

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEYREKLİK TABANLI SİNYAL GERİÇATIM VE  
GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**



**DOKTORA TEZİ**

**Sedat ÇAMLICA**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. İmam Şamil YETİK**

**EKİM 2017**

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **131217001** numaralı Doktora Öğrencisi **Sedat ÇAMLICA** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**SEYREKLİK TABANLI SİNYAL GERİÇATIM VE GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**" başlıklı tezi **31.10.2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. İmam Şamil YETİK** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Orhan ARIKAN (Başkan)** .....  
Bilkent Üniversitesi

**Prof. Dr. Çağatay CANDAN** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT**.....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Harun Taha HAYVACI** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Sedat ÇAMLICA

## ÖZET

Doktora Tezi

### SEYREKLİK TABANLI SİNYAL GERİÇATIM VE GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sedat ÇAMLICA

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İmam Şamil YETİK

Tarih: Ekim 2017

Seyrekliğe dayalı Sıkıştırılmış Algılama (SA) yöntemleri gerçek hayattaki uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulması ile birlikte son dönemlerde oldukça önem kazanmıştır. Sıkıştırılmış Algılama Nyquist örnekleme oranı altında azaltılmış ölçüm ile çalışmaya olanak sağlamaktadır. SA'nın kullanıldığı uygulamalarda genellikle sinyaller örneklenerek belirli bir çözünürlüğe sahip bir ızgara üzerinde ifade edilir. Izgara yapısı, sinyaller sürekli olduğunda performans kaybına sebep olan ızgara dışılık problemine sebep olur. Performans kaybına sebep olabilecek bir başka konu ise kalibrasyon ihtiyacıdır. Kalibrasyon ile faz ve genlik hatalarının bozucu etkisinin giderilmesi amaçlanır. Bu tezde, Sıkıştırılmış Algılama tabanlı ızgara dışılık altında sinyal kestirimi ve kalibrasyonu yapan özgün yöntemler geliştirilmiştir.

Tez çalışmaları kapsamında öncelikle Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemleri için nokta modda seyrekliğe dayalı görüntüleme ve otomatik odaklama yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır. SAR sistemlerinde insan yapımı seyrek sahnelerin görüntülenmesi bir gerekliliktir. Bunu yanında etkisi giderilmemiş platform hareketlerinden kaynaklanan faz hataları SAR görüntülerinde odak bozulmasına sebep olmaktadır. Ek olarak, görüntünün sonlu bir ızgara üzerinde ifade edilerek

oluşturulması ızgara dışılık problemine sebep olmaktadır, bu ise görüntüleme performansını düşüren bir diğer etkidir. İlk olarak bu problemleri ele alan nokta modda görüntüleme için platform hareketi kaynaklı faz hatalarını ve ızgara dışı hedef hatalarını çözebilen bir görüntüleme tekniği geliştirilmiştir. Geliştirilen teknik, azaltılmış ölçüm sayıları ile çalışabilmekte ve kaliteli seyrek SAR görüntüleri oluşturabilmektedir. Sentetik ve gerçek SAR sistemi verileri ile alınan sonuçlar geliştirilen yöntemin daha iyi SAR görüntüsü oluşturduğunu göstermektedir.

Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemleri genellikle önceden tanımlanması gereken parametreye ihtiyaç duyarlar. Yöntemlerin başarımı parametrenin doğru belirlenmesine bağlıdır. Dolayısıyla parametreden bağımsız bir otomatik durdurma kriterine ihtiyaç vardır. Tez çalışmaları kapsamında dışarıdan parametreye gereksinim duymayan bir nokta mod SAR görüntü oluşturma otomatik odaklama algoritması geliştirilmiştir. Algoritma çapraz doğrulama tabanlı otomatik durdurma kriteri kullanmaktadır.

Tez çalışmaları kapsamında daha sonra ızgara dışılık altında seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ızgara dışı sinyal kestirimi ve kalibrasyon işlemlerini iteratif bir şekilde yapmaktadır. Kör sensör kalibrasyonu için öncelikle çoklu ölçüm altında ızgara dışı sinyal kestirimi yapılmaktadır. Daha sonra faz ve genlik hatası kestirimi ve ardından kalibrasyon yapılmaktadır. Son olarak bu yöntem Grup Seyreklik ve yön bulmaya uyarlanarak ızgara dışı sinyaller için yön bulma ve kör sensör kalibrasyonu uygulamaları için kullanılmıştır. Bu yöntem ızgara dışı yön kestirimi yapılabilmekte ve aynı zamanda sensörler üzerindeki faz ve genlik hatası kör bir şekilde düzeltilebilmektedir. Sentetik olarak üretilen veriler ile yapılan benzetim çalışmalarında, geliştirilen yöntemlerin ızgara dışılık altında sinyal kestirimi ve kör sensör kalibrasyonu yüksek performans ile yapabildiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıkıştırılmış algılama, Izgara dışılık, SAR görüntüleme, Otomatik odaklama, Kör kalibrasyon.

## **ABSTRACT**

Doctor of Philosophy

**SPARSITY BASED SIGNAL RECONSTRUCTION AND IMAGING**

**METHODS**

Sedat ÇAMLICA

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrics and Electronics Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. İmam Şamil YETİK

Date: October 2017

Sparsity based Compressive Sensing (CS) methods have gained high importance, since they have many application areas in real life. CS makes it possible to operate under Nyquist rate. CS techniques generally discretize the signal space and assume that the signal is sparse on the discretized grid. Due to continuous nature of the signals, representing the signal on a discretized grid results in the off grid problem which causes performance degradation. Calibration performance is also another issue which can also cause performance degradation and thus must be addressed. Calibration aims to reduce the disruptive effects of the phase and the gain errors. In this thesis, novel Compressive Sensing based techniques are developed which are capable of the estimation of off grid signals and performing the calibration simultaneously.

The thesis studies are firstly concentrated on developing sparsity based on joint imaging and autofocus techniques of Synthetic Aperture Radar (SAR) Spotlight mode. In SAR systems, the imaging of manmade scenes is a necessity. In addition, uncompensated platform motion errors cause performance degradation by defocusing the images. Discretizing the image space and assuming that the scene is sparse on the discretized grid is also another error source which results in the off grid problem. A

novel Compressive Sensing based spotlight SAR imaging method is developed which is capable of simultaneously handling the off grid problem and phase errors due to uncompensated platform motion effects. The method solves the target reflectivities, platform induced phase errors and the off-grid target location perturbations iteratively. The technique allows reduced number of measurements and results in sparse SAR images. The results obtained by using both simulated and real SAR system data show that the proposed technique provides better SAR images.

Sparsity based SAR image reconstruction and autofocus techniques usually require a predefined parameter and their performance are dependent on the accurate choice of the parameter. The parameter value itself is dependent on the actual scene which is to be estimated. So, there is a need for an automatic stopping criterion. In the thesis studies, a parameter free SAR image reconstruction and autofocus technique is developed. It uses a automatic stopping criterion which is based on cross validation.

A sparsity based off grid blind sensor calibration method is also developed. This method performs the off grid signal reconstruction and calibration iteratively. For blind sensor calibration, the off grid signals are estimated first using multiple measurement sets. Then, using the reconstructed signals, the phase and the gain errors are estimated and calibrated. Lastly, this method is adopted to Group Sparsity and direction finding for the off grid signals. This method is capable of jointly off grid direction estimation and correction of the sensor phase and gain errors. By simulations studies using the synthetically generated data, it is shown that developed techniques can estimate jointly the off grid signals and perform blind calibration with high performance.

**Keywords:** Compressive sensing, Offgrid, SAR imaging, Autofocus, Blind calibration.

## TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, moral veren değerli danışman hocam Doç. Dr. İmam Şamil YETİK'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren, zor zamanlarımda bana destek olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Orhan ARIKAN'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bana çalıŐırken doktora yapma imkanı sunan değerli Őirketim ASELSAN'a teşekkür ederim.

Bana burs sağlayarak çalıŐırken doktora yapabilme imkanı veren TOBB ET'ye teşekkür ederim.

HerŐeyimi borçlu olduğum zor zamanlarımda her zaman yanımda olan biricik annem ve babama sevgi, saygı ve teŐekkürlerimi sunarım.

Son olarak, varlıkları ile sevgi ve neŐe kaynağım olan canlarım Arya ve Kaan'a, benden destek ve anlayıŐımı hiçbir zaman esirgemeyen değerli eŐim Gönül'e sonsuz sevgi ve teŐekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Amaç . . . . .	1
1.2 Güncel Durum . . . . .	2
1.2.1 Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma . . . . .	2
1.2.2 Seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu . . . . .	5
1.2.3 Sıkıştırılmış algılamanın kısa bir özeti . . . . .	7
1.3 Tezin Katkısı . . . . .	9
1.4 Izgara Dışı Sinyal Geriçatımı ve Kalibrasyonu . . . . .	11
1.5 Tezin Organizasyonu . . . . .	14
<b>2. IZGARA DIŞI SEYREK SAHNELER İÇİN SAR NOKTA MOD GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA VE OTOMATİK ODAKLAMA</b> . . . . .	<b>15</b>
2.1 Giriş . . . . .	15
2.2 Nokta SAR Modu Sinyal Modeli . . . . .	20
2.3 Seyrekliğe Dayalı Nokta Modda SAR Görüntüleme . . . . .	23
2.4 Seyrekliğe Dayalı Izgara Dışı Nokta Mod SAR Görüntüleme ve Otomatik Odaklama . . . . .	25
2.5 Benzetimler ve Deneysel Sonuçlar . . . . .	30
2.5.1 Nitel sonuçlar . . . . .	32
2.5.2 Nicel analizler . . . . .	37
2.5.3 Gerçek veri sonuçları . . . . .	44
2.5.4 Sonuç ve yorumlar . . . . .	46
2.6 Otomatik Durdurma ile Seyrek SAR Görüntü Oluşturma . . . . .	48
2.6.1 Önerilen yöntem . . . . .	49
2.6.2 Benzetimler . . . . .	51
2.6.3 Sonuç ve yorumlar . . . . .	52
<b>3. IZGARA DIŞI SEYREK KÖR SENSÖR KALİBRASYONU</b> . . . . .	<b>59</b>
3.1 Giriş . . . . .	59
3.2 Kör Sensör Kalibrasyonu Sinyal Modeli . . . . .	61
3.3 Seyrekliğe Dayalı Izgara Dışı Kör Sensör Kalibrasyonu . . . . .	62
3.4 Optimizasyon Probleminin Çözümü . . . . .	63
3.5 Faz ve Genlik Hatası Kestirimi . . . . .	66
3.6 Benzetimler . . . . .	67
3.6.1 Görsel sonuçlar . . . . .	68
3.6.2 Izgara dışılığa göre karşılaştırmalı benzetim sonuçları . . . . .	73

3.6.3 Genlik hata ortalamasına göre benzetim sonuçları . . . . .	74
3.6.4 Genlik hata standart sapmasına göre benzetim sonuçları . . . . .	76
3.6.5 Faz De-Kalibrasyon değerine göre benzetim sonuçları . . . . .	79
3.6.6 Seyreklik seviyesine göre benzetim sonuçları . . . . .	83
3.6.7 Ölçüm sayısına göre benzetim sonuçları . . . . .	85
3.6.8 Sensör sayısına göre benzetim sonuçları . . . . .	85
3.6.9 Seyreklik seviyesi seçiminin sonuca etkisi . . . . .	87
3.7 Sonuç ve Yorumlar . . . . .	93
<b>4. IZGARA DIŞI YÖN BULMA VE KÖR KALİBRASYON . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1 Giriş . . . . .	95
4.2 Yön Bulma Sinyal Modeli . . . . .	96
4.3 Kör Kalibrasyon Sinyal Modeli . . . . .	97
4.4 Izgara Dışılık Altında Yön Bulma ve Kör Kalibrasyon Yöntemi . . . . .	98
4.5 Optimizasyon Probleminin Çözümü . . . . .	99
4.6 Faz ve Genlik Hatası Kestirimi . . . . .	102
4.7 Benzetimler . . . . .	102
4.7.1 SGO'na göre benzetim sonuçları . . . . .	104
4.7.2 Ölçüm sayısına göre benzetim sonuçları . . . . .	105
4.7.3 Genlik hata ortalamasına göre benzetim sonuçları . . . . .	108
4.7.4 Genlik hata standart sapmasına göre benzetim sonuçları . . . . .	111
4.7.5 Faz hatasına göre benzetim sonuçları . . . . .	111
4.7.6 Çözünürlük analizi benzetim sonuçları . . . . .	114
4.8 Sonuç ve Yorumlar . . . . .	117
<b>5. SONUÇ VE YORUMLAR . . . . .</b>	<b>123</b>
<b>KAYNAKLAR . . . . .</b>	<b>126</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ . . . . .</b>	<b>133</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1: Nokta SAR modu ölçüm toplama geometrisi . . . . .	17
Şekil 2.2: SAR görüntüleme sonuçları, ızgara üzeri sentetik sahne . . . . .	34
Şekil 2.3: SAR görüntüleme sonuçları, ızgara dışı sentetik sahne . . . . .	35
Şekil 2.4: SAR görüntüleme sonuçları, iki adet ızgara dışı noktasal reflektör. . . . .	36
Şekil 2.5: PA-SAR ve OMP karşılaştırma sonuçları . . . . .	38
Şekil 2.6: Farklı SGO seviyeleri için hesaplanan metrikler . . . . .	40
Şekil 2.7: Farklı SGO seviyeleri için hesaplanan metrikler . . . . .	41
Şekil 2.8: Farklı senaryolar için TTM sonuçları . . . . .	42
Şekil 2.9: Çözünürlük performansı analizi . . . . .	43
Şekil 2.10: Gerçek SAR Sistemi verisi görüntüleme sonuçları . . . . .	45
Şekil 2.11: Gerçek veri için faz hatası kestirimleri . . . . .	46
Şekil 2.12: PA-SAR otomatik odaklama ve görüntüleme sonuçları . . . . .	47
Şekil 2.13: Farklı SGO değerleri için benzetim sonuçları . . . . .	53
Şekil 2.14: Farklı SGO değerleri için benzetim sonuçları . . . . .	54
Şekil 2.15: Farklı ölçüm oranları için benzetim sonuçları . . . . .	55
Şekil 2.16: Farklı ölçüm oranları için benzetim sonuçları . . . . .	56
Şekil 2.17: AOMP - Gerçek SAR sistemi verisi görüntüleme sonuçları . . . . .	57
Şekil 3.1: Izgara üzeri durum için sonuçlar . . . . .	69
Şekil 3.2: Izgara üzeri durum için sonuçlar . . . . .	70
Şekil 3.3: Izgara dışı durum için sonuçlar . . . . .	71
Şekil 3.4: Izgara dışı durum için sonuçlar . . . . .	72
Şekil 3.5: Izgara üzeri durum için SGO'na göre sonuçlar . . . . .	74
Şekil 3.6: Izgara üzeri durum için SGO'na göre sonuçlar . . . . .	75
Şekil 3.7: Izgara dışı durum için SGO'na göre sonuçlar. . . . .	76
Şekil 3.8: Izgara dışı durum için SGO'na göre sonuçlar. . . . .	77
Şekil 3.9: Izgara dışı durum için SGO'na göre sonuçlar - Yakınlaştırılmış. . . . .	78
Şekil 3.10: Genlik ortalama De-Kalibrasyon değerine göre sonuçlar . . . . .	79
Şekil 3.11: Genlik ortalama De-Kalibrasyon değerine göre sonuçlar . . . . .	80
Şekil 3.12: Genlik De-Kalibrasyon standart sapma değerine göre sonuçlar . . . . .	81
Şekil 3.13: Genlik De-Kalibrasyon standart sapma değerine göre sonuçlar . . . . .	82
Şekil 3.14: Faz De-Kalibrasyon seviyesine göre sonuçlar . . . . .	83
Şekil 3.15: Faz De-Kalibrasyon seviyesine göre sonuçlar . . . . .	84
Şekil 3.16: Seyreklik seviyesine göre sonuçlar . . . . .	85
Şekil 3.17: Seyreklik seviyesine göre sonuçlar . . . . .	86
Şekil 3.18: Ölçüm sayısına göre sonuçları . . . . .	87
Şekil 3.19: Ölçüm sayısına göre sonuçları . . . . .	88
Şekil 3.20: Sensör sayısına göre sonuçlar . . . . .	89
Şekil 3.21: Sensör sayısına göre sonuçlar . . . . .	90

Şekil 3.22: Hatalı seyreklik seviyesine göre sonuçlar . . . . .	91
Şekil 3.23: Hatalı seyreklik seviyesine göre sonuçlar . . . . .	92
Şekil 4.1: Kalibrasyon öncesi ve sonrası MUSIC Spektrumları . . . . .	104
Şekil 4.2: SGO'na göre sonuçlar . . . . .	105
Şekil 4.3: SGO'na göre sonuçlar . . . . .	106
Şekil 4.4: SGO'na göre sonuçlar . . . . .	107
Şekil 4.5: Snapshot sayısına göre sonuçlar . . . . .	108
Şekil 4.6: Snapshot sayısına göre sonuçlar . . . . .	109
Şekil 4.7: Snapshot sayısına göre sonuçlar . . . . .	110
Şekil 4.8: Genlik hatası ortalama değerine göre sonuçları . . . . .	111
Şekil 4.9: Genlik hatası ortalama değerine göre sonuçları . . . . .	112
Şekil 4.10: Genlik hatası ortalama değerine göre sonuçları . . . . .	113
Şekil 4.11: Genlik hatası standart sapma değerine göre sonuçlar . . . . .	114
Şekil 4.12: Genlik hatası standart sapma değerine göre sonuçlar . . . . .	115
Şekil 4.13: Genlik hatası standart sapma değerine göre sonuçlar . . . . .	116
Şekil 4.14: Faz hatası değerine göre sonuçlar . . . . .	117
Şekil 4.15: Faz hatası değerine göre sonuçlar . . . . .	118
Şekil 4.16: Faz hatası değerine göre sonuçlar . . . . .	119
Şekil 4.17: Çözünürlük analizi . . . . .	120
Şekil 4.18: Çözünürlük analizi . . . . .	121
Şekil 4.19: Çözünürlük analizi . . . . .	122

## KISALTMALAR

<b>AOMP</b>	: Otomatik Odaklamalı Dikey Eşleşme Arama
<b>CCAL</b>	: Eksiksiz Kalibrasyon (Complete Calibration)
<b>C-OMP</b>	: Kör Kalibrasyonlu Dikey Eşleşme Arama
<b>C-OMP-DF</b>	: Yön bulma ile Kör Kalibrasyonlu Dikey Eşleşme Arama
<b>DF</b>	: Yön Bulma
<b>EMMP</b>	: Beklenti Maksimizasyonlu Eşleşme Arama
<b>HAO</b>	: Hedef Arkaplan Oranı
<b>MUSIC</b>	: Çoklu Sinyal Sınıflandırma (Multiple Signal Classification)
<b>OKS</b>	: Ortalama Karesel Hata
<b>PA-SAR</b>	: Pertürbasyona Dayalı Otomatik Odaklama SAR
<b>PC-OMP</b>	: İzgara Dışı Kör Kalibrasyonlu Dikey Eşleşme Arama
<b>PC-OMP-DF</b>	: Yön Bulma ile PC-OMP
<b>PGA</b>	: Faz Gradyeni Otomatik Odaklama
<b>SA</b>	: Sıkıştırılmış Algılama (Compressive Sensing)
<b>SAR</b>	: Sentetik Açıklıklı Radar
<b>SBA</b>	: Seyreklik Tabanlı Otomatik Odaklama
<b>SDA</b>	: Seyreklik Kullanan Otomatik Odaklama
<b>SGO</b>	: Sinyal Gürültü Oranı
<b>TTM</b>	: Toprak Taşıma Mesafesi

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler Açıklama

<b>A</b>	Ölçüm model matrisi
<b>a</b>	Taban vektörü
<b>B</b>	İterasyon güncellemeleri matrisi
<b>C</b>	SAR ölçüm kerneli matrisi
<b>F</b>	DFT matrisi
<b>G</b>	Eşlenik SAR projeksiyon operatörü
<b>g</b>	Eşlenik SAR projeksiyon taban vektörü
<b>p</b>	Histogram vektörü
<b>r</b>	Artık değer vektörü
<b>T</b>	OMP seçilen atom kümesi
<b>u</b>	İterasyon güncellemeleri vektörü
<b>W</b>	SDA iterasyon matrisi
<b>w</b>	Toplamsal gürültü matrisi
<b>x</b>	Sinyal vektörü
<b>y</b>	Ölçüm vektörü
<b>0</b>	Sıfır vektörü
<b><math>\theta</math></b>	Pertürbasyon parametre vektörü
<b><math>\mu</math></b>	İterasyon adım boyu
<b><math>\Phi</math></b>	Diyagonal faz hatası matrisi
<b><math>\phi</math></b>	Faz hatası
<b><math>\Psi</math></b>	Ölçüm model matrisi
<b><math>\alpha</math></b>	Sinyal karmaşık genlik vektörü

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Amaç

Sıkıştırılmış Algılama (SA, Compressive Sensing) son yıllarda oldukça önem kazanan bir alandır. Sıkıştırılmış Algılama ile Nyquist oranının altında azaltılmış örnekleme yapılarak başarılı bir şekilde sinyal geriçatımı yapılabilir [1, 2]. Bunun yapılabilmesi için sinyalin belirli tabanda seyrek olarak ifade edilebilmesi, bir başka deyişle bir tabanda sıkıştırılabilir olması ve ölçüm modeli matrisinin Kısıtlı İzometri Özelliği (Restricted Isometry Property, RIP) gibi belirli özelleri sağlaması gerekmektedir. Bu şartlar sağlandığında SA yöntemleri ile sinyal geriçatımı yapılabildiği gösterilmiştir [1–3]. Gerçek hayattaki birçok uygulamada sinyaller sıkıştırılabilir olduğundan SA'ya dayalı yöntemler önem kazanmıştır. Sıkıştırılmış Algılamanın kullanım alanlarından bazıları; veri sıkıştırma, kanal kodlama/kestirimi, ters problemler, optik görüntüleme, manyetik rezonans görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging, MRI) gibi medikal uygulamalar, sismik görüntüleme, çeşitli radar uygulamaları, Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) ile görüntüleme, analog dijital çeviriciler, spektrum kestirimi şeklinde sıralanabilir [4–7].

Gerçek hayatta kullanılan sistemlerde verimli çalışma kaygısıyla gerçekleştirilen uygulamalarda sinyaller bir ızgara üzerinde varsayılarak işlem yapılmaktadır. Böylelikle sistemlerin hafıza ve işlemsel karmaşıklık isterlerinin kısıtlı kaynaklarla karşılanabilmesi amaçlanmaktadır. Sinyallerin sürekli bir domende olması ise bu sistemlerin pratikteki sinyal işleme uygulamalarında performans kaybına sebep olmaktadır. Bu durum ızgara dışılık problemi olarak adlandırılır. Gerçek hayatta kullanılan sistemlerin bir diğer gereği de kalibrasyon ihtiyacıdır. Kalibrasyon yapılmadığı durumda sistem performansları düşmekte, zamanla işlevlerini yerine getiremez hale gelebilmektedirler. Kalibrasyon ihtiyacına yönelik çözümler sistemlerin karmaşıklığını ve maliyeti arttırmaktadır.

Bu tez çalışmaları kapsamında, bu problemleri çözmeye yönelik, seyrekliğe dayanan ızgara dışılık altında sinyal geriçatımı ve kalibrasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Öncelikle nokta modda SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama problemi üzerinde durulmuştur. Daha sonra ızgara dışılık altında sinyal geriçatımı ve kör kalibrasyon yeteneğine sahip bir yöntem geliştirilmiştir. Son olarak bu yöntem yön bulmaya ve grup seyrekliğe dayalı çalışmaya uyarlanmıştır.

## **1.2 Güncel Durum**

Bu bölümde tez kapsamında incelenen konuların güncel durumları anlatılmaktadır. Öncelikle sıkıştırılmış algılama tabanlı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemleri anlatılacaktır. Bu yöntemlerin ızgara dışılığı ele almadığı, ancak platform hareketinden kaynaklı faz hatlarını düzeltme işlemini görüntü oluşturma ile birlikte yaptıklarından bahsedilecektir. Daha sonra bu yöntemlerdeki parametreye bağımlılık konusuna değinilecektir. Son olarak seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu yöntemlerinden bahsedilecek ve bunların ızgara dışılıktan kaynaklanan hataları dikkate almadığı belirtilecektir.

### **1.2.1 Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma**

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) [8], üzerinde bulunduğu hava platformunun hareketi sırasında birden fazla radar darbesinden toplanan ölçümleri işleyerek geniş bir sentetik açıklık oluşturur, bunun sonucunda alınan veriler işlenerek görüntüsü oluşturulmak istenen alanın yüksek çözünürlüklü görüntüsü elde edilir. Yanca ve menzilde yüksek çözünürlük vermesi, olumsuz hava koşullarına dayanıklılığı SAR'a önem kazandırmış ve çeşitli konularda kullanımını olanaklı kılmıştır. Çevre gözetleme ve arazi haritalama gibi sivil uygulamaların yanında gözetleme ve bilgi toplama gibi askeri alanlarda da kullanılmaktadır. Nokta modu, şerit modu ve ters SAR modu genel olarak kullanılan SAR modlarıdır [9–11]. Nokta modunda SAR radarı anteni uçuş süresince yer yüzeyindeki (görüntüsü oluşturulmak istenen) aynı bölgeye baktırılır. Aynı bölgeden farklı açılardan veri toplanmış olunur. Nokta modunda, diğer SAR modlarına göre daha yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek



mümkündür.

Sıkıştırılmış Algılamaya dayalı yöntemler ile SAR sistemlerinde alternatif çözümler uygulanabilir. Klasik SAR görüntüleme yöntemlerinin aksine, SA teknikleri seyrek sahneler için Nyquist örnekleme oranının altında çalışabilmektedir [1]. Burada görüntüsü oluşturulmak istenen sahne bilinen bir tabanda seyrek olmalıdır. SA tekniklerinin özellikleri ve radarda olası uygulama alanlarının önemi ve bunların oluşturabileceği avantajlar dolayısıyla, SA teknikleri son yıllarda radar ve SAR alanlarında ilgi çekmiştir. SA tabanlı radar ve SAR uygulamaları konusunda kapsamlı literatür bilgisi, bu konu hakkındaki araştırma ve değerlendirme çalışmalarında bulunabilir [7, 12].

Sahnenin seyrek olarak ifade edilebildiği bilinen bir tabanda bazı bilinen şartlar sağlandığında, SA teorisi seyrek sahneler altında kararlı sonuçların oluşturulmasını garanti eder [13]. Sentetik açıklık oluşturulabilmesi için, görüntüsü oluşturulmak istenen alan ile SAR platformu arasındaki görece konum bilgilerinin (yön, uzaklık gibi) hatasız olarak bilinmesi gerekmektedir. Diğer taraftan, navigasyon sistemleri her ne kadar yüksek doğrulukta konum ve yönelim bilgisi sağlasa da, platform konumu bilgisinde belirsizlikler olması kaçınılmazdır. Bu belirsizlikler, ölçülen SAR sinyaline faz hataları olarak yansımaktadır. Görüntü düzleminin bir ızgara üzerinde modellenmesi ve yansıtıcıların ızgara üzerinde olduğu varsayımı gibi sistem modelleme hataları da faz uyumsuzluğuna neden olur. Toplam faz hatası SAR görüntülerinde bozulmaların temel sebebidir. Bu durum özellikle yanca yönünde ulaşılabilecek performans limitler.

SA tabanlı SAR görüntü oluşturma ve odaklama teknikleri, sistem modeli ve veriyi farklı türde optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla, Faz Eğimi Otomatik Odaklama (Phase Gradient Autofocus, PGA) [14] yöntemindeki gibi görüntü oluşturulduktan sonra otomatik odaklama yapmak yerine, bu tekniklerde otomatik odaklama işlemi görüntü oluşturma ile birlikte yapılır. Seyrekliği kullanan otomatik odaklama (Sparsity Driven Autofocus, SDA) yöntemi [15]'da önerilmiştir, burada bir optimizasyon problemi çözülerek görüntü oluşturulmakta ve otomatik odaklama yapılmaktadır. Maliyet fonksiyonu bir veri doğruluğu terimi ve bir düzenleme parametresinden oluşmaktadır. Düzenleme parametresi görüntünün  $\ell_1$

normudur. Optimizasyon probleminin çözümünde, görüntü ve faz hatası iteratif olarak birbirinden ayrı minimize edilerek belirlenir. Benzer olarak [16]'de de optimizasyon problemi çözülerek görüntüleme yapılır. [16]'de, oluşturulan görüntünün  $\ell_1$  normunun belirli bir eşiğin altında kalması şartı ile artık hata minimize edilmeye çalışılır. [17]'de beklenti maksimizasyonuna dayalı eşleşme arama (Expectation Maximization Matching Pursuit, EMMP) tabanlı iteratif bir SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemi verilmiştir. [17]'de görüntünün seyreklik seviyesinin ( $\ell_0$  normunun) belirli bir eşikten düşük olması kısıtı altında veri doğruluğu terimi minimize edilmeye çalışılır. [15] ve [16]'de iteratif bir şekilde öncelikle tüm görüntü oluşturulur ve ardından faz hatası kestirilerek otomatik odaklama yapılır. EMMP'de ise eşleşme arama prosedürünün içerisinde atomlar seçildikçe faz hatası kestirimi yapılır. Diğer teknikler [18–21] ise problemi ufak varyasyonlar ile ele alırlar.

Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma teknikleri [15–21], görüntü düzlemini ayrıklaştırır ve bir ızgara üzerinde ifade ederler. Bu durum, yansıtıcıların sürekli konumlu olduğu gerçek hayatta, ızgara dışılık problemine sebep olur. Bu ise görüntü performansını olumsuz etkiler. Bu tezde bu problemin çözümüne yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Literatürdeki Sıkıştırılmış Algılama tabanlı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemleri [15–21] incelendiğinde Nokta Modda SAR görüntü oluşturma yöntemini genellikle bir optimizasyon problemi olarak ele aldıkları görülmektedir. Bu optimizasyon problemi ise genel yaklaşım ile iteratif bir şekilde çözülmektedir [15–17]. İterasyon içerisinde öncelikle görüntü oluşturulmakta, daha sonra faz hatası kestirimi ve düzeltilmesi yapılmaktadır. Daha sonra tekrar görüntü oluşturularak iterasyon bir durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. Bu yöntemler değerleri önceden belirlenmesi gereken parametrelere ihtiyaç duymaktadırlar. Yöntemlerin performansı ise ihtiyaç duydukları parametrelerin doğru seçilmesine doğrudan bağlıdır. Bir parametre değerinde görüntü oluşturma performansı düşükken, aynı girdiler ve algoritma ile başka bir parametre değerinde görüntü oluşturma performansı iyileşebilmektedir. Parametrelerin doğru değerinin belirlenmesi ise görüntünün kendisine bağlıdır. Parametrelerin doğru belirlenebilmesi için görüntü

bilinmelidir, ancak bu yöntemler ise görüntü oluşturabilmek için önceden seçilmesi gereken parametrelere ihtiyaç duymaktadırlar.

Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma tekniklerinin [15–17] önceden tanımlanması gereken parametreye ihtiyaç duyması, bu yöntemlerin gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında ele alınan bir diğer konu ise parametreden bağımsız bir SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama tekniği geliştirilmesidir.

### **1.2.2 Seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu**

Dağıtık sensör ya da radar ağlarında, sistemlerin konumları ve diğer bazı sistem parametrelerinin değerleri tam olarak bilinmesi oldukça güçtür. Bu durum sensörlerde faz ve genlik bozulmalarına sebep olabilir [22, 23]. Mikrofon dizilerinde de mikrofonların frekans yanıtlarındaki farklılıktan dolayı kalibrasyon ihtiyacı vardır [24].

Sensör ya da radar ağlarında, kalibrasyon yapılabilmesi için, kalibrasyon yapılmak istenen kanala ayrıca bir kalibrasyon hattı oluşturulması gerekebilir. Bunun haricinde bilinen bir sinyal yardımıyla da kılavuzlu (guided) kalibrasyon yapılabilir. Bu işlemler sistemlerin karmaşıklığını ve maliyetini arttırmaktadır. Diğer taraftan, sensör ya da radar ağlarında olduğu gibi kalibrasyon ihtiyacı olan sistemlerde rehbersiz/kör (unguided, blind) kalibrasyon yöntemlerinin kullanılabilmesinin sistemlerin bakım/onarım maliyetlerini azaltabileceği gibi bakım/onarımı kolaylaştırabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca kalibrasyonun yapılmaması kestirilen parametrelerin değerlerinde önemli hatalara yol açabilir. Bu durum Kör Sensör Kalibrasyonunun (Blind Sensor Calibration) önemini vurgulamaktadır.

Literatür incelendiğinde Kör Sensör Kalibrasyonu üzerine farklı çalışmaların olduğu görülmektedir. Çalışma [25]'de seyrekliğe dayalı konveks optimizasyon yöntemlerini kullanan kör sensör kalibrasyonu yöntemleri geliştirilmiştir. Sinyal geri çatımı ve kalibrasyon işlemi eş zamanlı olacak yapılmaktadır. Faz ve genlik kalibrasyonu işlemleri kör bir şekilde birlikte ya da ayrı yapılabilmektedir. Bir diğer makalede [22], olağan sensör ölçümleri kullanılarak sensör ağlarının kör kalibrasyonu

yapılmaktadır. Bir diğey yayın olan [23]'de konumları bilinen yayın kaynakları kullanarak sensör ağı kalibrasyonu yapılmaktadır. Ağdaki sensörlerin konumları, faz ve genlik bozulmalarının yanı sıra sensörler arası ortak eşleşme (mutual coupling) değerleri de belirlenmektedir. Makale [26]'de ölçülen sinyaller üzerindeki bilinmeyen genlik değerleri, genelleştirilmiş yaklaşık mesaj iletimi yöntemi ile kalibre edilmektedir. Çalışma [27]'da seyrekliğe dayalı bir eşlenik (conjugate) gradyent algoritması ile kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Çalışma [28]'da sensör ağları üzerinden seyrekliğe dayalı toplam en küçük kareler yöntemi kullanılarak kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Diğey bir çalışmada [29] ise faz dizili sensörlerde seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu çalışılmıştır.

Bir diğey çalışma olan [30]'de gelişigüzel yerleştirilmiş sensörlerden oluşan ağ sistemi üzerinden kör hüzme oluşturma problemi ele alınmıştır. Sensörlerin konumları ve frekans yanıtlarının bilinmediğı varsayılmaktadır. Sadece algılanan sinyaller kullanılarak kör hüzme oluşturulma çalışılmıştır.

Literatür incelendiğinde seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu ile ızgara dışılığı ele alan bir yöntem rastlanamamıştır. Izgara dışılık sinyal geriçatımı ve kalibrasyonu performansını düşürmektedir. Bu durumu karşılamak adına, çoklu giriş çoklu çıkış durumu için ızgara dışılık altında sinyal geri çatımı ve faz ve genlik hatası düzeltimi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Yön bulma problemi üzerinde farklı kör sensör kalibrasyonu çalışmaları literatürde bulunmaktadır. Çalışma [31]'de kör sensör kalibrasyonu ile yüksek çözünürlüklü yön bulma problemi yöntemi geliştirilmiştir. Bu iteratif yöntemde öncelikle özdeğer açılımı (Eigen value decomposition) ile yön değerleri bulunmakta daha sonra kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Genlik ve faz hatalarının yanında, sensörler arası karşılıklı bağlantı (mutual coupling) hataları da düzeltilmektedir [31]. Çalışma [32]'de ise iteratif olmayan cebirsel çözüm ile kör sensör kalibrasyonu ile hüzme yönlendirme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem sensör konumlarının bilindiğini varsaymakta ve sensörler üzerindeki bilinmeyen genlik ve faz hatalarını düzeltmeyi amaçlamaktadır. Çalışma [33]'de benzer şekilde sinyal kestirimi ve kör sensör kalibrasyonunun birbirinden ayrı yapıldığı bir yöntem önerilmiştir.

Literatürde kör sensör kalibrasyonunun yanında bilinen sinyaller kullanılarak kılavuzlu sensör kalibrasyonu yapan yöntemler de [34] bulunmaktadır. Çalışma [34]'de bilinen sinyaller ile elde edilen kalibrasyon vektörü kullanılarak dizi kalibrasyonu yapılarak ardından farklı yöntemlerin yön bulma performansı incelenmektedir. Yöntem [35] ise birden fazla frekansta alınan ölçümler ile dizi kalibrasyonu ve ardından yön bulma yapılmaktadır.

Aynı anda yön kestirimi ve kör sensör kalibrasyonu yapan bir yöntem geliştirmek için; ızgara dışılık altında kör kalibrasyon çözümü uyarlanarak ızgara dışılık altında yön bulma ve kör sensör kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir.

### 1.2.3 Sıkıştırılmış algılamanın kısa bir özeti

Sıkıştırılmış Algılama (SA) nispeten yeni bir sinyal işleme tekniğidir [1, 36]. Azaltılmış ölçümler ile güvenilir sinyal geri çatımı yapabilir. SA kullanılabilmesi için sinyalin bilinen bir tabanda seyrek olması gerekmektedir. Birçok uygulamada sinyaller seyrek olduğu için SA doğal bir kullanım alanı bulmuştur. Aşağıda verilen ölçüm modeli ele alınsın:

$$\mathbf{y} = \Psi \mathbf{x}, \quad (1.1)$$

burada  $\Psi$  ölçüm matrisini,  $\mathbf{y}$  ölçümleri,  $\mathbf{x}$  ise bilinmeyen ve kestirilmeye çalışılan sinyali ifade eder.  $\mathbf{x}$  bilinen bir tabanda seyrek bir şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \boldsymbol{\alpha}, \quad (1.2)$$

burada  $\mathbf{A}$ 'ın kolonları taban vektörleridir.  $\boldsymbol{\alpha}$  ise ilgili katsayıları içeren seyrek vektördür. Bu ifade kullanılarak Denklem (1.1) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \boldsymbol{\alpha}, \quad (1.3)$$

burada  $\mathbf{G} = \Psi \mathbf{A}$  olarak tanımlanmıştır. Denklem (1.1) ile verilen doğrusal modelin seyrek çözümü, aşağıdaki  $l_0$  normu minimizasyonu problemi çözülerek bulunabilir:

$$\min \|\boldsymbol{\alpha}\|_0 \quad \text{Öyle ki } \mathbf{y} = \mathbf{G} \boldsymbol{\alpha}, \quad (1.4)$$

burada  $\|\alpha\|_0$ ,  $l_0$  normunu ifade etmektedir ve  $\alpha$ 'nın sıfırdan farklı elemanlarının sayısı olarak tanımlanır. Denklem (1.4)'in çözümü kombinasyoneldir ve pratik uygulamalar için çözümün işlemsel maliyeti çok yüksek olmaktadır.  $l_0$  problemine konveks rahatlatma uygulandığında aşağıdaki  $l_1$  problemi elde edilir,

$$\min \|\alpha\|_1 \quad \text{Öyle ki } \mathbf{y} = \mathbf{G}\alpha. \quad (1.5)$$

Denklem (1.5) ile verilen minimizasyon problemi verimli çözüm yöntemleri ve programlama araçlarının kullanımını olanaklı kılar [1, 36–43].

Burada  $\text{spark}(\mathbf{G})/2 \geq \|\alpha\|_0$  şartı sağlandığında, Denklem (1.4)'nin benzersiz (unique) seyrek çözümü garanti olarak bulunabilir [42]. Bu denklemde  $\text{spark}()$  işlevi  $\mathbf{G}$ 'nin doğrusal bağımsız en az sayıdaki kolon kümesinin eleman sayısı olarak tanımlanır. Sadece Denklem (1.4)'in değil, Denklem (1.5)'nin de benzersiz çözümü  $\text{spark}(\mathbf{G})$ 'ya bağlıdır.  $\text{spark}(\mathbf{G})/2 \geq \|\alpha\|_0$  şartı sağlanmadığı sürece Denklem (1.4) ve Denklem (1.5) arasında seyreklik açısından bir denklikten bahsedilemez. Bir matrisin  $\text{spark}$  değerinden daha güçlü bir kural Kısıtlı İzometri Özelliğidir (Restricted Isometry Property, RIP) ve aşağıdaki gibi verilir [44],

$$(1 - \delta_s) \|\alpha\|_2 \leq \|\mathbf{G}\alpha\|_2 \leq (1 + \delta_s) \|\alpha\|_2, \quad (1.6)$$

$$\text{Öyle ki } \delta_s \geq 0, \quad \|\alpha\|_0 \leq s,$$

burada izometri sabiti  $0 \geq \delta_s \geq 1$  şartını sağlar. RIP sinyalin seyrekliği için bir üst limit tanımlar, böylelikle ilgili operatör ile transformasyonu sonrasında sinyalin enerjisi belirli miktarda korunur.  $\alpha$ , seyrek ve  $\mathbf{G}$ , RIP özelliğini sağladığında Denklem (1.4) ve Denklem (1.5)'in aynı çözümü sağladığı kanıtlanmıştır [2, 44]. Diğer taraftan, orta boyutlu operatör matrisleri için dahi, operatörün RIP değerinin bulunması işlemsel karmaşıklık açısından pratik olmamaktadır. Bununla birlikte bazı özel matrislerin yaklaşık kesin bir şekilde RIP özelliğini sağladığı gösterilmiştir [2, 36, 44]. Bunlara bağımsız ve benzer dağılımlı rastgele matrisler, Fourier tabanı ile oluşturulan matrisler ve genel olarak dik tabanlar ile oluşturulan matrisler örnek olarak verilebilir.

### 1.3 Tezin Katkısı

Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma teknikleri [15–21], sadece platform hareketinden kaynaklı faz hatalarını gidermeye yöneliktir ve görüntüsü oluşturulmak istenen sahnenin bilinen bir tabanda seyrek olması gerekmektedir. Diğer taraftan, taban uyumsuzluğu olması durumunda, görüntünün seyreklik seviyesi olumsuz etkilenmektedir. Bu durum görüntü oluşturma performansını olumsuz etkiler. Yukarıda anlatılan teknikler, görüntü düzlemini ayrıklaştırır ve bir ızgara üzerinde ifade ederler. Görüntünün bu ızgara üzerinde seyrek olduğu varsayımı yapılır. Ancak, yansıtıcılar ızgara noktaları üzerinde olmanın yanında görüntü düzleminde herhangi bir yerde olabilirler. Bu ise taban uyumsuzluğuna sebep olur ve görüntünün kalitesini düşürür. Bu durum, SA literatüründe ızgara dışı hedef problemi olarak bilinir ve SAR görüntüleme haricinde; frekans kestirimi [45], yön bulma [45] ve menzil-doppler görüntüleme [46] de karşılaşılmaktadır. SA’da ızgara dışı hedef problemi için çeşitli çözümler bulunmaktadır [46–50]. Bunların içerisinde [46]’da önerilen parametre pertürbasyonuna dayalı dikey eşleşme arama (Parameter Perturbation based Orthogonal Matching Pursuit, PPOMP) yöntemi sürekli bir parametre uzayında seyrek olan sinyal geriçatımı yapar. Seyreklik tabanlı parametre uzayının ayrıklaştırılması ile oluşturulur. PPOMP parametre pertürbasyonlarını ve atomların genliklerini ortak bir şekilde bulur. Eğim (gradient) düşümü tabanlı arama kullanılır.

Önerilen yöntem [51]; pertürbasyona dayalı otomatik odaklama SAR (Perturbed Autofocus SAR, PA-SAR), ızgara dışılık problemini ele alarak otomatik odaklama yapmakta ve nokta modda (spotlight) SAR görüntüsü oluşturmaktadır. Literatürde bulunan SA’ya dayalı SAR görüntüleme yöntemleri ızgara dışılık problemini ele almamaktadır, bilindiği kadarıyla PA-SAR aynı anda ızgara dışılık altında otomatik odaklama ile SAR görüntüleme yapan ilk yöntemdir. PA-SAR dikey eşleşme arama (Orthogonal Matching Pursuit) tabanlı görüntü oluşturma yanında parametre pertürbasyonu yaparak yansıtıcı noktaları kestirimlerini iyileştirmektedir. Sonuç olarak; platform hareketlerinden kaynaklı faz hataları ve ızgara dışı hedef konumları ortak bir şekilde kestirilmektedir [51]. Alınan ilk sonuçlar [52]’da verilmiştir. PA-SAR azaltılmış ölçüm sayısı ile seyrek SAR görüntüleri oluşturabilmektedir. Gerçek SAR sistemi verisi ve sentetik olarak üretilmiş veriler ile yapılan benzetim

çalışmalarında önerilen yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma tekniklerinin [15–17] önceden tanımlanması gereken parametreye ihtiyaç duyması, bu yöntemlerin gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Uygulamada bir operatör yardımı ile farklı parametre değerleri ile görüntü oluşturulup en iyi performansı veren parametreye ya da parametreler seçilebilir. Farklı görüntü boyutu, sinyal gürültü oranı (SGO) ve seyreklik seviyesi değerlerine göre önceden parametre setleri oluşturulup, görüntü oluşturulurken senaryoya uygun parametre değerleri seçilerek işlem yapılabilir. Diğer taraftan farklı görüntü boyutu, SGO ve seyreklik seviyesi değerlerine göre önceden parametre setleri oluşturması işlem maliyeti yüksek ve karmaşık bir işlem olacaktır. Parametreden bağımsız bir yöntem geliştirilmesi bu zorlukların üstesinden gelecektir. Bu amaçla, PA-SAR'dan farklı olarak, önceden tanımlanması gereken bir parametreye ihtiyaç duymayan seyrekliğe dayalı bir Nokta Modda SAR Görüntüleme ve Otomatik Odaklama yöntemi geliştirilmiştir [53]. Bu yöntem Dikey Eşleşme Arama (Orthogonal Matching Pursuit - OMP) [43] tabanlıdır. Çapraz doğrulama ile OMP iterasyonları otomatik bir şekilde durdurulmaktadır, böylelikle yöntemin ön tanımlı bir parametreye ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır [53]. Geliştirilen yöntemin performansı sentetik ve gerçek SAR verisi kullanılarak gösterilmiştir. Benzetimlerde kullanılan yöntemlere kıyasla, geliştirilen yöntem ön tanımlı parametreye ihtiyaç duymamasına rağmen senaryoların çoğunda en iyi, kalanlarında ise en iyiye yakın performans göstermiştir.

Tez çalışmaları kapsamında yukarıda anlatılan yöntemlere ek olarak, çoklu giriş çoklu çıkış durumu için ızgara dışılık altında sinyal geri çatımı ve faz ve genlik hatası düzeltimi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu probleminin literatürde çokça çalışıldığı görülmektedir. Faz ve genlik hatalarının ve sinyal geri-çatımının aynı anda yapıldığı yöntemler vardır. Bununla birlikte var olan çalışmalarda ızgara dışı (off-grid) sinyalleri ele alarak kör sensör kalibrasyonu yapan bir yöntem yoktur. Bu noktadan hareketle böyle özgün bir yöntemin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu tezde ise [51]'da tariflenen yöntemden yola çıkarak ızgara dışılık altında kör



sensör kalibrasyonu yapan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ızgara dışı sinyalleri [51]'da tariflenen gradyen arama tabanlı çözümle ile ele almaktadır. Özgün yanları ise; faz kalibrasyonunun yanında genlik kalibrasyonu da yapılması, tek boyutlu çoklu ölçüm ile çalışması, çoklu ölçümü ele alan ve kör sensör kalibrasyonu yapan yeni bir algoritma yapısına sahip olmasıdır. Geliştirilen yöntemin performansı, literatürdeki güncel yöntemlerle de karşılaştırmalı olarak benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

Izgara dışılık altında kör kalibrasyon çözümü uyarlanarak ızgara dışılık altında yön bulma ve kör sensör kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem ile ızgara dışılık altında çoklu ölçüm için öncelikle yön kestirimi yapılmakta ve aynı zamanda kör sensör kalibrasyonu yapılarak sensör dizisi üzerindeki genlik ve faz hataları düzeltilmektedir. Izgara dışılık altında kör sensör kalibrasyonu ve yön kestirimi problemi için özgün bir çözücü (solver) önerilmiştir. Geliştirilen algoritma ızgara dışılık altında gradyen düşümü tabanlı arama ile yön kestirimi yapmaktadır. Geliştirilen yöntemin performansı, farklı senaryolar altında benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

#### **1.4 Izgara Dışı Sinyal Geriçatımı ve Kalibrasyonu**

Tez çalışmaları kapsamında geliştirilen seyrekliğe dayanan ızgara dışılık altında sinyal geriçatımı ve kalibrasyon yöntemlerinin kullandığı çözücülerin ortak yapısı bu bölümde bilgi amaçlı özetlenmiştir. Yöntemler aşağıda anlatılan yapıyı gerekli varyasyonlarla kullanmaktadır.

