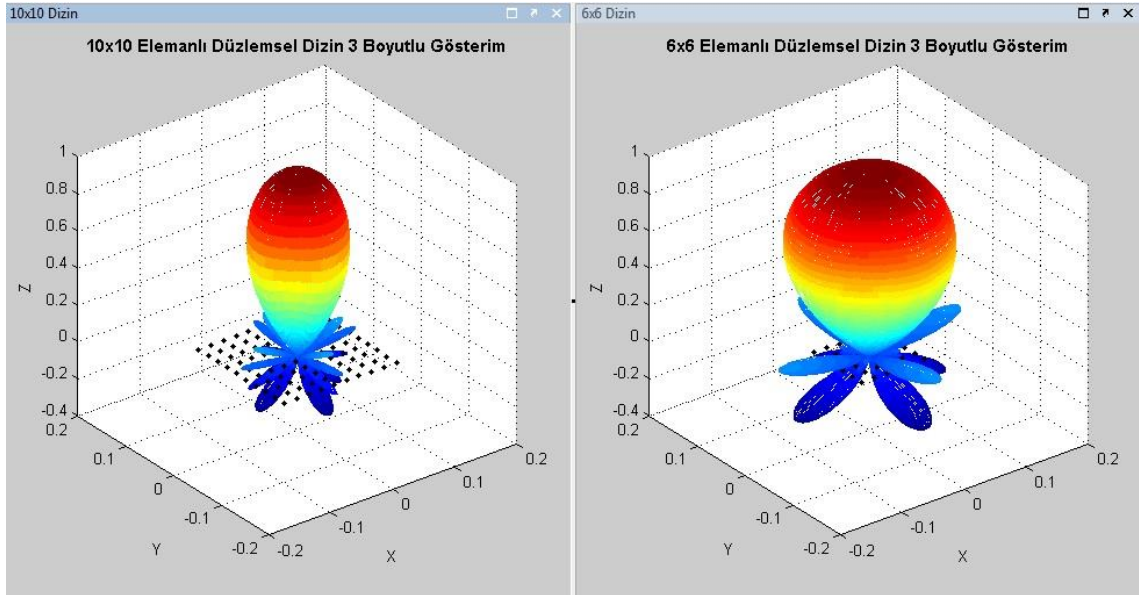
$$s(f, x_a, y_a) = \sum_{m=-M'}^{M'} \sum_{n=-N'}^{N'} c_{mn}(f) \delta(x_a - x_m) \delta(y_a - y_n) \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'den yola çıkılarak özdeş, kompleks ağırlıklandırılmış, yönsüz nokta elemandan oluşan  $M \times N$  boyutlu dizinin frekans cevabı iki boyutlu FIR filtre gibi düşünülebilir [44].

Yönsüz noktasal elemanlar için  $E(f, f_X, f_Y) = F_{xa}\{\delta(xa)\}F_{ya}\{\delta(ya)\} = 1$  olduğundan  $D(f, f_X, f_Y) = E(f, f_X, f_Y)S(f, f_X, f_Y) = S(f, f_X, f_Y)$  dizin yönlülük fonksiyonu elde edilir.

Düzlemsel dizin yapısı ışın demeti benzetimi MATLAB programında çizdirilebilmektedir. Benzetim için XY düzlemine yerleştirilmiş 6x6 adet ve 10x10 adet eleman kullanılmaktadır. Hatsal dizin ile paralellik göstermesi açısından frekans değerleri ve dizilim aralıkları aynı değerde alınmaktadır.

37500 Hz frekansta 10x10 adet ve 6x6 adet eleman için 0.02 m. aralıklarla dizilmiş karesel düzlemsel dizinler için çizdirilen ışın demetleri Şekil 2. 18’de gösterilmektedir. Yönlendirme açısı  $0^\circ$  olan düzlemsel dizinlerin 3 boyutlu grafikleri yan yana sergilenmektedir.



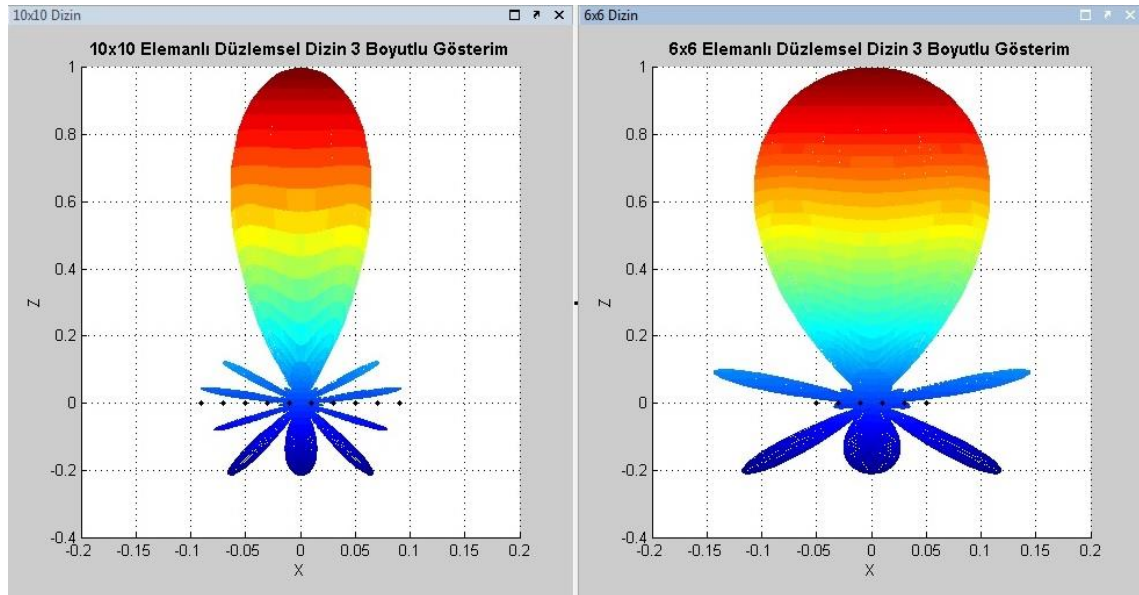
Şekil 2. 18 10x10 ve 6x6’lık düzlemsel dizinlerin ışın demetleri

Şekil 2. 18’den görüleceği üzere düzlemsel dizindeki eleman sayısı artırıldığında ışın demeti genişliğinin daraldığı 3 boyutlu olarak görülmektedir. Dizinin sahip olduğu elemanlar siyah noktalarla konumlandırılmaktadır. Dizideki eleman sayısı arttıkça dizinin gürültüye karşı olan direnimi de artmaktadır. Dizinlerde oluşan yan kulakçıklar irdelendiğinde daha fazla elemana sahip dizinlerin daha düşük yan kulakçıklara sahip olduğu görülmektedir.

Düzlemsel dizin yapısının ışın demeti genişliği hesabı için XZ veya YZ düzlemleri kullanılabilir. Her iki eksen de eleman sayıları aynı olduğu için ışın demeti genişlikleri değişmemektedir. Işın demeti genişliği hesabı için maksimum genliğin  $1/\sqrt{2}$  değerine düştüğü noktadaki açılar kullanılmaktadır.

Şekil 2. 19'dan görüldüğü üzere maksimum genliğin  $1/\sqrt{2}$  değerine düştüğü noktalar incelendiğinde 10x10 adet elemanlı dizin için yaklaşık olarak  $10.15^\circ (\pm 0.056 \pi)$ , 6x6 adet elemanlı dizin için yaklaşık olarak  $17.01^\circ (\pm 0.094 \pi)$  hesaplanmaktadır.

Düzlemsel dizin ve hatsal dizin için yapılan demet genişlikleri benzetimleri şekillerden görüldüğü üzere benzer sonuçlar ortaya koymaktadır.



Şekil 2. 19 10x10 ve 6x6'lık düzlemsel dizinlerin XZ düzlemi ışın demetleri

Bu tezde gösterim ve hesaplama kolaylığı açısından 6x6 adet elemanlı düzlemsel dizin kullanılmaktadır. 6x6 elemanlı dizine ait ışın demeti hesaplamaları daha sonraki bölümlerde kullanılmaktadır.

### 2.2.3 Pencereleme

Pencereleme tekniği spektral sızmayı engellemek için giriş verisinin önceden belirlenmiş pencere tipine göre uygun katsayılarla çarpılmasıdır [45]. Giriş sinyalinin kompleks olduğu durumlarda pencereleme katsayıları da kompleks olmalıdır [46]. Günümüzde en iyi sinyal analiz yöntemlerinden biri hızlı Fourier dönüşümü (FFT)

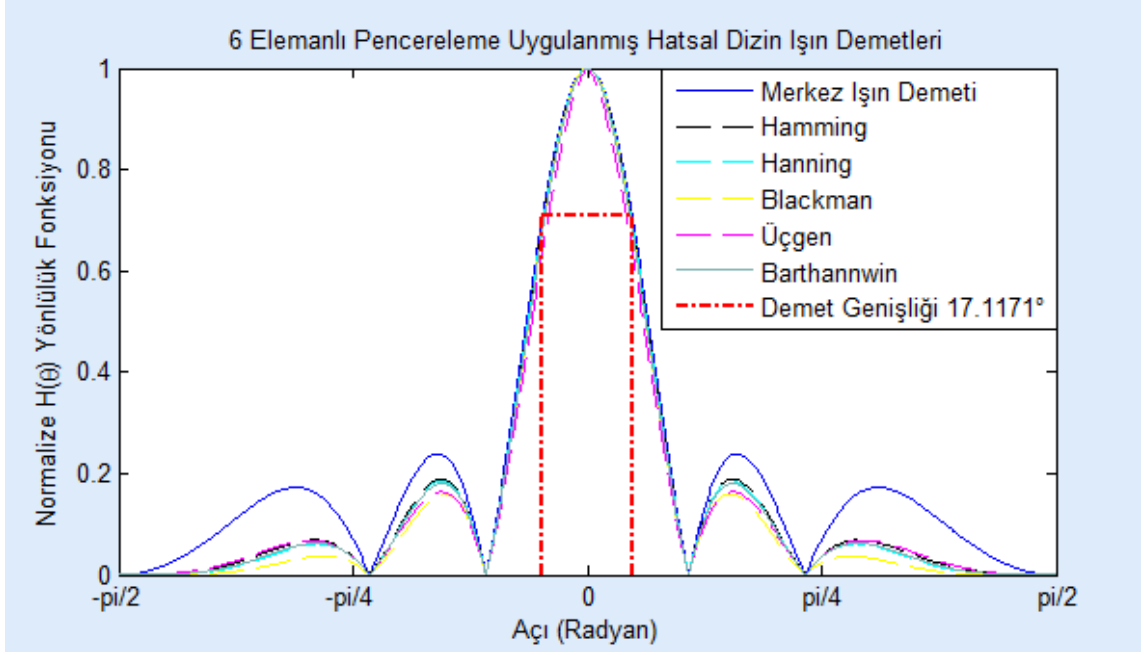
algoritmaları ile yapılan ayırık Fourier dönüşümüdür. DFT (Discrete Fourier Transform) olarak ta bilinmektedir. Fakat bu yöntemin en büyük sıkıntılarından biri spektral zayıflamadır [47]. Genellikle dikdörtgensel pencereler yüksek spektral sızıntı oranlarına sahiptir [48]. Spektral sızıntı sinyalin frekans izgesindeki gösteriminde istenmeyen frekans genlikleri olarak ortaya çıkmaktadır. Işın demetlemesindeki karşılığı yan kulakçıklardır. Yan kulakçıklar istenmeyen durumdur, bozucu girişimleri artırmaktadır [49]. Enerjinin ana kulakçık içerisinde olması ve maksimum şekilde karşı tarafa iletilmesi amaçlanmaktadır.

Yan kulakçıkları bastırmak için pencereleme fonksiyonları kullanılmaktadır. Hamming, Tukey, Hanning gibi değişik pencereleme fonksiyonları ile yan kulakçıklar azaltılabilmekte veya elimine edilebilmektedir [50].

Bazı pencereleme fonksiyonları ve denklemleri Çizelge 2. 2’de verilmektedir [51]. N kullanılan pencere uzunluğunu göstermektedir.

Çizelge 2. 2 Pencereleme fonksiyonları ve denklemleri

|               |                                                                                                                           |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dikdörtgensel | $w(n) = 1$                                                                                                                |
| Hamming       | $w(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$                                                                     |
| Hanning       | $w(n) = 0.5 + 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$                                                                       |
| Blackman      | $w(n) = 0.42 + 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right)$                              |
| Üçgen         | $w(n) = 1 - \frac{ n }{(N-1)/2}$                                                                                          |
| Barthannwin   | $w(n) = 0.62 - 0.48\left \left(\frac{n}{N} - 0.5\right)\right  + 0.38\cos\left(2\pi\left(\frac{n}{N} - 0.5\right)\right)$ |



Şekil 2. 20 6 elemanlı hatsal dizin pencereleme çizimleri

Şekil 2.20’den görüldüğü üzere 6 elemanlı hatsal dizine pencereleme uygulandığında yan kulakçıkların bastırıldığı görülmektedir. Herbir pencereleme fonksiyonu kendi karakteristikleri dâhilinde yan kulakçıkları bastırmaktadır. Normalize yönlülük fonksiyonları 37500 Hz frekansta, 6 elemanlı, 0.02 m. aralıklarla dizilmiş, yönlendirme uygulanmamış hatsal dizin için çizdirilmektedir.

Bu tezde hesaplama kolaylığı açısından dikdörtgensel pencereleme kullanılmaktadır.

#### 2.2.4 Yönlendirme

Dizinler için çeşitli yönlerde sinyal yayım ve alımı fiziksel döndürme olmadan yapılmak istenmektedir. Bu durum elektronik yönlendirme (steering) ile yapılabilmektedir [52].  $i_\tau$  zaman gecikmesi dizindeki i. elemana gelen sinyale yerleştirildiğinde denklem (2.26) elde edilmektedir.

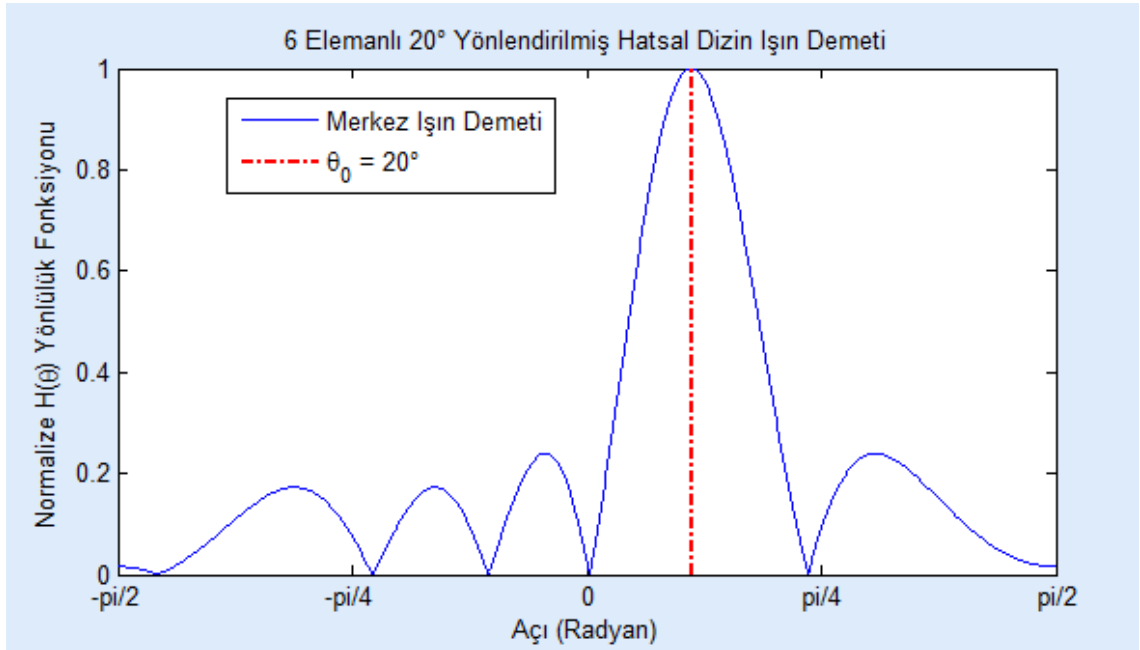
$$p(r, \theta, t) = \sum_{i=1}^N \frac{A}{r_i'} e^{j(\omega(t+i_\tau) - kr_i')} \quad (2.26)$$

Bu denklem kullanılarak yönlülük fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$H(\theta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin[(N/2)kd(\sin\theta - \sin\theta_0)]}{\sin[(1/2)kd(\sin\theta - \sin\theta_0)]} \right| \quad (2.27)$$

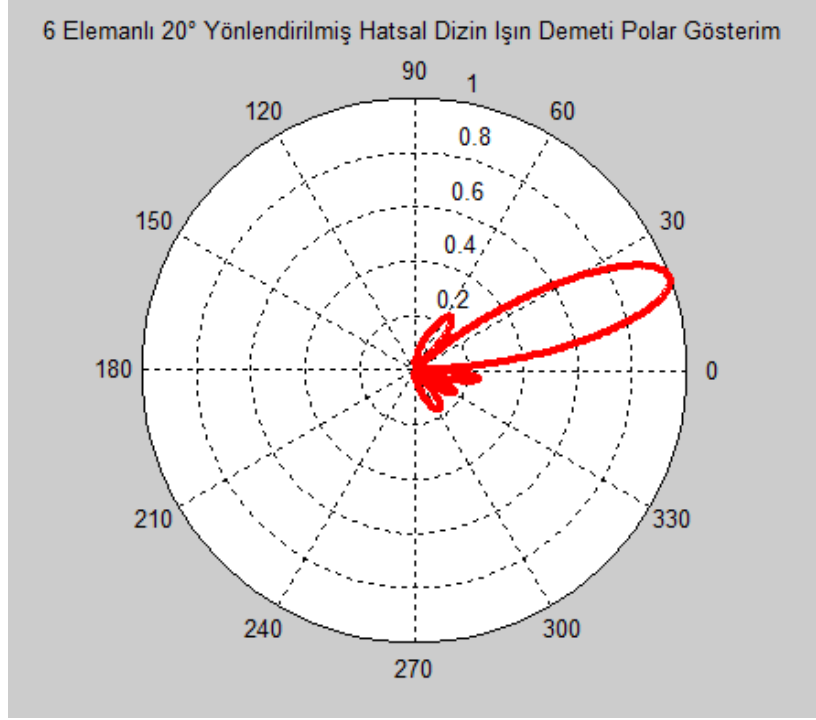
$H(\theta)$  yönlülük fonksiyonunda yönlendirme işleminden sonra ana kulakçık  $\theta_0$  açısını göstermektedir. Bu işlem, fonksiyondan da görüldüğü üzere frekanstan bağımsızdır. Pratikte yönlendirme işlemi, yayım ve alım için sinyallere geciktirme verilerek elektronik donanım veya bilgisayar yazılımları ile gerçekleştirilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus kaydırma açısı  $\theta_0 = 90^\circ$  olduğunda ikinci büyük kulakçık genişlemektedir [29].

