
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SEYREK SİNYAL GERİ KAZANIMI TABANLI POMP VE GOMP ALGORİTMALARININ ELEKTRONİK DESTEK SİSTEMLERİNDE YÖN BULMA İÇİN KULLANIMI

İlhan ERAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2026

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İlhan ERAY

25/06/2026

SEYREK SİNYAL GERİ KAZANIMI TABANLI POMP VE GOMP ALGORİTMALARININ ELEKTRONİK DESTEK SİSTEMLERİNDE YÖN BULMA İÇİN KULLANIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

İlhan ERAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2026

ÖZET

Günümüzün karmaşık elektromanyetik muharebe ortamında, Elektronik Destek (ED) sistemlerinin pasif olarak tehdit sinyallerini tespit etmesi ve konumlandırması kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel genlik karşılaştırmalı yön bulma yöntemleri, düşük Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) ve çoklu kaynak içeren senaryolarda sınırlı performans sergilemektedir. Bu tez çalışması, modern ED sistemlerinde yön bulma doğruluğunu ve verimliliğini artırmak amacıyla, seyrek sinyal geri kazanımına dayalı Perturbed Orthogonal Matching Pursuit (POMP) ve Generalized Orthogonal Matching Pursuit (gOMP) algoritmalarının entegrasyonunu ve performansını incelemektedir. Çalışma kapsamında, öncelikle pasif yön bulma ilkeleri, anten dizisi konfigürasyonları ve sıkıştırılmış algılama teorisinin temel prensipleri ele alınmıştır. Ardından, OMP, gOMP, POMP ve NOMP algoritmalarının matematiksel temelleri, gürültülü ortamlardaki sinyal seçimi ve tahmin doğruluğu üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Önerilen yöntemlerin etkinliği, oluşturulan bir simülasyon ortamında farklı SNR seviyeleri, anten sayıları ve çoklu hedef senaryoları altında Monte Carlo denemeleri ile analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, POMP algoritmasının özellikle düşük ve orta SNR (10-15 dB) koşullarında geleneksel OMP yaklaşımına göre daha kararlı bir davranış sergilediğini ve başarı oranının doygunluğa daha hızlı ulaştığını göstermiştir. Yapılan simülasyonlar POMP algoritmasının ızgara dışı hedefleri tespitte OMP algoritmasına karşı yüksek başarı gösterdiğini ancak NOMP algoritmasına karşı başarı oranının hemen hemen aynı olmasına rağmen daha yüksek hesaplama maliyeti oluşturduğunu göstermiştir. gOMP algoritmasının ise her iterasyonda birden fazla atom seçerek hesaplama yükünü azalttığı ve çoklu tehdit ortamlarında tepki süresini kısalttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sayısal bulgular, seyrek sinyal işleme yöntemlerinin modern elektronik harp sistemlerinde uygulanabilir, yenilikçi çözümler sunduğunu kanıtlamaktadır.

Bilim Kodu	:	93421
Anahtar Kelimeler	:	Seyrek sinyal işleme, elektronik destek, yön bulma, sıkıştırılmış algılama, OMP, POMP, GOMP, NOMP
Sayfa Adedi	:	65
Danışman	:	Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

SPARSE SIGNAL RECOVERY BASED POMP AND GOMP ALGORITHMS FOR DIRECTION FINDING IN ELECTRONIC SUPPORT SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

İlhan ERAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2026

ABSTRACT

In today's complex electromagnetic warfare environment, the ability of Electronic Support (ES) systems to passively detect and locate threat signals is of critical importance. Traditional amplitude-comparison-based direction-finding methods exhibit limited performance in scenarios involving low Signal-to-Noise Ratio (SNR) and multiple sources. This thesis investigates the integration and performance of the Perturbed Orthogonal Matching Pursuit (POMP) and Generalized Orthogonal Matching Pursuit (gOMP) algorithms, which are based on sparse signal recovery, with the aim of improving direction-finding accuracy and efficiency in modern ES systems. Within the scope of this study, the fundamentals of passive direction-finding principles, antenna array configurations, and compressed sensing theory were first addressed. Subsequently, the mathematical foundations of the OMP, gOMP, POMP and NOMP algorithms, along with their effects on signal selection and estimation accuracy in noisy environments, were detailed. The effectiveness of the proposed methods was analyzed using Monte Carlo simulations in a created simulation environment under various SNR levels, antenna counts, and multi-target scenarios. The simulation results demonstrate that the POMP algorithm exhibits more stable behavior compared to the traditional OMP approach, particularly under low and medium SNR (10–15 dB) conditions, and that the success rate reaches saturation more quickly. The simulations have demonstrated that the POMP algorithm significantly outperforms the OMP algorithm in detecting off-grid targets; however, while its accuracy is nearly identical to that of the NOMP algorithm, it imposes a higher computational cost. It has been observed that the gOMP algorithm reduces the computational load by selecting multiple atoms in each iteration and shortens the response time in multi-threat environments. The numerical results obtained demonstrate that sparse signal processing methods offer innovative solutions applicable to modern electronic warfare systems.

Science Code	:	93421
Key Words	:	Sparse signal recovery, electronic support, compressed sensing, OMP, POMP, GOMP, NOMP, direction finding
Page Number	:	65
Supervisor	:	Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, sadece teknik bir araştırmanın sonu değil; uykusuz gecelerin, verilen emeklerin ve en önemlisi, yoluma ışık tutan insanların sarsılmaz desteğinin bir nişanesidir. Bu uzun ve meşakkatli yolculukta, varlıklarıyla bana güç veren herkese en kalbi şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatımın bu en önemli durağında, bilgisiyle yolumu aydınlatan, karşılaştığım her güçlükte bilgeliği ve hoşgörüsüyle beni cesaretlendiren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Özgür ERTUĞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Sabrı ve paylaştığı bilgiler, akademik yolculuğumun en değerli kazanımları olmuştur.

Profesyonel hayatımda kendimi geliştirmem için bana her türlü imkânı sunan, bu çalışmanın hayata geçmesine zemin hazırlayan ASELSAN A.Ş'e ve değerli yöneticilerime minnettarım. Özellikle tecrübesiyle her zaman örnek aldığım ve güvenini her an hissettiğim Sayın Şükrü Fırat ADA'ya, varlığıyla çalışma ortamımızı huzurlu kılan ve desteğini esirgemeyen müdürüm Sayın Özden ERDEM KILIÇ'a ve ekip ruhunu her an hissettiren, liderliğiyle bana her zaman yol gösteren ekip liderim Sayın Sami TOKGÖZ'e şükranlarımı sunarım. Sizlerle çalışmak benim için büyük bir ayrıcalıktır.

Hayatın iniş çıkışlarında yanımda saf tutan, yükümü hafifleten ve bu zorlu süreçte moral kaynağım olan tüm dostlarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Sessiz destekleriniz ve sarsılmaz inancınız, en yorgun anlarımda en büyük dayanağım oldu. İyi ki varsınız.

Ve her şeyden öte; varlık sebebim olan, sevgilerini ve emeklerini kelimelerle tarif edemeyeceğim canım aileme... Hayatım boyunca attığım her adımda, başarısızlıklarımda sığındığım bir liman, başarılarımda ise en büyük gurur kaynağım oldunuz. Bu çalışma, sizin bana aşıladığınız azmin ve verdiğiniz sonsuz sevginin bir sonucudur. Sabrınız, dualarınız ve bana benden daha çok inandığınız için size sonsuz minnettarım. Bu başarı, en çok sizin hakkınızdır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER 7

2.1. Yön Bulma Temelleri ve Anten Dizileri 7

2.1.1. Pasif yön bulma 7

2.1.2. Anten dizileri ve anten örüntüsü 11

2.2. Sıkıştırılmış Algılama ve Seyrek Sinyaller 14

2.2.1. Seyrek sinyaller 15

2.2.2. Sıkıştırılmış algılama 16

2.3. Seyrek Sinyal Geri Kazanım Algoritmaları 19

2.3.1. Matching pursuit algoritması 20

2.3.2. Orthogonal matching pursuit algoritması 21

3. YÖNTEM 33

3.1. Problem Tanımı 33

3.2. Anten Modeli ve Yön Sözlüğü Oluşturma 34

3.2.1. Anten kazanç örüntüsü (Gauss modeli) 34

3.2.2. Anten dizisi konfigürasyonu 35

3.2.3. Yön sözlüğünün oluşturulması 37

Sayfa

3.3. OMP ve Türevlerinin Uygulanması 38
3.3.1. OMP: Temel referans uygulaması 38
3.3.2. GOMP: Hız ve çoklu hedef optimizasyonu 38
3.3.3. POMP: Model hataları ve ızgara dışı iyileştirme 38
3.3.4. NOMP: Sürekli uzayda Newton iyileştirmesi 39
3.4. Simülasyon Parametreleri ve Ölçütler 39
3.4.1. Ortak simülasyon ayarları 39
3.4.2. Simülasyon senaryoları 40
3.4.3. Performans ölçüm metrikleri 40
4. SİMÜLASYONLAR VE SONUÇLAR 43
4.1. SNR Seviyelerine Göre Performans Analizi 43
4.2. Izgara Dışı (Off-Grid) Tespit Yeteneği Performans Analizi 48
4.3. Anten Sayısının Yön Bulma Performansına Etkisi 51
4.4. GOMP Seçim Parametresi (S) Performans Analizi 53
5. TARTIŞMA 57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 61
ÖZGEÇMİŞ 65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Anten yerleşim açıları (4 antenli senaryo) 35

Çizelge 3.2. Anten yerleşim açıları (8 antenli senaryo) 36

Çizelge 4.1. OMP SNR analizi 44

Çizelge 4.2. POMP SNR analizi 46

Çizelge 4.3. Sözlük çözünürlüğüne göre performans analizi 49

Çizelge 4.4. POMP/NOMP performans analizi 50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Elektronik destek sistemi temel akış 1

Şekil 2.1. Alıcı antenin görüş ekseninden açıya bağlı olarak kazanç deseni 8

Şekil 2.2. Antenler arası oluşan faz farkı 10

Şekil 2.3. Geleneksel örnekleme yöntemleri 14

Şekil 2.4. Sıkıştırılmış algılama yöntemi 14

Şekil 2.5. Seyrek sinyal örneği 15

Şekil 3.1. Oluşturulan gauss kazançlı anten örüntüsü 35

Şekil 3.2. 4 antenli yerleşimde sinyal geliş açısına göre anten kazanç değerleri 36

Şekil 3.3. 8 antenli yerleşimde sinyal geliş açısına göre anten kazanç değerleri 37

Şekil 4.1. Sinyal frekans spektrumu (SNR=35dB) 44

Şekil 4.2. SNR seviyelerine göre açı kestirim hatası (OMP) 44

Şekil 4.3. SNR seviyelerine göre hesaplama süresi (OMP) 45

Şekil 4.4. SNR seviyelerine tespit başarı oranı (OMP) 45

Şekil 4.5. SNR seviyelerine göre açı kestirim hatası (POMP) 46

Şekil 4.6. SNR seviyelerine göre hesaplama süresi (POMP) 47

Şekil 4.7. SNR seviyelerine tespit başarı oranı (POMP) 47

Şekil 4.8. Simülasyon sonuçları (Anten sözlüğü çözünürlüğü 1 derece) 49

Şekil 4.9. Simülasyon sonuçları (Anten sözlüğü çözünürlüğü 5 derece) 49

Şekil 4.10. Simülasyon sonuçları (Anten sözlüğü çözünürlüğü 10 derece) 49

Şekil 4.11. Simülasyon sonuçları POMP/NOMP (Anten sözlüğü çözünürlüğü 10 derece) 50

Şekil 4.12. Hüzme genişliği katsayısı/anten sayısı açı kestirim hatası (OMP) 52

Şekil 4.13. Hüzme genişliği katsayısı/anten sayısı açı kestirim hatası (POMP) 52

Şekil 4.14. S parametresine göre tehdit RMSE bilgileri 53

Şekil 4.15. S parametresine göre ortalama RMSE bilgileri 54

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.16. S parametresine göre ortalama hesaplama süreleri..... 54

Şekil 4.17. S parametresine tespit başarı oranı 55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
db	Desibel
GHz	Gigahertz
Φ	Fi
θ	Teta
λ	Lambda
π	Pi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AOA	Angle of Arrival
AWGN	Beyaz Gauss Gürültüsü
BP	Basis Pursuit
CF	Taşıyıcı Frekans
CS	Sıkıştırılmış Algılama
CW	Sürekli Dalga
DF	Direction Finding
DTK	Darbe Tanımlayıcı Kelime
ED	Elektronik Destek
EK	Elektronik Koruma
ET	Elektronik Taarruz
FK	Faz Karşılaştırma
GK	Genlik Karşılaştırma
GOMP	Generalized Orthogonal Matching Pursuit
HPBW	Yarı Güç Hüzme Genişliği
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
MAE	Mean Absolute Error
MP	Matching Pursuit

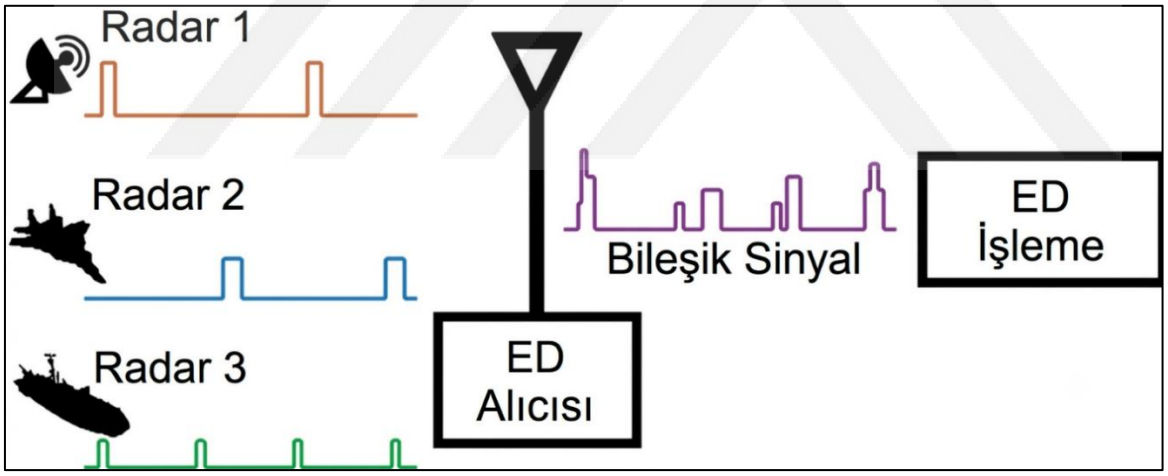
Kısaltmalar	Açıklamalar
NMSE	Normalize Edilmiş Karesel Hata
NOMP	Newtonized Orthogonal Matching Pursuit
OMP	Orthogonal Matching Pursuit
PA	Darbe Genlik Seviyesi
POMP	Perturbed Orthogonal Matching Pursuit
PRI	Darbe Tekrarlama Aralığı
PW	Darbe Genişliği
RF	Radio Frequency
RIP	Kısıtlanmış İzometri Özelliği
RMSE	Root Mean Square Error
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDOA	Time Difference of Arrival
UCA	Uniform Circular Array
ULA	Uniform Linear Array

1. GİRİŞ

Elektronik destek sistemleri

Elektronik destek (ED), elektronik harp sistemlerinin pasif istihbarat toplama bileşenini temsil eder. Bu sistemin başlıca amacı, elektromanyetik spektrumda yer alan düşman sinyallerini tespit etmek, belirlemek, yön tayini yapmak ve elde edilen bilgileri analiz ederek operasyonel kararların alınmasına yardımcı olmaktır. ED sistemleri, elektromanyetik yayın yapmadan çevredeki sinyalleri dinleyerek işlev gösterir; bu sayede hem gizlilik sunar hem de erken uyarı imkânı sağlar [33].

Bu sistemlerin ilk aşaması, elektronik destek alıcıları ile sinyalin tespit edilmesidir. Bu alıcılar sistemin tasarımına göre dar bant ya da geniş bant karakteristiğinde olabilmektedir. Tespit edilen sinyaller, spektral analiz, genlik-zaman çözümlemesi ve modülasyon tanıma gibi işlemlerden geçirilir. Bu analiz aşaması, sinyalin türü (örneğin radar ya da haberleşme), içerdiği bilgi ve kaynağın belirlenmesi açısından büyük önem taşır. Elde edilen veriler, sistemin veri tabanındaki bilinen tehdit sinyalleriyle karşılaştırılır ve sınıflandırılır.



Şekil 1.1. Elektronik destek sistemi temel akış

Elektronik destek sistemlerinin en önemli fonksiyonlarından biri de yön bulma yeteneğidir. Bu fonksiyon, ED sistemlerinin elektromanyetik sinyalin geldiği yönü belirlemesine olanak tanır ve böylece sinyalin kaynağının coğrafi konumu saptanabilir. Yön bulma işlemi pasif olduğundan, sinyal yayan sistemin fark edilmeden izlenmesine olanak tanır ve taktik alanda

hedefin konumu hakkında yüksek doğrulukta bilgi sağlar. Yön tayini, özellikle birden fazla ED platformu kullanılarak üçgenleme ile daha hassas hale getirilebilir.

Bu süreç genellikle faz interferometri, zaman farkı ile varış (TDOA – Time Difference of Arrival), açı farkı ile varış (AOA – Angle of Arrival) ve genlik karşılaştırma yöntemleriyle gerçekleştirilir. Faz interferometri yöntemi, sinyallerin birden fazla alıcı antene değişik fazlarla ulaşmasına dayanarak yön belirler. TDOA yöntemi, sinyalin farklı antenlere ulaşma sürelerindeki farklardan yararlanırken, AOA ve genlik karşılaştırma yöntemleri, sinyalin geliş açısı veya güç farkları üzerinden yön tayin eder. Genlik karşılaştırma yöntemi, genelde uygun maliyetli ve kompakt ED sistemlerinde kullanılan bir tekniktir; sinyalin farklı antenler üzerindeki güç düzeyleri arasındaki fark, geliş yönünü belirlemek için kullanılır.

Toplanan bilgiler, hem taktik hem de stratejik seviyede arşivlenir ve incelenir. ED sistemleri aynı zamanda ani tehditlere karşı erken uyarı işlevi de üstlenir. Örneğin, düşman hava savunma radarlarının kilitlenme sinyali algılandığında, bu bilgi hızla elektronik taarruz birimlerine iletilir ve karşı önlem alınır. Bu sayede ED, diğer elektronik harp görevleriyle entegre olarak spektrum üstünlüğünün sağlanmasına katkı sunar.

Günümüz elektronik destek sistemleri, dijital sinyal işleme, yapay zeka tabanlı sınıflandırma algoritmaları ve genişbant alıcı yapıları ile donatılmıştır. Özellikle son yıllarda, bilişsel yeteneklere sahip ED sistemlerinin geliştirilmesine başlanmış; bu sistemlerde sinyal algılama, zamanlama, güvenilirlik ve tepki süresi gibi kriterler üzerinden performans değerlendirmeleri yapılmaktadır [34]. Bu gelişmeler, geleneksel ED yapısını daha esnek ve akıllı sistemlere dönüştürmektedir.

Elektronik destek sistemlerinde yön bulmanın önemi

Günümüzün muharebe alanlarında elektronik harp sistemleri, tehditlerin algılanması, sınıflandırılması ve konumlandırılması için mutlak ihtiyaç duyulan platformlardandır. Bu sistemler, Elektronik Destek (ED), Elektronik Taarruz (ET) ve Elektronik Koruma (EK) olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Radar ED sistemleri, elektromanyetik spektrumda yer alan RF sinyallerin pasif olarak takip edilmesi ve analiz edilmesi işlemlerini yürütür. Bu bağlamda, yön bulma (Direction Finding, DF) Radar ED sistemlerinin en görev kritik fonksiyonlarından biri olmaktadır.

ED sistemlerinde yön bulma işlevi, sistem tarafından tespit edilen sinyalin geliş açısını belirlemek için kullanılan teknikleri ifade etmektedir. ED sistemleri, radar, iletişim araçları ve elektronik sinyaller yayan diğer ekipmanların yerini belirlemek için bu verileri kullanır. Kazanılan bilgi, durumsal algı (situational awareness), tehlike değerlendirmesi, araç hareket kestirimi ve hedefe yönelik eylemlerin zamanında yapılması gibi birçok alanda kullanılabilir.