Sinyal geriçatımı ve kalibrasyonu için ızgara üzeri (on-grid) sinyal modeli aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{w}. \quad (1.7)$$

$\mathbf{x}$  ve  $\mathbf{y}$  sırasıyla geri çatılmak istenen sinyal ve buna karşılık gelen ölçüm vektörleridir.  $\Psi$  ölçüm matrisi olmak üzere,  $\mathbf{G} = \Psi \mathbf{A}$  olarak tanımlanır.  $\mathbf{w}$  ise sıfır ortalamalı toplamsal beyaz Gauss dağılıma sahip gürültü matrisini ifade eder. Ölçümler arası gürültünün bağımsız olduğu varsayılmıştır. Bu problemin örnek bir uygulaması olarak frekans spektrumu kestirimi verilebilir. Bu durumda  $\mathbf{A}$  matrisi uygun boyutlu

bir ters DFT matrisi olur.  $L$  ölçüm sayısı olmak üzere  $\mathbf{y}$   $L \times 1$  boyutludur.  $\Phi$  de-kalibrasyon matrisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Phi = \begin{bmatrix} d_1 e^{j\phi_1} & & & \\ & d_2 e^{j\phi_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_L e^{j\phi_L} \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

Burada  $L$  sensör sayısını,  $d_j$  genlik kalibrasyon hatasını,  $\phi_i$  ise faz kalibrasyonu hatasını ifade eder,  $j = 1, 2, \dots, L$ . Kalibrasyon işlemi sırasında bu parametreler kestirilerek faz ve genlik hatası kalibrasyonu yapılması hedeflenmektedir.

Izgara dışılık ele alındığında  $\mathbf{y}$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{y} = \Phi \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{g}(f_k^o) + \mathbf{w}, \quad (1.9)$$

burada  $\mathbf{g}(\cdot)$  sinyalin ifade edildiği eşlenik taban işlevidir ve  $\mathbf{g}(f_k) = \Psi \mathbf{a}(f_k)$  olarak tanımlanmıştır.  $\alpha_k$ , sinyalin  $k$ . bileşeninin genliğini ifade eder.  $f_k^o$  ise  $k$ . sinyal bileşeni için parametre değerini ifade eder ve ızgara dışılığa sebep olan parametredir.

Bu durumda bilinmeyen parametrelerin kestirimi için aşağıdaki optimizasyon problemi çözülür. Maliyet fonksiyonu olarak hatanın  $l_2$  normu kullanılmaktadır.

$$\min_{\alpha_k, f_k, \delta f_k, \phi_j, d_j} \left\| \mathbf{y} - \Phi \Psi \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{a}(f_k + \delta f_k) \right\|_2, \quad (1.10)$$

Öyle ki;  $\sum_j d_j = c$ ,  $|\delta f_k| < \Delta/2$ ,

$i = 1, 2, \dots, D$  ve  $j = 1, 2, \dots, L$ .

Burada  $c$  pozitif bir sayıdır. Genlik kalibrasyonu için  $\mathbf{y} = d\hat{\mathbf{y}}$  eşitliğini sağlayan sonsuz sayıda  $d$  ve  $\hat{\mathbf{y}}$  çiftleri bulunabilir. Bu belirsizliği engellemek için  $\sum_j d_j = c$  kısıtı kullanılmıştır.

Denklem (1.10) ile verilen optimizasyon probleminde sinyal geriçatımı için genlik  $\alpha_k$  ve  $f_k$  ve  $\delta f_k$  bulunur.  $f_k$  en yakın ızgara noktası değerini,  $\delta f_k$  ise ilgili pertürbasyon (sapma) miktarını ifade eder ve ızgara dışılığa sebep olan parametredir.  $\phi_j$  ve  $d_j$

sırasıyla faz ve genlik kalibrasyon hatalarını ifade ederler. Faz ve genlik hatası kestirimi ve düzeltilmesi işlemi içerisinde sinyal parametreleri  $\alpha_k$  ve  $f_k$ ,  $\delta f_k$  ve kalibrasyon hataları  $\phi_j$ ,  $d_j$  iteratif bir şekilde kestirilecektir.

Bölüm 2’de ızgara dışılık altında nokta modda SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemi geliştirilmiştir [51]. Bu yöntem iteratif bir şekilde SAR görüntüsü oluşturmada ve platform hareketinden kaynaklı faz hatalarını düzelterek otomatik odaklama yapmaktadır. Bu yöntem temelde iki boyutlu ızgara dışı sahneyi kestirmekte ve iteratif bir şekilde otomatik odaklama yapmaktadır. Bu durumda Denklem (1.9) ile verilen taban fonksiyonu  $\mathbf{g}(\cdot)$  ilgili SAR projeksiyon operatörü olmaktadır.  $\alpha_k$ ’lar ise iki boyutlu sahnedeki ızgara dışı yansıtıcıların karmaşık genliğini ifade eder. Denklem (1.8) ile verilen  $\Phi$  ise sadece faz hatalarını içermektedir.

Bölüm 3’te ise ızgara dışılık altında sinyal geriçatımı ve kör kalibrasyon yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem tek boyutlu çoklu ölçümler ile çalışmakta ve alınan ölçümler üzerindeki faz ve genlik hatasını düzeltmektedir. Ölçümler birbirinden bağımsızdır. Bu durumda genellik bozulmadan,  $\mathbf{g}(\cdot)$  uygun bir tabana ait fonksiyonlar kümesini ifade eder.  $\alpha_k$ ’lar ise her bir ölçüme karşılık gelen sinyaldeki ilgili ızgara dışı bileşenin karmaşık genliğidir. Öncelikle iteratif bir şekilde tüm ölçümlere karşılık gelen tüm sinyaller ızgara dışılık altında kestirilir. Daha sonra bu kestirimler kullanılarak ortak bir şekilde kör kalibrasyon yapılarak faz ve genlik hataları düzeltilir.

Bölüm 3’te verilen yöntem yön bulmaya ve grup seyrekliğe [54, 55] dayalı çalışmaya uyarlanarak Bölüm 4’te ızgara dışılık altında yön bulma ve kör kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir. Yön değerlerinin ölçümler arası değişmediği varsayımı yapılmıştır. Bu durumda  $\mathbf{g}(\cdot)$  ilgili yönlerdeki dizi cevabıdır (dizi manifold vektörüdür).  $\alpha_k$ ’lar ise ilgili yönlerdeki karmaşık sinyal genliğidir. Yönler ve ilgili genlikler tüm ölçümler kullanılarak ortak bir şekilde kestirilmektedir. Daha sonra ortak bir şekilde kör kalibrasyon yapılmaktadır.

## 1.5 Tezin Organizasyonu

Bu tezin organizasyonunda öncelikle Bölüm 2’de Izgara Dışı Seyrek Saheneler için SAR Nokta Mod Görüntü Oluşturma ve Otomatik Odaklama anlatılacaktır. Bu bölüm içerisinde ayrıca Çapraz Doğrulama ile Otomatik Durdurma Kriteri ile Seyrekliğe Dayalı Görüntü Oluşturma ve Otomatik Odaklama yaklaşımı verilecektir. Ardından Bölüm 3’de Izgara Dışılık Durumunda Seyrekliğe Dayalı Sinyal Geriçatımı ve Kör Sensör Kalibrasyonu anlatılacaktır. Bölüm 4’te ise Izgara Dışılık Altında Yön Bulma ve Kör Kalibrasyon yöntemi açıklanacaktır. Benzetim çalışmaları her yöntem için ayrı yapılmıştır ve sonuçlar ilgili bölümlerde verilmiştir. Son olarak Bölüm 5’de yapılan çalışmalar özetlenerek yorumlanmıştır ve olası gelecek dönem çalışmalarından bahsedilmiştir.

## 2. IZGARA DIŞI SEYREK SAHNELER İÇİN SAR NOKTA MOD GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA VE OTOMATİK ODAKLAMA

### 2.1 Giriş

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) uzaktan algılama uygulamalarında yüksek öneme sahiptir. Platform hareketi, ölçüm modeli uyumsuzluğu ve ölçüm gürültüsünden kaynaklı faz hataları SAR görüntülerinde bozulmalara neden olabilir. Ölçümlerin verimli işlenebilmesi için görüntü düzlemi ölçeklenir ve bir ızgara üzerinde ifade edilir. Otomatik odaklama ve görüntü oluşturma işlemleri bu ızgara üzerinden yapılır. Bununla birlikte, platform hareketlerinden kaynaklı hatalara ek olarak, tam olarak ızgara noktalarının üzerinde bulunmayan yansıtıcılarda görüntü kalitesini düşürürler. Bu durum ızgara dışı yansıtıcı problemi olarak adlandırılır.

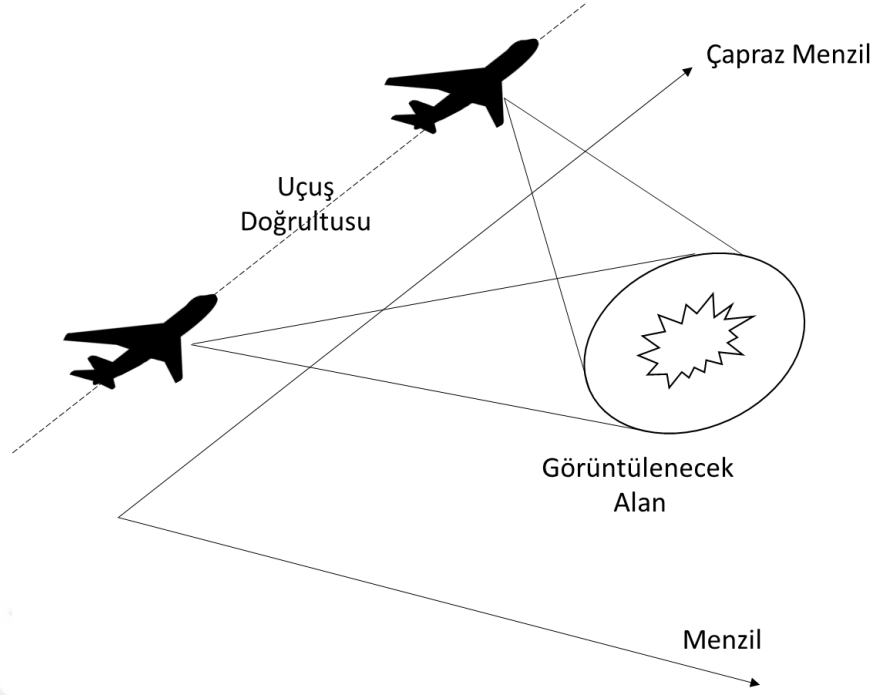
Bu çalışmada, seyrekliğe dayalı bir otomatik odaklama ve görüntü oluşturma algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, bozucu etkisi telafi edilememiőt platform hareketinden kaynaklı faz hatalarını düzeltebilmekte, yani otomatik odaklama yapabilmektedir. Bunun yanında ızgara dışı yansıtıcılar olduğu durumda görüntü oluőturulabilmektedir. Önerilen algoritma Dikey Eőleme Takibi (Orthogonal Matching Pursuit - OMP) tabanlıdır, otomatik odaklama özelliğine sahiptir. Parametre güncellemelerini eğim düşümü (gradient descent) ile yapmaktadır. Önerilen yöntem Nyquist örnekleme oranının altında yüksek kalitede görüntüler oluőturulabilmektedir. Gerçek ve sentetik veriler ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, emsal yöntemlere kıyasla önerilen yöntemin yaygın olarak kullanılan metrikler ile daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) [8], üzerinde bulunduğu hava platformunun hareketi sırasında birden fazla radar darbesinden toplanan ölçümleri işleyerek geniş bir sentetik açıklık oluşturur, bunun sonucunda alınan veriler işlenerek görüntüsü oluşturulmak istenen alanın yüksek çözünürlüklü görüntüsü elde edilir. Yanca ve

menzilde yüksek çözünürlük vermesi, olumsuz hava koşullarına dayanıklılığı SAR'a önem kazandırmış ve çeşitli konularda kullanımını olanaklı kılmıştır. Çevre gözetleme ve arazi haritalama gibi sivil uygulamaların yanında gözetleme ve bilgi toplama gibi askeri alanlarda da kullanılmaktadır. Nokta modu, şerit modu ve ters SAR modu genel olarak kullanılan SAR modlarıdır [9–11]. Nokta SAR modu ölçüm toplama geometrisi Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu modda SAR radarı anteni uçuş süresince yer yüzeyindeki (görüntüsü oluşturulmak istenen) aynı bölgeye baktırılır. Aynı bölgeden farklı açılardan veri toplanmış olunur. Nokta modunda, diğer SAR modlarına göre daha yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek mümkündür.

SAR sistemlerinde yüksek menzil çözünürlüğü elde etmek için yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum yüksek hızlı analog/dijital çeviricilere (ADC) ihtiyacı ortaya çıkardığı gibi, toplanması gereken ölçüm miktarlarını, ihtiyaç duyulan hafıza ve işlemci kapasitesini de arttırmaktadır. Klasik SAR sistemlerinde bant genişliğinin tamamı kullanılır ve yanca doğrultusu eş aralıklarla örneklenir. Bununla birlikte, yüksek bant genişlikleri kullanılması durumunda, bazı frekans bantlarının haberleşme gibi diğer sistemlerce kullanımı olabilir ya da bazı bantlarda yayın yapılmasına izin verilmiyor olabilir. Buna ek olarak, bazı yanca noktalarında alınan ölçümler bozuk olabilir, ya da çok işlevli radarlarda olduğu gibi, anten başka uygulamalarda kullanıldığı için ölçüm alınamamış olabilir. Bu tip uygulama kısıtları yanca yönünde de eş aralıklı olmayan örnekleme gerektirebilir. Bu gibi sebeplerle ya da farklı uygulamalardan doğabilecek gereklerle, SAR sisteminin menzil ve yancada daha düşük sayıda ölçüm ile yüksek kalitede görüntü oluşturması gerekebilir.

Sıkıştırılmış Algılamaya (SA, Compressive Sensing) [1, 2] dayalı yöntemler ile SAR sistemlerinde alternatif çözümler uygulanabilir. Klasik SAR görüntüleme yöntemlerinin aksine, SA teknikleri seyrek sahneler için Nyquist örnekleme oranının altında çalışabilmektedir [1]. Burada görüntüsü oluşturulmak istenen sahne bilinen bir tabanda seyrek olmalıdır. SA tekniklerinin özellikleri ve radarda olası uygulama alanlarının önemi ve bunların oluşturabileceği avantajlar dolayısıyla, SA teknikleri son yıllarda radar ve SAR alanlarında ilgi çekmiştir. SA tabanlı radar ve SAR uygulamaları konusunda kapsamlı literatür bilgisi, bu konu hakkındaki araştırma ve değerlendirme çalışmalarında bulunabilir [7, 12].



Şekil 2.1: Nokta SAR modu ölçüm toplama geometrisi.

Sahnenin seyrek olarak ifade edilebildiği bilinen bir tabanda bazı bilinen şartlar sağlandığında, SA teorisi seyrek sahneler altında kararlı sonuçların oluşturulmasını garanti eder [13]. Sentetik açıklık oluşturulabilmesi için, görüntüsü oluşturulmak istenen alan ile SAR platformu arasındaki görece konum bilgilerinin (yön, uzaklık gibi) hatasız olarak bilinmesi gerekmektedir. Diğer taraftan, navigasyon sistemleri her ne kadar yüksek doğrulukta konum ve yönelim bilgisi sağlasa da, platform konumu bilgisinde belirsizlikler olması kaçınılmazdır. Bu belirsizlikler, ölçülen SAR sinyaline faz hataları olarak yansımaktadır. Görüntü düzleminin bir ızgara üzerinde modellenmesi ve yansıtıcıların ızgara üzerinde olduğu varsayımı gibi sistem modelleme hataları da faz uyumsuzluğuna neden olur. Toplam faz hatası SAR görüntülerinde bozulmaların temel sebebidir. Bu durum özellikle yanca yönünde ulaşılabilecek performansı limitler.

Etkisi telafi edilememiş platform hareketinden kaynaklı faz hatalarını düzelten SAR görüntü oluşturma yöntemleri otomatik odaklama yapmaktadırlar. Literatürde bir çok otomatik odaklama yöntemi bulunmaktadır [14–17, 56]. Faz Eğimi Otomatik Odaklama (Phase Gradient Autofocus, PGA) [14] gibi klasik yöntemler Nyquist ya da daha yüksek oranlarda örneklenmiş veri üzerinde çalışırlar. Bu yöntemler genellikle

Polar Format Algoritması (PFA) [8, 10] gibi geleneksel tekniklerin oluşturduğu odağı bozuk görüntüler üzerinde kullanılır. Odağı bozuk görüntü işlenerek otomatik odaklama yapılır. Nyquist altı verilerde bu yöntemler performansı azalmaktadır. Diğer taraftan, SAR probleminin SA tabanlı ifade edilmesi Nyquist altı veri toplamaya olanak sağladığı gibi eş zamanlı görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yapılabilmesini de mümkün kılmaktadır. SA tabanlı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama literatürde çalışılmış bir konudur [15–21].

SA tabanlı SAR görüntü oluşturma ve odaklama teknikleri, sistem modeli ve veriyi farklı türde optimizasyon problemlerinde kullanmaktadırlar. Dolayısıyla, PGA gibi görüntü oluşturulduktan sonra otomatik odaklama yapmak yerine, bu tekniklerde otomatik odaklama işlemi görüntü oluşturma ile birlikte yapılır. Seyrekliği kullanan otomatik odaklama (Sparsity Driven Autofocus, SDA) yöntemi [15]'de verilmiştir, burada bir optimizasyon problemi çözülerek görüntü oluşturulmakta ve otomatik odaklama yapılmaktadır. Maliyet fonksiyonu bir veri doğruluğu terimi ve bir düzenleme parametresinden oluşmaktadır. Düzenleme parametresi görüntünün  $\ell_1$  normudur. Optimizasyon probleminin çözümünde, görüntü ve faz hatası iteratif olarak birbirinden ayrı minimize edilerek belirlenir. Benzer olarak [16]'da da optimizasyon problemi çözülerek görüntüleme yapılır. [16]'da, oluşturulan görüntünün  $\ell_1$  normunun belirli bir eşik altına kalması şartı ile veri doğruluğu minimize edilmeye çalışılır. [17]'de beklenti maksimizasyonuna dayalı eşleşme arama (Expectation Maximization Matching Pursuit, EMMP) tabanlı iteratif bir SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemi verilmiştir. [17]'de görüntünün seyreklik seviyesinin ( $\ell_0$  normunun) belirli bir eşikten düşük olması kısıtı altında veri doğruluğu terimi minimize edilmeye çalışılır. [15] ve [16]'da iteratif bir şekilde öncelikle tüm görüntü oluşturulur ve ardından faz hatası kestirilerek otomatik odaklama yapılır. EMMP'de ise eşleşme arama prosedürünün içerisinde atomlar seçildikçe faz hatası kestirimi yapılır. Diğer teknikler [18–21] ise problemi ufak varyasyonlar ile ele alırlar.

Bahsedilen teknikler, sadece platform hareketinden kaynaklı faz hatalarını gidermeye yöneliktir ve görüntüsü oluşturulmak istenen sahnenin bilinen bir tabanda seyrek olması gerekmektedir. Diğer taraftan, taban uyumsuzluğu olması durumunda,



görüntünün seyreklik seviyesi olumsuz etkilenmektedir. Bu durum görüntü oluşturma performansını olumsuz etkiler. Yukarıda anlatılan teknikler, görüntü düzlemini ayırklaştırır ve bir ızgara üzerinde ifade ederler. Görüntünün bu ızgara üzerinde seyrek olduğu varsayımı yapılır. Ancak, yansıtıcılar ızgara noktaları üzerinde olmanın yanında görüntü düzleminde herhangi bir yerde olabilirler. Bu ise taban uyumsuzluğuna sebep olur ve görüntünün kalitesini düşürür. Bu durum, SA literatüründe ızgara dışı hedef problemi olarak bilinir ve SAR görüntüleme haricinde; frekans kestirimi [45], yön bulma [45] ve menzil-doppler görüntüleme [46] de karşılaşılmaktadır. SA'da ızgara dışı hedef problemi için çeşitli çözümler bulunmaktadır [46–50]. Bunların içerisinde [46]'da önerilen parametre pertürbasyonuna dayalı dikey eşleşme arama (Parameter Perturbation based Orthogonal Matching Pursuit, PPOMP) yöntemi sürekli bir parametre uzayında seyrek olan sinyal geriçatımı yapar. Seyreklik tabanlı parametre uzayının ayırklaştırılması ile oluşturulur. PPOMP parametre pertürbasyonlarını ve atomların genliklerini ortak bir şekilde bulur. Eğim (gradient) düşümü tabanlı arama kullanılır.

Önerilen yöntem [51]; pertürbasyona dayalı otomatik odaklama SAR (Perturbed Autofocus SAR, PA-SAR), ızgara dışılık problemini ele alarak otomatik odaklama yapmakta ve nokta modda (spotlight) SAR görüntüsü oluşturmaktadır. Literatürde bulunan yöntemler ızgara dışılık problemini ele almamaktadır, bilindiği kadarıyla PA-SAR aynı anda ızgara dışılık altında otomatik odaklama ile SAR görüntüleme yapan ilk yöntemdir. PA-SAR dikey eşleşme arama (Orthogonal Matching Pursuit) tabanlı görüntü oluşturma yapmakta ve PPOMP'ye benzer şekilde parametre pertürbasyonu yaparak yansıtıcı noktaları kestirimlerini iyileştirmektedir. Sonuç olarak; platform hareketlerinden kaynaklı faz hataları ve ızgara dışı hedef konumları ortak bir şekilde kestirilmektedir [51]. Alınan ilk sonuçlar [52]'te verilmiştir. PA-SAR azaltılmış ölçüm sayısı ile seyrek SAR görüntüleri oluşturabilmektedir. Gerçek SAR sistemi verisi ve sentetik olarak üretilmiş veriler ile yapılan benzetim çalışmalarında önerilen yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

## 2.2 Nokta SAR Modu Sinyal Modeli

Nokta SAR modunda, tipik olarak lineer frekans modülasyonlu (FM) chirp sinyali  $s(t)$  bilinen bir darbe tekrarlama aralığı  $T_{PRI}$  ile transmit edilir,

$$s(t) = e^{j(\omega_0 t + at^2)}, \quad |t| \leq 0.5T, \quad (2.1)$$

burada  $\omega_0$  radyan cinsinden RF merkez frekansdır,  $2a$  FM oranı,  $T_{PRI}$ 'in küçük bir kısmı olan  $T$  ise darbe süresidir. Her darbe  $i$  için, ilgilenilinen yeryüzeyinden algılanan sinyal  $y_i(t)$  aşağıdaki gibi verilir ([9]):

$$y_i(t) = \iint_{\sqrt{z_1^2 + z_2^2} \leq Z_L} x(z_1, z_2) e^{-j\Omega(t)(z_1 \cos(\varphi_i) + z_2 \sin(\varphi_i))} dz_1 dz_2, \quad (2.2)$$

burada  $x(z_1, z_2)$ ,  $\Omega(t)$ ,  $\varphi_i$  ve  $Z_L$  sırasıyla yer yansıtıcılığı, radyal uzamsal frekans, ilgili bakış açısı ve ilgili yer yüzeyi parçasının uzunluğudur. Radyal uzamsal frekans;  $\Omega(t) = (2/c)(\omega_0 + 2a(t - (2R_\theta/c)))$  şeklinde verilir. Burada  $R_\theta$  menzili;  $\theta$  açısındaki çapraz menzil konumundaki SAR platformu ile görüntülenilen sahnenin merkezi arasındaki mesafeyi ifade eder.

Herhangi bir yer yüzeyi iç yüksek çözünürlüklü SAR görüntü oluşturma işlemi, algılanan sinyalin Nyquist ya da daha yüksek oranlarda örneklenmesi ve bu örneklerin eş fazlı (coherent) olarak işlenmesi ile mümkündür. Bununla birlikte, insan yapımı bir kaç objenin bulunduğu ya da bir kaç baskın yüksek yansıtıcının olduğu sahnelerin görüntüsü oluşturulmak istendiğinde, SA'ya dayalı teknikler kullanılarak Nyquist altında da yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek mümkündür. Bu düşüncüyü geliştirebilmek adına, ilgilenilen yeryüzü parçasının yansıtıcılığı için aşağıdaki model kullanılmıştır:

$$x(z_1, z_2) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \psi(z_1 - z_{1k}, z_2 - z_{2k}), \quad (2.3)$$

burada  $K$  baskın yansıtıcıların sayısını,  $\alpha_k$  yansıtıcıların kompleks genliklerini,  $(z_{1k}, z_{2k})$  yansıtıcıların sahnedeki konumunu ifade eder.  $\psi(z_1, z_2)$  ise karmaşık insan yapımı hedefleri, yansıtıcı merkezlerinin süperpozisyonu olarak ifade eden

fonksiyondur.  $\psi(z_1, z_2)$ 'nin uzamsal supportu bir çözünürlük hücresinin içerisinde kaldığı sürece, SAR görüntüsü oluşturma işlemi  $\psi(z_1, z_2)$ 'in gerçek şeklinden etkilenmez [9]. Bu model kullanılarak, alınan sinyal aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$y_i(t) = \iint \left( \sum_{k=1}^K \alpha_k \psi(z_1 - z_{1k}, z_2 - z_{2k}) \right) \times e^{-j\Omega(t)(z_1 \cos(\varphi_i) + z_2 \sin(\varphi_i))} dz_1 dz_2, \quad (2.4)$$

ya da daha basit haliyle:

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k g_i(t; z_{1k}, z_{2k}), \quad (2.5)$$

burada  $g_i(t; z_{1k}, z_{2k})$  eşdeğer SAR operatör fonksiyonudur. Alınan sinyalin bu halinde, sahne yansıtıcılığına dair toplam sayısı  $3K$  olan bilinmeyen parametreler çarpım şeklindedir:  $\alpha_k \psi(z_1 - z_{1k}, z_2 - z_{2k})$  ölçümler ile bilinmeyen parametreler arasında doğrusal bir ilişki kurulmasını engellemektedir. Yaygın olarak kullanılan bir çözümde, yeryüzü parçasına eş aralıklı bir ızgara uygulanır. Yansıtıcı konumlarının ızgara noktalarında olduğu varsayılır:  $(\bar{z}_{1n}, \bar{z}_{2m})$ , burada  $\bar{z}_{1n} = (n - \frac{N}{2}) \Delta z_1$ , ve  $\bar{z}_{2m} = (m - \frac{M}{2}) \Delta z_2$ ,  $1 \leq n \leq N$  ve  $1 \leq m \leq M$  şeklindedir. Böylelikle alınan sinyal aşağıdaki gibi modellenebilir,

$$y_i(t) = \iint \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \bar{\mathbf{x}}(n, m) \psi(z_1 - \bar{z}_{1n}, z_2 - \bar{z}_{2m}) e^{-j\Omega(t)(z_1 \cos(\varphi_i) + z_2 \sin(\varphi_i))} dz_1 dz_2, \quad (2.6)$$

burada  $\bar{\mathbf{x}}(n, m)$  2 boyutlu yansıtıcılık matrisidir.  $N \times M$  boyutludur ve sadece  $K$  adet yansıtıcı noktalarının olduğu yerlerde sıfırdan farklı değer alır. Problemin bu şekilde daha yüksek boyutlu bir uzayda ifade edilmesi ölçümler ile bilinmeyenler arasında doğrusal bir ilişki kurulabilmesini sağlar. Yansıtıcı konumlarının ızgara noktaları üzerinde olduğu varsayımı; gerçek görüntünün oluşturulmasında kayda değer performans kaybına sebep olabilir. Bu fenomen ızgara-dışılık problemi olarak bilinir ve SAR görüntü oluşturmada istisna değil, kuraldır.

İşlemsel karmaşıklığı arttırmayı göze alarak ızgara dışılık problemi karşısında esneklik sağlamanın bir yolu daha yüksek çözünürlüklü ızgaralar kullanmaktır. Bu ızgara boyutlarını büyüterek, problemin çok daha yüksek boyutlu uzaylarda çözülmesini gerektirecektir. Problemin yüksek boyutlu uzaylarda güvenilir bir şekilde çözülebilmesi için Nyquiste yakın örnekleme sıklığına ihtiyaç vardır. Bu durumda problem iyi bilinen ve yaygınca çalışılmış klasik SAR görüntü oluşturma işlemine dönüşmektedir. Bu sebeple, ızgara dışılık probleminin makul ızgara boyutları kullanılarak çözülmesi önem kazanmaktadır.

SAR projeksiyon operatörünü ifade etmek için;  $\mathbf{C}'_i$  elemanları

$\mathbf{C}'_i(n', m') = \exp(-j\Omega[n'\Delta t](z_{1m'} \cos(\theta_i) + z_{2m'} \sin(\theta_i)))$  olan bir matris olsun.

Burada  $\Omega[n'\Delta t]$  örneklenmiş uzamsal menzil frekansdır,

$\sqrt{z_{1m'}^2 + z_{2m'}^2} < Z_L$ ,  $0 \leq n' \leq T \cdot f_s - 1$  ve  $1 \leq m' \leq NM$ ,  $f_s$  birimi Hz olan örnekleme frekansdır. Buradan hareketle, (2.6) ile verilen gözlem kerneli,  $\mathbf{C}_i$ ,  $\mathbf{C}'_i$ 'nin kolonlarının ters ayırık Fourier dönüşü (IDFT) alınarak bulunur [8, 19, 57].  $i$ . yanca noktasındaki kompleks değerli ayırık SAR projeksiyon operatörü  $\mathbf{G}_i$  ise  $\mathbf{G}_i = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{C}_i$  ile bulunur. Burada  $\mathbf{F}$  uygun bir DFT matrisidir.

SAR projeksiyon operatörü  $\mathbf{G}_i$  kullanılarak ifadeler vektör formda yazılırsa ölçüm sinyallerinin doğrusal formda ifade edildiği aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{G}_i \mathbf{x}, \quad (2.7)$$

burada  $\mathbf{x}$  Denklem (2.6) ile verilen  $\bar{\mathbf{x}}$ 'in kolonları altalta dizilerek tek kolon halinde yazılmış halidir ve  $NM \times 1$  boyutlu ayırık yer yansıtıcılığı vektörüdür.  $\mathbf{y}_i$ ,  $i$ . yanca adımında  $t$  zamanı ile örneklenmiş yer yansıması sinyalidir ve  $L$  elemanlıdır. Alınan sinyal klasik bir ADC ile ya da [58]'de verilen sıkıştırılmış algılama tabanlı bir alıcı ile de örneklenebilir. Örnekleme işlemi  $\mathbf{G}_i$  içerisinde modellenmiştir,  $\mathbf{G}_i$   $i$ . yanca adımındaki kompleks değerli SAR projeksiyon operatörüdür ve ilgili yanca adımında alınan  $\mathbf{y}_i$  ölçümlerinin bilinmeyen yer yansıması vektörü ile ilişkisini tanımlar.

SAR veri işleme, SAR platformu ile sahne merkezi arasındaki mesafe ve açıların bilinmesini gerektirir. Ancak, navigasyon sistemlerinin kısıtlı doğrulukları gibi sebeplerden dolayı her zaman etkisi giderilememiş bir miktar platform hareket hatası

bulunur. Bu hatalar alınan sinyalde faz belirsizliklerine sebep olur. Belirsizliğe sahip platform konumunun bir darbe süresi içerisinde sabit olduğu, ancak yanca yönünde değiştiği varsayımı yapılırsa; faz hatasının aynı darbe örnekleri içerisinde sabit olduğu ancak yanca yönünde (darbeden darbeye) değiştiği varsayılabilir. Bu varsayım ve ölçüm gürültüsü altında,  $\mathbf{y}_i$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_i &= \text{diag}[e^{j\phi_i}, e^{j\phi_i}, \dots, e^{j\phi_i}] \mathbf{G}_i \mathbf{x} + \mathbf{w}_i, \\ &= \Phi_i \mathbf{G}_i \mathbf{x} + \mathbf{w}_i,\end{aligned}\quad (2.8)$$

burada  $\Phi_i$ ,  $L \times L$  boyutlu bilinmeyen diyagonal matristir. Diyagonal elemanları faz hatalarını içerir  $e^{j\phi_i}$  ve  $\mathbf{w}_i$  toplamsal kompleks beyaz Gauss ölçüm gürültü vektörüdür.

$D$  adet çapraz menzil örnekleri alınır, birleştirilmiş ölçümler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & & & \\ & \Phi_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Phi_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{G}_D \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_D \end{bmatrix}.\quad (2.9)$$

ya da daha basit haliyle  $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{w}$  şeklinde yazılabilir. Burada  $\mathbf{y}$   $LD \times 1$  boyutlu birleştirilmiş ölçüm vektörü,  $\Phi$   $LD \times LD$  boyutu faz hata terimlerini tutan diyagonal matris,  $\mathbf{G}$  ise eşlenik  $LD \times NM$  boyutlu ayrık SAR operatörüdür.  $\mathbf{w}$  ise birleştirilmiş ölçüm gürültüsü vektörüdür, beyaz Gauss dağılımına sahiptir ve bağımsız olduğu varsayılmıştır.

### 2.3 Seyrekliğe Dayalı Nokta Modda SAR Görüntüleme

Bu bölümde bazı güncel seyrekliğe dayalı nokta modu SAR görüntüleme ve otomatik odaklama teknikleri hakkında [15–17] genel bilgi verilecektir. Bu teknikler genellikle büyük benzerlik içeren maliyet fonksiyonlarını çözmeye çalışmaktadır. Çalışma [15]'de, seyrekliğe dayalı yöntem (Sparsity Driven Approach) kullanılmıştır ve maliyet

fonksiyonu  $f(\mathbf{x}, \Phi)$  aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\min_{\mathbf{x}, \Phi} J(\mathbf{x}, \Phi) = \|\mathbf{y} - \mathbf{G}\mathbf{x}\|_2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1, \quad (2.10)$$

burada  $\lambda$  önceden seçilmesi gereken düzenleme parametresidir. İki parametre üzerinden ortak minimizasyon problemi; iteratif bir şekilde her parametre üzerinden ayrı minimizasyon yapılarak çözülmektedir. Görüntü  $\hat{\mathbf{x}}^{(0)}$  ve faz hatalarının  $\hat{\Phi}^{(0)}$  ilk kestirimlerinden başlayarak, belirli bir durma kriteri sağlanana kadar aşağıdaki minimizasyonlar iteratif bir şekilde yapılır;

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}^{(n+1)} &= \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}, \hat{\Phi}^{(n)}), \\ \hat{\Phi}^{(n+1)} &= \arg \min_{\Phi} J(\hat{\mathbf{x}}^{(n+1)}, \Phi), \end{aligned} \quad (2.11)$$

burada  $n$  iterasyon indisini ifade eder. Denklem (2.11)'da öncelikle sabit bir faz hatası varsayımı altında görüntü kestirimi yapılır, daha sonra bu görüntü kestirimi kullanılarak faz hatası kestirimi yapılır. Ardından otomatik odaklama yapılır ve durma kriteri sağlanana kadar iterasyon başa dönerek devam eder. Denklem (2.11) ile verilen minimizasyon aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\hat{\mathbf{x}}^{(n+1)} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{W}_n)^{-1} \mathbf{G}^H \hat{\Phi}^{(n)} \mathbf{y}, \quad (2.12)$$

burada  $\mathbf{W}_n$  diyagonal matristir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{W}_n = \text{diag} \left[ 1 / \left( |\hat{\mathbf{x}}_1^{(n)}|^2 + \beta \right)^{1/2} \cdots 1 / \left( |\hat{\mathbf{x}}_{N_1 \times N_2}^{(n)}|^2 + \beta \right)^{1/2} \right]. \quad (2.13)$$

Burada  $\mathbf{x}$ ,  $N_1 \times N_2$  görüntüdür. İncelenen tüm otomatik odaklama tekniklerinde [15–17] faz hatası kestirimi aşağıdaki gibi yapılmaktadır;

$$\hat{\phi}_i = \angle \hat{\mathbf{x}}_i^H \mathbf{G}_i^H \mathbf{y}_i, \quad (2.14)$$

burada  $i$  darbe indisidir. SDA algoritmasında [15] yukarıda verilen prosedür önceden seçilmesi gereken  $\lambda$  ve  $\beta$  parametreleri ve iterasyonların sonlandırılmasında kullanılan bazı eşikler ile yapılır. Çalışma [16] ve [17]'de, aşağıdaki optimizasyon problemi farklı kısıtlar altında benzer şekilde formüle edilmiştir ([16] için  $p = 1$  ve [17] için  $p = 0$ ),

dolayısıyla her iki yöntem de farklı yaklaşımlar önermiştir:

$$\min_{\mathbf{x}, \Phi} \|\mathbf{y} - \mathbf{G}\mathbf{x}\|_2 \quad s. t. \quad \|\mathbf{x}\|_p \leq \tau. \quad (2.15)$$

Çalışma [16]'da görüntü oluşturma işlemi aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$\hat{\mathbf{x}}^{(n+1)} = P_\tau \left( \hat{\mathbf{x}}^{(n)} + \frac{1}{L_x} \mathbf{G}^H \left( \hat{\Phi}^{(n)} \mathbf{y} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}^{(n)} \right) \right), \quad (2.16)$$

burada  $P_\tau(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x}$ 'nin yarıçapı  $\tau$  olan  $l_1$  küresine projeksiyonunu alır,  $n$  iterasyon indisidir,  $\tau$  ve  $L_x$  ise önceden seçilmesi gereken parametrelerdir.

Çalışma [17]'de iteratif bir beklenti maksimizasyonuna dayalı eşleşme arama (Expectation Maximization Matching Pursuit, EMMP) prosedürü uygulanmıştır. Çalışma [15, 16]'da faz hata kestirimi tüm görüntünün kestirimi ile yapılırken, EMMP'de görüntü ve faz hatası kestirimleri iteratif bir şekilde eşleşme arama yapısı içerisinde yapılır. Bu algoritmaların tamamı ızgara üzeri hedef varsayımı ile çalışmaktadır. Ayrıca bu yöntemler azaltılmış ölçüm sayıları ile birlikte çalışabilmekte ve klasik PGA [14] algoritmasına kıyasla daha iyi faz hatası kestirimi yapabilmektedirler.

Bu bölümde geliştirilen yöntem problem tanımı kapsamında öncelikle burada anlatılan yöntemlere benzer olarak, ızgara dışılık altında SAR görüntü oluşturma problemi maliyet işlevi tanımlanacaktır. Ardından görüntü oluşturma yöntemi bu maliyet işlevi üzerinden anlatılacaktır. Ek olarak, faz hatası kestirimi ve düzeltilmesi buradaki yöntemlere benzer şekilde Denklem (2.14) kullanılarak yapılacaktır.

## **2.4 Seyrekliğe Dayalı Izgara Dışı Nokta Mod SAR Görüntüleme ve Otomatik Odaklama**

Bu bölümde tez çalışmaları kapsamında geliştirilen yöntem anlatılmaktadır. Bu yöntem ızgara dışılık ve platform hareketi kaynaklı faz hatalarını çözebilmekte ve eş zamanlı görüntü oluşturabilmektedir.

Yansıtıcılığı Denklem (2.3) ile modellenen  $K$  seyreklik seviyesine sahip bir sahne için,

örneklenmiş kombine ölçümler aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\mathbf{y} = \Phi \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{g}(f_{1,k}^o, f_{2,k}^o) + \mathbf{w}, \quad (2.17)$$

burada  $\alpha_k$   $k$ . hedefin karmaşık yansıtıcılığıdır.  $\mathbf{g}(f_{1,k}^o, f_{2,k}^o)$  ise;  $\boldsymbol{\theta}_k^o = (f_{1,k}^o, f_{2,k}^o)$  konumundaki hedef için tüm çapraz menzil konumlarını kapsayan kombine SAR operatörüdür. Eğer hedef tam olarak ızgara noktası üzerinde olursa,  $\mathbf{g}(\cdot)$  fonksiyonu  $\mathbf{G}$  matrisinin ilgili ızgara noktasını ifade eden kolonu olur. Bununla birlikte,  $\boldsymbol{\theta}_k^o$  parametrelerine sahip bir hedef, tam olarak ızgara noktası üzerinde olmayabilir, aksine en yakın ızgara noktasının bilinmeyen bir komşuluğunda olabilir. Bu komşuluk mesafesi bilinmeyen pertürbasyonlar olarak olarak adlandırılır. Bu pertürbasyonlar  $f_{1,k}^o = f_{1,k} + \delta f_{1,k}$  ve  $f_{2,k}^o = f_{2,k} + \delta f_{2,k}$  ile ifade edilir, burada  $\boldsymbol{\theta}_k = (f_{1,k}, f_{2,k})$  en yakın ızgara noktasıdır. Pertürbasyonlar  $|\delta f_{1,k}| < 0.5\Delta_1$  ve  $|\delta f_{2,k}| < 0.5\Delta_2$  kurallarını sağlar.  $\Delta_1$  ve  $\Delta_2$  sırasıyla menzil ve çapraz menzildeki ızgara boyutlarıdır.

Yüksek kalitede görüntü oluşturabilmek için,  $\Phi$ 'nin içerdiği bilinmeyen faz hataları, görüntü parametreleri olan  $\alpha_k$  ve  $(f_{1,k}^o, f_{2,k}^o)$ 'in yanında ızgara pertürbasyonları da kestirilmelidir. Dolayısıyla, buradaki amaç ızgara dışılık problemini ve otomatik odaklamayı aynı zamanda ele alarak görüntü oluşturmaktır. Bu amaca ulaşmak için aşağıda verilen optimizasyon problemi formüle edilmiştir,

$$\min_{\alpha_k, \delta f_{1,k}, \delta f_{2,k}, \phi_i} \left\| \mathbf{y} - \Phi \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{g}(f_{1,k} + \delta f_{1,k}, f_{2,k} + \delta f_{2,k}) \right\|_2,$$

$$\text{Öyle ki } \phi_i = \angle \left( \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \mathbf{g}_i(f_{1,k} + \delta f_{1,k}, f_{2,k} + \delta f_{2,k}) \right)^H \mathbf{y}_i, \quad (2.18)$$

$$i = 1, 2, \dots, D \text{ ve } |\delta f_{1,k}| < \Delta_1/2, |\delta f_{2,k}| < \Delta_2/2,$$

burada  $i$  darbe numarasını ifade eder. Denklem (2.18)'deki amaç artık (residual) hatanın  $l_2$  normunu minimize etmektir. Buradaki kısıtlar  $i$ . darbenin faz hatasının  $i$ . darbeye ilişkin ölçüm kestirimi ve gerçek ölçüm arasındaki açı [19] olmasının yanında pertürbasyonların bir ızgara hücresi içerisinde kalmasıdır. Denklem (2.18) ile ifade edilen optimizasyon problemi konveks değildir ve doğrudan çözülmesi oldukça güçtür. Bunun yerine, suboptimal iteratif bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda



aç gözlü (greedy) bir teknik kullanılarak faz hataları ve pertürbasyonlar iteratif bir şekilde çözülmektedir. Geliştirilen yöntem dikey eşleşme arama (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) [43] tabanlıdır ve kabuk yapısı PA-SAR Algoritma akışında verilmiştir.

#### PA-SAR Algoritması

$$\begin{array}{l}
 \hline
 \textbf{İkleme: } \mathbf{r}_0 = \mathbf{y}, \mathbf{T}_0 = \{\}, \\
 e = \|\mathbf{r}_0\|_2, k = 1 \\
 \hline
 e < \epsilon \text{ ise iterasyona devam et} \\
 j^* = \arg \max_{j \in 1:NM} \left| \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}_j)^H \mathbf{r}_{k-1} \right| \\
 \mathbf{T}_k = \mathbf{T}_{k-1} \cup \{\boldsymbol{\theta}_{j^*}\} \\
 (\boldsymbol{\alpha}, \Phi, [\delta\boldsymbol{\theta}_1, \dots, \delta\boldsymbol{\theta}_k]) = \mathbb{S}(\mathbf{y}, \mathbf{T}_k) \\
 \mathbf{r} = \Phi^H \mathbf{y} - \sum_{p=1}^k \alpha_p \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}_p + \delta\boldsymbol{\theta}_p) \\
 e = \|\mathbf{r}\|_2 \\
 k = k + 1 \\
 \hline
 \textbf{Çıktı: } (\boldsymbol{\alpha}, [\delta\boldsymbol{\theta}_1, \dots, \delta\boldsymbol{\theta}_k], \mathbf{T}_k) \\
 \hline
 \end{array}$$

Geliştirilen algoritmanın  $k$ . adımında, seçilen  $k$  adet ızgara konumları  $\mathbf{T}_k$  ve ölçümler aşağıdaki gibi ifade edilen bir alt algoritmaya girdi olarak verilir;

$$(\boldsymbol{\alpha}, [\delta\boldsymbol{\theta}_1 \dots \delta\boldsymbol{\theta}_k], \Phi) = \mathbb{S}(\mathbf{y}, [\boldsymbol{\theta}_1 \dots \boldsymbol{\theta}_k]). \quad (2.19)$$

Bu algoritma seçilen ızgara konumları için Denklem (2.18)'e karmaşık yansıtıcılıkları, pertürbasyonları ve her bir çapraz menzil için faz hatalarını içeren bir çözüm sağlar. Daha sonra artık hata faz hatası düzelmiş ölçümler ve pertürbe edilmiş taban vektörleri kullanılarak tekrar hesaplanır. Bu dikkat edilmesi gereken bir nokta,  $\mathbb{S}(\cdot)$  algoritmasının OMP tabanlı dış kabuktan bağımsız olduğudur. Bu algoritma doğru ızgara noktalarını veren bir başka yöntem ile de kullanılabilir.

Toplam  $k$  adet ızgara konumunun kestirimi OMP tarafından sağlanmış olsa bile, Denklem (2.18) ile verilen optimizasyon problemi konveks olmamaktadır. Karmaşık genliklerin  $\alpha_k$ , ızgara konumlarına olan pertürbasyonların  $\delta\boldsymbol{\theta}_k$  ve faz hatalarının  $\phi_i$  bulunması gerekmektedir. Bu amaçla, değişkenlerin birbirinden ayrı optimize edildiği iteratif bir optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bir değişken üzerinden optimizasyon yapılırken diğer değişkenler sabit tutulmaktadır. Yakınsama kriteri sağlanana kadar bu şekilde iteratif bir şekilde değişkenler çözülmektedir.

İlk olarak; yansıtıcılık vektörü  $\alpha$  aşağıdaki eşitlik kullanılarak kestirilmektedir,

$$\alpha_l = \arg \min_{\alpha} \left\| \mathbf{y} - \sum_{p=1}^k \alpha_p \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}_{p,l}) \right\|_2, \quad (2.20)$$

burada  $l, \mathbb{S}(\cdot)$  algoritmasının iterasyonlarını ifade eden indekstir.  $\boldsymbol{\theta}_{p,l}$  ise  $l$ . iterasyondaki  $\boldsymbol{\theta}_p$  vektörüdür. Güncel ızgara parametreleri ve yansıtıcılık değerleri kullanılarak, her darbeye ilişkin faz hatası aşağıdaki gibi kestirilir;

$$\hat{\phi}_i = \angle \alpha_{i,l}^H \mathbf{G}_i^H \mathbf{y}_i, \quad (2.21)$$

burada  $i$  darbe indisidir. Ölçümler üzerinde faz hatası düzeltmesi işlemi, Denklem (2.21) ile elde edilen faz hatası kestirimleri kullanılarak  $\hat{\mathbf{y}}_i = e^{-j\hat{\phi}_i} \mathbf{y}_i$  şeklinde yapılır, burada  $\hat{\mathbf{y}}_i$  faz hatası düzeltilmiş ölçüm vektörüdür. Ardından, ızgara pertürbasyon parametreleri güncellenir ve parametre pertürbasyonu  $\boldsymbol{\theta}_{p,l+1} = \boldsymbol{\theta}_{p,l} + \delta \boldsymbol{\theta}_{p,l}$  ile yapılır,  $[\delta \boldsymbol{\theta}_{1,l} \dots \delta \boldsymbol{\theta}_{k,l}]$  aşağıdaki ifadenin bir çözümü olarak elde edilir;

$$\min_{\substack{\delta f_{1,p}: |\delta f_{1,p}| \leq \Delta_1/2 \\ \delta f_{2,p}: |\delta f_{2,p}| \leq \Delta_2/2}} \left\| \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(f_{1,p,l} + \delta f_{1,p}, f_{2,p,l} + \delta f_{2,p}) \right\|_2. \quad (2.22)$$

Denklem (2.20)'nin çözümü iyi bilinen en küçük kareler tekniği ile bulunur. Denklem (2.22) ise doğrusal olmayan kısıtlı bir optimizasyon problemidir, gradyen düşümü kullanan bir yaklaşım ile çözülebilir. Bu amaçla, Denklem (2.22) ile verilen maliyet fonksiyonu  $\boldsymbol{\theta}_{p,l} = (f_{1,p,l}, f_{2,p,l})$  etrafında doğrusallaştırılabilir. İlgili arama işlemi bir ızgara boyutu ile sınırlandırılmış dar bir alanda yapıldığı için, bu doğrusallaştırma işlemi pratikte iyi sonuçlar vermenin yanında işlemsel karmaşıklığı oldukça azaltmaktadır. Birinci dereceden Taylor serisi kullanılarak  $\mathbf{g}(f_{1,p,l} + \delta f_{1,p}, f_{2,p,l} + \delta f_{2,p})$  aşağıdaki gibi yakınsanır;

$$\mathbf{g}(f_{1,p,l} + \delta f_{1,p}, f_{2,p,l} + \delta f_{2,p}) \approx \mathbf{g}(f_{1,p,l}, f_{2,p,l}) + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{1,p,l}} \delta f_{1,p} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{2,p,l}} \delta f_{2,p}. \quad (2.23)$$

Denklem (2.23) kullanılarak ve üzerindeki kısıtlar kaldırıldığında Denklem (2.22)

aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir;

$$\begin{aligned} [\delta\theta_{1,l} \dots \delta\theta_{k,l}] &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{J}_R(\mathbf{u}), \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}} \left\| \mathbf{r}_l - \mathbf{B}_l \mathbf{u} \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (2.24)$$

burada  $\mathbf{r}_l = \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(\theta_{p,l})$  dikey artık (residual) ve  $\mathbf{B}_l \in \mathcal{C}^{N \times 2k}$  ise doğrusallaştırma noktasındaki ağırlıklandırılmış kısmi türevleri barındıran matristir;

$$\mathbf{B}_l = \left[ \Delta_1 \alpha_{1,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{1,1,l}}, \dots, \Delta_1 \alpha_{k,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{1,k,l}}, \Delta_2 \alpha_{1,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{2,1,l}}, \dots, \Delta_2 \alpha_{k,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{2,k,l}} \right], \quad (2.25)$$

ve  $\mathbf{u} = [\delta f_{1,1}, \dots, \delta f_{1,k}, \delta f_{2,1}, \dots, \delta f_{2,k}]^T \in \mathbb{R}^{2k \times 1}$ ,  $l$ . iterasyondaki güncellemeleri tutar. Izgara boyutu ile yapılan normalizasyondan dolayı,  $\mathbf{u}$ 'nun içeriği birimsizdir. Her iterasyonda,  $\theta_{p,l}$  güncellemeleri ile birlikte  $\mathbf{B}_l$  de güncellenir.

