



**PRIME-PLC VE G3-PLC SİSTEMLERİNİN PLC-AMR SİSTEMLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRILMALI PERFORMANS ANALİZİ**

Eser BAYRAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Eser BAYRAM

01/10/2021

PRIME-PLC VE G3-PLC SİSTEMLERİNİN PLC-AMR SİSTEMLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRILMALI PERFORMANS ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Eser BAYRAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2021

ÖZET

Mevcut güç kabloları dışında ek kablolama ihtiyacı olmaması nedeniyle ekonomik açıdan avantajlı olan Enerji Hattı İletişim (EHİ) teknolojisi; sayaç okuma, ev içi otomasyon ve sokak aydınlatması gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır. Hala gelişmekte olan bir teknoloji olması nedeniyle birbirinden farklı performans değişkenlerine sahip çeşitli protokoller kullanılmakta olup kararlılık ve veri hızlarının artırılması hedeflenmektedir. Son yıllarda özellikle Dar Bant Enerji Hattı İletişim (DB EHİ) sistemlerine yönelik artan ilgi ile Otomatik Sayaç Okuma (Automatic Meter Reading – AMR) sistemlerinin yaygınlaşması arasında doğru orantı bulunmaktadır. AMR; enerji, gaz ve su ölçüm cihazlarından otomatik olarak veri toplayan ve faturalama amacıyla analiz etmek için merkez birime aktaran bir teknolojidir. AMR sistemleri genel itibarıyla; Elektronik Sayaç, Merkez Birim ve Haberleşme Sisteminden meydana gelmektedir. Bu çalışmada, DB EHİ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) tabanlı yeni nesil protokollerden G3-PLC ve PRIME standartlarının karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. Her iki standarda ait detaylı bilgilendirme ile enerji hattı ortamındaki performanslarının MATLAB benzetim sonuçları birlikte sunulmuştur. İletim kanalının uygun bir benzetiminin yapılabilmesi amacıyla çalışmada Katayama gürültü modeli kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 90523
Anahtar Kelimeler : PLC, OFDM, G3, PRIME, Enerji hattı iletişimi, AMR.
Sayfa Adedi : 45
Danışman : Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF
PRIME-PLC AND G3-PLC SYSTEMS FOR PLC-AMR SYSTEMS

(M.Sc. Thesis)

Eser BAYRAM

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2021

ABSTRACT

Power Line Communication (PLC) technology, which is economically advantageous because it does not require additional wiring other than existing power cables, finds use in many areas such as meter reading, indoor automation and street lighting. As it is still a developing technology, various protocols with different performance variables are used and it is aimed to increase the stability and data rates. In recent years, there is a clear relationship between the developing enthusiasm in Narrow Band Power Line Communication (NB PLC) systems and the common use of Automatic Meter Reading (AMR) systems. AMR is a technology which gathers data from energy, gas and water meters and delivers it to the processing unit for analysis for billing purposes. AMR systems generally consist of Electronic Meter, Central Unit and Communication System. In this study, comparative performance analysis of G3-PLC and PRIME standards, which are among the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)-based new generation protocols widely used in Narrow Band Power Line Communication (NB PLC), have been made. Detailed explanations of both standards and MATLAB simulation outcomes of their performances in power line systems are presented together. To simulate the transmission channel accurately, the Katayama noise model is used in this study.

Science Code : 90523

Key Words : PLC, OFDM, G3, PRIME, Power line communication, AMR.

Page Number : 45

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

TEŞEKKÜR

Bu alıřmanın yűrűtűlmesi esnasında bilgi birikimi ve tecrűbesini katkıya dűnűřtűrerek desteęini esirgemeyen danıřmanım Doç. Dr. Őzgűr ERTUę'a, bu gűnlere gelmemde maddi ve manevi çok bűyűk emekleri olan annem Semra BAYRAM ve babam Bűnyamin BAYRAM'a, yoęun çalıřmalarım sırasında bana gűsterdięi sabır ve anlayıř nedeniyle sevgili eřim Tuba BAYRAM'a, kendilerine ayırmam gereken zamandan feragat ederek bilgisayar bařında geçirdięim saatleri bűyűk bir anlayıřla karřılayarak çalıřma ortamına saęladıkları katkı nedeniyle ocuklarım Zeynep Azra BAYRAM ve Can Arda BAYRAM'a, varlıklarıyla her daim desteklerini hissettięim kardeřlerim Gizem BAYRAM, Sezer BAYRAM ve Melisa Kűbra BAYRAM'a, kodlama sűrelerinde yardımcı olan arkadařlarıma, Yűksek Lisans eęitimim için ihtiyaç duyduęum tolerans ve kolaylıęı saęlayan amirlerim ile mesai arkadařlarıma ve çalıřmam sırasında kűűk veya bűyűk katkı saęlayan herkese teőekkűr ederim.

Ayrıca "Hayatta en hakiki műrřit ilimdir, fendir!" diyerek bize her daim yol gűsterici olan ve sahip olduęumuz vatan ile bulunduęumuz makam ve mevkii kendisine borçlu olduęumuz ebedi Bařkomutanımız Mustafa Kemal ATATűRK'e minnet ve řűkranlarımı arz ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	x
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. HABERLEŞME SİSTEMLERİ	5
2.1. Haberleşme Sisteminin Bileşenleri	6
2.1.1. Verici	6
2.1.2. Haberleşme kanalı (İletim ortamı)	10
2.1.3. Alıcı	11
2.2. Haberleşme Sisteminin Verimliliği	11
3. ENERJİ HATTI İLETİŞİMİ.....	15
3.1. Tanım ve Tarihçe.....	15
3.2. EHİ Frekans Bandı	16
3.3. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)	18
3.4. Otomatik Sayaç Okuma (AMR) Sistemleri	19
4. TEORİK KIYASLAMA	23
4.1. PRIME.....	23

	Sayfa
4.2. G3-PLC	27
4.3. Karşılaştırma.....	32
5. BENZETİM ÇALIŞMASI	35
5.1. Gürültü Modeli	35
5.2. Kanal Frekans Tepkisi.....	37
5.3. Benzetim	38
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	45

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. PRIME PHY parametreleri	24
Çizelge 4.2. PRIME PHY veri hızı ve paket boyutu parametreleri	24
Çizelge 4.3. PRIME PHY çerçevesi	25
Çizelge 4.4. G3-PLC PHY katmanı veri hızı ve paket boyutu parametreleri.....	28
Çizelge 4.5. G3-PLC PHY çerçevesi.....	28
Çizelge 4.6. PRIME ve G3-PLC bit rate karşılaştırma tablosu	34
Çizelge 5.1. PRIME ve G3-PLC için modülasyon ve kodlama isimlendirmesi.....	38

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Analog ve sayısal sinyal gösterimi	5
Şekil 2.2. Temel haberleşme sistemi blok diyagramı	6
Şekil 2.3. Başlıca analog modülasyon türleri.....	7
Şekil 2.4. Temel analog modülasyon dalga şekilleri	8
Şekil 2.5. Temel sayısal modülasyon dalga şekilleri	8
Şekil 2.6. Başlıca sayısal modülasyon türleri	9
Şekil 2.7. Toplamsal gürültü kanalı matematiksel modeli.....	10
Şekil 2.8. Doğrusal zamanla değişmeyen filtre kanalı matematiksel modeli	10
Şekil 2.9. Doğrusal zamanla değişen filtre kanalı matematiksel modeli	11
Şekil 3.1. CENELEC frekans bantları	16
Şekil 3.2. EHI modülasyon teknikleri.....	17
Şekil 3.3. EHI ile sayaç okunmasına ilişkin şema	20
Şekil 4.1. PRIME sistemi basit blok diyagramı.....	23
Şekil 4.2. PRIME üst bilgi ve veri yapısı	25
Şekil 4.3. PRIME Convolutional Encoder blok diyagramı.....	26
Şekil 4.4. PRIME karıştırıcı blok diyagramı	26
Şekil 4.5. G3-PLC sistemi basit blok diyagramı.....	27
Şekil 4.6. G3-PLC çerçeve yapısı	29
Şekil 4.7. G3-PLC karıştırıcı blok diyagramı	30
Şekil 4.8. G3-PLC evrişimli kodlayıcı blok diyagramı	30
Şekil 4.9. Serpiştirici yapısı	31
Şekil 4.10. PRIME PSD.....	32
Şekil 4.11. G3-PLC PSD	33

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Haberleşme sistemlerinde gürültü ekleme modeli.....	35
Şekil 5.2. Gürültü türleri	36
Şekil 5.3. Yaklaşık gürültü varyansı örneği.....	37
Şekil 6.1. G3-PLC benzetim sonuçları	39
Şekil 6.2. PRIME benzetim sonuçları.....	40



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
AMR	Automatic Meter Reading
AGC	Adaptive Gain Control
AGN	Additive Gaussian Noise
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CE	Convolutional Encoder
CENELEC	Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
CP	Cyclic Prefix
EHİ	Enerji Hattı İletişimi
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
FCH	Frame Control Header
FEC	Forward Error Correction
FER	Frame Error Rate
FFT	Fast Fourier Transform
ISI	Inter Symbol Interference
LAN	Local Area Network
MSDU	MAC Service Data Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PHY	Fiziksel Katman
PPDU	Physical Protocol Data Unit
PSD	Power Spectral Density
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RC	Repetition Code
RS	Reed Solomon
SNR	Signal to Noise Ratio

1. GİRİŞ

Enerji Hattı İletişimi (EHİ); ilave kablo altyapısı kurulumuna ihtiyaç duyulmaksızın, mevcut elektrik şebekesi üzerinden verilerin bir noktadan başka bir noktaya aktarılması olarak tanımlanmaktadır. Elektrik hatları üzerinden iletişim, bu alanda ilk patentlerin sunulduğu 1900'lerin başlarına kadar uzanan eski bir fikirdir [1]. 1897'de, elektrik kabloları üzerinden iletişim kurarak elektrik şebekesi sayaçlarının uzaktan ölçümünü sağlayan bir teknik için ilk patent Edward Davy tarafından alınmıştır [2].

20. yüzyılın başlarından itibaren, (0,3 – 3 kHz) bandında çalışan Ultra Dar Bantlı EHİ sistemleri (UDB EHİ) enerji tedarikçileri tarafından kontrol uygulamaları ve arıza tespiti amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. 1950 yılına gelindiğinde, (100 Hz – 1 kHz) arasında taşıyıcı frekansı kullanan ve "Dalgalanma Kontrolü" olarak bilinen tek yönlü ilk EHİ sistemi, düşük ve orta voltajlı elektrik şebekeleri üzerinde kullanılmaya başlanmıştır [2]. 90'lı yılların ortalarından itibaren (2 MHz - 30 MHz) bandında çalışan Geniş Bantlı EHİ sistemleri (GB EHİ), geniş bant internet, yüksek çözünürlüklü televizyon gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmaya başlanmıştır.

Son yıllarda, Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC) tarafından tanımlanan (3 – 148.5 kHz) bandında veya Amerika Federal Haberleşme Komisyonu (FCC) tarafından tanımlanan (9 - 490 kHz.) bandında veya Japon Radyo Endüstrisi ve İşletmeleri Derneği (ARIB) tarafından tanımlanan (9 - 450 kHz) bandında çalışan Dar Bant EHİ sistemlerine (DB EHİ) olan ilgi giderek artmaktadır [3].

DB EHİ sistemlerine olan bu ilgi ile Otomatik Sayaç Okuma (Automatic Meter Reading – AMR) sistemlerinin yaygınlaşması arasında doğru orantı bulunmaktadır. AMR; enerji, gaz ve su ölçüm cihazlarından otomatik olarak veri toplayan ve faturalama amacıyla analiz etmek için merkez birime aktaran bir teknolojidir [4]. AMR sistemleri genel itibariyle; *Elektronik Sayaç, Merkez Birim ve Haberleşme Sisteminden* meydana gelmektedir.

AMR sistemlerinde kullanılan EHİ teknolojisi hâlihazırda gelişmeye devam etmekte olan bir teknoloji olması nedeniyle birbirinden farklı performans değişkenlerine sahip çeşitli protokoller kullanılmakta olup kararlılık ve veri hızlarının artırılması hedeflenmektedir.

Basit bir EHI sisteminde, verici tarafından modüle edilen sinyal, güç hattı iletişim kanalına aktarılır. Kanaldaki ortamın özelliklerine uygun olarak, güç hattı gürültüsüne tabi olan sinyal, demodüle edilmek üzere alıcıya iletilir. Sağlıklı bir aktarım için veri sinyalinin başarılı olarak vericide modüle edilmesi gerekir. Bu şekilde kanaldaki gürültü ve ortam etkileri alıcı tarafında temizlenir ve veriler doğru bir şekilde alınır [5].

Haberleşme modülasyonunda çoklu alt taşıyıcıların kullanılmasıyla; yüksek veri hızlı dar bant enerji hattı haberleşmesi (HDR-NB PLC) 2001- 2009 yılları arasında IEEE 1901.2 ve ITU-T G.hnem tarafından standartlaştırılmıştır. Bu yeni teknoloji sayesinde veri hızı 10 kbps'den 500 kbps'ye kadar çıkabilmektedir. En popüler standartlar CENELEC-A frekans bandında alçak gerilim (LV) şebekeler üzerinde çalışmak üzere tanımlanan; ITUT G.9904 özelliklerini kullanan PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) ve ITU-T G.9903 özelliklerini kullanan ERDF (Electricité Réseau Distribution France) tarafından geliştirilen G3-PLC'dir [6]. Ayrıca Yitran Technologies Ltd. tarafından patentlenmiş olan Differential Coded Shift Keying (DCSK) tabanlı EHI sistemleri de çeşitli ülkelerde kullanım alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada, DB EHI sistemlerinde CENELEC-A bandında (31-95 kHz) yaygın olarak kullanılan Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) tabanlı yeni nesil protokollerden; G3-PLC ve PRIME standartlarının AMR sistemleri için karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında her iki standarda ait açıklamalar ve teorik karşılaştırmalar ile enerji hattı ortamındaki performanslarının MATLAB benzetim sonuçları birlikte sunulmuştur. İletim kanalının uygun bir benzetiminin yapılabilmesi amacıyla çalışmada Katayama gürültü modeli kullanılmıştır. Elde edilen FER-SNR benzetim grafikleri ile bu grafikler çerçevesinde varılan yargılar sonuç bölümünde paylaşılmıştır.

Literatürde EHI sistemlerine ve AMR sistemlerinde PRIME, G3-PLC ve DCSK standartlarının kullanımına yönelik çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte özellikle benzetim tekniklerinin ve kullanılan gürültü modellerinin de çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda bu anlamda literatüre katkı sağlayacağı da değerlendirilmektedir. Ayrıca çalışma konusuna ilişkin özellikle Türkçe literatür kaynağı eksikliği bulunduğu da tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, benzer gürültü ortamlarında veri iletimi için kullanılan PRIME ve G3-PLC sistemlerinin AMR sistemleri için öne çıkan faydaları ve mahsurlarıyla birlikte iletim hızı ve iletim sağlamlığı gibi parametreler özelinde performansları gözlemlenebilecektir. Bu anlamda AMR sistemleri için optimum çözümün hangi standardın kullanımıyla sağlanacağına ilişkin sonuçlara varılması hedeflenmiştir.



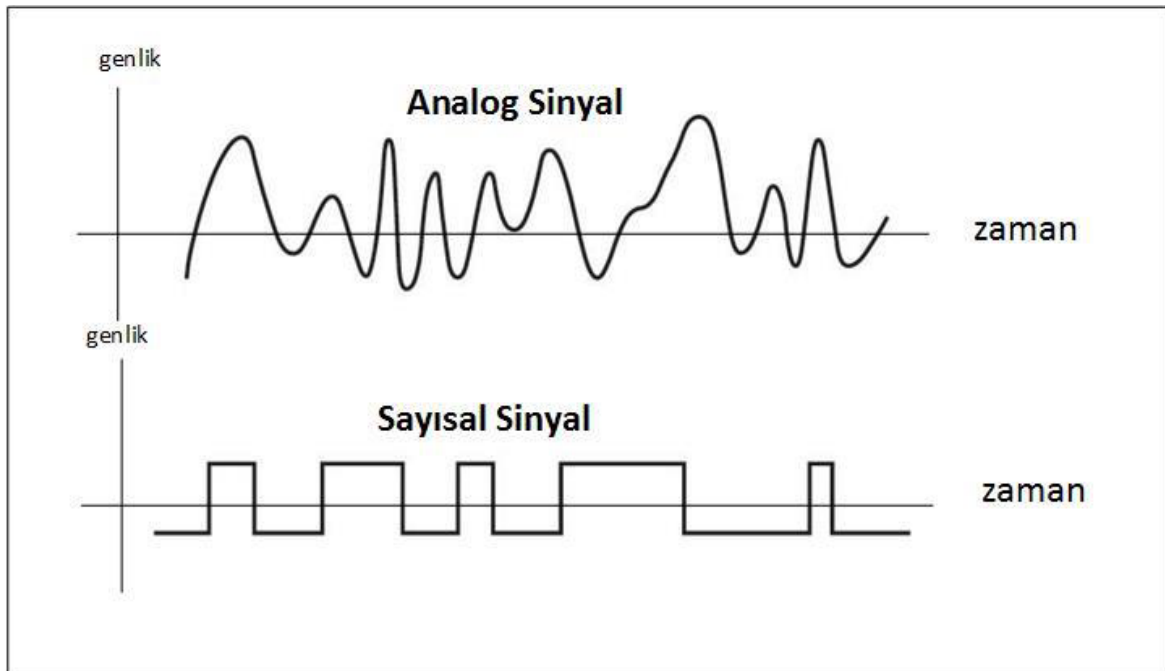


2. HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Haberleşme genel itibariyle; herhangi bir biçimdeki bilginin belirli bir zaman aralığı içerisinde bir noktadan diğer bir noktaya bir iletim ortamı üzerinden aktarılmasıdır. Haberleşme sistemleri bilginin aktarıldığı ortam çeşidine göre kablosuz ve kablolu olarak iki çeşide ayrılırken, iletilen sinyalin çeşidine göre de sayısal ve analog olacak şekilde iki çeşide ayrılmaktadır.

Kablolu haberleşme sistemlerinde bilgi iletimi için bakır başta olmak üzere iletken metal kablolar veya fiber optik kablolar kullanılmaktadır. Kablosuz haberleşme sistemlerinde ise bilgi iletimi için boşluk ve uzaydan faydalanılır. İletişim elektromanyetik dalgalar yardımıyla bu ortamlar üzerinden gerçekleştirilir.

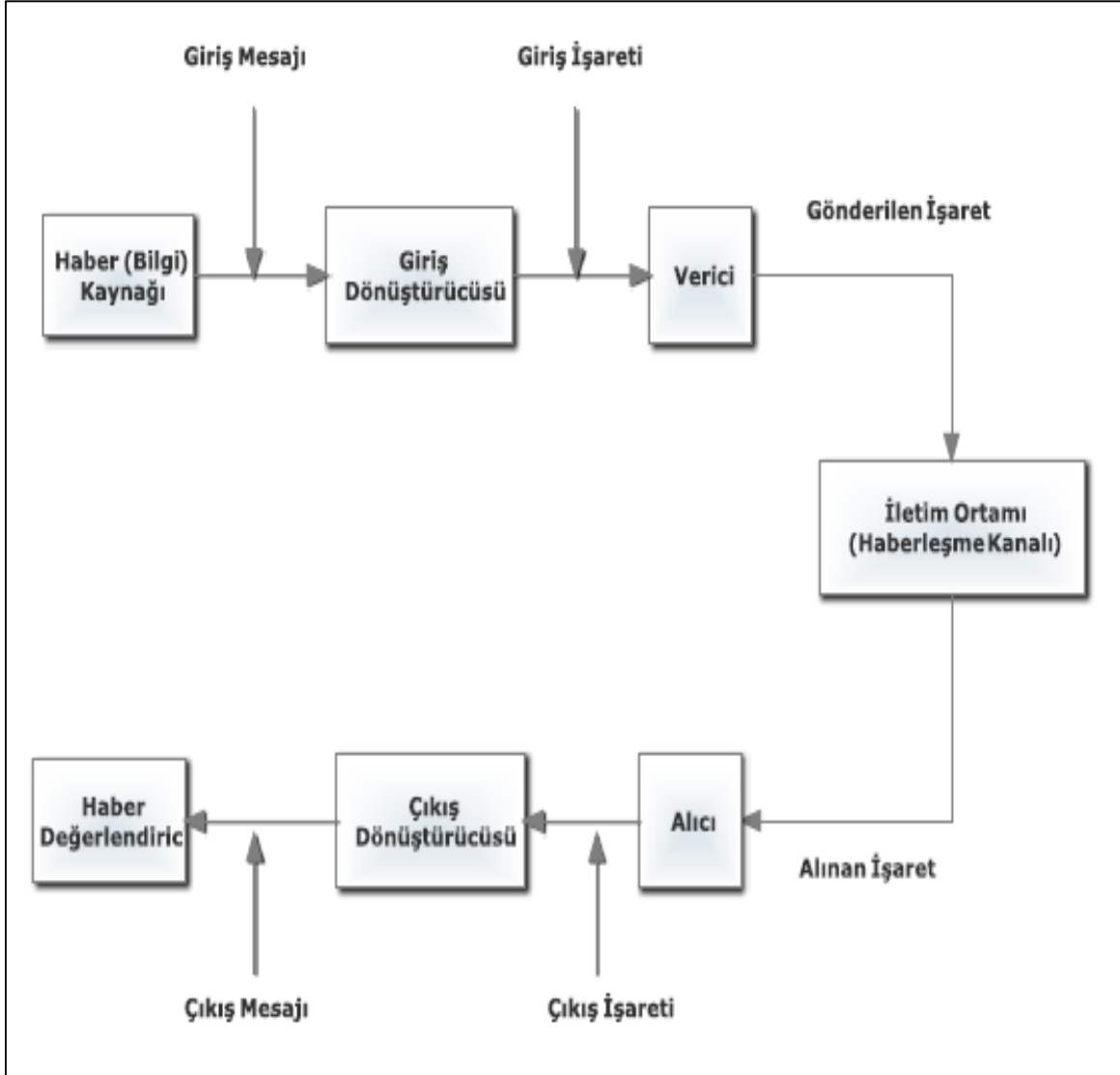
Orijinal bilgi enerjisinin anlık değişimlerini doğrudan takip eden elektronik sinyaller şeklinde iletilmesi analog haberleşme adını almaktadır. Bilginin sistemin her iki ucundaki insan veya makineler vasıtasıyla anlaşılacak şekilde önceden belirlenmiş kod darbeleri şeklinde iletilmesine ise sayısal haberleşme adı verilmektedir. Analog modülasyonda taşıyıcı olarak belirli bir frekansta sinüzoidal dalga kullanılırken sayısal modülasyonda taşıyıcı olarak dijital veriler (0,1) kullanılır. Sinyal gösterimleri Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Sayısal ve analog sinyal gösterimi [5]

2.1 Haberleşme Sisteminin Bileşenleri

Bir haberleşme sistemi genel olarak; verici, haberleşme kanalı ve alıcıdan oluşmaktadır. Bir verinin bir noktadan başka bir noktaya aktarılması için kullanılan haberleşme sistemi genel olarak Şekil 2.2'deki gibi modellenenmektedir.



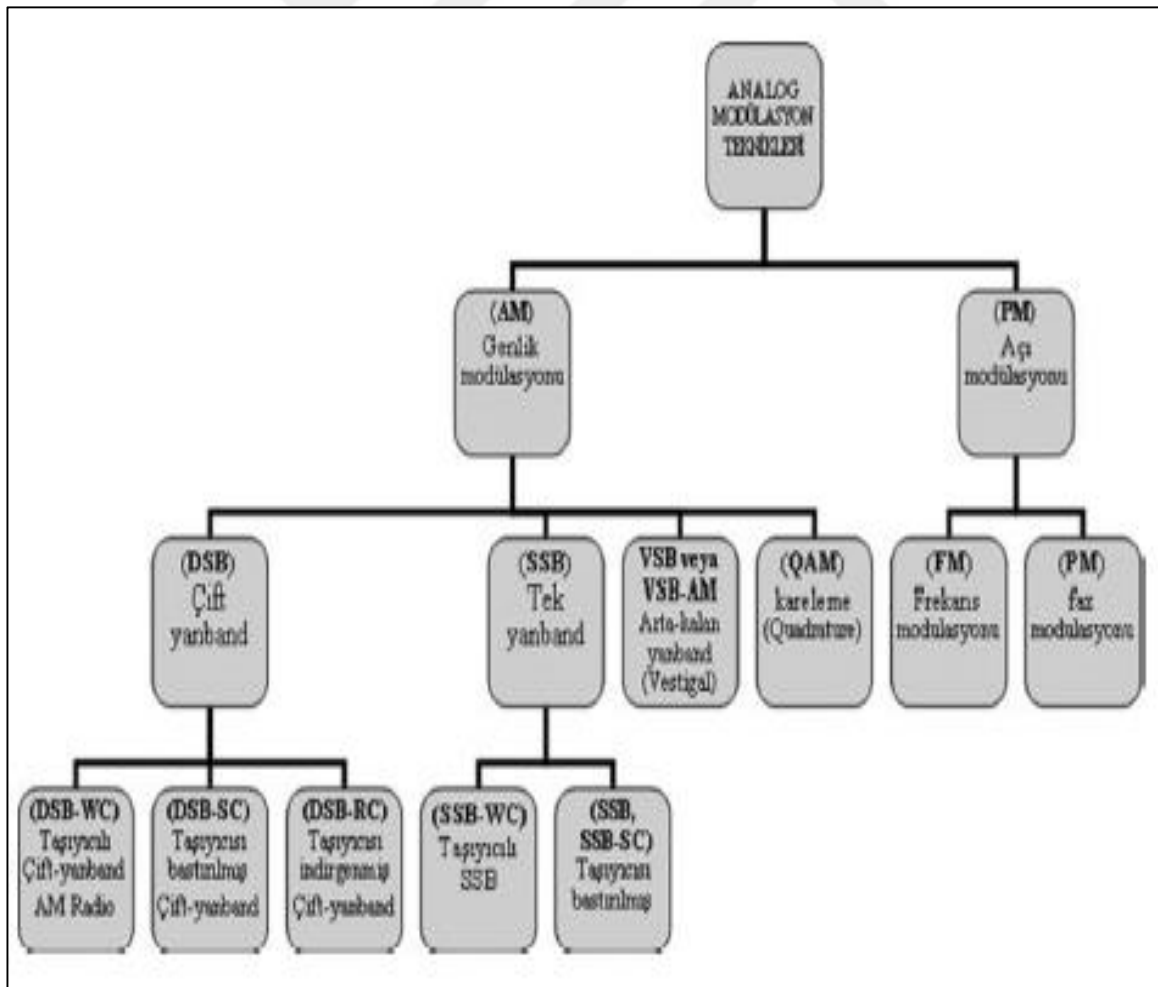
Şekil 2.2. Temel haberleşme sistemi blok diyagramı [7]

2.1.1. Verici (Transmitter)

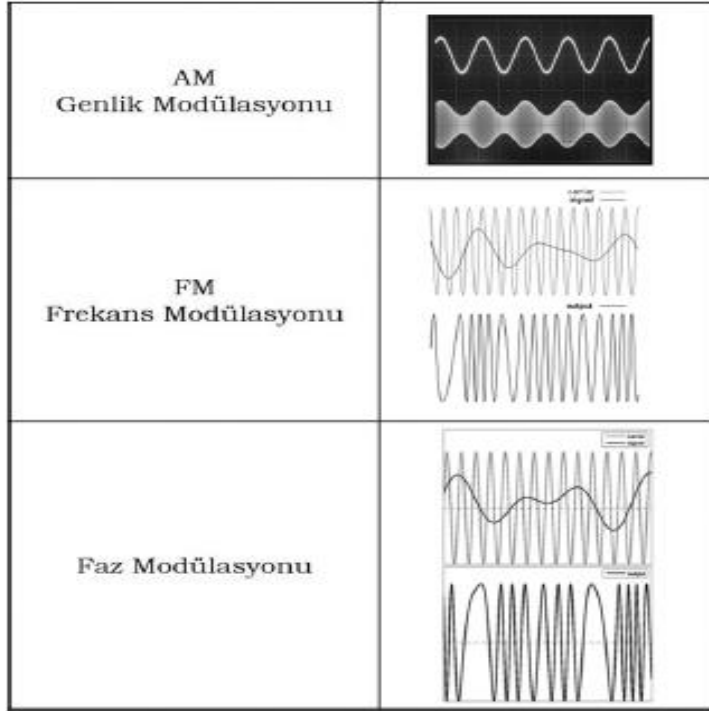
Verici, bilgi sinyalini iletişim kanalının karakteristiğine göre aktarılacak bir formata çeviren elektronik elemanlardır. Bu maksatla vericide filtreleme, yükseltme veya sinyalin bir taşıyıcıya bindirilmesi gibi işlemler yapılabilmektedir. Verici, modülasyon adı verilen bir prosedür aracılığıyla bilgi sinyalinin kanala eşlenmesini gerçekleştirir.

Genel itibariyle modülasyon, bilgiyi iletilebilecek bir düzeye çıkarma süreci olarak tanımlanır. Bu genellikle düşük frekanslı bir bilgi sinyalinin yüksek frekanslı bir sinyal üzerine bindirilmesi şeklinde yapılır. Anlamlı bilgi (görüntü, ses, renk, veri vb.) taşıyan düşük frekanslı sinyale bilgi sinyali veya mesaj sinyali denir. Bilgi sinyaline göre bir veya daha fazla parametresi değişen yüksek frekanslı sinyale taşıyıcı sinyal adı verilir. Bilgi sinyaline göre bir veya daha fazla parametresi değiştirilmiş sinyal modüle edilmiş sinyal olarak adlandırılır [8].

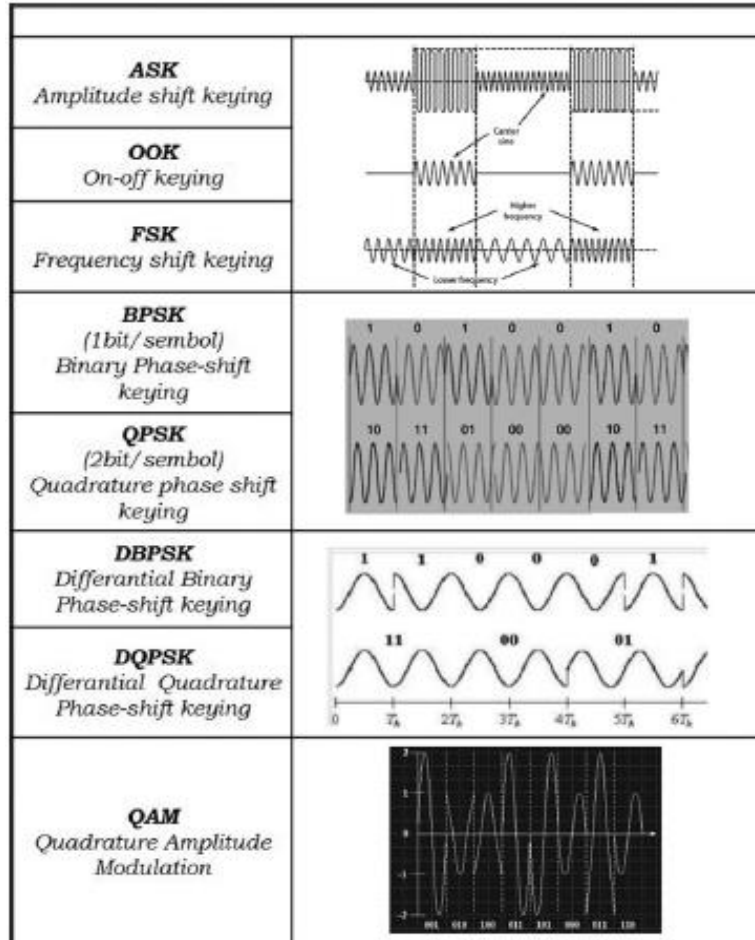
Genel itibariyle modülasyon sayısal ve analog modülasyon olarak iki türe ayrılır. Sayısal ve analog modülasyonun da çeşitli türleri bulunmaktadır. Analog modülasyona ait başlıca türler Şekil 2.3'te, temel analog modülasyon dalga şekilleri Şekil 2.4'te, temel sayısal modülasyon dalga şekilleri Şekil 2.5'te ve sayısal modülasyona ait başlıca türler ise Şekil 2.6'da gösterilmiştir [9].



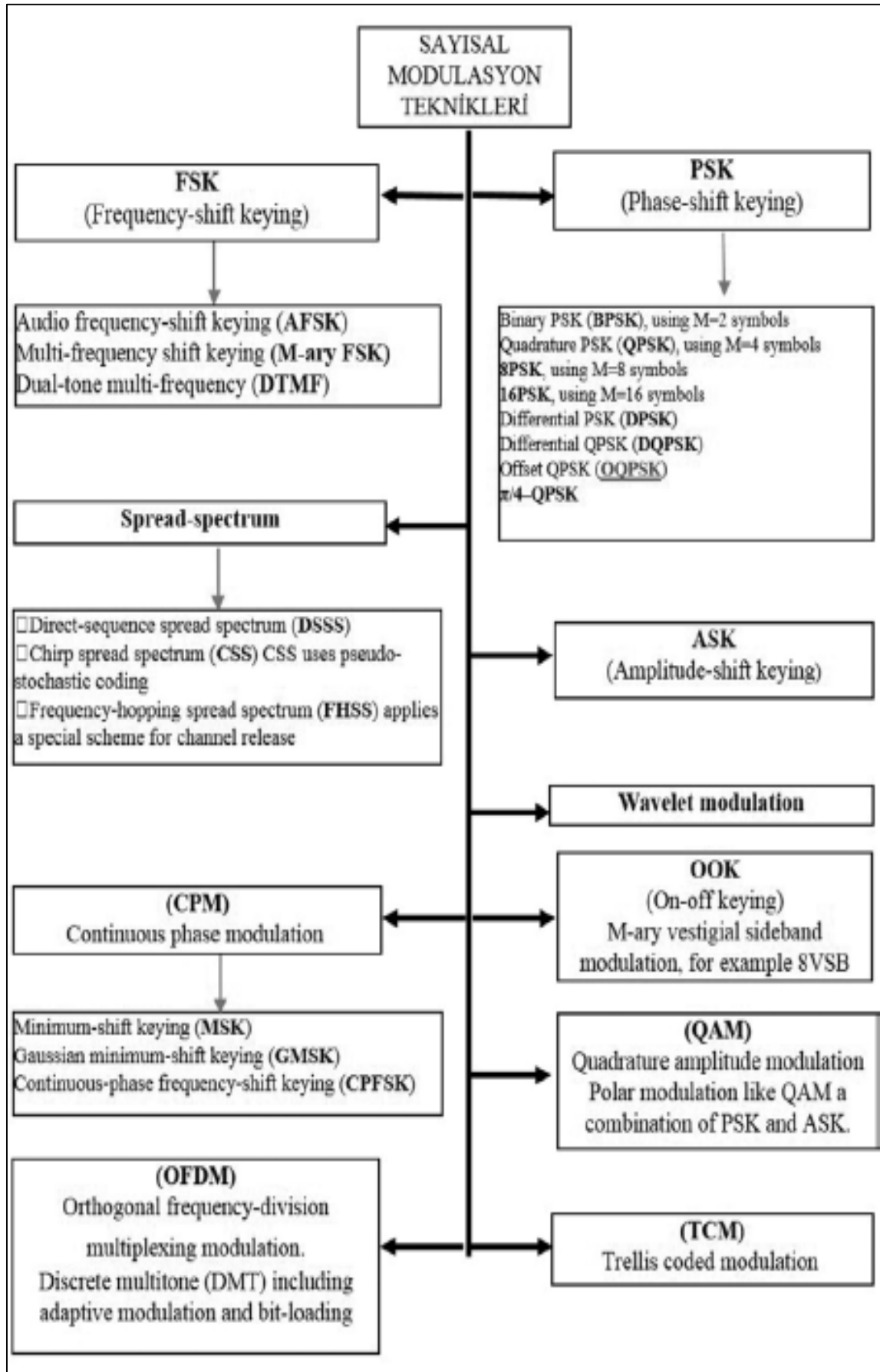
Şekil 2.3. Başlıca analog modülasyon türleri



Şekil 2.4. Temel analog modülasyon dalga şekilleri



Şekil 2.5. Temel sayısal modülasyon dalga şekilleri



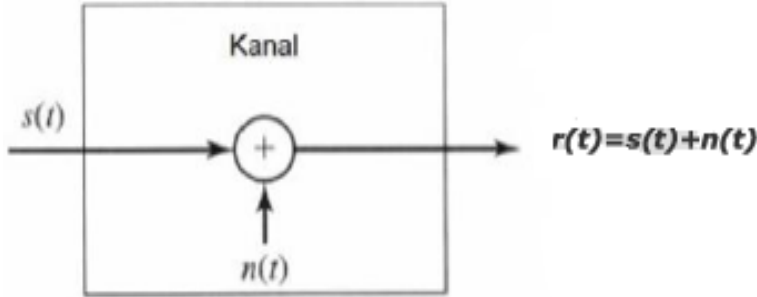
Şekil 2.6. Başlıca sayısal modülasyon türleri

2.1.2. İletişim kanalı (Haberleşme ortamı)

İletişim kanalı, vericiden alıcıya sinyal göndermek için kullanılan fiziksel iletim ortamıdır. Günümüz haberleşme sistemlerinde telli, telsiz, fiber optik gibi çeşitli iletim ortamları kullanılmaktadır.

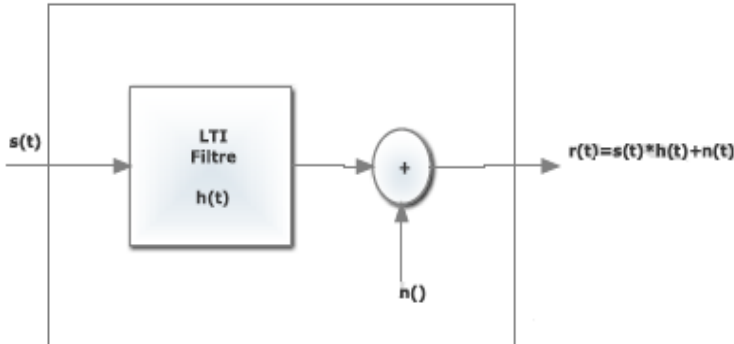
Çeşitli haberleşme ortamları ile bilgi iletimi için oluşturulan iletişim sistemlerinde, haberleşme ortamının özelliklerini yansıtan matematiksel modellerin oluşturulması sistem tasarımı ve analizi bakımından önemlidir. Genellikle, matematiksel modellemede kullanılan istatistikî tanımlama, kanallar vasıtasıyla veri iletimini içeren deneysel ölçümlerin neticesidir. Bu matematiksel modeller, verici bloğundaki kodlayıcı ve modülatör ile alıcı bloğundaki demodülatör ve kod çözücünün tasarımında kullanılmaktadır. Uygulamada yaygın olarak kullanılan kanal modellerinden bazıları aşağıdaki gibidir:

Toplamsal gürültü kanalı (Additive noise channel)



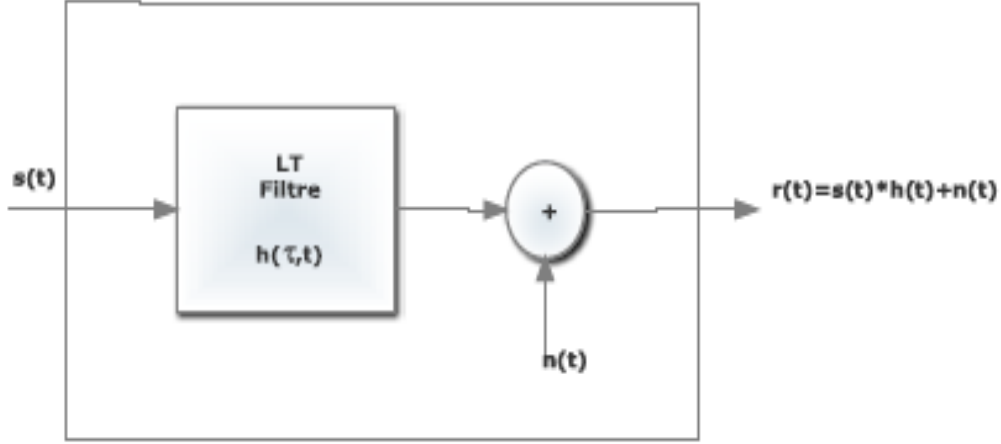
Şekil 2.7. Toplamsal gürültü kanalı matematiksel modeli [7]

Doğrusal zamanla değişmeyen filtre kanalı (Linear time-invariant filter channel)



Şekil 2.8. Doğrusal zamanla değişmeyen filtre kanalı matematiksel modeli [7]

Doğrusal zamanla değişen filtre kanalı (Linear time-variant filter channel)



Şekil 2.9. Doğrusal zamanla değişen filtre kanalı matematiksel modeli [7]

2.1.3. Alıcı (Receiver)

Alıcı; haberleşme ortamı vasıtasıyla vericiden gönderilen bilgi sinyali üzerinde muhtemel kayıplara karşı güçlendirmenin yapıldığı, vericideki giriş sinyalinin tekrar oluşturulması amacıyla sinyalin demodüle edildiği ve kod çözme (decoding) işlemlerinin yapıldığı kısımdır. Alıcıda gelen sinyalin demodülasyonu asli fonksiyon olarak gerçekleştirilmekle birlikte, gürültü bastırma ve sinyal filtreleme gibi ihtiyaç duyulan diğer işlemler de gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerin detaylarına çalışmamız kapsamında yeri geldiğinde değinilecektir.

2.2 Haberleşme Sisteminin Verimliliği

Haberleşme sistemlerinin temel amacının herhangi bir bilginin bir noktadan başka bir noktaya verici ve alıcı arasında hatasız olarak aktarılabilmesi olduğunu ifade etmiştik. Genel itibari ile bir sinyalin bir noktadan başka bir noktaya transferi için kullanılan dijital iletişim bloğu Şekil 2.2’de gösterilmişti.

Burada da görüldüğü üzere veri analog ise öncelikle sayısallaştırılmalıdır. Kaynaktan alınan veri iki bitlik işaret dizilerine çevrilmektedir. Bu verilerde asgari seviyede veri kaybı olması veya hiçbir veri kaybı bulunmaması beklenmektedir. Kanal kodlama uygulanarak verilerin bozucu kanal etkilerinden korunması hedeflenmektedir. Bu sebeple kontrol bitleri eklemektedir.

Sonrasında modülasyon işlemiyle birlikte verilerin uzak mesafelere taşınması sağlanmaktadır. Alıcı tarafında ise yine demodülatör yardımıyla taşıyıcı sinyal ile verilerin ayrıştırma işlemi gerçekleştirilir. Kodlama işlemlerinin tersi işlemler uygulanarak gönderilen veriye en yakın veriler elde edilmeye çalışılır.

Sayısal bir iletişim sistemi tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken bazı önemli parametreler mevcuttur. Bunlar sırası ile bandın verimliliği, güç verimliliği ve maliyettir. Bant verimliliği ile istenilen frekans bandında istenilen bant genişliğindeki verinin haberleşme metotları (Kanal kodlama, Modülasyon vb.) kullanarak gerçekleştirilebilmesidir. Güç verimliliği ise tasarlanan haberleşme sisteminin en az seviyede güç tüketerek ve güvenli bir şekilde iletilmesidir [10].

Bu bakımdan BER (Bit-error-rate), FER (Frame-error-rate) ve SNR (Signal to noise ratio) analizleri önem kazanmaktadır. BER, dijital veri aktarımında iletilen veri içerisindeki bozuk ya da yanlış bit oranını, FER ise çerçeve oranını ifade etmektedir. SNR sinyalin gürültüye oranıdır ve gönderilen sinyalin gücü ile kanalda oluşan gürültünün gücünün oranı şeklinde ifade edilebilir.

1948'de C.E. Shannon enformasyon kuramının temelini oluşturarak bir iletişim kanalındaki bilgi iletimi kapasitesinin; kullanılan bant genişliği ve sinyal gürültü oranı arasında ilişkiyi ortaya koymuştur. Bilgi kapasitesi, Shannon sınırı olarak da adlandırılan matematiksel ifadeye ilişkin denklem Eş. 2.1'de sunulmuştur [10].

$$C=B\log_2(1+Sinyal/Gürültü) \Rightarrow C=B\log_2(1+S/N) \quad (2.1)$$

Burada;

C = Bilgi kapasitesini (bps),

B = Bant genişliğini (Hertz),

S = Sinyal gücünü,

N = Gürültü gücünü ifade etmektedir.

Diğer bir deyişle kanal kapasitesi belirlenen BER/FER değerinde maksimum veri iletimi olarak tanımlanabilir. Bu yüzden BER/FER analizini gerçekleştirmek için tanımlanan kanaldaki SNR bilgisinin de kullanılması gerekmektedir. Tasarlanan herhangi bir iletişim

sisteminin karmaşık olması sebebiyle BER/FER analizlerinin teorik hesaplaması çok zor olmaktadır. Bu yüzden Monte Carlo yöntemi kullanarak analitik ya da numerik bir integral çözümüne gerek duyulmamaktadır. Farklı farklı kanal yapılarının ve kanal kodlama yöntemlerinin varlığında bu denklemlerin çözülmesi zorlaşmaktadır [10]. Bu maksatla MATLAB haberleşme araç kutusunda bulunan kodlamalar kullanılabilir.





3. ENERJİ HATTI İLETİŞİMİ

3.1. Tanım ve Tarihçe

Enerji hattı iletişimi, mevcut güç dağıtım hatlarının kullanılması suretiyle enerjinin ve bilgi iletim sinyallerinin birlikte çeşitli amaçlar dahilinde iletilmesidir. Güç hatlarının iletişim ortamı olarak kullanılması, sinyal güvenliğini sağlamak açısından oldukça zordur. Kanal karakteristiği ve parametreleri; frekansa, konuma, zamana ve sistemdeki diğer elektronik birimlerin türlerine göre değişir [5].

Enerji hatlarının frekans seçici kanalı olmasının yanı sıra; Ayrıca 10 kHz ile 200 kHz arasındaki frekans bölgelerinde elektronik parazit açısından da hassastır. Kanaldaki arka plan gürültüsünün yanı sıra genellikle 50/60 Hz'de oluşan dürtüsel gürültü de vardır. Dürtüsel gürültü nedeniyle iletilen pakette birkaç yüz mikrosaniyelik bir gecikme meydana gelir [5].

EHI teknolojisinin kökeni 1800'lü yılların sonu ile 1900'lü yılların başlarına kadar uzamaktadır. O yıllardan günümüze ulaşmaya dek birçok gelişim kaydetmiş, çeşitli patentler alınmış, uygulama alanları genişlemiş ve en önemlisi ise uluslararası standartlara kavuşmuştur. Elektrik hatlarından çift yönlü veri iletişimi, otomatik sayaç okuma (Automated Meter Reading (AMR)) ve otomasyon sistemlerinin tasarlanması ile 1980'li yıllarda hayatımıza girmeye başlamıştır. Yine Avrupa enerji piyasalarının 1990'lı yılların sonuna doğru serbestleşmesiyle birlikte yaygınlaşmaya başlayan EHI kullanımı 2000'li yıllarla birlikte Dar Bant PLC'ye yönelmiştir. Son 10 yıl içerisinde de ITU-T G.9901-9904 ve IEEE 1901.2 standartlarının yürürlüğe girmesiyle standardizasyon sağlanmıştır.

PLC sistemlerinin halihazırda mevcut olan altyapıyı kullanması ve dolayısı ile ilave kablo kurulumuna ihtiyaç duymaması en önemli avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte frekans seçici ve zamanla değişken bir dürtü yanıtına sahip olması, EMI/EMC problemleri yaşanması ve EHI modemlerinin üretiminin nispeten maliyetli olması bazı dezavantajları olarak sayılabilir.

3.2. EHİ Frekans Bandı

EHİ teknolojisi frekans bant genişlikleri dikkate alınarak Geniş Bant EHİ (GB EHİ), Dar Bant EHİ (DB EHİ) ve Ultra Dar Bant EHİ (UDB EHİ) olmak üzere 3 frekans bandına ayrılmaktadır. Geniş Bant EHİ, (2 – 30 MHz) bandında görüntü ve ses sinyallerinin iletilmesi, yüksek boyutlu veri aktarımı gibi alanlarda kullanılan yüksek kapasiteli ve hızlı veri aktarım türüdür. Fakat mevcut elektrik hatlarının yüksek frekans veri aktarımına müsait olmaması nedeniyle günümüz teknolojisinde uzun mesafeli veri aktarımında kullanılamamaktadır. Ultra Dar Bant EHİ (30 – 300 Hz) sistemlerinde çok düşük frekans veya (0.3 – 3 kHz) düşük frekans aralığında tek taraflı iletişim kullanılmaktadır. PRIME ve G3-PLC standartlarının da bulunduğu Dar Bant EHİ (3 – 500 kHz) bant aralığında çalışmaktadır [5].

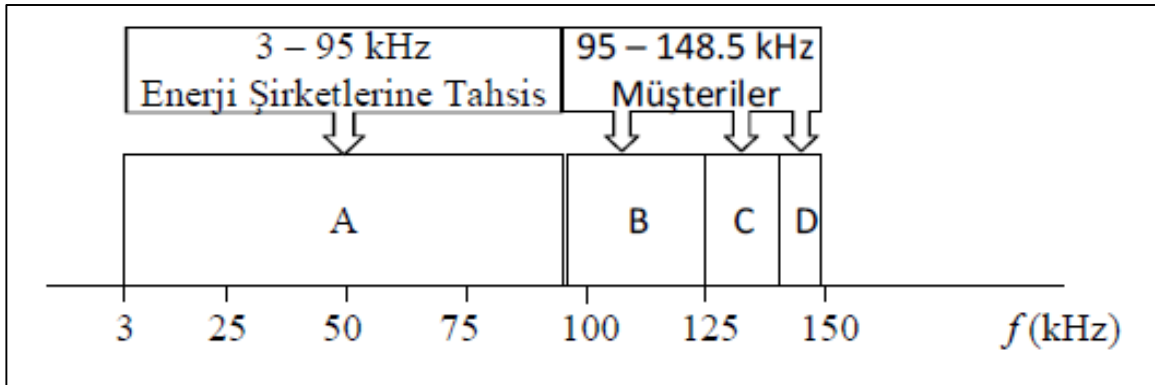
CENELEC tarafından bu iletim bandı (3 – 148.5 kHz) olarak belirlenerek Şekil 3.1’de gösterildiği üzere kullanım amaçlarına göre dört alt banda ayrılmıştır.

CENELEC A : 3 kHz – 95 kHz bant aralığı enerji tedarikçisi şirketlerin kullanımına ayrılmıştır.

CENELEC B : 95 kHz – 125 kHz bant aralığındadır ve kullanıcılar standart protokol yardımıyla faydalanabilirler.

CENELEC C : 125 kHz – 140 kHz bant aralığındadır ve CDMA/CA protokol kullanılarak ev ağ sistemlerinde faydalanılmaktadır.

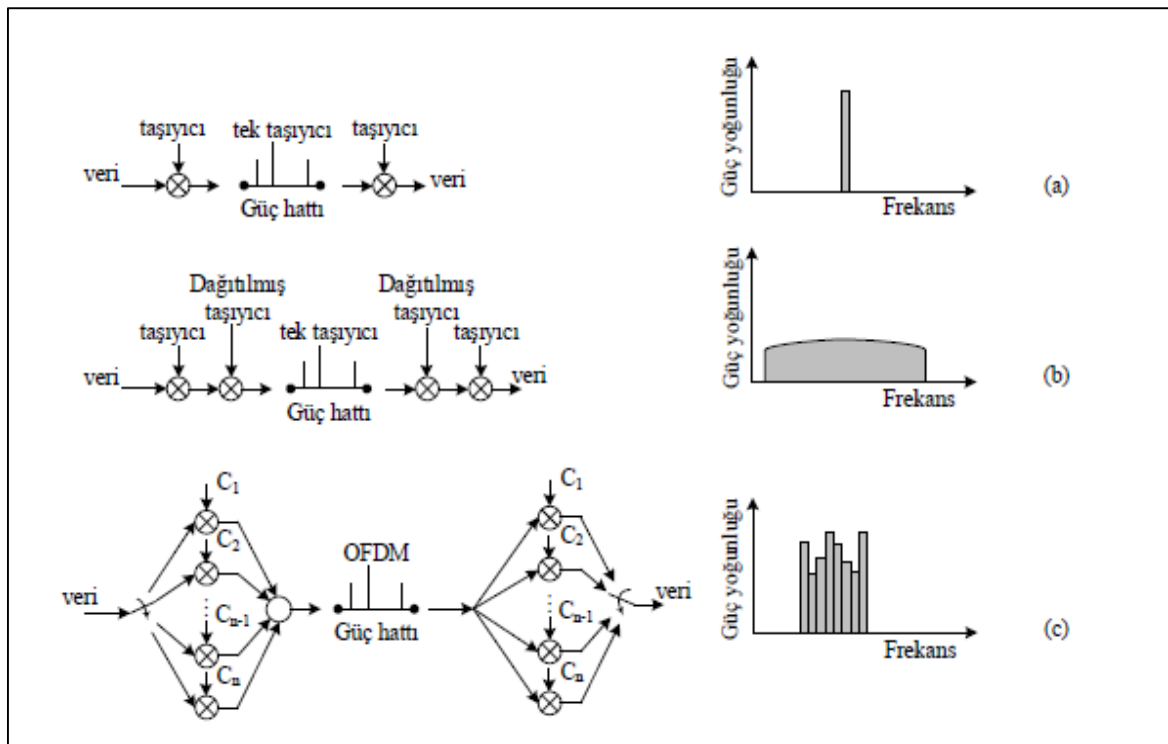
CENELEC D : 140 kHz – 148.5 kHz bant aralığındadır ve alarm/güvenlik maksadıyla özel protokol gereksiz kullanılabılır.



Şekil 3.1. CENELEC frekans bantları [11]

Dar bant EHİ sistemleri genellikle yenilenebilir enerjiye dayalı elektrik üretimi, gelişmiş ölçme teknikleri, akıllı sistemler ve otomasyon gibi düşük ve orta gerilim enerji sistemlerinde kullanılmaktadır. Dar bant EHİ sistemlerinde muhtelif modülasyon tipleri kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 3.2 dar bant EHİ sistemlerinde kullanım alanı bulan modülasyon tekniklerini göstermektedir. Şekil 3.2.a ile gösterilen modülasyon yöntemi tek taşıyıcılı olup bu yöntemde bilgi ve veri belirli miktarda ayrık sinyal ile gösterilmektedir. Bilgi; ASK (Amplitude Shift Keying - Genlik Kaydırmalı Anahtarlama), FSK (Frequency Shift Keying - Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) veya PSK (Phase Shift Keying - Faz Kaydırmalı Anahtarlama) kullanılmak suretiyle anahtarlanabilmektedir. Buradaki modülasyon tipi dar bant gürültülerine ve sinyal bozunumlarına karşı duyarlı olduğu için hataları algılayıcı ve düzeltici ilave devrelere ihtiyaç duymaktadır [5].

Şekil 3.2.b ile sunulan dağıtılmış spektrum modülasyon çeşidinde, bilgi belirli bir genişlikteki frekans aralığında yayılarak modellenir. Düşük maliyete sahip olması ve enerji sistemlerinden kaynaklanan parazit/gürültü ile frekans bozunumlarına karşı dayanıklılığı sayesinde kullanım alanı geniştir. DCSK (Differential Code Shift Keying - Diferansiyel Kod Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyon tipi bu modülasyon çeşidine örnek gösterilebilir.



Şekil 3.2. EHİ modülasyon teknikleri [11]

Şekil 3.2.c ile sunulan çoklu taşıyıcılı modülasyon çeşidi genel olarak geniş bant EHİ sistemlerinde kullanılmaktayken son yıllarda dar bant EHİ sistemlerinde de kullanılmaya başlamıştır. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama) burada sunulan modülasyon tekniğinin en yaygın kullanım alanı bulan çeşidi olmakla beraber OFDM tekniği çeşitli modülasyon tiplerinin geliştirilmesinde de kullanılmıştır. Bu yöntem daha büyük boyutlu verilerin aktarılmasını mümkün kılmasına rağmen devre tasarımının diğer yöntemlere nispeten daha karışık olması ve maliyetlerinin daha fazla olması gibi bazı dezavantajlara sahiptir [12].

Geniş bant EHİ; görüntü ve ses verilerinin aktarımı ile yüksek boyutlara sahip verilerin aktarımı gibi fonksiyonlar maksadıyla kullanım alanı bulan ve dar bant EHİ'ne göre daha fazla hız ve yüksek kapasiteli veri aktarımı sağlayan haberleşme sistemidir. Geniş bant EHİ, halihazırda mevcut altyapıyı kullanarak veri iletimi sağladığından ekstra kablolamaya gerek kalmadan uygulanabilen ve maliyeti nispeten düşük olan bir yöntemdir. Ancak yüksek frekanslı veri aktarımına uygun olmayan mevcut enerji altyapısı nedeniyle uzun mesafeli iletim maksadıyla günümüzde kullanım alanı bulamamaktadır. Bununla birlikte GB EHİ sistemlerinde yüksek frekans bantları (30 MHz'e kadar) kullanıldığı için terminale yakın bulunan elektronik cihazlar GB EHİ sinyalinden etkilenmekte bunun sonucunda da elektromanyetik uyumluluk sorunu oluşmaktadır. Bu dezavantajları sebebiyle, dış iletişimden ziyade ev içi ağlarında daha çok kullanılmaktadır [13].

3.3. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)

Çalışmamızda karşılaştırmasını yaptığımız PRIME ve G3-PLC sistemleri Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) tabanlı sistemlerdir. OFDM, çok sayıda alt taşıyıcıdan oluşan ve her bir alt taşıyıcının birbirinden bağımsız şekilde modüle edilerek veri taşıdığı bir modülasyon yöntemidir. Her taşıyıcı, PSK veya QAM (Quadrature Amplitude Modulation - Dörtlü Genlik Modülasyonu) gibi modülasyon çeşitleriyle modüle edilerek paralel veri akışını sağlar.

Taşıyıcılar tarafından kullanılan modülasyon tipini değiştirmenin mümkün olması sayesinde modülasyonun iletim hattında bulunan gürültüye uyarlanması ve daha az gürültülü dönemlerde iletim hızlarının artırılabilmesi OFDM'nin avantajlarından bir tanesidir. EHİ sistemleri açısından bir diğer önemli avantajı da OFDM alt taşıyıcılarının seçilebilir olmasıdır.

Başka bir deyişle, bir alt taşıyıcının frekansında bulunan gürültünün bu alt taşıyıcının kaldırılmasıyla önlenbilmesidir. OFDM tekniği ile düşük bit oranlı bir iletim birçok farklı alt taşıyıcı üzerinden verilerin farklı kısımlarının iletilmesiyle yüksek bit oranlı bir ilettime dönüştürülür. Zorlu kanal koşullarına uyum sağlama yeteneği (modülasyonu değiştirerek veya alt taşıyıcıları seçerek), çok yollu yayılmaya karşı dayanıklı olması ve yüksek bit hızı sağlaması OFDM'i EHİ ve AMR sistemleri açısından çekici bir seçim haline getirmektedir [14].

Bu avantajların yanı sıra OFDM teknolojisinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. OFDM sistemleri genel itibariyle maliyetlidir. Sistemin ihtiyaç duyduğu yüksek kapasiteli güç amplifikatörü daha az verimlidir ve daha fazla güç tüketerek daha fazla ısı üretirler. Aynı zamanda OFDM sistemleri daha karmaşık olduğundan kuplaj devresi, PLC sinyalinin yüksek gerilim ağına bağlamak için kullanılan transformatör, işlemci veya PLC modem için de ek maliyetler gerektirmektedir.

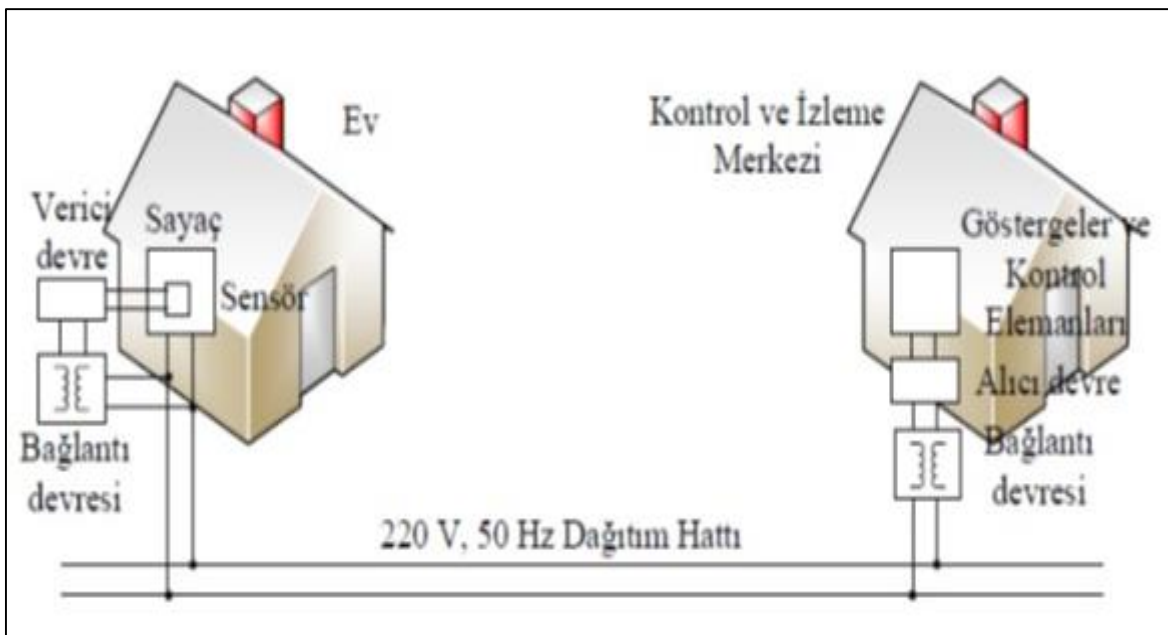
3.4. Otomatik Sayaç Okuma (AMR) Sistemleri

Enerji tasarrufu günümüzde giderek daha önemli bir mesela haline gelmektedir. Bu doğrultuda enerjinin akıllıca dağıtılması, izlenmesi ve yönetilmesi gerekmektedir. Bu izlemenin sayaçlardan manuel olarak veri toplanması şeklinde yapılması pek çok dezavantaja sahiptir. İnsana dayalı sistemler genellikle hataya daha meyilli olmaktadır. Ayrıca günümüz koşullarında modern yerleşim birimlerinde güvenlik sebebiyle erişim sıkıntıları ortaya çıkabilmektedir. Yine benzer şekilde yüzlerce veya binlerce hanelik yerleşim yerlerinde verilerin toplanması hem çok sayıda personel gerektirmekte hem de uzun zaman almaktadır.

Bu ve benzer nedenlerden dolayı su, gaz ve elektrik tüketiminin veya ihtiyaç duyulan diğer verilerin uzaktan ölçümünün yapılması daha makul bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji planlaması yapılmasında üretim tesislerindeki otomasyon tek başına yeterli değildir. Teknolojik gelişim ile beraber elektrikli araçlar, büyük güç elektroniği devreleri ve tüketici tarafı güç optimizasyonu gibi enerji kalitesini etkileyen devre elemanlarının kullanımı büyük önem kazanmıştır. Hem üretici hem de tüketici tarafında güç optimizasyonu yapabilmek için üretilen veya tüketilen elektrik enerjisinin sağlıklı bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu maksatla elektrik sayaçları kullanılır [11].

Elektrik iletim ve dağıtım sisteminin verimliliği, güvenliği ve güvenilirliği, mevcut elektrik şebekelerinin etkileşimli bir servis ağına veya akıllı şebekeye dönüştürülmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle, AMR (Automatic Meter Reading - Otomatik Sayaç Okuma) Sistemleri operatörlerin ağlarını gerçek zamanlı olarak izlemelerini ve onarmalarını sağlar. Akıllı şebeke iletişim teknolojileri, güç şebekesi kontrol merkezinin saniyede birkaç kez kendisine bağlı her bir sayaca erişmesini sağlayarak güç sistemine dinamik görünürlük sunmaktadır.

AMR sistemi üzerinden sayaçlar ve kontrol merkezleri arasındaki veri iletişimi için mevcut güç hattı altyapısını kullanan enerji hattı iletişim teknolojisi uygun maliyetli bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Son zamanlarda, DB EHİ sistemleri AMR uygulamaları için ilgi görmektedir. GB EHİ teknolojileri kullanılarak bazı testler ve pilot uygulamalar gerçekleştirilmiş ve hatta UDB EHİ teknolojileriyle gerçek konuşlandırmalar mevcut olsa da DB EHİ hem sayaç okuma hem de sayaçların uzaktan bağlanması-kesilmesi ve yeni özelliklerin mevcut altyapı üzerinden sahaya taşınmasını garantilemek için uzaktan ürün yazılımı yükseltme yetenekleri gibi gerçek zamanlı uygulamalar dahil olmak üzere AMR için yaygın bir seçimdir. GB EHİ sistemleri, elektrik şebekeleri üzerinden ticari internet erişimi ve ev içi kolay yerel alan ağı (LAN) bağlantısı için kullanılmıştır. UDB EHİ sistemleri, ekonomik açıdan başka hiçbir teknoloji seçeneğinin uygun olmadığı, gerçekten düşük yoğunluklu ve dağınık alanlar için bazen son bir seçenek olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.3. EHİ ile sayaç okunmasına ilişkin şema [11]

Şekil 3.3'te EHI yöntemiyle sayaç okumaya ilişkin temel şema sunulmuştur. Sayaç üzerindeki sensör yardımıyla okunan bilgi verici devreye aktarılarak sayısal verinin modüle edilmesi sayesinde bağlantı devresi üzerinden enerji hattına ulaştırılmaktadır. Enerji hattından gelen bilgiler kontrol ve izleme merkezindeki alıcı devre yardımıyla demodüle edilerek gözlemlenmekte ve gerekli müdahale ve işlemler gerçekleştirilmektedir.



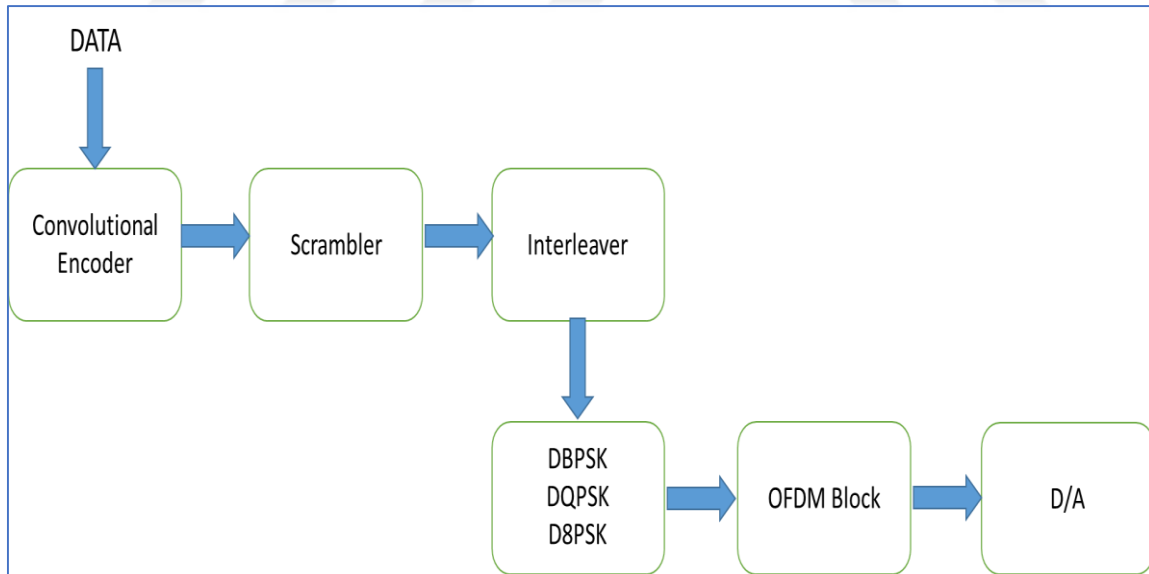


4. TEORİK KIYASLAMA

4.1. PRIME

PRIME, bir Fiziksel katman (PHY) ve Ortam Erişim Kontrolü (MAC) katmanından oluşan standart tanımıdır. İspanyol enerji sağlayıcısı Iberdrola liderliğindeki PRIME Alliance tarafından geliştirilmiş olup öncelikle İspanyol şebekesinde uygulanmıştır. Artan sayıda PRIME Alliance üyesi ve farklı üreticilerin ürünleri ile, dünya çapında PRIME ölçüm cihazları 2015'in ortasında 6,5 milyonun üzerine çıkmış olup günümüzde ise 15 ülkeye ve 20 milyonun üzerine çıkmıştır.

PRIME sistemi basit blok diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. PRIME sistemi çalışma frekansı (42-89 kHz) bant aralığındadır. OFDM sembollerinin her biri, bu bant genişliğine 488 Hz. aralıkla yerleştirilmiş 97 alt taşıyıcıdan oluşur. PRIME; D8PSK, DQPSK ve DBPSK olmak üzere üç tip modülasyon kullanmaktadır. Örnekleme frekansı 250 kHz ve FFT boyutu $M=512$ 'dir [15].



Şekil 4.1. PRIME sistemi basit blok diyagramı.

Kodlama kullanılmadan yapılan veri iletimi ideal şartlar altında daha yüksek veri hızlarına olanak sağlar ancak pratik ortamın ideal şartlardan uzak olması nedeniyle güç hattı kanalının frekans yanıtı kodlanmadan yapılan veri iletimine önemli ölçüde zarar verdiği için kodlama kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1'de PRIME PHY'de kullanılan frekans ve zamanlama parametreleri sunulmuştur. Bu parametreler tüm kodlama kombinasyonları için ortaktır.

Çizelge 4.1. PRIME PHY parametreleri [15].

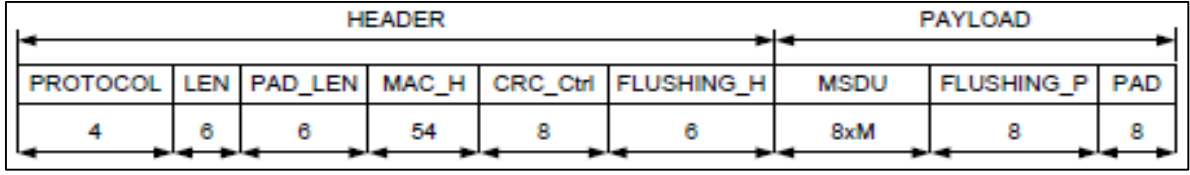
PRIME PHY FREKANS VE ZAMAN PARAMETRELERİ	
PARAMETRE	DEĞER
Base Band Clock (Hz)	250 000
Alt Taşıyıcı Aralığı (Hz)	48,828125
Alt Taşıyıcı Sayısı	97
FFT Aralığı (Örnekleme)	512
FFT Aralığı (μs)	2048
Döngüsel Önek (Örnekleme)	48
Döngüsel Önek (μs)	192
Sembol Aralığı (Örnekleme)	560
Sembol Aralığı (μs)	2240
Başlangıç Eki Periyodu (μs)	2048

Çizelge 4.2, faydalı yük iletimi sırasındaki PHY veri hızını ve çeşitli modülasyon ve kodlama kombinasyonları için maksimum MSDU uzunluğunu göstermektedir.

Çizelge 4.2. PRIME PHY veri hızı ve paket boyutu parametreleri.

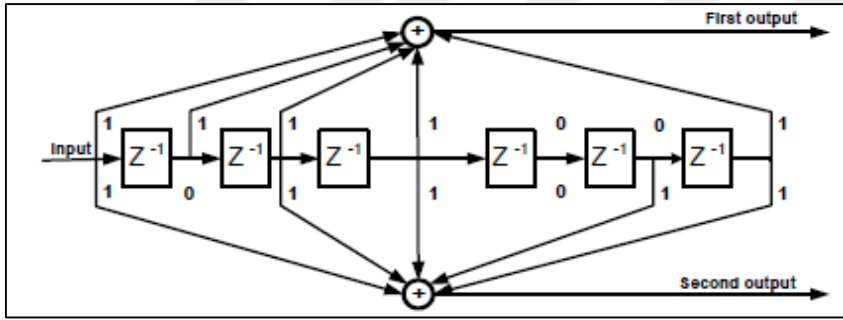
	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
	On	Off	On	Off	On	Off
Convolutional Code	On	Off	On	Off	On	Off
Alt Taşıyıcı Başına Bilgi Bitleri	0,5	1	1	2	1,5	3
OFDM Başına Bilgi Bitleri	48	96	96	192	144	288
Raw Data Rate	21,4	42,9	42,9	85,7	64,3	128,6
63 Sembol ile Azami MSDU Uzunluğu (Bit)	3016	6048	6040	12096	9064	18144
63 Sembol ile Azami MSDU Uzunluğu (Byte)	377	756	755	1512	1133	2268

PHY’de bulunan üst bilgi ve veri yapısı Şekil 4.2’de sunulmuştur.



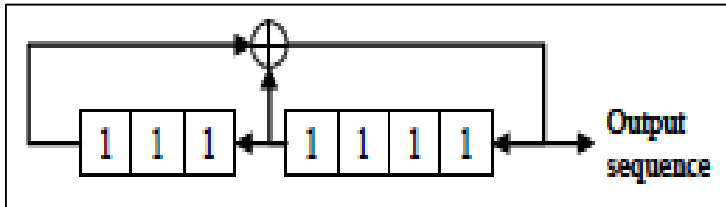
Şekil 4.2. PRIME üst bilgi ve veri yapısı.

Evrişimli Kodlayıcı (Convolutional Encoder - CE), kodlanmış bit akışı oluşturmak için kullanılır. 1/2 oranlı (uzunluk $K = 7$) ve $[001111001, 001011011]$ kod üretici polinomuna sahip bir encoderdir. PRIME sisteminde CE isteğe bağlı olarak kullanılır ve kullanıp kullanmayacağına uyarlamalı olarak MAC katmanı tarafından karar verilir [16]. PRIME sisteminde kullanılan CE blok diyagramı Şekil 4.3’te sunulmuştur.



Şekil 4.3. PRIME Convolutional Encoder blok diyagramı.

Sonrasında bit akışı $S(x)=x^7 \oplus x^4 \oplus 1$ üretici polinomuna sahip karıştırıcıya (scrambler) iletilir. Karıştırıcı blok diyagramı Şekil 4.4’te sunulmuştur.



Şekil 4.4. PRIME karıştırıcı blok diyagramı.

Son aşamada ise bit hatalarının oluşumunu rastgele hale getirmek için her OFDM sembolüne serpiştirici (interleaver) uygulanmaktadır. Tipik enerji hattı kanallarının frekans zayıflaması (dar bant paraziti) nedeniyle, OFDM alt taşıyıcıları genellikle farklı genliklerde alınır.

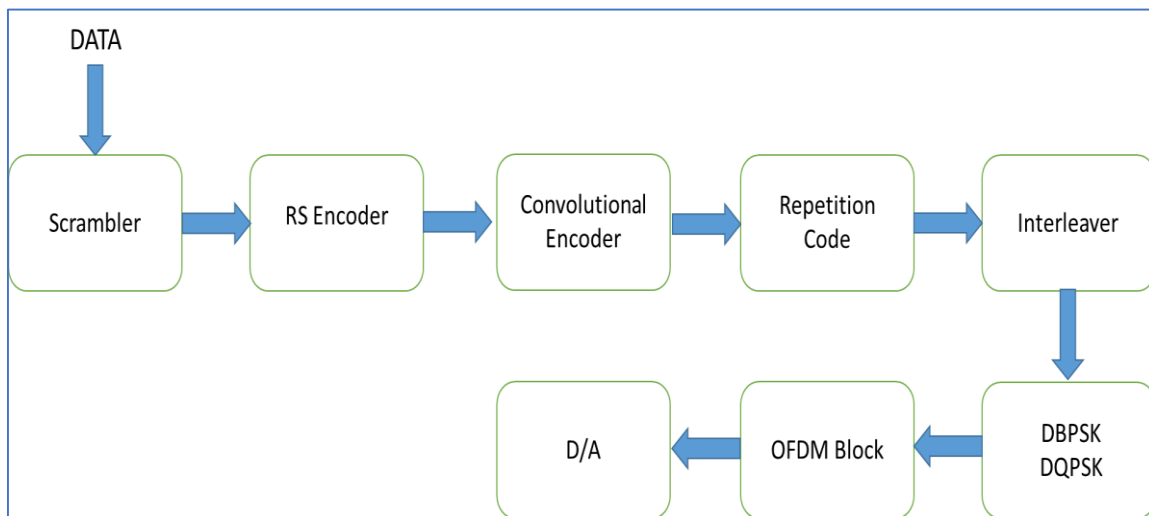
Spektrumdaki derin solmalar, alt taşıyıcı gruplarının diğerlerinden daha az güvenilir olmasına neden olabilir, bu nedenle rastgele dağılmak yerine patlamalarda bit hatalarının oluşmasına neden olabilir. Interleaving, kod çözmeden önce bit hatalarının oluşumunu rasgele hale getirmek için uygulanır.

Ara sembol girişimini (Inter Symbol Interference – ISI) önlemek amacıyla OFDM bloğu içerisinde Paralel/Seri dönüşümü öncesinde 48 örneklilik (192 μ s) döngüsel önek uzantısı (Cyclic Prefix Extension) eklenir.

Teorik olarak; kodlanmamış D8PSK modülasyonu kullanılarak 128,6 kbps veri hızına ulaşılabilirken, kodlanmış DBPSK kullanılması durumunda ise veri hızı 21,4 kbps'ye düşmektedir. Bununla birlikte Çerçeve Kontrol Başlığı (Frame Control Header - FCH) içerdiği verinin kritikliği nedeniyle her zaman CE ile kodlanmış olarak ve DBPSK modülasyonu kullanılarak iletilir [17].

4.2. G3-PLC

G3-PLC sistemi ERDF (Électricité Réseau Distribution France) tarafından elektrik üreticilerinden (tedarikçiler) son kullanıcılara uzanan elektrik tedarik zincirinin yönetilmesi için geliştirilmiştir. Sistem, OFDM PLC kullanarak müşteri tesislerine kurulan sayaçlarla yoğunlaştırıcı arasında (Master – Slave) iletişim kuran güvenilir iki yönlü bir iletişim sağlamaktadır [18].



Şekil 4.5. G3-PLC sistemi basit blok diyagramı.

G3-PLC sistemi basit blok diyagramı Şekil 4.5'te gösterilmiştir. G3-PLC, (35-91 kHz) bandında çalışmakta olup 1562,5 Hz. aralıkla yerleştirilmiş 36 adet alt taşıyıcı kullanmaktadır. PRIME'dan farklı olarak sadece DBPSK ve DQPSK modülasyonlarını desteklemektedir. Örnekleme frekansı 400 kHz ve FFT boyutu $M=256$ 'dır [18].

Çizelge 4.4'te G3-PLC PHY katmanında kullanılan frekans ve zamanlama parametreleri sunulmuştur.

Çizelge 4.4. G3-PLC PHY katmanı veri hızı ve paket boyutu parametreleri.

G3-PLC PHY FREKANS VE ZAMAN PARAMETRELERİ	
PARAMETRE	DEĞER
Base Band Clock (Hz)	400 000
Alt Taşıyıcı Aralığı (Hz)	1,5625
Alt Taşıyıcı Sayısı	36
FFT Aralığı (Örnekleme)	256
FFT Aralığı (μ s)	1024
Döngüsel Önek (Örnekleme)	30
Döngüsel Önek (μ s)	75
Başlangıç Eki Periyodu (ms)	6,08

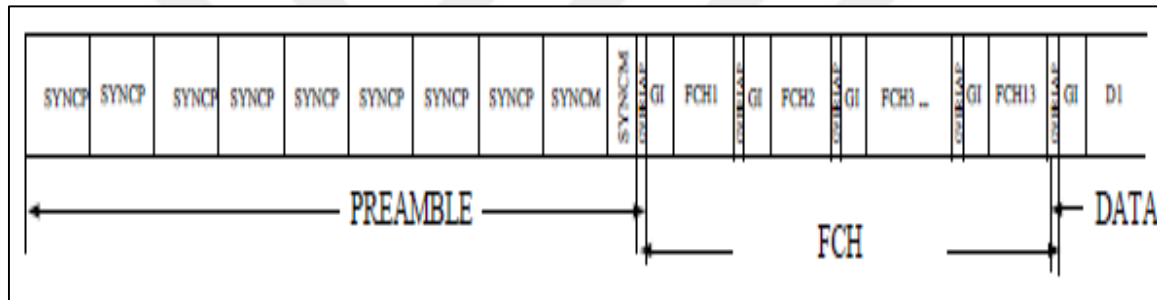
G3-PLC PHY çerçevesi de PRIME'da olduğu gibi; başlangıç eki (Preamble), üst bilgi (Header) ve veri (Payload) bölümlerinden meydana gelmektedir. Her PHY çerçevesi, 6,08 ms süren bir başlangıç ekiyle başlar, ardından toplam 9,295 ms üst bilgi ve her biri $4 \times 0,715$ ms süren M adet OFDM sembolünden meydana gelir [17]. G3-PLC PHY çerçevesi Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. G3-PLC PHY çerçevesi.

BAŞLANGIÇ EKİ (PREAMBLE)	ÜST BİLGİ (HEADER)	VERİ (PAYLOAD)
6,08 ms	9,2955 ms	$M \times 4 \times 0,715$ ms
	13 OFDM Sembolü	$M \times 4 \times$ OFDM Sembolü

G3-PLC PHY katmanı iki tür çerçeveyi destekler. Her çerçeve, AGC adaptasyonuna ek olarak senkronizasyon ve saptama için kullanılan bir başlangıç ekiyle başlar. Önsöz, sekiz SYNC-P sembolünden ve ardından bitişik semboller arasında döngüsel önek bulunmayan bir buçuk SYNC-M sembolünden oluşur. İlk sembol, önde gelen noktalarda yükseltilmiş kosinüs şekillendirmeyi içerir. Son yarım sembol de takip eden noktalarda yükseltilmiş kosinüs şekillendirmeyi içerir [18].

Başlangıcı, Çerçeve Kontrol Başlığına (Frame Control Header - FCH) tahsis edilmiş 13 veri sembolü takip eder. FCH, veri çerçevesini demodüle etmek için gereken önemli kontrol bilgilerine sahiptir. Daha sonra veri sembolleri iletilir. G3-PLC çerçeve yapısı Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. G3-PLC çerçeve yapısı.

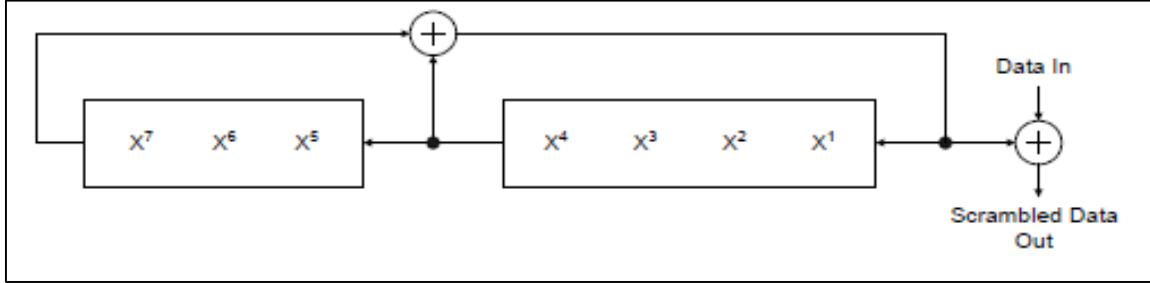
Başlangıç ön eki, 8 özdeş P simgesinden ve 1½ özdeş M simgesinden oluşur. P ve M sembollerinin her biri 256 örnektir, vericide önceden depolanır ve veri sembollerinden hemen önce iletilir. P sembolleri AGC adaptasyonu, sembol senkronizasyonu, kanal tahmini ve başlangıç fazı referans tahmini için kullanılır. M sembolleri, tüm taşıyıcıların p fazı kaydırılmış olması dışında P sembollerine özdeştir. Alıcıda, çerçeve senkronizasyonu için sembol P ve sembol M dalga formları arasındaki faz aralığı kullanılır [18].

Başlangıç ekinde hemen sonraki dört veri sembolü çerçeve kontrol başlığı (FCH) için ayrılmıştır. FCH, her veri çerçevesinin başlangıcında iletilen bir veri yapısıdır ve mevcut çerçeve ile ilgili bilgileri içerir. FCH'de hata tespiti için 5 bitlik bir döngüsel artıklık kontrolü (CRC) kullanılır. CRC5, Eş. 4.2'deki 5. derece standart oluşturucu polinomu kullanılarak hesaplanır [18].

$$G(x) = x^5 + x^2 + 1$$

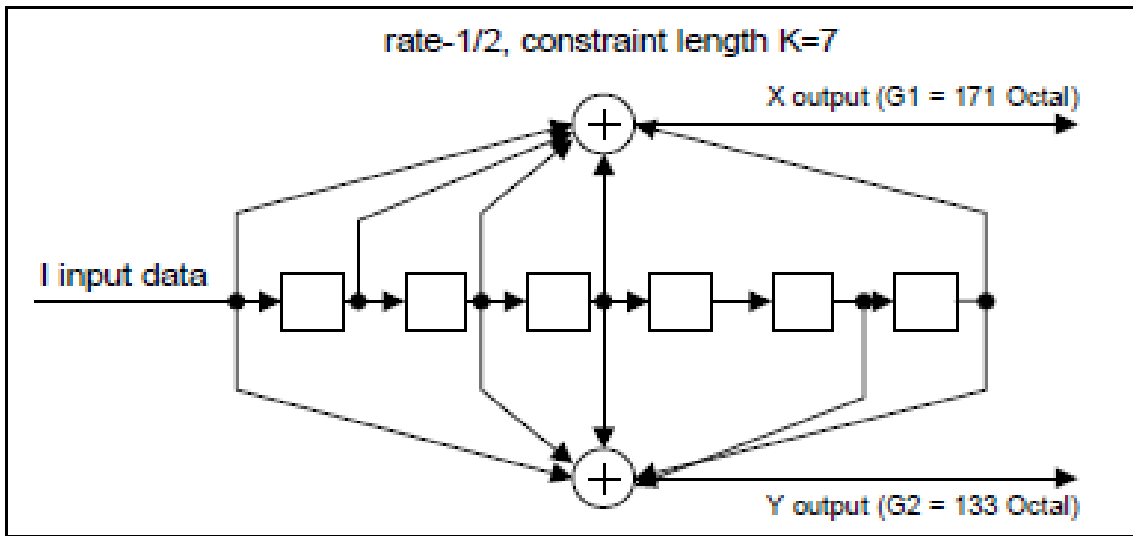
(4.2)

Veri karıştırıcı bloğu, Şekil 4.7'deki oluşturucu polinomu kullanarak verilere rastgele bir dağılım sağlamaya yardımcı olur.



Şekil 4.7. G3-PLC karıştırıcı blok diyagramı.

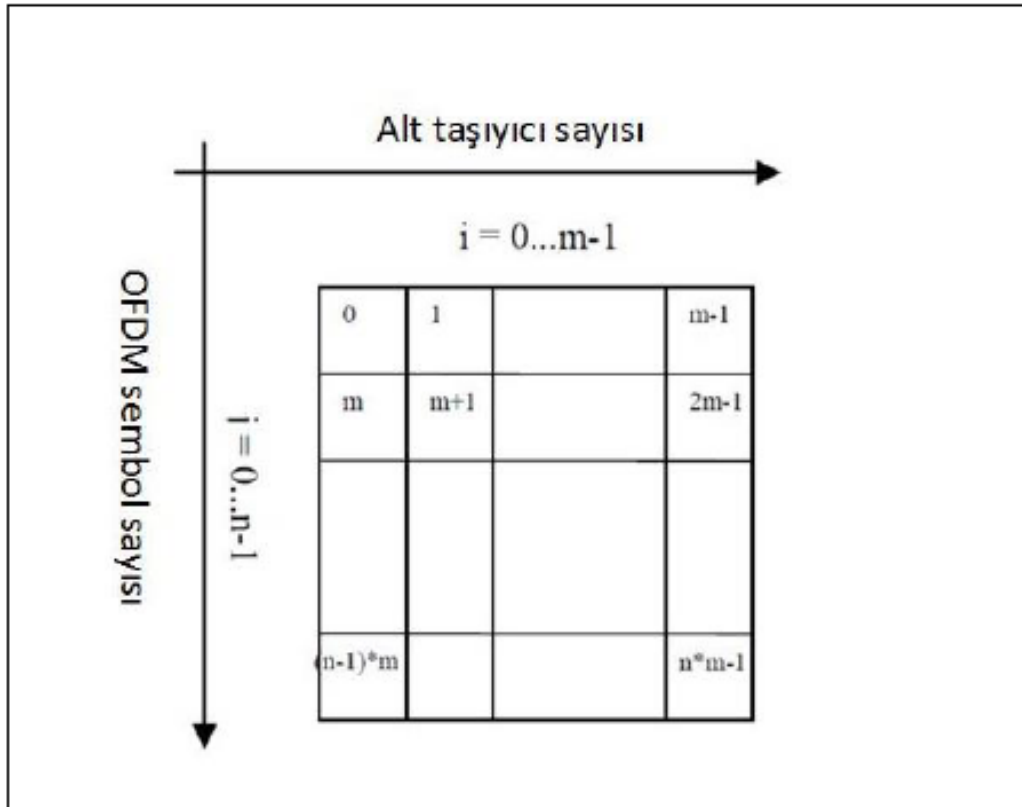
FEC kodlayıcı, bir Reed-Solomon kodlayıcı ve ardından bir evrişimli kodlayıcıdan oluşur. CE (1/2 oranlı (uzunluk $K = 7$) ve $[001111001, 001011011]$ kod üretici polinomu) ve karıştırıcı ($S(x)=x^7 \oplus x^4 \oplus 1$ üretici polinomu) yapısı PRIME'da kullanılan ile aynı yapıya sahiptir [17]. G3-PLC'de kullanılan evrişimli kodlayıcı Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. G3-PLC evrişimli kodlayıcı blok diyagramı.

Reed-Solomon (RS) kodlayıcı için ise iki tip yapı kullanılmaktadır. Normal mod için RS ($N=255, K=239, T=8$) ve Robust mod için RS($N=255, K=247, T=4$) kullanılmaktadır. Bu gösterimde K ve T giriş sembollerinin sayısı iken N çıkış sembollerinin sayısıdır. RS kodlama için Galois Field (GF)'dan faydalanır. Ayrıca robust modda bitleri 4 kez tekrar eden tekrarlama kodlayıcısı (Repetition Code - RC4) ve Süper Robust modda ise bitleri 6 kez tekrar eden (Repetition Code - RC6) kullanılmaktadır [5].

Serpiştirici, çok sayıda OFDM sembolü için birkaç bitişik frekansı bozan ve birkaç ardışık OFDM sembolünü bozan bir patlama hatasıyla kesintiye uğrayan bir frekans zayıflamasına karşı koruma sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu doğrultuda bu iki problemle birlikte mücadele etmek maksadıyla serpiştirme iki kademeli şekilde uygulanmaktadır. Öncelikle her bir sütun farklı sayıda dairesel olarak kaydırılmaktadır. Bu sayede, bozunmuş OFDM sembolü değişik sembollere yayılır. İkinci adımda, her satır farklı sayıda dairesel olarak kaydırılır, bu sayede tüm sütunun bozunması engellenir. Serpiştirici yapısı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Bu kaymaların miktarları, her bir birleştirme bloğundaki OFDM sembolüne ait alt taşıyıcı sayısı ve buna bağlı olarak seçilen m_i , m_j , n_i ve n_j parametreleri ile tespit edilir.



Şekil 4.9. Serpiştirici yapısı [5]

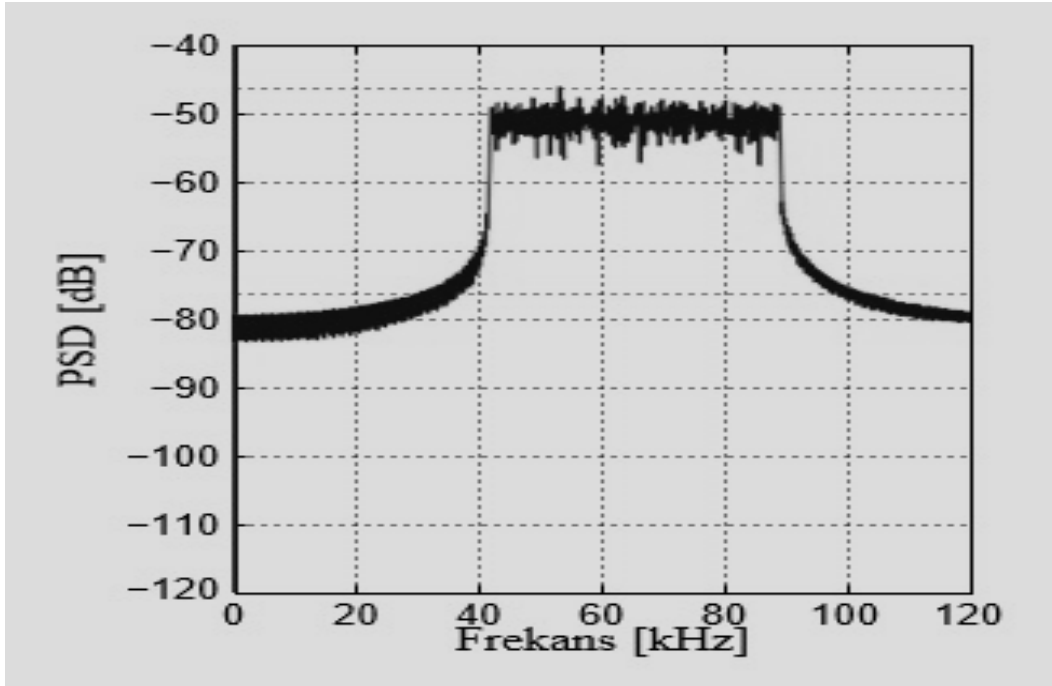
OFDM, ayrımsal şekilde kodlanmış DBPSK, DQPSK ve D8PSK gibi faz modülasyonları tarafından oluşturulan ve ayrı alt taşıyıcılara tahsis edilen karmaşık değerli sinyal noktaları üzerinde IFFT uygulanarak elde edilir. OFDM sembollerinde IFFT ile üretilen her blok başına bir döngüsel önek (CP-Cyclic Prefix) ilave edilir. Döngüsel önek uzantısı da PRIME'dan farklı olarak 30 örnektir (75 μ s).

Ayrıca her OFDM sembolü spektral formunun başlangıç ve sonunda 8 örneklilik yükseltilmiş kosinüs (raised-cosine) ile pencerelenir [17]. Bant dışı emisyonu azaltmak ve spektral yan lobu azaltmak için, Yükseltilmiş Kosinüs şekillendirme tüm veri sembollerine uygulanır. Ardından, birbirini izleyen sembollerin kuyrukları ve başları üst üste gelir ve birbirine eklenir.

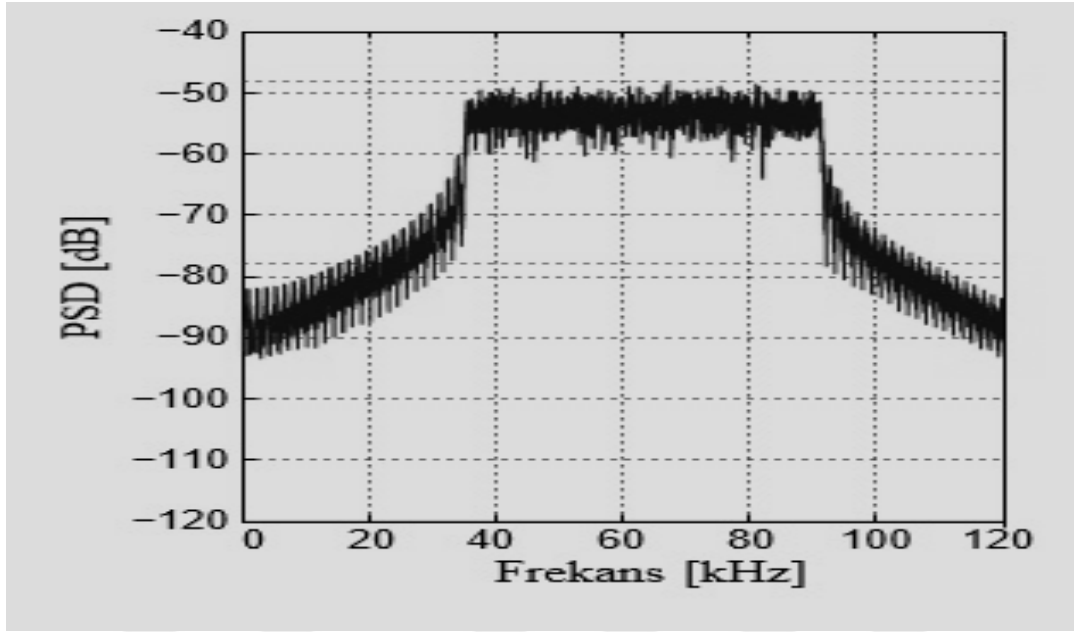
Teorik olarak; DQPSK modülasyonunda sadece CE ve RS encoder kullanılması ve RC kullanılmaması durumunda 35,4 kbps veri hızına ulaşılabilirken, DBPSK modülasyonunda CE ve RS encoder ile birlikte RC4 kullanılması durumunda veri hızı 3,2 kbps'ye düşmektedir [18].

4.3. Karşılaştırma

PRIME, 97 adet dar aralıklı alt taşıyıcı kullanırken, G3-PLC veri iletimi için 36 adet geniş aralıklı taşıyıcı içerir. Dar alt taşıyıcı aralığı, PRIME'de kompakt bir PSD'yi desteklerken, G3-PLC iyileştirme için OFDM sembolüne pencereleme uygulamak zorundadır [17]. Hem PRIME hem de G3-PLC Spektral Güç Yoğunluğu (Power Spectral Density – PSD) incelendiğinde Şekil 4.10 ve 4.11'de de görüleceği üzere benzer zarf yapılarına sahiptirler.



Şekil 4.10. PRIME PSD



Şekil 4.11. G3-PLC PSD

PRIME, tüm OFDM spektrumunda doğrusal bir chirp sinyali kullanırken, G3-PLC OFDM sembolünü 9.5 kez tekrarlamaktadır. Her iki protokolde de başlangıç eki senkronizasyon amacıyla kullanılır. G3-PLC’de ayrıca başlangıç eki kanal transfer fonksiyonunu tahmin etmek için kullanılır. Ayrıca, başlıktaki alt taşıyıcıların fazlarını tespit etmek için G3-PLC başlangıç ekinin son sembolü de referans olarak alınır. PRIME başlangıç ekinde faz bilgisi bulunmadığından, faz referansı sağlamak için başlık ve yükte bir pilot alt taşıyıcı kullanılır [16].

Dikkate alınması gereken bir diğer nokta ise İleri Hata Düzeltmedir (FEC). Her iki protokol de aynı Evrişimli Kodlayıcıyı (CE) kullanır. Ancak G3-PLC’de CE her zaman kullanılırken, PRIME modunda kanal yeterince iyiye ve daha yüksek verim gerekiyorsa MAC katmanı tarafından devre dışı bırakılabilir. G3-PLC’de ayrıca tüm modlarda Reed Solomon (RS) Kodlayıcıyı kullanır [15]. G3-PLC’de serpiştirici, tüm pakete uygulanır ve böylece komutunun her zaman istenen veri miktarına göre hesaplanması gerekir. Aksine PRIME’da serpiştirme sabit bir serpiştirme tablosundan yararlanılarak her bir OFDM sembolü başına gerçekleştirilir [17].

Son olarak, alıcı senkronizasyonunu sağlamak için her veri paketinden önce gelen ilgili başlangıç ekleri karşılaştırılacaktır. PRIME, koruma aralığı (guard interval) olmayan bir OFDM sembolüne eşit süreli bir chirp dizisi uygular. Aksine G3-PLC başlangıç eki, 9

buçuk kez tekrarlanan bir OFDM sembolünden oluşur ve bu sayede son bir buçuk sembol zıt işaret ile gönderilir. Bu nedenle, bir alıcının bir paketi tanımama olasılığı azalır. Literatür [17] açısından, her iki başlangıç eki de nispeten uzun oldukları ve CAZAC (Constant amplitude zero autocorrelation) özelliğini göstermedikleri için ideal değildir, bu nedenle her ikisi de geliştirilebilir.

PRIME ve G3-PLC sistemlerinin teorik bit rate karşılaştırma tablosu Çizelge 4.6'da verilmiştir.

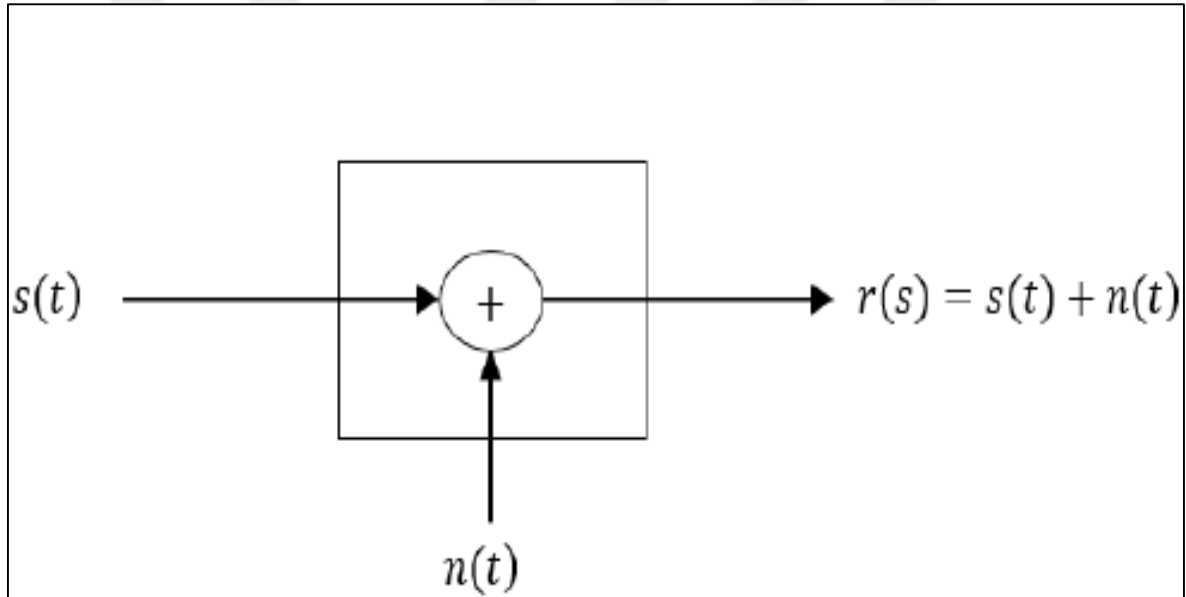
Çizelge 4.6. PRIME ve G3-PLC bit rate karşılaştırma tablosu.

	PRIME			G3	
	1.3.6		1.4		
	CE:ON	CE:OFF	CE+RC	CE+RS	CE+RS+RC
D8PSK	64,3 kbps	128,6 kbps	-	-	-
DQPSK	42,9 kbps	85,7 kbps	10,7 kbps	35,4 kbps	-
DBPSK	21,4 kbps	42,9 kbps	5,4 kbps	20,6 kbps	5,8 kbps

5. BENZETİM ÇALIŞMASI

5.1. Gürültü Modeli

Haberleşme sistemlerinde sinyalin iletimi esnasında iletim kanalına istenmeyen bazı sinyaller karışmaktadır. Bu sinyaller iletim kalitesi ve güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bahse konu istenmeyen sinyaller genel itibari ile gürültü olarak tanımlanmaktadır. İster kablosuz isterse de kablolu haberleşme ortamında olsun, sinyal iletimi sırasında mutlaka çevresel etkenlerden dolayı gürültü girişi bulunmaktadır. Şekil 5.1’de haberleşme sistemlerinde tipik gürültü ekleme modeli sunulmuştur.



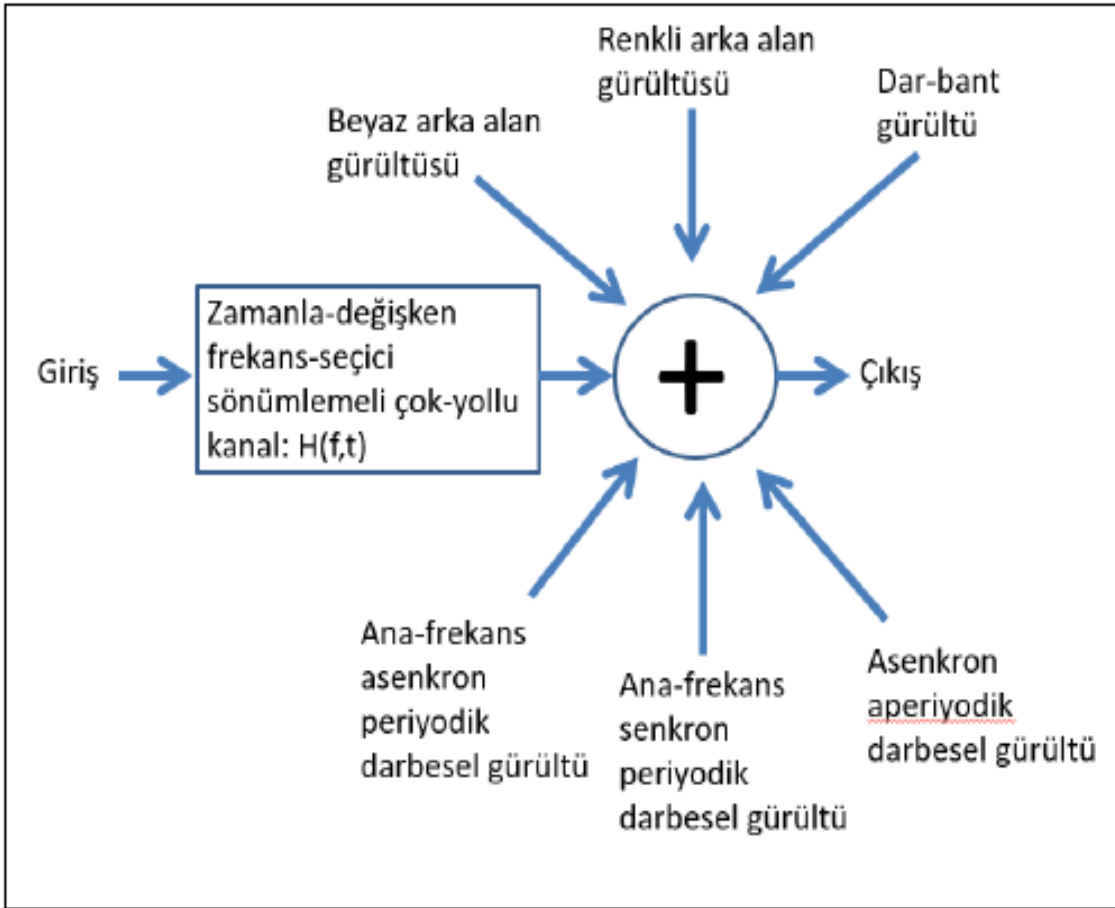
Şekil 5.1. Haberleşme sistemlerinde gürültü ekleme modeli

Gürültü, ilk olarak alıcıdaki elektronik komponentler ve yükselticiler tarafından yayılıyorsa bu durumda termal gürültü şeklinde nitelendirilebilir. Söz konusu gürültü Gauss gürültüsü şeklinde ifade edilir. Bu bağlamda meydana gelen matematiksel model genellikle ‘Eklenen Gauss Gürültüsü (Additive Gaussian Noise - AGN) olarak nitelendirilir. Bahsi geçen bu kanal modellemesi haberleşme sistemlerinin tasarım ve analizinde kullanılan en yaygın kanal modelidir [20]. Eş. 5.1’de sunulan gürültü formülünde a notasyonu ile belirtilen faktör zayıflama faktörüdür.

$$r(t) = as(t) + n(t) \quad (5.1)$$

EHİ kanalı vasıtasıyla iletilen veri, EHİ kanal yapısı nedeniyle alıcı tarafında önemli bir düşüşe sahiptir ve diğer iletişim kanallarının tersine, enerji hatları bir AWGN (Toplam Beyaz Gauss Gürültüsü) kanalı olarak betimlenmez. EHİ haberleşme kanalı, frekans seçici, hat kayıplı, çok yollu ve zaman ile değişen bir zayıflama kanalıdır. Bu kapsamda 6 farklı tipte beyaz ve beyaz olmayan gürültü tanımlanabilir [21].

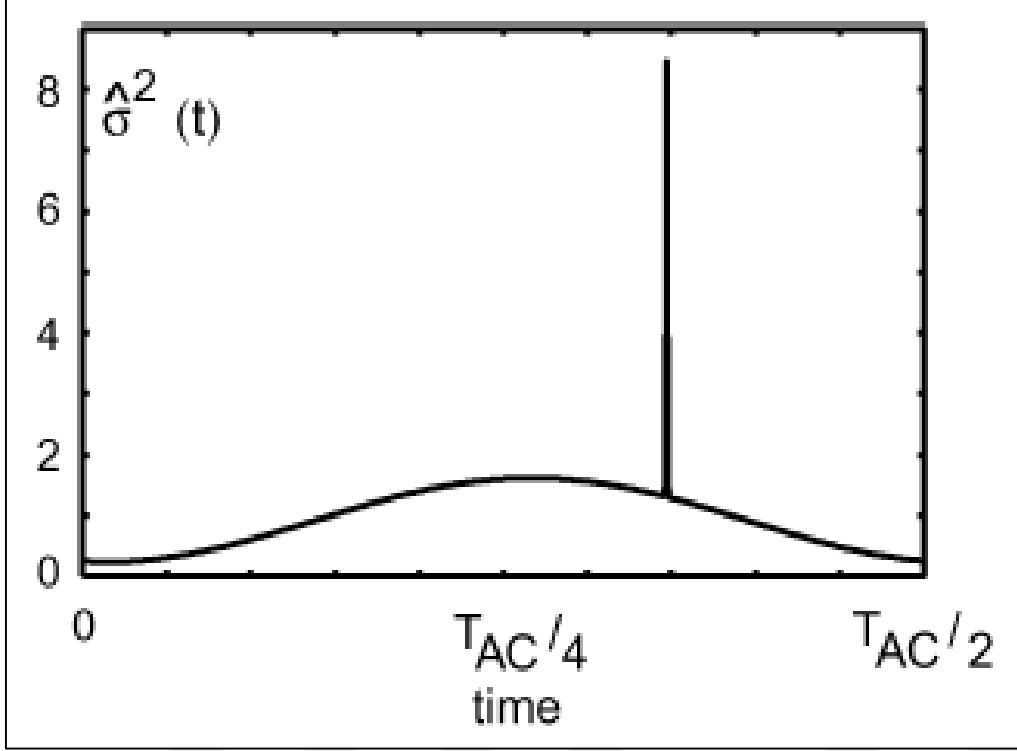
OFDM, dar bant gürültüsünün olumsuz etkilerini engellemekte başarılı olmakla birlikte, iletişimde çeşitli frekanslar yaydığı için dürtü gürültüsünü arttırmada da olumsuz bir etkiye sahiptir. Darbe gürültüsü birkaç frekansa dağıtılır ve bantlar arasındaki bağlantı demodülasyonu yardımıyla gürültü azaltılır. Şekil 5.2’de PLC gürültü türleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Gürültü türleri [5]

EHİ gürültüsü için çevrimsel modellemeler oluşturulmuştur. Dar bantlı EHİ sistemleri genel olarak az hız gerektiren uygulamalar maksadıyla kullanılsa da düşük frekanslarda bulunan gürültü sebebiyle güvenilir olarak kabul edilirler [5].

Çalışmamızda modellemesi yapılan EHİ kanallarında Katayama ACGN modeli kullanılmıştır. Kullanılan modelin yaklaşık gürültü varyansı örneği Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Yaklaşık gürültü varyansı örneği

5.2. Kanal Frekans Tepkisi

Genel olarak EHİ kanal frekans tepkisi hesaplariken, yaygın şekilde iki tür yaklaşım kullanılır:

Top-Down yaklaşımı

Bu modelleme yaklaşımı, ağ topolojisi mevcut olmadığında faydalı olabilir. Bununla birlikte, çok sayıda parametre ve karmaşık parametre tahmin prosedürü, bu yaklaşımın dezavantajlarından bazılarıdır. Dahası bu yaklaşım, EHİ ağ topolojisine ve belirli bir değişiklik ile nasıl değiştiğine bağlı olarak kanal yanıtını tahmin edemez. Ayrıca, model parametreleri sahadan sahaya (kırsal, endüstriyel, konut vb.) değişecek şekilde uyarlanmamıştır ve bu da EHİ sistemleri için kapsama ve dağıtım analizindeki uygulanabilirliğini sınırlar [20].

Bottom-Up yaklaşımı

Top-Down yaklaşımın aksine Bottom-Up yaklaşım, kanalı ağ topolojisinin ve elektrik bileşenlerinin bir işlevi olan belirleyici bir nicelik olarak görür. İletim hattı modellemesine göre, kanal tepkisi yayılma dalga yasaları kullanılarak belirlenir. Aslında, bu işlevin hesaplama karmaşıklığı büyük bir dezavantajdır ve bu nedenle ağ topolojisinin basitleştirilmesi gerekir [20].

Elektrik hattı kanal modellemesi, Top-Down veya Bottom-Up yaklaşımlarından birisini izleyebilir. İlki, güç hattı kanalını bir kara kutu olarak ele alır ve ölçümlerin sonuçlarını yerleştirerek yanıtının analitik bir ifadesini döndürür. Frekansla ilgili yaklaşımlara dayanan bu yaklaşım hızlı kanal simülasyonlarına izin verir ancak fiziksel gerçeklikle güçlü bir bağlantısı yoktur.

Bottom-Up yaklaşımı ise ağın tüm topolojik bilgilerini frekans kısıtlamaları olmadan kullandığından, frekans aralığına bağlı bir modele sahip olmaktan kurtulmamızı sağlar ve fiziksel gerçeklikle sıkı bir bağlantı kurar. Bu doğrultuda çalışmamızda Bottom-Up yaklaşımı, alçak gerilim iletim hattının transfer fonksiyonunu hesaplamak için kullanılmıştır.

5.3. Benzetim

PRIME ve G3-PLC'nin performans değerlendirmesinin yapılabilmesi amacıyla MATLAB benzetimleri kullanılmıştır. Karşılaştırmanın tutarlı olabilmesi amacıyla PRIME için evrişimli kodlama kullanılan modlar değerlendirmeye alınmıştır. Bu doğrultuda MOD 4, MOD 5 ve MOD 6 çalışmamız kapsamında değerlendirmeye alınmamış olup sadece MOD 1, MOD 2 ve MOD 3 değerlendirmeye alınmıştır. Farklı modülasyon ve evrişimli kodlama kullanımının gösteriminde kolaylık sağlaması amacıyla çalışmanın devamında Çizelge 5.1'deki isimlendirmeler kullanılmıştır.

Benzetim amacıyla kullanılan Katayama gürültü modellemesi için [5]'de yapılmış olan çalışmadan faydalanılmıştır. Yapılan çalışma üzerinde herhangi bir değişiklik ve düzenleme yapılmamıştır.

Çizelge 5.1. PRIME ve G3-PLC için modülasyon ve kodlama isimlendirmesi.

İSİMLENDİRME				
	G3		PRIME	
	RC VAR	RC YOK	CE VAR	CE YOK
DBPSK	TİP 1	TİP 2	MOD 1	MOD 4
DQPSK	-	TİP 3	MOD 2	MOD 5
D8PSK	-	-	MOD 3	MOD 6

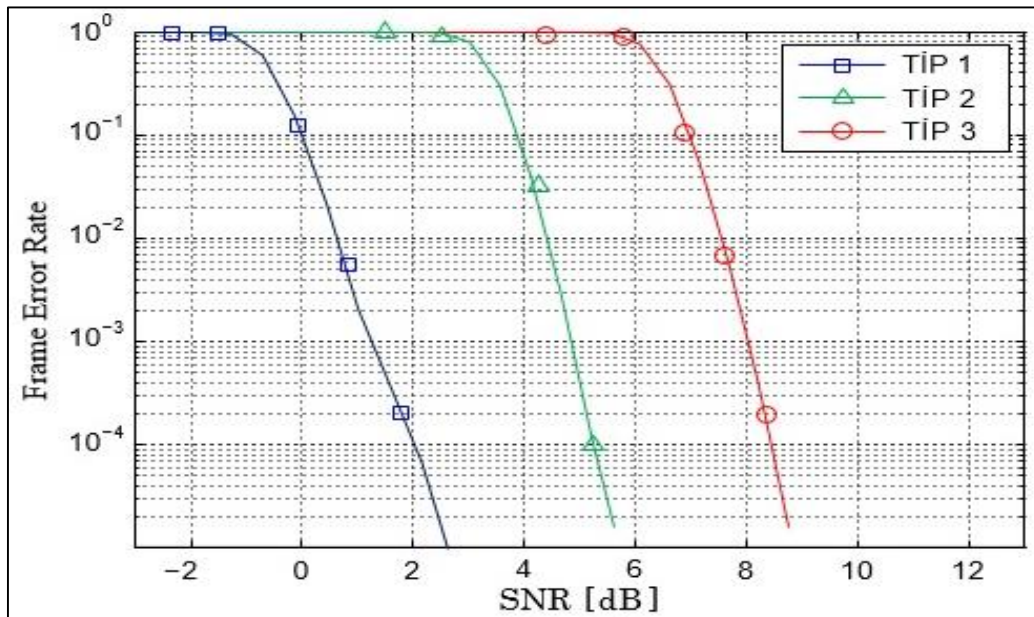


6. SONUÇ VE ÖNERİLER

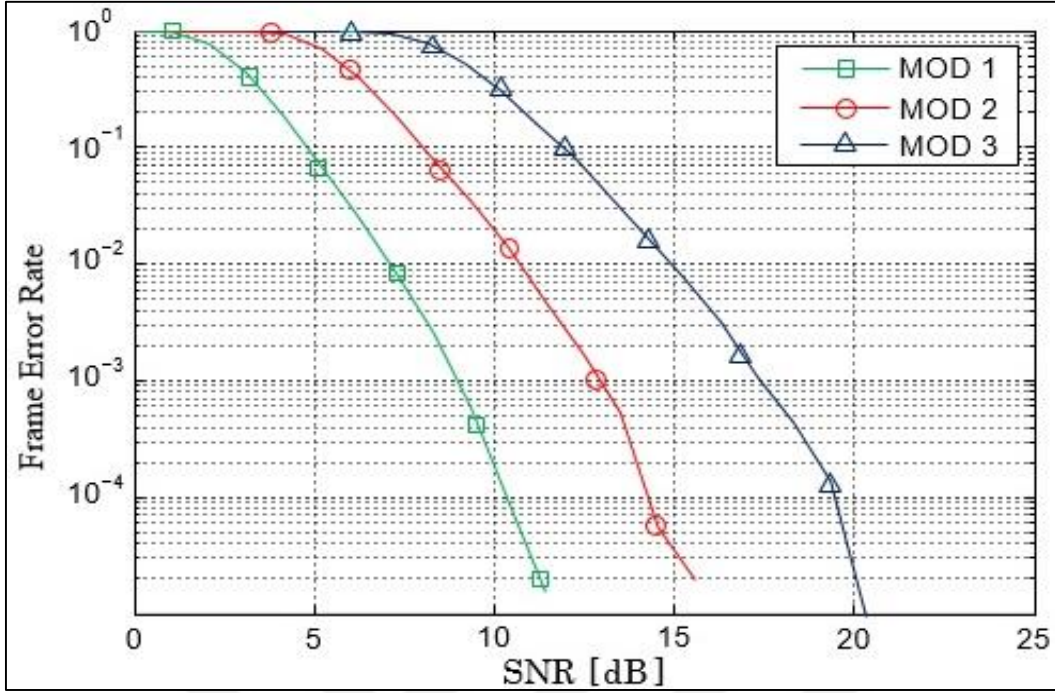
Tez çalışmamızda düşük gerilim enerji hatlarında dar bant güç hattı haberleşmesi MATLAB’da simule edilmiştir. G3-PLC ve PRIME için alıcı ve verici blokları MATLAB’da oluşturulmuştur. Çalışmamızda G3-PLC için hem robust mod hem normal mod simule edilmiştir. PRIME için ise yalnızca evrişimli kodlayıcı kullanılan modlar simule edilmiştir. Ayrıca G3-PLC’de DBPSK ve DQPSK modülasyonları kullanılırken PRIME’da DBPSK, DQPSK ve D8PSK modülasyonları kullanılmıştır. Katayama gürültü modeli ile modellenmesi yapılan dar bant enerji hattı gürültüsü MATLAB’da modellenerek enerji hattı iletişim kanalına ilave edilmiştir.

Rassal şekilde elde edilen veri ilk olarak verici iletişim bloklarında uygun formatta modülasyona tabi tutulmuştur. Daha sonra modüle edilmiş olan sinyal, üzerinde dar bant enerji hattı gürültüsü bulunan iletişim hattına aktarılmıştır. Hattan geçen sinyal, demodülasyona tabi tutulmak üzere alıcıya gönderilmiştir. Üzerinde dar bant enerji hattı iletişim hattı gürültüsü bulunan sinyal, alıcı bloklarda demodüle edilerek haberleşme sağlanmıştır [5].

Benzetim sonuçları Çizelge 5.1’deki isimlendirmeler çerçevesinde Şekil 6.1 ve 6.2’de sunulmuştur.



Şekil 6.1. G3-PLC benzetim sonuçları



Şekil 6.2. PRIME benzetim sonuçları

Benzetim sonuçlarından da görüleceği üzere G3-PLC, PRIME'a oranla daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. PRIME, uygun koşullarda yüksek veri hızlarına öncelik verirken, G3-PLC robust modu kullanmadan bile olumsuz koşullarda daha iyi güvenilirlik sağlamaktadır. Hem teorik açıdan hem de benzetim sonuçlarına göre, PRIME daha az karmaşık bir sistem olmasına karşın G3-PLC'de uygulanan FEC daha güçlüdür.

Elde edilen sonuç EHI sistemlerinde veri iletiminde kullanılan standartların performans değerlerinin ölçülmesi açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında tutarlı olduğu gözlemlenebilmektedir. Bahsettiğimiz gibi, EHI kanalı çok gürültülü ve sert bir iletişim ortamıdır, bu nedenle EHI sistemlerinin daha detaylı simülasyonunun ve deneysel analizinin yakın gelecekte araştırma konusu olması elzemdir. Tipik olarak EHI ve AMR sistemleri ortamında bulunan farklı kanal senaryoları (farklı gürültü ve parazit türleri) kullanılarak daha çeşitli analizler yapılması mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Galli, S., Scaglione, A. and Wang, Z. (2011). *For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid*. Proceedings of the IEEE Smart Grid Communications, 99, 6, 998-1027, Maryland, USA.
2. Sharma, N., Pande, T. and Shukla, M. (2011). *Survey of power line communication*, International Conference on Computer Communication and Networks CSI- COMNET-2011, Udaipur, India.
3. Souissi, S. (2016). *Narrowband PLC channel characterization and modeling: Emulation platform design for smart grid applications*. Ph.D. Thesis, Higher School of Communications, Tunis, 1.
4. Zaballos, A., Vallejo, A., Majoral, M. and Selga, J. M. (2009) *Survey and performance comparison of AMR over PLC standards*. IEEE Transactions On Power Delivery, 24(2), 604-613.
5. Başayar, T. (2019). *Alçak gerilim güç hattı haberleşmesinde kablo uzunluğu ve hattaki empedans değerlerine göre BER/SNR analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2.
6. Tonello, A. M. and Pittolo, A. (2015). *Considerations on narrowband and broadband power line communication for smart grids*. Proceedings of IEEE Smart Grid Communication, Miami, USA, 13-18.
7. İnternet: Koçak, Y. ELH 203 Telefon İletim ve Anahtarlama Sistemleri Ders Notları. URL: <https://www.elektronikhaberlesme.org/wp-content/uploads/2017/04/Haberleşme-Sistemlerinde-Temel-Kavramlar-1.pdf>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2021.
8. İnternet: T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. Analog ve Sayısal Haberleşme. URL: <https://www.yumpu.com/tr/document/read/17933414/elektrik-elektronik-teknolojisi-analog-ve-saysal-haberlesme-megep>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2021.
9. Genç, F. (2019). Monte Carlo yöntemi ile bit hata oranı analizi. *FIGES İleri Mühendislik ve Arge Teknolojileri Dergisi*, 21, 15-19.
10. Bal, G., Gülönü, R. ve Demirbaş, Ş. (2015). Enerji hatları üzerinden elektrik sayacının okunması ve deneysel analizi. *Gazi University Journal of Science*, 4(1), 1-11.
11. Baraboi, B. (2013). *Narrowband Powerline Communication-Applications and Challenges-Part I*. California:EDN Network Publications, 37.
12. Hrasnica, H., Haidine, A. and Lehnert, R. (2004). *Broadband Powerline Communications Network Design*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 148
13. İnternet: Jones, K. and Aslanidis, C. DCSK Technology vs. OFDM Concepts for PLC Smart Metering. URL: https://yitran.com/wp-content/uploads/2020/05/DCSK-OFDM-White-Paper_R1.0.pdf, Son Erişim Tarihi: 12.10.2021.

14. İnternet: PRIME Alliance Technical Working Group. Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME). URL: https://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2020/04/PRIME-Spec_v1.3.6.pdf, Son Erişim Tarihi: 12.10.2021.
15. Sadowski, Z. (2015). *Comparison of PLC-PRIME and PLC-G3 protocols*. XII International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, 3, Lagow, Poland.
16. Hoch, M. (2011). *Comparison of PLC G3 and PRIME*. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 165-169, Udine, Italy.
17. İnternet: Electricité Réseau Distribution France-ERDF. *PLC G3 Physical Layer Specification-Physical Layer Block for an Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Powerline Communications (PLC)*. URL: https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiN1OeYy8TzAhVRMewKHaW6CxoQFnoECAIQAAQ&url=https%3A%2F%2Fe2e.ti.com%2Fdfs-file%2F_key%2Fcommunityserver-discussions-components-files%2F171%2FG3_2D00_PLC_2D00_Physical_2D00_Layer_2D00_Specification.pdf&usg=AOvVaw2KT4KnhemtBc3lyRxl_aXt, Son Erişim Tarihi: 12.10.2021.
18. Katayama, M., Yamazato, T. and Okada, H. (2006). A mathematical model of noise in narrowband power line communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(7), 1267-1276.
19. Souissi, S., Rhouma O. B. and Rebai, C. (2013). *Bottom-up approach for narrowband powerline channel modeling*. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2987-2992, Atlanta, USA.
20. Korki, M., Hosseinzadeh, N., Vu, H. L., Moazzeni, T. and Foh, C. H. (2011). *Impulsive noise reduction of a narrowband power line communication using optimal nonlinearity technique*. Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC), 1-4, Melbourne, Australia.



GAZİ GELECEKTİR..