ED sistemlerinde yön bulma yeteneği, ayrıca sistemin aktif bir radar yayını gerçekleştirmeden hedef tespiti yapmasını mümkün kıldığı için ED sistemlerini görünmezlik ve sessizlik esasına dayalı operasyonlar için vazgeçilmez hale getirir.

Genlik karşılaştırmalı yöntemler ve zorluklar

Yön bulma için geliştirilen geleneksel yöntemlerden biri genlik karşılaştırmalı (Amplitude Comparison) tekniktir. Bu yöntem, birbirine belirli bir mesafede yerleştirilmiş antenler arasında alınan sinyal genliklerinin farklılıklarından yararlanarak sinyalin geldiği yönü belirlemeye dayanır. Basit donanım ihtiyacı ve görece düşük işlem yükü sayesinde uzun yıllar boyunca kullanılmıştır.

Ancak bu yöntem birtakım zorluklarla karşı karşıyadır:

Sınırlı Çözünürlük: Anten karakteristiklerinin sınırlı hassasiyeti, özellikle sinyalin geliş açısının sınır bölgelerinde tespitini zorlaştırır.

Gürültü Hassasiyeti: Ortamdaki beyaz gürültü ve parazit, genlik değerlerinin doğruluğunu etkileyebilir.

Çoklu Kaynak Problemi: Aynı anda birden fazla sinyalin alındığı durumlarda, genlik karşılaştırma yetersiz kalabilir.

[9]'da bu yöntemin düşük SNR (Signal-to-Noise Ratio) ortamlarında başarısının sınırlı olduğunu ve hassas anten kalibrasyonuna ihtiyaç duyduğunu belirtmektedir. Bu zorluklar, daha karmaşık ve sayısal yöntemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Seyrek sinyal işleme yöntemlerinin uygulanabilirliği

Seyrek sinyal işleme (Sparse Signal Processing) yaklaşımı, son yıllarda yön bulma uygulamalarında dikkat çekici bir alternatif haline gelmiştir. Bu yaklaşım, sinyal kaynağının uzayda sınırlı sayıda aktif yöne sahip olduğu varsayımına dayanarak, sınırlı ölçüm verisinden sinyal kaynağı konumunu doğrulukla tahmin etmeyi amaçlar. Bu kapsamda en yaygın olarak kullanılan algoritmalar Orthogonal Matching Pursuit (OMP), Generalized OMP (gOMP) ve Perturbed OMP (POMP) gibi çözüm teknikleridir.

Malioutov [35], bu yaklaşımı ilk olarak sensör dizileri ile kaynak konumlandırma problemi üzerine uygulamış ve geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha yüksek çözünürlük sağladığını göstermiştir. Bu algoritmalar, özellikle çoklu sinyal ortamlarında (multiple emitter scenarios) ve düşük SNR koşullarında çarpıcı performans sergilemektedir.

Bu yöntemlerin en büyük avantajlarından biri, geleneksel yöntemlerin başarısız olduğu durumlarda dahi uygulanabilirliğini korumasıdır. Ayrıca, az ölçümle yüksek doğruluk sağlayabildiği için, donanım maliyetlerini azaltma potansiyeli de taşımaktadır.

Sonuç olarak, seyrek sinyal geri kazanımına dayalı yöntemler, elektronik destek sistemlerinde yön bulma alanında yenilikçi ve etkili çözümler sunmakta; geleneksel yaklaşımlara alternatif olarak ciddi ölçüde fayda sağlamaktadır.

Tezin amacı ve kapsamı

Tezin temel amacı, modern Elektronik Destek (ED) sistemlerinde Yön Bulma (DF) doğruluğunu ve verimliliğini artırmak amacıyla, seyrek sinyal geri kazanımına dayalı algoritmalar olan Perturbed Ortogonal Matching Pursuit (POMP) ve Generalized Ortogonal Matching Pursuit (gOMP) yöntemlerinin entegre edilebilirliğini araştırmaktır. Gerçekleştirilecek analiz çalışması, özellikle çoklu radar sinyallerinin bulunduğu ortamlarda ve düşük Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) koşullarının mevcut olduğu senaryolarda sınırlılıklarla karşılaşan geleneksel genlik karşılaştırmalı DF yöntemlerine alternatif olarak, bu algoritmaların ED sistemlerinin yön tahmin performansı üzerindeki potansiyel iyileştirmelerini inceleyecektir. POMP algoritmasının ED alıcılarının ölçüm hatalarına ve sinyaldeki gürültü değişimlerine karşı gösterdiği sağlamlık (robustness) göz önüne alınarak,

daha az radar sinyali örneğiyle yüksek çözünürlüklü yön bulma potansiyeline odaklanılacaktır.

Bu araştırma, POMP ve gOMP algoritmalarının Elektronik Destek sistemlerine adaptasyonu için teorik bir zemin oluşturmayı ve bu yöntemlerin etkinliğini hem temel OMP hem de geleneksel genlik karşılaştırmalı DF yöntemleriyle karşılaştırarak, avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Tezin kapsamı, yön bulma ilkeleri, anten dizisi konfigürasyonları ve sıkıştırılmış algılama teorisinin temel prensiplerinin incelenmesini kapsamaktadır. Bu kuramsal çerçeve üzerine inşa edilerek, OMP, gOMP, POMP ve NOMP algoritmalarının matematiksel temelleri, özellikle gürültülü ortamlarda sinyal seçimi ve tahmin doğruluğu açısından sundukları iyileştirmelere odaklanılarak detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Buna ek olarak, POMP'un sayısal optimizasyona dayalı ızgara dışı iyileştirme yaklaşımı, analitik türev bilgisini kullanan Newtonized OMP (NOMP) algoritması ile hem kestirim doğruluğu hem de hesaplama süresi açısından karşılaştırılacaktır.

Daha sonra, bu algoritmalar önceden tanımlanmış senaryolar altında bir simülasyon ortamında uygulanacak ve çeşitli koşullar (örneğin, çoklu hedef, değişen SNR seviyeleri vb.) altında performans analizleri gerçekleştirilecektir. Elde edilen bulgular, klasik genlik karşılaştırmalı yöntemler ve temel OMP algoritması ile karşılaştırılarak, Perturbed OMP ve gOMP yöntemlerinin Elektronik Destek sistemlerindeki yön bulma başarısına olan katkıları sayısal olarak değerlendirilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yön Bulma Temelleri ve Anten Dizileri

Yön bulma sistemleri RF sinyalin geliş yönünü belirleyen pasif olarak çalışan sistemlerdir [2]. RF sinyalin kaynakları genellikle her darbeyi değişikliğe uğratmadan gönderdiği için, bu sinyallerin geliş yönü gelen darbelerin karakteristik özellikleri karşılaştırılarak belirlenebilmektedir [3].

Elektronik destek sistemleri elektromanyetik spektrumdan toplamış olduğu radar ve benzeri sinyalleri işleyerek Darbe Tanımlayıcı Kelime (DTK) olarak adlandırılan dijital veri paketleri oluşturur. Darbe tanımlayıcı kelime bir darbenin taşıyıcı frekansı (CF), geliş yönü (DOA), darbenin varış zamanı (TOA), darbe genişliği (PW), darbenin genlik seviyesi (PA) gibi kritik bilgileri içeren bir özettir. Darbenin geliş yönü bilgisi, bu dijital veri paketinin içerisindeki en önemli verilerden biridir. Tehdit konumlarının bildirilmesi, üst üste binmiş sinyallerin geliş açısına göre gruplandırılarak ayrıştırılması, RF sinyal kaynaklarının ilişkilendirilmesi gibi amaçlarla kullanılan bir bilgidir [1].

2.1.1. Pasif yön bulma

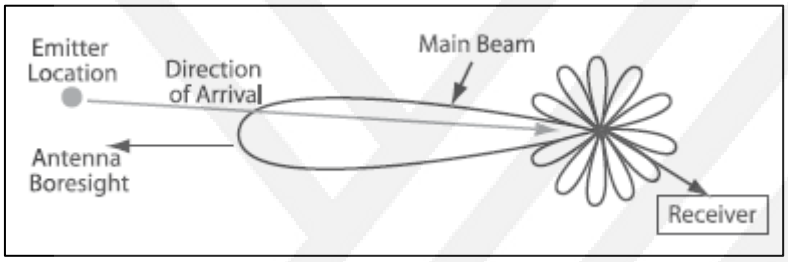
Elektronik destek sistemleri, aktif bir şekilde sinyal yayılımı gerçekleştiren bir kaynağın ortamda yaydığı sinyalleri toplayıp analiz ederek yön bulma işlevini gerçekleştirmektedirler. Modern harp sahasındaki hızlı gelişmeler göz önüne alındığında muharebe alanındaki tehditlerin hızlı ve yüksek doğrulukla tespit edilip tanımlanması hayati bir önem taşımaktadır.

Pasif yön bulma sistemleri, aktif sinyal yayılımı gerçekleştiren radarların aksine aldığı sinyal ile ilgili hiçbir bilgiye sahip olmamaktadır, aktif radarlar ise aldığı sinyali gönderdiği sinyal ile bir karşılaştırmaya tabi tutarak sinyali analizini gerçekleştirmektedir. Bu ‘sessiz dinleme’ prensibi, pasif yön bulma sistemlerinin kendilerini ifşa etmemesine olanak sağlar. Bu durum, muharebe alanında: hayatta kalma kabiliyeti, sürpriz etkisi ve maliyet etkinliği gibi anlamlarda ciddi bir taktiksel avantaj yaratır. Pasif yön bulma işlevi birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Döner anten kullanımı

Bu yöntemde mekanik olarak döndürülen döner anten tarafından toplanan tehdide ait radar sinyallerinin genlik ölçümleri ile yön tayini sağlanmaktadır. Döner anten olarak horn, spiral, sinüs, vivaldi veya log-periyodik anten tipleri kullanılmaktadır[3]. Genlik karşılaştırmalı yöntemin en basit ve geleneksel olanıdır.

Temel mantığı hedeften gelen sinyalin en yüksek ve en düşük genliğini kaydetmektir. Döner anten bir motor yardımıyla yatay düzlemde(azimut) 360 derece döndürülür veya yalnızca belirli bir sektör taraması gerçekleştirilir. Anten dönerken, hedeften gelen sinyalin genliği sürekli olarak ölçülür. Sinyal genliğinin en yüksek olduğu an (antene gelen sinyalin antenin ana hüzmesiyle tam olarak hizalandığı an) tespit edilir. Bu, hedefin bulunduğu açısal yöndür.



Şekil 2.1. Alıcı antenin görüş ekseninden açıya bağlı olarak kazanç deseni

Döner anten ile yön bulma işlevi basit ve maliyeti düşük bir yöntemdir ancak dönme hareketine bağlı sebeplerle darbe genişliği düşük ve darbe tekrarlama aralığı yüksek sinyallerin yakalanması ve yön tespitinin sağlanması için uygun değildir. Döner antenin fiziksel olarak bir alanı taraması, elektronik tarama yapan dizilere göre oldukça yavaştır. Hedef yüksek PRI'lı ve düşük PW'li bir darbe yayıyorsa, anten tam darbenin gönderildiği esnada hedefe bakmayabilir, bu da sinyal kaçırma riski doğurur.

Tek darbe yöntemleri

[5] numaralı kaynakta belirtildiğine göre monopulse terimi ilk olarak 1946 yılında Bell Telephone Laboratories'den H.T. Budenbom tarafından ortaya atılmıştır. Kelime anlamı, "Mono" (tek) ve "Pulse" (darbe) kelimelerinden gelir. Elektronik destek sistemlerinde açısal

konumlandırma ve hassas yön bulma konusunda devrim yaratmıştır. Bir hedefin açısal konumunu tek bir sinyal darbesi kullanarak yüksek doğrulukla belirleyen bir tekniktir.

“Monopulse” ile eş anlamlı olan simultaneous lobing (eşzamanlı loblama) terimi aslında tekniği daha doğru tanımlar, ancak daha az kullanılır. Burada esas olan “tek darbe” kavramı değil, eşzamanlılık ilkesidir [2].

Tek darbe yön bulma sistemleri hem hızlı, hem gerçek zamanlı hem de daha fazla veri işleme kapasitesine sahip sistemlerdir [4]. Monopulse yöntemleri tehditten gelen sinyal darbesini iki veya daha fazla anten bileşeni kullanarak eşzamanlı olarak alır. Bu anten bileşenlerinden gelen sinyallerin genlik veya faz farkları ölçülerek hedefin kesin açısal konumu hesaplanır. Aynı anda birden fazla anten bileşeninden alınan ölçümler sayesinde tehdit sinyalinin geliş açısındaki değişiklikler tek bir darbede yüksek hassasiyetle tespit edilir ve geleneksel tarama sistemlerindeki (konik tarama) zaman gecikmelerinden kaynaklanan hatalar neredeyse tamamen elenmiş olur.

Tek darbe yön bulma sistemlerinde hedef açı kestirimi yapabilmeyi sağlayan temel yöntemler genlik karşılaştırma (GK) ve faz karşılaştırma (FK) metotlarıdır [4]. Daha modern yöntemler bu iki tekniğin birleşimlerini veya varyasyonlarını kullanır.

Genlik karşılaştırma yöntemi

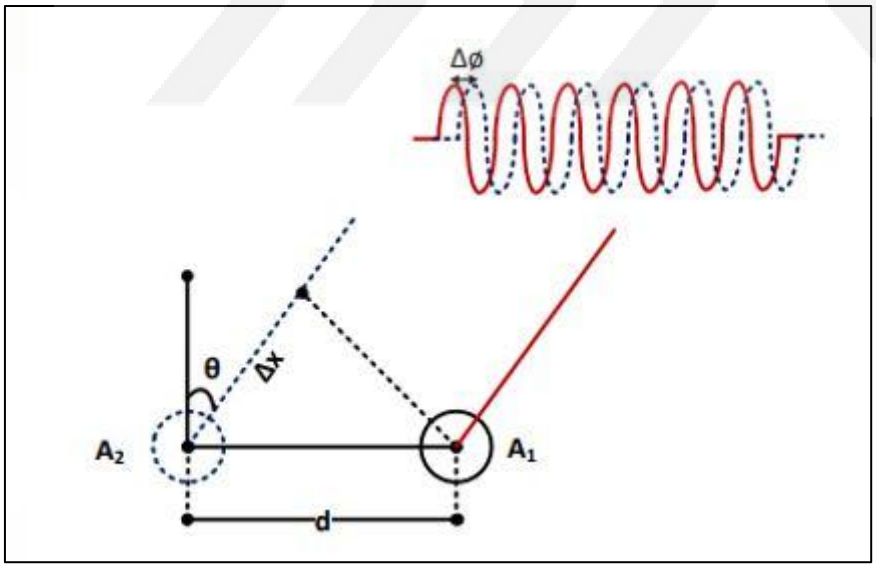
Günümüz teknolojilerinde kullanılan birçok radar ikaz alıcı sistemi yön bulma operasyonları doğrultusunda genlik karşılaştırma tekniği ile operasyonlarını gerçekleştirmektedir [2]. Genlik karşılaştırma yöntemi antenlerden alınan sinyallerin genlik farklarının bilinen anten örüntülerinde farkın karşılık düştüğü açının tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır [6]. Farklı bakış açılarına sahip anten dizilimlerinden kaynaklı ortamda yayılan RF enerji sistemin antenlerine farklı genliklerde ulaşır. Faz karşılaştırmalı yönteme göre daha basit bir yapıya ve düşük maliyete sahiptir, hassas yön bulma işlemleri için tercih edilmez.

Genlik karşılaştırma ile yön bulma yönteminde dört veya daha fazla anten kullanılarak alınan sinyallerin anten ışıma örüntüsünden etkilenen genliklerinin birbirine göre oranlanması sonucu yön tespiti yapılabilmektedir [7]. Genlik karşılaştırmasında, örüntüleri Gaussian şekilli hüzmelerle yaklaştırılabilen, tipik olarak geniş bantlı spiral anten elemanları

kullanılır. [2] Bunun başlıca sebepleri genlik karşılaştırma yöntemi bölümün başında bahsedildiği üzere farklı antenlerden alınan aynı sinyalin genlik farkını ölçme yoluyla çalışır, bu farkın anlamlı olabilmesi için, antenlerin tüm çalışma bandında benzer ve kararlı bir kazanç örüntüsü üretmesi gerekir. Spiral antenler, özellikle log-spiral veya Archimedean spiral tipleri, çok geniş frekans aralıklarında (ör. 2–18 GHz) düzgün kazanç karakteristiği sağlar[8]. Bu sayede yön bulma sistemi farklı frekanslarda kararlı bir şekilde çalışır. Genlik karşılaştırma yöntemi kullanılan sistemlerde antenlerin birebir aynı tepkiyi vermesi gerekir. Spiral antenlerin üretim toleransları ve geometrik simetrisi sayesinde anten eşleşmeleri kolay sağlanır.

Faz karşılaştırma yöntemi

Bu teknik, alınan sinyalin fazını, iki antenden her birinde ayrı ayrı ölçer ve bu iki faz değeri arasındaki farktan sinyalin varış yönünü (Direction of Arrival, DOA) çıkarır [10]. İnterferometri prensibine dayanmaktadır. Birbirinden belirli bir mesafe (d) ile ayrılmış olan iki anten elemanı bir interferometrik ana hat (baseline) oluşturur. Ortamdaki bir kaynaktan gelen düzlem dalganın (plane wave) varış açısı (θ) olduğunda, dalganın bu iki antene ulaşma zamanı arasında bir fark oluşur.



Şekil 2.2. Antenler arası oluşan faz farkı

Anten elemanlarına farklı zamanlarda ulaşan bu sinyallerin fazları arasında $\Delta\phi$ kadar bir faz farkı oluşur. Aşağıdaki denklem faz farkının ölçülmesi durumunda θ varış açısının

doğrudan elde edilebileceğini gösteren temel denklemdir. Bu denklem, θ açısının sıfır olduğu yerde faz farkının sıfıra eşit olacağını ve θ'nın artmasıyla faz farkının artacağını ortaya koyar.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{d\sin(\theta)}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (2.1)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi \cdot d}\right) \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.1)'de görüldüğü gibi sinyaller arasındaki faz farkı antenlerin yerleşimi ile belirlenen d mesafesi, tehdit radar sinyalinden çıkarılabilecek λ ve tespit edilmek istenen geliş açısı θ değişkenleri tarafından belirlenmektedir. Sinyaller arasında oluşan faz farkının ölçülmesi ile Eşitlik (2.2)'de tehdit sinyalinin geliş açısı hesaplanabilmektedir.

Bu yöntemde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri faz belirsizliği problemidir. Eğer antenler arasındaki mesafe (d), sinyal dalga boyunun yarısından ($\lambda/2$) daha büyük seçilirse, θ açısının belirli bir aralığında faz farkı 360 dereceden büyük olabilir. Faz farkının 2π rad döngüsünü aşması, aynı faz farkı ölçümüne karşılık birden fazla θ açısı olabileceği anlamına gelir, bu da yön tahmininde hataya sebep olur. Bu belirsizliklerin giderilmesi için antenlerin yerleşimleri arasındaki mesafenin tespit edilen sinyalin dalga boyunun yarısından küçük olması gerekmektedir [2].

Faz karşılaştırma yöntemi, daha kompleks bir yapı ve daha yüksek bir maliyete sahip olmasına rağmen yüksek doğruluk sağladığından dolayı yüksek hassasiyetle yön bulma gereksinimi olan projelerde daha çok kullanılır [11].

2.1.2. Anten dizileri ve anten örüntüsü

Yön bulma sisteminin en önemli bileşenlerinden birisi antenlerdir. Bu antenlerin yapısı, sayısı, polarizasyonu, yerleşim mimarisi ve baktığı yönler yön bulma sisteminin doğruluğunu, hata hassasiyetini ve çözünürlüğünü doğrudan etkiler [4].