Aramanın doğruluğunu iyileştirmek için, her adımda, parametreler negatif gradyen tarafından belirlenen düşüm yönünde güncellenir. Bunun için güncellemeler ızgara boyutundan küçük olmalıdır.

Denklem (2.24) ile verilen maliyet fonksiyonu için,  $\mathbf{J}_R$ 'nin  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ 'daki negatif gradyeni  $-\nabla_{\mathbf{u}} \mathbf{J}_R(\mathbf{u})|_{\mathbf{u}=\mathbf{0}} = \text{Re} \{2\mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l\}$  ile belirlenir. Öyleyse, Denklem (2.22) ile verilen ana amacın değişken gradyen düşümü (alternating gradient descend) çözümü vardır ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\begin{aligned} \alpha_l &= [\mathbf{g}(\theta_{1,l}) \mathbf{g}(\theta_{2,l}) \dots \mathbf{g}(\theta_{k,l})]^\dagger \mathbf{y}, \\ \theta_{p,l+1} &= \theta_{p,l} + \mu_{p,l} \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

burada  $\mu_{p,l}$  uygun bir şekilde seçilmiş adım boyudur. Bu noktada güncellemelerin ızgara kısıtlamalarını sağlayıp sağlamadığını kontrol edilir. Maliyet fonksiyonu türevi alınabilir ve arama alanı tek bir ızgara hücresi ile sınırlandırılmıştır. Bu sebeple, gradyen düşümü arama alanı içerisinde her zaman maliyet fonksiyonunun bir lokal minimasına yakınsar [59]. Burada Taylor serisinde birinci seviyede yaklaşıklık kullanılmıştır. Arama alanı birden fazla ızgara hücrelerini kapsıyor olsaydı, daha yüksek seviyede yaklaşıklık kullanılması gerekebilirdi. Bu iteratif optimizasyon

yaklaşımının algoritmik yapısı aşağıda verilmiştir, bu yapı  $\widehat{\mathbb{S}}(\cdot)$  ile belirtilmiştir. PA-SAR Algoritma akışında ise,  $\widehat{\mathbb{S}}(\cdot)$  algoritması OMP tabanlı metodun bir parçası olarak kullanılmıştır, bu yapı ızgara dışılık problemini ve otomatik odaklama işlemini aynı anda çözmektedir.

### Geliştirilen Çözücü $\widehat{\mathbb{S}}(\cdot)$ Algoritması

$$\begin{array}{l}
 \underline{\text{Girdiler: } (\mathbf{T}_k = [\boldsymbol{\theta}_1, \dots, \boldsymbol{\theta}_k], \mathbf{y}, \boldsymbol{\mu})} \\
 \underline{\text{İkleme: } l = 0, \boldsymbol{\theta}_{p,0} = \boldsymbol{\theta}_p, p = 1 : k} \\
 \text{Durma kriteri sağlanana kadar,} \\
 \mathbf{G}_l = [\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}_{1,l}) \ \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}_{2,l}) \ \dots \ \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}_{k,l})], \\
 \boldsymbol{\alpha}_l = \mathbf{G}_l^\dagger \mathbf{y}, \\
 \text{For } i = 1 : D \\
 \quad \phi_i = \angle \boldsymbol{\alpha}_i^H \mathbf{G}_i^H \mathbf{y}_i, \\
 \quad \widehat{\mathbf{y}}_i = e^{-j\phi_i} \mathbf{y}_i \\
 \mathbf{r}_l = \widehat{\mathbf{y}} - \mathbf{G}_l \boldsymbol{\alpha}_l \\
 \mathbf{B}_l \text{ oluştur} \\
 \mathbf{a}_l = \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \} \\
 \text{For } p = 1 : k \\
 \quad f_{1,p,l+1} = f_{1,p,l} + \Delta_1 \boldsymbol{\mu}_{p,l} a_{p,l} \\
 \quad f_{2,p,l+1} = f_{2,p,l} + \Delta_2 \boldsymbol{\mu}_{p+k,l} a_{p+k,l} \\
 \text{Eşitlik } \boldsymbol{\theta}_{p,l+1} = (f_{1,p,l+1}, f_{2,p,l+1}) \\
 \text{ızgara içerisinde mi?} \\
 \quad \delta \boldsymbol{\theta}_p = \boldsymbol{\theta}_{p,l+1} - \boldsymbol{\theta}_{p,0} \\
 \underline{\underline{\text{Çıktı: } (\boldsymbol{\alpha}, \phi_i, [\delta \boldsymbol{\theta}_1, \dots, \delta \boldsymbol{\theta}_k], \mathbf{T}_k)}}
 \end{array}$$

$\widehat{\mathbb{S}}(\cdot)$  algoritması iterasyonları için durma kriteri  $\mathbf{r}_l$ ,  $\boldsymbol{\theta}_{p,l}$  ve  $\|\mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l\|_2$ 'nin ya da bunların bir kombinasyonunun işlevi olarak verilebilir. Bu çalışmada, iterasyonlar artık değer normu  $\|\mathbf{r}_l\|$  belirli bir eşik seviyesinden düşük olması durumunda durdurulmuştur. Algoritma içerisinde değişken adım boyu  $\mu$  kullanılabilir, bununla birlikte nokta SAR modunun eş uzaklıklı ızgara boyutlarına sahip olması sabit adım boyu kullanılabilmesini olanaklı kılmaktadır, böylelikle algoritma karmaşıklığı da azalmış olmaktadır. Diğer taraftan, gerçek SAR sistemlerinde yapılacak analiz çalışmaları ile adım boyutunun gerçek değeri kolaylıkla belirlenebilir.

## 2.5 Benzetimler ve Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, geliştirilen yöntem PA-SAR algoritmasının performansı farklı senaryolar altında test edilmiştir. Karşılaştırmalı benzetimler yapılmıştır, karşılaştırmalarda PFA [9] ve PGA [14] gibi klasik yöntemlerin yanında, daha güncel

seyrekliğe dayalı yöntemler olan SDA [15], EMMP (Expectation Maximization Matching Pursuit) [17] ve SBA (sparsity based autofocus) [16] teknikleri de kullanılmıştır. Görsel sonuçlar hem sentetik veri hem de gerçek SAR sistemi verisi kullanılarak verilmiştir. Ayrıca farklı metriklere dayalı sayısal karşılaştırmalar da sunulmuştur.

Seyrek sahnelerde yansıtıcıların ayrık ızgara noktaları haricinde sürekli parametre uzayında her hangi bir yerde olabileceği altı çizilmesi gereken önemli bir konudur. Karşılaştırmalarda kullanılan yöntemler yansıtıcılardan oluşan görüntüyü ayrık bir ızgara üzerinde verirken PA-SAR algoritmasının çıktısı otomatik odaklaması yapılmış yansıtıcı değerleri ve bu yansıtıcıların ızgara dışı konumlarıdır. Bu ızgara dışı konum parametreleri sürekli bir uzayda verilmektedir. Bu sebeple, ızgara dışı hedef senaryoları için klasik ortalama karesel hata metriği (OKS) yöntemlerin performansını değerlendirmek için uygun bir yol değildir. Bunun yerine SAR görüntüsü oluşturma sayısal performans analizi için, farklı ızgara dışı senaryolarda kullanım uygulaması olan [60], Toprak Taşıma Mesafesi (TTM) (Earth Mover's Distance, EMD) [61, 62] metriği kullanımı önerilmiştir. TTM'nin yanında, SAR görüntüleme de kullanılan hedef-arkaplan oranı (HAO) [15] ve entropi ( $H_\alpha$ ) [18] metrikleri de hesaplanmıştır. Kullanılan metrikler aşağıda tanımlanmıştır;

1. **Toprak Taşıma Mesafesi (TTM)** (Earth Mover's Distance, EMD):

$P = (p_i, u_i)_{i=1}^m$  ve  $Q = (q_j, v_j)_{j=1}^n$  sırasıyla oluşturulmuş ve gerçek sahnelerdir.  $p_i$  ve  $q_j$  genlikleri,  $u_i$  ve  $v_j$  ise sırasıyla  $i$ . ve  $j$ . Yansıtıcıların konumlarını belirtir. TTM değeri oluşturulan sahnenin gerçek sahneye uyması için yapılması gereken minimum iş miktarını (isimde belirtildiği gibi taşınması gereken toprak miktarını) ifade eder. TTM aşağıdaki gibi tanımlanır [61, 62]:

$$TTM(P, Q) = \min_{F=\{\hat{f}_{i,j}\}} \frac{\sum_{i,j} \hat{f}_{i,j} d_{i,j}}{\sum_{i,j} \hat{f}_{i,j}}, \quad (2.27)$$

burada kısıtlar  $\sum_j \hat{f}_{i,j} \leq p_i$ ,  $\sum_i \hat{f}_{i,j} \leq q_j$ ,  $\sum_{i,j} \hat{f}_{i,j} = \min(\sum_i p_i, \sum_j q_j)$  ve  $\hat{f}_{i,j} \geq 0$  şeklindedir.  $d_{i,j}$   $i$ . ve  $j$ . reflektörler arasındaki Öklit uzaklığıdır.  $F = \{\hat{f}_{i,j}\}$  akış setleri ifade eder.  $\hat{f}_{i,j}$  akışı  $i$ . reflektörden  $j$ . reflektöre taşınması gereken miktarı belirtir. TTM [62]'da tanımlandığı gibi

hesaplanmıştır.

2. **Entropi:** Entropi ( $H_\alpha$ ) [18] görüntünün keskinliği ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$H_\alpha = - \sum_i p_i \log_2 p_i, \quad (2.28)$$

burada  $\mathbf{p}$ ,  $\alpha$  sahnesinin histogram değerlerini tutar. Keskin görüntüler için entropi değeri düşüktür.

3. **Hedef arkaplan oranı (HAO)** (Target Background Ratio, TBR): HAO aşağıdaki gibi tanımlanır [15]:

$$HAO = 20 \log_{10} \left( \frac{\max_{i \in T} |\hat{\alpha}_i|}{\frac{1}{I_B} \sum_{j \in B} |\hat{\alpha}_j|} \right), \quad (2.29)$$

burada  $T$  ve  $B$  sırasıyla hedef ve arkaplan piksellerini ifade eder.  $I_B$  arkaplan piksellerinin sayısıdır.

Karşılaştırılan yöntemler için, daha iyi görüntü oluşturma bakımından, TTM ve  $H_\alpha$  değerlerinin düşük, HAO'nın ise yüksek çıkması performansın daha yüksek olduğunu belirtir.

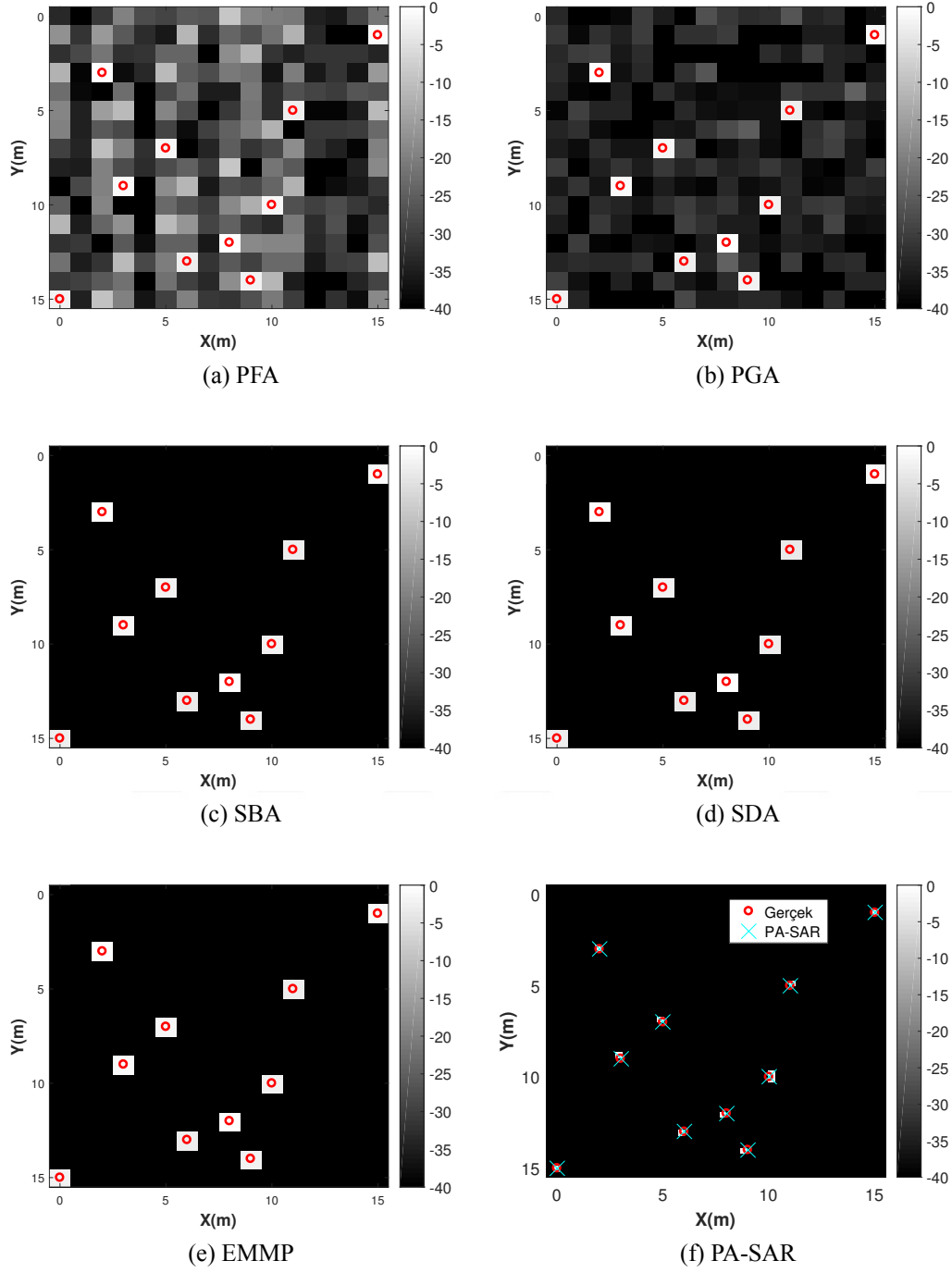
### 2.5.1 Nitel sonuçlar

Görsel kalitedeki iyileştirmeleri sunmak ve karşılaştırma yapabilmek için, PA-SAR ve benzetimlerde kullanılan diğer tekniklerin sentetik sahneler üzerindeki nitel sonuçları verilmiştir.  $K = 10$  adet yansıtıcıya sahip (16m)x(16m)'lik sentetik SAR verisi üretilmiştir. SAR sistem parametreleri, merkez frekans  $f_c = 10$  GHz, FM cıvıltı ortanı  $6 \cdot 10^{12} Hz^2$  ve darbe süresi  $T_p = 2.5 \times 10^{-5}$  saniye seçilmiştir. Hedef yansıtıcı genlikleri  $N(10, 1)$  olan dağılımdan rastgele olarak üretilmiştir, yansıtıcı fazları ise  $[0, 2\pi]$  arasında düzgün dağılımlıdır. Menzil ve çapraz menzil değerleri 1m olarak ayarlanmıştır. Kompanse edilmemiş platform hareketini yansıtmak için veriye faz hatası eklenmiştir. Ayrıca sentetik ölçümlere  $SGO = 10$  dB olacak şekilde karmaşık toplamsal beyaz Gauss gürültüsü eklenmiştir.

İlk senaryoda, tüm hedefler tam olarak ızgara noktaları üzerine konumlandırılmıştır. Test edilen tüm yöntemlerin sonuçları Şekil 2.2’de verilmiştir. Burada PFA görüntüsünde otomatik odaklama yapılmamıştır. Gerçek hedef konumları daireler ile PA-SAR sonuçları ise çarpı işaretleri ile belirtilmiştir. PA-SAR hedef konumu ve yansıtıcı kestirimleri verdiği için, hedef konumları bir görüntü elde etmek adına en yakın piksel noktasına genlik değerleri ile birlikte kaydırılmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, tüm hedeflerin ızgara noktaları üzerinde olduğu bu senaryo için tüm seyrekliğe dayalı yöntemler, klasik PGA’den oldukça iyi görünen, benzer performans sergilemektedirler.

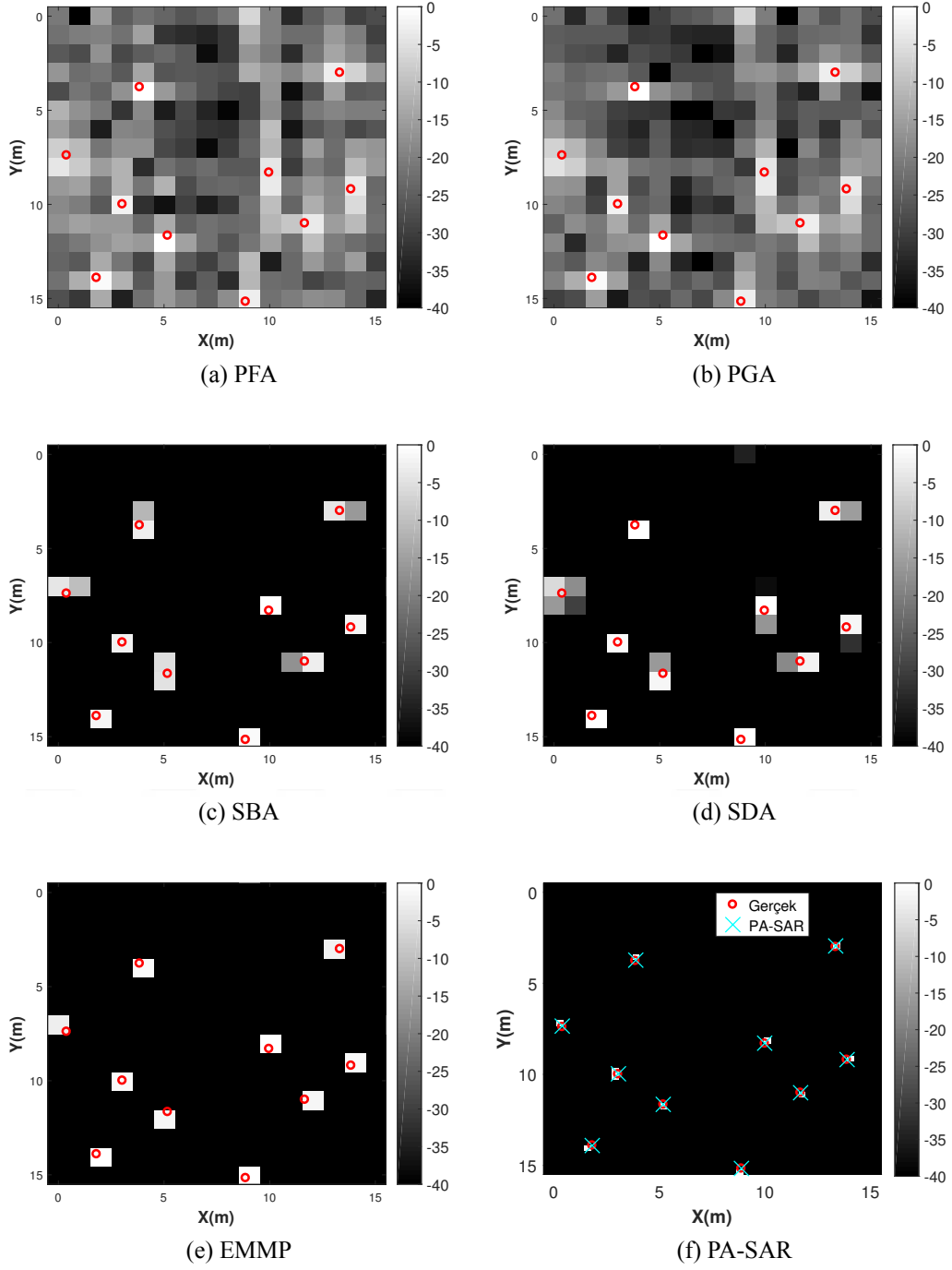
İlk senaryodaki parametreler ile hedeflerin ızgara dışı olarak rastgele yerleştirildiği bir sahnede karşılaştırılan yöntemlerin sonuçları Şekil 2.3’de verilmiştir. Seyrekliğe dayalı yöntemlerin PGA göre oldukça iyi performans göstermelerinin yanında, Şekil 2.2’de verilen ızgara üzeri duruma kıyasla ızgara dışılığı ele almayan yöntemlerin görüntülerinde bozulmalar olmaktadır. Diğer taraftan, geliştirilen PA-SAR algoritmasının ızgara dışılık altında da başarılı bir şekilde seyrek sahnenin görüntüsünü oluşturup otomatik odaklama yapabildiği görülmektedir.

Şekil 2.3’den görüldüğü üzere ızgara dışı hedefler, yansıtıcıların sinc benzeri davranışları sebebiyle genellikle komşu pikselleri etkilemektedir. SAR görüntülerinde bu durum genellikle insan yapımı yüksek yansıtıcılıklı bir objenin yakın komşuluğunda bulunan düşük yansıtıcılıklı bir diğer objeyi gölgelemesi şeklinde görülür. Böylesi yakın komşulukta bulunan ve aralarında genlik farkının yüksek olduğu hedefler için PA-SAR’ın performansını gösterebilmek adına bir diğer benzetim çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada mutlak genlik oranları 20’ye 1 olan birbirine yakın ve ızgara dışı yerleştirilmiş iki yansıtıcıdan oluşan sentetik veri üretilmiştir. Bu senaryo altında elde edilen sonuçlar Şekil 2.4’te verilmiştir. Görüldüğü üzere diğer seyreklik tabanlı teknikler genellikle yüksek yansıtıcılıklı hedefin görüntüsü oluştururken, düşük yansıtıcılıklı hedef görüntülenememektedir. Diğer taraftan PA-SAR ızgara dışılık problemi altında görüntüleme ve otomatik odaklama yaptığı için iki hedefi de görüntüleyebilmektedir. Bu avantaj, geliştirilen PA-SAR yönteminin en özgün yanlarından biridir.

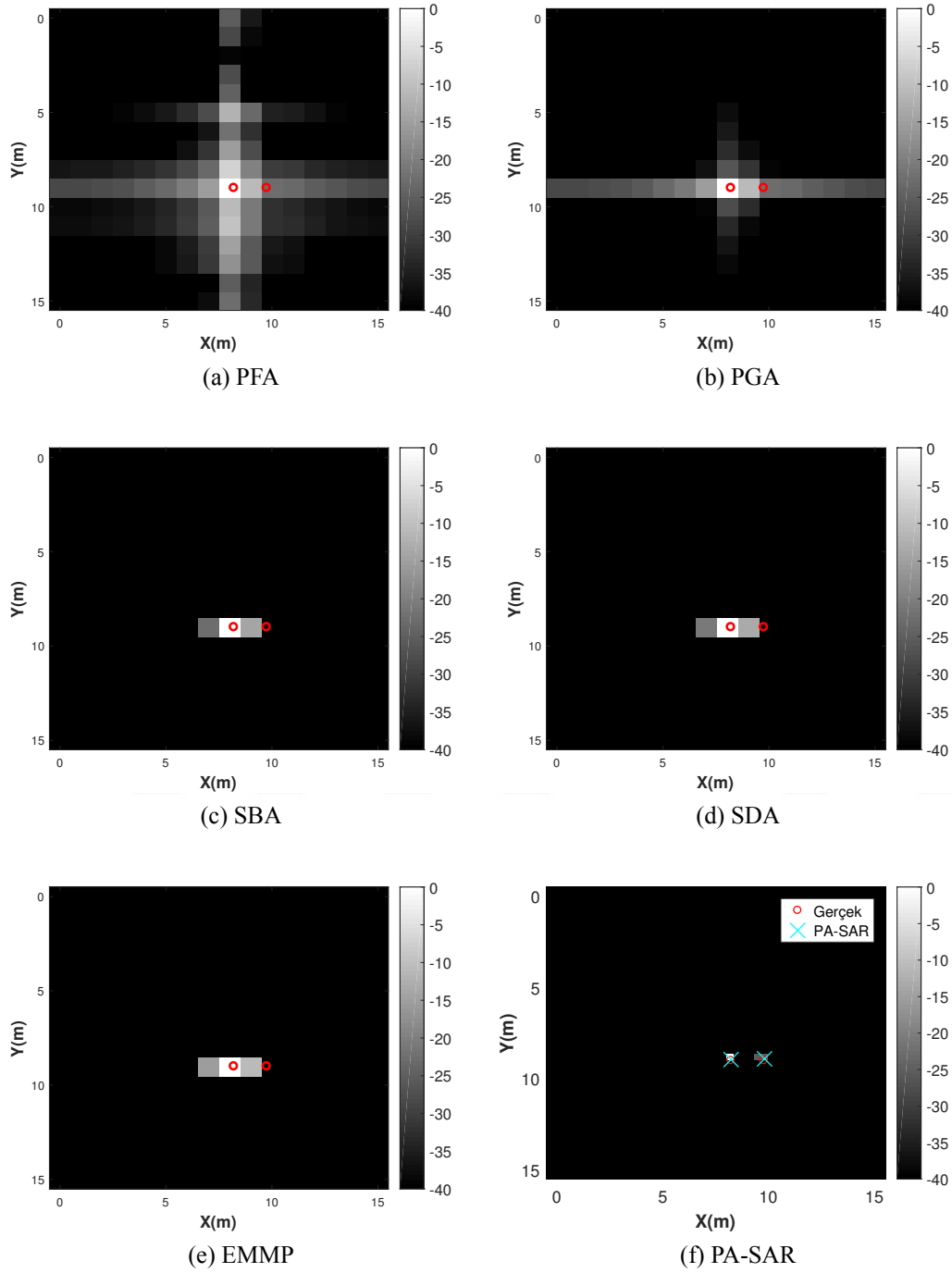


Şekil 2.2: SAR otomatik odaklama tekniklerinin görüntüleme sonuçları, ızgara üzeri hedefler içeren (16m)x(16m) sentetik sahne, (a) PFA, (b) PGA, (c) SBA, (d) SDA, (e) EMMP, (f) PA-SAR. Daireler  $K = 10$  adet hedefin gerçek konumlarını göstermektedir, çarpı işaretleri ise PA-SAR sonuçlarıdır. Görüntüler kendi maksimumlarına normalize edilerek dB skalasında çizdirilmiştir.





Şekil 2.3: SAR otomatik odaklama tekniklerinin görüntüleme sonuçları, ızgara dışı hedefler içeren (16m)x(16m) sentetik sahne, (a) PFA, (b) PGA, (c) SBA, (d) SDA, (e) EMMP, (f) PA-SAR. Daireler  $K = 10$  adet ızgara dışı hedefin gerçek konumlarını göstermektedir, çarpı işaretleri ise PA-SAR sonuçlarıdır. Görüntüler kendi maksimumlarına normalize edilerek dB skalasında çizdirilmiştir.



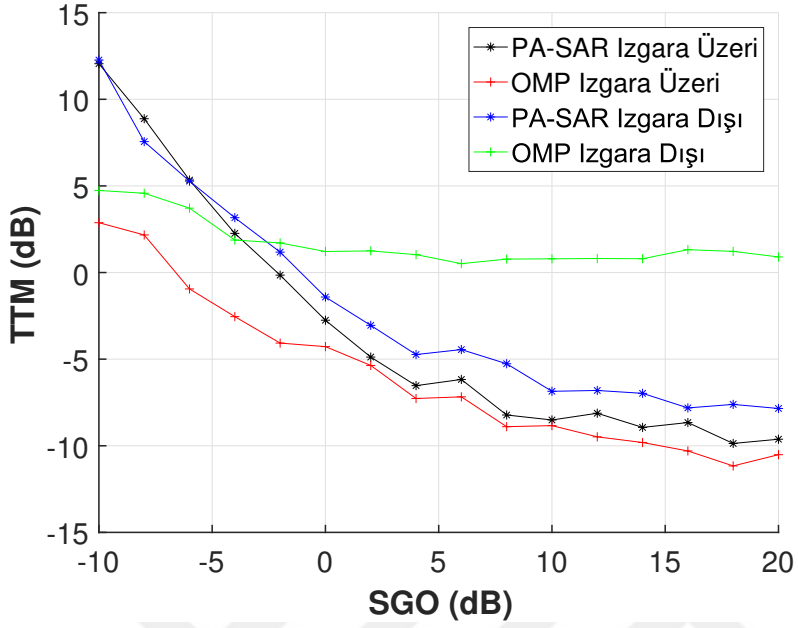
Şekil 2.4: SAR otomatik odaklama tekniklerinin görüntüleme sonuçları, iki adet birbirine yakın konumlu ızgara dışı noktasal reflektör, (a) PFA, (b) PGA, (c) SBA, (d) SDA, (e) EMMP, (f) PA-SAR. Daireler reflektörlerin gerçek konumlarını göstermektedir, çarpı işaretleri ise PA-SAR sonuçlarıdır. Görüntüler kendi maksimumlarına normalize edilerek dB skalasında çizdirilmiştir.

### 2.5.2 Nicel analizler

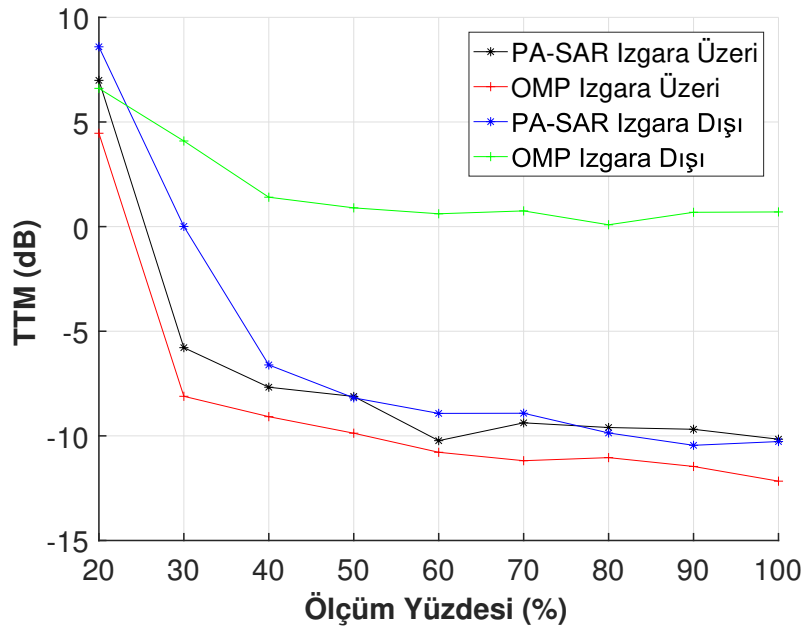
Bu bölümde, geliştirilen PA-SAR tekniği diğer seyrekliğe dayalı otomatik odaklama teknikleri ile nicel olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar SGO seviyesine ve farklı ölçüm oranlarına göre TTM, HAO ve Entropi metrikleri ile yapılmıştır. Sayısal karşılaştırma yapabilmek için ilgili senaryo parametresi altında  $(16m) \times (16m)$ , rastgele konumlandırılmış  $K = 10$  ızgara dışı hedefin bulunduğu 50 farklı sahne oluşturulmuştur. Her sahne için, farklı 1 boyutlu ve çapraz menzile göre değişen faz hatası sentetik veriye eklenmiştir. İlk olarak tüm SAR verisini kullandığı ve  $-10$  ile  $20$  dB SGO seviyesi arasında değişen durumlar oluşturulmuştur. Her SGO seviyesi için, her sahneye farklı bağımsız karmaşık toplamsal beyaz Gauss gürültüsü eklenmiştir. Daha sonra her sahne için test edilen metrikler hesaplanmış ve sonuçların ortalaması sunulmuştur.

Pertürbasyon işleminin performansını göstermek adına, PA-SAR ve otomatik odaklama yapan OMP algoritmaları ızgara üzeri ve ızgara dışı sahneler için karşılaştırılmıştır. OMP sonuçları, OMP'nin ihtiyaç duyduğu durdurma kriteri seti üzerinden üretilmiştir. Bu parametre seti içerisinde en düşük TTM değerini veren sonuçlar seçilmiştir. Dolayısıyla, OMP sonuçları herhangi bir ön parametre seçimi için minimum TTM değerine sahiptir. Sonuçlar Şekil 2.5'te verilmiştir. Izgara üzeri sahneler için OMP biraz daha iyi sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi OMP'nin hedeflerin üzerinde bulunduğu ızgara konum parametrelerine mükemmel uyum sağlayan taban vektörlerini seçmesidir. Izgara dışı durumda ise PA-SAR sonuçları bozulmamaktadır, bununla birlikte OMP sonuçlarında ızgara üzeri duruma kıyasla gözle görülür bir performans düşüşü yaşanmaktadır. Bu durum geliştirilen PA-SAR algoritmasının etkisini ortaya koymaktadır.

SGO'na bağlı olarak test edilen metriklerin sonuçları Şekil 2.6'te verilmiştir. TTM metriğine göre yapılan karşılaştırmalar Şekil 2.6 (a)'da verilmiştir, burada  $-5$  dB SGO seviyesinin üzerinde PA-SAR'ın performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi TTM metriğinin hem hedef yansıtıcılıklarını hem de ızgara dışı hedef konumlarını dikkate almasıdır, ve sadece PA-SAR algoritması ızgara dışılık ve faz hatası minimizasyonu yapmaktadır. Ek olarak, tüm SGO seviyeleri için seyrekliğe



(a)



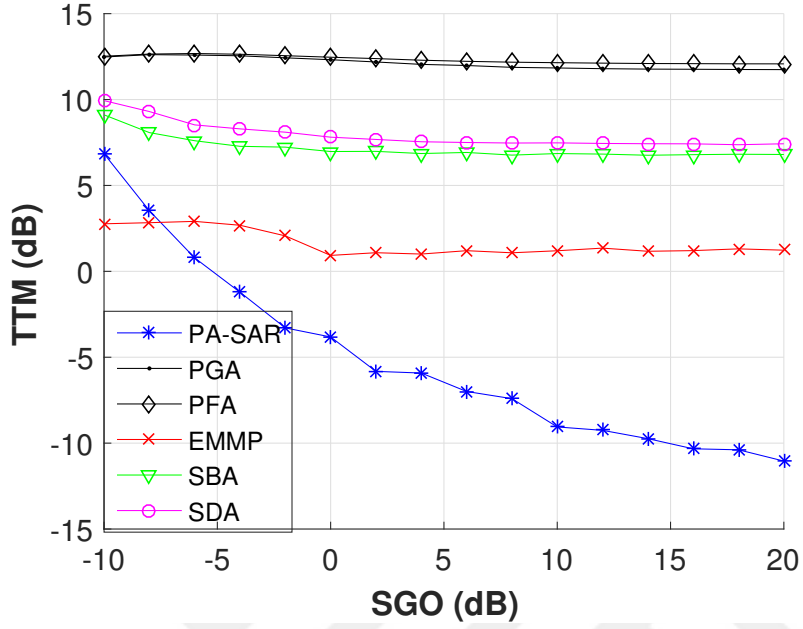
(b)

Şekil 2.5: Izgara üzeri ve ızgara dışı sahneler için OMP ile karşılaştırma sonuçları, (a) %50 ölçüm ile SGO'na göre TTM sonuçları , (b) SGO = 20dB için farklı ölçüm oranlarında TTM sonuçları.

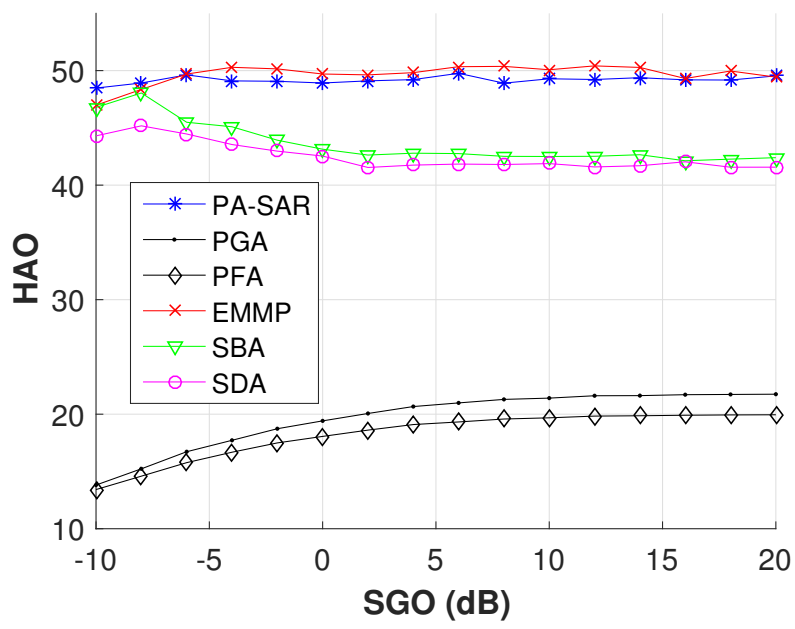
dayalı tekniklerin tamamı PFA ve PGA algoritmalarından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. SDA, SBA ve EMMP algoritmalarının çalışabilmek için ön tanımlı parametrelere ihtiyaç duyması önemli ve altı çizilmesi gereken bir konudur, ve bu algoritmaların performansları bu parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 2.6 ile verilen sonuçlarda bu yöntemler ön-tanımlı parametre setleri ile birden fazla defa çalıştırılmıştır. En düşük TTM değerini veren sonuç seçilerek hesaplamalara dahil edilmiştir. Dolayısıyla, karşılaştırılan tekniklerin TTM sonuçları herhangi bir parametre seti ile elde edilebilecek minimum TTM değerleridir. HAO ve entropi değerleri sırasıyla Şekil 2.7 (a) ve (b)'de verilmiştir. Seyrekliğe dayalı tüm yöntemler PFA ve PGA'den daha iyi sonuç vermektedir. PA-SAR ve EMMP'nin seyrekliğe dayalı yöntemler içerisinde az miktarda daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Faz hatası kestirimi OKS değerleri seyrekliğe dayalı yöntemlerde benzer çıkmaktadır.  $-5$  dB SGO seviyelerinden sonra PA-SAR algoritması bir miktar daha düşük OKS sonuçları vermektedir.

Karşılaştırılan tekniklerin azaltılmış ölçüm sayıları altında performanslarını incelemek için de benzetim çalışmaları yapılmıştır. %50 ölçüm sayısı ve farklı SGO seviyeleri için hesaplanan TTM değerleri Şekil 2.8 (a)'da verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere azaltılmış ölçüm sayısı altında da PA-SAR algoritması daha düşük TTM seviyelerine ulaşabilmektedir. Şekil 2.8 (b)'de ise 20dB'de sabit SGO ve  $K = 10$  olan sabit seyreklik seviyesi altında alınan TTM sonuçları verilmiştir. Düşük ölçüm sonuçlarında TTM değerleri yüksek çıkarsa da, %30 ve üzeri oranında SAR verisi kullanıldığında PA-SAR tekniği daha düşük TTM sonuçları vermektedir. TTM metriği ızgara dışı parametre kestiriminden etkilendiği için, ölçüm oranı daha da düşürüldüğünde PA-SAR tekniğinin performansı diğer seyrekliğe dayalı teknikler ile aynı seviyelere gelmektedir. Bu sonuçlar, %30 ve üzeri ölçüm seviyelerinde, test edilen SGO ve seyreklik seviyeleri için PA-SAR tekniğinin yansıtıcılık ve ızgara dışı parametre kestirimini başarılı bir şekilde yaptığını göstermektedir.

Çözünürlük performansını analiz edebilmek adına bir diğer benzetim senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryolar için,  $16m \times 16m$  boyutlu iki adet rastgele yerleştirilmiş eş genlikli hedefi içeren sentetik sahneler üretilmiştir. Karşılaştırılan yöntemlerin performansları iki ızgara dışı hedef arasındaki farklı uzaklıklar için

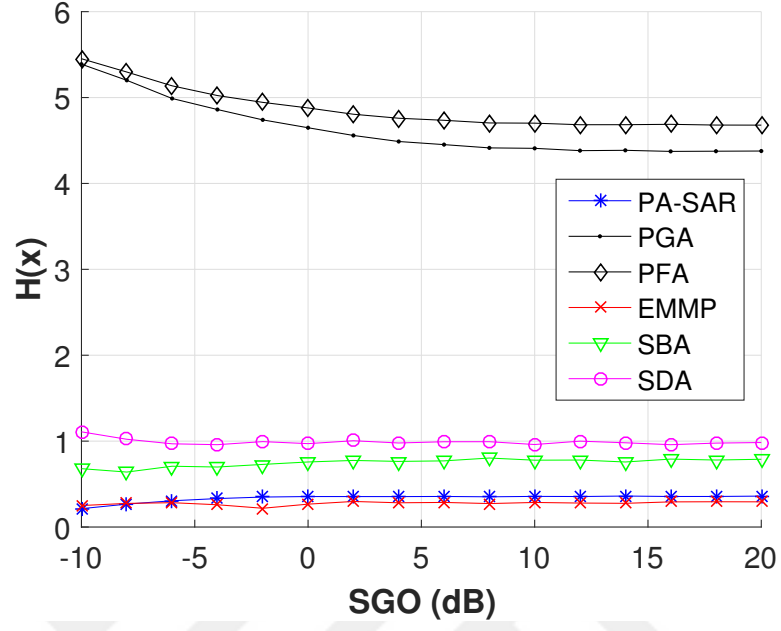


(a) TTM

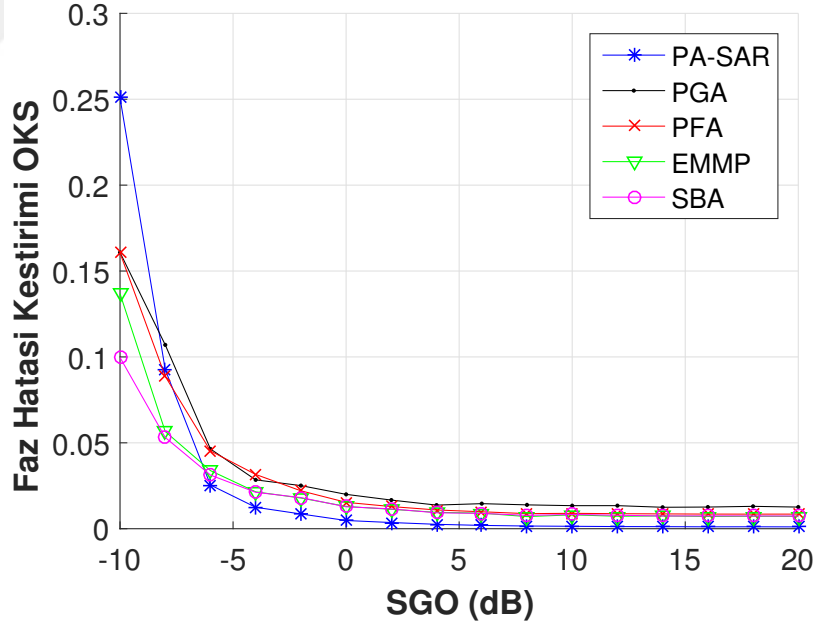


(b) HAO

Şekil 2.6: Farklı SGO seviyeleri için (a) TTM, (b) HAO.

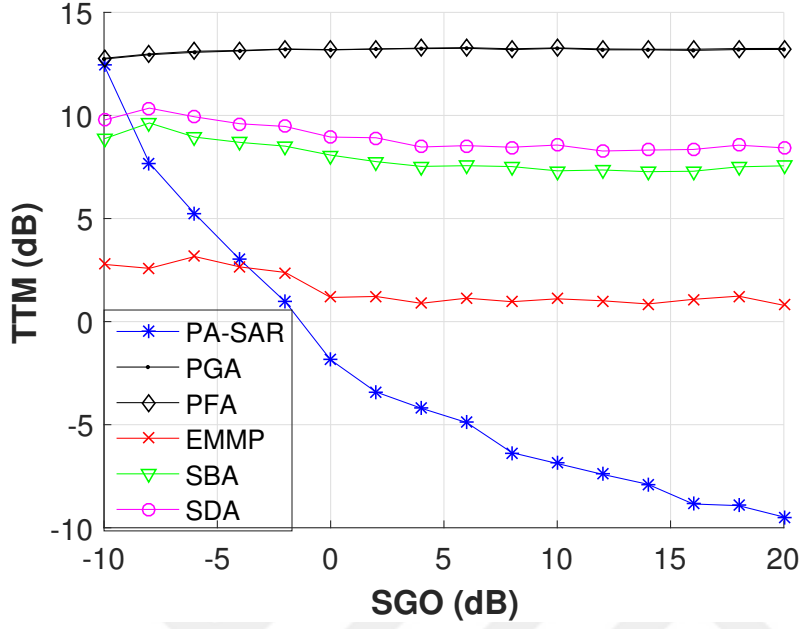


(a)  $H_\alpha$

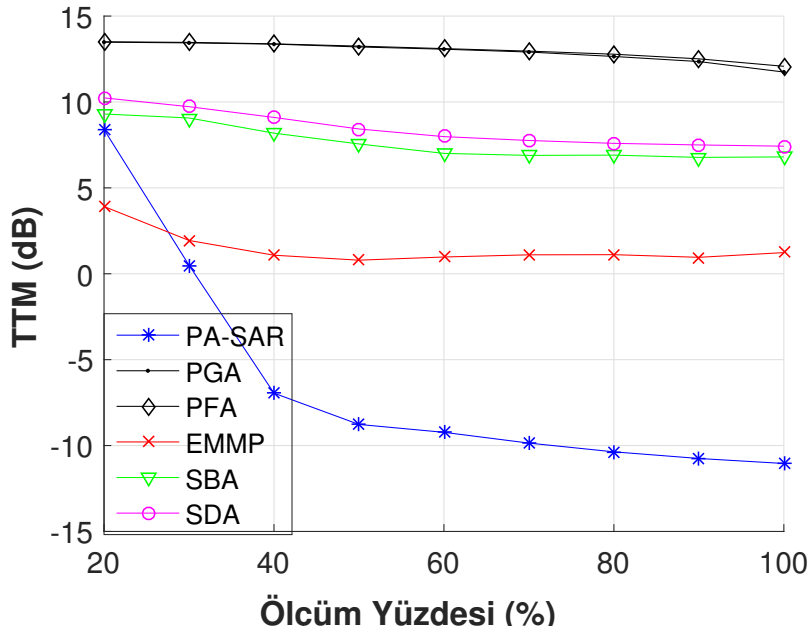


(b) Faz Hatası Kestirimi OKS

Şekil 2.7: Farklı SGO seviyeleri için (a)  $H_\alpha$ , (b) Faz Hata Kestirimi OKS.



(a)

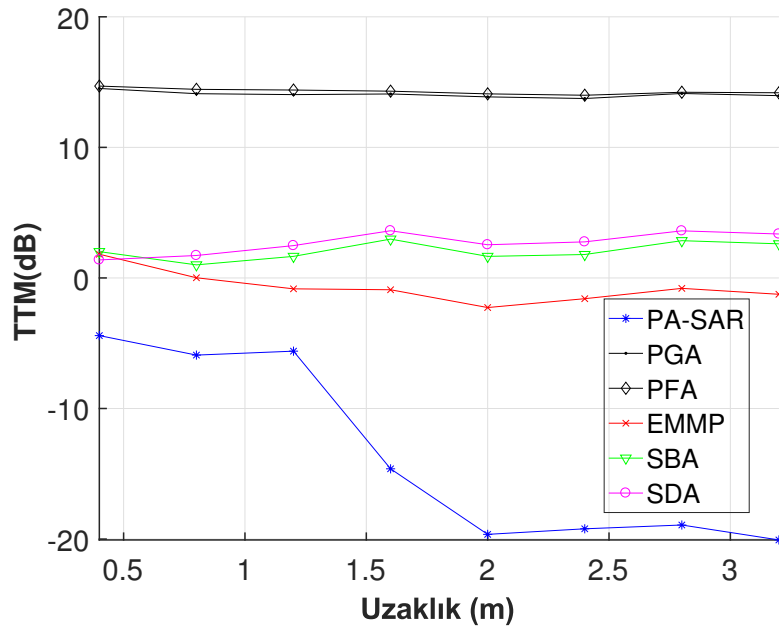


(b)

Şekil 2.8: (a) %50 ölçüm oranı ve farklı SGO seviyeleri için TTM sonuçları, (b) SGO = 20dB ve farklı ölçüm oranları için TTM sonuçları.



