
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DÜZLEMSEL ANTEN DİZİLERİ İÇİN İŞARET GELİŞ AÇISI KESTİRİM YÖNTEMLERİ

Meryem IŞIKSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Meryem IŞIKSOY

25/12/2023

DÜZLEMSEL ANTEN DİZİLERİ İÇİN İŞARET GELİŞ AÇISI KESTİRİM YÖNTEMLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Meryem IŞIKSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Sinyal geliş açısı kestirimi Elektrik, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinin çeşitli alt alanlarında büyük önem taşıyan bir konudur. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanı altuzay tabanlı yöntemlerdir. Altuzay tabanlı yöntemlerin gelişmesi ile birlikte başta tek bir sinyal kaynağının tespiti sağlanırken artık günümüzde birden çok sinyal kaynağının tespiti aynı zaman çerçevesi içerisinde yapılabilmektedir. Bu çalışmada; altuzay tabanlı sinyal geliş açısı kestirim yöntemlerinden MUSIC algoritması düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizileri için hem tek boyutlu hem de iki boyutlu sistemlerde MATLAB ortamında incelenmiştir. Anten dizisi eleman sayısı, alınan anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı değiştirilmiş ve bu parametrelerin sinyal geliş açısı kestirim performansına etkisi her üç dizi çeşidi için ayrı ayrı ele alınmıştır. Ek olarak, anten dizisi eleman sayısı, alınan anlık veri sayısı ve sinyal gürültü oranı parametrelerinin değişimi kapsamında üç dizi konfigürasyonu kendi arasında karşılaştırılmıştır. Üç dizi konfigürasyonu birbiri ile karşılaştırıldığında ise sinyal geliş açısı kestirim performansında en iyi sonuçları düzgün düzlemsel anten dizilerinin sergilediği görülmüştür.

Bilim Kodu	:	90516
Anahtar Kelimeler	:	Düzgün düzlemsel anten dizileri, düzgün dairesel anten dizileri, sinyal geliş açısı kestirimi, MUSIC algoritması
Sayfa Adedi	:	87
Danışman	:	Prof. Dr. Erkan AFACAN

DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION METHODS FOR PLANAR ANTENNA ARRAYS

(M. Sc. Thesis)

Meryem IŞIKSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

Direction of arrival estimation is a topic of great importance in various subfields of Electrical, Electronics and Communications Engineering. Among these methods, subspace-based methods are the most widely used. With the development of subspace-based methods, it is now possible to detect multiple signal sources in the same time frame, whereas it was initially possible to detect a single signal source. In this study, the MUSIC algorithm, one of the subspace-based direction of arrival estimation methods, is investigated using MATLAB for uniform linear, uniform planar and uniform circular antenna arrays in both one-dimensional and two-dimensional systems. The number of antenna array elements, the number of snapshots received, the signal to noise ratio, the angle of incoming signals and the number of incoming signals have been changed, and the effect of these parameters on the direction of arrival estimation performance has been analyzed separately for each of the three array configurations. In addition, the three array configurations have been compared among themselves within the scope of the variation in terms of the number of antenna array elements, the number of snapshots received and the signal to noise ratio parameters. When the three array configurations have been compared with each other, it has been observed that the best results have been obtained for the uniform planar antenna arrays regarding direction of arrival estimation performance with the MUSIC algorithm.

Science Code	:	90516
Key Words	:	Uniform planar antenna arrays, uniform circular antenna arrays, direction of arrival estimation, MUSIC algorithm
Page Number	:	87
Supervisor	:	Prof. Dr. Erkan AFACAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca destek ve katkıları ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Erkan AFACAN'a ve değerli tecrübelerini esirgemeyen hocam Sayın Dr. Öğrt. Üyesi Nilay AYTAŞ KORKMAZ'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile yanımda olup beni her zaman motive eden Babam Osman IŞIKSOY'a, Annem Sevda IŞIKSOY'a ve kardeşim Semih IŞIKSOY'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

1.1. Literatür Özetleri 3

2. ANTEN PARAMETRELERİ 9

2.1. Işıma Örüntüsü 9

2.1.1. Işıma örüntüsü kulakları 10

2.1.2. Anten alan bölgeleri 11

2.2. Işıma Şiddeti 12

2.3. Işıma Güç Yoğunluğu 13

2.4. Yönelticilik 14

2.5. Kazanç 15

2.6. Anten Verimi 15

2.7. Etkin Açıklık 16

3. ANTEN DİZİLERİ 19

3.1. Doğrusal Anten Dizileri 20

3.1.1. İki elemanlı doğrusal anten dizisi 20

3.1.2. *N* elemanlı doğrusal anten dizisi 23

3.2. Düzlemsel Anten Dizileri 24

Sayfa

3.3. Dairesel Anten Dizileri 26

4. SİNYAL GELİŞ AÇISI KESTİRİM YÖNTEMLERİ 29

4.1. Geleneksel Yöntemler 30

4.1.1. Geciktir-ve-Topla yöntemi 31

4.1.2. Capon'un minimum varyans yöntemi 31

4.2. Altuzay Tabanlı Yöntemler 31

4.2.1. MUSIC (Multiple Signal Classification) algoritması 31

4.2.2. ESPRIT algoritması 32

4.3. Maksimum Olasılık Yöntemleri 32

5. MUSIC ALGORİTMASI 33

6. SİMÜLASYON SONUÇLARI 41

6.1. Düzgün Doğrusal Anten Dizileri 41

6.1.1. Düzgün doğrusal anten dizilerinde MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirimi 41

6.1.2. Düzgün doğrusal anten dizilerinde anten elemanı sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 42

6.1.3. Düzgün doğrusal anten dizilerinde anlık veri sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 43

6.1.4. Düzgün doğrusal anten dizilerinde sinyal gürültü oranı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 44

6.1.5. Düzgün doğrusal anten dizilerinde gelen sinyaller arasındaki açı farkının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 45

6.1.6. Düzgün doğrusal anten dizilerinde gelen sinyal sayısının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 48

6.2. Düzgün Düzlemsel Anten Dizileri 51

6.2.1. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirimi 51

Sayfa

6.2.2. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde anten elemanı sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 52

6.2.3. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde anlık veri sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 53

6.2.4. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde sinyal gürültü oranı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 54

6.2.5. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde gelen sinyaller arasındaki açı farkının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 55

6.2.6. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde gelen sinyal sayısının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 58

6.3. Düzgün Dairesel Anten Dizileri 61

6.3.1. Düzgün dairesel anten dizilerinde MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısının kestirimi 61

6.3.2. Düzgün dairesel anten dizilerinde anten elemanı sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 62

6.3.3. Düzgün dairesel anten dizilerinde anlık veri sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 63

6.3.4. Düzgün dairesel anten dizilerinde sinyal gürültü oranı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 64

6.3.5. Düzgün dairesel anten dizilerinde gelen sinyaller arasındaki açı farkının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 65

6.3.6. Düzgün dairesel anten dizilerinde gelen sinyal sayısının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi 68

6.4. Düzgün Doğrusal, Düzgün Düzlemsel ve Düzgün Dairesel Anten Dizileri 71

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 79

KAYNAKLAR 81

ÖZGEÇMİŞ 87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Anten analizi için koordinat sistemi [5] 9

Şekil 2.2. Bir antenin ışıma örüntüsündeki kulaklar ve demet genişlikleri [5] 10

Şekil 2.3. Güç modelinin doğrusal grafiği ve bununla ilişkili kulaklar ve hüzme genişlikleri [5] 11

Şekil 2.4. Bir steradyanın tanımı [5] 12

Şekil 2.5. Anten referans terminalleri [5] 16

Şekil 3.1. *z* ekseninde konumlandırılmış iki elemanlı doğrusal anten dizisi [5] 21

Şekil 3.2. *z* ekseninde konumlandırılmış iki elemanlı doğrusal anten dizisinin uzak alan bölgesi [5] 21

Şekil 3.3. *y-z* düzleminde yerleştirilmiş N elemanlı anten dizisinin sistem geometrisi [5] 23

Şekil 3.4. Düzlemsel anten dizisi geometrisi [5] 25

Şekil 3.5. *N* elemanlı dairesel dizi geometrisi [5] 27

Şekil 6.1. Düzgün doğrusal anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 42

Şekil 6.2. Anten sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 43

Şekil 6.3. Anlık veri sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 44

Şekil 6.4. Sinyal gürültü oranına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 45

Şekil 6.5. 10°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 50°, 60°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 46

Şekil 6.6. 5°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 45°, 50°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 46

Şekil 6.7. 3°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 43°, 46°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.8. 2°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 42°, 44°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 47

Şekil 6.9. 1°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 41°, 42°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 48

Şekil 6.10. Bir adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi..... 49

Şekil 6.11. Beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi..... 49

Şekil 6.12. On adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi..... 50

Şekil 6.13. On iki adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi..... 50

Şekil 6.14. On beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi..... 51

Şekil 6.15. Düzgün düzlemsel anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi..... 52

Şekil 6.16. Anten sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 53

Şekil 6.17. Anlık veri sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 54

Şekil 6.18. Sinyal gürültü oranı değişimine bağlı anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 55

Şekil 6.19. 10°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 50°, 60°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 56

Şekil 6.20. 5°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 45°, 50°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 56

Şekil 6.21. 3°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 43°, 46°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 57

Şekil 6.22. 2°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 42°, 44°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 57

Şekil 6.23. 1°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 41°, 42°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.24. Bir adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 59

Şekil 6.25. Beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 59

Şekil 6.26. On adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 60

Şekil 6.27. On iki adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 60

Şekil 6.28. On beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 61

Şekil 6.29. Düzgün dairesel anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 62

Şekil 6.30. Anten sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 63

Şekil 6.31. Anlık veri sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 64

Şekil 6.32. Sinyal gürültü oranı değişimine bağlı anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi 65

Şekil 6.33. 10°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 50°, 60°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 66

Şekil 6.34. 5°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 45°, 50°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 66

Şekil 6.35. 3°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 43°, 46°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 67

Şekil 6.36. 2°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 42°, 44°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 67

Şekil 6.37. 1°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 41°, 42°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi 68

Şekil 6.38. Bir adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 69

Şekil 6.39. Beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 69

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.40. On adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 70

Şekil 6.41. On iki adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 70

Şekil 6.42. On beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi 71

Şekil 6.43. Anten sayısı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (toplam 40 adet anten) 72

Şekil 6.44. Anten sayısı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (toplam 60 adet anten) 72

Şekil 6.45. Sinyal gürültü oranı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (SNR= -20 dB) 73

Şekil 6.46. Sinyal gürültü oranı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (SNR= 0 dB) 74

Şekil 6.47. Sinyal gürültü oranı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (SNR= 20 dB) 74

Şekil 6.48. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=200) 75

Şekil 6.49. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=100) 76

Şekil 6.50. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=50) 76

Şekil 6.51. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=1) 77

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
AF	Dizi faktörü
$\boldsymbol{A_e}$	Etkin açıklık
$\boldsymbol{a}(\phi_j)$	Varış yönüne karşılık gelen dizi yönlendirme vektörü
$\boldsymbol{\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z}$	*x*, *y* ve *z* ekseni birim vektörü
$\boldsymbol{\hat{a}_\theta, \hat{a}_r, \hat{a}_\rho}$	Birim vektörler
D	Antenin maksimum boyutu
$\boldsymbol{D}$	Antenin yönelticiliği
d	Elemanlar arası mesafe
$\boldsymbol{D_0}$	İzotropik bir antenin yönelticiliği
da	Kapalı yüzeyin diferansiyel alanı
dB	Desibel
$\boldsymbol{D_{max}}$	Antenin maksimum yönelticiliği
E	Elektrik alan
$\boldsymbol{\vec{E}}$	Anlık elektrik alan şiddeti
$\boldsymbol{e_0}$	Boyutsuz toplam verimlilik
$\boldsymbol{e_c}$	Boyutsuz iletim verimliliği
$\boldsymbol{e_{cd}}$	Anten verimi
$\boldsymbol{e_d}$	Boyutsuz dielektrik verimliliği
$\boldsymbol{e_r}$	Boyutsuz yansıma verimliliği
$\boldsymbol{G(\theta, \emptyset)}$	Anten kazancı
$\boldsymbol{\vec{H}}$	Anlık manyetik alan şiddeti
H	Manyetik alan
hz	Hertz
$\boldsymbol{I_{m1}, I_{n1}}$	Genlik uyarım kat sayısı
K	En küçük özdeğerin katlılığı
L	Anlık veri sayısı

Simgeler	Açıklamalar
N,M	Anten dizisi eleman sayısı
$n(t)$	Anten dizisine ulaşan gürültü sinyali
n	Yüzeye dik birim vektör
P	Anlık toplam güç
P_{in}	Toplam giriş gücü
P_{MUSIC}	MUSIC uzaysal spektrumu
P_{rad}	Işınan toplam güç
P_T	İletilen güç
q_i	Özvektörler
R_{ss}	Korelasyon matrisi
R_{uu}	Giriş kovaryans matrisi
R,r	Kürenin yarıçapı
$\mathbf{s}(t)$	Gelen sinyalleri içeren vektör
sr	Steradyan
$U, U(\theta, \emptyset)$	Işıma şiddeti
U_0	İzotropik bir kaynağın ışıma şiddeti
U_{max}	Maksimum ışıma şiddeti
$u(t)$	Giriş vektörü veri modeli
V_n	Gürültü özvektörlerini içeren matris
ν_0	Sinyalin serbest uzaydaki hızı
$\overrightarrow{W}$	Anlık Poynting vektörü
W_i	Gelen dalganın güç yoğunluğu
W_{rad}	Işıma yoğunluğu
α_n	*n*'inci elemanın dizi merkezine göre faz uyarımı
β	Elemanlar arası faz farkı
Δr	Sinyalin serbest uzaydaki diferansiyel mesafesi
ϕ_n	*n*'inci elemanın *x-y* düzlemindeki açısal konumu
λ	Antenin dalga boyu
$\lambda_{0,\ldots}, \lambda_{M-1}$	Özdeğerler
η	Ortamın karakteristik empedansı
θ	Faz değişimi

Simgeler	Açıklamalar
$\boldsymbol{\sigma^2}$	Gürültü varyansı
$\boldsymbol{\sigma_n^2}$	Özdeğerlerin gürültü varyansı
$\boldsymbol{\tau_{mn}}$	Oluşan zaman gecikmesi
$\boldsymbol{\Gamma}$	Gerilim yansıma katsayısı
$\boldsymbol{\psi}$	İki birim vektör arasındaki açı
$\boldsymbol{\Lambda}$	Özdeğerler
$\boldsymbol{V}$	Özvektörler

Kısaltmalar	Açıklamalar
DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü
DOA	Sinyal Geliş Açısı
DRC	Ayrıştırılmış Azaltılmış Karmaşıklık
ESPRIT	Rotasyonel İnvaryans Yöntemi ile Sinyal Parametrelerinin Kestirimi
FNBW	İlk Sıfır Hüzme Genişliği
FH	Frekans Atlamalı
HPBW	Yarı Güç Hüzme Genişliği
ILSP-	Yinelemeli En Küçük Kareler Projeksiyonu Tabanlı
IRD	İyileştirilmiş Azaltılmış Boyut
MF	Uyumlu Filtre
ML	Maksimum Olasılık Yöntemi
MUSIC	Çoklu Sinyal Sınıflandırma
MVDR	Minimum Varyans Bozulmasız Yanıt
PD	Kısmi Deşarj
RMS	Kare Ortalama Karekök
RMSE	Kare Ortalama Karekök Hatası
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
UCA	Düzgün Dairesel Dizi
ULA	Düzgün Doğrusal Dizi
UPA	Düzgün Düzlemsel Dizi

1. GİRİŞ

Belirli bir hedefin konumu belirlenirken, yayın yapan bir veya birden fazla sinyal için bir anten grubu yardımıyla sinyal geliş açısı kestirimin yapılması önemli bir sorun teşkil etmektedir [1]. Bu sorun, kablosuz haberleşme, uydu haberleşmesi, sonar ve radar sistemleri gibi çeşitli askeri uygulamaların yanı sıra maden rezervlerinin tespiti, kaçak radyo yayınlarının tespiti ve vahşi yaşam takipçiliği gibi sivil uygulamalarda da karşımıza çıkmaktadır. Özellikle askeri uygulamalar için bu problemin çözümü özel önem arz etmektedir. Tek bir anten kullanımı sınırlı çözünürlüğe sahip olduğundan [2], anten dizileri kullanılarak yüksek kazanç ve sinyal alımında daha iyi performans elde edilmektedir. Böylece istenilen doğrultuda gelen sinyaller maksimum kazançla alınırken istenmeyen yönden gelen sinyaller bastırılmaktadır [3]. Kısaca bir veya daha fazla hedefin algılanması, tanılanması, yerinin tespit edilmesi ve izlenmesi dizi antenlerinin temel kullanım alanı olarak ifade edilmektedir [4].

Sinyal geliş açısı kestirim uygulamalarında elde edilen performans, sistemde antenlerin hangi düzende konumlandırıldığına bağlı olarak değişmektedir. Bu anlamda doğrusal, düzlemsel ve dairesel anten dizileri olmak üzere temelde üç çeşit anten dizisi mevcuttur.

Doğrusal anten dizileri;

• Bir doğru boyunca belirli aralıklarla yerleştirilmiş N adet antenden oluşan anten dizileridir.
• Pratik ve basit hesaplamalar sunmaktadırlar.

Düzlemsel anten dizileri;

• Çok yönlüdürler ve yan kulaklarla daha simetrik örüntüler sağlayabilmektedirler.
• Antenin ana hüzmesini uzayda herhangi bir noktaya doğru yöneltmek için kullanılabilirler.

Dairesel anten dizileri;

• Dairesel bir halka boyunca belirli aralıklarla yerleştirilmiş N adet antenden oluşan anten dizileridir.

• Yön bulma, yer altı dalga yayılımı, radar, sonar gibi çeşitli sistemlere ek olarak yakın zamanlarda kablosuz iletişim ve özellikle akıllı antenler için tercih edilmektedirler [5].

Sinyal kaynağının yerini tespit etmek için öncelikle alınan sinyalin geliş yönü belirlenmektedir. Sinyallerin uzayda her yöne dağıldığı varsayımı yapılmaktadır. Dolayısıyla, sinyal kaynağının yerini tespit etmek için sinyalin uzamsal spektrumundan yararlanılmaktadır. Bu anlamda sinyal kaynaklarının tespiti temelde klasik yöntemler ve altuzay tabanlı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Altuzay tabanlı yöntemler içerisinde ise MUSIC (Multiple Signal Classification / Çoklu Sinyal Sınıflandırma) ve ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques / Rotasyonel İnvaryans Yöntemi ile Sinyal Parametrelerinin Kestirimi) algoritmaları en sık tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır [6].

Bu tez çalışmasında; altuzay tabanlı sinyal geliş açısı kestirim tekniklerinden biri olan MUSIC algoritması düzgün doğrusal (Uniform Linear Array / ULA)), düzgün düzlemsel (Uniform Planar Array / UPA) ve düzgün dairesel (Uniform Circular Array / UCA) anten dizileri için incelenmiştir. Anten elemanı sayısı, alınan anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio / SNR), gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı gibi sistemin çeşitli parametreleri değiştirilerek performans analizi yapılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, antenlerin temel çalışma ilkeleri ve temel anten parametreleri açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, anten dizilerinden bahsedilmiş ve bu çalışmada tercih edilen düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizilerine detaylı bir bakış sağlanmıştır.

Tezin dördüncü ve beşinci bölümlerinde, öncelikle sinyal geliş açısı kestirim yöntemlerinden hem klasik hem altuzay tabanlı yöntemler tanıtılmış ve sonrasında çalışmanın temelini oluşturan MUSIC algoritması ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, sistemdeki çeşitli parametreler değiştirilerek MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirimi yapılmış ve sonuçlar grafikler yardımıyla yorumlanmıştır.

Tezin yedinci yani son bölümünde, genel sonuçlara ve ileriye yönelik çalışmalara değinilmiştir.

1.1. Literatür Özetleri

Sinyalin geliş yönünden faydalanarak sinyal geliş açısı kestirimi yapılır. Anten ve anten dizleri; haberleşme [7], akıllı antenler, sismoloji, okyanus coğrafyası [8], akustik, gözetleme, işitme cihazları, telekonferans [9], sonar ve radarlar [10] gibi çeşitli alanlarda sinyal geliş açısının kestirimi için kullanılmaktadır. Sinyal geliş açısının kestirimi için birçok farklı yöntem mevcuttur. Yapılan literatür taramasında incelenen çalışmalardan bazılarına aşağıda yer verilmiştir.

Bu konuda yapılan ilk çalışmalarda sinyal geliş açısı kestirimi için bir anten dizisine çarpan kablosuz sinyaller kullanılmıştır. 1950 yılında Barlett, sürekli spektrumların istatistiksel analizi olarak ilk girişimlerini sunmuştur [11].

1969 yılında Capon, birden fazla değişken dalga sayısı kullanımına dayanan yüksek çözünürlüklü bir tahmin yöntemi olan Maksimum Olabilirlik (Maximum Likelihood Estimation / MLE) yöntemini tanıtmıştır. Bu çalışmada Capon, dalga sayısı çözünürlüğünün geleneksel yöntemden yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır [12].

1970 yılı ortalarından itibaren yön tahmini için altuzay kestirim yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak 1973 yılında Pisarenko, kovaryans matrisinin özdeğerlerini ve özvektörlerini kullanarak yön tahmininde bulunmuştur [13].

1979 yılında Reddi, aynı anda birden çok sinyal kaynağının doğrusal diziler ve sayısal sinyal işleme yoluyla belirlemeye yönelik algoritmalar sunmuştur [14].

1986 yılında Schmidt, özuzay yöntemini kullanarak sinyal geliş açısı kestirimi yapan MUSIC [1] algoritmasını önermiştir.

1989 yılında Roy ve Kailath, sinyal altuzayları arasındaki temel rotasyonel değişmezlikten yararlanarak hesaplama süresini ve depolama alanlarını azaltan yüksek çözünürlüklü ESPRIT algoritmasını önermiştir [15].

Üç farklı anten dizi geometrisi için literatür özetleri aşağıda sunulmuştur.

Doğrusal anten dizileri ile ilgili çalışmalar

1992'de yapılan bir çalışmada, hava durumu, çevre ve anten konumundaki değişiklikler nedeniyle oluşabilecek bağımsız rasgele bozulmalar için MUSIC ve kök-MUSIC algoritmalarının analizi sunulmuştur [16].

Sırasıyla 2011, 2014 ve 2020 yıllarında yapılan dört çalışmada, düzgün doğrusal anten dizileri için MUSIC algoritması incelenmiş ve anten sayısı, dizi elemanları arasında bulunan mesafe, sinyal gürültü oranı ve anlık veri sayısı gibi çeşitli parametre değişimlerinin algoritma performansına etkisi paylaşılmıştır [17-20].

2009, 2012, 2013, 2014 ve 2020 yıllarında yapılan birçok farklı çalışmada, MUSIC algoritması, Bartlett'in Hüzmeleme Metodu, MVDR (Minimum Variance Distortionless Response / Minimum Varyans Bozulmasız Yanıt), Doğrusal Öngörü Yöntemi (Linear Prediction Method), RMSE (Root Mean Square Error / Kök Ortalama Kare Hatası), Kök-MUSIC algoritması, ESPRIT algoritması ve Matris Kalem Yöntemi gibi çeşitli sinyal geliş açısı kestirim teknikleri incelenmiş ve bunların performans karşılaştırması yapılmıştır [21-27].

2021 yılında, Matris Kalem Yöntemi ve Tekil Değer Ayrıştırma yöntemlerinin kombinasyonu kullanılarak en az hata ile sinyal geliş açısı kestirimi yapılabileceği gösterilmiştir [28, 29].

2022 yılında yapılan bir çalışmada, zaman modülasyonu ve matris kalem yönteminin birleştirilmesi ile önerilen yeni bir yaklaşım ile dairesel anten dizileri için sinyal geliş açısı kestirimi yapılmıştır. Gürültü seviyesi, sinyal kaynağı sayısı, anten elemanı sayısı ve farklı geliş açıları için algoritma performansı incelenmiştir [30, 31].

2023 yılında yapılan bir çalışmada, doğrusal bir anten dizisinin hareketi incelenerek genelleştirilmiş bir sinyal geliş açısı kestirim yöntemi MUSIC algoritması ile sunulmuştur. Birleştirilmiş parametreler durumunu daha başarılı bir şekilde ele almak üzere azaltılmış karmaşıklıkta çoklu sinyal sınıflandırma (Decoupled Reduced- Complexity MUSIC / DRC

MUSIC) algoritması kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, doğrusal dizilerle iki boyutlu sinyal geliş açısı kestiriminin mümkün olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, bu çalışmada tasarlanan DRC MUSIC algoritmasının yüksek doğruluk ve düşük karmaşıklık gibi özelliklere sahip olduğu ileri sürülmüştür [32].

Düzlemsel anten dizileri ile ilgili çalışmalar

1998 yılında düzlemsel anten dizilerinde yön tahmini için ilk çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Çalışmada öncelikle, düzlemsel anten dizilerinde MUSIC algoritması kullanılarak yön tahmini ilkeleri açıklanmıştır [33]. Ardından, doğrusal anten dizisi için MUSIC algoritması, düzlemsel anten dizisi için MUSIC algoritması ve düzlemsel anten dizisi için 2D-DFT (iki boyutlu ayrık Fourier dönüşümü) algoritması simüle edilerek bu üç durum karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar, dizi eleman sayısı, düzeni ve elemanlar arasındaki mesafe değiştirilerek yapılmıştır [33].

2009 yılında, düzlemsel antenlerde örüntü sıfırlaması ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma ile birlikte, dizi elemanlarının yalnızca konumunu optimize ederek ve önceden tanımlanmış bir şekle sahip bir düzlemsel diziyi seyrelterek, önceden belirlenmiş örüntü sıfırlarına sahip düzlemsel dizilerin örüntü sentezi için diferansiyel evrim algoritmasına dayanan sayısal ve yinelemeli yaklaşımlar sunulmuştur [34].

2014 yılında zaman modülasyonlu düzlemsel anten dizilerinde ana hüzmenin maksimum düzeyine göre yan bant seviyesinin maksimum noktası incelenmiştir. Çalışmada maksimum bağıl yan bant seviyesinin belirlenmesi ve bastırılması için kullanılabilecek bir eşitsizlik türetilmiştir [35].

2015 yılında, düzlemsel anten dizisi için hem teori hem de simülasyon ortamında MUSIC algoritması geleneksel Bartlett hüzmeleme yöntemi ve Capon minimum varyans yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları MUSIC algoritmasının daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğunu göstermektedir [36].

2016 yılında yapılan bir çalışmada, ortak bağlaşımın (mutual coupling) varlığında düzgün düzlemsel diziler için sinyal geliş açısı kestirimi ele alınmıştır. Yönlendirme vektörü yeniden yapılandırılarak bilinmeyen ortak bağlaşımlı yeni bir sinyal geliş açısı kestirimi algoritması

önerilmiştir. Önerilen algoritma standart MUSIC algoritması ile karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir [37].

2017 yılında, doğrusal anten dizileri için tasarlanan geleneksel sinyal geliş açısı kestirimi algoritmalarının düzlemsel anten dizilerine kolayca uygulanabilmesi için basit bir vektörleştirme işlemi önerilmiştir. Uyumlu Filtre (Matched Filter/ MF), MVDR ve MUSIC algoritması için sonuçlar değerlendirilmiştir [38]. 2017 yılında yapılan başka bir çalışmada, açı tahmininde yüksek performans elde edilebilmesi ve daha fazla kaynağın ayırt edilebilmesi için düzlemsel anten dizilerinde yeni bir algoritma önerilmiştir [39].

2019 yılında düzgün düzlemsel anten dizilerinde anten elemanı sayısı, sinyal-gürültü oranı ve gelen sinyallerin örnek sayısı değiştirilerek MUSIC algoritmasının simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca dairesel anten dizileri için sinyal geliş açısı kestirim sonuçları da düzlemsel anten dizileri ile karşılaştırılmıştır [40].

2022 yılında Frekans atlamalı (Frequency Hopping / FH) sinyallerin iki boyutlu sinyal geliş açısı kestirimi için IRD MUSIC (Improved Reduced Dimension MUSIC / Geliştirilmiş Azaltılmış Boyutlu MUSIC) algoritmasına dayalı bir tahmin algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın tahmin performansının düşük sinyal gürültü oranında iki boyutlu MUSIC algoritmasından daha iyi olduğunu ve performansın yüksek sinyal gürültü oranında iki boyutlu MUSIC algoritmasına eşdeğer olduğunu göstermektedir [41].

2023 yılında, düzgün düzlemsel bir anten dizisinde açısal koordinatlar kullanılarak yön modelinin daha sonra oluşturulması için uzamsal yumuşatmanın etkisi ile iki boyutlu MUSIC algoritmasının performans analizi yapılmıştır. Uzamsal yumuşatma yönteminin temel mantığı düzlemsel anten dizisinin örtüşen alt dizilere bölünmesidir. Bu amaçla, alt dizideki ögelerin sayısı, alt dizinin şekli ve alt dizilerin kendi aralarında örtüşmesinin varlığı gibi farklı parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçta, düzgün düzlemsel anten dizisinde, dikey konumda bulunan anten elemanı sayısının oluşturulan alt-dizide dikey konumda bulunan anten elemanı sayısına eşit olduğu durumun en uygun çözüm olduğu değerlendirilmiştir [42].

Dairesel anten dizileri ile ilgili çalışmalar

1997 yılında yapılmış bir çalışmada, yönlü bir sondaj radarında kullanılan dairesel anten dizisi için iki boyutlu MUSIC algoritması önerilmiş ve verici konumunun başarıyla tahmin edilmesi deneysel sonuçlarla birlikte sunulmuştur [43].

2006 yılında düzgün dairesel anten dizileri için yapılmış olan [44] çalışması sonucunda, MUSIC algoritmasının yüksek çözünürlüklü tahmin algoritması olduğu ve klasik Bartlett sinyal geliş açısı kestirim algoritmasından üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

2015 yılında, düzgün olmayan dairesel anten dizisi için; farklı sinyal gürültü oranı, çok yollu veya ayna yansıması ve farklı sayıda anlık veri gibi çeşitli faktörlerin değişmesine bağlı olarak MUSIC algoritması ile incelenmiştir [45].

2016 yılında yapılan çalışmada, düzgün dairesel anten dizisinin geometrik konfigürasyonundan tam olarak yararlanan veri kovaryans matrisi ile yeniden yapılandırma yöntemi kullanılarak değiştirilmiş bir MUSIC algoritması önerilmiştir [46].

2018 yılında düzgün dairesel dizi antenlerdeki sinyal geliş açısı kestirim algoritmalarından geleneksel algoritmalar (Capon minimum varyans yöntemi ve Bartlett hüzmeleme yöntemi) MUSIC algoritması ile karşılaştırılmıştır. Bartlett hüzmeleme yönteminde birden çok sinyal kaynağı olduğunda tahmin performansında keskin bir düşüş olacağı gözlemlenmiştir. Capon minimum varyans yönteminde uzamsal spektrumun tepe noktası için tüm alanın taranması gerektiği ve aynı zamanda büyük miktarda hesaplama gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle MUSIC algoritmasının, sinyal geliş açısı kestirimi için geleneksel algoritmanın yerini alması önerilmiştir [47].