Anten dizileri

Anten dizileri uzayda değişik noktalara yerleştirilmiş çok sayıda antenin oluşturduğu sistemlerdir. Yön bulma sistemlerinde çözünürlüğü, doğruluğu, hassasiyeti ve hangi sinyal işleme algoritmasının kullanılacağını belirleyen en önemli etkenlerden birisi de anten yerleşim geometrisidir [12]. Yön bulma sistemlerinde genellikle özdeş antenlerden oluşan çeşitli anten yerleşimleri kullanılmaktadır. Bu çeşitli anten yerleşimleri, sistemin uygulama alanına, hedeflenen performans kriterlerine ve platform kısıtlamalarına bağlı olarak büyük çeşitlilik gösterir. En yaygın kullanılan temel dizi geometrileri şunlardır:

Doğrusal Diziler (Linear Arrays): Anten elemanlarının tek bir eksen üzerinde dizilmesiyle oluşur. En basit dizi konfigürasyonu olmakla birlikte, hüzme şekillendirme ve yön bulma kabiliyeti genellikle tek bir düzlemle (azimuth veya elevation) sınırlıdır. Elemanlar arası mesafe sabitse, Düzgün Doğrusal Dizi (Uniform Linear Array - ULA) olarak adlandırılır. ULA'lar, analizleri nispeten basit olduğu için teorik çalışmalarda ve dar açılı uygulamalarda sıklıkla tercih edilir.

Dairesel Diziler (Circular Arrays): Anten elemanları bir daire üzerine eşit aralıklarla yerleştirilir. Bu geometrinin en büyük avantajı, 360 derecelik bir açıklıkta sabit hüzme genişliği ve kazanç sağlamasıdır. Bu özellik, geliş yönünün önceden bilinmediği veya tüm yönlerin eşit derecede önemli olduğu elektronik harp ve radar uygulamalarında dairesel dizileri vazgeçilmez kılar. Elemanlar eşit aralıklıysa, bu dizi Düzgün Dairesel Dizi (Uniform Circular Array - UCA) olarak adlandırılır.

Düzlemsel Diziler (Planar Arrays): Antenler bir düzlem üzerinde (dikdörtgen, dairesel vb.) dağıtılır. Bu konfigürasyon, hem azimuth hem de elevation düzlemlerinde hüzme kontrolüne izin vererek, uzayda herhangi bir noktaya yönelik yüksek çözünürlüklü yön bulma imkanı tanır.

Anten örüntüsü

Anten örüntüsü bir antenin ortama yaydığı (verici) veya ortamdan aldığı (alıcı) elektromanyetik gücün (veya alan şiddetinin) uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak matematiksel ya da grafiksel gösterimidir.

Basitçe ifade etmek gerekirse, antenin radyasyonu hangi yönlere, ne kadar güçlü yaydığının veya hangi yönlerden sinyali ne kadar iyi aldığının haritasıdır.

IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) standartlarına göre, anten örüntüsü genellikle antenin uzak alan bölgesinde tanımlanır ve yönlü koordinatların (θ ve ϕ) bir fonksiyonu olarak gösterilir. Bir ışıma örüntüsü aşağıdaki ana bileşenlerden oluşur:

Ana Lob (Main Lobe): Antenin enerjisinin büyük bir kısmını yaydığı (veya aldığı) yönü temsil eden, maksimum ışıma yoğunluğuna sahip bölgedir. Ana Lobun yönü, antenin kazancının en yüksek olduğu yöndür.

Yan Loblar (Side Lobes): Ana Lobun dışındaki daha zayıf, ikincil maksimumlardır. Yan loblar, genellikle sinyalin istenmeyen yönlere kaçmasına veya istenmeyen yönlerden gelen gürültü ve girişimi almasına neden olduğu için sistem performansı açısından baskılanması istenir.

Sıfır Noktaları (Nulls): Işıma gücünün veya alan şiddetinin sıfır veya minimum olduğu yönlerdir. Akıllı anten sistemlerinde bu sıfır noktaları, kasıtlı olarak bir girişim kaynağının bulunduğu yöne kaydırılarak gürültüyü engellemek için kullanılır.

Önemli parametreler

Işıma örüntüsü, bir antenin performansını tanımlayan birkaç önemli parametreyi içerir:

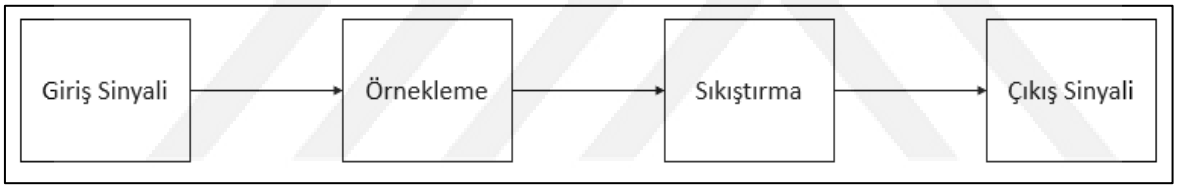
Yarı Güç Hüzme Genişliği (HPBW - Half-Power Beamwidth): Ana Lobun, maksimum gücün yarısına düştüğü noktalar arasındaki açısal genişliktir. Antenin ne kadar odaklanmış (yönlü) olduğunu gösterir.

Yönlülük (Directivity) ve Kazanç (Gain): Antenin maksimum ışıma yaptığı yöndeki enerji yoğunluğunun, aynı güçle beslenen teorik bir izotropik antenin yaydığı enerji yoğunluğuna oranıdır. Örüntü ne kadar sivriyse kazanç o kadar yüksektir.

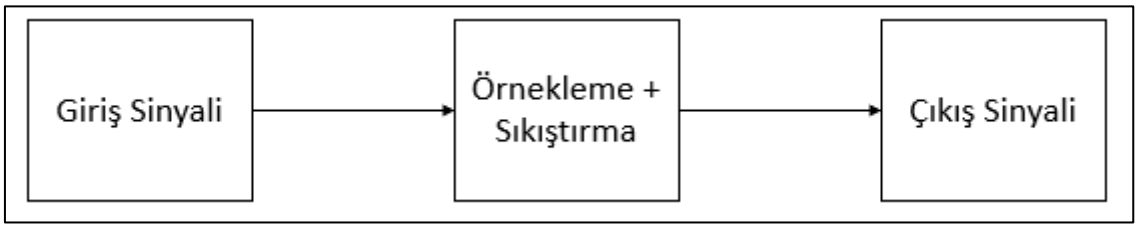
2.2. Sıkıştırılmış Algılama ve Seyrek Sinyaller

Geleneksel sinyal işleme ve toplama yöntemleri, Nyquist-Shannon Örnekleme Teoremi'ne sıkı sıkıya bağlı kalır. Nyquist-Shannon örnekleme teoremi, hem matematik hem de mühendislik literatüründe bir dönüm noktasıdır ve band-sınırlı sinyalleri bir sayı dizisine dönüştürme mekanizması sunar [13]. Bu teorem, bir sinyalin içerdiği en yüksek frekansın (bant genişliğinin) en az iki katı hızında örneklenmesini gerektirerek bilginin kayıpsız olarak geri kazanılmasını garanti eder [14]. Ancak, yüksek çözünürlüklü sensörler ve geniş bant genişliği gerektiren uygulamaların artmasıyla birlikte, yüksek örnekleme hızları hem donanım maliyetlerini hem de toplanan veri miktarını artırarak depolama ve işleme zorlukları yaratmıştır.

Sıkıştırılmış Algılama (Compressed Sensing - CS), bu geleneksel yaklaşımın kısıtlamalarına takılmayan, sinyal toplama ve sıkıştırmayı tek bir aşamada birleştiren bir yaklaşımdır. [16]. Sıkıştırılmış algılama algoritması geleneksel örnekleme yöntemlerinin uzun işlem süreleri, hesaplama karmaşıklığı ve büyük depolama gereksinimleri gibi sınırlamalarının üstesinden gelmek için kullanılabilir [15].



Şekil 2.3. Geleneksel örnekleme yöntemleri

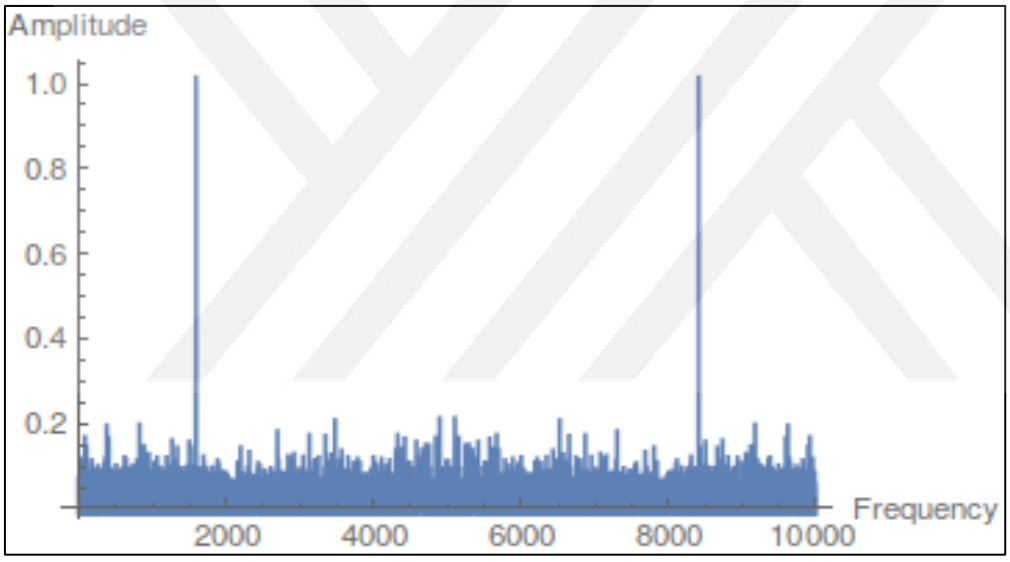


Şekil 2.4. Sıkıştırılmış algılama yöntemi

2.2.1. Seyrek sinyaller

Sıkıştırılmış Algılama (CS) algoritması temel olarak incelenen sinyalin seyreklik ve sıkıştırılabilirlik özelliklerini baz alır. Bu özellik, sıkıştırılmış algılama algoritmasının geleneksel Nyquist-Shannon sınırını aşmasına izin veren temel varsayımdır. Sinyalin içerdiği bilgi miktarı, sinyalin toplam boyutundan çok daha küçük olduğunda, sinyalin seyrek olduğu kabul edilir [17].

Aşağıdaki verilen şekilde tanım daha iyi anlaşılabilmektedir, alıcı tarafında görülen sinyalin anlamlı iki adet bileşeni bulunmaktadır, diğer bileşenler gürültü tabanının bileşenleridir. Buradan yapılabilecek çıkarım şudur: ortamdaki çoğu sinyal, uygun bir dönüşüm alanında temsil edildiğinde, taşıdığı anlamlı bilginin büyük çoğunluğunu birkaç sayıda büyük katsayıda yoğunlaştırır.



Şekil 2.5. Seyrek sinyal örneği

Seyrek sinyallerin matematiksel tanımını yapmak gerekirse N boyutlu bir $x \in \mathbb{R}^N$ ayrık zamanlı sinyali ele alalım. Bu sinyal, $\bar{\psi} \in \mathbb{R}^{NxN}$ taban matrisi (veya çerçevesi) kullanılarak bir katsayı vektörü $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^N$ cinsinden temsil edilebilir.

$$x = \bar{\psi} s \tag{2.3}$$

Burada $\bar{\psi}$ matrisinin sütunları, x sinyalini oluşturan atomlar olarak adlandırılır.

Eğer s katsayı vektörünün K adet elemanı sıfır değilse, x sinyali $\bar{\psi}$ tabanında K-seyrek olarak adlandırılır [18]. Bir sinyalin seyreklik derecesi, l_0 "normu" ile ölçülür ve sıfır olmayan bileşenlerin sayısını ifade eder:

$$\|s\|_0 = K \tag{2.4}$$

Bu durumda, sinyalin içerdiği anlamlı bilgi miktarı N'den K'ya düşürülmüş olur. Bu da klasik Nyquist sınırından daha az örneklemeyle geri kazanımın teorik temelini oluşturur.

2.2.2. Sıkıştırılmış algılama

Sıkıştırılmış Algılama [19], bir sinyalin geleneksel Shannon-Nyquist teoremine göre daha az örnek veya ölçümle kesin olarak geri kazanılıp/yeniden yapılandırılabileceğini belirtir. Geleneksel örneklemede, örnekleme frekansını en yüksek frekans bileşeni belirlerken, sıkıştırılmış algılamada sinyalin seyrekliği (sparsity) tarafından belirlenir.

Bu algoritma üç önemli bileşenden oluşmaktadır:

- Sinyalin Seyrek Temsili
- Ölçüm Matrisi ve Uyumsuzluk
- Seyrek Sinyal Geri Kazanım Algoritmaları

Sıkıştırılmış algılamada N boyutlu gerçek sinyalimiz x $\in \mathbb{R}^N$ direkt olarak $M << N$ adet doğrusal ölçümden $y \in R^M$ elde edilir. Bu işlem, $\phi \in R^{M \times N}$ ölçüm matrisi ile modellenir:

$$y = \Phi x + n \quad (8) \tag{2.5}$$

Burada n, ölçülen sinyalin gürültüsünü ifade eden vektörüdür.

Önceki bölümde ifade edildiği üzere x sinyali $\bar{\psi}$ tabanında $x = \bar{\psi} s$ seyrek olarak temsil edilir. Bu eşitlik kullanılarak ölçüm denklemi, katsayı vektörü s cinsinden yeniden yazılabilir:

$$y = \Phi(\psi s) + n \quad (2.6)$$

$$y = As + n \quad (2.7)$$

Burada A = $\Phi\psi \, \epsilon R^{MxN}$ matrisi, sözlük matrisi olarak isimlendirilir. Sıkıştırılmış algılama algoritmasının temel amacı, y = As denkleminden, sinyalin seyrek katsayı vektörü olan s vektörünü geri kazanmaktır [14].

Sıkıştırılmış algılama algoritmasının başarısı ölçüm matrisi Φ'nin ψ taban matrisi ile ilişkisine bağlıdır. Bu ilişki, uyumsuzluk (incoherence) ilkesiyle tanımlanır [14] [19]. Φ ve ψ matrislerinin sütunları arasındaki uyumsuzluğun yüksek olması gerekmektedir[20]. Bu Φ matrisinin ψ matrisinin sütunlarıyla yüksek oranda ilişkili (correlated) olmaması gerektiği anlamına gelir.

Karşılıklı tutarlılık (mutual coherence) değeri aşağıdaki formülü kullanarak hesaplanır:

$$\mu = \max_{1 \le i,j \le N} \left| \langle \phi_i, \psi_j \rangle \right| \quad (2.8)$$

Tutarlılık değeri $[1, \sqrt{N}]$ arasında olmalıdır. Sinyalin sonraki aşamada daha iyi yeniden yapılandırılabilmesi için μ değerinin mümkün olan en düşük seviyede olması istenir. Düşük tutarlılık, ölçüm matrisinin sinyalin seyrek temsilini sağlayan bazdan oldukça farklı olduğunu gösterir.

Ayrıca sıkıştırılmış algılama algoritmasının matematiksel olarak kanıtlanmış güçlü bir geri kazanımı sağlayabilmesi için, sözlük matrisi A'nın kısıtlanmış izometri özelliği (Restricted Isometry Property – RIP) koşulunu sağlaması gereklidir [14]. İzometri terimi geometride bir şeklin boyutlarını veya uzunluklarını değiştirmeden dönüştüren bir işlemdir. Sıkıştırılmış algılamada A matrisinin sinyalin tüm olası vektörlerinin normunu koruması beklenmez. Zaten M << N olduğundan bu durum olası değildir. Sıkıştırılmış algılama algoritmalarında önemli olan sinyalin sadece K-seyrek olduğu durumdur. Kısıtlanmış izometri özelliği A matrisinin, herhangi bir K-seyrek vektörün normunu korumak için, bu vektöre uygulandığında yalnızca küçük bir bozulmaya neden olduğunu ifade eder. Yani K-seyrek s vektörleri için $\delta_K \in (0,1)$ sabiti bulunur.

$$(1 - \delta_K)||s||_2^2 \leq ||As||_2^2 \leq (1 + \delta_K)||s||_2^2 \quad (2.9)$$

Verilen eşitsizlik, A matrisinin bu K-seyrek vektörleri üzerindeki norm koruma yeteneğini göstermektedir. K-seyrek bir sinyalin enerjisi ($||s||_2^2$) , ölçüm yapıldıktan sonra elde edilen y vektörünün enerjisine ($||As||_2^2$) çok yakındır. A matrisi, sinyali sıkıştırılmış bir forma dönüştürürken temel enerjisini ve yapısını neredeyse hiç bozmaz.

Geri kazanım problemindeki temel hedef, ölçümlere uyan en az sayıda sıfır olmayan bileşene sahip $\boldsymbol{s}$ vektörünü bulmaktır. Matematiksel olarak bir vektördeki sıfır olmayan bileşen sayısını hesaplayan l_0 normu kullanılarak problem gürültüsüz ortamlarda aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$\min_{s} ||s||_0 \quad \text{koşuluyla} \quad y = As \quad (2.10)$$

Burada l_0 normunu minimize etmek, hangi K adet bileşenin aktif olduğunu bulmak için tüm olası kombinasyonları denemeyi gerektiren kombinatoryel bir problemdir. Sinyal boyutu (N) büyüdükçe problemi çözmek için harcanan süre de katlanarak artacağı için bu problem NP-hard (Non-deterministic Polynomial- time hard) olarak sınıflandırılır ve pratik uygulamalar için kullanılamaz [19].

Sıkıştırılmış algılama algoritmasının en önemli katkılarından biri l_0 minimizasyon probleminin belirli şartlar altında daha kolay bir optimizasyon problemi olan l_1 norm minimizasyonu ile eşdeğer olarak çözülebilmesidir.

l_1 normu vektör bileşenlerinin mutlak değerlerinin toplamını temsil eder. Bu dönüşümle elde edilen Basis Pursuit (BP) problemi, bir konveks optimizasyon problemi haline gelir.

$$\min_{s} ||s||_1 \quad \text{koşuluyla} \quad y = As \quad (2.11)$$

Yeterli seyreklik ve uygun şekilde tasarlanmış A matrisleri (RIP koşulunu sağlayan) varsayımı altında, hesaplama açısından karmaşık olan en seyrek çözümü bulma problemi (l_0 norm minimizasyonu), verimli bir şekilde çözülebilen bir konveks optimizasyon problemi

olan l_1 norm minimizasyonuna indirgenmiştir [14], [19]. Bu sayede, sıkıştırılmış algılama teoriden pratiğe aktarılabilmiştir.

2.3. Seyrek Sinyal Geri Kazanım Algoritmaları

Sıkıştırılmış algılama algoritmalarını tamamlayan en kritik araştırma alanlarından biri seyrek sinyal geri kazanımıdır. Seyrek sinyal geri kazanımı algoritmalarının temel hedefi yüksek boyutlu bir sinyalin, sıkıştırılmış algılama algoritmalarıyla kendisinden elde edilen düşük boyutlu ölçümlerden hızlı, doğru ve hesap olarak verimli bir şekilde yeniden oluşturulmasıdır. Literatürde seyrek sinyal geri kazanımı için önerilen algoritmalar genel olarak üç ayrı sınıfta incelenir: konveks optimizasyon tabanlı algoritmalar, kombinatoryal tabanlı algoritmalar ve greedy (açgözlü) yaklaşım tabanlı algoritmalar [21].

Konveks optimizasyon algoritmaları l_1 minimizasyon problemine dayanır. Geri kazanım problemini bir konveks optimizasyon problemi olarak formüle eder. Bulunan herhangi bir yerel optimumun aynı zamanda global optimum olması bu algoritmanın avantajıdır. Bu durum algoritmanın kesin çözüme yakınsayacağını garanti eder. Bu algoritma yüksek hesaplama maliyeti, büyük matrislerle işlem yapma gerekliliğinden oluşan bellek gereksinimi, greedy algoritmalar gibi konveks olmayan optimizasyon algoritmalarının popülerlik kazanmasından dolayı tercih edilmez.

Greedy algoritmalar ise l_0 minimizasyonuna doğrudan bir yaklaşıklık sağlar. Temelde düşük hesaplama karmaşıklıkları ve genel olarak yalnızca matris-vektör çarpımları ile çalışabilmeleri başlıca avantajlarıdır. Bu strateji l_0 minimizasyonunun NP-hard bir problem olmasına karşı pratik bir çözüm olarak literatürde geniş kabul görmüştür [21]. Bu algoritmalar konveks optimizasyon algoritmalarına kıyasla çok hızlıdırlar ve çok yüksek boyutlara ölçeklenebilirler. Özellikle radar ve elektronik destek sistemleri gibi gerçek zamanlı çalışan sistemlerde orthogonal matching pursuit ve benzeri greedy yöntemlerin yaygın bir şekilde tercih edilmesinin başlıca nedeni; düşük hesap yüküne rağmen yüksek geri kazanım doğruluğu sunmalarıdır.

