

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TELEMETRE ALMAÇ SİSTEMLERİNİN BAŞARIM ANALİZİ

S. BURAK SAĞLAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2014

TELEMETRE ALMAÇ SİSTEMLERİNİN BAŞARIM ANALİZİ

PERFORMANCE ANALYSIS OF TELEMETRY RECEIVER APPLICATIONS

S. BURAK SAĞLAM

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK-ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

“Telemetre Almaç Sistemlerinin Başarım Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 10/02/2014 tarihinde, **ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Doç. Dr. Hasan OĞUL

Üye (Danışman) :
Yrd. Doç. Dr. Aysel ŞAFAK

Üye :
Doç. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

ONAY

/ 02/ 2014

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÜR

Daniőmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Aysel ŞAFAK'a tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı teőekkür ederim.

Çalışma boyunca bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren baőtta sevgili eőim Aslı SAĞLAM olmak üzere, Emre VAROL'a, Zafer ERASLAN'a, Burak AKILLI'ya, Yasin GENÇ'e ve Tuna ÖZTÜRK'e müteőekkirim.

Tezin laboratuvar çalışmaları aşamasında yardımcı olduğu için, ayrıca telemetre verilerinin yorumlanmasındaki katkılarından dolayı M. Özgür DEMİRAY'a teőekkür ederim.

Tez konusu seçimimdeki en büyük ilham kaynağım Alper KARASAR'a teőekkür ederim.

Her konuda sabırla yardımcı olan eőim Aslı SAĞLAM'a ve aileme desteklerinden dolayı teőekkür ederim.

ÖZ

Telemetre Almaç Sistemlerinin Başarım Analizi

S. Burak SAĞLAM

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma kapsamında, füze atış testlerinde kullanılan telemetre sistemleri üzerine yoğunlaşılacaktır ve bu alana ait özelleşmiş test dinamikleri dikkate alınacaktır.

Füze atış testlerinde, füzelere operasyonel konfigürasyonlarında yer almayacak ilave donanım ve yazılımlar eklenmektedir. Bu yolla test esnasında füzenin içerisinde yer alan çeşitli sensörlerin değerleri kayıt edilmekte ve/veya gerçek zamanlı olarak telemetre yer sistemine gönderilmektedir. Veriler gerçek zamanlı görüntülemekte ve analiz edilerek simülasyonlardan beklenen sonuçlara yakınlıkları değerlendirilmektedir. Atış testleri, teorik olarak tasarlanan füzelerin gerçek koşullarda verdikleri tepkilerin ölçülmesini sağlayan kritik aşamalardır. Mali yükü yüksek ve tekrarlanması külfetli bir test türü olması nedeniyle bu testlerde telemetre verilerinin sağlıklı şekilde alınabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle füze ve yer sistemi arasındaki iletişimin karakteristikleri standartlarla belirlenmiş durumdadır. Donanım ve yazılım tasarımları bu kısıtlara uygun yapılmaktadır.

Bu tezde, Matlab Simulink ortamında telemetre almaç sistemi tasarlanacak ve simülasyon çıktıları donanımdan alınan sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Ayrıca telemetre sistemlerinde kullanılan BPSK, QPSK, OQPSK, FSK modülasyonları ile Evrişimsel, Golay kodlamalar kullanılarak simülasyon çıktıları elde edilecek, elde edilen simülasyon çıktıları haberleşme performans parametreleri ile karşılaştırılacaktır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Telemetre, modülasyon, BER, haberleşme, kanal kodlama, BPSK, QPSK, OQPSK, FSK, Golay kodlama, Evrişimsel kodlama.

Danışman: Yrd.Doç. Dr. Aysel ŞAFAK, Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

Performance Analysis of Telemetry Receiver Applications

S. Burak SAĞLAM

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Electrical and Electronics Engineering

Within the scope of this thesis, the communication performance of a missile telemetry system is evaluated with its specific dynamics and the performance parameters are analyzed and compared.

During the missile flight tests, with instead of a war head carrying explosive load, the test missiles are equipped with a trial head; to sample and send the real time sensor measurements' data via telemetry link over the channel to the ground station, with the purpose of real time evaluation and recording for post analyzing. With the usage of real time evaluation of the telemetry data, the test results are then compared with the simulated data to decide whether the missile succeeded or not. Flight tests, a crucial step in qualification of missiles, are quite difficult and expensive to repeat. Therefore during the tests, proper collection of telemetry data is of high importance. Thus, telemetry hardware/ software systems are standardized and characteristics of communication between the test vehicle and ground station are pre-determined.

In this thesis, a telemetry data link is simulated with Matlab Simulink and is compared to and confirmed with a programmable software defined hardware. Subsequently, a telemetry channel is modeled with, digital modulation techniques of BPSK, QPSK, OQPSK, FSK and channel coding techniques of convolutional coding and Golay coding on top. The channel is modelled to suffer AWGN and Rician fading. The BER and bandwidth performances of these applications are compared to reach a feasible and efficient telemetry system design in the end.

Key Words: Telemetry, modulation, BER, communication, channel coding, BPSK, QPSK, OQPSK, FSK, Golay coding, Convolutional coding.

Advisor: Assistant Prof. Dr. Aysel ŞAFAK, Başkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering.

İÇİNDEKİLER

ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
1 TELEMETRE SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ.....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Tarihçe.....	3
1.3 Telemetre Sistemlerinin Standardizasyonu.....	4
1.4 Telemetre Sistemi İşlevsel Akışı.....	5
1.4.1 Füze üstü telemetre sistemi.....	7
1.4.2 Telemetre yer istasyonu.....	12
2 TELEMETRE HABERLEŞMESİ.....	15
2.1 Telemetre Almaç Sisteminin Kanal Modellemesi.....	16
2.1.1 Dar bant ve geniş bant kanal modelleme yöntemleri.....	18
2.1.2 Sönümlenme modeli.....	20
2.1.3 Serbest uzay kaybı.....	22
2.1.4 Çok yönlü sönümlenme.....	24
2.1.5 Gölgeleme.....	26
2.1.6 Doppler etkisi.....	26
2.1.7 Füze egzozu (plume) zayıflaması.....	28
2.1.8 RF kesintisi.....	28
2.1.9 Kılavuzlandırma.....	28
2.1.10 Atmosferik soğurma.....	29
2.1.11 Kanal gürültüsü.....	29
2.2 Telemetre Sistemlerinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri.....	31
2.2.1 Frekans kaydırmalı anahtarlama.....	31
2.2.2 Faz kaydırmalı anahtarlama.....	37
2.3 Telemetre Sistemlerinde Kullanılan Kanal Kodlama Teknikleri.....	42
2.3.1 Evrimsel kodlama ve performansı.....	43
2.3.2 Golay kodlama yöntemi.....	46
2.4 Telemetre Sisteminin Servis Kalitesi.....	49
2.4.1 Bit hata olasılığı.....	50
2.4.2 Sinyal gürültü oranı.....	51
3 DONANIM.....	52
4 SİMÜLASYON.....	56
4.1 BPSK Simülasyon Çıktıları.....	57
4.2 QPSK Simülasyon Çıktıları.....	62

4.3 OQPSK Simülasyon Çıktıları.....	67
4.4 PCM/FM Simülasyon Çıktıları	72
5 SONUÇ ve KARŞILAŞTIRMA.....	76
6 GELECEKTE YAPILACAK ÇALIŞMALAR.....	79
7 KAYNAKLAR LİSTESİ.....	80
EKLER	82
EK-1 Telemetre Yer İstasyonu Birimi Donanımları	82
EK-2 Telemetre Kanal ve Sistem Parametreleri.....	93
EK-3 ISI ve Darbe Şekillendirme (Pulse Shaping)	97
EK-4 Kullanılan Donanım ve Özellikleri.....	100
EK 5 Basınç Ölçer Spesifikasyon Dokümanı	104
EK 6 Analog-Sayısal Çevirici Spesifikasyon Dokümanı	105
EK 7 PCM Enkoder Spesifikasyon Dokümanı.....	106
EK 8 Göndermeç Spesifikasyon Dokümanı	107
EK 9 Füze Üstü Telemetre Anteni Spesifikasyon Dokümanı	108
EK 10 Telemetre Yer İstasyonu Anteni ve Donanımları Spesifikasyon Dokümanı.....	109
EK 11 Matlab Simulink Blok Diyagramları	110

Şekiller Listesi

Şekil 1.1 Telemetre sistemine ait birimler	5
Şekil 1. 2 Darbe Kod Modülasyonu uygulamasına ait blok diyagram	9
Şekil 1. 3 IRIG106 standardında PCM için belirlenmiş senkronizasyon kelimeleri	10
Şekil 1. 4 NRZ kodlama.....	11
Şekil 1. 5 Sarmal füze üstü telemetre anteni örneği	12
Şekil 1. 6 Telemetre yer istasyonu anteni örneği.....	13
Şekil 1. 7 Telemetre verilerinin görüntülenme ve işlenmesi için örnek kullanıcı arayüzü.....	14
Şekil 2. 1 Düz sönümlenme kanal özellikleri	17
Şekil 2. 2 Frekans seçici sönümlenme kanal özellikleri	18
Şekil 2. 3 Olasılıksal yoğunluk fonksiyonunun üç farklı K faktörü için grafiği	21
Şekil 2. 4 Çok yollu sönümlenme diyagramı.....	25
Şekil 2. 5 Çok yollu sönümlenme sonucu oluşan semboller arası girişim.....	25
Şekil 2. 6 Doppler etkisine ait diyagram ve Doppler spektrumu.....	27
Şekil 2. 7 Atmosferde sinyal zayıflamasına yol açan maddeler ve etki ettikleri frekanslar.....	29
Şekil 2. 8 İntermodülasyon gürültüsü nedeniyle oluşan istenmeyen sinyaller	30
Şekil 2. 9 İkili FSK modülasyonu ilinti sabiti- Δf grafiği	32
Şekil 2. 10 Eşvreli FSK modülasyon çözücü	33
Şekil 2. 11 Uyumlu süzgeç ile Eşvreli FSK modülasyon çözücü	34
Şekil 2. 12 Eşvresiz FSK Çözücü, İlintileyici ile	35
Şekil 2. 13 Eşvresiz FSK çözücü, Uyumlu Süzgeç ile	35
Şekil 2. 14 Eşvreli ve Eşvresiz FSK için BER grafiği	36
Şekil 2. 15 Başlıca PSK Takımları	38
Şekil 2. 16 Genel PSK Modülatör	38
Şekil 2. 17 PSK Modülasyon Çözücü	39
Şekil 2. 18 MPSK Spektral Güç Yoğunluğu.....	40
Şekil 2. 19 MPSK Sembol Hata Oranı	41
Şekil 2. 20 Hız 1/2 Evrişimsel kodlama diyagramı.....	44
Şekil 2. 21 Hız 2/3 Evrişimsel kodlama diyagramı.....	45
Şekil 3. 1 Uygulama Blok Diyagramı	52
Şekil 3. 2 PXI ile Alınan Telemetre Verisi	53
Şekil 3. 3 FSK Sinyali Spektrum Grafiği	54
Şekil 3. 4 Alınan Sinyalin Göz diyagramı.....	54
Şekil 3. 5 Demodüle edilen sinyalin sayısal bit dizini yapısı	55
Şekil 4. 1 Matlab Simulink BPSK Blok Yapısı	57

Şekil 4. 2 BPSK spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda.....	57
Şekil 4. 3 BPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında	58
Şekil 4. 4 BPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 kullanıldığında	58
Şekil 4. 5 BPSK için konstellasyon grafiği	59
Şekil 4. 6 BPSK için konstellasyon grafiği; SNR=5 iken	59
Şekil 4. 7 BPSK için konstellasyon grafiği; SNR=10 iken	60
Şekil 4. 8 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında BPSK, K faktörü=10	60
Şekil 4. 9 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında BPSK, K faktörü=50	61
Şekil 4. 10 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında BPSK, K faktörü=100	61
Şekil 4. 11 Matlab Simulink QPSK Blok Yapısı	62
Şekil 4. 12 QPSK spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda	62
Şekil 4. 13 QPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında	63
Şekil 4. 14 QPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 kullanıldığında.....	63
Şekil 4. 15 QPSK için konstellasyon grafiği	64
Şekil 4. 16 QPSK için konstellasyon grafiği; SNR=5 iken.....	64
Şekil 4. 17 QPSK için konstellasyon grafiği; SNR=10 iken.....	65
Şekil 4. 18 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında QPSK, K faktörü=10	65
Şekil 4. 19 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında QPSK, K faktörü=50	66
Şekil 4. 20 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında QPSK, K faktörü=100	66
Şekil 4. 21 Matlab Simulink OQPSK Blok Yapısı.....	67
Şekil 4. 22 OQPSK spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda.....	67
Şekil 4. 23 OQPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında	68
Şekil 4. 24 OQPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 kullanıldığında.....	68
Şekil 4. 25 OQPSK için konstellasyon grafiği	69
Şekil 4. 26 OQPSK için konstellasyon grafiği; SNR=5 iken	69
Şekil 4. 27 OQPSK için konstellasyon grafiği; SNR=10 iken	70
Şekil 4. 28 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında OQPSK, K faktörü=10	70
Şekil 4. 29 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında OQPSK, K faktörü=50	71
Şekil 4. 30 AWGN- Rician Sönümlleme ortamında OQPSK, K faktörü=100	71
Şekil 4. 31 Matlab Simulink PCM/FM Blok Yapısı	72
Şekil 4. 32 PCM/FM spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda	72
Şekil 4. 33 PCM/FM spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında	73
Şekil 4. 34 PCM/FM spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 ve Golay Kodlama kullanıldığında	73

Şekil 4. 35 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında PCM/FM, K faktörü=10.....	74
Şekil 4. 36 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında PCM/FM, K faktörü=50.....	74
Şekil 4. 37 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında PCM/FM, K faktörü=100.....	75
Ek-1 Şekil 1. 1 Anten Huzme Açısı / Anten Kazancı	83
Ek-1 Şekil 1. 2 Temsili Almaç Kontrol Birimi.....	84
Ek-1 Şekil 1. 3 Anten Örüntü Modeli	85
Ek-1 Şekil 1. 4 Yan Lobda Görülen Hedef.....	86
Ek-1 Şekil 1. 5 Sinyal Birleştirici	86
Ek-1 Şekil 1. 6 Bit Eşleyici Yapısı	87
Ek-1 Şekil 1. 7 Bit Eşleyicisinde Filtrelenmiş Sinyal	88
Ek-1 Şekil 1. 8 Göz Diyagramı	89
Ek-1 Şekil 1. 9 PCM yayınında Q-BER bağlantısı	89
Ek-1 Şekil 1. 10 Çerçeve Senkronizasyonu	90
Ek-1 Şekil 1. 11 Ön İşlemcili TVİB.....	91
Ek-1 Şekil 1. 12 Örnek Masaüstü Bilgisayar Sistemli TVİB	92
Ek-2 Şekil 2. 1 Farklı yağış miktarları için frekansa bağlı sinyal zayıflatma grafiği	95
Ek-3 Şekil 3. 1 Nyquist darbe	97
Ek-3 Şekil 3. 2 Raised Cosine Spektrumu.....	99
Ek-4 Şekil 4. 1 PXI - 5665 Sinyal Analizör Modülü	101
Ek-4 Şekil 4. 2 PXI iç yapısı	102

Çizelgeler Listesi

Çizelge 1 Evrişimsel kodlayıcı diyagramları.....	43
Çizelge 2 Optimum Çerçeve Senkronizasyon Kalıpları.....	90
Çizelge 3 Kullanılan PXI ve Modülleri.....	100
Çizelge 4 RF sinyal analizör karşılaştırma tablosu.....	101

Kısaltmalar

AM	: Amplitude Modulation
AWGN	: Additive White Gaussian Noise
BER	: Bit Error Rate
BFSK	: Binary FSK
BPSK	: Binary Phase Shift Keying
CR	: Carrier Recovery
FDM	: Frequency Division Multiplex
FEC	: Forward Error Correction
FM	: Frequency Modulation
FSK	: Frequency Shift Keying
I	: Inphase
IF	: Intermediate Frequency
IRIG	: Inter-Range Instrumentation Group
ISI	: Inter Symbol Interference
ITU	: International Telecommunications Union
LOS	: Line of Sight
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NRZ	: Non-Return to Zero
OQPSK	: Offset Quadrature Phase Shift Keying
PCM/FM	: Pulse Code Modulation/Frequency Modulation
PSK	: Phase Shift Keying
PXI	: PCI eXtensions for Instrumentation
RCC	: Range Commanders Council
RF	: Radyo Frekansı
Q	: Quadrature
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
SNR	: Sinyal/Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio, SNR)
TDM	: Time Division Multiplex
TMATS	: Telemetry Attributes Transfer Standard
TVİB	: Telemetre Veri İşleme Bilgisayarı

1 TELEMETRE SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ

1.1 Giriş

Tez çalışmasında haberleşme kalitesine ait bulguların incelenebilmesi için Matlab Simulink ortamındaki benzetim kapsamında füze üstünden telemetre yer istasyonuna gelen sinyaller simüle edilmiştir ve sinyalin BPSK, QPSK, OQPSK, PCM/FM tekniklerinden biri ile modüle edilerek ve Evrişimsel veya Golay tekniği ile kodlanarak almaca ulaşması sağlanmıştır. Ayrıca, sinyal bant genişliği ile BER (Bit Error Rate: bit hata olasılığı) ve SNR (Signal-to-Noise Ratio: sinyal gürültü oranı) grafikleri incelenmiş ve çıktılara yapılan yorumlar ile ideale yakın bir telemetre sistemine ait özellikler gözlemlenmiştir.

Füze ile yer istasyonu arasında direkt görüşün (LOS) olup olmaması, füzenin hızı kaynaklı Doppler etkisi, göndermeç tarafından gönderilen sinyalin farklı yollar izleyerek sönmülmüş halde yer istasyonuna iletilmesi, ortamın gürültüsü gibi olgular haberleşme kanalını etkilemektedir. Bu etkileri göz önünde bulundurarak bu çalışmada haberleşme kanalı modellenirken sinyalin, AWGN ve Rician Sönümleme etkilerine sahip bir kanaldan geçtiği varsayılmıştır.

Bu tezin sonuçları, literatürde incelenen diğer çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu, ancak farklı olarak genişletilmiş, bir yandan ise telemetre özeline yoğunlaşmış şekildedir. Örneğin K değerinin 10, 50, 100 değerlerinde seçilmesi, telemetre testleri esnasında antenlerin füze uçuşu boyunca LOS hattını koruması ilkesi kaynaklıdır.

Genellikle telemetre sistemlerinde PCM/FM teknikleri uygulanmasına ve kodlamaya ihtiyaç duyulmamasına karşın bu çalışmada farklı çeşit modülasyon ve kodlama türleri farklı değerlendirme kriterleri açısından incelenmiş ve gelecekte ortaya çıkabilecek yeni telemetre gereksinimlerine yönelik bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir.

Özetle, yapılan bu çalışma kapsamında, her bir modülasyon ve kodlama kombinasyonu karşılaştırılmış ve teletre uygulamaları için verimli bir çözüm arayışında bulunulmuştur.

1.2 Tarihçe

Kablosuz telemetre sistemlerinin ilk örnekleri, 1930'lu yıllarda Almanya'da hava durumunu tahminleyebilen ve bunu kodlarla iletebilen sistemlerin başarılı uçuşlar gerçekleştirmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu sistemler, sıcaklık ve nem verilerini basıncın fonksiyonu olarak yer sistemlerine iletebilmekteydi.

2. Dünya Savaşı esnasında ise, geliştirilen ve testlere tabi tutulan askeri uçaklar yüksek veri kapasiteli telemetre ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Uçaklara ait mümkün olduğunca fazla sayıda performans verisinin yere iletilmesi, herhangi bir kaza durumunda bu verilerin kaybedilmemesi açısından kritik önem taşımaktaydı. Ancak savaş yılları esnasında telemetre sistemleri konusunda bütün çabalara rağmen beklenen ilerlemeler sağlanamadı [1]. Örnek üzerinden açıklamak gerekirse, MESSINA 1, yani V-2 roketinin uçuşu testleri esnasında kullanılan telemetre sistemi, genlik modülasyonu kullanmaktaydı. Günümüzde genlik modülasyonunun laboratuvar ortamı dışında kullanılmaya müsait olmadığı çünkü gürültüye karşı hassasiyeti sebebiyle veri kaybına açık olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, füze egzozundan kaynaklanan düşük sinyal/gürültü oranları nedeniyle MESSINA 1 sisteminin kullanıldığı testlerde düzgün veri toplama ve bu verilerden anlam çıkarma işlevleri son derece yetersiz kalmıştır [2].

MESSINA 2, başarısız denemelerin ardından geliştirilmiş, genlik yerine frekans modülasyonu kullanan yeni bir telemetre sistemi idi, ancak V-2 roketini geliştiren tesislerin 1945 yılında Sovyet Kızıl Ordu eline geçmesi ile çalışmalar tamamlanamadı. Bu dönemde modülasyon teknikleri ve etkileri üzerine yeterince çalışma yapılmamış olması nedeniyle savaş sonrasında da telemetre sistemleri uzun süre gelişmeye açık bir konu olarak kaldı. Pratik ve verimli sistemlerin oluşması bağımsız araştırmacıların da katkıları ile mümkün oldu. Bu sistemlerin ilki, Darbe Pozisyon Modülasyonu-AM (PPM/AM) kullanıyordu. Bu teknik ile bir dizi sabit genliğe sahip darbe gönderiliyor, yarısı arasındaki zamanlar beklenen, yarısında ise zamanlar beklenmeyen değerlerde oluyor ve bu yolla da bilgi taşınıyordu [2].

Daha küçük boyutta veri taşınması ihtiyaç duyulan sistemlerde ise, örneğin havadan havaya füzeler, Darbe Süre Modülasyonu yöntemi uygulanıyor ve darbe genişliği bilgiyi taşıyan etken olarak kullanılıyordu.

1.3 Telemetre Sistemlerinin Standardizasyonu

Tasarımların doğrulanması aşamasında telemetre kullanımı yaygınlaştıkça, özellikle test alanlarında güvenlik sağlayabilmek adına RF yayının belli kısıtlarla limitlenmesi ihtiyacı doğmuştur. Standardizasyon, pek çok alanlarda olduğu gibi telemetre uygulamaları için de gerçekleştirilmiştir.

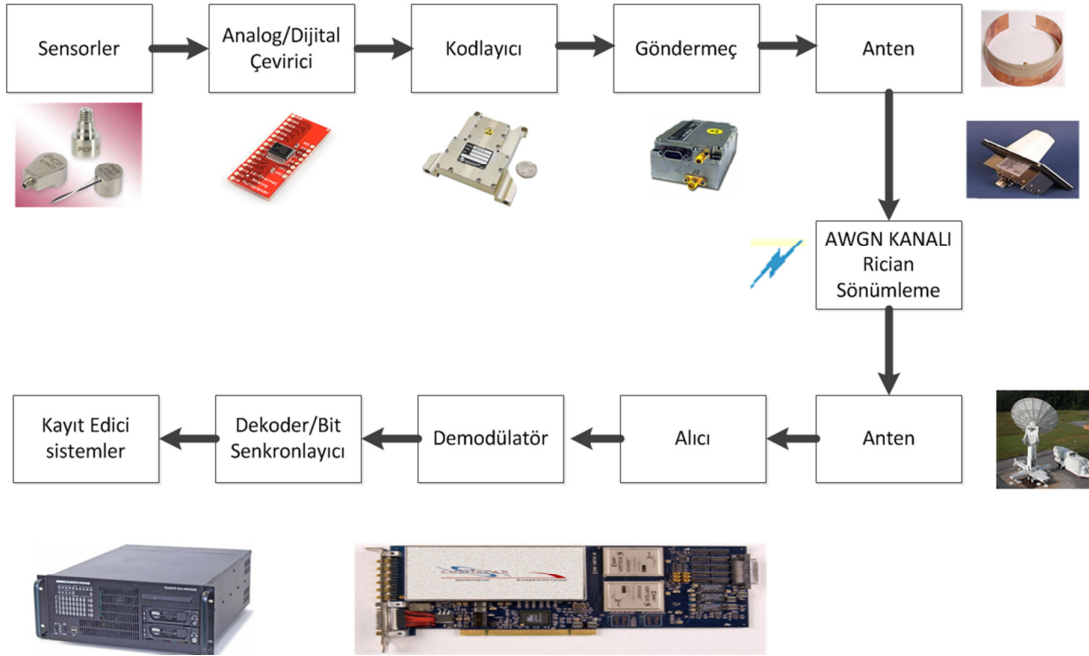
Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan RCC (Range Commanders Council) isimli topluluk, telemetre altyapısının standartlaşması ve güncel şartlara uygun olarak güncellenmesine yönelik çalışmaları altında bulunan IRIG (Inter-Range Instrumentation Group) kurulu ile yürütmektedir. IRIG-106 başlığı altında yayınlanan doküman, bu kurulun tanımladığı telemetre standardı olup dünya çapında sistemlerde kullanılacak haberleşme yöntemlerini detaylı bir şekilde tanımlamaktadır. Temel olarak IRIG-106 iki kısımdan oluşmaktadır: Birinci kısım bir telemetre ağına bağlı olmadan kullanılan tekil telemetre sistemlerini tanımlamaktadır. İkinci kısım ise, telemetre ağları üzerinde yapılan çalışmaları içermektedir. Bu doküman yaşayan bir doküman olup güncellemeleri sürmektedir.

Standardizasyon sayesinde, telemetre ekipman tasarımı ve modifikasyonu için gerekli kriterler belirlenmektedir. Amaç, spektrumu verimli kullanmak, girişime maruz kalmamak ve dünya çapındaki herhangi bir test alanında çalışabilen sistemler ortaya çıkartılmasını sağlamaktır.

RCC, yılda iki kez toplanmakta ve gerçekleştirilecek güncellemeler hakkında çalışmaktadır. IRIG 106 üzerinde şu an üzerinde çalışılan güncellemeler PCM (Darbe Kod Modülasyonu) standardı (sürekli güncellenmektedir), TMATS (Telemetry Attributes Transfer Standard) ve Dijital Veri Kayıt Formatı hakkındadır.

1.4 Telemetre Sistemi İşlevsel Akışı

Günümüzde telemetre sistemleri, test edilecek sistemin özellikleri ve test senaryolarına göre belirlenen ihtiyaçlara göre özelleşmiş bir yapıdadır. Yine de, bu sistemler için çalışma akışında ortak ve genel olan birimler şu şekilde sıralanabilir:



Şekil 1.1 Telemetre sistemine ait birimler

Telemetre sistemlerinin alt birimlerine ait teknik dökümanlar ekte verilmiştir. Bir telemetre sistemi, test edilen sistemin üzerindeki sistem ve telemetre yer sistemi olarak iki ana birimden oluşmaktadır.

Füze üstü birimde ilk işlev, teste tabi tutulan aracın üstünde (füze) bulunan ve hız, ivme, basınç, sıcaklık gibi kritik analog verileri oluşturan sensörlere, yani test edilen cihaz üstündeki herhangi bir durumu betimleyen göstergelere aittir. Bu sensörler, fiziksel bir durumun ölçümünü yapmakta ve ölçümü mühendislik birimlerine uygun forma getirmektedir. Sensörlerin bazıları (ivme, sıcaklık, vb.) direkt gerilim çıkışı vermekte iken, bazılarında (potansiyometre gibi) bir uyarıcı gerekebilmektedir. Bir sinyal şartlayıcının yardımıyla sensör sinyallerinin üzerinde

işlem yapılarak sinyaller bir sonraki aşama için hazırlanmaktadır. Genellikle bu işlem çok küçük olan elektriksel sinyallerin yükseltilmesidir.

Füze üzerinde telemetre ile iletilmesi gereken verilerin sayısı çok fazladır. Bütün çıktıları ayrı kanaldan göndermek masraflı ve gereksiz bir işlem olacağından, veriler bir çoklayıcı (bazı kaynaklarda komütatör olarak geçmektedir) yardımı ile analog gerilimlerden tek bir darbe dizisine dönüştürülmektedir. Çoklayıcı ile veriler, frekans veya zaman ekseninde ayrıştırılmakta ve gönderilmeye hazır hale getirilmektedir. Eğer hem zaman hem frekans ekseninde işlem yapılmak istenirse, hibrit çoklayıcılar kullanılmaktadır.

Darbe dizilerinin sensör ölçümlerine ait verileri taşıması için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Darbe Genlik Modülasyonu (PAM), her bir darbenin yüksekliğinin ölçülen değere göre orantılandığı bir yöntemdir. Ölçümlerin hangi sensörlere ait olduğu da, araya senkronizasyon darbelerinin eklenmesi ile anlaşılabilir. Ancak bu yöntem hassasiyet seviyesi, kullanılabilir ölçüm sayısını kısıtlaması ve sayısal verilerle uyum sağlayamaması sebebi ile yeni nesil telemetre sistemlerinde çok kullanılmamaktadır. PCM (Darbe Kod Modülasyonu) ise PAM'nin yetersiz kaldığı kabiliyetleri taşımakta; ölçüm çözünürlüğü analog-sayısal çeviricinin limitlerine dek çıkmakta, binlerce ölçüm ve üstüne eklenen sayısal verileri taşıma kapasitesi sağlamaktadır. PCM, çoklayıcının analog çıktısını sayısala çevirmekte ve sayısal diğer çıktılarla aralarına senkronizasyon verileri ekleyerek formatlamaktadır. Format işlemi, oluşturulmuş bu verinin ikili sistemde 1 ve 0 bitleri haline getirilmesini içerir. Daha sonra bu veriler filtrelenir ve göndermeç ile anten tarafından iletmeye hazır hale gelmiş olur.

Göndermeç bölümünde, çoklanmış veri, bir taşıyıcı frekans ile modüle edilir ve kablosuz olarak aktarılması için antene beslenir. Telemetre için genellikle 1435-1525 MHz (L-bandı), 2200-2290 MHz (alt S-bandı) ve 2360-2395 MHz (üst S-bandı) aralıklarında yer alan frekanslar kullanılmaktadır.

Test edilen cihaz üzerinde yer alan antenden gönderilen bu yüksek frekanslı sinyaller kanalda, yani havada ilerler.

Yer sistemindeki almaç işlevi, antenden veri alınması, bu verinin genliğinin yükseltilmesi, bir ara frekansa (IF) düşürülmesi, tekrar genliğinin yükseltilmesi, modülasyon işleminin çözümlenmesi ile verinin elde edilmesi işlevlerini gerçekleştirir.

Çoklama çözücü birimde frekans veya zaman ekseninde, veya hibrit bir şekilde çoklanmış veri tekrar ayrıştırılır.

Verinin telemetre akışındaki varış noktasında ise, test amacına uygun şekilde veri işlenmekte, görüntülenmekte ve arşivlenmektedir.

1.4.1 Füze üstü telemetre sistemi

Füze üstünde yer alan bu sistem, füze üstündeki belirli noktalardan ölçümlerin alınarak diğer telemetre alt sistemlerine iletilmesi ile işlevlerine başlamaktadır. Çeşitli ölçümleri gerçekleştirebilen pek çok sensör sayesinde, füzedeki fiziksel bir durum ölçümlenebilmekte ve değeri belirlenebilmektedir. Füze uygulamalarında basınç, sıcaklık ve ivme sensörleri sıkça kullanılan ölçüm aletleridir. Test mühendisleri; test senaryosu, çevresel etkiler, füzenin vereceği tepkiler, ihtiyaç duyulan ölçüm hassasiyeti, kararlılık, boyut ve ücrete göre bu cihazların seçimini gerçekleştirmektedir. Füze tasarımında fazladan boy, en, hacim ve ağırlık füzenin aerodinamik yapısını ve performansını direkt etkilediği için, sensörlerin de genellikle hafif ve küçük olmaları önemli bir kriter olarak ön plana çıkmaktadır.

Sensörler, aktif bir şekilde ölçümlerini gerilim olarak gösterebilecek kabiliyette, veya dışarıdan güç verilmesine ihtiyaç duyan bir yapıda olabilmektedir. Ancak, çıktı olarak alınan ölçümlerin, filtrelenmesi ve sonraki işlevlerde kullanılabilmesi için sinyal şartlayıcılar vasıtası ile uyumlandırılması ortak bir gereksinimdir.

Geliştirme dönemindeki füzelerde, patlayıcı içeren Harp Başlığı kompleksi yerine yerleştirilen Deneme Başlığı kısmı, içerdiği elektronik kart ile füzenin çeşitli bölgelerine yerleştirilen sensörlerden verileri toplamaktadır. Sensörlerden gelen analog verilerin yer istasyonu ile haberleşme için sayısal veriye çevrilmesi

gerekmektedir. Bu çevrim için öncelikle farklı sensörlerden gelen verilerin bir araya getirilmesi gerekmektedir.

Birden fazla sensörün çıktılarını, yani veri kanallarını bir araya getirerek daha sonra bir haberleşme link'inden iletmek üzere tek bir kompozit sinyal haline getirme işlemine çoklama denir. Çoklama işlemi için iki farklı yöntem bulunmaktadır; veriler frekans veya zaman ekseninde bölümlenebilir.

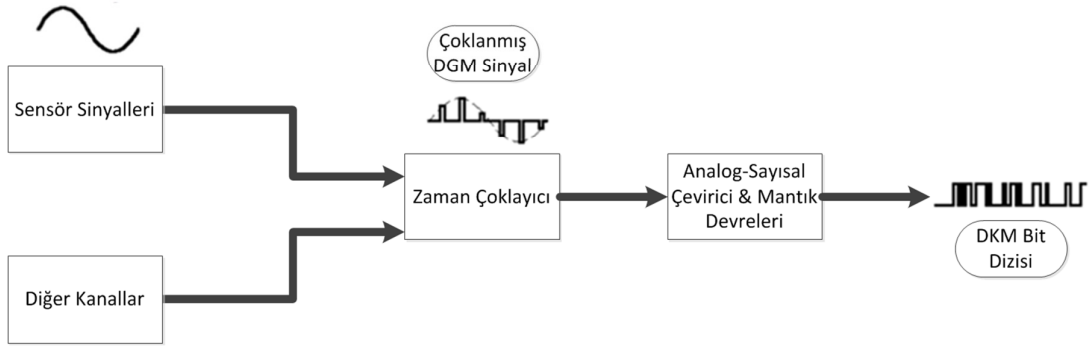
Frekans Bölümlenmeli Çoklama (Frequency Division Multiplex, FDM) tekniğinde, iletim hattının toplam bant genişliği, her bir kanal için bölümlere ayrılır. N adet bağımsız sinyal, N adet sinüs dalgasını, N farklı frekansta modüle etmektedir. Bahsi geçen N sinüs dalgasına 'subcarrier' ismi verilmekte ve bunların ağırlıklı toplamı, bir taşıyıcının frekans modülasyonunda kullanılmaktadır. Her bir sensörden alınan analog sinyaller yükseltilir ve bu çıktı gerilim kontrollü bir osilatöre beslenir. Bu osilatör, 'subcarrier' adı verilen dalgayı oluşturur.

Bir örnekle açıklamak gerekirse; füze içindeki belli bir noktada sıcaklık değerini ölçen bir sensör düşünülebilir. Bu sensörün çıkışındaki gerilim değerleri ölçülen sıcaklığı temsil etmektedir. Daha sonra bu gerilim değerine göre osilatörden farklı frekansta sinyaller oluşturulmakta ve diğer sensörlerin de oluşturduğu sinyaller ile toplanarak göndermeç ile havaya aktarılmaktadır.

Telemetre uygulamalarında sıkça tercih edilen çoklama yöntemi ise, zaman ekseninde verilerin bölümlenmesidir.

PCM ile birleştirilmiş Zaman Bölümlenmeli Çoklama (Time Division Multiplex, TDM) tekniğinde, komütatör N adet sensörden gelen analog sinyalleri sıralı bir şekilde örnekler ve her bir genlik değerini darbe periyodu kadar devam ettirir. Bu da, darbe genlik modülasyonu uygulanmış bir darbe dizisi oluşturur. Daha sonra bu dizi, darbelerin kuantize edilmesi ve her bir darbenin ikili kelimeye döndürülmesi için enkodere beslenir. Böylece bir bit akışı elde edilmiş olur. Bir veri kelimesinin uzunluğu genellikle 8 bit olmasına rağmen 16 bit'e kadar çıkabilmektedir. Bit

akışının dijital çoklayıcıya aktarılması ile de veri kelimeleri birleştirilir, zamanlama ve çerçeve senkronizasyonu sağlanmış olur.



Şekil 1. 2 Darbe Kod Modülasyonu uygulamasına ait blok diyagram

Haberleşmenin temelini oluşturan, örnekleme hızının sinyal spektrumundaki en yüksek frekansın en iki katı seçilmesi prensibi, her bir sensörün çıktısı için pratiğin yarattığı farklılıklar gözetilerek, yani örnekleme hızını iki değil dört veya beş kata çıkararak uygulanmaktadır. Her bir sensör için farklı değerler oluşturulması gerekeceği için (örneğin bir titreşim sensöründeki değişim frekansı, sıcaklık sensöründekine oranla daha fazla olmaktadır), komütatörün örnekleme hızını ayarlayabilecek şekilde programlanmış olması gerekmektedir.

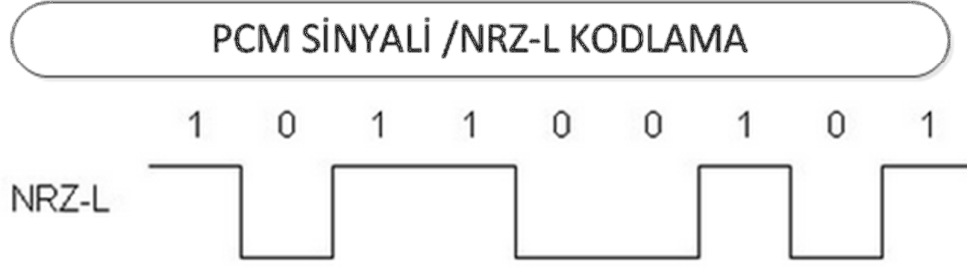
Bütün sensörlerin örneklenmesi sonrasında enkoder tarafından yaratılmış ikili kelimeler, çerçeve yapıları içerisine gruplandırılır. Çerçevenin telemetre yapısının karşı kısmına ulaştığında çözülebilmesi için çerçevelerin zaman ekseninde nerede başlayıp nerede bittiğinin anlaşılması gerekmektedir.

Pattern Length	Patterns								
7	101	100	0						
8	101	110	00						
9	101	110	000						
10	110	111	000	0					
11	101	101	110	00					
12	110	101	100	000					
13	111	010	110	000	0				
14	111	001	101	000	00				
15	111	011	001	010	000				
16	111	010	111	001	000	0			
17	111	100	110	101	000	00			
18	111	100	110	101	000	000			
19	111	110	011	001	010	000	0		
20	111	011	011	110	001	000	00		
21	111	011	101	001	011	000	000		
22	111	100	110	110	101	000	000	0	
23	111	101	011	100	110	100	000	00	
24	111	110	101	111	001	100	100	000	

For additional synchronization words up to a pattern length of 33, see IRIG 106-93, pp. c2, reference [1], Chapter 1.

Şekil 1. 3 IRIG-106 standardında PCM için belirlenmiş senkronizasyon kelimeleri[3]

İkili kodlanmış PCM veri dizisi adı verilen işaretler standartlarda verilen çeşitli bit kodlama teknikleri kullanılarak elektriksel seviyelere dönüştürülür. Bu teknikler güç tayfı etkinliği, karmaşıklık gibi bazı özelliklerine göre ayrılmaktadır. Telemetre uygulamalarında genellikle Kutupsal (Polar) NRZ kodu kullanılmaktadır. Bu teknik ile 0 biti T saniye süreli - V gerilim düzeyi ile, 1 biti ise T saniye süreli + V gerilim düzeyi ile kodlanır. Sinyalin bu değerler arasında bulunduğu başka bir değer bulunmamaktadır.



