

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALTERNATİF SÖNÜMLEMELİ KANAL YAPILARI  
VE HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE ETKİLERİNİN  
ANALİZİ**

Tologon KARATAEV

**FBE Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Haberleşme Programında Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Yrd.Doç.Dr. Lütfiye DURAK

**İstanbul, 2007**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	vii
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KABLOSUZ KANALLARIN İSTATİSTİKSEL ÖZELLİKLERİ .....	4
2.1 Rasgele Kanal Karakterizasyonu .....	4
2.1.1 Özilişki Bağlantıları .....	5
2.1.2 Özdeğişim .....	5
2.1.3 Durağanlık .....	5
2.1.4 Geniş-Duyarlılıklı Durağanlık .....	6
2.1.5 Ergodiklik .....	7
2.2 Güç-Spektrumu .....	7
2.2.1 RMS Gecikme Yayılımı .....	8
2.2.2 RMS Doppler Yayılımı .....	10
2.3 Sönümlenme Hızı Varyansı .....	10
2.3.1 Hız Varyansının Tanımı .....	10
2.4 Seviye Kesme Hızı ve Sönümlenme İstatistikleri .....	11
2.4.1 Seviye Kesme Hızı .....	11
2.4.2 Ortalama Sönümlenme Süresi .....	12
2.5 Çoklu-Yol Şekil Faktörü .....	12
2.5.1 Açısal Yayılım .....	13
2.5.2 Açısal Daraltma .....	13
2.5.3 Maksimum Sönümlenmenin Azimut Yönü .....	14
2.6 Sönümlenme Dağılımları .....	14
2.6.1 Rayleigh Sönümlenmesi Dağılımı .....	14
2.6.2 Rician Sönümlenmesi Dağılımı .....	14
2.6.3 Nakagami Sönümlenmesi Dağılımı .....	15
3. KABLOSUZ KANAL KARAKTERİZASYONU VE ÖZELLİKLERİ.....	16
3.1 Gezgin Radyo Yayılımı .....	16
3.2 Gauss Gürültülü Kanal .....	17
3.3 Sönümlenmeli Kanallar .....	17
3.4 Sönümlenmeli Kanal Sınıflandırması .....	18
3.5 Küçük-Ölçekli Sönümlenme .....	19

3.5.1	Yavaş Sönümleme .....	20
3.5.2	Hızlı Sönümleme .....	21
3.5.3	Düz Sönümleme (Frekans-Seçmeli Olmayan) .....	22
3.5.4	Frekans-Seçmeli Sönümleme .....	22
3.6	Kanalın Zamana Göre Değişimi .....	24
3.6.1	Zamanla-Değişen Kanallar .....	24
3.6.2	Zamanla-Değişmeyen Kanallar .....	24
3.7	Kanal Modelleme Çeşitleri .....	25
3.7.1	Sönümlemeli Kanallar için Matematiksel Modelleme .....	25
3.7.2	Saçılma Fonksiyonu ve İlgili Kanal Parametreleri .....	27
3.7.3	Frekans-Seçici Olmayan (Düz) Kanal: Çarpımsal Kanal Modeli .....	31
3.7.4	Frekans-Seçici Olan Kanal: Musluklandırılmış Gecikme Hatlı Kanal Modeli ....	32
3.7.5	Sönümlemeli İşaret Bileşenleri İçin İstatistiksel Modeller.....	34
4	SÖNÜMLEMELİ KANAL BENZETİMLERİ .....	39
4.1	Clarke'ın Matematiksel Referans Modeli.....	40
4.1.1	Sinüslerin Toplanması Modeli (Jakes Modeli).....	43
4.1.2	Beyaz Gauss Gürültüsünün Filtrelenmesi Metodu .....	43
4.1.3	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü Alma Modeli .....	44
4.2	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü Alma Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	44
4.2.1	Rayleigh Katsayılarının Elde Edilmesi.....	45
4.2.2	$F(k)$ Filtresinin Tasarlanması .....	47
5.	SÖNÜMLEMELİ KANAL UYGULAMALARI.....	50
5.1	Kosinüs İşaretin Oluşturulan Çeşitli Sönümlemeli Kanallardan İletilmesi.....	50
5.1.1	Düz Sönümlemeli Yavaş Değişen Kanal Uygulaması .....	51
5.1.2	Düz Sönümlemeli Hızlı Değişen Kanal Uygulaması .....	53
5.1.3	Frekans-Seçmeli Yavaş Değişen Kanal Uygulaması .....	55
5.1.4	Frekans-Seçmeli Hızlı Değişen Kanal Uygulaması .....	56
5.2	BPSK İşaretinin Oluşturulan Çeşitli Sönümlemeli Kanallardan İletilmesi.....	57
5.2.1	Yavaş Değişen Kanal.....	59
5.2.2	Hızlı Değişen Kanal.....	62
5.2.3	MATLAB programında <i>rayleighchan</i> komutu ile elde edilen performans gösterimi .....	68
6.	SONUÇ.....	69
	KAYNAKLAR.....	71
	EKLER .....	73
	Ek 1 Kosinüs işaretinin çeşitli sönümlemeli kanal uygulaması için MATLAB kodları .....	74
	Ek 2 BPSK işaretinin çeşitli sönümlemeli kanal uygulaması için MATLAB kodları .....	81
	Ek 3 BPSK işaretinin çeşitli sönümlemeli kanal uygulaması için MATLAB kodları (MATLAB <i>rayleighchan</i> komutu ile gerçekleştirilmiştir.) .....	89



## SİMGE LİSTESİ

$s(.)$	İletilen işaret
$r(.), y(.)$	Alınan işaret
$f_d$	Doppler kayması
$c$	Işık hızı
$v$	Hareketli hızı
$f_c$	Taşıyıcı frekansı
$T_S$	İşaretin sembol süresi
$T_C$	Kanalın uyumlu zamanı
$B_S$	İşaretin bantgenişliği
$B_C$	Kanalın uyumlu bantgenişliği
$\sigma_\tau$	Kanalın kök-ortalama-kareli gecikme yayılımı
$i$	Çoklu yol indeksi
$a_i$	Çoklu yol bileşeninin zayıflaması
$\theta_i$	Çoklu yol bileşeninin faz kayması
$N$	Çoklu yol sayısı
$\psi_i$	Dalganın geliş açısı
$\sigma^2$	Varyans
$R(t)$	Zarf
$f_R(.)$	Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu
$c(t; \tau)$	Kanal dürtü cevabı
$C(t; f)$	Kanalın zamanla-değişen frekans cevabı
$S(\tau; \lambda)$	Saçılma fonksiyonu
$T_m$	Çoklu yol yayılımı veya maksimum ek gecikme
$B_d$	Doppler yayılımı
$\theta(t)$	Faz
$\alpha(t)$	Zarf
$\phi_n(\tau)$	Özilişki fonksiyonu
$S_n(\lambda)$	Kanal Doppler spektrası
$m$	Sönümlenme şekli
$\tilde{h}(t)$	Zamanla-değişen bir kanal
$C_{\tilde{h}}(t_1, t_2)$	Kanalın özilişki fonksiyonu
$E\{\cdot\}$	Beklendik değer
$t_1$	Zaman göstergesi
$\overline{C_{\tilde{h}}}(\Delta t)$	Kanalın özdeğişim fonksiyonu
$\mu$	Ortalama değeri(Beklendik değer)
$\bar{\tau}$	Ortalama ek gecikmesi
$\overline{\tau^2}$	İkinci momenti
$\sigma_t^2$	Sönümlenme hızı varyansı
$R$	Eşik seviyesi
$N_R$	Seviye kesme hızı
$f_m$	Maksimum Doppler frekansı

$F_n$	n'ci karmaşık Fourier katsayıları
$\Lambda$	Açısal yayılım
$\gamma$	Açısal daraltma
$\theta_{\max}$	Maksimum sönümlenmenin azimutsel yönü
$F(k)$	Filtre katsayısı

## **KISALTMA LİSTESİ**

AWGN	Additive White Gaussian Noise
RMS	Root mean square
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
BPSK	Binary Phase Shift Keying
DPSK	Differential Phase Shift Keying

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 RMS gecikme yayılımı grafiksel gösterimi .....	9
Şekil 2.2 Zamanla-değişen Rayleigh dağılımlı rasgele süreç örnekleri .....	11
Şekil 2.3 Seviye Kesme Seviyesi Gösterimi .....	12
Şekil 3.1 Büyük-ölçekli sönümleme ve küçük-ölçekli sönümleme. ....	19
Şekil 3.2 Sembol periyoduna göre küçük-ölçekli kanal sınıflandırması.....	23
Şekil 3.3 Temelbant işaretinin bantgenişliğine göre küçük-ölçekli sönümlemeli kanal sınıflandırması.....	24
Şekil 3.4 Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	27
Şekil 3.5 Kanalin güç yoğunluk fonksiyonları ile özilişki fonksiyonları arasındaki ilişkiler (Sklar Bernard, 1997).....	30
Şekil 3.6 Çarpımsal kanal modeli.....	32
Şekil 3.7 Musluklandırılmış gecikme hatlı kanal modeli.....	33
Şekil 3.8 Rayleigh sönümlemeli zarf örneği .....	37
Şekil 3.9 Rician sönümlemeli zarf örneği (K = 5 dB için) (Kostov Nikolay, 2003).....	37
Şekil 3.10 K-faktörünün çeşitli değerlerine göre Rician olasılık yoğunluk fonksiyonları. Burada $K = -\infty$ iken Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşırken $K = +\infty$ iken Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşmaktadır (Gregory D. Durgin, 2000). ....	38
Şekil 4.1 Rayleigh sönümlemeli sürecin güç spektrumu (Vipin Sali).....	42
Şekil 4.2 Örneklendirilmiş Rayleigh dalga şeklinin gerçel ve sanal kısımları için özilişki ve çapraz ilişkilerinin grafiksel gösterimi (Christos Komninakis, 2004). ....	42
Şekil 4.3 Rayleigh değişkenlerini elde etmek için tek bir karmaşık ters ayrık Fourier dönüşümü kullanılan iyileştirilmiş algoritmanın blok diyagramı (Young D. J. vd.,2000). ....	45
Şekil 4.4 Gerçel ve sanal kısımları arasındaki özilişki ve çapraz-ilişki. Hareketli hızı 120 km/saat, $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , $T_s = 1$ ms, $F_m = 100$ Hz, $N = 4096$ olarak alınmıştır.46	
Şekil 4.5 Benzetimde elde edilen Doppler güç spektrumu. Hareketli hızı 120 km/saat, $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , $F_c = 900$ MHz, $T_s = 1$ ms, $F_m = 100$ Hz, $N = 4096$ olarak alınmıştır. ....	48
Şekil 4.6 Benzetimde elde edilen Rayleigh sönümlemeli dağılımın histogramı ve teorik Rayleigh sönümlemesi dağılımı. Hareketli hızı 120 km/saat, $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , $F_c = 900$ MHz, $T_s = 1$ ms, $F_m = 100$ Hz, $N = 4096$ olarak alınmıştır. ....	49
Şekil 4.7 Benzetimde elde edilen Rayleigh sönümleme zarfı örneği. Hareketli hızı 120 km/saat, $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , $T_s = 1$ ms, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 100$ Hz, $N = 4096$ olarak alınmıştır. ....	49
Şekil 5.1 Sinüzoidal işareti genliği dB olarak alınmış ve 250 ms aralığında seçilmiştir. ....	50
Şekil 5.2 Kanalin Rayleigh dağılımlı histogramı, elde edileni ve teorik olanı. Yavaş değişen kanal örneği için $v = 30$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, ve $F_m = 25$ Hz seçilmiştir. $T_C = 17$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. Ortalama = 0.87 elde edilmiştir.51	
Şekil 5.3 Kanalin Rayleigh sönümlemeli zarfı ve ortalaması. Yavaş değişen kanal örneği için $v = 30$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, ve $F_m = 25$ Hz seçilmiştir. $T_C = 17$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır.....	52
Şekil 5.4 Kanalin Rayleigh sönümlemeli kosinüs işaretli zarfı. Yavaş değişen kanal örneği için $v = 30$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, ve $F_m = 25$ Hz seçilmiştir. $T_C = 17$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır.....	52
Şekil 5.5 Kanalin Rayleigh dağılımı elde edileni ve teorik olanı. Hızlı değişen kanal örneği	



için $v = 520$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, ve $F_m = 433$ Hz seçilmiştir. $T_C = 0.9$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır.....	53
Şekil 5.6 Kanalın Rayleigh sönümlenmeli zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için $v = 520$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 433$ Hz ve $f_m = 0.43$ seçilmiştir. $T_C = 0.9$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	54
Şekil 5.7 Kanalın Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için $v = 520$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 433$ Hz ve $f_m = 0.43$ seçilmiştir. $T_C = 0.9$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	54
Şekil 5.8 Frekans-seçmeli Rayleigh sönümlenmeli kanalın gecikmeli güç spektrumu. ....	55
Şekil 5.9 Kanalın frekans-seçmeli Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Yavaş değişen kanal örneği için $v = 30$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, ve $F_m = 25$ Hz seçilmiştir. $T_C = 17$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır.....	56
Şekil 5.10 Kanalın Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Hızlı değişen kanal için $v = 520$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 433$ Hz ve $f_m = 0.43$ seçilmiştir. $T_C = 0.9$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır.....	57
Şekil 5.11 İletilecek olan BPSK işareti .....	58
Şekil 5.12 Rayleigh sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için $v = 1$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 0.8$ Hz ve $f_m = 0.0008$ seçilmiştir. $T_C = 507$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	59
Şekil 5.13 Frekans-seçmeli Rayleigh sönümlenmeli kanalın gecikmeli güç spektrumu. ....	60
Şekil 5.14 Rayleigh sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için $v = 1$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 0.8$ Hz ve $f_m = 0.0008$ seçilmiştir. $T_C = 507$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	60
Şekil 5.15 Rayleigh sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için performans analizi. Burada $v = 1$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 0.8$ Hz ve $f_m = 0.0008$ seçilmiştir. $T_C = 507$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	61
Şekil 5.16 Frekans-seçmeli kanalın Rayleigh sönümlenmeli işaretin zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için $v = 120$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 100$ Hz ve $f_m = 0.1$ seçilmiştir. $T_C = 4.2$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	62
Şekil 5.17 Frekans-seçmeli kanalın Rayleigh sönümlenmeli işaretinin zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için $v = 120$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 100$ Hz ve $f_m = 0.1$ seçilmiştir. $T_C = 4.2$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	63
Şekil 5.18 Hızlı değişen kanal için performans analizi. Hızlı değişen kanal örneği için $v = 120$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 100$ Hz ve $f_m = 0.1$ seçilmiştir. $T_C = 4.2$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır.....	64
Şekil 5.19 Rayleigh sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için $v = 10$ km/saat, $F_c = 1800$ MHz, $F_m = 16$ Hz ve $f_m = 0.016$ seçilmiştir. $T_C = 25$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	65
Şekil 5.20 Yavaş değişen kanal için performans analizi. Yavaş değişen kanal örneği için $v = 10$ km/saat, $F_c = 1800$ MHz, $F_m = 16$ Hz ve $f_m = 0.016$ seçilmiştir. $T_C = 25$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	66
Şekil 5.21 Rayleigh sönümlenmeli hızlı değişen kanal için $v = 120$ km/saat, $F_c = 1800$ MHz, $F_m = 200$ Hz ve $f_m = 0.2$ seçilmiştir. $T_C = 2$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak	

hesaplanmıştır. ....	67
Şekil 5.22 Hızlı değişen kanal için performans analizi. Hızlı değişen kanal örneği için $v = 120$ km/saat, $F_c = 1800$ MHz, $F_m = 200$ Hz ve $f_m = 0.2$ seçilmiştir. $T_C = 2$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	67
Şekil 5.23 Rayleigh sönümlmeli hızlı değişen kanal örneği için $v = 120$ km/saat, $F_c = 900$ MHz, $F_m = 100$ Hz ve $f_m = 0.1$ seçilmiştir. $T_C = 4.2$ ms ve $T_S = 1$ ms olarak hesaplanmıştır. ....	68

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında günümüzdeki kablosuz hareketli kanal çeşitleri incelenmiştir. Sönümlemeli kanal etkilerinin analizini elde etmek için bu kanallar üzerinde bir benzetim yapılmıştır. Sönümlemeli kanal benzetimi için önce literatür taraması yapılmış ve uygun olan bir kanal benzetiminin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kanal benzetiminin çeşitli haberleşme sistemleri için de kullanılabilceği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın yapılmasında her türlü destek ve yardımı sağlayan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Lütfiye Durak'a derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bölümümüz asistan hocalarından Sultan Aldırmaz'a da yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

## ÖZET

Kablosuz haberleşme sistemlerinde kanal etkisi haberleşmenin performansı üzerinde büyük önem taşımaktadır. Sönümlenmeli kanallar en yaygın kanal modeli olan beyaz Gauss gürültülü kanala göre iletilen işaretin üzerinde büyük bozunmalar ortaya çıkartmaktadır. Ayrıca sönümlenmeli kanallarda Doppler yayılımının da etkisi gözlenmektedir.

Bu çalışmada çeşitli sönümlenmeli kanalların haberleşme sistemlerindeki etkilerinin analizi yapılmaktadır. Öncelikli sönümlenmeli kanal çeşitleri birinci-dereceden ve ikinci-dereceden istatistiksel özellikleri bakımından incelenmektedir. Gerçek kanal durumları için yaklaşık aynı istatistiksel özellikleri sağlayan kanal benzetimi gerçekleştirilmektedir. Bu gerçekleştirme ters ayrık Fourier dönüşümü alma metodu ile elde edilmektedir. Elde edilen kanal benzetimi ile sönümlenmeli kanal uygulaması yapılmaktadır. Sönümlenmeli kanal uygulamasında öncelikli bir kosinüs işareti iletilmekte ve işaret üzerindeki kanal etkileri incelenmektedir. Daha sonra bir ikili faz kaymalı anahtarlama (BPSK) modülasyonlu işaretinin iletimi gerçekleştirilmekte ve performans analizi yapılmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Sönümlenmeli kanal, Kanal istatistikleri, Doppler yayılımı, Gecikmeli kanal spektrumu, Maksimum ek gecikme, Hızlı değişen kanal, Yavaş değişen kanal, Düz sönümleme, Frekans-seçmeli sönümleme, Rayleigh dağılımı.

## **ABSTRACT**

In wireless communication systems channel effects have great influences on the performance of communication. Fading channels may cause larger distortions on the transmitted signal compared to the widespread channel model white Gaussian noise channel. The Doppler spread also has impacts on the fading channels.

In this work, the analysis of the effects of various fading channels on the communication systems has been studied. Various fading channels are investigated in the first-order and second-order statistics. Channel simulations have been realized that gives approximately the same statistical features as the real channel. The channel simulations are realized by the method of inverse discrete Fourier transform which already exists in literature. Various fading channel applications are performed by using this simulation. In the fading channel application at first a cosine signal is transmitted and the channel effects are investigated. Then another application is simulated by transmitting a BPSK modulated signal through these various fading channel models and performance analysis have been investigated.

**Keywords:** Fading channel, Channel statistics, Doppler spread, Channel delay profile, Maximum excess delay, Fast fading, Slow fading, Flat fading, Frequency-selective fading, Rayleigh distribution.

## 1. GİRİŞ

Günümüz haberleşme sistemlerinde hareketli kablosuz kanallar çok önemli bir konuma sahiptir. Bundan dolayı hareketli kablosuz haberleşmede kanalın çok iyi kestirilmesi gerekmektedir. Kanallar iyi bir şekilde tanımlandıktan sonra haberleşmenin alıcı ve verici kısmı da buna göre tasarlanmaktadır.

Sönümlenmeli kanallar çoğunlukla rasgele değişim gösterdiklerinden rasgele süreçlerdeki gibi özelliklere sahip olabilmektedir. Kanallar zaman, frekans ve uzaya bağlı olarak istatistiksel özelliklerinde çok farklı değişimler gösterebilmektedir. Bu tezde kanalın istatistiksel özellikleri ile ilgili temel kavramlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Kanalla ilgili bu süreçler genelde *birinci-dereceden istatistikler* ve *ikinci-dereceden istatistikler* şeklinde ele alınmıştır. Genelde, *birinci-dereceden istatistikler*: Ortalama, varyans, olasılık yoğunluk fonksiyonları ve *ikinci-dereceden istatistikler*: Özilişki, özdeğişim, güç spektral yoğunluğu, seviye-kesme hızı, ortalama sönümleme süresi olarak alınmıştır (Rappaport, 1996; Sklar, 1997; Hayes, 1996).

Kablosuz bir kanalın benzetimi için düz sönümlenmeli kanaldaki gibi bir tane veya frekans-seçmeli sönümlenmeli kanaldaki gibi birden fazla sayıda istenen istatistiksel özelliklere sahip etkili rasgele kompleks Gauss süreçlerini üretmek için kullanılan üç temel model vardır. Bunlar, sinüslerin toplanması (Jakes Modeli), ters fourier dönüşümünü almak ve beyaz Gauss gürültüsünün filtrelenmesi modelleridir (Young ve Beaulieu, 2000; Tran vd., 2005; Li ve Huang, 2002; Komninakis, 2004; Patzold ve Hogstad 2005; Jakes, 1974).

Bu tezde Bölüm 2’de kablosuz kanalların istatistiksel özellikleri verilmiştir. Bölüm 3’te sönümlenmeli kanal karakterizasyonu tanıtılmıştır. Burada Bölüm 4 ve 5’te gerçekleştirilecek olan çeşitli sönümlenmeli kanal uygulamaları için gerekli olan tanımlamalar yapılmıştır. Bölüm 4’te sönümlenmeli kanal benzetimleri yapılmış ve Bölüm 5’te ise kanal uygulamaları yapılmıştır.

Bölüm 2’de kablosuz kanalların istatistiksel özellikleri üzerinde durulmuştur. Öncelikle rasgele kanal karakterizasyonu verilmiş ve bu karakterizasyonda kullanılan kanalın özilişki bağlantıları, geniş-duyarlılıklı durağanlık, özdeğişim, durağanlık ve ergodiklik kavramları sırasıyla tanımlanmıştır. Daha sonra kanal analizinde önemli bilgileri veren kanal güç spektrumu üzerinde durulmuştur. Burada rms gecikme yayılımı ve rms Doppler yayılımı ayrıntılı olarak verilmiştir. Ardından sönümleme güç varyansı tanımlanmış ve alt

bölümlerinde de hız varyansının tanımı yapılmış ve sönümleme istatistiği olan seviye kesme hızı ve ortalama sönümleme süresi açıklanmıştır. Ayrıca, sönümleme literatüründeki çoklu yol şekil faktörü tanımlanmış ve açısal yayılım, açısal daraltma ve maksimum sönümlemenin azimut yönü kavramları açıklanmış ve sönümleme için kullanılan dağılımlar incelenmiştir.

Bölüm 3'te öncelikli gezgin radyo yayılımı kısaca tanıtılmış, sonrasında haberleşmede en genel kanal durumu olan Gauss kanalı anlatılmıştır. Daha sonra sönümlemeli kanallar ayrıntılı bir şekilde açıklanmış ve sönümlemenin bir çok çeşidi örnekleriyle incelenmiştir. Ayrıca, kanalın zamana göre değişmesine bağlı olarak bir sınıflandırma yapılmıştır. Son olarak, sönümlemeli kanalın matematiksel modellemesi yapılmış ve bu matematiksel modellemeye göre literatürdeki en genel kanal modellemeleri tanıtılmıştır.

Daha sonra Bölüm 4'te sönümlemeli kanal benzetimleri yapılmıştır. Alıcı ile verici arasında doğrudan görüş hattının olmadığı ve alıcının vericiye göre hareketli olduğu durumlarda gerçekleşen kablosuz iletişimlerde gerçek kanal etkileri için en iyi yaklaşım Rayleigh sönümlemesi olmuştur. Rayleigh sönümlemeli bir kanal modelinde iletilen işarete çarpımsal bir bozulma katılmaktadır. Sönümlemeli kanallar için literatürde bir çok simülatörler yapılmıştır (Rappaport, 1996; Young ve Beaulieu, 2000; Tran vd., 2005; Li ve Huang, 2002; Ramaswamy, 2005; Sali; Komninakis, 2004; Baddour ve Beaulieu, 2005; Patzold ve Hogstad 2005; Jakes, 1974; Cheng, 2000; Punnoose vd.).

Bu metodlar Bölüm 4 boyunca tanıtılmaktadır ve yapılan benzetimler gösterilmektedir. İlk olarak Clarke'ın referans modeli verilmiştir. Sırasıyla sinüslerin toplanması metodu, beyaz Gauss gürültüsünün filtrelenmesi metodu ve ters ayırık Fourier dönüşümünü alma metodu tanıtılmıştır. Son olarak ters ayırık Fourier dönüşümünü alma metodunun gerçekleştirilmesi verilmiştir.

Bölüm 5'te Bölüm 4'te elde edilen simülatörle kanal uygulamaları yapılmıştır. İlk önce bir kosinüs işaretinin çeşitli sönümlemeli kanallardan iletilmesi uygulaması yapılmıştır. Düz sönümlemeli yavaş değişen kanal uygulaması, düz sönümlemeli hızlı değişen kanal uygulaması, frekans-seçmeli yavaş değişen kanal uygulaması ve frekans-seçmeli hızlı değişen kanal uygulaması gösterilmiştir. Buna ek olarak, bir BPSK işaretinin oluşturulan çeşitli sönümlemeli kanallardan iletilmesinin uygulaması yapılmış ve performans gösterimleri de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların grafiksel gösterimleri verilmiştir. Bu bölüm boyunca frekans-seçmeli kanal için dört gecikmeli yol olduğu varsayılmıştır.

Son olarak bu çalışmanın sonucu Bölüm 6'da verilmiştir.



## 2. KABLOSUZ KANALLARIN İSTATİSTİKSEL ÖZELLİKLERİ

Günümüz haberleşme sistemlerinde hareketli kablosuz kanallar çok önemli bir konuma sahiptir. Bundan dolayı hareketli kablosuz haberleşmede kanalın çok iyi kestirilmesi gerekmektedir. Kanallar iyi bir şekilde tanımlandıktan sonra haberleşmenin alıcı ve verici kısmı da buna göre tasarlanmaktadır. Bu bölümde kablosuz kanallar üzerinde tanımlamalar yapılmıştır.

Sönümlemeli kanallar çoğunlukla rasgele değişim gösterdiklerinden rasgele süreçlerdeki gibi özelliklere sahip olabilmektedir. Kanallar zaman, frekans ve uzaya bağlı olarak istatistiksel özelliklerinde çok farklı değişimler gösterebilmektedir. Bu bölümde kanalın istatistiksel özellikleri ile ilgili temel kavramlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Kanalla ilgili bu süreçler genelde *birinci-dereceden istatistikler* ve *ikinci-dereceden istatistikler* şeklinde de ele alınmıştır. Genelde, *birinci-dereceden istatistikler*: Ortalama, varyans, olasılık yoğunluk fonksiyonları ve *ikinci-dereceden istatistikler*: Özilişki, özdeğişim, güç spektral yoğunluğu, seviye-kesme hızı, ortalama sönümleme süresi olarak alınmıştır.

Bölümün içeriği şu şekilde sıralanmıştır: Bölüm 2.1’de rasgele kanal karakterizasyonu verilmiştir ve bu karakterizasyonda kullanılan kanalın özilişki bağlantıları, geniş-duyarlılıklı durağanlık, özdeğişim, durağanlık ve ergodiklik kavramları sırasıyla tanımlanmıştır. Daha sonra Bölüm 2.2’de kanal analizinde önemli bilgileri veren kanal güç spektrumu üzerinde durulmuştur. Burada rms gecikme yayılımı ve rms Doppler yayılımı ayrıntılı olarak verilmiştir. Bölüm 2.3’te sönümleme güç varyansı tanımlanmış ve alt bölümlerinde de hız varyansının tanımı yapılmıştır. Sönümleme istatistiği olan seviye kesme hızı ve ortalama sönümleme süresi de bölüm 2.4’te açıklanmıştır. Bölüm 2.5’te ise sönümleme literatüründeki çoklu yol şekil faktörü tanımlanmış ve açılal yayılım, açılal daraltma ve maksimum sönümlemenin azimut yönü kavramları açıklanmıştır. Son olarak Bölüm 2.6’da sönümleme için kullanılan dağılımlar incelenmiştir.

### 2.1 Rasgele Kanal Karakterizasyonu

Bu kısımda sönümlemeli kanalların istatistiksel tanımlamasında kullanılan kavramlar açıklanmıştır. Burada ilk olarak özilişki bağlantılarının matematiksel tanımlaması verilmiş ve sırasıyla özdeğişim, durağanlık, geniş-duyarlılıklı durağanlık, ergodiklik tanımlanmıştır. Özilişki ile özdeğişim fonksiyonları, iki rasgele değişken arasındaki doğrusal bağlılığın derecesi hakkında bilgi vermektedir.

### 2.1.1 Özilişki Bağlantıları

Bir rasgele sürecin değişimini karakterize etmek için en çok kullanılan yöntem fonksiyonun özilişkisini hesaplamaktır. Zamanla değişen bir kanal  $\tilde{h}(t)$  ile belirtilirse bu kanalın özilişkisi

$$C_{\tilde{h}}(t_1, t_2) = E\{\tilde{h}(t_1)\tilde{h}^*(t_2)\} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır.

Burada  $E\{\cdot\}$  beklendik değeri ifade etmektedir.  $\tilde{h}^*(t)$ , karmaşık eşleniğini göstermektedir. Bu denklem zamanın  $t_1$  ve  $t_2$  gibi iki farklı noktalarındaki fonksiyonun aldığı değerlerin çarpımlarının ortalamasını almakla  $\tilde{h}(t)$ 'nin zaman-değişimini vermektedir.

### 2.1.2 Özdeğişim

Özilişki fonksiyonunun tanımı üzerine bir çok kullanışlı çeşitleri vardır. İlk olarak, eğer bir süreç sıfır-ortalımalı bir süreç ise böyle bir sürecin özilişkisine *özdeğişim* denir. Örnek olarak zamanla-değişen bir kanal ele alınırsa, eğer  $E\{\tilde{h}(t)\} = 0$  ise, o zaman  $C_{\tilde{h}}(\Delta t)$  fonksiyonu bir özdeğişim fonksiyonu olmaktadır. Özdeğişim fonksiyonunun tanımı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \overline{C}_{\tilde{h}}(\Delta t) &= E\left\{\left[\tilde{h}(t_0) - \mu\right]\left[\tilde{h}^*(t_0 + \Delta t) - \mu^*\right]\right\}, \\ &= C_{\tilde{h}}(\Delta t) - |\mu|^2, \mu = E\{\tilde{h}(t)\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Bu tanımlamada geniş-duyarlılıklı durağan sürecin ortalama değeri çıkartılmıştır. Birçok kompleks temel bantlı kanalların özilişki fonksiyonları için  $\mu = 0$ 'dır ve özilişki fonksiyonu özdeğişim fonksiyonuna eşit olmaktadır. Dolayısıyla sıfır-ortalımalı rasgele kanallarda özilişki fonksiyonu aynı zamanda özdeğişim fonksiyonunu verir.

### 2.1.3 Durağanlık

Durağanlık rasgele bir süreci tanımlamada kullanılan en önemli ve güçlü niteliklerden birisidir ve bir çok çeşitleri vardır. Durağanlık terimi kanal değişimlerinden etkilenmeyen herhangi istatistik çeşidini tanımlamak için kullanılabilir. Ortalama ve varyansın sabit olduğu durumdur.

### Ortalama durağanlığı

Eğer zamanla-değişen bir sürecin ortalama değeri zamanın bir fonksiyonu olarak değişmiyorsa süreç *ortalamada durağan* olmaktadır. İstatistiğin hesaplanmasında kullanılan rasgele sürecin örneklerinin sayısına göre bir istatistik derecesi vardır. Örneğin, bir özilişki fonksiyonu rasgele sürecin iki tane örneğinden hesaplandığından *ikinci-dereceden* istatistik olmaktadır:

$$C_{\tilde{h}}(t_1, t_2) = E\{\tilde{h}(t_1)\tilde{h}^*(t_2)\} \quad (2.3)$$

Örneklerden birisi  $t_1$  anında ve diğeri de  $t_2$  anında alınmıştır.

