

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA MELEZ ÇOĞULLAMA YÖNTEMLERİ
KULLANILARAK ZAMAN BAĞIMSIZ YENİ BİR İLETİM TEKNİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ

Munip GEYLANI

TEMMUZ 2018

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA MELEZ ÇOĞULLAMA YÖNTEMLERİ
KULLANILARAK ZAMAN BAĞIMSIZ YENİ BİR İLETİM TEKNIĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ

Hazırlayan
Munip GEYLANI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK
Dr. Öğr. Üyesi Kemal BALIKÇI

TEMMUZ 2018

Munip GEYLANI tarafından hazırlanan “Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Melez Çoğullama Yöntemleri Kullanılarak Zaman Bağımsız Yeni Bir İletim Tekniğinin Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 25/07/2018 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

(Başkan)

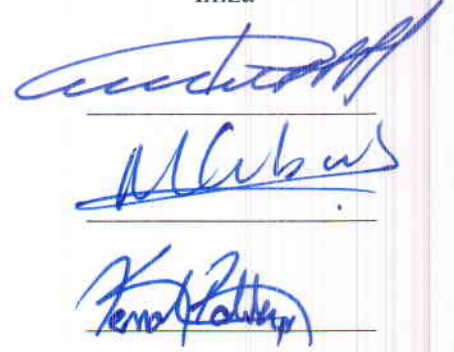
Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK

(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Kemal BALIKÇI

(Üye)

İmza



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 25/08/2018 gün ve 37/25. Sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Doç. Dr. Koray KÖKSAL
Enstitü Müdürü

ÖZET

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA MELEZ ÇOĞULLAMA YÖNTEMLERİ KULLANILARAK ZAMAN BAĞIMSIZ YENİ BİR İLETİM TEKNİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Munip GEYLANI

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK

Temmuz 2018, 106 sayfa

Haberleşme sistemlerinde aynı iletişim yolunun çok sayıdaki kullanıcıya hizmet vermesi ve iletişim maliyetlerini düşürülmesi için çoğullama teknikleri kullanılmaktadır. Kullanıcıların çoğullanan bu iletişim yollarını nasıl kullanacağı OEK (Ortam Erişim Kontrolü) protokolleri ile belirlenmektedir. Kablosuz haberleşme sistemleri çoğullama teknikleri bakımında incelendiğinde genel olarak frekans ve zaman düzleminde çoğullama yapıldığı görülmektedir. Frekans düzleminde çoğullama yapılarak farklı kullanıcıların kullanabileceği frekans kanalları oluşturulmaktadır. Kullanıcı sayısının frekans kanallarından fazla olduğu durumlarda zaman düzleminde çoğullama yapılarak frekans kanallarının farklı zaman dilimlerinde farklı kullanıcılara hizmet vermesi sağlanabilmektedir. Zaman düzleminde çoğullama yapıldığında gecikme kaçınılmaz olmaktadır.

Bu çalışmada gecikme kısıtının önemli olduğu kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları için faz düzleminde çoğullama yapan yeni bir teknik geliştirilmiştir. Genel çoğullama tekniklerinin yanı sıra faz düzleminde çoğullama yapan bu yeni teknikle iletişim kanallarının sayısı artırılmıştır. Geliştirilen tekniğin benzetim çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Zamandan bağımsız oluşturulan bu çoklu kanal yapısı veri boyutunun düşük ve gecikmenin önemli olduğu uygulamalar için paralel iletişim imkânı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Çoğullama, Faz Bölmeli Çoğullama, PDM, PDM-BPSK, PDM-QPSK

ABSTRACT

IMPROVING A NEW TIME-INDEPENDENT TRANSMISSION TECHNIQUE USING HYBRID MULTIPLEXING METHODS in WIRELESS SENSOR NETWORK

Munip GEYLANI

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Musa ÇIBUK

July 2018, 106 pages

In communication systems, multiplexing techniques are used in order to provide services to a large number of users and reduce communication costs. How users will use these multiplexed communication paths is determined by the Medium Access Control (MAC) protocols. When the wireless communication systems are examined in terms of multiplexing techniques, it is seen that multiplexing is done in frequency and time domain in general. Multiplexing is done on the frequency plane to create frequency channels that can be used by different users. When number of users is more than the frequency channels, it is possible to provide the frequency channels to different users in different time periods by multiplexing on the time plane. Delay is inevitable when multiplexing is performed on the time plane.

In this work, a new technique has been developed that multiplexing in the phase plane for wireless sensor network applications where delay is important. The number of communication channels has been increased with this new technique, which multiplexing in phase plane as well as general multiplexing techniques. Simulation studies of the developed technique have been made and the results obtained are shared. This time-independent multi-channel structure offers parallel communication for applications where data size is low and latency is important.

Keywords: Multiplexing, Phase Division Multiplexing, PDM, PDM-PSK, PDM-QPSK

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tez alıőması sırasında her türlü bilgi, teşvik ve deneyimleri ile yardımlarını esirgemeyen, üzerimde büyük emeği olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK'a teşekkür ederim. Ayrıca katkılarından dolayı başta Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ olmak üzere diğer bölüm hocalarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Gösterdikleri büyük emek, sabır ve fedakârlıkla bugünlere gelmemizin en büyük mimarları olan başta annem ve babam olmak üzere aile bireylerimin her birine ayrı ayrı teşekkür ederim. Yine yüksek lisans eğitimim süresince her türlü maddi ve manevi desteği ile göstermiş olduğu sabırdan dolayı eşim Hilal'e ve bundan tam 2 sene önce hayatıma giren, anlatılamayacak duyguları tattıran biricik kızım Masal'a verdiği pozitif enerjiden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Tezin Literatüre Katkısı.....	7
3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARI	9
3.1. Protokol Yığını	12
3.2. Kablosuz Algılayıcı Ağ Türleri	13
3.3. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Kullanılan Teknolojiler	14
3.3.1. ZigBee	14
3.3.2. 6LoWPAN	15
3.3.3. WirelessHART	16
3.3.4. ISA100.1a	17
3.3.5. Wi-SUN	18
3.3.6. Z-Wave	20
3.3.7. ANT	20
3.3.8. DASH7	21
3.4. Kablosuz Algılayıcı Ağların Kullanım Alanları	22
4. MODÜLASYON	25
4.1. Analog Modülasyon	26
4.1.1. Genlik Modülasyonu (AM)	26
4.1.2. Frekans Modülasyonu (FM)	28
4.1.3. Faz Modülasyonu (PM)	30
4.2. Sayısal Modülasyon	31
4.2.1. Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK).....	32
4.2.2. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK).....	33

4.2.3. Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)	35
4.2.4. Dikgen Genlik Modülasyonu (QAM)	35
4.3. Çok Seviyeli Faz Kaydırmalı Anahtarlama (M-PSK).....	36
4.3.1. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)	37
4.3.2. Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DPSK).....	38
4.3.3. Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK).....	40
4.3.4. Ötelemeli Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama (OQPSK)	43
4.3.5. 8-li Faz Kaydırmalı Anahtarlama (8PSK).....	45
4.4. Çok Seviyeli Dikgen Genlik Modülasyonu (M-QAM).....	48
4.4.1. Dikgen Genlik Modülasyon (QAM)	49
4.4.2. 16-lı Dikgen Genlik Modülasyonu (16QAM).....	50
4.4.3. 64-lü Dikgen Genlik Modülasyonu (64QAM).....	53
5. ÇOĞULLAMA.....	54
5.1. Frekans Bölmeli Çoğullama (FDM)	54
5.2. Zaman Bölmeli Çoğullama (TDM).....	55
5.3. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM).....	56
5.4. Kod Bölmeli Çoğullama (CDM).....	56
6. FAZ BÖLMELİ ÇOĞULLAMA	58
6.1. Çift Kanallı PDM-BPSK Yapısı.....	62
6.2. Çift Kanallı PDM-QPSK Yapısı	64
6.3. Dört Kanallı PDM-BPSK Yapısı	66
7. BENZETİM VE SONUÇLAR.....	68
7.1. Grafik Kullanıcı Arayüzü	68
7.2. Benzetim Çalışmaları	72
7.2.1. Çift Kanallı PDM-BPSK Benzetimi.....	72
7.2.2. Çift Kanallı PDM-QPSK Benzetimi	78
7.2.3. Dört Kanallı PDM-BPSK Benzetimi.....	82
7.3. Benzetim Sonuçları ve Analizi.....	85
7.4. PDM'in Çoklu Kanal Yapılarına Uygulanabilirliği	88
8. SONUÇ ve ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Gözlem Alanına Dağıtılmış Algılayıcı Düğümleri [3]	10
3.2. Algılayıcı Düğüm Temel Bileşenleri [3]	10
3.3. KAA Protokol Yığını	12
3.4. WirelessHART ağ cihazları[77]	17
3.5. Wi_SUN iletişim sistemi [81]	19
3.6. DASH7 Mode 2 fiziksel katman kanal yapısı [87].....	22
4.1. Örnek bir analog ses işareti	25
4.2. Genlik Modülasyonu [96].....	26
4.3. Genlik Modülasyonu ve Demodülasyonu Dalga Şekilleri [99].....	27
4.4. Genlik Modüleli Dalganın Frekans Spektrumu [99].....	28
4.5. Frekans Modülasyonu	29
4.6. FM Sinyali Frekans Spektrumu.....	30
4.7. Faz Modülasyonu [96].....	31
4.8. İkili ASK (OOK) [96]	32
4.9. ASK-PSK-FSK Modüleli Sinyal.....	33
4.10. MSK modülasyonu örneği [58]	34
4.11. BPSK Modülasyon ve Demodülasyon Blok Diyagramı [109].....	37
4.12. BPSK Kümeleşme Diyagramı	38
4.13. BPSK ve DPSK Modülasyonlu Sinyal.....	40
4.14. QPSK Verici Alıcı Yapısı.....	41
4.15. QPSK Gray Kodlu Kümeleşme Diyagramı [110].....	41
4.16. QPSK Modülasyonlu sinyal durumu.....	42
4.17. $\pi/4$ QPSK Kümeleşme Diyagramı [96].....	43
4.18. OQPSK Blok Diyagramı [96].....	44
4.19. OQPSK Q Kanalı Durumu [112]	45
4.20. 8PSK Blok Diyagramı [95]	45
4.21. 8PSK Çıkış Sinyali	47
4.22. 8PSK Kümeleşme Diyagramı.....	48
4.23. 16QAM Blok Diyagramı [95]	50

4.24.	I Kanalı Sinyal Çıkışları [95].....	52
4.25.	16QAM Kümeleşme Diyagramı.....	52
4.26.	64QAM için örnek bir kümeleşme [107]	53
5.1.	Frekans Bölmeli Çoğullama [12]	55
5.2.	Zaman Bölmeli Çoğullama [12].....	55
5.3.	(a) FDM (b) OFDM [125]	56
5.4.	Kod Bölmeli Çoğullama [130]	57
6.1.	İki düzeyli modülasyon (BPSK) ile faz kanalı oluşumu	59
6.2.	Dört düzeyli modülasyon (QPSK) ile faz kanalı oluşumu	59
6.3.	BPSK temelli PDM ile oluşturulmuş 2 faz kanalı.....	62
6.4.	(a) Çift kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı (b) alıcı için tolerans aralıkları.....	63
6.5.	QPSK temelli PDM ile oluşturulmuş 2 faz kanalı.....	64
6.6.	(a) Çift kanallı PDM-QPSK kümeleşme diyagramı (b) alıcı için tolerans aralıkları	65
6.7.	PDM-BPSK ile oluşturulmuş 4 faz kanalı.....	66
6.8.	(a) Dört kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı (b) alıcı için tolerans aralıkları	67
7.1.	GUI 1 arayüzü	68
7.2.	GUI 1 kümeleşme oluşumu	69
7.3.	GUI 1 tolerans hesabı	70
7.4.	GUI 2 ara yüzü	70
7.5.	GUI 2 veri iletimi	71
7.6.	Çift kanallı PDM-BPSK benzetimi	72
7.7.	Dual Ch PDM-BPSK Modulator 1 / mod_pdm_bpsk alt sistemi.....	74
7.8.	Dual Ch PDM-BPSK demodulator / demod_pdm_bpsk alt sistemi	75
7.9.	Farklı E_b/N_o değerleri için çift kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı.....	77
7.10.	Çift kanallı PDM-QPSK benzetimi	78
7.11.	Dual Ch PDM-QPSK Modulator 1 / mod_pdm_qpsk alt sistemi	79
7.12.	Dual Ch PDM-QPSK Demodulator / demod_pdm_qpsk alt sistemi	80
7.13.	Farklı E_b/N_o değerleri için çift kanallı PDM-QPSK kümeleşme diyagramı	81
7.14.	Dört kanallı PDM-BPSK benzetimi	82
7.15.	Farklı E_b/N_o değerleri için dört kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı	84
7.16.	BPSK/QPSK ile PDM yapılarının BER performansı karşılaştırması	85

7.17. QPSK, 16QAM ile PDM yapılarının BER performansı karşılaştırması	87
7.18. FDM-PDM bilikteliği	89
7.19. TDM-PDM birlikteliği	90
7.20. FDM-TDM-PDM birlikteliği	91



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

4.1.	Modülasyon Çeşitlerine Göre Nicemleme	36
4.2.	QPSK Giriş Çıkış Sinyal Değerleri	42
4.3.	I ve Q Kanalı Doğruluk Tablosu [95].....	46
4.4.	8PSK Çıkış ve Faz Durumları [95]	47
4.5.	16QAM PAM Sinyali Doğruluk Tablosu [95]	50
4.6.	16QAM Modüleli Sinyal Çıkış Durumları	51
6.1.	Çift kanallı PDM-BPSK giriş çıkış durumu	63
6.2.	Çift kanallı PDM-QPSK çıkış sinyalleri	65
6.3.	Dört kanallı PDM-BPSK çıkış sinyalleri	66
7.1.	Çift Kanallı PDM-BPSK benzetimi çıkış sinyalleri	75
7.2.	Çift Kanallı PDM-QPSK benzetimi çıkış sinyalleri.....	79
7.3.	Dört kanallı PDM-BPSK benzetimi çıkış sinyalleri.....	83
7.4.	BER= 10^{-5} için gerekli SNR	86
7.5.	Bit/sembol oranları ve Toplam Sembol Adetleri.....	87

SİMGELER DİZİNİ

A	Genlik (Amplitude)
C	Olası Giriş Kombinasyonları
f	Frekans (Frequency)
k	Kanal Numarası
m	Modülasyon Derecesi
n	Kanal Sayısı
N_s	Sembol Sayısı
ω_0	Taşıyıcı Sinyal Frekansı
φ	Sinyal Fazı
t	Zaman (time)

KISALTMALAR DİZİNİ

16QAM	16-lı Dikgen Genlik Modülasyonu (16 Ary Quadrature Amplitude Modulation)
256QAM	256-lı Dikgen Genlik Modülasyonu (256 Ary Quadrature Amplitude Modulation)
64QAM	64-lü Dikgen Genlik Modülasyonu (64 Ary Quadrature Amplitude Modulation)
6LoWPAN	IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks
8PSK	8-li Faz Kaydırmalı Anahtarlama (8 Ary Phase Shift Keying)
AD	Algılayıcı Düğüm
ADC	Analog Digital Converter
AGC	Otomatik Kazanç Kontrolü (Automatic Gain Control)
AM	Genlik Modülasyonu (Amplitude Modulation)
ARIB	Radyo Endüstrileri ve İşletmeler Birliği (Association of Radio Industries and Businesses)
ASK	Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (Amplitude Shift Keying)
AWGN	Toplanır Beyaz Gaus Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise)
BER	Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Shift Keying)
BS	Baz İstasyonu (Base Station)
BTU	İngiliz Isı Birimi
CDM	Kod Bölmeli Çoğullama (Code Division Multiplexing)
CSMA	Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access)
CSMA-CA	Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim-Çarpışma Kaçınmalı (Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance)
DAC	Sayısal Analog Dönüştürücü (Digital Analog Converter)
DPSK	Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Phase Shift Keying)
E_b/N_0	Bit Enerjisi / Gürültü Oranı
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartları Komitesi (European Telecommunications Standards Institute)
FCC	Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission)
FD	Saha Cihazı (Field Device)
FDM	Frekans Bölmeli Çoğullama (Frequency Division Multiplexing)
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
FFD	Tam Fonksiyonlu Cihaz (Full Function Device)
FM	Frekans Modülasyonu (Frequency Modulation)

FSK	Frekans Kaymalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying)
GD	Ağ Geçidi Cihazı (Gateway Device)
GFSK	Gauss FSK (Guassian Frequency Shift Keying)
GMSK	Gauss MSK (Guassian Minimum Shift Keying)
GUI	Grafik Kullanıcı Ara yüzü (Graphical User Interface)
HD	El Cihazları (Handheld Device)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Nesnelerin İnternetini (Internet of Things)
IPSO	Akıllı Nesnelere için IP (IP for Smart Object)
IPv4	IP sürüm 4
IPv6	IP sürüm 6
ISA	Uluslararası Otomasyon Derneği (International Society of Automation)
ISM	Lisanssız Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi bantlarını (Industrial, Scientific and Medical Radio Bands)
ISO	Uluslararası Standartlaştırma Örgütü (International Organization for Standardization)
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
KAAN	Kablosuz Algılayıcı Ağ (Wireless Sensor Network)
KD	Koordinatör Düğüm
LSB	En Önemsiz Bit (Least Significant Bit)
MAC	Ortam Erişim Kontrolü (Media Access Control)
MEMS	Mikro-Elektromekanik Sistemleri
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (Massachusetts Institute of Technology)
M-PSK	Çok seviyeli Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Multilevel Phase Shift Keying)
M-QAM	Çok seviyeli Dikgen Genlik Modülasyonu (Multilevel Quadrature Amplitude Modulation)
MSB	En Önemli Bit (Most Significant Bit)
MSK	Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (Minimum Shift Keying)
MTU	Maksimum İletim Birimi (Maximum Transfer Unit)
NM	Ağ Yöneticisi (Network Manager)
NRZ	Sıfıra Dönüşsüz (Non Return to Zero)

OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OEK	Ortam Erişim Kontrolü (MAC)
OOK	Açma-Kapama Anahtarlama (On-Off Keying)
OQPSK	Ofset Dikgen Faz Kaymalı Anahtarlama (Offset Quadrature Phase Shift Keying)
PAM	Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation)
PDM	Faz Bölmeli Çoğullama (Phase Division Multiplexing)
P-DM	Polarizasyon Bölmeli Çoğullama (Polarization Division Multiplexing)
PDM-BPSK	BPSK Temelli Faz Bölmeli Çoğullama
PDM-QPSK	QPSK Temelli Faz Bölmeli Çoğullama
PLL	Faz Kilitlemeli Döngü (Phase Locked Loops)
PM	Faz Modülasyonu (Phase Modulation)
PSK	Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
QAM	Dikgen Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
QPSK	Dikgen Faz Kaymalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
RD	Yönlendirme Cihazı (Routing Device)
RF	Radyo Frekansı
RFD	Düşük Fonksiyonlu Cihaz (Reduced Function Device)
SNR	Sinyal/Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
TCMP	Ağaç Tabanlı Çok Kanallı Protokol (Tree-based Multi-Channel Protocol)
TDM	Zaman Bölmeli Çoğullama (Time Division Multiplexing)
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
Wi-SUN	Kablosuz Akıllı Kamu Ağı (Wireless Smart Utility Network)
WSN	Wireless Sensor Networks

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme, Marconi tarafından 1897 yılında ilk telsiz telgraf patentinin alınmasıyla ortaya çıkmış ve üzerinden geçen bir asrı aşkın süre boyunca sürekli gelişerek birçok yeni iletişim sistemi ve teknolojisine temel olmuştur [1]. Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA, Wireless Sensor Networks-WSN) bu kablosuz haberleşme teknolojilerinden biridir. KAA'lar diğer kablosuz ağlara göre hesaplama gücü, veri oranı ve paket oranı düşük, bellek, depolama ve düğüm enerjisi yönüyle kısıtlı özel bir türdür [2]. KAA'lar, 1990'lı yılların sonlarına kadar askeri alanlarda kullanılırken, gelişen teknolojiyle beraber maliyetlerinin de düşmesiyle günümüzde çok çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır [3]. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nün (Massachusetts Institute of Technology-MIT) Teknoloji İnceleme Dergisi (Technology Review Magazine) KAA'ları dünyayı değiştirecek on teknolojiden biri olarak tanımlamaktadır [4].

Mikro düzeyde elektromekanik sistemlerindeki gelişim çok işlevli ve düşük güç gerektiren algılayıcı elemanlarının üretilmesini sağlamıştır. Algılayıcılar çevresindeki birtakım nicelikleri algılayarak ölçme yapabilmekte, verileri işleme/saklama yapabilmekte, çevresindeki diğer algılayıcılar ile iletişim kurabilmektedir. Birbiriyle iletişim halinde bulunan bu algılayıcı düğümler KAA'ları oluşturmaktadırlar. KAA'lar genellikle geniş bir alana ve rasgele bir şekilde yerleştirilmiş yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğüm içerir. KAA'lardaki düğümler işbirliği yaparak çalışırlar. Düğümler elde ettikleri verileri doğrudan veya diğer düğümlerle haberleşerek dolaylı bir yoldan merkezi bir birime iletirler [5].

Algılayıcı Düğüm (AD)'nin temel işlevi merkezi bir birime göndermek üzere yerleştirildiği alanda veriyi algılamak, saklamak ve iletmektir. AD tarafından toplanan veriler istendiği zaman ya da periyodik olarak sorgulanabilir. AD genellikle pil ile beslenir, ağa katıldıktan sonra pil değişimi ya da şarj edilmesi pek mümkün değildir. Bu nedenle genellikle ağ ömrünü uzatmak için boşta uykuya geçmelerini sağlayan bir yaklaşım hâkimdir. AD'ler bırakıldıkları yerlerde kendi kendine organize olarak KAA'ları oluştururlar [5].

KAA'lar orman yangını [6, 7] ve sel gibi afet tespiti [8], hasta izleme, biyoteleometri [9, 10], tıbbi bakım [11] ve mikro cerrahi gibi sağlık uygulamaları [12–15], akıllı ev, ofis ve bina uygulamaları [16–18], askeri varlık izleme, gözetleme ve savaş alanı izleme [19, 20], tarımsal ürün izleme [21], yaban hayatı izleme [22–24], endüstriyel kontrol uygulamaları [25, 26], sismik aktivitenin

izlenmesi [27], içme suyu kalitesinin tespiti [28] ve gerçek zamanlı temiz içme suyu kontrolü [29], tarihi binaların yapısal durumunun izlenmesi [30] ve daha birçok uygulama alanına sahiptir.

Bir KAA genel olarak büyük miktarda algılayıcı düğüm ve bir veya birden fazla koordinatör (sink) düğümünden meydana gelir. Koordinatör Düğümler (KD), ağdaki diğer tüm algılayıcı düğümlerin veri göndermeye çalıştığı ağ geçidi veya baz istasyonu olarak da adlandırılır. Algılayıcı düğümler birbirleriyle tanımlanmış frekans alanı içerisindeki bir kanalı seçerek haberleşirler. Tekli kanal haberleşmesinde KAA içerisindeki tüm AD'ler aynı kanalı kullanmaktadır. Bu durum ağ içerisindeki girişimi artırarak verimin düşmesine neden olmaktadır. Çoklu kanal haberleşmesinde ise KAA içerisindeki AD'ler iletişim için farklı kanalları kullanabilmektedir. KAA'larda çok kanallı çalışmanın temel amacı, tek kanallı ağlarla karşılaştırıldığında aynı veya komşu kanalları kullanan düğüm sayısı azalacağından ağdaki toplam girişimin azaltılmasıdır. Böylece paket bozulmaları ve çarpışmalar azaltılabilir. Diğer bir getirisi de paralel iletişimidir. Tek kanallı KAA'larda birbirine yakın olan düğüm çiftleri aynı anda iletişim kuramazlar. Bununla birlikte çok kanallı ağlarda birbirine yakın olan düğüm çiftleri birbiri üzerine çakışmayan kanallarda çalışıyorsa eş zamanlı olarak iletişim kurabilirler [2].

KAA'lar genellikle geniş tanımlanmış bir ortamda algılama yapar ve bu tür algılanan bilgiyi işlemek üzere depolayıp aktarırlar. Bu, KAA uygulama senaryolarının, değişik çevre ve veri toplama / aktarma gereksinimleri yönüyle çok farklı olabileceği anlamına gelir. KAA'lar tasarlanırken ilgili uygulama ihtiyaçlarının dikkatlice belirlenmesi ve tasarımın bu ihtiyaçları karşılıyor olması gerekmektedir [31]. Bu noktadan hareketle bu tez çalışmasında gerçek zamanlı iletişim ihtiyacı duyan KAA uygulamaları için gecikme parametresinin düşük olacağı uygun bir iletişim tekniği geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bunu gerçekleyebilmek için gecikme parametresinin öncelikli olduğu, gecikmenin düşürüldüğü çalışmalar incelenerek bir yol haritası çizilmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın 2. Bölümünde tez konusuyla ilgili yapılan önceki çalışmalar verilmiştir. 3. Bölümde tez konusunun temel çalışma alanını oluşturan KAA'lar hakkında detaylı bilgi verilmektedir. AD'lerin yapısı, KAA yapısı, türleri, KAA örnekleri ve kullanım alanları bu bölümde anlatılan konuları oluşturmaktadır. 4. Bölümde kablosuz ağlarda kullanılan genel modülasyon türleri anlatılmıştır. 5. Bölümde kablosuz ağlarda genel olarak kullanılan çoğullama tekniklerinden bahsedilmiştir. 6. Bölümde tezin ana konusunu oluşturan Faz Bölmeli Çoğullama (PDM- Phase

Division Multiplexing) tekniği olarak adlandırılan yapı anlatılmaktadır ve aynı bölümde örnek yapılar verilmektedir. 7. Bölümde PDM yapılarının benzetim çalışmaları anlatılmakta ve gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları paylaşılmaktadır. Son olarak 8. Bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapılan literatür çalışmasında KAA'larda enerji kullanımını azaltarak ağ ömrünü arttırmaya yönelik birçok çalışma mevcutken gecikmeyi düşürmek için fiziksel katmanda yapılmış çalışmalara pek rastlanılmamıştır. Bununla birlikte OEK (Ortam Erişim Kontrolü) protokolleri ile yönlendirme protokolleri ya da çoklu kanal protokolleri geliştirerek gecikmeyi azaltmaya yönelik çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

TDM-FDM MAC [32], TDM (Zaman bölmeli Çoğullama, Time Division Multiplexing) ve FDM (Frekans Bölmeli Çoğullama, Frequency Division Multiplexing) tekniklerini beraber kullanan bir OEK protokolüdür. Bu protokol minimum güç tüketimi için TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) kullanırken ağ ölçeğini genişletmek için kümeler arasında FDMA (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) kullanmaktadır. Bununla beraber hibrit FDM-TDM tekniği TDMA'ya göre belirgin bir şekilde gecikmeyi azaltmaktadır.

HyMAC [33], ağdaki çarpışmaları önleyen ve küçük sınırlı uçtan uca gecikme ile yüksek verim sağlayan bunun yanında çoklu frekansları kullanabilen bir OEK protokolüdür. TDMA ve FDMA tekniklerinin güçlü yanlarını birlikte kullanan hibrit bir tekniktir. Elde edilen küçük sınırlandırılmış uçtan uca gecikme ve yüksek verim sayesinde HyMAC'in gerçek zamanlı ses akışı uygulamalar için uygun bir aday olduğunu belirtilmektedir.

C.Çeken [34] çalışmasında enerji verimliliğinin yanı sıra gecikme hassasiyetli uygulamalar için TDMA tabanlı yeni bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Önerilen protokolde gecikme duyarlı uygulamanın gecikmesini azaltmak için ilgili düğüme ek zaman dilimi tahsis edilir. Kuyruk boyutunun eşik değeri aştığı durumlarda düğüm tarafından ek zaman dilimi talebi yapılır. Diğer kritik olmayan düğümler ise enerji verimliliği için periyodik olarak kendilerini uyku moduna almaktadır.

SMAC [35] öncelikli amacı enerji verimliliği ve kendiliğinden yapılandırma olan çekişme tabanlı bir OEK protokolüdür. Bu protokolde düğümler periyodik olarak uyku moduna girmektedirler. Periyodik uyku modu gecikmeyi arttırırken sistem verimliliğini düşürmektedir. SMAC hızlı cevap gerektiren gecikme duyarlı uygulamalar için uygun değildir. **DSMAC** [36], SMAC'ın geliştirilmiş bir türüdür. DSMAC'ta SMAC'ın sabit ve periyodik olan uyku süresi dinamik bir hale getirilerek gecikme değeri düşürülmüştür.

PEDAMACS [37], TDMA tekniğine dayanan ve uyku modu özellikli bu OEK protokolü ile hem enerji tasarrufu hem de belirli gecikme süresili bir yapı sunmaktadır. Gecikmeyi ortadan kaldırmaya yönelik bir çalışma olmayıp düğümlerin belli zaman dilimlerinde uyanıp çevreyi ve ağı kontrol edip harekete geçmesini ya da tekrar uyumasını sağlayan bir tekniktir. Bununla birlikte PEDEMACS, SMAC'tan daha az gecikme sağlamaktadır.

X-MAC [38], çekişme tabanlı bir OEK protokolüdür. Enerji verimliliğinin yanında gecikmeyi azaltmak için asenkron görev döngüsü tekniği üzerine kurulmuştur. Bu teknikte de sabit uykuda kalma süreleri olmayıp asenkron bir şekilde uyku uyanıklık şemaları mevcuttur.

Queue-MAC [39], CSMA-TDMA tabanlı hibrit bir OEK protokolüdür. Ağdaki mevcut trafiğe göre görev döngüsünü dinamik olarak uyarlar. Düğümlerin kuyruk uzunluğu ağ trafiği göstergesi olarak kullanılmaktadır ve bu kuyruk uzunluğuna göre dinamik TDMA ile uygun zaman dilimi tahsisi yapılmaktadır. Böylece CSMA (Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim, Carrier Sense Multiple Access)'daki çarpışmalar azaltılmaktadır. Bu sayede gerçek zamanlı ve acil veriler daha az gecikmeyle iletilmektedir. Bu protokol sonraki zamanlarda geliştirilerek **iQueue-MAC** [40, 41] türetilmiştir. Bu geliştirilen protokol ile paralel iletim ve değişken bant genişliği tahsisi yapabilen çoklu kanal yapısı özelliği kazandırılarak gecikme daha da düşürülmüştür.

Duo-MAC [42], çekişme tabanlı asenkron kaskad uyandırma programlı bir OEK protokolüdür. Enerji ve gecikme öncelikli iki modu bulunmaktadır. Trafik türüne ve gecikme gereksinimlerine göre iki mod arasında geçiş yapmaktadır. İlk mod gerçek zamanlı trafik mevcudiyetinde azaltılmış gecikme süresine sahip yüksek görev döngülü sistemdir. İkinci mod gerçek zamanlı olmayan trafik için enerji tasarrufuna önem veren düşük görev döngülü sistemdir.

WirArb-MAC [43], KAA'larda gerçek zamanlı iletişim gereksinimlerini karşılamak için geliştirilmiş bir OEK protokolüdür. Çarpışma ve zamanlama şemaları gecikmelerini ortadan kaldırmak için düğümlerin kanal erişimi, veri önceliğine göre belirlenmektedir. Bu şekilde çarpışmadan kaçınılmakta ve deterministik bir iletişim sunulmaktadır.

BEST-MAC [44], bitmap destekli verimli ve ölçeklenebilir TDMA tabanlı OEK protokolüdür. Hiyerarşik KAA'larda uyarlanabilir trafik için önerilebilir. BEST-MAC, farklı trafiğin gerekli

olduğu ve veri trafiğinde kayıp veya gecikmenin kabul edilemez olduğu akıllı Őehir uygulamalarının kalite kontrolünü geliştirmek iÇin özel olarak tasarlanmıştır. BEST-MAC protokolünde k¼¼k boyutlu zaman dilimleri kullanılmaktadır. Bu zaman dilimlerinin sayısı, ¼ye d¼đ¼mlerin sayısından daha fazladır. Zaman kaps¼lleri (time-slot) planlamak iÇin sırt Őantası algoritması kullanılmaktadır ve ¼ye d¼đ¼mleri tanımlamak iÇin kısa d¼đ¼m adresi önerilmektedir. BEST-MAC, t¼m ¼yelerin uyarlanabilir trafik y¼klerini verimli bir Şekilde ele alır. Sırt Őantası algoritması d¼đ¼mlerin iŐ tamamlanma s¼resini azaltmakla birlikte daha iyi bağlantı kullanımıyla ortalama paket gecikmesini de azaltmaktadır. Kısa d¼đ¼m adresi, enerji verimliliğini artırırken kontrol y¼k¼n¼ azaltmaktadır. Önerilen BEST-MAC ile az gecikme sağlanmakta ve enerji tüketimi azaltılmaktadır.

HİKMET [45], taşıma katman protokol¼d¼r. Geliştirilen bu protokol hibrit kayıp telefı mekanizmasına dayanmaktadır. HİKMET, t¼m sistem gecikmesine y¼nelik bir ŐalıŐma olmayıp ortam koşullarına g¼re adaptif olarak kullandığı kayıp telafı mekanizmasıyla d¼Ő¼k uÇtan uca gecikme sağlamaktadır.

ROL [46] (Route Optimisation and Load-balancing Protocol), özel KAA uygulamaları iÇin yeni bir k¼me tabanlı g¼zerg¼h optimizasyonu (y¼nlendirme algoritması) ve y¼k dengeleme protokol¼ geliştirilmiştir. TDMA ve CDMA tabanlı ŐalıŐan ROL özellikle ağ ¼mr¼n¼ uzatmaya, zamanında ileti teslimi sağlamaya ve ağ dayanıklılığı iÇin kapsamlı bir Őöz¼m sunmaya ŐalıŐmıŐtır. SonuÇ olarak gerÇek zamanlı iletişim iÇin uÇtan uca paket gecikmesini azaltmıŐtır.

PBBR [3], iŐaretsiz ¼ncelik tabanlı y¼nlendirme (Priority Beaconless Based Routing) protokol¼d¼r. Yazar ŐalıŐmasında verilere ¼nceliđine g¼re daha iyi hizmet sağlandığı y¼nlendirme protokol¼ geliştirmiştir. Y¼ksek ¼nceliđe sahip verilerin iletiminde gecikmeyi d¼Ő¼rd¼đ¼ g¼r¼lmektedir.

SPEED [47], gerÇek zamanlı iletişim iÇin geliştirilmiş y¼nlendirme algoritmasıdır. Bu protokol gerÇek zamanlı iletişim iÇin durum bilgisi iŐermeyen ve kontrol y¼k¼n¼ minimize eden bir y¼ntem ¼nermektedir. UÇtan uca gerÇek zamanlı iletişim iÇin istenen teslimat hızını algılayıcı ağı boyunca muhafaza ederek elde etmektedir.

TCMP [48], ağaç bazlı çoklu kanal protokolüdür. KAA'larda kullanılan kanal sayısının az olması ve zamanlama hatalarının kaçınılmaz olması sebebiyle düğüm bazlı çoklu kanal protokollerinin gerçek algılayıcı ağlarına uygun olmadığını düşünerek ağaç bazlı çoklu kanal protokolü geliştirilmiştir. TCMP (Tree-based Multi-Channel Protocol), tüm ağı çoklu alt ağaçlara ayırmakta ve her alt ağaca farklı statik kanal ataması yapmaktadır. Her veri akışı sadece ilgili alt ağaç boyunca iletilmektedir. Bu yapıda kanal ataması için Greedy adını verdikleri kanal atama algoritmaları kullanılmaktadır. Sonuç itibarıyla bu teknikle yüksek paket iletim oranı ve düşük iletim gecikmesi elde edilmiştir. Ancak alt ağaçlarda yine CSMA kullanıldığı için çarpışma ve dolayısıyla gecikme kaçınılmazdır. Düğüm bazlı çoklu kanal iletişiminin dar boğazı kanal sayısının azlığıdır. Bu tez çalışmasında önerilen kanal sayısının artırılması yaklaşımının bu soruna çözüm olabileceği düşünülmektedir.

Ç.Terzi [2] çalışmasında TCMP'de kullanılan Greedy kanal atama algoritmaları yerine daha az çarpışmayı sağlayan yeni bir kanal atama algoritması geliştirmiştir. TCMP'de ağaçlar arası girişim önlenirken ağaç içi girişim ve kanal paylaşımı söz konusudur. Dolayısıyla ağaç içi iletişimde gecikme kaçınılmazdır.

Multi-channel TDMA [49], Ergen'in [50]'de açıkladığı tek kanallı KAA'lar için TDMA tabanlı zamanlanmış yapısı çok kanallı KAA yapılarına uyarlanmıştır. Çok kanallı KAA'lar için TDMA tabanlı zamanlama algoritmaları geliştirilmiş ve statik kanal atama yöntemleri önerilerek daha az gecikme sağlanmıştır. Ağdaki tüm algılayıcılara statik TDMA ile statik kanal tahsisi yapmak amaçlanmaktadır. Bu yöntemle bile TDM'in gecikmelerinin yaşanması kaçınılmazdır. Literatürde çoklu kanal iletişimi üzerine yapılmış çalışmalar mevcuttur [48, 51–55] ancak bu çalışmalarda odak kanal sayısını arttırmak değil mevcut olan kanalların tahsisi üzerinedir. Veri iletimi için farklı düğümlerin farklı kanalları kullanması, çarpışma sayısını azaltabilir ve veri yayılımı gecikmesini azaltabilir [56]. Bu sebeple gerçek zamanlı haberleşme için gecikmenin az olacağı çok kanallı yapı ile statik kanal tahsisinin uygun olacağı düşünülmektedir.

2.1. Tezin Literatüre Katkısı

Kablosuz ağlarda gerçek zamanlı iletişim için gecikme parametresi en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Kablosuz ağlarda kullanılan zaman çizelgelerine göre kanal tahsisi veya çekişme tabanlı kanal tahsisleri gerçek zamanlı iletişimde istenmeyen gecikmelere neden olabilmektedir. Kullanıcılara statik kanal atama yapılması bu gecikmeyi ortadan kaldırmak için

uygun bir yöntem olabilmektedir. Ancak statik kanal ataması yapılabilmesi için yeteri kadar iletişim kanallarının mevcut olması gerekmektedir.

Gerçek zamanlı uygulamalarda, veri gecikmesi sınırlıdır ve belirli bir bant genişliği gereksinimine sahiptir. Kablosuz ortamdaki parazit ve çekişme nedeniyle, bu zor bir görevdir. Çok kanallı iletişim, paralel aktarımların sayısını artırarak ve gerçek zamanlı garantiler elde ederek gecikmeyi azaltmaya yardımcı olabilir [57].

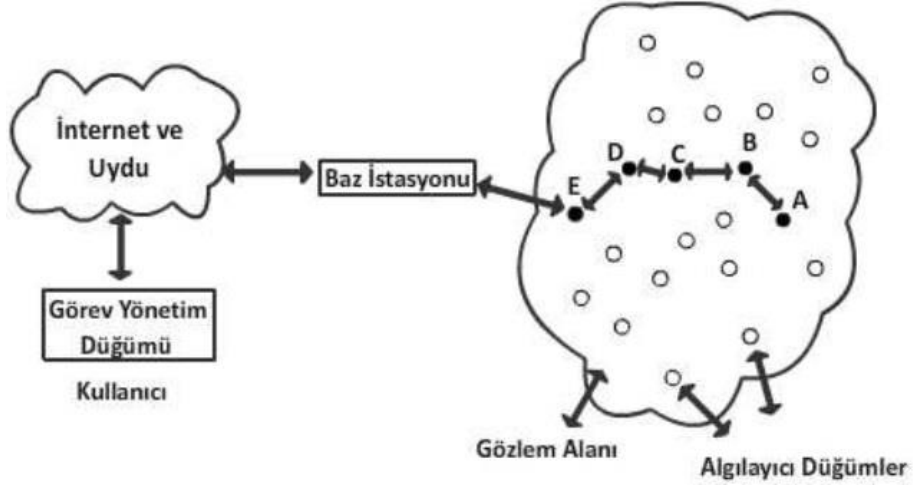
İletişim kanalı oluşturmak için genel olarak FDM ya da TDM kullanılmaktadır. TDM ile çoğullama yapmak gecikme anlamına gelecektir. FDM ile frekans bandını ihtiyaç duyulan kanal sayısı kadar bölmek çözüm olarak düşünülebilir. Nitekim IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.15.4-2015 [58]'te çok farklı senaryolar düşünülerek FDM ile değişik sayıda kanalların oluşturulduğu görülmektedir. FDM ile çoğullama mevcut bant genişliğinin bölünmesi ya da yeni frekans bandı temin edilmesi anlamına gelmektedir. Bant genişliğini bölmek istenmeyen bir durum olabileceği gibi yeni frekans bandı temin etmek masraflı olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında genel çoğullama yöntemlerinden bağımsız yeni bir çoğullama tekniği geliştirilmeye çalışılmıştır. Gerçek zamanlı iletişim gerektiren uygulamalarda statik kanal ataması yapabilmek için mevcut kanal sayısını artıracak faz tabanlı yeni bir çoğullama tekniği geliştirilmiştir. Faz Bölmeli Çoğullama (Phase Division Multiplexing - PDM) olarak adlandırılan bu teknik ile sinyal fazında bölme işlemi yapılarak faz kanalları oluşturulmaktadır. Bu faz kanalları kullanıcılara ayrı ayrı tahsis edilebilir. Böylelikle statik kanal ataması için mevcut iletişim kanalı sayısı artırılmış olur.