ölçülmüştür. Hedefler arasındaki her uzaklık değeri için, 50 farklı sahne üretilmiş ve bu sahneler için tüm yöntemlerin sonuçları oluşturulmuştur. Her sahne için, farklı 1 boyutlu ve çapraz menzile göre değişen faz hatası sentetik veriye eklenmiştir. Hedefler arasındaki mesafenin performansa etkisini inceleyebilmek için, görece yüksek 20dB SGO seviyesinde çalışılmıştır. Hedefler arasındaki mesafeye göre alınan sonuçlar Şekil 2.9’de verilmiştir. PA-SAR performansı çözünürlük seviyesinden sonra (1m) artmasına rağmen, tüm uzaklık seviyeleri için PA-SAR diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 2.9: Çözünürlük performansı analizi.

Benzetimlerde kullanılan yöntemlerin (16m)x(16m) boyutlu ve 1m çözünürlüklü,  $K = 10$  adet yansıtıcı içeren sahne için ortalama çalışma süreleri de hesaplanmıştır. Süre hesaplamaları Intel Core i5-3470 işlemcisi ve 8GB RAM’i olan bilgisayarda Matlab 2017a kullanılarak yapılmıştır. Tekniklerin ortalama çalışma süreleri saniye cinsinden; PA-SAR 3.062, SDA 0.076, PFA 0.0243, EMMP 0.237, SBA 0.102, PGA 0.0632 ve OMP 0.0194 olarak bulunmuştur. SDA ve SBA için maksimum iterasyon sayısı 100 olarak verilmiştir. PGA yöntemi girdi olarak PFA algoritmasının çıktısını kullandığı için PGA ve PFA sonuçlarının toplamı değerlendirilmelidir. PA-SAR’ın OMP tabanlı olduğu değerlendirildiğinde ve OMP’nin çalışma süresi göz önünde bulundurulduğunda PA-SAR çalışma süresinin tamamına yakınına pertürbasyonların

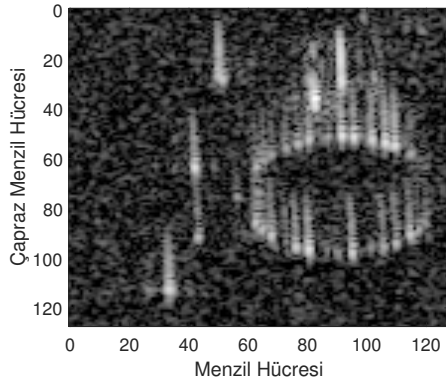
oluşturduğu söylenebilir. Farklı görüntü boyutları için çalışma sürelerinin değişeceği değerlendirilmektedir.

### 2.5.3 Gerçek veri sonuçları

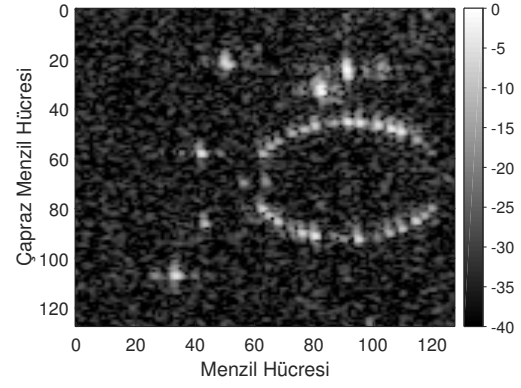
Benzetimler ile etkinliği gösterilen yöntemler ASELSAN tarafından geliştirilmiş olan hava platformuna konuşlu SARPERSAR Sisteminden [63] alınan gerçek karmaşık SAR verisi ile de çalıştırılmıştır. Köşe yansıtıcıların kullanıldığı bir test sahasından ölçüm alınmıştır. Benzetimlerde kullanılan teknikler tarafından oluşturulan otomatik odaklama yapılmış görüntüler Şekil 2.10'de, faz hatası kestirim sonuçları da Şekil 2.11'de verilmiştir. Seyrekliğe dayalı yöntemler tarafından verilerin sadece %33'ü kullanılmıştır. Çalışma [19]'de anlatıldığı şekilde yaklaşık-rastgele örnekleme uygulanmıştır. Tüm seyrekliğe dayalı yöntemlerde iterasyonlar aynı kriter ile sonlandırılmıştır.

Sonuçlardan görüldüğü üzere, PFA ve PGA'e kıyasla, tüm seyrekliğe dayalı yöntemler odaklanmış ve seyrek görüntüler oluşturmaktadır. Hedefler sadece nokta hedef olmadığı için, elde edilen görüntüler seyrekliğe dayalı yöntemler içerisinde birbirine benzer çıkmaktadır. Birbirine yakın hedefleri diğer teknikler birbirine karıştırabilmektedir, PA-SAR ise bu hedeflerde daha iyi ayrışım sağlamaktadır. Genliği zayıf bazı hedefleri PA-SAR tespit edebilirken, diğer teknikler kaçırabilmektedir. Faz hatası kestirimi için seyrekliğe dayalı teknikler birbirine yakın sonuçlar vermektedir, sadece PGA sonucu farklılık göstermektedir.

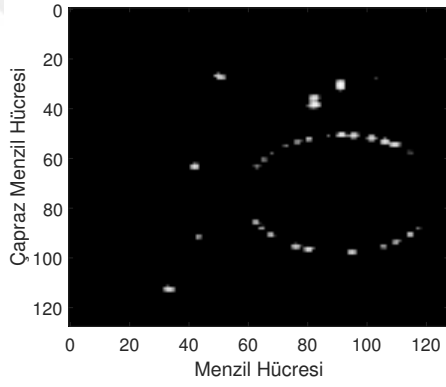
PA-SAR performansını sunmak için iki farklı gerçek SAR sistemi karmaşık veri seti daha kullanılmıştır. Bu karmaşık veriler de ASELSAN tarafından geliştirilmiş olan hava platformuna konuşlu SARPERSAR Sistemi [63] tarafından alınmıştır. Seyrekliğe dayalı çalışmanın performansını gösterebilmek amacıyla PA-SAR yöntemi için verilerin sadece %33'ü kullanılmıştır. Alınan sonuçlar Şekil 2.12'de verilmiştir. PFA odağı bozuk görüntüler oluşturmaktadır, PGA'in ise başarılı bir şekilde otomatik odaklama yapabildiği görülmektedir. PA-SAR, ilgili biçimsel ayrıntıların korunduğu odaklanmış seyrek görüntüler oluşturabilmektedir.



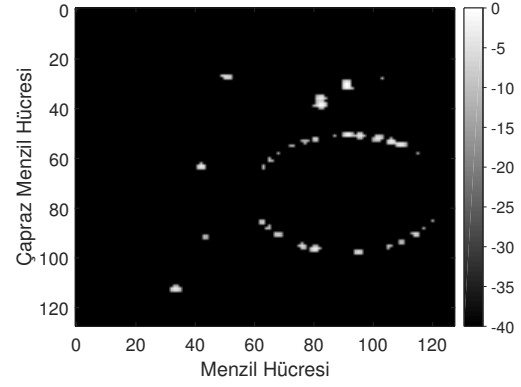
(a) PFA



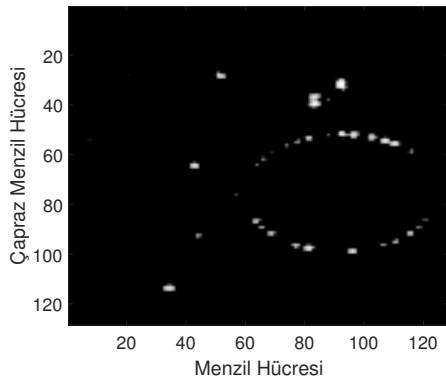
(b) PGA



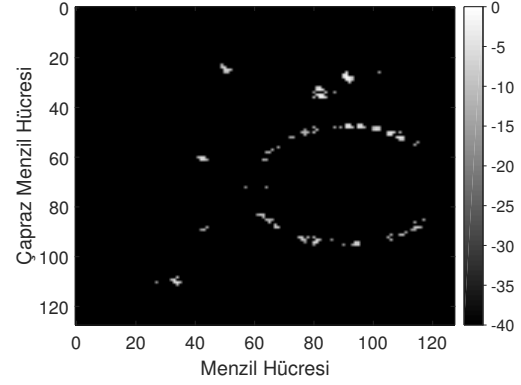
(c) SBA



(d) EMMP

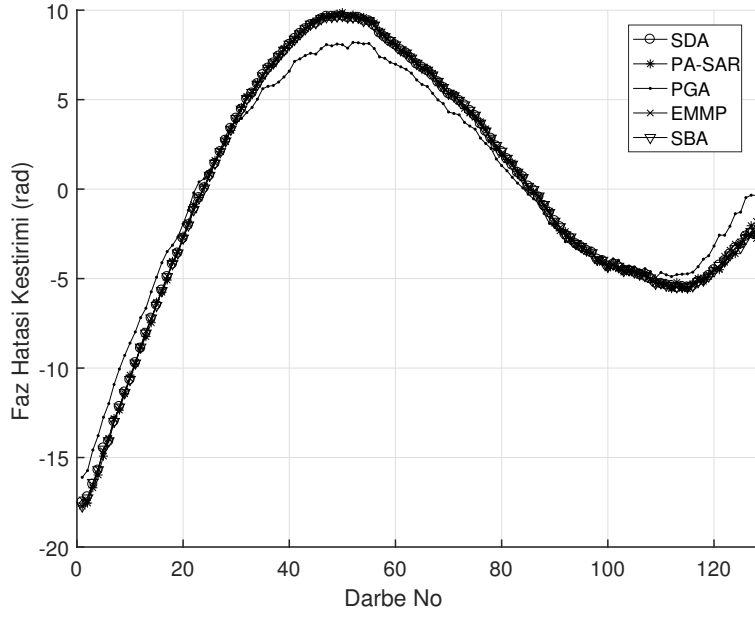


(e) SDA



(f) PA-SAR

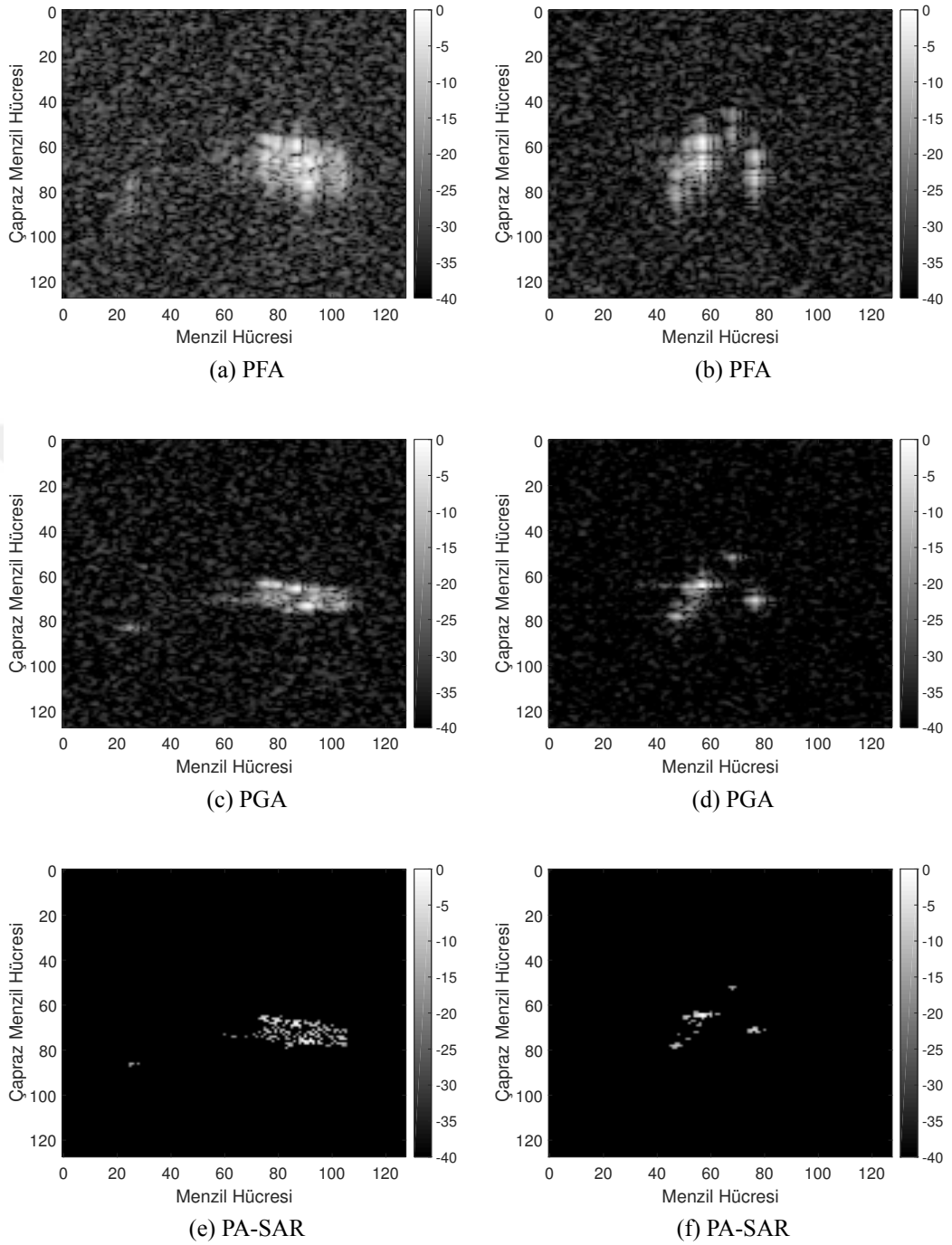
Şekil 2.10: Karşılaştırılan tekniklerin otomatik odaklama ve SAR görüntüleme sonuçları, ASELSAN SAR sistemi SARPER™ ile alınmış  $128 \times 128$  gerçek karmaşık veri, (a) PFA, (b) PGA, (c) SBA, (d) SDA, (e) EMMP, (f) PA-SAR. Verinin %33'ü kullanılmıştır.



Şekil 2.11: Karşılaştırılan tekniklerin (SDA, PGA, EMMP, SBA ve PA-SAR) gerçek veri için faz hatası kestirimleri. Verinin %33'ü kullanılmıştır.

#### 2.5.4 Sonuç ve yorumlar

Bu bölümde platform hareketi kaynaklı faz hatalarını ve ızgara dışı hedef hatalarını çözebilen PA-SAR görüntüleme tekniği geliştirilmiştir. Geliştirilen teknik dikey eşleşme arama (Orthogonal Matching Pursuit) tabanlı aç gözlü (greedy) bir tekniktir. Hedef yansıcılıkları, platform hareketi kaynaklı faz hataları ve ızgara dışı hedef pertürbasyonları iteratif bir şekilde çözülmektedir. PA-SAR ızgara dışılık hedef pertürbasyonlarını çözmek için gradyan düşümü tabanlı arama parametre güncellemesi ve faz hatası düzeltilmesi yaparak odaklı görüntüler oluşturmaktadır. Teknik azaltılmış ölçüm sayıları ile çalışabilmekte ve seyrek SAR görüntüleri oluşturmaktadır. Sentetik ve gerçek SAR sistemi verileri ile alınan sonuçlar, hesaplanan metrikler ile geliştirilen yöntemin daha iyi SAR görüntüsü oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 2.12: PA-SAR otomatik odaklama ve görüntüleme sonuçları, ASELSAN SAR sistemi SARPET<sup>TM</sup> ile alınmış  $128 \times 128$  gerçek karmaşık veri setleri. Verinin %33'ü kullanılmıştır. İnsan yapımı obje-1 için görüntüleme sonuçları (a) PFA, (c) PGA, (e) PA-SAR, İnsan yapımı obje-2 için görüntüleme sonuçları (b) PFA, (d) PGA, (f) PA-SAR.

## 2.6 Otomatik Durdurma ile Seyrek SAR Görüntü Oluşturma

Bu bölümde Sıkıştırılmış Algılama (SA) tabanlı Nokta Modda SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemi geliştirilmiştir [53]. Bu yöntem çapraz doğrulamaya (Cross Validation) dayanan otomatik durdurma kriteri kullanmaktadır [53].

Sıkıştırılmış Algılama tabanlı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama literatürde çalışılmış bir konudur [15–21]. Literatürdeki yöntemler incelendiğinde Nokta Modda SAR görüntü oluşturma yöntemini genellikle bir optimizasyon problemi olarak ele aldıkları görülmektedir. Bu optimizasyon problemi ise genel yaklaşım ile iteratif bir şekilde çözülmektedir [15–17]. İterasyon içerisinde öncelikle görüntü oluşturulmakta, daha sonra faz hatası kestirimi ve düzeltilmesi yapılmaktadır. Daha sonra tekrar görüntü oluşturularak iterasyon bir durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. Bu yöntemler değerleri önceden belirlenmesi gereken parametrelere ihtiyaç duymaktadırlar. Yöntemlerin performansı ise ihtiyaç duydukları parametrelerin doğru seçilmesine doğrudan bağlıdır. Bir parametre değerinde görüntü oluşturma performansı düşükken, aynı girdiler ve algoritma ile başka bir parametre değerinde görüntü oluşturma performansı iyileşebilmektedir. Parametrelerin doğru değerinin belirlenmesi ise görüntünün kendisine bağlıdır. Parametrelerin doğru belirlenebilmesi için görüntü bilinmelidir, ancak bu yöntemler ise görüntü oluşturabilmek için önceden seçilmesi gereken parametrelere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu durum pratikte bir açmaz oluşturmaktadır. Uygulamada bir operatör yardımı ile farklı parametre değerleri ile görüntü oluşturulup en iyi performansı veren parametre ya da parametreler seçilebilir. Farklı görüntü boyutu, SGO ve seyreklik seviyesi değerlerine göre önceden parametre setleri oluşturulup, görüntü oluşturulurken senaryoya uygun parametre değerleri seçilerek işlem yapılabilir.

Diğer taraftan farklı görüntü boyutu, SGO ve seyreklik seviyesi değerlerine göre önceden parametre setleri oluşturması işlem maliyeti yüksek ve karmaşık bir işlem olacaktır. Parametreden bağımsız bir yöntem geliştirilmesi bu zorlukların üstesinden gelecektir. Bu amaçla, önceden tanımlanması gereken bir parametreye ihtiyaç duymayan seyrekliğe dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem Dikey Eşleşme Arama (Orthogonal Matching Pursuit - OMP) [43] tabanlıdır. Çapraz doğrulama ile

OMP iterasyonları otomatik bir şekilde durdurulmaktadır, böylelikle yöntemin ön tanımlı bir parametreye ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Geliştirilen yöntemin performansı sentetik ve gerçek SAR verisi kullanılarak gösterilmiştir.

Bu bölümde öncelikle sonra geliştirilen yöntem anlatılacak ve daha sonra benzetim sonuçları ve yorumlar verilecektir.

### 2.6.1 Önerilen yöntem

Bölüm 2.3’de anlatılan, Çalışma [17]’de iteratif bir beklenti maksimizasyonuna dayalı eşleşme arama (Expectation Maximization Matching Pursuit, EMMP) prosedürü uygulanmıştır. Çalışma [15, 16]’da faz hata kestirimi tüm görüntünün kestirimi ile yapılırken, EMMP’de görüntü ve faz hatası kestirimleri iteratif bir şekilde eşleşme arama yapısı içerisinde yapılır. Bu algoritmaların tamamı ızgara üzeri hedef varsayımı ile çalışmaktadır. Ayrıca bu yöntemler azaltılmış ölçüm sayıları ile birlikte çalışabilmekte ve klasik PGA [14] algoritmasına kıyasla daha iyi faz hatası kestirimi yapabilmektedirler. Bununla birlikte bu algoritmaların tamamı önceden tanımlanması gereken parametrelere ihtiyaç duymaktadırlar. Algoritma performansları bu parametrelerin doğru seçilmesine bağlıdır. Bu parametrelerin değerlerinin doğru belirlenmesi ise bu algoritmaların gerçek uygulamalarda kullanılabilmesi için çözülmesi gereken önemli bir problemdir.

Bu bölümde Dikey Eşleşme Arama (Orthogonal Matching Pursuit - OMP) [43] altyapısını kullanan nokta mod SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama algoritması geliştirilmiştir (AOMP). Bu algoritma her OMP iterasyonunda yeni bir atom seçerek görüntü oluşturmakta ve diğer seyrekliğe dayalı yöntemler gibi Denklem (2.14) ile faz hatası kestirimi ve düzeltilmesi yapmaktadır. Algoritmayı önceden tanımlanması gereken bir parametreden kurtarmak için çapraz doğrulama tabanlı otomatik durdurma kriteri kullanılmaktadır. Bunun için ölçümler kestirim ( $\mathbf{y}_{(1)}$ ) ve doğrulama ( $\mathbf{y}_{(2)}$ ) olmak üzere iki segmente bölünmektedir. Kestirim segmentinde ile görüntü oluşturulmakta ve otomatik odaklama yapılmaktadır, elde edilen görüntü doğrulama segmenti kullanılarak test edilmektedir. Kestirim segmenti kullanılarak elde edilen görüntü  $\hat{\alpha}_k$  olsun, doğrulama segmenti kullanılarak

hesaplanan  $k$ . adımdaki hata  $e_k$  aşağıdaki gibi verilir;

$$e_k = \|\mathbf{y}_{(2)} - \mathbf{G}_2 \hat{\boldsymbol{\alpha}}_k\|_2, \quad (2.30)$$

burada  $\mathbf{G}_2$  doğrulama segmenti ile görüntü arasındaki ilişkiyi kuran SAR projeksiyon operatörüdür.

Kestirim ve doğrulama segmentleri, görüntü piksellerinin taşıdığı bilgi açısından ilintilidir. Dolayısıyla, algoritma içerisinde, kestirim ile görüntü oluşturma aşamasında görüntü pikselleri seçildiği sürece Denklem (2.30) ile verilen hata azalma eğilimi gösterecektir. Diğer taraftan görüntü pikselleri tüketildikten sonra gürültü kaynaklı pikseller seçilmeye başlanacaktır. Bu noktadan sonra Denklem (2.30) ile verilen hatanın artma eğilimi göstermesi beklenmektedir. Otomatik durdurma kriteri bu olguya dayanmaktadır. OMP iterasyonları içerisinde Denklem (2.30) ile verilen hata artmaya başladığında iterasyonlar durdurulmaktadır. Algoritma akışı aşağıda verilmiştir. Burada  $\mathbf{G}_1$ , kestirim segmenti ile görüntü arasındaki ilişkiyi kuran SAR projeksiyon operatörüdür.

#### Otomatik Durdurma Kriteri ile OMP - AOMP

---

**Girdi:**  $(\mathbf{G}, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \mathbf{y}, \mathbf{y}_{(1)}, \mathbf{y}_{(2)})$

---

**İkleme:**  $\mathbf{r} = \mathbf{y}_1, \mathbf{T}_0 = \{\}$ ,  
 $e_0 = \|\mathbf{y}_2\|_2, \hat{\mathbf{y}}_{(1)} = \mathbf{y}_{(1)}, \hat{\mathbf{y}}_{(2)} = \mathbf{y}_{(2)}, k = 1$

---

**DÖNGÜ;**  $e_k < e_{k-1}$  ise devam et

$j = \arg \max_{j \in 1:N} |\mathbf{G}_1^H \mathbf{r}_{k-1}|$   
 $\mathbf{T}_k = \mathbf{T}_{k-1} \cup \{\boldsymbol{\theta}_j\}$   
 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}'_k = (\mathbf{G}_1(\mathbf{T}_k))^\dagger \mathbf{y}_1$   
 Otomatik odaklama yap;  $\mathbf{y}_{(1)}$  ve  $\mathbf{y}_{(2)}$  için  
 Her  $i$ . darbe için,  $i = 1 : N$   
 $\hat{\phi}_i = \angle (\hat{\boldsymbol{\alpha}}'_k)^H \mathbf{G}_i^H \hat{\mathbf{y}}_i,$   
 $\hat{\mathbf{y}}_i = e^{-j\hat{\phi}_i} \hat{\mathbf{y}}_i$   
 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k = (\mathbf{G}_1(\mathbf{T}_k))^\dagger \hat{\mathbf{y}}_{(1)}$   
 $\mathbf{r} = \hat{\mathbf{y}}_{(1)} - \mathbf{G}_1 \hat{\boldsymbol{\alpha}}_k$   
 $e_k = \|\hat{\mathbf{y}}_{(2)} - \mathbf{G}_2 \hat{\boldsymbol{\alpha}}_k\|_2$   
 $k = k + 1$

**DÖNGÜ SONU**

---

**Çıktı:**  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k'}$

---



## 2.6.2 Benzetimler

Benzetim çalışmalarında SDA [15], SBA [16], EMMP [17] ve AOMP yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerin performansları sentetik ve gerçek veri ile test edilmiştir. Sentetik veriler kullanılarak Monte-Carlo benzetimleri yapılmış ve Ortalama Karesel Hata (OKS), hedef arkaplan oranı (HAO) [15] ve entropi ( $H_\alpha$ ) [18] metrikleri hesaplanarak çizdirilmiştir.

1. **Ortalama Karesel Hata (OKS)** (Mean Squared Error, MSE): OKS aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$OKS = \frac{1}{N_1 N_2} \|\alpha - \hat{\alpha}\|_2^2, \quad (2.31)$$

burada  $\alpha$   $N_1 \times N_2$  boyutlu gerçek görüntü ve  $\hat{\alpha}$  ise bunun kestirimidir.

2. **Hedef Arkaplan Oranı (HAO)** (Target Background Ratio, TBR): HAO aşağıdaki gibi tanımlanır [15]:

$$HAO = 20 \log_{10} \left( \frac{\max_{i \in T} |\hat{\alpha}_i|}{\frac{1}{I_B} \sum_{j \in B} |\hat{\alpha}_j|} \right), \quad (2.32)$$

burada  $T$  ve  $B$  sırasıyla hedef ve arkaplan piksellerini ifade eder.  $I_B$  arkaplan piksellerinin sayısıdır.

3. **Entropi ( $H_\alpha$ )** [18] görüntünün keskinliği ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$H_\alpha = - \sum_i p_i \log_2 p_i, \quad (2.33)$$

burada  $\mathbf{p}$ ,  $\alpha$  sahnesinin histogram değerlerini tutar. Keskin görüntüler için entropi değeri düşüktür.

Monte-Carlo çalışmaları için her bir senaryo adımında 50 adet,  $K = 10$  adet reflektör içeren (32m)x(32m) sentetik sahne üretilmiştir. Reflektör genlikleri  $N(10, 1)$  dağılımlı verilmiştir ve  $(0, 2\pi)$  arasında rastgele faz eklenmiştir. SAR sistem parametreleri, merkez frekans  $f_c = 10$  GHz, FM cıvıltı ortanı  $6 \cdot 10^{12} Hz^2$  ve darbe süresi  $T_p = 2.5 \times 10^{-5}$  saniye seçilmiştir. Çapraz menzil ve menzil çözünürlükleri 1 metre olarak verilmiştir. AOMP için verinin %90'ı kestirim segmentinde, kalan

%10'u ise doğrulama segmentinde kullanılmıştır. Segmentlerdeki örnekler rastgele seçilmiştir. SDA düzenleme parametresi  $\lambda = 10$  seçilmiştir. SBA parametresi olan  $\tau$ , AOMP sonucu oluşturulan görüntünün  $l_1$  normu olarak verilmiştir. EMMP parametresi olan seyreklik seviyesi ise AOMP sonucu oluşturulan görüntüdeki seyreklik seviyesi olarak verilmiştir. Monte-Carlo deneyleri sonucunda metrikler hesaplanmış ve ortalamaları çizdirilmiştir.

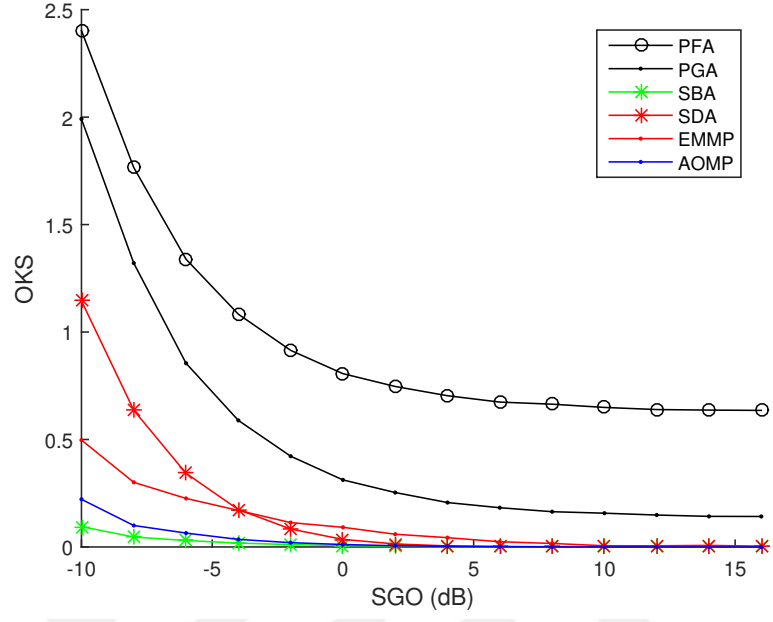
Toplam  $K = 10$  adet reflektör içeren (32m)x(32m) sentetik sahneler ile alınan sonuçlar Şekil 2.13'de verilmiştir. OKS ve  $H_\alpha$ 'nın düşük, HAO'nin ise yüksek çıkması yöntemlerin performansının iyi olduğunun göstergesidir. Şekil 2.13 (a), (b) ve Şekil 2.14'de farklı SGO seviyelerine göre sırasıyla OKS, HAO ve  $H_\alpha$  metriklerinin sonuçları verilmiştir. AOMP otomatik durdurma kriteri kullanmasına rağmen en iyi ya da en iyiye yakın sonuç vermektedir. OKS metriği için  $-5dB$  SGO seviyesinin altında SBA algoritması AOMP'den yakın da olsa daha iyi sonuç vermektedir.

Şekil 2.15 (a), (b) ve Şekil 2.16'de ise farklı ölçüm yüzdeleri için sırasıyla OKS, HAO ve  $H_\alpha$  sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan AOMP ile birlikte karşılaştırmalarda kullanılan tüm seyrekliğe dayalı yöntemlerin azaltılmış ölçüm altında çalışabildiği görülmektedir. Farklı SGO ve ölçüm yüzdeleri ile alınan tüm sonuçlarda AOMP otomatik durdurma kriteri kullanmasına rağmen en iyi ya da en iyiye yakın sonuç verdiği görülmektedir. Bu durum çapraz doğrulama kullanan otomatik durdurma kriterinin etkinliğinin bir kanıtıdır.

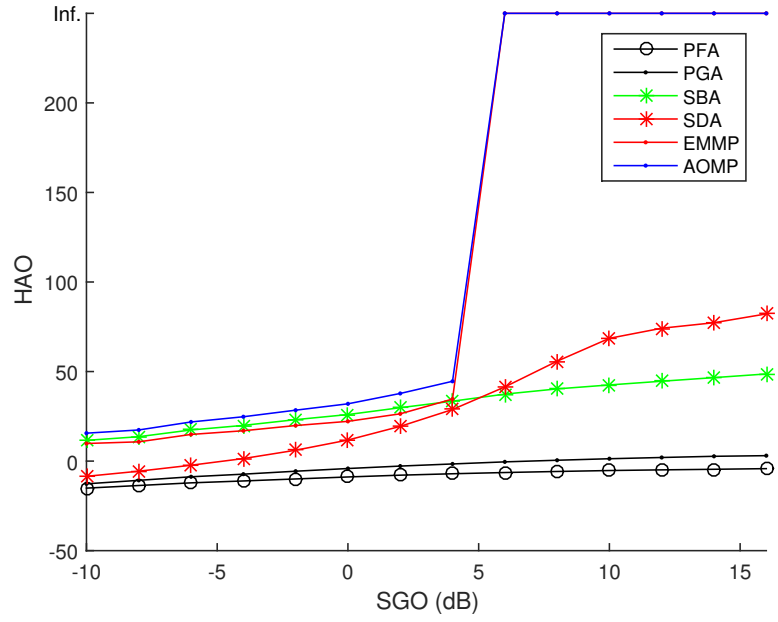
Benzetimlerde kullanılan algoritmalar ASELSAN hava platformu konuşlu SAR sistemi SARPER™[63] ile alınmış  $128 \times 128$  gerçek karmaşık SAR verisi ile de çalıştırılmıştır. Alınan sonuçlar Şekil 2.17'de verilmiştir. Gerçek veri ile alınan sonuçlar incelendiğinde AOMP otomatik durdurma kriteri kullanmasına rağmen diğer yöntemler ile oldukça benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

### 2.6.3 Sonuç ve yorumlar

Literatürdeki seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemleri incelendiğinde, bu algoritmaların genellikle iteratif olduğu ve önceden tanımlanması gereken parametreye gereksinim duydukları görülmektedir. Bu

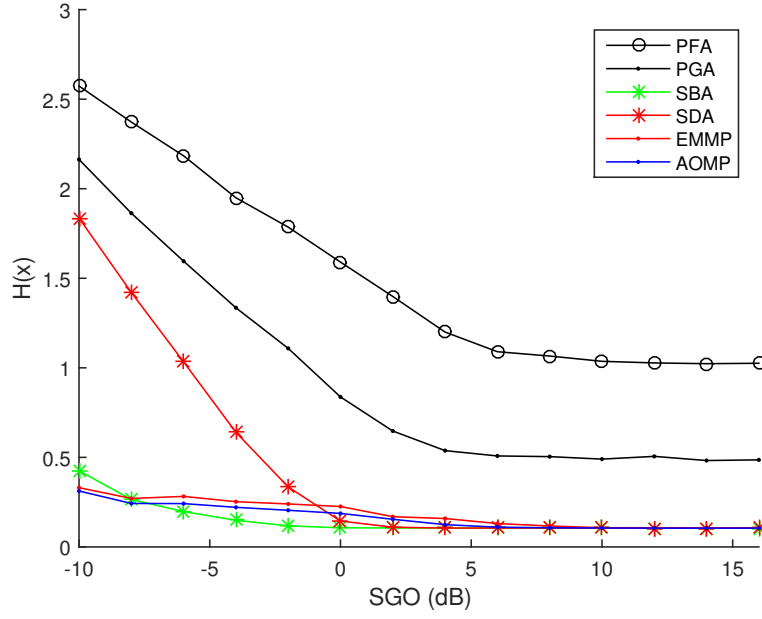


(a) OKS



(b) HAO

Şekil 2.13: Farklı SGO değerleri için benzetim sonuçları, (a) OKS, (b) HAO.

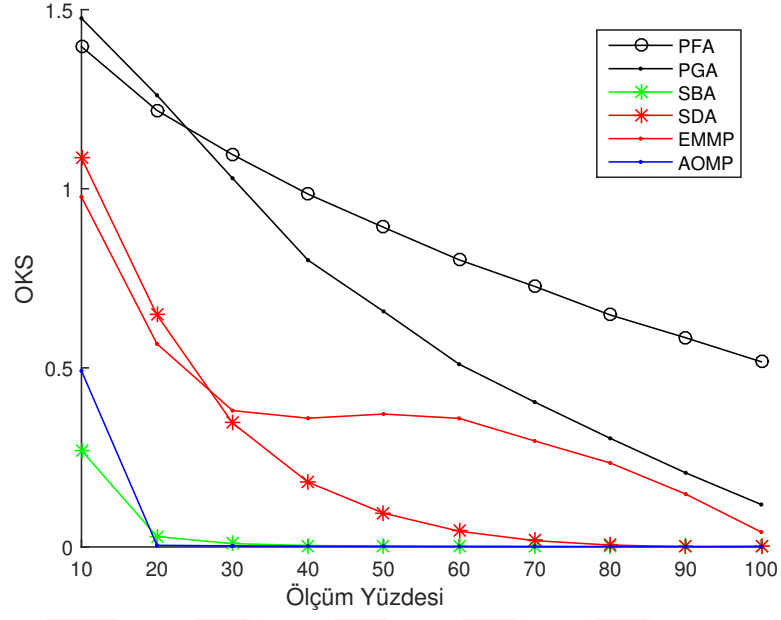


(a)  $H_\alpha$

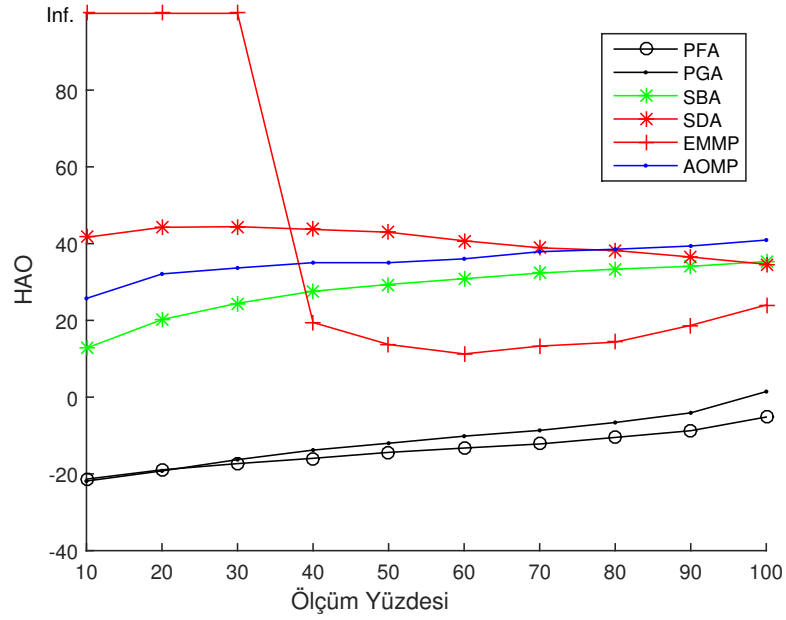
Şekil 2.14: Farklı SGO değerleri için benzetim sonuçları,  $H_\alpha$ .

yöntemlerin performansı ise bu parametrelerin doğru seçilmesine bağlıdır. Parametrelerin doğru değeri ise senaryoya ve görüntünün kendisine göre değişebilmektedir. Bu durum bu yöntemlerin pratikte kullanımını zorlaştırmaktadır.

Bu bölümde var olan metotların aksine dışarıdan parametreye gereksinim duymayan Dikey Eşleşme Arama (Orthogonal Matching Pursuit - OMP) tabanlı bir nokta mod SAR görüntü oluşturma otomatik odaklama (AOMP) algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma azaltılmış ölçüm altında da görüntü oluşturabilmektedir. Algoritma veriyi iki segmente ayırarak çapraz doğrulama tabanlı otomatik durdurma kriteri kullanmaktadır. Otomatik durdurma kriteri kullanmasına rağmen, sentetik ve gerçek SAR verisi ile yapılan analizlerde AOMP algoritmasının en iyi ya da en iyiye çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum AOMP algoritmasının etkinliğini göstermektedir.

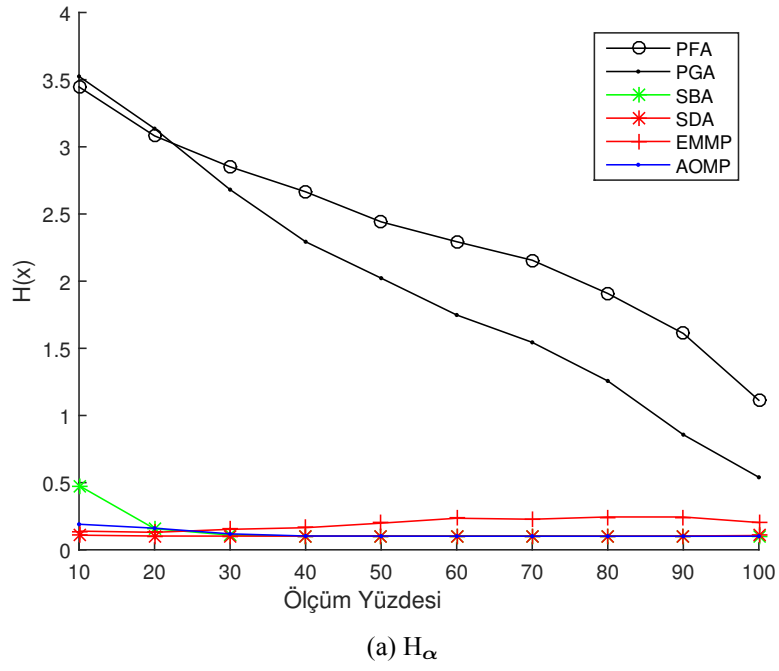


(a) OKS

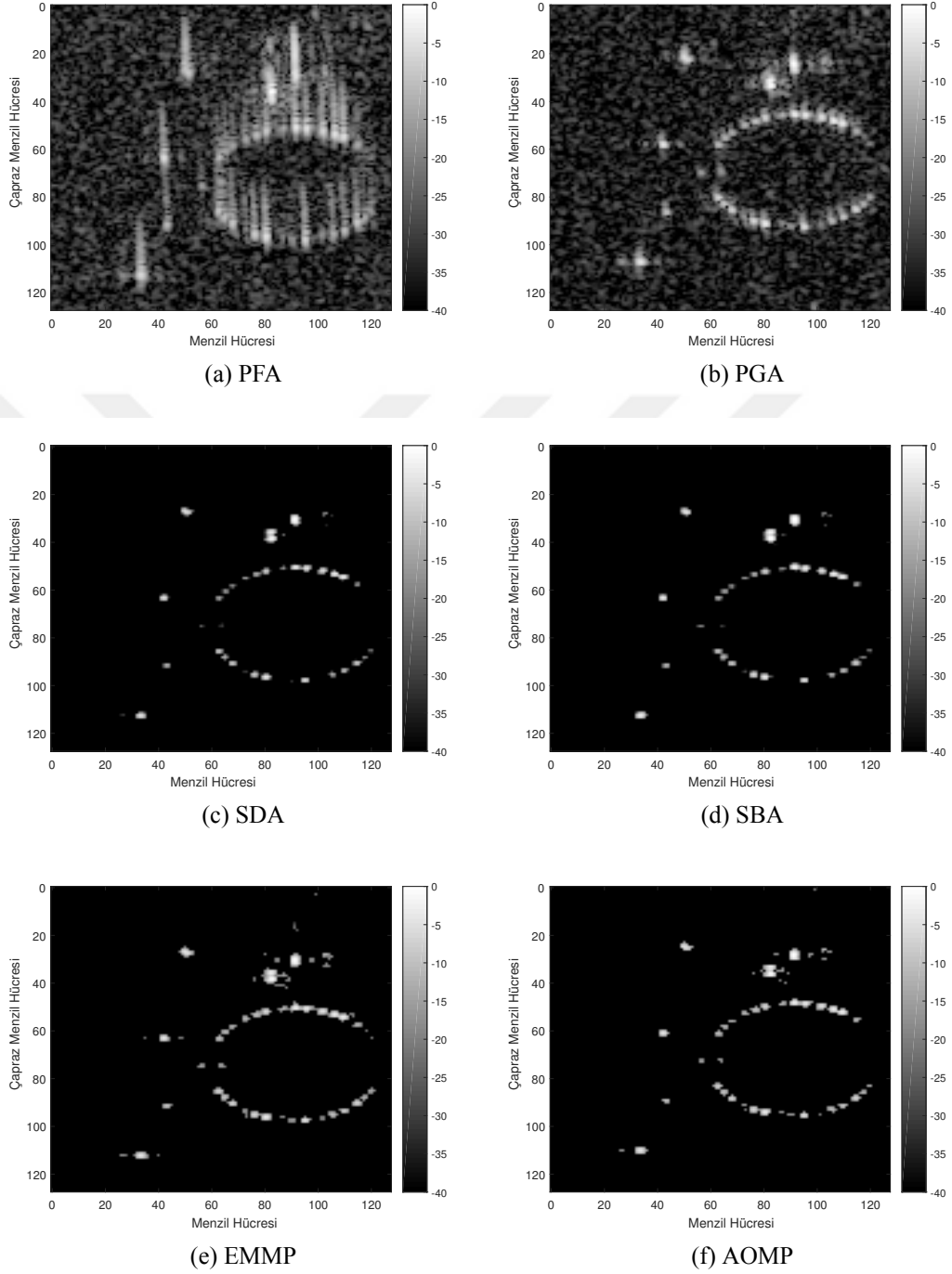


(b) HAO

Şekil 2.15: Farklı ölçüm oranları için benzetim sonuçları, (a) OKS, (b) HAO.



Şekil 2.16: Farklı ölçüm oranları için benzetim sonuçları,  $H_\alpha$ .



Şekil 2.17: Karşılaştırılan tekniklerin otomatik odaklama ve SAR görüntüleme sonuçları, ASELSAN SAR sistemi SARPET™ ile alınmış  $128 \times 128$  gerçek karmaşık veri, (a) PFA, (b) PGA, (c) SDA, (d) SBA, (e) EMMP, (f) AOMP.





### 3. IZGARA DIŞI SEYREK KÖR SENSÖR KALİBRASYONU

#### 3.1 Giriş

Bu bölümde ızgara dışılık durumunda, çoklu giriş çoklu çıkış durumu için sinyal geri çatımı ve faz ve genlik hatası düzeltimi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Dağıtık sensör ya da radar ağlarında, sistemlerin konumları ve diğer bazı sistem parametrelerinin değerleri tam olarak bilinemez. Bu durum sensörlerde faz ve genlik bozulmalarına sebep olabilir [22, 23]. Örneğin, mikrofon dizilerinde de mikrofonların frekans yanıtlarındaki farklılıktan dolayı kalibrasyon ihtiyacı vardır [24].

Sensör ya da radar ağlarında, rehbersiz/kör (unguided, blind) kalibrasyon yöntemlerinin kullanılabilmesinin sistemlerin bakım/onarım maliyetlerini azaltabileceği gibi bakım/onarımı kolaylaştırabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca kalibrasyonun yapılmaması kestirilen parametrelerin değerlerinde önemli hatalara yol açabilir. Bu durum Kör Sensör Kalibrasyonunun (Blind Sensor Calibration) önemini vurgulamaktadır.

Literatür incelendiğinde Kör Sensör Kalibrasyonu üzerine farklı çalışmaların olduğu görülmektedir. Çalışma [25]'de seyrekliğe dayalı konveks optimizasyon yöntemlerini kullanan kör sensör kalibrasyonu yöntemleri geliştirilmiştir. Sinyal geri çatımı ve kalibrasyon işlemi eş zamanlı olacak yapılmaktadır. Faz ve genlik kalibrasyonu işlemleri kör bir şekilde birlikte ya da ayrı yapılabilir. Bir diğer makalede [22] olağan sensör ölçümleri kullanılarak sensör ağlarının kör kalibrasyonu yapılmaktadır. Bir diğer yayın olan [23]'de konumları bilinen yayın kaynakları kullanılarak sensör ağı kalibrasyonu yapılmaktadır. Ağdaki sensörlerin konumları, faz ve genlik bozulmalarının yanı sıra sensörler arası ortak eşleşme (mutual coupling) değerleri de belirlenmektedir. Makale [26]'de ölçülen sinyaller üzerindeki bilinmeyen genlik değerleri, genelleştirilmiş yaklaşık mesaj iletimi yöntemi ile kalibre edilmektedir. Çalışma [27]'de seyrekliğe dayalı bir eşlenik (conjugate) gradyent algoritması ile kör

sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Çalışma [28]'de sensör ağları üzerinden seyrekliğe dayalı toplam en küçük kareler yöntemi kullanılarak kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Diğer bir çalışmada [29] ise faz dizili sensörlerde seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu çalışılmıştır.

Bir diğer çalışma [30]'de gelişigüzel yerleştirilmiş sensörlerden oluşan ağ sistemi üzerinden kör hüzme oluşturma problemi ele alınmıştır. Sensörlerin konumları ve frekans yanıtlarının bilinmediği varsayılmaktadır. Sadece algılanan sinyaller kullanılarak kör hüzme oluşturulma çalışılmıştır.

Literatür incelendiğinde seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu probleminin çokça çalışıldığı görülmektedir. Faz ve genlik hatalarının ve sinyal geri-çatımının aynı anda yapıldığı yöntemler görülmektedir. Bununla birlikte var olan çalışmalarda ızgara dışı (off-grid) sinyalleri ele alarak kör sensör kalibrasyonu yapan bir yöntem yoktur. Bu noktadan hareketle böyle özgün bir yöntemin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bölüm 2'de verilen yöntemde [51], seyrekliğe dayalı ızgara dışı sahnelerde SAR nokta modda görüntü oluşturulması ve aynı anda otomatik odaklama yapılması problemi ele alınmıştır. [51]'de geliştirilen yöntem matematiksel olarak ifade edildiğinde; 2 boyutlu seyrek sinyal geri-çatımı ve faz hatası kalibrasyonu yaptığı söylenebilir.

Bu bölümde ise [51]'de tariflenen yöntemden yola çıkarak ızgara dışılık altında kör sensör kalibrasyonu yapan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ızgara dışı sinyalleri [51]'de tariflenen eğim (gradyen) arama tabanlı çözümle ele almaktadır. Özgün yanları ise; faz kalibrasyonunun yanında genlik kalibrasyonu da yapılması, tek boyutlu çoklu ölçüm ile çalışması, çoklu ölçümü ele alan ve kör sensör kalibrasyonu yapan yeni bir algoritma yapısına sahip olmasıdır. Bu metnin yazıldığı tarihte yazarın bilgisi dahilinde, literatürdeki çalışmalar ile ele alındığında geliştirilen yöntem, ızgara dışılık durumunda çoklu ölçüm ile çalışan ve kör sensör kalibrasyonu yapan yegane yöntem olma özelliğini taşımaktadır.