### Geniş-Duyarlılıklı Durağanlık

(2.3) denklemi eğer özilişki fonksiyonu  $t_1$  ve  $t_2$  değerlerine göre değişmiyorsa, sadece bu iki değer arasındaki farkın fonksiyonu oluyorsa *geniş-duyarlılıklı durağan* olmaktadır.

### Birinci-dereceden durağanlık

Bir sürecin ortalama, varyans, olasılık yoğunluk fonksiyonu gibi birinci-dereceden olan tüm istatistikleri zaman ve frekans gibi bağımlılıklara göre değişmiyorsa bu süreç birinci-dereceden durağan olmaktadır.

### Kesin-Duyarlılıklı Durağanlık

Durağanlığın en geniş içerikli çeşidi *kesin-duyarlılıklı durağanlıktır*. Rasgele bir süreç eğer her bir dereceye göre durağan oluyorsa, kesin-duyarlılıklı durağan olmaktadır. Bir süreçte kesin-duyarlılıklı durağanlığı oluşturmak isteniyorsa pek çok rasgele süreç için ispatlaması zor bir durumdur.

#### 2.1.4 Geniş-Duyarlılıklı Durağanlık

Kanal durumlarıyla ilgili en çok karşılaşılan durumlardan birisi de geniş-duyarlılıklı durağanlıktaki kanaldır. Bir çok kaynaklarda (Biglieri vd., 1998; Hayes, 1996) belirtildiği gibi bir rasgele sürecin geniş-duyarlılıklı durağan olduğunu öğrenmek için bu sürecin özilişkisine bakmak gerekmektedir. Eğer bir rasgele sürecin özilişkisi sadece  $t_1$  ve  $t_2$  zamanları arasındaki farka bağlı olarak değişim gösteriyorsa bu süreç *geniş-duyarlılıklı durağan* bir süreçtir. Başka bir deyişle, ilişki davranışı zamana göre değişken değildir:

$$C_{\tilde{h}}(t_1, t_2) = C_{\tilde{h}}(t_0 + t_1, t_0 + t_2) , \quad \text{tüm } t_0 \text{ değerleri için} \quad (2.4)$$

Böylelikle, geniş-duyarlılıklı durağanlıktaki bir özilişki genellikle,  $\Delta t = t_2 - t_1$  gibi tek bir zaman değişkeninin fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$C_{\tilde{h}}(\Delta t) = E\{\tilde{h}(t)\tilde{h}^*(t + \Delta t)\}. \quad (2.5)$$

Aynı zamanda böyle bir sürecin ortalama değeri de sabittir ve varyansı da sınırlı olmaktadır.

Benzer şekilde özilişki tanımlamaları frekansın ve uzayın fonksiyonu olarak da gösterilebilir. Sonuç olarak, birinci ve ikinci-dereceden istatistikleri zamanın mutlak başlangıç değerinden bağımsızdır. Ayrıca, ortalaması ve özilişkisi sürecin zamanda kaydırılması ile değişmemektedir.

### 2.1.5 Ergodiklik

Rasgele bir sürecin istatistiksel ortalaması ile aritmetik ortalaması aynı ise bu sürece ergodik süreç denir. Bunun gibi kanalın kazanç süreci, eğer zamanda ortalaması topluluk ortalamasına eşit oluyorsa kanal ergodik olmaktadır. Başka bir deyişle, kanal kazancının rasgeleliliği zaman üzerinde ortalaması alınarak ortaya çıkartılabilir. Rasgele bir kanal için ortalama ergodiklik matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\langle \tilde{h}(t) \rangle_t = E\{\tilde{h}(t)\}. \quad (2.6)$$

Bunun yanında frekansa göre ergodik ve uzaya göre ergodik gibi çeşitleri de vardır.

Ergodik olmayan kanalda ise kanal kazancı bir rasgele değişkendir ve zamanla değişmemektedir. Kanalın kazanç süreci durağandır ama ergodik değildir. Dolayısıyla, zamanda ortalaması topluluk ortalamasına eşit olamamaktadır. Ve kanal kazancının rasgeleliliği zaman üzerinde ortalaması alınarak ortaya çıkartılamaz olmaktadır.

### 2.2 Güç-Spektrumu

Geniş-duyarlılıklı durağan rasgele bir süreci karakterize etmek için kullanılan diğer bir yöntem de güç spektrumunu kullanmaktır. Güç spektrumu geniş-duyarlılıklı durağan sürecin Fourier dönüşümünü almakla tanımlanabilir. Bir önceki bölümlerde ele alınan zamanla-değişen  $\tilde{h}(t)$  kanalı için güç spektrumu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S_{\tilde{h}}(w) = E \left\{ \left| \tilde{H}(w) \right|^2 \right\}. \quad (2.7)$$

Burada  $\tilde{H}(w)$  ve  $\tilde{h}(t)$  Fourier çiftleridir.

Sönümlenmeli kanallarda zamanda seçiciliği tanımlayan güç spektrumu *Doppler spektrumu* olarak adlandırılır ve aynı şekilde frekansta seçiciliği tanımlamak için de gecikmeli spektrum kullanılır. Bunun yanında bir de güç spektrumu ile özilişki fonksiyonu Fourier dönüşüm çiftleri olmaktadır:

$$S_{\tilde{h}}(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{\tilde{h}}(\Delta t) \exp(-jw\Delta t) d\Delta t, \quad (2.8)$$

$$C_{\tilde{h}}(\Delta t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\tilde{h}}(w) \exp(jw\Delta t) dw. \quad (2.9)$$

Fourier analizlerinde bilindiği gibi bir fonksiyon bir bölgede daralıyorsa dönüşüm bölgesinde bunun Fourier dönüşümü genişlemektedir. Bundan dolayı güç spektrumunun rms genişliği kanalın uyumluluğu hakkında önemli bir bilgi vermektedir. Dönüşüm bölgesinde güç spektrumu genişledikçe özilişkisi de daralmakta ve uyumluluk azalmaktadır.

Bölüm 2.2.1 ve 2.2.2'de ilk olarak kanalın rms gecikme yayılımı tanımlanmış ve matematiksel olarak ifadesi verilmiştir. Buna ek olarak maksimum ek gecikme, gürültü eşik değeri ve rms Doppler yayılımı tanımlanmıştır.

### 2.2.1 RMS Gecikme Yayılımı

RMS gecikme yayılımı rasgele sürecin gecikme spektrumundan tanımlanmaktadır. Matematiksel olarak gecikme yayılımı bu spektrumun ikinci momentidir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\sigma_{\tau}^2 = \overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2, \quad \overline{\tau^n} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \tau^n S_{\tilde{h}}(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{\tilde{h}}(\tau) d\tau} \quad (2.10)$$

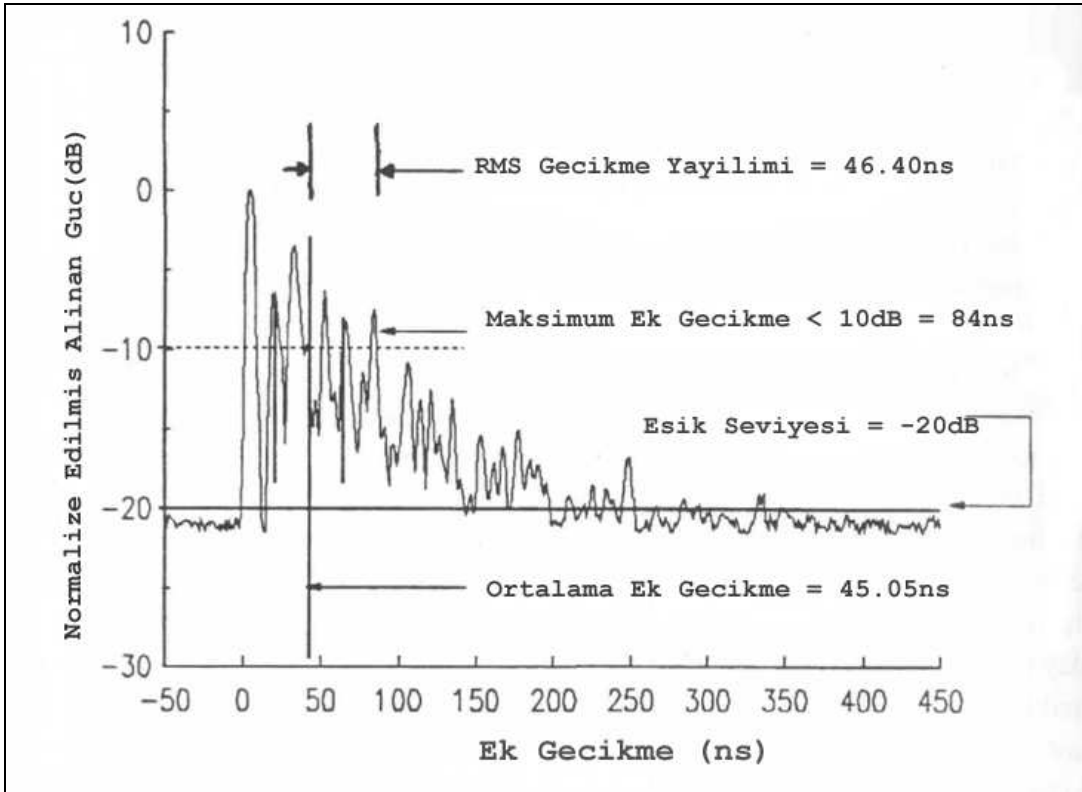
Burada,  $\overline{\tau}$  - ortalama ek gecikmesi,  $(\overline{\tau})^2$  - kareli ortalama ve  $\overline{\tau^2}$  - ikinci momentidir. Gecikme yayılımının büyük olması kanalın frekans seçiciliğinin büyük olmasını ve uyumlu kanal bantgenişliğinin küçük olmasını göstermektedir. Dolayısıyla kanal hakkında ayrıntılı bilgi

verebilmektedir.

Kanalın uyumlu bantgenişliğini hesaplamada bir çok kurallar vardır (Sklar, 1997). Genellikle, en az 0.5'lik ilişkiye sahip kanal karmaşık frekans transfer fonksiyonu için olan  $B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau}$  uyumlu bantgenişliği kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında da hesaplamalarda temel olarak bu eşitlik alınmıştır.

### Maksimum Ek Gecikme

Maksimum ek gecikmesi çoklu-yol enerjisinin maksimum çoklu-yol enerjisinden (ilk gelen bileşene ait olması řart değildir) belirli bir  $X$  dB kadar altına dıştüğünde alınan zaman gecikmesi olarak tanımlanabilir. Aynı zamanda *ek gecikme yayılımı* olarak adlandırılır. şekil 2.1'de rms gecikme yayılımının grafiksel gosterimi verilmiştir. Burada normalize edilmiş alınan gúce gúre ek gecikme grafiği gosterilmiştir. Maksimum ek gecikme için belirtilen değer 10 dB olmuştur. -20 dB gúcu ise eşit seviyesi olarak alınmış ve bunun altındaki değerler gürültü olarak varsyılmıştır. Bu gosterim bir çok tanımlamaların anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.



şekil 2.1 RMS gecikme yayılımı grafiksel gosterimi

## Gürültü Eşik Değeri

Zamanda yayılım parametrelerinin değerleri gürültü eşik değerine de bağlıdır. Gürültü eşik değeri işaretin artık gürültü olarak varsayıldığı güç seviyesinin altında kalan kısımdır. Eğer gürültü eşik değeri çok düşük seçilirse gürültü çoklu-yol gibi işlem görecektir ve böylece parametrelerin daha büyük olmasına sebep olacaktır.

### 2.2.2 RMS Doppler Yayılımı

RMS Doppler Yayılımı tanım olarak RMS gecikme yayılımı ile benzerdir ve Doppler spektrumunun ikinci merkezden momenti gibi hesaplanır:

$$\sigma_w^2 = \overline{w^2} - (\overline{w})^2, \quad \overline{w^n} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} w^n S_{\tilde{h}}(w) dw}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{\tilde{h}}(w) dw}. \quad (2.11)$$

Doppler yayılımı büyüdükçe kanal daha geniş zamansal dalgalanmalar göstermekte ve daha küçük uyumlu zamana sahip olmaktadır.

## 2.3 Sönümleme Hızı Varyansı

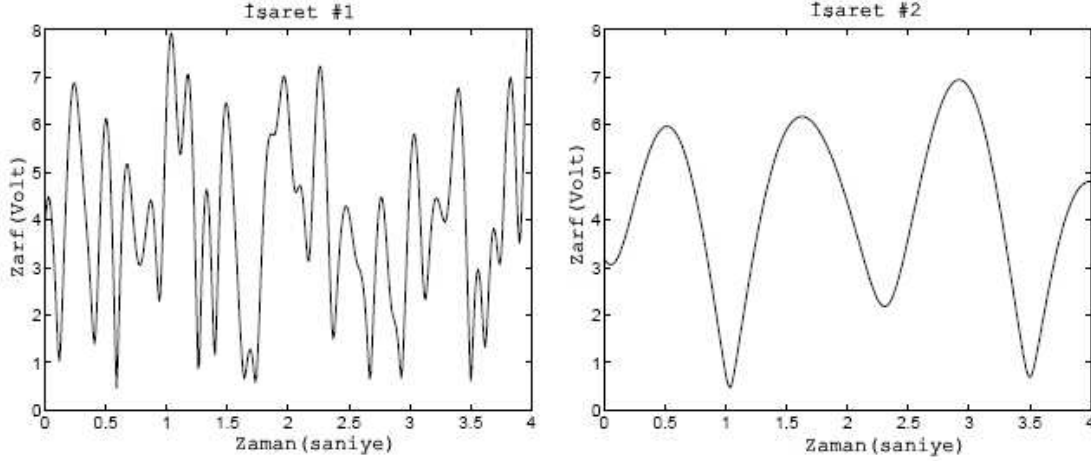
Sönümleme hızı varyansı kanalın zaman, uzay ve frekansın bir fonksiyonu olarak ne kadar hızlı dalgalandığını tanımlayan ikinci-dereceden anahtar bir istatistiktir. Bu bölümde hız varyansının tanımı yapılmıştır.

### 2.3.1 Hız Varyansının Tanımı

İki farklı zamanda-değişen gerilim sürecinin gösterildiği Şekil 2.3'de her iki süreç de Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunu izlemektedir. Şekilde, sol taraftaki süreç daha hızlı değişim gösterirken, sağ taraftakisi daha yavaş değişim göstermektedir. Her iki sürecin de zaman üzerindeki değişimi veren ikinci-dereceden istatistikleri çok farklıdır.

Geniş-duyarlılıklı durağanlıktaki ikinci-dereceden istatistikleri en iyi karakterize etmek için biri diğerinin Fourier çifti olan özilişki ile veya güç spektrumu ile mümkün olmaktadır. Temel bantlı kanal gibi karmaşık-değerli bir süreç için durağan-olmayan faz ayarlamasını yapmakla zamanla-değişen kanal dalgalanmasının ölçüsü sönümleme hızı varyansı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma_r^2 = E \left\{ \left| \frac{d[\tilde{h}(t) \exp(-j\omega t)]}{dt} \right|^2 \right\}. \quad (2.12)$$



Şekil 2.2 Zamanla-değişen Rayleigh dağılımlı rasgele süreç örnekleri

Burada kanalın zamansal-türevi sönümlenme hızını vermekte ve ortalama-kareli değer de bu sürecin varyansını vermektedir. Aynı şekilde frekans ve uzaysal sönümlenme hızı varyansı çeşitleri mevcuttur.

## 2.4 Seviye Kesme Hızı ve Sönümlenme İstatistikleri

Sönümlenmeli kanallarda sönümlenmenin seviye kesme hızı, ortalama sönümlenme hızı gibi tanımlamalar da önemlidir. Bu bölümde bu iki kavram kısaca tanıtılmıştır.

### 2.4.1 Seviye Kesme Hızı

Seviye kesme hızı yerel rms işaret seviyesine göre normalize edilmiş Rayleigh sönümlenmesi zarfının ilerlediği pozitif yönde belirli bir  $R$  eşik seviyesini kesmesindeki beklenen hız olarak tanımlanır. Saniyedeki seviye kesme sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

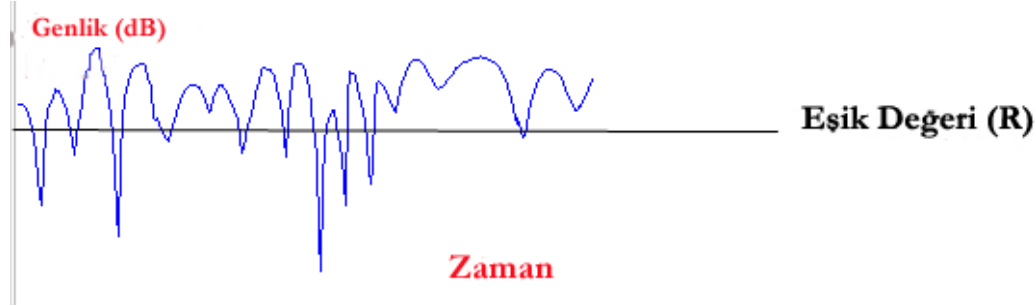
$$N_R = \int_0^{\infty} \sqrt{2\pi} f_m \rho e^{-\rho^2} . \quad (2.13)$$

Burada  $f_m$  maksimum Doppler frekansı ve  $\rho = R/R_{rms}$  belirli bir  $R$  seviyesinin sönümlenme zarfının yerel rms genliğine göre normalize edilmiş değeridir. (2.13) eşitliği belirli bir  $R$ 'de saniyedeki ortalama seviye kesme sayısı  $N_R$  değerini vermektedir. Seviye kesme hızı



$f_m$  'den dolayı aynı zamanda hareketli hızının bir fonksiyonu olmaktadır.

Şekil 2.3'te seviye kesme değeri gösterilmiştir. Burada sönümlemenin genliğinin zamana bağlı olarak belirlenen eşik değerinin kesmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Seviye Kesme Seviyesi Gösterimi

$\rho = 1/\sqrt{2}$  (rms seviyesinden 3 dB aşağısındaki bir seviyede) değerinde oluşan maksimum hızla hem yüksek hem de düşük seviyelerde bir çok kesmeler oluşmaktadır. İşaretin zarfı derin sönümlemeye ara sıra uğrarken derin olmayan sönümlemeye sık sık uğramaktadır.

#### 2.4.2 Ortalama Sönümleme Süresi

Alınan işaretin belirli bir  $R$  seviyesinin altında olduğundaki ortalama zaman periyodu olarak tanımlanır. Sönümleme süresince kaybolabilen işaretleşme bitlerinin en çok olasılıklı sayısını tanımlamada yardımcı olmaktadır. Ortalama sönümleme süresi öncelikli hareketlinin hızına bağlıdır ve maksimum Doppler hızı  $f_m$  yükseldikçe azalmaktadır. Rayleigh sönümlemeli işaret için ortalama sönümleme süresi aşağıdaki gibidir:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N_R} \Pr [r \leq R] = \frac{1}{N_R} (1 - e^{-\rho^2}). \quad (2.14)$$

Sonuç olarak,

$$\bar{\tau} = \frac{e^{\rho^2} - 1}{\rho f_m \sqrt{2\pi}} \quad (2.15)$$

elde edilmektedir.

#### 2.5 Çoklu-Yol Şekil Faktörü

Çoklu-yol şekil faktörü azimut açısı spektrumunun geometrik karakteristiklerini

tanımlamaktadır. Yerel bir alandaki her yönden olmayan çoklu yol dalgalarının herhangi bir dağılımının nitelikli analizini elde etmeyi sağlamaktadır. Burada yerel ortalama işaret gücünün geniş-duyarlılıklı durağan olduğu varsayılmaktadır. Temel olarak üç şekil faktörü tanımlanmıştır: Açısal yayılım, açısal daraltma ve maksimum sönümlemenin azimut yönü. Şekil faktörlerinin hepsi ikinci-dereceden sönümleme istatistiklerini etkilemektedir. Şekil faktörleri yerel bir alandaki yatay yayılımının genel gösterimi olan çoklu-yol gücünün açısal dağılımı,  $p(\theta)$  'dan elde edilir:

$$F_n = \int_0^{2\pi} p(\theta) \exp(-jn\theta) d\theta. \quad (2.16)$$

Burada,  $F_n$  n'ci karmaşık Fourier katsayılarıdır. Bu katsayılar şekil faktörlerini vermektedir.

Bir sonraki kısımlarda sırasıyla açısal yayılım, açısal daraltma ve maksimum sönümlemenin azimut yönü tanımlanmıştır.

### 2.5.1 Açısal Yayılım

Açısal yayılım, çoklu yolun gelen dalganın tek bir azimutsel yönüne nasıl yoğunlaştığının bir ölçüsünü gösterir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Lambda = \sqrt{1 - \frac{|F_1|^2}{F_0^2}}. \quad (2.17)$$

Burada  $F_0$  ve  $F_1$  (2.15) eşitliğinden elde edilir. Açısal yayılımı bu şekilde tanımlamanın bir çok yararları vardır. İlk olarak, açısal yayılım  $F_0$  (yerel ortalama alınan gücün toplam miktarı) ile normalize edilerek iletilen güçteki değişimlerle değişmemektedir. Bu tanımlama sezgisel olmakla açısal yayılım 0'dan 1'e kadar değişmektedir. Burada 0 değeri tek bir yönden olan tek bir çoklu yol bileşeninin en uç durumunu göstermekte ve 1 değeri de alınan gücün açısal dağılımında açık eğilim olmadığını göstermektedir.

### 2.5.2 Açısal Daraltma

Diğer bir şekil faktörü olan açısal daraltma  $\gamma$  ile gösterilmekte ve çoklu yolun iki azimutsel yönüne nasıl yoğunlaştığının bir ölçüsünü vermektedir. Açısal daraltma aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\gamma = \frac{|F_0 F_2 - F_1^2|}{F_0^2 - |F_1|^2} \quad (2.18)$$

olarak tanımlanır. Burada  $F_0$ ,  $F_1$  ve  $F_2$  (2.16) eşitliğinden elde edilirler. Açısal yayılımın tanımına benzer şekilde, açısal daraltma için olan ölçüm iletilen güçteki değişimlerle değişmemektedir. Açısal daraltmanın olası değerleri 0'dan 1'e doğru değişmektedir. Burada 0 değeri gelen iki yönde açık eğilim olmadığını göstermekte ve 1 değeri de farklı yönlerden gelen iki çoklu yol bileşenlerinin en uç durumunu göstermektedir.

### 2.5.3 Maksimum Sönümlemenin Azimut Yönü

Üçüncü şekil faktörü olan maksimum sönümlemenin azimutsel yönü bir yönlendirme parametresi gibi düşünülebilir ve  $\theta_{\max}$  ile belirtilerek aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \arg\{F_0 F_2 - F_1^2\}. \quad (2.19)$$

## 2.6 Sönümleme Dağılımları

Kanalın birinci-dereceden davranışını tam anlayabilmek için gücün veya zarfın olasılık yoğunluk fonksiyonlarını hesaplamak gerekmektedir. Sönümleme dağılımları çoklu yol sönümlemesinin istatistiksel bir karakterizasyonudur. Alınan işaretin genliğinin zamanla nasıl değiştiğini betimler. Çoklu yol ortamında alınan işaret farklı yön, faz ve genliklerle gelen çoklu işaretlerin toplamından oluşmaktadır. “Alınan işaret” denilen ise temelbant işaretidir ve işaretin zarfıdır. Sönümleme dağılımları yaygın olarak üç şekilde ifade edilir.

### 2.6.1 Rayleigh Sönümlemesi Dağılımı

Gezgin radyo kanallarında Rayleigh dağılımı düz sönümlemeli bir işaretin alınan zarfının istatistiksel zamanla değişen yapısını gözlemlemek için kullanılmaktadır. Rayleigh dağılımı tüm bileşenlerinin hiçbirinin doğrudan görüş-hatlı olmadığı kanallar için alınan işaret zarfının dağılımını tanımlar. Yayınım ortamında doğrudan görüş-hattı yoktur. Alıcıya ulaşan işaretler saçılmış ve yansımış işaretlerdir.

### 2.6.2 Rician Sönümlemesi Dağılımı

Rician dağılımı ise bileşenlerinin en az birinin doğrudan görüş-hatlı olduğu kanallar için alınan işaret zarfının dağılımını tanımlar. Yayınım ortamında etkin güce sahip (sönümlemesiz) en az bir tane doğrudan görüş-hattı vardır. Böyle bir durumda farklı açılardan gelen rasgele

çoklu yol bileşenleri durağan etkin işaretin üzerine eklenir. Etkin işaret zayıfladıkça Rayleigh dağılımlı zarfa sahip bir gürültü işaretine dönüşür.

### **2.6.3 Nakagami Sönümlemesi Dağılımı**

Nakagami dağılımı, Rayleigh dağılımından daha çok veya az sert olan sönümlenmeli-kanal durumlarını modellemede kullanılabilir ve Rayleigh dağılımı için özel bir durumu içermektedir. Aynı şekilde Rician sönümlemesi de Nakagami sönümlemesinden elde edilebilmektedir. Sonuç olarak Nakagami sönümlemesi modeli hızlı sönümlenmenin daha genel olan bir durumudur.

### 3. KABLOSUZ KANAL KARAKTERİZASYONU VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde sönümlenmeli kanal karakterizasyonu tanıtılmıştır. Bölüm 4 ve 5'te gerçekleştirilecek olan çeşitli sönümlenmeli kanal uygulamaları için gerekli olan tanımlamalar yapılmıştır.

Burada öncelikli Bölüm 3.1'de gezgin radyo yayılımı kısaca tanıtılmıştır. Sonrasında Bölüm 3.2'de haberleşmede en genel kanal durumu olan Gauss kanalı anlatılmıştır. Daha sonra Bölüm 3.3 ve 3.4'te sönümlenmeli kanallar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Haberleşme sürecinde sönümlenmeli kanallar bir çok kısıtlar ortaya çıkardığından bu kanalların iyi betimlenmesi gerekmektedir. Sönümlenmenin bir çok çeşidi Bölüm 3.5'te örnekleriyle incelenmiştir. Bölüm 3.6'da kanalın zamana göre değişmesine bağlı olarak bir sınıflandırma yapılmıştır. Son olarak, Bölüm 3.7'de sönümlenmeli kanalın matematiksel modellenmesi yapılmış ve bu matematiksel modellemeye göre literatürdeki en genel kanal modellemeleri tanıtılmıştır.

#### 3.1 Gezgin Radyo Yayılımı

Hareketli radyo kanalları, kablosuz iletişim sistemlerinin başarımında temel sınırlamalar koyar. Verici ve alıcı arasındaki haberleşme yolu basit-görüş hattından binalar, dağlar ve bitkiler gibi engelleyiciler tarafından güçlü bir şekilde zorlanan yollara kadar değişebilir. Hareketsiz ve kolayca tanımlanabilen kablolu kanallardan farklı olarak radyo kanalları rasgeledir ve analizi de kolay değildir. Gezgin terminal hareket ederken hızından dolayı işaret seviyesinin ne hızlılıkta sönümlendiği etkilenir. Bu nedenle, radyo kanallarını modellemek eskiden beri gezgin radyo sisteminin tasarımında en zor kısım olagelmiştir.

Elektromanyetik dalga yayılımının arkasındaki mekanizmalar çeşitlidir ama genel olarak *yansıma*, *kırınım* ve *saçılma* şeklinde nitelendirilebilir. Çoğu hücreli radyo sistemleri verici ve alıcı arasında doğrudan görüş hattının olmadığı kentsel alanlarda işlem görürler. Bu tür alanlarda yüksek binaların sebep olduğu büyük kırınım kayıpları oluşur. Çeşitli nesnelere oluşan çoklu yansımalarından dolayı elektromanyetik dalgalar değişen uzunluklardaki farklı yollarda gezer. Bu dalgalar arasındaki etkileşim belirli bir yerde çok yönlü sönümlenmeye neden olur ve verici ile alıcı arasındaki uzaklık arttıkça dalgaların güçleri azalır.

Bu bölümde gezgin iletişim sistemindeki işaret yayılımını etkileyen üç temel mekanizma olan yansıma, kırınım ve saçılma hakkında bilgi verilmektedir.

*Yansıma*, yayılan elektromanyetik dalganın, kendi dalga boyuna göre çok büyük boyutlara sahip nesnelere etkilediğinde oluşur. Dünyanın yüzeyinden, binalardan ve duvarlardan dolayı ortaya çıkan bir etkidir.

*Kırınım*, verici ve alıcı arasındaki yolun keskin kenarlara sahip yüzeyler tarafından engellendiği durumlarda ortaya çıkar. Engelleyici yüzeyden oluşan ikincil dalgalar uzay boyunca vardır ve engelin arkasında da devam eder. Engel etrafındaki dalgaların eğilmesine artış verir. Yüksek frekanslarda kırınım, yansıma gibi nesnenin geometrik şekline bağlı olduğu gibi kırınım noktasında oluşan dalganın genliğine, fazına ve polarizasyonuna da bağlıdır.

*Saçılma*, dalganın içinde gezdiği ortamın dalga boyuna göre küçük boyutlardaki nesnelere içerdiği ve birim hacimdeki engel sayısı büyük olduğu durumlarda ortaya çıkar. Saçılan dalgalar kanaldaki pürüklü yüzeyler, küçük nesnelere veya başka düzensizlikler tarafından üretilir. Pratikte, bitkiler, sokak işaretleri ve sokak lambaları gezgin iletişim sistemlerinde saçılmaya neden olurlar.

### 3.2 Gauss Gürültülü Kanal

Haberleşme sistemlerinde rastlanan en genel kanal modeli toplamsal beyaz Gauss gürültülü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) kanaldır. Bu kanalda, sıfır-ortalımalı beyaz Gauss gürültüsü iletilen  $s(t)$  işaretine eklenmiştir. Böylece, alınan  $r(t)$  işareti aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$r(t) = s(t) + n(t) . \quad (3.1)$$

Burada  $n(t)$ , sıfır-ortalımalı beyaz Gauss gürültü sürecidir ve bu gürültünün spektral güç yoğunluğu  $\frac{N_0}{2}$  'dir. Haberleşme sistem modellemelerinde Gauss kanalı genelde diğer kanal çeşitlerine referans olarak alınmaktadır.

### 3.3 Sönümlenmeli Kanallar

Kablosuz kanallarda vericiden gönderilen işaret alıcıya bir çok farklı yoldan geçerek ulaşmaktadır. Doğrudan görüş hattı olan ortamlarda kanal daha kararlı davranırken, doğrudan görüş hattı olmayan ortamlarda kanal daha kararsız davranabilmektedir. Doğrudan görüş hattının olmadığı durumlarda alıcıya ulaşan işaretler saçılmadan dolayı gecikmiş ve zayıflamış olarak gelmektedir. Dolayısıyla alıcıda alınan işaret genlik ve fazında değişikliğe

uğramaktadır.

Kablosuz haberleşmede ortamın durumuna göre bir çok kanal çeşitleri oluşmaktadır. Ortamdaki zaman, frekans ve geometrik değişimlere göre kanal da değişimlere uğramaktadır. Bununla birlikte, gönderilen işaretin bantgenişliğinin ve sembol süresinin, kanalın bantgenişliğinin de kanal değişimi için büyük etkileri vardır.

Literatürde bugüne kadar kanallar üzerinde bir çok çalışmalar yapılmıştır. Özellikle sönümlemeli kanalların haberleşmedeki öneminden dolayı bu kanalların üzerinde daha çok durulmuştur (Rappaport, 1996; Sklar, 1997; Biglieri vd., 1998; Ramaswamy, 2005; Durgin, 2000; Aki, 2004).