37500 Hz frekansta, 0.02 m. aralıklarla dizilmiş 6 elemanlı hatsal dizine  $20^\circ$  yönlendirme yapıldığında oluşan ışın demeti Şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 21 6 elemanlı hatsal dizin  $20^\circ$  yönlendirilmiş ışın demeti

Yönlendirme işlemi ışın demetlemesinin esasını oluşturmaktadır. Fiziksel döndürmeye gerek kalmadan sayısal olarak ışın demetinin yönlendirilebilmesi ile hedef tespiti daha kolay hale gelmektedir. Şekil 2. 22’de yönlendirilmiş ışın demetinin polar gösterimi yapılmaktadır.



Şekil 2. 22 6 elemanlı hatsal dizin 20° yönlendirilmiş ışın demeti polar gösterim

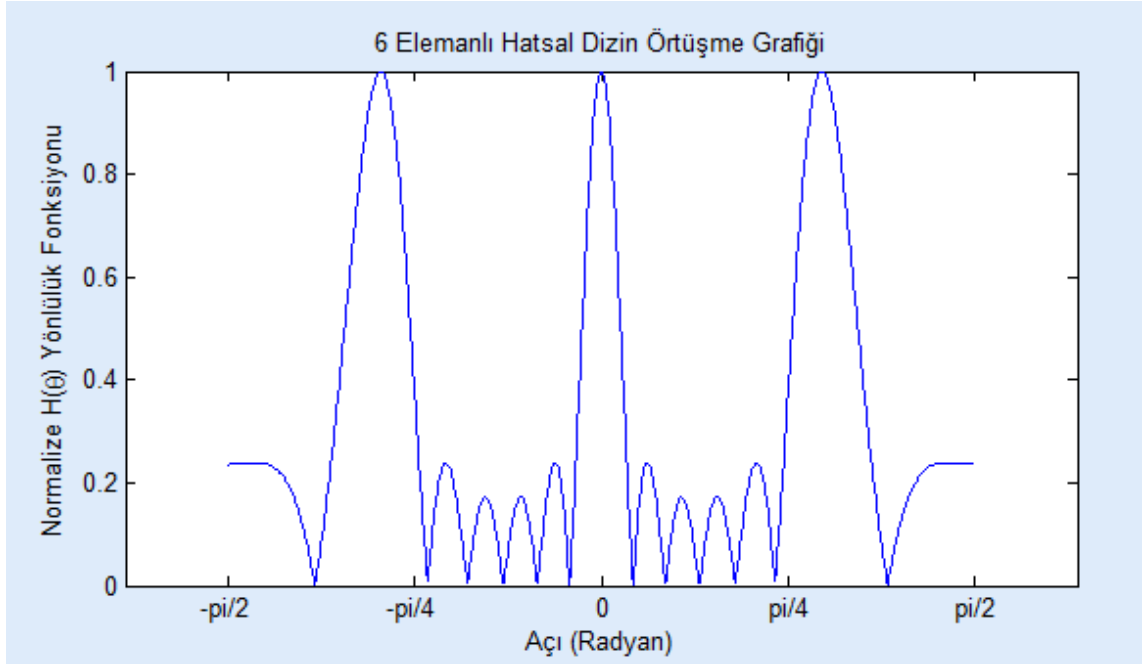
### 2.2.5 Örtüşme

Düzgün dizilişli diziler için elemanlar arası mesafe sinyal dalga boyunun yarısından fazla seçildiğinde uzamsal örtüşme meydana gelmektedir [53]. Işın demetlemesi kanallar arası korelasyonu maksimize eden gecikmeyi kullanmaktadır [54]. Aralık dalga boyunun yarısından fazla olduğunda ışın demetleyicisi sinyali maksimize edemez ve dizi yanıtında ızgara kulaklar oluşmaya başlar [55].

Örtüşme engellemek için örtüşme engelleyici filtreler ve yüksek frekanslarda uzamsal çözünürlük sınırlama gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [56-57].

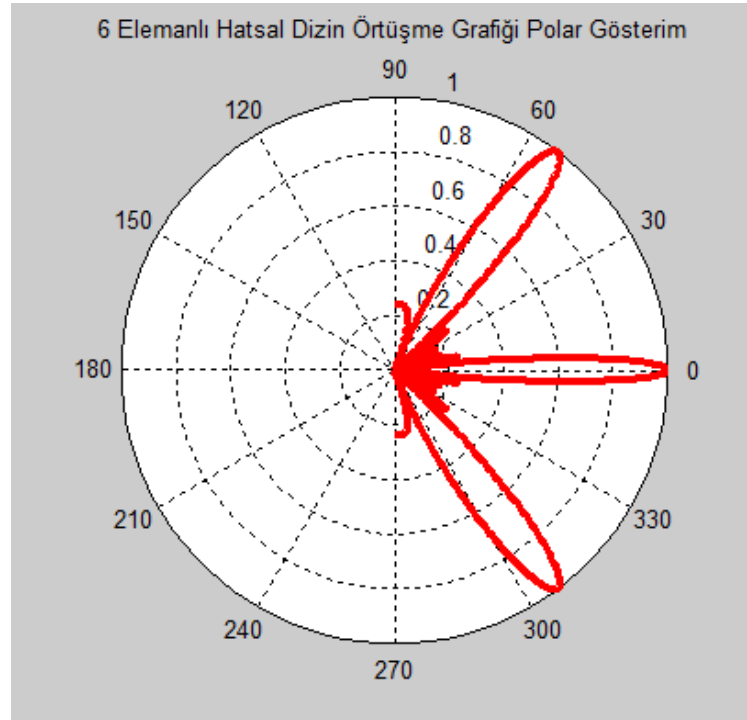
Örtüşme aynı zamanda örnekleme yapıldığında, sinyalin içerdiği en yüksek frekanslı bileşenin 2 katından daha düşük frekans kullanıldığında sinyal geri elde edilirken yüksek frekanslı bileşenlerin katlanması için de kullanılmaktadır [58].

37500 Hz için  $c = 1500 \text{ m/sn}$  kabul edildiğinde  $\lambda = c/f$  uyarınca hatsal ve düzlemsel dizinde kullanılan dalga boyu 0.04 m. olarak hesaplanır. Dizin yerleşimlerinde elemanlar arası mesafe 0.02 m. den fazla olduğunda örtüşmeler ortaya çıkmaktadır. Hatsal dizin için elemanlar arası mesafe 0.05 m. yapıldığında oluşan patern Şekil 2.23'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 23 6 elemanlı hatsal dizin örtüşme grafiği

Şekil 2. 23 ve Şekil 2. 24'ten görüldüğü üzere ana kulakçık daralmakta ve fazladan ana kulakçıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum enerjinin istenilen yöne iletilmesini engellemektedir. İstenmeyen bir durumdur. Hedef tespiti olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 2. 24 6 elemanlı hatsal dizin örtüşme grafiği polar gösterim

### IŞIN DEMETLEMESİ

Işın demetlemesi sinyale yayım ve alım esnasında yönlülük katmak ve istenmeyen yönlerden gelen bozucu sinyalin bastırılması için uygulanan bir sinyal işleme yöntemidir [1]. Işın demetlemesiyle yapıcı girişim sinyalleri etkinliği artırılırken, bozucu sinyaller bastırılır [59].

Işın demetlemesi ses dalgaları ve radyo frekans kontrollü dalgalar için kullanılabilir. RADAR, SONAR, kablosuz haberleşme, astronomi, akustik, sismoloji gibi alanlarda kullanılmaktadır. Işın demetlemesi yayımda sinyal kazancını artırmak ve yönlülük katmak, alımda ise sinyali gürültülerden arındırmak amaçlı kullanılmaktadır.

Dizinin yayım esnasında yönlülüğünü değiştirmek için her bir elemanın genlik ve fazının demetleyici tarafından kontrol edilmesini gerektirir. Alım esnasında ise herbir elemana gelen sinyaller belirlenen paterne göre toplanarak işlenir.

Günümüzde çoklu alıcılı mikrofon sistemleri kullanılarak konferans gibi bozucu etkilerin yüksek olduğu ortamlarda konuşmacının sesi ışın demetlemesiyle etkin olarak alınabilir [60]. Işın demetlemesiyle alım yapılırken her bir elemana farklı ağırlıklandırma katsayıları uygulanarak ana kulakçık belirginleştirilmeye çalışılır. Ağırlıklandırma katsayıları için Dolph-Chebyshev, Hamming, Hanning tarzında değişik pencereleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu sayede bozucu etkisi olan yan kulakçıklar bastırılarak gürültü etkisi kırılmaya çalışılır.

Işın demetlemesi yoğun bir hesaplama gerektirmektedir. SONAR gibi nispi olarak düşük veri oranlı sistemlerde aynı anda belli yöne hem yayım hem de alım işlemleri yapılabilir. RADAR gibi yüksek veri oranlı sistemler de ise genellikle aynı anda

sadece yayım veya alım yapılmaktadır. Günümüzde paralel işlem yapabilen FPGA ve DSP donanımları ile radar verileri de gerçek zamanlı olarak işlenebilmektedir.

### 3.1 Işın Demetlemesi Yöntemleri

Işın demetlemesi hedef tespiti için en önde gelen tekniklerden biridir. Günümüzde ışın demetlemesi için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin her birinin farklı yetenekleri ve limitleri vardır. En genel haliyle geleneksel ve uyarlamalı yöntemler olarak sınıflandırılabilirler [22]. Geleneksel ışın demetleyicilerinin cevabı gelen sinyal verisinden bağımsızdır. Uyarlamalı ışın demetleyicileri sinyal verisi bağımlıdır. Gelen sinyal çeşitli kısıtlara göre optimize edilerek ağırlık katsayıları bulunmaktadır. Bu ağırlık katsayıları gürültüyü minimize etmek ve istenmeyen yönlerden gelen sinyalleri bastırmak için kullanılır.

Uyarlamalı yöntemler geleneksel yöntemlere göre daha yüksek çözünürlük ve daha iyi sinyal girişim bastırma oranları sağlamaktadır. Bununla birlikte uyarlamalı yöntemlerde çevre, kaynak veya dizin üzerinde yapılacak yanlış varsayımlar geleneksel yöntemlerden çok daha düşük performans sergilenmesine sebep olmaktadır.

#### 3.1.1 Geleneksel Işın Demetleyiciler

Geleneksel ışın demetleyiciler önceden hesaplanmış ağırlık katsayılarını kullanarak işlemektedir. Herbir elemana gelen veriler belirlenen gecikmelerle toplanarak en yüksek sinyal genliği elde edilmeye çalışılır. Çıkışta elde edilen genlik denklem (3.1) ile gösterilmektedir.

$$y(t) = w^H x(t) \quad (3.1)$$

$y(t)$  çıkış sinyalini,  $w^H$  ağırlıklandırma katsayılarını,  $x(t)$  elemanlara gelen verileri göstermektedir.  $w^H$  için farklı yöntemler kullanılarak yan kulakçıklar bastırılmaya çalışılmaktadır.

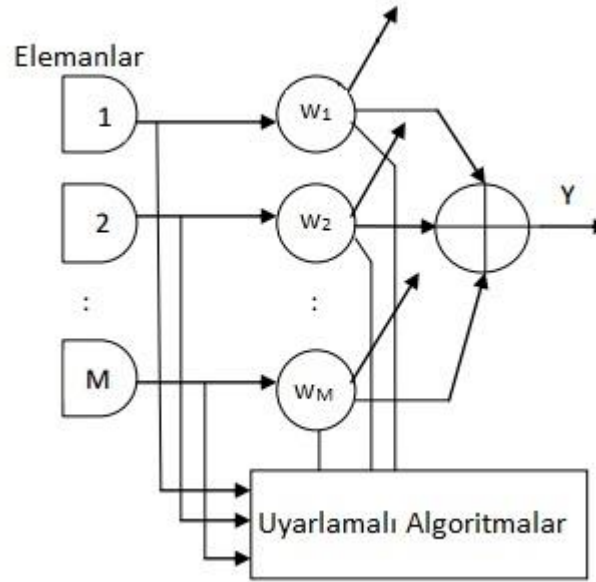
Geleneksel ışın demetleyicilerin frekans alanı uygulamasında da herbir elemana gelen veriler FFT işleminden geçirilerek zaman gecikmesinin karşılığı olan faz kaymasıyla çarpılır. Yönlendirme vektörüyle de çarpılarak demetleyici sonucu alınır.

$$Y(w) = S^H X(w) \quad (3.2)$$

$Y(w)$  demetleyici çıkışı,  $S^H$  yönlendirme vektörünü,  $X(w)$  girişe gelen sinyallerin frekans alanı karşılığını göstermektedir. Geniş bantlı sistemlerde gürültünün değişkenlik göstermesinden dolayı frekans alanında çalışılması tercih edilir.

### 3.1.2 Uyarlamalı Işın Demetleyiciler

Uyarlamalı ışın demetleyiciler değişken ağırlıklandırma katsayıları aracılığıyla istenilen yöndeki sinyal genliğini artırırken gürültü ve girişimleri bastırmaktadır. Ağırlıklandırma katsayıları gelen sinyal verisine göre optimize edilmektedir. Bu da yöntemin veri bağımlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. 1 Uyarlamalı ışın demetleyicisi genel yapı

Şekil 3.1'den görüldüğü üzere uyarlamalı ışın demetleyicisiyle  $w$  katsayıları güncellenerek sinyalden optimum değer alınmaya çalışılmaktadır.

Uyarlamalı ışın demetleyicisi yöntemleri çok farklılık arz edebilmektedir. Günümüzde de birçok yeni yöntem denenmektedir. Bu yöntemlerden bazıları tanıtılmaktadır [1].

### 3.1.2.1 Doğrusal Sınırlı Minimum Varyans Işın Demetleyicisi

Doğrusal sınırlı minimum varyans (LCMV) demetleyicisinin ardındaki temel fikir demetleyici cevabının sınırlandırılmasıdır. Bu şekilde ilgilenilen yöndeki sinyal belirli katsayılarla ve fazlarla geçirilir. Katsayılar çıkış varyansını minimize edecek şekilde seçilir. İstenilen yöndeki sinyal korunurken girişimler ve istenmeyen yönlerden gelen sinyaller minimize edilir.

$x$  dizin verisi,  $C$  sınırlama matrisi,  $R_x$  kovaryans matrisi,  $w$  ağırlıklandırma katsayıları ve  $f$  cevap vektörü olmak üzere  $R_x = E\{xx^H\}$ ,  $y = w^H x$  çıkışı elde edilir. Ağırlıklandırma katsayıları  $\min_w \{w^H R_x w\}$  s.t.  $C^H w = f$  durumunda  $w = R_x^{-1} C [C^H R_x^{-1} C]^{-1} f$  olarak bulunur.

### 3.1.2.2 Maksimum SGO Işın Demetleyicisi

Bu ışın demetleyicisinde ağırlıklandırmalar SGO değerini maksimum yapmak için seçilir. İstenilen sinyal  $R_s$  ve gürültü  $R_n$  kovaryans matrisleri bilinmelidir. RADAR uygulamaları için  $R_n$  yayım yapılmazken hesaplanabilir.

$s$  sinyal,  $n$  gürültü,  $w$  ağırlıklandırma katsayıları olmak üzere dizin elemanına gelen veri  $x = s + n$ 'dir.  $R_s = E\{ss^H\}$ ,  $R_n = E\{nn^H\}$  kovaryans matrisleri olmak üzere çıkış  $y = w^H x$  olarak elde edilir. Ağırlıklandırma katsayıları  $\max_w \frac{w^H R_s w}{w^H R_n w}$  durumunda  $R_n^{-1} R_s w = \lambda_{max} w$  ile bulunur.

### 3.1.2.3 Referans Sinyal Kullanımlı Işın Demetleyicisi

İstenilen sinyal biliniyorsa ağırlıklar demetleyici ve istenilen sinyal arasındaki hatayı minimize edecek şekilde belirlenebilir. Burada ışın demetleyicisine gerek olmadığı düşünülebilir. Fakat bazı uygulamalarda istenilen sinyale yakın bir sinyal üretilerek işlem yapılabilir.

$w$  ağırlıklandırma katsayıları,  $x$  dizin verisi,  $y_d$  istenilen sinyaldir.  $r_{xd} = E\{xy_d^*\}$ ,  $R_x = E\{xx^H\}$  kovaryans matrisi olmak üzere çıkış  $y = w^H x$ 'dir. Ağırlıklandırma katsayıları  $\min_w E\{|y - y_d|^2\}$  durumunda  $w_a = R_x^{-1} r_{xd}$  ile bulunur.

İstenilen sinyal yönüne ihtiyaç duyulmadığından kör demetleme olarak da adlandırılmaktadır. Diğer yakın kör demetleme yöntemleri sabit çarpan, dönemli-durağan, 3. veya yüksek dereceli istatistikler olarak sıralanabilir.