Tez çalışmasında seyrek geri kazanım için en bilinen açgözlü algoritmalardan olan orthogonal matching pursuit algoritması ve bu algoritmanın türevleri ile çalışmalar gerçekleştirilecektir.

2.3.1. Matching pursuit algoritması

Matching Pursuit (MP) algoritması, sıkıştırılmış algılama (compressed sensing) ve seyrek sinyal yaklaşımı (sparse approximation) problemlerini çözmek için kullanılan "açgözlü" (greedy) bir algoritmadır. Temel amacı, bir sinyali, geniş ve yedekli (redundant) bir vektör sözlüğünden seçilen en uygun elemanların lineer kombinasyonu olarak ifade etmektir [22]. Seyrek sinyal geri kazanım algoritmaları bölümünde de anlatıldığı üzere l_0 minimizasyonunun getirdiği hesaplama yükünü aşmak için geliştirilmiş yinelemeli yöntemlerin başında gelmektedir.

Sinyalin seyrek gösterimi için Mallat ve Zhang [23] tarafından önerilen Matching Pursuit (MP) algoritması, sinyali artıklıklı bir sözlükten seçilen dalga formlarının (atomların) toplamı olarak modelleyen yinelemeli bir yöntemdir. Bu algoritma gerçekleştirdiği her iterasyonda kalıntı (residual) vektörü ile sözlük matrisindeki atomlar arasındaki korelasyonu hesaplar. Mutlak olarak en büyük korelasyona sahip atom seçilir ve bu atomun sinyale olan katkısı sinyalden çıkartılarak yeni bir kalıntı oluşturulur. Matematiksel olarak t. İterasyonda seçilen atom a_{λ_t} ve katsayısı α_t olsun. Adım sonunda oluşturulan yeni kalıntı aşağıdaki gibi olur:

$$r_t = r_{t-1} - \alpha_t a_{\lambda_t} \tag{2.12}$$

Bu formüldeki α_t şu şekilde hesaplanır:

$$\alpha_t = \langle r_{t-1}, a_{\lambda_t} \rangle \tag{2.13}$$

Bu güncellemenin anlamı özetle şöyledir: Algoritma, her adımda ölçüm vektörü y içerisindeki en yoğun enerjiye sahip bileşeni bulur ve bu bileşeni oluşturulan kalıntı vektöründen ayıklar. Kalıntı vektörü sıfıra yaklaştıkça orijinal sinyalin enerjisi adım adım geri kazanılan sinyal vektörüne aktarılmış olur. Sonuç olarak t. İterasyon sonunda oluşmuş olan tahmini ölçüm sinyali, o ana kadar seçilen tüm atomların ve hesaplanan katsayıların toplamı olarak aşağıdaki ifadeyle gösterilebilir:

$$\widehat{y_t} = \widehat{y_{t-1}} + \alpha_t a_{\lambda_t} = \sum_{i=1}^{t} \alpha_i a_{\lambda_i} \tag{2.14}$$

Algoritma belirlenen K iterasyon sonunda durduğunda elimizde sinyalin modellenemeyen gürültü kısmı ve seyrek olarak temsil edilemeyen hatası olan kalıntı vektörü ayrıca seçilen atomların indislerine karşılık gelen yerlere α katsayılarının yerleştirilmesiyle oluşturulan seyrek vektör bulunur. MP algoritmasının önemli bir teorik özelliği enerji korunumudur. [24]'e göre, orijinal sinyalin enerjisi, seçilen bileşenlerin enerjisi ile kalan hatanın enerjisinin toplamına eşittir:

$$|y|^2 \approx |\widehat{y_K}|^2 + |r_K|^2 \qquad (2.15)$$

MP algoritmasının en belirgin teorik kısıtı, güncellenen hatanın (residual) yalnızca o adımda seçilen vektöre (atoma) dik olması, ancak daha önce seçilmiş vektörlere dik olmamasıdır. Bu durum, algoritmanın önceki adımlarda zaten seçmiş olduğu bir vektörü (atomu) ilerleyen adımlarda tekrar seçmesine olanak tanır. Aynı vektörün tekrar seçilmesi, algoritmanın gereksiz yere uzamasına neden olur. Buna karşılık, Orthogonal Matching Pursuit (OMP) gibi algoritmalar, hatayı o ana kadar seçilen tüm vektörlere dik hale getirerek bir vektörün asla ikinci kez seçilmemesini garanti eder [22].

Özetle, MP algoritması uygulanması en kolay açgözlü yöntem olmasına karşın; aynı bileşenleri tekrar seçebilmesi sebebiyle OMP ve türevi algoritmaların gerisinde kalmaktadır.

2.3.2. Orthogonal matching pursuit algoritması

Orthogonal Matching Pursuit, seyrek sinyal geri kazanımı ve fonksiyon yaklaştırma problemlerinde tercih edilen, geleneksel MP algoritmasının geliştirilmiş ve daha kararlı hale getirilmiş versiyonudur. MP algoritması basit yapısına rağmen "ortogonallik" özelliğine sahip olmadığından daha önce seçilen bir atomu tekrar seçme eğilimi gösterir. Bu durum yakınsamanın asimptotik olmasına ve optimum çözüme ulaşmak için çok sayıda iterasyon yapma ihtiyacı duyulmasına yol açmaktadır. Bu kısıtlamayı aşmak amacıyla Pati, Rezaiifar ve Krishnaprasad [25] tarafından 1993 yılında geliştirilen Ortogonal Eşleştirme Takibi (OMP), MP algoritmasının en önemli varyasyonudur.

OMP, MP'nin açgözlü seçim stratejisini korurken her adımda seçilen tüm atomların oluşturduğu alt uzaya dik (ortogonal) bir izdüşüm gerçekleştirerek algoritmanın kararlılığını ve yakınsama hızını gözle görülür bir şekilde artırır.

OMP'nin, MP'den ayrıldığı temel nokta bilgi güncelleme stratejisidir. MP; bir atom seçer, katsayısını hesaplar ve bu katsayıyı sabitler. Sonraki iterasyonlarda eski katsayıları güncellemez. OMP ise her yeni atom seçildiğinde o ana kadar seçilmiş olan tüm atomların katsayılarını tekrar hesaplar. Bu işlem ölçüm vektörünün seçilen atomlar matrisi tarafından oluşturulan alt uzay üzerine dik iz düşürülmesiyle gerçekleştirilir. Böylece, seçilen alt uzaydaki kalıntı minimize edilir. Bu gerçekleştirilen işlem matematiksel olarak şu anlama gelmektedir: t. iterasyondaki kalıntı vektörü r_t seçilen tüm atomlara (Φ_t) diktir.

$$\langle r_t, a_j \rangle = 0, \quad \forall j \in \Lambda_t \tag{2.16}$$

Bu özellik sayesinde, bir kez seçilen bir atomun tekrar seçilmesi matematiksel olarak imkansız hale gelir ve algoritma N boyutlu bir uzayda en fazla N adımda genellikle belirlenen K seyreklik seviyesinde (K<<N) sonlanır.

Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algoritması, bir sinyali veya veri vektörünü temsil etmek için en uygun atomları (vektörleri) adım adım seçen iteratif ve açgözlü (greedy) bir yöntemdir. Kaynaklarda belirtildiği üzere, OMP'nin işleyişi şu temel adımlardan oluşur [25][17][26]:

Başlatma (Initialization): Algoritma, kalıntıyı (residual, r_0) başlangıçta hedef sinyale (v veya y) eşitleyerek başlar ($r_0 = v$). Seçilen atomların indekslerini tutan destek kümesi (Λ_0) boş bırakılır ve iterasyon sayacı başlatılır (t =1).

Atom Seçimi (Identification/Selection): Her iterasyonda (t) mevcut kalıntı r_{t-1} ile sözlükteki tüm atomlar ϕ_j arasındaki iç çarpımlar hesaplanır. Amaç, kalıntı ile en yüksek korelasyona sahip olan atomu bulmaktır. Mutlak değerce en büyük iç çarpımı veren atomun indeksi (λ_t) seçilir.

$$\lambda_t = \arg\max_j |\langle r_{t-1}, \phi_j \rangle| \tag{2.17}$$

Destek Kümesinin Güncellenmesi (Support Update): Seçilen yeni atomun indeksi (λ_t) mevcut indeks kümesine (Λ_{t-1}) eklenir ($\Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup \{\lambda_t\}$). Ayrıca, seçilen atomların oluşturduğu matris (ϕ_t), yeni sütunun eklenmesiyle güncellenir.

Orthogonal İzdüşüm ve Katsayı Hesaplama (Orthogonal Projection): Bu adım OMP'yi standart MP'den ayıran en kritik adımdır. OMP, o ana kadar seçilmiş tüm atomları kullanarak sinyale en yakın yaklaşımı bulmak için bir least squares problemi çözer. Hedef hatanın l_2 normunu minimize eden katsayı vektörünü (x_t) hesaplamaktır:

$$x_t = \arg\min_x ||v - \Phi_t x||_2 \quad (2.18)$$

Bu işlem, sinyalin seçilen atomların gerdiği alt uzaya dik izdüşümünün hesaplanması anlamına gelir.

Kalıntı Güncellemesi (Residual Update): Yeni kalıntı (r_t), orijinal sinyalden hesaplanan yeni yaklaşımın ($a_t = \Phi_t x_t$) çıkarılmasıyla elde edilir.

$$r_t = v - a_t \quad (2.19)$$

Bu adımın sonucunda yeni kalıntı, o ana kadar seçilmiş tüm atomlara dik (ortogonal) olur. Bu özellik aynı atomun tekrar seçilmesini engeller ve algoritmanın yakınsamasını garantiler.

Tekrar ve Durdurma (Iteration and Stopping): Algoritma, iterasyon sayacını artırır ve belirli bir durdurma kriteri sağlanana kadar 2. adıma geri döner. Durdurma kriteri genellikle hedeflenen seyrekliği (m) yakalamak veya kalıntının normunun belirli bir hata eşiğinin altına düşmesi $|r_t|_2$ <şeklindedir.

Perturbed orthogonal matching pursuit algoritması

Perturbed Orthogonal Matching Pursuit (POMP), veya Türkçesiyle Pertürbasyonlu (Bozunumlu) Ortogonal Eşleştirme Takibi, klasik Ortogonal Eşleştirme Takibi (OMP) algoritmasının temel bir kısıtlaması olan "taban uyuşmazlığı" (basis mismatch) veya "ızgara dışı" (off-grid) problemlerini çözmek için geliştirilmiş gelişmiş bir seyrek sinyal geri kazanım algoritmasıdır [27].

Standart OMP algoritması, oluşturulmuş olan sözlük matrisinin sistemin gerçek fiziksel yapısını hatasız bir şekilde temsil ettiğini varsaymaktadır. Buna karşın tezimizde üzerinde durduğumuz ED altsistemlerinde anten yerleşimlerindeki ufak kaymalar, kablolama

kaynaklı oluşan faz farkları, sistemin çalışma sıcaklığındaki değişimler veya hedefin tarama ızgarasına tam oturmaması (off-grid target problem) gibi sebeplerle, matematiksel model ile fiziksel gerçeklik arasında uyumsuzluklar oluşmaktadır.

Literatürde bu durum, algılama matrisinin bir hata terimi E (pertürbasyon matrisi) ile bozulması olarak modellenir. Perturbed OMP, bu belirsizlikler altında algoritmanın kararlılığını analiz eden ve durdurma kriterlerini bu hataya göre optimize eden, OMP'nin daha güçlü bir varyasyonudur [28].

Standart OMP'ye karşın Perturbed OMP aşağıdaki hatalı sözlük modelini esas alır.

$$y = (A + E)x + n \tag{2.20}$$

Bu denklemde A sözlük matrisi, E kalibrasyon hatalarını veya ızgara uyuşmazlığını temsil eden sınırlı bir pertürbasyon matrisi, y ise bozunumlu ölçüm vektörüdür. Perturbed OMP'nin temel amacı, A yerine $\tilde{A} = A + E$ matrisinin kullanıldığı senaryolarda hatanın iterasyonlar boyunca yayılımını kontrol altında tutmak ve doğru destek kümesini tespit etmektir.

Perturbed OMP algoritması, temelde OMP'nin yaptığı seçim işlemini yapar, ancak her adımda seçilen vektörleri optimize eden bir pertürbasyon prosedürü ekler. [27]'de önerilen yönteme göre OMP bir vektör seçer, ancak bu vektör "ızgara dışı" bir hedeften kaynaklanıyorsa tam uyuşmaz. Perturbed OMP seçilen bu vektörü matematiksel olarak döndürerek artık hataya(residual) daha uygun hale getirir. [27]'de yöntemden adım adım aşağıdaki gibi bahsedilmiştir.:

Başlatma (Initialization): Artık hata $r_0 = y$ olarak belirlenir. Başlangıçta tüm sinyal hatadır. Destek kümesi $\Lambda_0 = \emptyset$'dur. İterasyon t=1'dir.

Standart Seçim: Standart OMP algoritmasında olduğu gibi mevcut kalıntı vektörü r_{t-1} ile sözlük matrisi A arasındaki korelasyonlar hesaplanır. Mutlak değerce en büyük korelasyonu veren ızgara atomu (a_{j^*}) seçilir.

$$j^* = \arg\max_j \frac{|\langle r_{k-1}, a_j \rangle|}{||a_j||_2} \tag{2.21}$$

Pertürbasyon Açısının Kestirimi: Bu adım Perturbed OMP'yi OMP'den ayıran kısımdır. Seçilen ızgara atomunun, gerçek hedeften ne kadar saptığı (ne kadar dönmesi gerektiği), kalıntı vektörünün karakteristiğine bakılarak hesaplanır. [27]'de önerilen açı kestirimi şu şekildedir:

$$\phi_k^* = \tan^{-1}\left(\frac{||r_{\perp,k}||_2 - \epsilon}{||x_k||_2}\right) \quad (2.22)$$

Burada $||r_{\perp,k}||_2$ OMP'nin o anki adımdaki artık hata normu, ϵ gürültü eşiği, $||x_k||_2$ ise kestirilen sinyal katsayısıdır.

Vektör Döndürme ve İyileştirme: Hesaplanan ϕ_k^* açısı kullanılarak seçilen a_{j^*} atomu, kalıntı vektörüne (gerçek hataya) doğru döndürülür. Yeni elde edilen a_{pomp} atomu şu formül ile oluşturulur:

$$a_{pomp} = a_{j^*}\cos(\phi_k^*) + u_{error}\sin(\phi_k^*) \quad (2.23)$$

Burada u_{error} hatanın yönünü gösteren birim vektördür. Bu işlem sayesinde, sözlükte fiziksel olarak bulunmayan (ızgara dışı) bir atom sanal olarak üretilmiş olur.

Güncelleme ve Durdurma: Destek kümesine standart atom yerine iyileştirilmiş a_{pomp} atomu eklenir. Sinyal katsayıları (x) ve kalıntı (r) güncellenir. Durdurma kriteri sağlanana kadar işlem tekrarlanır.

Literatür analizi kapsamında Perturbed OMP'nin OMP'ye karşı avantajları aşağıdaki gibidir [27][29]:

Izgara Dışı (Off-Grid) Hedeflerde Yüksek Başarım: Standart OMP, hedef tam ızgara üzerinde değilse enerjiyi komşu ızgara noktalarına dağıtarak "sızıntı" (leakage) yaratır. POMP, parametreleri sürekli uzayda optimize ettiği için gerçek hedef konumlarını çok daha hassas bulur.

Daha Seyrek (Sparse) Çözümler: OMP, ızgara dışı bir hedefi temsil etmek için birden fazla vektör seçmek zorunda kalabilir (yanlış pozitifler). POMP, vektörü hedefe kaydırarak tek bir vektörle doğru temsili sağlar, böylece gerçek seyreklik seviyesini korur.

Yüksek Gürültü ve Pertürbasyon Toleransı: Sinyal-Pertürbasyon Oranının (SPR) düşük olduğu durumlarda (yani sözlük hatasının baskın olduğu durumlarda), OMP başarısız olurken POMP pertürbasyonu telafi ederek kabul edilebilir bir hata oranıyla çalışmaya devam eder.

Daha Düşük Kurtarma Hatası: Simülasyon sonuçları, POMP'un OMP'ye kıyasla çok daha düşük normalize edilmiş karesel hata (NMSE) sağladığını göstermektedir. Örneğin, mmWave kanal tahmininde -20 dB'ye varan daha düşük hata oranları raporlanmıştır.

Dezavantajları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Hesaplama Karmaşıklığı: POMP, her iterasyonda bir optimizasyon (rotasyon açısı bulma veya gradyan inişi) işlemi gerçekleştirir. OMP sadece bir iç çarpım ve matris tersi alırken, POMP bu optimizasyon nedeniyle iterasyon başına daha fazla işlem yapar. Ancak, kaynaklar bu karmaşıklığın OMP ile aynı mertebede $\mathcal{O}(K^3M)$ veya $\mathcal{O}(K^2M)$ tutulabileceğini, çünkü matris boyutlarının genellikle yönetilebilir olduğunu belirtir.

Başlangıç Seçimine Duyarlılık: POMP, OMP'nin seçtiği ilk kaba konumu (grid point) iyileştirir. Eğer OMP başlangıçta yanlış bir "tepe" (lobe) seçerse, POMP'un yerel optimizasyonu (gradyan inişi) gerçek hedefe ulaşamayabilir; yani global optimum garanti edilmez, yerel optimuma yakınsar.

Generalized orthogonal matching pursuit algoritması

Standart OMP algoritması, her iterasyonda kalıntı vektörü ile en yüksek korelasyona sahip olan tek bir atomu seçerek ilerlemektedir. Yapılan bu tekli seçim işlemi özellikle seyreklik seviyesinin (K) yüksek olduğu veya geniş bantlı spektrum taraması yapılan elektronik destek uygulamalarında işlem süresini uzatabilir. Ayrıca seçilmesi gereken asıl atomun gürültü ve bozulmalar nedeniyle ikinci veya üçüncü sırada kaldığı senaryolarda OMP'nin hata yapma riski yüksektir. Bu kısıtlamaları aşmak amacıyla Wang, Kwon ve Shim [30] tarafından

önerilen Genelleştirilmiş Ortogonal Eşleştirme Takibi (GOMP) algoritması, iterasyon başına birden fazla atom seçimine izin veren esnek bir yapı sunar.

Bu algoritmaya "Genelleştirilmiş" (Generalized) denmesinin asıl sebebi şudur: Standart OMP algoritması her adımda sadece 1 adet en iyi eşleşen sütunu seçer. GOMP ise bu kuralı esneterek her adımda S adet en iyi eşleşen sütunun seçilmesine olanak sağlamaktadır. Eğer S=1 seçilirse, GOMP tıpkı standart OMP gibi çalışır [31]. Bu algoritma tarafından sağlanan çoklu atom seçimi stratejisi, algoritmanın yakınsama hızını artırırken, sonlu adımda çözüm garantisi sunmaya devam etmektedir.

Algoritmanın amacı, $y = Ax$ (veya gürültülü durumda $y = Ax + n$) denklemini çözerek seyrek x vektörünü yüksek doğrulukla geri kazanmaktır. GOMP algoritması aşağıdaki adımları izler [30] [31]:

Girdiler şu şekildedir: y (ölçüm vektörü (M x 1), A (sözlük matrisi (M x N), K (sinyalin bilinen veya tahmin edilen seyreklik seviyesi), S (her iterasyonda seçilecek atom sayısı ($1 \leq S \leq K$)). Başlangıç aşamasında iterasyon sayacı 0 olarak seçilir. Ayrıca artık hata POMP'ta olduğu gibi $r_0 = y$ belirlenir. Seçilen atomların indekslerini tutan destek kümesi (Λ_0) boş bırakılır. Durdurma kriteri sağlanana kadar ($||\mathbf{r}_t||_2$ belirli bir ϵ değerinin altına düşerse veya iterasyon sayısı maksimuma ulaşana kadar) şu adımlar tekrarlanır:

Tanımla/Çoklu Seçim: Algoritma sözlük matrisi A ile mevcut kalıntı vektörü r_{t-1} arasındaki korelasyonu hesaplar.

$$c = A^H r_{t-1} \tag{2.24}$$

Bu korelasyonlar mutlak değerce sıralanır ve en büyük S değere karşılık gelen indeksler seçilir. Seçilen bu indeksler kümesine Ω diyelim.

