İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KUANTALANMIŞ ÖN-KODLAYICININ İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMEYE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Ebru Sinem TOKER

Anabilim Dalı : ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : TELEKOMÜNİKASYON MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KUANTALANMIŞ ÖN-KODLAYICININ İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMEYE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ebru Sinem TOKER
(504051306)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ertuğrul ÇELEBİ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ümit AYGÖLÜ (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Oğuz KUCUR (G.Y.T.E.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde değerli zaman ve bilgilerinden yararlandığım, güleryüzünü ve anlayışını benden hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Ertuğrul ÇELEBİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımı değerli fikirleri ve yorumlarıyla süsleyen, üzerimde büyük emeği bulunan değerli arkadaşım Ar. Gör. Özgür ORUÇ'a; proje çalışmalarımız süresince yardımlarıyla ilerlememde büyük katkı sağlayan Prof. Dr. Ümit Aygölü, Doç. Dr. İbrahim Altunbaş ve Ar. Gör. Hacı İlhan başta olmak üzere tüm proje ekibine; hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini hep yanımda hissettiğim annem Sıdıka TOKER, babam Ali TOKER ve kardeşim İrem TOKER'e; başta kardeşim gibi sevdiğim Ar. Gör. Serhat Selçuk BUCAK olmak üzere beni her zaman neşelendirmeyi başarabilen çalışma arkadaşlarıma sevgilerimi sunarım. Son olarak, sevgisi ve en önemlisi dostluğu için Altan GÜRSES'e sonsuz teşekkürler.

Mayıs 2008 Ebru Sinem TOKER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
SEMBOL LİSTESİ **vii**
ÖZET **viii**
SUMMARY **xi**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Motivasyon 4

2. LİTERATÜR **7**
2.1. Röleli Sistemler ve Rölelerde Kullanılan Yöntemler 7
2.2. Röleli Kanallarda Güç Tahsisi ve Rölelerde Ağırlıklandırma 11

3. İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEME **12**
3.1. İşbirlikli Çeşitleme Protokolleri 13
3.1.1. Sabit Aktarma (Fixed Relaying) 13
3.1.1.1. Kuvvetlendir-İlet Protokolü 13
3.1.1.2. Çöz-İlet Protokolü 14
3.1.2. Kodlamalı İşbirliği 14
3.1.3. Seçimli Aktarma (Selection Relaying) 15
3.1.4. Artımlı Aktarma (Incremental Relaying) 16
3.2. İşbirlikli İletişimde Sistem Modeli 16
3.3. İşbirlikli Çeşitleme Yöntemleri İçin Servis Kesilme Davranışı 19
3.3.1. Direkt İletim 19
3.3.2. Sabit Aktarma 20
3.3.2.1. Kuvvetlendir-İlet Protokolü 20
3.3.2.2. Çöz-İlet Protokolü 20
3.3.3. Seçimli Aktarma (Selection Relaying) 21
3.3.4. Artımlı Aktarma (Incremental Relaying) 23

4. MIMO SİSTEMLERDE HUZME OLUŞTURMA **25**
4.1. SNR'ı Enbüyükleyecek Huzme Oluşturma 25

5. İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMEDE HUZME OLUŞTURMA **28**
5.1. Röleli Kanallarda Çeşitlemenin Arttırılması: Huzme Oluşturma ve Röle Seçimi 28
5.1.1. Sistem Modeli 28
5.1.2. Rölelerde Huzme Oluşturma İşlemi 29

5.2. İşbirlikli Çeşitlemede Huzme Oluşturma ve Röle Seçme Üzerine Yapılan, Doğruladığımız Örnek Çalışmalar 32
5.2.1. Referans Çalışma 1 32
5.2.2. Referans Çalışma 2 33
5.2.2.1. Genelleştirilmiş Özdeğer Problemi 36
5.3. Röle Seçme Algoritmaları 38
5.4. Benzetim Sonuçları 40

6. KANAL KUANTALAMA VE SINIRLI GERİBESLEME 46
6.1. Röleli Kanallarda Çeşitlemenin Arttırılması İçin Sınırlı Geribesleme ve Huzme Oluşturma 46
6.1.1. Rölelere Sınırlı Geribesleme 46
6.2. Benzetim Sonuçları 49

7. SONUÇ 57

KAYNAKLAR 58

ÖZGEÇMİŞ 62

KISALTMALAR

MIMO	: Multiple-Input Multiple-Output (Çok Girişli-Çok Çıkışlı)
MISO	: Multiple-Input Single-Output (Çok Girişli-Tek Çıkışlı)
MRC	: Maximum Ratio Combiner (Maksimum Oran Birleştirici)
SNR	: Signal-to-Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
DSNR	: Differential SNR (Farksal SNR)
BPSK	: Binary Phase Shift Keying
AF	: Amplify and Forward (Yükselt/Kuvvetlendir-İlet)
DF	: Decode and Forward (Çöz-İlet)
CRC	: Cyclic Redundancy Check (Çevrimsel Artıklık Kodu)
PDF	: Probability Density Function (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu)
BER	: Bit Error Rate (Bit Hata Olasılığı)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 : Kablosuz tasarsız ağlarda işbirlikli çeşitleme..... 2
Şekil 1.2 : İşbirlikli sistemin sanal MIMO sisteme eşdeğerliği..... 3
Şekil 1.3 : İşbirlikli iletişimde bağımsız sönümleme yolları..... 3
Şekil 2.1 : Röle kanalı..... 7
Şekil 2.2 : İşbirlikli sistemde her hareketli terminal hem bir kullanıcı hem de bir röledir..... 8
Şekil 2.3 : Röle kaynağa yakın ise DF, hedefe yakın ise CF tercih edilmektedir..... 10
Şekil 3.1(a) : Temel MIMO yapısı..... 12
Şekil 3.1(b) : İşbirlikli iletişim ile oluşan sanal MIMO yapısı..... 12
Şekil 3.2 : Kuvvetlendir-İlet yöntemi..... 13
Şekil 3.3 : Çöz-İlet yöntemi..... 14
Şekil 3.4 : Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi..... 15
Şekil 3.5 : Üç özel durumda iki vericili-iki alıcılı işbirlikli kanal modeli..... 18
Şekil 4.1 : Çok verici-çok alıcılı huzme oluşturma uygulanan sistem modeli.. 25
Şekil 4.2 : 3 vericili-1 alıcılı huzme oluşturma uygulanan MISO sisteme ait hata başarım sonucu..... 27
Şekil 5.1 : Bu tez çalışmasında kullanılan sistem modeli..... 29
Şekil 5.2 : [33]'de ele alınan sistem modeli..... 34
Şekil 5.3 : Hedefte ve rölelerde tam kanal durum bilgisi olması durumunda 2 röleli sisteme ait hata başarımı [33]..... 38
Şekil 5.4 : 10dB DSNR, 3 röle, AF yöntemi..... 41
Şekil 5.5 : 20dB DSNR, 3röle, DF yöntemi..... 42
Şekil 5.6 : 10dB DSNR, 3röle, DF yöntemi..... 43
Şekil 5.7 : 0dB DSNR, 3 röle, DF yöntemi..... 44
Şekil 6.1(a) : N_A=2 için Rayleigh dağılımı üzerinden genlik kuantalama..... 47
Şekil 6.1(b) : N_A=2 ve N_P=4 için kuantalama bölgeleri..... 47
Şekil 6.2 : N_A=4 ve N_P=4 için kuantalama bölgeleri..... 48
Şekil 6.3 : DF, genlik ve faz için eşit sayıda bit/bitler, 10dB ve 20dB DSNR... 50
Şekil 6.4 : DF, genlik ve faz için farklı sayıda bit/bitler, 20dB DSNR..... 51
Şekil 6.5 : DF, **f** ve **f** & **b** kuanta, 20dB farksal SNR..... 52
Şekil 6.6 : AF, genlik ve faz için eşit sayıda bit/bitler, 10dB ve 20dB DSNR... 53
Şekil 6.7 : AF, genlik ve faz için farklı sayıda bit/bitler, 20dB DSNR..... 54
Şekil 6.8 : AF, **f** ve **f** & **b** kuanta, 20dB farksal SNR..... 55
Şekil 6.9 : AF ve DF, genlik ve faz için toplamda 4 bit geribesleme, 20dB DSNR..... 56

SEMBOL LİSTESİ

n	**:** Röle sayısı
i	**:** Röle numarası
b_i	**:** Kaynak ile i. röle arasındaki kanal katsayısı
f_i	**:** i. röle ile hedef arasındaki kanal katsayısı
V_i	**:** i. rölede eklenen gürültü
N	**:** Hedefte eklenen gürültü
$\mathbf{w}$	**:** Hüzme oluşturma vektörü
E_s	**:** Kaynak iletim gücü
$\|(.)\|$	**:** Matrisin Frobenius normu veye vektörün Öklit normu
$(.)^*$	**:** Kompleks eşlenik alma
$(.)^T$	**:** Evrik alma
$(.)^H$	**:** Hermit alma
$\mathbf{a} \bullet \mathbf{b}$	**:** **a** ile **b** vektörlerinin iç çarpımı
Q	**:** Kuantalama katsayılarını içeren küme
N_A	**:** Kanal katsayısının genliği için kuantalama seviyelerinin sayısı
N_P	**:** Kanal katsayısının fazı için kuantalama seviyelerinin sayısı
K_k	**:** $k.$ kuanta genlik seviyesi
θ_m	**:** $m.$ kuanta faz seviyesi
$f_{q_{km}}$	**:** f_i kanal katsayısının kuantalanmış versiyonu
A_{km}	**:** k ve m indislerine ilişkin kuantalama bölgesi
$s(k)$	**:** Genlik kuantalama bölgelerinin $k.$ sınırı
$\angle(.)$	**:** Karmaşık bir sayının fazını alma
$\|(.)\|$	**:** Karmaşık bir sayının genliğini alma

KUANTALANMIŞ ÖN-KODLAYICININ İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMEYE UYGULANMASI

ÖZET

Günümüzde kablosuz iletişim sistemleri için talep artmakta ve bu da kablosuz ağlarda önemli gelişmeleri ve kablosuz uygulamalarda önemli çeşitlilikleri beraberinde getirmektedir. Kablosuz donanım ve servisler çok hızlı gelişmekte ve sistem tasarımcıları kanal ortamını ve çok-kullanıcılı haberleşmeyi daha iyi kavradıkça sistem ucuzlamaktadır. Buna ek olarak, integre devrelerde ve radyo-frekans haberleşmesindeki teknolojik ilerlemeler, daha karmaşık işaret işleme ve kanal kodlama algoritmalarının kullanımına imkan sağlamaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve artık yetersiz kalan uçtan-uca (point-to-point) ağların röleli ve işbirlikli sistemlerle desteklenmesi ve bu sistemlerin kalitesinin arttırılması üzerine çalışılması haberleşme sektörünü rahatlatacak ve servis kalitesinin artmasını sağlayacaktır.

Kablosuz kanallarda iletim; girişim, sönümleme, çok yolluluk, yol kaybı ve gölgeleme gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu etkilerinden korunmanın en önemli yolu sistemde çeşitlemeyi sağlamak, yani kaynak ve hedef arasında birbirinden bağımsız çoklu sönümleme yolları oluşturmaktır.

Birimlerde çok alıcı veya çok verici anten kullanan uzay çeşitlemesi son yıllarda en çok ilgi gören çeşitleme yöntemlerinden biridir. Bu çeşitlemenin mümkün ve pratik olmadığı durumlar için işbirlikli çeşitleme adı verilen ve tek anten bulunduran birimlerin birbirlerinin antenlerini paylaşarak sanal çok girişli-çok çıkışlı (MIMO) bir sistem yarattıkları yöntem geliştirilmiştir. Bu sistemlerde kaynak kullanıcının hedef birime iletimine yardım eden kullanıcıya röle adı verilmektedir ve bir terminalin işaretinin röle sayesinde farklı bir sönümleme yolundan da iletilmesi ile uzay çeşitlemesi sağlanmaktadır.

Vericide kanal durum bilgisi kullanılırsa, iletilen işaret daha yüksek link kapasitesi ve verim sağlamak üzere şekillendirilebilir ve en önemlisi sistemde kolayca

çeşitleme arttırımı sağlanabilir. Vericideki kanal bilgisinin vericiden gönderilen işaretlerin ağırlıklandırılması için kullanılıp işaretlerin kanala daha uyumlu bir şekilde gönderilmesi işlemine huzme oluşturma (beamforming) denir. Bu işlem tam kanal bilgisini gerektirdiği için pratik değildir. Bu nedenle alıcıdaki kanal durum bilgisi vericiye genelde kuantalanarak, sınırlı hızdaki geribesleme kanalı üzerinden yollanır.

MIMO sistemlerde, işaret gürültü oranını'ı arttırmak, kapasiteyi arttırmak veya servis kesilme olasılığını azaltmak gibi amaçlarla çeşitli bozulum ölçütleri önerilmiş ve bu ölçütlere göre verici-alıcı arasındaki kanal matrisi farklı kuantalama teknikleri ile kuantalanmış ve geribesleme ile verici tarafa ulaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, MIMO sistemlerde çeşitlemenin arttırılmasından yola çıkarak işbirlikli iletişimde yükselt-ilet (AF) ve çöz-ilet (DF) yöntemleri için çeşitlemeyi eniyileyecek huzme oluşturma katsayıları (röle ön-kodlayıcıları) belirlenmiş ve önerilen çeşitli röle seçme ve iptal etme algoritmaları bilgisayar benzetimleri ile incelenmiştir. Bu algoritmaların her iki yönteme katkıları tartışılmıştır.

Karşılaştırma amacıyla literatürde var olan bir röle seçme algoritması, çok giriş-tek çıkışlı bir sistem ve rölelerden eşit güçle iletim yapan bir sistemin de benzetimleri yapılmıştır. AF için röle seçme kriterlerine göre karar verilen en kötü röleyi iptal etmek veya en iyi röleyi seçmek iyi başarım getirmezken, huzme oluşturma yöntemiyle röleler arasında güç paylaşımı yapmak önerilen sistemler arasında en iyi başarımı sağlamaktadır. DF'de ise AF'nin aksine kötü röle veya röleleri iptal etmek iyi başarımlar sağlamaktadır. Her iki yöntemde de bit hata olasılığı bazında "Bletsas Algoritması" na [36] üstünlük sağlanmıştır.

Uygulanan huzme oluşturma ile AF yönteminde sistemde tam çeşitleme derecesine ulaşılırken, DF yönteminde rölelerde meydana gelen çözme hataları dolayısıyla tam çeşitleme derecesi görülememektedir.

Ek olarak, kaynak-röle ve röle-hedef kanalı önerilen yöntemle kuantalanarak kanal sönümleme katsayılarının genlik ve faz bilgileri çeşitli sayıda bit ile sınırlı geribesleme kanalı üzerinden rölelere gönderilmiştir. Rölelerdeki bu kısmi (kuantalanmış) bilgilere göre çeşitlemeyi eniyilemek üzere önerilen huzme oluşturma katsayıları düzenlenmiş, AF ve DF yöntemlerini kullanan röleli sistemin başarım

sonuçları elde edilmiş ve mükemmel kanal bilgisi durumu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kaynak-röle kanalının işaret-gürültü oranı (SNR), hedefteki SNR'dan farklı olduğu durumlar için de benzetimler çeşitlenmiştir. Sonuç olarak AF ve DF yöntemlerinin her ikisinde de kanal sönümleme katsayısının faz bilgisinin genlik bilgisine göre başarıma etkisinin daha önemli olduğu görülmüştür.

APPLYING QUANTIZED PRECODERS TO COOPERATIVE DIVERSITY SYSTEMS

SUMMARY

As demand for wireless communication systems increase and significant improvements in wireless networks are realized, the range of wireless applications expands. Wireless hardware and services develop rapidly and systems get economical as the communication channel settings and multi-user communication are well understood. Additionally, technologic advancements at integrated circuits and radio-frequency communication alleviates the use of more complex signal processing and channel coding algorithms. Point-to-point networks that was widespreadly used, but are inadequate nowadays, should be assisted by relayed and cooperative systems so to increase quality. In this way, communication firms get better in providing quality of service.

Transmission in wireless channels are mostly affected by the factors like interference, fading, multipath, path loss and shadowing. The most important tool to avoid these effects is to provide diversity by creating independent multiple fading paths between source and destination.

Space diversity utilizing multiple antennas at the transmitters or receivers is one of the popular diversity methods in recent years. For the case where this diversity method is not feasible and practical, cooperative diversity methods in which terminals having one antenna sharing each others' antenna and, thus, creating virtual multiple input-multiple output (MIMO) systems are proposed. At these systems, the user that helps the source terminal transmitting to the destination terminal is called relay. Transmittig a terminal's signal from a different fading path by the relay provides space diversity.

Using channel state information at the transmitter, transmitted signal can be made to provide higher link capacity, efficiency and diversity of the system. The process of weigthing the transmitted signals to make them better-matched to the channel using

the channel state information at the transmitter is known as beamforming. This process may not be practical for perfect channel knowledge. Thus, the channel state information at the receiver is generally quantized and fed back to the transmitter via a limited rate feedback channel.

Various distortion metrics for the purpose of increasing signal to noise ratio, increasing channel capacity or decreasing outage probability are proposed for MIMO systems. According to these metrics, the channel matrix between transmitter and receiver is quantized resulting different quantizing methods.

In this thesis, for the purpose of increasing diversity at MIMO systems, beamforming coefficients (relay precoder) providing optimum diversity order for the amplify-forward (AF) and decode-forward (DF) methods in cooperative systems are proposed. Utilizing these coefficients, the algorithms used to select or cancel relays are tested by computer simulations. The contributions of these algorithms to both methods are discussed.

For comparisons, a relay selection algorithm previously developed, a multiple input-single output system performing beamforming and a system where the relays transmit with equal power are used as benchmarks. For the AF method, making hard decisions, namely, canceling the worst or selecting the best relay according to proposed relay selection criteria does not give desirable results. Better performance is obtained by soft assignment of power, or beamforming. In contrast, canceling worst relay(s) yields better performance for DF method. In both cases, better performance in bit-error rate is obtained compared to "Bletsas Algorithm" [36].

While the beamforming scheme for AF results in roughly full diversity order, the scheme for DF cannot achieve full diversity order because of its dependence to the decoding errors made at the relays.

Moreover, source-relay and relay-destination channel is quantized according to the proposed criterion and the amplitude and phase information of channel fading coefficients are fed back to the relays in different number of bits. Beamforming coefficients aimed to increase diversity are formed according to these partial (quantized) information at the relays and the performances of AF and DF methods are observed and compared to full (perfect) information case. More simulations are

carried out considering the cases that the source-relay channel SNR is different from relay-destination channel SNR. In conclution, phase information of the channel coefficients appear to be more crucial than amplitude information for both AF and DF methods.

1. GİRİŞ

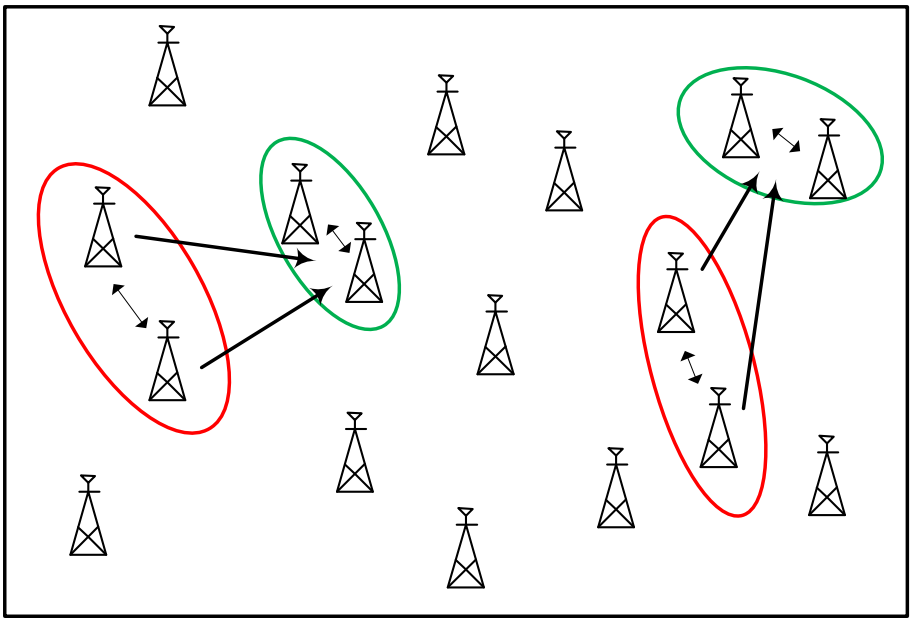
Artan sayıdaki kablosuz uygulama ve gün geçtikçe bunlar için artan talep, kablosuz ağlarda önemli gelişmeleri beraberinde getirmektedir. Bu gelişmeler özellikle hücresel ses ve veri ağlarında, kablosuz bilgisayar için geliştirilen tasarsız (ad-hoc) veri ağlarında, ev ve kişisel ağlarda etkisini göstermiştir.

Kablosuz bir tasarsız ağ, birbirleriyle kablosuz hatlar üzerinden haberleşen birçok hareketli birimden oluşur. Daha ucuz olması ve daha basit bir şekilde yeniden yapılandırılabilmesi tasarsız ağları özellikle ticari ve askeri alanda tercih edilir kılmaktadır. Kablosuz LAN (örn. IEEE 802.11) ve WAN (örn. DARPA's GLOMO), ev ağları (örn. HomeRF), araç ağları (örn. Bluetooth), sensör ağlar (örn. SmartDust, WINS) verilebilecek örnekler arasındadır.

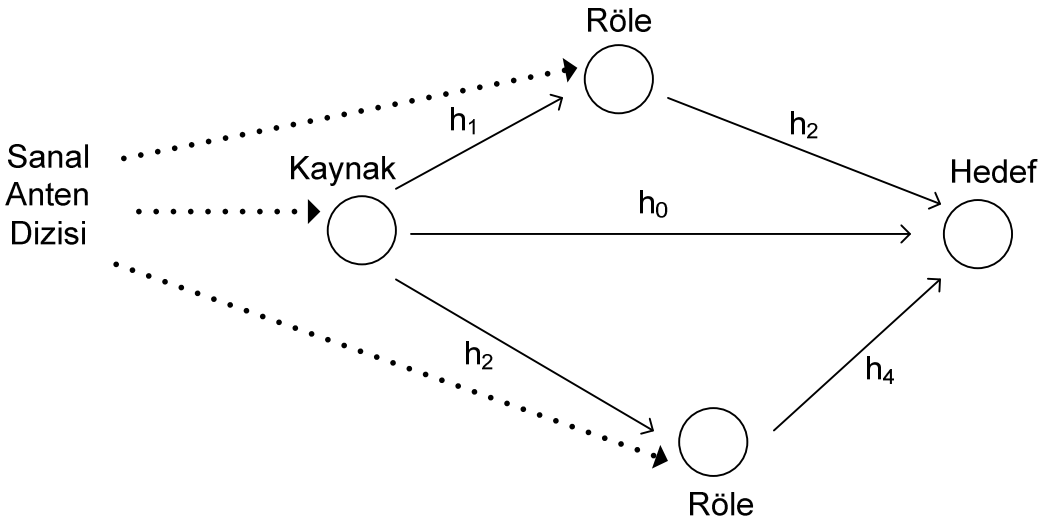
Geleneksel "infrastructure" ağlarda (örn. Hücresel ağlar) bir kullanıcıdan diğer bir kullanıcıya iletim bir kontrol baz istasyonu üzerinden gerçekleştirilirken, tasarsız ağlar verici ve alıcı birim arasında birebir iletişim sağlamaktadır. İki birim arasındaki direkt iletişim tek-sekmeli olarak adlandırılmaktadır. Kablosuz kanallar genelde zayıf oldukları için tek-sekmeli yönlendirme yüksek iletim gücü gerektirir ve dolayısıyla daha fazla girişime sebebiyet verir. Önemli derecede güç kazancı sağlayabilmek için bilgi, arada bulunan diğer birimler üzerinden hedefe iletilmelidir. Tek-sekmeli kanaldan iletişim günümüze kadar yeterince araştırılmış ve iyice anlaşılmıştır [1]. Çok birimli ağlar ise halen daha araştırılacak konu zenginliğine sahiptir.

Kablosuz kanallarda iletim; girişim, sönümleme, çok yolluluk, yol kaybı ve gölgeleme gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu etkiler karşısında haberleşmenin nasıl tasarlanacağı önemlidir. Bu etkilerinden korunmanın en önemli yolu sistemde çeşitlemeyi, yani çeşitli yöntemlerle işaretin bağımsız sönümlemelerden etkilenen birden fazla kopyasının alıcıya yollanmasını sağlamaktır. Anten (uzay) çeşitlemesi son yıllarda en çok ilgi gören çeşitleme yöntemlerinden biridir. Anten çeşitlemesi alıcı ve vericide uygulanmasına göre alıcı ve verici çeşitlemesi olarak adlandırılır.