#### 3.1.2.4 Çoklu Yan Kulakçık Engelleyici Işın Demetleyicisi

Çoklu yan kulakçık engelleyici ana kanal ve yardımcı kanaldan oluşmaktadır. Ana kanal tekli eleman veya bağımsız demetleyici olabilir. Yardımcı kanalın girişim sinyallerini aldığı varsayılmaktadır. Amaç yardımcı ağırlıklar yardımıyla ana kanal girişimlerini bastırmaktır.

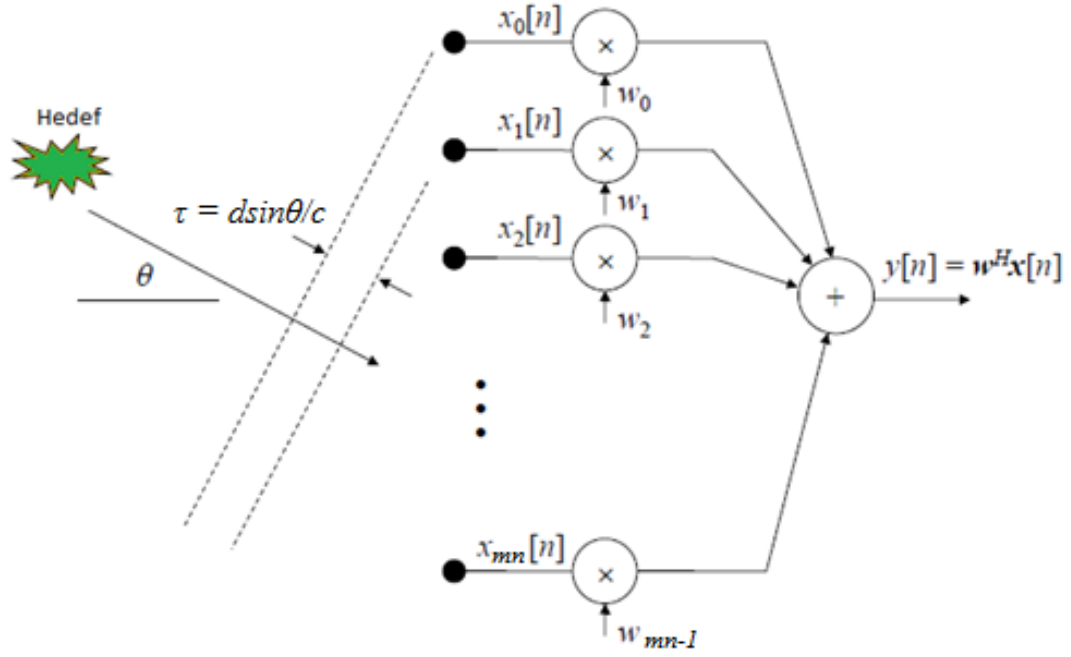
$x_a$  yardımcı kanal verisi,  $y_m$  birincil veriyi göstermektedir.  $r_{ma} = E\{x_a y_m^*\}$ ,  $R_a = E\{x_a x_a^H\}$  kovaryans matrisi olmak üzere çıkış  $y = y_m - w_a^H x_a$ 'dır. Ağırlıklandırma katsayıları  $\min_w E\{|y_m - w_a^H x_a|^2\}$  durumunda  $w_a = R_a^{-1} r_{ma}$  ile bulunur.

Bu yöntem istenilen sinyalin zayıf olduğu ve sinyalin olmadığı zaman dilimlerinin kesin olarak bilindiği durumlarda ağırlıklandırma katsayılarının bulunmasına yardımcı olur.

### 3.2 Zaman Alanı Işın Demetlemesi

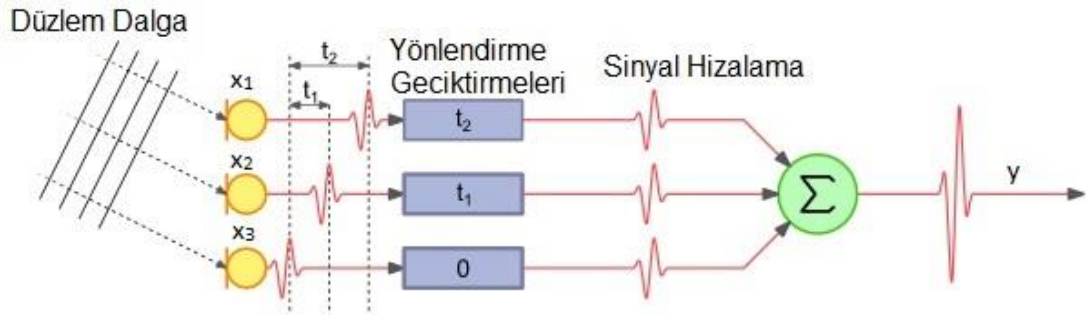
Zaman Alanı Işın Demetlemesi, dizine gelen sinyallerin herbir elemanda  $\tau_{m,n}$  zaman gecikmeleriyle toplanarak maksimum sinyal genliği elde etme tekniğidir. Bu sayede toplam sinyal genliği maksimum olacaktır.  $\tau_{m,n}$ , dizindeki her bir elemanın konumuna göre istenilen  $\theta$  açısı için gecikmesini göstermektedir. Toplama işlemi esnasında sadece  $\theta$  açısıyla ilgilenildiği için diğer yönlerden gelen sinyaller birbirini elimine edecektir.

Şekil 3. 2'den görüleceği üzere uzak alandaki kaynaktan  $\theta$  açısıyla gelen düzlemsel dalga herbir elemana  $\tau$  gecikmesiyle gelmektedir. Düzlemsel dalga m. elemana  $m * \tau$  zaman gecikmesi ile gelmektedir. Her bir elemanın arası düzgün diziliimli dizin olduğundan d kadardır. d mesafesinde oluşan zaman gecikmesi  $\tau = d \sin \theta / c$  formülüyle hesaplanabilmektedir. c ses hızı sualtında 1500 m/sn kabul edilmektedir.



Şekil 3. 2 Zaman alanı ışın demetlemesi diyagramı

Şekil 3. 2’den görüldüğü üzere giriş işareti  $x_{m,n}$   $w_{m,n}$  katsayılarıyla çarpılarak toplanmaktadır. Bu işlem filtre görevi yapmakta olup istenmeyen yönlerden gelen sinyallerin bastırılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3. 3 Düzlem dalga sinyallerinin hizalanması

Şekil 3. 3’ten görüldüğü üzere  $y$  toplamının maksimum olabilmesi için  $x_2$  ve  $x_3$  elemanına gelen sinyaller  $t_1$  ve  $t_2$  kadar kaydırılmaktadır.

Tezde kullanılan zaman alanı ışın demetlemesi diyagramı Şekil 3. 2’de gösterilmektedir.  $M \times N$  adet elemana sahip düzlemsel dizin için çıkıştaki toplam sinyal denklem (3.3) ile ifade edilebilir.

$$y_n = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} w_{m,n} x_{m,n}(n - \tau_{i_{m,n}}) \quad (3.3)$$

$y_n$  çıkıştaki toplam sinyal,  $x_{m,n}$  her bir elemana gelen sinyal,  $w_{m,n}$  ağırlıklandırma katsayıları,  $m, n$  eleman indeksi,  $\tau_{i_{m,n}}$  i. Işın demeti için zaman gecikmesini ifade etmektedir.  $w_{m,n}$  ağırlıklandırma katsayıları için istenilen pencereleme yöntemi kullanılabilir. Pencereleme ile istenmeyen yönlerden gelen sinyaller belli oranda bastırılmaktadır.

### 3.3 Frekans Alanı Işın Demetlemesi

Frekans alanı ışın demetlemesi için sinyallerin frekans bileşenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fourier dönüşümleri bunu mümkün kılmaktadır. Bilgisayar ortamında ayırık sinyaller için hızlı sonuç döndürmesi amacıyla hızlı Fourier dönüşümleri kullanılmaktadır [61].

Ayrık Zaman Fourier Dönüşümü (DTFT), ayırık zamanlı bir işaretin frekans içeriğini göstermektedir. Ayrık işaret olmasına rağmen elde edilen frekans spektrumu, sinyalin periyodik olmamasından ötürü sürekli. DTFT ve Ters-DTFT denklem (3.4) ve (3.5)'te sırasıyla gösterilmektedir. Ters DTFT denklemi (3.5)'te görüldüğü üzere sürekli fonksiyondur. Bilgisayar benzetimleri yapılacağından DTFT yerine DFT kullanılacaktır.

$$X(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (3.4)$$

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(k)e^{jwn}dw \quad (3.5)$$

DFT ayırık zamanlı işaretin  $N$  örneğini aynı sayıda frekans bileşenine çevirmektedir. Periyodik olmayan sinyallerin Fourier dönüşümünü almayı mümkün kılmaktadır.

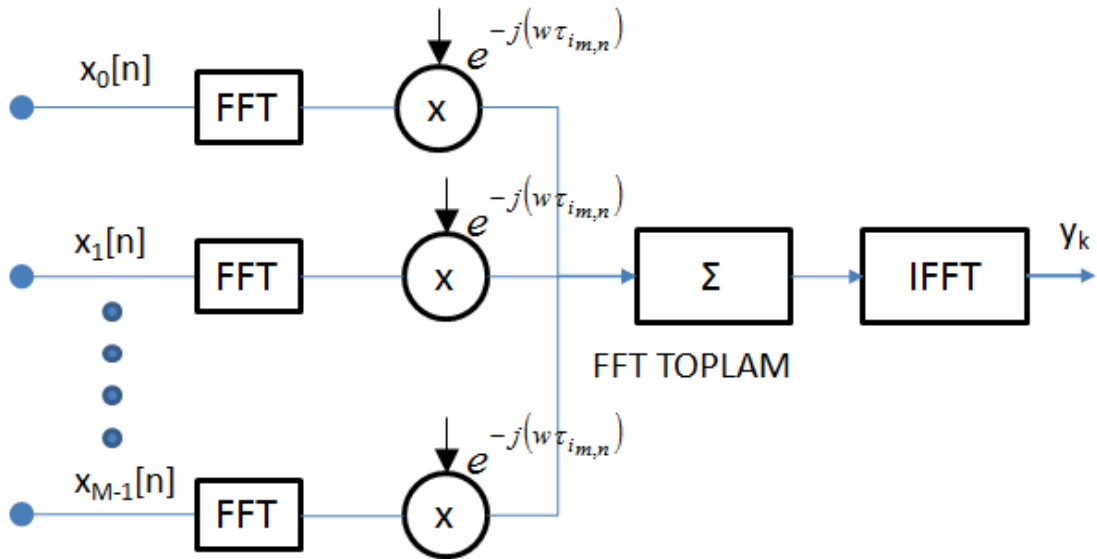
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} \quad (3.6)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} \quad (3.7)$$

DFT ve ters DFT dönüşümleri denklem (3.6) ve (3.7)'de verilmektedir. FFT hızlı DFT hesaplamasını sağlayan bir algoritmadır.

### 3.3.1 FFT ile Frekans Alanı Işın Demetlemesi

Ayrık Fourier dönüşüm tekniklerini içeren hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ışın demetlemesi olarak da bilinen, zaman alanı ışın demetlemesinin frekans alanındaki hali olan ışın demetlemesi yöntemidir. Şekil 3. 4'te FFT ile frekans alanı ışın demetlemesi diyagramı sergilenmektedir. Herbir elemana gelen zaman alanındaki veriler demetleme işlemi öncesinde frekans alanına taşınmaktadır. Herbir elemanın frekans alanındaki verileri eş faz dönüşümü yapıldıktan sonra frekans alanında toplanmaktadır. Toplanan veriler son aşamada ters Fourier dönüşümü alınarak zaman alanına geçilmektedir.



Şekil 3. 4 FFT ile frekans alanı ışın demetlemesi diyagramı

Bu tekniğin zaman alanı ışın demetlemesine göre avantajı örnekleme frekansının ışın demeti yönlendirmesinde çok etkin olmamasıdır. Örnekleme oranının Nyquist ölçütünü geçmesi yeterlidir. Işın demeti yönlendirme çözünürlüğü  $\tau_{i_m,n}$  gecikmesinin düzgün olarak hesaplanmasına bağlıdır.

Hesaplama zamanı açısından zaman alanı ışın demetlemesinden üstündür. Benzetim sonuçları irdelendiğinde fark görülmektedir.

$F\{x(n)\} \rightarrow X(w)$  ve  $F\{x(n - \tau)\} \rightarrow X(w)e^{-j\omega\tau}$  dönüşümlerinden yola çıkarak çıkış işareti aşağıdaki denklemlerle yazılabilir.

$$X_{m,n}(e^{j\omega}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n}(n)e^{-j\omega k} \quad (3.8)$$

$$B(q) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{m,n}(e^{j\omega})e^{-j(\omega\tau_{i_{m,n}})} \quad (3.9)$$

$x_{m,n}$  her bir transdüserine gelen sinyal,  $k$  dalga numarası,  $X_{m,n}(e^{j\omega})$  Fourier dönüşümü,  $B(q)$  dizindeki transdüserlerin FFT toplamı,  $w$  açısal frekans,  $\tau_{i_{m,n}}$  i. Işın demeti zaman gecikmesini göstermektedir.

$B(q)$  toplamının ters Fourier dönüşümü alınarak zaman alanında  $y_k$  çıkış işaretine ulaşılır.

$$y_k = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^{MN} B(q)e^{jwn} \quad (3.10)$$

Frekans alanındaki her bir elemanın eş faz dönüşümü FIR filtre ile ilintilendirilebilir. Zaman alanındaki FIR filtre frekans alanında ışın demetleyicisi gibi düşünülebilir.

Bir başka yöntem olarak FFT blokları daha alt bloklara ayrılarak konvolüsyon işlemi ile de sonuca gidilebilmektedir. İşlem karmaşası yarattığından ve uzun hesaplama süresinden dolayı bu yöntem kullanılmamaktadır.

### 3.3.2 Goertzel Algoritması Frekans Alanı Işın Demetlemesi

Goertzel algoritması sinyal içerisindeki belli frekanslara yoğunlaşan sayısal sinyal işleme tekniğidir. Gerald Goertzel tarafından 1958 yılında tanımlanmıştır [62].

Goertzel algoritması  $W_N^k$  faz faktörünün periyodikliğinden yararlanmaktadır ve lineer filtre operasyonu gibi DFT hesaplamasının hızlı biçimde yapılabilmesini sağlamaktadır.

$W_N^{-kN} = 1$  olduğundan DFT aşağıdaki şekilde çoklanabilir.

$$X(k) = W_N^{-kN} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) W_N^{km} = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) W_N^{-k(N-m)} \quad (3.11)$$

(3.11) işlemi konvolüsyon işlemidir. Sistem çıkışındaki toplam sinyal olan  $y_k(n)$  denklem (3.12)'deki gibi yazılabilir.

$$y_k(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) W_N^{-k(N-m)} \quad (3.12)$$

$y_k(n)$ 'in  $x(n)$  ve N uzunluklu filtrenin konvolüsyonundan oluştuğu düşünülebilir.

$$h_k(n) = W_N^{-kn} u(n) \quad (3.13)$$

Bu filtrenin çıkışı  $n=N$  noktasında DFT'nin  $w_k = \frac{2\pi k}{N}$  frekansındaki değerini üretir.

$$X(k) = y_k(n)|_{n=N} \quad (3.14)$$

(3.11) ve (3.12) karşılaştırıldığında  $h_k(n)$ 'in sistem fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$H_k(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}} \quad (3.15)$$

$y_k(n)$  fark denklemleri şeklinde yazılabilir.

$$y_k(n) = W_N^{-k} y_k(n-1) + x(n) \quad y_k(-1) = 0 \quad (3.16)$$

Kompleks konjuge kutuplardan kaçınmak için (3.15) denklemi aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

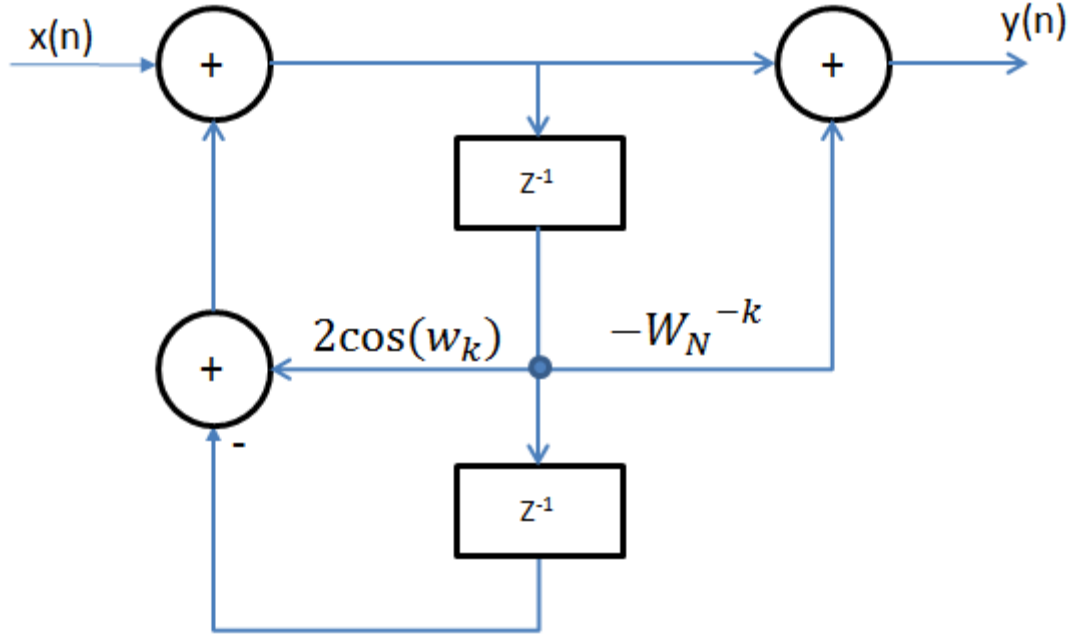
$$H_k(z) = \frac{1 - W_N^{-k} z^{-1}}{1 - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.17)$$

$$v_k(n) = 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) v_k(n-1) - v_k(n-2) + x(n) \quad (3.18)$$

$$y_k(n) = v_k(n) - W_N^{-k} v_k(n-1) \quad (3.19)$$

Başlangıç koşulları  $v_k(-2) = v_k(-1) = 0$  kabul edilmektedir.

