

**GÖRÜŞ HATTI ORTAMINDA ÇOK KULLANICI İÇİN
HÜZME YÖNLENDİRME**

**BEAMFORMING FOR MULTIPLE USERS IN LINE OF
SIGHT ENVIRONMENTS**

KAYACAN DİZDAR

DOÇ. DR CENK TOKER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Eşime ve Aileme...

ÖZET

GÖRÜŞ HATTI ORTAMINDA ÇOK KULLANICI İÇİN HÜZME YÖNLENDİRME

Kayacan DİZDAR

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk TOKER

Eylül 2019, 160 sayfa

Günümüzde kullanılan haberleşme cihazlarının sayılarının eskiye göre çok fazla artması, her bir cihaz için gereken veri aktarım boyutunun ve gerekli olan veri aktarım hızının yükselmesi nedeniyle hali hazırda kullanılan haberleşme altyapıları yetersiz kalmakta bu nedenle de yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler, çok sayıda kullanıcı ile aynı anda haberleşme ağının kurulabilmesine olanak sağlayan, çok sayıda anten elemanından oluşan faz dizili büyük ölçekli anten yapılarıdır. Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde haberleşme sırasında milimetre dalga boyunun kullanılması öngörülmektedir.

Milimetre dalga boyunun temel özellikleri arasında ilk olarak yüksek bant genişliği ile yüksek frekanslarda haberleşme yapabilmesi yer almaktadır. Haberleşme frekansının

yüksek olması nedeni ile haberleşme antenini oluşturan antenler daha küçük boyutlarda olmaktadır. Anten boyutlarının küçülmesi sonucunda da aynı birim alanda çok daha fazla sayıda anten kullanım olanağı sağlanabilmektedir. Böylece anten sayısının artışı ile birlikte haberleşmede kullanılan hüzmeler dar genişlikte olmaktadır. Saçılma, yansıma ve yayılma kayıplarının azalması nedeniyle de çok yol etkisi ile birlikte kullanılabilen hüzmeye şekillendirme yapısı yerine hüzmeye yönlendirme yöntemlerinin kullanım gereği ve bu gereğe bağlı olarak da görüş hattı ortamlarında kullanılmaya elverişli olması yer almaktadır.

Tez kapsamında, yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin alt yapısını oluşturan temel özellikler ve çok kullanıcının mevcut olduğu ortamlarda görüş hattı doğrultusunda yapılabilecek olan haberleşmenin performansı incelenmiştir. Analizler sırasında farklı anten örüntüsü tasarımları da kullanılmıştır. Bahsi geçen incelemeler kapsamında üç farklı hüzmeye yönlendirme tekniği karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hüzmeye Yönlendirme, Milimetre Dalga Boyu, Çok Kullanıcı, Görüş Hattı Ortamı, Haberleşme

ABSTRACT

BEAMFORMING FOR MULTIPLE USERS IN LINE OF SIGHT ENVIRONMENTS

Kayacan DİZDAR

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Cenk TOKER

September 2019, 160 pages

Due to the increasing number of communication devices used today and the increase in the required data size and data transfer rate for each device, the existing communication infrastructures are inadequate and therefore multi-input multi-output systems are needed.

The massive multi-input multi-output systems are large-scale phase array antenna structures consisting of a plurality of antenna elements that allow simultaneous communication with multiple users. It is envisaged to use millimeter wavelength during communication in massive multi-input multi-output systems.

In this thesis, various properties of millimeter wavelength were investigated. First of all,

it is necessary to use high broadcast frequency in order to communicate with high bandwidth. Secondly, since the communication is made using high frequency broadcast, the size of the antennas to be used during communication will be reduced. This will increase the number of antennas in the same unit area. With the increase in the number of antennas, the narrow beamwidth used in communication. Because of the decrease in reflection and diffusion losses, instead of the beamforming structure that can be used under multipath conditions, beamsteering methods need to be used and accordingly, they are suitable to be used in line of sight environments.

Within the scope of this thesis, the basic features that constitute the infrastructure of the massive multi-input multi-output systems and the performance of the communication which can be done in line with the line of sight in multi-user environments are examined. Different antenna pattern designs were also used during the analyzes. Three different beam orientation techniques were compared within the scope of the mentioned investigations.

Keywords: Beamsteering, Milimeter Wave, Multiuser, Line of Sight, Communication

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimin boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, eşsiz bilgisiyle tezimin nihai hale gelmesi için yol gösteren, desteğini benden esirgemeyerek her zaman yanımda olduğunu hissettiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Cenk TOKER'e,

Hayatım boyunca her koşulda bana destek veren ve sabır gösteren, önceliklerini her zaman benim önceliklerime göre değiştiren ve bunun karşılığını hiçbir zaman tam olarak ödeyemeyeceğim, bugünlere gelmemde en büyük katkıları olan canım aileme,

Manevi desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, her zorlukta sabırla ve anlayışla yanımda olduğunu hissettiren biricik eşime,

Sonsuz Teşekkürler...

Kayacan DİZDAR

Eylül 2019, Ankara

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. HABERLEŞME SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ	1
2. YOĞUN ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI SİSTEMLERİN TEMELLERİ	9
2.1. Faz Dizili Antenler ve Hüzme Yönlendirme	10
2.2. Yoğun Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemler	13
2.3. Milimetre Dalga Boyu ile Haberleşme	14
2.3.1. Bant Genişliği	14
2.3.2. Dalga Boyu	15
2.3.3. Yayılma Kaybı	15
2.3.4. Saçılma ve Yansıma Kaybı.....	16
2.4. Donanımsal Hüzme Şekillendirme Teknikleri	17
2.5. Çok Kullanıcı Durum	23
2.6. Hüzme Karakteristiği.....	24
2.6.1. 3 dB Ana Lob Hüzme Genişliği	25
2.6.2. Yan Hüzme Genişliği ve Yan Lob Tepe Seviyesi	26
2.7. Pencereleme Teknikleri	26
2.7.1. Dikdörtgen Pencere.....	30
2.7.2. Binomial Pencere	31
2.7.3. Dolph-Chebyshev Pencere.....	33
2.7.4. Taylor-Kaiser Pencere	35
2.7.5. Hamming Pencere	37

2.8. Ana ve Yan Hüzme Girişimleri.....	41
2.8.1. Yan Hüzme Girişimi	42
2.8.1.1. Hüzme Şekillendirme Yöntemleri	43
2.8.1.1.1. Schelkunoff's Zero Placement Method	43
2.8.1.1.2. Fourier Series Method with Windowing	45
2.8.1.1.3. Sector Beam Array Design	47
2.8.1.1.4. Woodward-Lawson Frequency Sampling Design (WLFSD).....	47
2.8.2. Ana Hüzme Girişimi	52
2.9. Performans Parametresi SGGO.....	53
3. MİNİMUM SGGO SEVİYESİNİN MAKSİMİZASYONU	61
3.1. Optimizasyon Probleminin Çözümü	61
4. HÜZME YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ VE PERFORMANSI.....	72
4.1. Hüzme Yönlendirme Performans Parametreleri	73
4.2. Kaba Kuvvet Çözümü	76
4.3. PSO Yöntemi	76
4.3.1. Anten Sayısı ve Kullanıcı Sayısının PSO Performansına Etkisi.....	78
4.3.2. Yüksek Kullanıcı Sayılarında PSO Performansı.....	87
4.3.3. Kullanıcı Menzilleri, Toplam Anten Gücü ve Ortam Gürültüsünün PSO Performansı Üzerindeki Etkisi.....	91
4.3.4. Pencereme Yönteminin PSO Yan Hüzme Girişim Performansı Üzerindeki Etkisi.....	98
4.4. Buluşsal Yöntem	107
4.4.1. Anten Sayısı ve Kullanıcı Sayısının Buluşsal Yöntem Performansına Etkisi.....	109
4.4.2. Kullanıcı Menzilleri, Toplam Anten Gücü ve Ortam Gürültüsünün Buluşsal Yöntem Performansına Etkisi.....	110
4.5. Çözüm Yöntemlerinin Performansı	112
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	114
6. YORUM.....	117
7. KAYNAKLAR	120
EK 6 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu	125

ÖZGEÇMİŞ	126
----------------	-----

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemde gönderme yapısı [18]	5
Şekil 1.2	Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde kullanılan analog hüzme yönlendirme yapısı [18]	7
Şekil 2.1	Bireysel yön bağımsız anten örüntüsü (a) ve faz dizili anten yapısı ile yönlendirilmiş hüzme (b).....	11
Şekil 2.2	Doğrusal N elemanlı faz dizili antende belirli bir açığa hüzme yönlendirme.....	11
Şekil 2.3	Sırası ile analog hüzme şekillendirme gönderme ve alma yapıları [34].....	18
Şekil 2.4	İki kullanıcı için N adet anten ile analog hüzme yönlendirme	19
Şekil 2.5	Sayısal hüzme şekillendirme gönderme yapısı [34].....	21
Şekil 2.6	Hibrit hüzme şekillendirme gönderme hattı [40].	23
Şekil 2.7	Her bir kullanıcıya özgü yönlendirilmiş yoğun çok girişli çok çıkışlı sistem anten örüntüsü (a) çok hüzmeli anten örüntüsü (b) [25].....	24
Şekil 2.8	Hüzme tasarım parametrelerinin hüzme üzerindeki yerleri	25
Şekil 2.9	Pencereleme yöntemleri için antenlere uygulanması gereken katsayı değerleri (YHS: 40 dB, anten sayısı: 32)	29
Şekil 2.10	Pencereleme yöntemleri sonucu oluşan anten örüntüleri (YHS: 40 dB, anten sayısı: 32)	29
Şekil 2.11	Dikdörtgen pencere kullanılan anten örüntüsü, anten sayısı: 16	30
Şekil 2.12	Dikdörtgen pencere anten katsayıları	31
Şekil 2.13	Anten sayısı 16 iken Binomial pencere kullanılan anten örüntüsü	32
Şekil 2.14	Binomial pencere anten katsayıları	32
Şekil 2.15	Anten sayısı 16 ve YHS 40 dB iken Dolph-Chebyshev pencere kullanılan anten örüntüsü	34
Şekil 2.16	YHS 40 dB iken Dolph-Chebyshev pencere anten katsayıları	34
Şekil 2.17	Anten sayısı 16 ve YHS 40 dB iken Taylor-Kaiser pencere kullanılan anten örüntüsü	36
Şekil 2.18	YHS 40 dB iken Taylor-Kaiser pencere anten katsayıları	36
Şekil 2.19	Anten sayısı 16 iken Hamming pencere kullanılan anten örüntüsü	37
Şekil 2.20	Hamming pencere anten katsayıları	38
Şekil 2.21	Anten sayısı 16 iken dikdörtgen pencereleme uygulanan anten hüzmesi	39
Şekil 2.22	Anten sayısı 16 iken farklı pencere yöntemleri uygulanan anten örüntüleri (Dolph-Chebyshev ve Taylor-Kaiser için YHS değerleri 40 dB olarak seçilmiştir)	41
Şekil 2.23	Yan hüzme üzerinden girişim olduğu durumda hüzmelerin temsili yönlendirilmesi	42
Şekil 2.24	6 elemanlı faz dizili anten hüzmeleri antenler arası uzaklık dalga boyunun 4'de 1'i ve 8'de 1'i iken [41].....	45

Şekil 2.25	WLFSD yöntemi ile hüzme şekillendirme akış diyagramı	50
Şekil 2.26	Hüzme şekillendirme yönteminde kullanılan hüzme hata penceresi	51
Şekil 2.27	64 adet anten kullanarak yön bağımsız antenler gönderilen hüzme ve hüzme şekillendirme yöntemi kullanılarak şekillendirilen hüzme	51
Şekil 2.28	Ana hüzme üzerinden girişim olduğu durumda hüzmelerin temsili yönlendirilmesi	52
Şekil 2.29	Bir kullanıcı üzerine gönderilen hüzmelerin diğer kullanıcı üzerindeki etkisi	54
Şekil 3.1	16 anten için iki kullanıcı olduğu durumda ilk kullanıcı için yönlendirilen hüzme sabit iken ikinci kullanıcının yönlendirilen hüzmeye bağlı olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu	68
Şekil 3.2	64 anten için iki kullanıcı olduğu durumda ilk kullanıcı için yönlendirilen hüzme sabit iken ikinci kullanıcının yönlendirilen hüzmeye bağlı olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu	69
Şekil 3.3	16 adet anten için on kullanıcı olduğu durumda son kullanıcı için yönlendirilen hüzme $[0^\circ, 180^\circ]$ açılı aralığında iken son kullanıcının yönlendirilen hüzmeye bağlı olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu	69
Şekil 3.4	64 adet anten için on kullanıcı olduğu durumda son kullanıcı için yönlendirilen hüzme $[0^\circ, 180^\circ]$ açılı aralığında iken son kullanıcının yönlendirilen hüzmeye bağlı olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu	70
Şekil 4.1	32 adet anten için hüzmelerin yönlendirilme açısına göre AHG_{NN} değeri	75
Şekil 4.2	16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda kullanıcıların üzerlerine yönlendirilmiş hüzme yönlendirme sonuçları	79
Şekil 4.3	16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda kaba kuvvet yönteminin hüzme yönlendirme sonuçları	80
Şekil 4.4	16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin açı doğruluğu ve SGGO performansı	80
Şekil 4.5	16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda arama penceresi $[0^\circ, 180^\circ]$ iken PSO yönteminin iteratif maliyet fonksiyonu hesabı	81
Şekil 4.6	64 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda kaba kuvvet yönteminin hüzme yönlendirme sonuçları	82
Şekil 4.7	64 adet anten kullanıldığı ve iki kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin açı doğruluğu ve SGGO performansı	83
Şekil 4.8	64 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin iteratif maliyet fonksiyonu hesabı	84
Şekil 4.9	64 adet anten ve üç kullanıcı olduğu durumda kaba kuvvet yönteminin hüzme yönlendirme sonuçları	85
Şekil 4.10	64 adet anten kullanıldığı ve üç kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin açı doğruluğu ve SGGO performansı	86

Şekil 4.11	64 adet anten ve üç kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin iteratif maliyet fonksiyonu hesabı.....	86
Şekil 4.12	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda PSO SGGO performansı	88
Şekil 4.13	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda, arama penceresi uygulanmıyorken ($0^{\circ} - 180^{\circ}$ genişlikte) PSO yönlendirme performansı	88
Şekil 4.14	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda arama penceresi $\pm 10^{\circ}$ iken PSO SGGO performansı.....	90
Şekil 4.15	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda arama penceresi $\pm 10^{\circ}$ iken PSO yönlendirme performansı.....	90
Şekil 4.16	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda kullanıcıların menzil ve açısız konumları	92
Şekil 4.17	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO SGGO performansı	93
Şekil 4.18	128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO yönlendirme performansı.....	93
Şekil 4.19	Toplam 100 W gücünde 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO SGGO performansı	95
Şekil 4.20	Toplam 100 W gücünde 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO yönlendirme performansı	95
Şekil 4.21	Ortam gürültüsü -70 dBm iken PSO SGGO performansı	97
Şekil 4.22	Ortam gürültüsü -70 dBm iken PSO hüzme yönlendirme performansı.....	97
Şekil 4.23	Senaryo 4.3.4.1 kullanıcı açısız yerleşimleri	99
Şekil 4.24	Dikdörtgen pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı.....	100
Şekil 4.25	Dikdörtgen pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı.....	100
Şekil 4.26	Binomial pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı.....	101
Şekil 4.27	Binomial pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı.....	102
Şekil 4.28	YHS 40 dB Dolph-Chebyshev pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı	103
Şekil 4.29	YHS 40 dB Dolph-Chebyshev pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı.....	103
Şekil 4.30	YHS 40 dB Taylor-Kaiser pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı	104
Şekil 4.31	YHS 40 dB Taylor-Kaiser pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı.....	105
Şekil 4.32	Hamming pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı	106
Şekil 4.33	Hamming pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı.....	106
Şekil 4.34	16 adet kullanıldığı durumda buluşsal anten örüntüsü ve ideal anten örüntüsü (YHS = -13.5 dB)	108
Şekil 4.35	Kullanıcı sayısına bağlı buluşsal yöntem SGGO performansı.....	110

Şekil 4.36	3 adet kullanıcı olduğu durumda menzile bağlı buluşsal yöntem hüzme yönlendirme güç seviyeleri	111
Şekil 4.37	Hüzme yönlendirme tekniklerinin kullanıcı sayısına göre SGGO performansı, her bir nokta için 50 tekrarlı gerçekleştirilmiştir ve SGGO değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır.....	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Pencereleme yöntemlerinin yan hüzme seviyeleri ve genişlik faktörü değerleri.....	38
Çizelge 4.1 Gerçeklenme analizi yapılarak ayarlanmış PSO parametreleri.....	77
Çizelge 4.2 Pencereleme yöntemlerinin PSO yönteminin performansı üzerindeki etkisi	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α_{kn}	Dolph-Chebyshev pencereleme katsayısı sabiti
α	Yan hüzme seviyesi
a_n	n 'inci anten genlik katsayısı
AHG_{3dB}	3dB Ana Hüzme Genlik Seviyesi (Derece)
AHG_{NN}	Ana hüzmenin sıfırdan sıfıra genişliği (Derece)
b	Genişlik faktörü
B	Bant genişliği (Hz)
$B(\psi(\phi))$	Anten örüntüsü
$B_k(\psi(\phi))$	k 'inci kullanıcı için oluşturulan anten örüntüsü
$B_{v \leftarrow k}(\psi(\phi_v))$	k kullanıcıya gönderilen hüzmenin v kullanıcısı üzerinde oluşturduğu hüzme sinyal seviyesi
c	Işık hızı
C	Taylor-Kaiser sabiti
d_x	Antenler arası mesafe (metre)
f	Frekans (Hz)
$F(\psi(\phi))$	Anten elemanı örüntüsü
F_n	Gürültü figürü
G_R	Gönderen anten kazancı
G_T	Alan anten kazancı

I_0	0. dereceden Bessel fonksiyonu
k	Boltzmann sabiti
K	Kullanıcı sayısı
M	Çift anten sayılı faz dizili antenlerde toplam anten sayısının yarısı
N	Anten sayısı
N_{RRF}	Alma modülü sayısı
N_{TRF}	Gönderme modülü sayısı
p	Perturbasyon parametresi
p_{kn}	k 'inci kullanıcı ve n 'inci anten için hesaplanan Dolph-Chebyshev pencereleme katsayısı
P_R	Alınan güç seviyesi (Watt)
P_T	Gönderilen güç seviyesi (Watt)
P_k	k 'inci kullanıcı için yayımlanan sinyal gücü
P_v	v 'inci kullanıcı için yayımlanan sinyal gücü
R	Menzil (metre)
$SGGO_{BL}$	Buluşsal yöntemin SGGO değeri (dB)
T	Anten sıcaklığı (Kelvin)
w_n	Kompleks anten katsayıları
w_{kn}	k 'inci kullanıcı için kullanılan kompleks anten katsayıları
x	Haberleşme sinyali seviyesi
x_k	k 'inci kullanıcı için gönderilen haberleşme sinyal seviyesi
$\delta(.)$	Dürtü fonksiyonu
z_{kn}	Dolph-Chebyshev k 'inci kullanıcı için uygulanacak olan pencerenin polinom kökleri

Θ	Optimizasyon fonksiyonu
ϕ	Tarama açısı ($[0^\circ, 180^\circ]$ aralığında)
ϕ_k	k 'inci kullanıcının anten merkezinden geçen normale göre açısı (derece)
$\Delta\phi$	Tarama açısı çözünürlüğü (derece)
λ	Dalga boyu (metre)
$\psi(\phi)$	Ddalga sayısı fonksiyonu
$\psi(\phi_k)$	k 'inci kullanıcıya ait dalga sayısı sayıl değeri
$\psi'(\phi_k)$	k 'inci kullanıcı için gönderilen hüzmelerin açısal yerinin dalga numarası değeri
σ	Gürültü genliği
$\sigma_{n_k}^2$	k 'inci kullanıcı üzerindeki ortam gürültüsü gücü
γ_{\min}	Minimum SGGO değeri (dB)
γ_{\min}^*	En büyük minimum SGGO değeri (dB)

Kısaltmalar

ACO	Ant Colony Optimization
ADC	Analog Sayısal Dönüştürücü
ALO	Ant-Lion Optimization
BL	Buluşsal Yöntem SGGO (dB)
CDMA	Kod bölmeli çoklu erişim
CSO	Cat Swarm Optimization
DAC	Sayısal Analog Dönüştürücü
DDC	Sayısal Alt Çevirici
DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü
FDMA	Frekans bölmeli çoklu erişim
GA	Genetic Algorithm
GPS	Küresel Konum Belirleme Sistemi
GWO	Grey-Wolf Optimizer
IDFT	Ayrık Ters Fourier Dönüşümü
KDB	Kanal Durum Bilgisi
LCMV	Linearly Constrained Minimum Variance
LTE	Uzun Vadeli Evrim
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response
NOMA	Dikey olmayan çoklu erişim
PSO	Particle Swarm Optimization
QoS	Hizmet Niteliği
RF	Radyo Frekansı
SGGO	Sinyal Gürültü Girişim Oranı
TDMA	Zaman bölmeli çoklu erişim
UMTS	Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi

WiFi

Kablosuz Bağlantı Alanı

YHS

Yan Hüzme Seviyesi

1. HABERLEŞME SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

Kablosuz haberleşme, iletilmek istenen bilginin iki ya da daha çok nokta arasında elektriksel bir bağlantı olmadan gönderilmesi olarak tanımlanmaktadır. Kablosuz haberleşme, genel olarak RF dalgalar kullanılarak yapılmaktadır. RF dalga ile haberleşme; radyolardan cep telefonlarına, personel dijital asistanlardan kablosuz haberleşme ağlarına, garaj kapılarından bilgisayarlarda kullanılan kablosuz farelere, kablosuz kulaklıklardan GPS'e kadar çok sayıda kullanım alanında yer almaktadır [1].

Kablosuz haberleşmenin en yaygın kullanıldığı alan şüphesiz cep telefonlarıdır. Telefonlarda kullanılan kablosuz haberleşme ilk olarak 1982-1990 yılında 1G ile başlamıştır. 1G teknolojisinin özellikleri arasında 30 kHz bant genişliği, 2.4 kbps iletim hızı, analog sinyal kullanılarak haberleşme gibi teknik detaylar mevcuttur.

1990'lı yıllarda 2G teknolojisi ortaya çıkmıştır. 2G teknolojisi haberleşme sırasında dijital sinyal kullanmaktadır, bant genişliği 30-200 kHz arasına kadar yükseltilmiştir. Sayısal ses, kısa mesaj ve düşük hızda da olsa veri aktarımı özellikleri bu sayede kullanılmaya başlanmıştır.

2000'li yılların başlarında haberleşme teknolojisinde, 3G teknolojisine geçiş yapılmıştır. 3G teknolojisi, 15-20 MHz bant genişliği üzerinden haberleşme imkanı sunmaktadır. Kullandığı bant genişliğinin büyüklüğü sayesinde haberleşme hızı artmış ve nispeten yüksek hızda veri gönderimi imkanı sağlanmıştır.

2010'lu yıllarda 4G teknolojisi geliştirilmiştir. Veri indirme hızı 100 Mbps değerlerine kadar yükseltilmiştir. 4G teknolojisi, 3G teknolojisine ek olarak çok daha büyük ölçekli veri aktarım hızı ve miktarı gerektiren hizmetleri (internet üzerinden TV izlemek gibi) 3G teknolojisine nazaran daha kaliteli ve daha hızlı olarak kullanıcılara sunmaktadır [2, 3].

4G kablosuz haberleşme sistemleri 700 MHz ile 2600 MHz frekans bandı aralığında kullanılabilir. İlgili frekans bant aralıkları çeşitli sistemler ve cep telefonu operatörleri için ayrılmışlardır. Örnek vermek gerekirse

700 MHz (Band 28 - Telstra / Optus)

850 MHz (Band 5 - Vodafone)

900 MHz (Band 8 - Telstra)

1800 MHz (Band 3 - Telstra / Optus / Vodafone)

2100 MHz (Band 1 - [a small number of Telstra sites] / Optus [Tasmania] / Vodafone)

2300 MHz (Band 40 - Optus [Vivid Wireless spectrum])

2600 MHz (Band 7 - Telstra / Optus)

maddeleri ile genel olarak listelenebilir [4].

Kablosuz haberleşme kullanan sistemlerin sayısı gün geçtikçe sürekli artmaktadır. Ayrıca haberleşmede kullanılacak olan veri boyutu da kullanılan sistemlerin sayısına paralel olarak artmaktadır [5, 6]. Bu artış, haberleşme sırasında kullanılacak olan haberleşme sistemlerinin üzerine büyük ölçüde işlem yükü ve güç ihtiyacı bindirmektedir. Ayrıca çok sayıda kullanıcı ile aynı anda haberleşme ağının kurulması sırasında kullanılacak olan çok sayıda haberleşme ağının taşıdığı bireysel bilgilerin yayın sırasında birbirlerine girişim yaratması da mevcut haberleşme sistemleri için çözülmesi zor ve karmaşık bir problem olmaya başlamaktadır. Bahsedilen dezavantajlar, günümüz kablosuz haberleşme sistemlerinin gelecekte yetersiz kalabilmesine neden olacaktır.

5G teknolojisi, artan kullanıcı sayısı ve veri trafiğinin yoğunluğunu kaldırabilmek amacıyla 4G'ye kıyasla 100 kat daha fazla kullanıcı için 1000 kat veri trafiğini kaldırabilecek kapasitede olacaktır [7]. İlgili ihtiyacı karşılamak için 5G teknolojisi kapsamında;

- Haberleşme sırasında kullanılan bandın daha az yoğun ve kullanıcılara sunulabilecek olan bant genişliğinin daha yüksek olması nedeni ile 30 GHz ve üzerine çıkartılması,
- Baz istasyonlarında kullanılan antenlerin çok sayıda anten içeren çoklu anten yapısından oluşması,
- Haberleşme sırasında kullanılan frekansın tekrar tekrar başka kullanıcılar için de kullanılabilmesi için kullanıcı için oluşturulan haberleşme bölgelerinin 10-200 metre aralığına indirilmesi

çalışmalarının yapılması gerektiği literatürde yer almaktadır [8]. İlgili çalışmalar birbirlerinden bağımsız gibi maddeler halinde yazılabilmesine rağmen birbirleri ile yüksek oranda bağlantılılardır.

Haberleşme sistemlerinde kullanılan bandın 30 GHz ve üzerine çıkartılması ihtiyacı, milimetre dalga boyu ile haberleşme teknolojisi ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır. Milimetre dalga boyu ile haberleşme sırasında kullanılacak olan bireysel anten büyüklüğünün de küçülmesi söz konusudur.

Çok kullanıcı ile aynı anda haberleşme ağı kurulabilmesi amacıyla her bir kullanıcı üzerine tek bir hüzmeye yönlendirilmesi istendiğinden, fiziksel olarak antenler arasında dalga boyunun yarısı kadar mesafe olması gerekmektedir. İlgili mesafe; milimetre dalga boyunda yayın yapan antenler arasında RF yayın yapan antenler arasındaki mesafeden, milimetre dalga boyunun daha düşük olması nedeniyle, daha düşük olacaktır [9].

Bireysel antenlerin boyutları, antenlerin yayın frekansı arttıkça küçülmektedir. Bu sebeple milimetre dalga boyunda yayın yapan faz dizili bir anten, daha yüksek dalga boyunda yayın yapan faz dizili bir antene göre çok daha küçük boyutlarda olacaktır. Ayrıca milimetre dalga yayını ile haberleşme sırasında kullanılacak olan bant genişliği değeri de RF dalga yayınına göre büyük ölçüde yükselecektir.

Son olarak kullanıcılar için oluşturulan haberleşme bölgelerinin daraltılma ihtiyacı, haberleşme frekansı arttıkça kullanıcılara gönderilen hüzme genişliğinin daralması sayesinde karşılanmış olacaktır.

Milimetre dalga boylu yayının dezavantajları arasında

- 60 GHz frekanslara kadar yapılacak olan yayın sırasında atmosferik kayıp değerinin çok yüksek olması [10]
- Atmosferik kayıp dışında saçılma kaybı, yansıma kaybı, nüfuz kaybı, yol kaybı gibi çok sayıda kayıp içermesi [11]
- Yayın frekansının çok yüksek değerlerde olması nedeniyle meydana gelebilecek olan kayıpların görüş hattında olmayan ve/veya uzak menzilli haberleşme için performansının çok düşük olması

maddeleri ile genel olarak ifade edilebilir. İlgili kayıpların aşılabilmesi amacıyla, haberleşmede kullanılan anten sayılarının artırılması ile çözüm aranmaktadır. Böylece bireysel antenlerin oluşturduğu toplam hüzme, yüksek kazançlar ile uzayda yönlendirilebilmektedir. Anten sayısı arttıkça her bir kullanıcı için oluşturulan hüzmelerin kazanç seviyesi de yükselecek ve böylece kullanıcılar üzerlerinde haberleşme için oluşan güç yoğunluğu değeri artacaktır.

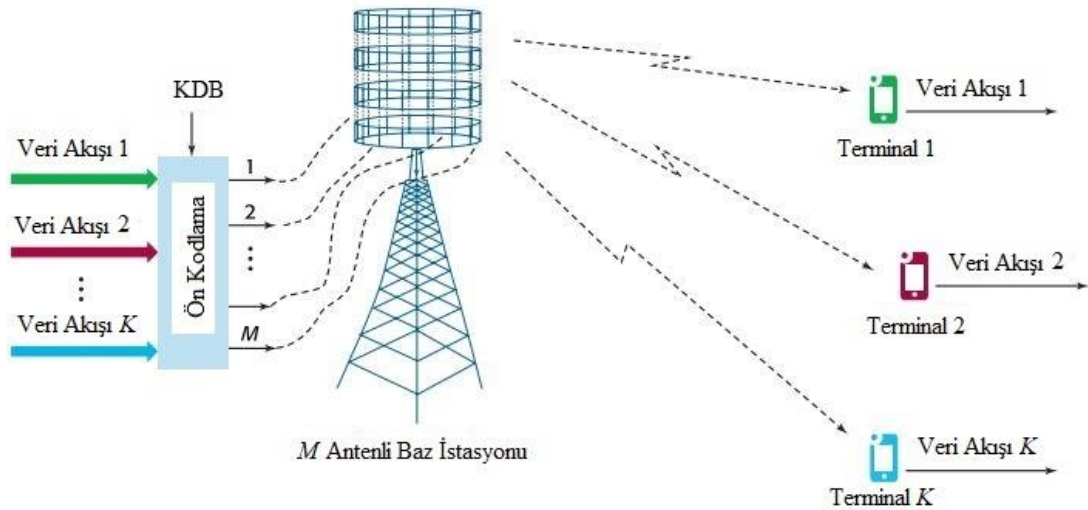
Milimetre dalga boyu yayının özellikleri ve yayımlanması “Milimetre Dalga Boyu ile Haberleşme” başlığı altında incelenecektir.

Birim yüzeye düşecek anten sayısı, anten büyüklüklerinin küçülmesi ile artırılabilir. Bu da baz istasyonlarında kullanılan faz dizili antenler içerisinde yer alan bireysel antenlerin sayıları, milimetre dalga boylu yayının kullanılacak olması sayesinde, faz dizili antenin fiziksel büyüklüğünün değiştirilmeden haberleşme için daha fazla sayıda anten kullanılabilmesi anlamına gelmektedir.

100 veya daha çok sayıda bireysel anten kullanılarak oluşturulan ve çok sayıda kullanıcı ile aynı anda haberleşmeyi sağlayan faz dizili anten yapısı, literatürde yoğun çok girişli çok çıkışlı sistem olarak geçmektedir [12]. Haberleşilecek kullanıcı sayısının fazla olması ve haberleşme sırasında kullanılacak olan anten sayısının çok yüksek olması nedeniyle yoğun çok girişli çok çıkışlı sistem ifadesi kullanılmaktadır.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler, 2010 senesinde Thomas Marzetta'nın [13] makalesi ile ilk defa gündeme gelmiş ve bu konu üzerinde çalışmalar başlamıştır. Makalesinde yalnızca çok girişli çok çıkışlı sistemlerin çok elemanlı anten dizileri ile yapılabileceğinden bahsedilmektedir. Yapıya yoğun çok girişli çok çıkışlı ismi verilmeden önce Thomas Marzetta'nın geniş boyutlu anten sistemleri ile ilgili olarak çok sayıda çalışmaları olmuştur [14-16].

Seneler geçtikçe çeşitli makalelerde ilgili sistem için büyük çok kullanıcılı çok girişli çok çıkışlı sistemler, büyük ölçekli çok girişli çok çıkışlı sistemler şeklinde çeşitli terimler kullanılmıştır. Günümüzde ise 2010 senesinde çalışmaya başlanan sistem yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler olarak literatürde yer almaktadır [17].



Şekil 1.1 Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemde gönderme yapısı [18]

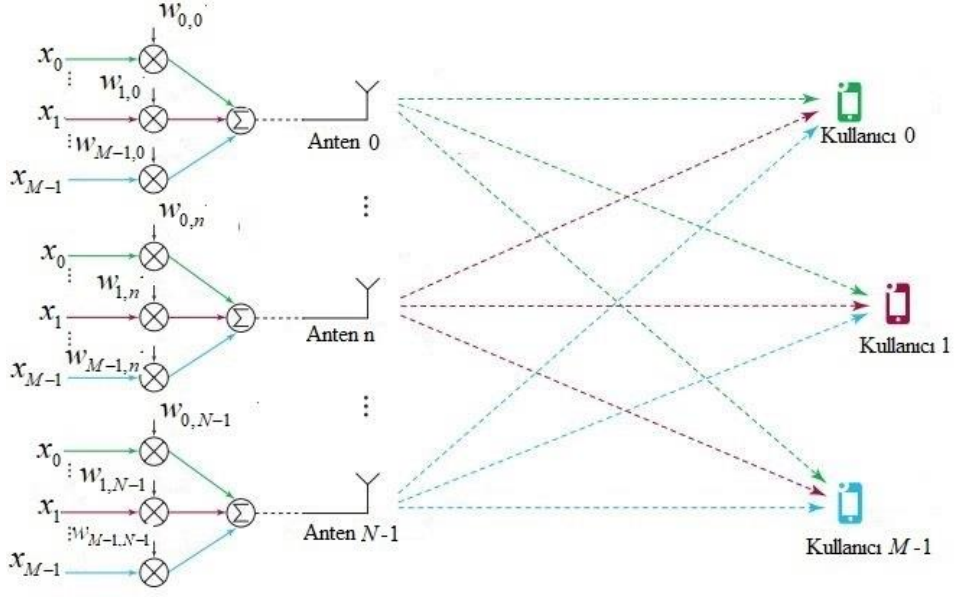
Haberleşme anten dizisinde mevcut olan bireysel anten sayıları yükseldikçe; korelasyonsuz gürültü seviyesi ve yayımlanan sinyalin kayıplardan dolayı hızlı sönümlenmesi azalmakta, bant genişliğinin izge verimi üzerindeki etkisi kalkmakta ve haberleşme sırasında gönderilecek olan bitler üzerindeki minimum gerekli güç seviyeleri düşmektedir. [8, 13]. Böylece milimetre dalga boyu ile yapılacak olan haberleşmenin dezavantajları ortadan kaldırılabilir.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin dezavantajları,

- Anten arkası elemanların anten sayılarına bağlı olarak artması sonucunda sistemin verimli çalışması için gereken güç miktarının çok yüksek seviyelere ulaşması ve ayrıca sistemin karmaşık hale gelmesi
- Çok sayıda anten elemanından oluştuğu için gönderme ve alma sırasında çok sayıda kullanıcıya da bağlı olarak işlem yükünün çok yüksek olması

olarak iki temel madde altında incelenebilir.

Anten arkası eleman sayılarının çok yüksek seviyelere ulaşması sorunu hibrit hüzme şekillendirme donanımı yapısının kullanılması ile zaman içerisinde çözülmüştür. Hibrit hüzme şekillendirme, analog ve sayısal hüzme şekillendirme tekniklerinin avantajlarını üzerinde taşımaktadır [19, 20].



Şekil 1.2 Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde kullanılan analog hüzme yönlendirme yapısı [18]

Donanımsal olarak hüzme şekillendirme teknikleri “Donanımsal Hüzme Şekillendirme Teknikleri” bölümünde incelenecektir.

İşlem yükünün çok yüksek seviyelerde olması, literatürde mevcut çok sayıda algoritmik çözüm yöntemleri geliştirilmesine neden olmuştur. İlgili çözüm yöntemleri “Performans Parametresi SGGO” bölümünde incelenecektir.

Literatürde faz dizili antenler üzerinde kullanılacak olan çeşitli pencereleme yöntemleri mevcuttur. Pencereleme yöntemleri ile gönderilen hüzmelemin tasarım parametreleri haberleşilen kullanıcıların yerleşimlerine uygun olarak ayarlanabilmektedir. “Pencereleme Teknikleri” başlığı altında mevcut pencereleme yöntemleri açıklanacaktır.

Kullanıcıların uzaydaki yerleşimlerinin haberleşme performansı üzerindeki etkileri “Ana ve Yan Hüzme Girişimleri” başlığı altında incelenecektir.

QoS (Hizmet Niteliği), kullanıcıların bir iletişim ağından aldıkları iletişim hizmetinden, bağlantı kurma gecikmesi, hatlardaki yankı miktarı ya da bit hata olasılığı gibi somut ölçülere dayandırılan ve çoğu kez hizmet sağlayıcı ile kullanıcı arasındaki sözleşmeye dayanarak oluşturulan hoşnutluk derecesidir [21]. QoS, çok sayıda faktöre bağlıdır. Haberleşme ağındaki kullanıcıların SGGO seviyesi QoS'in bağlı olduğu faktörlerden birisidir. Bu tez kapsamında kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyesini maksimize etmek amaçlanacaktır.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler çok sayıda kullanıcı ile haberleşme ağı kurduğundan performans kriteri olarak kullanıcılar üzerindeki minimum SGGO değerinin maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu istere uygun olacak şekilde her bir kullanıcı için oluşturulmuş olan hüzme, hüzme yönlendirme teknikleri ile uzayda belirli noktalara yönlendirilecektir. Uzaydaki hangi hüzme yönlendirme noktaların kullanıcıların mevcut yerleşimleri için eniyi nokta olduğu bilgisi; penaltı yöntemi ile kurulan dış bükey kısıtsız optimizasyon probleminin, PSO yöntemi kullanılarak çözümlenmesi sayesinde belirlenecektir. Böylece yönlendirilecek olan hüzmelerin hangi açıya yönlendirileceği bilgisinin düşük işlem yükü ile bulunabilmesi ve önerilen çözüm tekniğinin performansının incelenebilmesi amaçlanmaktadır.

2. YOĞUN ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI SİSTEMLERİN TEMELLERİ

Haberleşme sistemlerinde kullanıcı sayısının ve haberleşmede kullanılan veri miktarının artışı ile birlikte kullanılacak olan sistemlerden beklenti artmakta ve teknoloji arayışına girilmektedir. Bahsi geçen teknoloji ihtiyacına çözüm olarak geliştirilen yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler, çok sayıda kullanıcı ile aynı anda haberleşme ağının kurulabilmesine olanak sağlayan, çok sayıda anten elemanından oluşan faz dizili büyük ölçekli anten yapısıdır. Tez kapsamında yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemleri ve hüzme yönlendirme tekniklerini inceleyebilmek için öncelikle faz dizili antenler ve faz dizili antenlerde hüzme yönlendirme tekniklerinin açıklanması tezin bütünlüğü açısından önemlidir. Bölüm 2.1’de faz dizili antenler ve hüzme yönlendirme teknikleri hakkında bilgi verilmektedir.