Şekil 1. 4 NRZ kodlama

Telemetre sinyalinin daha sonra iletildiği göndermeç sistemi, sinyalin kablosuz olarak uzak mesafelere gidebilmesi için kendisine gelen bit akışını modüle edip anten aracılığı ile yer istasyonuna gönderen sistemdir. Göndermeç sistemine gelen sinyal RCC IRIG-106 telemetre standardında belirtilen frekanslara uygun bir taşıyıcı ile çarpılıp yükseltilir. Frekans anahtarlama modülasyonu (FSK) işlemi sonrasında sinyal, anten aracılığıyla telemetre yer istasyonuna aktarılır.

Füzenin yapısına, tipine, menziline, irtifasına ve uçuş esnasında yapacağı manevralara göre anten tipi belirlenir. Füze üstü aerodinamik yapıyı etkilemediği için genellikle mikroşerit yapıdaki sarmal antenler füze gövdesi üstüne sarılarak kullanılır. Antenin temel işlevi, göndermeçten gelen yüksek frekanslı elektriksel sinyali yer istasyonuna aktarmaktır. Antenin huzme açısı ve polarizasyonu burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birkaçıdır. Uçuş boyunca füze üstü anten huzmesi ile yer istasyonundaki anten huzmesinin birbirleriyle kesişecek biçimde ayarlanması ve analizlerin bu doğrultuda yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda füze üstü anten ve yer istasyonu antenleri arasındaki polarizasyon farklarından kaynaklanan sinyal zayıflamaları ve kayıplar en aza indirgenecek şekilde seçim yapılmalıdır.



Şekil 1. 5 Sarmal füze üstü telemetre anteni örneği

Telemetre sisteminde, haberleşme hatalarından dolayı atışın tekrarlanması istenmeyen ve maliyetli bir durum olduğu için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır, örneğin haberleşmedeki olası hataları engellemek için kanal kodlama teknikleri de kullanılmaktadır. Bu teknikler tezin sonraki kısımlarında incelenecektir.

1.4.2 Telemetre yer istasyonu



Şekil 1. 6 Telemetre yer istasyonu anteni örneği

Telemetre yer istasyonu, anteni vasıtası ile füze üstü telemetre vericisinden gelen verilerin alınmasına, daha sonra verinin işlenmesine, görüntülenmesine ve kayıt edilip daha sonra analiz edilmek üzere saklanması için kullanılan elektronik donanımlar bütünüdür.

İlk olarak, telemetre yer istasyonunda bulunan anten sayesinde füze üstünden gönderilen radyo frekansındaki sinyaller alınır ve almaca gönderilir. Füzeden tüm yörünge boyunca telemetre yayını alabilmek için telemetre yer istasyonunda kullanılan antenlerin kazancının yüksek olması ve gelen sinyalin gücüne göre füzeyi otomatik takip edebilen antenlerin kullanılması tercih edilmektedir. Füze telemetre uygulamalarında antenlerin kazancı ve antenlerin yanal ve yükselme yönlerindeki hızlanma, ivmelenmeleri değerleri yüksektir. Bu sayede telemetre yer sistemleri, uygun yerleşim yapıldığı müddetçe füzeyi tüm yörünge boyunca takip edebilecek yetenektedir.

Almacın işlevi, gelen radyo frekansındaki sinyalleri ara bant frekansına (IF) indirmek, filtrelemek, kanaldaki olası kayıplara karşı yükseltmek, sinyali demodüle ederek taşıyıcı frekanstan kurtulmak, daha sonra temel bant frekansına (*baseband*) indirmek, yeniden genliğini yükseltmek ve gürültüyü sinyalden filtreler yardımı ile ayıklamaktır. Almaç içerisinde RF devreleri ile sayısal devreler beraber çalışmaktadır. Sinyale daha sonra füze üstünde uygulanan işlemlerin tersi uygulanır; çoklama ve kodlamalar çözülür. Bu adım sonrasında veri, işlenmeye hazır duruma gelir.

Kablosuz iletişimin doğru ve kesintisiz sağlanabilmesi için kanalda, yani ortamda ilerleyen sinyalin taşıdığı bilgilerin kaybedilmemesi gerekmektedir. Füze üstü antenden gönderilen sinyal, ortamda ilerlerken mesafenin karesi ile ters orantılı olarak zayıflamaktadır. Buna bağlı olarak sinyal zayıflar ve üzerine binen gürültü nedeniyle algılanması güç hale gelir. Kullanılacak olan almacın asgari sinyal algılama seviyesi ne kadar düşük ise veri alma kabiliyeti o kadar yüksek olur.

Alınan sinyaller çözüldükten sonra, sinyal örneklenerek sayısal hale getirilmekte ve bilgisayarda analiz edilmek üzere kaydedilip saklanmaktadır.



Şekil 1. 7 Telemetre verilerinin görüntülenme ve işlenmesi için örnek kullanıcı arayüzü

2 TELEMETRE HABERLEŞMESİ

Tezin bu bölümünde, telemetre sistemlerinde kullanılan modülasyon ve kanal kodlama teknikleri ile tez konusu simülasyonda haberleşme performansını belirlemeye yönelik kullanılan kriterler açıklanacaktır.

Roket-füze test ortamlarında kullanılan telemetre sistemlerinde, testin konfigürasyonuna, uygulanan senaryoya, test edilen füzenin kabiliyetlerine bağlı olarak uzun mesafeler boyunca havadan yapılan haberleşmenin kesilmeden sürdürülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer kablosuz haberleşme uygulamalarında olduğu gibi burada da, zayıflayan sinyalin işleneceği yere ulaşabilmesi için taşıyıcı bir sinyal üzerine bindirilerek kuvvetlendirilmesi, yani modüle edilmesi tekniği uygulanmaktadır.

Modülasyon genel olarak üç tipte gerçekleşmektedir. Genlik modülasyon yöntemi, frekans modülasyon yöntemi ve faz modülasyon yöntemi.

Telemetre uygulamalarında tez kapsamında karşılaştırılan tüm modülasyon tekniklerinde aşağıda sıralanan faktörler incelenecektir:

1) Sabit Kılıf Yapılı Sinyal: Telemetre sistemindeki gönderme ortamı hava olduğundan ötürü, alınacak olan sinyalin genliğindeki değişimi tahmin etmek çok zordur. Sinyal, havada iken yayılım sönümlenmesine ve ilerleyen bölümlerde bahsi geçecek diğer sönümlenme durumlarına maruz kalmaktadır. Sabit kılıfa sahip modülasyon teknikleri, alıcı tasarımının daha basit yapıda olmasını sağlamaktadır.

2) Verimlilik: Alıcı kısmının kritik verileri en iyi şekilde alıp çözebilmesi için tasarımın yüksek verimliliğe sahip olması gerekmektedir. Bu açıdan, sinyalin hava ortamında maruz kaldığı bozulmalar göz önüne alınmalı, mümkün olduğunca düşük BER (bit hata olasılığı) ve yüksek hız ile sinyalin alıcıya ulaşmasını sağlamak gerekmektedir. İyileşme sağlanması için gönderme kısmında kaynak kodlama ve yüksek performanslı kanal kodlama yöntemleri seçilip tasarıma eklenmektedir.

3) Spektrum: Füzenin süpersonik, yani ses hızının üstündeki hızlarda uçabilecek kabiliyette olduğu durumlarda, Rice faktörü (çok yollu sönümlenme ve Doppler etkileri) ve uzaklığın yarattığı sönümlenme etkileri, haberleşmede frekans kaymasının yaşanmasına neden olabilmektedir. Dar bant genişliğine sahip bir sinyal yapısına gidildiğinde bu sorunun önüne geçilebilmektedir. Ayrıca, füze üstündeki sistemlere kısıtlı güç sağlanabildiğinden dolayı, telemetre göndermecinin harcadığı güç de kısıtlı olmalıdır. Bu nedenlerden ötürü, bant genişliği yapılan simülasyonun değerlendirilmesinde önemli parametrelerden bir tanesidir.

Tez kapsamında kanal kodlama teknikleri (Golay kodlama, Evrişimsel kodlama), farklı modülasyon teknikleri (BPSK, QPSK, OQPSK, PCM/FM (FSK)) üzerinde kullanılacak ve bit enerjisi/gürültü güç yoğunluğu, bant genişliği ile bit hata oranları incelenecektir.

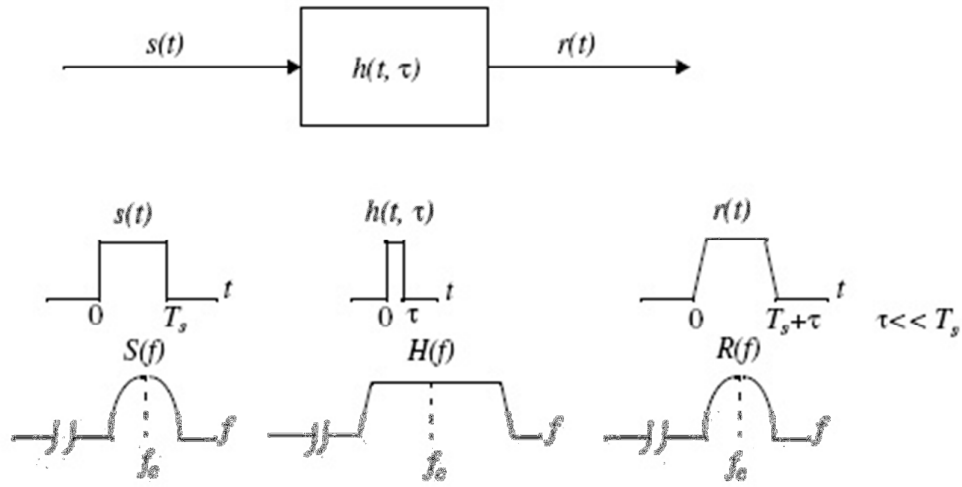
2.1 Telemetre Almaç Sisteminin Kanal Modellemesi

Kanal, sinyallerin göndermeçten almaca ileildiği fiziksel ortama verilen isimdir. Telemetre uygulaması da dahil olmak üzere, hareketli sistemler ile haberleşmede kanal havadır; hava arayüzü olarak da tanımlanabilir. Arayüzün hava olması, kullanıcıların kablolar, tellere bağlı olmadan iletişibilmesini sağlamaktadır, zaten telemetre sistemlerinde füze ile yerdeki sistemi kablo ile bağlamak mümkün değildir. Ancak, kablosuz haberleşme, telli iletişime kıyasla daha karmaşık ve tahmin edilmesi zor temellere dayalı bir uygulamadır. BER (bit hata olasılığı) da telli hatlara göre daha düşüktür. Yoldan kaynaklanan kayıp, gölgelenme, çok yollu sönümlenme gibi etkiler nedeniyle gönderilen sinyaller kanalda bozulmaya uğramaktadır. Genellikle kablosuz hatların modellenmesinde istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır.

Kanal modellemesi gerçekleştirilirken göz önünde bulundurulacak sönümlenme sınıflandırmaları, gönderilen sinyal ile ortamın karakteri arasındaki ilişkiye bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bunun için, aşağıda özellikleri anlatılacak çok yollu

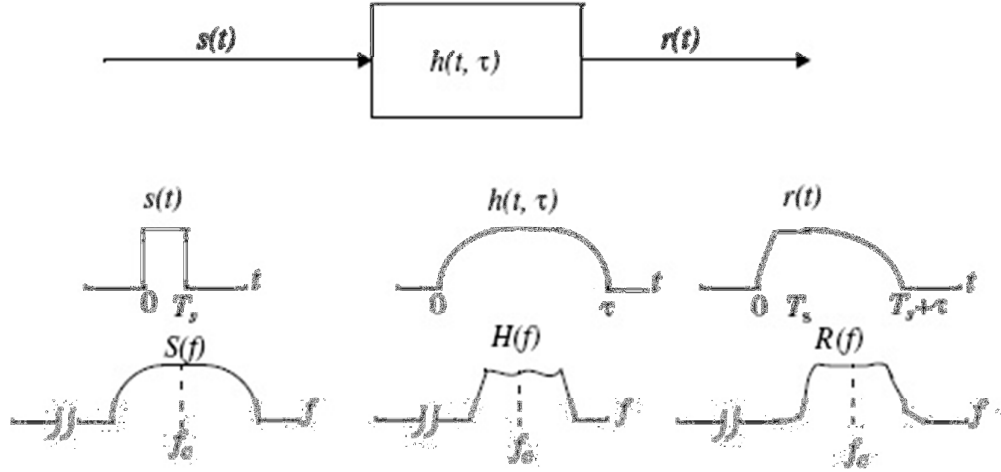
sönümlenme ve Doppler yayılımı etkileri göz önüne alınmaktadır. Çok yollu sönümlenme için iki adet olasılık vardır:

- Düz Sönümlenme: Sinyalin bant genişliğinin kanalinkinden küçük olması ve almaca ulaşan ilk sinyal ile son sinyal arasındaki sürenin sembol periyodundan az olması durumudur. Bu etkide, kanalın tepkisi sinyalin bant genişliğinden büyük bir bantta düz bir kazanç ve lineer faz sağlamaktadır. Kazanç, zamana bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2. 1 Düz sönümlenme kanal özellikleri[4]

- Frekans Seçici Sönümlenme: Sinyalin bant genişliğinin kanalinkinden daha büyük olması ve almaca ulaşan ilk sinyal ile son sinyal arasındaki sürenin sembol periyodundan çok olması durumudur. Burada sinyalin sabit kazanç ve lineer faz sağlayabildiği bantın genişliği, sinyalinkinden daha azdır. Bu da semboller arası girişimden kaynaklanan bir durumdur.



Şekil 2. 2 Frekans seçici sönümlenme kanal özellikleri[4]

Doppler yayılımı için de benzer şekilde iki olasılıktan söz edilebilir:

- Hızlı Sönümlenme: Yüksek Doppler yayılımı ve eşvretilik süresinin sembol periyodundan küçük olması durumudur. Kanalı verdiği tepkinin sembol süresi içinde hızla değişebilmesine yol açmaktadır. Pratikte, yalnızca çok düşük veri hızlarında gözlemlenen bir durumdur.
- Yavaş Sönümlenme: Düşük Doppler yayılımı ve eşvretilik süresinin sembol periyodundan fazla olması durumudur. Burada kanalın tepkisi gönderilen sinyale göre çok daha yavaş değişim göstermektedir.

2.1.1 Dar bant ve geniş bant kanal modelleme yöntemleri

Dar ve geniş bant kanal modellerden bahsetmeden önce, eşvretilik bant genişliği (*coherent bandwidth*) tanımını yapmak faydalı olacaktır. Eşvretilik bant genişliği, kanalın 'düz' kabul edildiği, yani kanalın sinyalleri eşit kazanç ve lineer faz ile ilerlettiği frekans aralığına verilen isimdir.

Kanal modelleri genellikle dar bant (*narrowband*) ve geniş bant (*wideband*) olarak iki ayrı kategoride ele alınmaktadır.

2.1.1.1 Geniş bant kanal modellemesi

Geniş bant kanal modelleri, sinyalin bant genişliğinin çok yollu sönümlenme işlemine ait eşevrelilik bant genişliğinden daha fazla olduğu durumlar modellenirken kullanılmaktadır. Böylesi durumlarda kanal, bir takım zamana bağlı değişen katsayılar ile kademelendirilmiş bir gecikme hattı ile çok yol karakteristiğindeki değişimleri açıklayacak şekilde modellenmektedir.

Hava araçlarının telemetre uygulamalarında geniş bant kanal modeli üç sinyal ilerleme hattını içermektedir: bir LOS hattı ve iki adet yansıma hattı. Kanalin transfer fonksiyonu şu denklemle ifade edilmektedir:

$$h(t) = \delta(t) + \sum_{k=1}^{L-1} \Gamma_k \exp(-j\omega_c T_k) \delta(t - T_k) \quad (2.1)$$

Bu formülde $\delta(t)$, direkt hattın birim dürtü tepkisi (*unit impulse response*) olarak modelini,

L , ışın sayısını (modelde toplamda 3 ışın bulunmaktadır),

Γ_k , k hattının genliğini,

T_k , k hattının gecikmesini tanımlamaktadır.

İlk yansıma hattının karakteri, direkt hattın yüzde 70-96'ı büyüklüğünde bir genlik ve 10-80 ns'lik iletim gecikmesini içermektedir. Bu yansıma hattı arazi yüzeyi nedeniyle oluşan yansımaları tanımlamaktadır.

İkinci yansıma hattı ise uçuş profili ve topolojisine bağlı olup, direkt hattın yüzde 2-8'i büyüklüğünde bir genlik ve 155 ns'lik iletim gecikmesi ile tanımlanmaktadır.

2.1.1.2 Dar bant kanal modellemesi

Dar bant kanal modelleri, sinyalin bant genişliğinin çok yollu sönümlenmenin eşevrelilik bant genişliğinden çok daha küçük olduğu durumlar için uygundur; bu durum için araziden gelen çok yollu yansımalar sinyal bant genişliği içerisinde çözülebilir değildir. Kanal modellemesinde odak, zamana bağlı sönümlenmenin

istatistiksel olarak tanımlanmasıdır. Bu modellerden Rayleigh sönümlenme kanalı, genellikle kentsel mobil telefon kanalları için, Rice modeli ise hareketli araçlarla iletişim kurulan diğer uygulamalar için kullanılmaktadır.

Bu kanal modeli için almaç tarafından alınan sinyal şu şekilde gösterilmektedir:

$$y(t) = A_{s_0}(t) + B_{s_0}(t - T_{sp}) \exp\{j\Delta w_{sp}(t - T_{sp})\} + \sum_k a_k \delta_0(t - T_k) \exp\{j\Delta w_k(t - T_k)\} \quad (2.2)$$

Bu formülde $A_{s_0}(t)$, direkt hat bileşenini,

$B_{s_0}(t - T_{sp}) \exp\{j\Delta w_{sp}(t - T_{sp})\}$ yansıma bileşenini,

$\sum a_k \delta_0(t - T_k) \exp\{j\Delta w_k(t - T_k)\}$, yayılmış çok yollu sönümlenme bileşenini tanımlamaktadır.

2.1.2 Sönümlenme modeli

Sönümlenme için farklı modeller kullanılabilir. Dar bant kanal modelleme modellerinde bahsi geçen Rayleigh ve Rician modelleri, en yaygın kullanılan modellerdir. Rayleigh dağılımı, almaç ve göndermeç arasında LOS hattı yok ise veya başka bir sönümlenmesiz yol etkisi baskın değil ise kullanılmaktadır. Bu model, düz sönümlenme durumunu belirtmektedir.

Rician modeli ise, çok yollu yayılımın sönümlenme etkisini ve Doppler etkisini kanal modeline, almaç ve göndermeç arasında görüş hattı (*line of sight, LOS*) bulunduğu durumlar için, ekleme olanağı sağlamaktadır. Telemetre uygulamalarında füze ve yer istasyonu arasında görüş hattı bulunduğundan tez kapsamındaki simülasyon için de bu model tercih edilmiştir.

Bu modelde, sinyalin ortalama değeri sıfır değildir ve olasılıksal yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki formülde gösterilmiştir.

$$P_{rician}(r) \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2+A^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) & A \geq 0, r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

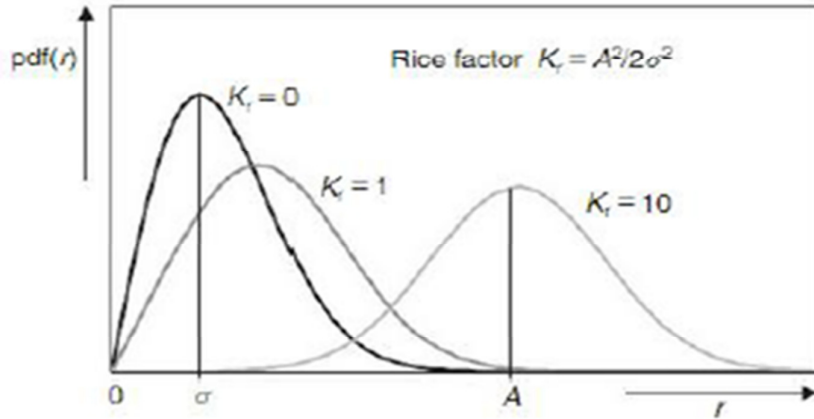
A sinyalin genliğini, $I_0(x)$ modifiye edilmiş sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır:

$$I_0(x) = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(x \cos \theta) d\theta \quad (2.4)$$

Rician sönümlenme modelinde K faktörü, direkt görüş açısının (LOS) gücünün, çok yollu sönümlenme bileşenlerine oranıdır:

$$\left(K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2.5)$$

K sıfır iken, Rician sönümlenme Rayleigh sönümlenme yapısını almaktadır. K arttıkça ise, Rician sönümlenme kanal yapısı, ortalaması A olan Gaussian dağılımına benzer. Aşağıdaki grafikte olasılıksal yoğunluk fonksiyonunun üç farklı K faktörüne karşılık gelen grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Olasılıksal yoğunluk fonksiyonunun üç farklı K faktörü için grafiği [5]

Göndermeç ile almaç arasında kilometreler mertebesinde mesafeler bulunduğu durumda, ki pek çok telemetre uygulamasında bu durum yaşanmaktadır,

alınabilen sinyalin ortalama gücü azalmakta ve buna da büyük-ölçüde yol kaybı adı verilmektedir. Zayıflama iletim yoluna bağlıdır ve empirik ölçümlerden türetilmiş bir şekildedir. Bunun yanında, bir radyo sinyalinin genliğinin kısa mesafeler ve iletim zamanlarında da değişebildiği bilinmektedir. Bu da, küçük-ölçüde sönümlenme modelinde hesaplanabilen bir değer olup, genellikle dalga boyunun bir-iki katı uzunluktaki mesafeler için geçerlidir.

Tek yönlü AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) kanal modelinde, gönderilen ve alınan sinyal arasında bir transfer fonksiyonu ile tanımlanan basit ilişki bulunmaktadır. Ancak pratikte, radyo kanallarının çalışma yapısı ve koşullarında yalnız AWGN değil başka etkiler de bulunmaktadır.

Radyo sinyallerinin maruz kaldığı etkiler şu başlıklar altında incelenebilir:

- Serbest uzay kaybı (*free space loss*)
- Çok yönlülük (*multipath*) kaynaklı sönümlenme
- Gölgeleme (*shadowing*)
- Doppler etkisi
- Füze egzozu (*plume*) zayıflaması
- RF kesintisi
- Kılavuzlandırma
- Atmosferik soğurma (*atmospheric absorption*)
- Kanaldaki gürültü (*noise*)

2.1.3 Serbest uzay kaybı

Sinyal zayıflaması, sinyalin kanalda ilerlerken (yayılırken) gücünün azalması durumu olup iletim kaybı olarak da tanımlanabilmektedir. Füze ile yer sistemi arasındaki mesafe arttıkça ve iletişim frekansının yüksekliğine bağlı olarak bu kayıp artmaktadır. Atmosferde ilerleyen sinyaller için ortam kablolu iletişimin aksine kılavuzsuzdur (*unguided media*), bu nedenle zayıflama ile mesafe ve atmosfer özellikleri (örneğin yağmur ve kar yağışı) arasında daha karmaşık bir ilişki bulunmaktadır. Bu zayıflama için göz önünde bulundurulması gereken birtakım hususlar vardır.

Yükselteçler kullanılarak sinyal genliği almaçtaki elektronik devrelerin algılayabileceği bir güce yükseltilebilir. Ancak yükselteçler sinyal ile birlikte gürültüyü de yükselttikleri, ve kendileri de ayrı bir gürültü yarattıkları için, çok uzun mesafeli iletişim durumlarında ortamda sinyal tekrarlayıcılar (*repeater*) kullanılması gerekmektedir.

Sinyalin gürültüye oranını, yani SNR'ı yükseltmek gerekmektedir. Bu işlev için almaç sistemlerinde sinyal çözümleyicilerden önce uyumlu süzgeçler (*matched filter*) kullanılmaktadır.

Sinyalin yüksek frekanslı bileşenlerinin daha fazla zayıflamaya uğradığı bilinmektedir. Sinyal dalga şeklinin bu nedenle bozulmaya (zayıflama bozulması) uğramaması için almaçta dengeleyicilere (*equalizer*) bu etkileri giderecek şekilde kazanç ve faz özellikleri sağlanır.

Göndermeç ile füzeden gönderilen sinyaller, elektromanyetik olarak boşlukta yayılırken mesafe arttıkça artan bir çapta küresel yüzeyler halinde yayılırlar. Bu da, gücün dağılması ve birim alana düşen gücün azalmasına yol açar ve bu fenomen 'serbest uzay kaybı' olarak adlandırılır.

c : Işık hızı (3×10^8 m/s)
f : Taşıyıcı üzerine bindirilmiş sinyalin frekansı (Hz)
 λ : Taşıyıcı üzerine bindirilmiş sinyalin dalga boyu (m)
d : Mesafe
P_t : Verici anteninden gönderilen sinyalin gücü (Watt)
P_r : Almaç antenine ulaşan sinyalin gücü (Watt) olmak üzere aşağıdaki formül ile serbest uzay kaybı bulunabilir:

$$L_{uk} = \frac{p_t}{p_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi f d}{c}\right)^2 \quad (2.6)$$

Formülün dB cinsinden kullanımı da şu formül ile gerçekleşmektedir:

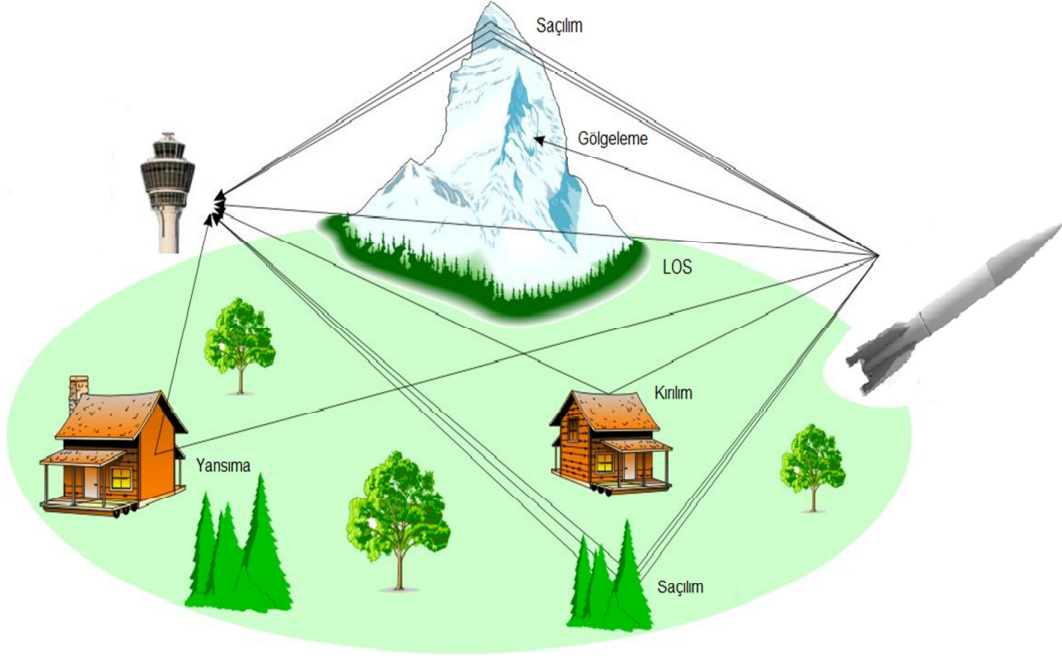
$$L_{uk} = 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d - 147,56 \text{ dB} \quad (2.7)$$

2.1.4 Çok yollu sönümlleme

Çok yollu sönümlleme oluşumu için üç farklı mekanizma vardır: Yansıma, Kırılım ve Kırınım. Yansıma, bir radyo dalgasının kendi dalga boyuna kıyasla daha büyük bir engelle karşılaşmasından kaynaklı bir durumdur. Kırılım, dalganın engelin etrafından dolaşmasıdır ve gölgelenme olarak da adlandırılır. Kırınım ise dalganın dalga boyuna kıyasla daha küçük bir engele çarparak etrafa dağılması olarak tanımlanır. Çok yollu sönümlleme fenomeni, telemetre sinyallerinde de etkili olmaktadır.

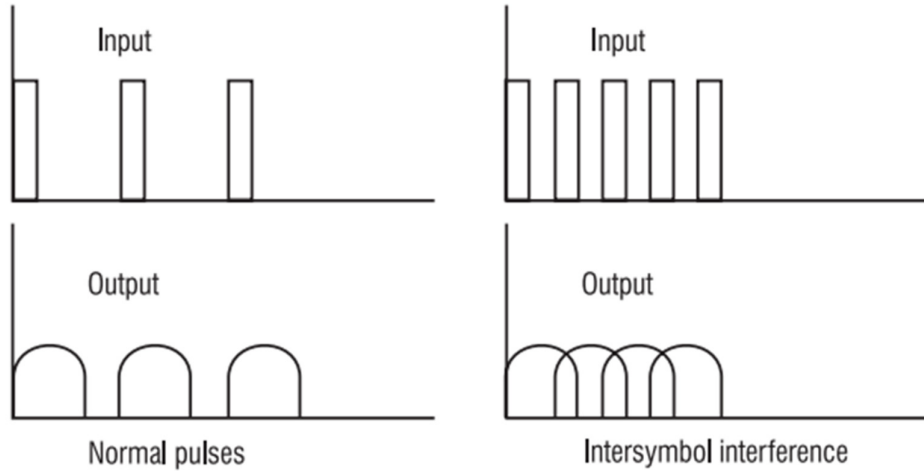
Bu durum sonucunda, gönderilen sinyalin birden fazla kopyası almaca farklı zamanlarda ulaşır. Bir başka deyişle, sinyal farklı yollardan almaca ulaşır; çok yollu sönümlleme de ismini buradan almaktadır.

Her yol, üstünde rastgele bir şekilde bulunan objeler tarafından tanımlanmaktadır ve olası bütün yollar birbirinden bağımsızdır. Telemetre sinyallerinin planlamasında da atış alanında bulunan ve çok yollu sönümllemeye neden olabilecek objeler dikkate alınmaktadır. Füzenin hareketlerinin belirsizlikleri ve objelerin çeşitliliği, telemetrede kanal parametrelerinin zamana bağılı olarak değişim göstermesine neden olmaktadır. Çok yollu sönümlleme, bu nedenlerden ötürü tahmin edilemez ve istatistiksel olarak modellenen bir durumdur.



Şekil 2. 4 Çok yollu sönümlenme diyagramı

Almaca ulaşan 'kopya' sinyallerin arasındaki zamansal farklılık, bir faz farkı yaratmaktadır. Dolayısıyla bütün bu sinyallerin almadaki toplamı yapıcı veya yıkıcı etkiler yaratma potansiyeline sahiptir.



Şekil 2. 5 Çok yollu sönümlenme sonucu oluşan semboller arası girişim

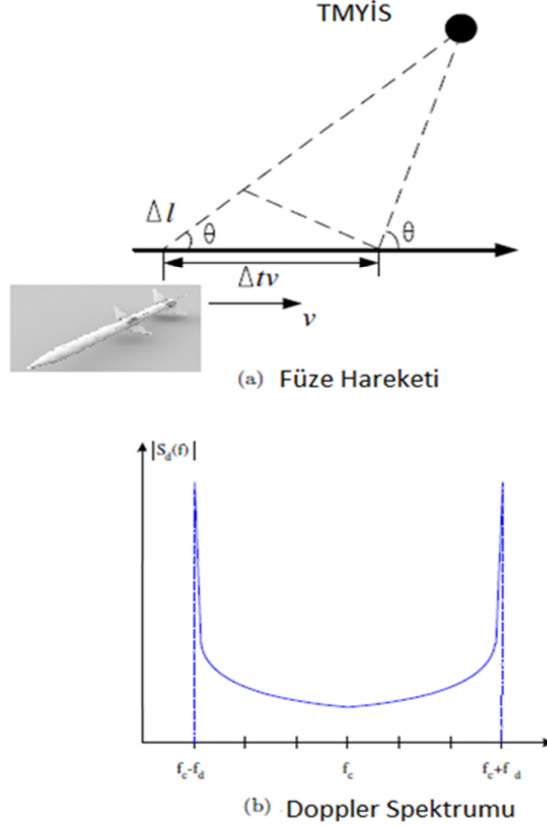
2.1.5 Gölgeleme

Füze üstü telemetre anteni ile yer istasyonu arasındaki görüşün fiziksel bir engel nedeni ile yok olması sonucu ortaya çıkan duruma gölgeleme denmektedir. Gölgeleme nedenleri, bu görüş hattının arasına giren füzenin gövdesi, füzenin kanatları ve engebeli arazi yapısı olabilmektedir. Füze dağ, tepe gibi bölgelerin arkasına uçtuğunda telemetre verilerini taşıyan RF dalgasında ciddi bir zayıflama meydana gelmektedir. Atışlı testlerdeki yaklaşım genellikle alıcı ile verici arasındaki görüş hattının olduğunu varsaymak ve buna göre planlama yapmaktır. Dolayısı ile beklenmedik bir gölgeleme ile bu görüş hattı kesildiğinde sinyalin neredeyse hepsinin alıcı tarafından kaybedilmesine neden olmaktadır. Bu olayın önüne geçmenin tek yolu, uçuşlu testler öncesinde araziye iyi etüt edip görüş hattının sürekli açık olan bir bölgesine alıcı anteni yerleştirmektir.

2.1.6 Doppler etkisi

Radyo sinyallerinin almaca ulaşması esnasında maruz kaldığı diğer önemli kanal etkisi Doppler etkisidir.

Atış gerçekleştikten sonra füze, yer istasyonundan hızla uzaklaşmaktadır. Bu hız ve mesafeden ötürü, alınan sinyalde faz kayması meydana gelmektedir. Füzedeki gelen sinyalde meydana gelen bu faz kayması, füze hızına bağlı bir fonksiyonla tanımlanmaktadır ve frekans kaymasına neden olmaktadır. Bu frekans kaymasına Doppler etkisi adı verilmektedir.



Şekil 2. 6 Doppler etkisine ait diyagram ve Doppler spektrumu

Örnek olarak; füze sabit bir v hızıyla Şekil 2-6 (a)'daki gibi hareket etmektedir. v_s yer istasyonunun hızı, v füzenin hızı, f füze üstünden yapılan yayın ve f' yer istasyonundan gözlenen frekans olmak üzere:

$$f' = \left(\frac{v}{v \pm v_s} \right) f \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklemden anlaşılacağı üzere füze, yer istasyonuna yaklaşınca almaca gelen sinyalin frekansı artmakta olup, uzaklaşınca almaca gelen sinyalin frekansı azalmaktadır.

2.1.7 Füzede egzozu (plume) zayıflaması

Telemetre alıcı antenin füze yörüngesinin tam arkasına koyulması, füze egzozu sinyali zayıflatma etkisine yol açmaktadır. Motor yapısına ve yakıtın tipine göre sinyalin zayıflama miktarı değişmektedir. Genellikle katı yakıtlı füzelerin egzozları, sıvı yakıtlı füzelerin egzozlarına nazaran sinyali daha az zayıflatmaktadırlar. Bu olayın önüne geçebilmek için telemetre antenini füzenin tam arkasında olacak şekilde yerleştirmemek önem taşımaktadır. Ayrıca telemetre yer istasyonunda yapılacak olan çeşitleme birleştiricisi yöntemiyle egzoz kaynaklı sinyal zayıflamasının önüne geçilebilir.

2.1.8 RF kesintisi

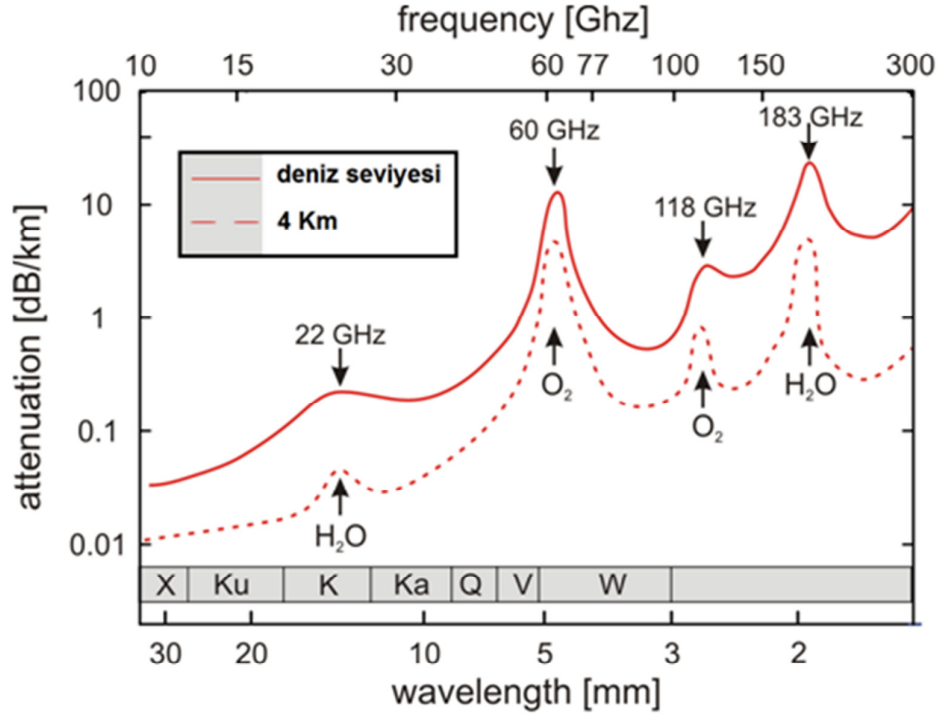
Uzun menzilli ve kıtalar arası uçan füzeler, gittikleri mesafenin uzaklığı dolayısıyla yörüngelerinin büyük kısmında atmosferin dışında, yakıtlarını harcamayarak gitmek durumundadır. Ancak bu füzelerin atmosfere tekrar giriş yaparken, yüksek iyon yüklü gazlar füzenin etrafını sararak RF sinyallerinin yer istasyonuna ulaşmasını engeller. Bu gazların dağılması sonrasında bu iletişim tekrar kurulur. Bu durum birkaç dakika boyunca sürebilmektedir.

2.1.9 Kılavuzlandırma

Bu durum RF sinyallerin bir kılavuz tarafından kontrol edilmişçesine ilerlemesi durumudur. Bu olayın meydana gelmesinin başlıca nedeni havadaki katmanlar arasındaki yoğunluk farklılıklarıdır. Bu yoğunluk farklılıklarına örnek olarak, yavaş sıcak havalarda yere yakın olan hava ile yere uzak mesafede olan hava katmanı arasındaki yoğunluk farklılığı gösterilebilir. Yüksekte uçan füzenin telemetre yer istasyonuna göndermiş olduğu sinyaller, yere uzak olan hava katmanında kalarak o katman boyunca sanki bir tüpün içinde yer alıyormuşçasına ilerler. Bu durum nedeni ile sinyaller istenilen hedefe yani telemetre yer istasyonuna ulaşamayabilmektedir.

2.1.10 Atmosferik soğurma

Serbest uzay kaybına ek olarak, atmosferin elektromanyetik dalgayı soğurma özelliği de sinyal zayıflaması üzerinde etkilidir. Yüksek frekanslarla yapılan iletişimde, havada bulunan H₂O ve O₂, mesafeyle artan kayıplara neden olabilmektedir.