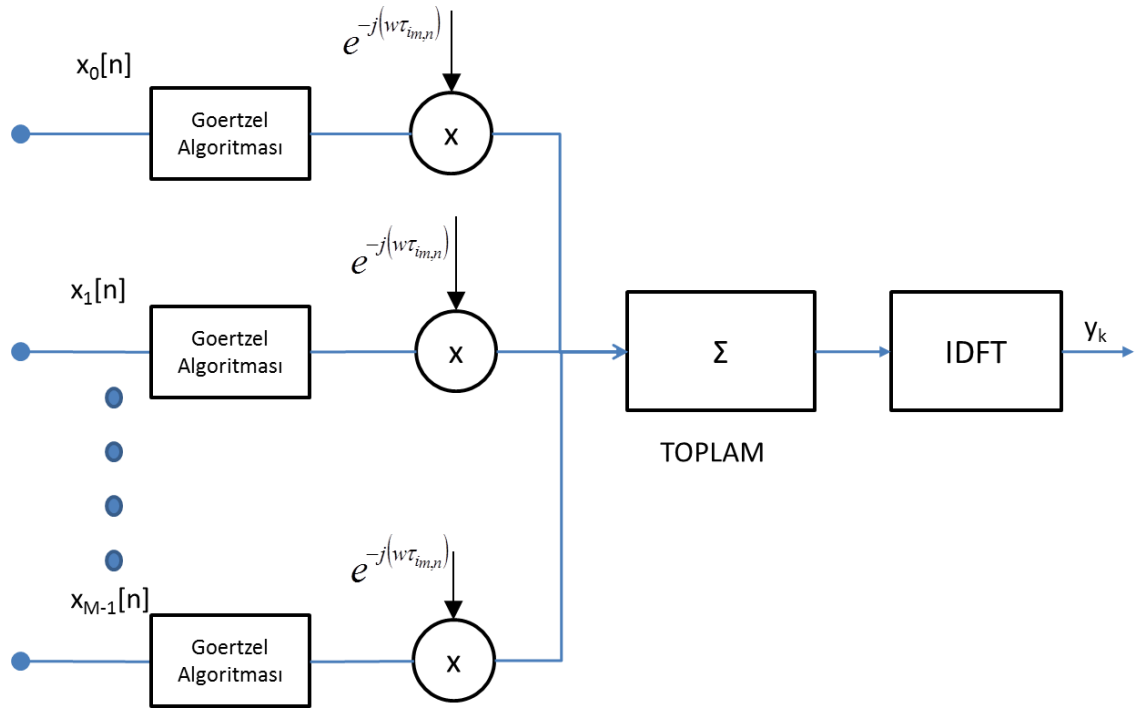
M kullanılmak istenen frekans sayısı, N kullanılan blok uzunluğu olmak üzere Goertzel algoritması DFT'nin  $M < \log_2 N$  durumunda kullanışlıdır, diğer durumlarda FFT algoritmaları daha etkilidir.



Şekil 3. 5 DFT hesabı için iki kutuplu rezonatör gerçekleştirilmesi

Goertzel algoritmasının gerçekleştirilmesi Şekil 3. 6'daki diyagramda gösterilmektedir. Goertzel ile DFT dönüşümleri alınan verilerin eş faz dönüşümü yapılarak toplam DFT değeri elde edilir. Toplam DFT değeri tersinerek zaman alanındaki değeri bulunur.

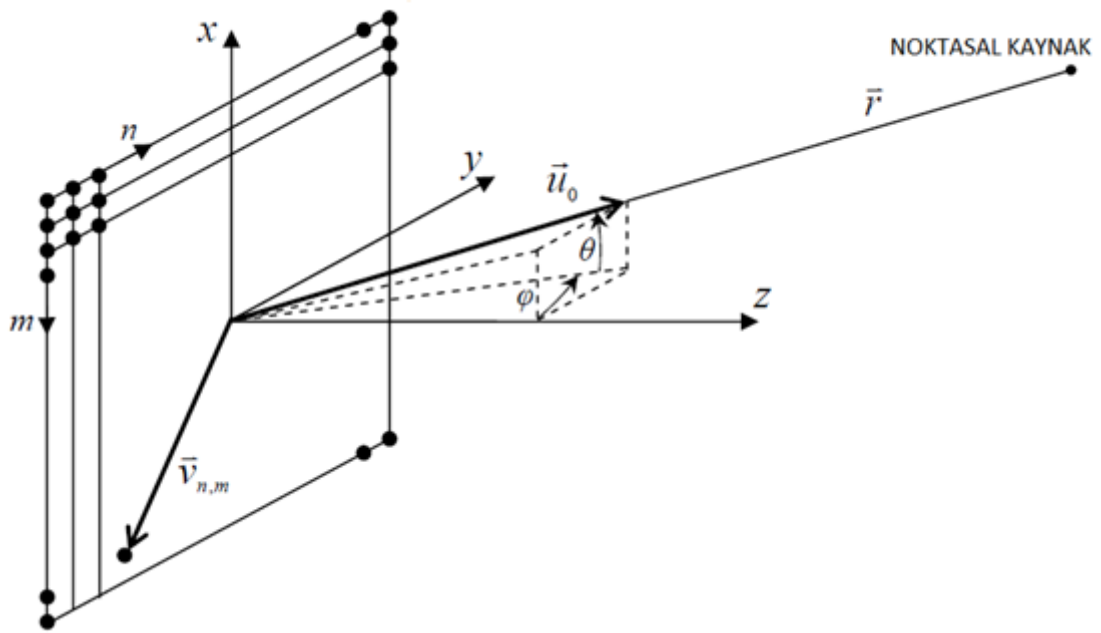
Şekil 3. 6'da çizilen diyagramdan Goertzel algoritması ve FFT ile frekans alanı ışın demetlemesinin benzerlik taşıdığı görülmektedir. Goertzel algoritması için kullanılan  $\tau_{i,m,n}$  zaman gecikmeleri FFT ile frekans alanı ışın demetlemesinde de kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de eş faz dönüşümünü sağlamaktadır. Goertzel algoritması sadece ilgilenilen frekans bileşenini taşımaktadır. Bu da az sayıda frekans bileşeni için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesine üstünlük kurmasına sebep olmaktadır. Fakat sinyal frekansındaki olası kaymalar durumunda Goertzel algoritmasının performansının düşeceği açıktır.



Şekil 3. 6 Goertzel algoritması ile frekans alanı ışın demetlemesi diyagramı

**BENZETİM VE SAYISAL ÖRNEKLER**

Hedef verisi üretimi ve analizi için MATLAB programı kullanılmaktadır. Hedef verisinin uzak alanda noktasal bir kaynaktan yayıldığı ve düzlemsel dizinin dalga cephesi yönünde olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 4. 1 Uzak alan noktasal kaynak ve düzlemsel dizin

Hedef verisi oluşturulması için hesaplamalarda kolaylık sağlamak üzere vektör analizinden yararlanılabilir. Dizin merkez noktası orijin olarak kabul edilirse hedef verisinin zaman gecikmeleri buna göre hesaplanabilir. Her bir elemana gelen veriler bu referansa göre oluşturulabilir.  $\vec{r}$  vektörü dizin merkezinden noktasal kaynağa olan uzaklığı göstermektedir.

$$\vec{r} = |\vec{r}| \vec{u}_0 = |\vec{r}| \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\theta \\ \sin\varphi \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Küresel koordinatlarda  $\theta$  elevasyon,  $\varphi$  azimut açısını,  $\vec{u}_0$  birim pozisyon vektörünü göstermektedir. Şekil 4. 1'deki XY eksenine oturtulmuş dizinde herbir elemana sinyal geliş süresi (4.2) ile tanımlanabilir.

$$t_{n,m} = \frac{|\vec{r} - \vec{v}_{n,m}|}{c} \quad (4.2)$$

$\vec{v}_{n,m}$  merkez noktasından herbir elemana olan uzaklığı, c ses hızını göstermektedir.

$$\vec{v}_{n,m} = \begin{pmatrix} x_m \\ y_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Buradan hareketle herbir elemana gelen hedef sinyalinin gecikmesi (4.4) ile hesaplanır.

$$\tau_{n,m} = t_{n,m} - t_{merkez} = \frac{|\vec{r} - \vec{v}_{n,m}|}{c} - \frac{|\vec{r}|}{c} \quad (4.4)$$

Hedef verisi benzetimi için kullanılan düzlemsel dizin 6x6 adet elemandan oluşmakta ve düzgün şekilde  $\lambda/2$  m. mesafe aralıklarla dizilimi sağlanmaktadır. Transdüser frekanslarının 37500 Hz olduğu ve ses hızının 1500 m/sn olduğu varsayılırsa,

$c = \lambda f \rightarrow 1500 = \lambda * 37500$  bağıntısından  $\lambda = 0.04$  m. olarak bulunur. d mesafesi için  $\lambda/2 = 0.02$  m. aralıklarla dizilim sağlanır.

Düzlemsel dizinin orta noktası kartezyen koordinatlarda (0,0,0) olarak kabul edilmektedir. Bu nokta referans alınarak hedef verisi oluşturulmaktadır. Hedef verisinin kartezyen koordinatlarda (100,100,1000) m. uzaklıkta olduğu varsayılmaktadır.

Hedef kartezyen koordinatlarda x,y,z ekseninde 100,100,1000 m. olduğundan açısal uzaklığı hesaplandığında xz ekseninde  $\psi = \arctan\left(\frac{x}{z}\right) = \arctan\left(\frac{100}{1000}\right) = 5,7^\circ$  olarak hesaplanır. Aynı şekilde yz ekseninde  $\theta = \arctan\left(\frac{y}{z}\right) = \arctan\left(\frac{100}{1000}\right) = 5,7^\circ$  olarak hesaplanır.

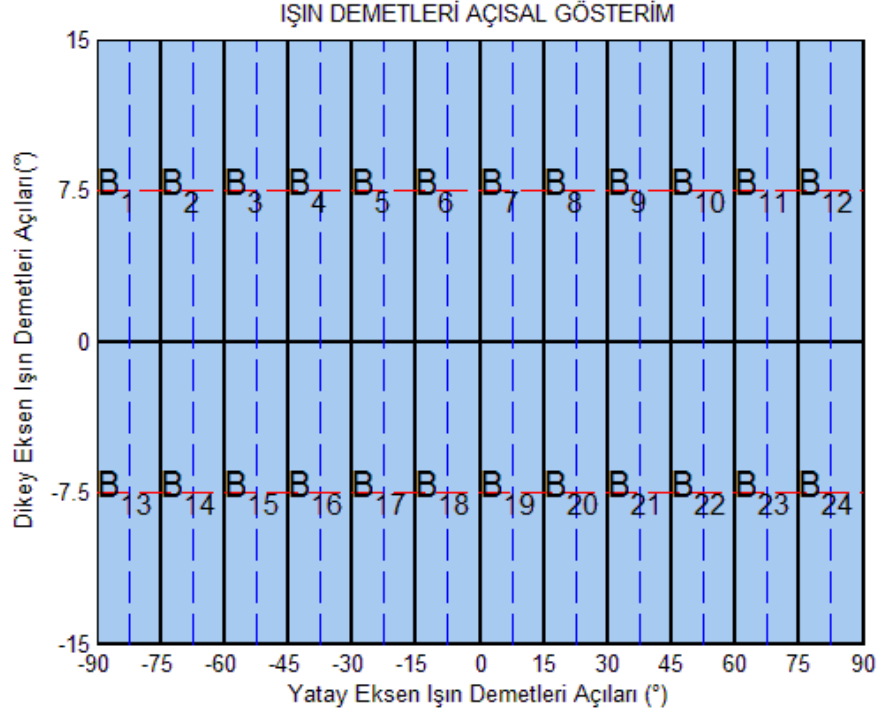
Hedef tespit açısı, normalize ışın demeti değerleriyle ışın demeti merkez açı değerleri çarpılarak kaba bir yaklaşımla hesaplanabilmektedir.

Hedef tespiti için 0.1 saniyelik veri üretilmektedir. Hedef verisi 37500 Hz frekansta ve 1 Mhz örnekleme ile oluşturulmaktadır. Hedef konumuna göre herbir transdüser geliş süreleri hesaplanarak düzlemsel dizin için veri seti hazırlanmaktadır. Hedef sinyallerinin 0.05. saniye ile 0.06. saniye arasında 0.01 saniye (10 milisaniye) geldiği varsayılmaktadır. Bu sayede analiz edilen sinyalde hedefin doğru zamanda tespit edilip edilmediği incelenerek çapraz doğrulama yapılabilir. Hedef sinyalinin farklı sinyal gürültü oranları için ışın demetlemesi tespit sonuçları alınmaktadır.

Bölüm 2’de anlatıldığı üzere bu tez çalışması için kolaylık olması bakımından 6x6 elemanlık düzlemsel bir dizin kullanılmaktadır. Seçilen dizin herbir inceleme ekseninde yaklaşık olarak 17 derecelik bir ışın demeti genişliğine sahiptir. Gösterim için inceleme açıları 15 derece seçilerek herbir ışın demeti için 2 derece bindirmeli kullanım sağlanmaktadır.

Yatay düzlemde  $[-82.5^\circ -67.5^\circ -52.5^\circ -37.5^\circ -22.5^\circ -7.5^\circ 7.5^\circ 22.5^\circ 37.5^\circ 52.5^\circ 67.5^\circ 82.5^\circ]$  olmak üzere 12 adet, dikey düzlemde  $[-7.5^\circ 7.5^\circ]$  olmak üzere 2 adet inceleme açısı kullanılmaktadır. Seçilen inceleme açıları için yataydaki ve dikeydeki gecikmeler elemanların konumlarına göre hesaplanarak  $\tau_{i,m,n}$  gecikmesiyle herbir ışın demetlemesi değeri bulunmaktadır. d mesafesi 0.02 m. ve c ses hızı 1500 m/sn’dir.

$[\theta_y]$  yatay düzlemdeki inceleme açıları,  $[\theta_d]$  dikey düzlemdeki inceleme açılarını göstermektedir. Her bir ışın demetinin yatay ve dikey açı bileşeni bulunmaktadır. Bu tezde kullanılan ışın demetleri için B harfi kullanılmaktadır.



Şekil 4. 2 Işın demetleri koordinat eksenine açısal gösterim

Şekil 4. 2’de herbir ışın demetinin XY eksenindeki yerleşimi gösterilmektedir. Herbir ışın demeti 15 derecelik bir alanı temsil etmektedir.

Herbir ışın demeti açısı yatay ve dikey açı bileşenlerinden oluşmaktadır (4.5).  $\tau$  gecikmesi yatay ve dikey gecikmelerin toplamından bulunmaktadır (4.6).

$$[B_i(\theta)] = [\theta_{yi}, \theta_{di}] \quad (4.5)$$

$$\tau = \tau_y + \tau_d \quad (4.6)$$

$$\tau_y = \frac{d \sin \theta_y}{c} \quad (4.7)$$

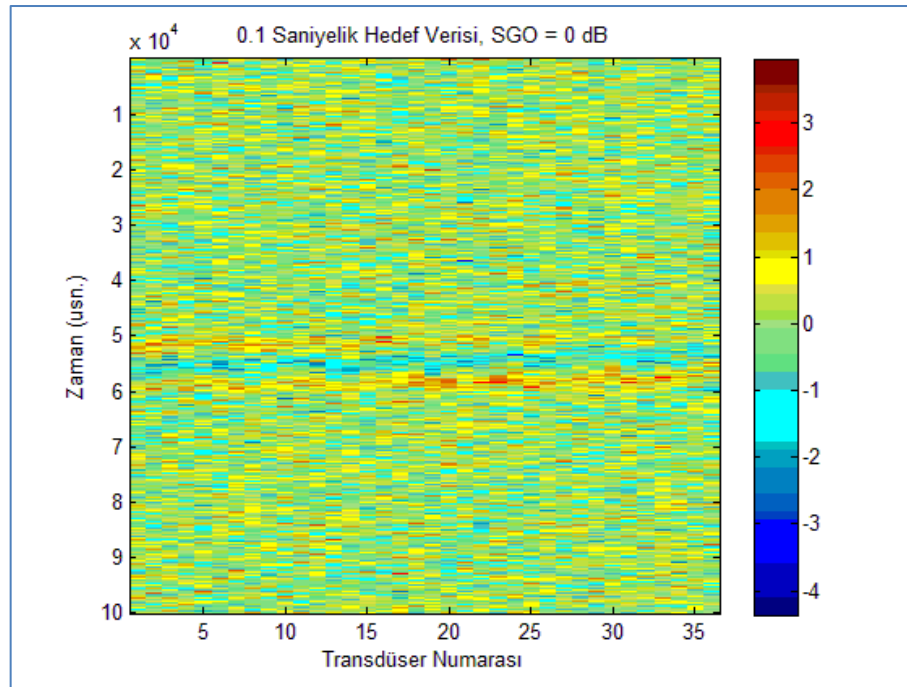
$$\tau_d = \frac{d \sin \theta_d}{c} \quad (4.8)$$

$\tau_{i,m,n}$  gecikmesi herbir elemanın konumsal verisine göre istenilen demet açısı gecikmesidir.  $i$  adet ışın demeti için  $i \times M \times N$  boyutlu zaman gecikme verisi üretilmektedir.

$$B_i = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} w_{m,n} x_{m,n}(n - \tau_{i,m,n}) \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da belirtildiği üzere her bir elemana gelen veriler  $\tau_{i,m,n}$  kadar geciktirilerek toplanmaktadır.  $i$  adet  $B$  (ışın demeti) genlik değeri bulunmaktadır. Genlikler grafiksel olarak çizdirilmektedir. Her bir ışın demeti temsil ettiği açı değerine yerleştirilmektedir. Grafik üzerinde hedefin olduğu ışın demetinin diğerlerinden daha fazla genlikte ve koyu renkte olması beklenmektedir. Grafik görsel olarak incelenerek hedef tespiti yapıp yapılamadığı görülebilmektedir.