çözülür. Maliyet fonksiyonu olarak hataların kareleri toplamı kullanılmaktadır.

$$\min_{\alpha_{i,k}, f_{i,k}, \delta f_{i,k}, \phi_j, d_j} \sum_i \left\| \mathbf{y}_i - \Phi \Psi \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \mathbf{a}(f_{i,k} + \delta f_{i,k}) \right\|_2,$$

Öyle ki;  $\sum_j d_j = c, |\delta f_k| < \Delta/2,$  (3.4)

$i = 1, 2, \dots, D$  ve  $j = 1, 2, \dots, L.$

Burada  $c$  pozitif bir sayıdır. Genlik kalibrasyonu için  $\mathbf{y} = d\hat{\mathbf{y}}$  eşitliğini sağlayan sonsuz sayıda  $d$  ve  $\hat{\mathbf{y}}$  çiftleri bulunabilir. Bu belirsizliği engellemek için genelliği bozmadan  $\sum_j d_j = c$  kısıtı kullanılmıştır.

Denklem (3.4) ile verilen optimizasyon probleminde sinyal geriçatımı için genlik  $\alpha_{i,k}$ ,  $f_{i,k}$  ve  $\delta f_{i,k}$  bulunur.  $f_{i,k}$  en yakın ızgara noktası değerini,  $\delta f_{i,k}$  ise ilgili pertürbasyon (sapma) miktarını ifade eder ve ızgara dışılığına sebep olan parametredir.  $\phi_j$  ve  $d_j$  sırasıyla faz ve genlik kalibrasyon hatalarını ifade ederler. Kör sensör kalibrasyonu işlemi içerisinde sinyal parametreleri  $\alpha_{i,k}$  ve  $f_{i,k}$ ,  $\delta f_{i,k}$  ve kalibrasyon hataları  $\phi_j$ ,  $d_j$  iteratif bir şekilde kestirilecektir.

### 3.3 Seyrekliğe Dayalı Izgara Dışı Kör Sensör Kalibrasyonu

Bu bölümde önerilen yöntemin algoritma akışı verilmektedir. Alınan snaphotlarda herhangi bir varsayım yapılmamaktadır. Her snaphot birbirinden bağımsız çözülmektedir. Daha sonra bu çözümler kullanılarak birlikte kalibrasyon yapılmaktadır. Algoritma adımları aşağıda anlatılmaktadır.

Temel olarak her adımda Orthogonal Matching Pursuit (OMP) [43] kullanılarak seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Daha sonra OMP'nin bulunduğu grid noktaları üzerinden perturbasyon ile ızgara dışı sinyal geriçatımı yapılmaktadır. Son olarak bu geriçatım ile oluşturulan sinyal kullanılarak kalibrasyon yapılmaktadır.

Literatürde yayın kaynağı sayısı kestirimine yönelik çalışmalar mevcuttur [64–66]. Algoritma akışı içerisinde yayın kaynağı sayısının, yani seyreklik seviyesinin bilindiği varsayılmıştır.

Durma kriteri sağlanana kadar OMP'nin her adımı için aşağıdaki işlemler yapılır;

- Her snapshot için ayrı ayrı projeksiyon alınır ve yeni bir atom seçilir,
- Her snapshot için en küçük kareler yöntemi ile sinyal geri çatımı yapılır,
- Her bir snapshot için ayrı ayrı yakınsama olana kadar perturbasyon yapılır,
- Her bir snapshot için hesaplanan offgrid değerler kullanılarak ortak kalibrasyon yapılır.

Ayrıntılı algoritma adımları aşağıda verilmiştir.

#### Izgara Dışı Kör Kalibrasyon Algoritması

**Başlangıç:**  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}, \mathbf{y}^0 = \mathbf{y}, \mathbf{T}_0 = \{\}$ ,  $k = 1$

$k \leq K$  ise iterasyona devam et

OMP projeksiyon alma ve atom seçme adımı:

Her  $i = 1 : D$ ,

$$j^* = \arg \max_j \left| \mathbf{g}(f_{i,j})^H \mathbf{r}_{i,k-1} \right|$$

$$\mathbf{T}_{i,k} = \mathbf{T}_{i,k-1} \cup \{f_{j^*}\}$$

Kalibrasyon adımı:

Her  $r = 1 : N_y$

Faz hatası kestirimi:

$$\hat{\phi}_r = \angle \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r^0$$

Genlik hatası kestirimi:

$$\hat{d}_r = 0.5 \left( \frac{e^{j\hat{\phi}_r} \mathbf{y}_r^0 \hat{\mathbf{y}}_r^H + e^{-j\hat{\phi}_r} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r^0}{\hat{\mathbf{y}}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r} \right)$$

Kalibrasyon yap;

$$\hat{\mathbf{y}}_r = e^{-j\hat{\phi}_r} \mathbf{y}_r^0 / \hat{d}_r$$

Perturbasyon adımı;

Her  $i = 1 : D$

$$(\boldsymbol{\alpha}_i, [\delta f_{i,1}, \dots, \delta f_{i,k}]) = \mathbb{S}(\mathbf{y}_i, \mathbf{T}_{i,k})$$

Yeni sinyal kestirimi ile kalibrasyon adımını tekrarla.

$k = k + 1$

**Çıktı:**  $(\boldsymbol{\alpha}, [\delta f_{i,1}, \dots, \delta f_{i,k}], \mathbf{T}_{i,k}, \Phi)$

### 3.4 Optimizasyon Probleminin Çözümü

Öncelikle OMP kullanılarak ızgara noktaları üzerinde  $\boldsymbol{\alpha}_l$  bulunur. Her  $\boldsymbol{\alpha}_l$  birbirinden bağımsız olarak çözülür. Bunun için sadece  $\mathbf{y}_l$  kullanılır. Bütün  $\boldsymbol{\alpha}_l$ 'ler hesaplandıktan sonra Bölüm 3.5'de anlatıldığı gibi faz ve genlik düzeltmesi işlemi yapılır.

## Kör Kalibrasyon Pertürbasyon Algoritması $\widehat{\mathbb{S}}(\cdot)$

<b>Girdiler:</b> $([f_{i,1}, \dots, f_{i,k}], \mathbf{y}_i, \boldsymbol{\mu})$
<b>Başlangıç:</b> $l = 0, f_{p,0} = f_p, p = 1 : k$
Durma kriteri sağlanana kadar,
$\mathbf{G}_l = [\mathbf{g}(f_{i,1,l}) \ \mathbf{g}(f_{i,2,l}) \ \dots \ \mathbf{g}(f_{i,k,l})],$
$\boldsymbol{\alpha}_l = \mathbf{G}_l^\dagger \mathbf{y}_i,$
$\mathbf{r} = \mathbf{y}_i - \mathbf{G}_l \boldsymbol{\alpha}_l$
$\mathbf{B}_l$ oluştur
Her $p = 1 : k$
$f_{i,p,l+1} = f_{i,p,l} + \boldsymbol{\mu}_{p,l} \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}$
$f_{i,p,l+1}$ ızgara hücresi içinde mi?
$\delta f_{i,p} = f_{i,p,l+1} - f_{i,p,0}$
<b>Çıktı:</b> $(\boldsymbol{\alpha}, [\delta f_{i,1}, \dots, \delta f_{i,k}])$

Faz ve genlik düzeltmesi yapılan her bir  $\hat{\mathbf{y}}_l$  ve  $\boldsymbol{\alpha}_l$  kullanılarak pertürbasyon yapılır. Izgara dışı taban vektörleri  $\mathbf{g}(f_{1,i,k}^o, f_{2,i,k}^o)$  ve  $\boldsymbol{\alpha}_l$ 'ler bulunur. Tüm  $l$ 'ler için bulunan değerler kullanılarak tekrar faz ve genlik düzeltmesi yapılır.

Daha sonra algoritma başa döner ve bir durdurma kriteri sağlanana kadar iterasyona devam edilir.

Pertürbasyonun yapıldığı algoritma aşağıda anlatılmıştır.  $l$ . ölçüm ve geri çatılan sinyal için  $k$ . iterasyonda,  $k$  adet ızgara noktası  $\mathbf{T}_k$  ve  $l$ . ölçüm  $\mathbb{S}(\cdot)$  ile ifade edilen algoritmaya beslenir:

$$\left( \boldsymbol{\alpha}, [\delta f_1 \ \dots \ \delta f_k], \Phi \right) = \mathbb{S} \left( \mathbf{y}, [f_1 \ \dots \ f_k] \right), \quad (3.5)$$

burada  $\mathbb{S}(\cdot)$  pertürbasyon parametrelerini bulmaktadır.

Öncelikle genlik vektörü  $\boldsymbol{\alpha}$  aşağıdaki gibi bulunur;

$$\boldsymbol{\alpha}_l = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left\| \mathbf{y} - \sum_{p=1}^k \alpha_p \mathbf{g}(f_{p,l}) \right\|_2, \quad (3.6)$$

burada  $l$ ,  $\mathbb{S}(\cdot)$  döngü indisidir,  $f_{p,l}$  ise  $l$ . iterasyondaki  $f_p$  vektörüdür. Daha sonra pertürbasyonlar gerçekleştirilir,  $f_{p,l+1} = f_{p,l} + \delta f_{p,l}$ . Burada  $[\delta f_{1,l} \ \dots \ \delta f_{k,l}]$  aşağıdaki gibi bulunur;

$$\min_{\delta f_{1,p}: |\delta f_{1,p}| \leq \Delta_1/2} \left\| \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(f_{1,p,l} + \delta f_{1,p}) \right\|_2. \quad (3.7)$$

Denklem (3.6)'in çözümü en küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunur. Denklem

(3.7) ise doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon problemidir. Bu problem gradyen düşümü ile çözülebilir. Bunun için (3.7) ile verilen maliyet fonksiyonu  $f_{p,l}$  etrafında doğrusallaştırılabilir.  $\mathbf{g}(f_{p,l} + \delta f_p)$  ifadesi birinci seviye Taylor serisine açılarak yakınsanabilir.

$$\mathbf{g}(f_{p,l} + \delta f_p) \approx \mathbf{g}(f_{p,l}) + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{p,l}} \delta f_p. \quad (3.8)$$

Denklem (3.8) kullanılırsa ve kısıtlar kaldırıldığında, (3.7) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} [\delta f_{1,l} \dots \delta f_{k,l}] &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{J}_R(\mathbf{u}), \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}} \left\| \mathbf{r}_l - \mathbf{B}_l \mathbf{u} \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (3.9)$$

burada  $\mathbf{r}_l = \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(f_{p,l})$  dik artıktır, ve  $\mathbf{B}_l \in \mathcal{C}^{N \times k}$  ise doğrulaştırma noktasındaki ağırlıklandırılmış kısmi türevleri barındırır:

$$\mathbf{B}_l = \left[ \Delta \alpha_{1,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{1,l}}, \dots, \Delta \alpha_{k,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{k,l}} \right], \quad (3.10)$$

ve  $\mathbf{u} = [\delta f_{1,1}, \dots, \delta f_{1,k}]^T \in \mathfrak{R}^{k \times 1}$  1. döngüdeki güncellemeleri tutar. Her döngüde  $f_{p,l}$  hesaplandığında  $\mathbf{B}_l$  de güncellenir. Döngüler sırasında arama negatif gradyen yönünde yapılır. Güncellenen parametreler bir ızgara hücresinde kalacak şekilde sınırlanır.

Denklem (3.9) ile verilen maliyet fonksiyonu için,  $J$ 'nin  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$  noktasındaki negatif gradyeni  $-\nabla_{\mathbf{u}} J(\mathbf{u})|_{\mathbf{u}=\mathbf{0}} = \text{Re} \{ 2\mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}$  ile verilir. Denklem (3.7) ile verilen problemin çözümü aşağıdaki gradyen düşümü döngüsü ile bulunur;

$$\begin{aligned} \alpha_l &= [\mathbf{g}(f_{1,l}) \mathbf{g}(f_{2,l}) \dots \mathbf{g}(f_{k,l})]^\dagger \mathbf{y}, \\ f_{p,l+1} &= f_{p,l} + \mu_{p,l} \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

burada  $\mu_{p,l}$  yeterince küçük seçilmiş adım boyudur.

### 3.5 Faz ve Genlik Hatası Kestirimi

Faz ve genlik hatası kestirimi, ölçümler  $\mathbf{y}$  ve ölçüm kestirimi arasındaki farkın  $l_2$  normunu minimize edilerek aşağıdaki şekilde yapılır:

$$J(d_r, \phi_r) = \arg \min_{d, \phi} \|\mathbf{y}_r - de^{j\phi} \hat{\mathbf{y}}_r\|_2. \quad (3.12)$$

Burada  $\hat{\mathbf{y}}_r$  ölçüm kestirimidir. Hesaplanan değerler ile (3.3)'teki  $\hat{\mathbf{y}}_i$ 'ler oluşturulur. Ardından bu değerler kullanılarak;  $\hat{\mathbf{y}}_r = [\hat{\mathbf{y}}(r)_1, \hat{\mathbf{y}}(r)_2, \dots, \hat{\mathbf{y}}(r)_D]$ , Burada  $\hat{\mathbf{y}}(r)_i$   $\hat{\mathbf{y}}_i$ 'nin  $r$ . satırdaki elemanını ifade eder.

Faz hatası terimi için kısmi türev alınırsa;

$$\frac{\partial J}{\partial \phi} = jde^{-j\phi} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r - jde^{j\phi} \mathbf{y}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r = 0. \quad (3.13)$$

Terimler düzenlenirse;

$$e^{-j\phi} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r = e^{j\phi} \mathbf{y}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r, \quad (3.14)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $A = e^{-j\phi} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r$  olursa, (3.14) eşitliğinin  $A = A^H$  olduğu görülür. Bu durumda faz hatası aşağıdaki gibi bulunur;

$$\hat{\phi}_r = \angle \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r. \quad (3.15)$$

Genlik hatası ise faz hatası kestirimi kullanılarak bulunur. (3.12) ifadesinin genlik hatası için kısmi türevi alınırsa;

$$\frac{\partial J}{\partial d} = -e^{j\hat{\phi}} \mathbf{y}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r - de^{-j\hat{\phi}} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r + 2d \hat{\mathbf{y}}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r. \quad (3.16)$$

Buradan, genlik hatası kestirimi aşağıdaki gibi bulunur;

$$\hat{d}_r = \frac{1}{2} \left( \frac{e^{j\hat{\phi}} \mathbf{y}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r + e^{-j\hat{\phi}} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r}{\hat{\mathbf{y}}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r} \right). \quad (3.17)$$

Genlik ve faz hatası ise  $\hat{\mathbf{y}}_r = e^{-j\hat{\phi}_r} \mathbf{y}_r / \hat{d}_r$  şeklinde düzeltilir.



### 3.6 Benzetimler

Bu bölümde önerilen yöntemin performansının değerlendirilmesi için benzetimler tasarlanmıştır. Önerilen yöntemin yanısıra literatürde bulunan ve çalışma [25]'da verilen Complete Calibration (CCAL) yöntemi performans karşılaştırması amacıyla benzetimlerde kullanılmıştır. Sinyal geri çatım ve kör kalibrasyon performansı; sensör sayısı, ölçüm sayısı, SGO, seyreklik seviyesi ve kalibrasyon hatalarının şiddeti gibi parametrelere bağlıdır. Bu gibi performansın bağlı olduğu parametreler kullanılarak farklı senaryolar ve ölçüm setleri üretilmiştir. Bunlar kullanılarak Monte-Carlo çalışması yapılmış ve sonuçlar verilerek yorumlanmıştır.

Benzetimlerde her bir durum için 20 Monte-Carlo çalışması yapılmıştır. Alınan sonuçların ortalaması çizdirilmiştir. Gerçek ve geri-çatılan sinyaller arasındaki Toprak Taşıma Mesafesi (TTM) (Earth Mover's Distance, EMD) [61], faz hatası kestirimi Ortalama Karesel Hatası (OKS) ve genlik hatası kestiriminin ortalama karesel hatası hesaplanarak çizdirilmiştir. Genlik hatası kestirimi sırasında belirsizlik olabildiği için TTM hesaplanmadan önce her bir ölçüm kendisinin  $l_2$  normu ile normalize edildikten sonra TTM hesaplanmıştır. Yine genlik hatası kestirimindeki belirsizlikten dolayı genlik hatası kestirimlerinin toplam değeri gerçek genlik hatasının toplam değerine eşitlendikten sonra genlik hatası OKS hesaplanmıştır.

Benzetimlerde Izgara Dışı Kör Kalibrasyon yöntemi (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit, PC-OMP), pertürbasyon yapmayan OMP (Calibration OMP, C-OMP) ve [25] (Complete Calibration, CCAL) ile verilen kör kalibrasyon yöntemi kullanılmıştır. [25] için yazarların internet sitesinde paylaştıkları kendi kodları kullanılmıştır. PC-OMP ve C-OMP algoritmaları için sinyaldeki seyreklik seviyesinin bilindiği varsayılmıştır. CCAL için maksimum 100 iterasyon değeri kullanılmıştır. Faz hatası kestirimi OKS değerleri radyan olarak çizdirilmiştir.

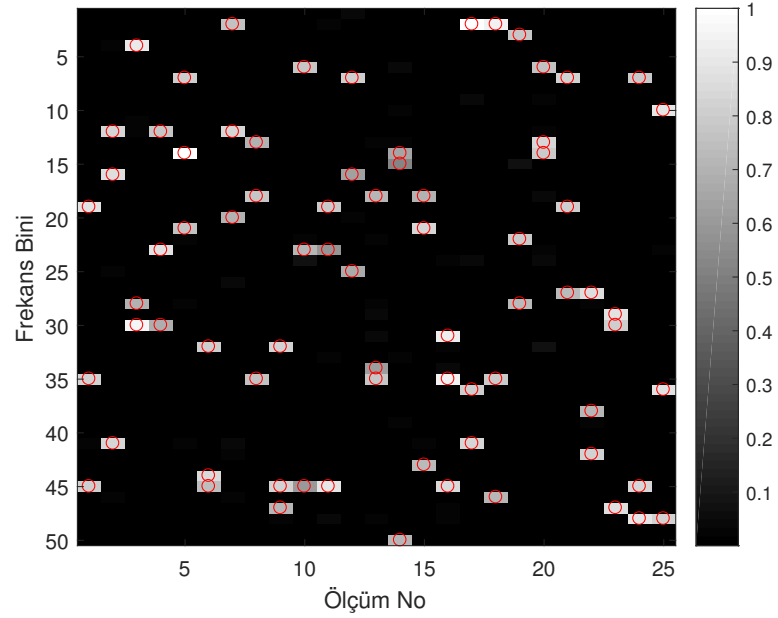
Benzetimler frekans kestirimi üzerine yapılmıştır. Izgara dışı frekanslar kullanılarak zaman domeninde sinyaller üretilmiştir. Daha sonra bunlar belirli faz ve genlik de-kalibrasyonuna uğratılmıştır. Benzetimlerde bu veriler kullanılmıştır.

### 3.6.1 Görsel sonuçlar

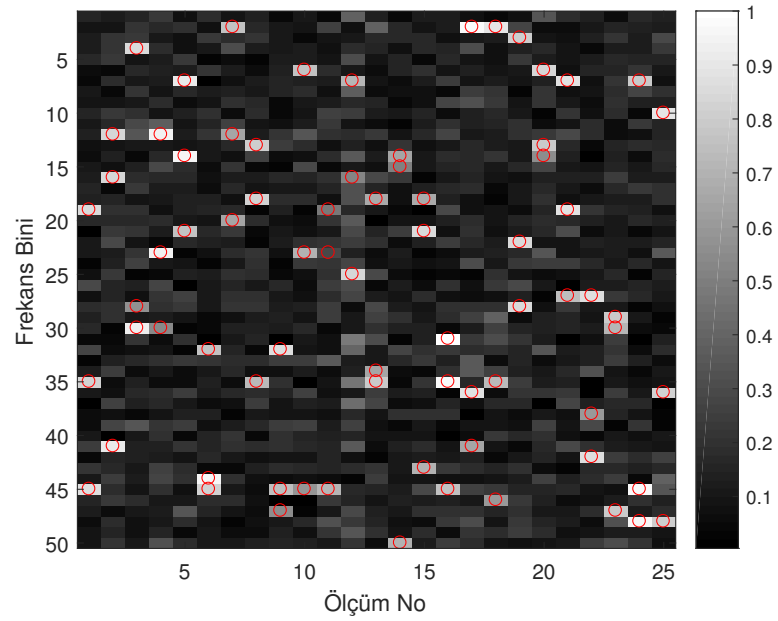
Bu bölümde görsel örnek olması için Monte-Carlo benzetimlerinde kullanılanlara benzer parametreler ile karşılaştırılan yöntemler örnek bir senaryo için çalıştırılmış ve alınan sonuçlar çizdirilmiştir.  $SGO = 20dB$ , sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

CCAL yöntemi "Alternating Direction Method of Multipliers" (ADMM) [67] kullanılarak gerçekleştirilmiştir [25]. ADMM'in bir girdisi olan  $\mu$  parametresinin aldığı değere göre CCAL yönteminin başarımı değişmektedir. Bu durumu göstermek için aynı senaryo girdileri ile farklı ADMM parametreleri için CCAL yöntemi çalıştırılmış ve alınan sonuçlar çizdirilmiştir. Izgara üzeri durum için alınan sonuçlar Şekil 3.1'de verilmiştir. Her sonuç kendi içerisinde maksimum değerine normalize edilerek verilmiştir. Görsel kolaylık açısından ilk 25 ölçüm için sonuçlar çizdirilmiştir. Şekilde kırmızı halkalar gerçek frekans değerlerini göstermektedir. Kırmızı x işareti ise PC-OMP için ızgara dışı frekans kestirimi değerlerini göstermektedir. Şekil 3.1 (a)'da CCAL  $\mu = 0.01$  için (b)'de ise CCAL  $\mu = 50$  için sonuçlar verilmiştir.  $\mu = 0.01$  için sonuçların daha iyi olduğu,  $\mu = 50$  için ise sonuçların kötüleştiği görülmektedir. C-OMP ve PC-OMP için ise sonuçlar sırasıyla Şekil 3.2 (a) ve (b)'de verilmiştir. PC-OMP sonucunun genlik değerlerini gösterebilmek adına sonuçlar en yakın ızgara noktasına yazdırılarak gösterilmiştir. PC-OMP için ızgara dışı frekans kestirimi değerleri ayrıca gösterilmiştir. C-OMP ve PC-OMP'nin ızgara üzeri durum için ufak farklılıklar ile yaklaşık aynı sonucu verdikleri görülmektedir.

Izgara dışı durum için alınan sonuçlar Şekil 3.3'de verilmiştir. Her sonuç kendi içerisinde maksimum değerine normalize edilerek verilmiştir. Görsel kolaylık açısından ilk 25 ölçüm için sonuçlar çizdirilmiştir. Şekilde kırmızı halkalar gerçek frekans değerlerini göstermektedir. Kırmızı x işareti ise PC-OMP için ızgara dışı frekans kestirimi değerlerini göstermektedir. Şekil 3.3 (a)'da CCAL  $\mu = 0.01$  için

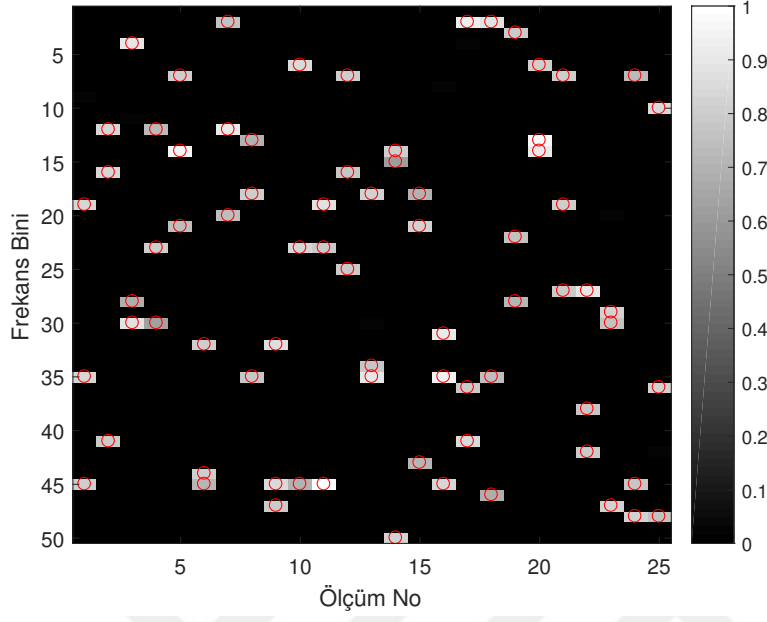


(a) CCAL  $\mu = 0.01$

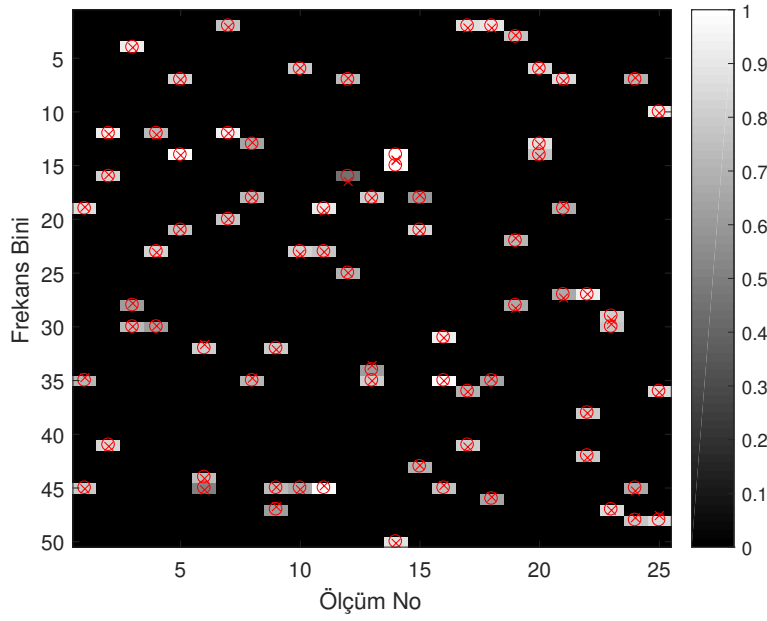


(b) CCAL  $\mu = 50$

Şekil 3.1: Izgara üzeri durum için sonuçlar (a) CCAL  $\mu = 0.01$  (b) CCAL  $\mu = 50$ . Kırmızı halkalar gerçek frekans değerlerini göstermektedir.

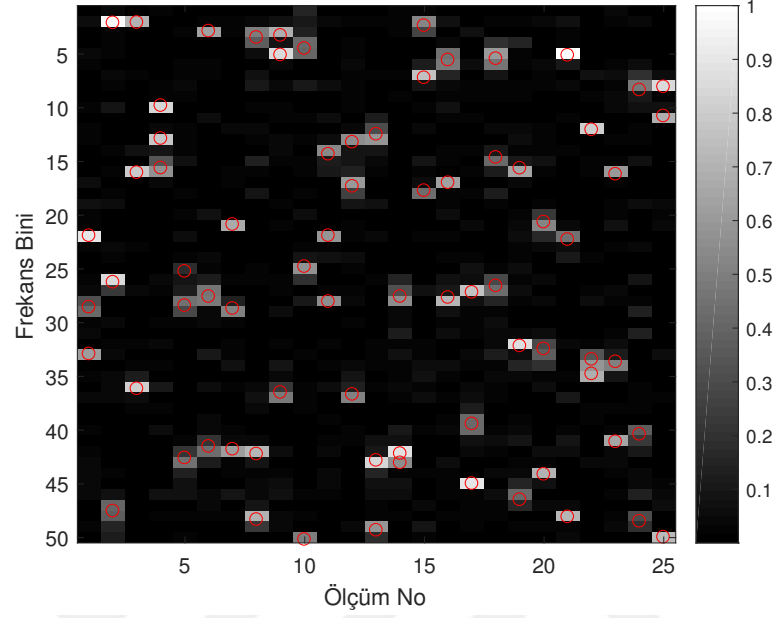


(a) C-OMP

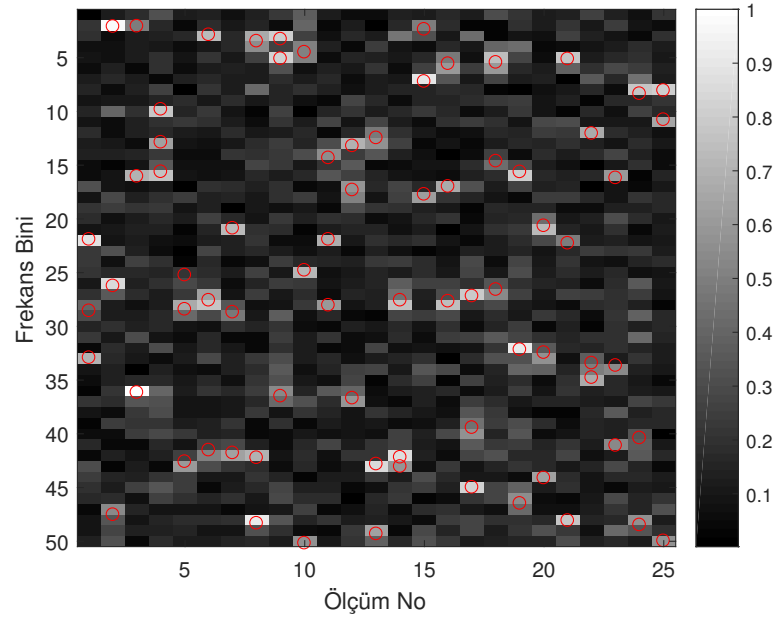


(b) PC-OMP

Şekil 3.2: Izgara üzeri durum için sonuçlar (a) C-OMP (b) PC-OMP. Kırmızı halkalar gerçek frekans değerlerini göstermektedir. Kırmızı x işareti ise PC-OMP için ızgara dışı frekans kestirimi değerlerini göstermektedir.

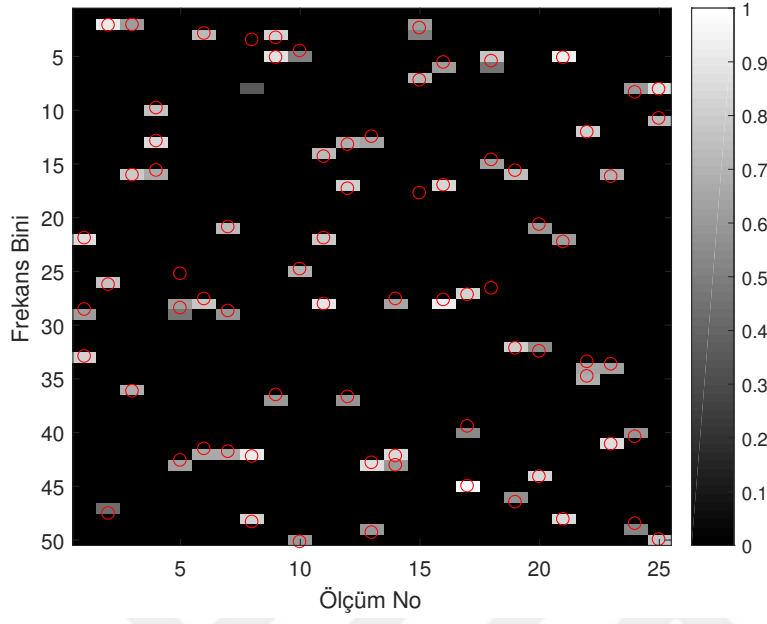


(a) CCAL  $\mu = 0.01$

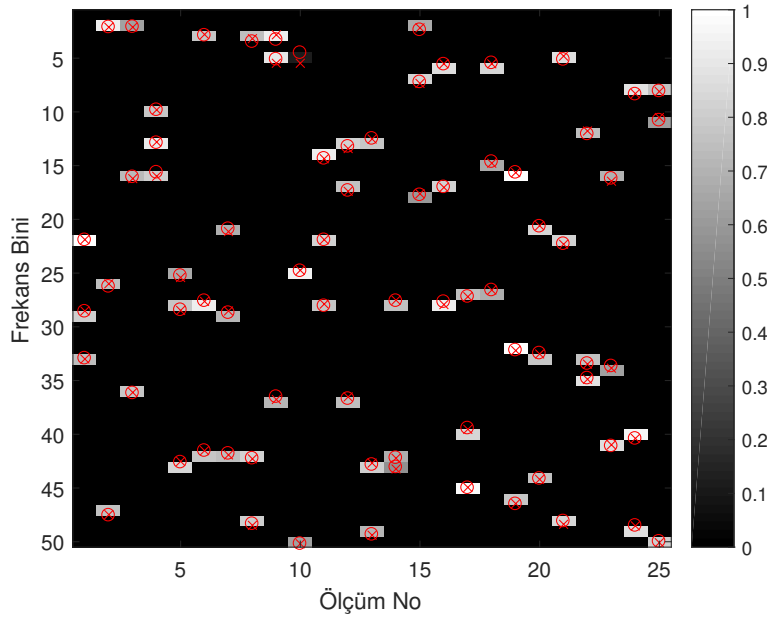


(b) CCAL  $\mu = 50$

Şekil 3.3: Izgara dışı durum için sonuçlar (a) CCAL  $\mu = 0.01$  (b) CCAL  $\mu = 50$ .



(a) C-OMP



(b) PC-OMP

Şekil 3.4: Izgara dışı durum için sonuçlar (a) C-OMP (b) PC-OMP. Kırmızı halkalar gerçek frekans değerlerini göstermektedir. Kırmızı x işareti ise PC-OMP için ızgara dışı frekans kestirimi değerlerini göstermektedir.

(b)'de ise CCAL  $\mu = 50$  için sonuçlar verilmiştir.  $\mu = 0.01$  için sonuçların daha iyi olduğu,  $\mu = 50$  için ise sonuçların kötüleştiği görülmektedir. Şekil 3.1'de verilen ızgara üzeri duruma göre CCAL sonuçlarında bozulma olduğu görülmektedir. C-OMP ve PC-OMP için ise sonuçlar sırasıyla Şekil 3.2 (a) ve (b)'de verilmiştir. C-OMP'nin ızgara dışı durumda bazı frekans bileşenlerini kaçırdığı görülmektedir. PC-OMP ise tüm frekans bileşenlerini başarılı bir şekilde kestirmektedir.

CCAL ve C-OMP için ızgara üzeri duruma göre bozulma olurken PC-OMP'de bu durum yaşanmamaktadır. Bu sonuç PC-OMP'nin ızgara dışılıktaki etkinliğini ortaya koymaktadır.

### 3.6.2 Izgara dışılığa göre karşılaştırmalı benzetim sonuçları

CCAL yönteminin performansının görece daha iyi olduğu ADMM parametresi  $\mu = 0.01$  ve bunun yanında yanında CCAL kodlarında kullanılan  $\mu = 50$  değeri için ızgara üzeri ve ızgara dışı durumlar kullanılarak farklı SGO değerlerindeki senaryolar için Monte-Carlo çalışmaları yapılmıştır. PC-OMP, C-OMP ve CCAL yöntemleri için metrikler hesaplanmış ve ortalamaları çizdirilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

SGO'na göre hesaplanan değerler çizdirilmiştir. Izgara üzeri durum için alınan sonuçlar Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere C-OMP en iyi sonuçları vermektedir. CCAL'ın performansı SGO yükseldikçe daha iyi olmaktadır. PC-OMP ise CCAL'dan daha iyi ancak C-OMP'den daha kötü sonuç vermektedir.

Izgara dışı durum için alınan sonuçlar Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve yakınlaştırılmış olarak Şekil 3.9'de verilmiştir. CCAL ve C-OMP'nin performanslarının ızgara üzeri duruma göre daha kötüleştiği görülmektedir. Bu durumu gözlemek özellikle TTM değerlerinde daha kolay olmaktadır. Diğer taraftan ızgara üzeri duruma göre PC-OMP

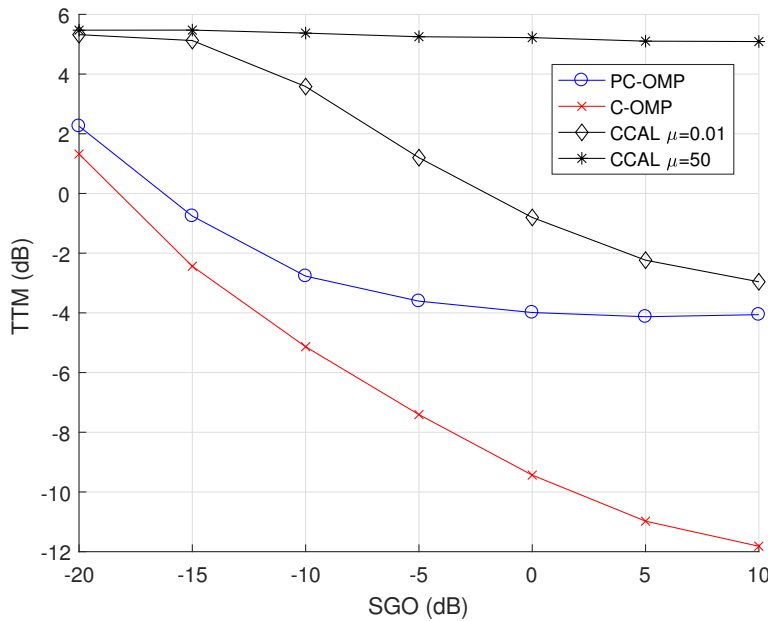
performansında belirgin bir değişim olmamıştır. Bu sonuç PC-OMP'nin ızgara dışı durumdaki etkinliğinin bir göstergesidir.

CCAL sonuçları incelendiğinde  $\mu = 0.01$  için daha seyrek sonuçlar hesapladığı görülmektedir. ADMM parametresi  $\mu = 50$ 'de ise gerçek frekans ızgaralarında yüksek sonuç verdiği, diğer ızgara noktalarında ise düşük genlikli de olsa frekans değerleri bulunduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir değişle CCAL sonuçları  $\mu = 50$ 'de seyrek çıkmamaktadır. Bu durumda da TTM değeri yüksek bulunmaktadır.

Faz ve genlik hatası kestirimi sonuçlarında ise PC-OMP C-OMP'den daha iyi sonuç vermiştir. CCAL performansı en düşük yöntem olarak görülmektedir.

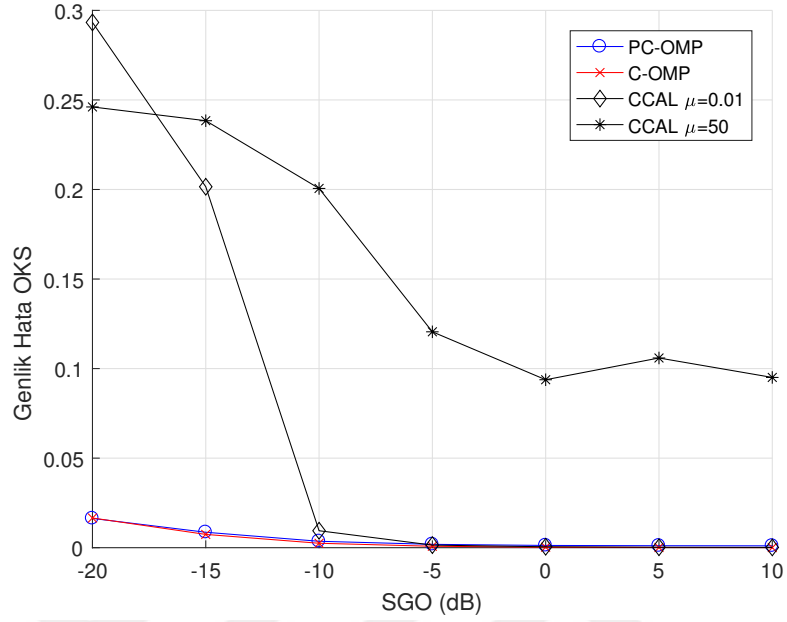
### 3.6.3 Genlik hata ortalamasına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımında farklı Genlik Ortalama De-Kalibrasyon değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir.  $SGO = 30$  dB alınmıştır. Ortalama değeri ilgili değeri ve standart sapması 0.05 olan Gauss dağılımına göre rastgele

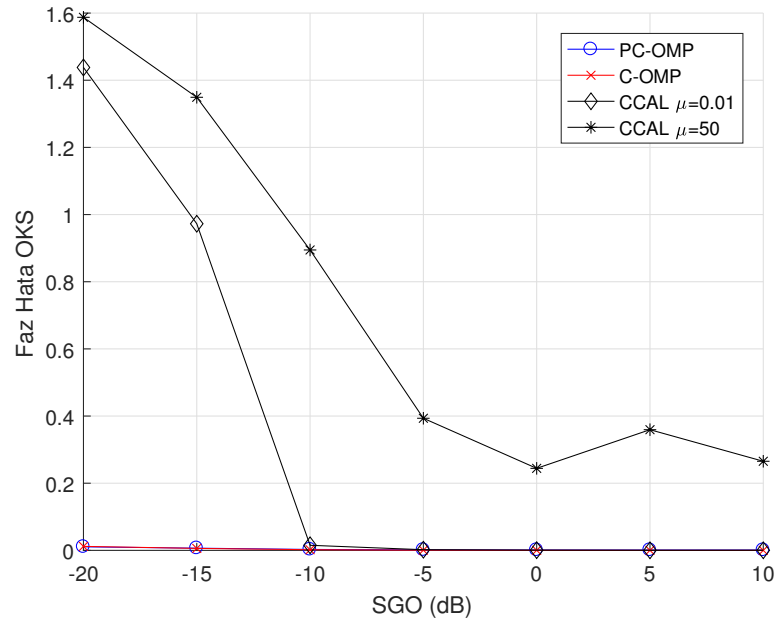


Şekil 3.5: Iızgara üzeri durum için SGO'na göre TTM Monte-Carlo sonuçları.  $SGO = [-20, 10]$ .



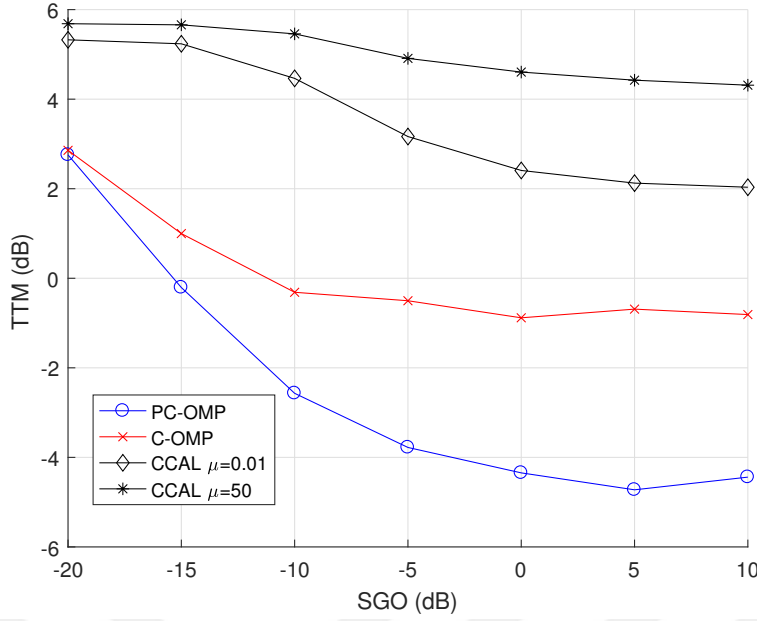


(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS (Radyan<sup>2</sup>)

Şekil 3.6: Izgara üzeri durum için SGO'na göre Monte-Carlo sonuçları.  $SGO = [-20, 10]$ . (a) Genlik Hata OKS (b)Faz Hata OKS.



Şekil 3.7: Izgara dışı durum için SGO'na göre TTM Monte-Carlo sonuçları.  $SGO = [-20, 10]$ .

değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

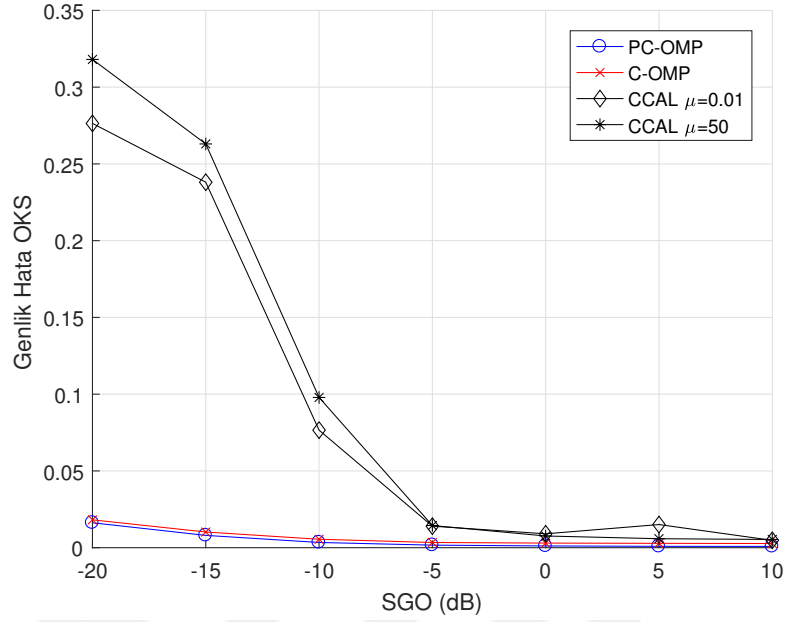
Alınan sonuçlar Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir. TTM değerleri; CCAL  $\mu = 50$  için yüksek ve yaklaşık sabit olup, C-OMP ve CCAL  $\mu = 0.01$  için artmaktadır, bununla birlikte PC-OMP için yaklaşık aynı değerde ve en iyi sonuçlar elde edilmektedir. Izgara üzeri varsayımı ile çalışan yöntemlerin sonuçları kötüleşirken PC-OMP'nin sonucunun sabit kalması yöntemin etkinliğinin bir göstergesidir.

Genlik hatası kestirimi için her üç yöntemin de değerleri artmaktadır/kötüleşmektedir, bu artış değeri PC-OMP için en az seviyededir.

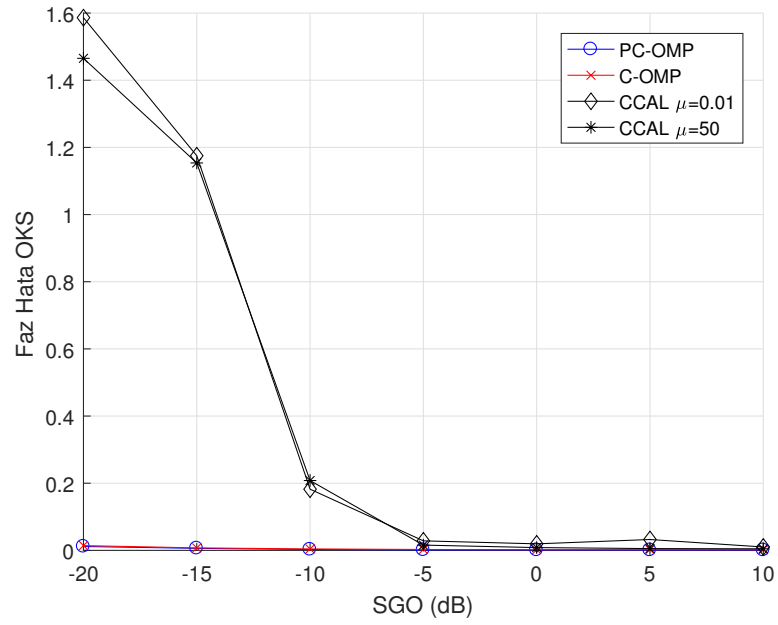
Faz hatası kestirimi için PC-OMP ve C-OMP sonuçları diğer yöntemlerden daha iyi ve birbirlerine yakındır. PC-OMP'nin en iyi sonucu verdiği görülmektedir.