Şekil 2. 7 Atmosferde sinyal zayıflamasına yol açan maddeler ve etki ettikleri frekanslar[5]

2.1.11 Kanal gürültüsü

Bilgi taşıyan sinyaller ortamda ilerlerken üstüne eklenen istenmeyen sinyallere gürültü adı verilmektedir. Gürültü türleri, farklı gruplar altında incelenebilmektedir:

- Isıl gürültü: Ortamın sıcaklığı nedeniyle iletkenlerdeki elektrik yüklerinin rastgele hareket etmeleri ve bu nedenle iletkenin uçları arasında rastgele bir şekilde değişen gerilimlerdir. Isıl gürültü, frekans ekseninde düzgün

dağılıma sahiptir, bu nedenle Beyaz Gürültü olarak da adlandırılır. Şu formül ile değeri bulunabilmektedir:

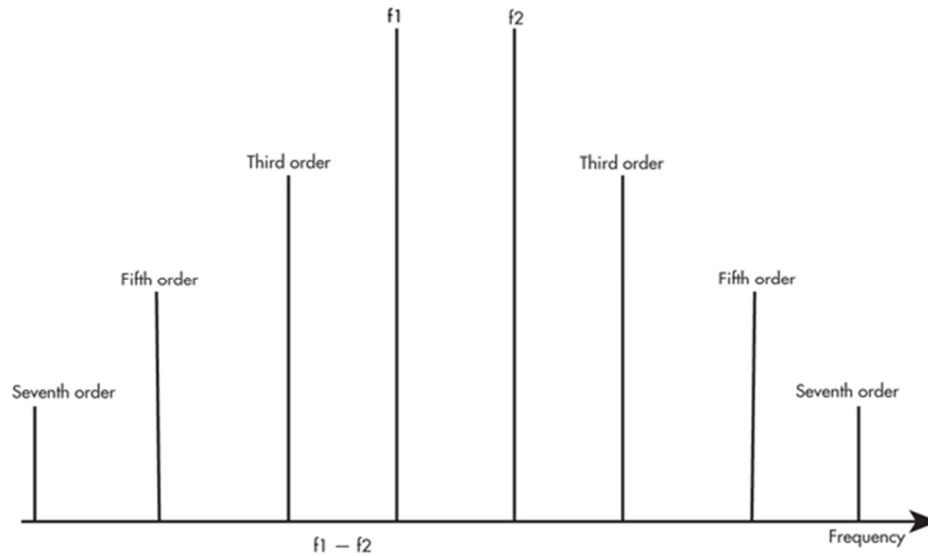
$$N_0 = kTB W \quad (2.9)$$

k: Boltzmann sabiti ($1.38 \times 10^{-21} \text{ J/}^\circ\text{K}$),

B: bant genişliği (Hz),

T: ortam sıcaklığı ($^\circ\text{K}$) olmak üzere.

- İntermodülasyon gürültüsü: Ara modülasyon gürültüsü olarak da adlandırılan bu gürültü türü, göndermeç, almaç veya kanalın lineer olmayan özelliklere sahip olması durumunda doğrusal olmayan elemanın çıkışında istem dışı oluşan ve bilgi taşıyan sinyal ile girişim yapabilen sinyaller nedeni ile oluşur. Bu gürültü, iki farklı frekanstaki sinyalin doğrusal olmayan sistemde karışmaları nedeniyle sistem çıkışında bu frekansların toplamı, farkı ya da bunların katları olan frekanslarda oluşan istenmeyen sinyallere yol açmaktadır.



Şekil 2. 8 İntermodülasyon gürültüsü nedeniyle oluşan istenmeyen sinyaller[6]

- Ortak kanal girişimi (*Co-channel interference*): Bu durum, kablosuz iletişim esnasında aynı frekans bandını kullanan göndermeçlerin neden olduğu çapraz karışımdır. Elverişsiz hava koşulları, yetersiz frekans planlama veya

radyo spektrumunun kalabalıklığı bu duruma neden olabilmektedir. Ancak füze atışlı testleri önceden planlanmış aktiviteler olduğu için telemetre haberleşmesinde bu etki genellikle görülmemektedir.

- Dürtü gürültüsü: Bu tipteki gürültüler çok kısa süreli, beklenmedik ve rastgele elektriksel değişimler nedeni ile oluşmaktadır. Kaynak genellikle yıldırım, şimşek, bozuk elektriksel kontaklar gibi dış elektromanyetik etkilerdir. Dürtü gürültüsü, sayısal haberleşme sistemleri üzerinde oldukça bozucu bir etkiye sahiptir ve veri kaybına neden olabilir. Ancak telemetre iletişimi ve füze atışlı testlerinin yukarıda da sıralanmış niteliklerinden ötürü bu çalışmada bu gürültü dikkate alınmamıştır.

2.2 Telemetre Sistemlerinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri

2.2.1 Frekans kaydırmalı anahtarlama

Frekans Kaydırmalı Anahtarlama yani FSK'da (Frequency Shift Keying), taşıyıcı sinyalin frekansı kullanılarak farklı bilgiler taşıyan sinyaller taşınmaktadır. Frekans Modülasyonu'na (FM) benzer şekilde modülasyon sinyali, sayısal bilgi sinyali ve yerel bir osilatör tarafından $f_c = \omega_c / 2\pi$ frekansında üretilen bir taşıyıcı sinyal bulunmaktadır.

$$s_i(t) = A \sin(\omega_i t) \quad (2.10)$$

$$\omega_i = \omega_c + i \Delta \omega \quad i \in [-M/2, M/2] \quad (2.11)$$

$M=2$ olarak alındığında İkili FSK (Binary FSK) elde edilir.

$$\omega_1 = \omega_c - \Delta \omega \quad (2.12)$$

$$\omega_2 = \omega_c + \Delta \omega \quad (2.13)$$

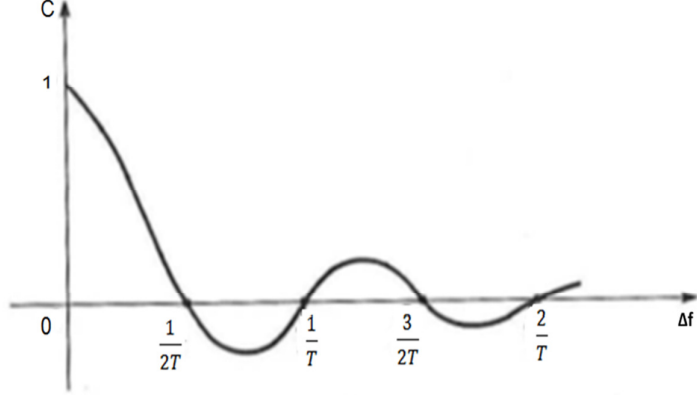
Modülasyon indeksi h , sembol periyodu T ile ilintili bir şekilde, iki sinyal arasındaki farkı ifade etmektedir.

$$h = \frac{(\omega_2 - \omega_1)T}{2\pi} \quad (2.14)$$

' h ' değerine bağımlı olarak ilinti sabiti (*correlation coefficient*) ' c ' bulunmaktadır:

$$C = \frac{\sin(h/2\pi)}{(h/2\pi)} \quad (2.15)$$

Aşağıda ilinti sabitinin frekansa göre grafiği verilmiştir.



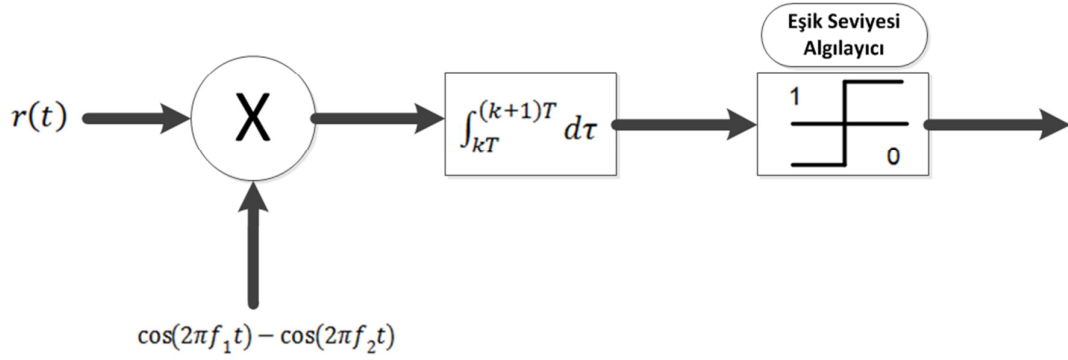
Şekil 2. 9 İkili FSK modülasyonu ilinti sabiti- Δf grafiği [7]

Şekil 2. 9 **İkili FSK modülasyonu ilinti sabiti- Δf grafiği**da görüldüğü gibi dik sinyaller için $h=i/2 \in N$ olmaktadır ve İkili FSK en iyi performansa sahip olduğu zaman h en azdır.

FSK modülasyonu, iki osilatörün modülasyon sinyaline bağlı olarak çoklanmasıyla ya da bir osilatörün frekansının kaydırılmasıyla elde edilebilmektedir.

Demodülasyon İşlemi:

Error! Reference source not found.2-10'da bir BFSK yöntemi için oluşturulan eşvreli çözücü uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 2. 10 Eşevreli FSK modülasyon çözücü

Bir başka açıdan, alıcıdaki ilintileyici (*correlator*) yerine uyumlu süzgeç (*matched filter*) kullanılabilir. Uyumlu süzgeçler, darbe cevapları $h(t)=s_i(-t)$, ve çıkışları sinyallerin konvolüsyonu olan süzgeçlerdir:

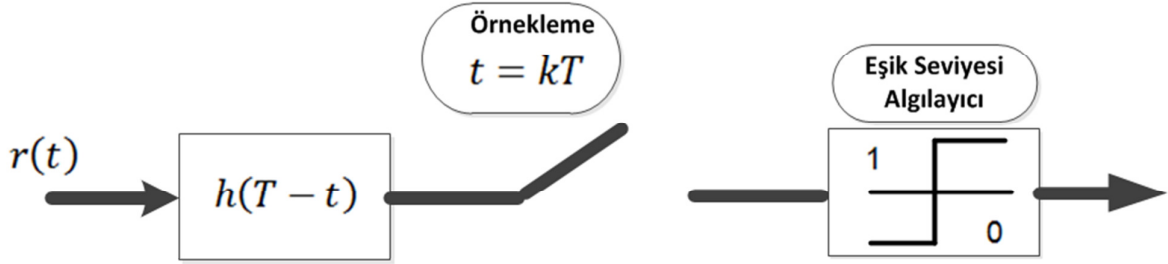
$$\int_0^t r(\tau)s_1(\tau)d\tau \quad (2.16)$$

Çarpıcı bloktan sonra integral alıcı blok olması yerine, süzgeç uygulandıktan sonra $t=T$ sinyal seviyesini alacak bir örnekleyci kullanılır.

Elde edilen değer, ilinti sabiti 'c' ile bağıntılıdır. Şekil 2. 11'de bir alıcıdaki uyumlu süzgeç uygulaması gösterilmiştir.

Darbe cevabı:

$$h(t) = \cos(2\pi f_1 t) - \cos(2\pi f_2 t) \quad (2.17)$$



Şekil 2. 11 Uyumlu süzgeç ile Eşevreli FSK modülasyon çözücü

Eşevresiz oluşturulan FSK ancak eşevresiz olarak çözülebilir. Ancak eşevreli FSK sinyallerinin taşıyıcı yenileme devrelerinden kurtulmak için eşevresiz olarak çözümleri yapılabilmektedir. Bu durumda algılama, sinyalin fazını bilmeden gerçekleştirilir. Fazı bilinmeyen bir sinyal şu şekilde yazılabilir:

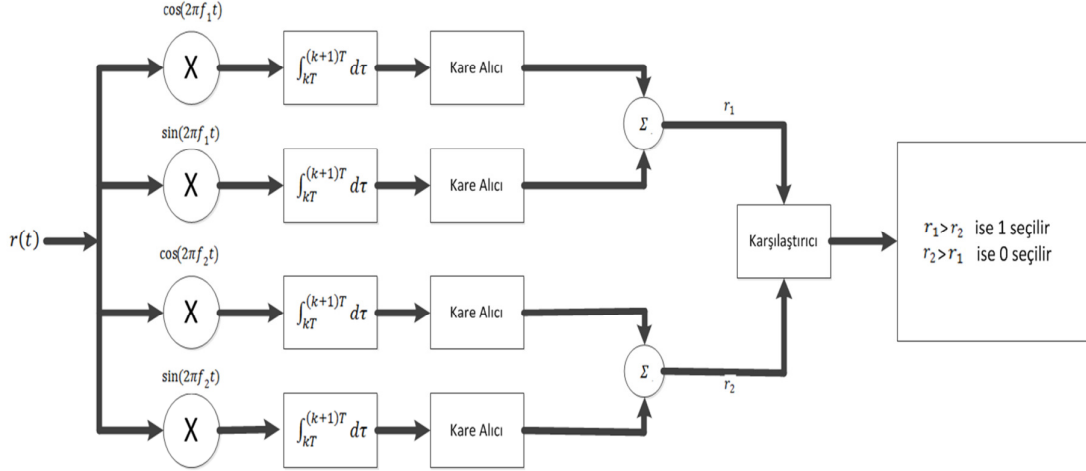
$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_i t + \theta), \quad i = 1,2 \quad (2.18)$$

$$= A \cos(\theta) \cos(2\pi f_i t) - A \sin(\theta) \sin(2\pi f_i t) \quad (2.19)$$

Alınan sinyal iki farklı sinyal olarak ayrılabilir. İntitleyicinin çıkışında $(AT/2)\cos(\theta)$ ve $(AT/2)\sin(\theta)$ elde edilir. Daha sonra elde edilen iki sinyalin kareleri toplanarak fazdan bağımsız bir değere ulaşılır.

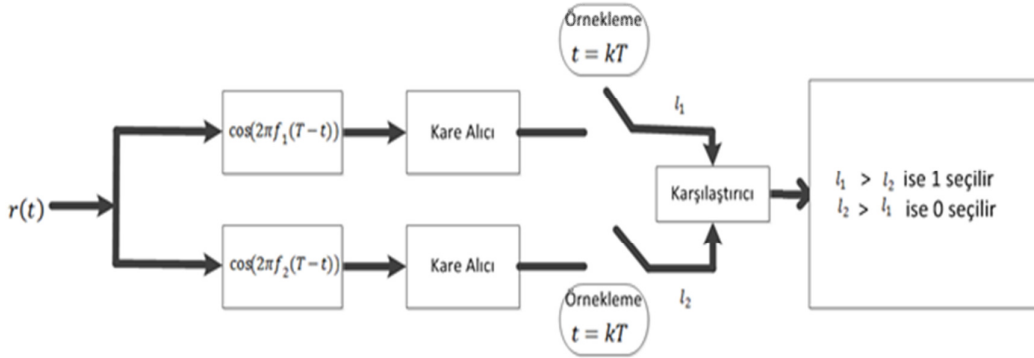
$$\left(\frac{AT}{2} \cos(\theta)\right)^2 + \left(\frac{AT}{2} \sin(\theta)\right)^2 = \frac{A^2 T^2}{2} \quad (2.20)$$

Şekil 2. 12'de eşevresiz algılayıcıya bir örnek verilmektedir.



Şekil 2. 12 Eşevresiz FSK Çözücü, İntitleyici ile

Uyumlu süzgeç ve zarf algılayıcı (*envelope detector*) ile oluşturulan eşdeğer alıcı Şekil 2. 13'de verilmiştir.



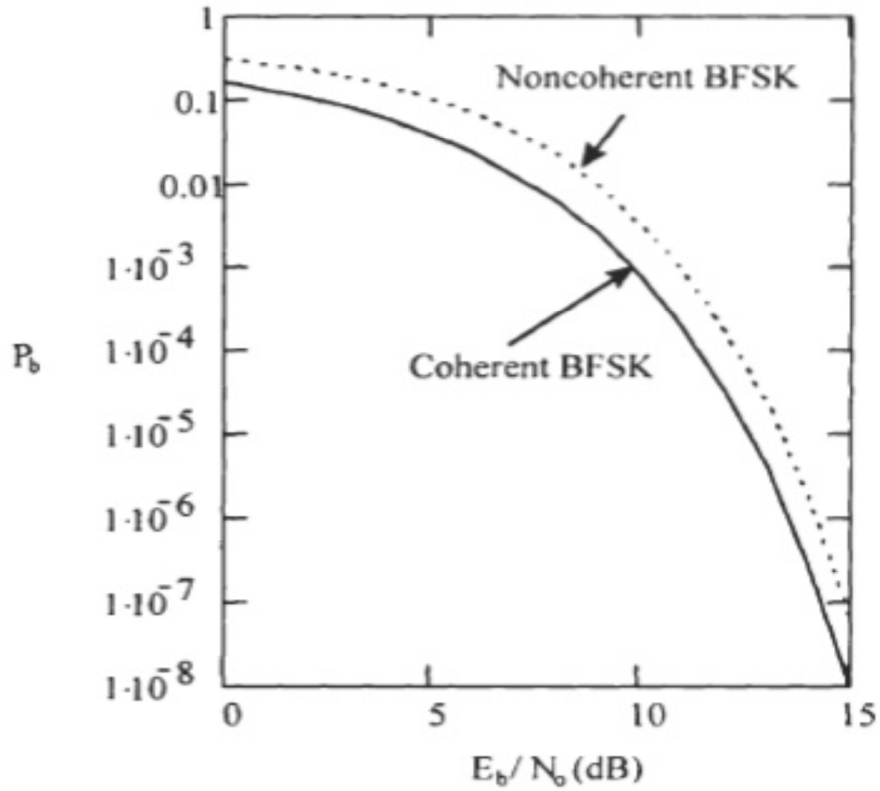
Şekil 2. 13 Eşevresiz FSK çözücü, Uyumlu Süzgeç ile

Birbirine dik olan sinyaller için bir hata olasılığı hesabı;

$$BER = \frac{1}{2} e^{-(E_k/2N_0)} \quad (2.21)$$

Uygulama basitliği açısından, uyumlu süzgeçler f_1 ve f_2 frekanslarında bant geçiren süzgeçler ile değiştirilebilirler. Bu durumda hata performansı her bir bant geçiren filtrenin darbe cevabına bağımlıdır.

Eşevreli özleme, eşevresiz çözülemeye göre 1dB kazanç sağlamaktadır. Ancak taşıyıcı yenileme devresi gereksinimlerinden dolayı daha az tercih edilmektedir.



şekil 2. 14 Eşevreli ve Eşevresiz FSK için BER grafiği [8]

Eşevreli ve eşevresiz iki sistem için de, semboller arası eşzamanlılık gerekmektedir. Bu, uyumlu süzgeçler için kullanılan örnekleyicinin örnekleme zamanının belirlenmesine karşılık gelmektedir.

2.2.2 Faz kaydırmalı anahtarlama

PSK (Phase Shift Keying), aynı frekansa sahip, farklı fazdaki M adet sinyal olarak tanımlanabilir.

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.22)$$

$$\theta_i = \frac{(2i-1)\pi}{M} \quad (2.23)$$

Sembol sayısı M'e bağlı olarak:

- BPSK (Binary PSK), 2 sembol
- QPSK (Quarternary PSK), 4 sembol
- MPSK, M sembol (8-PSK M=8 vb.)

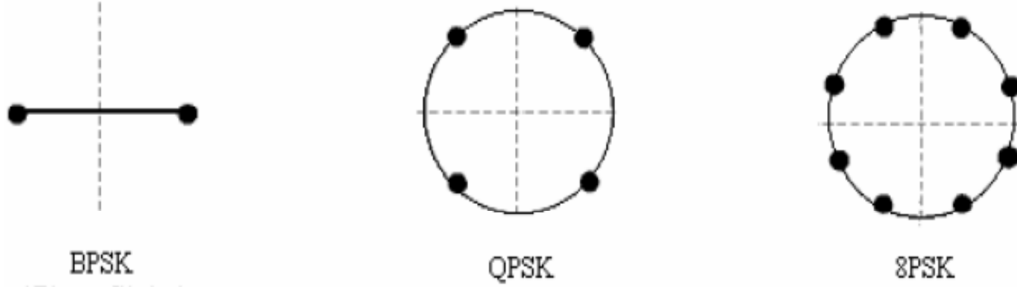
PSK modülasyonu ile oluşturulan $s_i(t)$, uygun orthonormal sinyaller ile ifade edilebilir. Modüle edilmiş sinyal, $N \leq M$ olmak üzere, N adet orthogonal ve normal sinyalin toplamı şeklinde yazılabilir. Ancak alınan sinyalin, N boyutlu sinyal uzayını geren orthonormal bazlar üzerindeki izdüşümünün belirlenmesi, karar verme için gereklidir.

Aşağıda belirtilen sinyaller orthonormal bazlardır:

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.24)$$

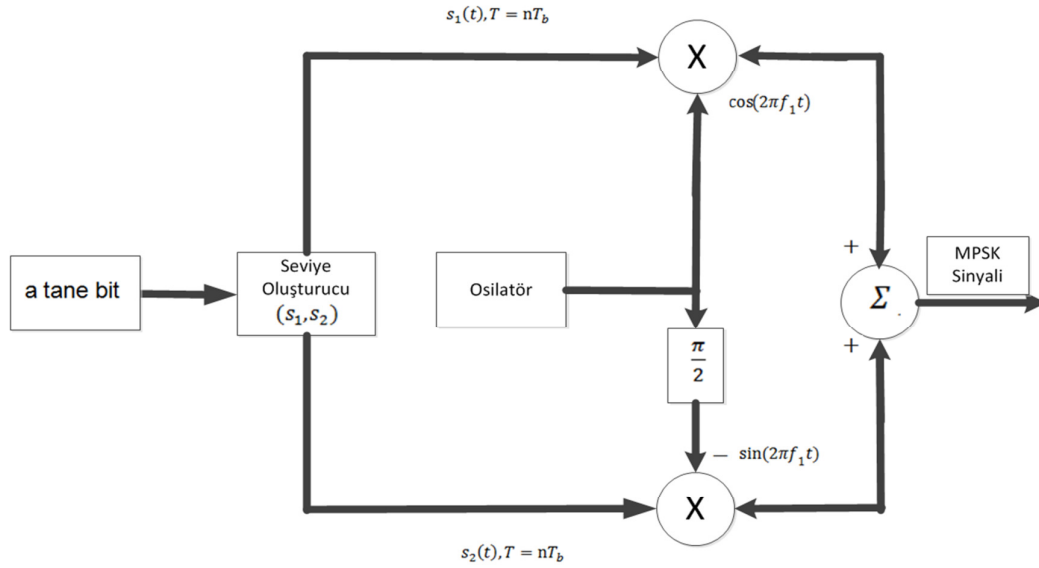
$$\phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.25)$$

Tüm PSK sinyalleri bu iki orthonormal sinyal ile ifade edilebilmektedir. Böylece sinyaller grafiksel olarak iki boyutlu koordinat sistemi üzerinde sinyal takımları şeklinde gösterilebilmektedir. Şekil 2. 15'de PSK örnekleri gösterilmiştir:



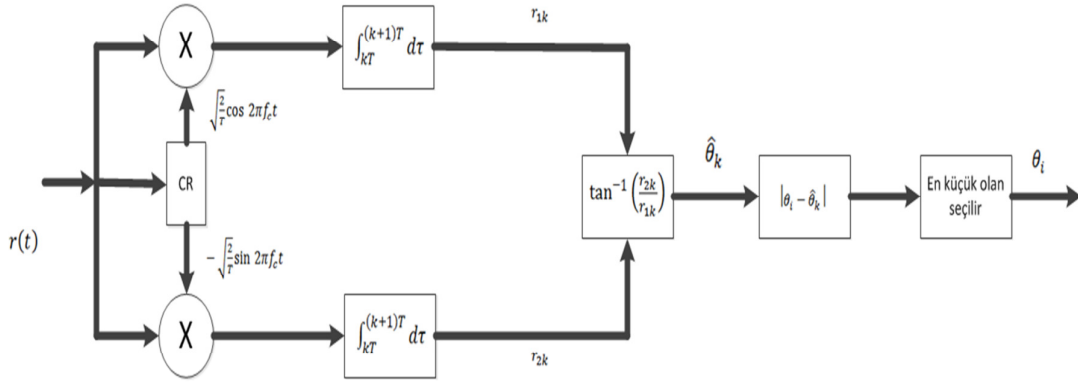
Şekil 2. 15 Başlıca PSK Takımları

Şekil 2. 16'da genel bir PSK modülatör gösterilmiştir. Modülatör $\phi_1(t)$ ve $\phi_2(t)$ sinyallerini oluşturmak için, $\pi/2$ gecikmesine neden olan geciktiriciye sahip bir yerel osilatör kullanmaktadır. Bu sinyaller I ve Q sinyalleri ile sırasıyla çarpılırlar. I ve Q sinyalleri seviye üreticiden gelmektedirler ve ikili bilginin I ve Q genliklerine aktarılması ile sembolün oluşmasını sağlarlar. Bu genliklerin seviyelerine bağlı olarak, bu uzayda yer alan herhangi bir sembol üretilebilir.



Şekil 2. 16 Genel PSK Modülatör

PSK modülasyon çözümü her zaman eşvrelili olmaktadır. PSK için eşvrelili modülasyon çözümü Şekil 2. 17'de gösterilen blok temel alınarak şekillenmektedir.



Şekil 2. 17 PSK Modülasyon Çözümü

Yapı, modülatörlerdeki yapıya çok benzemektedir. Ancak fark olarak osilatör yerine taşıyıcı yenileme devresi (*carrier recovery circuit, CR*) kullanılmaktadır. Bu devre, eşvrelili modülasyon çözümü yapabilmek için modüle edilmiş sinyalden taşıyıcı sinyali elde etmek için kullanılmaktadır. $\phi_1(t)$ ve $\phi_2(t)$ sinyallerinin her ikisi de gelen sinyal ile çarpılarak, I ve Q sinyalleri elde edilir. Bu sinyaller integral alıcı bloklardan geçirilirler. Daha sonra sinyaller sembol periyodu ile örneklenirler ve şu işlem yapılır:

$$\tan^{-1} \left(\frac{r_{2k}}{r_{1k}} \right) \quad (2.26)$$

Böylelikle sinyalin fazı belirlenir ve 'en yüksek olasılık' kriteri uygulanarak en olası sembol belirlenir.

PSK'nin doğrusal yapısı, iki boyutlu uzayda gösterimine izin vermektedir ve böylelikle spektral özelliklerinin incelenmesi kolaylaşmaktadır. Spektral yoğunluk şu şekilde tanımlanabilmektedir:

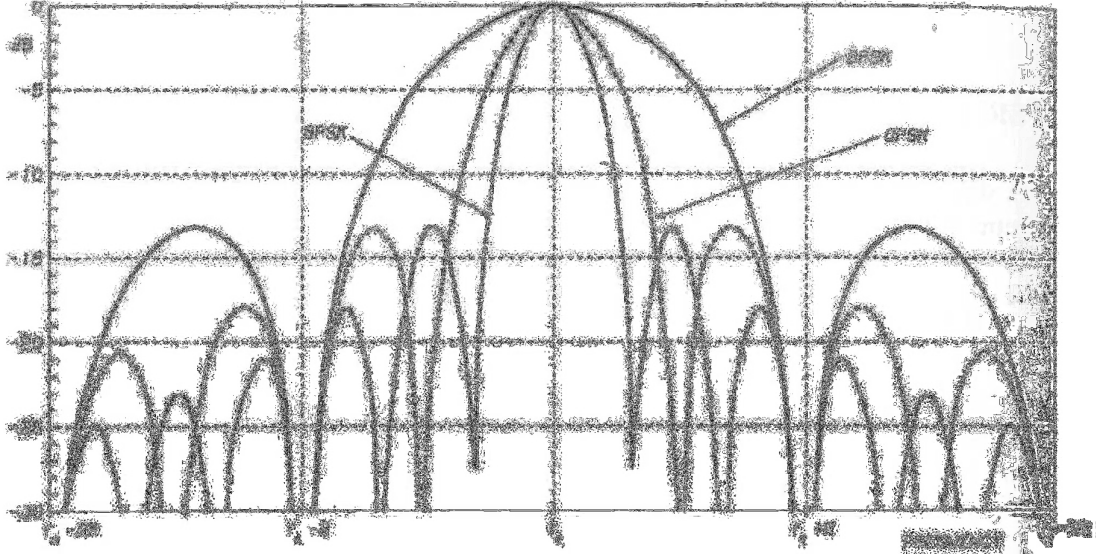
$$S_{PSK}(f) = \frac{P}{S} \left(\frac{\sin[\pi(f-f_c)/S]}{\pi(f-f_c)/s} \right)^2 \quad (2.27)$$

P: taşıyıcı sinyalin gücü,

S: sembol hızı olmak üzere.

Şekil 2. 18, BPSK, QPSK ve 8-PSK için spektral güç yoğunluğunu göstermektedir. Faz seviye sayısı M arttıkça, sembol hızının bit hızı ile ilişkili olmasından dolayı spektrum daralmaktadır.

(OQPSK ve $\pi/4$ QPSK, QPSK ile aynı spektral özelliğe sahiptir.)

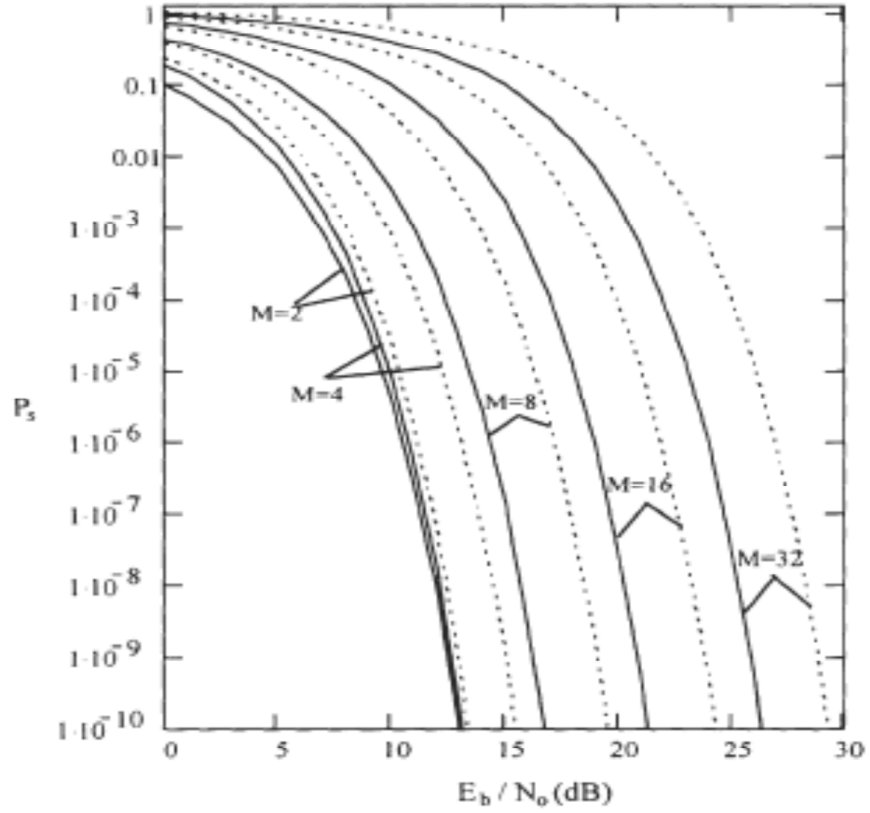


Şekil 2. 18 MPSK Spektral Güç Yoğunluğu [5]

Faz sayısının arttırılmasıyla RF bant genişliğinde sağlanan iyileştirme, gerekli BER değerini tutturabilmek için S/N oranı ile dengelenmektedir.

BER için en iyi performansı eşevreli modülasyon çözücüler vermektedir. Şekil 2. 19'da MSPK ve DMPSK için Sembol Hata Oranları verilmektedir. BER, Sembol Hata Oranı değeri semboldeki bit sayısına bölünerek bulunabilmektedir.

$$BER = \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (2.28)$$



Şekil 2. 19 MPSK Sembol Hata Oranı [5]

- BPSK

$$BER_{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.29)$$

- QPSK ve OQPSK

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.30)$$

- MPSK

$$BER_{DQPSK} = \frac{1}{n} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{n \frac{E_b}{N_0}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right) \quad (2.31)$$

Eşevreli modülasyon çözümü, alıcıdaki referans sinyalin fazı ve frekansının, alınan sinyalin fazı ile eşzamanlı olmasını gerektirmektedir. Taşıyıcı senkronizasyonu, taşıyıcı yenileme devresi ile alıcının almış olduğu gürültülü sinyalden faz ve frekans bilgilerinin alınıp referans sinyal üretilmesi ile olur. Buna ek olarak sembol senkronizasyonu da gerekmektedir. Bu da, alınan sinyalin yerel saat frekansını kontrol etmek için kullanan saat yenileme devresi (*clock recovery circuit*) ile gerçekleştirilmektedir.

2.3 Telemetre Sistemlerinde Kullanılan Kanal Kodlama Teknikleri

Telemetre uzaktan haberleşme sistemi tek yönlü haberleşme sistemidir. Bu yüzden dijital bilgilerin hatasız bir şekilde alıcıya gönderilmesi için düzeltme tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Telemetrede göndermeç sisteminde (füze üstünde) kullanılan ileri hata düzeltme tekniklerinin (*Forward Error Correction, FEC*) yapısı kolay olmaktadır fakat almaç kısmında yani telemetre yer istasyonunda bu sistem çok daha karmaşık bir yapıdadır.

FEC kodlama şeması iki ana şemadan oluşmaktadır.

1.Blok Kodlama

2.Evrişimsel Kodlama

Blok kodlamada, dijital bilgi mesajı k bitlik bloklara bölünmektedir. Böylelikle 2^k adet farklı mesaj tipi oluşmaktadır. Kodlayıcı k 'lık mesajlar ile n 'lik kod kelimesi oluşturmaktadır. 2^k 'lık mesajlar ile 2^n lik kodlayıcı çıktısı oluşmaktadır. Kod kelimelerinin kümesi (n,k) 'lık blok kodlarıdır. Bunların oranı $R=k/n$ kod hızı diye tabir edilmektedir. Hamming kodlama yöntemi, BCH kodlama yöntemi, Reed-Solomon kodlama yöntemi blok kodlama tiplerine örnek olarak verilebilir.

Evrişimsel kodlama tekniğinde konveksiyonel kod k bitlik bilgi mesajını alır ve n bitlik kod kelimesi oluşturur. Evrişimsel kodlama ile blok kodlamanın arasındaki temel fark evrişimsel kodlama tipinde m 'inci dereceden bir hafıza olmasıdır. Evrişimsel kodlama tipindeki kodlanan kelime k bitlik mesaja ve önceki m 'lik mesaj bloklarına bağlıdır. Evrişimsel kod tiplerine, Turbo kodlama de örnek olarak

verilebilir. Telemetre uygulamalarında kullanılan evrişimsel kodlama teknikleri ile BPSK, QPSK, FSK yöntemlerindeki BER ve bant genişliği performansları karşılaştırılacaktır.

2.3.1 Evrişimsel kodlama ve performansı

Evrişimsel kod ileri hata düzeltme tekniklerinden (FEC) biridir. FEC kodlama tekniği, dijital bilgi mesajına fazladan bit ekleyerek kanal kapasitesini iyileştiren bir tekniktir. Seri bilgi gönderiminde genellikle Evrişimsel kodlama metodu kullanılmaktadır. Evrişimsel kodlama tekniği üç farklı parametreden oluşmaktadır (n,k,m) . n çıkan bit sayısı, k giren bit sayısı, m hafızadaki kayıt sayısı. k/n kod oranı olarak tanımlanır. Kısıtlayıcı uzunluk K , evrişimsel kodlama tekniğinde önemli bir yere sahiptir. K hafızadaki kodlayıcıdaki bitlerin çıkış bitlerinin n nasıl etkileyeceğini temsil etmektedir. Kısıtlayıcı uzunluğun ifade şekli $K=m+1$ olarak tanımlanmaktadır. K uzunluğundaki bir bilgi mesajı uzunluğunun kod kelimesi uzunluğu $N= n(1+m)$ olarak tanımlanır.

Olası kodlayıcılar kod hızına, polinom yapısına ve kısıtlama uzunluğuna göre tanımlanmıştır. Çizelge 1 'de düşük hızdaki optimal Evrişimsel kodlama yöntemi kısıtlayıcı uzunluk $k=7$ olarak görülmektedir. Burada NASA standardı olan $(2,1,6)$ Evrişimsel kodlama yöntemini kullanılmaktadır.

Çizelge 1 Evrişimsel kodlayıcı diyagramları [9]

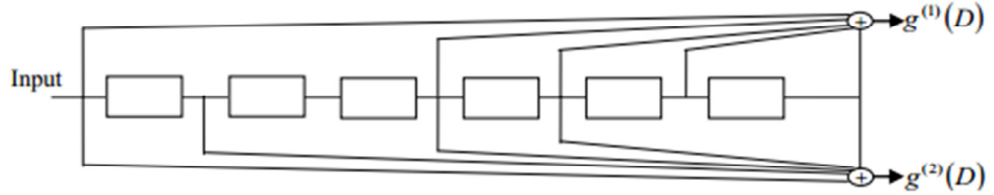
	Code Rate 1/2	Code Rate 1/3	Code Rate 1/4	Code Rate 2/3
$g^{(0)}$	$(117)_8=1\ 001\ 111$	$(117)_8=1\ 001\ 111$	$(117)_8=1\ 001\ 111$	$h^{(2)} = (123)_8$
$g^{(1)}$	$(155)_8=1\ 101\ 101$	$(127)_8=1\ 010\ 111$	$(127)_8=1\ 010\ 111$	$h^{(1)} = (147)_8$
$g^{(2)}$		$(155)_8=1\ 101\ 101$	$(155)_8=1\ 101\ 101$	$h^{(0)} = (121)_8$
$g^{(3)}$			$(171)_8=1\ 111\ 001$	

(a) Hız 1/2 Evrişimsel kodlama için polinom oluşturma yöntemi şu şekildedir:

$$g^{(0)}(D) = 1 + D^3 + D^4 + D^5 + D^6 \quad (2.32)$$

$$g^{(1)}(D) = 1 + D + D^3 + D^4 + D^6 \quad (2.33)$$

Oluşturulan matris $g(D) = [g_1^{(0)}(D); g_1^{(1)}(D)]$ şeklinde olmaktadır.



Şekil 2.20 Hız 1/2 Evrişimsel kodlama diyagramı

(b) Hız 2/3 Evrişimsel kodlama için polinom oluşturma yöntemi ise şu şekildedir:

$$g_1^{(0)}(D) = 1 + D^4 + D^6 \quad (2.34)$$

$$g_1^{(1)}(D) = 0 \quad (2.35)$$

$$g_1^{(2)}(D) = 1 + D + D^4 + D^6 \quad (2.36)$$

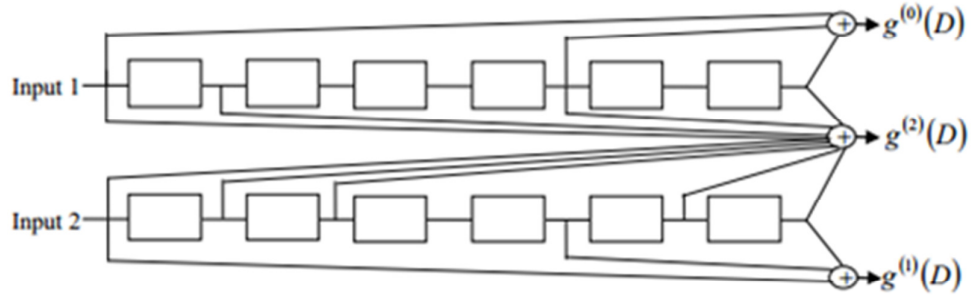
$$g_2^{(0)}(D) = 0 \quad (2.37)$$

$$g_2^{(1)}(D) = 0 \quad (2.38)$$

$$g_2^{(1)}(D) = 1 + D^4 + D^6 \quad (2.39)$$

$$g_2^{(2)}(D) = 1 + D + D^2 + D^5 + D^6 \quad (2.40)$$

Oluşturulan matris $g(D) = [g_1^{(0)}(D) g_2^{(0)}(D); g_1^{(1)}(D) g_2^{(1)}(D); g_1^{(2)}(D) g_2^{(2)}(D); g_1^{(3)}(D) g_2^{(3)}(D)]$ şeklinde olmaktadır.