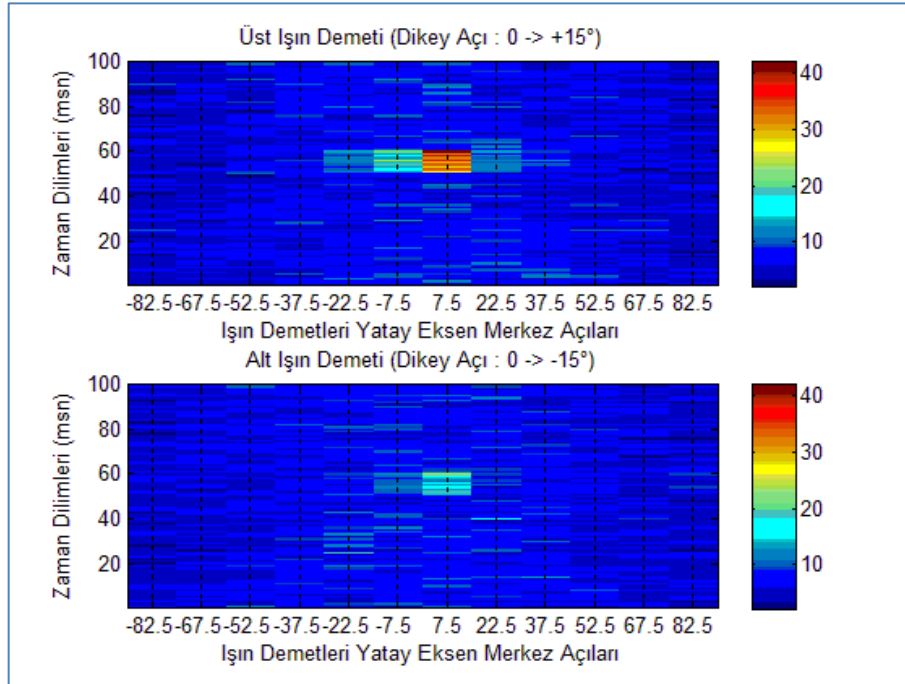
Hedef verisi zaman ve frekans alanında ışın demetlemesiyle işlenerek başarımlar sergilenmektedir. Hedef verisinin (100,100,1000) m. koordinatlarında noktasal bir kaynak olduğu düşünüldüğünde 7. ışın demeti ( $B_7$ ) içerisinde olması beklenmektedir. Ayrıca hedef verisi 0.05 ve 0.06 saniyeler arasında üretildiğinden hedefin bu zaman diliminde tespit edilmesi beklenmektedir. Farklı SGO değerlerinde hazırlanan hedef verileri için başarımlar aşağıdaki şekillerde görülebilir.



Şekil 4. 3 SGO = 0 dB, 0.1 saniyelik ham veri

Şekil 4. 3'te SGO = 0 dB iken 36 adet transdüser için 0.1 saniyelik ham veri üretilmektedir. Şekil incelendiğinde 50. ve 60. milisaniyelerde SGO değeri 0 dB

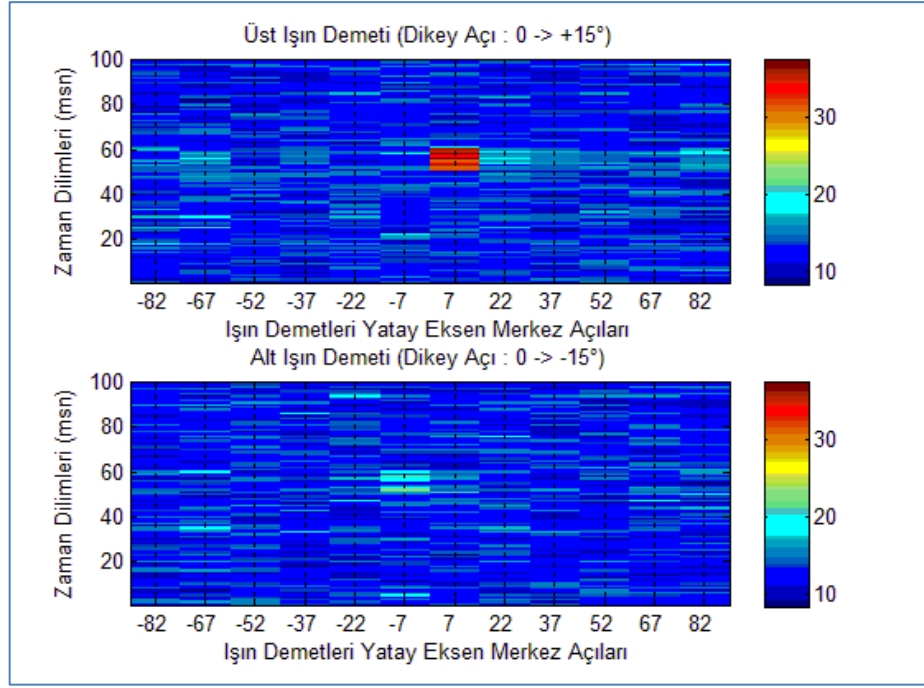
olduğundan hedef verisi olduğu seçilebilmektedir. SGO = 0 dB için ışın demetlemeleri sonuçları aşağıdadır.



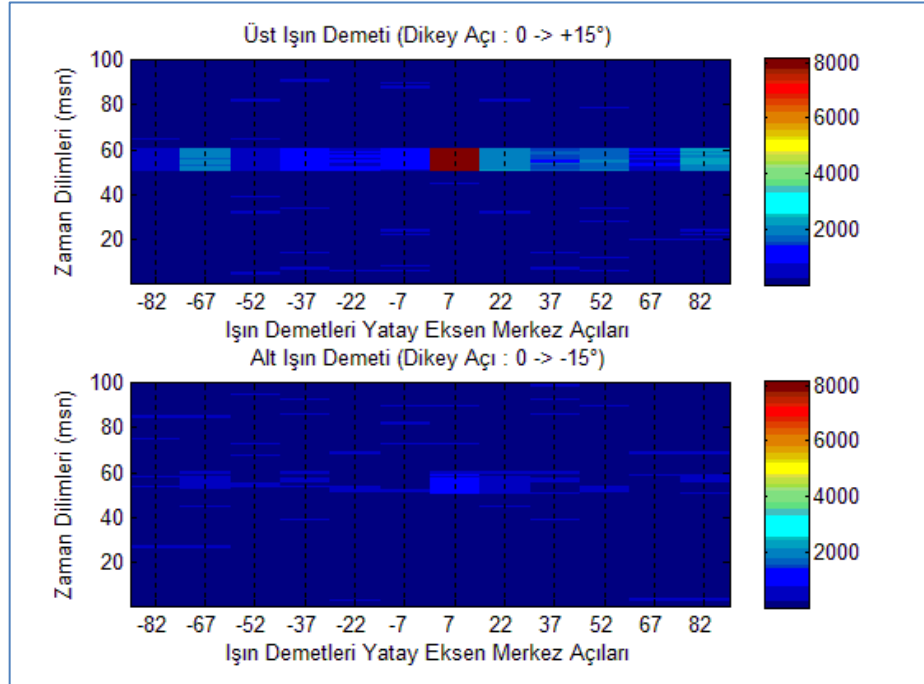
Şekil 4. 4 SGO = 0 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 4'ten görüldüğü üzere SGO = 0 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespiti yapıldığı zaman dilimi 50-60. milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Komşu ışın demetleri olan **B<sub>6</sub>** ve **B<sub>19</sub>** içerisinde de daha zayıf olmasına rağmen tespit belirtileri vardır.

Şekil 4. 5'ten görüldüğü üzere SGO = 0 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespiti yapıldığı zaman dilimi 50-60. milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Komşu ışın demetlerinde hedef tespit belirtileri ihmal edilecek kadar azdır.



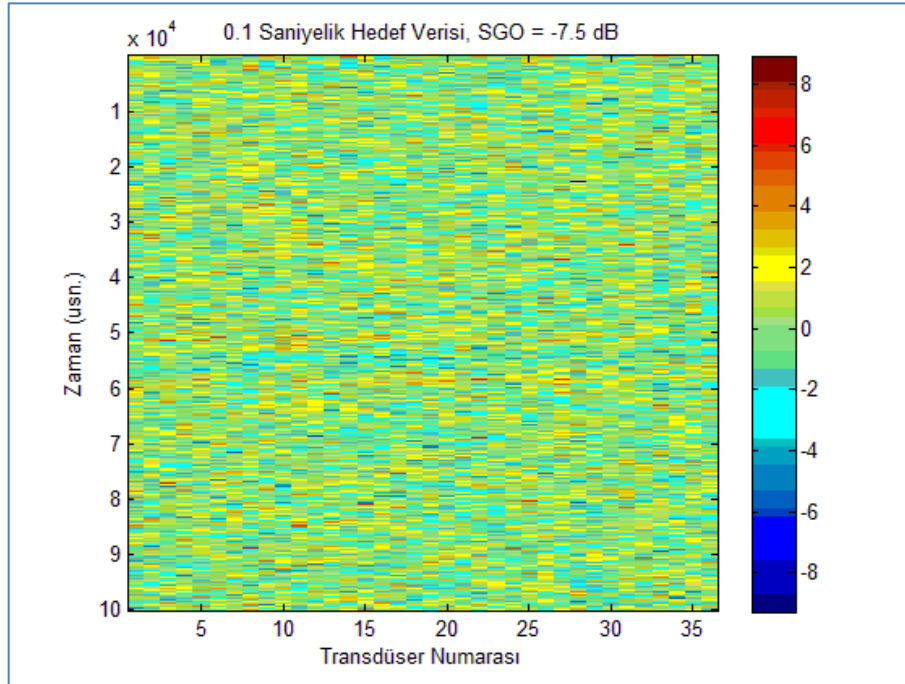
Şekil 4. 5 SGO = 0 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti



Şekil 4. 6 SGO = 0 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 6'dan görüldüğü üzere SGO = 0 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespitinin yapıldığı zaman dilimi 50-60. milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Komşu ışın demetlerinde hedef tespit

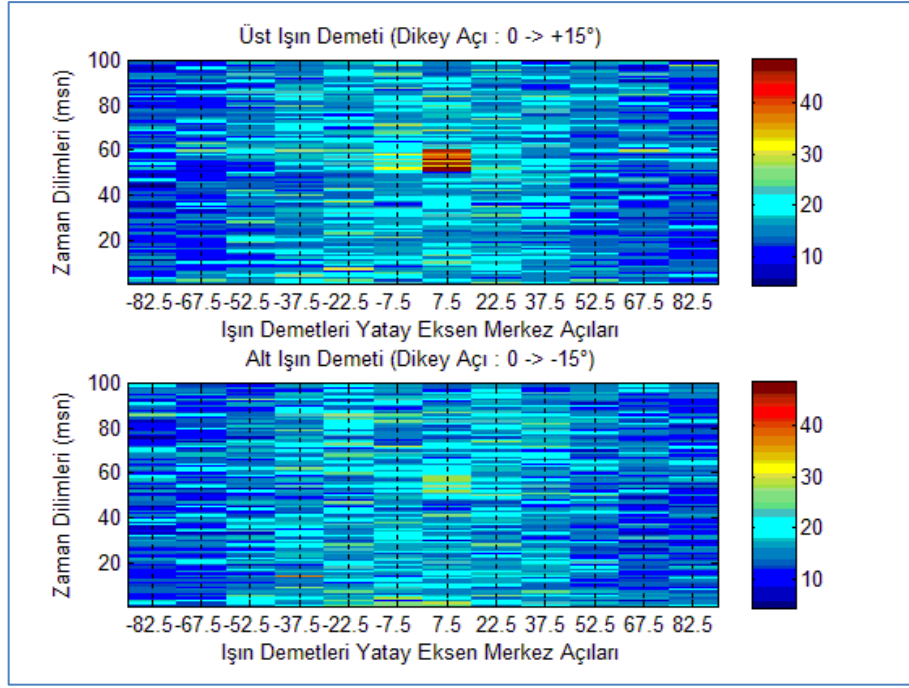
belirtileri olmasına rağmen algoritmanın gürültü bağışıklığının yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 7 SGO = -7.5 dB, 0.1 saniyelik ham veri

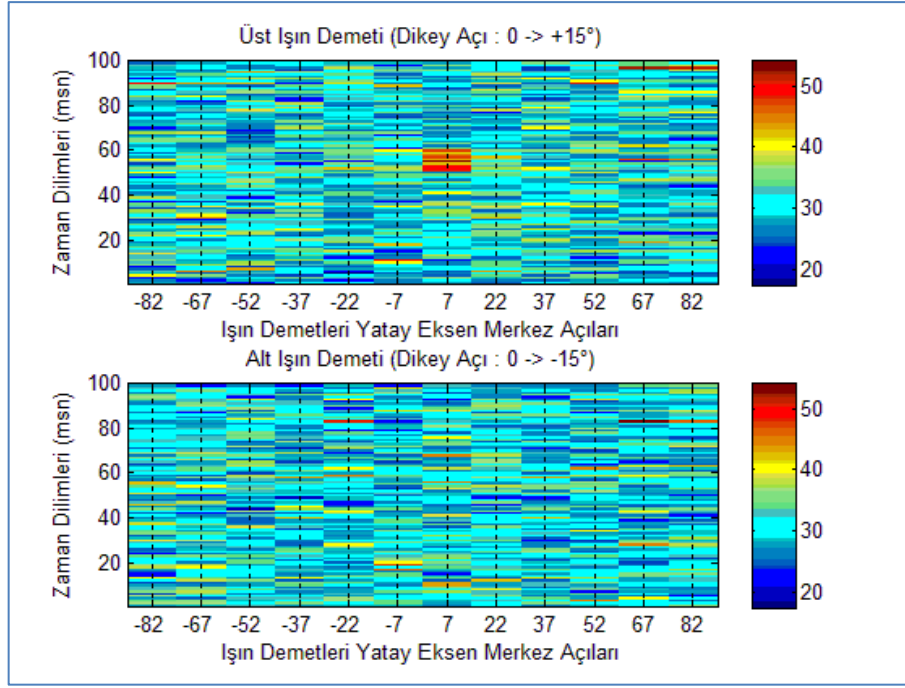
Şekil 4. 7’de SGO = -7.5 dB iken 36 adet transdüser için 0.1 saniyelik ham veri üretilmektedir. Şekil incelendiğinde SGO düşük olduğundan hedef verisi seçilememektedir. SGO = -7.5 dB için ışın demetlemeleri sonuçları aşağıdadır.

Şekil 4. 8’den görüldüğü üzere SGO = -7.5 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespiti yapıldığı zaman dilimi 50-60. milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Gürültü arttığından diğer ışın demetlerinde de zayıf hedef tespitleri vardır.

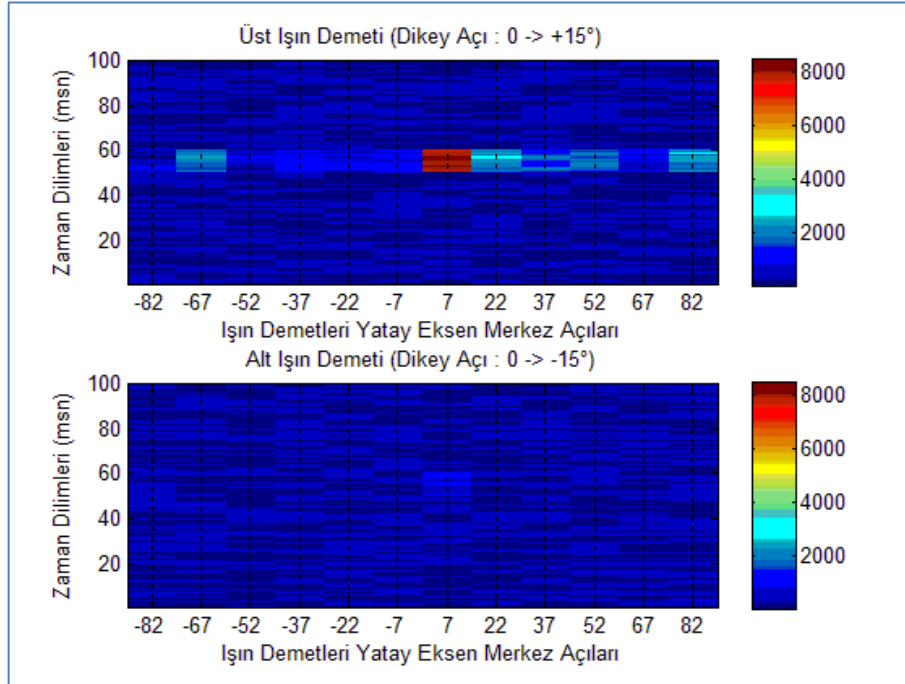


Şekil 4. 8 SGO = -7.5 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 9'dan görüldüğü üzere SGO = -7.5 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespitinin yapıldığı zaman dilimi 50-60. milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Gürültü arttığından diğer ışın demetlerinde de zayıf hedef tespitleri vardır. SGO = -7.5 dB iken FFT ile frekans alanı ışın demetlemesinin gürültü bağımsızlığının zaman alanı ışın demetlemesinden daha zayıf olduğu görülmektedir.