2022 yılında, dış yalıtım ekipmanının kısmi deşarj (Partial Discharge / PD) ile konumlandırılması için bir optimizasyon şeması geliştirilmiştir. Optimizasyon şeması, PD tarafından oluşturulan ultrasonik sinyali almak için sekiz ögeli bir dairesel anten dizisini temel almıştır ve sinyali bulmak için son derece hassas iki boyutlu MUSIC algoritması kullanılmıştır. Sonuçta, üç farklı konfigürasyondan en iyi konumlandırma etkisi iğne plakalı boşaltma modelinde gözlenmiştir [48].

2023 yılında yapılan bir çalışmada, emniyet valflerinin çoklu sızıntı kaynaklarının doğru bir şekilde konumlandırılması problemini çözmek amacıyla, düzgün dairesel dizili akustik emisyon tespitini ve geliştirilmiş MUSIC algoritmasını birleştiren bir lokalizasyon yöntemi önerilmiştir. Sonuçta, geliştirilmiş MUSIC algoritması ile emniyet valfinin birden fazla sızıntı kaynağını doğru bir şekilde tespit edebildiği görülmüştür. Emniyet valfinin çalışma basıncı artışına bağlı olarak geliştirilmiş olan MUSIC algoritmasının konumlandırma doğruluğunu arttırdığı görülmüştür [49].

2021 yılında, lokalizasyon performansını arttırmak için yakın alan dar bantlı optimal hüzme oluşturucuya üç boyutlu MUSIC kaynak lokalizasyon algoritması uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, MUSIC tabanlı optimal hüzme oluşturucunun, gürültülü ortamda, daha dar hüzmeyle, minimum sayıda anlık veri ve anten elemanı kullanarak birbirine yakın aralıklı birden fazla kaynağı kolayca algılayabildiğini göstermiştir [50].

MUSIC algoritmasını geliştirmek için [6, 51, 52] çalışmalarında çeşitli öneriler sunulmuştur.

MUSIC algoritmasında farklı konfigürasyonların birlikte ele alındığı birkaç çalışma bulunmaktadır. [53] çalışmasında, MUSIC algoritması, bilinmeyen anten elemanı bağlantısı ile düzgün doğrusal anten dizileri ve ortak bağlaşım özelliği bulunan düzgün düzlemsel anten dizileri için ele alınmıştır. [54] çalışmasında, MUSIC algoritması, dairesel, doğrusal ve doğrusal olmayan Y şekilli anten dizileri için incelenmiştir. Bu çalışmalar MUSIC algoritmasını farklı konfigürasyonlar altında inceleyerek bir karşılaştırma sunmuştur.

2023 yılında yapılan bir çalışmada, düzgün doğrusal ve düzgün dairesel anten dizileri için MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirimi yapılmıştır [55].

2. ANTEN PARAMETRELERİ

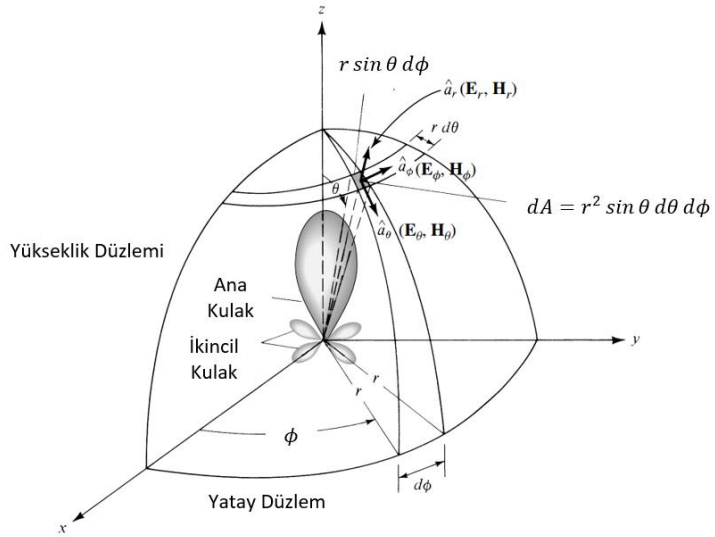
Bir antenin çalışma performansını önemli ölçüde etkileyen çeşitli parametreler bulunmaktadır. Temel anten parametreleri bu bölümde ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

2.1. Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü "Antenin yaymış olduğu gücün belirli alanlarda oluşturmuş olduğu, sabit bir uzaklıktaki açısal değişim özelliklerinin matematiksel bir işlevi veya grafiksel bir gösterimi" olarak tanımlanabilir [5].

Genelde θ ve ϕ açılarının bir fonksiyonu olarak temsil edilen ışıma örüntüsü, uzak alan bölgesinde belirlenir [5].

Uzak alan bölgesi, açısal alan dağılımının haberleşme sisteminde antene olan mesafeden bağımsız olduğu alan bölgesidir [5].



Şekil 2.1. Anten analizi için koordinat sistemi [5]

Şekil 2.1'de üç boyutlu verildiği gibi sabit yarıçaplı bir yüzey boyunca konumun bir fonksiyonu olarak yayılan enerjinin iki veya üç boyutlu uzaysal dağılımı, en çok ilgi duyulan ışıma özellikleri arasındadır. Işıma örüntüsü, güç örüntüsü ve alan örüntüsü olmak üzere ikiye ayrılır.

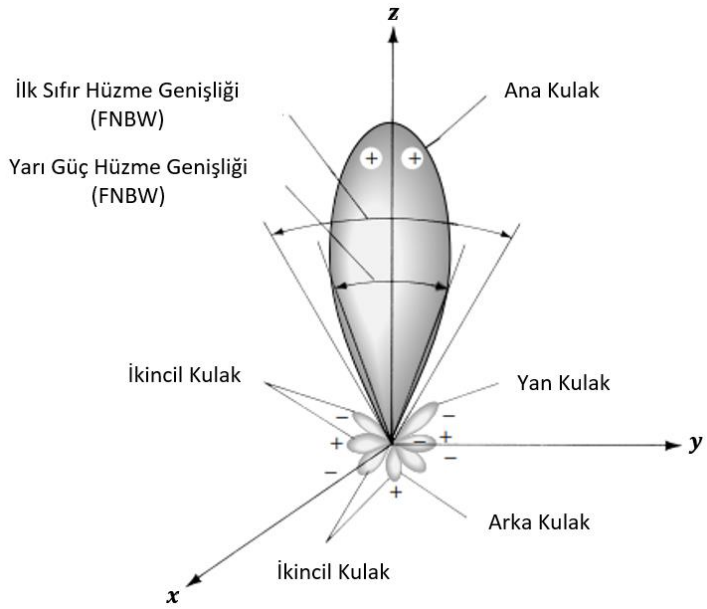
a. Alan örüntüsü, elektrik veya manyetik alan büyüklüğünün grafiğini, açısal uzayın bir fonksiyonu olarak temsil eder.
b. Güç örüntüsü, elektrik veya manyetik alan büyüklüğünün karesinin bir grafiğini, açısal uzayın bir fonksiyonu olarak temsil eder.
c. dB cinsinden güç örüntüsü, elektrik veya manyetik alanın desibel cinsinden büyüklüğünü açısal uzayın bir fonksiyonu olarak temsil eder [5].

$$E(\mathrm{dB}) = 20\log_{10}[|E|] \tag{2.1}$$

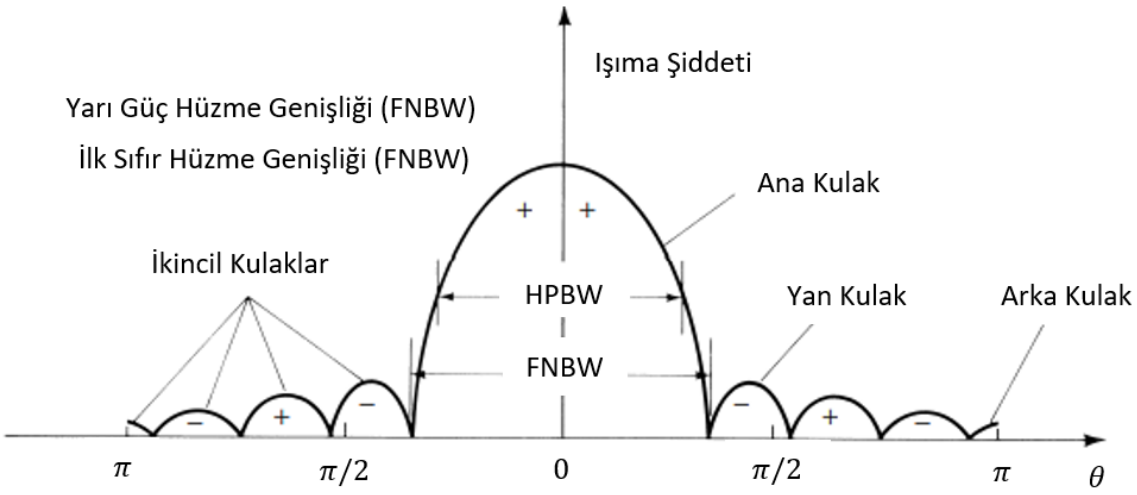
$$P(\mathrm{dB}) = 10\log_{10}[P] \tag{2.2}$$

2.1.1. Işıma örüntüsü kulakları

Bir ışıma örüntüsü ana kulak, ikincil kulak, yan kulak ve arka kulak olmak üzere çeşitli kısımlara ayrılmaktadır. Işıma örüntüsü kulağı "Daha zayıf ışıma yoğunluğuna sahip alanlarla sınırlanmış olan ışıma örüntüsünün bir kısmı" olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te bir anten örüntüsünün ışıma kulakları ve demet genişlikleri ile güç modelinin doğrusal grafiği sırasıyla aşağıda verilmiştir [5].



Şekil 2.2. Bir antenin ışıma örüntüsündeki kulaklar ve demet genişlikleri [5]



Şekil 2.3. Güç modelinin doğrusal grafiği ve bununla ilişkili kulaklar ve hüzme genişlikleri [5]

Ana Kulak; maksimum ışıma yönünü içeren ışıma örüntüsü kulağıdır.
İkincil Kulak; ana kulak dışındaki herhangi bir ışıma örüntüsü kulağıdır.
Yan Kulak; amaçlanan kulak dışında meydana gelen herhangi bir yöndeki ışıma örüntüsü kulağıdır.
Arka Kulak; antenin ana kulağı ile yaklaşık 180° açı yapan bir ışıma örüntüsü kulağıdır.
İkincil kulak genelde istenmeyen yönlerdeki ışımayı ifade etmektedir. Bu parametre, en aza düşürülmesi gereken bir parametredir. Yan kulak, ikincil kulağın en büyük olanıdır [5].

2.1.2. Anten alan bölgeleri

Bir anten çevresindeki serbest uzay genel olarak üç bölüme ayrılmaktadır.

Reaktif yakın alan bölgesi; anteni hemen çevreleyen, reaktif alanın baskın olduğu yakın alan bölgesidir. Antenlerin çoğu için bu bölgenin dış sınırı anten yüzeyinden $R<0.62\sqrt{D^3 / \lambda}$ kadar olmaktadır. Burada λ dalga boyunu ve D antenin maksimum boyutunu ifade etmektedir [5].

Fresnel bölgesi; bir antenin reaktif yakın alan bölgesi ile uzak alan bölgesi arasında kalan kısımdır. Bu bölgede ışıma alanları baskındır ve açısal alanda oluşmakta olan dağılım mesafeye bağlıdır. Bu alan, aşağıda belirtilen sınırlar içerisinde yer almaktadır;

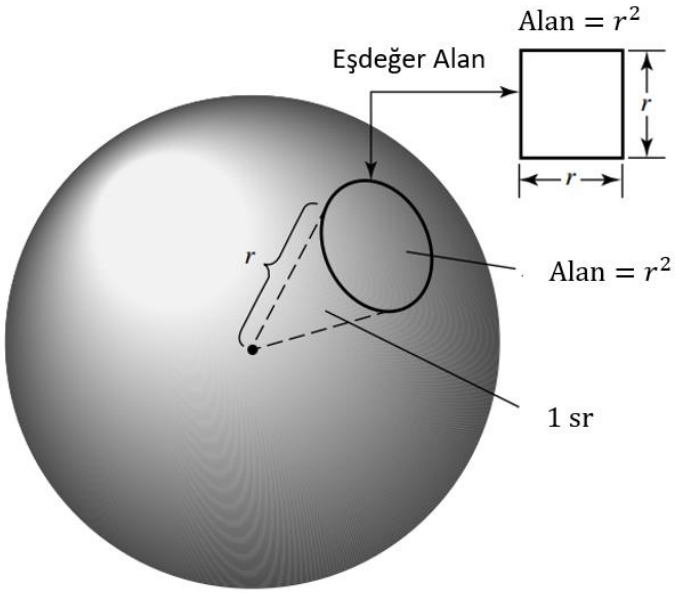
$$0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda \quad (2.3)$$

Uzak alan (Fraunhofer) bölgesi; bu bölgede açısal alan dağılımı antene olan mesafeden bağımsızdır. Uzak alan bölgesi $2D^2/\lambda < R$ sınırlarında tanımlanmaktadır [5].

2.2. Işıma Şiddeti

Antenin belirlenmiş bir yöndeki ışıma şiddeti "antenden birim katı açı başına yayılan güç" olarak tanımlanmaktadır. Katı açının birimi steradyandır [5].

Bir steradyan ise aşağıda Şekil 2.4'te gözüktüğü gibi, köşesi r yarıçaplı bir kürenin merkezinde olan ve kürenin yüzeyinde kenarları r uzunluğunda olan bir kare yüzey alanına karşılık gelen katı açı olarak tanımlanır [5].



Şekil 2.4. Bir steradyanın tanımı [5]

Işıma şiddeti, ışıma yoğunluğunun, mesafenin karesiyle çarpılması sonucunda elde edilebilen bir uzak alan parametresidir [5].

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.4)$$

Burada;
U: ışıma şiddeti (W/birim katı açı)
W_{rad}: ışıma yoğunluğu (W/m^2)
ile verilmektedir.

2.3. Işıma Güç Yoğunluğu

Bir sinyalin kablosuz bir haberleşme sisteminde iletimi elektromanyetik dalgalar ile sağlanır. Dolayısıyla oluşan güç ve enerjinin elektromanyetik alan ile bağlantılı olduğu bu sistemlerde ışıma güç yoğunluğu parametresi önemli konumdadır.

Bir elektromanyetik dalga ile bağlantılı olarak oluşan güç anlık Poynting vektörü olarak tanımlanmaktadır. Bir elektromanyetik dalganın güç yoğunluğu aşağıda verilen matematiksel formül ile hesaplanabilmektedir [5].

$$\overrightarrow{W} = \vec{E} \times \vec{H} \tag{2.5}$$

$\overrightarrow{W}$: anlık Poynting vektörü (W/m^2)
$\vec{E}$: anlık elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{H}$: anlık manyetik alan şiddeti (A/m)

Poynting vektörü bir güç yoğunluğu olduğundan kapalı yüzeyden geçen anlık toplam gücü hesaplamak için Poynting vektörünün normal bileşeninin tüm yüzey üzerinde integrali alınır [5].

$$P = \oiint_S \overrightarrow{\boldsymbol{W}} \cdot d\vec{\boldsymbol{s}} = \oiint_S \overrightarrow{\boldsymbol{W}} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, da \tag{2.6}$$

P: anlık toplam güç (W)
da: kapalı yüzeyin diferansiyel alanı (m^2)
$\hat{\mathbf{n}}$: yüzeye dik birim vektör

Zamanla değişen alan uygulamalarında genellikle ortalama güç yoğunluğunun hesaplanması tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda anlık Poynting vektörünün bir periyodu üzerinden integral alınarak yine aynı periyoda bölünmesiyle ortalama güç yoğunluğu hesap edilmektedir.

$$\vec{\mathbf{W}}_{av}(x,y,z) = \left[\vec{\boldsymbol{W}}(x,y,z;t)\right]_{av} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}}^{*}\right] \tag{2.7}$$

Elektrik ($\vec{\mathbf{E}}$) ve manyetik ($\vec{\mathbf{H}}$) alanlar için tepe değerleri kullanılmıştır. RMS değerleri için $^1/_2$ faktörü ihmal edilir. Eş. 2.7'den yola çıkarak bir antenin yaydığı ortalama güç ise aşağıdaki gibidir [5].

$$P_{rad} = P_{av} = \iint_S \vec{\mathbf{W}}_{rad} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \iint_S \vec{\mathbf{W}}_{av} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, da = \frac{1}{2}\iint_S Re\left(\vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}}^{*}\right) \cdot d\vec{\mathbf{s}} \tag{2.8}$$

2.4. Yönelticilik

Bir antenin yönelticiliği, "antenden belirli bir yönde birim katı açıdan ışınan gücün, tüm yönlerde birim katı açıdan ışınan ortalama güce oranı" olarak tanımlanmaktadır [5].

Ortalama ışıma şiddeti, anten tarafından yayılmakta olan toplam gücün 4π'ye bölünmesi ile elde edilir [5].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \tag{2.9}$$

Burada; D yönelticiliği, U ışıma şiddetini, U_0 izotropik bir kaynağın ışıma şiddetini ve P_{rad} ışınan toplam gücü ifade eder.

Yönelticilik, antenlerde verilmiş olan bir yön için tanımlanmaktadır. Herhangi bir yön belirtilmemiş ise antende U_{max} değerinde maksimum ışımanın olduğu varsayılır [5]. Bir antende meydana gelen maksimum yönelticilik ise;

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \tag{2.10}$$

şeklinde hesaplanır [5].

2.5. Kazanç

Antenin çalışma performansını etkileyen önemli bir diğer parametre ise kazançtır. Bir antenin belirli bir yöndeki kazancı "anten tarafından yayılan gücün izotropik olduğu kabul edilirse, ışıma şiddetinin giriş gücüne oranı" olarak tanımlanmaktadır [5].

$$\text{Kazanç} = 4\pi \frac{\text{Işıma Şiddeti}}{\text{Giriş Gücü}} = 4\pi \frac{U(\theta, \emptyset)}{P_{in}} \tag{2.11}$$

Yön belirtilmediği durumlarda, kazanç genellikle maksimum ışıma yönünde alınır.

Yayılan toplam güç (P_{rad}) giriş gücü (P_{in}) ile aşağıdaki gibi bağlantılıdır.

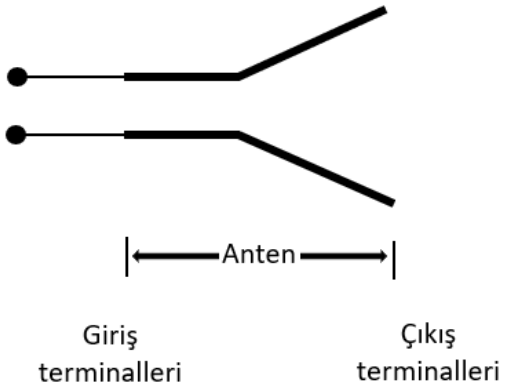
$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \tag{2.12}$$

Burada e_{cd} anten verimini ifade etmektedir. Sonuçta kazancın anten verimi ve yönelticiliğe bağlı elde edilen matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir [5].

$$G(\theta, \emptyset) = e_{cd} D(\theta, \emptyset) \tag{2.13}$$

2.6. Anten Verimi

Anten verimi, giriş terminalinde yansıma kaybına, çıkış terminalinde iletim ve dielektrik kayıplarına bağlıdır [5]. Bir antenin referans terminalleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Anten referans terminalleri [5]

Antenin verimi üç parametreye bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_0 = e_r e_c e_d \tag{2.14}$$

e_0: Boyutsuz anten verimi
e_r: Boyutsuz yansıma verimi = $(1 - |\Gamma|^2)$
e_c: Boyutsuz iletim verimi
e_d: Boyutsuz dielektrik verimi
Γ: Anten giriş uçlarında meydana gelen gerilim yansıma katsayısı
e_c ve e_d bileşenlerinin hesaplanmasının zor olması sebebiyle genellikle e_{cd} yazmak daha uygun olmaktadır. Böylece formülün son hali

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \tag{2.15}$$

şeklini almaktadır. Burada e_{cd}= e_c e_d olarak verilmektedir [5].

2.7. Etkin Açıklık

Bir alıcı antene aktarılan gücün, antene aynı yönden gelen dalganın güç yoğunluğuna oranı "etkin açıklık" olarak tanımlanmaktadır [5].

$$A_e = \frac{P_T}{W_i} \tag{2.16}$$

A_e: Etkin açıklık (m^2)

P_T: İletilen güç (W)

W_i: Aktarılan dalganın güç yoğunluğu (W/m^2)

3. ANTEN DİZİLERİ

Genellikle tek bir antenin ışıma örüntüsündeki ana kulak nispeten geniştir ve her bir eleman düşük kazanç değeri sağlamaktadır. Birçok uygulamada tercih edilen uzun mesafe haberleşmesi, altyapı taleplerini karşılamak için çok yüksek kazanca sahip antenlerin tasarlanmasını gerektirir. Daha fazla kazanç elde etmek için antenin elektriksel boyutu arttırılarak daha yönlü özellik kazanması sağlanabilir. Ancak bu çözüm anten boyutunun artması ile birlikte maliyetin artmasına ve sistemin kurulumunun zorlaşmasına neden olmaktadır.

Anten ve içerisindeki elemanlar tek tek büyütülmeden anten kazancını arttırmanın bir diğer yolu ise belirli bir elektriksel ve geometrik konfigürasyonda, birden fazla antenden oluşan bir sistemin kurulmasıdır. Antenlerin böyle bir sistem içerisinde dizilerek oluşturduğu yeni yapıya “anten dizisi” denir [5].

Daha basit ve daha pratik olması açısından genellikle bir anten dizisinin elemanları aynıdır. Hepsi aynı büyüklükte ve her biri aşamalı bir faza sahip olan bu özdeş ögeler dizisine düzgün dizi denir. Bu çalışmada, farklı dizi geometrileri incelenmiş, düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizileri tek tek ele alınmıştır.

Düzgün bir anten dizisinde, genel anten modelini şekillendirmek üzere kullanılabilecek farklı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler;

• Anten dizisinin geometrik konfigürasyonu (doğrusal, düzlemsel, dairesel, küresel vb.)
• Dizi elemanları arasındaki bağıl mesafe
• Her bir elemanın besleme genliği
• Her bir elemanın besleme fazı
• Her bir elemanın bağıl ışıma örüntüsü

olarak verilmektedir [5].

3.1. Doğrusal Anten Dizileri

Elemanların bir doğru boyunca yerleştirilmesi ile oluşan bu anten dizisi çeşidi en pratik ve basit konfigürasyondur. Konuyu detaylandırmak üzere öncelikle iki elemanlı ve ardından N elemanlı düzgün doğrusal anten dizileri incelenmiştir [5].

3.1.1. İki elemanlı doğrusal anten dizisi

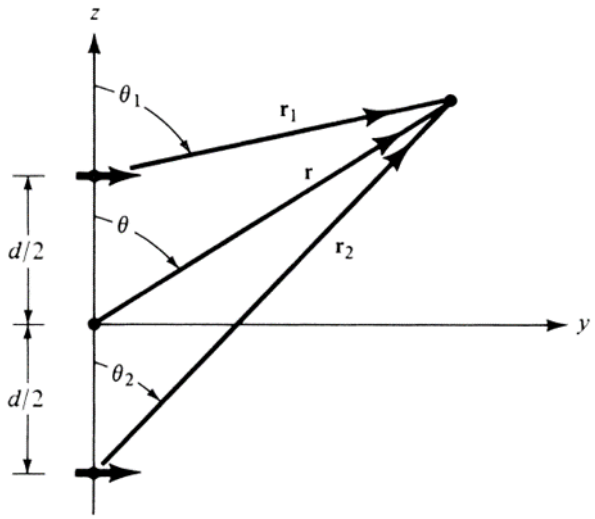
Şekil 3.1'de gösterildiği gibi z ekseni boyunca konumlandırılmış iki adet dipol antenin olduğu varsayılırsa bu iki antenden yayılan toplam alan her bir anten için oluşan alanların toplanması ile elde edilir. y-z düzlemi için toplam alan;

$$\vec{\mathbf{E}}_t = \vec{\mathbf{E}}_1 + \vec{\mathbf{E}}_2 = \hat{\mathbf{a}}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi}\left\{\frac{e^{-j[kr_1-(\beta/2)]}}{r_1}\cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2+(\beta/2)]}}{r_2}\cos\theta_2\right\} \tag{3.1}$$

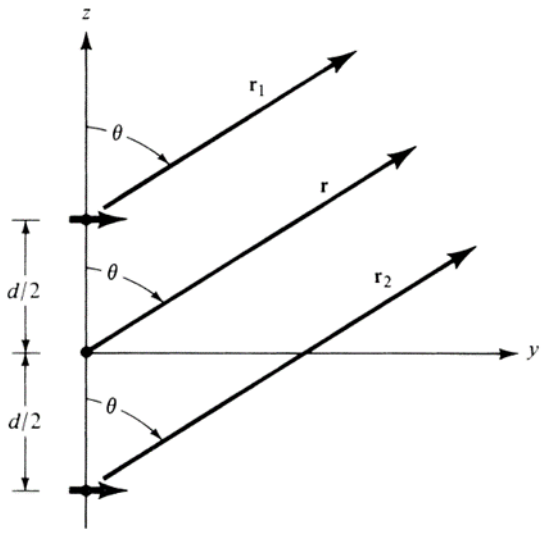
formülü ile verilir [5]. Burada;

$\vec{\mathbf{E}}_1$= Birinci elemanın seçilen bir referans noktasında oluşturduğu elektrik alan,
$\vec{\mathbf{E}}_2$= İkinci elemanın seçilen bir referans noktasında oluşturduğu elektrik alan,
$\vec{\mathbf{E}}_t$= Toplam alanın seçilen bir referans noktasında oluşturduğu elektrik alan,
r_1= Birinci elemanın seçilen bir referans noktasına uzaklığı,
r_2= İkinci elemanın seçilen bir referans noktasına uzaklığı ve
β = Elemanlar arası faz farkını

ifade etmektedir [5].



Şekil 3.1. z ekseninde konumlandırılmış iki elemanlı doğrusal anten dizisi [5]



Şekil 3.2. z ekseninde konumlandırılmış iki elemanlı doğrusal anten dizisinin uzak alan bölgesi [5]

Şekil 3.2'de verildiği gibi iki elemanlı bir anten dizisinin uzak alan bölgesi incelendiğinde;

$$\theta_1 \cong \theta_2 \cong \theta \tag{3.2}$$

olduğu görülür. Faz değişimleri için r_1 ve r_2 sırasıyla aşağıdaki gibi verilir:

$$r_1 \cong r - \frac{d}{2}\cos\theta \tag{3.3}$$

$$r_2 \cong r + \frac{d}{2} cos\,\theta \tag{3.4}$$

Genlik değişimleri için r_1 ve r_2;

$$r_1 \cong r_2 \cong r \tag{3.5}$$

olur. Eş. 3.1 aşağıdaki şekli alır.

$$\vec{\mathbf{E}}_t = \hat{\mathbf{a}}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \left[e^{+j(kd\cos\theta+\beta)/2} + e^{-j(kd\cos\theta+\beta)/2}\right] \tag{3.6}$$

$$\vec{\mathbf{E}}_t = \hat{\mathbf{a}}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \underbrace{\left\{2\cos\left[\frac{1}{2} kd\, cos\,\theta + \beta\right]\right\}}_{\text{Dizi Faktörü}} \tag{3.7}$$

Buradan dizinin toplam alanının; merkezde konumlandırılan tek bir elemanın oluşturduğu alan ile dizi faktörünün çarpımından hesaplandığı görülmektedir.

Özetle toplam alan;

$$\vec{\mathbf{E}}_t = \left[\vec{\mathbf{E}}(\text{Referans noktasındaki tek bir eleman})\right] x [\text{dizi faktörü}] \tag{3.8}$$

denklemi ile ifade edilebilir [5].

Sonuçta iki elemanlı bir anten dizisi için dizi faktörü;

$$\text{AF} = 2\cos\left[\frac{1}{2}(k\, d\, cos\,\theta + \beta)\right] \tag{3.9}$$

olarak ifade edilir. Buradan yola çıkarak normalize edilmiş dizi faktörü:

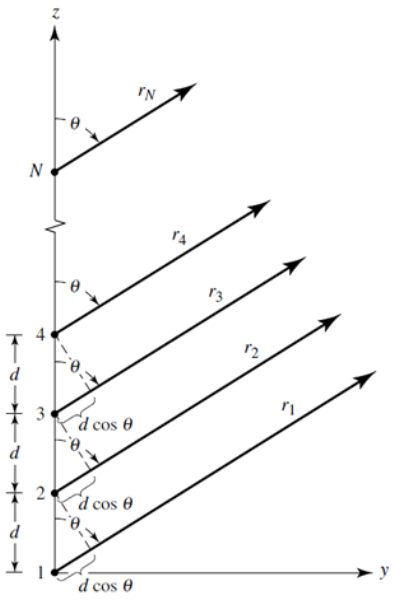
$$(\text{AF})_n = \cos\left[\frac{1}{2}(k\, d\, cos\,\theta + \beta)\right] \tag{3.10}$$

olarak ifade edilir. Dizi faktörü, dizi geometrisi ve uyarım fazına bağlı bir fonksiyondur. Elemanlar arasında mevcut olan uzaklık d veya β faz farkı değiştirilerek dizi faktörü ve dizinin toplam alanının özellikleri kontrol altında tutulabilir [5].

Her bir anten dizisinin kendine has dizi faktörü bulunmaktadır. Genel olarak dizi faktörü matematiksel olarak dizi elemanları sayısının, aralıklarının, geometrik konumlandırmanın, bağıl büyüklük ve fazlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Dizi faktörü; elemanlar aynı genliklere, fazlara ve mesafelere sahipse daha basit bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

3.1.2. *N* elemanlı doğrusal anten dizisi

Bir doğru boyunca yerleştirilmiş N adet elemandan oluşan bir anten dizisine doğrusal anten dizisi denmektedir. Burada yer alan elemanlar özdeştir ve tümü aynı genliktedir. Ancak sıralı elemanların bir öncekine göre β kadar faz farkı bulunmaktadır. N elemanlı doğrusal anten dizisi için sistem geometrisi Şekil 3.3'te verildiği gibidir [5].