Şekil 2. 21 Hız 2/3 Evrişimsel kodlama diyagramı

Evrişimsel kodlama çözümleyicisi

Viterbi algoritması, Evrişimsel kodlayıcıyı çözümlemek için kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk olarak bir trellis diyagramı inşa edilerek oluşturulur. h uzunluğundaki bir dijital bilgi dizinini çözmek için trellis diyagramı $h+m+1$ adet zaman parçası içermelidir. Viterbi çözümleyicisi, tümü sıfır olan bir durumla başlayan ve tümü-sıfır bir durumla biten durdurulmuş bir kod varsayımı kullanır. Yani, ilk m veya son m adet zaman parçasında her duruma geçilemez. Ancak trellis diyagramının orta kısmında her duruma geçmek mümkündür. Her bir duruma, 2^k adet toplam dal girmek veya çıkmaktadır. Çözümleyici, en düşük metriğe sahip trellis'den başlayarak geriye doğru bir yol izler ve bu yolla alınan kod kelimesinin çözümlenmesi sağlanır. Her bir zaman anında, önceden kaydedilmiş yol metriğine 2^k adet dal metriği eklenir, her bir duruma giren 2^k adet yolun metrikleri karşılaştırılır ve en düşük metrikli yol, yani 'survivor' seçilir. Her bir durumun survivor'ı metrikle beraber kaydedilir. Viterbi algoritması, şu adımlar ile tanımlanabilir[10]:

Adım-1: $t=m$ zaman anında, her bir duruma giren yolun kısmi metriği hesaplanır. Yol (survivor) ve metrik, her bir durum için kaydedilir.

Adım-2: t anı, $t+1$ olarak ilerletilir. Bir önceki zaman anındaki bağlantılı survivor'a, o duruma giren dala ait metrik eklenerek, bir duruma giren 2^k adet yola ait kısmi

metrik hesaplanır. Her bir durum için, o duruma giren 2^k adet yol karşılaştırılarak en düşük metriğe sahip yol, yani survivor, seçilir, metriği ile kaydedilir ve diğer bütün yollar elenir.

Adım-3: Eğer $t < h+m$ ise, Adım-2 tekrarlanır. Eğer t , $h+m$ değerine ulaştıysa durulur.

Hamming mesafesi, bu çözümlenme için bir metriktir. Bahsi geçen çözümlenme algoritması PSK ve FSK modülasyon türleri için aynıdır.

Çözümlenmenin uygulanmasında, 'hard decision' ve 'soft decision' olarak iki farklı seçenek bulunmaktadır. Hard decision kullanıldığında, almaca ulaşan ve göndermeç tarafından gönderilen bitlere denk gelen gerilim seviyeleri sayısal hale getirilmekte, bit dizisine dönüştürülmekte ve sonrasında kodlama çözümü yapılmaktadır. Soft decision tekniğinde ise, gelen gerilim değerleri sayısal hale getirilmeden önce kod çözümlenmektedir. Tez kapsamındaki simülasyonda bu iki seçenek de uygulanmakta ve sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2.3.2 Golay kodlama yöntemi

Golay kodlama yöntemi, lineer ikili blok kodlama yöntemleri arasında büyük bir öneme sahip olan ve haberleşme uygulamalarında sık kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, ismini kendisini bulan ve çalışmalarını 1949 yılında yayınlayan Marcel J. E. Golay'dan almaktadır. Golay'ın çalışmaları, gerçek dünyada pek çok pratik uygulamada görülmektedir, örneğin Voyager uzay aracı programında 1980'li yıllardan bu yana Golay yöntemleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi de, Golay kodlarının matematiksel olarak mükemmel veya mükemmele yakın olan yapılarıdır.

İkili Golay kodu

Bazı tanımların anlamının bu noktada netleştirilmesi, ileride bahsi geçecek hususlar açısından faydalı olacaktır. Ağırlık, ikili bir kelimedede, bitler içinde bulunan

1'lerin sayısıdır. Hamming uzaklığı ise, iki adet ikili sayının arasındaki farklı bit sayısıdır. Bu uzaklık, sayılara XOR işleminin uygulanması ile bulunur.

İkili Golay kodunun yapısına bakıldığında, bir kod kelimesinin 12 adet veri bitine 11 adet kontrol biti eklenmesi ile oluştuğu, kontrol bitlerinin CRC yapısında da olduğu gibi modulo-2 bölme işlemi ile türetildiği görülmektedir. Bu yapı için 23 toplam bit sayısını, 12 ise veri biti sayısını göstermek üzere Golay [23,12] notasyonu kullanılmaktadır. Her bir kod kelimesinin uzunluğu 23 olduğu için 2²³, yani 8,388,608 adet farklı ikili değerden bahsedilebilir. Ancak, 12 bit uzunluğundaki veri bitlerinin temsil ettiği her değer için tek bir 11'li kontrol biti seti olduğu için yalnızca 2¹¹, yani 4096 adet geçerli Golay kod kelimesi bulunmaktadır. Bu kod kelimeleri, aralarındaki Hamming uzaklığı kadar mesafe ile ayrılmış durumdadır ve yapılan çalışmalara göre herhangi iki Golay kod kelimesi arasında 7 veya daha fazla farklı bit bulunmaktadır. Dolayısıyla matematiksel olarak Golay kodunun minimum uzaklığını 7 olarak belirtmek ve düzeltebileceği maksimum hata sayısını $(d-1)/2$ eşitliğinden 3 bit olarak hesaplamak yanlış olmayacaktır. [8]

Golay kodunun daha kuvvetli olması için çoğu zaman genel bir parite biti de kod kelimesine eklenmekte ve bu durum Golay [24,12] notasyonu ile gösterilmektedir. Bu ek bit ile, tek sayı kadar olan tüm bit hataları ve 4 bitlik hatalar kod tarafından algılanabilmektedir.

Golay kodları hatayı teşhis etmek için kullanıldığında, 24 bitlik bir kod kelimesinde en fazla 6 adet bit hatasını algılayabilmektedir. Hata düzeltme performansı ise üç bit ile sınırlıdır. Dolayısıyla, hata teşhis etme performansı yüksek olmakla beraber, hata düzeltme yeteneğinin sınırlı olduğu da Golay kodlarının kullanımında göz önüne alınması gereken bir durumdur.

Hata düzeltme kodları içerisinde mükemmel kodlar olarak adlandırılan kodlar, tüm geçersiz kod kelimelerini düzeltme esnasında geçerli bir kod kelimesine dönüştürebilen kodlama tekniklerini içermektedir. Golay kodları, mükemmel kodlar içerisinde sıfır dışındaki çözümler içeren tek kodlama tekniği olarak bilinmektedir. Ancak bu, daha önce de belirtildiği gibi matematiksel bir mükemmelliği

belirtmektedir. Gerçekte, Golay kodları hatalı olduğu teşhis edilen kod kelimelerini en yakın gördüğü geçerli kod kelimesi olarak düzeltmekte ancak diğer kodlama teknikleri gibi yanlış bir geçerli kelimeyi seçebilmekte ve BER açısından belirli bir sınırın altına düşmemektedir.

Golay kod kelimelerinin dairesel invaryansa sahip olması, yani 23 bitlik Golay kodu dairesel bir şekilde herhangi bit sayısı kadar kaydırıldığında başka bir geçerli Golay kelimesi elde edilmesi, 23 bitlik bir Golay kelimesi tersine döndürüldüğünde yine geçerli Golay kod kelimesi elde edilmesi de bilinmesi faydalı olabilecek özelliklerdendir [11].

Golay kodlamasının uygulanması

Golay kodlama, tıpkı CRC gibi modulo-2 bölme işlemi kullanır. Ancak her bir kelimedede en fazla 12 veri biti bulunabileceği için, verinin 12 bitlik paketlere bölünüp kodlanması gerekmektedir. Kodlama esnasında kullanılan karakteristik polinomlar ise şunlardır:

$$g_1(x) = X^{11} + X^9 + X^7 + X^6 + X^5 + X + 1 \quad (2.41)$$

$$g_2(x) = X^{11} + X^{10} + X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + 1 \quad (2.42)$$

Bu polinomlar içinden seçilen bir tanesi, ters çevrilmiş veri bitlerinin başına eklenmekte, sona 11 adet sıfır eklenmekte ve kodlama esnasında veri bitleri ile XOR işlemine, modulo-2 bölme işlemi için tabi tutulmaktadır.

Golay kodlamanın çözülmesi

Golay ile kodlanmış bilgilerin çözümlenmesinde hataların düzeltilmesi için kullanılan algoritma şu şekildedir:

Adım-1: Kod kelimesinin sendromu bulunur. Eğer sıfır ise (yani herhangi bir hata yoksa) 5. adıma geçilir. Eğer gözden geçirilmesi gereken bir bit ters çevrilmiş ise 3. adıma, diğer durumda 2. adıma geçilmelidir.

Adım-2: Eğer sendromun ağırlığı 3 veya daha azsa, sendrom hata dizilimine uyumludur ve hataların XOR işlemi ile kelimedenden ayıklanması için kullanılabilir. Bu durumda 6. adıma geçilmeli, diğer durumda 3. adıma geçilmelidir.

Adım-3: Sendrom ağırlığı 1 veya 2 ise, sendrom hata dizilimine uyumludur ve hataların XOR işlemi ile kelimedenden ayıklanması için kullanılabilir. Bu durumda hatalar çıkartılmalı ve 6. adıma geçilmeli, aksi durumda 4. adıma geçilmelidir.

Adım-4: Kod kelimesinden bir deneme biti ters çevrilir ve 1 bitlik hata elimine edilmeye çalışılır. Eğer 23 bitin tamamı ters evrildiyse ve her biri için bir kere deneme yapıldıysa 5. adıma, diğer durumda 3. adıma gidilir.

Adım-5: Kod kelimesi dairesel olarak sola doğru bir bit kaydırılır ve 1. adıma gidilir.

Adım-6: Kod kelimesi, eğer ihtiyaç varsa, tekrar orijinal pozisyonuna getirilir. [12]

2.4 Telemetre Sisteminin Servis Kalitesi

Servis kalitesi, özellikle ticari iletişim uygulamalarında müşteri tarafından talep edilen, servis sağlayıcı tarafından sağlanacağı belirtilen, servis sağlayıcı tarafından sağlanabilen veya sağlanamayan ve müşteri tarafından alınan servis kalitesi metriklerinin arasındaki döngüyü tanımlayan bir kelimedir. Belirleyici olarak iletişime ait hız, doğruluk, ulaşılabilirlik, güvenilirlik, güvenlik gibi nitelikler değerlendirilmektedir. [9]

Telemetre uygulamalarında ticari iletişim servislerinden farklı olarak birden fazla kullanıcının aynı kanaldan haberleşmesi veya binalar nedeniyle iletişim kalitesinin düşmesi gibi etkiler, atışlı testlerin özel atış alanlarında yapılması, aynı anda sadece tek füzeden veri alınması gibi nitelikleri nedeniyle gözlemlenmemektedir.

Buna karşın, bant genişliği, verideki gecikme, hata oranı, sinyalin istikrarlı gözlenebilir olması gibi parametreler son derece önemlidir.

Bant genişliğinin verimli kullanılması adına füzeden gelen veriler uygun formatlara getirilmekte, modülasyon tipi belirlenirken bant genişliğine olan etkileri dikkate alınmaktadır. Bant genişliğinin düşük olması, yakın mesafelerde benzer frekanslı sinyallerin girişim etkilerinden kaçınmak ve telemetre gibi askeri uygulamalar için belirli bir süreliğine tahsis edilmiş frekansları verimli kullanmak adına önemlidir.

Gecikme ise, atış test anında yaşanabilecek herhangi bir beklenmedik probleme zamanında müdahale edilmesini etkileyen bir unsurdur. Örneğin, gözle teşhis edilemeyen bir hata durumunda füzenin en kısa zamanda ve hasar yaratmadan imha edilebilmesi için iletişimin düşük gecikmeye sahip olması avantaj sağlamaktadır.

Telemetre iletişimi için kabul edilebilir kalitede, mümkün olduğunca düşük bant genişliği kullanılarak, en yüksek hızda veri transferinin sağlanması gerektiği bilinmektedir. Performansın belirlenmesi için bahsi geçen özelliklerin değerlendirilme ve sağlanma kriterlerinin açıklanması gerekmektedir.

2.4.1 Bit hata olasılığı

İletimin kalitesi, Bit Hata Olasılığı (BER, Bit Error Rate), ile tanımlanmaktadır.

Bir bit başına düşen enerji ile gürültü yoğunluğu (E_b/N_0) şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{(S/R_b)}{(N/\Delta f)} = \frac{(S\Delta f)}{(NR_b)} \quad (2.43)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S \cdot \Delta f}{k T_T \Delta f R_b} = \frac{S}{N_0 R_b} \quad (2.44)$$

İkili (*binary*) haberleşme sistemlerinin BER değerlendirmesi yapılırsa:

$$p(\text{yanlış karar}|s_1) = p(\text{yanlış karar}|s_2) \quad (2.45)$$

Bu durumda;

$$BER = p(\text{yanlış karar}) = p(\text{yanlış karar}|s_i) \quad (2.46)$$

Olasılık değerinin tanımlamalarından yola çıkarak hesaplandığında:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_{s1} + E_{s2} - 2c\sqrt{E_{s1}E_{s2}}}{N_0}} \quad (2.47)$$

Tüm sembollerin eşit enerjiye sahip olduğu durum için:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b(1-c)}{N_0}} \quad (2.48)$$

elde edilir.

Link marjini (*link margin*) ve link bütçesi (*link budget*) tanımlamaları da BER'in değerlendirilmesi açısından önemlidir. Link marjin, belirli bir BER değeri için ihtiyaç duyulan SNR ile gerçekte sağlanabilen SNR arasındaki farklılıktır.

$$LM(dB) = \frac{E_b}{N_0}(dB) - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{BER} (dB) \quad (2.49)$$

2.4.2 Sinyal gürültü oranı

Füze fırlatıldıktan sonra telemetre yer istasyonunun füzenin göndermiş olduğu sinyalleri ne kadar takip edebileceğini hesaplamak için bütçeleme analiz çalışmaları yapılır. Bunu hesaplamak için ilk olarak almaçtaki sinyal gürültü oranının hesaplanması gerekmektedir.

Alıcıya ulaşan sinyalin gücünün gürültüye oranı bulunurken, alıcının hangi noktasında değer hesaplandığı çok önemlidir. Sayısal demodülatörün bulunduğu kısımda sinyal gürültü oranı, sayısal modülasyon sonucuna bağlı BER ve kanalın bant genişliğini ölçmek gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Füzeden yapılan telemetre yayını tek yönlüdür ve yerdeki yer istasyonu sadece sinyali alma durumundadır. Füzeden çıkan sinyal gücü S ve alıcıya gidene kadar sinyalin maruz kalmış olduğu dış etkenlerden ötürü oluşan gürültü N ile gösterecek olursak sinyalin gücünün gürültüye bölümü bize sinyalin bozulması hakkında bilgi vermektedir.

3 DONANIM

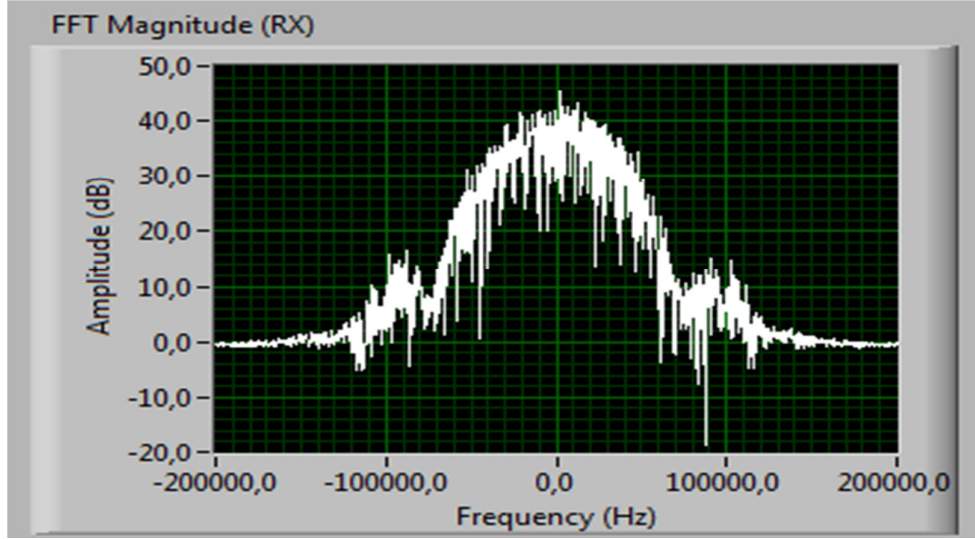
Donanım gerçeklemesi olarak, gerçek bir telemetre vericisinin yayını National Instruments'in programlanabilir PXI sistemi ile alınıp simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak, tez kapsamında geliştirilen simülasyon doğrulanmıştır. Ayrıca, alınan yayındaki sayısal veriler özömlenmiştir. Bu yolla, telemetrenin göndermiş olduğu basınç verileri özömlenen verilerle karşılaştırılmış ve verilerin sağlıklı bir şekilde alındığı görölmüştür.

Geliştirilen yazılım ile S-bant tümyönlü anten aracılığı ile telemetre göndermeç sisteminden gelen telemetre yayını alınmıştır. Bu sinyale FSK (frekans kaydırmalı modülasyon) uygulanmış olduğundan dolayı sinyalin önce taşıyıcı sinyalden arındırılıp bilgi taşıyan sinyalin elde edilmesi gerekmektedir. Demodülasyon işleminde geçen sinyal, frekansı düşürölerek ilk önce ara frekansa (IF), daha sonra taban bant sinyaline indirgenir. Bu aşamada sinyal analogdan sayısala çevrilmiştir. Sayısal sinyal PCM kodlanmış şekilde olduğundan dolayı, sayısal sinyale bit eşleme işlemi yapılmıştır. Belirli bir seviyenin üstündeki sinyale 1 ve belirli bir seviyenin altındaki değere ise 0 değeri atanmıştır.

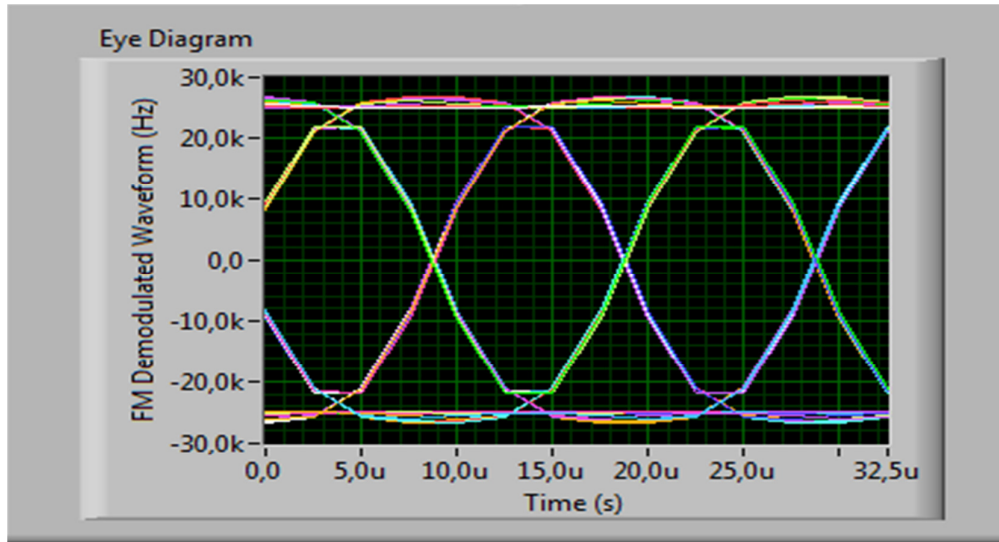
Sinyal sayısal bir bit dizisi haline getirilmiş olup bu dizide ereve senkronizasyon kelimesi arattırılmış, bu yolla ereve başlangıçları göröllebilmış ve yayın istenilen bit formatına getirilmiştir. Yani, donanım tasarım ve uygulaması sonucunda veri gerçek zamanlı alınmış ve uygun şekilde görüntölenebilmiştir. ereve senkronizasyon kelimesinin ardından gelen bit dizisi alınmış ve görüntölenebilmiştir. Yapılan işlem sırası aşağıda blok diyagram üzerinde gösterilmiştir:



Şekil 3. 1 Uygulama Blok Diyagramı

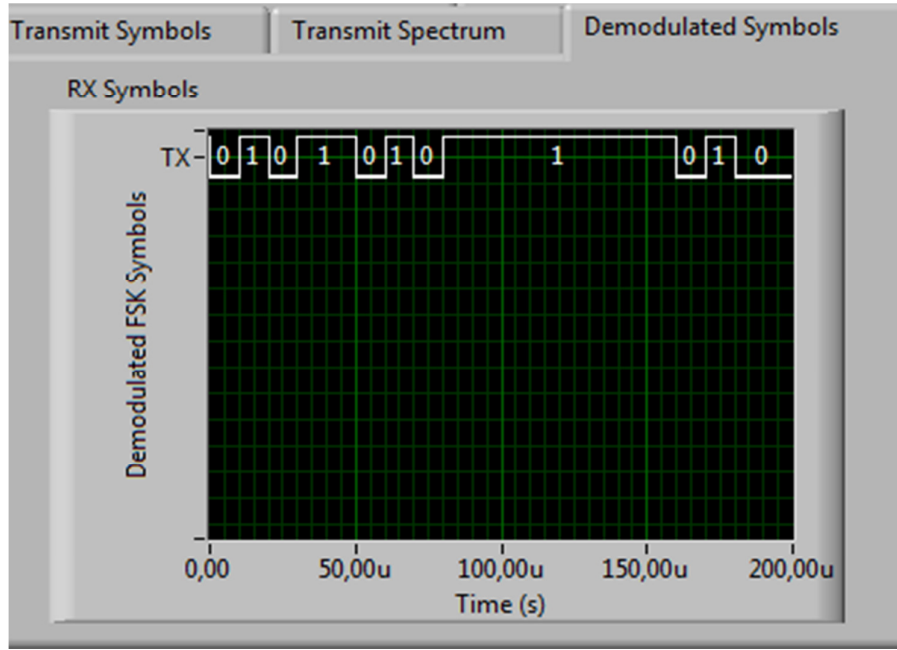


Şekil 3. 3 FSK Sinyali Spektrum Grafiği



Şekil 3. 4 Alınan Sinyalin Göz diyagramı

Şekilde de görüldüğü üzere, göz diyagramında alt ve üst mesafeler birbirinden uzak ve geçişler çok pürüzsüzdür. Bu, alınan sinyalin SNR'ı yüksek olduğundan ve alıcı ile verici arasında fazla uzaklık olmadığından dolayı kaynaklanmıştır.



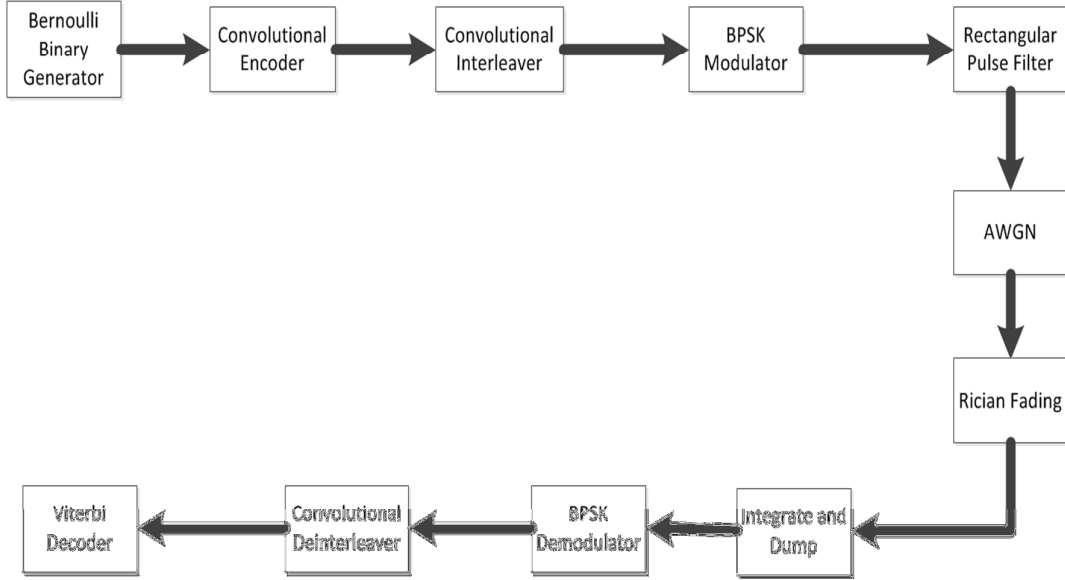
Şekil 3. 5 Demodüle edilen sinyalin sayısal bit dizini yapısı

4 SİMÜLASYON

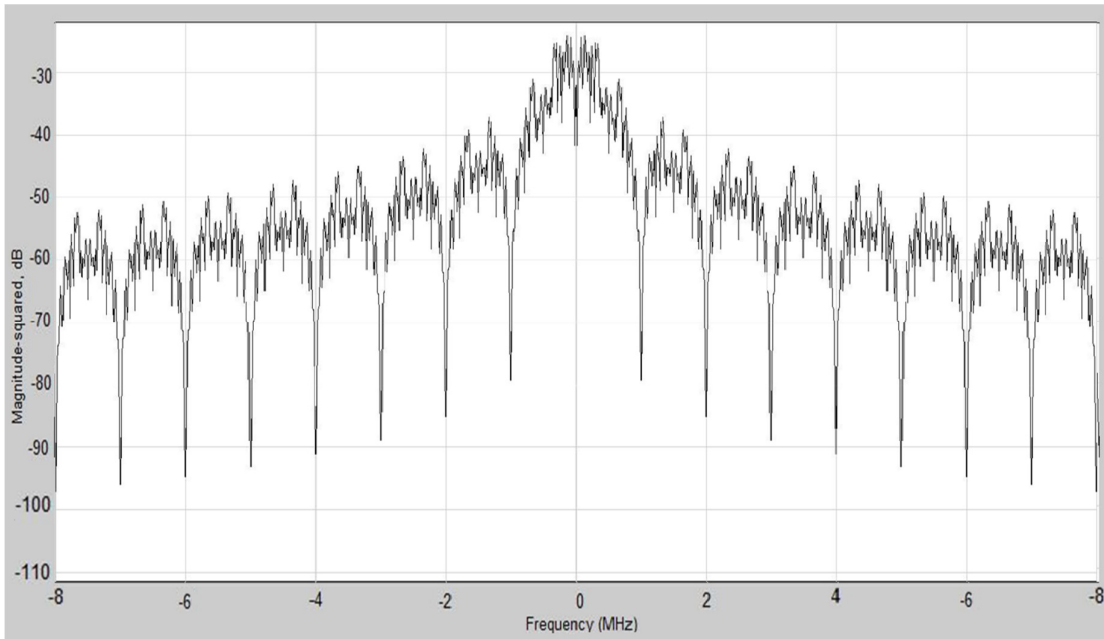
Matlab Simulink ortamında, füze üstünden telemetre yer istasyonuna gelen sinyaller simüle edilmiştir. Veri hızı 1 Mbit/sec olacak şekilde ayarlanmış olup bu veriler NRZ_L olarak kodlandıktan sonra PCM olarak modüle edilmektedir. PCM halini almış sayısal bit dizini, kanal kodlaması yapılarak dalga şekillendiriciden geçmektedir. Semboller arası girişimi engellemek için dalga şekillendirici kullanılmaktadır. IRIG 120-8 standardında belirtilen beta faktörü 0.3 olarak alınmıştır. Dalga şekillendikten sonra sinyal BPSK, QPSK, OQPSK, PCM/FM tekniklerinden biri ile modüle edilerek telemetre yer istasyonuna gönderilmektedir. Gerçek hayatta kullanılan füze üstü telemetre sistemlerinde PCM/FM modülasyonu kullanılmaktadır ve herhangi bir ileri kanal kodlama tekniği kullanılmamaktadır. Telemetre sistemlerinin performansını artırmak için kanal kodlama ve modülasyon teknikleri üzerinde durulmuştur.

Simülasyon kapsamında kullanılan ve performansları karşılaştırılan kanal kodlama tekniği Evrişimsel kodlama ve Golay kodlamadır. Performans karşılaştırmasında Evrişimsel kodlama tekniği kullanırken, kod oranı 2/3 ve 1/2 olarak ayarlanmıştır. Performans değerleri için Soft (hassas) karar verme ve Hard (sert) karar verme algoritmaları her iki kod oranı için de karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Golay kodlama tekniği de simüle edilmiş olup Evrişimsel kodlama tekniği ile çıktıları karşılaştırılmıştır. Füzenin uçuşu boyunca yapmış olduğu sinyalin yer istasyonuna ulaşmasını simüle eden sönümlenme tekniği Rician sönümlenme modelidir. Bu modelde füze sinyali, yer istasyonunun direkt görüş açısındadır ve bu sinyal Doppler, çok yollu sönümlenme ve beyaz Gaussian gürültüsüne maruz kalmaktadır. Telemetre standardında belirtildiği üzere K faktörünün genellikle 10 dB ile 20 dB arası değerler aldığı görülmüştür. Simulasyonlarda da K faktörünün bu aralıklara gelebilmesi için nümerik değeri sırasıyla 10-50-100 olarak seçilmiştir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak simülasyonlar yapılmıştır.

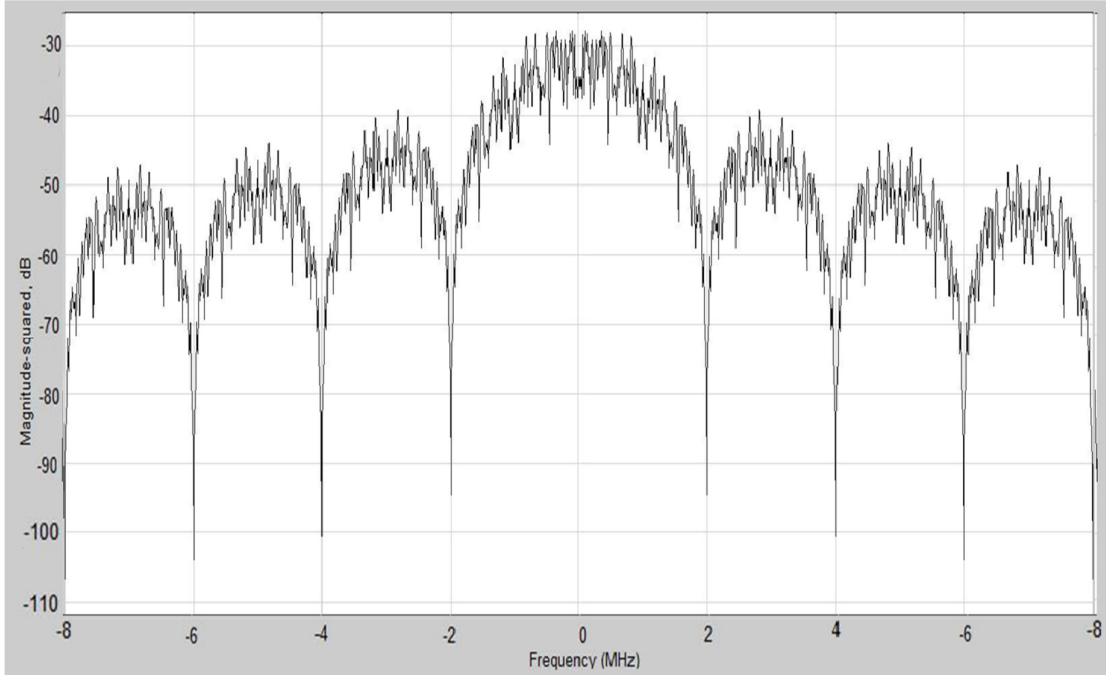
4.1 BPSK Simülasyon Çıktıları



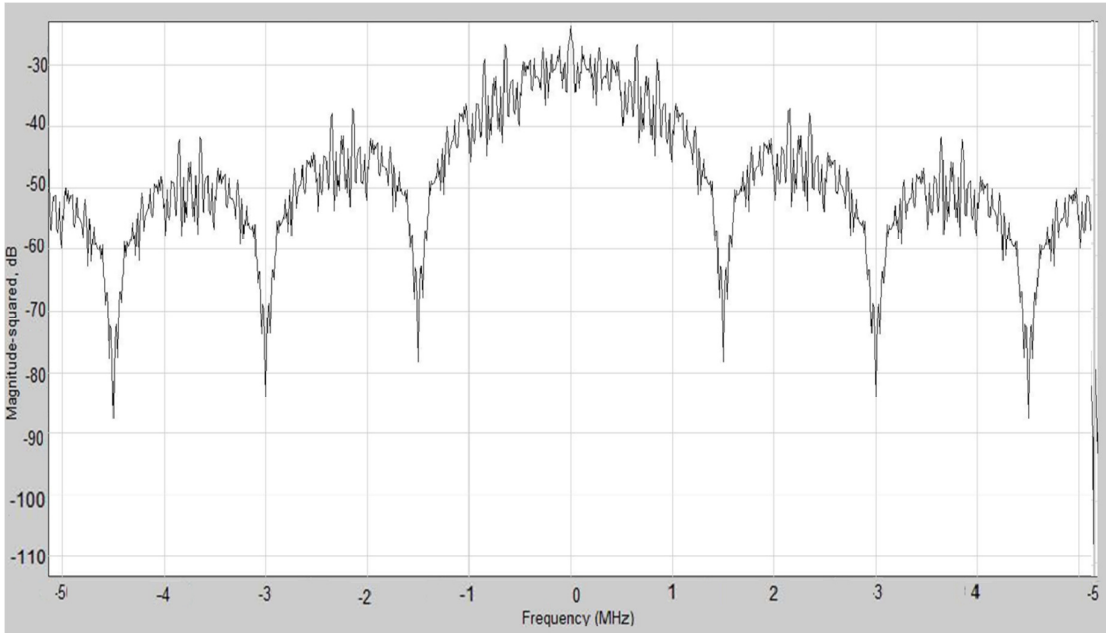
Şekil 4. 1 Matlab Simulink BPSK Blok Yapısı



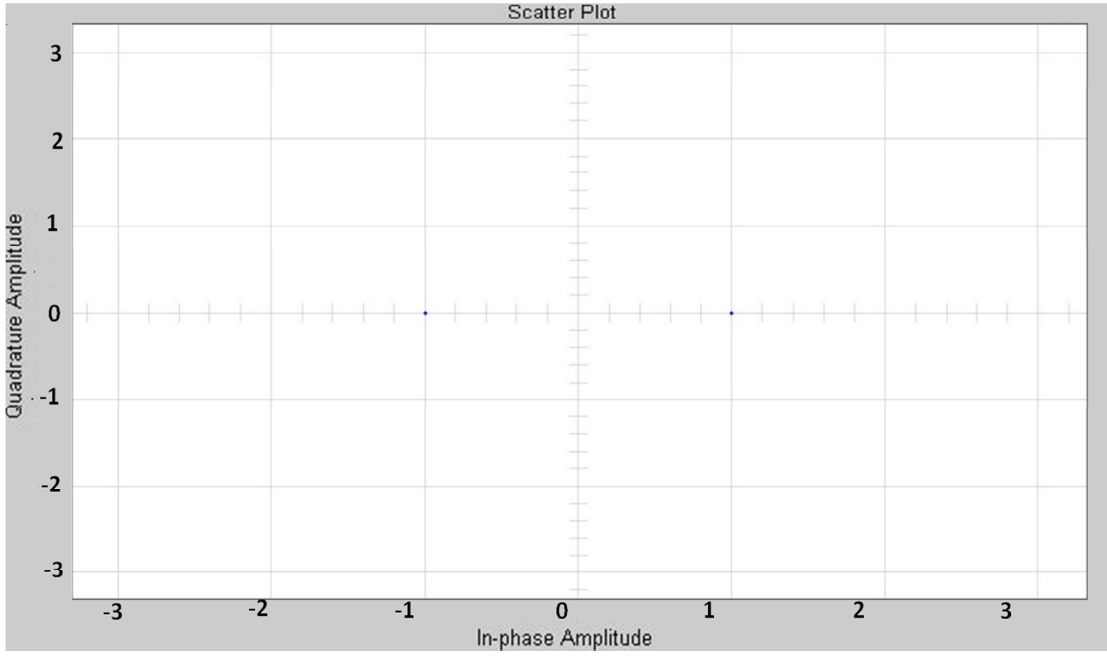
Şekil 4. 2 BPSK spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda



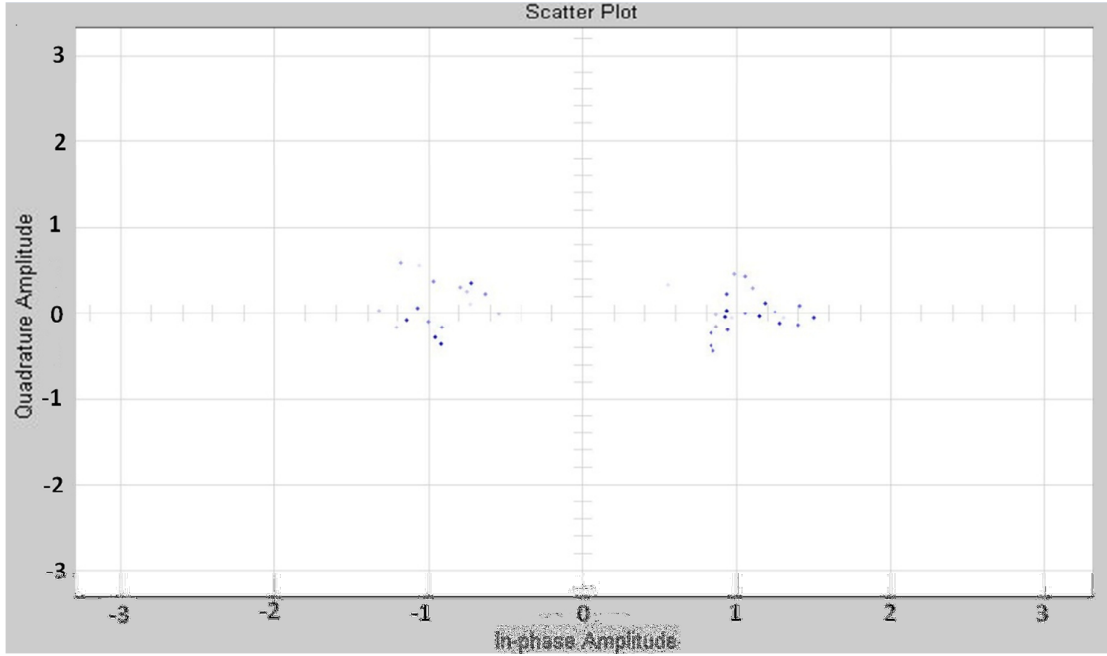
Şekil 4. 3 BPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında



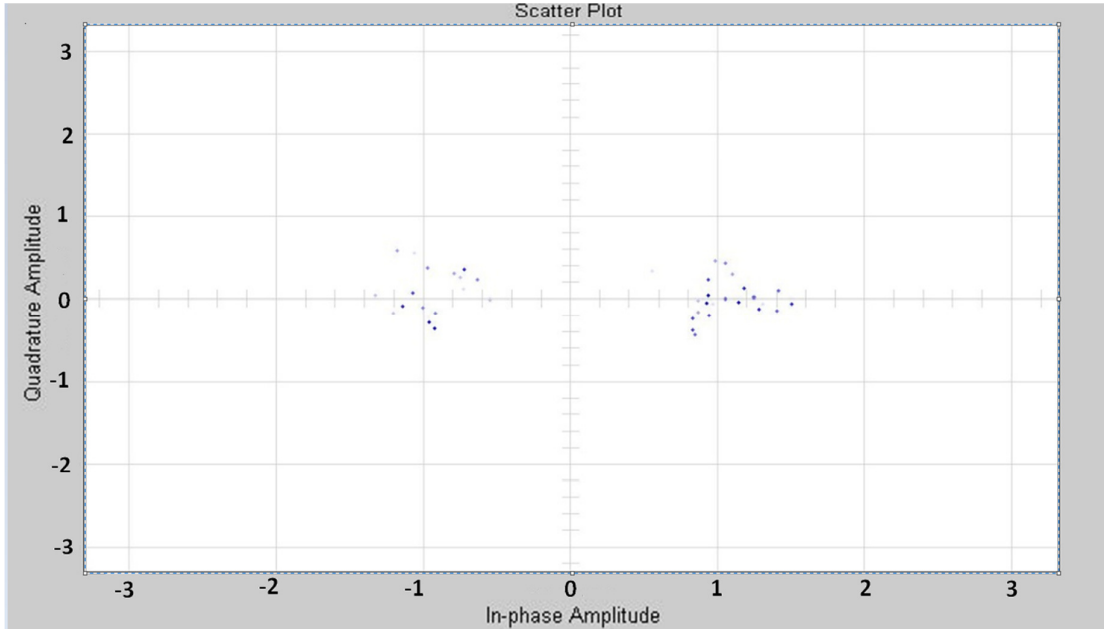
Şekil 4. 4 BPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 kullanıldığında



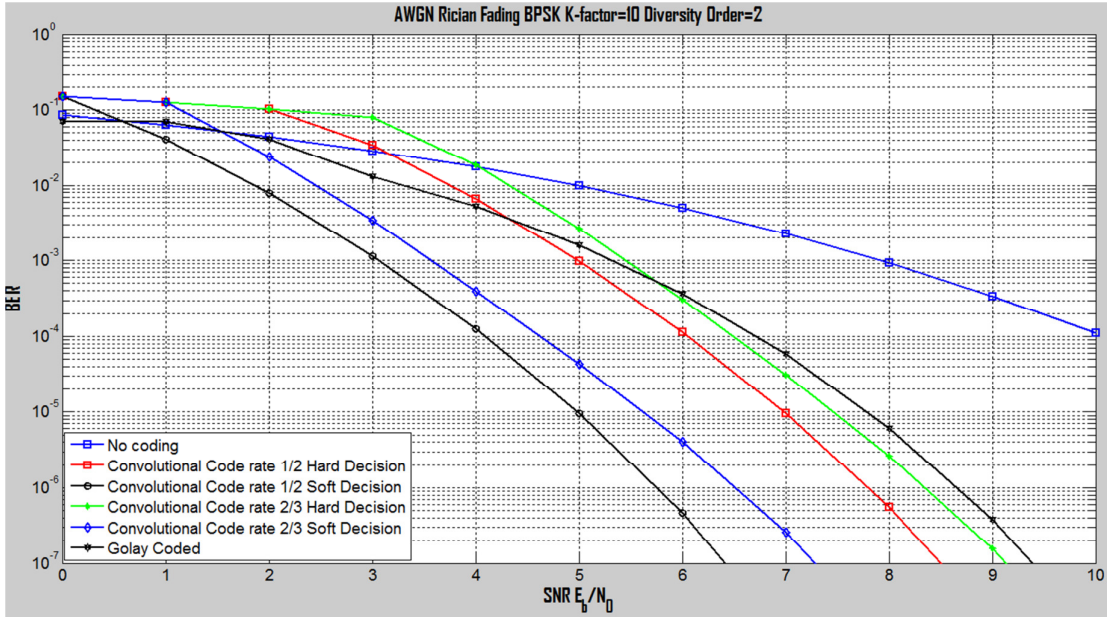
Şekil 4. 5 BPSK için konstellasyon grafiği



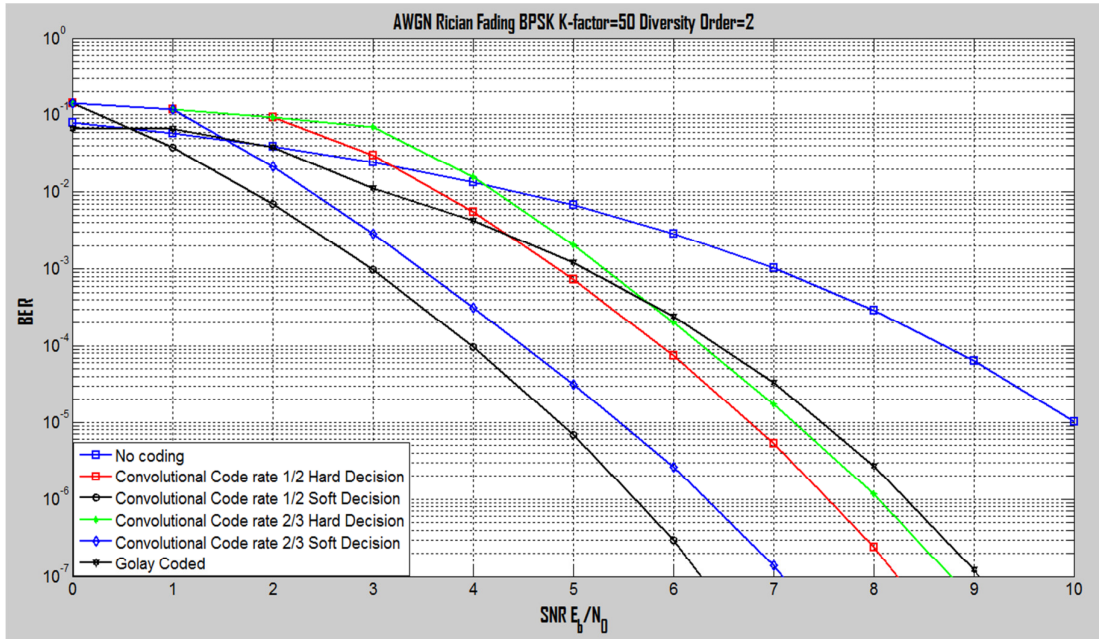
Şekil 4. 6 BPSK için konstellasyon grafiği; SNR=5 iken



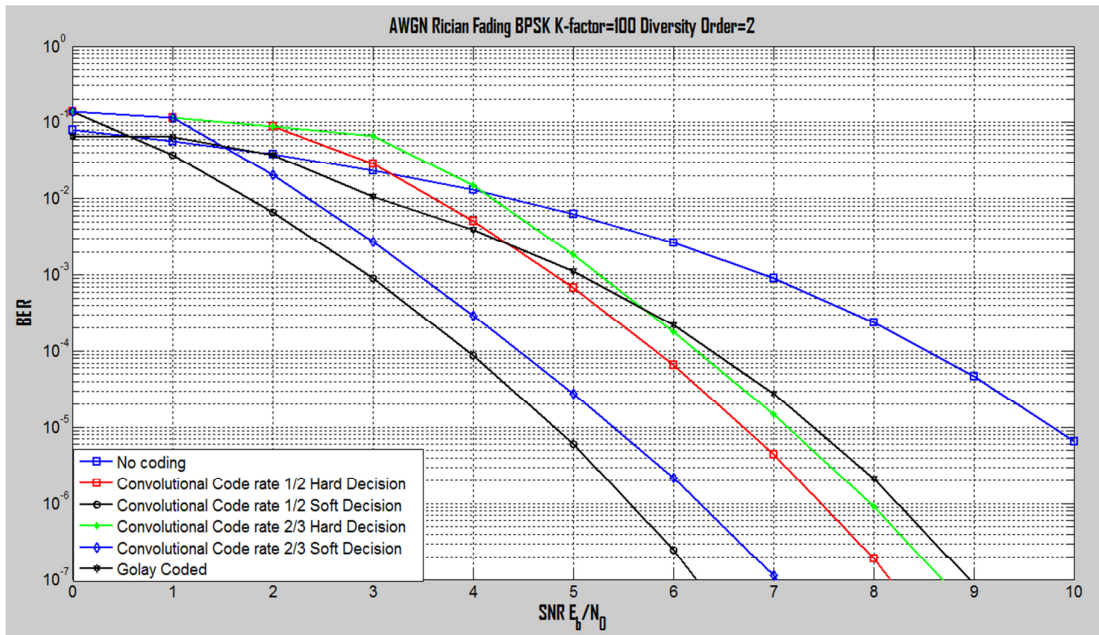
Şekil 4. 7 BPSK için konstellasyon grafiği; SNR=10 iken



Şekil 4. 8 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında BPSK, K faktörü=10

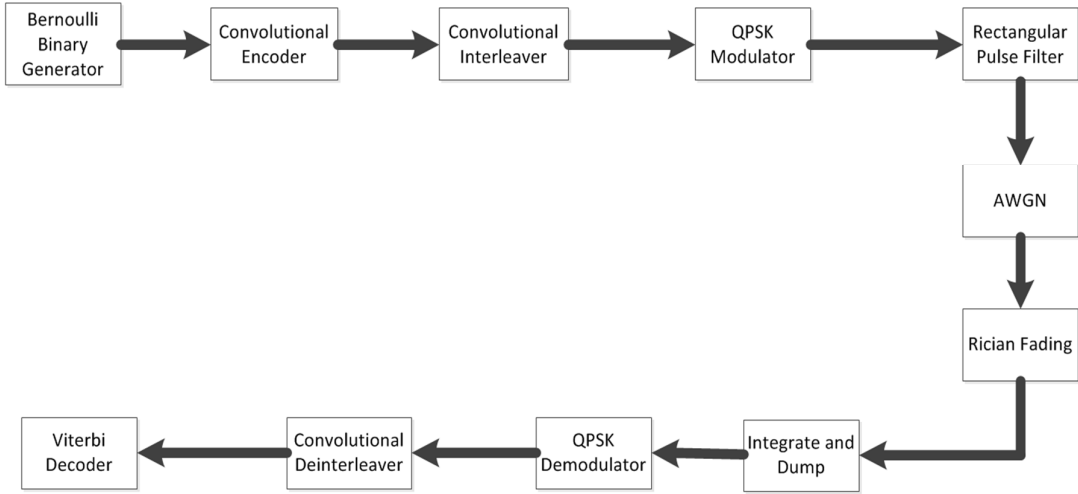


Şekil 4. 9 AWGN- Rician Sönüleme ortamında BPSK, K faktörü=50

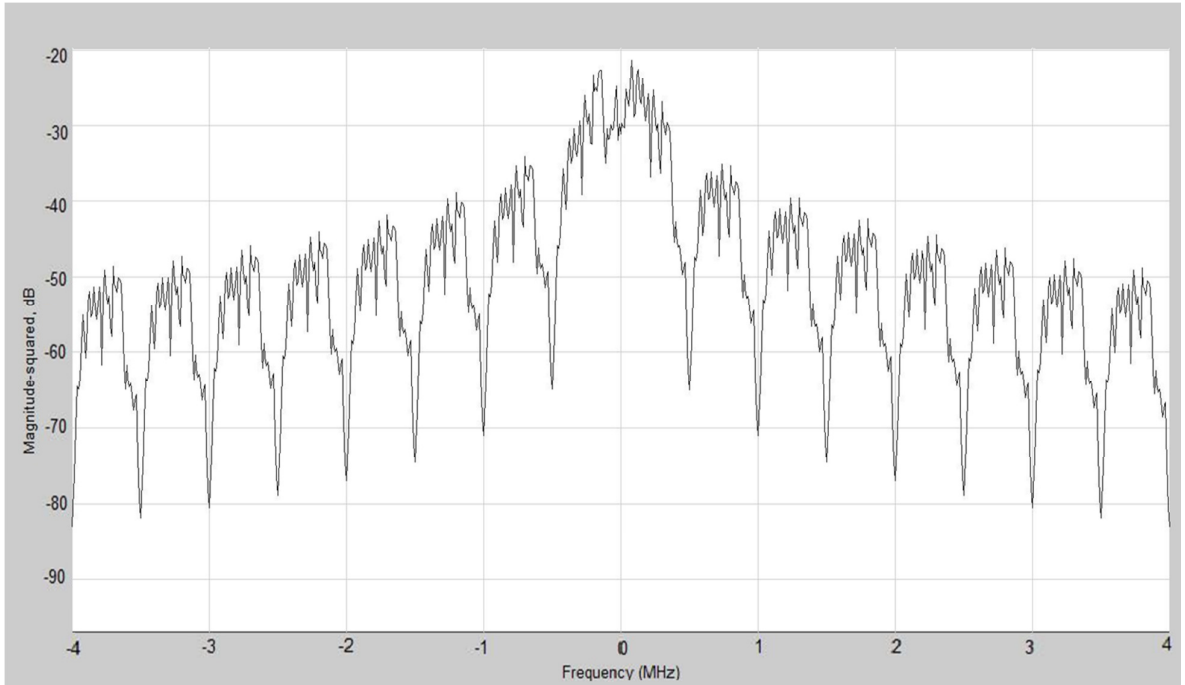


Şekil 4. 10 AWGN- Rician Sönüleme ortamında BPSK, K faktörü=100

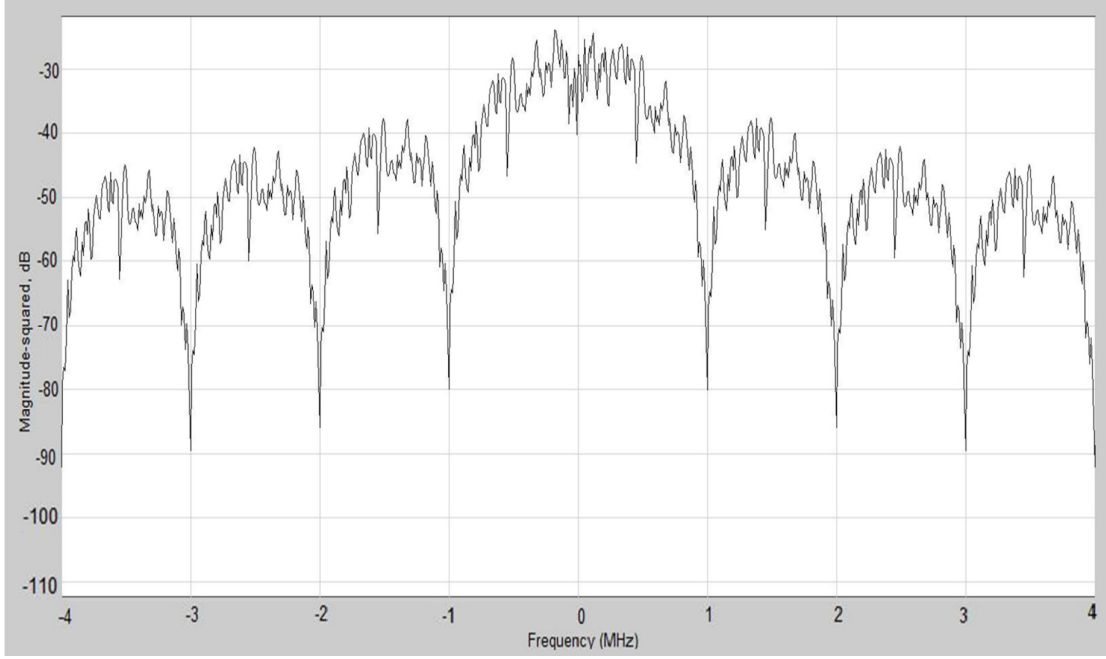
4.2 QPSK Simülasyon Çıktıları



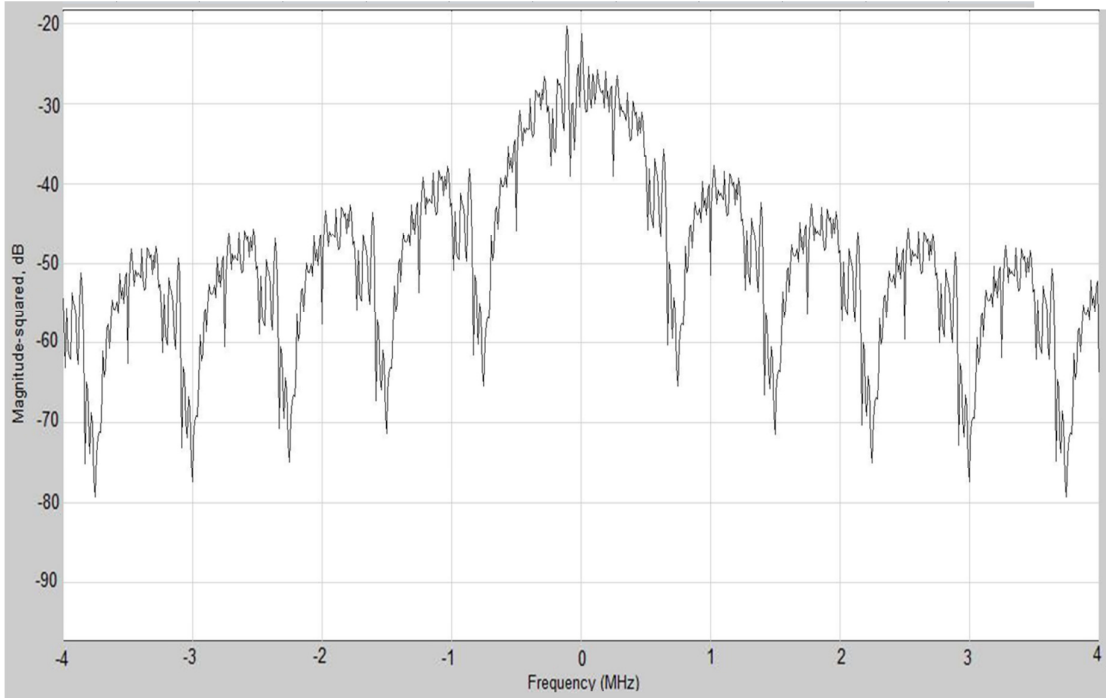
Şekil 4. 11 Matlab Simulink QPSK Blok Yapısı



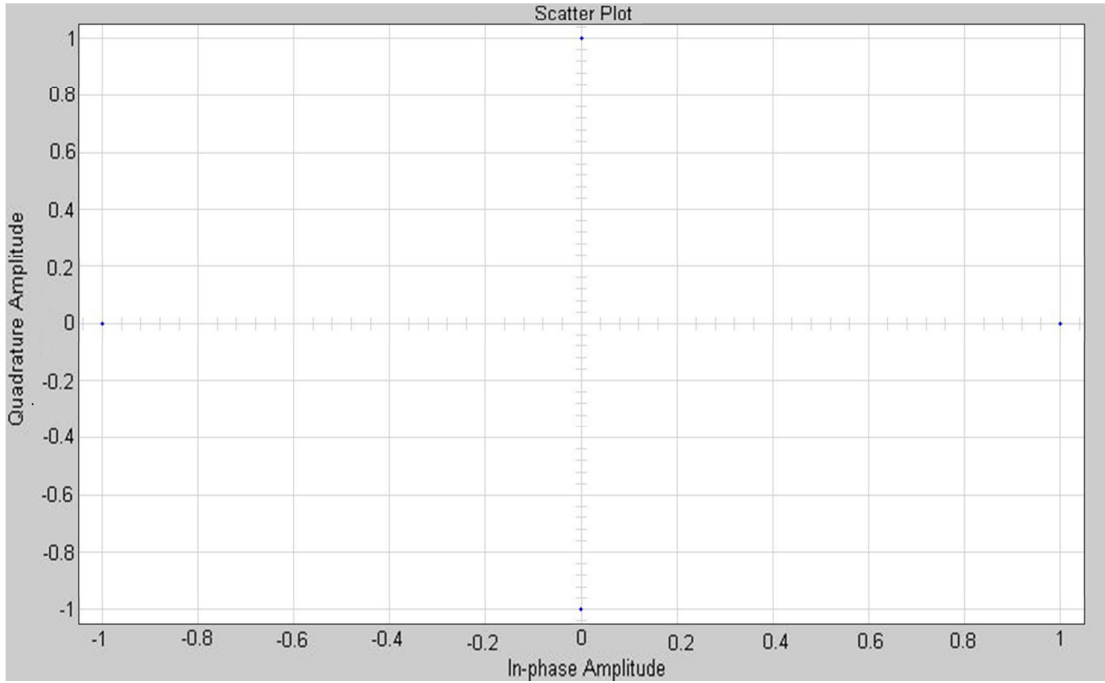
Şekil 4. 12 QPSK spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda



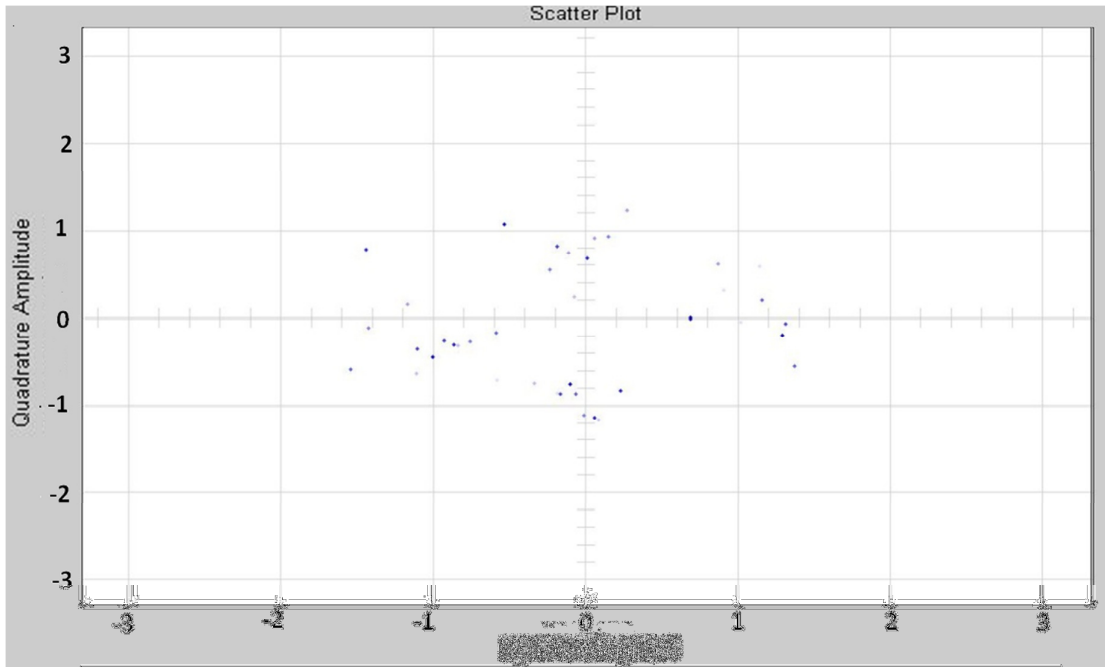
Şekil 4. 13 QPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında



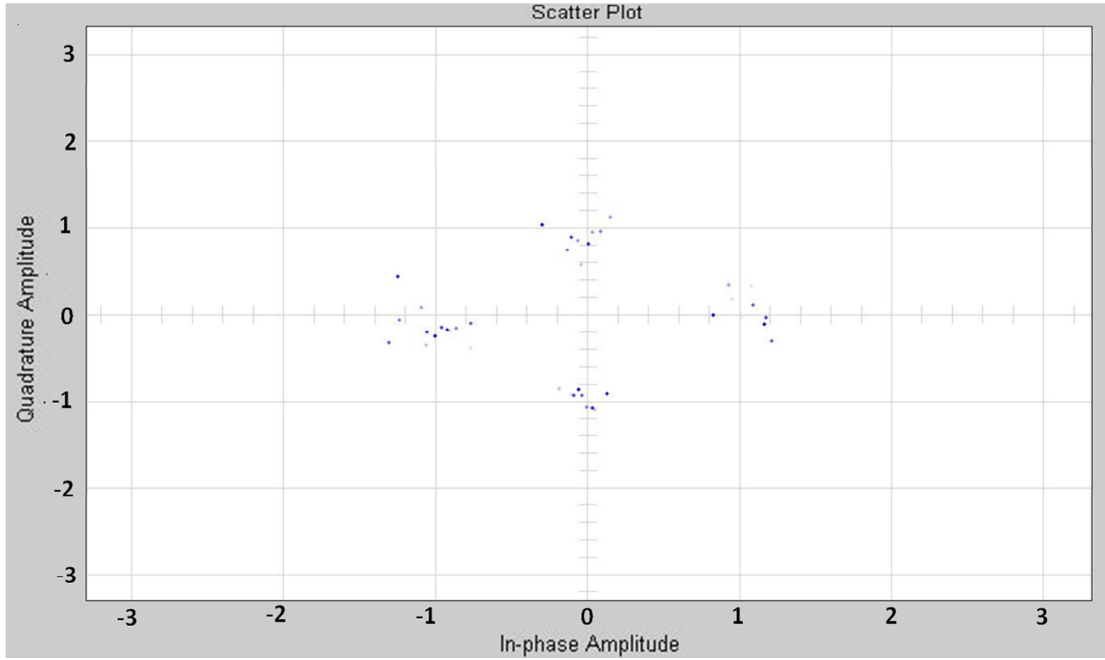
Şekil 4. 14 QPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 kullanıldığında



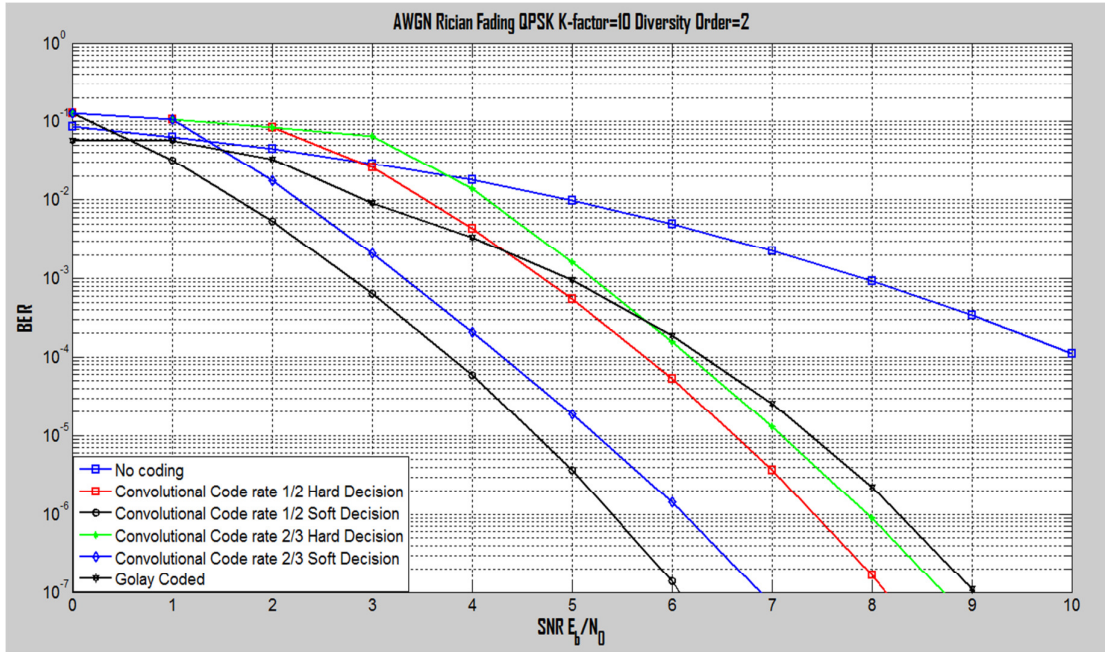
Şekil 4. 15 QPSK için konstellasyon grafiği



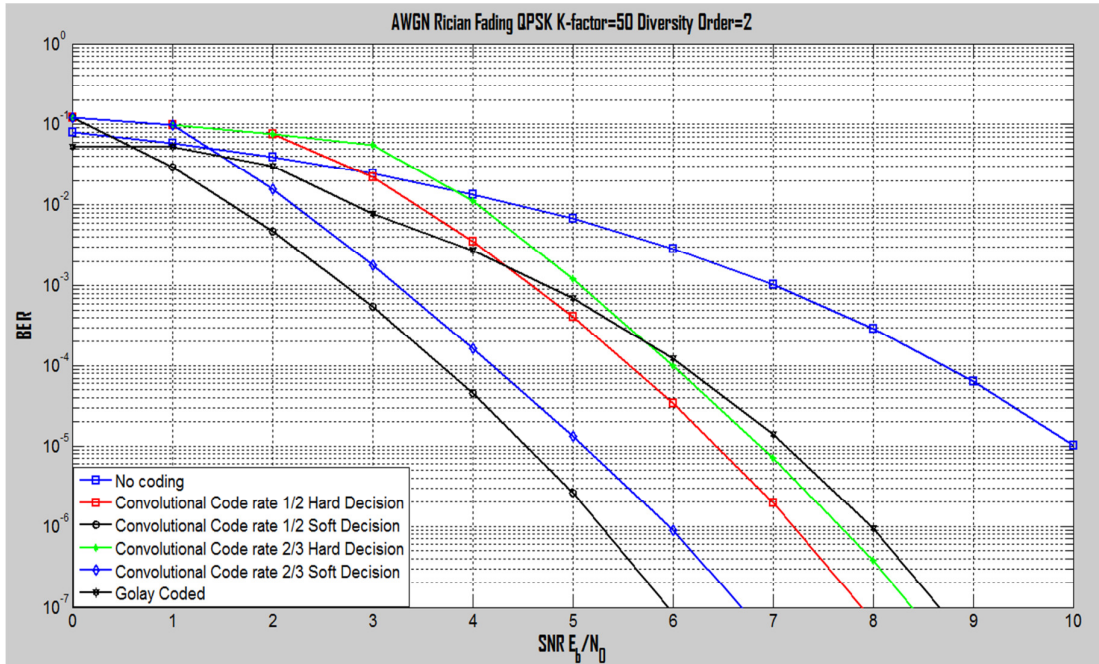
Şekil 4. 16 QPSK için konstellasyon grafiği; SNR=5 iken



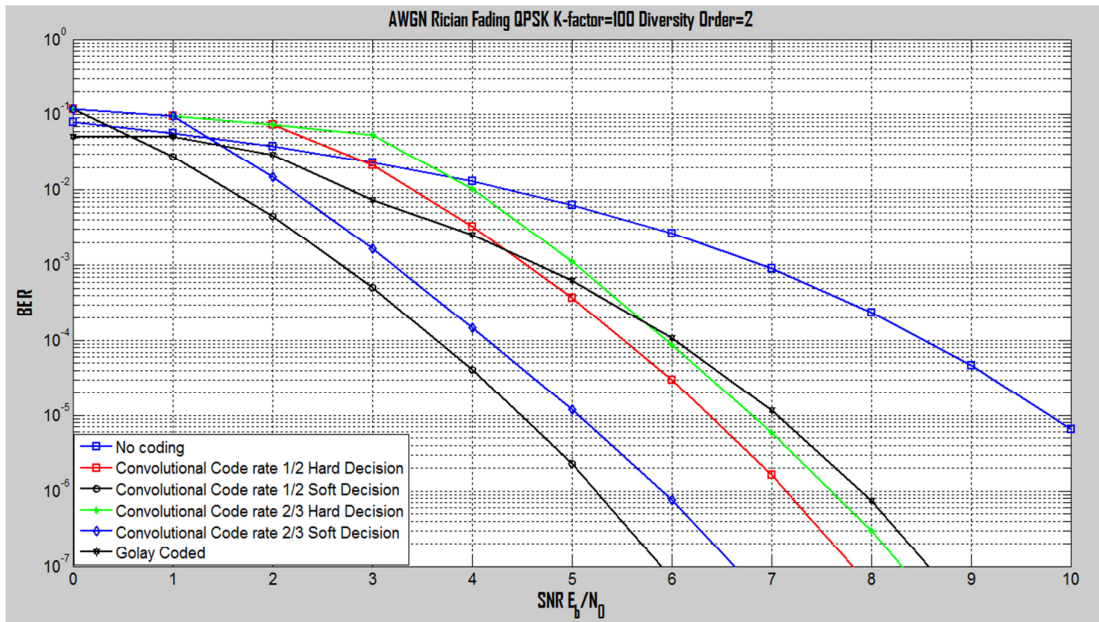
Şekil 4. 17 QPSK için konstellasyon grafiği; SNR=10 iken



Şekil 4. 18 AWGN- Rician Sönüleme ortamında QPSK, K faktörü=10

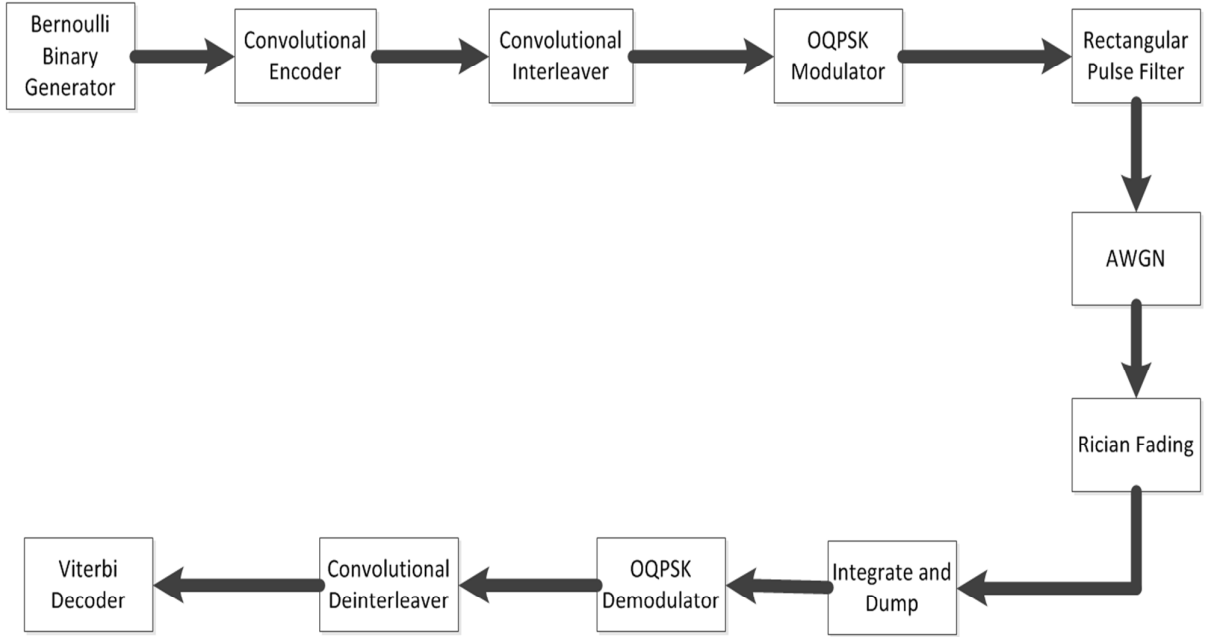


Şekil 4. 19 AWGN- Rician Sönüleme ortamında QPSK, K faktörü=50

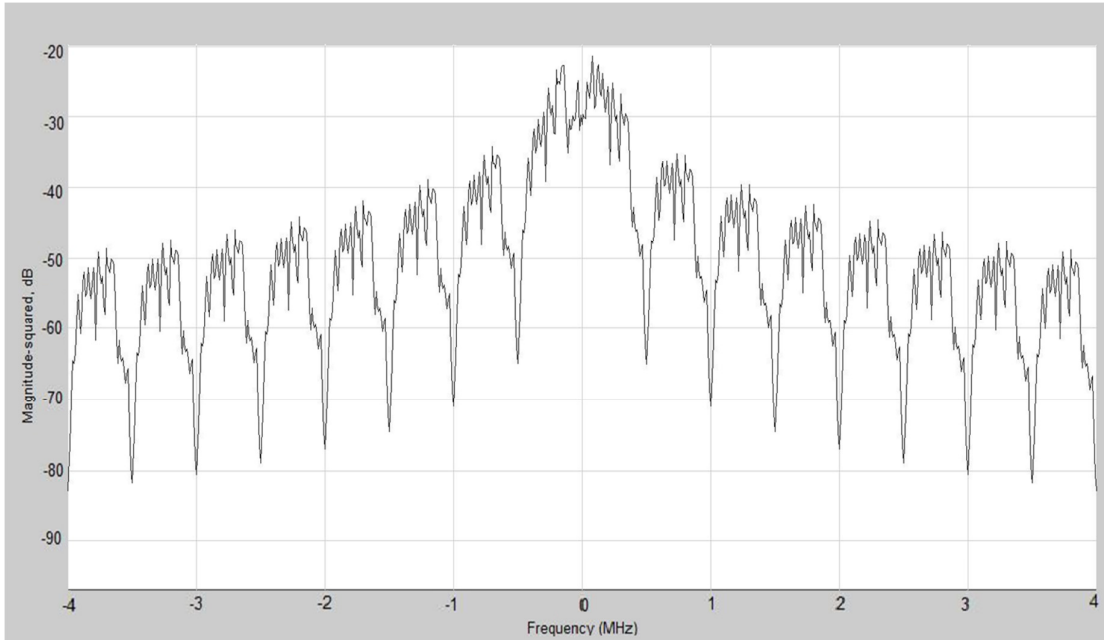


Şekil 4. 20 AWGN- Rician Sönüleme ortamında QPSK, K faktörü=100

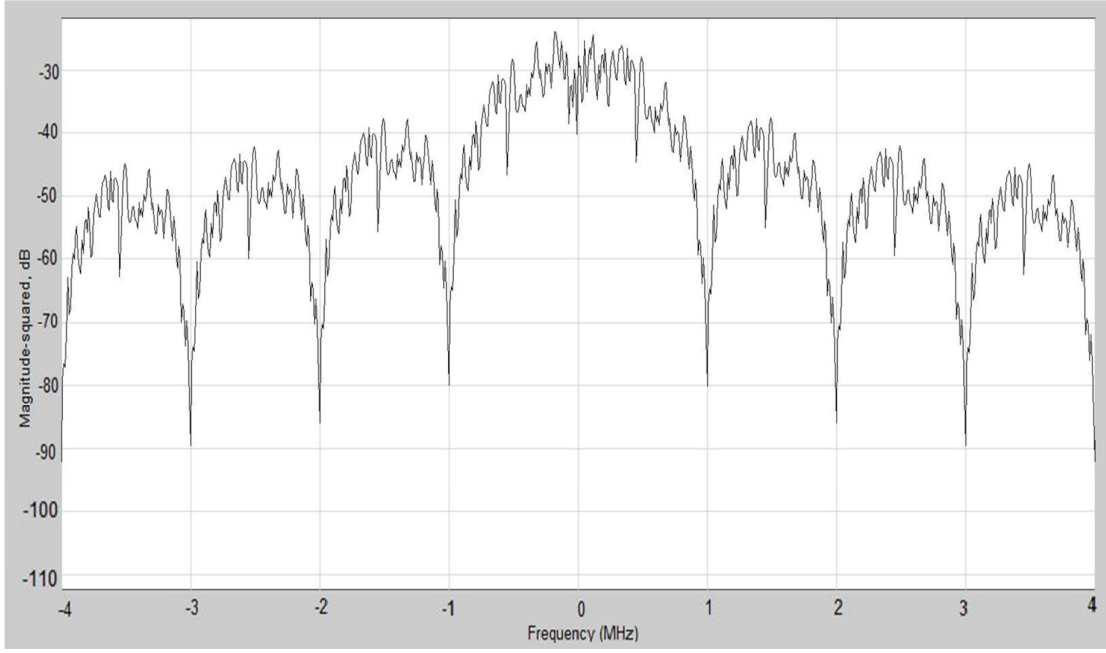
4.3 OQPSK Simülasyon Çıktıları



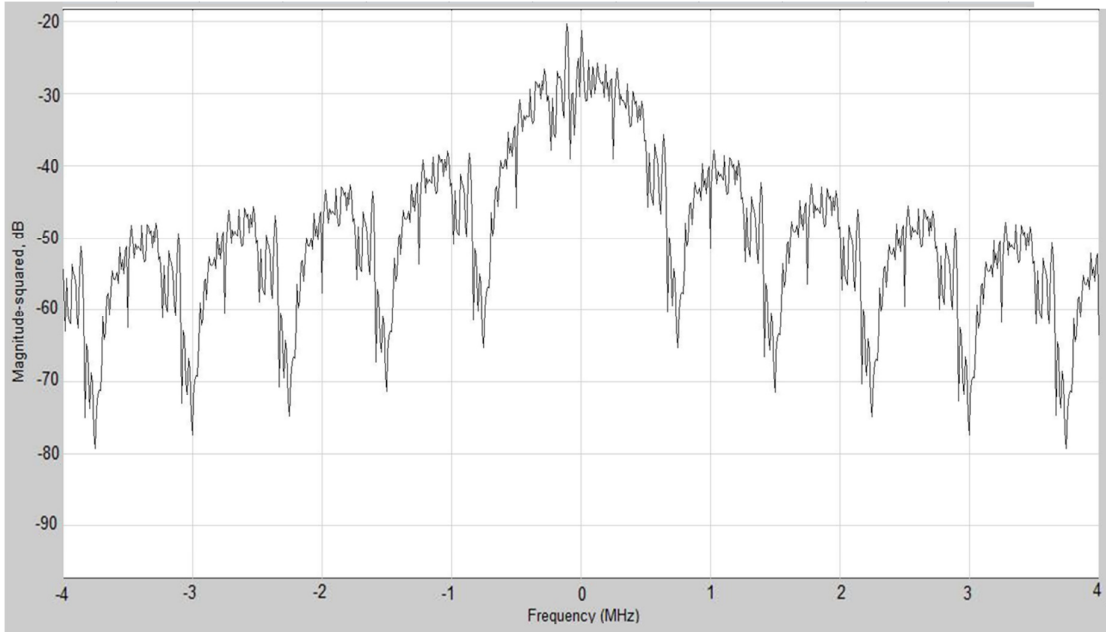
Şekil 4. 21 Matlab Simulink OQPSK Blok Yapısı