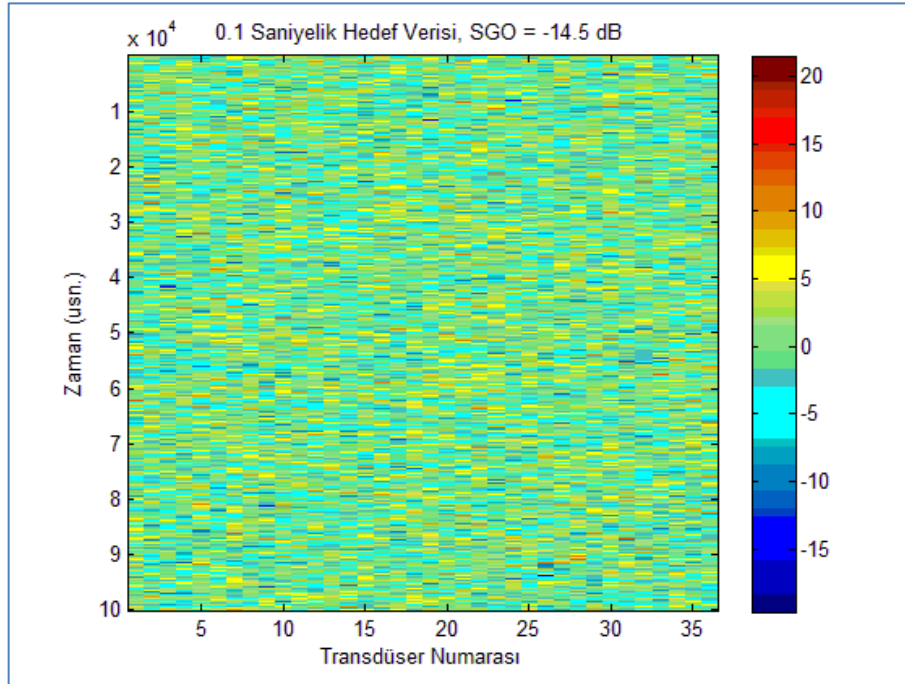
Şekil 4. 9 SGO = -7.5 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti



Şekil 4. 10 SGO = -7.5 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 10'dan görüldüğü üzere SGO = -7.5 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespitinin yapıldığı zaman dilimi 50-60.

milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Gürültü artmış olmasına rağmen Goertzel algoritması ihmal edilebilecek kadar az etkilenmektedir.

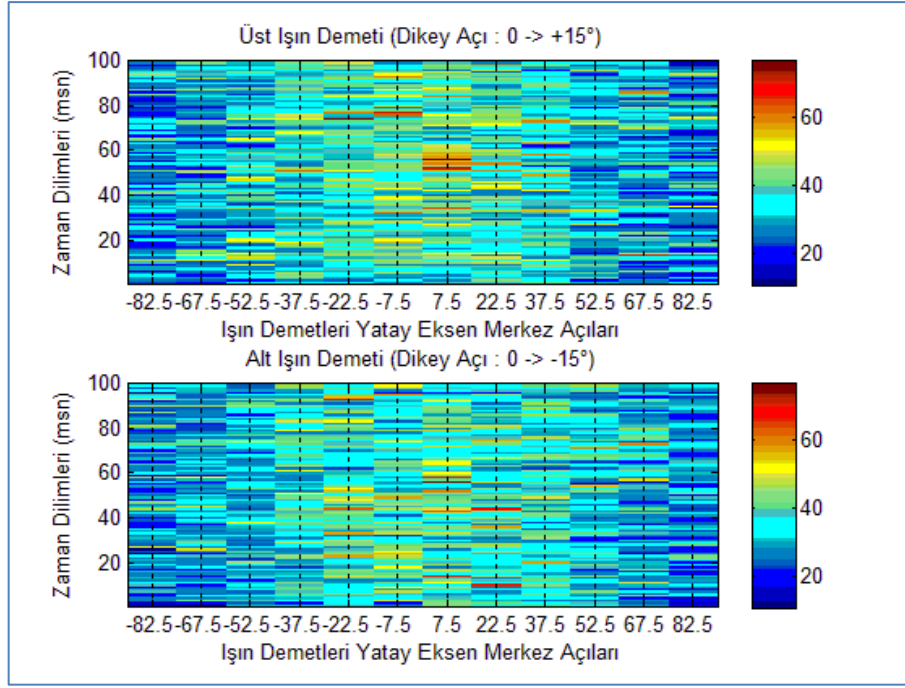


Şekil 4. 11 SGO = -14.5 dB, 0.1 saniyelik ham veri

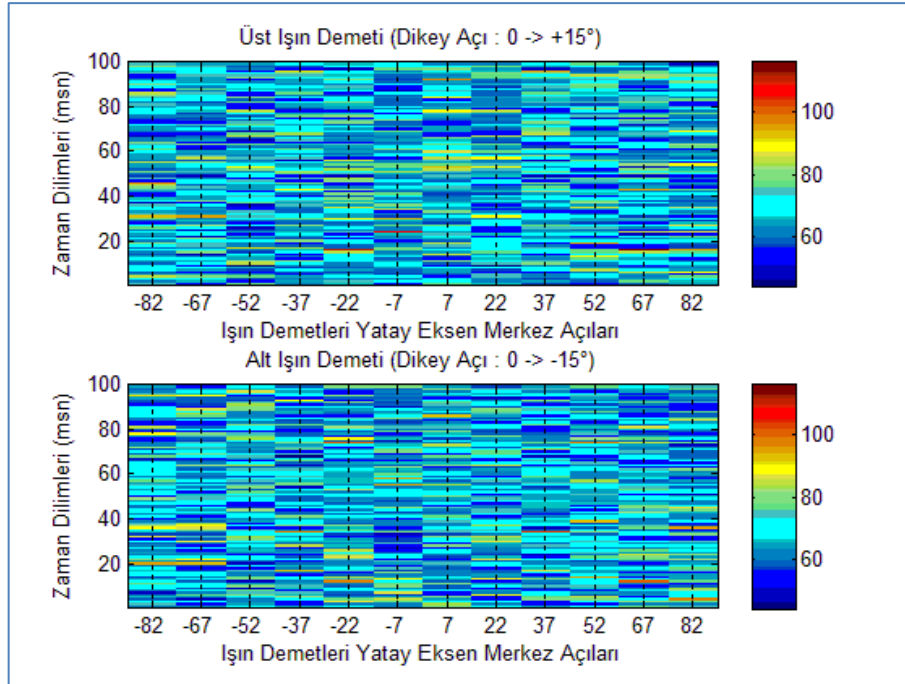
Şekil 4. 11’de SGO = -14.5 dB iken 36 adet transdüser için 0.1 saniyelik ham veri üretilmektedir. Şekil incelendiğinde SGO düşük olduğundan hedef verisi seçilememektedir. SGO = -14.5 dB için ışın demetlemeleri sonuçları aşağıdadır.

Şekil 4. 12’den görüldüğü üzere SGO = -14.5 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde güçlükle tespit edilebilmektedir. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespitinin yapıldığı zaman dilimi 50-60 milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Gürültü etkisi arttığından hedef tespiti zor yapılabilmektedir.

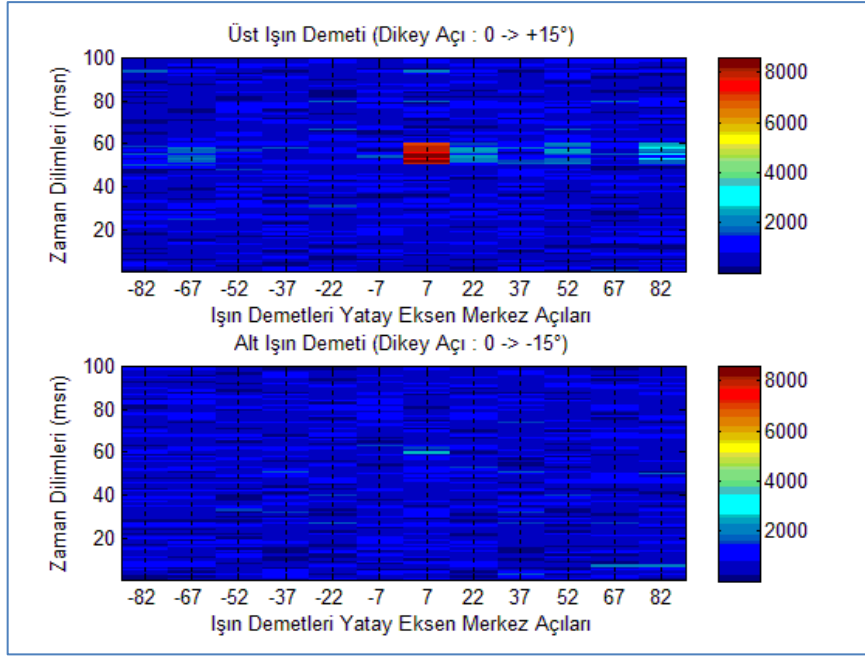
Şekil 4. 13’ten görüldüğü üzere SGO = -14.5 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespit edilememektedir. FFT ile frekans alanı ışın demetlemesi için hedef tespitinin yapılamadığı SGO = -14.5 dB değerinde Goertzel algoritmasıyla çözüm önerilmektedir. Goertzel algoritmasının SGO değeri 0 dB ve -7.5 dB değerlerindeki performansları da çizdirilerek algoritmanın sonuçları sergilenmektedir.



Şekil 4. 12 SGO = -14.5 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti

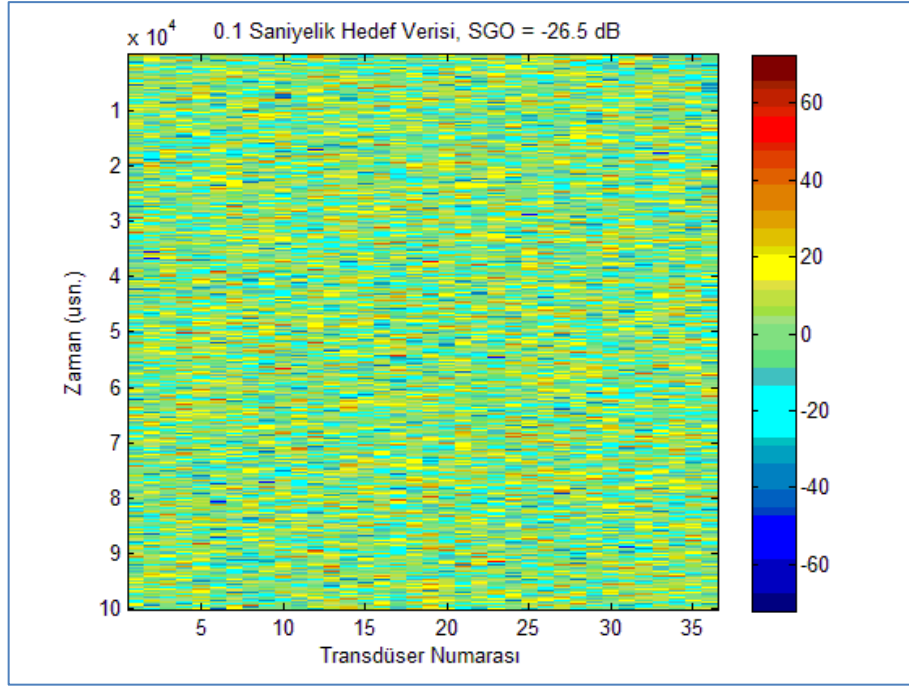


Şekil 4. 13 SGO = -14.5 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti



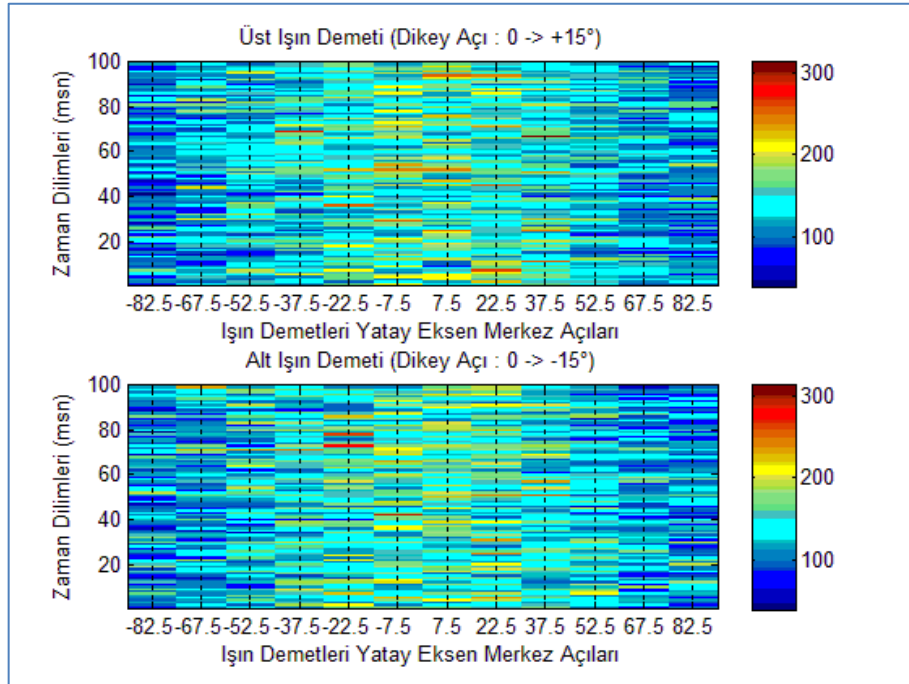
Şekil 4. 14 SGO = -14.5 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 14'ten görüldüğü üzere SGO = -14.5 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde 5.7° elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan **B<sub>7</sub>** ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespitinin yapıldığı zaman dilimi 50-60. milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. Gürültü artmış olmasına rağmen Goertzel algoritması ihmal edilebilecek kadar az etkilenmektedir. Goertzel algoritmasının gürültüye karşı bağışıklığı bu grafikten de açıkça görülebilmektedir.



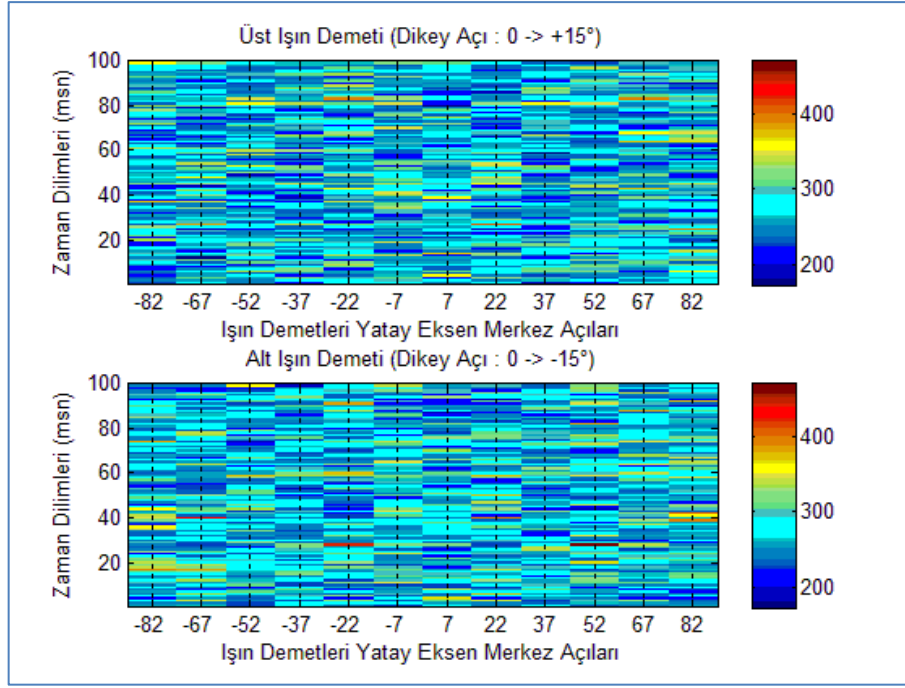
Şekil 4. 15 SGO = -26.5 dB, 0.1 saniyelik ham veri

Şekil 4. 15'te SGO = -26.5 dB iken 36 adet transdüser için 0.1 saniyelik ham veri üretilmektedir. SGO = -26.5 dB için ışın demetlemeleri sonuçları aşağıdadır.



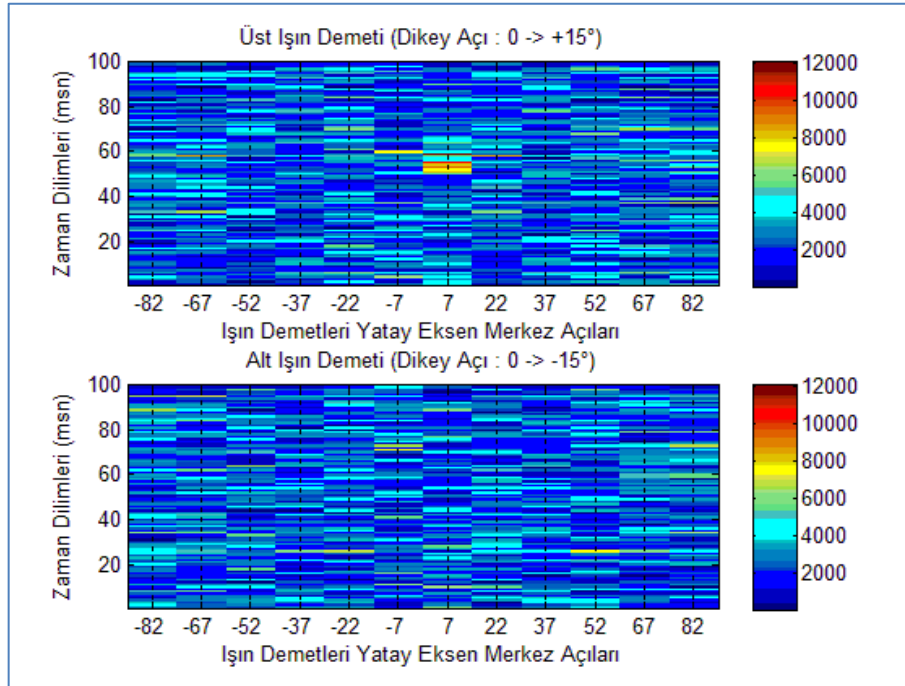
Şekil 4. 16 SGO = -26.5 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 16'dan görüldüğü üzere SGO = -26.5 dB için zaman alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapılamamaktadır.