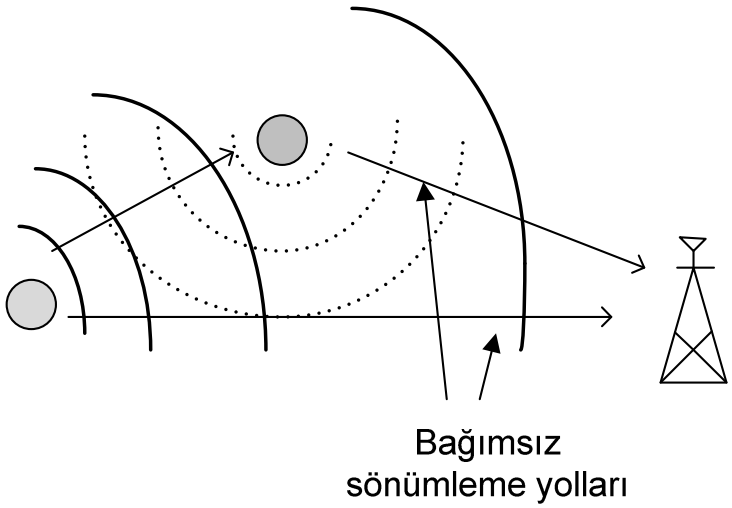
Birimlerde çok alıcı ve çok verici olması anten çeşitlemesi sağlayarak kapasiteyi ve aynı zamanda sönümleme ve girişime karşı direnci arttıracaktır. Bununla birlikte, birimlere çok anten yerleştirmenin mümkün ve pratik olmadığı durumlar olabileceği (örn. Sensör ağlardaki küçük ve basit birimlere boyut ve güç açısından) gibi pahalıya mal olacağı durumlar da olabilir. Böyle durumlarda birimlerde çoklu anten bulundurmaya gerek duymayan ve yine uzay çeşitlemesi sağlayan işbirlikli çeşitleme yöntemi tercih edilmektedir. Şekil 1.1'den görüldüğü üzere işbirlikli çeşitleme herbirinde bir anten bulunan birkaç birimi bir küme içerisine alır ve bu kümedeki birimler birbirlerinin antenlerini paylaşır. Bu kümede kaynak kullanıcının hedef birime iletimine yardım eden kullanıcıya röle adı verilmektedir. Bu sayede işbirlikli çeşitleme ile Şekil 1.2'de görüldüğü gibi verici ve/veya alıcı anten dizileri (sanal çok girişli - çok çıkışlı (MIMO) sistem) oluşturulur. İşaretlerin farklı yerlerden gönderilip bağımsız sönümlemelere maruz kalan versiyonlarının alıcıya ulaştığı uzay çeşitlemesi, işbirlikli sistemlerde de bir terminalin (birimin) işaretinin röle sayesinde farklı bir sönümleme yolundan da iletilmesi ile sağlanmaktadır. İşbirlikli iletişimde bağımsız sönümleme yolları Şekil 1.3'de görülmektedir. İşbirlikli çeşitleme özellikle tasarsız ağlarda oldukça fazla güç kazancı sağladığı için geniş uygulama alanı bulmuştur.



Şekil 1.1 : Kablosuz tasarsız ağlarda işbirlikli çeşitleme



Şekil 1.2 : İşbirlikli sistemin sanal MIMO sisteme eşdeğerliği



Şekil 1.3 : İşbirlikli iletişimde bağımsız sönümleme yolları

Röleli sistemler geleneksel haberleşme sistemlerine göre yerleşim, bağlanabilirlik, uyarlanabilirlik ve kapasite gibi konularda birçok üstünlük sağlamaktadırlar [2,3]. Ayrıca sabit bir altyapı için gereksinimi azalttığı için daha kolay, hızlı ve ucuza gerçeklenebilirler. Altyapı kurulumu için zamanın ve alanın kısıtlı olduğu yetersiz mimarilerde röle teknikleri ile şebekeler arası bağlantıyı sağlamak mümkündür. Bununla birlikte bu sistemler var olan şebekelerin kapsama alanını aradaki boşlukları doldurarak genişletebilir.

Röleli sisteme eklenen her bir terminal bağlanabilirliği arttırdığı gibi hata toleransında da gelişme sağlar. Sistemin fiziksel geometrisinin önemi de büyüktür.

Daha kısa iletim uzaklıkları ve iletim enerjisinin vericiler arasında etkili paylaştırılması, sistem genelinde daha düşük güç seviyelerinde çalışmayı sağlar. Bu da kanal kapasitesinin artacağı, girişim seviyelerinin düşeceği, terminalden yayılan radyasyonun azalacağı ve daha uzun pil ömürlerinin sağlanacağı anlamına gelmektedir.

Kablosuz donanım ve servisler çok hızlı gelişmekte ve sistem tasarımcıları kanal ortamını ve çok-kullanıcılı haberleşmeyi daha iyi kavradıkça sistem ucuzlamaktadır. Buna ek olarak, integre devrelerde ve radyo-frekans haberleşmesindeki teknolojik ilerlemeler, daha karmaşık işaret işleme ve kanal kodlama algoritmalarının kullanımına imkan sağlamaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve artık yetersiz kalan uçtan-uca (point-to-point) ağların röleli ve işbirlikli sistemlerle desteklenmesi ve bu sistemlerin kalitesinin arttırılması üzerine çalışılması haberleşme sektörünü rahatlatacak ve servis kalitesinin artmasını sağlayacaktır.

1.1 Motivasyon

Hem alıcıda hem vericide çoklu anten kullanıldığında oluşan kanala çok girişli - çok çıkışlı (MIMO) kanal denir. Bu yapı ile verici tarafta kodlama teknikleri, alıcı tarafta da işaret işleme teknikleri kullanılarak yüksek iletim hızlarına ulaşmak, çok yollu sönümlemeye direnç göstermek, sistemdeki gecikmeleri en aza indirmek ve birden fazla kullanıcıya hizmet vermek mümkündür. Hali hazırdaki çalışmalar MIMO teknolojisinin 3. ve 4. nesil hücresel sistemlerde, kablosuz yerel ağ şebekelerinde ve tasarsız kablosuz ağlarda yüksek başarım sağladığını göstermiştir.

Vericide kanal durum bilgisi kullanılırsa, iletilen işaret daha yüksek link kapasitesi ve verim sağlamak üzere şekillendirilebilir, uzamsal kanalı birden fazla kullanıcıya tahsis ederek sistem kapasitesi arttırılabilir, girişimi engellemek üzere çoklu-kullanıcılı sistemlerde alıcılar basitleştirilebilir ve en önemlisi sistemde kolayca çeşitleme arttırımı sağlanabilir. Dolayısıyla kanal durum bilgisi sayesinde MIMO teknolojisinin avantajları, MIMO'da vericiden iletim ve alıcıda alım aşamalarındaki zorluklar basitleştirilerek sağlanmış olur.

Vericideki kanal bilgisinin vericiden gönderilen işaretlerin ağırlıklandırılması için kullanılıp işaretlerin kanala daha uyumlu bir şekilde gönderilmesi işlemine huzme oluşturma (beamforming) denir. Bu işlem tam kanal bilgisini gerektirir. Her ne kadar

çoklu anten kullanımı kanal parametrelerini arttırsa da eğitici semboller yardımıyla alıcıda kanal kestirimi yapılabilir. Alıcıdaki kanal durum bilgisi vericiye genelde kuantalanarak, sınırlı hızdaki geribesleme kanalı üzerinden yollanır. Tam kanal durum bilgisinin yollanması için sınırsız geribeslemeye ihtiyaç vardır. Bu da pratikte mümkün değildir. MIMO sistemde geribesleme ihtiyacı, verici ve alıcı anten sayılarının çarpımı ile, gecikme yayılımı ile ve kullanıcı sayısı ile artmaktadır. Buna karşın kapasite lineer olarak artar. Örneğin kompleks bir 4 vericili - 4 alıcılı MIMO kanalda, kanal her değiştiğinde kuantalanması gereken 32 parametre vardır. Buna karşın tek anten bulunduran bir kanalda sadece 1 parametre kuantalanacaktır.

Sınırlı geribeslemenin kullanıldığı haberleşmede ana strateji vektör kuantalama tekniklerinin kullanılmasıdır. Bu sayede alıcıdaki kanal durum bilgisi geribesleme kanalına verilmeden önce kuantalama işlemine tabi tutulur. Bu da, içerisinde kanal bilgisinin kuantalanacağı optimum vektörleri bulunduran bir kod tablosunun tasarlanması gerekliliğini doğurur. Bu tablonun oluşturulmasında kullanılan başlıca kriterler; maksimum oran birleştiricinin (MRC) çıkışındaki ortalama işaret gürültü oranının (SNR) enbüyüklenmesi, ortalama karşılıklı bilginin enbüyüklenmesi veya servis kesilme olasılığının enküçüklenmesidir.

Buradaki vektör kuantalama işleminin geleneksel vektör kuantalamadan farkı bozulum (distorsiyon) metriklerinin seçimidir. Geleneksel vektör kuantalamada verilen kanalın iyi bir yaklaşıklığı yapılmaktadır. Halbuki sınırlı geribeslemenin kullanıldığı haberleşmede amaç birkaç bit geribesleme bilgisi kullanarak kapasiteyi arttırmak veya bit hata olasılığını azaltmaktır. Sonuç olarak kanalın tekrar elde edilmesi değil bu kanala dair bilgi ile ne yapılabileceği önemlidir. Bu kuantalama tekniklerinin MIMO haberleşmeye uygulanması değişik algoritmaların geliştirilmesi açısından geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

MIMO sistemlerde, SNR'ı arttırmak, kapasiteyi arttırmak veya servis kesilme olasılığını azaltmak gibi amaçlarla çeşitli bozulum ölçütleri önerilmiş ve bu ölçütlere göre verici-alıcı arasındaki kanal matrisi farklı kuantalama teknikleri ile kuantalanmış ve geribesleme ile verici tarafa ulaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, MIMO sistemlerde çeşitlemenin arttırılmasından yola çıkarak işbirlikli iletişimde yükselt-ilet (AF – amplify and forward) ve çöz-ilet (DF – decode and forward) yöntemleri için çeşitlemeyi eniyileyecek huzme oluşturma katsayıları

belirlenmiş ve önerilen çeşitli röle seçme ve iptal etme algoritmaları bilgisayar benzetimleri ile incelenmiştir. Bu algoritmaların her iki yöntem için de avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Karşılaştırma amacıyla literatürde var olan bir röle seçme algoritması, çok giriş-tek çıkışlı (MISO) bir sistem ve rölelerden eşit güçle iletim yapan bir sistemin de benzetimleri yapılmıştır. Kaynak-röle ve röle-hedef kanalı önerilen yöntemle kuantalanarak sınırlı geribesleme kanalı üzerinden rölelere gönderilmiştir. Rölelerdeki bu kısmi bilgilere göre çeşitlemeyi eniyilemek üzere önerilen huzme oluşturma katsayıları düzenlenmiş ve yükselt-ilet ve çöz-ilet yöntemlerini kullanan röleli sistemin başarım sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca kaynak-röle kanalının işaret-gürültü oranı (SNR), hedefteki SNR'dan farklı olduğu durumlar için de benzetimler çeşitlenmiştir.

Bölüm 2'de bu tez çalışmasına ilişkin literatür taraması verilecektir.

Bölüm 3'te işbirlikli çeşitleme ve çeşitli aktarma yöntemleri tanıtılacak ve bu yöntemlere ilişkin servis kesilme davranışları verilecektir.

Bölüm 4'te MIMO sistemde SNR'ı enbüyükleyecek huzme oluşturma katsayıları elde edilecek ve örnek bir sistem için başarım sonucu verilecektir.

Bölüm 5'te bu tez çalışmasında röleli kanallarda çeşitlemenin arttırılması amacıyla yükselt-ilet ve çöz-ilet yöntemleri için önerilen huzme oluşturma katsayıları verilecektir. Bu katsayılar ve önerilen çeşitli röle seçme algoritmalarına göre çalışan sistemler bilgisayar benzetimleri ile incelenecektir. Ayrıca literatürden karşılaştırma amacıyla seçilen ve doğrulanan çalışmalar da tanıtılacaktır.

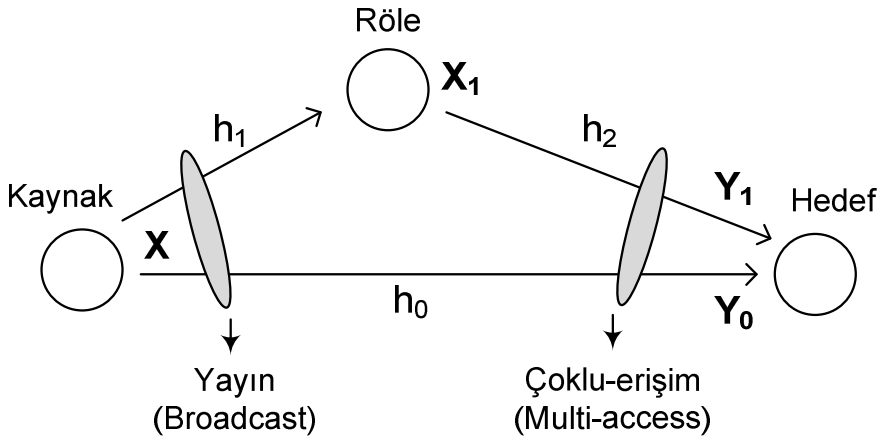
Bölüm 6'da kuantalama yöntemi verilecek ve kısmi bilgiye göre uyarlanmış huzme oluşturma yöntemi ile gerçekleştirilen benzetim sonuçları değerlendirilecektir.

Bölüm 7'de bu tez çalışmasında varılan sonuçlar sunulacak ve ilerde yapılabilecek çalışmalar tartışılacaktır.

2. LİTERATÜR

2.1 Röleli Sistemler ve Rölelerde Kullanılan Yöntemler

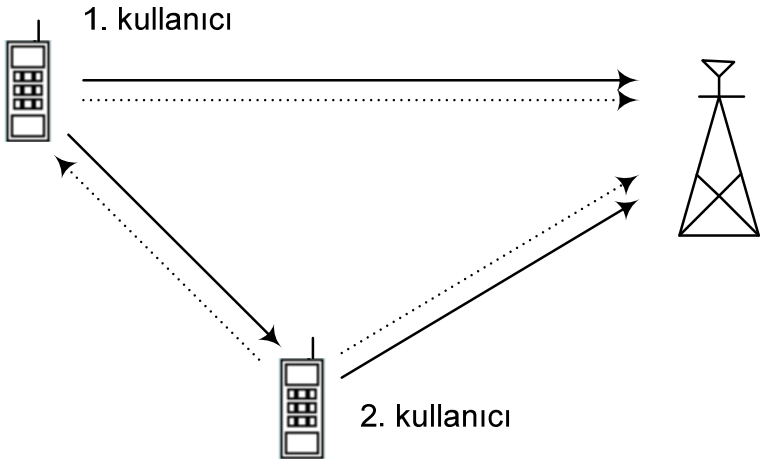
Röleli kanallar üzerine ilk çalışma Van-der Meulen tarafından 1971'de yapılmış [4] ve klasik röle kanalı tanıtılmıştır. Şekil 2.1'de görüleceği gibi bu kanal üç terminalden oluşmaktadır. Bunlar, iletim yapan bir kaynak, alıcı görevindeki hedef ve kaynak-hedef arasındaki iletime yardımcı olmak üzere hem verici hem alıcı görevi gören röledir. Bu klasik röle kanalında röle bir bilgi üretmeyen sadece kaynağa destek veren bir birimdir.



Şekil 2.1 : Röle kanalı

İşbirlikli sistemde ise farklı olarak birimler hem röle hem kaynak olarak çalışabilmektedirler. Şekil 2.2'de bir baz istasyonu ve hem kaynak hem röle görevi gören iki kullanıcılı bir sistem verilmiştir.

Çalışmalara Cover ve El Gamal (1979) tarafından büyük yenilikler getirilmiştir. Sönümlemesiz röle kanallar üzerinde çalışarak kanal sığasının alt ve üst sınırlarını farklı yöntemler için elde etmişlerdir [5]. Şekil 2.1'de görüleceği gibi, her terminalin aynı bandda çalıştığı varsayılırsa, sistem kaynak tarafından bakıldığında yayın kanalı, hedef tarafından ise çoklu-erişim kanalı olarak görülebilir.



Şekil 2.2 : İşbirlikli sistemde her hareketli terminal hem bir kullanıcı hem de bir röledir.

[5]'te iki farklı kodlama yöntemi tanıtılmıştır. İşbirlik (cooperation) olarak bilinen ve daha sonra çöz-ilet (decode-forward) ismini alan birinci yöntemde, ilk zaman aralığında röle aldığı mesajı çözer ve ikinci zaman aralığında bu işaretin iletimi için kaynak ile işbirliği yapar. Sıkıştır-ilet (compress-forward) olarak adlandırılan ikinci yöntemde, röle aldığı mesajı sıkıştırdıktan sonra hedefe iletir. Sıkıştır-ilet yönteminin performansı röle-hedef arası kanala bağlıyken, çöz-ilet yöntemi kaynak röle arasındaki kanaldan oldukça etkilenir [5].

Zamanla röle kanalının değişik uzantıları olan çoklu-röle senaryoları ortaya atılmıştır [6-9]. Bu senaryolardan biri de, rölelerin hedefe direkt iletim yaptığı paralel röle kanalıdır. [6] ve [7]'de sıkıştır-ilet ve çöz-ilet yöntemleri haricinde, yazarlar kuvvetlendir-ilet (yükselt-ilet) yöntemini tanıtmışlardır. Rölenin aldığı mesajı kuvvetlendirdikten sonra ilettiği bu yöntem basit olmasına karşın iyi başarım sergilemektedir. [6]'da kuvvetlendir-ilet yönteminin birçok durumda diğer yöntemleden iyi olduğu gösterilmiştir. Daha da ötesinde, [7]'de kuvvetlendir-ilet yönteminin röle sayısı arttıkça paralel röle kanalının kapasitesine ulaştığı belirtilmiştir.

[10]'da, [7]'deki çalışma MIMO Rayleigh sönümlemeli paralel röle kanalına taşınmıştır. Tek antenli paralel röle kanalından farklı olarak kuvvetlendir-ilet yönteminde kullanılan kuvvetlendirme katsayısı artık bir skaler değil matristir. Bu nedenle optimum matrisi bulmak güçtür. [10]'da Kuvvetlendir-ilet yöntemi için, MIMO Rayleigh sönümlemeli paralel röle kanalında ulaşılabilir maksimum iletim

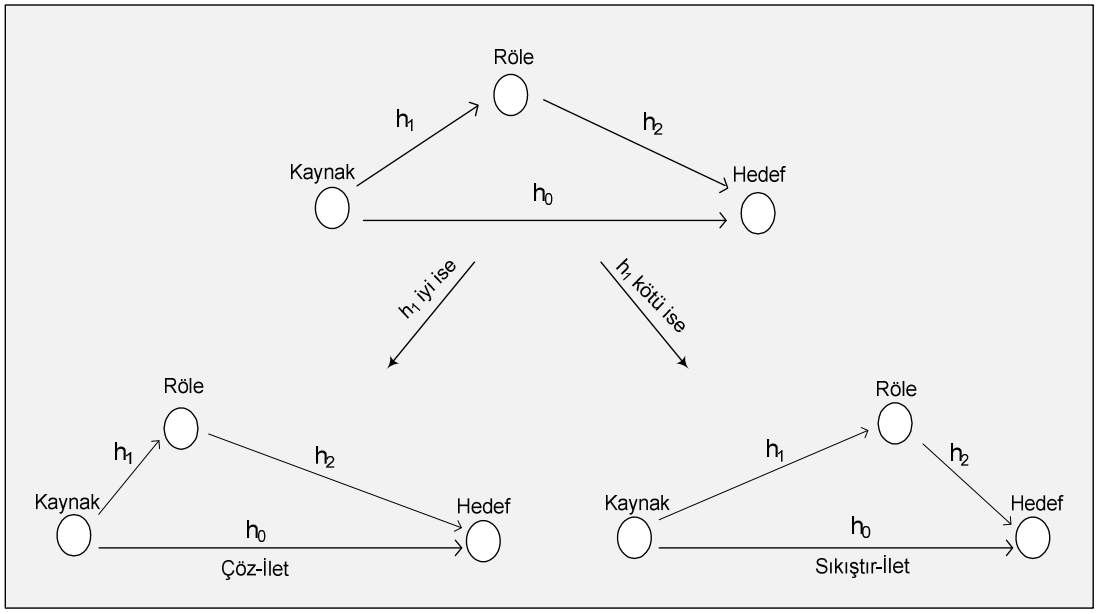
hızının anten sayısıyla doğrusal (çoğullama kazancını gösterir), röle sayısıyla logaritmik (dağılmış dizi kazancını (distributed array gain) gösterir) olarak arttığı gösterilmiştir.

İşbirlikli yapılarda ilk olarak yukarıda belirtilen üç kodlama yonteminin kullanılması düşünülmüştür. Kablosuz şebekelerde birimlerin işbirliği son zamanlarda birçok araştırmaya ışık tutmuştur. Vericide ve/veya alıcıda çoklu anten kullanan uzay çeşitlemesi, çoklu haberleşme yollarını oluşturma yöntemlerinden biridir. Fakat uzay çeşitlemesi genelde verici ile alıcı arasında doğrudan iletim yapılabildiği durumlarda kullanılmaktadır. Bunun yanısıra, [11] ve [12]'deki çalışmalarda kaynak ve hedef arasında boşta uygun bir mobil istasyonun röle görevi görebileceği ve bunun da dağılmış uzay çeşitlemesi [11] olarak adlandırılması uygun görülen bir uzay çeşitlemesi yaratacağı fikri sunulmuştur. [12]'de her kullanıcı kendi ortağının (partnerinin) bilgisini çözdükten sonra, kendisine ait bilgi ile birlikte hedefe gönderir. Sonuçta kullanıcılar ortaklarının antenlerini paylaşarak uzay çeşitlemesi yaratırlar. Kullanıcı ile ortağı arasındaki kanal her ne kadar gürültülü bile olsa, iki kullanıcılı işbirlikli bu sistemde ulaşılabilen maksimum iletim hızları işbirliği olmayan durumdaki kapasite bölgesinin bir alt kümesini oluşturmaktadır.

[12]'deki ana fikir üzerine [13]'te bir rölenin ortağından aldığı işareti çözüp ilettiği ve sadece güçlendirip ilettiği yöntemlerin performansları karşılaştırılmış ve bağımsız Gauss düz sönümlemeli kanallar için rölede sadece güçlendirmenin olduğu basit yöntemin diğerine benzer ortalama bit hata oranına sahip olduğu gösterilmiştir.

[14]'te röleli şebekeler için işbirliği protokolleri üzerinde durulmuş; Şekil 2.3'te görüldüğü gibi rölenin vericiye yakın olduğu durumda çöz-ilet yapının, rölenin alıcıya yakın olduğu durumda ise sıkıştır-ilet yapının eniyi olduğu gözlenmiştir.

[15] ve [16]'daki çalışmalarda Sendonaris ve diğ. işbirlikli sistemlerin daha yüksek iletim hızları sağladıklarını ve kanaldaki zayıflatmalara daha az hassasiyet gösterdiklerini ispatlamışlardır.



Şekil 2.3 : Röle kaynağa yakın ise DF, hedefe yakın ise CF tercih edilmektedir.

Laneman ve Wornell [17]'de çöz-ilet ve yükselt-ilet yöntemleri kullanıldığında işbirlikli sistemlerin farklı röle çalışma prensipleri için servis kesilme olasılıklarını incelemiş ve ortogonal işbirlikli protokollerin tam uzay çeşitlemesi sağladıklarını göstermişlerdir. [18]'de ise uzay-zaman kodlamalı işbirlikli çeşitleme algoritmaları geliştirmişlerdir. Alıcıda, gönderilen işareti sezme açısından, [13] ve [19]'daki çalışmalar işbirlikli sistemler için en büyük olabilirlikli sezme işlemini önermiş ve analiz etmişlerdir. Ayrıca işbirlikli sistemlerin ortalama sembol hata olasılıkları, yükselt-ilet yöntemi için [20-23]'te ve çöz-ilet yöntemi için [19]'da elde edilmiştir.

[24]'te ise yarı-statik ve Rayleigh sönümleme durumlarında verici işbirliği (transmitter cooperation-rölelerin vericiye yakın olduğu yapı) ve alıcı işbirliğinin (receiver cooperation -rölelerin alıcıya yakın olduğu durum) kanal durum bilgisi ve güç tahsisi bazında hangi durumlarda tercih edilir oldukları incelenmiştir. Yarı-statik kanallarda ve vericide tam kanal durum bilgisi bulunduğunda verici işbirliğinin tercih edilir olduğu, vericide kanal durum bilgisi olmadığında ise gücün, işbirliği yapan birimler arasında optimum paylaştırılması halinde alıcı işbirliğinin eniyi olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca Rayleigh sönümlemeli kanallarda, yüksek SNR'da eşit güç tahsisi durumunda çöz-ilet verici işbirliğinin, optimum güç tahsisi durumunda ise sıkıştır-ilet alıcı işbirliğinin tercih edilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

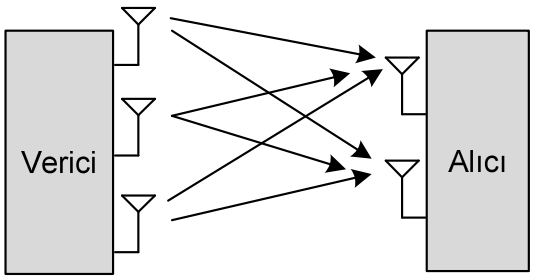
2.2 Röle Kanallarda Güç Tahsisi ve Rölelerde Ağırlıklandırma

Vericide tam veya kısmi kanal durum bilgisinin olması çok antenli bir sistemin başarımını önemli ölçüde etkilemektedir. Tam kanal bilgisi durumu alıcıdan vericiye sınırsız geribesleme gerektirdiği için gerçekçi bir çözüm değildir. Bu nedenle birçok çalışma vericide kısmi kanal bilgisi olma durumunu ele almıştır. Kısmi kanal bilgisi kullanarak ön-kodlayıcılar tasarlanmış veya verici antenlere eniyi güç tahsisi gerçeklenmiştir. Ön-kodlamada, iletilen işaret, sönümleme etkisini yok etmek için kompleks bir katsayı ile ağırlıklandırılırken, güç tahsisinde iletilen işaret gerçel bir sayı ile ağırlıklandırılıp gücü kontrol edilmektedir. Örneğin Narula ve diğ. [25] vericide gürültülü veya kısmi kanal durum bilgisi olması durumunda ortalama işaret gürültü oranını ve karşılıklı bilgiyi arttırmayı incelemişlerdir. [26] ve [27]'de ise kanalın ortalama ve/veya kovaryans matrislerinin vericide bilindiği durumda eniyi ön-kodlayıcılar tasarlanmıştır.