Şekil 3.3. *y-z* düzleminde yerleştirilmiş N elemanlı anten dizisinin sistem geometrisi [5]

İki elemanlı anten dizisinden yola çıkılarak N elemanlı anten dizisi için dizi faktörü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [5].

$$\mathrm{AF} = 1 + e^{+j(kd\cos\theta+\beta)} + e^{+2j(kd\cos\theta+\beta)} + \cdots + e^{j(N-1)(kd\cos\theta+\beta)} \tag{3.11}$$

$$\mathrm{AF} = \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1)(kd\cos\theta+\beta)} \tag{3.12}$$

Referans noktası dizinin fiziksel merkezi olarak varsayılır ise dizi faktörü

$$\mathrm{AF} = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)}\right] \tag{3.13}$$

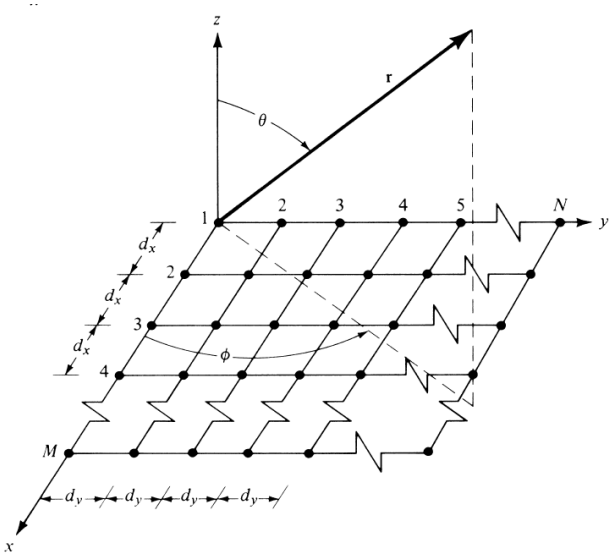
olarak verilir. Burada ψ aşağıda verildiği gibidir [5].

$$\psi = kd\cos\theta + \beta \tag{3.14}$$

3.2. Düzlemsel Anten Dizileri

Bir diğer anten dizisi çeşidi Şekil 3.4'te gösterildiği gibi elemanların bir dikdörtgen boyunca yerleştirilmesi ile oluşan düzlemsel anten dizisidir. Düzlemsel diziler geometrik konfigürasyonları sayesinde dizinin örüntüsünü kontrol etmek ve diziyi şekillendirmek için kullanılabilecek ek değişkenler sağlamaktadırlar. Düzlemsel dizilerin avantajlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Çok yönlüdürler.
- Alt yan kulakları ile birlikte daha simetrik örüntü sağlayabilirler.
- Uzayda herhangi bir noktayı taramak için antenin ana hüzmesini kullanabilirler.
- İzleme radarı, arama radarı, uzaktan algılama ve uzak mesafe iletişimi gibi birçok uygulama alanı bulunmaktadır [5].



Şekil 3.4. Düzlemsel anten dizisi geometrisi [5]

x ekseni boyunca yerleştirilmiş M adet eleman için dizi faktörü;

$$\mathrm{AF} = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \tag{3.15}$$

olarak yazılabilir. Burada I_{m1} her bir elemanın uyarım katsayısını, d_x elemanlar arasındaki mesafeyi ve β_x faz farkını temsil etmektedir. Benzer şekilde y ekseni boyunca d_y mesafesi ve β_y faz farkı ile yerleştirilmiş olan N adet elemandan oluşan bu sistemin tamamına düzlemsel dizi denmektedir. Toplam dizi faktörü

$$\mathrm{AF} = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} \left[\sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \right] e^{j(n-1)\left(kd_y \sin\theta\sin\phi+\beta_y\right)} \tag{3.16}$$

şeklinde hesaplanır [5].

Dizi elemanlarının y yönündeki genlik uyarım katsayıları x yönündekiler ile orantılıysa (m, n) için elemanın genliği Eş. 3.17'de verilmiştir.

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \tag{3.17}$$

Ek olarak, tüm dizi için tek tip genlik uyarımının olduğu varsayılır ($I_{mn} = I_0$). Eş. 3.16'nın

son hali Eş. 3.18'de verilmiştir [5].

$$\mathrm{AF} = I_0 \sum_{m=1}^{M} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1)\left(kd_y \sin\theta\sin\phi+\beta_y\right)} \tag{3.18}$$

Son olarak, dizi faktörünün normalize edilmiş hali ise:

$$AF_n(\theta,\phi) = \left\{\frac{1}{M}\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)}\right\}\left\{\frac{1}{N}\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)}\right\} \tag{3.19}$$

şeklinde yazılabilir [5].

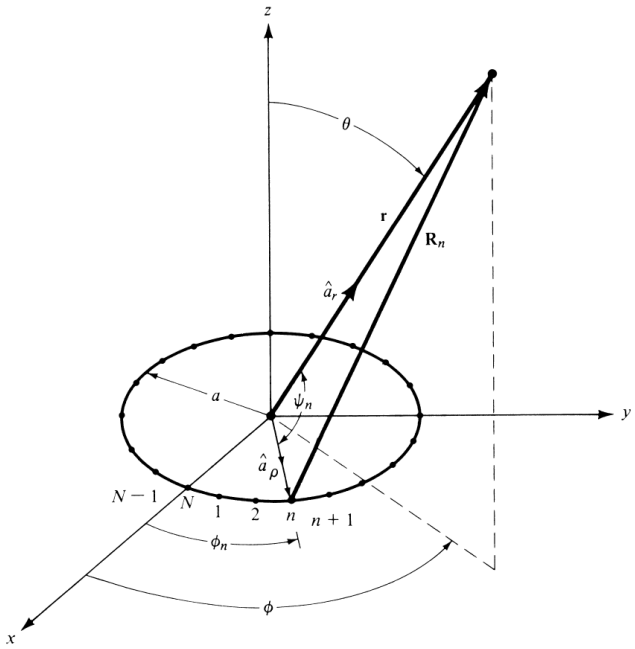
Eş. 3.19'de yer alan ψ_x ve ψ_y aşağıda verildiği gibidir [5].

$$\psi_x = kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta_x \tag{3.20}$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta\sin\phi + \beta_y \tag{3.21}$$

3.3. Dairesel Anten Dizileri

Bir dairesel anten dizisi Şekil 3.5'te gösterildiği gibi elemanların dairesel bir halka boyunca yerleştirilmesi sonucu oluşan dizi geometrisidir. Bu dizinin en büyük avantajı geometrisinin azimut eksenindeki simetrisinden kaynaklanmaktadır. Dairesel dizinin kenar elemanları içermemesi sebebiyle, bu geometri tarafından sentezlenen yönlü örüntüler dalga şeklinde önemli bir değişiklik olmaksızın azimut düzleminde elektronik tarama sağlamaktadırlar [5].



Şekil 3.5. *N* elemanlı dairesel dizi geometrisi [5]

Uygulama alanları; hava ve uzay sistemlerinde yön bulma, kablosuz haberleşme, akıllı antenler, dalga yayılımı, radar ve sonar uygulamaları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi x-y düzleminde a yarıçaplı dairesel bir halka üzerinde N adet izotropik antenin eşit aralıklarla yerleştirildiği varsayılırsa dizinin normalize edilmiş dizi faktörü aşağıdaki gibi olur [5].

$$\mathrm{AF}(\theta,\phi) = \sum_{n=1}^{N} I_n e^{j[ka\sin\theta\cos(\phi-\phi_n)+\alpha_n)]} \tag{3.22}$$

Burada;

I_n= *n*'inci elemanın uyarım genliğini

α_n= *n*'inci elemanın dizi merkezine göre faz uyarımını

ϕ_n= *n*'inci elemanın *x*-*y* düzlemindeki açısal konumunu

göstermektedir [5].

4. SİNYAL GELİŞ AÇISI KESTİRİM YÖNTEMLERİ

Sinyal geliş açısı kestirimi için temelde zaman gecikmelerinden faydalanılmaktadır. Öncelikle bir anten dizisi yardımı ile çeşitli yönlerden gelen sinyaller toplanmaktadır. Ardından sinyal geliş açısı kestirim algoritması ile zaman gecikmelerine bağlı olarak toplanan bu sinyallerin yönleri belirlenmektedir [5].

Zaman gecikmelerini hesaplamak üzere x ekseni boyunca d_x ve y ekseni boyunca d_y mesafesi ile yerleştirilmiş bulunan $M \times N$ adetli bir düzlemsel anten dizisi olduğu varsayılır. Gelen dalga temel bant sinyali $s(t)$'yi taşımaktadır. Bu dalga anten dizisine belirli bir (θ, ϕ) açısı ile çarpmaktadır. Burada dizideki diğer anten elemanlarına göre bir zaman gecikmesi oluşmaktadır. Oluşan bu gecikmeler anten geometrisine, dizideki anten elemanı sayısına ve elemanlar arası mesafeye bağlı olarak değişebilmektedir. Düzlemsel anten dizisinde (m, n)'inci eleman için $(0,0)$ noktası referans alındığında $s(t)$ sinyali için oluşan zaman gecikmeleri aşağıda verilmiştir [5].

$$\tau_{mn} = \frac{\Delta r}{v_0} \tag{4.1}$$

Burada Δr sinyalin serbest uzaydaki diferansiyel mesafesini, v_0 sinyalin serbest uzaydaki hızını ifade eder.

$$\Delta r = d_{mn} \cos(\psi) \tag{4.2}$$

Burada (m, n)'inci elemanın orijine uzaklığı d_{mn}'dir. ψ, bu elemanın $s(t)$ sinyali ile radyal birim vektörü arasındaki açıyı ifade etmektedir. d_{mn} ve $\cos(\psi)$ bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$d_{mn} = \sqrt{m^2 d_x^2 + n^2 d_y^2} \tag{4.3}$$

$$\cos(\psi) = \frac{\hat{\mathbf{a}}_r \cdot \hat{\mathbf{a}}_\rho}{|\hat{\mathbf{a}}_r||\hat{\mathbf{a}}_\rho|} \tag{4.4}$$

$\hat{\mathbf{a}}_r$, giriş sinyali $s(t)$ yönündeki birim vektörü ifade etmektedir. $\hat{\mathbf{a}}_\rho$, (m,n)'inci elemanın d_{mn} uzaklığı boyunca olan birim vektörü ifade etmektedir. Daha ayrıntılı bakıldığında *x*, *y* ve *z* eksenleri $\hat{\mathbf{a}}_x, \hat{\mathbf{a}}_y \; ve \; \hat{\mathbf{a}}_z$ birim vektörlerine bağlı olarak, $\hat{\mathbf{a}}_r$ ve $\hat{\mathbf{a}}_\rho$ birim vektörleri

$$\hat{\mathbf{a}}_r = \hat{\mathbf{a}}_x \sin\theta\cos\phi + \hat{\mathbf{a}}_y \sin\theta\sin\phi + \hat{\mathbf{a}}_z \cos\theta \tag{4.5}$$

$$\hat{\mathbf{a}}_\rho = \frac{\hat{\mathbf{a}}_x m d_x + \hat{\mathbf{a}}_y n d_y}{\sqrt{m^2 d_x^2 + n^2 d_y^2}} \tag{4.6}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradan yola çıkılarak Eş. 4.2 ve Eş. 4.6 numaralı ifadeler Eş. 4.1'de yerine konursa başlangıç noktasındaki zaman gecikmesinin matematiksel formülü aşağıda verilmiş olan şekli almaktadır [5].

$$\tau_{mn} = \frac{m d_x \sin\theta\cos\phi + n d_y \sin\theta\sin\phi}{v_0} \tag{4.7}$$

Sinyal geliş açısı kestirim yöntemleri genel anlamda klasik yöntemler, altuzay tabanlı yöntemler, maksimum olabilirlik yöntemi ve hibrit yöntemler olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir [56]. Bu tezde sadece ilk üç yönteme değinilmiştir.

4.1. Geleneksel Yöntemler

Geleneksel yöntemler, klasik hüzme oluşturma tekniklerine dayalıdır ve yüksek çözünürlük elde etmek için çok sayıda öge gerektirmektedir. Sinyal geliş açısı kestirimi, hüzme oluşturma ve sıfır yönlendirme kavramlarına dayanmaktadır. Alınan sinyal vektörü, sinyallerin istatistiksel özelliklerinden yararlanmaz. Tüm sinyallerin sinyal geliş açısı kestirimini hesaplamak üzere dalganın olası tüm yönlerde iletilmesi ile birlikte oluşan güç incelenir. Sonuçta elde edilen çıkış gücü spektrumunun tepe değerleri sinyal geliş açısı kestirimi için kullanılır. Geleneksel yöntemler, Geciktir-ve-Topla (Delay-and-Sum) ve Capon'un minimum varyans yöntemi olmak üzere iki alt başlık altında incelenmiştir [56].

4.1.1. Geciktir-ve-Topla yöntemi

Geciktir-ve-Topla yöntemi, klasik hüzmeleme veya Fourier yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Belirli bir yönde bir hüzme oluşturmak için anten dizisine sunulan tüm serbestlik derecelerini kullanmaktadır. Bu teknik tek bir sinyal için problemsiz çalışmaktadır. Ancak birden fazla sinyalin mevcut olduğu durumlarda, sistem çıkışında istenen sinyale ek olarak diğer yönlerden gelen istenmeyen sinyallerden katkılar içerir. Geciktir-ve-Topla yönteminde hüzme genişliği ve yan kulakların yüksekliği, çoklu yönlerden gelen sinyaller mevcut olduğunda performans etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle bu yöntem zayıf çözünürlüğe sahiptir. Anten elemanı sayısı arttırılarak çözünürlüğü arttırmak mümkün olsa da anten elemanı sayısının artması daha fazla depolama alanı gerektireceği için bu durum çok fazla tercih edilmemektedir [56].

4.1.2. Capon'un minimum varyans yöntemi

Capon'un minimum varyans yöntemi, Geciktir-ve-Topla yönteminde dezavantaj olan zayıf çözünürlük probleminin üstesinden gelmeye çalışır. Bu yöntem ile, belirli bir yönde bir hüzme oluşturmak için serbestlik derecelerinin bir kısmı kullanılırken kalan serbestlik dereceleri girişim yapan sinyallerin yönünde sıfır değerler oluşturmak için kullanılır. Böylece kazanç sabit tutulur ve çıkış gücü minimum seviyeye düşürülerek istenmeyen girişimlerin katkısı en aza indirilir [56].

4.2. Altuzay Tabanlı Yöntemler

Altuzay tabanlı yöntemler (subspace methods), klasik yöntemlerin aksine girdi veri matrisinin yapısından yararlanmaktadır. Bu sayede yüksek çözünürlük sağlamaktadırlar [56].

4.2.1. MUSIC (Multiple Signal Classification) algoritması

MUSIC algoritması, girişte oluşan kovaryans matrisinin özyapısından faydalanan altuzay tabanlı bir algoritmadır. Bu algoritma gelen sinyallerin sayısı, sinyal geliş açıları, alınan sinyaller arası çapraz ilinti, gürültü gücü vb. durumlar hakkında bilgi sağlayan bir sinyal

geliş açısı kestirim algoritmasıdır. Algoritmanın yüksek çözünürlük sağlaması bir avantaj iken çok hassas ve doğru bir dizi kalibrasyonu gerektirmesi bir dezavantajdır [56].

MUSIC algoritmasının görüntü kalitesini iyileştirmek ve hesaplama zorluğunu azaltmak için temel çalışma mantığı MUSIC algoritmasına dayanan çeşitli gelişmiş versiyonlar önerilmiştir. Düzgün aralıklı doğrusal diziye uygulanabilen ve polinom köküne dayanan kök-MUSIC algoritmasının geliştirilmesi ile çözünürlüğün artması sağlanmıştır [57]. Bir diğer çalışmada algoritmanın performansını arttırmak amacı ile sinyalin spektral tutarlılık özelliklerinden yararlanılarak Döngüsel-MUSIC (Cyclic-MUSIC) algoritması geliştirilmiştir [58]. Başka bir çalışmada [59], MUSIC algoritmasının hesaplama zorluğunu azaltmak üzere Hızlı Altuzay Ayrıştırma yöntemi (Fast Subspace Decomposition/ FSD) sunulmuştur.

4.2.2. ESPRIT algoritması

ESPRIT Algoritması 1989 yılında Roy tarafından önerilmiş olan bir diğer altuzay tabanlı sinyal geliş açısı kestirim yöntemidir [15]. Bu algoritmanın temel çalışma prensibi, anten dizisinin öteleme değişmezliği sonucu uyarılan sinyal altuzayının dönme değişmezliğini sunmaktır [56]. ESPRIT, MUSIC algoritmasının hesaplama ve depolama ihtiyaçlarını büyük ölçüde azaltır ve geliş açısı kestirimi için yönlendirme vektörlerinin geniş çaplı bir taramasını gerektirmez. ESPRIT algoritmasının MUSIC algoritmasından başka bir farkı, çok boyutlu bir yüzey vektörünü gerektirmemesi ve buna bağlı olarak dizi kalibrasyon gereksiniminin bulunmamasıdır. ESPRIT birçok sinyal geliş açısı kestirim yöntemlerinde bulunan arama prosedürünü ortadan kaldırır ve sinyal geliş açısı kestirimini özdeğerler cinsinden üretir [56].

4.3. Maksimum Olasılık Yöntemleri

Sinyal geliş açısı kestirimi için araştırılan ilk yöntemlerden bir tanesi Maksimum Olasılık Yöntemleridir (Maximum Likelihood Estimation / MLE). Hesaplama açısından yoğun olmaları sebebi ile altuzay tabanlı yöntemlere göre daha az tercih edilmektedir. Ancak ilintili sinyaller, düşük sinyal gürültü oranı veya az sayıda sinyal örnekleri için sinyal geliş açısı kestirim yöntemleri performans açısından incelendiğinde MLE teknikleri daha üstündür [60].

5. MUSIC ALGORİTMASI

MUSIC algoritmasının geliştirilmesi sinyal geliş açısı kestirim probleminin geometrik görünümüne bağlıdır. M adet eleman ve D adet sinyal alan bir dar bant veri modelinin giriş vektörü veri modeli, diziye gelen sinyallerin dalga biçimleri ve gürültünün doğrusal bir bileşeni olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [56].

$$\boldsymbol{u}(t) = \sum_{l=0}^{D-1} \boldsymbol{a}(\phi_l) s_l(t) + \boldsymbol{n}(t) \tag{5.1}$$

$$\boldsymbol{u}(t) = [\boldsymbol{a}(\phi_0)\ \boldsymbol{a}(\phi_1) \ldots \boldsymbol{a}(\phi_{D-1})] \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_1(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_{D-1}(t) \end{bmatrix} + \boldsymbol{n}(t) \tag{5.2}$$

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{A}s(t) + \boldsymbol{n}(t) \tag{5.3}$$

Burada,

D: Anten dizisinin almakta olduğu sinyal sayısıdır.

$\boldsymbol{a}(\phi_j)$: Dizinin j'inci sinyalin varış yönüne karşılık gelen dizi yönlendirme vektörüdür.

$\boldsymbol{s}^T(t)$=[$s_0(t)$ $s_1(t)$ ... $s_{D-1}(t)$]: $Dx1$ boyutunda gelen sinyalleri içeren bir vektördür.

$\boldsymbol{n}(t)$=[$n_0(t)$ $n_1(t)$ ... $n_{\mathrm{D}-1}(t)$]: Anten dizisine ulaşan gürültü sinyalini ifade eden vektördür.

Yukarıda verilen giriş veri modeline istinaden giriş kovaryans matrisi $\boldsymbol{R}_{uu}$ aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Burada $\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{ss}}$, $E[\boldsymbol{s}\boldsymbol{s}^{\mathrm{H}}]$'ın sinyal ilinti matrisini ifade eder [56].

$$\boldsymbol{R}_{uu} = E[\boldsymbol{u}\boldsymbol{u}^H] = \boldsymbol{A}E[\boldsymbol{s}\boldsymbol{s}^H]\boldsymbol{A}^H + E[\boldsymbol{n}\boldsymbol{n}^H] \tag{5.4}$$

$$\boldsymbol{R}_{uu} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H + \sigma_n^2\boldsymbol{I} \tag{5.5}$$

$\boldsymbol{R}_{uu}$'nun özdeğerleri olan $\{\lambda_0, .., \lambda_{M-1}\}$ kümesi aşağıdaki eşitliği sağlar.

$$|\boldsymbol{R}_{uu} - \lambda_i \boldsymbol{I}| = 0 \tag{5.6}$$

Eş. 5.5 kullanılarak bu ifade aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$|\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H + \sigma_n^2 \boldsymbol{I} - \lambda_i \boldsymbol{I}| = |\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H - (\lambda_i - \sigma_n^2)\boldsymbol{I}| = 0 \tag{5.7}$$

Bu nedenle $\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H$'nin özdeğerleri ν_i,

$$\nu_i = \lambda_i - \sigma_n^2 \tag{5.8}$$

şeklinde ifade edilir. $\boldsymbol{A}$ doğrusal bağımsız vektörlerden oluşmaktadır. Bu sebeple $\boldsymbol{A}$ tam sütun rankına sahiptir (bütün sütunlar doğrusal bağımsızdır) ve gelen sinyaller yüksek ilinti değerlerine sahip değilse $\boldsymbol{R}_{ss}$ tekil değildir. Bu özelliklere sahip bir yapının tercih edilmesinde gelen sinyal sayısı D anten dizisi eleman sayısı M'den küçük ise $\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H$ ifadesinin MxM matrisi D rank değerine sahip pozitif yarı tanımlı olmasını garanti eder [56].

Bu $\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H$ ifadesinin, ν_i, özdeğerleri arasından $M - D$ tanesinin 0'a eşit olduğu anlamına gelmektedir. Buradan Eş. 5.8 ile birlikte, $\boldsymbol{R}_{uu}$'nun $M - D$ tane özdeğerinin gürültü varyansı σ_n^2 değerine eşit olduğu anlaşılır.

$$\lambda_D, \dots, \lambda_{M-1} = \sigma_n^2 \tag{5.9}$$

Bir sonraki aşamada $\boldsymbol{R}_{uu}$'nun özdeğerleri, λ_0 en büyük ve λ_{M-1} en küçük değer olacak şekilde, sıralanır.

Gürültü varyansı ile sinyal gürültü oranı arasında Eş.5.10'daki gibi bir ilişki bulunmaktadır [61].

$$\text{Gürültü Varyansı} = \sigma^2 = \frac{\text{Sinyal Gücü}}{10^{\frac{\text{SNR}}{10}}} \tag{5.10}$$

Özilinti matrisi $\boldsymbol{R}_{uu}$ pratikte sonlu bir veri örneği içerisinden tahmin edildiği için, gürültü

gücüne karşı alınan tüm özdeğerler özdeş olmamaktadır. En küçük özdeğerin katlılığı K'nın belirlenmesinin ardından $M = D + K$ eşitliğinden sinyal sayısı $\widehat{D}$ hesaplanır. Sonuçta gelen sinyal sayısı,

$$\widehat{D} = M - K \tag{5.11}$$

ifadesi ile hesaplanır [56].

Belirli bir λ_i özdeğeri ve buna karşılık gelen $\boldsymbol{q}_i$ özvektörü aşağıdaki matematiksel ifadeyi sağlamaktadır.

$$(\boldsymbol{R}_{uu} - \lambda_i \boldsymbol{I})\boldsymbol{q}_i = 0 \tag{5.12}$$

$M - D$ ifadesinin en küçük özdeğerleriyle bağlantılı özvektörler için,

$$(\boldsymbol{R}_{uu} - \sigma_n^2 \boldsymbol{I})\boldsymbol{q}_i = \boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{q}_i + \sigma_n^2\boldsymbol{I} - \sigma_n^2\boldsymbol{I} = 0 \tag{5.13}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{q}_i = 0 \tag{5.14}$$

eşitlikleri sağlanır. Burada, $\boldsymbol{A}$ tam sütun rankına sahip olduğu ve $\boldsymbol{R}_{ss}$ tekil olmadığı için Eş. 5.14, Eş. 5.15 ile verilen şekli almaktadır.

$$\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{q}_i = 0 \tag{5.15}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^H(\phi_0)\boldsymbol{q}_i \\ \boldsymbol{a}^H(\phi_1)\boldsymbol{q}_i \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}^H(\phi_{D-1})\boldsymbol{q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

Buradan, $M - D$ ifadesinin en küçük özdeğerleriyle bağlantılı özvektörlerin $\boldsymbol{A}$ vektörünü oluşturan D yönlendirme vektörlerine dik olduğu anlaşılmaktadır [56].

$$\{\boldsymbol{a}(\phi_0), \dots, \boldsymbol{a}(\phi_{D-1})\} \perp \{\boldsymbol{q}_D, \dots, \boldsymbol{q}_{M-1}\} \tag{5.17}$$

MUSIC algoritmasının temel çalışma prensibini bu yaklaşım oluşturmaktadır. Bu alınan sinyaller ile birlikte ilişkili yönlendirme vektörlerinin bulunabileceği anlamına gelmektedir. Burada yönlendirme vektörleri $\boldsymbol{R}_{uu}$'nun ilişkili özvektörlerine dik ve σ_n^2 ifadesine yaklaşık eşittir.

Yapılan bu analiz ile birlikte $\boldsymbol{R}_{uu}$ kovaryans matrisine ait özvektörlerin sinyal altuzayı ve gürültü altuzayı adı verilen birbirine dik iki altuzayın birine ait olduğu anlaşılır. Sinyal geliş açısına karşılık gelen yönlendirme vektörleri sinyal altuzayı içerisinde bulunmaktadır ve buna bağlı olarak gürültü altuzayına dik konumdadır. Gürültü altuzayının kapsadığı uzaya dik tüm olası dizi yönlendirme vektörleri araştırılarak sinyal geliş açısı yani ϕ_i değerleri belirlenir. Gürültü altuzayını araştırmak üzere gürültü özvektörlerini içeren $\boldsymbol{V}_n$ matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur [56].

$$\boldsymbol{V}_n = [\boldsymbol{q}_D\ \boldsymbol{q}_{D+1}\ \dots\ \boldsymbol{q}_{M-1}] \tag{5.18}$$

Sinyal bileşenlerine karşılık gelen yönlendirme vektörlerinin gürültü altuzay vektörlerine dik olması sebebi ile çok yollu bir sistemdeki bileşenin sinyal geliş açısı kestirimine karşılık gelen ϕ değeri için $\boldsymbol{a}^H(\phi)\,\boldsymbol{V}_n\,\boldsymbol{V}_n^H\,\boldsymbol{a}(\phi) = 0$ olur. Ardından çoklu sinyallerin sinyal geliş açısı kestirimleri bir MUSIC uzamsal spektrumunun tepe noktalarının bulunması ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{MUSIC}(\phi) = \frac{1}{\boldsymbol{a}^H(\phi)\boldsymbol{V}_n\,\boldsymbol{V}_n^H\,\boldsymbol{a}(\phi)} \tag{5.19}$$

Bir başka gösterim şekli ise aşağıdaki gibidir.

$$P_{MUSIC}(\phi) = \frac{\boldsymbol{a}^H(\phi)\boldsymbol{a}(\phi)}{\boldsymbol{a}^H(\phi)\boldsymbol{V}_n\,\boldsymbol{V}_n^H\,\boldsymbol{a}(\phi)} \tag{5.20}$$

Gelen sinyallerin varış yönüne karşılık gelen dizi yönlendirme vektörü $\boldsymbol{a}(\phi)$ ile gürültü özvektörlerini içeren $\boldsymbol{V}_n$ matrisi arasındaki diklik paydayı en aza indirecek ve Eş. 5.19 ile Eş. 5.20'de tanımlanmış olan MUSIC spektrumlarında tepeler oluşacaktır. MUSIC

spektrumundaki en büyük D adet tepe noktası sinyallerin diziye göre geliş açılarını ifade etmektedir [56].

MUSIC spektrumundan sinyal geliş açıları, ϕ_i, kestirildikten sonra aşağıdaki eşitlik yardımı ile sinyal kovaryans matrisi bulunabilir [1].

$$\boldsymbol{R}_{ss} = (\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A})^{-1}\,\boldsymbol{A}^H(\boldsymbol{R}_{uu} - \lambda_{min}\,\boldsymbol{I})\,\boldsymbol{A}(\boldsymbol{A}^H\,\boldsymbol{A})^{-\mathbf{1}} \tag{5.21}$$

Bu eşitlik ile birlikte farklı giriş sinyallerine ait çapraz ilinti değerleri ve güçler elde edilebilir.

Sonuçta MUSIC algoritmasını aşağıdaki adımlar ile özetlemek mümkündür [56]:

1. $k = 0, \dots, K-1$ için giriş sinyalleri $\boldsymbol{u}_k$ toplanır ve buradan giriş kovaryans matrisi tahmin edilir.

$$\widehat{\boldsymbol{R}}_{uu} = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}\boldsymbol{u}_k\,\boldsymbol{u}_k^H \tag{5.22}$$

2 $\widehat{\boldsymbol{R}}_{uu}$ kovaryans matrisine ait özdeğerler ve özvektörler bulunur.

$$\widehat{\boldsymbol{R}}_{uu}\,\boldsymbol{V} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Lambda} \tag{5.23}$$

Buradan özdeğerler ve özvektörler sırası ile aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\boldsymbol{\Lambda} = diag\{\lambda_0, \dots, \lambda_{M-1}\} \tag{5.24}$$

$$\boldsymbol{V} = [\boldsymbol{q}_0\;\boldsymbol{q}_1\;\dots\;\boldsymbol{q}_{M-1}] \tag{5.25}$$

3. En küçük özdeğer λ_{min} için K katlılığından yararlanılarak $\widehat{D}$ sinyal sayısı hesaplanır.

$$\widehat{D} = M - K \tag{5.26}$$

4. $\boldsymbol{V}_n$ değerlerinin $[\boldsymbol{q}_D\;\boldsymbol{q}_{D+1}\;\dots\;\boldsymbol{q}_{M-1}]$ olduğu MUSIC spektrumu aşağıdaki gibi

hesaplanır.

$$\hat{P}_{MUSIC}(\phi) = \frac{\boldsymbol{a}^H(\phi)\boldsymbol{a}(\phi)}{\boldsymbol{a}^H(\phi)\boldsymbol{V}_n\,\boldsymbol{V}_n^H\,\boldsymbol{a}(\phi)} \tag{5.27}$$

5. Son olarak $\hat{P}_{MUSIC}(\phi)$ eşitliğinde elde edilen $\hat{D}$ tepe noktalarından sinyal geliş açıları tahmin edilir.

İki boyutlu sistemler için MUSIC algoritması hesabı aşağıda verildiği gibidir. Öncelikle alınan sinyal modeli $\boldsymbol{x}(t)$ oluşturulur [62].

$$\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{s}(t) + \boldsymbol{n}(t), \qquad t = 1, \dots, N \tag{5.28}$$

$$\boldsymbol{A} = [\boldsymbol{a}(\theta_1, \phi_1), \boldsymbol{a}(\theta_2, \phi_2), \dots, \boldsymbol{a}(\theta_K, \phi_K)] \tag{5.29}$$

Burada, $\boldsymbol{s}^T(t)$=[$s_0(t)$ $s_1(t)$ ... $s_{D-1}(t)$] sinyallerini içeren vektör ve $\boldsymbol{n}(t)$=[$n_0(t)$ $n_1(t)$ ... $n_{D-1}(t)$] anten dizisine ulaşan gürültü sinyalini ifade eden vektördür. Gelen sinyalin varış yönüne karşılık gelen dizi yönlendirme vektörü $\boldsymbol{a}$ Eş. 5.30'da verildiği gibidir [62].

$$\boldsymbol{a}(\theta, \emptyset) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\left[(2\pi/k_c)\left(d_x \sin\theta\cos\phi + d_y \sin\theta\sin\phi\right)\right]} \\ \vdots \\ e^{j(2\pi/k_c)\left[(M_x-1)d_x \sin\theta\cos\phi + (M_y-1)d_y \sin\theta\sin\phi\right]} \end{bmatrix} \tag{5.30}$$

Burada k_c merkez dalga boyudur. Eş. 5.28' de paylaşılan giriş veri modeline istinaden giriş kovaryans matrisi $\boldsymbol{R}$ aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir [62].

$$\boldsymbol{R} = E\,[\boldsymbol{x}(t)\,\boldsymbol{x}^H(t)] = \boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_s\boldsymbol{A}^H + \sigma_n^2\boldsymbol{I}_M \tag{5.31}$$

$$\hat{\boldsymbol{R}} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \boldsymbol{x}(t)\,\boldsymbol{x}^H(t) \tag{5.32}$$

Burada, $\boldsymbol{R}_s, E\ (\boldsymbol{s}(t)\ \boldsymbol{s}^H(t))$'nin $K \times K$ sinyal ilinti matrisini, $\boldsymbol{I}$ $M \times M$ birim matrisini ve σ_n^2 gürültü varyansını ifade eder [62].