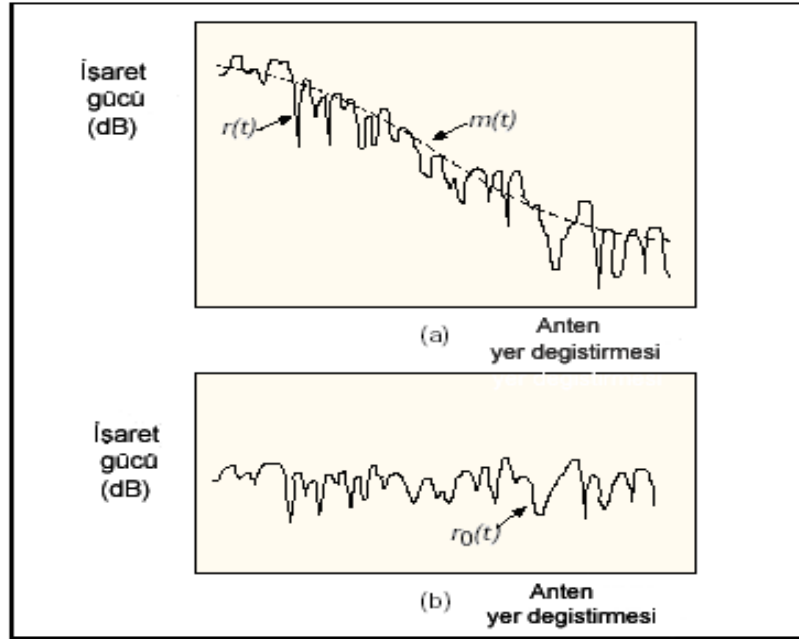
Sönümlemeli kanallar başlıca doğrudan görüş-hattının olmadığı Rayleigh sönümlemeli kanalı, küçük ölçekli sönümleme çeşitleri olan hızlı sönümleme, yavaş sönümleme, düz sönümleme, frekans-seçici sönümleme ve doğrudan görüş-hattının olduğu (etkin işaret) Rician sönümlemeli kanalı olarak modellenilebilmektedir. Bölüm 3.4'te bu sönümleme çeşitleri detaylandırılacaktır.

### 3.4 Sönümlemeli Kanal Sınıflandırması

Sönümlemeli kanallar Bölüm 3.3'te de bahsedildiği gibi çeşitli durumlara göre sınıflandırılabilir. Genel olarak gezgin iletişimi karakterize eden sönümleme küçük-ölçekli ve büyük-ölçekli sönümleme olmak üzere sınıflandırılabilir. Şekil 3.1.a'da büyük-ölçekli ile küçük-ölçekli sönümlenmeler arasındaki ilişki örnek bir senaryo üzerinde gösterilmiştir. Burada  $m(t)$  büyük-ölçekli sönümleme zarfını ve  $r(t)$  küçük-ölçekli sönümleme zarfı temsil eder. Görüldüğü gibi büyük-ölçekli sönümleme daha büyük mesafelerde değişim göstermektedir. Şekil 3.1 b'de ise sadece küçük-ölçekli sönümleme gösterilmiş ve burada  $r_0(t)$  zarfı belirtmektedir. Küçük-ölçekli sönümleme daha küçük mesafelerde (birkaç dalga boylarında) değişim göstermektedir.

Büyük-ölçekli sönümleme, geniş alandaki hareketten dolayı oluşan yol kaybını veya işaret gücü zayıflamasını tanımlar. Dolayısıyla, daha büyük verici-alıcı ayırması uzaklıklarındaki (birkaç yüz veya bin metre) ortalama işaret gücünü karakterize eder. Bu sönümleme çeşidi, vericiyle alıcı arasındaki tepeler, ormanlar, reklam panoları, bina yığınları gibi bilinen bölge şekilleri tarafından etkilenir. Alıcı sık-sık bu tür engeller tarafından gölgenmektedir. Büyük-ölçekli sönümlemenin istatistikleri bize yol kaybı tahminini uzaklığın fonksiyonu şeklinde

hesaplama olanağı sağlar (Rappaport, 1996; Sklar, 1997; Durgin, 2000). Bölüm 3.5'te küçük-ölçekli sönümleme anlatılmaktadır.



Şekil 3.1 Büyük-ölçekli sönümleme ve küçük-ölçekli sönümleme.

### 3.5 Küçük-Ölçekli Sönümleme

Küçük-ölçekli sönümleme, çok kısa gezi mesafeleri (birkaç dalga boyunda) boyunca veya kısa zaman süreleri (saniyeler mertebesinde) boyunca alınan işaret gücündeki hızlı dalgalanmaları karakterize eder. Alıcıyla verici arasındaki uzaysal ayrıştırmadaki küçük değişimler (yarım-dalga boyu kadar küçük) sonucunda oluşan işaretin genlik ve fazındaki değişimler olarak ele alınmaktadır. Bunun nedeni, alıcıya az farklı zamanlarda gelen iletilmiş işaretin bir veya daha fazla çeşitleri arasındaki girişimlerdir.

Çoklu yansımaları sayıca büyük ise ve görüş hattı işaret bileşeni yok ise, alınan işaretin zarfı istatistiksel olarak Rayleigh güç yoğunluk fonksiyonu ile modellenir. Görüş-hattı yayılım yolu gibi yüksek sönümlemesiz işaret bileşeni var ise, küçük-ölçekli sönümleme zarfı Rician olasılık yoğunluk fonksiyonu ile modellenir.

Küçük-ölçekli sönümleme Şekil 3.1.a'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi  $r_0(t)$ , küçük-ölçekli sönümleme olarak belirtilmiştir. Bu küçük-ölçekli sönümlemenin büyük-ölçekli sönümleme üzerine konulmuş olduğu şekilde Şekil 3.1 a'da açıkça gözükmemektedir.



Küçük-ölçekli sönümleme kanaldaki çok yönlü bileşenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır ve işaretin zaman yayılımı ve kanalın zamana bağlı değişimi gibi iki bağımsız mekanizmadan oluşmaktadır. Kanalın zamana bağlı değişimi Doppler kaymasına neden olmaktadır. Doppler kayması, alıcının vericiye göre olan bağıl hızından dolayı oluşan işarettaki spektral yayılımın bir ölçüsüdür. Doppler kayması alıcı hızının bir fonksiyonu olarak  $f_d$  ile gösterilir.

$$f_d = \frac{v}{c} f_c \cos \theta. \quad (3.2)$$

Burada  $v$  - gezgin hızı,  $f_c$  - taşıyıcı frekansı,  $\theta$  - dalganın geliş açısı ve  $c$  - ışık hızını temsil etmektedir.  $\theta$  açısının  $[0, 180]$  değerlerinde  $f_d$  maksimum Doppler kayması değerini almaktadır. Eğer aracın gidiş yönü dalganın geliş yönüne doğru ise Doppler kayması pozitif olmakta ve alınan frekansı arttırmaktadır. Eğer aracın gidiş yönü dalganın geliş yönü ile aynı yönde ise Doppler kayması negatif olmakta ve alınan frekansı azaltmaktadır.

Bununla ilgili aşağıdaki gibi iki örnek verilebilir:

1. Askeri haberleşmede frekans atamaları 900 MHz'lerdedir. Araç hızının 20 m/s olduğunu varsayarsak Doppler kayması  $f_d = 60$  Hz olmaktadır.
2. Hücreli haberleşmede, GSM 1800 için spektrum atamaları 1800 MHz'lerdedir. Araç hızının 20 m/s olduğunu varsayarsak Doppler kayması  $f_d = 120$  Hz olmaktadır.

Küçük-ölçekli sönümlemeli kanallar genel olarak dört farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar Doppler yayılımına bağlı olarak hızlı sönümleme ve yavaş sönümleme olarak tanımlanırken işaret bantgenişliğine göre de düz sönümleme ve frekans-seçmeli sönümleme olarak tanımlanmaktadır.

### 3.5.1 Yavaş Sönümleme

Doppler kaymasına bağlı olarak kanal yavaş veya hızlı sönümlemeli kanal olarak tanımlanabilmektedir. Yavaş sönümlemeli bir kanalda kanal impuls cevabı iletilen temelbant işaretine göre daha yavaş hızda değişmektedir. İşaretin sembol süresi  $T_s$ , kanalın uyumlu zamanı  $T_c$ 'den daha küçük olmaktadır ( $T_s \ll T_c$ ). *Uyumlu zaman*, kanal impuls cevabının esasen değişmediğindeki zaman süresinin istatistiksel bir ölçüsüdür. Dolayısıyla, kanal karakteristiklerinin değişim hızı iletilen işaretin değişim hızından çok daha küçük olmaktadır.

Genelde, Sklar'a (1997) göre de belirtildiği gibi kanal uyumlu zamanı hesaplanırken,  $f_d$  maksimum Doppler kayması olmak üzere,

$$T_C = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_d^2}} = \frac{0.423}{f_d} \quad (3.3)$$

eşitliğine göre hesaplanmaktadır ve işaret sembol süresi de

$$T_S \approx 1/W \quad (3.4)$$

olarak alınmaktadır. Burada  $W$  işaretin bantgenişliğini vermektedir. Sonuç olarak yavaş sönmüleme ile ilgili aşağıdaki özetler verilebilir:

- Sembol süresi uyumlu zamandan daha küçüktür (yaklaşık olarak,  $1/\text{Doppler hızı}$ ), düşük Doppler hızı.
- Uyumlu zaman, kanal cevabının farklı zamanlardaki benzerliklerini ölçmektedir. Başka bir deyişle, uyumlu zaman alıcıda alınan herhangi iki işaretin (farklı zamanlarda) çok güçlü bir korrelasyona sahip olduklarındaki zaman süresidir.

İki farklı Doppler kayması olarak 60 Hz ve 120 Hz alındığında, en uzun sembol periyodu  $T_S = 0.977\text{ms}$  olarak alınır. Uyumlu zaman  $f_d = 60\text{ Hz}$  için  $T_C = 7.05\text{ ms}$  ve  $f_d = 120\text{ Hz}$  için  $T_C = 3.5\text{ms}$  elde edilmektedir. Buradan görüldüğü gibi iletilen işaretin sembol süresi kanalın uyumlu zamanından daha küçüktür.

### 3.5.2 Hızlı Sönümleme

Hızlı sönmülemeli kanalda kanalın uyumlu zamanı  $T_C$ , iletilen işaretin sembol süresi  $T_S$ 'ten daha küçük olmaktadır:  $T_S > T_C$ . Ayrıca, kanal impuls cevabı iletilen temelbant işaretine göre daha hızlı değişmektedir. Kanal karakteristiklerinin değişim hızı iletilen işaretin değişim hızından daha büyüktür. En büyük nedeni Doppler yayılımıdır dolayısıyla alıcının hareketi sebep olmaktadır. Kanal, sembol süresince değişmektedir. Sembol süresi uyumlu zamandan daha büyüktür, yüksek Doppler hızı. Doppler hızının yüksek olması çeşitleme derecesinin de yüksek olması demektir. Yeteri kadar yüksek çeşitleme derecesinde, hızlı değişen kanal sabit bit hızının üstesinden gelebilmektedir. Böylece hızlı değişen kanal ergodik kanal haline gelmektedir.

### 3.5.3 Düz Sönümleme (Frekans-Seçmeli Olmayan)

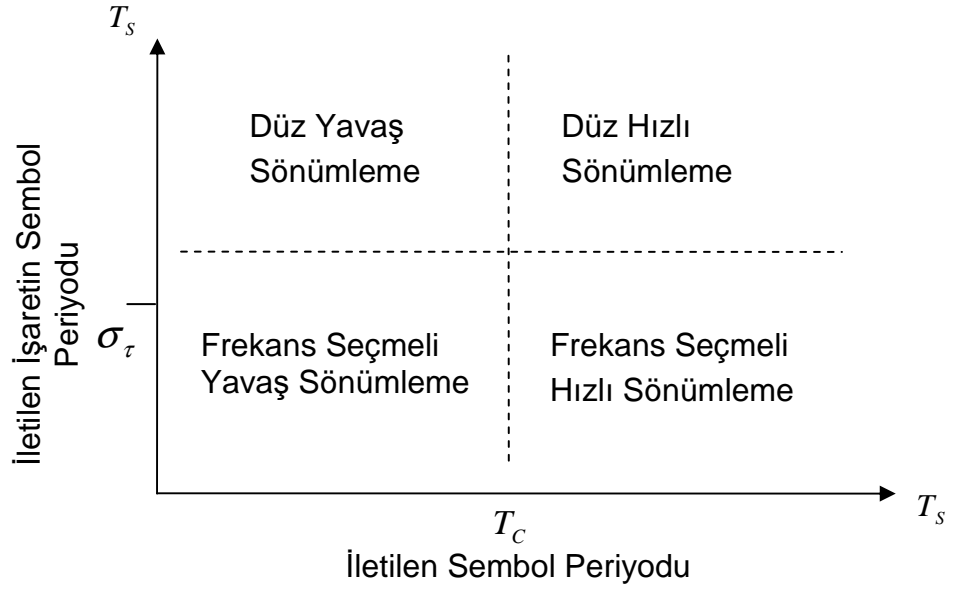
Çoklu-yol ortamındaki zaman yayılması işaretin düz veya frekans-seçmeli sönümlemeye uğramasına neden olmaktadır. Eğer kanal, iletilen işaretin bantgenişliğinden daha büyük bir bantgenişliği boyunca sabit bir kazanç ve doğrusal faz cevabına sahip ise, alıcıda alınan işaret düz sönümlemeye uğramaktadır. Ayrıca alınan işaret semboller arası girişimden dolayı bozuntuya uğramamaktadır. Düz sönümlemeli kanalda işaretin bantgenişliği kanalın uyumlu bantgenişliğinden daha küçük olmaktadır ( $B_s \ll B_c$ ). Zaman yayılması, sembol süresi  $T_s$  cinsinden de ifade edilebilmektedir. Dolayısıyla düz sönümlemeli kanalda sembol süresi  $T_s$ , kanalın kök-ortalama-kareli gecikme yayılımı olan  $\sigma_\tau$ 'dan çok daha büyük olmaktadır ( $T_s \gg \sigma_\tau$ ). Sonuç olarak işaretin bantgenişliği uyumlu bantgenişliğinden daha küçüktür (yaklaşık olarak, 1/maksimum ek gecikme yayılımı). Uygulanan işaret dar bantlı bir işarettir. *Uyumlu bantgenişliği*, kanalın yaklaşık olarak eşit kazanç ve doğrusal faza sahip olmasıyla “düz” olarak varsayılabildiği frekans aralıklarının istatistiksel bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle, uyumlu bantgenişliği herhangi iki frekans bileşenlerinin çok güçlü bir korrelasyona sahip olduklarındaki frekans aralığıdır derin sönümlemelere neden olabilmektedir. Uyumlu bantgenişliği yaklaşık olarak  $B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau}$  'ya eşittir. Burada  $\sigma_\tau$  gecikme yayılımının rms değeridir (Rappaport, 1996; Sklar, 1997; Biglieri vd., 1998).

### 3.5.4 Frekans-Seçmeli Sönümleme

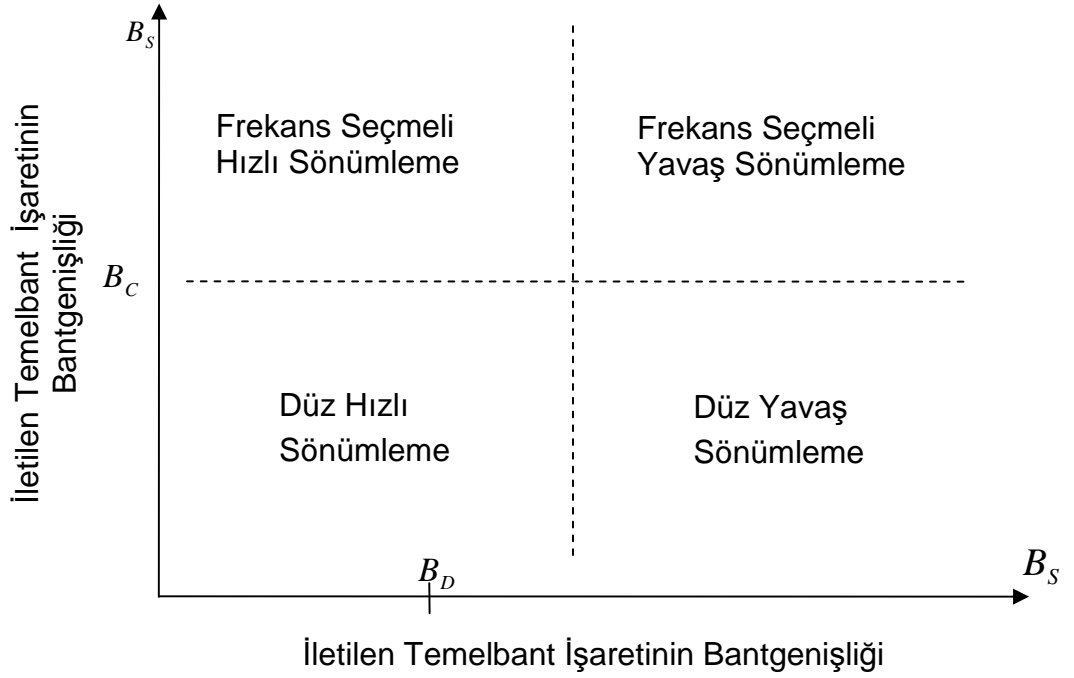
Eğer işaretin bantgenişliği kanalın uyumlu bantgenişliğinden daha büyük olursa işaret frekans seçmeli sönümlemeye uğramaktadır ( $B_s > B_c$ ). Frekans bölgesine bakıldığında kanalın işaretin farklı frekans bileşenleri için farklı seviyelerde zayıflatmaya uğrattığı görülecektir. Frekans seçmeli sönümleme, iletilen işaretin sembol süresine yakın veya aşan ( $T_s < \sigma_\tau$ ) çoklu-yol gecikmelerinden dolayı oluşmaktadır. Burada,  $\sigma_\tau$  gecikme yayılımının rms değeridir. Pratikte,  $T_s \leq 10\sigma_\tau$  olduğundan frekans seçmeli sönümlemeyi netice verir ve kanal semboller arası girişim üretir (Rappaport, 1996). Sonuç olarak, işaret bantgenişliği uyumlu bantgenişliğinden daha büyüktür. Karmaşık ve çözülmesi zor olan kanal durumudur. Alınan temel bant işaretinde bozulmaya neden olmaktadır. Sembol-Arası Girişime (ISI) neden olmaktadır.

Sönümlemenin farklı çeşitlerinin sınıflandırması Şekil 3.2'de sembol periyoduna göre ve

Şekil 3.3'te temelbant işaretinin bantgenişliğine göre gösterilmiştir. Şekil 3.2'de iletilen işaretin sembol periyodu ile kanalın uyumlu zamanı arasındaki değişime göre kanalın hızlı, yavaş, düz veya frekans-seçmeli olduğu gösterilmiştir.  $\sigma_\tau$  burada kanalın kök ortalama kareli gecikme zamanını göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 3.3'te kanalın uyumlu bantgenişliği ile temelbant işaretinin bantgenişliği arasındaki değişime göre kanalın durumu verilmiştir. Burada  $B_D$  kanalın Doppler bantgenişliğini göstermektedir (Rappaport, 1996; Sklar, 1997; Biglieri vd., 1998).



Şekil 3.2 Sembol periyoduna göre küçük-ölçekli kanal sınıflandırması



Şekil 3.3 Temelbant işaretinin bantgenişliğine göre küçük-ölçekli sönümlenmeli kanal sınıflandırması

### 3.6 Kanalın Zamana Göre Değişimi

Kanalların zamana göre değişip değişmediğine göre zamanla-değişen kanallar ve zamanla-değişmeyen kanallar şeklinde sınıflandırabilmektedir.

#### 3.6.1 Zamanla-Değişen Kanallar

Hareketli radyo uygulamalarında verici ile alıcı arasındaki hareketin yayılım yolunda değişimleri netice vermesinden dolayı kanal zamanla-değişken olmaktadır. Bu yayılım koşullarının değişim hızı sönümlenme hızını göstermektedir. Dolayısıyla kanal karakteristikleri zamana göre değişim göstermektedir. Gerçek kanallar zamanla değişen nitelikler gösterirler ve matematiksel modellemesi bir çok karmaşık değişkeni içerdiğinden daha zordur. Kanaldaki işaret iletimini hesaplamak için konvolüsyon alma veya frekans bölgesinde çarpma işlemleri yeterli olmamaktadır.

#### 3.6.2 Zamanla-Değişmeyen Kanallar

Zamanla-değişmeyen kanallar doğrusal zamanla-değişmeyen sistemler gibi tanımlanabilmektedir. Zamanla-değişmeyen doğrusal bir kanal aynı zamanda statik bir

kanaldır. Böyle bir kanalda yayını ortamında hareketli saçıcılar olmamakta, kanal sadece frekansın ve uzayın bir fonksiyonu olmaktadır. Kanaldaki işaret iletimini hesaplamak için konvolüsyonu alma veya frekans bölgesinde çarpma işlemi yeterlidir.

### 3.7 Kanal Modelleme Çeşitleri

Bu bölümde, haberleşme sistemlerinin analiz ve tasarımında sık-sık kullanılan sönümlenmeli çok yollu kanalların istatistiksel modelleri kısaca tanıtılmıştır. Bölüm 3.7.1’de sönümlenmeli kanallar için matematiksel modelleme yapılmıştır. Bölüm 3.7.2’de saçılma fonksiyonu tanımlanmış ve bununla ilgili parametreleri verilmiştir. Bölüm 3.7.3’te düz sönümlenmeli kanal için çarpımsal kanal modeli verilmiş ve Bölüm 3.7.4’te de frekans-seçici sönümlenmeli kanal için musluklandırılmış gecikme hatlı kanal modeli gösterilmiştir. Son olarak, Bölüm 3.7.5’te sönümlenmeli işaret bileşenleri için istatistiksel modeller kısaca tanıtılmıştır.

#### 3.7.1 Sönümlenmeli Kanallar için Matematiksel Modelleme

Sönümlenme, alınan radyo işaretinin kısa zaman aralığı boyunca genliğinde oluşan hızlı değişimlerini tanımlamak için kullanılan terimdir. Hareketli haberleşme kanallarında rastlanan genel bir durumdur. Gönderilen işaretin alıcıya az bir zaman farkıyla ulaşan bir veya daha fazla tekrarlarının arasındaki girişimden dolayı oluşmaktadır. Dolayısıyla alıcıda elde edilen işaret yoğunluk, dalgaların bağıl yayılım zamanı ve gönderilen işaretin bantgenişliği gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak genlik ve fazında genişçe değişebilmektedir. Değişen yol uzunluklarına göre işaret fazı rasgele olabilmekte ve alınan anlık güç de rasgele değişken olabilmektedir.

Sönümlenmeli bir kanaldan bir  $s(t) = A \cos 2\pi f_c t$  işaretinin doğrudan görüş-hattı olmadan iletildiği varsayılmaktadır. Alınan işaret gürültü ihmal edilerek aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$y(t) = A \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_c t + \theta_i) . \quad (3.5)$$

Burada,  $a_i$ ,  $i$ 'nci çoklu yol bileşeninin zayıflaması,  $\theta_i$ ,  $i$ 'nci çoklu yol bileşeninin faz-kayması ve  $N$ , çoklu yol sayısıdır.  $a_i$  ve  $\theta_i$  ikisi de rasgele değişkenlerdir. Alınan işaret,  $y(t)$ , alıcıyla verici arasındaki bağıl hız da eklenerek aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y(t) = A \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_{d_i} t + \theta_i) , \quad (3.6)$$

$$f_{d_i} = \frac{f_c v}{c} \cos \psi_i. \quad (3.7)$$

Burada,  $c = 3 \times 10^8$  m/s ışık hızı ve  $v$  - hareketli hızıdır.  $\psi_i$ ,  $[0, 2\pi]$  arasında düzgün dağılmış açı değişkenidir.

Yukarıdaki tanımlama aynı zamanda,

$$y(t) = A \left\{ \left( \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_{d_i} t + \theta_i) \right) \cos(2\pi f_c t) - \left( \sum_{i=1}^N a_i \sin(2\pi f_{d_i} t + \theta_i) \right) \sin(2\pi f_c t) \right\} \quad (3.8)$$

şeklinde de yazılabilir.

Her iki rasgele süreç  $X_1(t)$  ve  $X_2(t)$  şeklinde belirtilirse Denklem (3.8) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y(t) = A \{ X_1(t) \cos(2\pi f_c t) - X_2(t) \sin(2\pi f_c t) \}. \quad (3.9)$$

Burada çoklu yol sayısı olan  $N$  (çok sayıda saçılmış dalgalar olduğunda) daha da arttırılırsa *Merkezi Limit Teoremi* uyarınca,  $X_1(t)$  ve  $X_2(t)$ , sıfır-ortalamalı ve varyansı  $\sigma^2$  olan *Gauss rasgele değişkenlerine* yaklaşılmış olmaktadır. Denklem (3.9) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y(t) = AR(t) \cos(2\pi f_c t + \theta(t)). \quad (3.10)$$

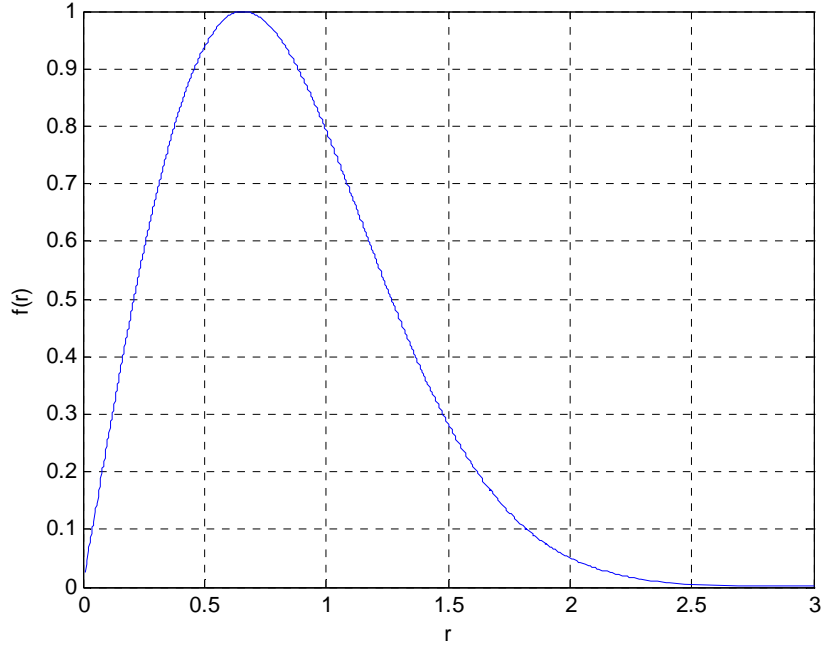
Böylece burada, alınan dalga şekli  $R(t)$ 'nin genliği aşağıdaki gibi oluşmaktadır:

$$R(t) = \sqrt{X_1(t)^2 + X_2(t)^2} \quad (3.11)$$

$X_1(t)$  ve  $X_2(t)$  gauss süreçleri olduğundan  $R(t)$  genliği aşağıdaki gibi olasılık yoğunluk fonksiyonu olan bir *Rayleigh Dağılımına* sahip olduğu görülmektedir:

$$f_R(r) = \frac{r}{2\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r > 0 \quad (3.12)$$

Şekil 3.4'te rms değeri 0.7264 olarak alınan Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu.

Alınan dalga şeklinin fazı  $\theta(t)$ , aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left( \frac{X_2(t)}{X_1(t)} \right) \quad (3.13)$$

$X_1(t)$  ve  $X_2(t)$  gauss süreçleri olduğundan,  $\theta(t)$  aşağıdaki gibi olasılık yoğunluk fonksiyonu olan *düzgün (uniform) bir dağılıma* sahip olmaktadır:

$$f_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi} \quad , \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \quad (3.14)$$

Fazdaki bozulma çeşitli modülasyon kullanılarak kolayca üstesinden gelinebilmektedir. Burada genlik bozulması olan  $R(t)$  daha önemli bir problemdir. Bu bozulma sönümlemeli kanallar üzerinden yapılan sayısal haberleşme sistemlerinin performansını etkili bir şekilde düşürmektedir.

### 3.7.2 Saçılma Fonksiyonu ve İlgili Kanal Parametreleri

Sönümlemeli bir kanal genelde doğrusal, impuls cevabına (eşdeğer alçak-geçiren) sahip zamanla-değişen bir sistem (veya zamanla-değişen frekans cevabı) şeklinde karakterize



edilmektedir. Böyle bir kanalın eşdeğer alçak-geçiren impuls cevabı  $c(t; \tau)$  olsun ve zamanla-değişen frekans cevabı ise  $C(t; f)$  olsun. Bu sistem  $t$ -değişkeninde geniş-duyarlılıkta durağan rasgele bir süreçtir. Kanalın impuls cevabındaki veya frekans cevabındaki zaman değişimleri *frekans yayılması* sonucunu vermektedir. Buna da kanal üzerinden iletilen işaretin Doppler yayılması denmektedir. Çok yollu yayılım iletilen işaretin *zamanda yayılmasına* neden olmaktadır. Sonuç olarak, sönümlenmeli çok yollu kanal hem zaman hem de frekansta yayılan kanal gibi karakterize edilebilmektedir.

Çok yollu işaretlerin kanal üzerinde farklı gecikmelerle yayıldığı farzedilirse, hem zamanda hem de frekansta yayılan kanal,  $S(\tau; \lambda)$ -*saçılma fonksiyonu* ile karakterize edilebilir.  $S(\tau; \lambda)$ , kanalın  $\tau$  gecikmesindeki ve  $\lambda$  frekans dengelemesindeki (taşıyıcı frekansa bağlı) kanalın güç spektrumunun bir ölçüsüdür. Bu saçılma fonksiyonundan *gecikmeli güç spektrumu* elde edilebilir. Bu spektrum,  $S(\tau; \lambda)$ 'nin  $\lambda$  üzerinden ortalaması alınmasıyla elde edilebilir. Burada formülasyon özetle aşağıdaki gibi takip edilebilir.  $c(t; \tau)$ - kanalın zamanla-değişen impuls cevabı,  $C(t; f)$ - kanalın zamanla-değişen frekans cevabı olarak tanımlanabilir. *Saçılma fonksiyonu*,  $S(\tau; \lambda)$ 'nin  $\lambda$  üzerinden ortalaması alınırsa,

$$S_c(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_c(\tau; \lambda) d\lambda \quad (3.15)$$

kanalın gecikmeli güç spektrumu elde edilir. Benzer şekilde,

$$S_c(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} S_c(\tau; \lambda) d\tau \quad (3.16)$$

kanalın Doppler güç spektrumu elde edilir.

$S_c(\tau) \neq 0$ 'daki değerler aralığı olan  $(\tau_0, \dots, \tau_n)$ 'da  $\tau_0$  ile  $\tau_n$  arasındaki fark kanalın çoklu yol yayılımı yada maksimum ek gecikme olarak tanımlanır ve  $T_m$  ile gösterilir.  $S_c(\lambda) \neq 0$ 'daki değerler aralığı olan  $(\lambda_0, \dots, \lambda_n)$ 'da  $\lambda_0$  ile  $\lambda_n$  arasındaki fark kanalın Doppler yayılımı olarak tanımlanır ve  $B_d$  ile gösterilir.  $B_d$ , Doppler yayılımının bir değeridir ve kanal impuls cevabının zamanda ne kadar hızlı değiştiğini veren bir ölçüdür.  $B_d$  arttıkça kanalın impuls değeri zamanla daha hızlı değişmektedir.

### Uyumlu Kanal Zamanı

Buradan diğerk bir kanal parametresi olan,

$$T_C = \frac{1}{B_d} \quad (3.17)$$

uyumlu kanal zamanı elde edilir. Böylece, yavaş değışen sönümlemeli kanal büyük uyumlu zamana sahip iken, hızlı değışen sönümlemeli kanal küçük uyumlu zamana sahip olmaktadır.

### Uyumlu Kanal Bantgenişliğı

Benzer şekilde çoklu yayılımın benzeri olan ,

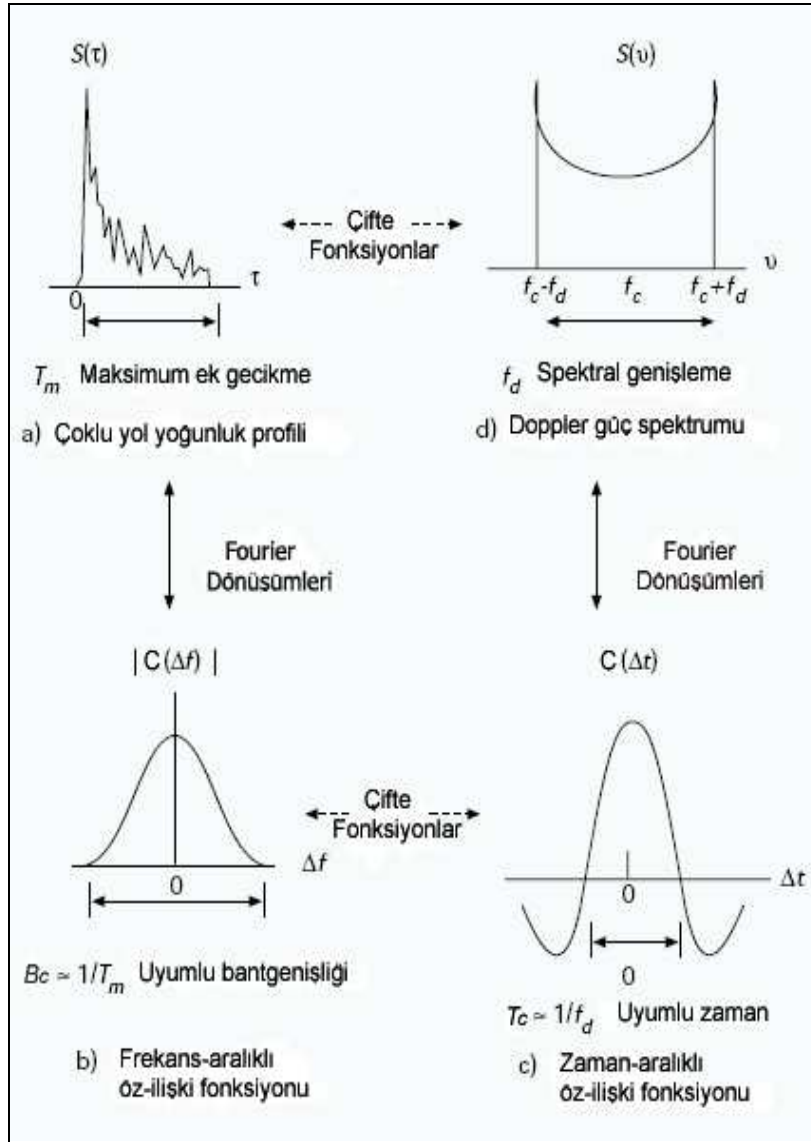
$$B_C = \frac{1}{T_m} \quad (3.18)$$

kanal uyumlu bantgenişliğı elde edilir.  $B_C$  - kanal cevabınca aynı şekilde etkilenen frekans bantlarının genişliğinin ölçüsünü verir. Dolayısıyla, sönümlemenin yüksek bir şekilde uyumunun sağlandığı frekans bantlarının genişliğidir. Genelde Sklar'da (1997) belirtildiğı gibi daha iyi sonucu elde etmek için en az 0.5'lik ilişkiye sahip kanal karmaşık frekans transfer fonksiyonu için olan,

$$B_C \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (3.19)$$

uyumlu bantgenişliğı kullanılmaktadır. Burada,  $T_m \cdot B_d$  kanalın yayılma faktörü'dür.  $T_m \cdot B_d < 1$  ise, alt yayılım (underspread), değılse üst yayılım (overspread) olmaktadır. Genelde,  $T_m \cdot B_d \ll 1$  ise, kanal impuls cevabı kolayca ölçülebilmekte ve bu ölçümler alıcıda alınan işaretin demodulasyonunda ve vericide iletilen işareti optimize etmek için kullanılır.  $T_m \cdot B_d > 1$  ise, kanal impuls cevabının ölçümü oldukça zor olmaktadır ve güvenilir olmamaktadır.

şekil 3.5'te kanalın güç yoğunluk fonksiyonları ile özilişki fonksiyonları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu şekilde bir çok kavramlar görsel olarak verilmiştir. şekilde (a)'da çoklu yol yoğunluk profili verilmiştir. Burada aynı zamanda maksimum ek gecikme de belirtilmiştir. şekilde (b)'de ise bunun Fourier dönüşümü olan frekans-aralıklı özilişki fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kanalin güç yoğunluk fonksiyonları ile özilişki fonksiyonları arasındaki ilişkiler (Sklar, 1997).

Burada maksimum ek gecikmeden elde edilen kanalın uyumlu bantgenişliği de verilmiştir. Aynı şekilde (c)'de Doppler güç spektrumu gösterilmiş ve  $f_d$  spektral genişlemesi verilmiştir. Şekilden hareketli haberleşmede ortaya çıkan merkez frekansı etrafında oluşan Doppler kayması açıkça gözükmemektedir. Bu spektrumun Fourier dönüşümü olan zaman-aralıklı özilişki fonksiyonu (d)'de gösterilmiştir. Burada ise  $f_d$ 'den kanal uyumlu zamanı elde edilmiştir. Bu şekil bir çok kanal spektrumu tanımlamaları için en geniş ayrıntıları içermektedir ve Sklar'ın (1997) çalışmasında daha ayrıntılı verilmiştir.

### 3.7.3 Frekans-Seçici Olmayan (Düz) Kanal: Çarpımsal Kanal Modeli

Belirtilen işaret için uygun olan kanal modelini seçmede iletilen işaretin karakteristiklerinin etkisi iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Kanal üzerinden gönderilen eşdeğer alçak-geçiren işaret  $x(t)$  olsun ve bu işaretin frekans içeriği  $X(f)$  ile gösterildiğinde, alınan eşdeğer alçak-geçiren işaret gürültüsüz olarak,

$$\begin{aligned} r(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} c(t; \tau) x(t - \tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} C(t; f) X(f) e^{j2\pi ft} df \end{aligned} \quad (3.20)$$

olur.  $B_s$ ,  $X(f)$ 'in bant genişliği olsun.  $B_c$ , kanalın uyumlu bant genişliğidir.  $B_s \ll B_c$  ise o zaman, kanal üzerindeki iletimde  $X(f)$ 'in tüm frekans bileşenleri aynı zayıflatmaya ve aynı faz kaymasına maruz kalır. Bu da gösterir ki,  $X(f)$  tarafından kullanılan  $B_s$  bant genişliği içinde kanalın zamanla-değişen transfer fonksiyonu  $C(t; f)$  frekans değişkeninde sabit kalmakta dolayısıyla, frekanstan bağımsız olmaktadır. Böyle bir kanal *frekans-seçici olmayan* veya *düz sönümleme* olarak adlandırılmaktadır.

Frekans-seçici olmayan kanal için Eşitlik (3.20) aşağıdaki gibi basitleştirilir:

$$\begin{aligned} r(t) &= C(t; 0) \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \\ &= C(t) \cdot x(t) \\ &= \alpha(t) \cdot e^{j\theta(t)} \cdot x(t) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Burada,  $C(t; 0) = \alpha(t) \cdot e^{j\theta(t)}$  olarak ifade edilebilir.  $\alpha(t)$  ve  $\theta(t)$  sırasıyla eşdeğer alçak-geçiren kanal cevabının genliği ve fazıdır. Böylece, frekans-seçici olmayan sönümlenmeli kanal iletilen işaretin üzerinde zamanla-değişen çarpımsal etkiye sahip olmaktadır. Benzer

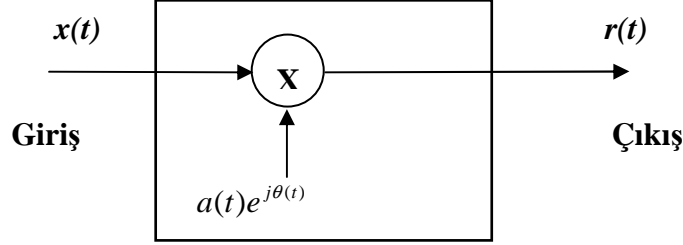
şekilde,  $T_m \ll \frac{1}{B_s}$  olur.  $T_s$ - iletilen sembolün zaman süreci,  $T_s \ll T_c$  ise frekans-seçici

olmayan bir kanal yavaş sönümlenmeli olmaktadır. Benzer şekilde,  $T_s \ll \frac{1}{B_d}$  veya  $B_d \gg \frac{1}{T_s}$

olmaktadır. Bununla birlikte genelde işaret bant genişliği  $\frac{1}{T_s}$ 'ten büyük yada eşit

alınmaktadır. Bu da göstermektedir ki, yavaş sönümlenmeli frekans-seçici olmayan bir kanal

alt yayılmalıdır (underspread).  $T_s \geq T_C$  olduğunda ise kanal hızlı sönmülemeli olmaktadır. Şekil 3.6'da Çarpımsal kanal modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Çarpımsal kanal modeli

### 3.7.4 Frekans-Seçici Olan Kanal: Musluklandırılmış Gecikme Hatlı Kanal Modeli

Gönderilen  $X(f)$  işaretinin bant genişliği  $B_s$  olmak üzere eğer gönderilen işaretin bant genişliği kanalın uyumlu bant genişliğinden daha büyükse, yani  $B_s > B_C$  ise,  $X(f)$ 'in  $B_C$ 'yi aşan frekans ayırmasıyla olan frekans bileşenleri farklı kazanç ve faz kaymasına maruz kalır. Bu durumda kanal *frekans-seçici kanal* olmaktadır. Buna ek bir bozulmaya da  $C(t; f)$ 'deki zaman değişimleri neden olur.  $X(f)$ 'deki frekans bileşenlerinin alınan işaret gücündeki zaman değişimleri sönmüleme etkisiyle ortaya çıkar.

$B_s \gg B_C$  olduğunda, kanal cevabındaki en az  $\frac{1}{B_s}$  kadar olan bir gecikme ile ayrılan çok-yollu bileşenleri tekrar çözülebilir. Bu durumda bu tekrar çözülebilir olan alınan işaret bileşenlerini göstermek için örnekleme teorisi kullanılabilir. Böylelikle, zamanla-değişen kanal impuls cevabı aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$c(t; \tau) = \sum_{n=1}^L c_n(t) \cdot \delta\left(\tau - \frac{n}{B_s}\right). \quad (3.22)$$

Buna karşı gelen zamanla-değişen transfer fonksiyonu ,

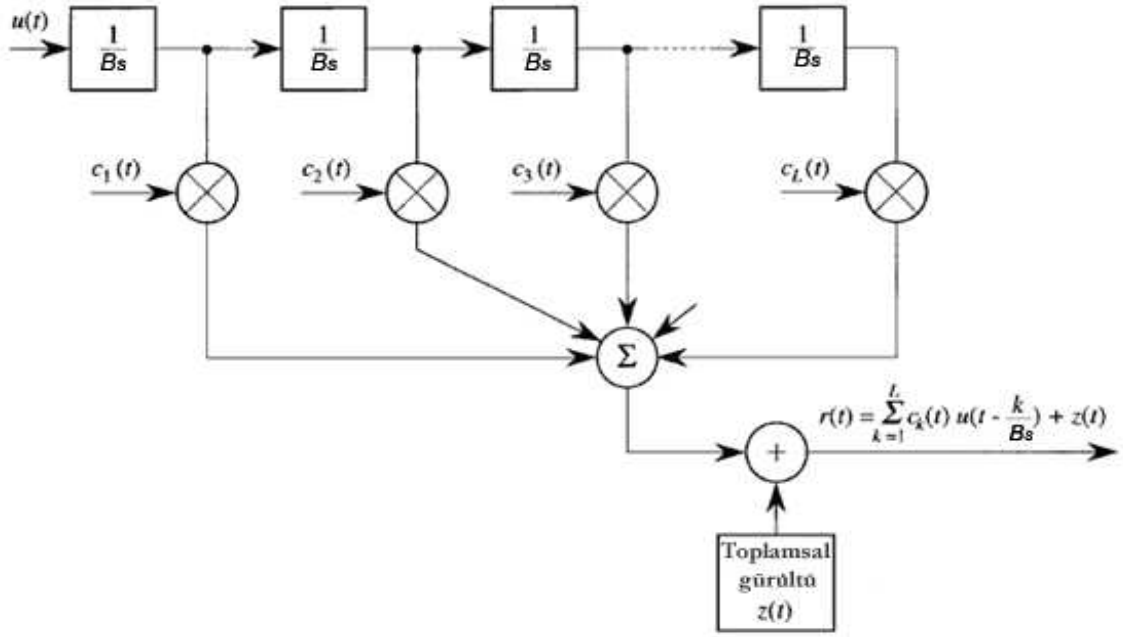
$$C(t; f) = \sum_{n=1}^L c_n(t) \cdot e^{j2\pi f n / B_s} \quad (3.23)$$

olur. Burada  $c_n(t)$   $n$ 'ci çok-yollu bileşenin kompleks değerli kanal kazancıdır.  $L$  ise tekrar çözülebilir çok-yollu bileşenlerin sayısını gösterir.

Çoklu yol yayılımı  $T_m$  iken ve bu çoklu yolun zaman çözünümlü  $\frac{1}{B_s}$  iken,

$$L = \lfloor T_m B_s \rfloor + 1 \quad (3.24)$$

olur.



Şekil 3.7 Musluklandırılmış gecikme hatlı kanal modeli.

Eşitlik (3.22)'deki gibi bir impuls cevabına sahip bir kanal  $L$  tane muslukla ve kompleks-değerli zamanla-değişen  $c_n(t)$  musluk katsayıları olan bir musluklandırılmış-gecikme hatları ile gösterilebilir. Şekil 3.7'de frekans-seçici olan kanal için uygun olan musluklandırılmış gecikme hatlı kanal modeli gösterilmiştir.

Rasgele zamanla-değişen musluk kazançları olan  $\{ c_n(t) \}$  terimleri

$$c_n(t) = \alpha_n(t) \cdot e^{j\theta_n(t)}, \quad n = 1, 2, \dots, L \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $\alpha_n(t)$  genlikler,  $\theta_n(t)$ - uygun fazlardır. Böylece alınan işaret aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$r(t) = \sum_{n=1}^L \alpha_n(t) e^{j\theta_n(t)} u(t - \frac{n}{B_s}) + z(t), \quad n = 1, 2, \dots, L \quad (3.26)$$

Burada  $\alpha_n(t)$  genlikleri yerel alan boyunca az bir değişim gösterirken  $\theta_n(t)$  alandaki yayılım mesafesindeki değişimlerden dolayı çok fazla değişim gösterebilmektedir. Dolayısıyla alıcının kısa mesafeler (dalga boyu mesafelerinde) boyunca olan hareketiyle faz değişiminin etkisi alınan işaret  $r(t)$ 'de büyük dalgalanmalar oluşturmaktadır. Böylece, alınan işaret  $L$  kadar çoklu yol bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır (Rappaport, 1996).

$c_n(t)$  musluk kazançları genelde durağan (geniş-duyarlıklı) karşılıklı-uyarlanmamış rasgele süreçler gibi modellenmektedir ve aşağıdaki gibi özilişki fonksiyonuna sahiptir.

$$\phi_n(\tau) = E \left[ \frac{1}{2} c_n^*(t) c_n(t + \tau) \right], \quad n = 1, 2, \dots, L. \quad (3.27)$$

Doppler güç spektrası,

$$S_n(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_n(\tau) e^{-j2\pi\lambda\tau} d\tau \quad (3.28)$$

olur. Böylece her bir tekrar çözülebilen çok-yollu bileşen sahip olduğu uygun Doppler spektrumu ile ve buna karşı düşen Doppler yayılımı ile modellenebilmektedir.

### 3.7.5 Sönümlmeli İşaret Bileşenleri İçin İstatistiksel Modeller

Sönümlmeli kanalların istatistiksel karakteristiklerini modellemede kullanılan bir çok olasılık dağılımları mevcuttur. Alıcıdaki işaret üzerine katkısı bulunan, kanalda büyük sayıda saçıcılar olduğunda iyonosferik veya troposferik işaret yayılımı durumunda olduğu gibi merkezi limit teoremi kanal impuls cevabı için bir Gauss süreci modelini verir. Eğer bu süreç sıfır-ortalımalı ise, kanal impuls cevabının herhangi bir anındaki zarfı Rayleigh dağılımına sahip olur ve fazı da  $(0, 2\pi)$  aralığında düzgün olarak dağıtılmış olur. Böylece aşağıdaki gibi bir zarfa ve olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip olur;

$$R = |c(t; \tau)| \quad (3.29)$$

$$p_R(r) = \frac{2r}{\Omega} e^{-r^2/\Omega}, \quad r \geq 0. \quad (3.30)$$

Burada ,

$$\Omega = E(R^2) \quad (3.31)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Buradan Rayleigh dağılımının  $\Omega$  gibi tek bir parametre ile karakterize edildiği gözlemlenmektedir. Frekans-seçici olmayan kanal için zarf, basitce kanalın çarpımsal kazancının genliği olmaktadır:

$$R(t) = |C(t)| = \alpha(t) . \quad (3.32)$$

Frekans-seçici (musluklandırılmış-gecikme-hatlı) kanal modeli için her bir musluk kazancı Rayleigh sönümlemesi gibi modellenen genliğe sahip olmaktadır. Şekil 3.8'de Rayleigh sönümlemeli zarf örneği gösterilmiştir. Burada genlik rms değerine normalize edilmiş ve dB olarak alınmıştır.

Kanal cevabının zarfı için diğer bir alternatif istatistiksel model ise, Nakagami- $m$  dağılımıdır. Bu dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir;

$$p_R(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left( \frac{m}{\Omega} \right)^m r^{2m-1} e^{-mr^2/\Omega} , \quad r \geq 0 . \quad (3.33)$$

Burada  $\Omega$  , (3.31)'daki gibidir. Eşitlik (3.33)'teki  $m$  parametresi ise momentlerin oranı şeklinde tanımlanmıştır ve *sönümleme şekli* diye adlandırılmıştır.

$$m = \frac{\Omega^2}{E[(R^2 - \Omega)^2]} , \quad m \geq 1/2 . \quad (3.34)$$

Sönümlemeli kanal istatistiklerini birleştirmek için kullanılan tek bir parametreye sahip Rayleigh dağılımının tersine, Nakagami- $m$  iki parametrelili bir dağılımdır ve bu parametreler de  $m$  ve  $\Omega$  'dır. Sonuç olarak, bu dağılım gözlemlenen işaret istatistiklerini birleştirmede daha çok esneklik ve yaklaşıklık sağlamaktadır. Nakagami- $m$  dağılımı, Rayleigh dağılımından daha çok veya az sert olan sönümlemeli-kanal durumlarını modellemede kullanılabilir ve Rayleigh dağılımı için özel bir durumu ( $m = 1$ ) gibi içermektedir. Örneğin, Turin ve Suzuki çalışmalarında Nakagami- $m$  dağılımının şehir radyo kanallarında alınan veri işaretleri için en uygun sonucu verdiğini göstermişlerdir (Turin vd., 1972; Suzuki, 1977).

Rice dağılımı ise iki-parametrelili bir dağılımdır ve sönümlemeli çok-yollu bir kanaldaki işareti karakterize etmek için kullanılabilir. Bu dağılım genelde, *vurgun bileşen* olarak adlandırılan impuls cevabı sıfır-olmayan ortalamalı bileşene sahip bir Gauss sönümlemeli kanalı modellemek için uygundur. Rice dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir;



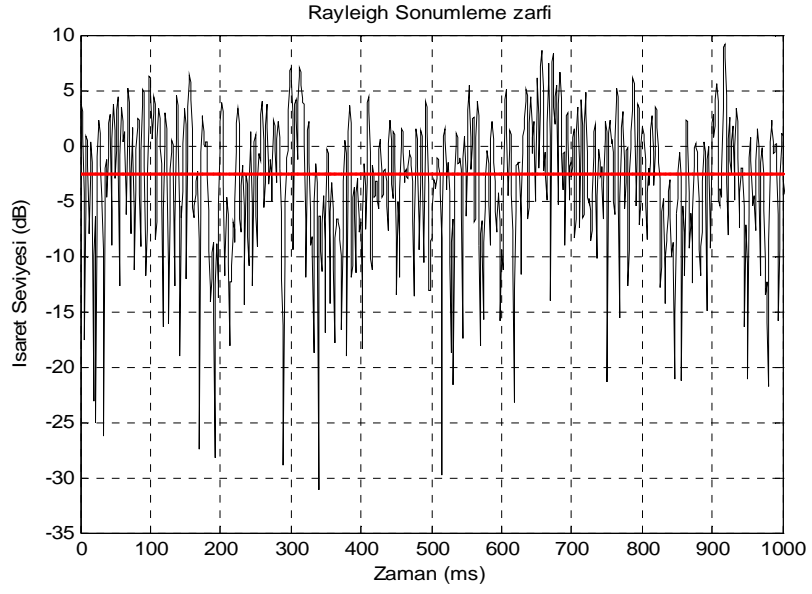
$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right), \quad r \geq 0. \quad (3.35)$$

$s^2$ , sönümlemeye uğramayan (vurgun) işaret bileşenlerindeki gücü göstermektedir ve  $\sigma^2$ , uygun düşen sıfır-ortalamalı Gauss bileşeninin varyansıdır. Aynı şekilde  $I_0(\cdot)$ , düzeltilmiş sıfırıncı-dereceden ve birinci türden Bessel fonksiyonudur. Genelde Rice dağılımı deterministik işaret gücünün çoklu yolun varyansına oranını veren  $K$  parametresi ile belirtilir.

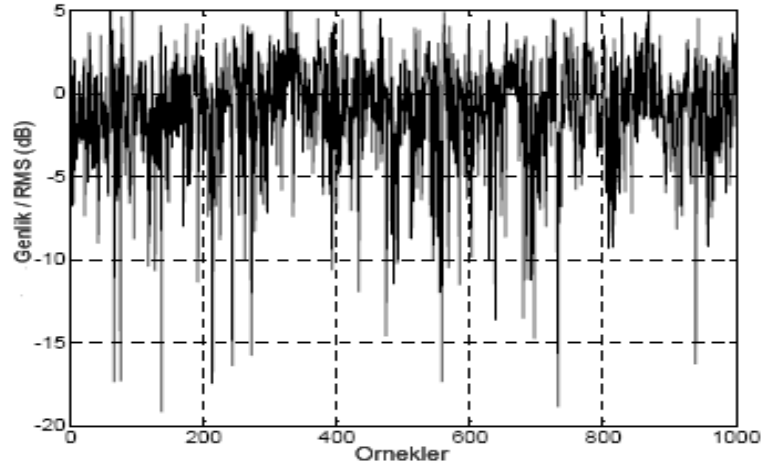
$$K = s^2/2\sigma^2 \quad (3.36)$$

Burada,  $s^2 = 0$ , olduğunda bu dağılım  $\sigma^2 = \Omega / 2$  'ye sahip Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonuna dönüşmektedir. Rice dağılımı özellikle, doğrudan yayılan işaret bileşenine (vurgun bileşen) ve çevre arazilerindeki ikincil yansımalarından ortaya çıkan farklı gecikmelerle gelen çok yollu bileşenlere sahip görüş hattı olan haberleşme linkleri için uygun bir modeldir. Şekil 3.9'da Rician sönümlemeli zarf örneği  $K = 5\text{dB}$  için gösterilmiştir. Burada genlik rms değerine göre normalize edilmiştir. Şekil 3.10'da ise  $K$ -faktörünün çeşitli değerlerine göre Rician olasılık yoğunluk fonksiyonları gösterilmiştir. Burada  $K = -\infty$  iken Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşmaktadır.

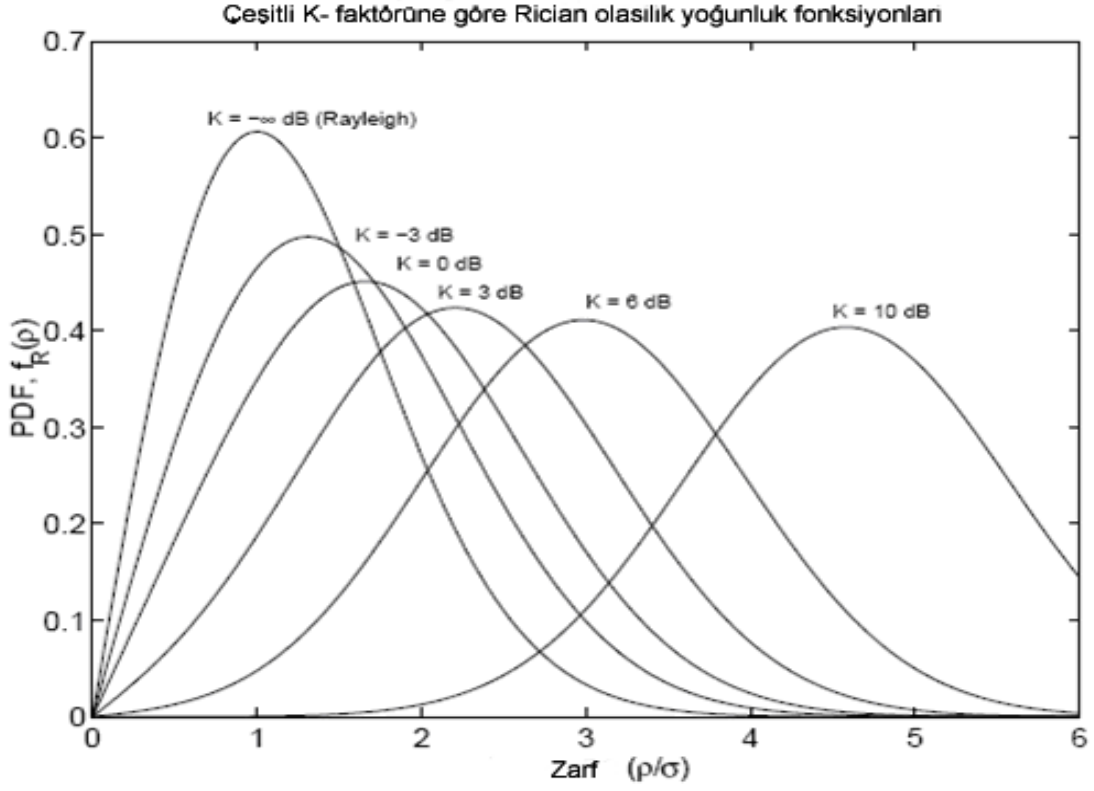
Sonuç olarak, Rayleigh, Rice ve Nakagami- $m$  dağılımları sönümlemeli çok-yollu kanallar üzerinden iletilen işaretler için yaygın olarak en çok kullanılan istatistiksel modellerdir (Rappaport, 1996; Cheng, 2000).



Şekil 3.8 Rayleigh sönümlemeli zarf örneği



Şekil 3.9 Rician sönümlemeli zarf örneği ( $K = 5$  dB için), (Kostov, 2003).



Şekil 3.10 K-faktörünün çeşitli değerlerine göre Rician olasılık yoğunluk fonksiyonları. Burada  $K = -\infty$  iken Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşırken  $K = +\infty$  iken Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşmaktadır (Durgin, 2000).

#### 4 SÖNÜMLEMELİ KANAL BENZETİMLERİ

Alıcı ile verici arasında doğrudan görüş hattının olmadığı ve alıcının vericiye göre hareketli olduğu durumlarda gerçekleşen kablosuz iletişimlerde gerçek kanal etkileri için en iyi yaklaşım Rayleigh sönümlemesi olmuştur. Rayleigh sönümlemeli bir kanal modelinde iletilen işarete çarpımsal bir bozulma katılmaktadır.

Sönümlemeli kanallar için literatürde bir çok simülasyonlar yapılmıştır (Rappaport, 1996; Young ve Beaulieu, 2000; Tran, vd., 2005; Li ve Huang, 2002; Ramaswamy, 2005; Sali; Komninakis, 2004; Kareem ve Beaulieu, 2005; Patzold ve Hogstad, 2005; Jakes, 1974; Cheng, 2000; Punnoose vd.). Bunlara ilk olarak Rappaport'ta (1996) Clarke modeline dayanan ve Smith tarafından bilgisayar ortamında benzetimleri yapılan simülasyonlar verilebilir. Smith'in bu çalışmasında ters ayrık Fourier dönüşümünü alma metodu kullanılmıştır. Burada öncelikli iki ayrı bağımsız Gauss karmaşık değişkenleri elde edilmiş ve ayrı-ayrı olarak Eşitlik (4.5)'teki güç spektrumu ile çarpma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ayrı-ayrı ters ayrık Fourier dönüşümleri elde edilmiş ve kareleri alınarak toplanmış, son olarak elde edilen toplamın kare kökü alınmıştır. Burada ters Fourier dönüşümünün sonucunun gerçel sayı olmasına dikkat çekilmiştir. Smith'in bu metodu daha sonra bir çok çalışmada genişletilmiştir (Young ve Beaulieu, 2000; Tran vd., 2005). Young ve Beaulieu'nin (2000) çalışmasında bu metodun daha az işlemle, daha hızlı gerçekleştirildiği gösterilmiştir.

Bundan başka sinüslerin toplanması metodu olan Jakes modeli önerilmiştir (Jakes, 1974). Bu metotta Gauss değişkenleri sinüslerin toplanması ile elde edilmiştir. Ayrıca, Li ve Huang, (2002) ve Patzold ve Hogstad'ın (2005) çalışmalarında bu metod için iyileştirmeler yapılmıştır. Yaygın olarak kullanılan diğer bir metod ise beyaz Gauss gürültüsünün filtrelenmesi metodudur (Ramaswamy, 2005). Bu metotta ise birbirinden bağımsız iki sıfır-ortalımalı beyaz Gauss rasgele süreci uygun bir filtreden geçirilmiş ve çıkışları toplanmıştır. Burada spektrumu şekillendirmek için kullanılan transfer fonksiyonu Eşitlik (4.5)'teki gibi oluşturulmuştur. Elde edilen dizilerin özilişki özellikleri filtre seçimiyle belirtilmiştir.

Bunlardan başka literatürde yer alan ve son zamanlarda gerçekleştirilen bir diğer teknik de Baddour ve Beaulieu'nun (2005) AR modellemesi metodudur. Burada elde edilen rasgele Gauss değişkenlerinin spektrumunu şekillendirmek için tüm kutuplu bir IIR filtresi tasarlanmıştır.

Bu metodlar Bölüm 4 boyunca tanıtılmaktadır ve yaptığımız benzetimler gösterilmektedir. Bölüm 4'ün planı şu şekildedir, Bölüm 4.1'de Clarke'ın referans modeli verilmiştir. Bölüm 4.1.1, 4.1.2 ve 4.1.3'te sırasıyla sinüslerin toplanması metodu, beyaz Gauss gürültüsünün filtrelenmesi metodu ve ters ayırık Fourier dönüşümünü alma metodu tanıtılmıştır. Bölüm 4.2'de ters ayırık Fourier dönüşümünü alma metodunun gerçekleştirilmesi verilmiştir. Son olarak Bölüm 4.3'te, Bölüm 4.2'de elde edilen ters ayırık Fourier metodu ile bir taşıyıcı işareti uygulaması yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

#### 4.1 Clarke'ın Matematiksel Referans Modeli

Genel olarak sönümlenmeli kanal simülatörlerinin temel aldığı ve daha yaygınca kullanılan model Clarke modelidir (Rappaport, 1996). Bu modelde, verici dikey polarize edilerek sabit (hareketsiz) olarak alınmış ve iletilen işaretin alıcıda bütün açılardan eşit olasılıkla alındığı bir çok yollu kanal varsayılmıştır. Farklı çok yollu bileşenlerinin genlik ve fazları birbirinden bağımsız olarak alınmıştır. Ayrıca Clarke'ın bu modelinde öncelikli düz sönümleme için modelleme yapılmış ve daha sonra bu model genişletilerek frekans-seçmeli sönümlenmeler için modelleme yapılmıştır.

Çok yollu sönümlenmeli kanaldan alınan işaret aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$r(t) = s(t)h(t) + N_0(t) \quad (4.1)$$

Burada  $r(t)$ ,  $s(t)$  ve  $h(t)$  sırasıyla alınan işaret, iletilen işaret ve kanal etkisini belirtmektedir.  $N_0(t)$  ise toplamsal gürültüyü ifade etmektedir.  $h(t)$  aynı zamanda Rayleigh sönümleme katsayısı olarak da bilinmektedir.

Clarke'ın bu modelinde amaç Rayleigh sürecini veren rasgele değişkenlerinin elde edilmesidir. Bunun için Clarke tarafından belirlenen referans modeli şu şekilde önerilmiştir. Bölüm 3'te belirtildiği gibi birbirinden bağımsız iki sıfır-ortalımalı Gauss rasgele değişkenlerinden oluşan karmaşık bir değişkenin zarfı Rayleigh sürecini vermektedir. Burada seçilen rasgele değişkenlerin sayısı yeteri kadar büyük olmalıdır. Kanal katsayısı  $h(t)$  olmak üzere,

$$h(t) = h_c(t) + jh_s(t) \quad (4.2)$$

$$h_c(t) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \cos(2\pi f_d t \cos \alpha_n + \phi_n)$$

$$h_s(t) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \sin(2\pi f_d t \cos \alpha_n + \phi_n)$$

olarak ifade edilebilir. Burada,  $h(t)$  varyansı bire eşit karmaşık Gauss rasgele değişkenidir ve yol sayısı olan  $N$  büyüdükçe  $h_c(t)$ ,  $h_s(t)$  birbirinden bağımsız Gauss dağılımlı rasgele değişkenler olmaktadır. Elde edilmek istenilen Rayleigh rasgele süreci için bu iki Gauss rasgele değişkeninin aşağıda sıralanan istatistiksel özelliklere sahip olması gerekmektedir.

$$R_{h_c h_c}(\tau) = E[h_c(t)h_c(t + \tau)] = J_0(2\pi f_d \tau) \quad (4.3)$$

$$R_{h_s h_s}(\tau) = J_0(2\pi f_d \tau)$$

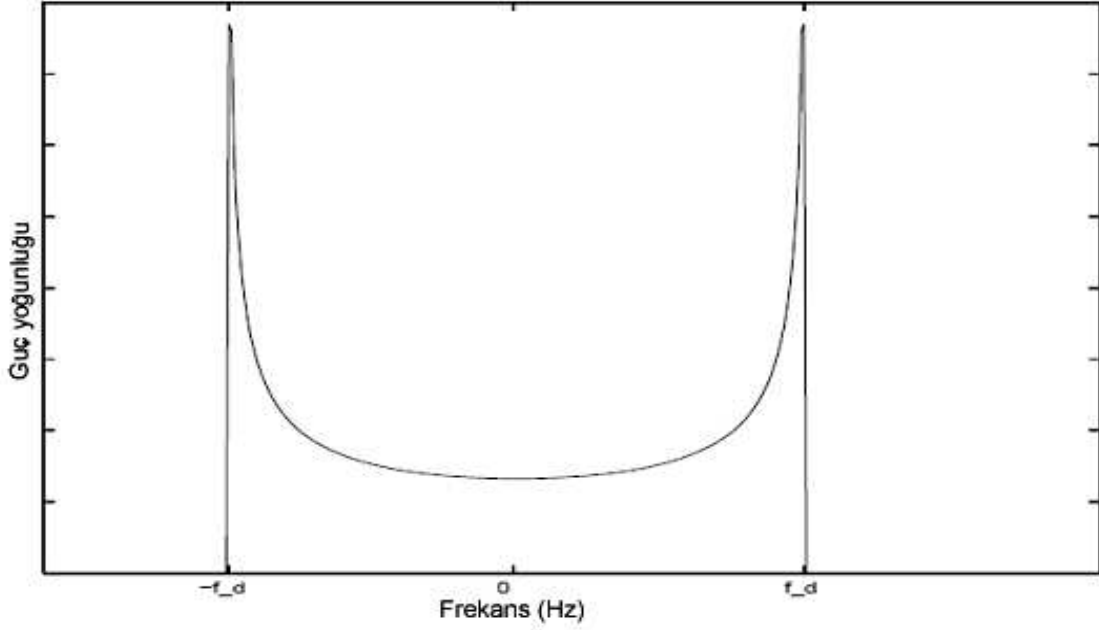
$$R_{h_c h_s}(\tau) = 0, \quad R_{h_s h_c}(\tau) = 0 \quad (4.4)$$

Dolayısıyla, kanal katsayılarının gerçel ve sanal kısımları olan  $h_c(t)$ ,  $h_s(t)$  aynı özilişki fonksiyonunu verirken ikisinin çapraz-ilişkisi sıfır olmaktadır. Burada  $J_0$  sıfırıncı-dereceden birinci türden Bessel fonksiyonu ve  $f_d$  Doppler frekansıdır. Bu özilişki fonksiyonunun Fourier dönüşümü kanal sürecinin spektral güç yoğunluğu  $S_{hh}(f)$ 'ı vermektedir.

$$S_{hh}(f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi f_d} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d}\right)^2}}, & |f| < f_d \\ 0, & \text{diger} \end{cases} \quad (4.5)$$

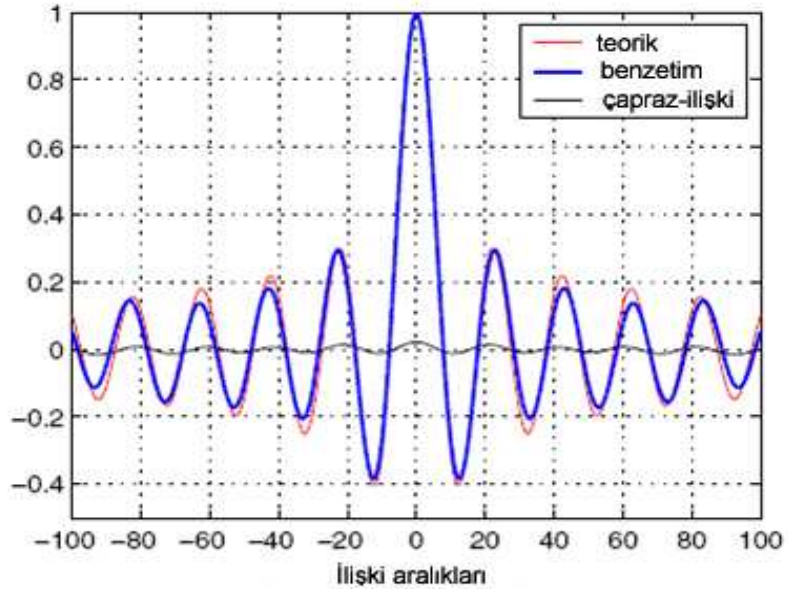
Elde edilen Gauss süreçleri daha sonra bu spektral güç yoğunluğunu verecek şekilde yapılandırılmıştır. Bunun için bir çok çalışmada Eşitlik (4.5)'teki gibi frekans cevabına sahip filtreler kullanılmıştır. Bir çok kanal simülatörü için en büyük amaç yukarıdaki istatistiksel özelliklere sahip bir süreci elde etmek olmuştur.

Eşitlik (4.5)'e göre elde edilen spektral güç yoğunluğu Şekil 4.1'deki gibi gösterilebilir. Şekilden görüldüğü gibi  $f = f_c \pm f_d$ 'de güç yoğunluğu sonsuza gitmektedir. Bunun üstesinden gelmek için  $S(f)$ 'in değeri sonlu bir değerle sınırlandırılmıştır. Doppler frekansı örnekleme süresi ile örneklendirilmiştir.



Şekil 4.1 Rayleigh sönümlenmeli sürecin güç spektrumu (Sali).

Eşitlik (4.3) ve (4.4)'deki özilişki ve çapraz-ilişki fonksiyonlarının grafiksel gösterimleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi özilişki fonksiyonu 1'i verirken çapraz-ilişki fonksiyonu 0'ı verir. Şekilde aynı şekilde teorik Bessel fonksiyonu da verilmiştir.



Şekil 4.2 Örneklendirilmiş Rayleigh dalga şeklinin gerçel ve sanal kısımları için özilişki ve çapraz ilişkilerinin grafiksel gösterimi (Komninakis, 2004).

Kablosuz bir kanalın benzetimi için düz sönümlemeli kanaldaki gibi bir tane veya frekans-seçmeli sönümlemeli kanaldaki gibi birden fazla sayıda istenen istatistiksel özelliklere sahip etkili rasgele kompleks Gauss süreçlerini üretmek için kullanılan üç temel model vardır. Bunlar, sinüslerin toplanması (Jakes Modeli), ters fourier dönüşümünü almak ve beyaz Gauss gürültüsünün filtrelenmesi modelleridir. Bir sonraki bölümlerde bu metodlar tanıtılmaktadır.

#### 4.1.1 Sinüslerin Toplanması Modeli (Jakes Modeli)

Bu yaklaşımda istenen Rayleigh sürecini elde etmek için genlikleri eşit olan ve rasgele düzgün dağılmış fazları olan bir çok sayıdaki sinüslerin superpozisyonu alınmıştır. Bu toplamayı tanımlamak için aşağıdaki eşitlikler verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 h(t) &= h_c(t) + jh_s(t) \\
 &= \sqrt{2} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \cos \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \cos \alpha \cos 2\pi f_d t \right] \\
 &\quad + j \left[ 2 \sum_{n=1}^N \cos \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \sin \alpha \cos 2\pi f_d t \right]
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Burada bu eşitliklerin (4.3) ve (4.4)'teki koşulları sağlaması için  $N$  yeteri kadar büyük olmalıdır ve sinüslerin frekanslarının dağılımı uygun seçilmelidir. Li ve Huang'ın (2002), çalışmasında bu metod için daha iyileştirilmiş bir sonuç verilmiş ve Patzold ve Hogstad, (2005) bu metodun farklı sınıflarını göstermişlerdir.

#### 4.1.2 Beyaz Gauss Gürültüsünün Filtrelenmesi Metodu

Bu metotta iki tane bağımsız Gauss gürültü kaynağından üretilen değişkenler alçak-geçiren filtrelerden geçirilerek kullanılmıştır. Alçak geçiren filtrenin frekans cevabı (4.5)'deki eşitliğin kare köküne eşit olarak seçilmiştir. Burada filtre doğrusal işlem gördüğünden elde edilen diziler Gauss dağılımına aynı şekilde sahip olabilmekte ve spektrumu,

$$S_{out}(f) = S_{in}(f) |H(f)|^2 \tag{4.7}$$

olarak ifade edilebilmektedir. Burada  $|H(f)|^2$ , Eşitlik (4.5)'te ifade edilen  $S(f)$ ' in karesidir.



### 4.1.3 Ters Ayrık Fourier Dönüşümü Alma Modeli

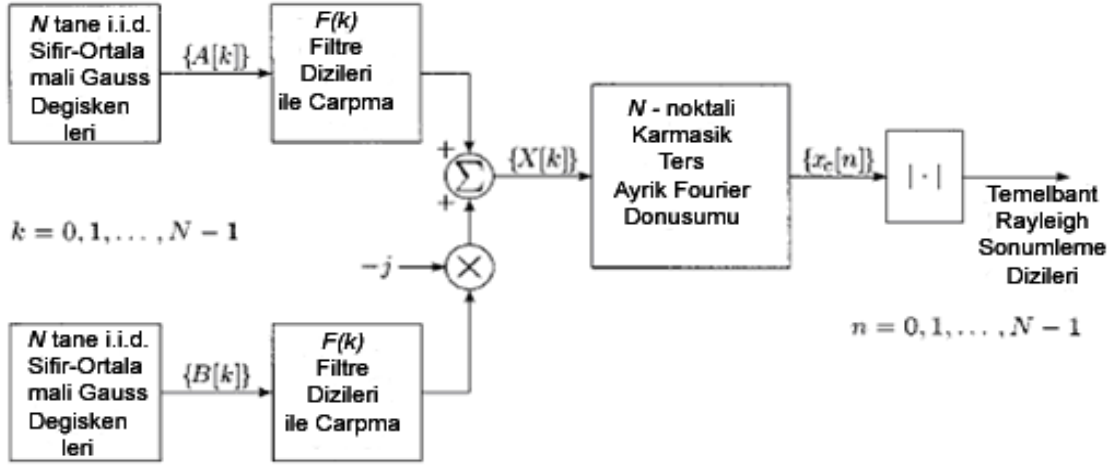
Bu model ilk olarak Smith tarafından Rappaport'taki (1996) algoritma ile verilmiştir. Smith burada ilk olarak iki tane bağımsız karmaşık Gauss değişkeni elde etmiştir. Burada her bir karmaşık Gauss değişkeninin gerçel ve sanal katsayıları birbirinden bağımsız, sıfır-ortalamalı gerçel değişkenlerdir. Daha sonra elde edilen bu karmaşık sayıları ayrı ayrı Eşitlik (4.5)'teki güç spektral yoğunluğunun kare kökü ( $\sqrt{S(f)}$ ) ile çarpma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çarpma işlemi frekans bölgesinde gerçekleştirilerek sonuçta elde edilen değişkenlerin ters Fourier dönüşümünü almıştır. Her iki ters Fourier dönüşümü alınmış değişkenlerin ayrı ayrı karelerini alarak toplamış ve karekökünü almıştır. Elde edilen karekök işlemi sonucunda Rayleigh sürecini elde etmiştir.

Smith'in bu modeli Young ve Beaulieu'de (2000) daha da basitleştirilmiş ve aynı özelliklere sahip Rayleigh katsayıları elde edilmiştir. Bu çalışmada bu modelin işlem süresinin diğerlerinden daha kısa olduğu belirtilmiş ve daha tercih edilir model olduğu gösterilmiştir. Bundan dolayı buradaki çalışmada bu metod izlenmiştir ve bir sonraki bölümde daha ayrıntılı verilmektedir.

### 4.2 Ters Ayrık Fourier Dönüşümü Alma Modelinin Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde öncelikli ters ayrık Fourier dönüşümü alma modelinin (Young ve Beaulieu, 2000) gerçekleştirilmesi açıklanmış ve MATLAB programında bir uygulaması elde edilmiştir. Bu çalışmada bu metodun tercih edilmesinin sebebi istenilen özilişki fonksiyonunun özelliklerini daha iyi vermesi ve diğerlerinden daha hızlı hesaplanmasıdır. Ters ayrık Fourier dönüşümünü alma metodu iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk olarak, karmaşık sıfır-ortalamalı Gauss gürültüsü  $A(k) + jB(k)$  şeklinde elde edilmiştir. Burada gerçel ve sanal kısımları bağımsız ve özdeş dağılımlı olmaktadır. Daha sonra elde edilen bu karmaşık vektör gerçel değerli  $F(k)$  filtre katsayıları olan vektörle çarpma işlemine tabi tutulmuştur.

Şekil 4.3'te bu metod için blok diyagramı verilmiştir. Bu metod gerçekleştirilirken bu blok diyagramı izlenmiştir.



Şekil 4.3 Rayleigh değişkenlerini elde etmek için tek bir karmaşık ters ayırık Fourier dönüşümü kullanılan iyileştirilmiş algoritmanın blok diyagramı (Young ve Beaulieu, 2000).

#### 4.2.1 Rayleigh Katsayılarının Elde Edilmesi

Rayleigh katsayılarının elde edilmesi Şekil 4.3'te görüldüğü gibi iki tane bağımsız sıfır-ortalımalı Gauss kaynaklarından  $N$  kadar değişkenler elde edilmesiyle yapılmıştır. Burada Rayleigh katsayılarını elde ederken tüm çok yollu bileşenlerden alınan toplam ortalama gücün 1'e eşit olacak şekilde oluşturulmuştur. Her bir değişken sıfır-ortalımalı ve  $\sigma^2$  varyanslı normal bir dağılıma sahiptir.

$$E\{A(k)\} = E\{B(k)\} = 0, \quad (4.8)$$

$$E\{A^2(k)\} = E\{B^2(k)\} = \sigma^2 = 1. \quad (4.9)$$

Elde edilen değişkenler  $F(k)$  gerçel değerli filtre katsayıları ile çarpılarak

$$X(k) = F(k)A(k) - jF(k)B(k) \quad (4.10)$$

elde edilir. Burada  $k = 0, 1, \dots, N-1$  olarak alınmıştır. Elde edilen  $X(k)$ 'nin ters ayırık Fourier dönüşümü alınarak,

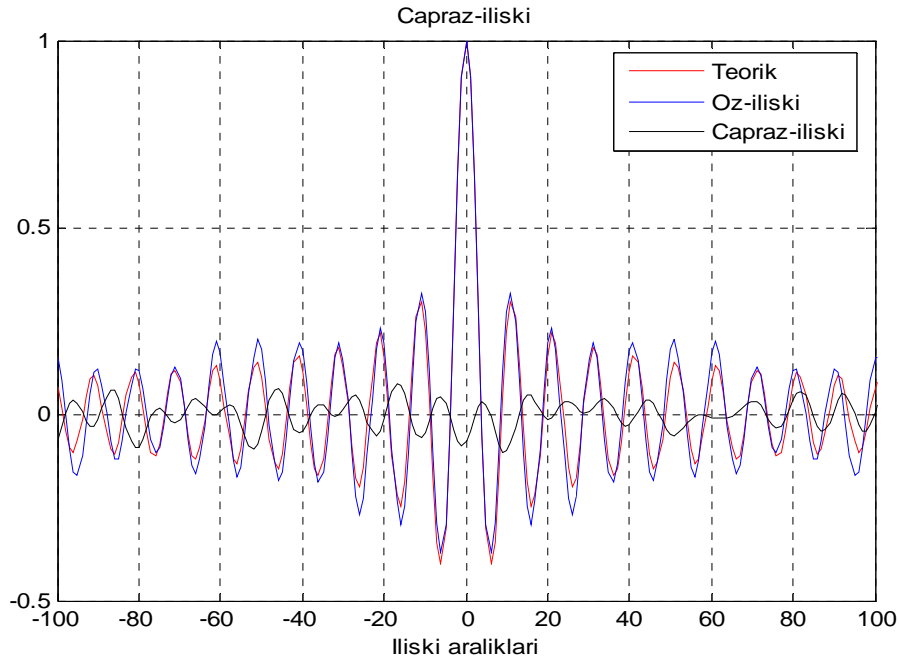
$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (F(k)A(k) - jF(k)B(k)) e^{j(2\pi kn/N)} \quad (4.11)$$

elde edilir. Burada  $n = 0, 1, \dots, N-1$  değerlerini almaktadır. Elde edilen son değerlerin mutlak değeri alınarak Rayleigh sönümlenmeli diziler elde edilir. Burada filtre katsayıları elde edilen sürecin özelliklerini belirtmektedir.

Yukarıdaki blok diyagramla elde edilen dizi sayısı sadece bir tane olduğundan modelleme sadece düz sönümlenme için olabilmektedir. Frekans-seçmeli sönümlenme modellemesi için gecikmeli yol sayısı kadar Rayleigh katsayısı üreticileri kullanılarak ve uygun gecikmeler ile güç değerleri eklenerek gerçekleştirilebilir.

### Benzetim Sonuçları

Ters ayrık Fourier dönüşümü ile elde edilen simülasyon çıkışındaki Rayleigh sürecinin gerçel ve sanal kısımları arasındaki ilişki için gösterim gerçekleştirilmiştir. Burada örnek olarak hareketli hızı 120 km/saat, taşıyıcı frekans  $F_c=900$  MHz, örnekleme frekansı ile normalize edilmiş maksimum Doppler frekansı  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , örnekleme süresi  $T_s = 1$  ms, maksimum Doppler frekansı  $F_m = 100$  Hz ve  $N = 4096$  olarak alınmıştır. Bu değerlere göre elde edilen özilişki ve çapraz ilişki Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi çapraz ilişki sıfıra yakın iken özilişki 1'e yakın olmaktadır ve aynı şekilde teorik olarak elde edilen özilişki ile bire-bir benzemektedir.



Şekil 4.4 Gerçel ve sanal kısımları arasındaki özilişki ve çapraz-ilişki. Hareketli hızı 120 km/saat,  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ ,  $T_s = 1$  ms,  $F_m = 100$  Hz,  $N = 4096$  olarak alınmıştır.

#### 4.2.2 $F(k)$ Filtresinin Tasarlanması

Filtre katsayılarının özilişki fonksiyonunun özelliklerine etkisi büyük olmaktadır. Bunun için bu katsayıların iyi bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Smith'in elde ettiği değerler için Young ve Beaulieu'de (2000) iyileştirme yapılmış ve daha hassas sonucu veren katsayılar tasarlanmıştır. Matematiksel düzenlemeler sonucu istenen Rayleigh dağılımlı süreç için elde edilen  $F(k)$  filtre katsayıları:

$$F(k) = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ \sqrt{\frac{1}{2\sqrt{1-(\frac{k}{Nf_m})^2}}}, & k = 1, 2, \dots, k_m - 1 \\ \sqrt{\frac{k_m}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{k_m-1}{\sqrt{2k_m-1}}\right) \right]}, & k = k_m \\ 0, & k = k_m + 1, \dots, N - k_m - 1 \\ \sqrt{\frac{k_m}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{k_m-1}{\sqrt{2k_m-1}}\right) \right]}, & k = N - k_m \\ \sqrt{\frac{1}{2\sqrt{1-(\frac{N-k}{Nf_m})^2}}}, & k = N - k_m + 1, \dots, N - 2, N - 1. \end{cases} \quad (4.12)$$

olmaktadır (Young ve Beaulieu, 2000). Burada  $k_m$ , maksimum Doppler frekansına eşit veya hemen altında olduğundaki  $F(k)$ 'nin indeksidir.

$$k_m = \lfloor Nf_m \rfloor \quad (4.13)$$

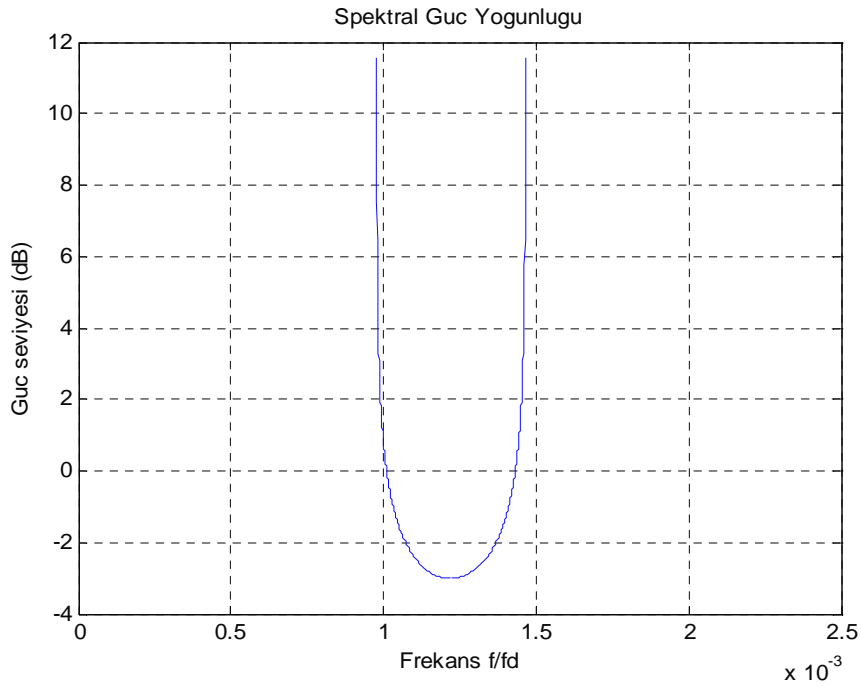
Burada  $\lfloor \cdot \rfloor$ , içindeki değere en yakın veya az küçük tam sayıyı göstermektedir. Yukarıdaki denklemde  $f_m = F_m / F_s$  maksimum Doppler frekansının örnekleme frekansı ile normalize edilmiş halidir. Elde edilen süreçte gerçekleştirilen maksimum Doppler frekansı  $k_m F_s / N$  olmaktadır.

Dikkat edilmesi gereken nokta ise  $F(0) = 0$  yapmakla Rayleigh sönümlenmesi elde edilirken, Rice dağılımlı sönümlenme için küçük bir değişiklik yapmak gerekmektedir. Bunun için  $X(0)$ 'daki değeri deterministik bir değere değiştirmekle yapılabilir. Rice dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonundaki  $s$  değişkenini kullanarak aşağıdaki denklemle Rice dağılımlı sönümlenmesi elde edilebilmektedir.

$$|X(0)| = N \cdot s \quad (4.14)$$

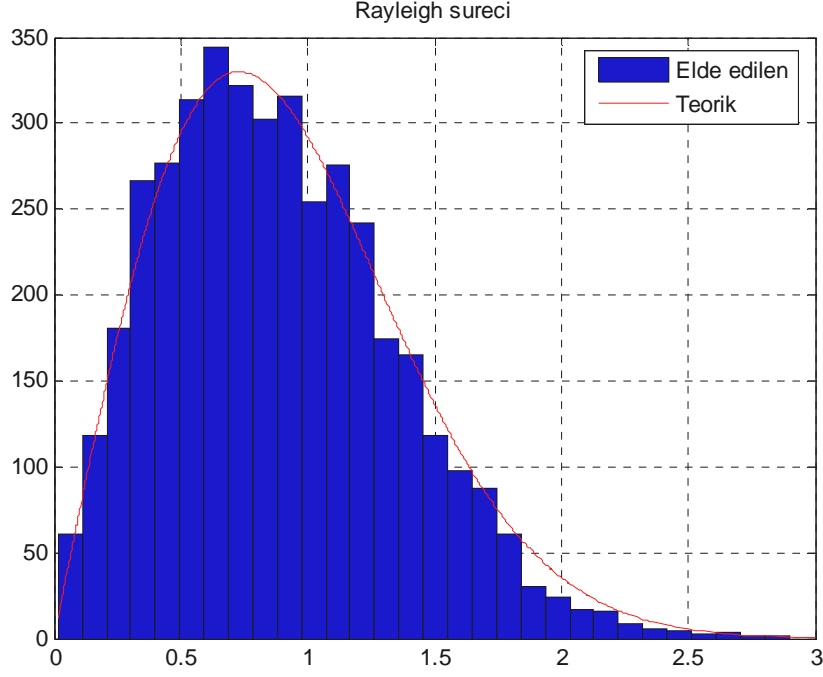
Ters Fourier ayrık dönüşümü doğrusal bir süreçtir. Bundan dolayı giriş karmaşık Gauss gürültüsü uygulanırsa çıkıştaki sürecin gerçel ve sanal kısımları da Gauss dağılımlı olmaktadır.  $N$  değerini  $2$ 'nin üsleri şeklinde seçmekle ters ayrık Fourier dönüşümü alma işlemi etkin olabilmektedir.

Şekil 4.5'te benzetimde elde edilen Doppler güç spektrumu gösterilmektedir. Burada örnek olarak hareketli hızı 120 km/saat, normalize edilmiş maksimum Doppler frekansı  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , taşıyıcı işaret  $F_c = 900$  MHz, örnekleme süresi  $T_s = 1$  ms,  $F_m = 100$  Hz,  $N = 4096$  olarak alınmıştır.

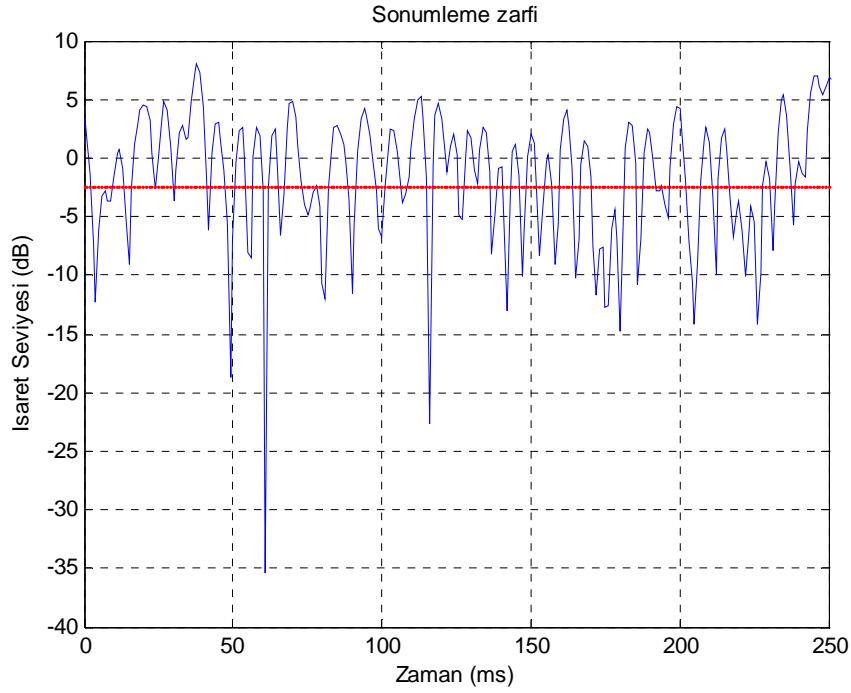


Şekil 4.5 Benzetimde elde edilen Doppler güç spektrumu. Hareketli hızı 120 km/saat,  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ ,  $F_c = 900$  MHz,  $T_s = 1$  ms,  $F_m = 100$  Hz,  $N = 4096$  olarak alınmıştır.

Şekil 4.7'de benzetimde elde edilen Rayleigh sönümlenmeli dağılımın histogramı ve teorik Rayleigh sönümlenmesi dağılımı beraber gösterilmektedir. Burada örnek olarak hareketli hızı 120 km/saat,  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ ,  $F_c = 900$  MHz,  $T_s = 1$  ms,  $F_m = 100$  Hz,  $N = 4096$  olarak alınmıştır. Aynı örnek değerleri için benzetimde elde edilen Rayleigh sönümlenme zarfı örneği Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Benzetimde elde edilen Rayleigh sönümlenmeli dağılımın histogramı ve teorik Rayleigh sönümlenmesi dağılımı. Hareketli hızı 120 km/saat,  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ ,  $F_c = 900$  MHz,  $T_s = 1$  ms,  $F_m = 100$  Hz,  $N = 4096$  olarak alınmıştır.



Şekil 4.7 Benzetimde elde edilen Rayleigh sönümleme zarfı örneği. Hareketli hızı 120 km/saat,  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ ,  $T_s = 1$  ms,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 100$  Hz,  $N = 4096$  olarak alınmıştır.

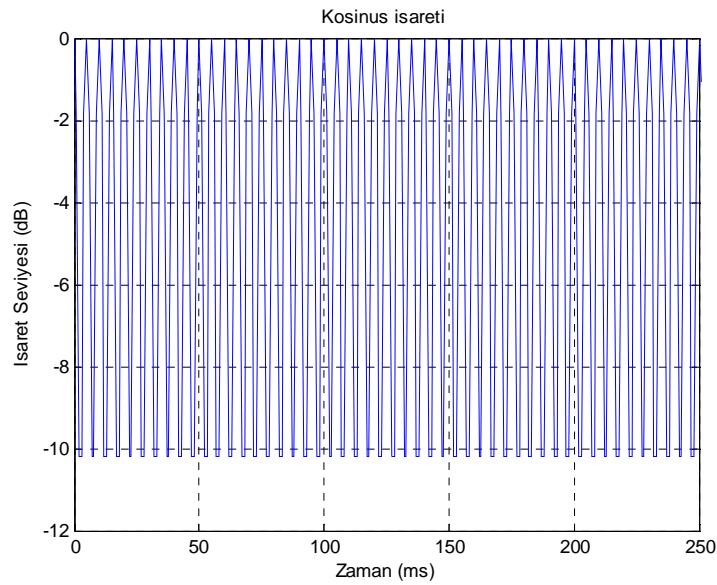
## 5. SÖNÜMLEMELİ KANAL UYGULAMALARI

Bu bölümde Bölüm 4'te elde edilen simülatörle kanal uygulamaları yapılmıştır. İlk önce Bölüm 5.1'de bir kosinüs işaretinin çeşitli sönümlemeli kanallardan iletilmesi uygulaması yapılmıştır. Bölüm 5.1.1'de düz sönümlemeli yavaş değişen kanal uygulaması, Bölüm 5.1.2'de düz sönümlemeli hızlı değişen kanal uygulaması yapılmıştır. Daha sonra frekans-seçmeli yavaş değişen kanal uygulaması Bölüm 5.1.3'te ve frekans-seçmeli hızlı değişen kanal uygulaması Bölüm 5.1.4'te gösterilmiştir. Bölüm 5.3'te bir BPSK işaretinin oluşturulan çeşitli sönümlemeli kanallardan iletilmesinin uygulaması yapılmış ve performans gösterimleri de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların grafiksel gösterimleri verilmiştir. Bu bölüm boyunca frekans-seçmeli kanal için dört gecikmeli yol olduğu varsayılmıştır.