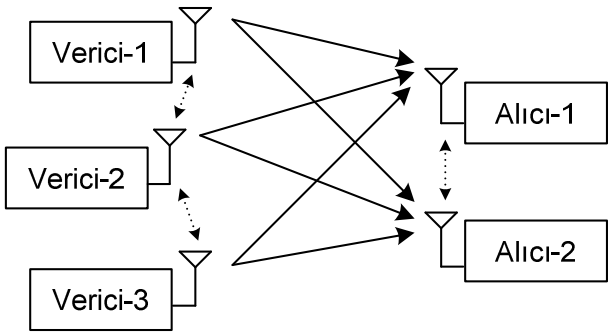
İşbirlikli sistemler de dağılmış çoklu antenli sistemler olarak bilindiğine göre, kanal durum bilgisinin kullanımının başarımı oldukça arttıracağı açıktır. Hammerström ve diğ. [28], rölelerde tam kanal durum bilgisi olma durumunda röle ön-kodlayıcıları tasarlamışlardır. Fakat röle ön-kodlayıcıları ve alıcıda kod çözücüyü birlikte optimize etmemişlerdir. Rölelerde kısmi kanal bilgisi olması durumunda ise yazarlar iki röle ön-kodlayıcısı tasarlamışlar fakat hedefteki kod çözücüyü optimize etmemişlerdir. [29]'da Wittneben ve Rankov röleler arasında, kanallar hakkında bilgi alışverişi olmadığı durumda röleler için güç tahsisi kriteri belirlemişlerdir, fakat önerilen yapı optimize edilmemiştir. [30] ve [31]'de ise sistemde 1 röle olduğu durumda, kısmi kanal bilgisi varsayımı altında röle ve kaynak arasında optimum güç tahsisi incelenmiştir. Çöz-ilet yöntemi için optimum güç tahsis yöntemi [32]'de verilmiştir. [33]'te yükselt-ilet yöntemi için değişen röle sayılarına uygun ve kanal durum bilgilerinin hedefte ve rölelerdeki durumuna göre hedefteki işaret gürültü oranını en büyükleyen optimum röle ön-kodlayıcısı ve hedefte optimum kod çözücü tasarlanmıştır.

3. İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEME

Çok yollu sönümleme, kablosuz iletişim sistemlerinin hızını ve güvenilirliğini etkileyen en önemli faktördür. Uzay çeşitlemesi, tek antenli terminaller arasındaki iletişimde bu sönümlemenin etkisini azaltamamaktadır. Fakat tasarsız ağ yapılarında, Şekil 3.1(b)'de de görüleceği üzere, bir alandaki tek antenli terminaller, birbirleriyle işbirliği içerisinde çalışarak sanal (virtual) çoklu anten kaynağı oluşturur ve uzay çeşitlemesi etkisini yakalarlar. İşbirliğinden kasıt, ağ içerisindeki terminallerin hem kendi işaretlerini hem de işbirliği içerinde oldukları terminallerin işaretlerini röle görevi görerek iletmeleridir. Şekil 3.1(a)'daki MIMO yapı ile elde edilen uzay çeşitlemesi, Şekil 3.1(b)'deki her bir terminalinde 1 anten bulunan işbirlikli sistem ile de elde edilebilmektedir.



Şekil 3.1(a) : Temel MIMO yapısı



Şekil 3.1(b) : İşbirlikli iletişim ile oluşan sanal MIMO yapısı

Terminallerin genelde yarı çift yönlü çalıştıkları ve dolayısıyla aynı anda hem iletim hem alım yapamadıkları varsayılır. Çünkü telsiz kanalda işaretler zayıflamaya maruz

kalırlar ve verici-alıcı devreler arasındaki izolasyon yetersiz olabilir. Bu nedenle de bir terminalin iletim gücü alım gücünün çok üzerinde kalır ve terminal diğer terminallerden aldığı işareti bastırır. Bu durumdan kurtulmak için her kanal ortogonal alt kanallara bölünerek yarı çift yönlü çalışma sağlanır. İşbirliğinin çeşitli protokolleri mevcuttur.

3.1 İşbirlikli Çeşitleme Protokolleri

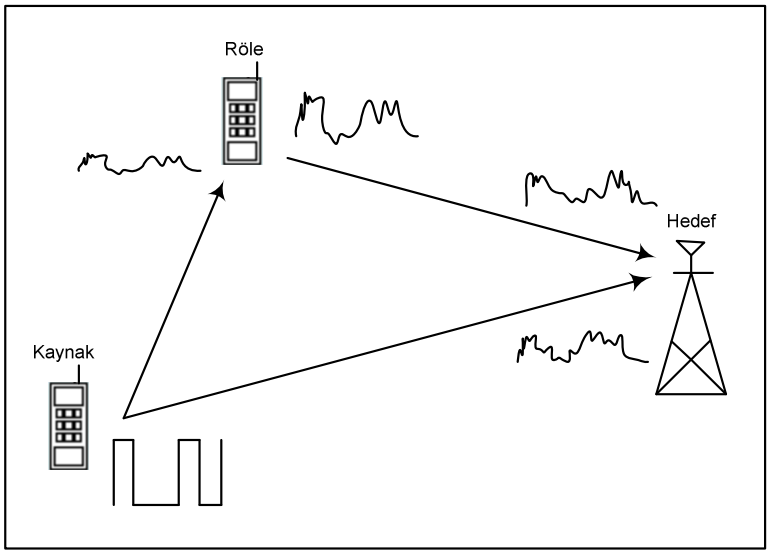
Bu bölümde basit işbirlikli çeşitleme protokolleri tanıtılacaktır. Bunlar sabit (fixed), seçimli (selection) ve artımlı (incremental) aktarmalardır.

3.1.1 Sabit Aktarma (Fixed Relaying)

Kuvvetlendir-İlet ve Çöz-İlet protokollerini içermektedir.

3.1.1.1 Kuvvetlendir-İlet Protokolü

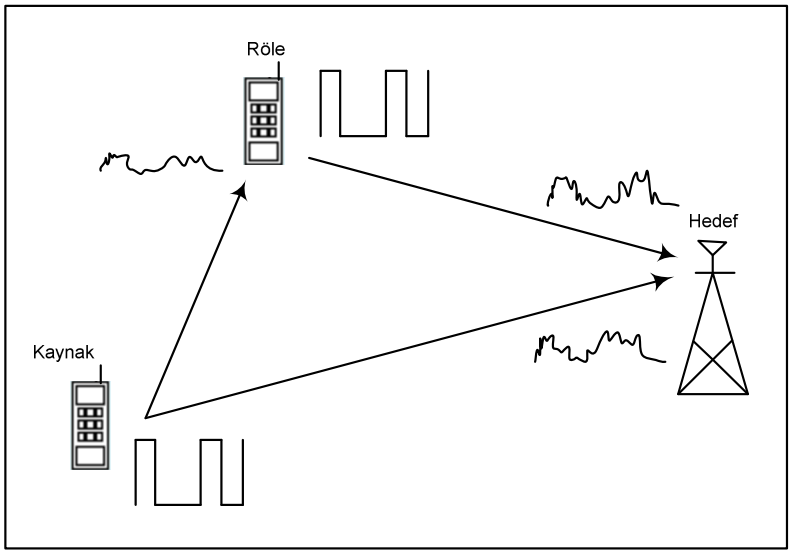
Bu protokolde röle, kaynaktan aldığı işareti belli bir güç kısıtı altında kuvvetlendirerek gönderir. Kuvvetlendirme katsayısı (kazancı) kaynak ve röle arasındaki kanala bağlıdır. Bu yapıda kaynak tarafından iletilmek istenen sembolün röle üzerinden de iletimi gerçekleştirilerek sanki iki ayrı vericiden iletim yapılmış ve tekrarlamalı kodlama (repetition-coding) gerçeklenmiş gibi düşünülebilir. Fakat burada önemsenmesi gereken husus, rölenin kendi alıcı gürültüsünü de güçlendirmesidir [17]. Şekil 3.2'de kuvvetlendir-ilet yöntemi ile çalışan bir sistem verilmiştir.



Şekil 3.2 : Kuvvetlendir-İlet yöntemi

3.1.1.2 Çöz-İlet Protokolü

Bu protokolde röle, kaynaktan aldığı işareti çözer ve kestirdiği işareti hedefe yollar [17]. Dolayısıyla bu protokolde kaynak-röle arası kanal önem kazanır. Rölenin kötü bir kestirim yapması sistem başarımını önemli ölçüde etkiler. Şekil 3.3'te çöz-ilet yöntemi ile çalışan bir sistem verilmiştir.



Şekil 3.3 : Çöz-İlet yöntemi

3.1.2 Kodlamalı İşbirliği

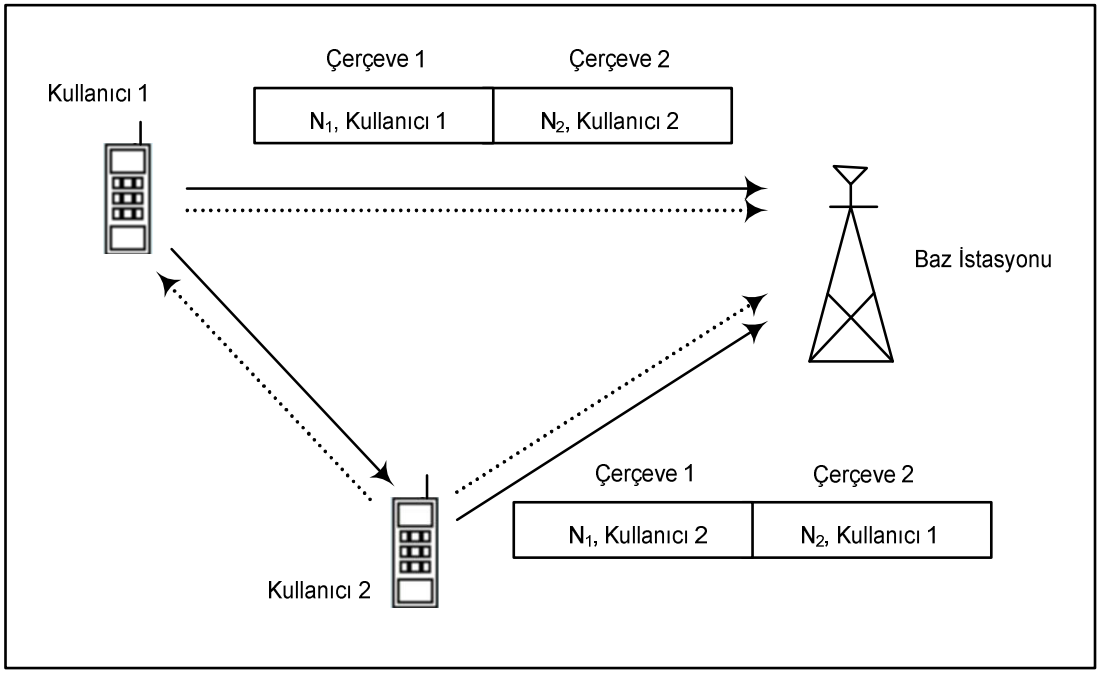
Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi, işbirlikli iletişimi kanal kodlamasıyla birleştiren bir yöntemdir. Bu çeşitleme türü, her kullanıcıya ait kod sözcüğünün farklı bölümlerinin, iki bağımsız sönümleme yolundan gönderilmesi ilkesine dayanır. Her bir kullanıcı ortağıyla artan bir bit miktarı ile işbirliği yapmaya çalışır. İşbirliği mümkün olmadığı takdirde kullanıcılar otomatik olarak işbirliksiz duruma geçerler. Bütün bunlar kod tasarımı ile otomatik olarak kontrol edilir ve bu sayede kullanıcılar arası bir geribeslemeye ihtiyaç duyulmaz.

Kullanıcılar, CRC (çevrimsel artıklık) kodunu da bulunduran bilgi bitlerinden elde ettikleri kodlanmış bitlerini bloklara bölerler. Her bir kullanıcı kodlanmış bitlerini *N1* ve *N2* sayıda bitten oluşan iki bölüme ayırır. Bu işlemin nasıl yapıldığını anlamak için şu örneği düşünelim: kaynak kod sözcüğü toplam *N1 + N2* bitten oluşsun. Bu kod sözcüğünün büyüklüğünü, örneğin silme yardımıyla *N1*'e düşürerek ilk kısmı elde ederiz. Geriye *N2* bit kalır.

Bölmeleme işlemi bundan başka biçimlerde de yapılabilir. Bu örneğin amacı sadece kodlamalı işbirliği çeşitlemesine ait bir fikir vermektir.

Veri iletim süresi *N1* ve *N2* bitlerinin sürelerine bölünür. Bu zaman aralıklarına çerçeve (frame) denir. Birinci çerçevede, her bir kullanıcı *N1* bit kod bölmesinden oluşan kod sözcüklerini iletirler. Bütün kullanıcılar aynı zamanda ortağının kod sözcüklerinin çözme işlemini yaparlar. İşlemin başarısı CRC koduyla kontrol edilir. Eğer bu işlem başarılı bir şekilde yapılırsa, ikinci çerçevede kullanıcı partnerinin *N2* bitten oluşan kod bölmesini iletir. Aksi gerçekleşmiş olursa, kullanıcı *N2* bitten oluşan kendi ikinci bölmesini iletir. Dolayısıyla, her bir kullanıcı her zaman iki çerçeve süresi boyunca toplam *N1+ N2* bit iletir. *N2/ N* oranı, işbirliği düzeyini gösterir.

Şekil 3.4'te kodlamalı işbirliği çeşitlemesi gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi

3.1.3 Seçimli Aktarma (Selection Relaying)

Yapılan çalışmaların gösterdiği üzere çöz-ilet kodlama yöntemi kaynak ve röle arasındaki direkt iletime çok bağlıdır. Bununla birlikte, kaynak ve röleler arasındaki yolların sönümleme katsayıları belli alıcılar tarafından bilinebilir ve bu bilgi kullanılarak iletim kanala göre şekillendirilebilir. Bu fikre dayanan seçimli

aktarmada, $a_{s,r}$, $a_{s,d}$, $a_{r,d}$ sırasıyla kaynak-röle, kaynak-hedef ve röle-hedef arası kanal katsayılarını belirtmek üzere, $\left|a_{s,r}\right|^2$ belli bir eşik değerin altında ise röle kaynak ile işbirliği yapmaz ve kaynak tekrarlamalı veya daha güçlü kodlar kullanarak iletimine devam eder. $\left|a_{s,r}\right|^2$ eşik değerin üzerinde ise işbirliği gerçekleşir ve işbirlikli çeşitleme yöntemlerinden biri kullanılarak çeşitleme kazancı sağlanır.

Seçimli işbirliği çeşitleme sağlamaktadır, çünkü bilginin kaybolması için iki yolun birden kötü olması gerekmektedir. Örneğin $\left|a_{s,r}\right|^2$ küçük iken $\left|a_{s,d}\right|^2$ de küçük veya $\left|a_{s,r}\right|^2$ büyük iken hem $\left|a_{s,d}\right|^2$ hem de $\left|a_{r,d}\right|^2$ küçük olmalıdır [17].

3.1.4 Artımlı Aktarma (Incremental Relaying)

Görüldüğü üzere, sabit ve seçimli aktarma kanalı etkin bir şekilde kullanamamaktadır [17]. Özellikle yüksek iletim hızlarında bu etkisini daha çok göstermektedir çünkü röleler sürekli aktarma yapmaktadırlar.

Artımlı aktarmada ise hedef terminalden sınırlı geribesleme ile, örneğin bir bit ile, kaynak-hedef arası direkt iletimin başarılı veya başarısız olduğuna dair bir bilgi kaynak ve röleye yayınlanır. Bu bilginin en azından röle tarafından güvenilir bir şekilde sezildiği varsayılır. Rölede güçlü sezme yöntemleri kullanılır. Kaynak-hedef arasındaki yolun SNR'ı yeterince yüksekse, geribesleme ile başarı biti yayınlanır ve röle bu durumda hiçbir şey yapmaz. Eğer SNR başarılı bir iletim için düşükse, geribesleme ile rölenin kaynaktan aldığı mesajı kuvvetlendirip iletmesi istenir. Bir sonraki adımda hedef, röle ve kaynaktan aldığı bilgiyi birleştirir. Sonuç olarak, bu yöntemde sabit ve seçimli aktarmaya göre kanal oldukça etkin bir şekilde kullanılmış olunur, spektral verimlilik artar çünkü iletimin tekrarlanması çok nadir yapılır. Artımlı çöz-ilet yöntemi de mevcuttur fakat analizi karmaşıktır, ayrıca artımlı kuvvetlendir-ilet yönteminden daha kötü başarım sergilemektedir [17].

3.2 İşbirlikli İletişimde Sistem Modeli

Şekil 3.5'te iki vericili - iki alıcılı işbirlikli kanal modeli ve bu modele ait üç özel durum verilmiştir. Terminal 1 (T1)'deki verici Terminal 3 (T3)'teki alıcıya $w_1 \in \{1,...,M_1\}$ mesajını, Terminal 2 (T2)'deki verici Terminal 4 (T4)'teki alıcıya

$w_2 \in \{1,...,M_2\}$ mesajını iletmek istemektedir. Genel olarak Terminal i ($i=1,2,3,4$), N sembolden oluşan $x_i[n]$, $n=1,2,...,N$ bloğunu belli bir güç kısıtı ($(1/N)\sum_{n=1}^{N}|x_i[n]|^2 \le P_i$) altında iletmektedir. Bu durumda Terminal i'deki iletim hızı $R_i = (\log M_i / N)$ olmaktadır. Terminal i ve j arasındaki kanal Rayleigh düz sönümlemelidir, kanal katsayısı h_{ij} ile belirtilmektedir ve kanal katsayıları istatistiksel olarak bağımsız, kompleks, sıfır ortalamalı Gauss rastlantı değişkenleridir. Terminal 1, 2, 3 ve 4'te alınan işaretler sırasıyla (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) ile verilmektedir.

$$y_1[n] = h_{12}x_2[n] + z_1[n] \tag{3.1}$$

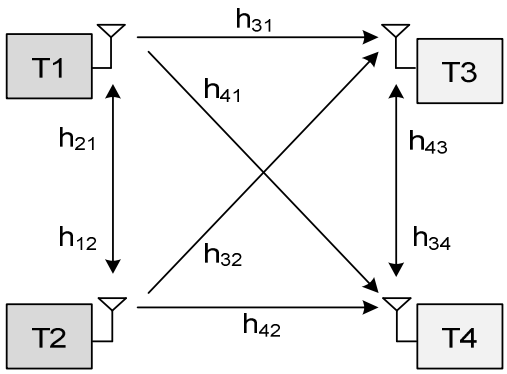
$$y_2[n] = h_{21}x_1[n] + z_2[n] \tag{3.2}$$

$$y_3[n] = h_{31}x_1[n] + h_{32}x_2[n] + h_{34}x_4[n] + z_3[n] \tag{3.3}$$

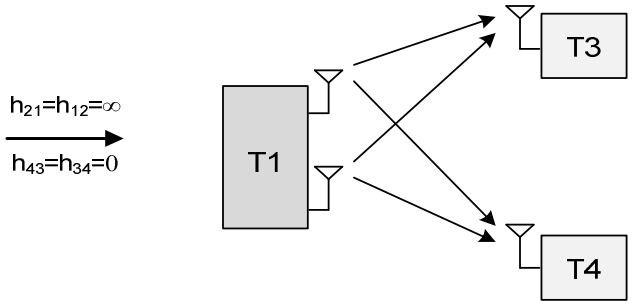
$$y_4[n] = h_{41}x_1[n] + h_{42}x_2[n] + h_{43}x_4[n] + z_4[n] \tag{3.4}$$

ile verilmektedir. Burada $z_i, i=1,...,4$ dairesel simetrik, kompleks, sıfır ortalamalı toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü göstermektedir. Notasyonları basitleştirmek için, gürültüler birim güçlü ve $h_{31} = h_{42} = 1$ alınmıştır.

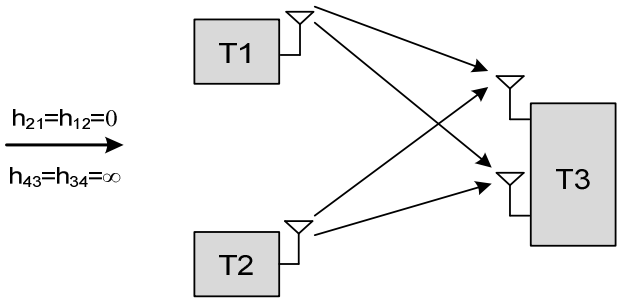
Verici işbirlikli kanal için, $h_{43} = h_{34} = 0$, alıcı işbirlikli kanal için ise $h_{21} = h_{12} = 0$ olmaktadır. İşbirliği iyi ise, verici işbirliği iki antenli MIMO yayın kanalına ($h_{21}, h_{12} \to \infty$), alıcı işbirliği ise iki alıcı antenin bulunduğu iki kullanılıcı çoklu erişim (multiple access) kanalına ($h_{43}, h_{34} \to \infty$) indirgenmektedir. Hem verici hem de alıcı işbirliğinin yüksek olduğu durum ($h_{21}, h_{12}, h_{43}, h_{34} \to \infty$) da iki verici- iki alıcı antenli MIMO kanala eşdeğerdir. Diğer açıdan, işbirliği yok ise, örneğin $h_{21} = h_{12} = h_{43} = h_{34} = 0$ ise, kanal girişim kanalı olarak adlandırılır.



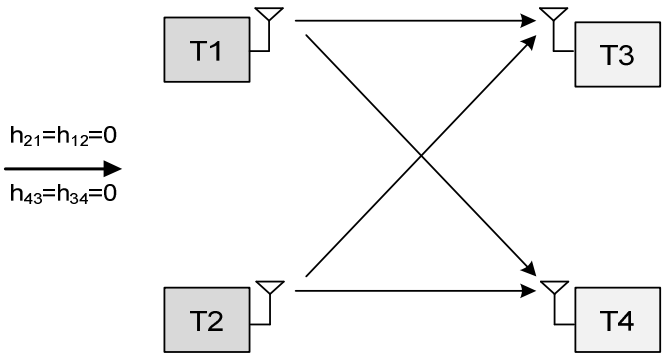
İki verici-iki alıcılı işbirlikli kanal modeli



İki vericili MIMO yayın kanalı



İki alıcılı çoklu erişim kanalı



Girişim kanalı

Şekil 3.5 : Üç özel durumda iki vericili - iki alıcılı işbirlikli kanal modeli

Teorik çalışmalar göstermiştir ki, iki verici iki alıcılı işbirlikli kanal, yüksek SNR bölgesinde, tam çoğullama kazancı olan 2'yi sağlamaz. Bu da her terminalde 1 anten kullanmaya karşılık ödenen bir bedel gibi görülebilir. Tam çoğullama kazancının sağlanabilmesi için verici/alıcı antenler arası sıkı bir koordinasyon gerekir. Bu da antenlerin bir araya yerleştirilmeleri ile mümkündür. Buna karşın, işbirlikli çeşitleme yüksek toplamsal hız (rate) kazançları sağlar. Bu kazançların sağlamasının ardında yan bilgi (side information) ile kodlama, örneğin Wiener-Ziv kodlaması, kirli kağıt (Dirty Paper) kodlaması yatmaktadır [34].

3.3 İşbirlikli Çeşitleme Yöntemleri İçin Servis Kesilme Davranışı

İki değişken ele alındığında, bu değişkenlerden birinin bilinmesinin diğeri hakkındaki belirsizliği ne derecede ortadan kaldırdığının ölçüsü karşılıklı bilgi olarak tanımlanmaktadır. I ile temsil edilen karşılıklı bilgi rastlantısal değişkenler olan sönümleme katsayılarının bir foksiyonudur ve rastlantısal bir değişkendir. Karşılıklı bilginin belli bir spektral verimliliğin (R : bit/sn/Hz) altında kalmasına ($I < R$**)** servis kesilme olayı, bu olayın olma olasılığına ($P(I < R)$) da servis kesilme olasılığı denir.