$\boldsymbol{R}$'ye özdeğer ayrışımı aşağıdaki gibi uygulanır.

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{V}_s \boldsymbol{\Pi}_s \boldsymbol{V}_s^H + \boldsymbol{V}_n \boldsymbol{\Pi}_n \boldsymbol{V}_n^H \tag{5.33}$$

$$\widehat{\boldsymbol{R}} = \widehat{\boldsymbol{V}}_s \widehat{\boldsymbol{\Pi}}_s \widehat{\boldsymbol{V}}_s^H + \widehat{\boldsymbol{V}}_n \widehat{\boldsymbol{\Pi}}_n \widehat{\boldsymbol{V}}_n^H \tag{5.34}$$

Burada ilgili parametrelerin detaylı açıklaması aşağıda verildiği gibidir [62].

$$\boldsymbol{V}_s = [\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_K] \tag{5.35}$$

$$\boldsymbol{V}_n = [\boldsymbol{v}_{K+1}, \dots, \boldsymbol{v}_M] \tag{5.36}$$

$$\boldsymbol{\Pi}_s = diag\{\pi_1, \dots, \pi_K\} \tag{5.37}$$

$$\boldsymbol{\Pi}_n = diag\{\pi_{K+1}, \dots, \pi_M\} \tag{5.38}$$

$$\widehat{\boldsymbol{V}}_s = [\widehat{\boldsymbol{v}}_1, \dots, \widehat{\boldsymbol{v}}_K] \tag{5.39}$$

$$\widehat{\boldsymbol{V}}_n = [\widehat{\boldsymbol{v}}_{K+1}, \dots, \widehat{\boldsymbol{v}}_M] \tag{5.40}$$

$$\widehat{\boldsymbol{\Pi}}_s = \ diag\{\hat{\pi}_1, \dots, \hat{\pi}_K\} \tag{5.41}$$

$$\widehat{\boldsymbol{\Pi}}_n = \ diag\{\hat{\pi}_{K+1}, \dots, \hat{\pi}_M\} \tag{5.42}$$

Burada, s ve n alt simgeleri sırasıyla sinyal ve gürültü altuzayını temsil etmektedir.

$\boldsymbol{V}_s$ ve $\boldsymbol{V}_n$ arasında bulunan diklikten iki boyutlu sistemler için MUSIC algoritması Eş. 5.43'te verildiği gibi hesaplanır [62].

$$P_{2D-MUSIC}(\theta,\emptyset)=\frac{1}{\boldsymbol{a}^{H}(\theta,\emptyset)\widehat{\boldsymbol{V}}_{n}\widehat{\boldsymbol{V}}_{n}^{H}\boldsymbol{a}(\theta,\emptyset)} \tag{5.43}$$

Burada oluşan K adet tepe noktasından sinyal geliş açısı kestirimi yapılır [62].

6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, MATLAB ortamında hazırlanmış olan programlarla düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizilerine farklı yönlerden gelen sinyallerin geliş açısı kestirimi MUSIC algoritması ile yapılmıştır. Anten dizisinin eleman sayısı, anlık veri sayısı (snapshot), sinyal gürültü oranı, gelen sinyaller arasındaki açı farkı ve gelen sinyallerin sayısı değiştirilerek MUSIC algoritmasının çalışma performansının her bir dizi konfigürasyonunda etkisi paylaşılmıştır.

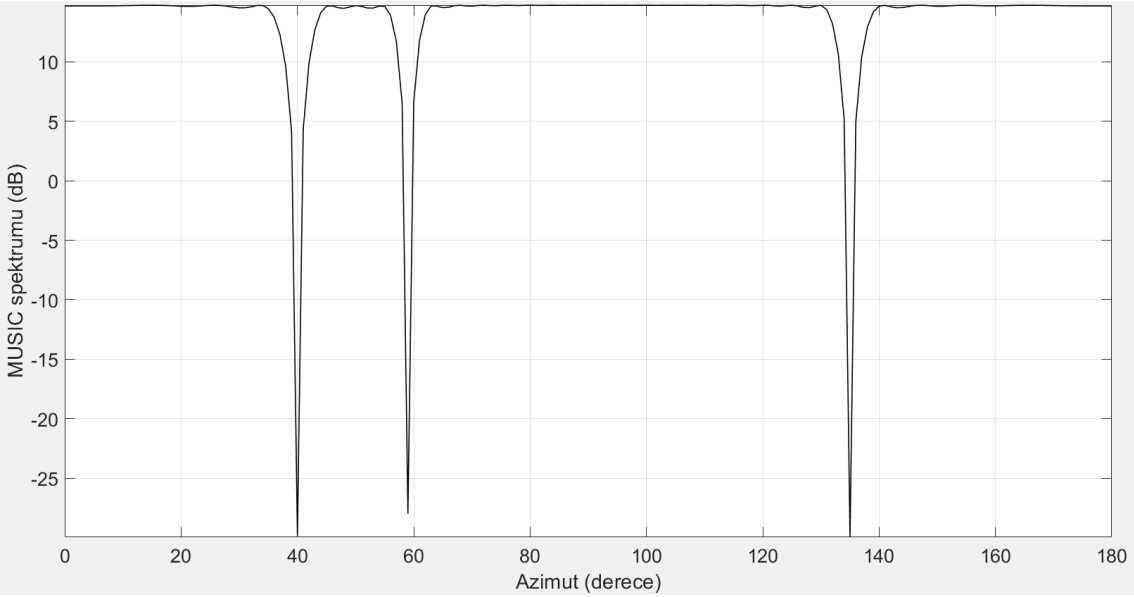
Üç dizi konfigürasyonu ayrı ayrı incelendikten sonra düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizilerinde MUSIC algoritmasının çalışma performansı anten elemanı sayısı, anlık veri sayısı ve sinyal gürültü oranı parametrelerinin değişimi kapsamında karşılaştırılmıştır.

6.1. Düzgün Doğrusal Anten Dizileri

Anten dizisi çeşitlerinden tek boyutlu düzgün doğrusal anten dizisi için beş farklı senaryo uygulanarak anten dizisine gelen sinyallerin kestiriminde MUSIC algoritmasının performans sonuçları paylaşılmıştır. Sinyal geliş açısı kestirim performansına etkisini görmek için anten elemanı sayısı, anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyaller arasındaki açı farkı ve gelen sinyallerin sayısı sırayla değiştirilerek farklı beş durum için MUSIC algoritmasının sonuçları grafikler yardımıyla sunulmuştur.

6.1.1. Düzgün doğrusal anten dizilerinde MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirimi

İlk simülasyonda N=30 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için düzgün doğrusal anten dizisinde MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestirimi ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda elde edilen sonuç grafiği Şekil 6.1'de gösterilmektedir.

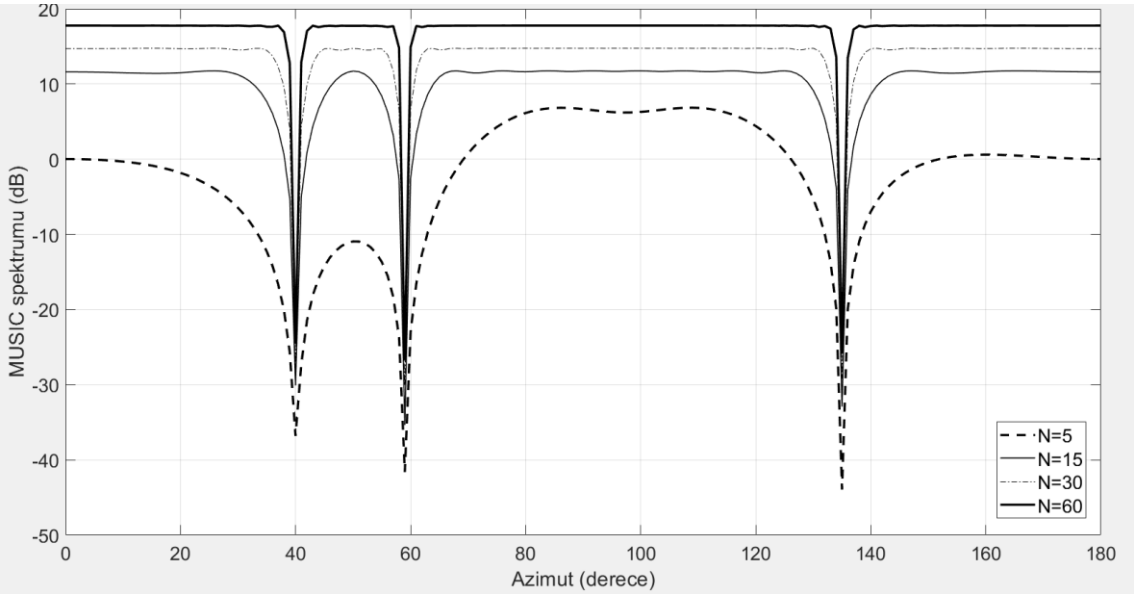


Şekil 6.1. Düzgün doğrusal anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Elde edilen keskin tepe noktalarından MUSIC algoritmasının düzgün doğrusal anten dizilerinde sinyal geliş açısı kestiriminde başarılı olduğu görülmüştür.

6.1.2. Düzgün doğrusal anten dizilerinde anten elemanı sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Bir düzgün doğrusal anten dizisinde bulunan anten elemanı sayısının MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak anten sayısı N=5, N=15, N=30 ve N=60 olmak üzere dört farklı durum incelenmiştir. L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile düzgün doğrusal anten dizisine gelen sinyallerin geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda dört farklı konfigürasyon için elde edilen sonuçlar Şekil 6.2'de paylaşılmıştır.

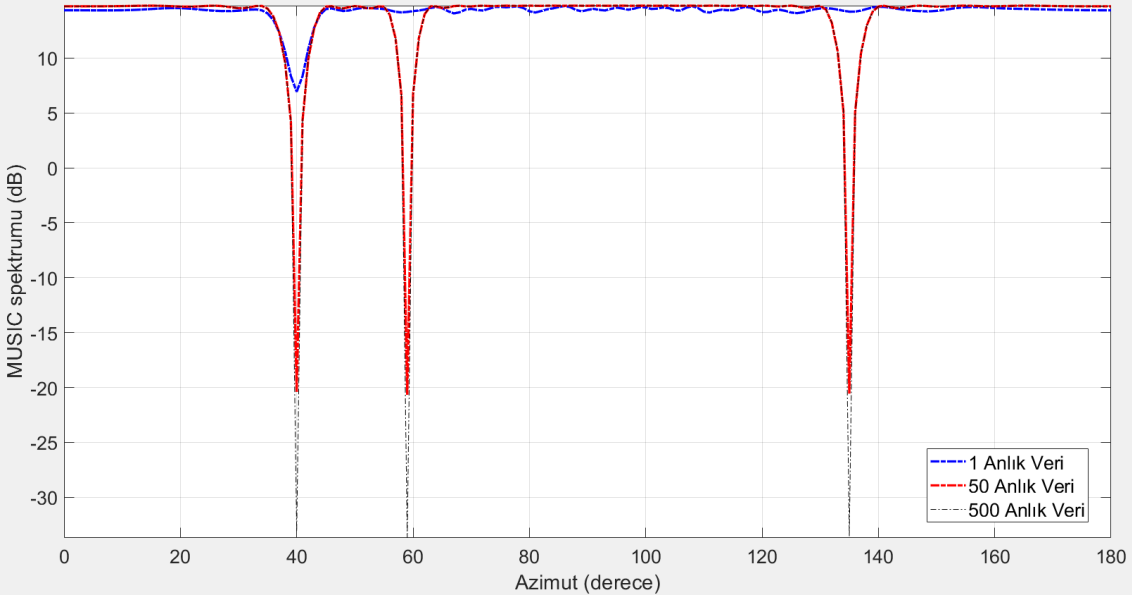


Şekil 6.2. Anten sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Şekil 6.2'de görüldüğü gibi anten sayısının artışına bağlı olarak MUSIC algoritmasında oluşan keskin tepe değerlerinden sinyal geliş açısı kestirim performansının giderek arttığı görülmektedir. Dolayısıyla sinyal geliş açısı kestiriminde daha iyi sonuçlar elde etmek için anten elemanı sayısının arttırılması düşünülebilir. Ancak bu alanda yapılmış olan farklı çalışmaların incelenmesi ile birlikte pratikte, anten elemanı sayısındaki artışın maliyeti, hesaplama miktarını ve sistem hızını etkileyeceği görülmüştür. Dolayısıyla, yapılan uygulamaya bağlı olarak, sinyal geliş açısı kestirim doğruluğunun sağlanması koşuluyla, kaynak israfını en aza indirecek ve algoritma hızını düşürmeyecek sayıda anten elemanı sayısı seçilmelidir [19].

6.1.3. Düzgün doğrusal anten dizilerinde anlık veri sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Anlık veri sayısı değişiminin düzgün doğrusal anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere dizideki anten elemanı sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak anlık veri sayısı L=1, L=50, L=500 olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. N=30 adet anten ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile düzgün doğrusal anten dizisine gelen sinyallerin geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda üç farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.3'te paylaşılmıştır.

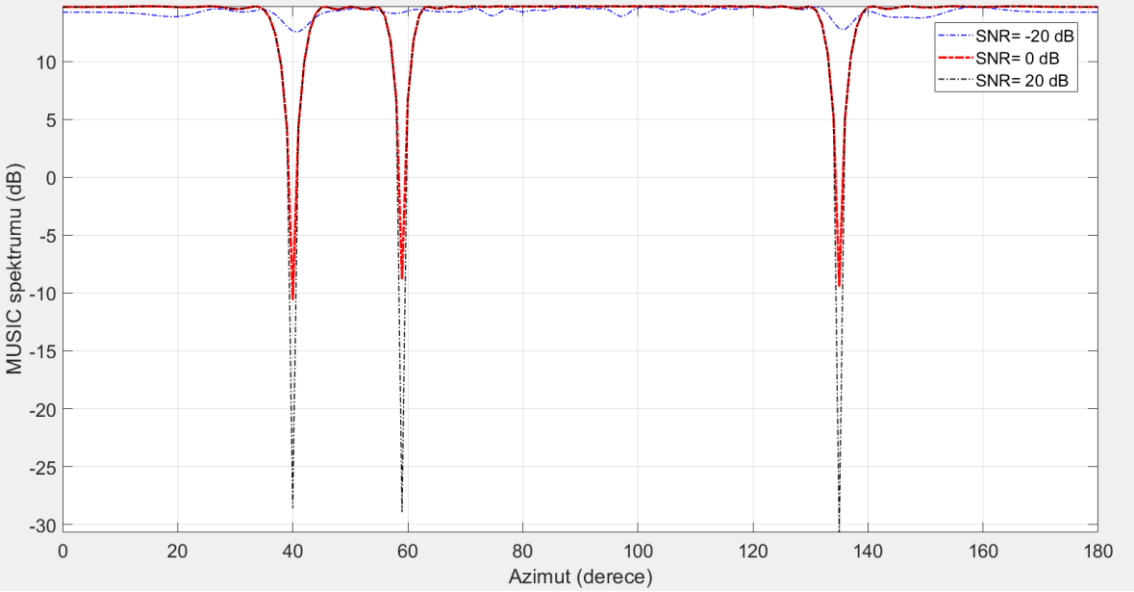


Şekil 6.3. Anlık veri sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Anlık veri sayısı artışına bağlı olarak tepe değeri keskinliğinin giderek arttığı Şekil 6.3'ten görülmektedir. Ancak bu alanda yapılmış olan farklı çalışmaların incelenmesi ile birlikte pratikte, anlık veri sayısındaki artışın maliyeti, hesaplama hızını ve sistem hızını etkileyeceği görülmüştür [19].

6.1.4. Düzgün doğrusal anten dizilerinde sinyal gürültü oranı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Sinyal gürültü oranının düzgün doğrusal bir anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere dizideki anten sayısı, alınan anlık veri sayısı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak sinyal gürültü oranı -20 dB, 0 dB ve 20 dB olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. N=30 adet anten ve L=200 adet anlık veri ile düzgün doğrusal anten dizisine gelen sinyallerin geliş açıları [40°; 59°; 135°] olduğunda üç farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.4'te paylaşılmıştır.

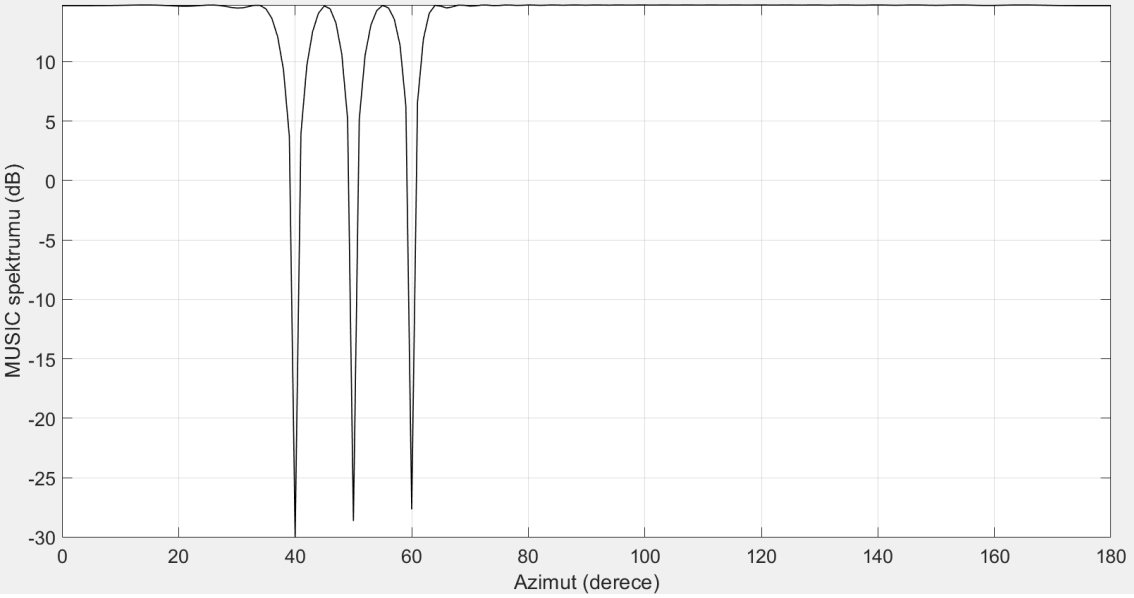


Şekil 6.4. Sinyal gürültü oranına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

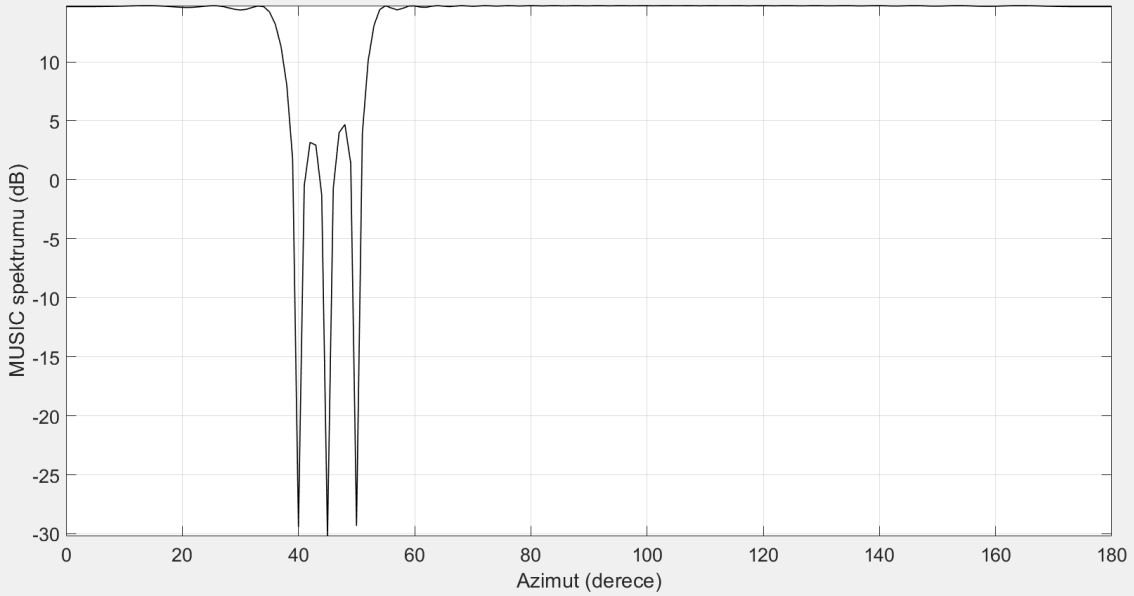
Düzgün doğrusal anten dizileri için elde edilen sonuç grafiğinde, sinyal gürültü oranı 0 dB ve 20 dB iken keskin tepe noktaları ile sinyal geliş açısı kestiriminin yapıldığı görülmektedir. Sinyal gürültü oranı -20 dB olduğunda ise algoritmanın gelen sinyalleri tahmin etmekte zorluk yaşamaya başladığı görülmektedir. Sonuçta sinyal gürültü oranındaki artışın MUSIC algoritması sinyal geliş açısı kestirim performansını olumlu etkilediği görülmüştür.

6.1.5. Düzgün doğrusal anten dizilerinde gelen sinyaller arasındaki açı farkının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

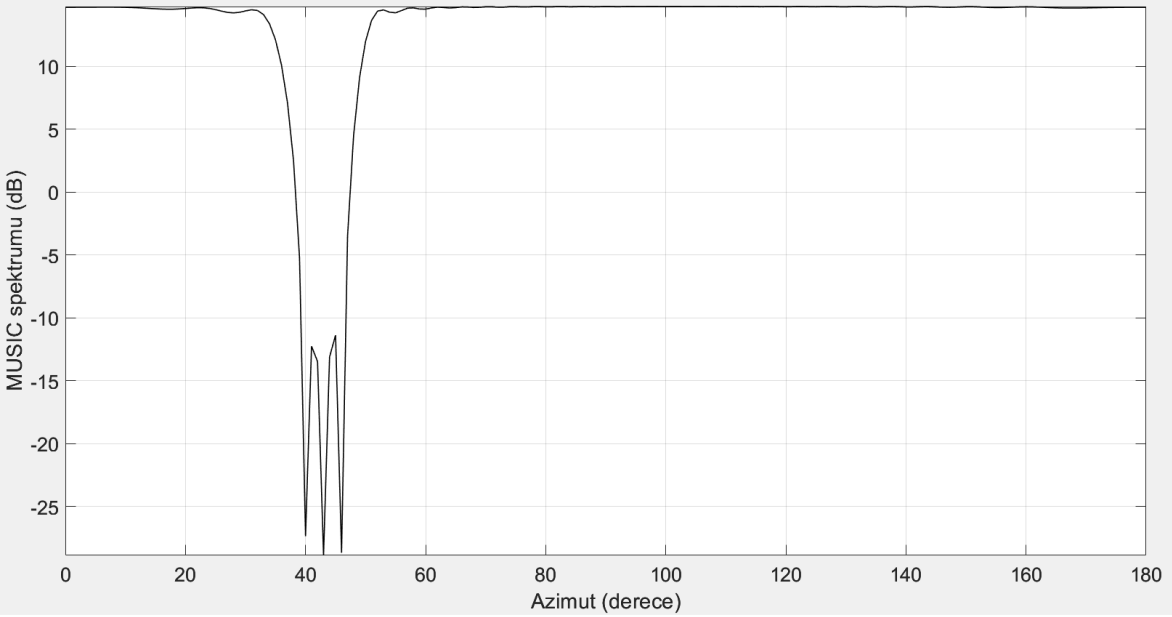
Sisteme gelen sinyallerin geliş açılarının MUSIC algoritmasının çalışma performansına etkisini incelemek üzere üç sinyal sırasıyla 10°, 5°, 3°, 2° ve 1°'lik farklar ile anten dizisine ışıma yapmıştır. N=30 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için düzgün doğrusal anten dizisinde sinyal geliş açıları [40°; 50°; 60°], [45°; 50°; 55°], [40°; 43°; 46°], [40°; 42°; 44°] ve [40°; 41°; 42°] olduğunda MUSIC algoritmasının sonuç grafikleri Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9 ile paylaşılmıştır.



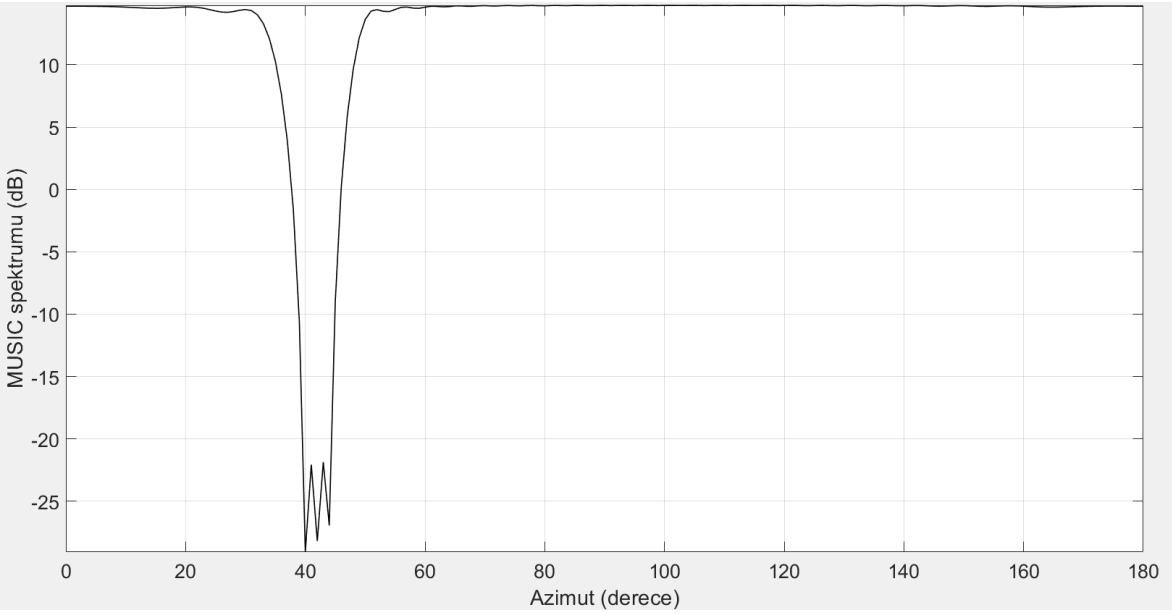
Şekil 6.5. 10°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 50°, 60°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



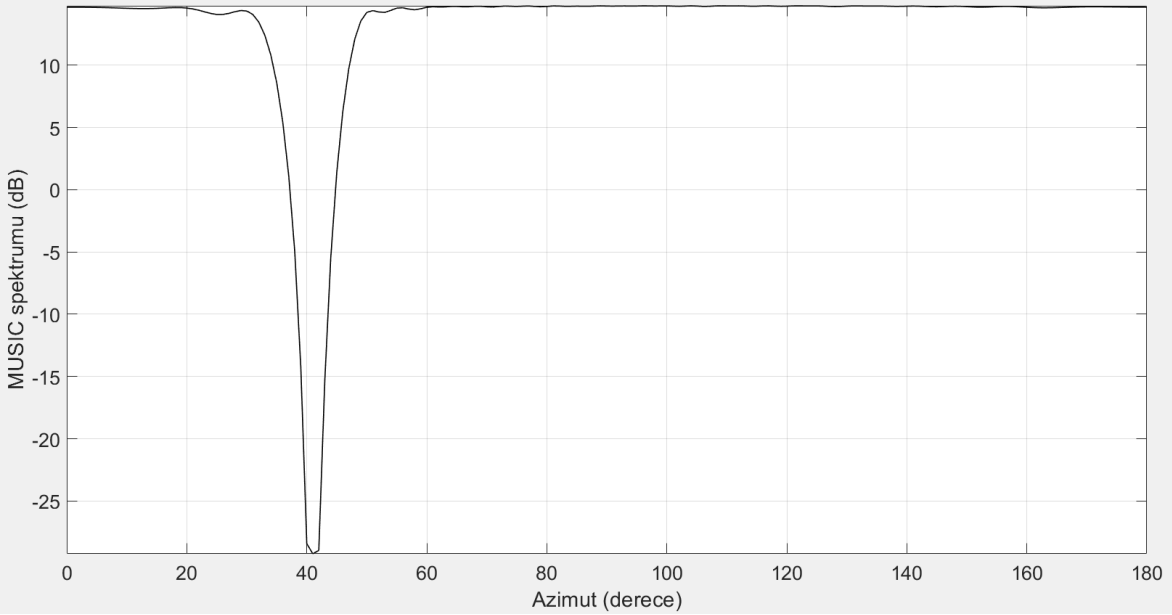
Şekil 6.6. 5°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 45°, 50°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



Şekil 6.7. 3°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 43°, 46°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



Şekil 6.8. 2°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 42°, 44°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



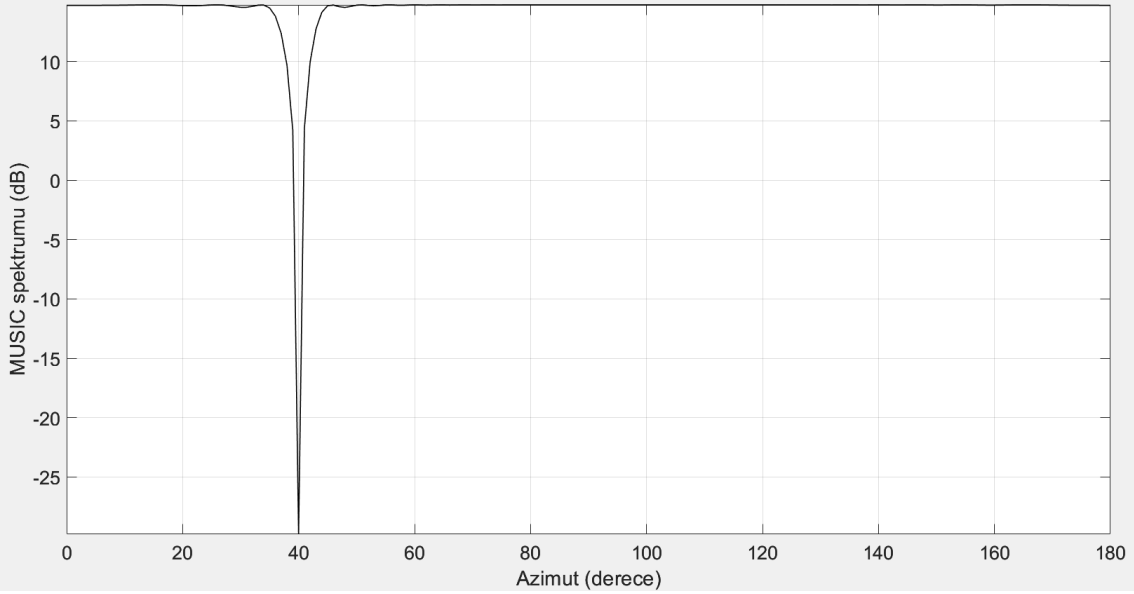
Şekil 6.9. 1°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 41°, 42°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi

Elde edilen sonuç grafiğinde, gelen sinyaller arasında bulunan açı farkının azalması ile algoritmanın sinyal geliş açısı kestiriminde zorluk yaşamaya başladığı görülmektedir. Gelen sinyaller arasında 10°'lik fark olduğunda sinyal geliş açısı kestiriminin yapıldığı Şekil 6.5'te görülmektedir. Ancak Şekil 6.6Şekil 6.6 ve sonrasında gelen sinyaller arasındaki açı farkının azalması ile birlikte sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğü ve Şekil 6.9'da 1° açı farkı ile gelen üç sinyal arasında algoritmanın ayrım yapmakta zorlandığı görülmüştür.