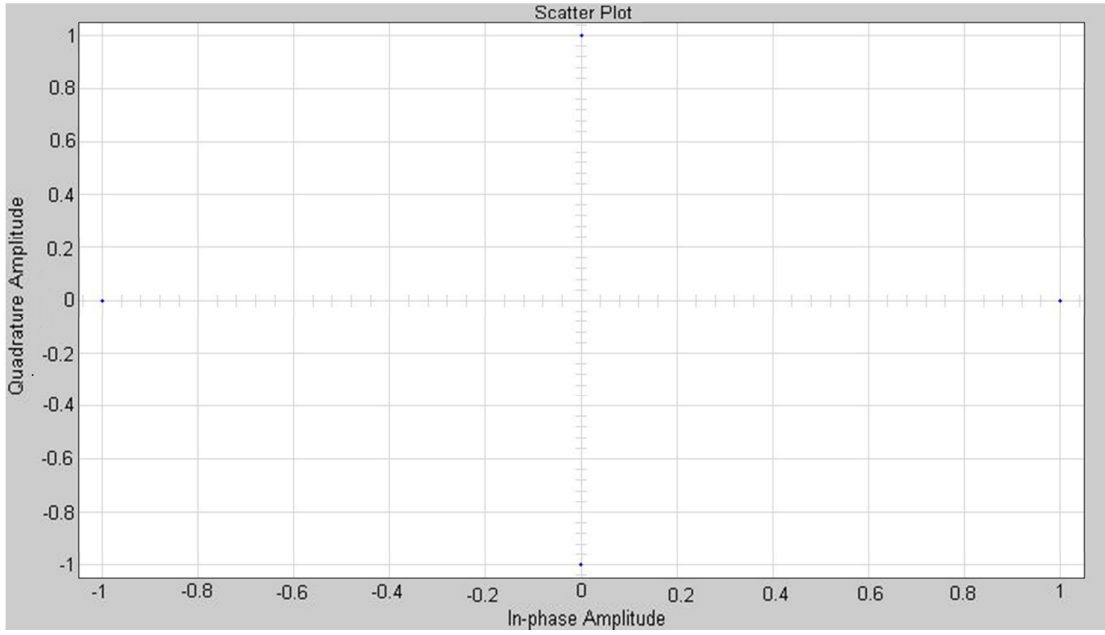
Şekil 4. 22 OQPSK spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda



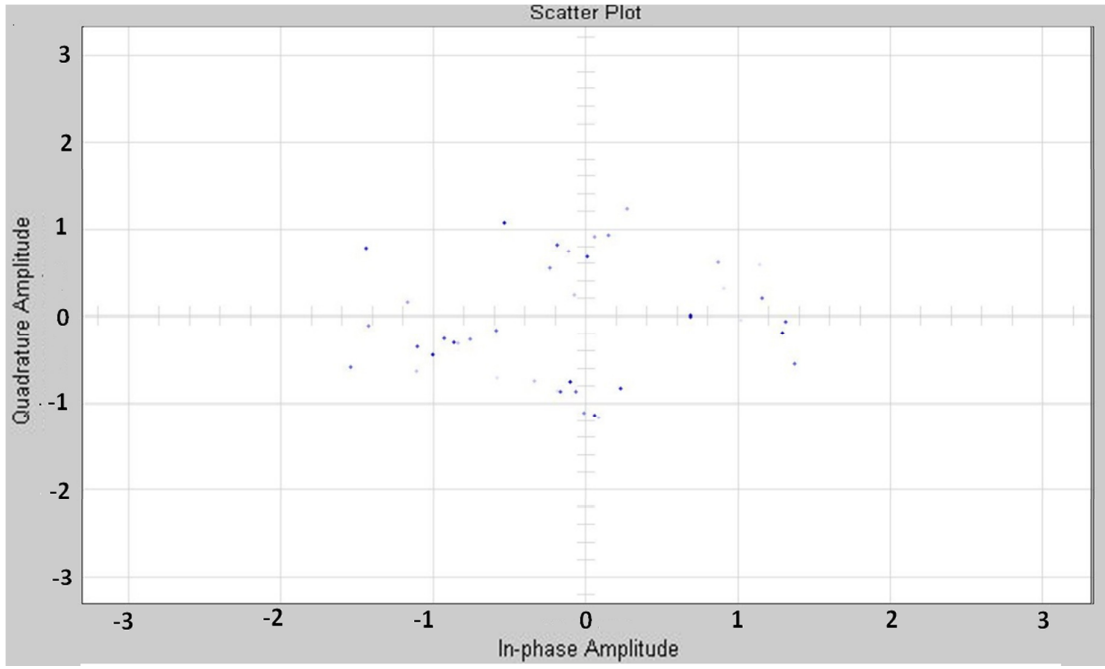
Şekil 4. 23 OQPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında



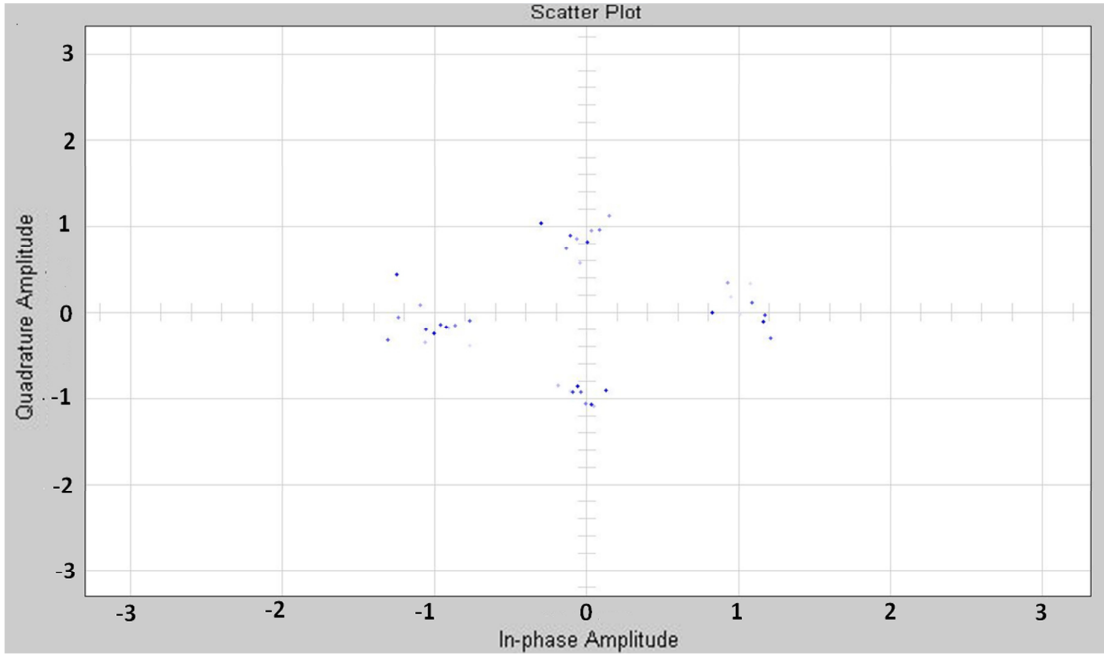
Şekil 4. 24 OQPSK spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 kullanıldığında



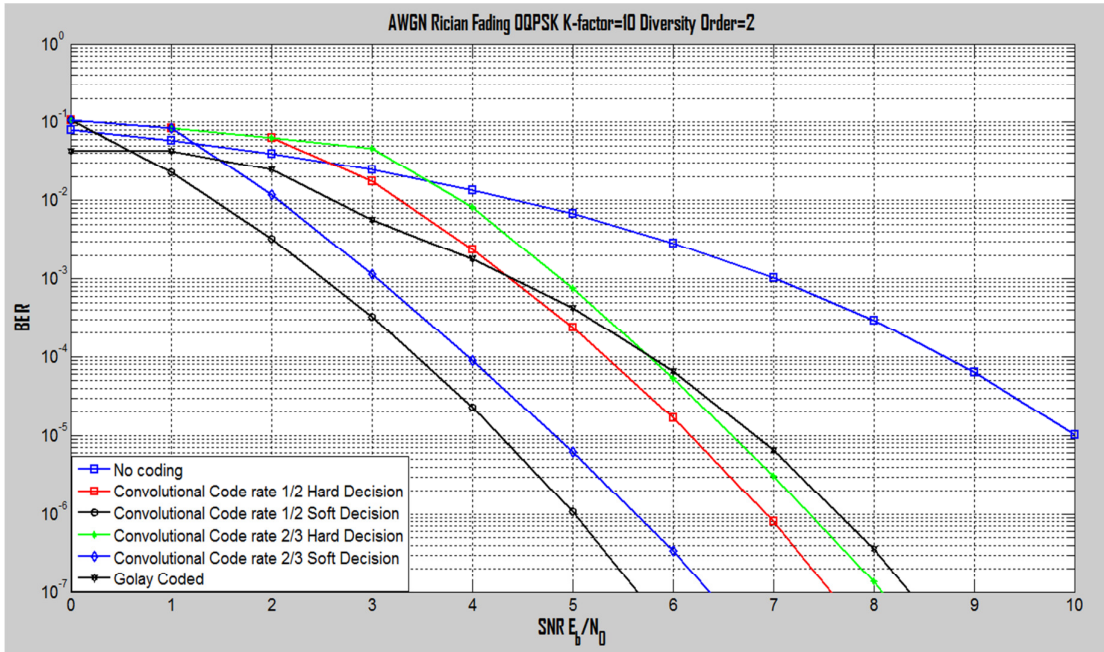
Şekil 4. 25 OQPSK için konstellasyon grafiği



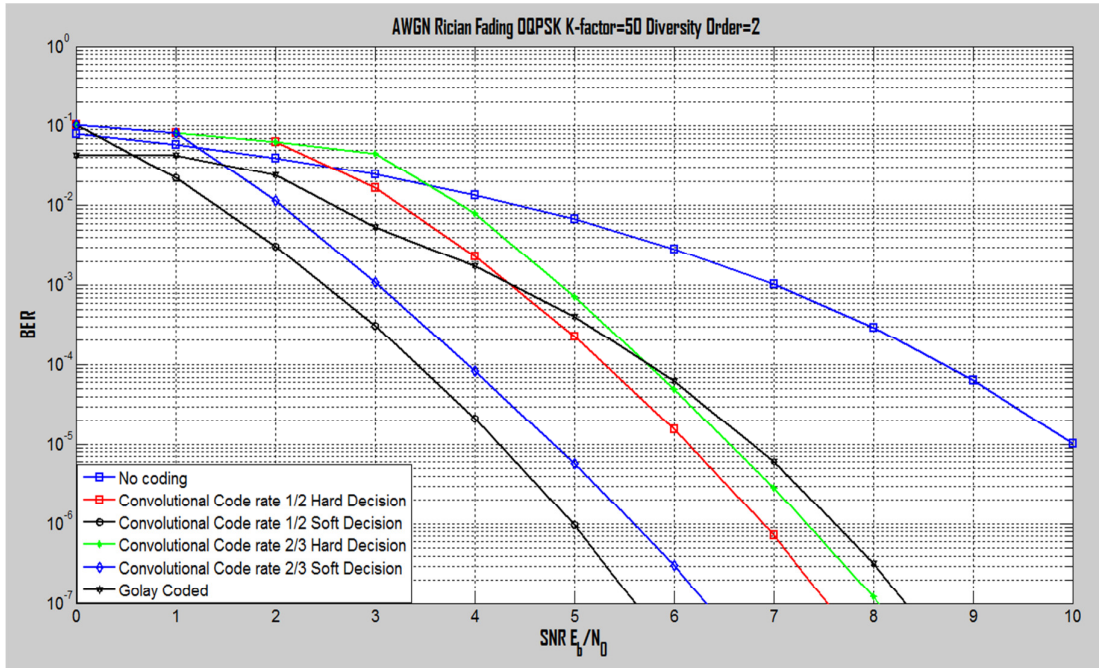
Şekil 4. 26 OQPSK için konstellasyon grafiği; SNR=5 iken



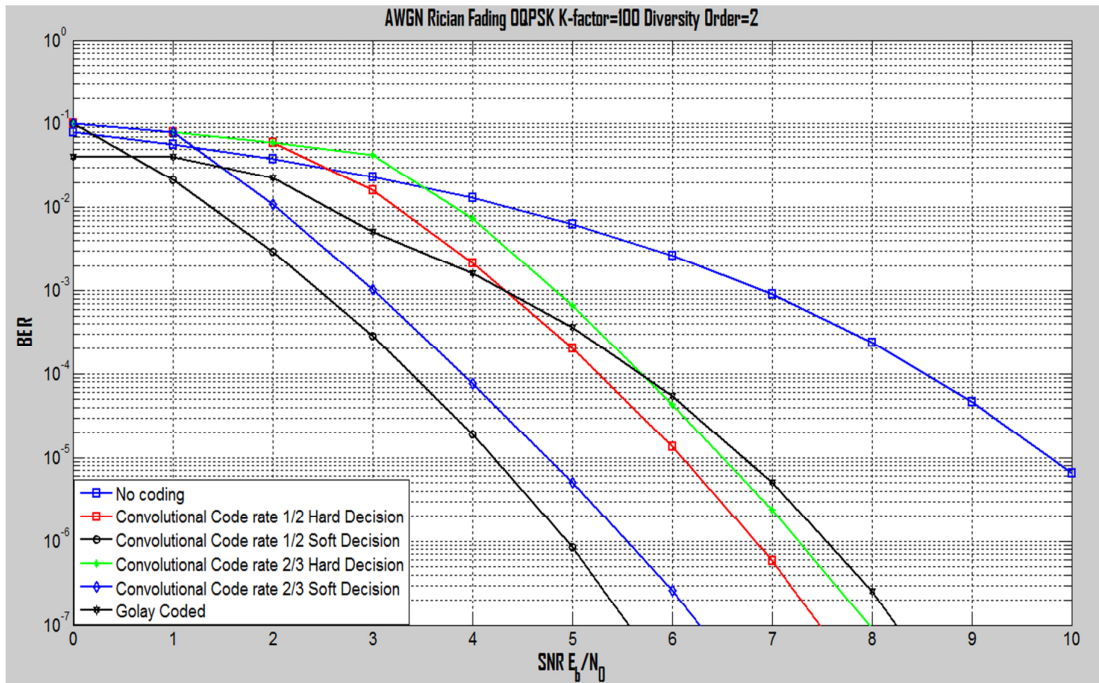
Şekil 4. 27 OQPSK için konstellasyon grafiği; SNR=10 iken



Şekil 4. 28 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında OQPSK, K faktörü=10

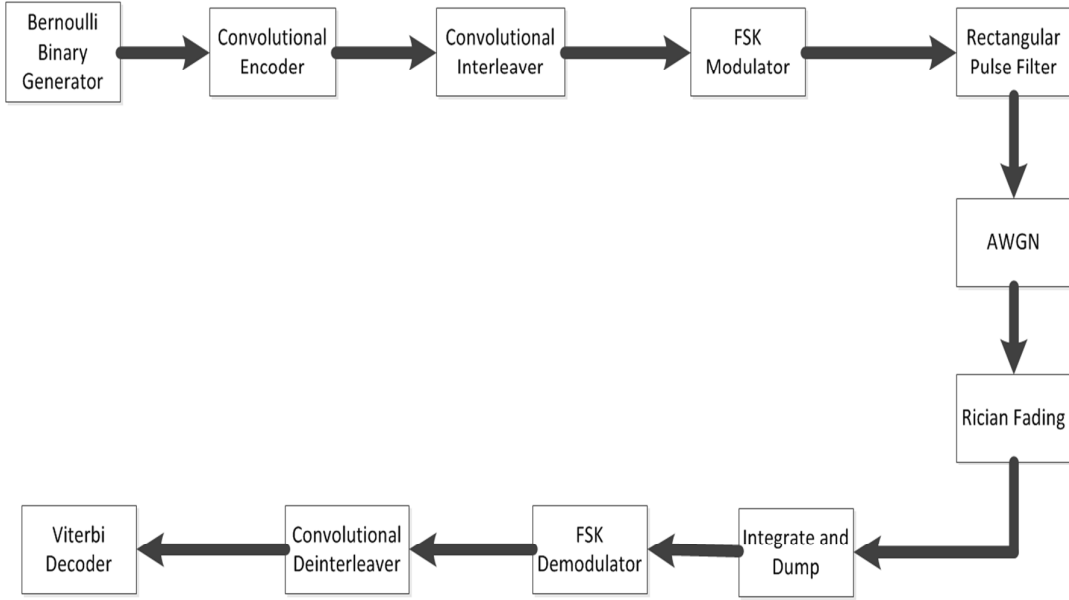


Şekil 4. 29 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında OQPSK, K faktörü=50

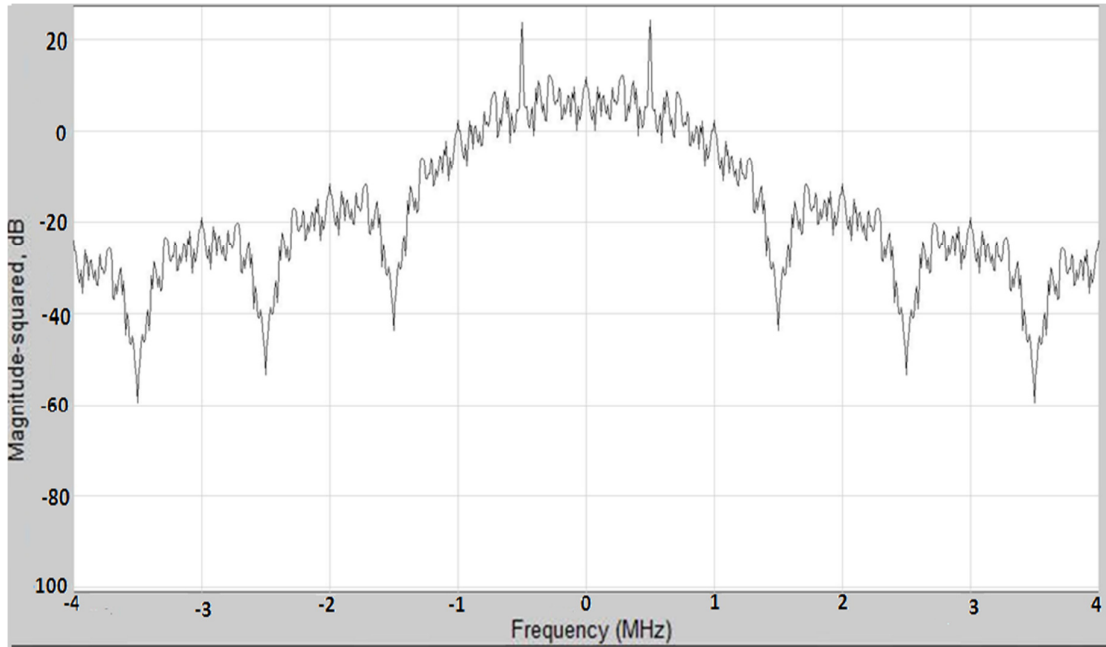


Şekil 4. 30 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında OQPSK, K faktörü=100

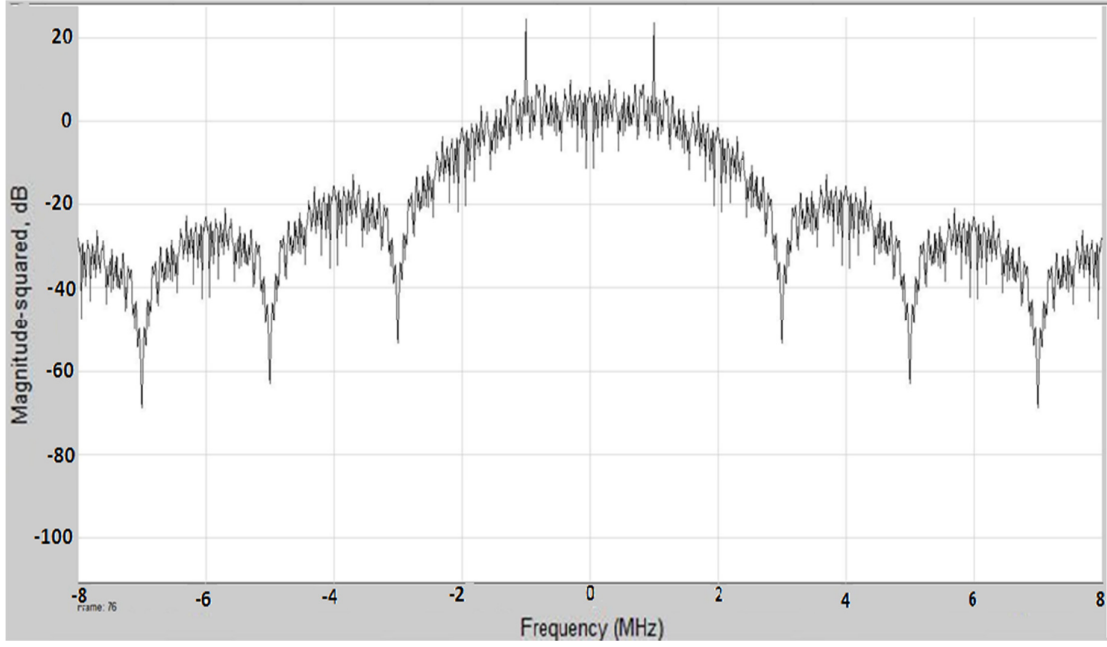
4.4 PCM/FM Simülasyon Çıktıları



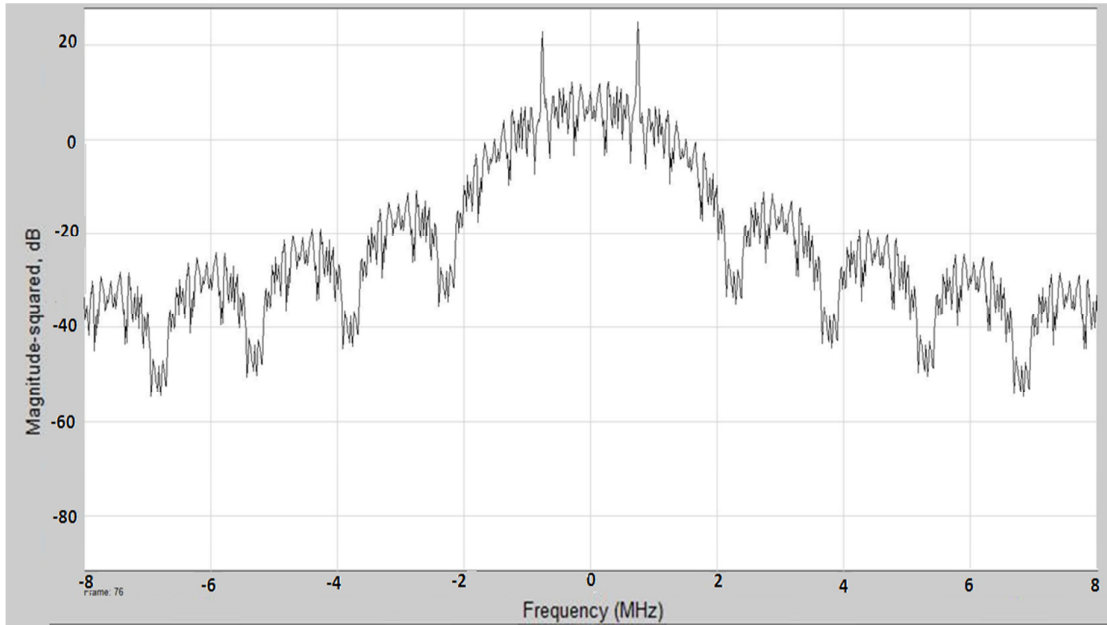
Şekil 4. 31 Matlab Simulink PCM/FM Blok Yapısı



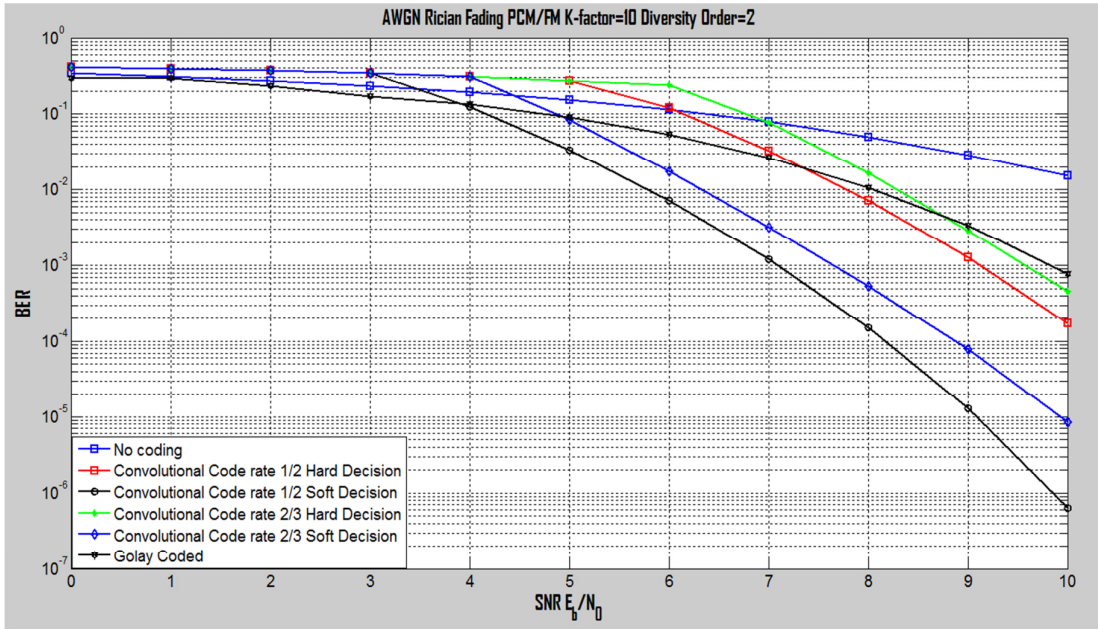
Şekil 4. 32 PCM/FM spektrumu, kodlama kullanılmadığı durumda



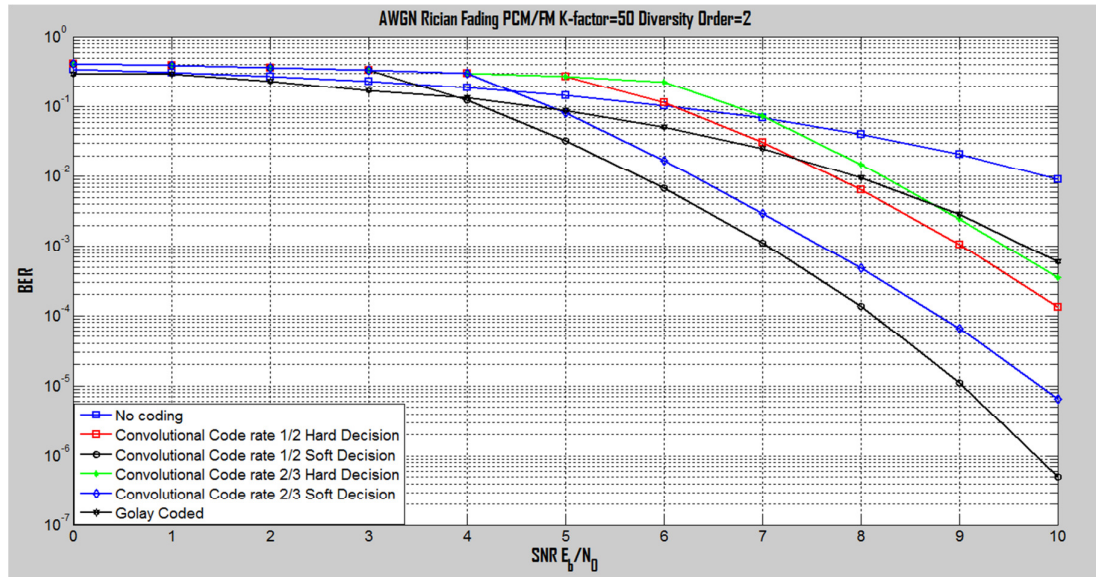
Şekil 4. 33 PCM/FM spektrumu, Evrişimsel Kodlama 1/2 ve Golay Kodlama kullanıldığında



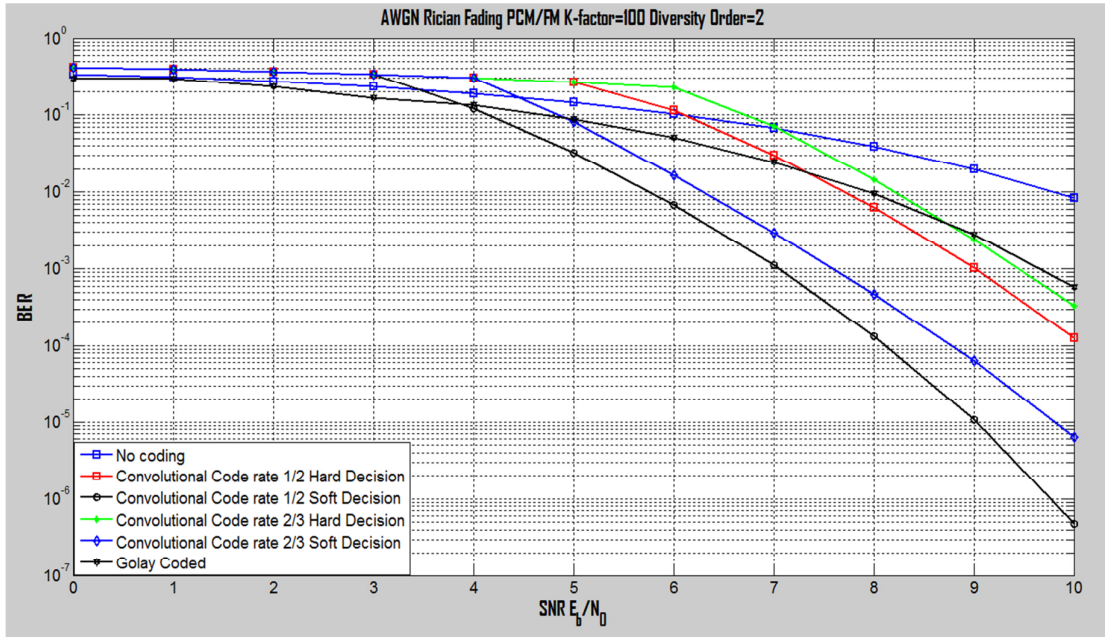
Şekil 4. 34 PCM/FM spektrumu, Evrişimsel Kodlama 2/3 ve Golay Kodlama kullanıldığında



Şekil 4. 35 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında PCM/FM, K faktörü=10



Şekil 4. 36 AWGN- Rician Sönümlenme ortamında PCM/FM, K faktörü=50



Şekil 4. 37 AWGN- Rician Sönümlene ortamında PCM/FM, K faktörü=100

5 SONUÇ ve KARŞILAŞTIRMA

Bu çalışmanın BPSK modülasyonu ve hassas karar verme algoritması ile çözülen 1/2 Evrişimsel kodlama kısmına ait çıktıların, Modestion ile Mui'nin [13] Rician sönümlmeli kanallarda Evrişimsel kod performansını inceleyen makalelerindeki BER vs SNR grafiklerindeki sonuçlara benzer olduğu görülmüştür. Chen ve Wei'nin makalelerindeki [14] PSK modülasyon türlerine ait sonuçlar da incelenmiş, OQPSK modülasyonunun Rappaport'un [4] kitabında irdelenen özellikleri nedeniyle daha verimli olabileceği değerlendirilmiştir. Çıkan sonuçlar da bu görüşü destekler niteliktedir.

BPSK, QPSK ve OQPSK modülasyon tekniklerini kullandığımızda, kanal kodlaması olmayan durumda sinyalin SNR'ı 10 dB civarında iken BER, 10^{-4} 'ten yüksek çıkmaktadır. Bu hata oranı pratikte kullanılan bir telemetre sistemi için kabul edilebilir değildir. Bu nedenle, ileri kanal kodlama teknikleri kullanılması gerekmektedir. Grafikte Evrişimsel kodlama tekniğinin, hassas (Soft) karar alma seçeneğinde, sert (Hard) kararlara göre 2 dB'lik bir avantajı olduğu görülmektedir. Evrişimsel kodlama tekniğinde kod oranı 1/2 uygulanan durum, 2/3 olan duruma göre daha iyi performans vermektedir. Fakat kod oranının 1/2 olduğu durumda bant genişliği 2 katına; 2/3 olduğu durumlarda 1.5 katına çıkmaktadır.

PCM/FM için Evrişimsel kodlamanın sonucunda düşük SNR değerlerinde kod kullanılmayan duruma göre iyi performans görülmemektedir. Golay kodlama tekniğinin yüksek SNR değerlerinde Evrişimsel kodlamalara göre kötü performans verdiği görülmektedir. Düşük SNR'larda ise, Golay kodlama tekniği, Evrişimsel kodlamaya göre -her iki kod oranında ve hassas olmayan kararlar baz alındığında- daha iyi performans göstermektedir. Golay kodlama kullanıldığı durumda bant genişliği ise 2 katına çıkmaktadır.

K faktörünün üç durumu da göz önüne alındığında (K=10 K=50 K=100), grafiklerde bariz bir değişiklik olmadığı görülmüştür.

Sonuç olarak, bant genişliği açısından değerlendirildiğinde, QPSK ve OQPSK BPSK'ya göre daha avantajlıdır. Güç kısıtlaması bakımından OQPSK, QPSK'ya oranla daha verimlidir. OQPSK modülasyon ve 1/2 hassas karar veren Evrişimsel kodlama tekniği en iyi performansı göstermektedir.

PCM/FM modülasyon tekniğini kullanıldığında, kanal kodlaması teknikleri uygulanmayan durumda sinyalin SNR 10 dB civarında iken BER'in 10^{-2} 'den büyük olduğu görülmektedir. Bu hata oranı, pratikte kullanılan bir telemetre sistemi için kabul edilebilir değildir. Grafikte Evrişimsel kodlama tekniği hassas (soft) kararlar ile kullanıldığı durumlarda, hassas olmayan (Hard) kararlara göre 2dB'lik bir avantaj sağlandığı görülmektedir. Evrişimsel kodlama tekniğinde kod oranı 1/2, 2/3'ten daha iyi bir performans sergilemektedir. Ancak, kod oranının 1/2 olduğu durumda bant genişliği açısından yine olumsuz bir durum yaşanmaktadır. Evrişimsel kodlamalı simülasyon sonuçlarında, düşük SNR değerlerinde kod kullanılmayan duruma göre daha iyi performans görülmemektedir. Golay kodlama tekniğinin, yüksek SNR'larda, yani 10dB civarında, Evrişimsel kodlamalara göre daha kötü performans verdiği görülmektedir. Düşük SNR'larda, yani 5dB'nin altındaki durumlarda ise Golay kodlama tekniği, uygulanan 1/2 oranındaki ve 2/3 oranındaki Evrişimsel kodlamanın her iki karar algoritmasına kıyasla daha iyi performans vermektedir. Golay kodlama kullanıldığı durumda bant genişliği 2 katına çıkmaktadır. K faktörünün üç durumu da göz önüne alındığında (K=10 K=50 K=100), grafiklerde PCM/FM için de bariz bir değişiklik olmadığı görülmüştür.

Sonuç olarak OQPSK modülasyon tekniğinin, gerek bant genişliği, gerek Evrişimsel kanal kodlama tekniğindeki düşük bit hata olasılığı açısından diğer modülasyon türlerine kıyasla, telemetre uygulamaları için daha avantajlı olacağı değerlendirilmektedir.

Telemetre sistemlerinde OQPSK modülasyon tekniği ve 1/2 Evrişimsel kanal kodlama kullanımı önerilmektedir. Alıcı kısmındaki Viterbi algoritmasında da hassas karar veren algoritma kullanılması daha iyi bir performans sağlamaktadır. Bu koşullar için simülasyon çıktıları PCM/FM modülasyon tekniğinin aynı

ayarlamaları ile karşılaştırıldığında, PCM/FM modülasyonunun aynı BER değerine ulaşmak için 2 kat daha fazla güç harcaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

6 GELECEKTE YAPILACAK ÇALIŞMALAR

Bu tezde teletre gibi önemli ve kritik bir haberleşme yapısının sayısal modülasyon ve kanal kodlama yöntemleriyle geliştirilebildiği görülmüştür. Çıkan sonuçlar, halihazırda kullanılan sisteme kıyasla daha verimli, daha etkili ve kaybı az olan, güvenilirliği yüksek bir teletre sisteminin gerçekleştirilebileceğine yönelik çıktılardır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar, bu sistemin donanımlar ile entegre edilmesi ve performansının gerçek koşullarda gözlenmesidir. Ayrıca bu konulardaki makaleler ve yeni gelişmelerin takip edilerek tezde değinilenler dışındaki farklı modülasyon teknikleri ve farklı kanal kodlama yöntemleri simüle edilebilir ve bu yolla performansı daha yüksek bir teletre sistemi de oluşturulabilir.