### 3.6.4 Genlik hata standart sapmasına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımımda farklı Genlik De-Kalibrasyon standart sapma değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)

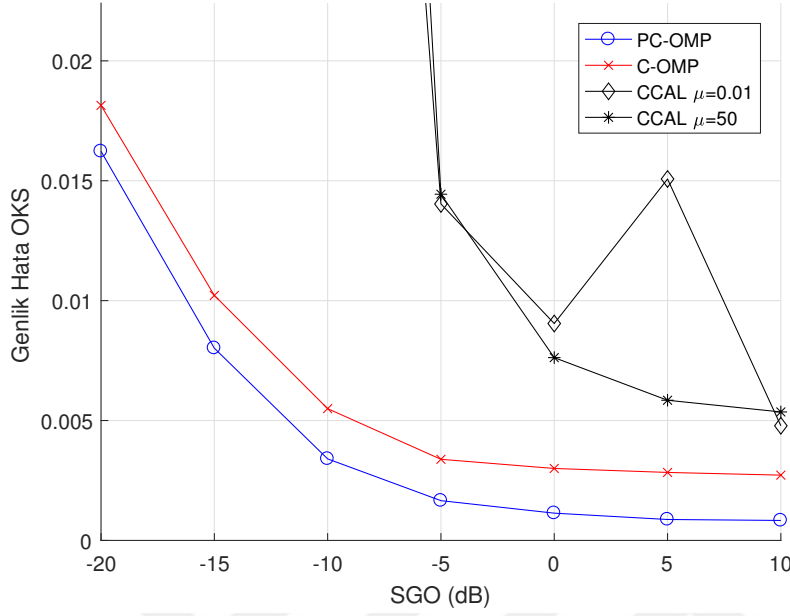


(a) Genlik Hata OKS

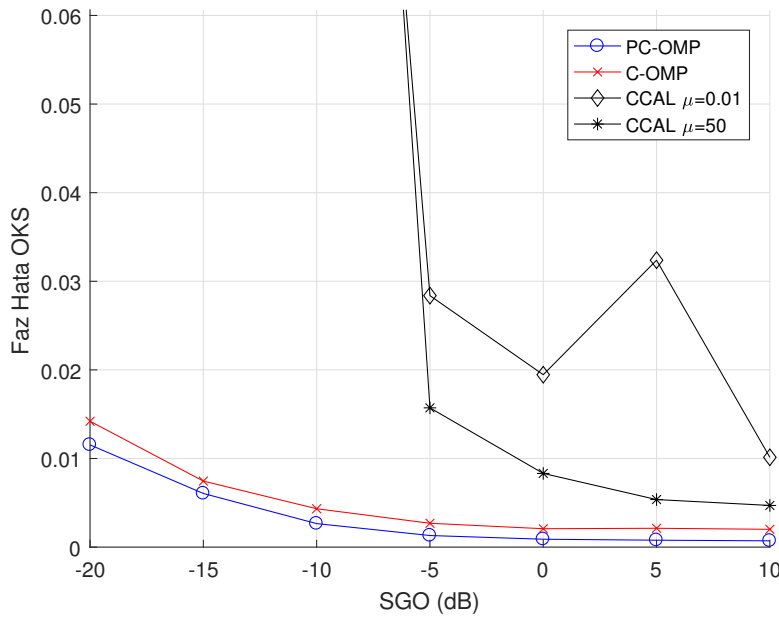


(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 3.8: Izgara dışı durum için SGO'na göre Monte-Carlo sonuçları.  $SGO = [-20, 10]$ . (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.



(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

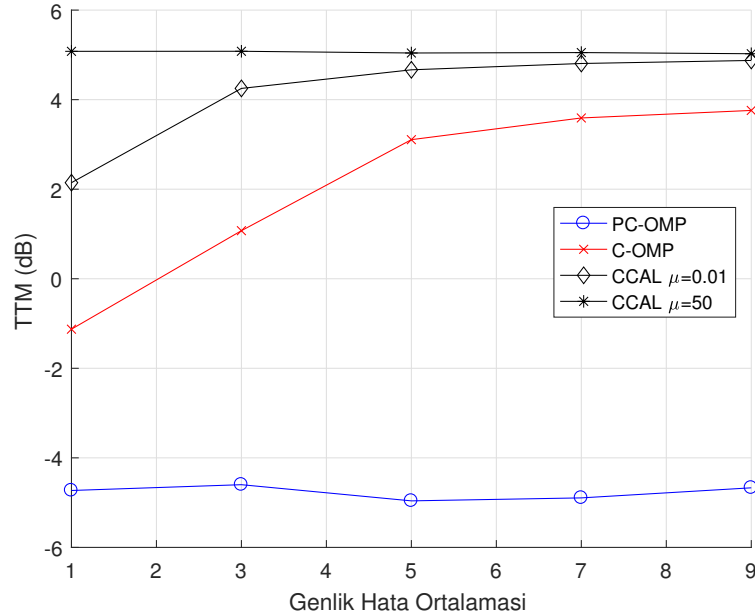
Şekil 3.9: Izgara dışı durum için SGO'na göre Monte-Carlo Sonuçları - Yakınlaştırılmış.  $SGO = [-20, 10]$ . (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

$N_x = 50$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir.  $SGO = 30$  dB alınmıştır. Ortalama değeri 10 ve standart sapması ilgili değer olan Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

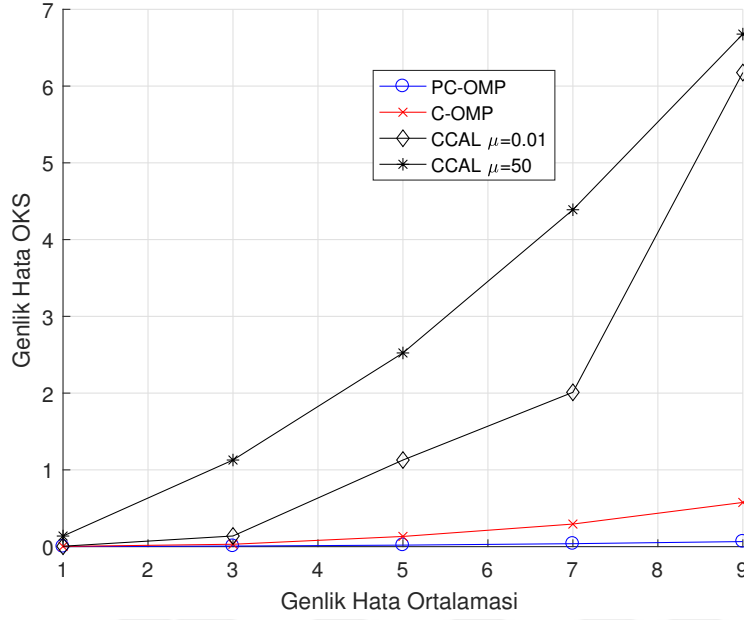
Alınan sonuçlar Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir. Alınan sonuçların genlik de-kalibrasyon standart sapmasına göre yaklaşık fazla değişmediği gözlemlenmektedir. Görüldüğü üzere PC-OMP en iyi değerleri vermektedir.

### 3.6.5 Faz De-Kalibrasyon değerine göre benzetim sonuçları

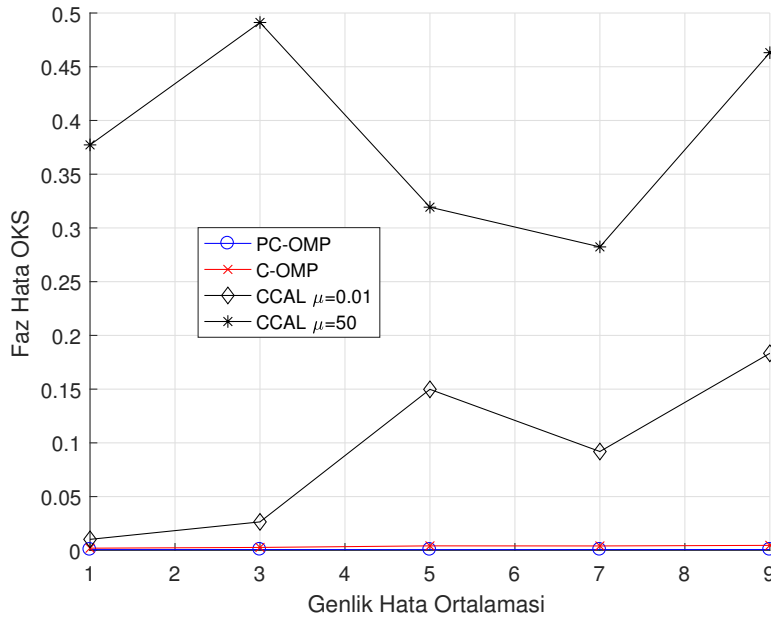
Bu senaryo adımı farklı faz de-kalibrasyon değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, \sigma\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir, burada  $\sigma$  ilgili faz



Şekil 3.10: Genlik Ortalama De-Kalibrasyon değerine göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Genlik Hata Ortalaması:  $[1, 10]$ .



(a) Genlik Hata OKS

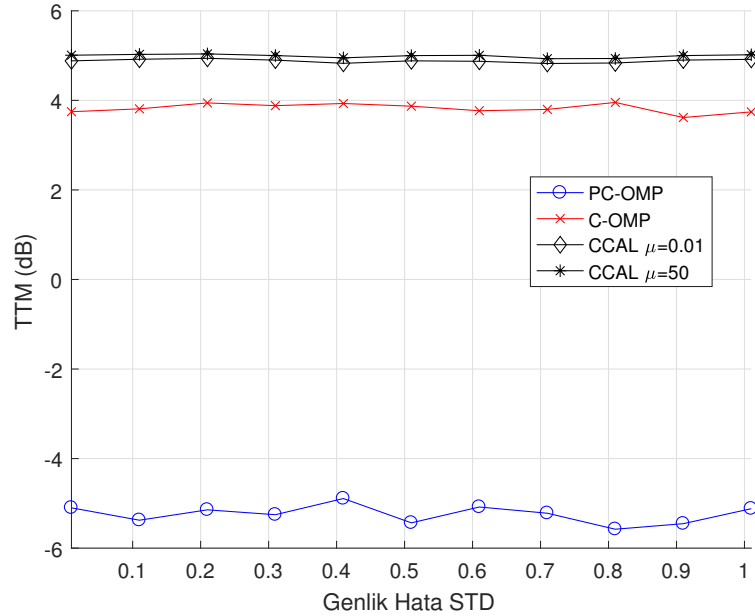


(b) Faz Hata OKS (Radyan<sup>2</sup>)

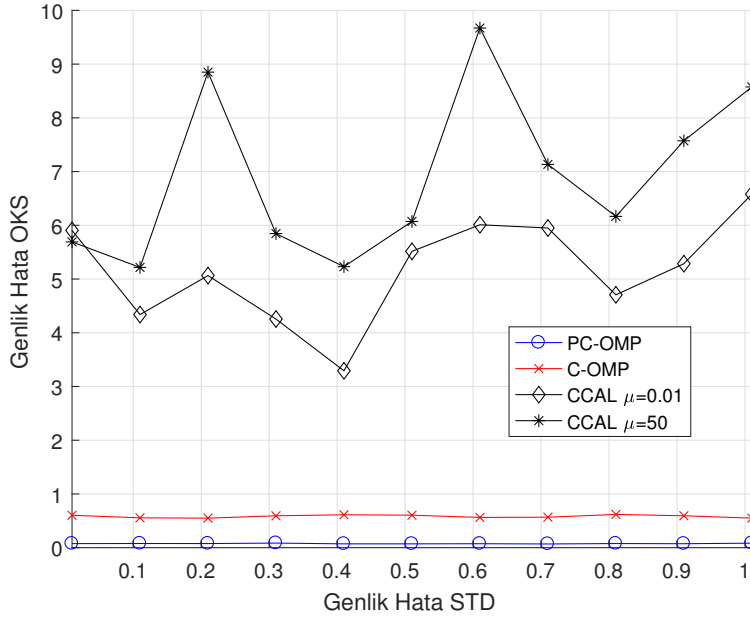
Şekil 3.11: Genlik Ortalama De-Kalibrasyon değerine göre Monte-Carlo sonuçları. Genlik Hata Ortalaması: [1, 10] (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

de-kalibrasyon değeridir.

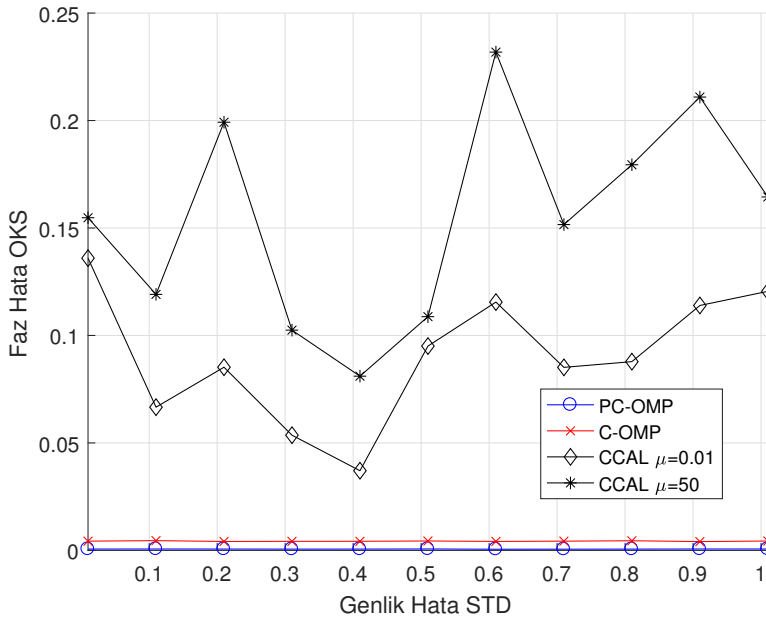
Sonuçlar Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’da verilmiştir. TTM sonuçlarında PC-OMP ve C-OMP sonuçları faz hatası de-kalibrasyon değerine göre artmakta ve  $0.6\pi$  radyandan sonra çok yakın seyretmektedir. Her iki yöntem de  $\mu = 50$  parametre değerini kullanan CCAL’dan daha iyi sonuçlar vermektedir. PC-OMP ve C-OMP  $0.5\pi$  radyanın altında CCAL  $\mu = 0.01$ ’den daha iyi sonuç vermektedir.  $0.5\pi$  radyanın üzeri için CCAL  $\mu = 0.01$  en iyi sonucu vermektedir. Genlik ve faz hatası kestirimi için CCAL sonuçlarının  $\mu = 50$  için deęiŐkenlik gösterdiği görülmektedir. PC-OMP ve C-OMP sonuçları ise artan faz hatası ile artmaktadır. Faz hatası kestirimi sonuçların PC-OMP ve C-OMP  $0.6\pi$  radyana kadar CCAL  $\mu = 50$ ’den daha iyi CCAL  $\mu = 0.01$ ’den daha iyi ancak yakın sonuç vermektedir. Bu değerden sonra PC-OMP ve C-OMP sonuçları birbirine yakın olmakla beraber artış göstermektedir.  $0.5\pi$  radyanın altında PC-OMP en iyi sonuçları vermektedir.



Şekil 3.12: Genlik De-Kalibrasyon standart sapma değerine göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Genlik Hata STD:  $[0, 1]$ .



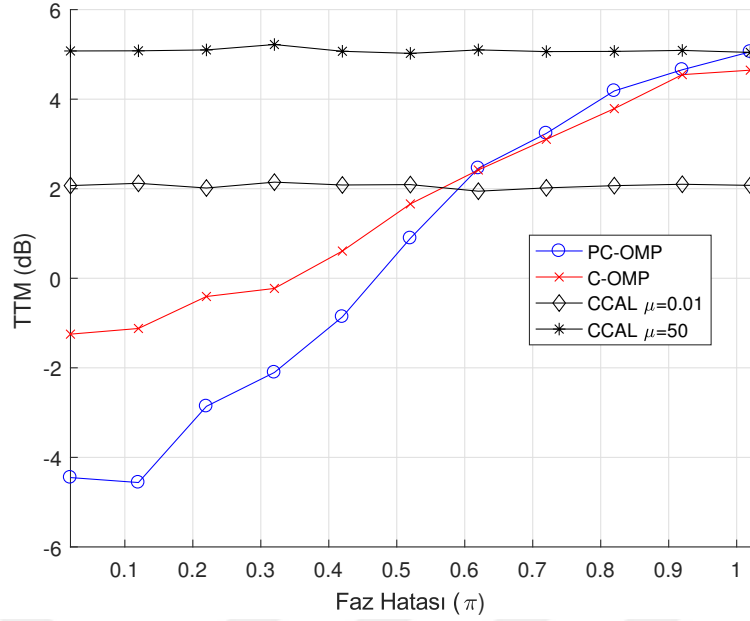
(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 3.13: Genlik De-Kalibrasyon standart sapma değerine göre Monte-Carlo sonuçları. Genlik Hata STD: [0, 1]. (a) TTM, (b) Genlik Hata OKS.





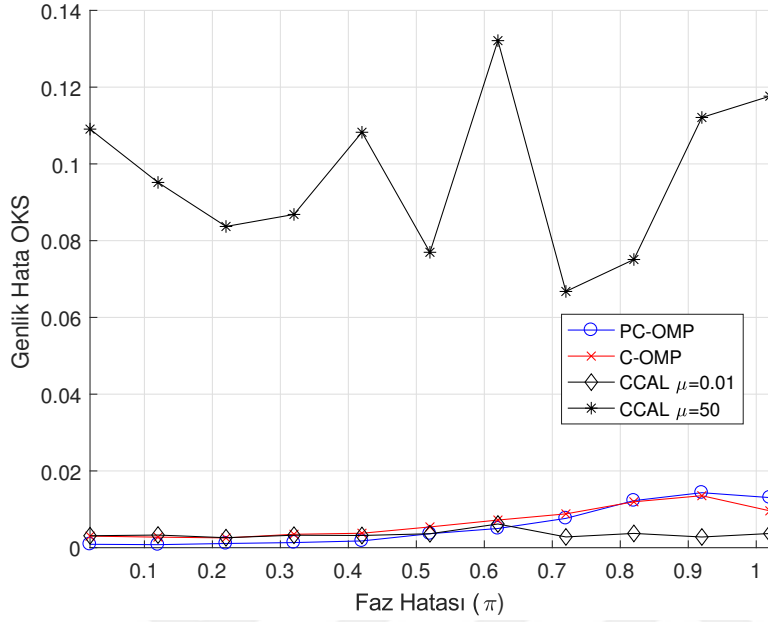
Şekil 3.14: Faz De-Kalibrasyon seviyesine göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Faz Hatası:  $[0, \pi]$ .

### 3.6.6 Seyreklik seviyesine göre benzetim sonuçları

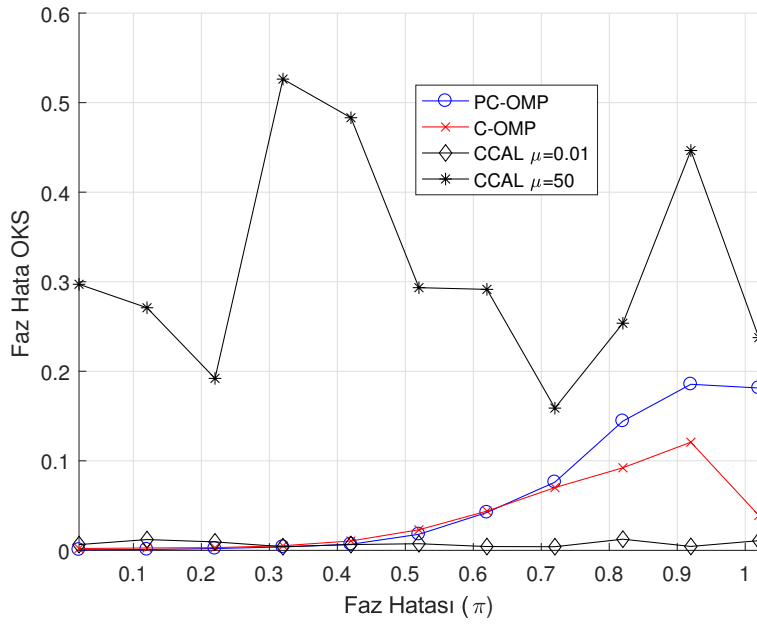
Bu senaryo adımımda farklı seyreklik ( $K$ ) değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , SGO seviyesi  $30dB$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

$N_x = 50$  olduğu için  $K = 1$  olduğunda seyreklik seviyesi %2,  $K = 5$  olduğunda seyreklik seviyesi %10 olmaktadır. Sinyalin seyrek olması için  $K \ll N_x$  olması gerektiğinden,  $K = 5$  değeri seyreklik tanımı için oldukça yüksek bir değerdir. Benzetim sonuçları bu bilgiler ile birlikte yorumlanmalıdır.

Alınan sonuçlar Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde faz ve genlik hatası kestirimi değerlerinin faz değişmediği, bununla birlikte PC-CAL’ın en iyi değerleri verdiği görülmektedir. C-OMP ve PC-OMP’nin TTM sonuçları CCAL’dan daha iyi olmakla birlikte zamanla artmaktadır.  $K = 5$  için seyreklik seviyesi %10 ile bu durumun olağan olduğu değerlendirilmektedir.

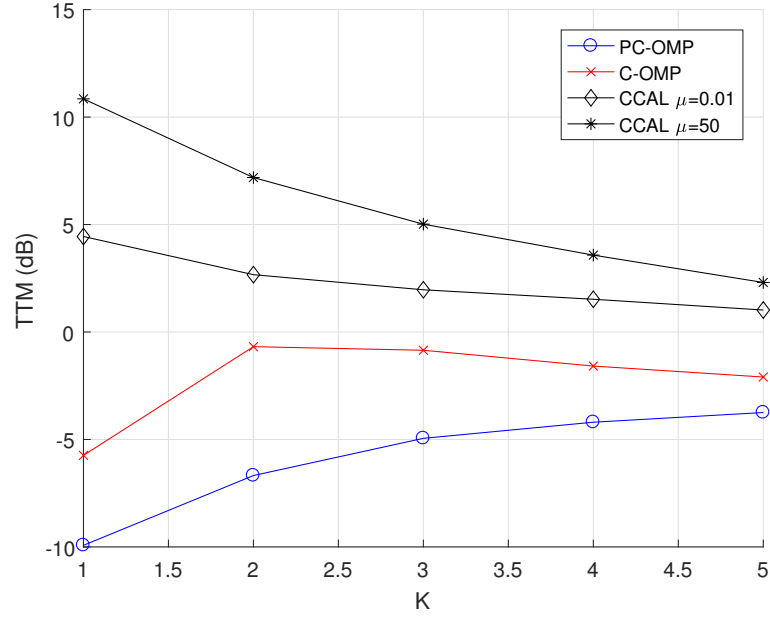


(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 3.15: Faz De-Kalibrasyon seviyesine göre Monte-Carlo sonuçları. Faz Hatası:  $[0, \pi]$ . (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.



Şekil 3.16: Seyreklik seviyesine göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Seyreklik seviyesi,  $K = [1, 5]$ .

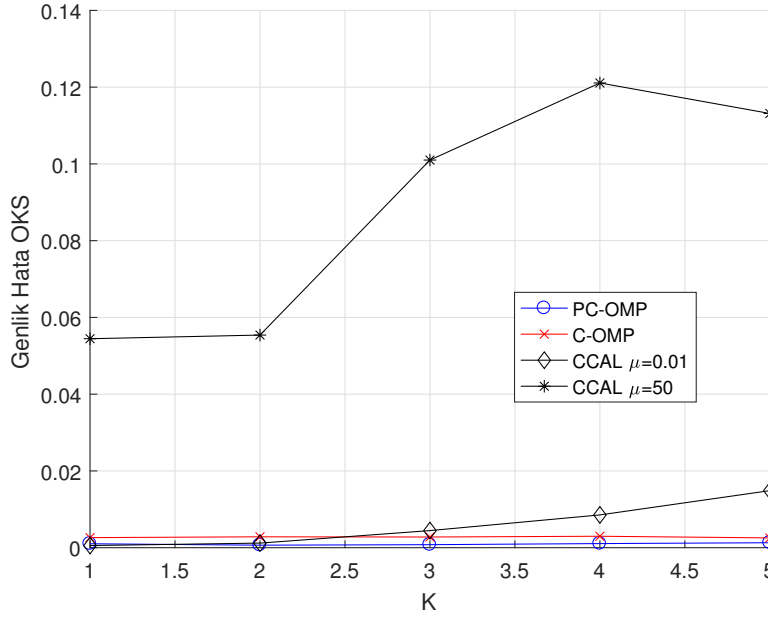
### 3.6.7 Ölçüm sayısına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımında farklı ölçüm ( $L$ ) sayılarına göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 50$ , Seyreklik seviyesi  $K = 3$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , SGO seviyesi  $30dB$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

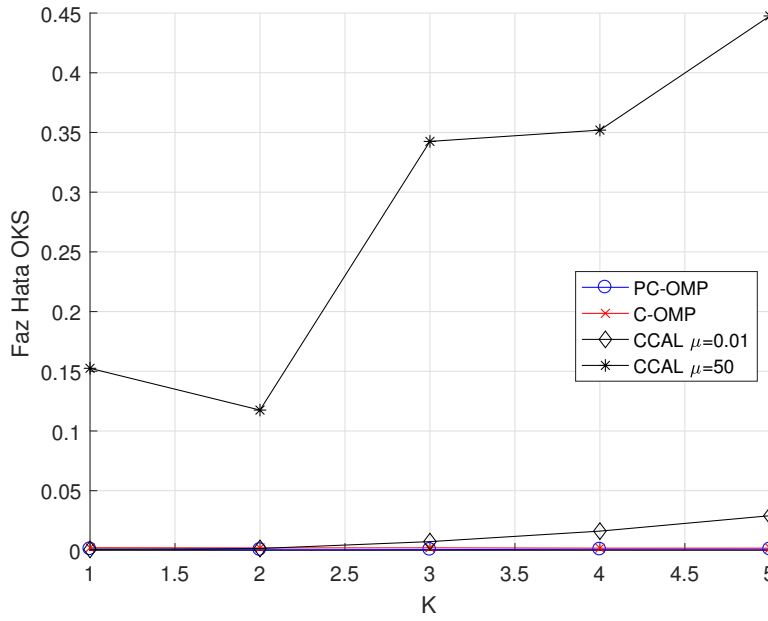
Alınan sonuçlar Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’de verilmiştir. Benzetimler incelendiğinde  $L = 15$  ve  $L = 20$  değerlerinden sonra sonuçların yakınsadığı ve fazla değişmediği gözlemlenmektedir. PC-OMP ve C-OMP, CCAL’dan daha iyi, PC-OMP ise en iyi sonuçları vermektedir.

### 3.6.8 Sensör sayısına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımında farklı sensör ( $N_y$ ) sayılarına göre sonuçlar verilmiştir. Ölçüm sayısı  $L = 50$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu

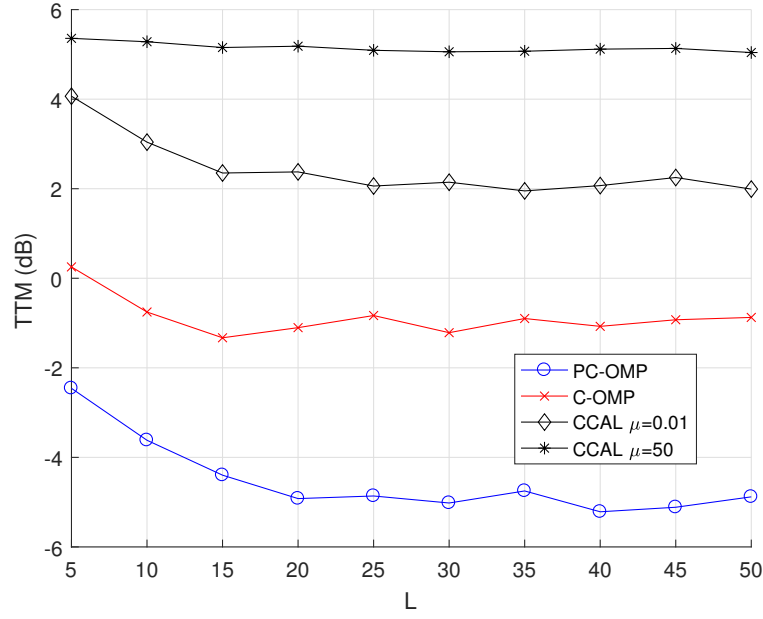


(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 3.17: Seyreklik seviyesine göre Monte-Carlo sonuçları. Seyreklik seviyesi,  $K = [1, 5]$ . (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.



Şekil 3.18: Ölçüm sayısına göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Ölçüm sayısı: [5, 50].

(ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , SGO seviyesi  $30dB$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

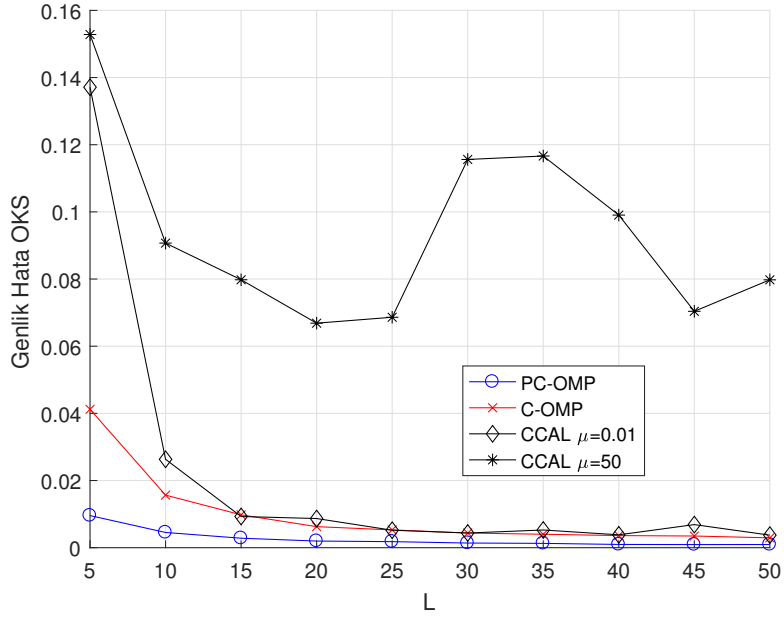
$N_y = 10$  için  $N_y/N_x = 0.2$  ve  $N_y = 50$  için  $N_y/N_x = 1$  olmaktadır. Sonuçlar bu bilgiler ile birlikte yorumlanmalıdır.

Sonuçlar Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.  $N_y = 10$  ve  $N_y = 15$  için C-OMP ve PC-OMP birbirlerine çok yakın ve CCAL’dan daha iyi sonuç vermektedir. Artan  $N_y$  değerlerinde PC-OMP, C-OMP’ye göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

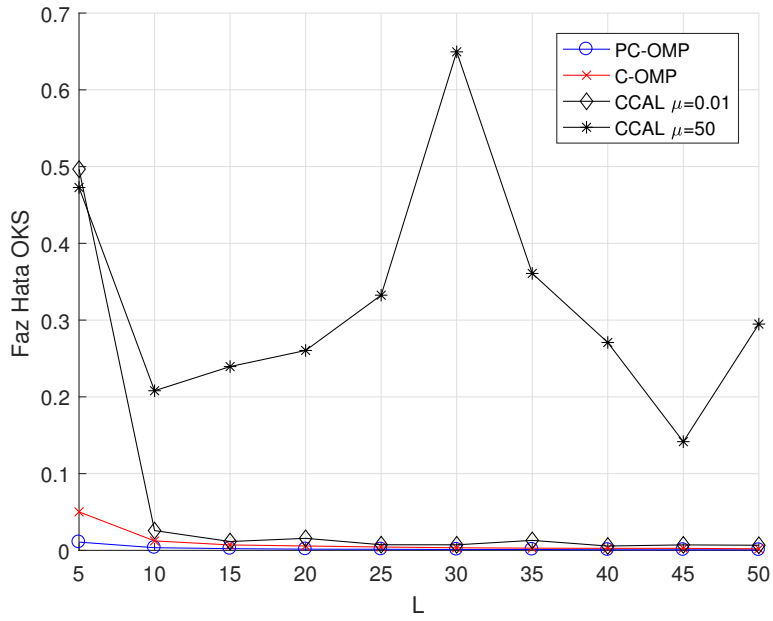
Faz ve genlik hatası kestirimi sonuçlarında CCAL değerleri oldukça kötüleşmektedir. C-OMP ile yakın olmakla birlikte en iyi sonucu PC-OMP vermiştir.

### 3.6.9 Seyreklik seviyesi seçiminin sonuca etkisi

C-OMP ve PC-OMP için seyreklik seviyesinin bilindiği varsayımı yapılmıştır. Bu bölümde seyreklik seviyesi parametresinin yanlış verildiği durumda yöntemlerin performansları analiz edilmiştir. Ölçüm sayısı  $L = 50$ , sensör sayısı  $N_y = 50$ ,



(a) Genlik Hata OKS



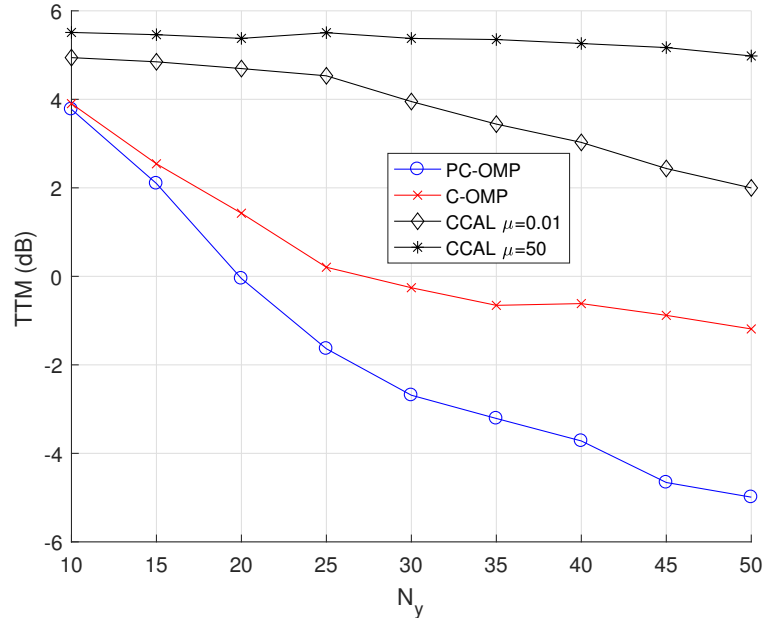
(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 3.19: Ölçüm sayısına göre Monte-Carlo sonuçları. Ölçüm sayısı: [5, 50]. (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu)  $N_x = 50$ , SGO seviyesi  $30dB$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan  $N(1, 0.05)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.02\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

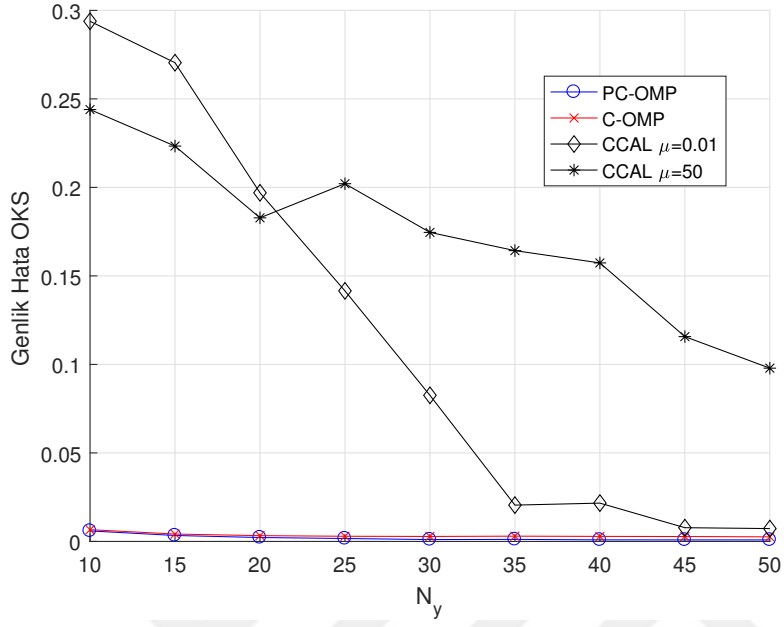
Seyreklik seviyesi gerçek değeri  $K = 3$  iken, C-OMP ve PC-OMP yöntemlerine 1 ile 10 arasında değişen seyreklik seviyesi parametreleri verilerek metrikler hesaplanmıştır. Alınan sonuçlar Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te verilmiştir. Görüldüğü gibi TTM, gerçek seyreklik seviyesi  $K=3$ 'e kadar azalmakta, daha sonra beklenildiği gibi artmaktadır. Ancak bu artış azalan eğimle olmaktadır. Bu durum TTM değerinin belirli seyreklik değerinden sonra bir üst limite yakınsayacağını göstermektedir. TTM değerinin aksine genlik ve faz hataları kestirim değerleri hatalı seyreklik seviyesinden etkilenmemektedir. Hatalı  $K$  değerine göre azalmaktadırlar. Bu durum sinyal geriçatımının doğru yapıldığının bir göstergesidir.

TTM, genlik ve faz hataları sonuçları birlikte incelendiğinde seyreklik seviyesi parametresi fazla verildiğinde, gerçek sinyal noktalarının doğru bulunduğu, bunların yanında (seyreklik seviyesindeki fazlalık kadar) gerçekte olmayan noktalarda da

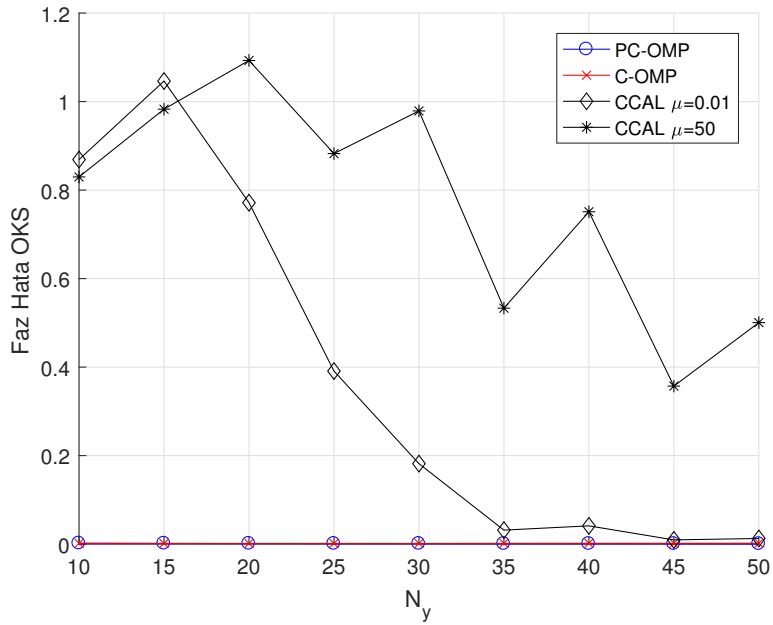


(a) TTM

Şekil 3.20: Sensör sayısına göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Sensör sayısı:  $N_y = [10, 50]$ .



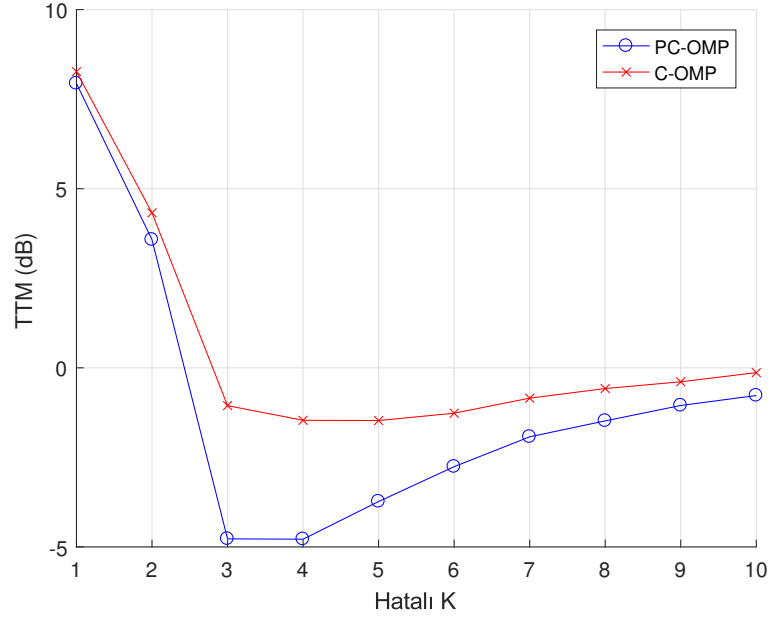
(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS (Radyan<sup>2</sup>)

Şekil 3.21: Sensör sayısına göre Monte-Carlo sonuçları. Sensör sayısı:  $N_y = [10, 50]$ .  
(a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.



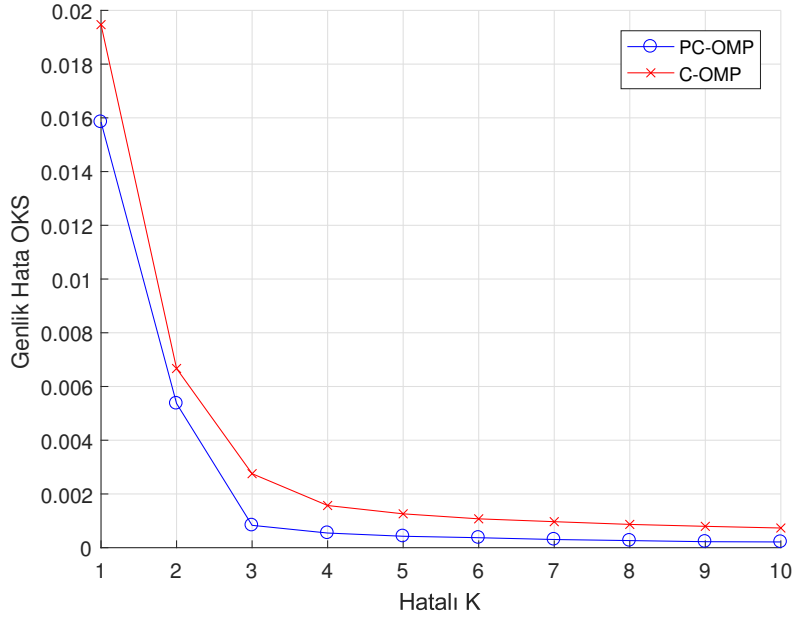


(a) TTM

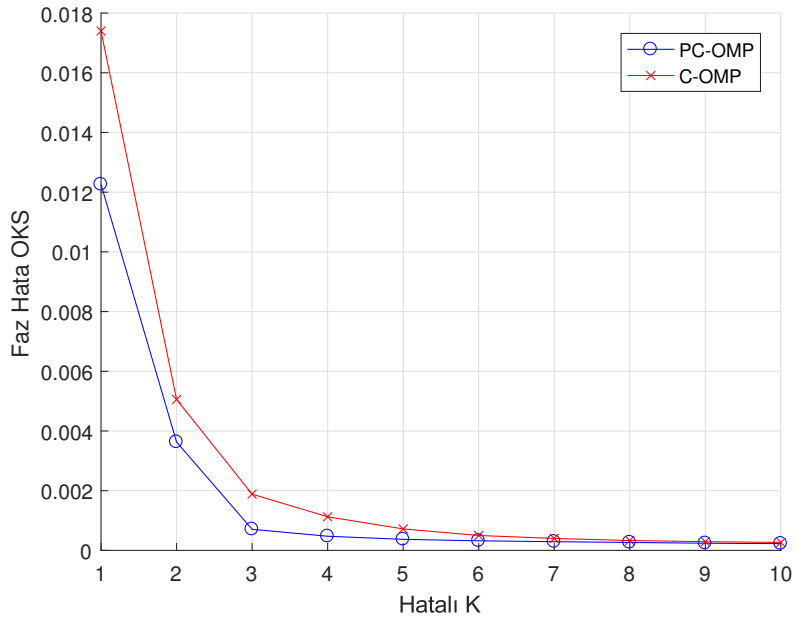
Şekil 3.22: Hatalı seyreklik seviyesine göre TTM Monte-Carlo sonuçları. Hatalı  $K = [1, 10]$ .

(gürültü kaynaklı vb) sinyal genliği oluşturulduğu anlaşılmaktadır.

Benzetimlerde kullanılan yöntemlerin çalışma süreleri de (sensör sayısı  $N_y = 50$ , ölçüm sayısı  $L = 50$ , frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu  $N_x = 50$  ve seyreklik seviyesi  $K = 3$  değerleri için) hesaplanmıştır. Süre hesaplamaları Intel Core i5-3470 işlemcisi ve 8GB RAM'i olan bilgisayarda Matlab 2017a kullanılarak yapılmıştır. Tekniklerin ortalama çalışma süreleri saniye cinsinden; PC-OMP 7.612, C-OMP 0.031 ve CCAL 15.237 olarak bulunmuştur. CCAL maksimum iterasyon sayısı 100 olarak verilmiştir. PC-OMP'nin OMP tabanlı olduğu değerlendirildiğinde ve OMP'nin çalışma süresi göz önünde bulundurulduğunda PC-OMP çalışma süresinin tamamına yakınına pertürbasyonların oluşturduğu söylenebilir. Farklı veri boyutları için çalışma sürelerinin değişeceği değerlendirilmektedir.



(a) Genlik Hata OKS



(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 3.23: Hatalı seyreklik seviyesine göre Monte-Carlo sonuçları. Hatalı  $K = [1, 10]$ .  
 (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

### 3.7 Sonuç ve Yorumlar

Bu bölümde ızgara dışı sinyaller için Kör Sensör Kalibrasyonu problemi çalışılmıştır. C-OMP (Calibration Orthogonal Matching Pursuit) ve PC-OMP (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit) olmak üzere Seyrekliğe Dayalı Kör Sensör Kalibrasyonu yöntemleri önerilmiştir. Önerilen yöntemler kapsamında, kör sensör kalibrasyonu için öncelikle çoklu ölçüm altında sinyal geriçatımı yapılmaktadır. Daha sonra faz ve genlik hatası kestirimi yapılmaktadır. PC-OMP yöntemi ızgara dışılık durumunda çalışabilmektedir. Benzetimler incelendiğinde, ızgara üzeri varsayımı ile çalışan C-OMP'nin literatürdeki emsal yöntemden sonuçların çoğunda daha iyi performans verdiği görülmektedir. Bunun yanında PC-OMP'nin ise sonuçların tamamına yakınında en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Alınan sonuçlar incelendiğinde literatürde bulunan yöntemlere kıyasla önerilen yöntemler aşağıdaki özellikleri ile öne çıkmaktadır;

- Önerilen yöntemler daha iyi sinyal geriçatımı yapmaktadır,
- Kalibrasyon performansları daha iyidir,
- PC-OMP ızgara dışılık durumunda Kör Sensör Kalibrasyonu yapabilmektedir.

İlerleyen dönem çalışmaları kapsamında önerilen yöntemlerin gerçek sistemlerden alınacak veriler ile test edilmesi ve bu sistemlerde gerçek zamanlı olarak çalıştırabilmesi üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri gerçekleştirilecektir.



## 4. IZGARA DIŞI YÖN BULMA VE KÖR KALİBRASYON

### 4.1 Giriş

Bölüm 3’de anlatılan yöntemde ızgara dışılık altında kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Bu bölümde ise Bölüm 3’deki yöntem uyarlanarak ızgara dışılık altında yön bulma ve kör sensör kalibrasyonu problemi çalışılmıştır. Çoklu ölçüm için öncelikle ızgara dışı yön bulunmakta, daha sonra kör sensör kalibrasyonu yapılarak faz ve genlik hataları düzeltilmektedir.

Literatür incelendiğinde yön bulma problemi üzerinde farklı kör sensör kalibrasyonu çalışmaları bulunmaktadır. Çalışma [31]’de kör sensör kalibrasyonu ile yüksek çözünürlüklü yön bulma problemi yöntemi geliştirilmiştir. Bu iteratif yöntemde öncelikle özdeğer açılımı (Eigen value decomposition) ile yön değerleri bulunmakta daha sonra kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Genlik ve faz hatalarının yanında, sensörler arası karşılıklı bağlantı (mutual coupling) hataları da düzeltilmektedir [31]. Çalışma [32]’de ise iteratif olmayan cebirsel çözüm ile kör sensör kalibrasyonu ile hüzme yönlendirme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem sensör konumlarının bilindiğini varsaymakta ve sensörler üzerindeki bilinmeyen genlik ve faz hatalarını düzeltmeyi amaçlamaktadır. Çalışma [33]’de benzer şekilde sinyal kestirimi ve kör sensör kalibrasyonunun birbirinden ayrı yapıldığı bir yöntem önerilmiştir.

Literatürde kör sensör kalibrasyonunun yanında bilinen sinyaller kullanılarak kılavuzlu sensör kalibrasyonu yapan yöntemler de [34] bulunmaktadır. Çalışma [34]’de bilinen sinyaller ile elde edilen kalibrasyon vektörü kullanılarak dizi kalibrasyonu yapılarak ardından farklı yöntemlerin yön bulma performansı incelenmektedir. Yöntem [35] ise birden fazla frekansta alınan ölçümler ile dizi kalibrasyonu ve ardından yön bulma yapılmaktadır.

Bu bölümde geliştirilen yöntem ile ızgara dışılık altında yön kestirimi yapılmakta ve aynı zamanda kör sensör kalibrasyonu yapılarak sensör dizisi üzerindeki genlik ve faz

hataları düzeltilmektedir. Izgara dışılık altında kör sensör kalibrasyonu ve yön kestirimi problemi için özgün bir çözücü (solver) önerilmiştir. Geliştirilen algoritma ızgara dışılık altında gradyen düşümü tabanlı arama ile yön kestirimi yapmaktadır.

## 4.2 Yön Bulma Sinyal Modeli

Yön bulma problemi Düzgün Doğrusal Dizi (Uniform Linear Array, ULA) üzerinde incelenmiştir. Diğer dizi geometrilerine de uygulanabilir. Bu bölümde ULA üzerinden yön bulma problemi için ölçüm modeli verilmektedir [68].

Belirli bir  $K$  seyrekliğine sahip bir sahne için,  $K$  adet dar bantlı sinyal  $\{s_k(t)\}_{k=1}^K$ ,  $N$  adet sensörde ölçülür. Ardından aşağıdaki  $N \times 1$  boyutlu ölçüm vektörü oluşturulur,

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}(\theta_k) s_k(t) + \mathbf{w}(t), \quad (4.1)$$

burada  $\mathbf{w}(t)$  gürültüyü,  $\mathbf{a}(\theta_k)$  ise  $\theta_k$  açısındaki dizi yanıtını (manifold vektörü) ifade eder ve aşağıdaki gibi verilir;

$$\mathbf{a}(\theta_k) = \left[ 1 \quad \exp(-ja) \quad \exp(-j2a) \quad \dots \quad \exp(-j(N-1)a) \right]^T, \quad (4.2)$$

burada  $a$  elemanlar arası faz farkını ifade eder ve  $a = 2\pi d / \lambda \sin(\theta_k)$  ile verilir.  $d$  ULA'daki elemanlar arası uzaklıktır.  $\lambda$  ise dalga boyudur.