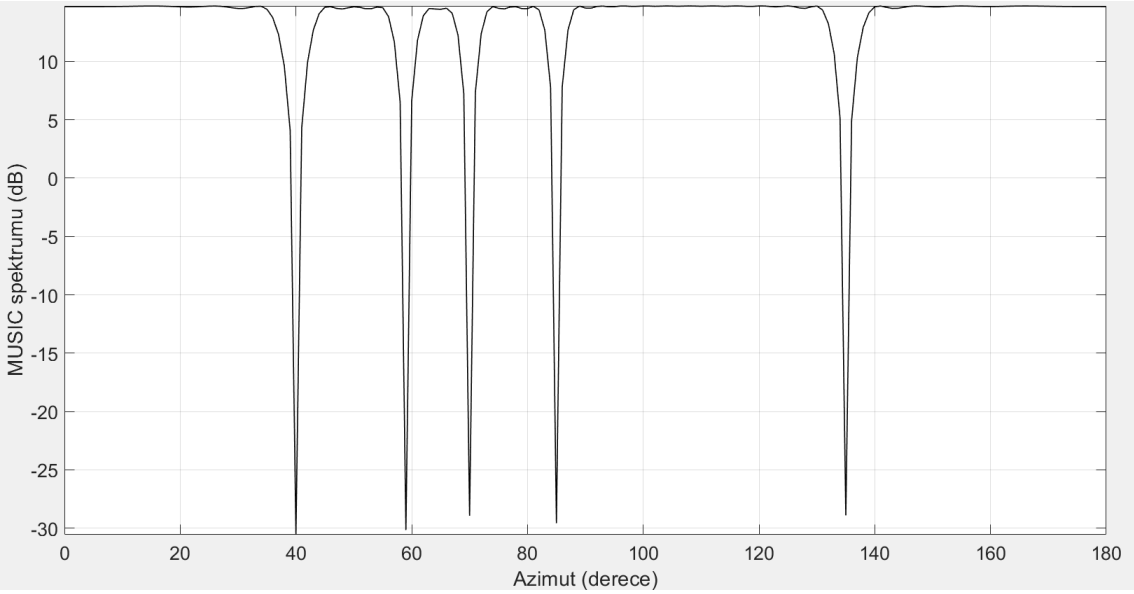
6.1.6. Düzgün doğrusal anten dizilerinde gelen sinyal sayısının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Sisteme gelen sinyal sayısının MUSIC algoritması çalışma performansına etkisini incelemek üzere sırasıyla 1, 5, 10, 12 ve 15 adet gelen sinyal için düzgün doğrusal anten dizisinde sinyal geliş açısı kestirim sonuçları Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 ile paylaşılmıştır. N=30 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için sinyal geliş açısı kestirimi yapılmıştır. İlk aşamada 1 sinyal kaynağı 40°'lik açı ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. İkinci aşamada 5 adet sinyal kaynağı [40°, 59°, 70°, 85°, 135°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Ardından 10 adet sinyal kaynağı [13°, 30°, 40°, 59°, 78°, 85°, 110°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Sonrasında 12 adet sinyal kaynağı [13°, 35°, 48°, 59°, 70°, 78°, 85°, 100°, 120°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır.

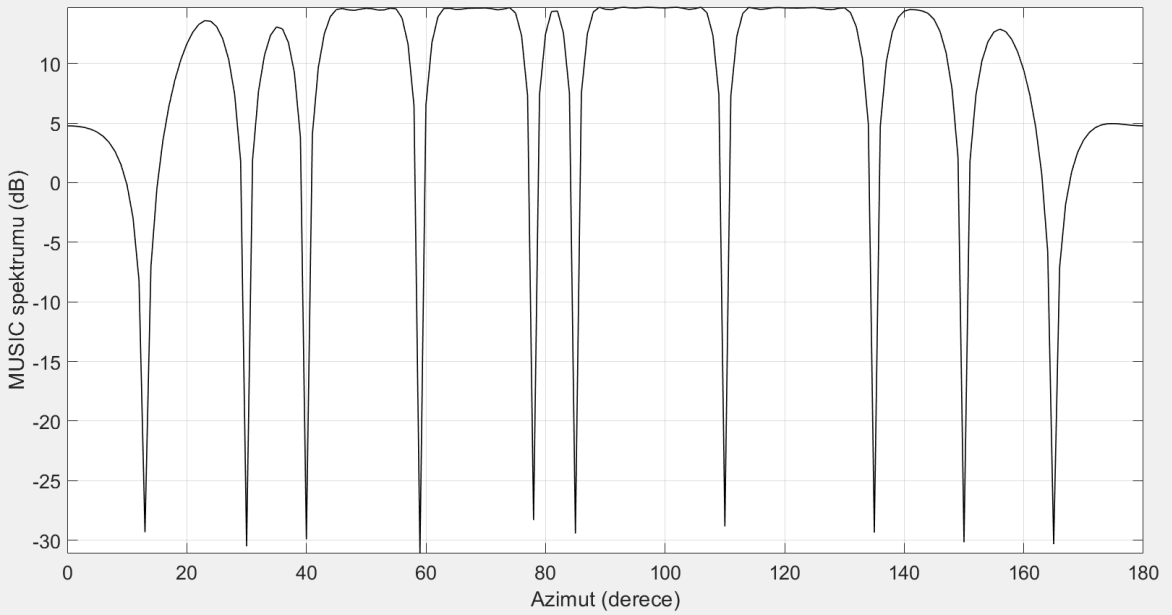
Son olarak 15 adet sinyal kaynağı [13°, 20°, 30°, 40°, 48°, 59°, 70°, 78°, 85°, 97°, 110°, 120°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır.



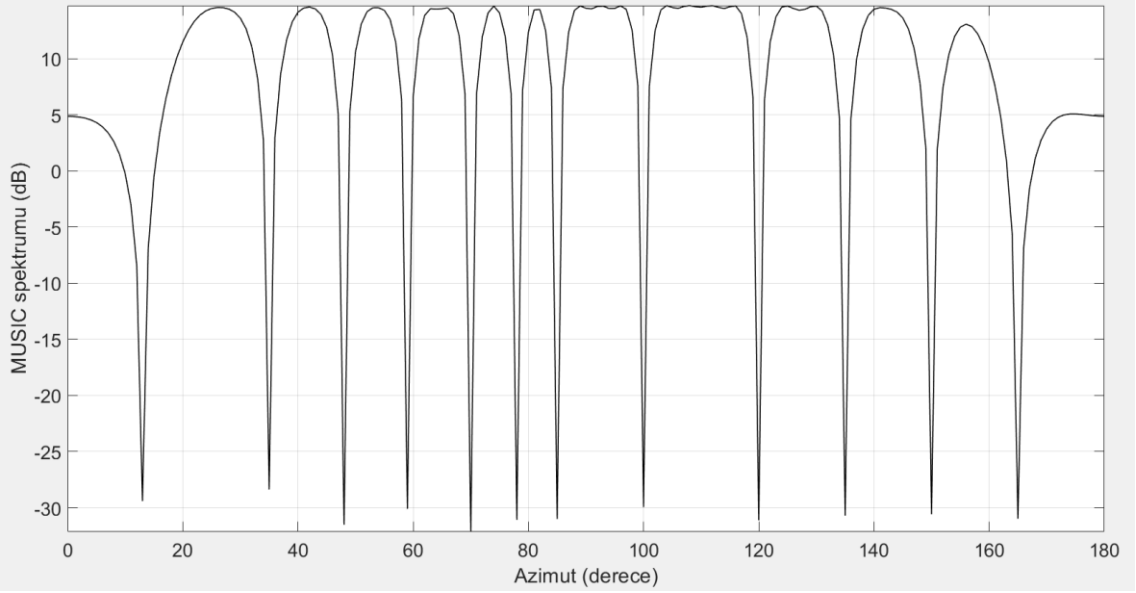
Şekil 6.10. Bir adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açısı kestirimi



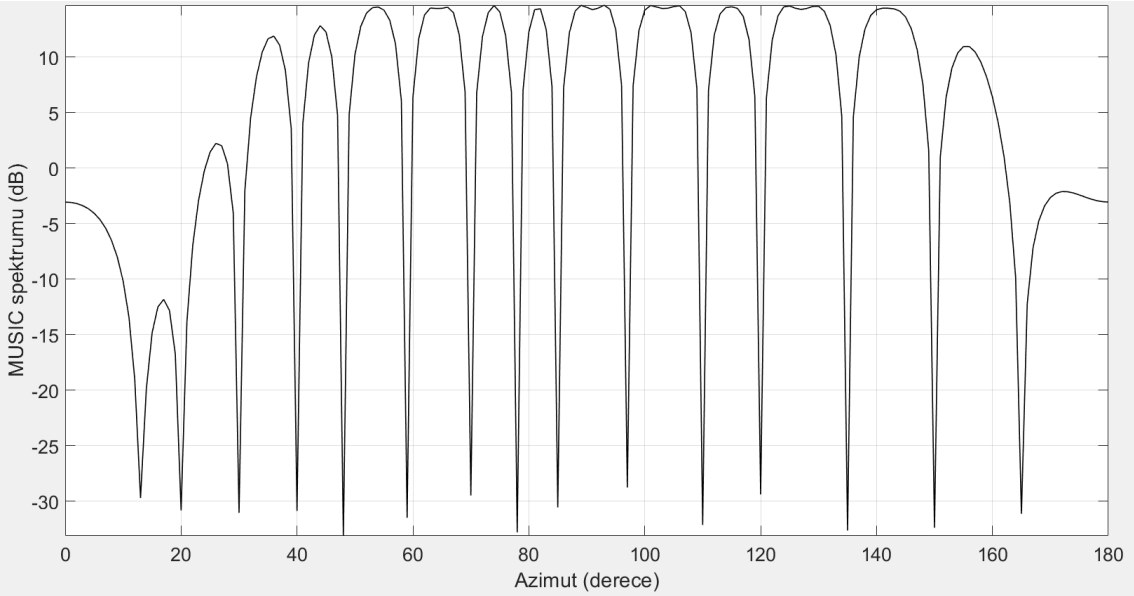
Şekil 6.11. Beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.12. On adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.13. On iki adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.14. On beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi

Anten dizisine gelen sinyallerin sayısı değiştirilerek beş farklı senaryo için sinyal geliş açısı kestiriminde MUSIC algoritmasının performans sonuçları paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, gelen sinyal sayısı artışına bağlı olarak MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestirim performansında sinyaller arasında bulunan mesafenin azalması sonucunda, birbirine yakın gelen bu sinyaller sebebi ile algoritma performansının düştüğü görülmektedir. Bu duruma Şekil 6.14'te 13° ve 20° ile gelen sinyaller örnek gösterilebilir.

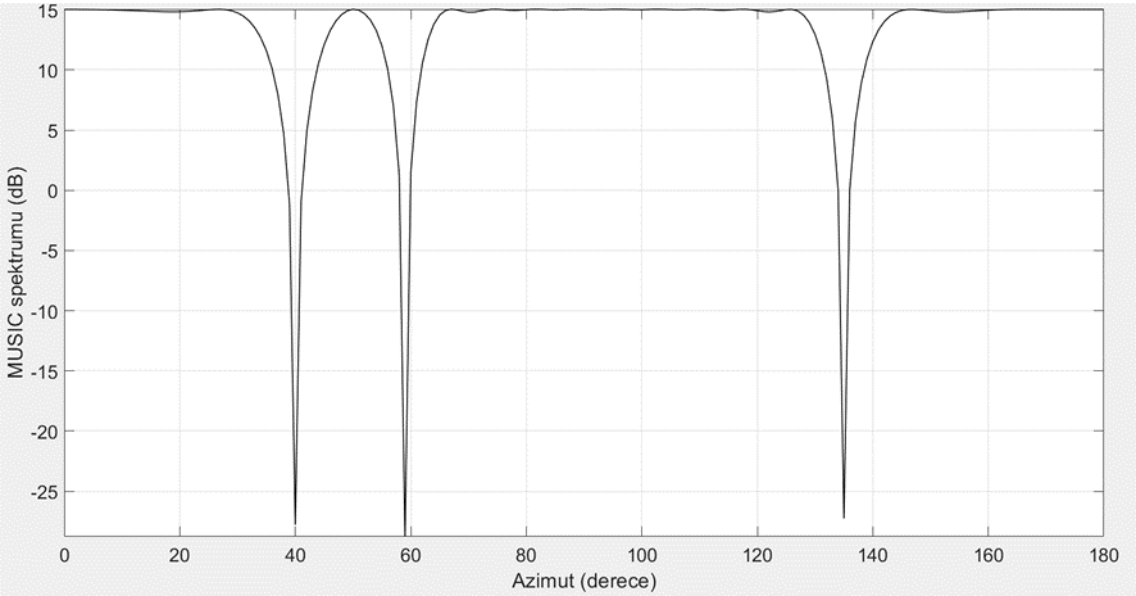
6.2. Düzgün Düzlemsel Anten Dizileri

Bu bölümde iki boyutlu sistemlerden biri olan düzgün düzlemsel anten dizisi için beş farklı senaryo uygulanarak anten dizisine gelen sinyallerin kestiriminde MUSIC algoritmasının performans sonuçları paylaşılmıştır. Anten dizisinin eleman sayısı, anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyaller arasındaki açı farkı ve gelen sinyallerin sayısı sırasıyla değiştirilerek MUSIC algoritmasının performansı beş farklı durum için grafikler yardımı ile paylaşılmıştır.

6.2.1. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirimi

$M \times N = 16 \times 2$ adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için düzgün düzlemsel anten dizisinde MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı

kestirimi ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda elde edilen sonuç grafiği Şekil 6.15'te gösterilmektedir.

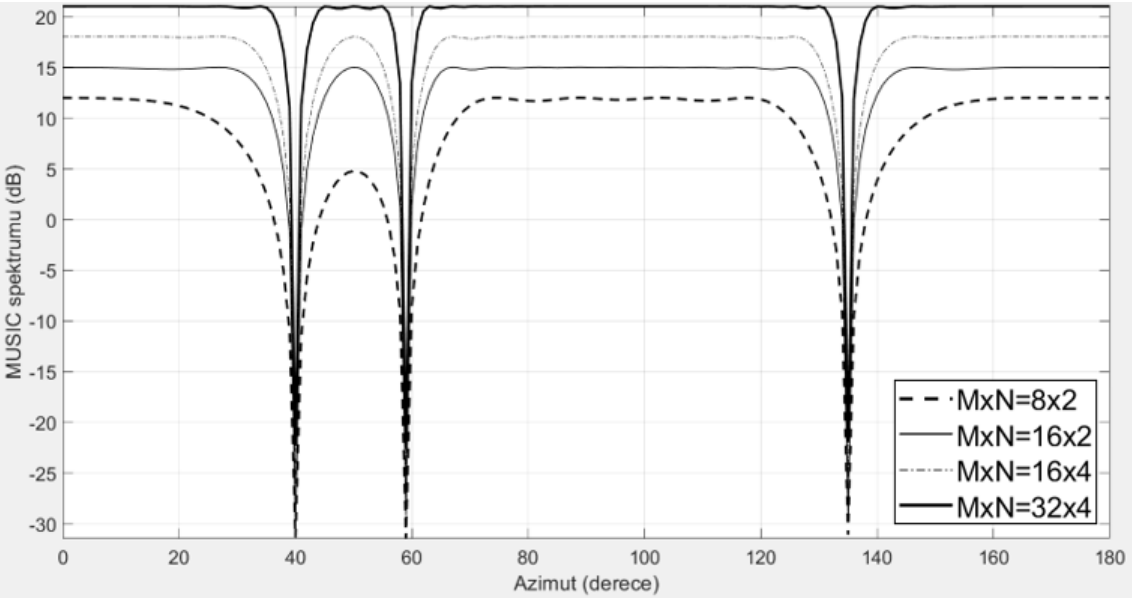


Şekil 6.15. Düzgün düzlemsel anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Düzgün düzlemsel anten dizisi için Şekil 6.15'te gösterildiği gibi elde edilen keskin tepe noktalarından MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestiriminde doğrusal anten dizisine benzer şekilde iki boyutlu ortamlarda da başarılı olduğu görülmüştür.

6.2.2. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde anten elemanı sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Düzgün düzlemsel anten dizisinde bulunan anten elemanı sayısının MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak anten sayısı $M \times N = 8 \text{ x } 2$, $M \times N = 16 \text{ x } 2$, $M \times N = 16 \times 4$ ve $M \times N = 32 \text{ x } 4$ olmak üzere dört farklı durum incelenmiştir. L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda dört farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.16'da paylaşılmıştır.

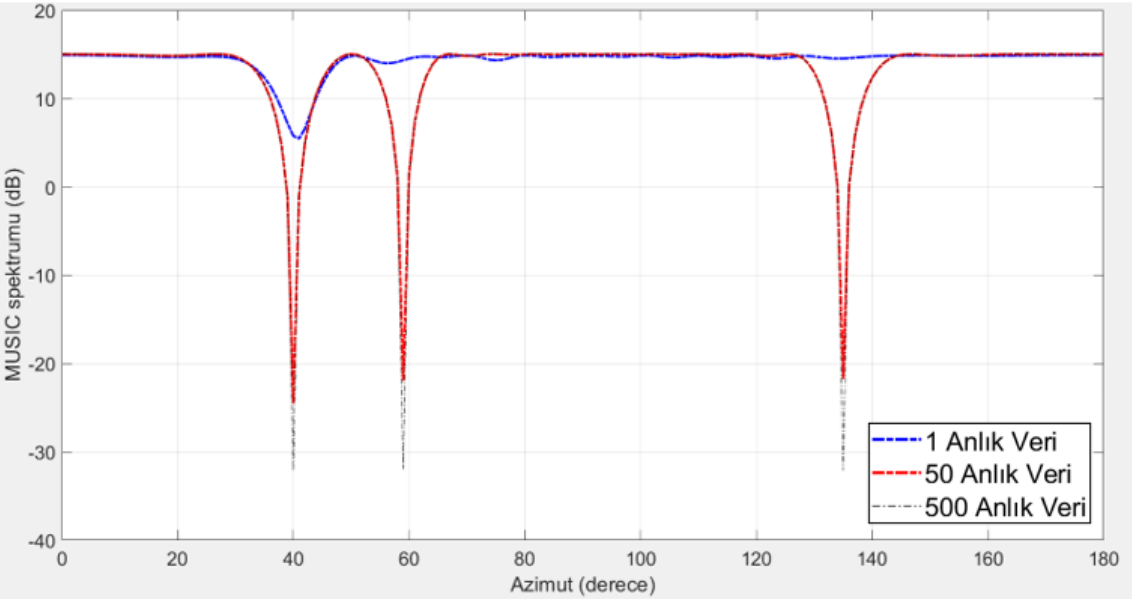


Şekil 6.16. Anten sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Düzgün düzlemsel anten dizisinde; anten sayısının artışına bağlı olarak MUSIC algoritmasında oluşan keskin tepe değerlerinden sinyal geliş açısı kestirim performansının giderek arttığı görülmektedir. Ancak düzgün doğrusal anten dizisinde olduğu gibi burada da anten sayısı artışının pratikte maliyet ve hesaplama hızını olumsuz yönde etkileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla sinyal geliş açısı kestirim doğruluğunun sağlanması koşuluyla, kaynak israfını en aza indirecek ve algoritma hızını düşürmeyecek sayıda eleman sayısı seçilmelidir [19].

6.2.3. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde anlık veri sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Anlık veri sayısı değişiminin düzlemsel anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere dizideki anten elemanı sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak anlık veri sayısı L=1, L=50, L=500 olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. $M \times N = 32$ adet anten ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda üç farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.17'de paylaşılmıştır.

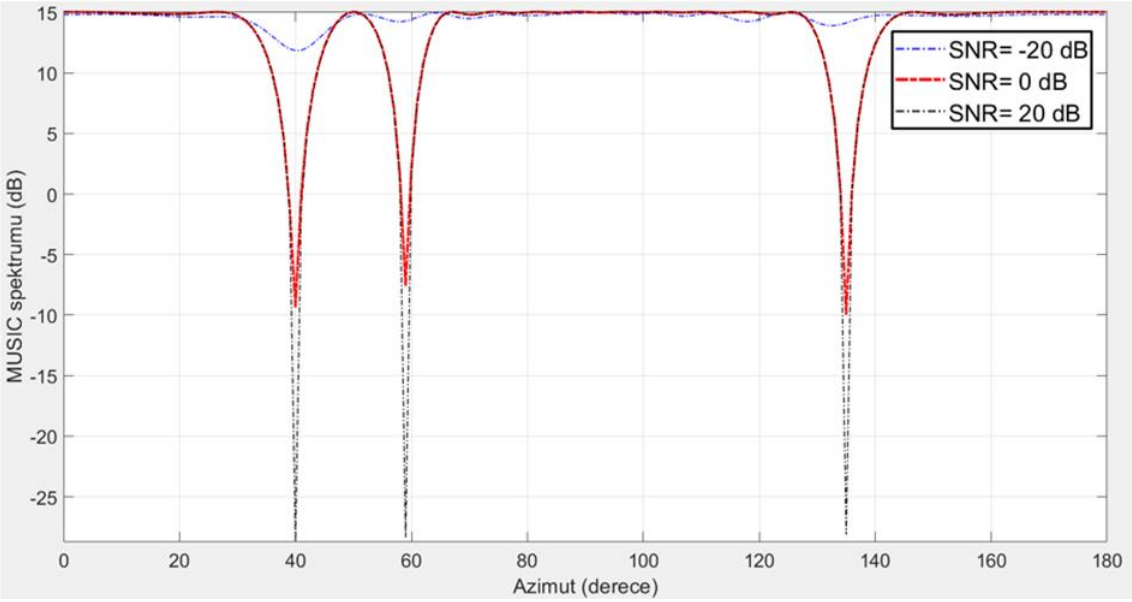


Şekil 6.17. Anlık veri sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Anlık veri sayısı artışına bağlı olarak tepe değeri keskinliğinin giderek arttığı Şekil 6.17'den görülmektedir. Dolayısıyla sinyal geliş açısı kestiriminde daha iyi sonuçlar elde etmek için anlık veri sayısının arttırılması düşünülebilir. Ancak bu alanda yapılmış olan farklı çalışmaların incelenmesi ile birlikte pratikte, anlık veri sayısındaki artışın maliyeti, hesaplama süresini ve sistem hızını etkileyeceği görülmüştür [19].

6.2.4. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde sinyal gürültü oranı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Sinyal gürültü oranı değişiminin düzgün düzlemsel bir anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere anten elemanı sayısı, alınan anlık veri sayısı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak sinyal gürültü oranı 20 dB, 0 dB, ve -20 dB olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. $M \times N = 32$ adet anten ve L=200 adet anlık veri ile sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda üç farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.18'de paylaşılmıştır.

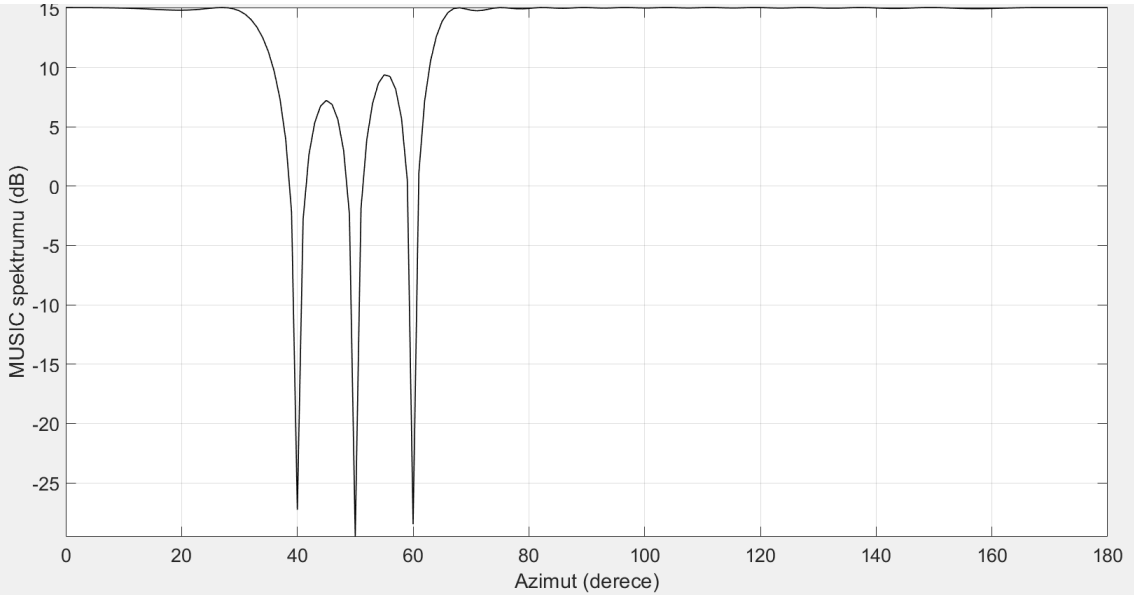


Şekil 6.18. Sinyal gürültü oranı değişimine bağlı anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

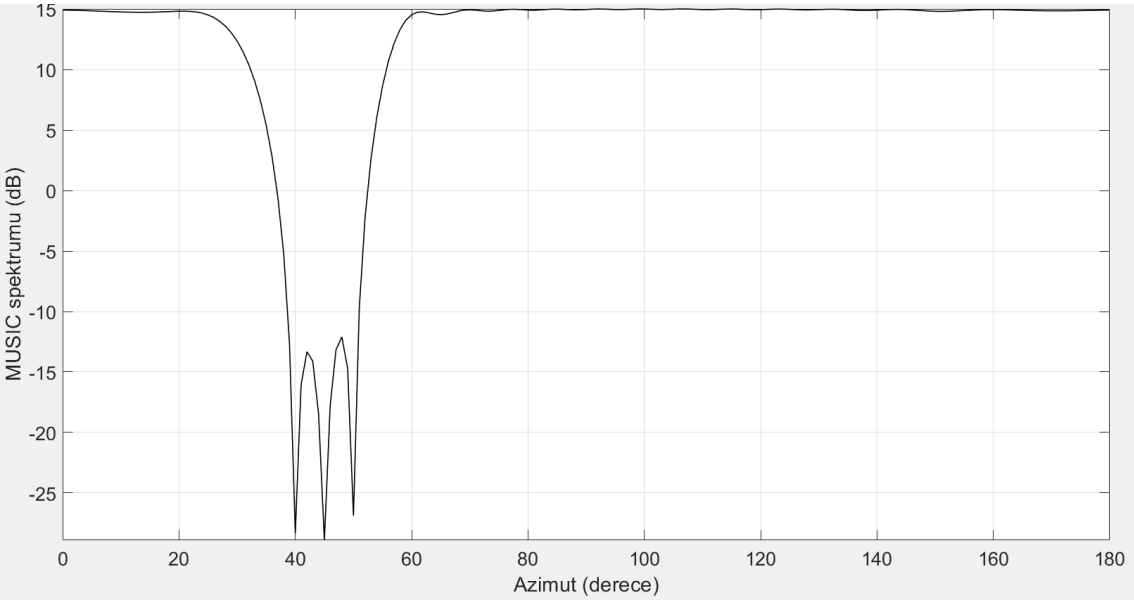
Düzgün düzlemsel anten dizisi sonuç grafiğinde, sinyal gürültü oranı 0 dB ve 20 dB iken keskin tepe noktaları ile sinyal geliş açısı kestiriminin yapıldığı görülmektedir. Sinyal gürültü oranı -20 dB olduğunda ise algoritmanın gelen sinyalleri tahmin etmekte zorluk yaşamaya başladığı görülmektedir. Sonuçta sinyal gürültü oranındaki artışın MUSIC algoritması sinyal geliş açısı kestirim performansını olumlu etkilediği görülmüştür.

6.2.5. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde gelen sinyaller arasındaki açı farkının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

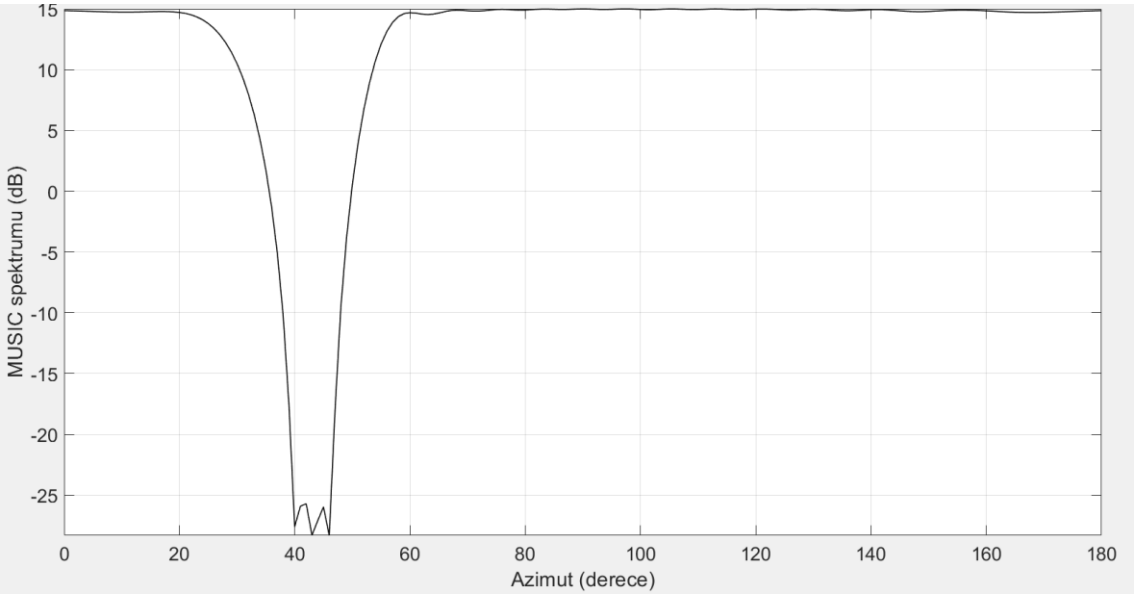
Sisteme gelen sinyallerin geliş açılarının düzgün düzlemsel anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini incelemek üzere üç sinyal sırasıyla 10°, 5°, 3°, 2° ve 1°'lik farklar ile anten dizisine ışıma yapmıştır. $M \times N = 16$ x 2 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için sinyal geliş açıları [40°, 50°, 60°], [45°, 50°, 55°], [40°, 43°, 46°], [40°, 42°, 44°] ve [40°, 41°, 42°] olduğunda MUSIC algoritmasının sonuç grafikleri Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23 ile paylaşılmıştır.