Genişletme: Yeni seçilen S adet indeks, mevcut destek kümesi Λ_{t-1} ile birleştirilir.

$$\Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup \Omega \tag{2.25}$$

Bu adımda destek kümesi büyür ve sinyalin sıfır olmayan elemanlarının yerleri toplu olarak tahmin edilir.

Kestirim: Güncellenen destek kümesi Λ_t kullanılarak, en küçük kareler (least squares) yöntemiyle sinyal katsayıları ($\hat{x}$) hesaplanır. Bu işlem, y ölçüm vektörünün seçilen sütunların uzayı üzerine dik izdüşümünü bulur:

$$\widehat{x_{\Lambda_t}} = \arg\min_x ||y - A_{\Lambda_t} x||_2 = \left(A_{\Lambda_t}^H A_{\Lambda_t}\right)^{-1} A_{\Lambda_t}^H y \quad (2.26)$$

Burada $\left(A_{\Lambda_t}^H A_{\Lambda_t}\right)^{-1} A_{\Lambda_t}^H$ seçilen sütunlardan oluşan alt matrisin sözde tersidir.

Kalıntı Güncelleme: Yeni kalıntı, ölçüm vektöründen tahmin edilen sinyalin katkısı çıkarılarak hesaplanır:

$$r_t = y - A_{\Lambda_t} \widehat{x_{\Lambda_t}} \quad (2.27)$$

Bu işlem, yeni kalıntının seçilen sütunlar uzayına dik olmasını garanti eder. Döngü tamamlandığında, son tahmin edilen $\hat{x}$ vektörü çıktı olarak verilir. Vektörün destek kümesi dışındaki elemanları sıfırdır.

Bu algoritmanın standart OMP'ye karşı sağladığı avantajlar şunlardır [30] [31]:

Hız: Her adımda 1 yerine S (örneğin 3 veya 5) sütun seçtiği için sonuca çok daha hızlı ulaşır. İterasyon sayısı azalır.

Kararlılık: Bazı durumlarda tek bir sütun seçmek hatalı olabilir. GOMP, birden fazla aday seçerek "doğru" sütunu yakalama şansını artırır ve yanlış seçim riskini yayar. Literatürde, S sayısı arttıkça algoritmanın gürültüye karşı hassasiyetinin değiştiği gözlemlenmiştir.

Performans: Simülasyonlar, GOMP'nin karmaşık optimizasyon yöntemleriyle ($l1$-minimizasyonu) yarışabilir bir başarı oranına sahip olduğunu, ancak onlardan çok daha hızlı çalıştığını göstermektedir.

Dezavantajlarından ise şu şekilde bahsedilebilir:

Matris Tersi Alma Yükü: İterasyon sayısı azalsa da, her iterasyonda matrisin boyutu S kadar büyür.

Aşırı Seçim Riski (Over-Selection): Eğer S parametresi gereğinden büyük seçilirse, algoritma gerçek sinyal bileşenlerinin yanında çok sayıda gürültü bileşenini de (false alarms) destek kümesine ekleyebilir.

Parametre Belirsizliği: S değerinin optimal seçimi senaryoya (SNR, seyreklik) göre değişir. Sabit bir S her durum için ideal olmayabilir.

Newtonized orthogonal matching pursuit algoritması

Newtonized Orthogonal Matching Pursuit (NOMP), veya Türkçesiyle Newton İyileştirmeli Ortogonal Eşleştirme Takibi, klasik OMP algoritmasının sürekli parametre uzayına genelleştirilmiş bir versiyonudur. Mamandipoor, Ramasamy ve Madhow [36] tarafından frekans kestirimi problemi için önerilen algoritma, frekans kestirimi ile geliş açısı kestirimi arasındaki matematiksel benzerlik sayesinde yön bulma problemlerine de doğrudan uygulanabilmektedir. POMP, taban uyuşmazlığı (basis mismatch) problemini seçilen ızgara atomunu matematiksel olarak döndürerek çözmeye çalışırken; NOMP, seçilen atomun parametresini (geliş açısını) sürekli uzayda Newton yöntemi ile iyileştirir. Böylece sözlük yalnızca kaba bir başlangıç noktası sağlamak için kullanılır; nihai açı kestirimi ise ızgaradan tamamen bağımsızdır [36].

NOMP, ölçüm modelini sonlu bir sözlük matrisi yerine sürekli parametreli atomlar üzerinden tanımlar:

$$y = \sum_{l=1}^{K} g_l a(\theta_l) + n \qquad (2.28)$$

Bu denklemde $a(\theta)$ sürekli θ açısına bağlı yönlendirme (atom) vektörünü, g_l karmaşık sinyal genliğini, n ise beyaz Gauss gürültüsünü temsil etmektedir. Algoritma, her bileşen için kalıntı vektörü y_r üzerinden tanımlanan aşağıdaki maliyet fonksiyonunu maksimize etmeye çalışır:

$$S(\theta, g) = 2\mathrm{Re}\{g^{*}a(\theta)^{H}y_{r}\} - |g|^{2}||a(\theta)||_{2}^{2} \quad (2.29)$$

[36]'da önerilen yöntem dört temel adımdan oluşmaktadır:

Kaba Tespit (Coarse Detection): Kalıntı $r_0 = y$ ile başlanır ve kalıntı vektörü ile kaba bir ızgara (Ω) üzerinde tanımlanan atomlar arasındaki normalize korelasyonun en büyük olduğu nokta seçilir:

$$\hat{\theta} = \arg\max_{\theta\in\Omega} \frac{|\langle r_{t-1}, a(\theta)\rangle|^{2}}{||a(\theta)||_{2}^{2}} \quad (2.30)$$

Seçilen noktaya karşılık gelen genlik, dik izdüşüm ile $\hat{g} = a(\hat{\theta})^{H} r_{t-1} / ||a(\hat{\theta})||_{2}^{2}$ olarak kestirilir.

Newton İyileştirmesi (Newton Refinement): Kaba ızgaradan seçilen açı kestirimi, maliyet fonksiyonunun açıya göre birinci ($\dot{S}$) ve ikinci ($\ddot{S}$) türevleri kullanılarak sürekli uzayda iyileştirilir:

$$\hat{\theta}' = \hat{\theta} - \frac{\dot{S}(\hat{\theta}, \hat{g})}{\ddot{S}(\hat{\theta}, \hat{g})} \quad (2.31)$$

Iraksamayı önlemek için güncelleme yalnızca $\ddot{S} < 0$ koşulu sağlandığında, yani kestirim bir yerel maksimum civarındayken uygulanır; ardından genlik aynı izdüşüm formülüyle yeniden hesaplanır [36].

Döngüsel İyileştirme (Cyclic Refinement / Geri Besleme): NOMP'u diğer açgözlü algoritmalardan ayıran en önemli adımdır. Yeni bir bileşen tespit edildikten sonra, daha önce tespit edilmiş tüm bileşenlerin parametreleri belirli sayıda tur (R_c) boyunca Newton adımlarıyla yeniden iyileştirilir. Bu geri besleme mekanizması, önceki adımlardaki kestirim hatalarının sonradan düzeltilmesine olanak tanır; OMP, gOMP ve POMP gibi tek yönlü ilerleyen algoritmalarda böyle bir düzeltme imkanı bulunmamaktadır [36].

Güncelleme ve Durdurma: Her iterasyonun sonunda tüm genlikler en küçük kareler yöntemiyle toplu olarak yeniden hesaplanır ve kalıntı güncellenir. Durdurma kriteri olarak

Sabit Yanlış Alarm Oranı (CFAR) tabanlı bir eşik kullanılır: kalıntı ile atomlar arasındaki maksimum korelasyon τ eşiğinin altına düştüğünde algoritma sonlanır; böylece seyreklik seviyesi K'nın önceden bilinmesine gerek kalmaz [36].

NOMP'un başlıca avantajları şu şekilde özetlenebilir: parametreler sürekli uzayda kestirildiğinden taban uyuşmazlığı problemi tamamen ortadan kalkar ve Cramér-Rao alt sınırına (CRB) yakın, ızgara bağımsız süper çözünürlük elde edilir; yüksek doğruluk için yoğun sözlük gerekmediğinden bellek ve korelasyon hesaplama yükü azalır; geri besleme mekanizması, birbirine yakın açılardan gelen hedeflerin bulunduğu yoğun elektronik destek senaryolarında önceki kestirimlerin düzeltilmesini sağlar; CFAR tabanlı durdurma ise hedef sayısı bilinmeden sabit yanlış alarm oranıyla çalışmayı mümkün kılar [36][37].

Dezavantajları ise şunlardır: Newton adımı için atom vektörünün açıya göre birinci ve ikinci türevlerinin analitik olarak hesaplanabilmesi gerekir; Newton yöntemi yalnızca yerel yakınsama garantisi sunduğundan kaba ızgaranın belirli bir aşırı örnekleme katsayısı (γ) ile oluşturulması zorunludur; döngüsel iyileştirme iterasyon başına ek işlem yükü getirir ve γ ile R_c parametrelerinin senaryoya göre ayarlanması gerekir. Ayrıca çok anlık (multi-snapshot) ölçümler için algoritmanın MNOMP gibi genişletilmiş versiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır [37].

3. YÖNTEM

Tezin bu bölümünde, tez kapsamında önerdiğimiz yöntemlerin teorik altyapısı, sistem modeli yapılacak simülasyonların performans değerlendirme süreci detaylandırılacaktır. Çalışma, elektronik destek sistemlerinde yön bulma hassasiyetini artırmak amacıyla seyrek sinyal geri kazanımı tekniklerinin kullanımına odaklanmaktadır.

3.1. Problem Tanımı

Tez boyunca tanımlanmış olan yön bulma problemi, elektromanyetik spektrumdaki sinyal kaynaklarının seyreklik özelliği taşıdığı varsayımı üzerine kurgulanmıştır. Modern harp sahasında, elektronik destek alıcıları tarafından toplanan sinyallerin tüm olası geliş açılarının (N) aksine, aynı anda aktif bir şekilde yayın yapmakta olan sinyal kaynaklarının sayısı (K) oldukça sınırlıdır. Bu durum, problemin sıkıştırılmış algılama çerçevesinde modellenmesine olanak tanımaktadır.

Sistem modeli, M adet antenden oluşan bir dizi yapısı için aşağıdaki doğrusal denklem ile gösterilebilmektedir:

$$y = A(\theta)s + n \tag{3.1}$$

Burada:

- $y \in C^{M\times 1}$: M adet anten elemanından alınan genlik ve faz bilgilerini içeren ölçüm vektörüdür.
- $A(\theta) \in C^{M\times N}$: Yön sözlüğü olarak kullanılır, her bir sütunu belirli bir geliş açısına karşılık gelen anten yanıt vektörünü temsil etmektedir.
- $s \in C^{N\times 1}$: K-seyrek sinyal vektörüdür; bu vektörün sıfır olmayan bileşenlerinin indisleri, sinyalin geldiği yönleri temsil etmektedir. Tanımlanan yön bulma problemi ölçüm vektörü y kullanılarak s vektörünün seyrek yapısının geri kazanılması problemi olarak yeniden formüle edilmektedir.
- n : Sisteme eklenen beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN) ifade etmektedir. Gürültü varyansı, sistemin sinyal-gürültü oranını (SNR) belirleyen kritik parametrelerden biridir

ve önerilen yöntemlerin farklı SNR seviyeleri altındaki performanslarının analiz edilmesinde kullanılacaktır.

3.2. Anten Modeli ve Yön Sözlüğü Oluşturma

Elektronik destek sistemlerinde yön bulma performansının teorik olarak modellemesi, sistemde kullanılacak antenlerin anten örüntüleriyle doğrudan ilişkilidir. Tezimizde, literatürde kabul görmüş olan Gauss tabanlı anten kazanç modeli esas alınacaktır. Bu model genlik karşılaştırma ile yön bulan sistemlerin karakterizasyonu için tasarlanmıştır.

3.2.1. Anten kazanç örüntüsü (Gauss modeli)

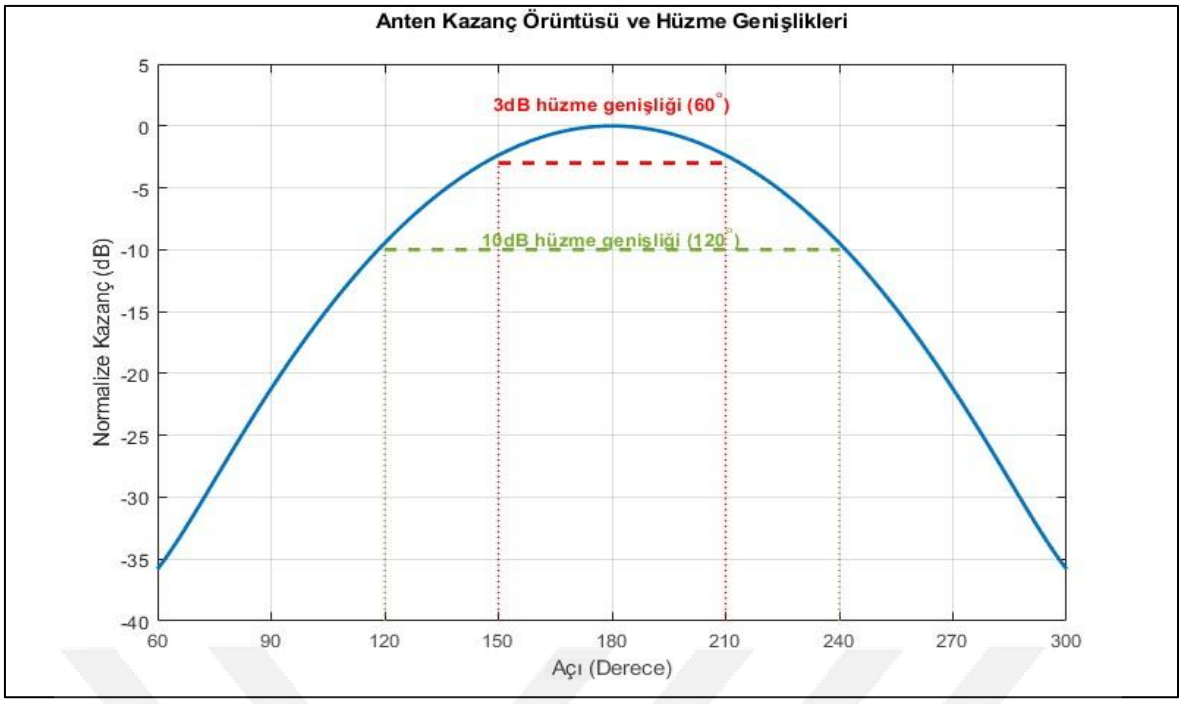
Sistemde belirlenecek olan anten yerleşimindeki her bir antenin kazanç karakteristiği, fiziksel anten tepkilerini yüksek doğrulukla temsil eden üstel bir Gauss fonksiyonu ile modellenmiştir. i. antenin ϕ geliş açısındaki lineer kazanç cevabı aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$G_i(\phi) = a + b \cdot \exp\left(-0.5 \cdot \left(\frac{\phi - \phi_{0,i}}{d}\right)^2\right) \tag{3.2}$$

Denklemde yer alan parametreler [2] ve [32]'deki değerler referans alınarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- $a = 9.9 \times 10^{-5}$: Antenin yan lob ve arka lob seviyelerini temsil eden taban katsayısı.
- $b = 0.9999$: Ana lobun tepe kazancını belirleyen ölçeklendirme katsayısı.
- $d = 28.7382$: Anten hüzme genişliğini kontrol eden şekil parametresi.
- $\phi_{0,i}$: i. Antenin bakış yönü.

Pratik sistemlerde anten kazançları çalışma frekansına göre değişiklik göstermektedir [32]. Ancak tezimizdeki çalışmada anten örüntüleri Eşitlik (3.2)'de gösterildiği gibi Gauss olarak modellenmiştir.



Şekil 3.1. Oluşturulan gauss kazançlı anten örüntüsü

Anten örüntüsü oluşturulurken en çok dikkat edilmesi gereken noktalardan biri 3 dB ve 10 dB hüzme genişliklerindeki kazanç değerleridir. Şekilde görüldüğü gibi oluşturulan anten örüntüsünde yarım dalga (3dB) hüzme genişliği 60 derece, 10 dB hüzme genişliği 120 derece ve minimum kazanç 40 dB olarak ayarlanmıştır.

3.2.2. Anten dizisi konfigürasyonu

Simülasyonlarda, 360 derece kapsama sağlanabilmesi için kullanılacak anten sayısına göre yönlü antenler dairesel bir geometri ile yerleştirilmiştir. Simülasyon parametrelerinde bahsedileceği üzere 2 farklı anten sayısı yerleşimi ile simülasyonlar gerçekleştirileceğinden antenlerin bakış yönleri 2 farklı senaryo için aşağıdaki gibi ayarlanmıştır:

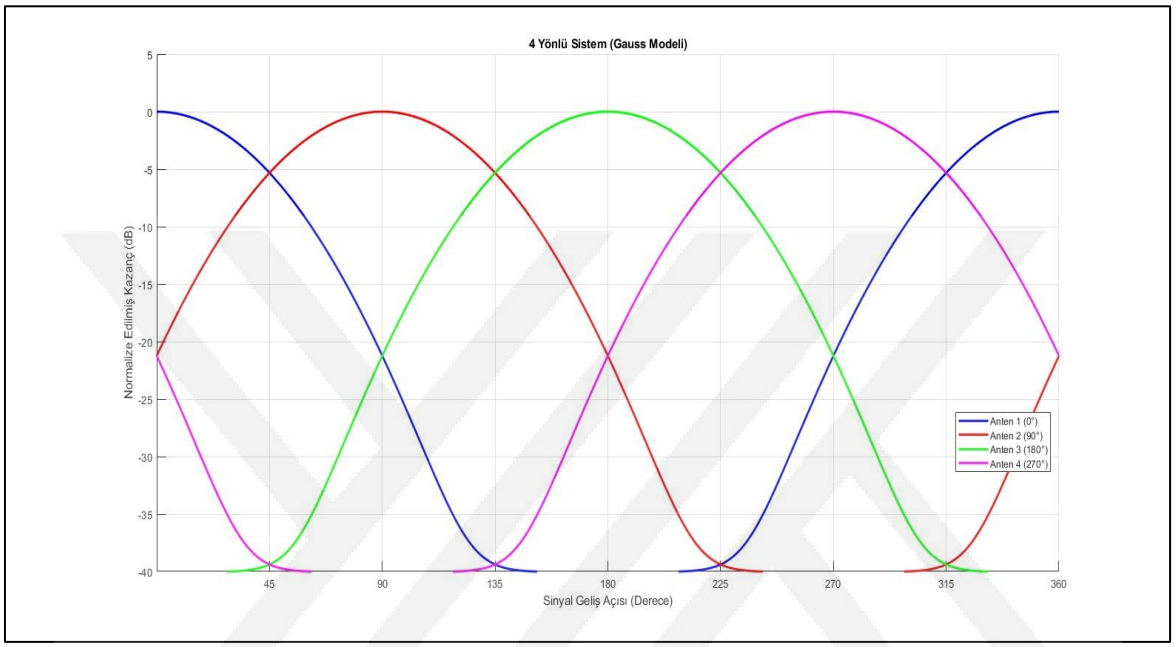
Çizelge 3.1. Anten yerleşim açıları (4 antenli senaryo)

4 Antenli Yerleşim Senaryosu			
Anten-1	Anten-2	Anten-3	Anten-4
0 derece	90 derece	180 derece	270 derece

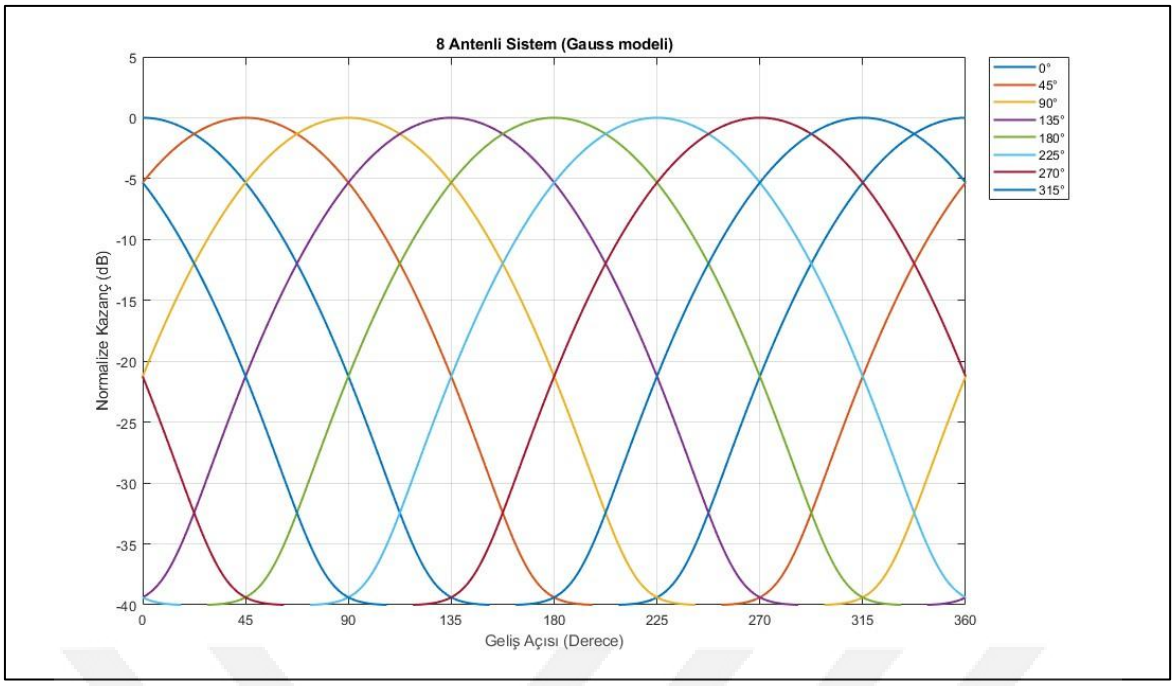
Çizelge 3.2. Anten yerleşim açıları (8 antenli senaryo)

8 Antenli Yerleşim Senaryosu							
Anten-1	Anten-2	Anten-3	Anten-4	Anten-5	Anten-6	Anten-7	Anten-8
0 derece	45 derece	90 derece	135 derece	180 derece	225 derece	270 derece	315 derece

4 antenli ve 8 antenli yerleşimler için oluşturulmuş anten örüntüleri ise aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.2. 4 antenli yerleşimde sinyal geliş açısına göre anten kazanç değerleri



Şekil 3.3. 8 antenli yerleşimde sinyal geliş açısına göre anten kazanç değerleri

3.2.3. Yön sözlüğünün oluşturulması

Sıkıştırılmış algılama algoritmalarında sözlük matrisi (A) olarak kullanılacak olan bileşen, önceki bölümde tanımlanmış olan anten örüntülerinin belirlenmiş bir açısal çözünürlükle örneklenmesiyle oluşturulacaktır.