Şekil 4. 17 SGO = -26.5 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 17'den görüldüğü üzere SGO = -26.5 dB için FFT ile frekans alanı ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapılamamaktadır.



Şekil 4. 18 SGO = -26.5 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti

Şekil 4. 18'den görüldüğü üzere SGO = -26.5 dB için Goertzel algoritması ışın demetlemesiyle hedef tespiti yapıldığında, hedef doğru ışın demeti (**B<sub>7</sub>**) içerisinde

bulunmaktadır. Hedef yatay ve dikey ekseninde  $5.7^\circ$  elevasyon ve azimut açısına sahip olduğundan  $B_7$  ışın demeti içerisinde yer almaktadır. Hedef tespiti için yapılan zaman dilimi 50-60 milisaniyeler olduğundan zaman doğrulaması da geçerlidir. -26.5 dB SGO değerinde gürültü etkisinden dolayı hedef tespiti zor yapılabilmektedir. Daha yüksek SGO değerlerinde hedef tespiti net yapılabilirken gürültü artımıyla performans azalması görülmektedir.

Hedef verisinin farklı SGO değerleri için zaman alanı ve frekans alanı ışın demetlemesi hedef tespiti başarımları karşılaştırılarak Çizelge 4. 1’de sunulmaktadır.

Çizelge 4. 1 Işın demeti hedef tespit başarımları

| SGO (dB) | Zaman Alanı           | Frekans Alanı     |                   |
|----------|-----------------------|-------------------|-------------------|
|          |                       | FFT               | Goertzel          |
| 0 dB     | Hedef Belirgin        | Hedef Belirgin    | Hedef Belirgin    |
| -7.5 dB  | Hedef Seçilebilir     | Hedef Seçilebilir | Hedef Belirgin    |
| -14.5 dB | Hedef Zor Seçilebilir | Hedef Seçilemez   | Hedef Belirgin    |
| -26.5 dB | Hedef Seçilemez       | Hedef Seçilemez   | Hedef Seçilebilir |

Çizelge 4. 1 benzetim sonuçları şekillerine göre oluşturulmaktadır. Şekiller üzerinden hedefin beklenen ışın demeti içerisinde oluşu ve renk farklılığına göre görsel olarak tespit değerleri tabloya yansıtılmaktadır.

Çizelge 4. 2 Işın demeti hesaplama süreleri

|                                         | Zaman Alanı | Frekans Alanı |          |
|-----------------------------------------|-------------|---------------|----------|
|                                         |             | FFT           | Goertzel |
| 0.1 sn. Ham Veri Hesaplama Süresi (sn.) | 2.3         | 0.9           | 6.9      |

Çizelge 4. 2 benzetim sonuçlarının çizdirildiği grafiklerin hesaplama sürelerini vermektedir. Hesaplama süreleri karşılaştırması için her metot aynı örnekleme hızına sahiptir. Veriler 1000’lik bloklar halinde incelenmektedir. Bu yüzden Goertzel algoritması hesaplama süresi daha uzun sürmektedir. Örnekleme hızının frekans alanı

için Nyquist ölçütünü geçmesi yeterlidir [63]. Bu da daha hızlı işlem yapmaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca Goertzel algoritması için veri bloklarının daha küçük seçilmesi de önemlidir. Fakat bahsedilen parametrelerin farklı kullanılması anlaşılabilir bir karşılaştırma olanağı vermeyeceğinden tercih edilmemektedir.

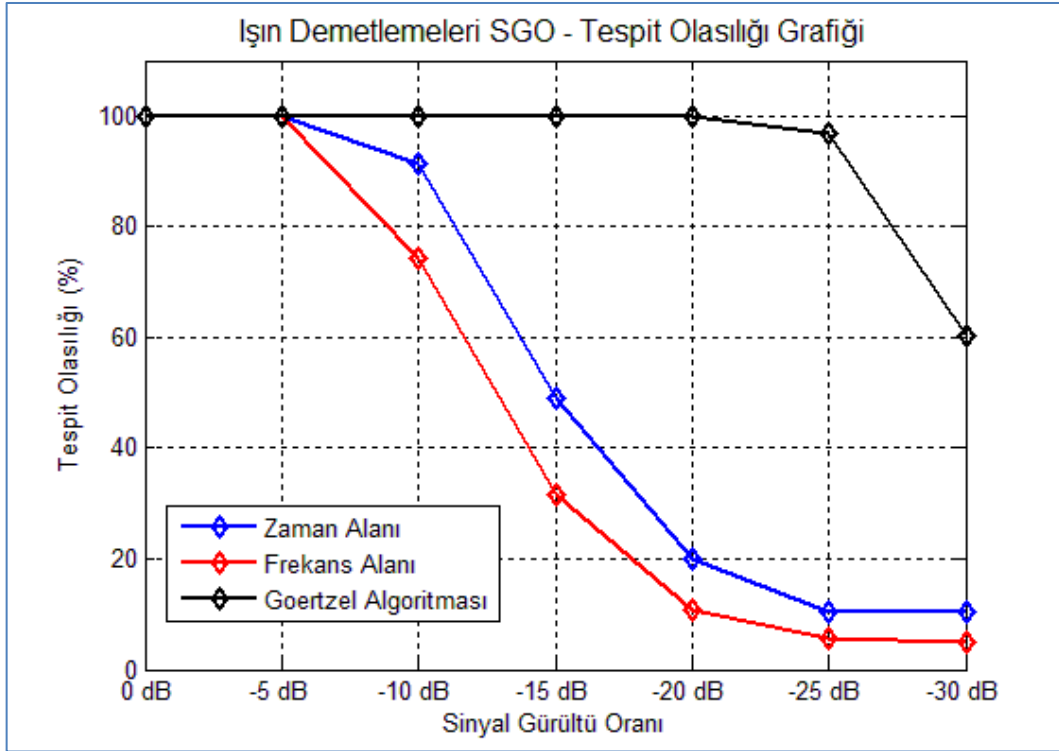
Çizelge 4. 3 Sistem gereksinimleri

|                    | Zaman Alanı | Frekans Alanı |          |
|--------------------|-------------|---------------|----------|
|                    |             | FFT           | Goertzel |
| Örnekleme          | Yüksek      | Alçak         | Alçak    |
| Bellek Gereksinimi | Yüksek      | Orta          | Orta     |
| İşlem Karmaşıklığı | Alçak       | Orta          | Orta     |

Çizelge 4. 3'te kullanılan ışın demetlemesi yöntemlerinin donanımsal isterleri verilmektedir. Zaman alanı ışın demetlemesi yüksek örnekleme hızına ve bellek gereksinimine ihtiyaç duymaktayken işlem karmaşıklığı bakımından avantajlıdır. Zaman alanı ışın demetlemesi örnekleme hızı sinyal frekansının en az 10 katı olması tespit sonucu açısından önemlidir. Bellek gereksinimi bu yüzden yüksektir. Zamanda kaydırma ve toplama işlemi yapıldığından işlem karmaşıklığı içermemektedir. Frekans alanı ışın demetlemelerinde yüksek örnekleme hızına ve bellek ihtiyacına gereksinim duyulmamaktadır. Örnekleme frekansının 2 kat seçilmesi yeterlidir. 1000'lik blok verilerin 256 ve 512 noktalı frekans dönüşümleri alınabildiğinden bellek gereksinimi daha azdır. Fakat alınan verilerin frekans dönüşümü yapılması, eş fazör çarpımları, toplam alınması ve zaman alanına geri dönülmesinden dolayı daha fazla işlem karmaşıklığı içermektedir.

Çizelge 4. 1'de sonuçlar görsel olarak sergilenmekte ve performansları karşılaştırılmaktadır. Işın demetlemesi performanslarının hedef tespit olasılığı grafiği Şekil 4. 19'da gösterilmektedir. Bu grafikte SGO değişimi ile tespit olasılığı başarımının değişimi yer almaktadır. Şekilden görüldüğü üzere SGO değeri düştükçe tespit başarımları azalmaktadır. Goertzel algoritması hedef verisinin frekans bilgisinin sabit olduğu durum için çok başarılıdır. Bu grafik 100 adet iterasyon yapılarak hedefin tespit edildiği ışın demeti başarımını göstermektedir. Hedefin beklenen ışın demetinde olması

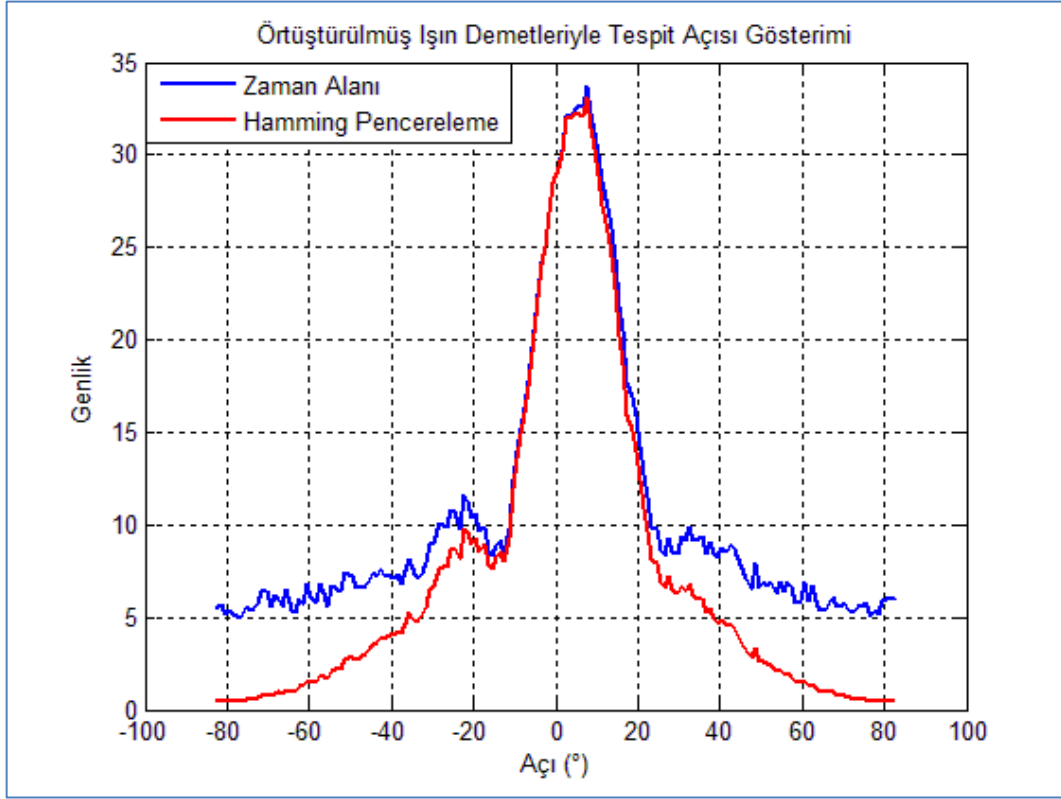
durumu başarımlı olarak kabul edilmektedir. Herbir ışın demeti 15 derecelik açıyı temsil etmektedir. Şekil 4. 19, Şekil 4. 21 ve Şekil 4. 22’de grafik üzerinde FFT ile frekans alanı ışın demetlemesi için “Frekans Alanı” isimlendirmesi kullanılmaktadır.



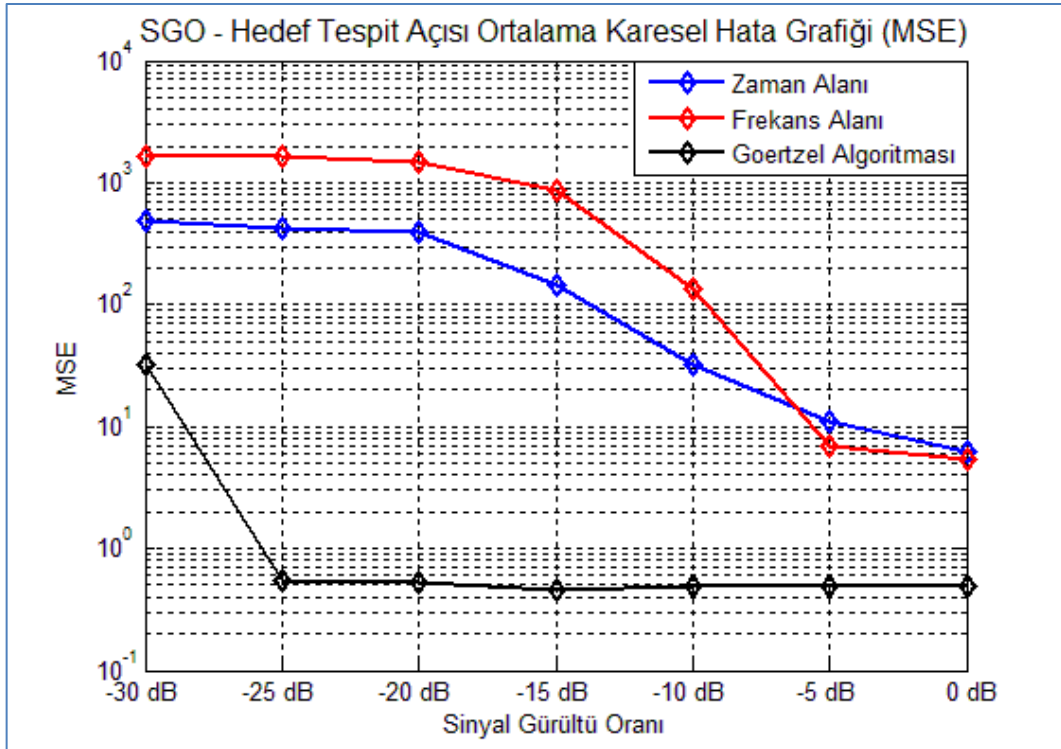
Şekil 4. 19 SGO – Tespit olasılığı grafiği

Herbir ışın demeti 15 derecelik açıyı kapsadığından hedef açısının detaylı olarak bulunmasına imkân tanımamaktadır. Dizindeki eleman sayısı artırılamayacağından ışın demetleri 1’er derecelik açılarla kaydırılarak ışın demetleri üst üste bindirilebilir. Bu durum hedefin birkaç ışın demetinde var olmasını sağlamaktadır. Fakat hedefin bulunduğu açıdaki kaydırılmış ışın demetinde en yüksek genlik değerini alacağı beklenmektedir. Buradan çıkacak sonuçla ortalama karesel hata (OKH) verisi bulunabilir. Örnek teşkil etmesi açısından Şekil 4. 20’de ışın demetleri, -82.5 derece açıdan itibaren 1’er derece kaydırılarak 82.5 derece açıya kadar zaman alanı ışın demetlemesiyle SGO = 0 değeri için sergilenmektedir. Şekilden görüldüğü üzere genliğin maksimum olduğu açı değeri yatay ekseninde 7.5 derecedir. Hamming pencereleme yapılarak yan kulakçıklar bastırılmaktadır. Hedef yatay ekseninde 5.7° açıda olduğundan 1.8° hata payı vardır. OKH literatürde Mean Squared Error (MSE) olarak adlandırılmaktadır.

$MSE(\hat{\theta}) = E[(\hat{\theta} - \theta)^2]$  ile gösterilmektedir.  $\hat{\theta}$  beklenen değeri,  $\theta$  aktüel değeri göstermektedir.



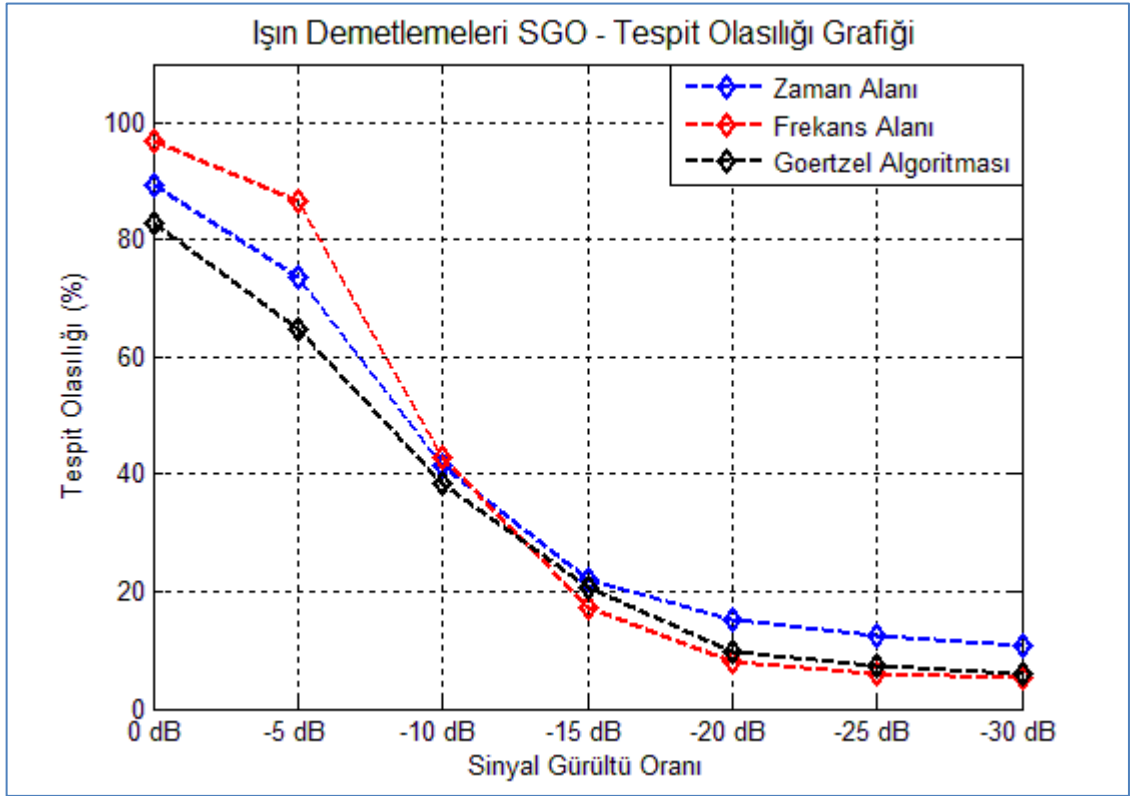
Şekil 4. 20 SGO = 0 dB zaman alanı için örtüşürülmüş ışın demetleri grafiği



Şekil 4. 21 SGO – Hedef tespit açısı OKH grafiği

Şekil 4. 21’den görüldüğü üzere Goertzel algoritmasının hedef tespit açısı hatası çok düşüktür. SGO = -25 dB değerine kadar çok düşük hedef tespit açısı hatasına sahiptir. Zaman alanı, FFT ile frekans alanı ışın demetlemesinden daha iyi performans sergilemektedir.