3.3.1 Direkt İletim

Kaynak ve hedef arasında birbirinden bağımsız, sıfır ortalamalı ve dairesel simetrik kompleks Gauss girişler tarafından oluşturulan maksimum ortalama karşılıklı bilgi (3.5) ile verilir [17].

$$I_D = \log(1 + SNR\left|a_{s,d}\right|^2) \tag{3.5}$$

Bu durumda R spektral verimliliği için, servis kesilme olayı (3.6) denkliği ile ifade edilir.

$$I_D < R \equiv \left|a_{s,d}\right|^2 < \frac{2^R - 1}{SNR} \tag{3.6}$$

Rayleigh sönümleme durumunda, $\left|a_{s,d}\right|^2$'nin $\sigma_{s,d}^{-2}$ ile üstel dağıldığı göz önüne alınarak servis kesilme olasılığı (3.7) ile verilir.

$$p_D^{out}(SNR,R)=\Pr\left[I_D<R\right]=\Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2<\frac{2^R-1}{SNR}\right]$$
$$=1-\exp\left(-\frac{2^R-1}{SNR\sigma_{s,d}^2}\right) \tag{3.7}$$
$$\approx\frac{1}{\sigma_{s,d}^2}\cdot\frac{2^R-1}{SNR}$$

3.3.2 Sabit Aktarma (Fixed Relaying)

3.3.2.1 Kuvvetlendir-İlet Protokolü

Kuvvetlendir-İlet protokolü, bir girişli - iki çıkışlı ve çıkışlarda farklı gürültü seviyelerine sahip kompleks Gauss gürültülü kanal oluşturmaktadır. Bu durumda, bir giriş - iki çıkış arasındaki maksimum ortalama karşılıklı bilgi (3.8) ile verilir [17].

$$I_{AF}=\frac{1}{2}\log\left(1+SNR\left|a_{s,d}\right|^2+f\left(SNR\left|a_{s,r}\right|^2,SNR\left|a_{r,d}\right|^2\right)\right) \tag{3.8}$$

Burada $f\left(x,y\right)$ (3.9) ile tanımlanmıştır.

$$f\left(x,y\right):=\frac{xy}{x+y+1} \tag{3.9}$$

Bu durumda servis kesilme olayı (3.10) denkliği ile ifade edilir.

$$I_{AF}<R\equiv\left|a_{s,d}\right|^2+\frac{1}{SNR}f\left(SNR\left|a_{s,r}\right|^2,SNR\left|a_{r,d}\right|^2\right)<\frac{2^{2R}-1}{SNR} \tag{3.10}$$

Servis kesilme olasılığı ise yüksek SNR'da (3.11) ile verilir.

$$p_{AF}^{out}\left(SNR,R\right)=\Pr\left[I_{AF}<R\right]$$
$$\approx\left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2}\frac{\sigma_{s,r}^2+\sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2\sigma_{r,d}^2}\right)\left(\frac{2^{2R}-1}{SNR}\right)^2 \tag{3.11}$$

3.3.2.2 Çöz-İlet Protokolü

Rölenin kaynaktan gelen işareti tam olarak çözdüğü varsayımı altında maksimum ortalama karşılıklı bilgi

$$I_{DF} = \frac{1}{2}\min\left\{\log\left(1+SNR\left|a_{s,r}\right|^2\right), \log\left(1+SNR\left|a_{s,d}\right|^2 + SNR\left|a_{r,d}\right|\right)\right\} \tag{3.12}$$

ile verilir [17]. (3.12)'de birinci terim rölenin, kaynağın mesajını çözebileceği maksimum hızı, ikinci terim ise hedefin, kaynak ve röle üzerinden gelen bilgiye dayanarak, kaynağın mesajını güvenilir olarak çözebileceği maksimum hızı belirtmektedir. Bu iki hızdan minimum olanı kaynağın mesajının, hem röle hem de hedef tarafından hatasız olarak çözüldüğü hızı verir. Bu durumda servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned} p_{DF}^{out}\left(SNR, R\right) &:= \Pr\left[I_{DF} < R\right] \\ &= \Pr\left[\left|a_{s,r}\right|^2 < g\left(SNR\right)\right] \\ &\quad + \Pr\left[\left|a_{s,r}\right|^2 \geq g\left(SNR\right)\right]\Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2 + \left|a_{r,d}\right|^2 < g\left(SNR\right)\right] \end{aligned} \tag{3.13}$$

ile ifade edilir. Burada $g\left(SNR\right) = \left[2^{2R} - 1\right] / SNR$ ile verilmektedir. Servis kesilme olasılığının yüksek SNR $(SNR \to \infty)$ davranışı

$$p_{DF}^{out}\left(SNR, R\right) \approx \frac{1}{\sigma_{s,r}^2} \cdot \frac{2^{2R} - 1}{SNR} \tag{3.14}$$

ile verilir.

Servis kesilme olasılığındaki $1/SNR$ terimi, yüksek SNR için çöz-ilet yönteminin çeşitleme kazancı sağlamadığını göstermektedir. Çünkü rölenin kaynaktan aldığı mesajı tam olarak çözmesi gerekliliği, başarımı kaynak-röle arası kanala bağlı kılarak sınırlamaktadır.

3.3.3 Seçimli Aktarma (Selection Relaying)

Klasik röle kanalının ve ilgili kanalların kapasiteleri açık birer problem olduğundan kuvvetlendir-ilet veya çöz-ilet protokollerinin eniyi olduğu söylenememektedir. Bununla birlikte, seçimli aktarma yöntemi işbirliği yapan terminallerin tam uzay çeşitlemesi sağlamasını ve çöz-ilet yönteminin kısıtlarının aşılmasını sağlar. Seçimli aktarma için maksimum ortalama karşılıklı bilgi (3.15) ile ifade edilir [17].

$$I_{SDF}=\begin{cases}\frac{1}{2}\log\left(1+2SNR\left|a_{s,d}\right|^2\right), & \left|a_{s,r}\right|^2<g\left(SNR\right)\\ \frac{1}{2}\log\left(1+SNR\left[\left|a_{s,d}\right|^2+\left|a_{r,d}\right|^2\right]\right), & \left|a_{s,r}\right|^2\geq g\left(SNR\right)\end{cases} \tag{3.15}$$

(3.15)'te 1. terim rölenin çözme işlemini yapamadığı ve kaynağın kendi mesajını tekrar hedefe gönderdiği durumda, maksimum ortalama karşılıklı bilgiyi vermektedir. Kaynaktan hedefe tekrarlamalı kodlamadan (repetition coding) dolayı, SNR'ın önüne 2 çarpanı gelmiştir. 2. terim ise rölenin kaynaktan gelen mesajı çözüp aktarabildiği durumda maksimum ortalama karşılıklı bilgidir.

Bu durumda servis kesilme olayı,

$$\begin{aligned}I_{SDF}<R\equiv&\left(\left\{\left|a_{s,r}\right|^2<g(SNR)\right\}\cap\left\{2\left|a_{s,d}\right|^2<g(SNR)\right\}\right)\\&\cup\left(\left\{\left|a_{s,r}\right|^2\geq g(SNR)\right\}\cap\left\{\left|a_{s,d}\right|^2+\left|a_{r,d}\right|^2<g(SNR)\right\}\right)\end{aligned} \tag{3.16}$$

ile verilir. Bu protokolün direkt iletimden kötü olmadığı fakat bant verimliliği açısından da iyi olmadığı gözlemlenmiştir. Servis kesilme olasılığı ise toplam şeklinde,

$$\begin{aligned}P_{SDF}^{out}\left(SNR,R\right)&=\Pr\left[I_{SDF}<R\right]\\&=\Pr\left[\left|a_{s,r}\right|^2<g(SNR)\right]\Pr\left[2\left|a_{s,d}\right|^2<g(SNR)\right]\\&+\Pr\left[\left|a_{s,r}\right|^2\geq g(SNR)\right]\Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2+\left|a_{r,d}\right|^2<g(SNR)\right]\end{aligned} \tag{3.17}$$

ile verilebilmektedir. Yüksek SNR davranışı (SNR→∞) incelendiğinde, (3.18)'den görüleceği üzere, seçimli çöz-ilet protokolünün yüksek SNR davranışının sadece kuvvetlendir-ilet protokolünün kullanıldığı sisteminki ile aynı olduğu görülmektedir.

$$
\begin{aligned}
&\frac{1}{g^2(SNR)} P_{SDF}^{out}\left(SNR, R\right) \\
&= \left(\underbrace{\frac{1}{g(SNR)} \Pr\left[\left|a_{s,r}\right|^2 < g(SNR) \right]}_{\to 1/\sigma_{s,r}^2} \right) \left(\underbrace{\frac{1}{g(SNR)} \Pr\left[2\left|a_{s,d}\right|^2 < g(SNR) \right]}_{\to 1/(2\sigma_{s,d}^2)} \right) \\
&+ \left(\underbrace{\Pr\left[\left|a_{s,r}\right|^2 \geq g(SNR) \right]}_{\to 1} \right) \left(\underbrace{\frac{1}{g^2(SNR)} \Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2 + \left|a_{r,d}\right|^2 < g(SNR) \right]}_{\to 1/(2\sigma_{s,d}^2\sigma_{r,d}^2)} \right) \\
&\to \left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2} \frac{\sigma_{s,r}^2 + \sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2 \sigma_{r,d}^2} \right)
\end{aligned}
\tag{3.18}
$$

3.3.4 Artımlı Aktarma (Incremental Relaying)

Artımlı aktarma yönteminde servis kesilme olayı analizleri, spektral verimlilik çok değişken olduğundan karmaşıktır. Kaynak-hedef arası iletim başarılı olduğunda protokolün verimliliği R iken, rölelerin de sisteme dahil olup kaynak bilgisini tekrarladığı durumda verimlilik $R/2$ olmaktadır. Dolayısıyla servis kesilme olasılığı, SNR ve beklenen verimliliğin ($\overline{R}$) bir fonksiyonu olmaktadır.

Artımlı kuvvetlendir-ilet protokolü için servis kesilme olasılığı,

$$
\begin{aligned}
P_{IAF}^{out}\left(SNR, R\right) &= \Pr\left[I_D < R\right] \Pr\left[I_{AF} < R/2 \middle| I_D < R \right] = \Pr\left[I_{AF} < R/2 \right] \\
&= \Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2 + \frac{1}{SNR} f\left(SNR\left|a_{s,r}\right|^2, SNR\left|a_{r,d}\right|^2 \right) < g(SNR) \right]
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

ile verilir [17].

(3.19)'da ikinci eşitlikten görüleceği üzere, direkt iletim ve kuvvetlendir-ilet protokolünün servis kesilme olasılıklarının kesişim noktası, kuvvetlendir-ilet protokolünün yarı verimlilik değerindeki servis kesilme olasılığına eşittir.

Beklenen spektral verimlilik ise,

$$\begin{aligned}\overline{R} &= R\,\Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2 \geq \frac{2^R-1}{SNR}\right] + \frac{R}{2}\Pr\left[\left|a_{s,d}\right|^2 < \frac{2^R-1}{SNR}\right] \\ &= \mathrm{Re}\,xp\left(-\frac{2^R-1}{SNR}\right) + \frac{R}{2}\left[1-\mathrm{e}\,xp\left(-\frac{2^R-1}{SNR}\right)\right] \\ &= \frac{R}{2}\left[1+\mathrm{e}\,xp\left(-\frac{2^R-1}{SNR}\right)\right] \\ &= h_{SNR}(R)\end{aligned} \tag{3.20}$$

ile bulunur. Burada çözülmesi gereken problem, verilen bir $\overline{R}$ spektral verimliliği için R verimliliğinin neye eşit olacağıdır. Belli bir $\overline{R}$ verimliliğini, SNR değerine bağlı olarak farklı birçok R değerinden elde etmek mümkündür. Dolayısıyla $h_{SNR}^{-1}(\overline{R})$'nin birçok değeri olabileceğinden servis kesilme olasılığının gerektirdiği gibi minimum değer ($\tilde{h}_{SNR}^{-1}(\overline{R}) = \min h_{SNR}^{-1}(\overline{R})$) kullanılmalıdır. Bu durumda yüksek SNR bölgesinde servis kesilme olasılığı,

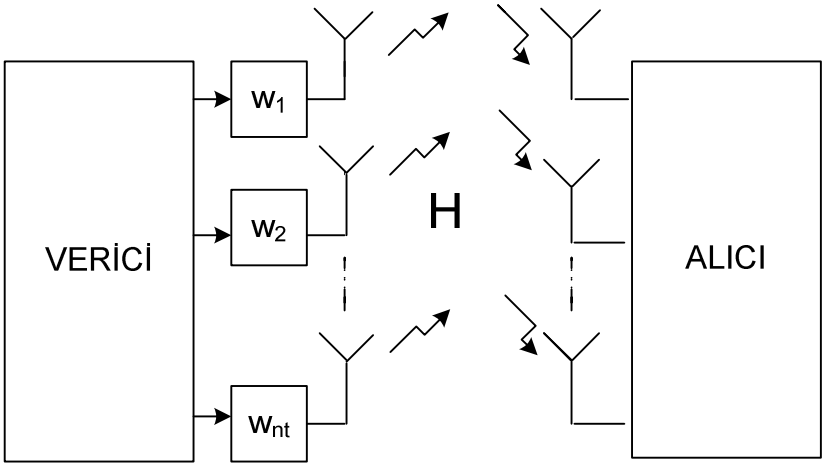
$$p_{IAF}^{out}\left(SNR, \tilde{h}_{SNR}^{-1}(\overline{R})\right) \approx \left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2}\frac{\sigma_{s,r}^2+\sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2\sigma_{r,d}^2}\right)\left(\frac{2^{\overline{R}}-1}{SNR}\right)^2 \tag{3.21}$$

ile verilir.

4. MIMO SİSTEMLERDE HUZME OLUŞTURMA

Genel olarak çok girişli - çok çıkışlı bir kanal durumunda, vericinin sahip olduğu kanal bilgisi, verici antenlerden gönderilen işaretlerin ağırlıklandırılması ve dolayısıyla kanala uyumlu bir şekilde gönderilmesi için kullanılabilmektedir. Bu yönteme huzme oluşturma adı verilmektedir [35].

4.1 SNR'ı Enbüyükleyecek Huzme Oluşturma



Şekil 4.1 : Çok verici-çok alıcılı huzme oluşturma uygulanan sistem modeli

Bu amaçla, Şekil 4.1'den de görüleceği üzere, iletimi yapılacak olan s simgesi,

$$\mathbf{w} = \left[w_1 \; w_2 \cdots w_{n_t} \right]^T \tag{4.1}$$

biçiminde iletim öncesi belirlenecek bir $\mathbf{w}$ ağırlık vektörü ile çarpılmaktadır:

$$\mathbf{x} = \mathbf{w}s \, . \tag{4.2}$$

(4.1)'de n_t verici anten sayısını belirtmektedir. $\mathbf{z}$, N_o varyanslı gürültü vektörü, $\mathbf{H}$ kanal matrisi olmak üzere alınan işaret (4.3) ile ifade edilir.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{w}s + \mathbf{z} \tag{4.3}$$

Şu halde işaret-gürültü oranı

$$SNR = \frac{E\left\{|s|^2\right\}}{N_o}\|\mathbf{Hw}\|^2 \tag{4.4}$$

ile verilmektedir. Vericideki kanal bilgisi *SNR*'ı arttırmak amacıyla kullanıldığında eniyi huzme oluşturma katsayıları ($\mathbf{w}$ ağırlık vektörü), işaret gürültü oranındaki $\|\mathbf{Hw}\|^2$ ifadesi en büyüklenerek bulunur. Bu işlemin anlamlı olabilmesi için toplam iletilen gücün sınırlandırılması gerekmektedir. Aksi takdirde $\mathbf{w}$ vektörü olabildiğince büyük tutularak $\|\mathbf{Hw}\|^2$ ifadesi istenilen büyüklüğe çıkarılabilir, böylelikle istenilen herhangi bir *SNR* değerine ulaşılabilir.

SNR'ı en büyüklemek için $\mathbf{w}$ vektörünün normunu γ^2 ile sınırladığımızda, $E\{|s|^2\} = 1$ varsayımıyla, toplam iletilen güç de γ^2 ile sınırlanmış olmaktadır:

$$\|\mathbf{w}\|^2 \le \gamma^2 . \tag{4.5}$$

Bu durumda *SNR*'ı en büyükleme problemi

$$\max_{\mathbf{w}} \quad \|\mathbf{Hw}\|^2 \tag{4.6}$$

ile ifade edilir, öyle ki $\|\mathbf{w}\|^2 \le \gamma^2$ koşulu sağlansın [35]. Bu durumda, $\mathbf{R}_{n_t \times n_t} = \mathbf{H^H H}$ olmak üzere ve $\lambda_{\max}$ bir matrise ait maksimum özdeğeri gösterdiğinde,

$$\frac{\|\mathbf{Hw}\|^2}{\|\mathbf{w}\|^2} = \frac{\mathbf{w^H H^H H w}}{\mathbf{w^H w}} \le \lambda_{\max}(\mathbf{R}) \tag{4.7}$$

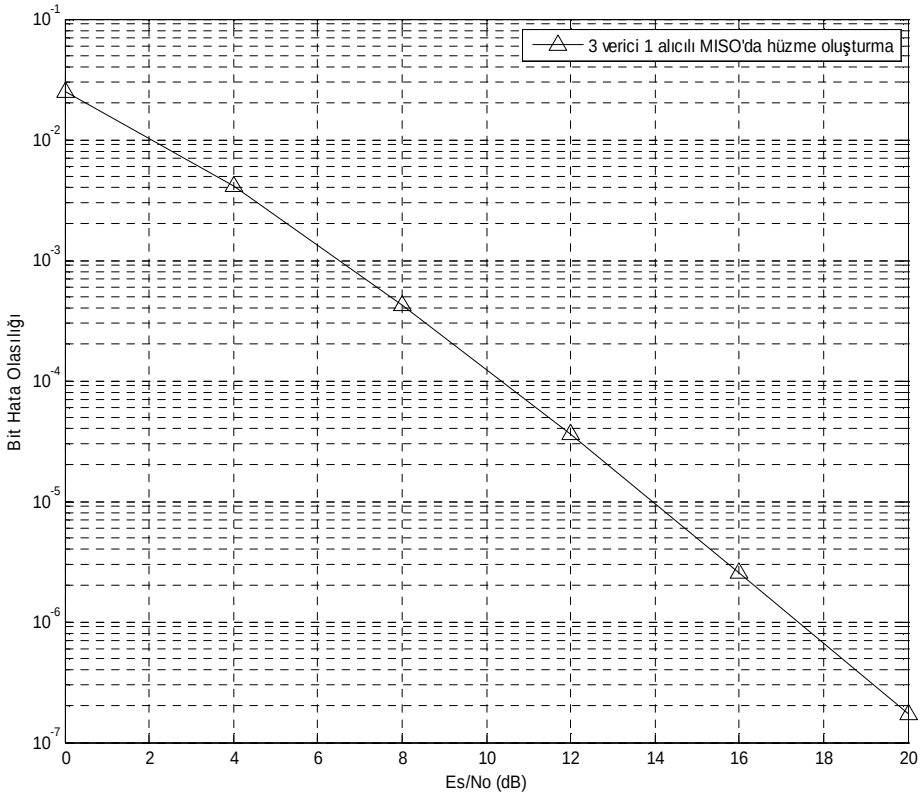
eşitsizliği geçerli olmaktadır. $\mathbf{v_{max}}$, $\lambda_{\max}$'a ilişkin özdeğer vektörünü göstermek üzere (4.7)'de eşitlik durumu sadece $\mathbf{w}$'nin $\mathbf{v_{max}}$ ile orantılı olduğu durum için geçerli olmaktadır. Şu halde *SNR*'ı en büyükleyen optimum ağırlık vektörü

$$\mathbf{w}_{optimum} = \gamma \frac{\mathbf{v_{max}}}{\|\mathbf{v_{max}}\|} \tag{4.8}$$

ile bulunabilmektedir. Böylelikle $\left\|\mathbf{w}_{optimum}\right\|^2 = \gamma^2$ sağlanmış olmaktadır. İşaret gürültü oranı ise

$$SNR = \frac{\gamma^2}{N_o}\lambda_{\max}(\mathbf{H}^{\mathbf{H}}\mathbf{H})E\left\{|s|^2\right\} \tag{4.9}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 4.2'de 3 verici-1 alıcı bulunduran çok vericili-bir alıcılı (MISO) sisteme ait hata başarım sonucu verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere SNR'ı eniyilemek üzere uygulanan bu huzme oluşturma yöntemiyle aynı zamanda tam çeşitleme derecesi olan 3'e ulaşılabilmektedir. Burada çeşitleme derecesi, bit hata olasılığı eğrisinin eğimi ile tanımlanmaktadır.



Şekil 4.2 : 3 vericili-1 alıcılı huzme oluşturma uygulanan MISO sisteme ait hata başarım sonucu

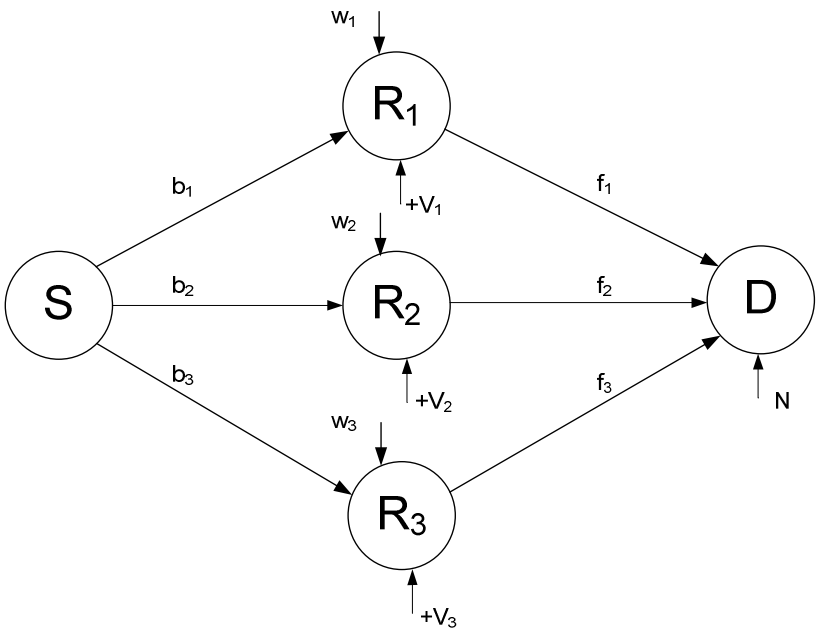
5. İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMEDE HUZME OLUŞTURMA

5.1 Röleli Kanallarda Çeşitlemenin Arttırılması: Huzme Oluşturma ve Röle Seçimi Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, sönümlemeli röle kanalları için çeşitli huzme oluşturma ve röle seçme yapılarının başarımları incelenmiştir. AF ve DF yöntemlerine gore çalışan röleler göz önüne alınmış, her iki yöntem için de çeşitleme derecesini arttırmayı hedefleyen huzme oluşturma katsayıları (röle ön-kodlayıcıları) önerilmiş ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. AF yöntemi için sert karar (hard decision) esas alınarak, röle seçme kriterlerine göre karar verilen en kötü röleyi iptal etmek veya en iyi röleyi seçmek iyi başarım getirmezken, yumuşak karar (soft decision) esas alınarak huzme oluşturma yöntemiyle röleler arasında güç paylaşımı yapmak önerilen sistemler arasında en iyi başarımı sağlamaktadır. DF yönteminde ise AF'nin aksine kötü röle veya röleleri iptal etmek iyi başarımlar sağlamaktadır. Her iki yöntemde de bit hata olasılığı bazında ileriki bölümlerde açıklanacak olan "Bletsas Algoritması" na [36] üstünlük sağlanmıştır.

5.1.1 Sistem Modeli

Şekil 5.1'de bu çalışmada önerilen sistemin üç röleli versiyonu görülmektedir. Duruğumsu Rayleigh sönümlemeli kanal varsayımı altında, n röle sayısı olmak üzere ve i indisi ($i = 1, 2, ..., n$) röle numarasını belirttiğinde, kaynak ile i. röle arası kanal, diğer bir ifadeyle ara kanal sönümleme katsayısı b_i, i. röle ile hedef arası kanal sönümleme katsayısı f_i, rölelerde kullanılan huzme oluşturma katsayıları w_i, rölelerde eklenen 0 ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss gürültüler V_i, hedefte eklenen 0 ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss gürültü ise N ile adlandırılmıştır.



Şekil 5.1 : Bu tez çalışmasında kullanılan sistem modeli

$(.)^*$, $(.)^T$ ve $(.)^H$ ile sırasıyla eşlenik, evrik ve Hermit alma belirtilmekte, $\mathbf{a}\cdot\mathbf{b}$ ile de $\mathbf{a}$ ve $\mathbf{b}$ vektörlerinin iç çarpımı gösterilmektedir. Birinci zaman diliminde kaynaktan rölelere, ikinci zaman diliminde de rölelerden hedefe iletim yapılmaktadır. Toplamda rölelerden iletilen güç, kaynaktan sembolün iletildiği güce (E_s) eşittir. Rölelerden iletilen toplam güç, huzme oluşturma katsayıları yardımıyla, rölelerin seçilen koşullara göre belirlenen kalitesine oranla rölelere dağıtılmaktadır. Bu sayede iyi röle daha çok güç ile, kötü röle daha az güç ile iletim yapmaktadır. $\mathbf{w}=[w_1\ w_2\ \cdots\ w_n]^T$ olmak üzere, toplamda rölelerden iletilen güç $\mathbf{w}^H\mathbf{w}=E_s$ ile ifade edilir.

5.1.2 Rölelerde Huzme Oluşturma İşlemi

Verici anten sayısının birden fazla, alıcı anten sayısının bir veya birden fazla olduğu sistemlerde, vericideki kanal bilgisi verici antenlerden gönderilen işaretlerin ağırlıklandırılması ve dolayısıyla kanala uyumlu bir şekilde gönderilmesi için kullanılabilmektedir. Bu sayede kötü bir kanaldan iletim yapan antenin daha az güç, iyi bir kanaldan iletim yapanın ise daha fazla güç göndermesi sağlanarak sistem başarımı önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Bu yönteme huzme oluşturma adı verilmektedir.

Bu amaçla çok vericili - bir alıcılı (multiple input-single output, MISO) sistemde, iletimi yapılacak olan s sembolü iletim öncesi belirlenecek bir $\mathbf{w}$ huzme oluşturma vektörü ile çarpılmaktadır.