- Açısal Çözünürlük: 0 derece ile 360 derece aralığı 0.5 derece adımlarla taranmıştır. Bu durum sözlük matrisinin N=721 adet sütuna yani atoma sahip olacağı anlamına gelir.
- Matris Yapısı: M=4 antenli sistem için $A \in R^{4\times721}$ boyutundaki sözlük matrisinin her bir sütunu, ilgili θ_j açısı için dört antenin normalize edilmiş dB kazanç değerlerini ($[G_1, G_2, G_3, G_4]^T$)içerir.

Bu modelleme sayesinde, elektromanyetik spektrumda yayılan bir sinyalin alıcı anten dizisi üzerinde oluşturacağı genlik imzasının oluşturulmuş sözlük matrisindeki atomlarla olan korelasyonu incelenerek OMP ve türevi algoritmalar ile yüksek hassasiyetli yön tahmini yapılması sağlanacaktır.

3.3. OMP ve Türevlerinin Uygulanması

Tezin ikinci bölümünde detaylı olarak kuramsal temellerini açıkladığımız seyrek sinyal geri kazanım algoritmaları, bu bölümde 3.2. başlığı altında tanımlanan yön sözlüğü kullanılarak yön tahmini aşamasında kullanılacaktır. Uygulama aşamasında, her algoritmanın elektronik destek sisteminin operasyonel gereksinimlerine (hız, doğruluk, gürültü toleransı) göre özelleştirilmiş kullanım stratejileri aşağıdaki başlıklar altında özetlenmiştir.

3.3.1. OMP: Temel referans uygulaması

OMP sistemin temel performans referansı olarak kurgulanmaktadır. Uygulama aşamasında, alıcı antenler tarafından toplanan genlik ölçümleri her iterasyonda sözlükteki atomlarla korele edilerek en baskın yön bileşeni tespit edilecektir. Durdurma kriteri olarak seyreklik seviyesinin yakalanması veya kalıntı hatasının belirlenen eşik değerinin altına düşmesi esas alınacaktır.

3.3.2. GOMP: Hız ve çoklu hedef optimizasyonu

GOMP algoritması özellikle çoklu radar tehditlerinin bulunduğu yoğun ortamlarda sistemin tepki süresini kısaltmak amacıyla entegre edilecektir. Uygulama aşamasında standart OMP'den farklı olarak her iterasyonda S adet en iyi eşleşen atom aynı anda destek kümesine dahil edilir. Yapılacak simülasyonlarda S parametresi belirlenmiş değerler arasında değiştirilerek elektronik destek sisteminin gerçek zamanlı çalışma performansını en üst düzeye çıkaran "hız-doğruluk" dengesi analiz edilecektir. Bu yaklaşımın iterasyon sayısını azaltarak hesaplama yükünü düşürmesi ve geniş bantlı taramalarda avantaj sağlaması beklenmektedir.

3.3.3. POMP: Model hataları ve ızgara dışı iyileştirme

POMP algoritması sistemdeki fiziksel belirsizlikleri ve ızgara dışı hedef problemlerini bastırmak için karşılaştırma aşamasına dahil edilmiştir. Uygulama aşamasında anten örüntüsündeki belli orandaki bozulmalar altında sistemin kararlılığını koruyup koruyamadığı test edilecektir. Bu algoritma teorikte hedefin 1 derece veya 0.5 derece

değerindeki sabit ızgara noktaları arasında kaldığı durumlarda, klasik yöntemlerin ürettiği hataları engellemekte ve açısal çözünürlüğü artırmaktadır.

3.3.4. NOMP: Sürekli uzayda Newton iyileştirmesi

NOMP algoritması, POMP ile aynı ızgara dışı hedef problemini farklı bir mekanizma ile çözdüğü için karşılaştırma aşamasına dahil edilmiştir. Uygulamada, 3.2 başlığında tanımlanan Gauss tabanlı anten kazanç örüntüsünün açıya göre birinci ve ikinci türevleri analitik olarak çıkarılmış; kaba tespit için mevcut yön sözlüğü kullanılmış, ardından açı kestirimi belirli sayıda (Rc) Newton iyileştirme adımıyla sürekli uzayda hassaslaştırılmıştır. Iraksamayı önlemek amacıyla Newton adımı yalnızca maliyet fonksiyonunun ikinci türevinin negatif olduğu bölgede uygulanmış ve adım büyüklüğü kaba ızgara aralığı ile sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşımın, POMP'un sayısal optimizasyon tabanlı iyileştirmesine kıyasla benzer doğruluğu çok daha az fonksiyon değerlendirmesiyle sağlaması beklenmektedir.

3.4. Simülasyon Parametreleri ve Ölçütler

Bu bölümde tezde önerilen algoritmaların performanslarını değerlendirebilmek amacıyla kurgulanan simülasyon senaryolarının teknik parametreleri ve başarı kriterlerinden bahsedilecektir. Yapılacak tüm analizler, istatistiksel bağlamda anlam sağlaması için 100 adet bağımsız Monte Carlo denemesi üzerinden gerçekleştirilecektir.

3.4.1. Ortak simülasyon ayarları

Simülasyonlarda kullanılan temel parametreler aksi belirtilmedikçe, bölüm 3.2.'de tanımlanan anten örüntüsü ile entegre edilerek şu şekilde belirlenmiştir:

- Yön Aralığı ve Çözünürlük: 0 derece ile 360 derece arasındaki açısal uzay 0.5 derece çözünürlükle örneklenecektir.
- Sinyal Modeli: Sabit genlik ve sabit frekanslı CW sinyaller esas alınmıştır.
- Gürültü Modeli: Ölçümlere Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN) eklenerek gerçekçi kanal koşulları oluşturulacaktır.

- Sayısal model: Alıcıların ölçüm süreci $y = A(\theta)x + n$ denklemi üzerinden yürütülecektir.

3.4.2. Simülasyon senaryoları

Algoritmaların farklı koşullar altındaki davranışlarını ölçebilmek maksadıyla 4 temel senaryoda karşılaştırmalar gerçekleştirilecektir.

SNR Seviyelerine Göre Performans: Sinyal-gürültü oranı [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35] dB değerleri arasında değiştirilerek, gürültünün yön bulma doğruluğu üzerindeki etkisine bakılacaktır.

Izgara Dışı Tespit Yeteneği: Anten sözlüğü oluşturma adımında sözlük çözünürlüğü değiştirilerek POMP algoritmasının ızgara dışı tehditleri tespit etmedeki başarısı OMP algoritmasıyla kıyaslanacaktır. Ayrıca ızgara dışı bir tehdit ayrı bir senaryoda POMP ve NOMP ile kestirilecektir.

Anten Sayısının Etkisi: Alıcı antenlerin sayısı ve hüzme genişlikleri değiştirildiğinde yön doğruluğundaki değişim analiz edilecektir.

GOMP Seçim Parametresi (S): GOMP algoritmasının her iterasyonda seçtiği atom sayısı [1,2,4,8] olarak değiştirilerek, hız ve doğruluk dengesindeki değişimler analiz edilecektir.

3.4.3. Performans ölçüm metrikleri

Algoritmaların çıktıları, elektronik destek sistemlerinin operasyonel kriterlerine uygun olarak aşağıda verilen 4 metrik üzerinden değerlendirilecektir:

- *RMSE (Root Mean Square Error):* Tahmin edilen geliş açısı ile gerçek geliş açısı arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökünü ifade eder. Derece cinsinden hesaplanan bu metrik, hataların karelerini alması nedeniyle büyük sapmaları (outliers) MAE'ye göre daha ağır cezalandırır ve sistemin kararlılığını ölçmede daha hassas bir gösterge sunar.

- *Doğru Tespit Oranı:* Tahmin edilen yönün gerçek yöne göre $\pm 5°$ tolerans sınırı içerisinde olma yüzdesidir.
- *Zaman Karmaşıklığı:* Her bir algoritmanın bir yön kestirim işlemini tamamlama süresi (ms) üzerinden hesaplama yükü belirlenir.
- *Seyreklik Tahmin Hatası:* Gerçekte sinyal olmayan yönlere hatalı enerji atanması (yanlış alarm) oranını ölçer.

4. SİMÜLASYONLAR VE SONUÇLAR

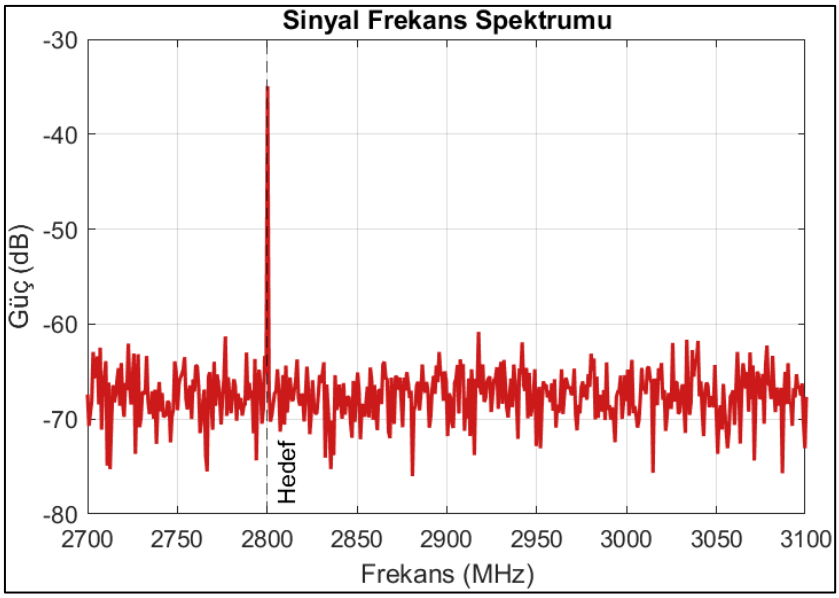
Bu bölümde Bölüm 3.4.2'de tanımlanan simülasyon senaryoları kapsamında elde edilen sayısal bulgular ve sonuçlar sunulmuş olup önerilen algoritmaların performansları ilgili simülasyon senaryosu detayında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilmiş simülasyonların tamamı elektronik destek sistemlerinin kullanım koşullarını yansıtacak şekilde kurgulanmış olup; algoritmaların performansı yön bulma doğruluğu, gürültüye karşı hassasiyet, hesaplama yükü gibi kritik ölçütler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilmiş sonuçlar POMP ve GOMP algoritmalarının klasik OMP yaklaşımına kıyasla sağladığı kazanımları sayısal olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır. İşlem süresi metriği; donanım performansı, işletim sistemi, yazılım ortamı ve kod optimizasyon düzeyine bağlı görece bir ölçüttür. Bu nedenle raporlanan süreler mutlak değerler olarak değil, tüm algoritmaların aynı ortamda ve aynı ölçüm sınırlarıyla koşturulmasından elde edilen göreli karşılaştırma ölçütü olarak değerlendirilmelidir.

4.1. SNR Seviyelerine Göre Performans Analizi

Bu alt bölümde, OMP ve POMP algoritmalarının gürültüye karşı dayanıklılıkları çeşitli sinyal-gürültü oranları altında incelenmiştir. SNR seviyesinin düşük olduğu zorlu senaryolardan yüksek SNR koşullarına kadar geniş bir aralıkta gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde, yön bulma doğruluğunun ve kararlılığının gürültüye bağlı değişimi analiz edilmiştir.

Ortak olmayan simülasyon parametreleri aşağıdaki gibidir:

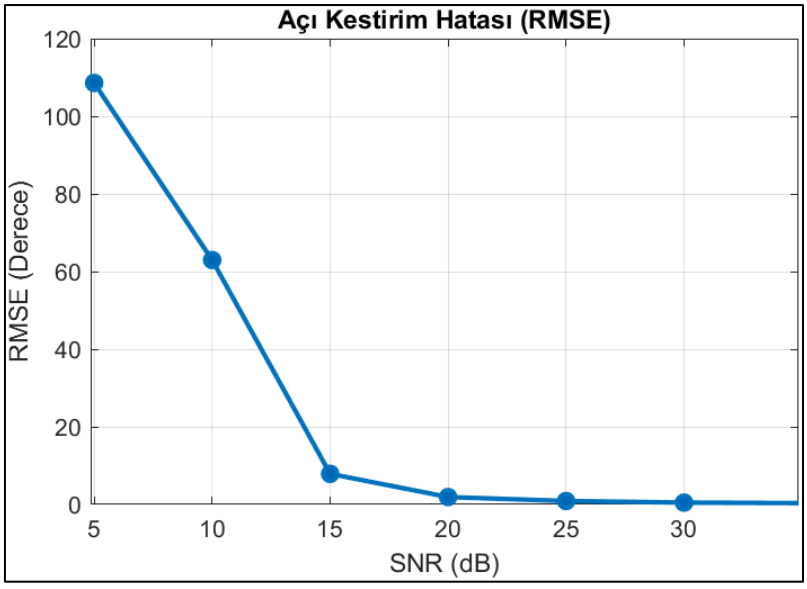
- Tehdit Açısı: 142,5 derece.
- Tehdit Frekansı: 2800 MHz
- SNR Test Aralığı: [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35] dB
- Gürültü Tabanı Seviyesi: -70 dBm



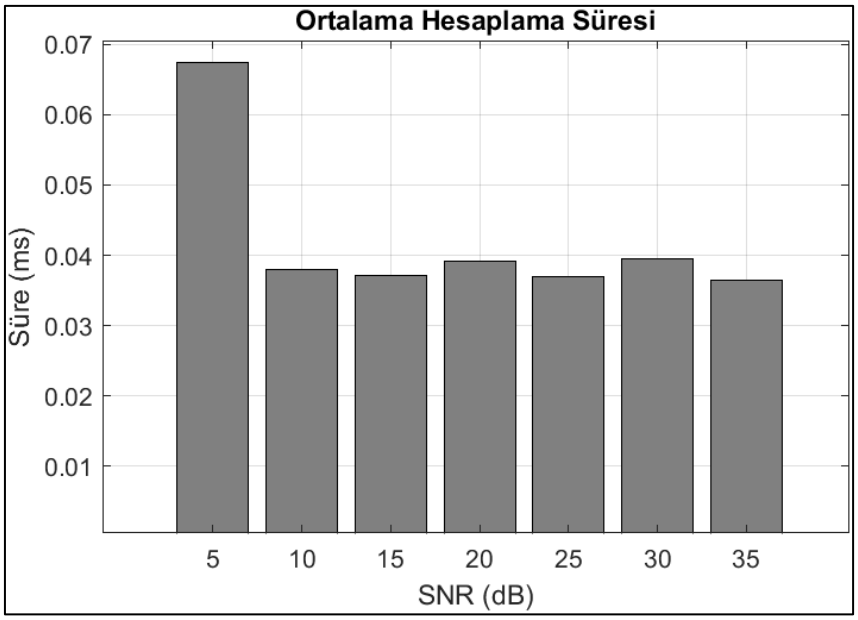
Şekil 4.1. Sinyal frekans spektrumu (SNR=35dB)

Çizelge 4.1. OMP SNR analizi

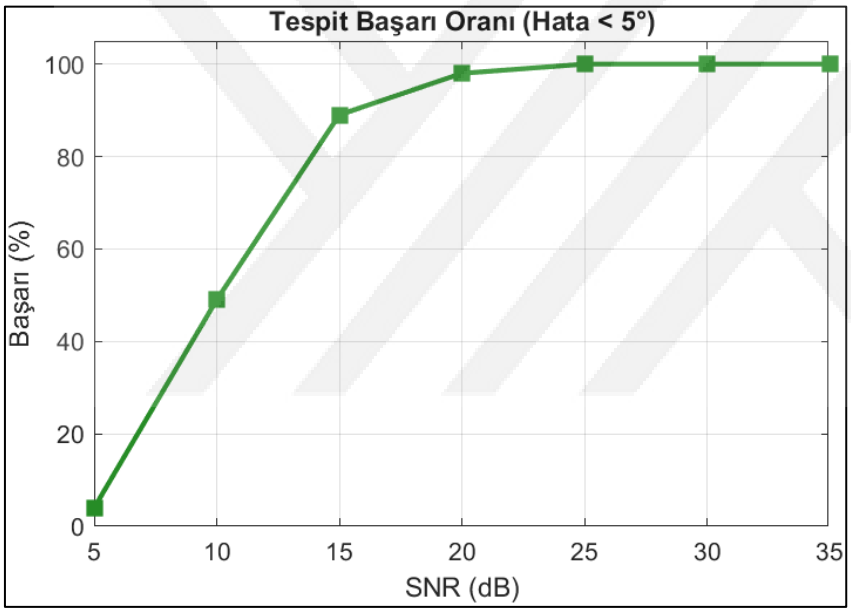
SNR(dB)	RMSE(deg)	Başarı(%)	Süre(ms)
5	108,584	4,0	0,0675
10	62,975	49,0	0,0379
15	7,896	89,0	0,0371
20	1,913	98,0	0,0391
25	0,893	100,0	0,0370
30	0,482	100,0	0,0396
35	0,354	100,0	0,0365



Şekil 4.2. SNR seviyelerine göre açı kestirim hatası (OMP)