7 KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Kennedy Hickman. (2008). *World War II: V-2 Rocket*. Available: <http://militaryhistory.about.com/od/artillerysiegeweapons/p/v2rocket.htm>. Last accessed 20th Sep 2013.
- [2] J Muehlner and Park, "Trends in Missile and Space Radio Telemetry", Raytheon, 2p, 1962.
- [3] USA. Range Commanders Council. IRIG. "IRIG STANDARD 106-04 Part I". By Secretariat Range Commanders Council. 2004.
- [4] S. Tirro (1993). *Satellite Communication Systems Design*.:Plenum Press.
- [5] Proakis, J. G (1995). "Digital Communications", 3rd ed. ,New York, McGraw-Hill.
- [6] Peterson, W.W., "Error-Correcting Codes," MIT Undergraduate Journal of Mathematics, MIT Press, 1961.
- [7] A. J. Viterbi, "Convolutional codes and their performance in communication systems", IEEE, 1971.
- [8] Kanemasu, M., "Golay Codes," MIT Press, 1990.
- [9] Daniel, Waturu. "ITU-T Recommendations and Other International Standards Relevant to QOS/QOE." Reading. Workshop on Delivering Good Quality Telecommunications Service in a Safe Environment in Africa. Nairobi. 11 Jan. 2014. ITU. Web.
- [10] Rappaport, Theodore S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1996. Print.
- [11] Frenzel, Lou. "Passive Intermodulation (PIM): What You Need To Know." *Electronic Design Home Page*. N.p., 4 Mar. 2013. Web. 15 Jan. 2014.
- [12] Montanari, Simone. "Microwave Generation for Automotive Applications." *Webspace Cerca*. N.p., 8 Feb. 2005. Web. 11 Jan. 2014.
- [13] Modestino and Mui. "Convolutional Code Performance in the Rician Fading Channel" *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-24, No. 6, (1976): 592-606.
- [14] Chen and Wei. "On the Performance of Rate 1/2 Convolutional Codes with QPSK on Rician Fading Channels" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 39, No. 2, (1990): 161- 70.
- [15] Carden, Frank, Russell P. Jedlicka, and Robert Henry. "Telemetry Systems Engineering". Boston, MA: Artech House, 2002.
- [16] L3 Communications. "PCM Tutorial." *Telemetry Products*. Web. 10 Jan. 2014.

- [17] ITU-R Recommendation P.837-4, "Characteristics of precipitation for propagation modeling", 2003.
- [18] Hewlett-Packard. Digital Modulation in Communications Systems – An Introduction. Application Note 1298.
- [19] "PXI Platform." - National Instruments. Web. 05 Jan. 2014.
- [20] Govindrao Pawar, Atul. "Wireless Communication in Missiles: Challenges." DRDO Science Spectrum (2009): 230-35.
- [21] USA. NASA. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. "The Performance of Noncoherent Orthogonal M-FSK in the Presence of Timing and Frequency Errors". By Sami Hinedi, Marvin Simon, and Dan Raphaeli. 1993.

EKLER

EK-1 Telemetre Yer İstasyonu Birimi Donanımları

ANTEN SİSTEMLERİ

Anten tipi:

Telemetre sistemlerinde yer istasyonlarında kullanılan anten tipleri;

- **Horn:** Genel olarak sabit hedef açısı (boresight) durumunda kullanılır.
- **Omnidirectional:** Düşük menzilli operasyonlar için kullanılır.
- **Planar Array:** Etkin anten alanı yüksek anten tipleridir. En az 2 adet sinyal dedektörün birbirinden eşit mesafede yerleştirilmesi ve alıcılara ulaşan sinyalin yorumlanması ile otomatik takip ve veri işleme yapılır. Boyutlarının küçük olması ve hafifliği nedeniyle tercih edilir. Anten huzme açısı geniştir, üretim aşamasında belirlenir ve bu açı değiştirilemez.
- **Dish:** Uzun menzilli operasyonlarda telemetre yer istasyonlarında kullanılır. Çeşitleri aşağıda belirtilmiştir.
 - *Cosecant-Squared (Dish/Feed)*
 - *Parabolic (Dish/Feed)*
 - *Cassegrain (Dish/Feed/Reflector)*
 - *Flat*

Anten Kazancı:

Telemetre yer istasyonlarında kullanılan takip antenlerinde anten kazancı için en önemli parametre antenin etkin alanıdır. Anten kazancının hesaplanması için kullanılan formül;

$$G = 38.6 - Ae - 20 \log(F)$$

G : Anten Kazancı (dB)

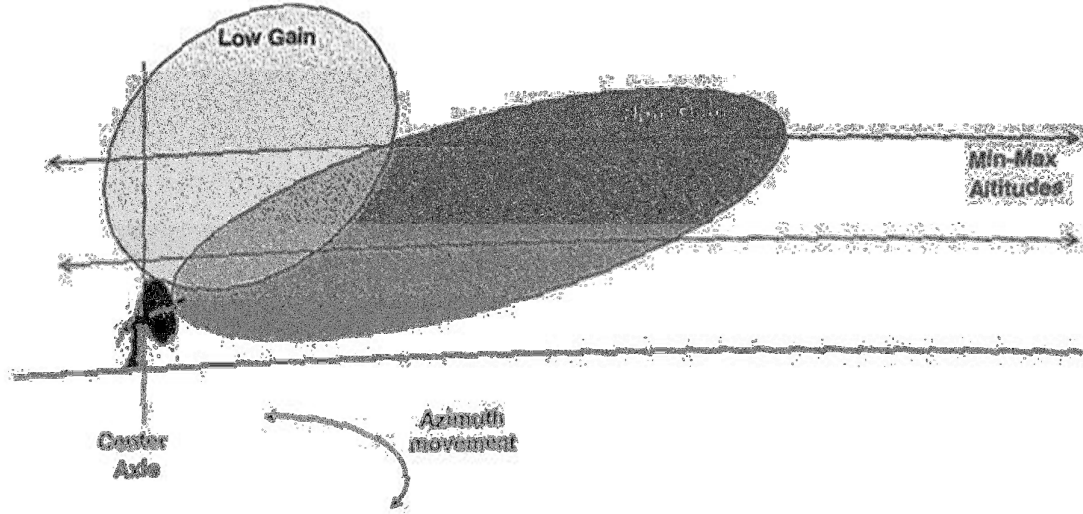
Ae : Anten etkin Alanı (dBms)

F : Frekans (GHz)

şeklindedir.

Anten Huzme Açısı

Anten teorisine göre yapılan yayının bir anten vasıtasıyla yönlendirilmesi sırasında anten huzme açısı ne kadar düşük ise o kadar fazla kazanç sağlanabilir. Telemetre yer istasyonlarında kullanılan takip antenlerinin huzme açıları Şekil-1.1'deki gibi gösterilebilir.



Ek-1 Şekil 1. 1 Anten Huzme Açısı / Anten Kazancı [5]

Geniş Huzme Açısı: Yayın yapan kaynağın yerinin öngörülemediği ya da ani yön değişiklikleri yapabilen kaynakların kullanıldığı uygulamalarda kullanılmalıdır. Geniş huzme açısı, yerden ve yayın yapan platformdan (helikopter palı, uçak motoru gibi) kaynaklanan yansılardan fazlasıyla etkilenir. Özellikle irtifası düşük hava araçlarından veri alınmak istendiğinde, yerden olabildiğince yüksekte konuşlandırılmalıdır. Huzme açısının genişletilmesi anten kazancını düşüreceğinden haberleşme maksimum menzilini düşürmektedir.

Dar Huzme Açısı: Yayın yapan kaynaktan uzakta olunması ya da anten açısal hızlarının az olacağı öngörülen durumlarda kullanılmalıdır. Özellikle uzun menzilli yayın alınacağı durumlarda kullanılması uygundur. Anten huzme açısının düşük olması nedeniyle füzenin yapacağı beklenmeyen ya da öngörülemeyen ani bir manevra sonrasında, mühimmat huzmenin dışında kalabilir ve veri kaybı yaşanabilir. Bu durumu engellemek için dar huzme açılı antenlerin fırlatma doğrultusunun gerisinde konuşlandırılarak, antenin açısal hızlanma ve ivmelenme sınırlarını zorlamayacak uzaklıkta konuşlandırılması gerekmektedir.

Anten Kontrol Sistemleri

Anten Eksenleri

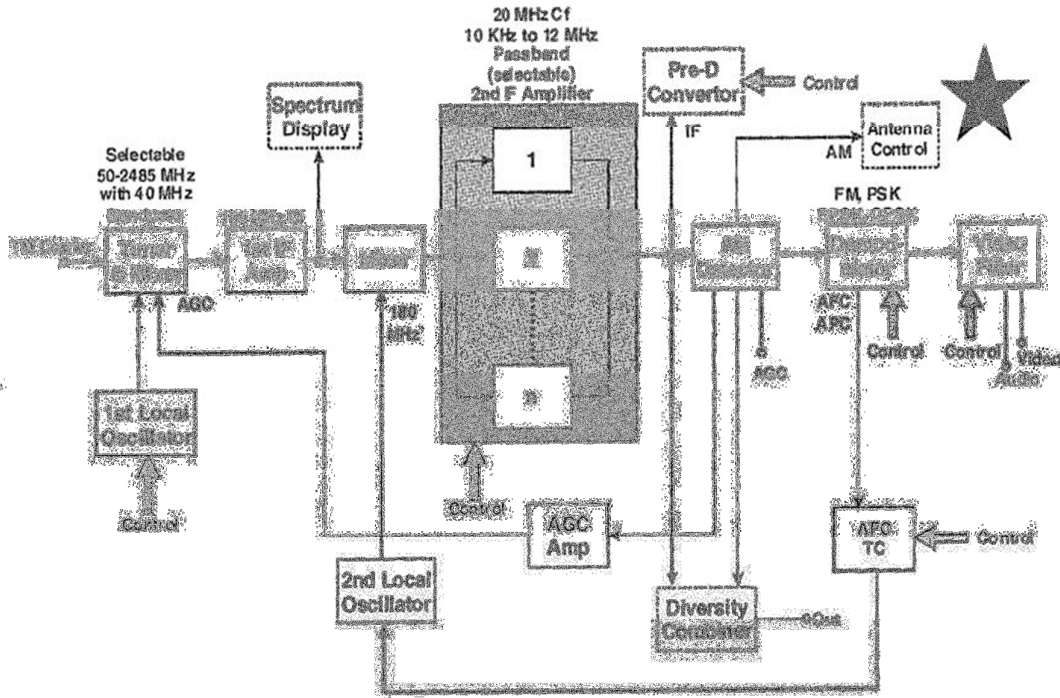
Antenler yan ve yükseklik olmak üzere iki eksene sahiptir. Otomatik takip yapan anten sistemleri iki tiptir.

90 Derece Limitli Yükseklik: Anten kaidesi yükseliş açısı 90 derece ile sınırlandırılmıştır. Anten kaidesinin yükseklik açısı 90 derecenin üzerine çıktığında takip anteni yanca yön değiştirmek zorundadır.

180 Derece Limitli Yükseklik: Anten kaidesi yükseliş açısı 180 derece ile sınırlandırılmıştır. Özellikle yayın kaynağının yerden dik olarak ayrıldığı durumlarda kullanılması uygundur. Yükseliş açısı 90 derece limitli anten sistemleri maliyet açısından daha efektif olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Antenin Otomatik Olarak Hedefe Yönlenmesi (Otomatik Takip)

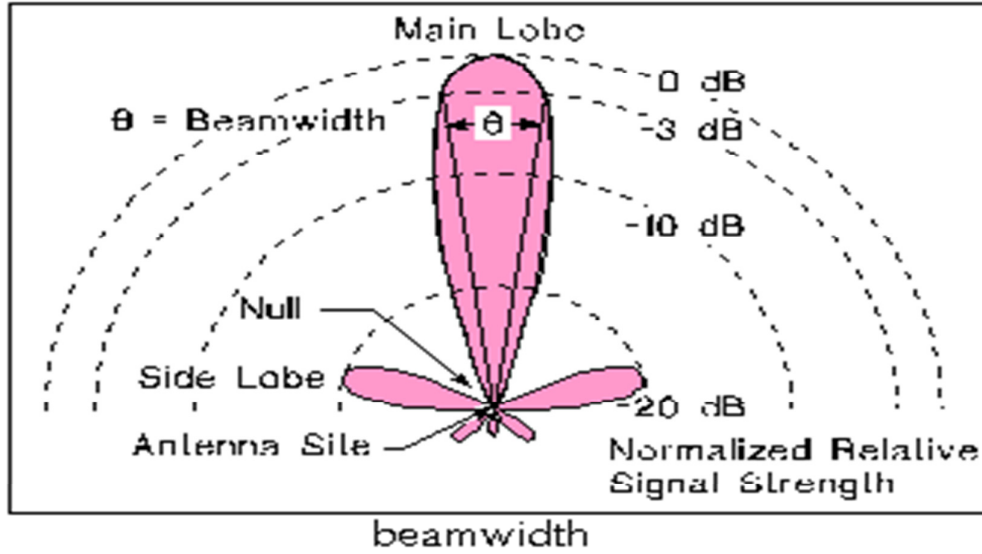
Almaç kısmında antenin doğru şekilde otomatik olarak hedefe yönlendirilebilmesi için gereken çıktı Genlik Modülasyonu (AM) hata sinyalinden sağlanır. AM hata sinyalinin değişimi ile anten yan ve yükseliş eksenlerinde otomatik olarak sürülebilir.



Ek-1 Şekil 1. 2 Temsilî Almaç Kontrol Birimi [15]

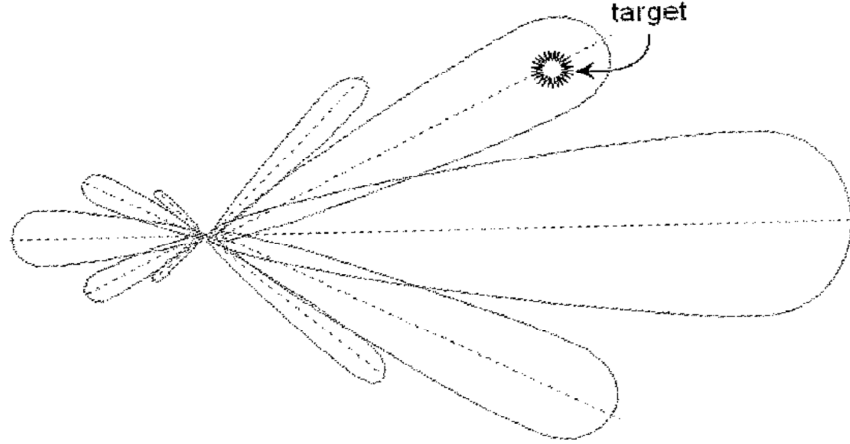
Piyasada yer alan firmalar tarafından üretilen otomatik takip yeteneğine sahip telemetre antenlerinin almaç sistemleri AM hata sinyallerini dört kadranlı dedektör mantığıyla işletmekte ve en az iki yükseklik ve iki yan hata sinyali ile çalışmaktadır. Dört kadranlı almaçta oluşan sinyal seviyesinin gücüne göre bir AM hata sinyali oluşturulur ve bu hata sinyali işlenerek anten hedefe yönlendirilir. Hedefe yönlendirilmiş anten için almaçların hepsindeki sinyal seviyesi eşittir.

Füze üstü telemetre sistemlerinden radyo frekansı ile gönderilen veriler anten sistemlerinin kazancı ile yükseltilecek alması alt birimine aktarılırlar. Verinin gönderildiği yöne bağlı olarak anten sistemi gelen sinyali belirli bir kazanç katsayısı ile çarpar. Antenlerin hangi yönde hangi kazancı kullanacağını göstermek üzere anten örüntü modelleri çıkarılır. Anten örüntü modellerinde bir tane ana lob ve bunun yanında birden fazla yan bulunmaktadır. (Şekil 1.3)



Ek-1 Şekil 1. 3 Anten Örüntü Modeli [15]

Bu yan lobların gücü az olmakla beraber özellikle yakın mesafelerde hedef yan lobun içerisinde kalabilir. Bu istenmeyen bir durumdur ve antenin hedefe doğru şekilde yönelmesini bozar. Bu durumu engellemek için dar huzme açılı antenlerin fırlatma doğrultusunun gerisinde konuşlandırılarak, antenin açısız hızlanma ve ivmelenme sınırlarını zorlamayacak uzaklıkta konuşlandırılması gerekmektedir.

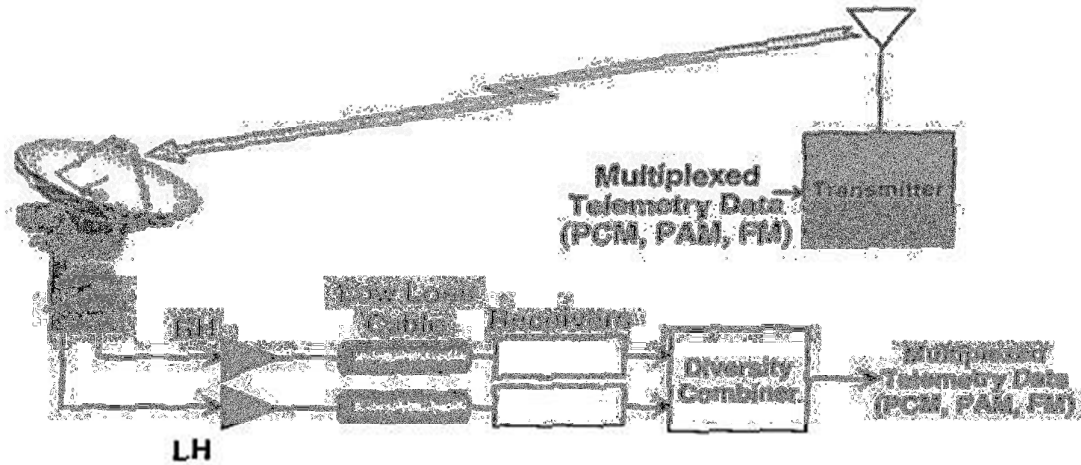


Azimuth
(overhead look)

Ek-1 Şekil 1. 4 Yan Lobda Görülen Hedef [15]

Sinyal Birleştiriciler (Diversity Combiner)

RF sinyalinin daha sağlıklı alınabilmesi için sinyal iki verici aracılığıyla veya iki fazlı (Right Hand (RH) ve Left Hand (LH) polarizasyonlu) olarak yayın yapılır. Alınan iki fazlı verinin Sinyal Gürültü Oranı'nın (SNR) artması için birleştiricinin kullanılması gerekmektedir. Yapılan yayının iki fazlı gönderilerek birleştirilmesi ile SNR'da 10 dB'ye kadar iyileşme sağlanabilmektedir.



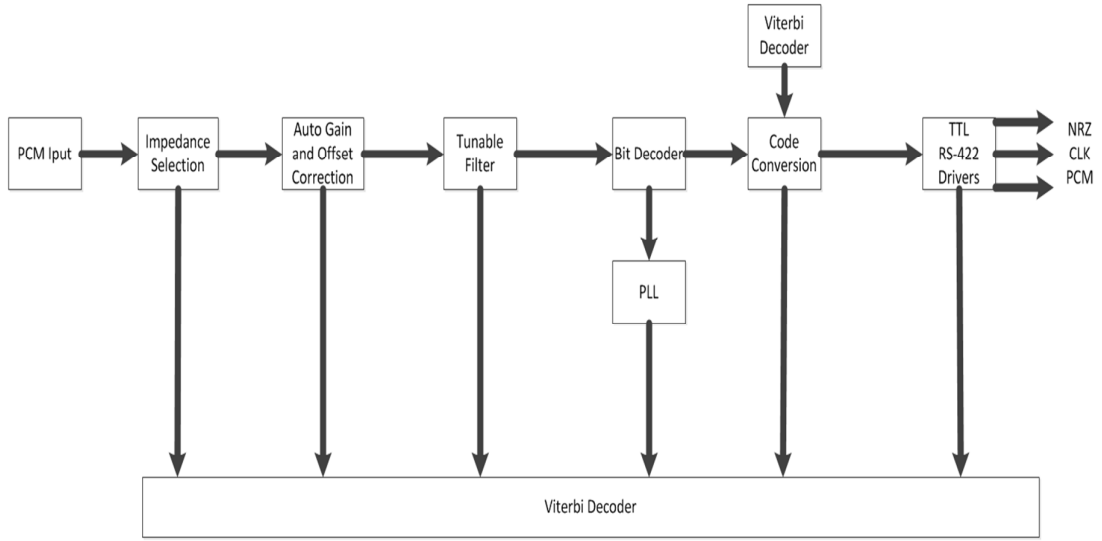
Ek-1 Şekil 1. 5 Sinyal Birleştirici [15]

VERİ İŞLEME SİSTEMİ

Bit Eşleyici

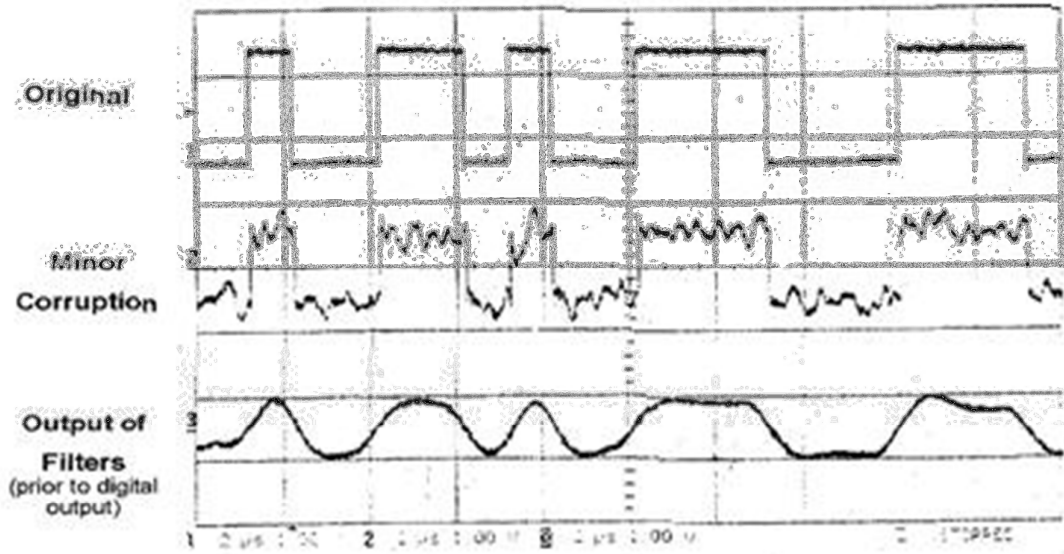
Bit Eşleyici gelen yayındaki gürültünün yok edildiği ve gelen bitlerin düzenlenmesinin yapıldığı veri işleme sistemi birimidir. Başlıca amacı sinyaldeki faz kaymalarını ve genlik bozukluklarını düzenleyerek gelen yayındaki bitlerin 1 veya 0 olarak belirlenmesine karar vermektir.

Şekil 1.6'da gösterildiği üzere öncelikle gelen PCM sinyaline empedans uyumlaması yapılmaktadır. Daha sonra otomatik kazanç ve Ofset doğrulaması yapıp ilgili akıştaki bitlerin 1 ve 0 kararının verilmesi için sinyal Bit Decoder'de işleminden geçirilmektedir. Bu bitlerin kararı verilirken gelen yayın üzerindeki Viterbi veya Golay ile kodlanmış kontrol bitleri de çözümlenerek bitlerin kontrolü yapılmaktadır. Daha sonra söz konusu telemetre yayını gürültüden arınmış ve bit düzeltmeleri yapılmış olan sinyal dekomutatöre gönderilecektir.



Ek-1 Şekil 1. 6 Bit Eşleyici Yapısı [16]

Şekil 1.7'de görülen ilk sinyal yayın kaynağından gönderilen temel frekans bandındaki sinyali, ikincisi almaç tarafından alınıp temel frekans bandına indirgenmiş sinyal ve sonuncusu ise ayarlanabilir filtreden (Tunable Filter) çıkan sinyali göstermektedir.

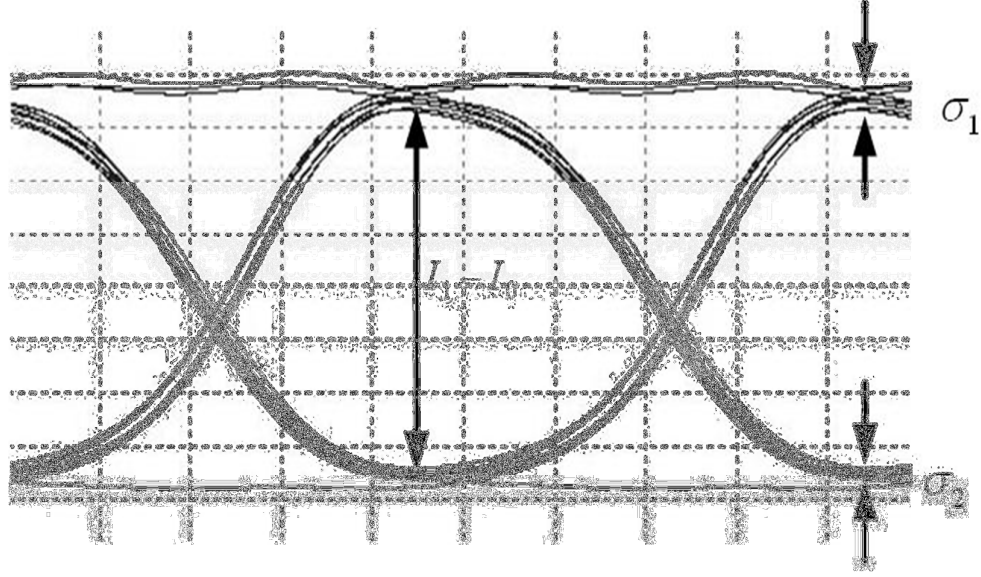


Ek-1 Şekil 1. 7 Bit Eşleyicisinde Filtrelenmiş Sinyal[16]

RF link aracılığıyla bir dijital yayın ile sisteme ulaşmayan bit hata sayısına BER (Bit Error Rate) denir. Bir sistemde kaybedilen bit sayısı ne kadar az ise RF linkin o kadar güvenilir olduğu belirtilir.

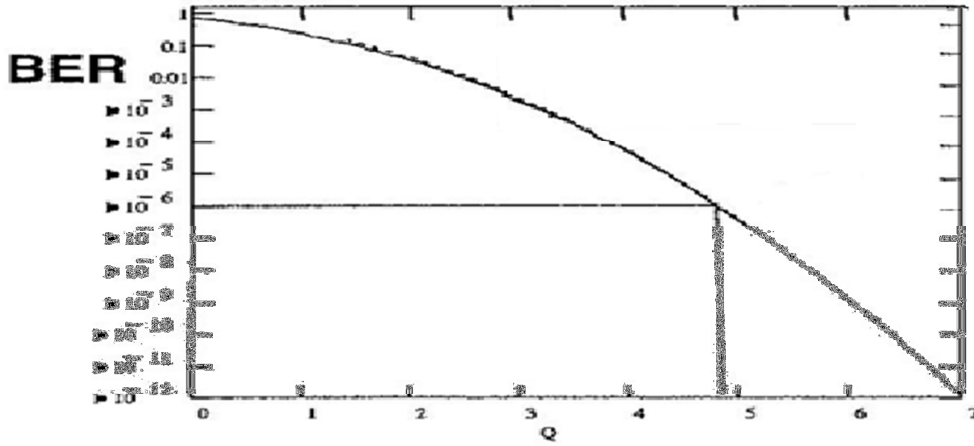
Yer istasyonuna ulaşan PCM sinyali Şekil 1.8 'de gösterildiği gibi bir göz diyagramı şeklindedir. Bu göz diyagramı üzerinde bir Q parametresi belirlenerek BER değeri bulunabilir. Q parametresi için denklemde verilmiştir.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$



Ek-1 Şekil 1. 8 Göz Diyagramı[15]

Q değeri artarken BER azalmaktadır. Bu bağlantı aşağıdaki şekilde verilmiştir. Örneğin Q=5 değeri için BER= 10^{-6} 'dır.

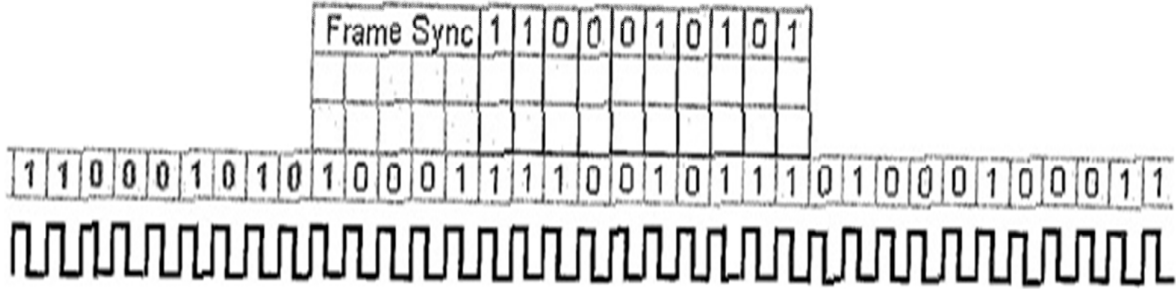


Ek-1 Şekil 1. 9 PCM yayınında Q-BER bağlantısı [5]

Dekomutator

Dekomutator, demultiplekser olarak da bilinmektedir. Gelen verilerin içeriğine göre çerçeve senkronizasyonunun sağlandığı kısımdır. Bit Eşleyiciden gelen PCM formatında oluşturulmuş bitlerin (0 ve 1'lerden oluşan dizi) yerlerinin tespit edilmesi için dekomutator Şekil 1.10'da gösterildiği gibi bir çerçeve senkronizasyon bit

grubunu arar. Bu grup bulunduktan sonra veri taşıyıcı çerçeveden itibaren kaç bit veri olduğu ayarlanarak çerçevenin sınırları çizilir.



Ek-1 Şekil 1. 10 Çerçeve Senkronizasyonu[3]

Telemetre dekomutatörleri tarafından kullanılan optimum çerçeve senkronizasyon kalıpları IRIG standartları ile düzenlenmiştir. Bu kalıplar Çizelge 2'de verilmiştir. Örneğin 24 bit çerçeve senkronizasyonu için optimum kalıp FAF320'dir.

Çizelge 2 Optimum Çerçeve Senkronizasyon Kalıpları [3]

Number of Bits	Octal	Hex
8	560	B8
10	6700	DC0
12	6540	B60
14	71500	E680
16	727100	EB90
18	746500	F3500
20	7336100	EDE20
22	7466500	F36A00
24	76571440	FAF320
26	764654200	FA68100
28	7536263000	F5E980
30	7657146400	FAF34000
32	77465450200	FE6B2840

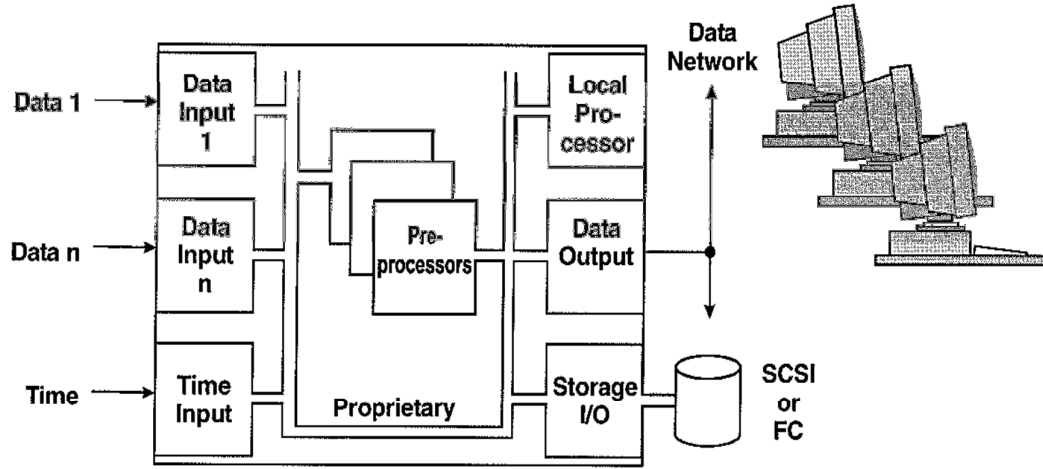
Telemetre Verisi İşleme Bilgisayarı (TVİB)

TVİB almaç sisteminden gelen telemetre verisinin çözümlenerek gerçek zamanlı görüntülenebilecek veya daha sonra görüntülenmek üzere saklanabilecek hale getirildiği kısımdır. Bu bilgisayarların altyapısı için iki tip çözüm bulunmaktadır.

- Ön İşlemcili Sistemler
- Masaüstü Bilgisayar Sistemleri

Ön İşlemcili Sistemler

Ön işlemcili sistemler gelen telemetre verisini işlemek için bir ön işlemci kullanırlar. Ön işlemci işlenen veriyi saklamak veya görüntülemek üzere ilgili kısımlara aktarır. Gerçek zamanlı uygulamalarda bu tip bir çözüm daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Fakat fiyat olarak pahalı bir çözümdür. Şekil 1.11'de ön işlemcili sistemin altyapısı görülmektedir.

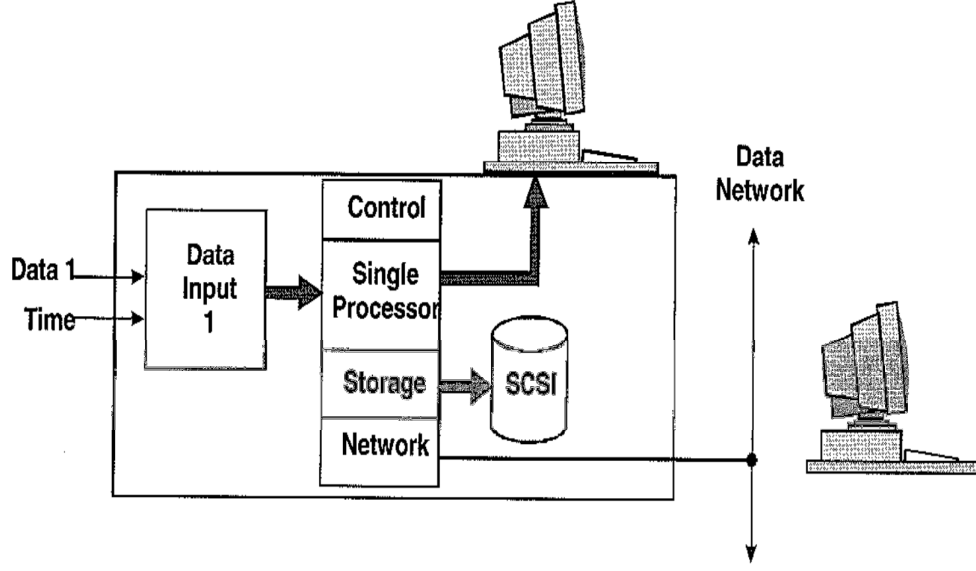


Ek-1 Şekil 1. 11 Ön İşlemcili TVİB [15]

Masaüstü Bilgisayar Sistemleri

Günümüzde telemetre sistemi tasarımı yapan firmaların satış maliyetlerini azaltmak için kullandığı yöntemlerden biri de TVİB olarak masaüstü bilgisayar çözümleri kullanmaktır. Bu sistemlerin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımında çeşitli sakıncalar bulunmakla birlikte masaüstü bilgisayar sektöründeki standartlaşma, hızlı gelişim ve ucuz maliyet telemetre sistemi üretiminin de masaüstü bilgisayar kullanımını daha yaygın hale getirmektedir. Şekil 1.12'de örnek masaüstü bilgisayar altyapısını kullanan bir TVİB görülebilir.

Bu tarz TVİB'lerinde Windows ve Linux vb. işletim sistemleri üzerinde koştan telemetre yazılımları bulunmaktadır.



Ek-1 Şekil 1. 12 Örnek Masaüstü Bilgisayar Sistemli TVİB [15]

EK-2 Telemetre Kanal ve Sistem Parametreleri

Almaç ve Göndermeç Antenlerinin Kazancı

Antenler elektromanyetik dalgaların alınmasını ve gönderilmesini sağlar. Bu işlemleri yaparken elektromanyetik dalgaları elektrik akımına çevirirler ya da elektrik akımını elektromanyetik dalgalara dönüştürürler. Anten kazancı hem gönderim yönün de hem de alış yönün de önemli bir parametredir. Telemetre Yer İstasyonlarında kullanılan anten çeşitleri parabolik (çanak) antenlerdir.

Çanak antenler yönlendirilmiş anten grubuna girer. Telemetre uygulamalarında kullanılan çanak antenlerin huzme açıları çok dardır. Antenin kazançları çok yönlü antenlerin kazançlarına göre hesaplanır. Aşağıdaki denklemde antenin maksimum kazancı G 'nin bağlı olduğu parametreler gösterilmiştir. Anten kazancı G ; Antenin verimliliğine n , antenin yarıçapına d ve dalga boyuna λ bağlıdır.

$$G = n \left(d \frac{\pi}{\lambda} \right)^2$$

Telemetre antenlerin huzme açıları dar olduğundan ötürü füzeyi sürekli takip etmesi gerekmektedir. Bu yüzden antenin sürekli füzeyi görebilecek şekilde yerleştirilmesi çok önemlidir.

Elektromanyetik dalgalar antenden yayılırken Yatay (Horizontal) ve Düşey (Vertical) yönde hareket eder. Füze anteninden gönderilen sinyalin yayılım hareketiyle almaç antenin yayılım hareketi aynı yönlü olmalıdır. Aksi takdirde almaç anteni sinyali gürültülü ve çok zayıf alır. Bu polarizasyon farkından dolayı oluşan sinyal kayıpları göz önünde bulundurulmalıdır.

Yol Kayıpları ve Etkileri

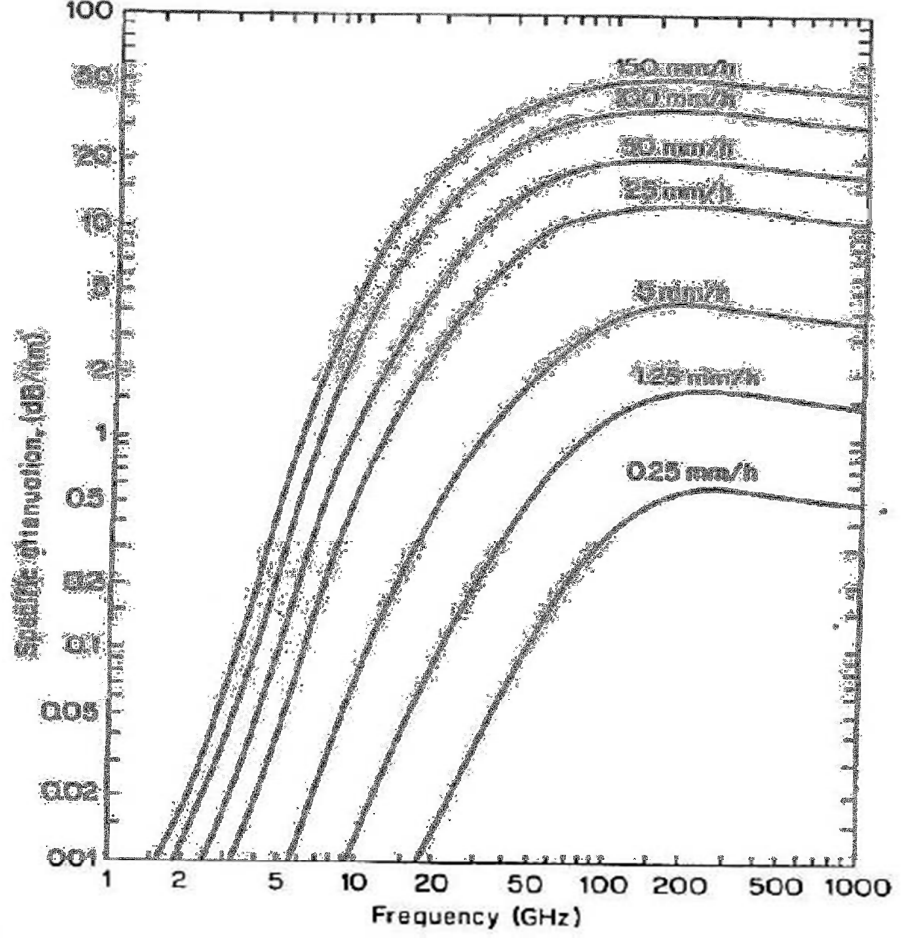
-Serbest Uzay Kayıpları L_{FS} sinyalin antenden uzaklaştıkça meydana gelir. Bu kayıplar alıcı verici arasındaki mesafeye bağlıdır ve uzaklığın karesi ile doğru orantılıdır.

$$L_{FS} = \left(4\pi \frac{d}{\lambda}\right)^2$$

-Anten ayarsızlıklarından oluşan kayıplar L_A füzenin üstündeki anten ile yer istasyonunda bulunan antenlerin örüntüleri birbirleriyle kesişmeme durumunda oluşmaktadır.