Ölçüm vektörü  $\mathbf{x}(t)$  halde aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}s(t) + \mathbf{w}(t). \quad (4.3)$$

Dizi manifold matrisi  $\mathbf{A}$ ,  $N \times K$  boyutludur ve ölçüm modelini ifade eder. ULA'nın tüm açılardaki dizi yanıtını içerir ve aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\mathbf{A} = \left[ \mathbf{a}(\theta_1) \quad \mathbf{a}(\theta_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\theta_K) \right]. \quad (4.4)$$

### 4.3 K r Kalibrasyon Sinyal Modeli

Bu bölümde çoklu ölüm (snapshot) durumunda yön bulma sinyal modeli verilecektir. Kestirimi yapılacak y n değerlerinin ölümler arası değişmediği varsayımı yapılmıştır. Yön bulma problemi için ızgara üzeri sinyal modeli aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \dots & \mathbf{y}_D \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi} \mathbf{G} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_D \end{bmatrix} + \mathbf{w}. \quad (4.5)$$

Burada  $D$  ULA ile yapılan snapshot sayısıdır.  $\mathbf{y}_i$  ve  $\mathbf{x}_i$  sırasıyla  $i$ .  l m  (snapshot) ve buna karşılık gelen sinyali ifade eder.  $\mathbf{\Psi}$   l m matrisi olmak üzere,  $\mathbf{G} = \mathbf{\Psi} \mathbf{A}$  olarak tanımlanır.  $\mathbf{\Phi}$  genlik ve faz bozulmasını içeren diyagonal de-kalibrasyon matrisidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} d_1 e^{j\phi_1} & & & \\ & d_2 e^{j\phi_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_D e^{j\phi_D}. \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Burada  $d_i$  ve  $\phi_i$  sırasıyla,  $i$ . sensördeki genlik ve faz bozulması değerleridir.

ızgara dışılık ele alındığında  $\mathbf{y}_i$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{\Phi} \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \mathbf{g}(\theta_{i,k}^o) + \mathbf{w}_i. \quad (4.7)$$

ULA'nın yanıt vektörü kullanılarak  $\mathbf{g}(\theta_k) = \mathbf{\Psi} \mathbf{a}(\theta_k)$  olarak tanımlanmıştır. Bu durumda aşağıdaki optimizasyon problemi üzülür.

$$\min_{\alpha_{i,k}, \delta\theta_{i,k}, \phi_r, d_r} \sum_i \left\| \mathbf{y}_i - \mathbf{\Phi} \mathbf{\Psi} \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{a}(\theta_k + \delta\theta_k) \right\|_2, \quad (4.8)$$

Öyle ki;  $i = 1, 2, \dots, D$  and  $|\delta\theta_k| < \Delta/2$ .

Burada  $\delta\theta_k$  ızgara dışılığa neden olan pertürbasyon değeridir.

#### 4.4 Izgara Dışılık Altında Yön Bulma ve Kör Kalibrasyon Yöntemi

Literatürde Grup Dikey Eşleşme Arama (Group Orthogonal Matching Pursuit, GOMP) [55] ve Blok Dikey Eşleşme Arama (Block Orthogonal Matching Pursuit, BOMP) [54] olmak üzere OMP'de atomların birlikte seçildiği algoritmalar vardır. Bu algoritmaların yapısı benzerlik göstermektedir. GOMP'ta, OMP adımı olan projeksiyon hesaplama işlemi gruplar halinde yapılır. Ortalamada en yüksek projeksiyon değerine sahip grup seçilir [55]. BOMP'ta ise sinyalin bloklar halinde sparse olduğu varsayılmıştır. En yüksek korelasyona sahip blok seçilerek işleme devam edilir [54].

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntem Orthogonal Matching Pursuit (OMP) [43] tabanlıdır. Bu yöntemde alınan snapshotlarda bulunacak yön değerlerinin snapshotlar arası sabit olduğu varsayımı yapılmaktadır. Yön değerleri belirli bir çözünürlüğe (örneğin  $1^\circ$ ) sahip bir ızgara üzerinde ifade edilirse, sabit olduğu varsayılan yönler snapshotlar arası yön ızgarası üzerinde grup özelliği taşıyacaktır. Geliştirilen algoritmada [55] ve [54]'den esinlenilerek projeksiyon alma işlemi aşağıdaki gibi yapılmaktadır;

$$\hat{p} = \max \sum_{i=1}^D |\mathbf{G}^H \mathbf{y}_i|. \quad (4.9)$$

Bu işlem sonucunda projeksiyonun maksimum değeri seçilir. Algoritma içerisinde tüm snapshotlar için bu seçilen değer kullanılır.

Yönler sabit olmadığı durumda, alınan ölçümler arası zamanların yeterince kısa olduğu varsayılırsa, yön değişimi yavaş olacaktır. Bu durumda ölçümler arası yön değerleri Kalman Filtre [69] gibi bir yapı yardımı ile takip edilerek yön kestirimi iyileştirilebilir. Diğer taraftan böyle bir yöntem, çözümün karmaşıklığını arttıracaktır ve bu tez çalışmaları kapsamında ele alınmamıştır.

Literatürde yayın kaynağı sayısı kestirimine yönelik çalışmalar mevcuttur [64–66]. Algoritma akışı içerisinde yayın kaynağı sayısının, yani seyreklik seviyesinin bilindiği varsayılmıştır.

Ayrıntılı olarak ayrıca verilen algoritma adımları aşağıda sözel olarak anlatılmıştır. Durma kriteri sağlanana kadar OMP'nin her adımı için aşağıdaki işlemler yapılır;



- Her snapshot için ayrı ayrı projeksiyon alınır ve Denklem (4.9) ile verilen  $P$  projeksiyonu elde edilir,
- Elde edilen projeksiyon vektörünün maksimum noktasını veren yön seçilir (OMP atomu olarak eklenir),
- Her snapshot için en küçük kareler yöntemi ile sinyal geri çatımı yapılır,
- Bu geri çatım kullanılarak kör kalibrasyon yapılır,
- Her bir snapshot için ayrı ayrı tek bir perturbasyon adımı yapılır (tek bir adımlık gradyen arama yapılır),
- OMP'de seçilen adımlara göre perturbasyon yapıldığı için, snapshotlar arası sabit yön varsayımı altında, her snapshot için bulunan değerlerin hangi yöne ait olduğu bilinmektedir. Buna göre snapshotlarda bulunan yön değerlerinin ortalaması alınır.
- Izgara dışı bulunan yön değerleri ile sinyal kestirimi yapılır, bu kestirim kullanılarak kör kalibrasyon yapılır.

#### 4.5 Optimizasyon Probleminin Çözümü

Öncelikle OMP kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile ızgara noktaları üzerinde  $\alpha_l$  bulunur. Her  $\alpha_l$  birbirinden bağımsız olarak çözülür. Bunun için sadece  $\mathbf{y}_l$  kullanılır. Bütün  $\alpha_l$ 'ler hesaplandıktan sonra Bölüm 4.6'da anlatıldığı gibi faz ve genlik düzeltmesi işlemi yapılır.

Faz ve genlik düzeltmesi yapılan her bir  $\hat{\mathbf{y}}_l$  ve  $\alpha_l$  kullanılarak perturbasyon yapılır. Izgara dışı taban vektörleri  $\mathbf{g}(f_{1,i,k}^o, f_{2,i,k}^o)$  ve  $\alpha_l$ 'ler bulunur. Tüm  $l$ 'ler için bulunan değerler kullanılarak tekrar faz ve genlik düzeltmesi yapılır.

Daha sonra algoritma başa döner ve bir durdurma kriteri sağlanana kadar iterasyona devam edilir.

Perturbasyonun yapıldığı algoritma aşağıda anlatılmıştır.  $l$ . ölçüm ve geri çatılan sinyal için  $k$ . iterasyonda,  $k$  adet ızgara noktası  $\mathbf{T}_k$  ve  $l$ . ölçüm  $\mathbb{S}(\cdot)$  ile ifade edilen algoritmaya

## Izgara Dışı Yön Bulma ve Kör Kalibrasyon Algoritması

**Başlangıç:**  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}, \mathbf{y}^0 = \mathbf{y}, \mathbf{T}_0 = \{\}$ ,  $k = 1$

$k \leq K$  ise iterasyona devam et

OMP projeksiyon alma ve atom seçme adımı:

$$P = \arg \max \sum_{i=1}^D |\mathbf{G}\mathbf{y}_i|$$

$$j^* = \arg \max_j P(j)$$

$$\mathbf{T}_{i,k} = \mathbf{T}_{i,k-1} \cup \{f_{j^*}\}$$

Kalibrasyon adımı:

Her  $r = 1 : N_y$

Faz hatası kestirimi:

$$\hat{\phi}_r = \angle \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r^0$$

Genlik hatası kestirimi:

$$\hat{d}_r = 0.5 \left( \frac{e^{j\hat{\phi}_r} \mathbf{y}_r^0 \hat{\mathbf{y}}_r + e^{-j\hat{\phi}_r} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r^0}{\hat{\mathbf{y}}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r} \right)$$

Kalibrasyon yap;

$$\hat{\mathbf{y}}_r = e^{-j\hat{\phi}_r} \mathbf{y}_r^0 / \hat{d}_r$$

Pertürbasyon adımı;

Durma kriteri sağlanana kadar,

Her  $i = 1 : D$

$$(\boldsymbol{\alpha}_i, [\delta\theta_{i,1}, \dots, \delta\theta_{i,k}]) = \mathbb{S}(\mathbf{y}_i, [\theta_1, \dots, \theta_k])$$

Pertürbasyonların ortalamasını al;

$$\delta\theta_k = \sum_i \delta\theta_{i,k} / D$$

Parametre güncelle:  $\theta_k = \theta_k + \delta\theta_k$ ,

Yeni sinyal kestirimi ile kalibrasyon adımını tekrarla.

$k = k + 1$

**Çıktı:**  $(\boldsymbol{\alpha}, [\delta\theta_1, \dots, \delta\theta_k], \mathbf{T}_{i,k}, \Phi)$

## Yön Bulma Pertürbasyon Algoritması $\hat{\mathbb{S}}(\cdot)$

**Girdiler:**  $([\theta_1, \dots, \theta_k], \mathbf{y}_i, \boldsymbol{\mu})$

**Başlangıç:**  $l = 0, f_{p,0} = f_p, p = 1 : k$

$$\mathbf{G}_l = [\mathbf{g}(\theta_{1,l}), \mathbf{g}(\theta_{2,l}) \dots \mathbf{g}(\theta_{k,l})],$$

$$\boldsymbol{\alpha}_l = \mathbf{G}_l^\dagger \mathbf{y}_i,$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{y}_i - \mathbf{G}_l \boldsymbol{\alpha}_l$$

$\mathbf{B}_l$  oluştur

Her  $p = 1 : k$

$$\theta_{p,l+1} = \theta_{p,l} + \boldsymbol{\mu}_{p,l} \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}$$

$\theta_{p,l+1}$  ızgara hücresi içinde mi?

$$\delta\theta_p = \theta_{p,l+1} - \theta_{p,0}$$

**Çıktı:**  $(\boldsymbol{\alpha}, [\delta\theta_1, \dots, \delta\theta_k])$

beslenir:

$$\left( \boldsymbol{\alpha}, [\delta\theta_1 \dots \delta\theta_k], \boldsymbol{\Phi} \right) = \mathbb{S} \left( \mathbf{y}, [\theta_1 \dots \theta_k] \right), \quad (4.10)$$

burada  $\mathbb{S}(\cdot)$  pertürbasyon parametrelerini bulmaktadır.

Öncelikle genlik vektörü  $\boldsymbol{\alpha}$  aşağıdaki gibi bulunur;

$$\boldsymbol{\alpha}_l = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left\| \mathbf{y} - \sum_{p=1}^k \alpha_p \mathbf{g}(\theta_{p,l}) \right\|_2, \quad (4.11)$$

burada  $l$ ,  $\mathbb{S}(\cdot)$  döngü indisidir.  $\theta_{p,l}$  ise  $l$ . iterasyondaki  $\theta_p$  vektörüdür. Bu optimizasyon problemi  $\boldsymbol{\alpha}$  için karesel olduğundan basit bir en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözüm bulunabilir.

Daha sonra pertürbasyonlar gerçekleştirilir,  $\theta_{p,l+1} = \theta_{p,l} + \delta\theta_{p,l}$ . Burada  $[\delta\theta_{1,l} \dots \delta\theta_{k,l}]$  aşağıdaki gibi bulunur;

$$\min_{\delta\theta_{1,p}: |\delta\theta_{1,p}| \leq \Delta_{1/2}} \left\| \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(\theta_{1,p,l} + \delta\theta_{1,p}) \right\|_2. \quad (4.12)$$

Denklem (4.12) ise doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon problemidir. Bu problem gradyen düşümü ile çözülebilir. Bunun için (4.12) ile verilen maliyet fonksiyonu  $\theta_{p,l}$  etrafında doğrusallaştırılabilir.  $\mathbf{g}(\theta_{p,l} + \delta\theta_p)$  ifadesi birinci seviye Taylor serisine açılarak yakınsanabilir.

$$\mathbf{g}(\theta_{p,l} + \delta\theta_p) \approx \mathbf{g}(\theta_{p,l}) + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \theta_{p,l}} \delta\theta_p. \quad (4.13)$$

Denklem (4.13) kullanılıp ve kısıtlar kaldırıldığında, (4.12) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} [\delta\theta_{1,l} \dots \delta\theta_{k,l}] &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{J}_R(\mathbf{u}), \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}} \left\| \mathbf{r}_l - \mathbf{B}_l \mathbf{u} \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (4.14)$$

burada  $\mathbf{r}_l = \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(\theta_{p,l})$  dik artıktır, ve  $\mathbf{B}_l \in \mathcal{C}^{N \times k}$  ise doğrulaştırma

noktasındaki ağırlıklandırılmış kısmi türevleri barındırır:

$$\mathbf{B}_l = \left[ \Delta\alpha_{1,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \theta_{1,l}}, \dots, \Delta\alpha_{k,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \theta_{k,l}} \right], \quad (4.15)$$

ve  $\mathbf{u} = [\delta\theta_{1,1}, \dots, \delta\theta_{1,k}]^T \in \Re^{k \times 1}$  1. döngüdeki güncellemeleri tutar. Her döngüde  $\theta_{p,l}$  hesaplandığında  $\mathbf{B}_l$  de güncellenir. Döngüler sırasında arama negatif gradyen yönünde yapılır. Güncellenen parametreler bir ızgara hücresinde kalacak şekilde sınırlanır.

Denklem (4.14) ile verilen maliyet fonksiyonu için,  $J$ 'nin  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$  noktasındaki negatif gradyeni  $-\nabla_{\mathbf{u}} J(\mathbf{u})|_{\mathbf{u}=\mathbf{0}} = \text{Re} \{2\mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l\}$  ile verilir. Dolayısıyla, Denklem (4.12) ile verilen problemin çözümü aşağıdaki gradyen düşümü döngüsü ile bulunur;

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_l &= [\mathbf{g}(\theta_{1,l}) \ \mathbf{g}(\theta_{2,l}) \ \dots \ \mathbf{g}(\theta_{k,l})]^\dagger \mathbf{y}, \\ \theta_{p,l+1} &= \theta_{p,l} + \mu_{p,l} \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

burada  $\mu_{p,l}$  yeterince küçük seçilmiş adım boyudur.

#### 4.6 Faz ve Genlik Hatası Kestirimi

Faz ve genlik hatası kestirimi ve düzeltilmesi Bölüm 3.5'te anlatıldığı gibi yapılmaktadır.

#### 4.7 Benzetimler

Bu bölümde önerilen yöntemin performansının değerlendirilmesi için benzetimler tasarlanmıştır. Önerilen yöntemin yanısıra referans olarak MUSIC [70] yöntemi yön bulma performans karşılaştırması amacıyla benzetimlerde kullanılmıştır. Sinyal geri çatım ve kör kalibrasyon performansı; sensör sayısı, ölçüm sayısı, SGO, seyreklik seviyesi ve kalibrasyon hatalarının şiddeti gibi parametrelere bağlıdır. Bu gibi performansın bağlı olduğu parametreler kullanılarak farklı senaryolar ve ölçüm setleri üretilmiştir. Bunlar kullanılarak Monte-Carlo çalışması yapılmış ve sonuçlar verilerek yorumlanmıştır.

Benzetim çalışmaları kapsamında ULA kullanılarak sentetik veri üretilmiştir. Dizi

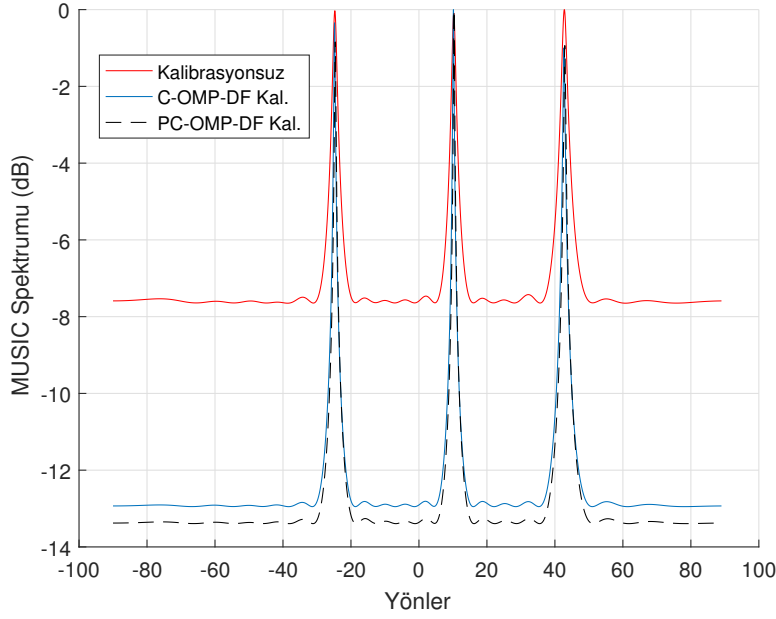
hüzme paterni, yön bulma çözünürlüğü ve doğruluğu dizideki sensör sayısına ve yayın yönüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir [68]. Bu sebeple, hesaplanan performans parametrelerinin yanıltıcı olmaması adına benzetim çalışmaları kapsamında yayın yönü ve sayısı sabit tutulmuştur.  $K = 3$  adet yayın kullanılmıştır. Yayın yönleri sırasıyla  $-25^\circ$ ,  $9.57^\circ$  ve  $42.48^\circ$  verilmiştir.

Benzetimlerde her bir durum için 50 Monte-Carlo çalışması yapılmıştır. Alınan sonuçların ortalaması çizdirilmiştir. Gerçek ve geri-çatılan sinyaller arasındaki Toprak Taşıma Mesafesi (TTM) [61], faz hatası kestirimi Ortalama Karesel Hatası (OKS) ve genlik hatası kestiriminin ortalama karesel hatası hesaplanarak çizdirilmiştir. MUSIC algoritması ile sadece yön değerleri bulunmaktadır, bunun için yönü bulunan sinyallerin genliği unit genlik verilerek TTM hesaplanmıştır. Genlik hatası kestirimi sırasında belirsizlik olabildiği için şu şekilde bir normalizasyon yapılmıştır; genlik hatası kestirimlerinin toplam değeri gerçek genlik hatasının toplam değerine eşitlendikten sonra genlik hatası OKS hesaplanmıştır. Faz hatası kestirimi OKS değerleri radyan olarak çizdirilmiştir.

Benzetimlerde Izgara Dışı Kör Kalibrasyon ve Yön Bulma yöntemi (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit Direction Finding, PC-OMP-DF), pertürbasyon yapmayan OMP'ye dayalı kör kalibrasyon ve yön bulma yöntemi (Calibration OMP Direction Finding, C-OMP-DF) ve MUSIC [70] kullanılmıştır.

Sensör kalibrasyonunun performansının bir diğer göstergesi olarak MUSIC spektrumu kullanılabilir. Örneğin, Monte-Carlo çalışmalarındakine benzer olarak olarak  $SGO = 20dB$  ve 40 adet sensöre sahip bir ULA ile kalibrasyon öncesi ve sonrası hesaplanan MUSIC spektrumları Şekil 4.1'de verilmiştir. Görüldüğü üzere kalibrasyon sonrası MUSIC spektrumu daha keskinleşmektedir. Bu durum kalibrasyon sonraki SGO kazancının arttığını göstermektedir. Izgara dışı yön bulma kullanan PC-OMP-DF yöntemi ile SGO iyileşmesi daha fazla olmaktadır.

MUSIC spektrumu incelendiğinde, spektrumun keskinliği ve ortalamasının kalibrasyon performansının bir göstergesi olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Bu noktadan hareketle kalibrasyon öncesi ve sonrasındaki MUSIC spektrumu maksimum ve minimum değerlerinin oranı ve MUSIC spektrumunun ortalaması da



Şekil 4.1: Kalibrasyon öncesi ve sonrası hesaplanan örnek MUSIC Spektrumları.

Monte-Carlo çalışmalarında hesaplanmış ve her bir durum için çizdirilmiştir.

#### 4.7.1 SGO'na göre benzetim sonuçları

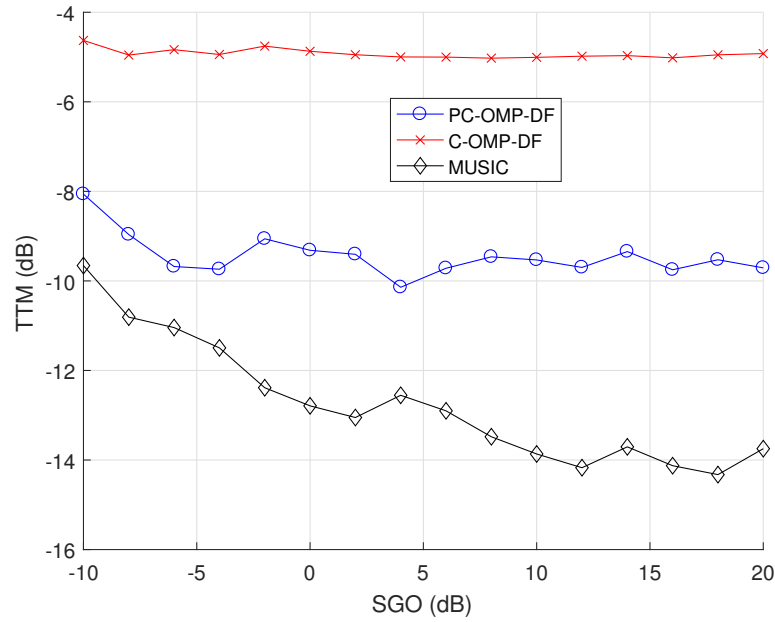
Bu senaryo adımımda farklı SGO değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 40$ , ölçüm sayısı (snapshot sayısı)  $L = 40$ , yön uzayında sinyaller için ızgara çözünürlüğü  $1^\circ$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.1 olan  $N(1, 0.1)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.2\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

SGO'na göre hesaplanan değerler Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de çizdirilmiştir. TTM sonuçları yön bulma performansını göstermektedir. Görüldüğü gibi PC-OMP-DF yönteminin sonuçları C-OMP-DF yönteminden daha iyi çıkmaktadır. Bu sonuç pertürbasyonun sonuca olumlu katkısını göstermektedir. Genlik ve faz hatası kestirim sonuçları da artan SGO değerlerinde daha iyileşmektedir. PC-OMP-DF yönteminin sonuçları daha iyi çıkmaktadır.

Kalibrasyon yapılmadan önce ve kalibrasyon yapıldıktan sonra MUSIC spektrumu kullanılarak elde edilen metrikler Şekil 4.4 (a) ve (b)'de verilmiştir. Şekil 4.2 (a)'de

ilgili MUSIC spektrumlarının maksimum ve minimum değerleri oranları verilmiştir. Bu değer yüksek çıkması kalibrasyonun başarılı yapıldığının bir göstergesidir. Görüldüğü gibi PC-OMP-DF ve C-OMP-DF ile yapılan kalibrasyonlar sonrası hesaplanan sonuçlar, kalibrasyon yapılmadan önceki sonuçlardan daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç kalibrasyon ile SGO kazancı elde edildiğini göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 4.2 (b)'de ise ilgili MUSIC spektrumlarının ortalama değerleri verilmiştir. Bu değer daha düşük çıkması kalibrasyonun daha iyi yapıldığını göstermektedir. Görüldüğü gibi kalibrasyon sonrası sonuçlarda iyileşme olmaktadır.

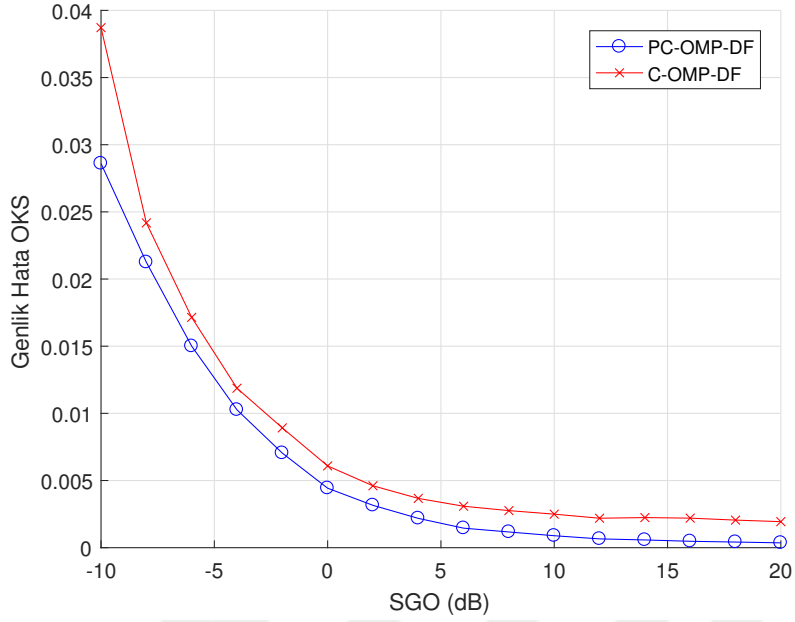
Şekil 4.2 (a) ve (b)'de PC-OMP-DF yönteminin sonuçları C-OMP-DF yönteminden daha iyi çıkmaktadır. Bu sonuç pertürbasyonun sonuca olumlu katkısını göstermektedir.



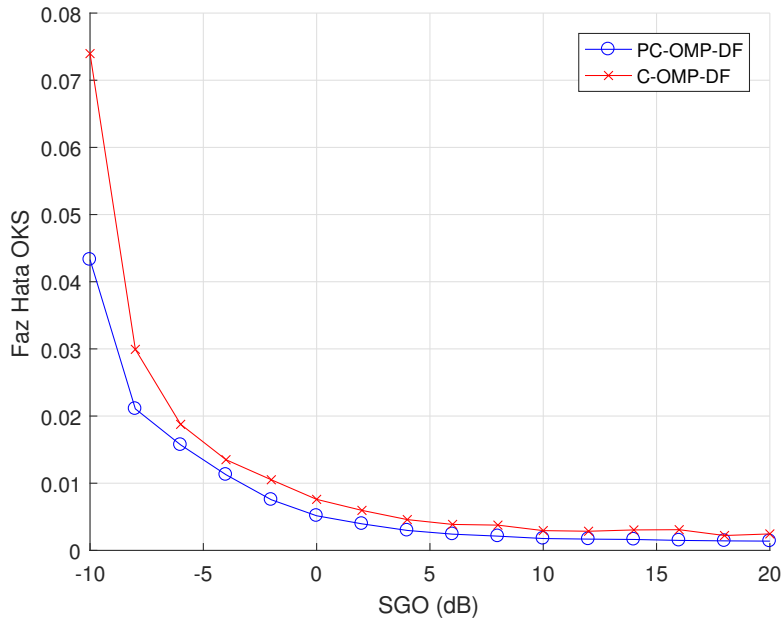
Şekil 4.2: SGO'na göre TTM Monte-Carlo sonuçları.  $SGO = [-10, 20]$ .

#### 4.7.2 Ölçüm sayısına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımında farklı ölçüm (snapshot) sayılarına göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 40$ ,  $SGO = 20$ dB, yön uzayında sinyaller için ızgara çözünürlüğü  $1^\circ$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.1 olan  $N(1, 0.1)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak



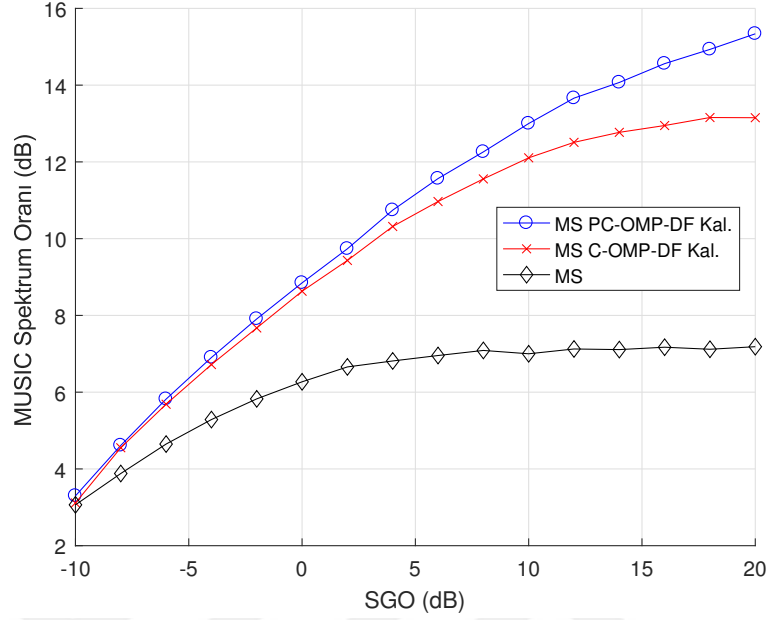
(a) Genlik Hata OKS



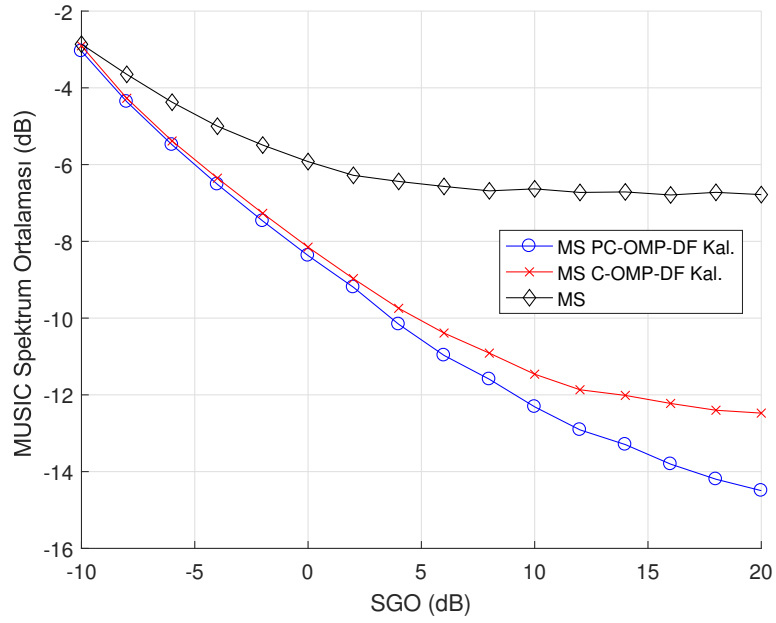
(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 4.3: SGO'na göre Monte-Carlo sonuçları.  $SGO = [-10, 20]$ . (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.





(a) MUSIC Spektrum Oranı

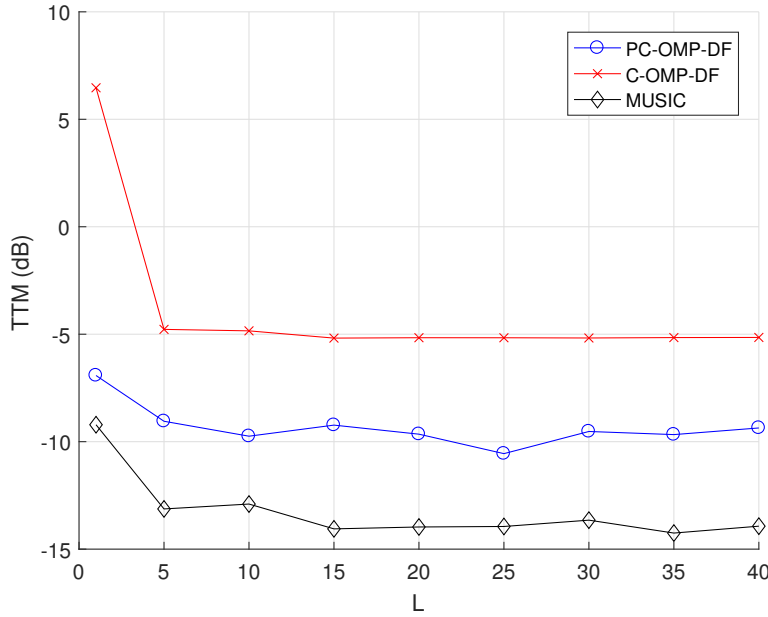


(b) MUSIC Spektrum Ort.

Şekil 4.4: SGO'na göre Monte-Carlo Sonuçları.  $SGO = [-10, 20]$ . (a) MUSIC Spektrum Oranı, (b) MUSIC Spektrum Ortalaması.

verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.2\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

Alınan sonuçlar Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Ölçüm sayısı  $L = 5$  değerinden sonra sonuçlarda belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Hesaplanan parametrelerde PC-OMP-DF yönteminin sonuçlarının C-OMP-DF yönteminden daha iyi çıktığı görülmektedir.

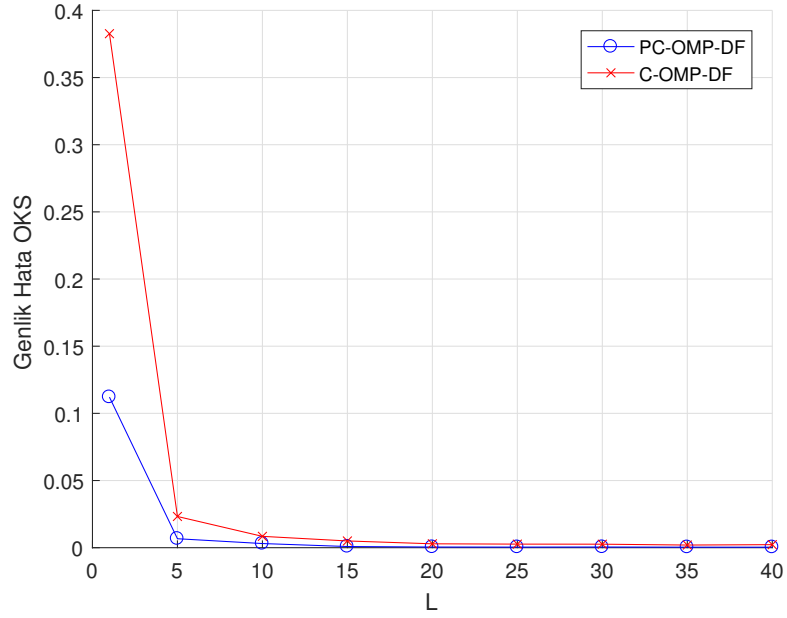


Şekil 4.5: Snapshot sayısına ( $L$ ) göre TTM Monte-Carlo sonuçları.  $L = [1, 40]$ .

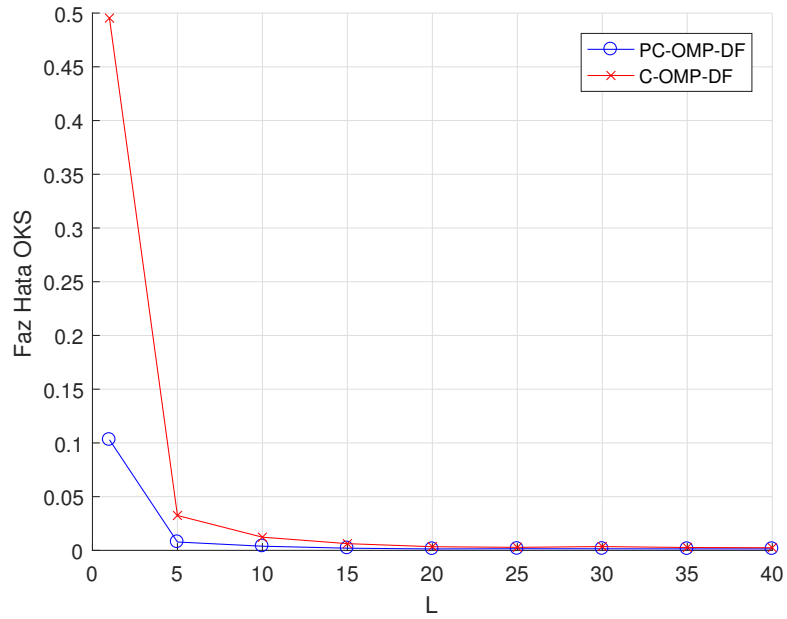
#### 4.7.3 Genlik hata ortalamasına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımımda farklı genlik dekalibrasyon hatası değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 40$ ,  $SGO = 20\text{dB}$ , ölçüm sayısı  $L = 40$ , yön uzayında sinyaller için ızgara çözünürlüğü  $1^\circ$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri ilgili senaryo değeri ve standart sapması 0.1 olan Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.2\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

Alınan sonuçlar Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir. Görüldüğü gibi C-OMP-DF yönteminin sonuçları artan genlik hatası ortalamasına bağlı olarak kötüleşmektedir. PC-OMP-DF yönteminde ise bu durum olmamaktadır. Bu sonuç pertürbasyonun sonuca olumlu katkısını göstermektedir.

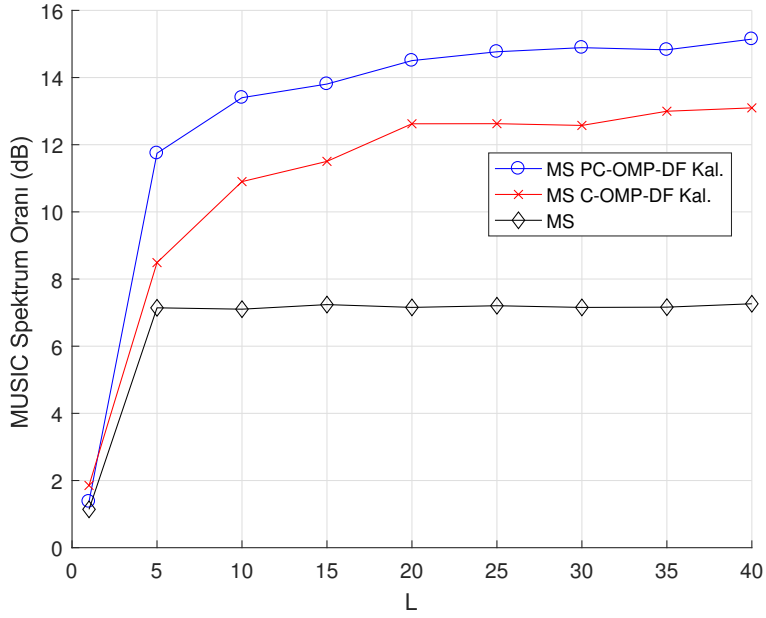


(a) Genlik Hata OKS

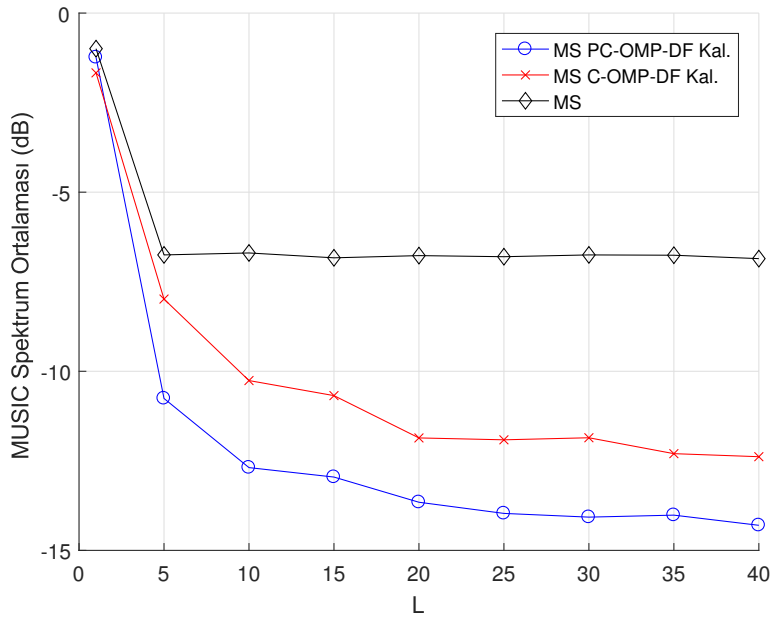


(b) Faz Hata OKS (Radyan<sup>2</sup>)

Şekil 4.6: Snapshot sayısına ( $L$ ) göre Monte-Carlo sonuçları.  $L = [1, 40]$ . (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

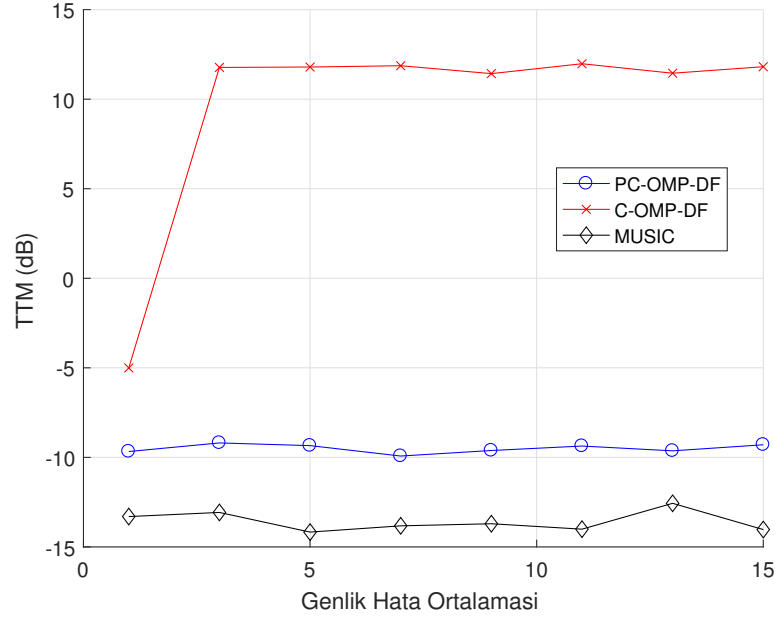


(a) MUSIC Spektrum Oranı



(b) MUSIC Spektrum Ort.

Şekil 4.7: Snapshot sayısına ( $L$ ) göre Monte-Carlo sonuçları.  $L = [1, 40]$ . (a) MUSIC Spektrum Oranı, (b) MUSIC Spektrum Ortalaması.



Şekil 4.8: Genlik hatası ortalama değerine göre TTM Monte-Carlo sonuçları.

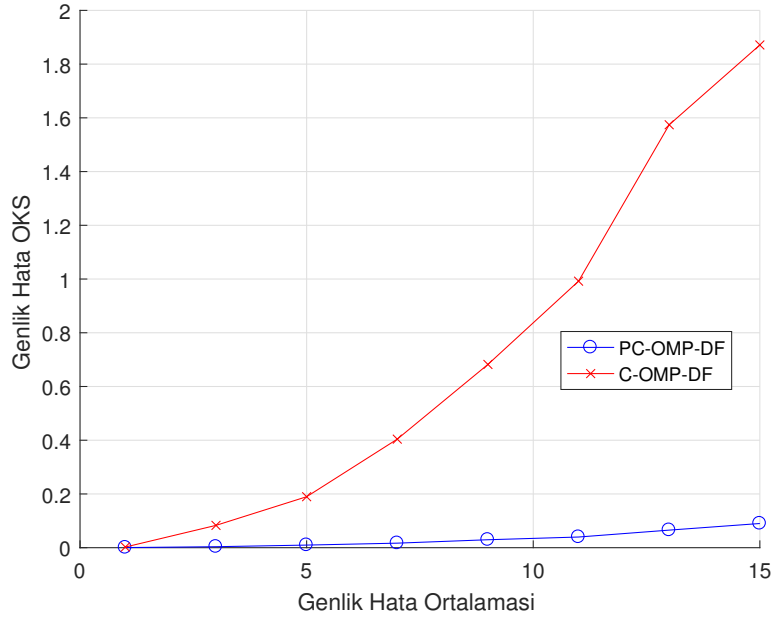
#### 4.7.4 Genlik hata standart sapmasına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımımda farklı genlik dekalibrasyon hatası standart sapması değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 40$ ,  $SGO = 20\text{dB}$ , ölçüm sayısı  $L = 40$ , yön uzayında sinyaller için ızgara çözünürlüğü  $1^\circ$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması ilgili senaryo değeri olan Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası  $[0, 0.2\pi]$  arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

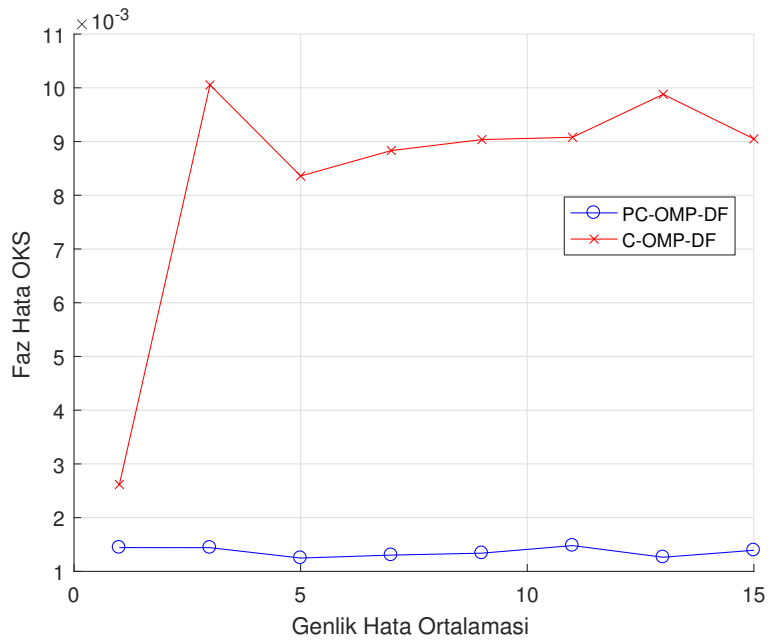
Alınan sonuçlar Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir. Görüldüğü gibi sonuçlar genlik hatasının standart sapma değerinden etkilenmemektedir.

#### 4.7.5 Faz hatasına göre benzetim sonuçları

Bu senaryo adımımda farklı faz dekalibrasyon hatası değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 40$ ,  $SGO = 20\text{dB}$ , ölçüm sayısı  $L = 40$ , yön uzayında sinyaller için ızgara çözünürlüğü  $1^\circ$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.1 olan  $N(1, 0.1)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası 0 ve ilgili senaryo değeri arasında

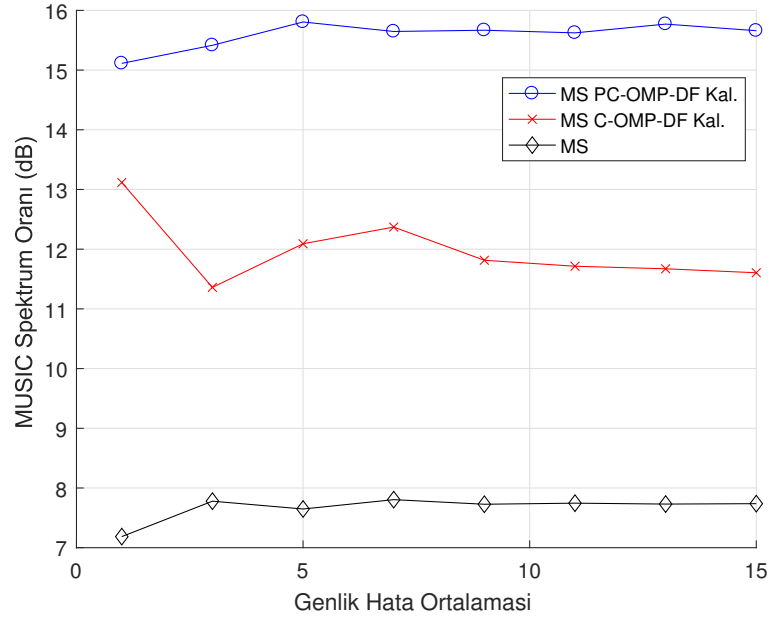


(a) Genlik Hata OKS

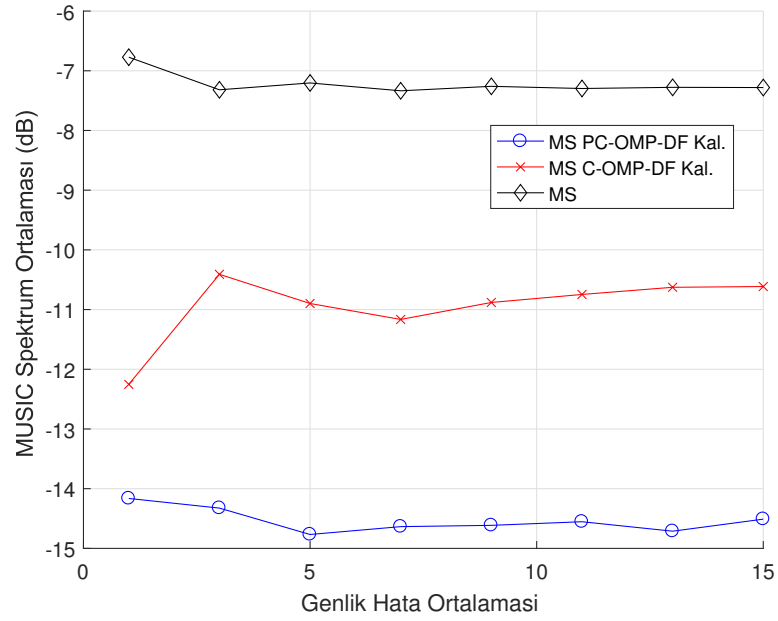


(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 4.9: Genlik hatası ortalama değerine göre Monte-Carlo sonuçları. (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

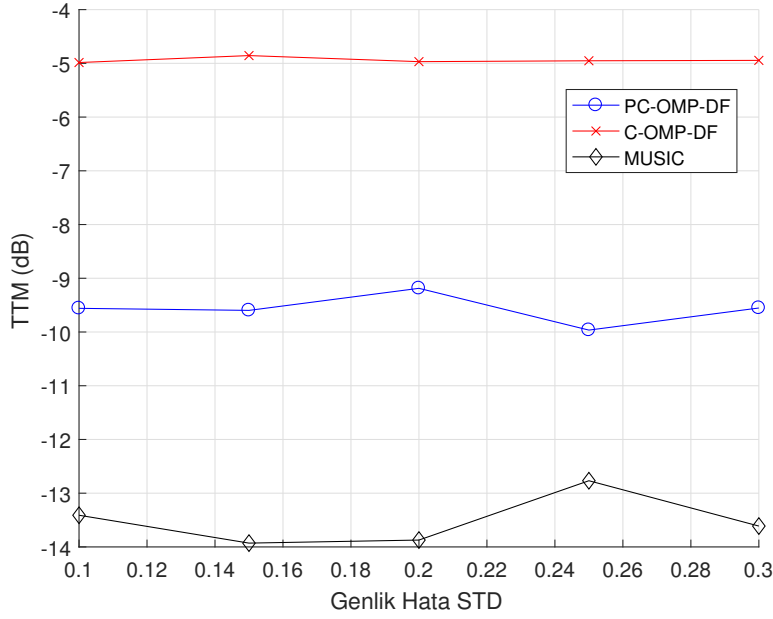


(a) MUSIC Spektrum Oranı



(b) MUSIC Spektrum Ort.