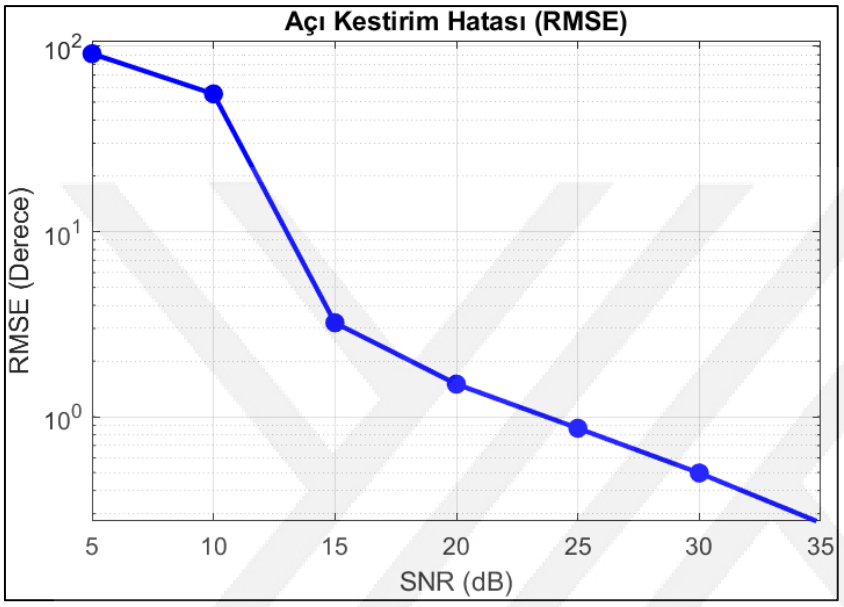
Şekil 4.3. SNR seviyelerine göre hesaplama süresi (OMP)



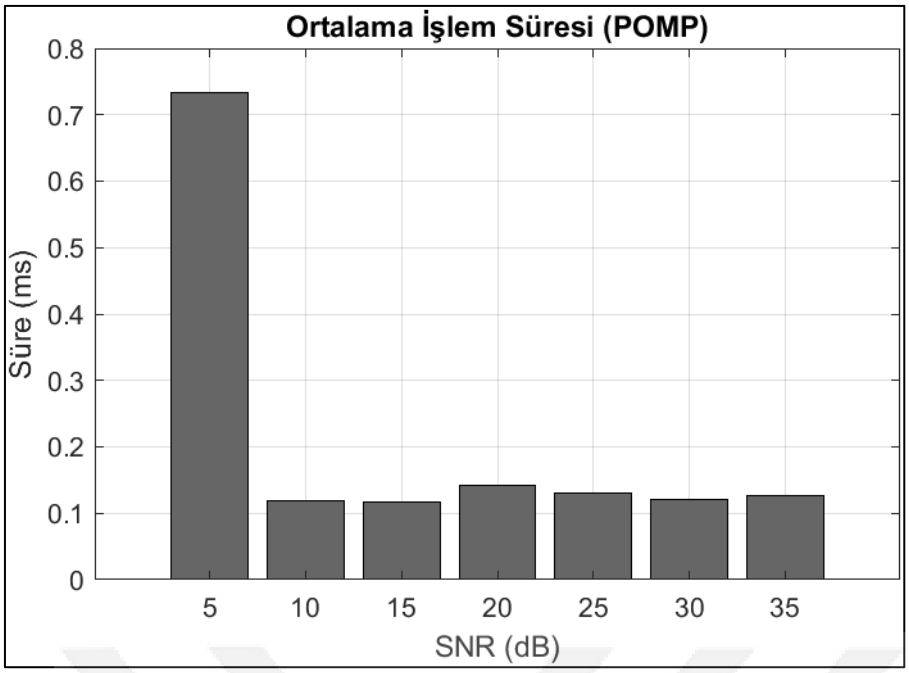
Şekil 4.4. SNR seviyelerine tespit başarı oranı (OMP)

Çizelge 4.2. POMP SNR analizi

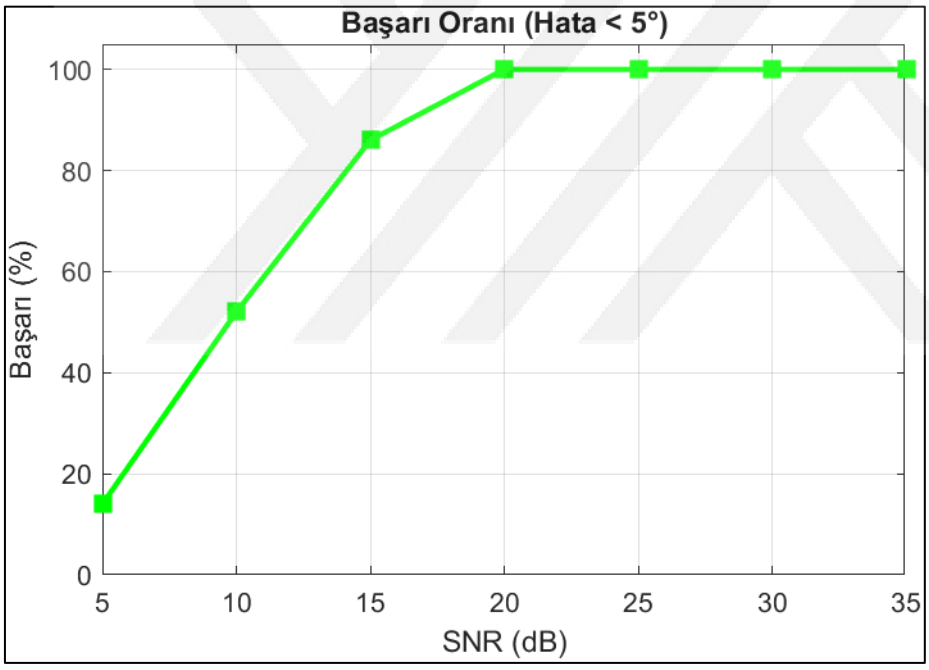
SNR(dB)	RMSE(deg)	Başarı(%)	Süre(ms)
5	91,2854	14,0	0,7332
10	55,4045	52,0	0,1183
15	3,2186	86,0	0,1161
20	1,5017	100,0	0,1429
25	0,8673	100,0	0,1311
30	0,4970	100,0	0,1212
35	0,2674	100,0	0,1261



Şekil 4.5. SNR seviyelerine göre açı kestirim hatası (POMP)



Şekil 4.6. SNR seviyelerine göre hesaplama süresi (POMP)



Şekil 4.7. SNR seviyelerine tespit başarı oranı (POMP)

Elde edilen sonuçlar yorumlandığında düşük SNR ile çalışıldığında (5-10dB) her iki algoritmanın da yön bulma başarımı belirgin bir şekilde düşük kalmaktadır. Ancak teorik olarak beklediğimiz gibi bu koşullarda POMP algoritması OMP algoritmasına kıyasla daha

kararlı bir davranış sergilemektedir. Orta SNR seviyelerinde ise (10-15dB) POMP algoritmasının performans artışı OMP algoritmasına kıyasla çok daha hızlı gerçekleşmiştir.

Tablolar incelenip POMP algoritmasının başarı oranı göz önüne alındığında OMP algoritmasına göre daha önce doygunluğa ulaştığı gözlemlenmektedir. Yüksek SNR bölgesinde ise (≥25 dB) her iki algoritma da neredeyse ideal performans sergilemektedir. Hesaplama süresi açısından POMP algoritması OMP'ye kıyasla daha yüksek işlem süresi gerektirmektedir. Hesaplama süresindeki bu fark, POMP algoritmasında uygulanan pertürbasyon ve yerel arama adımlarının doğal bir sonucudur.

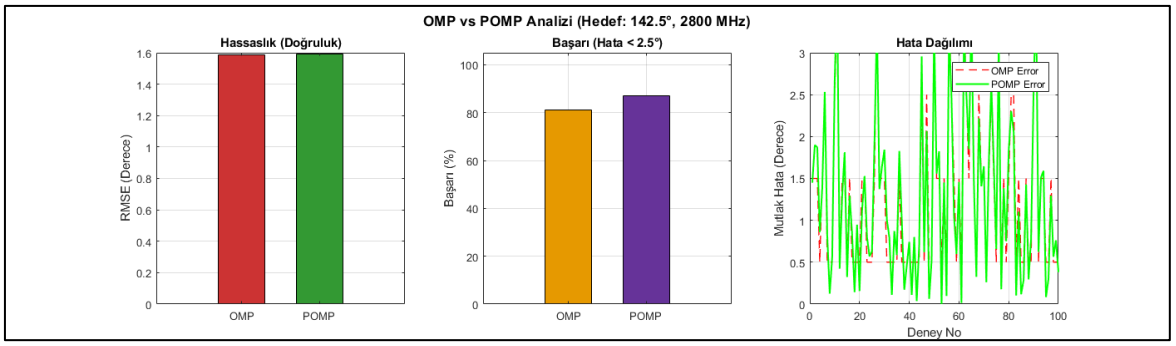
Genel değerlendirme yapıldığında, POMP algoritması özellikle düşük ve orta SNR koşullarında yüksek doğruluk ve daha düşük hata sağlayarak OMP'ye kıyasla daha avantajlı bir yapı sunmaktadır. Yüksek SNR ile çalışıldığında ise OMP'nin daha düşük hesaplama yükü sayesinde tercih edilebilir olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. Izgara Dışı (Off-Grid) Tespit Yeteneği Performans Analizi

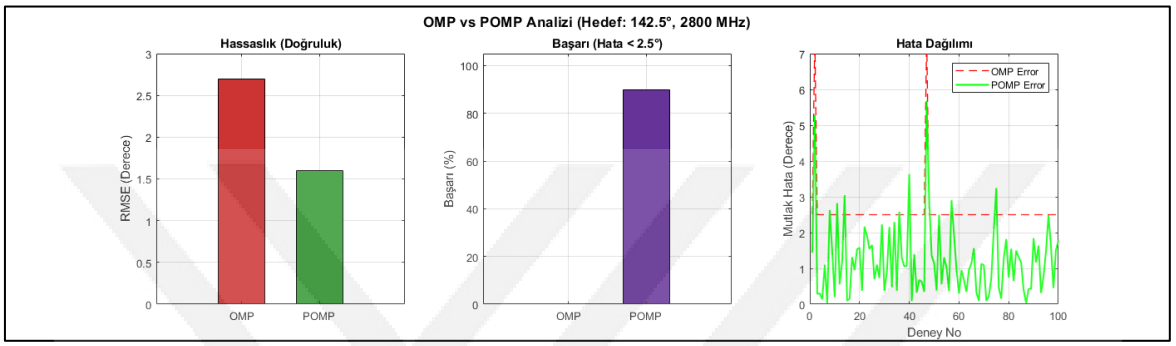
Bu adımda sözlük tabanlı seyrek sinyal geri kazanım algoritmalarındaki temel sınırlardan biri olan ızgara dışı yönlerin tespiti problemine odaklanılmıştır. Anten sözlüğü çözünürlüğünün kasıtlı olarak düşürüldüğü senaryolar altında POMP algoritmasının pertürbasyon mekanizması sayesinde tehdit sinyalinin geliş açısının ne kadar doğru temsil edebildiği irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, POMP algoritmasının ızgara dışı tehditler karşısındaki başarımını OMP algoritması ile karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Son adımda ise NOMP algoritmasının tespit başarısından ödün vermeden hesaplama süresinde sağladığı iyileştirme araştırılmıştır.

Ortak olmayan simülasyon parametreleri aşağıdaki gibidir:

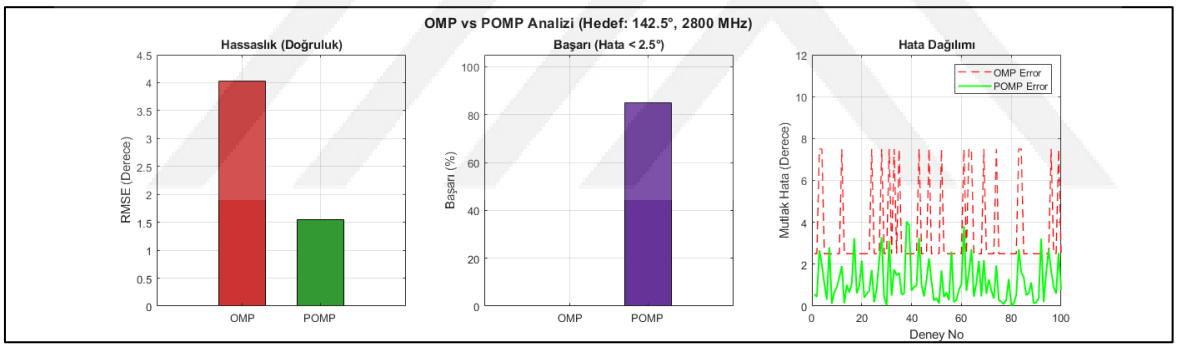
- Tehdit Açısı: 142,5 derece.
- Tehdit Frekansı: 2800 MHz
- SNR Test Aralığı : 20 dB
- Gürültü Tabanı Seviyesi: -70 dBm
- Anten Sözlüğü Çözünürlüğü: [1,5,10] derece



Şekil 4.8. Simülasyon sonuçları (Anten sözlüğü çözünürlüğü 1 derece)



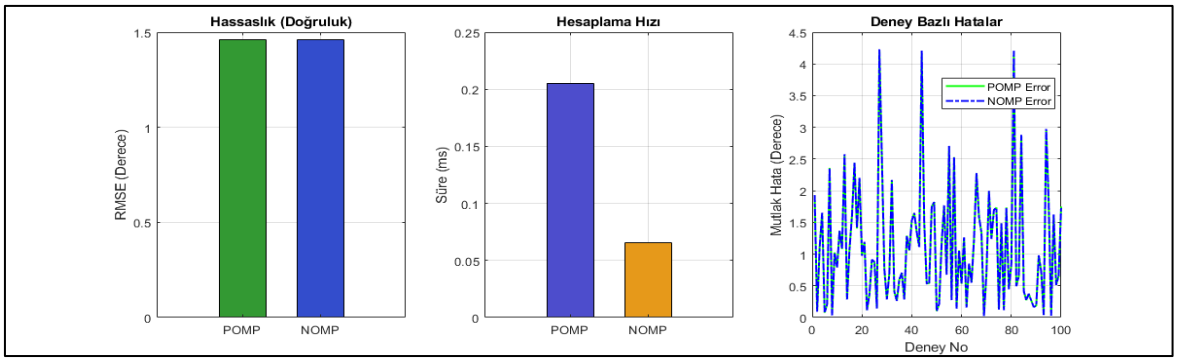
Şekil 4.9. Simülasyon sonuçları (Anten sözlüğü çözünürlüğü 5 derece)



Şekil 4.10. Simülasyon sonuçları (Anten sözlüğü çözünürlüğü 10 derece)

Çizelge 4.3. Sözlük çözünürlüğüne göre performans analizi

Algoritma	Çözünürlük(deg)	RMSE(deg)	Başarı Oranı(%)	Hesaplama Süresi(ms)
OMP	1	1,5843	81	0,0329
	5	2,6926	0	0,0261
	10	4,0311	0	0,0085
POMP	1	1,5913	87	0,3324
	5	1,5999	90	0,3244
	10	1,5533	85	0,3002



Şekil 4.11. Simülasyon sonuçları POMP/NOMP (Anten sözlüğü çözünürlüğü 10 derece)

Çizelge 4.4. POMP/NOMP performans analizi

Algoritma	Çözünürlük(deg)	RMSE(deg)	Başarı Oranı(%)	Hesaplama Süresi(ms)
POMP	10	1,4619	81	0,2054
NOMP		1,4619	87	0,0654

Veriler yorumlandığında:

- Yüksek çözünürlüklü sözlük kullanıldığında her iki algoritma da kabul edilebilir bir yön tahmin performansı sergilemektedir. Ancak RMSE değerleri ve tespit başarı oranları göz önüne alındığında yüksek çözünürlükte dahi POMP, OMP'ye kıyasla daha kararlı bir sonuç sunmuştur.
- Orta çözünürlüklü sözlük kullanıldığında algoritmalar arasındaki fark belirginleşmektedir. OMP algoritması 5 derece çözünürlükte %0 başarı oranına düşerek yön tahmin yeteneğini kaybetmiştir. POMP algoritması ise RMSE değerini neredeyse sabit tutarak yüksek bir tespit başarı oranı elde etmiştir. Bu sonuç, POMP algoritmasının pertürbasyon mekanizması sayesinde sözlük ızgarası dışındaki yönleri etkin biçimde telafi edebildiğini açıkça ortaya koymaktadır.
- Düşük çözünürlüklü sözlük kullanıldığında ise OMP algoritmasının performansının daha da kötüleştiği görülmektedir. Buna karşılık POMP algoritması çözünürlükteki ciddi düşüşe rağmen yüksek doğruluk seviyesini korumuştur.
- Hesaplama süresi açısından değerlendirme yapıldığında POMP algoritmasının, OMP'ye kıyasla daha yüksek işlem süresi gerektirdiği gözlemlenmiştir.

- POMP ve NOMP algoritmalarının performansı kıyaslandığında kestirim hatasının benzer olmasına karşın hesaplama süresi göz önüne alındığında NOMP algoritmasının ciddi bir avantaj sağladığı görülmüştür.

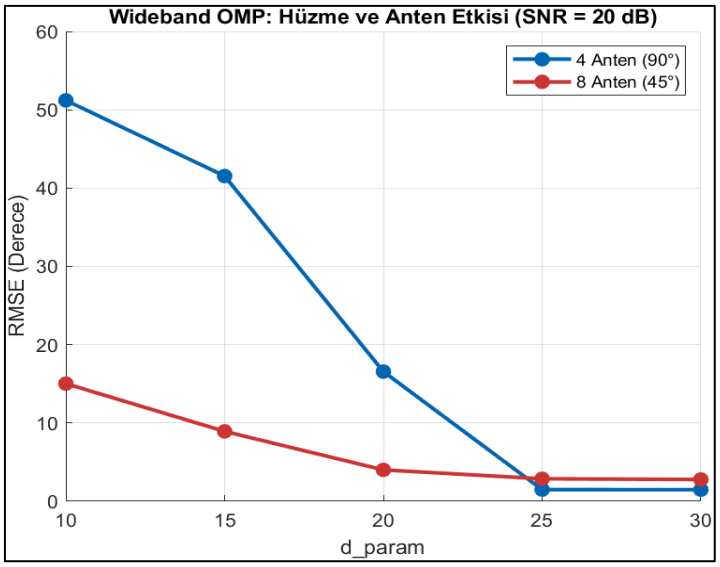
Genel değerlendirme olarak, OMP algoritması yüksek çözünürlüklü sözlüklerde kabul edilebilir sonuçlar üretse de, sözlük çözünürlüğü düştüğünde başarısı hızla azalmaktadır. Buna karşın POMP algoritması, düşük çözünürlüklü ve ızgara dışı yönlerin bulunduğu senaryolarda dahi yüksek doğruluk ve kararlılık sağlayarak elektronik destek sistemleri için daha uygun bir çözüm olduğunu göstermektedir. NOMP algoritması ise sağladığı hız avantajı ile POMP algoritmasına karşı tercih edilebilecektir.

4.3. Anten Sayısının Yön Bulma Performansına Etkisi

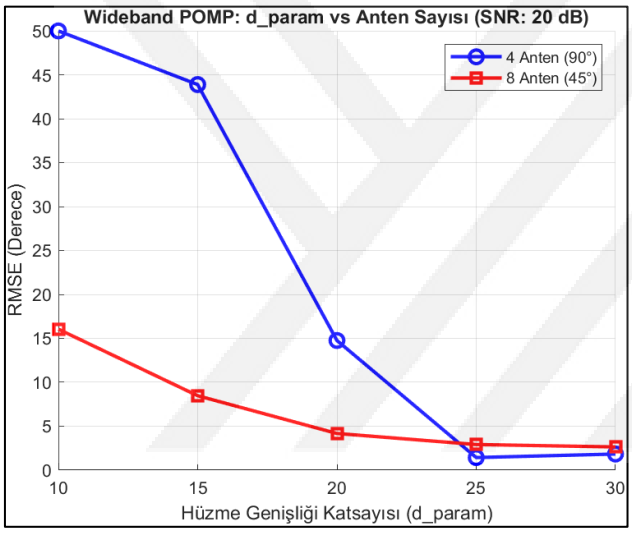
Bu alt bölümde, alıcı sistemde kullanılan anten sayısı ve kullanılan antenlerin hüzme genişliklerindeki değişimlerin yön bulma doğruluğu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Anten sayısının artırılmasıyla ölçüm uzayının zenginleşmesinin algoritmaların performansına nasıl yansıdığı incelenmiştir. Bu analiz, sistem tasarımı açısından performans-maliyet dengesi hakkında önemli çıkarımlar sunmayı hedeflemektedir.

Ortak olmayan simülasyon parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Tehdit Açısı: 47,5 derece.
- Tehdit Frekansı: 2800 MHz
- SNR Test Aralığı : 20 dB
- Gürültü Tabanı Seviyesi: -70 dBm
- Anten Sözlüğü Çözünürlüğü: [1,5,10] derece



Şekil 4.12. Hüzme genişliği katsayısı/anten sayısı açı kestirim hatası (OMP)



Şekil 4.13. Hüzme genişliği katsayısı/anten sayısı açı kestirim hatası (POMP)

Grafiklerden de görüldüğü gibi düşük anten hüzme genişliği katsayısı değerlerinde OMP algoritmasının hata seviyesinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Anten sayısının artırılması hem OMP hem de POMP algoritması için tüm hüzme genişliği katsayısı değerlerinde belirgin bir performans iyileşmesi sağlamıştır. Bu, anten sayısının artmasıyla beraber uzaysal örneklemenin iyileştiğini ve algoritmaların doğru atomları seçme olasılığının yükseldiğini göstermektedir. Hüzme genişliği katsayısı 20 değerini geçtikten sonra her iki algoritmada da RMSE değerlerinde hızlı bir düşüş olduğu görülmüştür, bu noktadan itibaren sistem, yeterli açısal çözünürlüğe ulaşmakta ve algoritmalar çok daha kararlı çalışmaktadır. Daha yüksek değerlerde ise 4 antenli yapı ile 8 antenli yapı arasındaki

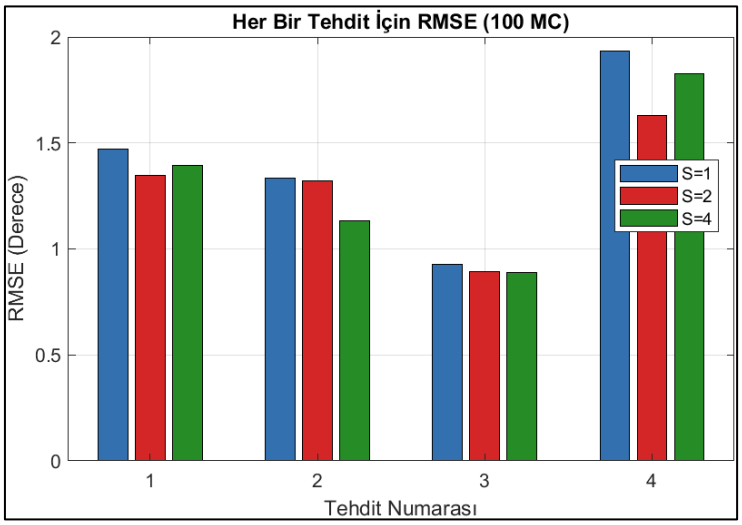
performans farkı neredeyse yok denecek kadar düşüktür. Bu durum, hüzme ayrımının yeterince yüksek olduğu senaryolarda anten sayısının ikincil bir faktör haline geldiğini göstermektedir.

4.4. GOMP Seçim Parametresi (S) Performans Analizi

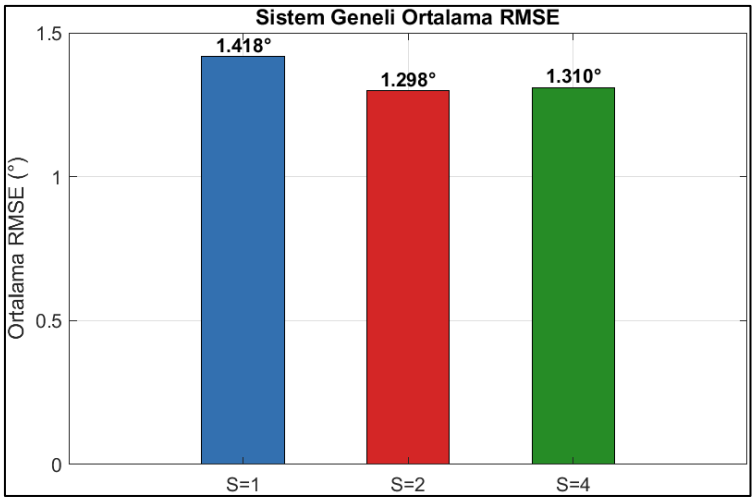
Bu bölümde GOMP algoritmasının her iterasyonda seçtiği atom sayısını belirleyen S parametresinin, yön bulma doğruluğu ve hesaplama süresi üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Farklı S değerleri için gerçekleştirilen simülasyonlarla birlikte algoritmanın hız-doğruluk dengesi incelenmiş ve uygun parametre seçiminin sistem performansına olan katkıları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, GOMP algoritmasının pratik uygulamalardaki parametre ayarlarına yön göstermeyi amaçlamaktadır. GOMP algoritmasının kullanımı çoklu tehdit içeren ortamlarda simüle edilmiştir, S parametresi 1 olarak seçildiğinde algoritma OMP algoritması gibi çalışmaktadır.

Ortak olmayan simülasyon parametreleri aşağıdaki gibidir:

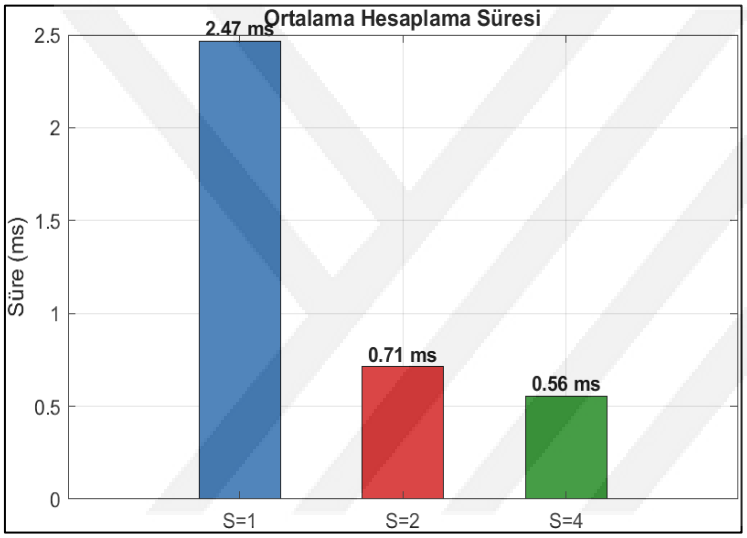
- Tehdit Açıları: [40, 140, 225, 323] derece.
- Tehdit Frekansları: [2750, 2850, 2950, 3050] MHz
- SNR Test Aralığı : 20 dB
- Gürültü Tabanı Seviyesi: -70 dBm



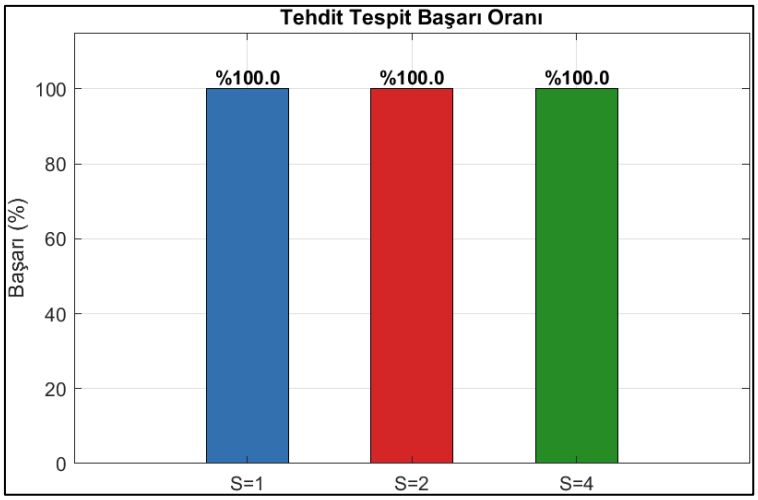
Şekil 4.14. S parametresine göre tehdit RMSE bilgileri



Şekil 4.15. S parametresine göre ortalama RMSE bilgileri



Şekil 4.16. S parametresine göre ortalama hesaplama süreleri



Şekil 4.17. S parametresine tespit başarı oranı

Simülasyon sonuçları incelendiğinde GOMP algoritmasının en çarpıcı avantajı hesaplama hızı üzerinde görülmüştür. GOMP algoritması çalıştırılırken S parametresinin arttırılması, çoklu tehdit bulunan ortamlarda tespit sürecini yaklaşık %75-80 oranında hızlandırmıştır. Bu durum, ED sistemlerinin gerçek zamanlı tepki verme kabiliyetini doğrudan artırır. Ayrıca RMSE değerleri incelendiğinde S parametresindeki değişimin hata değerleri üzerinde negatif bir etki oluşturmadığı gözlemlenmiştir. GOMP algoritmasındaki S parametresi, ED sistemleri için kritik olan "hız-doğruluk" dengesini optimize etmektedir. Seçim sayısının artması, iterasyon sayısını azaltır bu da dolaylı olarak işlem yükünü hafifletir. Çoklu tehdit içeren yoğun spektrum ortamlarında GOMP'un S parametresinin 2 veya daha yüksek seçilmesi, sistem başarımı için en efektif strateji olarak değerlendirilmektedir.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışması dahilinde gerçekleştirilen simülasyonlarda elde edilen sonuçlar, ED sistemlerinin yön bulmadaki performans seviyesinin sadece algoritma seçimine değil, aynı zamanda sistemin fiziksel parametrelerine de katı bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. Sistemimizin temelini oluşturan gauss tabanlı anten kazanç modeli, genlik karşılaştırmalı yöntemlerin karakterizasyonunda başarıyla kullanılmış; özellikle anten hüzme genişliğini kontrol eden katsayısının 20 eşiğini aşmasıyla RMSE değerlerinde görülen büyük iyileşme açısal çözünürlüğün sistemin geometrik sınırlarıyla olan doğrusal ilişkisini göstermiştir. Anten yerleşiminde 4 yerine 8 anten kullanılmasının OMP ve POMP algoritmaları için de doğruluğu artırması uzaysal örnekleme kapasitesinin artışıyla açıklanabilir; ancak hüzme ayrımının yeterince yüksek olduğu simülasyon senaryolarında anten sayısının ikincil bir faktör haline gelmesi, sistem tasarımı gerçekleştirilirken maliyet performans dengesinin kullanılan anten üzerinden optimize edilebileceğini kanıtlamaktadır.

Algoritmalar arası karşılaştırmada, POMP'un OMP'ye karşı özellikle düşük ve orta SNR seviyelerinde çok daha kararlı davranış sergilediği literatürdeki yorumlarla aynı doğrultuda gözlemlenmiştir. Izgara dışı tehdit tespit yeteneği göz önüne alındığında POMP'un sözlük çözünürlüğünün 10 derece gibi yüksek seviyelere çıkarıldığında bile RMSE değerinin neredeyse sabit tutarak yüksek doğruluğunu koruması, ED sistemlerinde sürekli karşılaşılan kalibrasyon hataları ve ızgara uyuşmazlıkları karşısında önerilen yöntemin sağlamlığını ortaya koymaktadır. Izgara uyuşmazlıklarına çözüm olarak önerilen bir diğer algoritma olan NOMP'un POMP algoritmasına kıyasla hesaplama süresinde ciddi bir kazanç sağladığı ölçülmüştür.

Çoklu tehdit ortamlarında test edilen GOMP algoritmasının performansı ise hız ve doğruluk arasındaki kritik dengeyi net bir şekilde ortaya koymuştur. GOMP algoritmasında seçim parametresi olarak kullanılan S değerindeki artışın 4 farklı tehditin tespit süresini 2,47ms'den 0,56ms'e düşürmesi yön kestiriminden ödün verilmeden elde edilen %77'lik bir hız kazanımı anlamına gelmektedir. Elde edilen bu sonuç gerçek zamanlı çalışan ED sistemlerinde GOMP'un iterasyon sayısını azaltarak hesaplama yükünü düşürme potansiyelini doğrulamaktadır. Buna karşın literatürde de tartışıldığı üzere, S değerinin gereğinden yüksek seçilmesi gürültü bileşenlerini yanlış alarm olarak destek kümesine

ekleme riski oluşturmaktadır. Bu sebeple GOMP algoritmasının kullanımında sistemin çalışma SNR'ına göre parametre optimizasyonu yapılması zorunlu hale gelmektedir.

Özetle bu tezde sunulan analizler; yüksek hız ihtiyacı olan yoğun tehdit ortamlarında GOMP'un yüksek hassasiyet ve model belirsizliği olan durumlarda ise POMP'un geleneksel yöntemlere göre ciddi bir performans üstünlüğü sağladığını sayısal verilerle kanıtlamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, modern ED sistemlerindeki en kritik işlevlerden biri olan yön bulma performansı, seyrek sinyal geri kazanım algoritmaları olan OMP, POMP, NOMP ve GOMP üzerinden detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, geleneksel genlik karşılaştırmalı yöntemlerin sınırlı kaldığı düşük SNR ve ızgara dışı tehdit senaryolarında, önerilen algoritmaların yüksek doğruluk ve sağlamlık gösterdiği sayısal verilerle gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlarda POMP algoritmasının üstünlüğü, pertürbasyon mekanizması sayesinde ızgara dışı hedeflerde standart OMP'ye göre çok daha kararlı bir davranış göstermesiyle kanıtlanmıştır. Düşük sözlük çözünürlüklerinde dahi doğruluğunu koruması, sistemin kalibrasyon hatalarına karşı direncini ortaya koymuştur. GOMP algoritmasının ise çoklu tehdit ortamlarında kullanılması, yön bulma doğruluğundan ödün vermeden işlem sürelerini standart OMP'ye kıyasla %75'in üzerinde bir oranla kısaltmıştır. Bu bulgu, gerçek zamanlı tepki süresinin hayati önem taşıdığı ED alıcıları için GOMP'un operasyonel bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için şu öneriler sunulmaktadır:

- Donanım Entegrasyonu: Teorik olarak elde edilen hız ve doğruluk kazanımlarının, FPGA veya DSP tabanlı gerçek zamanlı donanım platformları üzerinde doğrulanması, algoritmaların pratik ED sistemlerine geçişi için kritik bir adım olacaktır.
- Hibrit Yaklaşımlar: POMP'un hassas kestirim yeteneği ile GOMP'un çoklu hedef tespit hızını birleştiren hibrit seyrek geri kazanım yapılarının geliştirilmesi, daha karmaşık elektromanyetik ortamlarda performansı bir üst seviyeye taşıyabilir.
- Dinamik Senaryolar: Hareketli platformlar ve değişken frekanslı sinyallerin bulunduğu dinamik senaryoların analiz sürecine dahil edilmesi, algoritmaların operasyonel dayanıklılığını daha kapsamlı bir şekilde test etme imkânı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Neri, F. (1990). *Introduction to electronic defense systems* (1. Baskı). Norwood: Artech House, 290-331.

2. İpek, A. V. (2006). *Implementation of a direction finding algorithm on an FPGA platform*. Doctoral Dissertation, Middle East Technical University, Ankara.

3. Lipsky, S. E. (2003). *Microwave passive direction finding* (1. Baskı). Raleigh: SciTech Publishing, 1-11.

4. Orduyılmaz, A., Serin, M., Yıldırım, A., Ceyhan, K., ve Gürbüz, A. C. (2015, 16-19 May). *Hybrid phase amplitude direction finding method*. Paper presented at the 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya.

5. Sherman, S. M. (1984). *Monopulse principles and techniques* (1. Baskı). Norwood: Artech House, 15-25.

6. Gürel, A. E. (2020). *Elektronik destek sistemleri için gerçek zamanlı uygulanabilir tek darbe yön bulma algoritmaları*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

7. Schleher, D. C. (1999). *Electronic warfare in the information age* (1. Baskı). Norwood: Artech House, 175-185.

8. Roy, A., Vinoy, K. J., Martin, N., Mallégol, S., ve Quendo, C. (2022). Performance improvement of an archimedean spiral antenna for 2–18 GHz applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(7), 1383-1387.

9. Daum, F. (2008). Radar handbook, 3rd edition (M.I. Skolnik, Ed; 2008) [Book Review]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 23(5), 41.

10. Adamy, D. L. (2004). *EW 102: A second course in electronic warfare* (1. Baskı). Norwood: Artech House, 137-144.

11. Martino, A. D. (2012). *Introduction to modern EW systems* (1. Baskı). Norwood: Artech House, 231-239.

12. Evirgen, E. A. (2001). *Direction finding with a uniform circular array placed on a moving platform*. Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

13. Zeng, Z., Liu, J., ve Yuan, Y. (2024). A generalized Nyquist-Shannon sampling theorem using the Koopman operator. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 72, 3595-3610.

14. Candes, E. J., ve Wakin, M. B. (2008). An introduction to compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2), 21-30.

15. Mishra, A., Thakkar, F., Modi, C., ve Kher, R. (2012, 28 August-1 September). *ECG signal compression using compressive sensing and wavelet transform*. Paper presented at the 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego.

16. Shaik, C., RajaA, R., Kalapala, S. S., Lakshmi Nrusimhi, C. S., Devi Duth Kolusu, S. N., ve Polasi, P. K. (2022, 11-12 February). *A comprehensive review on compressive sensing*. Paper presented at the 2022 International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC), Salem.

17. Li, J., Wu, Z., Feng, H., Wang, Q., ve Liu, Y. (2014, 12-15 May). *Greedy Orthogonal Matching Pursuit algorithm for sparse signal recovery in compressive sensing*. Paper presented at the 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Montevideo.

18. Cevher, V., ve Baraniuk, R. (2008, 21-23 July). *Compressive sensing for sensor calibration*. Paper presented at the 2008 5th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Darmstadt.

19. Donoho, D. L. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4), 1289-1306.

20. Kronqvist, J., Bernal, D. E., Lundell, A., ve Grossmann, I. E. (2019). A review and comparison of solvers for convex MINLP. *Optimization and Engineering*, 20(2), 397-455.

21. Jiang, H., ve Zhang, X. (2022, 14-16 April). *A novel sparse signal reconstruction algorithm based on l0 minimization*. Paper presented at the 2022 International Conference on Wireless Communications, Electrical Engineering and Automation (WCEEA), Indianapolis.

22. Bian, S., ve Zhang, L. (2021, 14-16 April). *Overview of Match Pursuit algorithms and application comparison in image reconstruction*. Paper presented at the 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Dalian.

23. Mallat, S. G., ve Zhang, Z. (1993). Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(12), 3397-3415.

24. Karabulut, G. Z., Kurt, T., ve Yongacoglu, A. (2004, 26-29 September). *Angle of arrival detection by matching pursuit algorithm*. Paper presented at the IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall), Los Angeles.

25. Pati, Y. C., Rezaiifar, R., ve Krishnaprasad, P. S. (1993, 1-3 November). *Orthogonal matching pursuit: Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition*. Paper presented at the 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove.

26. Tropp, J. A., ve Gilbert, A. C. (2007). Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Information Theory*, 53(12), 4655-4666.

27. Teke, O., Gurbuz, A. C., ve Arikan, O. (2013). Perturbed orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(24), 6220-6231.

28. Ding, J., Chen, L., ve Gu, Y. (2013). Perturbation analysis of orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(2), 398-410.

29. Gurbuz, A. C., Yapici, Y., ve Guvenc, I. (2018, 20-24 May). *Sparse channel estimation in millimeter-wave communications via parameter perturbed OMP*. Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Kansas City.

30. Wang, J., Kwon, S., ve Shim, B. (2012). Generalized orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(12), 6202-6216.

31. Wang, J., ve Shim, B. (2011, 6-9 November). *Exact reconstruction of sparse signals via generalized orthogonal matching pursuit*. Paper presented at the 2011 Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), Pacific Grove.

32. Ceyhan, K. (2016). *Tek Darbe Pasif Yön Bulma Tekniklerinin Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

33. Gemma, M., Tafuto, A., Bartocci, M., ve Onori, D. (2019). Electronic warfare systems and their current issues. In S. Scotti ve F. Fresi (Eds.), *Photonics for radar networks and electronic warfare systems*. London: Institution of Engineering and Technology, 27-48.

34. Kuzdeba, S., Radlbeck, A., ve Anderson, M. (2018, 29 October-1 November). *Performance metrics for cognitive electronic warfare - electronic support measures*. Paper presented at the 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Los Angeles.

35. Malioutov, D., Çetin, M., ve Willsky, A. S. (2005). A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(8), 3010-3022.

36. Mamandipoor, B., Ramasamy, D., ve Madhow, U. (2016). Newtonized orthogonal matching pursuit: Frequency estimation over the continuum. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(19), 5066-5081.

37. Zhu, J., Han, L., Blum, R. S., ve Xu, Z. (2019). Multi-snapshot Newtonized orthogonal matching pursuit for line spectrum estimation with multiple measurement vectors. *Signal Processing*, 165, 175-185.



Gazili olmak ayrıcalıktır