-Atmosferik Soğurma Kayıpları L_{ATM} Dünyanın atmosfer katmanlarının soğurma özelliğinden dolayı oluşan kayıplardır. Aşağıdaki grafikte frekansa bağlı olan atmosfer soğurma grafiği gösterilmiştir. Frekans arttıkça dünyadaki atmosferin hem iyonosfer katmanında hem de troposfer katmanında soğurma oranı artmaktadır.

- Yağmur yüzünden oluşan kayıplar L_{RAIN} atmosferde bulunan su buharının boyutu ile sinyalin dalga boyu ile eşdeğer boyda olmalarından ötürü zayıflamalar oluşmaktadır. Bu zayıflama frekansa, yağış miktarına bağlı olarak değişmektedir. Aşağıdaki grafikte ITU'nün sağlamış olduğu yağış miktarına göre frekanstaki zayıflama miktarı gösterilmiştir:



Ek-2 Şekil 2. 1 Farklı yağış miktarları için frekansa bağlı sinyal zayıflatma grafiği [17]

Gürültü Gücü

Sinyalin bozulmasına sebep olan her faktör gürültü olarak nitelendirilmektedir. Gürültünün kaynağı, iki ana nedenden oluşmaktadır. Alıcının neden olduğu gürültü ve başka elektromanyetik sinyallerin neden olduğu enterferanslar (güneş etkisi, atmosfer etkisi, yağmur gibi).

Alıcı Gürültüsü

Alıcıda oluşan gürültü, gürültü seviyesi olarak nitelendirilir. Gürültü seviyesi; alıcının çıkışındaki gürültü gücünün örnek standart bir gürültünün alıcı kazancıyla çarpımının oranına eşittir.

$$G = \frac{N_{out}}{GN_{in}}$$

Örnek standart gürültü 290⁰ kelvindeki sıcaklık gürültüsüdür.

Boltzmann sabit $k = 1.380653 \times 10^{-23} m^2 kg s^{-2} K^{-1}$

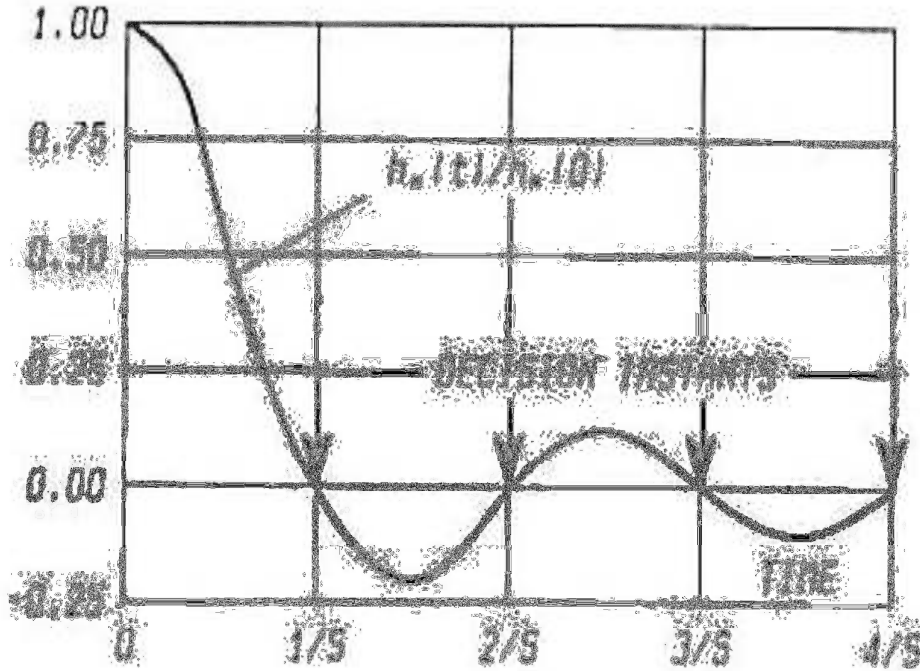
$$N_{in} = kT_0 \Delta f$$

Sıcaklık gürültüsü 0⁰ kelvinin üzerindeki her sıcaklıkta mevcuttur. Gürültünün doğası gereği (AWGN) enerjisi tüm frekanslara eşit olarak dağılmıştır.

EK-3 ISI ve Darbe Şekillendirme (Pulse Shaping)

Sayısal haberleşmede en önemli sorunlardan biri Semboller Arası Girişimdir (*Inter Symbol Interference, ISI*). Sistemdeki süzgeçler modüle edilmiş sinyalin bant genişliğini sınırlamaktadır. Böylelikle sembolün I ve Q sinyal bileşenleri azalan kuyruğu takip eden düzensiz tepeler (*peak*) oluşturur. Sonuç olarak, sembol enerjisinin bir kısmı diğer semboller üzerine yayılarak girişime neden olur ve hatalı karar verme ihtimalini belirgin bir şekilde artırır.

I ve Q sinyalleri, taşıyıcı sinyali modüle edilmeden düzgün bir şekilde süzülebilir ve bu durum süzgecin darbe cevabına göre sinyallere bir darbe şekli tanımlamak olarak da bilir. Eğer her iki sinyal de Nyquist shaping pulse tarafından süzülürse, ISI doğru zamanda örnekleme yapılarak engellenebilir. Error! Reference source not found.'de Nyquist pulse örneği verilmiştir.



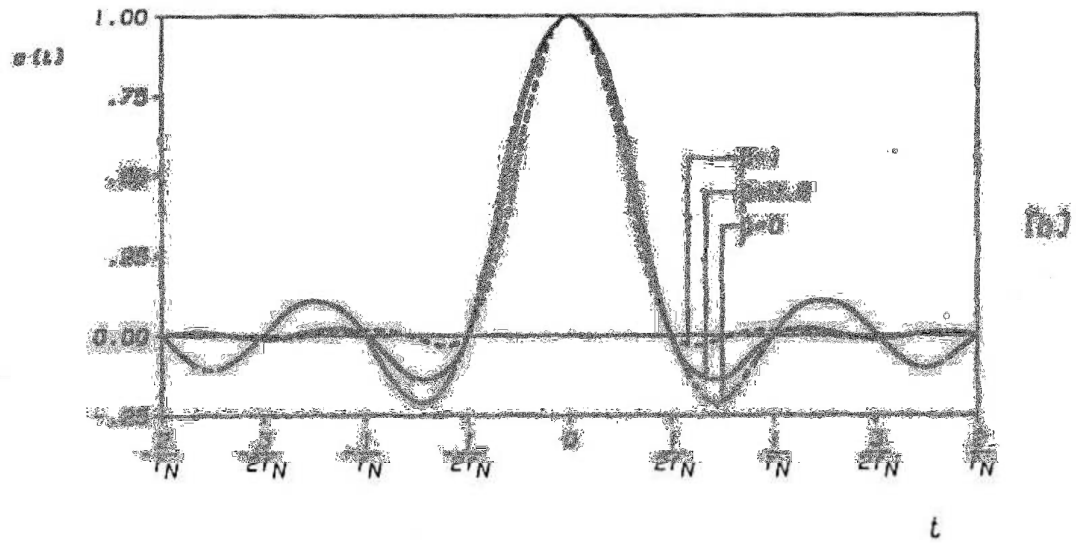
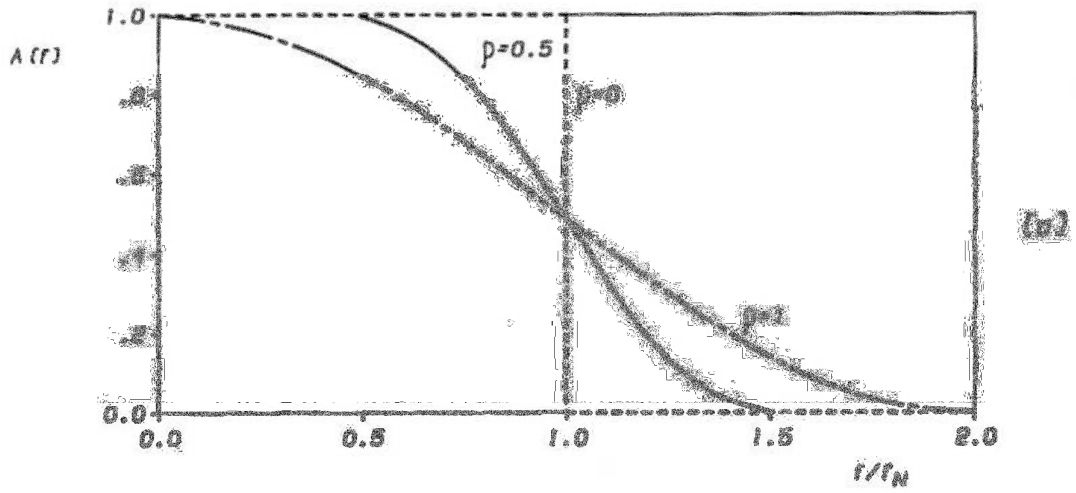
Ek-3 Şekil 3. 1 Nyquist darbe [18]

Grafikten de görüldüğü gibi sistem için gerekli bant genişliği, sembol hızına denk gelecek şekilde $2f_h$ dir.

Bu tipteki filtreleri pratikte uygulamak, sonsuz cevaplarından dolayı mümkün değildir. Buna ek olarak Nyquist cevabını bozan herhangi bir doğrusal olmayan etki ve bozulma, yüksek ISI oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle pratikte uygulaması daha kolay olacak şekilde geniş bant genişliği olması için roll-off katsayısı ρ olan ve daha küçük kuyruklar üreten bir süzgeç kullanılır. **Error! Reference source not found.**2'de değişik ρ değerlerine göre örnekler verilmiştir.

$$BW = S(1 + \rho)$$

$\rho=0$ olduğu durumda Nyquist pulse oluşmaktadır.



Ek-3 Şekil 3. 2 Raised Cosine Spektrumu [18]

EK-4 Kullanılan Donanım ve Özellikleri

Çizelge 3 Kullanılan PXI ve Modülleri

PXI SİSTEMİ	ÖZELLİKLERİ
PXI 5673 (Sinyal Oluşturma Modülü)	<ul style="list-style-type: none">• 85 Mhz ile 6.6 Ghz operasyonel çalışma aralığı• >100 Mhz bandgenişliği• 10 dBm'e kadar RF yükseltebilme• Windows 7/Vista/XP/2000
PXI 5665 (Sinyal Analiz Modülü)	<ul style="list-style-type: none">• 20 Hz ile 3.6 GHz'e kadar frekans aralığını alabilmektedir• 25/50 Mhz anlık band genişliğine sahiptir• 1 Ghz'de ortalama -165 dBm/Hz hataya sahiptir

RF Sinyal Analizör (PXIe – 5665):

PXIe - 5665 RF Sinyal analizör modülü, 20 Hz ile 14 GHz frekans aralığında çalışan PXI teknolojisinin en yüksek performanslı vektör sinyal analizörüdür. PXIe - 5665, sağladığı düşük faz gürültüsü, yüksek dinamik aralık ve doğrusallık sayesinde mikrodalga tasarım, radar ve elektronik harp sistemlerinde en çok tercih edilen PXI RF analizörüdür. Birden fazla PXIe - 5665 eş zamanlı ölçüm alacak şekilde ayarlanabilir. Eş zamanlı ölçüm yapabilme yeteneği sayesinde çoklu giriş (*Multiple Input*) ve eş fazlı ölçümlere izin vermektedir.



Ek-4 Şekil 4. 1 PXI - 5665 Sinyal Analizör Modülü [19]

Yetenekleri:

- Spektrum analizi
- Modülasyon – Demodülasyon
- Kanal kodlama ve çözme
- Maksimum hızda (300 MB/s) diske kayıt

Özellikleri:

- Frekans Aralığı: 20 Hz – 14 GHz (3.6 GHz Versiyonu Mevcuttur)
- -129 dBc/Hz Faz Gürültüsü
- 100 MHz Anlık Bantgenişliği (300 kHz Dar Bant Seçilebilir)
- -165 dBm/Hz Gürültü Tabanı
- +/- 0.1 dB Genlik Doğruluğu
- 16 Bit Çözünürlük

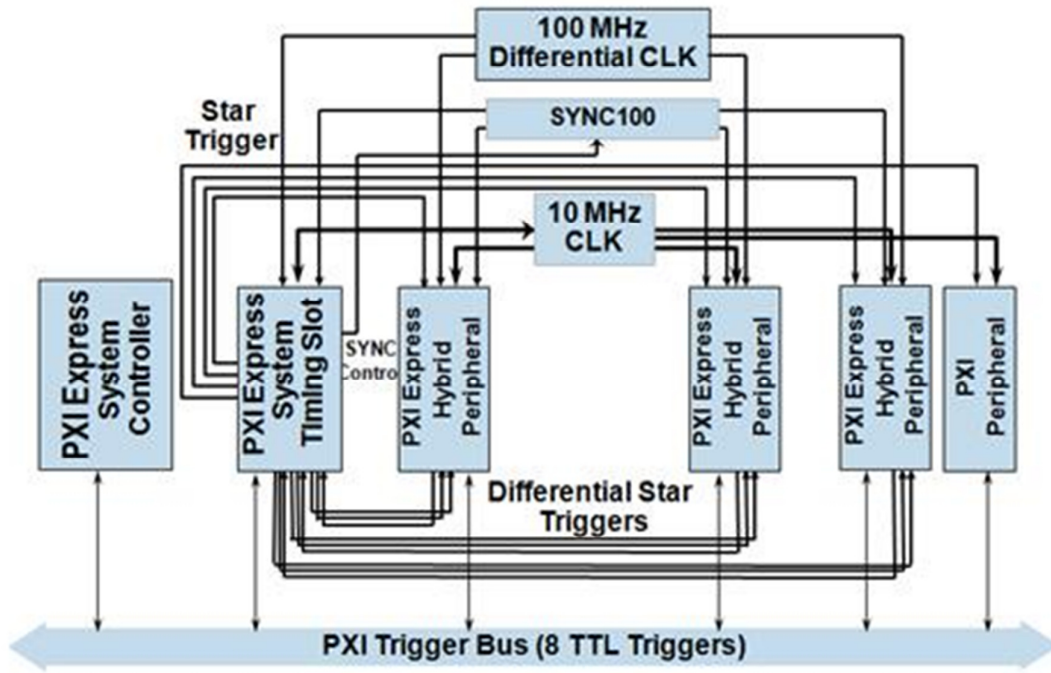
Çizelge 4 RF sinyal analizör karşılaştırma tablosu[19]

Model	Frekans Aralığı	Bant Genişliği	Çözünürlük	Form Faktör	Faz Koherent Ölçüm
PXIe - 5663	10 MHz – 6.6 GHz	100 MHz	16 Bit	PXI Ekspres	Mevcut
PXIe - 5665	20 Hz – 14 GHz	100 MHz	16 Bit	PXI Ekspres	Mevcut

PXI:

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation), endüstriyel dayanıklı bir yapıya sahip olan bilgisayar tabanlı yüksek performanslı modüler test ve ölçüm platformudur. 1997 yılında National Instruments tarafından geliştirilmiş olan PXI için günümüzde birçok firma modül üretmektedir.

PCI ve PCIeKspres teknolojisi temelinde geliştirilmiş olan PXI, ticari bilgisayar teknolojisini içerdiğinden dolayı kolaylıkla ve düşük maliyette güncellenebilmektedir ve kullanıcılara esneklik kazandırmaktadır. 8 GB'a kadar yüksek bant genişliği sağlayan PXI sistemi, üzerinde senkronizasyon ve zamanlama hattı bulundurmaktadır. Programlanabilir senkronizasyon ve zamanlama hattı kullanılarak aynı anda kullanılan birden fazla modül kolaylıkla senkron olabilmektedir. Aşağıda PXI Ekspres sistemin senkronizasyon ve zamanlama şeması görülmektedir.



Ek-4 Şekil 4. 2 PXI iç yapısı [19]

NI LabView:

Labview, bilim ve mühendislik alanlarında özel bir amaca yönelik gerçek zamanlı veriler ve sinyaller ile etkileşim kurmaya yarayan bir yazılım geliştirme platformudur.

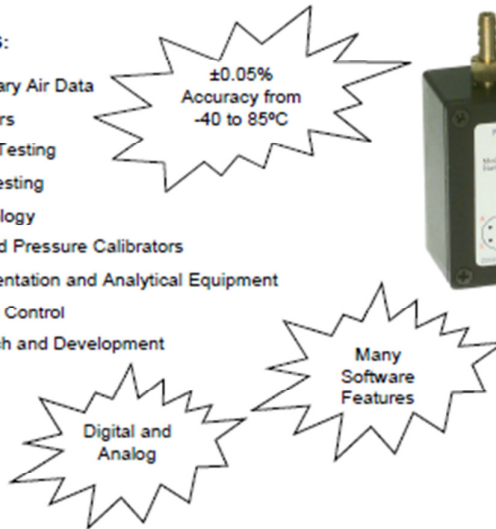
Gerekli PXI modülleri Labview yazılımı ile birleştirildiğinde, gerçek zamanlı veriler işlenip analiz edilebilmektedir.

Precision Pressure Transducer PPT

Honeywell's precision pressure transducer (PPT) offers extraordinary value with high accuracy over a wide temperature range. The PPT combines proven silicon sensor technology with microprocessor-based signal conditioning to provide an extremely smart pressure transducer. Available in a compact, rugged design, the PPT has many software features that support a wide range of applications.

APPLICATIONS:

- Secondary Air Data
- Altimeters
- Engine Testing
- Flight Testing
- Meteorology
- Flow and Pressure Calibrators
- Instrumentation and Analytical Equipment
- Process Control
- Research and Development



Digital and Analog

Many Software Features

CE Qualified
ISO-9001
ISO-14001

FEATURES AND BENEFITS

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ High Accuracy
±0.05% FS typical accuracy from -40 to 85°C ➤ Smart, Digital Sensing and Control ➤ Versatile and Configurable ➤ User Selectable Software Features | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplifies System Design - No additional signal compensation needed to gain the benefits of a very accurate sensor. ➤ Efficient Data Acquisition - Connect up to 89 units on a multidrop bus using built-in RS-485 capability.
Easy Interface - Directly connects to PC via communication ports.
Closes the Loop - Smart PPT makes control decisions. ➤ Works with existing and new systems. - All units have 0-5V analog and either RS-232 or RS-485 digital outputs.
Handles most dry gas media.
Optimizes Output - User-configurable pressure units, sampling, update rate.
Flags Problems - Internal diagnostics set flags, provide alarms. ➤ Baud Rate, Parity Setting, Continuous Broadcast, ASCII or Binary Output, Sensor Temperature Output (°C or °F), Deadband, Sensitivity, Tare Value, Configurable Analog Output |
|--|--|

EK 6 Analog-Sayısal Çevirici Spesifikasyon Dokümanı



14-Bit, 150 MSPS, 1.8 V Analog-to-Digital Converter

AD9254

FEATURES

- 1.8 V analog supply operation
- 1.8 V to 3.3 V output supply
- SNR = 71.8 dBc (72.8 dBFS) to 70 MHz Input
- SFDR = 84 dBc to 70 MHz Input
- Low power: 430 mW @ 150 MSPS
- Differential Input with 650 MHz bandwidth
- On-chip voltage reference and sample-and-hold amplifier
- DNL = ± 0.4 LSB
- Flexible analog input: 1 V p-p to 2 V p-p range
- Offset binary, Gray code, or twos complement data format
- Clock duty cycle stabilizer
- Data output clock
- Serial port control
 - Built-in selectable digital test pattern generation
 - Programmable clock and data alignment

APPLICATIONS

- Ultrasound equipment
- IF sampling in communications receivers
 - CDMA2000, WCDMA, TD-SCDMA, and WiMax
- Battery-powered instruments
- Hand-held scopemeters
- Low cost digital oscilloscopes
- Macro, micro, and pico cell infrastructure

GENERAL DESCRIPTION

The AD9254 is a monolithic, single 1.8 V supply, 14-bit, 150 MSPS analog-to-digital converter (ADC), featuring a high performance sample-and-hold amplifier (SHA) and on-chip voltage reference. The product uses a multistage differential pipeline architecture with output error correction logic to provide 14-bit accuracy at 150 MSPS data rates and guarantees no missing codes over the full operating temperature range.

The wide bandwidth, truly differential SHA allows a variety of user-selectable input ranges and offsets, including single-ended applications. It is suitable for multiplexed systems that switch full-scale voltage levels in successive channels and for sampling single-channel inputs at frequencies well beyond the Nyquist rate. Combined with power and cost savings over previously available ADCs, the AD9254 is suitable for applications in communications, imaging, and medical ultrasound.

A differential clock input controls all internal conversion cycles. A duty cycle stabilizer (DCS) compensates for wide variations in the clock duty cycle while maintaining excellent overall ADC performance.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

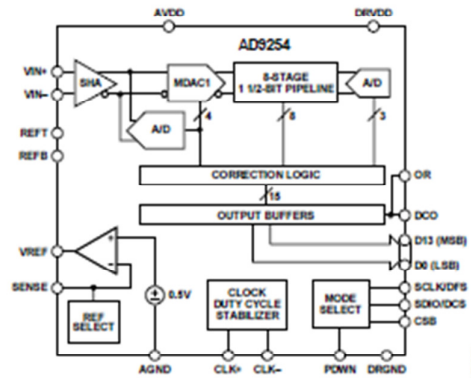


Figure 1.

The digital output data is presented in offset binary, Gray code, or twos complement formats. A data output clock (DCO) is provided to ensure proper latch timing with receiving logic.

The AD9254 is available in a 48-lead LFCSP_VQ and is specified over the industrial temperature range (-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$).

PRODUCT HIGHLIGHTS

- The AD9254 operates from a single 1.8 V power supply and features a separate digital output driver supply to accommodate 1.8 V to 3.3 V logic families.
- The patented SHA input maintains excellent performance for input frequencies up to 225 MHz.
- The clock DCS maintains overall ADC performance over a wide range of clock pulse widths.
- A standard serial port interface supports various product features and functions, such as data formatting (offset binary, twos complement, or Gray coding), enabling the clock DCS, power-down, and voltage reference mode.
- The AD9254 is pin-compatible with the AD9233, allowing a simple migration from 12 bits to 14 bits.

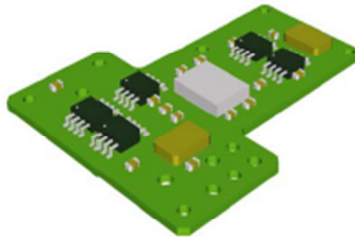
One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2006 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

EK 7 PCM Enkoder Spesifikasyon Dokümanı

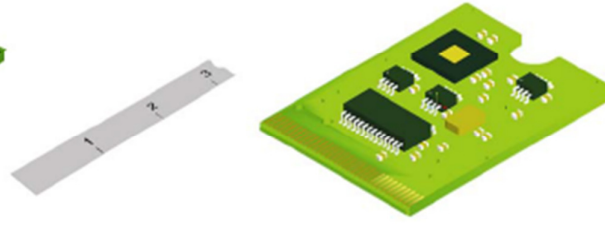
Technical Bulletin

(UTTS) Universal Tactical Telemetry System S-Band Transmitter/PCM Encoder

S-Band Transmitter Module



PCM Encoder Module



DESCRIPTION

The Universal Tactical Telemetry System (UTTS) is a modular assembly consisting of Transmitter and PCM Encoder Modules (PC Board assemblies) designed specifically for extremely high shock applications. These applications include, but are not limited to, projectiles, high performance missiles, and in-bore (155 mm cannon and other) telemetry applications. The Transmitter and PCM Encoder modules are mounted in a compartmentalized aluminum housing to provide maximum isolation and EMI protection, and can be operated from a wide variety of power sources from 3.5 to 15 Vdc. The modules are small enough to allow packaging into virtually any type of mechanical system configuration, and in special cases, can be made even smaller through the use of ASIC and Hybrid devices. The versatility of these two basic module assemblies allows considerable latitude in the design and implementation of a Telemetry System for projectile and high environment programs. These components can be used for Test and Instrumentation applications, as Warhead replacement systems for projectile and missile performance evaluation applications, for training, or where a need for a Tactical Telemetry capability is required.

TRANSMITTER FEATURES

- Minimum Size and Weight
- Available in 0.5 to 2.0 Watts RF Out
- S-Band 2200 to 2400 MHz
- Frequency Agile/Programmable
- Meets IRIG 106 Standards
- 1/2 MHz Steps
- Modulation Input 1 kHz to 10 MHz

PCM ENCODER FEATURES

- FPGA based
- Minimum Size and Weight
- 1-16 Analog Inputs (Single Ended/Differential)
- 1-24 Discrete Inputs
- 1-2 RS-422/232 Serial Inputs
- I/O via PC Edge or MDM Connector
- Externally Programmable
- 6 Pole Pre Mod Filter



communications

Cleared by DoD/DFOISR for public release under DFOISR case number 04-S-0513 on July 27, 2004.

EK 8 Göndermeç Spesifikasyon Dokümanı

Airborne Telemetry

ST-3000 Telemetry Transmitter

Telemetry Products



FEATURES

- Integral and Proprietary Isolated Switching Power Supply Design resulting in Ultra High Efficiency
 - 10 watt – 1.3 A, typical
 - 5 watt – 0.9 A, typical
 - 2 watt – 0.7A, typical
- Lower Heat Dissipation
 - Significantly reduces Heat Sink requirements
- Full S Band coverage (2200 to 2400 MHz)
 - L Band available
- Programmable Center Frequency and Deviation Sensitivity via serial communications port (RS232 or RS422). Non-volatile memory retains settings when power is off
- Fully Configurable Isolated Ground
 - DC Input Power Isolated From Chassis
 - Fully Isolated Control Interface
 - Modulation Input Isolated from Chassis/DC Return
 - All without the use of an Isolation Plate
- Meets latest IRIG-106 requirements
- Remote power on/off control
- Built In Status Capability, including –
 - Temperature
 - Forward Power Monitor
 - DC Current Monitor
 - Internal Power Supply Voltages
 - Internal Fault Signals



communications
Telemetry & RF Products

Excellence You Can Measure

DESCRIPTION

The ST-3000 Telemetry Transmitter is designed for operation in Aerospace environments where size, weight and power efficiencies are critical. This evolutionary Transmitter extends battery life while incorporating Ultra High Power Efficiency, Full Isolation, and Serial Loaded Programmability. All this with the performance, quality and reliability you've come to expect of L-3 Telemetry East Transmitter products. The ST-3000 continues the legacy of the extremely successful ST-800 series of Telemetry Transmitters.

The ST-3000 is available in 2, 5, and 10-Watt models and offers two versions in order to suit every Frequency and Deviation Sensitivity requirement needed. Center Frequency and Deviation Sensitivity can be programmed in the serial loaded version via a serial communications port using a basic PC (personal computer.) Or, for those applications where a single frequency is desired, the ST-3000 can be factory set for the specific frequency required for your mission/application. Both versions feature field adjustable Deviation Sensitivity.

The ST-3000's internal modules (modulator, regulator, and power amplifier) are housed in separate machined enclosures to maximize RF isolation, while providing a rigid and robust mechanical design able to withstand the harshest of missile, weapons and aircraft mission environments. All units are subjected to these rigorous environmental testing requirements to ensure reliable operation under extreme mission conditions every time.

"Cleared by DoD/OFOISR for public release under OFOISR Case No. 08-S-1499 on May 8, 2008"



S-Band Airborne Antenna

S2400B



Highlights

- ➔ Rugged, airborne design
- ➔ For aircrafts, helicopters, UAV's
- ➔ VSWR better than 1,5 : 1
- ➔ 20 W CW
- ➔ omni-directional
- ➔ Wide bandwidth
- ➔ Wide Temperature range
- ➔ Made in Germany

EK 10 Telemetre Yer İstasyonu Anteni ve Donanımları Spesifikasyon Dokümanı

Telemetry and Instrumentation Ground Station Support and Services

Dynetics provides end-to-end telemetry solutions for our customers. This includes design and fabrication of custom telemetry instrumentation; installation of instrumentation in a variety of high-performance missiles, aircraft, and other systems; field test support and data collection; and post-test data analysis.

In 2007, Dynetics developed the Telemetry and Instrumentation Ground Receiver Station (TIGRS) van to provide total system support at any test range. The TIGRS van includes state-of-the-art telemetry receivers, test equipment, and real-time analysis tools. TIGRS includes a customer viewing area that allows our customers to view live tests and test results.

Dynetics has more than 15 years of experience in the design, fabrication, and support of telemetry systems. Over the years, Dynetics has acquired extensive expertise and state-of-the-art capabilities for telemetry data collection and test-range ground support.

System Features

Mobile Dual-Axis Tracking Antenna

- Two independent tracking systems
- Frequency: 1425 to 2400 MHz
- Aperture diameter: 4 ft
- Gain: 25 dB
- Polarization: simultaneous LHCP and RHCP
- Antenna feed: conical scan
- Pedestal slew rate: 30°/sec
- Pedestal acceleration: 60°/sec/sec

Multiple Receivers

- Frequency: 2200 to 2400 MHz
- Noise figure: < 8 dB
- IF bandwidth: selectable
- Demodulation format: PCM/FM and SOQPSK
- Data rates: up to 20 Mbits/sec

Decom

- Data rates: up to 20 Mbits/sec
- Bit encoding: NRZ-L/M/S and biphase-L/M/S
- Network: ethernet TCP/IP
- Data storage capacity: 80 Gbytes
- IRIG-B time-sync accuracy: +/- 1 msec
- TENA gateway compatible

TSPI Ground Segment

- Survey-grade GPS reference receiver
- Joint Advanced Missile Instrumentation (JAMI) ground segments
- Processor provides a differentially corrected post-processing solution
- On-site TSPI processing

IRIG-B Generator

Multiple Day/Night Cameras

High-speed digital satellite link

- Provides Internet and VOIP telephone service to remote locations

Video Recording Capabilities with IRIG-B Timing Overlay

Customer Viewing Area

Highly mobile and self contained

Independent power generation capability

Simultaneous recording of multiple telemetered units



Ground Station Support Services Highlights

- Experienced team
- Broad expertise in missile and unmanned systems testing
- Expertise in coordinating with multiple test ranges
- Extensive pre-mission and post-mission analysis
- Real-time results and quick-look analysis tools
- Redundant data collection to minimize data-collection failures
- Leading-edge GPS technology
- Test Enabling Network Architecture (TENA) capability
- Custom data reduction
- Video capture of mission events

For More Information:

- ✉: telemetry@dynetics.com
- ☎: 256.713.5060
- 🌐: www.dynetics.com

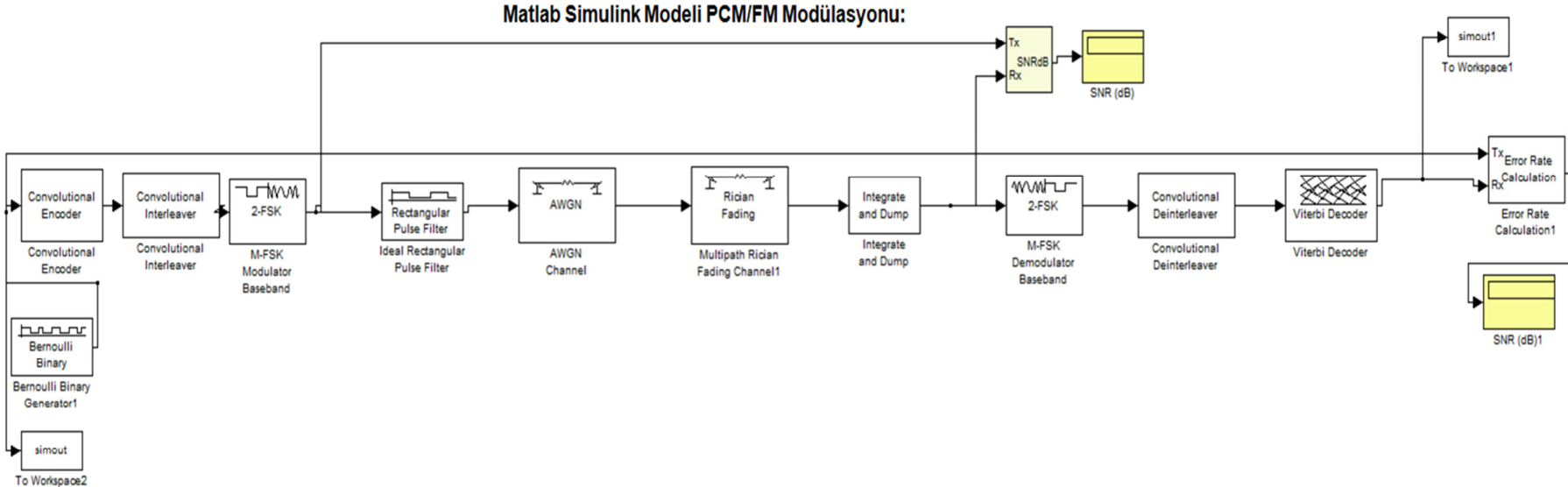
492033-1

www.dynetics.com

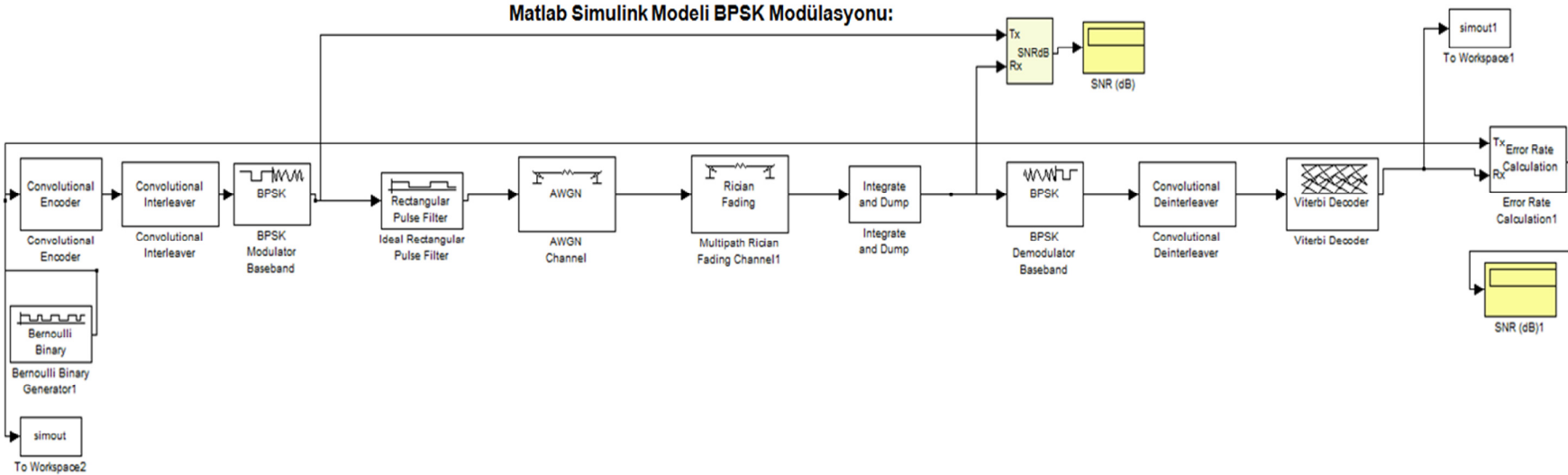
© 2010 Dynetics, Inc. All rights reserved.

Dynetics

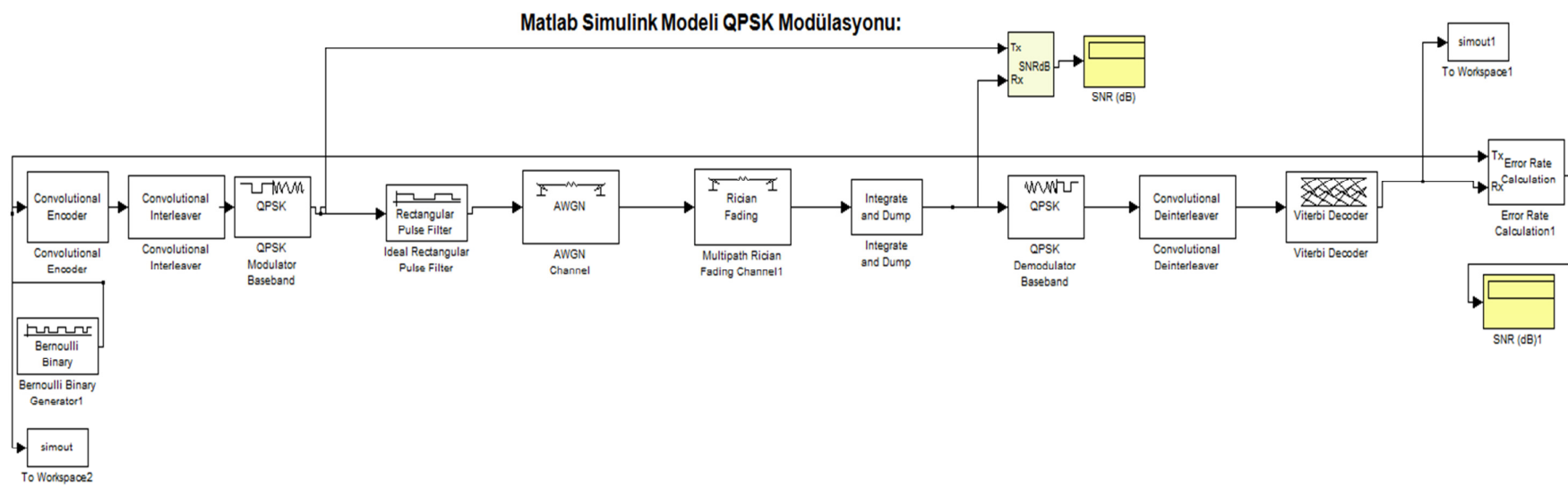
EK 11 Matlab Simulink Blok Diyagramları
Matlab Simulink Modeli PCM/FM Modülasyonu:



Matlab Simulink Modeli BPSK Modülasyonu:



Matlab Simulink Modeli QPSK Modülasyonu:



Matlab Simulink Modeli OQPSK Modülasyonu:

