

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SES SİNYALİ AKTARIM TEKNİKLERİNİN OPTİKSEL İLETİŞİM İÇİN
KARŞILAŞTIRMALI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mehmet Bora YILDIZ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2011

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SES SİNYALİ AKTARIM TEKNİKLERİNİN OPTİKSEL İLETİŞİM İÇİN KARŞILAŞTIRMALI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet Bora YILDIZ

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Faruk ÖZEK

Tez çalışmasının ilk bölümünde ses sinyali aktarımında esas olan sistem parametreleri, ses sinyali aktarım teknikleri ve genel alan seslendirme sistemleri incelenmiştir. Ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla genel alan seslendirme sistemlerinde kullanılan ses sinyali aktarım teknikleri ve sistem tasarımları göz önüne alınmıştır. Ses sinyalinin özellikleri, aktarım ortamları ve veri aktarım teknikleri incelenerek ses sinyali aktarım tekniklerinin sağlıklı bir şekilde karşılaştırılması sağlanmıştır. Optiksel iletişimin sağladığı avantajlar göz önüne alınarak optiksel iletişim için optimize edilmiş yeni bir genel alan seslendirme sistem tasarımı önerilmiştir. Son olarak, önerilen sistem tasarımı ile genel ses sinyali aktarım teknikleri optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Temmuz 2011, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: Optiksel iletişim, fiber optik, ses sinyali, veri aktarım teknikleri

ABSTRACT

Master Thesis

A COMPARATIVE EVALUATION OF AUDIO SIGNAL TRANSMISSION TECHNIQUES FOR OPTICAL COMMUNICATIONS

Mehmet Bora YILDIZ

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Faruk ÖZEK

In the first part of the thesis, fundamental system parameters of audio signal transmission techniques and the public address systems are investigated. In order to comparatively evaluate the audio signal transmission techniques for optical communications, the related techniques and the types of the system design used in public address systems are considered, including a study on characteristics of audio signals, the transmission media and the related techniques. Finally, regarding the advantages of optical communications, a new system design is suggested and evaluated comparatively with the general audio signal transmission techniques.

July 2011, 71 pages

Key Words: Optical communications, fiber optic, audio signals, data transfer techniques

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarımı yönlendiren, araőtırmalarımın her aőamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Faruk ÖZEK' e (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi), çalıőmalarıma destek veren Ali Rıza KARSLI, őenol CEYHAN ve Levent SEÇEN' e, bu çalıőmayı yapmam için gerekli laboratuvar ve teknik imkanları sağlayan ATEMPO őirketler Grubu' na ve bir çok fedakarlık göstererek beni destekleyen anneme, babama, abime en derin duygularla teşekkür ederim.

Mehmet Bora YILDIZ

Ankara, Temmuz 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ	1
1.1 Sistem Parametreleri	1
1.2 Ses Sinyali Aktarım Teknikleri	2
1.3 Seslendirme Sistemleri	3
1.4 Ses Sinyali Aktarım Tekniklerinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi	11
2. MATERYAL VE YÖNTEM	14
2.1 Ses Sinyalinin Özellikleri	14
2.2 Veri Aktarımı: Tanımlar, Parametreler	16
2.3 Kablolu Aktarım Ortamları	20
2.4 Aktarım Ortamlarının Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi	26
2.5 Veri Aktarım Teknikleri	29
2.5.1 Sayısal veri aktarımı	30
2.5.2 Analog veri aktarımı	34
3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	41
3.1 Tasarım	42
3.1.1 Önerilen sistem tasarımı için sayısal ses sinyali aktarımı	45
3.1.2 Önerilen sistem tasarımı için fiber optik iletişim esasları	49
3.2 Uygulamalar	50

3.2.1 Ses Sinyali işleme ve tümleşik devre uygulamaları.....	50
3.2.2 Sayısal Ses Amplifikatör(Class-D Amplifier) uygulamaları.....	55
4. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	59
KAYNAKLAR.....	64
EKLER.....	66
EK 1 Varizone Sistem Yapısı.....	67
EK 2 ADAU1702 Teknik Özellikleri.....	68
EK 3 TPA3106D1 Teknik Özellikleri.....	69
EK 4 Class-D Amplifikatör Şematik Tasarımı.....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	71

SİMGELER DİZİNİ

ADC	Analog Digital Converter
PCM	Pulse Code Modulation
RF	Radio Frequency
LAN	Local Area Network
WAN	Wide Area Network
PA	Public Address
RMS	Root Mean Square
I-PAM	Integrated Powered Amplifier Module
DSS	Digital Speaker System
VAB	Voice Announcement Background
SPL	Sound Pressure Level
dBu	Decibel Unloaded
dBv	Decibel Voltage
UTP	Unshielded Twisted Pair
STP	Shielded Twisted Pair
NRZ-L	Nonreturn Zero Level
NRZI	Nonreturn Zero Invert
ASK	Amplitude Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
PSK	Phase Shift Keying
DM	Delta Modulation
PAM	Pulse Amplitude Modulation
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation

PM	Phase Modulation
DAC	Digital Analog Converter
I2S	Inter IC Sound
TDM	Time Division Multiplexing
MADI	Multichannel Audio Digital Interface
REAC	Roland Ethernet Audio Communication
AES	Audio Engineering Society
SoC	System On Chip
DSP	Digital Signal Processing
GUI	Graphical User Interface
I2C	Inter Integrated Circuit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 70/100V Genel Alan Seslendirme Sistemi.....	5
Şekil 1.2 70/100V Genel Alan Seslendirme Sistemleri Yüksek Empedans Trafo Sistemi.....	6
Şekil 1.3 DSS Veri Hattı ve I-PAM.....	8
Şekil 1.4 Preasedio genel alan seslendirme ve acil anons sistemi.....	9
Şekil 1.5 CobraNET tabanlı profesyonel ses sistemi tasarımı.....	11
Şekil 2.1 Akustik sinyal ile elektriksel ses sinyalleri arasındaki ilişki.....	14
Şekil 2.2 Elektromagnetik Spektrum.....	18
Şekil 2.3 Elektromagnetik spektrum ve veri aktarım ortamları arasındaki ilişki.....	20
Şekil 2.4 Büklümlü Çift Kablo.....	21
Şekil 2.5 UTP&STP Kablo Yapısı.....	22
Şekil 2.6 UTP Kablo	23
Şekil 2.7 STP Kablo.....	23
Şekil 2.8 Koaksiyel kablo yapısı.....	24
Şekil 2.9 Fiber optik kablo yapısı.....	25
Şekil 2.10 Tekli Modlu Fiber – Çoğul Modlu Fiber: kesit yapıları.....	26
Şekil 2.11 Kablo türleri için bant genişliği – sinyal zayıflama ilişkisi.....	28
Şekil 2.12 Sayısal veri ile sayısal sinyal arasındaki ilişki.....	30
Şekil 2.13 Sayısal sinyal kodlama yöntemleri.....	32
Şekil 2.14 Genlik kaydırma anahtarlama.....	33
Şekil 2.15 Frekans kaydırma anahtarlama.....	33
Şekil 2.16 Faz kaydırma anahtarlama.....	34

Şekil 2.17 Analog veri sayısal sinyal aktarımı.....	35
Şekil 2.18 <i>Pulse Code Modulation</i>	37
Şekil 2.19 Delta Modülasyonu.....	38
Şekil 2.20 Genlik Modülasyonu.....	39
Şekil 2.21 Frekans Modülasyonu.....	39
Şekil 2.22 Faz Modülasyonu.....	40
Şekil 3.1 Optiksel veri iletişimi esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımı blok diyagramı.....	42
Şekil 3.2 Sayısal mikrofon üniteleri blok diyagramı.....	43
Şekil 3.3 Adreslenebilir hoparlör sistemi blok diyagramı.....	44
Şekil 3.4 TDM sinyal diyagramı.....	45
Şekil 3.5 CM-2 CobraNET modülü.....	47
Şekil 3.6 CM-2 CobraNET modülü sistem blok diyagramı.....	47
Şekil 3.7 ADAU1702 fonksiyonel blok diyagramı.....	51
Şekil 3.8 ADAU1702 için haberleşme ayarlarının yapılandırılması.....	52
Şekil 3.9 ADAU1702 tümleşik devresi için gerçekleştirilmiş olan program tasarımı.....	53
Şekil 3.10 ADAU1702 tümleşik devresi için yazmaç(<i>register</i>) değerleri.....	54
Şekil 3.11 TPA3106D1 Class-D Ses Amplifikatör Entegre Devresi.....	55
Şekil 3.12 Class-D Amplifikatör PCB tasarımı.....	56
Şekil 3.13 Class-D amplifikatör test düzeneği.....	57
Şekil 3.14 Class-D amplifikatör ölçümleri.....	58
Şekil 4.1 70/100V Sistem amplifikatörü gürültü ölçümü.....	60
Şekil 4.2 Önerilen sistem amplifikatörü gürültü ölçümü.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Ses Sinyali Aktarım Teknikleri	4
Çizelge 1.2 Genel Ses Sinyali Aktarım Teknikleri:	
Üstünlükler ve Yetersizlikler.....	12
Çizelge 2.1 Ses Basınç Seviyeleri.....	15
Çizelge 2.2 Ses çıkış hat seviyeleri ve nominal voltaj seviyeleri.....	16
Çizelge 2.3 Yaygın olarak kullanılan veri aktarım hızları.....	19
Çizelge 2.4 Aktarım ortamları aktarım hızı ve bant genişliği.....	27
Çizelge 4.1 Ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi.....	62

1. GİRİŞ

Ses sinyali aktarımında sistem kalitesini belirleyen en önemli faktör **ses kalitesi** dir. İstenilen ses kalitesinin elde edebilmesi için, ses sisteminde kullanılan elektronik ve akustik bileşenlerin yanı sıra sistemi oluşturan **cihazlar arası ses sinyali aktarımı** da son derece önem taşımaktadır. Ses sinyali aktarım **tekniklerinin** değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkacak veriler şüphesiz yeni sistem tasarımlarını da beraberinde getirecektir.

Optiksel iletişimin gelişmesi ve yaygınlaşması sonucu, veri aktarımında yeni bir teknolojik döneme girilmiştir. Optiksel haberleşme ile birlikte yüksek hızda ve kalitede veri aktarımı sağlanmaktadır. Ses sinyali aktarım teknikleri değerlendirilirken optiksel iletişimin özellikleri göz önüne alınmalıdır. Ses sinyallerinin çevre gürültülerden etkilenmeden en sağlıklı biçimde aktarılabilmesi için optiksel veri iletişiminin kullanımı ve bu alanda geliştirilen teknikler, sistem kalitesinin artırılması açısından önemli bir araştırma alanıdır.

1.1 Sistem Parametreleri

Ses sinyali aktarımında aktarım tekniği belirlenirken öncelikli olarak sistemin temel gerekliliklerini belirleyen sistem parametreleri incelenmelidir. Sistem parametreleri; frekans aralığı, aktarım uzaklığı ve ortamı olarak sıralanabilir.

Frekans Aralığı: Aktarılmak istenilen ses sinyalinin frekans aralığı ses sisteminin uygulama amacına göre farklılık göstermektedir. Konuşma yayını ve müzik yayını için farklı bant genişlikleri gerekmektedir. Konuşma yayını için kanal başına 4 kHz bant genişliği, müzik yayını için ise kanal başına 20 kHz bant genişliği kullanılmaktadır[29]. Aktarım teknikleri değerlendirilirken, aktarılmak istenilen ses sinyalinin frekans aralığı, dolayısıyla aktarılacak olan sinyalin bant genişliği önem taşımaktadır.

Aktarım Uzaklığı: Ses sinyali aktarımında aktarım uzaklığı aktarım tekniğinin belirlenmesinde kilit rol oynamaktadır. Sinyal aktarımı, ses sistemini oluşturan cihazlar arasında birebir kablo bağlantısı ile kısa mesafeli olabileceği gibi RF(Radyo Frekansı), LAN(Yerel Alan Ağı, *Local Area Network*) veya WAN(Geniş Alan Ağı, *Wide Area*

Network) gibi uygulamalar üzerinden uzun mesafeli olarak gerçekleştirebilmektedir. Başka bir deyişle aktarım, cihazlar, binalar, şehirler ve hatta deniz aşırı ülkeler arası da olabilmektedir.

Aktarım Ortamı: Tercih edilecek aktarım ortamı kablolu veya kablosuz olmak üzere iki bölümde değerlendirilebilir. Uygulama alanına ve çevresel şartlara göre aktarım ortamına karar verilir. Ortamın kablolu veya kablosuz, veri aktarımının elektriksel veya optiksel oluşu tercih edilecek aktarım tekniğini doğrudan etkilemektedir.

1.2 Ses Sinyali Aktarım Teknikleri

Ses sinyali aktarım teknikleri seslendirme sistemlerinde sinyal aktarımının sağlıklı bir biçimde gerçekleşebilmesi için geliştirilen analog veya sayısal tekniklerdir. Yukarıda belirtilen sistem parametrelerine göre aktarım teknikleri çeşitlilik göstermektedir. Ses sinyali aktarımı telefon, internet, radyo ve televizyon yayını ile profesyonel ses sistemleri gibi birçok farklı alanda gerçekleşmektedir. Telefon, internet, radyo ve televizyon yayını üzerinden gerçekleştirilen ses sinyali aktarımı haberleşme sistemleri ile ilişkilidir. Bu nedenle, tez çalışmasında ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için sağlıklı bir biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla *genel alan* seslendirme sistemleri ve *profesyonel seslendirme* sistemleri için kullanılan ses sinyali aktarım teknikleri incelenmiştir.

Genel alan seslendirme sistemlerinin uygulama alanları okul, hastane, fabrika, alışveriş merkezleri, iş merkezleri, oteller ve havaalanları gibi mekânların müzik yayını ve anons sistemleridir. Profesyonel seslendirme sistemlerinin uygulama alanları ise canlı performans ve benzeri etkinliklerin olduğu konser salonları, konferans salonları, tiyatrolar ve benzeri mekânların ses sistemleridir.

Genel alan seslendirme sistemleri için tüm dünyada yaygın olarak kullanılan sistem; zayıf akım ses sistemi olarak da bilinen 70/100 Volt genel alan seslendirme sistemleridir. Bu sistemde ses sinyali aktarımı analog olarak yüksek voltaj, alçak akım esasına

dayanarak gerçekleşmektedir. Aktarılabak olan ses sinyalinin voltaj değeri trafo ile yukseltilerek ses sinyali aktarımı gerçekleştirilir.

Profesyonel seslendirme sistemleri için analog ses sinyali aktarımı ise aktarılabak olan ses sinyalinin herhangi bir voltaj dönüşümüne veya modülasyon tekniğine uğramadan aktarılması esasına dayanır.

Günümüzde profesyonel seslendirme ve genel alan seslendirme sistemleri için sayısal sinyal aktarım teknikleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu tekniklerden tüm dünyada yaygın olarak kullanılan *CobraNET* sistemi incelenmiştir. Bunun yanı sıra ses sistemleri alanında üretim yapan önde gelen firmalar kendi sistemlerini geliştirmişlerdir. Bu sistemlerden *Klotz Digital Varizone* ve *Bosch Praesideo* sistemleri incelenerek genel alan seslendirme sistemleri için sayısal ses sinyali aktarım teknikleri değerlendirilmiştir. Çizelge 1.1 ses sinyali aktarım tekniklerinin fiber optik iletişim için değerlendirilebilmesi amacıyla incelenecek olan ses sinyali aktarım tekniklerini göstermektedir.

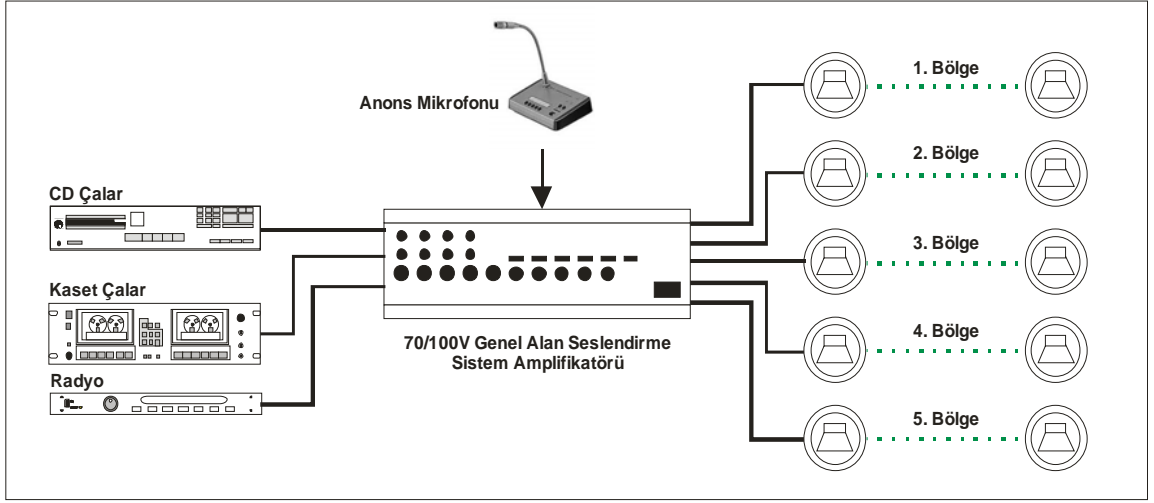
Çizelge 1.1 Ses sinyali aktarım teknikleri

Sistem Adı	Sistem Tipi	Veri Tipi	Aktarım Ortamı	Açıklama
70/100 Volt Genel Alan Seslendirme Sistemi	Genel Alan	Analog	Bakır Kablo	70/100 Volt analog ses sinyali aktarımı
Klotz Varizone	Genel Alan	Sayısal	Bakır Kablo	Sayısal ses sinyali aktarımı, adreslenebilir bağımsız hoparlör sistemi
Bosch Praesideo	Genel Alan	Sayısal	Fiber Optik Kablo & Bakır Kablo	Fiber optik hat üzerinden sayısal ses sinyali aktarımı
CobraNET	Profesyonel & Genel Alan	Sayısal	Bakır Kablo	Ethernet üzerinden sayısal ses sinyali aktarımı

Optiksel iletişim için ses sinyali aktarım tekniklerinin değerlendirilmesi ve elde edilen bulgular sonucu yeni sistem tasarımlarının geliştirilmesi amacıyla Çizelge 1.1 de belirtilen ses sinyali aktarım teknikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda optiksel iletişim esaslı yeni sistem tasarımları tezin araştırma ve bulgular bölümünde önerilmiştir.

1.3 Seslendirme Sistemleri

70/100 Volt genel alan seslendirme sistemleri, PA(Public Address) sistemleri olarak da bilinen genel alan anons, acil anons ve müzik yayın sistemleridir. Uygulama alanları alışveriş merkezleri, oteller, hastaneler ve havaalanları gibi alanların genel alan seslendirme sistemlerini kapsamaktadır. 70/100V genel alan seslendirme sistemlerinde ses sinyali aktarımı **analog** olarak gerçekleşmektedir. Şekil 1.1 örnek bir 70/100V genel alan seslendirme sistem tasarımını göstermektedir.

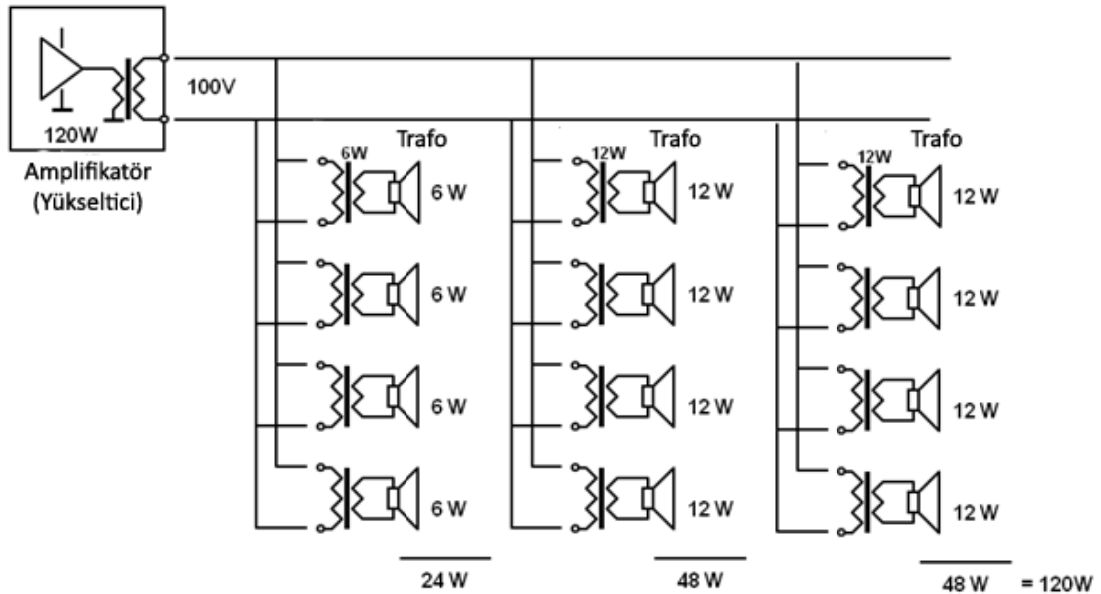


Şekil 1.1 70/100V Genel alan seslendirme sistemi

Şekil 1.1’ de blok diyagramı gösterilen örnek 70/100V genel alan seslendirme sistemi, kullanılan sistem yükselticinin özelliğine bağlı olarak sistemi belirli bir bölge sayısına ayırarak ses sinyali aktarımını gerçekleştirmektedir. Böylece istenilen bölgeye istenilen kaynak veya kaynaklardan ses sinyali aktarımı gerçekleştirilmiş olur. Ancak her bir hoparlör için bağımsız ses sinyali aktarımı söz konusu değildir.

Genel alan seslendirme sistemlerindeki başlıca sorun aktarım mesafesinin uzak ve hoparlör sayısının çok olmasıdır. Aktarım mesafesinin uzun oluşu, ses sinyalinin zayıflamasına ve aktarım hattı boyunca sinyalin gürültü sinyaline maruz kalmasına yol açar. Bu etkilerden dolayı ses kaynağından çıkan 0dB(0,707Volt RMS) seviyesindeki ses sinyali amplifikatör ile güçlendirilir ve *Step-Up* trafo ile $70V_{rms}$ sinyal seviyesine yükseltilerek sinyal aktarımı gerçekleştirilir. Voltaj seviyesinin yüksek olması ses sinyalinin aktarım mesafesi boyunca gürültü sinyalinden daha az etkilenmesini ve sinyal zayıflaması nedeniyle meydana gelen güç kaybının daha az olmasını sağlamaktadır. 70/100V genel alan seslendirme sistemlerinde ses sinyali aktarımı sabit empedanslı hoparlör kablosu üzerinden yüksek voltaj dolayısıyla düşük akım seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu sayede aktarım mesafesi boyunca meydana gelen güç kaybı Joule Yasası’ na göre, $P_{kayıp} = I^2 \times R$, en aza indirilmektedir[9].

Genel alan seslendirme sistemlerinde hoparlör sayısının yüksek ve ayrıca hoparlörlerin tek bir hat üzerinden paralel olarak çalışması sistem empedansının düşük olmasına neden olmaktadır. Örneğin; 8Ω empedans değerine sahip 10 adet hoparlör paralel olarak bağlandığında sistem empedansı 0.8Ω gibi hiçbir amplifikatör ünitesinin süremeyeceği bir değere düşmektedir. Genel alan seslendirme sistemlerinde kullanılan hoparlör adetleri ise bu adetlerin çok daha üzerindedir. Bu durumda sistem empedansının amplifikatör empedansı ile uyumluluğunu sağlamak için empedans dönüştürücü trafolar kullanılmaktadır. Amplifikatör çıkışları için *Step-Up* , hoparlör girişleri için ise *Step-Down* trafolar kullanılarak yüksek empedanslı sistem tasarımı gerçekleştirilir. Şekil 1.2 70/100V genel alan seslendirme sistemlerinin temel tasarım prensibini oluşturan yüksek empedans sistem yapısını açıklamaktadır.



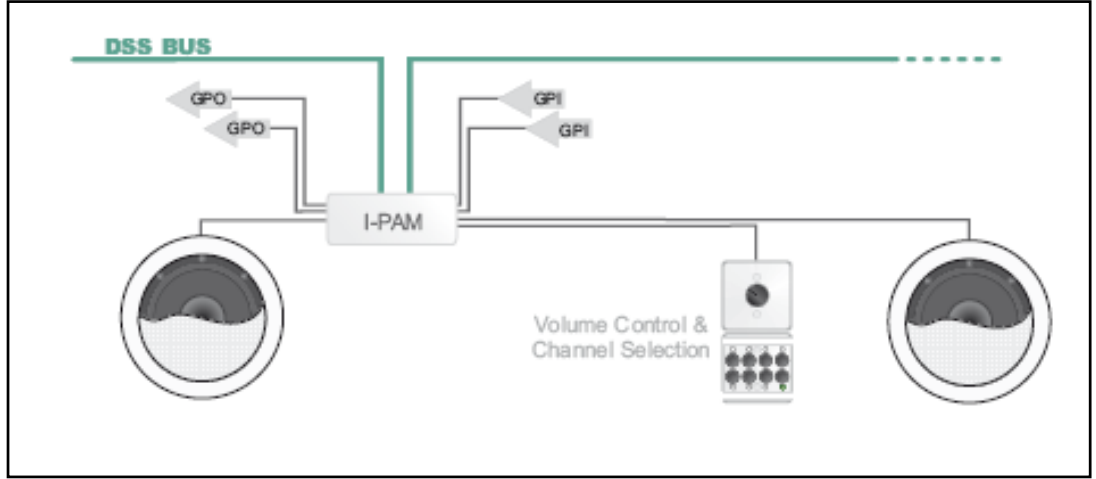
Şekil 1.2 70/100V Genel alan seslendirme sistemleri yüksek empedans trafo sistemi

Sistemde bulunan her amplifikatör için 70V *Step-Up* trafo kullanılması gerekmektedir. Ayrıca her hoparlör için 70V *Step-Down* trafo kullanılmalıdır. Bu durum bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Trafo sistemleri gücü bir noktadan başka bir noktaya aktarırken belirli bir oranda güç kaybına neden olurlar. Trafo teknik özelliklerinde *Insertion Loss* olarak adlandırılan bu kayıp 70/100V genel alan seslendirme sistemlerinde kullanılan empedans dönüştürücü trafolar için %33 civarındadır[9]. Güç Verimliliği(*Power Efficiency*) oldukça düşüktür. 70/100V genel alan seslendirme

sistemleri için karşılaşılan diğer sorun ise sistem tasarımında kullanılan trafoların yetersiz güçte ve kalitede olması sonucu ses sinyalinde meydana gelen bozulmalardır. Kalitesiz trafo kullanımı ses kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Yetersiz güçteki trafolar özellikle düşük frekanslarda ses sinyalinde bozulmalara neden olurlar. Aynı zamanda trafoların frekans aralığının yetersiz oluşu ses sinyali dinamik aralığını olumsuz yönde etkilemektedir.

70/100V genel alan seslendirme sistemleri güç verimliliği ve ses kalitesi açısından yüksek kalite standartlarına sahip olmamasına rağmen düşük maliyeti ve basit tasarımı nedeniyle günümüzde kullanılan en yaygın sistem türüdür.

Klotz Varizone sistemi *Klotz Digital* firması tarafından geliştirilmiş olan ve sayısal ses sinyali aktarımı prensibi ile çalışan genel alan seslendirme sistemidir. En önemli özelliği sistemde bulunan her bir hoparlörün bağımsız çalışabilmesidir. Sistem DSS(*Digital Speaker System*) olarak adlandırılan veri hattı üzerinden sayısal ses sinyalini, kontrol sinyalini ve 48V DC besleme sinyalini I-PAM(*Integrated Powered Amplifier Module*) adı verilen sayısal amplifikatör modüllerine aktarmaktadır. Her bir I-PAM birbirinden bağımsız iki hoparlör çıkışına sahiptir. I-PAM kendisine aktarılan kontrol sinyaline göre her bir hoparlöre ilgili ses sinyalini güçlendirerek aktarır. Ses seviye kontrol ve kanal seçici üniteleri ile I-PAM modülleri üzerinden her bir hoparlörün ses seviye kontrolü ve kanal kontrolü gerçekleştirilir. Şekil 1.3, DSS veri hattı, I-PAM modülleri ve sistem hoparlörleri arasındaki bağlantıyı göstermektedir.



Şekil 1.3 DSS Veri Hattı ve I-PAM

(GPO-Global Port Output, GPI-Global Port Input: Sayısal kontrol giriş ve çıkış)

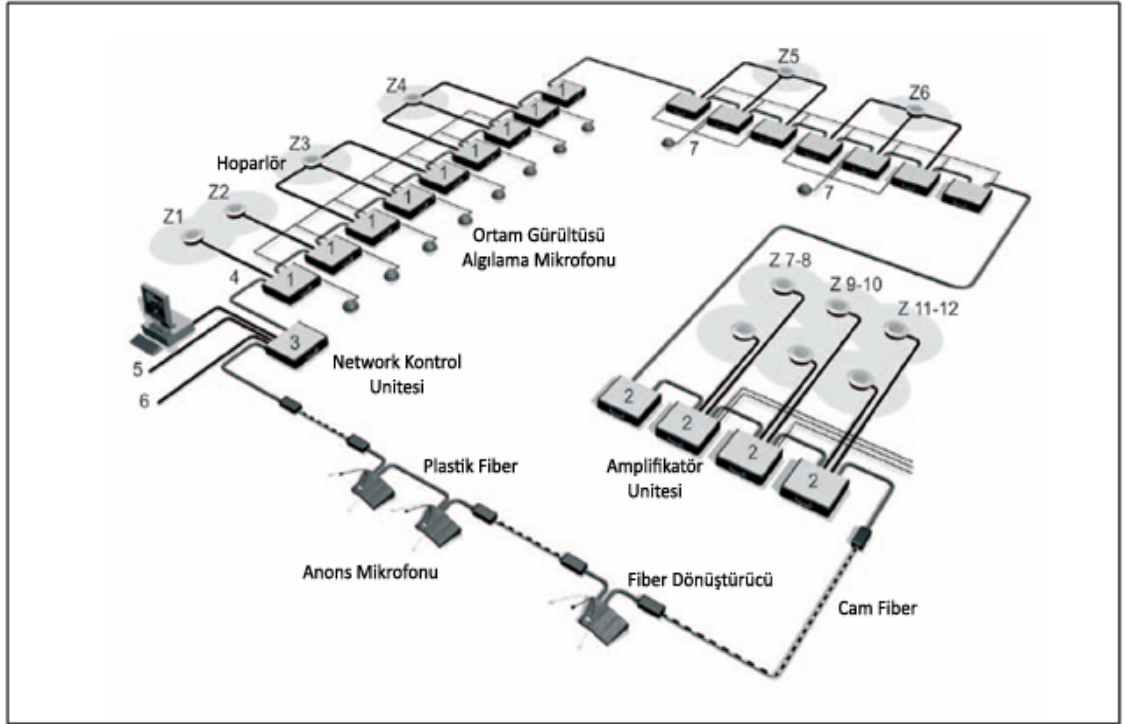
Varizone sistem kontrolünü ve sayısal ses sinyali aktarımını VAB(*Voice Evacuation, Announcement, Background Music Controller*) olarak adlandırılan merkezi kontrol cihazı üzerinden gerçekleştirir. Cihaz üzerinde ses kaynaklarının bağlanabilmesi için 3 adet 0dB sinyal seviyesinde analog giriş bulunmaktadır. Sisteme anons mikrofoni, CD çalar, radyo ve benzeri harici kaynakların dahil olabilmesi için ses sinyali giriş/çıkış modülleri ve OCTO-Bus adı verilen sayısal veri hattı kullanılmaktadır. OCTO-Bus veri hattı üzerinden giriş çıkış modülleri kullanılarak farklı bölgelerde bulunan harici ses kaynakları sisteme dahil edilebilmektedir. Ek.1’ de örnek bir Varizone sistem yapısı sunulmuştur.

Sistemin sayısal ses sinyali aktarımı DSS veri hattı üzerinden 8 kanal 16 bit çözünürlüğünde veya 4 kanal 24 bit çözünürlüğünde ve her bir ses kanalı için 48kHz örnekleme oranında gerçekleşmektedir. Veri aktarım mesafesi herhangi bir sinyali yükseltici kullanılmadan 200 metre olarak belirlenmiştir. Veri aktarım ortamı olarak standart CAT5 kablo kullanılmaktadır.

Klotz Digital firması tarafından geliştirilen Varizone sistemi genel alan seslendirme sistemleri için sayısal ses sinyali aktarımı temel alınarak tasarlanmıştır. Sayısal veri aktarımı sayesinde her bir hoparlörün bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir olması genel alan seslendirme sisteminin daha esnek bir yapıda olmasını sağlamaktadır.

Praesideo sistemi Bosch firması tarafından geliştirilmiş sayısal genel alan seslendirme ve acil anons sistemidir. Sistem üniteleri arası kontrol sinyali ve ses sinyali aktarımı sayısal olarak fiber optik kablo üzerinden gerçekleşmektedir. Sistemin amplifikatör cihazları ile hoparlörler arası ses sinyali aktarımı ise 70/100V genel alan seslendirme sistemleri ile aynı şekilde analog olarak gerçekleşmektedir. Şekil 1.4 Praesideo sistem tasarımı örneğini göstermektedir.

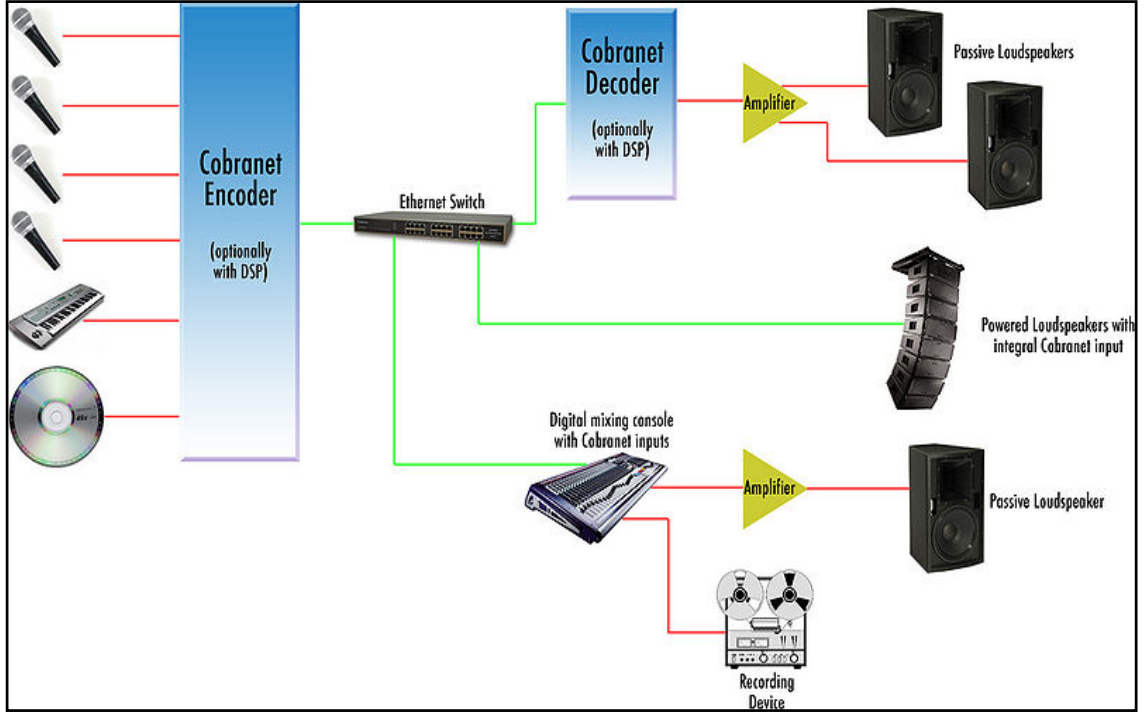
Sistem temelde dört ünitelerden oluşmaktadır. Bu üniteler; network kontrol ünitesi, amplifikatör ünitesi, anons istasyonu ve fiber optik dönüştürücü üniteleridir. Sistemin merkezi olan network kontrol ünitesi tüm sistemin yönetildiği ünite olarak çalışır. Bu ünite üzerinden amplifikatör ünitelerine kontrol ve ses sinyali aktarımı sayısal olarak fiber optik kablo üzerinden gerçekleştirilir. Amplifikatör üniteleri optiksel olarak aktarılan sayısal ses sinyalini elektriksel analog ses sinyaline dönüştürür ve güçlendirerek 70/100V sinyal seviyesinde hoparlörlere aktarır.



Şekil 1.4 Praesideo genel alan seslendirme ve acil anons sistemi

Sistemin diğere genel alan seslendirme sistemleri ile karşılaştırıldığı zaman en büyük avantajı sistem üniteleri arası veri aktarımının fiber optik kablo üzerinden gerçekleştirilmesidir. Böylece sayısal sinyal aktarımında meydana gelecek gecikme etkisi azaltılmış olur. Sonuç olarak aktarım mesafesi artırılarak ses sinyali sayısal olarak cam fiber kablo üzerinden kilometrelerce öteye herhangi bir gürültü sinyaline maruz kalmaksızın aktarılabilir. Buna rağmen Preasedio sisteminde amplifikatör cihazları sonrası 70/100V genel alan seslendirme sistemlerine benzer şekilde trafo sistemi kullandığından güç ve ses kalitesinde kayıplara neden olabilmektedir.

CobraNET sistemi 1996 yılında Peak Audio firması tarafından geliştirilmiştir. Cirrus Logic firması 2001 yılında CobraNET teknolojisinin tüm haklarını satın almıştır. CobraNET sayısal ses sinyali aktarımının Ethernet üzerinde herhangi bir sıkıştırma formatı kullanılmadan aktarılması amacıyla geliştirilmiş profesyonel ses sistemleri ve büyük ölçekli genel alan seslendirme sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış bir teknolojidir. CobraNET teknolojisi bir ses teknolojisi olmaktan çok bir network teknolojisidir. Günümüzde büyük ölçekli konser salonları, konferans merkezleri, havaalanları ve benzeri birçok projede CobraNET teknolojisi kullanılarak ses sinyali aktarımı Ethernet network üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 1.5 CobraNET teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiş örnek bir profesyonel ses sistemi blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 1.5 CobraNET tabanlı profesyonel ses sistemi tasarımı

Şekil 1.5’ de görüldüğü gibi ses sinyali aktarımı CobraNET Encoder/Decoder cihazları kullanılarak Ethernet üzerinden gerçekleşmektedir. Bu şekilde tek bir CAT-5 kablo ile 64 kanal sıkıştırılmamış ses sinyali aktarılabilir. Analog bir sistemde 64 kanal ses sinyalini aktarabilmek için 64 kablo çiftine ihtiyaç duyulurken CobraNET sistemi ile tek bir CAT-5 kablo üzerinden 64 kanal ses sinyali aktarılabilir. Dolayısıyla maliyet ve sistem kurulum kolaylığı açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

1.4 Ses sinyali aktarım tekniklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi

Genel alan seslendirme sistemleri ve profesyonel ses sistemleri için ses sinyali aktarım tekniklerinin değerlendirilmesi ile birlikte görülmüştür ki her bir sistemin kendine göre üstünlük ve yetersizlikleri bulunmaktadır. Çizelge 1.2 ses sinyali aktarım tekniklerinin değerlendirilmesi sonucu belirlenen üstünlük ve yetersizlikleri göstermektedir.

Çizelge 1.2 Genel ses sinyali aktarım teknikleri: *üstünlükler ve yetersizlikler*

Sistem Adı	Üstünlükler	Yetersizlikler
70/100 Volt Genel Alan Seslendirme Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> - Kolay sistem tasarımı - Düşük maliyet 	<ul style="list-style-type: none"> - Düşük ses kalitesi - Yüksek güç kaybı - Zayıf sistem kontrolü
Klotz Digital Varizone	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Yüksek güç verimliliği - Esnek sistem kontrolü 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek maliyet - Karmaşık sistem tasarımı - Düşük aktarım mesafesi
Bosch Praesideo	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Optiksel iletişim ile yüksek kalitede veri aktarımı - Yüksek aktarım mesafesi 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek maliyet - Yüksek güç kaybı
CobraNET	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Esnek sistem kontrolü - Yüksek aktarım mesafesi - Yüksek kanal sayısı 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek Maliyet - Karmaşık sistem tasarımı

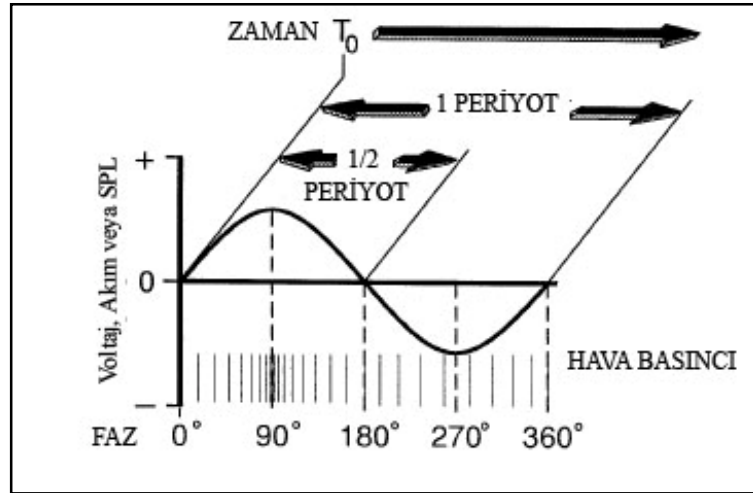
Tez çalışması kapsamında yapılan araştırma sonucunda optiksel iletişim için optimize edilmiş herhangi bir genel alan seslendirme sistem tasarımının bulunmadığı ortaya çıkmıştır. Çizelge 1.2’ de belirtilen üstünlük ve yetersizliklerin daha iyi anlaşılabilmesi ve optiksel iletişim için optimize edilmiş sistem tasarımının gerçekleştirilmesi amacıyla materyal ve yöntem bölümünde ses sinyali özellikleri ve veri aktarımı konuları detaylı

olarak incelenmiştir. Tez çalışmasında; ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi sonucunda elde edilen bulgular ile birlikte optiksel iletişim için optimize edilmiş yeni sistem tasarımı önerilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Ses Sinyalinin Özellikleri

Ses fiziksel bir ortamdaki moleküllerin titreşmesi sonucu ortaya çıkan **akustik** enerjidir. Akustik olarak ses sinyali üç boyutlu uzayda zamana göre **basınç** değerinin değişimi olarak ifade edilmektedir. Mikrofon aracılığı ile akustik ses sinyali elektriksel ses sinyaline dönüştürülür. **Elektriksel** olarak ses sinyali ise zamana göre **voltaj** değerinin değişimidir. Akustik ile elektriksel ses sinyalleri arasındaki ilişki Şekil 2.1’de açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Akustik sinyal ile elektriksel ses sinyalleri arasındaki ilişki

Ses sinyalinin **genliği** sinyal seviyesi olarak tanımlanır. Sinyal seviyesi desibel(dB) olarak ifade edilir. Desibel iki sinyalin logaritmik olarak birbirine oranıdır. İnsan kulağı logaritmik bir algılama yapısına sahiptir. Bu nedenle ses sinyalinin desibel olarak ifade edilmesi insan algısıyla eşdeğerlilik taşıması açısından önemlidir. Ses sinyalinin genliği incelenirken akustik ses sinyali ve elektriksel ses sinyali ayrı olarak incelenmelidir.

Ses **basınç** seviyesi(SPL: *Sound Pressure Level*) logaritmik olarak ses basıncının göreceli basınç değerine(0 dB) göre oranıdır. Ses basıncı için ölçü birimi Pascal(Pa) dır.

Göreceli basınç değeri insan kulağının duyabilme eşik değeri olan 20uPa olup insan kulağına 3 metre uzaklıkta uçan bir sivrisineğin çıkarmış olduğu sese denktir. Desibel olarak ses basıncı, P, Eşitlik(2.1) den hesaplanır.

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) dB \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)' e göre 1 Pascal ses basıncı 94 dB seviyesine eşittir. Ses basınç değerlerinin anlaşılabilmesi için Çizelge 2.1'de yaygın olarak karşılaşılan ortalama çevre ses basınç değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 Ses basınç seviyeleri

Ses Kaynağı	Kaynağa olan uzaklık	Ses Basıncı (Pascal)	Ses Basınç Seviyesi (dB)
Jet Uçak Motoru	50 metre	200 Pa	140 dB
Kulak ağrı eşik değeri	-	63.2 Pa	130 dB
Kulak rahatsızlık eşik değeri	-	20 Pa	120 dB
Testere	1 metre	6.3 Pa	110 dB
Disko Ortamı	-	2 Pa	100 dB
Dizel Kamyon	10 metre	0.63 Pa	90 dB
Elektrikli Süpürge	1 metre	0.063 Pa	70 dB
Konuşma	1 metre	0.02 Pa	60 dB
Ev Ortamı	-	0.0063	50 dB
Kütüphane Ortamı	-	0.002 Pa	40 dB
Stüdyo Ortamı	-	0.0002 Pa	30 dB
Kulak işitme eşik değeri	-	0.00002 Pa	0 dB

Ses basıncının fiziksel olarak iki katına çıkarılması sesin 6 dB artması anlamına gelmektedir. Aynı şekilde ses kaynağına olan uzaklık iki katına çıktığında ses basıncında 6 dB azalma meydana gelir.

Elektriksel Ses Sinyali için yaygın olarak dBu (*decibel unloaded*) birimi kullanılmaktadır. Referans sinyal voltajı dBu birimi için $0.775 V_{rms}$ dir. Tarihsel olarak ses sinyal aktarımı ilk kez telefon hatlarında gerçekleştirilmiştir. Referans voltajı $0.775 V_{rms}$ değeri empedans değeri 600Ω olan telefon hatlarında $1mW$ değerine karşılık gelmektedir.

Özellikle tüketici elektroniğinde ses cihazları için ses sinyal birimi dBV (*decibel voltaj*) kullanılmaktadır. dBV için referans voltaj değeri $1 V_{rms}$ dir. $1 V_{rms}$ değeri empedans değeri $1 k \Omega$ olan hatlar için 1 miliWatt güce eşdeğerdir.

Ses kaynağı olarak kullanılan cihazların(CD çalar, MP3 çalar, kasetçalar, bilgisayar ses kartları, ses mikserleri vb.) ses çıkış seviyeleri hat seviyesi olarak tanımlanır. Ses sinyali amplifikatör ile yükseltilmeden önce hat seviyesinde olmalıdır. Eğer ses sinyali hat seviyesinden düşük ise ön yükseltici(*preamp*) kullanılarak hat seviyesine yükseltilir. Hat seviyeleri düşük seviye sinyallerdir. Ses sisteminin kullanım alanlarına göre hat seviyeleri değişiklik gösterir. Aşağıdaki tabloda hat seviyeleri ve nominal voltaj seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 2.2 Ses çıkış hat seviyeleri ve nominal voltaj seviyeleri

Kullanım Alanı	Nominal Seviye (dB)	Nominal Seviye (Volt)	Maksimum Seviye (Volt)
Profesyonel Ses Sistemi	6 dBu	1.55 V(rms)	2.192 V(peak)
Stüdyo Sistemi	4 dBu	1.23 V(rms)	1.737 V(peak)
Tüketici Elektroniği	-10 dBV	0.316 V(rms)	0.447 V(peak)

2.2 Veri Aktarımı: Tanımlar, Parametreler

Veri aktarımı bir noktadan başka bir noktaya veya birden fazla noktaya istenilen verinin belirli bir aktarım ortamı üzerinden taşınması olarak tanımlanır. Aktarılan veri sayısal veya analog sinyal olabilir. Sinyal aktarımı elektriksel, optiksel, infrared, mikrodalga veya radyo frekansı olarak gerçekleştirilebilir. Aktarım ortamı belirlenirken aktarılacak olan verinin bant genişliği ve aktarım mesafesi öncelikli olarak göz önüne alınmalıdır.

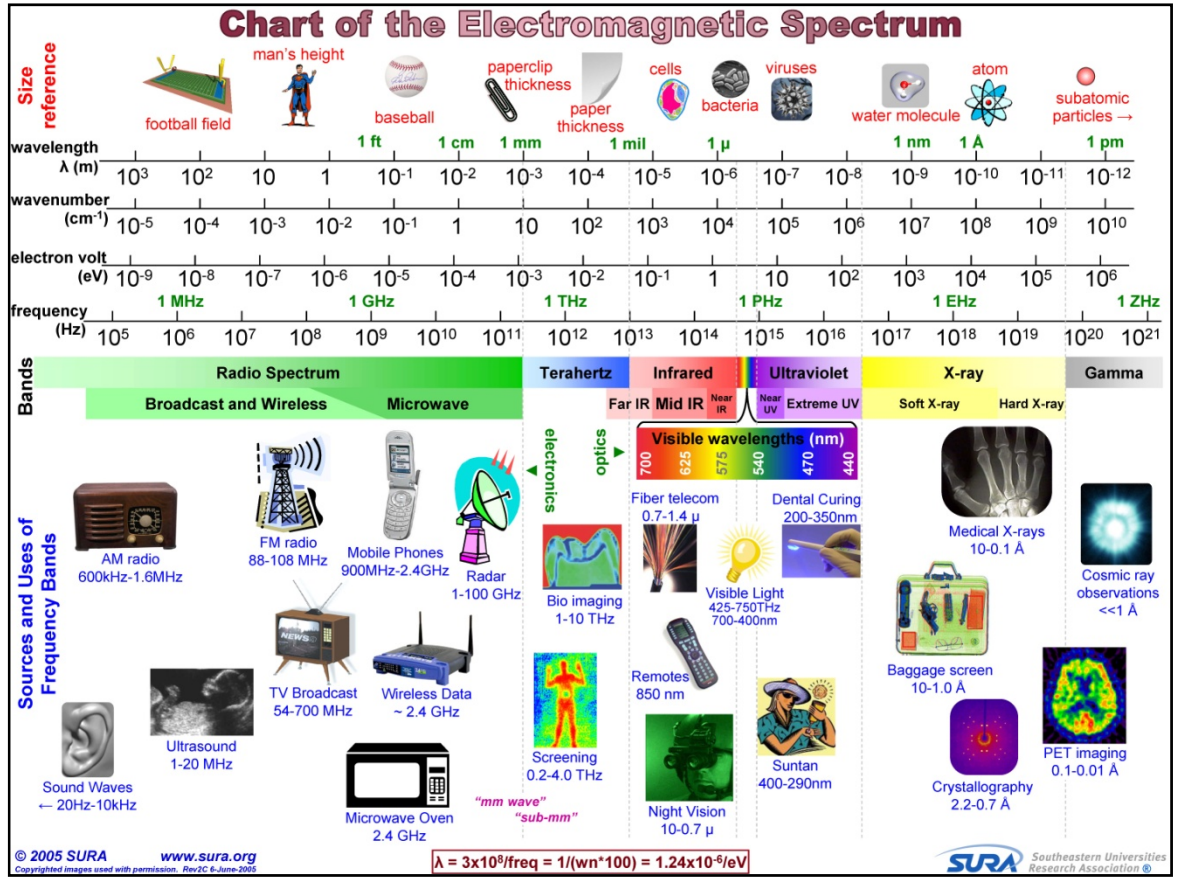
Veri aktarımında sinyal gücü, bant genişliği, veri aktarım hızı ve veri aktarım ortamı veri aktarım kalitesini belirleyen dört temel unsurdur.

Bir sinyalin voltaj yüksekliği o sinyalin **gücünü** gösteren en temel birimdir. Yaygın olarak ses sinyalleri için sinyal gücü desibel(dBu) olarak ifade edilir. 0 dBu sinyal gücü voltaj değeri olarak $0.775 V_{rms}$ değerine karşılık gelmektedir. Veri aktarımında sinyal gücünde meydana gelen zayıflama(*attenuation*) veri aktarım problemlerinin başında gelmektedir. Aktarım mesafesi arttıkça aktarılan sinyalin gücü zayıflayacaktır. Sinyalde meydana gelen zayıflama aktarım ortamı ile doğrudan ilişkilidir. Aktarım ortamları ile sinyal zayıflama ilişkisi Bölüm 2.3' de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Veri aktarımının gerçekleştiği frekans bölgesinin genişliği **bant genişliği** olarak tanımlanır. Analog veri aktarımı için bant genişliği aktarılacak olan verinin bant genişliği ile doğrudan ilişkilidir. Analog veri aktarımında bant genişliği en az aktarılacak verinin bant genişliği kadar olmalıdır. Ancak yayıncılıkta yayına tahsis edilen bant genişliğinin sınırlı oluşu bazı sınırlamalara yol açmaktadır. Analog ses sinyali aktarımında ses bandı FM radyo vericilerinde 15 kHz, AM radyo vericilerinde 5 kHz, telefon hatlarında ise 3.4 kHz dir. Ses bandı genişliğinin azalması ses kalitesinin düşmesi anlamına gelmektedir. Telefon hatlarında bant genişliğinin 3.4 kHz olmasının nedeni konuşma ses aralığının 300 Hz ile 3 kHz aralığında olmasıdır. 3.4 kHz bant genişliği bu aralıkta veri aktarımı için yeterli görülmektedir.

Sayısal veri iletimi için bant genişliği veri aktarım kanalının kapasitesini belirler. Bant genişliği ne kadar artarsa belli bir süre içinde aktarılabilecek verinin miktarı da o kadar artmış olur. Özellikle internet ve cep telefonu gibi haberleşme ortamlarında bant genişliği en büyük sorunlardan biridir. Servis sunucularının kullanıcı sayıları arttıkça ihtiyaç duyulan bant genişliği de artmaktadır. Bu nedenle servis sunucuları bant genişliklerini arttırmak için çok ciddi paralar ödemektedirler. Günümüzde bant genişliği teknik anlamda olduğu kadar ekonomik anlamda da son derece önem taşımaktadır.

Veri aktarımı için ihtiyaç duyulan bant genişliği belirlenmiş olsa da tercih edilen haberleşme tekniğine göre kullanılan frekans aralıkları değişim göstermektedir. Şekil 2.2 Elektromagnetik spektrumu ve haberleşme frekans aralıklarını göstermektedir.



Şekil 2.2 Elektromagnetik spektrum

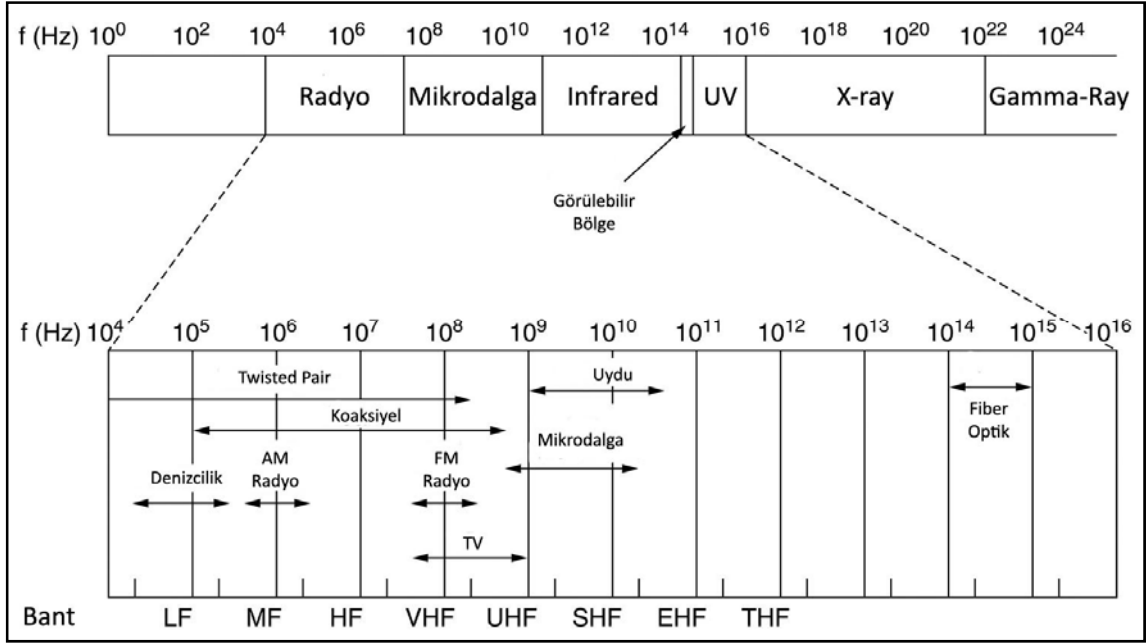
Veri aktarım hızı aktarılmak istenilen verinin hangi *hızla*, bit/saniye, alıcı tarafına aktarıldığını gösteren bir parametredir. Özellikle dijital veri aktarımında veri aktarım hızı kavramı sıklıkla kullanılmaktadır. Çizelge 2.3’de veri aktarım hızları ile ilgili örnek değerler verilmiştir.

Çizelge 2.3 Yaygın olarak kullanılan veri aktarım hızları

Veri Aktarım Hızı	Veri Tipi	Uygulama	Açıklama
56 kbit/s	Network Verisi	56k Modem	-
1 Gbit/s	Network Verisi	Gigabit Ethernet	-
4 kbit/s	Ses Verisi	Konuşma Kodlama	-
8 kbit/s	Ses Verisi	Telefon	-
192 kbit/s	Ses Verisi	MP3	Sabit Bit Oranı
1411.2 kbit/s	Ses Verisi	CD	2kanal x 16bit x 44,1 kHz
8 Mbit/s	Video Verisi	DVD	-
27 Mbit/s	Video Verisi	HDTV	-
39.813 Gbit/s	Network Verisi	OC-768	SONET
60 Mbyte/s	Bilgisayar Veri Yolu	USB 2.0	-
625 Mbyte/s	Bilgisayar Veri Yolu	USB 3.0	-
98.3 Mbyte/s	Bilgisayar Veri Yolu	FireWire	-
600 Mbyte/s	Bilgisayar Veri Yolu	SATA	3. Nesil
533 Mbyte/s	Bilgisayar Veri Yolu	PCI	-

Veri Aktarım Ortamı aktarılabilecek olan sinyalin taşınacağı fiziksel ortamı ifade etmektedir. Veri aktarım ortamları kablolu veya kablosuz ortamlar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Kablolu ortamlar bükümlü çift kablolar, koaksiyel kablolar ve fiber optik kablolar olmak üzere üç farklı tipte örneklendirilebilir. Kablosuz ortam

olarak ifade edilen veri aktarım ortamı ise havadır. Veri aktarım ortamları ve veri türleri arasındaki ilişki Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



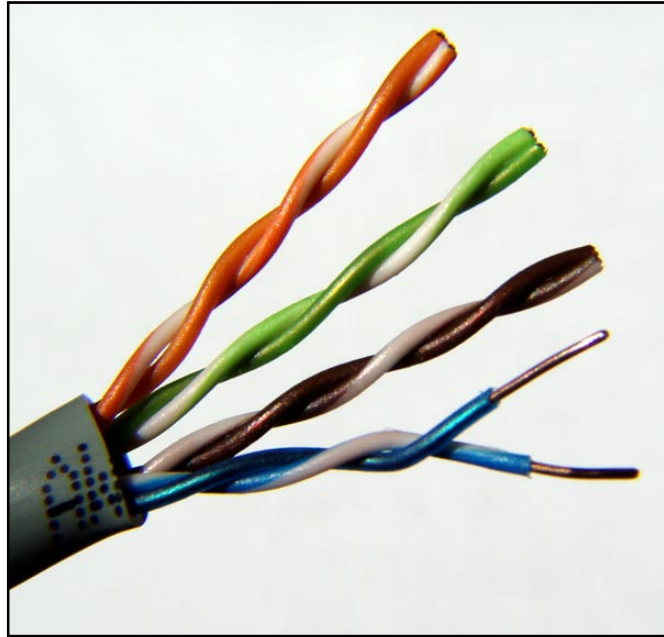
Şekil 2.3 Elektromagnetik spektrum ve veri aktarım ortamları arasındaki ilişki (Stallings 1997)

Şekil 2.3’ de görüldüğü üzere aktarılabilecek olan verinin bant genişliği ve frekansı aktarım ortamının belirlenmesinde nihai önem taşımaktadır. Ses sinyali aktarımında tercih edilecek olan veri aktarım metodu ve veri aktarım ortamı birbiri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle veri aktarım tekniklerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için veri aktarım ortamları ve veri aktarım teknikleri incelenmelidir.

2.3 Kablolu Aktarım Ortamları

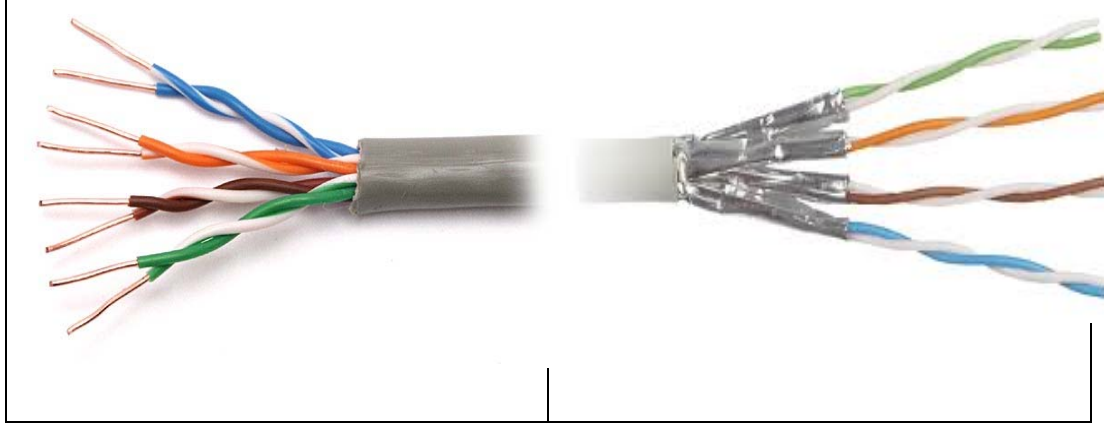
Veri aktarımı amacıyla kullanılan kablolar fiziksel yapılarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Günümüzde veri aktarımı amacıyla kullanılan kablolar; *Twisted Pair*(Büklümlü Çift), *Koaksiyel* ve Fiber Optik kablolar olmak üzere üç temel başlık altında incelenebilir.

Büklümlü Çift Kablo(Şekil 2.4) veri aktarımında en yaygın kullanılan kablo tipidir. Bunun başlıca nedeni büklüm çift kablo maliyetlerinin koaksiyel kablolar ve fiber optik kablolarla göre daha düşük olmasıdır. Aynı zamanda büklüm çift kabloların esnek yapıları ve kolay kurulumu bu kabloları kısa mesafeli network bağlantılarında ön plana çıkarmıştır. Özellikle en temel network standardı olan Ethernet uygulamalarında büklüm çift kablolar tercih edilirler. Standart bir CAT5 Ethernet kablosu toplam dört büklümlü çiftten oluşmaktadır.



Şekil 2.4 Büklümlü çift kablo

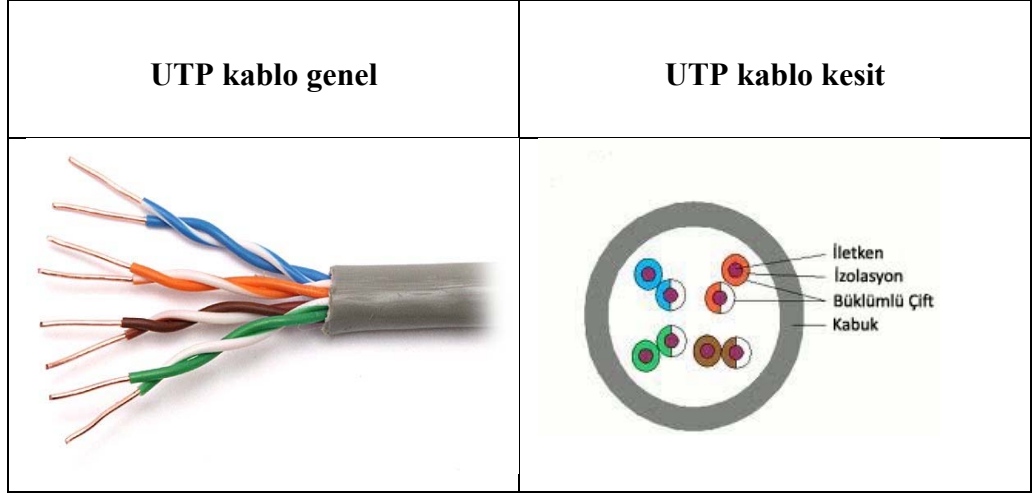
Temelde iki farklı tip büklüm çift kablo bulunmaktadır. Bunlar dış şase muhafazasız (*Unshielded Twisted Pair - UTP*) ve muhafazalı(*Shielded Twisted Pair - STP*) kablolardır: Şekil (2.5).



Şekil 2.5 UTP&STP kablo yapısı

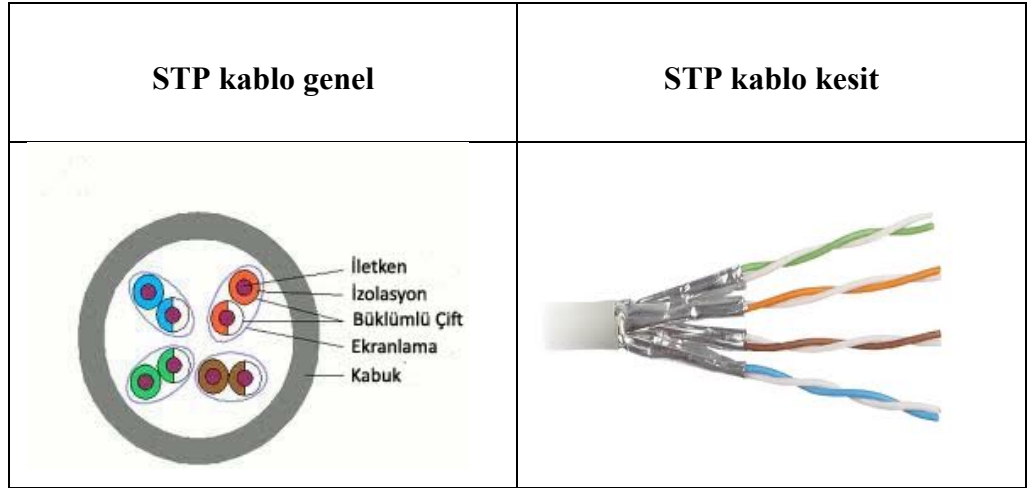
Büklümlü çift kabloda kabloların sarmal bir yapıda olmasının nedeni harici elektrik ve elektronik cihazlar tarafından oluşabilecek elektromagnetik bozulmayı azaltmaktır. Düzgün bir sarmal yapı ile komşu kablo çiftleri arasındaki yan gürültü(*Crosstalk*) azaltılmış olur. Her bir kablo çifti farklı bir bükülme sıklığına sahiptir. Farklı bükülme sıklıkları *Crosstalk* gürültüsünün azalmasını sağlar. Kablo grubunun dış şase kaplamalı olması elektromagnetik yayılımı engelleyen önemli özelliktir ve yüksek enerji hatlarının bulunduğu bölgelerde veri aktarımı yapılırken dış şase kaplamalı büklümlü çift kablo tercih edilmelidir.

UTP kablolar Ethernet ve telefon sistemlerinde tercih edilen en basit yapıdaki büklümlü çift kablolardır. UTP kablolar herhangi bir ekranlama özelliğine sahip değildir. Bu nedenle geniş alan network sistemlerinde veya yüksek elektromagnetik bozulum bulunabilecek ortamlarda kullanılamazlar.



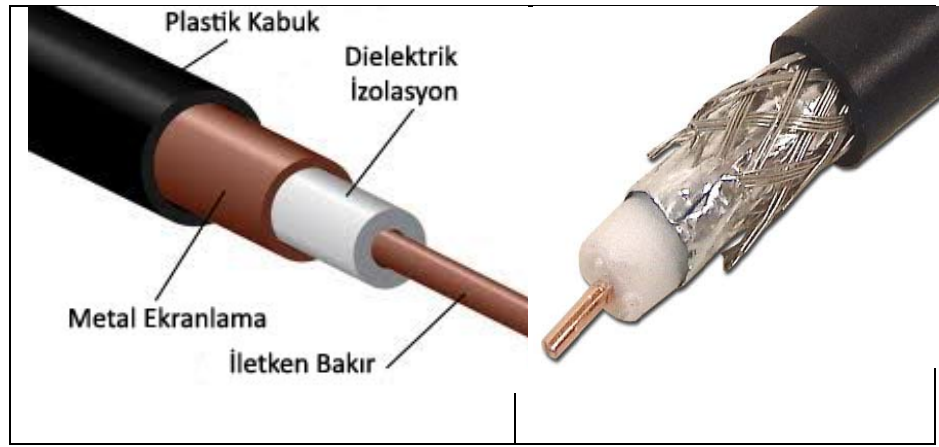
Şekil 2.6 UTP kablo

STP kablolar en güvenilir büklümlü çift kablo çeşididir. STP kablo(Şekil 2.7) içersindeki her bir büklümlü çift ekranlanmıştır. Aynı zamanda dış kablo çeperi de ekranlanmıştır. Elektromagnetik bozulunun yüksek olabileceği ortamlarda tercih edilmelidir.



Şekil 2.7 STP kablo

Koaksiyel kablo ortasında tek bir iletken bakır kablo bulunan çevresi plastik yalıtım hattı ile kaplı ve metal kaplamalı bir kablodur(Şekil 2.8). Kablo etrafında bulunan metal kaplama elektromagnetik bozulmaları önlemek amaçlıdır. Koaksiyel kablolar kurulumları zor olmalarına rağmen güvenli olmaları sebebiyle tercih edilirler. Özellikle yüksek magnetik alanlı ortamlarda bükülmü çift kabloları nazaran çok daha iyi performans gösterirler. Yüksek frekans veri aktarımında koaksiyel kablolar tercih edilirler.



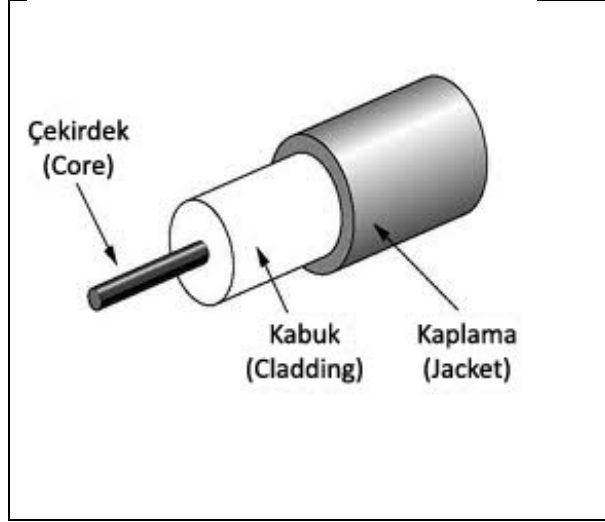
Şekil 2.8 Koaksiyel kablo yapısı

Koaksiyel kabloların yaygın olarak kullanıldığı uygulamalar;

- Televizyon hattı (Kablolu Televizyon Sistemleri)
- Uzun mesafeli telefon hattı
- Network Uygulamaları

Fiber optik kablo, Şekil(2.9), plastik veya cam fiberlerden oluşan ve ışık sinyali taşıyan aktarım ortamıdır. Fiber optik kablolar gerek fiziksel yapıları gerekse çalışma prensibi olarak bakır kabloları göre oldukça farklıdır. Bakır kabloları elektriksel veri aktarımı gerçekleştirirken fiber optik kabloları optiksel veri aktarımı gerçekleştirir. Fiziksel olarak

fiber optik kablolar üç bölümden oluşur; çekirdek(*Core*), Kabuk(*Cladding*) ve kaplama(*Jacket*).



Şekil 2.9 Fiber Optik kablo yapısı

Fiber optik kablo, üç kısımdan oluşmaktadır: Şekil(2.9).

Çekirdek(Core): Işığın iletiildiği ince cam kısımdır.

Kabuk(Cladding): Çekirdeği çevreleyen optik malzemenen üretilmiş ve ışığı iç yansıtma ile tekrar merkeze gönderen kısımdır.

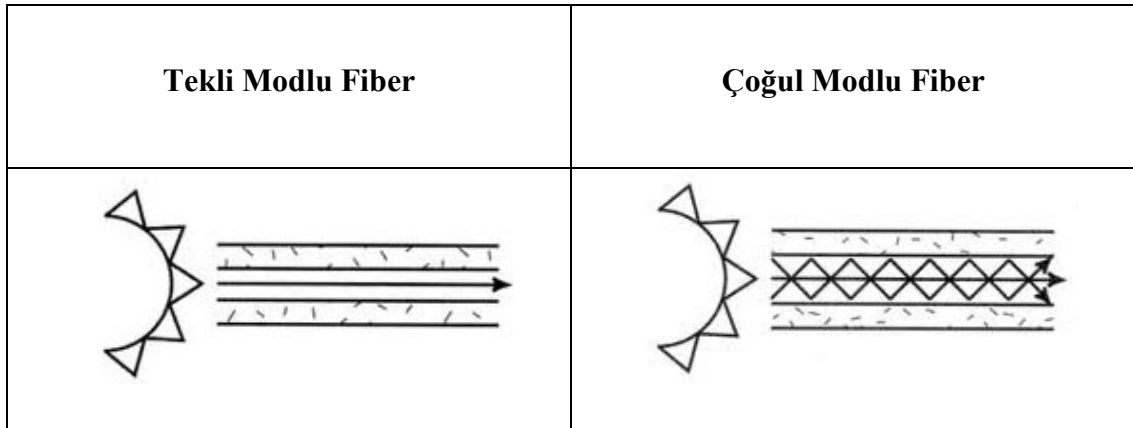
Kaplama(Jacket): Fiber kabloyu darbelere, neme ve diğer dış etkilere karşı koruyan dış katmandır.

Fiber optik kablolar merkez çaplarına, malzeme yapılarına ve ışığın kırılma şekline göre Tekli Modlu Fiber – Çoğul Modlu Fiber olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Tekli Modlu Fiber: Merkez çapları yaklaşık olarak 9 mikron genişliğindedir. Veri aktarımı 1300 ile 1550 nanometre arasında dalga boyuna sahip kızılötesi lazer ışığı üzerinden gerçekleştirilir. Günümüzde veri kaybının en az olduğu kablolu aktarım ortamı tekli modlu fiberdir. Yüksek maliyetli olmasına rağmen veri kaybının daha az olmasının istendiği durumlarda kullanılırlar.

Çoğul Modlu Fiber: Şekil 2.10' de görüldüğü üzere tekli modlu fiber ışığı doğrusal tek bir yol izleyerek iletirken çoğul modlu fiber ışığın cam yüzeyde yansırarak iletilmesi prensibi ile çalışır. Bu nedenle tekli modlu fiberlerde veri kaybı çoğul modlu fiberlere göre daha azdır.

Merkez çapları yaklaşık olarak 62 mikron genişliğindedir. Veri aktarımı, 850 ile 1300 ve 1550-1610 nanometre arasında dalga boyuna sahip kızılötesi lazer ışığı üzerinden gerçekleştirilir. Veri kaybı oranı Tekli Modlu Fiberlere göre daha yüksek olsa da düşük maliyet avantajı nedeniyle en çok kullanılan fiber optik kablo tipidir. Özellikle kısa mesafeli bina ve yerleşke altyapılarında tercih edilirler. Çoğul modlu fiberler 600 metre mesafeye kadar 10Mbit/s ile 10Gbit/s arasında veri aktarım oranına sahiptirler.



Şekil 2.10 Tekli Modlu Fiber – Çoğul Modlu Fiber: kesit yapıları

2.4 Aktarım Ortamlarının Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi

Kablolu veri aktarım ortamları, kullanım amaçları ve aktarım uzaklığı ele alınarak değerlendirilmelidir. Her bir aktarım ortamının birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Temelde aktarım ortamları birbiri ile karşılaştırılırken elektriksel veri aktarımı ve optiksel veri aktarımı olmak üzere iki grupta incelenebilir. Elektriksel veri aktarımı için günümüzde en sık kullanılan kablo tipleri bükümlü çift kablolar ve koaksiyel kablolar bir önceki bölümde incelenmiştir. Optiksel veri aktarımı

için kullanılan fiber optik kablolar da bir önceki bölümde ele alınmıştır. Genel olarak bir karşılaştırma yapıldığında fiber optik kablolar bakır kablolarla göre veri aktarım kalitesi açısından daha üstündür. Buna rağmen bakır kablolar özellikle aktarım mesafesinin kısa olduğu uygulamalarda maliyet açısından tercih edilir. Bu üç kablo tipinin(Büklüm Çift Kablo, Koaksiyel Kablo ve Fiber Optik Kablo) birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları aşağıda konu başlıkları halinde incelenmiştir.

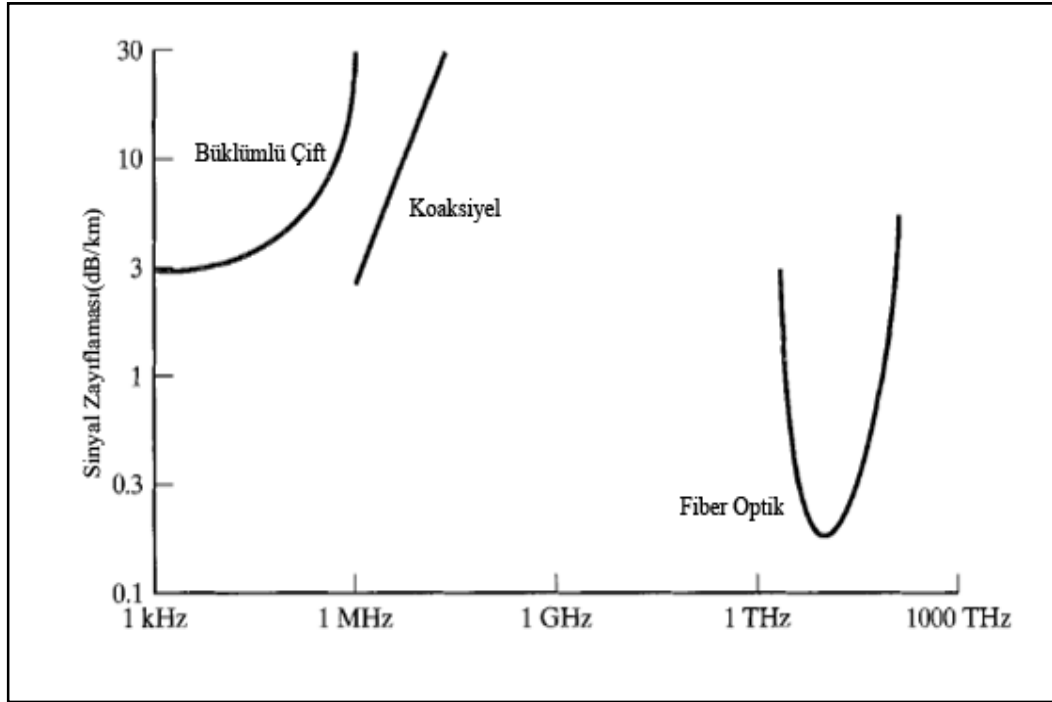
Aktarım Uzaklığı: Fiber optik kablolar, büklümlü çift ve koaksiyel bakır kablolarla göre çok daha uzun mesafelere tekrarlayıcı veya yükselticiye ihtiyaç duymaksızın veri aktarımını yapabilirler. Fiber optik kabloların aktarım mesafelerinin uzun olmasının nedeni sinyal kaybının çok düşük olmasıdır. Fiber optik kablolarla aktarım uzaklığı yükseltmeye ihtiyaç duymadan 100 -150 km, optik yükseltme yardımı ile 4000km'ye kadar çıkabilirken bakır kablolarla 100 metre ile sınırlıdır. Fiber optik kablolar bu avantajı sayesinde özellikle uzun mesafeli veri aktarımını uygulamalarında tercih edilirler. Günümüzde network haberleşme altyapısı fiber optik kablolar ile sağlanmaktadır.

Aktarım Hızı ve Bant Genişliği: Fiber optik kablolar ışık ile veri aktarımını gerçekleştirdiği için büklümlü çift ve koaksiyel kablolarla göre çok daha hızlı veri aktarımını sağlarlar. Aynı zamanda bakır kablolar ile karşılaştırıldığı zaman fiber optik kablolar çok daha geniş bir bant genişliğine sahiptirler. Çizelge 2.4 kabloların aktarım hızı ve bant genişliği değerlerini göstermektedir.

Çizelge 2.4 Aktarım ortamları aktarım hızı ve bant genişliği(Stallings, Alcatel-Lucent)

Aktarım Ortamı	Veri Hızı	Bant Genişliği
Twisted Pair Kablo	4 Mbps	3 MHz
Koaksiyel Kablo	500 Mbps	350 MHz
Fiber Optik Kablo	1,28 Tb/s (4000km'ye kadar) 2,56 Tb/s(1000km'ye kadar)	2 GHz

Sinyal Zayıflaması: Şekil 2.11’de bükümlü çift, koaksiyel ve fiber optik kablolar için sinyal zayıflama eğrileri görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi fiber optik kablolarda sinyal zayıflaması çok daha azdır. Şekil 2.11 üç farklı kablo tipi içinde aktarım hızı ve sinyal zayıflaması arasındaki ilişkiyi de göstermektedir. Bu durumda fiber optik kablolar için çok daha yüksek hızlarda çok daha düşük sinyal zayıflaması ile veri aktarımını gerçekleştirdiğini söyleyebiliriz.



Şekil 2.11 Kablo türleri için bant genişliği – sinyal zayıflama ilişkisi(Stallings 1997)

Elektromagnetik Yalıtım: Fiber optik kablolar veri aktarımını optiksel yollarla gerçekleştirdikleri için herhangi bir elektromagnetik alandan etkilenmezler. Bu nedenle fiber optik kablolar için elektromagnetik girişim veya gürültüden bahsedilemez. Ancak elektrik sinyali taşıyan twisted pair veya koaksiyel kablolar için elektromagnetik alan büyük bir problem teşkil etmektedir. Bunun yanı sıra fiber optik kablolar elektrik sinyali taşımadıkları için elektromagnetik enerji yayılımında da bulunmazlar. Tüm bu avantajlar düşünüldüğünde fiber optik kablolar elektromagnetik yayılım açısından kritik olan uygulamalarda tercih edilirler.

Kablo Boyutu ve Ağırlığı: Fiber optik kablolar bükümlü çift veya koaksiyel kablolarla göre çok daha hafif ve küçük boyuttadırlar. Veri aktarımının gerçekleştiği fiber lif öyle incedir ki tek bir kablo içerisinde yüzlerce fiber lif bulunabilir. Ancak fiber optik kablolar diğer kablolarla göre daha az esnekler ve kırılma riskleri vardır. Bu nedenle kurulumları bakır kablolarla göre daha zordur.

Güvenlik: Bükümlü çift ve koaksiyel kablolar elektriksel sinyal taşıdıkları için bu sinyallere başka bir hattan bağlanıp ulaşmak mümkündür ve bu da veri hattı üzerinde ciddi bir güvenlik açığının olması demektir. Ancak optiksel sinyal taşıyan fiber optik kablo için hat üzerinden kancalama ile bilgi çalınması mümkün değildir. Veri güvenliğinin önem taşıdığı uygulamalarda fiber optik kablo tercih edilir.

Maliyet: Maliyet açısından ele alındığında fiber optik kablolar maliyeti en yüksek aktarım ortamıdır. Gün geçtikçe fiber optik kablo maliyetleri azalsa da bükümlü çift kablo ve koaksiyel kablo ile karşılaştırıldığı zaman fiber optik kablo ve kurulum maliyetleri çok daha yüksektir. Bu nedenle kısa mesafeli ve veri aktarım kalitesinin çok önemli olmadığı uygulamalarda bükümlü çift kablolar tercih edilirler. Koaksiyel kablolar fiber optik kablolarla göre daha ucuz olsalar da bükümlü çift kablolar ile karşılaştırıldıklarında daha yüksek maliyete sahiptirler.

2.5 Veri Aktarım Teknikleri

Bir ortamdan başka bir ortama veri aktarımı söz konusu olduğunda verinin tipine göre farklı aktarım teknikleri uygulanmaktadır. Veri aktarım tekniği seçilirken öncelikle aktarılan verinin dijital olarak mı yoksa analog olarak mı aktarılması gerektiğine karar verilir. Bu aşamadan sonra aktarılan verinin bant genişliği, veri aktarım hızı ve veri aktarım ortamı göz önüne alınarak aktarım tekniği belirlenir. Veri aktarım tekniklerini incelerken aktarılan veri tipi ve aktarım ortamı üzerinden taşınacak olan sinyal tipine göre sınıflandırma yapılabilir. Bu durumda veri aktarım tekniklerini bir sonraki sayfada belirtilen başlıklar üzerinden inceleyebiliriz.

- Sayısal Veri → Sayısal Sinyal

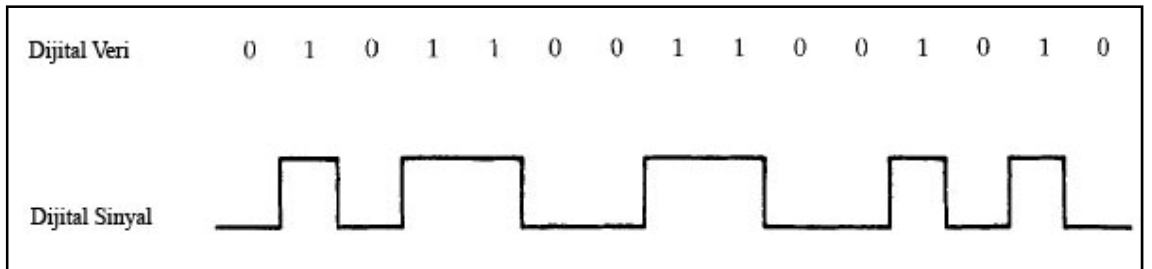
- Sayısal Veri → Analog Sinyal
- Analog Veri → Sayısal Sinyal
- Analog Veri → Analog Sinyal

2.5.1 Sayısal Veri Aktarımı

Temelde sayısal olarak ifade edilebilen verilere dijital veri denilmektedir. En küçük dijital veri 1 bit olarak ifade edilebilmektedir. Genel olarak dijital veriler 8 bitlik kümeler halinde tutulurlar. Bu 8 bitlik kümelere 1 Byte denir. Dijital veri bir ortamdan başka bir ortama aktarılmak istenildiğinde dijital sinyal ile veri aktarımı ve analog sinyal ile veri aktarımı olmak üzere iki farklı temelde veri aktarımı gerçekleştirilir.

Sayısal Veri → Sayısal Sinyal

Sayısal veri aktarımında izlenebilecek en temel yöntem sayısal verinin sayısal sinyal ile aktarılmasıdır. Dijital veri 1 ve 0 olmak üzere ikilik sayısal tabanda tanımlanır. Dijital sinyal 1 ve 0 sayısal değerleri için iki farklı voltaj seviyesi ile veriyi aktarır. Dijital sinyal ile dijital veri arasındaki ilişki Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Sayısal veri ile sayısal sinyal arasındaki ilişki

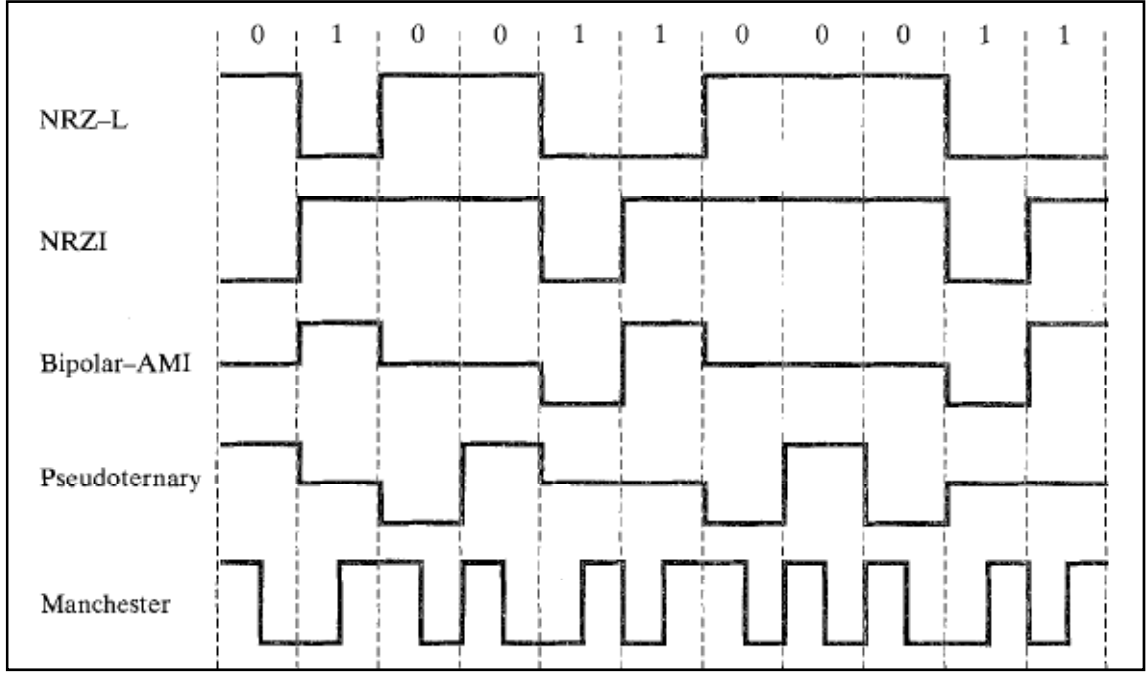
Sayısal veri aktarımında sayısal verinin kodlanması esasına dayalı birçok farklı yöntem izlenmektedir. Aşağıda yaygın olarak kullanılan teknikler açıklanmıştır.

Nonreturn to Zero Level(NRZ-L): Bu yöntem sayısal sinyal ile sayısal veri aktarımında kullanılan en temel yöntemdir. Her bir bit değeri için sabit bir voltaj seviyesi aktarılır. Genel olarak düşük voltaj 1 değerini, yüksek voltaj ise 0 değerini taşır. Düşük voltaj değeri olarak sistemin sıfır volt referans değeri aktarılır. Şekil 2.13' de *Nonreturn to Zero Level* tekniği gösterilmiştir.

Nonreturn to Zero Invert(NRZI): Bu teknikte sayısal 1 değeri için voltaj seviyesi değiştirilerek sinyal aktarımı yapılır. Şekil 2.13' de *Nonreturn to Zero Invert* tekniği gösterilmiştir.

Multilevel Binary: Bu teknikte ikiden fazla sinyal seviyesi üzerinden veri aktarımı gerçekleştirilmektedir. Temel olarak veri aktarımı şu esasa dayanır; 0 sayısal verisinin aktarımı için referans voltaj(0 Volt) değeri gönderilirken, 1 sayısal değeri için iki farklı sinyal seviyesi değiştirilerek gönderilir. Bu teknik *Bipolar-AMI* olarak tanımlanır. Diğer bir *Multilevel Binary* tekniği ise *Pseudoternary* olarak tanımlanmıştır. Bu teknikte ise *Bipolar-AMI* tekniğinin tam tersi olarak 1 verisi için 0 Volt gönderilirken 0 verisi için iki farklı sinyal seviyesi değiştirilerek gönderilir. İki farklı teknikte Şekil 2.13'de gösterilmiştir.

Manchester Kodlama: Yaygın olarak kullanılan kodlama yöntemlerinden biri de Manchester kodlama yöntemidir. Bu yöntemde *binary* bir verinin aktarılması için iki farklı voltaj seviyesi arasında geçiş yapılır. Aktarılan sinyalde voltaj seviyesi yüksek seviyeden düşük seviyeye geçiş yapıyorsa sayısal 0 verisi, düşük seviyeden yüksek seviyeye bir geçiş yapıyorsa sayısal 1 verisi aktarılmış olur. Manchester kodlama yöntemi Şekil 2.13'de gösterilmektedir.



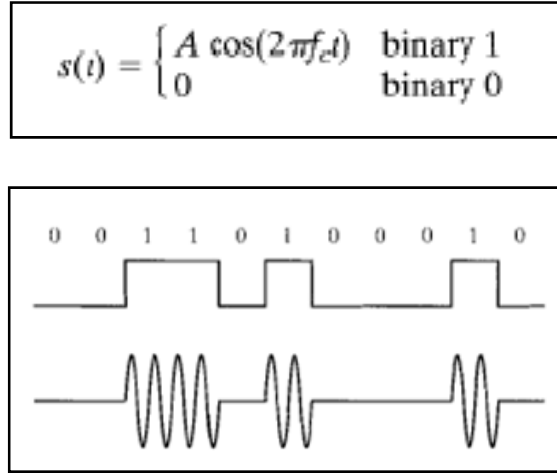
Şekil 2.13 Sayısal sinyal kodlama yöntemleri

Sayısal Veri → Analog Sinyal

Dijital verilerin aktarımında analog sinyaller de kullanılabilir. Bunun en temel örneği telefon hatlarıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan modem(modülatör-demodülatör) cihazları bilgisayarlar tarafından gönderilen sayısal veriyi analog forma dönüştürerek telefon hattı üzerinden aktarmaktadırlar. Aynı şekilde telefon hattı üzerinden gelen analog sinyal sayısal veri olarak bilgisayarlara aktarılır. Bu bölümde dijital verinin analog sinyal olarak aktarılabilmesi için kullanılan analog modülasyon teknikleri incelenecektir. Sayısal verilerin aktarımı için üç temel analog modülasyon tekniği kullanılmaktadır. Bunlar;

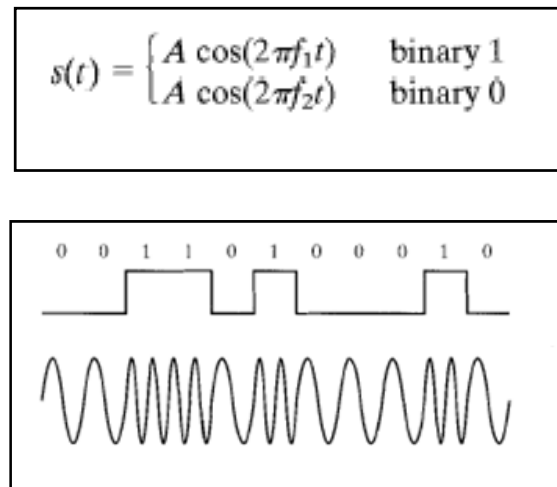
- Genlik Kaydırma Anahtarlama(*Amplitude Shift Keying – ASK*)
- Frekans Kaydırma Anahtarlama (*Frequency Shift Keying – FSK*)
- Faz Kaydırma Anahtarlama(*Phase Shift Keying – PSK*)

Genlik Kaydırma Anahtarlama: Genlik kaydırma anahtarlama temel olarak aktarılmak istenilen sayısal verinin iki farklı değeri için iki farklı genlik değerine sahip sabit frekanslı taşıyıcı sinyalin aktarılması esasına dayanır. Genel olarak sayısal 0 değeri için 0 genlik değeri aktarılır. Sayısal 1 değeri için ise sabit bir frekans ve genlik değerine sahip sinyal aktarılır. Şekil 2.14’ de genlik kaydırma anahtarlama örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Genlik kaydırma anahtarlama

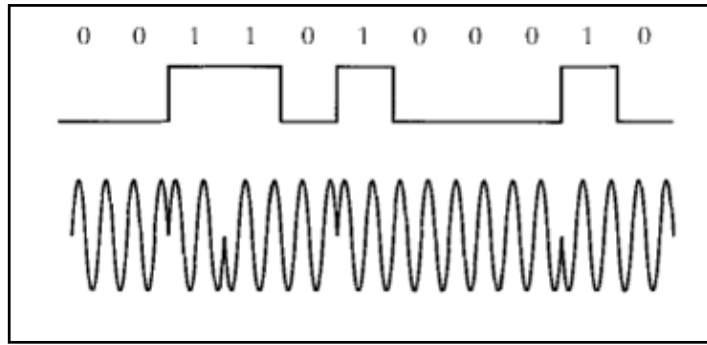
Frekans Kaydırma Anahtarlama: Frekans kaydırmalı anahtarlama aktarılmak istenilen sayısal verinin iki farklı değeri için iki farklı frekans değerine sahip sabit genlikli sinyal aktarılır. Şekil 2.15’ de frekans kaydırma anahtarlama örneği gösterilmiştir. Aktarılan sinyal fonksiyonu Şekil 2.15’ deki gibidir.



Şekil 2.15 Frekans kaydırma anahtarlama

Faz Kaydırma Anahtarlama: Faz kaydırmalı anahtarlama aktarılan analog sinyal sabit frekans ve sabit genliğe sahiptir. Sayısal 1 değeri için sinyalin fazı değiştirilerek faz kaydırmalı anahtarlama gerçekleştirilir. Şekil 2.16’ da frekans kaydırma anahtarlama örneği gösterilmiştir. Faz kaydırmalı anahtarlama için sinyal fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 0} \end{cases}$$



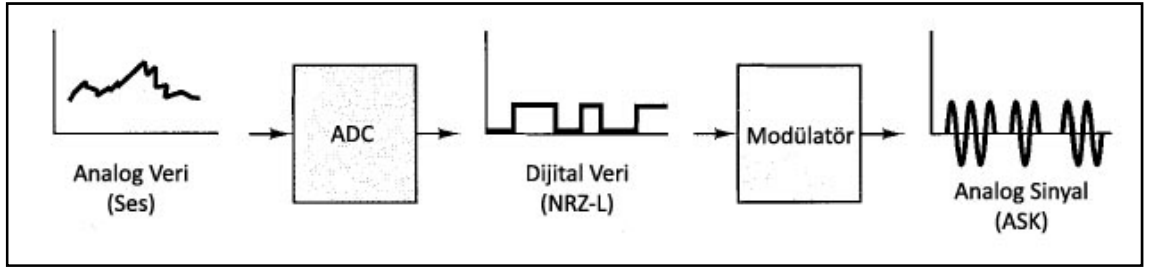
Şekil 2.16 Faz kaydırma anahtarlama

2.5.2 Analog Veri Aktarımı

Analog veri aktarımı dijital veri aktarımında olduğu gibi sayısal sinyaller veya analog sinyaller üzerinden farklı modülasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bunun yanı sıra analog sinyal hiçbir modülasyona tabi tutulmaksızın aktarılabilir. Ancak sinyal zayıflaması ve benzeri etkiler sonucu veri aktarım problemleriyle karşı karşıya kalmabilir. Bu nedenle analog sinyal yükselticiler tarafından aktarılacak sinyal belirli bir voltaj seviyesinin üzerine çıkarılarak aktarım gerçekleştirilebilir. Analog sinyallerin modülasyon teknikleri kullanılarak aktarılması sayısal modülasyon ve analog modülasyon olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Sayısal modülasyon analog verinin sayısal sinyal olarak aktarılması için kullanılır. Analog modülasyon ise analog verinin yine analog sinyal olarak aktarılması amacıyla kullanılmaktadır.

Analog Veri → Sayısal Sinyal

Analog verilerin sayısal sinyal olarak aktarılması için ilgili analog verinin sayısal sinyal haline getirilmesi gerekmektedir. Diğer bir deyişle analog sinyal sayısal sinyale dönüştürülür. Bu dönüştürme için farklı modülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Temel olarak ses sinyalleri için PCM(*Pulse Code Modulation*) ve DM(*Delta Modulation*) analog sinyalleri sayısal sinyallere dönüştürmek için kullanılmaktadır. Analog Sayısal Çeviriciler(*Analog Digital Converters – ADC*) tarafından ilgili sinyal dönüşümü sağlanmaktadır.



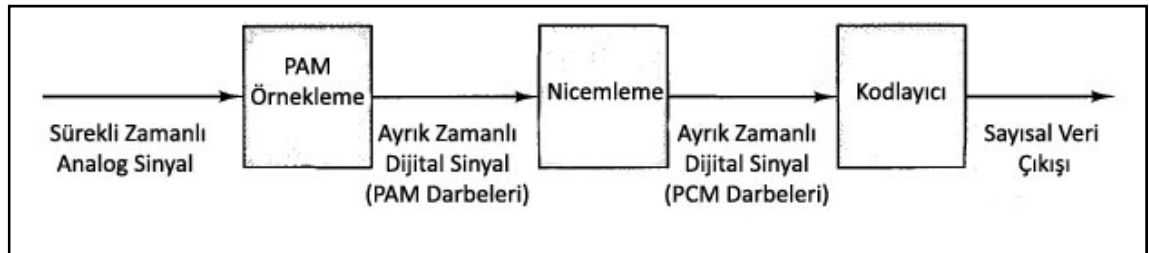
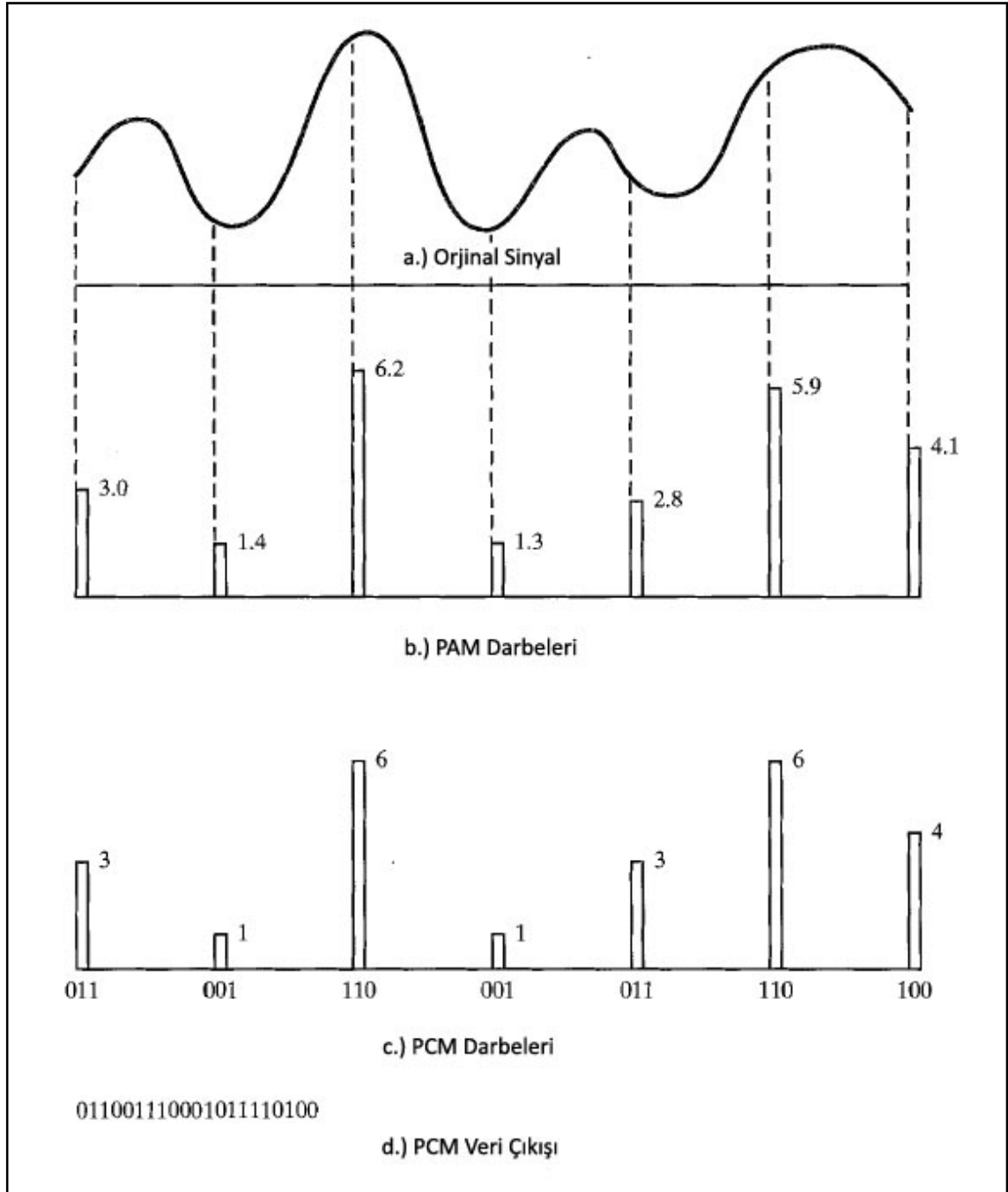
Şekil 2.17 Analog veri sayısal sinyal aktarımı

Şekil 2.17 örnek bir analog veri aktarım yöntemini göstermektedir. Aktarılacak olan analog veri öncelikle analog sayısal çevirici(ADC) tarafından sayısal sinyale dönüştürülür. Uzun mesafeli veri aktarımı için sayısal sinyal genlik kaydırmalı anahtarlama(ASK) modülasyonu ile analog sinyale dönüştürülür. Böylece analog veri sayısal bir sinyal gibi ASK modülasyon tekniği kullanılarak aktarılmış olur.

PCM(Pulse Code Modulation): PCM örnekleme teoremini(*Nyquist-Shannon Sampling Theorem*) temel alan bir modülasyon tekniğidir. Örnekleme teoremine göre eğer bir sinyal frekans bandı içerisindeki en yüksek frekansın iki katı oranında eşit aralıklarla örneklenebilirse orijinal sinyal hakkındaki tüm bilgiler edinilmiş olur. Örneğin; konuşma sinyali için en yüksek frekans değeri 4000 Hz dir. Bu durumda konuşma sinyalinin örneklenmesi için gerekli olan örnekleme oranı saniyede 8000 örnekleme olacaktır. Saniyede 8000 örnekleme konuşma sinyalinin tüm özelliklerini

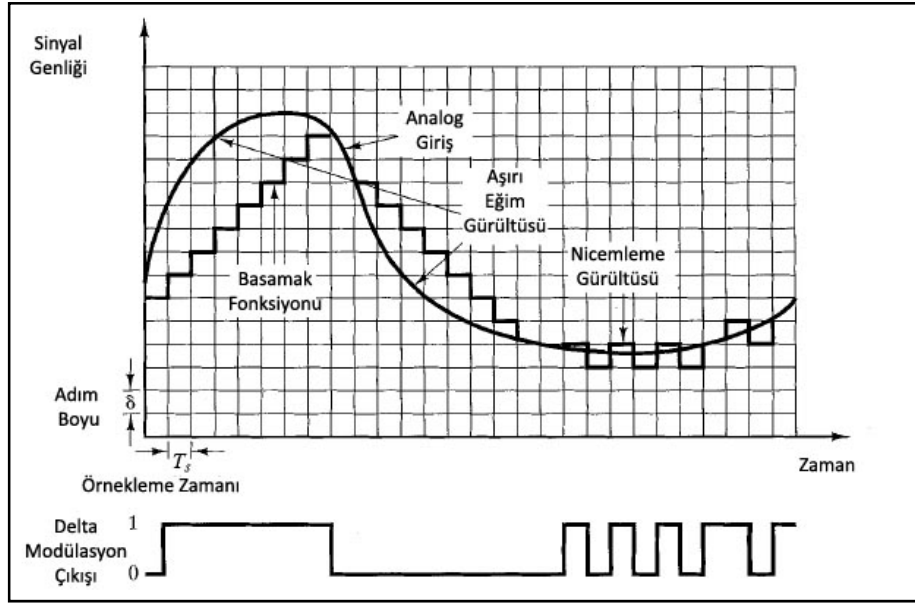
çıkartmak için yeterli bir örnekleme değeridir. Günümüzde müzik CD'leri PCM tekniği kullanılarak kaydedilmektedirler. Standart bir müzik CD' si oluşturulurken 16 bit kuantizasyon seviyesinde 44,1 kHz örnekleme oranında bir PCM gerçekleştirilmektedir.

Örnekleme teoremine göre aktarılmak istenen analog sinyal eşit aralıklarla ölçümlenir. Ölçümlenen değerler belirlenen nicemleme seviyesine göre sayısal olarak ifade edilir. Şekil 2.18 PCM uygulamasının aşamalarını göstermektedir. PCM uygulamasının ilk aşaması analog sinyalin belirlenen örnekleme oranda genlik değerlerinin ölçümlenmesidir. Bu aşama PAM(*Pulse Amplitude Modulation*) olarak adlandırılır. İkinci aşamada elde edilen sayısal değerler belirlenen nicemleme seviyesinde nicemlenir. Şekildeki örnekte nicemleme seviyesi $n=3$ dür. Ardından elde edilen sayısal değerler belirlenen kodlama tekniği ile sayısal olarak kodlanarak *encoding* işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 2.18 Pulse Code Modulation (Stallings 1997)

DM(Delta Modülasyonu): Delta modülasyonu da PCM' e benzer bir şekilde belirli aralıklarla analog sinyalin değerini ölçümler. Ancak delta modülasyonda analog sinyale karşılık gelen sayısal değer belirlenirken bir önceki değer ile karşılaştırma yapılarak ilgili sayısal değere karar verilir. Şekil 2.19 Delta Modülasyon uygulamasını göstermektedir.



Şekil 2.19 Delta modülasyonu(Stallings 1997)

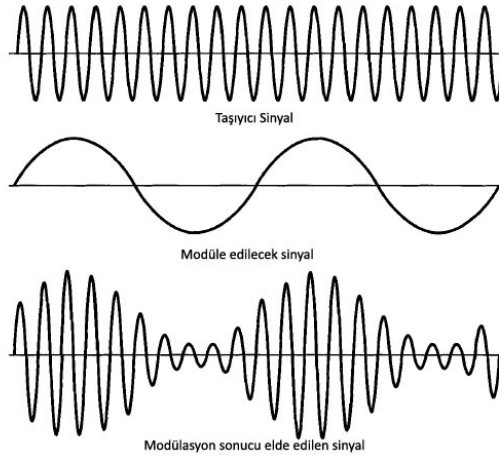
Analog Veri → Analog Sinyal

Analog veri aktarımında özellikle kablosuz uygulamalarda yaygın olarak aşağıda belirtilen analog modülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerin hepsinde temel olarak belirli bir taşıyıcı sinyal üzerinden istenilen analog veri aktarılmaktadır. Aşağıda üç temel analog modülasyon tekniği incelenmiştir.

- Genlik Modülasyonu(Şekil 3.9)
- Frekans Modülasyonu(Şekil 3.10)
- Faz Modülasyonu(Şekil 3.11)

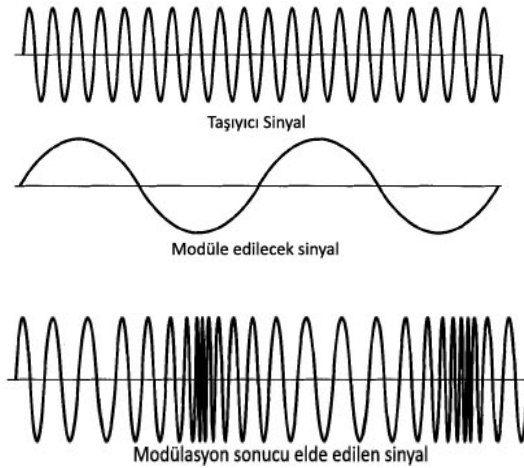
Genlik Modülasyonu: Genlik modülasyonu(*Amplitude Modulation - AM*) sabit frekanslı taşıyıcı bir sinüs sinyalinin modüle edilecek olan sinyale göre genliğinin değişmesi esasına dayanır. Taşıyıcı sinyal sabit yüksek frekanslı bir sinüs sinyalidir.

Modüle edilecek olan sinyale bağılı olarak taşıyıcı sinyalin genliği değişir. Şekil 2.20 genlik modülasyon örneğini göstermektedir.



Şekil 2.20 Genlik modülasyonu

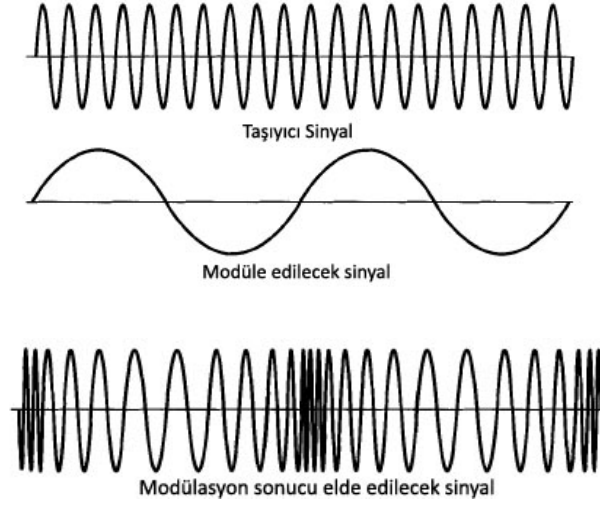
Frekans Modülasyonu: Frekans modülasyonu(*Frequency Modulation – FM*) taşıyıcı bir sinüs sinyalinin modüle edilecek olan sinyale göre frekansının değişmesi esasına dayanır. Frekans modülasyonunda taşıyıcı sinyalin genlik değeri sabit kalarak frekans değeri modüle edilecek sinyale göre artar veya azalır. Şekil 2.21 frekans modülasyon örneğini göstermektedir.



Şekil 2.21 Frekans modülasyonu

Faz Modülasyonu: Faz modülasyonu(*Phase Modulation – PM*) taşıyıcı bir sinüs sinyalinin modüle edilecek olan sinyale göre faz değerinin değişmesi esasına dayanır. Faz modülasyonunda taşıyıcı sinyalin genlik değeri sabit kalarak faz değeri modüle

edilecek sinyale göre değişim gösterir. Şekil 2.22 faz modülasyon örneğini göstermektedir.



Şekil 2.22 Faz Modülasyonu

Tez çalışmasında; genel alan seslendirme sistemleri ve profesyonel seslendirme sistemleri için sistem kalitesinin artırılması amacıyla ses sinyali aktarım teknikleri optiksel iletişim için değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının araştırma ve bulgular bölümünde optiksel veri iletişimi esaslı sistem tasarımı önerilmiş ve tasarımın uygulanabilirliği gerçekleştirilen prototipler ile test edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Ses sinyallerinin çevre gürültülerden etkilenmeden en sağlıklı biçimde aktarılabilmesi amacıyla optiksel veri iletişiminin kullanımı ve bu alanda geliştirilen uygulamalar genel alan seslendirme sistemleri ve profesyonel seslendirme sistemlerinde ses kalitesi açısından önem taşımaktadır. Günümüzde özellikle genel alan seslendirme sistemleri için kullanılan analog 70/100V trafolu sistemler gerek enerji verimliliği gerekse sistem performansı ve ses kalitesi açısından geri kalmış sistemlerdir. Tez çalışmasında bu sistemlere alternatif olarak optiksel veri iletişiminin kullanıldığı yeni bir sistem tasarımı önerilmiştir. Şekil 3.1 önerilen optiksel veri iletişimi esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımının blok diyagramını göstermektedir. Bu sistem tasarımı ile enerji verimliliği, ses kalitesi ve sistem esnekliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Şekilde görülen sistem tasarımında uygulama alanında bulunan her bir hoparlör için bağımsız bir amplifikatör ünitesi kullanılmıştır. Bu sayede her bir hoparlör merkezi kontrol ünitesi tarafından bağımsız olarak kontrol edilebilmekte, istenilen ses kanalından ve istenilen ses seviyesinde her bir hoparlör için bağımsız olarak yayın yapılabilmektedir. Amplifikatör ünitelerinin hoparlör üniteleri ile bütünleşik olması sayesinde diğer sistemlerde karşılaşılan aktarım mesafesi boyunca ortaya çıkan güç kaybı bu sistemde karşılaşılmaz. Bunların yanı sıra sistemde trafo kullanılmaması ve ses sinyali aktarımının sayısal olarak fiber optik kablo üzerinden gerçekleştirilmesi sayesinde ses sinyali çevre gürültülerinden etkilenmeden yüksek kalitede aktarılır. Trafolu sistemlerde karşılaşılan ses kalitesindeki bozulmalar ve güç kaybı önerilen bu yeni sistem için söz konusu değildir.

Önerilen optiksel veri iletişimi esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımı ile günümüzde kullanılan analog genel alan seslendirme sistemleri karşılaştırıldığında iki önemli farklılık ortaya çıkmaktadır. Bunlar;

- Ses sinyalinin sayısal ve optiksel olarak aktarılması
- Her bir hoparlör için bağımsız amplifikatör kullanılması

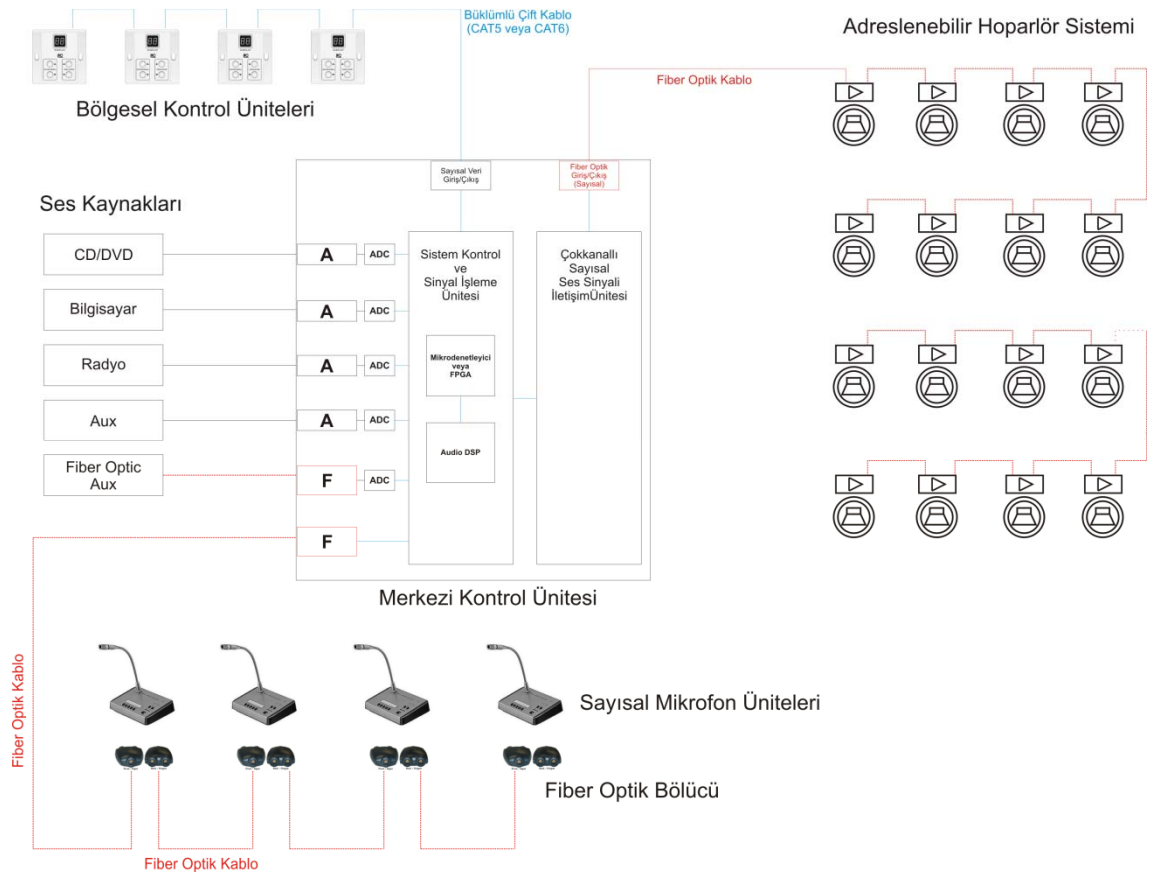
Belirtilen farklılıklar sistemde ses kalitesinin daha yüksek olmasını ve bağımsız olarak adreslenebilir hoparlör sistemi ile sistem esnekliğinin artırılmasını sağlamaktadır.

Bu bölümde:

- Optiksel iletişim esaslı *sistem tasarımı* önerilmiş,
- *Tasarımın uygulanabilirliği* gerçekleştirilen prototip çalışmaları ile test edilmiştir.

3.1 Tasarım

Genel alan seslendirme sistemleri için önerilen optiksel veri iletişimi esaslı sistem tasarımının blok diyagramı Şekil 3.1’ de gösterilmektedir.



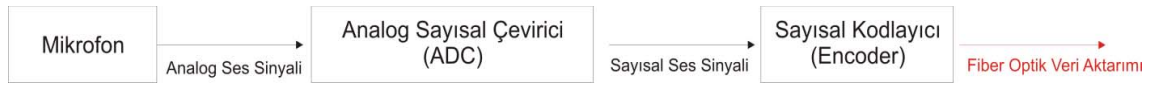
Şekil 3.1 Optiksel veri iletişimi esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımı blok diyagramı;

A : Analog Ses Girişi

F: Fiber Optik Bağlantı

Blok diyagramı gösterilen optiksel veri iletişimi esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımı ilgili başlıklar altında değerlendirilmiştir.

Sayısal Mikrofon Üniteleri: Bilgilendirme anonsu ve acil anons gibi uygulamaların gerçekleştirildiği bölümdür. Her bir mikrofon ünitesinin içerisinde mikrofon ön yükseltici(*Microphone Preamp*), analog dijital çevirici(ADC) ve sayısal kodlama(*Encoder*) blokları bulunmaktadır. Şekil 3.2 sayısal mikrofon üniteleri için öngörülen sistem blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.2 Sayısal mikrofon üniteleri blok diyagramı

Mikrofon üniteleri ile merkez ünite arasındaki kontrol ve ses sinyali aktarımı fiber optik kablo ile sayısal olarak sağlanmaktadır. Bir fiber optik kablo içerisinde çift yönlü (*Full-Dublex*) kontrol sinyali için iki fiber kıl, çift yönlü ses sinyali aktarımı için ise yine iki fiber kıl olmak üzere toplam dört fiber kıl olması öngörülmektedir.