3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARI

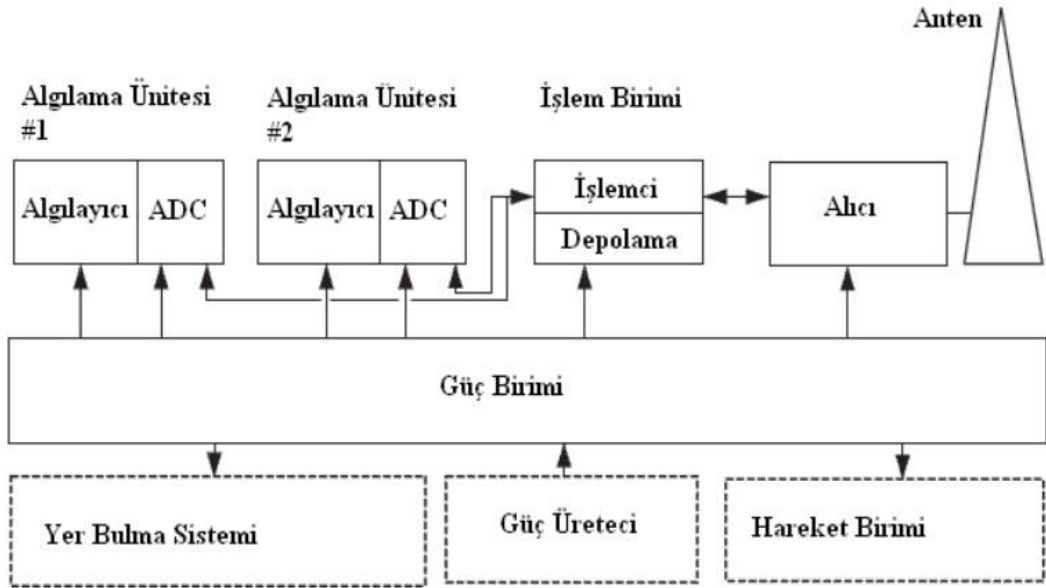
21. yüzyılın en önemli teknolojilerinden biri olarak tanımlanan Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA), belirli bir hedef doğrultusunda yerleştirilmiş, birbirleriyle iletişim halinde olan bulunduğu ortamı algılayıp ölçebilen çok sayıdaki akıllı algılayıcıdan oluşan bir mimaridir. Bu teknolojiyi oluşturan algılayıcı düğümler sınırlı mikroişlemci ve bellek kapasitelerine sahip, kısa mesafede kablosuz ortam üzerinden haberleşebilen düşük güçlü, düşük maliyetli ve çok işlevli algılayıcı düğümlerden meydana gelmektedir. Son yıllarda KAA'lar farklı uygulamalar için dünya çapında ilgi görmüştür. Algılayıcı düğümler bilgiyi algılamak, ölçmek, toplamak ve verileri kullanıcılara iletmek için geniş bir alanda kullanılmaktadır. Küçük boyutlarda ve ucuzdurlar. Bir ağ içerisinde çok sayıda dağıtılabilirler. Askeri hedef izleme, doğal afet yardımı, biyomedikal sağlık izleme ve endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılabilirler. İzlenen parametreler ağdaki algılayıcı düğümünün işlevine göre sıcaklık, nem, basınç, çözünmüş oksijen, elektriksel iletkenlik, Ph değeri gibi fiziksel, kimyasal, biyolojik veya ulusal güvenlik odaklı olabilmektedir. Kurulum öncesi yerleştirildiği ortamlarda herhangi bir altyapı istememeleri, kurulum sonrası ise sorunsuz çalışabilmeleri, ek bakım gerektirmemeleri ve çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olmalarından dolayı KAA'ların kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [5, 59, 60].

Algılayıcı düğümlerinin düşük maliyetli olması, normal şartlarda erişimin zor olduğu coğrafik bölgelere kolaylıkla yerleştirilebilmeleri vb. özellikleri KAA'ların çok çeşitli alanlarda kullanılabilmelerini mümkün kılmaktadır. KAA'lar Şekil 3.1'de gösterildiği gibi gözlem alanında bulunan kablosuz algılayıcı düğümlerden, baz istasyonu olarak ifade edilen nihai hedef alıcı ve görev yönetim düğümünden meydana gelmektedir [3, 61].



Şekil 3.1. Gözetim Alanına Dağıtılmış Algılayıcı Düğümleri [3]

Bir algılayıcı düğümü, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi genel olarak algılama ünitesi, işlem birimi, alıcı ünitesi ve güç birimi şeklinde dört temel bileşenden oluşur. Ayrıca bir yer bulma sistemi, jeneratör ve mobilizatör gibi uygulamaya bağlı bileşenlere de sahip olabilirler [61].



Şekil 3.2. Algılayıcı Düğüm Temel Bileşenleri [3]

Algılama birimleri, genellikle iki alt birimden oluşur: algılayıcılar ve analog-dijital dönüştürücüler (ADC). Gözlemlenen olaya dayanarak algılayıcılar tarafından üretilen analog sinyaller, ADC tarafından dijital sinyallere dönüştürülür ve daha sonra işlem birimine iletilir.

İşlem birimleri, genel olarak küçük bir depolama birimi ile bağlantılıdır. Algılama görevlerini yerine getirmek için, algılayıcı düğümünü diğer düğümlerle birlikte çalıştıran prosedürleri yönetir. Veri işleme, geçici - kısa süreli depolama, şifreleme, ileri hata düzeltme, sayısal modülasyon ve sayısal iletim yapmak için kullanılırlar.

Alıcı-verici ünitesi, düğümü ağa bağlar. Algılayıcı düğümler veya diğer cihazlar arasında kablosuz iletişim için kullanılır. Alıcı ve anten elemanlarından oluşan iletişim sistemi, noktadan noktaya ve noktadan çoklu noktaya tek atlama, düğümler arası çoklu atlama, radyo bağlantısı kurulabilme gibi özelliklere sahip olmalıdır. Radyo ara yüzü olarak da adlandırılan bu ünite genellikle düşük oranlı veri (10-100 kbps) ve kısa menzilli (100 m'den az) olan kablosuz ünitelerdir. Bu ünite gücün çoğunu tükettiği için enerji verimli iletişim teknikleri kullanılmalıdır [3, 61, 62].

Güç üniteleri, bir algılayıcı düğümünün en önemli bileşenlerinden biridir ve genellikle pillerden oluşur. Güneş pilleri veya diğer alternatif enerji kaynakları tarafından desteklenebilir. Enerji tüketimi, KAA'ların temel problemidir, çünkü geniş bir alana dağılmış çok sayıda algılayıcı düğümünden oluşan KAA'ların pillerini değiştirmek zordur.

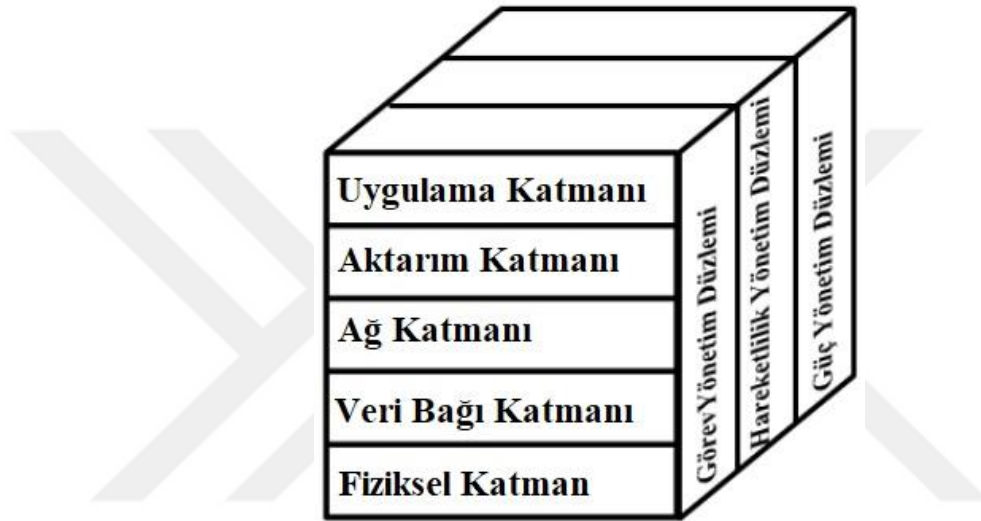
Düğümlerde, bulunacağı bölgeye göre veya uygulama alanına bağlı olarak başka alt birimler de bulunabilmektedir. KAA yönlendirme teknikleri ve algılama görevlerinin çoğu, yüksek hassasiyetle konum bilgisi gerektirir. Bu nedenle, bir AD'nin bir konum bulma sistemine sahip olduğu yaygındır. Atanan görevleri gerçekleştirmek gerektiğinde, AD'leri hareket ettirmek için bir seferberlik gerekebilir. Bu alt birimlerin hepsinin kibrit kutusu boyutunda bir modüle sığması gerekebilir. Gerekli boyut, havaya asılı kalacak kadar hafif olan bir kübik santimetreden bile daha küçük olabilir. Boyut haricinde, AD'ler için başka kısıtlamalar da vardır. Bu düğümler aşırı düşük güç tüketmeli, yüksek hacimsel yoğunluklarda çalışmalı, düşük üretim maliyetine sahip olmalı, dağıtılabılır ve özerk olmalı, gözetimsiz olmalı ve çevreye uyulanmalıdır [3, 61].

AD'ler tasarsız (ad-hoc) veya önceden planlanmış bir şekilde konuşlandırılabilir. Bir ad-hoc dağıtım, geniş ve güvenli olmayan bölgelerde izleme ve raporlama işlevlerini yerine getirmek için çok sayıda düğümün dağıtılıp yalnız bırakılabildiği bir ağ için uygundur. Çok sayıda düğüm nedeniyle böyle bir KAA'da bağlantıyı yönetmek ve hataları algılamak gibi ağ bakımı zordur. Öte

yandan, önceden planlanmış dağıtım, daha düşük ağ bakımı ve yönetim maliyeti avantajı ile belirli konumlarda daha az düğümün konuşlandırıldığı sınırlı kapsama alanı için iyidir [62].

3.1. Protokol Yığını

Şekil 3.1’de gösterilen AD’ler tarafından kullanılan protokol yığını Şekil 3.3’te verilmiştir. Bu protokol yığını güç ve yönlendirme farkındalığını birleştirir, ağ protokolleriyle verileri bütünleştirir, kablosuz ortam aracılığıyla gücü verimli bir şekilde kullanarak iletişim kurar ve işbirlikçi çabaları teşvik eder.



Şekil 3.3. KAA Protokol Yığını

Protokol yığını fiziksel katman, veri bağı katmanı, ağ katmanı, aktarım katmanı, uygulama katmanı, güç yönetimi düzlemi, hareketlilik yönetim düzlemi ve görev yönetim düzleminde oluşur. Fiziksel katman, basit ancak sağlam modülasyon, aktarım ve alma tekniklerinin gereksinimlerini karşılar. Ortam gürültülü olduğundan ve AD’ler mobil olabileceğinden ilgili OEK protokolünün güç farkındalığı olmalı ve komşuların yayınlarıyla çarpışmayı en aza indirebilmelidir. Ağ katmanı, ulaşım katmanı tarafından sağlanan verilerin yönlendirilmesiyle ilgilidir. Aktarım katmanı, KAA uygulaması gerektiriyorsa, veri akışının korunmasına yardımcı olur. Algılama görevlerine bağlı olarak, uygulama katmanında farklı uygulama yazılımları oluşturulabilir ve kullanılabilir. Ek olarak, güç, hareketlilik ve görev yönetimi düzlemleri, algılayıcı düğümleri arasındaki güç, hareket ve görev dağılımını izler. Bu düzlemler, AD’lerin algılama görevini koordine etmesine ve genel güç tüketimini azaltmasına yardımcı olur [61].

Fiziksel katman, frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretimi, sinyal algılama, çoğullama, modülasyon ve veri şifrelemesinden sorumludur. KAA standartları yaygın olarak Lisanssız Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi bantlarını (Industrial, Scientific and Medical radio bands-ISM) kullanırlar.

Veri bağı katmanı, OEK protokollerinin tasarlandığı katmandır. Genel olarak veri akışlarının, veri çerçevesinin tespitinin, ortam erişiminin ve hata kontrolünün çok yönlü olmasından sorumludur. Bir iletişim ağında güvenilir noktadan noktaya ve noktadan çoklu nokta bağlantılarına olanak sağlar.

Güç yönetimi düzlemi, bir AD'nin gücünü nasıl kullandığını yönetir. Örneğin, AD, komşularından bir mesaj aldıktan sonra alıcısını kapatabilir. Bu, kopyalanmış mesajlardan kaçınmaktır. Ayrıca, AD'nin güç seviyesi düşük olduğunda, AD, komşularına, gücünün düşük olduğu ve yönlendirme mesajlarına katılamayacağını bildirir. Kalan güç algılama için ayrılır.

Hareketlilik yönetimi düzlemi, AD'lerin hareketini algılar ve kaydeder, böylece kullanıcıya geri giden bir rota her zaman korunur ve algılayıcı düğümleri, komşu AD'lerinin kim olduğunu takip edebilir [61]. AD'ler komşu AD'lerin kim olduğunu bilerek güçlerini ve görev kullanımlarını dengeleyebilir.

Görev yönetim düzlemi, belirli bir bölgeye verilen algılama görevlerini dengeler ve zamanlar. Bir bölgedeki tüm AD'lerin aynı zaman diliminde algılama görevini gerçekleştirme gerekliliği yoktur. Sonuç olarak, bazı algılayıcı düğümleri, güç seviyesine bağlı olarak görevleri diğerlerinden daha fazla gerçekleştirebilir. Bu yönetim düzlemleri, AD'lerin güç verimli bir şekilde birlikte çalışabilmeleri, verileri bir mobil KAA'da yönlendirebilmeleri ve AD'ler arasındaki kaynakları paylaşabilmeleri için gereklidir [61].

3.2. Kablosuz Algılayıcı Ağ Türleri

Teknolojik gelişmeler birçok farklı özelliğe sahip algılayıcı düğümün geliştirilmesine olanak tanımıştır. Bu algılayıcı düğümler istenilen amaca uygun özellikte donatılmış bir şekilde ve bulunduğu çevre koşullarına uyum sağlayarak birçok farklı ağ oluşturmada kullanılabilir. Kara, yeraltı ve sualtı gibi farklı alanlarda KAA uygulamaları görmek mümkündür. Rawat P. ve arkadaşları [62]'de KAA türlerini Karasal KAA, Yeraltı KAA, Sualtı KAA, Multimedya KAA ve Mobil KAA olmak üzere beş farklı grupta toplamıştır.

3.3. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Kullanılan Teknolojiler

KAA'larda kullanılan iletişim cihazlarının birbiriyle uyumlu çalışabilmesi için tanımlanan birkaç KAA standardı mevcuttur. Bu standartların önde gelenleri IEEE tarafından tanımlanmış IEEE 802.15.4 [58], ETSI tarafından geliştirilmiş EN 300 440 [63], FCC tarafından tanımlanmış CFR47 Part15 [64], ITU tarafından önerilmiş ITU G.9959 [65], Japon standardı olan ARIB STD-T66 [66] ve ARIB STD-T99 [67] sayılabilir.

Uygulamalarda gereksinimlere göre farklı kablosuz standartlara dayalı algılayıcılar kullanılabilir. Standartların en popüler olanı 802.15.4 standardıdır. KAA'lar ayrıca 802.11 (WiFi), bluetooth ve benzeri teknolojileri de kullanabilirler. Bazen uygulamalarda karma standart yapılarının kullandığı da görülebilir. Örneğin akıllı ev uygulamalarında [16, 17] kablosuz kameralar 802.11 [68] kullanırken, lamba açıp kapatma Lightwave Rf [69], sıcaklık kontrol algılayıcıları da 802.15.4 ile kontrole bağlı olabilir [70]. Genelde teknoloji geliştiricileri ve cihaz üreticileri bir cihaz üreteceği ya da bir protokol tanımlayacağı zaman bu alanda söz sahibi olan bu standartlardan birini temel alarak yoluna devam etmektedir. Bu standartlara dayanarak geliştirilmiş KAA teknolojilerinden bazıları aşağıdaki gibidir.

3.3.1. ZigBee

ZigBee [71], gömülü sistemlerde kullanılan düşük maliyetli ve düşük güçlü bir kablosuz iletişim teknolojisidir. ZigBee standardı ZigBee Alliance tarafından geliştirilmektedir. Fiziksel katman ve OEQ katmanı IEEE 802.15.4 standardından almaktadır. Daha üst katmanları bu grup tarafından geliştirilmektedir. ZigBee, düşük veri hızı, uzun pil ömrü ve güvenli ağ iletişimi gerektiren radyo frekansı (RF) uygulamalarında kullanılmaktadır. Düşük maliyet, teknolojinin kablosuz kontrol ve izleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını sağlar [72]. Genellikle Zigbee'yi dağıtmak için Zigbee son cihazına ek olarak Zigbee koordinatörü ve Zigbee router gibi ek ekipmanlara ihtiyaç vardır [62].

ZigBee, uzun pil ömrü ile kendi kendini organize eden, çoklu atlama ve güvenilir ağ bağlantısı sağlar. İki farklı cihaz türü mevcuttur. Bunlar tam işlevli cihaz olan FFD (Full Function Device) ve düşük fonksiyonlu cihaz RFD (Reduced Function Device-RFD)'dir. FFD, ağ koordinatörü, koordinatör veya son cihaz olarak hizmet verebilirken ağdaki diğer FFD veya RFD cihazlarla iletişim kurabilir. RFD ise basit son cihaz olarak çalışmaktadır. Bir RFD ağda yalnızca bir FFD ile

konusabilir. Bir RFD, bir ışık anahtarı veya bir pasif kızılötesi algılayıcı gibi son derece basit uygulamalar için tasarlanmıştır. Bir ağda en az bir FFD bulunmalıdır [73].

ZigBee IEEE 802.15.4 de tanımlanmış 3 farklı frekans bandında toplam 27 frekans kanalında çalışmaktadır.

- 2.4 GHz bandında 16 kanal 250 kbps veri oranıyla (Dünya geneli)
- 915 MHz bandında 10 kanal 40 kbps veri oranıyla (Güney Amerika, Avustralya ve birkaç ülkede)
- 868 MHz bandında 1 kanal 20 kbps veri oranıyla (Avrupa ülkelerinde)

ZigBee ağı kurulurken koordinatör düğüm mevcut kanalları tarayarak en az girişimin olduğu en uygun kanalı otomatik olarak seçmektedir. ZigBee kanal erişim tekniği olarak CSMA-CA (Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim-Çarpışma Kaçınmalı-Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) tekniğini kullanmaktadır. Ethernet'te yıllarca başarıyla kullanılan bu teknik, cihazlar arasında senkronizasyon gerektirmemesi yönüyle avantaj sağlamaktadır. Çarpışmadan kaçınma mekanizması basit bir "konuşmadan önce dinle" stratejisini kullanır. Cihaz, kanalın meşgul olup olmadığını dinler ve eğer meşgulse tekrar kontrol etmeden önce bekler. Yoğun bir konferans görüşmesinde konuşmaya çalışan insanların stratejisi gibi sadece bekleyip başka kimse konuşmuyorken konuşulur [71].

3.3.2. 6LoWPAN

6LoWPAN (IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks) [74], IETF (Internet Engineering Task Force) tarafından IEEE 802.15.4 ağlarının üstüne IPv6 iletişimini uyarlamak için tanımlanmış açık bir standarttır. 6LoWPAN, IPv6'nın düşük güç, düşük veri hızı, düşük maliyetli kişisel alan ağları üzerinde nasıl kullanılacağını açıklayan bir protokol tanımlamasıdır. 6LoWPAN çalışma grubunun tüzüğü, IEEE 802.15.4 bağlantıları üzerinden açık standartlara uyarak ve diğer IP cihazlarıyla birlikte çalışabilirliği sağlayarak IP tabanlı iletişimi nasıl taşıyacağını tanımlamaktır. Akıllı Nesnelere için IP İttifakı (IP for Smart Object-IPSO Alliance), akıllı nesnelere 6LoWPAN ve gömülü IP çözümlerinin kullanımını teşvik etmektedir [62, 75].

İnternetteki her cihaz, cihaz tanımlama ve konum adresleme için kullanılan İnternet Protokolü (IP) adresi olarak adlandırılan sayısal bir etikete sahiptir. İnternet Protokolü sürüm 4 (IPv4) IP

protokolünün en çok kullanılan sürümüdür. IPv4'ün 32 bit adres alanı vardır ve 2^{32} adres atayabilir. İnternette mevcut olan cihazların artışıyla, IPv4'ten daha fazla adrese ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, İnternet Protokolü versiyon 6 (IPv6) önerilmiştir. IPv6, 128 bit adres alanıyla 2^{128} adet IP ataması yapabilmektedir [70].

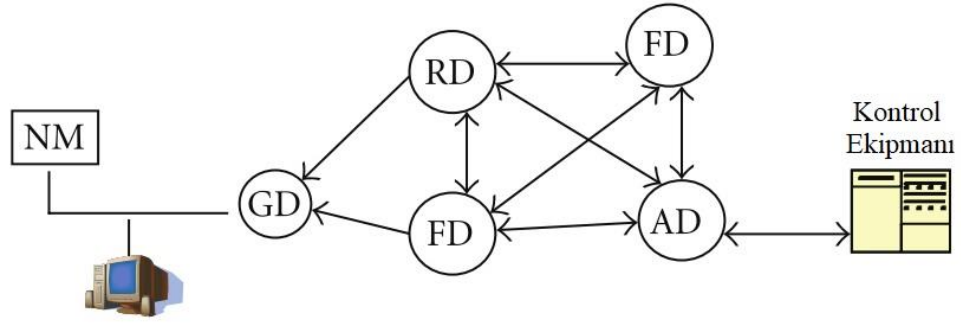
IPv6, internette çok sayıda aygıtın ele alınmasına izin verse de, sınırlı işlem yeteneği ve küçük paket boyutu nedeniyle düşük güçlü ağ bağlantılı gömülü aygıtlar internette dışarıda bırakılıyordu. KAA'lar çoğunlukla 802.15.4 standardını kullanır ve 802.15.4'teki paket boyutları IPv6'yı kullanmak için çok küçüktür. Maksimum İletim Birimi (Maximum Transfer Unit-MTU) paket boyutu 802.15.4'te 127 bayt iken IPv6'da en az 1280 bayt olmalıdır. 6LoWPAN bu amaçla tanıtılmış ve gömülü cihazların IP protokolünü kullanmasına izin vermiştir. 6LoWPAN'ın da ZigBee gibi ilk iki katmanı 802.15.4 standardının ilk iki katmanıdır. Bu iki katmanın üzerinde adaptasyon katmanı tanımlanmaktadır. 6LoWPAN özellikli cihazlar kapsülleme ve başlık sıkıştırma mekanizmaları sayesinde IPv6 paketlerini 802.15.4 tabanlı ağlar üzerinden alıp gönderebilir. Ağa gömülü sistemlerde IP'yi etkinleştirme Nesnelerin İnternetini (Internet of Things- IoT) gerçekleştirilmesini sağlamıştır [70, 76].

3.3.3. WirelessHART

2007 yılında piyasaya sürülen WirelessHART, süreç ölçüm ve kontrol uygulamaları veya endüstriyel uygulamalar için uygun bir kablosuz iletişim standardıdır [62]. HART İletişim Kuruluşu tarafından kablolu HART iletişim teknolojisine dayanarak geliştirilmiştir. Bu standart geliştirilirken endüstriyel tesislerdeki iletişim gereksinimleri dikkate alınmış ve özellikle elektriksel gürültülü ortamları ve gerçek zamanlı gecikme kısıtlarını telafi edilmiştir [77].

WirelessHART, IEEE802.15.4 standardının fiziksel katmanı kullanır ve 2.4 GHz ISM radyo bandında çalışan bir teknolojidir. OEK katman girişimlerini en aza indirmek için TDMA ve kanal atlamalı bir yapıya sahiptir [72, 77]. İşgal edilen kanalların kullanımını engelleyen kara liste özelliği mevcuttur. Parazitsiz iletişim için haberleşme cihazlarına her zaman diliminde (frekans atlamalı) özel bir kanal tahsis edilir, böylece cihazlar aynı bantta çalışan diğer RF cihazlarından gelen parazitlere karşı bağışık hale getirilir [76].

WirelessHART, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi altı farklı tipte cihazla bir ağ ağı oluşturur [77].



Şekil 3.4. WirelessHART ağ cihazları [77]

- NM (Network Manager-Ağ Yöneticisi): Ağdaki TDMA zamanlamasını ve rotalarını oluşturur ve yönetir.
- FD (Field Device-Saha Cihazı): İzlenen makinelere doğrudan bağlı iletişim cihazlarıdır.
- RD (Routing Device-Yönlendirme Cihazı): Yönlendirilen cihazlara doğrudan bağlı olmayan yönlendirici cihazlardır. Yönlendirici cihazlar iletişim sürecine yardımcı olur ve ağ kapsama alanını artırmak için kullanılabilir. RD'ler standart olarak isteğe bağlıdır.
- AD (Adapter Device-Adaptör Cihazı): Entegre kablolu HART protokolü adaptörüne sahip makineler, bir AD kullanarak kablosuz ağa bağlanabilir.
- HD (Handheld Device-El Cihazları): WirelessHART ağındaki mobil izleme, konfigürasyon ve düğümlerin korunmasına izin verir.
- GD (Gateway Device-Ağ Geçidi Cihazı): Bir ağ geçidi, WirelessHART uyumlu bir ağı, endüstriyel tesiste kullanılan farklı bir teknolojiye sahip bir ağa bağlar. Ağ genellikle fabrika otomasyon sistemidir.

WirelessHART'ın bir avantajı, zorlu endüstriyel iletişim ortamının sağlamlığıdır. Ana dezavantaj, NM'nin tek bir hata noktası olmasıdır. Bir yedek NM uygulanabilmesine rağmen, ağda sadece bir aktif NM'ye izin verilir [77].

3.3.4. ISA100.1a

ISA100.1a, Uluslararası Otomasyon Derneği (International Society of Automation-ISA) tarafından oluşturulan kablosuz iletişim standartlarına yönelik bir teknolojidir. ISA100.1a, süreç otomasyonuna karşılık gelir ve WirelessHART ile çeşitli özellikleri paylaşır. Her iki standart da IEEE 802.15.4'teki fiziksel katman üzerine kuruludur ve kendilerine özel frekans atlamalı ve kanal kara listeye alma özelliğine sahip bir OEK katmanını kullanırlar. Kanal erişimi için CSMA ve

TDMA teknikleri kullanılmaktadır. ISA100.1a ve WirelessHART arasındaki farklar ağ, aktarım ve uygulama katmanlarıdır. Bununla birlikte ISA100.1a OEK katmanının ayrı bir özelliği, özel zaman dilimlerine veya paylaşılan zaman aralıklarına izin vermesidir. Bir zaman dilimini paylaşırken, erişimi kontrol etmek için öncelikleri kullanan bir CSMA-CA algoritması kullanılır[77].

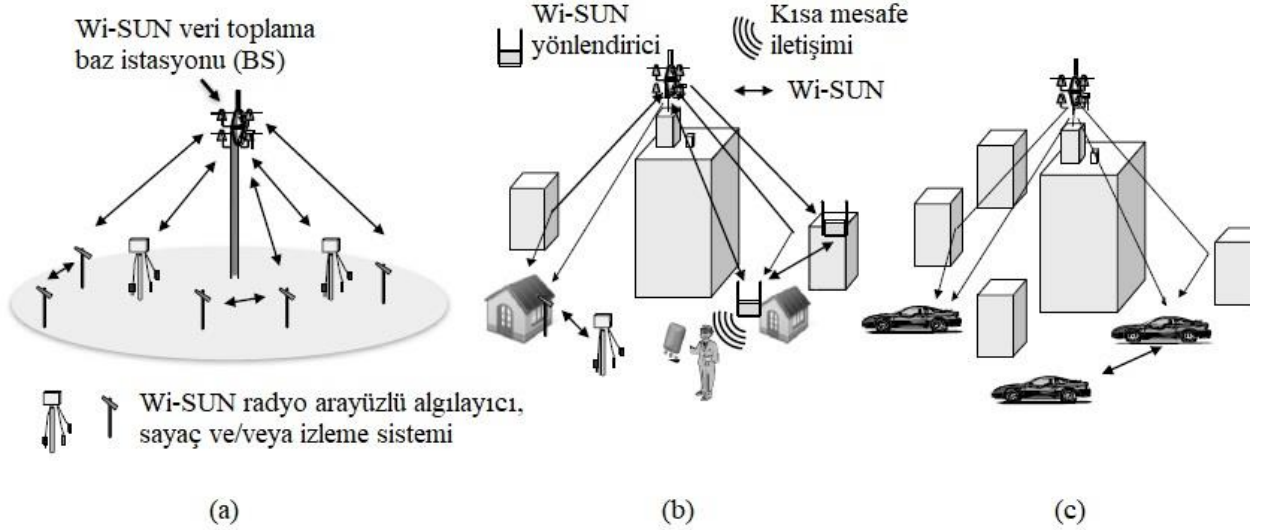
Bir ISA100.11a KAA, saha cihazları, ağ geçitleri ve el cihazlardan oluşur. Saha cihazları, algılayıcı verilerinin toplanmasından sorumludur ve bazıları da yönlendirme işlevlerini sağlayabilir. Ağ geçitleri, KAA ile kullanıcı uygulaması arasında bağlantı sağlar ve ayrıca ağlar arasındaki bilgileri çevirerek ve tünelleyerek WirelessHART gibi mevcut standartlarla birlikte çalışabilirliği destekler. El cihazları, cihaz kurulumunu, yapılandırmasını ve bakımını destekler. ISA100.1a'nın temel özelliklerinden biri, 100 ms'den düşük gecikme süresi veya hızlı yanıt süresidir. ISA100.11a, güvenilirliği artırmak ve diğer kablosuz ağlardan gelen paraziti önlemek için frekans atlamalı olarak yalnızca 2.4 GHz ISM bandını kullanır [62]. Bu standart 6LoWPAN ile uyumlu çalışabilmektedir [76].

ISA100.1a'nın avantajlarından biri, HART, Fieldbus [78] ve Profibus [79] gibi farklı endüstriyel kablolu standartlarla doğrudan bağlantıya izin vermesidir. Dezavantajı, şebekeyi kontrol etmek için sistem karmaşıklığını arttıran iki yönetici düğümünün gerekmesidir [77].

3.3.5. Wi-SUN

Fiziksel katman özellikleri IEEE 802.15.4.g [80] standardına dayanan Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network-Kablosuz Akıllı Kamu Ağı), 2012 yılında kurulan ve 100'den fazla üye şirketten oluşan Wi-SUN Alliance tarafından standartlaştırılmıştır. Wi-SUN ayrıca birkaç uygulamayı desteklemek amacıyla IEEE ve IETF tarafından standartlaştırılan OEK, uyarılma, ağ ve aktarım katmanları protokollerinin ek özelliklerini de içerir.

IEEE 802.15.4g'de SUN cihazları için üç farklı fiziksel katman tanımlanmıştır. Bu fiziksel katmanlarda FSK, OFDM (BPSK, QPSK,16QAM ile), O-QPSK modülasyonlarının kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca farklı frekans bantlarında, değişik bant genişliğinde (12,5KHz-5MHZ) olmak üzere en az 3 en fazla 7279 adet farklı frekans kanalı tanımlanmıştır [80].



Şekil 3.5. Wi_SUN iletişim sistemi [81]

Şekil 3.5'te Wi-SUN iletişimi üç şekilde kategorize edilmiştir [81]. Kategori (a) geniş açık alan ortamında bir bilgi algılama ve izleme sistemidir. Kategori (a) sabit noktadan çoklu noktaya iletişime dayanmaktadır ve kapsama alanı 1–5 km'dir. Şekil 3.5 (a)'da her bir Wi-SUN radyo cihazı (algılayıcı, sayaç veya izleme sistemi) BS ile iletişim kurar. Cihazlar direkt olarak BS ile iletişim kuramıyorsa, verilerini diğer radyo cihazlarından çoklu servis ile BS'ye iletebilirler.

Kategori (b), geniş alan kentsel ortamlarda bir bilgi algılama ve izleme sistemidir. BS'ler bina üzerinde kurulmuştur ve Wi-SUN tarafından evler veya işyerlerine yerleştirilmiş cihazlarla iletişim halindedir. BS'ler ve radyo cihazları arasındaki doğrudan iletişim mevcut değilse radyo cihazları arasında Wi-SUN yönlendiriciler kullanılır.

Kategori (c), geniş alan mobil iletişim ortamında bir bilgi algılama ve izleme sistemidir. BS'ler bina üzerinde bulunur ve mobil araçlardaki Wi-SUN radyo cihazları ile iletişim kurarlar. Sistemin fizibilite zorluğu, mobil ortamdaki algılayıcı, sayaç veya monitör bilgilerini almak için Wi-SUN radyo cihazlarına fonksiyon eklemektir.

Wi-SUN Alliance tarafından tanımlanan teknik şartname Wi-SUN profili olarak adlandırılır. Wi-SUN profilinin başarılarından biri, Japon elektrik akıllı sayacı ve ev enerji yönetim sistemindeki (HEMS) radyo cihazları arasındaki iletişimin belirtilmesidir. Japonya'daki tüm elektrik şirketleri şartnameyi benimsemiştir ve abonelerinin sayısı 2014'te on milyondan fazladır. Başarıdan sonra

Wi-SUN, tarım, afet önleme ve akıllı ulaşım sistemleri gibi yeni uygulama alanları üzerine yoğunlaşmıştır [81].

3.3.6. Z-Wave

Z-Wave, Danimarkalı Zensys firması tarafından geliştirilen bir teknolojidir. Düşük güçlü uzaktan kumanda uygulamaları için düşük güçlü RF radyo kullanır. Teknoloji Z-Wave Alliance tarafından ITU G9959 [65] tavsiyesine dayanarak standartlaştırılmıştır. Bu teknoloji 802.15.4 ile uyumlu değildir. Bu teknolojinin 802.15.4'e göre ana avantajı 1 GHz alt bandında çalışmasıdır. 2.4 GHz RF bandı, birçok teknoloji tarafından kullanıldığından önemli parazitlere maruz kalmaktadır. Öte yandan, Z-Wave tarafından kullanılan 868 MHz ISM bandı, Avrupa yönetmelikleri tarafından %1 ya da daha düşük bir seviyede faaliyet göstermesi ile sınırlıdır. Bununla birlikte, bandın % 1 görev döngüsünde çalışması, kontrol uygulamalarının çoğu için yeterli olabilir. Ağda en fazla 2^{32} düğüm bulundurulabilir [75]. Kullanılabilir veri hızları 9.6 kbps, 40 kbps ve 100 kbps'dir. Bu veri oranlarını sırasıyla 300 kHz, 300 kHz ve 400 kHz'lik üç frekans kanalı kullanarak elde etmektedir [82].

3.3.7. ANT

ANT [83], ultra düşük güç ağ uygulamaları için düşünülen kablosuz iletişim protokolüne sahip tescilli bir teknolojidir. Dynastream Innovations Inc.'in ANT Wireless bölümü tarafından geliştirilmiştir. 2,4 GHz ISM bandında çalışan düşük maliyetli, düşük güçlü mikro denetleyiciler ve alıcı-vericiler kullanılarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. ANT KAA protokolü, basitlik ve verimlilik için tasarlanmış olup, ultra düşük güç tüketimi, maksimum pil ömrü, sistem kaynakları üzerinde minimum yük, daha basit ağ tasarımları ve daha düşük uygulama maliyetleri ile sonuçlanmıştır. ANT aynı zamanda düşük gecikme süresi, güç tüketimine karşı veri oranını dengeleme ve 20 kbps'lik net veri hızına kadar yayın, burst ve onaylanmış işlemleri destekleme özelliğine de sahiptir [75]. GFSK modülasyonu kullanan ANT ve yeni nesil ANT+ teknolojilerinde 1, 8 ve 15 adet bağımsız frekans kanalı bulunmaktadır. Kanal erişimi tekniği olarak TDMA şemaları kullanılmaktadır [84].

ANT düğümleri, bir ağ içinde köleler veya master'lar olarak hareket etme ve herhangi bir zamanda rol değiştirmeyi becerebilmektedir. Bu, düğümlerin trafiği diğer düğümlere yönlendirmek için vericiler, alıcılar veya alıcı-vericiler olarak hareket edebileceği anlamına gelir. ANT, pratik ağlar

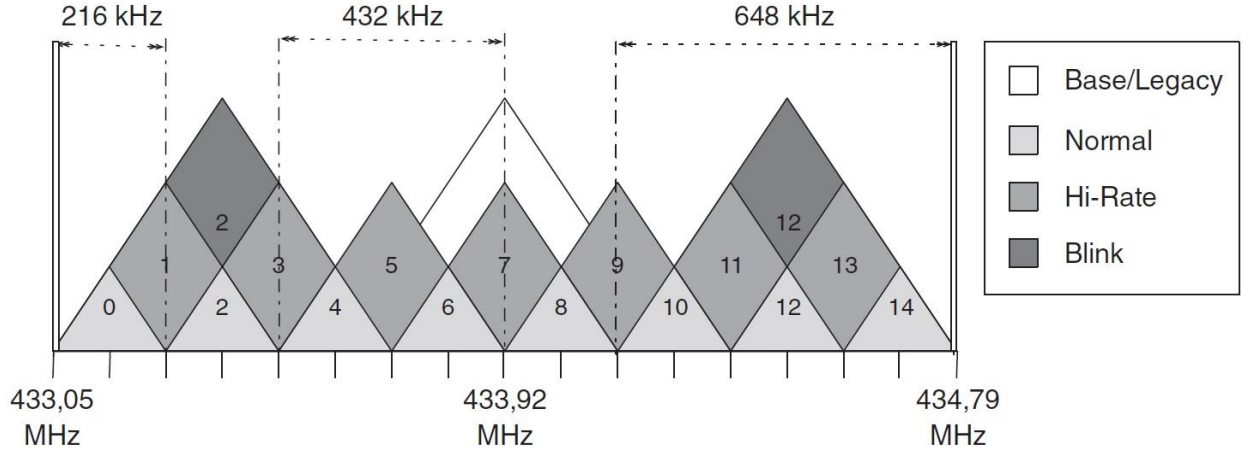
için onlarca veya yüzlerce düğümün kendi ara bağlantılarını destekleme yeteneğinden dolayı iyi bir protokoldür.

ANT, bir sistemin zamanının çoğunu ultra düşük güçte uyku modunda geçirmesini sağlar. Hızlıca uyanır, mümkün olan en kısa sürede verisini ilettikten sonra yine hızlı bir şekilde ultra düşük güç moda döner. Bu yönüyle ANT, enerji tasarrufu güçlü teknolojilerden birdir. IEEE 802.15.4'e göre daha az karmaşık olmakla beraber birlikte çalışabilirlikten yoksundur [75].

3.3.8. DASH7

DASH7 [85], ISO 18000-7 [86] açık standardına dayanan, açık kaynaklı, ultra düşük güç ve uzun menzilli KAA teknolojisidir. 433 MHz ISM lisanssız bandında çalışır. DASH7 cihazları arasında birlikte çalışabilirliğe odaklanan DASH7 Alliance tarafından desteklenmektedir. DASH7 ağında, cihazlar arasında engeli, asenkron iletişimin olduğu kullanımlar için en uygun hale getirilen BLAST (Bursty, Light, Asynchronous, Transitive) teknolojisi denen yeni bir kavram kullanılmaktadır. DASH7 sistem aygıtları taşınabilir ve yükleme merkezlidir, bu nedenle cihazları baz istasyonları gibi sabit aygıtlarla yönetmeye gerek yoktur. DASH7'nin ana özellikleri arasında çok yıllı pil ömrü, 10 km'ye kadar iletişim aralığı, hareketli nesnelere bağlantı için düşük gecikme süresi, güvenlik desteği, 200 kbps'e varan veri hızı ve 4 saat içinde gerçek zamanlı konum hassasiyeti yer almaktadır. DASH7'nin başlıca uygulamaları arasında tedarik zinciri yönetimi, envanter yönetimi, mobil ödemeler, üretim ve depo optimizasyonu, tehlikeli madde izleme, gelişmiş konum tabanlı hizmetler, akıllı sayaç ve bina otomasyonu yer almaktadır [62].

DASH7 Mode 2, aktif radyo frekansı tanımlama uygulamaları için DASH7 Alliance tarafından geliştirilen ISO / IEC 18000-7: 2009 standardının yeni bir versiyonudur. DASH7 Mode 2'nin fiziksel katmanı, 433MHz bandında çalışır ve 15 adet 108 kHz kanal şeklinde düzenlenir. 15 kanal, farklı bant genişliği olan ve farklı modülasyon şemaları kullanan beş farklı kanal türü (Base, Legacy, Normal, Hi-Rate ve Blink) oluşturmak için birleştirilir [87]. DASH7 Mode 2'nin fiziksel katman yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. DASH7 Mode 2 fiziksel katman kanal yapısı [87]

- Normal sınıf, 55 kbps veri hızına sahip bir BFSK veya GFSK modülasyon şemasını kullanan 8 adet 216 kHz kanalı sağlar.
- Hi-Rate sınıfı, 200 kbps veri hızına sahip BFSK veya GFSK modülasyon şemasını kullanan 4 adet 432 kHz kanalı sağlar.
- Blink sınıfı, Hi-rate kanal sınıfı ile aynı modülasyon ve veri hızını kullanan 2 adet 648 kHz kanalı sağlar.
- Son olarak, Base ve Legacy sınıfları, 433.92 MHz'de ortalanmış, normal sınıfa benzer bir modülasyon ve veri hızı kullanan tek bir adet 432 kHz kanal sağlar.

3.4. Kablosuz Algılayıcı Ağların Kullanım Alanları

KAA'larda uygulama alanlarından bazıları: Askeri uygulamalar, çevre algılaması ve izleme, felaketten korunma ve kurtarma, tıbbi hizmetler, akıllı ev, yapı otomasyon, bilimsel araştırmalar, etkileşimli çevreleme, nezaret gözetim, endüstriyel otomasyon, boru hatlarının izlenmesi, hassas tarım, yer altı maden bulma çıkarma çalışmaları şeklinde sıralanabilir [3, 88].

KAA'lar, aşağıda sıralanan değerleri içeren çok çeşitli ortam koşullarını izleyebilen sismik, dūřuk örnekleme oranlı manyetik, termal, görsel, kızılötesi, akustik ve radar gibi birçok farklı türde algılayıcıdan oluşabilir;

- Sıcaklık
- Nem
- Araç hareketi
- Yıldırım durumu
- Basınç
- Toprak yapısı
- Gürültü seviyeleri
- Belirli türdeki nesnelere varlığı veya yokluğu
- Nesnelere mekanik stres seviyeleri
- Hız, yn gibi mevcut zellikler
- Bir nesnenin boyutu

AD'ler sürekli algılama, olay algılama, olay kimliği, konum algılama ve aktüatörlerin lokal kontrolü için kullanılabilir. Bu düğümlerin mikro algılama ve kablosuz bağlantı özelliği birçok yeni uygulama alanının oluşmasını sağlamaktadır. I.F.Akyildiz vd. [88]'de uygulamaları askeri, evre, sağlık, ev ve diğer ticari olmak üzere beř başlık altında ele almaktadır. Bu sınıflandırmayı alan araştırması, kimyasal işleme ve afet yardımı gibi daha fazla kategori ile genişletmek mümkündür. İnsanoğlunun sınırsız ihtiyaı ve sürekli olan teknolojik gelişmeler ile algılayıcı ağlarının birçok farklı alanda da kullanılacağı aşıkrdır. Algılayıcıların, bir canlının üzerine, bir binaya, bir nehre, hızla hareket eden bir aracın üzerine, bir okyanusun dibine, bir fırtınanın içine, makinelerin içine, bir savaş alanında dūřman hatlarının gerisine, biyolojik veya kimyasal kirlilik bölgelerine yerleştirilmesi veya atılması suretiyle KAA'lar oluşturulur [5].

KAA'ların ilk kullanım alanı askeri alanlardır. KAA'lar ile müttefik glerin, ekipman ve mühimmatın izlenmesi; savaş alanı gözetimi; rakip kuvvetlerin ve arazinin keşfi; hedefleme; savaş hasarı değerlendirmesi; nükleer, biyolojik ve kimyasal saldırı tespiti yapılabilir [88].

KAA'lar takip ve izlemenin fiziksel zorluklar barındırdığı ve sürekli olması gerektiği çevresel alan uygulamalarında büyük kolaylıklar sağlamıştır. Kuş, hayvan ve böceklerin izlenmesi, orman

yağını tespiti, evre kirliliği tespiti ve daha birçok çevresel alan uygulaması mevcuttur. Sağlık alanında da KAA'lar ara yüz oluşturarak engelli bakımı, hasta izleme, hastalık teşhisi, hastanelerde ilaç yönetimi, insan fizyolojik verilerinin tele-izlenmesi ve bir hastane içindeki doktorların ve hastaların takip edilmesine olanak tanımaktadır [12].

Akıllı ev uygulamalarında KAA kullanılarak merkezi ısıtma ya da soğutma, aydınlatma, ev aletlerinin çalıştırılması, evin güvenliği, elektrik, su ve gaz kullanımı kontrol altında tutularak ev sistemlerinin kontrolü otomatik hale getirilir [89].

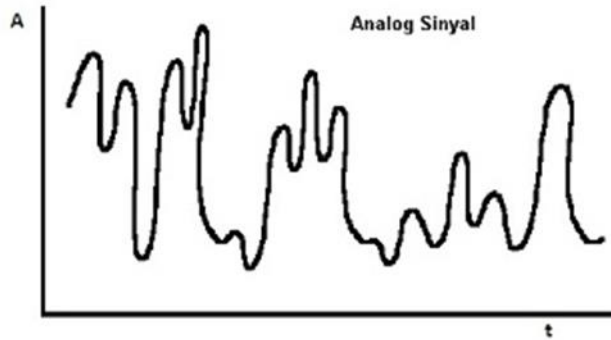
Ticari uygulamalardan bazıları, malzeme yorgunluğunu izleme, sanal klavye oluşturma, envanter yönetimi, ürün kalitesini izleme, akıllı ofis alanları inşa etme, ofis binalarında evre kontrolü, otomatik üretim ortamlarında robot kontrolü ve rehberliği, interaktif oyuncaklar, interaktif müzeler, fabrika süreç kontrolü ve otomasyon, afet bölgesi izleme, içine gömülü algılayıcı düğümleri ile akıllı yapılar, makine teşhisi, ulaştırma, fabrika enstrümantasyonu, araba hırsızlıklarını tespit etme, araç takip ve tespit, yarıiletken işleme odalarının, dönen makinelerin, rüzgar tünellerinin ve yankısız odaların enstrümantasyonu şeklinde sayılabilir [88].

4. MODÜLASYON

Kelime anlamı değiştirmek olan modülasyon, bir taşıyıcı sinyalin bazı özelliklerinin iletilmek istenen bir sinyale (bilgi sinyali veya mesaj sinyali) uyumlu olarak değiştirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bilgi sinyaline modüle edici sinyal ve modülasyon sonucu elde edilen sinyale modüle edilmiş sinyal denmektedir [90]. Genel olarak bilgi sinyaline göre taşıyıcı sinyalin genlik, frekans veya fazı değiştirilmekle beraber son zamanlarda sinyalin açıl momentumu da değiştirilebilir bir parametre olarak literatürde karşılaşılmaktadır [91–94].

Bilgi sinyalleri vericiyle alıcı arasında, bir iletim ortamında taşınmalıdır. Ancak, bilgi sinyalleri nadiren iletim için uygun bir biçimde bulunurlar. Modülasyon, bilgiyi başlangıçtaki biçiminden, vericiyle alıcı arasında iletim için daha uygun bir biçime dönüştürme sürecidir. Demodülasyon ise modüle edilen sinyali ilk biçimine dönüştüren ters süreçtir. Modülasyon, modülatör adı verilen bir devrede, demodülasyon ise demodülatör adı verilen bir devrede gerçekleştirilir [95].

Sayısal haberleşme sistemleri; bilgi (temel bant), iletim ortamı ve taşıyıcı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bilgi, sayısal ya da analog olabilir. Analog işaret, maksimum ve minimum değerleri olan sürekli bir işarettir. Örneğin Şekil 4.1’de gösterilen ses işareti, genliği belirli bir aralıkta değişen analog bir işarettir. Sayısal işaret ise analog işaretin örneklenmiş ve boyutlandırılmış bir biçimidir. Analog işaret örneklenip, boyutlandırıldıktan sonra her seviye ikili sayıya dönüştürülür.



Şekil 4.1. Örnek bir analog ses işareti

Modülasyon kullanımındaki bir diğer amaç bilgi işaretinin, taşıyıcı sinyal üzerine bindirilerek daha uzak mesafelere iletilmesidir. Genellikle taşıyıcı işaret olarak Şekil 4.2’de gösterilen yüksek frekanslı sinüzoidal işaret kullanılır [96].

Analog giriş işaretine göre taşıyıcı parametrelerinin değişimi sürekli ise bu modülasyon tekniği analog modülasyon olarak adlandırılır. Eğer değişim ayrık ise sayısal modülasyon olarak adlandırılır [97].

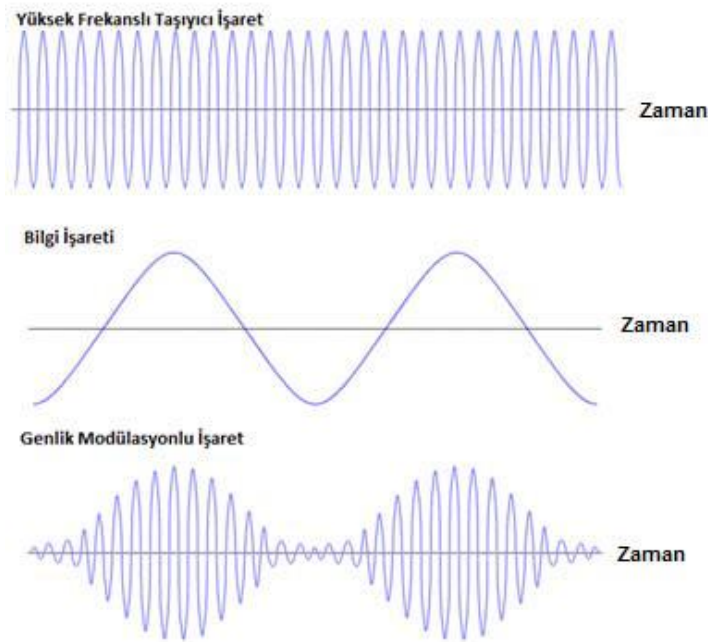
Modülasyon temel olarak analog modülasyon ve sayısal modülasyon olarak ikiye ayrılır. Bunlara değinmek konunun anlaşılması açısından faydalı olacaktır.

4.1. Analog Modülasyon

Analog modülasyon, analog giriş işaretine göre taşıyıcı parametrelerinin değişiminin sürekli olduğu bir modülasyon tekniğidir. Analog modülasyon teknikleri, Genlik Modülasyonu (AM-Amplitude Modulation), Frekans Modülasyonu (FM-Frequency Modulation) ve Faz Modülasyonu (PM- Phase Modulation) olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır [98].

4.1.1. Genlik Modülasyonu (AM)

Genlik Modülasyonu (AM-Amplitude Modulation), bilgi işaretine bağlı olarak taşıyıcı işaretin genliğinin değiştirilmesidir. Yüksek frekanslı taşıyıcı işaretin bilgi işareti ile modülasyonu sonucu oluşan genlik modülasyonlu işaret Şekil 4.2’de verilmiştir.



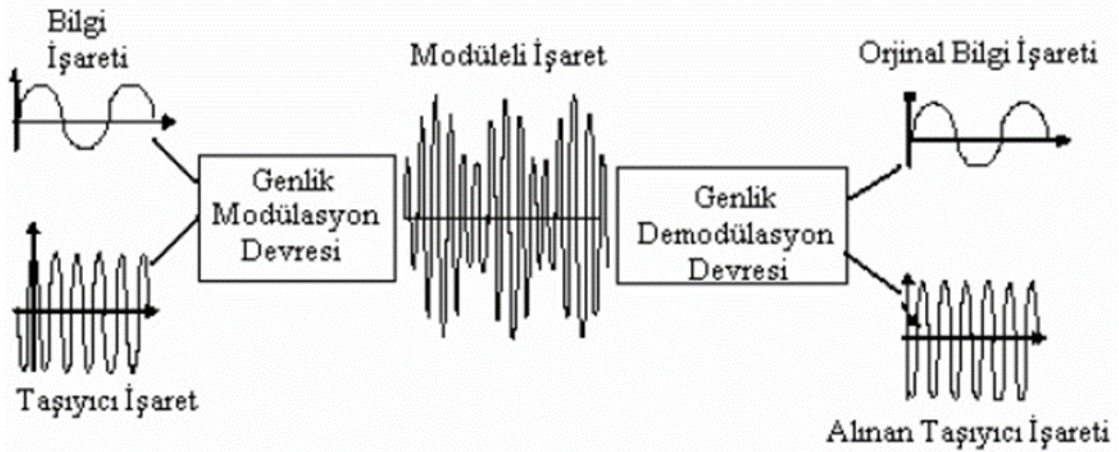
Şekil 4.2. Genlik Modülasyonu [96]

Genlik Modülasyonunun 3 farklı çeşidi vardır.

Bunlar;

1. Taşıyıcılı Genlik Modülasyonu
2. Çift Yan Bantlı Modülasyon
3. Taşıyıcısı Bastırılmış Tek Yan Bantlı Modülasyon
 - 3.1. Üst Yan Bant Modülasyonu
 - 3.2. Alt Yan Bant Modülasyonu [99]

Genlik Modülasyonu ses ve görüntü iletiminde diğer modülasyon türlerine göre daha ucuz ve basittir. Genlik modülasyonu dünyada uzun dalga ve orta dalga vericilerinde kullanılmaktadır. Ayrıca televizyon yayıncılığında video işareti negatif genlik modülasyonuna tabi tutulmaktadır. Bilgi işaretinin frekansı, taşıyıcı işaretin frekansından daha düşüktür. Genlik modülasyon ve demodülasyonu sonucunda orijinal bilgi işaretinin tekrar elde edilmesi Şekil 4.3'te gösterilmiştir[99].



Şekil 4.3. Genlik Modülasyonu ve Demodülasyonu Dalga Şekilleri [99]

$$C(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (4.1)$$

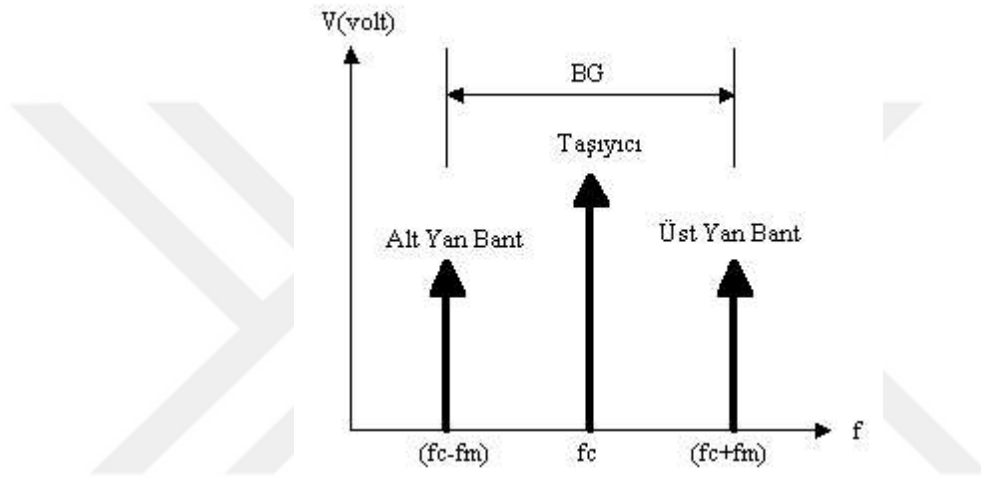
$$A(t) = [1 + m \cdot f(t)] \quad (4.2)$$

$$C(t) = A \cdot [1 + m \cdot f(t)] \cos(\omega_0 t) \quad (4.3)$$

Genliği modüle edilmiş dalga şeklinin genel ifadesi Denklem (4.1) ve Denklem (4.2) de, taşıyıcılı işaretin dalga biçimi de Denklem (4.3) de gösterilmiştir. “A(t)” genliği ile modüle edilen “f(t)”

bilgi işareti arasındaki ilişkiye bağlı olarak genlik modülasyonunun değişik biçimleri elde edilir. Burada, “ $f(t)$ ” modüle eden işaret (bilgi işareti), “ w_0 ” ise taşıyıcı frekansını belirtir. “ m ” ve “ A ” değişmez sabitler olup, “ m ” modülasyon derecesidir.

Genlik Modülasyonu sonucunda iki yeni frekans oluşur. Taşıyıcı frekansının altında ve üstünde meydana gelen bu iki yeni frekansa yan bant (kenar bant) ismi verilir. Bu yan bantlardan “ f_c+f_m ” frekansına üst yan bant denir. “ f_c-f_m ” frekansına alt yan bant denir. Alt yan bant, üst yan bant ve taşıyıcı işaretlerinin frekans spektrumu Şekil 4.4’te gösterilmiştir [99].



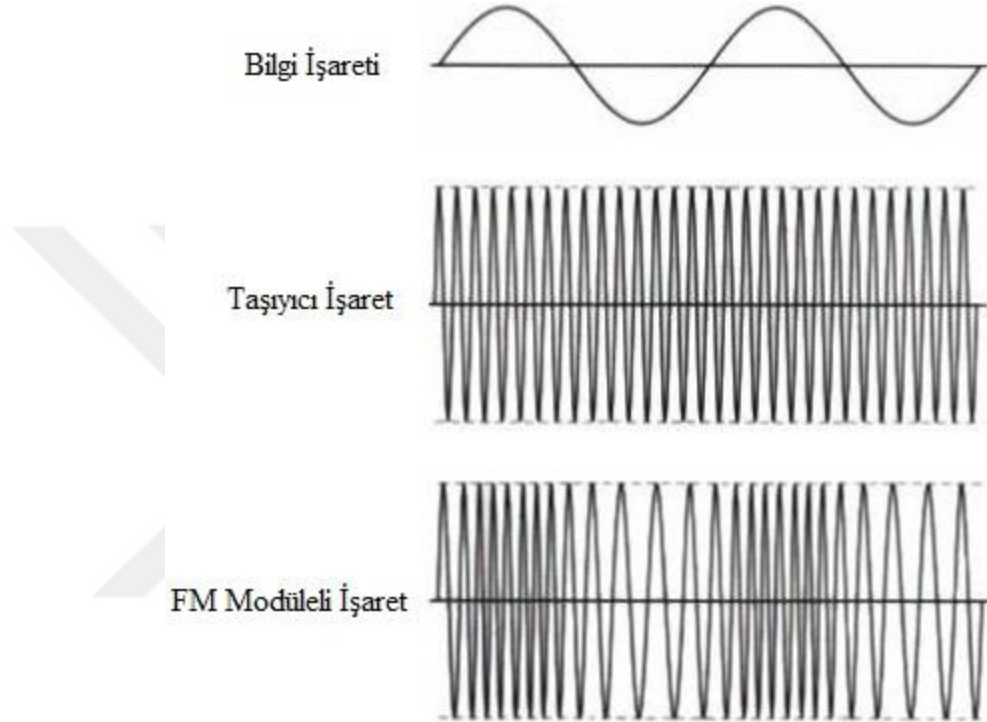
Şekil 4.4. Genlik Modüleli Dalganın Frekans Spektrumu [99]

4.1.2. Frekans Modülasyonu (FM)

Frekans Modülasyonu (FM - Frequency Modulation), yayıncılıkta sıklıkla kullanılan modülasyon türüdür. Bu modülasyon türü Edwin Howard Armstrong tarafından 1933 yılında geliştirilmiştir. Frekans Modülasyonu, açđ modülasyonu türü olarak tanımlanmaktadır ve genlik modülasyonuna göre bant genişliği ve karmaşıklığı arttırmasına karşın gürültüye daha az duyarlı olduğundan ve girişimlerden daha az etkilendiği için performansı arttırmaktadır [90, 95]. Genlik modülasyonunda 2 kHz bant genişliği ile iletilen bir bilgi (tek yan bant ile 1 kHz bant genişliğinde) frekans modülasyonu ile 6 kHz’lik bir bant genişliğiyle iletilebilmektedir. Frekans modülasyonunda bilgi işaretinin genliğine göre taşıyıcı işaretin frekansı değişir [95].

FM’de taşıyıcı sinyal olarak sinüzoidal sinyal kullanılır. Bilgi sinyalinin genliğine göre bu taşıyıcı sinyalin frekansı değiştirilir. Alıcı tarafında ise alınan bu modüleli sinyalin frekans değişikliklerine bakılarak iletilen bilgi sinyalinin ne olduğu anlaşılır.

Yüksek frekanslı taşıyıcı işaretin bilgi işareti ile modülasyonu sonucu oluşan frekans modülasyonlu işaret Şekil 4.5’de verilmiştir.

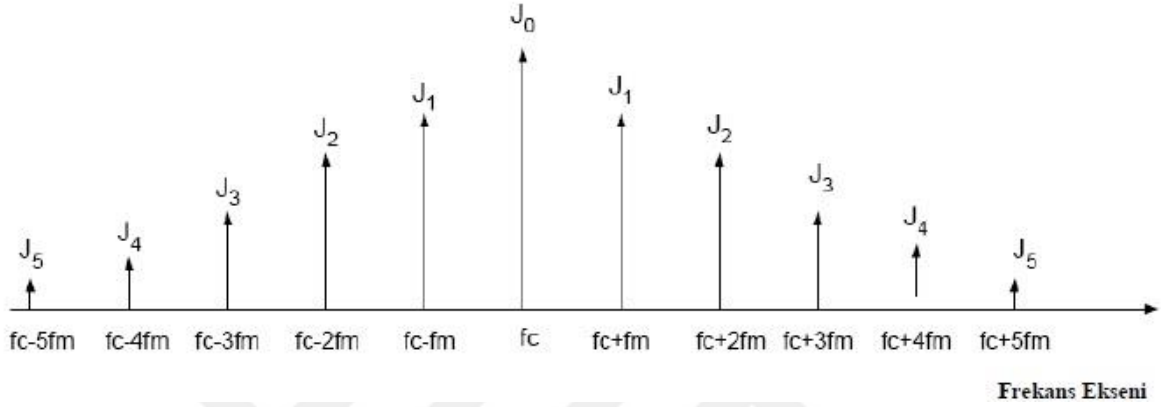


Şekil 4.5. Frekans Modülasyonu

Frekans Modülasyonunda, bilgi işaretinin genlik değişmelerine bağlı olarak taşıyıcı işaret frekansının değiştirildiği belirtilmiştir. Atmosferden ve çevredeki elektrik tesis ve sistemlerinden gelen gürültüler genlik üzerine bindiği için frekans modülasyonu ile kablolu taşıma ve radyo ile iletimde gürültüden etkilenme az olmaktadır.

Frekans Modülasyonunda, bilgi işaretinin genliğine bağlı olarak taşıyıcı merkez frekansının altında ve üstünde frekans değişimleri oluşmaktadır. Taşıyıcı frekansının, modüle eden bilgi işaretinin pozitif ve negatif maksimum tepe değerlerine bağlı olarak frekans değişim miktarına frekans sapması denir. Frekans modülasyonunun sivil amaçlı vericilerin frekans sapması $\pm 75\text{kHz}$, askeri amaçlı vericilerin frekans sapması $\pm 40\text{kHz}$ dir [99].

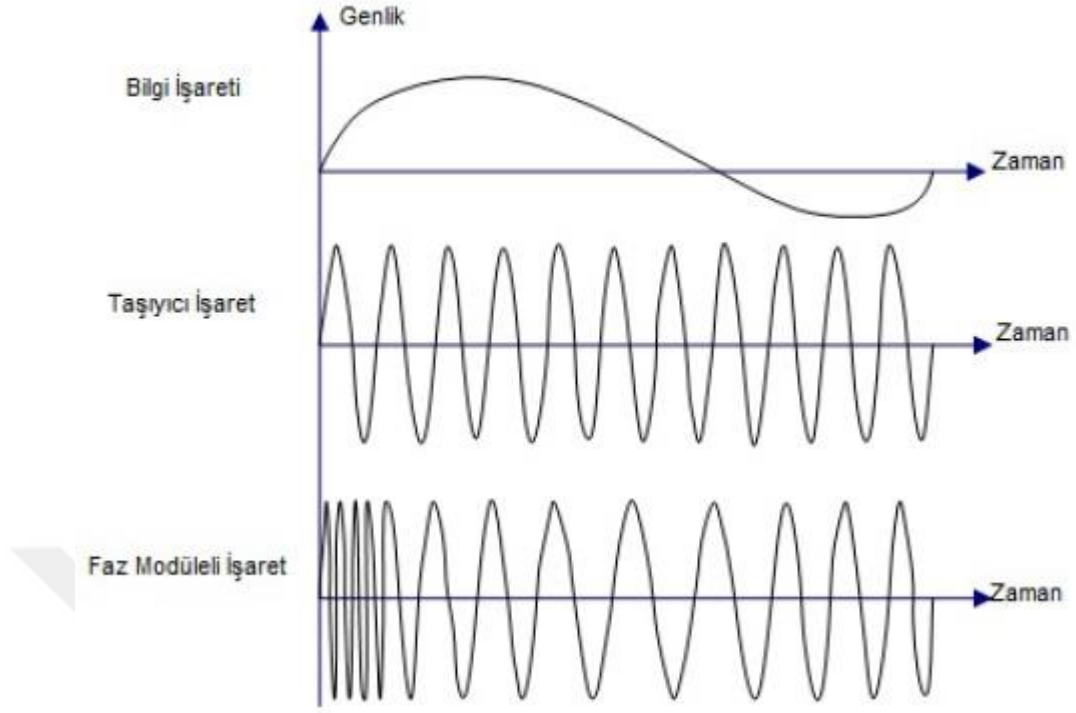
Frekans Modülasyonunda modüle edici her sinyal için bir çift yan bant oluşur. Bu da teorik olarak frekans modülasyonunda sonsuz sayıda yan bant oluşması anlamına gelir. Fakat frekans değişimi arttıkça yan bant sinyallerinin gücü azalır. Çoğunun genliği ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve çeşitli kriterler kullanılırken göz ardı edilir. Şekil 4.6’da bir FM sinyalinin frekans spektrumu gösterilmiştir [95].



Şekil 4.6. FM Sinyali Frekans Spektrumu

4.1.3. Faz Modülasyonu (PM)

Faz Modülasyonu (PM – Phase Modulation), bilgi işaretine bağlı olarak taşıyıcı işaretinin fazının değiştirilmesidir. Faz modülasyonlu işaret elde edilirken bilgi işaretinin türevi alınır. Frekans modülasyonunda frekans sapması meydana gelirken, faz modülasyonunda faz sapması meydana gelmektedir [99]. Yüksek frekanslı taşıyıcı işaretin bilgi işareti ile modülasyonu sonucu oluşan faz modülasyonlu işaret Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Faz Modülasyonu [96]

4.2. Sayısal Modülasyon

Sayısal veri iletimi, analog veri iletimine göre hata koruma, sıkıştırma vb. gibi konularda birçok üstünlük göstermektedir. Ancak birçok fiziksel ortam sayısal verinin doğrudan iletimine uygun değildir. Kablosuz kanallar veya bakır kablo gibi bu tür ortamlarda sayısal verinin iletilmesi için sayısal modülatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bir sayısal modülatör ayrık zamanlı sayısal veriyi analog bir dalga şekline dönüştürür [100].

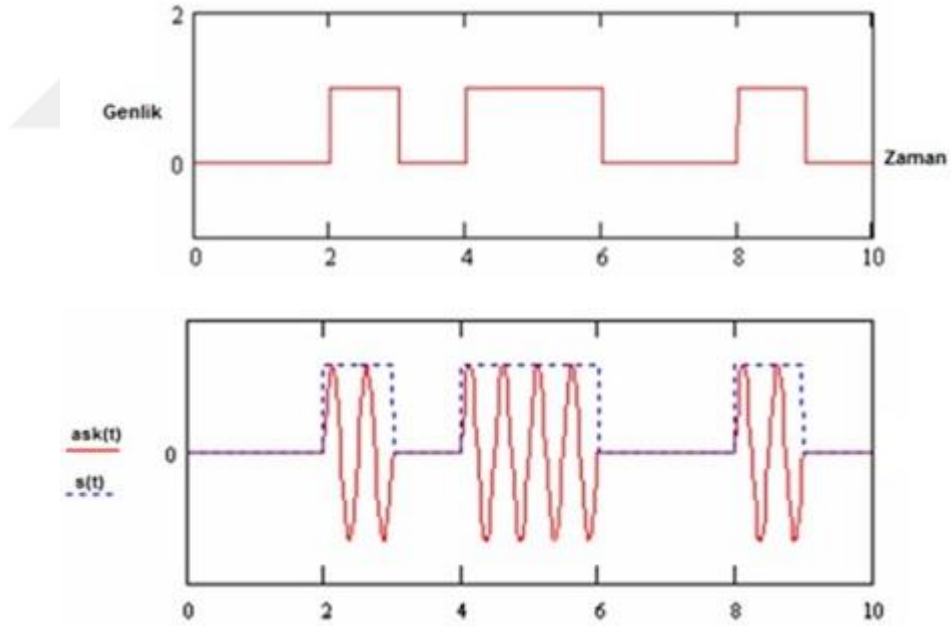
Sayısal modülasyon sistemlerini analog modülasyon sistemlerinden ayıran özellik bilgi sinyalinin sayısal darbeler olmasıdır. Sayısal sistemlerde analog sistemlerdeki gibi analog taşıyıcılar kullanılmaktadır [95].

Sayısal modülasyon teknikleri temel olarak ya algılanma özelliklerine ya da bant genişliği sıkıştırma özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır [101]. Temel sayısal modülasyon teknikleri aşağıdaki gibidir.

1. Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK - Amplitude Shift Keying)
2. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK - Frequency Shift Keying)
3. Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK -Phase Shift Keying)
4. Dikgen Genlik Modülasyonu (QAM - Quadrature Amplitude Modulation) [102]

4.2.1. Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK)

Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK) tekniği, taşıyıcının sabit frekans değerine karşılık genliğinin değiştiği bir modülasyon tekniğidir. Açma-Kapama Anahtarlama Tekniği (OOK:ON-OFF Keying) ASK modülasyonuna bir örnektir [98].

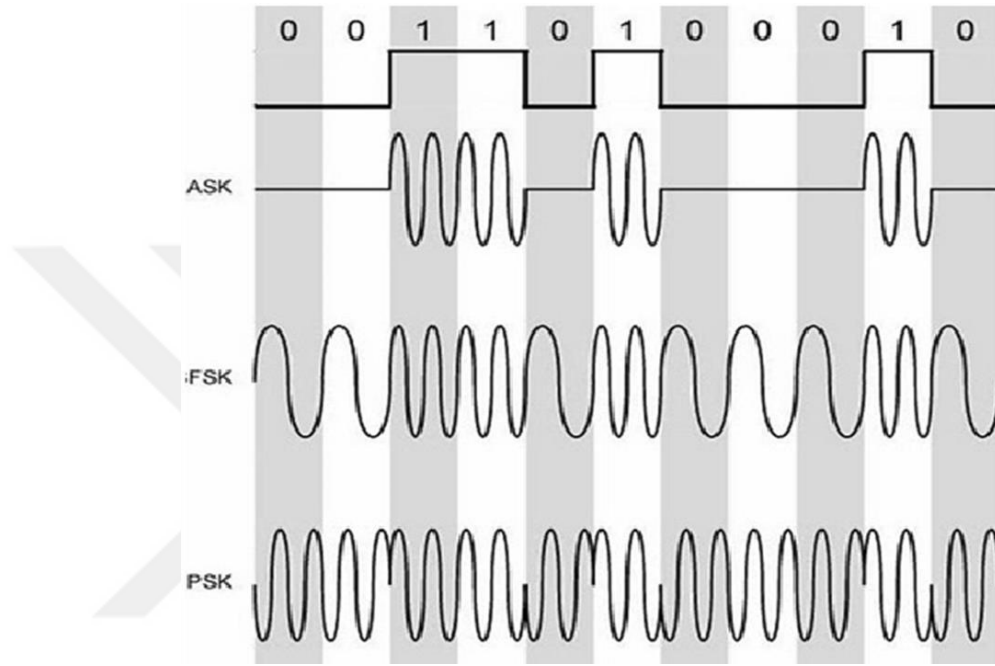


Şekil 4.8. İkili ASK (OOK) [96]

Şekil 4.8’de OOK ile iletilecek bilgi işaretine göre taşıyıcı sinyalin nasıl değişeceği gösterilmiştir.

4.2.2. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK)

Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK), nispeten basit, düşük performanslı bir sayısal modülasyon biçimidir. FSK, klasik frekans modülasyonuna benzer sabit - zarflı bir açı modülasyonudur. FSK’da modüle edici bilgi sinyalinin sayısal olması sebebiyle modüleli sinyal iki farklı frekans değerine sahip olmaktadır [95]. Şekil 4.9’da örnek FSK sinyali gösterilmiştir.



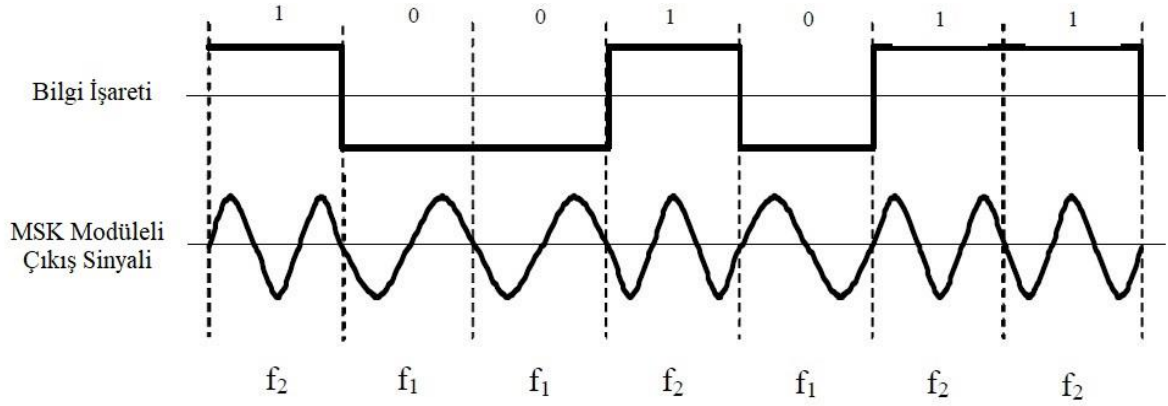
Şekil 4.9. ASK-PSK-FSK Modüleli Sinyal

FSK ve türevleri kablosuz haberleşme sistemlerinde, mobil haberleşme sistemleri ve özellikle KAA’larda sıklıkla kullanılmaktadır. FSK’nın türevleri olan bu modülasyon türleri alt başlıkta açıklanmıştır.

4.2.2.1. Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (MSK)

MSK (Minimum Kaydırmalı Anahtarlama - Minimum Shift Keying) modülasyonu, modülasyon indeksi 0.5 olan FSK modülasyonunun özel bir halidir. Bu modülasyon indeksi, iki FSK sinyalinin tutarlı şekilde ortogonal olmasına izin veren minimum frekans aralığına karşılık gelir. Kare dalga şeklindeki bilgi sinyali sinüzoidal darbe biçimlendirme işlemine tabi tutularak genliklerdeki keskin geçişler önlenmektedir. İşaret seviyelerinde ve zarfında ani değişimler yoktur. Sembol geçişlerinde fazdaki süreksizliği kaldırarak performansın artmasını sağlar. ‘0’ biti f_1 frekansıyla ve ‘1’ biti f_2 frekansıyla taşınan sıradan bir FSK modülasyonu gibidir. f_1 ve f_2 frekansları arasındaki fark bit

hızının yarısı kadardır bu da taşıyıcı frekanslar arasındaki en büyük frekans sapması bit hızının dörtte biri olacağı anlamına gelir [103, 104].



Şekil 4.10. MSK modülasyonu örneği [58]

Şekil 4.10'da tek kanal üzerinden iletilecek bilgi sinyaline karşılık oluşan MSK sinyali gösterilmiştir.

MSK, sürekli FSK taşıyıcılarından birbirine dik ve aralarındaki frekans sapması en az olan iki taşıyıcı kullanılarak yapıldığı için minimum kaydırmalı anahtarlama ismini alır [104]. MSK sinüzoidal olarak dalga şekillendirilme yapılmış bir OQPSK yapısına sahiptir. QPSK da 180° , OQPSK'da 90° olan maksimum faz kaymaları ve faz süreksizlikleri MSK da yoktur yani faz her zaman süreklidir. MSK sürekli-fazlı FSK ya da sinüzoidal darbe biçimlendirme kullanan özel bir OQPSK olarak görülebilir [105].

4.2.2.2. Gauss FSK/ Gauss MSK (GFSK/GMSK)

GFSK/GMSK modülasyonları MSK gibi sayısal modülasyon türü olan FSK modülasyonundan türetilmiştir. Kare dalga bilgi işareti darbeleri yerine Gauss filtresiyle filtrelenip şekillendirilmiş darbeler kullanılarak yapılan FSK modülasyonuna GFSK modülasyonu, özel olarak modülasyon indeksinin 0,5 olduğu durumda oluşan modülasyona GMSK modülasyonu denmektedir [103].

GMSK genel olarak MSK'ya benzer. Aradaki fark kullanılan darbe şekillendiricinin yarım dalga sinüs yerine Gauss olmasıdır. GMSK'da kullanılan NRZ (Non Return to Zero) darbelerinin Gauss alçak geçiren filtresi ile filtrelenmesi sonucu spektrumdaki yayılmalar oldukça kısılarak bant genişliği azaltılmış bir modülasyon elde edilir. MSK da sinüzoidal darbe biçimlendirme

kullanılarak fazda süreklilik sağlanmasına karşın frekansta süreksizlikler devam etmektedir aynı zamanda spektrumda ana lob da daralır ve bant genişliği düşer. GMSK'da yapılan filtreleme işlemi demodülasyon için çok karmaşık yapılar gerektirmez. Eş evreli bir MSK demodülatör ya da eş evreli olmayan bir FSK demodülatörle kolayca demodüle edilebilir. Pratikte GMSK'nin tercih edilmesindeki en büyük etkenlerden biri güç verimliliğidir. Tabi ki bunu sağlayan en büyük etken sabit zarflı olması ve spektral verimliliğidir [104].

4.2.3. Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)

Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK), açı modülasyonlu, sabit - zarflı sayısal modülasyonun bir başka biçimidir. PSK, klasik faz modülasyonuna benzemektedir, aradaki fark PSK'da giriş sinyali ikili sayısal bir sinyaldir ve sınırlı sayıda çıkış fazı mümkün olmasıdır [95]. Şekil 4.9'da örnek PSK sinyali gösterilmiştir.

PSK modülasyonu çok seviyeli türevleri bulunmaktadır. M- seviye PSK modülasyonu için bilgi M tane farklı fazda iletilmektedir. KAA'larda M-PSK türlerinden BPSK (Binary PSK), DPSK (Diferansiyel PSK) QPSK (Quadrature PSK), OQPSK (Offset QPSK) modülasyonlarının kullanıldığı görülmektedir. Burada modülasyon seviyesi artarken gürültüye dayanıklılığı azalır, bant genişliği verimliliği ve enerji ihtiyacı artar.

4.2.4. Dikgen Genlik Modülasyonu (QAM)

Dikgen Genlik Modülasyonu (QAM), iletilecek olan sayısal bilgi sinyaline göre taşıyıcı sinyalinin genlik ve fazının değiştirildiği bir sayısal modülasyon biçimidir. ASK tekniği ve PSK tekniğinin birleştirilmesi ile Dikgen Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) meydana gelmektedir [106].

QAM'in 16QAM, 64QAM, 256QAM gibi çok seviyeli modülasyon türleri bulunmaktadır. Modülasyon seviyesi arttıkça gürültü dayanıklılığı azalmakta ve sistem karmaşıklığı, enerji ihtiyacı ve bant genişliği verimliliği artmaktadır. Günümüzde 256 seviyeye kadar bu modülasyon tekniğini kullanabilen kablosuz haberleşme sistemleri mevcuttur [107].

4.3. Çok Seviyeli Faz Kaydırmalı Anahtarlama (M-PSK)

Çok seviyeli modülasyon teknikleri, sınırlı olan bir taşıyıcı sinyal frekansında daha fazla bilginin iletilmesi temeline dayanmaktadır. Spektral verimliliği, Polarizasyon-Bölmeli Çoğullama (Polarization - Division Multiplexing, P-DM) kullanmadan 1bit/s/Hz üstüne çıkarabilmek için çok düzeyli sinyalizasyon tekniklerinin kullanılması şarttır [108]. Bunu gerçekleştirebilmek için taşıyıcı sinyalin fazı “M” adet eşit parçalara bölünerek her bir faz bölümünde farklı bilginin iletilmesi sağlanmaktadır.

M-li PSK sinyalinde, taşıyıcı sinyalin fazı “M” tane farklı dalga biçimi için “M” adet eşit parçalara ayrılmaktadır [108]. M’li kodlama sisteminde sinyal $2^N=M$ adet eşit parçaya ayrılmaktadır. Buradaki “N” sayısı sembol içerisinde iletebilecek bit sayısını vermektedir. Yani M-li kodlama sistemlerindeki bit/sembol=N dir denilebilir.

2π ’lik faz açısının “M” nicemleme seviyeleri PSK modülasyon çeşitleri için kullanılabilir [96]. Bu çalışmada özellikle bahsedilecek olan BSPK, QPSK, 8PSK, için M sayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Modülasyon Çeşitlerine Göre Nicemleme

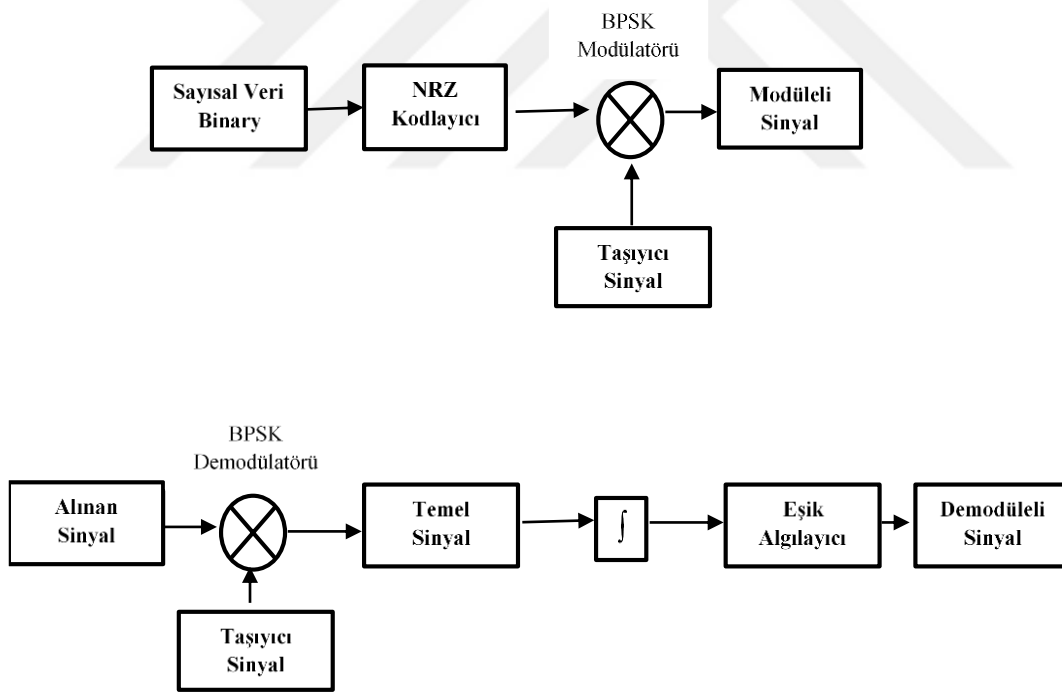
Modülasyon Tipi	Seviye	N
BPSK	M=2	1
QPSK	M=4	2
8PSK	M=8	3

M-PSK’da “M” sayısı arttıkça iletim için gerekli bant genişliği azalmaktadır. Bununla beraber iki komşu sembol arasındaki faz farkı azalmakta, dolayısıyla sistemin gürültüden etkilenmesi artmaktadır. Sonuç olarak sabit güç kullanımında hata olasılığı artmaktadır. Bu nedenle M-PSK için kullanılacak “M” sayısında pratik bir sınırlama bulunmaktadır [105].

4.3.1. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK), $M=2$ olan bir M -li kodlama tekniğidir. Tek bitlik veri girişine karşın çıkışta birbirinden 180° farklı iki sinyal değeri oluşmaktadır. $N=1$ olduğundan bit/sembol oranı = 1 olur.

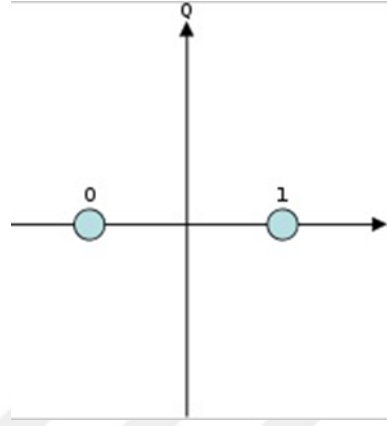
BPSK, gürültü bağışıklığı açısından en dayanıklı modülasyon yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Kanal etkileri veya alıcı ve verici tarafındaki osilatör farklılıkları nedeniyle faz ve frekans farklılıkları ortaya çıkabilmektedir. BPSK modülasyonu faz kaymasına dayandığından alıcının taşıyıcı frekansını bilmesi ve demodülasyonun tutarlı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Düzgün demodülasyon için Faz kilitlemeli döngü (PLL-Phase Locked Loops) tekniği kullanılmaktadır. PLL ile referans taşıyıcı ayarlandıktan sonra, alınan sinyal temel banda indirgenir. Veriler bütünleşik bit bölümü eşik tespiti ile dekode edilebilir [109]. Şekil 4.11’de BPSK modülasyon ve demodülasyonu blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.11. BPSK Modülasyon ve Demodülasyon Blok Diyagramı [109]

Giriş verisinin mantık durumuna bağılı olarak taşıyıcı sinyal, çıkışa ya referans osilatörüyle aynı fazda ya da 180° faz farkıyla aktarılır. Yani “1” mantık verisi referans osilatörüyle aynı fazda olan bir sinyal ile iletiliyorsa “0” mantık verisi 180° faz farkı olan bir sinyal ile iletilir. Giriş mantık

durumu her değiştiğinde çıkış fazy da değişmektedir. Dolayısıyla BPSK'da çıkış değişim hızı (baud) giriş değişim hızına (bps) eşitir. Demodölasyon için alıcı devrede, verinin modüle edildiği taşıyıcı sinyali ile eş evreli bir taşıyıcı sinyalin elde edilmesi gerekmektedir [95]. Şekil 4.12'de BPSK kümeleşme diyagramı ve Şekil 4.13'te BPSK modüleli sinyal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.12. BPSK Kümeleşme Diyagramı

Sayısal modölasyon tekniklerinde faz modölasyonu türünün en basit örneği BPSK'dır denebilir. Çünkü taşıyıcı sinyal fazı sadece iki değişik faz durumunu temsil etmektedir. Genellikle yüksek hız veri transferi uygulamalarında kullanılmaktadır. ASK modölasyon tekniğinden daha dayanıklı, uygulanması kolay ve 3dB güç avantajı sağlamaktadır. Fakat bant genişliğini daha verimsiz kullanmaktadır ve genellikle lineer olmayan modölasyon Őeması olarak adlandırılır. Diğer tüm sistemlerden daha düşük hata oranı sağlamaktadır. Bu modölasyon tekniğinin bir dizi türevi bulunmaktadır [101].

4.3.2. Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DPSK)

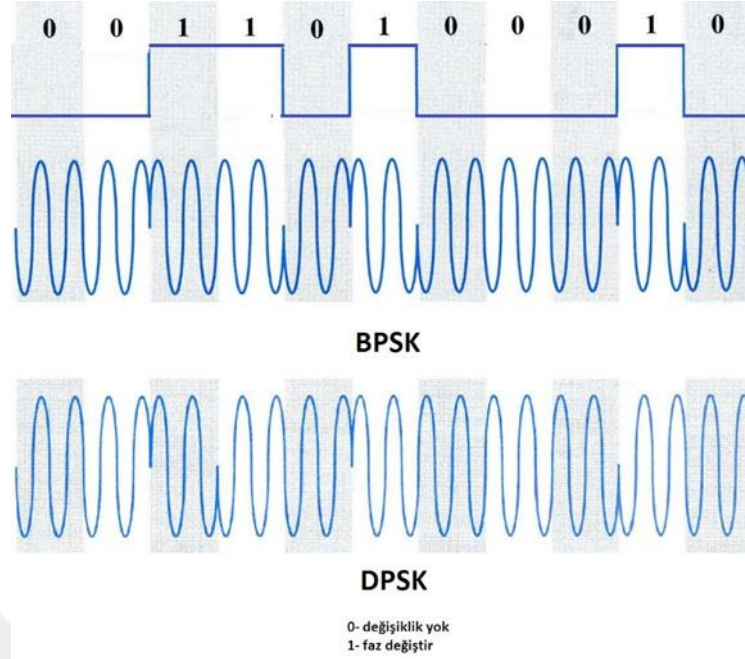
Eşzamanlı haberleşmede, taşıyıcı sinyalin mutlak faz (zamanlama) bilgisinin alıcı tarafta da bilinmesi çok önemlidir. PSK modölasyonunda mutlaka taşıyıcı frekansına kilitlenmiş sinüzoidal işarete gereksinim duyulması ve eş evreli olmayan demodölasyon kullanılmaması, alıcı maliyetini arttırmakta ve daha hassas bir alıcı gerektirmektedir. Bununla birlikte, mutlak faz bilinmese dahi faz değişimlerini belirlemek mümkün olabilmektedir. Esasen BPSK modölasyonunda, vericiden sürekli olarak taşıyıcı frekansında bir işaret gönderilmekte ve alıcı tarafından alınmaktadır. Bu taşıyıcı frekansındaki işaret geciktirilerek demodölasyonda kullanılabilir. Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DPSK), temelinde bu tekniği esas alan bir modölasyon türüdür [105].

Demodülasyon işleminde, faz modülasyonunun mükemmel şekilde algılanması için alıcının bir eş evreli referans sinyaline ihtiyaç duyduğu açıktır. Eğer vericide diferansiyel kodlama ve faz kaydırmalı anahtarlama birlikte kullanılırsa bu teknik Diferansiyel PSK adını alır.

'1' sembolünün iletimi için faz değişmezken '0' sembolü için faz 180° ilerletilir. Tüm süreç, iki bitlik aralıklar boyunca faz değişikliği çok yavaş olduğundan sabit kabul edilmesine dayanmaktadır [101].

DPSK sistemde ikili işareti belirtmek için faz değişimleri kullanılmaktadır. Eğer sıfır bilgisi gönderilecekse, vericide işaretin fazı bulunduğu değerden diğer bir değere değiştirilir (180° ilerletilir). O halde, vericiden '0' gönderileceği zaman faz θ_0 ise, faz θ_1 'e değişmektedir. Diğer taraftan orijinal faz θ_1 ise, '0' işaretinin gönderilmesi vericinin fazını θ_0 'a değiştirir. '1' gönderilirken taşıyıcının fazı değiştirilmez. Bunun tersi de mümkündür. Yani '1' faz değiştirip '0' ın değiştirmemesi de olabilir, iki durum da aynıdır [105]. Şekil 4.13'te giriş bilgisine karşılık DPSK modüleli sinyal çıkışı gösterilmiştir.

Alıcıda DPSK işaretin herhangi bir aralıkta fazının gözlenmesi, iki mümkün işareten hangisinin gönderildiğini belirlemeye yeterli değildir. Bir aralıktaki fazın bir önceki aralıktaki fazla karşılaştırılması gerekmektedir. Bu yöntem, basit bir seziciyle DPSK işaretin demodülasyonunu gerçekleştirmektedir. Bu sistemde önceki işaret fazı referans oluşturmaktadır. DPSK bir bitin belirlenmesi birbirini takip eden iki bit aralığına bağlı olduğundan, hatalar bit çiftleri biçiminde oluşmaktadır [105].



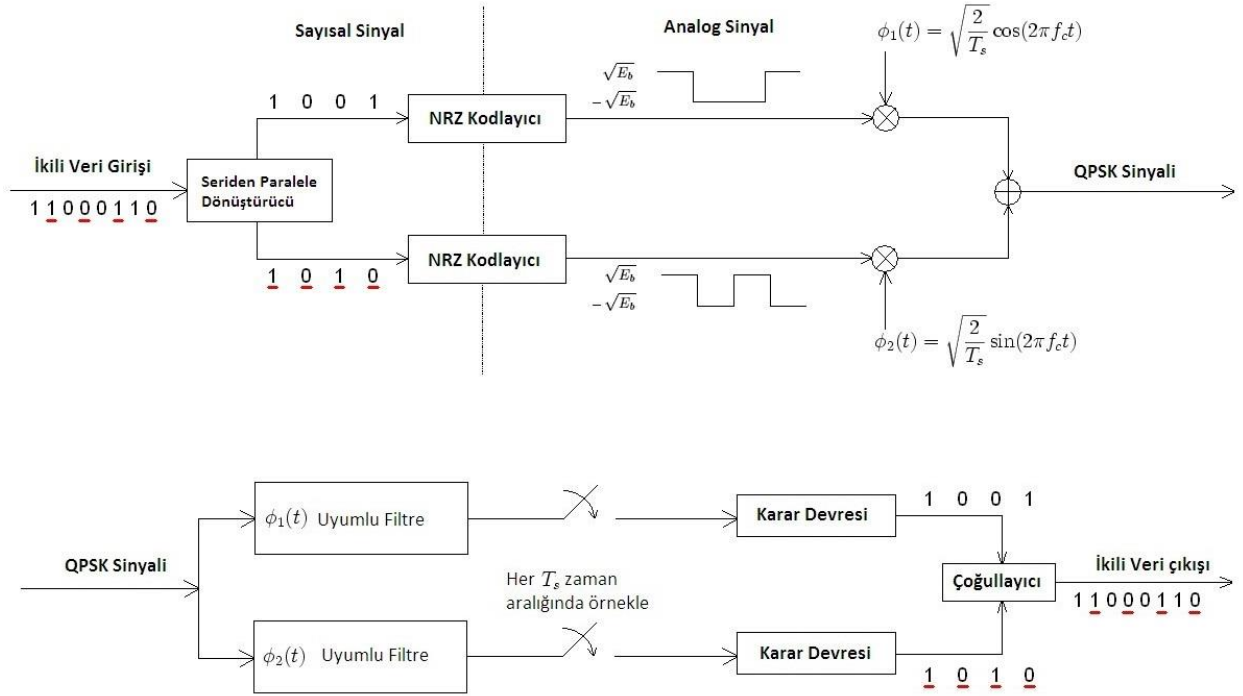
Şekil 4.13. BPSK ve DPSK Modülasyonlu Sinyal

4.3.3. Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK)

Dikgen (Quadrature) Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) ya da diğer bir adıyla Dörtlü (4 Ary) PSK, başka bir açı modülasyonlu, sabit-zarflı sayısal modülasyon biçimidir. QPSK, M 'nin 4 olduğu M -li bir kodlama tekniğidir. QPSK da tek bir taşıyıcı frekans için dört çıkış fazı mümkündür. Dört farklı çıkış fazı olduğu için, dört farklı giriş durumu olmalıdır. QPSK modülatörünün sayısal girişi ikili (2 tabanında) bir sinyal olduğu için dört farklı giriş durumu üretilmesi için tek bir giriş bitinden fazlası gerekmektedir. 2 bit giriş için olası dört durum vardır (00, 01, 10, 11). Bu nedenle QPSK'da ikili giriş verileri, dibit adı verilen 2 bitlik gruplar halinde birleştirilir. Her dibit kodu, dört olası çıkış fazından birini üretir. Dolayısıyla modülatöre giren her 2 bitlik dibit için, tek bir çıkış değişikliği meydana gelir. Bu nedenle, çıkıştaki değişim hızı (baud hızı) giriş bit iletim hızının yarısıdır [95].

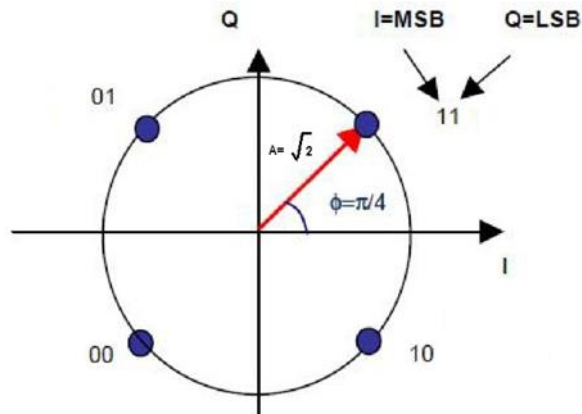
PSK sayısal modülasyon tekniğinin başka bir türevi, taşıyıcı sinyal fazının dört eşit aralıklı faz açısına bölünmesiyle elde edilen Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) tekniğidir. Bu açılar $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ ve $7\pi/4$ şeklindedir. QPSK bilgi kapasitesini ikiye katlamasıyla BPSK'ya göre büyük avantaj sağlamaktadır. Örneğin QPSK kümeleşme (constellation) diyagramında 4 mesaj noktasına sahiptir. Böylece BPSK ya nazaran bant genişliği verimliliği sağlamaktadır. Fakat

alıcı tasarımı hususunda, tam faz alma çok önemli bir faktör olmaktadır. Fazın doğru alınmaması durumunda hata oranı artacaktır. Bu faktör alıcı tasarım karmaşıklığını arttırmaktadır [101].



Şekil 4.14. QPSK Verici Alıcı Yapısı

Şekil 4.14'te QPSK modülatör ve demodülatörünün blok diyagramı gösterilmiştir. QPSK modülatöründe, bilgi sinyali tek ve çift olarak ayrıldıktan sonra tek bitler I (In Phase) kanalına çift bitler Q (Quadrature) kanalına iletilir. I kanalı gelen sinyali referans osilatörüyle aynı fazda modüle ederken Q kanalı gelen sinyali referans osilatöründen 90° farklı fazda modüle eder [95].



Şekil 4.15. QPSK Gray Kodlu Kümeleşme Diyagramı [110]

Şekil 4.15'te QPSK kümeleşme diyagramı verilmiştir. İletilecek dibitin MSB biti (en önemli bit) I kanalıyla, LSB (en önemsiz biti) Q kanalıyla iletilmektedir [110].

Çizelge 4.2. QPSK Giriş Çıkış Sinyal Değerleri

QPSK (IQ)	I = 1 (cos(ωt))	Q = 1 (sin(ωt))	I = 0 (-cos(ωt))	Q = 1 (-sin(ωt))	QPSK
11	X	X			cos(ωt) + sin(ωt)
01		X	X		-cos(ωt) + sin(ωt)
00			X	X	-cos(ωt) - sin(ωt)
10	X			X	cos(ωt) - sin(ωt)

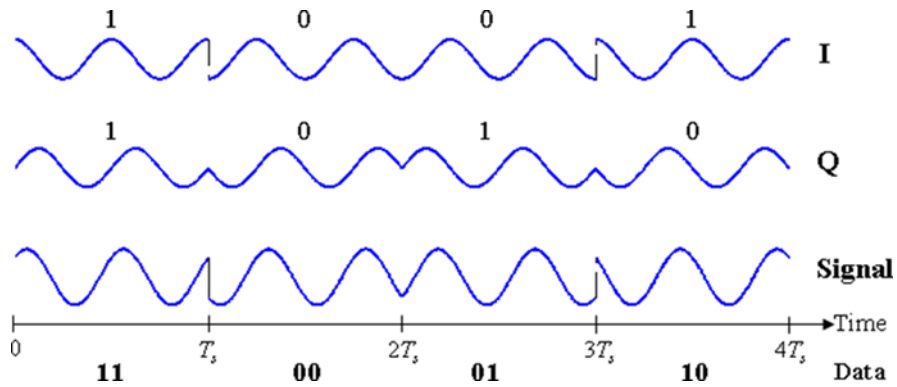
Çizelge 4.2’de I ve Q kanallarının durumlarına göre QPSK sinyalinin çıkış durumları verilmiştir ve aşağıda matematiksel ifadeleri hesaplanmıştır. QPSK Sinyali: I + Q şeklinde düşünüldüğünde her dibit için sinyal hesaplaması aşağıdaki gibi olur:

$$(11) = \cos(\omega t) + \sin(\omega t) = \sqrt{2}\sin(\omega t + \pi/4)$$

$$(01) = -\cos(\omega t) + \sin(\omega t) = \sqrt{2}\sin(\omega t + 3\pi/4)$$

$$(00) = -\cos(\omega t) - \sin(\omega t) = \sqrt{2}\sin(\omega t + 5\pi/4)$$

$$(10) = \cos(\omega t) - \sin(\omega t) = \sqrt{2}\sin(\omega t + 7\pi/4)$$



Şekil 4.16. QPSK Modülasyonlu sinyal durumu

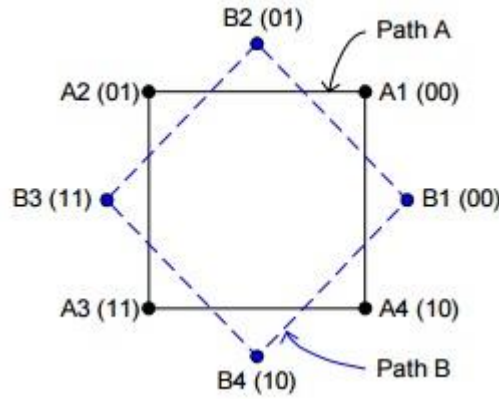
Şekil 4.16’da QPSK modüleli çıkış sinyali görülmektedir. Buna göre her bir kanaldan iletilen bitler şu şekilde olur.

I kanalında iletilen bitler (tek bitler) : **1 1 0 0 1 1 0**

Q kanalında iletilen bitler (çift bitler) : **1 1 0 0 1 1 0**

$\pi/4$ -QPSK; Kümeleşme diyagramındaki 4 nokta daire üzerinde aynı anda çevrilerek farklı fazlarda sinyal setleri türetilebilir. Kümeleşme diyagramının çevrilmesi ile elde edilen ve yaygın olarak kullanılan diğer bir QPSK diyagramı ise $\pi/4$ -QPSK modülasyonudur [111].

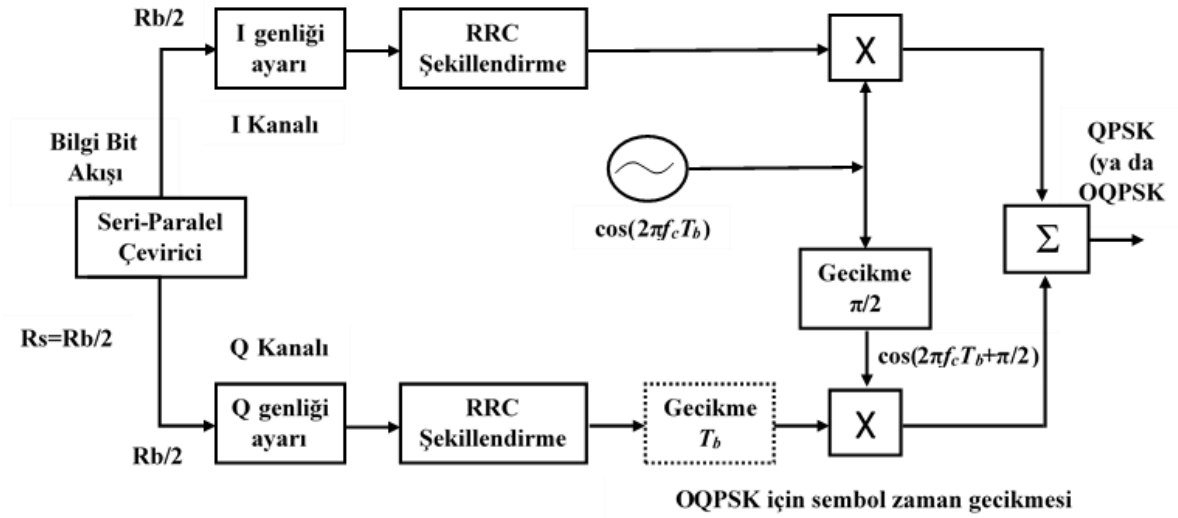
$\pi/4$ QPSK sinyali QPSK sinyalinin kümeleşme diyagramı üzerinde saat yönünün tersine çevrilmesiyle elde edilir. Sinyalin faz geçişleri QPSK sinyalinde olduğu gibi 180° değildir. $\pi/4$ QPSK sinyalinde faz geçişleri 135° 'dir [111]. $\pi/4$ -QPSK kümeleşme diyagramı Şekil 4.17'de verilmiştir. İletilecek verinin ilk dibit A düzleminde ikinci dibiti B düzleminde sonraki dibiti tekrar A düzleminde şeklinde, değişen her dibit için düzlemin de değişmesi suretiyle veri iletilir. Bir taşıyıcı sinyal frekansında QPSK gibi 2 bit iletebilmektedir. QPSK ile farklı olarak 8PSK ya benzer bir kümeleşme diyagramı mevcuttur. QPSK da olası 4 çıkış durumu mevcutken $\pi/4$ QPSK'da olası 8 çıkış durumu mevcuttur.



Şekil 4.17. $\pi/4$ QPSK Kümeleşme Diyagramı [96]

4.3.4. Ötelemeli Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama (OQPSK)

Ötelemeli Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Offset QPSK), I ve Q kanallarındaki bit dalga biçimlerinin bir bit süresinin yarısı kadar kaydırıldığı, üzerinde değişiklik yapılmış bir QPSK biçimidir.

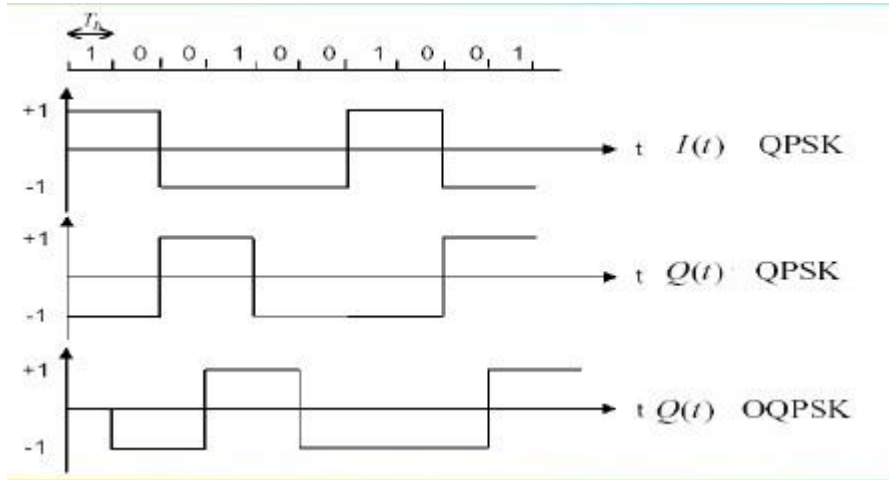


Şekil 4.18. OQPSK Blok Diyagramı [96]

Şekil 4.18’de bir OQPSK modülörünün blok diyagramı görülmektedir. QPSK’ dan farklı olarak “Q” kanalındaki bitler geciktirilmektedir. “I” kanalındaki değişiklikler “Q” kanalı bitlerinin orta noktalarında, aynı şekilde “Q” kanalındaki değişiklikler de “I” kanalı bitlerinin orta noktalarında meydana geldiği için, dibit kodunda hiçbir zaman tek bir bit değişikliğinden fazlası olmamaktadır. Bu nedenle, çıkış fazında hiçbir zaman 90° ’den fazla kayma oluşmaz. Klasik QPSK’da, giriş dibitinde “00”dan “11”e ya da “01”den “10”a olan bir değişiklikte çıkış fazında buna karşılık gelen 180° ’lik bir kaymaya neden olmaktadır. Dolayısıyla OQPSK’nın bir avantajı, modülasyon sırasında QPSK’ya oranla daha sınırlı bir faz kayması gerektirmesidir. OQPSK’nın bir dezavantajı, çıkış fazındaki değişikliklerin, I ya da Q kanalındaki veri hızının iki katı bir hızda meydana gelmesidir. Sonuç olarak, belli bir bit iletim hızı için OQPSK’nın baudu ve minimum bant genişliği, klasik QPSK’ nın iki katı olmaktadır. OQPSK’ya bazen Offset Anahtarlamalı QPSK (Offset Keyed QPSK) da denmektedir [95].

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi OQPSK modülasyonunun QPSK modülasyonundan farkı Q kanalından gelen şekillendirilmiş işaret " T_b " (sembol zamanının yarısı) gibi bir gecikme süresi sonunda taşıyıcı ile modüle edilmesidir. Böylece I ve Q kanallarından gelen işaretler aynı anda iletilmezler. Bunun sonucu olarak faz kayması sınırlandırılır. Böylece OQPSK, QPSK modülasyonundan daha çok sabit zarflı özellikte olur. Doğrusal kanallarda OQPSK ve QPSK BER değeri aynı iken, doğrusal olmayan kanallarda OQPSK’nın BER (Bit Error Rate – Bit Hata Oranı) değeri daha düşüktür. Uydu gibi doğrusal olmayan özellikleri bulunan yüksek güçlü yükselteçlerin kullanıldığı

sistemlerde, bu özellikler sebebiyle OQPSK modülasyonu daha çok tercih edilir [96]. Ayrıca KAA'larda kullanıldığı da görülmektedir.

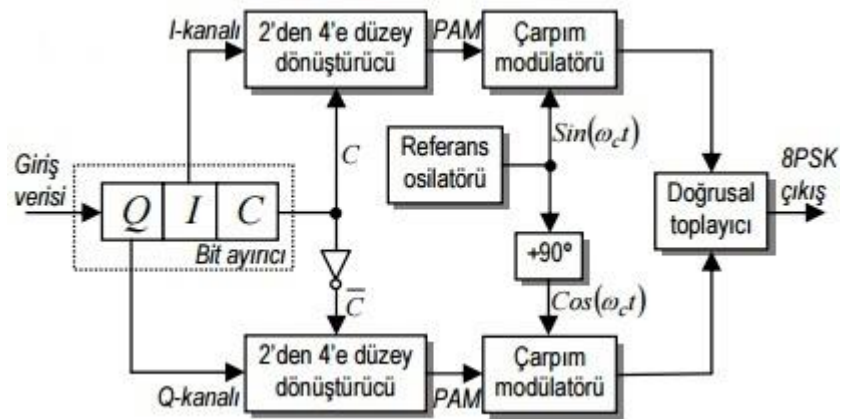


Şekil 4.19. OQPSK Q Kanalı Durumu [112]

OQPSK kümeleşme diyagramı QPSK kümeleşme diyagramı ile aynıdır [96].

4.3.5. 8-li Faz Kaydırmalı Anahtarlama (8PSK)

Sekizli Faz Kaydırmalı Anahtarlama (8PSK), $M=8$ olan M -li bir kodlama tekniğidir. 8PSK modülöründe, 8 olası çıkış fazı bulunmaktadır. 8 farklı fazı kodlamak için, gelen bitler 3 bitlik gruplar halinde değerlendirilir; bu 3 bitlik gruplara Tribit (üçlü bit) ($2^3=8$) denmektedir [95].



Şekil 4.20. 8PSK Blok Diyagramı [95]

8PSK'nın blok diyagramı Şekil 4.20'de verilmiştir. Gelen seri bit akışı bit ayırıcıya girerek paralel üç kanallı bir çıkışa dönüştürülmektedir. Burada I ve Q kanallarından başka üçüncü bir C (Control)

kanalı mevcuttur. Dolayısıyla üç kanalın her birindeki bit iletim hızı giriş bit hızının üçte biri kadar olmaktadır. I ve C kanallarındaki bitler, I kanalının “2’ den 4’ e düzey düşürücü” süne; Q ve \bar{C} kanallarındaki bitler ise Q kanalının “2’ den 4’ e düzey dönüştürücü” süne girer. Temel olarak “2’ den 4’ e düzey dönüştürücüler”, paralel girişli sayısal-analog dönüştürücülerdir (Digital Analog Converter - DAC). 2 giriş biti ile 4 çıkış gerilimi mümkün olmaktadır. DAC’ların algoritmaları, I ya da Q biti, analog çıkış sinyalinin polaritesini belirlerken (1 mantık düzeyi= +V ve 0 mantık düzeyi= -V); C ya da \bar{C} biti ise büyüklüğü belirlemektedir. (1 mantık düzeyi= 1.307 V ve 0 mantık düzeyi= 0.541 V). Dolayısıyla iki büyüklük ve iki polariteyle dört farklı çıkış durumu mümkün olmaktadır [95].

8PSK modülasyonunda 8 sembol iletilir. Her bir sembol 3 bitten oluşur. İletilen işaretlerde küçük faz geçişleri bulunur. QPSK’ya göre BER oranı yüksektir. Buna rağmen 8PSK’nın kullanılmasının sebebi sembol başına daha fazla bit iletiminin olmasıdır. 8PSK’nın bant genişliği verimliliği QPSK’dan %50 daha fazladır [98].

Çizelge 4.3’te “2’ den 4’e düzey dönüştürücülerin” doğruluk tablosu ve buna karşılık gelen çıkış durumları, Çizelge 4.4’te ise giriş bitlerine göre çıkış sinyalinin matematiksel ifadesi ve çıkış fazları gösterilmiştir.

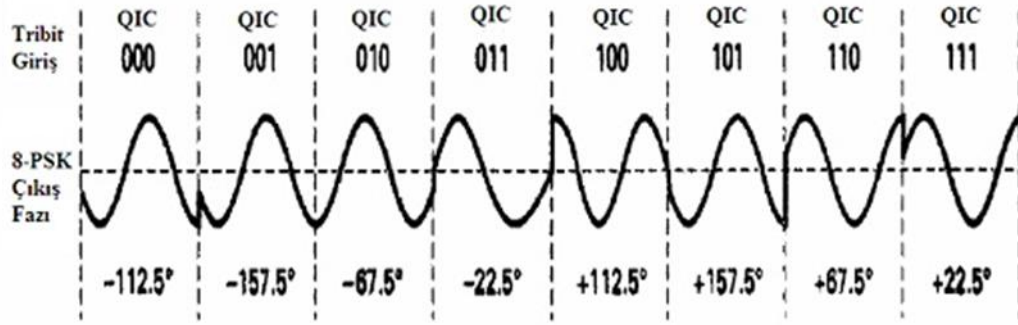
Çizelge 4.3. I ve Q Kanalı Doğruluk Tablosu [95]

I	C	Çıkış
0	0	-0.541 V
0	1	-1.307 V
1	0	+0.541 V
1	1	+1.307 V

Q	\bar{C}	Çıkış
0	1	-1.307 V
0	0	-0.541 V
1	1	+1.307 V
1	0	+0.541 V

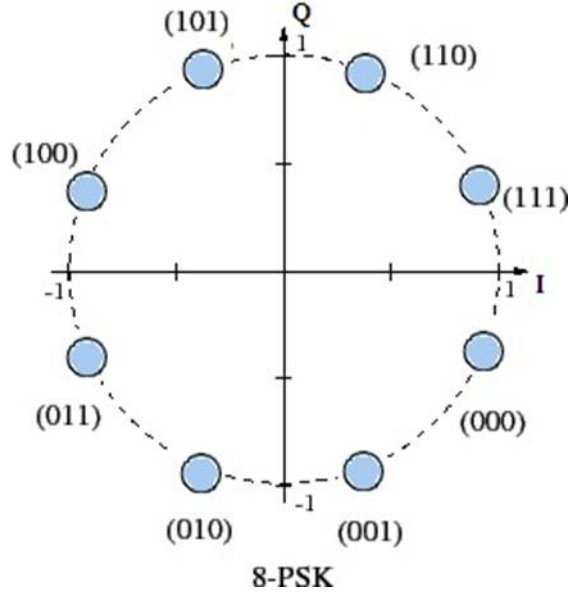
Çizelge 4.4. 8PSK Çıkış ve Faz Durumları [95]

I	Q	C	8PSK Çıkış Fazı	8PSK Çıkışı
0	0	0	-112.5°	$-1.307 \cos(\omega t) - 0.541 \sin(\omega t)$
0	0	1	-157.5°	$-0.541 \cos(\omega t) - 1.307 \sin(\omega t)$
0	1	0	-67.5°	$+1.307 \cos(\omega t) - 0.541 \sin(\omega t)$
0	1	1	-22.5°	$+0.541 \cos(\omega t) - 1.307 \sin(\omega t)$
1	0	0	$+112.5^\circ$	$-1.307 \cos(\omega t) + 0.541 \sin(\omega t)$
1	0	1	$+157.5^\circ$	$-0.541 \cos(\omega t) + 1.307 \sin(\omega t)$
1	1	0	$+67.5^\circ$	$+1.307 \cos(\omega t) + 0.541 \sin(\omega t)$
1	1	1	$+22.5^\circ$	$+0.541 \cos(\omega t) + 1.307 \sin(\omega t)$



Şekil 4.21. 8PSK Çıkış Sinyali

Çizelge 4.4'te verilen değerler göre 8PSK modüledi çıkış sinyali Şekil 4.21'deki gibi olacaktır. 8PSK'nın kümeleşme diyagramı Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. 8PSK Kümeleşme Diyagramı

Kümeleşme diyagramında da görüleceği gibi iki fazörün arasındaki açısal fark 45° (QPSK'daki açısal farkın yarısı) olmaktadır. Bu nedenle 8PSK sinyal iletimi sırasında $\pm 22,5^\circ$ lik bir faz kayması durumunda bilgiyi koruyabilmektedir. Ayrıca her fazör aynı büyüklüktedir; üçlü bit durumu (gerçek bilgi) yine sinyalin fazında iletilmektedir [95]. 8PSK'nın QPSK'ya göre hata oranını artmakta ve dolayısıyla doğru bir modülasyon için gerekli SNR (Sinyal Gürültü Oranı, Signal Noise Ratio) yükselmektedir. Bunun yanında QPSK bir taşıyıcı frekansında her sembol 2 bitten oluşurken 8PSK'da her sembol 3 bitten oluşmaktadır.

4.4. Çok Seviyeli Dikgen Genlik Modülasyonu (M-QAM)

Spektral verimliliği, Polarizasyon-Bölmeli Çoğullama kullanmadan 1bit/s/Hz üstüne çıkarabilmek için çok düzeyli sinyalizasyon tekniklerinin kullanılmasının gerekli olduğunu 3.3. bölümde bahsedilmişti. M-PSK modülasyonu gibi bir diğer çok seviyeli modülasyon tekniği de Çok Seviyeli Dikgen Genlik Modülasyonudur (Multilevel QAM, M-QAM).

M-PSK modülasyonunda, iletilen sinyalin genliği sabit tutuluyorken, dairesel kümeleşme diyagramı oluşmaktaydı. Faz ile beraber genliğinde değişiklik göstermesine müsaade edilmesiyle M-QAM adı verilen yeni bir modülasyon tekniği elde edilmiştir. İletim için çeşitli taşıyıcı fazlarına ek olarak birden fazla genlik değerinin de kullanılması sayesinde taşıyıcı sayısı arttırılarak fazör uzayının daha etkili bir biçimde kullanılması mümkün olmaktadır. Bu sayede iletim için gerekli

bant genişliği düşürülmekte ve son derece sınırlı bir haberleşme kaynağı olan frekans spektrumunun daha verimli kullanılması sağlanmaktadır [105].

Yüksek spektral verimliliği sayesinde M-QAM kablosuz haberleşme sistemlerinde etkili bir modülasyon tekniği haline gelmiştir. M-QAM son zamanlarda sunulmuş ve çeşitli adaptif ve adaptif olmayan kablosuz sistemler için üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Ancak, kablosuz kanalların doğası gereği büyük genlik ve faz dalgalanmaları sebebiyle M-QAM de bit hata oranı artmaktadır. İşte bu nedenle, demodülatör kanal kazancını normalleştirmek için alınan sinyali ölçmesi gerekmektedir. Bu sayede iletilen sinyalin kümeleşme diyagramıyla bölgesel karşılaştırma yaparak karar verebilecektir. Bu ölçme işlemi Otomatik Kazanç Kontrolü (Automatic Gain Control - AGC) olarak adlandırılmaktadır.

Kanal kazancının hatalı hesaplanması durumunda, AGC'nin alınan sinyali yanlış ölçecek ve gürültünün olmadığı durumlarda bile hatalı demodülasyona yol açabilecektir. Bu nedenle, M-QAM ile güvenilir iletişim için alıcıda hassas sönüm dengeleme teknikleri gerekmektedir [113]. M-QAM, tüm modülasyon türlerinin içinde spektral verimliliği en fazla olan modülasyon türüdür. M-li QAM sinyalinde, M tane farklı dalga biçimi için taşıyıcı sinyalin faz ve genliğinin her ikisi de kullanılmaktadır [108]. M-QAM modülasyon tekniğinde oluşturulan kümeleşme diyagramları eş oranlı ya da düzensiz olabilmektedir. Bu çalışmada M-QAM modülasyonu, eş oranlı (uniform) kümeleşme diyagramları üzerinden açıklanmıştır.

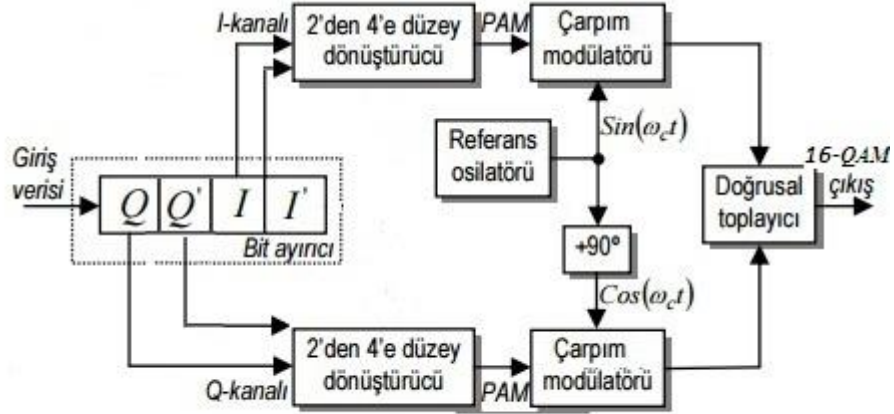
4.4.1. Dikgen Genlik Modülasyon (QAM)

Dikgen Genlik Modülasyonu (QAM), sayısal bilginin iletilen taşıyıcının hem genliğinde hem de fazında içerildiği bir sayısal modülasyon biçimidir [95]. $M=4$ olduğu bir M-li modülasyon tekniğidir. QAM de, 2 farklı genlik değerine karşın 2 farklı faz değeri olması itibariyle 4 farklı çıkış sinyali elde edilmektedir. Bu yönüyle QPSK modülasyonu ile aynıdır.

Genlik Kaydırmalı Anahtarlama tekniği (ASK) ve Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK) tekniğinin birleştirilmesi ile dikgen genlik modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) meydana gelmektedir [96, 106].

4.4.2. 16-lı Dikgen Genlik Modülasyonu (16QAM)

16-lı Dikgen Genlik Modülasyonu (16QAM), $M=16$ olan M -li bir kodlama tekniğidir. Giriş verileri dörtlük gruplara ($2^4=16$) bölünür. QAM modülasyonunun yapısı gereği taşıyıcı sinyalinin hem faz hem de genliği değiştirilmektedir.



Şekil 4.23. 16QAM Blok Diyagramı [95]

16QAM verici blok diyagramı Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Giriş veri bitleri I, I', Q ve Q' şeklinde dört kanala bölünmektedir. Her kanaldaki bit iletim hızı, giriş bit iletim hızının dörtte birine eşit olmaktadır. Dört bit, bit ayırıcıya seri olarak verilmektedir. Sonra bu bitler aynı zamanda I, I', Q ve Q' kanallarıyla paralel olarak çıkarılmaktadır. I ve Q bitleri PAM sinyalinin polaritesini belirlerken (1 mantık= +, 0 mantık = -), I' ve Q' bitleri büyüklüğü belirlemektedir (1 mantık = 0.821 V, 0 mantık = 0.22 V). Dolayısıyla 4 düzeyli bir PAM sinyali üretilmiş olur. Dolayısıyla PAM sinyalleri ± 0.22 V ile ± 0.821 V değerlerini alabilmektedir [95]. Çizelge 4.5'te giriş bitlerine karşılık PAM sinyalleri çıkış değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. 16QAM PAM Sinyali Doğruluk Tablosu [95]

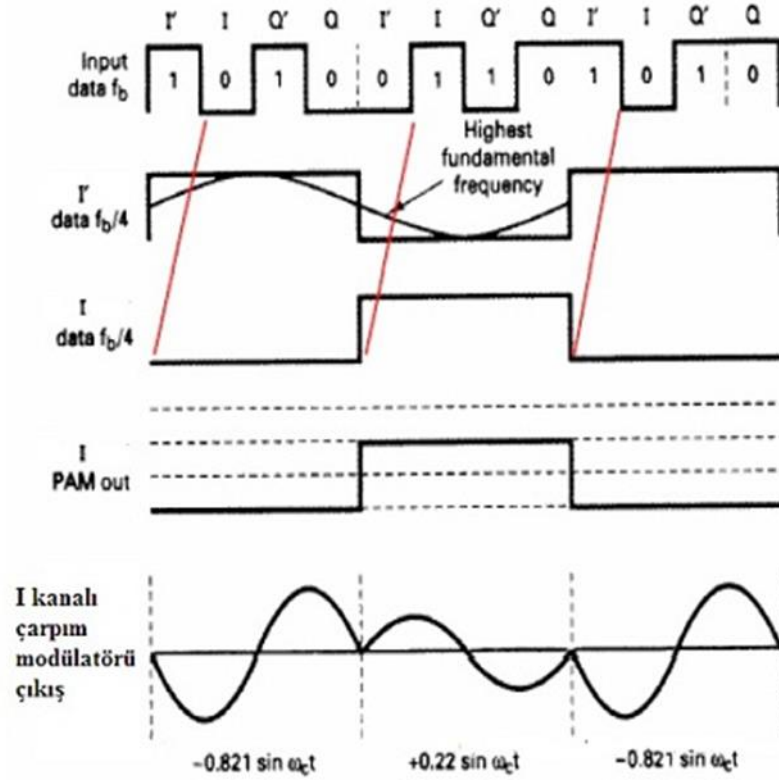
I I'	PAM çıkışı (V)	Q Q'	PAM çıkışı (V)
0 0	-0.22	0 0	-0.22
0 1	-0.821	0 1	-0.821
1 0	+0.22	1 0	+0.22
1 1	+0.821	1 1	+0.821

PAM sinyalleri, çarpım modülatörlerinde aynı genlikte ve birbirine dik iki taşıyıcıyla modüle edilir. Böylece her çarpım modülatöründe dört çıkış elde edilecektir. Doğrusal toplayıcı, I ve Q kanalı çarpım modülatörlerinin çıkışlarını birleştirir ve 16QAM için gerekli (4x4=16) 16 çıkış durumunu üretirler.

Çizelge 4.6'da giriş bitlerine göre olası 16 çıkış durumu gösterilmiştir. Bu çıkış durumlarının kümeleşme diyagramı Şekil 4.25'te gösterildiği gibi olacaktır [95].

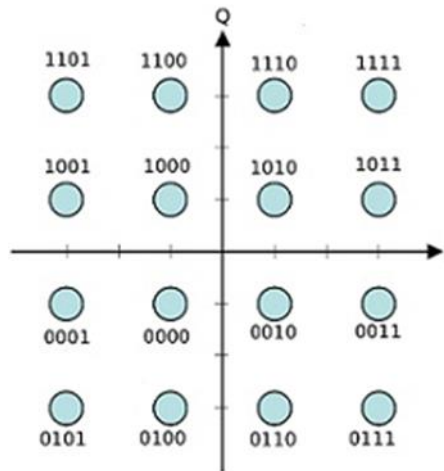
Çizelge 4.6. 16QAM Modüleli Sinyal Çıkış Durumları

Giriş Verisi				16QAM Çıkış	
Q	Q'	I	I'		
0	0	0	0	0.311 V	-135°
0	0	0	1	0.850 V	-165°
0	0	1	0	0.311 V	-45°
0	0	1	1	0.850 V	-15°
0	1	0	0	0.850 V	-105°
0	1	0	1	1.161 V	-135°
0	1	1	0	0.850 V	-75°
0	1	1	1	1.161 V	-45°
1	0	0	0	0.311 V	135°
1	0	0	1	0.850 V	165°
1	0	1	0	0.311 V	45°
1	0	1	1	0.850 V	15°
1	1	0	0	0.850 V	105°
1	1	0	1	1.161 V	135°
1	1	1	0	0.850 V	75°
1	1	1	1	1.161 V	45°



Şekil 4.24. I Kanalı Sinyal Çıkışları [95]

Veri girişinin 1010, 0110, 1010 olması durumunda, I kanalındaki PAM çıkış sinyali Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. 16QAM Kümeleşme Diyagramı

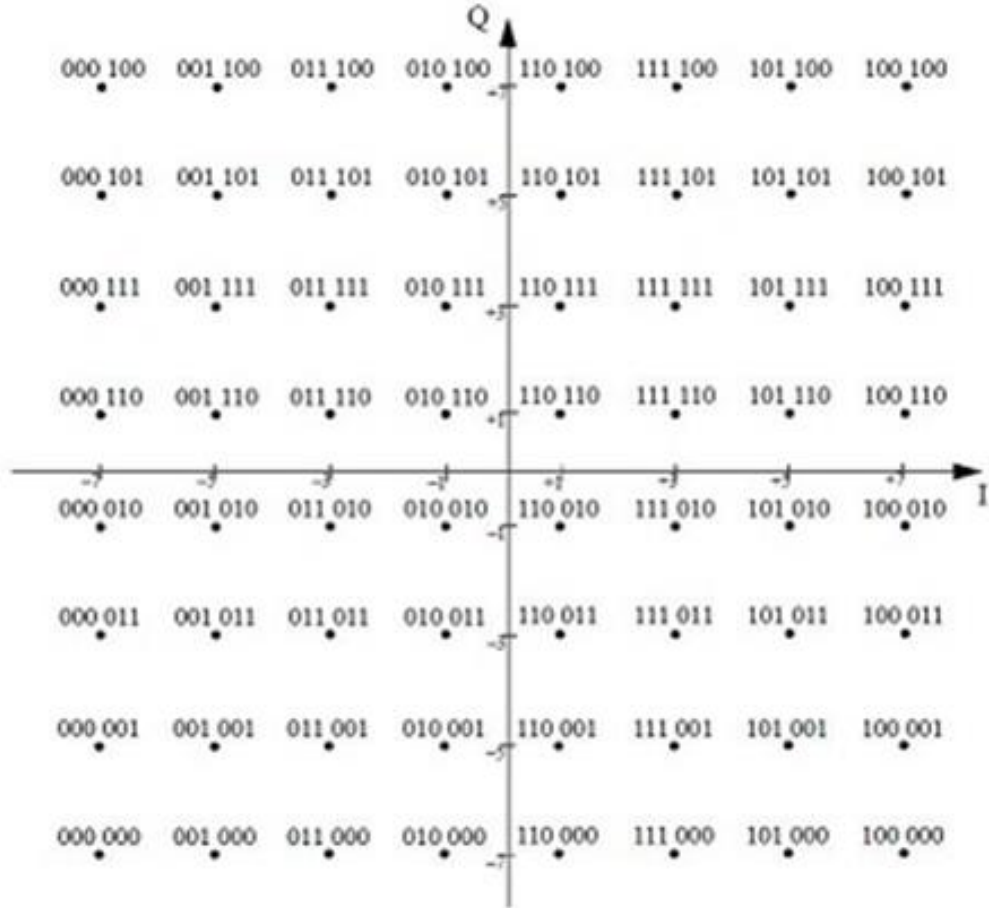
16QAM de giriş verileri dört kanala bölüldüğü için 2'den 4 e düzey dönüştürücülerin giriş ve çıkışlarındaki bit iletim hızı giriş veri hızının dörtte birine eşittir. Her 4 giriş veri biti için çıkış

sinyalinde değişiklik meydana geldiği için 16QAM baud hızı $f_b/4$ olacaktır ki bu minimum bant genişliği ile aynıdır.

Aynı giriş bit iletim hızı için 16QAM de gerekli minimum bant genişliği, BPSK'nın dörtte birine, QPSK'nın yarısına ve 8PSK'nın dörtte üçüne eşittir. Her modülasyon için Baud oranı da aynı şekilde azalır [95].

4.4.3. 64-lü Dikgen Genlik Modülasyonu (64QAM)

64-lü Dikgen Genlik Modülasyonu (64QAM), $M=64$ olan M -li modülasyon tekniğidir. 64QAM, her sembol 6 bitten oluşmaktadır. Böylece tek bir taşıyıcı frekans için $2^6=64$ farklı çıkış oluşması sağlanmaktadır. Şekil 4.26'da 64QAM için örnek bir kümeleşme diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.26. 64QAM için örnek bir kümeleşme [107]

5. ÇOĞULLAMA

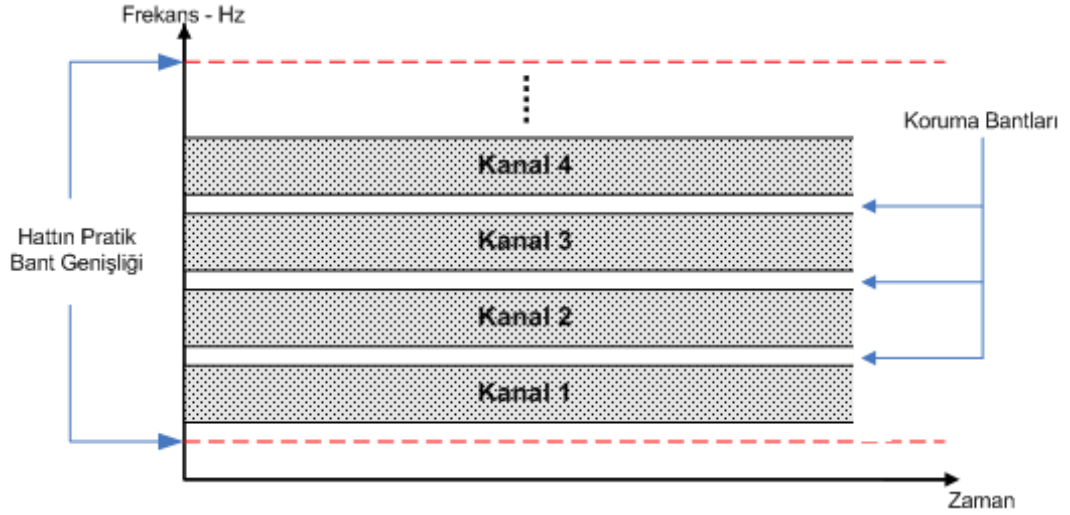
Herhangi bir iletim hattının, verilen bir zaman aralığında maksimum bir bant genişliği vardır. Bir iletişim hattı sadece iki u arasındaki iletişimi sağlamak üzere ayrıldığı zaman önemli bir israf yapılmış olunur ve bu nedenle sistem verimi dūřuk olacaktır. Bu noktada sistemi daha verimli kullanabilmek amacıyla oęullama (oklama - multiplexing) yapılır. Çoęullama, mevcut bir iletişim yolunu birden fazla kullanıcının hizmetine sunar ve iletişim maliyetini dūřürür. Çoęullama ile bir hat üzerinden birden fazla bilgi simültane ya da sırayla iletilir. İletim hattı “kanal” adı verilen sanal tünellere bölünür.

Kablosuz haberleşmede oğullama temel olarak FDM, TDM veya bu iki oğullama tekniğinin beraber kullanılmasıyla yapıldığı gürölmektedir [12, 114, 115]. FDM, frekans bandını bölmek suretiyle kullanıcılara birden çok iletişim kanalı sunarken TDM, zamanda bölme yaparak iletişim yolunu farklı zamanlarda farklı kullanıcılara tahsis ederek oğullama yapmaktadır. Bu iki temel yaklaşımdan başka FDM tekniğinin bir türevi olan OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Dikgen Frekans Bölmeli oğullama) ve mantıksal bir oğullama tekniği olan CDM (Code Division Multiplexing – Kod Bölmeli oğullama) tekniklerinin de kullanıldığı gürölmektedir.

Yapılan literatür çalışmasında belirtildiği üzere KAA’larda genel olarak FDM, TDM ve CDM oğullama tekniklerinin kullanıldığı gürölmektedir. Kablosuz ağlarda genel olarak kullanılan oğullama tekniklerine kısaca değinmek faydalı olacaktır.

5.1. Frekans Bölmeli oğullama (FDM)

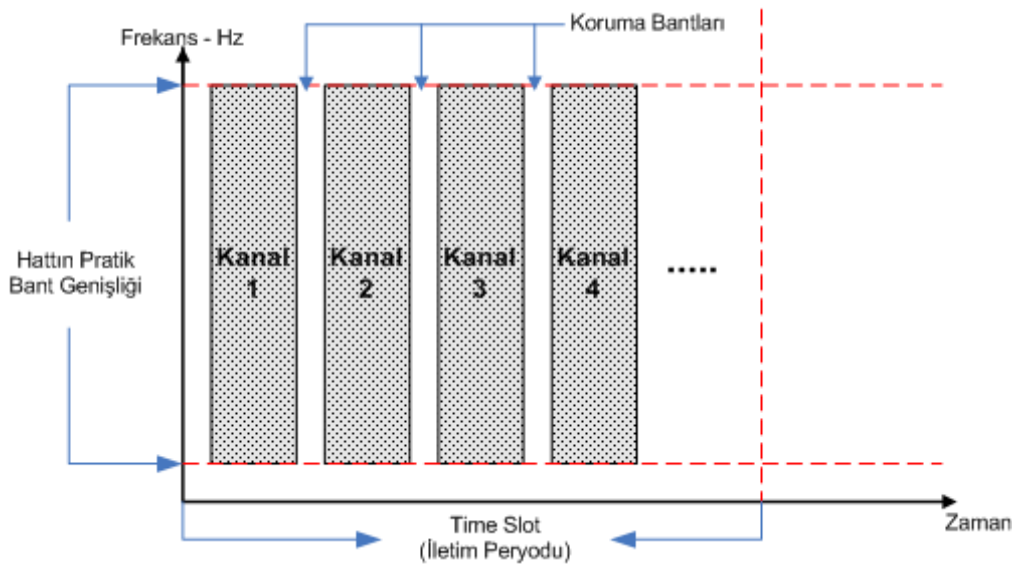
FDM [116], oğullama teknikleri arasında en eski olanıdır ve günümüzde radyo, televizyon yayını, cep telefonları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [115]. Bu teknikte iletişim yolunun bant genişliğinin çok sayıda frekans aralıklarına bölünmesi suretiyle iletişim kanalları oluşturulur. Oluşturulan bu kanallar farklı kullanıcılar için tüm zaman boyunca tahsis edilir. Genel olarak analog işaretlerin oğullanmasında kullanılır [117]. Oldukça sık kullanılan bir oğullama çeşididir. Şekil 5.1’de gürsterildiği üzere her iletişim kanalına mevcut iletişim yolu bant genişliğinin bir bölümü ayrılır ve bütün zamanlarda ayrılan bu bant genişliği kullanılır. Kanallar arası girişimi önlemek için koruma bantları kullanılmaktadır [12, 118].



Şekil 5.1. Frekans Bölmeli Çoğullama [12]

5.2. Zaman Bölmeli Çoğullama (TDM)

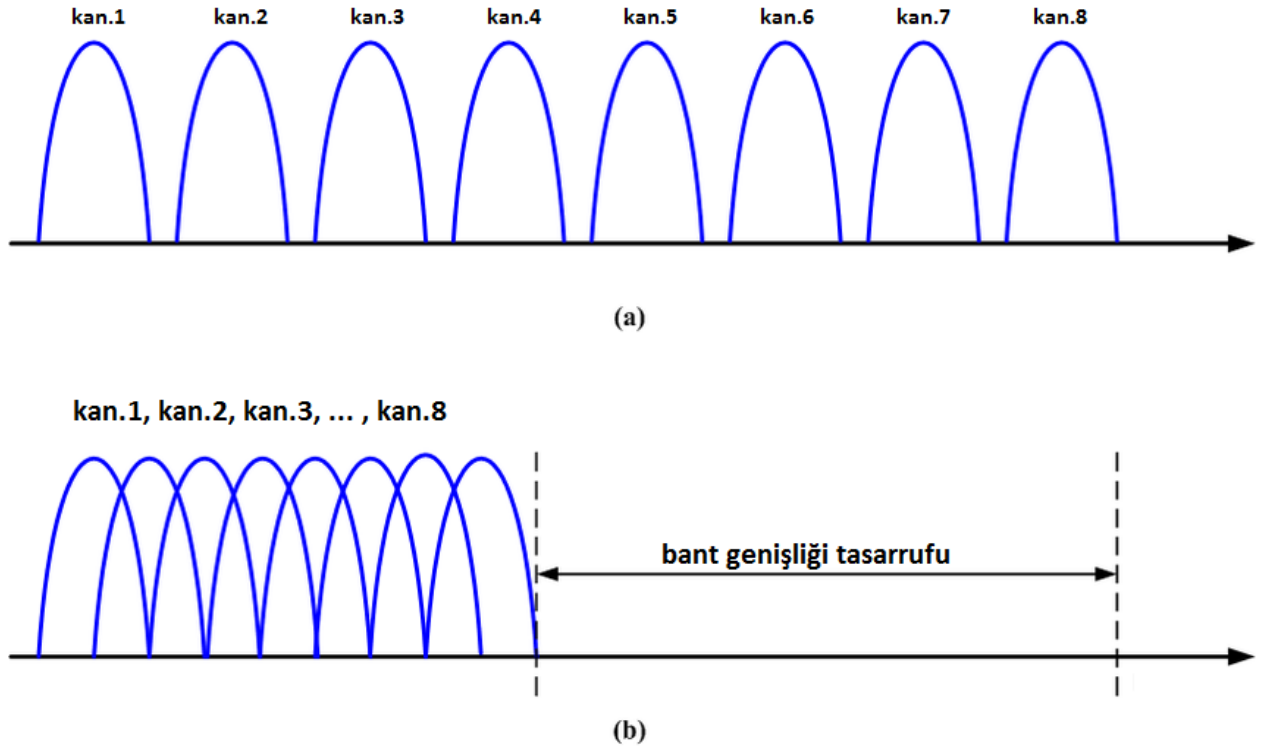
TDM'de [116] iletişim yolunun zaman dilimlerine (time slot) bölünmesi suretiyle iletişim kanalları oluşturulur. Oluşturulan bu kanallar farklı kullanıcıların farklı zaman dilimlerinde aynı iletişim yoluna erişimini ve kullanımını sağlamaktadır. Bu, ne kadar çok kanal oluşturulursa o kadar geç kanal kullanım sırası geleceği anlamı taşımaktadır. Genel olarak sayısal haberleşmede kullanılmaktadır. Bu teknik mevcut iletişim kanallarının belirli zaman dilimlerinde belirli kullanıcılara tahsis edilmesi temeline dayanmaktadır [114, 115, 118]. Şekil 5.2'de TDM yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Zaman Bölmeli Çoğullama [12]

5.3. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)

OFDM [119], mevcut frekans spektrumunu bir dizi halinde birbirine dik alt taşıyıcılara bölen çok taşıyıcılı bir iletim tekniğidir. Esasen FDM'in bir türevi olan OFDM tekniğini diğer çoğullama türlerinden ayıran temel özellik, alt taşıyıcıların birbirine dik oluşudur. Alt taşıyıcıların birbirine dik oluşu hem taşıyıcılar arası girişim oluşumunu engellerken hem de iletim bandının daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır [120]. Günümüzde kablosuz ve mobil haberleşmede yoğun olarak kullanılmaktadır [121–124]. Şekil 5.3'te FDM'e göre OFDM'in bandı nasıl daha verimli kullandığı görülmektedir.

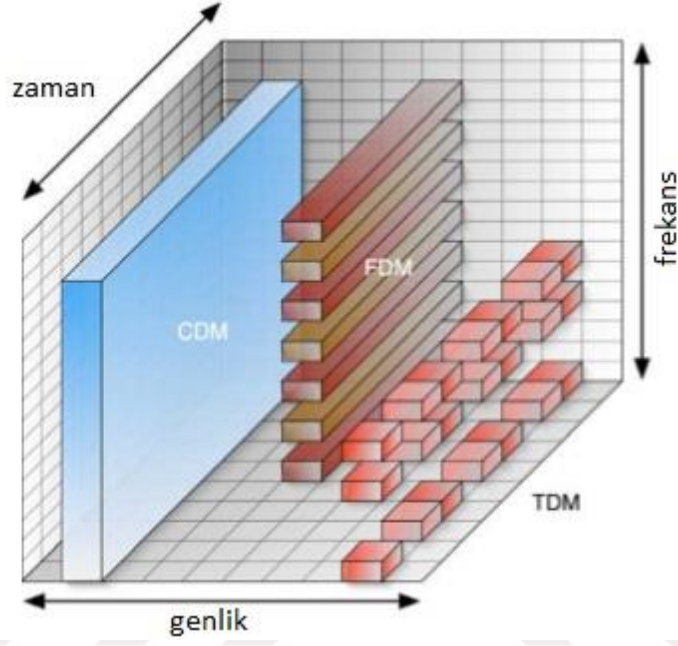


Şekil 5.3. (a) FDM (b) OFDM [125]

5.4. Kod Bölmeli Çoğullama (CDM)

CDM [126], FDM ve TDM gibi fiziksel bölme işlemi olmayıp mantıksal bir çoğullama tekniğidir. Şekil 5.4'te CDM, FDM ve TDM yapıları gösterilmiştir. Bu çoğullama tekniğinde kullanıcılar tüm zaman boyunca iletim yolunun tüm frekans bant genişliğini kullanabilirler. Bölümleme işlemi her bir kullanıcıya eşsiz bir kod atamak suretiyle yapılır ve bu koda sahip olan kişiler iletişim ortamındaki bilgiyi alabilir. İletişim ortamındaki tüm veriler kodlanmış durumdadır ve kullanıcılar

elinde bulundurduğu anahtar koda göre veri ortamından kendine ait olan bilgiyi alır. Yani iletilecek bilgi sinyali kodlanarak başka bir sinyale dönüştürülür ve tüm sinyaller aynı ortamdan iletilir. Bu yöntem ile kodlanmış veriler yüksek güvenilirli olarak iletilmiş olmaktadır. Yine elinde bu kodlanmış sinyali çözecek kodu bulunduran kullanıcı veriye erişebilmektedir. Bu teknik özellikle 3. Nesil (3G) mobil haberleşme teknolojilerinde kullanılmıştır [127–129].



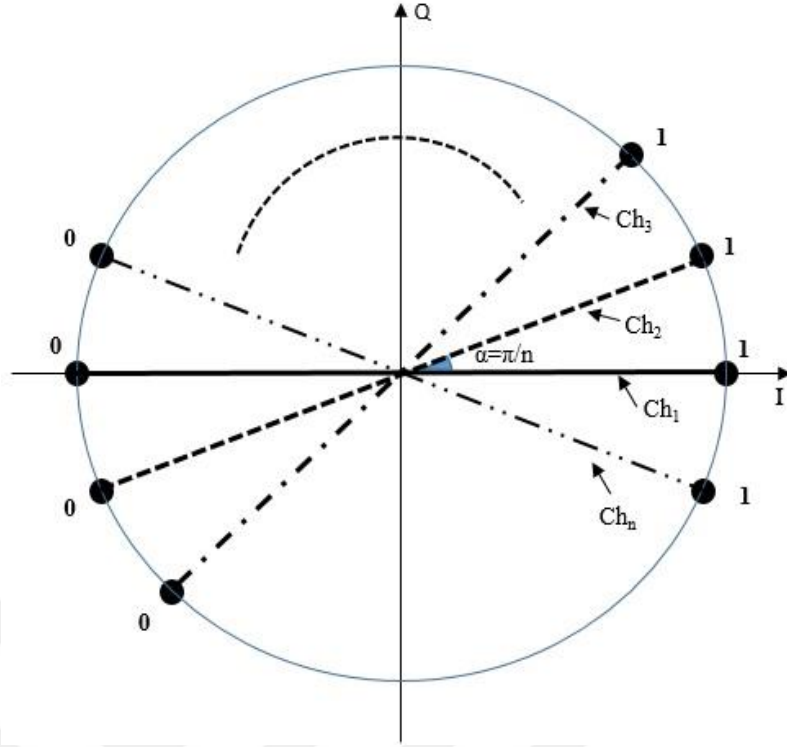
Şekil 5.4. Kod Bölmeli Çoğullama [130]

6. FAZ BÖLMELİ ÇOĞULLAMA

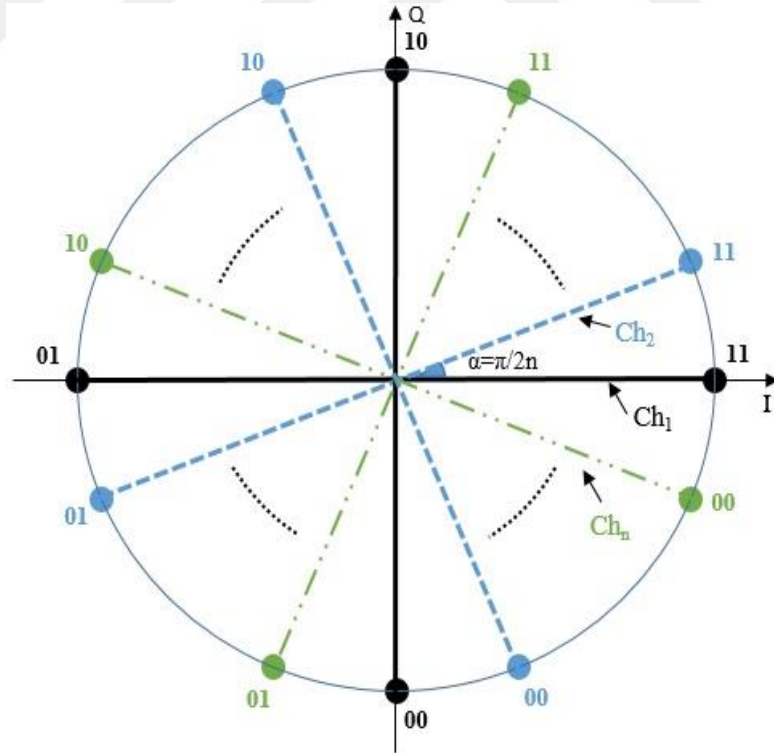
KAA'larda gerçek zamanlı iletişim için gecikme parametresi en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Kullanılan zaman çizelgelerine göre kanal tahsisi veya çekişme tabanlı kanal tahsisleri gerçek zamanlı iletişimde istenmeyen gecikmelere neden olabilmektedir. Kullanıcılara statik kanal atama yapılması bu gecikmeyi ortadan kaldırmak için uygun bir yöntem olabilmektedir. Ancak statik kanal ataması yapılabilmesi için yeteri kadar iletişim kanallarının mevcut olması gerekmektedir. Buradan hareketle bu tez çalışmasında gerçek zamanlı iletişim gerektiren uygulamalarda statik kanal ataması yapabilmek için mevcut kanal sayısını artıracak faz tabanlı yeni bir çoğullama tekniği geliştirilmiştir. Faz Bölmeli Çoğullama (Phase Division Multiplexing - PDM) olarak adlandırılan bu teknik ile sinyal fazında bölme işlemi yapılarak faz kanalları oluşturulmaktadır. Bu faz kanalları kullanıcılara ayrı ayrı tahsis edilebilir. Böylelikle statik kanal ataması için mevcut iletişim kanalı sayısı artırılmış olur.

Geliştirilen PDM, kullanılacak olan modülasyon türüne bağımlı bir yapıya sahiptir. PDM'de kullanılacak modülasyon PSK modülasyonu gibi sabit genlik değerine sahiptir ve birbirinden 180° faz farkı bulunan sembol çiftlerinin kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Bu nedenle geliştirilen PDM yapısında PSK modülasyonu kullanılıyor denilebilir. Buradan hareketle kullanılan 2 düzeyli modülasyon için BPSK ve 4 düzeyli modülasyon için QPSK denilecektir. PDM ile 360° olan sinyal fazı elde etmek istenilen kanal sayısına göre bölünür. Oluşturulan faz kanalı sayısı, kullanılan modülasyon düzeyi ve olası giriş durumlarına göre oluşacak kümeleşme diyagramları elde edilir. Bu kümeleşme diyagramlarına göre veri iletişimi gerçekleştirilir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen iki düzeyli modülasyon (BPSK) ile faz kanalı oluşumu (PDM-BPSK) diyagramı Şekil 6.1'de dört düzeyli modülasyon (QPSK) ile faz kanalı oluşumu (PDM-QPSK) diyagramı ise Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. İki düzeyli modülasyon (BPSK) ile faz kanalı oluşumu



Şekil 6.2. Dört düzeyli modülasyon (QPSK) ile faz kanalı oluşumu

PDM-BPSK yapısında sinyalin fazı oluşturulmak istenen kanal sayısına göre bölünerek her bir kanala 2 adet sembol sinyali atanır. PDM-QPSK yapısında ise yine sinyalin fazı elde edilmek istenen faz kanalı sayısına göre bölünerek her bir kanal için dört adet sembol sinyali atanmaktadır. PDM ile oluşturulan kanallar aynı frekans değerinde çalışmaktadır. Bu nedenle aynı zaman diliminde (bir sembol süresi boyunca) oluşan kanal sayısı kadar sembol iletilebilmektedir. Yani PSK modülasyonunda bir sembol süresince tek bir sembol iletilirken PDM ile oluşturulan tüm faz kanallarının kullanıldığını varsayarsak bir sembol süresince oluşturulan kanal sayısı kadar sembol yayılacaktır. Kanallardan yayılan bu semboller aynı frekans değerinde olduğu için birbiri üstüne binecek ve alıcıda tüm bu sembollerin vektörel toplamı olan tek bir sembol alınmış olacaktır. Bu çalışmada birbiri üstüne binen bu sinyalleri anlamlandırma ve hesaplama üzerine kuruludur. Vektörel toplam olan bu sembol PDM-BPSK yapısı için kanal sayısı uzunluğunda veri gruplarını, PDM-QPSK yapısı için ise her bir kanaldan ikili veri geleceği için kanal sayısının iki katı uzunluğunda veri gruplarını temsil edecektir. PDM-BPSK yapısında veri gruplarının her bir hanesi farklı kanallara ait veri olacaktır. En anlamlı bit 1. kanal (k_1), en anlamsız bit sonuncu kanal (k_n) verisi olacak şekilde planlama yapılmıştır. PDM-QPSK yapısında ise veri grupları ikili haneler olarak farklı kanallara ait olacaktır. İlk iki bit 1. kanal (k_1k_2), son iki bit sonuncu kanal ($k_{n-1}k_n$) verisi olacak şekilde planlama yapılmıştır. Böylece alıcı aldığı sembol sinyalinin temsil ettiği veri grubu içerisinde tüm kanalların verisine erişmiş olacaktır. Yine alıcının bir kullanıcıyla iletişim kurması durumu, veri grubunun kanal sıralamasına göre olacaktır. Kullanıcı alıcı taraftan gönderilen veri grubunun kendine ait sıralamasında bulunan biti süzerek verisini elde edecektir. Daha büyük düzeyli modülasyonlar için benzer şekilde tahsis yapılabilir.

PDM ile, oluşturulan yapıda hesaba katılması gereken önemli bir konu da kanalların kullanılmama durumudur. PDM’de, PSK ve diğer modülasyonlardan farklı olarak giriş durumunda ‘1’ ve ‘0’ verilerinin yanı sıra kanalların kullanılmama durumunu gösteren üçüncü bir ‘-’ durumu oluşmaktadır. Oluşturulan bir faz kanalında iki düzeyli bir modülasyon kullanıldığında olabilecek 3 farklı giriş durumunun olası tüm kombinasyonları ‘n=kanal sayısı’ olmak üzere 3^n adet olacaktır. Yani 3^n adet sembol sinyali işleniyor olacaktır. Oluşturulan faz kanallarında dört düzeyli bir modülasyon kullanıldığında ‘00’, ‘01’, ‘10’ ‘11’ ve kanalın kullanılmama durumu ‘--’ olmak üzere 5 farklı olası giriş durumu oluşmaktadır. Bu, olası tüm giriş durumlarını temsil edecek faz ve genlik olarak birbirinden farklı 5^n adet sembol sinyali işleneceği anlamını taşımaktadır.

N_s : sembol sayısı, C: olası giriş kombinasyonları, n=kanal sayısı ve $n \in \mathbb{Z}^+$ olmak üzere;

$$N_s = C^n \quad (6.1)$$

denklemini elde edilir. Buna göre;

- PDM-BPSK için $N_s=3^n$
- PDM-QPSK için $N_s= 5^n$ olmaktadır.

PDM’de faz kanalları oluşturulurken olası tüm giriş durumlarına karşılık faz ve genlik değerleri farklı sembol sinyallerinin elde edilebilmesi önemli bir gerekliliktir. Aksi durumda iletişim mümkün olamamaktadır. PDM’de ilk olarak oluşturulan her bir faz kanalına kullanılan modülasyon düzeyine göre ayrı ayrı semboller tanımlanmakta ve sonrasında kanalların kullanılmama durumunu da hesaba katmak suretiyle bu kanalların birlikte çalışma durumları işlenmektedir. Birlikte çalışma durumlarında sembol sinyallerinin çakışması veya birbirini nötrleştirmesi haberleşmeyi mümkün kılmamaktadır.

Bu çalışmada kanallar oluşturulurken sinyal fazında simetrik bölmeleme yapılmıştır. Asimetrik faz bölmeleme ile kanal oluşturma da mümkün olmakla beraber bu tez çalışmasının kapsamı dışındadır. Simetrik bölmeleme yapılarak oluşturulan yapıda her bir faz kanalına farklı faz değerine sahip sinyaller tahsis edilmiştir. Her bir kanal ileteceği verisine göre bu kendine özel sinyalleri kullanmaktadır. Faz kanalları aynı frekans değerine sahip olduğu için kanallardan yayılan sinyaller birbiri üzerine binmektedir ve bu noktada çakışma veya nötrleştirme söz konusu olabilmektedir. Böyle bir çakışma veya nötrleştirilmenin olmaması için iki ve ikinin katları şeklinde faz kanalı oluşturulmalıdır. Aksi durumda çakışmadan ötürü iletişim sağlanamayacaktır. Ayrıca oluşturulacak faz kanalı sayısının artırılması oluşacak sembol sayısının da artması anlamına gelmektedir. İşlem yapılacak sembol sayısının fazla olması sistem karmaşıklığı ve maliyet anlamına gelmektedir. Bu sebeplerden ötürü KAA’lar için PDM modülasyon düzeyi 4 ile sınırlandırılmıştır. Diğer bir deyişle KAA’lar için oluşturulan PDM’de modülasyon düzeyi düşük olan BPSK ve QPSK modülasyonları kullanılmıştır. Bununla birlikte elde edilecek sembol sayısının fazla olmaması için BPSK temelli PDM’de (PDM-BPSK) 2 ve 4 kanal, QPSK temelli PDM’de (PDM-QPSK) ise 2 kanal oluşturulmuştur.

6.1. Çift Kanallı PDM-BPSK Yapısı

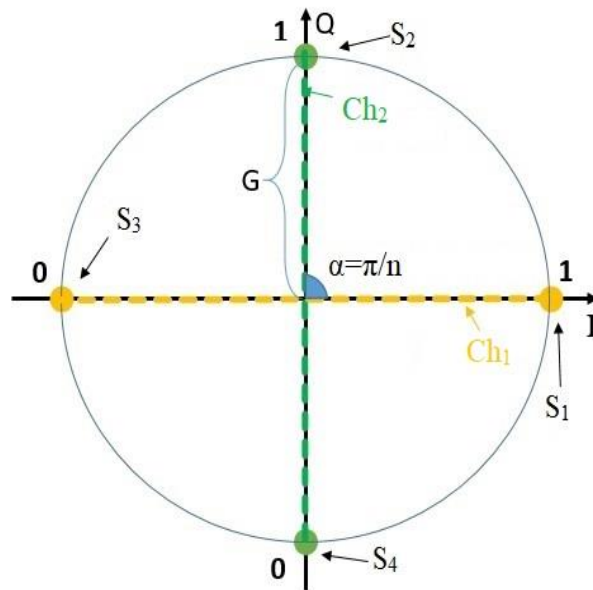
Bu çalışmada çift kanallı PDM-BPSK yapısı için kanallar oluşturulurken simetrik bölmeleme yapılmıştır. BPSK temelli PDM ile çift kanal oluşturmak için ilk olarak (6.2) ve (6.3) numaralı denklemler ile kanallara ait sembol sinyalleri elde edilmiştir.

n =kanal sayısı; A =Genlik; α = kanallar arası faz farkı; S_k = Sembol sinyali olmak üzere $k \in \mathbb{Z}^+$ $S_k = \{1,2,3 \dots 2n\}$ için;

$$\alpha = \pi/n \quad (6.2)$$

$$S_k = A \cdot e^{j(2\pi f + k\alpha - \alpha)} \quad (6.3)$$

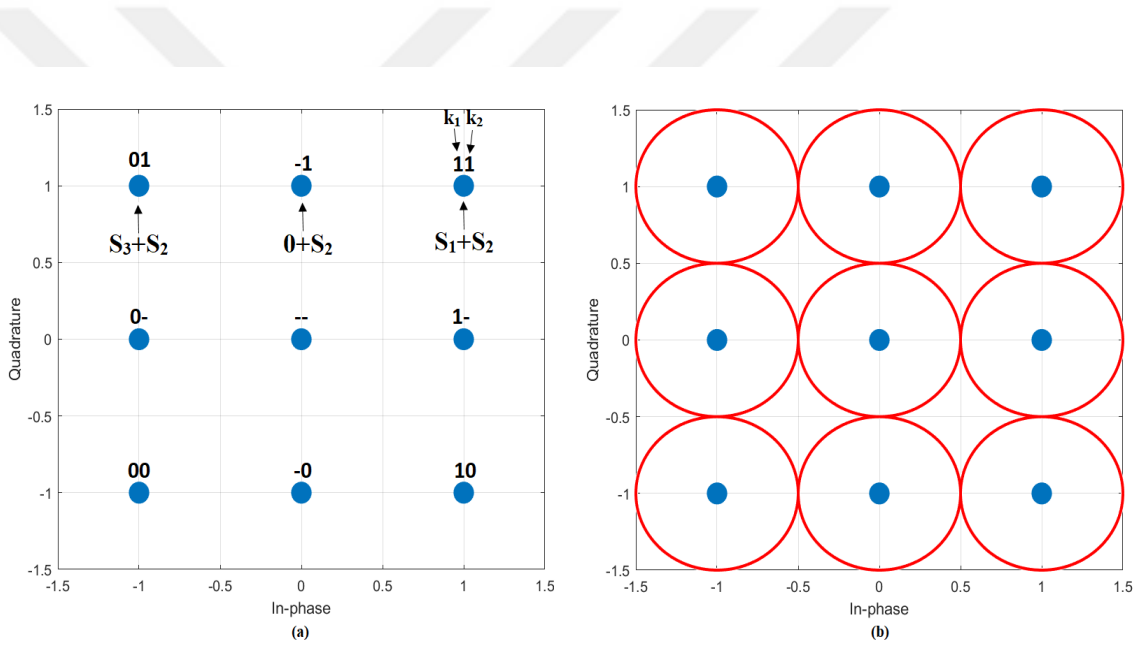
PDM-BPSK ile iki kanal oluşturulduğunda kanallar Şekil 6.3'te gösterildiği gibi olmaktadır. 360° olan sinyal fazı 4 eşit parçaya ayrılmış ve birbirine zıt açıda olan faz parçaları aynı kanala tahsis edilmiştir. Birinci kanalın '1' bitini S_1 , '0' bitini S_3 sinyali temsil ederken ikinci kanalın '1' bitini S_2 , '0' bitini S_4 temsil etmektedir. Kanallar iletmek istedikleri veriye göre bu sinyalleri yaymaktadırlar. Aynı anda her iki kanal sinyal yaydığı için bu sinyallerin toplamı PDM yapısının kümeleşme diyagramlarını oluşturacaktır. Alıcı aldığı sinyallerin hangi gurubunu temsil ettiğini bu kümeleşme diyagramına göre anlamaktadır. Çizelge 6.1'de kanal giriş durumlarına karşın çıkış sembol sinyallerinin durumu ve birbiri üstüne binen bu sembol sinyallerinin genlik ve faz değerleri verilmektedir.



Şekil 6.3. BPSK temelli PDM ile oluşturulmuş 2 faz kanalı

Çizelge 6.1. Çift kanallı PDM-BPSK giriş çıkış durumu

Giriş Durumları		Çıkış Sinyali		
k_1	k_2	Sembol	Genlik (V)	Faz
-	-	0+0	0	0°
-	0	$0+S_4$	5	270°
-	1	$0+S_2$	5	90°
0	-	S_3+0	5	180°
1	-	S_1+0	5	0°
0	0	S_3+S_4	7.0711	225°
0	1	S_3+S_2	7.0711	135°
1	0	S_1+S_4	7.0711	315°
1	1	S_1+S_2	7.0711	45°



Şekil 6.4. (a) Çift kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı (b) alıcı için tolerans aralıkları

Şekil 6.4'te Çift kanallı PDM-BPSK için oluşan kümeleşme diyagramı verilmiştir. Şekil 6.4 (a)'da görüldüğü üzere 9 farklı giriş durumu oluşmakta ve her sembol 2 bitlik veri gurubunu temsil etmektedir. Her sembolün birinci biti 1. kanal verisi ve ikinci biti 2. kanal verisini temsil etmektedir. Alıcı aldığı sembol sinyalini Şekil 6.4 (b)'deki tolerans aralıklarına göre anlamlandırıp kanallara ait verileri ayrıştırmaktadır. Alıcı kullanıcılara veri iletmek istediği zaman yine 2 bitlik veri gurupları kullanacaktır. Kullanıcılar kendi faz kanallarının veri gurubundaki sıralarını bilmekte ve bu sıradaki veriyi ayrıştırarak verilerini elde etmektedirler.

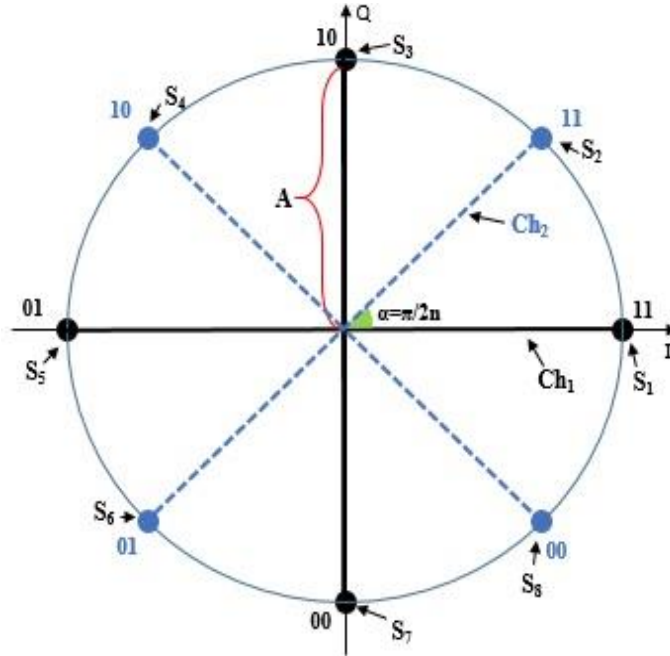
6.2. Çift Kanallı PDM-QPSK Yapısı

PDM-QPSK'nın PDM-BPSK'lı yapıdan farkı oluşturulan kanallara 4 sinyal değeri atanmasıdır. Böylece QPSK'lı yapıda her bir kanaldan 2 bitlik veri iletilebilmektedir. PDM-QPSK ile simetrik bölme yapılarak çift kanal oluşturulması durumunda kanallar Şekil 6.5'te gösterildiği gibi olmaktadır. (6.3) ve (6.4) numaralı denklemler kullanılarak faz kanallarına ait sembol sinyalleri elde edilmiş ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir. 360° olan sinyal fazı kanal sayısının 4 katına bölünmüş ve her bir kanala birbirine dik olan 4 adet faz parçası tahsis edilmiştir. Çift kanallı PDM-QPSK yapısında 4 bitlik veri grupları üzerinden haberleşme sağlanmaktadır. Bu veri gruplarının ilk iki hanesi birinci kanala ait veriyi, son iki hanesi ikinci kanala ait veriyi temsil etmektedir.

n =kanal sayısı; A =Genlik; α = kanallar arası faz farkı; S_k = Sembol sinyali olmak üzere $k \in \mathbb{Z}^+$ $S_k = \{1,2,3,\dots,4n\}$ için;

$$\alpha = \pi/2n \quad (6.4)$$

$$S_k = A \cdot e^{j(2\pi f + k\alpha - \alpha)} \quad (6.3)$$

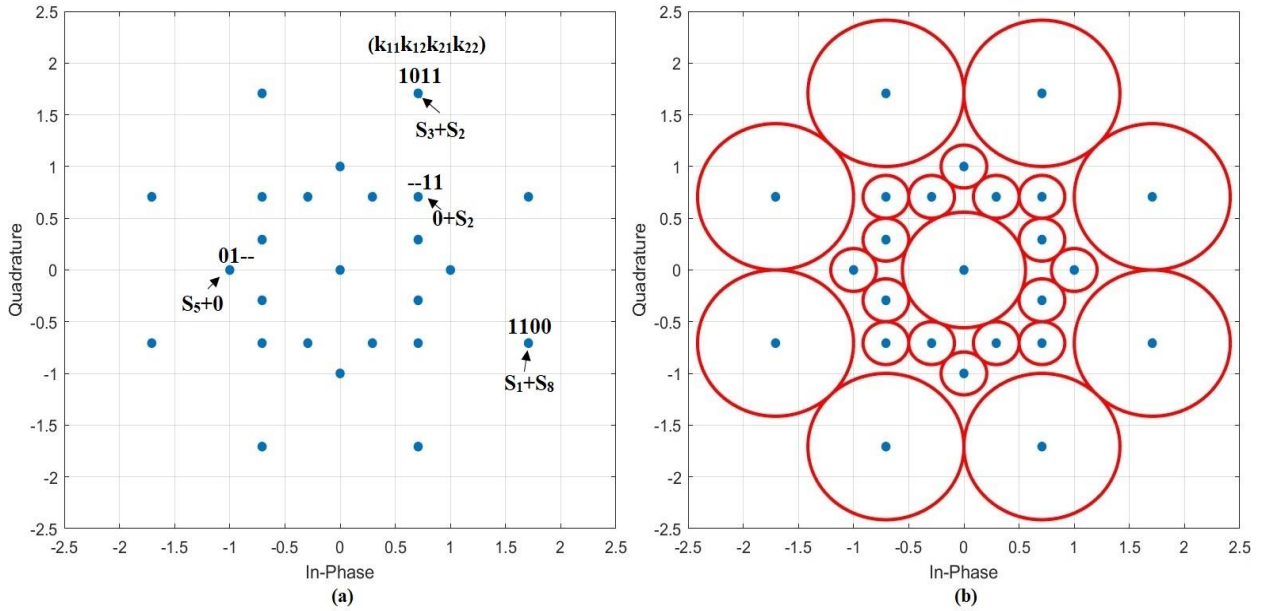


Şekil 6.5. QPSK temelli PDM ile oluşturulmuş 2 faz kanalı

Çizelge 6.2. Çift kanallı PDM-QPSK çıkış sinyalleri

Giriş Verisi	Çıkış Sinyali	
	Ch1	Ch2
11	S_1	S_2
10	S_3	S_4
01	S_5	S_6
00	S_7	S_8
-	0	0

Çizelge 6.2’de Çift kanallı PDM-QPSK yapısında veri girişlerine karşılık kanalların çıkış sinyalleri gösterilmektedir. Kanallar gelen verilere göre kendine ait çıkış sinyalini yayacaktır. Yayılan bu sinyaller aynı frekansta olduğu için birbiri üstüne binecek ve toplam sembol sinyallerini oluşturacaktır. Bu toplam sembollerinin tümü kümeleşme diyagramını oluşturur.



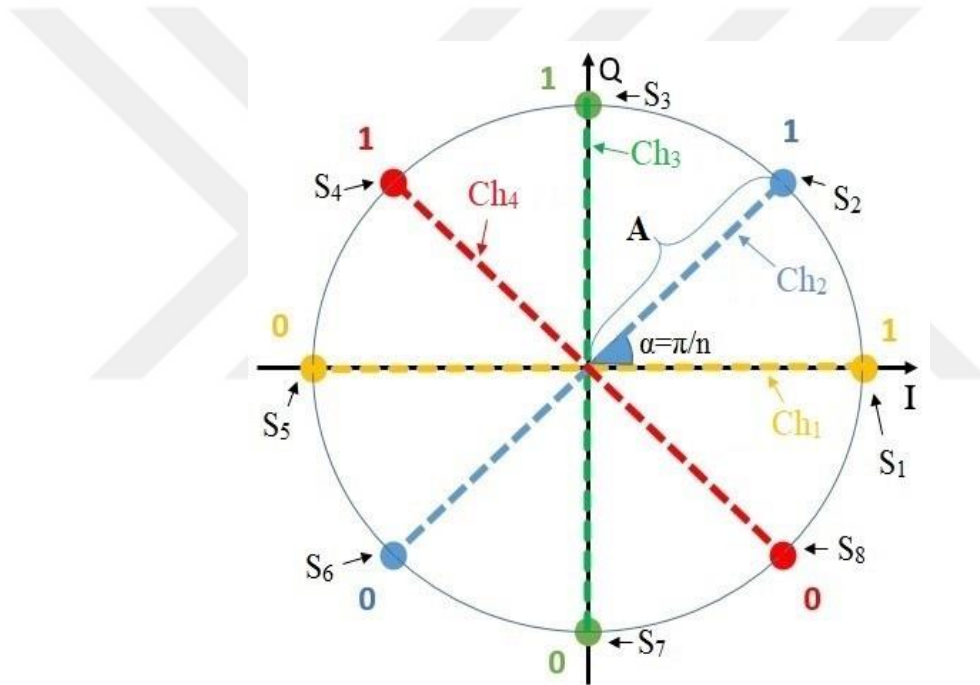
Şekil 6.6. (a) Çift kanallı PDM-QPSK kümeleşme diyagramı (b) alıcı için tolerans aralıkları

Şekil 6.6 (a)’da çift kanallı PDM-QPSK için oluşan kümeleşme diyagramı verilmiştir. Kümeleşme diyagramındaki her bir sembol 0,1,- lardan oluşan 4 haneli veri gruplarını temsil etmektedir. 4 bitlik verinin olası tüm kombinasyonları 16 farklı durum oluşturabilirken çift kanallı PDM-QPSK yapısında kanalın kullanılmama durumunun da bulunmasından ötürü 25 farklı giriş durumu gözlenmektedir. Bu 25 farklı giriş durumu her biri farklı genlik ve faz değerine sahip 25 sembol sinyaliyle temsil edilmektedir. Şekil 6.6 (b)’de çift kanallı PDM-QPSK yapısı için belirlenmiş

tolerans aralıkları gösterilmiştir. Alıcı aldığı sinyalin genlik ve faz değerine bakarak hangi tolerans aralığında olduğunu belirleyecek ve buna göre hangi veriyi aldığını anlayacaktır.

6.3. Dört Kanallı PDM-BPSK Yapısı

PDM-BPSK ile simetrik bölme yaparak 4 kanal oluşturulduğunda kanallar Şekil 6.7’de gösterildiği gibi olmaktadır. Yine (6.2) ve (6.3) numaralı denklemler kullanılarak kanallara ait sembol sinyalleri elde edilmiş ve Şekil 6.7’de gösterilmiştir. 360° olan sinyal fazı 8 eşit parçaya ayrılmış ve birbirine zıt açıda olan faz parçaları aynı kanala tahsis edilmiştir. Dört kanallı PDM-BPSK yapısında her bir hanesi farklı bir kanala ait olan 4 bitlik veri grupları üzerinden iletişim kurulmaktadır.



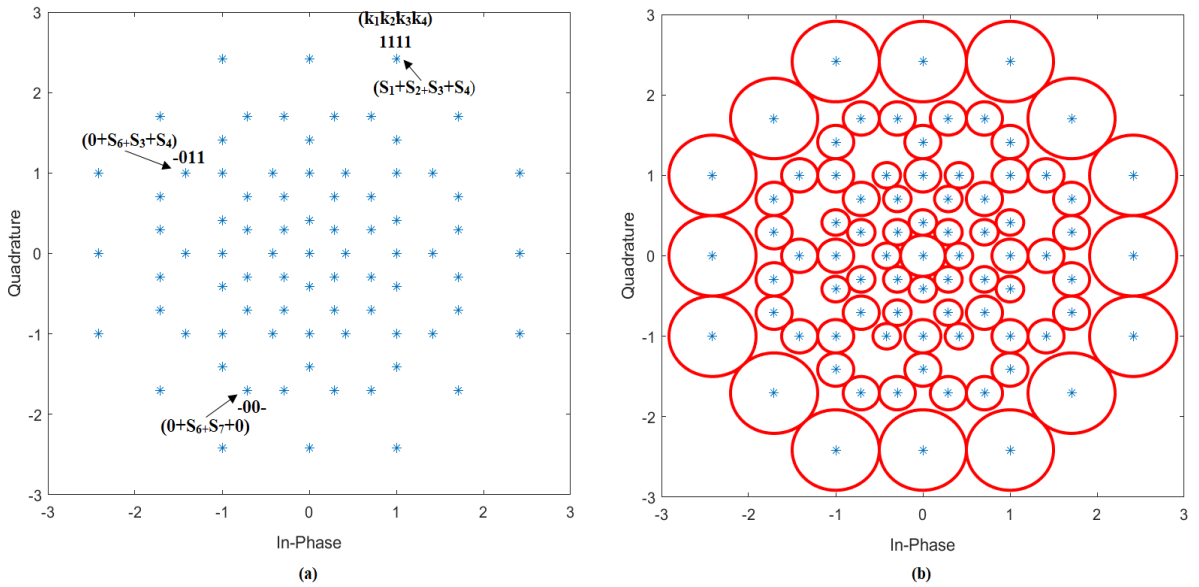
Şekil 6.7. PDM-BPSK ile oluşturulmuş 4 faz kanalı

Çizelge 6.3. Dört kanallı PDM-BPSK çıkış sinyalleri

Giriş Verisi	Çıkış Sinyali			
	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
1	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
0	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
-	0	0	0	0

Çizelge 6.3'te dört kanallı PDM-BPSK yapısında veri girişlerine karşılık kanalların çıkış sinyalleri gösterilmektedir. Kanallar gelen verilere göre kendilerine ait çıkış sinyalini yayacaktır. Yayılan bu sinyaller aynı frekansta olduğu için birbiri üstüne binecek ve toplam sembol sinyallerini oluşturacaktır.

Şekil 6.8 (a)'da dört kanallı PDM-BPSK için oluşacak kümeleşme diyagramı verilmiştir. Kümeleşme diyagramındaki her bir sembol '0', '1' ve '-' lerden oluşan 4 haneli veri gurubunu temsil etmektedir. Normal şartlarda 4 bitlik veri 16 farklı durum oluşturabilirken PDM yapısında '0' ve '1' lerden farklı olarak kanalın kullanılmama durumunu gösteren '-' verisi de olduğu için 81 ayrı giriş durumu gözlenmektedir. Bu 81 farklı giriş durumu her biri farklı genlik ve faz değerine sahip 81 sembol sinyaliyle temsil edilmektedir. Şekil 6.8 (b)'de dört kanallı PDM-BPSK için tolerans aralıkları gösterilmiştir. Alıcı aldığı sinyalin genlik ve faz değerine bakarak tolerans aralığına göre anlamlandırarak hangi veriyi aldığını tespit edebilecektir.

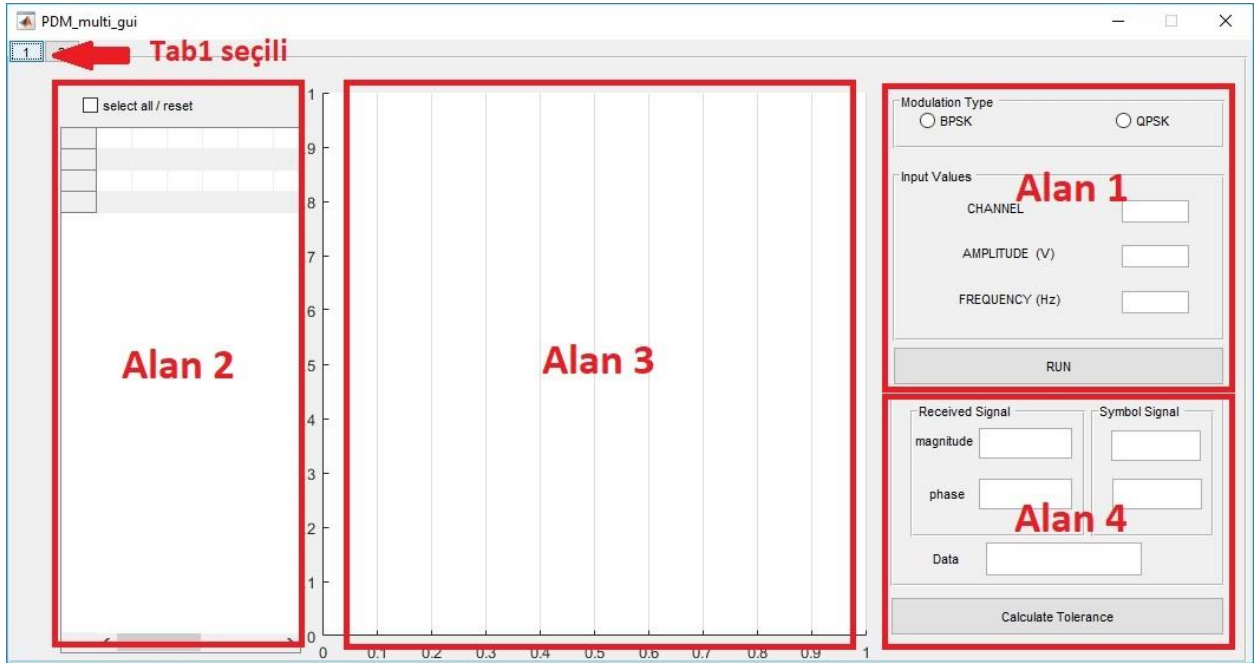


Şekil 6.8. (a) Dört kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı (b) alıcı için tolerans aralıkları

7. BENZETİM VE SONUÇLAR

7.1. Grafik Kullanıcı Arayüzü

Bu tez çalışmasında Faz Bölmeli Çoğullama tekniğini geliştirmek ve yapılan çalışmanın testlerini gerçekleştirebilmek için grafik tabanlı bir kullanıcı ara yüzü (GUI-Grafical User Interface) tasarlanmıştır. Bu GUI farklı 2 formdan oluşmaktadır. İlki istenen giriş değerlerine göre kümeleşme diyagramını üretmekte ve tolerans aralıklarını belirlemektedir. Diğeri ise PDM yapıları üzerinde belirli verilerin gönderilip alınabildiğini gösteren ara yüzüdür. Bu ara yüzler aşağıda açıklanmaktadır.



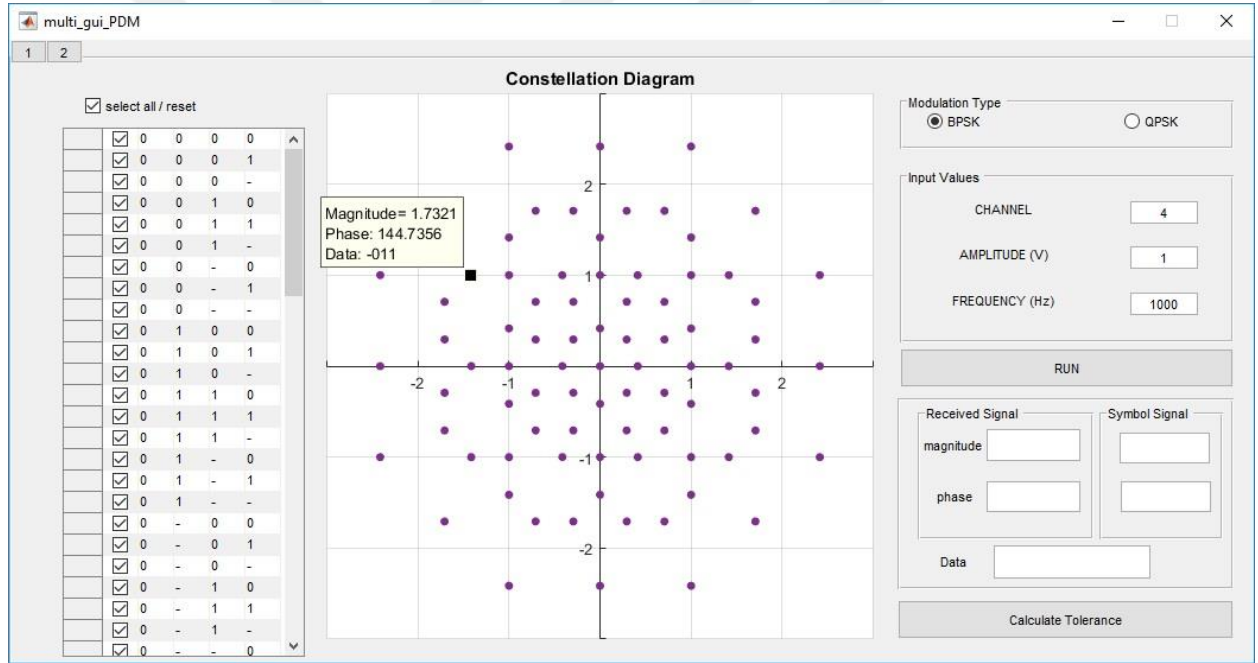
Şekil 7.1. GUI 1 arayüzü

Şekil 7.1’de gösterilen ara yüz 1 numaralı Tab seçildiğinde gelmektedir. GUI 1 üzerinde işaretlenmiş alanlar özetle anlatılacak olunursa;

Alan 1: İlk olarak bu alanda modülasyon türü seçilir, kanal sayısı, sinyal genlik değeri ve frekans değerleri girildikten sonra ‘RUN’ ile çalıştırılır. Bu verilere göre oluşması gereken sembol sinyallerini hesaplar. Böylece kümeleşme diyagramı elde edilmiş olunur. Bu değerlerden biri seçilmez ya da girilmezse GUI çalışmamaktadır.

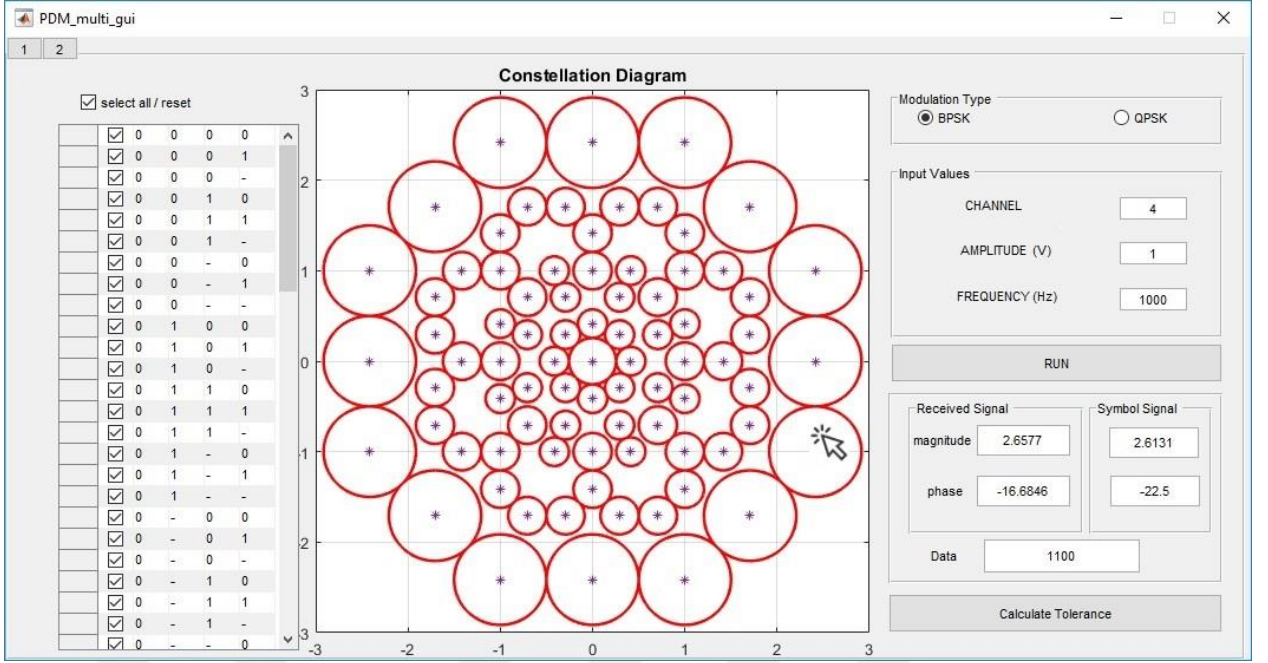
Alan 2: Giriş durumu tablosu alanıdır. Yani Alan 1’de girilmiş değerlere göre oluşacak olası tüm giriş durumları tablosunu gösterir. Seçili olanlar grafikte çizdirilir. Durum tablosunun tamamı seçilmeyip durumların tek tek seçilmesi durumunda, seçilen dataya karşılık gelen sembol grafikte çizdirilir ve Alan 4’te ‘Symbol Signal’ kısmında sembol hakkında bilgi gösterilir.

Alan 3: Grafik ekranıdır. Alan 1’de hesaplanmış sembol değerlerinden Alan 2’de seçili olanlarını gösterir. Tüm durumlar seçilebildiği gibi her bir durum ayrı ayrı seçilebilmekte ve ayrı ayrı çizdirilebilmektedir. Ayrıca kümeleşme diyagramındaki sembol sinyallerinin üzerine tıklandığında sembol sinyali hakkında bilgiler gösteren “datacursor” özelliği bulunmaktadır. Şekil 7.2’de 4 kanallı PDM-BPSK için oluşan kümeleşme diyagramı, giriş durumu tablosu görülmektedir. Ayrıca seçili sembol sinyalinin bilgisini gösteren datacursor özelliği görülebilmektedir.



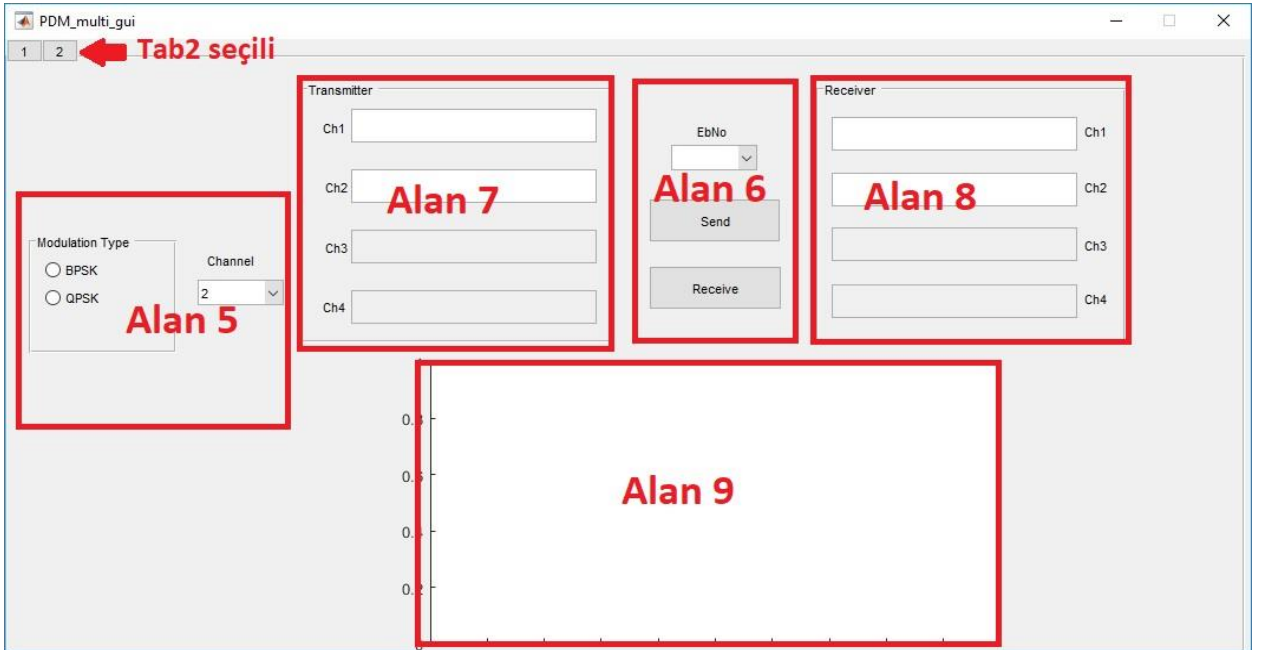
Şekil 7.2. GUI 1 kümeleşme oluşumu

Alan 4: Bu alanda ‘Calculate Tolerance’ ile oluşan kümeleşme diyagramına göre demodülasyon işlemi için tolerans aralıkları hesaplanır ve bu alan kümeleşme diyagramı üzerinde gösterilir. Ayrıca fare yardımıyla bu grafik ekranında herhangi bir yere dokunmaları sinyali olarak algılar ve belirlenen tolerans aralıklarına göre demodüle eder. Şekil 7.3’te tolerans hesabı yapılmış bir örneği görülmektedir. Fare ile grafik ekranına dokunulduğunda farenin konumuna göre algıladığı sinyali ‘Received Signal’ bölümünde gösterirken demodüle edildiği zaman karşılık gelen sembol sinyalini de ‘Symbol Signal’ bölümünde göstermektedir.



Şekil 7.3. GUI 1 tolerans hesabı

Şekil 7.4'de gösterilen ara yüz 2 numaralı Tab seçildiğinde gelmektedir. GUI 2 ara yüzü 6. Bölümde detaylı olarak anlatılan PDM yapıları için belirli bir verinin iletilip alındığını görmek üzere gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4. GUI 2 ara yüzü

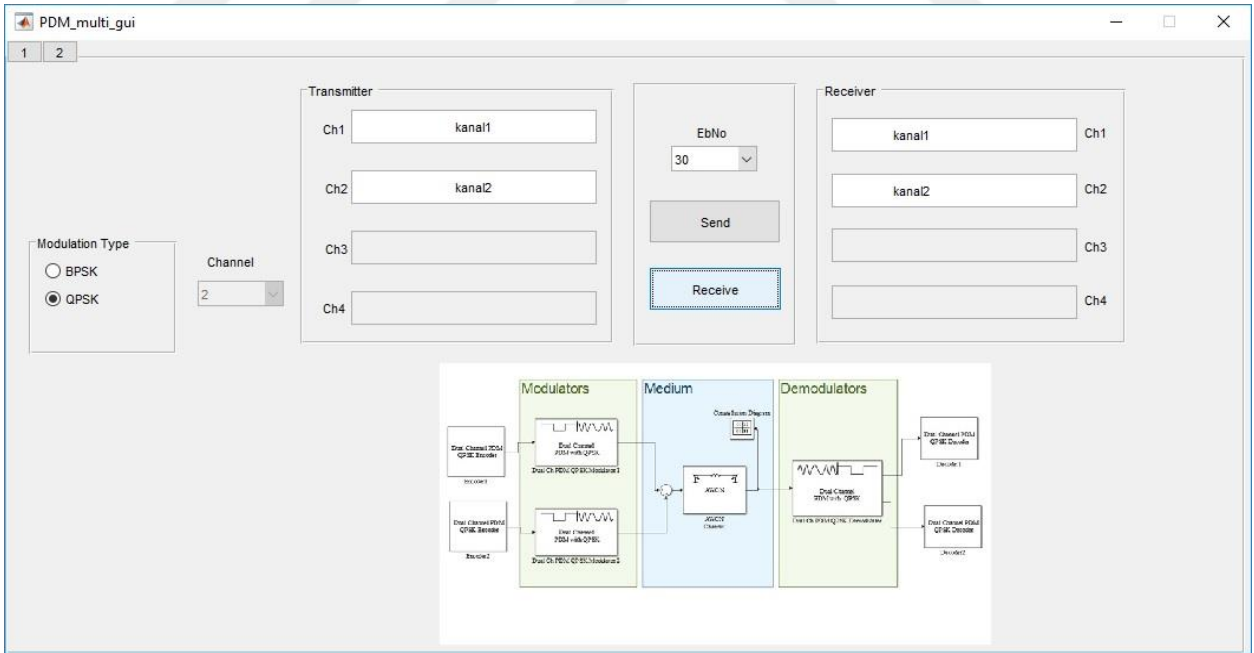
Şekil 7.4’de gösterilen GUI 2 üzerinde işaretlenmiş alanlar özetle anlatılacak olunursa;

Alan 5: Bu alanda modülasyon türü ve kanal sayısı seçilir. Böylece arka planda çalışması gereken benzetim belirlenmiş olmaktadır.

Alan 6: Bu alanda E_b/N_0 oranı seçilir. Sağlıklı bir iletişim için modülasyon türü ve kanal sayısına uygun E_b/N_0 değeri seçilmiş olmalıdır. ‘Send’ düğmesi ile Alan 7’de girilmiş olan kanal verileri enkod edilir ve PDM türüne göre modüle edilerek havaya yayılır. Sonrasında ‘Receive’ ile havaya yayılan sinyaller gürültülü bir şekilde alınır. Demodüle edilen bu sinyaller dekod işlemine tabi tutulur ve elde edilen veri Alan 8’de ekrana yazdırılır. Şekil 7.5’te PDM-QPSK için çalıştırılmış GUI örneği görülmektedir.

Alan 7 / Alan 8: Gönderilen kanal verilerinin girildiği ve alınan kanal verilerinin gösterildiği alanlardır.

Alan 9: Alan 1’de seçilen verilere göre arka planda çalışan benzetim modelini göstermektedir

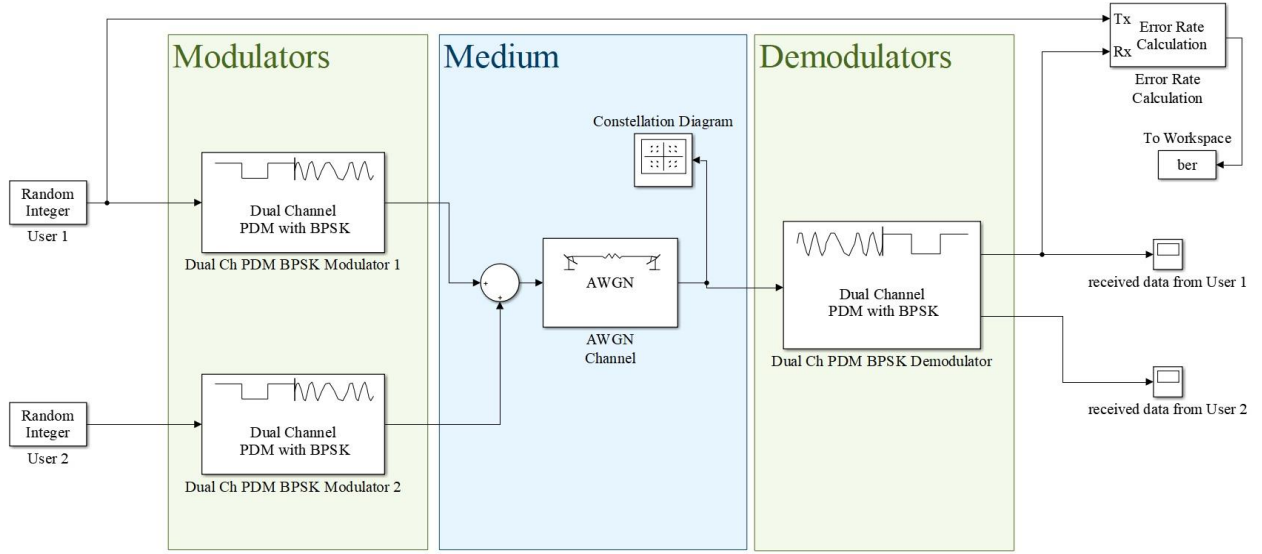


Şekil 7.5. GUI 2 veri iletimi

7.2. Benzetim Çalışmaları

PDM yapısının başarımını test etmek için MATLAB/Simulink ortamında çift ve dört kanallı PDM modülatör ve demodülatörü tasarlanmış, gürültü faktörü de eklenerek benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

7.2.1. Çift Kanallı PDM-BPSK Benzetimi



Şekil 7.6. Çift kanallı PDM-BPSK benzetimi

Şekil 7.6’da çift kanallı PDM-BPSK benzetim modeli gösterilmiştir. Bu benzetim için Simulink programının hazır blokları kullanılmasının yanında bu çalışmaya özgü PDM yapısını yansıtacak özel blok ve fonksiyonlar da tanımlanmıştır.

İlk olarak benzetim için başlangıçta bir kere çalışması yeterli olacak fonksiyonlar `InitFcn` fonksiyonu altında tanımlanmıştır. Böylece benzetim modeli çalıştırılınca `InitFcn` altındaki bu fonksiyonlar bir kez çalışır ve elde edilen çıkış değerleri değişkenlere atanarak model ortamına taşınabilir. `InitFcn` ile model ortamına taşınan bu değişkenler Modülatör ve Demodülatör alt sistemlerinde giriş değeri olarak kullanılmaktadır. `InitFcn` özelliği sayesinde iletilecek kullanıcı verilerinin bit düzeyindeki değişikliklerinde bu fonksiyonlar tekrar tekrar çalıştırılmamış olmaktadır. `InitFcn` altında tanımlanmış bu değişken ve fonksiyonlar aşağıda belirtilmiştir.

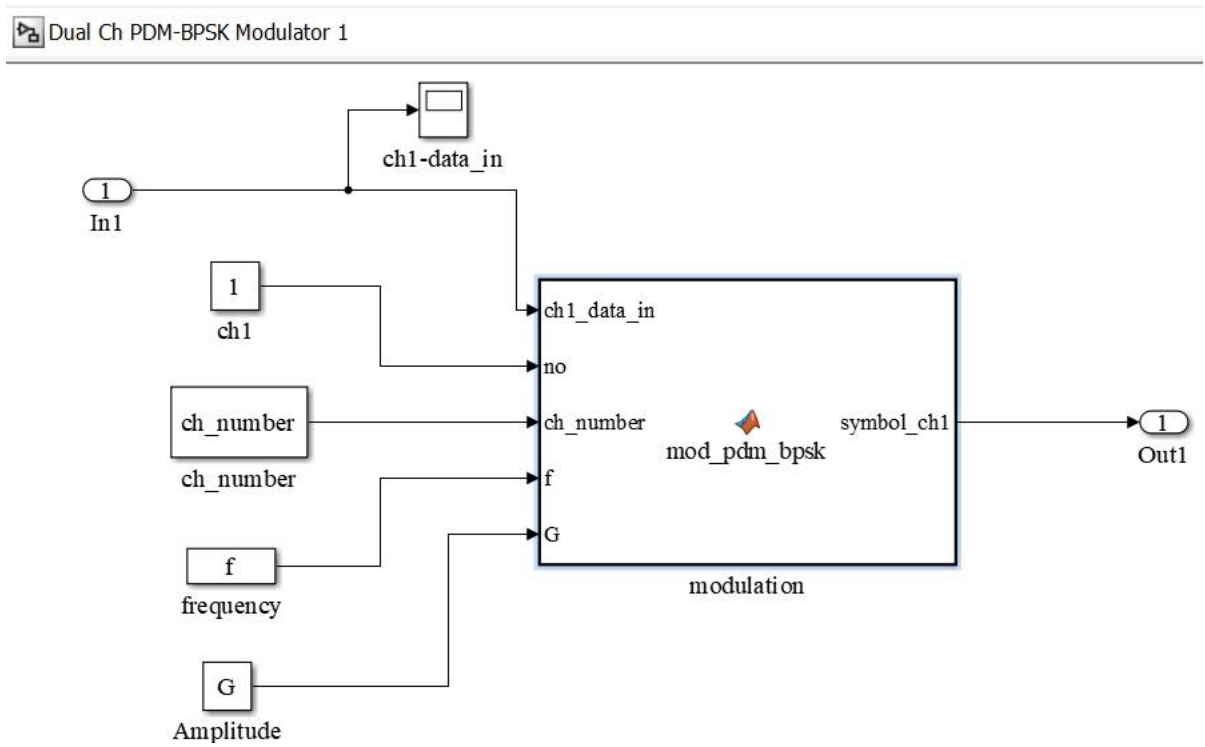
- **ch_number, A, f** değişkenleriyle sırasıyla oluşturulacak kanal sayısı, sinyal genliği ve sinyal frekans değerleri model ortamına aktarılır. Çift kanal için ch_number=2 olmalıdır.
- **modulation_type** = 'BPSK' veya 'QPSK' modülasyon türüne göre fonksiyonların çalışması sağlanır. PDM-BPSK için 'modulation_type=BPSK' olmalıdır.
- **avgPower=mean(abs(sig_mat).^2)**
Sembol sinyallerinin ortalama gücünü hesaplamaktadır. Ortalama güç girilen genlik değeri ve kullanılan PDM tekniğine göre değişmektedir. avgPower değişkeniyle model ortamına aktarılır. Bu parametre AWGN kanal bloğunda giriş sinyal gücünü göstermektedir.
- **function comb=comb_mat(ch_number, modulation_type)**
Bu fonksiyon kanal sayısına ve modülasyon türüne göre oluşacak giriş durumu kombinasyonlarını üretir ve comb değişkeni ile bu kombinasyon matrisini model ortamına aktarır.
- **function reff=ref_point(comb, A, f, ch_number, modulation_type)**
Giriş durumu kombinasyonları, genlik, frekans, kanal sayısı ve modülasyon türüne göre oluşacak sembol sinyallerini tek satırda çıkış olarak verir. reff değişkeni ile model ortamına aktarılan bu değer kümeleşme diyagramında referans noktaları olarak kullanılmaktadır.
- **function sig_mat=calculate_sig_mat(comb, A, f, ch_number, modulation_type)**
reff değişkeni ile aynı değerleri tek bir sütunda vermektedir (sig_mat=reff). sig_mat değişkeniyle bu değer model ortamına aktarılır.
- **function [tol_centers, tol_radius]=cal_tolere(ch_number, sig_mat, modulation_type)**
Kanal sayısı, modülasyon türü ve sembol sinyallerinin birbirine göre konumuna bakarak tolerans aralığı için daire merkezi ve en kapsayıcı daire yarıçaplarını hesaplar. tol_centers değişkeni ile daire merkezleri olan sembol noktalarını ve tol_radius değişkeni ile en kapsayıcı yarıçap değerlerini model ortamına aktarır.

Kullanılan bloklar hakkında açıklamalar aşağıdaki gibidir.

Random Integer Generator: [0, 2] aralığında rastgele eşit olarak dağıtılmış tam sayılar oluşturur.

Çizelge 7.1'de gösterildiği gibi '0', '1' ve '-' giriş verileri sırasıyla '0', '1' ve '2' ile temsil edilmiştir.

Dual Ch PDM-BPSK Modulator: Kanal numarasına göre (1 ya da 2) gelen veriye karşılık çıkış sinyalini üretmektedir. Her bir modülatör bloğunun altında Şekil 7.7'de gösterilen alt sistem (subsystem) bulunmaktadır. Bu alt sistem tüm PDM-BPSK türevleri için aynıdır. Alt sistemde tanımlanmış “**mod_pdm_bpsk**” fonksiyonu kullanıcı verisini alarak kanal sayısı, kanal numarası, frekans, genlik değerine göre bu veriyi modüle eder ve modüleli sinyali çıkışa verir.



Şekil 7.7. Dual Ch PDM-BPSK Modulator 1 / mod_pdm_bpsk alt sistemi

Modülatörler altında tanımlanan fonksiyonlar ile Çizelge 7.1'de gösterildiği gibi çıkış sinyali üretmektedirler. Modülatörlerden çıkacak olan modüleli sinyaller aynı frekans değerine sahip olduğu için vektörel olarak toplanacak ve AWGN kanalın girişine toplam tek bir sinyal gelmiş olacaktır.

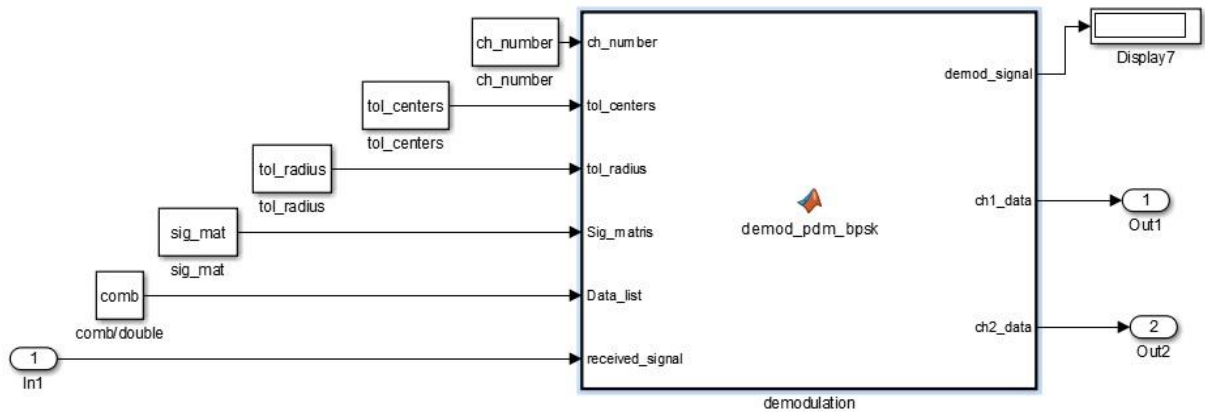
Çizelge 7.1. Çift Kanallı PDM-BPSK benzetimi çıkış sinyalleri

Giriş Verisi	Çıkış Sinyali		
	Generator	Ch1 Modulator	Ch2 Modulator
1	1	S ₁	S ₂
0	0	S ₃	S ₄
-	2	0	0

AWGN Channel: Giriş sinyaline beyaz Gauss gürültüsü ekler. Kanallardan yayılan sinyaller aynı frekansta olduğu için toplanmakta ve AWGN Channel bloğuyla gürültüye maruz bırakılmaktadır.

Dual Ch PDM-BPSK Demodulator: AWGN kanaldan gelen gürültülü sembol sinyalini alır. Tolerans aralıklarına bakarak hangi sembolün geldiğine karar verir ve buna göre iletilen 2 kanal verisini ayrıştırarak çıkışa verir. Şekil 7.8’de demodülatör alt sistemi gösterilmiştir. Bu alt sistem tüm PDM-BPSK türevleri için aynıdır. Alt Sistem’de tanımlanan “demod_pdm_bpsk” fonksiyonu giriş parametrelerine göre tolerans aralıklarını hesaplar ve AWGN kanaldan alınan gürültülü sinyali hesapladığı tolerans aralıklarına göre kıyaslar. Kıyaslama sonucu hangi sembolün alındığına karar verir ve bu karara göre iletilen 2 kanal verisini ayrıştırarak çıkışa verir. Bu fonksiyonun giriş değerlerinde InitFcn ile model ortamına aktarılmış değişkenler bulunduğu görülmektedir. Bu sayede iletilecek her bit için InitFcn altındaki fonksiyonlar çalıştırılmamış olur. InitFcn fonksiyonlarının başlangıçta bir kere çalışması yeterli olmaktadır.

Dual Ch PDM-BPSK Demodulator

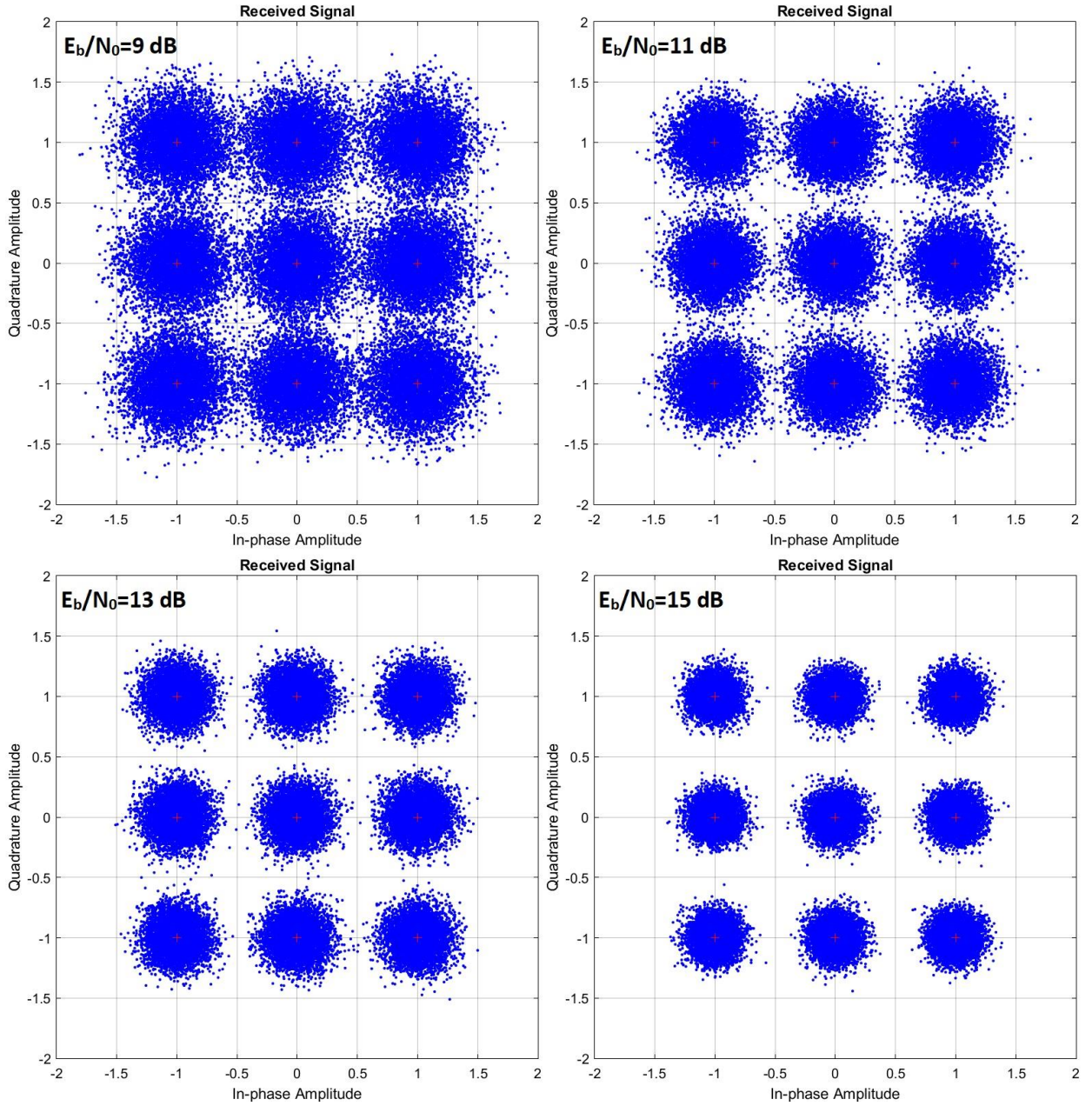


Şekil 7.8. Dual Ch PDM-BPSK demodulator / demod_pdm_bpsk alt sistemi

Error Rate Calculation: Giriş verisiyle çıkış verisini karşılaştırarak hatalı gelen bit oranını hesaplamaktadır.

Çift kanallı PDM-BPSK benzetimi aşağıda verilen parametrelerle gerçekleştirilmiş ve oluşan kümeleşme diyagramı Şekil 7.9'da verilmiştir.

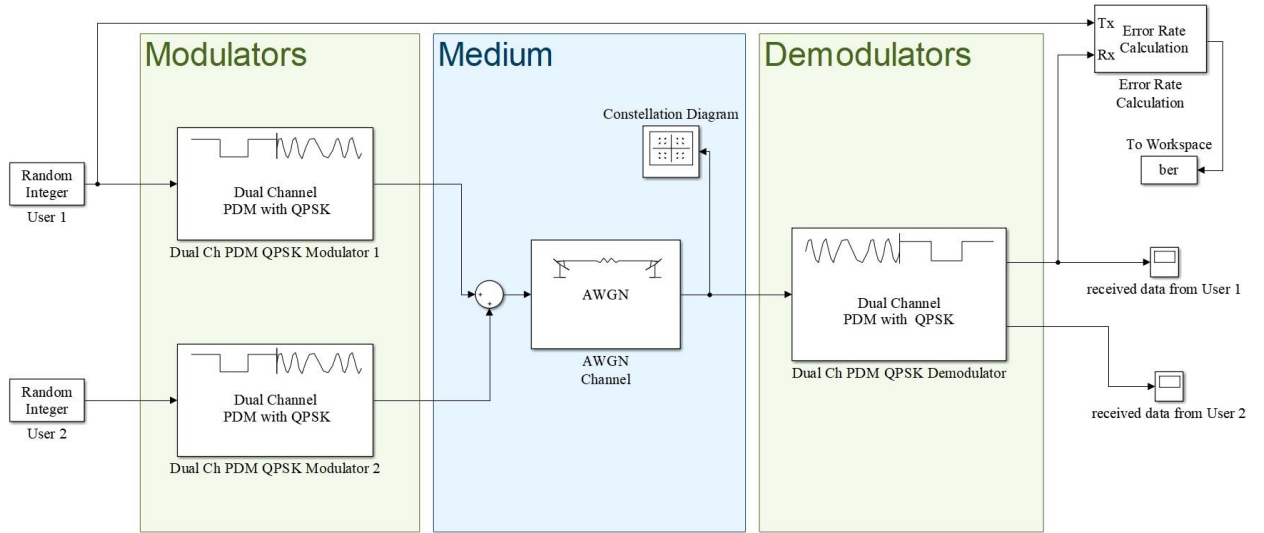
A : 1 V
f : 100 Hz
Sample time : 1 μ s
Symbol period : 1 μ s
Run Time : 1 s
Input signal power : 1.3333 W
Number of bits per symbol : 2
 E_b/N_o : 9 dB, 11 dB, 13 dB, 15 dB



Şekil 7.9. Farklı E_b/N_0 değerleri için çift kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı

Şekil 7.9'da görüldüğü gibi, $E_b/N_0 = 15$ dB için alınan sembol sinyalleri birbirinden ciddi şekilde ayrılmakta ve belirtilen tolerans sınırları içinde gruplanmaktadır. E_b/N_0 değeri düştükçe sembol sinyalleri birbirine yaklaşmakta ve aradaki belirgin açıklıklar gittikçe kaybolmaktadır.

7.2.2. Çift Kanallı PDM-QPSK Benzetimi

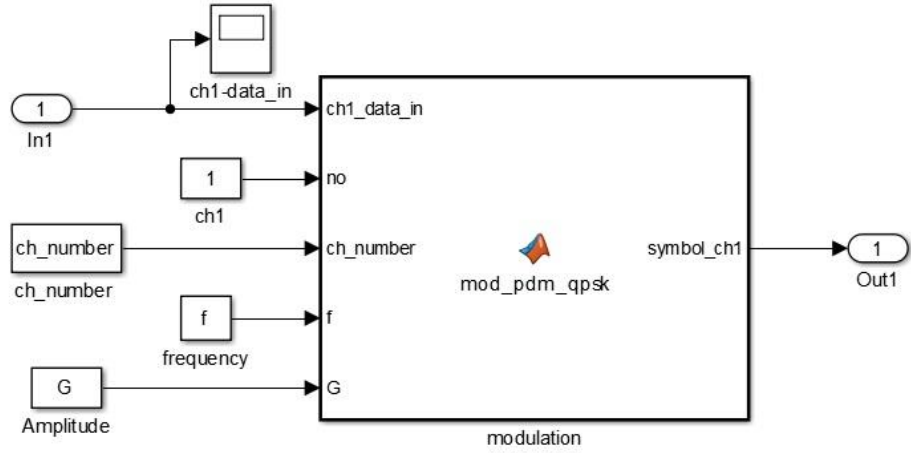


Şekil 7.10. Çift kanallı PDM-QPSK benzetimi

Şekil 7.10’da çift kanallı PDM-QPSK benzetim modeli gösterilmiştir. InitFcn altında tanımlanan fonksiyonlar tüm benzetim modelleri için aynıdır. Değişkenlerden G (genlik) ve f (frekans) opsiyonel olup ch_number=2 ve modulation_type= ‘QPSK’ şeklindedir. Modelde kullanılan bloklar hakkında açıklamalar aşağıdaki gibidir.

Random Integer Generator: [0, 4] aralığında rastgele eşit olarak dağıtılmış tam sayılar oluşturur. Çizelge 7.2’de giriş verilerini temsil eden generatör çıkış değerleri gösterilmiştir.

Dual Ch PDM-QPSK Modulator: Kanal numarasına göre (1-2) gelen veriye karşılık çıkış sinyalini üretmektedir. Her bir modülatör bloğunun altında Şekil 7.11’de gösterilen alt sistem (subsystem) bulunmaktadır. Alt sistemde tanımlanmış “mod_pdm_qpsk” fonksiyonu kullanıcı verisini alarak kanal sayısı, kanal numarası, frekans, genlik değerine göre bu veriyi modüle eder ve modüleli sinyali çıkışa verir.



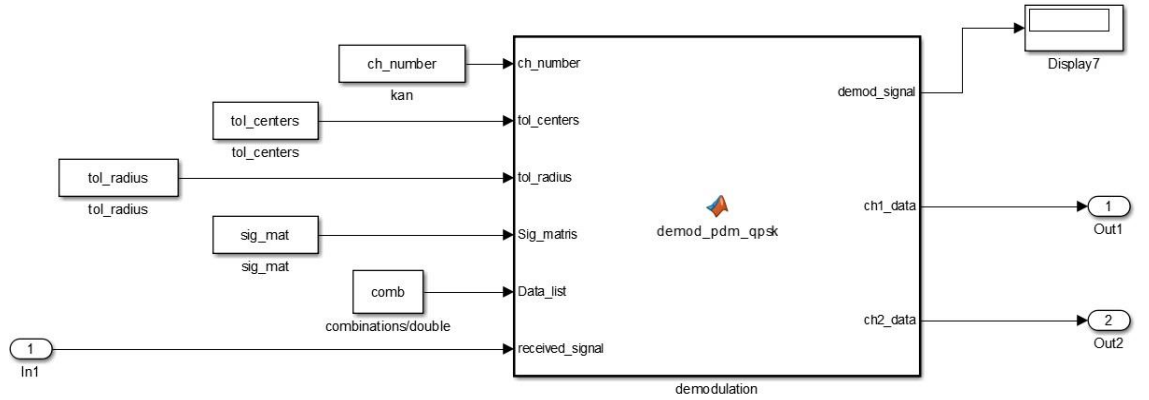
Şekil 7.11. Dual Ch PDM-QPSK Modulator 1 / mod_pdm_qpsk alt sistemi

Modülatörler altında tanımlanan fonksiyonlar ile Çizelge 7.2’de gösterildiği gibi çıkış sinyali üretilmektedir. Modülatörlerden çıkacak olan modüleli sinyaller aynı frekans değerine sahip olduğu için vektörel olarak toplanacak ve AWGN kanalın girişine toplam tek bir sinyal gelmiş olacaktır.

Çizelge 7.2. Çift Kanallı PDM-QPSK benzetimi çıkış sinyalleri

Giriş Verileri	Çıkış Sinyali		
	Generator	Ch1 Modulator	Ch2 Modulator
11	3	S ₁	S ₂
10	2	S ₃	S ₄
01	1	S ₅	S ₆
00	0	S ₇	S ₈
--	4	0	0

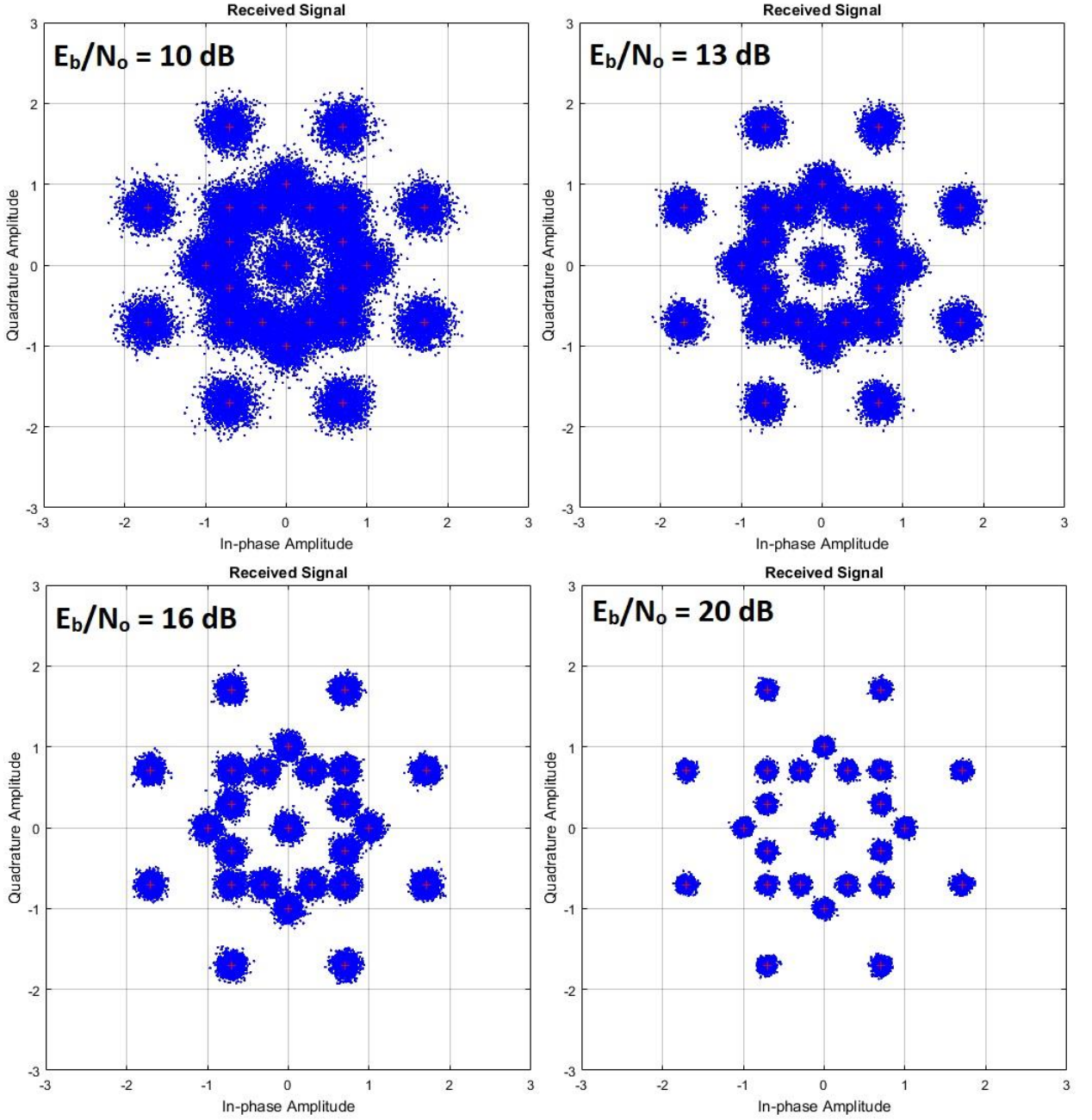
Dual Ch PDM-QPSK Demodulator: AWGN kanaldan gelen gürültülü sembol sinyalini alır. Tolerans aralıklarına bakarak hangi sembolün geldiğine karar verir ve buna göre iletilen 2 kanal verisini ayrıştırarak çıkışa verir. Bu demodulator bloğunun altında Şekil 7.12’de gösterildiği gibi bir demodülatör alt sistemi çalışmaktadır. Alt Sistem’de tanımlanan “demod_pdm_qpsk” fonksiyonu giriş parametrelerine göre tolerans aralıklarını hesaplar ve AWGN kanaldan alınan gürültülü sinyali hesapladığı tolerans aralıklarına göre kıyaslar. Kıyaslama sonucu hangi sembolün alındığına karar verir ve bu karara göre iletilen 2 kanal verisini ayrıştırarak çıkışa verir.



Şekil 7.12. Dual Ch PDM-QPSK Demodulator / demod_pdm_qpsk alt sistemi

Çift kanallı PDM-QPSK benzetimi aşağıda verilen parametrelerle gerçekleştirilmiş ve oluşan kümeleşme diyagramı Şekil 7.13'te verilmiştir.

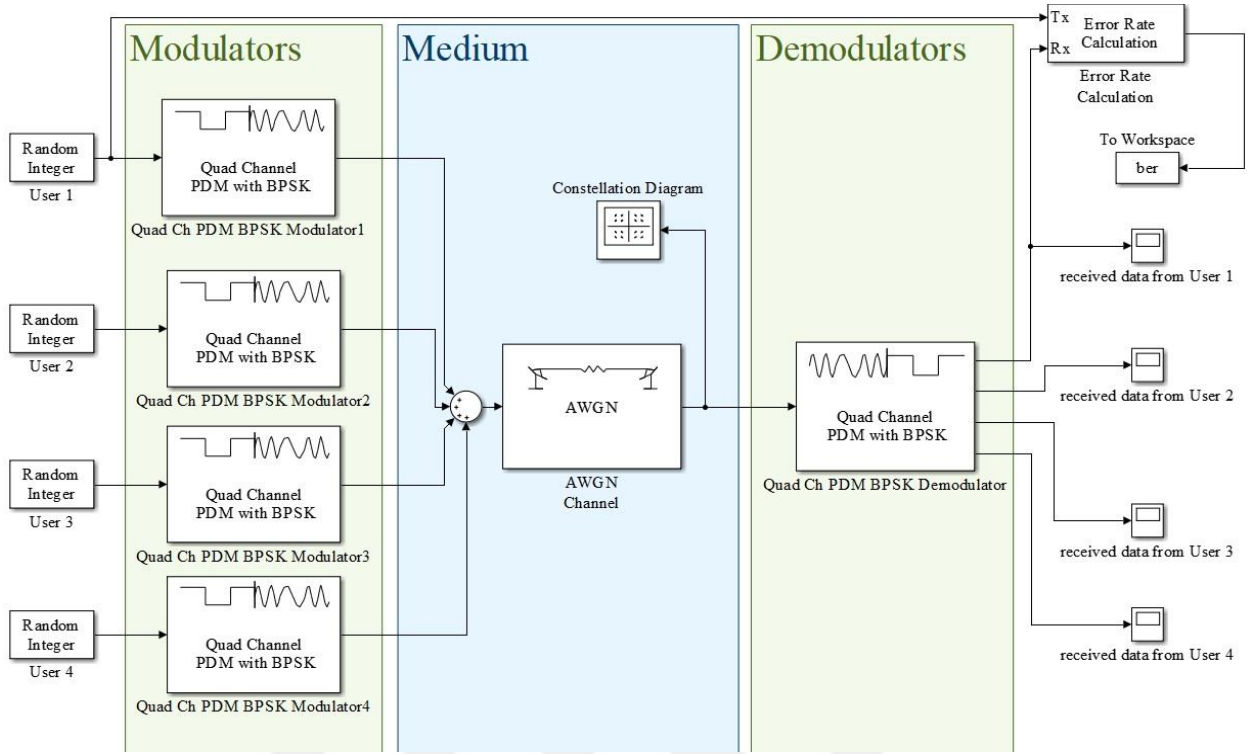
A : 1 V
 f : 100 Hz
 Sample time : 1 μ s
 Symbol period : 1 μ s
 Run Time : 1 s
 Input signal power : 1.6 W
 Number of bits per symbol : 4
 E_b/N_o : 10 dB, 13 dB, 16 dB, 20 dB



Şekil 7.13. Farklı E_b/N_0 değerleri için çift kanallı PDM-QPSK kümeleşme diyagramı

Şekil 7.13'te görüldüğü gibi, $E_b/N_0 = 20$ dB için alınan sembol sinyalleri birbirinden belirgin şekilde ayrılmakta ve tanımlanmış tolerans sınırları içinde gruplanmaktadır. E_b/N_0 değeri düştükçe sembol sinyalleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu durum önerilen yöntemin başarımının E_b/N_0 ile ilişkili olduğunu ve belli bir değer altında istenilen başarıımı sağlayamayacağını göstermektedir.

7.2.3. Dört Kanallı PDM-BPSK Benzetimi



Şekil 7.14. Dört kanallı PDM-BPSK benzetimi

Şekil 7.14'te dört kanallı PDM-BPSK benzetim modeli gösterilmiştir. InitFcn altında tanımlanan fonksiyonlar aynıdır. Değişkenlerden G (genlik) ve f (frekans) opsiyonel olup ch_number=4 ve modulation_type= 'BPSK' şeklindedir. Modelde kullanılan bloklar hakkında açıklamalar aşağıdaki gibidir.

Random Integer Generator: [0, 2] aralığında rastgele eşit olarak dağıtılmış tam sayılar oluşturur.

Çizelge 7.3'te gösterildiği gibi '0', '1' ve '-' giriş verileri sırasıyla '0', '1' ve '2' ile temsil edilmiştir.

Quad Ch PDM-BPSK Modulator: Kanal numarasına göre (1-4) gelen veriye karşılık çıkış sinyalini üretmektedir. Her bir modülatör bloğunun altında Şekil 7.7'de gösterilen alt sistem bulunmaktadır. Alt sistemde tanımlanmış "mod_pdm_bpsk" fonksiyonu kullanıcı verisini alarak kanal sayısı, kanal numarası, frekans, genlik değerine göre bu veriyi modüle eder ve modüleli sinyali çıkışa verir. Modülatörler altında, Çizelge 7.3'te gösterildiği gibi çıkış sinyali üretecek fonksiyonlar çalışmaktadır. Modülatörlerden çıkacak olan modüleli sinyaller aynı frekans

değerine sahip olduğu için vektörel olarak toplanacak ve AWGN kanalın girişine toplam tek bir sinyal gelmiş olacaktır.

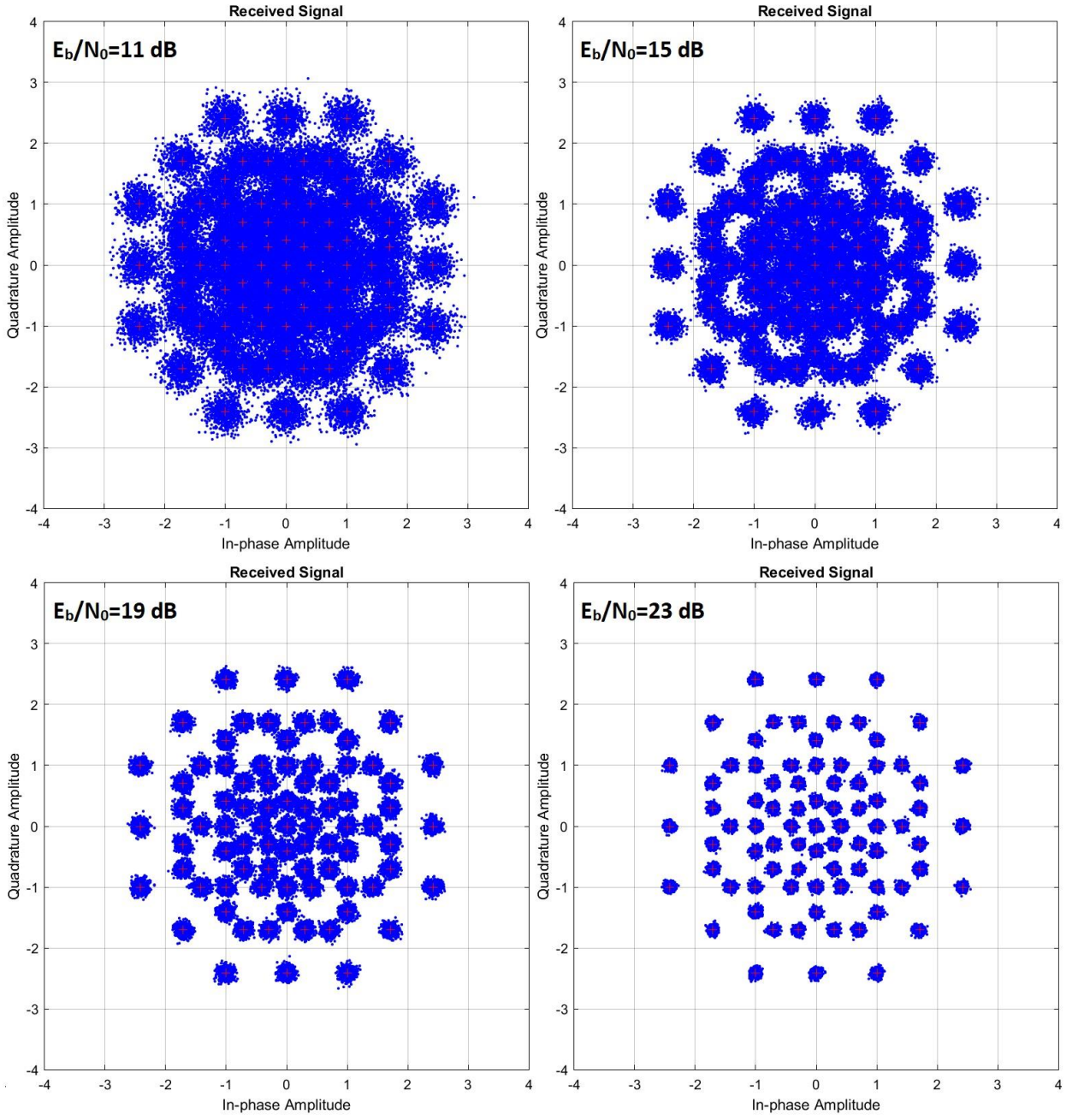
Çizelge 7.3. Dört kanallı PDM-BPSK benzetimi çıkış sinyalleri

Giriş Durumu	Çıkış Sinyalleri				
	Generator Çıkışı	Ch1 Modulator	Ch2 Modulator	Ch3 Modulator	Ch4 Modulator
1	1	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
0	0	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
-	2	0	0	0	0

Quad Ch PDM-BPSK Demodulator: AWGN kanaldan gelen gürültülü sembol sinyalini alır. Tolerans aralıklarına bakarak hangi sembolün geldiğine karar verir ve buna göre iletilen 4 kanal verisini ayrıştırarak çıkışa verir. Demodulator bloğunun altında Şekil 7.8’de gösterilen demodülör alt sistemi çalışmaktadır. Alt Sistem’de tanımlanan “demod_pdm_bpsk” fonksiyonu giriş parametrelerine göre tolerans aralıklarını hesaplar ve AWGN kanaldan alınan gürültülü sinyali hesapladığı tolerans aralıklarına göre kıyaslar. Kıyaslama sonucu hangi sembolün alındığına karar verir ve bu karara göre iletilen 4 kanal verisini ayrıştırarak çıkışa verir.

Dört kanallı PDM-BPSK benzetimi aşağıda verilen parametrelerle gerçekleştirilmiş ve oluşan kümeleşme diyagramı Şekil 7.15’te verilmiştir.

- A : 1 V
- f : 100 Hz
- Sample time : 1µs
- Symbol period : 1µs
- Run Time : 1 s
- Input signal power : 2.6667 W
- Number of bits per symbol : 4
- E_b/N_o : 11 dB, 15 dB, 19 dB, 23 dB

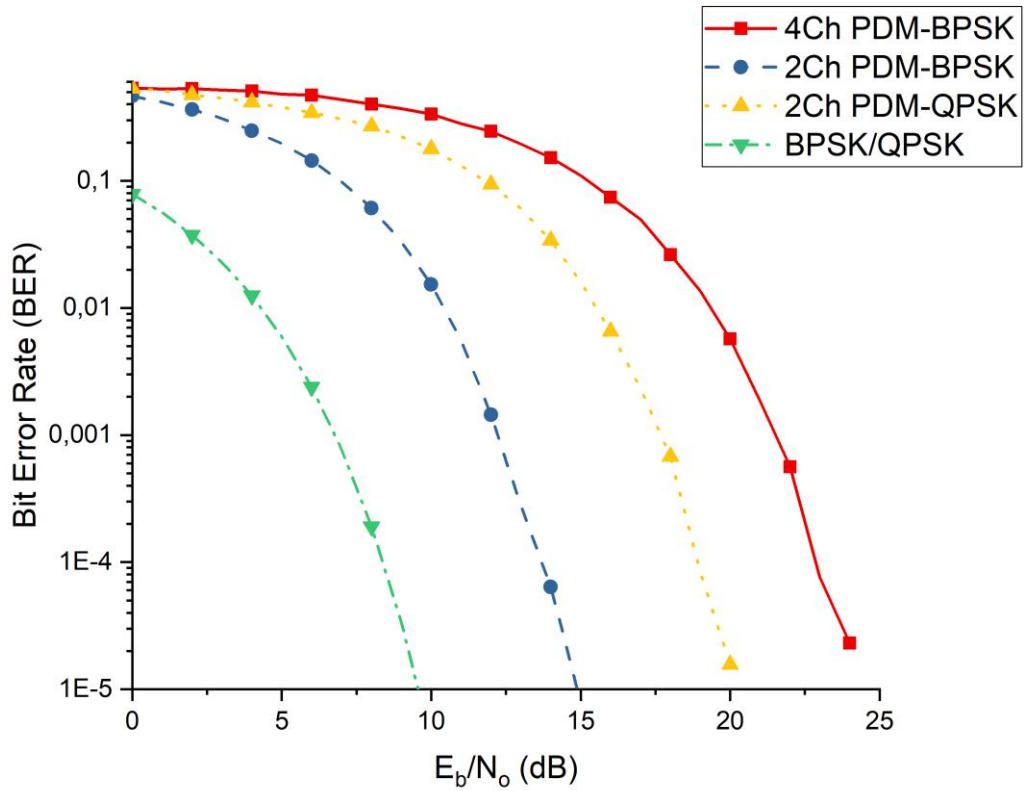


Şekil 7.15. Farklı E_b/N_0 değerleri için dört kanallı PDM-BPSK kümeleşme diyagramı

Şekil 7.15’da görüldüğü gibi, $E_b/N_0 \geq 23$ dB için alınan sembol sinyalleri birbirinden ciddi şekilde ayrılır ve belirtilen tolerans sınırları içinde gruplanır. E_b/N_0 değeri düştükçe sembol sinyalleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu durumda girişim olacağı için belli bir değerin altında istenilen başarımları sağlayamayacağını göstermektedir.

7.3. Benzetim Sonuçları ve Analizi

Benzetimlerde belirtilen parametre değerleriyle farklı E_b/N_0 değerlerine karşılık oluşan BER değerlerini hesaplamak için MATLAB'ın Bit Error Rate Analysis Tool (BERTool) aracı kullanılmıştır. PDM yapıları için oluşan BER eğrileri Şekil 7.16'da gösterilmiştir.



Şekil 7.16. BPSK/QPSK ile PDM yapılarının BER performansı karşılaştırması

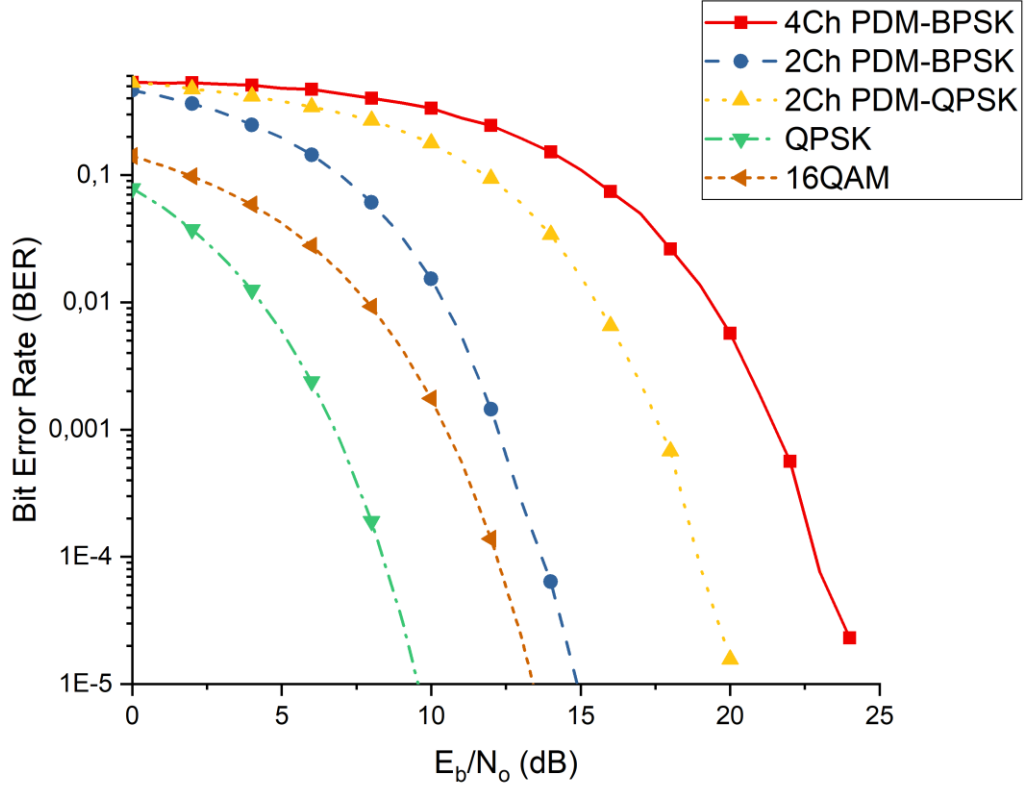
PDM yapısında BPSK ve QPSK modülasyonları kullanılmıştır. Bu nedenle PDM-BPSK ve PDM-QPSK örnek yapıları BPSK ve QPSK modülasyonlarının BER (Bit Error Rate – Bit Hata Oranı) eğrileriyle kıyaslanmıştır. BPSK ile QPSK modülasyonlarının BER eğrileri aynıdır. Şekil 7.16'da görülebilen $BER=10^{-5}$ değeri için gerekli E_b/N_0 (SNR - Signal Noise Rate) değerleri Çizelge 7.4'te verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere kanal sayımız arttıkça gerekli SNR artmaktadır. Yine PDM'de daha yüksek seviyeli modülasyon kullanıldığında da gerekli SNR değerinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kanal sayısı artınca ya da modülasyon seviyesi yükseltildince oluşan sembol sinyallerinin birbirine yaklaşması ve tolerans paylarının düşmesidir.

Çizelge 7.4. BER= 10^{-5} için gerekli SNR

Modülasyon ve PDM	BER	SNR (dB)	Kanal Sayısı
BPSK/QPSK	10^{-5}	9,5	1
2 Ch PDM-BPSK	10^{-5}	15	2
2 Ch PDM-QPSK	10^{-5}	20	2
4 Ch PDM-BPSK	10^{-5}	24	4

Genel olarak PDM yapılmca bir bit iletmek için gereken sinyal gücü artacaktır fakat buna karşılık birden fazla iletişim kanalı elde edilmiş olacaktır. Diğer bir ifadeyle zaman ya da frekans değerlerini değiştirmeksizin sadece SNR (E_b/N_o) değerini arttırarak BPSK veya QPSK modülasyonu kullanan 2 ile 4 bağımsız iletişim kanalları elde edilebilmektedir.

Öte yandan bit/sembol (bit of symbol) oranlarına göre bir karşılaştırma yapmak istenirse; 2 kanal PDM-BPSK'da semboller 2 bitlik veri olduğu için QPSK ile; 2 kanal PDM-QPSK ve 4 kanal PDM-BPSK'da semboller 4 bitlik veri olduğu için 16QAM modülasyonu karşılaştırılabilir. Buna göre oluşacak BER eğrisi Şekil 7.17'deki gibi olmaktadır.



Şekil 7.17. QPSK, 16QAM ile PDM yapılarının BER performansı karşılaştırması

Çizelge 7.5’te belirtildiği üzere QPSK 4 sembol sinyali işlerken 2 kanal PDM-BPSK 9 adet sembol sinyali işlemekte, 16QAM 16 sembol sinyali işlerken 2 kanal PDM-QPSK 25 adet ve 4 kanal PDM-BPSK 81 adet sembol sinyali işlemektedir. Bu nedenle, Şekil 7.17’deki grafikten görülebileceği gibi QPSK ve 16QAM eğrileri SNR olarak PDM yapılarından daha iyi bir eğriye sahiptir.

Çizelge 7.5. Bit/sembol oranları ve Toplam Sembol Adetleri

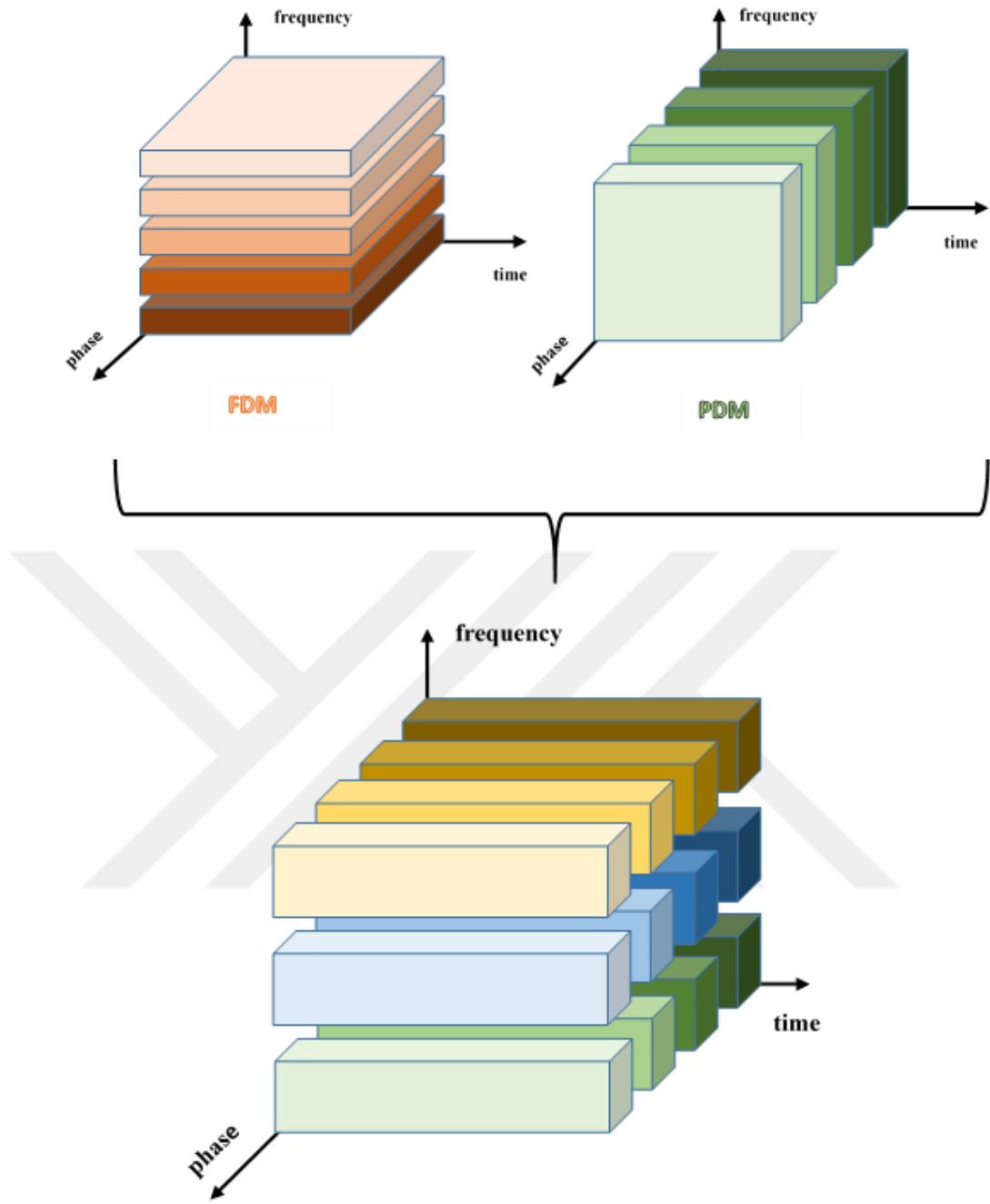
Modülasyon ve PDM	Bit/Sembol Oranı	N_s (Sembol Adedi)	SNR dB (BER= 10^{-5} için)	Kanal Sayısı
QPSK	2	4	9,5	1
2 Ch PDM-BPSK	2	9	15	2
16QAM	4	16	13,5	1
2 Ch PDM-QPSK	4	25	20	2
4 Ch PDM-BPSK	4	81	24	4

PDM ile çoğullama yapıldığında iletilen bit sayısına göre gerekli SNR değeri de artmaktadır. Bu artan sembol sayısının tolerans paylarını azaltmasının bir sonucudur. PDM yapılarının ana hedefi ve kazancı elde edilen çoklu kanallardır. PDM, frekans ve zamandan bağımsız bir şekilde çoğullama yaparak faz kanalları elde etmeyi sağlamaktadır.

7.4. PDM'in Çoklu Kanal Yapılarına Uygulanabilirliği

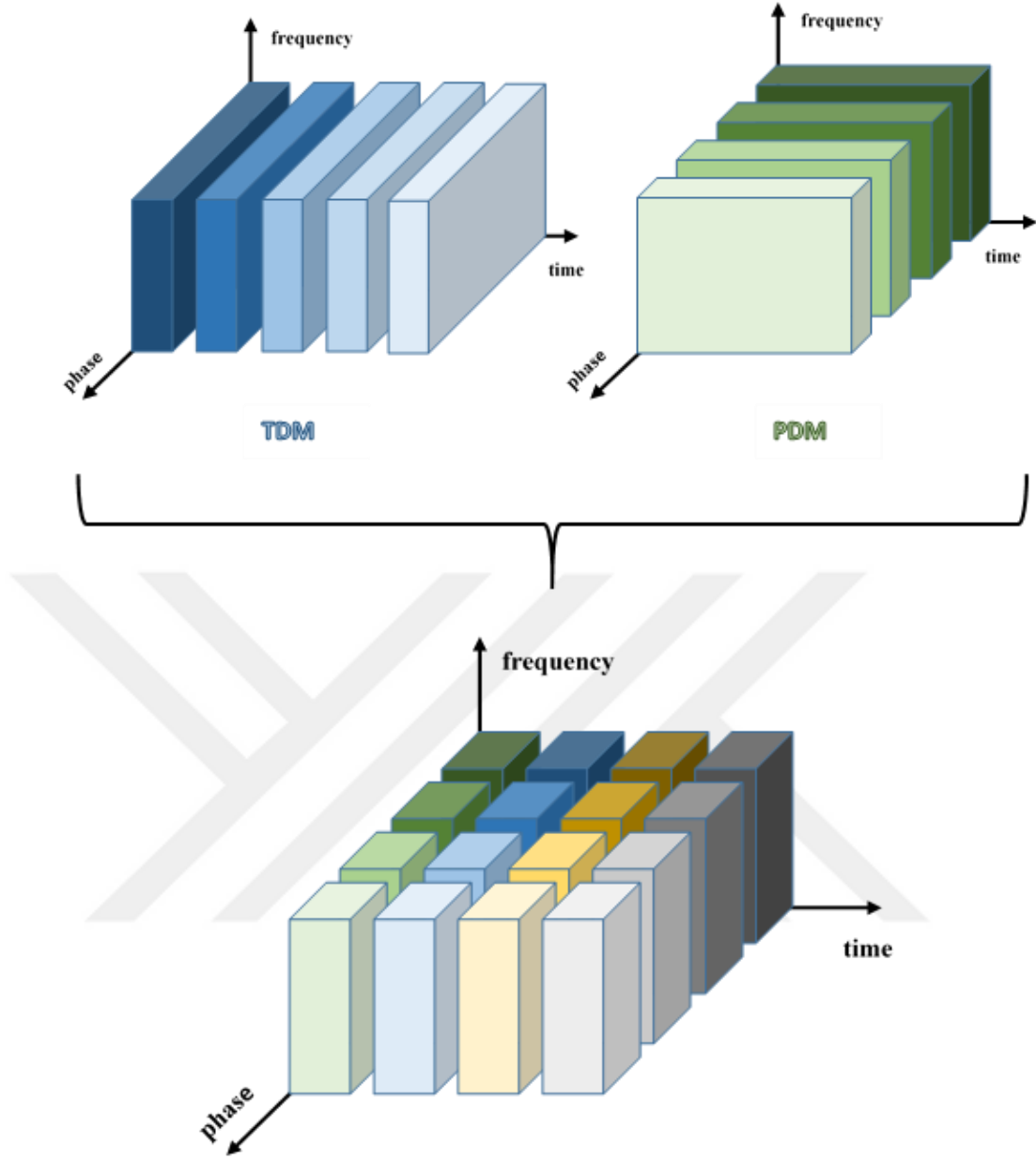
Yapılan benzetim çalışmaları ve analizler doğrultusunda PDM tekniği kullanılarak çoğullama yapılabileceği gösterilmiştir. PDM tekniği tek başına kullanılabileceği gibi FDM ve TDM teknikleriyle beraber kullanılabilmesi de mümkündür.





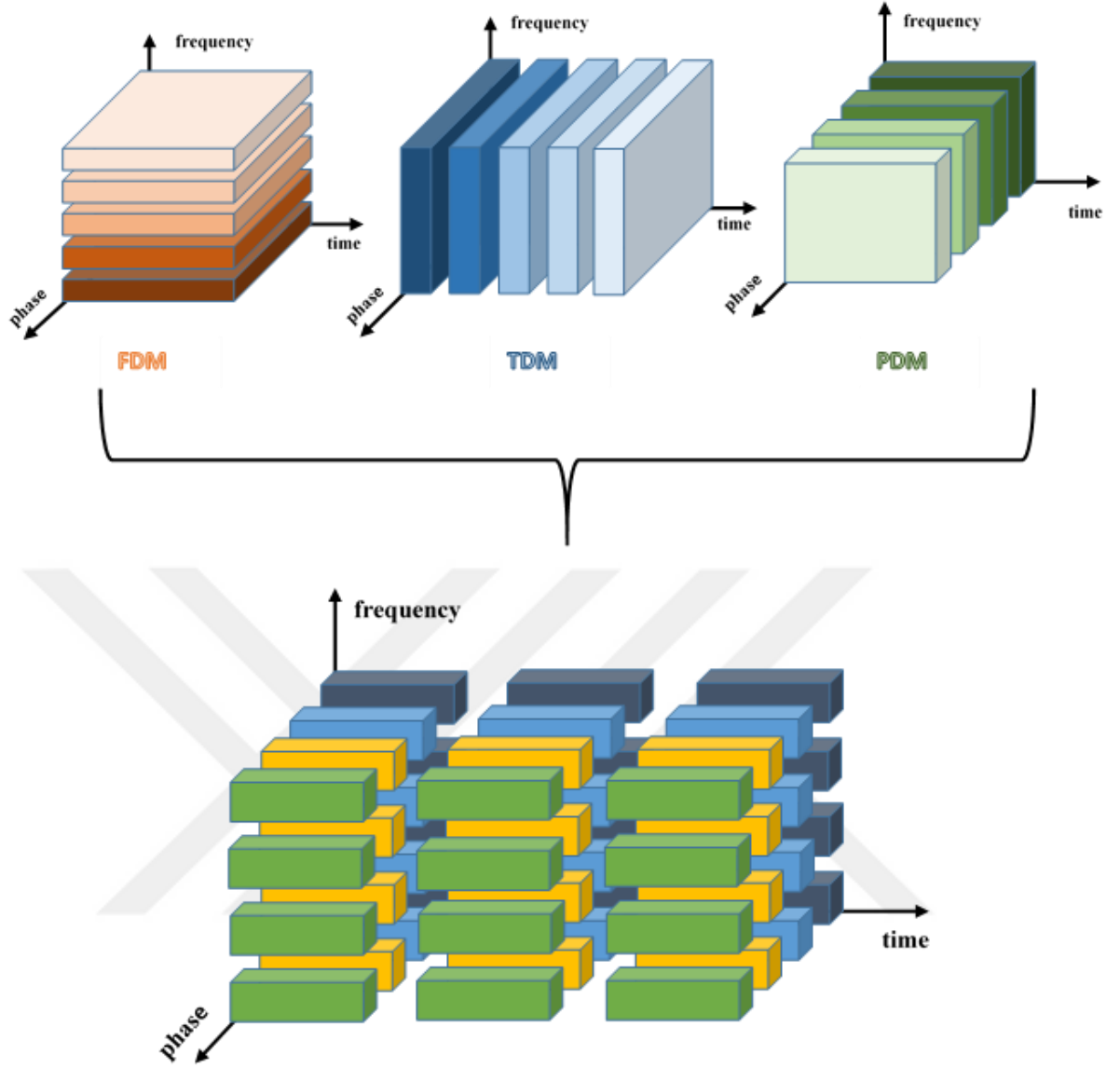
Şekil 7.18. FDM-PDM bilikteliği

Şekil 7.18’de PDM-FDM tekniklerinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan iletişim kanalları yapısı görülmektedir. PDM sinyalin fazını bölerken bundan bağımsız olarak FDM sinyalin frekansında bölme işlemi yapmaktadır. Bu yapı PDM ile elde edilen iletişim kanalları yetersiz kaldığında FDM ile kanal sayısı artırılabilir şeklinde yorumlanabilir ya da FDM ile elde edilmiş frekans kanallarında PDM kullanılarak bağımsız iletişim kanalı sayısı artırılabilir anlamına gelmektedir. PDM-FDM tekniklerinin beraber kullanıldığı bu yapıda zamanda bölme yapılmadığı için TDM gecikmeleri olmayacaktır.



Şekil 7.19. TDM-PDM birlikteliği

Şekil 7.19'da PDM-TDM tekniklerinin birlikte kullanılmasıyla oluşan iletişim kanalları gösterilmektedir. PDM sinyalin fazını bölerek çoğullama yaparken TDM bu kanalları farklı zaman dilimlerinde farklı kullanıcılara sunarak zamanda bölme yapmaktadır. TDM ve PDM'in beraber kullanılması sinyalin frekans bandının bölünmesinin istenmediği durumlar için uygun olabilir. PDM-TDM tekniklerinin beraber kullanıldığı bu yapıda TDM'den kaynaklı gecikmeler yaşanması kaçınılmazdır. Bununla birlikte iletişim için ayrılmış tüm frekans bandı kullanılır.



Şekil 7.20. FDM-TDM-PDM birlikteliği

Şekil 7.20’de PDM-FDM-TDM tekniklerinin birlikte kullanılmasıyla oluşan iletişim kanalları gösterilmektedir. Burada faz, frekans ve zaman eksenlerinde bölme işlemi yapılmaktadır. KAA’larda frekans ve zaman eksenlerinde bölme işlemi yapan FDM-TDM çoğullama tekniklerinin yanında 3. eksen olarak fazda bölme yapmaya olanak tanıyan PDM tekniği ile elde edilecek bağımsız iletişim kanalları sayısı 4 katına kadar artırılmaktadır.

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Sürekli gelişen teknolojik imkânlar, artan kullanıcı sayısı ve çeşitliliğiyle beraber iletişim kaynaklarının sınırlı olması, mevcut iletişim kaynaklarının daha fazla kullanıcıya nasıl hizmet sunabilirliği araştırmacıların dikkatini bu yöne vermesine sebep olmaktadır. Günümüzde oldukça geniş bir alanda uygulama alanı bulan KAA'lar da sürekli gelişmektedir ve değişik uygulama alanlarında da kullanılabilirliği için üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. KAA'larda gerçek zamanlı iletişim bu araştırma konularından biridir. Bu tez çalışmasında KAA'larda gerçek zamanlı iletişimin gerekleri ve bu gerekleri yerine getirecek teknikler incelenmiştir. Gerçek zamanlı iletişim için en uygun seçeneğin statik kanal atama yapılması olduğu belirlenmiş ve bu statik kanal atamasına büyük katkı sağlayacak yeni bir çoğullama tekniği önerilmiştir. PDM adı verilen bu teknik ile fazladan iletişim kanalları oluşturularak statik kanal ataması yapılmasına destek sağlanmaktadır.

Bu çalışmada yapılan tüm matematiksel hesaplamalar, faz-kanal kümeleşme diyagramlarının hesaplanması ve alıcı tolerans aralıklarının belirlenmesi işlemleri MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları ise Simulink programı kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada, PDM tekniği kullanılarak aynı frekans değerinde çoğullama yapılabileceği gösterilmiştir. Ancak PDM'in modülasyon türünün belli olması sınırlı bir alanda çoğullama yapılabileceği anlamına gelmektedir. PDM için kullanılan modülasyon türü BPSK ya da QPSK olmak durumundadır. KAA'larda kullanılan modülasyon türleri genel olarak BPSK, QPSK, MSK, FSK, ASK, OQPSK ve bunlar gibi düşük seviyeli modülasyon türleridir. Bu nedenle PDM yapımız KAA'lar için uygun bir teknik olmaktadır.

Kablosuz ağlarda belli bir frekans bandında çok kanallı bir iletişim sağlamak için FDM ile bandı bölmek ya da TDM ile zaman dilimlerine bölme işlemi yapmadan biraz daha fazla enerji kullanarak PDM ile fazda bölme yapılabileceği gösterilmiştir. Fazda yapılan bu bölme işlemi ne frekans değerine ne de zaman dilimlerine olumsuz bir etkisi olmamakta ve tamamen bunlardan bağımsız yapılan bir çoğullama olduğu için ilave bir özellik olmaktadır. PDM ile elde edilen bu faz kanalları ayrı ayrı kullanıcılara tahsis edilebilir. Bu tez çalışmasında ortaya konan PDM yöntemi ile önerilen KAA yapılarında mevcut kanal sayısı sadece fazda yapılan bu çoğullama ile 2 ve 4 kat arttırılabilir.

PDM'in zamandan bağımsız sunduğu bu çoklu kanal yapısı veri boyutu düşük uygulamalar için uygundur. Ayrıca PDM'in sunduğu çoklu kanal yapısı paralel iletişime de olanak sağlamaktadır. Gecikmenin önemli olduğu gerçek zamanlı iletişim gibi uygulamalar için statik kanal ataması yapılmasına büyük katkı sağlayacak iyi bir seçenek olabileceği düşünülmektedir.

PDM ile beraber FDM ya da TDM tekniklerinin kullanıldığı hibrit yapıların oluşturulması mümkündür. FDM ile oluşturulmuş frekans kanallarında bir de PDM kullanılması iletişim kanal sayısını dört katına kadar çıkarabilecektir. FDM ve PDM ile oluşturulmuş iletişim kanalları sayısı burada TDM tekniğinin kullanılmasıyla çok daha arttırılabilir. Diğer bir deyişle FDM ve TDM beraber kullanılarak oluşturulmuş iletişim kanalları sayısı ilaveten sadece PDM kullanılmasıyla 4 katına kadar çıkarılabilmektedir.

Gelecek çalışmalarda aşağıdaki konular üzerinden çalışmanın ilerletilmesi düşünülmektedir;

- PDM modülatör ve demodülatör devrelerinin tasarlanarak gerçekleştirilmesi.
- Gerçekleştirilen modülatör ve demodülatör devrelerinin başarımı, kapsama alanı, enerji tüketimi ve BER analizinin yapılması.
- Asenkron PDM tekniklerinin geliştirilmesi, başarımlar ve karşılaştırma analizleri.
- KAA'lar için PDM tabanlı çalışan bir OEK protokolü geliştirilmesi.
- Özellikle kümelenme tabanlı çalışan KAA'lar için PDM tekniğinin uygulanabilirliği ve başarımlar testleri

KAYNAKLAR

- [1] Bondyopadhyay PK, 1998. Sir J C Bose's diode detector received Marconi's first transatlantic wireless signal of december 1901 (the "Italian navy coherer" scandal revisited). Proc IEEE, 86(1):259–285.
- [2] Terzi Ç, 2012. Tree-Based Channel Assignment Schemes for Multi-Channel Wireless Sensor Networks. Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] Kaya A, 2012. Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Öncelik Tabanlı Yeni Bir Yönlendirme Protokolü Tasarımı ve Başarım Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [4] Anonim, 2003. 10 Emerging Technologies That Will Change the World. MIT Technol. Rev. <http://www2.technologyreview.com/news/401775/10-emerging-technologies-that-will-change-the/2/> (Erişim Tarihi:02.02.2018).
- [5] Tümer AE, 2011. Bina İçi Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Enerji Verimli Yönlendirme Protokollerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [6] Zhang J, Li W, Han N, Kan J, 2008. Forest fire detection system based on a ZigBee wireless sensor network. Front For China, 3(3):369–374.
- [7] Liyang Yu, Neng Wang, Xiaoqiao Meng, 2005. Real-time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks. In: Proceedings. 2005 Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. 2005. IEEE, Wuhan, s:1214–1217.
- [8] ALERT Users Group. www.alertsystems.org/ (Erişim Tarihi:10.01.2018).
- [9] Çıbuk M, Balık HH, 2012. Implementation of WEB based biotelemetry applications on Wimax networks. Adv Eng Softw, 49(1):14–20.
- [10] Çıbuk M, Balık HH, 2011. A novel solution approach and protocol design for bio-telemetry applications. Adv Eng Softw, 42(7):513–528.

- [11] Welsh M, Malan D, Duncan B, Fulford-Jones T, 2004. Wireless sensor networks for emergency medical care. In: GE Glob. Res. Conf. Boston, s:1–21.
- [12] Çıbuk M, 2009. Wimax/Ieee 802.16 Ağları Üzerinden Web Tabanlı Bio-Telemetri Uygulamaları İçin Protokol Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [13] Malan D, Fulford-Jones T, Welsh M, Moulton S, 2004. CodeBlue : An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care. In: Proc. WAMES 2004. Boston, s:12–14.
- [14] Sung M, Pentland A, 2004. LiveNet: Health and Lifestyle Networking Through Distributed Mobile Devices. In: Proc. WAMES 2004. Boston, s:15–17.
- [15] Patel S, Park H, Bonato P, Chan L, Rodgers M, 2012. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. J Neuroeng Rehabil, 9(1):21.
- [16] Huiyong W, Jingyang W, Min H, 2013. Building a Smart Home System with WSN and Service Robot. In: 2013 Fifth Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. IEEE, Hong Kong, s:353–356.
- [17] Hussain S, Schaffner S, Moseychuck D, 2009. Applications of Wireless Sensor Networks and RFID in a Smart Home Environment. In: 2009 Seventh Annu. Commun. Networks Serv. Res. Conf. IEEE, New Brunswick, s:153–157.
- [18] Shaikh PH, Nor NBM, Nallagownden P, Elamvazuthi I, Ibrahim T, 2014. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. Renew Sustain Energy Rev, 34:409–429.
- [19] Clouqueur T, Phipatanasuphorn V, Ramanathan P, Saluja KK, 2002. Sensor Deployment Strategy for Target Detection. In: Proc. 1st ACM Int. Work. Wirel. Sens. networks Appl. - WSNA '02. ACM Press, New York, s:42–48.
- [20] Lee SH, Lee S, Song H, Lee HS, 2009. Wireless Sensor Network Design for Tactical Military Applications : Remote Large-scale Environments. In: MILCOM 2009 - 2009 IEEE Mil. Commun. Conf. IEEE, Boston, Massachusetts, s:1–7.

- [21] Yoo S, Kim J, Kim T, Ahn S, Sung J, Kim D, 2007. A2S: Automated Agriculture System based on WSN. In: 2007 IEEE Int. Symp. Consum. Electron. IEEE, s:1–5.
- [22] Hof H-J, 2007. Applications of Sensor Networks. 1–20, In: Algorithms Sens. Ad Hoc Networks (Wagner D, Wattenhofer R). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [23] Prabhu SRB, Balakumar N, Antony A, 2017. Wireless sensor network based smart environment application. IJIRT, 3(8):1–10.
- [24] Jain VR, Bagree R, Kumar A, Ranjan P, 2008. wildCENSE: GPS based Animal Tracking System. In: 2008 Int. Conf. Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process. IEEE, Sydney, s:617–622.
- [25] Park P, Fischione C, Bonivento A, Johansson KH, Sangiovanni-Vincent A, 2011. Breath: an adaptive protocol for industrial control applications using wireless sensor networks. IEEE Trans Mob Comput, 10(6):821–838.
- [26] Low KS, Win WNN, Er MJ, 2005. Wireless Sensor Networks for Industrial Environments. In: Int. Conf. Comput. Intell. Model. Control Autom. Int. Conf. Intell. Agents, Web Technol. Internet Commer. IEEE, Vienna, Austria, s:271–276.
- [27] Leveque A, Pecheux F, Louerat M-M, Aboushady H, Vasilevski M, 2010. SystemC-AMS Models for Low-Power Heterogeneous Designs: Application to a WSN for the Detection of Seismic Perturbations. In: 23th Int. Conf. Archit. Comput. Syst. 2010. Hannover, Germany, s:1–6.
- [28] O’Flynn B, Martinez-Catala R, Harte S, O’Mathuna C, Cleary J, Slater C, Regan F, Diamond D, Murphy H, 2007. SmartCoast: A Wireless Sensor Network for Water Quality Monitoring. In: 32nd IEEE Conf. Local Comput. Networks (LCN 2007). IEEE, Dublin, Ireland, s:815–816.
- [29] Nasirudin MA, Za’bah UN, Sidek O, 2011. Fresh water real-time monitoring system based on Wireless Sensor Network and GSM. In: 2011 IEEE Conf. Open Syst. IEEE, Langkawi, Malaysia, s:354–357.
- [30] Anastasi G, Re G Lo, Ortolani M, 2009. WSNs for structural health monitoring of historical buildings. In: 2nd Conf. Hum. Syst. Interact. 2009. Catania, Italy, s:574–579.

- [31] Asudeh A, Záruba G V., Das SK, 2016. A General Model for MAC Protocol Selection in Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*, 36(1):189–202.
- [32] Wan Y, Wang Q, Zhang X, Xu J, Geng L, Li L, Wang R, 2007. A Hybrid TDM-FDM MAC Protocol for Wireless Sensor Network Using Timestamp Self-Adjusting Synchronization Mechanism. In: 2007 Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. IEEE, Shanghai, China, s:2705–2709.
- [33] Salajegheh M, Soroush H, Kalis A, 2007. HYMAC: Hybrid TDMA/FDMA Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks. In: 2007 IEEE 18th Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. IEEE, Athens, Greece, s:1–5.
- [34] Ceken C, 2008. An energy efficient and delay sensitive centralized MAC protocol for wireless sensor networks. *Comput Stand Interfaces*, 30(1–2):20–31.
- [35] Ye W, Heidemann J, Estrin D, 2004. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans Netw*, 12(3):493–506.
- [36] Lin P, Qiao C, Wang X, 2004. Medium Access Control with a Dynamic Duty Cycle for Sensor Networks. In: 2004 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. (IEEE Cat. No.04TH8733). IEEE, Atlanta, s:1534–1539.
- [37] Ergen SC, Varaiya P, 2006. PEDAMACS: power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks. *IEEE Trans Mob Comput*, 5(7):920–930.
- [38] Buettner M, Yee G V., Anderson E, Han R, 2006. X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol For Duty-Cycled Wireless Sensor Networks. In: Proc. 4th Int. Conf. Embed. networked Sens. Syst. - SenSys '06. ACM Press, New York, USA, s:1–11.
- [39] Zhuo S, Song Y-Q, Wang Z, Wang Z, 2012. Queue-MAC: A Queue-length Aware Hybrid CSMA/TDMA MAC Protocol for Providing Dynamic Adaptation to Traffic and Duty-cycle Variation in Wireless Sensor Networks. In: 9th IEEE Int. Work. Fact. Commun. Syst. 2012. IEEE, Lemgo, Germany, s:105–114.
- [40] Zhuo S, Wang Z, Song Y, Wang Z, Almeida L, 2013. iQueue-MAC: A Traffic Adaptive duty-cycled MAC Protocol With Dynamic Slot Allocation. In: 2013 IEEE Int. Conf. Sensing, Commun. Netw. IEEE, New Orleans, s:95–103.

- [41] Zhuo S, Wang Z, Song Y-Q, Wang Z, Almeida L, 2016. A traffic adaptive multi-channel MAC protocol with dynamic slot allocation for WSNs. *IEEE Trans Mob Comput*, 15(7):1600–1613.
- [42] Doudou M, Djenouri D, Barcelo-Ordinas JM, Badache N, 2016. Delay-efficient MAC Protocol with Traffic Differentiation and Run-time Parameter Adaptation for Energy-constrained Wireless Sensor Networks. *Wireless Networks*, 22(2):467–490.
- [43] Zheng T, Gidlund M, Akerberg J, 2016. WirArb: a new MAC protocol for time critical industrial wireless sensor network applications. *IEEE Sens J*, 16(7):2127–2139.
- [44] Alvi AN, Bouk SH, Ahmed SH, Yaqub MA, Sarkar M, Song H, 2016. BEST-MAC: Bitmap-assisted efficient and scalable TDMA-based WSN MAC protocol for smart cities. *IEEE Access*, 4:312–322.
- [45] Kiraz A, 2013. Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Hibrit Kayıp Telafi Mekanizmasına Dayanan Yeni Bir Taşıma Protokolü Tasarımı. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [46] Hammoudeh M, Newman R, 2015. Adaptive routing in wireless sensor networks: QoS optimisation for enhanced application performance. *Inf Fusion*, 22:3–15.
- [47] Tian He, Stankovic JA, Chenyang Lu, Abdelzaher T, 2003. SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks. In: 23rd Int. Conf. Distrib. Comput. Syst. 2003. Proceedings. IEEE, Rhode Island, USA, s:46–55.
- [48] Wu Y, Stankovic JA, He T, Lin S, 2008. Realistic and Efficient Multi-Channel Communications in Wireless Sensor Networks. In: 2008 Proc. IEEE INFOCOM - 27th Conf. Comput. Commun. IEEE, Phoenix, USA, s:1193–1201.
- [49] Uyanık Ö, 2013. Multi-channel TDMA Scheduling in Wireless Sensor Networks. Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [50] Ergen SC, Varaiya P, 2010. TDMA Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks. *Wireless Networks*, 16(4):985–997.

- [51] Zhou G, Huang C, Yan T, He T, Stankovic J a., Abdelzaher TF, 2006. MMSN: Multi-Frequency Media Access Control for Wireless Sensor Networks. In: Proc. IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE Int. Conf. Comput. Commun. IEEE, Barcelona, s:1–13.
- [52] Bilgin BE, Gungor VC, 2011. On the Performance of Multi-Channel Wireless Sensor Networks in Smart Grid Environments. In: 2011 Proc. 20th Int. Conf. Comput. Commun. Networks. IEEE, Maui, USA, s:1–6.
- [53] Gong A, Landsiedel O, Soldati P, Johansson M, 2012. Revisiting Multi-channel Communication to Mitigate Interference and Link Dynamics in Wireless Sensor Networks. In: 2012 IEEE 8th Int. Conf. Distrib. Comput. Sens. Syst. IEEE, Hangzhou, China, s:186–193.
- [54] Yu H, Feng X, Liang W, Zhang X, 2013. Reliable transmission scheduling for multi-channel wireless sensor networks with low-cost channel estimation. *IET Commun*, 7(1):71–81.
- [55] Trivedi N, Iyengar SS, Balakrishnan N, 2008. Efficient Multiplexing for Multichannel Data Dissemination with Delay Guarantees in Wireless Sensor Networks. In: 2008 Second Int. Conf. Sens. Technol. Appl. (sensorcomm 2008). IEEE, Cap Esterel, France, s:23–29.
- [56] Huang L, Setia S, Simon R, 2010. McTorrent: using multiple communication channels for efficient bulk data dissemination in wireless sensor networks. *J Syst Softw*, 83(1):108–120.
- [57] Incel OD, 2011. A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks. *Comput Networks*, 55(13):3081–3099.
- [58] IEEE, 2015. IEEE 802.15.4-2015:Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEE Stand. Assoc. .
- [59] Cheffena M, 2012. Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation. *EURASIP J Wirel Commun Netw*, 2012(1):297.
- [60] Trung N Le, 2014. A New Approach for Collecting Data in Wireless Sensor Network. Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

- [61] Akyildiz IF, Weilian Su, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E, 2002. A survey on sensor networks. *IEEE Commun Mag*, 40(8):102–114.
- [62] Rawat P, Singh KD, Chaouchi H, Bonnin JM, 2014. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *J Supercomput*, 68(1):1–48.
- [63] ETSI, 2017. EN 300 440 V2.1.1:Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 1 GHz to 40 GHz frequency range; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. *Eur. Telecommun. Stand. Inst.* .
- [64] FCC, 2005. FCC Part 15:Radio Frequency Devices. Federal Communications Commission.
- [65] ITU-T, 2015. G.9959 Series G: Transmission Systems And Media, Digital Systems And Networks. ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU.
- [66] ARIB, 2003. Second Generation Low Power Data Communication System / Wireless Lan System ARIB Standard ARIB Std-T66. Association of Radio Industries and Businesses.
- [67] ARIB, 2008. 150 MHz Band Animal Detection Report System Equipemnt For Specified Low-Power Radio Station STD-T99. Association of Radio Industries and Businesses.
- [68] IEEE, 2007. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society. IEEE Standards Association.
- [69] LightwaveRF, www.lightwaverf.com (Erişim Tarihi:03.11.2017).
- [70] Bagci İE, 2016. Novel Security Mechanisms for Wireless Sensor Networks. Doctoral Thesis, Lancaster University School of Computing and Communications, Lancashire.
- [71] Zigbee White Paper, 2011. ZigBee and Wireless Radio Frequency Coexistence. ZigBee Alliance.
- [72] Radmand P, Talevski A, Petersen S, Carlsen S, 2010. Comparison of Industrial WSN Standards. In: 4th IEEE Int. Conf. Digit. Ecosyst. Technol. IEEE, Dubai, s:632–637.
- [73] Lee J, Su Y, Shen C, 2007. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In: IECON 2007 - 33rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. IEEE, Taipei, Taiwan, s:46–51.

- [74] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, Culler D, 2007. RFC 4944 IPv6 over IEEE 802.15.4. IETF Internet Engineering Task Force.
- [75] Buratti C, Conti A, Dardari D, Verdone R, 2009. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*, 9(9):6869–6896.
- [76] Labeau F, Agarwal A, Agba B, 2015. Comparative study of Wireless Sensor Network standards for application in Electrical Substations. In: 2015 Int. Conf. Comput. Commun. Secur. IEEE, Pamplemousses, Mauritius, s:1–5.
- [77] Kabara J, Calle M, 2012. MAC protocols used by wireless sensor networks and a general method of performance evaluation. *Int J Distrib Sens Networks*, 8(1):1–11.
- [78] Fieldbus Found., www.fieldbus.org (Erişim Tarihi:15.03.2018).
- [79] PROFIBUS PROFINET Int., www.profibus.com (Erişim Tarihi:15.03.2018).
- [80] IEEE, 2012. IEEE 802.15.4g: Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks. IEEE Standards Association.
- [81] Harada H, Mizutani K, Fujiwara J, Mochizuki K, Obata K, Okumura R, 2017. IEEE 802.15.4g based Wi-SUN communication systems. *IEICE Trans Commun*, E100.B(7):1032–1043.
- [82] Z-Wave Alliance, 2014. Recommendation ZAD12837-1:Z-Wave Transceivers – Specification of Spectrum Related Components. Z-Wave Alliance Recommendation - ZAD12837-1.
- [83] Dynastream Innovations Inc., www.dynastream.com (Erişim Tarihi:01.02.2018).
- [84] Dynastream Innovations Inc., 2015. Multi-Channel Design Considerations. https://www.thisisant.com/developer/ant/advanced-features/#39_tab.
- [85] Dash7 Alliance, <http://www.dash7-alliance.org> (Erişim Tarihi:01.02.2018).

- [86] ISO International Organization for Standardization., www.iso.org/standard/57336.html (Erişim Tarihi:01.02.2018).
- [87] Tuset-Peiró P, Anglès-Vazquez A, López-Vicario J, Vilajosana-Guillén X, 2014. On the suitability of the 433 Mhz band for m2m low-power wireless communications: propagation aspects. *Trans Emerg Telecommun Technol*, 25(12):1154–1168.
- [88] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E, 2002. Wireless sensor networks: a survey. *Comput Networks*, 38(4):393–422.
- [89] Sohraby K, Minoli D, Znati T, 2007. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA.
- [90] Hsu HP, 2003. *Analog and Digital Communications (Second Edition)*. McGraw-Hill. New York.
- [91] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, Thidé B, Bianchini A, Romanato F, 2012. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *New J Phys*, 14(3):1–17.
- [92] Cheng L, Hong W, Hao Z-C, 2015. Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes. *Sci Rep*, 4(1):1–5.
- [93] Cagliero A, De Vita A, Gaffoglio R, Sacco B, 2016. A new approach to the link budget concept for an OAM communication link. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 15:568–571.
- [94] Morabito AF, Di Donato L, Isernia T, 2018. Orbital angular momentum antennas: understanding actual possibilities through the aperture antennas theory. *IEEE Antennas Propag Mag*, 60(2):59–67.
- [95] Tomasi W, Atakay M, 2002. *Elektronik İletişim Teknikleri*. MEB. Ankara.
- [96] Kurt T, 2013. *Uydu Haberleşme Sistemlerinde Modülasyon Tekniklerinin Link Denklemlerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [97] Haykin S, 2001. *Communication Systems* (fourth edition). John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [98] Kayran AH, Panayırıcı E, Aygözü Ü, 2009. *Sayısal Haberleşme*. Birsen Yayınevi. İstanbul.
- [99] Erdem Yakut S, 2007. *Analog Modülasyonlarda Dalgacık Dönüşüm Temelli bir Akıllı Sınıflandırma Sistemi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [100] Uçan ON, Osman O, 2006. *Haberleşme Teorisi ve Mühendislik Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım. Ankara.
- [101] Sharma DK, Mishra A, Saxena R, 2010. Analog & digital modulation techniques: an overview. *Tech Int J Comput Sci Commun Technol*, 3(1):551–561.
- [102] Özen A, Öztürk C, 2013. Yapay Arı Koloni Algoritması Üzerine Kurulan Yeni Bir Modülasyon Tanıma Yöntemi. In: 21st. Signal Process. Commun. Appl. Conf. Girne KKTC, s:1–4.
- [103] Švedek T, Herceg M, Matić T, 2009. A Simple Signal Shaper for GMSK/GFSK and MSK Modulator based on Sigma-delta Look-up Table. *Radioengineering*, 18(2):230–237.
- [104] Tekçe F, 2006. *GMSK Modülör Demodülör Gerçekleme*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [105] Ertürk S, 2010. *Sayısal Haberleşme*. Birsen Yayınevi. İstanbul.
- [106] Patel JN, Dalal UD, 2007. A Comparative Performance Analysis of OFDM Using MATLAB Simulation with M-PSK and M-QAM Mapping. In: Int. Conf. Comput. Intell. Multimed. Appl. (ICCIMA 2007). IEEE, s:406–410.
- [107] Geylani M, Çıbuk M, Çınar H, Ağgün F, 2016. Geçmişten günümüze hücreli haberleşme teknolojilerinin gelişimi. *Deu Muhendis Fak Fen ve Muhendis Derg*, 18(54):606–623.
- [108] Ho KP, 2005. *Phase-Modulated Optical Communication Systems*. Springer Science & Business Media. New York.

- [109] Bilgiç KÖ, 2012. Aerial Acoustic Data Communication. Yüksek lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [110] Azarbad B, Binti A, 2012. DVB-S2 Model in Matlab: Issues and Impairments. 218–234, In: MATLAB - A Fundam. Tool Sci. Comput. Eng. Appl. - Vol. 2 (Katsikis VN ed). InTech, Croatia.
- [111] Aktaş T, 2011. Sayısal Modülasyon Tekniklerinin FPGA (Alan Programlanabilir Kapı Dizisi) ile Gerçekleştirilmesi İçin Yaklaşımlar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [112] Hausman H, 2009. Fundamentals of Satellite Communications Part 3 Modulation Techniques used in Satellite Communication. <https://iee.li> .
- [113] Xiaoyi Tang, Alouini M-S, Goldsmith AJ, 1999. Effect of channel estimation error on M-QAM BER performance in Rayleigh fading. IEEE Trans Commun, 47(12):1856–1864.
- [114] Stallings W, 2007. Data and Computer Communications eight edition. Pearson Education Inc. New Jersey.
- [115] White C, 2015. Data Communications and Computer Networks: A Business User's Approach. Course Technology Cengage Learning. USA.
- [116] Ryan MJ, Frater M, 2002. Communications and Information Systems. Argos Press P/L. Red Hill.
- [117] Patranabis D, 1999. Telemetry Principles. Tata McGraw Hill Education. New Delhi.
- [118] Schiller JH, 2003. Mobile Communications. Pearson Education. Great Britain.
- [119] Li YG, Stuber G, 2006. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications. Springer Science & Business Media. Berlin.
- [120] Al-Tamimi AK, 2007. Exponential Effective Signal to Noise Ratio Mapping (EESM) Computation for Wimax Physical Layer. Master of Science Thesis, Sever Institute of Washington University, Washington.

- [121] Prasad R, 2004. OFDM for Wireless Communications Systems. Artech House. Boston&London.
- [122] Kaur S, Bharti G, 2012. Orthogonal frequency division multiplexing in wireless communication systems : a review. *Int J Adv Res Comput Eng Technol*, 1(3):125–129.
- [123] Rashmi R, Sarala SM, 2014. OFDM : modulation technique for wireless communication. *Int J Innov Res Adv Eng*, 1(1):1–5.
- [124] Arrano HF, Azurdia-Meza CA, 2016. OFDM: Today and in the Future of Next Generation Wireless Communications. In: 2016 IEEE Cent. Am. Panama Student Conf. IEEE, Guatemala City, s:1–6.
- [125] Mahmood SH, Newagy F, Zeyad HL, Zikry A-E, 2014. Effect of Switching Loads on the Power Line Communication (PLC) Modems inside Direct Local Area Network (dlan). In: Al-Azhar Eng. Thirteen Int. Conf. Cairo Egypt, s:1–19.
- [126] Hoffmann C, 2004. Code Division Multiplexing. Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts.
- [127] Jordan R, Abdallah CT, 2002. Wireless communications and an overview. *IEEE Antennas Propag Mag*, 44(1):185–193.
- [128] Fan P, 2006. Multiple Access Technologies for Next Generation Mobile Communications. In: 2006 6th Int. Conf. ITS Telecommun. Proc. Chengdu, China, s:10–11.
- [129] ITU, 2011. About mobile technology and IMT-2000: Cellular Standards for the Third Generation: The ITU's IMT-2000 family. <https://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html> (Erişim Tarihi:10.10.2017).
- [130] Tonmukayakul A, Weiss MB, 2004. Secondary use of radio spectrum: A feasibility analysis. *Telecommun Policy Res Conferance*, s:1–24.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Tatvan'da doğdu. İlkokulu Uluer İlkokulu'nda, ortaokulu Tatvan Anadolu Lisesi'nde ve liseyi Bitlis Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında kazandığı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu. 2008-2013 yıllarında Türk Telekom A.Ş. de mühendis olarak çalıştı. 2013 Aralık ayında Bitlis Eren Üniversitesi Enformatik Bölümünde Uzman olarak göreve başladı. Eylül 2014'de Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı. Yabancı dili İngilizcedir.

Halen Bitlis Eren Üniversitesi Enformatik Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Munip GEYLANI