DF yönteminde, rölelerde alınan işaret çözüldükten sonra kaynaktan iletilmiş olan s sembolüne karar verildiği için ara kanalda hata yapılmadığı durumda rölelerden hedefe iletim $\mathbf{b}=[b_1\ b_2\ \cdots\ b_n]$ kanal vektöründen bağımsızdır. Röleler-hedef arası kanal, MISO kanala benzetilerek, $\mathbf{f}=[f_1\ f_2\ \cdots\ f_n]$ kanal vektörü olmak üzere rölelerde karar verilen birim enerjili sembol $\hat{s}$ ile adlandırıldığında hedefte alınan işaret (5.1) ile verilir.

$$y=\mathbf{f}\mathbf{w}\hat{s}+N \tag{5.1}$$

Bu durumda işaret gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR)

$$SNR=\frac{\|\mathbf{f}\mathbf{w}\|^2}{N_0} \tag{5.2}$$

ile ifade edilir.

Vericideki kanal bilgisi SNR'ı arttırmak amacıyla kullanıldığında en iyi huzme oluşturma vektörü, işaret gürültü oranındaki $\|\mathbf{f}\mathbf{w}\|^2$ ifadesi enbüyüklenerek bulunur. Bu işlemin anlamlı olabilmesi için toplam iletilen gücün sınırlandırılması gerekmektedir ($\|\mathbf{w}\|^2\le\gamma^2$). Bu durumda SNR'ı en büyükleme problemi (5.3) ile ifade edilebilmektedir.

$$\max_{w_i,\,i=1,2,\ldots,n}\left|\sum_{i=1}^{n}f_i w_i\right|^2 \text{ öyle ki } \|\mathbf{w}\|^2\le\gamma^2 \tag{5.3}$$

Bu problem Cauchy-Schwartz eşitsizliği yardımıyla (5.4)'e benzetilerek çözülebilmektedir.

$$\left|\sum_{i=1}^{n}f_i w_i\right|^2\le\|\mathbf{f}\|^2\|\mathbf{w}\|^2 \tag{5.4}$$

(5.4)'te eşitlik durumu, α keyfi bir sabit olmak üzere huzme oluşturma vektörü elemanlarının $w_i = \alpha f_i^*$ denkliğini sağlaması ile gerçeklenmektedir.

Bu durumda hedefte işaret-gürültü oranını en büyükleyen ve rölelerden çıkan toplam gücün E_s olmasını sağlayan en iyi huzme oluşturma vektörü veya huzme oluşturma katsayıları sırasıyla (5.5) ve (5.6) ile bulunabilmektedir.

$$\mathbf{w} = \sqrt{E_s}\frac{\mathbf{f}^H}{\|\mathbf{f}\|} \tag{5.5}$$

$$\underset{i=1,2,...,n}{w_i} = \sqrt{E_s}\frac{f_i^*}{\|\mathbf{f}\|} = \sqrt{E_s}\frac{f_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}|f_i|^2}} \tag{5.6}$$

(5.5), (5.1)'de kullanıldığında, hedefte alınan işaret (5.7) ile verilir.

$$y = \sqrt{E_s\sum_{i=1}^{n}|f_i|^2}\,s + N \tag{5.7}$$

(5.7)'den görüleceği üzere iletilen işaret kanal sönümleme katsayılarının mutlak karelerinin toplamından etkilenmektedir. Dolayısıyla, rölelerde çözme hatası yapılmadığı varsayımı altında, DF için (5.6)'daki huzme oluşturma katsayıları ile en büyük çeşitleme derecesi sağlanır.

AF yönteminde ise röleler kaynaktan aldıkları işareti $\underset{i=1,2,..,n}{\beta_i} = \frac{1}{\sqrt{E_s|b_i|^2 + N_0}}$ ile kuvvetlendirip iletecekleri için hedefte alınan işaret

$$y = \sum_{i=1}^{n}\sqrt{E_s}b_i\beta_i f_i w_i s + \sum_{i=1}^{n}\beta_i f_i w_i V_i + N \tag{5.8}$$

(5.8) ile verilir ve hedefteki işaret gürültü oranında kaynak-röle arası kanal vektörünün de etkisi vardır.

Bu durumda sistemde tam çeşitlemeyi elde edebilmek için rölelerde, eşdeğer kanal vektörü olarak düşünülen $\mathbf{f}\cdot\mathbf{b}=[\,f_1b_1\;\;f_2b_2\;\cdots\;f_nb_n\,]$ dikkate alınmalı ve çöz-ilet yöntemindeki huzme oluşturma vektörüne benzetilerek ve rölelerdeki toplam iletim gücünün sabit ve E_S olmasını sağlayacak (5.9)'daki huzme oluşturma vektörü uygulanmalıdır.

$$\mathbf{w}=\sqrt{E_s}\,\frac{(\mathbf{f}\cdot\mathbf{b})^H}{\|\mathbf{f}\cdot\mathbf{b}\|} \tag{5.9}$$

$$\underset{i=1,2,\ldots,n}{w_i}=\sqrt{E_s}\,\frac{f_i^*b_i^*}{\|\mathbf{f}\cdot\mathbf{b}\|}=\sqrt{E_s}\,\frac{f_i^*b_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}|f_ib_i|^2}} \tag{5.10}$$

(5.10), (5.8)'de kullanıldığında iletilen işaret DF'de olduğu gibi kanal sönümleme katsayılarının mutlak karelerinin toplamından etkilenmektedir. Dolayısıyla, (5.10)'daki huzme oluşturma katsayıları ile AF için en büyük çeşitleme derecesi sağlanır.

5.2 İşbirlikli Çeşitlemede Huzme Oluşturma ve Röle Seçme Üzerine Yapılan, Doğruladığımız Örnek Çalışmalar

5.2.1 Referans Çalışma 1 [36]

Bu tez çalışmasında önerilen röle seçme algoritmalarıyla karşılaştırma yapmak üzere incelenen çalışmalardan biri [36]'dır. [36]'da röle seçimi için önerilen fonksiyon kullanılarak en iyi olduğuna karar verilen rölenin kullanımının sistem başarımını önemli ölçüde arttırdığı ve sistemde tam çeşitlemeye ulaşıldığı sonucuna varılmıştır. İlgili çalışmada anlık kanal değerlerine bağlı olarak kaynak ve hedef arasındaki en iyi röle seçilmiştir. Kaynak-hedef arasındaki direkt yol göz önüne alınmamıştır. Kaynak-röle arası kanal katsayısı a_{si}, röle-hedef arası kanal katsayısı a_{id} ile gösterilmiştir. En iyi rölenin seçiminde hem a_{si} hem de a_{id} kanal katsayısının durumu sistem başarımı için önemlidir.

Her röle aktif olarak çalışıp çalışamayacağını aşağıda gösterilen iki tür fonksiyona göre belirleyebilir:

Fonksiyon 1:

$$\min\left\{|a_{si}|^2, |a_{id}|^2\right\}$$

Fonksiyon 2:

$$\frac{2}{\frac{1}{|a_{si}|^2}+\frac{1}{|a_{id}|^2}} = \frac{2|a_{si}|^2|a_{id}|^2}{|a_{si}|^2+|a_{id}|^2}$$

Buradaki 1. fonksiyondan anlaşılacağı üzere iki kanaldan minimum genlikli katsayıya sahip olanı seçilmektedir. 2. fonksiyonda ise iki kanal katsayısının harmonik ortalaması alınmaktadır. 1. fonksiyon iki kanal arasında bir kırılma noktası belirlerken, 2. fonksiyon iki kanalın da kuvvetini dengeleyerek 1. fonksiyona göre daha yumuşak bir çözüm sağlamaktadır. Kullanılan fonksiyona göre, fonksiyonu maksimum yapan röle en iyi röle seçilir ve rölelerin iletimde kullanacağı toplam güç, bu en iyi röle üzerinden gönderilerek sistemde iyi bir başarım elde edilir. Sonuçta 1 röle kullanılarak, sistemde gözlenmesi gereken toplam çeşitleme derecesine ulaşılır. Röle seçiminde 1. fonksiyona dayalı yöntem, “Bletsas algoritması” [36] adı verilerek yaptığımız çalışmalarda kullanılmıştır.

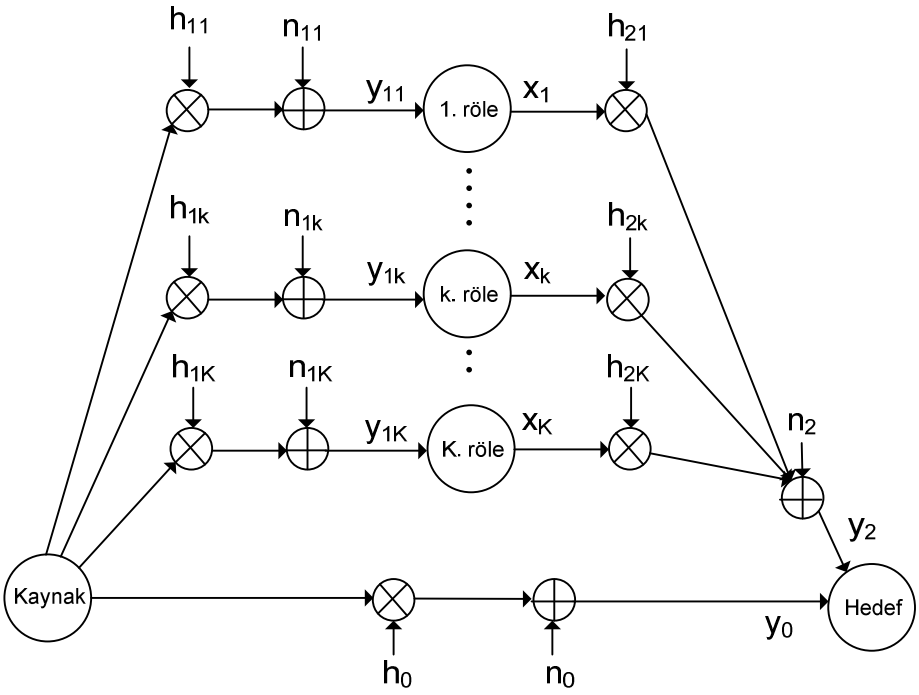
İleride de açıklanacağı üzere, bu yöntemden esinlenerek, kaynağın hedefe 3 röle üzerinden iletim yaptığı ve kaynak-hedef arasındaki direkt hattın önemsenmediği bir sistem ele alınmıştır. Bu sistemde 1. fonksiyon kullanılarak en iyi röle seçilmiş ve sistemin hata başarımı incelenmiştir.

5.2.2 Referans Çalışma 2 [33]

Bu tez çalışmasında rölelerde huzme oluşturma konusunda incelenen ilk çalışma, [33]’dir. [33]’de, kanal durum bilgisinin hedefte ve rölelerde var olup olmamasına göre 3 farklı durum ele alınmıştır:

1. Hedefte ve rölelerde tam kanal bilgisinin olması
2. Hedefte tam kanal bilgisi, rölelerde ise kısmi kanal bilgisi olması
3. Hedefte ve rölelerde kısmi kanal bilgisi olması.

Her 3 durum için de, hedefteki işaret gürültü oranını maksimum yapacak optimum röle ön-kodlayıcıları ve hedefte optimum kod çözücüler (maksimum oran birleştiriciler) bulunmuştur. Sistem modeli Şekil 5.2 ile verilmektedir.



Şekil 5.2 : [33]'de ele alınan sistem modeli

Şekil 5.2'de h_{1j} kaynak ile j. röle arasındaki, h_{2j} j. röle ile hedef arasındaki, h_0 ise kaynak ile hedef arasındaki kanal katsayısını belirtmektedir. n_{1j} j. rölede eklenen gürültüyü, n_2 hedefte röleden gelen işaretlerin toplamına eklenen gürültüyü, n_0 ise hedefte kaynaktan gelen işarete eklenen gürültüyü ifade etmektedir. y_{1j} j. röleden alınan işareti, x_j j. röleden iletilen işareti, y_2 hedefte rölelerden alınan, y_0 ise hedefte kaynaktan alınan işareti belirtmektedir.

Kaynak simge başına ortalama E_s enerjisi ile iletim yapmaktadır. K rölenin bulunduğu sistemde röleler yükselt-ilet yöntemi ile çalışmaktadır. 1. zaman aralığında kaynağın ilettiği işaret röle ve hedef tarafından alınırken, 2. zaman aralığında röleler aldıkları işareti güçlendirip eş zamanlı olarak hedefe göndermektedirler. Sönümleme katsayılarının bir zaman aralığında sabit olmakla birlikte farklı zaman aralıklarında değiştikleri varsayılmıştır.

Şekil 5.2'deki sistem modelinden yola çıkarak, $k = 1,....,K$ olmak üzere 1. zaman aralığında hedefte alınan işaret,

$$y_0 = \sqrt{E_s} h_0 s_0 + n_0 \tag{5.11}$$

ve 1. zaman aralığında rölelerde alınan işaret (5.12) ile verilmektedir.

$$y_{1k} = \sqrt{E_s} h_{1k} s_0 + n_{1k} \tag{5.12}$$

w_{rk} k. röledeki ön-kodlayıcı, $1/\rho_k$ k. röledeki kuvvetlendirme katsayısı ve x_k k. röleden iletilen işaret olmak üzere,

$$\rho_k = \sqrt{E_s \left|h_{1k}\right|^2 + 1} \tag{5.13}$$

$$x_k = y_{1k} w_{rk} / \rho_k \tag{5.14}$$

ile verilir. 1. zaman aralığında hedefte alınan işaret (5.15) ile verilir.

$$y_2 = \sum_{k=1}^{K} h_{2k} x_k + n_2 = \sqrt{E_s} s_0 \mathbf{a} \mathbf{w}_r^H + \mathbf{n}_1 \mathbf{A} \mathbf{w}_r^H + n_2 \tag{5.15}$$

$$\mathbf{w}_r = [w_{r1}^*, ..., w_{rK}^*] \tag{5.16}$$

$$\mathbf{n}_1 = [n_{11}, ..., n_{1K}] \tag{5.17}$$

$$\mathbf{a} = \left[h_{11} h_{21} / \sqrt{E_s \left|h_{11}\right|^2 + 1}, ..., h_{1K} h_{2K} / \sqrt{E_s \left|h_{1K}\right|^2 + 1} \right] \tag{5.18}$$

$$\mathbf{A} = diag\left[h_{21} / \sqrt{E_s \left|h_{11}\right|^2 + 1}, ..., h_{2K} / \sqrt{E_s \left|h_{1K}\right|^2 + 1} \right]_{K \times K} \tag{5.19}$$

Çalışmada $K \geq 2$ alınmıştır. Aksi durumda rölelerde ön-kodlama yapmanın anlamı yoktur.

Hedefte 1. zaman aralığında kaynaktan gelen işaret w_{d0} ile ve 2. zaman aralığında rölelerden gelen işaretlerin toplamı w_{d2} ile ağırlıklandırılıp birleştirilmiştir:

$$\tilde{s}_0 = w_{d0} y_0 + w_{d2} y_2 = \sqrt{E_s} s_0 \mathbf{h}\mathbf{w}_d^H + \mathbf{n}\mathbf{w}_d^H . \tag{5.20}$$

$$\mathbf{w}_d = \left[w_{d0}^*, w_{d2}^* \right] \tag{5.21}$$

$$\mathbf{h} = \left[h_0, \mathbf{a}\mathbf{w}_r^H \right] \tag{5.22}$$

Burada $\mathbf{w}_d$ hedefteki maksimum oran birleştiricisi olarak düşünülmüştür.

Bu durumda 1. kanal durum bilgisi varsayımı altında hedefteki anlık işaret gürültü oranı $\tilde{\gamma}$ olmak üzere

$$\tilde{\gamma} = E_s \frac{\mathbf{w}_d \mathbf{h}^H \mathbf{h}\mathbf{w}_d^H}{\mathbf{w}_d \mathbf{\Omega} \mathbf{w}_d^H} \tag{5.23}$$

$$\mathbf{\Omega} = diag\left[1, \mathbf{w}_r \mathbf{A}^H \mathbf{A}\mathbf{w}_r^H + 1 \right]_{2\times 2} \tag{5.24}$$

ile ifade edilir. Buradan hareketle amaç, bu anlık işaret gürültü oranını maksimum yapacak ve kaynak ve rölelerden çıkacak toplam gücün sabit kalmasını sağlayacak $\mathbf{w}_d$ (maksimum oran birleştiricisi) ve $\mathbf{w}_r$ (ön-kodlayıcı) katsayılarının ifadesini bulmaktır. Bu problem genelleştirilmiş özdeğer problemine benzetilerek çözümü sağlanmıştır.

5.2.2.1 Genelleştirilmiş Özdeğer Problemi

$\mathbf{U} = \mathbf{u}^H \mathbf{u}$ bir Hermit matris, $\mathbf{V}$ de pozitif tanımlı bir Hermit matris olmak üzere $\frac{\mathbf{x}\mathbf{U}\mathbf{x}^H}{\mathbf{x}\mathbf{V}\mathbf{x}^H}$ oranına bir üst sınır getirilebilir. Bu oran $\lambda_{\max}$ ile üstten sınırlandırıldığında,

$$\frac{\mathbf{x}\mathbf{U}\mathbf{x}^H}{\mathbf{x}\mathbf{V}\mathbf{x}^H} \le \lambda_{\max} \tag{5.25}$$

$$\lambda_{\max} = Tr\left[\left(\mathbf{V}^{H/2} \right)^{-1} \mathbf{U} \left(\mathbf{V}^{1/2} \right)^{-1} \right] \tag{5.26}$$

elde edilir. Burada $\lambda_{\max}$, $\left(\mathbf{V}^{H/2} \right)^{-1} \mathbf{U} \left(\mathbf{V}^{1/2} \right)^{-1}$'in en büyük özdeğerine eşittir. Bu durumda $\frac{\mathbf{x}\mathbf{U}\mathbf{x}^H}{\mathbf{x}\mathbf{V}\mathbf{x}^H} \le \lambda_{\max}$ probleminde eşitlik, $\mathbf{x} = c\mathbf{u}\mathbf{V}^{-1}$ olduğunda sağlanır.

Hedefte elde edilen anlık işaret gürültü oranı ifadesi, (5.27) ile bu probleme benzetilerek,

$$\tilde{\gamma} \le E_s \tilde{\lambda}_0 \tag{5.27}$$

$$\tilde{\lambda}_0 = \left|\mathbf{h}_0\right|^2 + \frac{\mathbf{w}_r \mathbf{a}^H \mathbf{a} \mathbf{w}_r^H}{\mathbf{w}_r \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{w}_r^H + 1} \tag{5.28}$$

$$\tilde{\mathbf{w}}_\mathbf{d} = \left[\mathbf{h}_0, \frac{\mathbf{a}\mathbf{w}_r^H}{\mathbf{w}_r \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{w}_r^H + 1} \right] \tag{5.29}$$

elde edilir. (5.29) ile hedefteki optimum kod çözücü ($\tilde{\mathbf{w}}_\mathbf{d}$) elde edilebilir. İkinci olarak $\tilde{\lambda}_0$'ı maksimum yapacak $\mathbf{w}_r$ ön-kodlayıcısı bulunur. Aynı şekilde $\tilde{\lambda}_0$ ifadesi de özdeğer problemine benzetilerek,

$$\tilde{\lambda}_0 \le \left|h_0\right|^2 + \sum_{k=1}^{K} \frac{E_r \left|h_{1k}\right|^2 \left|h_{2k}\right|^2}{E_s \left|h_{1k}\right|^2 + E_r \left|h_{2k}\right|^2 + 1} \tag{5.30}$$

ve rölelerden çıkan toplam enerjinin E_r olmasından faydalanarak ve

$$\begin{aligned} &\mathbf{w}_r \mathbf{w}_r^H = E_r \;\Rightarrow\; \mathbf{w}_r \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{w}_r^H + 1 = \mathbf{w}_r \left(\mathbf{A}^H \mathbf{A} + \left(1/E_r\right) \mathbf{I}_{K \times K} \right) \mathbf{w}_r^H \\ &\mathbf{U} = \mathbf{a}^H \mathbf{a} \\ &\mathbf{V} = \mathbf{A}^H \mathbf{A} + \left(1/E_r\right) \mathbf{I}_{K \times K} \\ &\mathbf{x} = \mathbf{w}_r \end{aligned} \tag{5.31}$$

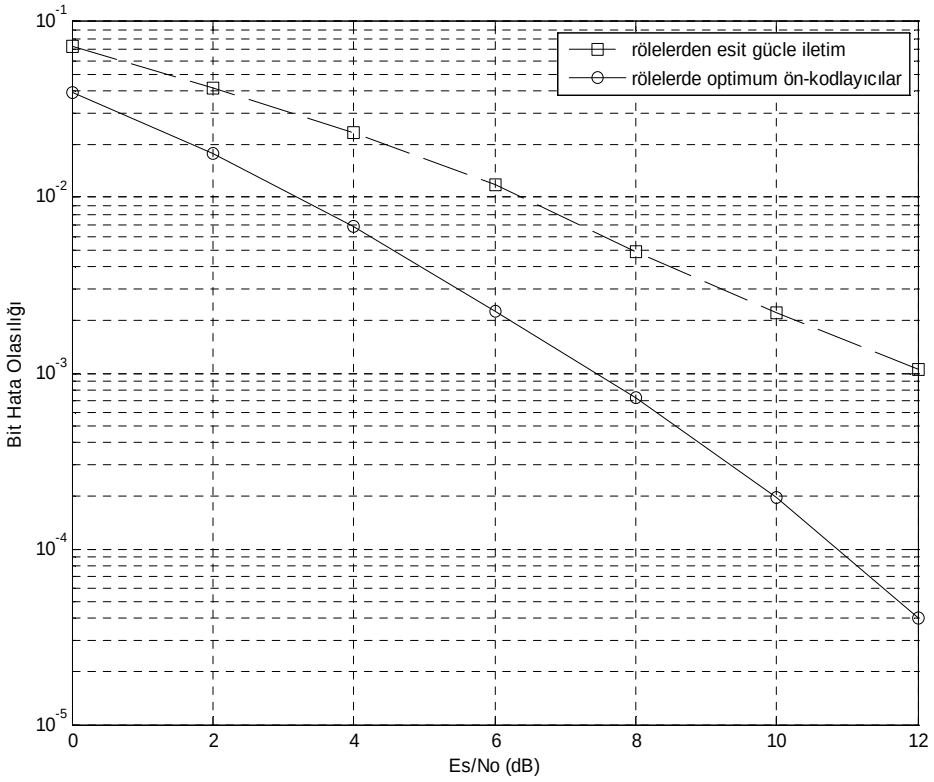
(5.31)'den yararlanarak,

$$\tilde{c} = \sqrt{\frac{E_r}{\left|\tilde{\mathbf{w}}_{ru}\right|^2}} \qquad \tilde{\mathbf{w}}_r = \tilde{c} \tilde{\mathbf{w}}_{ru} = \tilde{c} \left[\frac{h_{11} h_{21} \sqrt{E_s \left|h_{11}\right|^2 + 1}}{E_s \left|h_{11}\right|^2 + E_r \left|h_{21}\right|^2 + 1}, \ldots, \frac{h_{1K} h_{2K} \sqrt{E_s \left|h_{1K}\right|^2 + 1}}{E_s \left|h_{1K}\right|^2 + E_r \left|h_{2K}\right|^2 + 1} \right] \tag{5.32}$$

biçiminde optimum ön-kodlayıcılar ($\tilde{\mathbf{w}}_r$) bulunur.

Şekil 5.3'te, bu bölümde tanıtılan çalışma örnek alınarak elde edilen bit hata olasılığına ilişkin bilgisayar benzetimi sonuçları gösterilmektedir. Benzetimlerde hedefte ve rölelerde tam kanal durum bilgisine sahip olunduğu ve sistemde 2 röle olduğu varsayılmıştır. Rölelerden çıkan toplam güç kaynaktan çıkan güce eşit alınmıştır. Sistemdeki tüm gürültüler 0 ortalamalı ve boyut başına $N_o/2$ varyanslı

toplamsal Gauss gürültüleridir. İşaret-gürültü oranı tanımı ise verici taraf esas alınarak, E_s kaynaktan simge başına iletilen ortalama enerji olmak üzere, E_s / N_o alınmıştır. Kullanılan modülasyon BPSK olmakla birlikte tüm kanal katsayıları 0 ortalamalı birim varyanslı kompleks Gauss dağılımına sahiptir. Şekil 5.3'teki eğride yatay eksen ortalama işaret-gürültü oranını, düşey eksen ise bit hata olasılığını göstermektedir. Elde edilen eğriler, [33]'dekilerle aynıdır.



Şekil 5.3 : Hedefte ve rölelerde tam kanal durum bilgisi olması durumunda 2 röleli sisteme ait hata başarımı [33]

5.3 Röle Seçme Algoritmaları

S# kullanılan sisteme verilen ismi belirtmek üzere, S1, S4 ve S8 literatürde var olan sistemler, diğerleri ise AF ve DF yöntemleri için bu çalışmada önerilen huzme oluşturma ve röle seçme algoritmalarına göre şekillenen sistemlerdir.

S1: Tüm rölelerin eşit güçle iletim yaptığı AF veya DF sistemidir (eniyi olmayan sistem, non-optimal system).

S2: AF yönteminde i. röle için b_i ve f_i kanal katsayılarının çarpımsal olarak başarıma etkisi olduğu için, en küçük $|f_i b_i|$ değerine sahip rölenin en kötü röle olarak değerlendirildiği ve bu rölenin iptal edildiği sistemdir. İptal edilmeyen rölelerden eşit güçle iletim yapılmaktadır.