Şekil 4.10: Genlik hatası ortalama değerine göre Monte-Carlo sonuçları. (a) MUSIC Spektrum Oranı, (b) MUSIC Spektrum Ortalaması.



Şekil 4.11: Genlik hatası standart sapma değerine göre TTM Monte-Carlo sonuçları.

normal dağılımlı olarak verilmiştir.

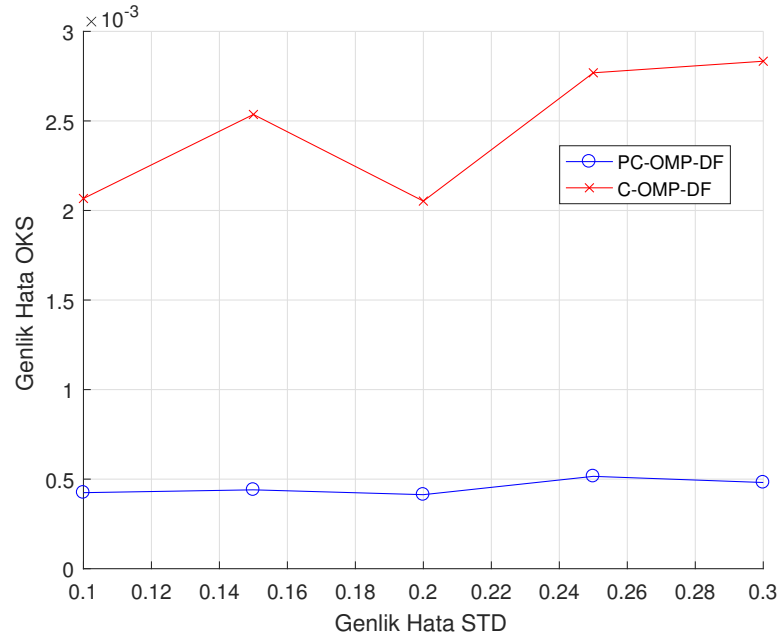
Alınan sonuçlar Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Görüldüğü gibi sonuçlar genlik hatasının standart sapma değerinden etkilenmemektedir. Sonuçlardan görüldüğü üzere faz hatasının  $0.5\pi$  değerinden sonra yön bulma ve kalibrasyon yapılamamaktadır.

#### 4.7.6 Çözünürlük analizi benzetim sonuçları

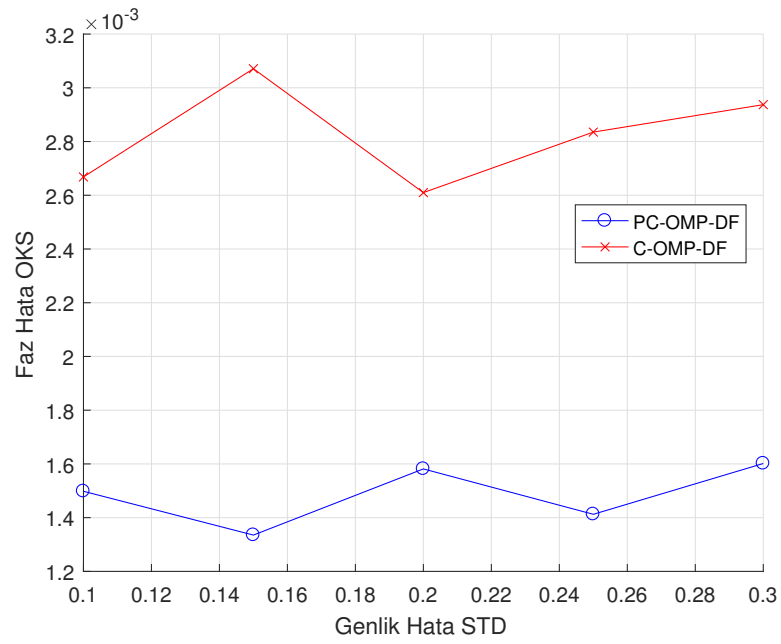
Bu senaryo adımında iki yayın arasındaki yön farkı değerine göre sonuçlar verilmiştir. Sensör sayısı  $N_y = 40$ ,  $SGO = 20\text{dB}$ , ölçüm sayısı  $L = 40$ , yön uzayında sinyaller için ızgara çözünürlüğü  $1^\circ$ , seyreklik seviyesi  $K = 3$  verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.1 olan  $N(1, 0.1)$  Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası sıfır ile ilgili senaryo değeri arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir.

Alınan sonuçlar Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. ULA dizinin çözünürlük etkisinden dolayı PC-OMP-DF ve C-OMP-DF sonuçları yön bulma performansı açısından birbirinden fazla ayrışmamaktadır. Bununla birlikte faz ve



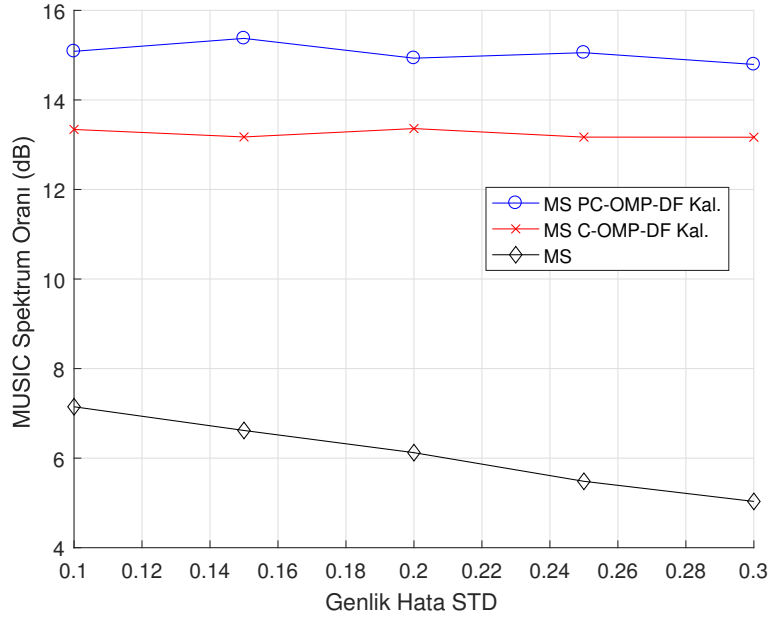


(a) Genlik Hata OKS

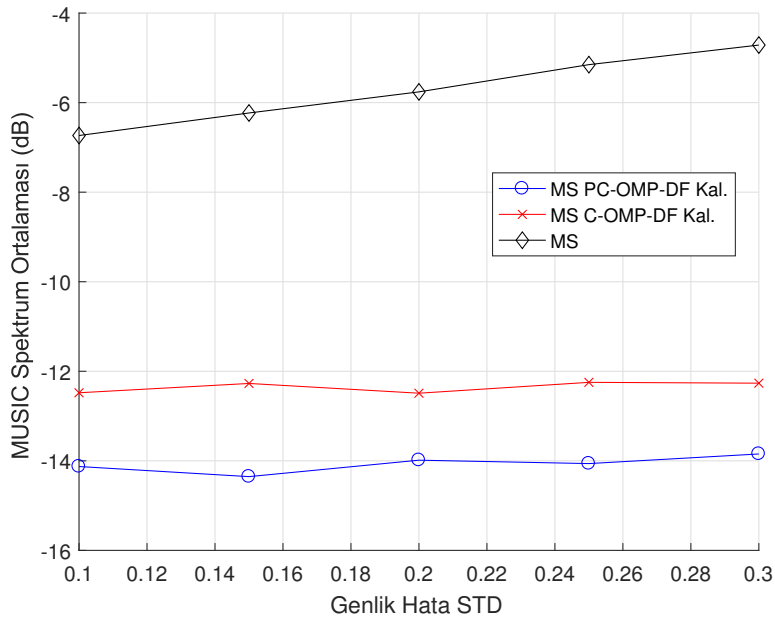


(b) Faz Hata OKS (*Radyan*<sup>2</sup>)

Şekil 4.12: Genlik hatası standart sapma değerine göre Monte-Carlo sonuçları. (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

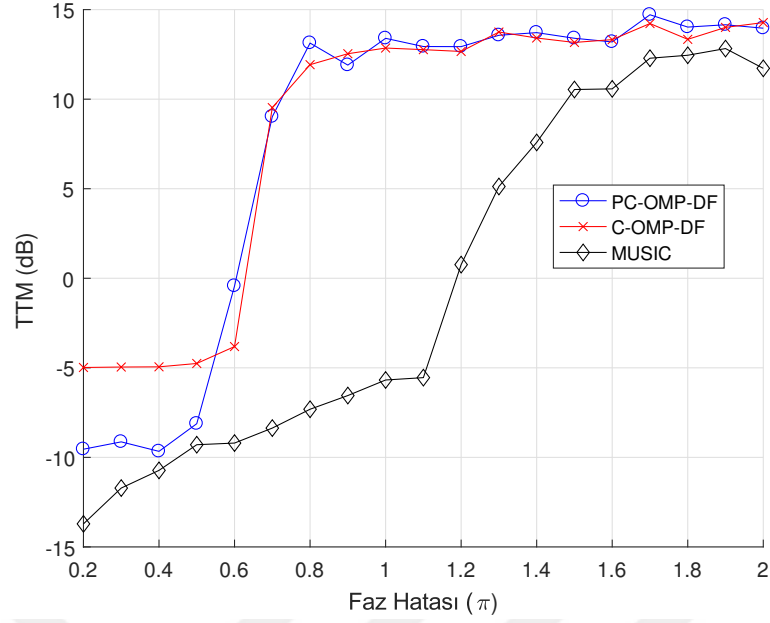


(a) MUSIC Spektrum Oranı



(b) MUSIC Spektrum Ort.

Şekil 4.13: Genlik hatası standart sapma değerine göre Monte-Carlo sonuçları. (a) MUSIC Spektrum Oranı, (b) MUSIC Spektrum Ortalaması.



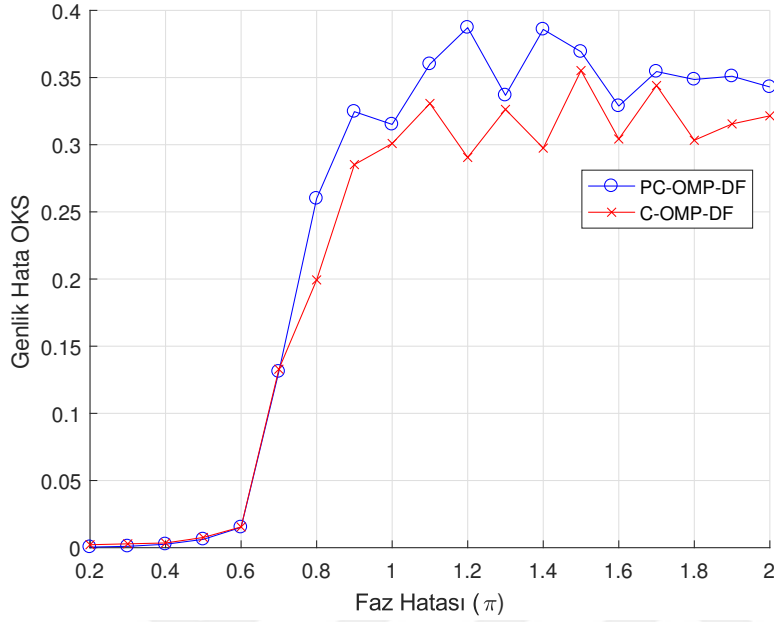
Şekil 4.14: Faz hatası değerine göre TTM Monte-Carlo sonuçları.

genlik hatası kestirimi başarımı ve MUSIC spektrumu metrikleri bakımından PC-OMP-DF sonuçlarının daha iyi çıktığı görülmektedir.

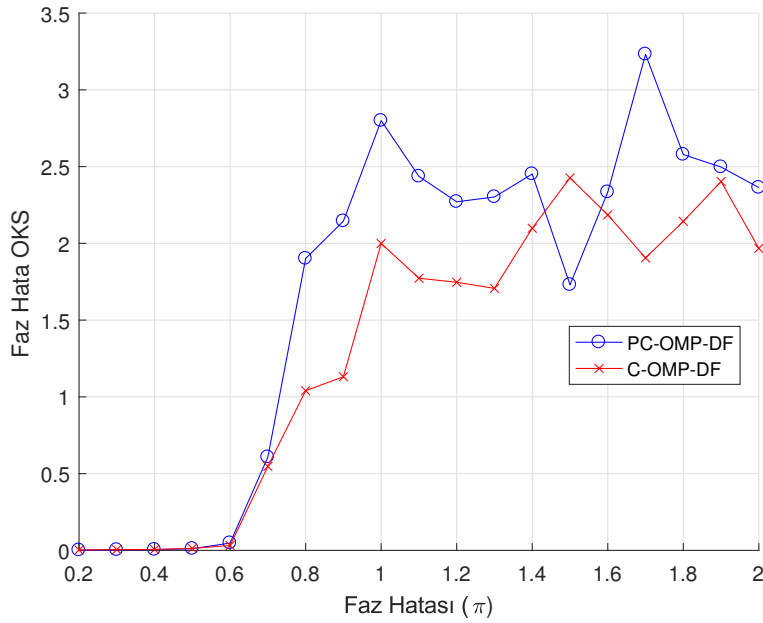
#### 4.8 Sonuç ve Yorumlar

Bu bölümde Düzgün Doğrusal Dizi (Uniform Linear Array, ULA) kullanılarak ızgara dışı sinyaller için yön bulma ve kör sensör kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir. Izgara Dışı Kör Kalibrasyon ve Yön Bulma (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit Direction Finding, PC-OMP-DF) yönteminin ızgara dışı sinyaller için daha iyi sonuçlar verdiği benzetim sonuçları ile gösterilmiştir. PC-OMP-DF yöntemi ızgara dışı yön kestirimi yapılabilenkte aynı zamanda sensörler üzerindeki faz ve genlik hatası kör bir şekilde düzeltilebilmektedir. Önerilen yöntem ile kör kalibrasyon yapıldığı durumda SGO artışı sağlandığı yapılan benzetim çalışmaları gösterilmiştir. Izgara üzeri yön kestirimi yapan C-OMP-DF algoritmasına kıyasla PC-OMP-DF kullanıldığında SGO artışı daha yüksek olmaktadır.

Benzetimler yapılırken seyreklik seviyesinin, diğer bir değişle sinyal sayısının bilindiği varsayılmıştır. İlerleyen dönem çalışmaları kapsamında seyreklik seviyesine bağlı kalınmadan otomatik durdurma kriteri geliştirme çalışmaları yapılacaktır. Buna

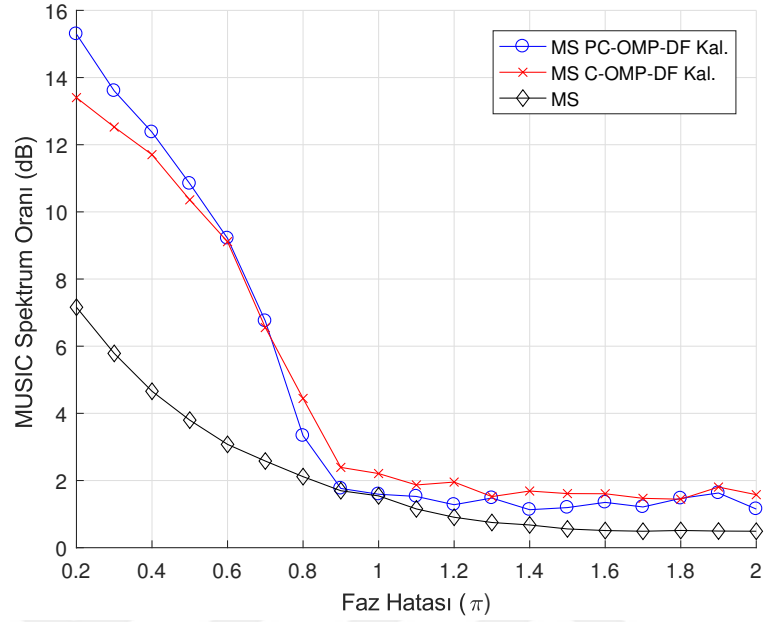


(a) Genlik Hata OKS

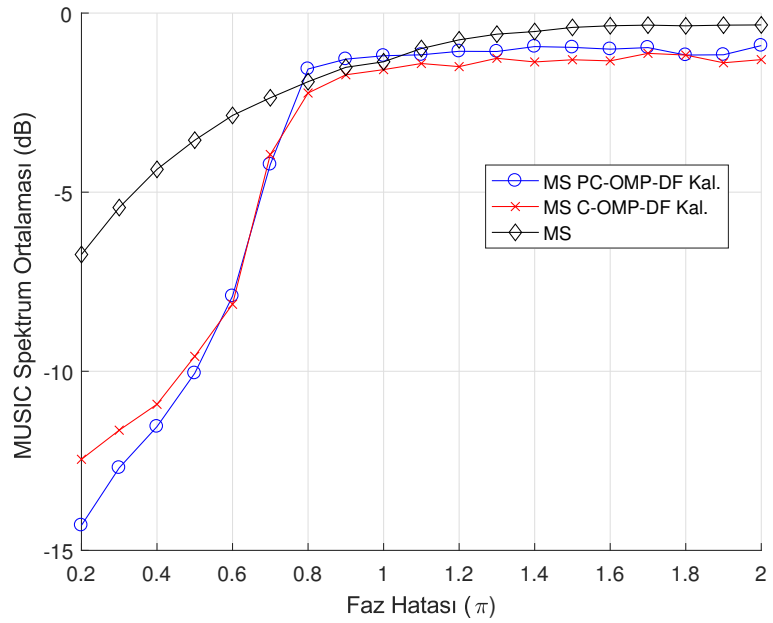


(b) Faz Hata OKS ( $Radyan^2$ )

Şekil 4.15: Faz hatası değerine göre Monte-Carlo sonuçları. (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.

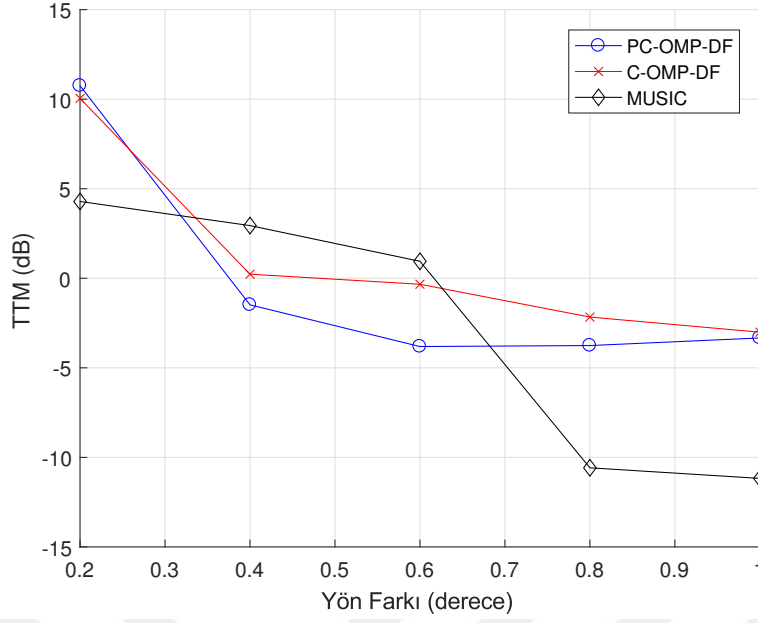


(a) MUSIC Spektrum Oranı



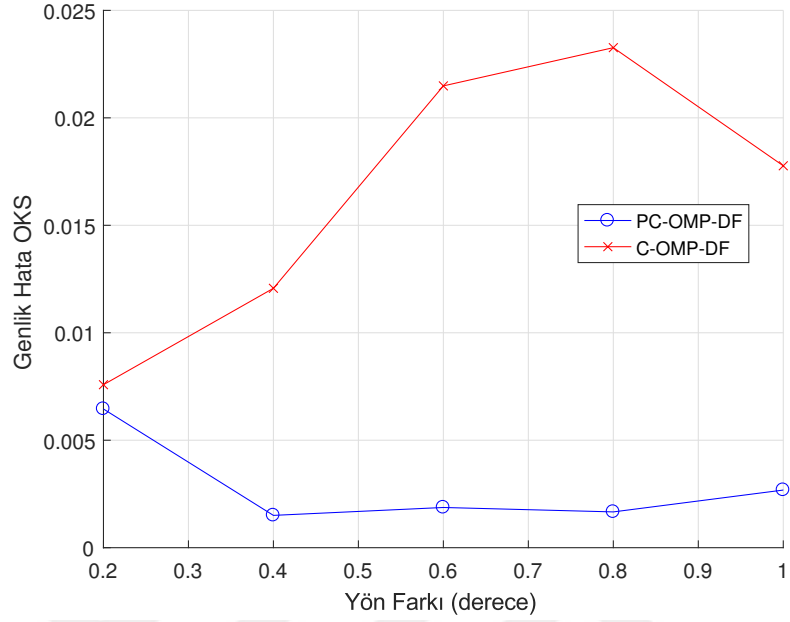
(b) MUSIC Spektrum Ort.

Şekil 4.16: Faz hatası değerine göre Monte-Carlo sonuçları. (a) MUSIC Spektrum Oranı, (b) MUSIC Spektrum Ortalaması.

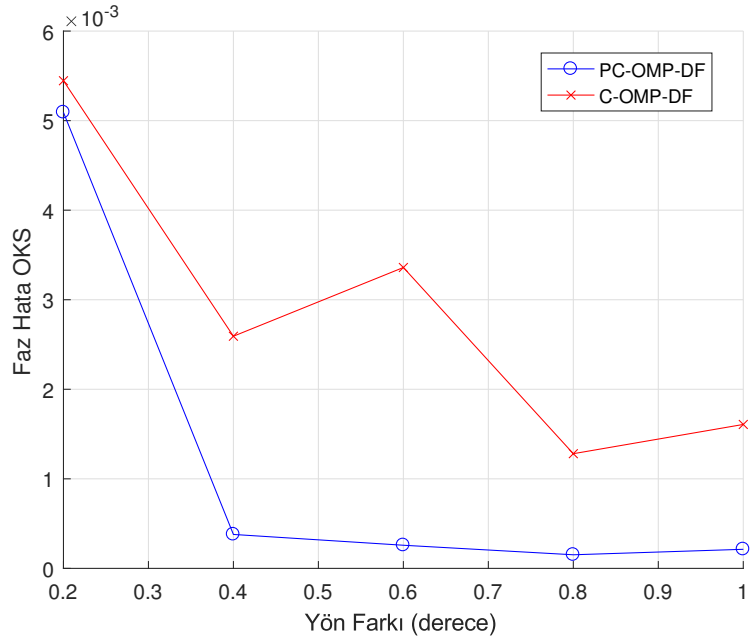


Şekil 4.17: 2 kaynak arasındaki açı farkına göre TTM Monte-Carlo sonuçları.

ek olarak kalibrasyon işlemi sırasında ortak etkileşime (mutual coupling) bir çözüm getirilmemiştir. Yine ilerleyen dönem çalışmaları kapsamında bu konunun da ele alınması değerlendirilmektedir.

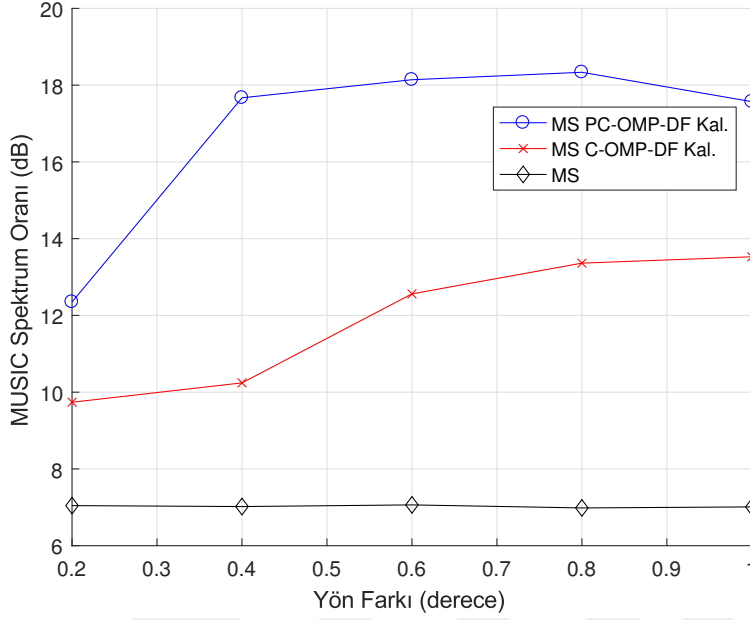


(a) Genlik Hata OKS

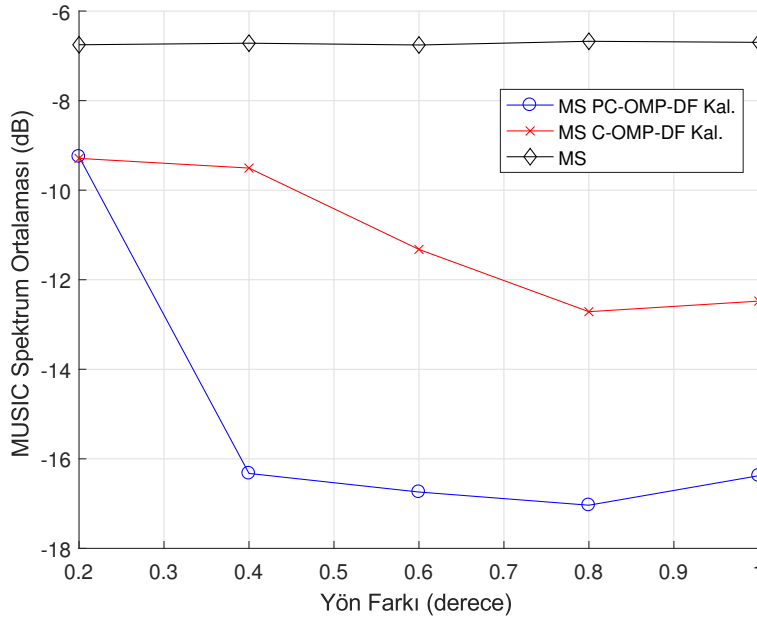


(b) Faz Hata OKS (*Radyan*<sup>2</sup>)

Şekil 4.18: 2 kaynak arasındaki açı farkına göre Monte-Carlo sonuçları. (a) Genlik Hata OKS, (b) Faz Hata OKS.



(a) MUSIC Spektrum Oranı



(b) MUSIC Spektrum Ort.

Şekil 4.19: 2 kaynak arasındaki açı farkına göre Monte-Carlo sonuçları. (a) MUSIC Spektrum Oranı, (b) MUSIC Spektrum Ortalaması.



## 5. SONUÇ VE YORUMLAR

Sıkıştırılmış Algılama (SA) son yıllarda önem kazanan, Nyquist oranının altında azaltılmış örnekleme ile sinyal geriçatımına olanak sağlayan bir alandır [1, 2]. Gerçek hayattaki birçok uygulamada sinyaller sıkıştırılabilir olduğundan SA'ya dayalı yöntemler önem kazanmıştır. Izgara dışılık gerçek hayatta kullanılan sistemlerin performansını kısıtlayan bir problemdir. Bu sistemler üzerinde, sinyaller belirli bir çözünürlükte ızgara üzerinde ifade edilmektedirler. Bu durum da ızgara dışılığa sebep olmakta ve sistemlerin performansını düşürmektedir. Izgara dışılığın üzerinden gelenebilmesi için bir yöntem daha yüksek çözünürlüklü ızgaralar kullanmaktadır. Kısıtlı kaynaklar söz konusu olduğunda bu çözümün kullanımı mümkün olmayabilir. Bu durum da ızgara dışılık probleminin çözülebilmesi için etkin çözümler geliştirilmesi gerekliliğini doğurur. Gerçek hayatta kullanılan sistemlerin bir diğer pratik gereği de kalibrasyon ihtiyacıdır. Kalibrasyon yapılmadığı durumda sistemlerin performansı belirgin şekilde düşmekte, sistemler görevlerini yerine getirememeye durumuna gelebilmektedirler. Kalibrasyon ihtiyacı sistemlerin karmaşıklığını ve maliyeti arttırmaktadır. Bu konulara yönelik, tez çalışmaları kapsamında farklı uygulamalar için ızgara dışılık problemine çözümler üreten ve aynı zamanda kör kalibrasyon yapabilen metotlar geliştirilmiştir.

Bölüm 2'de ilk olarak Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemlerin Nokta modda görüntüleme için platform hareketi kaynaklı faz hatalarını ve ızgara dışı hedef hatalarını çözebilen PA-SAR görüntüleme tekniği geliştirilmiştir. Bu yöntem ile hedef yansıcılıkları, platform hareketi kaynaklı faz hataları ve ızgara dışı hedef pertürbasyonları iteratif bir şekilde çözülmektedir. PA-SAR ızgara dışı hedef pertürbasyonlarını çözmek için gradyen düşümü tabanlı arama, parametre güncellemesi ve faz hatası düzeltilmesi yaparak odaklı görüntüler oluşturmaktadır. Teknik azaltılmış ölçüm sayıları ile çalışabilmekte ve seyrek SAR görüntüleri oluşturmaktadır. Sentetik ve gerçek SAR sistemi verileri ile alınan sonuçlar,

hesaplanan metrikler ile geliştirilen yöntemin daha iyi SAR görüntüsü oluşturduğunu göstermektedir. Yapılan benzetim çalışmaları ile geliştirilen tekniğin ızgara dışılık durumunda görüntü kalitesinde iyileştirme sağladığı ve dinamik alanı arttırdığı gösterilmiştir.

Literatürdeki seyrekliğe dayalı SAR görüntü oluşturma ve otomatik odaklama yöntemleri incelendiğinde, bu algoritmaların genellikle iteratif olduğu ve önceden tanımlanması gereken parametreye gereksinim duydukları görülmektedir. Bu yöntemlerin performansı ise bu parametrelerin doğru seçilmesine bağlıdır. Bölüm 2’de dışarıdan parametreye gereksinim duymayan bir nokta mod SAR görüntü oluşturma otomatik odaklama (AOMP) algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma azaltılmış ölçüm altında da görüntü oluşturabilmektedir. Algoritma veriyi iki segmente ayırarak çapraz doğrulama tabanlı otomatik durdurma kriteri kullanmaktadır. Otomatik durdurma kriteri kullanmasına rağmen, sentetik ve gerçek SAR verisi ile yapılan analizlerde AOMP algoritmasının, literatürdeki güncel seyrekliğe dayalı görüntüleme yöntemlerine kıyasla, en iyi ya da en iyiye çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bölüm 3’te ızgara dışı sinyaller için Kör Sensör Kalibrasyonu problemi çalışılmıştır. C-OMP (Calibration Orthogonal Matching Pursuit) ve PC-OMP (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit) olmak üzere Seyrekliğe Dayalı Kör Sensör Kalibrasyonu yöntemleri önerilmiştir. Önerilen yöntemler sinyal geriçatımı ve kalibrasyon işlemlerini iteratif bir şekilde yapmaktadırlar. Kör sensör kalibrasyonu için öncelikle çoklu ölçüm altında sinyal kestirimi yapılmaktadır. Daha sonra faz ve genlik hatası kestirimi ve ardından kalibrasyon yapılmaktadır. PC-OMP yöntemi ızgara dışılık durumunda çalışabilmektedir. Benzetimler incelendiğinde, PC-OMP’nin sonuçların tamamına yakınında en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Alınan sonuçlar incelendiğinde literatürde bulunan yöntemlere kıyasla önerilen yöntemler daha iyi sinyal kestirimi ve kalibrasyon yapmaktadırlar. Bunun yanında, PC-OMP özgün olarak ızgara dışılık durumunda çalışmakta ve kör sensör kalibrasyonu yapabilmektedir.

Bölüm 4’te Düzgün Doğrusal Dizi (Uniform Linear Array, ULA) kullanılarak ızgara dışı sinyaller için yön bulma ve kör sensör kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir.

Izgara Dışı K r Kalibrasyon ve Yön Bulma (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit Direction Finding, PC-OMP-DF) yönteminin ızgara dışı sinyaller için daha iyi sonuçlar verdiği benzetim sonuçları ile gösterilmiştir. PC-OMP-DF yöntemi ızgara dışı y n kestirimi yapılabilmekte aynı zamanda sensörler üzerindeki faz ve genlik hatası k r bir Şekilde düzeltilebilmektedir. Önerilen yöntem ile kalibrasyon yapıldığı durumda SGO artışı sağlandığı yapılan benzetim çalışmaları gösterilmiştir. Izgara  zeri y n kestirimi yapan yönteme kıyasla PC-OMP-DF kullanıldığında SGO artışı daha yüksek olmaktadır.

Bölüm 3 ve Bölüm Bölüm 4'te benzetim çalışmaları yapılırken seyreklik seviyesinin, diğer bir değişle sinyal sayısının bilindiği varsayılmıştır. İlerleyen dönem çalışmaları kapsamında bu yöntemler için seyreklik seviyesine bağlı kalınmadan otomatik durdurma kriteri geliştirme çalışmaları yapılacaktır. Buna ek olarak kalibrasyon işlemi sırasında ortak etkileşime (mutual coupling) bir  z m getirilmemiştir, gelecekte bu konunun da ele alınması değerlendirilmektedir.

İlerleyen dönem çalışmaları kapsamında geliştirilen yöntemlerin gerçek sistemlerden alınacak veriler ile test edilmesi ve bu sistemlerde gerçek zamanlı olarak çalıştırabilmesi üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri gerçekleştirilecektir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Donoho, D.** Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory* 52, 4 (2006), 1289–1306.
- [2] **Candes, E., Romberg, J., and Tao, T.** Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory* 52 (2006), 489–509.
- [3] **Baraniuk, R.** Compressive sensing. *IEEE Signal Processing Magazine* 24, 4 (July 2007), 118–121.
- [4] **Lustig, M., Donoho, D. L., and Pauly, J. M.** Compressed sensing mri. *IEEE Signal Processing Magazine* 25, 2 (March 2008), 72–82.
- [5] **Candes, E. J., and Wakin, M. B.** An introduction to compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine* 25, 2 (March 2008), 21–30.
- [6] **Qaisar, S., Bilal, R. M., Iqbal, W., Naureen, M., and Lee, S.** Compressive sensing: From theory to applications, a survey. *IEEE Journal of Communications and Networks* 15, 5 (October 2013), 443–456.
- [7] **Cetin, M., Stojanovic, I., Onhon, N., and Varshney, K.** Sparsity-driven synthetic aperture radar imaging: Reconstruction, autofocusing, moving targets, and compressed sensing. *IEEE Signal Processing Magazine* 31, 4 (July 2014), 27–40.
- [8] **Munson, D., O'Brien, J., and Jenkins, W.** A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar. *Proceedings of the IEEE* 71, 8 (Aug. 1983), 917–925.
- [9] **Carrara, W. G., Goodman, R., and Majewski, R.** *Spotlight Synthetic Aperture Radar, Signal Processing Algorithms*. Artech House Inc., 1995.
- [10] **Jakowatz, C. V., Wahl, D. E., Eichel, P. H., Ghiglia, D. C., and Thompson, P. A.** *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*. Springer US, 1996.
- [11] **Soumekh, M.** *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*. Wiley US, 1999.
- [12] **Ender, J.** A brief review of compressive sensing applied to radar. In *2013 14th International Radar Symposium* (2013), vol. 1, pp. 3–16.

- [13] **Baraniuk, R., Davenport, M., DeVore, R., and Wakin, M.** A simple proof of the restricted isometry property for random matrices. *Constructive Approximation* 28, 3 (2008), 253–263.
- [14] **Wahl, D., Eichel, P., Ghiglia, D., and Jakowatz, C.** Phase gradient autofocus - a robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 30, 3 (July 1994), 827–835.
- [15] **Onhon, O., and Cetin, M.** A sparsity-driven approach for joint sar imaging and phase error correction. *IEEE Transactions On Image Processing* 21 (April 2012), 2075–2088.
- [16] **Kelly, S., Yaghoobi, M., and Davies, M.** Sparsity-based autofocus for undersampled synthetic aperture radar. *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems* 50 (April 2014), 972–986.
- [17] **Ugur, S., Arikan, O., and Gurbuz, A.** Sar image reconstruction by expectation maximization based matching pursuit. *Digital Signal Processing* 37 (February 2015), 75–84.
- [18] **Samadi, S., Cetin, M., and Masnadi-Shirazi, M.** Sparse representation based synthetic aperture radar imaging. *IET Radar, Sonar and Navigation* 5, 2 (Feb. 2011), 182–193.
- [19] **Ugur, S., and Arikan, O.** Sar image reconstruction and autofocus by compressed sensing. *Digital Signal Processing* 22, 6 (Dec. 2012), 923–932.
- [20] **Jihua, T., Jinping, S., Xiao, H., and Bingchen, Z.** Motion compensation for compressive sensing sar imaging with autofocus. In *2011 6th IEEE ICIEA* (2011), pp. 1564–1567.
- [21] **Gungor, A., Cetin, M., and Guven, E.** An augmented lagrangian method for autofocused compressed sar imaging. In *2015 3rd IEEE CoSeRa* (2015), pp. 1–5.
- [22] **Balzano, L., and Nowak, R.** Blind calibration of sensor networks. In *6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks* (April 2007).
- [23] **Ng, B. C., and See, C. M. S.** Sensor-array calibration using a maximum likelihood approach. *IEEE Transactions on Antennas Propagation* 44 (June 1996), 827–835.
- [24] **Mignot, R., Daudet, L., and Ollivier, F.** Room reverberation reconstruction: Interpolation of the early part using compressed sensing. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 21, 11 (Nov 2013), 2301–2312.
- [25] **Bilen, C., Puy, G., Gribonval, R., and Daudet, L.** Convex optimization approaches for blind sensor calibration using sparsity. *IEEE Transactions on Signal Processing* 62 (September 2014), 4847–4856.

- [26] **Kamilov, U., Bourquard, A., Bostan, E., and Unser, M.** Autocalibrated signal reconstruction from linear measurements using adaptive gamp. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (October 2013).
- [27] **Shen, H., Kleinstuber, M., Bilen, C., and Gribonval, R.** A conjugate gradient algorithm for blind sensor calibration in sparse recovery. In *IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing* (September 2013).
- [28] **Lipor, J., and Balzano, L.** Robust blind calibration via total least squares. In *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (2014).
- [29] **Wijholds, S., and Chiarucci, S.** Blind calibration of phased arrays using sparsity constraints on the signal model. In *European Signal Processing Conference (EUSIPCO)* (2016).
- [30] **Yao, K., Hudson, R. E., Reed, C. W., Chen, D., and Lorenzelli, F.** Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 16, 8 (Oct. 1998), 1555–1567.
- [31] **Khallaayoun, A., Weber, R. J., and Huang, Y.** A blind iterative calibration method for high resolution doa estimation. In *IEEE Military Communications Conference, MD, USA* (January 2011).
- [32] **Demissie, B.** Algebraic method for deterministic blind beamforming with unknown receiver gain and phases. In *IEEE International Conference on Signal Processing and Communications (ICSPC 2007), Dubai* (November 2007).
- [33] **Liu, J., Wu, X., Emery, W. J., Zhang, L., Li, C., and Ma, K.** Direction-of-arrival estimation and sensor array error calibration based on blind signal separation. *IEEE Signal Processing Letters* 24, 1 (January 2017), 7–11.
- [34] **Pierre, J., and Kaveh, M.** Experimental performance of calibration and direction-finding algorithms. In *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP, Toronto, Canada* (April 1991).
- [35] **Friedlander, B.** Multi-frequency self-calibration of antenna arrays. In *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, CA, USA* (Nov 2015).
- [36] **Candes, E., and Tao, T.** Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies. *IEEE Transactions on Information Theory* 52 (2006), 5406–5425.
- [37] **Chen, S. S., Donoho, D. L., and Saunders, M. A.** Atomic decomposition by basis pursuit. *SIAM Journal on Scientific Computing* 20, 1 (1998), 33–61.

- [38] **Tropp, J.** Greed is good: Algorithmic results for sparse approximation. *IEEE Transactions on Information Theory* 50 (2004), 2231–2242.
- [39] **Tropp, J.** Just relax: Convex programming methods for identifying sparse signals in noise. *IEEE Transactions on Information Theory* 52 (2006), 1030–1051.
- [40] **Baraniuk, R., Cehver, V., Duarte, M., and Hedge, C.** Model-based compressive sensing. *IEEE Transactions on Information Theory* 56 (2010), 1982–2001.
- [41] **Gorodnitsky, I. F., and Rao, B. D.** Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: A re-weighted minimum norm algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing* 45 (1997), 600–626.
- [42] **Donoho, D., and Elad, M.** Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via  $\ell_1$  minimizations. *The Proc. Nat. Aca. Sci.* 100 (2003), 2197–2202.
- [43] **Tropp, J., and Gilbert, A.** Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Information Theory* 53, 12 (Dec. 2007), 4655–4666.
- [44] **Candes, E., Romberg, J., and Tao, T.** Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements. *Communications on Pure and Applied Mathematics* 59, 8 (2006), 1207–1223.
- [45] **Chi, Y., Scharf, L., Pezeshki, A., and Calderbank, R.** The sensitivity to basis mismatch of compressed sensing in spectrum analysis and beamforming. In *Sixth Workshop on Defense Applications of Signal Processing (DASP)* (Lihue, HI, Oct. 2009).
- [46] **Teke, O., Gurbuz, A., and Arikan, O.** A robust compressive sensing based technique for reconstruction of sparse radar scenes. *Digital Signal Processing* 27 (2013), 23–32.
- [47] **Zhu, H., Leus, G., and Giannakis, G.** Sparsity-cognizant total least-squares for perturbed compressive sampling. *IEEE Transactions on Signal Processing* 59, 5 (2011), 2002 – 2016.
- [48] **Tang, G., Bhaskar, B., Shah, P., and Recht, B.** Compressed sensing off the grid. *IEEE Transactions on Information Theory* 59, 11 (Nov 2013), 7465–7490.
- [49] **Teke, O., Gurbuz, A., and Arikan, O.** Perturbed orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Signal Processing* 61, 24 (2013), 6220–6231.
- [50] **Ekanadham, C., Tranchina, D., and Simoncelli, E. P.** Recovery of sparse translation-invariant signals with continuous basis pursuit. *IEEE Transactions on Signal Processing* 59, 10 (2011), 4735 – 4744.



- [51] **Camlica, S., Gurbuz, A. C., and Arikan, O.** Autofocused spotlight sar image reconstruction of off-grid sparse scenes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 53 (August 2017), 1880–1892.
- [52] **Camlica, S., Gurbuz, A., and Arikan, O.** Sar image reconstruction with joint off-grid target and phase error corrections. In *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (2015), pp. 4502 – 4505.
- [53] **Camlica, S., Guven, H. E., Gurbuz, A. C., and Arikan, O.** Analysis of sparsity based joint sar image reconstruction and autofocus techniques. In *Compressed Sensing Theory and its Applications to Radar, Sonar and Remote Sensing (CoSeRa), 2015 3rd International Workshop on* (17-19 June 2015).
- [54] **Eldar, Y., Kuppinger, P., and Bolcskei, H.** Block-sparse signals uncertainty relations and efficient recovery. *IEEE Transactions on Signal Processing* 58, 6 (June 2010), 3042–3054.
- [55] **Majumdar, A., and Ward, R.** Fast group sparse classification. In *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing* (August 2009), vol. 34, pp. 11–16.
- [56] **Morrison, R., Do, M., and Munson, D.C., J.** Mca: A multichannel approach to sar autofocus. *IEEE Transactions on Image Processing* 18, 4 (April 2009), 840–853.
- [57] **Ugur, S.** *Novel Methods For SAR Imaging Problems*. Bilkent Uni., Ph.D. Thesis, 2013.
- [58] **Mishali, M., Eldar, Y., and Elron, A.** Xampling: Signal acquisition and processing in union of subspaces. *IEEE Transactions on Signal Processing* 59, 10 (Oct 2011), 4719–4734.
- [59] **Boyd, S., and Vandenberghe, L.** *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [60] **Schmidt, L., Hegde, C., and Indyk, P.** The constrained earth mover distance model, with applications to compressive sensing. In *10th Intl. Conf. on Sampling Theory and Appl.(SAMPTA)* (2013).
- [61] **Ling, H., and Okada, K.** An efficient earth mover’s distance algorithm for robust histogram comparison. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Int.* 29, 5 (May 2007), 840–853.
- [62] **Rubner, Y., and ans L. J. Guibas, C. T.** The earth mover’s distance as a metric for image retrieval. *International Journal of Computer Vision* 40, 2 (2000), 99–121.
- [63] **SARPER.** Aselsan SAR Airborne System. <http://www.aselsan.com.tr>.

- [64] **Wu, H. T., Yang, J. F., and Chen, F. K.** Source number estimators using transformed gerschgorin radii. *IEEE Transactions on Signal Processing* 43, 6 (June 1995), 1325–1333.
- [65] **Huang, L., Long, T., Mao, E., and So, H. C.** Mmse based mdl method for accurate source number estimation. *IEEE Signal Processing Letters* 16, 9 (September 2009), 798–801.
- [66] **Radich, B. M., and Buckley, K. M.** Single snapshot doa estimation and source number detection. *IEEE Signal Processing Letters* 4, 4 (April 1997), 109–111.
- [67] **Boyd, S., Parikh, N., Chu, E., Peleato, B., and Eckstein, J.** Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends in Machine Learning* 3 (2011), 1–122.
- [68] **Trees, H. V.** *Optimum Array Processing*. John Wiley and Sons, NY, USA, 2002.
- [69] **Bar-Shalom, Y., Li, X. R., and Kirubarajan, T.** *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. Wiley-Interscience, 2001.
- [70] **Schmidt, R.** Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 34, 3 (March 1986), 276–280.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Sedat ÇAMLICA  
**Uyruğu** : TÜRKİYE CUMHURİYETİ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 23.11.1982, İzmir

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elk. ve Elektronik Fakültesi, Telekomünikasyon Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2009, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, EEM
- **Doktora** : 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, EEM

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER::

Yıl	Yer	Görev
2006 -	Aselsan A.Ş., REHİS	Sistem Mühendisi
2013 - 2017	TOBB ETÜ	Araştırma burslu doktora öğrencisi

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- Sedat Çamlıca, Ali Cafer Gürbüz, Orhan Arıkan, July 2017. Autofocused Spotlight SAR Image Reconstruction of Off-Grid Sparse Scenes. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 53(4), 1880-1892.
- Sedat Çamlıca, H. Emre Güven, Ali Cafer Gürbüz, Orhan Arıkan, 17-19 June 2015. Analysis of sparsity based joint SAR image reconstruction and autofocus techniques. CoSeRa, 99-103, Pisa, Italy.
- Sedat Çamlıca, Ali Cafer Gürbüz, Orhan Arıkan, 26-31 July 2015. SAR image reconstruction with joint off-grid target and phase error corrections. IGARSS, 4502-4505, Milan, Italy.