Bölüm 2.2 kapsamında, yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin kullanımının gereği ve avantajları ile ilgili bilgi verilmektedir.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde kullanılan dalga boyu milimetre dalga olduğundan milimetre dalganın özellikleri ve yayılma şekilleri bölüm 2.3 altında incelenmiştir.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler çok sayıda donanım elemanı içerdiğinden işlem yükünün düşürülebilmesi ve performansının yükseltilebilmesi için çeşitli donanımsal hüzme şekillendirme teknikleri kullanılmaktadır. İlgili teknikler bölüm 2.4 altında incelenmiştir.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler isminde yer alan yoğun çok girişli ifadesi, sistemin çok sayıda kullanıcı ile aynı anda haberleşme yapabilmesinden gelmektedir. Bölüm 2.5 altında çok kullanıcı ile aynı anda haberleşebilmek için kullanılan yaklaşım açıklanmıştır.

Haberleşme sırasında kullanılan hüzmelerin karakteristiği haberleşme performansını yükseltilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Hüzme karakteristiğini belirleyen çeşitli hüzme tasarım parametreleri mevcuttur. Bölüm 2.6 ve 2.7'de hüzme karakteristiği tanımlanmış ve hüzme tasarım parametrelerinin sayısal olarak belirlenebilmesi için pencereleme tekniklerinden bahsedilmiştir.

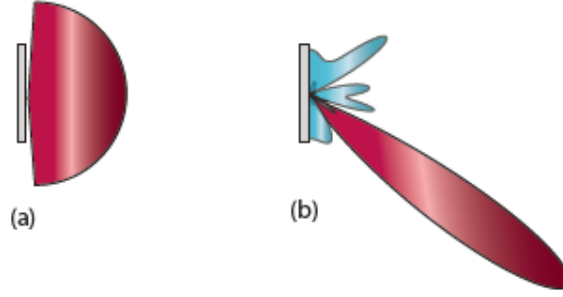
Çok sayıda kullanıcının uzayda mevcut olduğu durumda kullanıcıların açılal yerleşimleri ve birbirleri üzerinde oluşturduğu girişim seviyeleri önem arz etmektedir. İlgili durumlar bölüm 2.8 altında açıklanmaktadır.

Haberleşme sistemlerinin performansının belirlenmesinde kullanılan en önemli parametre SGGO seviyesidir. SGGO seviyesinin mümkün olduğunca yüksek tutulması kanal üzerinden iletilen ve alınan verinin mümkün olduğunca bozulmadan göndericiden alıcıya ulaşmasını sağlar. SGGO parametresinin anlatımı, yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin kullanıldığı durumda çok sayıda hüzme yayımlanan durumdaki girişim seviyeleri bölüm 2.9 altında açıklanmıştır.

2.1. Faz Dizili Antenler ve Hüzme Yönlendirme

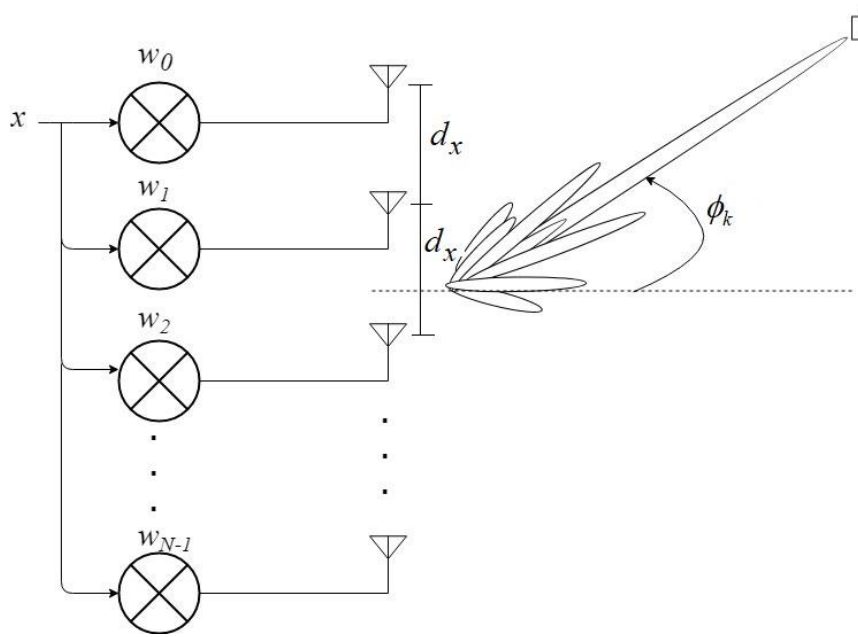
Bir antenin kendine has ve sabit bir örüntüsü olmasına rağmen sinyal işleme teknikleri ile herhangi bir faz dizili anten yapısında anten hüzmelerinin şeklini ve yönünü belirli koşullar altında kontrol edebilmek mümkündür.

Faz dizili anteni oluşturan her bir anten elemanından yapılan yayın, hüzmelerin yönlendirilmesi istenen noktada yapıcı olarak, yönlendirilmesi istenmeyen bölgelerde ise yıkıcı olarak toplanarak uzayda oluşması istenen toplam hüzmeyi meydana getirir. Hüzme yönlendirme olarak adlandırılan bu yöntemde anten dizileri tarafından oluşturulan belirli şekildeki bir hüzmeyi uzayda başka bir noktaya yönlendirme sağlanır. Benzer şekilde uzayda belirli bir bölgeden gelen yayını alıp belirli bölgelerden gelen yayını almamak da sağlanabilir. Yani hüzme oluşturma yöntemi, bir çeşit uzaysal filtreleme olarak tanımlanabilir [22].



Şekil 2.1 Bireysel yön bağımsız anten örüntüsü (a) ve faz dizili anten yapısı ile yönlendirilmiş hüzme (b)

Standart bir faz dizili anten yapısında her bir anten elemanı ile ilgili olarak ilgili antenden yayılan sinyalin faz ve genliğini ayarlayan kompleks ağırlık çarpanı vardır. Bu ağırlık çarpanı sayesinde diziden uzaya yayılacak hüzmenin anten merkezine göre yaptığı yönelme açısı ve hüzmenin karakteristik özellikleri ayarlanabilir.



Şekil 2.2 Doğrusal N elemanlı faz dizili antende belirli bir açıda hüzme yönlendirme

Şekil 2.2’de yer aldığı gibi uzayda ϕ_k açısında yer alan kullanıcı üzerine yönlendirilen hüzmenin matematiksel ifadesi

$$B(\psi(\phi)) = F(\psi(\phi)) \left[\sum_{n=0}^{N-1} xw_n e^{jd_x n \psi(\phi)} \right] \quad (1)$$

biçiminde ifade edilebilir. Eşitlik (1)'de yer alan $F(\psi(\phi))$ fonksiyonu, faz dizili anten içerisindeki anten elemanlarının örüntüsünü ifade etmektedir.

$F(\psi(\phi))$ dışında kalan terim, dizi içerisinde kullanılan antenlerin pozisyonlarına ve antenlerin ağırlık çarpanlarına bağlı bir fonksiyondur ve literatürde dizi faktörü olarak tanımlanır.

İdeal durumda faz dizili anteni oluşturan anten elemanları yön bağımsız olarak kabul edildiğinde $F(\psi(\phi)) = 1$ değerini alır. Bu durumda Eşitlik (1)

$$B(\psi(\phi)) = \sum_{n=0}^{N-1} xw_n e^{jd_x n \psi(\phi)} \quad (2)$$

biçiminde sadeleştirilebilir. Buradan anlaşıldığı üzere dizi faktörü değeri, dizi içerisinde kullanılan antenler yön bağımsız ise anten örüntüsü ile aynı hale gelmektedir. Tez boyunca yapılacak olan işlemlerin daha da karmaşık hale gelmesini engellemek için anten örüntüsü fonksiyonu dizi faktörüne eşit olarak kabul edilecektir.

Eşitlik (2)'deki w_n değişkeni kompleks değerli anten katsayısı olup

$$w_n = |w_n| e^{-jd_x n \psi(\phi_k)} \quad (3)$$

biçiminde ifade edilir. Kompleks anten katsayısının genlik seviyesi, uzayda yayımlanan her bir hüzmeye için kullanılacak olan hüzmeye özgü pencere katsayıları ifade ederken faz değeri sayesinde de hüzmeye yönlendirme işlemi yapılır.

x değişkeni her bir kullanıcı için haberleşme sırasında kullanılacak olan sinyali ifade eder.

Eşitlik (2)'de yer alan $\psi(\phi)$ dalga sayısı fonksiyonu doğrusal anten dizisi için

$$\psi(\phi) = \frac{2\pi}{\lambda} \cos(\phi) \quad (4)$$

biçiminde yazılabilir. ϕ açısı faz dizili antenin hüzme yönlendirebildiği $[0^\circ, 180^\circ]$ aralığında tanımlıdır. Çok kullanıcıli bir senaryoda, $\psi(\phi)$ fonksiyonu k 'inci kullanıcıya ait ϕ_k hüzme yönlendirme açısına bağlı olarak yazıldığında,

$$\psi(\phi_k) = \frac{2\pi}{\lambda} \cos(\phi_k) \quad (5)$$

biçiminde noktasal her bir kullanıcı için sayıl bir büyüklük haline gelir.

d_x değişkeni, anten yerleşimlerinin arasındaki fiziksel uzaklığı ifade eder. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda antenler arası uzaklık, dalga boyunun yarısına eşit olarak kabul edilmiştir. Eşitlik (2) açık halde yazıldığında,

$$B(\psi(\phi)) = \left[\sum_{n=0}^{N-1} x_n | w_n | e^{jn\pi(\cos(\phi) - \cos(\phi_k))} \right] \quad (6)$$

biçiminde sadeleşebilmektedir. Böylece oluşturulan hüzmenin genlik seviyesi yayın frekansından bağımsız hale gelmektedir.

2.2. Yoğun Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemler

Tek girişli tek çıkışlı sistemler ile çok girişli çok çıkışlı sistemler karşılaştırıldığında; çok girişli çok çıkışlı sistemler verici ve alıcı tarafında çok sayıda anten kullanarak veri hızını yükselterek ve diğer sistemlere göre daha güvenli haberleşme sağlayarak sistem performansını yükseltir [23]. Bu nedenle günümüzde kullanılan haberleşme standartları (LTE, UMTS gibi) çok girişli çok çıkışlı sistemlerle birlikte kullanılmaktadır [24].

Günümüzde kullanılan haberleşme cihazlarının sayılarının eskiye göre çok fazla artması, her bir cihaz için gereken veri aktarım boyutunun ve gerekli olan veri aktarım

hızının yükselmesi nedeniyle hali hazırda kullanılan haberleşme altyapıları yetersiz kalmakta bu nedenle de yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelecek nesil hücresel haberleşme sistemlerinin, diğer bir deyişle 5G teknolojisinin, ortaya çıkması ve gelişebilmesi üzerinde yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin çok büyük ölçüde rolü olacaktır. Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler; çok girişli sistemler üzerine ön kodlayıcılar ve her bir ön kodlayıcı altına da çok sayıda anten eklenerek oluşturulmaktadır. Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde; çok sayıda anten kullanılması sonucunda oluşturulan hüzmenin daralması nedeniyle açılış çözünürlüğünün yükselmesi ve antenlerin ön kodlayıcılar altında guruplanması sonucu da güç verimliliği yönünden avantajlıdır [25].

2.3. Milimetre Dalga Boyu ile Haberleşme

WiFi ve 4G gibi haberleşme teknikleri ile karşılaştırıldığında; milimetre dalga boyu ile haberleşmenin yüksek taşıyıcı frekansı, yüksek bant genişliği, huzme genişliğinin dar olması, yüksek iletim kalitesi gibi çok sayıda avantajı vardır. Milimetre dalga boyu frekans izgesinde 30 GHz-300 GHz aralığında çok geniş bir bölge kapsamaktadır. Bu nedenle dalga boyunun özellikleri ile ilgili olarak literatürde çok fazla sayıda çalışma mevcuttur. Tez kapsamından sapmamak adına milimetre dalga boyu yayının temel özellikleri ve dalganın yayılımı ile ilgili genel bilgilere değinilecektir. Milimetre dalga boyu yayınının özellikleri alt başlıklar halinde incelenecektir.

2.3.1. Bant Genişliği

Haberleşme sistemlerinde kullanılan 2G, 3G ve 4G haberleşme ağları genel olarak 780 MHz bant genişliğinden daha düşük bant genişliklerinde haberleşme yapılabilmesini sağlar. Diğer düşük frekanslı yayınlar ile yapılan haberleşme ile karşılaştırıldığında milimetre dalga boyu ile yapılan haberleşmenin en büyük avantajlarından biri çok daha geniş (150 GHz ve üstü) bir bant genişliği üzerinden haberleşme yapılabilmesini sağlamasıdır [26].

2.3.2. Dalga Boyu

Milimetre dalga boyunun kullanılan diğer düşük frekanslı dalga boylu haberleşme sistemlerine nazaran çok daha düşük olması, birim antenlerden oluşan büyük ölçekli anten yapıları tasarlarken aynı birim hacme çok daha fazla sayıda dalga boyunun yarısı kadar aralıkla anten yerleştirilebilmesini sağlamaktadır. Böylece antenin haberleşme performansı artmaktadır. Bu da yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler için büyük ölçüde avantaj sağlamaktadır [26].

2.3.3. Yayılma Kaybı

Genel olarak milimetre dalga boylarında yayılma kaybı, yol kaybı ve nüfuz kaybı olarak iki başlık altında incelenebilir.

Haberleşen sistemler görüş hattı içerisinde haberleşiyorsa, boşlukta gerçekleşen kayıp miktarı

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R c^2}{(4\pi Rf)^2} \quad (7)$$

biçimindeki Friis yayılma formülü yardımıyla hesaplanabilir.

Formülde yer alan; P_R değeri alınan sinyal gücünü, P_T değeri gönderilen sinyal gücünü, G_T değeri gönderme anteni kazancını, G_R değeri alma anteni kazancını, c ışık hızını, R menzil değerini, f yayın frekansını ifade etmektedir.

Yol kaybı, gönderme ve alma yaparken yön bağımsız antenler kullanıldığında ($G_T = G_R = 1$) gönderilen ve alınan sinyal gücünün birbirine oranı olarak tanımlanmaktadır. Böylece Friis yayılma formülü

$$P_L = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (8)$$

biçiminde sadeleşerek yol kaybı değerini ifade eder.

Yol kaybı, Eşitlik (8)'de de görüldüğü gibi, yayın frekansının ve haberleşme yapılan menzilin karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Milimetre dalganın frekansı (30 GHz-300 GHz) diğer haberleşme sinyallerinin frekanslarından çok daha yüksek olduğundan yol kaybı da milimetre dalga boylu yayınlarda yüksek olmaktadır. Örnek vermek gerekirse, 2.4 GHz ile 60 GHz frekanslı yayının kullanımını arasında oluşan kaybın 28 dB daha fazla olduğu söylenebilir [27]. Yol kaybının etkisi, yönlü antenler kullanılarak telafi edilebilmektedir.

Boşlukta gerçekleşen kaybın yanında atmosferik kayıp değerinin atmosferde yer alan gaz moleküllerinin yapısından dolayı yüksek frekanslarda daha fazla olması nedeniyle de atmosferik kayıp miktarı milimetre dalga boyları kullanılarak yapılan yayınlarda diğer düşük frekanslı yayınlara göre daha yüksektir.

Görüş hattı doğrultusunda olmayan haberleşmelerde ise yol kaybından çok nüfuz kaybı yayımlanan sinyal üzerinde etkili olmaktadır. Nüfuz kaybı haberleşme doğrultusu üzerindeki herhangi bir cisimden dolayı sinyal üzerinde gerçekleşen güç kaybını ifade etmektedir. Cismin yapısı, kalınlığı, yüzeyinin yapısı, yansıtıcılığı vb. gibi çok sayıda değişkene bağlı olarak farklı değerler alabilmektedir. Literatürde nüfuz kaybı için yapılan çok sayıda araştırma mevcuttur. C.U. Bas ve arkadaşları [28] yaptıkları çalışma ile 28 GHz yayın frekansında meydana gelecek olan nüfuz kaybı değerlerini, standart tek katlı bir ev için 10.6 dB, çok katlı tuğla bir bina için ise 22.7 dB olarak hesaplamışlardır. Carlos Eduardo ve arkadaşları [29] ise farklı ortamlardaki nüfuz kaybı değerlerini 26.5 GHz ile 40 GHz arasındaki yayın frekansları için hesaplamışlardır. Theodore S. Rappaport ve arkadaşları [30] ise nüfuz kaybını farklı durumlar altında modellemeye çalışmışlardır.

2.3.4. Saçılma ve Yansıma Kaybı

Milimetre dalga yayınlarda dalga boyu seviyesi çok küçük olduğundan yayımlanan dalga, cisimlerin yüzeylerindeki mevcut girinti ve çıkıntılar nedeniyle saçılır ve yansır. Bu durum nedeniyle haberleşmek için kullanılan yayın zayıflamaya uğrar. Cisimlerin mevcut olduğu madde, cisim yüzeylerinin pürüzlülüğü, yayının cisme çarpma açısı vb. gibi çok fazla sayıda parametre içerdiğinden tam olarak modellenmesi ve öngörülebilmesi zordur.

Milimetre dalga boylarında saçılma değeri ise Gauss dağılımı kullanılarak modellenmektedir. Y. Kuga ve P.Phu [31] yaptıkları çalışmalarda saçılım yaratacak yüzeyleri tek boyutlu ve iki boyutlu olarak modellemiş ve bu modeller için geçerli olan Gauss dağılım eşitliklerini yazmışlardır.

Yunchou ve arkadaşları [32] ev ortamında 28 GHz, 73 GHz ve 140 GHz milimetre dalga boylu yayınların saçılma ve yansıma durumlarını incelemişlerdir. Theodore S. Rappaport [33] ve arkadaşları ise 73 GHz yayın için yer yüzeyinin yansıma etkisini modelleyebilmek için çalışmalar yapmışlardır. İki çalışmada da milimetre dalga boylu yayınların yayılımı ile ilgili olarak bulunulan dış veya ev ortamına uygun olacak şekilde modelleme çalışmaları yapılmış ve ölçümler ile bu çalışmaların sonuçları desteklenmiştir. Yapılan çalışmalar çerçevesinde ev ortamlarında kullanılabilir olan yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler için saçılma ve yansıma kaybı etkisinin dışarıda kullanılacak olan sistemlere göre ev içerisindeki eşyaların yoğunluğuna ve duvarlara bağlı olarak çok daha yüksek olarak haberleşme sinyali üzerinde zayıflamaya neden olacağı görülmektedir.

2.4. Donanımsal Hüzme Şekillendirme Teknikleri

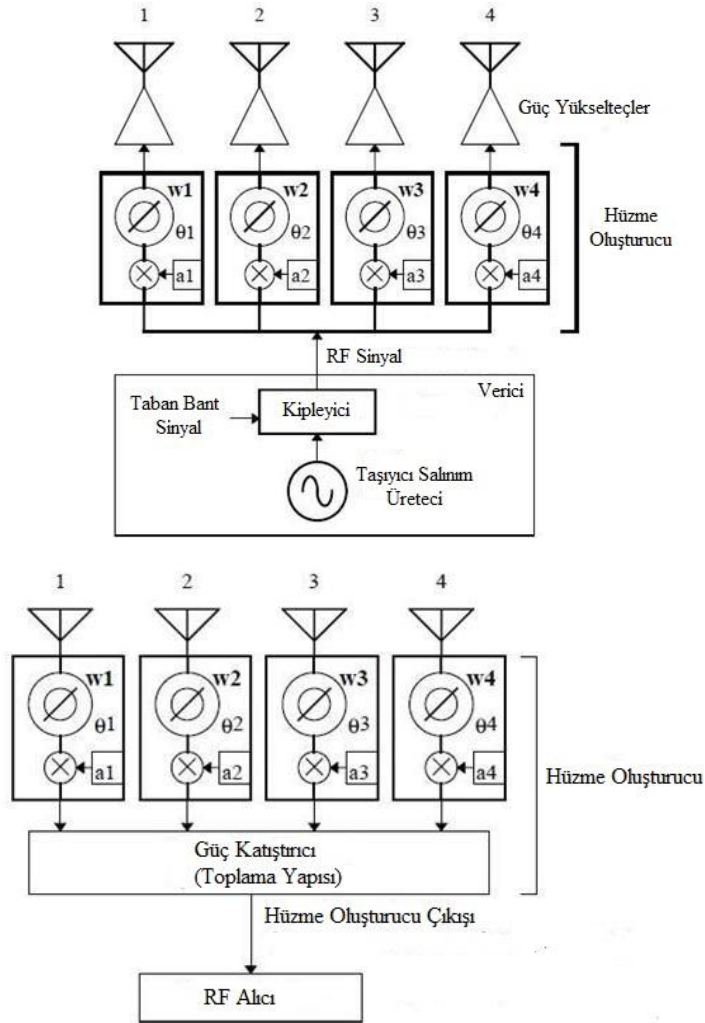
Tüm donanımsal hüzme şekillendirme yapıları belirli bir bölgeye yönlendirilen sinyal gücünü maksimize ederken diğer bölgelere yönlendirilen sinyali ve ortam gürültüsünü bastırmayı amaçlar. Hüzme şekillendirme, haberleşme sinyalinin dar bantlı ya da geniş bantlı oluşuna göre farklı tekniklerle yapılabilir. Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde, bireysel anten sayısı çok fazla olduğundan uzayda oluşturulan örüntü dar bantlı olarak kabul edilir.

Donanımsal yapılar göz önünde bulundurulursa hüzme şekillendirme yapıları analog, sayısal ve hibrit olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yapılar, ilgili anten arkası donanımın farklı yerleşimleri nedeniyle farklı isimlerle literatürde yer alır. Her bir yaklaşımın farklı avantajları ve dezavantajları mevcuttur.

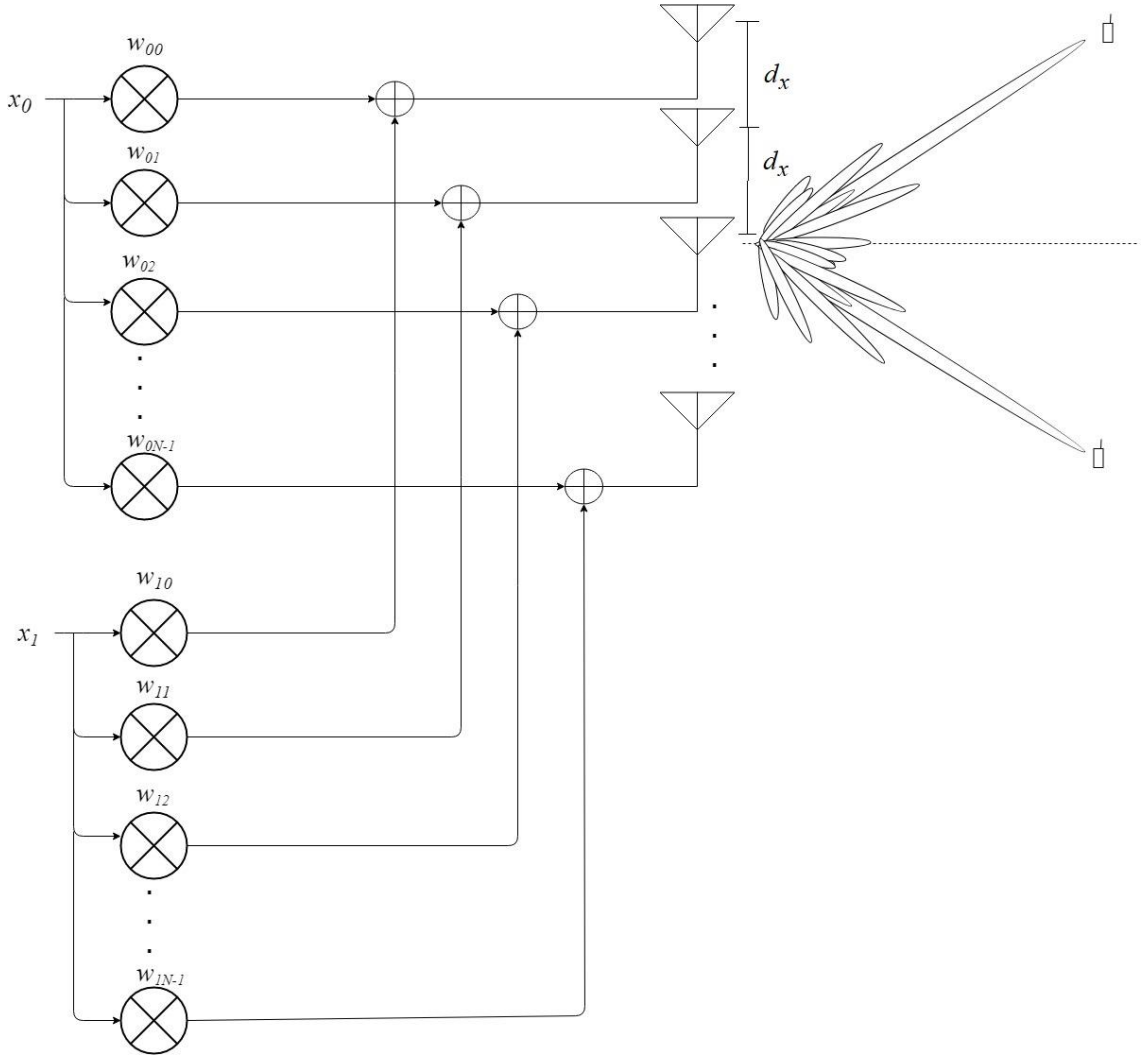
Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin en önemli dezavantajı sistem yapısı nedeniyle güç tüketiminin yüksek olması ve donanım karmaşıklığı problemini ortaya getirmesidir.

İlgili dezavantajları çözebilmek için yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler üzerinde yapılan çalışmalar sırasında ilk önce donanımsal olarak analog hüzmeye şekillendirme teknikleri kullanılmıştır (Şekil 2.3). Analog hüzmeye şekillendirme uygulandığında yalnızca kullanıcıların görüş hattı doğrultularının kestirimlerinin yapılması yeterli olmaktadır. Bu sayede düşük karmaşıklıkta, düşük güç tüketimli sistemler tasarlanabilmektedir.

Analog hüzmeye şekillendirme gerçekleştirilen vericide, uzaya gönderilecek olan analog sinyaller RF bandındayken faz kaydırıcılardan geçirilir ve anten katsayıları ile çarpım işlemleri yapılır. Sonrasında ise güç yükselteçlerden geçirilerek uzaya yayımlanır. Alma yapısında ise RF sinyal öncelikle faz kaydırıcılardan ve gerekli anten katsayısı çarpım işlemlerinden geçirilir. Sonrasında ise güç katıştırıcı yapısı kullanılarak alıcıya iletilir.



Şekil 2.3 Sırası ile analog hüzmeye şekillendirme gönderme ve alma yapıları [34]



Şekil 2.4 İki kullanıcı için N adet anten ile analog hüzme yönlendirme

Analog hüzme şekillendir yapısı kullanıldığında Şekil 2.4’de de görüldüğü gibi k ’inci kullanıcı için gönderilen k ’inci hüzme Eşitlik (2)’den farklı olarak

$$B_k(\psi(\phi)) = \sum_{n=0}^{N-1} x_k w_{kn} e^{jd_x n \psi(\phi)} \quad (9)$$

biçiminde genel halde yazılabilir. Eşitlik (9)’da yer alan w_{kn} kompleks anten katsayısı değerlerinin iki boyutlu olmasının nedeni, her bir kullanıcı için bireysel olarak toplamda K adet yayımlanacak olan hüzmenin farklı anten katsayıları ile çarpılarak gönderilen kullanıcıya özgün olarak oluşturulmasıdır. İki boyutlu kompleks anten katsayısı

$$w_{kn} = |w_{kn}| e^{-jd_x n \psi(\phi_k)} \quad (10)$$

biçiminde ifade edilir. $B_k(\psi(\phi))$ ifadesi, k 'inci kullanıcı için oluşturulan hüzmelerin genlik seviyesini, d_x değeri antenler arası uzaklığı, x_k değeri ise k 'inci kullanıcı için gönderilecek olan sinyalin genlik seviyesini ifade etmektedir.

Analog hüzmeye şekillendirme yapısının en büyük dezavantajı, haberleşme yapılan ortam hakkında herhangi bir bilgiye dayalı olarak hüzmeye yönlendirme işlemini yapamamasıdır. Çok kullanıcılı haberleşme sırasında yalnızca kullanıcıların uzayda yerleştiği açı değerlerine uygun olarak hüzmeye yönlendirme yapılmasını sağlamaktadır. Uzaya gönderilecek olan hüzmeler üzerinden haberleşme ortamına uygun olarak işlem yapılarak haberleşme performansının yükseltilebilmesi için sayısal hüzmeye oluşturma donanımının kullanılması gerekmektedir.

Analog hüzmeye şekillendirme yapısı düşük maliyetli ve düşük güç tüketimi ile yapılabilen bir yöntem olmasına rağmen sayısal hüzmeye şekillendirme yöntemi, hüzmeye şekillendirme konusunda analog hüzmeye şekillendirme yapısına göre çok daha esneklerdir.

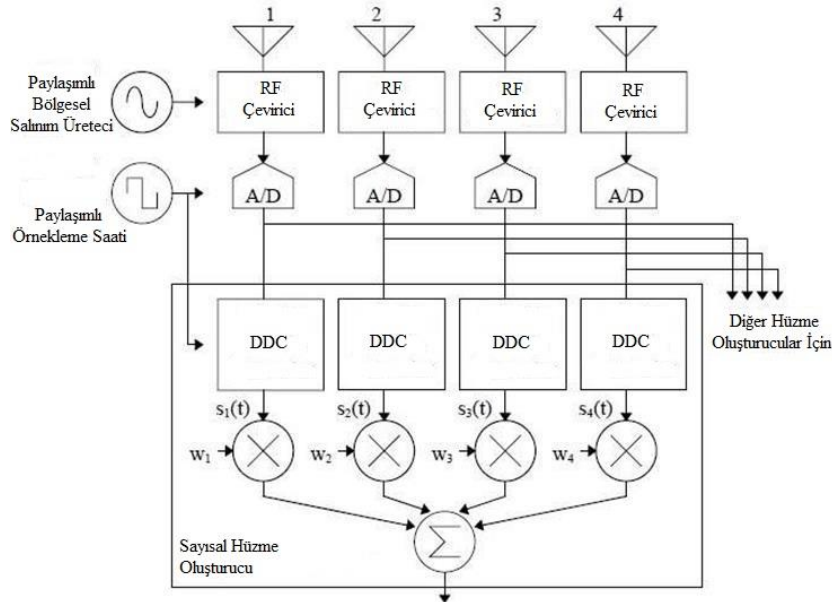
Alıcı tarafından alınan kullanıcı sinyalleri öncesinde ADC (Analog-Sayısal Dönüştürücü) yapılarından geçirilerek örneklenir. Sonrasında DDC (Sayısal Alt Çevirici) yapılarından geçirilip anten katsayıları ile çarpılarak toplamda alınan tüm sinyal örneklenmiş olur. Örneklenen sinyaller üzerinden haberleşme yapılan ortam ile ilgili bilgi toplanır.

Haberleşme yapılan ortamda mevcut olan çevresel faktörler ve cisimler (dış ortam ise ağaçlar, elektrik direkleri, binalar vb., oda gibi kapalı bir ortam ise mobilyalar, duvarlar, pencereler vb.) yayımlanan sinyal üzerinde yapıcı ve yıkıcı etkiler oluşturur. Haberleşme yapılan bu denli karmaşık bir ortamın etkisi, faz dizili anten üzerinde Gauss ve/veya Rayleigh dağılımlı güç yoğunluğu oluşturmaktadır. Bahsedilen güç yoğunluğu literatürde KDB (Kanal Durum Bilgisi) olarak tanımlanmaktadır [35]. Ortam etkisini haberleşme sinyali üzerinden kaldırmak ve haberleşme performansını yükseltmek için KDB bilgisi aracılığıyla anten katsayıları Gauss veya Rayleigh

dağılımlı katsayılar ile hesaplanır ve bu katsayılar kullanılarak hüzme şekillendirme işlemi yapılır. Hüzme şekillendirme işlemi sırasında kanal özelliklerini içeren kanal matrisi oluşturulur ve gönderilecek olan sinyal kanal matrisi ile çarpılarak gönderilir. İlgili işleme MRT (Maksimum Oran Gönderimi) denilmektedir. Alma işlemi sırasında alıcılardan gelen sinyal ile kanal matrisinin kompleks eşleniği çarpılır. Bu işleme de MRC (Maksimum Oran Toplayıcısı) denilmektedir [36, 37].

Ortamda bulunan cisimler nedeniyle haberleşme sinyali kullanıcıya birden fazla yoldan yansyarak ve zayıflayarak da ulaşabilir. Mevcut olay çok yol etkisi olarak literatürde tanımlanmaktadır. Çok yol etkisi altında haberleşme performansını yükseltebilmek için yansıtıcı yüzeyler üzerine de hüzmeler gönderilerek görüş hattındaki kullanıcı üzerine düşen toplam güç yoğunluğu yükseltilebilir. Literatürde bu yaklaşım geometri tabanlı istatistiksel kanal modellemesi olarak geçmektedir [38].

Sayısal hüzme şekillendirme sırasında yapılan tüm işlemler, örneklenmiş kullanıcı sinyalleri üzerinden yapılmaktadır. Bu sayede sayısal hüzme şekillendirme yapısı, anten örüntüsü şekillendirme konusunda analog hüzme şekillendirme yapısına göre avantaj sağlar.



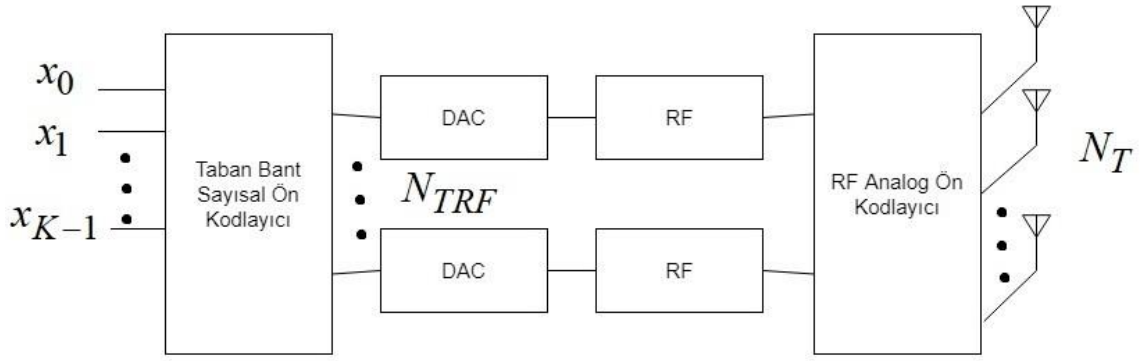
Şekil 2.5 Sayısal hüzme şekillendirme gönderme yapısı [34]

Sayısal hüzme şekillendirme yapısının kullanılabilmesi için Şekil 2.5’de de görüldüğü üzere faz dizili antende yer alan her bir anten elemanı arkasında RF hatlar ve DAC (Sayısal Analog Dönüştürücü) yapılarının kullanılması gerekmektedir. Ancak yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde anten sayısının da fazlalığı nedeniyle bu şekilde yapılacak olan bir yaklaşım kullanılacak toplam gücü ve donanımsal karmaşıklığı büyük ölçüde arttırmaktadır.

Sonuç olarak, literatürde analog ve sayısal hüzme şekillendirme yöntemlerinin birleştirildiği ve her iki yöntemin de avantajlı taraflarını taşıyan hibrit hüzme şekillendirme teknikleri önerilmiştir [20].

Hibrit hüzme şekillendirme, sayısal hüzme şekillendirme tekniğinin hüzme şekillendirme konusundaki esnekliği ve analog hüzme şekillendirme yönteminin donanım basitliğini ve düşük maliyetli olma özelliğini içermektedir. Ayrıca sayısal hüzme şekillendirme yönteminde hüzme yönlendirmek için kullanılacak olan faz kaydırma işlemi sayısal olarak sinyal üzerine gecikme uygulanarak yapılmaktadır. Milimetre dalga boyu ile haberleşme sırasında yüksek frekans değerleri kullanıldığından uygulanacak olan gecikme miktarı pikosaniyeler cinsinden olacağından sayısal olarak bu kadar kısa gecikmenin sinyal üzerine uygulanabilmesi mevcut teknolojiler kapsamında mümkün değildir. 5G haberleşme teknolojisinde yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler üzerinde kullanılacak olan en uygun hüzme şekillendirme tekniği olarak kabul edilmektedir [39].

Verici yönünden bakılırsa; öncelikle kullanıcılara gönderilmek istenen K adet haberleşme sinyali taban bantta ön kodlama yapılarak gruplanır. Gruplanan taban banttaki kullanıcı sinyalleri üzerine N_{TRF} adet gönderme modülü ile faz ve genlik ekleme/çıkartma işlemleri yapılır. Faz ve genlik ekleme/çıkartma işlemlerinden sonra gönderilmek istenen sinyaller DAC (Sayısal Analog Dönüştürücü)’den geçirilerek analog hale getirilir ve sonrasında RF frekansa yükseltilerek RF analog ön kodlayıcısına gönderilir. RF analog ön kodlayıcı içerisinde analog hüzme şekillendirme yöntemi uygulanarak uzayda açılal olarak istenen noktaya hüzme gönderme işlemi yapılır. Şekil 2.6’da hibrit hüzme şekillendirme tekniği gösterilmiştir.



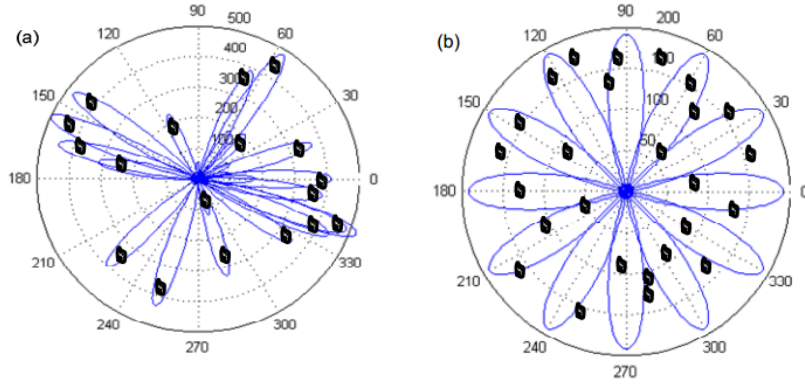
Şekil 2.6 Hibrit hüzme şekillendirme gönderme hattı [40].

Tez sırasında hüzme yönlendirme ile ilgili algoritmik yaklaşımlar üzerinde çalışıldığından, hibrit hüzme şekillendirme yapısının yalnızca RF analog ön kodlayıcı (analog hüzme şekillendirme) kısmı üzerine yoğunlaşılacaktır.

2.5. Çok Kullanıcılı Durum

Uzayda birden fazla kullanıcının yer aldığı durumda izgel verimliliği yüksek bir haberleşme ağının kurulabilmesi için kullanıcı sayısı kadar hüzmenin aynı anda yayımlanması gerekmektedir. Literatürde bu gereksinimin çok hüzmeli (Multibeam) anten kullanarak yapılabildiği belirtilmektedir. Faz dizili anten üzerindeki antenlerin yerleşimi donanımsal olarak birbirlerine yarım dalga boyundan daha yakın olduğu durumda faz dizili anten, çok hüzmeli yayın yapabilmektedir [41]. Çok hüzmeli yayın durumunda ana hüzmenin ayna görüntüleri uzayda birden fazla bölgeye aynı anda gönderilebilmektedir.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde her bir kullanıcı için haberleşmede kullanılacak olan sinyaller taşıdıkları bilginin kullanıcılara özel olması nedeniyle farklıdır. Bu nedenle çok hüzmeli antenlerden farklı olarak, yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemin anteninin her bir kullanıcı için Şekil 2.7’de görüldüğü gibi ayrı ayrı hüzme oluşturulması gerekmektedir.



Şekil 2.7 Her bir kullanıcıya özgü yönlendirilmiş yoğun çok girişli çok çıkışlı sistem anten örüntüsü (a) çok hüzmeli anten örüntüsü (b) [25].

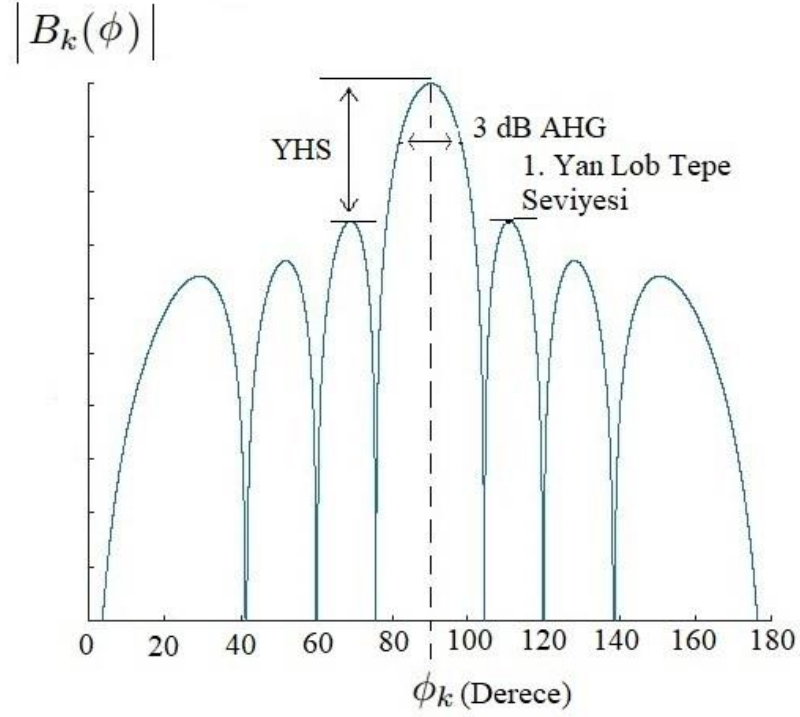
Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde, sistem üzerinde yer alan N adet antenin her biri tüm kullanıcılar üzerine bireysel olarak yönlendirildiğinden dolayı, sistem üzerinde kullanılan toplam güç arttırılmadan uzaya haberleşme için basılan sinyal kullanıcı bazında N kat daha güçlü olarak iletilecektir. Bu iletim, izgenin daha verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca kendisi için hüzmeye şekillendirilen kullanıcının mevcut olmadığı bölgelere daha az güç yayımlanması sonucunda diğer kullanıcılar üzerinde yaratılan girişim sinyali seviyesi de düşük olur [22].

2.6. Hüzmeye Karakteristiği

Oluşturulan tüm hüzmeler kullanım amacına bağlı olarak anten performans kriterleri arasında yer almaktadır. Bu kriterleri sağlayabilecek olan belirli tasarım parametreleri mevcuttur. Tasarım parametreleri ile şekillendirilen hüzmelerin karakteristik özellikleri anten performansını iyileştirecek şekilde optimize edilebilir.

Çok sayıda kullanıcı ile yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler aracılığıyla haberleşme yapılabilmesi için uzayda şekillendirilen hüzmelerin karakteristiği büyük önem taşımaktadır. Tez kapsamında kullanılacak olan hüzmeye tasarım parametreleri Şekil 2.8’de görüldüğü gibi; 3 dB ana hüzmeye genişliği (3dB AHG), ana hüzmeye ile ana hüzmeye en yakın yan lob tepe seviyesi arasındaki güç farkı (YHS, Yan hüzmeye seviyesi) ve yan lob tepe seviyeleridir.

2.6.1. 3 dB Ana Lob Hüzme Genişliği



Şekil 2.8 Hüzme tasarım parametrelerinin hüzme üzerindeki yerleri

Doğrusal anten dizilerinde kartezyen koordinatlarda x-y düzlemi üzerindeki 3 dB AHG

$$AHG_{3dB} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \sqrt{0.886 \frac{\lambda}{Nd_x} b} \quad ; \phi_k = 0^\circ, \phi_k = 180^\circ \\ \frac{0.886 \lambda b}{\sin(\phi_k) Nd_x} \quad \phi_k \neq 0^\circ, \phi_k \neq 180^\circ \end{array} \right\} \quad (11)$$

ifadesi yardımı ile hesaplanabilir [41]. Eşitlik (11) içerisinde yer alan b değişkeni, genişletme faktörü olarak tanımlanır ve pencereleme yöntemlerine göre değişmektedir. λ değişkeni dalga boyunu ifade eder. d_x değişkeni antenler arası mesafeyi, N değeri anten sayısını, ϕ_k değişkeni ise hüzme yönlendirme açısını ifade etmektedir. Pencereleme yöntemlerinin ana hüzme genişliği üzerindeki etkileri Pencereleme Teknikleri başlığı altında incelenecektir.

2.6.2. Yan Hüzme Genişliği ve Yan Lob Tepe Seviyesi

Yan hüzme genişliği (YHS); ana hüzme tepe seviyesi ile bu hüzme en yakın seviyede olan yan lob tepe seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanır. Faz dizili anten içerisinde kullanılan anten sayısına bağlı olarak değişmeyen bir parametredir. Kullanılan pencereleme yöntemleri ile değişir.

Yan lob tepe seviyeleri değerleri de anten sayısına bağlı olarak değişmeyen bir parametredir. YHS değerinde olduğu gibi kullanılan pencereleme yöntemleri ile değiştirilebilir.

Anten hüzmesinin sıfır noktalarının sıklığı anten sayısı arttıkça artmaktadır. Uzaydaki açısal yerleri ise kullanıcılara yönlendirilen hüzmelerin yönlenme açı değerlerine göre değişmektedir. Çok sayıda kullanıcı üzerine hüzme yönlendirme işlemleri yapılırken anten hüzmesinin sıfır noktalarının pozisyonları ve tepe seviyeleri büyük ölçüde önem taşımaktadır.

Çok sayıda kullanıcı ile yapılacak olan haberleşme sırasında yüksek anten sayılarının da kullanıldığı düşünöldüğünde, yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler için kullanıcı bazında hesaplanacak olan SGGO seviyelerini analitik olarak hesaplamak ve maksimize etmek çok büyük ölçekte işlem yükü gerektirmektedir. Bu nedenle SGGO seviyeleri hesaplama işlemlerini çeşitli optimizasyon yöntemleri ile kestirebilmek işlem yükünü düşürebilme açısından büyük önem taşımaktadır.

2.7. Pencereleme Teknikleri

Literatürde yer alan birden fazla pencereleme yöntemi vardır. İlgili yöntemleri kullanarak haberleşme yapılması istenen kullanıcı konumlarına uygun olarak uzaydaki her bir kullanıcı için mümkün olan en iyi hüzmenin yayınlanması amaçlanmaktadır.

Pencereleme yöntemlerinde bireysel anten katsayılarının alabileceği farklı genlik seviyeleri yan lob sinyal seviyelerinin ve ana lob genişliğinin ayarlanmasında yardımcı olmaktadır.

Uzayda pencereler ile oluşturulan örüntünün yan lob tepe seviyeleri ile ana lob hüzmeye genişliği arasında bir ödünleşim mevcuttur. Yan lob seviyeleri ne kadar düşük olursa ana hüzmeye genişliği o kadar yüksek, ana hüzmeye genişliği ne kadar düşük olursa yan lob seviyeleri de o kadar yüksek olur.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde anten sayısı çok fazla olduğundan dolayı uzayda her bir kullanıcı için yayımlanan hüzmeler darhüzme olarak kabul edilebilir. Darhüzme yaklaşımında, uzayda k 'inci kullanıcı için şekillendirilen örüntü yalnızca yönlendirildiği ϕ_k açısında maksimum güç transferi gerçekleştirdiğinden, ilgili hüzmeye dürtü fonksiyonu ($\delta(\cdot)$) ile tanımlanabilir.

Hüzme yönlendirme işlemi, dalga sayısı fonksiyonlarının farkı alınarak yapılır. Sonuç olarak k 'inci kullanıcı için oluşturulan örüntü

$$B_k(\psi(\phi)) = 2\pi\delta(\psi(\phi) - \psi(\phi_k)) \quad (12)$$

biçiminde yazılabilmektedir.

Kompleks anten katsayıları, anten örüntüsü üzerinden

$$w_{kn} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} B_k(\psi(\phi)) e^{-jn\psi(\phi_k)} d\psi \quad (13)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Formülde yer alan $B_k(\psi(\phi))$ k 'inci kullanıcı için oluşturulan anten örüntüsü fonksiyonu yerine Eşitlik (12)'deki darbantlı hüzmeye yaklaşımında kullanılan değer yazıldığında

$$w_{kn} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 2\pi \delta(\psi(\phi) - \psi(\phi_k)) e^{-jn\psi(\phi_k)} d\psi \quad (14)$$

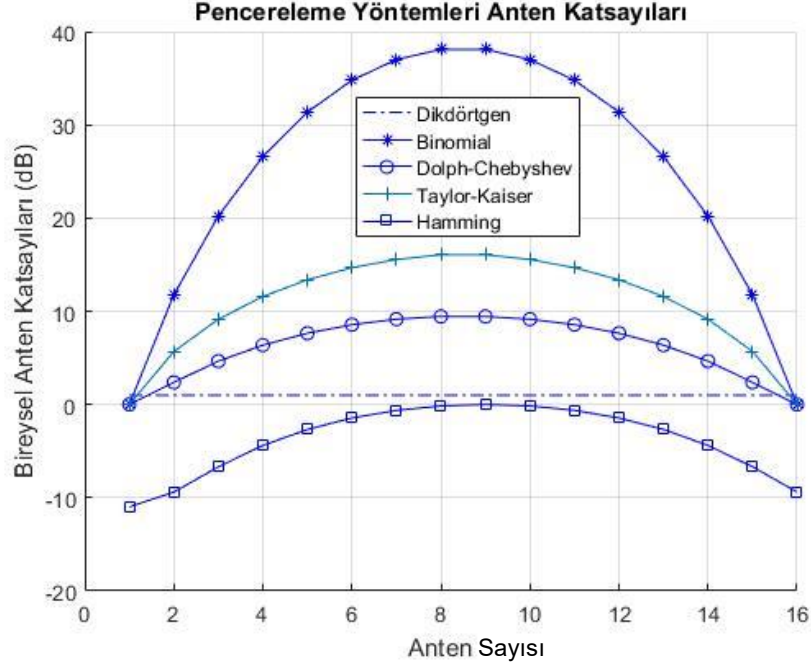
haline gelmektedir. Eşitlik (14) sadeleştiğinde ise

$$w_{kn} = e^{-jn\psi(\phi_k)} \quad (15)$$

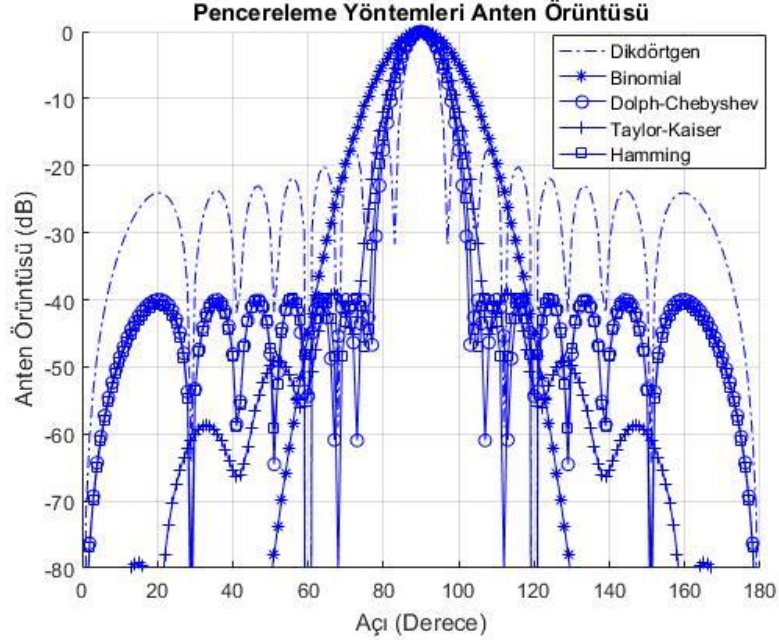
sonucuna ulaşılmaktadır [41]. İlgili sonuçta görüldüğü üzere bireysel anten katsayılarının genlik seviyesi 1 olmaktadır. Faz değeri ise yönlendirilen ϕ_k açısıdır. Genlik seviyesi 1 olduğundan, kullanılabilir olan pencereleme yöntemleri ile her bir anten için gerçek değerli olarak hesaplanan pencere katsayıları, hüzmelerin yapısını bozmadan doğrudan uygulanabilir.

Sonuç olarak literatürde yer alan pencereleme yöntemleri yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Tez kapsamında antenlerin kartezyen koordinat düzleminde x ekseninde yerleştiği varsayılacaktır. Bu nedenle antenlerin ana hüzmeleri, antenler herhangi bir ağırlık çarpanı ile çarpılmadığı takdirde, x eksenine göre 90° açı ile oluşacaktır.



Şekil 2.9 Pencereleme yöntemleri için antenlere uygulanması gereken katsayı değerleri (YHS: 40 dB, anten sayısı: 32)



Şekil 2.10 Pencereleme yöntemleri sonucu oluşan anten örüntüleri (YHS: 40 dB, anten sayısı: 32)

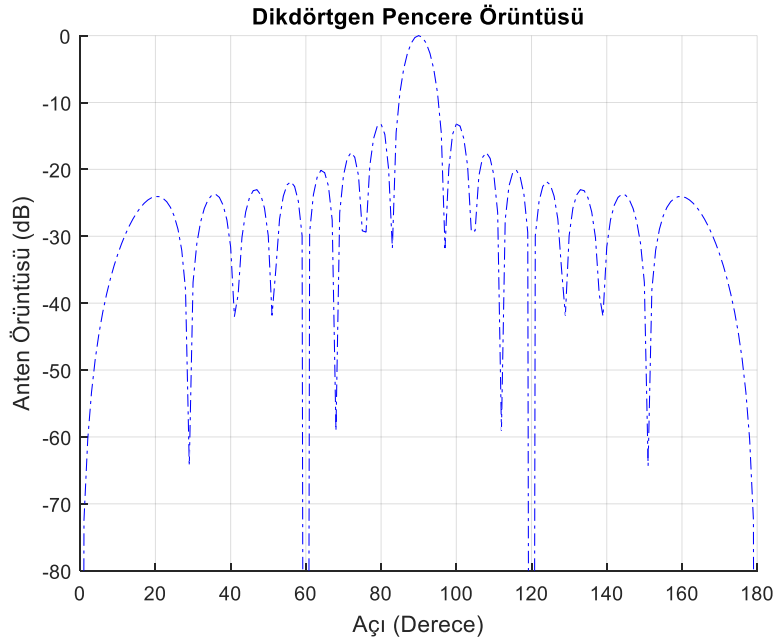
Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da görülen, sinyal üzerine uygulanacak olan pencereleme yöntemleri dışında matematiksel olarak sentezlenerek hüzme şekillendirme yapılabilir.

2.7.1. Dikdörtgen Pencere

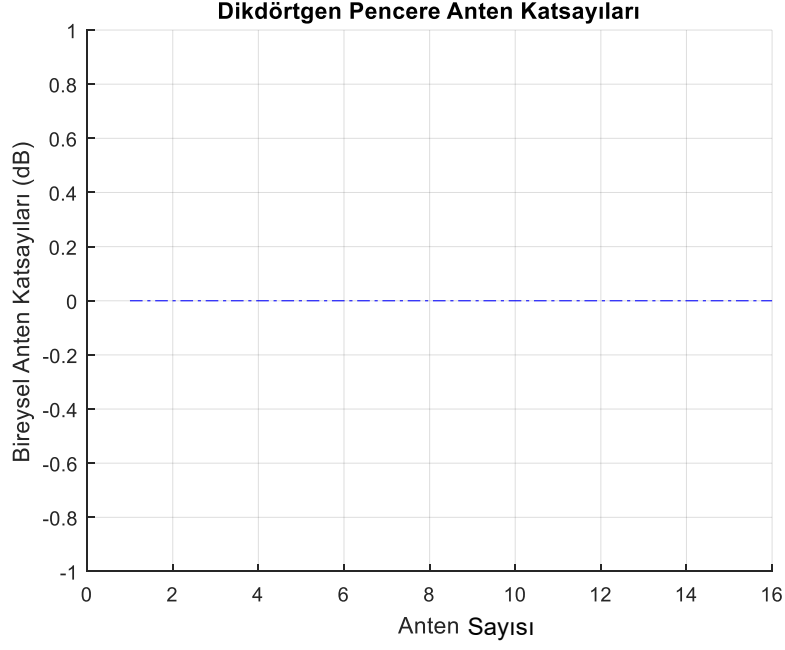
Şekil 2.11’de hüzme üzerindeki etkisi yer alan dikdörtgen pencere, faz dizili anten üzerindeki tüm antenler için uygulanan pencere katsayılarını Şekil 2.12’de yer aldığı gibi 0 dB olarak kabul eder. Kısaca pencere uygulanmayan durumdur.

3 dB ana lob hüzme genişliği ve yan lob seviyeleri faz dizili anten üzerindeki bireysel antenlerin yerleşimine ve karakteristiğine bağlı olarak değer alır.

Yön bağımsız bireysel antenlerden oluşan faz dizili antenlerde yan hüzme seviyesi -13.5 dB değerini alır. Ana hüzme genişliği ise anten sayısına bağlı bir değerdir.



Şekil 2.11 Dikdörtgen pencere kullanılan anten örüntüsü, anten sayısı:16



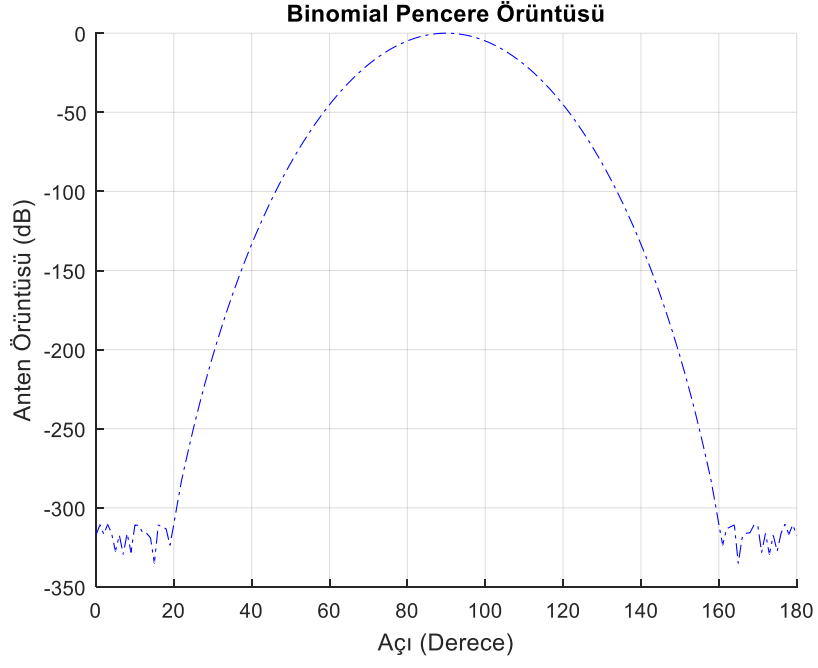
Şekil 2.12 Dikdörtgen pencere anten katsayıları

2.7.2. Binomial Pencere

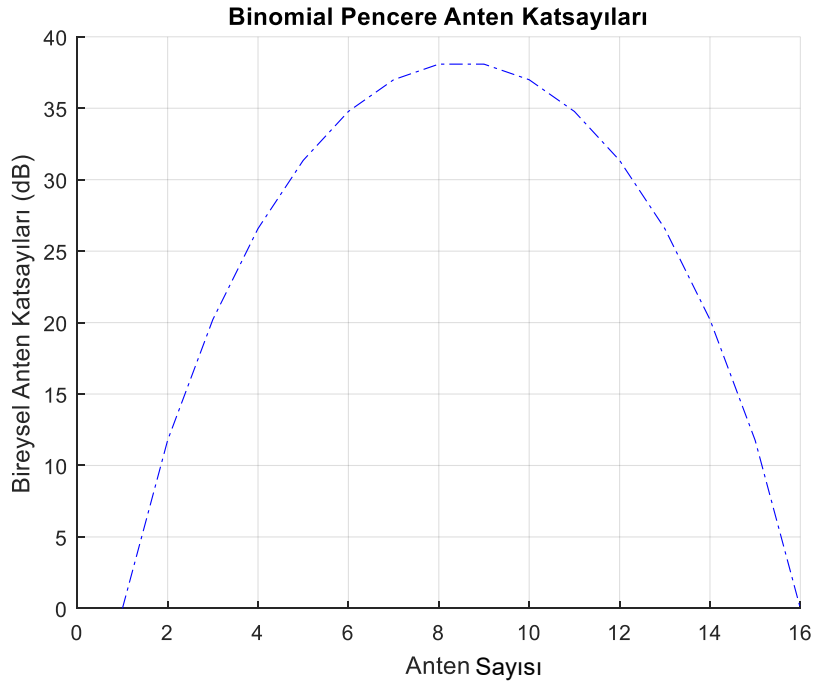
Binomial pencerenin özelliği, pencereleme işlemleri sonucunda ortaya çıkan örüntünün Şekil 2.13’de görüldüğü gibi yan hüzmeye seviyelerinin ihmal edilebilecek kadar düşük seviyede olmasıdır. Ancak bu iyileştirme, AHG_{3dB} seviyesinin genişlemesine neden olmaktadır. Binomial pencerelemenin yapılabilmesi için anten katsayıları Eşitlik (16)’daki gibi hesaplanmaktadır ve 16 adet anten için Şekil 2.14’de dB cinsinden verilmektedir.

$$w_{kn} = \frac{(N-1)!}{n!(N-1-n)!} \quad (16)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$



Şekil 2.13 Anten sayısı 16 iken Binomial pencere kullanılan anten örüntüsü



Şekil 2.14 Binomial pencere anten katsayıları

2.7.3. Dolph-Chebyshev Pencere

İlgili yaklaşım Chebyshev polinomlarını kullanarak pencere katsayılarını oluşturmayı amaçlar. Dolph-Chebyshev penceresi, kullanıcı tarafından belirlenen YHS (Yan hüzme seviyesi)'yi ayarlamaya çalışır. Diğer tüm yan hüzme tepe seviyelerini de Şekil 2.15'de görüldüğü gibi aynı güç değerinde olacak şekilde ayarlar.

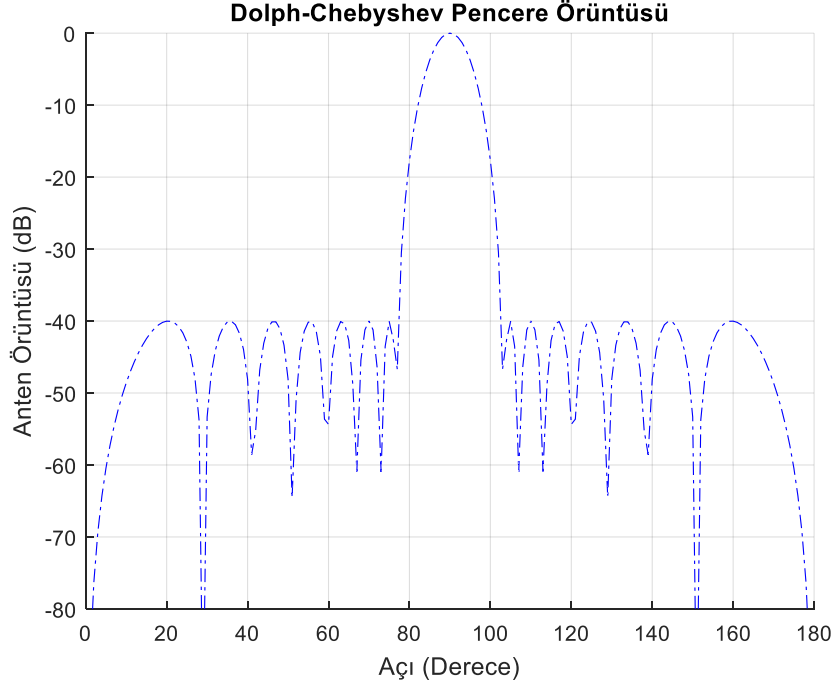
Literatürde Dolph-Chebyshev pencere katsayıları

$$\begin{aligned}x_{k0} &= \cosh\left(\frac{a \cosh(10^{YHS/20})}{N-1}\right) \\x_{kn} &= \cos\left(\frac{\pi(n-0.5)}{N-1}\right) \\ \alpha_{kn} &= 2 \arccos\left(\frac{x_{kn}}{x_{k0}}\right) \\ z_{kn} &= e^{j\alpha_{kn}}\end{aligned}\tag{17}$$

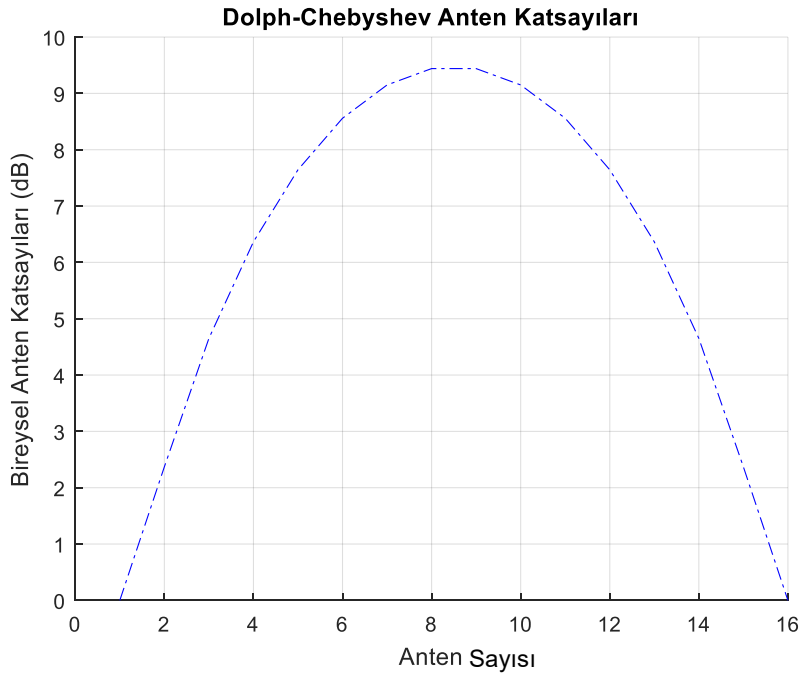
işlemleri sırası ile yapılarak ayarlanır. 16 adet anten için Dolph-Chebyshev katsayılarının dB cinsinden değeri Şekil 2.16'da görülmektedir.

Eşitlik (17)'de yer alan z_{kn} ifadesi k 'inci kullanıcı için uygulanacak olan pencerenin polinom köklerini ifade etmektedir. Oluşturulan polinomun katsayıları Dolph-Chebyshev pencere katsayılarını verir.

Dolph-Chebyshev penceresi, faz dizili anten üzerindeki bireysel antenler arasındaki uzaklık $\frac{\lambda}{2}$ değerine eşit ya da büyük ise geçerlidir. Antenler arası uzaklığın daha düşük olduğu durumlarda, ilgili anten katsayıları Riblet modifikasyonu ile hesaplanabilir.



Şekil 2.15 Anten sayısı 16 ve YHS 40 dB iken Dolph-Chebyshev pencere kullanılan anten örüntüsü



Şekil 2.16 YHS 40 dB iken Dolph-Chebyshev pencere anten katsayıları

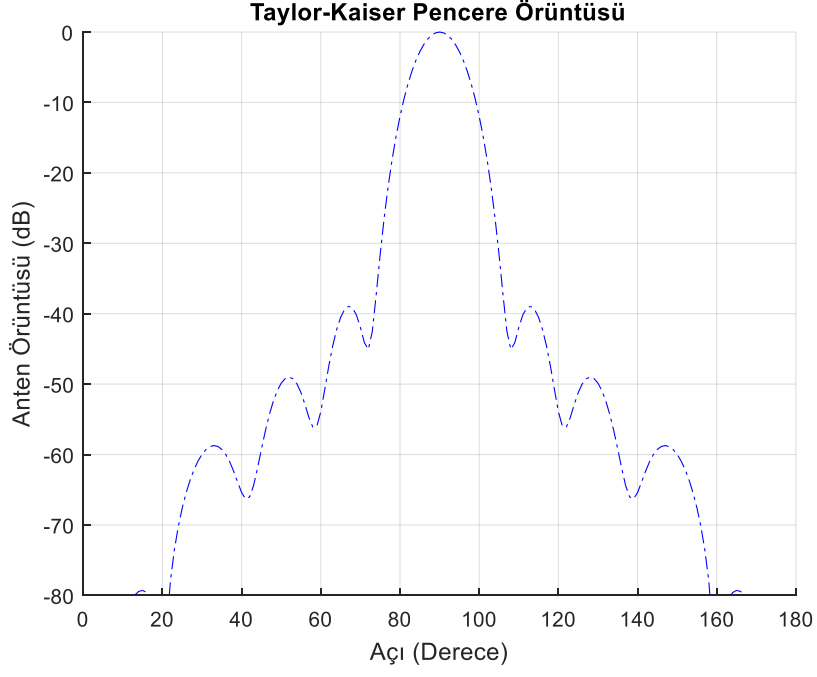
2.7.4. Taylor-Kaiser Pencere

Taylor-Kaiser penceresi yalnızca belirlenen ilk yan hüzme seviyesini ayarlar. Diğer yan hüzme seviyeleri ile ilgili herhangi bir işlem yapmaz. Şekil 2.17’de Taylor-Kaiser penceresinin hüzme üzerindeki etkisi görülmektedir. Daha önce bahsedilen ödünleşimden yola çıkarak ana hüzme seviyesinin, Dolph-Chebyshev penceresinin ana hüzme seviyesinden daha geniş olduğu görülebilir. Yan hüzme seviyelerini Taylor-Kaiser pencere kullanarak ayarlamak için

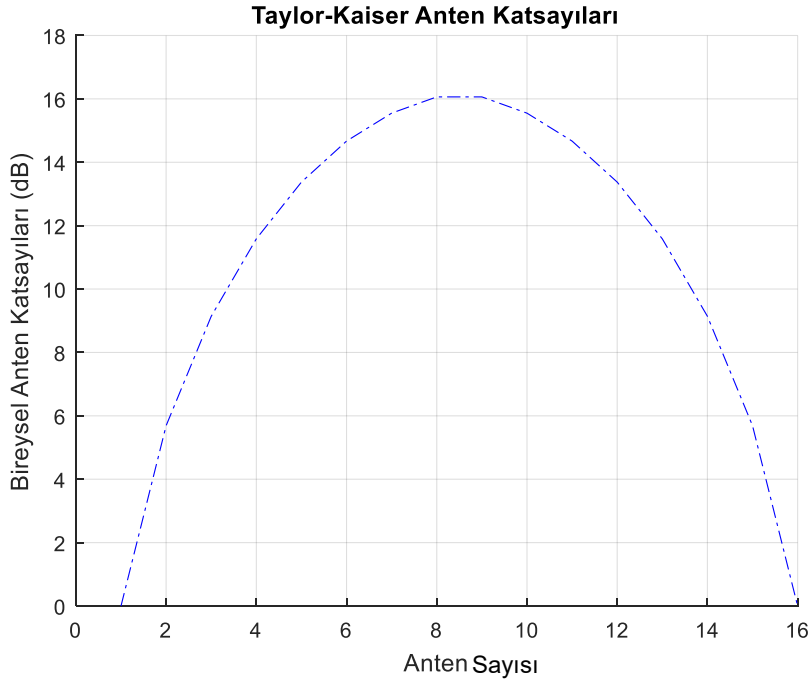
$$w_{km} = I_0(\pi C \sqrt{1 - (m/M)^2})$$
$$\pi C = \begin{cases} 0 & \alpha \leq 13.26 \\ 0.76609(\alpha - 13.26)^{0.4} + 0.09834(\alpha - 13.26) & 13.26 \leq \alpha \leq 60 \\ 0.12438(\alpha + 6.3) & 60 < \alpha < 120 \end{cases} \quad (18)$$

eşitlikleri sırası ile hesaplanır. Şekil 2.18’de 16 adet anten için hesaplanmış Taylor-Kaiser pencere katsayılarının dB cinsinden değerleri görülmektedir.

Eşitliklerde yer alan M değeri, çift anten sayılı faz dizili antenlerde toplam anten sayısının yarısına eşittir.



Şekil 2.17 Anten sayısı 16 ve YHS 40 dB iken Taylor-Kaiser pencere kullanılan anten örüntüsü



Şekil 2.18 YHS 40 dB iken Taylor-Kaiser pencere anten katsayıları

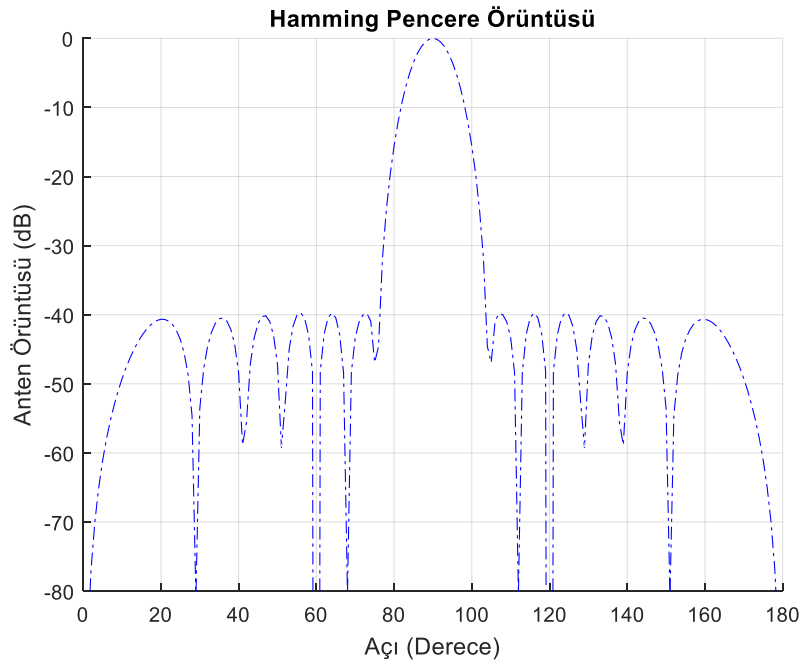
2.7.5. Hamming Pencere

Hamming pencere yönteminde k 'inci kullanıcı için antenlere uygulanması gereken katsayılar

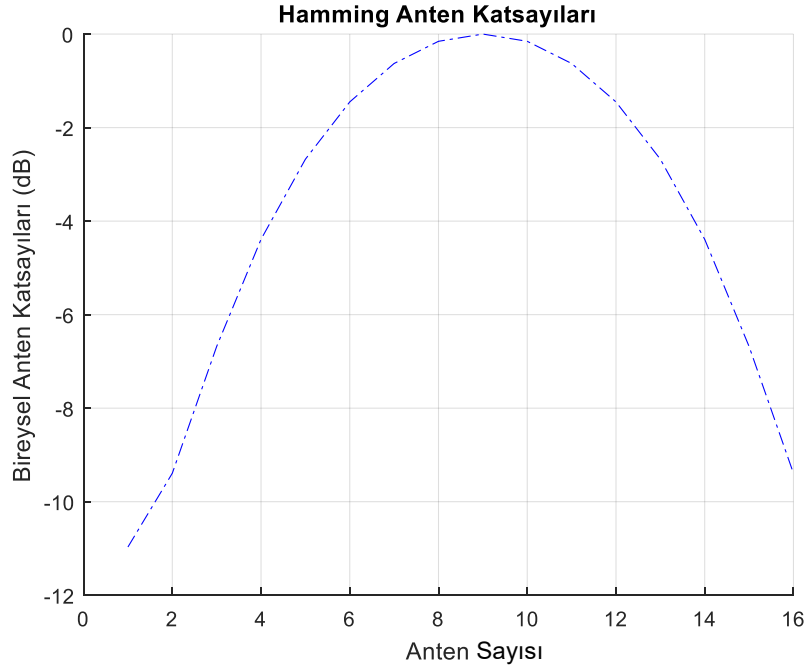
$$w_{kn} = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \quad (19)$$
$$n = 0, 1, \dots, N - 1$$

eşitliği yardımıyla hesaplanabilir. 16 adet anten için hesaplanmış Hamming pencere katsayılarının dB cinsinden değeri Şekil 2.20'de görülmektedir. Hamming pencerelemenin sonucu olarak yan hüzme seviyeleri Şekil 2.19'da görüldüğü gibi -40 dB değerine ayarlanır.

Ana hüzme genişliği ile yan hüzme tepe seviyeleri arasındaki ödünleşimin etkisi genişlik faktörü değeri ile belirtilir. Dikdörtgen pencere olduğu durumu referans alır ve anten dizisi üzerinde kullanılan pencereleme yöntemine göre farklı değerler alır.



Şekil 2.19 Anten sayısı 16 iken Hamming pencere kullanılan anten örüntüsü



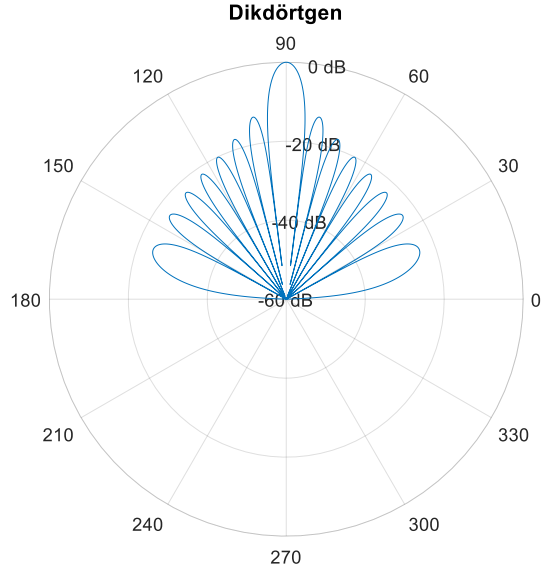
Şekil 2.20 Hamming pencere anten katsayıları

Pencere katsayılarının YHS (Yan hüzme seviyesi)'ye bağlı b genişlik faktörü değerleri Çizelge 2.1'de verilmektedir. Genişlik faktörü değerinin büyük olması, pencereleme yöntemi ile oluşturulan hüzmenin AHG_{3dB} seviyesinin geniş olması anlamına gelmektedir.

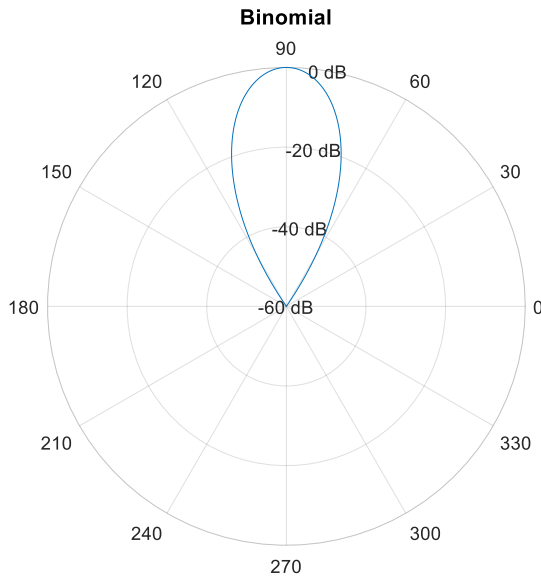
Çizelge 2.1 Pencereleme yöntemlerinin yan hüzme seviyeleri ve genişlik faktörü değerleri

Pencere	YHS (dB)	b
Dikdörtgen	-13.5	1
Hamming	-40	2
Taylor-Kaiser	İstenen YHS (α)	$\frac{6(\alpha + 12)}{155}$
Dolph-Chebyshev	İstenen YHS (α)	$1 + 0.636 \left[\frac{2}{10^{\alpha/20}} \cosh(\sqrt{\arccos^2(10^{\alpha/20}) - \pi^2}) \right]^2$

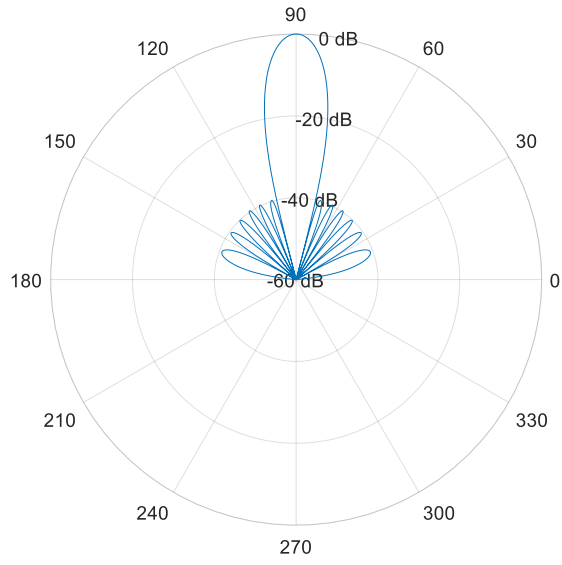
Tüm pencereleme yöntemlerinin polar ekseninde çizilmiş halleri Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de verilmektedir. Hüzmelerin tek ana hüzmeye içermesinin nedeni şekillerin $[0^\circ, 180^\circ]$ açı aralığında çizdirilmiş olmasıdır.



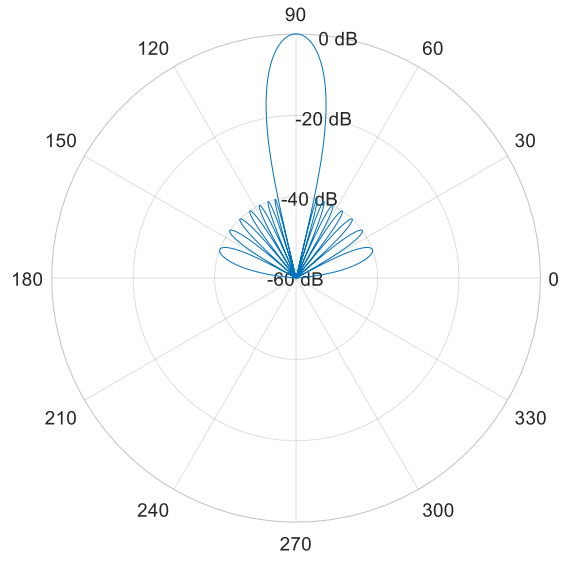
Şekil 2.21 Anten sayısı 16 iken dikdörtgen pencereleme uygulanan anten hüzmesi

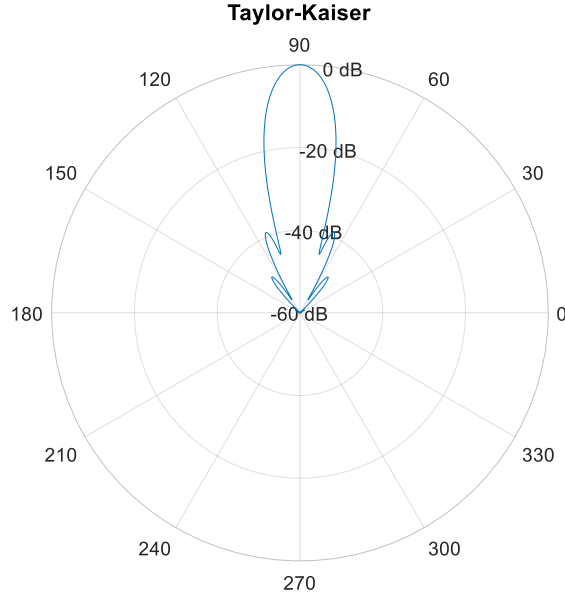


Hamming



Dolph-Chebyshev





Şekil 2.22 Anten sayısı 16 iken farklı pencere yöntemleri uygulanan anten örüntüleri (Dolph-Chebyshev ve Taylor-Kaiser için YHS değerleri 40 dB olarak seçilmiştir)

2.8. Ana ve Yan Hüzme Girişimleri

Bu tez kapsamında baz istasyonunda yoğun çok girişli çok çıkışlı anten dizisinin kullanıldığı bir aşağı yönlü (downlink) haberleşme ağı göz önüne alınmaktadır. Analizlerin kolaylığı açısından kullanıcıların tek antene sahip olduğu varsayılmaktadır. Haberleşme yapılması istenen kullanıcıların uzaydaki mevcut yerleşimleri büyük ölçüde önem taşımaktadır. Haberleşme performansının düşmemesi için kullanıcıların bulunduğu yere uygun olarak kullanıcıya ait hüzmenin tasarım parametrelerinin haberleşme yapılmak istenen koşullara uygun olarak ayarlanması gerekmektedir.

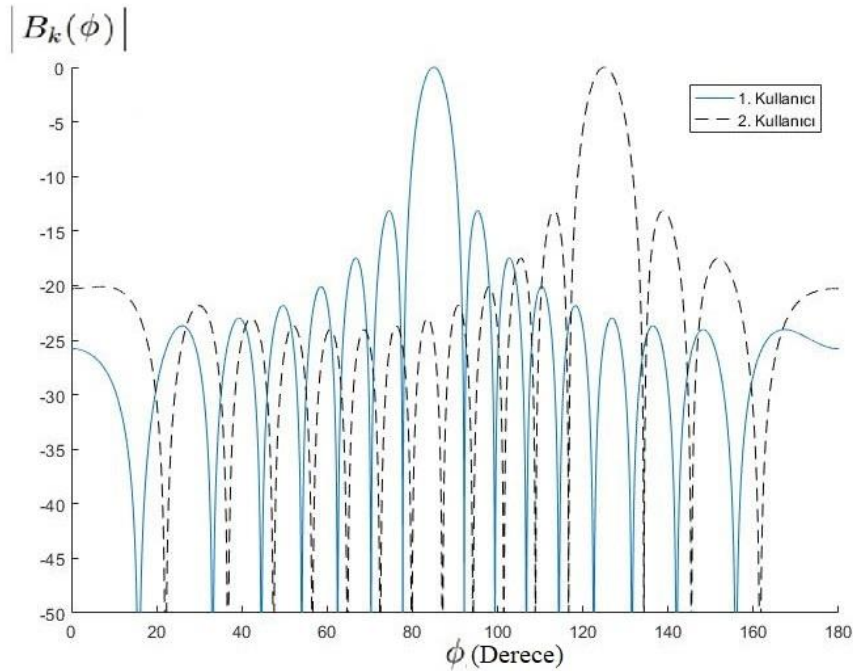
Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin kullanılacağı haberleşme ağı içerisinde çok fazla sayıda kullanıcı yer almaktadır. Herhangi bir kullanıcı üzerine gönderilen hüzme, diğer kullanıcılar üzerinde de bir güç yoğunluğu oluşturduğundan dolayı girişim yaratır. Kullanıcı sayısının çok büyük değerlere ulaştığı düşünüldüğünde, girişim haberleşme performansını düşüren en büyük faktörlerden biridir.

Problemin basitçe açıklanabilmesi adına, iki kullanıcı ile aynı anda haberleşme yapıldığı durum göz önüne alınabilir. Kullanıcılar, uzayda yerleştiği yere göre 3 alt başlık altında incelenebilir.

2.8.1. Yan Hüzme Girişimi

Kullanıcılar birbirlerine antenden yayınlanan ana hüzme genişliği seviyesi kadar yakın değillerse birbirlerinin yan hüzme seviyelerinden büyük ölçüde etkileneceklerdir. Şekil 2.23’de bahsedilen durum için kullanıcılar üzerlerine gönderilen hüzme genliği değerleri görülmektedir.

Kullanıcıların diğer kullanıcılar için gönderilen hüzmelerin diğer kullanıcılar üzerinde yarattığı girişim sinyalinin ilk yan hüzmeden mi yoksa diğer yan hüzmelerden mi kaynaklı olduğu önemlidir. Farklı koşullar altında farklı pencereleme yöntemleri ve hüzme şekillendirme yöntemleri kullanılarak girişim sinyali seviyeleri düşürülebilir.



Şekil 2.23 Yan hüzme üzerinden girişim olduğu durumda hüzmelerin temsili yönlendirilmesi

2.8.1.1. Hüzme Şekillendirme Yöntemleri

Pencereleme yöntemlerinden bölüm 2.7’de bahsedilmiştir. Hüzme şekillendirme yöntemlerindeki temel amaç ise kullanım yerine göre en yüksek performansta haberleşme yapabilmek için uzayda şekillendirilecek olan hüzmeyi matematiksel olarak sentezleyerek oluşturmaktır. Yan hüzme genişliğinin azaltılmasının sonucu olarak artan ana hüzme genişliği girişim etkisi yan hüzmeler üzerinden olduğu için göz ardı edilebilir.

Hüzme şekillendirme yöntemleri;

- Schelkunoff’s Zero Placement Method
- Fourier Series Method with Windowing
- Sector Beam Array Design
- Woodward-Lawson Frequency Sampling Design

olacak biçimde 4 temel bölüm altında toplanabilir [41]. Aşağıda bu yöntemlerden Woodward-Lawson Frequency Sampling Design yöntemi detaylı olarak incelenilmiş ve üzerinde çalışılmıştır.

2.8.1.1.1.Schelkunoff’s Zero Placement Method

N elemanlı doğrusal anten dizisinin dizi faktörü değeri N dereceli tek değişkenli polinom şeklinde yazılabilir. Anten yerleşimine göre tek eksen için N adet kökü vardır.

Anten örüntüsünün z dönüşümü

$$B(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n z^n = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_{N-1}) a_{N-1}^* \quad (20)$$

biçiminde Taylor açılımı kullanılarak ifade edilebilir. a_{N-1}^* ifadesi tüm katsayıların genliklerinin çarpımını ifade etmektedir.

Schelkunoff yönteminde, görünür bölge kullanılmaktadır. Birim çemberin görünür bölge içerisinde kalan kısmı üzerinde anten sayısı kadar eşit faz aralıklarıyla örnek alınmaktadır. İlgili örnekler dizi faktörü fonksiyonunun kökleri olarak seçilmektedir.

Görünür bölge, anten örüntüsünün bir tam periyodunu kapsamaktadır. Anten örüntüsü değeri periyodik olduğundan görünür bölge dışarısındaki bölgelerde de aynı örüntünün ayna görüntüleri meydana gelecektir. İlgili ayna görüntülerinin oluşmasının nedeni, uzayı tarayan açılarının periyodik olan sinüs ve kosinüs fonksiyonları içinde yer almasıdır.

ψ düzlemi üzerinde oluşturulan anten örüntüsünün periyodu

$$\psi(\phi) - \psi(\phi_k) = kd_x (\cos(\phi) - \cos(\phi_k)) \quad (21)$$

biçiminde yazılabilir.

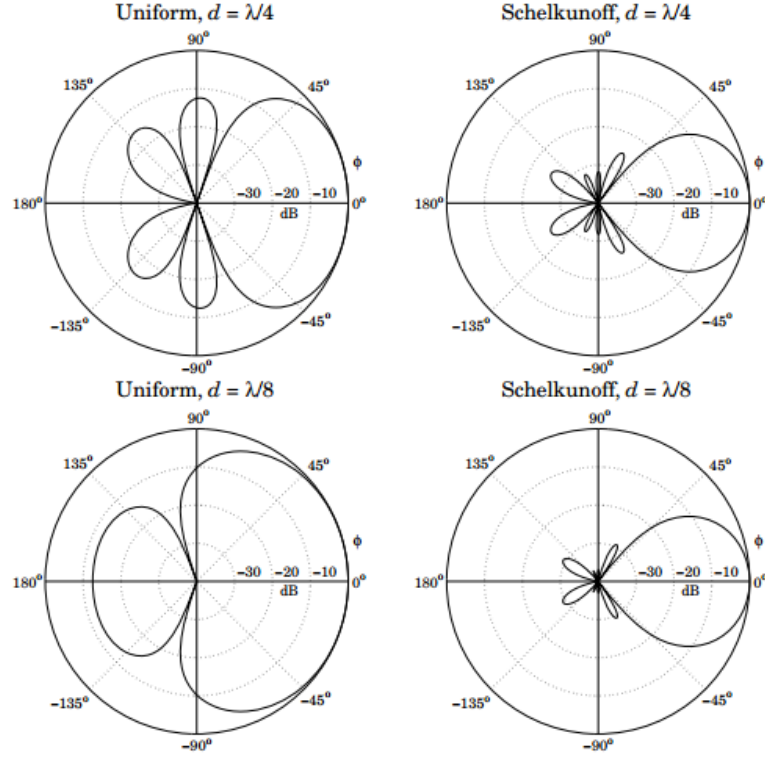
ϕ_k hüzme yönlendirme açısı $[0^\circ, 180^\circ]$ aralığında değerler almaktadır. ϕ tarama açısının da $[0^\circ, 180^\circ]$ aralığında değerler aldığı göz önünde bulundurulduğunda

Eşitlik (21)

$$0 \leq \psi(\phi) - \psi(\phi_k) \leq 2kd_x \quad (22)$$

biçiminde yeniden düzenlenebilir.

Schelkunoff yönteminde, anten sayısı kadar sıfır köklerinin yerleşimi yapıldığı ve fonksiyonun kutup değerleri olmadığı için oluşturulabilecek olan örüntünün ana hüzme genişliği diğer hüzme şekillendirme yöntemlerine göre daha geniş olacaktır [41]. Şekil 2.24'de Schelkunoff yöntemi ile şekillendirilen hüzmenin, antenler arası mesafenin farklı dalga boylarına eşit olduğu durumda şekli görülmektedir.



Şekil 2.24 6 elemanlı faz dizili anten hüzmeleri antenler arası uzaklık dalga boyunun 4'de 1'i ve 8'de 1'i iken [41].

2.8.1.1.2. Fourier Series Method with Windowing

Fourier serisi yönteminde sonsuz sayıda anten kullanılıyor yaklaşımı vardır ve anten örüntüsünün tam olarak integralinin alınabiliyor olması gerekmektedir. Kare dalga gibi süreksizliği olan bir anten örüntüsü mevcutsa, WLFSD (Woodward-Lawson Frequency Sampling Design) yöntemi kullanılmalıdır.

Fourier serisi yönteminde sonsuz kabul edilen anten sayısı sonlu olduğundan anten katsayıları hesaplanırken Gibbs Olgusu'nda yer aldığı gibi dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu dalgalanmalardan kurtulmak için pencereleme yöntemleri kullanılabilir. Anten sayısı tek ise anten örüntüsü

$$B(\psi(\phi)) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n e^{jn\psi(\phi)} + a_{-n} e^{-jn\psi(\phi)}] \quad (23)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

İlgili ters Fourier dönüşümü

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} B(\psi(\phi)) e^{-jn\psi(\phi)} d\psi(\phi)$$
$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$
(24)

eşitlikleri aracılığıyla yapılabilir.

Anten sayısı çift ise anten örüntüsü

$$B(\psi(\phi)) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n e^{j(n-1/2)\psi(\phi)} + a_{-n} e^{-j(n-1/2)\psi(\phi)}]$$
(25)

ve ilgili ters Fourier dönüşümü

$$a_{\pm n} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} B(\psi(\phi)) e^{\mp j(n-1/2)\psi(\phi)} d\psi(\phi)$$
$$n = 1, 2, \dots$$
(26)

biçiminde ifade edilebilir.

Haberleşme performansı için en uygun olduğu düşünülen anten örüntüsü üzerinde, anten sayısının tek ya da çift oluşuna uygun olan ters Fourier dönüşümü yapılır. Sonrasında hesaplanan anten katsayıları, uygulanacak olan pencere katsayıları ile çarpılır. Böylece Gibbs Olgusu sonucunda oluşan dalgalanmalar temizlenmiş olur [41].

2.8.1.1.3. Sector Beam Array Design

Haberleşme için kullanılacak olan anten örüntüsü dar bantlı olduğundan, üzerine uygulanacak olan pencere katsayıları ile anten örüntüsünün şeklinin ayarlanabildiği literatürde yer almaktadır. İlgili yaklaşım sonucunda uzayda pencere katsayıları yardımıyla bant geçiren bir filtre oluşturulduğu yaklaşımı mevcuttur. Böylece DSP alanında yer alan bant geçiren filtre tasarımı yöntemlerinin kullanılabilirdiği söylenmektedir [41].

2.8.1.1.4. Woodward-Lawson Frequency Sampling Design (WLFSD)

Her bir kullanıcı için hesaplanan anten örüntüsü formülü uzaysal Fourier dönüşümü kullanılarak da hesaplanabilir. Bireysel anten elemanları sonlu sayıda olduğundan dönüşümü yapılacak olan formül aperiodyk ve ayrık olacaktır. Aperiodyk-ayrık formülün izgesi ise sürekli ve periyodiktir. Yani hesaplamalar sonunda çıkacak olan anten örüntüsü sürekli ve periyodik olacaktır.

Kosinüs fonksiyonunun çift fonksiyon olması nedeniyle uzayda yönlendirilen bir hüzmünün ayna görüntüsü 360° periyodunda oluşmaktadır.

WLFSD yönteminde dönüşümde kullanılacak olan faz değerlerini elde edebilmek amacıyla anten sayısı kadar birim çember üzerinden örnek alınmaktadır.

Birim çember üzerinden alınan örneklere ile dalga sayısı

$$\psi(\phi_n) = \frac{2\pi(n - \frac{N-1}{2})}{N} \quad (27)$$
$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

biçiminde ifade edilebilir.

$B_k(\psi(\phi))$ bireysel anten örüntüsü, örnekler üzerinden anten sayısı tek ise

$$B_k(\psi(\phi_n)) = w_{0k} + \left[\sum_{u=1}^{(N-1)/2} w_{uk} e^{ju\psi(\phi_n)} + w_{-uk} e^{-ju\psi(\phi_n)} \right] \quad (28)$$

biçiminde, anten sayısı çift ise

$$B_k(\psi(\phi_n)) = \sum_{u=1}^{N/2} [w_{uk} e^{j(u-1/2)\psi(\phi_n)} + w_{-uk} e^{-j(u-1/2)\psi(\phi_n)}] \quad (29)$$

biçiminde hesaplanabilir.

w_{uk} anten elemanı katsayıları, ters Fourier dönüşümü kullanılarak, anten sayısı tek ise

$$w_{uk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} B(\psi(\phi_n)) e^{-ju\psi(\phi_n)} \quad (30)$$

ifadesi ile ve anten sayısı çift ise

$$w_{\pm uk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} B(\psi(\phi_n)) e^{\mp j(u-1/2)\psi(\phi_n)} \quad (31)$$

eşitliği ile hesaplanır.

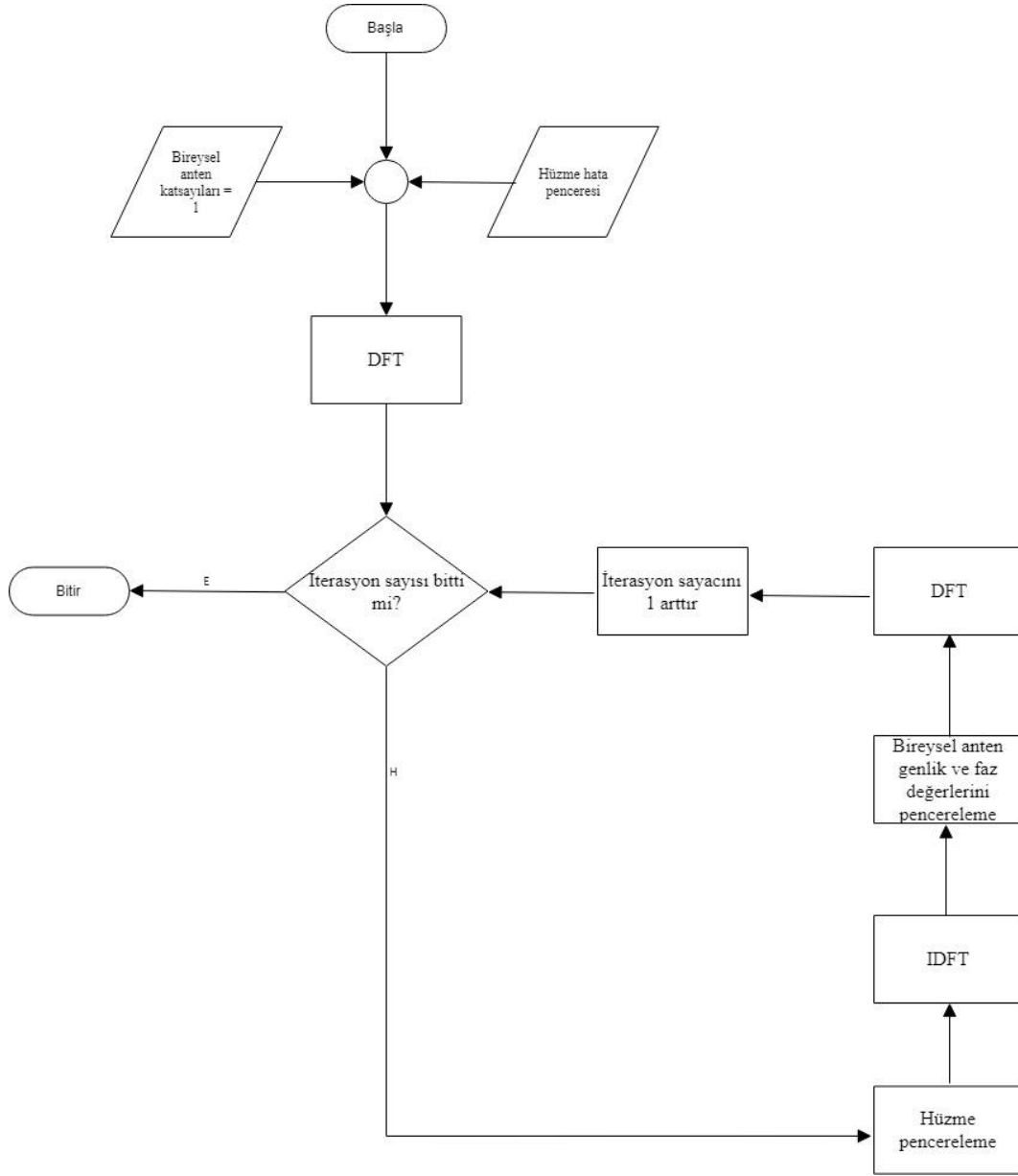
İşlem yükünü düşürebilmek açısından farklı kullanıcı yerleşimleri için sentezlenerek oluşturulan hüzmeleri şekillendirebilecek olan WLFSD anten katsayıları, tablolar şeklinde sistem üzerinde tutularak gerektiği durumlarda uygulanabilir. Buna rağmen

WLFSD yönteminin karmaşıklığından dolayı tez kapsamında yer alan analizler, literatürde daha geniş kapsamda incelendiği ve kolay uygulanabildiği için pencereleme teknikleri kullanılarak yapılacaktır.

Bahsedilen WLFSD yöntemini kullanarak hüzme şekillendirme yapılması,

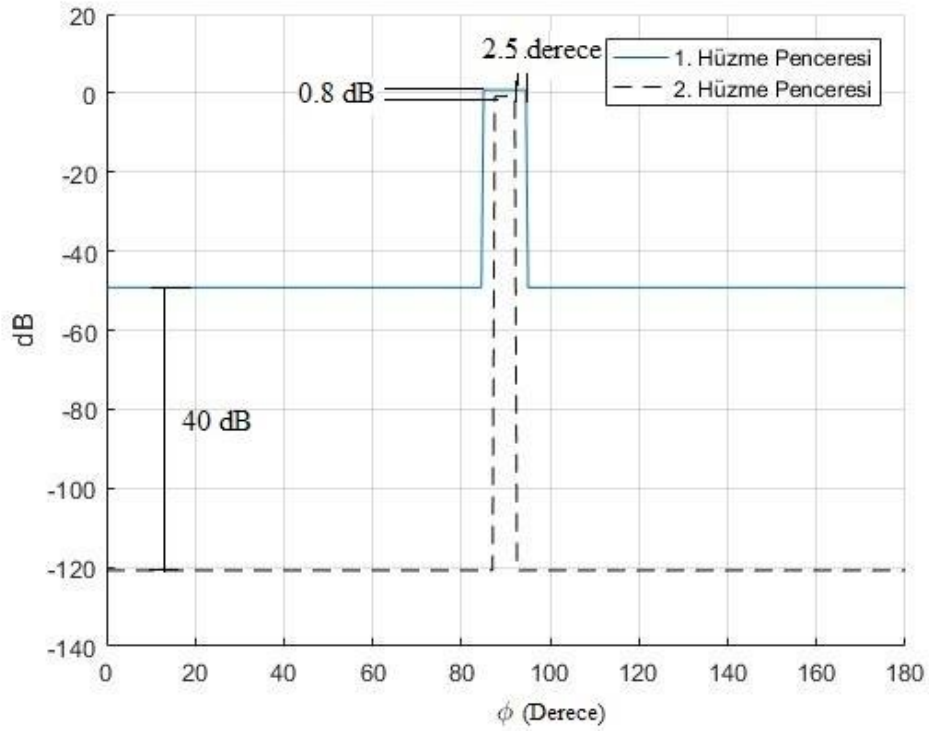
- 1) İstenilen hüzme için hata penceresi yaratılır. Hüzme şekli bu pencere içerisinde oluşacaktır. Hüzmenin şeklindeki hata miktarı, hata penceresinin maksimum ve minimum noktaları arasında olacaktır.
- 2) Bireysel anten katsayıları dikdörtgen pencere katsayıları olan 1'den başlatılır. DFT alınarak hüzme oluşturulur.
- 3) Oluşturulan hüzmenin hata penceresinin üstünde ve altında kalan noktaları için hata penceresinin üst ve alt noktalarına eşitlenir.
- 4) IDFT alınarak ilgili hüzmenin bireysel anten katsayıları hesaplanır.
- 5) Bireysel anten katsayılarının bireysel anten gücü etrafında değerler alınması istendiğinden belirli bir aralık etrafında kalacak şekilde genlikler ayarlanır. Genlik ayarlama işlemleri hata penceresi kullanılarak yapılabilir.
- 6) DFT alınarak hüzme oluşturulur ve 3. Maddeden itibaren iteratif bir şekilde devam edilir.

maddelerinde geçen sıra ile yapılabilir.

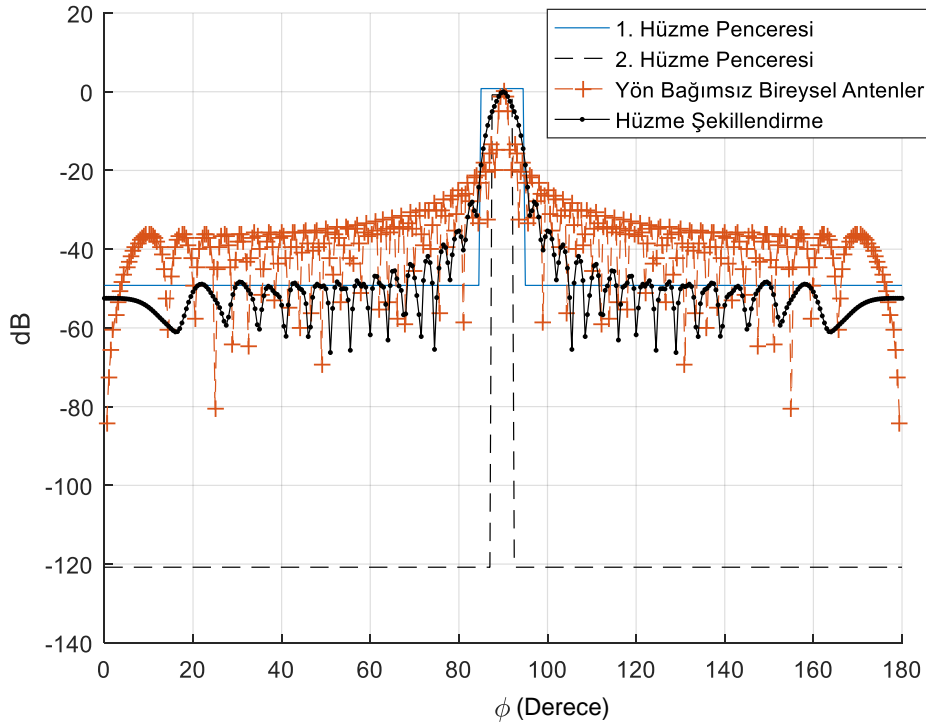


Şekil 2.25 WLFSD yöntemi ile hüzme şekillendirme akış diyagramı

Hüzme pencereleme işlemi, hüzmenin yapay olarak oluşturulması istenen şekilde girdi olarak algoritmaya verilmelidir. Şekil 2.26’da bir hata penceresi örneği verilmiştir. Bu gereklilik de başlı başına çalışılması gereken başka bir konudur. Tez kapsamında yer verilmeyecektir. Yalnızca örnek olarak Şekil 2.27’de görüldüğü şekilde 64 adet anten ile hüzme şekillendirme yöntemi uygulanmıştır.



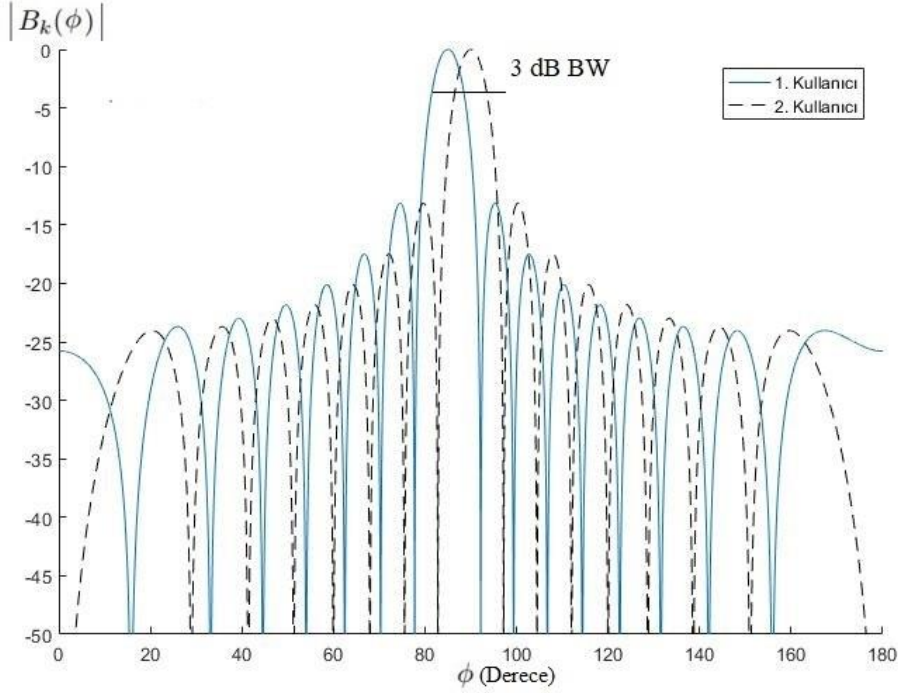
Şekil 2.26 Hüzme şekillendirme yönteminde kullanılan hüzme hata penceresi



Şekil 2.27 64 adet anten kullanarak yön bağımsız antenler gönderilen hüzme ve hüzme şekillendirme yöntemi kullanılarak şekillendirilen hüzme

2.8.2. Ana Hüzme Girişimi

Kullanıcıların birbirlerine 3 dB ana hüzme genişliğinden daha yakın olduğu durumlarda, ana hüzme üzerindeki sinyal güçleri yüksek seviyede olduğundan, kullanıcılar üzerinde yüksek seviyede girişim sinyali oluşur. Pencereleme yöntemleri arasında en dar hüzme genişliğine sahip olan pencereleme yöntemi dikdörtgen penceredir. Bu nedenle dikdörtgen pencereleme yöntemine göre diğer hiçbir pencere yöntemi veya hüzme şekillendirme yöntemleri ana hüzme genişliğini daha düşük bir değere getiremez. Bu nedenle ana hüzme girişiminin olduğu senaryolarda pencereleme ve hüzme şekillendirme gibi yöntemlerin iyileştirme sağlayamadığı sonucu çıkartılabilir. Şekil 2.28’de ana hüzme girişimi yaratacak olan hüzmeler gösterilmiştir.



Şekil 2.28 Ana hüzme üzerinden girişim olduğu durumda hüzmelerin temsili yönlendirilmesi

Yüksek sinyal girişiminden kaçınmak için ana hüzmelerin daraltılması gerekmektedir. Ana hüzme ve yan hüzme genişlik seviyeleri faz dizili anten üzerinde yer alan anten sayısına, kullanılan yayın frekansına ve bireysel anten örüntüsüne bağlıdır. Bu nedenle hüzme daraltma işlemi donanımsal seviyede yapılacak olan iyileştirmeler ile azaltılabilir. Ayrıca haberleşme ortamını verimli bir şekilde kullanabilmek için çoklu

erişim teknikleri kullanılmaktadır. Ancak çoklu erişim teknikleri bu tez kapsamında incelenmemektedir.

Haberleşme sistemlerinde, gönderici istasyondan alıcı istasyona bilgi aktarılırken alıcı istasyondan gönderici istasyona aynı anda bilgi göndermesine izin verilmesi çoğu zaman arzu edilir.

Kanala erişime izin vermenin birkaç farklı yolu vardır. Bunlar esas olarak aşağıdaki gibi gruplanabilir

- Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA)
- Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA)
- Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA)
- Dikey olmayan çoklu erişim (NOMA)

[42].

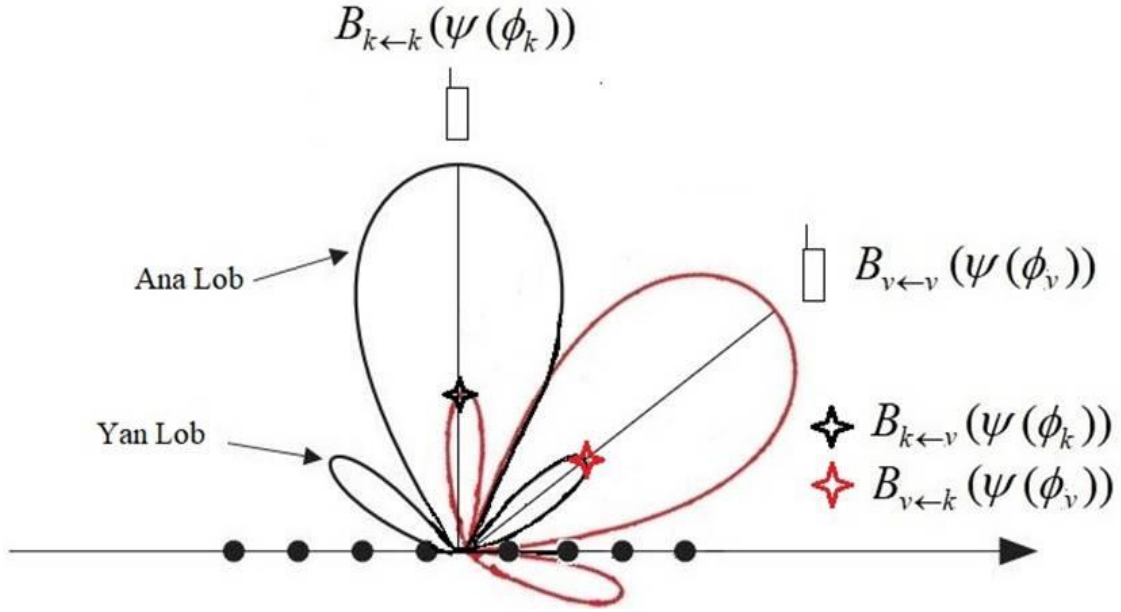
2.9. Performans Parametresi SGGO

Sinyal girişim gürültü oranı; haberleşme teknolojisinde gönderilen ve alınan sinyalin, ortam gürültüsü ve girişim sinyallerinin toplamından ne kadar daha güçlü olduğunu gösteren bir parametredir.

Çok kullanıcıli durumunda kullanılan yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler için, kullanıcılar ile haberleşmede yapılması amacıyla birbirlerinden bağımsız çok sayıda hüzme yayımlanması gerektiğinden, kullanıcılar ile haberleşme performansının düşmemesi için SGGO seviyelerinin yüksekliği sistemin performansını doğrudan belirlemektedir.

Girişim durumunu açıkça ifade edebilmek için öncelikle uzayda mevcut iki kullanıcı olduğu durum incelenebilir. k kullanıcıya gönderilen hüzmenin k kullanıcısı üzerinde oluşturduğu hüzme sinyal seviyesi $B_{k \leftarrow k}(\psi(\phi_k))$, v kullanıcısı üzerinde oluşturduğu

hüzme sinyal seviyesi $B_{v \leftarrow k}(\psi(\phi_v))$ olmaktadır. k kullanıcısı ile haberleşme sırasında kullanılacak olan hüzme v kullanıcısı için, v kullanıcısı ile haberleşme sırasında kullanılacak olan hüzme de k kullanıcısı için girişim yaratmaktadır. Şekil 2.29'da açıklanan durum görülmektedir.



Şekil 2.29 Bir kullanıcı üzerine gönderilen hüzmenin diğer kullanıcı üzerindeki etkisi

Herhangi bir kullanıcı için oluşturulan hüzmenin diğer kullanıcılar üzerinde yarattığı girişim girişim değerleri SGGO seviyeleri üzerinde büyük ölçüde zayıflamaya neden olmaktadır. Özellikle haberleşilecek kullanıcı sayısı çok büyük değerlere ulaştığında, uzayda oluşturulması gereken hüzme sayısının da kullanıcı sayısı ile paralel olarak artacağı için girişime bağlı SGGO seviyesi üzerindeki zayıflama miktarı her bir kullanıcı için yüksek değerlere ulaşacaktır.

Çok sayıda kullanıcı olduğu durumlarda, SGGO seviyelerinin iyileştirilmesi için hüzme kullanıcılar üzerine yönlendirilmesi yerine başka noktalara yönlendirilmesi ve mümkün olduğunca diğer kullanıcılar üzerinde hüzmenin sıfırlarının getirilmesi hedeflenmektedir.

Girişimlerin bireysel kullanıcı SGGO seviyeleri üzerindeki etkisini inceleyebilmek için öncelikle girişim güç seviyesini hesaplamak gerekmektedir.

k 'inci kullanıcı için yayımlanan anten hüzmesi genlik seviyesi

$$B_k(\psi(\phi)) = \sum_{n=0}^{N-1} x_k w_{kn} e^{jd_x n \psi(\phi)} \quad (32)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Kompleks anten katsayıları

$$w_{kn} = |w_{kn}| e^{-jd_x n \psi(\phi_k)} \quad (33)$$

biçiminde açık halde yazıldığında Eşitlik (32)

$$B_k(\psi(\phi)) = \sum_{n=0}^{N-1} x_k |w_{kn}| e^{jd_x n (\psi(\phi) - \psi(\phi_k))} \quad (34)$$

biçiminde ifade edilebilir.

k 'inci kullanıcı yerinin dalga numarası değerinin $\psi(\phi_k)$ ve gönderilen hüzmenin açısız yerinin dalga numarası değerinin $\psi'(\phi_k)$ olduğu düşünülürse, k 'inci kullanıcı üzerinde oluşan hüzme sinyal seviyesi $(1/R_k^d)$ zayıflama katsayısı ile beraber düşünüldüğünde

$$B_{k \leftarrow k}(\psi(\phi_k)) = \frac{1}{R_k^d \sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_k \sqrt{P_k} |w_{kn}| e^{jd_x n (\psi(\phi_k) - \psi'(\phi_k))} \quad (35)$$

eşitliği ortaya çıkmaktadır. Burada, d değeri üstel zayıflama katsayısı olarak tanımlanmaktadır ve tez kapsamında Friis zayıflama formülünde de yer aldığı üzere 2 olarak kabul edilmektedir. R_k değeri k 'inci kullanıcının verici antenine olan uzaklığını ifade etmektedir. x_k değeri k 'inci kullanıcı için yayımlanacak olan veri sembolünü ifade etmektedir ve tez kapsamında ortalama değerinin sıfır olduğu ve ortalama gücünün bir olacak şekilde normalize edildiği varsayılmaktadır. k 'inci kullanıcı için antenden yayımlanacak olan ortalama güç P_k olarak alınmaktadır. N değişkeni anten sayısını ifade etmektedir ve $1/\sqrt{N}$ çarpanı ile tüm antenlere toplamda P_k kadar güç verildiği garanti edilmektedir.

v 'inci kullanıcı için gönderilen huzmenin uzayda yer alan k 'inci kullanıcı üzerinde oluşturduğu girişim sinyal seviyesi de aynı yaklaşımla

$$B_{k \leftarrow v}(\psi(\phi_k)) = \frac{1}{R_v^d \sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_v \sqrt{P_v} |w_{vn}| e^{jd_x n(\psi(\phi_k) - \psi'(\phi_v))} \quad (36)$$

biçiminde hesaplanır.

Böylece k 'inci kullanıcı üzerinde oluşan SGGO seviyesi

$$SGGO_k = \frac{|B_{k \leftarrow k}(\psi(\phi_k))|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} |B_{k \leftarrow v}(\psi(\phi_k))|^2 + \sigma_{n_k}^2} \quad (37)$$

biçiminde yazılabilir. Formülde yer alan anten örüntüsü fonksiyonları açıldığında

$$SGGO_k = \frac{\left| \frac{1}{R_k^d \sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_k \sqrt{P_k} |w_{kn}| e^{jd_x n(\psi(\phi_k) - \psi'(\phi_k))} \right|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \left| \frac{1}{R_v^d \sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_v \sqrt{P_v} |w_{vn}| e^{jd_x n(\psi(\phi_k) - \psi'(\phi_v))} \right|^2 + \sigma_{n_k}^2} \quad (38)$$

eşitliği elde edilmektedir. Tez kapsamında tüm kullanıcılar için 1 W güçte sinyal basıldığı düşünülürse ($P_k = P_v = 1, \forall_{k,v}$) Eşitlik (38) sadeleştirildiğinde

$$SGGO_k = \frac{\left| \frac{1}{R_k^d \sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_k |w_{kn}| e^{jd_x n(\psi(\phi_k) - \psi'(\phi_k))} \right|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \left| \frac{1}{R_v^d \sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_v |w_{vn}| e^{jd_x n(\psi(\phi_k) - \psi'(\phi_v))} \right|^2 + \sigma_{n_k}^2} \quad (39)$$

ifadesi üzerinden, kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyelerinin, eğer tüm kullanıcılara eşit güçte yayın yapılıyorsa, kullanıcılara gönderilen sinyalin güç seviyesinden bağımsız olduğu görülmektedir.

Formülü kapalı formda yazabilmek için; k 'inci kullanıcıya hüzme yönlendirmek için kullanılacak olan hüzme yönlendirme vektörü

$$\mathbf{s}_k = [e^{-jd_x 0(\psi'(\phi_k))}, e^{-jd_x 1(\psi'(\phi_k))} \dots e^{-jd_x (N-1)(\psi'(\phi_k))}]^T \quad (40)$$

ve k 'inci kullanıcının uzaydaki yerini, kullanıcı için basılacak sinyali ve menzilden dolayı gerçekleşecek olan zayıflamayı içeren kullanıcı yeri vektörü

$$\mathbf{h}_k = \frac{x_k}{R_k^d \sqrt{N}} [w_{k0} e^{-jd_x 0(\psi(\phi_k))}, w_{k1} e^{-jd_x 1(\psi(\phi_k))} \dots, w_{k(N-1)} e^{-jd_x (N-1)(\psi(\phi_k))}]^T \quad (41)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Tanımlanan vektörler SGGO formülünde yerine konulursa, her bir kullanıcı için SGGO seviyesi, kapalı formül kullanılarak

$$SGGO_k = \frac{\|\mathbf{h}_k \mathbf{H}_{\mathbf{s}_k}\|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \|\mathbf{h}_k \mathbf{H}_{\mathbf{s}_v}\|^2 + \sigma_{n_k}^2} \quad (42)$$

biçiminde hesaplanabilir.

Hüzmelerin yönlendirme yerleri, tüm kullanıcıların SGGO değerleri arasından minimum olanı maksimize edecek şekilde kurulan

$$\max_{\forall k} \min_{\phi_k} SGGO_k \quad (43)$$

formatındaki max-min optimizasyon problemi sonucunda hesaplanmaktadır.

Oluşturulan optimizasyon problemi; anten sayısı kadar boyutu olan, vektörler içerisindeki üstel terimler ve kosinüs fonksiyonu nedeniyle doğrusal olmayan ve dış bükey olmayan bir problemdir. Ayrıca çok sayıda yerel eniyi çözüm noktası içerdiğinden global eniyi çözümü bulmak zordur. Anten hüzmelerinin simetrik yapısı nedeniyle yerel eniyi çözümü birden fazla hüzmeye yönlendirme vektörü için mevcut olabilir. Bahsedilen nedenlerden dolayı eniyi çözüm noktası/noktaları etrafına yakın bir çözüm bulma amaçlanmaktadır.

İlgili optimizasyon problemini çözebilmek için literatürde birçok çözüm yöntemi önerilmektedir.

[8, 37, 43-45] Makalelerinde yayının yapıldığı ortama bağlı olarak hüzme üzerine sıfır koyma ve maksimum oran iletimi teknikleri incelenmiştir. Ancak bu makalelerde kanal durum bilgisinin mükemmel olarak bilindiği varsayımı üzerinden işlem yapılmaktadır. Yani anten ile kullanıcılar arasında haberleşme sinyalinin iletimi nedeniyle sinyal üzerinde oluşturulacak tüm etki, kanal fonksiyonu olarak mükemmel olarak bilinmektedir yaklaşımı vardır. Kanal fonksiyonunu oluşturabilmek için haberleşme sinyalinin yayımlandığı bölge hakkındaki sinyali etkileyen tüm özelliklerin bilinmesi ve modellenmesi gerekmektedir.

Ortaya çıkartılan optimizasyon problemi yapısı nedeniyle kolay çözülebilen bir problem değildir. Bu nedenle problemi basitleştirebilmek amacıyla çeşitli gevşetme yöntemleri kullanarak yeniden oluşturulan optimizasyon probleminin, belirli bir hata seviyesi altında farklı tekniklerle çözmeye çalışan yöntemler mevcuttur, örneğin SDP, Semi Definite Programming [46]. Ancak bu yaklaşımların işlem yükü, karmaşıklığı ve çözüm doğruluğundan verdiği ödün nedeniyle bu tezdeki çalışmada tercih edilmemiştir.

Literatürde mevcut hata türevine bağlı olarak kurulan adaptif hüzme oluşturma tekniklerinin (LCMV, MVDR gibi); yeterince esnek olamaması, optimizasyon probleminin çözümü sırasında yerel minimum noktalarda takılıyor olması ve hassas bir şekilde karıştırıcıların etkisinin veya kullanıcı SGGO değerlerinin hesaplanması sırasında tüm kullanıcıların yerlerinin biliniyor olması gereği, araştırmacıları başka çözüm yöntemleri bulma arayışına itmiştir [39].

Son zamanlarda YHS (Yan Hüzme Seviyesi) minimizasyonu ve istenen yerlere hüzme sıfırı konulması vb. gibi hüzme tasarımına dair parametrelerin de iyileştirilebilmesi ve ayrıca dış bükey olmayan, türevlenemeyen optimizasyon problemlerine karşı kolaylıkla çözüm bulabilmesi açısından doğa kaynaklı buluşsal optimizasyon algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır [39]. Bunların başlıcaları; Genetic Algorithm (GA), Particle

Swarm Optimization (PSO) Ant-Lion Optimization (ALO) Grey Wolf Optimizer (GWO) Cat Swarm Optimization (CSO) Ant Colony Optimization (ACO) olarak sayılabilir [47-52].

PSO yöntemi kolay uygulanabilişi, hızlı oluşu, SGGO hesaplanışı sırasında yerel eniyi noktalara takılma probleminin çok sayıda parçacığın çözüm uzayında mevcut oluşu nedeniyle büyük ölçüde azaltılabiliyor oluşu ve ayrıca doğrusal ile doğrusal olmayan problemleri çözebiliyor oluşu nedeniyle tezin ilerleyen kısımlarında tercih edilecektir.

3. MİNİMUM SGGO SEVİYESİNİN MAKSİMİZASYONU

Bu bölümde, bölüm 2.9’da kurulan

$$\max_{\forall k} \min \phi_k \quad SGGO_k \quad (44)$$

optimizasyon probleminin sonucu, tüm kullanıcıların üzerindeki SGGO seviyeleri arasından minimum SGGO seviyesini maksimize etmek amacıyla düzenlenip çözülecektir. Eşitlik (44)’de yer alan problem kullanıcı sayısı kadar boyutu olan bir optimizasyon problemidir. $SGGO_k$ değeri k ’inci kullanıcı için

$$SGGO_k = \frac{\|\mathbf{h}_k \mathbf{H}_{\mathbf{s}_k}\|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \|\mathbf{h}_k \mathbf{H}_{\mathbf{s}_v}\|^2 + \sigma_{n_k}^2} \quad (45)$$

biçiminde kapalı halde yazılabilir. Çok boyutlu optimizasyon probleminin literatürdeki mevcut optimizasyon yöntemleri ile çözülebilmesi için öncelikle problemin çok boyutlu optimizasyon probleminden tek boyutlu optimizasyon problemine indirilmesi amaçlanmaktadır. Optimizasyon Probleminin Çözümü alt başlığında çözüm yöntemi adım adım açıklanacaktır.

3.1. Optimizasyon Probleminin Çözümü

Amaç, minimum SGGO’nun enbüyütülmesi olduğu için problem,

$$\max \min \{SGGO_0, SGGO_1, \dots, SGGO_{K-1}\} \quad (46)$$

olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu problemin matematiksel olarak takibi güçtür.

Alternatif olarak, belirlenmiş bir hüzme yönlendirme vektörü için tüm kullanıcıların SGGO değerleri arasından minimum SGGO değerine eşit veya daha düşük olan γ_{\min} değeri

$$\gamma_{\min} \leq \min\{SGGO_0, SGGO_1, SGGO_2, \dots, SGGO_{K-1}\} \quad (47)$$

biçiminde tanımlanabilir. Böylece max-min optimizasyon problemi

$$\begin{aligned} \max \quad & \gamma_{\min} \\ \text{s.t.} \quad & \gamma_{\min} \leq SGGO_0 \\ & \gamma_{\min} \leq SGGO_1 \\ & \cdot \\ & \cdot \\ & \cdot \\ & \gamma_{\min} \leq SGGO_{K-1} \end{aligned} \quad (48)$$

biçimindeki bir kısıtlı probleme dönüştürülür.

Her bir kullanıcı için hesaplanan kapalı formdaki SGGO formülleri optimizasyon probleminde yerine konulursa, tüm kullanıcılar için minimum SGGO değerlerini maksimize edecek olan optimizasyon problemi

$$\begin{aligned}
& \max \quad \gamma_{\min} \\
& \text{s.t.} \quad \gamma_{\min} \leq \frac{\|\mathbf{h}_0 \mathbf{H} \mathbf{s}_0\|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \|\mathbf{h}_0 \mathbf{H} \mathbf{s}_v\|^2 + \sigma_{n_0}^2} \\
& \quad \gamma_{\min} \leq \frac{\|\mathbf{h}_1 \mathbf{H} \mathbf{s}_1\|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \|\mathbf{h}_1 \mathbf{H} \mathbf{s}_v\|^2 + \sigma_{n_1}^2} \\
& \quad \cdot \\
& \quad \cdot \\
& \quad \cdot \\
& \quad \gamma_{\min} \leq \frac{\|\mathbf{h}_{K-1} \mathbf{H} \mathbf{s}_{K-1}\|^2}{\sum_{\substack{v=0 \\ v \neq k}}^{K-1} \|\mathbf{h}_{K-1} \mathbf{H} \mathbf{s}_v\|^2 + \sigma_{n_{K-1}}^2}
\end{aligned} \tag{49}$$

biçiminde ifade edilebilir.

Eşitlik (49)'da yer alan

$$\mathbf{s}_k = [e^{-jd_x 0(\psi'(\phi_k))}, e^{-jd_x 1(\psi'(\phi_k))}, \dots, e^{-jd_x (N-1)(\psi'(\phi_k))}]^T \tag{50}$$

ifadesi bölüm 2.9'da açıklandığı gibi hüzmeye yönlendirme vektörünü,

$$\mathbf{h}_k = \frac{x_k}{R_k^d \sqrt{N}} [w_{k0} e^{-jd_x 0(\psi(\phi_k))}, w_{k1} e^{-jd_x 1(\psi(\phi_k))}, \dots, w_{k(N-1)} e^{-jd_x (N-1)(\psi(\phi_k))}]^T \tag{51}$$

ifadesi ise yine bölüm 2.9'da açıklandığı gibi kullanıcı yeri vektörünü ifade etmektedir.

Optimizasyon problemini PSO yöntemi ile çözebilmek amacıyla, çok amaçlı maliyet fonksiyonu yapısını tek boyutlu maliyet fonksiyonuna dönüştürmek ve optimizasyon problemini kısıtsız hale getirmek için literatürde geçen Penaltı Fonksiyonu yöntemi kullanılacaktır. Problem, öncelikle literatürde çözümleri yer alan standart yapıdaki minimum kısıtlı probleme dönüştürülür:

$$\begin{aligned}
& \min \quad -\gamma_{\min} \\
& \text{s.t.} \quad \gamma_{\min} - SGGO_0 \leq 0 \\
& \quad \quad \gamma_{\min} - SGGO_1 \leq 0 \\
& \quad \quad \cdot \\
& \quad \quad \cdot \\
& \quad \quad \cdot \\
& \quad \quad \gamma_{\min} - SGGO_{K-1} \leq 0
\end{aligned} \tag{52}$$

X. Li ve S. Pan [53], bahsi geçen optimizasyon probleminin çözümü üzerinde çalışmışlardır. Problemin çözümü için öncelikle optimizasyon problemi Lagrange fonksiyonuna dönüştürülür. Problemin Lagrange fonksiyonunun sürekli ve analitik bir çözümü olmadığından entropi fonksiyonu tanımlanarak probleme eklenir ve problem perturbasyon problemine çevrilir. [53] kapsamında yer alan dönüşümlerin ve işlemlerin uzun olması nedeniyle konudan sapmamak amacıyla tez kapsamında, makalede yer alan üstel penaltı fonksiyonu dönüşümü yapılmış kısım üzerinden işlemlere devam edilecektir.

Böylece dış bükey olmayan, doğrusal olmayan, çok amaçlı ve kısıtlı optimizasyon problemi, kısıtlı olmayan hale getirilebilir. İşlemlerin uzun ve karmaşık olması ve ayrıca tez kapsamında ana konudan sapmamak amacıyla, literatürde yer alan mevcut formülün tez kapsamında yazılan optimizasyon problemine uygun forma getirilmiş

$$\begin{aligned}
\min_{-\gamma_{\min}, \bar{\phi}} \Theta(-\gamma_{\min}, \bar{\phi}) = & -\gamma_{\min} + p^{-1} \sum_{k=0}^{K-1} \exp[p(\gamma_{\min} - SGGO_k) - 1]
\end{aligned} \tag{53}$$

çözümü kullanılacaktır.

Formülde yer alan p değişkeni, perturbasyonlu çözümde hesaplanan sonucun optimum sonuca ne kadar yakın olabileceğini ayarlayan bir katsayıdır. Optimizasyon probleminin Lagrange fonksiyonunun sürekli ve analitik bir çözümü olmasını sağlamaktadır. $p \rightarrow \infty$ durumunda perturbasyonlu problem çözüm kümesi, gerçek problem çözüm kümesine yakınsamaktadır.

Eşitlikte yer alan γ_{\min} değişkeninin çözüm üzerinde büyük ölçüde etkisi vardır. γ_{\min} değişkeninin, ϕ_k çözümüne ulaşılabilmesi için Θ fonksiyonunda yerine konulması gerekmektedir.

γ_{\min} değeri minimum SGGO seviyesinin maksimum değeridir. İlgili değer bilinemediğinden

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \gamma_{\min}} [\Theta(-\gamma_{\min}, \bar{\phi})] \Big|_{\gamma_{\min}^*} \\ &= \frac{\partial}{\partial \gamma_{\min}} \left\{ -\gamma_{\min} + p^{-1} \sum_{k=0}^{K-1} \exp[p(\gamma_{\min} - SGGO_k) - 1] \right\} \Big|_{\gamma_{\min}^*} \end{aligned} \quad (54)$$

biçiminde çıkartılan fonksiyonun türevi alınarak sifıra eşitlenir. Sonuç olarak

$$-1 + \sum_{k=0}^{K-1} \exp[p(\gamma_{\min}^* - SGGO_k) - 1] = 0 \quad (55)$$

eşitliği ortaya çıkmaktadır. Optimizasyon probleminin yerel minimum ve maksimumlarını verebilecek olan γ_{\min} köklerinin bulunması amaçlanmaktadır. Eşitlik (55)'de yer alan ifade

$$\exp[1 - p\gamma_{\min}^*] = \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] \quad (56)$$

biçiminde düzenlendikten sonra eşitliğin her iki tarafının e tabanında logaritması alınarak

$$\ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] = 1 - p\gamma_{\min}^* \quad (57)$$

İfadesi elde edilir. Eşitlik (57) düzenlendiğinde, γ_{\min}^* değeri

$$\gamma_{\min}^* = p^{-1} - p^{-1} \ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] \quad (58)$$

biçiminde hesaplanabilir.

Eşitlik (58)'de hesaplanan γ_{\min}^* değeri Eşitlik (55)'de yer alan γ_{\min} yerine konulursa, optimizasyon probleminin çözümü hüzmelerin yönlenme açılarını verecektir. Böylece

$$\min_{\bar{\phi}} \Theta(\bar{\phi}) = -\gamma_{\min}^* + p^{-1} \exp[p\gamma_{\min}^* - 1] \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] \quad (59)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (59) açık halde yazıldığında

$$\begin{aligned} \min_{\bar{\phi}} \Theta(\bar{\phi}) = & -p^{-1} + p^{-1} \ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] \\ & + p^{-1} \exp\{-\ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k]\} \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] \end{aligned} \quad (60)$$

biçimine gelir. Üstel fonksiyon özelliklerinden yararlanılarak

$$\exp\{-\ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k]\} = \frac{1}{\sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k]} \quad (61)$$

şeklinde ifade edilirse Eşitlik (60)

$$\min_{\bar{\phi}} \Theta(\bar{\phi}) = -p^{-1} + p^{-1} \ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] + p^{-1} \quad (62)$$

haline gelir. Gerekli sadeleştirme işlemleri yapıldığında Eşitlik (53)'de yer alan optimizasyon problemi

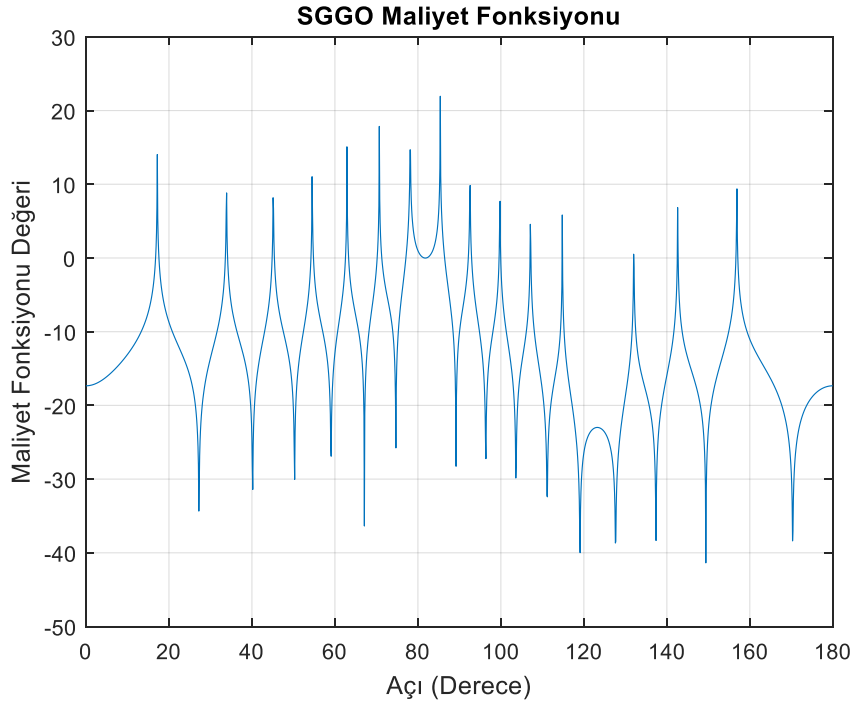
$$\min_{\bar{\phi}} \Theta(\bar{\phi}) = p^{-1} \ln \sum_{k=0}^{K-1} \exp[-pSGGO_k] \quad (63)$$

biçiminde γ_{\min} değerini içermeyen tek değişkenli basit bir forma çevrilmiş olur.

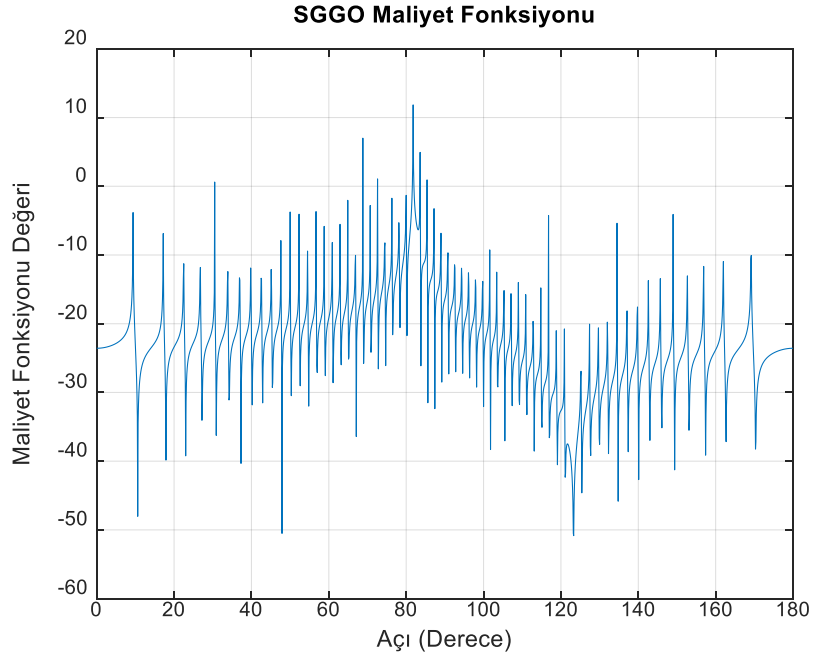
Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de 16 adet ve 64 adet anten kullanıldığı ve kullanıcı yerlerinin sırası ile 82° ile 123° olan iki kullanıcının olduğu durumda ve Şekil 3.3 ile Şekil 3.4'de 41° 53° 65° 77° 82° 96° 105° 116° 128° 139° olan on adet kullanıcının olduğu

durumda kullanıcıların bir tanesi için gönderilen hüzme, tüm hüzme yönlendirme açısı aralığı için taranmış, diğer kullanıcıların üzerlerine gönderilen hüzmeler sabit kabul edilmiştir. Böylece Eşitlik (63)'de yer alan SGGO maliyet fonksiyonunun doğrusal olmayan yapısı görülmektedir.

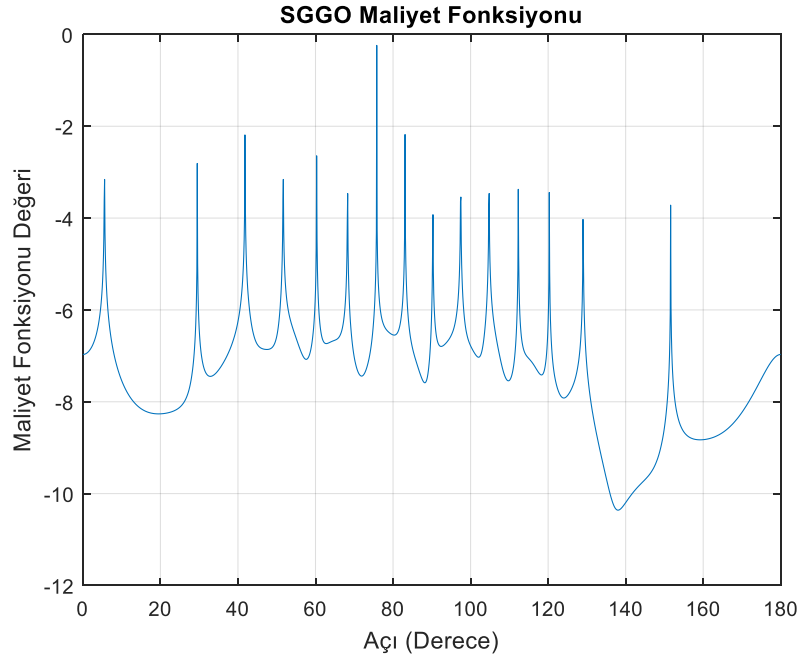
Şekil 3.1'de 16 adet anten kullanıldığında maliyet fonksiyonunun doğrusal olmayan yapısı nedeniyle ikinci kullanıcı için hesaplanacak olan minimum değer birden fazla yerel bölgede oluşabilmekte ve problem çözümünü zorlaştırmaktadır. 64 adet anten kullanıldığında ise maliyet fonksiyonunun minimum değeri, yerel minimumlardan ayırmaya başlamış ve böylece PSO yönteminin performansı artmıştır.



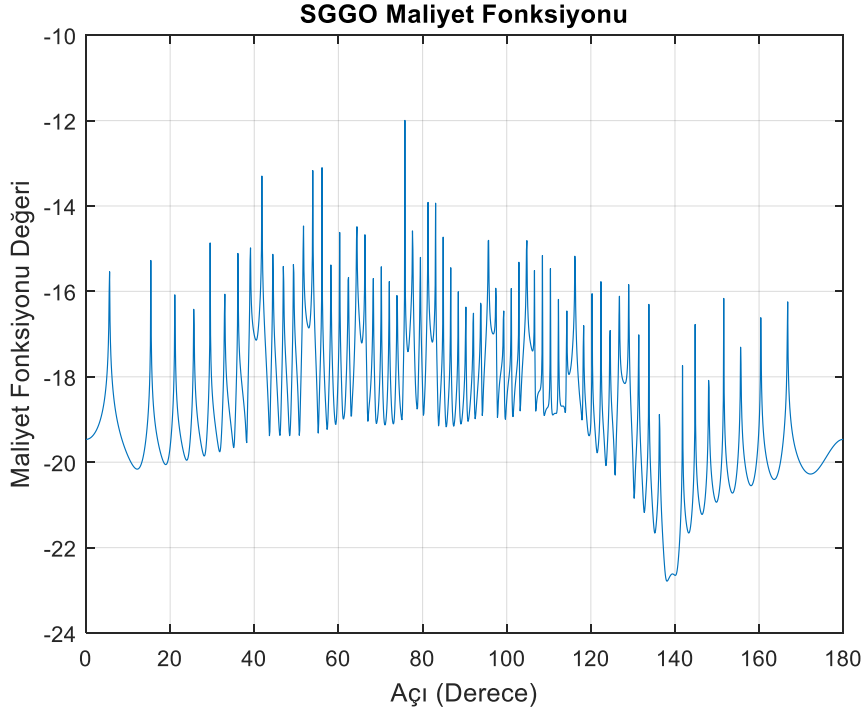
Şekil 3.1 16 anten için iki kullanıcı olduğu durumda ilk kullanıcı için yönlendirilen hüzme sabit iken ikinci kullanıcının yönlendirilen hüzmeye bağlı olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu



Şekil 3.2 64 anten için iki kullanıcı olduğu durumda ilk kullanıcı için yönlendirilen hüzme sabit iken ikinci kullanıcının yönlendirilen hüzmeyle ilgili olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu



Şekil 3.3 16 adet anten için on kullanıcı olduğu durumda son kullanıcı için yönlendirilen hüzme $[0^\circ, 180^\circ]$ açı aralığında iken son kullanıcının yönlendirilen hüzmeyle ilgili olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu



Şekil 3.4 64 adet anten için on kullanıcı olduğu durumda son kullanıcı için yönlendirilen hüzme $[0^\circ, 180^\circ]$ açı aralığında iken son kullanıcının yönlendirilen hüzmeye bağlı olarak üzerindeki SGGO maliyet fonksiyonu

Çok amaçlı optimizasyon problemi, perturbasyon işlemi yapılarak tek maliyet fonksiyonlu kısıtlı olmayan optimizasyon problemi haline dönüştürülmüştür. Ancak hesaplanan yeni optimizasyon problemi hala çok boyutlu ve doğrusal olmayan durumdadır ayrıca çok sayıda yerel eniyi değeri mevcuttur.

Oluşturulan problemin karmaşıklığı ve işlem yükünün çok büyük olması nedeniyle öncesinde de bahsedildiği gibi çözüm yöntemi olarak PSO yöntemi kullanılacaktır. Bu sayede işlem yükü düşürülecek ve çok sayıda kullanıcı olduğu durumda ve çok sayıda anten kullanıldığı durumda bir çözüm kümesi elde edilecektir. Ancak elde edilen çözüm, PSO yönteminin dezavantajlarında da yer aldığı gibi eniyi nokta olmayabilir.

PSO çözümünün performansının incelenebilmesi için, PSO çözümünün yanı sıra kaba kuvvet çözümü ve buluşsal yöntem kullanılacaktır. Buluşsal yöntemde tüm yan hüzme seviyelerinin birinci yan hüzme tepe seviyesinde olduğu yaklaşımı uygulanacaktır.

Böylece ana hüzmeye doğrudan kullanıcının üzerine yönlendirilecek ve herhangi bir hüzmeye yönlendirme çözümü oluşturulmayacaktır. PSO yönteminin, buluşsal yöntemin ve kaba kuvvet çözüm yönteminin işlem yükü ve doğruluğu ile ilgili performans değerleri bir sonraki deneysel çalışmalar bölümü altında tartışılacaktır.

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin kullanım alanları çok sayıda kullanıcı ve anten durumu içerdiğinden, kaba kuvvet yaklaşımı işlemci performansının çok daha yukarısında bir işlem gücüne ihtiyaç duyabilmektedir. Buna rağmen düşük sayıda kullanıcıların olduğu durumda, PSO performansını inceleyebilmek amacıyla karşılaştırmalarda kullanılacaktır.

4. HÜZME YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ VE PERFORMANSI

Kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyeleri, haberleşme sistemleri için en kritik tasarım parametrelerinden biridir. Bu nedenle verimli bir haberleşme ağının kurulabilmesi için kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyelerinin mümkün olan en yüksek değerde olması gerekmektedir. Bu tez kapsamında SGGO seviyelerinin maksimize edilmesi için hüzme yönlendirme tekniklerinin kullanılması amaçlanmaktadır.

Bu bölümde alt başlıklar halinde üç adet hüzme yönlendirme yönteminin performansı incelenmektedir. Bu yöntemler,

- Kaba kuvvet yaklaşımı ile hüzme yönlendirme
- Üstel fonksiyonlar kullanılarak oluşturulmuş optimizasyon probleminin PSO yöntemi kullanılarak çözülmesi
- Buluşsal yöntem

olarak sıralanmaktadır.

Hüzme Yönlendirme Performans Parametreleri başlığı altında hüzme yönlendirme işlemlerinin performansını ölçebilmek amacıyla kullanılacak olan parametreler açıklanacaktır.

Kaba Kuvvet Çözümü, herhangi bir yöntem kullanmadan hüzmelerin yönlenebileceği tüm açı değerleri için hesaplanan SGGO seviyeleri üzerinden analiz yapılmasını ifade etmektedir. Çözüm kümesinin çok sayıda değişken içermesi ve kullanıcı sayısının çok sayıda olması nedeniyle hesaplama için gerekli olan işlem yükü çok yüksek seviyelere çıkmaktadır. İşlem yükü hesabı Kaba Kuvvet Çözümü Başlığı altında hesaplanacaktır.

Gerekli olan işlem yükünü düşürebilmek için evrimsel algoritmalar olarak isimlendirilen algoritmalarından biri olan PSO, tez kapsamında kullanılacaktır. PSO

Yöntemi başlığı altında bölüm 3’de hesaplanan optimizasyon probleminin PSO yöntemi ile çözülmesi sonucunda elde edilen çözümlerin performansı incelenecektir.

Buluşsal Yöntem başlığı altında, kaba kuvvet ve PSO yönteminin kullanıcı sayısının çok yüksek olduğu durumlarda işlem yükü nedeniyle çalışmadığı seviyelerde içsel olarak önerilmiş algoritma açıklanacak ve performansı incelenecektir.

4.1. Hüzme Yönlendirme Performans Parametreleri

Hüzme yönlendirme performansı, çok sayıda farklı değişkene bağlı olduğundan alt başlıklara bölünerek incelenmesi gereken bir problemdir.

SGGO performansını etkileyen ve tez kapsamında incelenecek olan parametreler;

- Kullanıcıların Yerleşimi
 - Yan hüzme girişimi performansı
 - Kullanılan Pencereleme Yöntemleri
 - Dikdörtgen
 - Binomial
 - Taylor-Kaiser
 - Dolph-Chebyshev
 - Hamming
- Anten Sayısı, Kullanıcı Menzilleri, Kullanıcı Sayısı, Toplam Anten Gücü
- Arama Penceresi
- Ortam Gürültüsü

biçiminde sıralanabilir. Tez kapsamında haberleşme anteni üzerindeki bireysel antenler arasındaki d_x uzaklığı yayında kullanılan dalga boyunun yarısı kadar alınmıştır. Bu nedenle bölüm 2.1’de de açıklandığı gibi haberleşme için oluşturulan hüzmenin genlik seviyesi yayın frekansından bağımsız hale gelmektedir.

Kullanıcıların yerleşimi, kullanıcıların haberleşme için kullanılan antene göre uzaydaki açısal yerini tanımlamaktadır.

Anten sayısı parametresi, haberleşme için kullanılan yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemi oluşturan antenlerin sayısını ifade etmektedir. Anten sayısı arttıkça oluşturulan anten hüzmesi daralmakta bu nedenle hüzme üzerindeki birim metrakare başına düşen güç miktarı yükselmektedir. Bu nedenle anten açıklığı değeri, anten sayısı arttıkça yükselmektedir.

Kullanıcı menzilleri, kullanıcıların haberleşme için kullanılan antene göre ne kadar uzakta olduğunu ifade etmektedir.

Kullanıcı sayısı, haberleşme yapılan toplam kullanıcı sayısı değerini ifade eder. Toplam anten gücü, haberleşme sırasında kullanılan yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemin toplam gücünü ifade eder.

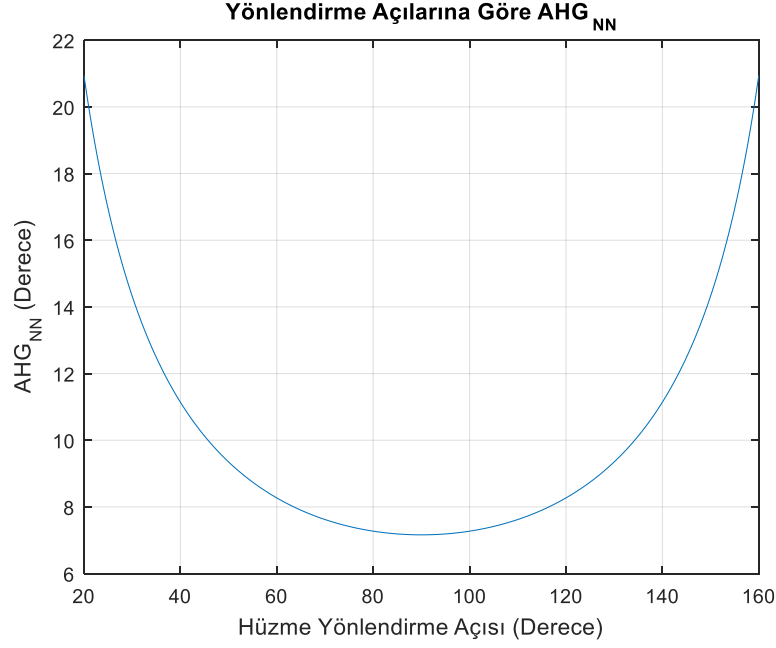
Kullanıcı sayısı ve anten sayısı parametreleri; tüm kullanıcılar için hüzme yönlendirildiği düşünüldüğünde, kullanıcıların ana hüzme üzerinden girişim yaratmayacak bölgelerde olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle sıfırdan sıfıra ana hüzme genişliği değerinden açısal olarak birbirlerine daha yakın olan kullanıcı yerleşimleri Birörnek dağılımı ile hesaplanan kullanıcı yerleşimleri içerisinde çıkarılmıştır. Ana hüzmenin sıfırdan sıfıra açı genişliği değeri

$$AHG_{NN} = 2 \frac{\lambda}{Nd_x \sin(\phi_k)} \quad (64)$$

biçiminde literatürde yer almaktadır [41].

Şekil 3.5’de 32 adet anten kullanıldığı durumda farklı hüzme yönlendirme açılarına göre ana hüzme genişliği seviyeleri derece cinsinden verilmiştir. İlgili grafiğe göre

hüzme yönlendirme işlemi yapılmadığında AHG_{NN} değeri 7.16 derece olarak hesaplanmaktadır. Kullanıcıların yaklaşık olarak 20 ile 160 derece arasında dağıldığı düşünüldüğünde ise 32 adet anten için yaklaşık olarak 14-15 adet kullanıcı olduğu durumda ana hüzme üzerinden girişim yaratmadan uzayda yerleşebilecekleri öngörülmektedir.



Şekil 4.1 32 adet anten için hüzmelerin yönlendirilme açısına göre AHG_{NN} değeri

Arama penceresi, kullanıcıların uzaydaki yerleşimleri etrafında açısal olarak kaç derece aralıkta hüzme yönlendirme yapıldığını ifade eder.

Tez kapsamında kullanıcı yerlerinin net olarak bilindiği yaklaşımı kullanılmıştır. SGGO seviyelerinin maksimize edilebilmesi için kullanıcıların açısal yeri etrafında belirli bir açı aralığında arama penceresi açılarak bu pencere içerisinde kalacak şekilde hüzme yönlendirme işlemi yapılmaktadır.

Ortam Gürültüsü, haberleşme sırasında çevresel etkenler nedeniyle haberleşme sinyali üzerinde oluşan SGGO seviyesini düşüren bir güç değeridir. Gürültü seviyesi

$$\sigma^2 = N_0 B \quad (65)$$

biçiminde hesaplanır. Eşitlik (65)'de yer alan N_0 değeri gürültü tabanını, B değeri ise bant genişliğini ifade eder. 1MHz bant genişliği gürültü gücü yaklaşık olarak -110 dBm alınmıştır. Bu nedenle analizlerde -110 dBm değeri gürültü seviyesi olarak kabul edilecektir. Haberleşme için kullanılan bant genişliği, ortam gürültüsünü doğrudan etkileyen bir parametredir. 1MHz yerine 10 GHz bant genişliğinde haberleşme yapıldığı düşünüldüğünde ortam gürültüsü değeri 40 dB yükselecektir.

4.2. Kaba Kuvvet Çözümü

Kaba kuvvet çözümü, tüm antenlerin tüm hüzmeye yönlendirme kombinasyonları için ortaya çıkan kullanıcılar üzerinde oluşan SGGO seviyelerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Böylece minimum SGGO değerini maksimize edebilecek olan ϕ_k çözüm kümesi eniyi çözümü verebilecek şekilde hesaplanabilir. Hesaplama sırasında ortaya çıkan işlem yükü miktarı

$$CC = \left(\frac{180}{\Delta\phi} + 1\right)^K \quad (66)$$

olmaktadır. 4 kullanıcı için 0.1° açı çözünürlüğünde, kullanıcı sayısı kadar olan K adet hüzmelerin açı çözünürlüğüne bağlı olarak 1801 farklı noktaya gönderildiği düşünüldüğünde bile ortaya çıkan çözüm sayısı 10^{12} gibi çok yüksek değerlere çıkabilmektedir. Bu nedenle kaba kuvvet çözümü maksimum 3 kullanıcı için uygulanabilmiştir.

4.3. PSO Yöntemi

PSO yöntemi, buluşsal algoritmalar başlığı altında literatürde yer almaktadır [54]. Çok sayıda değişken içeren, çok boyutlu, doğrusal olmayan ve dış bükey olmayan problemlerin çözümlerinde kullanılmaktadır. Çözüm uzayına yayılan ve birbirleri

arasında etkileşim olan parçacıklar yardımıyla maliyet fonksiyonunu minimize edebilecek olan çözüm kümesini bulmayı amaçlar.

PSO yönteminin performansını etkileyen çok sayıda parametresi mevcuttur ve oluşturulan optimizasyon probleminin yapısına uygun olarak ayarlanması gerekmektedir. Optimum parametre setini hesaplama işlemi için literatürde çok sayıda farklı optimizasyon problemleri mevcuttur. Ancak tez kapsamında ayarlama işlemi sırasında diğer tüm performans parametreleri sabit tutulmuş ve çok sayıda gerçekleştirme analizi uygulanmıştır. Çözümüne her defasında en çok yakınsayan parametre seti ayarlanmıştır. Çizelge 4.1’de hesaplanan PSO parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.1 Gerçeklenme analizi yapılarak ayarlanmış PSO parametreleri

PSO Parametreleri	Değerler
Parçacık Sayısı (Swarm Size, SS)	100
Parçacık İvmesi Alt Sınırı (Min Inertia Range, IR_{min})	0.28
Parçacık İvmesi Üst Sınırı (Max Inertia Range, IR_{max})	2.1
Parçacık Güven Katsayısı (Self Adjustment Weight)	1.65
Sosyal Güven Katsayısı (Social Adjustment Weight)	1.8
Minimum Adaptif Komşu Büyüklüğü (Minimum Adaptive Neighborhood Size, NS_{min})	0.1 (Tarama açısı çözünürlüğü kadar)

PSO yöntemi, temel olarak parçacıkların mevcut konumlarındaki açılı değeri kümesi için maliyet fonksiyonunu hesaplar ve her bir parçacık için maliyet fonksiyonunu düşürecek yönde parçacıkların hareket edebilmesi için parçacık sayısı kadar vektörel hız hesaplar. Bir sonraki iterasyonda, her bir parçacık hesaplanan hız vektörü doğrultusunda hareket eder. Böylece iteratif bir şekilde parçacıklar çözüm kümesi üzerinde hareket ederken maliyet fonksiyonu minimize edilmiş olur.

PSO yönteminin uygulanması sırasında gerekecek olan işlem yükü değeri PSO parametrelerine göre değişken değerler alabilmektedir. Parçacık sayısı yükseldikçe gereken işlem yükü değeri, parçacık sayısının yükseliş miktarına göre doğrusal olarak artmaktadır. Parçacıkların PSO çözüm iterasyonuna ilk başladığı nokta da işlem yükünü doğrudan etkileyen bir parametredir.

4.3.1. Anten Sayısı ve Kullanıcı Sayısının PSO Performansına Etkisi

Anten sayısı ve kullanıcı sayısı parametreleri altında PSO çözüm yönteminin çıktısı, gerçekleşme analizi yapılarak incelenmiştir. Kaba kuvvet ile hesaplanan hüzmeye yönlendirme açıları eniyi çözüm olarak kabul edilmektedir. Kullanıcı açıları Birörnek rastgele değişkenli olarak seçilmiştir.

Senaryo-4.3.1.1

Anten Sayısı: 16

Kullanıcı Sayısı: 2

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Monte Carlo Sayısı: 50

Anten Gücü: 1W

Menzile Göre Zayıflama: Yok

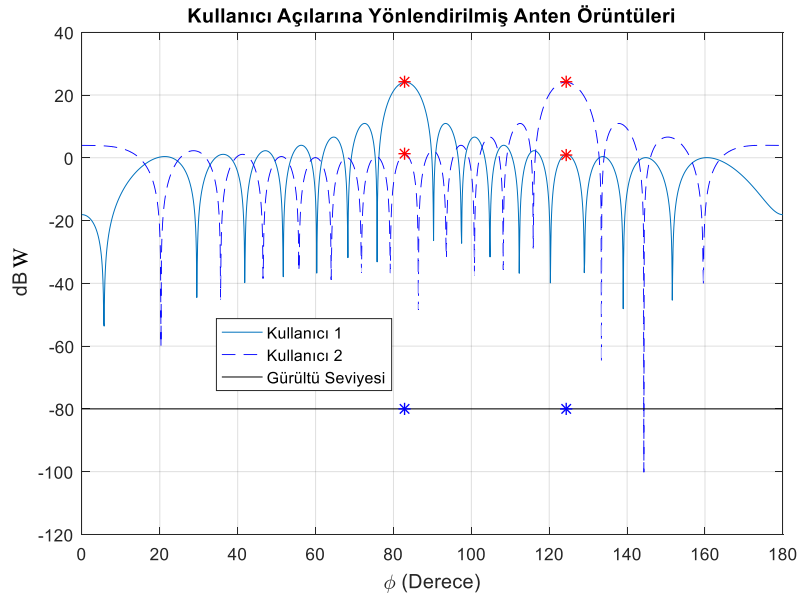
Ortam Gürültüsü: -110 dBm

Arama Penceresi: $0^\circ - 180^\circ$

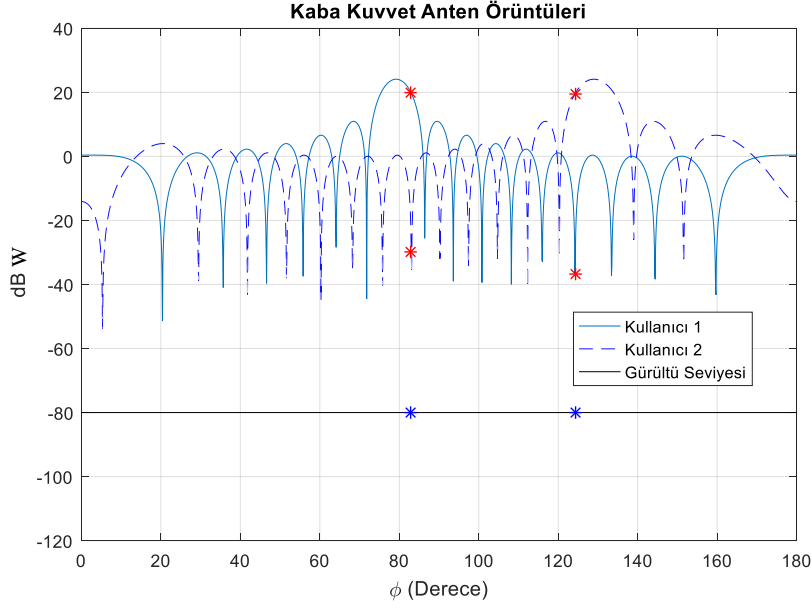
Kullanıcı Yerleri (Derece): 83.1, 124.2

İlgili senaryoda gürültü gücü -110 dBm, hüzmeye tepe seviyesi değeri de 16 adet anten için 24 dB'dir. Bu durumda tek kullanıcının SGO (Sinyal Gürültü Oranı) seviyesi 104 dB olarak hesaplanabilmektedir. Girişim seviyeleri gürültü gücünün çok üzerinde değerler aldığı için SGO'yu negatif yönde asıl etkileyen büyüklük girişim seviyesi olmaktadır.

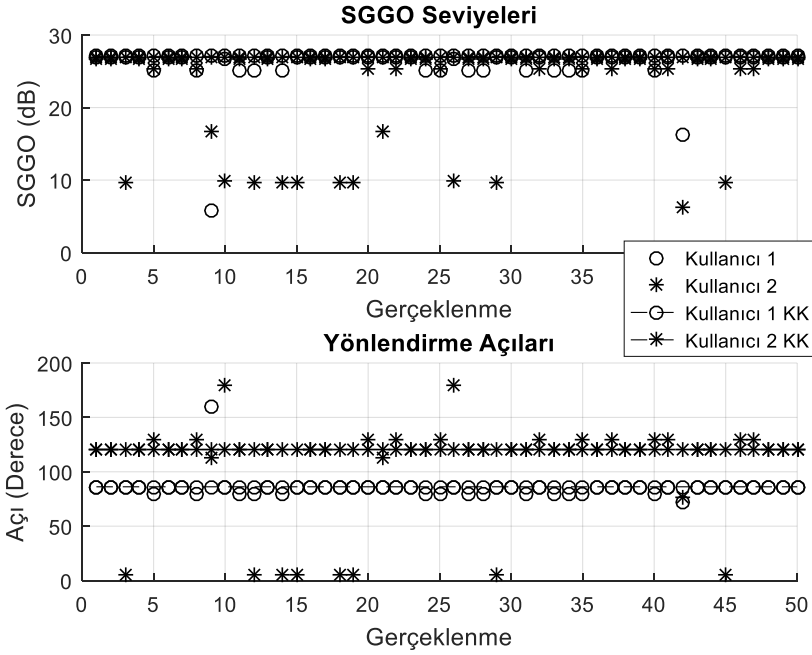
Kaba kuvvet yöntemi ile hesaplanan hüzmeye açıları 86.3° ile 120.6° olarak bulunmuştur. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de kırmızı ve mavi ile gösterilen noktalar kullanıcıların yerini ifade etmektedir. Şekli 4.1’de herhangi bir yöntem ile hüzmeye yönlendirme açıları hesaplanmadan hüzmeler kullanıcıların üzerine doğrudan yönlendirilmiştir. Diğer kullanıcının yarattığı girişim nedeniyle birinci kullanıcının üzerindeki SGGO seviyesi 23 dB olmaktadır. Girişim seviyesi ortam gürültüsü değerinden çok daha yüksek seviyelerde olduğundan SGGO’yu asıl etkileyen büyüklük girişim olmaktadır. Şekil 4.2’de kaba kuvvet yöntemi ile hesaplanan açılara hüzmelerin yönlendirilmesi görülmektedir. Görüldüğü üzere kaba kuvvet yönteminin kullanımı sonucunda kullanıcıların SGGO seviyelerinde yaklaşık olarak sırası ile 25 dB ve 31 dB seviyelerinde iyileştirme sağlanmıştır.



Şekil 4.2 16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda kullanıcıların üzerlerine yönlendirilmiş hüzmeye yönlendirme sonuçları

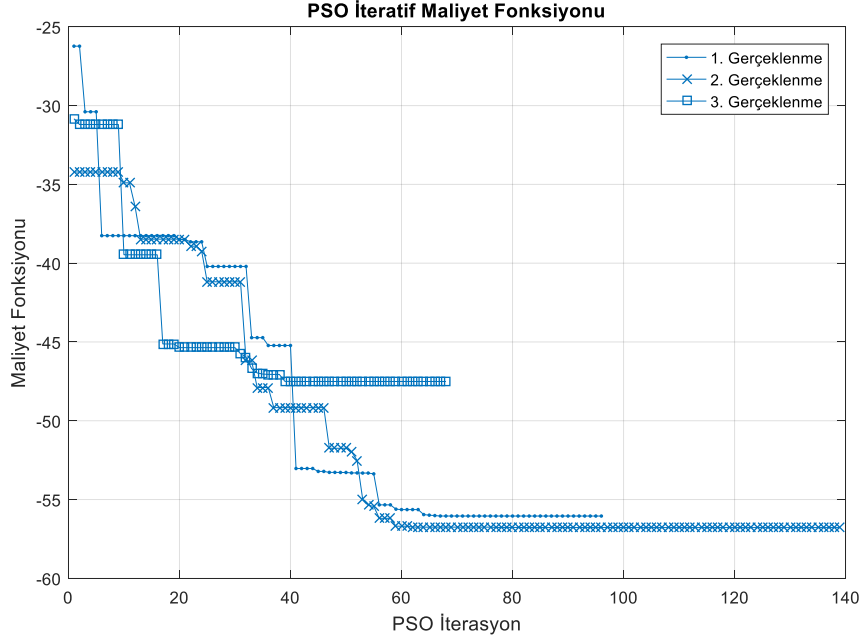


Şekil 4.3 16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda kaba kuvvet yönteminin hüzme yönlendirme sonuçları



Şekil 4.4 16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin açı doğruluğu ve SGGO performansı

Şekil 4.4’de arama penceresi $[0^\circ, 180^\circ]$ aralığında seçilmiştir. PSO çözümü, kaba kuvvet çözümü ile hesaplanan (Şekilde KK olarak geçmektedir) ideal çözümler ile karşılaştırıldığında yaklaşık % 80 ihtimal ile çözüm üretebilmiş ve ürettiği çözümler SGGO bazında maksimum 1.5 dB, hüzme yönlendirme açısı bazında ise maksimum 7 derecelik hata ile bulunabilmiştir.



Şekil 4.5 16 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda arama penceresi $[0^\circ, 180^\circ]$ iken PSO yönteminin iteratif maliyet fonksiyonu hesabı

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere 16 adet kullanıldığı durumda PSO yönteminin çıktısı maliyet fonksiyonunu minimum yapabilecek olan global eniyi açı değerlerine yakınsayamamıştır. Bulunan çözüm, bölüm 2.8’de de anlatıldığı gibi maliyet fonksiyonunun yerel minimum değerlerinden birisidir. Bu nedenle PSO çözüm yönteminin performansı 16 adet anten için düşüktür.

Senaryo-4.3.1.2

Anten Sayısı: 64

Kullanıcı Sayısı: 2

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Monte Carlo Sayısı: 50

Anten Gücü: 1W

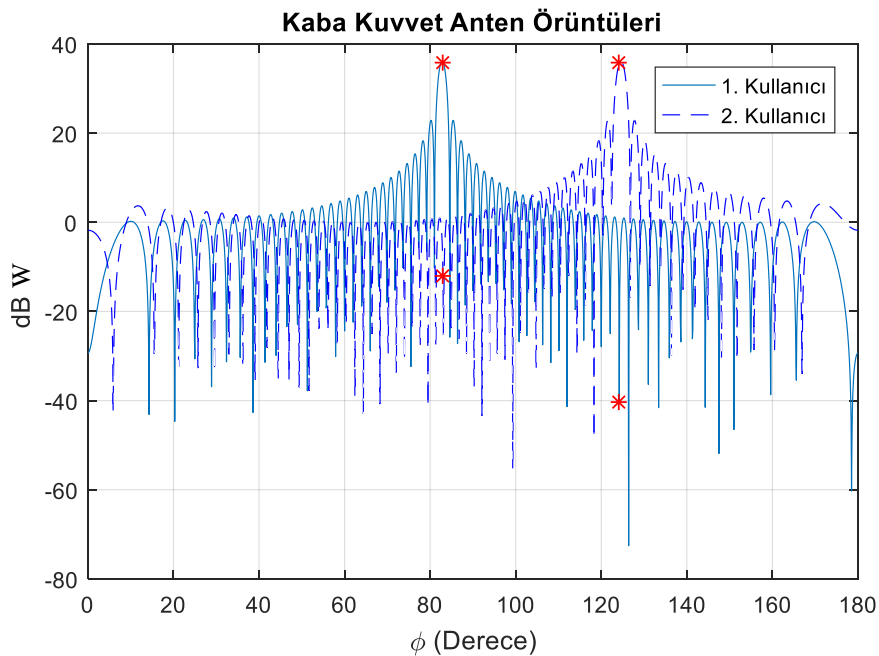
Menzile Göre Zayıflama: Yok

Ortam Gürültüsü: -110 dBm

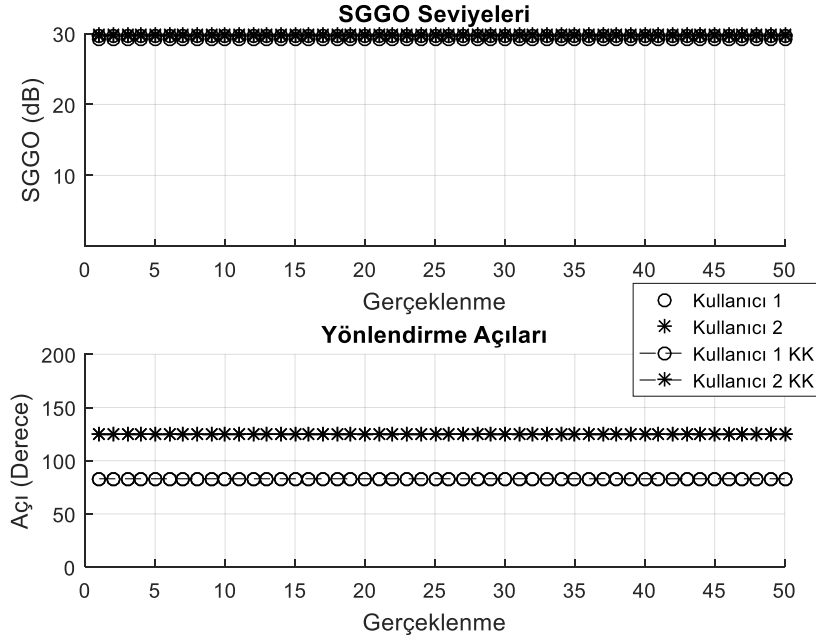
Arama Penceresi: $0^\circ - 180^\circ$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 83.1, 124.2

Kaba kuvvet yöntemi ile hesaplanan hüzmeye açıları 83° ile 124.3° olarak bulunmuştur. Şekil 4.6'da kaba kuvvet sonucunda hesaplanan açılara hüzmeler yönlendirilmiştir.

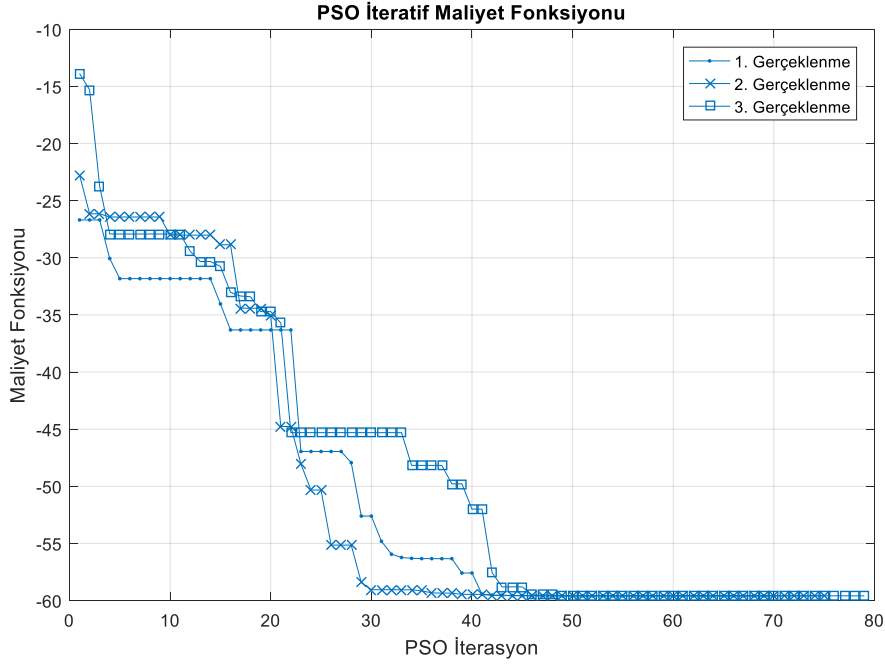


Şekil 4.6 64 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda kaba kuvvet yönteminin hüzmeye yönlendirme sonuçları



Şekil 4.7 64 adet anten kullanıldığı ve iki kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin açığı doğruluğu ve SGGO performansı

Anten sayısı yükseldikçe bölüm 2.8’de de açıklandığı gibi, anten hüzmesi daraldığı için maliyet fonksiyonunun tepe noktası yükselmekte ve bu nedenle de PSO çözüm yönteminin çıktıları da iyileşmektedir. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere ideal kaba kuvvet çözümlere göre maksimum 0.5 dB SGGO kaybı ve 0.2 derece hüzme yönlendirme hatası ile hüzmeler, minimum SGGO seviyesini maksimize edebilecek şekilde kullanıcılara yönlendirilebilmiştir.



Şekil 4.8 64 adet anten ve iki kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin iteratif maliyet fonksiyonu hesabı

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere senaryo 4.3.1.1’in aksine 64 adet anten kullanıldığı durumda PSO yönteminin çıktısı maliyet fonksiyonunu minimum yapabilecek olan global eniyi açılış değerlerine yakınsayabilmiştir.

Senaryo-4.3.1.3

Anten Sayısı: 64

Kullanıcı Sayısı: 3

Tarama Açılış Çözünürlüğü: 0.1°

Monte Carlo Sayısı: 50

Anten Gücü: 1W

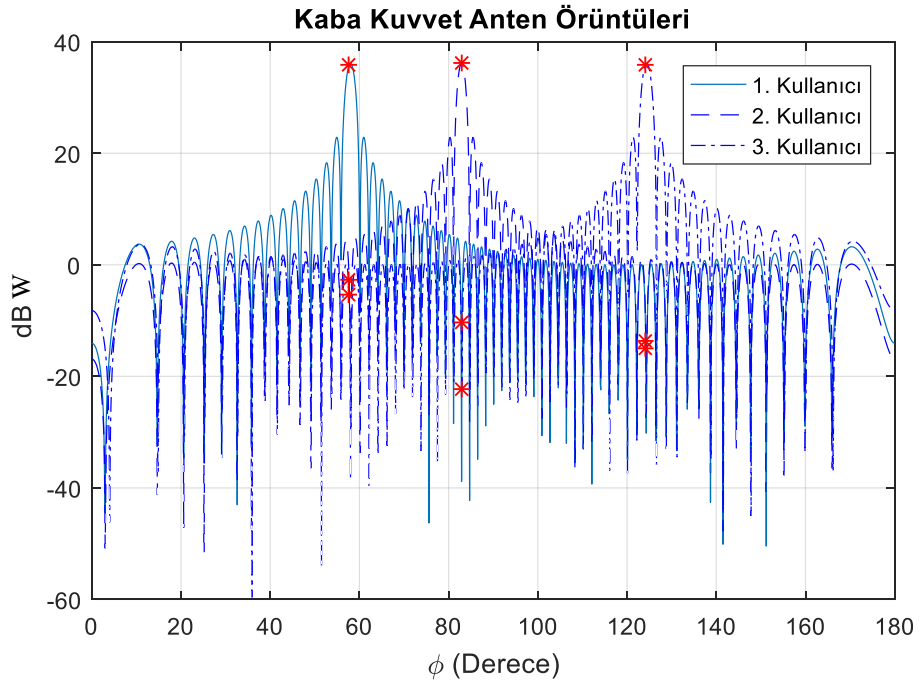
Menzile Göre Zayıflama: Yok

Ortam Gürültüsü: -110 dBm

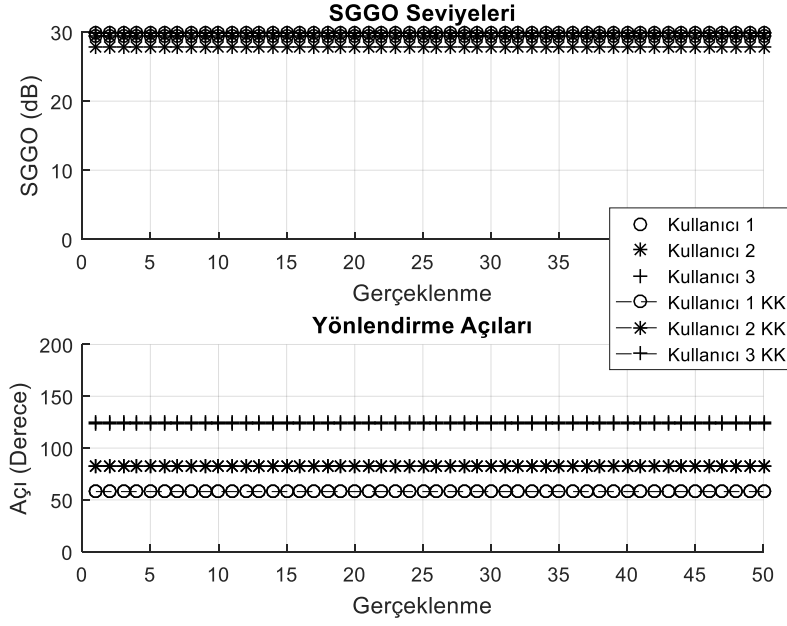
Arama Penceresi: $0^\circ - 180^\circ$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 57.8, 83.1, 124.2

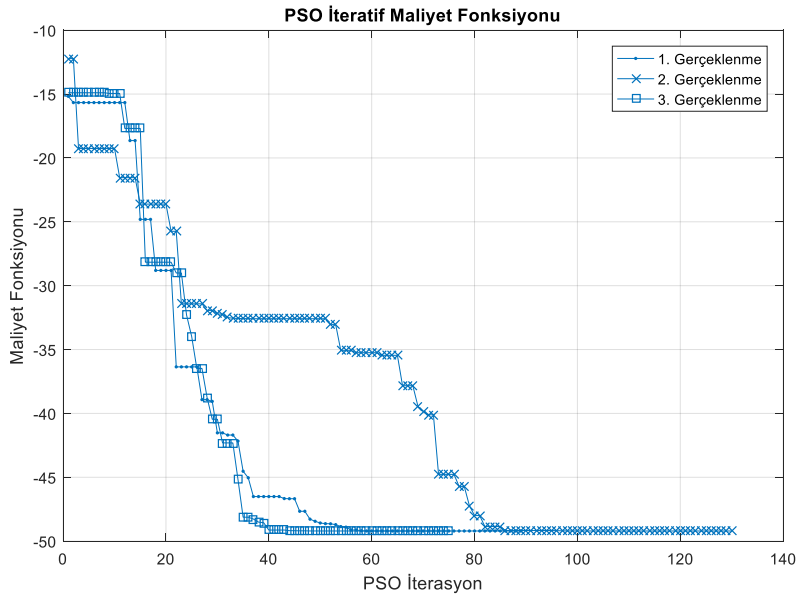
Kaba kuvvet yöntemi ile hesaplanan hüzme açıları 58° , 82.9° ve 124.4° olarak bulunmuştur. Şekil 4.9'da kaba kuvvet yöntemi ile bulunan açı değerlerine hüzmeler yönlendirilmiştir.



Şekil 4.9 64 adet anten ve üç kullanıcı olduğu durumda kaba kuvvet yönteminin hüzme yönlendirme sonuçları



Şekil 4.10 64 adet anten kullanıldığı ve üç kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin açı doğruluğu ve SGGO performansı



Şekil 4.11 64 adet anten ve üç kullanıcı olduğu durumda PSO yönteminin iteratif maliyet fonksiyonu hesabı

Şekil 4.10’da görüldüğü üzere 3 kullanıcı için arama penceresi $[0^\circ, 180^\circ]$ derece aralığında iken PSO çözümü, kaba kuvvet çözümü ile hesaplanan ideal çözümler ile

karşılaştırıldığında % 100 ihtimal ile çözüm üretebilmiş ve ürettiği çözümler SGGO bazında maksimum 1.5 dB, hüzmeye yönlendirme açısı bazında ise maksimum 0.2 derecelik hata ile bulunabilmiştir.

Şekil 4.11’de PSO yönteminin iteratif olarak maliyet fonksiyonunu minimize edebildiği görülmektedir. Bu da 3 kullanıcı olduğunda 64 adet anten kullanıldığı durumda SGGO optimizasyon probleminin %100 verim ile çözülebildiği anlamına gelmektedir.

2 ve 3 kullanıcı olduğu durumlarda PSO performansı üzerinde anten sayısının ve kullanıcı sayısının etkisi incelenmiştir. Diğer performans parametreleri ve yüksek sayıda kullanıcı olan durumlardaki PSO sonuçları, kaba kuvvet işlem yükünün çok yüksek olması nedeniyle Monte Carlo analizleri ile incelenecektir.

4.3.2. Yüksek Kullanıcı Sayılarında PSO Performansı

Kullanıcı sayısı çok yüksek olduğundan Monte Carlo analizi yapılarak bulunan minimum SGGO değerini maksimize edecek sonuçların SGGO seviyeleri ortalama değerleri ve varyans değerleri ile hüzmelerin yönelim açısı değerlerinin ortalama değeri ve varyans değerleri hesaplanacaktır. Böylece, çok sayıda kullanıcı için yapılan çok sayıda Monte Carlo sonucu daha net olarak yorumlanabilecektir. Yapılan analizler PSO yönteminin performansı ile ilgili olarak bilgi verecektir.

Senaryo-4.3.2.1

Anten Sayısı: 128

Kullanıcı Sayısı: 10

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Monte Carlo Sayısı: 50

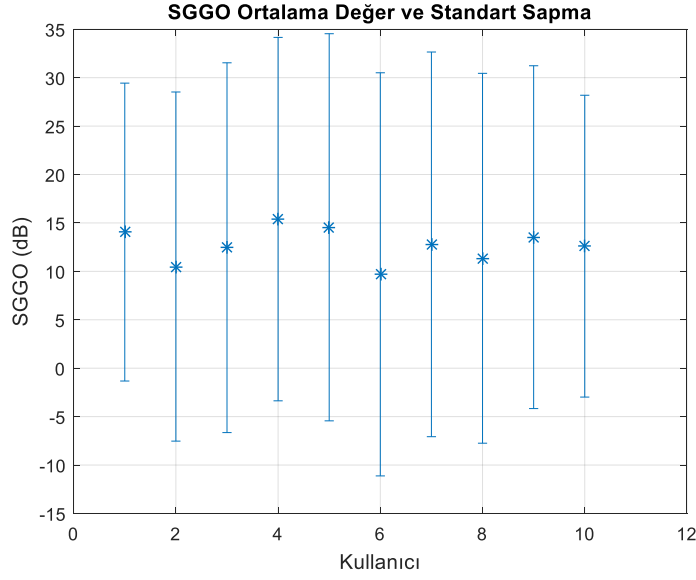
Anten Gücü: 1W

Menzile Göre Zayıflama: Yok

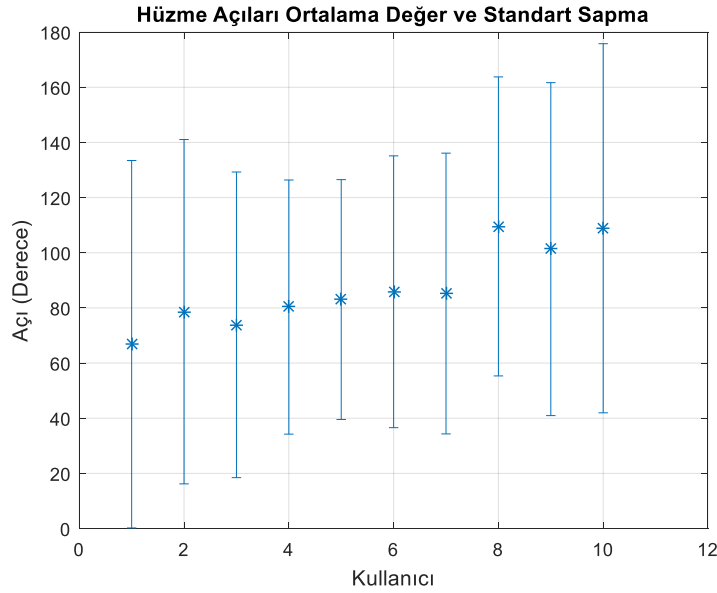
Ortam Gürültüsü: -110 dBm

Arama Penceresi: $0^{\circ} - 180^{\circ}$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 0-180 arası Birörnek dağılımlı



Şekil 4.12 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda PSO SGGO performansı



Şekil 4.13 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda, arama penceresi uygulanmıyorken ($0^{\circ} - 180^{\circ}$ genişlikte) PSO yönlendirme performansı

Kullanıcı sayısının arttığı durumlarda uzayda oluşturulan toplam hüzmeye sayısı arttığından her bir kullanıcı için hesaplanacak olan hüzmeye yönlendirme açısı değerini bulmak zorlaşmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.12 ve 4.13’de görüldüğü üzere PSO yönteminin performansı düşmektedir.

Yüksek sayıda kullanıcı olan durumda haberleşebilmek için anten sayısının da paralel olarak artırılması gerekmektedir. Anten sayısının arttığı durumda ise hüzmelerin sıfır noktaları artacağından çözüm kümesi içerisinde yerel eniyi açısı değerlerinin sayısı artacak ve tüm bu nedenlerle çözüm bulmak zorlaşacaktır.

İlgili işlem yükünün düşürülmesi için kullanıcıların uzaydaki bilinen açısal yerlerinin etrafında hüzmeye yönlendirme için uygulanan arama penceresi daraltılabilir. Böylece arama uzayı küçülecek, yerel eniyi değerlerin bir kısmı göz ardı edildiği için global eniyi değeri bulma ihtimali yükselecek ve işlem yükü düşecektir. Buna paralel olarak da PSO yönteminin performansının yükselmesi beklenmektedir.

Senaryo-4.3.2.2

Anten Sayısı: 128

Kullanıcı Sayısı: 10

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Monte Carlo Sayısı: 50

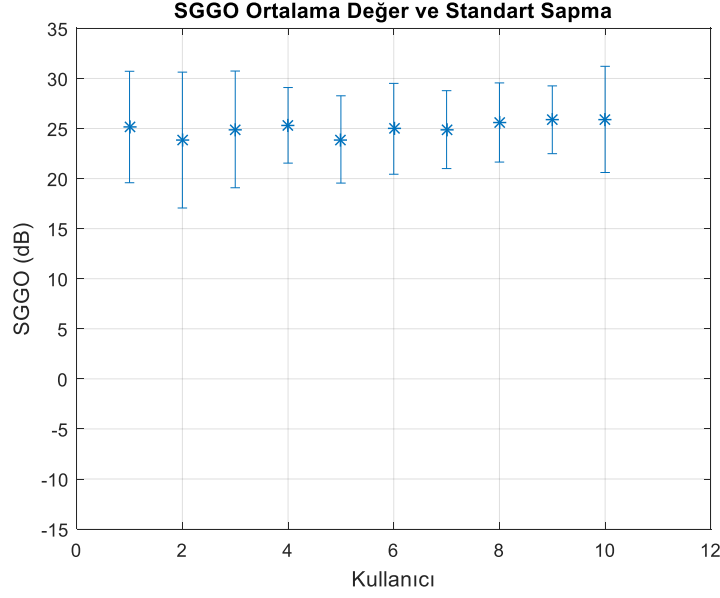
Anten Gücü: 1W

Menzile Göre Zayıflama: Yok

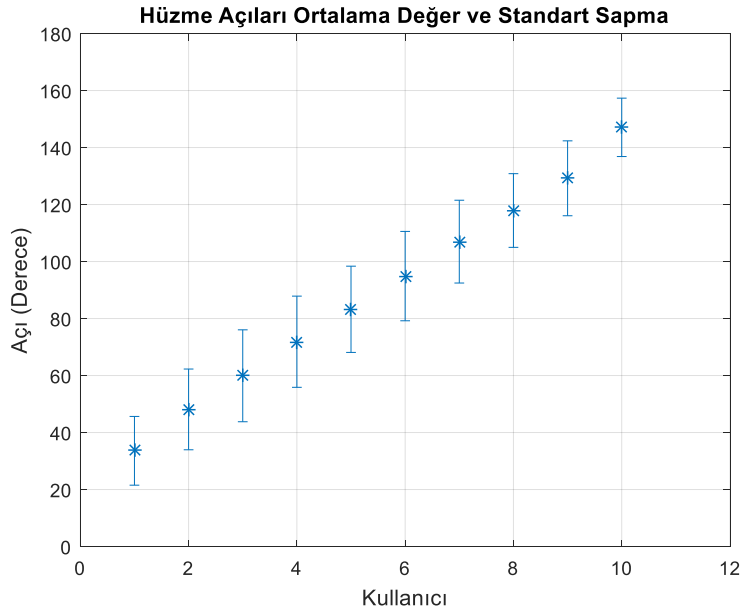
Ortam Gürültüsü: -110 dBm

Arama Penceresi: $\pm 10^\circ$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 0-180 arası Birörnek dağılımlı



Şekil 4.14 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda arama penceresi $\pm 10^\circ$ iken PSO SGGO performansı



Şekil 4.15 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda arama penceresi $\pm 10^\circ$ iken PSO yönlendirme performansı

128 adet anten olduğu durumda ortalama ve standart sapma değerlerinden de anlaşıldığı üzere PSO yöntemi kullanılarak üretilen çözümler arama penceresi kullanıcı yerlerinin $\pm 10^\circ$ etrafında açıldığında, Şekil 4.14 ve 4.15’de görüldüğü üzere Senaryo 4.3.2.1’in

sonuçları ile karşılaştırıldığında büyük ölçüde iyileşme olduğu gözlenmektedir. Bu iyileşmenin nedeni arama penceresinin daraltılması sonucu çözüm uzayının daha az sayıda yerel eniyi değerleri içermesidir.

4.3.3. Kullanıcı Menzilleri, Toplam Anten Gücü ve Ortam Gürültüsünün PSO Performansı Üzerindeki Etkisi

İlk olarak kullanıcıların, yoğun çok girişli çok çıkışlı sisteme göre farklı menzillerde yer almasının yarattığı durum incelenecektir.

Kullanıcıların menzil değerlerine bağlı olarak güç yoğunluğu seviyesinde düşüş gerçekleşecektir. İlgili düşüş nedeniyle görece uzak olan kullanıcılar üzerinde düşen güç yoğunluğu düşük olacağından, yakın kullanıcılar üzerinde yarattığı girişim seviyesi düşük olacaktır. Bu nedenle yakında yer alan kullanıcıların SGGO seviyelerinin normalden daha yüksek olması beklenmektedir.

Senaryo-4.3.3.1-Yol Zayıflamasının Etkisi

Anten Sayısı: 128

Kullanıcı Sayısı: 10

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Gerçeklenme Sayısı: 50

Anten Gücü: 1W

Menzile Göre Zayıflama: Var

Ortam Gürültüsü: -110 dBm

Arama Penceresi: $\pm 10^\circ$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 42.2, 54.8, 69.7, 77.1, 96.2, 109.4, 129.1, 137.6, 142.0, 146.5

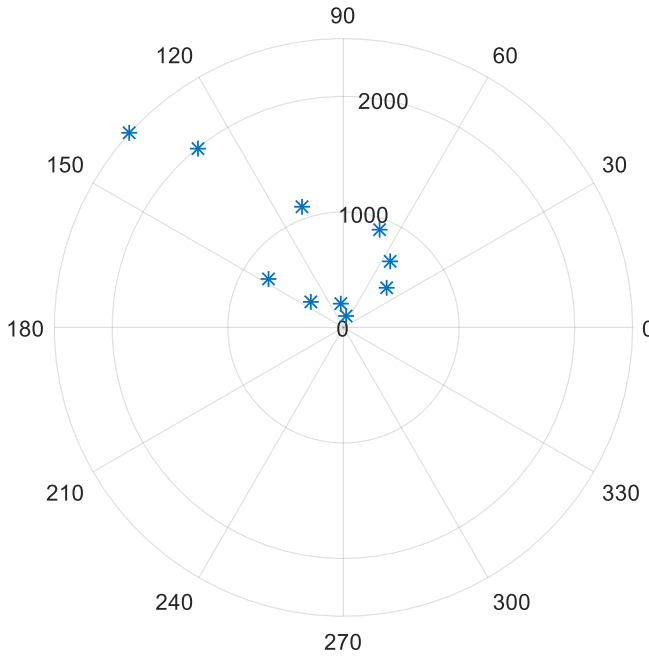
Kullanıcı Menzilleri (km): 0.5, 0.7, 0.9, 0.1, 0.2, 1.1, 2, 2.5, 0.36, 0.77

Menzile bağlı zayıflama değerleri Friis zayıflama formülü ile

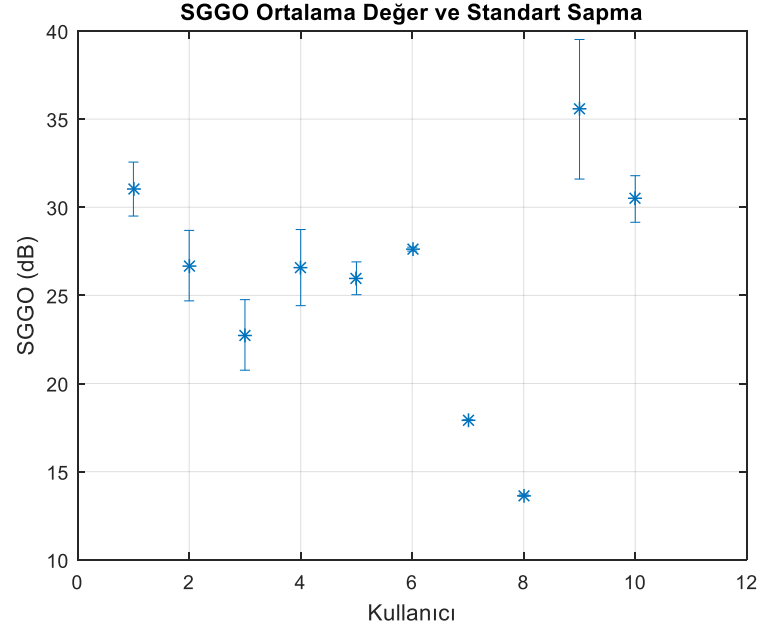
$$P_L = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (67)$$

hesaplanabilmektedir. Kullanıcıların yayın frekanslarının aynı değerlerde olduğu göz önünde bulundurulduğunda, en yakın kullanıcı üzerindeki zayıflama miktarına göre kullanıcıların üzerindeki yol kaybı değerleri sırası ile 13.98 dB, 16.90 dB, 19.1 dB, 0 dB, 6.02 dB, 20.83 dB, 26 dB, 27.96 dB, 11.13 dB ve 17.73 dB olarak hesaplanmaktadır. Yani en yakında yer alan kullanıcıya göre diğer kullanıcılar üzerinde ek olarak bahsedilen yol kaybı değerleri de olacaktır.

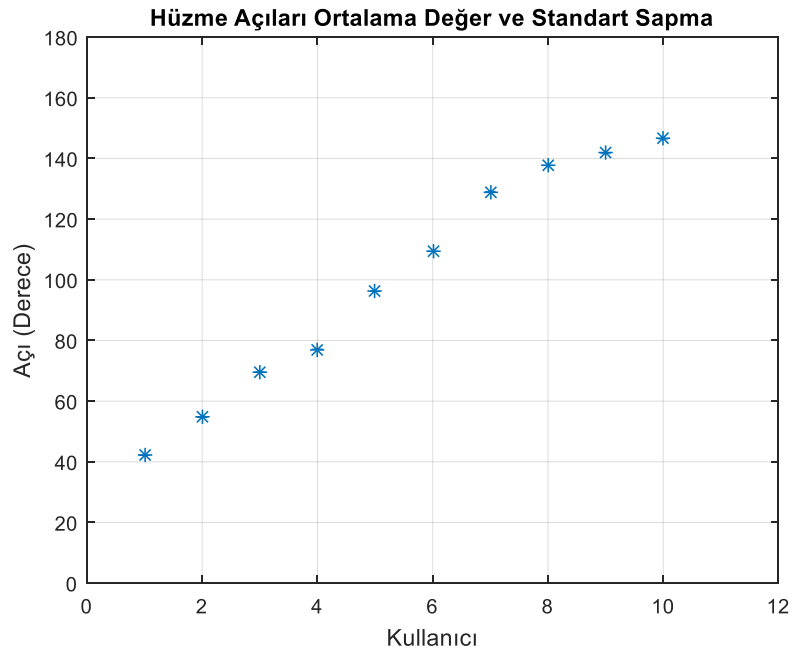
Kullanıcı Yerleri Antene Göre Menzil ve Açılı Değerleri



Şekil 4.16 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda kullanıcıların menzil ve açılal konumları



Şekil 4.17 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO SGGO performansı



Şekil 4.18 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO yönlendirme performansı

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18, farklı uzaklıklarda yer alan hedefler için yapılmış olan simülasyon sonuçlarını içermektedir. Kullanıcılar için gönderilen hüzmelerin menzile bağlı zayıflama değerlerinin hesaplanmasında yalnızca yol kaybı dikkate alınmış ve R^2 faktörü ile gönderilen hüzmelerin genlik seviyesi üzerinde zayıflama etkisinin olduğu yaklaşımı kullanılmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, yakında olan kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyeleri uzaktaki kullanıcılara göre daha yüksek çıkmaktadır.

Senaryo-4.3.3.2-Toplam Anten Gücünün Etkisi

Toplam anten gücünün artması, her bir bireysel antenin gücünün artmasını sağlar bu da tüm kullanıcılar üzerine yönlendirilen her bir hüzmelerin güç yoğunluğunun artmasına neden olur. Ancak tüm kullanıcılar için eşit genlik seviyesinde sinyal ile haberleşme sağlandığı durumda, ilgili güç yoğunluğunun artışına bağlı olarak girişim seviyelerinin de aynı oranda yükselmesi nedeniyle SGGO seviyeleri üzerinde herhangi bir iyileştirme sağlanması beklenmemektedir.

Anten Sayısı: 128

Kullanıcı Sayısı: 10

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Monte Carlo Sayısı: 50

Anten Gücü: 100 W

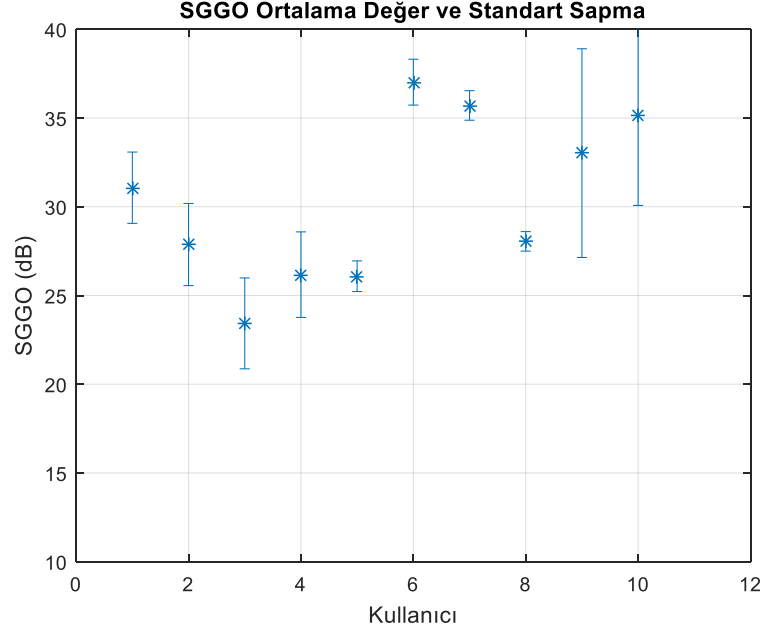
Menzile Göre Zayıflama: Var

Ortam Gürültüsü: -110 dBm

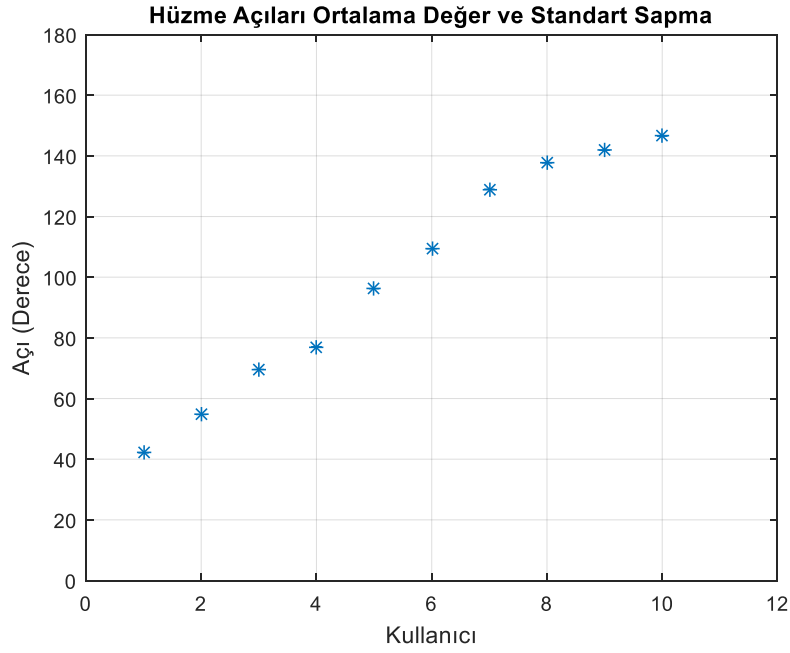
Arama Penceresi: $\pm 10^\circ$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 42.2, 54.8, 69.7, 77.1, 96.2, 109.4, 129.1, 137.6, 142.0, 146.5

Kullanıcı Menzilleri (km): 0.5, 0.7, 0.9, 0.1, 0.2, 1.1, 2, 2.5, 0.36, 0.77



Şekil 4.19 Toplam 100 W gücünde 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO SGGO performansı



Şekil 4.20 Toplam 100 W gücünde 128 adet anten ve 10 kullanıcı olduğu durumda menzile göre zayıflama var iken PSO yönlendirme performansı

Şekillerde görüldüğü üzere toplam güç yoğunluğunun artması SGGO seviyelerinin artışına neden olmamıştır. Çünkü anten gücünün yükselmesi tüm hüzmelerin sıfır değerlerinin ve tepe noktalarının aynı seviyede artışına neden olmaktadır.

Senaryo-4.3.3.3 –Ortam Gürültüsünün Etkisi

Ortam gürültüsü, uzayda mevcut olan tüm kullanıcılar için aynı büyüklüktedir. Bu nedenle, ortam gürültüsünün yükselmesinin tüm kullanıcıların SGGO seviyeleri üzerinde düşürücü etkisinin olması beklenmektedir. Ortam gürültüsü değerinin haberleşmede kullanılan bant genişliği ile bağlantılı olduğu bölüm 4.1’de açıklanmaktadır. 40 dB’lik gürültü gücü yükselmesi, bant genişliğinin 1000 katına çıkarılması ile (30 dB ve gürültü figürü değerinin artışı) yaklaşık olarak meydana gelebilmektedir.

Anten Sayısı: 128

Kullanıcı Sayısı: 10

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Gerçekleşme Sayısı: 50

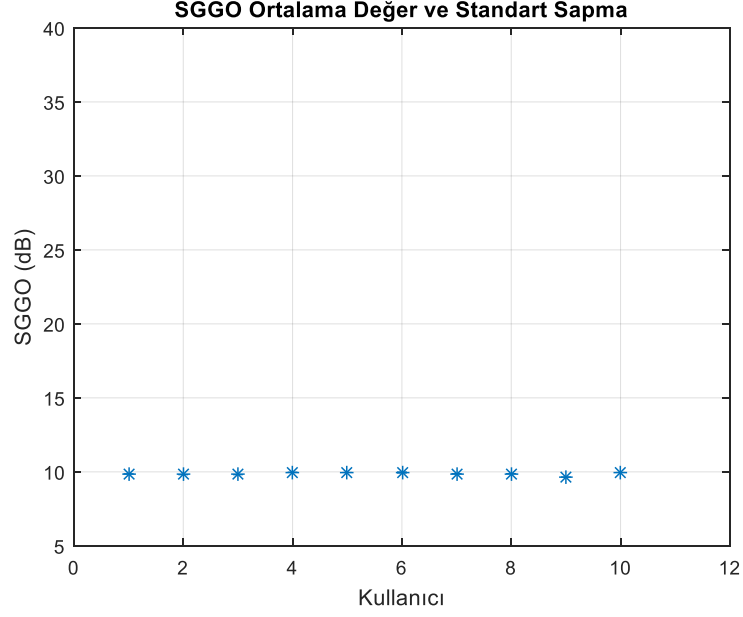
Anten Gücü: 1W

Menzile Göre Zayıflama: Yok

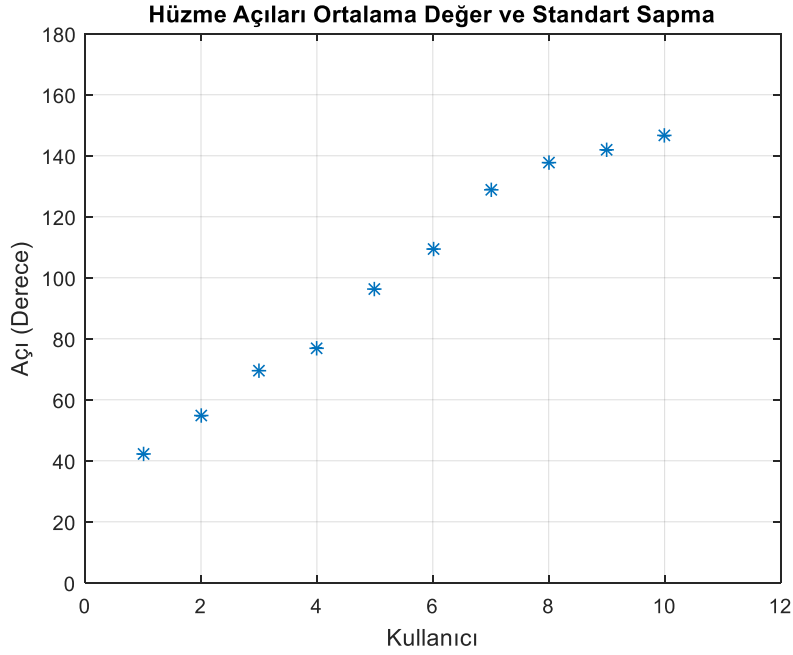
Ortam Gürültüsü: -70 dBm

Arama Penceresi: $\pm 10^{\circ}$

Kullanıcı Yerleri (Derece): 42.2, 54.8, 69.7, 77.1, 96.2, 109.4, 129.1, 137.6, 142.0, 146.5



Şekil 4.21 Ortam gürültüsü -70 dBm iken PSO SGGO performansı



Şekil 4.22 Ortam gürültüsü -70 dBm iken PSO hüzme yönlendirme performansı

Ortam gürültüsünün hüzme sıfır değerlerinden daha yüksek bir seviyeye çıkması nedeniyle; minimum SGGO maksimizasyonu işlemi, kullanıcıların üzerindeki girişim seviyesinin azaltılması diğer kullanıcılar için gönderilen hüzmelerin açılal sıfır noktalarının bahsi geçen kullanıcı üzerine getirilmesi ile sağlanamamaktadır. SGGO'yu

düşüren temel etken girişim yerine ortam gürültüsü olmaktadır. Bu nedenle kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyeleri ortam gürültüsünün etkisiyle tüm kullanıcılar için aynı seviyede düşmektedir.

4.3.4. Pencereleme Yönteminin PSO Yan Hüzme Girişim Performansı Üzerindeki Etkisi

Kullanıcılar üzerinde yan hüzme girişimi olduğu durumda, kullanıcı hüzmeleri üzerinde farklı pencereleme yöntemleri kullanılarak yapılan yayın için PSO yönteminin performansı incelenecektir. Pencereleme yöntemlerinin performansı incelenirken kullanıcı yerleri senaryo kapsamında değiştirilmemiş ve Şekil 4.23’de görüldüğü üzere $[0^\circ, 180^\circ]$ arasına yaklaşık olarak eşit aralıklarla yerleştirilmiştir.

Senaryo-4.3.4.1-Pencereleme Yöntemleri

Anten Sayısı: 64

Kullanıcı Sayısı: 9

Tarama Açısı Çözünürlüğü: 0.1°

Geçeklenme Sayısı: 50

Anten Gücü: 1W

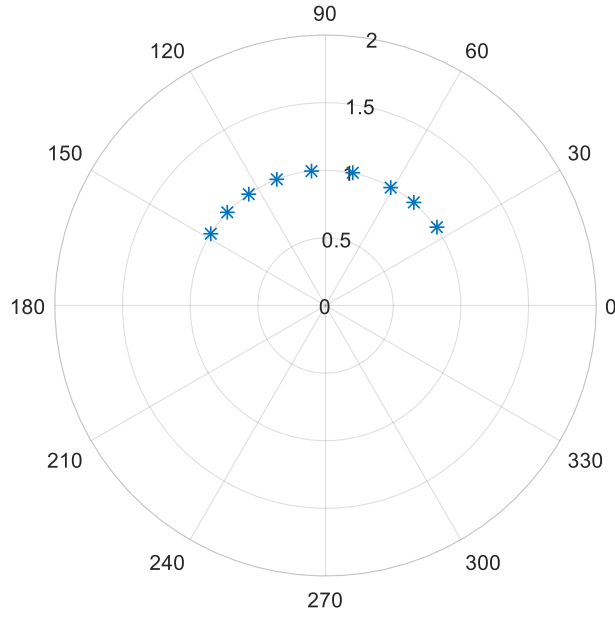
Menzile Göre Zayıflama: Yok

Ortam Gürültüsü: -110 dBm

Arama Penceresi: $\pm 10^\circ$

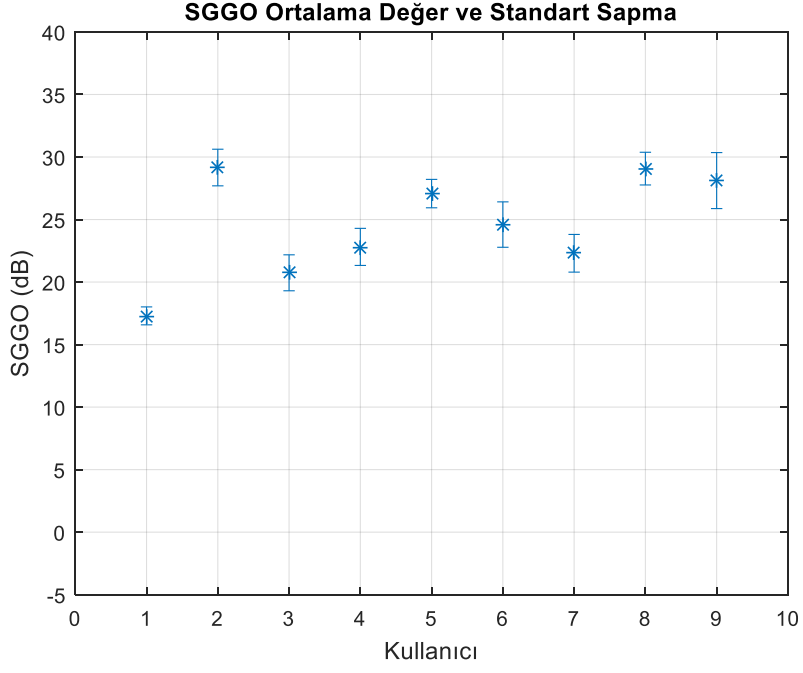
Kullanıcı Yerleri (Derece): 35, 49.6 , 61.2 , 78.4, 96.1, 111, 124.3, 136.7, 148.2

Kullanıcı Yerleri Antene Göre Menzil ve Aç ı De ğerleri

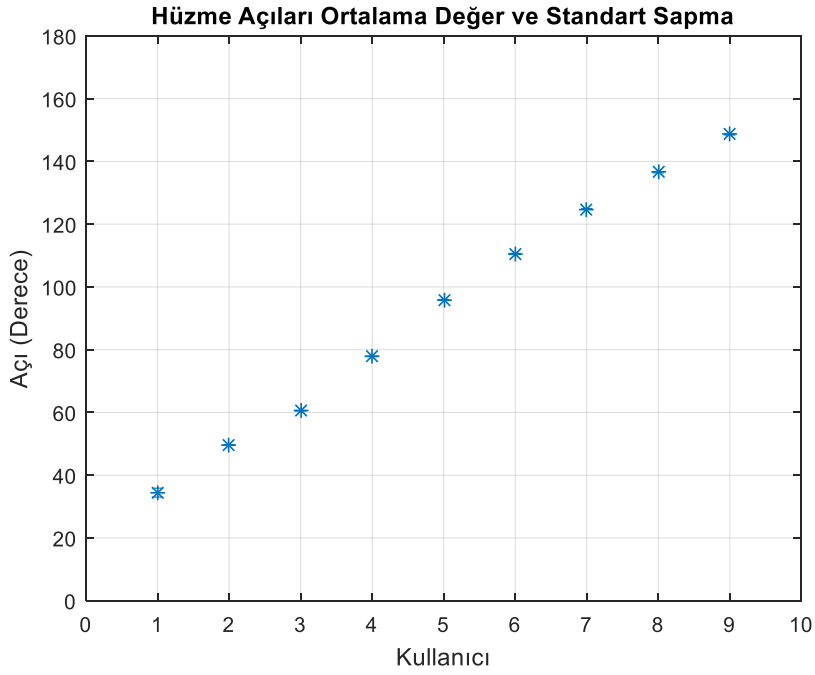


Şekil 4.23 Senaryo 4.3.4.1 kullanıcı açısal yerleşimleri

Dikdörtgen pencere kullanıldığı durum, antenler için uygulanan pencere katsayılarının 1 olması nedeniyle aslında hiç pencere kullanılmayan durum ile aynı durumu ifade etmektedir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de dikdörtgen pencere kullanıldığı durumda kullanıcıların PSO çözümü ile hesaplanan SGGO seviyeleri ve hüzme yönlendirme performansı görülmektedir.



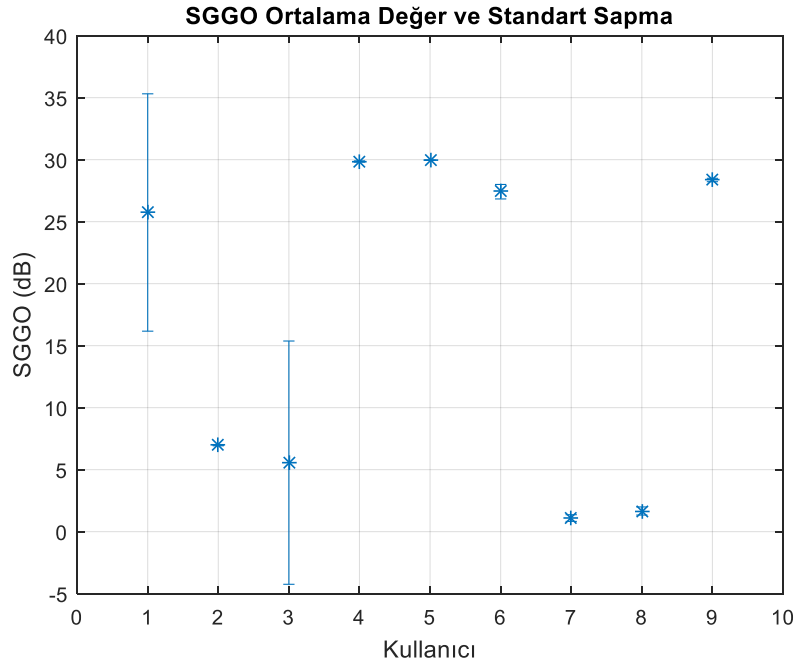
Şekil 4.24 Dikdörtgen pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı



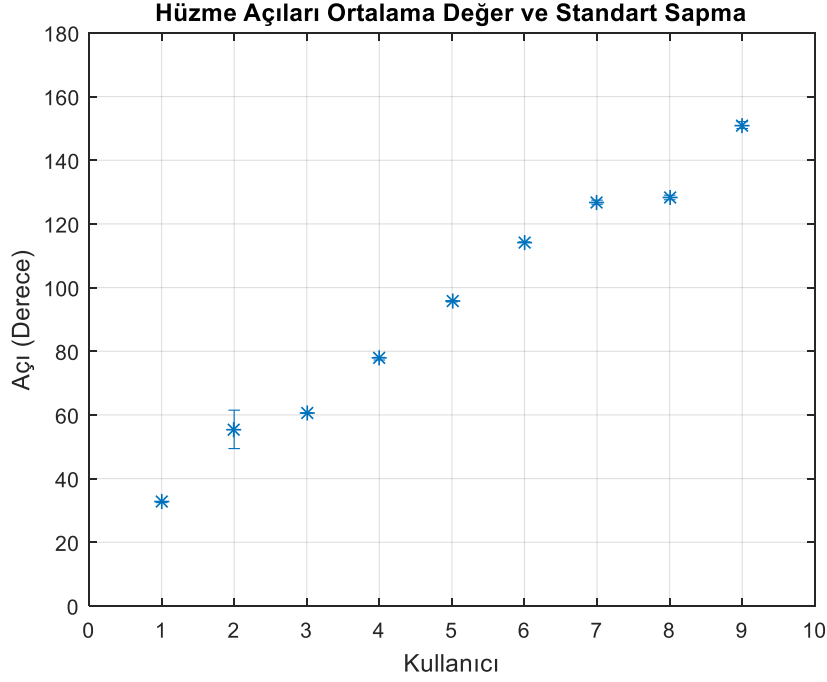
Şekil 4.25 Dikdörtgen pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı

Binomial pencere kullanıldığı durumda, bölüm 2.7.2’de de bahsedildiği gibi ana hüzme genişlikleri çok büyük açılara çıkabildiğinden, birbirlerine ana hüzme genişliğinden daha yakın olan hedefler için girişim nedeniyle performans düşürücü etkisi vardır. Ancak birbirlerine ana hüzme genişliği seviyesinden daha uzak olan kullanıcılar için, yan hüzme seviyelerinin çok düşük olmasından dolayı, performans yükseltici etkisi vardır.

Şekil 4.26’da kullanıcı 1 ve kullanıcı 3 için ana hüzme genişliklerinin büyük olmasından dolayı diğer kullanıcıların yarattığı girişim nedeniyle SGGO performansı düşmüştür. Ancak diğer kullanıcıların binomial pencere yönteminin yan lob seviyelerinin çok düşük olmasından dolayı SGGO performansı yükselmiştir. Şekil 4.27’de PSO yönteminin Binomial pencere kullanıldığı durumda hüzme yönlendirme performansını göstermektedir.

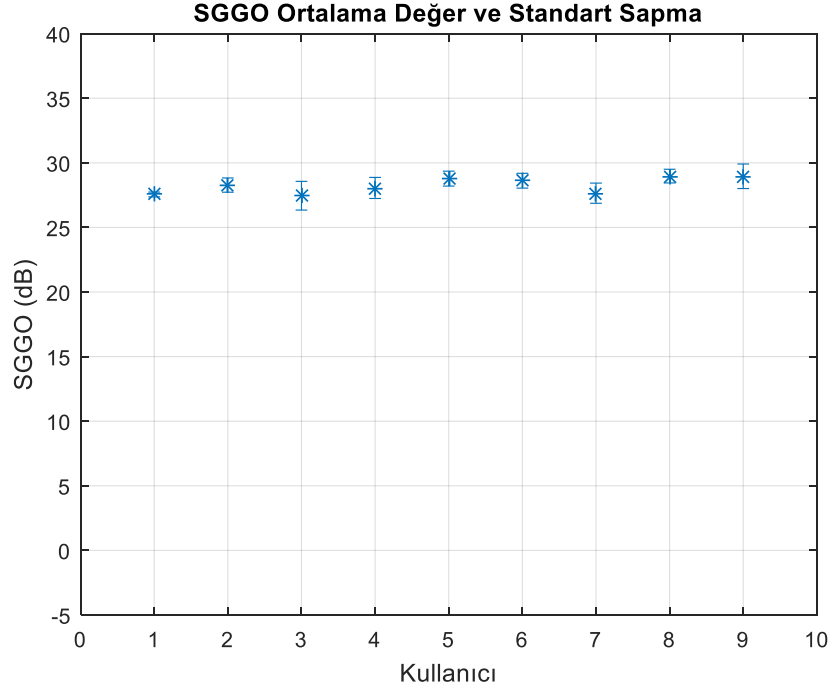


Şekil 4.26 Binomial pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı

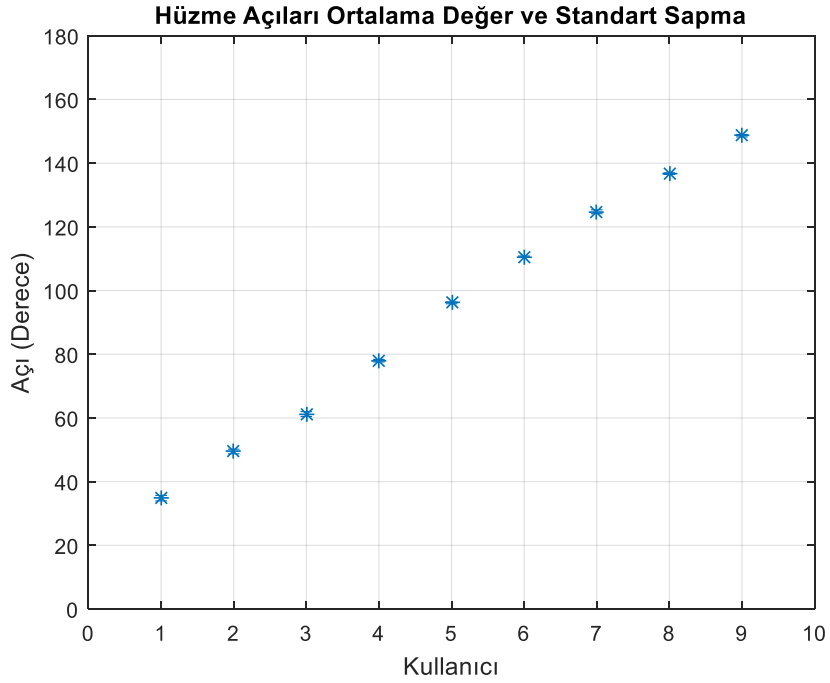


Şekil 4.27 Binomial pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı

Dolph-Chebyshev penceresinin özelliği yan hüzme seviyelerinin istenen değerde ayarlanabilmesidir. Bu nedenle ana hüzme girişimi olmayan durumlarda tüm kullanıcılar için SGGO seviyesini yükseltici etkisinin olması beklenmektedir. Şekil 4.28’de YHS 40 dB olması için uygulanan Dolph-Chebyshev penceresinin, PSO SGGO performansını dikdörtgen pencere veya binomial pencere kullanıldığı durumdan daha fazla oranda yükseltici etkisi olduğu görülebilmektedir. Şekil 4.29’da ise Dolph-Chebyshev pencere kullanıldığı durumda PSO yönteminin hüzme yönlendirme performansı gösterilmektedir.

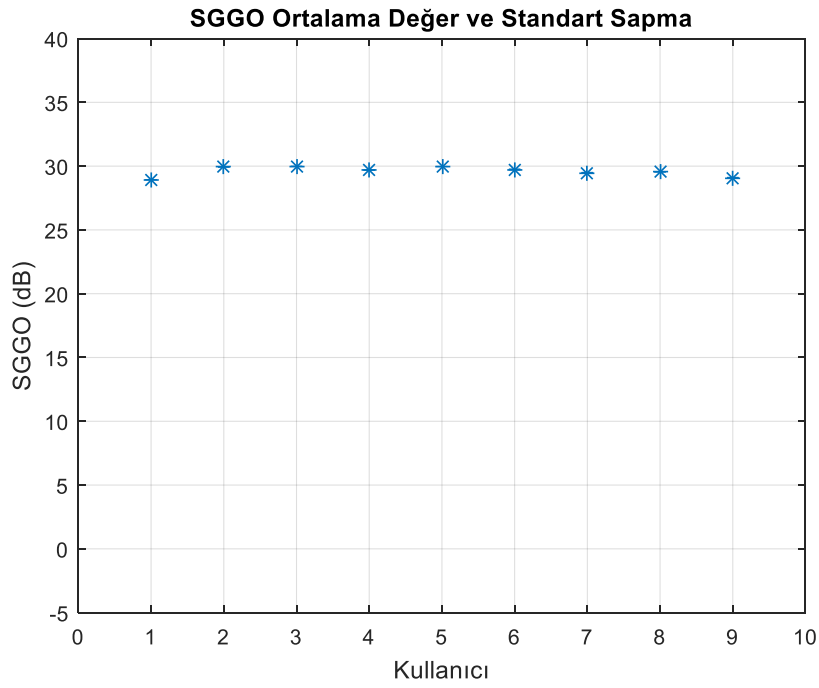


Şekil 4.28 YHS 40 dB Dolph-Chebyshev pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı

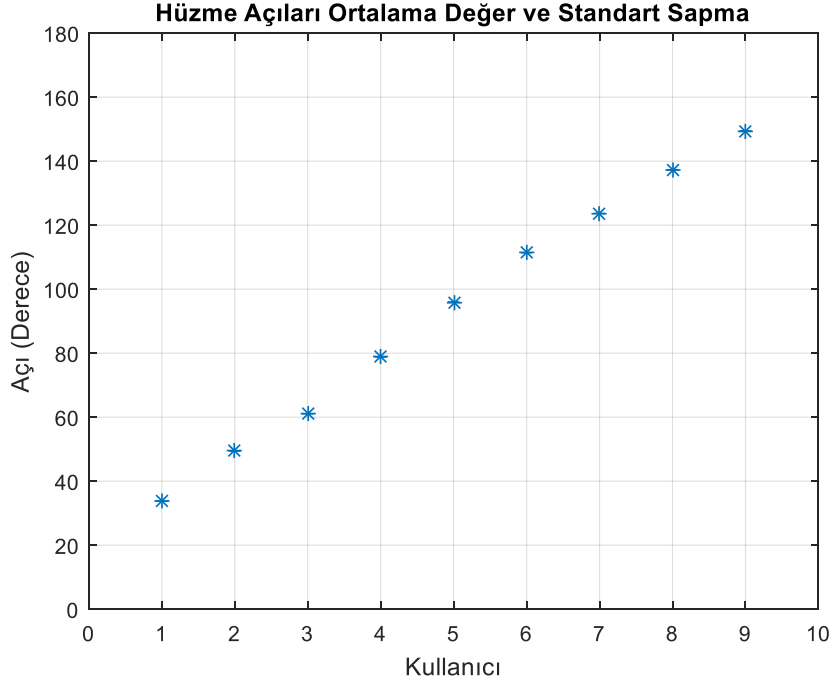


Şekil 4.29 YHS 40 dB Dolph-Chebyshev pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı

Taylor-Kaiser penceresinin özelliği, yan hüzme seviyelerinin yalnızca ilk yan hüzme için ayarlanabiliyor olmasıdır. Diğer yan hüzmelerin tepe seviyelerinin üstel şekilde azalmaya devam etmesi nedeniyle birbirlerine açısız olarak yeterince uzak olan kullanıcılar için SGGO performansı Dolph-Chebyshev pencere uygulanan duruma göre daha iyidir. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de Taylor-Kaiser pencere kullanıldığı durumda PSO yönteminin performansı gösterilmektedir.

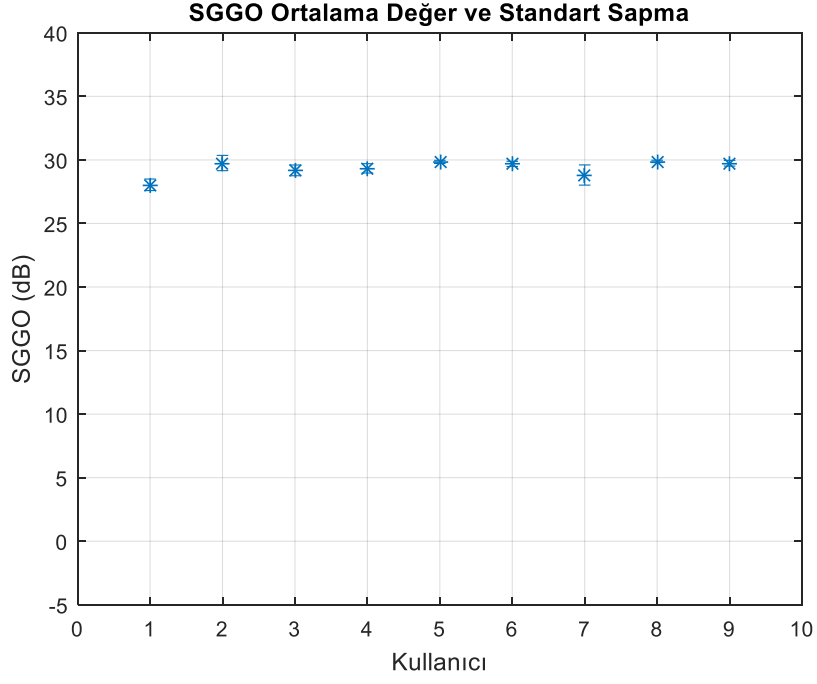


Şekil 4.30 YHS 40 dB Taylor-Kaiser pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı

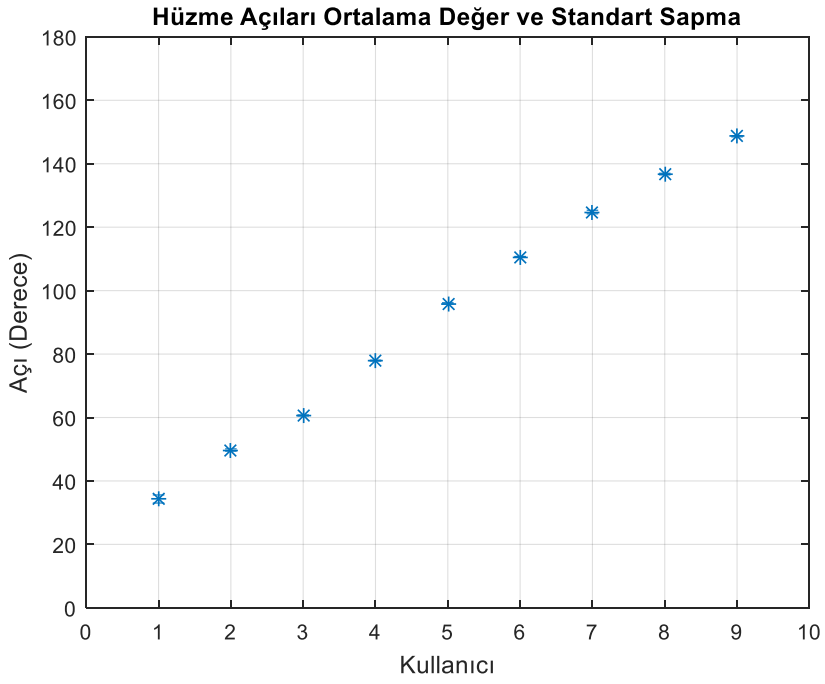


Şekil 4.31 YHS 40 dB Taylor-Kaiser pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı

Hamming pencere, tüm yan hüzme seviyelerini -40 dB seviyesine ayarlamaktadır. Dolph-Chebyshev ve Taylor-Kaiser pencerelerine göre pencere katsayılarının hesaplanışının kolay olması bakımından avantajı vardır. Dolph-Chebyshev penceresi ile SGGO performansı bakımından yaklaşık olarak aynı sonuçları vermektedir. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de Hamming pencere kullanıldığı durumda PSO yönteminin performansı gösterilmektedir.



Şekil 4.32 Hamming pencere kullanıldığı durumda PSO SGGO performansı



Şekil 4.33 Hamming pencere kullanıldığı durumda PSO hüzme yönlendirme performansı

Çizelge 4.2’de tüm pencereleme yöntemlerinin PSO performansı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

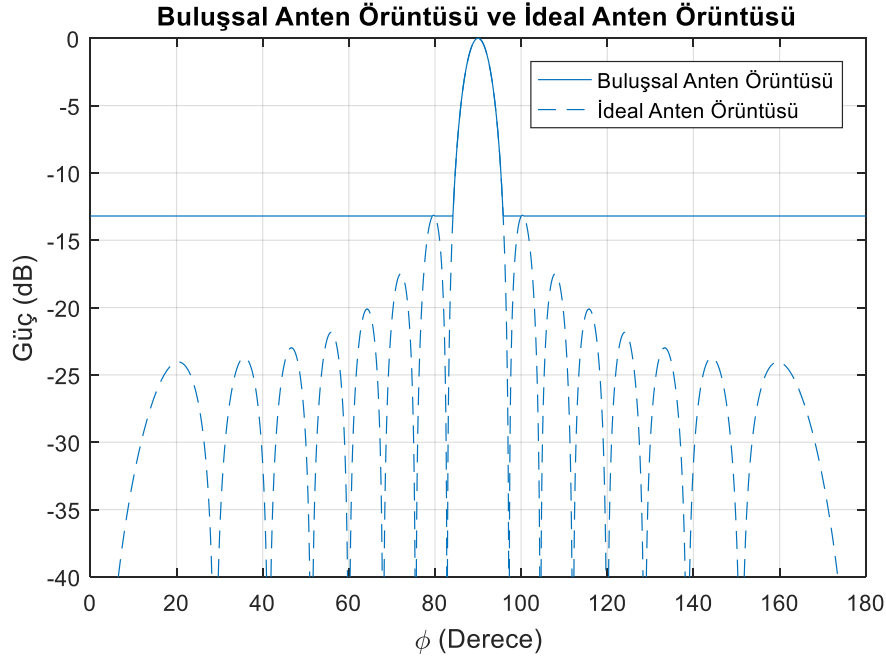
Çizelge 4.2 Pencereleme yöntemlerinin PSO yönteminin performansı üzerindeki etkisi

Pencere (40 dB YHS)	Minimum SGGO Ortalama (dB)	Maksimum SGGO Varyans (dB)
Dikdörtgen	17.3	2.2
Hamming	1.1	9.8
Taylor-Kaiser	28.9	0.04
Dolph-Chebyshev	27.5	1.1
Hamming	28	0.79

4.4. Buluşsal Yöntem

Buluşsal yöntemin avantajı, PSO yönteminin işlem yükü nedeniyle çözümsüz kalması durumunda (20 kullanıcıdan daha fazla kullanıcı olduğu durumda) işlem yükü düşük bir yöntem olmasından dolayı çözüm üretebilmesidir. İşlem yükünün düşürülmesi ile hesaplanan hüzmeye yönlendirme açılarının eniyi çözüm olması arasında bir ödünleşim mevcuttur. Bu nedenle buluşsal yöntem, kaba kuvvet yaklaşımı ve PSO yöntemi kadar yüksek performanslı sonuç vermemektedir. Ancak yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde kullanıcı sayılarının 20’den çok daha fazla olacağı düşünüldüğünde bu tez kapsamında mevcut senaryolar için de çözüm üretilmesi amaçlanmaktadır.

Buluşsal yöntem, en kötü senaryo olacak şekilde, ana hüzmeye en yakın yan hüzmeye tepe seviyesini ana hüzmeye dışındaki tüm açısal noktalar için aynı olarak kabul etmektedir. Böylece birbirlerine ana hüzmeye girişi olmayan kullanıcılar için hiçbir optimizasyon problemi çözülmeden kullanıcıları merkez olacak şekilde hüzmeye yönlendirme işleminin yapılması amaçlanmaktadır.



Şekil 4.34 16 adet kullanıldığı durumda buluşsal anten örüntüsü ve ideal anten örüntüsü (YHS = -13.5 dB)

Herhangi bir pencere kullanılmadığı durumda anten tasarım parametrelerinden bağımsız olarak, YHS (Yan hüzme tepe seviyesi) -13.5 dB olmaktadır. Buluşsal anten örüntüsü bu nedenle -13.5 dB seviyesinden daha düşük olan YHS değerlerini -13.5 dB olarak kabul etmektedir. Şekil 4.34’de 16 adet anten kullanıldığı durumda buluşsal ve ideal anten örüntüleri gösterilmektedir.

Kullanıcılar üzerinde oluşan SGGO seviyesi herhangi bir ilk yan hüzme seviyesi için

$$SGGO_{BL} = \frac{1}{10^{(YHS/20)}(K-1) + \sigma^2} \quad (68)$$

biçiminde hesaplanabilir. Eşitlik (68)’de yer alan K parametresi toplam kullanıcı sayısını, σ^2 parametresi de gürültü seviyesini ifade etmektedir.

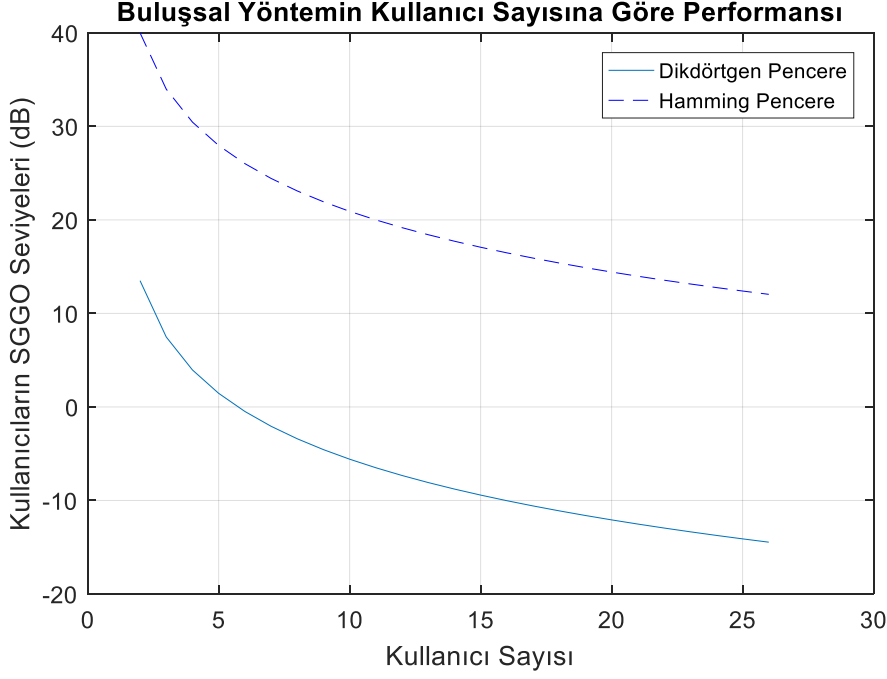
Eğer ortamda 6 kullanıcı varsa, dikdörtgen pencere kullanıldığı durumda ve ortam gürültüsü ile yol kaybı ihmal edildiğinde her bir kullanıcı üzerinde oluşan SGGO seviyesi Eşitlik (70) yardımıyla yaklaşık -0.5 dB olarak hesaplanır. Haberleşme performansı için -0.5 dB SGGO seviyesi çok düşük bir seviyedir ve kullanıcı sayısının artışı ile daha da düşecektir.

YHS seviyesini düşürmek için bölüm 2.7'de yer alan pencereleme yöntemleri kullanılabilir. Hamming pencere, pencere katsayılarının hesaplanması için gerekli olan işlem yükü bakımından en düşük olan pencereleme yöntemidir ve YHS değeri -40 dB olmaktadır. Bu durumda 6 kullanıcı için hesaplanacak olan SGGO seviyeleri her bir kullanıcı için yaklaşık olarak 26 dB olacak şekilde hesaplanabilmektedir.

Buluşsal yöntemin performansı, bölüm 4.1'de yer alan hüzme yönlendirme performans parametreleri ile incelenecektir.

4.4.1. Anten Sayısı ve Kullanıcı Sayısının Buluşsal Yöntem Performansına Etkisi

Eşitlik (70)'de yer alan ifade kullanıldığında, YHS parametresi tanımı gereği ana hüzme tepe seviyesi ile ilk yan hüzme tepe seviyesi arası fark olduğundan anten sayısının yükseltilmesi ile buluşsal yöntem performansının iyileştirilebilmesi mümkün değildir.



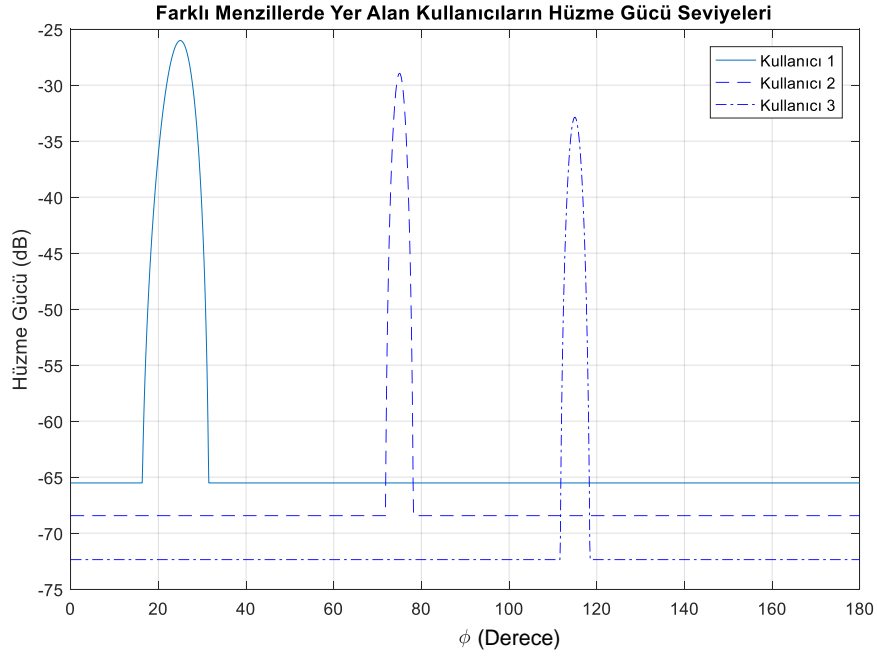
Şekil 4.35 Kullanıcı sayısına bağlı buluşsal yöntem SGGO performansı

Kullanıcı sayısının artışı ile buluşsal yöntem sonucu hüzme yönlendirilmiş olan her bir kullanıcı üzerindeki SGGO seviyesi logaritmik olarak azalmaktadır. Hamming pencere kullanıldığı durumda 26 kullanıcı olduğu senaryoda bile kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyeleri yaklaşık olarak 12 dB olmaktadır.

4.4.2. Kullanıcı Menzilleri, Toplam Anten Gücü ve Ortam Gürültüsünün Buluşsal Yöntem Performansına Etkisi

Toplam anten gücü seviyesinin yükselmesi, yan hüzme seviyelerini değiştirmeyeceği için buluşsal yöntemin performansı üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır. Ortam gürültüsü değeri de aynı şekilde tüm kullanıcılar üzerinde sabit bir gürültü seviyesi olması nedeniyle buluşsal yöntemin performansı üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır. Ancak ortam gürültüsü seviyesi kullanıcılar üzerindeki toplam girişim seviyelerinden daha yüksek olursa SGGO seviyeleri ortam gürültüsüne bağlı olarak tüm kullanıcılar için aynı oranda düşecektir.

Tüm kullanıcıların farklı menzillerde yer alması durumunda, haberleşme sistemine görece olarak daha yakın olan kullanıcıların girişim seviyesi görece uzak olan kullanıcılar üzerinde daha büyük olacaktır.



Şekil 4.36 3 adet kullanıcı olduğu durumda menzile bağlı buluşsal yöntem hüzme yönlendirme güç seviyeleri

Şekil 4.36'da menzilleri sırası ile 50, 70 ve 110 metre olan üç farklı kullanıcı için buluşsal yöntem kullanılarak hüzme yönlendirme işlemi yapılmıştır. Kullanıcıların açısal yerleşimleri sırası ile 25, 75 ve 115 derecedir. Simülasyon sırasında hamming pencere kullanılmıştır. d üstel zayıflama katsayısı parametresi 1 olarak kabul edilmiştir. Simülasyon sonucuna göre kullanıcılar üzerindeki SGGÖ seviyeleri sırası ile 25.6, 22.2 ve 17.9 dB olarak hesaplanmıştır.

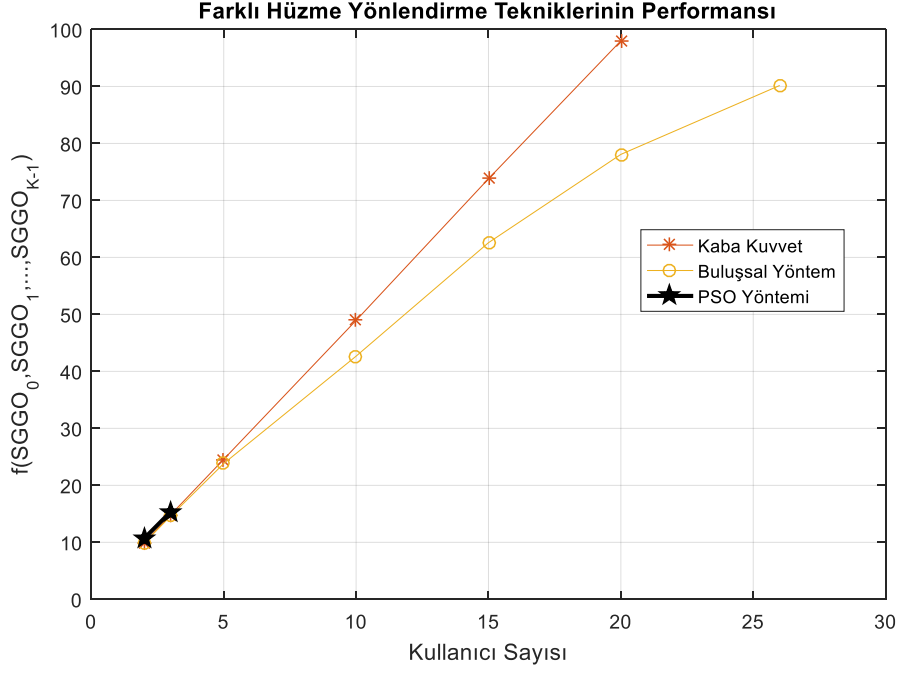
4.5. Çözüm Yöntemlerinin Performansı

PSO yöntemi ile çözülen optimizasyon problemi, kaba kuvvet ile çözülen problem ve buluşsal yöntem ile çözülen problem performans değerlendirme açısından karşılaştırılmıştır. Buluşsal yöntemde, hüzmelerin yönlendirilme açılarını hesaplamak için harcanan işlem yükünün dahi düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bunun için birinci yan hüzmanın tepe seviyesi, ana hüzmeye dışındaki tüm noktalar için sabit kabul edilmiş ve her bir kullanıcıya ait olan hüzmeye, kullanıcılar üzerine doğrudan yönlendirilmiştir.

Çok sayıda kullanıcının olduğu durumda, PSO yöntemi ile çözülen optimizasyon problemi, kaba kuvvet çözümü ve buluşsal çözüm ile hesaplanan sonuçların karşılaştırılması için ortak bir performans parametresine ihtiyaç duyulmaktadır. Liu ve arkadaşları [55], çok değişkenli maliyet fonksiyonu içeren optimizasyon problemlerini tek değişkenli maliyet fonksiyonu içeren optimizasyon problemine dönüştürebilmek amacıyla çeşitli faydalı fonksiyonlar kullanmışlardır. Faydalı fonksiyonlar arasından, toplam oranı fonksiyonu

$$f(SGGO_0, SGGO_1, \dots, SGGO_{K-1}) = \sum_{k=0}^{K-1} \log_2(1 + SGGO_k) \quad (69)$$

biçiminde kullanılacaktır. Böylece çok sayıda kullanıcının olduğu durumda minimum SGGO seviyeleri ne kadar yüksekse bahsi geçen fonksiyonun değeri de o kadar yüksek olacak ve böylece üç ayrı yöntem farklı kullanıcı sayıları için karşılaştırılmış olacaktır.



Şekil 4.37 Hüzme yönlendirme tekniklerinin kullanıcı sayısına göre SGGO performansı, her bir nokta için 50 tekrarlı gerçekleştirilmiştir ve SGGO değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır.

Kaba kuvvet çözümü uygulanması sırasında gerektirdiği işlem yükü bakımından 3 kullanıcıdan fazla kullanıcı olduğu durumda çalışmamaktadır. PSO yöntemi ise 20 kullanıcıdan fazla kullanıcı olduğu durumda çalışmamaktadır. Performans açısından eniyi yöntemin kaba kuvvet çözümü, en kötü yöntemin ise buluşsal yöntem olduğu görülmektedir. Ancak 20 veya daha fazla kullanıcının olduğu durumda buluşsal yöntem işlem yükünün düşük olması nedeniyle tercih edilebilir. 20 kullanıcıya kadar olan durumlarda, PSO yöntemi kaba kuvvet çözümüne çok yakın değerler aldığından hüzme yönlendirmek için kullanılabilirliği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde, tüm kullanıcılar için haberleşme performansının en yüksek seviyede tutulabilmesi için her bir kullanıcının üzerine düşen SGGO seviyelerinin mümkün olan en yüksek seviyelerde olması gerekmektedir. SGGO seviyesini yükselten faktör, haberleşme sinyalinin gücünün yükseltilmesidir. Kullanıcı SGGO seviyelerini düşüren en büyük faktörlerden biri ortam gürültüsü, diğeri ise kullanıcıların birbirleri üzerinde oluşturduğu girişimlerdir. Haberleşme sinyalinin gücünün tüm kullanıcılar için aynı miktarda yükseltilmesi, kullanıcılar için gönderilen hüzmelerin tepe seviyeleri ile sıfır noktalarının seviyelerini eşit miktarda arttıracığından bir iyileştirme sağlayamamaktadır. Farklı kullanıcılar için farklı seviyelerde gücün artırılması, gücü arttırılan kullanıcının haberleşme performansının iyileşmesini sağlasa bile diğer kullanıcılar üzerindeki girişim seviyelerini de yükselteceğinden toplam performans üzerinde düşürücü etkisi olacaktır.

Haberleşme yapılan ortamın gürültü değeri, ortam koşullarına bağlıdır. Bu nedenle ortam gürültüsü ile ilgili tasarım seviyesinde yapılabilecek herhangi bir şey yoktur. Ortam gürültüsünü eniyi temizleyebilme şekli, alma sırasında uyumlu filtre veya benzeri bir filtre kullanmaktır. Alma sırasında uyumlu filtre kullanan yöntemler mevcuttur (MRC, MRT). Ancak uyumlu filtre veya benzeri herhangi bir filtre kullanımı için ortam hakkında yeterince bilgi sahibi olunması gerekmektedir (KDB).

Birden fazla kullanıcı için aynı anda kullanıcılar ile iletişim kurabilme amacıyla oluşturulan hüzmeler diğer kullanıcılar üzerinde girişim yaratırlar. İlgili girişim sinyal seviyelerini düşürebilmek amacıyla literatürde genel olarak ZF yöntemi kullanılır. İlgili yöntem, herhangi bir kullanıcı ile haberleşme yapılırken o kullanıcı üzerinde girişim yaratacak olan diğer kullanıcıların sinyallerinin geldiği bölgelere hüzmeye üzerinde sıfır koymaktadır.

MRC, MRT ve ZF yöntemleri için KDB bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır ve kullanıcı sayısı arttıkça KDB bilgisinin elde edilmesi ve işlenmesi işlem yükü açısından içinden çıkılmaz karmaşıklık seviyelerine gelebileceği düşünülmektedir. Ayrıca bahsedilen

tüm yöntemlerin uygulanabilmesi için kullanıcıların uzaydaki açısal yerlerinin kesin olarak bilinmesi gerekmektedir ve bu işlem için de çok sayıda kullanıcı için yüksek performansta uzun zamanlar alan işlemler gerekmektedir.

İşlem yükünü hafifletmek ve kullanıcıların yerlerinin kesin olarak bilinmesinin zorunlu olmadığı bir hüzmeye yönlendirme tekniği geliştirilmesi tez kapsamında amaçlanmıştır. Mevcut yapıda tüm kullanıcıların üzerlerindeki SGGO seviyeleri arasından minimum olanı maksimize edecek olan optimizasyon problemi, üstel penaltı fonksiyonu yöntemi ile geliştirilmiştir. Geliştirilen optimizasyon probleminin yapısı nedeniyle yerel çok sayıda çözümü mevcuttur. İlgili çözümler arasından eniyi olan çözümü işlem yükü düşük olacak şekilde hızlıca hesaplayabilmek adına PSO yöntemi kullanılmıştır.

Geliştirilmiş olan optimizasyon problemi çözülürken, kullanıcılar üzerine oluşan minimum SGGO değerini maksimize etmeye çalışıldığından ideal durumda haberleşilen kullanıcı dışındaki kullanıcılar üzerine sıfır noktalarını düşürmeyi amaçlamaktadır.

Optimizasyon probleminin performansının yükseltilmesi için literatürde hali hazırda faz dizili antenler için kullanılan pencereleme yöntemleri üzerinde çalışılmış ve PSO performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İnceleme sonucunda kullanıcıların uzaydaki açısal yerleşimlerinin PSO performansını etkileyen en büyük faktör olduğu gözlemlenmiştir. Ana hüzmeye üzerinden girişim olan kullanıcı yerleşimlerinde 3 dB ana hüzmeye genişliğinin, anten üzerindeki bireysel anten yerleşimlerinin ve bireysel anten sayısı değiştirilmeden, düşürülemeyeceği için algoritmik olarak tez kapsamında incelenmemiştir. Yan hüzmeler üzerinden girişim olan durumda ise en yüksek performansla çalışan yöntemin Taylor-Kaiser pencereleme yönteminin olduğu analizler sırasında görülmüştür.

Geliştirilen optimizasyon probleminin PSO yöntemi ile çözümü, kullanıcı sayısının 20'den fazla olduğu durumlarda işlem yükü nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle hüzmeye yönlendirme yöntemi olarak buluşsal yöntem önerilmiştir. Performans açısından PSO yöntemi ile optimizasyon probleminin çözümü kadar iyi değildir ancak işlem

yükünün çok düşük seviyelerde olması, ilgili yöntemin yüksek sayıda kullanıcıların olduğu durumda çözüm üretebilmesini sağlar. Hamming pencere yönteminin buluşsal yöntem ile birlikte kullanılması, buluşsal yöntemin performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Kullanıcı sayısının artışına bağlı olarak SGGO performansını düşürmemek adına Hamming pencere yerine 40 dB YHS seviyesinden daha düşük değerleri verebilecek olan Dolph-Chebyshev ve Taylor-Kaiser pencere kullanımı da mümkündür.

6. YORUM

Bu tez kapsamında, görüş hattı ortamında çok sayıda kullanıcı ile yüksek performansta haberleşmenin yapılabilmesi için hüzme yönlendirme teknikleri üzerinde çalışılmıştır. Mevcut haberleşme sistemi literatürde Yoğun Çok Girişli ve Çok Çıkışlı Sistem olarak yer almaktadır. Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin çok sayıda kullanıcı ile aynı anda haberleşme yapabilmesi için kullanıcılara yönlendirilecek olan hüzmelerin yönlendirme teknikleri çalışılmıştır. Tez kapsamında üç farklı teknik incelenmiş ve önerilen bu tekniklerin performansları karşılaştırılmıştır. Yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerde hüzme yönlendirme tekniklerinin çalışılabilmesi için öncelikle yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin temel yapısı ile doğrudan ilgili olan faz dizili anten yapısı ve faz dizili anten yapısında hüzme yönlendirme teknikleri açıklanmıştır. Sonrasında ise yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin faz dizili anten yapısından farklı olan noktalarından milimetre dalga boyu ile haberleşme, anten sayısının çok yüksek olması, yüksek işlem yükü, donanımsal hüzme oluşturma teknikleri gibi konular incelenmiş ve literatürden bu noktalar ile ilgili bilgi toplanmıştır.

Hüzme yönlendirme teknikleri ile birlikte kullanılabilir olan hüzme tasarım parametrelerinden bahsedilmiş ve literatürde bu parametreler üzerinde iyileştirme sağlayabilecek olan mevcut teknikler tez kapsamında açıklamıştır. Hüzme yönlendirme tekniklerinin performans incelemesini yapabilmek için gerekli olan en kritik parametre olan SGGO açıklanmıştır. Tez kapsamında, yoğun çok girişli çok çıkışlı sistem performansının yüksek olması için kullanıcılar üzerindeki minimum SGGO seviyesinin maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda kaba kuvvet, PSO yöntemi ve buluşsal yöntem ana başlıkları altında hüzme yönlendirme teknikleri çalışılarak performansları incelenmiştir.

Kaba kuvvet yaklaşımında, kullanıcı sayısı kadar oluşturulmuş olan hüzmelerin hepsi uzayda yönlendirilebilecek olan $0^\circ - 180^\circ$ tüm açı aralığına sırasıyla yönlendirilmiştir. Her bir aşamada tüm kullanıcıların üzerlerindeki SGGO seviyeleri hesaplanmış ve minimum SGGO seviyesinin en yüksek olduğu açı değerleri hüzmelerin yönlendirme açısı olarak kabul edilmiştir. Hüzme yönlendirme tekniği olarak kaba kuvvet

yaklaşımının kullanılması, kaba kuvvet yöntemi tüm çözüm kümesini taradığı için eniyi performansı vermektedir.

Kaba kuvvet çözümünde işlem yükünün çok fazla olması nedeniyle 3 kullanıcıdan fazla kullanıcı olduğu durumda çalışamaz hale gelmektedir. Bu nedenle minimum SGGO seviyesini maksimize edebilecek olan optimizasyon problemi kurulmuş ve bu optimizasyon problemine çözüm aranmıştır. Kurulan optimizasyon probleminin anten sayısına bağlı olarak çok sayıda yerel minimum değeri olduğundan ve doğrusal olmadığından literatürde yer alan klasik optimizasyon problemleri ile çözülemediği görülmüştür. Bu nedenle literatürde yer alan buluşsal çözüm yöntemi olan PSO yöntemi ile kurulan optimizasyon problemi çözülmüştür. PSO yöntemi, kaba kuvvet çözüm yaklaşımına göre çok az bir performans kaybı ile işlem yükü daha düşük bir çözüm yöntemidir ve kullanıcı sayısının 20'ye kadar çıktığı durumda kullanılabilir.

PSO yöntemi, 20 kullanıcıdan fazla kullanıcıya hüzmeye yönlendirilmek istendiğinde işlem yükü açısından yetersiz kalmaya başlamaktadır. Bu problem üçüncü bir hüzmeye yönlendirme tekniği olan buluşsal yöntemin kullanılması ile çözülebilmektedir. Buluşsal yöntemde; kullanıcılara yönlendirilecek olan hüzmeler kullanıcıların üzerlerine gönderilmiş ve ana hüzmeye seviyesine en yakın olan yan hüzmeye tepe seviyesi, ana hüzmeye üzerindeki genliği daha yüksek olan açısız noktalar dışındaki hüzmeye üzerindeki tüm açısız noktalarda sabit kabul edilmiştir. Bahsi geçen kabul, hüzmeye tasarımı için en kötü durumdur ve kullanıcılar üzerindeki SGGO seviyelerinin en kötü bu seviyelerde olacağı sonucunu vermektedir.

İşlem yükü ile hüzmeye yönlendirme tekniklerinin performansı arasında doğrudan bir ilişki olduğu tez kapsamında gösterilmiştir. 3 kullanıcıya kadar kaba kuvvet, 3-20 kullanıcı arası kullanıcı olduğu durumda PSO yöntemi ve 20 kullanıcıdan fazla kullanıcı olduğu durumda da buluşsal yöntemin kullanılması hüzmeye yönlendirme çözümünün üretilebilmesi açısından gerekmektedir. İşlem yükü ve performansı en düşük olan yöntem buluşsal yöntem iken, işlem yükü ve performansı en yüksek olan yöntem ise kaba kuvvet yöntemidir. Hüzmeye yönlendirme tekniklerinin performansı, çözüm

yöntemlerinin performansı başlığı altında literatürde yer alan faydalı fonksiyondan toplam oranı fonksiyonu kullanılarak incelenmiştir.

Hüzme yönlendirme tekniklerinin performansı, kullanıcı sayısı dışında hüzme tasarım parametreleri ile de iyileştirilebilmektedir. İncelenen pencereleme yöntemlerinden Hamming pencere veya çok yüksek sayıda kullanıcıların mevcut olduğu ortamlar için 40 dB YHS seviyesinden daha düşük seviyedeki Taylor-Kaiser pencere buluşsal yöntem için eniyi, Taylor-Kaiser pencere kullanımı ise PSO yöntemi için eniyi sonucu vermektedir.

Literatürde yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemlerin frekans izgesi çok geniş olduğundan dolayı çok sayıda farklı milimetre dalga boylarında çalışmalar yer almaktadır. Ancak bu tez kapsamında yer alan çalışmalar hüzme yönlendirme teknikleri ile ilgili olduğu için farklı yayın frekansları için de geçerlidir. Bu nedenle içeride veya dışarıda yer alan farklı frekanslarda yayın yapan tüm yoğun çok girişli çok çıkışlı sistemler üzerinde uygulanabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Anonim, Wireless, <https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless>, (Erişim Tarihi: **08.09.2019**).
- [2] L.J. Vora, Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G, *Int. J. of Modern Trends in Engineer. and Research*, 2 (2015) 281-290.
- [3] K. Pandya, Comparative Study on Wireless Mobile Technology: 1G, 2G, 3G, 4G and 5G, *IJRTER*, 1 (2015) 24-27.
- [4] Anonim, 4G, <https://en.wikipedia.org/wiki/4G>, (Erişim Tarihi : **08.09.2019**).
- [5] T. Cisco, Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2012–2017, Cisco Public Information, 26 (2013) 27.
- [6] T. Wen, P. Zhu, 5G: A technology vision, Huawei. <http://www.huawei.com/en/abouthuawei/publications/winwin-magazine/hw-329304.htm>, (2013).
- [7] S.A. Busari, K.M.S. Huq, S. Mumtaz, L. Dai, J. Rodriguez, Millimeter-wave massive MIMO communication for future wireless systems: A survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20 (2017) 836-869.
- [8] A.L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari, F. Capolino, Millimeter-wave massive MIMO: The next wireless revolution?, *IEEE Communications Magazine*, 52 (2014) 56-62.
- [9] Z. Pi, F. Khan, An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems, *IEEE communications magazine*, 49 (2011) 101-107.
- [10] T.E. Bogale, L.B. Le, Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11 (2016) 64-75.
- [11] F.W. Vook, T.A. Thomas, E. Visotsky, Massive MIMO for mmWave systems, 2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, IEEE, 2014, pp. 820-824.
- [12] L. Lu, G.Y. Li, A.L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, R. Zhang, An overview of massive MIMO: Benefits and challenges, *IEEE journal of selected topics in signal processing*, 8 (2014) 742-758.
- [13] T.L. Marzetta, Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas, *IEEE transactions on wireless communications*, 9 (2010) 3590-3600.

- [14] F. Rusek, D. Persson, B.K. Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, F. Tufvesson, Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays, arXiv preprint arXiv:1201.3210, (2012).
- [15] H.Q. Ngo, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems, IEEE Transactions on Communications, 61 (2013) 1436-1449.
- [16] B.M. Hochwald, T.L. Marzetta, V. Tarokh, Multiple-antenna channel hardening and its implications for rate feedback and scheduling, IEEE transactions on Information Theory, 50 (2004) 1893-1909.
- [17] Anonim, Massive MIMO, <https://ma-mimo.ellintech.se/2018/03/12/origin-of-the-massive-mimo-name/> (Erişim Tarihi : 08.08.2019).
- [18] T.L. Marzetta, Massive MIMO: an introduction, Bell Labs Technical Journal, 20 (2015) 11-22.
- [19] L. Liang, W. Xu, X. Dong, Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems, IEEE Wireless Communications Letters, 3 (2014) 653-656.
- [20] T.E. Bogale, L.B. Le, Beamforming for multiuser massive MIMO systems: Digital versus hybrid analog-digital, 2014 IEEE Global Communications Conference, IEEE, 2014, pp. 4066-4071.
- [21] Anonim, Türkçe Bilim Terimleri Sözlüğü, <http://www.tubaterim.gov.tr> (Erişim Tarihi: 12.09.2019).
- [22] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, T.L. Marzetta, Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays, Digital Signal Processing, (2019).
- [23] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, T.L. Marzetta, Massive MIMO for next generation wireless systems, IEEE communications magazine, 52 (2014) 186-195.
- [24] Y. Mehmood, W. Afzal, F. Ahmad, U. Younas, I. Rashid, I. Mehmood, Large scaled multi-user MIMO system so called massive MIMO systems for future wireless communication networks, 2013 19th International Conference on Automation and Computing, IEEE, 2013, pp. 1-4.
- [25] E. Ali, M. Ismail, R. Nordin, N.F. Abdulah, Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research, Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 18 (2017) 753-772.
- [26] Z. Lin, X. Du, H.-H. Chen, B. Ai, Z. Chen, D. Wu, Millimeter-Wave Propagation Modeling and Measurements for 5G Mobile Networks, IEEE Wireless Communications, 26 (2019) 72-77.

- [27] A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, A. Khoryaev, A. Lomayev, Experimental investigations of 60 GHz WLAN systems in office environment, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27 (2009) 1488-1499.
- [28] C.U. Bas, R. Wang, T. Choi, S. Hur, K. Whang, J. Park, J. Zhang, A.F. Molisch, Outdoor to indoor penetration loss at 28 GHz for fixed wireless access, 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), IEEE, 2018, pp. 1-6.
- [29] C.E.O. Vargas, L. da Silva Mello, R.C. Rodriguez, Measurements of construction materials penetration losses at frequencies from 26.5 GHz to 40 GHz, 2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), IEEE, 2017, pp. 1-4.
- [30] T.S. Rappaport, Y. Xing, G.R. MacCartney, A.F. Molisch, E. Mellios, J. Zhang, Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—With a focus on propagation models, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65 (2017) 6213-6230.
- [31] Y. Kuga, P. Phu, Experimental studies of millimeter-wave scattering in discrete random media and from rough surfaces, *Progress In Electromagnetics Research*, 14 (1996) 37-88.
- [32] Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, T.S. Rappaport, Indoor Wireless Channel Properties at Millimeter Wave and Sub-Terahertz Frequencies, arXiv preprint arXiv:1908.09765, (2019).
- [33] T.S. Rappaport, S. Deng, 73 GHz wideband millimeter-wave foliage and ground reflection measurements and models, 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), IEEE, 2015, pp. 1238-1243.
- [34] Anonim, Analog Beamforming vs Digital Beamforming, <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Analog-Beamforming-vs-Digital-Beamforming.html>, (Erişim tarihi: 25.08.2019).
- [35] A. Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath, Capacity limits of MIMO channels, *IEEE Journal on selected areas in Communications*, 21 (2003) 684-702.
- [36] Y.-G. Lim, C.-B. Chae, G. Caire, Performance analysis of massive MIMO for cell-boundary users, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14 (2015) 6827-6842.
- [37] E. Björnson, M. Bengtsson, B. Ottersten, Optimal multiuser transmit beamforming: A difficult problem with a simple solution structure [lecture notes], *IEEE Signal Processing Magazine*, 31 (2014) 142-148.
- [38] L. Liu, C. Oestges, J. Poutanen, K. Haneda, P. Vainikainen, F. Quitin, F. Tufvesson, P. De Doncker, The COST 2100 MIMO channel model, *IEEE Wireless Communications*, 19 (2012) 92-99.

- [39] M.A. Almagboul, F. Shu, Y. Qin, X. Zhou, J. Wang, Y. Qian, K.J. Zou, An Efficient Hybrid Beamforming Design for Massive MIMO Receive Systems via SINR Maximization Based on an Improved Bat Algorithm, arXiv preprint arXiv:1811.01176, (2018).
- [40] Anonim, Hüzme Oluşturma, <https://www.edn.com/electronics-blogs/5g-waves/4460321/Hybrid-beamforming-for-5G-MIMO-arrays> (Erişim tarihi: 25.08.2019).
- [41] S.J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, 2016.
- [42] Anonim, Wireless Communication, https://www.tutorialspoint.com/wireless_communication/wireless_communication_multiple, (Erişim tarihi: 25.08.2019).
- [43] E. Björnson, E. Jorswieck, Optimal resource allocation in coordinated multi-cell systems, Foundations and Trends® in Communications and Information Theory, 9 (2013) 113-381.
- [44] E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, M. Debbah, Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer?, IEEE Transactions on Wireless Communications, 14 (2015) 3059-3075.
- [45] E. Björnson, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, Massive MIMO: Ten myths and one critical question, IEEE Communications Magazine, 54 (2016) 114-123.
- [46] Y. Guo, W. Ai, Maximizing SINR in DL MU-MIMO system on SDP algorithm, 2012 IEEE 14th International Conference on Communication Technology, IEEE, 2012, pp. 1267-1270.
- [47] A. Fraser, D. Burnell, Computer models in genetics, Computer models in genetics., (1970).
- [48] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Ieee, 1995, pp. 39-43.
- [49] S. Mirjalili, The ant lion optimizer, Advances in Engineering Software, 83 (2015) 80-98.
- [50] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, Grey wolf optimizer, Advances in engineering software, 69 (2014) 46-61.
- [51] S.-C. Chu, P.-W. Tsai, J.-S. Pan, Cat swarm optimization, Pacific Rim international conference on artificial intelligence, Springer, 2006, pp. 854-858.
- [52] M. Dorigo, M. Birattari, Ant colony optimization, Springer 2010.
- [53] X. Li, S. Pan, Solving the finite min-max problem via an exponential penalty method, Bilgi İşlem Teknolojisi, 8 (2003).

[54] Q. Bai, Analysis of particle swarm optimization algorithm, *Computer and information science*, 3 (2010) 180.

[55] Y.-F. Liu, Y.-H. Dai, Z.-Q. Luo, Coordinated beamforming for MISO interference channel: Complexity analysis and efficient algorithms, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59 (2010) 1142-1157.