S3: AF ve DF yöntemlerinde her röle için b_i ve f_i katsayıları modüllerine göre karşılaştırılıp en küçüğü bulunmuş ve *i* rölesinin işbirliğine katkısında bu katsayının belirleyici olduğu düşünülmüştür. Bu kanal katsayısı kötü ise o röleye daha az güç vererek sistem başarımına etkisini azaltmak, iyi ise de daha fazla güç vererek başarıma etkisini arttırmak istenmiştir. Rölelere güç paylaştırma işlemi de, her röle için seçilen minimum kanal katsayısına göre huzme oluşturma yaparak gerçekleştirilmiştir.

S4: AF ve DF yöntemlerinde, "Bletsas algoritması" ndan [36] esinlenerek, her röle için b_i ve f_i katsayıları modüllerine göre karşılaştırılıp, (5.33)'ü sağlayan rölenin en iyi röle olduğuna karar verildiği sistemdir. Rölelerden aktarılacak tüm güç bu en iyi röle üzerinden aktarılmaktadır.

$$\max_{i=1,2,\ldots,n} \left\{\min(|b_i|,|f_i|)\right\} \tag{5.33}$$

S5: AF yönteminde her röle için $|f_i b_i|$ değerleri karşılaştırılarak, en küçük $|f_i b_i|$ değerine sahip rölenin en kötü röle olduğuna karar verilip bu rölenin iptal edildiği, geri kalan rölelere ise (5.9) ile verilen huzme oluşturmanın uygulandığı sistemdir.

S6: AF yönteminde her röle için b_i ve f_i katsayıları modüllerine göre karşılaştırılıp, (5.34)'ü sağlayan rölenin en kötü röle olduğuna karar verildiği ve bu rölenin iptal edildiği, geri kalan rölelere ise (2.7) ile verilen huzme oluşturmanın uygulandığı sistemdir.

$$\min_{i=1,2,\ldots,n} \left\{\min(|b_i|,|f_i|)\right\} \tag{5.34}$$

S7: Herhangi bir röle iptalinin olmadığı ve rölelerde AF yöntemi için (5.9)'dan yararlanarak huzme oluşturma uygulandığı sistemdir.

S8: Üç verici ve bir alıcıya sahip MISO rölesiz ve (5.5)'ten yararlanarak huzme oluşturma uygulanan sistemdir [35].

S9: Herhangi bir röle iptalinin olmadığı ve rölelerde DF yöntemi için (5.5) ile verilen huzme oluşturmanın uygulandığı sistemdir.

S10: DF yönteminde her röle için $|b_i|$ ve $|f_i|$ değerleri karşılaştırılarak, (5.35)'i sağlayan rölenin en kötü röle olduğuna karar verilip iptal edildiği sistemdir. Diğer rölelere (5.6) ile verilen huzme oluşturma katsayıları uygulanmaktadır.

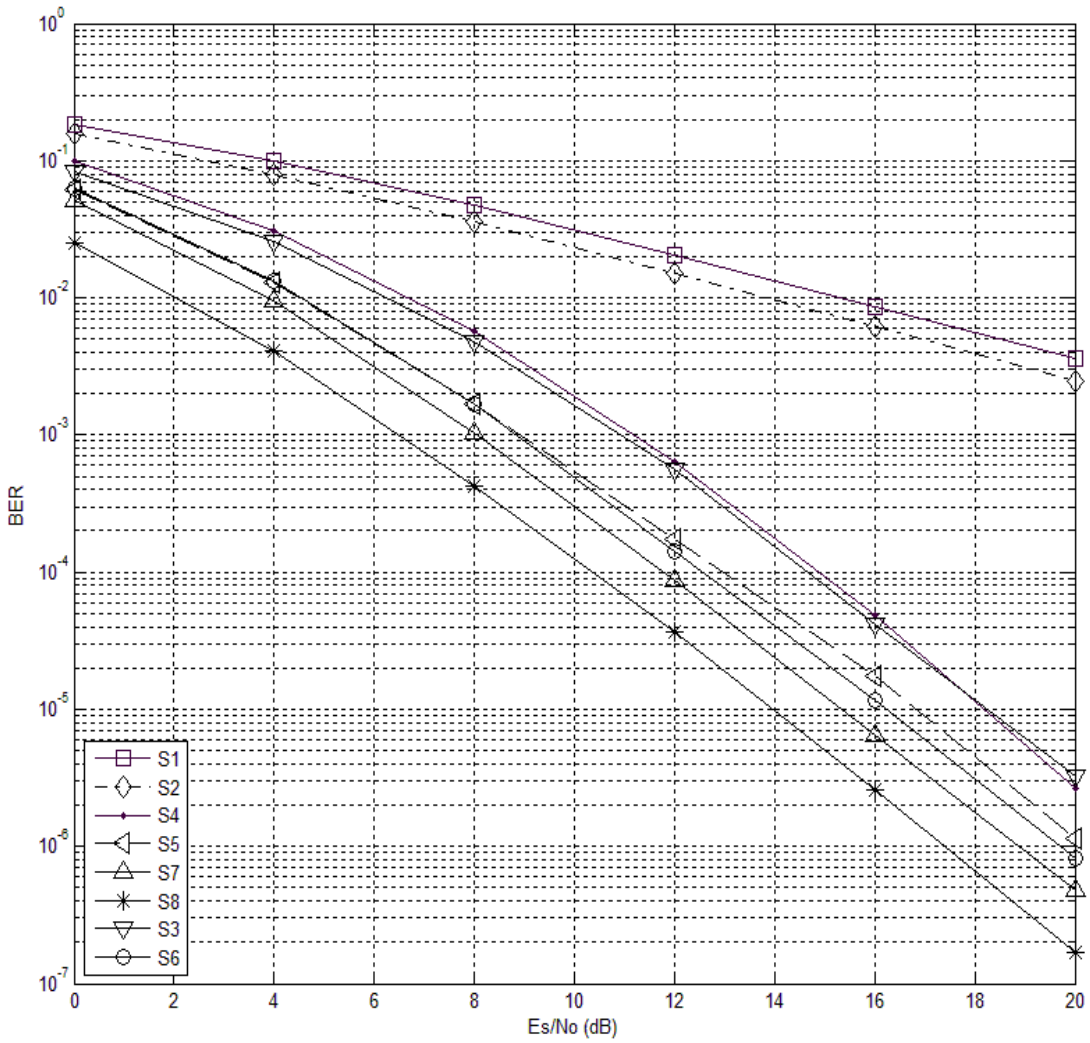
$$\min_{i=1,2,\ldots,n} \left\{ \min(|b_i|, |f_i|) \right\} \tag{5.35}$$

S11: DF yöntemi için röleler arasında $|b_i|$ değerlerinin karşılaştırıldığı ve minimum değeri veren rölenin en kötü röle olduğuna karar verilip bu rölenin iptal edildiği, geri kalan rölelere ise (5.5)'ten yararlanarak huzme oluşturma uygulandığı sistemdir.

S12, S13 and S14'te DF yönteminde $|b_i|$ değerleri için eşik belirlenmiş ve bu eşiğin altında kalan $|b_i|$ değerlerine sahip röleler iptal edilmiştir. Çalışan rölelere ise (5.5)'e göre huzme oluşturma uygulanmıştır. Bu eşik değerleri sırası ile 0.3, 0.1 ve 0.05 alınmıştır. Bu değerler örnek oluşturması açısından benzetimlerle seçilmiş ve sırasıyla 0dB, 10dB ve 20dB farksal SNR (DSNR) için kullanılmıştır. Bu çalışmada farksal SNR değeri, ara kanal SNR'ının hedefteki SNR'dan ne kadar iyi olduğunun dB biriminden ölçüsüdür.

5.4 Benzetim Sonuçları

Bilgisayar benzetimlerinde duruğumsu Rayleigh sönümleme varsayımı altında, 3 röleli sistemde BPSK modülasyonu kullanılmış ve $E_s = 1$ alınmıştır. 10 dB farksal SNR'da yapılan benzetimlerde, uygun röle seçme algoritmaları ve huzme oluşturma durumlarında, AF ve DF yöntemlerinin başarımları incelenmiştir. DF yöntemi için 0dB, 10 dB ve 20dB DSNR'da röle seçme algoritmaları test edilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla [36]'daki röle iptal algoritmasının uygulandığı sistem (S4), rölelerden eşit güçle iletim yapılan sistem (S1) ve huzme oluşturma işleminin uygulandığı bir MISO rölesiz sistem (S8) de ele alınmıştır. Hata başarım sonuçları için verilen şekillerde yatay eksen işaret-gürültü oranını göstermektedir. Bu çalışmada işaret-gürültü oranı, E_s / N_0 değeri ile temsil etmektedir.

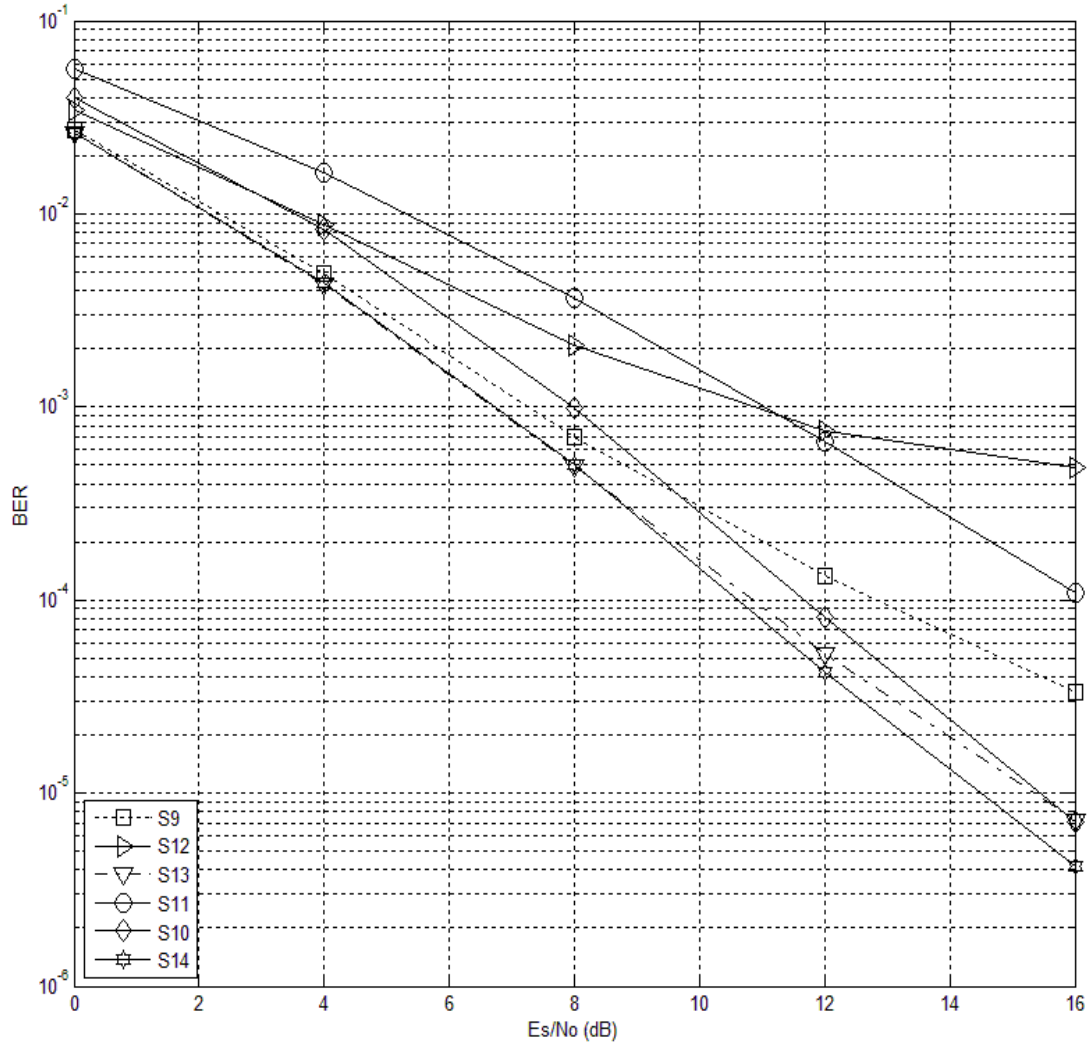


Şekil 5.4 : 10dB DSNR, 3 röle, AF yöntemi

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere yükselt-ilet yönteminde en iyi başarım **f** ve **b** kanal vektörlerinin birlikte değerlendirildiği (5.9) ile huzme oluşturma uygulandığı durumda elde edilmektedir. Üç rölenin bulunduğu sistemde, çeşitlemenin 3 olduğu görülebilmektedir. Bu da AF yönteminde her iki kanalın da başarıma etkisinin önemli olduğunu göstermektedir. Buradan varılacak bir başka sonuç ise, S2, S4 ve S5'in başarımlarından da görüleceği üzere AF yönteminde önerilen koşullarda röle iptalinin sistem başarımını kötüleştirdiğidir. Kanal durumu kötü dahi olsa ilişkin rölenin huzme oluşturma katsayıları ile ayarlanacak az bir güçle çalıştırılması başarımı iyileştirmektedir.

AF yönteminde, her röleye ait b_i ve f_i katsayılarından en küçük olanının o rölenin başarımını etkilediğini düşünerek, rölelere sahip oldukları bu katsayıların en küçüğüne göre güç verdiğimiz S3'te de S7'teki gibi çeşitleme derecesinin 3 olduğu

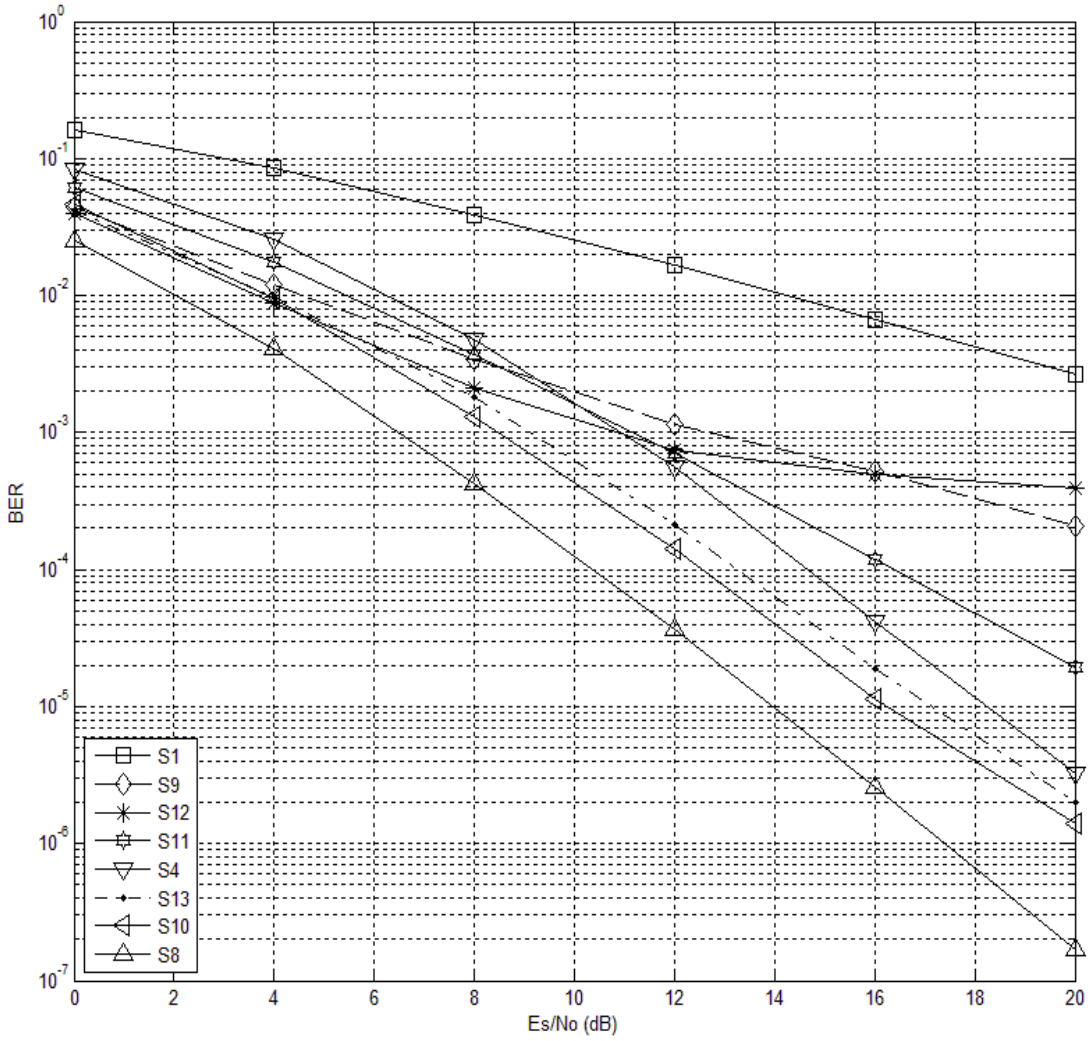
gözlenmektedir. Ayrıca bu sistemin, S4 ile yaklaşık aynı başarımı sağladığı görülmektedir. Fakat bütün rölelerin aktif olduğu S7, 10^{-4} hata olasılığında her iki sisteme göre yaklaşık 3dB daha iyidir. Ayrıca S6'nın başarımından görüleceği üzere her röleye ait b_i ve f_i katsayılarından genlik olarak en kötüsü yada $|f_i b_i|$ değeri sistemi oldukça etkilemektedir. Burada tam çeşitlemeye ulaşılmasına rağmen S7 10^{-4} hata olasılığında yaklaşık 1dB iyileşme sağlamaktadır. S2'de ise en kötü röle iptal edildikten sonra kalan rölelerden eşit güçle iletim yapıldığı için istenen çeşitleme derecesine ulaşılamamaktadır. Sonuç olarak çeşitlemenin görülebilmesi için sistemde AF yöntemi için önerilen huzme oluşturma işlemi uygulanmalıdır.



Şekil 5.5 : 20dB DSNR, 3röle, DF yöntemi

Şekil 5.6'da 10dB DSNR'da DF yöntemi için sonuçlar verilmiştir. Açıkça görülmektedir ki, yükselt-ilet yönteminin aksine çöz-ilet yönteminde kötü röleyi iptal etmek sistem başarımını arttırmaktadır.

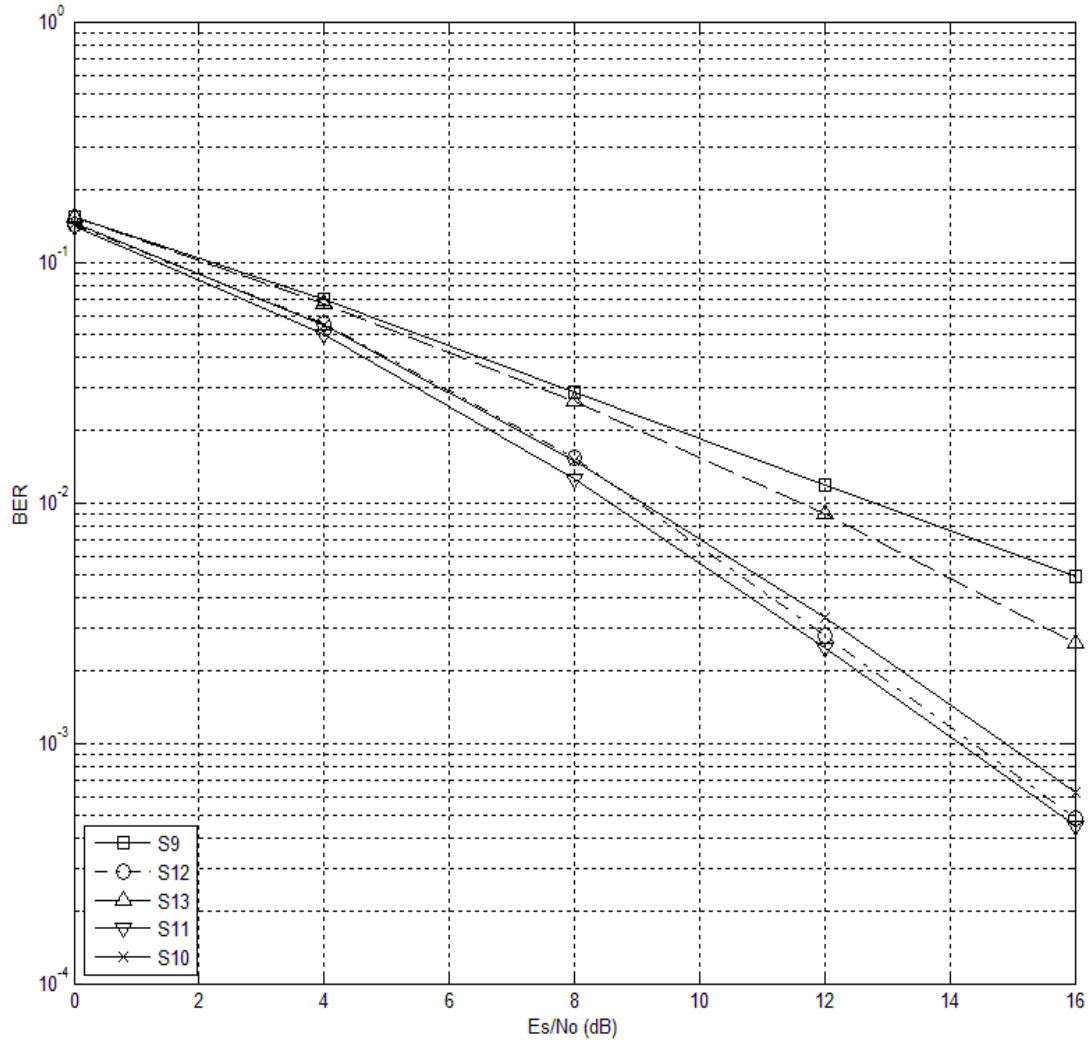
Tüm rölelerin çalıştığı ve huzme oluşturma uygulandığı S9 ile 1 rölenin iptal edildiği S10 karşılaştırıldığında 10^{-3} bit hata olasılığında yaklaşık 4dB fark gözlenmektedir. S4'e göre, S10 ile 10^{-4} bit hata olasılığında yaklaşık 2dB iyileşme sağlanmaktadır. DF yöntemi öncelikle ara kanaldan etkilendiğinden, 10dB DSNR durumuna göre, Şekil 5.5'ten görüleceği üzere 20dB DSNR'da S11'de çeşitleme derecesinin arttığı fakat yine de rölede olabilecek çözme hatalarından dolayı tam çeşitlemeye ulaşılamadığı görülmektedir.



Şekil 5.6 : 10dB DSNR, 3röle, DF yöntemi

Bunun yanısıra S3, AF yönteminde tam çeşitleme sağlarken DF'de istenilen iyileşmeyi sağlayamamaktadır. Bunun nedeni ise DF yönteminin başarımının öncelikle ara kanala bağlı olmasıdır. Ara kanal katsayısı (b_i) kötü olduğunda f_i katsayısının iyi olması rölede yapılan çözme işlemi hatasını düzeltememektedir.

Yükselt-ilet yönteminde ise her iki kanal katsayısının çarpımı başarımı etkilediğinden kötü olan bir kanala göre röle gücünün ayarlanması başarımı iyileştirmektedir. Ek olarak S11'de ara kanala göre bir iptal söz konusudur. Şekil 5.7'den görüleceği üzere, 0dB DSNR'da S11 diğer sistemler arasında en iyi başarımı sağlamaktadır. Fakat Şekil 5.6'da DSNR 10dB alındığından ara kanal iyileştirilmiştir ve S11, S10'daki iptal yöntemine göre 10^{-4} hata olasılığında yaklaşık 4dB daha kötüdür. S11'in, ara kanalın daha da iyileştiği 20dB DSNR durumunda daha da kötüleştiği görülmektedir. Şekil 5.5-7'den görüleceği üzere ara kanal durumu iyileştikçe S10'un başarımı S11'inkine tercih edilmektedir.



Şekil 5.7 : 0dB DSNR, 3 röle, DF yöntemi

Sonuç olarak, DSNR 0dB olduğunda, b_i kanal katsayısının işaret üzerinde bozucu etkisi arttığından, en kötü b_i değerine sahip röleyi iptal etmek daha iyi sonuç vermektedir. Farksal SNR arttıkça, b_i ve f_i birlikte göz önüne alınmalıdır.

Şekil 5.5'te 20dB DSNR durumunda ara kanalın anlık değerine bir eşik getiren S14 en iyi başarımı göstermektedir. Ara kanal durumu kötüleştikçe, eşik seviyesinin de 10dB ve 0dB DSNR için sırasıyla 0.1 ve 0.3 değerlerini alarak arttığı görülmektedir.

6. KANAL KUANTALAMA ve SINIRLI GERİBESLEME

6.1 Röleli Kanallarda Çeşitlemenin Arttırılması İçin Sınırlı Geribesleme ve Huzme Oluşturma

Bu bölümde, Şekil 5.1'deki sistem modeli esas alınarak AF ve DF yöntemleri için çeşitlemeyi arttırmak üzere elde edilen rölelerdeki huzme oluşturma katsayıları kullanılmıştır. Bu sistemler, sönümlemeli röle kanalları için rölelerde kaynak-röle arası kanalın tam bilindiği varsayımı altında, tam veya kısmi röle-hedef kanal durum bilgisi olmasına göre bilgisayar benzetimleriyle incelenmiştir. Ayrıca rölelerde kısmi kaynak-röle ve röle-hedef kanal durum bilgisi olması durumu da ele alınmıştır.

Tüm bu sistemler pratikte geçerliliği olmayan, rölelerin tam kanal durum bilgisine sahip olma durumuyla karşılaştırılmıştır. Uygulanan kuantalama işlemi ile kanal sönümleme katsayılarının genlik ve faz bilgileri çeşitli sayıda bit ile rölelere geribeslenmiştir. Sonuç olarak AF ve DF yöntemlerinin her ikisinde de kanal sönümleme katsayısının faz bilgisinin başarıma etkisinin daha önemli olduğu görülmüştür.

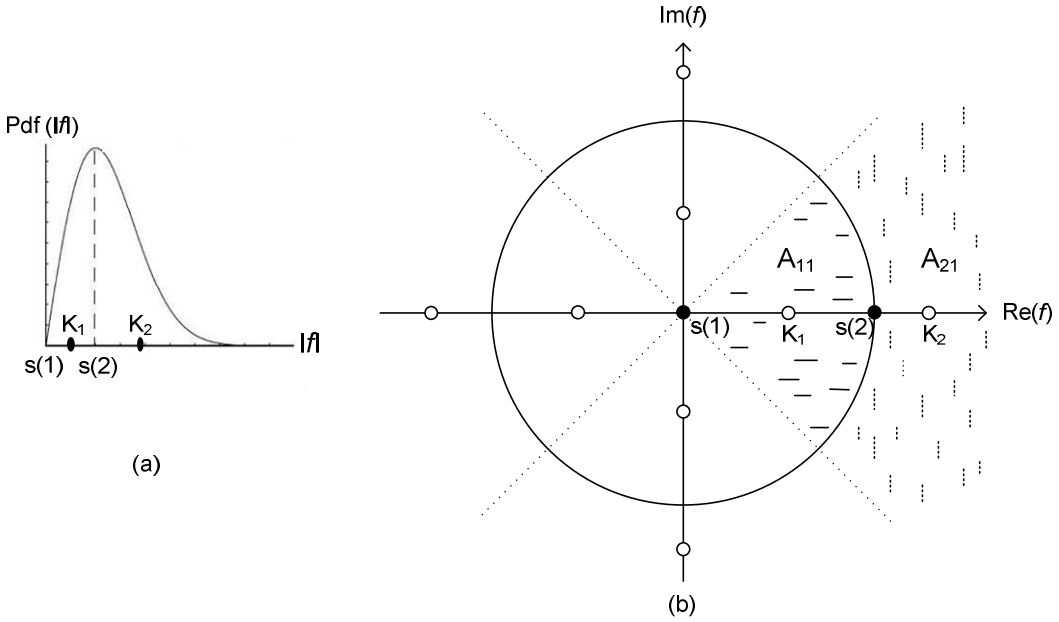
6.1.1 Rölelere Sınırlı Geribesleme

Bu bölümde, hedefte tam kanal durum bilgisi olduğu, röleler ise kaynak-röle kanalının tam bilgisine sahipken $f_i, i=1,...,n$ kanal katsayılarının kuantalanmış versiyonu olan $f_{q_{km}}$ bilgisinin rölelere geribeslendiği varsayılmıştır. Geribesleme işlemi şu şekilde çalışmaktadır: önceden belirlenmiş N adet kuantalama katsayısından oluşan $Q=\left\{ f_{q_{km}} \right\}$, $1\le k\le N_A$, $1\le m\le N_P$ kümesi röle ve hedef tarafından bilinmektedir. Burada N_A kanal katsayısının genlik değerleri için kuantalama seviyelerinin sayısını ve N_P de faz değerleri için kuantalama seviyelerinin sayısını vermektedir. $N=N_A\times N_P$ eşitliği sağlanmaktadır. Kanal katsayılarının genliği Rayleigh dağılımına, fazı da düzgün dağılıma sahiptir. K_k, k. kuanta genlik seviyesini, θ_m ise m. kuanta faz seviyesini belirtmek üzere

$f_{q_{km}} = K_k e^{j\theta_m}$ kuantalama katsayısına ilişkin "kuantalama bölgesi" A_{km} ile adlandırılmaktadır. $s(1) = 0$ ve $s(N_A + 1) = \infty$ alınarak, $s(k)$ genlik kuantalama bölgelerinin $k.$ sınırını vermektedir. Bu durumda kuantalama bölgeleri (6.1) ile ifade edilmektedir.

$$A_{km} \triangleq \left\{ f: \; s(k) \le |f| < s(k+1), \left(\frac{2(m-3/2)\pi}{N_P}\right) \le \angle f < \left(\frac{2(m-1/2)\pi}{N_P}\right) \right\} \tag{6.1}$$

Anlık kanal katsayısı f_i için $f_i \in A_{km}$ sağlanıyorsa, hedef, kanal katsayısının genliği için $\log_2 N_A$ bit kullanarak k indisini, fazı için de $\log_2 N_P$ bit kullanarak m indisini rölelere geribeslemektedir. Böylece röle w_i huzme oluşturma katsayısını uyarlamak için bu kuantalanmış kanal bilgisinden yararlanır.

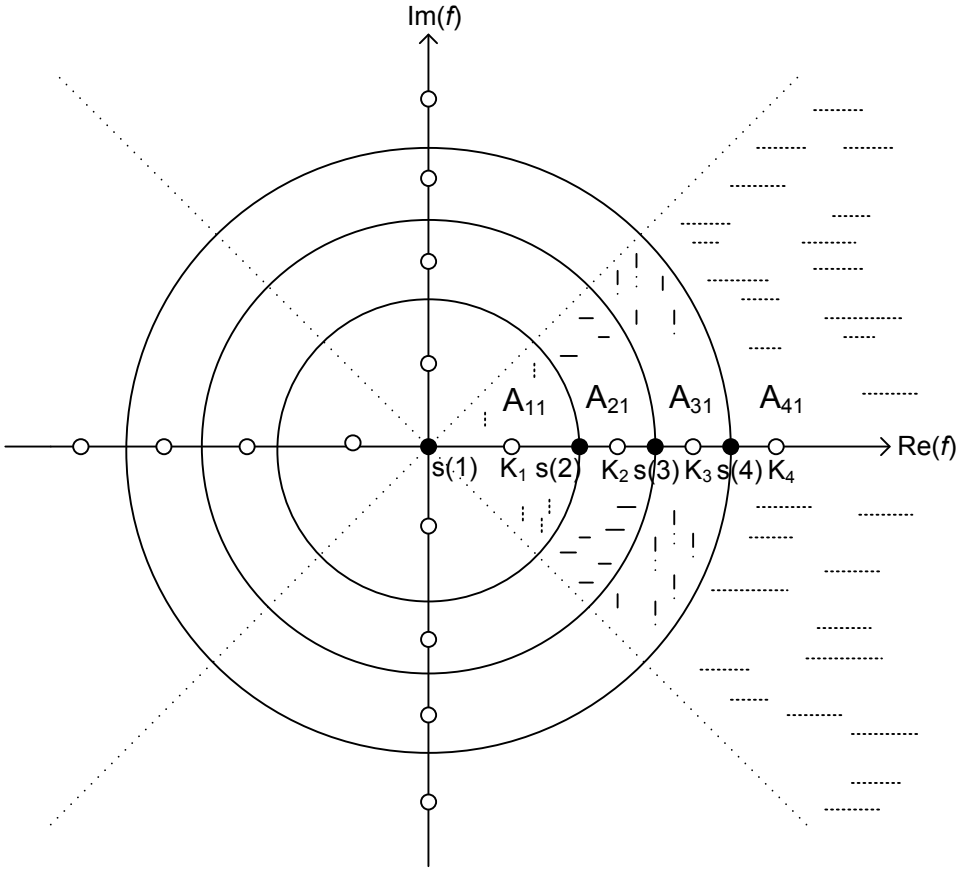


Şekil 6.1(a) : $N_A = 2$ için Rayleigh dağılımı üzerinden genlik kuantalama

(b) : $N_A = 2$ ve $N_P = 4$ için kuantalama bölgeleri

$N_A = 2$ ve $N_P = 4$ alındığında oluşan 8 bölgeden A_{11} ve A_{21} olarak adlandırılan ikisi Şekil 6.1(b)'de gösterilmiştir. Bu örnekte rölelere, f_i katsayısının genliği için 1, fazı için de 2 bit geribeslenmektedir. Şekil 6.1(a)'dan görüleceği üzere, $|f_i|$'nin dağılımının Rayleigh olduğu göz önüne alınarak, 1 bit geribesleme için olasılık

yoğunluk fonksiyonu (probability density function -pdf) altındaki alan $s(2)$ noktası ile ikiye ayrılmıştır. Burada elde edilen alanların eşit olasılıklı olması için $s(2)$, dağılımın medyanı seçilmiştir. Bu örnek için genlik kuantalama seviyeleri olan K_1 ve K_2 de ilişkin alanların medyanları seçilmiştir. Ek olarak, fazın da düzgün dağıldığı göz önüne alındığında kuantalama bölgeleri eşit sayıda elemandan oluşmaktadır.



Şekil 6.2 : $N_A = 4$ ve $N_P = 4$ için kuantalama bölgeleri

Şekil 6.2'de $N_A = 4$ ve $N_P = 4$ alındığında oluşan 16 bölgeden A_{11}, A_{21}, A_{31} ve A_{41} olarak adlandırılan dördü gösterilmiştir. Bu şekilde de $s(1)$, $s(2)$, $s(3)$ ve $s(4)$ bölgeleri ayıran sınır noktalarını, K_1, K_2, K_3 ve K_4 ise ilişkin bölgelerin kuanta genlik seviyelerini vermektedir.

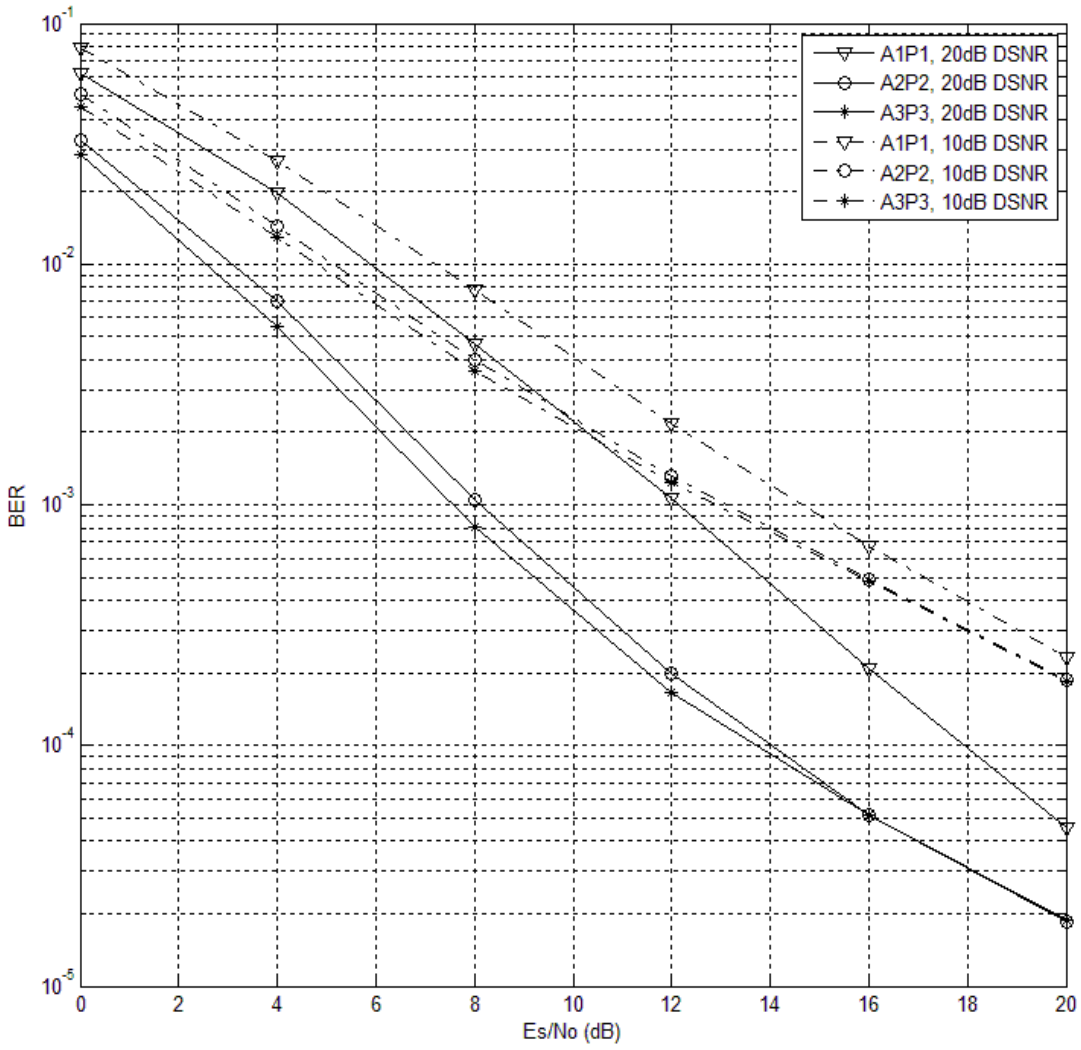
6.2 Benzetim Sonuçları

Duruğumsu Rayleigh sönümlemeli kanal varsayımı altında, Şekil 5.1'deki 3 röleli sistemde BPSK modülasyonu kullanılarak benzetimler yapılmıştır. 10dB ve 20dB DSNR'da yapılan benzetimlerde kuantalanmış (kısmi) bilgi kullanan uygun huzme oluşturma durumlarında, AF ve DF yöntemlerinin başarımları gözlenmiştir. Rölelerde hem kaynak-röle arası kanal katsayısı hem de röle-hedef arası kanal katsayısının kısmi bilgileri bulunması durumları incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak üzere rölelerde mükemmel bilgi olması durumu da ele alınmıştır.

Her iki yöntem için de, kanal katsayılarının genlik ve fazları için eşit sayıda bit veya bitler geribeslenmiş ve başarımlar ek olarak 10dB ve 20dB DSNR durumlarında karşılaştırılmıştır. Bunun yanısıra, kanal katsayılarının genlik ve fazları için farklı sayılarda bit veya bitler geribeslenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Şekillerde yatay eksen işaret-gürültü oranını (SNR), düşey eksen ise bit hata olasılıklarını (BER) vermektedir. Burada SNR, E_s / N_o olarak tanımlanmıştır. AxPy ile de genlik için x bit, faz için y bit geribeslendiği belirtilmektedir.

Şekil 6.3'ten görüldüğü gibi, DF yönteminde hem 10dB hem de 20dB DSNR'da A3P3, A1P1'den oldukça iyi iken, A2P2 ile benzer başarımları göstermektedir. Ara kanal durumu iyileştikçe, Şekil 6.3'te görüldüğü üzere A1P1 durumundan A3P3 durumuna başarım artışı daha da iyileşmektedir. 10^{-3} bit hata olasılığında, 10dB DSNR'da A3P3, A1P1'den 1.5dB daha iyi başarım gösterirken, 20dB DSNR'da bu başarım artışı 4.5dB'ye çıkmaktadır.

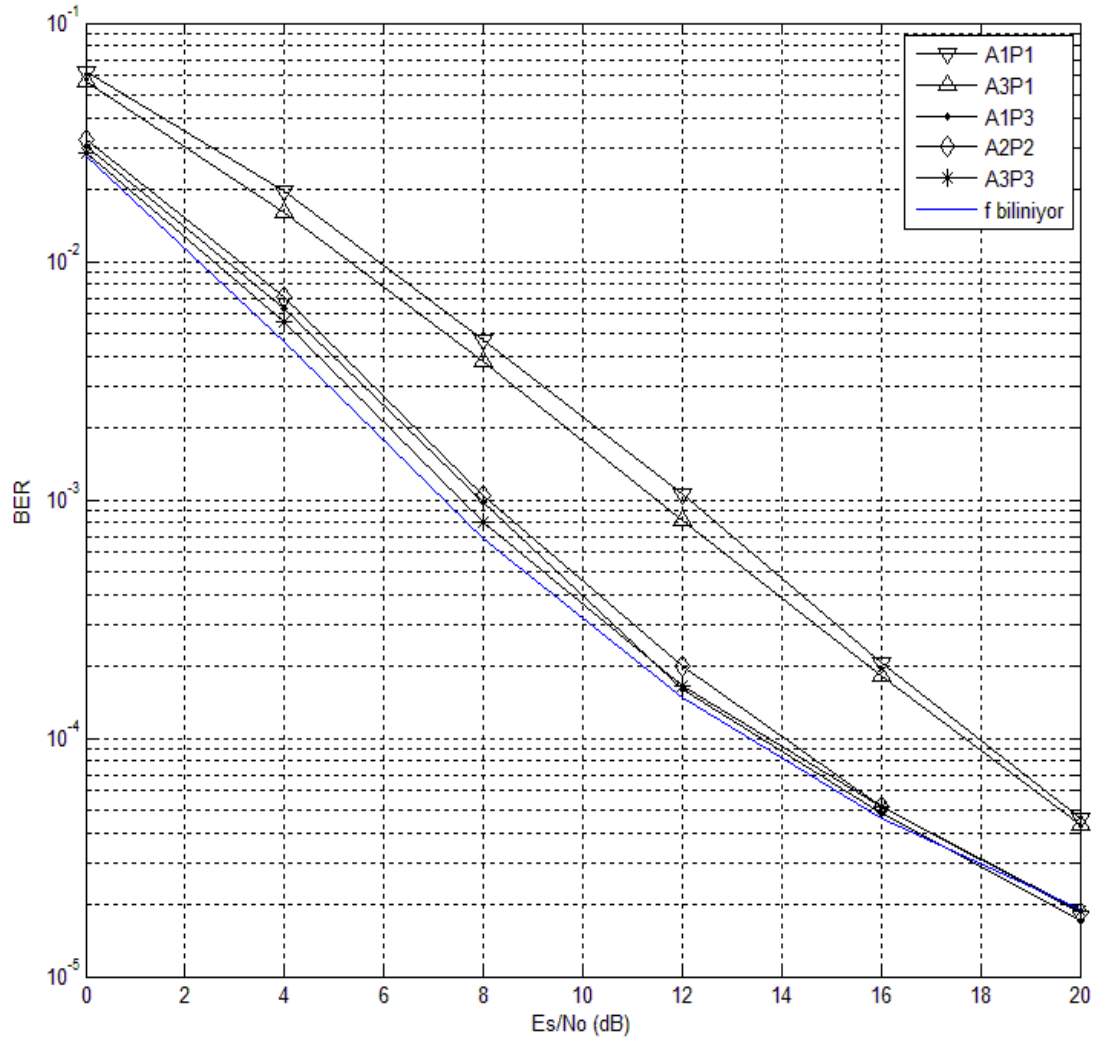
Ayrıca 20dB DSNR'da, 10dB'ye göre A1P1 durumundan A3P3'e geçişte çeşitleme derecesinin daha da arttığı fakat tam çeşitleme derecesi olan 3'e ulaşılamadığı görülmektedir. Bu da DF yönteminin öncelikle ara kanaldan etkilendiğinin ve rölelerde yapılacak çözme hatalarına oldukça bağlı olduğunun göstergesidir. Hata yayılımı 10dB DSNR'da 10^{-3} bit hata olasılığında oluşmaya başlarken, 20dB DSNR'da 10^{-4} seviyelerine inmektedir.



Şekil 6.3 : DF, genlik ve faz için eşit sayıda bit/bitler, 10dB ve 20dB DSNR

Şekil 6.4'te faz geribesleme bit sayısı 1 olarak sabit alındığında, genlik geribesleme bit sayısını 1'den 3'e çıkarmak 10^{-3} bit hata olasılığında başarımı 0.5dB iyileştirmektedir. Diğer taraftan, genlik geribesleme bit sayısı 1 olarak sabit alındığında, faz geribesleme bit sayısını 1'den 3'e çıkarmak 10^{-3} bit hata olasılığında başarımı 4dB iyileştirmektedir. Bu nedenle, faz bilgisinin bit hata olasılığı başarımı için daha değerli olduğu ve faz daha doğru geribeslendiğinde daha iyi bir çeşitleme derecesine ulaşıldığı sonucuna varılmaktadır.

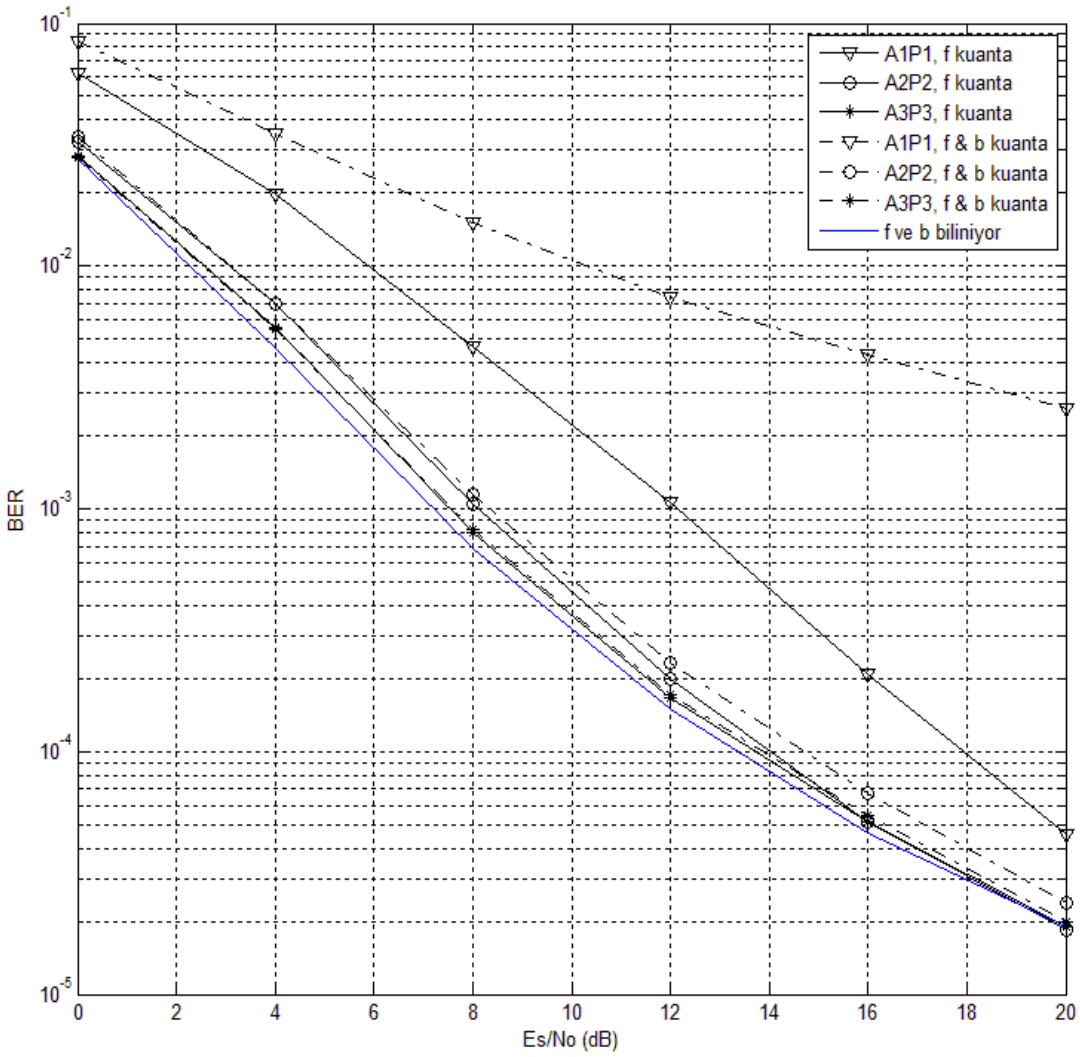
Bunun yanısıra, A3P3 durumu ile **f** 'in her röle tarafından mükemmel bilindiği duruma yaklaşılmaktadır. Fazı 3 bit ile kuantalamak çeşitleme derecesini arttırmaktadır fakat hata yayılımı tam çeşitlemenin görülmesini engellemektedir.



Şekil 6.4 : DF, genlik ve faz için farklı sayıda bit/bitler, 20dB DSNR

Şekil 6.5'ten görüldüğü üzere, DF yönteminde hem **f** hem de **b** kanal katsayısının kuantalanması sadece **f** 'in kuantalandığı duruma göre daha kötü başarım vermektedir. Sadece **f** 'in kuantalandığı durumda **b** kanal katsayısının bilindiği varsayılmaktadır. Fakat bu iki yöntem arasındaki başarım farkı A3P3 durumunda önemsiz hale gelmiştir. **b** kanal katsayısının genlik ve fazının 3'er bit ile geribeslenmesi başarımı **b** 'nin bilindiği ve sadece **f** 'in kuantalandığı duruma oldukça yaklaştırmaktadır.

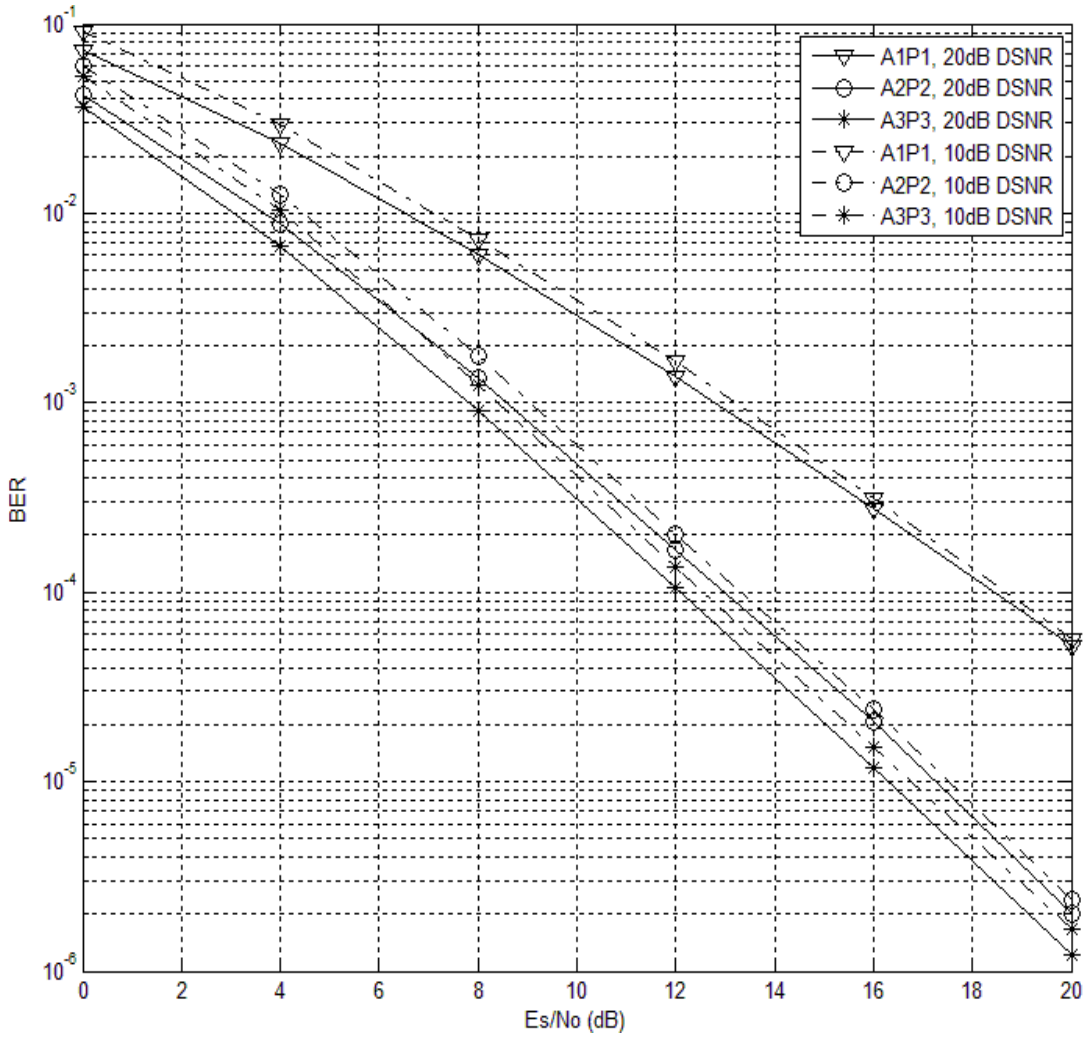
A1P1 durumundan açıkça görüldüğü üzere, sadece **f** 'in kuantalanması, **f** ve **b** 'nin kuantalanmasına göre önemli bir başarım artışı sağlamaktadır. Bu da **b** 'nin fazının daha iyi kuantalanmasının hata katını daha düşük bit hata olasılığı seviyelerine çektiğini göstermektedir. DF yönteminde **f** 'nin fazının daha iyi kuantalanması ise çeşitleme derecesini etkilemektedir.



Şekil 6.5 : DF, **f** ve **f** & **b** kuanta, 20dB farksal SNR

Şekil 6.6'da, AF yöntemi için bütün geribesleme durumlarında 20dB DSNR'ın 10dB'ye göre başarımı iyileştirdiği görülmektedir. Fakat bu iyileşme DF yöntemindeki kadar göze çarpmamaktadır.

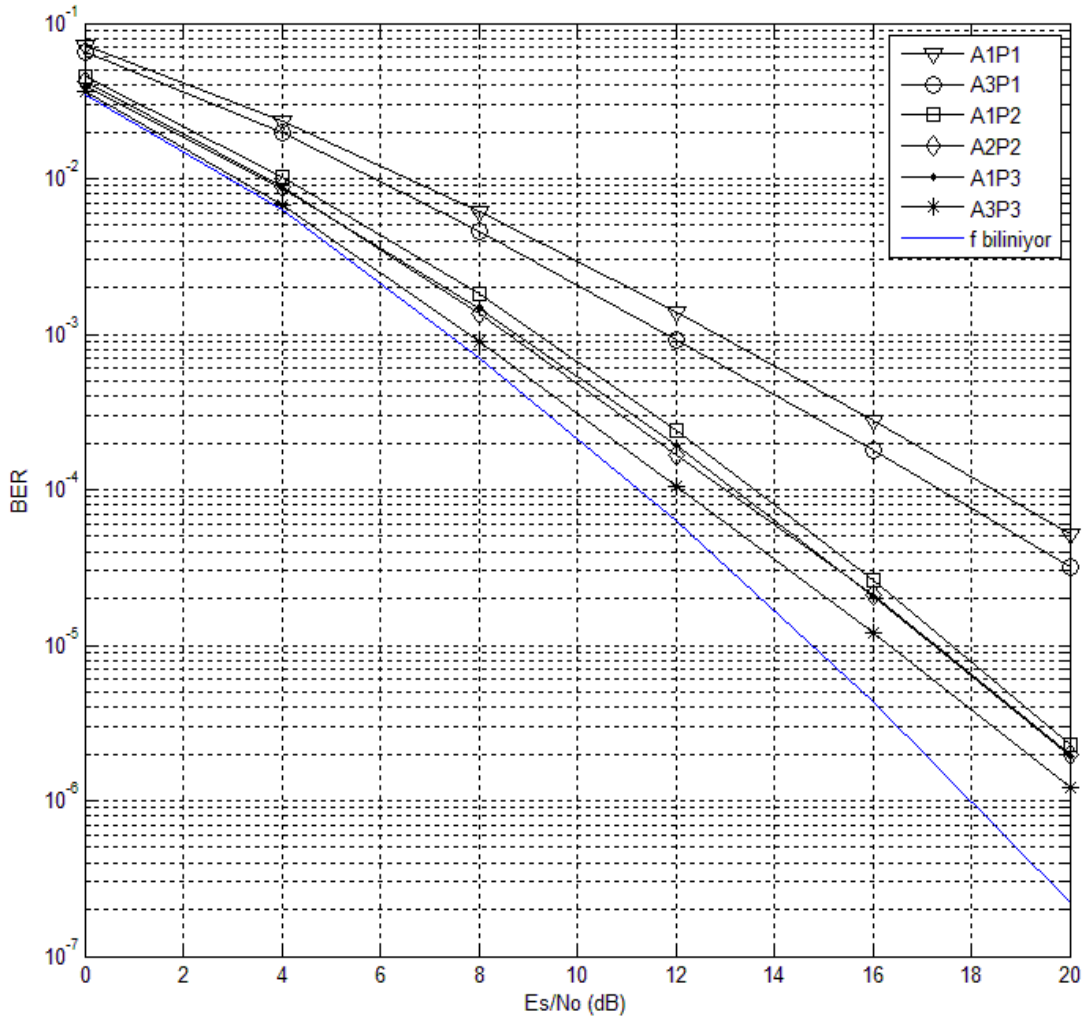
DSNR 10dB ve 20dB olduğu her iki durumda da 10^{-4} bit hata olasılığında A3P3, A1P1'e göre 6dB daha iyi başarım göstermektedir. A1P1'den A3P3 durumuna çeşitleme derecesi artışı Şekil 6.6'da açıkça görülmektedir.



Şekil 6.6 : AF, genlik ve faz için eşit sayıda bit/bitler, 10dB ve 20dB DSNR

Şekil 6.7'de AF için genlik ve fazda farklı sayıda bit/bitler geribeslendiği durumdaki benzetim sonuçları verilmiştir. Burada da DF yöntemine benzer şekilde, kanal katsayısının faz bilgisinin genlik bilgisine göre daha doğru bilinmesinin, genlik bilgisinin daha doğru bilinmesine göre başarım artışını daha çok etkilediği görülmektedir.

A3P3 durumu ile DF'tekinin aksine, rölelerin röle-hedef kanallarını mükemmel bildiği alt sınır durumuna çok iyi yaklaşılamamaktadır. Fakat A2P2 durumunda A3P3'e önemli bir başarım artışı da görülmemektedir. Rölelerin **f** 'i mükemmel bildiği durumda, (10)'da verilen huzme oluşturma katsayıları ile en büyük çeşitleme derecesi olan 3'e ulaşılmaktadır.

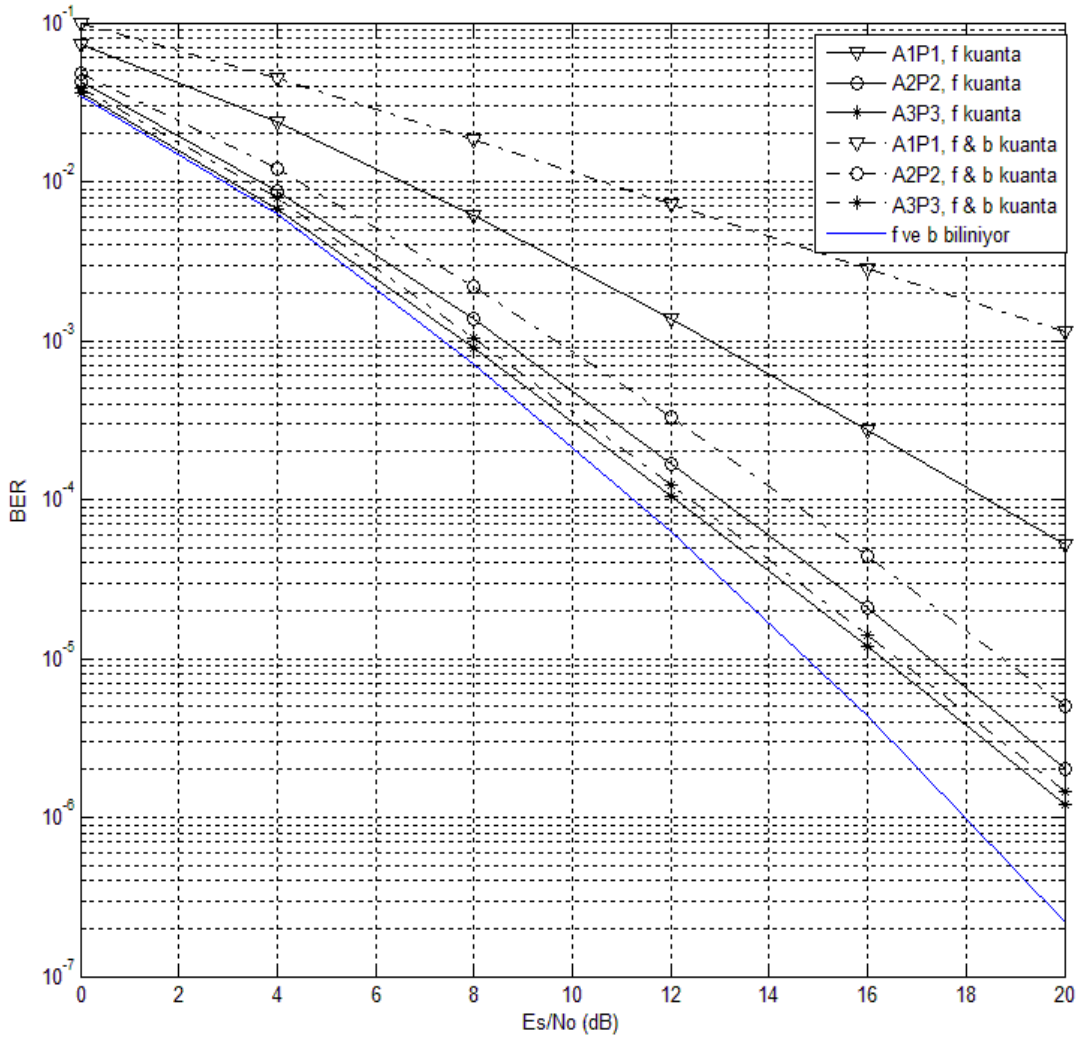


Şekil 6.7 : AF, genlik ve faz için farklı sayıda bit/bitler, 20dB DSNR

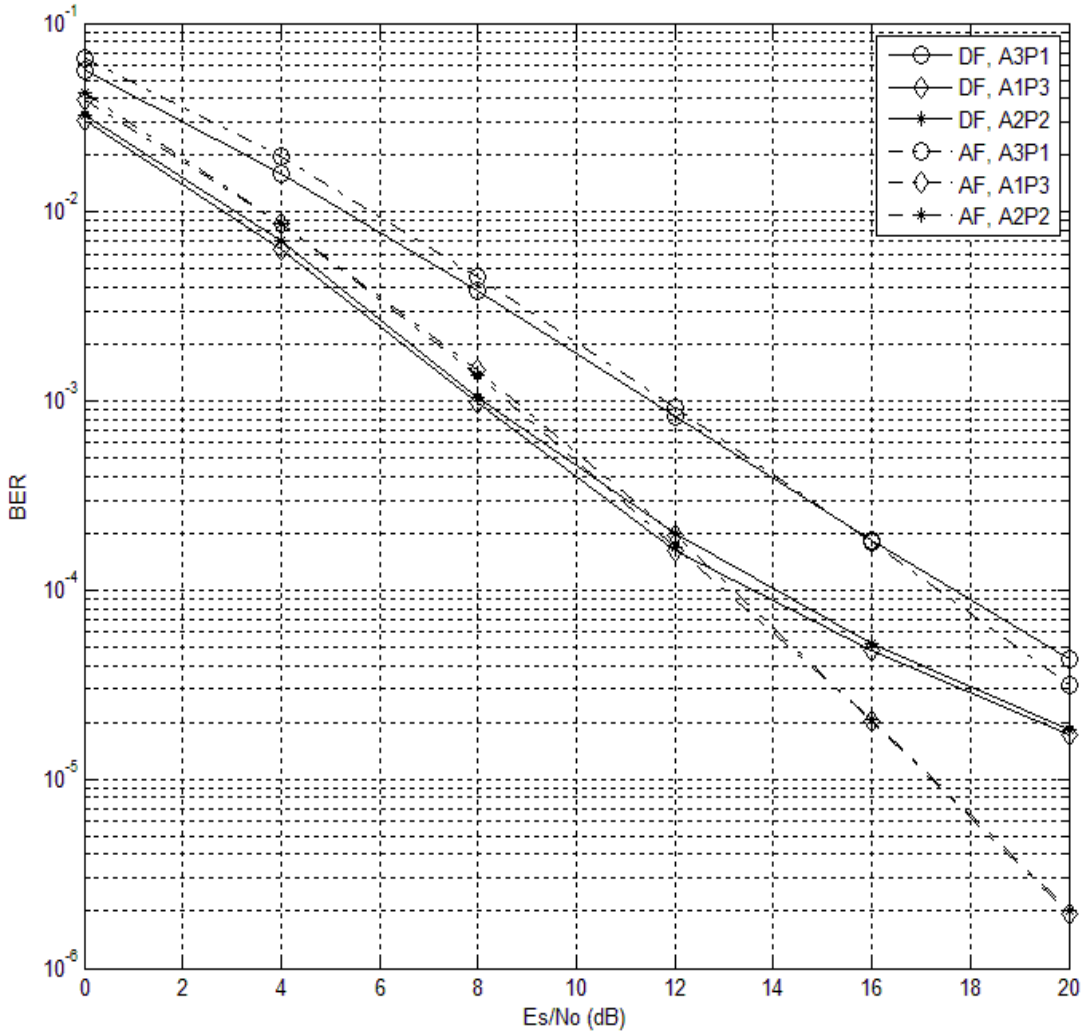
Şekil 6.8'de DF yöntemi gibi AF'de de hem **f** hem de **b** kanal katsayısının kuantalanması sadece **f** 'in kuantalandığı duruma göre daha kötü başarım verdiği görülmektedir. DF'de olduğu gibi AF'de de **b** 'nin toplamda 6 bit ile geribeslendiği durumda **b** 'nin bilindiği duruma yaklaşılmaktadır.

AF'de **f** ve **b** 'nin kuantalandığı durumdan sadece **f** 'in kuantalandığı duruma geçişlerde çeşitleme derecesinin de arttığı görülmektedir. Bu da huzme oluşturmada **b** kanal katsayısının da kullanılmasından dolayı çeşitlemeye **b** 'nin de etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla hem **f** hem de **b** 'nin fazının daha doğru kuantalanması çeşitleme derecesinin arttırılmasında önemlidir.

Şekil 6.9'da AF ve DF yöntemleri 20dB DSNR'da genlik ve faz için toplamda 4 bit geribeslendiği A3P1, A2P2 ve A1P3 durumlarında karşılaştırılmıştır. A3P1 durumunda 16dB SNR'a, A2P2 ve A1P3 durumlarında da yaklaşık 12dB SNR'a kadar DF yöntemi AF'den daha iyi başarım göstermektedir. Bu seviyeleri aşınca daha yüksek SNR'larda DF yöntemi kötüleşmeye başlamaktadır. Bunun nedeni de 10^{-4} bit hata olasılığı seviyesinde hata yayılımının görülmesidir.



Şekil 6.8 : AF, **f** ve **f** & **b** kuanta, 20dB farksal SNR



Şekil 6.9 : AF ve DF, genlik ve faz için toplamda 4 bit geribesleme, 20dB DSNR

7. SONUÇ

Bu çalışmada, AF ve DF yöntemleri için röleli kanallarda çeşitlemeyi arttırmak üzere huzme oluşturma ve röle seçme yapıları önerilmiştir. Yapılan benzetimlerle literatürde var olan yapılarla karşılaştırılmış her iki yöntem için de avantaj ve dezanvantajları gözlenmiştir.

AF yönteminde önerilen röle seçme yapılarına göre kötü olduğuna karar verilen rölenin iptal edilmesi yerine az güçle de olsa çalışmasını sağlamak sistemin başarımını arttırmaktadır. Bunun aksine, DF yönteminde kötü olduğuna karar verilen röleyi iptal etmek daha iyi başarım getirmektedir. Ek olarak, DF yönteminde röle seçme yapılarının başarımı ara kanal durumuna göre değişkenlik göstermektedir.

Bu çalışmada ayrıca, kaynak-röle ve röle-hedef arası kanal katsayıları kuantalanarak rölelere sınırlı geribesleme kanalı üzerinden gönderilmiştir. Çeşitlemeyi arttırmak üzere önerilen huzme oluşturma katsayıları, rölelere geribeslenen kısmi kanal bilgilerine göre üretilmiştir. Kanal kuantalama yönteminde kanal sönümleme katsayılarının Rayleigh dağılımı esas alınmıştır. Bunun yanısıra AF ve DF yöntemlerinde kanal katsayısının genlik ve fazı için farklı sayılarda bit geribesleme durumları ele alınmış, 10dB ve 20dB DSNR'da benzetimler yapılmıştır.

AF yönteminde, rölelerde röle-hedef kanalının tam bilgisine sahip olduğunda uygulanan huzme oluşturma yöntemiyle tam çeşitleme derecesine ulaşılmaktadır. Diğer taraftan, DF yöntemi ara kanaldan etkilendiğinden ve rölelerde çözme hataları nedeniyle tam çeşitleme derecesi görülememektedir.

AF ve DF yöntemlerinin her ikisi için de kanal katsayısının fazının daha doğru bilinmesi sistemin çeşitleme derecesi ve bit hata olasılığı başarımını daha çok etkilemektedir. Bunun yanısıra röle-hedef kanal katsayısının genlik ve fazının 3 bit ile geribeslenmesi, sistemi sınırsız geribesleme durumuna yaklaştırmaktadır. Son olarak, DF düşük SNR bölgesinde AF'den daha iyi olmasına rağmen, hata yayılımı nedeni ile yüksek SNR'da kötüleşmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Cover, T. and Thomas, J.**, 1991. Elements of Information Theory, Wiley, New York .

[2] **Haas, Z. J., Gerla, M., Johnson, D. B., Perkins, C. E., Pursley, M. B., Steenstrup, M., Toh, C.-K., Hayes, J. F.**, 1999. Guest editorial wireless ad hoc networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, pp. 1329 - 1332.

[3] **Kermani, P. and Vaidya, N.H.**, 2001. Advances in mobile ad hoc networking, *IEEE Journal on Personal Comm.*, vol. 8, pp. 6-7.

[4] **Van-der Meulen, E. C.**, 1971. Three-terminal communication channels, *Advances in Applied Prob. J.*, vol. 3, pp. 120–154.

[5] **Cover, T. M. and El Gamal, A.**, 1979. Capacity theorems for the relay channel, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 25, pp.572–584.

[6] **Schein, B. and Gallager, R. G.**, 2000. The Gaussian parallel relay network, in *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory*, p. 22.

[7] **Gastpar, M. and Vetterli, M.**, 2005. On the capacity of large Gaussian relay networks, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, pp.765–779.

[8] **Gastpar, M., Vetterli, M., and Gupta, P.**, 2002. The multiple-relay channel: Coding and antenna-clustering capacity, in *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory*, p. 136.

[9] **Xie, L. L. and Kumar, P. R.**, 2005. An achievable rate for the multiple-level relay channel, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, pp.1348– 1358.

[10] **Bolcskei, H., Nabar, R. U., Oyman, O. and Paulraj, A. J.**, 2006. Capacity scaling laws in MIMO relay networks, *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 5, pp. 1433–1444.

[11] **Laneman, J. N. and Wornell, G. W.**, 2000. Exploiting distributed spatial diversity in wireless networks, in *Proc. 40th Allerton Conf. Communications, Control, and Computing*, pp. 775-785.

[12] **Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B.**, 1998. Increasing uplink capacity via user cooperation diversity, in *Proc. IEEE Int. Symp. Informaton Theory*, p. 156.

[13] **Laneman, J. N. and Wornell, G. W.**, 2000. Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks, in *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conf.*, vol. 1, pp. 7–12.

[14] **Kramer, G., Gastpar, M. and Gupta, P.**, 2005. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, pp. 3037-3063.

[15] **Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B.**, 2003. User cooperation diversity– Part I: System description, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1927–1938.

[16] **Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B.**, 2003. User cooperation diversity– Part II: Implementation aspects and performance analysis, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1939–1948.

[17] **Laneman, J. N., Tse, D. N. C. and Wornell, G. W.**, 2004. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, pp. 3062–3080.

[18] **Laneman, J. N. and Wornell, G. W.**, 2003. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, pp. 2415–2425.

[19] **Chen, D. and Laneman, J. N.**, 2006. Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, pp. 1785–1794.

[20] **Hasna, M. O. and Alouini, M. S.**, 2003. End-to-end performance of transmission systems with relays over rayleigh– fading channels, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, pp. 1126–1131.

[21] **Hasna, M. O. and Alouini, M. S.**, 2004. Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, pp. 130–135.

[22] **Anghel, P. A. and Kaveh, M.**, 2004. Exact symbol error probability of a cooperative network in a Rayleigh-fading environment, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, pp. 1416–1421.

[23] **Ribeiro, A., Cai, X. and Giannakis, G. B.**, 2005. Symbol error probabilities for general cooperative links, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 1264–1273.

[24] **Ng, C. T. K. and Goldsmith, A. J.**, 2007. The impact of csi and power allocation on relay channel capacity and cooperation strategies, submitted to *IEEE Transactions on Information Theory*.

[25] **Narula, A., Lopez, M., Trott, M. D. and Wornell, G. W.**, 1998. Efficient use of side information in multiple-antenna data transmission over fading channels, *IEEE Journal on Selected Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1423–1436.

[26] **Visotsky, E. and Madhow, U.**, 2001. Space-time transmit precoding with imperfect feedback, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, pp. 2632–2639.

[27] **Yoo, T., Yoon, E. and Goldsmith, A.**, 2004. MIMO capacity with channel uncertainty: does feedback help?, in *Proc. IEEE GLOBECOM'04*, vol.1, pp. 96–100.

[28] **Hammerstrom, I., Kuhn, M. and Wittneben, A.**, 2004. Impact of relay gain allocation on the performance of cooperative diversity networks, in *Proc. IEEE VTC'04*, vol. 3, pp. 1815–1819.

[29] **Wittneben, A. and Rankov, B.**, 2004. Distributed antenna systems and linear relaying for gigabit MIMO wireless, in *Proc. IEEE VTC'04*, vol. 5, pp. 3624–3630.

[30] **Hasna, M. O. and Alouini, M. S.**, 2004. Optimal power allocation for relayed transmissions over rayleigh-fading channels, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, pp. 1999–2004.

[31] **Deng, X. and Haimovich, A. M.**, 2005. Power allocation for cooperative relaying in wireless networks, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, pp. 994–996.

[32] **Luo, J., Blum, R. S., Cimini, L., Greenstein, L. and Haimovich, A. M.**, 2005. Power allocation in a transmit diversity system with mean channel gain information, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, pp. 616–618.

[33] **Yi, Z. and Kim, I.M.**, 2007. Joint optimization of relay-precoders and decoders with partial channel side information in cooperative networks," *IEEE Journal on Selected Areas Commun.*, vol. 25, pp. 447–458.

[34] **Stankovic, V., Host-Madsen, A., Xiong, Z.**, 2006. Cooperative diversity for wireless ad hoc networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 3, pp. 37-49.

[35] **Larsson, E.G. and Stoica, P.**, 2003. Space-time block coding for wireless communications, Cambridge University Press, New York.

[36] **Bletsas, A., Khisti, A., Reed, D. and Lippman, A.**, 2006. A simple cooperative diversity method based on network path selection, *IEEE Journal on Selected Areas Commun*., vol. 24, pp. 659-672.

ÖZGEÇMİŞ

Ebru Sinem TOKER, 09/03/1982 tarihinde Edirne/Keşan'da doğmuştur. Lise eğitimini Çanakkale Fen Lisesi'nde tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini aldıktan sonra aynı üniversitede Telekomünikasyon Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Aralık 2006'dan itibaren Telekomünikasyon Mühendisliği Bölümü'nde eğitim asistanlığı görevinde çalışmaktadır.