Hedef benzetiminde giriş sinyali  $\hat{x}(n) = x(n)a(\vartheta) + v(n)$  yaklaşımıyla elde edilmektedir.  $\hat{x}(n)$  transdüserde alınan sinyali,  $x(n)$  hedef sinyalini,  $a(\vartheta)$  yönlendirme vektörünü,  $v(n)$  normal dağılımlı gürültü vektörünü göstermektedir.  $x(n)$  hedef sinyali sabit frekanslı bir sinyal olarak kullanılmaktadır.  $x(n)$  hedef sinyali  $f_m=37500$  Hz sabit frekans yerine  $37500 \pm \%5f_m$  Hz arasında rastgele değişen frekanslarda her bir transdüser her an farklı frekans gelecek şekilde oluşturulsun. Hedef sinyalinin beklenen sinyalden farklı frekanslarda alınması durumunda ışın demetleri başarımları grafiği Şekil 4. 22’de sergilenmektedir.



Şekil 4. 22 Frekans değişimli hedef için SGO – Tespit olasılığı grafiği

Şekil 4. 22 incelendiğinde hedef sinyalinin frekansı  $\pm\%5$  sürekli ve rastgele değiştirildiğinden ışın demetlemelerinin başarımlarının düştüğü görülmektedir. Özellikle Goertzel algoritmasının sinyal frekansının  $\%10$ 'luk değişim bandından dolayı

performansı çok fazla düşmektedir. Anılan tekniğin frekans değişimlerinin çok fazla olduğu hedef sinyalleri için kullanılmasının uygun olmadığı değerlendirilmektedir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Bu tezde ışın demetlemesi yöntemleri kullanılarak hedef tespiti yapılmaya çalışılmaktadır. Hedef verisi ve ışın demeti benzetimleri MATLAB programında modellenerek sonuçlar yine aynı programda grafikler aracılığıyla sergilenmektedir.

Çalışma ortamı olarak frekansların küçük olması ve gösterim kolaylığı sağlaması sebebiyle sualtı ortamı kullanılmaktadır. Fakat sualtı ortamının dinamik yapısı nedeniyle modellenmesi çok zor olduğundan ideal ortam şartları olduğu varsayılmaktadır. Hedef verisinin uzak alanda noktasal bir kaynak olduğu varsayılmaktadır. Sualtı ortamında hedeften yayılan dalgaların kırınımına uğramadan düzlemsel şekilde yayıldığı kabul edilmektedir. Işın demetlemesi yapılmadan önce kullanılacak olan dizin yapıları modellenerek ışın demeti yapıları sergilenmektedir. Yönlendirme, pencereleme ve örtüşme işleminin ışın demetlemesi üzerine etkileri incelenmektedir. Işın demetlemesi için 3 boyutlu gösterim ve dizin kazancı avantajlarından dolayı düzlemsel dizin kullanılmaktadır. Düzlemsel dizinde kullanılacak elemanların yönsüz transdüserler olduğu kabul edilmektedir. Transdüserler  $\lambda/2$  aralıklarla dizilerek örtüşme olmaması sağlanmaktadır.

Hedef verileri zaman alanı ve frekans alanında ışın demetlemesi ile işlenerek hedef kerteriz tespiti yapılmaya çalışılmaktadır. Değişik SGO değerleri için hedef verisi setleri oluşturularak bu veriler için zaman ve frekans alanı ışın demetlemeleriyle hedef tespit başarımları görsel olarak sergilenmektedir.

Zaman alanı ışın demetlemesinin FFT ile frekans alanı ışın demetlemesine göre daha düşük SGO değerlerinde dahi hedef tespiti yapabildiği fakat daha yavaş çalıştığı

görülmektedir. Frekans alanı ışın demetlemesi hızlı çalışması ve daha az donanıma ihtiyaç duyması sebebiyle daha ideal bir çalışma ortamı sunmaktadır. Frekans alanında düşük SGO değerleri için Goertzel algoritması önerilmekte, yapılan çalışmada algoritmanın başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Fakat bu algoritmanın yüksek oranlı frekans değişimine sahip durumlarda kullanılmasının uygun olmadığı değerlendirilmektedir.

Hedef tespit başarımının artırılması için daha çok elemanla oluşturulmuş daha dar ışın demetleriyle daha fazla sayısal ışın demeti kullanılabilir. Bu sayede konum keskin biçimde bulunabilir. Fakat bu fazladan maliyet ve hesaplama karmaşıklığının yanı sıra uzun hesaplama süresi de gerektirmektedir.

Işın demetlemesi için günümüzde çok farklı yaklaşımlar mevcuttur. Birçok çalışmada çok farklı yöntemler denenerek değişik koşullar altında ışın demetlemesi başarımları artırılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle ışın demetinin genel karakteristik yapısı üzerinde durulmaktadır. Bu tezde zaman ve frekans alanında ışın demetlemesiyle konumu bilinen bir hedefin tespiti yapılmaya çalışılmaktadır. Uygulanan yöntemler benzetim aracılığıyla test edilmektedir. Fakat pratik olarak da kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Bu tezde yapılan çalışmalar sadece sualtı ortamı için değil genel bir yaklaşımı içermektedir. Havada veya diğer ortamlarda farklı frekans ve farklı dizilimler için de uyarlanabilmektedir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Van Veen, B.D. ve Buckley, K.M., (1998). "Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering", IEEE ASSP Magazine, 5:4-24.
- [2] Beste, D. ve Leith, E., (1966). "An Optical Technique for Simultaneous Beamforming and Cross-Correlation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-2(4):376-384.
- [3] Lacos, R.T. ve Kuster G., (1970). "Processing A Partially Coherent Large Seismic Array for Discrimination", 9th IEEE Symposium on Adaptive Processes Decision and Control, 203.
- [4] Saltzer, B., (1971). "A Hardware Approach to Acoustic Imaging", Engineering in the Ocean Environment, 85-98.
- [5] Stephen, K.P. ve John S.B., (2013). "Sharpening Sidescan Sonar Images for Shallow-Water Target and Habitat Classification with a Vertically Stacked Array", IEEE Journal of Oceanic Engineering, 38(3):455-469.
- [6] Pan, X., Li, C., Xu, Y., Wen X. ve Gong, X., (2014). "Combination of Time-Reversal Focusing and Nulling for Detection of Small Targets in Strong Reverberation Environments", IET Radar, Sonar and Navigation, 8(1):9-16.
- [7] Kim, S.M. ve Kim, S.M., (2013). "Performance Improvement of Visible Light Communications Using Optical Beamforming", 5th International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 362-365
- [8] Zheng, G., (2014). "Joint Beamforming Optimization and Power Control for Full-Duplex MIMO Two-Way Relay Channel", IEEE Transactions on Signal Processing, 63(3):555-566.
- [9] Yang, L. ve Zhang, W., (2014). "On Degrees of Freedom Region of Three-User MIMO Interference Channels", IEEE Transactions on Signal Processing, 63(3):590-603.
- [10] Gallacher, R. ve Rahman, S., (2014). "Linear MU-MIMO Precoding Algorithms for a Milimeter Wave Communication System Using Hybrid Beamforming", IEEE International Conference on Communication, Sydney, 5449-5454.
- [11] Pailhas, Y. ve Petillot, Y., (2014). "Large MIMO Sonar Systems: A Tool for Underwater Surveillance", Sensor Signal Processing for Defence, Edinburgh, 1-5.

- [12] McHugh R., Shaw S. ve Taylor N., (1996). "Efficient Digital Signal Processing Algorithm for Sonar Imaging", IEE Proceedings-Radar, Sonar Navigation, 143(3).
- [13] Carter, C., (1981). "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 29(3): 463-470.
- [14] DeMuth, G., (1977). "Frequency Domain Beamforming Techniques", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 713-715.
- [15] Tucker, J.D. ve Azimi-Sadjadi, M.R., (2011). "Coherence-Based Underwater Target Detection From Multiple Disparate Sonar Platforms", IEEE Journal of Oceanic Engineering, 36(1):37-51.
- [16] Yang, S., (2008). "Underwater Laser Imaging Target Detection Technology", First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, Wuhan, 437-440.
- [17] Tucker, J.D., Sadjadi, M.R. ve Kabatek, M., (2009). "An Underwater Target Detection System for Electro-Optical Imagery Data", OCEANS 2009, Biloxi, MS, 1-8.
- [18] Varadarajan, V. ve Krolik, J., (2005). "Target Detection Using Dynamically Reconfigurable Sensor Arrays", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 4:1009-1012.
- [19] Han, Y., Zhou1, F., Tian, X. ve Chen, Y., (2012). "Distributed and Parallel Subarray Beamforming for Underwater Real-Time 3-D Acoustic Imaging", 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology, Changchun, 2091-2096.
- [20] Palmese, M. ve Trucco, A., (2007). "Digital Near Field Beamforming for Efficient 3-D Underwater Acoustic Image Generation", IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, Krakow, 1-5.
- [21] Chen, P., Tian, X. ve Chen, Y., (2010). "Optimization of the Digital Near-Field Beamforming for Underwater 3-D Sonar Imaging System", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 415-424.
- [22] Krishnaveni, V., Kesavamurthy, T. ve Aparna, B., (2013). "Beamforming for Direction of Arrival (DOA) Estimation – A Survey", International Journal of Computer Applications, 61(11).
- [23] Sanudin, R., Noordin, N.H., El-Rayis, A., Haridas, N., Erdogan, A. ve Arslan, T., (2011). "Capon-Like DOA Estimation Algorithm for Directional Antenna Arrays", Antennas & Propagation Conference, Loughborough.
- [24] Rao, B.D. ve Hari, K.V.S., (1989). "Performance Analysis of Root-Music", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 37:1939-1949.
- [25] Hamid, U., Qamar, R. ve Waqas, K., (2014). "Performance Comparison of Time-Domain and Frequency-Domain Beamforming Techniques for Sensor

- Array Processing”, 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, Islamabad, 379-385.
- [26] Karakaya, Y. ve Güçlüoğlu, T., (2014). “Zaman ve Frekans Alanında Işın Demetlemesiyle Sualtında Hedef Kerteriz Tespiti”, Signal Processing and Communications Applications Conference, Trabzon, 1150-1153.
  - [27] Qili, G. ve Chao, S., (2014). “Time-frequency Analysis for Underwater Acoustic Signals Based on Wideband Beamformer Outputs”, IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, Guilin, 355-358.
  - [28] Lawrance, K. ,Austin, F. ,Alan, C. ve James, S. , “Fundamentals of Acoustics”, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-84789-5.
  - [29] J. Lawrance Ziomek, (1995). “Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing, Book”, CRC Press, ISBN 0-8493-9455-4.
  - [30] Haiming, Z., Yujiu, H., Yimin, X. ve Fei, C., (2013). “Chaos Analysis of Reverberation from Short Distance Acoustic Detection in Deep Sea Mining Environment”, 5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Hong Kong, 361-364.
  - [31] Yaosong, X., Dandan, W. ve Hua, F., (2014). “Underwater Acoustic Source Localization Method Based on TDOA with Particle Filtering”, 26th Chinese Control and Decision Conference, Changsha, 4634-4367.
  - [32] Orlic, M., (2001). “Marine Hydrodynamics and Vehicle Control”, The Ocean Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton, 34-52.
  - [33] Urick, J., (1983). “Principles of Underwater Sound”, 3rd Edition, Mc. Graw Hill, ISBN 0-07-066087-5.
  - [34] Aksoy, S., (2014). “Su Altı Akustik Dalga Yayılımı & Sonar Sistemler “, GYTE.
  - [35] Medwin, H., (1975). “Speed of Sound In Water: A Simple Equation for Realistic Parameters”, Journal of the Acoustical Society of America, 58(6): 1318-1319.
  - [36] Medwin, H. ve Clay, S., (1998). “Fundamentals of Acoustical Oceanography”, Academic Press, ISBN 0-12-487570-X.
  - [37] Erbe, C., (2011). “Underwater Acoustic”, A Pocket Handbook, 3rd Edition, Jasco Applied Science, British Columbia, 30-31.
  - [38] Agarwall, A. ve Lang, J.H., (2005). “Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits”, Elsevier Inc., ISBN: 1-55860-735-8.
  - [39] Chen, H., Lin, T.H., Kung, H., Lin, C.K. ve Gwon, Y., (2012). “Determining RF Angle of Arrival Using COTS Antenna Arrays: A Field Evaluation”, Military Communications Conference, Orlando, 1-6.
  - [40] Balasem, S.S., Tiong, S.K. ve Koh, S.P., (2012). “Beamforming Algorithms Technique by Using MVDR and LCMV”, International E-Conference on Information Technology and Applications, 2(5):315-324.

- [41] Johnson, D.H. ve Dudgeon, D.E., (1993). "Array Signal Processing: Concepts and Techniques", Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [42] Orfanidis, S.J., (2010). "Introduction to Signal Processing", Rutgers University, Prentice Hall, ISBN 0-13-209172-0.
- [43] Nai, S., Ser, W., Yu, Z. L. ve Chen, H., (2010). "Beampattern Synthesis for Linear and Planar Arrays with Antenna Selection by Convex Optimization", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 58(12):3923-3930.
- [44] Brian D. Jeffs, (2004). "Beamforming", Dept. of Electrical and Computer Engineering Brigham Young University.
- [45] Chrysostomou, C., Seker, H. ve Aydın, N., (2011). "Effects of Windowing and Zero-Padding on Complex Resonant Recognition Model for Protein Sequence Analysis", Engineering in Medicine and Biology Society, Boston, 4955-4958.
- [46] Douglas, L., (2009). "The Discrete Fourier Transform, Part 3: The PSD", Journal of Object Technology, 8(6).
- [47] Reljin, I., Reljin, B., Papic, V. ve Kostic, P., (1998). "New Window Functions Generated by Means of Time Convolution – Spectral Leakage Error", 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Tel-Aviv, 2:878-881.
- [48] Lin, Y., Jian, Y., Su, C. ve Phoong, S., (2004). "Windowed MultiCarrier Systems with Minimum Spektral Leakage", International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 4:749-752.
- [49] Dmochowski, J., Benesty, J. ve Affes, S., (2009). "On Spatial Aliasing in Microphone Arrays", IEEE Transactions on Signal Processing, 57(4):1383-1395.
- [50] Harris, F., (1978). "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform", Proceedings of the IEEE, 66(1):51-83.
- [51] Oppenheim, A.V., ve Schafer, R.W., (1999). "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 468-471.
- [52] Haynes, T., (1998). "A Primer on Digital Beamforming", Spectrum Signal Processing.
- [53] Tang, Z., Blacquiere, G. ve Leus, G., (2011). "Aliasing-Free Wideband Beamforming Using Sparse Signal Representation", IEEE Transactions on Signal Processing, 59(7):3464-3469.
- [54] Hinich, M., (1978). "Processing Spatially Aliased Arrays", Virginia Polytechnic Institute and State University, Jun 1978, Virginia.
- [55] Ertuğ, Ö., (2011). "Kablosuz Ağlarda Enterferans Bastırımı için Multimodal Işın Oluşturma", Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Gelişme Raporu, Ankara.
- [56] Alon, D. ve Rafaely, B., (2014). "Spatial Aliasing Cancellation for Circular Microphone Arrays", 4th Joint Workshop on Hands-free Speech Communication and Microphone Arrays, 137-141.

- [57] Meyer, J. ve Elko, G., (2008). "Handling Spatial Aliasing in Spherical Array Applications", *Hands-Free Speech Communication and Microphone Arrays*, Trento, 1-4.
- [58] Blinn, J., (1989). "Return of the Jaggy (High Frequency Filtering)", *Computer Graphics and Applications*, 9(2):82-89.
- [59] Ferguson, B.G ve Carevic, D., (2010) "Optimal Spatial Filtering of Real Data from Submarine Sonar Arrays", *OCEANS 2010 IEEE*, Sydney, 1-7.
- [60] McCowan, I., (2001). "Robust Speech Recognition Using Microphone Arrays", PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia.
- [61] Proakis, J. ve Manolakis, D., (1996). "Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications", Prentice Hall Third Edition, ISBN 0-13-3TM33fl-cl, New Jersey.
- [62] Goertzel, G., (1958). "An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series" , *American Mathematical Monthly*, 65(1):34-35.
- [63] Blackman, R. B. ve Tukey, J. W., (1958). "The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering", *Bell System Technical Journal*, 37(1):185-282.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Yılmaz KARAKAYA  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 1981, Kdz.Ereğli  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : yilmaz.kk@mynet.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan                                | Okul/Üniversite                            | Mezuniyet Yılı |
|--------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| Lisans | Elektrik-Elektronik<br>Mühendisliği | İstanbul Üniversitesi                      | 2003           |
| Lise   | Fen Bilimleri                       | Kdz.Ereğli Yabancı Dil Ağırlıklı<br>Lisesi | 1999           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl  | Firma/Kurum | Görevi               |
|------|-------------|----------------------|
| 2006 | ARMERKOM    | Elektronik Mühendisi |
| 2005 | Klas Kablo  | Ar-Ge Mühendisi      |

## **YAYINLARI**

### **Bildiri**

1. SiU 2014 Karakaya, Y. ve Güçlüoğlu T., (2014). “Zaman ve Frekans Alanında Işın Demetlemesiyle Sualtında Hedef Kerteriz Tespiti”, Trabzon, 1150-1153.