### 5.1 Kosinüs İşaretin Oluşturulan Çeşitli Sönümlemeli Kanallardan İletilmesi

Bunun için bir kosinüs işareti iletimi ile düz sönümlemeli yavaş değişen kanal, düz sönümlemeli hızlı değişen kanal, frekans-seçmeli sönümlemeli yavaş değişen kanal ve frekans-seçmeli sönümlemeli hızlı değişen kanal uygulamaları yapılmış ve bunlar üzerinde gözlemler yapılmıştır.

Burada gönderilecek olan taşıyıcı işaret  $s(t) = A \cos(2\pi f_t t)$  olarak seçilmiştir. İşaret için  $f_t = 100$  Hz ve  $A=1$  olarak seçilmiştir. Şekil 5.1'de iletilecek işaret, genliği dB olarak ve 250 ms aralığında gösterilmektedir.

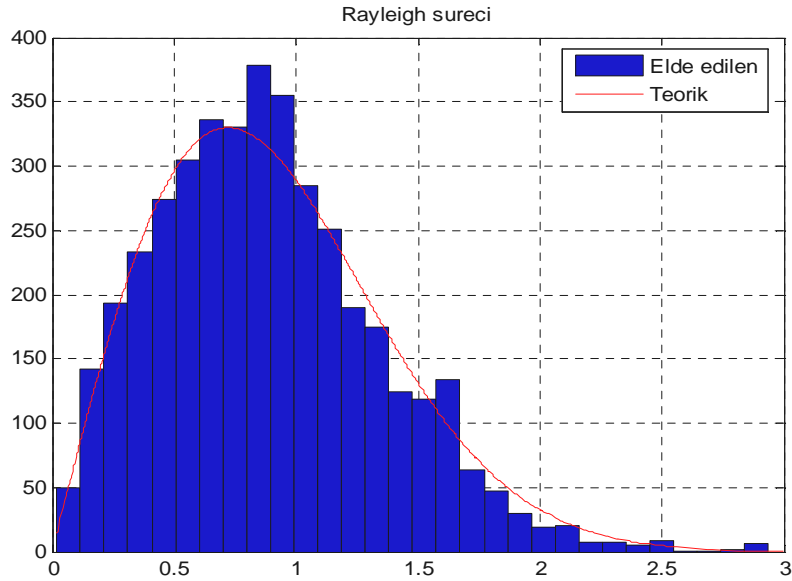


Şekil 5.1 Sinüzoidal işareti genliği dB olarak alınmış ve 250 ms aralığında seçilmiştir.

### 5.1.1 Düz Sönümlmeli Yavaş Değişen Kanal Uygulaması

Düz sönümlmeli yavaş değişen kanal için verilen istatistiksel özellikler Bölüm 3'te verilmektedir. Düz sönümlmeli kanalda ek gecikmeli gelen yol olmamaktadır. Kanalın hızlı veya yavaş olduğunu belirten parametreler sırasıyla kanal uyumlu zamanı ve işaretin sembol süresi:  $T_C = \frac{0.423}{F_m}$ ,  $T_S \approx 1/W$ 'dan hesaplanmıştır. Burada  $f_m = F_m / F_s = 0.1$ , örnekleme süresi  $T_s = 1\text{ms}$  olarak alınmıştır. Kanal,  $T_S < T_C$  ise yavaş değişen kanal olurken  $T_S > T_C$  ise hızlı değişen kanal olmaktadır.

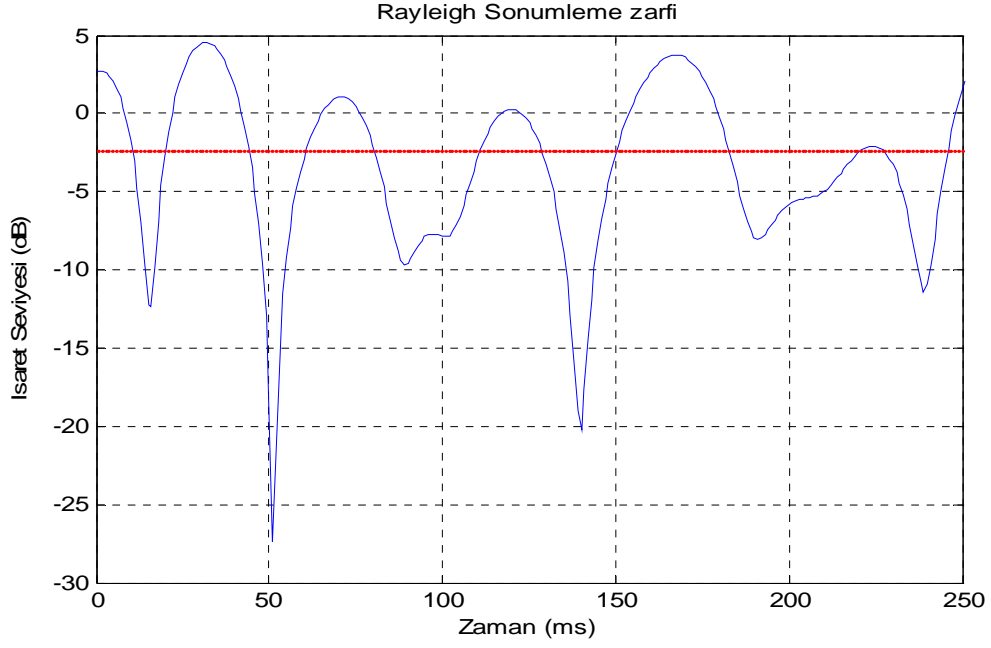
Yavaş değişen kanal örneği için hareketli hızı  $v = 30\text{ km/saat}$  ve maksimum Doppler frekansı  $F_m = 25\text{ Hz}$  seçilmiştir. Kanal uyumlu zamanı  $T_C = 17\text{ ms}$  ve işaretin örnekleme süresi  $T_S = 1\text{ ms}$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.2'de yavaş değişen kanal örneği için Rayleigh dağılımlı histogram gösterilmektedir.



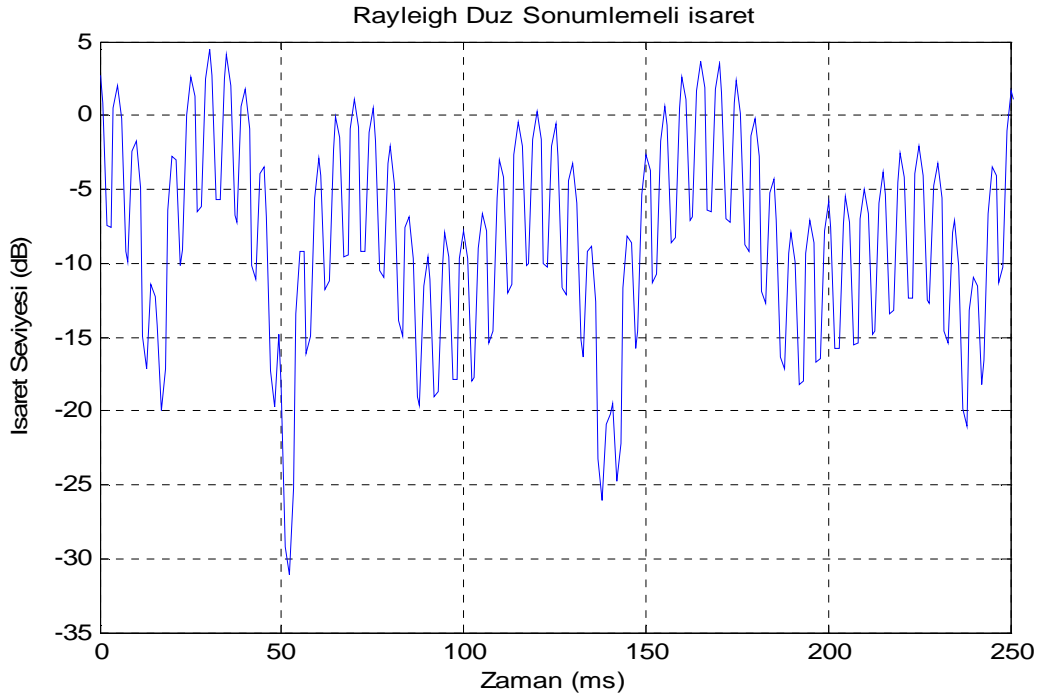
Şekil 5.2 Kanalın Rayleigh dağılımlı histogramı, elde edileni ve teorik olanı. Yavaş değişen kanal örneği için  $v = 30\text{ km/saat}$ ,  $F_c = 900\text{ MHz}$ , ve  $F_m = 25\text{ Hz}$  seçilmiştir.  $T_C = 17\text{ms}$  ve  $T_S = 1\text{ms}$  olarak hesaplanmıştır. Ortalama = 0.87 elde edilmiştir.

Şekil 5.3'te yavaş değişen düz sönümlmeli kanal örneği için Rayleigh sönümlmeli zarfı gösterilmektedir ve Şekil 5.4'te ise kosinüs işareti ile çarpılmış hali gösterilmektedir. Buradan görüldüğü gibi düz sönümlmeli yavaş değişen kanalda işaret derin sönümlmeye çok az uğramakta ve bozulmalar da olmamaktadır.





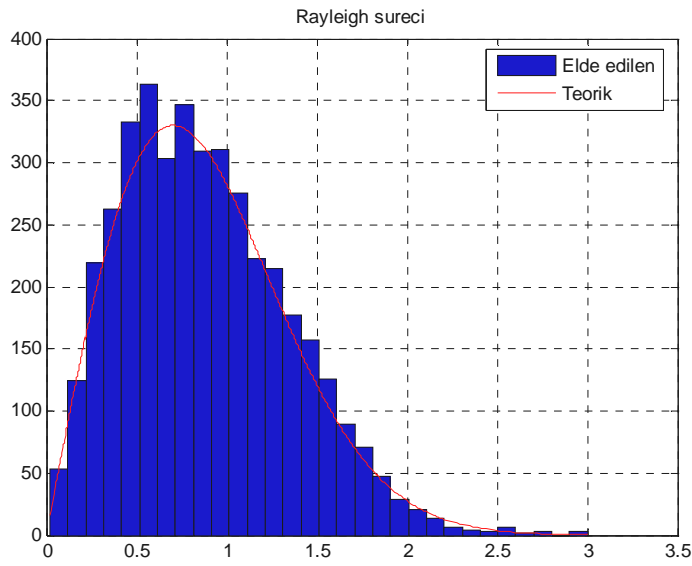
Şekil 5.3 Kanalin Rayleigh sönümlenmeli zarfı ve ortalaması. Yavaş değişen kanal örneği için  $v = 30$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz, ve  $F_m = 25$  Hz seçilmiştir.  $T_c = 17$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.4 Kanalin Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Yavaş değişen kanal örneği için  $v = 30$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz, ve  $F_m = 25$  Hz seçilmiştir.  $T_c = 17$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

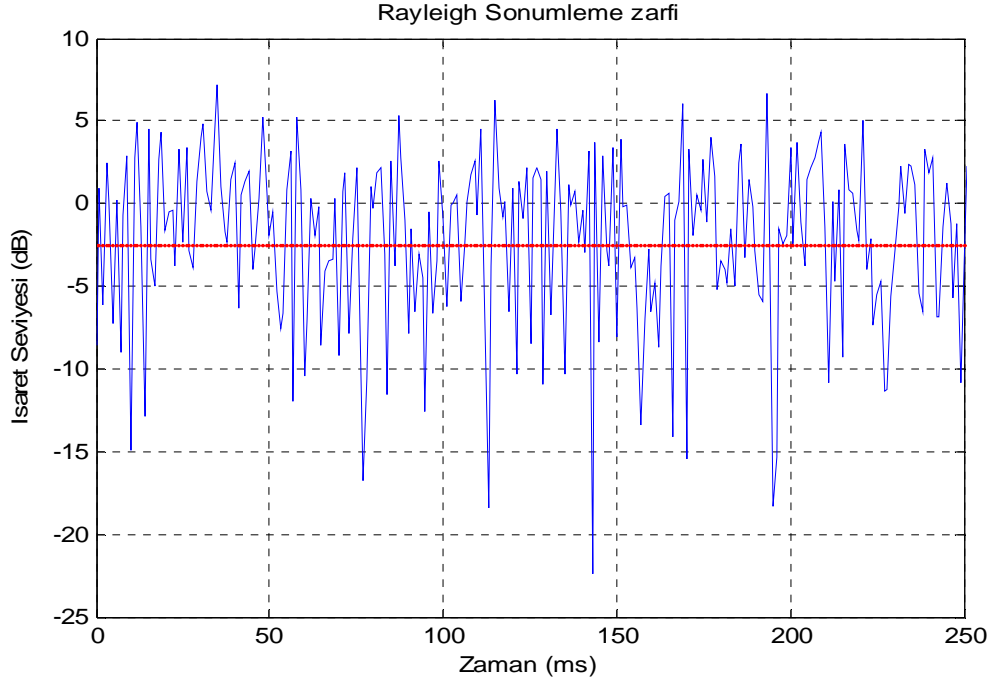
### 5.1.2 Düz Sönümlmeli Hızlı Değişen Kanal Uygulaması

Hızlı değişen düz sönümlmeli kanalda  $T_s > T_c$  olmaktadır. Burada maksimum Doppler hızı  $F_m = 100$  Hz seçilmiştir. Kanal uyumlu zamanı  $T_c = 4.2$  ms ve işaretin sembol süresi  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.  $T_s = 1$  ms ve taşıyıcı frekansı  $F_c = 900$  MHz değerleri için  $T_s > T_c$  olması için hareketli hızının en az  $v = 515$  km/saat olması gerekmektedir. Hareketli hızı bu hızın üstünde iken hızlı sönümleme olmaktadır. Bunun için burada düz sönümlmeli hızlı değişen kanal örneği için hareketli hızı  $v = 520$  km/saat alınmıştır. Şekil 5.5'te bu değerler için kanal zarfının Rayleigh dağılımlı histogramı gösterilmektedir.

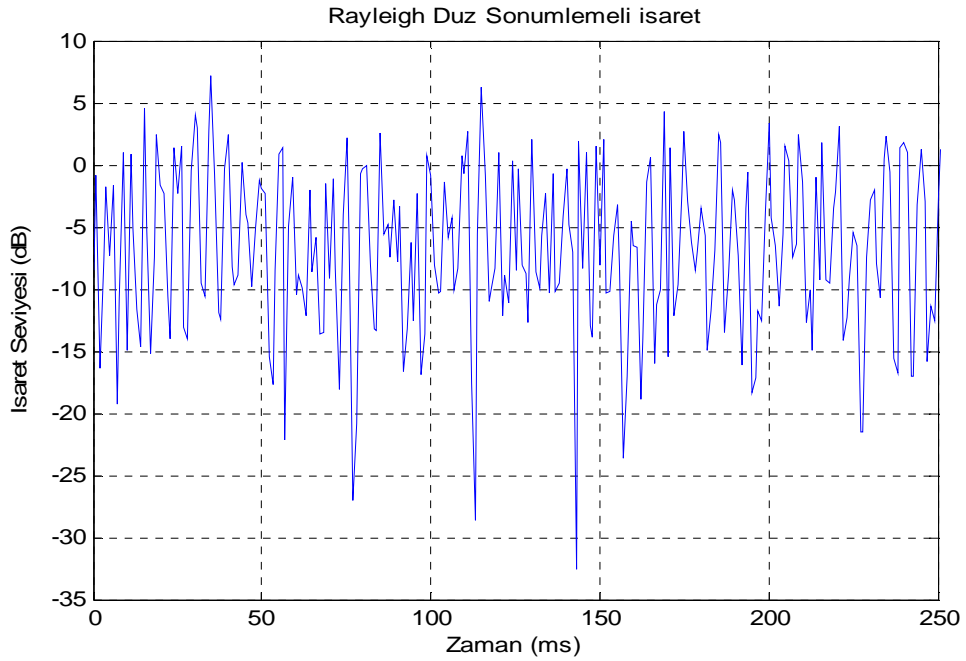


Şekil 5.5 Kanalın Rayleigh dağılımı elde edilene ve teorik olanı. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 520$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz, ve  $F_m = 433$  Hz seçilmiştir.  $T_c = 0.9$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.6'da düz sönümlmeli hızlı değişen kanal örneği için Rayleigh sönümlmeli zarfı gösterilmektedir ve Şekil 5.7'de kosinüs işareti ile çarpılmış zarfı gösterilmektedir. Buradan görüldüğü gibi hızlı değişen kanalda işaret üzerinde derin sönümlmeler artmakta ve bozulmalar olmaktadır.



Şekil 5.6 Kanalın Rayleigh sönümlenmeli zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 520$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 433$  Hz ve  $f_m = 0.43$  seçilmiştir.  $T_c = 0.9$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Kanalın Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 520$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 433$  Hz ve  $f_m = 0.43$  seçilmiştir.  $T_c = 0.9$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

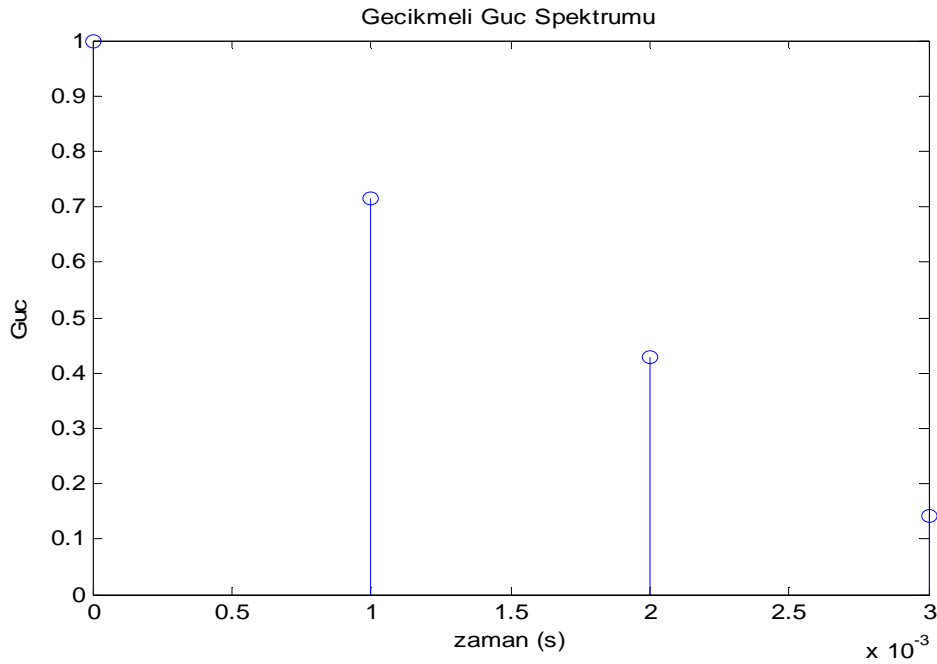
Düz sönümlenmeli yavaş ve hızlı değişen kanal uygulaması için MATLAB kodları **Ek 1**'de verilmektedir.

### 5.1.3 Frekans-Seçmeli Yavaş Değişen Kanal Uygulaması

Frekan-seçmeli sönümlenmeli kanal durumunda gecikmeli yollar olmaktadır. Buradaki kanal uygulamalarında 4 tane gecikmeli yol olduğu varsayılmaktadır. Her bir gecikmeli yola düşen gecikmeler  $T_s = 1$  ms farkıyla,  $\tau_1 = 0$ ,  $\tau_2 = 1$  ms,  $\tau_3 = 2$  ms ve  $\tau_4 = 3$  ms olarak alınmıştır. Gecikmeli güçler 1'e göre normalize edilerek dB olarak alınmıştır. Aynı şekilde her bir gelen gecikmeli yola düşen güç miktarı sırasıyla  $P_1 = 0$  dB,  $P_2 = -1.46$  dB,  $P_3 = -3.68$  dB ve  $P_4 = -8.45$  dB olarak hesaplanmıştır. Gecikmeli bu yollar aşağıdaki gibi faz farkı varsayılarak toplanmıştır.

$$R_{Top} = Yol1 - Yol2 + Yol3 - Yol4;$$

Gecikmeli güç profili Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

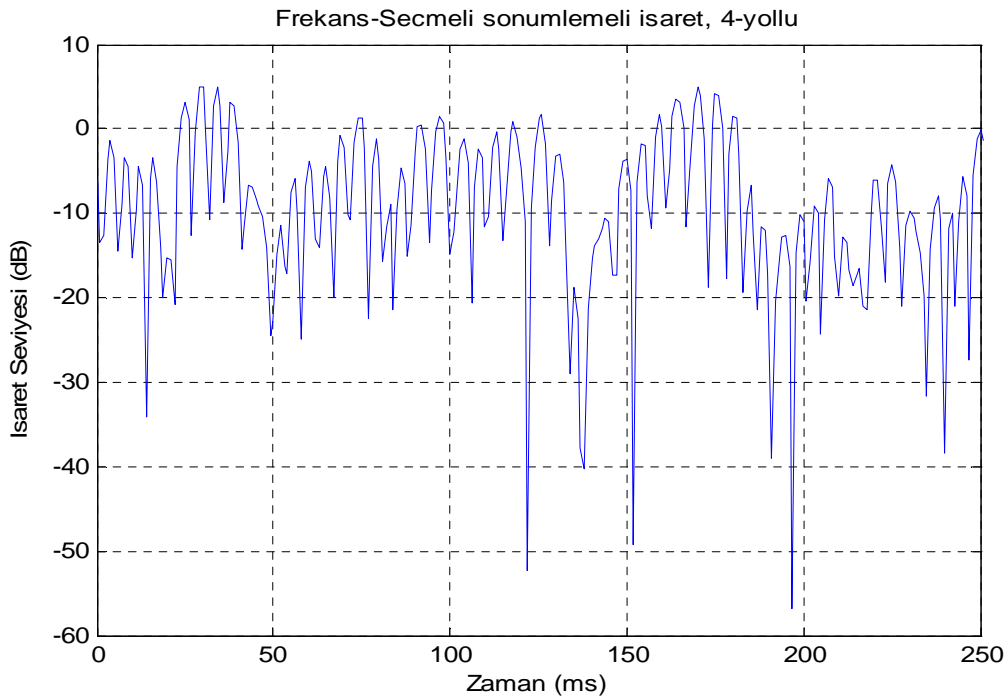


Şekil 5.8 Frekans-seçmeli Rayleigh sönümlenmeli kanalın gecikmeli güç spektrumu.

Maksimum ek gecikmesi  $T_m = 4$  ms olarak hesaplanmıştır. Frekans-seçmeli kanal için işaretin bantgenişliği kanalın uyumlu bantgenişliğinden daha büyük olmaktadır,  $B_s > B_c$ . Burada

kanalın uyumlu zamanı  $B_C = \frac{1}{T_m}$  'tan hesaplanmıştır. Maksimum Doppler hızı  $F_m=25$  Hz olarak alınmıştır. İşaretin bantgenişliği  $B_S=1/T_S=1000$  Hz ve kanalın uyumlu bantgenişliği maksimum ek gecikme  $T_m = 4$  ms alınarak,  $B_C = 250$  Hz olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi  $B_S > B_C$  olmaktadır ve kanal frekans-seçmeli olmaktadır.

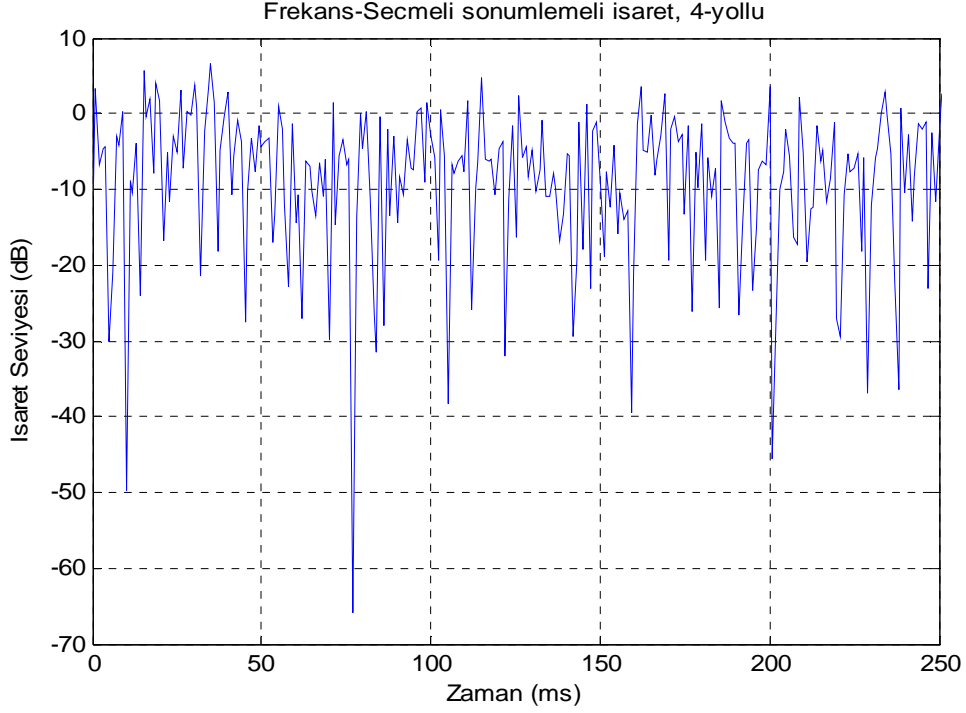
Şekil 5.9'da frekans-seçmeli yavaş değişen kosinüs işaretli kanal örneği için Rayleigh sönümlenmeli zarfı gösterilmektedir. Buradan görüldüğü gibi frekans-seçmeli yavaş değişen kanalda işaret daha derin sönümlenmelere uğramakta ve bozulmalar olmaktadır.



Şekil 5.9 Kanalın frekans-seçmeli Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Yavaş değişen kanal örneği için  $v = 30$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz, ve  $F_m = 25$  Hz seçilmiştir.  $T_C = 17$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

#### 5.1.4 Frekans-Seçmeli Hızlı Değişen Kanal Uygulaması

Frekans-Seçmeli hızlı değişen kanal en zorlu kanal durumudur. Burada maksimum Doppler hızı  $F_m=100$  Hz olarak alınmıştır. Düz sönümlenmeli hızlı değişen kanal örneğinde olduğu gibi hareketli hızlı örnek olarak  $v = 520$  km/saat alınmıştır. Şekil 5.10'da frekans-seçmeli hızlı değişen kosinüs işaretinin Rayleigh sönümlenmeli zarfı gösterilmektedir.



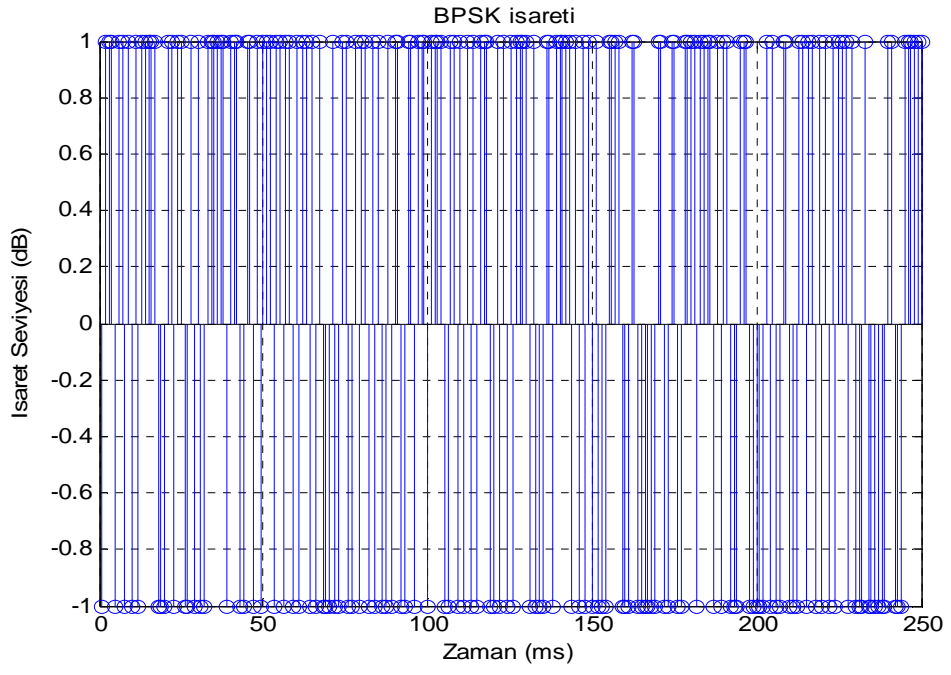
Şekil 5.10 Kanalin Rayleigh sönümlenmeli kosinüs işaretli zarfı. Hızlı değişen kanal için  $v = 520$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 433$  Hz ve  $f_m = 0.43$  seçilmiştir.  $T_C = 0.9$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Buradan görüldüğü gibi frekans-seçmeli hızlı değişen kanalda işaret çok daha derin sönümlenmelere uğramakta ve bozunmalar daha fazla olmaktadır. İşaret düz sönümlenmeli kanala göre 30 dB kadar daha fazla zayıflamaktadır. Buradan görüldüğü gibi frekans-seçmeli hızlı değişen kanal en kötü kanal durumu olmaktadır.

Bu uygulama için MATLAB programı EK-1'de verilmektedir.

## 5.2 BPSK İşaretinin Oluşturulan Çeşitli Sönümlenmeli Kanallardan İletilmesi

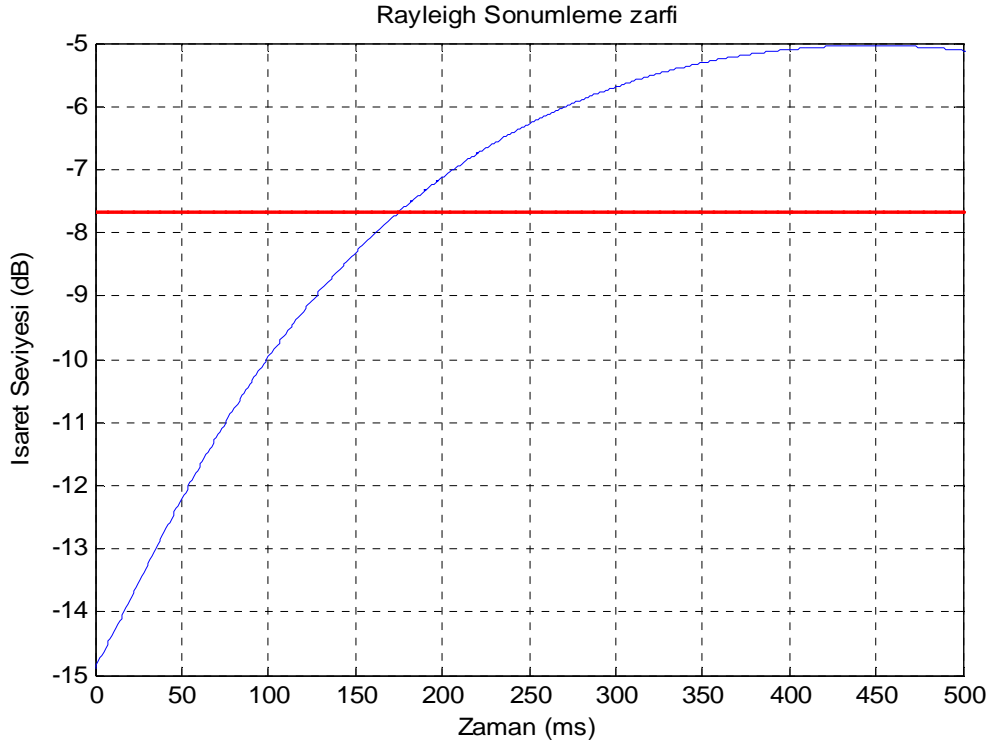
Bu bölümde bir BPSK işaretinin çeşitli sönümlenmeli kanallardan iletimi yapılmıştır ve performans değerlendirmeleri verilmiştir. Burada iletilecek olan BPSK işareti aşağıdaki gibi seçilmiştir. Kanal analizlerini yapmak için ilk olarak yavaş değişen kanal ve sonrasında hızlı değişen kanal şeklinde hem düz sönümlenme hem de frekans-seçmeli sönümlenme örnekleri ele alınmıştır.



Şekil 5.11 İletilecek olan BPSK işareti

### 5.2.1 Yavaş Değişen Kanal

Yavaş değişen kanal durumu için hem düz sönümlenme örneği hem de frekans-seçmeli sönümlenme örneği verilmiştir. Bu kanal durumu için örnek olarak hareketli hızı  $v = 1$  km/saat, taşıyıcı frekans  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 0.8$  Hz ve  $f_m = 0.0008$  seçilmiştir. Kanal uyumlu zamanı  $T_c = 507$  ms ve örnekleme süresi  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır. Yavaş değişen kanal durumu için Rayleigh sönümlenmesi zarfı Şekil 5.12’de verilmektedir.



Şekil 5.12 Rayleigh sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için  $v = 1$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 0.8$  Hz ve  $f_m = 0.0008$  seçilmiştir.  $T_c = 507$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

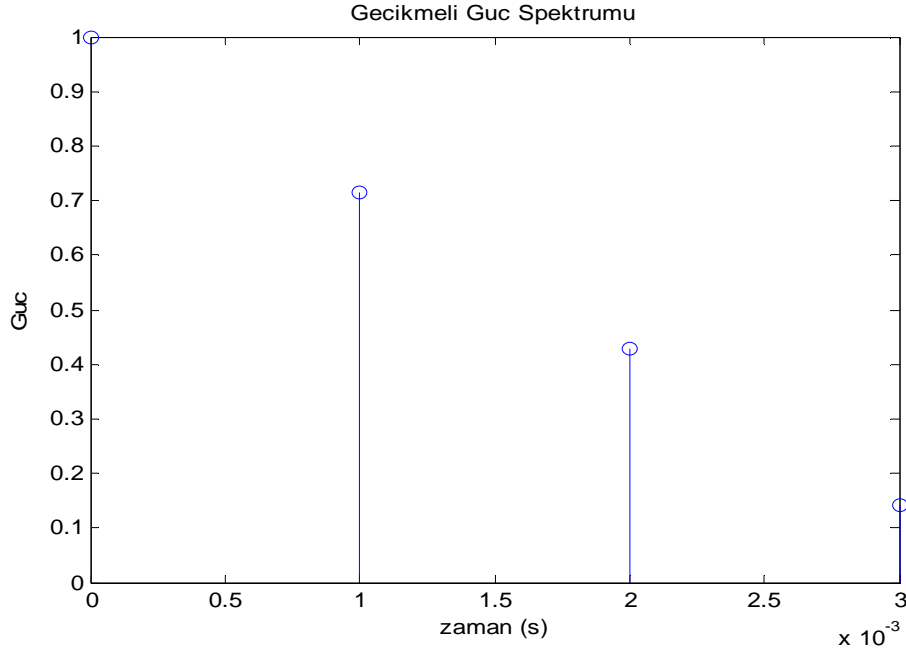
Burada gecikmeli yol sayısı 4 tane olarak seçilmiş ve her bir gecikmeli yola düşen gecikmeler  $T_s = 1$  ms farkıyla  $\tau_1 = 0$ ,  $\tau_2 = 1$  ms,  $\tau_3 = 2$  ms ve  $\tau_4 = 3$  ms olarak alınmıştır. Gecikmeli güçler 1'e göre normalize edilerek dB olarak alınmıştır. Her bir gelen gecikmeli yola düşen güç miktarı sırasıyla  $P_1 = 0$  dB,  $P_2 = -1.46$  dB,  $P_3 = -3.68$  dB ve  $P_4 = -8.45$  dB olarak hesaplanmıştır. Gecikmeli bu yollar aşağıdaki gibi faz farkı varsayılarak toplanmıştır.

$$R_{Top} = Yol1 - Yol2 + Yol3 - Yol4;$$

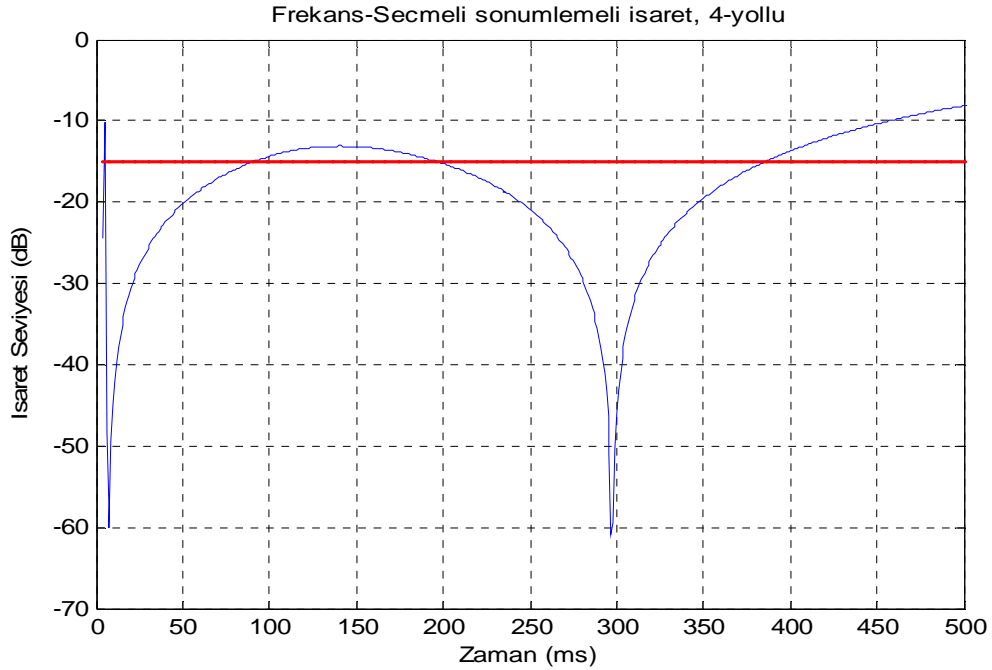
Şekil 5.13'te frekans-seçmeli kanal durumu için gecikmeli güç spektrumu gösterilmektedir ve



Şekil 5.14'te ise frekans-seçmeli yavaş değişen kanal için Rayleigh sönümlmeli zarfı gösterilmektedir.



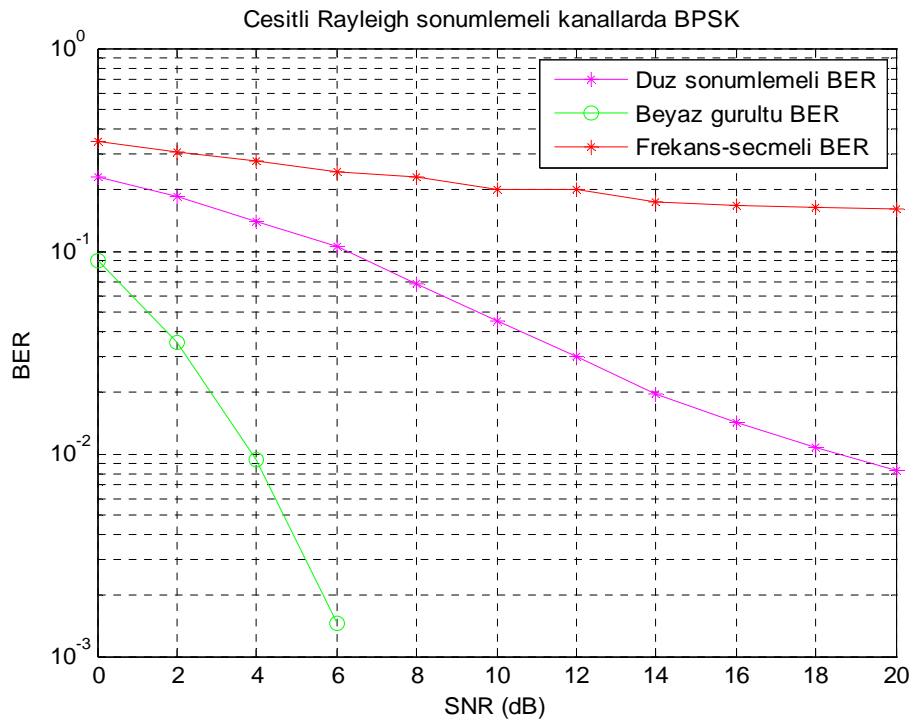
Şekil 5.13 Frekans-seçmeli Rayleigh sönümlmeli kanalın gecikmeli güç spektrumu.



Şekil 5.14 Rayleigh sönümlmeli yavaş değişen kanal örneği için  $v = 1$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 0.8$  Hz ve  $f_m = 0.0008$  seçilmiştir.  $T_c = 507$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Burada zarfın ortalama gücü  $P = -6.7$  dB olarak hesaplanmıştır. Maksimum Doppler hızı  $F_m = 0.8$  Hz olarak alınmıştır. İşaretin bantgeniği  $B_s = 1/T_s = 1000$  Hz ve kanalım uyumlu bantgeniği maksimum ek gecikme  $T_m = 4$  ms alınarak,  $B_c = 250$  Hz olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi  $B_s > B_c$  olmakta ve kanal frekans-seçmeli sönümlenmeli olmaktadır. Performans analizi yapmak için iletilecek bit sayısı 5000 olarak seçilmiştir.

Şekil 5.15'te yavaş değişen düz sönümlenmeli ve frekans-seçmeli sönümlenmeli kanal durumları için performans analizi verilmektedir.

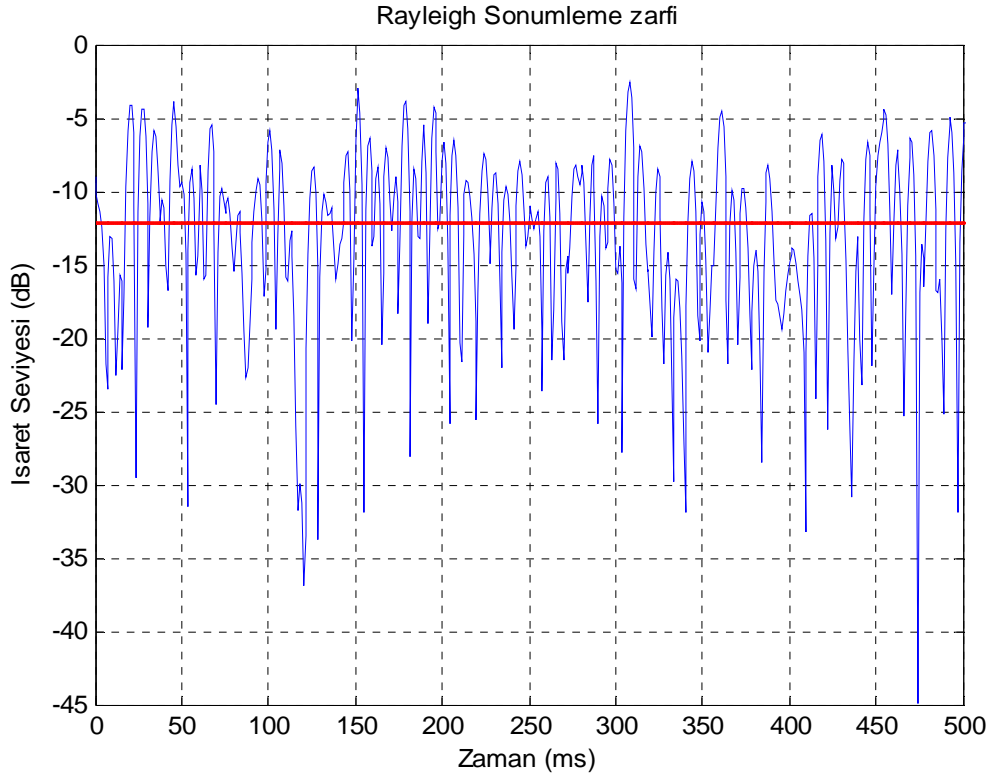


Şekil 5.15 Rayleigh sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için performans analizi. Burada  $v = 1$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 0.8$  Hz ve  $f_m = 0.0008$  seçilmiştir.  $T_c = 507$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Burada düz sönümlenmeli yavaş değişen kanal örneği için bit hata sayısı 16 ve frekans-seçmeli hızlı kanal için bit hata sayısı 671 olarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi en iyi performansı veren Gauss gürültülü kanala göre düz sönümlenmeli yavaş değişen kanal daha düşük performans göstermekte ve frekans-seçmeli yavaş sönümlenmeli kanal ise en düşük performans gösteren kanal durumu olmaktadır.

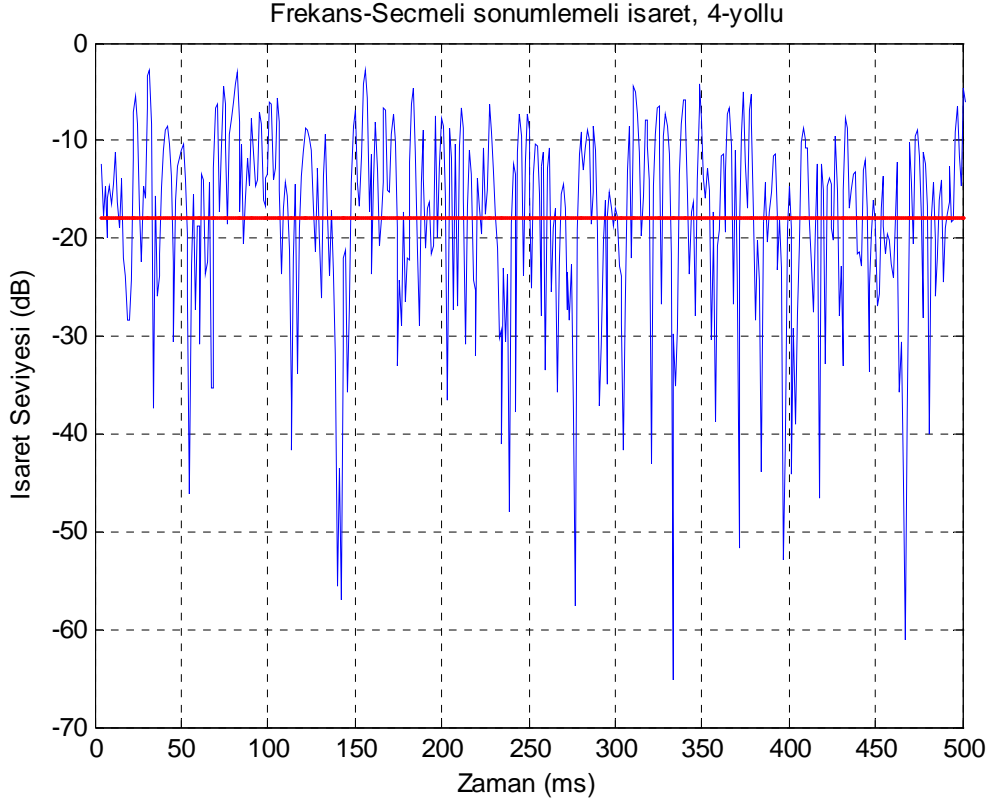
### 5.2.2 Hızlı Değişen Kanal

Hızlı değişen kanal durumu için yavaş değişen kanaldaki gibi hem düz sönümlenme örneği hem de frekans-seçmeli sönümlenme örneği verilmiştir. Bu kanal durumu için ise örnek olarak hareketli hızı  $v = 120$  km/saat, taşıyıcı frekansı  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 0.8$  Hz ve  $f_m = 0.0008$  seçilmiştir. Kanal uyumlu zamanı  $T_C = 4.2$  ms ve örnekleme süresi  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır. Hızlı değişen kanal durumu için Rayleigh sönümlenmesi zarfı Şekil 5.16'da verilmektedir.



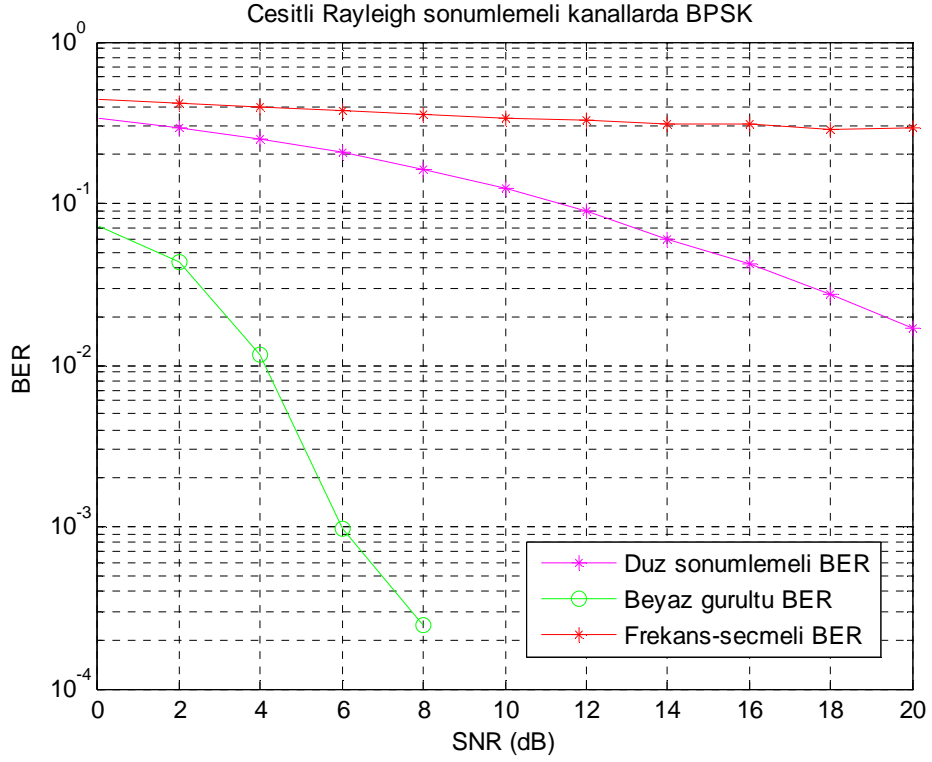
Şekil 5.16 Frekans-seçmeli kanalın Rayleigh sönümlenmeli işaretin zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 120$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 100$  Hz ve  $f_m = 0.1$  seçilmiştir.  $T_C = 4.2$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.17'de frekans-seçmeli hızlı sönümlenme için Rayleigh sönümlenmeli zarfı gösterilmektedir. Burada zarfın ortalama gücü  $P = -9.5$  dB olarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi frekans-seçmeli hızlı değişen kanalda işaret derin sönümlenmelere uğramakta ve çok güçlü bir şekilde bozulmaktadır. Aynı şekilde gücünde yaklaşık 25 dB kadar zayıflayabilmektedir.



Şekil 5.17 Frekans-seçmeli kanalın Rayleigh sönümlmeli işaretinin zarfı. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 120$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 100$  Hz ve  $f_m = 0.1$  seçilmiştir.  $T_C = 4.2$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

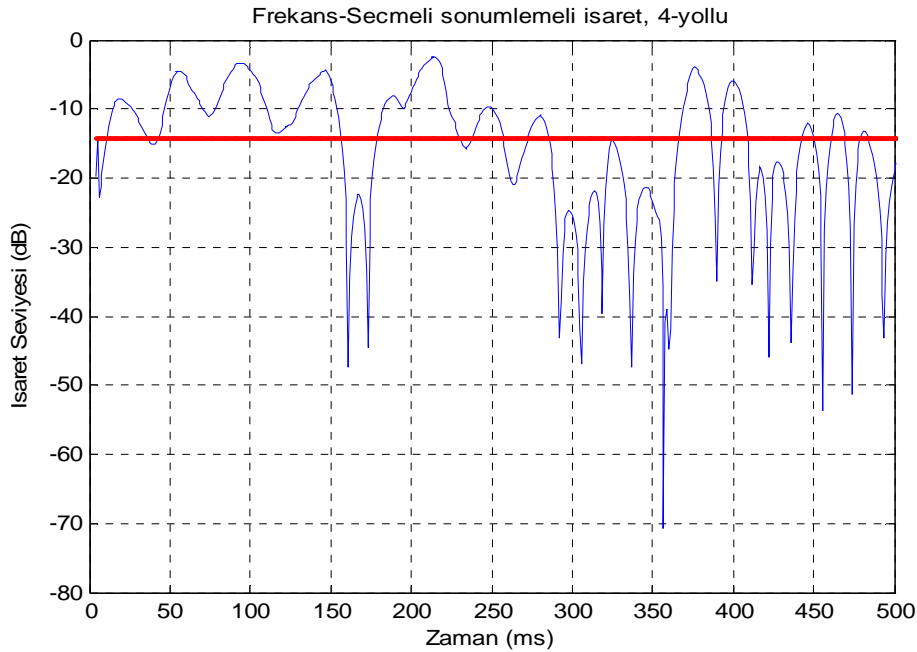
Hızlı değişen düz sönümlmeli ve frekans-seçmeli sönümlmeli kanal örnekleri için performans analizi Şekil 5.18'de gösterilmektedir. Burada iletilen toplam bit sayısı 5000 olarak seçilmiştir. Düz sönümlmeli hızlı kanal için bit hata sayısı 91 ve frekans-seçmeli hızlı kanal için bit hata sayısı 1453 olarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi hız arttıkça düz sönümlmeli işaret frekans-seçmeli sönümlmeli işarete yaklaşmaktadır. Hız arttıkça bit hata sayıları da artmaktadır. Şekilde frekans-seçmeli hızlı sönümlmeli kanal durumu frekans-seçmeli yavaş sönümlmeli kanal durumundan daha az miktar iyileşme göstermektedir.



Şekil 5.18 Hızlı değişen kanal için performans analizi. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 120$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 100$  Hz ve  $f_m = 0.1$  seçilmiştir.  $T_C = 4.2$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

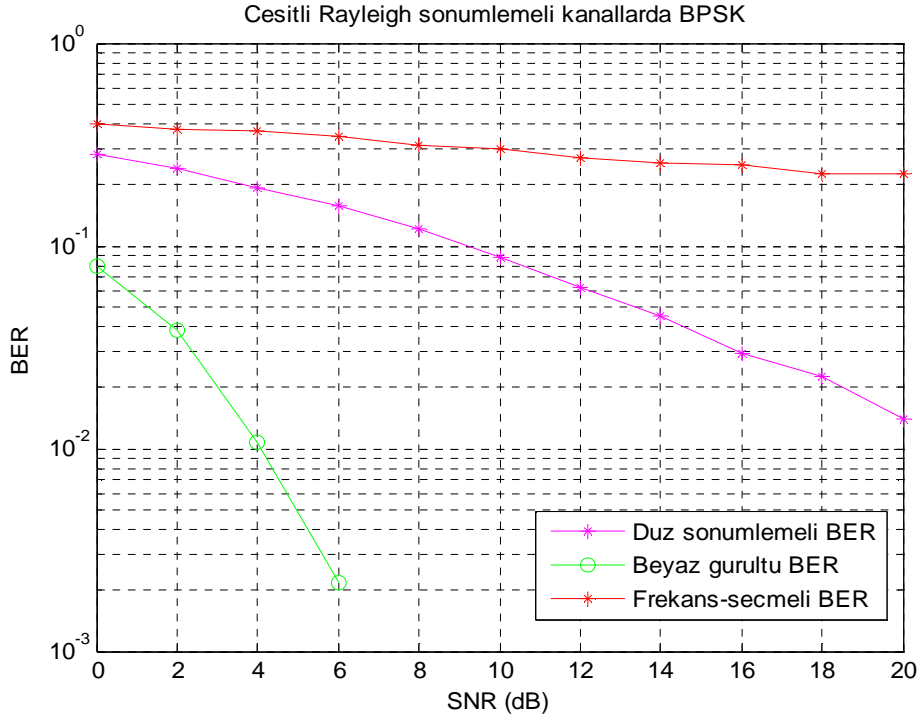
Burada taşıyıcı frekansı  $F_c=1800$  MHz seçilerek aynı şekilde kanal analizi yapılmaktadır. Öncelikli yavaş değişen kanal durumu için değerlendirmeler yapılmış sonrasında hızlı değişen kanal durumu ele alınmıştır. Yavaş değişen kanal durumu için örnek olarak hareketli hızı  $v = 1$  km/saat alınmıştır. Maksimum Doppler frekansı  $F_m=1.6$  Hz, örnekleme frekansı  $f_m=0.0017$ , kanal uyumlu zamanı  $T_c = 253$  ms ve örnekleme süresi  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır. Frekans-seçmeli kanal durumu için bir önceki örneklerdeki gecikmeli güç değerleri alınmıştır.

Şekil 5.19'da yavaş değişen frekans-seçmeli sönmülemeli kanal durumu için zarf örneği gösterilmektedir.



Şekil 5.19 Frekans-Seçmeli Rayleigh sönmülemeli yavaş değişen kanal zarfı. Kanal örneği için  $v=1$  km/saat,  $F_c = 1800$  MHz,  $F_m = 1.6$  Hz ve  $f_m = 0.0017$  seçilmiştir.  $T_c = 253$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.20'de  $F_c=1800$  MHz durumunda performans analizi verilmektedir. Burada düz sönmülemeli yavaş değişen kanal için bit hata sayısı 24 ve frekans-seçmeli hızlı değişen kanal için bit hata sayısı 913 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi taşıyıcı frekansı arttıkça hızlı sönmülemeli kanal durumu gibi performans düşmektedir.

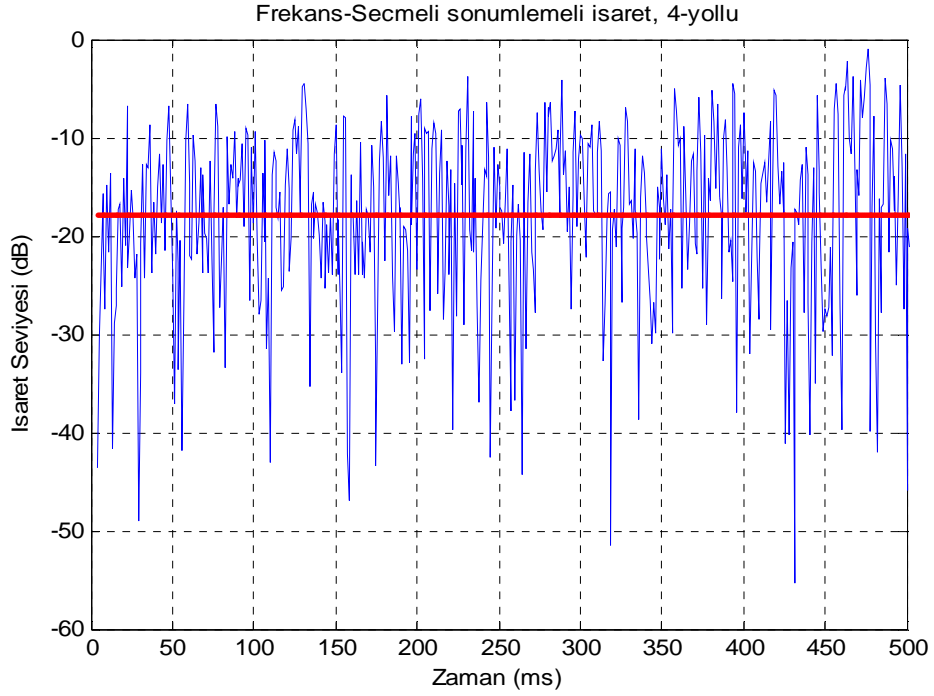


Şekil 5.20 Yavaş değişen kanal için performans analizi. Yavaş değişen kanal örneği için  $v = 1$  km/saat,  $F_c = 1800$  MHz,  $F_m = 1.6$  Hz ve  $f_m = 0.0017$  seçilmiştir.  $T_c = 253$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

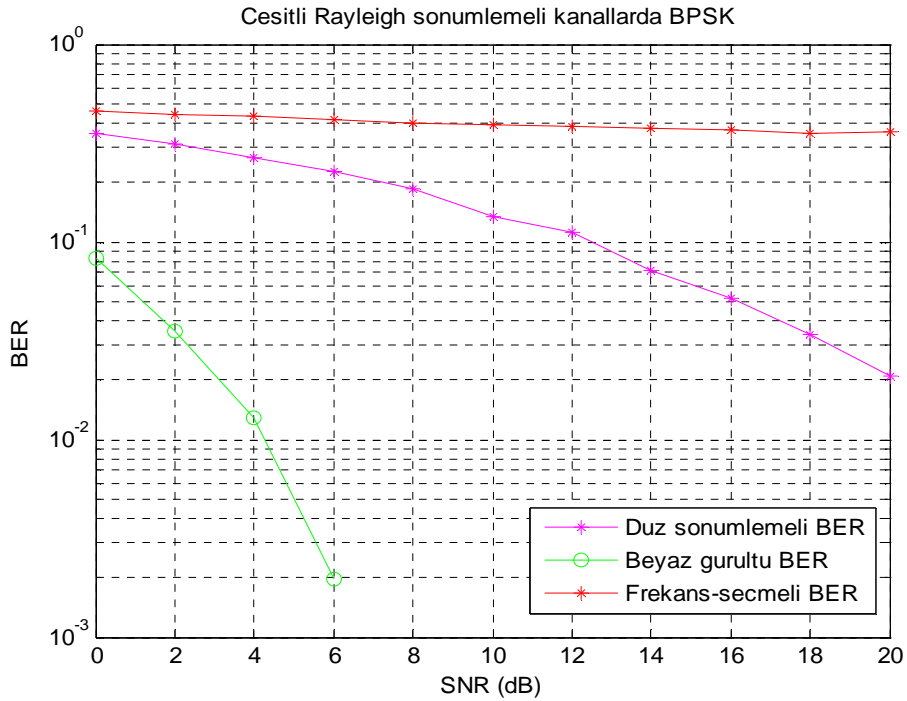
Taşıyıcı frekansı  $F_c = 1800$  MHz iken hızlı değişen kanal durumu için hareketli hızı  $v = 120$  km/saat seçilmiştir. Maksimum Doppler frekansı  $F_m = 200$  Hz, örnekleme frekansı  $f_m = 0.2$ , kanal uyumlu zamanı  $T_c = 2$  ms ve örnekleme süresi  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.21’de hızlı değişen frekans-seçmeli sönmleme durumu için zarf örneği gösterilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi işaret bozulmakta ve derin sönmlemeler çok olmaktadır.

Şekil 5.22’de hızlı değişen kanal durumu için düz sönmlemeli ve frekans-seçmeli sönmlemeli kanal performans analizi gösterilmektedir. Burada düz sönmlemeli hızlı değişen kanal için iletilen 5000 bit sayısında bit hata sayısı 93 ve frekans-seçmeli hızlı kanal için bit hata sayısı 1358 olarak hesaplanmıştır. Taşıyıcı frekansındaki artış maksimum Doppler frekansını artırmakta, dolayısıyla kanal uyumlu zamanını azaltmaktadır. Kanalın hızlı değişim göstermesine neden olmaktadır.

Bu uygulamalar için MATLAB kodları EK-2’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Rayleigh sönümlenmeli hızlı değişen kanal için  $v = 120$  km/saat,  $F_c = 1800$  MHz,  $F_m = 200$  Hz ve  $f_m = 0.2$  seçilmiştir.  $T_C = 2$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.



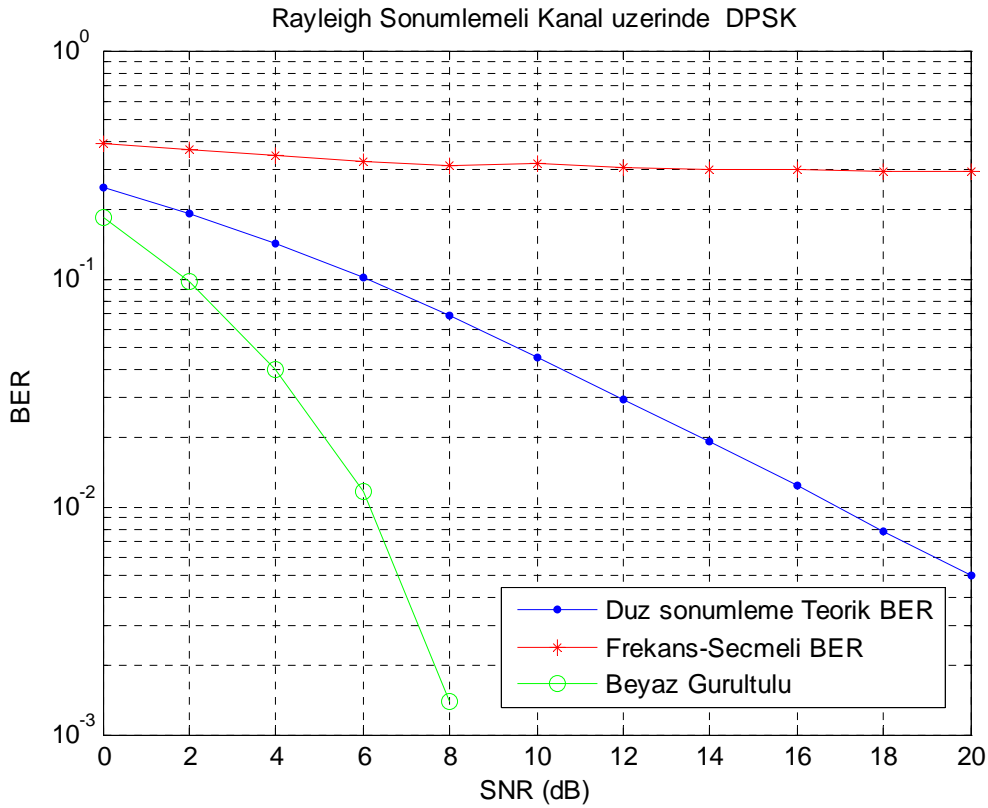
Şekil 5.22 Hızlı değişen kanal için performans analizi. Hızlı değişen kanal örneği için  $v = 120$  km/saat,  $F_c = 1800$  MHz,  $F_m = 200$  Hz ve  $f_m = 0.2$  seçilmiştir.  $T_C = 2$  ms ve  $T_S = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.



### 5.2.3 MATLAB programında *rayleighchan* komutu ile elde edilen performans gösterimi

Burada karşılaştırma yapmak için frekans-seçmeli Rayleigh sönümlenmeli kanalı için bir önceki parametreler aynı şekilde alınmıştır. Gönderilecek işaret olarak bir DPSK işareti seçilmiştir. Burada her bir gecikmeli yolun güç ve gecikme miktarları sırasıyla  $P_1 = 0$  dB,  $P_2 = -1.46$  dB,  $P_3 = -3.68$  dB ve  $P_4 = -8.45$  dB,  $\tau_1 = 0$ ,  $\tau_2 = 1$  ms,  $\tau_3 = 2$  ms ve  $\tau_4 = 3$  ms olarak hesaplanmıştır.

Bu uygulama için MATLAB kodları EK-3'te verilmiştir.



Şekil 5.23 Rayleigh sönümlenmeli hızlı değişen kanal örneği için  $v = 120$  km/saat,  $F_c = 900$  MHz,  $F_m = 100$  Hz ve  $f_m = 0.1$  seçilmiştir.  $T_c = 4.2$  ms ve  $T_s = 1$  ms olarak hesaplanmıştır.

Burada frekans-seçmeli kanal durumu için ölçülen bit hata sayısı 1440 olmaktadır. Düz sönümlenmeli kanal durumu için bit hata sayısı 239 olmaktadır. Şekil 5.23'te görüldüğü gibi frekans-seçmeli kanalda bit hata oranı 0.5'e yakın kalmaktadır.

## 6. SONUÇ

Bu tezde sönümlemeli kanal çeşitleri incelenmekte ve benzetimleri yapılmaktadır. Küçük-ölçekli sönümlemeli kanallar temel olarak, düz sönümlemeli yavaş değişen, düz sönümlemeli hızlı değişen, frekans-sönümlemeli yavaş değişen ve frekans-sönümlemeli hızlı değişen şeklinde modellenmektedir. Bu kanallar zamanda seçiciliğe göre yavaş değişen kanal veya hızlı değişen kanallar olarak sınıflandırılırken frekansta seçiciliğe göre ise, düz sönümlemeli kanal veya frekans-seçmeli sönümlemeli kanallar olarak sınıflandırılabilir.

Bu çalışmada bu kanalların benzetimleri yapılmıştır. Benzetimlerde elde edilen kanal simülatörü ters ayrık Fourier dönüşümü alma metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu simülatörün istenen özilişki özelliklerini sağlaması istenmektedir. İstenen özilişki özellikleri ise iki gerçel değerli Gauss değişkenlerinden oluşan karmaşık bir sayının zarfının Rayleigh sürecini vermesidir ve bu iki değişkenlerin özilişkilerinin 1, çapraz-ilişkilerinin 0 olmasıdır. Bu kanal simülatörünün bu özilişki özelliklerini sağladığı grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada ters ayrık Fourier dönüşümü metodunun tercih edilmesinin sebebi istenilen özilişki fonksiyonunun özelliklerini daha iyi sağlaması ve işlem karmaşıklığının diğer yöntemlere oranla az olması olmuştur.

Benzetimlerde ilk olarak bir kosinüs işareti için ters ayrık Fourier dönüşümü metodu ile elde edilen çeşitli kanallar üzerinde uygulama yapılmıştır. Burada 900 MHz taşıyıcı frekansında iken yavaş değişen kanal örneği için hareketli hızı 30 km/saat seçilmiş ve hızlı değişen kanal örneği için hareketli hızı 520 km/saat seçilmiştir. Bu değerlere göre yavaş değişen düz sönümlemeli kanal ile yavaş değişen frekans-seçmeli sönümlemeli kanalın hızlı değişen düz sönümlemeli kanal ile hızlı değişen frekans-seçmeli sönümlemeli kanal durumuna göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, frekans-seçmeli sönümlemeli kanal durumunda işaretin daha sık sönümlemeye uğradığı ve daha çok zayıflama gösterdiği grafiksel olarak gözlemlenmiştir. Burada frekans-seçmeli sönümlemeli kanal durumu örnekleri için alıcıya gelen 4 tane gecikmeli yol olduğu varsayılmıştır. Her bir yol için uygun gecikmeler ile güç değerleri verilmiştir.

Daha sonra bir BPSK işaretinin taşıyıcı frekansları 900 MHz ve 1800 MHz alınarak bu kanal çeşitleri üzerinden ayrı ayrı iletimi sağlanmıştır. Burada elde edilen sonuçlar için haberleşme sisteminin performans analizleri verilmiştir. Çeşitli Rayleigh sönümlemeli kanallarda iletilen BPSK işareti için sadece beyaz Gauss gürültüsünün olduğu ve buna ilave olarak düz

sönümlenmeli ve frekans-seçmeli sönümlenmeli kanal durumları için performans gösterimleri verilmiştir. Farklı taşıyıcı frekanslarının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarda, taşıyıcı frekansındaki artışın maksimum Doppler frekansını artırdığı dolayısıyla kanalın uyumlu zamanını azalttığından kanalın hızlı değişim göstermesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Performans analizlerinde kanal çeşitleri içinde en iyi performansı veren Gauss gürültülü kanala göre düz sönümlenmeli yavaş değişen kanalın daha düşük performans gösterdiği ve frekans-seçmeli hızlı sönümlenmeli kanalın ise en düşük performans gösteren kanal durumu olduğu grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, yavaş değişen kanal örneği için hareketli hızı 1 km/saat alınmış ve hızlı değişen kanal örneği için hareketli hızı 120 km/saat alınmıştır. Buna göre hareketli hızının artmasıyla oluşan Doppler frekansındaki artışın bit hata sayısını arttırdığı gözlenmiştir.

Ayrıca, hareketli hızı arttıkça düz sönümlenmeli işaret frekans-seçmeli sönümlenmeli işarete yaklaşmaktadır. Frekans-seçmeli hızlı sönümlenmeli kanal durumunda bit hata sayısı daha fazla olurken frekans-seçmeli yavaş sönümlenmeli kanal durumunda bit hata sayısı daha az olmaktadır.

Son olarak, karşılaştırma yapmak için MATLAB programındaki *rayleighchan* komutu kullanılarak elde edilen performans gösterimi de verilmiştir.

**KAYNAKLAR**

- Rappaport, T. S. (1996), *Wireless Communication: Principles and Practice*, Prentice Hall.
- Sklar, B. (1997), "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems, Part I: Characterization," *IEEE Commun.Mag.*, vol. 35, no. 9, pp. 136–146, Sept.
- Manglani, M. J. *Wavelet Modulation in Gaussian and Rayleigh Fading Channels*.
- Biglieri, E., Proakis, J. ve Shamai, S. (1998), *Fading channels: Information-theoretic and communications aspects*,. IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, pp. 2619-2692.
- Ziemer, R. E. ve Tranter, W. H. (2002), *Principles of Communications: Systems Modulation and Noise*, John Wiley&Sons, Inc.
- Hayes, M. H. (1996), *Statistical Digital Signal Processing And Modeling*, John Wiley & Sons, Inc.
- Young D. J. ve Beaulieu N. C. (2000), "The Generation of Correlated Rayleigh Random Variates by Inverse Discrete Fourier Transform," IEEE Transactions On Communications, Vol. 48, No. 7, pp. 1114-1127, July.
- Tran, L. C., Wysocki, T. A., Mertins, A. ve Seberry, J. (2005), "A Generalized Algorithm for the Generation of Correlated Rayleigh Fading Envelopes in Wireless Channels" EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking , pp. 801-815.
- Li, Y. ve Huang, X. (2002), "The Simulation of Independent Rayleigh Faders" IEEE Transactions On Communications, Vol. 50, No. 9, September.
- Ramaswamy, V. R. S. (2005) "A Comparative study of Rayleigh Fading Wireless Channel Simulators", A Thesis for Master of Science, Birla Institute of Technology and Science, Pilani, December.
- Sali, V. "Simulation of Rayleigh Fading Clarke's model Using Spectrum Shaping".
- Komninakis, C. (2004), "A Fast and Accurate Rayleigh Fading Simulator". Applied Wave Research, Inc.
- Baddour, K. E. ve Beaulieu, N. C. (2005), "Autoregressive Modeling for Fading Channel Simulation" . IEEE Transactions On Wireless Communications, Vol. 4, No. 4, pp. 1650-1662, July.
- Patzold, M. ve Olav Hogstad, B. (2005), "Classes of Sum-of-Sinusoids Rayleigh Fading Channel Simulators and Their Stationary and Ergodic Properties". Proceedings of the 4'th WSEAS Int. Conf. On Information Security, Communications and Computers, Tenerife, Spain, December 16-18, (pp488-504).
- Jakes W. C. (1974), *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Durgin, G. D. (2000), "Theory Of Stochastic Local Area Channel Modeling For Wireless Communications", Dissertation work. Blacksburg, Virginia.
- Aki, S. (2004), "Multipath propagation and LTV channel model", S-72.333 Postgraduate Course in Radio Communications, Autumn.

Cheng, C. (2000), “*A Nakagami-m Fading Channel Simulator*”, Thesis work for Master of Science, Canada.

Turin, G. L. *et al.*, (1972), “Simulation of urban vehicle monitoring systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 9–16, Feb.

Suzuki, H. (1977) “A statistical model for urban multipath channels with random delay,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, pp. 673–680, July.

Kostov, N. (2003), “*Mobile Radio Channels Modeling in MATLAB*” , Department of Radio Engineering, Technical University of Varna, Student 1, 9010 Varna, Bulgaria, December.

Punnoose, R. J., Nikitin, P. V. ve Stancil, D. D. “*Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator*” Department of Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University Pittsburgh.

**EKLER**

- Ek 1 Kosinüs işaretinin çeşitli sönümlemeli kanal uygulaması için MATLAB kodları  
Ek 2 BPSK işaretinin çeşitli sönümlemeli kanal uygulaması için MATLAB kodları  
Ek 3 BPSK işaretinin çeşitli sönümlemeli kanal uygulaması için MATLAB kodları  
(MATLAB rayleighchan komutu ile gerçekleştirilmiştir.)

### Ek 1 Kosinüs işaretinin çeşitli sönümlenmeli kanal uygulaması için MATLAB kodları

```

clear all;

clc;

close all;

N = 4096;           %Uretilen ornek sayisi

Fc=900*10^6;       %Tasiyici frekansi

wc=2*pi*Fc;

v = 520/3600;      %Alici hizi [km/saat]

c=300*10^3;        %ışık hızı

wm = wc*(v/c);     %Maksimum kayma

Fm=wm/(2*pi)       %Maksimum Doppler kaymasi

Ft=100;%Hz

Fs=10*Ft;

Ts=1/Fs            %Örnekleme süresi

Tc=0.423/Fm        %Kanal uyumlu zamanı

Ts =0.001;

t=0:Ts:(N-1)*Ts;

fs = 1/Ts;

fm = Fm*Ts

km=round(fm*N);

% Filtre katsayilarinin bulunmasi

F(1)=0;f(1)=0;

for k=1:1:N-1

    if k>=1 & k<=km-1

        F(k+1)=sqrt(1/(2*sqrt(1-((k+1)/(N*fm))^2)));

    end

    if k==km

```

```

    F(k+1)=sqrt(km/2*(pi/2-atan((km-1)/sqrt(2*km-1))));

end

if k>=km+1 & k<=N-km-1

    F(k+1)=0;

end

if k==N-km

    F(k+1)=sqrt(km/2*(pi/2-atan((km-1)/sqrt(2*km-1))));

end

if k>=N-km+1 & k<=N-1

    F(k+1)=sqrt(1/(2*sqrt(1-((N-k+1)/(N*fm))^2)));

end

f(k+1)=(k+1)*fs/N;

end

% f=f./Fm;

k=1:N-1;

f=f./Fm;

F1=fftshift(F);

% figure;

% plot(f,20*log10(F1),'b');title('Spektral Guc Yogunlugu');

% ylabel('Guc seviyesi (dB)');

% xlabel('Frekans f/fd');grid on;

% IFF=real(ifft(F));IFF=fftshift(IFF);

% figure;plot((IFF));grid on;% xlim([N/2 N/2+100]);

%Gauss degiskenlerinin uretilmesi

No_taps=4;

D=[];

for tap=1:No_taps

```



```

ww=1/sqrt(2)*randn(N,1);

uu=1/sqrt(2)*randn(N,1);

%Filtre katsayilari ile carpma

WW=F.*ww';

UU=F.*uu';

%Elde edilen degerleri toplama

X=WW-j*UU;

%Rician dagilimi icin

% s=0.051;K=s^2/(2*sigma^2);sigma=var(X);

% X(1)=N*s;

%Ters Ayrik Fourier Donusumunu Alma

x=ifft(X);

z=abs(x); %Elde edilen Rayleigh dizisi

AvgPower=1;

rmsEnvelope = sqrt(mean(z.*z));

fadeEnvelope = z/rmsEnvelope;

z = fadeEnvelope*sqrt(AvgPower);

D=[D;z];

end

z1=D(1,:);

z2=D(2,:);

z3=D(3,:);

z4=D(4,:);

%Teorik Bessel fonksiyonu

d=-N/2:1:N/2-1;

Z=2*pi*fm*abs(d);nu=0;

J = besselj(nu,Z);

```

```

figure:plot((d),J,'r');xlim([-100 100]);

title('teorik');hold on

[A,lags]=xcorr(real(x),N/2,'coeff');

plot(lags,A,'-b');title('Oz-iliski');

xlabel('Iliski araliklari');

grid on;xlim([-100 100]);

[T,lags]=xcorr(real(x),imag(x),N/2,'coeff');

plot(lags,T,'-k');title('Capraz-iliski');

xlabel('Iliski araliklari');

grid on;xlim([-100 100]);

brighten(0.5);

legend('Teorik','Oz-iliski','Capraz-iliski');

%Histogram icin

figure;hist(z1,30);title('Rayleigh sureci');

hold on;

Env=(z1);

y = sort(Env);          %Ortalamayi 1 yapmak icin

b = (mean(y)^2)*2/pi;  %Ortalama 1 icin Rayleigh parametresi

fyray = (y./b).*exp(-(y.^2/(2*b)));

y=3*y./max(y);

x2=fyray;

x2=330*x2./max(x2);

fray=x2;

meanENV=mean(fray);

plot(y,fray,'r');legend('Elde edilen','Teorik');

grid on;hold off;

figure:plot(t*1000,20*log10(z1),t*1000,mean(20*log10(z1)), 'r');grid on;

```

```

xlim([0 250]);

title('Rayleigh Sonumleme zarfi');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

mean=mean(z1);

% *****

% Duz sonumleme icin modelleme

% *****

% Kosinus isaretinin uretilmesi

n=0:N-1;

S1=cos(2*pi*Ft/Fs*n);

figure;plot(n,(S1));grid on;xlim([0 250]);

title('Kosinus isareti ');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

% Isaretin sonumleme zarfi ile carpilmasi

R=z1.*S1;

figure;plot(n,20*log10(R));xlim([0 250]);

title('Rayleigh Duz Sonumlemeli isaret');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');grid on;

% *****

% Frekans-Seçmeli kanal modeli için

% *****

% Gecikmeli guc ve gecikme zamanının ayarlanması

numTaps = 4;

Tm = Ts * numTaps;

% fDts = fD / fs;

% zaman ekseni

t = [0:Ts:Ts*(N-1)];

```

```

tPowerDelay = [0:Ts:(numTaps-1)*Ts];

delay=tPowerDelay

Ps=sqrt( Ts*(-2*tPowerDelay-Ts+2*Tm)/Tm^2 );

% Ortalama gucu 1'e göre guc ayar? yapmak

Ps=Ps./max(Ps);

% AvgPower=1;

% rmsEnv = sqrt(mean(Ps.*Ps));

% fadeEnv = Ps/rmsEnv;

% Ps = fadeEnv*sqrt(AvgPower);

% Ortalama Ek Gecikmesi

MED=(Ps(1)*delay(1)+Ps(2)*delay(2)+Ps(3)*delay(3)+Ps(4)*delay(4))/(sum(Ps))

SCM=(Ps(1)*delay(1)^2+Ps(2)*delay(2)^2+Ps(3)*delay(3)^2+Ps(4)*delay(4)^2)/(sum(Ps))

% rms gecikme yayilimi

RMSdelay=sqrt(SCM-MED^2)

% Gecikmeli Guç Spektrumu

figure;

stem(t(1:length(Ps)), Ps.^2);

title( 'Gecikmeli Guç Spektrumu' );

xlabel( 'zaman (s)' );

ylabel( 'Guç' );

PsdB=20*log10(abs(Ps));

% Gelen yollarin ayarlanmasi

% 2'ci gelen yol

S2=cos(2*pi*Ft/Fs*(n-1));

% figure;plot(n,S2);grid on;xlim([0 250]);

% xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

% 3'cu gelen yol

```

```

S3=cos(2*pi*Ft/fs*(n-2));

% figure;stem(n,S3);grid on;xlim([0 250]);

% xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

%4'cu gelen yol

S4=cos(2*pi*Ft/fs*(n-3));

% figure;stem(n,S4);grid on;xlim([0 250]);

% xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

Path1=Ps(1)*z1.*S1; Var1=var(Path1);

Path2=Ps(2)*z2.*S2; Var2=var(Path2);

Path3=Ps(3)*z3.*S3; Var3=var(Path3);

Path4=Ps(4)*z4.*S4; Var4=var(Path4);

RTop=Path1-Path2+Path3-Path4;

figure;plot(n,20*log10(RTop));

xlim([0 250]);title('Frekans-Secmeli sonumlemeli isaret, 4-yollu');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');grid on;

```

**Ek 2 BPSK işaretinin çeşitli sönümlmeli kanal uygulaması için MATLAB kodları**

```
clear all;clc;close all;
```

```
N = 4096;          % Uretilen ornek sayisi
```

```
Fc=900*10^6; % 1800*10^6      %Tasiyici frekansi
```

```
wc=2*pi*Fc;
```

```
v = 1/3600; % 120/3600, 520/3600   % Alici hizi [km/saat]
```

```
c=300*10^3;      % isik hizi
```

```
wm = wc*(v/c);   % Maksimum Doppler kaymasi
```

```
Fm=wm/(2*pi)     % Maksimum Doppler kaymasi
```

```
Ft=1;           % Hz
```

```
Fs=1000*Ft;
```

```
Ts =1/Fs;
```

```
t=0:Ts:(N-1)*Ts;
```

```
fs = 1/Ts;
```

```
fm = Fm*Ts
```

```
km=round(fm*N);
```

```
Tc=0.423/Fm      % Kanal uyumlu zamanı
```

```
No_taps=4;
```

```
% Filtre katsayilarinin bulunmasi
```

```
F(1)=0;f(1)=0;
```

```
for k=1:1:N-1
```

```
    if k>=1 & k<=km-1
```

```
        F(k+1)=sqrt(1/(2*sqrt(1-((k+1)/(N*fm))^2)));
```

```
    end
```

```
    if k==km
```

```
        F(k+1)=sqrt(km/2*(pi/2-atan((km-1)/sqrt(2*km-1))));
```

```
    end
```

```

if k>=km+1 & k<=N-km-1

    F(k+1)=0;

end

if k==N-km

    F(k+1)=sqrt(km/2*(pi/2-atan((km-1)/sqrt(2*km-1))));

end

if k>=N-km+1 & k<=N-1

    F(k+1)=sqrt(1/(2*sqrt(1-((N-k+1)/(N*fm))^2)));

end

f(k+1)=(k+1)*fs/N;

end

k=1:N-1;

f=f./Fm;

F1=fftshift(F);

AvgPower=1;

% figure;

% plot(f,20*log10(F1),'b');title('Spektral Guc Yogunlugu');

% ylabel('Guc seviyesi (dB)');

% xlabel('Frekans f/fd');grid on;

% IFF=real(iff(F));IFF=fftshift(IFF);

% figure;plot((IFF));grid on;% xlim([N/2 N/2+100]);

% Gauss degiskenlerinin uretilmesi

D=[];

for tap=1:No_taps

    ww=1/sqrt(2)*randn(N,1);

    uu=1/sqrt(2)*randn(N,1);

    %Filtre katsayilari ile carpma

```

```

WW=F.*ww';

UU=F.*uu';

%Elde edilen degerleri toplama

X=WW-j*UU;

%Rician dagilimi icin

% s=0.051;

% X(1)=N*s;K=s^2/(2*sigma^2);sigma=var(X);

%Ters Ayrik Fourier Donusumunu Alma

x=ifft(X);

z=abs(x); %Elde edilen Rayleigh dizisi

%Gucun normalize edilmesi

z = z./max(z);

D=[D;z];

end

% FWW=fftshift(WW);figure;

% plot(f,(FWW),'b');title('Spektral Guc Yogunlugu');

% ylabel('Guc seviyesi (dB)');

% xlabel('Frekans f/fd');grid on;

z=D(1,:);

z2=D(2,:);

z3=D(3,:);

z4=D(4,:);

figure;plot(t*1000,20*log10(z),t*1000,mean(20*log10(z)), 'r');grid on;

xlim([0 500]);

title('Rayleigh Sonumleme zarfi');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

%Teorik Bessel fonksiyonu

```



```

d=-N/2:1:N/2-1;

Q=2*pi*fm*abs(d);nu=0;

J = besselj(nu,Q);

figure;plot((d),J,'r');xlim([-100 100]);

title('teorik');hold on

[A,lags]=xcorr(real(x),N/2,'coeff');

plot(lags,A,'-b');title('Oz-iliski');

xlabel('Iliski araliklari');

grid on;xlim([-100 100]);

[T,lags]=xcorr(real(x),imag(x),N/2,'coeff');

plot(lags,T,'-k');title('Capraz-iliski');

xlabel('Iliski araliklari');

grid on;xlim([-100 100]);

brighten(0.5);

legend('Teorik','Oz-iliski','Capraz-iliski');

% Verinin uretilmesi

M = 2;                % BPSK isareti icin

tx = randint(N,1,M);

pskSig = pskmod(tx,M); % BPSK isareti

% İşaaretin kanala iletilmesi

Z=z';

fadedSig1 = Z.*pskSig; % Kanal etkisi

n=1:N;

figure;plot(n,20*log10(fadedSig1));

xlim([0 500]);title('Duz sonumlemeli isaret');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');grid on;

% SNR'in farkli degerleri icin hata oraninin hesaplanmasi

```

```

SNR = 0:2:20;    % SNR deger araligi(dB).

for n = 1:length(SNR)

    rxSig = awgn(fadedSig1,SNR(n)); % Gaussian gurultusunun eklenmesi

    rx = pskdemod(rxSig,M);          % Demodulasyon islemi

    rxSigA = awgn(dpskSig,SNR(n)); % Gaussian gurultusunun eklenmesi

    rxA = pskdemod(rxSigA,M);       % Demodulasyon islemi

    [nErrors, BER(n)] = biterr(tx,rx);

    [nErrorsA, BERA(n)] = biterr(tx,rxA);

end

[nErrors, BER(n)] = biterr(tx,rx)

[nErrorsA, BERA(n)] = biterr(tx,rxA)

% Karsilastirma icin teorik hesaplama

BERAtheory = berawgn(SNR,'psk',M,'nondiff');

n=1:N;

S=pskSig;

figure;stem(n,(S));grid on;xlim([0 250]);

title('BPSK isareti ');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');

% *****

%FREKANS-SECMELI KANAL MODELİ İCİN

% *****

%Gecikmeli guc ve gecikme zamanının ayarlanması

numTaps = 4;

Tm = Ts * numTaps;

% fDts = fD / fs;

% zaman ekseni

t = [0:Ts:Ts*(N-1)];

```

```

tPowerDelay = [0:Ts:(numTaps-1)*Ts];

delay=tPowerDelay

% Gecikmeli Guc Profilinden alinan standard sapmalar

Ps=sqrt( Ts*(-2*tPowerDelay-Ts+2*Tm)/Tm^2 );

Ps=Ps./max(Ps);

%Ortalama Ek Gecikmesi

MED=(Ps(1)*delay(1)+Ps(2)*delay(2)+Ps(3)*delay(3)+Ps(4)*delay(4))/(sum(Ps));

%Ikinci merkez momenti

SCM=(Ps(1)*delay(1)^2+Ps(2)*delay(2)^2+Ps(3)*delay(3)^2+Ps(4)*delay(4)^2)/(sum(Ps));

%rms gecikme yayilimi

RMSdelay=sqrt(SCM-MED^2);

PsdB=20*log10(abs(Ps));

% Gecikmeli Guc Profili

figure;

stem(t(1:length(Ps)), Ps.^2);

title( 'Gecikmeli Guc Spektrumu' );

xlabel( 'zaman (s)' );

ylabel( 'Guc' );

%2'ci gelen yol

Z2=z2';

n=2:N+1;

S2=pskSig(n-1);S2(1)=0;

% figure;stem(n,S2);grid on;xlim([0 25]);

% xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');xlim([0 25]);

S2dB=20*log10(abs(S2));

%3'cu gelen yol

Z3=z3';

```

```

n=3:N+2;

S3=pskSig(n-2);S3(1)=0;S3(2)=0;

%4'cu gelen yol

Z4=z4';

n=4:N+3;

S4=pskSig(n-3);

Path1=Ps(1)*Z.*S; Var1=var(Path1);

Path2=Ps(2)*Z2.*S2; Var2=var(Path2);

Path3=Ps(3)*Z3.*S3; Var3=var(Path3);

Path4=Ps(4)*Z4.*S4; Var4=var(Path4);

Var=[Var1 Var2 Var3 Var4];

% Gecikmeli Guc Spektrumu'

% figure;

% stem(t(1:length(Ps)), [Var]);

% title('Gecikmeli Guc Spektrumu');

% xlabel('zaman (s)');

% ylabel('Guc');

%Toplama islemi gelen yolun fazina(dolayisiyla gelis açısına) göre degisir.

RTop=Path1-Path2+Path3-Path4;

figure;plot(n,20*log10(RTop),n,mean(20*log10(abs(RTop))),'r');

xlim([0 500]);title('Frekans-Secmeli sonumlemeli isaret, 4-yollu');

xlabel('Zaman (ms)');ylabel('Isaret Seviyesi (dB)');grid on;

fadedSig2=RTop;

for n = 1:length(SNR)

    rxSig2 = awgn(fadedSig2,SNR(n));

    rx2 = pskdemod(rxSig2,M);

    [nErrors2, BER2(n)] = biterr(tx,rx2);

```

```
end

% Bit hata oranı sonuçlarının gösterilmesi

figure;

semilogy(SNR,BER,'m-*');hold on

semilogy(SNR,BERA,'g-o',SNR,BER2,'r*-');hold on

xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');

title('Cesitli Rayleigh sonumlemeli kanallarda ikili PSK ');

grid on;

zoom on;

legend('Duz sonumlemeli BER','Beyaz gurultulu BER','Frekans-secmeli BER');

xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');

[nErrors, BER2(n)] = symerr(tx,rx2)
```

**Ek 3 BPSK işaretinin çeşitli sönümlmeli kanal uygulaması için MATLAB kodları  
(MATLAB rayleighchan komutu ile gerçekleştirilmiştir.)**

```

Close all; clc; clear;

fc=900*10.^6;           %Taşıyıcı frekansı

wc=2*pi*fc;

v=120/3600              %Receiver speed [km/h]

c=300*10^3;            %Işık hızı

wm=wc*(v/c);           %Maksimum Doppler kayması

Fm=wm/(2*pi)           %Maksimum Doppler kayması (Hz)

fs=1000;

ts=1/fs;                %isaretin örnekleme süresi (sn)

fm=Fm*ts

numTaps = 4;

fD = Fm;

td = ts * numTaps;

fDts = fD / fs;

Tc=0.423/fD

tPowerDelay = [0:ts:(numTaps-1)*ts];

Ps=sqrt( ts*(-2*tPowerDelay-ts+2*td)/td^2 );

PsdB=20*log10(abs(Ps));

bitRate=fs;

chan = rayleighchan(1/bitRate,fD,[tPowerDelay],[PsdB]);

chan

% figure;

% plot(n,20*log10(sig));xlim([0 250]);

% figure;

% plot(n,20*log10((y)));xlim([0 250]);

```

```

% figure;hist(abs(y),30);

chan.ResetBeforeFiltering = 1;

%chan.StoreHistory = true;

n=1:5000;

% Verinin üretilmesi ve kanala verilmesi.

M = 2; % DBPSK modülasyonu derecesi

tx = randint(5000,1,M); % Rasgele bit dizisi

dpskSig = dpskmod(tx,M); % BPSK işareti

fadedSig = filter(chan,dpskSig); % Sönümlenmeli kanal etkisi

% figure;hist(abs(fadedSig),30);

figure;

plot(n,(dpskSig),n,mean(dpskSig),'r');xlim([0 250]);

figure;

plot(n,20*log10(abs(fadedSig)),n,mean(20*log10(fadedSig),'r');xlim([0 250]);

% SNR'ın farklı değerleri için performans hesaplaması.

SNR = 0:2:20; % SNR değerleri aralığı (dB).

for n = 1:length(SNR)

    rxSig = awgn(fadedSig,SNR(n)); % Gauss gürültüsünün eklenmesi

    rx = dpskdemod(rxSig,M); % Demodulasyon işlemi.

    rxSigA = awgn(dpskSig,SNR(n),'measured');

    rxA = dpskdemod(rxSigA,M);

    [nErrors, BER(n)] = biterr(tx(2:end),rx(2:end));

    [nErrorsA, BERA(n)] = biterr(tx(2:end),rxA(2:end));

end

[nErrors, BER(n)] = biterr(tx(2:end),rx(2:end))

BERtheory = berfading(SNR,'dpsk',M,1);

figure;

```

```
semilogy(SNR,BERtheory,'b.-',SNR,BER,'r-*');hold on;  
  
semilogy(SNR,BERA,'g-o');  
  
legend('Duz sonumleme Teorik BER','Frekans-Secmeli BER','Beyaz Gurultulu');  
  
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');  
  
title(' Rayleigh Sonumlemeli Kanal uzerinde Ikili DPSK ');  
  
grid on;  
  
zoom on;
```



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	07.03.1981	
Doğum yeri	KIRGIZİSTAN/OŞ	
Lise	1994-1998	Özel Oş Kırgız-Türk Teknik Erkek Lisesi
Lisans	1998-2003	İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı, Haberleşme Programı