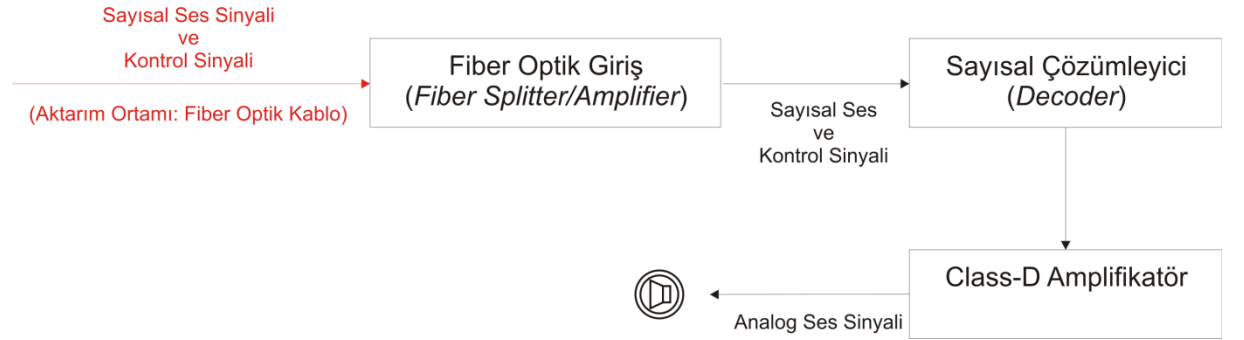
Harici Ses Üniteleri: Merkez ünite üzerinde bulunan analog ses sinyal girişleri ile CD, DVD, radyo, bilgisayar ve benzeri harici ses kaynaklarından alınan analog ses sinyalleri ADC üniteleri ile sayısal ses sinyaline dönüştürülerek sistem kontrol ve sinyal işleme ünitelerine aktarılmaktadır. Bu sayede harici analog ses kaynakları sayısal olarak kodlanarak istenilen hoparlöre ses sinyali aktarılmış olur.

Kontrol Üniteleri : Genel alan seslendirme sisteminin bulunduğu saha içerisinde bölgesel ses seviye ayarları veya kanal seçimi gibi uygulamalarının yapılabilmesi amacıyla kontrol üniteleri yer almaktadır. Kontrol üniteleri ilgili kontrol sinyallerini sayısal olarak merkez üniteye iletir. Sistemde kontrol üniteleri ile merkez ünite arasındaki aktarım ortamının CAT5 veya CAT6 bükümlü çift kablo olması öngörülmektedir.

Merkez Ünite: Sistemin tüm sinyal işleme ve veri aktarımı uygulamalarının yürütüldüğü sistem merkezini oluşturan bölümdür. Sayısal mikrofon üniteleri, harici ses üniteleri ve kontrol ünitelerinden gelen kontrol ve ses sinyalleri merkez ünite içerisinde sayısal olarak işlenerek fiber optik çıkış üzerinden adreslenebilir hoparlör sistemine iletilir. Merkez ünite içerisinde analog ses sinyalinin sayısal ses sinyaline dönüştürülmesi, sayısal ses sinyali işleme, sistem kontrolü ve çok kanallı sayısal ses sinyali aktarımı gibi işlemler yürütülmektedir.

Adreslenebilir Hoparlör Sistemi: Günümüzde uygulanmakta olan genel alan seslendirme sistemlerinden farklı olarak önerilen bu yeni tasarımda her bir hoparlör ayrı ayrı adreslenebilmektedir. Bu sayede her bir hoparlör bağımsız olarak kontrol edilebilir olmuştur. Tavsiye edilen sistemin en büyük avantajı adreslenebilir hoparlör sistemidir.

Her bir hoparlör ünitesi içerisinde sayısal olarak merkezi tarafından kontrol edilebilen amplifikatör ünitesi yer almaktadır. Amplifikatör üniteleri fiber optik kablo üzerinden gelen sayısal ses ve kontrol sinyalini çözümler(*decode*) ve ilgili sayısal ses sinyali sayısal analog çevirici(DAC) modülüne iletilir. DAC modülünden çıkan analog ses sinyali Class-D tipi amplifikatör ile yükselttilerek hoparlöre aktarılır. Şekil 3.3 adreslenebilir hoparlör sisteminin blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.3 Adreslenebilir hoparlör sistemi blok diyagramı

3.1.1 Önerilen sistem tasarımı için sayısal ses sinyali aktarımı

Şekil 3.1’ de gösterilen optiksel veri iletişimi esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımında sistem üniteleri arasındaki ses sinyali iletimi sayısal olarak gerçekleşmektedir. Genel alan seslendirme sistemleri için önerilen tasarımda sayısal ses sinyali iletimi en az 6 kanal olmalıdır. Yüksek ses kalitesinin elde edilmesi için sayısal ses sinyali iletimi kayıpsız olarak gerçekleşmelidir. Bu nedenle ses sinyalinin sayısal olarak kodlanmasında kayıpsız kodlama(*Lossless Encoding*) tercih edilmelidir. Sayısal ses sinyali iletimi değerlendirilirken ses sinyalinin tümleşik devreler arasındaki iletimi ve sistem üniteleri arasındaki iletimi ayrı ayrı ele alınmıştır.

Tümleşik devreler arasında çok kanal sayısal ses sinyalinin aktarılması sistem tasarımında kullanılan tümleşik devrelerin birbirleri arasında sayısal ses sinyali alışverişinin gerçekleşebilmesi için gereklidir. Bu konuda geliştirilen teknikler araştırıldığında I²S(Inter-IC Sound), Left-Justified, Right-Justified ve TDM(Time Division MultiPlexing) tekniklerinin ilgili tümleşik devreler tarafından desteklendiği tespit edilmiştir. Ancak I²S, Left-Justified ve Right-Justified teknikleri sadece iki kanal(stereo) sayısal ses sinyali iletimi için geliştirilmiş tekniklerdir. Bu nedenle tümleşik devreler arasında çok kanal sayısal ses sinyali iletimi için TDM tekniği kullanılmaktadır. Şekil 3.4 TDM ile sayısal ses sinyali aktarımının sinyal diyagramını göstermektedir.

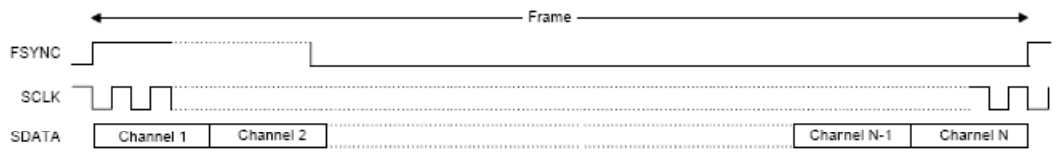


Figure 2. Generic TDM Interface

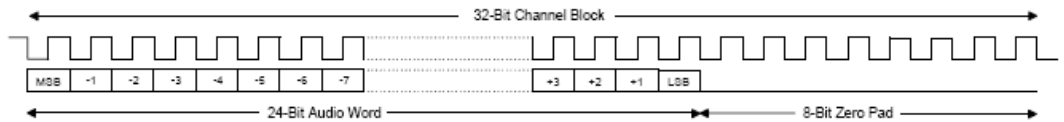


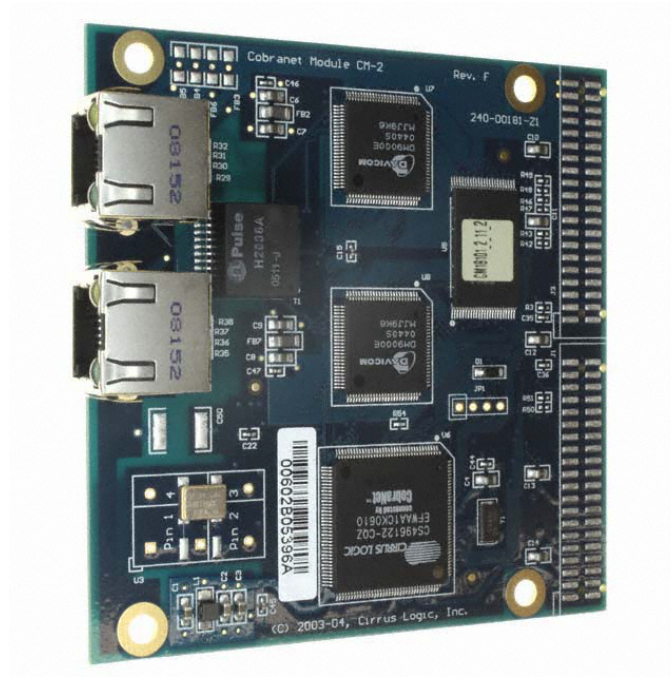
Figure 3. 32-Bit Channel Block

Şekil 3.4 TDM sinyal diyagramı

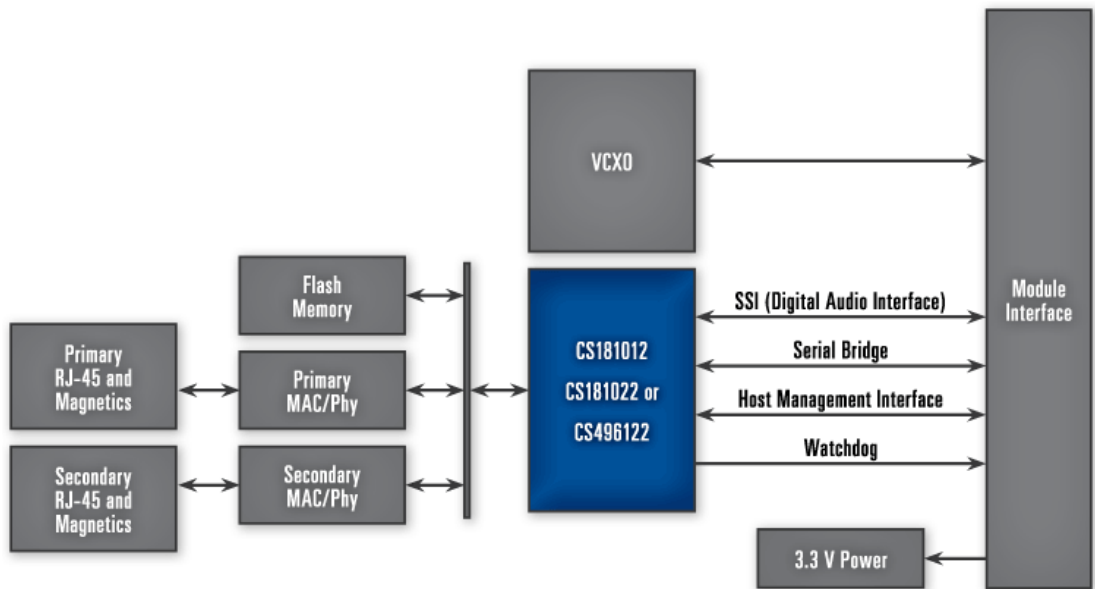
Sistem üniteleri arasında çok kanal sayısal ses sinyalinin aktarılması amacıyla geliştirilmiş olan protokoller araştırıldığında MADI(*Multichannel Audio Digital Interface*), CobraNET, REAC(*Roland Ethernet Audio Communication*) ve *EtherSound* gibi haberleşme protokolleri ile karşılaşılmıştır.

MADI ses mühendisliği alanındaki standartları geliştiren bir organizasyon olan AES(Audio Engineering Society) tarafından yayınlanmış olan çok kanal sayısal sinyali aktarım standardıdır. İlk olarak 1991 yılında yayınlanan AES10-1991 standardı 2003 yılında yenilenerek AES-2003 standardı olarak son şeklini almıştır. MADI protokolü ile çok kanal sayısal ses sinyali seri olarak koaksiyel kablo veya fiber optik kablo üzerinden aktarılır. MADI ile her bir kanal 24 bit çözünürlüğünde ve 96kHz örnekleme oranında olmak üzere toplam 28, 56 veya 64 kanal sayısal ses sinyali aktarımı gerçekleştirilebilir. MADI protokolünün AES gibi bir organizasyon tarafından geliştirilmiş olması ve herhangi bir firmaya ait olmaması önerilen sistem tasarımında kullanılabilirliği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

CobraNET protokolü temelde Ethernet üzerinden çok kanal ses sinyalinin sıkıştırılmamış(*Uncompressed*) ve kayıpsız(*Lossless*) olarak aktarılması amacıyla geliştirilmiş bir network protokolüdür. CobraNET protokolü 1996 yılında Peak Audio tarafından geliştirilmiş ve 2001 yılında Cirrus Logic firması tarafından tüm hakları satın alınmıştır. CobraNET protokolü Ethernet tabanlı bir protokol olduğu için tüm fiziksel altyapı ihtiyaçları Ethernet yapısı içerisinde çözümlenmektedir. Tek bir Ethernet kablosu üzerinden çok kanal ses sinyali aktarımı sayesinde kablolama ve altyapı maliyetleri CobraNET sistemi ile düşürülmektedir. CobraNET protokolü ile maksimum 64 kanal sayısal ses sinyali 24 bit çözünürlüğünde ve 96kHz örnekleme oranında aktarılabilir. CobraNET protokolü önerilen sistem tasarımında uygulanabilmesi için Cirrus Logic firması tarafından geliştirilmiş olan SoC(*System On Chip*) çipleri olan CS1810 veya CS4961 serisi çipler kullanılarak CobraNET modülünün tasarlanması gerekmektedir. Bunun yanı sıra Cirrus Logic firması tarafından tasarlanmış olan CM-1 ve CM-2 modülleri de kullanılabilir. Şekil 3.5 CM-2 modülünü, Şekil 3.6 ise CM-2 modülünün sistem blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.5 CM-2 CobraNET modülü



Şekil 3.6 CM-2 CobraNET modülü sistem blok diyagramı

REAC Roland firması tarafından geliştirilmiş ve CobraNET sistemine benzer bir şekilde Ethernet ağı üzerinden sayısal ses sinyali aktarımı prensibine göre çalışan bir sistemdir. REAC ile 24 bit çözünürlüğünde 96 kHz örnekleme oranında toplamda maksimum 40 kanal ses sinyali tek bir CAT kablo üzerinden aktarılabilir. REAC protokolü Roland firmasına ait özel bir haberleşme protokolü olduğu için önerilen sistem tasarımında kullanılması mümkün değildir.

Ethersound protokolü CobraNET ile benzer bir şekilde fiziki Ethernet ağı üzerinden ses sinyalinin kayıpsız olarak aktarılması amacıyla geliştirilmiş bir protokoldür. Ethersound Digigram firması tarafından geliştirilmiş olup 24 bit çözünürlüğünde 48 kHz örnekleme oranında maksimum 64 kanal sayısal ses sinyalini Ethernet ağı üzerinden aktarabilmektedir. Ethersound sistemi sadece fiziksel altyapı olarak Ethernet altyapısını kullanmaktadır. Ethernet standartlarında bulunan karşılıklı haberleşme(*two way communication*) gibi özellikleri desteklemez. Ethersound protokolünde veri aktarımı tek yönlü(*one way communication*) olarak gerçekleşir. Ethersound protokolünün en önemli özelliği Ethernet üzerinden ses sinyali aktarımında meydana gelen network gecikmesinin(*latency*) oldukça düşük olmasıdır. CobraNET protokolü için minimum gecikme değeri 1,3 milisaniye seviyelerindeyken Ethersound için network gecikmesi 125 mikro saniye seviyelerindedir.

Tavsiye edilen sistem tasarımında AES tarafından standartları belirlenmiş olan MADI ve tüm dünya tarafından kabul görmüş olan CobraNET protokollerinin uygulanabilirliği gözlemlenmiştir. MADI protokolünün ses mühendisliği alanında tüm dünyada standartları belirleyen AES(Audio Engineering Society) organizasyonu tarafından yayınlanmış olması bu protokolün tercih edilmesinde etkin bir rol oynamaktadır. CobraNET protokolü ise tüm dünya tarafından kabul görmüş olan bir protokol olmakla birlikte Cirrus-Logic firmasının üretmiş olduğu CM-2 modülleri ile birlikte sistem entegrasyonunun pratikliği açısından önemlidir. Önerilen sistem tasarımında hangi protokolün tercih edileceği sistem maliyeti ve sistem entegrasyonu açılarından değerlendirilerek karar verilmelidir. Bu aşamada her iki protokolünde önerilen sistem tasarımı için uygulanabileceği gözlemlenmiştir.

3.1.2 Önerilen sistem tasarımı için fiber optik iletişim esasları

Ses sinyali aktarımında fiber optik iletişimin kullanılması sistem kalitesi ve güvenilirliği açısından kritik rol oynamaktadır. Özellikle genel alan seslendirme sistemleri için sayısal ses sinyali aktarımında aktarım mesafesinin ve veri aktarım hızının yüksek oluşu aktarım ortamının önemini artırmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında önerilen genel alan seslendirme sistemi tasarımı için çok kanallı sayısal ses sinyalinin aktarımında fiber optik iletişim tercih edilmiştir.

Sistemde kullanılacak olan fiber optik kablonun özelliklerinin belirlenebilmesi için kullanılacak olan sayısal ses sinyali aktarım protokolünün belirlenmesi ve bu protokol standartlarında belirtilmiş olan aktarım ortamı kıstaslarının tespit edilmesi gerekmektedir. MADI protokolü için AES-10 2003 standardı incelendiğinde fiber optik kablonun özellikleri ilgili standartta belirtilmiştir. AES-10 2003 standardına göre kullanılacak olan fiber optik kablo ISO/IEC 9314-3' de belirtilen özelliklerde olmalıdır. Bu özellikler;

Merkez Çapı:	62,5 nm graded-index
Kabuk Çapı:	125 nm
Sayısal Açıklık(<i>Numerical Aperture</i>):	0,275
Dalgaboyu:	1300nm

olarak belirtilmiştir. Bu özelliklere sahip bir fiber optik kablo ile MADI protokolünden 2 km' ye kadar sayısal ses sinyalinin aktarımı sorunsuz olarak gerçekleştirilebilmektedir.

CobraNET protokolü sayısal ses sinyali aktarımını Ethernet üzerinden gerçekleştiren bir network protokolü olduğu için fiber optik iletişimin Ethernet ağı üzerindeki tüm kıstasları CobraNET içinde geçerli olacaktır. Bu durumda *gigabit* Ethernet ve fiber optik Ethernet altyapıları CobraNET sistemi için kullanılarak daha yüksek bant genişliğinde sayısal ses sinyali aktarımı fiber optik Ethernet ağı üzerinden gerçekleştirilebilir.

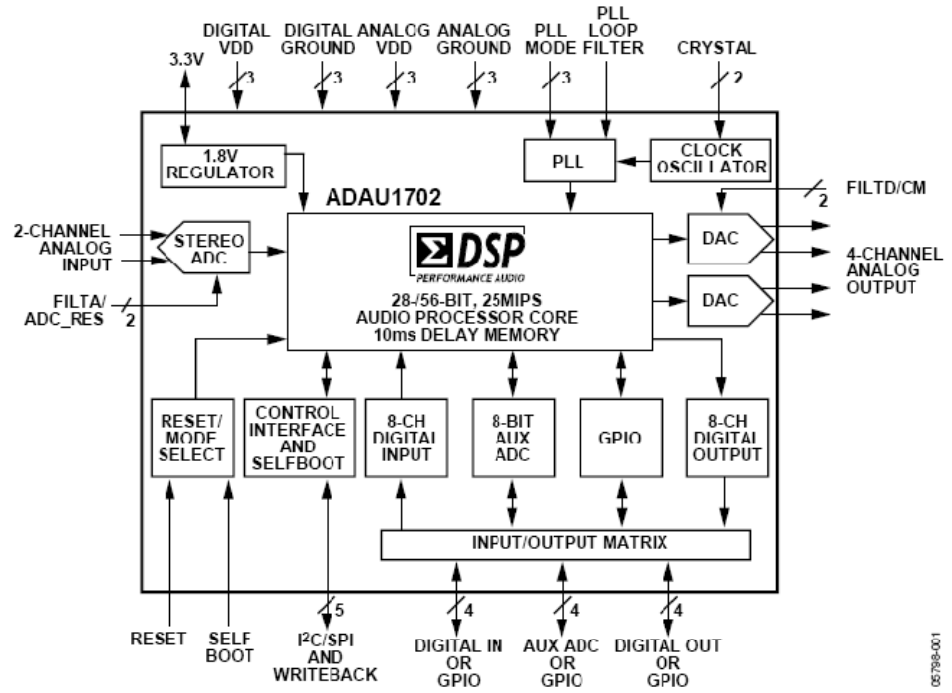
3.2 Uygulamalar

Önerilen optiksel veri iletişimi esaslı sistem tasarımının gerçekleştirilebilmesi ve uygulanabilirliğinin sınanması açısından prototip çalışmaları yapılarak ilgili test ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sistemin temelini oluşturan ses sinyali işleme uygulamaları için örnek bir programlama yapılarak sistemde kullanılması öngörülen DSP ünitesi test edilmiştir. Aynı şekilde sistemde adreslenebilir hoparlör yapısının temelini oluşturan Class-D amplifikatör ünitesi donanımsal olarak gerçekleştirilerek test edilmiş ve sistemde uygulanabilirliği gözlemlenmiştir.

3.2.1 Ses sinyali işleme ve tümleşik devre uygulamaları

Ses sinyali aktarımının gerçekleştirilmesi için öncelikli olarak aktarılacak olan ses sinyalinin işlenmesi ve aktarım şartları göz önüne alınarak kodlanması gerekmektedir. Ses sinyali aktarımı analog veya sayısal olarak gerçekleştirilebilir. Analog olarak ses sinyali aktarımı için herhangi bir analog-sayısal sinyal dönüşümü veya sinyal kodlaması gerekmez. Ancak ses sinyalinin sayısal olarak aktarılabilmesi için öncelikli olarak analog ses sinyalinin sayısal ses sinyaline dönüştürülmesi ve aktarım şartları göz önüne alınarak sayısal ses sinyalinin kodlanması (*Encoding*) gerekmektedir. Ses sinyali işleme amaçlı tümleşik devreler *Texas Instruments* ve *Analog Device* gibi yarıiletken malzeme üretimi yapan firmalar tarafından geliştirilmektedir. Bunlardan; SigmaDSP ADAU1702 (*Analog Device*) tümleşik devresi değerlendirilerek uygulama gerçekleştirilecektir.

SigmaDSP ADAU1702 Analog Device firması tarafından üretilmekte olan ses sinyali işleme (*Audio DSP*) tümleşik devresidir. ADAU1702 içerisinde bir adet stereo analog dijital çevirici (*Sigma Delta ADC*) ve 2 adet stereo dijital analog çevirici (*Sigma Delta DAC*) bulunmaktadır. ADC ve DAC modüllerinin performanslarını gösteren teknik veriler Ek 2' de yer almaktadır. ADAU1702 stereo analog ses sinyalini ADC ünitesi ile sayısal ses sinyaline dönüştürerek *sigmaDSP* sinyal işleme modülüne aktarır. Programlanabilir *sigmaDSP* modülü ses sinyali işleme uygulamalarının gerçekleştirildiği bölümdür. Sayısal olarak işlenmiş olan ses sinyali DAC veya I²S ünitelerine aktarılarak analog veya sayısal olarak çıkışa iletilmektedir. Şekil 3.7, ADAU1702 tümleşik devresi için fonksiyonel blok diyagramı göstermektedir.



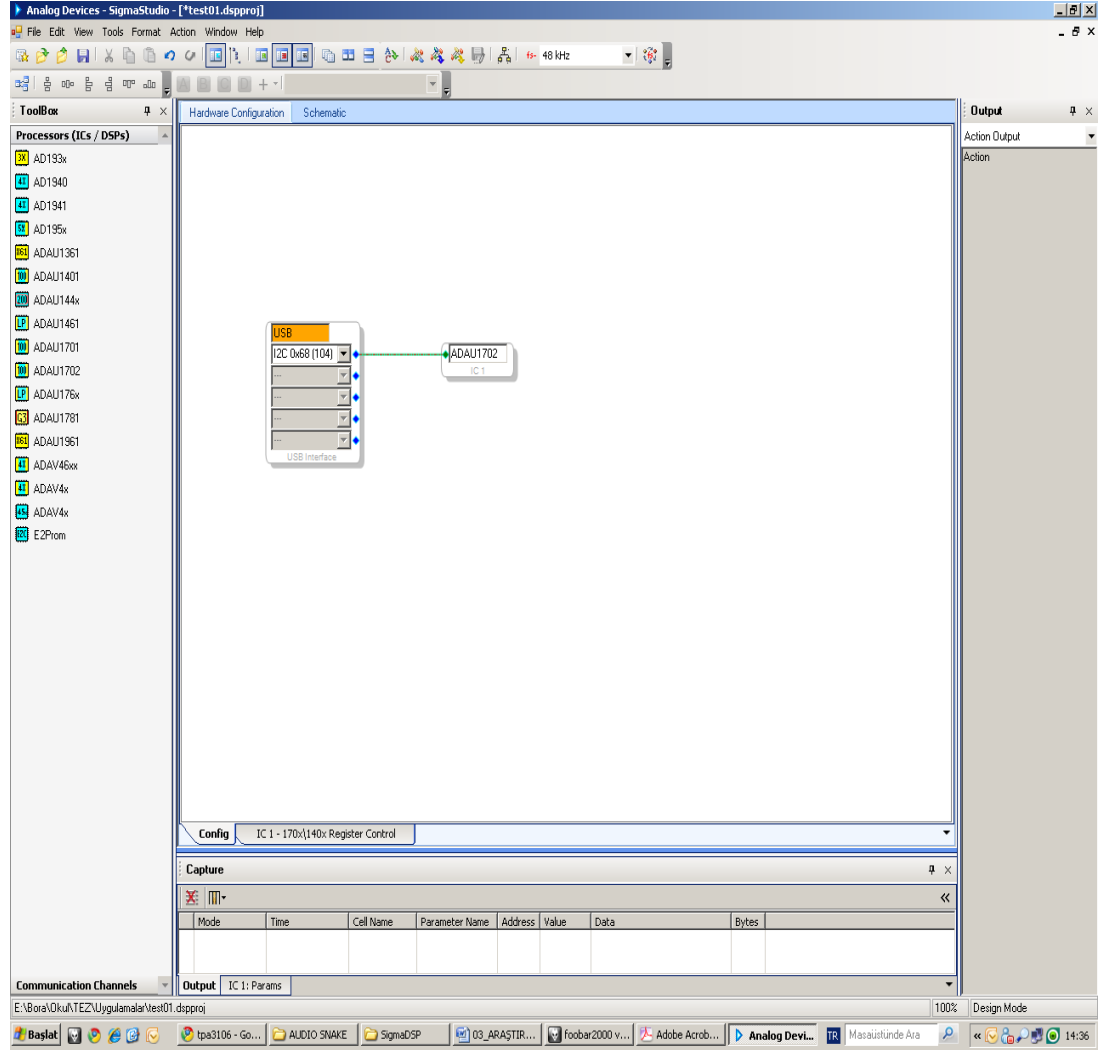
Şekil 3.7 ADAU1702 fonksiyonel blok diyagramı

Sistemin çekirdeği olan programlanabilir sigmaDSP kullanıcı ara yüzü(GUI) tabanlı olarak programlanarak ses sinyali işleme uygulamalarını gerçekleştirmektedir. Tez çalışmasında ADAU1702 tümleşik devresi için *Sigma Studio* programı kullanılarak örnek bir uygulama tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada iki kanal analog ses sinyali ADC üniteleri ile sayısal sinyale dönüştürülmüş ve sigmaDSP işlemcisi üzerinden 5 kanal *equalizer* ayarı yapıldıktan sonra sayısal ses sinyali DAC ünitelerine aktarılmıştır. Dört farklı kanaldan sayısal olarak işlenmiş ses sinyali analog olarak elde edilmiştir. Ayrıca uygulamada harici ses seviye kontrolü için bir ADC ünitesi(Aux_ADC_3) yerleştirilmiştir.

Sigma Studio programı ile gerçekleştirilmiş olan yazılımın ADAU1702 işlemcisine aktarılabilmesi için bilgisayar ile USB portu üzerinden haberleşen EVAL-ADUSB2Z arabirimi kullanılmıştır. Bu arabirim ile USB portu üzerinden gönderilen veriler I2C protokolüne dönüştürülerek ADAU1702 işlemcisine aktarılır.

ADAU1702 işlemcisinin programlanabilmesi için izlenen adımlar bir sonraki sayfada yer almaktadır.

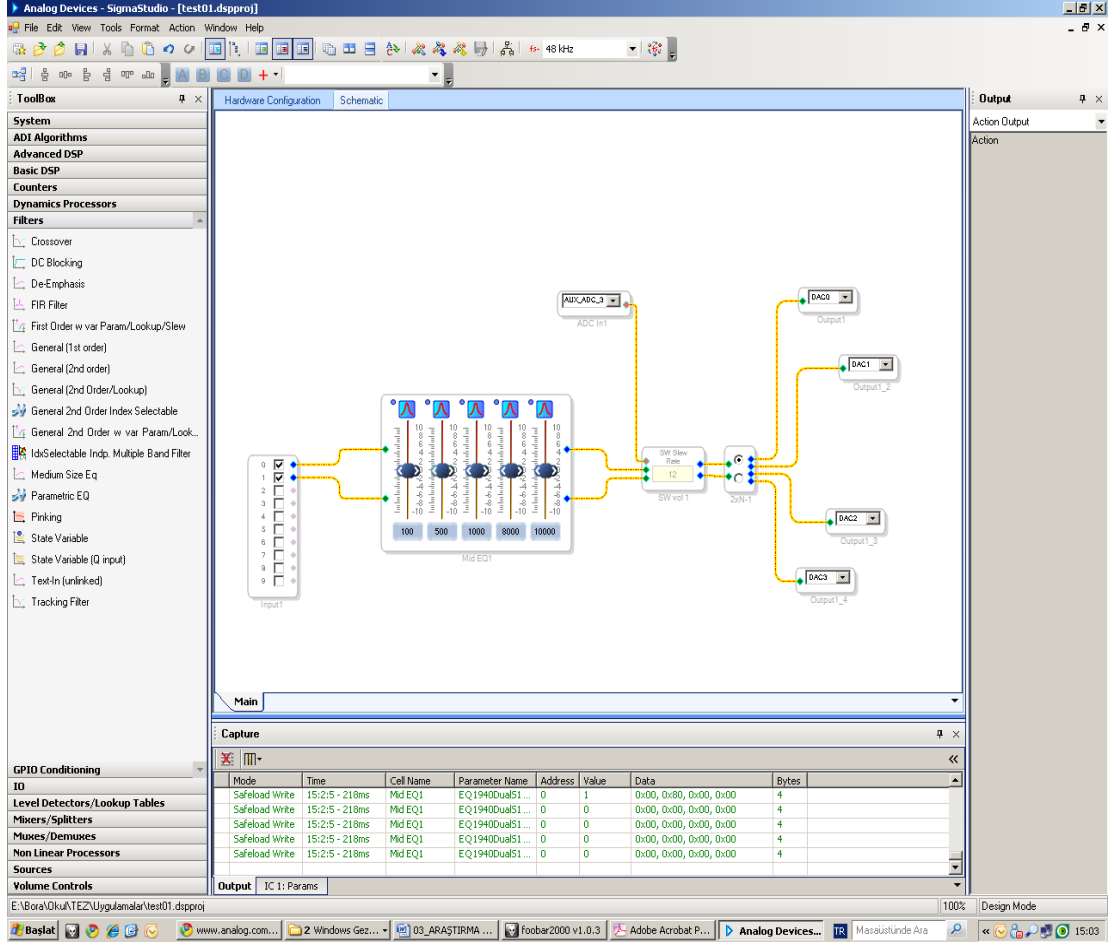
1. Öncelikli olarak ADAU1702 tümleşik devresi ile sistem tasarımının gerçekleştirildiği *Sigma Studio* yazılımı arasındaki haberleşme protokolü belirtilmiştir. Bu uygulamada bilgisayar ile ADAU1702 arasında USB üzerinden I2C protokolü kullanılarak haberleşme gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8 ADAU1702 için haberleşme ayarlarının nasıl yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.8 ADAU1702 için haberleşme ayarlarının yapılandırılması

- 2.
3. ADAU1702 içerisinde bulunan sigmaDSP ses sinyali işleme modülü bir çok DSP fonksiyonunu gerçekleştirebilmektedir. Bu fonksiyonlar *Sigma Studio* yazılımı ile birlikte görsel olarak programlanabilmektedir. Her bir fonksiyon görsel bloklar olarak birbirleri ile ilişkilendirilerek programlama gerçekleştirilir.

Şekil 3.9 ADAU1702 tümleşik devresi için gerçekleştirilmiş olan program tasarımını göstermektedir.



Şekil 3.9 ADAU1702 tümleşik devresi için gerçekleştirilmiş olan program tasarımı

Bu tasarımda iki kanal ADC(*Input1*) bloğu üzerinden elde edilen sayısal ses sinyali 5 band *equalizer*(*MidEQ1*) bloğuna aktarılmaktadır. *Equalizer* modülü ile ses sinyali sayısal olarak işlenerek ses seviye ayarının gerçekleştirildiği bloğa(*SW vol1*) iletilir. Bu uygulamada toplam dört farklı DAC ünitesi üzerinden ses sinyali analog olarak elde edilmiştir.

4. Görsel olarak programlanmış olan sigmaDSP işlemcisinin bloklar arası ilişki ve yazmaç(*Register*) değerleri *Register Control* bölümünden gözlemlenebilmektedir.

Şekil 3.10 gerçekleştirilmiş olan ses sinyali işleme uygulaması için ortaya çıkan yazmaç(Register) değerlerini göstermektedir.

Register	Address	Value
Core	2076	b 0000000011100
CpioAll	2056	b 00000000000000000000
EAIn	2077	b 1000
SerialOut1	2078	b 0000000000000000
SerialInput	2079	b 000000
mip-clg0	2080	b 0000000000000000000000000000
mip-clg1	2081	b 0000000000000000111100000000
AnalogHowd2082	b 000000000000	
AnalogInterf2084	b 100000000000000000	
AnalogInterf2085	b 0000000000000000	
Reg0	x 00000000	
Reg1	x 00000000	
Reg2	x 00000000	
Reg3	x 00000000	
Reg4	x 00000000	
Reg5	x 00000000	
Reg6	x 00000000	
Reg7	x 00000000	

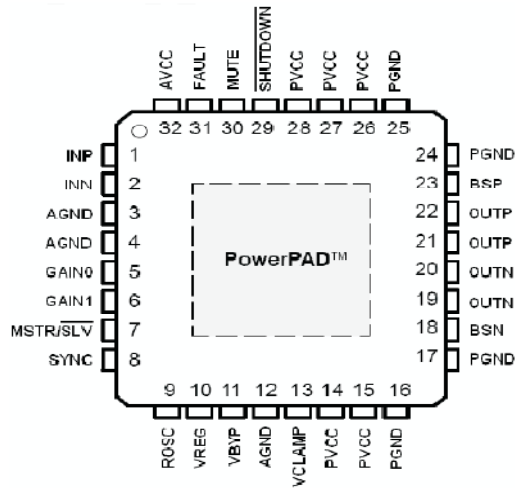
Şekil 3.10 ADAU1702 tümleşik devresi için yazmaç(register) değerleri

Gerçekleştirilen bu uygulama ile önerilen sistem tasarımı için ADAU1702 veya benzeri bir tümleşik devrenin hem analog dijital çevirici olarak hem de ses sinyali işleme modülü olarak kullanılabilceği gösterilmiştir. Bu sayede ses sinyalinin analog-sayısal, sayısal-analog dönüşümü ve dijital sinyal işleme uygulamaları tek bir tümleşik devre üzerinden gerçekleştirilerek sistem tasarımı kolaylaştırılmış ve sistem maliyeti azaltılmıştır.

3.2.2 Sayısal ses amplifikatör (*Class-D Amplifier*) uygulamaları

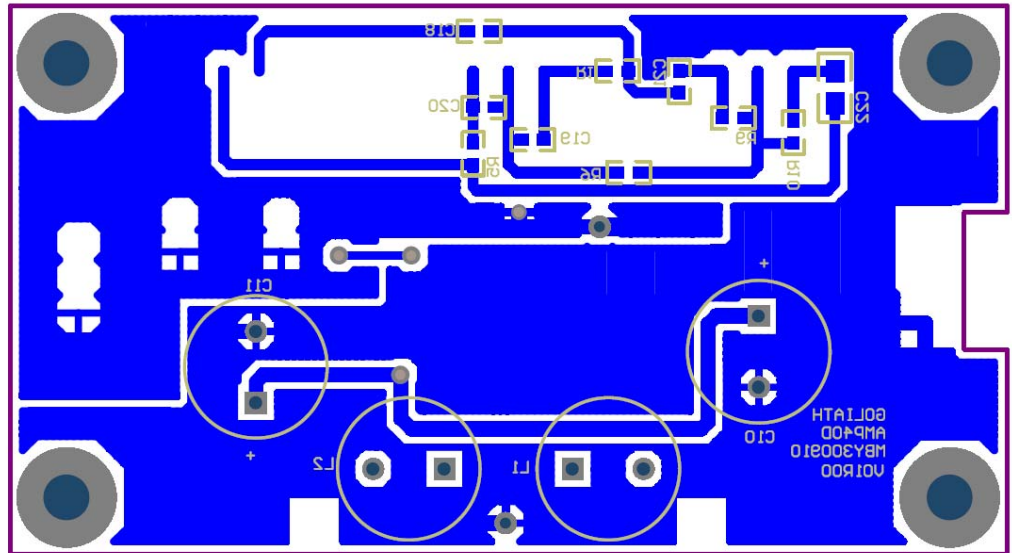
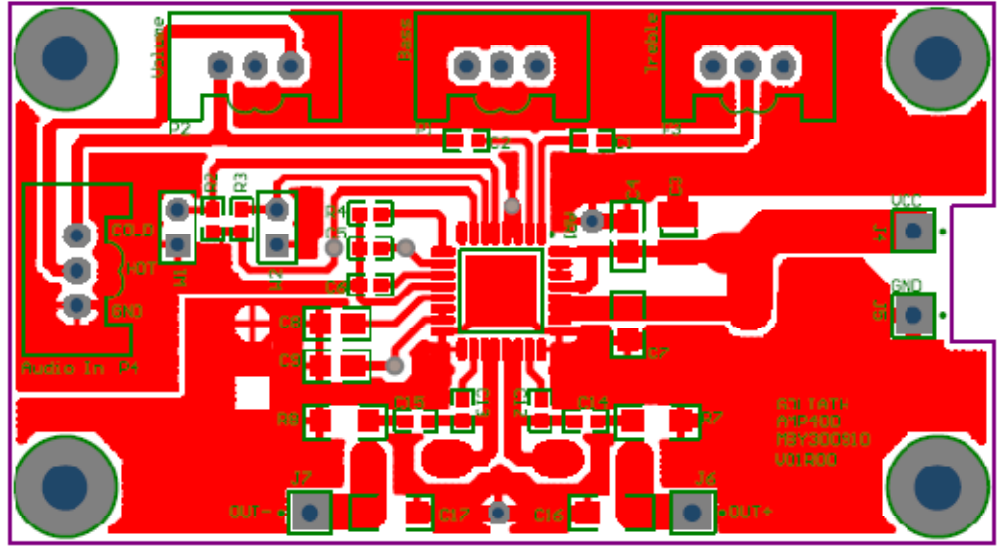
Genel alan seslendirme sistemleri için önerilen optiksel veri iletişimi esaslı sistem tasarımının gerçekleştirilebilmesi için her bir hoparlör ünitesinin kendine ait amplifikatöre sahip olması gerekmektedir. Bu amplifikatör üniteleri sistemin fiziksel olarak uygulanabilirliği açısından mümkün olduğunca küçük ve yüksek enerji verimliliğine sahip olmalıdırlar. Bu amaçla Class-D amplifikatörler olarak bilinen sayısal ses amplifikatörleri kullanılmalıdır.

Tez çalışmasında önerilen sistem tasarımına uygun olarak Class-D tipi bir sayısal ses amplifikatörü tasarlanmıştır. Tasarım; araştırma, şematik tasarımı ve PCB tasarımı olmak üzere üç aşamada tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen araştırmada *Texas Instruments* firmasının üretmiş olduğu *TPA3106D1* entegresinin gerek fiziksel boyutlarının küçük olması gerekse güç verimliliğinin yüksek olması açısından kullanılmasına karar verilmiştir. TPA3106D1 40Watt gücünde ve %92 güç verimliliğine sahip Class-D tipi ses amplifikatör entegresidir. Güç verimliliğinin yüksek olması sayesinde entegre daha az ısınarak daha yüksek güç sağlamaktadır. Entegrenin alt yüzeyinde bulunan *PowerPAD* sayesinde herhangi bir harici soğutma sistemine ihtiyaç duyulmamıştır. TPA3106D1 ile ilgili diğer teknik bilgiler Ek 2.'de yer almaktadır. Şekil 3.11 TPA3106D1 entegresini ve bağlantı bacaklarının diyagramını göstermektedir.



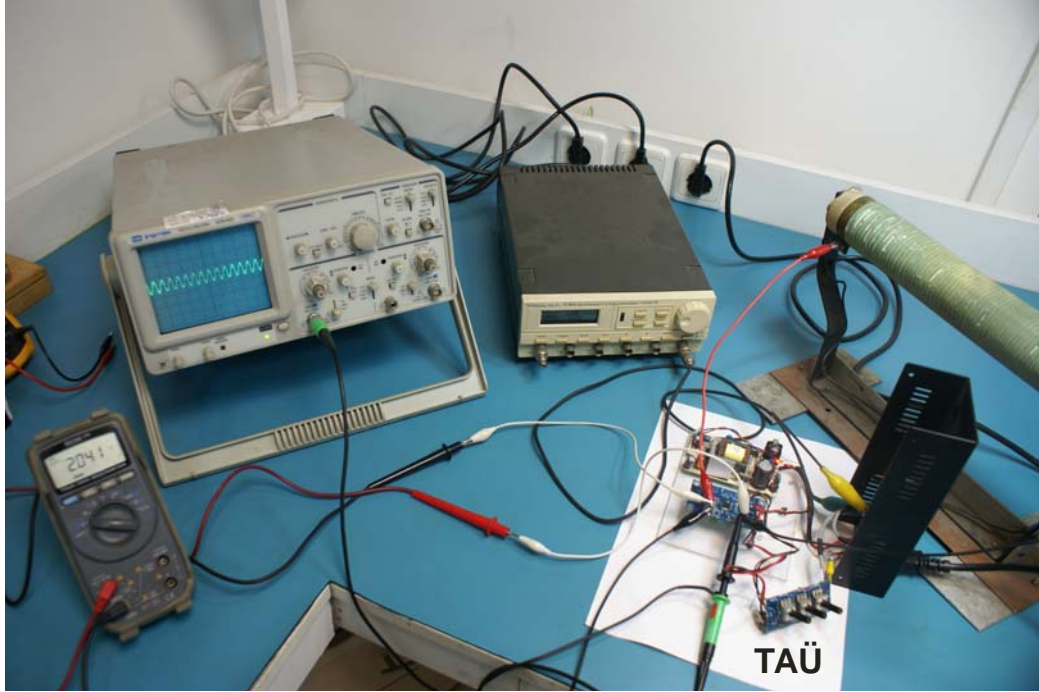
Şekil 3.11 TPA3106D1 Class-D ses amplifikatör entegre devresi

TPA3106D1 entegresi için yayınlanmış olan uygulama notlarına uygun olarak Altium-Designer programı kullanılarak Class-D amplifikatör ünitesinin şematik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen şematik tasarımını Ek 3.'de yer almaktadır. Şematik tasarımını takiben Class-D amplifikatör ünitesinin PCB çizimi de tamamlanarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12 gerçekleştirilen PCB çiziminin üst ve alt katmanlarını göstermektedir.



Şekil 3.12 Class-D amplifikatör PCB tasarımı

Prototip tasarımı tamamlanmış olan Class-D amplifikatör ünitesi 8 Ω değerinde bir yük ile test edilmiştir. Şekil 3.13 prototip tasarımının son halini ve test düzeneğini göstermektedir.

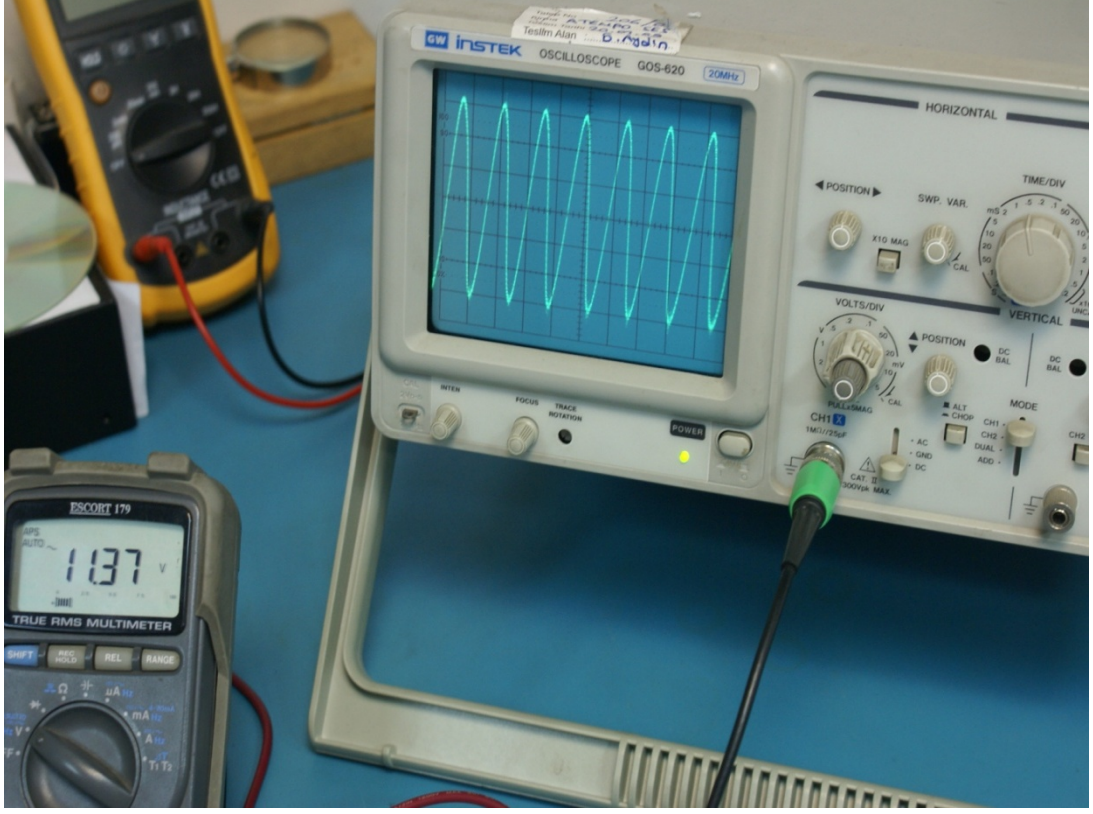


Şekil 3.13 Class-D amplifikatör test düzeneği;

TAÜ: Tasarlanmış Amplifikatör Ünitesi

Deneyde, tasarımı gerçekleştirilmiş olan Class-D amplifikatör ünitesinin güç kapasitesi ölçü aleti ile ölçülmüştür. Frekans üretici ile 0.775 V yüksekliğinin 1kHz frekans değerindeki sinüs sinyali amplifikatör girişine verilmiş ve çıkışta elde edilen güç osiloskop ve ölçü aleti ile ölçümlenmiştir. Şekil 3.14 deneyde gözlemlenen ölçüm değerlerini göstermektedir. Osiloskop ve ölçü aleti üzerinden sinüs sinyalinin bozulmadığı maksimum değer 11,37 Volt olarak elde edilmiştir. Bu durumda tasarlanmış olan amplifikatör ünitesi için maksimum güç değeri 4 Ω yük değeri için Eşitlik 3.1' de verilmiştir.

$$P = V^2/R = (11,37)^2 / 4 = 32 \text{ Watt} \quad (3.1)$$



Şekil 3.14 Class-D amplifikatör ölçümleri ;

Osiloskop: Sinyal bozulma eşik değerinin(*Clipping*) gözlemlenmesi

Multimetre: Sinyal bozulma eşığının altındaki maksimum voltaj = 11.37 Volt

Genel alan seslendirme sistemlerinde her bir hoparlörün bağımsız olarak sürülebilmesi için kullanılması önerilen bu amplifikatör tasarımı ile maksimum 32 Watt'lık güç elde edilebilmektedir. Genel alan seslendirme sistemlerinde kullanılan hoparlörler için beklenen güç değeri genel olarak 6Watt ile 30Watt arasında değişmektedir. Bu durumda tasarlanmış olan Class-D amplifikatör ile elde edilen güç değeri her bir hoparlörün bağımsız olarak sürülebilmesi için yeterlidir.

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Ses sistemleri için en temel unsur olan ses sinyali aktarım tekniklerinin değerlendirilmesi ve geliştirilmesi sistem kalitesi açısından önemli rol oynamaktadır. Optiksel iletişimin gelişmesi ve yaygınlaşması sonucu ses sinyali aktarımı optiksel olarak gerçekleştirilebilmektedir. Optiksel veri iletişiminin beraberinde getirdiği avantajlar göz önüne alınarak geliştirilecek yeni sistem tasarımları ile birlikte sistem kalitesinin artırılması hedeflenmektedir.

Tez çalışmasında; genel alan seslendirme sistemleri için ses sinyali aktarım teknikleri değerlendirilerek optiksel iletişim esaslı genel alan seslendirme sistem tasarımı önerilmiştir. Ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ile birlikte günümüzde yaygın olarak kullanılan analog 70/100V genel alan seslendirme sistemlerinin ses kalitesi, enerji verimliliği ve sistem esnekliği açılarından yetersizlikler gösterdiği gerçekleştirilen ölçümler sonucunda gözlemlenmiştir.

Mevcut sistem ile önerilen sistemin karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi için her iki sistem için kullanılan amplifikatör üniteleri üzerinde ölçümler yapılmıştır. Ölçümlendirmeler için kullanılan 70/100V sistem amplifikatörü TOA VM-2240, önerilen sistem için kullanılan amplifikatör ise tez çalışması esnasında tasarlanmış olan amplifikatör ünitesidir. Aşağıda belirtilen parametreler için ölçümler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Ses kalitesi: Mevcut sistem ve önerilen sistemin ses kalitesi açısından ölçümlendirilmesi amacıyla *KlarkTeknik DN6000 Audio Analyser* kullanılarak her iki sistem için gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mevcut sistem için elde edilen sonuçlar Şekil 4.1, önerilen sistem için elde edilen sonuçlar Şekil 4.2' de gösterilmektedir. Önerilen sistem amplifikatörü için sinyal gürültüsünün mevcut sistem amplifikatörüne oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda önerilen sistem için ses kalitesinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır.

Enerji verimliliği: Her iki sistemin enerji verimliliği açısından karşılaştırılması amacıyla sistemler eş zamanlı olarak çalıştırılarak enerji transferleri gözlemlenmiştir. Mevcut sistem ile önerilen sistem oda sıcaklığında aynı güçlerde çalışırken mevcut sistem üzerinde ölçümlenen sıcaklık 45C° iken önerilen sistem 30C° değerindedir. Mevcut sistem için harcanan enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi önerilen sisteme oranla daha yüksektir. Bu da önerilen sistemin enerji verimliliği açısından daha üstün olduğunu göstermektedir.

Sistem esnekliği: Önerilen sistemde her bir hoparlörün ayrı amplifikatör ünitesine sahip olması sayesinde adreslenebilir hoparlör sistemi sağlanmıştır. Mevcut sistem için tüm hoparlörler tek bir amplifikatör üzerinden beslenmektedir. Bu durumda sistem esnekliği açısından önerilen sistem üstünlük taşımaktadır.

Önerilen optiksel iletişim esaslı genel alan seslendirme sistemi ile birlikte bu üç parametre için sistem performansı artırılmıştır.

Analog 70/100V trafolu sistemlerde kullanılan dönüştürücü trafolar ses kalitesini ve enerji verimliliğini önemli ölçüde etkileyen olumsuz faktörlerdir. Önerilen sistem tasarımında dönüştürücü trafo kullanılmamakta ve her bir hoparlör ünitesi için bağımsız bir amplifikatör ünitesi kullanılmaktadır. Bu sayede aktarım mesafesi boyunca ortaya çıkacak olan enerji kaybı önlenmiş ve kalitesiz trafo kullanımının yol açtığı ses kalitesindeki bozulmalar ortadan kaldırılmıştır. Önerilen sistem tasarımında ses sinyalinin optiksel yolla ve sayısal olarak aktarımı sayesinde ses sinyalinin çevre gürültülerinden etkilenmeden en sağlıklı biçimde aktarılabilmesi hedeflenmektedir. Sayısal ses sinyali aktarımının ve bağımsız amplifikatör sisteminin sağladığı bir diğer avantaj ise sistem esnekliğinin artırılmasıdır. Analog 70/100V sistemlerde hoparlörler bölgesel olarak kontrol edilebilirken önerilen sistem tasarımında her bir hoparlör bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Ses sinyali aktarım tekniklerinin optiksel iletişim için karşılaştırmalı olarak Değerlendirilmesi

Sistem Adı	Üstünlükler	Yetersizlikler
70/100 Volt Genel Alan Seslendirme Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> - Kolay sistem tasarımı - Düşük maliyet 	<ul style="list-style-type: none"> - Düşük ses kalitesi - Yüksek güç kaybı - Zayıf sistem kontrolü
Klotz Digital Varizone	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Yüksek güç verimliliği - Esnek sistem kontrolü 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek maliyet - Karmaşık sistem tasarımı - Düşük aktarım mesafesi
Bosch Praesideo	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Optiksel iletişim ile yüksek kalitede veri aktarımı - Yüksek aktarım mesafesi 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek maliyet - Yüksek güç kaybı
CobraNET	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Esnek sistem kontrolü - Yüksek aktarım mesafesi - Yüksek kanal sayısı 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek Maliyet - Karmaşık sistem tasarımı
Önerilen Sistem	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek ses kalitesi - Yüksek güç verimliliği - Esnek sistem kontrolü - Çevre gürültülerden etkilenmeme - Yüksek aktarım mesafesi - Yüksek kanal sayısı - Optiksel iletişim için optimize edilmiş sistem tasarımı ile yüksek kalitede veri aktarımı 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek maliyet - Karmaşık sistem tasarımı

Tez çalışmasında; önerilen sistem tasarımının gerçekleştirilebilmesi için önemli rol oynayan tasarım gereklilikleri değerlendirilerek sistem tasarımının uygulanabilirliği gözlemlenmiştir. Bu gereklilikler;

- Tümlleşik devreler arasında çok kanallı sayısal ses sinyalinin aktarılması
- Sistem üniteleri arasında çok kanallı sayısal ses sinyalinin aktarılması
- Sistem tasarımı için fiber optik iletişim esaslarının belirlenmesi
- Ses sinyali işleme ve tümlleşik devre uygulamaları
- Sayısal ses ses amplifikatör(Class-D Amplifier) uygulamaları

olarak belirlenmiştir. Yukarıda belirtilen araştırma ve uygulamalar gerçekleştirilerek sistem tasarımının uygulanabilmesi için gerekli olan teorik ve pratik altyapı çalışması tamamlanmıştır.

Geleceğe Yönelik Öneriler

Çalışmaya paralel olarak geleceğe yönelik çalışmalar şu başlıklar altında toplanabilir:

Önerilen sistem tasarımının uygulamaya alınabilmesi için donanım gerekliliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Sistemde kullanılacak elektronik ve mekanik donanımlar üretim ve pazarlama stratejilerine göre farklılık gösterebilmektedir.

Sistemde donanım tasarımının yanı sıra haberleşme ve kontrol yazılımlarının gerçekleştirilmesi sistemin uygulamaya alınabilmesi için gerekli olan bir başka çalışma alanıdır. Sistemde bulunan cihazlar arasında bilgi alışverişinin gerçekleştirileceği haberleşme protokolüne ortam şartları dikkate alınarak karar verilmelidir. Kontrol yazılımları cihazların işlevsel özelliklerine bağlı olarak geliştirilmelidir.

Optiksel veri iletişiminin gelişmesi ile birlikte sistem tasarımında yer alan optiksel bileşenler her geçen gün daha düşük maliyetli olmaktadır. Önerilen sistemin getirmiş olduğu avantajlar da değerlendirilerek gerçekleştirilecek ürün tasarımları seslendirme sistemleri için daha yüksek kalitede ve daha uygun maliyette sistemlerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Anonymous. 2010. A Detailed Guide to Constant Voltage Audio Systems, Web Sitesi: <http://www.prosoundweb.com/>, Erişim Tarihi: 15.10.2010
- Anonymous. 2011. Cirrus Logic Inc, Web Sitesi: <http://www.cobranet.info/>, Erişim Tarihi: 20.01.2011
- Anonymous. 2010. Bosch Inc, Web Sitesi: <http://www.praesideo.co.uk>, Erişim Tarihi: 25.12.2010
- Audio Engineering Society. 2009. Synchronization of digital audio equipment in studio operations. Standart No. AES11-2009.
- Audio Engineering Society. 2001. Transmission of AES3 formatted data by unbalanced coaxial cable. Standart No. AES-3id-2001.
- Audio Engineering Society. 2003. Serial Multichannel Audio Digital Interface(MADI). Standart No. AES10-2003.
- Audio Engineering Society. 2005. High-resolution multi-channel audio interconnection(HRMAI). Standart No. AES50-2005.
- Ballou, G. 2002. Handbook for Sound Engineers. Focal Press,1778 s., Oxford.
- Crown Engineering. 2005. Guide to Constant Voltage Systems.
- Davis, D. and Patronis, E. 2006. Sound System Engineering, Focal Press, 489 s., Oxford.
- Davis, G. and Jones, R. 1990. Sound Reinforcement Handbook. Hal Leonard, 421 s., Milwaukee.
- DeCusatis, C. 2008. Handbook of Fiber Optic Data Communication. Elsevier, 784 s., London.
- Eiche, J. F. 1990. Guide to Sound Systems for Worship. Hal Leonard, 187 s., Buena Park.
- Emmett, J. 1995. Engineering Guidelines the EBU/AES Digital Audio Interface. European Broadcasting Union.
- Hans, M. And Schafer, R. W. 2001. IEEE Signal Processing Magazine, 21-32.
- International Electrotechnical Commission. 2006. Digital Audio Interface – Part 1 General. Standart No. IEC 60958-1.
- International Electrotechnical Commission. 2006. Digital Audio Interface – Part 2 Serial copy management system. Standart No. IEC 60958-2.

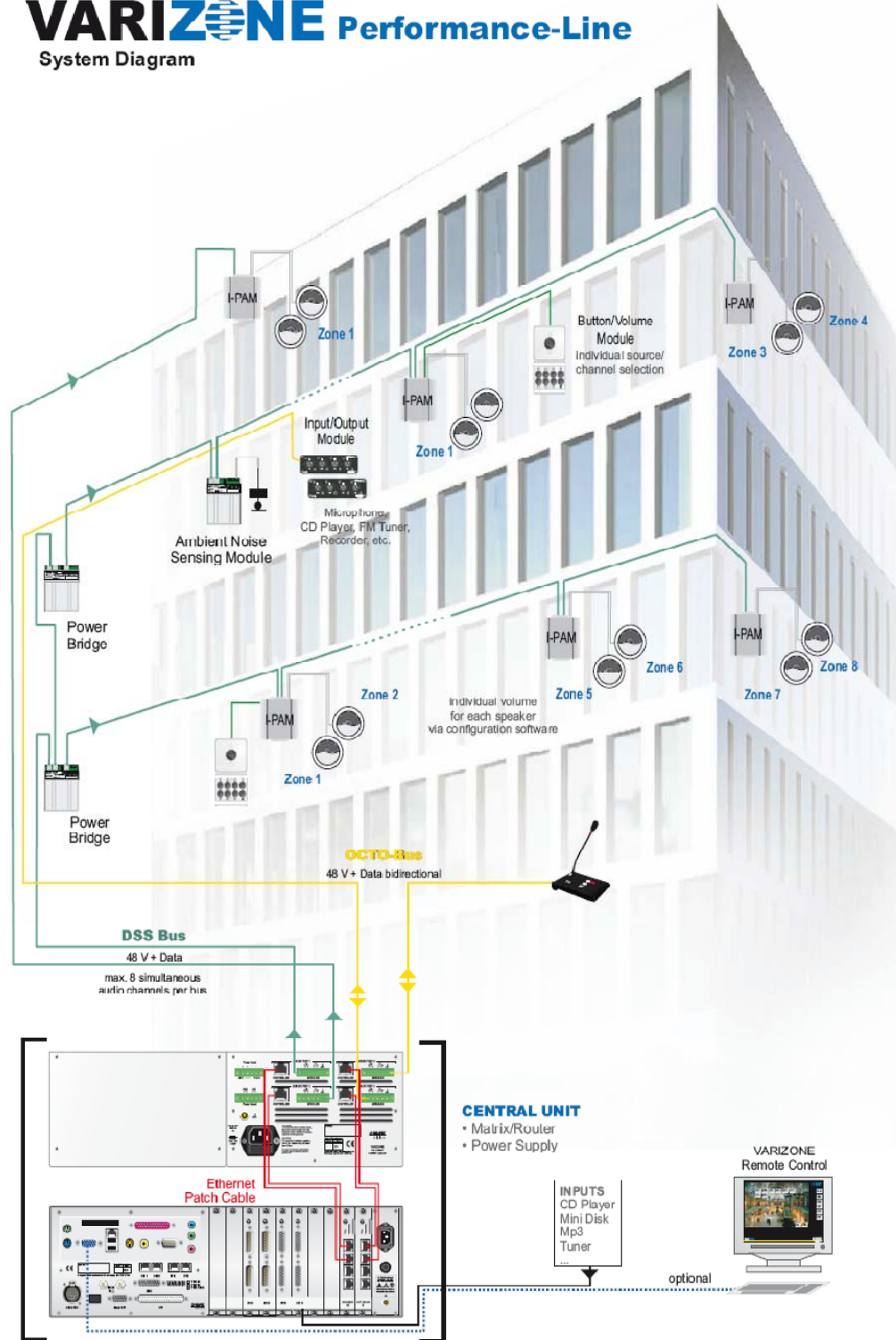
- International Electrotechnical Commission. 2006. Digital Audio Interface – Part 3 Consumer applications. Standart No. IEC 60958-3.
- International Electrotechnical Commission. 2006. Digital Audio Interface – Part 4 Professional applications. Standart No. IEC 60958-4.
- JBL Corporation. 1999. Sound System Design Reference Manual. JBL Professional, 104 s., Northridge
- Kirby, D. G. 1995. Twisted pair cables for AES/EBU Digital Audio Signals. Journal of the Audio Engineering Society, Volume 43, Number 3
- Laven, P. 2004. Specification of the Digital Audio Interface. European Broadcasting Union. Tech 3250
- Mathews, P. 2005. Unwinding Distribution Transformers. Rane Corporation. Note 159
- McCarthy, B. 2007. Sound System Design and Optimization: Modern Techniques and Tools for Sound System Design and Alignment. Focal Press, 539 s., Oxford
- Noll, P. 1997. MPEG Digital Audio Coding. IEEE Signal Processing Magazine, 59-81.
- Ogonowski, G. J. 1998. Audio Signal Processing for Digital Transmission Systems. Modulation Index, 4 s., USA
- Pfleiderer, J. 2005. Fibre Basics. Design, Mayıs 2005; 46-48.
- Purat, M., Liebchen, T. and Noll, P. 1997. Lossless Transform Coding of Audio Signals. Audio Engineering Society Convention, Preprint 4414.
- Rodman, J. 2006. The Effect of Bandwidth on Speech Intelligibility. Polycom, 1-9.
- Roland Corporation Catalog. 2006. Digital Snake: Multi Channel Digital Audio Transfer System. Roland Systems Group
- Sayood, K. 2003. Lossless Compression Handbook. Academic Press, 455 s., California.
- Stallings, W. 1997. Data and Computer Communications. Prentice Hall, 808 s., New Jersey.

EKLER

- EK 1 Varizone Sistem Yapısı
- EK 2 ADAU1702 Teknik Özellikleri
- EK 3 TPA3106D1 Teknik Özellikleri
- EK 4 Class-D Amplifikatör Şematik Tasarımı

EK 1 Varizone Sistem Yapısı

VARIZONE Performance-Line System Diagram



EK 2 ADAU1702 Teknik Özellikleri

ADAU1702

SPECIFICATIONS

AVDD – 3.3 V, DVDD – 1.8 V, PVDD – 3.3 V, IOVDD – 3.3 V, ambient temperature 25° C, master clock input 12.288 MHz, unless otherwise noted.

ANALOG PERFORMANCE

Table 1.

Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Test Conditions/Comments
ADC INPUTS					
Number of Channels		2			Stereo input
Resolution		24		Bits	
Full-Scale Input		100 (283)		μA_{rms} (μA_{pp})	2 V_{rms} Input with 20 k Ω (18 k Ω external + 2 k Ω internal) series resistor
Signal-to-Noise Ratio A-Weighted		100		dB	
Dynamic Range A-Weighted	95	100		dB	–60 dB with respect to full-scale analog input
Total Harmonic Distortion + Noise		–83		dB	–3 dB with respect to full-scale analog input
Interchannel Gain Mismatch		25	250	m dB	
Crosstalk		–82		dB	Analog channel-to-channel crosstalk
DC Bias		1.5		V	
Gain Error	–11		+11	%	
DAC OUTPUTS					
Number of Channels		4			Two stereo output channels
Resolution		24		Bits	
Full-Scale Analog Output		0.9 (2.5)		V_{rms} (V_{pp})	
Signal to Noise Ratio A-Weighted		104		dB	
Dynamic Range A-Weighted	99	104		dB	–60 dB with respect to full-scale analog output
Total Harmonic Distortion + Noise		90		dB	1 dB with respect to full scale analog output
Crosstalk		–100		dB	Analog channel-to-channel crosstalk
Interchannel Gain Mismatch		25	250	m dB	
Gain Error	–10		+10	%	
DC Bias		1.5		V	
VOLTAGE REFERENCE					
Absolute Voltage (CM, FILTA, FILTD)		1.5		V	
AUXILIARY ADC					
Full-Scale Analog Input		3.0		V	
INL		0.5		LSB	
DNL		1.0		LSB	
Offset		15		mV	
Input Impedance		30		k Ω	

EK 3 TPA3106D1 Teknik Özellikleri

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

			UNIT
V _{CC}	Supply voltage	AVCC, PVCC	-0.3 V to 30 V
V _I	Input voltage	SHUTDOWN, MUTE	-0.3 V to V _{CC} + 0.3 V
		GAIN0, GAIN1, INN, INP, MSTR/SLV, SYNC	-0.3 V to VREG + 0.5 V
Continuous total power dissipation			See Thermal Information Table
T _A	Operating free-air temperature range		-40°C to 85°C
T _J	Operating junction temperature range ⁽²⁾		-40°C to 150°C
T _{stg}	Storage temperature range		-65°C to 150°C
R _{load}	Load resistance		3.2 Ω Minimum
Electrostatic discharge	Human body model ⁽³⁾ (all pins)		±2 kV
	Charged-device model ⁽⁴⁾ (all pins)		±500 V

- (1) Stresses beyond those listed under *absolute maximum ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operations of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *recommended operating conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) The TPA3106D1 incorporates an exposed thermal pad on the underside of the chip. This acts as a heatsink, and it must be connected to a thermally dissipating plane for proper power dissipation. Failure to do so may result in the device going into thermal protection shutdown. See TI Technical Briefs [SCBA017D](#) and [SLUA271](#) for more information about using the QFN thermal pad. See TI Technical Briefs [SI MA0002](#) for more information about using the HTOPF thermal pad.
- (3) In accordance with JEDEC Standard 22, Test Method A114-B.
- (4) In accordance with JEDEC Standard 22, Test Method C101-A.

THERMAL INFORMATION

THERMAL METRIC ^{(1) (2)}		TPA3106D1	UNITS
		VFP (32 PINS)	
θ _{JA}	Junction-to-ambient thermal resistance	28.23	°C/W
θ _{JCtop}	Junction-to-case (top) thermal resistance	32.4	
θ _{JB}	Junction-to-board thermal resistance	16.6	
ψ _{JT}	Junction-to-top characterization parameter	1	
ψ _{JB}	Junction-to-board characterization parameter	6.7	
θ _{JCbot}	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	1.1	

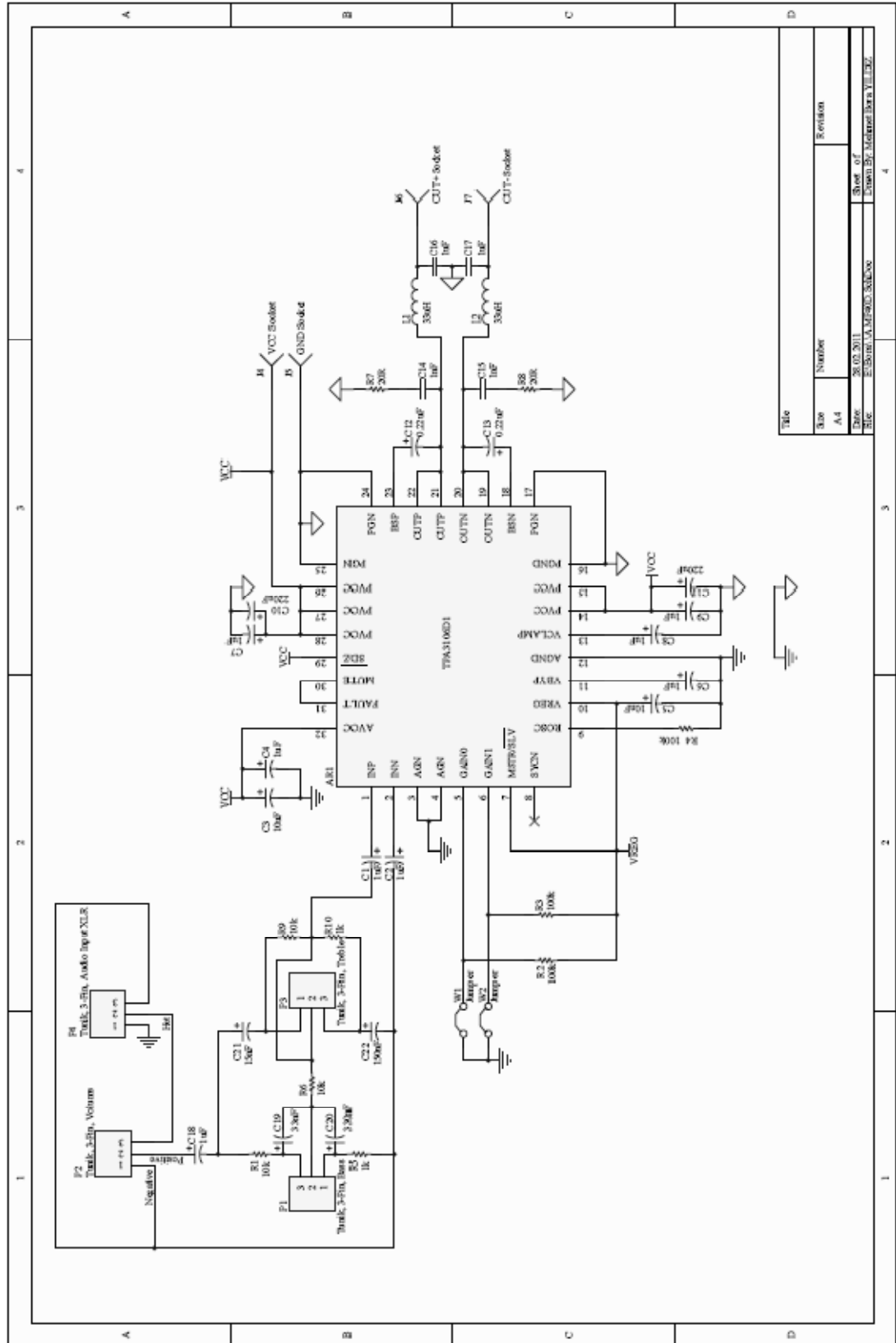
- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).
- (2) For thermal estimates of this device based on PCB copper area, see the [TI PCB Thermal Calculator](#).

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	MAX	UNIT	
V _{CC}	Supply voltage	PVCC, AVCC	10	26	V
V _{IH}	High-level input voltage	SHUTDOWN, MUTE, GAIN0, GAIN1, MSTR/SLV, SYNC	2		V
V _{IL}	Low-level input voltage	SHUTDOWN, MUTE, GAIN0, GAIN1, MSTR/SLV, SYNC		0.8	V
I _{IH}	High-level input current	SHUTDOWN, V _I = V _{CC} , V _{CC} = 24 V		125	μA
		MUTE, V _I = V _{CC} , V _{CC} = 24 V		75	
		GAIN0, GAIN1, MSTR/SLV, SYNC, V = VREG, V _{CC} = 24 V		2	
I _{IL}	Low-level input current	SHUTDOWN, V _I = 0, V _{CC} = 24 V		2	μA
		SYNC, MUTE, GAIN0, GAIN1, MSTR/SLV, V _I = 0 V, V _{CC} = 24 V		1	
V _{OH}	High-level output voltage	FAULT, I _{OL} = 1 mA	VREG - 0.6		V
V _{OL}	Low-level output voltage	FAULT, I _{OL} = -1 mA		AGND + 0.4	V
f _{OSC}	Oscillator frequency	R _{OSC} resistor = 100 kΩ	200	300	kHz

EK 4 Class-D Amplifikatör Şematik Tasarımı



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet Bora YILDIZ

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 20.04.1983

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Batıkent Lisesi(2001)

Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü (2006)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2007 – Mayıs 2010)

Çalıştığı Kurum

ATEMPO Ses ve Işık Sistemleri Ltd. Şti (2006 - ...)