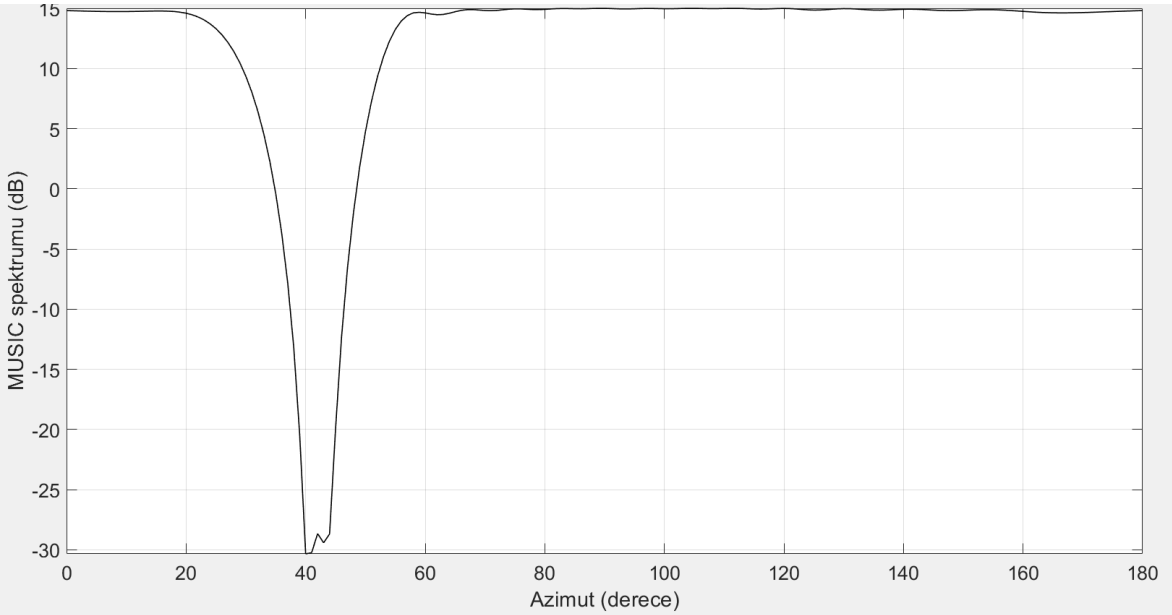
Şekil 6.19. 10°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 50°, 60°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



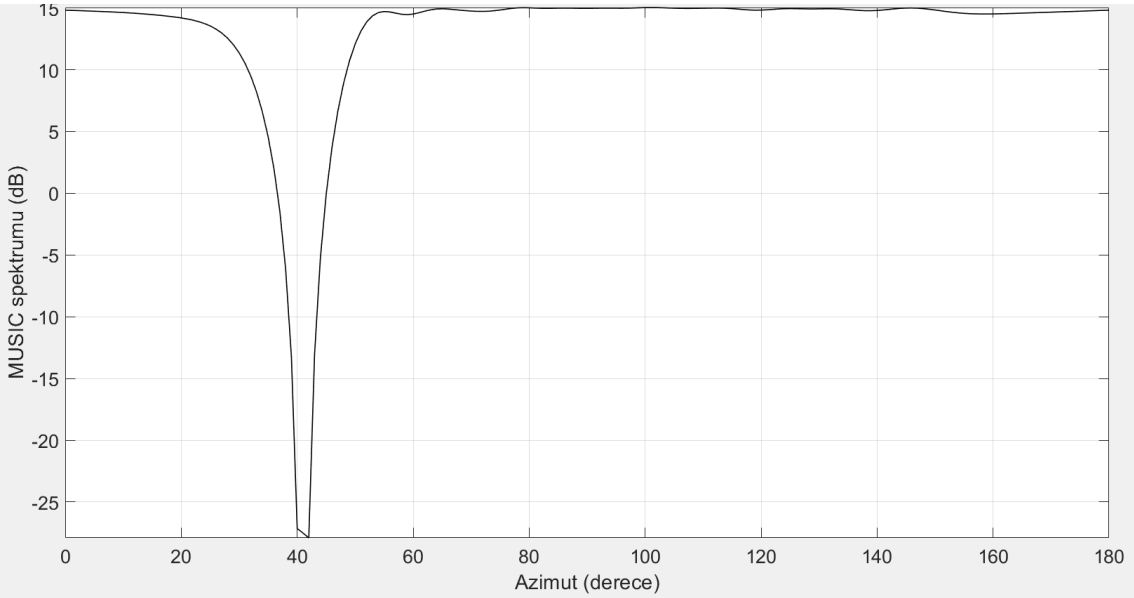
Şekil 6.20. 5°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 45°, 50°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



Şekil 6.21. 3°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 43°, 46°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



Şekil 6.22. 2°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 42°, 44°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



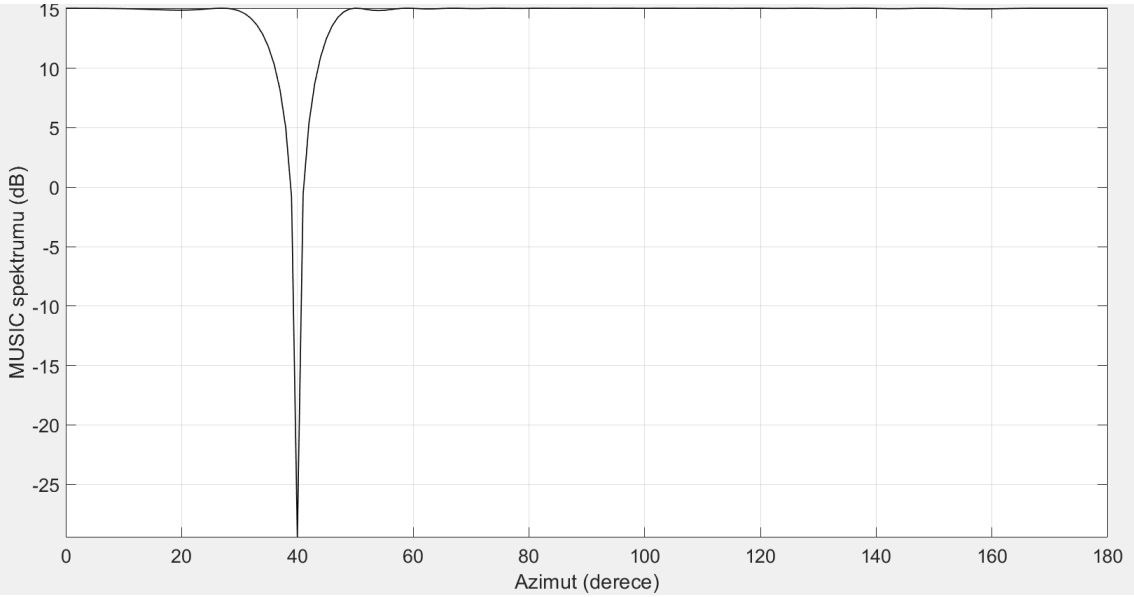
Şekil 6.23. 1°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 41°, 42°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi

Elde edilen sonuçlar, düzgün düzlemsel anten dizileri için sinyal geliş açıları arasında bulunan farkın azalması ile sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğünü göstermektedir. Gelen sinyaller arasında 10°'lik fark olduğunda sinyal geliş açısı kestiriminin yapıldığı Şekil 6.19'da görülmektedir. Ancak Şekil 6.20 ve sonrasında sinyaller arasındaki açı farkının azalması ile sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğü ve Şekil 6.23'te 1° açı farkı ile gelen üç sinyal arasında algoritmanın ayrım yapmakta zorlandığı görülmüştür.

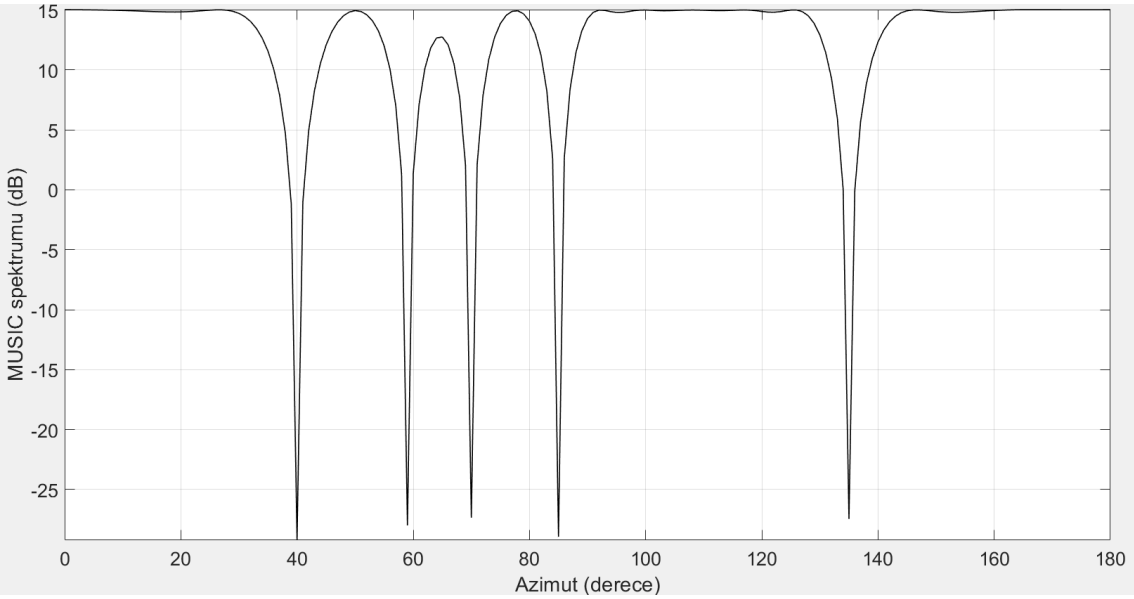
6.2.6. Düzgün düzlemsel anten dizilerinde gelen sinyal sayısının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Anten dizisine gelen sinyallerin sayısının düzgün düzlemsel anten dizilerinde MUSIC algoritmasına etkisini incelemek üzere sırasıyla 1, 5, 10, 12 ve 15 adet gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi sonuçları Şekil 6.24, Şekil 6.25, Şekil 6.26, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28 ile paylaşılmıştır. $M \times N = 32$ adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB sinyal gürültü oranı için sinyal geliş açısı kestirimi yapılmıştır. İlk aşamada 1 sinyal kaynağı 40°'lik açı ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. İkinci aşamada 5 adet sinyal kaynağı [40°, 59°, 70°, 85°, 135°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Ardından 10 adet sinyal kaynağı [13°, 30°, 40°, 59°, 78°, 85°, 110°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Sonrasında 12 adet sinyal kaynağı [13°, 35°, 48°, 59°, 70°, 78°, 85°, 100°, 120°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır.

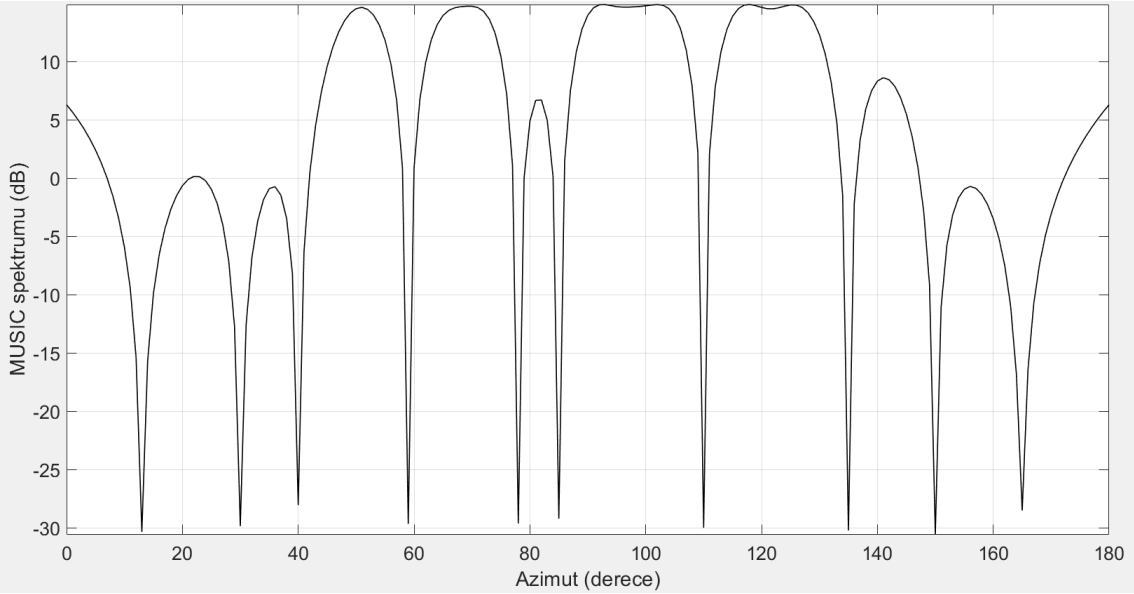
Son olarak 15 adet sinyal kaynağı [13°, 20°, 30°, 40°, 48°, 59°, 70°, 78°, 85°, 97°, 110°, 120°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır.



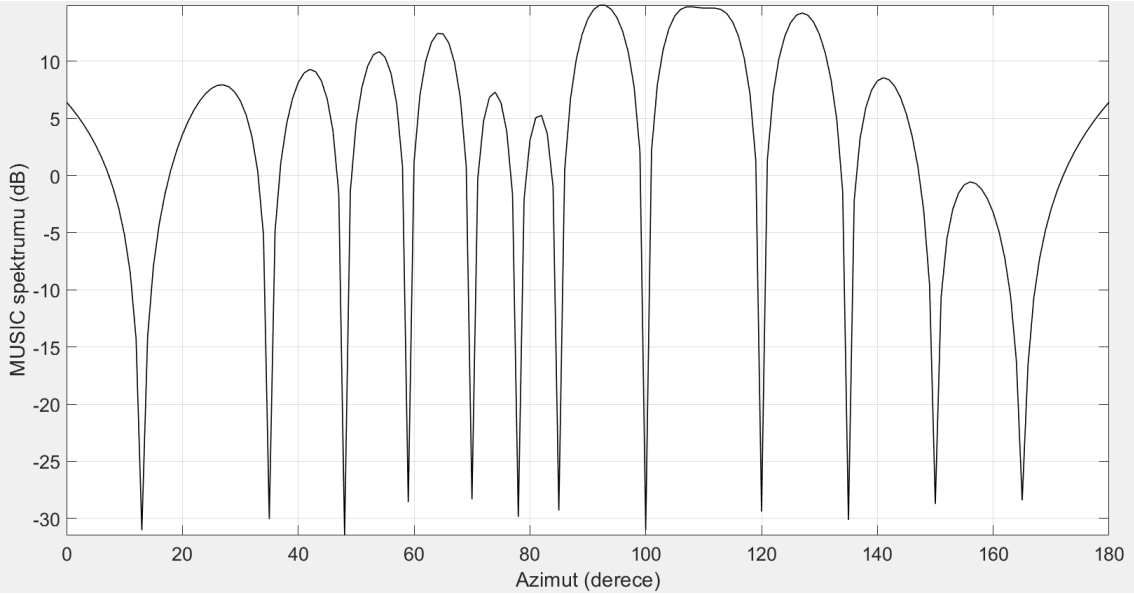
Şekil 6.24. Bir adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açısı kestirimi



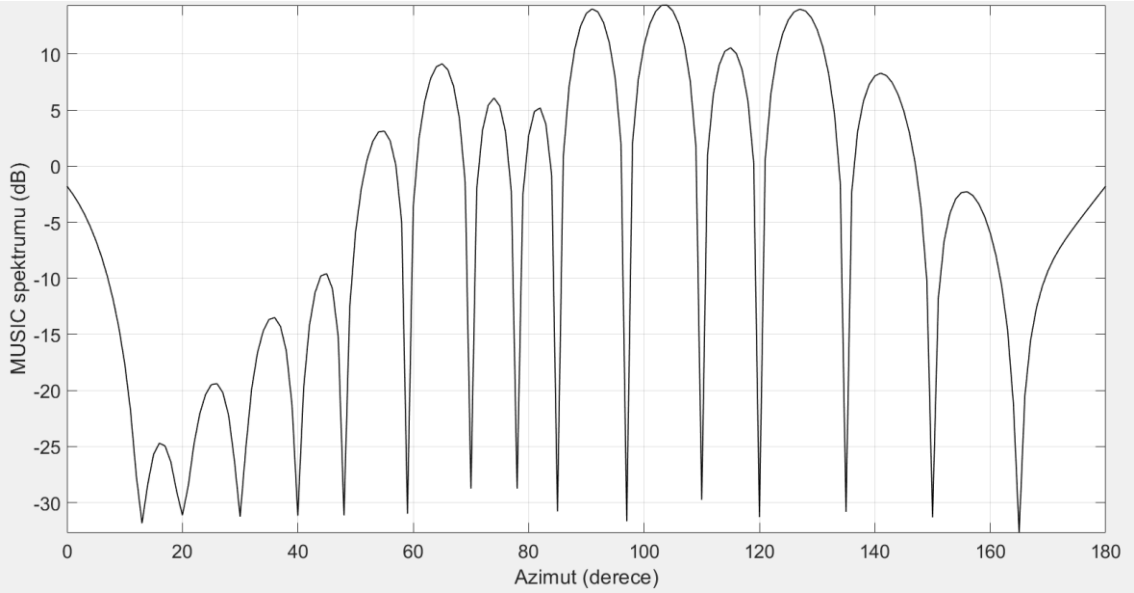
Şekil 6.25. Beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.26. On adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.27. On iki adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.28. On beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gelen sinyal sayısı artışına bağlı olarak MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestirim performansında sinyaller arasında bulunan mesafenin azalması sonucunda, birbirine yakın gelen bu sinyaller sebebi ile, algoritma performansının düştüğü görülmektedir. Bu duruma Şekil 6.28'de 13°, 20°, 30° ve 40° ile gelen sinyaller örnek gösterilebilir.

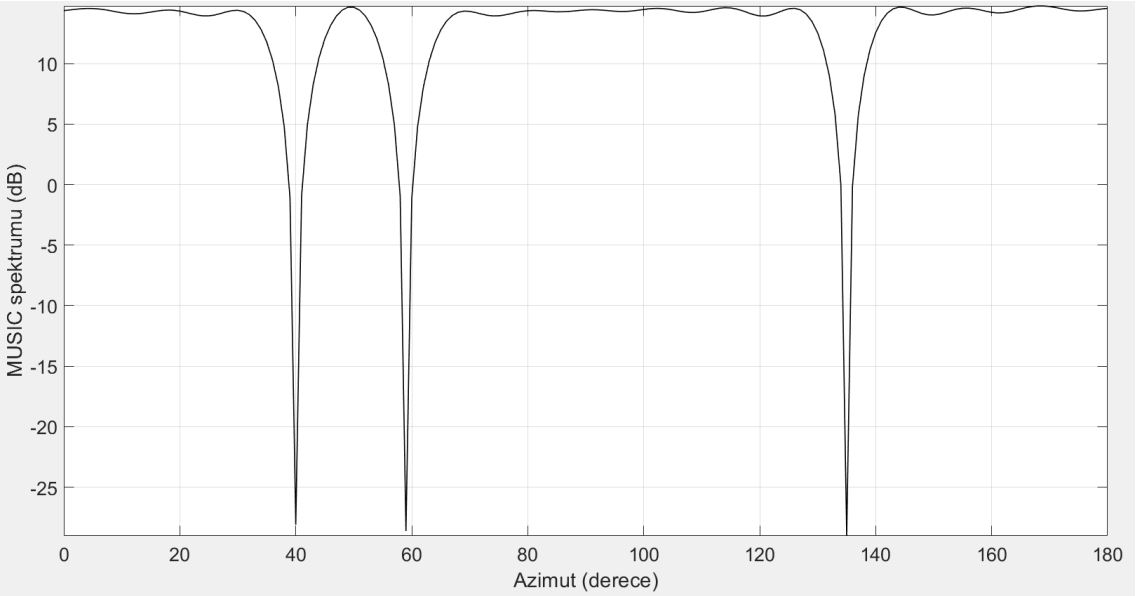
6.3. Düzgün Dairesel Anten Dizileri

Bu bölümde iki boyutlu sistemlerden bir diğeri olan düzgün dairesel anten dizisi için beş farklı senaryo uygulanarak anten dizisine gelen sinyallerin kestiriminde MUSIC algoritmasının performans sonuçları paylaşılmıştır. Anten elemanı sayısı, anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyaller arasındaki açı farkı ve gelen sinyallerin sayısı değiştirilerek MUSIC algoritmasının performansı beş farklı durum için grafikler yardımıyla paylaşılmıştır.

6.3.1. Düzgün dairesel anten dizilerinde MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısının kestirimi

Toplam N=30 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için düzgün dairesel anten dizisinde MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestirimi ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda elde

edilen sonuç grafiği Şekil 6.29'da gösterilmektedir.

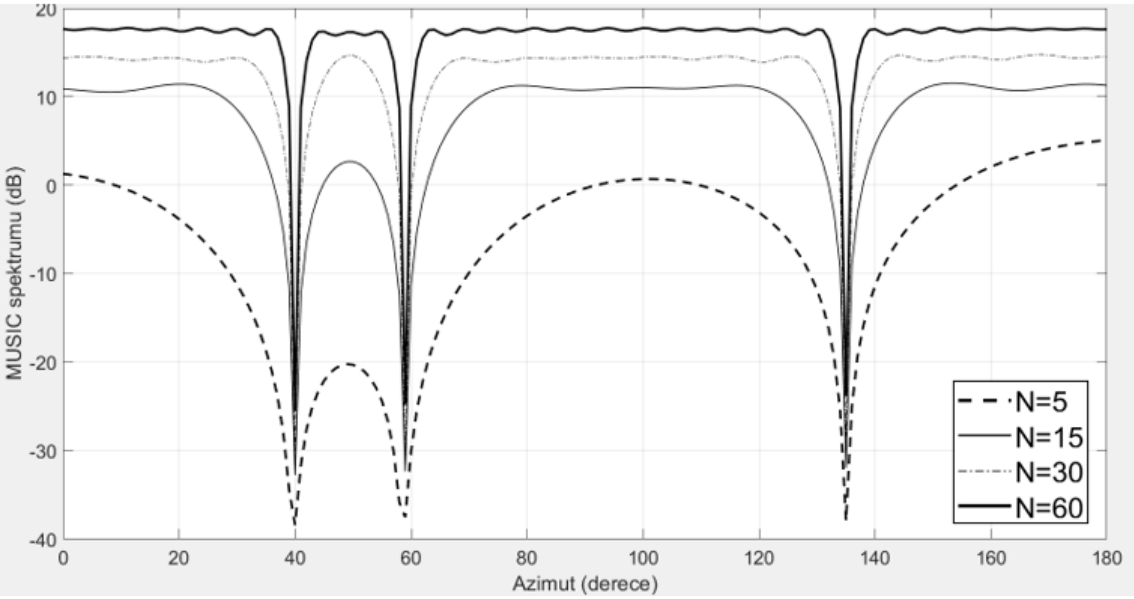


Şekil 6.29. Düzgün dairesel anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Düzgün dairesel anten dizisi için Şekil 6.29'da gösterildiği gibi elde edilen keskin tepe noktalarından MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestiriminde başarılı olduğu görülmüştür.

6.3.2. Düzgün dairesel anten dizilerinde anten elemanı sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Düzgün dairesel anten dizisinde bulunan anten elemanı sayısının MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak anten sayısı N=5, N=15, N=30 ve N=60 olmak üzere dört farklı durum incelenmiştir. L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda dört farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.30'da gösterilmiştir.

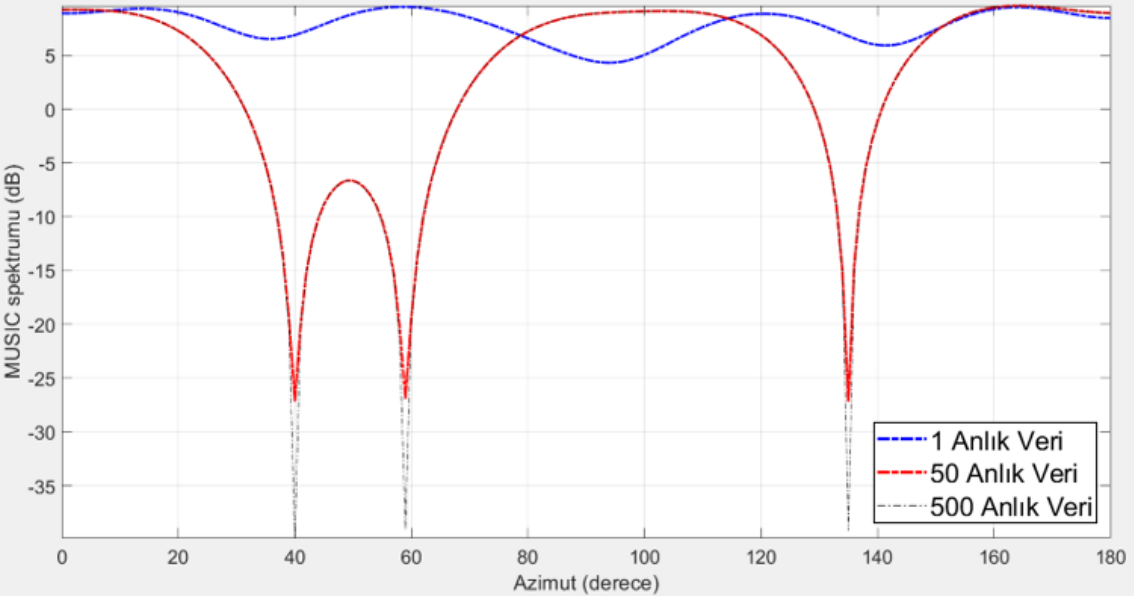


Şekil 6.30. Anten sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Düzgün dairesel anten dizisinde; anten sayısının artışına bağlı olarak MUSIC algoritmasında elde edilen keskin tepe değerleriyle sinyal geliş açısı kestirim performansının giderek arttığı görülmektedir. Ancak diğer iki dizi konfigürasyonunda olduğu gibi anten sayısı artışının pratikte maliyet ve hesaplama hızını olumsuz yönde etkileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla, yapılan uygulamaya bağlı olarak, sinyal geliş açısı kestirim doğruluğunun sağlanması koşuluyla, kaynak israfını en aza indirecek ve algoritma hızını düşürmeyecek sayıda anten elemanı sayısı seçilmelidir [19].

6.3.3. Düzgün dairesel anten dizilerinde anlık veri sayısı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Anlık veri sayısı değişiminin düzgün dairesel anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere anten elemanı sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak anlık veri sayısı L=1, L=50, L=500 olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. N=30 adet anten ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda üç farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.31'de paylaşılmıştır.

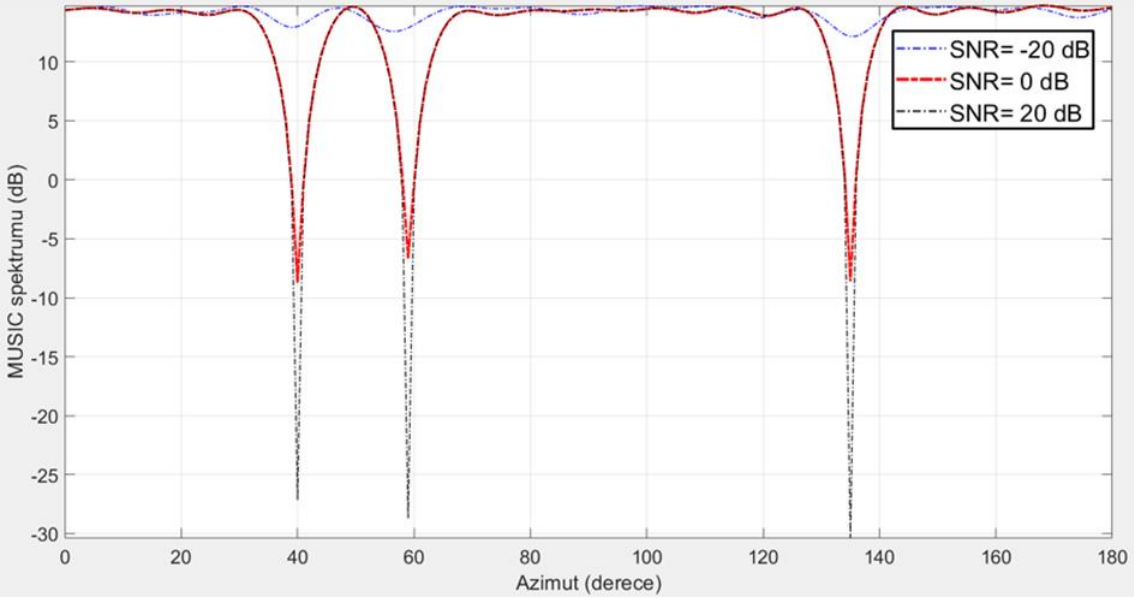


Şekil 6.31. Anlık veri sayısına bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

Düzgün dairesel anten dizisinde, anlık veri sayısı artışına bağlı olarak tepe değeri keskinliğinin giderek arttığı Şekil 6.31'den görülmektedir. Ancak bu alanda yapılmış olan farklı çalışmaların incelenmesi ile birlikte pratikte, anlık veri sayısındaki artışın maliyeti, hesaplama süresini ve sistem hızını etkileyeceği görülmüştür [19].

6.3.4. Düzgün dairesel anten dizilerinde sinyal gürültü oranı değişiminin sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Sinyal gürültü oranı değişiminiz düzgün dairesel bir anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini göstermek üzere dizideki anten elemanı sayısı, alınan anlık veri sayısı, gelen sinyallerin açısı ve gelen sinyallerin sayısı sabit tutularak sinyal gürültü oranı -20 dB, 0 dB ve 20 dB olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. N=30 adet anten ve L=200 adet anlık veri ile sinyal geliş açıları [40°, 59°, 135°] olduğunda üç farklı durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.32'de paylaşılmıştır.

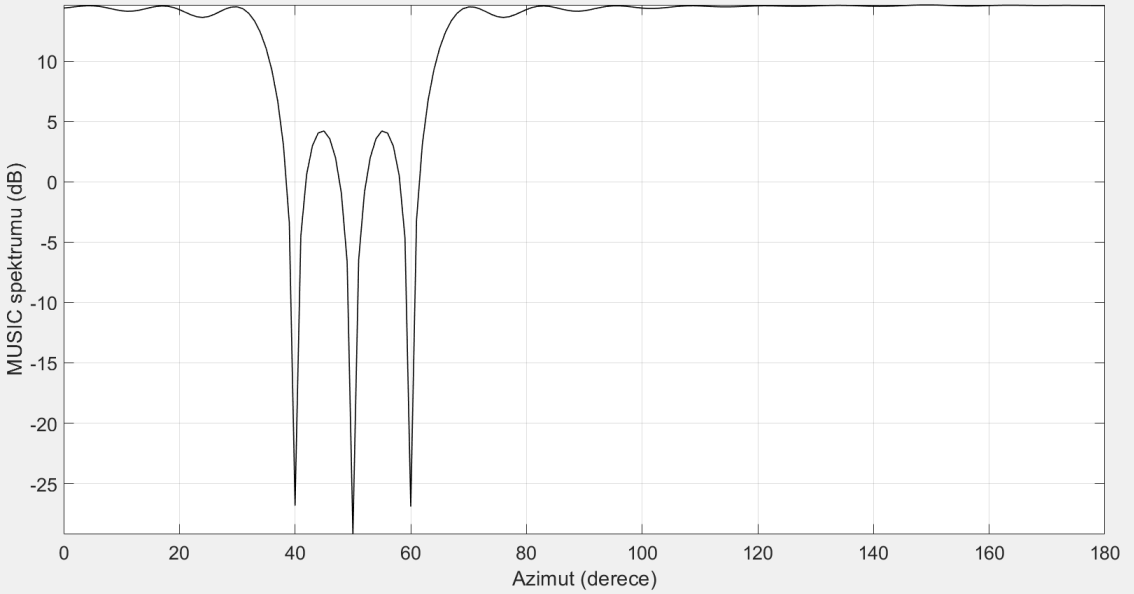


Şekil 6.32. Sinyal gürültü oranı değişimine bağlı olarak anten dizisine [40°, 59°, 135°] ile gelen sinyaller için sinyal geliş açısı kestirimi

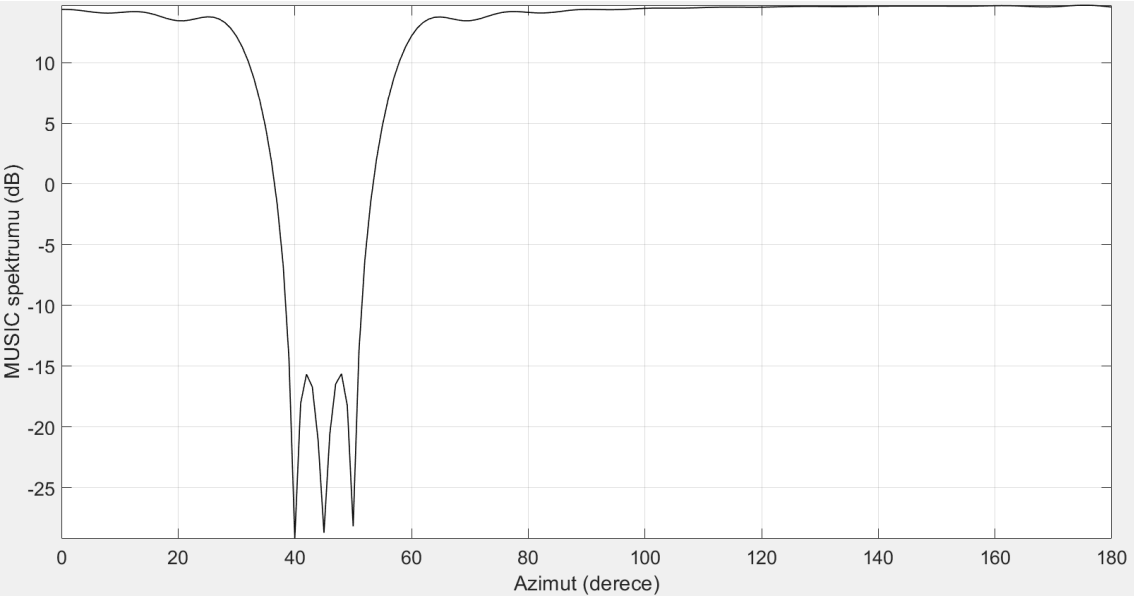
Düzgün dairesel anten dizisi sonuç grafiğinde, sinyal gürültü oranı 0 dB ve 20 dB iken keskin tepe noktaları ile sinyal geliş açısı kestiriminin yapıldığı görülmektedir. Sinyal gürültü oranı -20 dB olduğunda ise algoritmanın gelen sinyalleri tahmin etmekte zorluk yaşamaya başladığı görülmektedir. Sonuçta sinyal gürültü oranındaki artışın MUSIC algoritması sinyal geliş açısı kestirim performansını olumlu etkilediği görülmüştür.

6.3.5. Düzgün dairesel anten dizilerinde gelen sinyaller arasındaki açı farkının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

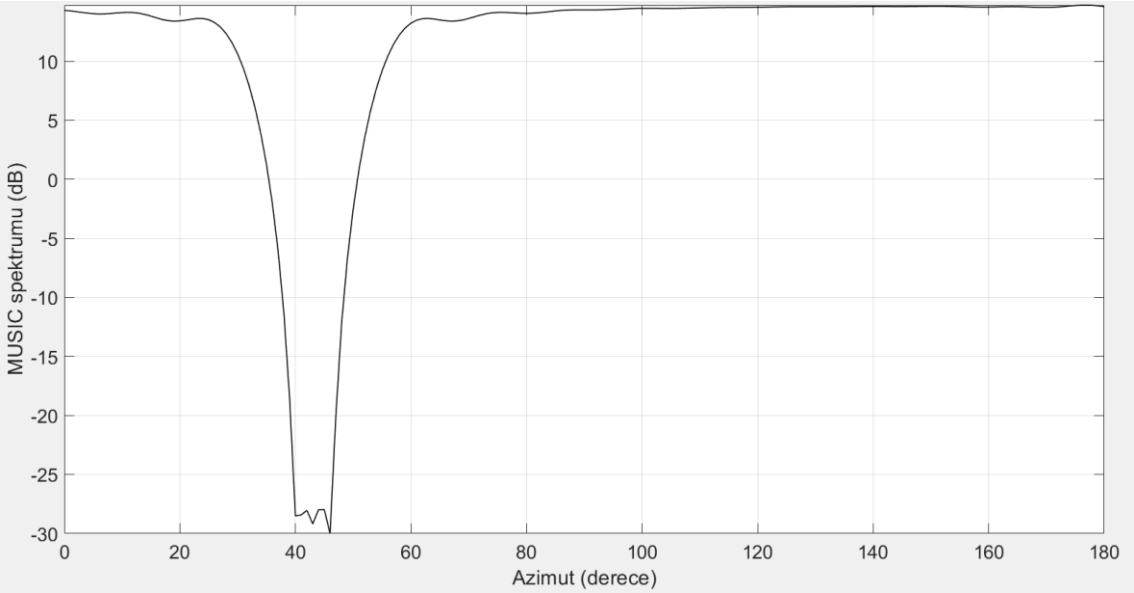
Sisteme gelen sinyallerin geliş açılarının düzgün dairesel anten dizisinde MUSIC algoritmasına etkisini incelemek üzere üç sinyal sırasıyla 10°, 5°, 3°, 2° ve 1°'lik farklar ile anten dizisine ışıma yapmıştır. N=30 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı ile sinyal geliş açıları [40°, 50°, 60°], [45°, 55°, 60°], [40°, 43°, 46°], [40°, 42°, 44°] ve [40°, 41°, 42°] olduğunda MUSIC algoritmasının sonuç grafikleri Şekil 6.33, Şekil 6.34, Şekil 6.35, Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'de paylaşılmıştır.



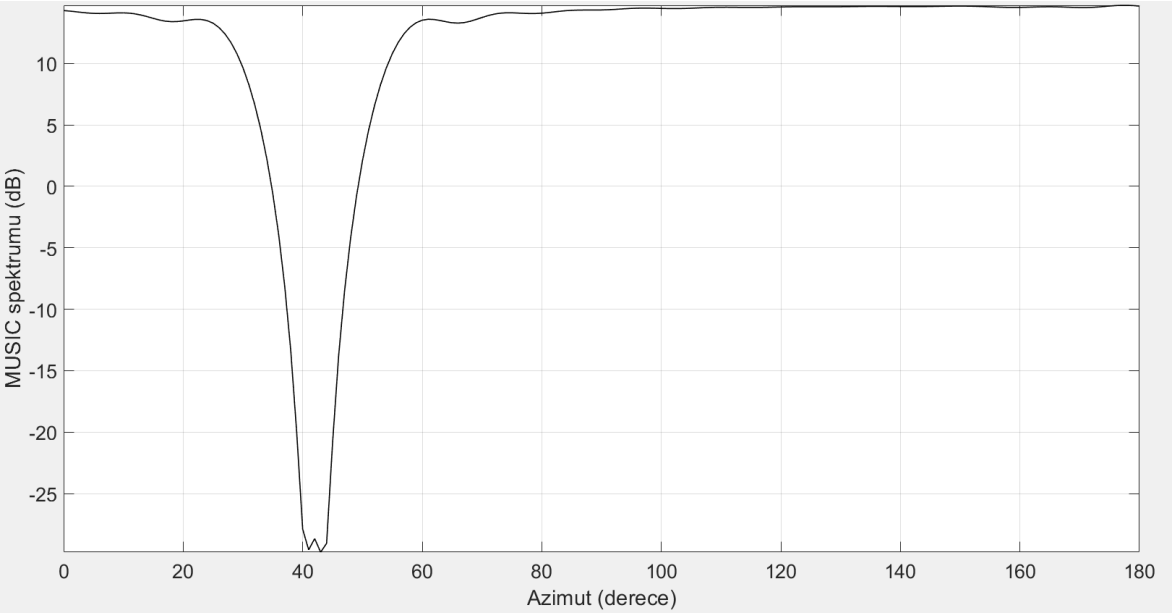
Şekil 6.33. 10°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 50°, 60°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



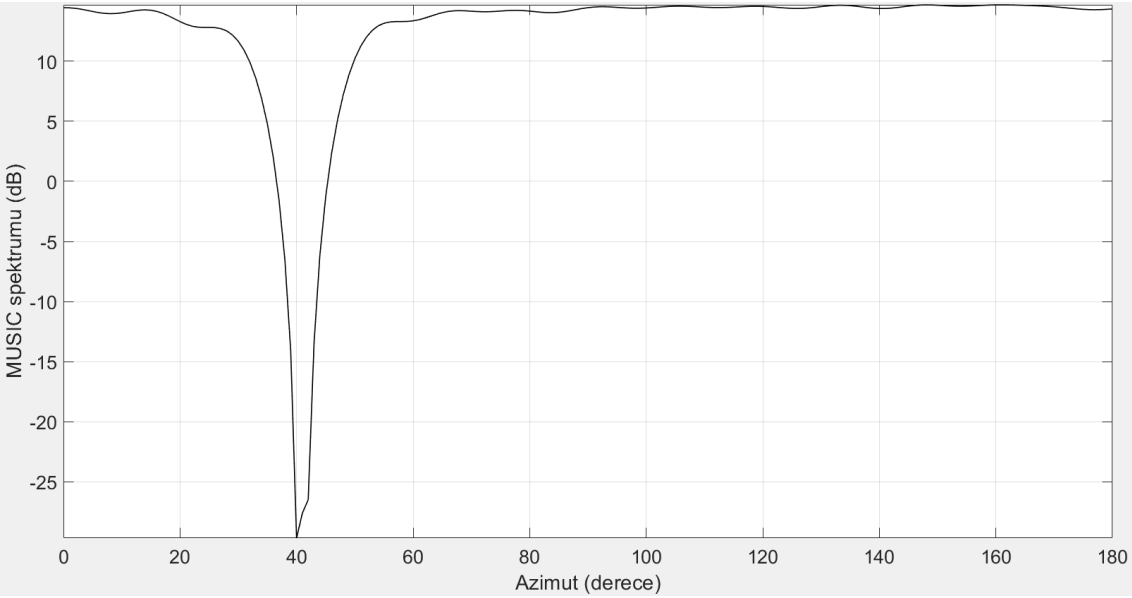
Şekil 6.34. 5°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 45°, 50°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



Şekil 6.35. 3°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 43°, 46°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



Şekil 6.36. 2°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 42°, 44°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi



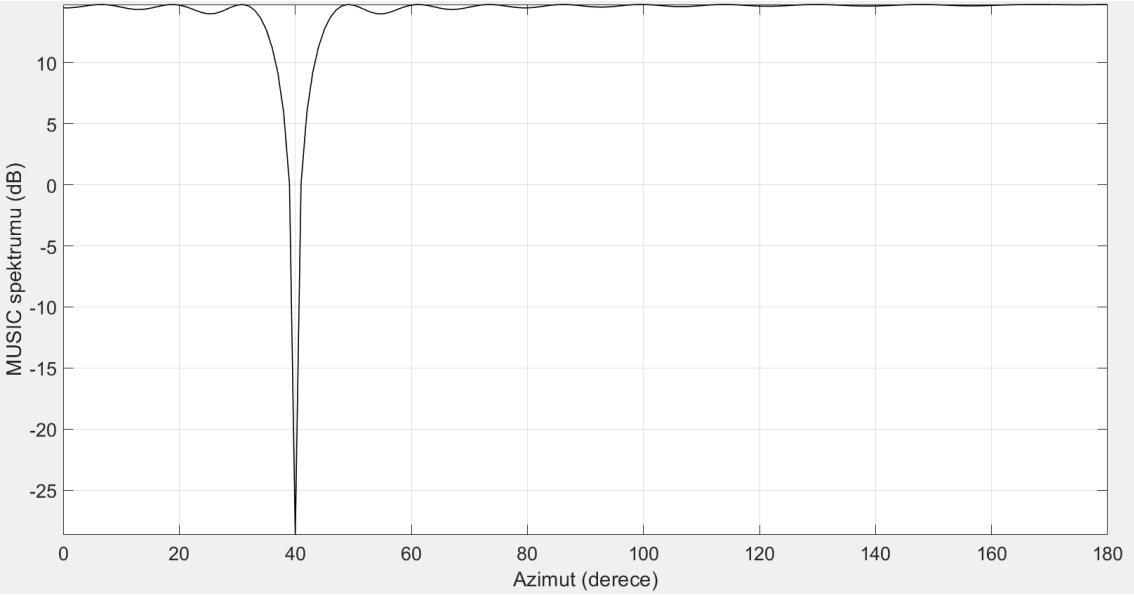
Şekil 6.37. 1°'lik farklar ile sinyal geliş açılarının [40°, 41°, 42°] olduğu üç gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirimi

Elde edilen sonuçlar, düzgün düzlemsel anten dizileri için sinyal geliş açıları arasında bulunan farkın azalması ile sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğünü göstermektedir Gelen sinyaller arasında 10°'lik fark olduğunda sinyal geliş açısı kestiriminin yapıldığı Şekil 6.33'te görülmektedir. Ancak Şekil 6.34 ve sonrasında sinyaller arasındaki açı farkının azalması ile sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğü ve Şekil 6.37'de 1° açı farkı ile gelen üç sinyal arasında algoritmanın ayrım yapmakta zorlandığı görülmüştür.

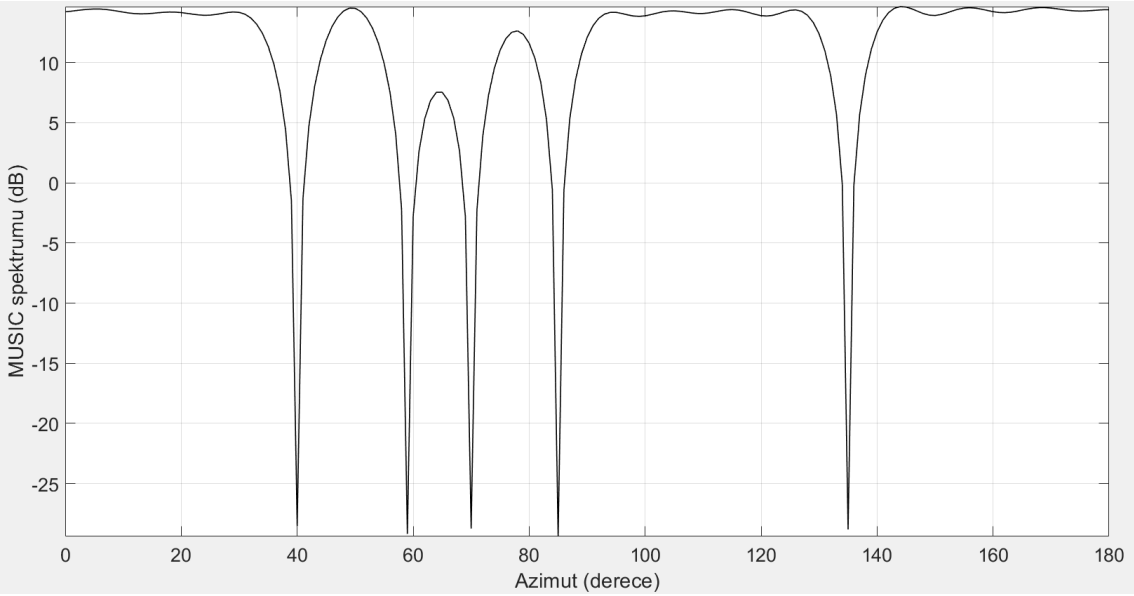
6.3.6. Düzgün dairesel anten dizilerinde gelen sinyal sayısının sinyal geliş açısı kestirimine etkisi

Bir anten dizisine gelen sinyallerin sayısının düzgün dairesel anten dizilerinde MUSIC algoritmasına etkisini incelemek üzere sırasıyla 1, 5, 0, 12 ve 15 adet gelen sinyal için sinyal geliş açısı kestirim sonuçları Şekil 6.38, Şekil 6.39, Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42 ile paylaşılmıştır. N=30 adet anten, L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için sinyal geliş açısı kestirimi yapılmıştır. İlk aşamada 1 sinyal kaynağı 40°'lik açı ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. İkinci aşamada 5 adet sinyal kaynağı [40°, 59°, 70°, 85°, 135°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Ardından 10 adet sinyal kaynağı [13°, 30°, 40°, 59°, 78°, 85°, 110°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Sonrasında 12 adet sinyal kaynağı [13°, 35°, 48°, 59°, 70°, 78°, 85°, 100°, 120°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır. Son

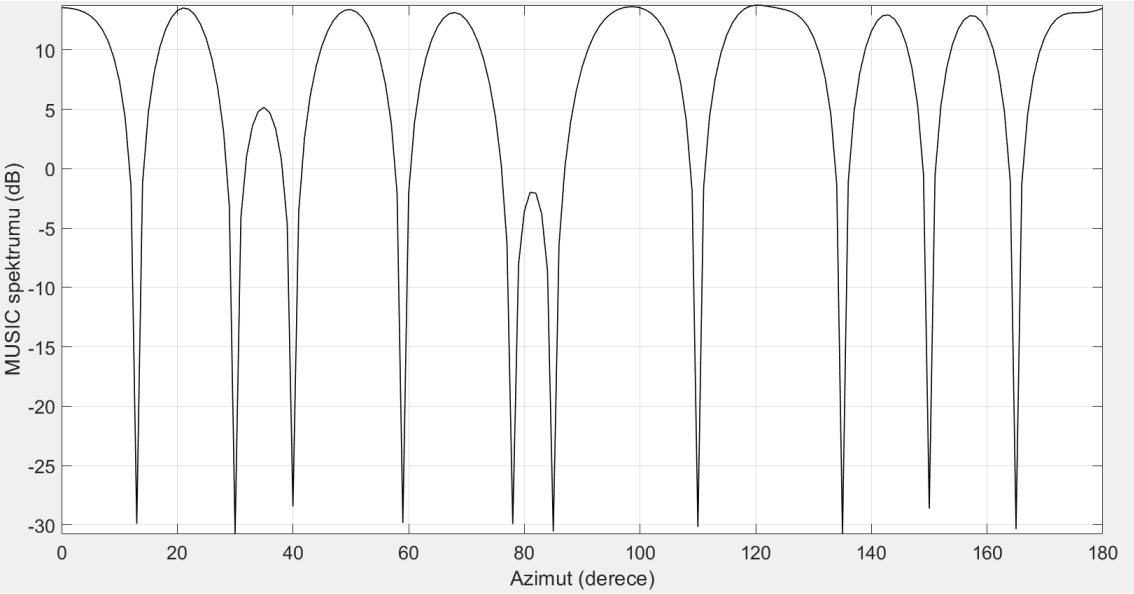
olarak 15 adet sinyal kaynağı [13°, 20°, 30°, 40°, 48°, 59°, 70°, 78°, 85°, 97°, 110°, 120°, 135°, 150°, 165°]'lik açılar ile anten dizisi üzerine ışıma yapmıştır.



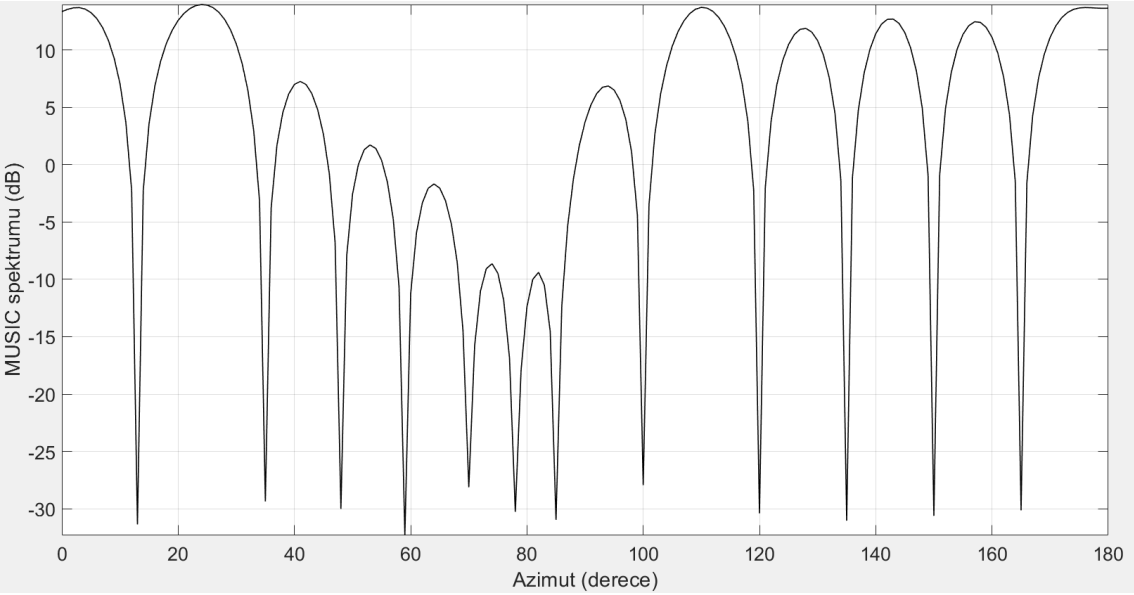
Şekil 6.38. Bir adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açısı kestirimi



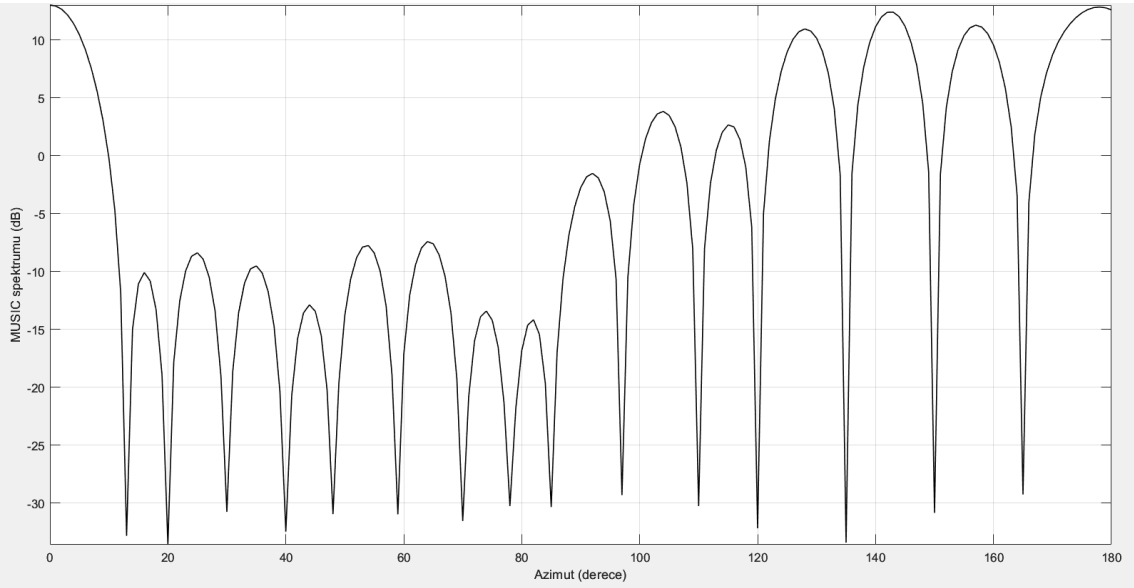
Şekil 6.39. Beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.40. On adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



Şekil 6.41. On iki adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi



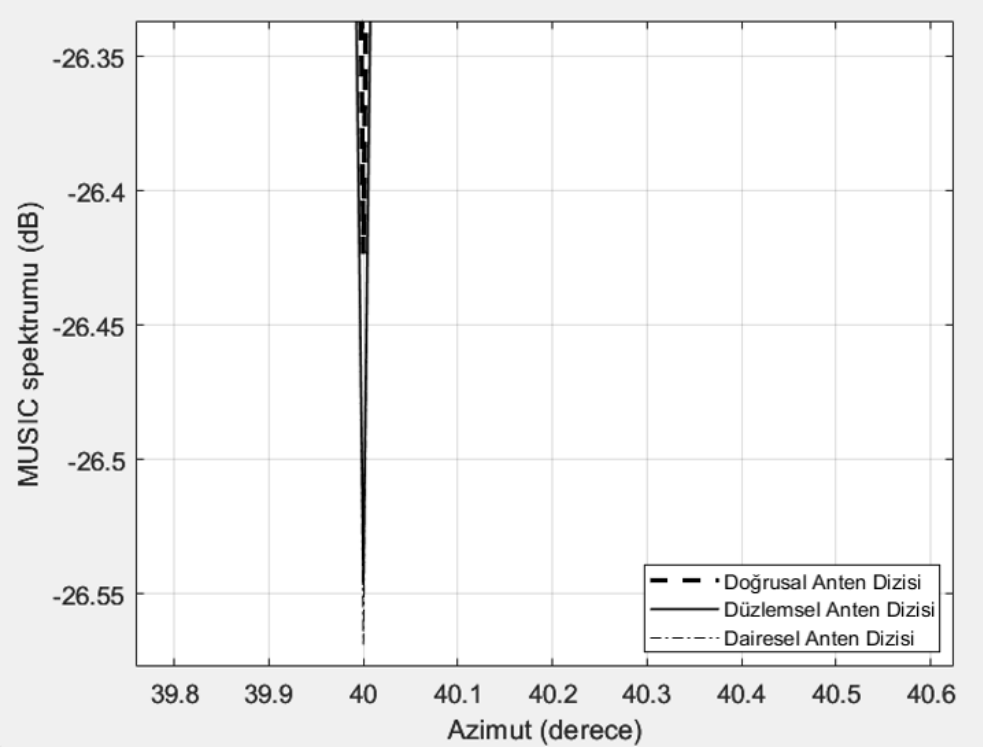
Şekil 6.42. On beş adet sinyal kaynağının anten dizisine ışıma yapması sonucu elde edilen sinyal geliş açıları kestirimi

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, gelen sinyal sayısı artışına bağlı olarak MUSIC algoritmasının sinyal geliş açısı kestirim performansında sinyaller arasında bulunan mesafenin azalması ile birlikte, birbirine yakın gelen bu sinyaller sebebi ile algoritma performansının düştüğü görülmektedir. Bu duruma Şekil 6.42'de 13°, 20°, 30° ve 40° ile gelen sinyaller örnek gösterilebilir.

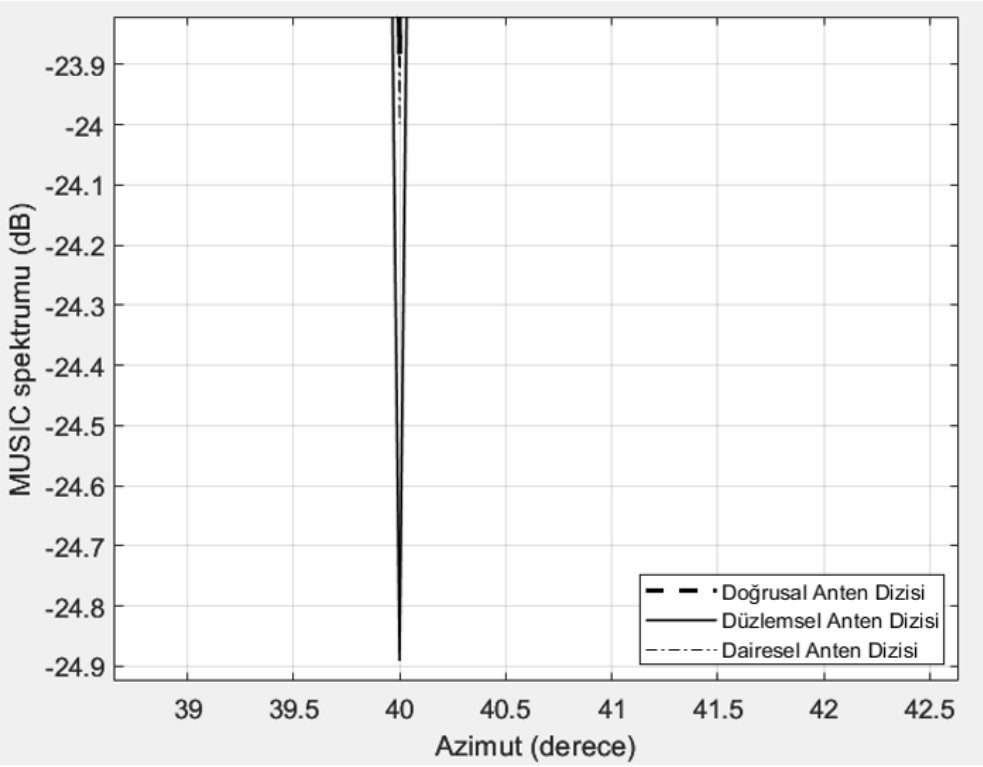
6.4. Düzgün Doğrusal, Düzgün Düzlemsel ve Düzgün Dairesel Anten Dizileri

Bu bölümde, anten elemanı sayısı, anlık veri sayısı ve sinyal gürültü oranı değişimine bağlı olarak MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirim performansı üç farklı anten dizisi konfigürasyonu için sunulmuştur.

Anten sayısındaki artışın algoritma performansına etkisini göstermek üzere L=200 adet anlık veri ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için üç dizinin çalışma performansı paylaşılmıştır. Şekil 6.43'te düzgün doğrusal ve düzgün dairesel anten dizileri için N=40, düzgün düzlemsel anten dizileri için $M \times N = 20 \times 2$ adet anten ile sinyal geliş açısı kestirimi için detaylı bir bakış sunulmuştur. Şekil 6.44'te düzgün doğrusal ve düzgün dairesel anten dizileri için N=60, düzgün düzlemsel anten dizileri için $M \times N = 30 \times 2$ adet anten için sonuçlar paylaşılmıştır.



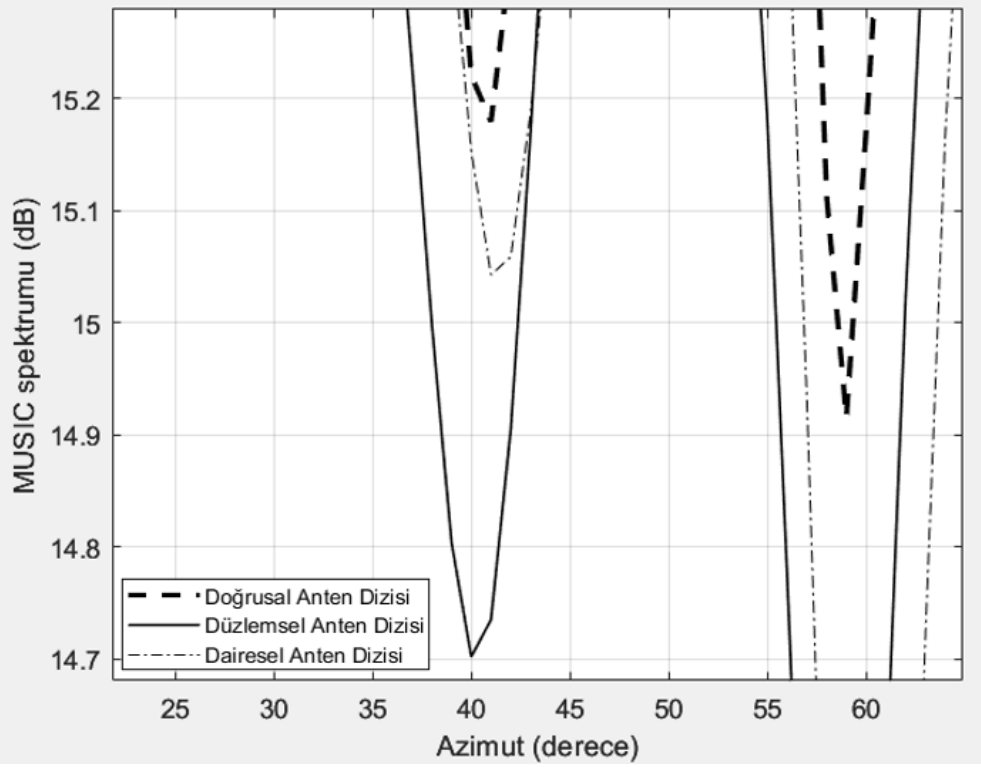
Şekil 6.43. Anten sayısı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (toplam 40 adet anten)



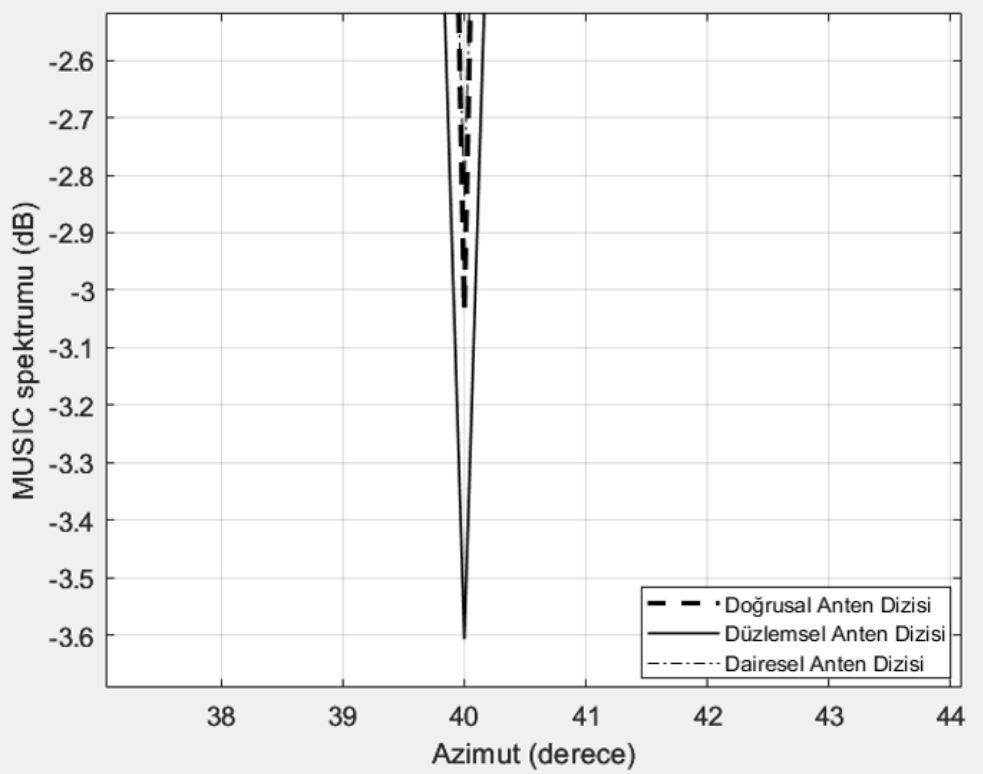
Şekil 6.44. Anten sayısı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (toplam 60 adet anten)

Her üç dizi konfigürasyonunun kendi çalışma performansında anten sayısındaki artıştan olumlu yönde etkilendiği, önceki bölümlerde gösterilmişti. Burada elde edilen sonuçlar, anten dizisi eleman sayısı artışına bağlı olarak düzgün düzlemsel anten dizisinin sinyal geliş açısı kestirim performansında en iyi sonuçları sergilediğini göstermektedir.

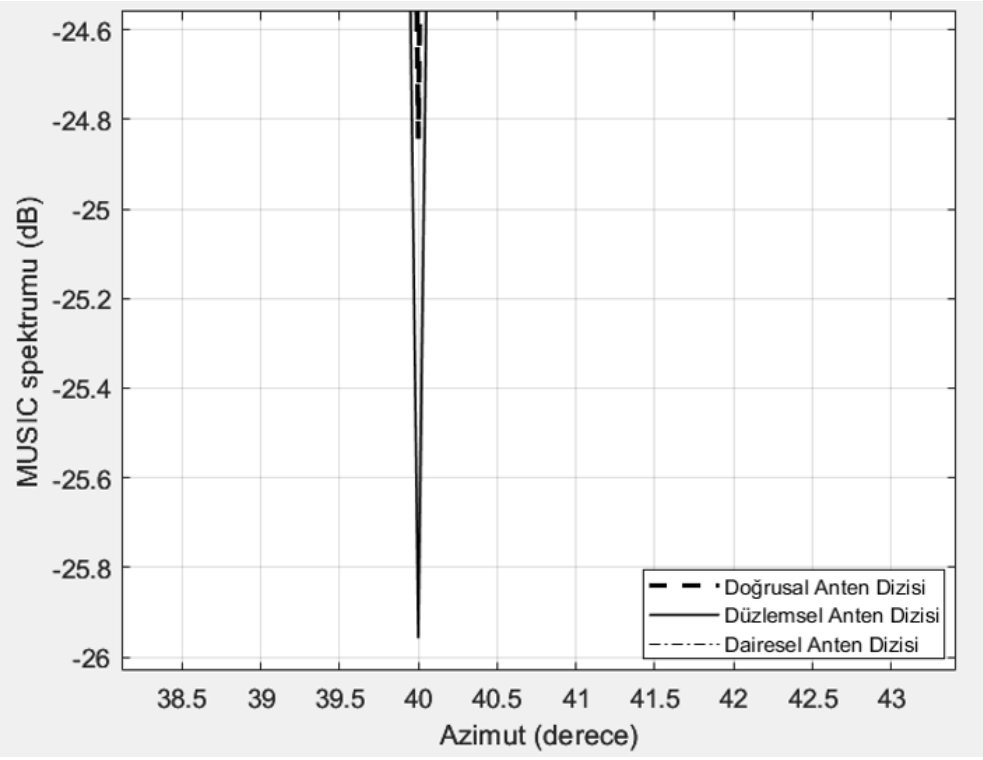
Sinyal gürültü oranındaki artışın algoritma performansına etkisini göstermek üzere 40 adet anten ve L=200 adet anlık veri için üç dizinin çalışma performansı paylaşılmıştır. Sinyal gürültü oranı -20 dB, 0 dB ve 20 dB olmak üzere üç durum incelenmiştir. Sonuçlar sırasıyla Şekil 6.45, Şekil 6.46 ve Şekil 6.47'de verildiği gibidir.



Şekil 6.45. Sinyal gürültü oranı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (SNR= -20 dB)



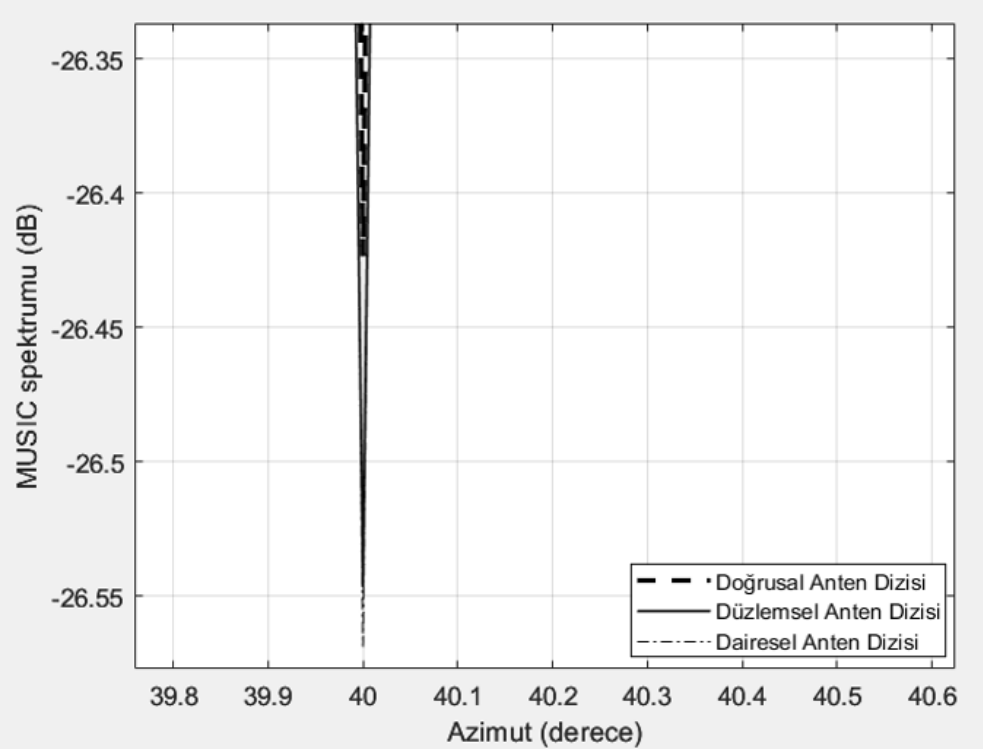
Şekil 6.46. Sinyal gürültü oranı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (SNR= 0 dB)



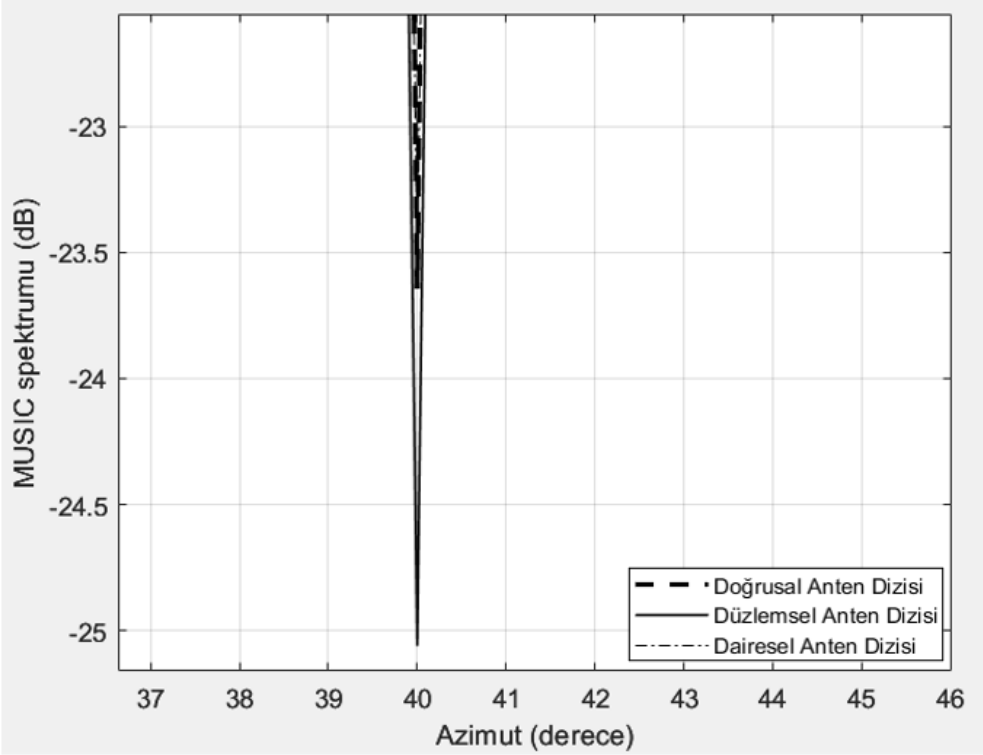
Şekil 6.47. Sinyal gürültü oranı artışına bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (SNR= 20 dB)

Her üç anten dizisi konfigürasyonunun kendi çalışma performansında sinyal gürültü oranındaki artıştan olumlu yönde etkilendiği, önceki bölümlerde gösterilmişti. Burada elde edilen sonuçlar, üç tip anten dizisi konfigürasyonu için sinyal geliş açısı kestiriminin sinyal gürültü oranı düşük iken en iyi performansı düzgün düzlemsel anten dizisinin sergilediğini göstermektedir.

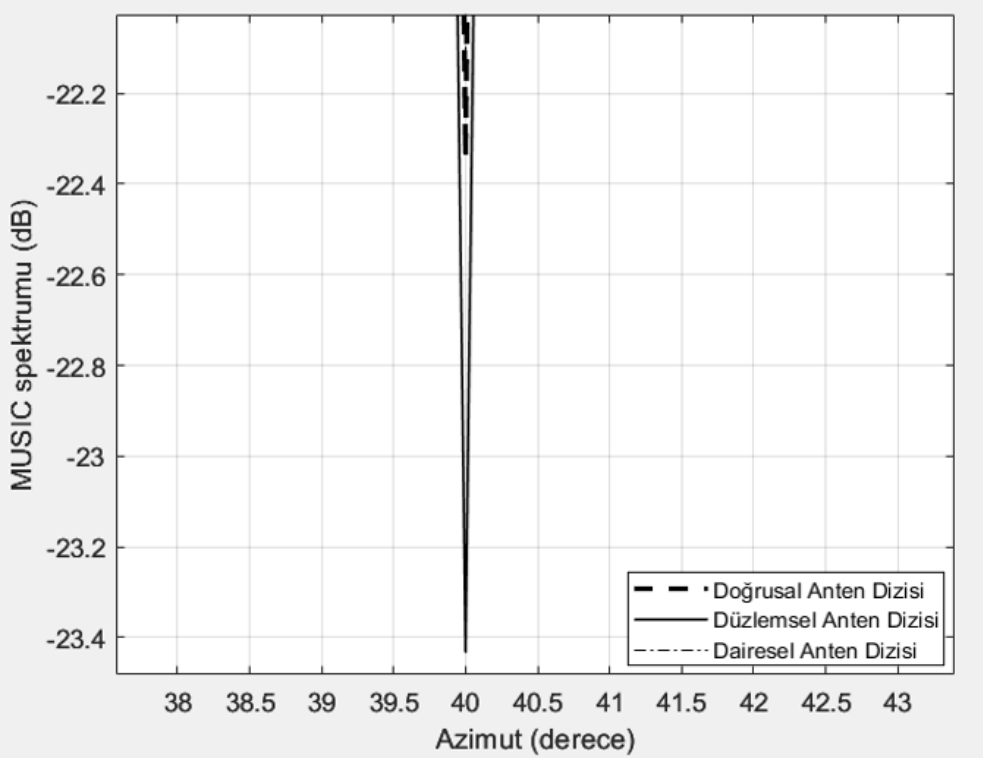
Anlık veri sayısındaki düşüşün algoritma performansına etkisini göstermek üzere toplam 40 adet anten ve 20 dB değerinde sinyal gürültü oranı için üç dizinin çalışma performansı paylaşılmıştır. Anlık veri sayısı L=200, L=100, L=50 ve L=1 olmak üzere dört durum ele alınmıştır. Sonuçlar sırasıyla Şekil 6.48, Şekil 6.49, Şekil 6.50 ve Şekil 6.51'de verildiği gibidir.



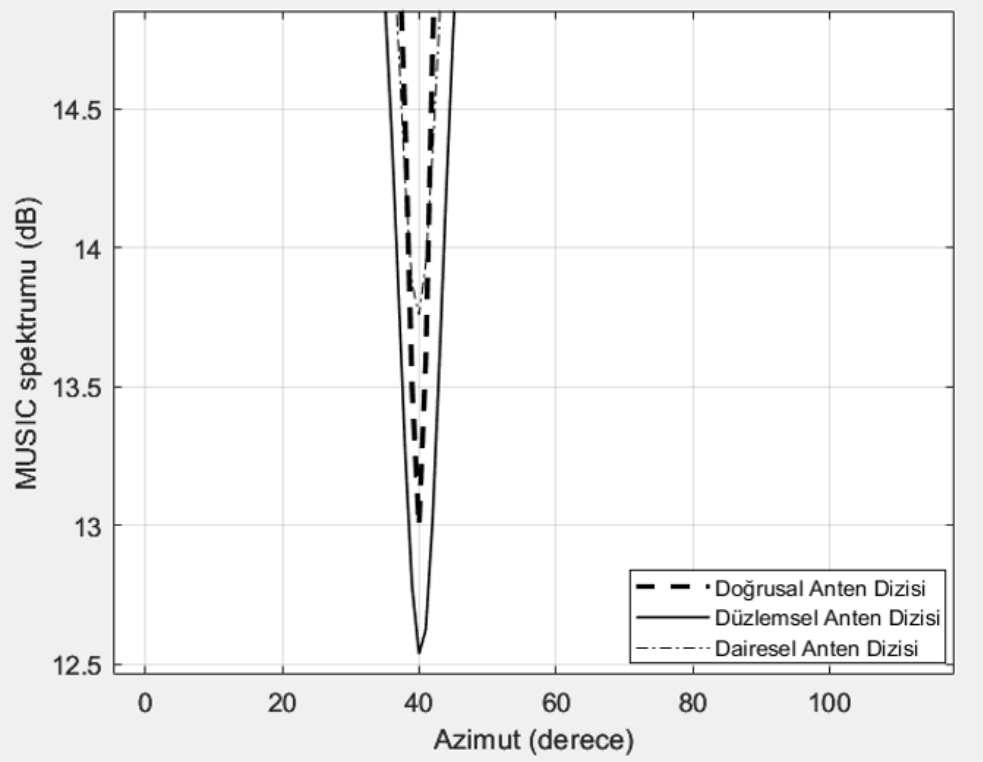
Şekil 6.48. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=200)



Şekil 6.49. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=100)



Şekil 6.50. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=50)



Şekil 6.51. Anlık veri sayısı düşüşüne bağlı olarak üç anten dizisi konfigürasyonunun karşılaştırması (L=1)

Her üç anten dizisi konfigürasyonunun kendi çalışma performansında anlık veri sayısındaki düşüşün algoritma performansını olumsuz yönde etkilediği, önceki bölümlerde gösterilmişti. Anlık veri sayısı değişimi için sonuçlar incelendiğinde, üç tip anten dizisi konfigürasyonu için düzgün düzlemsel anten dizisinin anlık veri sayısındaki azalışa bağlı olarak sinyal geliş açısı kestirimini en iyi şekilde yaptığı görülmüştür.

Sonuçta üç tip anten dizisi için sonuçlar incelendiğinde,

• Her bir anten dizisi konfigürasyonunda bulunan anten elemanı sayısının artışına bağlı olarak sinyal geliş açısı kestirim performansının arttığı,
• Anlık veri sayısının artışına bağlı olarak sinyal geliş açısı kestirim performansının arttığı,
• Sinyal gürültü oranının artışı ile birlikte sinyal geliş açısı kestirim performansının arttığı,
• Sinyal geliş açısı farkının azalması yani sinyallerin birbirine yakın gelmesi durumlarında sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğü,
• Gelen sinyal sayısının artışına bağlı olarak sinyal geliş açısı kestirim performansının düştüğü gözlemlenmiştir.

Düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizileri için MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirim performansı detaylı olarak incelendiğinde,

- Anten elemanı sayısı artışında,
- Anlık veri sayısı artışında ve
- Sinyal gürültü oranı artışında

sinyal geliş açısı kestirim performansında en iyi sonuçları düzgün düzlemsel anten dizisinin sağladığı görülmüştür.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, düzgün doğrusal, düzgün düzlemsel ve düzgün dairesel anten dizileri için MUSIC algoritması kullanılarak sinyal geliş açısı kestirim performansı incelenmiştir. Öncelikle, her bir dizi konfigürasyonu kendi içerisinde, anten dizisi eleman sayısı, alınan anlık veri sayısı, sinyal gürültü oranı, gelen sinyaller arasındaki açı farkı ve gelen sinyallerin sayısı gibi parametreler değiştirilerek bu değişimlerin sinyal geliş açısı kestirim performansına etkisi sunulmuştur. Ardından üç dizi konfigürasyonunun MUSIC algoritması ile sinyal geliş açısı kestirim performansı anten dizisi eleman sayısı, alınan anlık veri sayısı ve sinyal gürültü oranı parametreleri kapsamında karşılaştırılmıştır ve en iyi sonuçları düzgün düzlemsel anten dizilerinin verdiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasının devamı olarak gelecekte üç boyutlu sistemler için sinyal geliş açısı kestirimi MUSIC algoritması ile yapılabilir. Örneğin anten dizisindeki elemanlar küresel, silindirik veya konformal bir düzende yerleştirilerek üç boyutlu sistemlerde sinyal geliş açısı kestirimi üzerine algoritmalar geliştirilebilir. Bu üç boyutlu yapıların hareket eden sistemlere entegre edilmesi düşünülebilir. Silindirik bir yapıda bulunan ve hareket halinde olan bir füze, tehdit oluşturan bir unsurun konumunu tespit etmekte kullanılabilir. Çalışmayı zenginleştirmenin bir diğer yöntemi ise sinyal geliş açısı kestiriminde MIMO benzeri farklı yapıların kullanılmasıdır.

KAYNAKLAR

1. Schmidt, R. O. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3), 276-280.

2. Grice, M. M. (2007). *Direction of arrival estimation using super resolution algorithms.* M Sc. Thesis, California State Polytechnic University, Pomona.

3 Özen, B. ve Afacan, E. (2014). *Dairesel Anten Dizilerinin Genetik Algoritma ile Tasarımı*. ELECO, Bursa, 469-473.

4. Chen, J. C., Yao, K., and Hudson, R. E. (2002). Source localization and beamforming. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2), 30-39.

5. Balanis, C. A. (1997). *Antenna theory analysis and design*. USA: John Wiley & Sons Publication.

6 Gupta, P., and Kar, S. P. (2015). *MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival.* In IEEE 2015 International Conference on Communications and Signal Processing, (ICCSP), 0757-0761.

7 Mankal, P., Gowre, S. C., and Dakulagi, V. (2021). A New DOA algorithm for spectral estimation. *Wireless Personal Communications*, 119, 1729-1741.

8. Al Mahmud, T. H., Ye, Z., Shabir, K., and Sheikh, Y. A. (2018). DOA estimation of quasi-stationary signals exploiting virtual extension of coprime array imbibing difference and sum co-array. *IEICE Transactions on Communications*, 101(8), 1876-1883.

9. Mohan, S., Lockwood, M. E., Kramer, M. L., and Jones, D. L. (2008). Localization of multiple acoustic sources with small arrays using a coherence test. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(4), 2136-2147.

10. Swartling, M., Sallberg, B., and Grbic, N. (2008). *Direction of arrival estimation for speech sources using fourth order cross cumulants*. In 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 1696-1699.

11. Bartlett, M. S. (1950). Periodogram analysis and continuous spectra. *Biometrika*, 37(1/2), 1-16.

12. Capon, J. (1969). *High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis.* Proceedings of the IEEE, 57(8), 1408-1418.

13. Pisarenko, V. F. (1973). The retrieval of harmonics from a covariance function. *Geophysical Journal International*, 33(3), 347-366.

14. Reddi, S. S. (1979). Multiple source location-a digital approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (1), 95-105.

15. Roy, R., and Kailath, T. (1989). *ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques*. IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing, 37(7), 984-995.

16. Swindlehurst, A. L., and Kailath, T. (1992). *A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors. I. The MUSIC algorithm*. IEEE Transactions on signal processing, 40(7), 1758-1774.

17. Dongarsane, C. R., and Jadhav, A. N. (2011). *Simulation study on DOA estimation using MUSIC algorithm.* International Journal of Technology And Engineering System (IJTES), 2(1), 54-57.

18. Tang, H. (2014). *DOA estimation based on MUSIC algorithm*. Lisans Tezi, Linnaeus Üniversitesi, İsveç.

19. Zhou, X., Zhu, F., Jiang, Y., Zhou, X., Tan, W., ve Huang, M. (2020). *The simulation analysis of doa estimation based on music algorithm.* In IEEE 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), 1483-1486.

20. Chowdhury, M. W. T. S., and Mastora, M. (2020). *Performance analysis of MUSIC algorithm for DOA estimation with varying ULA parameters*. In 2020 23rd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), 1-5.

21. Adam, I. A. H., and Islam, M. R. (2009). *Perfomance study of direction of arrival (DOA) estimation algorithms for linear array antenna*. In IEEE 2009 International Conference on Signal Processing Systems, 268-271.

22. Bhuiya, S. N., Islam, F., and Matin, M. A. (2012*). Analysis of direction of arrival techniques using uniform linear array.* International Journal of Computer Theory and Engineering, 4(6), 931-934.

23. Reaz, K., Haque, F., and Matin, M. A. (2012). *A comprehensive analysis and performance evaluation of different direction of arrival estimation algorithms.* In 2012 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI), 256-259.

24. Orul, T. (2012). *Akıllı Anten Sistemleri için İşaret Geliş Açısı Kestirim Yöntemleri*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

25. Orul, T. and Afacan, E. (2013). *Estimation of direction of arrival algorithms*. Progress In Electromagnetics Research, 1347.

26. Kutay, F., and Afacan, E. (2014). *Evaluation of MUSIC Algorithm with regard to Signal Estimation for Short Wave Links*. 22nd IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 313-316. Trabzon.

27. Gentilho Jr, E., Scalassara, P. R., and Abrão, T. (2020). Direction-of-arrival estimation methods: A performance-complexity tradeoff perspective. *Journal of Signal Processing Systems*, 92(2), 239-256.

28. Aytaş, N. (2017). *Bir Anten Dizisine Gelen Sinyalin Yönünün Tekil Değer Ayrışımı ve Matris Kalem Yöntemi ile Bulunması*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

29. Aytaş, N., Afacan, E., and İnanç, N. (2021). Matrix Pencil Method and Singular Value Decomposition Application for DOA Estimation Using Linear Antenna Array with Multiple Signal Sources. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 5(2), 107-114.

30. Aytaş, N. (2022). *Zaman Modülasyonlu Doğrusal Anten Dizilerinin Matris Kalem Yöntemi ile İncelenmesi*. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

31. Aytas, N., Afacan, E., and İnanç, N. (2022). Direction of arrival estimation in time modulated linear arrays using matrix pencil method with single snapshot and optimized time steps. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol.150.

32. Chu, J., Zhang, Z., and Guo, Y. (2023). Exploration on 2D DOA estimation of linear array motion: Uniform linear motion. *China Communications*.

33. Sekizawa, S. (1998). Estimation of arrival directions using MUSIC algorithm with a planar array. *IEEE 1998 International Conference on Universal Personal Communications, Conference Proceedings*, 1, 555-559.

34. Aksoy, E., and Afacan, E. (2009). Planar antenna pattern nulling using differential evolution algorithm. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 63(2), 116-122.

35. Aksoy, E., and Afacan, E. (2014). An inequality for the calculation of relative maximum sideband level in time-modulated linear and planar arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(6), 3392-3397.

36. Cui-zhen, S. (2015). The application of MUSIC algorithm in the planar array antenna. In 2015 *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 1-4.

37. He, X., Zhang, Z., and Wang, W. (2016). *DOA estimation with uniform rectangular array in the presence of mutual coupling.* In 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 1854-1859.

38. Wei, L., Li, Q., and Wu, G. (2017). *Direction of arrival estimation with uniform planar array.* In 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 1-5.

39. Xu, L., and Wen, F. (2017). Fast noncircular 2D-DOA estimation for rectangular planar array. *Sensors*, 17(4), 840.

40. Liu, J., Wei, M., Li, H., Shi, S., Wang, X., Wang, X., and Mei, N. (2019). *Evaluation on the music algorithm performance of uniform rectangular arrays.* In 2019 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 1-3.

41. Yu, X., Liu, B., Qiu, G., and Tian, C. (2022). *2D-DOA efficient estimation algorithm based on IRD-MUSIC for frequency hopping signal.* In 2022 IEEE 4th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 675-679.

42. Grishin, I., Fokin, G., Sevidov, V., and Okuneva, D. (2023). *Analysis of the Spatial Smoothing Influence on the Perfomance of 2D-MUSIC for Ultra-Dense Networks*. In 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 1-6.

43. Ebihara, S., Sato, M., and Niitsuma, H. (1997). Estimation of source location for a borehole radar with a circular array by the MUSIC algorithm. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 80(6), 69-77.

44. Bo, W. (2006). *Realization and simulation of DOA estimation using MUSIC algorithm with uniform circular arrays.* In The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 908-912.

45. Yu, L., Wang, N., Zhu, H., Chen, Y., and Jiang, T. (2015). *Simulation research to finding direction precision based on music algorithm in non-uniform circular array*. In 2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT), 142-146.

46. Amine, I. M., and Seddik, B. (2016). *2-D DOA estimation using MUSIC algorithm with uniform circular array*. In 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), 850-853.

47. Sun, C., and Ding, J. (*2018). Application of the DOA algorithms in the uniform circular array antennas.* In 2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS),633-636.

48. Pei, S., Liu, D., Ye, Z., Yang, J., and Liu, Y. (2023). Optimization scheme of partial discharge location of external insulation based on 2-D multiple signal classification algorithm. *IET Science, Measurement & Technology*, 17(1), 11-26.

49. Hou, J., Li, S., and Yang, L. (2023). Multi-Leakage Source Localization of Safety Valve Based on Uniform Circular AE Array and Improved MUSIC Algorithm. *Sensors*, 23(9), 4515.

50. Tota, R., and Hossain, M. S. (2021*). Three Dimentional Multiple Near-field Source Localization Based on MUSIC Algorithm to Increase the Localization Accuracy of Optimal Beamformer.* In 2021 3rd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), 9-12.

51. Shen, Y., Sheng, H., and Wang, Q. (2019). *Research on Direction of Arrival Estimation of Antenna Array Based on Improved MUSIC Algorithm.* In 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID*)*, 1, 204-207.

52. Hanada, T., Ahn, C. J., and Maruta, K. (2020). *Improving DOA Estimation Accuracy by Rotating Planar Array Antenna.* In 2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 1-4.

53. Çalışkan, M. (2014). *Performance analysis of direction-of-arrival estimation algorithms in the presence of array imperfections and multipath for different antenna array geometries.* Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara.

54. Hajian, M., Coman, C., and Ligthart, L. P. (2006). *Comparison of circular, Uniform- and non Uniform Y-Shaped Array Antenna for DOA estimation using MUSIC Algorithm.* In 2006 European Conference on Wireless Technology, 143-146.

55. Işıksoy M., Genç Y., Korkmaz A. N., Akkoç, A., Afacan E. ve Yazgan E. (2023). Doğrusal ve Dairesel Anten Dizileri için MUSIC Algoritmasının İncelenmesi. Başkent *4. Uluslararası Multidisiplinler Bilimsel Çalışmalar Kongresi*, Ankara, 897-901.

56. Liberti, J. C., and Rappaport, T. S. (1999). *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*. New Jersey, Prentice Hall PTR.

57. Barabell A. J., (1983). Improving the resolution performance of eigenstructurebased direction finding algorithms. *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 8, 336-339.

58. Gardner W. A., Calabretta R.A., and Schell S.V. (1989). *Cyclic MUSIC algorithms for signal-selective direction estimation.* International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 4, 2278-2281.

59. Xu G., and Kailath T. (1994). *Fast subspace decomposition.* IEEE Transactions on Signal Processing, 42 (3), 539-550.

60. I. Ziskind and M. Wax, (1998). Maximum Likelihood Localization of Multiple Sources by Alternating Projection. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Process*., 36 (10), 1553–1560.

61. Mazda, F. (Ed.). (2014). *Telecommunications engineer's reference book*. London, Butterworth-Heinemann.

62. Yan, F. G., Chen, Z. K., Sun, M. J., Shen, Y., and Jin, M. (2015). Two-dimensional direction-of-arrivals estimation based on one-dimensional search using rank deficiency principle. *International Journal of Antennas and Propagation*,3-5.



Gazili olmak ayrıcalıktır